



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΤΗΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

Θεοφανώς Α. Φωτίου

Αθήνα, Απρίλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΚΤΗΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Διδακτορική Διατριβή

της

Θεοφανώς Α. Φωτίου

Συμβουλευτική Επιτροπή: Π. Κάπρος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)

Κ. Βουρνάς, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Γ. Κορρές, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την:

.....
Π. Κάπρος,
Ομότιμος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κ. Βουρνάς
Ομότιμος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Κορρές
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιλάκης
Αναπληρωτής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Καρέλλας
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Θεοφανώ Α. Φωτίου

Διδάκτωρ της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Θεοφανώ Α. Φωτίου 2022

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 στο συγγραφέα.

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

Στην οικογένειά μου

Bounded rationality (Herbert A. Simon) was proposed as an alternative basis of the mathematical economic modelling of decision-making.

Bounded rationality asserts that rationality is limited when individuals make decisions. In other words, humans' preferences are determined by changes in outcomes, seeking a satisfactory or an adequacy solution, rather than an optimal solution.

However, others assume that humans can be reasonably approximated or described as "rational" entities, understanding bounded rationality as a formal method of addressing the discrepancy between the assumed perfect rationality of human behavior and the reality of human cognition.

In short, bounded rationality revises notions of "perfect" rationality to account for the fact that perfectly rational decisions are often not feasible in practice because of the intractability of natural decision problems and the finite computational resources available for making them.

The concept of bounded rationality continues to influence (and be debated in) different disciplines, including economics, psychology, law, political science, and cognitive science. Bounded rationality implies the idea that humans take reasoning shortcuts that may lead to sub-optimal decision-making. Behavioral mathematical models use techniques to map the decision shortcuts that agents use in order to mimic seemingly irrational, hence sub-optimal, choices.

Concepts such as expected utility maximization, Bayesian probability judgments, asymmetric information choices and decision-making under uncertainty can be categorized within the bounded rationality approach.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος (E3MLab) το διάστημα Σεπτεμβρίου 2016-Μαρτίου 2022. Φτάνοντας στο τέλος της μακράς αυτής πορείας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με διάφορους τρόπους στην ολοκλήρωσή της.

Η διατριβή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Παντελή Κάπρου, τον οποίο θερμά ευχαριστώ καταρχάς για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα αυτής. Επίσης τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για το ενδιαφέρον που έδειξε στην παρακολούθηση της εξέλιξης της διατριβής, και για τις γνώσεις, τις ιδέες και τις συμβουλές που μου παρείχε όλα αυτά χρόνια, χάρη στις οποίες κατάφερα να αναπτύξω τη δική μου επιστημονική σκέψη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βουρνά και τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Κορρέ για την αποδοχή της συμμετοχής τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και για τις συμβουλές και επισημάνσεις τους. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Παύλο Γεωργιλάκη και τον Καθηγητή κ. Σωτήρη Καρέλλα για την αποδοχή της συμμετοχής τους στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή της ενδιάμεσης κρίσης και στην επταμελή εξεταστική επιτροπή καθώς και για τα σχόλια και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Ιωάννη Ψαρρά και Σταύρο Παπαθανασίου για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της επταμελούς επιτροπής εξέτασης της διατριβής.

Θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου που συνέβαλλαν με ποικίλους τρόπους στην ολοκλήρωση της διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στη Δρ. Μαρία Κανναβού, στον Γιώργο Ζαζιά, και στη Δρ. Σταυρούλα Ευαγγελοπούλου για την υποστήριξή τους σε επαγγελματικό και προσωπικό επίπεδο και για την εξαιρετική συνεργασία στις εύκολες αλλά κυρίως στις απαιτητικές εργασίες που φέραμε σε πέρας, δουλεύοντας ως ομάδα. Ευχαριστώ επίσης τους Φαίδρα Φιλιππίδου και Ανδρέα Ανδρέου, χωρίς την υποστήριξη των οποίων η ολοκλήρωση της διατριβής θα ήταν ένα ακόμα πιο δύσκολο εγχείρημα. Τέλος, ευχαριστώ τους Ιωάννη Χαραλαμπίδη, Φρόσω Φούκη, Αλέξανδρο Μακρυσόπουλο, Alessia De Vita και Δρ. Παναγιώτη Φράγκο, για τις χρήσιμες συμβουλές και την άψογη συνεργασία όλα αυτά τα χρόνια.

Κλείνοντας θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα αγαπημένα μου πρόσωπα, φίλους και οικογένεια, οι οποίοι με υποστήριξαν στην πορεία αυτής τη διατριβής. Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που ήταν δίπλα μου συνέχεια και με υποστήριζαν με όλα τα δυνατά μέσα, όπως επίσης και τον αδερφό μου, τον Σπύρο που με συμβούλευε και μου έδινε κουράγιο για να ολοκληρώσω τη διατριβή. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να πω στον Γιάννη για την υποστήριξή του και την υπομονή του στις δύσκολες στιγμές. Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς την Νίκη, τον Λάμπρο, τον Δαβίδ, και τον Θωμά που με υποστήριζαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο και με βοήθησαν να μείνω προσηλωμένη στο στόχο μου παρά τις δυσκολίες, όπως και τον Ηλία, που με στήριξε πολύ στα τελευταία μέτρα αυτής της διαδρομής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έρευνα στο πλαίσιο της διατριβής επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και υπολογιστική κατασκευή μοντέλου ενεργειακής οικονομίας για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας και της ενεργειακής αποδοτικότητας στον κτηριακό τομέα. Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο να μελετά λεπτομερώς στρατηγικές και πολιτικές ενεργειακής απόδοσης, στο πλαίσιο της επίτευξης φιλόδοξων στόχων για την ενέργεια και το κλίμα μακροπρόθεσμα.

Στο πλαίσιο της διατριβής εφαρμόστηκε το μοντέλο στα αριθμητικά δεδομένα όλων των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Το μοντέλο αναπαριστά, με μεγάλη λεπτομέρεια, κατάτμηση σε τύπους κτηρίων και καταναλωτών του κτηριακού αποθέματος του οικιακού τομέα και του τομέα των κτηρίων γραφείων και υπηρεσιών της κάθε χώρας. Η λεπτομερής κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος, σε συνδυασμό με τη θεωρία διακριτών επιλογών που εφαρμόζει το μοντέλο, ως προς την προσομοίωση των επενδυτικών αποφάσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια, επιτρέπει την αναπαράσταση της ετερογένειας των καταναλωτικών επιλογών και της αποτύπωσης των ιδιοσυγκρασιών στις συμπεριφορές, εγγενές χαρακτηριστικό της ζήτησης ενέργειας στα κτήρια. Η προσέγγιση του μοντέλου συνίσταται στην αναπαράσταση των συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με τη βελτιστοποίηση της επιλογής τεχνολογίας και επενδύσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο υπό την παρουσία πολλαπλών εμποδίων που στην πράξη δυσκολεύουν και στρεβλώνουν την βελτιστοποίηση.

Η ενσωμάτωση με συστηματικό τρόπο των παραγόντων αυτών στη μοντελοποίηση της βελτιστοποίησης στην ουσία εφαρμόζουν τη θεωρία της περιορισμένης ορθολογικότητας (bounded rationality) ως κατάλληλη σε συνδυασμό με τη λεπτομερή κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος σε τύπους κτηρίων και καταναλωτών για την προσομοίωση των φαινομενικά μη-ορθολογικών συμπεριφορών σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση αλλά και η αριθμητική της εφαρμογή αποτελούν την πρωτοτυπία της διατριβής.

Η προσέγγιση της περιορισμένης ορθολογικότητας είναι μεγάλης σημασίας για την αξιολόγηση της ενεργειακής πολιτικής σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα γιατί μόνο αυτή καταφέρνει να αποτιμήσει σωστά τη δυσκολία που αντιμετωπίζει η πολιτική για την επιτυχή παροχή κινήτρων για την εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Για το σκοπό αυτό, η προσέγγιση του μοντέλου θεωρεί ότι η περιορισμένη ορθολογικότητα που δυσκολεύει τα κίνητρα πολιτικής οφείλεται σε μη-οικονομικά εμπόδια, εκτός δυσκολιών κόστους, δηλαδή οικονομικά εμπόδια (market barriers). Η προσέγγιση διαχωρίζει τα μη-οικονομικά εμπόδια (non-market barriers) που δυσκολεύουν την ενεργειακή αποδοτικότητα σε «κρυφά» κόστη και παράγοντες που σχετίζονται με την πρόσβαση σε χρηματοδότηση αλλά και σε θεσμικά εμπόδια που αντιστοιχούν σε παράγοντες που δεν έχουν άμεσο πληρωτέο κόστος. Τα μη οικονομικά εμπόδια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τρεις ομάδες: α) την (ασύμμετρη) πληροφόρηση, και β) την αβεβαιότητα σχετικά με τις οικονομικές και τεχνικές επιδόσεις των επενδυτικών επιλογών (συμπεριλαμβανομένου του κόστους ευκαιρίας των ιδίων και δανειακών κεφαλαίων), γ) τη ρυθμιστική αβεβαιότητα (κανονιστικές διατάξεις). Η συμπλήρωση της πληροφόρησης αλλά και η άρση των αβεβαιοτήτων έχουν δυναμική εξέλιξη στην προσέγγιση του μοντέλου: όσο περισσότερο γίνονται επενδύσεις σε εξοικονόμηση ενέργειας και νέες τεχνολογίες, τόσο πιο πολύ εξοικειώνονται με αυτές οι επενδυτές και τόσο πιο πολύ μηχανισμοί κοινωνικής μίμησης ευθυγραμμίζουν μεταξύ τους τις ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές των επενδυτών, ενώ ταυτόχρονα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

βελτιώνεται η τεχνολογία μέσω μαζικής παραγωγής και εκμάθησης. Οι πολιτικές παροχής κινήτρων για επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας έχουν στην προσέγγιση του μοντέλου όχι μόνο ρόλο παροχής οικονομικών διευκολύνσεων αλλά και ρόλο μόχλευσης – εναύσματος (enabling conditions) του δυναμικού μηχανισμού εκμάθησης και άρσης των θεσμικών εμποδίων, πληροφόρησης και αβεβαιότητας. Με τον τρόπο αυτό η προσέγγιση τονίζει το ρόλο του κράτους ως μοχλού ανάπτυξης, ο οποίος στην οικονομική θεωρία εντοπίζεται στην επίτευξη θετικών εξωτερικότητων.

Η μαθηματική αναπαράσταση περιλαμβάνει πολλαπλά εργαλεία πολιτικής, οικονομικά, και θεσμικά, τα οποία δρουν υπέρ της άρσης των εμποδίων ώστε να διευκολύνουν τις επενδύσεις και την επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια. Το μοντέλο έχει συμπεριλάβει επίσης τις υποχρεώσεις ρυθμιστικού χαρακτήρα της κείμενης νομοθεσίας, όσον αφορά τους οικοδομικούς κανονισμούς για τα νέα κτήρια (Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων) και τα ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για τον ενεργειακό εξοπλισμό (Οδηγία για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων).

Μαθηματικά το μοντέλο λύνει πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού για την επιλογή επενδύσεων το οποίο ενσωματώνεται σε πρόβλημα μη γραμμικής συμπληρωματικότητας, το οποίο αναπαριστά την ταυτόχρονη επίτευξη βέλτιστης ωφέλειας για τον καταναλωτή και ικανοποίησης των στόχων πολιτικής σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Το τελευταίο συνδέεται με τη διάδοση των αντλιών θερμότητας καθώς και άλλων τεχνολογιών ΑΠΕ που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση επενδύσεων. Η διατύπωση των επενδυτικών αποφάσεων στο μοντέλο είναι ιεραρχική και η επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη εξαρτάται από τις επιλογές ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Οι επιλογές ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση επηρεάζουν με τη σειρά τους τις επιλογές για τις υπόλοιπες θερμικές χρήσεις.

Η ύπαρξη φιλόδοξων κλιματικών και ενεργειακών στόχων στην ΕΕ βραχυπρόθεσμα και κυρίως η δέσμευση της ΕΕ να είναι η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος μέχρι το 2050, προϋποθέτει βαθύ μετασχηματισμό ολόκληρου του ενεργειακού συστήματος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αναφορικά με την εφαρμογή του σε διάφορα ζητήματα πολιτικής για την εξοικονόμηση ενέργειας έχουν ως κοινό υπόβαθρο φιλόδοξο κλιματικό στόχο, και παρέχουν βάση διαμόρφωσης ολοκληρωμένης πολιτικής για την ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια αλλά και της αξιολόγησής της από την οπτική της οικονομικότητας, αποτελεσματικότητας, εφικτότητας και κοινωνικών επιπτώσεων.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η άρση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, είναι κομβικής σημασίας για το μετασχηματισμό του κτηριακού αποθέματος όπως απαιτείται στο πλαίσιο της μετάβασης προς την κλιματική ουδετερότητα. Οι κατάλληλες πολιτικές οικονομικών κινήτρων αλλά και οι θεσμικές πολιτικές άρσης εμποδίων είναι εξίσου απαραίτητες για να κινητοποιήσουν τις απαραίτητες επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Απλά θεσμικά μέτρα που σχετίζονται με την ενημέρωση και την πληροφόρηση των καταναλωτών, μπορούν να μοχλεύσουν επενδύσεις με αποτελεσματικότητα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν επίσης ότι η ένταση των μέτρων πολιτικής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις υποθέσεις σχετικά με την άρση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, το οποίο τελικά σημαίνει ότι τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις καταναλωτικές επιλογές.

Όσον αφορά τις εναλλακτικές λύσεις, τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι οι βασικοί πυλώνες είναι η μεγάλη ένταση ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των παλαιών κτηρίων και ο

εξηλεκτρισμός της θέρμανσης. Άλλωστε, ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης συνάδει με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων και έτσι γίνεται οικονομικά αποδοτικός. Ειδικά οι αντλίες θερμότητας καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια πολύ αποδοτικά και μπορούν να συμβάλουν στους στόχους για τις ΑΠΕ. Η χρήση των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων (δηλαδή του υδρογόνου, του συνθετικού μεθανίου και του βιοαερίου) συνάδουν με την κλιματική ουδετερότητα, αλλά δεν μπορούν να υποκαταστήσουν το ρόλο της εξοικονόμησης ενέργειας. Τα συνθετικά καύσιμα ενέχουν τεχνικές και συστημικές αβεβαιότητες και είναι μεγάλης εντάσεως ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα να απαιτούν υπερβολικά εκτεταμένες επενδύσεις σε ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής αν στα κτήρια και σε άλλους τομείς δεν γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας σε πολύ μεγάλη κλίμακα. Επιπλέον, η αβεβαιότητα που ενέχει η εξέλιξη των τιμών των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων για τους τελικούς καταναλωτές, εξαίρει τη σημασία της συνεισφοράς της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων στο πλαίσιο του μετασχηματισμού προς την κλιματική ουδετερότητα, διότι η ενεργειακή αναβάθμιση μειώνει το συνολικό κόστος ενέργειας αλλά και τη δαπάνη αγοράς ενεργειακών προϊόντων.

Η μείωση των λογαριασμών ενέργειας στα νοικοκυριά, στο πλαίσιο της επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας, είναι οπωσδήποτε ένα πλεονέκτημα της στρατηγικής, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα. Όμως η δυσκολία έγκειται στη συλλογή επενδυτικών κονδυλίων, γιατί η ενεργειακή αναβάθμιση των παλαιών κτηρίων, και μάλιστα μέχρι και σε σχεδόν παθητικά κτήρια, είναι εντάσεως κεφαλαίου. Το ίδιο συμβαίνει και με τον εξηλεκτρισμό της θέρμανσης. Αναδεικνύεται επομένως ως μεγάλης σημασίας η παροχή επιδοτήσεων ιδίως προς τους καταναλωτές με περιορισμένη δυνατότητα συλλογής επενδυτικών κονδυλίων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επιβεβαιώνουν τη σημασία των επιδοτήσεων για τη μόχλευση επενδύσεων. Όμως, τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι οι επιδοτήσεις οφείλουν να διαφοροποιούνται κατά εισοδηματική κατηγορία γιατί ενυπάρχει μεγάλη ασυμμετρία μεταξύ κατηγοριών σχετικά με τις επενδυτικές δυνατότητες. Η πολιτική επιδοτήσεων πρέπει να αμβλύνει τις διαφορές μεταξύ των κατηγοριών (όπως αυτές μπορούν να υπολογιστούν από το ποσοστό του εισοδήματος που τα νοικοκυριά δαπανούν για αγορά ενέργειας), ώστε να μοχλεύσει συνολικά μεγάλες επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των οικονομικών κινήτρων πρέπει να λάβει υπόψη τις κοινωνικές-οικονομικές διαφορές.

Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την αποτίμηση πολιτικής ρυθμιστικού χαρακτήρα η οποία επιβάλλει πρότυπα ενεργειακής απόδοσης (standards) στα κτήρια. Η ανάλυση καταδεικνύει την ανάγκη διαφοροποίησης των προτύπων κατά τύπο κτηρίου με πολλά κριτήρια. Τα αποτελέσματα όμως έδειξαν ότι η πολιτική προτύπων δεν καταφέρνει να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τη διαφοροποίηση των δυνατοτήτων κατά εισοδηματική κατηγορία και ως προς αυτό υστερεί έναντι της πολιτικής οικονομικών κινήτρων. Αν και πρακτικά δεν είναι εφικτό, για λόγους ανάλυσης, στο πλαίσιο της διατριβής μελετήθηκε και η περίπτωση διαφοροποίησης των προτύπων ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία νοικοκυριού και ενώ μια τέτοια πολιτική αμβλύνει τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των νοικοκυριών, ο προϋπολογισμός της πολιτικής αυτής γίνεται ιδιαίτερα υψηλός. Τίθεται επομένως ζήτημα βελτιστοποίησης της πολιτικής.

Η διατριβή εντοπίζει και αναλύει θέματα προς περαιτέρω έρευνα. Θεωρεί μεγάλης σημασίας να γίνει προσπάθεια περαιτέρω εμβάθυνσης της προσέγγισης της περιορισμένης ορθολογικότητας με τρόπο ώστε να βελτιωθούν οι δυναμικές ιδιότητες του μοντέλου, σχετικά με την ανάδραση των πολιτικών επί των παραμέτρων που προσομοιώνουν τα εμπόδια στη λήψη ορθολογικών συμπεριφορών. Άλλος τομέας περαιτέρω έρευνας με μεγάλη σημασία αναδεικνύεται η προσομοίωση των τεχνικών και οικονομικών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

δυνατοτήτων αυτό-παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, σε συνδυασμό με αποθήκευση και περιορισμό της ζήτησης, με παράλληλη δυναμική συμμετοχή στις αγορές, ιδίως από συμπλέγματα όμορων κτηρίων.

Το μοντέλο της διατριβής και οι εφαρμογές του αποτέλεσαν αντικείμενο πρωτότυπων δημοσιεύσεων σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά μετά από κρίση και έτυχαν ερευνητικής χρηματοδότησης αλλά και αναγνωρισμένης εφαρμογής σε ανάλυση πολιτικών Κυβερνήσεων και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τον τομέα των κτηρίων.

Λέξεις-κλειδιά:

Μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, ενεργειακή πολιτική για ενεργειακή αποδοτικότητα, ενεργειακή εξοικονόμηση στα κτήρια, ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων, εξηλεκτρισμός της θέρμανσης

ABSTRACT

The research in the PhD thesis focused on the development and computational construction of an energy economy model for the projection of energy consumption and energy efficiency in the buildings sector. The model conception aims to build a tool suitable for analysing ambitious energy efficiency policies and measures in detail as needed in achieving ambitious energy and climate targets in the long term.

For the research in the PhD thesis, the arithmetic implementation of the model covered all European Union (EU) countries individually. The model's data include segmentation of each country's residential and services sector buildings into many categories to represent the building and consumer classes differently. The detailed segmentation of the building stock, together with the discrete choice theory applied by the model to simulate investment decisions for energy efficiency in buildings, captures the heterogeneity of consumer choices and idiosyncratic behaviours that are inherent characteristics of energy demand in buildings. The modelling approach represents consumer behaviours regarding the optimal choice of technological equipment and the undertaking of energy-saving investments by considering engineering and economic constraints while in the presence of multiple barriers that impede and distort optimality behaviours.

The systematic integration of barriers affecting optimal choices builds essentially on the theory of bounded rationality: asymmetric information, uncertainties and non-market barriers lead to apparently sub-optimal choices from an engineering perspective but are perfectly consistent from the individual's perspective. In this manner, the model builds causality between policy instruments aiming to improve energy efficiency by acting on removing barriers and driving individuals closer to engineering optimality. Furthermore, capturing the idiosyncratic behaviours through the detailed segmentation of the buildings and consumers into many classes is also important for the accurate modelling of the way targeted policy instruments may effectively drive energy efficiency improvement. Finally, the use of discrete choice theory functional forms in the model also aims at capturing the heterogeneity of investment behaviours. The combination of the representation of barriers, the mathematical formulation and the detailed segmentation are the distinctive original features of the model proposed by the PhD research. The numerous numerical applications of the model have greatly helped to fine-tune the approach and test its robustness in policy analysis and impact assessment studies.

The model splits the non-market barriers into real "hidden" costs and issues related to the access to capital resources and to elements that do not have a direct payable or "true" cost. The non-market barriers can broadly be split in three groups: (a) asymmetric information, (b) uncertainty about the financial and technical performance of investment options (including the high opportunity cost of equity and debt), and (c) regulatory uncertainty. The removal of uncertainty factors as well as the institutional measures have a dynamic evolution in the model: the more energy efficiency investments are undertaken, the more consumers realize the benefits of these investments, while at the same time there is technological development as a result of economies of scale and learning factors. In the modelling, the actively incentivizing policies not only provide the necessary economic incentives to trigger energy efficiency investments, but they also constitute conditions enabling the dynamic removal of non-market barriers. In this way the approach emphasizes the role of the state as a lever of growth, which in economic theory is supposed to achieve positive externalities.

ABSTRACT

A detailed portrayal of policies specific to the building sector is included in the model, comprising economic and institutional policies and measures, that remove the barriers and improve consumers' perception regarding the benefits of energy efficiency. The model also includes the regulatory obligations prescribed in the current legislation regarding the energy performance standards for new buildings (Energy Performance of Buildings Directive) and the minimum energy efficiency standards for energy equipment (Eco-Design Directive).

Mathematically, the model solves a dynamic programming problem for energy efficiency investment decisions which is integrated into a mixed complementarity problem that represents the simultaneous achievement of maximum utility for the consumer and the achievement of the policy objectives regarding energy efficiency, CO₂ emissions and renewables (RES). The latter is linked to the penetration of heat pumps as well as other RES technologies resulting from investment optimization. The formulation of investment decisions in the model is hierarchical and the choice of energy equipment for space heating and cooling depends on the energy renovation of the building envelope. In turn, the choices of energy equipment for space heating affect the choices for other thermal uses.

The ambitious energy and climate targets that the EU had set in the short term and, most importantly, the EU's commitment to reach climate neutrality by 2050, imply that the entire energy system needs to undergo a substantial transformation. The results of the model from its application into various policy questions that all have in common the climate neutrality goal, can give an insight to policy makers on how to ensure a cost-effective, resilient and fair transformation of energy consumption in the buildings sector.

The model results confirm that the removal of barriers to energy efficiency is of utmost importance for the transformation of energy consumption in the buildings sector. Economic and regulatory policies remove the non-market barriers, in addition to providing the right incentives or disincentives to mobilize the necessary investments in energy efficiency. Beyond that, institutional measures related to consumer information and knowledge can lead to an effective policy framework. The results of the model show that the intensity of policy measures is highly dependent on the assumptions about the removal of barriers to energy efficiency, which ultimately means that barriers to energy efficiency greatly influence consumer choices.

Regarding alternative strategies that can lead to the substantial transformation of energy consumption in buildings, the results of the model show that the main pillars are the deep renovation of old buildings and the electrification of heating. The electrification of heating in particular is consistent with the improvement of the thermal performance of buildings and is, at the same time, a cost-effective choice. In fact, heat pumps consume electricity very efficiently and can contribute to the RES targets. The climate-neutral fuels (i.e., hydrogen, synthetic methane, and biogas), of course, contribute to the transition towards climate neutrality, but cannot be a substitute of energy efficiency. This is, not only because high uncertainty surrounds the evolution of the technologies that produce the synthetic fuels, but also because they are highly electricity-intensive and need excessively high RES power capacities. They would imply considerable stress for the power generation system, if developed as much as needed to meet today's energy needs of the buildings without consideration of high energy efficiency improvement. Also, the uncertainty surrounding the development of the end-user prices of the climate-neutral fuels further underlies the importance of renovation of buildings in the context of the transition to climate neutrality,

as renovations reduce energy bills making consumers less exposed to the uncertain development of the prices of climate-neutral fuels.

The reduction of energy bills of households, in the context of the transition to climate neutrality, is definitely an advantage of the energy efficiency strategy. However, fundraising to renovate the housing stock towards reaching a “passive” house standard in the entire stock is a challenge, in particular for the majority of households with limited access to cash flow. Therefore, the policy strategy for energy efficiency requires appropriately designed instruments to subsidize investment and facilitate fundraising up to ensuring that all households can invest in energy efficiency. It is therefore of great importance to provide subsidies, especially to consumers with limited access to capital funding resources. The results of the model confirm the importance of subsidies to incite energy efficiency investments. However, the results also show that subsidies should be differentiated by income class because there is a large asymmetry between income categories related to investment possibilities. The subsidization policy should mitigate the social differences across consumer classes (as they can be calculated by the ratio of energy bills over income) for leveraging large energy-saving investments for the entire household sector. Therefore, the energy policy design must consider socio-economic differences across consumer classes.

The model was also used to evaluate the application of regulatory policy instruments consisting of raising stringent energy efficiency standards for buildings. The analysis demonstrates the need to differentiate the level of the standard by type of building using several criteria to categorize the building types appropriately. The results, however, showed that the policy based on standards fails to effectively handle the limited fundraising possibilities of the various income categories. To this respect, an instrument based on standards is inferior compared to the policy based on subsidies. Combining standards with differentiated fundraising instruments is more cost-effective. However, it is impractical to differentiate the level of standards based on social criteria; nonetheless, this policy option has also been analyzed with the model, for research purposes.

The PhD thesis identifies and analyzes topics for further research. Regarding the modelling approach, enhancing the representation of bounded rationality is an important, yet unexploited, research area. The enhancement would include an endogenous feedback effect of policies and investment accumulation on the parameters that represent the non-market barriers to energy efficiency, so as to close the loop of the dynamic adjustment process. Another area of further research is the simulation of the technical and economic possibilities of self-production of energy from RES, in combination with storage, energy efficiency and demand response, particularly for blocks of houses or buildings, together with dynamic participation in the power market.

The model presented in the PhD thesis and its applications has been published in international scientific journals after peer review. The research has been funded by research programs and the model has been used in several applications to support impact assessment studies and analyses for Governments and the European Commission.

Keywords:

Energy-economy model to project energy consumption in buildings, energy policy for energy efficiency, energy savings in buildings, energy renovation of buildings, electrification of heating

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Πρόλογος | 9 |
| Περίληψη | 11 |
| Abstract..... | 15 |
| Πίνακας περιεχομένων | 19 |
| Κατάλογος εικόνων..... | 23 |
| Κατάλογος πινάκων | 27 |
| 1. Εισαγωγή..... | 31 |
| 1.1 Ο μετασχηματισμός της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια στο πλαίσιο της επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας | 31 |
| 1.2 Σκοπός της διατριβής..... | 34 |
| 1.3 Πρωτοτυπία της διατριβής | 35 |
| 1.4 Εφαρμογές | 36 |
| 1.5 Δομή της διατριβής..... | 36 |
| 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση..... | 39 |
| 2.1 Ο κλάδος της ενεργειακής οικονομίας και ανάλυσης και η θέση της έρευνας για τη ζήτηση ενέργειας | 39 |
| 2.2 Η σημασία της ενεργειακής αποδοτικότητας στη σύγχρονη στρατηγική για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής | 41 |
| 2.3 Το παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα | 45 |
| 2.4 Επισκόπηση των μεθόδων και προσεγγίσεων για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια..... | 54 |
| 2.4.1. Μοντέλα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» | 55 |
| 2.4.2. Μοντέλα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» | 56 |
| 2.4.3. Υβριδικά μοντέλα..... | 65 |
| 2.5 Η θέση του προτεινόμενου μοντέλου της διατριβής στη βιβλιογραφία | 68 |
| 2.6 Βιβλιογραφική επισκόπηση ερωτημάτων πολιτικής που πραγματεύεται το μοντέλο | 70 |
| 3. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο | 77 |
| 3.1 Εισαγωγή | 77 |
| 3.2 Οι προσεγγίσεις μοντέλων μηχανικού για την ενέργεια στα κτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή | 78 |
| 3.3 Η τυποποίηση και κατηγοριοποίηση στο προτεινόμενο μοντέλο | 81 |
| 3.3.1. Ποιοτική περιγραφή της λήψης ενεργειακών αποφάσεων στα κτήρια..... | 81 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.3.2. | Η ονοματολογία και η δομή δεδομένων του προτεινόμενου μοντέλου | 83 |
| 4. | Τεχνικό-οικονομική τεκμηρίωση των δεδομένων του μοντέλου των κτηρίων..... | 91 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 91 |
| 4.2 | Ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων..... | 92 |
| 4.2.1. | Έννοιες και ορισμοί που αντλούνται από τη νομοθεσία..... | 92 |
| 4.2.2. | Μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης (και της ενεργειακής κατάταξης) των κτηρίων | 96 |
| 4.2.3. | Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για τη μοντελοποίηση των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων..... | 105 |
| 4.3 | Ενεργειακός εξοπλισμός για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στα κτήρια..... | 108 |
| 4.3.1. | Πρακτικές εφαρμογής του ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια | 108 |
| 4.3.2. | Αντλίες θερμότητας | 109 |
| 4.3.3. | Μέθοδοι αποθήκευσης και συνδυασμός με ΑΠΕ | 130 |
| 5. | Μαθηματική διατύπωση του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου..... | 137 |
| 5.1 | Μοντελοποίηση της ζήτησης για ωφέλιμες ενεργειακές χρήσεις | 137 |
| 5.2 | Μοντελοποίηση των επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα βάσει της μεθοδολογίας του δυναμικού προγραμματισμού και της θεωρίας των διακριτών επιλογών | 140 |
| 5.3 | Μορφοποίηση μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων | 144 |
| 5.4 | Μορφοποίηση μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς σχετικά με την επιλογή και επενδύσεις ενεργειακού εξοπλισμού | 152 |
| 5.4.1. | Διατύπωση της λειτουργίας του ενεργειακού εξοπλισμού..... | 156 |
| 5.4.2. | Διατύπωση επέκτασης δυναμικότητας του ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια..... | 159 |
| 5.4.3. | Διατύπωση της οικονομικής βελτιστοποίησης για την παραγωγή ενέργειας από τον ενεργειακό εξοπλισμό στα κτήρια..... | 159 |
| 5.5 | Μαθηματική περιγραφή του συνολικού μοντέλου για την ενέργεια στα κτήρια | 167 |
| 5.5.1. | Περιγραφή ολόκληρου του μοντέλου | 167 |
| 5.5.2. | Ενσωμάτωση του μοντέλου των κτηρίων στο πλήρες μοντέλο ενεργειακής ισορροπίας της αγοράς | 176 |
| 5.6 | Αναπαράσταση πολιτικών που επηρεάζουν τις αποφάσεις στο προτεινόμενο μοντέλο | 178 |
| 5.7 | Ανάπτυξη και προγραμματισμός του μοντέλου σε υπολογιστή..... | 180 |
| 6. | Εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου σε τυπικά ερωτήματα πολιτικής..... | 181 |
| 6.1 | Το παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων για την ενεργειακή αποδοτικότητα | 181 |
| 6.1.1. | Περιγραφή του προβλήματος..... | 181 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.1.2. | Ενσωμάτωση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα στο προτεινόμενο μοντέλο | 184 |
| 6.1.3. | Ευαισθησία των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου ως προς τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα | 189 |
| 6.1.4. | Αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου | 195 |
| 6.2 | Πώς μπορεί ο κτηριακός τομέας να επιτύχει την κλιματική ουδετερότητα | 205 |
| 6.2.1. | Περιγραφή του προβλήματος..... | 205 |
| 6.2.2. | Συνοπτική παρουσίαση των ιστορικών τάσεων και της σημερινής κατάστασης σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια..... | 207 |
| 6.2.3. | Η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων και του εξηλεκτρισμού για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας | 215 |
| 6.2.4. | Το δίλημμα κατά πόσον απαιτούνται κλιματικά ουδέτερα καύσιμα για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα κτήρια..... | 227 |
| 6.3 | Η πρόκληση της αύξησης επενδύσεων στα κτήρια και η ενεργειακή φτώχεια..... | 241 |
| 6.3.1. | Περιγραφή του προβλήματος..... | 241 |
| 6.3.2. | Όγκος επενδύσεων και επιμερισμός σε κατηγορίες κτηρίων και κατηγορίες καταναλωτών | 244 |
| 6.3.3. | Μέτρα πολιτικής αναφορικά με την πρόκληση των επενδύσεων και την ενεργειακή φτώχεια | 250 |
| 6.3.4. | Σύγκριση μεταξύ πολιτικών με βάση επιδοτήσεις και με βάση τεχνικές προδιαγραφές και πρότυπα | 255 |
| 7. | Σύνοψη και συμπεράσματα..... | 263 |
| 7.1 | Σύνοψη..... | 263 |
| 7.2 | Συμπεράσματα..... | 264 |
| 7.3 | Προτεινόμενες βελτιώσεις του μοντέλου και συνέχισης της έρευνας | 270 |
| | Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά..... | 275 |
| | Άλλες τεχνικές μελέτες/εκθέσεις..... | 275 |
| | Παράρτημα | 277 |
| | Βιβλιογραφία | 289 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 1: Κατανομή οικιακού κτηριακού αποθέματος ανά έτος κατασκευής στις χώρες της ΕΕ το 2020 | 32 |
| Εικόνα 2: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο στην ΕΕ το 2019 για τον οικιακό τομέα και τον τομέα των υπηρεσιών | 33 |
| Εικόνα 3: Κατανομή καυσίμων στην τελική κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση στον οικιακό τομέα στην ΕΕ το 2019 | 34 |
| Εικόνα 4: Διάγραμμα ροής θερμικής ενέργειας σε ένα κτήριο | 98 |
| Εικόνα 5: Μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους [W/m^2K] του κτηριακού αποθέματος για την ΕΕ | 99 |
| Εικόνα 6: Μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους των κτηρίων κατοικίας ανά έτος κατασκευής στη Γερμανία, την Ελλάδα, και τη Φιλανδία..... | 100 |
| Εικόνα 7: Όρια ενεργειακής κατανάλωσης που αντιστοιχούν σε κάθε κατηγορία ενεργειακής απόδοσης στην Ελλάδα, τη Σουηδία και τη Γερμανία..... | 104 |
| Εικόνα 8: Πλήθος ΠΕΑ ανά κατηγορία ενεργειακής απόδοσης (Α-Η) που έχουν εκδοθεί στην Ελλάδα από το 2011 έως το 2019..... | 105 |
| Εικόνα 9: Καμπύλες κόστους-δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους για διάφορες κατηγορίες κτηρίων που χρησιμοποιούνται στο προτεινόμενο μοντέλο . | 107 |
| Εικόνα 10: Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου (αντίστροφος κύκλος Carnot) αντλίας θερμότητας στη λειτουργία θέρμανσης..... | 114 |
| Εικόνα 11: Βαθμός απόδοσης αντλίας θερμότητας αέρα-νερού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε λειτουργία θέρμανσης (α) και ψύξης (β) και διαφορετική θερμοκρασία νερού θέρμανσης [$35/55^\circ C$] και ψύξης [$18/7^\circ C$] | 115 |
| Εικόνα 12: Βαθμός απόδοσης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αέρα-νερού σε συνάρτηση με την παρεχόμενη θερμοκρασία ρευστού από το γεωεναλλάκτη για (α) ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης [$35^\circ C$] και (β) για σώματα καλοριφέρ [$50^\circ C$]..... | 116 |
| Εικόνα 13: Συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος με το βαθμό απόδοσης της αντλίας θερμότητας (ΑΘ) και της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής στο σύστημα θέρμανσης | 117 |
| Εικόνα 14: Εύρος εξέλιξης τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών τύπων αντλίας θερμότητας, όπως βρίσκονται στη βιβλιογραφία | 125 |
| Εικόνα 15: Σύγκριση επενδυτικής δαπάνης μεταξύ μονοσθενούς και υβριδικού συστήματος αντλίας θερμότητας για εγκατάσταση σε υφιστάμενη και νέα κατοικία | 126 |
| Εικόνα 16: Πλήθος πωλήσεων ανά τύπο αντλίας θερμότητας για 21 χώρες της ΕΕ | 128 |

| | |
|---|------------|
| Εικόνα 17: Ποιοτική γραφική αναπαράσταση της καμπύλης που αντιπροσωπεύει την ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας στα κτήρια..... | 139 |
| Εικόνα 18: Γραφική απεικόνιση της επίδρασης της ελάττωσης του οριακού κόστους μιας ενεργειακής υπηρεσίας..... | 148 |
| Εικόνα 19: Μεταβολή της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες λόγω μείωσης της τιμής της ενεργειακής υπηρεσίας για (α) ανελαστική ζήτηση και (β) ελαστική ζήτηση..... | 149 |
| Εικόνα 20: Γραφική αναπαράσταση της συσχέτισης μεταξύ του συντελεστή φορτίου συμβατικού λέβητα αερίου για θέρμανση και του βαθμού απόδοσής του..... | 157 |
| Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση του συνολικού μοντέλου για την ενέργεια στα κτήρια..... | 169 |
| Εικόνα 22: Καμπύλες κόστους-δυναμικού εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, συμπεριλαμβανόμενων των παραγόντων «κρυφού» κόστους για βόρειες χώρες..... | 184 |
| <i>Εικόνα 23: Καμπύλες κόστους-δυναμικού εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, συμπεριλαμβανόμενων των παραγόντων «κρυφού» κόστους για νότιες χώρες.....</i> | <i>185</i> |
| Εικόνα 24: Κόστος μετάβασης από λέβητα πετρελαίου κεντρικής θέρμανσης σε άλλες τεχνολογίες θέρμανσης σε κτήριο κατοικίας..... | 186 |
| Εικόνα 25: Εξέλιξη του κόστους και της ενεργειακής απόδοσης (COP) διαφόρων τύπων αντλιών θερμότητας μέσα στο χρόνο..... | 188 |
| Εικόνα 26: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και της αποδοτικότητας στο κέλυφος για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)..... | 196 |
| Εικόνα 27: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)..... | 197 |
| Εικόνα 28: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και της αποδοτικότητας στο κέλυφος για διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών..... | 198 |
| Εικόνα 29: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της δαπάνης για κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ και του όγκου των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)..... | 199 |
| Εικόνα 30: Συσχέτιση μεταξύ της αποδοτικότητας του κελύφους και του όγκου των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)..... | 200 |
| Εικόνα 31: Συσχέτιση μεταξύ του επιτοκίου προεξόφλησης και της αποδοτικότητας στο κέλυφος, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια»..... | 201 |
| Εικόνα 32: Συσχέτιση μεταξύ του επιτοκίου προεξόφλησης και του όγκου των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια»..... | 202 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 33: Συσχέτιση μεταξύ του φόρου που αντιστοιχεί στις εκπομπές CO ₂ με το μέσο βαθμό απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια» | 203 |
| Εικόνα 34: Συσχέτιση μεταξύ της αξίας των Λευκών Πιστοποιητικών και του μέσου βαθμού απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια» | 203 |
| Εικόνα 35: Τελική κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα για την περίοδο 2000 έως 2019 και ενεργειακή ένταση ως προς την ιδιωτική κατανάλωση (δείκτης 2000=100) | 208 |
| Εικόνα 36: Τελική κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών για την περίοδο 2000 έως 2019 και ενεργειακή ένταση ως προς την Προστιθέμενη Αξία (δείκτης 2000=100) | 208 |
| Εικόνα 37: Διάρθρωση της (ωφέλιμης) ζήτησης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020. | 209 |
| Εικόνα 38: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020 | 210 |
| Εικόνα 39: Διάρθρωση της (ωφέλιμης) ζήτησης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020 | 211 |
| Εικόνα 40: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020 | 212 |
| Εικόνα 41: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά καύσιμο για το διάστημα 2005-2020 | 213 |
| Εικόνα 42: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά καύσιμο για το διάστημα 2005-2020 | 214 |
| Εικόνα 43: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | 218 |
| Εικόνα 44: Προβολή βαθμομερών θέρμανσης και ψύξης στην Ευρώπη..... | 219 |
| Εικόνα 45: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | 220 |
| Εικόνα 46: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | 223 |
| Εικόνα 47: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | 225 |
| Εικόνα 48: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» | 229 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 49: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» | 230 |
| Εικόνα 50: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» | 231 |
| Εικόνα 51: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» | 232 |
| Εικόνα 52: Ποσοστό της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα για τις χώρες της ΕΕ το 2019 | 242 |
| Εικόνα 53: Ποσοστό της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα για τις χώρες της ΕΕ το 2050 για το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | 245 |
| Εικόνα 54: Μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 246 |
| Εικόνα 55: Ένταση ενεργειακής αναβάθμισης στο κελύφος των κτηρίων ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 247 |
| Εικόνα 56: Ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 248 |
| Εικόνα 57: Επενδυτική δαπάνη για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 249 |
| Εικόνα 58: Μέση ετήσια δαπάνη για αγορά ενέργειας ως ποσοστό του εισοδήματος ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 250 |
| Εικόνα 59: Αποτελέσματα του μοντέλου για την στρατηγική τιμολογιακής πολιτικής | 256 |
| Εικόνα 60: Αποτελέσματα του μοντέλου για την στρατηγική ρυθμιστικής πολιτικής | 259 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 1: Μέση ιδιωτική κατανάλωση ανά εισοδηματική κατηγορία και περιοχή της ΕΕ για το 2020 . | 85 |
| Πίνακας 2: Επιτόκια προεξόφλησης στον οικιακό τομέα ανά κατηγορία εισοδήματος και επενδυτική απόφαση..... | 90 |
| Πίνακας 3: Ανώτατα όρια για τη συνολική ετήσια χρήση πρωτογενούς ενέργειας ενός νέου κτηρίου μηδενικών εκπομπών σύμφωνα με την Οδηγία | 94 |
| Πίνακας 4: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση | 96 |
| Πίνακας 5: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών για προετοιμασία ΖΝΧ | 102 |
| Πίνακας 6: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών για ψύξη..... | 103 |
| Πίνακας 7: Αντιστοίχιση μεταξύ των κατηγοριών έντασης ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και των εργασιών ενεργειακής αναβάθμισης που αναπαριστούν | 106 |
| Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανά τύπο αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών | 118 |
| Πίνακας 9: Εύρος τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών τύπων αντλίας θερμότητας για εφαρμογή στα κτήρια κατοικίας, όπως βρίσκονται στη βιβλιογραφία..... | 124 |
| Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων υδροφθορανθράκων και των εναλλακτικών τους λύσεων..... | 130 |
| Πίνακας 11: Επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας των τυπικών συστημάτων θερμικής αποθήκευσης και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών | 132 |
| Πίνακας 12: Τεχνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των τυπικών τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης επί του παρόντος..... | 133 |
| Πίνακας 13: Κόστος αγοράς και εγκατάστασης ηλιοθερμικού συστήματος σε κτήριο κατοικίας επί του παρόντος..... | 134 |
| Πίνακας 14: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μοντελοποίησης της ζήτησης για ωφέλιμες ενεργειακές χρήσεις..... | 137 |
| Πίνακας 15: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων | 144 |
| Πίνακας 16: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς σχετικά με την επιλογή και τις επενδύσεις ενεργειακού εξοπλισμού..... | 152 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 17: Ονοματολογία παραμέτρων που υπολογίζονται μετά την επίλυση του μοντέλου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής | 164 |
| Πίνακας 18: Εύρος της τελικής τιμής των επιτοκίων προεξόφλησης χάρη στην ύπαρξη πλαισίου πολιτικής που αίρει τα μη-οικονομικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα | 189 |
| Πίνακας 19: Προβολές για την ενέργεια και τις εκπομπές CO ₂ στον οικιακό τομέα στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια» | 191 |
| Πίνακας 20: Προβολές για την ενέργεια και τις εκπομπές CO ₂ στον τομέα των υπηρεσιών στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια» | 192 |
| Πίνακας 21: Προβολές ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια κατοικίας στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια» | 193 |
| Πίνακας 22: Κόστη στον οικιακό τομέα στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια» | 194 |
| Πίνακας 23: Κόστη στον τομέα των υπηρεσιών στο σενάριο χωρίς εμπόδια και στο σενάριο με εμπόδια | 195 |
| Πίνακας 24: Προβολές ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO ₂ στα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας στον οικιακό τομέα | 233 |
| Πίνακας 25: Προβολές ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO ₂ στα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα των υπηρεσιών | 234 |
| Πίνακας 26: Σύγκριση κόστους μεταξύ των σεναρίων πολιτικής για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον οικιακό τομέα | 235 |
| Πίνακας 27: Σύγκριση κόστους μεταξύ των σεναρίων πολιτικής για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα των υπηρεσιών | 236 |
| Πίνακας 28: Επιπτώσεις των σεναρίων κλιματικής ουδετερότητας στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής . | 239 |
| Πίνακας 29: Σύγκριση των εναλλακτικών στρατηγικών πολιτικής ως προς τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας..... | 260 |
| Πίνακας 30: Βασικές πηγές που χρησιμοποιούνται συνδυαστικά για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων του μοντέλου | 277 |
| Πίνακας 31: Επιλογές ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση και κλιματισμό στο προτεινόμενο μοντέλο | 280 |
| Πίνακας 32: Επιλογές ενεργειακού εξοπλισμού για προετοιμασία ZNX και μαγείρεμα στο προτεινόμενο μοντέλο | 281 |
| Πίνακας 33: Δεδομένα του προγράμματος ENTRANZE για το κόστος και τη θερμική συμπεριφορά ενεργειακών επεμβάσεων αυξανόμενης έντασης ανά οικοδομικό υλικό και τύπο κτηρίου..... | 282 |
| Πίνακας 34: Εξέλιξη των τεχνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο για τον οικιακό τομέα | 285 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 35: Εξέλιξη των τεχνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο για τον οικιακό τομέα (συνέχεια) | 286 |
| Πίνακας 36: Εξέλιξη των τεχνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο για τον τομέα των υπηρεσιών..... | 287 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΠΙΤΕΥΞΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑΣ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), ως ένα από τα συμβαλλόμενα μέρη στη συμφωνία του Παρισίου, έχει δεσμευθεί να καταβάλει τις καλύτερες προσπάθειες ώστε να συμβάλει στο να περιοριστεί η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά λιγότερο από 1.5 °C μέχρι το μέσον του αιώνα. Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε το 2021 μια δέσμη προτάσεων («Fit for 55») (European Commission, 2021b) μέσω των οποίων οι ενωσιακές πολιτικές για το κλίμα, την ενέργεια, τη χρήση γης, τις μεταφορές και τη φορολογία θα προσαρμοστούν κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αυτό έχει ως απώτερο στόχο για την ΕΕ να καταστεί η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος στον κόσμο έως το 2050, όπως άλλωστε και η ίδια δεσμεύτηκε με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) (European Commission, 2019) το 2019.

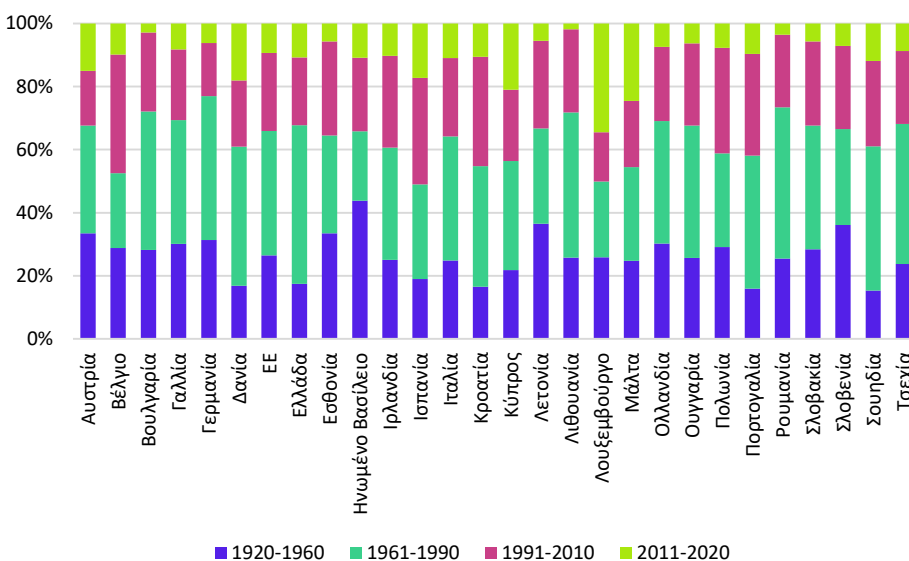
Κατά συνέπεια, το ενεργειακό σύστημα θα πρέπει να καταστεί κλιματικά ουδέτερο μέχρι τα μέσα του αιώνα, ενώ όλοι οι τομείς θα υποστούν ουσιαστικούς μετασχηματισμούς ώστε να επιτευχθεί ισχυρή εξοικονόμηση ενέργειας και μετάβαση σε τεχνολογίες και καύσιμα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Οι κύριοι πυλώνες αυτού του μετασχηματισμού είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα, ο εξηλεκτρισμός των τελικών χρήσεων και η απανθρακοποίηση του τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της ευρείας διείσδυσης μεταβλητών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Ο τομέας των κτηρίων είναι ο υψηλότερος καταναλωτής ενέργειας στην ΕΕ, αντιπροσωπεύοντας 31 TWh ή 37.2% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας το 2019, σύμφωνα με τα ενεργειακά ισοζύγια της Eurostat (Eurostat, 2022). Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται στα κτήρια χρησιμοποιείται μόνο για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης (Fleiter et al., 2016). Η ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη εξαρτάται από τις θερμικές απώλειες του κελύφους του κτηρίου και το βαθμό απόδοσης του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Έτσι, η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους του κτηρίου, μαζί με την επιλογή αποδοτικού εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη, αποτελούν τα βασικά μέσα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια (IEA, 2018).

Σύμφωνα με την Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων (OAEK-EPBD) της ΕΕ (European Commission, 2018b), όλα τα νέα κτήρια της ΕΕ θα πρέπει να είναι Κτήρια σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΚΣΜΚΕ - nZEB) από το 2021 και μετά, δηλαδή κτήρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης που καλύπτουν τη (χαμηλή) κατανάλωση ενέργειας με τη χρήση κυρίως ΑΠΕ (Boermans et al., 2011). Σε αυτήν την κατεύθυνση, τα κράτη μέλη έχουν συμπεριλάβει στις εθνικές νομοθεσίες συγκεκριμένες απαιτήσεις που αφορούν την ενεργειακή συμπεριφορά του κελύφους των νέων κτηρίων, δηλαδή οικοδομικούς κανονισμούς (Economidou, 2012), που υποχρεώνουν τα κτήρια να κατατάσσονται σε μια ελάχιστη κατηγορία ενεργειακής απόδοσης. Μέρος των απαιτήσεων αποτελούν και οι ρυθμιστικοί μηχανισμοί για να διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τους οικοδομικούς κανονισμούς. Ωστόσο, οι πρακτικές επιβολές των κανονισμών δεν είναι σε όλα τα κράτη μέλη αυστηροί με αποτέλεσμα να διαπιστώνονται διαφυγές (Max Jamieson et al., 2016).

Ενώ η ενεργειακή συμπεριφορά των νέων κτηρίων είναι καλή, οι ρυθμοί κατεδάφισης (ή γενικά εγκατάλειψης) των παλαιών κτηρίων και κατασκευής νέων είναι χαμηλοί στην ΕΕ σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (BPIE, 2011; Meijer et al., 2012). Οι νέες κατασκευές αναμένεται να αντιπροσωπεύουν ένα μικρό μερίδιο του κτηριακού αποθέματος το 2050, ενώ τα κτήρια ηλικίας μεγαλύτερης των 50 ετών θα αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μερίδιο του συνολικού αποθέματος. Κατά συνέπεια, το κλειδί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον κτηριακό τομέα βρίσκεται στη βελτίωση της ενεργειακής αναβάθμισης των παλαιών κτηρίων (Edelenbosch et al., 2021). Το δυναμικό επίτευξης υψηλής εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης είναι πολύ μεγάλο, αφού η πλειονότητα των κτηρίων στην ΕΕ σήμερα, κατασκευάστηκε πριν υπάρξουν οποιοδήποτε οικοδομικοί κανονισμοί που να έχουν λάβει υπόψη περιβαλλοντικά κριτήρια ή ζητήματα εξοικονόμησης ενέργειας (Εικόνα 1).

Εικόνα 1: Κατανομή οικιακού κτηριακού αποθέματος ανά έτος κατασκευής στις χώρες της ΕΕ το 2020



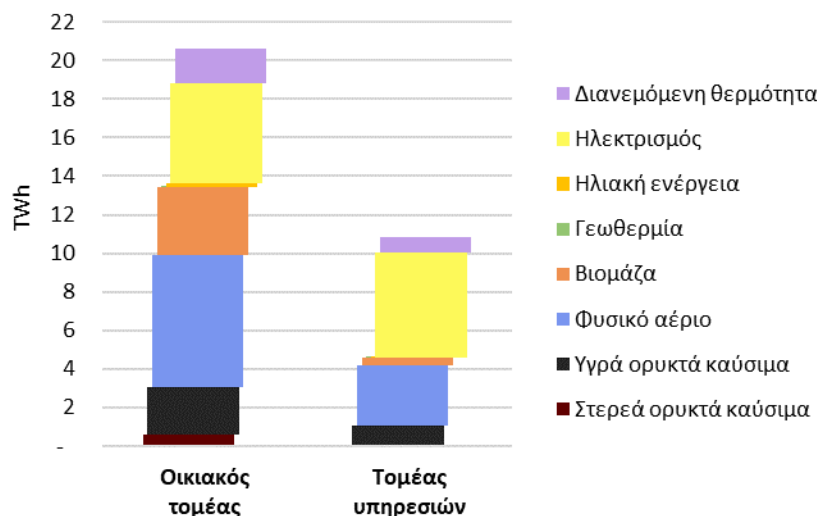
Πηγή: (BPIE, 2011; EU BSO, 2022), και ίδιες εκτιμήσεις

Η Οδηγία για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων (European Commission, 2009) καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού που καταναλώνει ενέργεια στα κτήρια, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, θέτοντας ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης ως τεχνικές προδιαγραφές. Τα τελευταία χρόνια, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης συγκεκριμένων ηλεκτρικών συσκευών και του φωτισμού είναι εντυπωσιακή. Παρόλα αυτά, υπάρχει δυναμικό για την περαιτέρω βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, τόσο τεχνολογικά (IEA, 2016; van Delft & de Kler, 2017), όσο και ως προς την αποδοχή τους από τους καταναλωτές.

Σύμφωνα με τα ενεργειακά ισοζύγια της Eurostat για το 2019 (Eurostat, 2022), το 44.5% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα, δηλαδή στερεά ορυκτά καύσιμα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο (Εικόνα 2). Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν βασικά την ηλιακή ενέργεια για την προετοιμασία Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) και τη βιομάζα. Η τηλεθέρμανση έχει άνιση κάλυψη μεταξύ των κρατών μελών, ανάλογα με την υποδομή, η οποία είναι διαθέσιμη κυρίως στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης.

Όσον αφορά το μείγμα καυσίμων στις διάφορες χρήσεις στον οικιακό τομέα για το 2019, η θέρμανση καλύπτεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (και ειδικά φυσικό αέριο), η ψύξη καλύπτεται εξολοκλήρου από ηλεκτρισμό και μείγμα καυσίμων χρησιμοποιείται στο μαγείρεμα και την προετοιμασία ΖΝΧ.

Εικόνα 2: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο στην ΕΕ το 2019 για τον οικιακό τομέα και τον τομέα των υπηρεσιών



Πηγή: Ενεργειακά ισοζύγια (Eurostat, 2022)

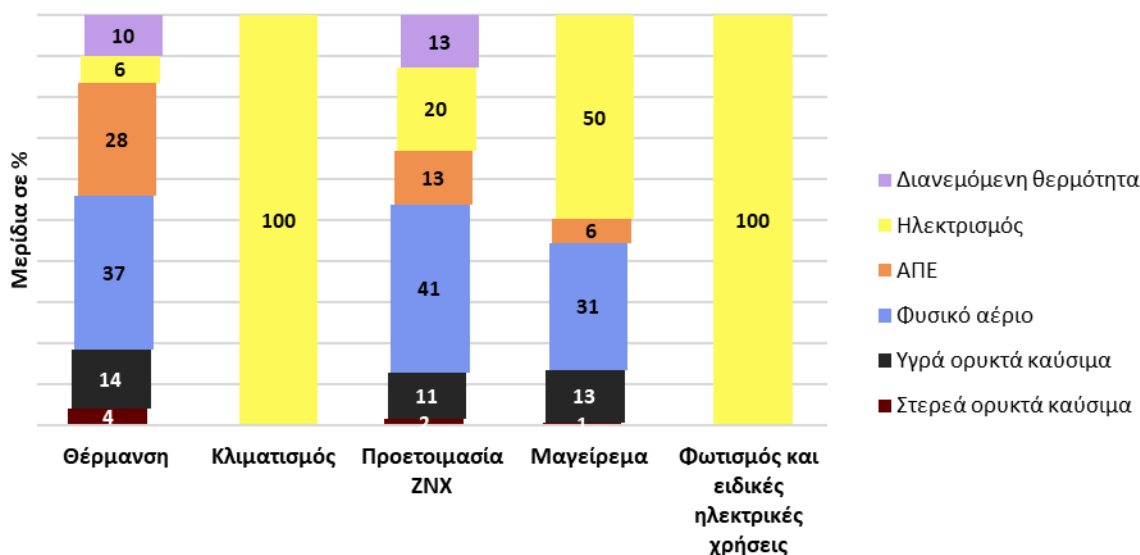
Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στα κτήρια βασίζεται στην αλλαγή του μείγματος καυσίμων και στη στροφή προς τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, διανεμόμενης θερμότητας (όπου υπάρχει αυτή η δυνατότητα) και ΑΠΕ. Θα ήταν επίσης δυνατό να συνεχιστεί η χρήση του φυσικού αερίου μακροχρόνια, εάν το μεθάνιο που διανέμεται στο δίκτυο είναι ουδέτερο ως προς τις εκπομπές CO₂ (συνθετικό μεθάνιο). Ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης μέσω των αντλιών θερμότητας συμβάλλει όχι μόνο στην απανθρακοποίηση της θέρμανσης αλλά και στην επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης (van Delft & de Kler, 2017). Ωστόσο, μπορεί να είναι απαραίτητος ο συνδυασμός των αντλιών θερμότητας με εφεδρικό σύστημα (συνήθως λέβητα αερίου) σε ψυχρότερα κλίματα.

Η ενεργειακή και κλιματική πολιτική της ΕΕ υιοθέτησε την ενεργειακή αποδοτικότητα ως αυτόνομο στόχο, όχι μόνο για να εξασφαλίσει τη μείωση των εκπομπών CO₂. Ο λόγος είναι ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση αυτή καθαυτή, και ταυτόχρονα, η μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτρέψει την εύκολη απανθρακοποίηση του τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της διείσδυσης ενεργειακών μορφών απαλλαγμένων από εκπομπές CO₂ (πχ. ΑΠΕ).

Οι πολιτικές που στοχεύουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια και ειδικά στην προώθηση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων, μπορούν να επιφέρουν μείωση των εκπομπών CO₂ λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά μπορεί να μην παρέχουν τα απαραίτητα κίνητρα για την αλλαγή του μείγματος καυσίμων. Καθαρά τεχνικό-οικονομικοί υπολογισμοί υποδηλώνουν ότι οι αντλίες θερμότητας μπορεί να είναι η πιο κατάλληλη λύση για κτήρια που έχουν υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης. Έτσι, ο εξηλεκτρισμός των θερμικών χρήσεων συνάδει με την ενεργειακή

αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων. Η ανάπτυξη της χρήσης ΑΠΕ πέρα από την παραδοσιακή χρήση βιομάζας απαιτεί επίσης προσανατολισμένες πολιτικές, οι οποίες αυτή τη στιγμή δεν εφαρμόζονται σε πολλά από τα κράτη μέλη της ΕΕ. Το δυναμικό των ΑΠΕ (δηλαδή της ηλιακής ενέργειας, της γεωθερμίας, της βιομάζας και των στερεών και υγρών αποβλήτων) εξαρτάται από τους εθνικούς πόρους και τη διαθεσιμότητά τους. Η τηλεθέρμανση είναι μια έγκυρη εναλλακτική λύση, αλλά εξαρτάται από την ύπαρξη δικτύου διανομής, το οποίο ελάχιστα επεκτείνεται στα κράτη μέλη της ΕΕ για διάφορους λόγους.

Εικόνα 3: Κατανομή καυσίμων στην τελική κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση στον οικιακό τομέα στην ΕΕ το 2019



Πηγή: (Eurostat [nrg_d_hhq], 2022)

Μελέτες που χρησιμοποιούν συνήθεις οικονομικούς δείκτες (Hu, 2019; Zachariadis et al., 2018) επιβεβαιώνουν ότι η ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης του κελύφους των κτηρίων είναι οικονομικά αποδοτική και λόγω του μεγάλου ανεκμετάλλευτου δυναμικού, πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα στη χάραξη πολιτικής. Παραδόξως, όμως, η προθυμία των καταναλωτών να πραγματοποιήσουν εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος των κτηρίων είναι μικρή και οι υπάρχουσες πολιτικές δεν παρέχουν τα κατάλληλα κίνητρα ώστε να κινητοποιήσουν τέτοιες επενδύσεις. Τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα, όπως είναι η αβεβαιότητα, η έλλειψη πληροφόρησης, η δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση κ.ά., είναι η αιτία αυτής της φαινομενικά παράδοξης συμπεριφοράς, η οποία οδηγεί τελικά σε περιορισμένες επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως το «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα».

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Σκοπός της διατριβής είναι η μαθηματική μοντελοποίηση της ενεργειακής ζήτησης και αποδοτικότητας στον κτηριακό τομέα και της επιλογής τεχνολογίας στις διάφορες ενεργειακές χρήσεις σε μακροχρόνια προοπτική, περιλαμβανομένου του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης. Η προσέγγιση της μοντελοποίησης συνίσταται στην αναπαράσταση των συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με τη βελτιστοποίηση της επιλογής τεχνολογίας και επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο

υπό την παρουσία πολλαπλών οικονομικών και μη-οικονομικών εμποδίων που δυσκολεύουν και στρεβλώνουν τη βελτιστοποίηση. Αντίθετα, δηλαδή από τις καθαρά τεχνικές μελέτες που δεν συμπεριλαμβάνουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα στους υπολογισμούς τους. Το μοντέλο αναπαριστά, με μεγάλη λεπτομέρεια, κατάτμηση των κτηρίων και των καταναλωτών σε κατηγορίες για να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά τους και ταυτόχρονα να μπορούν να αξιολογηθούν οι κοινωνικές-οικονομικές-περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πολιτικών σε κάθε κατηγορία.

Στο πλαίσιο που περιεγράφηκε προηγουμένως, η παρούσα διατριβή, μέσω του προτεινόμενου μοντέλου, επιχειρεί να προσφέρει απαντήσεις στα εξής θέματα:

- Πόσο επιδρούν αβεβαιότητες και μη-οικονομικά εμπόδια στις επενδύσεις για την ενεργειακή αποδοτικότητα και τον εξηλεκτρισμό στα κτήρια;
- Πως δρουν οι πολιτικές με σκοπό την άρση των εμποδίων στην επιτάχυνση επενδύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας και εξηλεκτρισμού στα κτήρια;
- Ποια είναι η βέλτιστη στρατηγική για τη μετάβαση του ενεργειακού συστήματος των κτηρίων και των κατοικιών προς την κλιματική ουδετερότητα και την επίτευξη των στόχων της ΕΕ για την ενεργειακή αποδοτικότητα και τις ΑΠΕ;
- Ποιες είναι οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις που θα έχει η μετάβαση προς την κλιματική ουδετερότητα; Πως επιδρά η μετάβαση αυτή στην ενεργειακή φτώχεια; Ποια μέτρα πολιτικής, οικονομικά, τεχνικά, θεσμικά, είναι κατάλληλα για τα οικονομικά ευάλωτα νοικοκυριά ώστε να επιτύχουν την ενεργειακή αποδοτικότητα;

1.3 ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Το μοντέλο που αναπτύσσεται στη διατριβή είναι απολύτως πρωτότυπο στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τη μαθηματική μοντελοποίηση των τεχνικών και οικονομικών αποφάσεων για τον κτηριακό τομέα και τις ενεργειακές τεχνολογίες.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια υβριδική προσέγγιση για την προβολή στο μέλλον της ενεργειακής ζήτησης στον τομέα των κτηρίων. Η μοντελοποίηση μελετά τη δυναμική εξέλιξη του κτηριακού αποθέματος και δίνει μεγάλη έμφαση στις συμπεριφορές των καταναλωτών, καθώς και στις πολιτικές που επηρεάζουν τις συμπεριφορές τους. Ως εκ τούτου, το μοντέλο αναπαριστά τις ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές των καταναλωτών και τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μαθηματικές τεχνικές και προσεγγίσεις που είναι γνωστές στη βιβλιογραφία αλλά τις συνθέτει με πρωτότυπο τρόπο ώστε να κατασκευάσει ένα πολύπλοκο εφαρμοσμένο μοντέλο μεγάλης κλίμακας.

Ειδικά η ενδογενής μοντελοποίηση των αποφάσεων ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων, αποτελεί πρωτοτυπία της διατριβής. Και τούτο διότι, δεν υπάρχει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που να προβάλλει τις αποφάσεις για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους σε ολόκληρο το κτηριακό απόθεμα, για πολλές χώρες, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα οικονομικούς και υποκειμενικούς παράγοντες και την επίδραση που έχουν στις αποφάσεις διάφορα μέτρα πολιτικής.

Πρωτοτυπία επίσης της διατριβής αποτελεί η σαφής ενσωμάτωση στη μοντελοποίηση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω παραγόντων που ποσοτικοποιούν τα εμπόδια αυτά, και επιπλέον η εφαρμογή των εμποδίων αυτών στις συγκεκριμένες κατηγορίες κτηρίων τις οποίες αφορούν. Η ενσωμάτωση με συστηματικό τρόπο των παραγόντων αυτών στη μοντελοποίηση της βελτιστοποίησης

στην ουσία εφαρμόζουν τη θεωρία της περιορισμένης ορθολογικότητας (bounded rationality). Ενώ, η βιβλιογραφία που ασχολείται με τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα είναι πολύ εκτενής, δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο που με συστηματικό τρόπο να ενσωματώνει αυτούς τους παράγοντες στη μοντελοποίηση.

Επίσης, η πολύ λεπτομερής κατηγοριοποίηση του κτηριακού αποθέματος που παρουσιάζεται στη διατριβή, για να αντιπροσωπεύει την ετερογένεια των καταναλωτικών συμπεριφορών, δεν είχε αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία στην έκταση που έγινε αυτό στη διατριβή και μάλιστα για πολλές χώρες της ΕΕ.

Τέλος, η πλήρης αριθμητική εφαρμογή του μοντέλου σε πολλές χώρες και η επιτυχής χρήση του σε πολλές αναλύσεις πολιτικής είναι επίσης μέρος της πρωτοτυπίας της διατριβής και αποτελεί επιβεβαίωση της επιτυχούς έρευνάς της.

1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στόχος της έρευνας στην παρούσα διατριβή είναι αφού αναλύσει τη μεθοδολογία και τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου μοντέλου, να παρουσιάσει τα αποτελέσματα του μοντέλου όπως έχουν προκύψει στο πλαίσιο συγκεκριμένων εφαρμογών, που αφορούν τυπικά ερωτήματα πολιτικής. Οι εφαρμογές του μοντέλου που παρουσιάζονται στη διατριβή σχετίζονται με τα εξής ζητήματα:

- Το παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων για την ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια

Η πρώτη εφαρμογή, σκοπεύει να αναδείξει την επίδραση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, που ερμηνεύουν το «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων», τόσο στις αποφάσεις ενεργειακής απόδοσης όσο και στην αποτελεσματικότητα των μέτρων πολιτικής.

- Ο μετασχηματισμός της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια στο πλαίσιο της επίτευξης στόχου για κλιματική ουδετερότητα μέχρι το 2050

Η δεύτερη εφαρμογή, παρουσιάζει τους βασικούς πυλώνες του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στον κτηριακό τομέα, για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, αντιπαραβάλλοντας εναλλακτικές στρατηγικές πολιτικής και υπολογίζοντας τις επιπτώσεις κάθε στρατηγικής τόσο στον κτηριακό τομέα όσο και στο υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα.

- Η πρόκληση της αύξησης των επενδύσεων στα κτήρια και η ενεργειακή φτώχεια

Τέλος, η ανάλυση εστιάζει στον οικιακό τομέα και παρουσιάζονται οι επιπτώσεις, από πλευράς κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας, του ριζικού μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια κατοικίας σε διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών. Εξετάζονται επίσης εναλλακτικές στρατηγικές πολιτικής που μπορούν να κινητοποιήσουν τις απαραίτητες επενδύσεις ώστε να επιτευχθεί η εξοικονόμηση ενέργειας που απαιτεί ο στόχος της κλιματικής ουδετερότητας και μελετώνται οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις που έχουν διαφορετικοί τρόποι εφαρμογής των υπό μελέτη πολιτικών στις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών.

1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η δομή της διατριβής περιλαμβάνει την εισαγωγή και πέντε κεφάλαια με επιμέρους θεματικές ενότητες.

Στην εισαγωγή παρουσιάζονται το αντικείμενο της έρευνας, η συνεισφορά της διατριβής και τα επιτεύγματά της, τόσο στην έρευνα όσο και στην εφαρμογή του μοντέλου. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει τις βασικές έννοιες και ορισμούς: οι έννοιες είναι σχετικές με το θέμα της παρούσας διατριβής, γίνεται ανασκόπηση των μεθόδων και προσεγγίσεων για την ανάλυση, βελτιστοποίηση και πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια και παρουσιάζονται τα κυριότερα πρόσφατα ολοκληρωμένα μοντέλα για την ενέργεια στα κτήρια. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο, και συγκεκριμένα γίνεται ποιοτική περιγραφή της λήψης αποφάσεων στα κτήρια και παρουσιάζεται η τυποποίηση και κατηγοριοποίηση των χρήσεων ενέργειας που εφαρμόζει το προτεινόμενο μοντέλο. Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει την τεχνικό-οικονομική τεκμηρίωση των δεδομένων του μοντέλου, όπου δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνικές παραμέτρους που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων και στην επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου, όσον αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων και την επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού. Το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τις τρεις εφαρμογές του μοντέλου σε ζητήματα πολιτικής.

Στην Ενότητα 6.1 γίνεται μελέτη σχετικά με το λεγόμενο «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων». Παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράγοντες του μοντέλου που αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα και δίνονται παραδείγματα αριθμητικών τιμών σχετικά με τα εμπόδια αυτά. Έπειτα, γίνεται αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων του μοντέλου που αναπαριστούν διαφορετικές υποθέσεις σχετικά με την άρση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, και τέλος παρουσιάζεται η αιτιοκρατική σχέση μεταξύ δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια και μέτρων πολιτικής, σε πλαίσιο στο οποίο έχουν αρθεί τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα και σε ένα άλλο στο οποίο τα εμπόδια ισχύουν.

Στην Ενότητα 6.2 αναδεικνύονται οι παράγοντες που αποτελούν τους βασικούς πυλώνες του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, στο ενεργειακό σύστημα μέχρι το 2050, δηλαδή της ενεργειακής αναβάθμισης των παλαιών κτηρίων και του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης. Για το σκοπό αυτό, γίνεται ανάλυση των προβολών του μοντέλου, σε σενάριο πολιτικής που επιτυγχάνει αυτούς του κλιματικούς στόχους. Οι συγκεκριμένες προβολές αντιπαραβάλλονται στη συνέχεια με σενάρια που εξετάζουν την αποτυχία του ενός ή και των δύο παραγόντων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, διατηρώντας όμως το στόχο της κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050. Οι προβολές συγκρίνονται από πλευράς κόστους και επιπτώσεων στον κτηριακό τομέα και στο υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα.

Στην Ενότητα 6.3 μελετώνται οι κοινωνικές επιπτώσεις του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο ενεργειακό σύστημα μέχρι το 2050, σε διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών. Στην ενότητα αυτή αντιπαραβάλλονται δυο εναλλακτικές πολιτικές παροχής κινήτρων, που αποτελούν ανέκαθεν δίλημμα στη δημόσια πολιτική, δηλαδή το δίλημμα μεταξύ της θέσπισης τιμολογιακών ή ρυθμιστικών πολιτικών. Οι πολιτικές συγκρίνονται ως προς τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και ως προς τις κοινωνικές τους επιπτώσεις, ενώ εξετάζονται και παραλλαγές ως προς τον τρόπο εφαρμογής τους, δηλαδή μεταξύ της εφαρμογής των μέτρων πολιτικής με την ίδια ένταση για όλους τους καταναλωτές ή με διαφορετική ένταση, βάσει κριτηρίων.

Τέλος, το Κεφάλαιο 7 συνοψίζει και σχολιάζει τα αποτελέσματα των εφαρμογών.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Ο ΚΛΑΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ Η ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο κλάδος της «Ενεργειακής Οικονομίας» έχει αναπτυχθεί επί σειρά ετών. Στις δεκαετίες του 1950 και 1960 η ενεργειακή οικονομία εστίαζε κατά κύριο λόγο στον τομέα της προσφοράς ενέργειας και τα θέματα που την απασχολούσαν περιλάμβαναν (Bhattacharyya, 2011):

- Την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας, με σκοπό το σωστό προγραμματισμό της κατασκευής των μονάδων παραγωγής ή μετατροπής ενέργειας
- Τη διαχείριση των αποθεμάτων των πρωτογενών, εξαντλούμενων πηγών ενέργειας (άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου κλπ.) και τον προγραμματισμό της προμήθειας αυτών μέσω των εισαγωγών
- Την αποτελεσματική λειτουργία των διυλιστηρίων πετρελαίου
- Την τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας παίρνοντας υπόψη καμπύλες ζήτησης
- Τον προγραμματισμό της έρευνας και ανάπτυξης σχετικά με νέες μορφές ενέργειας

Οι οικονομικές κρίσεις, αρχικά του 1973 και έπειτα του 1979, με την απότομη αύξηση των τιμών του πετρελαίου, ανέδειξαν την κύρια διάσταση του ενεργειακού προβλήματος: τα αποθέματα πετρελαίου είναι περιορισμένα και καταναλώνονται με ταχύτατο ρυθμό, και άρα προκύπτει αβεβαιότητα επάρκειας και σταθερότητας της ενεργειακής τροφοδοσίας. Το πρόβλημα ήταν γνωστό από πριν, οι κρίσεις, όμως, κατέστησαν δυνατή την κατανόηση της σοβαρότητάς του (Bhattacharyya, 2011).

Οι συνθήκες που επικράτησαν στην ενέργεια και στην οικονομία μετά το 1973, έκαναν αναγκαία την παραπέρα ανάπτυξη της ενεργειακής οικονομίας μέσω της συστηματικής μελέτης του τομέα της ζήτησης ενέργειας. Έως τότε, η ενεργειακή οικονομία περιλάμβανε μεν την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας, η πρόβλεψη όμως αυτή είχε τον χαρακτήρα της προέκτασης των εξελίξεων του παρελθόντος και βασιζόταν αποκλειστικά στην εξέλιξη των μεγεθών οικονομικής ανάπτυξης, χωρίς να εξετάζεται η ανάδραση του ενεργειακού συστήματος προς την οικονομία. Έτσι, η ενεργειακή οικονομία χρειάστηκε να διευρύνει τις δραστηριότητές της ώστε να μελετήσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενέργειας και οικονομίας. Άλλωστε, η ενέργεια, όχι μόνο ως ένα τελικό προϊόν αλλά και ως ένας συντελεστής παραγωγής (όπως για παράδειγμα είναι η εργασία), έχει πολύπλευρες επιπτώσεις στην οικονομία. Η ενεργειακή οικονομία διευρύνθηκε επιπλέον με τη μελέτη της ενέργειας, ως ενιαίου συστήματος, το οποίο αποτελεί τμήμα της οικονομίας. Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, η προσφορά ικανοποιεί τη ζήτηση και διαμορφώνει το εισόδημα των οικονομικών παραγόντων, δηλαδή των ιδιωτών, των επιχειρήσεων και του κράτους. Το εισόδημα, με τη σειρά του, καθορίζει τη ζήτηση και έτσι κλείνει ο κύκλος της λειτουργίας της οικονομίας. Και στους τρεις αυτούς τομείς της οικονομίας (προσφορά, ζήτηση, εισόδημα) καθοριστικό ρόλο παίζουν οι τιμές των προϊόντων και των συντελεστών παραγωγής, οι οποίες επίσης διαμορφώνονται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ίδιων τομέων. Ακόμη, η ενεργειακή οικονομία άρχισε να μελετά τις αγορές των ενεργειακών προϊόντων (πετρελαίου, στερεών καυσίμων, ηλεκτρισμού), θεωρώντας ότι αυτές λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα και όχι χωριστά για κάθε ενεργειακό προϊόν. Με αυτό τον τρόπο η ενεργειακή οικονομία άρχισε να εξετάζει και πιθανές δυνατότητες υποκατάστασης μεταξύ τους. Στη δεκαετία του 1990, τα περιβαλλοντικά ζητήματα άρχισαν

να απασχολούν την ενεργειακή πολιτική και γι' αυτό έκτοτε οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας αποτελούν βασικό κομμάτι της ενεργειακής οικονομίας (Bhattacharyya, 2011)

Η ανάλυση των μηχανισμών της ζήτησης ενέργειας και η πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης είναι από τα πιο δύσκολα θέματα της ενεργειακής οικονομίας. Η ζήτηση ενέργειας αποτελείται από διαφορετικούς τομείς τελικής κατανάλωσης που συνθέτουν ένα μεγάλο και ετερογενές σύνολο καταναλωτών. Εδώ εντάσσονται οι μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων, η βιομηχανία, ο οικιακός και ο τριτογενής τομέας. Ο κάθε τομέας χαρακτηρίζεται από διαφορετικά χαρακτηριστικά ενεργειακής συμπεριφοράς και δραστηριότητας, και για αυτό η ανάλυση και η πρόβλεψη της ζήτησης χρειάζεται να γίνεται ξεχωριστά για κάθε τομέα. Σε αυτήν την κατεύθυνση έχει συμβάλει και η ανάπτυξη πολύπλοκων μαθηματικών συστημάτων που βοηθούν στην κατανόηση των μηχανισμών εξέλιξης της ζήτησης ενέργειας.

Η διαδικασία διαμόρφωσης της ζήτησης ενέργειας είναι για τους καταναλωτές ένα πρόβλημα σύνθετων αποφάσεων που αφορά συνδυαστικά την τεχνολογική επιλογή, την επιλογή των ενεργειακών προϊόντων και τελικά, τη λειτουργία του εξοπλισμού. Η επιλογή ξεκινά με την απόφαση για επενδύσεις και περιλαμβάνει την επένδυση σε μια τεχνολογία ή έναν εξοπλισμό και την απόφαση για τον τρόπο χρήσης της ενέργειας ώστε να ικανοποιηθεί μια ανάγκη (Bhattacharyya, 2006, 2011; Hartman, 1979). Εάν ο καταναλωτής αποφασίζει βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα για τη διαμόρφωση της ζήτησης ενέργειας, οι επιλογές και οι δυνατότητές του είναι διαφορετικές. Όταν οι αποφάσεις του είναι βραχυπρόθεσμες, οι εξοπλισμοί μπορούν να θεωρηθούν δεδομένοι, και άρα οι επιλογές του περιορίζονται στον τρόπο χρήσης της ενέργειας. Όταν οι αποφάσεις του είναι μακροπρόθεσμες οι εξοπλισμοί δεν θεωρούνται δεδομένοι, έτσι οι επιλογές του περιλαμβάνουν και τις δυνατότητες επένδυσης σε νέο εξοπλισμό, αλλά και τις επιλογές χρήσης της ενέργειας. Άρα, η πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους.

Το ζήτημα της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής που έχει προκύψει τις τελευταίες δεκαετίες και ειδικά η πρόσφατη δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050, έχει κάνει ξεκάθαρο ότι απαιτείται ο μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος που θα οδηγήσει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε αυτή την κατεύθυνση συμβάλλει η ενεργειακή πολιτική. Τα πρώτα χρόνια η ενεργειακή πολιτική εστίαζε στον τομέα της προσφοράς ενέργειας, όμως για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής δεν αρκεί μόνο ο μετασχηματισμός του τομέα της προσφοράς ενέργειας, αλλά πρέπει να αλλάξει σε βάθος και ο τομέας της ζήτησης ενέργειας.

Η πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας και ιδίως η πρόβλεψη του μετασχηματισμού σε ένα άλλο μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας, το οποίο ενσωματώνει μια τεχνολογική μεταβολή, είναι ένα δύσκολο εγχείρημα γιατί απαιτεί την πρόβλεψη των αποφάσεων και των συμπεριφορών των καταναλωτών, που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις προτιμήσεις. Μάλιστα, η ενεργειακή πολιτική που εστιάζει στη ζήτηση ενέργειας, ακριβώς επειδή απευθύνεται σε ένα ετερογενές σύνολο καταναλωτών, χρησιμοποιεί μέτρα πολιτικής που έχουν έμμεσο χαρακτήρα (πχ. κίνητρα και αντικίνητρα, πρότυπα, φορολογία), και δεν είναι βέβαιη η αποτελεσματικότητά τους.

Η ανάγκη να μοντελοποιηθούν σε βάθος όχι απλώς οι συμπεριφορές αλλά και οι αποφάσεις μέσω επενδύσεων, που θα οδηγήσουν στον πλήρη μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας είναι ένα καινούριο ζητούμενο στην ενεργειακή οικονομία, το οποίο ουσιαστικά ενέκυψε ταυτόχρονα με την δέσμευση για κλιματική ουδετερότητα. Ο μετασχηματισμός της κατανάλωσης ενέργειας περιλαμβάνει ως βασικό πυλώνα την ενεργειακή αποδοτικότητα, κάτι που διαφέρει από τις συνήθεις πρακτικές της

πρόβλεψης της ζήτησης που επικρατούσαν μέχρι πρόσφατα στην ενεργειακή οικονομία, σύμφωνα με τις οποίες η κατανάλωση ενέργειας μπορούσε να αυξάνει απεριόριστα, παράλληλα με την οικονομική ανάπτυξη.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στην πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης και αποδοτικότητας στον κτηριακό τομέα, δηλαδή στον οικιακό και στον τριτογενή τομέα και η έρευνα έχει εφαρμοστεί για τις χώρες της ΕΕ. Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να μοντελοποιήσει σε βάθος τις σύνθετες αποφάσεις που διαμορφώνουν τη ζήτηση και τελικά την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια και τον τρόπο με τον οποίο η ενεργειακή πολιτική μπορεί να επηρεάσει τις αποφάσεις αυτές. Το μαθηματικό μοντέλο και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του, μπορούν να συμβάλουν στην αξιολόγηση της ενεργειακής πολιτικής και στην ανάλυση των οικονομικών και κοινωνικών της επιπτώσεων, κάτι που είναι θεμελιώδους σημασίας στο πλαίσιο του μετασχηματισμού του ενεργειακού συστήματος για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

2.2 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Στο πλαίσιο της διάσκεψης COP21 για το κλίμα, που πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι το Δεκέμβριο του 2015, η ΕΕ δεσμεύθηκε να περιορίσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (ΑτΘ-GHG) σε χαμηλά επίπεδα, όπως απαιτείται για να διατηρηθεί η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από τους 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα. Στο πλαίσιο αυτό η ΕΕ ολοκλήρωσε το 2019 την έγκριση πακέτου πολιτικής με τίτλο «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους» (“Clean Energy for all Europeans”) (Directorate-General for Energy (European Commission), 2019; European Commission, 2018a) που έθετε δεσμευτικούς στόχους για την ενέργεια και το κλίμα στο σύνολο της ΕΕ μέχρι το 2030¹.

Από την άλλη πλευρά, η συμφωνία του Παρισιού αναφέρει ρητά ότι πρέπει να καταβληθούν οι βέλτιστες προσπάθειες για τον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε 1.5°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, αναγνωρίζοντας ότι αυτό θα μειώσει σημαντικά τους κινδύνους και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αμέσως μετά το 2050 και κατά το δεύτερο ήμισυ του αιώνα. Έτσι τον Ιούλιο του 2021, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε μια δέσμη προτάσεων («Fit for 55»)(European Commission, 2021b) μέσω των οποίων οι ενωσιακές πολιτικές για το κλίμα, την ενέργεια, τη χρήση γης, τις μεταφορές και τη φορολογία θα προσαρμοστούν κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αυτό έχει ως απώτερο στόχο για την ΕΕ να καταστεί η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος στον κόσμο έως το 2050, όπως άλλωστε και η ίδια δεσμεύτηκε με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) (European Commission, 2019) το 2019.

¹ Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40-45% κάτω από τα επίπεδα του 1990, βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 32.5% (μείωση πρωτογενούς και τελικής ενέργειας συγκριτικά με το σενάριο του 2007 για το έτος 2030 πριν από την οικονομική κρίση) και 32% μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας.

Η εκπλήρωση του νέου αυτού φιλόδοξου στόχου για το κλίμα απαιτεί τον ριζικό μετασχηματισμό του ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος και ευρύτερα της οικονομίας, και για αυτό η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε μια σειρά από νομοθετικά εργαλεία που καλύπτουν τους τομείς του κλίματος², της ενέργειας³, της χρήσης γης⁴, των μεταφορών⁵ και της φορολογίας⁶.

Πριν από τις οικονομικές κρίσεις της δεκαετίας του 1970, που οι τιμές των ενεργειακών προϊόντων και κυρίως του πετρελαίου ήταν χαμηλές, η εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας ήταν δεδομένη και οι ερευνητές προέβλεπαν ότι η ζήτηση ενέργειας θα αύξανε απεριόριστα. Εθεωρείτο μάλιστα η ανεξέλεγκτη αύξηση της ζήτησης ενέργειας ως δείγμα ευημερίας και ευζωίας. Με την αύξηση, όμως, των τιμών του πετρελαίου στη δεκαετία του 1970, οι ερευνητές και οι κυβερνήσεις άρχισαν να μελετούν αναλυτικά τις δυνατότητες διαχείρισης του τομέα της ζήτησης ενέργειας.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (World Bank, 2005), οι δυνατότητες διαχείρισης του τομέα της ζήτησης ενέργειας (demand-side management - DSM) αναφέρονται στις «συστηματικές δραστηριότητες από τη μεριά των κυβερνήσεων, που έχουν σχεδιαστεί για να αλλάζουν τον όγκο ή/και τη χρονική στιγμή της κατανάλωσης της ενέργειας από τους καταναλωτές». Ο παραπάνω ορισμός είναι γενικός και περιλαμβάνει διάφορες δραστηριότητες όπως (CSPM, 2001; World Bank, 2005):

- Διαχείριση φορτίου (load management) : Η διαχείριση φορτίου στοχεύει στη μείωση ή την αλλαγή του μεγέθους ή της χρονικής στιγμής της κατανάλωσης, έτσι ώστε η ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου αιχμής να είναι μειωμένη (μειώνοντας έτσι την ανάγκη για επενδύσεις σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες αιχμής) και για να εξασφαλίζεται η αποδοτική λειτουργία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε άλλες περιόδους, ώστε τελικά να μειώνεται το κόστος παραγωγής.
- Υποκατάσταση στη χρήση ενεργειακών προϊόντων (fuel substitution): Η υποκατάσταση στη χρήση ενεργειακών προϊόντων στοχεύει στην αντικατάσταση ενός καυσίμου από ένα άλλο για την κάλυψη συγκεκριμένης ανάγκης και τροποποιεί έτσι τη ζήτηση για συγκεκριμένα ενεργειακά προϊόντα, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τον όγκο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

² Αναθεώρηση της Οδηγίας 2003/87/ΕΚ σχετικά με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας, αναθεώρηση του Κανονισμού (ΕΕ) 2018/842 σχετικά με τη δεσμευτική ετήσια μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τα κράτη μέλη από το 2021 έως το 2030, θέσπιση του Κανονισμού 2021/0214 (COD) για τη δημιουργία Συνοριακού Μηχανισμού Προσαρμογής Άνθρακα, θέσπιση του Κανονισμού 2021/0206 (COD) για τη δημιουργία ενός Κλιματικού Κοινωνικού Ταμείου

³ Τροποποίηση της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/2001 για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, τροποποίηση της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/2002 για την ενεργειακή απόδοση,

⁴ Αναθεώρηση του Κανονισμού (ΕΕ) 2018/841 σχετικά με τη δέσμευση για συλλογική επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2035 στον τομέα της χρήσης γης, της δασοκομίας και της γεωργίας, τη θέσπιση της νέας ευρωπαϊκής πολιτικής για τα δάση,

⁵ Τροποποίηση του Κανονισμού (ΕΕ) 2019/631 σχετικά με τα πρότυπα επιδόσεων για τις εκπομπές CO₂ από τα καινούργια επιβατικά αυτοκίνητα και από τα καινούργια ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, αναθεώρηση της Οδηγίας 2014/94/ΕΕ για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων, θέσπιση του Κανονισμού 2021/0205 (COD) για τη διασφάλιση ίσων όρων ανταγωνισμού για βιώσιμες αεροπορικές μεταφορές, θέσπιση του Κανονισμού 2021/0210 (COD) σχετικά με τη χρήση ανανεώσιμων και χαμηλών σε εκπομπές άνθρακα καυσίμων στις θαλάσσιες μεταφορές

⁶ Αναθεώρηση της Οδηγίας 2003/96/ΕΚ σχετικά με την αναδιάρθρωση του κοινοτικού πλαισίου φορολογίας των ενεργειακών προϊόντων και της ηλεκτρικής ενέργειας

- Εξοικονόμηση ενέργειας (energy conservation): Η εξοικονόμηση ενέργειας στοχεύει στην ουσιαστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, μέσω βελτιώσεων ενεργειακής απόδοσης.

Κατά τη δεκαετία του 1970, η διαχείριση του τομέα της ζήτησης εστίαζε αποκλειστικά στη διαχείριση του φορτίου, με την έννοια της μετατόπισης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από ώρες αιχμής προς ώρες χαμηλού φορτίου, μέσω της προώθησης της χρήσης ωριαίων μετρητών και σχετικών κινήτρων. Αυτές οι πρακτικές όμως δεν συνέβαλαν στο μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας, γιατί ο όγκος της ζήτησης ενέργειας δεν μειωνόταν, αλλά μόνο μετατοπιζόταν.

Στη δεκαετία του 1980, μετά το ξέσπασμα των παγκοσμίων κρίσεων της αγοράς πετρελαίου, έγινε η προσπάθεια υποκατάστασης του πετρελαίου με άλλα καύσιμα: αναπτύχθηκαν τα δίκτυα φυσικού αερίου, μπήκαν φόροι στο πετρέλαιο και άρχισε να προωθείται ο εξηλεκτρισμός των θερμικών χρήσεων. Και πάλι όμως, αυτές οι προσπάθειες διαχείρισης του τομέα της ζήτησης δεν σκόπευαν στο μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας αλλά στη μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο.

Από τη δεκαετία του 1990 και μετά, καθώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας άρχισαν να αποτελούν σημαντικό κομμάτι της ενεργειακής πολιτικής, άρχισε να προωθείται η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, η κλιματική αλλαγή έφερε στο προσκήνιο το βαθύ μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας και ανέδειξε τη μείωση της ζήτησης ενέργειας, δηλαδή την εξοικονόμηση ενέργειας ή την ορθολογική χρήση της ενέργειας, ως μέγιστης συνεισφοράς για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων.

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία, αναγνωρίζοντας τη συνεισφορά της ενεργειακής εξοικονόμησης για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων, έχει ενσωματώσει ήδη από τη δεκαετία του 2010, νομοθετικά εργαλεία με τη μορφή Οδηγιών και Κανονισμών που σκοπό έχουν την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Η Οδηγία για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων (EcoDesign Directive - 2009/125/EE) (European Commission, 2009) καλύπτει διάφορες κατηγορίες προϊόντων που είτε καταναλώνουν ενέργεια, όπως οι ηλεκτρικές συσκευές, είτε σχετίζονται με την ενέργεια, όχι καταναλώνοντας την απευθείας αλλά επιδρώντας στην κατανάλωσή της (έμμεσα ή άμεσα) και άρα στην εξοικονόμησή της, όπως είναι τα μονωτικά υλικά κ.ά. Η Οδηγία εξασφαλίζει ότι τα ενεργειακά προϊόντα πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους από το σχεδιασμό, την κατασκευή, την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διάθεση και τη χρήση τους έως και την αντικατάστασή τους.

Η Οδηγία για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας (EcoLabelling Directive - 2010/30/EE) (European Commission, 2010a) καλύπτει, όπως και η Οδηγία για τον Οικολογικό Σχεδιασμό, όχι μόνο προϊόντα που καταναλώνουν ενέργεια αλλά και αυτά που σχετίζονται με την ενέργεια. Στόχος της συγκεκριμένης Οδηγίας είναι η επιβολή της εφαρμογής επισημάνσεων στα ενεργειακά προϊόντα ώστε να πληροφρούνται οι καταναλωτές σχετικά με την ενεργειακή τους αποδοτικότητα.

Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων (Energy Performance of Buildings Directive - 2010/31/EE) (European Commission, 2010b) προωθεί τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων, μέσω του καθορισμού απαιτήσεων ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης για όλα τα νέα και ριζικά ανακαινιζόμενα κτήρια, για όλα τα δομικά στοιχεία του κελύφους και για τα τεχνικά συστήματα των κτηρίων που αντικαθίστανται ή αναβαθμίζονται. Η Οδηγία τροποποιήθηκε το 2018 (2018/844/EE)

(European Commission, 2018b), ως μέρος του πακέτου πολιτικής «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους». Ειδικότερα, η τροποποιημένη Οδηγία εισήγαγε νέα στοιχεία και πρόταξε τη δέσμευση της ΕΕ να εκσυγχρονίσει τον τομέα των κτηρίων συμβαδίζοντας με τις τεχνολογικές εξελίξεις και να αυξήσει τις ανακαινίσεις των κτηρίων. Τον Οκτώβριο του 2020, η Επιτροπή παρουσίασε τη στρατηγική της «Κύμα ανακαινίσεων» (“Renovation wave”) (European Commission, 2020), στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Η στρατηγική περιέχει ένα σχέδιο δράσης με συγκεκριμένα ρυθμιστικά, χρηματοδοτικά και δυναμικά μέτρα για την ενίσχυση της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων. Έχει ως στόχο να επιτευχθεί υπέρ-διπλασιασμός του ετήσιου ποσοστού ενεργειακής ανακαίνισης των κτηρίων έως το 2030 και να προωθηθεί η ανακαίνιση μεγάλης έντασης του κτηριακού αποθέματος. Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και μάλιστα της δέσμης προτάσεων «Fit for 55», η Επιτροπή πρότεινε το Δεκέμβριο του 2021 εκ νέου την αναθεώρηση της Οδηγίας (*Αναθεώρηση Της Οδηγίας Για Την Ενεργειακή Απόδοση Των Κτιρίων*, 2022) αναβαθμίζοντας το υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι υψηλότερες φιλοδοξίες και οι επιτακτικότερες ανάγκες όσον αφορά την κλιματική και κοινωνική δράση. Η αναθεωρημένη Οδηγία παρέχει, παράλληλα, στα κράτη μέλη την αναγκαία ευελιξία ώστε να μπορεί να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κτηριακού αποθέματος της κάθε χώρας.

Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency Directive - 2012/27/EK) (European Commission, 2012) όριζε, όπως αρχικά είχε διαμορφωθεί, κοινό πλαίσιο μέτρων για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης εντός της ΕΕ προκειμένου να διασφαλιστεί η επίτευξη του πρωταρχικού στόχου της ΕΕ για το 2020, για 20% στην ενεργειακή απόδοση, και να προετοιμάσει το έδαφος για περαιτέρω βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης πέραν της προαναφερόμενης χρονολογίας. Επιπλέον, θέσπιζε κανόνες που αποσκοπούσαν στην άρση των εμποδίων στην αγορά ενέργειας και στην αντιμετώπιση των αδυναμιών της αγοράς που επιδρούν στον εφοδιασμό και τη χρήση ενέργειας. Η Οδηγία όριζε ενδεικτικούς εθνικούς στόχους ενεργειακής απόδοσης για το 2020, που όμως αποτελούσαν ελάχιστες απαιτήσεις και δεν εμπόδιζαν τα κράτη μέλη να είναι πιο φιλόδοξα. Η Οδηγία τροποποιήθηκε το 2018 (2018/844/EE) (European Commission, 2018b), ως μέρος του πακέτου πολιτικής «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους». Ειδικότερα, η τροποποιημένη Οδηγία επικαιροποίησε το πλαίσιο πολιτικής για το 2030 και έθεσε στόχο βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κατά 32.5% (μείωση πρωτογενούς και τελικής ενέργειας συγκριτικά με το σενάριο του 2007 για το έτος 2030 πριν από την οικονομική κρίση) στην ΕΕ. Η τροποποιημένη Οδηγία ενσωμάτωσε και την αρχή της «Ενεργειακής Απόδοσης Πρώτα» (“Energy efficiency first” principle), η οποία περιλαμβάνει «τη μέγιστη συνεκτίμηση, στο πλαίσιο των αποφάσεων σχεδιασμού και πολιτικής και επενδύσεων στον τομέα της ενέργειας, εναλλακτικών και οικονομικά αποδοτικών μέτρων ενεργειακής απόδοσης, για την αύξηση της αποτελεσματικότητας στη ζήτηση και προσφορά ενέργειας, ιδίως μέσω οικονομικά αποδοτικών ενεργειακών εξοικονομήσεων στην τελική χρήση, μέσω πρωτοβουλιών για ανταπόκριση στη ζήτηση και μέσω πιο αποτελεσματικής μετατροπής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας, με παράλληλη όμως επίτευξη των στόχων των αποφάσεων αυτών» (European Commission, 2018c). Τον Ιούλιο του 2021, προτάθηκε η εκ-νέου τροποποίηση της Οδηγίας στο πλαίσιο της δέσμης προτάσεων «Fit for 55» λαμβάνοντας υπόψη ότι για να επιτευχθεί ο νέος στόχος της ΕΕ για το 2030 για το κλίμα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην ενεργειακή απόδοση. Η πρόταση για την τροποποιημένη Οδηγία αυξάνει τη φιλοδοξία του ευρωπαϊκού στόχου για την ενεργειακή απόδοση για το 2030, ο οποίος αντιστοιχεί σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 36% και 39% στην τελική και πρωτογενή ενέργεια αντίστοιχα, συγκριτικά με το σενάριο του 2007 για το έτος 2030 πριν από την οικονομική κρίση, και τον κάνει δεσμευτικό. Η πρόταση για την τροποποιημένη Οδηγία δίνει επίσης

μεγαλύτερη έμφαση στην αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας και στην υποστήριξη των καταναλωτών, μέσω μέτρων που στοχεύουν στην περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και την παροχή πληροφοριών.

Η τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια (οικιακού και τριτογενή τομέα) αποτελεί το 37,2% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας (δείκτης Europe 2020-2030) στην Ευρώπη (πλην του Ηνωμένου Βασιλείου), σύμφωνα με τα ενεργειακά ισοζύγια της Eurostat (2019). Ειδικά η τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια του οικιακού τομέα αποτελεί το 25% της συνολική τελικής κατανάλωσης, και το αντίστοιχο ποσοστό για τα κτήρια του τριτογενή τομέα είναι 14%. Επίσης, το μεγαλύτερο μερίδιο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα, κυρίως πετρέλαιο και φυσικό αέριο, με αποτέλεσμα οι εκπομπές CO₂ στον κτηριακό τομέα στην Ευρώπη να είναι 446,7 MtCO₂ το 2019 (European Environment Agency, 2022).

Συνεπώς, ο μετασχηματισμός της χρήσης της ενέργειας στα κτήρια είναι απαραίτητος προκειμένου όχι μόνο να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας αλλά και να μετριαστεί το κτηριακό ανθρακικό αποτύπωμα. Σε αυτήν την κατεύθυνση, συμβάλλουν τόσο η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων – μέσω της τοποθέτησης μόνωσης και της αντικατάστασης των υαλοπινάκων – όσο και η αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με νέα, αποδοτικά συστήματα και η επιλογή ηλεκτρικών συσκευών υψηλής κατηγορίας ενεργειακής απόδοσης.

Ο τομέας των κτηρίων είχε ανέκαθεν επιστημονικές μεθόδους προσομοίωσης που εστίαζαν στο κτηριακό απόθεμα, στον τρόπο κατασκευής των κτηρίων και στην κατανάλωση ενέργειας, προερχόμενες από τους κλάδους του μηχανικού, κυρίως του πολιτικού μηχανικού, του αρχιτέκτονα και του μηχανολόγου μηχανικού. Αλλά όλες αυτές οι μέθοδοι προσομοίωσης δεν ενσωμάτωσαν τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να επηρεαστούν οι ενεργειακές αποφάσεις των καταναλωτών, ώστε να μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

Η ύπαρξη του στόχου μετασχηματισμού της χρήσης της ενέργειας στα κτήρια δημιουργεί την ανάγκη συνολικής αντιμετώπισης του κτηριακού τομέα, από πλευράς τεχνικό-οικονομικής και μακροχρόνιας βελτιστοποίησης, πράγμα που ξεπερνάει τις προσεγγίσεις μηχανικού που υπήρχαν μέχρι τώρα στις εφαρμογές στα κτήρια.

Η παρούσα διατριβή σκοπεύει να αντιμετωπίσει αυτήν την πρόκληση: θα ερευνήσει σε βάθος και τελικά θα μοντελοποιήσει τις ενεργειακές συμπεριφορές και αποφάσεις των καταναλωτών, με απώτερο στόχο να καταστεί εφικτή η πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης και της αποδοτικότητας στα κτήρια στο πλαίσιο της σύγχρονης στρατηγικής για την κλιματική αλλαγή.

2.3 ΤΟ ΠΑΡΑΔΟΞΟ ΤΩΝ ΜΗ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η μικρό-οικονομική θεμελίωση για τη ζήτηση ενέργειας από τους καταναλωτές βασίζεται στις αρχές μεγιστοποίησης της χρησιμότητας (Κάπρος & Ντελκής, 2007). Σύμφωνα με τη μικρό-οικονομική θεωρία, οι καταναλωτές γνωρίζουν τα σενάρια και τη σειρά των προτιμήσεών τους. Μάλιστα, οι προτιμήσεις τους μπορεί να αναπαρασταθούν μέσω κάποιας συνάρτησης χρησιμότητας και οι καταναλωτές επιλέγουν ορθολογικά ανάμεσα στις επιλογές τους. Έτσι, σύμφωνα με τη μικρό-οικονομική θεωρία, κατά τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης, οι καταναλωτές συγκρίνουν τις εναλλακτικές επιλογές και

καταλήγουν στη βέλτιστη από πλευράς επίδοσης επιλογή, δηλαδή σε αυτήν που μεγιστοποιεί τη χρησιμότητά τους.

Η χρησιμότητα, σχετικά με τη ζήτηση ενέργειας στα κτήρια, έχει την έννοια της θερμικής άνεσης (μέσω της θέρμανσης ή της ψύξης), της ικανοποίησης άλλων θερμικών αναγκών (πχ. μαγείρεμα ή προετοιμασία Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX)), της οπτικής άνεσης (μέσω του φωτισμού), κ.ά.

Οι ενεργειακές αποφάσεις που διαμορφώνουν τη ζήτηση ενέργειας στα κτήρια, περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, τις αποφάσεις για επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης. Οι αποφάσεις αυτές προκύπτουν από το συμβιβασμό μεταξύ του υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης και του χαμηλού λειτουργικού κόστους που αναμένεται λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας από την επένδυση. Όταν ο υπολογισμός αυτός γίνεται με καθαρά οικονομοτεχνικά κριτήρια, τεχνικές μελέτες συμφωνούν (European Commission, 2014; Gorshkov et al., 2016; Hu, 2019; PF4EE Expert Support Facility, 2019; Teni et al., 2019; Zachariadis et al., 2018), ότι αρκετές επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης είναι οικονομικά αποδοτικές, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα συνθήκες άνεσης (πχ. θερμικής, οπτικής κλπ.). Άρα, σύμφωνα με την μικρό-οικονομική θεωρία, θα έπρεπε οι καταναλωτές να πραγματοποιούν αυτές τις επενδύσεις. Όμως, στη βιβλιογραφία (Brown, 2001) παρατηρείται ότι οι καταναλωτές πραγματοποιούν πολύ λιγότερες επενδύσεις (underinvestment), από ό,τι θα αναμενόταν βάσει της μικρό-οικονομικής θεωρίας, και αυτό δίνει την εντύπωση ότι επιλέγουν μη ορθολογικά όταν αποφασίζουν για ενεργειακή αποδοτικότητα. Το παραπάνω αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Golove & Eto, 1996; Hirst & Brown, 1990; Jaffe & Stavins, 1994; Solar Energy Reserch Institute, 1981) ως το «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα» (“energy efficiency paradox”).

Η πρώτη φορά που παρουσιάστηκε στη βιβλιογραφία η έννοια του “παραδόξου των μη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα”, ήταν από τον (Hausman, 1979). Ο Hausman μελέτησε την αγορά οικιακών κλιματιστικών μονάδων στην Αμερική στο τέλος της δεκαετίας του 1970 για να παρουσιάσει την ατομική συμπεριφορά στην αγορά και τη χρήση ενεργειακών αγαθών, με έμφαση στο συμβιβασμό μεταξύ αρχικού κόστους επένδυσης και εξοικονόμησης του λειτουργικού κόστους. Για το σκοπό αυτό, ακολούθησε μια συγκεκριμένη αποδεικτική μέθοδο: τη στατιστική ανάλυση δείγματος παρατηρημένων συμπεριφορών.

Για να μοντελοποιήσει ο Hausman τις αποφάσεις των νοικοκυριών σχετικά με την αγορά και τη χρήση των κλιματιστικών, δημιούργησε ένα στατιστικό μοντέλο που υπολόγιζε τη χρησιμότητα που παρέχεται στα νοικοκυριά όταν αυτά έχουν επενδύσει στην αγορά ενός κλιματιστικού. Έπειτα, ακολουθώντας μια λογαριθμική-τετραγωνική ηδονική ανάλυση παλινδρόμησης (log-quadratic hedonic regression) επί των τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών ορισμένων μοντέλων κλιματιστικών που κυκλοφορούσαν τότε στην αμερικάνικη αγορά, προσδιόρισε τη σχέση μεταξύ του κόστους αγοράς των κλιματιστικών και της ενεργειακής τους απόδοσης (EER).

Για να προσδιορίσει τις τιμές των παραμέτρων του στατιστικού μοντέλου χρησιμότητας, χρησιμοποίησε δεδομένα από την στατιστική έρευνα MRI (1978): η έρευνα είχε πραγματοποιηθεί σε ένα τυχαίο δείγμα νοικοκυριών σε 16 πολιτείες των ΗΠΑ. Τα δεδομένα της έρευνας περιλάμβαναν στοιχεία ιδιοκτησίας/αγοράς και τεχνικών χαρακτηριστικών των συσκευών, τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των νοικοκυριών και τους λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος και φυσικού αερίου. Επίσης, χρησιμοποιώντας ένα δείγμα κλιματιστικών και επιλέγοντας μια συνάρτηση επιβίωσης (survival function), της μορφής Weibull, εκτίμησε το μέσο τεχνικό χρόνο ζωής των κλιματιστικών.

Χρησιμοποιώντας τα στατιστικά δεδομένα από την έρευνα στα νοικοκυριά, τη λογαριθμική-τετραγωνική σχέση μεταξύ του κόστους αγοράς και της ενεργειακής απόδοσης των κλιματιστικών και την εκτίμηση της διάρκειας ζωής τους, ο Hausman προσδιόρισε με οικονομετρία τις τιμές των παραμέτρων του στατιστικού μοντέλου χρησιμότητας. Βρήκε ότι το μοντέλο συμφωνεί με την οικονομική θεωρία και μπορεί να εξηγήσει σε μεγάλο βαθμό τις ατομικές συμπεριφορές. Έχοντας υπολογίσει τις παραμέτρους του μοντέλου χρησιμότητας, ο Hausman υπολόγισε και τα προεξοφλητικά επιτόκια, τα οποία εμμέσως είχαν χρησιμοποιήσει οι καταναλωτές (implicit discount rates) όταν έλαβαν την απόφαση για την επένδυση σε μία συγκεκριμένη κλιματιστική μονάδα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα εν λόγω επιτόκια ήταν της τάξης του 20%. Τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια που υπολόγισε ο Hausman ήταν πολύ μεγαλύτερα από αυτά που θα υπολογίζονταν βάσει της οικονομικής θεωρίας και της υπόθεσης ότι οι αποφάσεις των καταναλωτών στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας, και άρα ισοδυναμούν με το ποσοστό απόδοσης σε εναλλακτικές επενδύσεις συγκρίσιμου κινδύνου. Επιπλέον, γνωρίζοντας τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά του δείγματος των καταναλωτών, ο Hausman υπολόγισε και τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια ανά εισοδηματική κλάση καταναλωτών και διαπίστωσε ότι τα δύο μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα, δηλαδή οι υψηλότερες εισοδηματικές κλάσεις χρησιμοποιούν χαμηλότερα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια από τις χαμηλότερες εισοδηματικές κλάσεις. Στην αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ του εισοδήματος και των έμμεσων προεξοφλητικών επιτοκίων σε ό,τι αφορά στις επενδύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια του οικιακού τομέα κατέληξαν και άλλοι στη βιβλιογραφία (Berkovec et al., 1983; Goett & McFadden, 1982; Hartman, 1986).

Τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια που υπολόγισε ο Hausman αποκλίνουν από αυτά που θα υπολογίζονταν βάσει της τυπικής οικονομικής θεωρίας, και αποδεικνύουν την απροθυμία των καταναλωτών να επενδύσουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα (στην προκειμένη περίπτωση σε ενεργειακά αποδοτικές κλιματιστικές μονάδες), διότι εάν οι καταναλωτές είχαν χρησιμοποιήσει τα επιτόκια της αγοράς στις αποφάσεις τους θα φαινόταν σαν να μην είχαν επιλέξει ορθολογικά τελικά αφού δεν θα είχαν επιλέξει τις οικονομικά αποδοτικές επιλογές. Με άλλα λόγια, με την τιμή του επιτοκίου της αγοράς φαίνεται να μπορεί να γίνει ο συμβιβασμός μεταξύ του υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης και του χαμηλού λειτουργικού κόστους που αναμένεται λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας από την επένδυση, δηλαδή ότι οι επενδύσεις είναι οικονομικά αποδοτικές και όμως οι καταναλωτές δεν τις επιλέγουν άρα είναι μη ορθολογικοί. Όμως, με μια μεγαλύτερη τιμή επιτοκίου, όσο αυτή που υπολογίζει ο Hausman, φαίνεται πράγματι ότι οι επενδύσεις είναι μη οικονομικά αποδοτικές και ορθά δεν τις επιλέγουν οι καταναλωτές,

Ο Hausman σε κάθε περίπτωση χρησιμοποίησε μια επιστημολογικά έγκυρη και τυπική μέθοδο για να παρουσιάσει τις παρατηρήσιμες συμπεριφορές των καταναλωτών, υπολογίζοντας τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια και δεν σκόπευε να ερμηνεύσει τις παρατηρήσιμες συμπεριφορές. Με άλλα λόγια, ήταν έξω από το ερευνητικό του ενδιαφέρον να ερμηνεύσει το λόγο για τον οποίο τα προεξοφλητικά επιτόκια που έμμεσα χρησιμοποιήθηκαν κατά τη λήψη της απόφασης ήταν αυτής της τάξης μεγέθους. Αυτό, είναι κάτι που αναλύθηκε σε βάθος από τους μελετητές που ασχολήθηκαν με την ερμηνεία του «παραδόξου των μη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα», όπως θα δούμε παρακάτω. Ωστόσο η συνεισφορά της μελέτης του Hausman ήταν σημαντική για τους εξής λόγους:

- Ο Hausman χρησιμοποίησε μια τυπική αποδεικτική μέθοδο στην οικονομική επιστήμη, που δεν μπορεί να αμφισβητηθεί, επειδή χρησιμοποιεί τις πραγματικές συμπεριφορές και τις επεξεργάζεται στατιστικά. Ταυτόχρονα, ενσωμάτωσε στη μέθοδο ένα τεχνικοοικονομικό μοντέλο, για να

προσδιορίσει με ακρίβεια τη σχέση μεταξύ του κόστους αγοράς των κλιματιστικών και της ενεργειακής τους απόδοσης.

- Ανατρέπει την προσέγγιση των συμπεριφορικών οικονομολόγων (behavioral economist) ότι η οικονομική επιστήμη πάσχει γιατί μπορεί να μοντελοποιεί μόνο ορθολογικές αποφάσεις, ενώ οι καταναλωτές τελικά αποφασίζουν μη-ορθολογικά. Το γεγονός ότι τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια που υπολόγισε ο Hausman διέφεραν ανάλογα με τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των νοικοκυριών, υποδεικνύει ότι κατά τη μοντελοποίηση των αποφάσεων πρέπει να συμπεριλαμβάνονται όλοι οι παράγοντες που επιδρούν στις αποφάσεις. Εάν η μαθηματική μοντελοποίηση δεν είναι επαρκής, οι αποφάσεις μοιάζουν μη-ορθολογικές.
- Για την έννοια του έμμεσου προεξοφλητικού επιτοκίου αυτή καθαυτή, η οποία τελικά στη βιβλιογραφία πήρε και άλλες μορφές, όπως την έννοια του κόστους ευκαιρίας (opportunity cost). Το έμμεσο προεξοφλητικό επιτόκιο ούτε παρατηρείται ούτε ο αποφασίζων έχει σκεφτεί μια αριθμητική τιμή για αυτό. Υπονοεί το επιτόκιο που εμμέσως χρησιμοποιεί ο αποφασίζων όταν κάνει το συμβιβασμό μεταξύ αρχικού κόστους επένδυσης και εξοικονόμησης του λειτουργικού κόστους. Η μεθοδολογία του Hausman να υπολογιστούν στατιστικά τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια, στηρίχτηκε σε μια από τις θεμελιώδεις έννοιες της οικονομικής θεωρίας, την έννοια των σκιωδών τιμών (shadow prices) (M. Harrison, 2010; Lind et al., 2013) που δεν παρατηρούνται στη φύση και εκφράζουν το αληθινό οριακό κοινωνικό όφελος ή κόστος ενός αγαθού, στο πλαίσιο μιας αγοράς που λειτουργεί ατελώς.

Αντίστοιχες αποδεικτικές εμπειρικές μέθοδοι, όπως αυτή που χρησιμοποίησε ο Hausman για τις επενδύσεις σε κλιματιστικές μονάδες, έχουν εφαρμοσθεί και για άλλα ενεργειακά αγαθά (A. Sanstad & McMahon, 2008; Train, 1985). Όλες οι μελέτες καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα: τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια που αφορούν τις επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα έχουν πολύ υψηλή τιμή, πολύ μεγαλύτερη από την τιμή του επιτοκίου της αγοράς.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, προκύπτει ότι τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια μπορούν να εξηγήσουν την απροθυμία των καταναλωτών να προβούν σε επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, παρότι αυτές, με καθαρά τεχνικούς υπολογισμούς φαίνονται οικονομικά αποδοτικές, δηλαδή εξηγούν το «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα» (Ameli & Brandt, 2015; Howarth & Sanstad, 1995). Προκειμένου οι καταναλωτές να είναι πρόθυμοι να προβούν σε επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, τα δημόσια οικονομικά προτείνουν τη θέσπιση μέτρων και πολιτικών, που επί της ουσίας θα καταφέρουν να μειώσουν τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια. Αυτή η διαπίστωση, θεωρεί όμως δεδομένο ότι τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια είναι αποτέλεσμα ατελειών στην αγορά και για αυτό χρειάζεται η ανάμιξη της πολιτείας που θα τις αντιμετωπίσει.

Υπάρχει μια διαμάχη στη βιβλιογραφία (Golove & Eto, 1996; A. H. Sanstad & Howarth, 1994a) σχετικά με την ερμηνεία των (υψηλών) έμμεσων προεξοφλητικών επιτοκίων. Οι αναλυτές της οικονομικής επιστήμης υποστηρίζουν ότι οι αποφάσεις των καταναλωτών είναι απολύτως ορθολογικές και λαμβάνουν χώρα σε μία τέλεια αγορά (Sutherland, 1991). Έτσι, τα υψηλά προεξοφλητικά επιτόκια προκύπτουν για συγκεκριμένους λόγους (Ameli & Brandt, 2015; Golove & Eto, 1996; Howarth & Sanstad, 1995): γιατί δεν έχουν συνυπολογιστεί «κρυφά» κόστη που σχετίζονται με την επένδυση, γιατί η επένδυση γίνεται σε ένα καθεστώς μεγάλης αβεβαιότητας, γιατί είναι μη-αναστρέψιμη η φύση της επένδυσης, και γιατί υπάρχει ετερογένεια μεταξύ των καταναλωτών. Σύμφωνα λοιπόν με τους αναλυτές της οικονομικής επιστήμης, εάν οι τεχνικοί υπολογισμοί συμπεριλάβουν όλα αυτά τα στοιχεία, τα

έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια που αντιστοιχούν στις επενδύσεις είναι χαμηλότερα, και έτσι δεν χρειάζεται η ανάμιξη της πολιτείας με θέσπιση μέτρων και πολιτικών ώστε να κινητοποιηθούν επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν πολλές εμπειρικές μελέτες που να μπορούν να υποστηρίξουν αυτήν την άποψη (Howarth & Sanstad, 1995; A. H. Sanstad & Howarth, 1994a, 1994b), ότι δηλαδή δεν είναι απαραίτητη η ανάμιξη της πολιτείας για να αντιμετωπιστεί η απροθυμία των καταναλωτών να επενδύσουν σε ενεργειακή αποδοτικότητα.

Από την άλλη, οι αναλυτές μηχανικοί υποστηρίζουν ότι υπάρχουν εμπόδια (market barriers) (DeCanio, 1993; Golove & Eto, 1996; Howarth & Andersson, 1993; Howarth & Sanstad, 1995; A. H. Sanstad & Howarth, 1994a, 1994b; Schleich & Gruber, 2008; Sutherland, 1991) που αποτρέπουν τους καταναλωτές να προβούν σε επενδύσεις για ενεργειακή αποδοτικότητα. Τα εμπόδια κατανοούνται σωστά ως αποτυχίες της αγοράς (market failures) (Ameli & Brandt, 2015) ή ατέλειες της αγοράς (market imperfections) (Howarth & Sanstad, 1995), και είναι αυτά που εξηγούν τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια. Σύμφωνα λοιπόν με τους αναλυτές μηχανικούς, η αντιμετώπιση των ατελειών της αγοράς απαιτεί την ανάμιξη της πολιτείας με τη θέσπιση μέτρων και πολιτικών που θα κινητοποιήσουν τις επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

Σε ό,τι αφορά στην υπόθεση της τέλειας αγοράς σχετικά με την ερμηνεία των (υψηλών) έμμεσων προεξοφλητικών επιτοκίων από τους αναλυτές της οικονομικής επιστήμης, το πρώτο επιχείρημα αναφέρει ότι στους υπολογισμούς πρέπει να συμπεριλαμβάνονται και «κρυφά» κόστη (Golove & Eto, 1996; Howarth & Sanstad, 1995; A. H. Sanstad & Howarth, 1994a, 1994b). Τα «κρυφά» κόστη των επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να αφορούν τη μείωση της άνεσης, (πχ. η θερμοκρασία χρώματος από τις λάμπες φθορισμού είναι πολύ διαφορετική από τη θερμοκρασία χρώματος των συμβατικών λαμπτήρων, γεγονός που μπορεί να δυσαρεστεί πολλούς χρήστες). Μπορεί, επίσης, να σχετίζονται με την αξιοπιστία του εξοπλισμού (πχ. να υπάρχουν λίγα μόνο εξουσιοδοτημένα κέντρα για την συντήρηση μιας τεχνολογίας και αυτά να βρίσκονται μόνο στα μεγάλα αστικά κέντρα και όχι στην επαρχία), ή να αφορούν τη διαδικασία εγκατάστασης της τεχνολογίας ή του εξοπλισμού (πχ. να απαιτούνται ειδικές εργασίες εγκατάστασης λόγω τεχνικών περιορισμών). Τα «κρυφά» κόστη τελικά περιλαμβάνουν υποκειμενικά κόστη, που δεν πληρώνονται στην πραγματικότητα αλλά επηρεάζουν τους αποφασίζοντες όταν πρέπει να επιλέξουν, και αληθινά επιπλέον κόστη που μπορεί να αντιστοιχούν σε μία επένδυση.

Ένα δεύτερο επιχείρημα των αναλυτών που υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχουν ατέλειες στην αγορά, συσχετίζει τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια με τους κινδύνους που αντιλαμβάνονται οι καταναλωτές ότι ενέχουν οι επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα (Sutherland, 1991). Το επιχείρημα αυτό βασίζεται κυρίως στην αβεβαιότητα σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη τόσο των τιμών των ενεργειακών προϊόντων (πχ. του ηλεκτρισμού) όσο και των τεχνολογιών. Στο πλαίσιο του κινδύνου που ενέχουν οι επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, αναφέρεται (Hassett & Metcalf, 1993; Metcalf, 1994) και η μη-αναστρεψιμότητα ορισμένων από αυτές (πχ. η εφαρμογή μόνωσης στα κτήρια).

Ένα τελευταίο επιχείρημα για την ερμηνεία των (υψηλών) έμμεσων προεξοφλητικών επιτοκίων σε μια αγορά χωρίς ατέλειες βασίζεται στην ετερογένεια μεταξύ των καταναλωτών. Σύμφωνα με αυτήν την άποψη, οι καταναλωτές είναι σε καλύτερη θέση να κρίνουν τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών από ό,τι οι αναλυτές που δεν είναι καλά ενημερωμένοι σχετικά με τις συγκεκριμένες συνήθειες και προτιμήσεις του καθενός. Για παράδειγμα, τα μεμονωμένα ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης μπορεί να μην είναι

οικονομικά αποδοτικά για ένα κτήριο κατοικίας που χρησιμοποιείται όλον το χρόνο, αλλά μπορεί να είναι η πιο οικονομικά αποδοτική επιλογή για εξοχικές κατοικίες.

Σχετικά με την άποψη ότι υπάρχουν ατέλειες στην αγορά που οδηγούν σε απροθυμία επενδύσεων στην ενεργειακή αποδοτικότητα και μπορούν να ερμηνεύσουν τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια, οι κύριες ατέλειες, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Howarth & Sanstad, 1995) είναι: η μερική και ασύμμετρη πληροφόρηση (imperfect και asymmetric information), τα κόστη συναλλαγών (transaction costs), τα ατελώς κατανομημένα κίνητρα (misplaced incentives), η περιορισμένη ορθολογικότητα (bounded rationality) και η περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση (lack of access to capital).

Ο σημαντικότερος ισχυρισμός γύρω από την άποψη της ύπαρξης ατελειών στη αγορά είναι, ότι οι καταναλωτές είναι ελάχιστα ενημερωμένοι σχετικά με τις ενεργειακές επιλογές που τους διατίθενται. Χαρακτηριστικά, ο (P. C. Stern, 1986) συνοψίζοντας μελέτες πάνω στις συμπεριφορές που σχετίζονται με ενεργειακές αποφάσεις, διαπίστωσε ότι οι πληροφορίες που έχουν οι καταναλωτές σχετικά με τη χρήση της οικιακής ενέργειας «δεν είναι μόνο ελλιπείς, αλλά συστηματικά λανθασμένες. Σε γενικές γραμμές, οι άνθρωποι τείνουν να υπερεκτιμούν τις ποσότητες ενέργειας που χρησιμοποιούν και που μπορεί να εξοικονομηθούν από τεχνολογίες που ήδη χρησιμοποιούν».

Το πρόβλημα της ασύμμετρης πληροφόρησης στις οικονομικές αποφάσεις, αναδείχθηκε αρχικά από τον Akerlof το 1970, στη δημοσίευση “The Market for Lemons: Quality Uncertainty and the Market Mechanism” (Akerlof, 1970). Ο Akerlof χρησιμοποίησε την αγορά μεταχειρισμένων αυτοκινήτων (“lemons” στην αμερικάνικη αργκό) ως παράδειγμα του προβλήματος της αβεβαιότητας σε σχέση με την ποιότητα των μεταχειρισμένων αυτοκινήτων, και κατέληξε ότι η ποιότητα των εμπορευμάτων εν γένει που διακινούνται σε μια αγορά μπορεί να υποβαθμιστεί παρουσία ασύμμετρης πληροφόρησης μεταξύ αγοραστών και πωλητών. Στην περίπτωση των επενδύσεων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, οι πωλητές (αλλά και πιο γενικά το κράτος, οι εταιρείες παροχής υπηρεσιών κ.ά.) μπορεί να διαθέτουν ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες που γνωρίζουν ότι θα παρέχουν ξεκάθαρα οφέλη στους αγοραστές (ή γενικά στους καταναλωτές), αλλά η αποτελεσματική μεταφορά αυτών των πληροφοριών στους αγοραστές μπορεί να αποδειχθεί δύσκολη ή αδύνατη εάν τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας δεν είναι εμφανή ή κατανοητά κατά τη φάση της συναλλαγής.

Οι επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα έχουν διάφορα στάδια: το στάδιο του προγραμματισμού και της προετοιμασίας, το στάδιο της εφαρμογής ή πραγματοποίησης της επένδυσης και το στάδιο της παρακολούθησης και ελέγχου της επένδυσης (Valentová, 2010). Κάθε ένα από αυτά τα στάδια, περιλαμβάνει επιπλέον κόστη, τα λεγόμενα κόστη συναλλαγής, τα οποία μπορεί να είναι πραγματικά ή έμμεσα και συνήθως σχετίζονται με την πληροφόρηση. Στη φάση του προγραμματισμού μιας επένδυσης είναι απαραίτητη η συλλογή των πληροφοριών, η οποία απαιτεί χρόνο αλλά και κόστος. Ο χρόνος που απαιτείται για τη συλλογή και επεξεργασία των πληροφοριών δεν έχει πραγματικό κόστος, αλλά ο αποφασίζων δεσμεύει κάποιες ώρες ώστε να ενημερωθεί για την επένδυση που τον ενδιαφέρει, τις οποίες θα μπορούσε να διαθέσει αλλού. Στο στάδιο της εφαρμογής της επένδυσης, τα κόστη συναλλαγής προκύπτουν λόγω των διαπραγματεύσεων ή συνεννοήσεων που πρέπει να γίνουν σχετικά με την προμήθεια ή την επικύρωση της επένδυσης. Τέλος, μετά το πέρας της επένδυσης στην ενεργειακή αποδοτικότητα εφαρμόζονται συνήθως μηχανισμοί παρακολούθησης, ποσοτικοποίησης και επαλήθευσης της εξοικονόμησης ενέργειας ή της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, που συνοδεύονται από συγκεκριμένο κόστος (Valentová, 2010).

Τα ατελώς κατανεμημένα κίνητρα για επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, προκύπτουν όταν μεσάζοντες εμπλέκονται στις αποφάσεις για επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα ή όταν τα άτομα που είναι υπεύθυνα για τις επενδυτικές αποφάσεις διαφέρουν από εκείνα που επωφελούνται από την εξοικονόμηση ενέργειας. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πρόβλημα του ιδιοκτήτη-ενοικιαστή (landlord-tenant problem): δεδομένου ότι ο ενοικιαστής τυπικά επωφελείται από την εξοικονόμηση ενέργειας (λόγω της μείωσης των λογαριασμών ενέργειας), δεν υπάρχει σχεδόν κανένα κίνητρο για τον ιδιοκτήτη να επενδύσει. Ούτε ο ιδιοκτήτης θα συμφωνούσε να πληρώνει τους λογαριασμούς ενέργειας, καθώς αυτό θα δημιουργούσε κίνητρο στους ενοικιαστές να κάνουν υπερβολική κατανάλωση. Ταυτόχρονα, οι ενοικιαστές έχουν πολύ περιορισμένα κίνητρα να επενδύσουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα της κατοικίας τους, επειδή είναι πιθανό να μετακομίσουν πριν ανακτήσουν τα κεφαλαιουχικά κόστη της επένδυσής τους (Ameli & Brandt, 2015; Jaffe & Stavins, 1994; Schleich & Gruber, 2008).

Από τα όσα αναφέρθηκαν έως τώρα, σχετικά με τις ατέλειες της αγοράς που εξηγούν την απροθυμία των καταναλωτών να προβούν σε επενδύσεις για την ενεργειακή αποδοτικότητα, οι πιο σημαντικές ατέλειες αφορούν την έλλειψη πληροφόρησης, τη δυσκολία συλλογής των πληροφοριών, και την ασύμμετρη πληροφόρηση. Όμως υπάρχει και το επιχείρημα, ότι ακόμα και αν οι καταναλωτές διαθέτουν όλες τις πληροφορίες σχετικά με το κόστος και τα οφέλη της ενεργειακής απόδοσης, πολλές φορές δεν διαθέτουν την απαιτούμενη γνώση για να λάβουν πλήρως ορθολογικές αποφάσεις, κάτι που στη βιβλιογραφία (Howarth & Sanstad, 1995) αναφέρεται ως «περιορισμένη ορθολογικότητα» (Simon, 1955). Εν ολίγοις, η περιορισμένη ορθολογικότητα εξηγεί το ότι οι απόλυτα ορθολογικές αποφάσεις συχνά δεν είναι εφικτές στην πράξη λόγω του δυσεπίλυτου χαρακτήρα των φυσικών προβλημάτων απόφασης και των πεπερασμένων (υπολογιστικών, ενημερωτικών, .κ.ά.) πόρων που διατίθενται για τη λήψη τους. Μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με την αποδοτικότητα της χρήσης επισήμανσης (labelling) στις συσκευές και τον εξοπλισμό έχουν καταλήξει ότι η πολύ ακριβής παροχή τεχνικών πληροφοριών σχετικά με τα καθαρά οφέλη της ενεργειακής απόδοσης, δε βελτιώνει απαραίτητα την ποιότητα των αποφάσεων (McNeill & Wilkie, 1979; Robinson, 1991)

Τέλος, η δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση ή γενικά η δυσκολία δανεισμού αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την πραγματοποίηση επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Αυτή η δυσκολία αντιμετωπίζεται κυρίως από τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, τα οποία βάσει του οικογενειακού προϋπολογισμού τους μπορούν να διαθέσουν μόνο ένα μικρό μέρος του εισοδήματός τους σε δαπάνες που σχετίζονται με την ενέργεια. Το ίδιο ισχύει και για τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις, οι οποίες μπορεί συχνά να βρίσκονται αντιμέτωπες με αδυναμία δανεισμού, και μάλιστα όχι μόνο για να επενδύσουν σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Ορισμένες μελέτες, μάλιστα, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα που δεν ενισχύονται από επιδοτήσεις δεν είναι βιώσιμες από την πλευρά του ιδιώτη επενδυτή, ειδικά όταν πρόκειται για νοικοκυριό με χαμηλό εισόδημα (Mikulic et al., 2016).

Τα επιχειρήματα που χρησιμοποιούν οι αναλυτές της οικονομικής επιστήμης για να ερμηνεύσουν τα υψηλά προεξοφλητικά επιτόκια σε μία τέλεια αγορά, δηλαδή οι ανεπαρκείς υπολογισμοί ή ζητήματα αντίληψης και συμπεριφοράς των καταναλωτών, ισχύουν, αν και όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Howarth & Sanstad, 1995; A. H. Sanstad & Howarth, 1994a, 1994b) δεν υπάρχει σχετική συστηματική εμπειρική απόδειξη και ούτε είναι δυνατόν να ερμηνεύσουν απολύτως τα υψηλά προεξοφλητικά επιτόκια. Το τελευταίο αποδείχθηκε μάλιστα και από τους (Hassett & Metcalf, 1993) που προσπάθησαν να συνυπολογίσουν τα στοιχεία του ρίσκου και της αβεβαιότητας, και ύστερα να υπολογίσουν τα έμμεσα

προεξοφλητικά επιτόκια, αλλά και πάλι κατέληξαν σε πολύ υψηλές τιμές επιτοκίων. Συνεπώς, είναι ο συνδυασμός των παραγόντων συμπεριφοράς, που αναλύουν οι αναλυτές της οικονομικής επιστήμης, και των ατελειών της αγοράς, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως, που τελικά εξηγούν τα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια και επομένως ερμηνεύουν και την απροθυμία των καταναλωτών να επενδύσουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Αυτές οι δύο κατηγορίες περιορισμών, δηλαδή οι παράγοντες συμπεριφοράς και οι ατέλειες της αγοράς, αποτελούν τελικά τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα (barriers to energy efficiency).

Πέραν της διαμάχης μεταξύ των αναλυτών που παρουσιάστηκε προηγουμένως, σχετικά με την ύπαρξη ατελειών στην αγορά της ενεργειακής αποδοτικότητας, υπάρχει και μια ακόμα διαμάχη, όπως φαίνεται στη βιβλιογραφία (Golove & Eto, 1996). Η διαμάχη σε αυτή τη περίπτωση είναι μεταξύ αναλυτών που συμφωνούν για την ύπαρξη ατελειών στην αγορά αλλά διαφωνούν σχετικά με τον τρόπο ανάμειξης της πολιτείας και του κράτους προς αντιμετώπιση αυτών των ατελειών. Υπάρχει λοιπόν μια μερίδα αναλυτών που προτείνουν την ανάμιξη της πολιτείας με θέσπιση μέτρων και πολιτικών ώστε να εξομαλυνθούν οι οικονομικές στρεβλώσεις που προκύπτουν από τις ατέλειες της αγοράς και να μπορέσουν να κινητοποιηθούν επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Υπάρχει όμως και μια μερίδα αναλυτών, που δεν θεωρεί ότι από μόνες τους οι ατέλειες της αγοράς μπορούν να αιτιολογήσουν την ανάγκη για ανάμιξη της πολιτείας, ή προτείνει η ανάμιξη της πολιτείας να είναι συγκεκριμένη.

Προσπαθώντας να ερμηνεύσουμε τις υποθέσεις πίσω από κάθε μία από τις προηγούμενες τοποθετήσεις, είναι σαφές, ότι η δεύτερη ομάδα αναλυτών, που προάγει την συνετή θέσπιση πολιτικών – υπολογίζοντας για παράδειγμα το καθαρό κοινωνικό όφελος από αυτές- είναι πιο συγκροτημένη, και στο πλαίσιο αυτής της λογικής, θα αναφερθούν ακολούθως παραδείγματα μέτρων και πολιτικών που έχουν ως στόχο την αντιμετώπιση των ατελειών της αγοράς, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν κάποιες λύσεις.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Valentová, 2010), χρειάζονται διάφορα μέτρα πολιτικής για να αρθούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Τα μέτρα πολιτικής μπορεί να κυμαίνονται από αυτά που θα παρέχουν το απαραίτητο ρυθμιστικό πλαίσιο στην αγορά για να αντιμετωπίσει τις ατέλειές της, μέχρι εκείνα που θα εντάξουν θεσμικά (ενημερωτικά) μέσα ή σκληρά ρυθμιστικά μέσα (πχ. πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης, οικοδομικούς κανονισμούς) και οικονομικά κίνητρα (επιδοτήσεις, δάνεια). Συνήθως δεν αρκεί η θέσπιση μόνο ενός μέτρου αλλά ένας συνδυασμός αυτών, αφού οι διάφορες ατέλειες συνυπάρχουν και αλληλοτροφοδοτούνται. Όταν πρόκειται για μέτρα που απευθύνονται κατευθείαν στους καταναλωτές ή γενικά στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, τίθεται ακόμα το ζήτημα σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων. Δύο είναι οι εναλλακτικές σε αυτές τις περιπτώσεις: τα μέτρα πρέπει να έχουν την ίδια ένταση για όλους τους καταναλωτές ή να διαφοροποιούνται ανά κατηγορία καταναλωτή βάσει ορισμένων κριτηρίων. Η βιβλιογραφία άλλωστε έχει αποδείξει (Hausman, 1979) ότι τουλάχιστον η κοινωνικό-οικονομική κατάσταση των νοικοκυριών, όπως αυτή μπορεί να προσεγγιστεί μέσω του εισοδήματός τους, επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά τους όσον αφορά στην απόφαση για επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Το τελευταίο συνεπάγεται, ότι η ένταση των πολιτικών που στοχεύουν στη μόχλευση των επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα στον οικιακό τομέα, θα μπορούσε να διαφοροποιείται με βάση την εισοδηματική κατηγορία των ενδιαφερόμενων. Η βιβλιογραφία (Dubin, 1992; Fujita et al., 2008; G. W. Harrison et al., 2002; Kesicki & Ekins, 2012) έχει δείξει επίσης ότι εκτός από το εισόδημα, που είναι ο κύριος εξηγηματικός παράγοντας διακύμανσης της συμπεριφοράς μεταξύ των νοικοκυριών σχετικά με τις επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα,

το εύρος επηρεάζεται επίσης από την ηλικία των αποφασιζόντων και την ιδιοκτησία του ακινήτου, και άρα η ένταση των πολιτικών θα μπορούσε να διαφοροποιηθεί και με κάποιο τέτοιο κριτήριο. Σε κάθε περίπτωση, η κάθε εναλλακτική σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και τελικά ο στόχος της πολιτικής μπορεί να υποδείξει ποια εναλλακτική είναι προτιμότερη.

Ανάμεσα στα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, πάνω στα οποία προσκρούουν οι επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα συμπεριλαμβάνονται: η αβεβαιότητα για τις μελλοντικές τιμές της ενέργειας ή ο φόβος για την επένδυση επειδή μπορεί να είναι μη αναστρέψιμη, το υψηλό αρχικό κόστος της επένδυσης, η έλλειψη χρηματοδότησης και η αδυναμία δανεισμού από την τράπεζα. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η εφαρμογή των κατάλληλων οικονομικών κινήτρων, μέσω προγραμμάτων επιδότησης των επενδύσεων (ή και της κατανάλωσης) ή δανείων, μπορεί να κινητοποιήσει τις απαραίτητες επενδύσεις.

Στην ευρύτερη κατηγορία των οικονομικών κινήτρων, αλλά με αντίθετο «πρόσημο» σε σχέση με τη θέσπιση προγραμμάτων επιδότησης, είναι η φορολογία των ενεργειακών προϊόντων ή εν γένει οι πολιτικές τιμολόγησης. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, στο πλαίσιο της ενεργειακής πολιτικής είναι η εφαρμογή του φόρου για τις εκπομπές CO₂. Συγκεκριμένα, το κόστος από τις εκπομπές CO₂ αποτελεί μια εξωτερικότητα (externality) που μόνο το κράτος μπορεί να εσωτερικοποιήσει: οι τιμές των ορυκτών καυσίμων που έχουν εκπομπές CO₂ είναι υποτιμημένες γιατί δεν περιλαμβάνουν το κόστος από τις εκπομπές. Εάν η τιμή των ορυκτών καυσίμων αυξανόταν κατά το φόρο, τότε θα μειωνόταν η κατανάλωσή τους. Αυτό το μέτρο βέβαια, μπορεί αντί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας να οδηγήσει σε υποκατάσταση με άλλα καύσιμα που έχουν μικρότερο φόρο άνθρακα (πχ. φυσικό αέριο) ή και μηδενικό φόρο άνθρακα (πχ. ΑΠΕ).

Για την αντιμετώπιση του εμποδίου που σχετίζεται με τη δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση, η βιβλιογραφία προτείνει την ανάμιξη των Οργανισμών Κοινής Ωφέλειας (ESCO – Energy Service Company). Οι Οργανισμοί Κοινής Ωφέλειας έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν την επένδυση αντί των καταναλωτών (πχ. των νοικοκυριών) και τελικά να παρέχουν την επένδυση έναντι οικονομικού ανταλλάγματος (πχ. ενοικίου) στους καταναλωτές. Αυτό το μέτρο, αντιμετωπίζει ταυτόχρονα και το εμπόδιο δυσκολίας εύρεσης αρχικών κεφαλαίων, με την προϋπόθεση βέβαια ότι ο αποφασίζων μπορεί τελικά να πληρώνει ένα δεδομένο ποσό περιοδικά, αλλά και το εμπόδιο της πληροφόρησης, είτε αυτό είναι η συλλογή και η κατανόηση των πληροφοριών, είτε η ακρίβεια αυτών.

Ένα ρυθμιστικό μέτρο, το οποίο μπορεί να προωθήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα είναι η θέσπιση προτύπων ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης. Τα πρότυπα αυτά αφορούν είτε την ειδική κατανάλωση του εξοπλισμού, ή τους οικοδομικούς κανονισμούς που εφαρμόζονται κατά την κατασκευή (ή/και ριζική ανακαίνιση) των κτηρίων. Το να υπάρχουν πρότυπα, τα οποία υποχρεωτικά πρέπει να ακολουθούνται, σημαίνει ότι δεν υπάρχουν επιλογές για τον αποφασίζοντα και υποχρεωτικά επενδύει σε μια συγκεκριμένη επιλογή, αυτή που ορίζεται από το πρότυπο. Από την άλλη όμως, η υποχρεωτική συμμόρφωση με τα πρότυπα μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις κοινωνικά: εάν τα πρότυπα είναι πολύ αυστηρά (τέτοια που να οδηγούν σε υψηλή ενεργειακή εξοικονόμηση), μάλλον θα έχουν και υψηλό κόστος επένδυσης, που θα είναι εμπόδιο καθαυτό για ορισμένους καταναλωτές. Δηλαδή ένα μέτρο που περιλαμβάνει πρότυπα μπορεί να οξύνει τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των καταναλωτών.

Συνδυάζοντας όμως ένα τέτοιο ρυθμιστικό μέτρο με οικονομικά κίνητρα, εξασφαλίζεται ένα αποτελεσματικό πακέτο πολιτικής.

Η ατελής ή και ασύμμετρη πληροφόρηση, αλλά και το γεγονός ότι οι αποφασίζοντες συχνά δεν μπορούν να διαχειριστούν τις πληροφορίες που συλλέγουν, αποτελούν σημαντικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Τα μέτρα που έχουν αναφερθεί ήδη, εμμέσως ή αμέσως αντιμετωπίζουν και τα ζητήματα που σχετίζονται με την πληροφόρηση, υπάρχουν όμως και άλλα μέτρα, τα λεγόμενα θεσμικά μέτρα, τα οποία σκοπό έχουν να ενημερώνουν τους καταναλωτές σχετικά με τα οφέλη από την ενεργειακή εξοικονόμηση και να τους διευκολύνουν στη λήψη αποφάσεων. Τέτοια μέτρα περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τη χρήση επισημάνσεων στον εξοπλισμό και τις συσκευές (labelling) ώστε να γνωρίζουν οι καταναλωτές τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού (πχ. βαθμός απόδοσης, ειδική κατανάλωση ενέργειας κ.ά.). Ως προς την αποτελεσματικότητα αυτού του μέτρου στην κινητοποίηση επενδύσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα, υπάρχουν μελέτες που βρίσκουν ότι η χρήση επισημάνσεων έχει ένα σημαντικό αντίκτυπο στην ενθάρρυνση της επιλογής ενεργειακά αποδοτικών συσκευών (Newell & Siikamäki, 2014), αλλά και άλλες που έχουν καταλήξει ότι η πολύ ακριβής παροχή τεχνικών πληροφοριών σχετικά με τα καθαρά οφέλη της ενεργειακής απόδοσης, δεν βελτιώνει απαραίτητα την ποιότητα των αποφάσεων (McNeill & Wilkie, 1979; Robinson, 1991). Για να μπορέσουν να ενισχυθούν οι καταναλωτές στη συλλογή και κατανόηση των πληροφοριών σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα, η εφαρμογή εκστρατειών (campaigns) και διαφημιστικών μηνυμάτων συνεισφέρει στη διοχέτευση και κατανόηση της πληροφορίας. Στο ίδιο πλαίσιο κινείται και το μέτρο της πιστοποίησης (certificate), είτε μιας συσκευής, είτε μιας διεργασίας, είτε ολόκληρου του κτηρίου. Η ύπαρξη μιας κοινά αποδεκτής πιστοποίησης που θα πραγματοποιείται από ανεξάρτητους φορείς και θα επιβεβαιώνει την ενεργειακή συμπεριφορά του συγκεκριμένου προϊόντος ή υπηρεσίας, μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα από την ασύμμετρη ή ελλιπή πληροφόρηση.

2.4 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Η ανάγκη μελέτης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων, τόσο ως προς τη διαπίστωση του δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης αλλά και απανθρακοποίησής τους, όσο και για τον αποδοτικό σχεδιασμό των ενεργειακών πολιτικών που θα συνεισφέρουν στο μετασχηματισμό της χρήσης της ενέργειας σε αυτά, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών μαθηματικών μοντέλων παγκοσμίως που μελετούν ή/και προβλέπουν την ενεργειακή κατανάλωση στα κτήρια. Τα μοντέλα αυτά, ανάλογα με τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά τους, έχουν χρησιμοποιηθεί σε τεχνικές μελέτες και αναφορές, σε επιστημονικές δημοσιεύσεις ή απλά ως εφαρμογές και έχουν συμβάλει στη μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων. Κατά περίπτωση λειτουργούν και αυτόνομα ή αποτελούν υπό-μοντέλο μιας ευρύτερης ομάδας μοντέλων που αναπαριστά όλο το ενεργειακό σύστημα.

Τα μεγάλης κλίμακας μοντέλα που συνήθως έχουν και πολλές εφαρμογές (χρησιμοποιούνται για τον ενεργειακό σχεδιασμό πολλών χωρών, περιοχών κλπ.) μελετούν και τους δύο τομείς (οικιακό και τριτογενή), χωριστά διότι τόσο η οικονομική δραστηριότητα όσο και οι χρήσεις ενέργειας σε αυτούς διαφέρουν.

Οι τεχνικές που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του ενεργειακού συστήματος εν γένει (και άρα και της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την «από-πάνω-

προς-τα-κάτω» («top-down») και την «από-κάτω-προς-τα-πάνω» («bottom-up») τεχνική. Η ορολογία αναφέρεται στην ιεραρχική θέση των δεδομένων εισόδου σε σχέση με το ενεργειακό σύστημα ή/και την οικονομία.

Ειδικά σε ό,τι αφορά στην αξιοποίηση της κάθε τεχνικής για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια τα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντέλα διερευνούν τις σχέσεις της ενεργειακής ζήτησης με την οικονομία και αποτελούν συνολικές προσεγγίσεις (Charlier et al., 2011). Αντίθετα, τα μοντέλα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» υπολογίζουν την ενεργειακή κατανάλωση ανά χρήση για διάφορους τύπους κτηρίων αντιπροσωπευτικών του κτηριακού αποθέματος. Χρησιμοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης, στατιστικές μεθόδους ή κάποιο λογισμικό προσομοίωσης που βασίζεται στη μηχανική ή τη φυσική, και στο τέλος πολλαπλασιάζουν τα μοναδιαία αποτελέσματα με το πλήθος παρόμοιων κτηρίων ίδιου τύπου για τον υπολογισμό των συνόλων (Bernard, 1996; Clinch et al., 2001; Coffey et al., 2009). Τέλος, υπάρχουν μοντέλα που συνδυάζουν τεχνικές, και για αυτό χαρακτηρίζονται υβριδικά (“hybrid”) μοντέλα.

2.4.1. Μοντέλα «από-πάνω-προς-τα-κάτω»

Η μοντελοποίηση «από-πάνω-προς-τα-κάτω» (top-down modelling) δίνει έμφαση σε μια λεπτομερή περιγραφή της οικονομίας (π.χ. υψηλή ανάλυση των τομέων, των δομών παραγωγής και των μεταξύ τους αλληλεξαρτήσεων) και παραβλέπει ιδιαίτερα λεπτομερείς πληροφορίες για τα τεχνολογικά θέματα του ενεργειακού συστήματος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Löschel & Schymura, 2013), τα μοντέλα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» είναι δυνατόν να χωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες, σε μακροοικονομικά μοντέλα (macroeconomic models), υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας (Computable General Equilibrium models - CGE) και άλλα.

Ειδικά σε ό,τι αφορά στον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, τα μοντέλα αυτά προσδιορίζουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια αδιαφορώντας συνήθως για τις μεμονωμένες τελικές χρήσεις που συνθέτουν το σύνολο. Σκοπός τους είναι να καθορίσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της μακροοικονομίας ή του περιβάλλοντος και της κατανάλωσης ενέργειας, ώστε τελικά να προβλέπουν ή να προβάλλουν τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση βάσει επεξηγηματικών παραγόντων. Οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της ενεργειακής ζήτησης στα κτήρια, περιλαμβάνουν μακροοικονομικούς δείκτες (πχ. το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ), ποσοστά εργασιακής απασχόλησης και δείκτες τιμών), κλιματικά στοιχεία, ρυθμούς ανοικοδόμησης κτηρίων και εκτιμήσεις του πλήθους συσκευών και εξοπλισμού (Swan & Ugursal, 2009)

Το βασικό πλεονέκτημα της «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντελοποίησης είναι ότι τα δεδομένα εισόδου είναι ιστορικά, συγκεντρωτικά δεδομένα που είναι συνήθως διαθέσιμα στις εθνικές ή διεθνείς στατιστικές υπηρεσίες, όπως είναι τα ενεργειακά ισοζύγια ή και τα δημογραφικά στοιχεία. Όμως, η εξάρτηση από ιστορικά δεδομένα είναι ταυτόχρονα ένα μειονέκτημα, επειδή τα μοντέλα αυτά εγγενώς δεν έχουν ικανότητα να μοντελοποιούν ασυνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις (πχ. τη στροφή προς τις αντλίες θερμότητας για θέρμανση) και χαρακτηρίζονται από αρκετή αδράνεια. Αυτό, καθιστά τα μοντέλα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» ακατάλληλα για ανάλυση της πιθανής επίπτωσης της ανάπτυξης νέων και αποδοτικών τεχνολογιών στην τελική κατανάλωση ενέργειας (Wills, 2018). Επιπλέον, η έλλειψη λεπτομερειών σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας ανά τελική χρήση ή ανά τύπο κτηρίου δεν επιτρέπει τον εντοπισμό εκείνων των χρήσεων ή κτηρίων που έχουν δυναμικό βελτίωσης (π.χ. ενεργειακής εξοικονόμησης), κάτι που είναι απαραίτητο για το σχεδιασμό αποτελεσματικών ενεργειακών πολιτικών.

Παρακάτω περιγράφονται σύντομα τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας μοντέλων «από-πάνω-προς-τα-κάτω», χωρίς όμως να γίνεται αναλυτική παρουσίαση παραδειγμάτων μοντέλων που εμπίπτουν στην κάθε κατηγορία, διότι οι τομείς των κτηρίων αναπαρίστανται συστηματικά με συνολικές προσεγγίσεις ή συναρτήσεις.

Μακροοικονομικά μοντέλα

Τα μακροοικονομικά μοντέλα βασίζονται συνήθως σε μακρές χρονοσειρές δεδομένων και, ως εκ τούτου, έχουν μια ασφαλή εμπειρική βάση. Χρησιμοποιούν οικονομετρικές εξισώσεις χωρίς να βασίζονται σε υποθέσεις ισορροπίας. Είναι πολύ πλούσια σε οικονομική λεπτομέρεια και τα παραδοσιακά μοντέλα ακολουθούν μια νέο-κείνσιανή θεωρητική προσέγγιση, υποθέτοντας μια δομή που βασίζεται στη ζήτηση αγαθών και υπηρεσιών και τη δυνατότητα υποαξιοποίησης της παραγωγικής ικανότητας. Επομένως, είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις (Löschel & Schymura, 2013).

Υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας

Τα υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα για την αξιολόγηση μέτρων στο πλαίσιο της κλιματικής πολιτικής. Περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση καταναλωτών, παραγωγών, τιμών, αγορών και τις επιπτώσεις από διάφορες πολιτικές. Τις περισσότερες φορές, οι προτιμήσεις των νοικοκυριών και η πλευρά της παραγωγής απεικονίζονται από συναρτήσεις σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης (constant elasticity of substitution -CES). Εστιάζουν σε μια λεπτομερή και διαρθρωτική εικόνα της οικονομίας και είναι συνήθως παγκόσμια (Löschel & Schymura, 2013).

Άλλα μοντέλα

Εκτός από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν προηγούμενα, υπάρχουν και άλλα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντέλα, που δεν εμπίπτουν σε κάποια από αυτές, όπως για παράδειγμα μοντέλα μερικής ισορροπίας.

2.4.2. Μοντέλα «από-κάτω-προς-τα-πάνω»

Η μοντελοποίηση «από-κάτω-προς-τα-πάνω» (bottom-up modelling), δίνει έμφαση σε μια πολύ λεπτομερή περιγραφή των τεχνολογικών επιλογών στο ενεργειακό σύστημα ή σε έναν τομέα αυτού, αντιμετωπίζοντας την υπόλοιπη οικονομία με έναν στοιχειώδη τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο, τα μοντέλα αυτά είναι συχνά μοντέλα μερικής ισορροπίας, που εστιάζουν στο ενεργειακό σύστημα και δεν λαμβάνουν υπόψη τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν τα μέτρα για την κλιματική πολιτική στην υπόλοιπη οικονομία. Χρησιμοποιούν ένα μεγάλο σύνολο ενεργειακών τεχνολογιών, βάσει πληροφοριών που παρέχονται από τεχνικές μελέτες και τη βιομηχανία, προκειμένου να αντιπροσωπεύουν πλήρως τις τεχνολογικές επιλογές σε επίπεδο πρωτογενούς και τελικής ενέργειας, και να αναπαριστούν τις εναλλακτικές τεχνικές βελτίωσης των διεργασιών ή εξοικονόμησης ενέργειας. Περιλαμβάνοντας στο μενού των τεχνολογικών επιλογών και νέες τεχνολογίες, επιτρέπουν τη μοντελοποίηση ριζικών τεχνικών αλλαγών. Η διεξόδυση των νέων τεχνολογιών στην αγορά εξαρτάται από το κόστος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους (Löschel & Schymura, 2013).

Ειδικά σε ό, τι αφορά στον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, στα μοντέλα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» η ανάλυση γίνεται ανά τελική χρήση τυπικών κτηρίων ή ομάδων κτηρίων που αντιπροσωπεύουν το κτηριακό απόθεμα (Swan & Ugursal, 2009).

Τα δεδομένα εισόδου στα μοντέλα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» περιλαμβάνουν συνήθως τεχνικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των κτηρίων όπως τη γεωμετρία και τον τύπο του κτηρίου, τα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους του, το είδος, τα χαρακτηριστικά και το ρυθμό χρησιμοποίησης του εξοπλισμού και των συσκευών, τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής, καθώς και τις επικρατούσες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου. Τα δεδομένα εισόδου, όπως παρουσιάζονται παραπάνω είναι αρκετά λεπτομερή και τέτοιας φύσεως που δίνουν τη δυνατότητα στα μοντέλα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» να υπολογίζουν την κατανάλωση ενέργειας κάθε τελικής χρήσης και με αυτόν τον τρόπο να μπορούν να προσδιορίσουν τομείς βελτίωσης (πχ. εξοικονόμησης). Ταυτόχρονα όμως τόσο λεπτομερή δεδομένα δεν είναι πάντα διαθέσιμα ή τουλάχιστον πλήρη για κάθε τύπο κτηρίου ή ομάδα κτηρίων. Επίσης, οι τεχνικές υπολογισμού ή προσομοίωσης των μοντέλων «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μπορεί να είναι περίπλοκες. Τα δύο τελευταία χαρακτηριστικά, αποτελούν και τα κυριότερα μειονεκτήματά τους.

Αφού έχει υπολογιστεί η κατανάλωση ενέργειας ανά τελική χρήση και τύπο κτηρίου, η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας του κτηριακού τομέα προκύπτει από τη στάθμιση του κάθε μοντελοποιημένου κτηρίου ή ομάδας κτηρίων στο σύνολο του τομέα, δηλαδή με βάση το πλήθος της κάθε αντιπροσωπευτικής κατηγορίας.

Η βιβλιογραφία (Bhattacharyya & Timilsina, 2009) προτείνει το διαχωρισμό των «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλων, ανάλογα με την τεχνική της μοντελοποίησης σε μοντέλα βελτιστοποίησης και σε λογιστικά μοντέλα. Η διαφοροποίηση αυτή αφορά συνήθως σε μοντέλα που μελετούν όλο το ενεργειακό σύστημα και όχι αποκλειστικά τον κτηριακό τομέα.

Άλλοι ερευνητές (Swan & Ugursal, 2009) που εστιάζουν περισσότερο στα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλα που μελετούν αποκλειστικά τον κτηριακό τομέα, προτείνουν ένα διαφορετικό διαχωρισμό, ανάλογα με το είδος των δεδομένων εισόδου. Σύμφωνα με αυτούς, υπάρχουν τα μοντέλα που βασίζονται στη στατιστική (statistical models) και τα μοντέλα μηχανικού (engineering models).

Παρακάτω γίνεται διαχωρισμός των μοντέλων «από-κάτω-προς-τα-πάνω» σε μοντέλα για όλο το ενεργειακό σύστημα (energy system models) (και άρα και για τον κτηριακό τομέα) και σε μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μόνο για τη μελέτη του κτηριακού τομέα (buildings models). Στο πλαίσιο αυτής της κατηγοριοποίησης, δίνονται παραδείγματα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα.

Μοντέλα για όλο το ενεργειακό σύστημα

Μοντέλα βελτιστοποίησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα βελτιστοποίησης (optimization models) που καλύπτουν το κομμάτι της ζήτησης ενέργειας. Σε αυτά ο κτηριακός τομέας είτε αντιπροσωπεύεται ρητά με ξεχωριστό υπό-μοντέλο είτε είναι τμήμα της συνολικής αποτύπωσης της ζήτησης ενέργειας.

RESGEN [Regional Energy Scenario Generator]

Το μοντέλο RESGEN αναπτύχθηκε από τους Resource Management Associates και χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη δεκαετία του 1990 για τον ενεργειακό σχεδιασμό αναπτυσσόμενων χωρών. Είναι

περισσότερο ένα λογισμικό παρά ένα μοντέλο που επιτρέπει στο χρήστη να αποτυπώνει το ενεργειακό σύστημα της προς μελέτη χώρας. Βασίζεται στη θεώρηση ενός ενεργειακού συστήματος αναφοράς (RES approach – Reference Energy System approach). Η μέθοδος αυτή ιστορικά αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 από τον Hoffman [Hoffman and Wood,1976], και επί της ουσίας το ενεργειακό σύστημα αναφοράς αποτυπώνει αναλυτικά όλες τις διεργασίες που συμβαίνουν από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Επιτρέπει με αυτό τον τρόπο τη μελέτη της επίδρασης νέων τεχνολογιών όπως επίσης και τη μελέτη των οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν διαφορετικές μελλοντικές διαμορφώσεις του συστήματος. Το μοντέλο RESGEN είναι ένα γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού και καλύπτει αναλυτικά τόσο το κομμάτι της προσφοράς όσο και το κομμάτι της ζήτησης ενέργειας (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

EFOM [Energy Flow Optimisation model]

Το μοντέλο EFOM αναπτύχθηκε αρχικά στη δεκαετία του 1970 από το “Institut Economique et Juridique de l’Energie” στην Γκρενόμπλ και έπειτα χρησιμοποιήθηκε ευρέως τόσο στην ΕΕ όσο και στην Ασία. Είναι ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού ελαχιστοποίησης κόστους που σκοπό έχει να προσδιορίσει τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν στο κομμάτι της προσφοράς και θα καλύψουν τη ζήτηση ενέργειας, η οποία προσδιορίζεται εξωγενώς. Βασίζεται και αυτό στη θεώρηση ενός ενεργειακού συστήματος αναφοράς (RES approach), και μπορεί να υποστηρίξει αναλύσεις που αφορούν όλο το ενεργειακό σύστημα (δηλαδή και την προσφορά και τη ζήτηση ενέργειας), όμως είναι πιο αναλυτικό σε ό,τι αφορά στο κομμάτι της προσφοράς ενέργειας (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

MARKAL model⁷ [Market allocation model]

Το μοντέλο MARKAL αναπτύχθηκε περί το 1980 από το Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) της International Energy Agency (IEA) και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από διάφορους οργανισμούς και χώρες. Το μοντέλο αναπαριστά τόσο την προσφορά όσο και τη ζήτηση ενέργειας, έτσι ώστε η μία πλευρά να ανταποκρίνεται αυτόματα σε αλλαγές που γίνονται στην άλλη (δηλαδή οι τιμές της προσφοράς ενέργειας επηρεάζουν τη ζήτηση ενέργειας, η οποία με τη σειρά της διαμορφώνει τις τιμές κ.ο.κ.), μέχρις ότου να υπάρξει ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Ωστόσο, στην αρχική του μορφή το μοντέλο χρησιμοποιούσε μια εξωγενή ζήτηση ενέργειας, την οποία βέβαια έπρεπε να εξυπηρετήσει με διάφορες τεχνολογίες. Σε κάθε περίπτωση, οι τομείς της ζήτησης, συμπεριλαμβανομένων του οικιακού και του τομέα των υπηρεσιών, αναπαρίστανται σε επίπεδο τελικών χρήσεων, χωρίς να γίνεται πολύ αναλυτική κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος.

Το μοντέλο MARKAL είναι ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού (που έχει όμως λάβει υπόψη και διάφορα μη-γραμμικά στοιχεία, όπως οι οικονομίες κλίμακος) ελαχιστοποίησης κόστους που σκοπό έχει να προσδιορίσει τις τεχνολογίες που θα επιλεγούν σε όλο το ενεργειακό σύστημα ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένοι ενεργειακοί/περιβαλλοντικοί στόχοι, (πχ. μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά ένα ορισμένο ποσό). Δηλαδή, το μοντέλο επιλέγει αυτόν το συνδυασμό τεχνολογιών που

⁷ <https://iea-etsap.org/index.php/etsaptool/model-generators/markal>

ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος, πετυχαίνοντας ταυτόχρονα συγκεκριμένους στόχους. Το μοντέλο έχει ένα μενού υπάρχουσών και μελλοντικών τεχνολογιών, για τις οποίες χρησιμοποιούνται ως είσοδος, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και το κόστος τους.

Έτσι, σε αντίθεση με άλλα «από κάτω προς τα πάνω» μοντέλα, το MARKAL δεν απαιτεί η επιλογή των τεχνολογιών που μπορούν να πετύχουν τους συγκεκριμένους στόχους, πχ. να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, να γίνεται εκ των προτέρων. Αντ' αυτού, το μοντέλο αποφασίζει και τελικά επιλέγει τις προτιμώμενες τεχνολογίες ενδογενώς λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό μελλοντικής μείωσης των εκπομπών που απαιτείται (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

TIMES [The Integrated MARKAL-EFOM System]

Το μοντέλο TIMES αναπτύχθηκε περί το 2000 από το ETSAP της IEA και έχει προκύψει από το συνδυασμό των μοντέλων MARKAL και EFOM. Είναι ένα γραμμικό μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους (όπως ακριβώς και τα MARKAL και EFOM), με πληθώρα τεχνολογικών επιλογών (όπως και το MARKAL) που κατά την επίλυση σέβεται μια σειρά περιορισμών και τελικά υπολογίζει όχι μόνο τις επενδυτικές αποφάσεις αλλά και τον τρόπο λειτουργίας των τεχνολογιών. Καλύπτει τόσο το κομμάτι της προσφοράς όσο και της ζήτησης ενέργειας και μπορεί να εφαρμοστεί για το ενεργειακό σύστημα συνολικά ή για έναν μεμονωμένο τομέα.

Το υπό-μοντέλο της ζήτησης μελετάει τον κάθε τομέα ξεχωριστά (οικιακό, τριτογενή, βιομηχανικό, μεταφορές), χρησιμοποιεί εξωγενείς υποθέσεις για τις παραμέτρους που καθορίζουν τη ζήτηση ενέργειας (πχ. επιβατοχιλιόμετρα, ή μέγεθος θερμαινόμενης επιφάνειας) και συνδέει τις παραμέτρους αυτές με τη ζήτηση μέσω ελαστικοτήτων, οι οποίες επίσης προσδιορίζονται εξωγενώς. Η χρήση των ελαστικοτήτων επιτρέπει στο μοντέλο να επηρεάζεται από αλλαγές σε μέτρα και πολιτικές που μπορεί πχ να σχετίζονται με περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

Όπως και τα προηγούμενα μοντέλα, βασίζεται και αυτό στη θεώρηση ενός ενεργειακού συστήματος αναφοράς (RES approach) και έχει μεγάλη ευελιξία εφαρμογών, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μία χρονιά, είτε για μια χρονική περίοδο, είτε για μια συγκεκριμένη περιοχή ή χώρα είτε για όλον τον κόσμο. Οι ανάγκες του μοντέλου σε δεδομένα εισόδου είναι μεγάλες και γι' αυτό συνδέεται με βάσεις δεδομένων που παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

MESAP [Modular Energy System Analysis and Planning]

Το μοντέλο MESAP αναπτύχθηκε αρχικά από το Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης και είναι περισσότερο ένα σύστημα λογισμικών και μοντέλων. Η βασική ιδέα του συστήματος MESAP ήταν να συνδυάσει τις δυνατότητες ενεργειακού σχεδιασμού των υπάρχοντων μοντέλων με την ενσωμάτωση σύγχρονων εργαλείων διαχείρισης πληροφοριών και δεδομένων.

Τα υπό-μοντέλα που το αποτελούν είναι τα INCA – για υπολογισμούς για επενδύσεις, PlaNet – λογισμικό προσομοίωσης του ενεργειακού συστήματος, TIMES – βελτιστοποίηση ενεργειακού συστήματος, PROFAKO – λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος και του συστήματος διανεμομένου ατμού, Xtractor – GAMS model interface και CalQlator – general equation editor.

Όπως και τα προηγούμενα μοντέλα, βασίζεται και αυτό στη θεώρηση ενός ενεργειακού συστήματος αναφοράς (RES approach) και επίσης χρησιμοποιεί ένα εκτενές μενού εναλλακτικών τεχνολογιών (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

Λογιστικά μοντέλα

LEAP [Long-range Energy Alternatives Planning model]/ [Low Emissions Analysis Platform]

Το μοντέλο LEAP είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας, της παραγωγής και της εξόρυξης πόρων σε όλους τους τομείς μιας οικονομίας, και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα γεωγραφικά επίπεδα (από το επίπεδο πόλης, σε εθνικό ή και παγκόσμιο επίπεδο). Αναπτύχθηκε από το Stockholm Environment Institute και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πλήθος εφαρμογών και από διάφορους χρήστες.

Ειδικά για το μοντέλο της ζήτησης ενέργειας, αυτό προβλέπει τη ζήτηση ενέργειας χρησιμοποιώντας μια λογιστική μέθοδο που βασίζεται στις φυσικές ιδιότητες του ενεργειακού συστήματος. Δηλαδή δεν χρησιμοποιεί κάποιον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ή προσομοίωσης, για να υπολογίσει τα μερίδια στην αγορά που μπορεί να έχουν διάφορες τεχνολογίες που θα καλύψουν τη ζήτηση ενέργειας, αλλά θεωρεί τα μερίδια εξωγενώς και αναλύει τις επιπτώσεις αυτών στην ενεργειακή ζήτηση. Επίσης, το μοντέλο θεωρεί μια στοιχειώδη κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος σε κατηγορίες (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

MEDEE [Model for Long-Term Energy Demand Evaluation] (Lapillonne, 1978)/ MAED [Model for Analysis of Energy Demand] (IAEA, 2006)

Το μοντέλο MEDEE αναπτύχθηκε αρχικά από τους Chateau και Lapillonne και έπειτα προεκτάθηκε μέσα από έρευνα που έγινε από την IIASA. Το μοντέλο MAED προήλθε από το μοντέλο MEDEE και αναπτύχθηκε από την IAEA. Συνεπώς, η μοντελοποίηση στα δύο μοντέλα είναι η ίδια.

Στην αρχική μορφή του μοντέλου οι τομείς της ζήτησης και οι τελικές χρήσεις σε κάθε έναν από αυτούς ήταν προκαθορισμένα: η κατασκευαστική βιομηχανία αποτελείτο από τέσσερις υπό-τομείς, στον τομέα των μεταφορών θεωρούνταν ξεχωριστά η μεταφορά επιβατών και η μεταφορά αγαθών, για τον οικιακό τομέα θεωρούνταν διάφοροι τύποι νοικοκυριών και στον τομέα των υπηρεσιών θεωρούνταν διάφοροι τύποι κτηρίων. Καθώς το μοντέλο εξελίχθηκε, έγινε πιο ευέλικτο και πλέον ο χρήστης μπορεί να ορίσει επιπλέον τομείς, τύπους νοικοκυριών κ.ά.

Το μοντέλο ακολουθεί τη λογική των μοντέλων μηχανικού και χρησιμοποιεί μια λογιστική μέθοδο για να καθορίσει τη ζήτηση ενέργειας. Η ανάλυση γίνεται με τη μορφή σεναρίων τα οποία θέτουν το κοινωνικό-οικονομικό και τεχνολογικό πλαίσιο που θέλει να μελετήσει το μοντέλο. Ανάλογα με τον τομέα της ζήτησης, οι κοινωνικό-οικονομικοί παράγοντες που προσδιορίζουν τη ζήτηση ενέργειας διαφέρουν. Έτσι, στον οικιακό τομέα, η ζήτηση προσδιορίζεται από δημογραφικούς παράγοντες ενώ στον τομέα των υπηρεσιών η ζήτηση προσδιορίζεται από την οικονομική δραστηριότητα. Για χρήσεις ενέργειας που έχουν υποκατάστατα καύσιμα (πχ. θέρμανση κτηρίων), αρχικά προσδιορίζεται η ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας (useful energy demand). Έπειτα, με δεδομένα τα μερίδια στην αγορά που θεωρεί το κάθε σενάριο ότι θα λάβει μια τεχνολογία, σε συνδυασμό και με την αποδοτικότητά της προσδιορίζεται η τελική κατανάλωση ενέργειας (final energy consumption) της χρήσης αυτής. Για χρήσεις που δεν υπάρχει

η δυνατότητα υποκατάστασης, πχ ηλεκτρικές συσκευές, το μοντέλο υπολογίζει κατευθείαν την τελική κατανάλωση ενέργειας. Τελικά, αθροίζοντας την τελική κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση και τομέα προκύπτει η συνολική κατανάλωση ενέργειας για το κάθε σενάριο και έτσι το μοντέλο μπορεί να μελετήσει την επίπτωση που έχουν οι συγκεκριμένες κοινωνικό-οικονομικές ή τεχνικό-οικονομικές υποθέσεις στην κατανάλωση.

Μοντέλα για τον κτηριακό τομέα

Μοντέλα που βασίζονται στη στατιστική

Τα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλα που βασίζονται στη στατιστική (statistical models) χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας διαφόρων τύπων κτηρίων και εφαρμόζουν κάποια μέθοδο παλινδρόμησης ώστε να συσχετίσουν τις τελικές χρήσεις ενέργειας με την κατανάλωση ενέργειας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των μοντέλων που βασίζονται στη στατιστική είναι η δυνατότητα που έχουν να συμπεριλαμβάνουν στη μοντελοποίηση στοιχεία συμπεριφοράς σε ό,τι αφορά τη χρήση ενέργειας, αφού αυτή έχει διαμορφώσει -μαζί και με συγκεκριμένα μακροοικονομικά και κλιματικά στοιχεία- την παρατηρημένη κατανάλωση ενέργειας.

Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιούν τα μοντέλα που βασίζονται στη στατιστική, χωρίζονται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Swan & Ugursal, 2009), σε τρεις επιμέρους κατηγορίες: μοντέλα ανάλυσης παλινδρόμησης (regression technique), μοντέλα ανάλυσης υπό συνθήκη ζήτησης (CDA-Conditional Demand Analysis), μοντέλα που βασίζονται στα νευρωνικά δίκτυα (NN-Neural Network).

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε επί-μέρους κατηγορίας των στατιστικών «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλων, χωρίς όμως να δίνονται συγκεκριμένα παραδείγματα, διότι υπάρχουν πολύ αναλυτικά σε άλλες βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις και θα αποτελούσε επανάληψη (Swan & Ugursal, 2009). Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας είναι φανερό ότι οι μέθοδοι αυτές έχουν πολλές εφαρμογές σε επίπεδο πόλης ή χώρας. Ειδικά, τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων έχουν σημειώσει μεγάλη άνθηση τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να χρησιμοποιηθούν και μελλοντικά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Μοντέλα ανάλυσης παλινδρόμησης

Τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούν ανάλυση παλινδρόμησης (regression technique) διαμορφώνουν μια μαθηματική σχέση που συσχετίζει τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου με την κατανάλωση ενέργειας. Δηλαδή τα μοντέλα αυτά προσδιορίζουν με παλινδρόμηση τους συντελεστές της μαθηματικής σχέσης που αντιστοιχούν στις παραμέτρους εισόδου και αναμένεται να επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας. Ανάλογα με το είδος των παραμέτρων εισόδου που έχουν επιλεγεί στο μοντέλο, οι συντελεστές του μοντέλου μπορεί να έχουν ή να μην έχουν φυσική σημασία.

Μοντέλα ανάλυσης υπό συνθήκη ζήτησης

Τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούν ανάλυση υπό συνθήκη ζήτησης (Conditional Demand Analysis - CDA) διαμορφώνουν μια μαθηματική σχέση που συσχετίζει την τελική κατανάλωση ενέργειας με τον εξοπλισμό τελικής χρήσης. Δηλαδή τα μοντέλα αυτά προσδιορίζουν με παλινδρόμηση τους συντελεστές της μαθηματικής σχέσης που αντιστοιχούν σε μια λίστα συσκευών και εξοπλισμού. Οι συντελεστές στην περίπτωση αυτή αντιπροσωπεύουν το επίπεδο χρήσης και το μέγεθος (ή την ισχύ) των συσκευών.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι η ευκολία απόκτησης των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου: μια απλή έρευνα με μορφή ερωτηματολογίου μπορεί να προσφέρει τις απαραίτητες πληροφορίες. Όμως προκειμένου αυτά τα μοντέλα να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα και ανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται, απαιτούνται δεδομένα από πολλούς τύπους κτηρίων.

Μοντέλα νευρωνικών δικτύων

Η τεχνική των νευρωνικών δικτύων (neural networks models) χρησιμοποιεί ένα απλοποιημένο μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στην πυκνά διασυνδεδεμένη παράλληλη δομή των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Η τεχνική επιτρέπει σε όλες τις τελικές χρήσεις να επηρεάζουν η μία την άλλη μέσω μιας σειράς παράλληλων «νευρώνων». Το σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να εισάγουν μη-γραμμικότητες στη μοντελοποίηση. Δεδομένου ότι είναι ένα παράλληλο μοντέλο, οι συντελεστές δεν έχουν φυσική σημασία.

Μοντέλα μηχανικού

Τα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλα μηχανικού (engineering models) χρησιμοποιούν τη θερμοδυναμική ή και τη μηχανική προκειμένου να υπολογίσουν την κατανάλωση ενέργειας ανά τελική χρήση σε αντιπροσωπευτικά κτήρια. Έχουν το πλεονέκτημα, έναντι των υπολοίπων μοντέλων, ότι δεν βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα για να προσδιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας και όταν χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα αυτά λειτουργούν ως δεδομένα για τη βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου. Επιπλέον, το γεγονός ότι βασίζονται στη φυσική εν γένει, τους επιτρέπει να αξιολογούν και να ποσοτικοποιούν την επίδραση νέων τεχνολογιών στην κατανάλωση ενέργειας. Το σημαντικότερό τους μειονέκτημα έγκειται στην εγγενή τους αδυναμία να μοντελοποιούν συμπεριφορές, επειδή αυτές είναι υποκειμενικές και ποικίλουν, ενώ επίσης εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες που δεν έχουν σχέση με το κτήριο αυτό καθαυτό. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν κάποιο λογισμικό που πραγματοποιεί θερμοδυναμική ανάλυση ή ανάλυση μεταφοράς θερμότητας για να υπολογίσουν την κατανάλωση ενέργειας κάθε τύπου κτηρίου που θεωρούν. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Swan & Ugursal, 2009) σε τρεις επιμέρους κατηγορίες, με κριτήριο την τεχνική που χρησιμοποιούν για να υπολογίσουν την κατανάλωση ενέργειας στο χαμηλότερο ιεραρχικό επίπεδο της ανάλυσης, δηλαδή στο επίπεδο του κτηρίου. Τελικά, δηλαδή υπάρχουν τα μοντέλα που υπολογίζουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας των κτηρίων χρησιμοποιώντας κατανομές ιδιοκτησίας και χρήσης εξοπλισμού (distributions models), εκείνα που θεωρούν ορισμένου πλήθους τυπικά κτήρια (αρχέτυπα – archetypes), τα οποία όμως είναι αντιπροσωπευτικά του κτηριακού αποθέματος και τέλος τα μοντέλα που υπολογίζουν αναλυτικά την κατανάλωση ενέργειας για ένα δείγμα κτηρίων (samples).

Μοντέλα κατανομών

Τα μοντέλα που υπολογίζουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας των κτηρίων χρησιμοποιώντας κατανομές (distributions) ιδιοκτησίας και χρήσης εξοπλισμού, αντλούν συνήθως τα δεδομένα από έρευνες και χρησιμοποιώντας τυπικά μεγέθη και ενεργειακές αποδόσεις για τον εξοπλισμό, υπολογίζουν την ενεργειακή κατανάλωση ανά τελική χρήση. Επειδή η κάθε χρήση υπολογίζεται ανεξάρτητα από την άλλη, δεν υπάρχει η αλληλεπίδραση μεταξύ χρήσεων και η συνολική τελική κατανάλωση του κτηριακού τομέα προκύπτει τελικά από το άθροισμα των καταναλώσεων κάθε χρήσης. Τέτοια μοντέλα έχουν

αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσουν την κατανάλωση ενέργειας του οικιακού τομέα στην Ιταλία (Carasso et al., 1994), στον Καναδά (Jaccard et al., 1996), στη Μαλαισία (Ahamed et al., 2011), και στην πόλη του Δελχί (Kadian et al., 2007).

Μοντέλα τυπικών κτηρίων

Τα μοντέλα που υπολογίζουν τη συνολική κατανάλωση των κτηρίων χρησιμοποιώντας πρότυπα κτήρια (αρχέτυπα-archetypes) θεωρούν ότι το κτηριακό απόθεμα μπορεί να αντιπροσωπευθεί από συγκεκριμένους τύπους κτηρίων. Στη βιβλιογραφία, τόσο το πλήθος όσο και τα κριτήρια βάσει των οποίων προκύπτουν τα αρχέτυπα, διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο. Στοιχεία που συνήθως λαμβάνονται υπόψη και χαρακτηρίζουν τα αρχέτυπα είναι ο τύπος του κτηρίου, τα χαρακτηριστικά της μόνωσης που θα προσδιορίσουν τη θερμική του συμπεριφορά, το μέγεθος και η τοποθεσία.

Αφού έχουν προσδιοριστεί τα πρότυπα κτήρια, τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν συνήθως κάποιο λογισμικό προσομοίωσης που υπολογίζει αναλυτικά την ενεργειακή κατανάλωση ανά χρήση του κάθε προτύπου. Παρακάτω δίνονται κάποια παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών, κυρίως ώστε να παρουσιαστεί η μεγάλη ποικιλία σε ό, τι αφορά την επιλογή των προτύπων κτηρίων και η πληθώρα λογισμικών προσομοίωσης.

Οι (MacGregor et al., 1993) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να προσδιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια κατοικίας της Νέας Σκωτίας θεωρώντας 27 πρότυπα κτήρια και γι' αυτό χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα ωριαίας ανάλυσης (hourly analysis program - HAP) που έχει αναπτυχθεί από την Carrier Corporation. Οι (Huang & Brodrick, 2000) και οι (Carlo et al., 2003) χρησιμοποίησαν το DOE-2.1, ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια, που υποστηρίζεται και από το USA Department of Energy. Οι (Jones et al., 2001) ανέπτυξαν ένα ενεργειακό/περιβαλλοντικό μοντέλο πρόβλεψης που χρησιμοποίησε τεχνικές GIS. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη UK Standard Assessment Procedure (SAP) για την προσομοίωση μιας κατοικίας βάσει του θερμομονωτικού υλικού, της θερμικής διαπερατότητας των υαλοπινάκων, τις ανάγκες αερισμού, θέρμανσης και ZNX και το κόστος καυσίμου. Οι (Wan & Yik, 2004) θέλησαν να μελετήσουν ειδικά τα ηλιακά θερμικά οφέλη στα κτήρια κατοικίας στο Hong Kong και έτσι χρησιμοποίησαν τις μηχανές προσομοίωσης HTB2 (heat-transfer) and BECREs (air-conditioning) στα τυπικά κτήρια που είχαν θεωρήσει. Οι (Yao & Steemers, 2005) ανέπτυξαν ένα μοντέλο βασιζόμενοι σε τέσσερις τύπους κτηρίων στο Ηνωμένο Βασίλειο: διαμέρισμα, μονοκατοικία, διπλοκατοικία και πολυκατοικία. Για να υπολογίσουν τις θερμικές απώλειες σε κάθε τύπο κτηρίου χρησιμοποίησαν τη μέθοδο θερμικής αντίστασης που έχει αναπτυχθεί από το Martin Centre. Οι (Palmer et al., 2006) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τον οικιακό τομέα στο Ηνωμένο Βασίλειο χρησιμοποιώντας 431 πρότυπα κτήρια. Για να υπολογίσουν την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ZNX χρησιμοποίησαν το BREDEM-8 Building Research Establishment tool (Anderson et al., 2001). Οι (Petersdorff et al., 2006) μοντελοποίησαν το κτηριακό απόθεμα για ορισμένες χώρες της Ευρώπης θεωρώντας πέντε τυπικά κτήρια και χρησιμοποίησαν το λογισμικό BEAM (Built Environment Analysis Model) του Ecofys που υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση. Οι (Clarke et al., 2008) μοντελοποίησαν την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια της Σκωτίας θεωρώντας κατηγορίες κτηρίων με συγκεκριμένη θερμοδυναμική συμπεριφορά. Για να υπολογίσουν τις θερμικές ενεργειακές απαιτήσεις της κάθε κλάσης χρησιμοποίησαν το λογισμικό προσομοίωσης ESP-r.

Ένα μοντέλο που ανήκει σε αυτή την κατηγορία και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές είναι το μοντέλο BREHOMES (Shorrock & Dunster, 1997) το οποίο αναπτύχθηκε για να προσδιορίσει την

κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια κατοικίας στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το μοντέλο BREHOMES χωρίζει τα κτήρια κατοικίας σε 1000 κατηγορίες και χρησιμοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης BREDEM (BRE Domestic Energy Model), το οποίο είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο που βασίζεται στη φυσική και μπορεί να υπολογίσει την κατανάλωση ενέργειας για τις θερμικές χρήσεις σε ένα κτήριο λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και στοιχεία συμπεριφοράς. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο μοντέλο BREDEM περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων το μέγεθος και το είδος του κτηρίου, τα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους του κτηρίου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, κλιματολογικά στοιχεία και τις εσωτερικές θερμοκρασίες. Τα δεδομένα αυτά διατίθενται από διάφορες βάσεις δεδομένων αναλυτικά για κάθε ένα από τα 1000 κτήρια που θεωρεί το BREHOMES, και έτσι ο αλγόριθμος προσομοίωσης επαναλαμβάνεται για κάθε τυπική κατοικία. Ειδικά για τις ηλεκτρικές χρήσεις και το φωτισμό, το BREHOMES χρησιμοποιεί δεδομένα από το DECADE Project. Τελικά, πολλαπλασιάζοντας τα αποτελέσματα της τελικής κατανάλωσης ενέργειας κάθε τύπου κτηρίου με το πλήθος αυτών προκύπτει η συνολική κατανάλωση ενέργειας του οικιακού τομέα. Το μοντέλο BREHOMES μπορεί να εφαρμοστεί για το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον. Εφαρμόζοντας το μοντέλο για το παρελθόν προκύπτουν συμπεράσματα για το ποια είναι τα οφέλη της ενεργειακής εξοικονόμησης τελικά. Οι εφαρμογές του μοντέλου για το παρόν εξυπηρετούν σε αναλύσεις σχετικά με το δυναμικό εξοικονόμησης συγκεκριμένων τύπων κτηρίων ή συγκεκριμένων μέτρων εξοικονόμησης. Οι εφαρμογές του μοντέλου για το μέλλον βασίζονται στην προέκταση των τωρινών τάσεων με χρήση συναρτήσεων λογιστικής μορφής και γι' αυτό δεν γίνονται για κάθε τύπο κτηρίου αλλά για ένα μέσο κτήριο, για το οποίο όμως γίνονται υπολογισμοί αναλυτικά σε επίπεδο χρήσεων. Το τελευταίο απλοποιεί μεν τους υπολογισμούς, σε βάρος όμως της πλήρους ποικιλομορφίας. Όσον αφορά τα κόστη, το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει το οριακό ή και το πλήρες κόστος των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, τα οποία στη συνέχεια συγκρίνονται με την προκύπτουσα εξοικονόμηση ενέργειας.

Ένα άλλο μοντέλο που αναπτύχθηκε επίσης για να προσδιορίσει την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια κατοικίας στο Ηνωμένο Βασίλειο, προσπαθώντας όμως βασικά να αντιμετωπίσει το μειονέκτημα του BREHOMES σχετικά με τον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα στο μέλλον, είναι το μοντέλο κτηριακού αποθέματος UKDCM (UK domestic carbon model). Το μοντέλο κατηγοριοποιεί τα κτήρια σε περίπου 20.000 τύπους κατοικιών έως το 2050. Οι κατοικίες ταξινομούνται σύμφωνα με την ηλικία τους, τον τύπο, τον αριθμό ορόφων και το μέγεθός του. Χρησιμοποιεί όπως και το BREHOMES, το μοντέλο προσομοίωσης BREDEM για να υπολογίσει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση. (Kannan & Strachan, 2009)

Παρόμοια με το UKDCM, το μοντέλο DECarb. (Domestic energy and carbon) (Natarajan & Levermore, 2007) είναι επίσης ένα μοντέλο που εστιάζει στην εξέλιξη του κτηριακού αποθέματος στο Ηνωμένο Βασίλειο και χρησιμοποιεί μια τεχνική πρόβλεψης για να προσδιορίσει μελλοντικούς τύπους κτηρίων. Όπως και τα προηγούμενα μοντέλα χρησιμοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης BREDEM για να υπολογίσει τη μελλοντική κατανάλωση ενέργειας.

Μοντέλα που βασίζονται σε δείγμα κτηρίων

Αυτή η τεχνική αναφέρεται στη χρήση πραγματικών δεδομένων από ένα δείγμα (sample) κτηρίων, αντιπροσωπευτικών του αποθέματος, για τον προσδιορισμό της συνολικής κατανάλωσης όλων των κτηρίων. Τα δεδομένα αντλούνται συνήθως από μετρητές κατανάλωσης ενέργειας, από τα χρεωστικά τιμολόγια των παρόχων ενέργειας ή από έρευνες. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι,

προκειμένου να αποδώσει αξιόπιστα αποτελέσματα θα πρέπει το πλήθος των κτηρίων που θα αποτελούν το δείγμα να είναι αρκετό ώστε να περιλαμβάνονται όλοι οι τύποι κτηρίων και μάλιστα σε διάφορες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα εισόδου θα πρέπει να είναι πολλά και ενδέχεται να μην είναι πάντα διαθέσιμα στο βαθμό της λεπτομέρειας που μπορεί να χρειάζεται το μοντέλο. Αυτό το μειονέκτημα έχει κάνει και αυτή την τεχνική μοντελοποίησης λιγότερο δημοφιλή, σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους που αναφέρθηκαν.

Συγκρίνοντας την τεχνική μοντελοποίησης με χρήση δείγματος κτηρίων με την τεχνική μοντελοποίησης με επιλογή αρχέτυπων κτηρίων, η δεύτερη παρέχει μια περιορισμένη αναπαράσταση του τοπικού ή του εθνικού κτηριακού αποθέματος λόγω της περιορισμένης ποικιλίας των αρχέτυπων, ενώ η επιλογή ενός πραγματικού δείγματος κτηρίων μπορεί να αντικατοπτρίζει πιο ρεαλιστικά την κατανάλωση ενέργειας του κτηριακού αποθέματος, υπό την προϋπόθεση ότι το μέγεθος του δείγματος είναι αρκετά μεγάλο.

2.4.3. Υβριδικά μοντέλα

Τα υβριδικά μοντέλα (hybrid models) έχουν πάρει το όνομα τους από το γεγονός ότι συνδυάζουν τεχνικές μοντελοποίησης ή μεθόδους. Συνήθως, αναφέρονται σε μοντέλα που συνδυάζουν την «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντελοποίηση με την «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντελοποίηση.

Τα υβριδικά μοντέλα είναι τα μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα και είναι τα μόνα που συνδυάζουν οικονομικές, κοινωνικές και τεχνικές προσεγγίσεις. Στα υβριδικά μοντέλα οι αποφάσεις, που καθορίζουν την τελική κατανάλωση, απορρέουν από τη βελτιστοποίηση της χρησιμότητας και του κόστους, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, οικονομικούς ή περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Η χρησιμοποίηση συναρτήσεων χρησιμότητας επιτρέπει την ενσωμάτωση προτιμήσεων και άλλων παραμέτρων που καταγράφουν συμπεριφορές. Οι υβριδικές προσεγγίσεις συνήθως υπολογίζουν τη συχνότητα των επιλογών σε διαφορετικά επίπεδα σύμφωνα με κατανομές συχνοτήτων, οι οποίες αντλούνται από την ανάλυση διακριτών επιλογών.

Παρακάτω, δίνονται παραδείγματα υβριδικών μοντέλων, διακρίνοντάς τα σε μοντέλα για όλο το ενεργειακό σύστημα ή σε μοντέλα για τον τομέα των κτηρίων.

Μοντέλα για όλο το ενεργειακό σύστημα

NEMS [National Energy Modelling System]⁸

Το μοντέλο NEMS αναπτύχθηκε από το US Department of Energy για την προετοιμασία του Annual Energy Outlook. Το μοντέλο βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της οικονομίας και της ενέργειας και χρησιμοποιείται για να μελετήσει την επίδραση διαφόρων οικονομικών ρυθμών ανάπτυξης στην εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος. Αποτελείται από 12 υπό-μοντέλα τα οποία μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα ή συνδυαστικά. Το μοντέλο βρίσκει την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης για όλα τα ενεργειακά προϊόντα (ηλεκτρισμό, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα), δηλαδή υπολογίζει τις τιμές των ενεργειακών προϊόντων που εξισορροπούν τις ποσότητες των ενεργειακών προϊόντων που οι

⁸ [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/documentation/residential/pdf/m067\(2020\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/documentation/residential/pdf/m067(2020).pdf)

παραγωγοί είναι πρόθυμοι να διαθέσουν με τις ποσότητες που οι καταναλωτές επιθυμούν να καταναλώσουν.

Το μοντέλο καλύπτει ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα, δηλαδή και την πλευρά της ζήτησης και αυτήν της προσφοράς ενέργειας. Στην πλευρά της ζήτησης, το μοντέλο θεωρεί τους τέσσερις τομείς της ζήτησης: βιομηχανία, μεταφορές, οικιακό τομέα και τομέα υπηρεσιών, και χρησιμοποιεί και περαιτέρω κατηγορίες για να αντιπροσωπεύει καλύτερα την πραγματικότητα. Το μοντέλο NEMS ανήκει στην κατηγορία των υβριδικών μοντέλων γιατί συνδυάζει τις λεπτομέρειες που χρησιμοποιούν τα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλα μηχανικού με τη θεώρηση των συμπεριφορών που χρησιμοποιούν τα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντέλα.

Το υπό-μοντέλο για τα κτήρια του οικιακού τομέα χωρίζει τα κτήρια σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τους και υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας ανά τυπική χρήση. Υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας στα νέα κτήρια, που χτίζονται κάθε χρόνο, και λαμβάνει υπόψη την ηλικία του εξοπλισμού, για να υπολογίσει το ρυθμό αντικατάστασης αυτού. Η επιλογή του νέου εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη γίνεται με κριτήριο το κόστος (με χρήση συναρτήσεων logit), ενώ λαμβάνεται υπόψη και η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους με την υπόθεση ενός ρυθμού ανακαίνισης των κτηρίων.

Το υπό-μοντέλο για τα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών χωρίζει τα κτήρια σε επτά κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τους και υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας ανά τυπική χρήση. Το μοντέλο λύνει τρεις ρουτίνες σειριακά, όπου η έξοδος κάθε μίας αποτελεί είσοδο για την επόμενη: πρώτα υπολογίζεται η επιφάνεια των κτηρίων, έπειτα υπολογίζεται η ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας ανά χρήση, λαμβάνοντας υπόψη τις τάσεις κορεσμού που έχουν οι συγκεκριμένες χρήσεις και τέλος επιλέγεται ο εξοπλισμός που θα καλύψει τη ζήτηση ανά τελική χρήση με κριτήριο το κόστος ή τις επικρατούσες τάσεις (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

POLES [Prospective Outlook on Long-term Energy Systems]

Το POLES είναι ένα αναδρομικό, αναλυτικό και παγκόσμιο μοντέλο που μελετά και αναλύει το ενεργειακό σύστημα, δηλαδή είναι ένα μοντέλο μερικής ισορροπίας της αγοράς. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μακροπρόθεσμες αναλύσεις ενεργειακής πολιτικής στην ΕΕ και στη Γαλλία.

Το μοντέλο POLES αποτελείται από τέσσερα υπό-μοντέλα: το μοντέλο της ζήτησης ενέργειας, το μοντέλο της προσφοράς ενέργειας που θεωρεί διάφορες νέες και ανανεώσιμες τεχνολογίες, το μοντέλο του μετασχηματισμού της ενέργειας και ένα μοντέλο για τη διάθεση των ορυκτών καυσίμων.

Ειδικά για το υπό-μοντέλο της ζήτησης, το μοντέλο ακολουθεί την «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντελοποίηση, θεωρώντας τομείς της ζήτησης και ειδικές τελικές χρήσεις. Η ζήτηση ενέργειας προκύπτει από τη δημογραφία και οικονομικούς δείκτες, οι οποίοι προσδιορίζονται εξωγενώς και συνδέονται με τη ζήτηση με ελαστικότητες. Η επιλογή του εξοπλισμού γίνεται με κριτήριο το κόστος, γίνονται επενδύσεις σε νέο εξοπλισμό λαμβάνοντας υπόψη την ηλικία του και τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτηρίων, μέσω της ενεργειακής τους αναβάθμισης η οποία υπολογίζεται ενδογενώς.

Όλα τα υπό-μοντέλα επικοινωνούν μέσω ενός μοντέλου που αντιπροσωπεύει την ενεργειακή αγορά και στο οποίο γίνεται η εκκαθάριση της αγοράς: για το πετρέλαιο θεωρεί μια παγκόσμια αγορά, για τα στερεά ορυκτά καύσιμα θεωρεί τρεις τοπικές αγορές ενώ για το φυσικό αέριο θεωρείται ότι συμβαίνει

διμερές εμπόριο. Τελικά, το μοντέλο POLES συνδυάζει την «από-κάτω-προς τα-πάνω» μοντελοποίηση με ένα μοντέλο τιμολόγησης (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

WEM [World Energy Model],

Το WEM είναι το παγκόσμιο ενεργειακό μοντέλο της IEA που χρησιμοποιείται για την προετοιμασία του World Energy Outlook (WEO) . Το βασικό μοντέλο αποτελείται από τέσσερα υπό-μοντέλα: ένα μοντέλο ζήτησης ενέργειας, ένα μοντέλο για το ηλεκτρικό σύστημα, ένα μοντέλο για τη διάθεση των ορυκτών καυσίμων και ένα μοντέλο για το εμπόριο των εκπομπών.

Το μοντέλο της ζήτησης ακολουθεί την «από-κάτω-προς τα-πάνω» μοντελοποίηση, για κάθε έναν από τους υπό-τομείς της ζήτησης: βιομηχανία, μεταφορές, οικιακό και τριτογενή τομέα, θεωρώντας συγκεκριμένες χρήσεις ανά τομέα, αντιπροσωπευτικές των ενεργειακών αναγκών που τους χαρακτηρίζουν. Η ζήτηση ενέργειας επηρεάζεται κυρίως από την οικονομική δραστηριότητα, τις τιμές και άλλους αντίστοιχους δείκτες (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

SAGE [System for the Analysis of Global Energy Markets]

Το μοντέλο SAGE αναπτύχθηκε από το US Department of Energy για την ανάλυση της παγκόσμιας ενεργειακής κατάστασης. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο περιφερειακό ενεργειακό μοντέλο που περιλαμβάνει πληθώρα τεχνολογικών επιλογών για την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος. Μελετάει και την πλευρά της προσφοράς και την πλευρά της ζήτησης ενέργειας.

Στην τυπική του έκδοση, χωρίζει τον τομέα της ζήτησης σε 42 τυπικές τελικές χρήσεις και η κατανάλωση ενέργειας καθορίζεται από οικονομικούς και δημογραφικούς παράγοντες, τον ενεργειακό εξοπλισμό και τις τεχνολογικές αλλαγές. Το μοντέλο της ζήτησης χωρίζει τον κόσμο σε 15 περιοχές με ιδιαίτερη έμφαση στους μεγάλους καταναλωτές. Από την πλευρά της προσφοράς ενέργειας το μοντέλο εξετάζει την παγκόσμια αγορά πετρελαίου, την αγορά φυσικού αερίου και άλλων ενεργειακών πόρων. Δεδομένης της περιφερειακής ζήτησης, το μοντέλο καθορίζει τις επιλογές προσφοράς με το χαμηλότερο κόστος για την κάλυψη της ζήτησης λαμβάνοντας υπόψη τις επιλογές εξοπλισμού που μπορούν να γίνουν στις τελικές χρήσεις και τις επιλογές από την πλευρά της προσφοράς (Bhattacharyya & Timilsina, 2009).

CIMS

Το μοντέλο CIMS (Rivers & Jaccard, 2006; Sadler, 2003) έχει αναπτυχθεί από την ομάδα EMRG (Energy and Materials Research Group) του Πανεπιστημίου Simon Fraser στον Καναδά. Το υβριδικό μοντέλο CIMS είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο ισορροπίας ενέργειας και οικονομίας που προσομοιώνει την αλληλεπίδραση της προσφοράς και ζήτησης ενέργειας με τη μακροοικονομία. Το μοντέλο ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία, όπου σε κάθε επανάληψη επιδιώκεται η ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης μέσω των τιμών ενέργειας και η επαναληπτική διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι τιμές ενέργειας συγκλίνουν. Μια παρόμοια επαναληπτική διαδικασία εφαρμόζεται έπειτα μέχρις ότου επέλθει η ισορροπία μεταξύ της αγοράς αγαθών και υπηρεσιών, δηλαδή έτσι κλείνει ο κύκλος με την οικονομία.

Το CIMS προσομοιώνει τον ανταγωνισμό των τεχνολογιών σε κάθε κόμβο ενεργειακής υπηρεσίας στην οικονομία με βάση τη σύγκριση του κόστους κύκλου ζωής τους (Life-Cycle Costs - LCC) λαμβάνοντας υπόψη φυσικούς, τεχνικούς ή ρυθμιστικούς περιορισμούς. Στους υπολογισμούς, συμπεριλαμβάνει,

πέραν του πραγματικού κόστους και άυλα κόστη που αντικατοπτρίζουν τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων ως προς τις συγκεκριμένες επιλογές.

Μοντέλα για τον κτηριακό τομέα

CHREM [Canadian Hybrid Residential End-Use Energy and GHG Emissions Model] (Swan et al., 2008)

Το μοντέλο CHREM είναι ένα υβριδικό μοντέλο που προσδιορίζει την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια κατοικίας στον Καναδά. Το μοντέλο θεωρεί 16,952 κτήρια κατοικίας για τα οποία γνωρίζει τα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους τους και τα συστήματα που χρησιμοποιούν για την κάλυψη των αναγκών τους, όπως αυτά προκύπτουν από την βάση δεδομένων Canadian Single-Detached and Double/Row House Database (CSDDRD). Τα κτήρια αυτά θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν στατιστικά το οικιακό κτηριακό απόθεμα στον Καναδά. Το μοντέλο θεωρείται «υβριδικό» γιατί συνδυάζει δύο μεθοδολογίες της «από-κάτω-προς-τα-πάνω» τεχνικής: χρησιμοποιεί ένα μοντέλο νευρωνικών δικτύων για να υπολογίσει την ετήσια ζήτηση ZNX και για ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις, βάσει της ιδιοκτησίας, της χρήσης και ορισμένων δημογραφικών δεικτών και το μοντέλο προσομοίωσης ESP-r (το οποίο χρησιμοποιεί ως είσοδο τα αποτελέσματα του μοντέλου νευρωνικών δικτύων και δεδομένα σχετικά με τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου όπως προκύπτουν από τη βάση δεδομένων CSDDRD) για να υπολογίσει την τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τελική χρήση σε κάθε τύπο κτηρίου.

Όπως φαίνεται από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε, υπάρχει πληθώρα (μαθηματικών) μοντέλων, που έχει τη δυνατότητα να αναλύει ή/και να προβλέπει τη ζήτηση ενέργειας στον κτηριακό τομέα. Ειδικά τα «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντέλα μηχανικού και στατιστικά μοντέλα έχουν διαχρονικά πάρα πολλές εφαρμογές. Η ενότητα που ακολουθεί σκοπεύει να αξιολογήσει την ανάλυση των προσεγγίσεων και μεθόδων που αναλύθηκαν εδώ, ώστε να αναδείξει το κενό που υπάρχει στη βιβλιογραφία και το οποίο καλείται να καλύψει το μοντέλο που προτείνει η παρούσα διατριβή.

2.5 Η ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη διατριβή χρησιμοποιεί μια υβριδική προσέγγιση για την προβολή στο μέλλον της ενεργειακής ζήτησης στον τομέα των κτηρίων. Η προσέγγιση συνδυάζει τις αρχές της «από-κάτω-προς-τα-πάνω» και της «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντελοποίησης. Η μοντελοποίηση μελετά τη δυναμική εξέλιξη του κτηριακού αποθέματος και δίνει μεγάλη έμφαση στις συμπεριφορές των καταναλωτών, καθώς και στις πολιτικές που επηρεάζουν τις συμπεριφορές. Ως εκ τούτου, το μοντέλο αναπαριστά τις ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές των καταναλωτών και τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Τελικά, το μοντέλο προβάλλει τη μελλοντική ενεργειακή ζήτηση, χρησιμοποιώντας δυναμική προσομοίωση για την αναπαράσταση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους, και της επιλογής τεχνολογιών και καυσίμων για τις διαφορετικές χρήσεις ενέργειας στα κτήρια.

Τα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» οικονομετρικά μοντέλα, δεν καταφέρνουν να ενσωματώσουν πολύπλοκους τεχνικούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα περιορισμούς που αναπαριστούν το δυναμικό ενεργειακής αναβάθμισης στα κτήρια. Το γεγονός όμως ότι βασίζονται σε μακρές χρονοσειρές στατιστικών δεδομένων για να συσχετίσουν την ενεργειακή ζήτηση με μακροοικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες, τους παρέχει μια ασφαλής εμπειρική βάση. Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη διατριβή εκμεταλλεύεται αυτό το προτέρημα της οικονομετρικής μοντελοποίησης και ενσωματώνει οικονομετρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της ενεργειακής δραστηριότητας των κτηρίων, η οποία εξ'

ορισμού αλληλοεπιδρά με μακρό-οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Για να ενσωματώσει το μοντέλο πολύπλοκους τεχνικούς περιορισμούς, που εγγενώς αδυνατεί να συμπεριλάβει η οικονομετρική μοντελοποίηση, ακολουθεί τη προσέγγιση της μεγάλης πληθώρας των μοντέλων μηχανικού: κατατάμνει το απόθεμα των κτηρίων σε πολλές κατηγορίες (που ονομάζονται «τάξεις κτηρίων») με βάση τον τύπο του κτηρίου, τη γεωγραφική του θέση, την ηλικία κατασκευής του, την κατηγορία εισοδήματος των νοικοκυριών ή τον τομέα των υπηρεσιών. Η κατάτμηση των κτηρίων σε κατηγορίες επιτρέπει τη ρεαλιστική αναπαράσταση των συμπεριφορών σχετικά με τις αποφάσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα, αφού ενσωματώνει στη μοντελοποίηση τις τεχνικές και οικονομικές ιδιαιτερότητες κάθε κατηγορίας κτηρίου. Έτσι, τελικά το προτεινόμενο μοντέλο που παρουσιάζεται στην διατριβή συνδυάζει τις αρχές της «από-κάτω-προς-τα-πάνω» και της «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντελοποίησης.

Τα υβριδικά μοντέλα μεγάλης κλίμακας είναι σπάνια στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (Ενότητα 2.4.3), λόγω της πολυπλοκότητας του μαθηματικού προβλήματος που διατυπώνουν και της ανάγκης για λεπτομερή δεδομένα. Μία συνήθης πρακτική μοντελοποίησης στις υβριδικές προσεγγίσεις για την αποτύπωση των επιλογών σε διαφορετικά επίπεδα λήψης απόφασης, είναι η χρήση συναρτήσεων που υπολογίζουν συχνότητες επιλογών και βασίζονται στη θεωρία διακριτών επιλογών (πχ. NEMS, CHREM, CIMS). Τα «από-πάνω-προς-τα-κάτω» μοντέλα βελτιστοποίησης, από την άλλη, χρησιμοποιούν συνήθως γραμμικό προγραμματισμό για να αποτυπώσουν τις επιλογές ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια (πχ. MARKAL, MARKAL-EFOM, TIMES). Οι προσεγγίσεις γραμμικού προγραμματισμού, αν και πιο απλές στην εφαρμογή, σε σχέση με τις υβριδικές προσεγγίσεις που βασίζονται στη θεωρία διακριτών επιλογών, αδυνατούν να μοντελοποιούν ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές και να αντικατοπτρίζουν τις μη γραμμικές σχέσεις κόστους-δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα της προσέγγισης μοντελοποίησης που βασίζεται στο γραμμικό προγραμματισμό (Fotiou et al., 2019). Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη διατριβή, καινοτομεί συνδυάζοντας τη θεωρία των διακριτών επιλογών με τον δυναμικό προγραμματισμό στη μοντελοποίηση αποφάσεων ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Friege & Chappin, 2014a), η μοντελοποίηση για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων, μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες: α) στα μοντέλα μηχανικού που αξιολογούν τις εναλλακτικές τεχνικές ενεργειακής αναβάθμισης με βάση οικονομικούς υπολογισμούς (economic viability models), όπως για παράδειγμα υπολογίζοντας την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) των επιλογών και β) στα μοντέλα συμπεριφοράς που μελετούν υποκειμενικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης απόφασης (βασικά των νοικοκυριών) για επενδύσεις σε ενεργειακή αναβάθμιση (decision making models). Η βιβλιογραφία σχετικά με τη μοντελοποίηση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων διευρύνεται (Clinch & Healy, 2003; Friege & Chappin, 2014b; Jakob, 2007; Ximenes, 2015) αλλά δεν υπάρχει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που να προβάλλει τις αποφάσεις για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους για ολόκληρο το κτηριακό απόθεμα, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα οικονομικούς και υποκειμενικούς παράγοντες και την επίδραση που έχουν στις αποφάσεις διάφορα μέτρα πολιτικής.

Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη διατριβή φιλοδοξεί να καλύψει αυτό το κενό στη βιβλιογραφία: ενσωματώνει ένα πλήρες οικονομικό-τεχνικό μοντέλο αποφάσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων στο τυπικό ενεργειακό μοντέλο πρόβλεψης της ζήτησης ενέργειας στα κτήρια, που συνήθως εστιάζει στην τελική κατανάλωση ενέργειας και στην επιλογή του εξοπλισμού για

ικανοποίηση των αναγκών ενέργειας στα κτήρια. Η εφαρμογή του μοντέλου για πολλές χώρες με πολύ λεπτομερή κατάτμηση των κτηρίων σε κατηγορίες είναι επίσης νέα στη βιβλιογραφία της μοντελοποίησης αποφάσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους. Άλλα μοντέλα μεγάλης κλίμακας, όπως τα NEMS, CIMS, CHREM και TIMES, που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν περιλαμβάνουν ενδογενή οικονομική μοντελοποίηση για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων και αντί αυτού χρησιμοποιούν απλές λογιστικές εξισώσεις βασισμένες σε εξωγενείς παραμέτρους.

Η βιβλιογραφία που ασχολείται με τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα είναι εκτενής, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως (Ενότητα 2.3). Η προσέγγιση μοντελοποίησης στην παρούσα διατριβή βασίστηκε εκτενώς στη βιβλιογραφία αυτή, όσον αφορά το εννοιολογικό πλαίσιο και τα αριθμητικά δεδομένα που έχουν εκτιμηθεί στατιστικά και μπορούν να αναπαραστήσουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Το εν λόγω μοντέλο ενσωματώνει τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα και μπορεί να μελετήσει την άρση τους χάρη στις πολιτικές με συστηματικό τρόπο, και αυτή είναι μια νέα προσέγγιση μοντελοποίησης ως προς αυτό.

Τέλος, το υπό συζήτηση μοντέλο είναι μακράν το μεγαλύτερο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί ποτέ για τον τομέα των κτηρίων της ΕΕ, αφού χρησιμοποιεί μια λεπτομερή κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος και των καταναλωτών που λειτουργούν ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων. Το μοντέλο βασίζεται σε αυτή τη λεπτομερή κατάτμηση για να αντιπροσωπεύει ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές και την επίδραση υποκειμενικών παραγόντων και ατελειών, που αντιπροσωπεύουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Χάρη στην κατάτμηση του κτηριακού τομέα και στη ρητή μοντελοποίηση των συμπεριφορών, το μοντέλο είναι σε θέση να αναπαραστήσει και τελικά να αξιολογήσει μεμονωμένα μέτρα πολιτικής, ένα χαρακτηριστικό που είναι πολύ σημαντικό για τη χάραξη της σύγχρονης ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής.

2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΩΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΕΥΕΤΑΙ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 2.3 που αναλύει το λεγόμενο «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων», η βιβλιογραφία παραθέτει και αναλύει με συνέπεια τους παράγοντες που συνθέτουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Είναι λογικό, λοιπόν τα ενεργειακά μοντέλα που έχουν ως στόχο να προβλέπουν την κατανάλωση ενέργειας να συμπεριλαμβάνουν αυτούς τους παράγοντες στη μοντελοποίηση, προκείμενου να μπορούν να αναπαραστήσουν ρεαλιστικά τις συμπεριφορές επένδυσης και κατανάλωσης ενέργειας. Υπάρχουν διάφορα παραδείγματα από ενεργειακά μοντέλα στη βιβλιογραφία (Innorpaths, 2020; Koomey et al., 2001; Schleich et al., 2016; Wilkerson et al., 2013), τα οποία αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω της χρήσης υψηλών προεξοφλητικών επιτοκίων, που αντικατοπτρίζουν έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια, και όχι τα επιτόκια της αγοράς. Υπάρχει βέβαια και διαμάχη ως προς αυτό, το κατά πόσον δηλαδή τα ενεργειακά μοντέλα είναι δόκιμο να χρησιμοποιούν έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια για να αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα (Arrow et al., 2014; Braungardt et al., 2014; Hermelink & De Jager, 2015; Nordhaus, 2007; Steinbach & Staniaszek, 2015; N. Stern & Taylor, 2007).

Πέραν αυτής της προσέγγισης, δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία κάποιο ενεργειακό μοντέλο που να αναπαριστά συστηματικά και ρητά όλες τις κατηγορίες εμποδίων στις οποίες προσκρούουν οι αποφάσεις για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια, και μάλιστα αναλυτικά για πολλές χώρες. Υπάρχουν βέβαια περιπτώσιολογικές μελέτες που εξετάζουν εναλλακτικές επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης για ένα

μεμονωμένο κτήριο, ή για μια κατηγορία κτηρίων (πχ. επιλογές ενεργειακής απόδοσης σε κτήρια πολυκατοικίας ή σε κτήρια γραφείων). Αυτές οι μελέτες, ακριβώς επειδή εξετάζουν μια συγκεκριμένη περίπτωση, μπορεί να συμπεριλαμβάνουν με συνέπεια όλα τα «κρυφά» ή/και έμμεσα κόστη που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση, και ενδεχομένως αγνοούνται στις καθαρά τεχνικές μελέτες. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιούν και έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια, για να αναπαραστήσουν τις στρεβλώσεις της αγοράς που επηρεάζουν τις αποφάσεις για επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης. Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία ένα ενεργειακό μοντέλο που να αναπαριστά συστηματικά και ρητά τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα για το σύνολο του κτηριακού αποθέματος (δηλαδή για όλες τις κατηγορίες κτηρίων ή για αντιπροσωπευτικές κατηγορίες αυτού) πολλών χωρών.

Η βιβλιογραφία αναφέρει την ετερογένεια μεταξύ των καταναλωτών ως έναν από τους παράγοντες που μπορεί να εξηγήσει την απροθυμία των καταναλωτών να επενδύουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα (Gillingham & Palmer, 2014). Η ετερογένεια μεταξύ των καταναλωτών δεν αποτελεί εμπόδιο με την έννοια της ατέλειας της αγοράς, αλλά μπορεί να ερμηνεύσει την αναποτελεσματικότητα συγκεκριμένων μέτρων πολιτικής. Το γεγονός ότι η ετερογένεια συμπεριλαμβάνεται στη βιβλιογραφία στους παράγοντες που μπορούν να εξηγήσουν τις περιορισμένες επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια, εξηγεί εμμέσως και γιατί είναι δύσκολο να προσομοιάσουν τα ενεργειακά μοντέλα τις αποφάσεις ενεργειακής απόδοσης: κάθε κατηγορία καταναλωτή έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, προτιμήσεις και συμπεριφορές, και για αυτό η κάθε κατηγορία προσκρούει σε διαφορετικά εμπόδια όταν αποφασίζει σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Το παραπάνω, καθιστά σαφές ότι η κατά το δυνατόν λεπτομερέστερη κατηγοριοποίηση των καταναλωτών και τύπων κτηρίων στα ενεργειακά μοντέλα είναι αναγκαία προκειμένου να μπορεί να εξεταστεί ρεαλιστικά η αποτελεσματικότητα των πολιτικών ενεργειακής απόδοσης. Τα μοντέλα μηχανικού που ακολουθούν τη μεθοδολογία των τυπικών κτηρίων, προσπαθούν να αντιμετωπίσουν αυτή την πρόκληση, αλλά συνήθως χρησιμοποιούν λογισμικό προσομοίωσης για να προβλέψουν την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια και άρα δεν αναπαριστούν συμπεριφορές επένδυσης και κατανάλωσης με λεπτομέρεια. Όταν, από την άλλη, τα μοντέλα μηχανικού εφαρμόζουν οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση αυτή γίνεται σε αντιπροσωπευτικά κτήρια.

Όσον αφορά τις μακροπρόθεσμες προβλέψεις της ενεργειακής κατανάλωσης, η εξέλιξη του κόστους των τεχνολογιών, αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ένας παράγοντας που μπορεί να επιταχύνει τις επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης. Το κόστος των πολύ αποδοτικών τεχνολογιών, αποτελεί εμπόδιο αυτό καθαυτό, για ορισμένες κατηγορίες καταναλωτών, όπως για παράδειγμα για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος. Η αναμενόμενη μείωση του κόστους των πολύ αποδοτικών τεχνολογιών, χάρη στην ανάπτυξη της αγοράς για αυτές, είτε μέσω πολιτικών που θα απαγορεύουν τις λιγότερο αποδοτικές τεχνολογίες, είτε λόγω πολιτικών που θα στοχεύουν στην απευθείας προώθηση αυτών, αναφέρεται ξεκάθαρα στη βιβλιογραφία (Nowak, 2021b), και έχει παρατηρηθεί και στο παρελθόν (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Και για αυτό, τα ενεργειακά μοντέλα που προβλέπουν την κατανάλωση ενέργειας στο μέλλον συμπεριλαμβάνουν παράγοντες που αντιπροσωπεύουν την εξέλιξη του κόστους των τεχνολογιών, ως αποτέλεσμα των οικονομιών κλίμακας και της ανάπτυξης της αγοράς. Η περιορισμένη δημοτικότητα των πολύ αποδοτικών τεχνολογιών όμως, προέρχεται και από παράγοντες (τεχνικής) αβεβαιότητας που οι καταναλωτές σχετίζουν με τις (επί του παρόντος) ανώριμες ή απλά όχι ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες. Η αβεβαιότητα είναι ένα μη-οικονομικό εμπόδιο, και δεν σχετίζεται με το κόστος των πολύ αποδοτικών τεχνολογιών αλλά με την αντίληψη των καταναλωτών σε σχέση με άγνωστες (για αυτούς) τεχνολογίες. Η χρήση των έμμεσων προεξοφλητικών επιτοκίων, όπως γίνεται στα

ενεργειακά μοντέλα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορεί να αντικατοπτρίσει σε ένα βαθμό αυτούς τους παράγοντες αβεβαιότητας, όμως οι καταναλωτές ανάλογα και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους αντιλαμβάνονται ή αποδέχονται διαφορετικά την κάθε τεχνολογία. Με άλλα λόγια, η κάθε κατηγορία καταναλωτή αντιμετωπίζει διαφορετικά εμπόδια όσον αφορά την επιλογή της κάθε τεχνολογίας. Στα ενεργειακά μοντέλα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία δεν αναπαρίστανται ρητά και με συνέπεια οι παράγοντες που αντικατοπτρίζουν την αβεβαιότητα των καταναλωτών σε σχέση με τις διάφορες (αποδοτικές) τεχνολογίες, παρά μόνο μέσω των έμμεσων προεξοφλητικών επιτοκίων, και αυτό οφείλεται και πάλι στη λιτή κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος σε κατηγορίες ή/και στην περιορισμένη αναπαράσταση των εναλλακτικών τεχνολογιών/επιλογών. Η εξέλιξη του κόστους των τεχνολογιών, όμως, συμπεριλαμβάνεται στη μοντελοποίηση, και μπορεί μάλιστα να είναι και ενδογενής σε ορισμένες περιπτώσεις (Innorpaths, 2020).

Όσον αφορά το μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στον κτηριακό τομέα στο πλαίσιο της επίτευξης φιλόδοξων στόχων για την ενέργεια και το κλίμα, η βιβλιογραφία συμφωνεί ότι οι βασικοί πυλώνες του μετασχηματισμού είναι η ενεργειακή ανακαίνιση μεγάλης έντασης των παλαιών κτηρίων (Korkmaz et al., 2020; Ma et al., 2012; Mastrucci et al., 2014; Vieites et al., 2015) και ο μετασχηματισμός της θέρμανσης (Fina et al., 2019). Ειδικά σε ότι αφορά τις στρατηγικές για απανθρακοποίηση της θέρμανσης, η βιβλιογραφία εστιάζει σε δύο -βασικά- εναλλακτικές: στην επέκταση ή/και αναβάθμιση των δικτύων τηλεθέρμανσης (τα οποία με τη σειρά τους θα είναι κλιματικά ουδέτερα) (Connolly et al., 2014; Poronovski et al., 2018; Rämä & Wahlroos, 2018; Zwickl-Bernhard & Auer, 2022), και στον εξηλεκτρισμό της θέρμανσης μέσω των αντλιών θερμότητας (Connolly et al., 2014; Leibowicz et al., 2018; Poronovski et al., 2018). Φυσικά η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι και οι δύο εναλλακτικές υπόκεινται σε περιορισμούς, είτε χωρικούς (για την περίπτωση των δικτύων τηλεθέρμανσης), είτε τεχνικούς (που αφορούν την εγγενή εξάρτηση της λειτουργίας των αντλιών θερμότητας από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος), έτσι η κάθε εναλλακτική μπορεί να αξιοποιηθεί με ένα ορισμένο δυναμικό. Τέλος, η συνδυασμένη εφαρμογή ΑΠΕ (συνήθως ηλιακή ενέργεια) με αντλίες θερμότητας, αποκτά ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον μελέτης (Kamel et al., 2015).

Όσον αφορά τα μέτρα πολιτικής που μπορούν να οδηγήσουν στο μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, υπάρχουν πολλές μελέτες, οι οποίες είτε αξιολογούν τις υπάρχουσες πολιτικές (πχ. (Braungardt et al., 2014; European Commission, 2016b)), είτε προτείνουν στρατηγικές πολιτικής που μπορούν να διαμορφώσουν τη ζήτηση ενέργειας στον κτηριακό τομέα της Ευρώπης μακροπρόθεσμα (πχ. (Bossman et al., 2012; BPIE, 2011; Paardekooper et al., 2018)). Αυτές οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε εναλλακτικές πολιτικές που μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια και δεν αξιολογούν τις πολιτικές αυτές και τις επιπτώσεις τους στην ενεργειακή κατανάλωση από οικονομική σκοπιά. Οι (Innorpaths, 2020) μελέτησαν με οικονομοτεχνικά κριτήρια εναλλακτικές στρατηγικές πολιτικής που μπορούν να επιφέρουν μεγάλη ένταση μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια στην Ευρώπη. Αντίστοιχα, οι (Korkmaz et al., 2020) σύγκριναν από πλευράς κόστους και απόδοσης εναλλακτικές στρατηγικές πολιτικής για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα. Ειδικά για τον κτηριακό τομέα κατέληξαν ότι ο ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης θα πρέπει να ξεπεράσει το 3% ετησίως για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, δηλαδή πολύ πάνω από τις ιστορικές τιμές.

Η βιβλιογραφία δεν είναι εκτενής όσον αφορά τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών εργαλείων πολιτικής για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια σε διάφορες χώρες

της ΕΕ. Οι (Schild et al., 2010) συνέκριναν την αυστηρότητα των οικοδομικών κανονισμών για τα νέα κτήρια κατοικίας σε διάφορες χώρες της ΕΕ. Οι (Filippini et al., 2014) και (Ó Broin et al., 2015) ανέλυσαν και συνέκριναν την αποτελεσματικότητα πολιτικών ενεργειακής απόδοσης για κτήρια κατοικίας σε διάφορες χώρες. Και οι δύο μελέτες επικεντρώθηκαν στα κυρίαρχα μέτρα ενεργειακής πολιτικής που έχουν υιοθετηθεί από τα κράτη μέλη της ΕΕ, δηλαδή σε μέτρα ρυθμιστικής πολιτικής (όπως είναι η επιβολή προτύπων ενεργειακής απόδοσης) και σε μέτρα οικονομικής πολιτικής (όπως είναι οι επιδοτήσεις και οι φορολογικές ελαφρύνσεις). Στην ανάλυση εξετάστηκαν επίσης μέτρα που στοχεύουν στην ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των καταναλωτών, αλλά βρέθηκε ότι δε συνεισφέρουν σημαντικά στην προώθηση επενδύσεων ενεργειακής απόδοσης.

Τα τελευταία χρόνια μελετάται συστηματικά στη βιβλιογραφία ως μέτρο οικονομικής πολιτικής που μπορεί να οδηγήσει στην απανθρακοποίηση του κτηριακού τομέα και η ένταξη των κτηρίων στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ). Συγκεκριμένα, οι (Innopath, 2020) εξετάζουν αυτή τη στρατηγική πολιτικής ως την κύρια στρατηγική που μπορεί να οδηγήσει στην απανθρακοποίηση του κτηριακού τομέα στην Ευρώπη. Ομοίως, σύμφωνα με τους (Nägeli et al., 2020) η εφαρμογή φόρου για τις εκπομπές CO₂ από τα κτήρια αποτελεί σημαντικό μέτρο για την επιτάχυνση της μετάβασης σε ένα κλιματικά ουδέτερο κτηριακό απόθεμα. Αναφορικά με την αποτελεσματικότητα αυτού του μέτρου στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στην εξοικονόμηση ενέργειας, γίνεται τελευταία και μια κριτική στη βιβλιογραφία (Zwickl-Bernhard et al., 2022), χωρίς όμως το ζήτημα αυτό να έχει μελετηθεί σε βάθος: οι ιδιοκτήτες των ακινήτων είναι οι υπεύθυνοι λήψης των επενδυτικών αποφάσεων ενεργειακής ανακαίνισης των κτηρίων, αλλά οι αποφάσεις τους εκ των πραγμάτων δεν επηρεάζονται από την τιμή του φόρου για τις εκπομπές CO₂, διότι δεν είναι αυτοί που καταναλώνουν την ενέργεια. Αντίθετα, οι ενοικιαστές αισθάνονται την αβεβαιότητα σχετικά με τη μελλοντική ύπαρξη/εξέλιξη του φόρου για τις εκπομπές CO₂, χωρίς όμως να είναι αυτοί που αποφασίζουν για τις επενδύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, π.χ. για την αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης.

Οι μελέτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι είτε περιπτωσιολογικές (μελετώντας μια χώρα, ή μια κατηγορία κτηρίων), είτε εστιάζουν σε μια στρατηγική πολιτικής για όλες τις χώρες της ΕΕ ή την Ευρώπη στο σύνολο της. Αν και η συνεισφορά αυτών των μελετών έχει αξία για τη χάραξη της ενεργειακής πολιτικής, ωστόσο η μελέτη όλων των περιπτώσεων και χωρών ταυτόχρονα, με μεγάλη λεπτομέρεια ως προς τα χαρακτηριστικά του κτηριακού αποθέματος της κάθε χώρας, δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία. Επίσης, σε πολύ λίγες μελέτες (πχ. (Fina et al., 2019)) έχει αναδειχθεί η σημασία της συνέργειας μεταξύ της ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης του κελύφους του κτηρίου και του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης ως κομβικής σημασίας στρατηγική για το μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια και στο ενεργειακό σύστημα συνολικά. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν κυρίως τεχνικές μελέτες (Miara, 2022) που υποδεικνύουν αυτή τη συσχέτιση, βασικά γιατί οι αντλίες θερμότητας έχουν την πιο αποδοτική λειτουργία σε κτήρια με χαμηλές θερμικές ανάγκες. Η ανάλυση της συνέργειας από οικονομική σκοπιά, λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό εξοικονόμησης και απανθρακοποίησης που έχει αυτή σε κάθε χώρα, δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία.

Όλες οι μελέτες που αναφέρονται παραπάνω εξετάζουν την αποτελεσματικότητα των πολιτικών ενεργειακής απόδοσης στην ΕΕ συνολικά ή σε επίπεδο κρατών μελών, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας ή/και τη μείωση των εκπομπών CO₂, στο πλαίσιο της επίτευξης των στόχων για την ενέργεια και το κλίμα που έχει θέσει η ΕΕ μέσα στα χρόνια. Όσον αφορά τις κοινωνικές επιπτώσεις που έχουν οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης στις διάφορες κατηγορίες καταναλωτών, η βιβλιογραφία συνήθως

περιλαμβάνει περιπτωσιολογικές μελέτες ανά χώρα. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν συνήθως στις επιπτώσεις που έχουν οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης στην ενεργειακή φτώχεια (Baffert et al., 2015; Mafalda Matos et al., 2022; Mari-Dell’Olmo et al., 2017). Οι μελέτες επισημαίνουν ότι οι κοινωνικές ομάδες που είναι περισσότερο εκτεθειμένες στην ενεργειακή φτώχεια, όπως τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, αντιμετωπίζουν περισσότερα εμπόδια όταν αποφασίζουν για επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης (όπως για επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων), από άλλες κοινωνικές ομάδες, και επομένως πολιτικές ενεργειακής απόδοσης που δεν αντιμετωπίζουν στοχευμένα αυτά τα εμπόδια, ενδέχεται να εντείνουν τις ανισότητες μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών των καταναλωτών. Η έννοια της «ενεργειακής δικαιοσύνης» αναφέρεται επίσης στη βιβλιογραφία (Pellegrini-Masini et al., 2020; The Oxford Institute for Energy Studies, 2021), και αναφέρεται στις ενέργειες που γίνονται ώστε να εξασφαλίζεται ότι στο πλαίσιο της επίτευξης των κλιματικών και ενεργειακών στόχων «δε μένει κανένας πίσω» (Zwickl-Bernhard et al., 2022). Οι (van Bommel & Höffken, 2021) πραγματοποίησαν μελέτη ανασκόπησης με επίκεντρο την ενεργειακή δικαιοσύνη σε επίπεδο κοινότητας στην Ευρώπη. Οι (Mundaca et al., 2018) παρουσίασαν δύο περιπτωσιολογικές μελέτες (στη Γερμανία και τη Δανία) που αξιολογούν την τοπική ενεργειακή μετάβαση από την άποψη της ενεργειακής δικαιοσύνης. Τέλος, οι (Jenkins et al., 2018) έδειξαν ότι η ενεργειακή δικαιοσύνη και η ενεργειακή μετάβαση μπορούν να συνδυαστούν και να επιτευχθούν ταυτόχρονα.

Οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης που εστιάζουν ειδικά στα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος έχουν θετικές κοινωνικές επιπτώσεις και είναι σε θέση να αποφέρουν τα πολλαπλά οφέλη της ενεργειακής απόδοσης. Οι (Ugarte et al., 2016) αναφέρουν ωστόσο ότι υπάρχουν λίγες τέτοιες πολιτικές στα κράτη μέλη της ΕΕ, επί του παρόντος. Παρόμοια είναι η κατάσταση στις ΗΠΑ σύμφωνα με τους (Xu & Chen, 2019), που επίσης επισημαίνουν ότι τα προγράμματα ενεργειακής απόδοσης, τα οποία είναι διαθέσιμα για όλες τις εισοδηματικές ομάδες, ενδέχεται να εντείνουν τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των κατηγοριών των καταναλωτών επειδή τείνουν να ωφελούν δυσανάλογα τους καταναλωτές υψηλότερου εισοδήματος. Στην ίδια κατεύθυνση κινούνται και οι (Sovacool et al., 2019), που καταλήγουν ότι η πορεία για τη μετάβαση προς τη κλιματική ουδετερότητα μπορεί να εντείνει τις κοινωνικές διαφορές.

Αναγνωρίζοντας τη συνεισφορά των μελετών που υπάρχουν επί του παρόντος στη βιβλιογραφία σχετικά με την πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης και αποδοτικότητας στον κτηριακό τομέα, στο πλαίσιο της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής στην Ευρώπη, η παρούσα διατριβή στοχεύει να καλύψει το κενό της έρευνας και της μελέτης ως προς αυτό. Συγκεκριμένα, το γεγονός ότι το μοντέλο μελετά κάθε ένα από τα κράτη μέλη της ΕΕ χωριστά επιτρέπει την ανάλυση σε βάθος του δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης και απανθρακοποίησης του κτηριακού τομέα της κάθε χώρας και της αποτελεσματικότητας ή/και των επιπτώσεων εναλλακτικών μέτρων πολιτικής στην πορεία της ενεργειακής μετάβασης. Το γεγονός ότι το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε κράτους μέλους, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του κτηριακού αποθέματος, τις συμπεριφορές κατανάλωσης ενέργειας και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις σχετικά με τις επενδύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, επιτρέπει την αναπαράσταση των συμπεριφορών επένδυσης και κατανάλωσης με λεπτομέρεια σε κάθε χώρα ώστε να μπορεί να μελετηθεί η επίπτωση μέτρων πολιτικής με στόχο την επιτάχυνση των επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Επιπλέον, η κατάτμηση υψηλής ανάλυσης του μοντέλου επιτρέπει την εξέταση των κοινωνικών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν οι εναλλακτικές πολιτικές ενεργειακής απόδοσης ή οι διαφορετικοί τρόποι εφαρμογής αυτών σε διαφορετικές κατηγορίες καταναλωτών. Δεδομένου ότι η μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα απαιτεί τον

ουσιαστικό μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, αναλύσεις όπως αυτές που μπορούν να πραγματοποιηθούν με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής είναι σημαντικές για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής προκειμένου να διασφαλιστεί μια δίκαιη και οικονομικά αποδοτική μετάβαση.

3. ΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη διατριβή προβάλλει στο μέλλον τη ζήτηση και κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών. Το μοντέλο εστιάζει στη δυναμική προσομοίωση των αποφάσεων για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων και για την επιλογή του ηλεκτρικού και μηχανολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στα κτήρια για την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας.

Η κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια αποτελείται από την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, προετοιμασία ζεστού νερού χρήσης (ZNX), μαγείρεμα, ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και φωτισμό. Η ενέργεια (πχ. θερμότητα) που αντιστοιχεί στην ικανοποίηση μιας ανάγκης ή στην παροχή μιας υπηρεσίας (πχ. θέρμανση) ονομάζεται επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια (desired useful energy). Η ενεργειακή εξοικονόμηση που προκύπτει από τις επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος του κτηρίου, καθώς και η ενεργειακή εξοικονόμηση που προκύπτει από αλλαγές στη συμπεριφορά χρήσης της ενέργειας (πχ. αλλαγή της θερμοκρασίας του θερμοστάτη, σβήσιμο λαμπτήρων κατά την έξοδο από έναν χώρο, αλλαγή στη συχνότητα χρήσης του ZNX κ.ά.), καλύπτουν κατά ένα μέρος την επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια για τις θερμικές και ηλεκτρικές χρήσεις. Ο εξοπλισμός και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στα κτήρια, καλύπτουν την εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια. Για το σκοπό αυτό, ο εξοπλισμός καταναλώνει ενεργειακά προϊόντα (τελική κατανάλωση ενέργειας), τα οποία οι καταναλωτές προμηθεύονται από την αγορά (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρισμός κ.ά.) ή διατίθενται από το περιβάλλον (πχ. ηλιακή ενέργεια, θερμότητα περιβάλλοντος κ.ά.). Η αυτό-παραγωγή (ηλεκτρικής) ενέργειας αποτελεί επίσης δυνατότητα, και η περίσσεια ενέργειας διατίθεται στο δίκτυο.

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο εφαρμόζει κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος σε κατηγορίες με βάση την ηλικία, τον τύπο του κτηρίου, τη γεωγραφική του θέση και τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των χρηστών του. Μέρος του κτηριακού αποθέματος κατεδαφίζεται κάθε χρόνο (με την έννοια ότι εγκαταλείπεται ή σταματά η χρήση του), και στη θέση του κτίζονται νέα κτήρια, σύμφωνα με οικοδομικούς κανονισμούς και πρότυπα ενεργειακής απόδοσης. Από το παλαιό κτηριακό απόθεμα, ένα μέρος μπορεί να υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και ένα άλλο μπορεί να παραμένει στην αρχική του κατάσταση για όλη τη διάρκεια της περιόδου προβολής. Οι αποφάσεις για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων επηρεάζουν τις αποφάσεις που σχετίζονται με την τελική κατανάλωση ενέργειας του εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη, συμπεριλαμβανομένων των αποφάσεων για αντικατάσταση του εξοπλισμού είτε πρόωρα είτε στο τέλος του τεχνικού χρόνου ζωής του.

Επιπλέον της πολύ λεπτομερούς κατάτμησης του κτηριακού αποθέματος σε κατηγορίες, το μοντέλο δε θεωρεί έναν αντιπροσωπευτικό καταναλωτή για κάθε κατηγορία κτηρίων, αλλά αναπαριστά ετερογενείς καταναλωτές με διαφορετικές ιδιοσυγκρασίες σε ό, τι αφορά τις προτιμήσεις τους. Για το σκοπό αυτό, το μοντέλο εφαρμόζει τη θεωρία των διακριτών επιλογών στο πλαίσιο δυναμικής βελτιστοποίησης.

Τελικά, το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη διατριβή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας, του μείγματος καυσίμων στην τελική κατανάλωση, του ρυθμού και της έντασης της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους, του ρυθμού αντικατάστασης του εξοπλισμού για

θέρμανση και ψύξη και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα κτήρια του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών. Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί για κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) και οι προβολές της ζήτησης ενέργειας γίνονται μέχρι το 2050 ή το 2070 σε χρονικά βήματα 5 ετών. Το μοντέλο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή να ενσωματώνεται στο πλήρες μοντέλο ενεργειακής ισορροπίας της αγοράς.

3.2 ΟΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κατά την ανασκόπηση των μεθόδων μοντελοποίησης, έγινε σαφές ότι η «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντελοποίηση έχει τη δυνατότητα να αναπαριστά τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας και επιτρέπει τη μοντελοποίηση ριζικών τεχνικών αλλαγών, επειδή ενσωματώνει ένα μεγάλο σύνολο τεχνολογικών επιλογών και επιμερίζει τα κτήρια σε αντιπροσωπευτικές κατηγορίες. Επιπλέον, η «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντελοποίηση έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη συμπεριφορές στη χρήση ενέργειας, αφού οι υπολογισμοί γίνονται αναλυτικά ανά τελική χρήση και τύπο κτηρίου.

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο, ενσωματώνει τα παραπάνω χαρακτηριστικά της «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μοντελοποίησης: εφαρμόζει κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος σε κατηγορίες, και μελετά τις χρήσεις ενέργειας στα κτήρια ξεχωριστά, συμπεριλαμβάνοντας πολλές εναλλακτικές τεχνολογικές επιλογές για κάθε χρήση. Έγινε πολύ συστηματική μελέτη της βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην Ενότητα 2.4.2, πάνω στα μοντέλα μηχανικού που χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία των αρχέτυπων ή τυπικών κτηρίων, ώστε να προκύψει και η κατηγοριοποίηση του κτηριακού αποθέματος που εφαρμόζει το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο. Τελικά, και επειδή το μοντέλο έχει μεγάλη γεωγραφική κάλυψη, η επιλογή των κατηγοριών, στις οποίες το μοντέλο επιμερίζει το κτηριακό απόθεμα, προέκυψε αναζητώντας τη χρυσή τομή μεταξύ επαρκούς αναπαράστασης της ετερογένειας μεταξύ των καταναλωτών και διαθεσιμότητας δεδομένων.

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο δίνει μεγάλη έμφαση στην ενδογενή μοντελοποίηση των αποφάσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και ενσωματώνει ένα πλήρες οικονομικό-τεχνικό μοντέλο για αυτόν το σκοπό. Αυτή η μοντελοποίηση είναι και μια πρωτοτυπία της διατριβής, που έρχεται να καλύψει ένα κενό στη βιβλιογραφία με συστηματικό τρόπο. Γι' αυτό και το μοντέλο αντλεί από τη βιβλιογραφία δεδομένα, μεθόδους και τεχνικές που σχετίζονται με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και έχουν χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο διαφόρων εφαρμογών, οι οποίες όμως έχουν προσεγγίσει το ζήτημα αυτό από μια καθαρά τεχνική πλευρά.

Συμφωνά με τις αρχές της μεταφοράς θερμότητας όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά των κτηρίων, μέρος της συνολικής θερμικής ωφέλιμης ενέργειας καλύπτεται χάρη στη θερμομόνωση, και ο εξοπλισμός για θέρμανση και ψύξη καλύπτει την υπόλοιπη θερμική ωφέλιμη ενέργεια. Για να υπολογιστεί στο μοντέλο η ωφέλιμη θερμική ενέργεια που απομένει μετά τη συνεισφορά του κελύφους του κτηρίου, δηλαδή, για να υπολογιστούν οι θερμικές απώλειες του κελύφους του κτηρίου, εφαρμόζεται η μεθοδολογία που βασίζεται στη θερμοδυναμική EN 13790: 2008 (Loga et al., 2013). Η

μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη μεταξύ άλλων τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας⁹ (U Value σε $[W/m^2K]$) των διαφόρων οικοδομικών στοιχείων κάθε κατηγορίας κτηρίου, και τις εξωτερικές και εσωτερικές θερμοκρασίες. Οι εσωτερικές θερμοκρασίες, αφενός προκύπτουν βάσει των προτύπων θερμικής άνεσης (ASHRAE Standard 55)¹⁰, αφετέρου σχετίζονται με τις προτιμήσεις και τα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας κτηρίου.

Για τη συλλογή των τιμών των συντελεστών θερμικής διαπερατότητας των διαφόρων οικοδομικών στοιχείων των κτηρίων ανά κατηγορία χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική πλατφόρμα του Building Stock Observatory (EU BSO, 2022), όπου διατίθενται τα δεδομένα αυτά για τη μεγάλη πλειοψηφία των ευρωπαϊκών χωρών, και για διάφορες κατηγορίες ή ηλικίες κτηρίων.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών του κελύφους, έχει ήδη εφαρμοστεί στο ερευνητικό πρόγραμμα της Intelligent Energy Europe IEE, TABULA (Typology approach for Building Stock Energy Assessment). Το πρόγραμμα ήταν σε εφαρμογή κατά την περίοδο 2009 έως 2012, και είχε ως στόχο να δημιουργήσει μια ευρωπαϊκή βάση δεδομένων για τη θερμική συμπεριφορά του εθνικού κτηριακού οικιακού αποθέματος για 13 χώρες της Ευρώπης. Το πρόγραμμα TABULA επεκτάθηκε μετά το 2012 μέσω του ευρωπαϊκού προγράμματος EPISCOPE, και η βάση δεδομένων διευρύνθηκε συμπεριλαμβάνοντας 8 ακόμη χώρες της Ευρώπης. Επιπλέον, στο πρόγραμμα EPISCOPE εφαρμόστηκαν μοντέλα προσομοίωσης για την αξιολόγηση των διαδικασιών ανακαίνισης και την προβολή της μελλοντικής κατανάλωσης ενέργειας σε διάφορες κατηγορίες κτηρίων, από μια καθαρά τεχνική σκοπιά. Πραγματοποιήθηκαν περιπτωσιολογικές έρευνες σε 16 χώρες για την παρακολούθηση της εφαρμογής μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και την επίδρασή τους στην κατανάλωση ενέργειας στην πράξη.

Η μεθοδολογία που αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι εξολοκλήρου τεχνική, αλλά είναι απαραίτητη ώστε να προκύπτει το επίπεδο ενεργειακής εξοικονόμησης που αντιστοιχεί στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους. Η μεθοδολογία αυτή αναλύεται σε λεπτομέρεια στην Ενότητα 4.2.2.

Το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιεί ως είσοδο τις ακόλουθες παραμέτρους για να μοντελοποιήσει ενδογενώς τις αποφάσεις που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, και που θα οδηγήσουν στην ενεργειακή εξοικονόμηση:

- Το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας του κτηριακού αποθέματος κάθε κράτους μέλους.
- Το αρχικό κόστος επένδυσης που αντιστοιχεί στην εφαρμογή συγκεκριμένων πακέτων ενεργειακής αναβάθμισης

⁹ Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας εκφράζει την ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα χρόνου που περνά μέσα από $1m^2$ στοιχείου κατασκευής με πάχος d (m), όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με $1K$, και ορίζεται ως ο λόγος του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού προς το πάχος του υλικού. Προφανώς όσο παλιότερο και ανεξάρτητο από οικοδομικούς κανόνες είναι ένα κτήριο τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας και άρα τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες θερμότητας από το κέλυφος.

¹⁰ <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>

Για την άντληση των δεδομένων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν οι αναφορές (Boneta, 2013; Pietrobon et al., 2013) από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENTRANZE (Policies to ENforce the TRAnstition to Nearly-Zero Energy buildings in the EU27), το οποίο ήταν σε εφαρμογή κατά την περίοδο 2012-2014. Το πρόγραμμα ENTRANZE είχε «ως στόχο να υποστηρίξει ενεργά τη χάραξη πολιτικής παρέχοντας τα απαιτούμενα δεδομένα, αναλύσεις και κατευθυντήριες γραμμές για να επιτευχθεί μια γρήγορη και ισχυρή διείδυση των Κτηρίων σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΚΣΜΚΕ – nZEB) και των ΑΠΕ για θέρμανση και ψύξη στα υπάρχοντα κτήρια»¹¹. Ενώ το πρόγραμμα εστίασε στην ανάλυση εννέα χωρών, τα αποτελέσματα μπορούν να γενικευθούν για το σύνολο της ΕΕ, επειδή οι χώρες που μελετήθηκαν καλύπτουν πάνω από το 60% του κτηριακού αποθέματος στην Ευρώπη. Στο πλαίσιο του προγράμματος, αναπτύχθηκε λεπτομερής βάση δεδομένων για τα χαρακτηριστικά του κτηριακού αποθέματος των εννέα χωρών, και παρουσιάστηκαν σενάρια πολιτικής με διάφορα επίπεδα φιλοδοξίας σχετικά με την προώθηση πακέτων μέτρων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων. Τα πακέτα μέτρων περιλάμβαναν εργασίες διαφόρων επιπέδων ενεργειακής εξοικονόμησης και αφορούσαν στην αντικατάσταση των δομικών στοιχείων του κελύφους (υαλοπίνακες, μόνωση στους τοίχους κ.ά.). Σε κάθε ένα από τα πακέτα μέτρων αντιστοιχούσε ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση, δηλαδή πριν την εφαρμογή του μέτρου. Η εξοικονόμηση προκύπτει ουσιαστικά από την αλλαγή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του εκάστοτε δομικού στοιχείου στο οποίο γίνεται η παρέμβαση, η οποία οδηγεί σε ελάττωση του συνολικού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους και άρα σε μείωση των απωλειών θερμότητας από το κέλυφος. Τελικά εξοικονομείται ενέργεια που καταναλωνόταν για θέρμανση και ψύξη και το ποσοστό της εξοικονόμησης σχετίζεται με το ποσοστό μείωσης του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας ύστερα από την εφαρμογή του πακέτου μέτρων. Σε κάθε πακέτο μέτρων αντιστοιχεί αρχικό κόστος επένδυσης [Euros/m² conditioned space] το οποίο περιλαμβάνει το κόστος εργασίας και υλικών, το κόστος απομάκρυνσης και απόθεσης των υπαρχόντων δομικών στοιχείων που αντικαθίστανται, το κέρδος της εταιρείας που αναλαμβάνει τις εργασίες και άλλα τεχνικά έξοδα. Για την ποσοτικοποίηση των σεναρίων πολιτικής στο πρόγραμμα ENTRANZE, εφαρμόστηκε το μοντέλο προσομοίωσης Invert/EE-Lab. Το μοντέλο αυτό έχει τη δυνατότητα να αξιολογεί τις επιπτώσεις διαφορετικών πακέτων πολιτικής στη συνολική ενεργειακή ζήτηση, στο μείγμα καυσίμων, στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και στο κόστος για τις διάφορες χρήσεις στα κτήρια. Όμως, δεν έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί τις συμπεριφορές σε σχέση με τις αποφάσεις για ενεργειακή αναβάθμιση. Με άλλα λόγια, το μοντέλο Invert/EE-Lab χρησιμοποιεί υποθέσεις σχετικά με το ρυθμό και την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης, οι οποίες προσδιορίζονται εξωγενώς ανάλογα με τη φιλοδοξία του σεναρίου πολιτικής που προσομοιώνει, και υπολογίζει μόνο την επιλογή μεταξύ τεχνολογιών ακολουθώντας μια καθαρά τεχνική προσέγγιση.

Ένα ακόμα δεδομένο που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο προτεινόμενο μοντέλο για την ενδογενή μοντελοποίηση των αποφάσεων που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους είναι ο ρυθμός και η ένταση ενεργειακής αναβάθμισης και ανακαίνισης των κτηρίων ανά κράτος μέλος, όπως αυτά έχουν παρατηρηθεί ιστορικά. Το μοντέλο αντλεί τα δεδομένα αυτά από τη βάση δεδομένων EU

¹¹ <https://www.entranze.eu/about/home>

Building Stock Observatory (EU BSO, 2022), στην οποία περιλαμβάνονται το πλήθος των κτηρίων (σε μονάδες κτηρίων ή επιφάνειας) που ανακαινίζονται ενεργειακά κάθε χρόνο και χωρίζει τις ανακαινίσεις σε τρεις κατηγορίες αυξανόμενης έντασης (ή ενεργειακής εξοικονόμησης).

Στα παραπάνω παρουσιάστηκαν τεχνικές μέθοδοι και δεδομένα που έχουν ενσωματωθεί στο προτεινόμενο μοντέλο, για την ενδογενή μοντελοποίηση των αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και αντλήθηκαν από προσεγγίσεις μοντέλων μηχανικού που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Επειδή αυτό το κομμάτι της μοντελοποίησης στο προτεινόμενο μοντέλο είναι καινοτόμο, ήταν απαραίτητο η μοντελοποίηση να ενσωματώσει τα κυριότερα δεδομένα από σχετικές εφαρμογές κατά κατηγορία κτηρίων και να εντάξει ακόμα και απλουστευμένους υπολογισμούς μηχανικού, διότι αυτά εξασφαλίζουν την εγκυρότητα του μοντέλου και την απαραίτητη τεχνική θεμελίωση, η οποία τελικά πλαισιώνει την μικρό-οικονομική θεωρία στη μοντελοποίηση.

3.3 Η ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.3.1. Ποιοτική περιγραφή της λήψης ενεργειακών αποφάσεων στα κτήρια

Οι αποφάσεις που αφορούν ενεργειακές επενδύσεις στα κτήρια περιλαμβάνουν την απόφαση για κατεδάφιση (ή εγκατάλειψη) παλαιών κτηρίων και την κατασκευή νέων, την απόφαση για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους παλαιών κτηρίων και την απόφαση για αγορά νέου εξοπλισμού (π.χ. λέβητα για θέρμανση, πλυντήριο ρούχων, λαμπτήρες φωτισμού κ.ά.) σε αντικατάσταση παλαιού, συμπεριλαμβανομένης της πιθανής πρόωρης αντικατάστασης του εξοπλισμού. Ο καταναλωτής εξετάζει διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες γι' αυτές τις επενδυτικές αποφάσεις: η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ για τις ηλεκτρικές συσκευές ο τεχνικός χρόνος ζωής είναι μόνο λίγα χρόνια. Επίσης, υπάρχει μια ιεραρχία μεταξύ των επενδυτικών αποφάσεων: η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους ενός κτηρίου επηρεάζει την επιλογή του συστήματος θέρμανσης και αυτή, με τη σειρά της, επηρεάζει την επιλογή του συστήματος για προετοιμασία ΖΝΧ και μαγειρέμα.

Σε κάθε επενδυτική απόφαση, ο αποφασίζων καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε εναλλακτικές τεχνολογίες, οι οποίες, ανταγωνίζονται ως προς το επενδυτικό τους κόστος και την ενεργειακή απόδοση. Το επενδυτικό κόστος των τεχνολογιών είναι γενικά υψηλότερο όταν αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση. Η Οδηγία για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων, η οποία λαμβάνεται υπόψη στη μοντελοποίηση, απαγορεύει ορισμένες τεχνολογίες που έχουν μειωμένη ενεργειακή απόδοση. Αντίστοιχα, η Οδηγία για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας, η οποία επίσης έχει ενσωματωθεί στη μοντελοποίηση, επιτρέπει την προώθηση και την αποδοχή των πιο αποδοτικών τεχνολογιών σταδιακά μέσα στο χρόνο.

Εκτός από την τεχνολογία, ο αποφασίζων καλείται να επιλέξει τον τύπο καυσίμου που θα χρησιμοποιεί ο εξοπλισμός, και αυτό κυρίως αφορά τον εξοπλισμό που ικανοποιεί τις θερμικές ανάγκες, όπου οι υποκαταστάσεις μεταξύ καυσίμων είναι τεχνικά εφικτές. Το μοντέλο καλύπτει μια μεγάλη ποικιλία επιλογών, συμπεριλαμβανομένων λεβήτων υγρών καυσίμων (κυρίως πετρελαίου), αυτόνομων συστημάτων υγραερίου (υγραερίου), αυτόνομων συστημάτων και λεβήτων διανεμόμενου αερίου (με δυνατότητα χρήσης μείγματος φυσικού αερίου, υδρογόνου, βιοαερίου και συνθετικού μεθανίου), συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και διανεμόμενης θερμότητας, λεβήτων βιομάζας (ξύλου ή πέλλετ) και ηλιοθερμικών ή γεωθερμικών συστημάτων. Η διαθεσιμότητα ενός τύπου καυσίμου σε μία χώρα ή μια περιοχή εξαρτάται από την υποδομή των δικτύων διανομής. Οι διάφορες κατηγορίες κτηρίων,

που ανήκουν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, έχουν διαφορετική πρόσβαση σε δίκτυα διανομής καυσίμων.

Οι επενδυτικές αποφάσεις που αφορούν στην επιλογή του εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη επηρεάζονται από τις αποφάσεις σχετικά με την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Ένα πολύ μονωμένο κτήριο έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιεί ενέργεια για θέρμανση ή ψύξη για λιγότερες ώρες, από ό, τι ένα κτήριο που έχει μεγάλες θερμικές απώλειες. Το μέγεθος (δηλαδή η ισχύς) και οι ώρες λειτουργίας του εξοπλισμού είναι σημαντικοί παράγοντες για την τεχνικό-οικονομική αξιολόγηση των υποψήφιων συστημάτων θέρμανσης και έτσι η θερμική συμπεριφορά του κελύφους ενός κτηρίου επηρεάζει την ορθολογική επιλογή του εξοπλισμού θέρμανσης (και ψύξης).

Ο υπέρ-διαστασιολογημένος εξοπλισμός για ένα πολύ μονωμένο κτήριο είναι λιγότερο οικονομικά αποδοτικός σε σύγκριση με άλλους τύπους εξοπλισμού κατάλληλου μεγέθους, ακόμη και αν το μοναδιαίο κόστος αγοράς για τους τελευταίους είναι υψηλότερο από ό, τι για τον πρώτο. Για παράδειγμα, μια αντλία θερμότητας είναι ο πιο κατάλληλος εξοπλισμός για θέρμανση για ένα καλά μονωμένο κτήριο σε σχέση με έναν λέβητα, ο οποίος αναπόφευκτα θα ήταν υπέρ-διαστασιολογημένος. Η επιλογή εξαρτάται επίσης από τα μεγέθη που διατίθενται στην αγορά, καθώς και από την ευελιξία στη χρήση τους. Το μοντέλο αποτυπώνει αυτήν την πολυπλοκότητα λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το τυπικό κτήριο, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους, για τον υπολογισμό του τεχνικού μεγέθους των υποψήφιων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης και την τεχνικό-οικονομική αξιολόγηση του εξοπλισμού και των τύπων καυσίμων. Εάν οι εκτιμήσεις γίνονταν ανά μονάδα επιφάνειας (ανά τετραγωνικό μέτρο – τ.μ.) και όχι ανά κτήριο, δεν θα μπορούσε να συμπεριληφθεί η επίδραση της θερμικής συμπεριφοράς του κτηρίου στο μέγεθος του εξοπλισμού κατά την επιλογή του εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη. Το μοντέλο περιλαμβάνει τη δυνατότητα αναθεώρησης της επιλογής εξοπλισμού και καυσίμου για θέρμανση και ψύξη μετά από μια ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους του κτηρίου μεγάλης έντασης, ακόμη και αν ο εγκατεστημένος εξοπλισμός δεν έχει φτάσει στο τέλος του τεχνικού χρόνου ζωής του.

Στην πραγματικότητα, οι αποφάσεις σχετικά με τον εξοπλισμό για τις διάφορες χρήσεις είναι ιεραρχικά δομημένες. Η επιλογή του εξοπλισμού και του τύπου καυσίμου για θέρμανση πραγματοποιείται πριν από την επιλογή του εξοπλισμού για προετοιμασία ΖΝΧ και μαγείρεμα. Η ιεραρχική δομή των αποφάσεων οφείλεται στο υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας της θέρμανσης σε σύγκριση με το αντίστοιχο κόστος των άλλων θερμικών χρήσεων. Το μοντέλο αντικατοπτρίζει τις ιεραρχικά δομημένες επιλογές ως δέντρο αλληλεξαρτώμενων επιλογών. Όλοι οι συνδυασμοί επιλογών δεν είναι πλήρως συμβατοί μεταξύ τους και το μοντέλο εφαρμόζει παράγοντες ποινής σε ασυνήθιστους συνδυασμούς, καθώς τέτοιες περιπτώσεις συνεπάγονται επιπλέον ή «κρυφό» κόστος και στην πραγματικότητα. Η συμβατότητα των επιλογών διαφέρει μεταξύ διαφόρων κατηγοριών κτηρίων, ιδίως όσον αφορά τη γεωγραφική περιοχή, το μέγεθος του κτηρίου, την ύπαρξη δικτύου διανομής κ.ά.

Οι επενδυτικές αποφάσεις για ηλεκτρικές συσκευές και φωτισμό είναι ανεξάρτητες από τις επενδυτικές αποφάσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους ή την αντικατάσταση του εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη, και οι επιλογές υπόκεινται στους περιορισμούς της σχετικής νομοθεσίας (EcoDesign και EcoLabelling Directive). Οι ηλεκτρικές συσκευές έχουν πολύ μικρότερο τεχνικό χρόνο ζωής σε σχέση με τον υπόλοιπο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στα κτήρια για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, και

μάλιστα υπάρχει η τάση να αυξάνεται ο όγκος των συσκευών ανά κτήριο (ο ρυθμός διείσδυσης των συσκευών), ειδικά των μικρών συσκευών στα κτήρια κατοικίας, ως αποτέλεσμα της οικονομικής ανάπτυξης και του ολοένα μικρότερου κόστους αγοράς τους.

3.3.2. Η ονοματολογία και η δομή δεδομένων του προτεινόμενου μοντέλου

Το «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα» ή αλλιώς η απροθυμία πραγματοποίησης επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια, παρότι αυτές φαίνεται να είναι οικονομικά αποδοτικές με βάση τεχνικούς υπολογισμούς, η οποία έρχεται σε αντίθεση με τη συμβατική μικροοικονομική θεωρία, αποδόθηκε στη βιβλιογραφία, στα (υψηλά) έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια που αντικατοπτρίζουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

Η προσέγγιση που προτείνεται στο μοντέλο, ενσωματώνει με συνέπεια τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα στο πλαίσιο της μικροοικονομικής μοντελοποίησης, τα οποία σε συνδυασμό με τις ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές των καταναλωτών, μπορούν να αναπαραστήσουν την απροθυμία πραγματοποίησης επενδύσεων σε ενεργειακή εξοικονόμηση εξακολουθώντας να αντιπροσωπεύουν ορθολογικές συμπεριφορές. Με άλλα λόγια, η μοντελοποίηση των αποφάσεων για ενεργειακή απόδοση στα κτήρια βασίζεται στη μικροοικονομική θεωρία, η οποία έχει εμπλουτιστεί με την αναπαράσταση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, της ετερογένειας μεταξύ των καταναλωτών και των ιδιοσυγκρασιακών συμπεριφορών εντός κάθε κατηγορίας καταναλωτή ή τύπου κτηρίου.

Η επίδραση των εμποδίων στις ατομικές αποφάσεις για ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των ατομικών προτιμήσεων. Για να αναπαρασταθεί επαρκώς η ετερογένεια των καταναλωτών, είναι σημαντικό να γίνει η κατηγοριοποίηση των κτηρίων ή/και των καταναλωτών σε διάφορες αντιπροσωπευτικές ομάδες. Η επιλογή των κριτηρίων βάσει των οποίων το κτηριακό απόθεμα επιμερίζεται σε κατηγορίες, έγινε ύστερα από συστηματική μελέτη της βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην Ενότητα 2.4.2, πάνω στα μοντέλα μηχανικού που χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία των αρχέτυπων ή τυπικών κτηρίων. Το μοντέλο κατηγοριοποιεί το κτηριακό απόθεμα λαμβάνοντας υπόψη τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις των καταναλωτών, συμπεριλαμβανομένου του εισοδήματος και της γεωγραφικής θέσης του κτηρίου, καθώς και άλλων παραγόντων όπως είναι ο τύπος του κτηρίου, η ηλικία του, και άλλα κριτήρια.

Για τον οικιακό τομέα, το μοντέλο κατηγοριοποιεί τα νοικοκυριά σε 270 κατηγορίες, για κάθε κράτος μέλος, με κριτήριο:

- Το βαθμό αστικοποίησης. Η κατηγοριοποίηση γίνεται σε νοικοκυριά που βρίσκονται σε αστικές περιοχές (urban), σε ημί-αστικές περιοχές (semi-urban), και σε αγροτικές περιοχές (rural). Η κατηγοριοποίηση αυτή επιτρέπει να μοντελοποιούνται οι αποφάσεις σχετικά με τις επιλογές σε επίπεδο κυρίως τύπου καυσίμου, η διαθεσιμότητα των οποίων και ειδικά η ύπαρξη δικτύου διανομής, διαφέρει στις διάφορες περιοχές. Έτσι, τα νοικοκυριά που βρίσκονται σε πολύ απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, δεν έχουν τη δυνατότητα επιλογής διανεμόμενης θερμότητας ή ακόμα και διανεμόμενου αερίου, επειδή συνήθως δεν υπάρχει δίκτυο διανομής γι' αυτά τα ενεργειακά προϊόντα σε αυτές τις περιοχές. Αντίθετα, η βιομάζα και τα στερεά καύσιμα αποτελούν συνήθως επιλογές καυσίμων για θέρμανση ή και προετοιμασία ZNX, στις αγροτικές περιοχές αποκλειστικά. Ειδικά για τη βιομάζα, πολλές αστικές περιοχές σε διάφορες χώρες, απαγορεύουν τη χρήση της λόγω της διασποράς επιβλαβών σωματιδίων (PM2.5) κατά την καύση της.

- Τον τύπο του κτηρίου. Η κατηγοριοποίηση γίνεται σε διαμερίσματα σε πολυκατοικία (multi-family household), και μονοκατοικίες (single family household). Η κατηγοριοποίηση αυτή επιτρέπει να αναπαρίστανται συγκεκριμένα εμπόδια που αντιμετωπίζουν τα νοικοκυριά που κατοικούν σε μια πολυκατοικία, όταν πρέπει να πάρουν ενεργειακές επενδυτικές αποφάσεις. Συγκεκριμένα, είτε πρόκειται για απόφαση ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους του κτηρίου, είτε πρόκειται για απόφαση αντικατάστασης του εξοπλισμού για θέρμανση, υπάρχουν στις πολυκατοικίες κανονισμοί λειτουργίας, οι οποίοι απαιτούν τη σύμφωνη γνώμη μερίδας των ιδιοκτητών, ώστε κάποιο διαμέρισμα να προβεί σε μία τέτοια επένδυση. Ειδικά όταν πρόκειται για πολυκατοικίες που έχουν κεντρικό σύστημα θέρμανσης, η αυτονόμηση ενός διαμερίσματος, απαιτεί επίπονες συνεννοήσεις μεταξύ των ιδιοκτητών.
- Το έτος κατασκευής. Ορίζονται εννέα ηλικιακές κατηγορίες μέχρι το 2015, και συγκεκριμένα οι κατοικίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το διάστημα στο οποίο χτίστηκαν: 1920-1940, 1941-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 (δεκαετία θέσπισης οικοδομικών κανονισμών), 1991-2000, 2001-2010 (δεκαετία θέσπισης οικοδομικών κανονισμών) και 2011-2015. Η επιλογή αυτών των διαστημάτων έγινε λαμβάνοντας υπόψη ότι μέρος του κτηριακού αποθέματος πολλών πόλεων στις χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης έχει κατασκευαστεί πριν από τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, και συνήθως υπόκειται σε αρχιτεκτονικούς περιορισμούς. Επίσης, ευρωπαϊκές πόλεις που υπέστησαν μεγάλες καταστροφές κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, ανέπτυξαν μεγάλη οικοδομική δραστηριότητα μετά την δεκαετία του 1940. Τέλος, οι περισσότερες χώρες όρισαν σε δύο φάσεις μέχρι σήμερα οικοδομικούς κανονισμούς και μάλιστα σε σχετικά κοντινές χρονολογικές περιόδους. Σε κάθε χρονικό βήμα της μοντελοποίησης, από το 2020 και μετά, το μοντέλο θεωρεί νέες κατασκευές, με βάση εξωγενή δεδομένα για το ρυθμό κατεδάφισης παλαιών και κατασκευής νέων κτηρίων και την πρόβλεψη για την εξέλιξη του συνολικού οικιακού κτηριακού αποθέματος, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά και σε επόμενη ενότητα (Ενότητα 5.1).
- Το εισόδημα του νοικοκυριού. Τα νοικοκυριά έχουν χωριστεί σε πέντε εισοδηματικές τάξεις. Η κατανομή των νοικοκυριών ανά κατηγορία εισοδήματος μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου εξωγενώς με βάση την αύξηση του εισοδήματος και την αύξηση της δραστηριότητας, τα οποία επίσης προσδιορίζονται εξωγενώς. Η ταξινόμηση των νοικοκυριών σε εισοδηματικές τάξεις βασίζεται σε στατιστικά στοιχεία από τη βάση δεδομένων Eurostat EU-SILC και τα πλήθος του πληθυσμού που αντιστοιχεί στην κάθε τάξη διαφέρει από χώρα σε χώρα. Αντίστοιχα, και η ιδιωτική κατανάλωση (private consumption - σε €/άτομο) διαφέρει ανά εισοδηματική τάξη και χώρα. Ενδεικτικά δίνεται η μέση ιδιωτική κατανάλωση ανά εισοδηματική τάξη και γεωγραφική περιοχή της ΕΕ για το 2020 (Πίνακας 1). Για την προβολή της ιδιωτικής κατανάλωσης για κάθε κατηγορία εισοδήματος για ολόκληρη την περίοδο προβολής, γίνεται η υπόθεση ότι αυτή μεταβάλλεται κάθε χρόνο κατά το ίδιο ποσοστό με το Ακαθάριστο Εγχώριο Ποσοστό (ΑΕΠ) της κάθε χώρας, το οποίο είναι εξωγενής υπόθεση του μοντέλου. Η κατηγοριοποίηση των νοικοκυριών με βάση το εισόδημα επιτρέπει την αναπαράσταση του εμποδίου της δυσκολίας πρόσβασης σε χρηματοδότηση, το οποίο αντιμετωπίζεται κυρίως από τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος. Επίσης, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος τείνουν να έχουν μεγαλύτερη αποστροφή από τον κίνδυνο (risk averse) σε σχέση με τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος (risk prone), όταν αποφασίζουν για ενεργειακή αποδοτικότητα, και αυτό οφείλεται στο υψηλό κόστος ευκαιρίας που οι πρώτοι συσχετίζουν με τις ταμειακές ροές. Η αναπαράσταση αυτών των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα γίνεται με τη θεώρηση υψηλότερων προεξοφλητικών επιτοκίων για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος στην

οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση, συγκριτικά με τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος, όπως προτείνει και η βιβλιογραφία και παρουσιάστηκε αναλυτικά στην Ενότητα 2.3.

Πίνακας 1: Μέση ιδιωτική κατανάλωση ανά εισοδηματική κατηγορία και περιοχή της ΕΕ για το 2020

| 2020 | Μέση ιδιωτική κατανάλωση (σε €/άτομο) | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------|
| | Χώρες στην κεντρική /δυτική Ευρώπη | Χώρες στη νότια Ευρώπη | Χώρες στη βόρεια Ευρώπη | Χώρες στην ανατολική Ευρώπη | ΕΕ |
| Νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος | 10,545 | 7,006 | 12,620 | 3,840 | 8,121 |
| Νοικοκυριά μεσαίου εισοδήματος | 20,391 | 15,367 | 25,620 | 8,163 | 16,455 |
| Νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος | 29,326 | 22,525 | 38,186 | 12,165 | 23,827 |

Για τον τομέα των υπηρεσιών, το μοντέλο κατηγοριοποιεί τα κτήρια σε 64 κατηγορίες, για κάθε κράτος μέλος, λαμβάνοντας βασικά υπόψη τις κύριες δραστηριότητές τους. Έτσι, τα κτήρια χωρίζονται με βάση τον τομέα ή/ και τον υπό-τομέα δραστηριότητας τους σε:

- Κτήρια του τομέα ιδιωτικών υπηρεσιών, και πιο συγκεκριμένα σε κτήρια γραφείων και σε κτήρια του τομέα της εστίασης (π.χ. εστιατόρια) και σε κτήρια που σχετίζονται με τον τουρισμό (π.χ. ξενοδοχεία)
- Κτήρια του τομέα δημοσίων υπηρεσιών, και πιο συγκεκριμένα σε κτήρια που στεγάζουν δημόσιες υπηρεσίες, σε κτήρια υγειονομικού ενδιαφέροντος (πχ. νοσοκομεία) και σε κτήρια που σχετίζονται με την εκπαίδευση (πχ. σχολεία και πανεπιστήμια).
- Κτήρια που σχετίζονται με το εμπόριο, και πιο συγκεκριμένα εμπορικά καταστήματα, και αποθήκες.

Η επιλογή αυτών των κατηγοριών για τη διάκριση των κτηρίων του τομέα των υπηρεσιών έγινε, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ανάγκες και η χρήση ενέργειας σε κάθε κατηγορία είναι διαφορετική, γεγονός που επηρεάζει τις ενεργειακές αποφάσεις. Για παράδειγμα, τα κτήρια γραφείων και οι δημόσιες υπηρεσίες λειτουργούν με συγκεκριμένα ωράρια όλες τις καθημερινές, πλην Σαββατοκύριακου, και έχουν εξίσου θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες. Από την άλλη, τα νοσοκομεία, λειτουργούν όλο το χρόνο και έχουν, μεταξύ άλλων, θερμικές ανάγκες υψηλής ενθαλπίας για λόγους αποστείρωσης. Αντίστοιχες ανάγκες έχουν και οι ξενοδοχειακές μονάδες, αλλά σε μικρότερο βαθμό, και η λειτουργία τους ταυτίζεται με τις τουριστικές περιόδους και περιορίζεται σε ορισμένους μήνες το χρόνο στις περισσότερες περιπτώσεις.

Ειδικά, η διαφοροποίηση του τομέα των δημοσίων υπηρεσιών, επιτρέπει τη σε βάθος μελέτη και ανάλυση των ενεργειακών επενδύσεων σε αυτήν την κατηγορία κτηρίων, γεγονός που υποδεικνύεται και από την ειδική μέριμνα που έχει η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση, σχετικά με τον υποδειγματικό ρόλο των κτηρίων του δημοσίου τομέα (Άρθρο 5 της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση).

Επίσης, η ολοένα αυξανόμενη και αναμενόμενη διεύθυνση των κέντρων δεδομένων (data center) σε διάφορες χώρες της Ευρώπης (Danish Ministry of Climate Energy and Utilities, 2019; Republic of Cyprus, 2020), απαιτεί τη διαφοροποίηση του τομέα αυτού από τις υπόλοιπες κατηγορίες κτηρίων του τομέα των υπηρεσιών, λόγω των εξαιρετικά υψηλών ηλεκτρικών τους αναγκών. Η κατηγορία αυτή, στη μοντελοποίηση συνυπολογίζεται στα κτήρια που λειτουργούν σαν αποθήκες.

Τα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών χωρίζονται επίσης ανάλογα με την ηλικία κατασκευής τους, όπως στον οικιακό τομέα, δηλαδή, το υπάρχον κτηριακό απόθεμα έχει χωριστεί σε εννέα ηλικιακές ομάδες που καλύπτουν την περίοδο 1920-2015. Ολόκληρο το κτηριακό απόθεμα στον τομέα των υπηρεσιών έχει χωριστεί περαιτέρω ανάλογα με τον τύπο αερισμού, σε κτήρια με μηχανικό και φυσικό αερισμό, και τα δεδομένα γι' αυτή τη διάκριση αντλήθηκαν από το (Brelieh et al., 2009).

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, το μοντέλο χρησιμοποιεί μια λεπτομερή βάση δεδομένων για το κτηριακό απόθεμα. Αυτή η βάση δεδομένων περιλαμβάνει το πλήθος των κτηρίων ανά κατηγορία, την επιφάνεια αυτών, τα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους κάθε κατηγορίας, το πλήθος των ατόμων ανά κατοικία και των υπαλλήλων ή/και επισκεπτών για τα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών. Η βάση δεδομένων και για τους δύο τομείς έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας δεδομένα από μια πληθώρα βάσεων δεδομένων που έπρεπε να συνδυαστούν για να δημιουργηθεί ένα συνεπές σύνολο δεδομένων (Arran & Slowe, 2012; Birchall et al., 2014; Dol & Haffner, 2010; Eurostat [hbs_car_t315], 2022; Eurostat [ilc_lvho04], 2022; Eurostat [urb_clivcon], 2022; Fleiter et al., 2015; Loga et al., 2013; Schimschar et al., 2011). Στον Πίνακα 30 (στο Παράρτημα), υπάρχει ένας εκτεταμένος κατάλογος των βάσεων δεδομένων, των έργων και των αναφορών που έχουν συνδυαστεί και επεξεργαστεί για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιεί το μοντέλο.

Το μοντέλο αναπαριστά τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα είτε ρητά είτε εμμέσως, και στο πλαίσιο της μοντελοποίησης τα εμπόδια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα οικονομικά εμπόδια (market barriers), δηλαδή σε δυσκολίες κόστους και στα μη-οικονομικά εμπόδια (non-market barriers). Τα μη-οικονομικά εμπόδια χωρίζονται σε εμπόδια που σχετίζονται με "αληθινά" κόστη (που πραγματικά πληρώνονται από τους καταναλωτές) και θέματα που σχετίζονται με την πρόσβαση σε χρηματοδότηση και σε παράγοντες που δεν έχουν άμεσο πληρωτέο ή "αληθινό" κόστος και συχνά ονομάζονται και «αντιληπτά κόστη» (perceived costs) (Valentová, 2010) ή θεσμικά εμπόδια. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται και υποκειμενικοί παράγοντες σχετικά με το πως αντιλαμβάνονται οι αποφασίζοντες τις επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα εμπόδια που σχετίζονται με "αληθινά" κόστη περιλαμβάνουν καταρχάς «κρυφά» επενδυτικά κόστη (Golove & Eto, 1996). Σε ό,τι αφορά στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, τα «κρυφά» επενδυτικά κόστη δεν σχετίζονται άμεσα με το κόστος των υλικών ή της εργασίας, αλλά είναι παρ' όλ' αυτά πληρωτέα κόστη. Αυτά περιλαμβάνουν: το κόστος που προκύπτει για την αποφυγή διαταραχών σε γειτονικά διαμερίσματα, την περίπλοκη απομάκρυνση οικοδομικών υλικών που δημιουργούνται κατά τη φάση των εργασιών ή την περίπτωση δυνατότητας εφαρμογής θερμομόνωσης μόνο στο εσωτερικό του κτηρίου. Στους υπολογισμούς λαμβάνεται επίσης υπόψη το υψηλό κόστος επένδυσης για τα πολύ παλαιά κτήρια, των οποίων η οικοδομική κατάσταση μπορεί να είναι αβέβαιη κατά την έναρξη των εργασιών, και ενδεχομένως απαιτούνται επιπλέον εργασίες για λόγους στατικότητας ή αντοχής του κτηρίου. Ομοίως, τα διατηρητέα κτήρια, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, συνεπάγονται επίσης πολύ υψηλό κόστος λόγω περιορισμών ανακαίνισης που προκύπτουν από αρχιτεκτονικές οδηγίες και άλλους περιορισμούς. Στην περίπτωση κτηρίων που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, το επιπλέον κόστος μεταφοράς των υλικών λαμβάνεται επίσης υπόψη στους υπολογισμούς.

Τα «κρυφά» κόστη που αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετίζονται με τη φάση των εργασιών ενεργειακής αναβάθμισης, όμως υπάρχουν και «κρυφά» κόστη που δε σχετίζονται με τις οικοδομικές εργασίες καθαυτές. Αυτά περιλαμβάνουν απώλεια χώρου στα κτήρια όταν εφαρμόζεται εσωτερική θερμομόνωση

ή τον εγκλωβισμό επενδύσεων (lock-in-effect) από ανακαινίσεις που έγιναν για αισθητικούς λόγους και δεν συμπεριέλαβαν στοιχεία εξοικονόμησης ενέργειας και υποδηλώνουν ότι ο επενδυτής θα πρέπει να λάβει υπόψη μη ανακτημένα κόστη κεφαλαίου αν αποφασίσει να επενδύσει άμεσα σε ενεργειακή αναβάθμιση. Επίσης, όταν γίνονται ενεργειακές αναβαθμίσεις μεγάλης έντασης, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις υπονοούν την πλήρη ανακατασκευή του κτηρίου, δεν είναι δυνατόν να παραμένουν σε αυτό όσοι ζουν ή εργάζονται εκεί για όσο διάστημα εκτελούνται οι εργασίες. Αυτό, επί της ουσίας συνεπάγεται ότι στα έξοδα της ενεργειακής αναβάθμισης θα πρέπει να συμπεριληφθούν και τα έξοδα προσωρινής μετεγκατάστασης. Τα «κρυφά» κόστη περιλαμβάνονται ρητά στη μοντελοποίηση ως πραγματικά κόστη, τα οποία επηρεάζουν το συνολικό κόστος των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης και, ως εκ τούτου, την επιλογή του είδους (δηλαδή της έντασης) και της χρονικής στιγμής της ανακαινίσης. Τα επιπλέον αυτά στοιχεία κόστους που αναπαριστούν «κρυφά» κόστη εφαρμόζονται μόνο στις κατηγορίες κτηρίων για τις οποίες ισχύουν (π.χ., σε κτήρια σε αστικές περιοχές που χτίστηκαν πριν από κάποια ημερομηνία ή σε μερίδα αγροτικών κατοικιών που αντιπροσωπεύουν νοικοκυριά που ζουν σε απομακρυσμένες περιοχές).

«Κρυφά» κόστη συμπεριλαμβάνονται και στις αποφάσεις σχετικά με την επιλογή συστήματος θέρμανσης και ψύξης. Σε αυτές τις αποφάσεις τα «κρυφά» κόστη περιλαμβάνουν το κόστος εγκατάστασης, το οποίο συνεπάγεται όχι μόνο το κόστος εργασίας και υλικών για την εγκατάσταση του συστήματος, αλλά και το κόστος που σχετίζεται με τη μετάβαση από την ήδη εγκατεστημένη τεχνολογία στη νέα (π.χ. γεωτρήσεις σε περίπτωση γεωθερμικών τεχνολογιών, διαθεσιμότητα καμινάδας κατά την αλλαγή καυσίμου, αντικατάσταση τερματικών σωμάτων ή σωληνώσεων για την εγκατάσταση αντλιών θερμότητας κλπ.). Επιπλέον, οι πρόσθετες απαιτήσεις χώρου για την αποθήκευση ορισμένων καυσίμων, π.χ. για βιομάζα και πετρέλαιο, περιλαμβάνονται επίσης ως κόστος και μπορεί να αποτελούν εμπόδιο για ορισμένες κατηγορίες κτηρίων. Η ανάγκη χρήσης εφεδρικών συστημάτων για θέρμανση ή για προετοιμασία ZNX, που συμπεριλαμβάνει το κόστος επένδυσης και λειτουργίας των συστημάτων αυτών, θεωρούνται επίσης εμπόδια όσον αφορά την επιλογή συγκεκριμένων τεχνολογιών σε ορισμένες περιοχές. Το τελευταίο ισχύει για τις ηλιοθερμικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για θέρμανση και προετοιμασία ZNX, οι οποίες πρέπει να συνδυάζονται με εφεδρική πηγή ενέργειας για τις περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίστοιχα, επειδή η απόδοση των αεροθερμικών αντλιών θερμότητας μειώνεται όταν η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από ένα συγκεκριμένο όριο, είναι συνήθως πρακτική η εγκατάσταση ενός βοηθητικού συστήματος (συνήθως λέβητα αερίου ή ηλεκτρικής αντίστασης) που μπορεί να συμπληρώσει ή να αντικαταστήσει τη χρήση των αντλιών θερμότητας όταν αυτές δεν μπορούν να καλύπτουν τις απαιτήσεις θέρμανσης με αποδοτικό τρόπο.

Στα εμπόδια που σχετίζονται με "αληθινά" κόστη περιλαμβάνονται και οι παράγοντες που αναπαριστούν τη δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση, το οποίο αναγνωρίζεται από τη βιβλιογραφία (Ameli & Brandt, 2015; Golove & Eto, 1996; Paiho & Ahvenniemi, 2017; Palm & Reindl, 2018; Valentová, 2010) ως ένα κρίσιμο εμπόδιο στην ενεργειακή αποδοτικότητα, όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 2.3. Το εμπόδιο αυτό αφορά κυρίως τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος και τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις.

Τα μη οικονομικά εμπόδια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τρεις ομάδες: α) την (ασύμμετρη) πληροφόρηση, β) την αβεβαιότητα σχετικά με τις οικονομικές και τεχνικές επιδόσεις των επενδυτικών επιλογών (συμπεριλαμβανομένου του κόστους ευκαιρίας των ιδίων και δανειακών κεφαλαίων), και γ) τη ρυθμιστική αβεβαιότητα (κανονιστικές διατάξεις)

Η έλλειψη πληροφόρησης, η χαμηλή ακρίβεια των διαθέσιμων πληροφοριών, η έλλειψη κινήτρων για τη συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών, η έλλειψη γνώσης ή ικανότητας για την εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων από τις διαθέσιμες πληροφορίες, καθώς και η ασύμμετρη πληροφόρηση σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα είναι χαρακτηριστικά που παρατηρούνται συχνά στη βιβλιογραφία, όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 2.3

Το υψηλό αρχικό κόστος των επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα προκαλεί αβεβαιότητα στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, κυρίως στα νοικοκυριά που τείνουν να αποφεύγουν τον κίνδυνο κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η αβεβαιότητα πηγάζει από την άγνωστη και αβέβαιη εξέλιξη των τιμών της ενέργειας και του κόστους των τεχνολογιών στο μέλλον. Επιπλέον, υπάρχει γενικά μια απροθυμία από τους καταναλωτές να επενδύουν σε νέες τεχνολογίες που δεν έχουν ακόμη ωριμάσει πλήρως ή έχουν περιορισμένη διείσδυση στην αγορά.

Η μοντελοποίηση λαμβάνει υπόψη αυτούς τους παράγοντες, δηλαδή παράγοντες πληροφόρησης και αβεβαιότητας, επιβαρύνοντας το επενδυτικό κόστος των πολύ αποδοτικών ή/και, βιομηχανικά «ανώριμων» τεχνολογιών με «αντιληπτά κόστη», που αναπαριστούν την αποδοχή που έχουν αυτές οι τεχνολογίες από τους καταναλωτές. Με αυτόν τον τρόπο επηρεάζεται και ο βαθμός διείσδυσης των τεχνολογιών αυτών στο μείγμα εξοπλισμού στα κτήρια. Για την ποσοτικοποίηση των παραγόντων που αντιπροσωπεύουν τα «αντιληπτά κόστη», έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα από τεχνικές αναφορές (συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών μελετών ανά τεχνολογία που συνοδεύουν το EcoDesign Directive), σχετικά με την αναμενόμενη διείσδυση των διαφόρων τεχνολογιών και την πρόοδο της βιομηχανίας και των τεχνολογικών εξελίξεων στο μέλλον.

Όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνονται ρητά τα διάφορα εμπόδια στην οικονομο-τεχνική βελτιστοποίηση που μοντελοποιεί τις επενδυτικές αποφάσεις για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια. Όμως, οι επενδυτικές αποφάσεις των καταναλωτών βασίζονται, εξ' ορισμού, στην έννοια του κόστους κεφαλαίου, δηλαδή στην ελάχιστη απόδοση που θα πρέπει να έχουν οι εκάστοτε επενδύσεις ώστε να έχει νόημα η πραγματοποίησή τους. Το κόστος κεφαλαίου είναι, ανάλογα με τον κλάδο, είτε το Μέσο Σταθμικό Κόστος Κεφαλαίου¹² (WACC – Weighted Average Cost of Capital), για μεγαλύτερες επιχειρήσεις, είτε ένα υποκειμενικό προεξοφλητικό επιτόκιο, για νοικοκυριά ή μικρότερες επιχειρήσεις. Και στις δύο περιπτώσεις, η απόδοση ή το επιτόκιο που χρησιμοποιείται για την προεξόφληση μελλοντικών δαπανών και εσόδων αντικατοπτρίζει τη σκοπιά του ιδιώτη επενδυτή. Το ιδιωτικό αυτό προεξοφλητικό επιτόκιο περιλαμβάνει ένα ασφάλιστρο κινδύνου που αντανακλά τις επιχειρηματικές πρακτικές, διάφορους παράγοντες αβεβαιότητας ή ακόμα και τη

¹² Το WACC, εξορισμού εκφράζει το συνολικό κόστος κεφαλαίων ενός επενδυτή λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος (ή την απόδοση) όσο και την αναλογία μεταξύ των ιδίων και των δανειακών κεφαλαίων. Μία απλή συνάρτηση υπολογισμού του WACC είναι η: $WACC = \frac{E}{E+D} \cdot r_e + \frac{D}{E+D} \cdot r_d$, όπου τα E, D αντιπροσωπεύουν την αξία των ιδίων (equity) και των δανειακών (debt) κεφαλαίων αντίστοιχα, και r_e, r_d αντιπροσωπεύουν το κόστος των ιδίων και των δανειακών κεφαλαίων αντίστοιχα. Το κόστος των δανειακών κεφαλαίων προσδιορίζεται άμεσα από την αγορά και ισούται με το επιτόκιο της αγοράς. Το κόστος των ιδίων κεφαλαίων αντανακλά την απόδοση μιας ασφαλούς επένδυσης προσαρμοσμένης κατά έναν συντελεστή ασφαλείας ο οποίος επηρεάζεται από παράγοντες όπως την αντίληψη του κάθε επενδυτή ως προς το ρίσκο. Το κόστος των ιδίων κεφαλαίων είναι δηλαδή ένα υποκειμενικό επιτόκιο, και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μπορεί να προκύπτει από το Μοντέλο Αποτίμησης Κεφαλαιακών Στοιχείων (CAPM – Capital Asset Pricing Model)

δυσκολία δανεισμού ή γενικά την περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση. Ειδικά για τα νοικοκυριά, το προεξοφλητικό επιτόκιο αντανακλά επίσης παράγοντες αποστροφής κινδύνου.

Τα ιδιωτικά προεξοφλητικά επιτόκια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα από τη μεριά του ιδιώτη επενδυτή, έχουν υψηλή τιμή, πολύ μεγαλύτερη από τα κοινωνικά προεξοφλητικά επιτόκια, όπως άλλωστε απέδειξε ο Hausman αλλά και πολλοί άλλοι αναλυτές και παρουσιάστηκε αναλυτικά στην Ενότητα 2.3. Τα προεξοφλητικά επιτόκια αντικατοπτρίζουν το κόστος ευκαιρίας από τη χρηματοδότηση επενδύσεων εντάσεως κεφαλαίου και το κόστος αυτό διαφέρει θεμελιωδώς μεταξύ των ιδιωτών και του κράτους. Η πρόσβαση σε χρηματοδότηση, η αίσθηση ως προς τον κίνδυνο που έχουν οι ιδιώτες επενδυτές στη φάση των επενδύσεων, και άλλα, είναι μεταξύ των αιτιών της διαφοράς μεταξύ των κοινωνικών και ιδιωτικών προεξοφλητικών επιτοκίων. Επιπλέον, παράγοντες ασφάλιστρου κινδύνου που εκφράζουν ατέλειες της αγοράς αποτελούν μέρος των ιδιωτικών προεξοφλητικών επιτοκίων και τα ωθούν προς τα πάνω.

Η μοντελοποίηση συμπεριφορών δεν πρέπει να συγχέεται με τις αναλύσεις κόστους-οφέλους της δημόσιας πολιτικής, οι οποίες χρησιμοποιούν κοινωνικά προεξοφλητικά επιτόκια. Για παράδειγμα (European Commission, 2016a), μια ανάλυση κόστους-οφέλους μπορεί να στοχεύει στην αξιολόγηση μιας πολιτικής που χρησιμοποιεί δημόσιους πόρους για να επιδοτήσει επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης που πρόκειται να γίνουν από ιδιώτες. Εάν το κράτος θέλει να αξιολογήσει εάν αξίζει να επιδοτήσει την ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με άλλους προορισμούς χρηματοδότησης, οι αναλύσεις κόστους-οφέλους πρέπει να χρησιμοποιήσουν ένα κοινωνικό προεξοφλητικό επιτόκιο. Αυτό συμβαίνει γιατί διακυβεύονται δημόσιοι πόροι και δικαιούχος είναι η κοινωνία στο σύνολό της. Εάν όμως το κράτος θέλει να αξιολογήσει εάν το ποσό των επιδοτήσεων επαρκεί για να εξασφαλίσει ένα συγκεκριμένο στόχο εξοικονόμησης ενέργειας, τότε η ανάλυση πρέπει να χρησιμοποιήσει ιδιωτικά προεξοφλητικά επιτόκια για να εκτιμήσει τις επιμέρους συμπεριφορές των ιδιωτών σχετικά με την ενεργειακή απόδοση. Η χρήση ενός κοινωνικού προεξοφλητικού επιτοκίου σε αυτή την περίπτωση θα ήταν προφανώς παραπλανητική.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι λογικό οι τιμές των ιδιωτικών προεξοφλητικών επιτοκίων που χρησιμοποιούνται στο προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο να είναι υψηλές. Οι τιμές των προεξοφλητικών επιτοκίων που χρησιμοποιούνται για επενδυτικές αποφάσεις από τα νοικοκυριά βασίζεται στη βιβλιογραφία και διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της απόφασης και τον τύπο του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, οι ερευνητές έχουν βρει ότι για επενδύσεις σε συστήματα θέρμανσης ειδικά για νεόδμητες κατοικίες (δηλαδή επιλογές που έγιναν κατά την κατασκευή της κατοικίας), τα έμμεσα προεξοφλητικά επιτόκια είναι πολύ χαμηλότερα από ό,τι σε παρόμοιες επιλογές κατά την ανακαίνιση υπαρχουσών κατοικιών. Ο λόγος είναι ότι είναι πιο αβέβαιο να πραγματοποιηθούν επενδύσεις ανακαίνισης σε υπάρχοντα κτήρια από το να ενσωματωθούν αποδοτικές τεχνολογίες σε νέες κατοικίες, λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι οι αποδοτικές επιλογές για τα νέα κτήρια κατοικίας θα διαρκέσουν περισσότερο από ό,τι για τα παλαιά κτήρια (European Commission, 2016a). Για το λόγο αυτό το μοντέλο εφαρμόζει χαμηλότερα προεξοφλητικά επιτόκια όταν οι αποφάσεις αφορούν νέα κτήρια.

Επίσης, τα αποτελέσματα οικονομετρικών εκτιμήσεων που περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία, συμπεριλαμβανομένης της μελέτης του (Hausman, 1979), αποδεικνύουν ότι τα προεξοφλητικά επιτόκια, που έμμεσα χρησιμοποιούν οι καταναλωτές κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το εισόδημα και μπορεί να είναι έως και 3,6% (δηλαδή κοντά στα επιτόκια της αγοράς)

για κατηγορίες υψηλού εισοδήματος. Αλλά μπορεί κάλλιστα να είναι ένας διψήφιος αριθμός (δηλαδή πολύ υψηλότερος από τα επιτόκια της αγοράς) για κατηγορίες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος (European Commission, 2016a).

Πολλοί αναλυτές (A. H. . Sanstad et al., 1995; Train, 1985) συνόψισαν τα ευρήματα ερευνών που έγιναν κατά τη δεκαετία του '80 και του '90 σχετικά με τη συμπεριφορά των καταναλωτών κατά την επιλογή διαφόρων ειδών εξοπλισμού. Όλες οι έρευνες επιβεβαίωσαν την ισχυρή αντίστροφη συσχέτιση των προεξοφλητικών επιτοκίων και του εισοδήματος. Οι εκτιμήσεις επιβεβαίωσαν τη μεγάλη διακύμανση των επιμέρους προεξοφλητικών επιτοκίων κυρίως ως αντίστροφη συνάρτηση του εισοδήματος ανά νοικοκυριό (European Commission, 2016a):

- 14%-56% για εξοπλισμό θέρμανσης (και ειδικά για λέβητες 4%-51%)
- 5%-90% για κλιματιστικό εξοπλισμό
- 4%-88% για την εφαρμογή θερμομόνωσης στις κατοικίες
- 15%-45% για αντικατάσταση υαλοπινάκων και άλλα παρόμοια μέτρα σε κτήρια
- 15%-62% για εξοπλισμό μαγειρέματος και προετοιμασίας ZNX
- 35%-100% για ψυγεία και
- 20%-40% για μικρές ηλεκτρικές συσκευές.

Η μοντελοποίηση, αντλώντας από τη βιβλιογραφία, διαφοροποιεί τα ιδιωτικά προεξοφλητικά επιτόκια ανά εισοδηματική κλάση και τύπο απόφασης και ο Πίνακας 2 που ακολουθεί, παρουσιάζει τις χρησιμοποιούμενες τιμές.

Το ιδιωτικό προεξοφλητικό επιτόκιο που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς που αφορούν στον τομέα των υπηρεσιών είναι ένα WACC, το οποίο αποτυπώνει την αβεβαιότητα των αποφαιζόντων σχετικά με την επίδοση μελλοντικών επενδύσεων που σχετίζονται με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η τιμή του WACC είναι για όλους τους τομείς των υπηρεσιών μικρότερη σε σχέση με αυτή που εφαρμόζεται στα νοικοκυριά, είναι όμως μεγαλύτερη από τα επιτόκια της αγοράς. Η τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου είναι για όλους τους υπό-τομείς του τομέα των υπηρεσιών και για όλες τις επενδυτικές αποφάσεις 11%.

Πίνακας 2: Επιτόκια προεξόφλησης στον οικιακό τομέα ανά κατηγορία εισοδήματος και επενδυτική απόφαση

| | Απόφαση για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού για θερμικές χρήσεις | Επιλογή ηλεκτρικών συσκευών |
|---------------------------------------|---|------------------------------------|
| Νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος | 14% | 13% |
| Νοικοκυριά μεσαίου εισοδήματος | 13% | 12% |
| Νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος | 12% | 11% |

4. ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσέγγιση της μοντελοποίησης του προτεινόμενου μοντέλου συνίσταται στην αναπαράσταση των συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με τη βελτιστοποίηση της επιλογής τεχνολογίας και επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο στον κτηριακό τομέα στην Ευρώπη στο πλαίσιο της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής. Η λεπτομερής κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος που εφαρμόζεται στη μοντελοποίηση, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3.2, συμβάλλει σε αυτήν την κατεύθυνση αφού επιτρέπει τη διαπίστωση του δυναμικού και των δυνατοτήτων ενεργειακής εξοικονόμησης και μείωσης των εκπομπών CO₂ αναλυτικά για κάθε κράτος μέλος.

Η ανάλυση του δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης στα κτήρια είναι κάτι που έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, μέσω των μοντέλων μηχανικού, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.4.2. Η εκτενής εφαρμογή των μοντέλων μηχανικού στην πράξη και στο πλαίσιο πολλών μελετών, υπογραμμίζει το γεγονός ότι η ανάλυση αυτή έχει καταρχήν μια καθαρά τεχνική διάσταση, και το προτεινόμενο μοντέλο έχει χρησιμοποιήσει είτε αναλυτικά είτε απλουστευμένα δεδομένα, μαθηματικές εξισώσεις, και αρχές που σχετίζονται με αυτήν την τεχνική διάσταση της ανάλυσης. Η εφαρμογή του μοντέλου για όλες τις χώρες της ΕΕ και ταυτόχρονα ο στόχος της μοντελοποίησης, που δεν είναι μια ανάλυση μηχανικού, αλλά η ανάλυση των συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με τις αποφάσεις για την ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια, υπονοούν ότι σε διάφορα σημεία της μοντελοποίησης έχουν γίνει απλουστεύσεις όσον αφορά την καθαρά τεχνική διάσταση των αποφάσεων.

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η τεχνικό-οικονομική βάση της αριθμητικής κατασκευής του μοντέλου των κτηρίων, με ιδιαίτερη έμφαση στα δεδομένα και τους τεχνικούς υπολογισμούς που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση τους κελύφους των κτηρίων και στον ενεργειακό εξοπλισμό, και ειδικά στις αντλίες θερμότητας. Οι αντλίες θερμότητας είναι μια τεχνική επιλογή που έχει πολλά προτερήματα και έχει λάβει πολύ μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Ειδικά στο πλαίσιο της πορείας προς την κλιματική ουδετερότητα, που απαιτεί και η ηλεκτροπαραγωγή να είναι απαλλαγμένη από τις εκπομπές CO₂, ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης αποτελεί την πιο αποδοτική επιλογή απανθρακοποίησης για τον τομέα των κτηρίων. Επιπλέον, οι αντλίες θερμότητας είναι βολικές γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάλυψη όχι μόνο των αναγκών της θέρμανσης αλλά και των αναγκών της ψύξης ή ακόμα και για την προετοιμασία Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX). Η σύγχρονη πολιτική για την ενέργεια και το κλίμα τοποθετεί τις αντλίες θερμότητας στο κέντρο της προσοχής, λόγω και της συνεισφοράς τους στο μερίδιο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων (ΟΕΑΚ) χρησιμεύει ως η κύρια νομοθεσία που θέτει το πλαίσιο σχετικά με την κατασκευή και την ανακαίνιση των κτηρίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και στοχεύει στη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, επιτρέποντας έτσι στον κτηριακό τομέα να συμβάλλει στην επίτευξη των ενεργειακών στόχων για το 2030 και το 2050. Η Οδηγία εγκρίθηκε για πρώτη φορά το 2002, αναδιατυπώθηκε το 2010 και αναθεωρήθηκε το 2018. Η κατά το 2018 αναθεωρημένη Οδηγία έθετε μια σαφή κατεύθυνση για την πλήρη απανθρακοποίηση του κτηριακού

αποθέματος της ΕΕ έως το 2050, με αυξημένη έμφαση στην ανακαίνιση και τον εκσυγχρονισμό των κτηρίων. Αυτός ο στόχος, συνοδευόμενος από έναν οδικό χάρτη και προτεινόμενα μέτρα για την επίτευξη αυτού του οράματος όπως αυτά διατυπώνονται και στις εθνικές εκθέσεις μακροπρόθεσμης στρατηγικής του κτηριακού αποθέματος (*Long-Term Renovation Strategies, 2022*), αποτελούν το μοχλό για αυξημένες δραστηριότητες ανακαίνισης στην ΕΕ (Fabbri et al., 2020). Το Δεκέμβριο του 2021 η Επιτροπή πρότεινε εκ νέου την αναθεώρηση της Οδηγίας αναβαθμίζοντας το υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι υψηλότερες φιλοδοξίες και οι επιτακτικότερες ανάγκες όσον αφορά την κλιματική και κοινωνική δράση. Η αναθεωρημένη Οδηγία παρέχει, παράλληλα, στα κράτη μέλη την αναγκαία ευελιξία ώστε να μπορεί να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κτηριακού αποθέματος της κάθε χώρας (*Αναθεώρηση Της Οδηγίας Για Την Ενεργειακή Απόδοση Των Κτιρίων, 2022*). Τα κράτη μέλη έχουν μετατρέψει την ΟΑΕΚ σε εθνικούς νόμους και επικαιροποιούν διαρκώς τους νόμους και τις πολιτικές τους σχετικά με την ενεργειακή απόδοση και πιστοποίηση των κτηρίων.

Το Κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: γίνεται μια επισκόπηση των βασικών αρχών που καθιερώθηκαν διαχρονικά μέσω της ΟΕΑΚ (π.χ. πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης (ΠΕΑ), κτηριακό απόθεμα υψηλής ενεργειακής συμπεριφοράς και απαλλαγμένο από εκπομπές), και οι οποίες θέτουν το τεχνικό πλαίσιο της ανάλυσης που χρησιμοποιεί το προτεινόμενο μοντέλο της διατριβής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η «από-κάτω-προς-τα-πάνω» μεθοδολογία που εφαρμόζεται στη μοντελοποίηση, ώστε να ενταχθούν σε αυτήν οι τεχνικές προδιαγραφές της ΟΑΕΚ (όσον αφορά τα πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων). Έπειτα, παρατίθενται τα τεχνικό-οικονομικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων. Τέλος, το Κεφάλαιο εστιάζει στις επιλογές του ενεργειακού εξοπλισμού που συμπεριλαμβάνονται στη μοντελοποίηση και ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνικές παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά των αντλιών θερμότητας και των μεθόδων αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.

4.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

4.2.1. Έννοιες και ορισμοί που αντλούνται από τη νομοθεσία

Η έννοια της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων επίσημα χρησιμοποιήθηκε στην Οδηγία 2002/91/ΕΚ «για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων», η οποία από το 2002 θέτει απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση, την ψύξη, το φωτισμό και τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας στα κτήρια. Με την αναδιατύπωση της Οδηγίας 2002/91/ΕΚ από την Οδηγία 2010/31/ΕΕ, που αποτελεί την πρώτη κύρια νομοθετική πράξη σε επίπεδο ΕΕ για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων, δίνεται έμφαση κυρίως στην επίτευξη των πιο μακροπρόθεσμων στόχων της Οδηγίας, σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης που πρέπει να πληρούν τα νέα και ριζικά ανακαινιζόμενα υφιστάμενα κτήρια. Στους μακροπρόθεσμους στόχους της Οδηγίας του 2010 περιλαμβάνεται και η δέσμευση για τα νέα κτήρια τα οποία από το 2021 και μετά (από το 2019 για τα κτήρια που στεγάζουν δημόσιες υπηρεσίες) θα έπρεπε να αντιστοιχούν σε Κτήρια σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (ΚΣΜΕ - nZEB) (“ENERGYHUB FOR ALL,” 2022).

Βάσει του άρθρου 2(2) της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ «κτήριο με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας» είναι ένα κτήριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση του οποίου η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών, καλύπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, περιλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται

επιτόπου ή πλησίον του κτηρίου». Κάθε κράτος μέλος της ΕΕ όφειλε να καθορίσει τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης (ή αλλιώς τα τεχνικά χαρακτηριστικά) των ΚΣΜΚΕ, λαμβάνοντας υπόψη τις εθνικές, περιφερειακές ή τοπικές συνθήκες, περιλαμβανομένου αριθμητικού δείκτη της χρήσης πρωτογενούς ενέργειας σε κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο κατ' έτος ($\text{kWh/m}^2\text{a}$) ("ENERGYHUB FOR ALL," 2022).

Έως τον Απρίλιο του 2015, περίπου το 60% των κρατών μελών είχαν καταλήξει σε έναν λεπτομερή ορισμό σχετικά με τα ΚΣΜΚΕ (Concerted Action EPBD, 2016) και τα υπόλοιπα κράτη μέλη όρισαν τα ΚΣΜΚΕ τα επόμενα χρόνια. Οι προσεγγίσεις για το χειρισμό των ΑΠΕ στους υπολογισμούς ενεργειακής απόδοσης και στη νομοθεσία για τα ΚΣΜΚΕ διαφέρουν μεταξύ των κρατών μελών. Επιπλέον, το γεγονός ότι διάφοροι τύποι εξοπλισμού εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες (πχ. αντλίες θερμότητας, ηλιακοί συλλέκτες), υπονοεί ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις και ως προς αυτό όσον αφορά τον ορισμό των ΚΣΜΚΕ στα κράτη μέλη (Moore et al., 2019).

Τα κράτη μέλη έχουν υιοθετήσει ένα ευρύ φάσμα λεπτομερών ορισμών για τα ΚΣΜΚΕ. Ενώ ορισμένες χώρες θέτουν μόνο μία απαίτηση, η οποία αφορά συνήθως την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας, τις εκπομπές CO_2 ή την τελική κατανάλωση ενέργειας, άλλες χώρες χρησιμοποιούν πολλές πρόσθετες απαιτήσεις. Οι πρόσθετες απαιτήσεις μπορεί να περιλαμβάνουν τις μέσες τιμές θερμικής διαπερατότητας του κελύφους, τις μέγιστες απώλειες μέσω μεταφοράς θερμότητας από το κέλυφος, την ελάχιστη ενεργειακή απόδοση ολόκληρου του κτηρίου ή συγκεκριμένου ενεργειακού εξοπλισμού κ.λπ. (Concerted Action EPBD, 2016).

Στην Οδηγία του 2010 αναφέρεται ρητά ότι «τα κράτη μέλη πρέπει να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα για τη θέσπιση συστήματος πιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων». Τα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τη δημιουργία αγοράς για ενεργειακά αποδοτικά κτήρια (Moore et al., 2019). Τα ΠΕΑ επιτρέπουν την εκτίμηση του ενεργειακού κόστους ενός κτηρίου, όπως αυτό προκύπτει από τη σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας του υπό μελέτη κτηρίου με αυτήν ενός κτηρίου αναφοράς. Τα συστήματα (έκδοση, πιστοποίησης κ.ά.) ΠΕΑ ποικίλλουν ανά τα κράτη μέλη, με βάση τις ειδικές ανάγκες, τη δομή του κτηριακού αποθέματος και τις διάφορες κλιματικές συνθήκες (Atanasiu & Constantinescu, 2011). Τα ΠΕΑ πρέπει να περιλαμβάνουν πληροφορίες για την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου (πχ. κατηγορία ενεργειακής απόδοσης, ετήσια συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ κ.α.) σε σύγκριση με τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης (του κτηρίου αναφοράς), προκειμένου οι ιδιοκτήτες ή οι ενοικιαστές του κτηρίου ή της κτηριακής μονάδας να μπορούν να συγκρίνουν και να αξιολογούν την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου που τους ενδιαφέρει (Fabbri et al., 2020).

Το άρθρο 3 της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ παρέχει καθοδήγηση στα κράτη μέλη σχετικά με τη μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων (ώστε αυτή να αναγράφεται και στο ΠΕΑ) και προτείνει δύο εναλλακτικές μεθόδους: με βάση την υπολογιζόμενη (δηλ. λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες πρωτογενούς ενέργειας του κτηρίου χωρίς να συνυπολογίζονται όλες οι απώλειες που προέρχονται από την παραγωγή ενέργειας) ή την πραγματική κατανάλωση ενέργειας (δηλ. περιλαμβάνοντας τη συμπεριφορά των χρηστών και την πιθανή δυσλειτουργία ορισμένου εξοπλισμού (Arcipowska et al., 2014)) που απαιτείται για να καλυφθούν οι διάφορες ανάγκες που συνδέονται με τη συνήθη χρήση του κτηρίου. Η επιλογή της μεθοδολογίας προσδιορισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων ποικίλλει μεταξύ των κρατών μελών. Μεταξύ των 27 χωρών της ΕΕ, οι 13 έχουν υιοθετήσει τη

μεθοδολογία που βασίζεται στην υπολογιζόμενη κατανάλωση ενέργειας, η οποία εξαρτάται κυρίως από τον τύπο ή την ηλικία του κτηρίου. Σε άλλες χώρες, χρησιμοποιούνται τόσο η πραγματική όσο και η υπολογιζόμενη κατανάλωση ενέργειας (Moore et al., 2019).

Η ΟΑΕΚ αναθεωρήθηκε το 2018 (2018/844/ΕΕ) (European Commission, 2018b), ως μέρος του πακέτου πολιτικής «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους», για να συμβαδίζει με τους κλιματικούς και ενεργειακούς στόχους για το 2030 που ορίζονταν στο πλαίσιο του πακέτου πολιτικής. Η αναθεωρημένη Οδηγία έθετε μια σαφή κατεύθυνση για την πλήρη απανθρακοποίηση του κτηριακού αποθέματος της ΕΕ έως το 2050, με αυξημένη έμφαση στην ανακαίνιση και τον εκσυγχρονισμό των κτηρίων.

Πίνακας 3: Ανώτατα όρια για τη συνολική ετήσια χρήση πρωτογενούς ενέργειας ενός νέου κτηρίου μηδενικών εκπομπών σύμφωνα με την Οδηγία

| Κλιματική ζώνη ΕΕ* | Κτήριο που προορίζεται για κατοικίες | Κτήριο που προορίζεται για γραφεία | Κτήριο που προορίζεται για άλλες χρήσεις |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|
| Μεσογειακή | <60kWh/(m ² a) | <70kWh/(m ² a) | <συνολική χρήση πρωτογενούς ενέργειας ΚΣΜΚΕ όπως ορίζεται σε εθνικό επίπεδο |
| Ωκεάνια | <60kWh/(m ² a) | <85kWh/(m ² a) | <συνολική χρήση πρωτογενούς ενέργειας ΚΣΜΚΕ όπως ορίζεται σε εθνικό επίπεδο |
| Ηπειρωτική | <65kWh/(m ² a) | <85kWh/(m ² a) | <συνολική χρήση πρωτογενούς ενέργειας ΚΣΜΚΕ όπως ορίζεται σε εθνικό επίπεδο |
| Βόρεια | <75kWh/(m ² a) | <90kWh/(m ² a) | <συνολική χρήση πρωτογενούς ενέργειας ΚΣΜΚΕ όπως ορίζεται σε εθνικό επίπεδο |

* Μεσογειακή: Κύπρος, Κροατία, Ιταλία, Ελλάδα, Μάλτα, Ισπανία, Πορτογαλία, Ωκεάνια: Βέλγιο, Δανία, Ιρλανδία, Γερμανία, Γαλλία, Λουξεμβούργο, Ολλανδία, Ηπειρωτική: Αυστρία, Βουλγαρία, Τσεχία, Ουγγαρία, Πολωνία, Ρουμανία, Σλοβενία, Σλοβακία, Βόρεια: Εσθονία, Φιλανδία, Λετονία, Λιθουανία, Σουηδία.

Πηγή:(European Commission, 2021a)

Το Δεκέμβριο του 2021 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε εκ νέου την αναθεώρηση της Οδηγίας. Σύμφωνα με τη νέα πρόταση τα νέα κτήρια θα πρέπει από το 2030 (από το 2027 για τα κτήρια του δημοσίου τομέα), να είναι κτήρια μηδενικών εκπομπών, δηλαδή «κτήρια με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση σύμφωνα με την αρχή της προτεραιότητας στην ενεργειακή απόδοση, στα οποία η πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που εξακολουθεί να απαιτείται, να καλύπτεται πλήρως από ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές σε επίπεδο κτηρίου ή συνοικίας ή κοινότητας» (European Commission, 2021c). Η συνολική ετήσια χρήση πρωτογενούς ενέργειας ενός νέου κτηρίου μηδενικών εκπομπών θα πρέπει να συμμορφώνεται με τα ανώτατα όρια του Πίνακα 3, όπως αναγράφεται στο Παράρτημα III της προτεινόμενης Οδηγίας. Όσον αφορά τα ΠΕΑ, η προτεινόμενη αναθεώρηση σκοπεύει να διασφαλίσει τη συγκρισιμότητα αυτών σε ολόκληρη την ΕΕ, και έτσι προτείνει έως το 2025 να βασίζονται σε εναρμονισμένη κλίμακα κατηγοριών ενεργειακής απόδοσης. Συγκεκριμένα, οι κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης θα αναπροσαρμόζονται με σκοπό την επίτευξη του κοινού οράματος για κτηριακό απόθεμα μηδενικών εκπομπών έως το 2050, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις εθνικές διαφορές του κτηριακού αποθέματος: η υψηλότερη

κατηγορία A θα αντιστοιχεί σε κτήριο μηδενικών εκπομπών, ενώ η χαμηλότερη κατηγορία G θα περιλαμβάνει το 15 % των κτηρίων του εθνικού κτηριακού αποθέματος με τις χειρότερες επιδόσεις. Όσον αφορά τις ανακαινίσεις, προτείνονται νέα πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδο ΕΕ, τα οποία απαιτούν την αναβάθμιση των κτηρίων ενεργειακής κατάταξης G σε τουλάχιστον κατάταξη F έως το 2027 για τα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών και έως το 2030 για τα κτήρια κατοικίας. Τέλος, δεν θα πρέπει να δίνονται οικονομικά κίνητρα για την εγκατάσταση λεβήτων με ορυκτά καύσιμα από το 2027 και επίσης τα κράτη μέλη έχουν τη νομική δυνατότητα να απαγορεύσουν εξολοκλήρου τη χρήση ορυκτών καυσίμων στα κτήρια (*Αναθεώρηση Της Οδηγίας Για Την Ενεργειακή Απόδοση Των Κτιρίων*, 2022).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ΟΕΑΚ επιβάλλει τα νέα και ριζικά ανακαινιζόμενα κτήρια να πληρούν ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Αυτές είναι διαφορετικά ορισμένες σε κάθε κράτος μέλος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του εθνικού κτηριακού αποθέματος, τις κλιματικές και άλλες συνθήκες. Ομοίως τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ΚΣΜΚΕ είναι διαφορετικά ορισμένα σε κάθε κράτος μέλος. Η αναθεωρημένη Οδηγία 2018/844/ΕΕ επιβάλλει η ενεργειακή απόδοση του κτηρίου να εκφράζεται με αριθμητικό δείκτη χρήσης πρωτογενούς ενέργειας σε kWh/(m².a) που καταναλώνεται για θέρμανση, ψύξη, προετοιμασία ΖΝΧ, εξαερισμό, ενσωματωμένη εγκατάσταση φωτισμού και άλλα τεχνικά συστήματα του κτηρίου. Δεδομένου ότι η μοντελοποίηση λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές της ΟΕΑΚ είναι προφανές ότι απαιτείται να εφαρμοστεί μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης (και της ενεργειακής κατάταξης) των κτηρίων των κρατών μελών που θα επιτρέπει τη διαφοροποίηση των υπολογισμών ανά κράτος μέλος. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται στο μοντέλο η εποχική μέθοδος σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 13790: 2008 (στη βάση ενός μονοζωνικού μοντέλου) για τον υπολογισμό της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και προετοιμασία ΖΝΧ.

Η Οδηγία 2010/31/ΕΕ άφηνε ευελιξία στα κράτη μέλη όσον αφορά τη μεθοδολογία που αυτά θα χρησιμοποιούσαν για να υπολογίζουν την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων τους, αρκεί η συγκεκριμένη μεθοδολογία να πληρούσε ορισμένες προδιαγραφές, όπως ορίζονταν στο Παράρτημα Ι αυτής. Η μεθοδολογία EN 13790:2008 ήταν η επίσημη μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης και πιστοποίησης των κτηρίων για διάφορα κράτη μέλη, (πχ στην Ελλάδα, στη Γαλλία, στην Ιταλία, στην Κροατία). Η αναθεωρημένη Οδηγία 2018/844/ΕΕ επέβαλε στα κράτη μέλη να περιγράψουν τις οικείες εθνικές μεθόδους υπολογισμού σύμφωνα με τα εθνικά παραρτήματα της οικογένειας προτύπων, ISO 52000, δηλαδή τα ISO 52000-1, 52003-1, 52010-1, 52016-1, και 52018-1. Ειδικά το πρότυπο ISO 52016-1, αποτελεί το διάδοχο του EN 13790: 2008 (Hogeling et al., 2021).

Τελικά, στο προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζεται η μεθοδολογία EN 13790:2008 για τον υπολογισμό των δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη θέρμανση και προετοιμασία ΖΝΧ, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο (Loga et al., 2013) για κάθε κατηγορία κτηρίου, επειδή:

- όπως αναφέρθηκε και αναλυτικά στην Ενότητα 3.2, η EN 13790: 2008 έχει εφαρμοστεί στο ερευνητικό πρόγραμμα TABULA, της Intelligent Energy Europe IEE, για συνολικά 21 χώρες της Ευρώπης, και άρα για αυτήν υπάρχουν δεδομένα για 21 χώρες, και
- είναι πιο απλουστευμένη από τις νεότερες εκδόσεις της (δηλαδή την ISO 52016-1).

Και τα δύο αυτά στοιχεία την καθιστούν κατάλληλη για τους σκοπούς της εφαρμογής της στο πλαίσιο της μοντελοποίησης. Οι τιμές των παραμέτρων για τις 7 χώρες για τις οποίες το πρόγραμμα TABULA δεν

είχε εφαρμοστεί, προκύπτουν από το συνδυασμό υποθέσεων (βάσει των γνωστών τιμών από τις δεδομένες χώρες) και της βιβλιογραφίας (BPIE, 2011).

Για τον υπολογισμό της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη, η οποία συμπεριλαμβάνεται στους δείκτες ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που προτείνεται από την αναφορά (Kemna & Acedo, 2014), η οποία είναι σύμφωνη με το πρότυπο EN 13790, στη λειτουργία της ψύξης.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης (και ενεργειακής κατάταξης) των κτηρίων στο προτεινόμενο μοντέλο.

4.2.2. Μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης (και της ενεργειακής κατάταξης) των κτηρίων

Η μεθοδολογία όπως παρουσιάζεται παρακάτω, εφαρμόζεται πριν την επίλυση του μοντέλου για μια χρονιά του παρελθόντος (την πιο πρόσφατη για την οποία υπάρχουν πλήρη στατιστικά δεδομένα), ώστε να έχει προσδιοριστεί (πριν την επίλυση) η ενεργειακή απόδοση του κτηριακού αποθέματος της κάθε χώρας. Σκοπός δηλαδή της εφαρμογής της μεθοδολογίας είναι να έχει υπολογιστεί ο δείκτης της (πρωτογενούς) κατανάλωσης ενέργειας σε kWh/(m²a) και επομένως η κατηγορία ενεργειακής απόδοσης κάθε κατηγορίας κτηρίου του μοντέλου. Η μεθοδολογία αυτή, εφαρμόζεται επίσης για να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμική ενέργεια που απομένει μετά τη συνεισφορά του κελύφους του κτηρίου, δηλαδή, για να υπολογιστεί η εξοικονόμηση σε ωφέλιμη θερμική ενέργεια χάρη στην εφαρμογή μέτρου ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Τέλος, η ίδια μεθοδολογία εφαρμόζεται για τις νέες κατασκευές, εξασφαλίζοντας ότι αυτές συμμορφώνονται με τους οικοδομικούς κανονισμούς και τα πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης.

Υπολογισμός ενεργειακών αναγκών για τη θέρμανση

Πίνακας 4: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση

| Ονοματολογία και σύμβολα | |
|------------------------------------|--|
| Δείκτες και σύνολα | |
| i | Δομικά στοιχεία (τοίχοι, παράθυρα κλπ.) |
| j | Προσανατολισμοί του κτηρίου |
| k | Συστήματα θέρμανσης |
| Παράμετροι | |
| $Q_{H,nd}$ [kWh/m ² a] | Ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης |
| Q_{ht} [kWh/m ² a] | Συνολική μεταφορά θερμότητας μέσω του κτηρίου |
| $Q_{ht,tr}$ [kWh/m ² a] | Συνολική μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής από το κέλυφος κατά την περίοδο θέρμανσης |
| $Q_{ht,ve}$ [kWh/m ² a] | Συνολική μεταφορά θερμότητας δια κυκλοφορίας από το κέλυφος κατά την περίοδο θέρμανσης |
| $Q_{H,gn}$ [kWh/m ² a] | Συνολικά θερμικά κέρδη από το κτήριο |
| Q_{int} [kWh/m ² a] | Εσωτερικά θερμικά κέρδη κατά την περίοδο θέρμανσης |
| Q_{sol} [kWh/m ² a] | Ηλιακά θερμικά κέρδη την περίοδο θέρμανσης |
| H_{tr} [W/K] | Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

| | |
|--|---|
| H_{ve} [W/K] | Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια κυκλοφορίας |
| F_{nu} | Αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη την ανομοιόμορφη θέρμανση λόγω των συνεχών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της μέρας |
| θ_{int} [°C] | Εσωτερική θερμοκρασία στην περίοδο θέρμανσης |
| $\theta_{e,hs}$ [°C] | Μέση εξωτερική θερμοκρασία την περίοδο θέρμανσης |
| d_{hs} [ημέρες/έτος] | Διάρκεια της περιόδου θέρμανσης |
| b_{tr} | Αδιάστατος συντελεστής προσαρμογής των απωλειών θερμότητας προς το έδαφος |
| $A_{env,i}$ [m ²] | Η επιφάνεια του δομικού στοιχείου i |
| $U_{eff,i}$ [W/m ² K] | Συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του δομικού στοιχείου i |
| ΔU_{tbr} [W/m ² K] | Προσαύξηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους, προκειμένου να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες θερμότητας μέσω των θερμογεφύρων |
| $c_{p,air} = 0.34$ Wh/m ³ K | Ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα |
| $n_{air,use}$ [1/h] | Μέσος ρυθμός εναλλαγής του αέρα κατά την περίοδο θέρμανσης (θεμιτός αερισμός) |
| $n_{air,infiltr}$ [1/h] | Μέσος ρυθμός διείσδυσης αέρα (αθέμιτος αερισμός) |
| $A_{C,ref}$ [m ²] | Επιφάνεια αναφοράς του κτηρίου |
| φ_{int} [W/m ²] | Μέση θερμική ισχύς από διάφορες πηγές εντός του κελύφους |
| F_{sh} | Αδιάστατος συντελεστής μείωσης των ηλιακών θερμικών κερδών λόγω των εξωτερικών σκιάστρων |
| F_F | Πλαίσιο του παραθύρου ως ποσοστό του παραθύρου |
| F_W | Αδιάστατος συντελεστής μείωσης των ηλιακών θερμικών κερδών επειδή δεν πέφτει όλη η ακτινοβολία κατακόρυφα στο παράθυρο |
| $g_{gl,n}$ | Συνολικός συντελεστής μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας κατακόρυφα στο παράθυρο |
| $A_{window,j}$ [m ²] | Επιφάνεια που καλύπτουν τα παράθυρα ανά προσανατολισμό j |
| $I_{sol,j}$ [kWh/m ² a] | Μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επιφάνειες με προσανατολισμό j |
| $\eta_{h,gn}$ | Αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης των θερμικών κερδών για θέρμανση |
| c_m [Wh/m ² K] | Εσωτερική θερμική ικανότητα ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας |
| $q_{del,h,k}$ [kWh/m ² a] | Τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση από τη λειτουργία συστήματος k |
| $\alpha_{nd,h,k}$ | Το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρει κάθε σύστημα k για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης |
| $q_{g,h,out}$ [kWh/m ² a] | Η ενέργεια στην έξοδο του συστήματος θέρμανσης |
| $e_{g,h,k}$ | Ο αντίστροφος λόγος του βαθμού απόδοσης του συστήματος θέρμανσης k |
| $q_{w,h}$ [kWh/m ² a] | Οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης ΖΝΧ που ανακτώνται από τους χώρους εντός του κελύφους |
| $q_{g,w,h}$ [kWh/m ² a] | Οι απώλειες του εξοπλισμού ΖΝΧ που ανακτώνται από τους χώρους εντός του κελύφους |

| | |
|--|--|
| $q_{s,w,h}$ [kWh/m ² a] | Οι απώλειες του συστήματος αποθήκευσής ΖΝΧ που ανακτώνται από τους χώρους εντός του κελύφους |
| $q_{d,w,h}$ [kWh/m ² a] | Οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς ΖΝΧ που ανακτώνται από τους χώρους εντός του κελύφους |
| $q_{ve,h,rec}$ [kWh/m ² a] | Συνεισφορά στη θέρμανση από τη μονάδα αερισμού |
| $\eta_{ve,rec}$ [kWh/m ² a] | Βαθμός απόδοσης του συστήματος αερισμού |
| $q_{d,h}$ [kWh/m ² a] | Απώλειες θερμότητας από το σύστημα διανομής της θέρμανσης |
| $q_{s,h}$ [kWh/m ² a] | Απώλειες θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης της θέρμανσης (εφόσον υπάρχει) |

Οι ετήσιες ανάγκες θέρμανσης του κτηρίου, $Q_{H,nd}$, υπολογίζονται από την εξίσωση (4-1).

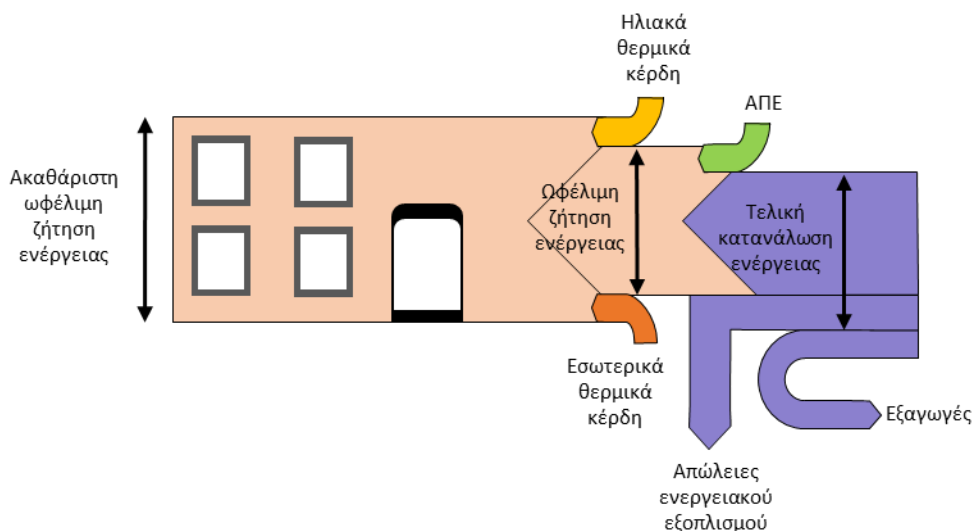
$$Q_{H,nd} = Q_{ht} - \eta_{h,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (4-1)$$

Όπου, η ετήσια συνολική μεταφορά θερμότητας από το κτήριο, Q_{ht} , υπολογίζεται από την εξίσωση (4-2).

$$Q_{ht} = Q_{ht,tr} + Q_{ht,ve} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot (H_{tr} + H_{ve}) \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,hs}}) \cdot d_{hs} \quad (4-2)$$

Η τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας (θ_{int}) αντιστοιχεί καταρχήν στα πρότυπα θερμικής άνεσης (ASHRAE Standard 55). Για τους σκοπούς της μοντελοποίησης όμως, η τιμή αυτή μπορεί να διαφέρει από αυτήν των προτύπων για ορισμένες κατηγορίες κτηρίων (πχ. για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, ή για κτήρια που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές), προσομοιώνοντας έτσι διαφορετικές προτιμήσεις ή συμπεριφορές όσον αφορά τη χρήση της ενέργειας.

Εικόνα 4: Διάγραμμα ροής θερμικής ενέργειας σε ένα κτήριο

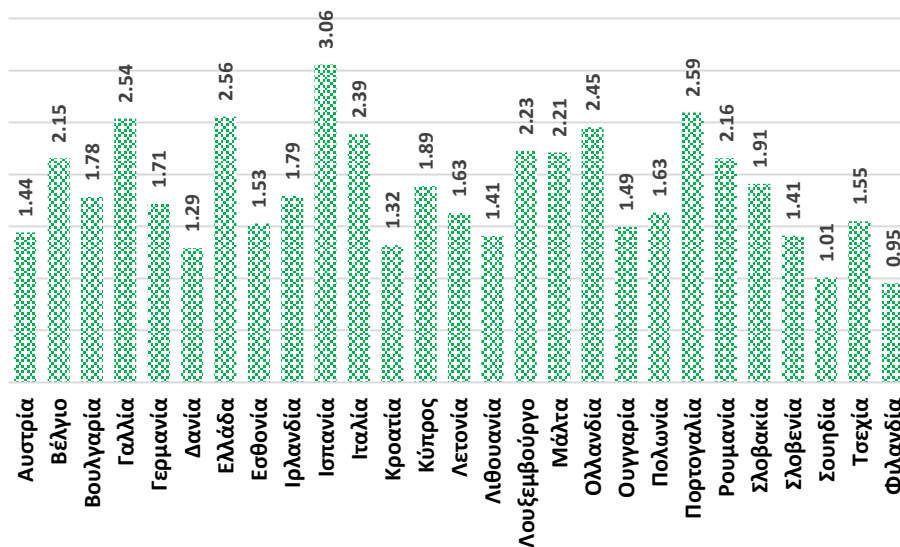


Πηγή: (UNIDO, 2015)

Επίσης, εισάγοντας στη μοντελοποίηση ρητά την έννοια της ρύθμισης του θερμοστάτη, είναι δυνατόν να μελετηθεί με το μοντέλο και η επίπτωση στην ενεργειακή κατανάλωση που έχουν στρατηγικές που

στοχεύουν στην περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των καταναλωτών. Στη βιβλιογραφία, τα τελευταία χρόνια υπάρχουν πολλές μελέτες (Innorpaths, 2020; Rodrigues et al., 2022), που εξετάζουν την επίπτωση που έχει στην ενεργειακή αποδοτικότητα η αλλαγή της θερμοστατικής ρύθμισης στα κτήρια, μιας και τέτοιου είδους πρακτικές μπορούν να συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, χωρίς οικονομικό κόστος.

Εικόνα 5: Μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους [W/m^2K] του κτηριακού αποθέματος για την ΕΕ



Πηγή: (BPIE, 2011; EU BSO, 2022; Loga et al., 2013)

Οι συνολικές ετήσιες απώλειες θερμότητας διά συναγωγής από το κέλυφος, $Q_{ht,tr}$, υπολογίζονται από την εξίσωση (4-3).

$$Q_{ht,tr} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot H_{tr} \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,hs}}) \cdot d_{hs} \quad (4-3)$$

Όπου, ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά συναγωγής, H_{tr} , υπολογίζεται από την εξίσωση (4-4).

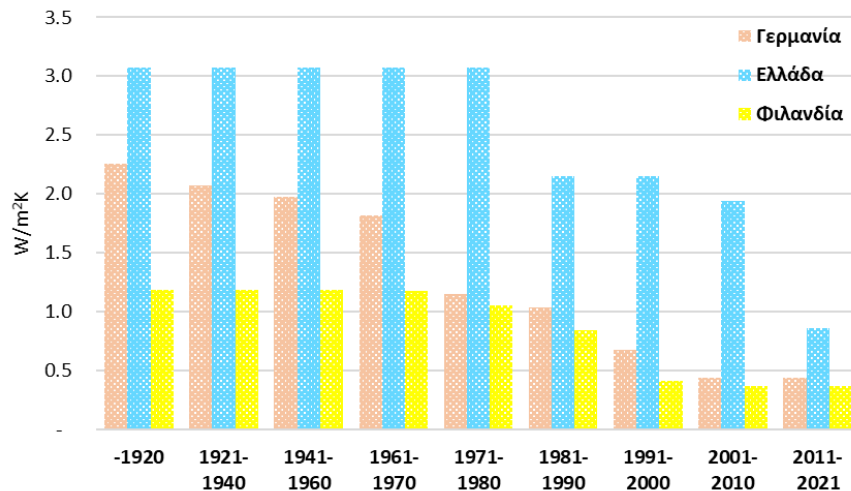
$$H_{tr} = \sum_i b_{tr,i} A_{env,i} U_{eff,i} + \left(\sum_i A_{env,i} \right) \cdot \Delta U_{tbr} \quad (4-4)$$

Για τους σκοπούς της μοντελοποίησης, δε διαχωρίζεται το κτήριο σε δομικά στοιχεία και κάθε κτήριο θεωρείται μια ενιαία οντότητα, δηλαδή είναι $\sum_i A_{env,i} = 1m^2$. Αντίστοιχα, δεν χρησιμοποιείται στην εξίσωση (4-4) ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας κάθε δομικού στοιχείου του κελύφους, αλλά ο μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους του κτηρίου.

Η Εικόνα 5 παρουσιάζει το μέσο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους του κτηριακού αποθέματος κάθε χώρας, όπως προκύπτει από τα δεδομένα που αντλούνται από τις διάφορες πηγές που

χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό (BPIE, 2011; EU BSO, 2022; Loga et al., 2013). Στην εξίσωση (4-4) χρησιμοποιείται φυσικά ο μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους του κτηρίου κάθε κατηγορίας, ο οποίος ουσιαστικά διαφοροποιείται με βάση την ηλικία του κτηρίου. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ο μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους των κτηρίων κατοικίας διαφόρων ετών κατασκευής σε τρεις χώρες, τη Γερμανία, την Ελλάδα, και τη Φιλανδία. Όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα, η θερμική συμπεριφορά του κτηριακού αποθέματος της Φιλανδίας είναι με διαφορά πολύ καλύτερη από αυτή των υπολοίπων χωρών, το οποίο προφανώς σχετίζεται και με το ψυχρότερο κλίμα της χώρας. Το μοτίβο αυτό διαπιστώνεται και αλλού (πχ. Δανία, Σουηδία). Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι, σε αντίθεση με την Ελλάδα, στις άλλες δύο χώρες η θερμική συμπεριφορά του κελύφους των κτηρίων μεταβάλλεται σχεδόν μεταξύ όλων των ετών κατασκευής, ενώ στην Ελλάδα ο μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας είναι ο ίδιος μέχρι πριν το 1980 (όπου και υπήρχε η εφαρμογή του πρώτου Οικοδομικού Κανονισμού), και ομοίως μεταξύ 1981-2000, 2001-2010 και από το 2010 έως σήμερα που ισχύει η ΟΑΕΚ.

Εικόνα 6: Μέσος συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του κελύφους των κτηρίων κατοικίας ανά έτος κατασκευής στη Γερμανία, την Ελλάδα, και τη Φιλανδία



Πηγή: (BPIE, 2011; EU BSO, 2022; Loga et al., 2013)

Οι συνολικές ετήσιες απώλειες θερμότητας διά κυκλοφορίας από το κέλυφος, $Q_{ht,ve}$, υπολογίζονται από την εξίσωση (4-5).

$$Q_{ht,ve} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot H_{ve} \cdot F_{nu} \cdot (\theta_{int} - \overline{\theta_{e,hs}}) \cdot d_{hs} \quad (4-5)$$

Όπου, ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά κυκλοφορίας, H_{ve} , υπολογίζεται από την εξίσωση (4-6).

$$H_{ve} = c_{p,air} \cdot (n_{air,use} + n_{air,infiltr}) \cdot A_{C,ref} \cdot h_{room,ve,ref} \quad (4-6)$$

Τα συνολικά ετήσια θερμικά κέρδη κατά την περίοδο θέρμανσης, $Q_{H,gn}$, υπολογίζονται από την εξίσωση (4-7).

$$Q_{H,gn} = Q_{sol} + Q_{int} \quad (4-7)$$

Όπου, τα εσωτερικά ετήσια θερμικά κέρδη κατά την περίοδο θέρμανσης, Q_{int} , υπολογίζονται από την εξίσωση (4-8).

$$Q_{int} = 0.024 \frac{kh}{d} \cdot \varphi_{int} \cdot d_{hs} \cdot A_{C,ref} \quad (4-8)$$

Και τα ηλιακά θερμικά κέρδη την περίοδο θέρμανσης, Q_{sol} , υπολογίζονται από την εξίσωση (4-9).

$$Q_{sol} = F_{sh} \cdot (1 - F_F) \cdot F_W \cdot g_{gl,n} \cdot \sum_j A_{window,j} \cdot I_{sol,j} \quad (4-9)$$

Για τους υπολογισμούς στο πλαίσιο της μοντελοποίησης θεωρείται ότι η παράμετρος $A_{window,j}$ αντιπροσωπεύει το ποσοστό των παραθύρων ως προς το κέλυφος συνολικά και δε γίνεται διαχωρισμός προσανατολισμών.

Ο αδιάστατος συντελεστής αξιοποίησης των θερμικών κερδών για θέρμανση, $\eta_{h,gn}$, δίνεται από την εξίσωση (4-10).

$$\eta_{h,gn} = \frac{1 - \gamma^{\alpha_H}}{1 - \gamma^{\alpha_H+1}} \quad (4-10)$$

όπου: $\gamma_{h,gn} = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{ht}}$ είναι το ποσοστό θερμικής ισορροπίας

$\alpha_H = \alpha_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}}$, είναι παράμετρος για την οποία,

$\alpha_{H,0} = 0.8$ είναι σταθερή παράμετρος (EN ISO 13790), $\tau_{H,0} = 30h$ είναι σταθερή παράμετρος (EN ISO 13790), και $\tau = \frac{c_m \cdot A_{C,ref}}{H_{tr} + H_{ve}}$ είναι χρονική σταθερά του κτηρίου, σε h , που προσδιορίζει πόσο γρήγορα πραγματοποιούνται οι απώλειες θερμότητας στο κτήριο και για την οποία c_m [Wh/m²K] είναι η εσωτερική θερμική ικανότητα ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας,

Η τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση από τη λειτουργία κάθε συστήματος k , $q_{del,h,i}$, υπολογίζεται από την εξίσωση (4-11). Για λόγους απλούστευσης θεωρείται ότι κάθε κτήριο χρησιμοποιεί ένα σύστημα για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ($k = 1$).

$$q_{del,h,k} = \alpha_{nd,h,k} \cdot q_{g,h,out} \cdot e_{g,h,k} \quad (4-11)$$

Η ενέργεια που δίνει το σύστημα θέρμανσης στην έξοδό του, $q_{g,h,out}$, είναι το άθροισμα των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και των απωλειών του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης του συστήματος θέρμανσης (εφόσον υπάρχει), και δίνεται από την εξίσωση (4-12).

$$q_{g,h,out} = q_{nd,h} - \eta_{h,gn} \cdot (q_{w,h} + q_{ve,h,rec}) + q_{d,h} + q_{s,h} \quad (4-12)$$

Όπου, οι απώλειες θερμότητας του συστήματος προετοιμασίας ZNX, που ανακτώνται από το κέλυφος προς όφελος της θέρμανσης, $q_{w,h}$, υπολογίζονται από την εξίσωση (4-13).

$$q_{w,h} = q_{g,w,h} + q_{s,w,h} + q_{d,w,h} \quad (4-13)$$

Και η συνεισφορά στη θέρμανση από τη μονάδα αερισμού, $q_{ve,h,rec}$, υπολογίζεται από την εξίσωση (4-14).

$$q_{ve,h,rec} = \eta_{ve,rec} \cdot q_{ht,ve} \quad (4-14)$$

Υπολογισμός ενεργειακών αναγκών για την προετοιμασία ZNX

Πίνακας 5: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών για προετοιμασία ZNX

| Ονοματολογία και σύμβολα | |
|--------------------------------------|--|
| Δείκτες και σύνολα | |
| l | Συστήματα για την προετοιμασία ZNX |
| Παράμετροι | |
| $q_{del,w,l}$ [kWh/m ² a] | Τελική κατανάλωση ενέργειας για την προετοιμασία ZNX από τη λειτουργία συστήματος l |
| $\alpha_{nd,w,l}$ | Το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρει κάθε σύστημα l για την κάλυψη των αναγκών για ZNX |
| $q_{g,w,out}$ [kWh/m ² a] | Τελική κατανάλωση ενέργειας για την προετοιμασία ZNX |
| $e_{g,w,l}$ | Ο αντίστροφος λόγος του βαθμού απόδοσης του συστήματος l για προετοιμασία ZNX |
| $q_{nd,w}$ [kWh/m ² a] | Ενεργειακές ανάγκες για προετοιμασία ZNX |
| $q_{d,w}$ [kWh/m ² a] | Οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα διανομής ZNX |
| $q_{s,w}$ [kWh/m ² a] | Οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης του ZNX (εφόσον υπάρχει) |

Η τελική κατανάλωση ενέργειας για προετοιμασία ZNX από τη λειτουργία συστήματος l , $q_{del,w,l}$, υπολογίζεται από την εξίσωση (4-15). Για λόγους απλούστευσης θεωρείται ότι κάθε κτήριο χρησιμοποιεί ένα σύστημα για την κάλυψη των αναγκών για προετοιμασία ZNX ($l = 1$).

$$q_{del,w,l} = \alpha_{nd,w,l} \cdot q_{g,w,out} \cdot e_{g,w,l} \quad (4-15)$$

Η ενέργεια που δίνει το σύστημα για την προετοιμασία ZNX στην έξοδό του, $q_{g,w,out}$, είναι το άθροισμα των ενεργειακών αναγκών για προετοιμασία ZNX και των απωλειών του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης ZNX (εφόσον υπάρχει) και υπολογίζεται από την εξίσωση (4-16).

$$q_{g,w,out} = q_{nd,w} + q_{d,w} + q_{s,w} \quad (4-16)$$

Από τη βάση δεδομένων του TABULA λαμβάνονται οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες για προετοιμασία ΖΝΧ, $q_{nd,w}$, του μέσου κτηρίου κάθε χώρας. Το μέγεθος αυτό διαφοροποιείται ανά κατηγορία κτηρίου, βάσει της βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη ότι οι ενεργειακές ανάγκες για την προετοιμασία ΖΝΧ εξαρτώνται στα μεν κτήρια κατοικίας από την οικονομική κατάσταση και το μέγεθος του κάθε νοικοκυριού, και για τα δε κτήρια του τομέα των υπηρεσιών από τις συγκεκριμένες ανάγκες του κάθε τομέα (πχ. στα ξενοδοχεία υπάρχουν μεγαλύτερες ανάγκες για ΖΝΧ από ό, τι στα κτήρια που στεγάζουν εκπαιδευτικά ιδρύματα).

Υπολογισμός ενεργειακών αναγκών για την ψύξη

Πίνακας 6: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών για ψύξη

| Ονοματολογία και σύμβολα | |
|-------------------------------------|--|
| Παράμετροι | |
| $q_{nd,ac}$ [kWh/m ² a] | Ενεργειακές ανάγκες ψύξης |
| $CDhours$ [Kh/a] | Βαθμώρες ψύξης |
| $Occup_Rate$ [%] | Ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του κτηρίου που ψύχεται |
| $e_{g,ac}$ | Ο αντίστροφος λόγος του βαθμού απόδοσης του συστήματος ψύξης |
| $q_{del,ac}$ [kWh/m ² a] | Τελική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη |

Οι ενεργειακές ανάγκες για ψύξη, $q_{nd,ac}$, υπολογίζονται από την εξίσωση (4-17).

$$q_{nd,ac} = 0.001 \cdot CDhours \cdot Occup_Rate \cdot (U_{eff} + H_{ve}) \quad (4-17)$$

Και η τελική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη, $q_{del,ac}$, υπολογίζεται από την εξίσωση (4-18).

$$q_{del,ac} = q_{nd,ac} \cdot e_{g,ac} \quad (4-18)$$

Υπολογισμός πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας και προσδιορισμός κατηγορίας ενεργειακής απόδοσης κτηρίων

Η συνολική ετήσια πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας, q_{pr} [kWh/m²a], υπολογίζεται από την τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, προετοιμασία ΖΝΧ, και ψύξη (στα κτήρια κατοικίας), και τους συντελεστές μετατροπής (f_p) της τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε πρωτογενή, σύμφωνα με την εξίσωση (4-19).

Οι συντελεστές μετατροπής της τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε πρωτογενή προέρχονται είτε από το Παράρτημα Ε του προτύπου EN 15603 ή χρησιμοποιούνται τιμές που η κάθε χώρα έχει ορίσει σε εθνικό επίπεδο.

$$q_{pr} = \sum_k q_{del,h,k} \cdot f_{p,k} + \sum_k q_{del,h,l} \cdot f_{p,l} + q_{del,ac} \cdot f_{p,ac} \quad (4-19)$$

Από την εξίσωση (4-19), προκύπτει και η κατηγορία ενεργειακής απόδοσης του κάθε κτηρίου, λαμβάνοντας υπόψη τα ελάχιστα όρια ενεργειακής κατανάλωσης που αντιστοιχούν σε κάθε κατηγορία, και τα οποία μέχρι την ΟΑΕΚ του 2021 (European Commission, 2021c) ορίζονταν σε εθνικό επίπεδο.

Ως προς αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι, δεδομένης της ευελιξίας που έδινε η ΟΑΕΚ, δεν χρησιμοποιούσαν όλες οι χώρες το δείκτη της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας για να κατατάξουν το εθνικό κτηριακό απόθεμα σε κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει τον τρόπο ορισμού των κατηγοριών ενεργειακής απόδοσης στην Ελλάδα, τη Γερμανία και τη Σουηδία, για τα κτήρια κατοικίας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η κάθε χώρα χρησιμοποιεί διαφορετικό ορισμό: στην Ελλάδα οι κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης προκύπτουν βάσει της συσχέτισης της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας του υπό μελέτη κτηρίου με την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας ενός κτηρίου αναφοράς, στη Σουηδία τα όρια της κάθε κατηγορίας προκύπτουν επίσης σχετικά με ένα κτήριο αναφοράς αλλά η μέτρηση γίνεται σε μονάδες τελικής κατανάλωσης ενέργειας, όπως και στη Γερμανία

Εικόνα 7: Όρια ενεργειακής κατανάλωσης που αντιστοιχούν σε κάθε κατηγορία ενεργειακής απόδοσης στην Ελλάδα, τη Σουηδία και τη Γερμανία.

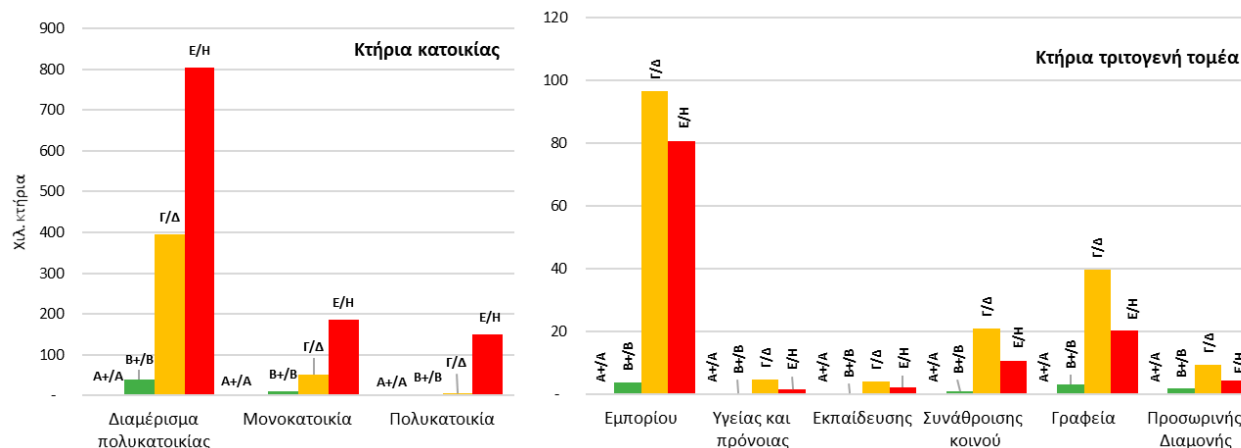
| Κατηγορία | Όρια κατηγορίας | | |
|-----------|--|--|---|
| | Ελλάδα | Σουηδία | Γερμανία |
| | EP: Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας [kWh/m ² a] υπό μελέτη κτηρίου RR: Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας [kWh/m ² a] κτηρίου αναφοράς | EP: Τελική κατανάλωση ενέργειας [kWh/m ² a] υπό μελέτη κτηρίου RR: Τελική κατανάλωση ενέργειας [kWh/m ² a] νέων κτηρίων | EP: Τελική κατανάλωση ενέργειας [kWh/m ² a] υπό μελέτη κτηρίου |
| A+ | EP ≤ 0.33R _R | | EP < 30kWh/m ² a |
| A | 0.33R _R < EP ≤ 0.50R _R | EP ≤ 0.50R _R | EP < 50kWh/m ² a |
| B+ | 0.50R _R < EP ≤ 0.75R _R | | EP < 75kWh/m ² a |
| B | 0.75R _R < EP ≤ 1.00R _R | 0.50R _R < EP ≤ 0.75R _R | EP < 100kWh/m ² a |
| Γ | 1.00R _R < EP ≤ 1.41R _R | 0.75R _R < EP ≤ 1.00R _R | EP < 130kWh/m ² a |
| Δ | 1.41R _R < EP ≤ 1.82R _R | 1.00R _R < EP ≤ 1.35R _R | EP < 160kWh/m ² a |
| E | 1.82R _R < EP ≤ 2.27R _R | 1.35R _R < EP ≤ 1.80R _R | EP < 200kWh/m ² a |
| Z | 2.27R _R < EP ≤ 2.73R _R | 1.80R _R < EP ≤ 2.35R _R | EP < 250kWh/m ² a |
| H | 2.73R _R < EP | 2.35R _R < EP | EP > 250kWh/m ² a |

Σημείωση: Η πηγή των δεδομένων για την Ελλάδα είναι (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, 2017), για τη Σουηδία και για τη Γερμανία (Moore et al., 2019).

Αφού έχει εφαρμοστεί η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω για όλες τις κατηγορίες κτηρίων που θεωρούνται στο μοντέλο (για την πιο πρόσφατη χρονιά για την οποία υπάρχουν πλήρη στατιστικά δεδομένα), συγκρίνονται για κάθε χώρα τα αποτελέσματα των υπολογισμών της μεθόδου με στατιστικά δεδομένα σχετικά με την ενεργειακή απόδοση του κτηριακού αποθέματος, όπως αυτά που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται το πλήθος των κτηρίων στην Ελλάδα ανά χρήση (κτήρια οικιακού τομέα και κτήρια του τομέα των υπηρεσιών) και κατηγορία ενεργειακής απόδοσης, βάσει των ΠΕΑ που έχουν εκδοθεί σε ορισμένη χρονική περίοδο, και έχουν κατατεθεί στην αρμόδια υπηρεσία. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η εγκυρότητα των υπολογισμών και η τεχνική βάση του μοντέλου. Όταν υπάρχουν αποκλίσεις, ρυθμίζονται παράμετροι της μεθόδου που έχουν διαφοροποιηθεί ανά κατηγορία κτηρίου (πχ. η εσωτερική θερμοκρασία θέρμανσης, οι ενεργειακές

ανάγκες για προετοιμασία ZNX, η ψυχόμενη επιφάνεια ανά κατηγορία κτηρίου) μέχρις ότου τα αποτελέσματα της μεθόδου να συμφωνούν με τα στατιστικά δεδομένα.

Εικόνα 8: Πλήθος ΠΕΑ ανά κατηγορία ενεργειακής απόδοσης (Α-Η) που έχουν εκδοθεί στην Ελλάδα από το 2011 έως το 2019.



Πηγή: (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2020)

4.2.3. Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για τη μοντελοποίηση των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων

Για να αναπαραστήσει το μοντέλο τις επιλογές ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων, θεωρεί 8 επίπεδα έντασης, που αναπαριστούν διαφορετικές επεμβάσεις στο κέλυφος, αυξανόμενης έντασης, δηλαδή αυξανόμενης ενεργειακής εξοικονόμησης. Οι επεμβάσεις κυμαίνονται από οικοδομικές εργασίες που στην πράξη αντιστοιχούν σε απλή αντικατάσταση υαλοπινάκων μέχρι τοποθέτηση μόνωσης μεγάλου πάχους και πολύ μικρής ειδικής θερμικής αγωγιμότητας σε όλα τα αδιαφανή μέρη του κελύφους (τοιχοί, οροφή, δάπεδο), με ταυτόχρονη αντικατάσταση των υαλοπινάκων. Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει την αντιστοιχία μεταξύ των κατηγοριών έντασης ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και των εργασιών ενεργειακής αναβάθμισης που αναπαριστούν.

Το ύψος της επενδυτικής δαπάνης που αντιστοιχεί σε κάθε είδος ενεργειακής αναβάθμισης αναπαρίσταται μέσω μη γραμμικών καμπυλών κόστους-δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης που διαφέρουν ανά τύπο ή κατηγορία κτηρίου. Οι καμπύλες έχουν θετικές ανοδικές κλίσεις και συσχετίζουν το είδος και την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης (δηλαδή το ποσοστό ενεργειακής εξοικονόμησης) με την επενδυτική δαπάνη. Η μη γραμμικότητα αντιπροσωπεύει το επιπλέον οριακό κόστος που αντιστοιχεί στις επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης καθώς η θερμική συμπεριφορά των κτηρίων (πχ. το πάχος της μόνωσης, ή ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας των υαλοπινάκων) προσεγγίζει ένα μέγιστο τεχνικό δυναμικό. Η μορφή των καμπυλών (δηλαδή η κλίση και η θέση των καμπυλών) διαφέρουν ανά κατηγορία κτηρίου για να αντιπροσωπεύουν τα συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας. Για την εκτίμηση των καμπυλών αυτών, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για το (τεχνικό) κόστος επένδυσης ενεργειακών παρεμβάσεων αυξανόμενης έντασης στο κέλυφος των κτηρίων από το ENTRANZE project, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.

Το «ENTRANZE project» διαφοροποιεί το κόστος επένδυσης μόνο με βάση τον τύπο κτηρίου (δηλαδή, μεταξύ πολυκατοικιών και μονοκατοικιών για τον οικιακό τομέα και μεταξύ κτηρίων γραφείου, νοσοκομείων, και σχολείων για τον τομέα των υπηρεσιών). Άλλες τεχνικές μελέτες που παρουσιάζουν τα τεχνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά επενδύσεων σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους συγκεκριμένων τύπων κτηρίων (πχ. περιπτωσιολογικές μελέτες για κτήρια διαφόρων ηλικιών ή κτήρια που βρίσκονται σε διάφορες πόλεις ή περιοχές μιας χώρας) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και επιτρέπουν την επέκταση των αριθμητικών εκτιμήσεων όπως παρέχονται από το «ENTRANZE project» και σε άλλες κατηγορίες κτηρίων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητές τους, όπως:

- Τη γεωγραφική θέση του κτηρίου, π.χ. τα κτήρια που βρίσκονται στα (ιστορικά) κέντρα των πόλεων, σε αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές
- Τους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς που σχετίζονται με την αρχική κατασκευή του κτηρίου
- Την ηλικία του κτηρίου
- Τις ιδιαίτερες κλιματολογικές συνθήκες στην περιοχή που βρίσκεται το κτήριο.

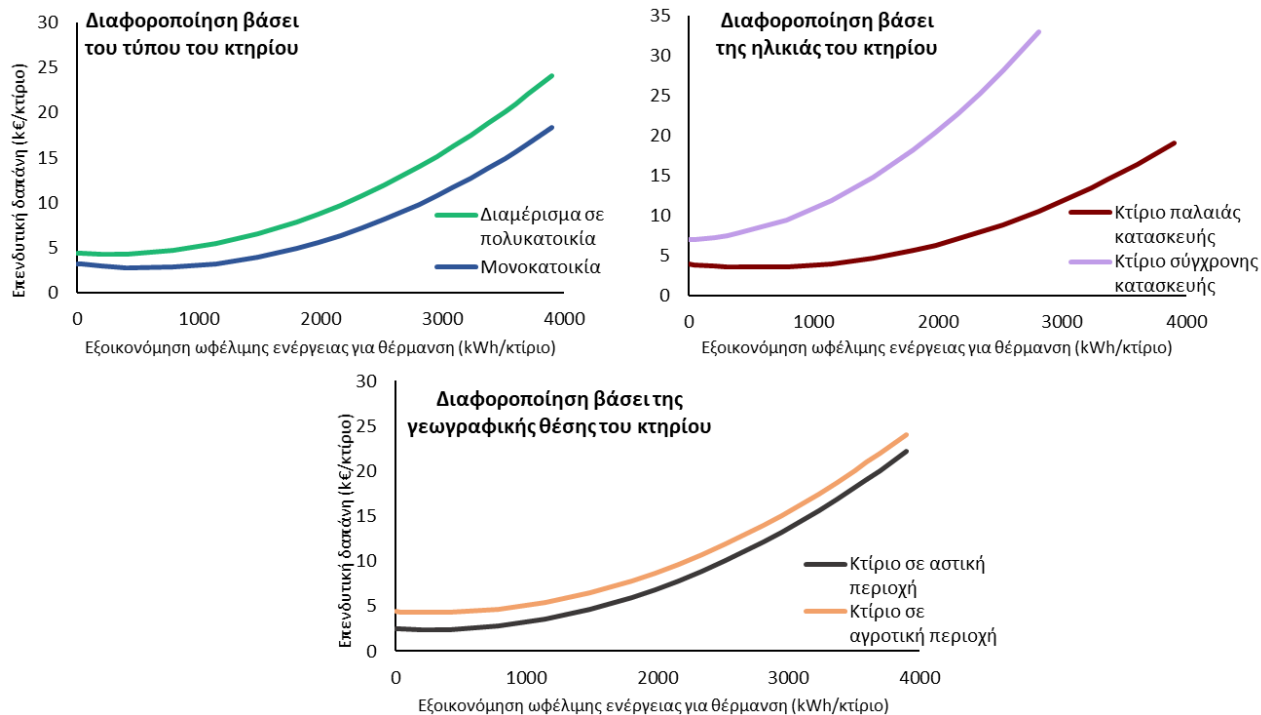
Πίνακας 7: Αντιστοίχιση μεταξύ των κατηγοριών έντασης ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και των εργασιών ενεργειακής αναβάθμισης που αναπαριστούν

| Κατηγορίες έντασης ενεργειακής αναβάθμισης | Ορισμός |
|--|---|
| ρ_0 | Καμία ενεργειακή αναβάθμιση |
| ρ_1 | Ενεργειακή αναβάθμιση μικρής έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:2.7 W/m ² K) |
| ρ_2 | Ενεργειακή αναβάθμιση μικρής έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:1.7 W/m ² K) |
| ρ_3 | Ενεργειακή αναβάθμιση μεσαίας έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:2.7 W/m ² K, τοποθέτηση μόνωσης 5cm) |
| ρ_4 | Ενεργειακή αναβάθμιση μεσαίας έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:1.7 W/m ² K, τοποθέτηση μόνωσης 5cm) |
| ρ_5 | Ενεργειακή αναβάθμιση μεσαίας έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:1.7 W/m ² K, τοποθέτηση μόνωσης 10cm) |
| ρ_6 | Ενεργειακή αναβάθμιση μεσαίας έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:1.5 W/m ² K, τοποθέτηση μόνωσης 10cm) |
| ρ_7 | Ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:1.5 W/m ² K, τοποθέτηση μόνωσης 20cm) |
| ρ_8 | Ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης (Αντικατάσταση κουφωμάτων/ανοιγμάτων-U-value:1.0 W/m ² K, τοποθέτηση μόνωσης 20cm) |

Ο Πίνακας 33 στο Παράρτημα περιλαμβάνει τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων του οικιακού τομέα όπως αυτά αντλούνται από τη βάση δεδομένων που παρέχει το πρόγραμμα ENTRANZE, για τις πόλεις της Ευρώπης για τις οποίες εφαρμόστηκε. Τα δεδομένα αυτά είναι τα αρχικά δεδομένα, τα οποία για τους σκοπούς του μοντέλου

συνδυάζονται και προσαρμόζονται ώστε να προκύψουν τα 8 επίπεδα έντασης της ενεργειακής αναβάθμισης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Εικόνα 9: Καμπύλες κόστους-δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους για διάφορες κατηγορίες κτηρίων που χρησιμοποιούνται στο προτεινόμενο μοντέλο



Η Εικόνα 9 δείχνει ενδεικτικές καμπύλες κόστους-δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης που διαφοροποιούνται ανά τύπο κτηρίου. Τα κτήρια μεγαλύτερης ηλικίας έχουν ελάχιστη ή και καθόλου μόνωση με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλες θερμικές απώλειες και άρα υψηλή κατανάλωση ενέργειας (σε kWh/κτήριο) σε σύγκριση με κτήρια που είναι πιο σύγχρονα και ενδεχομένως να έχουν κατασκευαστεί ακολουθώντας συγκεκριμένους τεχνικούς οικοδομικούς κανονισμούς, που εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια σε διάφορες χώρες της ΕΕ. Συνεπώς, στα πιο σύγχρονα κτήρια που έχουν χαμηλό δυναμικό εξοικονόμησης λόγω της αρχικής τους (καλής) κατάστασης, το μοναδιαίο κόστος επένδυσης είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα παλαιότερα κτήρια (προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο ποσό ενεργειακής εξοικονόμησης).

Οι εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης είναι ακριβότερες στις πολυκατοικίες σε σύγκριση με τις μονοκατοικίες ανά μονάδα εξοικονόμησης ενέργειας, επειδή αυτές οι εργασίες είναι συνήθως ευκολότερες σε μεμονωμένα κτήρια (πχ. πολλές φορές έχουν μόνο έναν όροφο και δεν απαιτείται σκαλωσιά ή δεν χρειάζονται άδεια από τον δήμο γιατί έχουν κήπο). Επίσης, οι επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης στις πολυκατοικίες περιέχουν και πολλά «κρυφά» κόστη λόγω της περίπλοκης απομάκρυνσης οικοδομικών υλικών ή της ανάγκης λήψης μέτρων ώστε να αποφευχθεί η ενόχληση σε γειτονικά διαμερίσματα. Τέλος, η ενεργειακή αναβάθμιση για κτήρια που βρίσκονται σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές είναι ακριβότερη (ανά μονάδα εξοικονόμησης ενέργειας) σε σύγκριση με αυτήν για κτήρια που βρίσκονται στις αστικές περιοχές, λόγω του επιπλέον κόστους για τη μεταφορά του ειδικευμένου προσωπικού, μηχανημάτων και των υλικών.

4.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Το προτεινόμενο μοντέλο περιλαμβάνει πάνω από 50 διαφορετικές τεχνολογίες ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση, ψύξη, προετοιμασία ΖΝΧ και μαγείρεμα (π.χ. συμβατικοί λέβητες και λέβητες τεχνολογίας συμπύκνωσης, αντλίες θερμότητας, λέβητες πέλλετ ξύλου κ.λπ.), όπως φαίνεται στους Πίνακες 31 και 32 (στο Παράρτημα). Κάθε τύπος εξοπλισμού χωρίζεται περαιτέρω σε τέσσερις κατηγορίες αποδοτικότητας, από την τρέχουσα διαθέσιμη τεχνολογία έως την καλύτερη μη διαθέσιμη τεχνολογία (Best Not Available Technology - BNAT), σύμφωνα με την ταξινόμηση της ενεργειακής αποδοτικότητας της Οδηγίας για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων. Τα δεδομένα και οι παραδοχές για τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών (βαθμός απόδοσης, τεχνική διάρκεια ζωής, κόστος επένδυσης, κόστος συντήρησης και λειτουργίας και άλλα μεταβλητά κόστη) βασίζονται σε μεγάλο αριθμό τεχνικών αναφορών και πηγών. Τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού εξοπλισμού, που τελικά χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο μοντέλο, έχουν διασταυρωθεί και με μια πρόσφατη μελέτη, η οποία προέκυψε ύστερα από εκτεταμένες διαβουλεύσεις με βιομηχανικούς φορείς και περιλαμβάνει συνεπείς εκτιμήσεις και προβλέψεις (De Vita et al., 2018).

Πέραν των καθαρά τεχνικοοικονομικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών, το μοντέλο συμπεριλαμβάνει επίσης και παράγοντες που αναπαριστούν την τεχνολογική πρόοδο των τεχνολογιών, που συμβαίνει είτε λόγω της εξέλιξης της βιομηχανίας που παράγει τις διάφορες τεχνολογίες, είτε της σταδιακής αποδοχής που έχουν οι διάφορες τεχνολογίες διαχρονικά. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται στη βιβλιογραφία, ως παράγοντες learning-by-doing (LBD) και learning-by-researching (LBR). Οι Πίνακες 34, 35 και 36 (*EU Reference Scenario 2020, 2022*) στο Παράρτημα περιλαμβάνουν τα τεχνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο, και την εξέλιξη αυτών στο χρόνο ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής προόδου. Τα εύρη ενεργειακής απόδοσης περιλαμβάνουν όλες τις κατηγορίες ενεργειακής αποδοτικότητας που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

4.3.1. Πρακτικές εφαρμογής του ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια

Στην πράξη, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και ψύξη διαφέρουν τόσο ως προς τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας (νερό, αέρας κ.λπ.) εντός των χώρων του κτηρίου όσο και ως προς το σύστημα διανομής, δηλαδή το δίκτυο διανομής (αγωγοί, σωλήνες κ.λπ.) και τις τερματικές μονάδες (κοινά θερμαντικά σώματα, fan-coils κλπ.) με τις οποίες εάν συνδυαστούν έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση (IEA-ETSAP & IRENA, 2012).

Οι λέβητες, οι μονάδες συμπαραγωγής και η τηλεθέρμανση συνήθως λειτουργούν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και είναι κατάλληλες τεχνολογίες για συνδυασμό με συστήματα διανομής υψηλής θερμοκρασίας (55 έως 80°C), όπως τα παραδοσιακά θερμαντικά σώματα. Τα συστήματα διανομής χαμηλής θερμοκρασίας (35 έως 55°C), όπως η ενδοδαπέδια θέρμανση και τα θερμαντικά σώματα χαμηλής θερμοκρασίας (πχ. fan-coils), έχουν μεγάλες επιφάνειες, λειτουργούν για πολλές ώρες και έχουν ως αποτέλεσμα πιο σταδιακές αλλαγές θερμοκρασίας στον θερμαινόμενο χώρο. Οι αντλίες θερμότητας επιτυγχάνουν πολύ υψηλότερους εποχιακούς βαθμούς ενεργειακής απόδοσης εάν συνδυαστούν με συστήματα διανομής θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, ειδικά μεταξύ 35-45 °C (IEA-ETSAP & IRENA, 2012).

Στις οικιακές εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται συνήθως το νερό ως εργαζόμενο μέσο για τη μεταφορά θερμότητας μέσω των θερμαντικών σωμάτων, ενώ στα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών (κτήρια

γραφείων, νοσοκομεία, ξενοδοχεία κλπ.) το αντίστοιχο εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας. Τα συστήματα εξαναγκασμένου αερισμού θερμαίνουν τον αέρα σε μια κεντρική πηγή και τον διανέμουν στο κτήριο μέσω αεραγωγών (IEA-ETSAP & IRENA, 2012).

Στο μοντέλο γίνονται απλουστεύσεις σχετικά με την εγκατάσταση και τη λειτουργία του συστήματος διανομής, με την έννοια ότι δεν αποτελούν κομμάτι της μοντελοποίησης αυτές οι τεχνικές λεπτομέρειες. Για κάθε τεχνολογία έχουν γίνει υποθέσεις σχετικά με τις συνθήκες πρακτικές ανά περίπτωση.

Έτσι, για παράδειγμα, στα νέα κτήρια κατοικίας που επιλέγουν αντλία θερμότητας για θέρμανση, θεωρείται ότι αυτή εξορισμού συνδυάζεται με σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Το ίδιο ισχύει και για κτήρια που υπόκεινται σε ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης. Δεν ισχύει το ίδιο όμως για κτήρια τα οποία επιλέγουν να αντικαταστήσουν το υπάρχον σύστημα θέρμανσης με αντλία θερμότητας, χωρίς να έχουν αναβαθμίσει ενεργειακά το κέλυφός τους. Σε αυτήν την περίπτωση, υποτίθεται ότι οι αντλίες θερμότητας παρέχουν νερό προσαγωγής υψηλής θερμοκρασίας. Το ίδιο ισχύει και για οποιαδήποτε αντικατάσταση ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση, η οποία δε γίνεται παράλληλα με επέμβαση ενεργειακής αναβάθμισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, δηλαδή, θεωρείται ότι το σύστημα θέρμανσης (δίκτυο διανομής και τερματικές μονάδες) διατηρείται στην αρχική του κατάσταση, που συνήθως είναι σύστημα υψηλών θερμοκρασιών.

Στις επόμενες ενότητες, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην παρουσίαση τεχνικών παραμέτρων και περιορισμών των κυριότερων τεχνολογιών που μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές τεχνολογίες βασικά για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, οδηγώντας σε εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των εκπομπών CO₂. Οι τεχνολογίες που παρουσιάζονται αναλυτικά είναι οι αντλίες θερμότητας και τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης (σε συνδυασμό με ηλιοθερμία). Ειδικά για τις αντλίες θερμότητας αναφέρονται λεπτομερώς τεχνικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη λειτουργία τους και τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη μοντελοποίηση.

4.3.2. Αντλίες θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας (ΑΘ) είναι μια τεχνολογία γνωστή εδώ και πολλά χρόνια, αφού η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας που χρησιμοποιούν και άλλα ψυκτικά μηχανήματα, όπως τα ψυγεία. Η εφαρμογή τους, ως τεχνολογία κάλυψης των ενεργειακών αναγκών θέρμανσης και ψύξης στα κτήρια, έχει ξεκινήσει εδώ και δεκαετίες. Κατά κύριο λόγο, οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνταν αρχικά για την κάλυψη των αναγκών ψύξης (τα γνωστά κλιματιστικά), όμως τα τελευταία 30 χρόνια έχει αρχίσει να εξαπλώνεται η χρήση τους και για κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, ή ακόμα και για κάλυψη των αναγκών για την προετοιμασία ΖΝΧ.

Το κυριότερο προτέρημα των αντλιών θερμότητας για κάλυψη των αναγκών θέρμανσης έναντι των συμβατικών τεχνολογιών, όπως είναι οι λέβητες πετρελαίου και φυσικού αερίου, είναι η μεγαλύτερη θερμική τους απόδοση, η οποία συνεπάγεται καταρχάς εξοικονόμηση ενέργειας. Η υψηλή θερμική τους απόδοση, σε συνδυασμό και με τις ολοένα αυξανόμενες τιμές των συμβατικών ορυκτών καυσίμων, μπορεί επίσης να οδηγήσει και σε εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους. Ο πιο συνήθης τύπος αντλίας θερμότητας είναι οι ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας. Στο πλαίσιο της μετάβασης προς την κλιματική ουδετερότητα, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση (και μάλιστα με υψηλό βαθμό απόδοσης) είναι η πιο συμβατή επιλογή, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη και τη σταδιακή απανθρακοποίηση του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, που υπονοεί ότι αυτή η ηλεκτρική ενέργεια είναι κλιματικά ουδέτερη. Επιπλέον,

η θερμότητα περιβάλλοντος που αντλούν οι αντλίες θερμότητας από τις διάφορες πηγές θερμότητας (δηλαδή τον αέρα, το νερό ή το έδαφος), συνυπολογίζεται στους περιβαλλοντικούς δείκτες για τις ΑΠΕ, εφόσον οι αντλίες θερμότητας υπερβαίνουν ένα κατώτατο όριο ενεργειακής απόδοσης. Άρα, η επιλογή τους ως τεχνολογία θέρμανσης στα κτήρια, συμβαδίζει και με τη δέσμευση για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων για τις ΑΠΕ (τόσο για το δείκτη ΑΠΕ θέρμανσης και ψύξης – RES H&C share- όσο και για το συνολικό δείκτη ΑΠΕ – overall RES share).

Λαμβάνοντας υπόψη και τα κύρια σημεία της πρότασης για την αναθεώρηση της ΟΑΕΚ (2021), όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.2, αφενός η παύση της χρηματοδότησης εγκαταστάσεων θέρμανσης με ορυκτά καύσιμα έως το 2027, και αφετέρου η απαίτηση όλα τα νέα κτήρια να είναι κτήρια μηδενικών εκπομπών από το 2030 και μετά, σε συνδυασμό με την ενίσχυση των μέτρων που θα οδηγήσουν στην αύξηση των ενεργειακών ανακαινίσεων στα κτήρια, αναμένεται να φέρουν τις αντλίες θερμότητας στο κέντρο της προσοχής της ενεργειακής πολιτικής. Αυτό με τη σειρά του, θα οδηγήσει και σε σταδιακή μείωση του κόστους τους, όπως άλλωστε ήδη έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια, ως αποτέλεσμα της αύξησης της ζήτησης για αυτές.

Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούν συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντλιών θερμότητας, που επηρεάζουν ή και χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους, και τα οποία εμμέσως ή αμέσως έχουν ληφθεί υπόψη στη μοντελοποίηση. Συγκεκριμένα, έχουν συμπεριληφθεί στη μοντελοποίηση, είτε απλουστευμένα είτε ρητά, τεχνικές παράμετροι που πράγματι λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή, εγκατάσταση και λειτουργία των αντλιών θερμότητας, όπως όταν γίνεται μια καθαρά τεχνική μελέτη σχετικά με την εφαρμογή συστήματος αντλίας θερμότητας στα κτήρια.

Τύποι και κατηγορίες αντλιών θερμότητας

Η αντλία θερμότητας είναι μια μηχανολογική διάταξη, η οποία σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες θέρμανσης, δεν παράγει αλλά μεταφέρει θερμική ενέργεια (θερμότητα) από ένα περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα περιβάλλον υψηλότερης. Η λειτουργία των αντλιών θερμότητας βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο, δηλαδή στο διαρκή κύκλο εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ρευστού, όπως ισχύει και για όλα τα ψυκτικά μηχανήματα (πχ. ψυγεία, καταψύκτες κ.ά.). Τα βασικά κατασκευαστικά μέρη μιας αντλίας θερμότητας είναι ο συμπιεστής, οι εναλλάκτες θερμότητας (εξατμιστής και συμπυκνωτής) και η εκτονωτική διάταξη. Επίσης βασικό στοιχείο είναι το ψυκτικό ρευστό ενώ για τη λειτουργία μιας ολοκληρωμένης αντλίας θερμότητας χρησιμοποιούνται μηχανισμοί αντιστροφής της λειτουργίας του ψυκτικού κύκλου καθώς και αυτοματισμοί ελέγχου και ρύθμισης (Γιαννάκος, 2014).

Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργία θέρμανσης, ψύξης και προετοιμασίας ΖΝΧ. Προκειμένου η αντλία θερμότητας να μπορεί να καλύπτει και τις επιπλέον χρήσεις πλην της θέρμανσης απαιτείται για τη μεν λειτουργία της ψύξης η ύπαρξη τετράοδης βαλβίδας ανάμιξης στο κλειστό κύκλωμα του ψυκτικού ρευστού, η οποία επιτρέπει την αντιστροφή του ψυκτικού κύκλου, και για τη δε λειτουργία προετοιμασίας ΖΝΧ, ο συνδυασμός του συστήματος με δοχείο ζεστού νερού.

Κατά τη λειτουργία της θέρμανσης οι αντλίες θερμότητας απορροφούν θερμότητα από το περιβάλλον και την απορρίπτουν στο θερμαινόμενο κτήριο. Αντίστροφα, κατά τη λειτουργία της ψύξης απορροφούν θερμότητα από τον κλιματιζόμενο χώρο και την απορρίπτουν στο περιβάλλον. Για να ορισθεί ένα μέσο ως πηγή θερμότητας (heat source) είναι απαραίτητο να διατηρεί μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, υψηλότερη από τη θερμοκρασία εξάτμισης του ψυκτικού ρευστού. Αντίστοιχα για να ορισθεί ένα μέσο

ως αποδέκτης θερμότητας (heat sink) θα πρέπει κατά τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας να διατηρεί μια θερμοκρασία που να επιτρέπει τη συμπύκνωση του ψυκτικού ρευστού (Γιαννάκος, 2014).

Οι αντλίες θερμότητας χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες και η κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνεται με τα εξής κριτήρια:

A. Ανάλογα με την πηγή και τον αποδέκτη θερμότητας (είτε διαφορετικά ανάλογα με το είδος των εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την άντληση/απόρριψη της θερμότητας)

Οι βασικές πηγές (ή αποδέκτες κατά τη λειτουργία της ψύξης) θερμότητας είναι ο αέρας (αεροθερμικές αντλίες θερμότητας), το έδαφος (γεωθερμικές αντλίες θερμότητας) και το νερό (υδροθερμικές αντλίες θερμότητας). Άλλες πηγές θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αλλά οι σχετικές τεχνολογίες έχουν ακόμη περιορισμένη χρήση, ειδικά για εφαρμογές στα κτήρια, είναι: τα απόβλητα ύδατα (waste water), η απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανικές διεργασίες (industrial waste heat), τα απαέρια γεωθερμίας (geothermal flue gas), η τηλεψύξη και η ηλιακή θερμότητα (Valancius et al., 2019).

Οι αεροθερμικές αντλίες θερμότητας είναι οι πιο διαδεδομένες. Για τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στον αέρα και το ψυκτικό ρευστό, κατά τη λειτουργία της θέρμανσης, χρησιμοποιούνται αερόψυκτοι εξατμιστές. Παρότι είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία, είναι και αυτή που συναντά τις μεγαλύτερες προκλήσεις όσον αφορά τη λειτουργία της, διότι η θερμοκρασία του αέρα από τον οποίο η αντλία απάγει την (περιβάλλουσα) θερμότητα μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο, γεγονός που επιδρά στην απόδοση τους, όπως θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω. Ανάλογα με το εάν ο συμπυκνωτής είναι εναλλάκτης θερμότητας αέρα/ψυκτικού (αερόψυκτος) ή εναλλάκτης θερμότητας νερού/ψυκτικού (υδρόψυκτος), οι αεροθερμικές αντλίες θερμότητας διαχωρίζονται επιπλέον σε αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα και αντλίες θερμότητας αέρα-νερού, αντίστοιχα. Η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή των συστημάτων αέρα-αέρα είναι οι κλιματιστικές μονάδες που τοποθετούνται κατεξοχήν για ψύξη, ενώ η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή των συστημάτων αέρα-νερού είναι τα συστήματα κεντρικού κλιματισμού μεγάλων κτηρίων. Εκτός από τον αέρα του περιβάλλοντος, ως πηγή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο αέρας απόρριψης από συστήματα κεντρικού εξαερισμού ή κλιματισμού (exhaust-air). Σε πολλά μεγάλα κτήρια, ένα ποσό από τον αέρα των χώρων πρέπει να ανανεώνεται συνεχώς. Ο απορριπτόμενος αέρας είναι ιδανική πηγή θερμότητας για αντλίες θερμότητας με πηγή τον αέρα, εφόσον η παροχή του είναι σταθερή και ικανοποιητική (Γιαννάκος, 2014).

Στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, η άντληση της αποθηκευμένης στο έδαφος θερμότητας πραγματοποιείται με κατάλληλα διαμορφωμένα δίκτυα σωληνώσεων, τους γεωεναλλάκτες (οριζόντιους ή κάθετους) ή με ενεργειακούς πασσάλους. Το έδαφος μπορεί να αποθηκεύσει σε μεγάλες ποσότητες ηλιακή ενέργεια, που απορροφάται είτε μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας είτε παραλαμβάνεται από το έδαφος μέσω της βροχής και του αέρα. Όσο πιο μεγάλο είναι το βάθος του εδάφους σε σχέση με την επιφάνεια, τόσο πιο σταθερή είναι η θερμοκρασία του και τόσο υψηλότερη από τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται κατά 1°C για κάθε 30m βάθους. Η εκμετάλλευση του εδάφους ως πηγής/αποδέκτη θερμότητας εξαρτάται και από τη σύνθεσή του (thermal diffusivity). Οι οριζόντιοι γεωεναλλάκτες είναι συνήθως κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και τοποθετούνται σε βάθος 0.8-2m ή και μεγαλύτερο εάν το επιτρέπει το κόστος των εκσκαφών. Κύριο πλεονέκτημα των οριζόντιων εγκαταστάσεων είναι το μικρότερο κόστος εγκατάστασης, ωστόσο μειονέκτημα αποτελεί η απαίτηση για μεγάλη επιφάνεια εδάφους. Οι κάθετοι γεωεναλλάκτες κατασκευάζονται και αυτοί από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και τοποθετούνται

σε βάθος μέχρι και 15m. Ο τρόπος τοποθέτησής τους είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο, με το κόστος εκσκαφής να είναι αρκετά αυξημένο λόγω του μεγαλύτερου βάθους. Οι κάθετοι γεωεναλλάκτες ωστόσο πλεονεκτούν όσον αφορά την απαίτηση επιφάνειας σε σχέση με τους οριζόντιους. Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες ή ενεργειακοί πάσσαλοι (U-tubes) τοποθετούνται εντός γεωτρήσεων μεγάλου βάθους που μπορεί να φθάνουν και τα 400m. Οι ενεργειακοί πάσσαλοι πλεονεκτούν σε σχέση με τους υπόλοιπους γεωεναλλάκτες καθώς καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση λόγω της εφαρμογής τους σε μεγάλο βάθος, εξασφαλίζοντας πιο σταθερές και ελαφρώς μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αποτρεπτικός παράγοντας στη χρήση τους όμως αποτελεί το μεγάλο κόστος διάνοιξης των γεωτρήσεων (Γιαννάκος, 2014). Εντός των γεωεναλλακτών (οποιοδήποτε τύπου) κυκλοφορεί διάλυμα νερού-αντιπηκτικού (γεωθερμική αντλία θερμότητας κλειστού κύκλου), το οποίο αντλεί τη θερμότητα από το έδαφος και τη μεταφέρει στο ψυκτικό ρευστό μέσω υδρόψυκτου εξατμιστή. Ο συμπυκνωτής είναι συνήθως εναλλάκτης θερμότητας νερού/ψυκτικού (υδρόψυκτος) και έτσι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χαρακτηρίζονται επίσης αντλίες θερμότητας νερού-νερού. Υπάρχει η δυνατότητα εντός των γεωεναλλακτών να κυκλοφορεί απευθείας το ψυκτικό ρευστό (γεωθερμική αντλία θερμότητας απευθείας εκτόνωσης). Σε αυτή την περίπτωση παρακάμπτεται η χρήση του υδρόψυκτου εξατμιστή, αφού γίνεται άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του ψυκτικού ρευστού. Αυτός ο τύπος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας έχει αφενός απλούστερη κατασκευή από την αντλία θερμότητας κλειστού κύκλου, αλλά ταυτόχρονα απαιτεί μέρος της ενέργειας του συμπιεστή να καταναλώνεται και για την κυκλοφορία του ψυκτικού ρευστού εντός του γεωεναλλάκτη. Επίσης απευθείας χρήση ψυκτικού ρευστού ενέχει κινδύνους διαρροών.

Στις υδροθερμικές αντλίες θερμότητας, η άντληση της αποθηκευμένης στο νερό ενέργειας πραγματοποιείται είτε μέσω κλειστού κυκλώματος (κατ' αντιστοιχία της διαμόρφωσης των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας), είτε μέσω ανοιχτού κυκλώματος, όπου δηλαδή η θερμότητα του νερού μεταφέρεται στο ψυκτικό ρευστό μέσω του εξατμιστή. Το επιφανειακό νερό (ποτάμια, λίμνες) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας αλλά η θερμοκρασία του πέφτει αισθητά το χειμώνα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται δυσμενώς η λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Ως πηγή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το νερό της θάλασσας, πρέπει όμως μεταξύ της θάλασσας και της αντλίας να παρεμβάλλεται ένας εναλλάκτης θερμότητας που εξασφαλίζει προστασία από διάβρωση. Τα υπόγεια νερά είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική πηγή θερμότητας διότι έχουν καθ' όλη τη διάρκειά του έτους σταθερή θερμοκρασία που κυμαίνεται από 10 έως 20°C (Γιαννάκος, 2014). Οι υδροθερμικές αντλίες θερμότητας χαρακτηρίζονται αντλίες θερμότητας νερού-νερού, επειδή και σε αυτές συνήθως ο συμπυκνωτής είναι υδρόψυκτος.

B. Ανάλογα με τη θέση των διαφόρων στοιχείων της εγκατάστασης

Ανάλογα με την κατασκευή τους, οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε ενιαίου (monoblock) και διαιρούμενου (split) τύπου.

Οι αντλίες θερμότητας ενιαίου τύπου, είναι συστήματα στα οποία όλα τα κατασκευαστικά μέρη βρίσκονται εγκατεστημένα σε μια ενιαία μονάδα, η οποία τοποθετείται εκτός του κτηρίου. Η σύνδεση της αντλίας με το σύστημα θέρμανσης (δηλαδή με το δοχείο θερμού νερού που συνδέεται με το δίκτυο θέρμανσης και εν τέλει με τα θερμαντικά σώματα) γίνεται με σωλήνες νερού, χωρίς να παρεμβάλλεται άλλο στοιχείο. Σε αυτό έγκειται και το μειονέκτημα αυτής της εγκατάστασης: επειδή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν να παγώσει το νερό που συνδέει την αντλία θερμότητας με το σύστημα

θέρμανσης, πρέπει να χρησιμοποιείται μείγμα προπυλενογλυκόλης/νερού ως υγρό μεταφοράς θερμότητας.

Στις αντλίες θερμότητας διαιρούμενου τύπου, τα κατασκευαστικά μέρη είναι διαχωρισμένα σε δύο μονάδες, μία εκτός του κτηρίου και μία εντός. Η εξωτερική μονάδα περιέχει τον συμπιεστή, τον εξωτερικό εναλλάκτη, την εκτονωτική βαλβίδα, την τετράοδη βαλβίδα, τον ανεμιστήρα, τις καλωδιώσεις και το σύστημα ελέγχου. Με κατάλληλο δίκτυο σωλήνων το ψυκτικό ρευστό μεταφέρεται στην εσωτερική μονάδα που περιλαμβάνει τα υπόλοιπα εξαρτήματα, δηλαδή τον εσωτερικό εναλλάκτη, τον ανεμιστήρα, καλωδιώσεις και σύστημα ελέγχου (Γιαννάκος, 2014). Η εσωτερική μονάδα ονομάζεται «υδραυλική μονάδα» (hydraulic unit) και είναι εκεί που συνδέονται οι σωλήνες του νερού με το δίκτυο θέρμανσης.

Όσον αφορά τη σύγκριση των δύο διατάξεων, οι αντλίες θερμότητας ενιαίου τύπου είναι πιο απλές στην εγκατάσταση διότι δεν απαιτείται η σύνδεση με το δίκτυο θέρμανσης του κτηρίου μέσω του ψυκτικού ρευστού, που υπονοεί την απαίτηση για εξειδικευμένο προσωπικό κατά την εγκατάσταση. Επιπλέον, το κόστος αγοράς των αντλιών ενιαίου τύπου είναι χαμηλότερο από αυτό των διαιρούμενου τύπου. Συμπεριλαμβάνοντας όμως και το κόστος του μείγματος προπυλενογλυκόλης/νερού για τις πρώτες, το κόστος των δύο διατάξεων είναι συγκρίσιμο. Τέλος, οι αντλίες θερμότητας διαιρούμενου τύπου χρησιμοποιούνται όταν είναι δύσκολη η τοποθέτηση αντλίας θερμότητας ενιαίου τύπου κοντά στο σημείο όπου καταλήγουν οι κεντρικές σωληνώσεις του κτηρίου.

C. Ανάλογα με το είδος του συμπιεστή

Ανάλογα με το είδος συμπιεστή, που αποτελεί την κινητήρια μηχανή, οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε αυτές που χρησιμοποιούν ηλεκτροκίνητους συμπιεστές, σε αυτές των οποίων οι συμπιεστές κινούνται από μηχανές εσωτερικής καύσης (πετρέλαιο, ατμός, αέριο κ.λπ.), και σε αυτές που χρησιμοποιούν τεχνολογία ρόφησης (είτε απορρόφησης είτε προσρόφησης).

Οι πιο διαδεδομένοι συμπιεστές είναι οι ηλεκτροκίνητοι, γεγονός που εξηγείται από το ότι η μεγαλύτερη ανάπτυξη και χρήση των αντλιών θερμότητας έχει γίνει σε εφαρμογές στα κτήρια και ειδικότερα σε κτήρια γραφείων, εμπορικά καταστήματα και κατοικίες (Βραχόπουλος et al., 2015).

Σε άλλες εφαρμογές (με μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος) όπως, στη βιομηχανία, έχουν αναπτυχθεί και συμπιεστές κινούμενοι από μηχανές εσωτερικής καύσης (Βραχόπουλος et al., 2015).

Στις αντλίες θερμότητας τεχνολογίας ρόφησης, ο μηχανικός συμπιεστής που βρίσκεται σε μια τυπική ηλεκτρική αντλία θερμότητας αντικαθίσταται από έναν θερμικό (The Carbon Trust and Rawlings Support Services, 2016). Επίσης, αντί του απλού ψυκτικού ρευστού που χρησιμοποιείται σε μια συμβατική αντλία θερμότητας, στις αντλίες θερμότητας τεχνολογίας ρόφησης χρησιμοποιείται λειτουργικό ζεύγος ψυκτικού και ροφητικού μέσου. Οι αντλίες θερμότητας τεχνολογίας ρόφησης χρησιμοποιούν τη θερμότητα ως πηγή ενέργειας και μπορούν να λειτουργήσουν με μια μεγάλη ποικιλία πηγών θερμότητας, όπως το φυσικό αέριο, το προπάνιο, το νερό που θερμαίνεται μέσω ηλιακής ή γεωθερμικής θερμότητας.

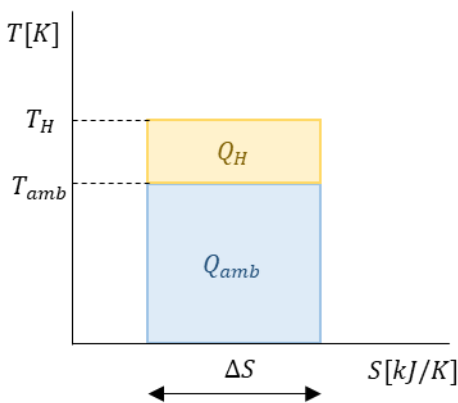
Μια ανασκόπηση των τεχνολογιών απορρόφησης (Wu et al., 2014) έδειξε ότι γίνονται όλο και πιο σημαντικές για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών. Σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται ήδη αντλίες θερμότητας τεχνολογίας απορρόφησης, αλλά σε εφαρμογές μικρής ισχύος έχουν μικρότερη δημοτικότητα. Απαιτείται ακόμη σημαντική πρόοδος προτού υιοθετηθούν

ευρέως τα συστήματα θέρμανσης με τεχνολογία απορρόφησης. Όμως, τα περιβαλλοντικά οφέλη αυτών των θερμικών αντλιών θερμότητας είναι εντυπωσιακά. Η έρευνα σε σχέση με αυτήν την τεχνολογία εστιάζει στη βελτίωση της απόδοσής τους και σε αυτό μπορεί να συμβάλει η ανάπτυξη καινοτόμων ροφητικών μέσων και ο κατάλληλος σχεδιασμός των συστημάτων (Valancius et al., 2019).

Ενεργειακή απόδοση αντλιών θερμότητας

Ως βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας (η) ορίζεται ο λόγος της ωφέλιμης ενέργειας (Q), δηλαδή της ενέργειας που μεταφέρεται για να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης (ή ψύξης), προς την ενέργεια που καταναλώνεται (P), δηλαδή την ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής. Κατά τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας για θέρμανση, η ωφέλιμη ενέργεια αντιστοιχεί στην ενέργεια που δίνεται στο θερμαινόμενο χώρο, Q_H , ενώ κατά τη λειτουργία της ψύξης, η ωφέλιμη ενέργεια αντιστοιχεί στην ενέργεια που αφαιρείται από αυτόν, Q_C . Έτσι, ο βαθμός απόδοσης στη λειτουργία της θέρμανσης είναι $\eta_H = \frac{Q_H}{P}$ και ο βαθμός απόδοσης στη λειτουργία της ψύξης είναι $\eta_C = \frac{Q_C}{P}$.

Εικόνα 10: Διάγραμμα T-s ιδανικού κύκλου (αντίστροφος κύκλος Carnot) αντλίας θερμότητας στη λειτουργία θέρμανσης



Στη λειτουργία της θέρμανσης, η ενέργεια που καταναλώνεται, P , για τη μεταφορά θερμότητας από το θερμοκρασιακό επίπεδο T_{amb} (που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) στο θερμοκρασιακό επίπεδο T_H (που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του θερμαινόμενου χώρου) ισούται με τη διαφορά των εμβαδών Q_{amb} και Q_H , για μια αντλία θερμότητας Carnot (Εικόνα 10).

Έτσι, οι σχέσεις που αναπαριστούν το βαθμό απόδοσης για μια αντλία θερμότητας Carnot, εκφράζονται εναλλακτικά:

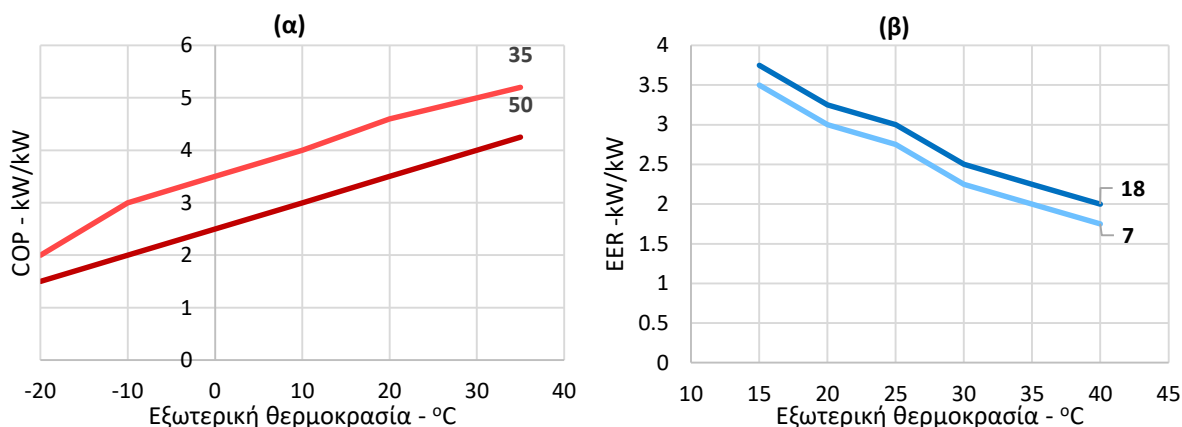
$$\eta_H = \frac{Q_H}{P} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_{amb}} = \frac{T_H \cdot \Delta S}{(T_H - T_{amb}) \cdot \Delta S} = \frac{1}{1 - \frac{T_{amb}}{T_H}}$$

$$\eta_C = \frac{Q_C}{P} = \frac{Q_C}{Q_{amb} - Q_C} = \frac{T_C \cdot \Delta S}{(T_{amb} - T_C) \cdot \Delta S} = \frac{1}{\frac{T_{amb}}{T_C} - 1}$$

Βάσει των σχέσεων υπολογισμού του βαθμού απόδοσης (για τις ιδανικές αντλίες θερμότητας) είναι προφανές, ότι όσο μικρότερη είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του μέσου από το οποίο

αντλείται η θερμότητα και της θερμοκρασίας του μέσου στο οποίο απορρίπτεται η θερμότητα, τόσο υψηλότερος είναι ο βαθμός απόδοσης. Για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας στην πράξη δεν χρησιμοποιείται ο κύκλος Carnot, αλλά ο κύκλος συμπίεσης ατμών (ο οποίος προσεγγίζει ρεαλιστικά τον κύκλο Carnot), ο βαθμός απόδοσης του οποίου είναι χαμηλότερος από αυτόν του κύκλου Carnot, αλλά τα παραπάνω εκτέθηκαν ώστε να παρουσιαστεί (μέσω μαθηματικών σχέσεων) η συσχέτιση των θερμοκρασιών λειτουργίας της αντλίας θερμότητας με την απόδοσή της. Τα διαγράμματα που ακολουθούν, και τα οποία έχουν προέλθει από κατασκευαστές επιβεβαιώνουν αυτή τη συσχέτιση.

Εικόνα 11: Βαθμός απόδοσης αντλίας θερμότητας αέρα-νερού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε λειτουργία θέρμανσης (α) και ψύξης (β) και διαφορετική θερμοκρασία νερού θέρμανσης [35/55°C] και ψύξης [18/7°C]



Πηγή: (Γιαννάκος, 2014)

Όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως αφορούν γενικά τον ορισμό της ενεργειακής απόδοσης των αντλιών θερμότητας. Όταν πρέπει όμως να αξιολογηθούν οι αντλίες θερμότητας ως προς την ενεργειακή τους συμπεριφορά (συμπεριλαμβανομένης της συνεισφοράς τους στο μερίδιο των ΑΠΕ), ορίζονται δυο διαφορετικοί δείκτες: ο συντελεστής συμπεριφοράς και ο εποχιακός βαθμός απόδοσης.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς COP (Coefficient of Performance) είναι ο πιο συνηθισμένος δείκτης για την απόδοση μιας αντλίας θερμότητας. Είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς την καταναλισκόμενη ισχύ. Στην περίπτωση της θερινής λειτουργίας σε ψύξη χρησιμοποιείται ο όρος «λόγος ενεργειακής απόδοσης» EER (Energy Efficiency Ratio). Η μέτρηση του COP και του EER γίνεται στο εργαστήριο και μάλιστα σε τυποποιημένες συνθήκες (συνθήκες Eurovent).

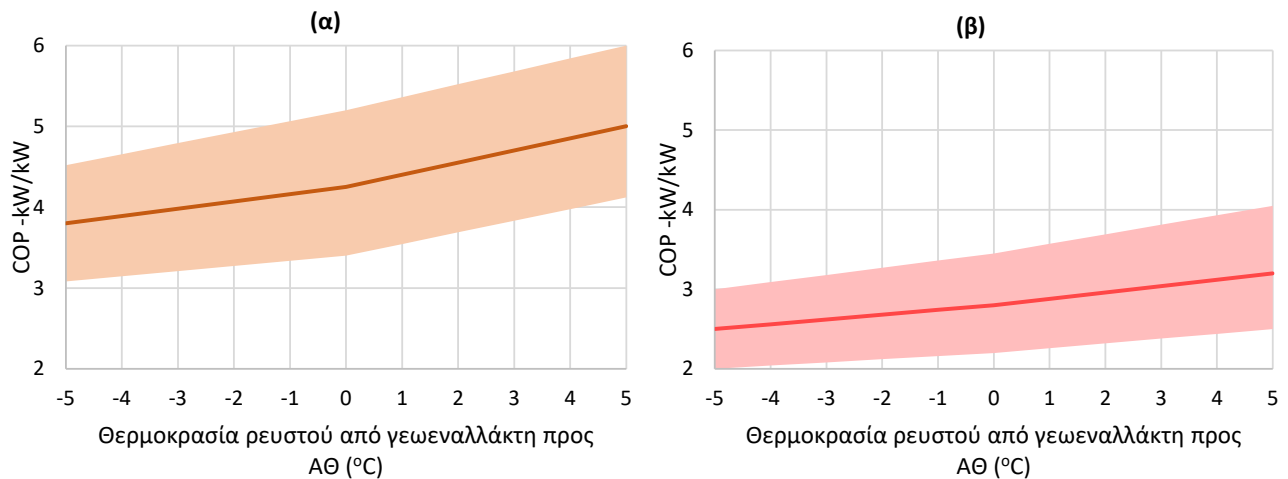
Για τη λειτουργία της θέρμανσης ο συντελεστής συμπεριφοράς ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ισχύος του συμπυκνωτή, q_H , προς την (ηλεκτρική) ισχύ του συμπιεστή, w :

$$COP_H = COP = \frac{q_H}{w}$$

Και για τη λειτουργία της ψύξης, ο λόγος ενεργειακής απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της ψυκτικής ισχύος του εξατμιστή, q_C , προς την (ηλεκτρική) ισχύ του συμπιεστή, w :

$$COP_C = EER = \frac{q_C}{w}$$

Εικόνα 12: Βαθμός απόδοσης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αέρα-νερού σε συνάρτηση με την παρεχόμενη θερμοκρασία ρευστού από το γεωεναλλάκτη για (α) ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης [35°C] και (β) για σώματα καλοριφέρ [50°C]



Πηγή: (Sanner et al., 2003)

Επειδή όμως σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας οι θερμοκρασίες δεν ισούνται με τις θερμοκρασίες που καθορίζονται στο πρότυπο Eurovent, ορίζεται ο εποχιακός βαθμός απόδοσης SPF (Seasonal Performance Factor), ο οποίος είναι ο λόγος της συνολικής ωφέλιμης ενέργειας προς τη συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει και την κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας (π.χ. από ηλεκτρική αντίσταση, ανεμιστήρες εξατμιστή και συμπυκνωτή) (Γιαννάκος, 2014).

Για τη λειτουργία της θέρμανσης, ο εποχιακός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ενέργειας που αποδίδει ο συμπυκνωτής, Q_H , προς την καταναλισκόμενη (ηλεκτρική) ενέργεια, P :

$$SPF_H = SCOP = \frac{Q_H}{P}$$

Για τη λειτουργία της ψύξης, ο εποχιακός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της θερμότητας που αφαιρεί ο εξατμιστής, Q_C , προς την καταναλισκόμενη (ηλεκτρική) ενέργεια, P :

$$SPF_C = SEER = \frac{Q_C}{P}$$

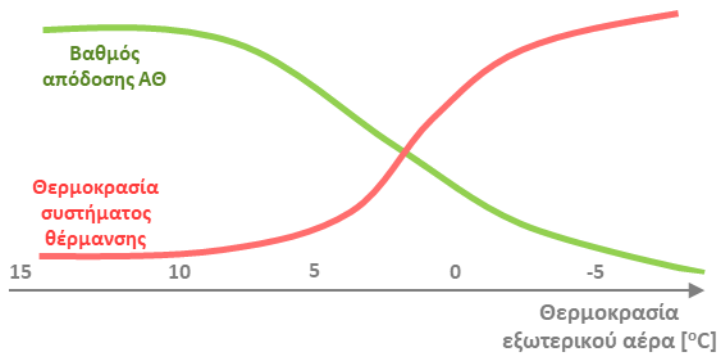
Δύο είναι τα ζητήματα που τίθενται σε σχέση με το ότι η ενεργειακή απόδοση της αντλίας θερμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του μέσου από το οποίο αντλείται η θερμότητα και του μέσου στο οποίο απορρίπτεται η θερμότητα: καταρχάς, το πως επηρεάζεται η απόδοση των αντλιών θερμότητας σε ψυχρά κλίματα, ή γενικά όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι για μεγάλο διάστημα κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου χαμηλές (και άρα η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της πηγής και του αποδέκτη θερμότητας είναι μεγάλη), και ,έπειτα, το πως συνδυάζονται οι αντλίες θερμότητας με το κύκλωμα θέρμανσης (δηλαδή ποια είναι η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να λειτουργούν τα θερμαντικά σώματα ώστε να είναι αποδοτική η λειτουργία της αντλίας θερμότητας) .

Το γεγονός ότι στις γεωθερμικές (και υδροθερμικές) αντλίες θερμότητας, η θερμοκρασία του εδάφους είναι γενικά σταθερή κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας θέρμανσης, και (ανάλογα και με το κλίμα) ικανοποιητικά υψηλή, οι προκλήσεις σχετικά με τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω, αφορούν βασικά τις αεροθερμικές αντλίες θερμότητας, οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε όλη τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου.

Χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας και πιο συγκεκριμένα στη βελτίωση της απόδοσης των συμπιεστών, των εναλλακτών θερμότητας και των ψυκτικών ρευστών, οι σύγχρονες αεροθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα από -15°C έως -30°C , ανάλογα με τον κατασκευαστή, επιτρέποντας τη χρήση τους και σε περιοχές με πολύ ψυχρό κλίμα. Έτσι, οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατοικίες στις Σκανδιναβικές χώρες (Hirvonnen, 2017). Τα τελευταία χρόνια αυτό αντικατοπτρίζεται και στις πωλήσεις αντλιών θερμότητας στη Λιθουανία (Gaigalis et al., 2016; Nowak, 2018). Μια μελέτη στον Καναδά (Self et al., 2013) έδειξε ότι οι συντελεστές απόδοσης των αεροθερμικών αντλιών θερμότητας για διάφορα συστήματα θέρμανσης ήταν 2,3–3,5. Μελέτες που έγιναν στη Λετονία (Kazjonovs et al., 2014) έδειξαν ότι ο εποχιακός βαθμός απόδοσης μιας αεροθερμικής αντλίας θερμότητας ποικίλλει από 2,45 έως 2,62 για μέσες θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα, αντίστοιχα, μεταξύ $+2,4^{\circ}\text{C}$ και $+6,0^{\circ}\text{C}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι κατά τους κρύους μήνες σε περιοχές με ψυχρό κλίμα, οι αεροθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να λειτουργήσουν με μέσο εποχιακό βαθμό απόδοσης από 1,8 έως 3,5 (Valancius et al., 2019). Αυτό το εύρος ενεργειακής απόδοσης είναι αρκετά μεγάλο, και οι υψηλότερες τιμές του δεν αντιστοιχούν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (της τάξης των -15°C), γεγονός που συνεπάγεται ότι οπωσδήποτε η τεχνολογική πρόοδος έχει συμβάλει στην αντιμετώπιση της πρόκλησης της διατήρησης του βαθμού απόδοσης σε υψηλά επίπεδα, ακόμα και σε χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, όμως σε αυτές τις συνθήκες η λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι πιο δυσμενής.

Εικόνα 13: Συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος με το βαθμό απόδοσης της αντλίας θερμότητας (ΑΘ) και της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής στο σύστημα θέρμανσης



Πηγή: (Günther et al., 2020; Prinzing et al., 2020)

Όσον αφορά τις επιλογές που υπάρχουν για τη σύνδεση της αντλίας θερμότητας με το κύκλωμα θέρμανσης του κτηρίου, αυτές είναι σύνδεση είτε με κοινά θερμαντικά σώματα, είτε με σώματα ανεμιστήρα στοιχείου (fan-coils), είτε με ενδοδαπέδια θέρμανση. Τα κοινά θερμαντικά σώματα απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες νερού προσαγωγής στο κύκλωμα θέρμανσης (της τάξης των 70°C) ενώ οι

υπόλοιπες διατάξεις λειτουργούν αποτελεσματικά σε χαμηλές θερμοκρασίες (από 35°C έως 55°C). Γενικά, σε ένα σύστημα αντλίας θερμότητας, το υδραυλικό τμήμα της εγκατάστασης ελέγχει μέσω συστήματος αυτοματισμού τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής με στόχο να τη μεταβάλει ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία. Έτσι, η αντλία θερμότητας παρέχει νερό προσαγωγής υψηλής θερμοκρασίας μόνο όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλή για να εξασφαλίσει την απαιτούμενη θερμική άνεση, ενώ όσο η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι ηπιότερη το σύστημα αυτοματισμού ρυθμίζει τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής για να εξασφαλίσει θερμική άνεση με σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 13) παρουσιάζεται ποιοτικά, αυτή η συσχέτιση.

Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανά τύπο αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών

| Τύπος αντλίας θερμότητας | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|---|--|---|
| Συστήματα με βελτιστοποιημένο σχεδιασμό (Optimised design for specific refrigerants) | Μικρή τροποποίηση της τυπικής αντλίας θερμότητας | Οι βελτιώσεις στα εξαρτήματα της αντλίας θερμότητας μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση σταδιακά, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν όρια στο εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας και στην αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να προσφέρει κάθε ψυκτικό |
| Τεχνική ενισχυμένης εισαγωγής ατμού (EVI - Enhanced Vapour Injection) | <ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να προσφέρει νερό προσαγωγής θερμοκρασίας μέχρι και 80°C • Η απόδοση κάθε κύκλου μπορεί να βελτιστοποιηθεί και η ανύψωση της θερμοκρασίας για κάθε κύκλο μειώνεται | <ul style="list-style-type: none"> • Απαιτούνται δύο ξεχωριστά ψυκτικά σε δύο ξεχωριστούς κύκλους, άρα υψηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος • Πιο περίπλοκο σύστημα • Μεγάλες απαιτήσεις χώρου |
| Αθ τεχνολογίας αλληλουχίας δύο συμπιεστών (Cascade) | Μπορεί να προσφέρει νερό προσαγωγής θερμοκρασίας σε ένα μόνο σύστημα μέχρι και 70-75°C | Ακριβότερο και πιο περίπλοκο σύστημα |
| Αθ φυσικών ψυκτικών ρευστών με κύκλο ρόφησης (Sorption) | Το ζεύγος ψυκτικού-ροφητικού μέσου επιτρέπει την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών | Βαθμός απόδοσης χαμηλότερος από ό, τι σε Αθ τεχνολογίας συμπίεσης ατμών |

Πηγή: (The Carbon Trust and Rawlings Support Services, 2016)

Επί του παρόντος μια αντλία θερμότητας μπορεί να παρέχει νερό προσαγωγής θερμοκρασίας έως και 80°C (αντλίες θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών), και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές προς αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος θέρμανσης (πχ. με λέβητα πετρελαίου ή αερίου) χωρίς αντικατάσταση των κοινών θερμαντικών σωμάτων. Το παραπάνω είναι εφικτό με αντλία θερμότητας

τεχνολογίας αλληλουχίας δύο συμπιεστών (cascade). Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιεί δύο ανεξάρτητα ψυκτικά κύκλωμα με διαφορετικό ψυκτικό ρευστό: ο πρώτος συμπιεστής αναλαμβάνει να μεταφέρει τη θερμότητα που απορροφάται στον εναλλάκτη της εξωτερικής μονάδας (η μεταφορά θερμότητας γίνεται σε ψυκτικό κύκλωμα που χρησιμοποιεί ψυκτικό ρευστό R410Aa) προς το δεύτερο κύκλωμα στο οποίο ο δεύτερος συμπιεστής αναλαμβάνει να ανυψώσει το σημείο συμπύκνωσης του ψυκτικού ρευστού (η μεταφορά θερμότητας γίνεται σε ψυκτικό κύκλωμα που χρησιμοποιεί ψυκτικό ρευστό R134a) σε τέτοιο επίπεδο ώστε να υπάρξει η επιθυμητή θερμοκρασία για το νερό προσαγωγής (Daikin, 2022). Η τεχνολογία αυτή υπάρχει στην αγορά εδώ και αρκετά χρόνια αποτελώντας τη λύση τόσο για συστήματα θέρμανσης όσο και ψύξης. Την τελευταία δεκαετία ήρθε στο προσκήνιο λόγω της αύξησης των τιμών των ορυκτών καυσίμων και της απόδοσής της, σε εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες νερού προσαγωγής. Άλλες τεχνικές που μπορούν να εξασφαλίσουν υψηλές θερμοκρασίες νερού προσαγωγής, περιλαμβάνουν συστήματα με βελτιστοποιημένο σχεδιασμό για συγκεκριμένα ψυκτικά ρευστά (optimised design for specific refrigerants), τεχνική ενισχυμένης εισαγωγής ατμού (EVI - Enhanced Vapour Injection), αντλία θερμότητας φυσικών ψυκτικών ρευστών (όπως είναι το CO₂ και το προπάνιο- R290) με κύκλο ρόφησης (sorption) (The Carbon Trust and Rawlings Support Services, 2016).

Τα θερμοκρασιακά επίπεδα του νερού προσαγωγής στο κύκλωμα θέρμανσης που καθιστούν αποδοτική μια αντλία θερμότητας και είναι ευρέως διαδεδομένα σήμερα στην αγορά κυμαίνονται από 35°C έως 55°C (αντλίες θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών). Για αυτό η ενδοδαπέδια θέρμανση αποτελεί την πλέον κατάλληλη μέθοδο θέρμανσης χώρων, καθώς δεν απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες νερού προσαγωγής. Η επιλογή της ενδοδαπέδιας θέρμανσης όμως είναι στην πράξη εφικτή μόνο σε νέα κτήρια (ή σε κτήρια που υφίστανται ριζική ανακαίνιση) διότι απαιτεί σημαντικές κατασκευαστικές εργασίες. Για τις υφιστάμενες κατασκευές, που στην πλειονότητά τους είναι εξοπλισμένες με τα κοινά θερμαντικά σώματα, η αντικατάσταση όλων ή ορισμένων θερμαντικών σωμάτων με μονάδες fan coils ή με μεγαλύτερα σώματα, η μη διακοπτόμενη λειτουργία της θέρμανσης, η προσθήκη δοχείου θερμού νερού και πολλές φορές συνδυασμός κάποιων ή και όλων των παραπάνω (The Carbon Trust and Rawlings Support Services, 2016), μπορεί να οδηγήσουν σε βελτίωση του βαθμού απόδοσης του συστήματος της αντλίας θερμότητας, το οποίο όμως δε θα είναι όσο αποδοτικό θα ήταν με την επιλογή της ενδοδαπέδιας θέρμανσης.

Η αγορά για αντλίες θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας είναι προς το παρόν πολύ περιορισμένη, και σύμφωνα με τους αναλυτές, η αγορά αυτή δεν θα μπορέσει να αναπτυχθεί ραγδαία, τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα, επειδή το κόστος αυτών των συστημάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των αντλιών θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών. Επίσης, οι εξωτερικές μονάδες των αντλιών θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των χαμηλών θερμοκρασιών, και αυτό είναι ένα ακόμα μειονέκτημα.

Ανάλογα και με την επιλογή των θερμαντικών σωμάτων, υπάρχουν και διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος της αντλίας θερμότητας όσον αφορά το κατά πόσον οι θερμικές ανάγκες του κτηρίου θα καλύπτονται αποκλειστικά από την αντλία θερμότητας. Με άλλα λόγια, ανάλογα με την απαιτούμενη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής (που εξαρτάται από το είδος των θερμαντικών σωμάτων που διαθέτει το σύστημα), υπάρχουν και διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος της αντλίας θερμότητας που μπορούν να εξασφαλίσουν όχι μόνο θερμική άνεση αλλά και εξοικονόμηση ενέργειας.

Στα μονοσθενή συστήματα (monovalent systems) η αντλία θερμότητας παρέχει όλη την απαραίτητη θερμότητα στο δίκτυο θέρμανσης και η ισχύς της πρέπει να είναι ικανή να καλύψει το θερμικό φορτίο του κτηρίου ακόμη και στη χαμηλότερη θερμοκρασία σχεδιασμού (μέση ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία). Γι' αυτή τη διαμόρφωση οι πιο κατάλληλες είναι οι γεωθερμικές (ή υδροθερμικές) αντλίες θερμότητας, καθώς σε αυτές η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας διατηρείται σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το μονοσθενές σύστημα παρουσιάζει αρκετά οικονομικά πλεονεκτήματα, ωστόσο δεν μπορεί να ανταποκριθεί το ίδιο αποδοτικά στις περιπτώσεις κτηρίων με χαμηλή ποιότητα θερμομόνωσης αλλά και σε ακραίες εξωτερικές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται σε νέες κατασκευές που έχουν καλή θερμική συμπεριφορά και συνήθως συνδυάζεται με ενδοδαπέδια θέρμανση (Γιαννάκος, 2014).

Στα μονοενεργειακά συστήματα (monoenergetic systems) η αντλία θερμότητας παρέχει το κύριο μέρος της απαιτούμενης θερμότητας, σε ποσοστό περίπου 95%. Σε περιπτώσεις όμως εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών τίθεται αυτόματα σε λειτουργία βοηθητική ηλεκτρική αντίσταση που λειτουργεί συμπληρωματικά και παράλληλα με την αντλία θερμότητας έως ότου η εξωτερική θερμοκρασία επανέλθει σε επιτρεπτά όρια. Ο όρος μονοενεργειακό σύστημα σχετίζεται με το γεγονός ότι τόσο για τη βοηθητική αντίσταση όσο και για την αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται κοινή πηγή ενέργειας, η ηλεκτρική (Γιαννάκος, 2014).

Στα δισθενή (ή υβριδικά) συστήματα (bivalent ή hybrid systems), εκτός από την αντλία θερμότητας, χρησιμοποιείται και δεύτερη πηγή θερμότητας, συνήθως λέβητας αερίου. Σκοπός της δεύτερης πηγής μπορεί να είναι είτε η κάλυψη θερμικών φορτίων που βρίσκονται πέραν των ορίων ισχύος της αντλίας θερμότητας, είτε η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά που επιτυγχάνει η αντλία θερμότητας. Ανάλογα με τον τρόπο που συνδυάζονται η αντλία θερμότητας με την συμπληρωματική πηγή, τα υβριδικά συστήματα διαχωρίζονται σε υβριδικά συστήματα με παράλληλη ή σε υβριδικά συστήματα με εναλλασσόμενη λειτουργία της αντλίας θερμότητας και της συμπληρωματικής πηγής ενέργειας (Γιαννάκος, 2014).

Η ανάπτυξη των συστημάτων αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιούν συμπληρωματική πηγή θερμότητας (είτε τα μονοενεργειακά είτε τα υβριδικά συστήματα), έχει ως στόχο να αντιμετωπίσει καταρχάς την εξάρτηση της απόδοσης των αεροθερμικών αντλιών θερμότητας από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του μέσου από το οποίο αντλείται η θερμότητα και του μέσου στο οποίο απορρίπτεται η θερμότητα. Συγκεκριμένα, τόσο η ηλεκτρική αντίσταση όσο και ο λέβητας, μπορούν να συμπληρώνουν την αντλία θερμότητας όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες του αέρα κατά τη χειμερινή περίοδο είναι πολύ χαμηλές, και έτσι να εξασφαλίζουν ότι η θερμοκρασία του νερού προσαγωγής στα θερμαντικά σώματα είναι στο επίπεδο που απαιτείται για εξασφάλιση θερμικής άνεσης. Με άλλα λόγια, ο λόγος ύπαρξης των συμπληρωματικών πηγών θερμότητας είναι να καλύπτονται περιστασιακά κάποια ακραία φορτία χωρίς να υπερδιαστασιοποιηθεί η αντλία, και όχι να δίνονται σε μόνιμη βάση υψηλότερες θερμοκρασίες προσαγωγής. Ειδικά για τα υβριδικά συστήματα, το παραπάνω έχει μια καθαρά οικονομική διάσταση: επειδή η απόδοση της αντλίας θερμότητας μπορεί να είναι τόσο χαμηλή (κάτω από μια συγκεκριμένη εξωτερική θερμοκρασία) άρα το λειτουργικό κόστος της να αυξάνεται, μπορεί να είναι οικονομικά πιο αποδοτικό το σύστημα να καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης στη διάρκεια εκείνων των περιόδων με το λέβητα (Günther et al., 2020; Prinzing et al., 2020).

Επιπλέον, ο συνδυασμός αντλίας θερμότητας με λέβητα μπορεί να είναι η πιο αποδοτική επιλογή σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης θερμικής ενέργειας, είτε διότι οι απαιτήσεις του κτηρίου αυτού καθαυτού είναι μεγάλες (για παράδειγμα σε κτήριο πολυκατοικίας με κεντρική θέρμανση), είτε επειδή η θερμική συμπεριφορά του κτηρίου είναι κακή. Άρα, οι υβριδικές αντλίες θερμότητας μπορεί να είναι μια ενδιάμεση λύση, που οδηγεί σε μείωση εκπομπών CO₂ και ενεργειακή εξοικονόμηση σε παλαιά κτήρια που έχουν κακή θερμική συμπεριφορά και στα οποία δεν είναι (τεχνικά ή οικονομικά) εφικτή η πλήρης ενεργειακή ανακαίνιση (εφαρμογή μόνωσης στο κέλυφος και αντικατάσταση του υπάρχοντος εξοπλισμού θέρμανσης με αντλία θερμότητας) βραχυπρόθεσμα (Observ'ER, 2021). Το ίδιο ισχύει και για κτήρια που έχουν αναβαθμίσει ενεργειακά το κέλυφος (άρα έχουν περιορίσει τις θερμικές τους ανάγκες) αλλά διατηρούν το υπάρχον δίκτυο θέρμανσης (υψηλών θερμοκρασιών). Και σε αυτές τις περιπτώσεις, η επιλογή υβριδικού συστήματος αντλίας θερμότητας θα είναι οικονομικά πιο αποδοτική από την επιλογή μονοσθενούς συστήματος.

Η επιλογή υβριδικού συστήματος μπορεί να είναι μια οικονομικά αποδοτική επιλογή και για την περίπτωση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Συγκεκριμένα, ο συνδυασμός γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με δευτερεύουσα πηγή θέρμανσης μπορεί να μειώσει το μέγεθος του απαιτούμενου συστήματος βρόγχου, μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης και επιτρέποντας στην αντλία θερμότητας να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά καθώς δεν θα καταπονείται σε περιόδους αιχμής (IEA-ETSAP & IRENA, 2012).

Όσον αφορά την επιλογή του μεγέθους της αντλίας θερμότητας σε ένα υβριδικό σύστημα, υπάρχει διαμάχη ως προς αυτό μεταξύ των εγκαταστατών σε ορισμένες χώρες. Έτσι, για παράδειγμα, σύμφωνα με καθοδήγηση που έχει κυκλοφορήσει από ένα πρόγραμμα της κυβέρνησης του Ηνωμένου Βασιλείου, συνιστάται το μέγεθος των αντλιών θερμότητας υβριδικού συστήματος για κτήριο κατοικίας να είναι αυτό που θα αντιστοιχούσε στην πλήρη κάλυψη των αναγκών θέρμανσης από την αντλία θερμότητας (σαν να είναι η αντλία θερμότητας η μόνη θερμική πηγή), και όχι αυτό που αντιστοιχεί στη μερική κάλυψη των θερμικών αναγκών του κτηρίου από την αντλία θερμότητας (IEA-ETSAP & IRENA, 2012).

Όσον αφορά τις τυπικές διαμορφώσεις των υβριδικών συστημάτων, σύμφωνα με τους κατασκευαστές, αυτές μπορεί να είναι οι εξής (Foster et al., 2017):

- Προέκταση υπάρχοντος συστήματος λέβητα (add-on): η αντλία θερμότητας και ο ελεγκτής εγκαθίστανται ώστε να λειτουργούν παράλληλα με τον υπάρχοντα λέβητα.
- Ενσωματωμένο σύστημα (integrated): λέβητας, αντλία θερμότητας και ελεγκτής πωλούνται και τοποθετούνται μαζί ως ένα προϊόν.
- Συσκευασμένο σύστημα (packaged): λέβητας, αντλία θερμότητας και ελεγκτής διατίθενται ως ξεχωριστά προϊόντα αλλά πωλούνται και τοποθετούνται μαζί.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι προφανές ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ του τύπου της αντλίας θερμότητας και της κατάστασης του κτηρίου, ήτοι εάν πρόκειται για νέα κατασκευή, για κτήριο που έχει υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση ή για κτήριο που βρίσκεται στην αρχική του κατάσταση. Η βασική διάσταση αυτού του ζητήματος σχετίζεται με τις θερμικές ανάγκες που καλείται να καλύψει η αντλία θερμότητας (δηλαδή με τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου), όμως υπάρχουν και πρακτικά ζητήματα που συνυπολογίζονται κατά την επιλογή (δηλαδή η επιλογή συγκεκριμένων θερμαντικών σωμάτων).

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν εξάγονται τα εξής συμπεράσματα, τα οποία έχουν σημασία και συμπεριλαμβάνονται στη μοντελοποίηση:

Όσον αφορά τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας σε ψυχρά κλίματα, αν και αυτό αποτελούσε πολύ μεγάλη πρόκληση τα προηγούμενα χρόνια., η τεχνολογική πρόοδος, έχει επιτρέψει την αντιμετώπισή της σε μεγάλο βαθμό. Συγκεκριμένα:

- Η κατασκευαστική βιομηχανία έχει αναπτύξει είδη αεροθερμικών αντλιών θερμότητας που μπορούν να λειτουργούν με υψηλή απόδοση, ή τουλάχιστον υψηλότερη από τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης, ακόμα και σε πολύ χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες.
- Οι υβριδικές αντλίες θερμότητας (και οι μονοενεργειακές αντλίες θερμότητας) έχουν κατασκευαστεί προκειμένου η συμπληρωματική πηγή να καλύπτει τις θερμικές ανάγκες του κτηρίου στις «αιχμές» ζήτησης, όταν δηλαδή οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι αρκετά χαμηλές και η αντλία θερμότητας αδυνατεί να θερμάνει το νερό προσαγωγής στην απαραίτητη θερμοκρασία με υψηλή απόδοση.
- Οι γεωθερμικές (ή υδροθερμικές) αντλίες θερμότητας είναι η πιο ασφαλής επιλογή, γιατί η θερμοκρασία του εδάφους (ή του νερού) που λειτουργεί ως πηγή θερμότητας διατηρεί μια σταθερή (και ικανοποιητικά υψηλή) θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Το μειονέκτημα αυτών των τύπων αντλίας θερμότητας έγκειται στο υψηλό κόστος εγκατάστασης, την απαίτηση χώρου και τον έλεγχο της ποιότητας του εδάφους. Ο συνδυασμός με λέβητα μπορεί να αντιμετωπίσει αυτά τα μειονεκτήματα.

Απόδειξη άλλωστε ότι οι αντλίες θερμότητας έχουν σαφώς δυνατότητα εφαρμογής ακόμα και σε ψυχρά κλίματα (χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις και λύσεις που αναφέρθηκαν και παραπάνω) είναι το γεγονός ότι οι σκανδιναβικές χώρες είναι πρωτοπόρες σε πωλήσεις διαχρονικά (Nowak, 2021b).

Όσον αφορά τη συσχέτιση της επιλογής της αντλίας θερμότητας με την κατάσταση του κτηρίου (δηλαδή το κατά πόσον οι αντλίες θερμότητας είναι κατάλληλες μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογών), έχει υπάρξει σημαντική πρόοδος και ως προς αυτό. Είναι δεδομένο ότι, όσο μικρότερες είναι οι απώλειες θερμότητας από το κτήριο, τόσο πιο αποτελεσματικά μπορεί να λειτουργήσει μια αντλία θερμότητας. Έτσι, οι αντλίες θερμότητας οπωσδήποτε είναι πιο αποδοτικές στα νέα ή ριζικά ανακαινισμένα κτήρια. Η εξέλιξη της κατασκευαστικής βιομηχανίας και η τεχνολογική πρόοδος (Günther et al., 2020; Prinzing et al., 2020), μπορούν να εξασφαλίσουν την αποδοτική χρήση συστημάτων αντλίας θερμότητας και στα παλαιά κτήρια. Συγκεκριμένα, από τεχνικής άποψης, ισχύουν τα παρακάτω:

- Για τα νέα κτήρια που έχουν κατασκευαστεί βάσει αυστηρών οικοδομικών κανονισμών, και άρα έχουν χαμηλό θερμικό φορτίο, όταν μάλιστα σε αυτά υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού του συστήματος της αντλίας με σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, μπορούν να επιλέγονται μονοσθενείς αεροθερμικές αντλίες θερμότητας.
- Σε κτήρια που έχουν αναβαθμιστεί ενεργειακά, αλλά δεν έχουν αντικαταστήσει τα θερμαντικά σώματα, απαιτείται η επιλογή αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν πρόκειται για επιλογή μονοσθενούς συστήματος, τότε μπορεί να επιλεγεί αντλία θερμότητας τεχνολογίας cascade, που είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών, έχει όμως επί του παρόντος μεγάλο κόστος. Εναλλακτικά, μια υβριδική αντλία θερμότητας μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά σε τέτοιες εφαρμογές.

- Σε κτήρια που έχουν αναβαθμιστεί ενεργειακά και επιπλέον έχουν αντικαταστήσει τα παραδοσιακά θερμαντικά σώματα, τότε ανάλογα και με το είδος των θερμαντικών σωμάτων, μια μονοσθενής ή μια υβριδική αντλία θερμότητας θα λειτουργήσουν εξίσου αποδοτικά.
- Σε κτήρια που βρίσκονται στην υφιστάμενη κατάσταση όσον αφορά το κέλυφος αλλά και τα θερμαντικά σώματα, και άρα έχουν κακή θερμική συμπεριφορά και απαιτούν νερό προσαγωγής υψηλής θερμοκρασίας, μια μονοσθενής αντλία θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών ή ένα υβριδικό σύστημα θα λειτουργούσαν αποδοτικά.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, και ανάλογα με τις θερμικές ανάγκες της κάθε εφαρμογής (νέο κτήριο, ανακαινισμένο κτήριο, κτήριο σε υφιστάμενη κατάσταση), θα πρέπει να επιλεγούν και διαφορετικά μεγέθη αντλίας θερμότητας. Αυτό προφανώς επηρεάζει την επενδυτική δαπάνη, η οποία σε συνδυασμό με το λειτουργικό κόστος του συστήματος (που επίσης εξαρτάται από τα θερμαντικά σώματα και το κλίμα, για τις αεροθερμικές αντλίες θερμότητας), καθορίζουν την οικονομικότητα της επένδυσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχει ισχυρή εξάρτηση μεταξύ της θερμικής συμπεριφοράς του κτηρίου και της καταλληλότητας της αντλίας θερμότητας, από οικονομικής (αλλά και περιβαλλοντικής) άποψης. Εκτός από την τεχνολογία που εξελίσσεται και διευρύνει τις δυνατές εφαρμογές των μονοσθενών συστημάτων αντλίας θερμότητας, οι υβριδικές αντλίες θερμότητας αποτελούν την οικονομικά πιο αποδοτική επιλογή στην πλειονότητα των εφαρμογών, και αυτό είναι μια τάση που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια και οπωσδήποτε συμβαδίζει με τους φιλόδοξους ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους που έχουν τεθεί στην Ευρώπη.

Τεχνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα σχετικά με τις αντλίες θερμότητας, είναι σαφές ότι ανάλογα με τον τύπο της αντλίας θερμότητας, και ιδίως ανάλογα με την πηγή θερμότητας και το σύστημα διανομής (δίκτυο διανομής και τερματικές μονάδες) στο οποίο συνδέεται η αντλία, τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά αυτών ποικίλουν.

Πίνακας 9: Εύρος τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών τύπων αντλίας θερμότητας για εφαρμογή στα κτήρια κατοικίας, όπως βρίσκονται στη βιβλιογραφία

| Τύπος αντλίας θερμότητας (ΑΘ) | | Θερμική ισχύς ΑΘ | Κόστος αγοράς | Κόστος συντήρησης | Κόστος εγκατάστασης* | Βαθμός απόδοσης (COP) | | | | Τεχν. χρόνος ζωής | |
|-------------------------------|------------------------------|------------------|---------------|-------------------|----------------------|----------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|-------------------|---------|
| | | | | | | Χαμηλής θερμοκρασίας (35°C-50°C) | | Υψηλής θερμοκρασίας (55°C-80°C) | | | |
| | | | | | | Βορράς | Νότος | Βορράς | Νότος | | |
| | | kW | €/kW | €/χρόνο | €/kW | | | | | Χρόνια | |
| ΑΘ χαμηλών θερμοκρασιών | Αεροθερμική ΑΘ (αέρα- αέρα) | 7-12 | 420 - 587 | 70 - 180 | 179 - 249 | 3.2 - 4.1 | 4 - 5 | 2 - 3.4 | 3.3 - 3.5 | 10-20 | |
| | Αεροθερμική ΑΘ (αέρα-νερού) | | 638 - 1046 | 180 - 210 | 271 - 445 | 3.2 - 4.1 | 4 - 5 | 2.5 - 3.4 | 3.3 - 3.5 | 10-20 | |
| | Γεωθερμική ΑΘ (νερού-νερού) | | | | | | | | | | |
| | Οριζόντιοι γεωεναλλάκτες | | 551 - 891 | 180 - 210 | 1073 - 2425 | 4.6 - 5 | 5.1 - 5.5 | 2.5 - 4.2 | 4.3 - 4.7 | 15 - 20 | |
| | Κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες | | | | 1555-2910 | 5.0 - 5.5 | 5.6- 6.0 | 4.2 - 4.6 | 4.8 - 5.2 | | |
| | Υδροθερμική ΑΘ (νερού-νερού) | | 551 - 891 | 180 - 210 | 927-1492 | 5.2 - 5.7 | 5.4 - 5.8 | 4 - 4.3 | 4.5 - 4.9 | 15 - 20 | |
| | ΑΘ αερίου | | 471 - 2147 | 180 - 210 | 228 - 1039 | 1.4 - 1.5 | 1.8 - 1.5 | 1.3 - 1.4 | 1.3 - 1.4 | 15 - 20 | |
| | Υβριδική ΑΘ** | | 3.5-6 | 718 - 1809 | 180 - 210 | 306 - 770 | 3.2 - 4.1 | 4 - 4.5 | 2.7 - 3.4 | 3.3 - 3.5 | 15 - 20 |
| ΑΘ υψηλών θερμοκρασιών | Αεροθερμική ΑΘ (80°C+) | 10-16 | 516-710 | 180 - 210 | 300-700 | | | | | 15 - 20 | |
| | Αεροθερμική ΑΘ (70°C+) | 6-13 | 387-838 | 180 - 210 | 260-960 | | | | | 15 - 20 | |
| | Αεροθερμική ΑΘ (65°C) | 9-15 | 322-580 | 180 - 210 | 320-1000 | | | | | 15 - 20 | |
| | Γεωθερμική ΑΘ (65°C+) | 6-30 | 451-1290 | 180 - 210 | 900-1600 | | | | | 15 - 20 | |

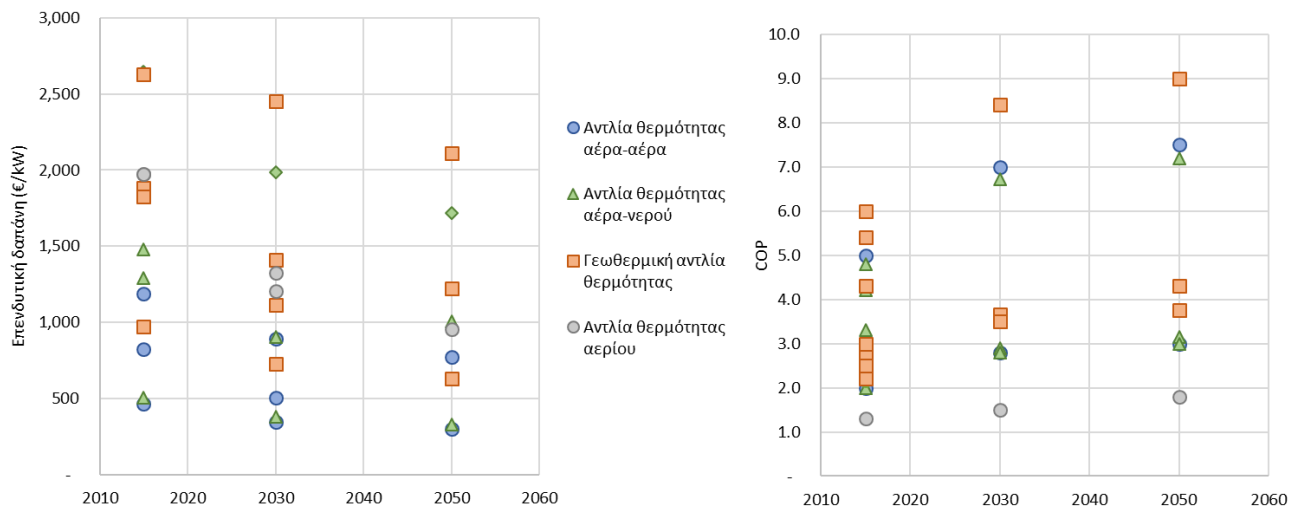
Σημείωση(*): Το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνει το κόστος γεώτρησης, επεμβάσεις στο δίκτυο θέρμανσης, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης θερμοστατικών σωμάτων
 Σημείωση(**): Η ισχύς του λέβητα κυμαίνεται μεταξύ 5-10kW - Το κόστος αφορά το υβριδικό σύστημα συνολικά (δηλαδή συμπεριλαμβάνεται και το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του λέβητα που υπολογίζεται σε περίπου 1000€)

Πηγές: (Arran & Slowe, 2012; Bettgenhäuser et al., 2013; Foster et al., 2017; IEA-ETSAP & IRENA, 2012, 2013; Kokoni & Leach, 2021)

Βάσει της βιβλιογραφικής αναδρομής που έγινε για την έρευνα στο πλαίσιο της διατριβής, έχουν συλλεχθεί (από διάφορες πηγές) και πρόκειται να παρουσιαστούν εδώ τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά για διάφορους τύπους αντλίας θερμότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές στα κτήρια. Τα κόστη αφορούν σημερινές τιμές (Πίνακας 9), αλλά παρουσιάζεται και η αναμενόμενη εξέλιξη του κόστους και της ενεργειακής απόδοσης όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία (Εικόνα 14). Λόγω της πληθώρας των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υβριδικές αντλίες θερμότητας, θα αναφερθούν, επίσης εδώ αναλυτικά στοιχεία της σύγκρισης του κόστους μεταξύ ενός μονοσθενούς συστήματος και ενός υβριδικού συστήματος αντλίας θερμότητας.

Τα κόστη αγοράς και εγκατάστασης των αντλιών θερμότητας ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος της μονάδας. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι πιο ακριβές από τις αεροθερμικές αντλίες θερμότητας ίδιου μεγέθους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η εγκατάσταση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας απαιτεί εντατικότερες εργασίες και επιπλέον εξοπλισμό. Το κόστος εγκατάστασης εξαρτάται επίσης από τη διαμόρφωση της αντλίας θερμότητας: οι αντλίες θερμότητας διαιρούμενου τύπου έχουν περίπου διπλάσιο κόστος εγκατάστασης από αυτές του ενιαίου, αν και αυτό εξαρτάται και από το κόστος εργασίας στην κάθε χώρα. Τα παλαιότερα κτήρια έχουν χειρότερη θερμική συμπεριφορά και, για αυτό απαιτείται η εγκατάσταση μεγαλύτερων μονάδων για την αποτελεσματική θέρμανση αυτών των κτηρίων. Το κεφαλαιουχικό κόστος των αντλιών θερμότητας αυξάνεται με το μέγεθος, έτσι τα ανεπαρκώς μονωμένα κτήρια ενδέχεται να πρέπει να πραγματοποιήσουν υψηλότερες επενδυτικές δαπάνες από τα πιο σύγχρονα κτήρια, εάν επιλέξουν να εγκαταστήσουν μια αντλία θερμότητας.

Εικόνα 14: Εύρος εξέλιξης τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών τύπων αντλίας θερμότητας, όπως βρίσκονται στη βιβλιογραφία



Πηγές: (Arran & Slowe, 2012; IEA-ETSAP & IRENA, 2013; Nowak, 2021b)

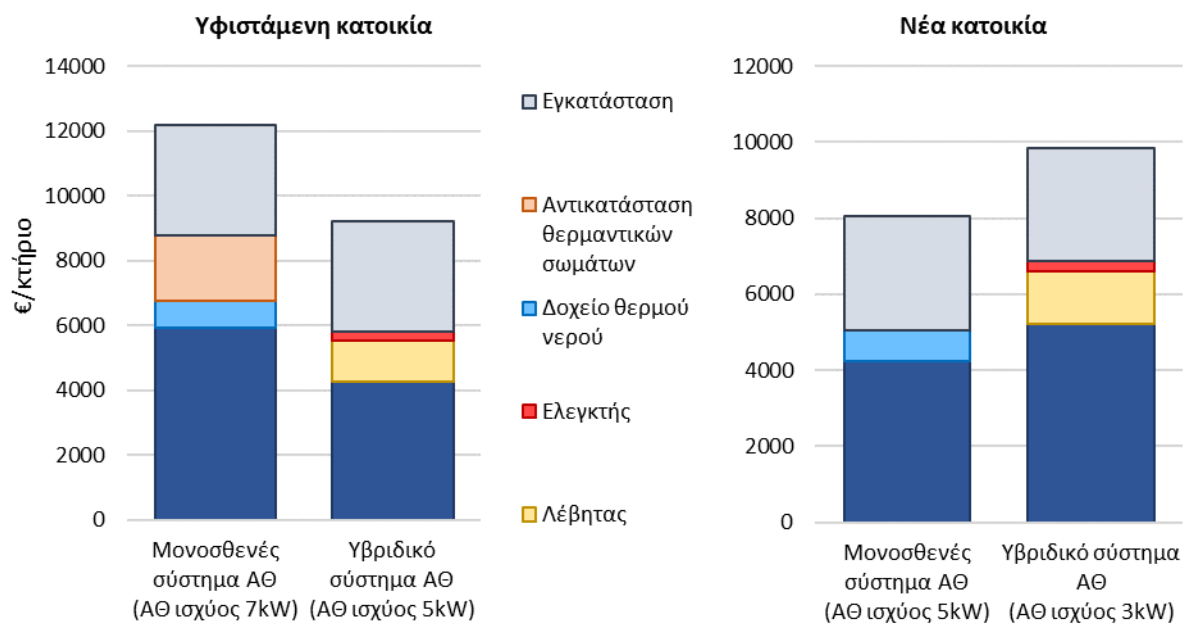
Η σταθερή αύξηση των πωλήσεων των αντλιών θερμότητας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, θα επηρεάσει στο άμεσο μέλλον την εξέλιξη του κόστους τους, ως αποτέλεσμα των παραγόντων learning. Στα τρέχοντα επίπεδα ανάπτυξης της αγοράς, οι ευρωπαϊκές πωλήσεις αντλιών θερμότητας θα διπλασιάζονται κάθε 8 – 10 χρόνια, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατά περίπου. 22% έως το 2024 και κατά περίπου. 39% έως το 2030, σύμφωνα με την έκθεση της EHPA (Nowak, 2021b). Η τυποποίηση

της ίδιας της συσκευής της αντλίας θερμότητας θα επιτρέψει την ευκολότερη και ταχύτερη εγκατάσταση, περιορίζοντας ταυτόχρονα ζητήματα που σχετίζονται με την ποιότητα της εγκατάστασης (Nowak, 2021b).

Μπορούν να αναμένονται βελτιώσεις τόσο στο κόστος όσο και στην απόδοση των αντλιών θερμότητας χάρη στην τεχνολογική ανάπτυξη σε επίπεδο εξαρτημάτων. Η απόδοση των αντλιών θερμότητας έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα των τεχνικών βελτιώσεων, της χρήσης μετατροπέων (inverters) και των συστημάτων ελέγχου. Οι συμπιεστές έχουν βελτιστοποιηθεί για να ταιριάζουν σε εφαρμογές αντλιών θερμότητας, οι βαλβίδες εκτόνωσης, οι τρίοδες βαλβίδες και τα συστήματα ελέγχου τυποποιούνται όλο και περισσότερο και πωλούνται σε πολύ μεγαλύτερους αριθμούς. Η κατασκευή προκατασκευασμένων υπό-μονάδων (ψυκτικοί κύκλοι, πλήρεις εξωτερικές μονάδες) που στη συνέχεια ενσωματώνονται σε ένα περίβλημα και συνδέονται με το υδρονικό σύστημα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση του χρόνου και του κόστους εγκατάστασης (Nowak, 2021b).

Το κόστος των αντλιών θερμότητας αποτελεί το σημαντικότερο εμπόδιο στη ραγδαία εξάπλωση των αντλιών θερμότητας σε εφαρμογές στα κτήρια. Ακόμα και σήμερα, που το κόστος των αντλιών θερμότητας έχει μειωθεί σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, τόσο ένα μονοσθενές όσο και ένα υβριδικό σύστημα αντλίας θερμότητας κοστίζει 5 έως 7 φορές περισσότερο (κόστος αγοράς και εγκατάστασης) από ένα σύστημα λέβητα (αερίου) (Foster et al., 2017).

Εικόνα 15: Σύγκριση επενδυτικής δαπάνης μεταξύ μονοσθενούς και υβριδικού συστήματος αντλίας θερμότητας για εγκατάσταση σε υφιστάμενη και νέα κατοικία



Πηγή: (Foster et al., 2017)

Συγκρίνοντας το κόστος αγοράς και εγκατάστασης μονοσθενούς συστήματος αντλίας θερμότητας και υβριδικού συστήματος αντλίας θερμότητας σε υφιστάμενη κατοικία, το υβριδικό σύστημα έχει μικρότερο συνολικό κόστος διότι στην υβριδική εγκατάσταση υπάρχει η δυνατότητα να μην αντικατασταθούν οι υπάρχουσες θερμαντικές μονάδες (καλοριφέρ) με θερμαντικές μονάδες χαμηλής θερμοκρασίας. Επίσης,

υπάρχει η δυνατότητα η διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος να είναι τέτοια που το μέγεθος της αντλίας θερμότητας να είναι χαμηλότερο από αυτό που απαιτείται στο μονοσθενές σύστημα (όταν δηλαδή οι ανάγκες θέρμανσης πρέπει να καλύπτονται πλήρως από την αντλία θερμότητας), γεγονός που μειώνει ακόμα περισσότερο την επενδυτική δαπάνη στο υβριδικό σύστημα (σε σύγκριση με αυτή σε μονοσθενές) (Foster et al., 2017).

Δεν ισχύει όμως το ίδιο σε νέες κατοικίες. Λόγω της χαμηλότερης θερμικής ζήτησης ενός νέου κτηρίου (που έχει κατασκευαστεί τηρώντας συγκεκριμένους οικοδομικούς κανονισμούς) έναντι αυτής ενός υφιστάμενου κτηρίου κατοικίας, τα μεγέθη της αντλίας θερμότητας τόσο στη περίπτωση υβριδικού συστήματος όσο και στη περίπτωση μονοσθενούς συστήματος είναι μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν στην υφιστάμενη κατοικία. Λόγω της υψηλότερης τιμής ανά kW μικρότερων συστημάτων, αυτό σημαίνει ότι το κόστος της αντλίας θερμότητας είναι υψηλότερο για την υβριδική εγκατάσταση σε σχέση με την αυτόνομη εγκατάσταση. Το πιο σημαντικό όμως στη διαμόρφωση του πλήρους κόστους των δύο συστημάτων στην περίπτωση του νέου κτηρίου, έχει να κάνει με το γεγονός ότι το νέο κτήριο είναι εφοδιασμένο με θερμαντικά σώματα χαμηλής θερμοκρασίας κατά τη φάση της κατασκευής, πράγμα που σημαίνει ότι η περίπτωση εγκατάστασης υβριδικού συστήματος θέρμανσης δεν επωφελείται από την αποφυγή του κόστους εγκατάστασης θερμαντικών σωμάτων χαμηλής θερμοκρασίας (όπως ήταν η περίπτωση του υφιστάμενου κτηρίου) (Foster et al., 2017).

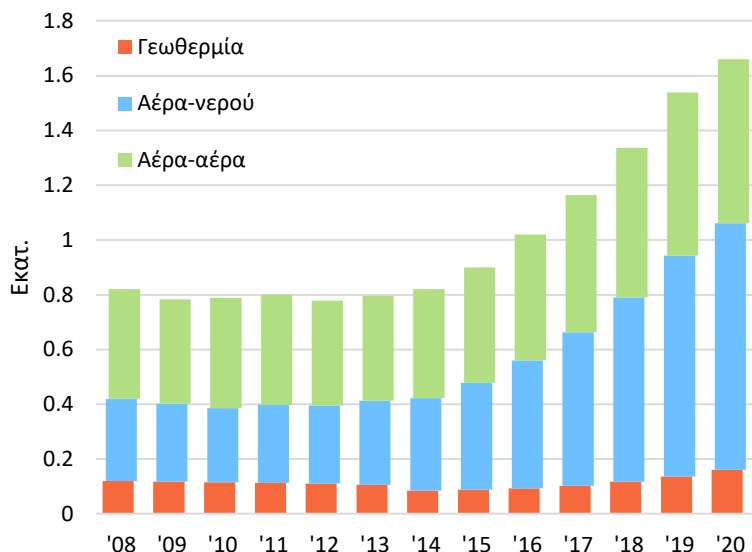
Στατιστικά στοιχεία και εξέλιξη της αγοράς

Σύμφωνα με το (Observ'ER, 2021) οι εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας στην ΕΕ ανέρχονται σε περίπου 41,9 εκατομμύρια μονάδες (40,1 εκατομμύρια αεροθερμικές αντλίες θερμότητας και 1,8 εκατομμύρια γεωθερμικές αντλίες θερμότητας). Αυτός ο αριθμός δεν περιορίζεται στις αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούνται για θέρμανση, αλλά περιλαμβάνει επίσης μονάδες που καλύπτουν και τις ανάγκες ψύξης, και αφορά μόνο τις αντλίες θερμότητας των οποίων οι συντελεστές απόδοσης πληρούν τα κριτήρια ώστε να συνυπολογίζονται στο δείκτη για το μερίδιο των ΑΠΕ.

Σύμφωνα με την έκθεση της ΕΗΡΑ, «Ευρωπαϊκή Αγορά Αντλίας Θερμότητας και Στατιστικά» για το 2021 (Nowak, 2021b), το πλήθος των εγκατεστημένων αντλιών θερμότητας που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για σκοπούς θέρμανσης ανέρχονταν σε περίπου 14,86 εκατομμύρια το 2020 (μέγεθος υπολογισμένο από τις συνολικές πωλήσεις από το 1997 έως το 2020). Σύμφωνα με αυτό, περίπου τα δύο τρίτα των εγκατεστημένων αντλιών θερμότητας καλύπτει κυρίως τις ανάγκες ψύξης. Όσον αφορά τη διασπορά των εγκατεστημένων αντλιών θερμότητας στις διάφορες χώρες στην Ευρώπη, στις πέντε πρώτες θέσεις είναι η Ιταλία και η Γαλλία (με 2,3 εκατ. εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας η καθεμία), ακολουθεί η Σουηδία (με 2 εκατ. εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας), η Νορβηγία (με 1,3 εκατ. εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας), η Φιλανδία (με 1,1 εκατ. εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας) και η Γερμανία (με 1 εκατ. εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας).

Σύμφωνα με την έκθεση της ΕΗΡΑ, η πλειονότητα των πωλήσεων των αντλιών θερμότητας στην ευρωπαϊκή αγορά αφορά διαχρονικά αεροθερμικές αντλίες θερμότητας. Ενώ το μερίδιο των πωλήσεων αντλιών θερμότητας αέρα-αέρα είναι σχεδόν σταθερό μέσα στα χρόνια, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση των πωλήσεων αντλιών θερμότητας αέρα-νερού. Αυτές χρησιμοποιούνται βασικά για θέρμανση και στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται και αντλίες θερμότητας που προορίζονται για εφαρμογή σε υβριδικό σύστημα. Το μερίδιο των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στις πωλήσεις αντλιών θερμότητας είναι επίσης σταθερό διαχρονικά.

Εικόνα 16: Πλήθος πωλήσεων ανά τύπο αντλίας θερμότητας για 21 χώρες της ΕΕ



Πηγή: Έκθεση της ΕΗΡΑ, «Ευρωπαϊκή Αγορά Αντλίας Θερμότητας και Στατιστικά» για το 2021 (Nowak, 2021b)

Η αγορά αντλιών θερμότητας για κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης μεγάλωσε το 2020. Σύμφωνα με το (Observ'ER, 2021), πάνω από 4,3 εκατ. αντλίες θερμότητας πωλήθηκαν στη διάρκεια του έτους στην ΕΕ των 27, συμπεριλαμβάνοντας όλα τα μεγέθη και τις τεχνολογίες, σημειώνοντας 3,4% άνοδο σε σχέση με το 2019. Αυτά τα στατιστικά στοιχεία καλύπτουν ειδικότερα τα μεγέθη αντλιών θερμότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον οικιακό και τον τριτογενή τομέα. Η αγορά αντλιών θερμότητας μεσαίας και μεγάλης ισχύος είναι πολύ μικρότερη.

Σύμφωνα με το (Observ'ER, 2021), σχεδόν 3,6 εκατ. αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα πωλήθηκαν το 2020, και ο αριθμός αυτός των πωλήσεων είναι παρόμοιος με αυτόν που σημειώθηκε το 2019 (μάλιστα οι πωλήσεις αυξήθηκαν κατά 1,3% μεταξύ 2019 και 2020). Ωστόσο, αυτή η τάση είναι κυρίως αντιπροσωπευτική για χώρες με σημαντικές ανάγκες ψύξης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η Ιταλία, η Ισπανία, η Πορτογαλία και η Γαλλία μαζί αντιπροσωπεύουν το 80,8% των νεοεγκατεστημένων συστημάτων αντλιών θερμότητας αέρα-αέρα στην Ευρώπη. Οι πωλήσεις αντλιών θερμότητας αέρα-νερού αυξήθηκαν κατά 15,2% μεταξύ 2019 και 2020. Η ανάπτυξη αυτού του τμήματος της αγοράς ήταν εξαιρετικά υψηλή στην Πολωνία, όπου οι πωλήσεις διπλασιάστηκαν μεταξύ 2019 και 2020. Η ανάπτυξη ήταν επίσης υψηλή στη Δανία (50,6%), τη Γερμανία (44,0%), το Βέλγιο (35,6%) και τη Σουηδία (34,0%). Τουλάχιστον 10 χώρες κατέγραψαν διψήφιους ρυθμούς ανάπτυξης σε αυτό το τμήμα της αγοράς.

Η αγορά γεωθερμικών αντλιών θερμότητας καλύπτει ειδικά τις ανάγκες θέρμανσης και επίσης μεγάλωσε σε ολόκληρη την ΕΕ το 2020. Η συγκεκριμένη αγορά μεγάλωσε το 2020 κατά 9,1% σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά. Φυσικά, οι τάσεις αγοράς σε εθνικό επίπεδο ποικίλλουν πολύ. Η μεγαλύτερη αύξηση στις πωλήσεις παρατηρήθηκε στην Ολλανδία (64,6%), το Βέλγιο (23%) και τη Γερμανία (16,8%).

Σύμφωνα με τους αναλυτές της αγοράς αντλιών θερμότητας (Nowak, 2021a), στην ανάπτυξη της αγοράς στην Ευρώπη στο άμεσο και απώτερο μέλλον αναμένεται να συμβάλουν οι εξής τρεις τάσεις:

1. Από τεχνολογική άποψη, οι σημερινές αντλίες θερμότητας μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Μπορούν να λειτουργήσουν σε επίπεδα εξωτερικής θερμοκρασίας έως -25°C και να παρέχουν νερό προσαγωγής θερμοκρασίας 65°C με αποτελεσματικό τρόπο. Αυτό επιτρέπει τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε μεγαλύτερο μερίδιο κτηρίων από ό,τι πριν από μια δεκαετία. Τα υβριδικά συστήματα επιτρέπουν τη χρήση αντλίας θερμότητας ακόμη και σε κτήρια με πολύ κακή θερμική συμπεριφορά.
2. Η ανάγκη επιτάχυνσης του ενεργειακού μετασχηματισμού και στον τομέα της θέρμανσης και ψύξης φέρνει τις αντλίες θερμότητας στο επίκεντρο της προσοχής της ενεργειακής πολιτικής. Η νομοθεσία που έχει ψηφιστεί τα τελευταία χρόνια έχει πλέον μετατραπεί σε εθνική νομοθεσία σε όλα τα κράτη μέλη και αρχίζει να έχει αντίκτυπο. Τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για τα κτήρια (πχ. οι οικοδομικοί κανονισμοί) περιορίζουν τη μέγιστη ζήτηση θερμότητας ανά τετραγωνικό μέτρο, επιβάλλουν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κτήρια και ευνοούν τα έξυπνα κτήρια. Αυτό συχνά τεκμηριώνεται από θεσμικές και οικονομικές επιδοτήσεις που διευκολύνουν την ανάπτυξη της αγοράς αντλιών θερμότητας.
3. Οι συνεχώς μεγαλύτεροι και αυξανόμενοι αριθμοί πωλήσεων έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους των αντλιών θερμότητας. Οι οικονομίες κλίμακας πραγματοποιούνται σε επίπεδο εξαρτημάτων και προϊόντος. Η ταχεία μείωση του κόστους παραγωγής των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζει επίσης την αγορά θέρμανσης: η χρήση αυτό-παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με ένα σύστημα αντλίας θερμότητας παρέχει μια πηγή ενέργειας πολύ χαμηλού κόστους για τα κτήρια. Πρόσθετα οφέλη όπως οι υπηρεσίες απόκρισης στη ζήτηση (demand-response) που παρέχονται στο δίκτυο (που θα μπορούσαν να γίνουν επιχειρηματικό μοντέλο και να προσφέρουν εισόδημα στους παρόχους τους) είναι στον ορίζοντα, αλλά δεν έχουν ακόμη υλοποιηθεί.

Περιβαλλοντικές πρακτικές σχετικά με τις αντλίες θερμότητας

Για τον έλεγχο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα φθοριούχα αέρια (F-gases), και των υδροφθορανθράκων (HFC), η ΕΕ έχει εκδώσει τον Κανονισμό για τα φθοριούχα αέρια (F-Gas Regulation), που καλύπτει όλες τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται φθοριούχα αέρια.

Ο πρώτος Κανονισμός για τα φθοριούχα αέρια θεσπίστηκε το 2006 (ΕΚ 842/2006), ενώ το 2014 αντικαταστάθηκε από νεότερο (ΕΚ 517/2014) με έναρξη εφαρμογής το 2015. Ο νέος κανονισμός για τα φθοριούχα αέρια θέτει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση της ποσότητας των υδροφθορανθράκων που πωλούνται στην ΕΕ, με στόχο τη μείωση κατά 79 % έως το 2030.

Οι κλιματικές επιπτώσεις των ψυκτικών ρευστών εκφράζονται ως δυναμικό υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας (GWP - Global Warming Potential). Το δυναμικό υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας εκφράζει πόσο περισσότερο ένα αέριο επιδρά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2 , GWP = 1). Οι τιμές του δυναμικού υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας των διαφόρων ψυκτικών υδροφθορανθράκων και υδροχλωροφθορανθράκων (HCFC), είναι γενικά της τάξης των χιλιάδων μονάδων. Αντίθετα, οι τιμές του δυναμικού υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας των φιλικών προς το περιβάλλον εναλλακτικών λύσεων είναι πολύ χαμηλότερες.

Μετά την απαγόρευση των υδροχλωροφθορανθράκων την 1η Ιανουαρίου 2015, ο κανονισμός για τα φθοριούχα αέρια στοχεύει στη σταδιακή απαγόρευση μιας άλλης οικογένειας φθοριούχων αερίων, των υδροφθορανθράκων, συμπεριλαμβανομένου του R410A που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται συνήθως σε εγκαταστάσεις κλιματισμού και θέρμανσης.

Το κανονιστικό πλαίσιο του νέου κανονισμού ενθαρρύνει τους κατασκευαστές να επικεντρωθούν στη χρήση λύσεων χαμηλού δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη όπως είναι το R290 (προπάνιο) ή ακόμα χαμηλότερου δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη όπως είναι το R32 (διφθορομεθάνιο), που δεν καταστρέφει το όζον και του οποίου το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι τρεις φορές χαμηλότερο από αυτό του R410A (675 σε σύγκριση με 2088). Ο κανονισμός καθοδηγεί τους κατασκευαστές να ξεπεράσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με την υψηλή πίεση λειτουργίας, την τοξικότητα και/ή την ευφλεκτότητα αυτών των ψυκτικών ρευστών.

Οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης της βιομηχανίας σε αυτά τα ψυκτικά ρευστά ήταν επιτυχείς και πολλά από τα νέα μοντέλα χρησιμοποιούν ήδη το R32 ως ψυκτικό ρευστό σε αντιστρέψιμες αντλίες θερμότητας. Ορισμένες αντλίες θερμότητας με υδροψυκτο συμπυκνωτή χρησιμοποιούν σήμερα το αέριο R290, το οποίο επιπλέον επιτυγχάνει παροχή νερού προσαγωγής θερμοκρασίας έως και 70 °C (αντλίες θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών).

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων υδροφθορανθράκων και των εναλλακτικών τους λύσεων

| Ψυκτικό Ρευστό | Δυναμικό Υπερθέρμανσης Πλανήτη (GWP) | Ιδιότητες ασφάλειας χρήσης του ψυκτικού ρευστού |
|--|--------------------------------------|---|
| Διοξείδιο του άνθρακα CO ₂ (R744) | 1 | Υψηλή πίεση |
| Αμμωνία NH ₃ (R717) | 1 | Τοξικό |
| Νερό (R718) | 1 | Ακίνδυνο |
| R-1234 | 1 | Μέτρια αναφλεξιμότητα |
| Υδρογονάνθρακες | 3-5 | Υψηλή αναφλεξιμότητα |
| HFOs | 200-400 | Μέτρια αναφλεξιμότητα |
| R32-HFO μείγματα | 200-400 | Μέτρια αναφλεξιμότητα |
| R32 (an HFC) | 675 | Μέτρια αναφλεξιμότητα |
| R134a | 1430 | Μη αναφλέξιμο |
| R410A | 2088 | Μη αναφλέξιμο |
| R404A | 3922 | Μη αναφλέξιμο |

Πηγή:(Carrier, 2022)

4.3.3. Μέθοδοι αποθήκευσης και συνδυασμός με ΑΠΕ

Οι μέθοδοι αποθήκευσης στα κτήρια περιλαμβάνουν την ηλεκτροχημική αποθήκευση, με μπαταρίες και τη θερμική αποθήκευση. Μια μονάδα αποθήκευσης επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας για ένα χρονικό διάστημα και τη χρήση αυτής όταν απαιτείται. Αυτό επιτρέπει την εξομάλυνση ή τη μεταβολή του προφίλ της ζήτησης που πρέπει να καλύψει ο ενεργειακός εξοπλισμός. Επιπλέον, ο συνδυασμός του συστήματος αποθήκευσης με ΑΠΕ, συνήθως φωτοβολταϊκό ή ηλιοθερμικό σύστημα, οδηγεί σε εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους, σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂, και συνεισφορά στο μερίδιο των ΑΠΕ. Εάν επιπλέον στο κτήριο που χρησιμοποιεί σύστημα με ενσωματωμένο φωτοβολταϊκό χρησιμοποιείται

μετρητής ενέργειας, η αυτό-παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που βρίσκεται σε περίσσεια μπορεί να προσφέρεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, προσδίδοντας έσοδα στους καταναλωτές.

Η επενδυτική δαπάνη που σχετίζεται με αυτές τις εφαρμογές είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο όσον αφορά τη συστηματική υιοθέτησή τους από τους καταναλωτές, και αυτό δεν οφείλεται στο κόστος των φωτοβολταϊκών ή των ηλιοθερμικών, που είναι ώριμες τεχνολογίες αλλά στο κόστος της αποθήκευσης. Το κόστος των μονάδων αποθήκευσης για μεγέθη μικρής κλίμακας που είναι κατάλληλα για εφαρμογές στα κτήρια είναι ακόμη σήμερα αρκετά μεγάλο, αν και έχει ελαττωθεί τα τελευταία χρόνια. Η απαίτηση της ΟΑΕΚ τα νέα κτήρια, να είναι κτήρια μηδενικών εκπομπών από το 2030 (2027) και μετά, μπορεί να συμβάλει στην ταχεία ωρίμανση και υιοθέτηση τέτοιων ολοκληρωμένων συστημάτων (δηλαδή παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και αποθήκευσης), αφού αυτές οι εφαρμογές μπορούν να εξασφαλίσουν την απαλλαγή από εκπομπές CO₂.

Όσον αφορά στις μεθόδους αποθήκευσης, η ηλεκτροχημική αποθήκευση που βασίζεται στην τεχνολογία ιόντων λιθίου αποτελεί μία από τις κύριες επιλογές για αποθήκευση ενέργειας μικρής διάρκειας (λιγότερο από 10 ώρες) (Gür, 2018) Προϊόντα αυτής της τεχνολογίας για μεγέθη μικρής κλίμακας είναι εμπορικά διαθέσιμα. Επί του παρόντος, τόσο η επιστημονική βιβλιογραφία όσο και η ενεργειακή πολιτική, επικεντρώνονται σχεδόν αποκλειστικά στην ηλεκτροχημική αποθήκευση, και κυρίως στην τεχνολογία ιόντων-λιθίου στερεάς κατάστασης (Chen et al., 2020). Επειδή όμως οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου έχουν εφαρμογή και στον τομέα των μεταφορών, στο πλαίσιο της μετάβασης προς την κλιματική ουδετερότητα, τίθεται πλέον στη βιβλιογραφία το ζήτημα του κατά πόσον είναι βιώσιμη η μεγάλης έκτασης ζήτηση για αυτήν την τεχνολογία, δεδομένου ότι για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται σημαντικές ποσότητες σπάνιων υλικών όπως το κοβάλτιο, το νικέλιο, το λίθιο και φυσικός γραφίτης (Odukomaiya et al., 2021).

Ανεξάρτητα όμως από αυτό, δεδομένου ότι οι θερμικές ανάγκες των κτηρίων αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών τους αναγκών, η θερμική αποθήκευση αποτελεί μια σωστή επιλογή, για τους εξής λόγους (IEA, 2012a):

- Η θερμική αποθήκευση μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος θέρμανσης περιορίζοντας τη λειτουργία του σε μερικό φορτίο ή γενικά σε μη βέλτιστους χρόνους. Αυτό μπορεί να επιτυγχάνεται με αποθήκευση ωρών, ημερών ή μηνών.
- Η θερμική αποθήκευση μετατοπίζει τη ζήτηση προκειμένου να μειώσει τα φορτία αιχμής. Αυτό μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του ενεργειακού συστήματος, στη μείωση της επενδυτικής δαπάνης (γιατί ο εξοπλισμός μπορεί να έχει μικρότερο μέγεθος) και στη μείωση του λειτουργικού κόστους. Αυτό μπορεί να επιτυγχάνεται με αποθήκευση ωρών ή ημερών.
- Η θερμική αποθήκευση διευκολύνει τη μεγαλύτερη χρήση ΑΠΕ μέσω της αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ ώστε να χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ζήτηση (αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας για ημέρες, εβδομάδες ή μήνες για την κάλυψη των αναγκών ΖΝΧ ή/και θέρμανσης).

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις κυρίως τεχνολογίες με βάση τις υποκείμενες φυσικές αρχές της τεχνικής αποθήκευσης, σε αποθήκευση αισθητής θερμότητας, αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, και θερμοχημική αποθήκευση.

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας χρησιμοποιεί ένα μέσον αποθήκευσης που θερμαίνεται (π.χ. δοχείο θερμού νερού). Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης έχει σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Οι αποθήκες μεγάλης κλίμακας (στην κλίμακα MWh) τοποθετούνται συχνά υπόγεια για να χρησιμοποιούν το έδαφος ως

μόνωση. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας στον υδροφόρο ορίζοντα (ATES) (Aquifer thermal energy storage (ATES)) ανταλλάσσει θερμότητα μέσω γεωτρήσεων, με ένα φυσικό υπόγειο στρώμα κορεσμένο σε νερό και διαπερατό ως μέσον αποθήκευσης.

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιεί την αλλαγή φάσης μιας ουσίας για να αποθηκεύσει και στη συνέχεια να απελευθερώσει ενέργεια χωρίς καμία αλλαγή στη θερμοκρασία. Αυτή η τεχνολογία αποθήκευσης έχει ενεργειακές πυκνότητες αποθήκευσης 5 έως 15 φορές μεγαλύτερες από τις μονάδες αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Πίνακας 11: Επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας των τυπικών συστημάτων θερμικής αποθήκευσης και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών

| Τύπος θερμικής αποθήκευσης | Επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|--|
| Αποθήκευση αισθητής θερμότητας | 3 | <ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό κόστος Απλό και αξιόπιστο σύστημα Εύκολα ελέγξιμο | <ul style="list-style-type: none"> Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα Αποφόρτιση και απώλειες θερμότητας Υψηλό κόστος (για συστήματα αποθήκευσης στον υδροφόρο ορίζοντα) |
| Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας | 2-3 | <ul style="list-style-type: none"> Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα Παροχή θερμότητας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία | <ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος Θερμική αστάθεια Φθορά |
| Θερμοχημική αποθήκευση | 1 | <ul style="list-style-type: none"> Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα Ενιαίο και συμπαγές σύστημα Αμελητέες θερμικές απώλειες Μη-τοξικά υλικά | <ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος Αστάθεια υλικών Προβλήματα στους κύκλους λειτουργίας Περίπλοκο σύστημα |

Σημείωση: Επίπεδο ωριμότητας 1=επίπεδο έρευνας και ανάπτυξης, 2=επίπεδο επίδειξης, 3=επίπεδο εμπορικής διάθεσης
 Πηγή: (Chen et al., 2020)

Η θερμοχημική αποθήκευση, η οποία χρησιμοποιεί αναστρέψιμες θερμοχημικές αντιδράσεις (πχ. προσρόφηση μιας ουσίας από την επιφάνεια ενός άλλου στερεού ή υγρού) για την αποθήκευση ενέργειας, μπορεί να επιτύχει πυκνότητες αποθήκευσης 5 έως 12 ή και 20 φορές μεγαλύτερες από τις μονάδες αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, ενώ είναι σε θέση να παρέχει θερμική ενέργεια σε διαφορετικές θερμοκρασίες εκφόρτισης, ανάλογα με τις ιδιότητες της συγκεκριμένης θερμοχημικής αντίδρασης. Η θερμοχημική αποθήκευση έχει την υψηλότερη θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα μεταξύ των τριών κατηγοριών αποθήκευσης θερμότητας και οι απώλειες θερμότητας μπορεί να είναι, κατ' αρχήν, αμελητέες. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να οδηγήσει σε ένα πιο συμπαγές σύστημα, το οποίο καθιστά αυτήν την τεχνολογία ιδανική στη χρήση για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για μια σχετικά μεγάλη περίοδο. Επί του παρόντος τα κύρια μειονεκτήματα είναι τα ζητήματα αστάθειας των υλικών και το χαμηλό επίπεδο ωριμότητας της τεχνολογίας, γεγονός που συνεπάγεται ότι η εμπορευματοποίησή της δεν

προβλέπεται στο εγγύς μέλλον. Διαφορετικά υλικά ρόφησης διερευνώνται για σκοπούς αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας. Ειδικότερα, τα καθαρά προσροφητικά (pure adsorbents) και τα ένυδρα άλατα (salt hydrates) ερευνώνται κυρίως από την επιστημονική κοινότητα για τέτοιες εφαρμογές (Aydin et al., 2015; Ding & Riffat, 2013; N'Tsoukroe et al., 2009; Solé et al., 2015; Yu et al., 2013). Ο Πίνακας 11 συνοψίζει τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας (Chen et al., 2020).

Πίνακας 12: Τεχνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των τυπικών τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης επί του παρόντος

| Τύπος θερμικής αποθήκευσης | Τεχνολογία | Ικανότητα θερμικής αποθήκευσης (kWh/t) | Θερμική Ισχύς (kW) | Απόδοση (%) | Διάρκεια αποθήκευσης | Κόστος αγοράς και εγκατάστασης (€/kWh) |
|-----------------------------------|---|--|--------------------|-------------|----------------------|--|
| Αποθήκευση αισθητής θερμότητας | Δοχείο θερμού νερού | 20-80 | 1-10000 | 50-90 | ημέρα-χρόνος | 0.08-0.11 |
| | Σύστημα αποθήκευσης στον υδροφόρο ορίζοντα (ATES) | 5-10 | 500-10000 | 50-90 | ημέρα-χρόνος | Διάφορα |
| | Σύστημα αποθήκευσης στο έδαφος (BTES) | 5-10 | 100-5000 | 50-90 | ημέρα-χρόνος | Διάφορα |
| Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας | Αποθήκευση μέσω PCM | 50-150 | 1-1000 | 75-90 | ώρα-εβδομάδα | 13-65 |
| Θερμοχημική αποθήκευση | | 120-150 | 10-1000 | 75-100 | ώρα-μέρα | 10-52 |

Πηγή: (IEA, 2012b)

Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (π.χ. δοχείο θερμού νερού) και ορισμένες αποθήκες λανθάνουσας θερμότητας (π.χ. αποθήκευση πάγου) είναι ώριμες τεχνολογίες. Ωστόσο, οι εξελίξεις στα προηγμένα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και οι χημικές αντιδράσεις δημιουργούν νέες δυνατότητες εφαρμογής, όπως τα PCM που ενσωματώνονται σε δομικά υλικά όπως τούβλα, σανίδες τοίχου και δάπεδα. Υβριδικά συστήματα είναι επίσης δυνατά, για παράδειγμα πλαστικά οζίδια PCM μπορούν να τοποθετηθούν σε μια δεξαμενή όπου το υγρό μεταφοράς θερμότητας (συνήθως νερό) λιώνει ή στερεοποιεί το PCM. Η πυκνότητα αποθήκευσης αυτού του υβριδικού συστήματος είναι υψηλότερη από αυτή του νερού, αλλά μικρότερη από αυτή ενός καθαρού συστήματος PCM.

Επί του παρόντος, η Έρευνα & Ανάπτυξη επικεντρώνεται στη μείωση του ειδικού κόστους αποθήκευσης υψηλής πυκνότητας, το οποίο εξακολουθεί να είναι πολύ υψηλό για πολλές εφαρμογές σε κτήρια. Μια άλλη βασική πρόκληση είναι η βελτίωση του αριθμού των κύκλων που μπορούν να επιτευχθούν με τις νεότερες τεχνολογίες αποθήκευσης. Ενσωματώνοντας τις μονάδες αποθήκευσης υπόγεια, ιδιαίτερα για μεγάλα κτήρια, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση για όγκους αποθήκευσης χαμηλού κόστους, ειδικά σε αστικές

περιοχές, με την Έρευνα & Ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα να επικεντρώνεται σε νέα υλικά και μεθόδους κατασκευής.

Η μονάδα θερμικής αποθήκευσης μπορεί να αποθηκεύει θερμότητα που προέρχεται είτε από συμβατικό σύστημα θέρμανσης (πχ λέβητας πετρελαίου ή αερίου) είτε από αντλία θερμότητας. Η ενσωμάτωση σε ένα τέτοιο σύστημα και ηλιοθερμικής μονάδας μπορεί να εξασφαλίσει εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους. Ειδικά ο συνδυασμός της αντλίας θερμότητας με ηλιοθερμία και μονάδα αποθήκευσης είναι μια τεχνολογική επιλογή για κάλυψη των θερμικών αναγκών (θέρμανσης και προετοιμασία ΖΝΧ), που μπορεί ταυτόχρονα να αυξήσει την απόδοση της αντλίας θερμότητας (αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι χαμηλές). Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα είτε έμμεσα ως πηγή θερμότητας για τις αντλίες θερμότητας, και έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι μπορεί να επιτύχει υψηλά επίπεδα θερμοκρασιών. Στα άμεσα συστήματα οι σωληνώσεις του εξατμιστή τοποθετούνται σε ηλιακούς συλλέκτες, συνήθως επίπεδους. Εάν οι συλλέκτες δεν καλύπτονται από διαφανή επιφάνεια μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα ως συμπυκνωτές, όταν η αντλία θερμότητας λειτουργεί σε ψύξη. Στα έμμεσα συστήματα, στους ηλιακούς συλλέκτες κυκλοφορεί νερό το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται σε δοχείο ζεστού νερού, από το οποίο η αντλία θερμότητας αντλεί θερμότητα. Πολλοί κατασκευαστές αντλιών θερμότητας, προσφέρουν σήμερα τέτοια ολοκληρωμένα συστήματα.

Πίνακας 13: Κόστος αγοράς και εγκατάστασης ηλιοθερμικού συστήματος σε κτήριο κατοικίας επί του παρόντος

| | Κτήριο μονοκατοικίας | Κτήριο πολυκατοικίας |
|---|----------------------|----------------------|
| Θερμική ισχύς (kW_{th}) (για κάλυψη αναγκών θέρμανσης και προετοιμασίας ΖΝΧ) | 8-11 | 70-130 |
| Κόστος αγοράς και εγκατάστασης (€/kW_{th}) | 940-1435 | 780-1110 |

Πηγή: (IEA, 2012b)

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα η ηλιοθερμική μονάδα να είναι το πρωτεύον σύστημα για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του κτηρίου, και ο λέβητας ή η αντλία θερμότητας να λειτουργούν συμπληρωματικά. Η τεχνολογία αυτή, για κάλυψη των αναγκών ΖΝΧ, χρησιμοποιείται ήδη κατά κόρον, και η ηλιοθερμική μονάδα έχει τη δυνατότητα να καλύπτει (ανάλογα με την περιοχή) το 20% έως 70% των αναγκών για ΖΝΧ (IEA, 2012b). Προκειμένου η ηλιοθερμική μονάδα να καλύπτει και τις ανάγκες θέρμανσης απαιτείται τουλάχιστον διπλασιασμός της επιφάνειας των συλλεκτών και δεκαπλασιασμός της μονάδας θερμικής αποθήκευσης (εφόσον πρόκειται για τη συμβατική μονάδα θερμικής αποθήκευσης, δηλαδή το δοχείο θερμού νερού). Η λύση αυτή με τις δεδομένες τιμές των μονάδων θερμικής αποθήκευσης δεν είναι ανταγωνιστική, όμως η μείωση του κόστους, ειδικά των μονάδων θερμικής αποθήκευσης που έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (PCM), μπορεί να κάνει αυτά τα ηλιοθερμικά συστήματα ανταγωνιστικά.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις (IEA, 2012b) για την εξέλιξη του κόστους των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας, το κόστος των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αναμένεται μέχρι το 2030 να έχει μειωθεί κατά 50% έως 75%, σε σχέση με τις σημερινές τιμές, και η αντίστοιχη μείωση για το 2050 αναμένεται να είναι, λίγο μεγαλύτερη, της τάξης του 65% με 85% (σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές).

Ο συνδυασμός αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκό είναι επίσης ένα ολοκληρωμένο σύστημα που προσφέρουν οι κατασκευαστές αντλιών θερμότητας σήμερα. Το σύστημα αυτό μπορεί να συνδυάζεται με θερμική ή ηλεκτροχημική αποθήκευση ή και τα δύο (Observ'ER, 2021). Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται συνήθως από πάνελ που τοποθετούνται στη στέγη ή την οροφή του κτηρίου, όμως υπάρχει και η δυνατότητα εφαρμογής των φωτοβολταϊκών συστημάτων επί της κατασκευής (Building Integrated PV systems – BIPV, όπου τα φωτοβολταϊκά πάνελ αντικαθιστούν τα δομικά στοιχεία του κτηρίου, και εξυπηρετούν και οικοδομικά, προσφέροντας στεγανότητα, θερμομόνωση, προστασία από τον ήχο ή τον ήλιο και την αξιοποίηση του φυσικού φωτός.).

5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΩΦΕΛΙΜΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ

Το πρώτο βήμα στη μοντελοποίηση είναι η εκτίμηση της συνολικής ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες, κάθε χρόνο t εντός του χρονικού ορίζοντα επίλυσης του μοντέλου ($t_0 \leq t \leq T$), δηλαδή της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας (desired useful energy) για συγκεκριμένες χρήσεις σε κάθε κατηγορία κτηρίου h του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών. Ο δείκτης ω αντιπροσωπεύει τις τελικές χρήσεις που καλύπτονται στο μοντέλο, δηλαδή, τη θέρμανση, την ψύξη, την προετοιμασία Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX), το μαγείρεμα, τις ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και το φωτισμό. Ο όρος U^d αντιπροσωπεύει την επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια και είναι μια λογιστική καμπύλη που τείνει στο ανώτερο όριο της θεωρητικά επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας (\bar{u}^d). Ο όρος U^d μεταβάλλεται με το χρόνο με ρυθμό που επηρεάζεται από μακροοικονομικούς και δημογραφικούς παράγοντες (M) και το καθαρό ετήσιο κόστος για ωφέλιμες ενεργειακές υπηρεσίες στα κτήρια (C), όπως φαίνεται στην εξίσωση (5-1). Στα νοικοκυριά ο μακροοικονομικός δείκτης που χρησιμοποιείται είναι η ιδιωτική κατανάλωση ανά κτήριο (private consumption), ενώ ο αντίστοιχος δείκτης στον τομέα των υπηρεσιών είναι η προστιθέμενη αξία ανά κλάδο και κτήριο (value added). Σχετικά με τους δημογραφικούς παράγοντες, στα νοικοκυριά χρησιμοποιείται το πλήθος των ατόμων ανά νοικοκυριό και στον τομέα των υπηρεσιών το πλήθος των υπαλλήλων/επισκεπτών ανά κτήριο. Το καθαρό ετήσιο κόστος για ωφέλιμες ενεργειακές υπηρεσίες αναπαριστά το συνολικό ετήσιο κόστος (σταθερό και μεταβλητό κόστος) για την ενέργεια ανά κτήριο.

Πίνακας 14: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μοντελοποίησης της ζήτησης για ωφέλιμες ενεργειακές χρήσεις

| Ονοματολογία συμβόλων | |
|---|---|
| Δείκτες και σύνολα | |
| t ή tt | Χρονιές εντός του χρονικού ορίζοντα προβολής $t_0 \leq t \leq T$, με t_0 τη χρονιά βάσης και T τον ορίζοντα επίλυσης |
| h ή h' | Κατηγορίες κτηρίων |
| ω := { sh, ac, wh, co, ea, lh } | Χρήσεις ενέργειας στο κτήριο (sh : θέρμανση, ac : ψύξη, wh : ZNX, co : μαγείρεμα, ea : ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις, lh : φωτισμός) |
| Παράμετροι | |
| $M_{h,t}$ | Μακροοικονομικοί και δημογραφικοί δείκτες |
| $C_{\omega,h,t}$ | Καθαρό ετήσιο κόστος για ωφέλιμες ενεργειακές υπηρεσίες |
| $\varphi_{\omega,h,t}$ | Λογαριθμική συνάρτηση (log-linear) για τη συσχέτιση σταθερής κατάστασης μεταξύ της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας U^d και των επεξηγηματικών παραγόντων M, C |
| $\bar{u}_{\omega,h,t}^d$ | Ανώτερο όριο της λογιστικής καμπύλης για τον προσδιορισμό της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας U^d |
| $\alpha_{0,\omega,h}$ | Παράμετρος βαθμονόμησης (scale parameter) της λογιστικής καμπύλης για τον προσδιορισμό της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας U^d |
| $\alpha_{1,\omega,h}$ | Κλίση (slope parameter) της λογιστικής καμπύλης για τον προσδιορισμό της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας U^d |

| | |
|---------------------------|--|
| $\beta_{0,\omega,h}$ | Παράμετρος βαθμονόμησης (scale parameter) της λογαριθμικής συνάρτησης φ |
| $\beta_{1,\omega,h}$ | Ελαστικότητα της ζήτησης για τη χρήση ω ως προς τους μακροοικονομικούς παράγοντες |
| $\beta_{2,\omega,h}$ | Ελαστικότητα της ζήτησης για τη χρήση ω ως προς τις τιμές |
| $\tau_{h,t}$ | Ετήσιος ρυθμός κατεδάφισης του κτηριακού αποθέματος (εξωγενής) |
| $\dot{M}_{h,t}$ | Ετήσιος ρυθμός μεταβολής των μακροοικονομικών και δημογραφικών δεικτών |
| rS_h | Ετήσιος ρυθμός με τον οποίο το S τείνει δυναμικά σε ένα βέλτιστο απόθεμα κτηρίων |
| $rt_{h',h,t}$ | Ετήσιος ρυθμός μεταφοράς πληθυσμού από την κατηγορία κτηρίων h' στην h (εξωγενής) |
| $\bar{T}_{h',h,t}$ | Μέγιστο ετήσιο όριο μεταφερόμενου πληθυσμού από την κατηγορία κτηρίων h' στην h |
| Θετικές μεταβλητές | |
| $U_{\omega,h,t}^d$ | Οικονομετρικά εκτιμώμενη επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια ανά χρήση ενέργειας ω |
| $S_{h,t}$ | Πλήθος κτηρίων ανά κατηγορία κτηρίου h |
| $\dot{S}_{h,t}$ | Ετήσιος ρυθμός αύξησης του κτηριακού αποθέματος ανά κατηγορία κτηρίου h |
| $\dot{N}_{h,t}$ | Ετήσιος ρυθμός αύξησης των νέων κτηρίων ανά κατηγορία κτηρίου h |
| $T_{h',h,t}$ | Μεταφορά πληθυσμού (πλήθος κτηρίων) από την κατηγορία κτηρίων h' στην h |
| $\dot{T}_{h',h,t}$ | Ετήσιος ρυθμός μεταφοράς πληθυσμού από την κατηγορία κτηρίων h' στην h |

Η συνάρτηση φ (εξίσωση (5-2)) είναι μια λογαριθμική (log-linear) συνάρτηση που αντιπροσωπεύει την ελαστικότητα μεταξύ της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες και των παραγόντων που την επηρεάζουν, δηλαδή των μακροοικονομικών και δημογραφικών παραγόντων και του καθαρού ετήσιου κόστους για ωφέλιμες ενεργειακές υπηρεσίες. Οι μακροοικονομικοί και δημογραφικοί παράγοντες καθορίζουν επίσης μέσω μιας λογαριθμικής συνάρτησης το ανώτερο όριο της θεωρητικά επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας, το οποίο αναπαριστά την ωφέλιμη ενέργεια που αντιστοιχεί σε συνθήκες μέγιστης άνεσης στο κτήριο. Εάν ο όρος α_1 στην εξίσωση (5-1) είναι αρνητικός, η λογιστική καμπύλη αυξάνεται, εκφράζοντας βελτίωση της άνεσης και του βιοτικού επιπέδου, ενώ εάν είναι θετικός, η λογιστική καμπύλη μειώνεται, εκφράζοντας βελτίωση της παραγωγικότητας της ενέργειας. Οι σταθερές β και γ στις εξισώσεις (5-2) και (5-3) αντιστοιχα είναι ελαστικότητες, όπου οι β_1, γ_1 είναι ελαστικότητες της ζήτησης ως προς τους μακροοικονομικούς παράγοντες (πχ. το εισόδημα) και είναι θετικές και οι β_2 είναι ελαστικότητες της ζήτησης ως προς το κόστος της ενεργειακής υπηρεσίας (ελαστικότητες της ζήτησης ως προς τις τιμές) και είναι αρνητικές, συμβαδίζοντας με την οικονομική θεωρία.

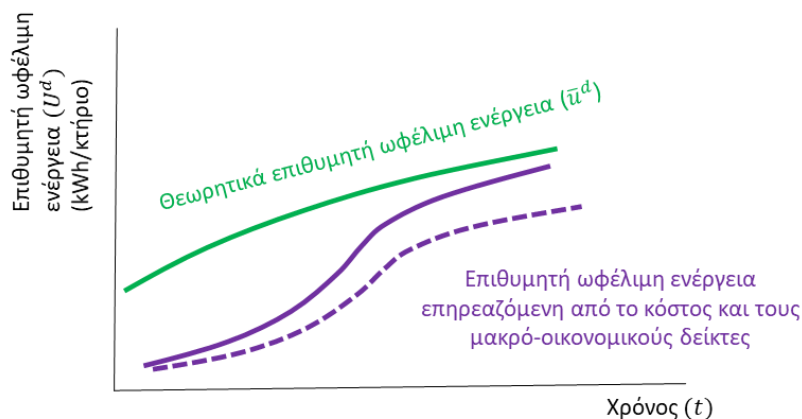
$$U_{\omega,h,t}^d = \frac{\bar{u}_{\omega,h,t}^d}{1 + e^{(\alpha_{0,\omega,h} + \alpha_{1,\omega,h} \cdot \varphi(M_{h,t}, C_{\omega,h,t}))}} \quad \forall \omega, h, t \quad (5-1)$$

$$\ln(\varphi_{\omega,h,t}) = \beta_{0,\omega,h} + \beta_{1,\omega,h} \cdot \ln(M_{h,t}) + \beta_{2,\omega,h} \cdot \ln(C_{\omega,h,t}) \quad \forall \omega, h, t \quad (5-2)$$

$$\ln(\bar{u}_{\omega,h,t}^d) = \gamma_{0,\omega,h} + \gamma_{1,\omega,h} \ln(M_{h,t}) \quad \forall \omega, h, t \quad (5-3)$$

Οι τιμές των ελαστικότητων προέρχονται από μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση (Charlier & Kahouli, 2019; Labandeira et al., 2017; Risch & Salmon, 2017; Schulte & Heindl, 2017) σε συνδυασμό με οικονομετρικές εκτιμήσεις, και διαφέρουν ανά χώρα και τύπο κτηρίου. Οι κατηγορίες χαμηλού εισοδήματος ξεκινούν από ένα χαμηλό επίπεδο ωφέλιμης ενέργειας και μπορεί να έχουν γρήγορο ρυθμό προς το ανώτερο όριο της θεωρητικά επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας. Οι κατηγορίες υψηλού εισοδήματος ξεκινούν από υψηλό επίπεδο και ο ρυθμός ανάπτυξης μπορεί να είναι αργός λόγω του κορεσμού. Αντίστοιχα, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην εξίσωση (5-1) έχει διαφορετικό σχήμα σε βόρειες χώρες με ψυχρό κλίμα και σε νότιες που είναι γενικά πιο θερμές. Η Εικόνα 17 που ακολουθεί παρουσιάζει μια ποιοτική γραφική αναπαράσταση της εξίσωσης (5-1).

Εικόνα 17: Ποιοτική γραφική αναπαράσταση της καμπύλης που αντιπροσωπεύει την ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας στα κτήρια



Ύστερα από τον προσδιορισμό της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας ανά τελική χρήση και κατηγορία κτηρίου, γίνεται η προβολή του κτηριακού αποθέματος στο μέλλον. Για το σκοπό αυτό, το μοντέλο χρησιμοποιεί μια δυναμική οικονομετρική εξίσωση (εξίσωση (5-4)), ώστε να υπολογίσει τον ετήσιο ρυθμό «δημιουργίας» νέων κτηρίων (\dot{N}) ανά κατηγορία h . Τα νέα κτήρια αντιπροσωπεύουν κατά κύριο λόγο νέες κατασκευές, που κτίζονται είτε για να αντικαταστήσουν τα κτήρια που κατεδαφίζονται (ή γενικά εγκαταλείπονται) κάθε χρόνο είτε επειδή το σύνολο των κτηρίων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, S , μπορεί να αυξάνεται. Τα νέα κτήρια αντιπροσωπεύουν όμως και τη μεταφορά πληθυσμού μεταξύ κατηγοριών κτηρίων, που συμβολίζεται με T . Ο ετήσιος ρυθμός μεταφοράς πληθυσμού μεταξύ κατηγοριών κτηρίων ακολουθεί μια λογιστική καμπύλη με εξωγενή ρυθμό rt και μέγιστο όριο μεταφοράς \bar{T} , που είναι επίσης εξωγενής. Τα κτήρια που κατεδαφίζονται κάθε χρόνο προσδιορίζονται βάσει ενός ρυθμού κατεδάφισης τ , και το σύνολο των κτηρίων που ανήκουν σε κάθε κατηγορία τείνει δυναμικά σε ένα βέλτιστο απόθεμα με ρυθμό rs . Το βέλτιστο απόθεμα είναι μια λανθάνουσα, μη-παρατηρήσιμη μεταβλητή και η τάση προσέγγισής του εξαρτάται από την εξέλιξη των δημογραφικών παραγόντων.

$$\dot{N}_{h,t} = \tau_{h,t} \cdot S_{h,t-1} + rS_h \cdot (\delta_{0,h} + \delta_{1,h} \cdot \dot{M}_{h,t}) + \dot{T}'_{h',h,t} \quad \forall h, t \quad (5-4)$$

$$\dot{S}_{h,t} = \dot{N}_{h,t} - \tau_{h,t} \cdot S_{h,t-1} \quad \forall h, t \quad (5-5)$$

$$\dot{T}'_{h',h,t} = -rt_{h',h,t} \cdot T_{h',h,t} \cdot \left(1 - \frac{T_{h',h,t}}{\bar{T}_{h',h,t}}\right) \quad \forall h, t \quad (5-6)$$

Ο ρυθμός κατεδάφισης είναι εξωγενής παράμετρος και διαφέρει μεταξύ του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών, προκύπτει από τη βιβλιογραφία (EU BSO, 2022; Meijer et al., 2012) και είναι γενικά πολύ χαμηλός, ειδικά στον οικιακό τομέα. Επίσης, ο ρυθμός κατασκευής νέων κτηρίων μπορεί να διαφέρει ανά κατηγορία κτηρίου ανάλογα με την οικονομική ανάπτυξη και άλλους παράγοντες, όπως η αστικοποίηση. Οι νέες κατασκευές ακολουθούν τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και τους οικοδομικούς κανονισμούς, σε ό,τι αφορά τη θερμική τους συμπεριφορά και λαμβάνονται υπόψη τυχόν εθνικές απαγορεύσεις σε σχέση με τον εξοπλισμό για θέρμανση και ψύξη για τα νέα κτήρια. Το μοντέλο χρησιμοποιεί και έναν βαθμό συμμόρφωσης στα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και τους οικοδομικούς κανονισμούς, ο οποίος αντλείται από τη βιβλιογραφία (Max Jamieson et al., 2016) και η προβολή του εξαρτάται τόσο από τα σχετικά στατιστικά δεδομένα όσο και από την ύπαρξη μέτρων στις εθνικές νομοθεσίες (πχ. Εθνικά σχέδια για την Ενέργεια και το Κλίμα - ΕΣΕΚ) που εξασφαλίζουν τη συμμόρφωση με τα πρότυπα (πχ. εφαρμογή ποινών όταν οι νέες κατασκευές δεν ακολουθούν τις εθνικές ή/ και ευρωπαϊκές οδηγίες).

5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΕΠΙΛΟΓΩΝ

Αφού έχει γίνει η προβολή του κτηριακού αποθέματος στο μέλλον, μοντελοποιούνται ενδογενώς οι αποφάσεις σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων. Η μοντελοποίηση ακολουθεί το δυναμικό προγραμματισμό και τελικά υπολογίζει το επίπεδο, το ρυθμό και την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης έως το τέλος του ορίζοντα προβολής. Οι αποφάσεις των καταναλωτών για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους βασίζονται στο μοναδιαίο κόστος κατανάλωσης ενέργειας πριν από την αναβάθμιση, την εξοικονόμηση ενέργειας από την ενεργειακή αναβάθμιση, το επενδυτικό κόστος της κάθε επιλογής και στην επίδραση των μέτρων πολιτικής στους παράγοντες που αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας από την εφαρμογή των εργασιών της ενεργειακής αναβάθμισης, δηλαδή για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών από το κέλυφος πριν και μετά την ενεργειακή αναβάθμιση, εφαρμόζεται η μέθοδος EN 13790: 2008, που αναφέρθηκε προηγουμένως (Ενότητα 3.2 και Ενότητα 4.2.2).

Σε αυτό το στάδιο μοντελοποίησης, τα χαρακτηριστικά του κελύφους για όλα τα κτήρια που αποτελούν το κτηριακό απόθεμα, δηλαδή η θερμική συμπεριφορά των κτηρίων, είναι γνωστά για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα του μοντέλου: στα νέα κτήρια έχουν εφαρμοστεί οικοδομικοί κανονισμοί ή πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους συμμόρφωσης σε αυτά, μέρος των παλαιών κτηρίων έχει αναβαθμιστεί ενεργειακά και ένα άλλο μέρος των παλαιών κτηρίων παραμένει στην αρχική του κατάσταση.

Το μοντέλο στη συνέχεια διατυπώνει το πρόβλημα για την ικανοποίηση της εναπομένουσας ωφέλιμης ενέργειας (δηλαδή της ωφέλιμης ενέργειας που απομένει μετά τη συνεισφορά του κελύφους του κτηρίου) μέσω της χρήσης του εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη. Το μοντέλο διατυπώνει το πρόβλημα ξεχωριστά για κάθε χρήση ενέργειας και διαδοχικά με τη σειρά: πρώτα για θέρμανση και ψύξη, και ύστερα για προετοιμασία ΖΝΧ και μαγείρεμα. Η επιλογή ηλεκτρικών συσκευών για την κάλυψη των ειδικών ηλεκτρικών χρήσεων (δηλ. λαμπτήρες φωτισμού, λευκές συσκευές, συσκευές πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών και μικρές συσκευές) γίνεται ανεξάρτητα από τις αποφάσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και τον ενεργειακό εξοπλισμό θέρμανσης και ψύξης.

Για να αναπαραστήσει το μοντέλο τις εναλλακτικές επιλογές σχετικά με την ένταση και τον τύπο των εργασιών για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, και τη χρονική στιγμή πραγματοποίησης των επενδύσεων αυτών, διαμορφώνει στρατηγικές που εξελίσσονται δυναμικά στο χρόνο. Το ίδιο κάνει για να αναπαραστήσει τις εναλλακτικές επιλογές σχετικά με τον εξοπλισμό για θέρμανση και ψύξη και τη χρονική στιγμή πιθανής αντικατάστασής του. Οι στρατηγικές οργανώνονται ως δυναμικά δέντρα αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο ενσωματώνεται στη μοντελοποίηση η μεθοδολογία του δυναμικού προγραμματισμού.

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ο χρόνος μπορεί να είναι είτε συνεχής, είτε διακριτός. Όταν ο χρόνος είναι διακριτός και οι άγνωστες μεταβλητές ορίζονται στη διάσταση του χρόνου, το πρόβλημα βελτιστοποίησης ταξινομείται στην κατηγορία προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου (“optimal control”) ή γενικότερα στην κατηγορία προβλημάτων calculus of variations. Επίσης, όταν ο χρόνος είναι διακριτός αίρεται η έννοια του άπειρου χρόνου γιατί δεν μπορεί να λυθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διακριτού χρόνου με άπειρο χρονικό ορίζοντα, άρα αναγκαστικά ο ορίζοντας είναι πεπερασμένος και το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να λυθεί διαχρονικά (intertemporal optimization). Ένα πρόβλημα διαχρονικής βελτιστοποίησης με διακριτό χρόνο είναι ισοδύναμο ενός προβλήματος optimal control που έχει πεπερασμένο και διακριτό χρόνο, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού.

Η έννοια του δυναμικού προγραμματισμού, όπως προσδιορίστηκε από τον Bellman (Bellman, 1954, 1957), έχει να κάνει με τον τρόπο διατύπωσης και επίλυσης ορισμένων προβλημάτων διαχρονικής βελτιστοποίησης, αναπαριστώντας τα με απλή μορφή και επιλύοντάς τα χωρίς πολύπλοκους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Η λογική πίσω από τη μεθοδολογία που πρότεινε ο Bellman έχει να κάνει με τον εξής συλλογισμό: καθώς προχωράει ο διακριτός χρόνος, δηλαδή σε κάθε στάδιο του διακριτού χρόνου, λαμβάνονται συγκεκριμένες αποφάσεις, και ανάλογα με την απόφαση σε κάθε στάδιο του διακριτού χρόνου προκύπτουν επιλογές για το επόμενο στάδιο. Έτσι αναπτύσσεται ένα δυναμικό δένδρο αποφάσεων, του οποίου όσο προχωράει ο χρόνος αυξάνονται τα κλαδιά. Μια διαδρομή ως προς το χρόνο, δηλαδή ένα κλαδί του δένδρου αποφάσεων, που αντιστοιχεί σε διαδοχικές αλληλεξαρτούμενες αποφάσεις, είναι μια στρατηγική.

Αντί να λυθεί το πρόβλημα των διαδοχικών αποφάσεων μέσα στο χρόνο ως ένα πρόβλημα διαχρονικής βελτιστοποίησης, ο Bellman πρότεινε να αξιολογηθούν οι τελικές απολήξεις των κλαδιών του δένδρου αποφάσεων, δηλαδή των στρατηγικών. Η στρατηγική με την καλύτερη επίδοση θα είναι αυτή που θα προκρίνεται, και αφού πρόκειται για μια διαδρομή ως προς το χρόνο, εκ των πραγμάτων θα μπορεί να αναπαριστά τις αποφάσεις που έγιναν σε κάθε χρονική στιγμή. Για την αξιολόγηση των στρατηγικών ο Bellman πρότεινε μια συνάρτηση αξίας, δηλαδή μια μαθηματική συνάρτηση, η οποία δίνει πράγματι την καλύτερη λύση.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία του δυναμικού προγραμματισμού, το μοντέλο αξιολογεί το διαχρονικά καθαρό οικονομικό όφελος κάθε δυναμικής στρατηγικής και κατατάσσει τις στρατηγικές για κάθε κατηγορία κτηρίου σε φθίνουσα σειρά, από τη στρατηγική με το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος σε αυτή με το μικρότερο. Για την αξιολόγηση του καθαρού οφέλους κάθε δυναμικής στρατηγικής, το μοντέλο υπολογίζει την παρούσα αξία των δαπανών και του οικονομικού οφέλους από την εξοικονόμηση ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι δαπάνες αντιστοιχούν στις επενδύσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και την αγορά του εξοπλισμού και στο κόστος συντήρησής του. Οι δαπάνες περιλαμβάνουν επίσης επιπλέον παράγοντες που αντιπροσωπεύουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα, συμπεριλαμβανομένων και των παραγόντων που αναπαριστούν «κρυφά» κόστη. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να μεταβάλλονται όταν εφαρμόζονται συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής που στοχεύουν στην άρση των εμποδίων. Οι δαπάνες μπορεί να επαναλαμβάνονται περισσότερες από μία φορές κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα επίλυσης και η περιοδικότητά τους είναι το κύριο χαρακτηριστικό που διακρίνει την κάθε στρατηγική από τις υπόλοιπες. Τα οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας περιλαμβάνουν καταρχάς την εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους που είναι αποτέλεσμα τόσο της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους όσο και της αντικατάστασης του εξοπλισμού και της επιλογής ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών για θέρμανση και ψύξη.

Τα οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας περιλαμβάνουν όμως και έμμεσα οικονομικά οφέλη που μπορεί να είναι υποκειμενικά ή αντικειμενικά, και είναι αποτέλεσμα της βελτιωμένης αποδοτικότητας. Τα έμμεσα οικονομικά οφέλη μπορεί να προέρχονται από τη βελτιωμένη ενεργειακή συμπεριφορά του κτηρίου, το οποίο ύστερα από μια ενεργειακή αναβάθμιση αυξάνει την αξία του στην αγορά ακινήτων ενώ επίσης μπορεί να βελτιώσει και το επίπεδο διαβίωσης όσων ζουν ή εργάζονται σε αυτό. Αντίστοιχα, τα έμμεσα οικονομικά οφέλη μπορεί να σχετίζονται με την αποφυγή κυρώσεων όταν, χάρη στην ενεργειακή αναβάθμιση, τα χαρακτηριστικά του κτηρίου συμμορφώνονται με πρότυπα και κανονισμούς που απαιτούνται για την ενοικίαση ή την πώληση του ακινήτου και έτσι διευκολύνονται τέτοιες ενέργειες. Οι επιδοτήσεις για εξοικονόμηση ενέργειας και άλλες πολιτικές που στοχεύουν στην κινητοποίηση των επενδύσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα περιλαμβάνονται επίσης στο μοντέλο, ανάλογα με την εφαρμογή τους, και συνυπολογίζονται στα οικονομικά οφέλη. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο αποτυπώνει τις επιπτώσεις ρυθμιστικών και οικονομικών πολιτικών που λειτουργούν ως άμεσα ή έμμεσα κίνητρα για την ενεργειακή αναβάθμιση και τη βελτίωση της αποδοτικότητας του εξοπλισμού.

Η μοντελοποίηση χρησιμοποιεί την κατάταξη των δυναμικών στρατηγικών για κάθε κατηγορία κτηρίου ως βάση για να σχηματίσει μια σύνθετη στρατηγική για κάθε κατηγορία κτηρίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και προηγουμένως, για να αναπαρασταθεί η ετερογένεια μεταξύ των καταναλωτών, η μοντελοποίηση δεν ακολουθεί τη λογική του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή ανά κατηγορία. Εάν ακολουθείτο αυτή η λογική, τότε για κάθε κατηγορία κτηρίων θα επιλεγόταν μια στρατηγική, αυτή με την καλύτερη επίδοση. Όμως για να αναπαρασταθεί η ιδιοσυγκρασία ως προς τις προτιμήσεις των καταναλωτών ή των τύπων κτηρίων που, αν και μπορεί να ανήκουν στην ίδια κατηγορία, για διάφορους λόγους μπορεί να αποφασίζουν διαφορετικά, ακολουθείται η προσέγγιση της σύνθετης στρατηγικής για κάθε κατηγορία κτηρίου. Η σύνθετη στρατηγική προκύπτει ως ο συνδυασμός των προκρινόμενων μεμονωμένων στρατηγικών, δηλαδή αυτών που έχουν τις υψηλότερες θέσεις στην κατάταξη, τις οποίες η κάθε κατηγορία κτηρίου επιλέγει με πιθανότητες. Είναι δηλαδή, σαν να θεωρούνται πολλοί «αντιπροσωπευτικοί» καταναλωτές για κάθε κατηγορία κτηρίων. Για να προκύψει η σύνθετη στρατηγική, ενσωματώνεται στη μοντελοποίηση η μεθοδολογία που βασίζεται στη θεωρία των διακριτών επιλογών.

Σύμφωνα με τη θεωρία των διακριτών επιλογών, οι αποφασίζοντες κάνουν διακριτές επιλογές, επηρεαζόμενοι από παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να είναι άγνωστοι στους αναλυτές ή τους ερευνητές. Τα μοντέλα που βασίζονται στην θεωρία των διακριτών επιλογών (discrete choice models) προβλέπουν με ορθολογικό τρόπο τη συχνότητα εμφάνισης επιλογών, χωρίς να ερμηνεύουν τις επιλογές αυτές (Train, 2003). Έχουν δηλαδή μια αιτιώδη προοπτική: συγκεκριμένοι παράγοντες καθορίζουν την επιλογή του αποφασίζοντα και άλλοι από αυτούς παρατηρούνται από τον ερευνητή και άλλοι όχι.

Τα μοντέλα διακριτών επιλογών βασίζονται στην παραδοχή ότι ο αποφασίζων συμπεριφέρεται προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητά του και για αυτό ονομάζονται τυχαία μοντέλα χρησιμότητας (Random Utility Models - RUM). Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ωστόσο, ότι αν και προκύπτουν από την παραδοχή της μεγιστοποίησης της χρησιμότητας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν και αποφάσεις που δεν συνεπάγονται μεγιστοποίηση χρησιμότητας, δηλαδή μη ορθολογικές αποφάσεις (Train, 2003).

Τα τυχαία μοντέλα χρησιμότητας (RUM) προκύπτουν ως εξής: ο αποφασίζων n έχει να επιλέξει από ένα σύνολο εναλλακτικών J . Ο αποφασίζων μπορεί να αποκτήσει από κάθε εναλλακτική επιλογή ένα ορισμένο επίπεδο χρησιμότητας (ή κέρδους), η οποία ορίζεται $U_{nj}, j = 1, \dots, J$. Η χρησιμότητα είναι γνωστή στον αποφασίζοντα αλλά όχι στον ερευνητή. Ο αποφασίζων τελικά καταλήγει σε εκείνη την επιλογή που του προσφέρει τη μεγαλύτερη χρησιμότητα, δηλαδή καταλήγει σε εκείνη την επιλογή i , εάν και μόνο εάν $U_{ni} > U_{nj} \forall j \neq i$.

Ο ερευνητής δεν παρατηρεί τη χρησιμότητα του αποφασίζοντα. Παρατηρεί όμως ορισμένα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών επιλογών από το πως τα αντιμετωπίζει ο αποφασίζων, τα $x_{nj} \forall j$, και κάποια χαρακτηριστικά του ίδιου του αποφασίζοντα, s_n , και καθορίζει μια συνάρτηση που συνδέει αυτούς τους παράγοντες που παρατηρεί, με τη χρησιμότητα του αποφασίζοντα που δεν παρατηρεί. Η συνάρτηση συμβολίζεται $V_{nj} = V(x_{nj}, s_n) \forall j$ και συχνά ονομάζεται αντιπροσωπευτική χρησιμότητα (representative utility). Συνήθως, η συνάρτηση V εξαρτάται από παραμέτρους που είναι άγνωστες στον ερευνητή και ως εκ τούτου εκτιμώνται στατιστικά.

Δεδομένου ότι υπάρχουν πτυχές της χρησιμότητας που ο ερευνητής δεν μπορεί ή δεν γίνεται να παρατηρήσει, ισχύει $V_{nj} \neq U_{nj}$. Η χρησιμότητα του αποφασίζοντα μπορεί να γραφτεί ως $U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj}$, όπου τα ε_{nj} αντιπροσωπεύουν τους παράγοντες που επηρεάζουν τη χρησιμότητα αλλά δεν περιλαμβάνονται στο V_{nj} . Ο ερευνητής δε γνωρίζει τα ε_{nj} και επομένως αντιμετωπίζει αυτούς τους όρους ως τυχαίους, και θεωρεί ότι τα ε_{nj} ακολουθούν μία κατανομή $f(\varepsilon_{nj})$. Ανάλογα με την κατανομή που ο ερευνητής θεωρεί ότι ακολουθούν οι τυχαίες μεταβλητές ε_{nj} , ορίζονται διαφορετικά μοντέλα διακριτών επιλογών. Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα διακριτών επιλογών είναι τα μοντέλα logit, GEV, probit και mixed logit (Train, 2003).

Τα μοντέλα logit είναι τα πιο εύκολα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα διακριτών επιλογών. Στα μοντέλα logit θεωρείται ότι οι τυχαίες μεταβλητές ε_{nj} είναι independently, identically distributed extreme value και ακολουθούν μια logit κατανομή. Η κατανομή που ακολουθούν οι τυχαίες μεταβλητές ε_{nj} αναφέρεται επίσης στη βιβλιογραφία ως Gumbel ή γενικά Type I extreme value. Η κατανομή και η αθροιστική κατανομή που ακολουθούν οι τυχαίες μεταβλητές ε_{nj} δίνονται από τους τύπους $f(\varepsilon_{nj}) = e^{-\varepsilon_{nj}} e^{-e^{-\varepsilon_{nj}}}$ και $F(\varepsilon_{nj}) = e^{-e^{-\varepsilon_{nj}}}$, αντίστοιχα. Τελικά, η πιθανότητα επιλογής (logit choice probability) της

επιλογής i από τον αποφασίζοντα n , σύμφωνα με τον McFadden (McFadden, 1974), δίνεται από τη

$$\text{σχέση: } P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_j e^{V_{nj}}}$$

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη θεωρία των διακριτών επιλογών για να αποτυπώσει τις ιδιοσυγκρασιακές συμπεριφορές των μεμονωμένων καταναλωτών (τόσο μεταξύ των κατηγοριών όσο και εντός μιας κατηγορίας) και τα ετερογενή χαρακτηριστικά των αποφασιζόντων. Στην μοντελοποίηση, οι στρατηγικές του διαχρονικού δένδρου αποφάσεων αναπαριστούν τις επιλογές i , και το καθαρό όφελος της κάθε στρατηγικής ανά κατηγορία κτηρίου αντικατοπτρίζει την αντιπροσωπευτική χρησιμότητα V_{nj} . Η πιθανότητα επιλογής P_{ni} υπολογίζεται για το πλήθος των επικρατέστερων στρατηγικών ανά κατηγορία κτηρίου, όπως αυτό προκύπτει από την αξιολόγηση (valuation) των στρατηγικών με βάση το οικονομικό τους όφελος. Τελικά, η μοντελοποίηση των επενδυτικών αποφάσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια αναπαρίσταται από μια σύνθετη στρατηγική για κάθε κατηγορία κτηρίου, που προκύπτει ως ένα μείγμα από τις καλύτερες δυναμικές στρατηγικές και το μείγμα σταθμίζεται με τις αντίστοιχες πιθανότητες.

Συνοψίζοντας, η μοντελοποίηση των επενδυτικών αποφάσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια βασίζεται στο συνδυασμό μεταξύ της μεθοδολογίας του δυναμικού προγραμματισμού, με την έννοια του διαχρονικού δένδρου αποφάσεων, όπου η κάθε διαδρομή μέσα στο χρόνο είναι μια στρατηγική που αξιολογείται βάσει του διαχρονικού καθαρού της οφέλους, και της θεωρίας των διακριτών επιλογών, με την έννοια ότι αφού οι στρατηγικές έχουν ταξινομηθεί για κάθε κατηγορία κτηρίου με βάση την αξία τους, υπολογίζονται συχνότητες εμφάνισης των επικρατέστερων στρατηγικών σε συνάρτηση της αξίας τους. Επιπλέον, η μοντελοποίηση των επενδυτικών αποφάσεων για κάθε χρήση είναι ιεραρχική και οι επιλογές σε κάθε χαμηλότερο επίπεδο εξαρτώνται (conditional choices) από τις επιλογές που έχουν γίνει στο προηγούμενο επίπεδο: η επιλογή των στρατηγικών που αναπαριστούν τις επενδυτικές αποφάσεις σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους είναι το πρώτο βήμα στη μοντελοποίηση. Δεδομένων των στρατηγικών αυτών, γίνονται οι επιλογές των στρατηγικών που αναπαριστούν τις επενδυτικές αποφάσεις και τη λειτουργία του εξοπλισμού για θέρμανση και ψύξη, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν την επιλογή των στρατηγικών που αναπαριστούν τις επενδυτικές αποφάσεις και τη λειτουργία του εξοπλισμού για ΖΝΧ και μαγείρεμα.

Στα επόμενα, παρουσιάζεται αναλυτικά η μορφοποίηση του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων και σχετικά με την επιλογή και τις επενδύσεις ενεργειακού εξοπλισμού, όπως αυτά διαμορφώνονται λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού και τη θεωρία των διακριτών επιλογών.

5.3 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Κάθε στρατηγική που αναφέρεται στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, (ρ, tt) , αναπαριστά την πραγματοποίηση επένδυσης σε ενεργειακή αναβάθμιση έντασης ρ , τη χρονική στιγμή tt . Το μοντέλο θεωρεί 8 επίπεδα έντασης, που αναπαριστούν διαφορετικές επεμβάσεις στο κέλυφος, αυξανομένης έντασης, δηλαδή αυξανομένης ενεργειακής εξοικονόμησης (Πίνακας 7). Μεταξύ των επιλογών, υπάρχει και η επιλογή επέμβασης που δεν οδηγεί σε ενεργειακή εξοικονόμηση (ρ_0), και θεωρείται ότι όλα τα κτήρια βρίσκονται σε αυτήν την κατάσταση έτσι κι αλλιώς, δηλαδή ταυτίζεται με την αρχική θερμική συμπεριφορά κάθε κατηγορίας κτηρίου. Στην επιλογή αυτή αντιστοιχεί μια πολύ χαμηλή επενδυτική δαπάνη και

αναπαριστά επεμβάσεις, κυρίως για αισθητικούς λόγους ή για τη συντήρηση της οικοδομής, και θεωρείται ότι όλα τα κτήρια επενδύουν ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (κάθε 20 χρόνια) σε τέτοιες επεμβάσεις, οι οποίες δεν έχουν ενεργειακό αντίκρισμα.

Πίνακας 15: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων

| Ονοματολογία συμβόλων | |
|--|---|
| Δείκτες και Σύνολα | |
| $\rho, \rho' := \{\rho_1, \dots, \rho_8\}$ | Κατηγορίες έντασης ενεργειακής αναβάθμισης - ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά με βάση την ενεργειακή εξοικονόμηση και το κόστος - πολλαπλά ρ είναι δυνατά |
| (ρ, tt) | Διακριτή στρατηγική ενεργειακής αναβάθμισης έντασης ρ , που επιλέγεται τη χρονική στιγμή tt |
| k | Σύνολο προκρινόμενων στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης ανά κατηγορία κτηρίου h |
| (h, k) | Κατηγορίες κτηρίων μετά τις αποφάσεις ενεργειακής αναβάθμισης - οι κατηγορίες κτηρίων επεκτείνονται σε (h, k) , με βάση τις στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης |
| $mp_{k,(\rho,tt)}$ | Σύνδεση μεταξύ των προκρινόμενων στρατηγικών k και του είδους της ενεργειακής αναβάθμισης στην οποία αντιστοιχούν |
| Παράμετροι | |
| $icr_{h,(\rho,tt)}$ | Επενδυτική δαπάνη για την ενεργειακή αναβάθμιση που διαφοροποιείται ανάλογα με την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης, ρ , και τις κατηγορίες κτηρίων, h |
| $sr_{h,tt}$ | Ποσό επιδότησης για ενεργειακή αναβάθμιση επί του κόστους επένδυσης |
| $sav_{h,(\rho,tt)}$ | Εξοικονόμηση ενέργειας, σε μονάδες ωφέλιμης ενέργειας, χάρει στην επένδυση ενεργειακής αναβάθμισης |
| $OC_{h,t}$ | Λειτουργικό κόστος ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας |
| $sc_{h,t}$ | Αντιληπτά κόστη που σχετίζονται με την ενεργειακή αναβάθμιση |
| $\delta_{h,t}$ | Ιδιωτικό προεξοφλητικό επιτόκιο (που αντανακλά το υποκειμενικό κόστος των ιδίων και δανειακών κεφαλαίων) |
| et | Οικονομική διάρκεια ζωής της επένδυσης |
| $af_{h,t}$ | Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου ή τοκοχρεολύσιο |
| $\delta t_{h,t}$ | Επιτόκιο που αντανακλά την προτίμηση ως προς το χρόνο |
| \bar{r}_{tt} | Μέγιστος επιτρεπτός ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης |
| \overline{sav}_h | Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας, σε μονάδες ωφέλιμης ενέργειας, για κάθε κατηγορία κτηρίου, h |
| $\mu_{(h,k),(\rho,tt)}$ | Παράγοντες τεχνικής ωριμότητας (maturity) επιλογών |
| $\theta_{h,tt}$ | Παράγοντες αδράνειας (inertia) για επιλογή βέλτιστων συχνοτήτων |
| Θετικές μεταβλητές | |
| $r_{h,(\rho,tt)}$ | Δυαδική μεταβλητή που αναπαριστά την επιλογή της διακριτής στρατηγικής (ρ, tt) από το κτήριο |

| | |
|--------------------------|--|
| $ICR_{h,(\rho,tt),t}$ | Ετήσιο κόστος επένδυσης σε ενεργειακή αναβάθμιση έντασης ρ , που πραγματοποιήθηκε τη στιγμή tt |
| $BC_{h,(\rho,tt),t}$ | Ετήσιο οικονομικό όφελος από την ενεργειακή αναβάθμιση έντασης ρ , που πραγματοποιήθηκε τη στιγμή tt |
| ev_t | Δυική μεταβλητή περιορισμού για ενεργειακή αποδοτικότητα |
| m_t | Δυική μεταβλητή του περιορισμού για το δυναμικό της κατασκευαστικής βιομηχανίας όσον αφορά το πλήθος των ενεργειακών αναβαθμίσεων που μπορούν να πραγματοποιούνται κάθε χρονική στιγμή |
| $npv(r_{h,(\rho,tt)})$ | Καθαρή παρούσα αξία ανά στρατηγική και τύπο κτηρίου |
| $RATER_{tt}$ | Ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης |
| $\phi_{(h,k),(\rho,tt)}$ | Συχνότητες επιλογής των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης ανά τύπο κτηρίου |
| $S_{(h,k),t}$ | Πλήθος κτηρίων ανά κατηγορία (h, k) |
| $U_{(h,k),t}^{eff}$ | Εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια που πρέπει να καλυφθεί από τον εξοπλισμό θέρμανσης και ψύξης μετά την επιλογή της στρατηγικής k |

Η επιλογή μιας στρατηγικής ενεργειακής αναβάθμισης για κάθε κατηγορία κτηρίου, αποτυπώνεται στο μοντέλο με τη δυαδική μεταβλητή $r_{h,(\rho,tt)}$, και κάθε κατηγορία κτηρίου πρέπει να επιλέγει τουλάχιστον μια στρατηγική (εξίσωση (5-10)), για αυτό και ανάμεσα στις επιλογές είναι και η στρατηγική διατήρησης της αρχικής κατάστασης ρ_0 , σε όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα επίλυσης. Το ποσοστό ενεργειακής εξοικονόμησης ανά στρατηγική ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους, διαφέρει για κάθε κατηγορία κτηρίου, sav , επειδή εξαρτάται από την αρχική θερμική συμπεριφορά του κτηρίου, δηλαδή το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας (U-value) του κτηρίου πριν τη συγκεκριμένη ενεργειακή αναβάθμιση, και το ποσοστό εξοικονόμησης υπολογίζεται βάσει της μεθόδου EN 13790: 2008 . Για κάθε κατηγορία κτηρίου υπάρχει ένα μέγιστο ποσοστό εξοικονόμησης \bar{sav} , δηλαδή ένα δυναμικό εξοικονόμησης που αποτελεί τεχνικό περιορισμό και σχετίζεται με τα συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά (δηλαδή τη θερμική συμπεριφορά) της κάθε κατηγορίας κτηρίου (εξίσωση (5-7)).

Στο χρονικό ορίζοντα επίλυσης, ένα κτήριο μπορεί να πραγματοποιήσει παραπάνω από μια επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης, αρκεί οι επεμβάσεις να είναι αυξανόμενης έντασης, και οι εναλλακτικές στρατηγικές είναι οργανωμένες κατ' αυτόν τον τρόπο (εξίσωση (5-9)), δηλαδή η δυαδική μεταβλητή r εμπεριέχει αυτή την πληροφορία. Για παράδειγμα, μια στρατηγική ενεργειακής αναβάθμισης μπορεί να περιλαμβάνει την πραγματοποίηση επέμβασης μικρής έντασης (πχ. ρ_1), στην αρχή της περιόδου προβολής ($tt = 2025$), και την πραγματοποίηση επέμβασης μεγάλης έντασης (πχ. ρ_8), μετά από 25 χρόνια ($tt = 2050$). Αντίστοιχα, νεότερα κτήρια, που μπορεί να έχουν χτιστεί βάσει οικοδομικών κανονισμών και άρα έχουν μια καλή θερμική συμπεριφορά στην αρχική τους κατάσταση μπορούν να επιλέξουν μόνο ενεργειακές επεμβάσεις μεσαίας ή μεγάλης έντασης, διότι οι ενεργειακές επεμβάσεις μικρής έντασης μπορεί να αντιστοιχούν σε μέσο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας μεγαλύτερο από αυτόν της αρχικής τους κατάστασης (και άρα σε χειρότερη θερμική συμπεριφορά). Προφανώς, η πραγματοποίηση της επένδυσης τη χρονική στιγμή tt , υποδηλώνει την αρχική στιγμή από την οποία μπορούν να υπολογίζονται τα οφέλη από την ενεργειακή εξοικονόμηση. Η επέμβαση στο κέλυφος ισχύει για κάθε επόμενη χρονική στιγμή ή μέχρι την επιλογή μιας επέμβασης μεγαλύτερης έντασης (εξίσωση (5-8)), όπως δηλαδή συμβαίνει και στην πραγματικότητα, όταν γίνεται η εφαρμογή μόνωσης σε ένα κτήριο.

Κάθε επένδυση σε ενεργειακή αναβάθμιση έχει μια τεχνική διάρκεια ζωής, που συνήθως είναι 40 χρόνια. Καθώς περνάνε τα χρόνια, εξασθενούν οι ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών και υπάρχουν θερμικές απώλειες από το κέλυφος. Το μοντέλο αναπαριστά τη σταδιακή χειρότερηση των ιδιοτήτων των θερμομονωτικών υλικών μέσα στο χρόνο με μια συνάρτηση επιβίωσης (survival function), sv , η οποία είναι της μορφής Weibull, και τείνει στο 0 όσο ο χρόνος t πλησιάζει το τέλος του τεχνικού χρόνου ζωής των υλικών που εφαρμόστηκαν στο κτήριο τη χρονική στιγμή tt . Η ενεργειακή εξοικονόμηση που αντιστοιχεί στην επέμβαση ενεργειακής αναβάθμισης ισχύει εξολοκλήρου για το χρονικό διάστημα που η τιμή της συνάρτησης επιβίωσης είναι ίση με 1, και όσο αυτή τείνει στο 0, περιορίζεται και το ποσό της ενεργειακής εξοικονόμησης. Όλα τα προηγούμενα (εξισώσεις (5-7) έως (5-10)), ορίζουν το χώρο των εφικτών στρατηγικών ανά κατηγορία κτηρίου, Φ_h .

$$\Phi_h := \{ \quad \quad \quad \forall h$$

$$\sum_{(\rho, tt)} (r_{h,(\rho, tt)} \cdot sv_{h,(\rho, tt), t}) \cdot sav_{h,(\rho, tt)} \leq \overline{sav}_h \quad (5-7)$$

$$r_{h,(\rho, tt)} \leq r_{h,(\rho, t)} \quad \forall t \geq tt \quad (5-8)$$

$$\begin{aligned} r_{h,(\rho', tt)} - r_{h,(\rho', tt-1)} &\leq 1 - (r_{h,(\rho, t)} - r_{h,(\rho, t-1)}) \\ \text{όπου } \forall(\rho', \rho): \quad sav_{h,(\rho', tt)} &> sav_{h,(\rho, t)} \end{aligned} \quad \forall t \geq tt \quad (5-9)$$

$$\sum_{(\rho, tt)} r_{h,(\rho, tt)} \geq 1 \} \quad (5-10)$$

Επειδή οι στρατηγικές, αναπαριστούν επενδύσεις σε ενεργειακή αναβάθμιση που συμβαίνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές tt ή και την επιλογή παραπάνω από μιας ενεργειακής επέμβασης εντός του χρονικού ορίζοντα προβολής, υπολογίζεται ετήσια ισοδύναμη ράντα πληρωμών ώστε να κατανεμηθεί, στην οικονομική διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου (et), η επενδυτική δαπάνη που αντιστοιχεί στην κάθε στρατηγική. Με άλλα λόγια, υπολογίζεται το ισοδύναμο ετήσιο κόστος της επενδυτικής δαπάνης για κάθε στρατηγική, βάσει του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (af). Το επιτόκιο προεξόφλησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου είναι το ιδιωτικό (υποκειμενικό) προεξοφλητικό επιτόκιο, δ , που διαφοροποιείται ανά κατηγορία καταναλωτή, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά προηγουμένως (Ενότητα 3.3.2), και ο συντελεστής υπολογίζεται βάσει του τύπου: $af = \frac{\delta}{1-(1+\delta)^{-et}}$. Στον υπολογισμό του ισοδύναμου ετήσιου κόστους της επενδυτικής δαπάνης (εξίσωση (5-11)), συμπεριλαμβάνονται και τυχόν επιδοτήσεις (sr), που εφαρμόζονται επί της επενδυτικής δαπάνης (icr), στην οποία έχουν συνυπολογιστεί και τα «κρυφά» κόστη, όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως (Ενότητα 3.3.2).

$$ICR_{h,(\rho, tt), t} = icr(sav_{h,(\rho, tt)}) \cdot (1 - sr_{h, tt}) \cdot af_{h, t} \cdot sv_{h,(\rho, tt), t} \quad \forall(\rho, tt) \quad (5-11)$$

$$\forall h, t$$

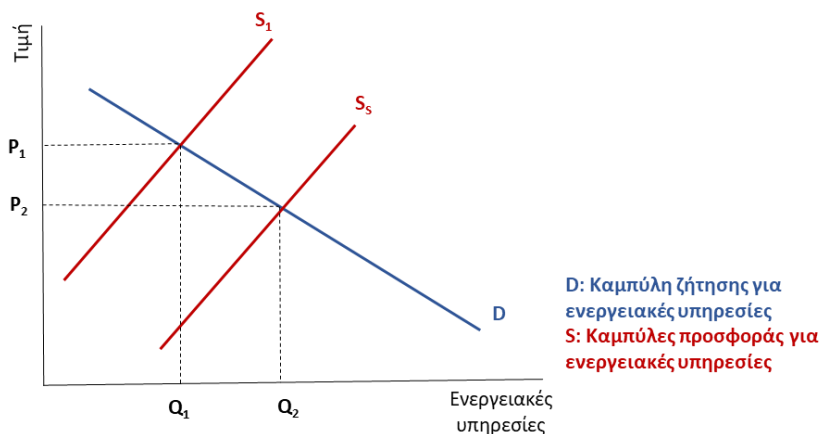
Το μοναδιαίο καθαρό όφελος (BC) κάθε στρατηγικής σε ενεργειακή αναβάθμιση εξαρτάται από το χρόνο και την ένταση των επεμβάσεων και ισούται με τον όγκο των ενεργειακών δαπανών που αποφεύγονται χάρη στην ενεργειακή εξοικονόμηση. Αυτές τροποποιούνται, σε σχέση με τις καθαρά χρηματικές ενεργειακές δαπάνες (OC) που σχετίζονται με το λειτουργικό κόστος της ενεργειακής χρήσης (συμπεριλαμβανομένου του κόστους καυσίμου), εξαιτίας των παραγόντων που αντιπροσωπεύουν τα αντιληπτά κόστη (sc) και την επίδραση των πολιτικών (ev), όπως φαίνεται στην εξίσωση (5-12).

Τα αντιληπτά κόστη στην περίπτωση αυτή αντιπροσωπεύουν την έλλειψη πληροφόρησης και την τεχνική αβεβαιότητα σχετικά με τα οφέλη από την ενεργειακή αναβάθμιση, που μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα οι διάφορες κατηγορίες κτηρίων να μην αντιλαμβάνονται ότι θα κερδίσουν το πλήρες ποσό της ενεργειακής εξοικονόμησης, όπως αυτό προκύπτει βάσει των τεχνικών υπολογισμών.

$$BC_{h,(\rho,tt),t} = (OC_{h,t} + ev_t - sc_{h,t}) \cdot U_{h,t}^d \cdot sv_{h,(\rho,tt),t} \cdot sav_{h,(\rho,tt)} \quad \forall (\rho, tt) \quad \forall h, t \quad (5-12)$$

Ακόμα, τα αντιληπτά κόστη σε αυτή την περίπτωση, και επειδή ακριβώς εκφράζονται στο επίπεδο του λειτουργικού κόστους (και όχι του επενδυτικού), αναπαριστούν και την επίδραση του αντίρροπου αποτελέσματος (rebound effect), όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Bourrelle, 2014; Corrado et al., 2016; Greening et al., 2000; Herring & Roy, 2007; Von Utfall Danielsson, 2009), και σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας μετά την πραγματοποίηση μιας επένδυσης σε ενεργειακή αναβάθμιση. Σύμφωνα με αυτό, ενώ μια επένδυση ενεργειακής αναβάθμισης αναμένεται να οδηγήσει σε ενεργειακή εξοικονόμηση συγκεκριμένου όγκου, μπορεί τελικά να φαίνεται σαν να έχει πραγματοποιηθεί μικρότερη ενεργειακή εξοικονόμηση, και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και αύξηση στη ζήτηση ενέργειας.

Εικόνα 18: Γραφική απεικόνιση της επίδρασης της ελάττωσης του οριακού κόστος μιας ενεργειακής υπηρεσίας



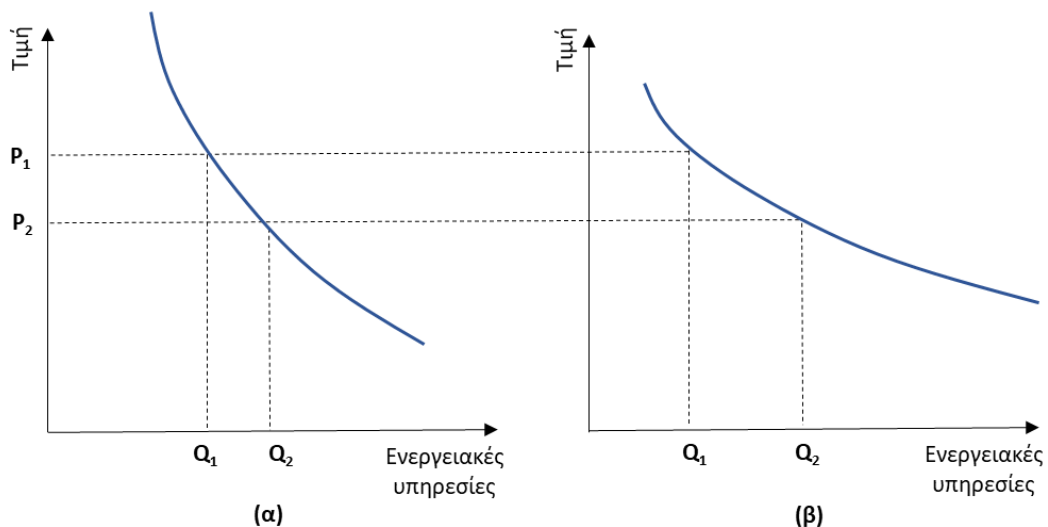
Πηγή: (Von Utfall Danielsson, 2009)

Στην πραγματικότητα, η εξήγηση για την επίδραση του αντίρροπου αποτελέσματος έγκειται στο ό, τι η αναμενόμενη εξοικονόμηση ενεργειακών δαπανών που γνωρίζουν οι καταναλωτές ότι θα τους επιφέρει η επένδυση σε ενεργειακή αναβάθμιση, τους ωθεί να αλλάξουν συμπεριφορά ως προς τη ζήτηση ενέργειας,

όπως για παράδειγμα να ρυθμίζουν το θερμοστάτη σε υψηλότερη θερμοκρασία από ότι ορίζουν οι συνθήκες θερμικής άνεσης, ή στο να θερμαίνουν ή να ψύχουν το κτήριο για μεγαλύτερη διάρκεια. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από την μικρό-οικονομική θεωρία: όταν υπάρχει βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, αυτό οδηγεί σε μείωση του οριακού κόστους παροχής της ενεργειακής υπηρεσίας. Σε ένα απλό μοντέλο προσφοράς και ζήτησης, αυτό απεικονίζεται ως μια μετατόπιση προς τα έξω της καμπύλης προσφοράς, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 18. Το κέρδος από την ενεργειακή απόδοση σχετίζεται με χαμηλότερη τιμή που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ποσότητα ζήτησης της ενεργειακής υπηρεσίας. Στην περίπτωση που μελετάται εδώ, η ενεργειακή υπηρεσία αναπαριστά την ωφέλιμη θερμική ενέργεια και η τιμή αναπαριστά τις ενεργειακές δαπάνες (δηλαδή το κόστος καυσίμου): η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους οδηγεί σε εξοικονόμηση του κόστους καυσίμου, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε αύξηση της ωφέλιμης θερμικής ενέργειας, μέσω της αλλαγής στη συμπεριφοράς της χρήσης της ενέργειας.

Όλα τα παραπάνω υπονοούν ότι η επίδραση του (άμεσου) αντίρροπου αποτελέσματος σχετίζεται με την ελαστικότητα της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες (δηλαδή για ωφέλιμη θερμική ενέργεια), ως προς τις τιμές (δηλαδή ως προς τις ενεργειακές δαπάνες για θερμικές χρήσεις) και τα σχήματα που ακολουθούν αναπαριστούν γραφικά την επίδραση του άμεσου αντίρροπου αποτελέσματος για διάφορες περιπτώσεις ελαστικότητας της ζήτησης ως προς τις τιμές.

Εικόνα 19: Μεταβολή της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες λόγω μείωσης της τιμής της ενεργειακής υπηρεσίας για (α) ανελαστική ζήτηση και (β) ελαστική ζήτηση



Πηγή: (Von Utfall Danielsson, 2009)

Στην Εικόνα 19 (α), η ζήτηση είναι πολύ ανελαστική και επομένως μια αλλαγή της τιμής έχει μικρή επίδραση στη ζητούμενη ποσότητα. Η Εικόνα 19 (β) εμφανίζει μια ελαστική ζήτηση, όπου μια αλλαγή τιμής προκαλεί μεγαλύτερη επίδραση στη ζήτηση. Η εικόνα (α) θα μπορούσε να αναπαριστά ένα νοικοκυριό υψηλού εισοδήματος, ενώ η εικόνα (β) ένα νοικοκυριό χαμηλού εισοδήματος.

Η μεταβλητή en , στην εξίσωση (5-12), είναι η δυική μεταβλητή του περιορισμού για την ενεργειακή αποδοτικότητα και αναπαριστά το οριακό κόστος επίτευξης του στόχου ενεργειακής απόδοσης. Η

μεταβλητή αυτή ενδέχεται να αντιπροσωπεύει συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής, όπως την ύπαρξη συστήματος εμπορίας Λευκών Πιστοποιητικών (White Certificated scheme), όπου σε αυτήν την περίπτωση η τιμή της μεταβλητής είναι η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς των Λευκών Πιστοποιητικών. Η μεταβλητή μπορεί επίσης να αντιπροσωπεύει μη προσδιορισμένες πολιτικές, συμπεριλαμβανομένων θεσμικών μέτρων. Στη μοντελοποίηση, η μεταβλητή ev βελτιώνει την οικονομική απόδοση των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης. Ουσιαστικά, όσο υψηλότερη είναι η τιμή της μεταβλητής ev , τόσο πιο φιλόδοξες είναι οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης. Το πως ορίζεται και ενσωματώνεται στη μοντελοποίηση η μεταβλητή ev αναλύεται σε επόμενο ενότητα (Ενότητα 5.5) με λεπτομέρεια.

Για να υπολογιστεί το καθαρό οικονομικό όφελος των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης ανά κατηγορία κτηρίου, υπολογίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) των ετήσιων χρηματορροών της κάθε στρατηγικής (εξίσωση (5-13)). Στον υπολογισμό, λαμβάνεται υπόψη το ισοδύναμο ετήσιο κόστος της επενδυτικής δαπάνης και το μοναδιαίο καθαρό όφελος της κάθε στρατηγικής, που είναι εξορισμού ετήσιο. Για τον υπολογισμό της ΚΠΑ των ετήσιων χρηματορροών της κάθε στρατηγικής στην εξίσωση (5-13), χρησιμοποιείται επιτόκιο (δt), το οποίο αναπαριστά την προτίμηση ως προς τον χρόνο (preference over-time rate) της κάθε κατηγορίας καταναλωτή. Η αριθμητική τιμή του είναι χαμηλότερη από την τιμή του ιδιωτικού προεξοφλητικού επιτοκίου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ισοδύναμου ετήσιου κόστους της επενδυτικής δαπάνης βάσει του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου και το δt αναπαριστά το βαθμό που οι μελλοντικές εξελίξεις επηρεάζουν τις συμπεριφορές και τις αποφάσεις. Όπως έχει αναφερθεί, στο μοντέλο εφαρμόζεται διαχρονική βελτιστοποίηση (intertemporal optimization), αφού οι αποφάσεις οργανώνονται με τη μορφή στρατηγικών που εγγενώς εμπεριέχουν την πληροφορία των αποφάσεων σε κάθε χρονική στιγμή εντός του χρονικού ορίζοντα επίλυσης και τελικά η εξίσωση (5-13) υπολογίζει τη διαχρονική αξία των στρατηγικών, εντός του χρονικού ορίζοντα επίλυσης, ο οποίος έχει διάρκεια 20 χρόνια. Η τιμή του επιτοκίου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ΚΠΑ της κάθε στρατηγικής, επηρεάζει την αντίληψη του επενδυτή σχετικά με τις μελλοντικές εξελίξεις (foresight), και όσο μικρότερη είναι η τιμή του (ακόμα και πολύ κοντά στο 0), τόσο μεγαλύτερη σημασία έχουν οι μελλοντικές εξελίξεις για τις σημερινές αποφάσεις.

$$npv(r_{h,(\rho,tt)}) = \sum_t (-ICR_{h,(\rho,tt),t} \cdot (1 + m_{tt}) + BC_{h,(\rho,tt),t}) \cdot (1 + \delta t_{h,t})^{-t} \quad \forall(\rho, tt) \quad \forall h \quad (5-13)$$

Το κριτήριο της ΚΠΑ, χρησιμοποιείται τελικά για την αξιολόγηση των στρατηγικών, οι οποίες ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά (από αυτήν με τη μεγαλύτερη ΚΠΑ σε αυτή με τη μικρότερη) (εξίσωση (5-14)).

$$r_{h,(\rho,tt)} = \underset{r_{h,(\rho,tt)} \in \Phi_h}{argmax} npv(r_{h,(\rho,tt)}) \\ := \{r_{h,(\rho,tt)} | r_{h,(\rho,tt)} \in \Phi_h \cap \forall r'_{h,(\rho,tt)} \in \Phi_h : npv(r'_{h,(\rho,tt)}) \leq npv(r_{h,(\rho,tt)})\} \quad \forall h \quad (5-14)$$

Αφού οι στρατηγικές έχουν αξιολογηθεί και ταξινομηθεί με το κριτήριο της ΚΠΑ, τελικά, διατηρείται ένα πλήθος αυτών, k , ανά κατηγορία κτηρίου (εξίσωση (5-15)). Αυτές αντιπροσωπεύουν τελικά, τις στρατηγικές με την καλύτερη επίδοση, ως προς το καθαρό οικονομικό τους όφελος που προκύπτει από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, για κάθε κατηγορία κτηρίου, και αυτές συνθέτουν τη σύνθετη στρατηγική για

κάθε κατηγορία. Άρα, η κάθε κατηγορία κτηρίων h , χαρακτηρίζεται πλέον και από τις k επικρατέστερες στρατηγικές για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, που της αντιστοιχούν.

$$r_{(h,k),(\rho,tt)} \text{ όπου } card(k) \sim 50 \quad \forall h \in (h, k) \cap mp_{k,(\rho,tt)} \quad (5-15)$$

Εφαρμόζοντας τη θεωρία των διακριτών επιλογών και χρησιμοποιώντας ως συνάρτηση αντιπροσωπευτικής χρησιμότητας μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών (των στρατηγικών) για ενεργειακή αναβάθμιση, την ΚΠΑ αυτών, υπολογίζονται οι συχνότητες εμφάνισης των k στρατηγικών για κάθε κατηγορία κτηρίου, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5-16). Οι παράγοντες μ στην εξίσωση εκφράζουν παράγοντες τεχνικής ωριμότητας όσον αφορά την επιλογή ενεργειακών επεμβάσεων στο κέλυφος του κτηρίου. Οι παράγοντες αυτοί τροποποιούν τον αντίκτυπο του σχετικού κόστους μεταξύ των επιλογών k και επομένως χρησιμεύουν στον υπολογισμό των συχνοτήτων αδράνειας, που αποτελούν το πρώτο μέρος του αθροίσματος. Ο υπολογισμός των βέλτιστων συχνοτήτων (το δεύτερο μέρος του αθροίσματος) δεν λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες μ και εξαρτάται αποκλειστικά από το σχετικό κόστος μεταξύ των επιλογών k . Η μαθηματική έκφραση των συχνοτήτων, όπως υπαγορεύεται από τη θεωρία των διακριτών επιλογών, διευρύνθηκε σύμφωνα με την παραπάνω λογική, ώστε να μπορεί να αναπαρασταθεί η ατελής υποκατάσταση μεταξύ των επιλογών, η οποία οφείλεται σε τεχνικούς λόγους και στην ετερογένεια. Τελικά δηλαδή οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε στρατηγικής είναι το σταθμισμένο άθροισμα των συχνοτήτων που υπολογίζονται σε κατάσταση αδράνειας και στη βέλτιστη κατάσταση. Τα βάρη θ αντιπροσωπεύουν την ευαισθητοποίηση των καταναλωτών όσον αφορά την υιοθέτηση πολύ αποτελεσματικών επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης και επηρεάζουν το ρυθμό υιοθέτησης των βέλτιστων συχνοτήτων. Σε μία κατάσταση ως έχει (business-as-usual), ο ρυθμός αυτός είναι πολύ αργός, τα βάρη θ όμως επηρεάζονται από τις διάφορες πολιτικές και έτσι ο ρυθμός υιοθέτησης των βέλτιστων συχνοτήτων επιταχύνεται.

$$\begin{aligned} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} = & \theta_{h,tt} \cdot \frac{\mu_{(h,k),(\rho,tt)} \cdot \exp\left(npv(r_{(h,k),(\rho,tt)})\right)}{\sum_{k',(\rho',tt')} \mu_{(h,k'),(\rho',tt')} \cdot \exp\left(npv(r_{(h,k'),(\rho',tt')})\right)} \\ & + (1 - \theta_{h,tt}) \cdot \frac{\exp\left(npv(r_{(h,k),(\rho,tt)})\right)}{\sum_{k',(\rho',tt')} \exp\left(npv(r_{(h,k'),(\rho',tt')})\right)} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \forall h \\ \in (h, k) \\ \cap mp_{k,(\rho,tt)} \end{array} \quad (5-16)$$

Βάσει των συχνοτήτων υπολογίζεται τελικά το πλήθος κάθε κατηγορίας κτηρίων, S , που έχουν επιλέξει την κάθε στρατηγική, k , για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους (εξίσωση (5-17)).

$$S_{(h,k),tt} = \sum_{\rho \in mp_{k,(\rho,tt)}} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} \cdot S_{h,tt} \quad \begin{array}{l} \forall (h, k) \\ \forall tt \end{array} \quad (5-17)$$

Το μοντέλο υπολογίζει το συνολικό ρυθμό ενεργειακής αναβάθμισης σε κάθε χρονική στιγμή, σύμφωνα με την εξίσωση (5-18).

$$RATER_{tt} = \frac{\sum_{(h,k) \in mp_{k,(\rho,tt)} | \rho \neq \rho_0} S_{(h,k),tt}}{\sum_{(h,k) \in mp_{k,(\rho,tt)}} S_{(h,k),tt}} \quad \forall tt \quad (5-18)$$

Στη μοντελοποίηση, λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι υπάρχει ένα εξαντλητικό δυναμικό που αφορά στις ικανότητες της κατασκευαστικής βιομηχανίας για εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης, και αναπαριστά τη διαθεσιμότητα τόσο των οικοδομικών υλικών όσο και εξειδικευμένου προσωπικού. Αυτός ο περιορισμός, διατυπώνεται στο μοντέλο ως επίπτωση κόστους, δηλαδή, ο υπερβολικός όγκος ανακαίνισης μπορεί να συνεπάγεται αύξηση του κόστους ανά μονάδα, σύμφωνα με μια μη γραμμική συνάρτηση (G) κόστους-προσφοράς (εξίσωση (5-19)) που ορίζεται σε επίπεδο αγοράς (δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο του κτηριακού αποθέματος που τελικά επιλέγει να επενδύσει σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους). Η δυική μεταβλητή του περιορισμού (5-19) (δηλαδή η μεταβλητή m_{tt} που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (5-13)) αναπαριστά το οριακό κόστος που αντιστοιχεί στην επένδυση σε ενεργειακή αναβάθμιση όταν ο ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης που προκύπτει κάθε χρονική στιγμή ξεπερνάει το δυναμικό της κατασκευαστικής βιομηχανίας.

$$RATER_{tt} \leq G(\bar{r}_{tt}) \quad \forall tt \quad (5-19)$$

Το κέλυφος του κτηρίου καλύπτει μέρος της συνολικής επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας U^d μέσω της θερμομόνωσης, δηλαδή μέσω της επιλογής των στρατηγικών για ενεργειακή αναβάθμιση, r . Ο εξοπλισμός για θέρμανση πρέπει να καλύπτει την εναπομένουσα επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια μέσω της τελικής κατανάλωσης ενέργειας. Η εναπομένουσα επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια, U^{eff} , υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-20).

$$U_{(h,k),t}^{eff} = U_{(h,k),t}^d \cdot \left(1 - \sum_{tt \leq t} \sum_{\rho} (r_{(h,k),(\rho,tt)} - r_{(h,k),(\rho,tt-1)}) \cdot sv_{(h,k),(\rho,tt),t} \cdot sav_{(h,k),(\rho,tt)} \right) \quad \forall (h,k) \quad \forall t \quad (5-20)$$

5.4 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Πίνακας 16: Ονοματολογία συμβόλων της μαθηματικής περιγραφής της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς σχετικά με την επιλογή και τις επενδύσεις ενεργειακού εξοπλισμού

| Ονοματολογία και σύμβολα | |
|--------------------------|--|
| Δείκτες και σύνολα | |
| s ή s' | Ενεργειακός εξοπλισμός που αναπαριστά τον τύπο της τεχνολογίας |
| $self(s)$ | Εξοπλισμός με δυνατότητα αυτό-παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας |
| $s_2(s)$ | Εφεδρική τεχνολογία |
| bu_{s,s_2} | Σύνδεση μεταξύ κύριας και εφεδρικής τεχνολογίας |

| | |
|---|---|
| (s, tt) | Διακριτή στρατηγική για την επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού – γίνεται επένδυση σε τεχνολογία τύπου s , τη χρονική στιγμή tt |
| ef | Ενεργειακές μορφές |
| $f(ef)$ | Ενεργειακές μορφές (καύσιμα) που καταναλώνονται από τον εξοπλισμό – είσοδος στον εξοπλισμό |
| $o(ef)$ | Ενεργειακές μορφές που παράγονται από τον εξοπλισμό – έξοδος από τον εξοπλισμό |
| l | Ρύποι (πχ. εκπομπές CO ₂ , σωματίδια PM2.5) |
| $mp_{o,f}$ | Σύνδεση μεταξύ ταυτόσημων ενεργειακών μορφών, $o \equiv f$ |
| $mp_{(s,tt),f}$ | Σύνδεση μεταξύ ενεργειακών μορφών (καυσίμων) και τεχνολογιών |
| $mp_{(s,tt),o}$ | Σύνδεση μεταξύ παραγόμενων ενεργειακών μορφών και τεχνολογιών |
| $mp_{(s,tt),\omega}$ | Σύνδεση μεταξύ τεχνολογιών και χρήσεων ενέργειας |
| $mp_{o,\omega}$ | Σύνδεση μεταξύ παραγόμενων ενεργειακών μορφών από τις τεχνολογίες και χρήσεων ενέργειας |
| $mp_{(s,tt),(o,\omega)} = mp_{(s,tt),o} \cap mp_{o,\omega}$ | Σύνδεση μεταξύ παραγόμενων ενεργειακών μορφών από τις τεχνολογίες, τεχνολογιών και χρήσεων ενέργειας |
| $mp_{(h,k),s}$ | Σύνδεση μεταξύ κατηγορίας κτηρίου και τεχνολογιών που σχετίζεται με τα διαθέσιμα καύσιμα και εξαρτάται από την ύπαρξη υποδομής και την αγορά |
| n | Σύνολο προκρινόμενων στρατηγικών ενεργειακού εξοπλισμού ανά κατηγορία κτηρίου (h, k) |
| (h, k, n) | Κατηγορίες κτηρίων μετά τις αποφάσεις ενεργειακής αναβάθμισης και την επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού - οι κατηγορίες κτηρίων (h, k) επεκτείνονται σε (h, k, n) , με βάση τις στρατηγικές για επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού |
| $mp_{n,(s,tt)}$ | Σύνδεση μεταξύ των προκρινόμενων στρατηγικών και του ενεργειακού εξοπλισμού στον οποίο αντιστοιχούν |
| Τεχνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά | |
| $ics_{(s,tt)}, sz_{(s,tt)}, ec_{(s,tt)}$ | Επενδυτική δαπάνη για αγορά εξοπλισμού, μέγεθος της τεχνολογίας, και δείκτης κόστους που εξαρτάται από το μέγεθος της τεχνολογίας |
| $omc_{(s,tt)}, gomc_{(s,tt)}$ | Κόστος συντήρησης και λειτουργίας και ρυθμός αύξησης αυτού με τον χρόνο |
| $cf_{(s,tt)}$ | Συντελεστής δυναμικότητας ενεργειακού εξοπλισμού |
| $vc_{(s,tt)}$ | Μεταβλητό κόστος (που δεν σχετίζεται με το κόστος καυσίμου) |
| $hc_{(h,k),(s,tt)}$ | Επενδυτική δαπάνη που αναπαριστά τα «κρυφά» κόστη |
| $tc_{(h,k),(s^p,s)}$ | Επενδυτική δαπάνη που αναπαριστά το κόστος μετάβασης από τεχνολογία s^p σε τεχνολογία $s \neq s^p$ |
| $aic_{(h,k),(s,s'),t}$ | Διαφορικό επενδυτικής δαπάνης για τεχνολογία s' που χρησιμοποιείται στη θέρμανση εφόσον χρησιμοποιείται η ίδια και σε άλλη χρήση |
| $afc_{(h,k),(f,f'),t}$ | Διαφορικό κόστους καυσίμου για χρήση διαφορετικού καυσίμου f' για άλλες χρήσεις, εφόσον στη θέρμανση χρησιμοποιείται f |

| | |
|--|---|
| $lbd_{(s,tt),t}$ | Παράγοντας learning |
| $\eta(UR_{(h,k),(s,tt),t})$ | Ενεργειακή απόδοση τεχνολογίας ως συνάρτηση του συντελεστή φορτίου (καμπύλη με καθοδική κλίση) |
| $\beta_{(s,tt),(o,o')}$ | Λόγος διαμερισμού παραγωγής δύο ενεργειακών μορφών o, o' |
| $d_{(h,k),\omega,t}$ | Διάρκεια λειτουργίας ανά χρήση και κατηγορία κτηρίου |
| $lt_{(s,tt)}$ | Τεχνική διάρκεια ζωής τεχνολογίας |
| $se_{(s,tt),t}$ | Περίοδος αποπληρωμής επένδυσης |
| $b_{(h,k),s,s_2,\omega,t}$ | Ποσοστό συμπλήρωσης της παραγωγής του πρωτεύοντος συστήματος s με εφεδρικό σύστημα s_2 |
| emf_f | Συντελεστής εκπομπών ανά τύπο καυσίμου |
| $k0_{(h,k),(s,tt)}$ | Διακριτός εξοπλισμός s , αγορασμένος τη χρονική στιγμή tt , που λειτουργεί την αρχική χρονική στιγμή t_0 |
| Μεταβλητές | |
| $s_{(h,k),(s,tt)}$ | Διαδική μεταβλητή που αναπαριστά την επιλογή της διακριτής στρατηγικής (s, tt) από το κτήριο |
| $\Pi_{(h,k),(s,tt),o,t}$ | Παραγωγή ενεργειακής μορφής από τεχνολογία ανά κατηγορία κτηρίου |
| $F_{(h,k),(s,tt),f,t}$ | Τελική κατανάλωση ενέργειας (καυσίμου) ανά κατηγορία κτηρίου και τεχνολογία |
| $M_{(h,k),f,t}$ | Προμήθεια καυσίμου από την αγορά ανά κατηγορία κτηρίου |
| $MT_{f,t}$ | Συνολική προμήθεια καυσίμου από την αγορά |
| $Y_{(h,k),(s,tt),f,t}$ | Διάθεση περίσσειας καυσίμου στην αγορά ανά κατηγορία κτηρίου |
| $I_{(h,k),(s,tt)}$ | Πλήθος νέου διακριτού εξοπλισμού s που αγοράζεται τη χρονική στιγμή tt (νέες επενδύσεις) |
| $K_{(h,k),(s,tt),t}$ | Πλήθος διακριτού εξοπλισμού s , αγορασμένου τη χρονική στιγμή tt , που λειτουργεί τη χρονική στιγμή t (λειτουργών εξοπλισμός) |
| $D_{(h,k),(s,tt),t}$ | Πλήθος διακριτού εξοπλισμού s , αγορασμένου τη χρονική στιγμή tt , που αποσύρεται τη χρονική στιγμή t |
| $ICS_{(h,k),(s,tt),t}$ | Ετήσιο κόστος επένδυσης σε εξοπλισμό s , αγορασμένο τη χρονική στιγμή tt |
| $OPC_{(h,k),(s,tt),t}$ | Ετήσιο λειτουργικό κόστος εξοπλισμού s , αγορασμένου τη χρονική στιγμή tt |
| $UR_{(h,k),(s,tt),t}$ | Συντελεστής φορτίου εξοπλισμού |
| $SA_{(h,k),(s,tt),t}$ | Εναπομένουσα αξία του εξοπλισμού όταν αποσύρεται |
| $RV_{(h,k),(s,tt),t}$ | Έσοδα από τη διάθεση της περίσσειας καυσίμου στην αγορά |
| $cv_{l,t}$ | Δυική μεταβλητή περιορισμού για μείωση των εκπομπών CO ₂ |
| rv_t | Δυική μεταβλητή περιορισμού για τη συνεισφορά των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση |
| $pv(s_{(h,k),(s,tt)})$ | Παρούσα αξία του κόστους της κάθε στρατηγικής επιλογής ενεργειακού εξοπλισμού για κάθε κατηγορία κτηρίου |
| Παράμετροι που σχετίζονται με την αγορά | |
| $pf_{f,t}$ | Τιμή αγοράς καυσίμων από την αγορά |
| $bf_{f,t}$ | Τιμή πώλησης της περίσσειας καυσίμων στην αγορά |
| $a_{(h,k),f,t}$ | (Άνω) όριο για τη διάθεση της περίσσειας καυσίμου στην αγορά |

| | |
|-----------------------|---|
| $\overline{MT}_{f,t}$ | (Άνω) όριο δυναμικότητας για καύσιμα που προμηθεύει η αγορά |
| \overline{EE}_t | (Άνω) όριο συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας – περιορισμός για ενεργειακή εξοικονόμηση |
| \overline{RES}_t | (Άνω) όριο τελικής κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ – περιορισμός για συνεισφορά των ΑΠΕ |
| $\overline{EM}_{l,t}$ | (Άνω) όριο για εκπομπές CO ₂ – περιορισμός για μείωση των εκπομπών CO ₂ |

Αφού το μοντέλο έχει υπολογίσει το τμήμα της ωφέλιμης ενέργειας που καλύπτεται από το κέλυφος, υπολογίζεται η εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια που θα πρέπει να καλυφθεί από τον εξοπλισμό για κάθε χρήση, ω , και κατηγορία κτηρίου, (h, k) σε κάθε χρονική στιγμή t , εντός του χρονικού ορίζοντα επίλυσης. Η μοντελοποίηση της κάλυψης της εναπομένουσας ωφέλιμης ενέργειας από τον ενεργειακό εξοπλισμό περιλαμβάνει τόσο τη λειτουργία του εξοπλισμού όσο και την πραγματοποίηση επενδύσεων.

Κάθε στρατηγική που αναφέρεται στην επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού, (s, tt) , αναπαριστά την πραγματοποίηση επένδυσης σε ενεργειακό εξοπλισμό s , τη χρονική στιγμή tt . Ο εξοπλισμός s αναπαριστά τον τύπο της τεχνολογίας (πχ. λέβητας, αντλία θερμότητας, ηλεκτρικές συσκευές) και την κατηγορία ενεργειακής απόδοσής του, για τις οποίες το μοντέλο θεωρεί τέσσερα επίπεδα, από την τρέχουσα διαθέσιμη τεχνολογία έως την καλύτερη μη διαθέσιμη τεχνολογία (BNAT). Οι εξοπλισμοί που δε συμμορφώνονται με τα πρότυπα σε ότι αφορά την ενεργειακή τους απόδοση, υφίστανται κυρώσεις. Μεταξύ των επιλογών τεχνολογίας εξοπλισμού s είναι και τεχνολογίες αυτό-παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πχ. μικρό -CHP, κυψέλη καυσίμου κ.ά.). Κάθε εξοπλισμός s , χρησιμοποιεί ως είσοδο ενεργειακά προϊόντα f και μεταξύ των δύο υπάρχει μονοσήμαντη σχέση $(mp_{(s,tt),f})$, και παρέχει ως έξοδο χρήσιμες ενεργειακές μορφές o $(mp_{(s,tt),o})$. Στα ενεργειακά προϊόντα που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον εξοπλισμό περιλαμβάνονται τα διάφορα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, κάρβουνο), το διανεμόμενο αέριο (συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας παροχής μείγματος αερίου, που αποτελείται από ορυκτό φυσικό αέριο, υδρογόνο, βιοαέριο και συνθετικό μεθάνιο) οι ΑΠΕ (βιομάζα, ήλιος, γεωθερμία, θερμότητα περιβάλλοντος), η διανεμόμενη θερμότητα και ο ηλεκτρισμός. Οι ενεργειακές μορφές στην έξοδο του εξοπλισμού μπορεί να είναι θερμότητα (για κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, προετοιμασίας ΖΝΧ και μαγειρέματος) ή ψύξη (με τη μορφή υγρού ατμού υψηλής (ή αντίστοιχα χαμηλής) ενθαλπίας ή αέρα), ηλεκτρική ενέργεια ή μια ωφέλιμη ενεργειακή υπηρεσία (πχ. τα lumen που παρέχει ο φωτισμός, ή η ψύξη του ψυγείου κ.ά.). Ο ίδιος εξοπλισμός (η ίδια τεχνολογία), μπορεί να παρέχει στην έξοδο παραπάνω από μία ενεργειακές μορφές, είτε ταυτόχρονα είτε σε άλλη χρονική στιγμή.

Η επιλογή μιας στρατηγικής για τον ενεργειακό εξοπλισμό από κάθε κατηγορία κτηρίου, αποτυπώνεται στο μοντέλο με τη δυαδική μεταβλητή $s_{(h,k),(s,tt)}$, και κάθε κατηγορία κτηρίου πρέπει να επιλέγει τουλάχιστον μια στρατηγική (εξίσωση (5-23)), για αυτό και ανάμεσα στις επιλογές είναι και η στρατηγική διατήρησης του ίδιου (αρχικού) εξοπλισμού, σε όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα επίλυσης. Στο χρονικό ορίζοντα επίλυσης, ένα κτήριο μπορεί να επενδύσει σε εξοπλισμό s παραπάνω από μια φορές για κάθε χρήση. Εάν ο τύπος του εξοπλισμού είναι ο ίδιος (πχ. λέβητας πετρελαίου) αρκεί η κατηγορία ενεργειακής απόδοσης του εξοπλισμού (που αναπαρίσταται μέσω του ονομαστικού βαθμού ενεργειακής απόδοσης του εξοπλισμού) να είναι τουλάχιστον ίση με την προηγούμενη και οι εναλλακτικές στρατηγικές είναι οργανωμένες κατ' αυτόν τον τρόπο (εξίσωση (5-22)), δηλαδή η δυαδική μεταβλητή s εμπεριέχει αυτή την πληροφορία. Εάν ο τύπος του εξοπλισμού είναι διαφορετικός (πχ. αντικατάσταση του λέβητα πετρελαίου με αντλία θερμότητας), δεν είναι απαραίτητο η (ονομαστική) ενεργειακή απόδοση του νέου εξοπλισμού να είναι

καλύτερη από αυτήν του παλιού, με την έννοια ότι δεν έχουν αποκλειστεί οι επιλογές αντικατάστασης που μπορεί να αντιστοιχούν σε αντικατάσταση με εξοπλισμό χαμηλότερης απόδοσης (πχ. αντικατάσταση λέβητα πετρελαίου με λέβητα βιομάζας). Προφανώς, η πραγματοποίηση μιας επένδυσης τη χρονική στιγμή tt , υποδηλώνει την αρχική στιγμή από την οποία στο κτήριο λειτουργεί η συγκεκριμένη τεχνολογία για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Η τεχνολογία αυτή λειτουργεί για κάθε επόμενη χρονική στιγμή ή μέχρι την επιλογή μιας άλλης τεχνολογίας (εξίσωση (5-21)), όπως δηλαδή συμβαίνει και στην πραγματικότητα.

Όλα τα προηγούμενα (εξισώσεις (5-21) έως (5-23)), ορίζουν το χώρο των εφικτών στρατηγικών επιλογής ενεργειακού εξοπλισμού ανά κατηγορία κτηρίου, $\Phi_{(h,k)}$.

$$\Phi_{(h,k)} := \left\{ \begin{array}{ll} \forall(h, k) & \\ S_{(h,k),(s,tt)} \leq S_{(h,k),(s,t)} & \forall t \geq tt \end{array} \right. \quad (5-21)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_{(h,k),(s',tt)} - S_{(h,k),(s',tt-1)} \leq 1 - (S_{(h,k),(s,t)} - S_{(h,k),(s,t-1)}) & \forall t \geq tt \\ \text{όπου } \forall(s', s) | (s' \equiv s): & \bar{\eta}_{(s',tt)} \geq \bar{\eta}_{(s,t)} \end{array} \right. \quad (5-22)$$

$$\left\{ \sum_{(s,tt)} S_{(h,k),(s,tt)} \geq 1 \right\} \quad (5-23)$$

5.4.1. Διατύπωση της λειτουργίας του ενεργειακού εξοπλισμού

Σύμφωνα με την εξίσωση (5-24), θα πρέπει, οι ενεργειακοί εξοπλισμοί να παρέχουν αρκετή ποσότητα ενεργειακών μορφών (Π_o), ώστε να καλύπτεται η εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια U_{ω}^{eff} για κάθε χρήση ω σε κάθε κατηγορία κτηρίου.

$$\sum_s \sum_{tt \leq t} \sum_{o \in \text{Emp}_{(s,tt),(o,\omega)}} \Pi_{(h,k),(s,tt),o,t} \geq U_{(h,k),\omega,t}^{eff} \quad \forall \omega, (h, k) \quad (5-24)$$

Ορισμένα είδη εξοπλισμού, απαιτούν την ύπαρξη και δευτερεύοντος ή εφεδρικού συστήματος. Τέτοια παραδείγματα είναι οι αεροθερμικές αντλίες θερμότητας, των οποίων η λειτουργία είναι λιγότερο αποδοτική όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι χαμηλότερη από μια ορισμένη τιμή (βλ. Ενότητα 4.3.2), και συχνά συνδυάζονται με αυτόνομο σύστημα αερίου ή ηλεκτρική αντίσταση. Άλλο παράδειγμα χρήσης εφεδρικού συστήματος είναι η συμπλήρωση των αναγκών για ΖΝΧ που καλύπτεται πρωταρχικά με ηλιακή ενέργεια με ηλεκτρικό σύστημα. Η εξίσωση (5-25) αναπαριστά την απαιτούμενη παραγωγή του εφεδρικού εξοπλισμού (s_2), η οποία προκύπτει ως ένα μερίδιο (b_{s,s_2}) της παραγωγής του πρωτεύοντος συστήματος. Η τιμή του μεριδίου αυτού, είναι τεχνικό χαρακτηριστικό της πρωτεύουσας τεχνολογίας και εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της κάθε χώρας.

$$\sum_{o \in mp_{(s_2, tt), (o, \omega)}} \Pi_{(h, k), (s_2, tt), o, t} = b_{(h, k), s, s_2, \omega, t} \cdot \sum_{o \in mp_{(s, tt), (o, \omega)}} \Pi_{(h, k), (s, tt), o, t} \quad \forall \omega, (h, k) \quad (5-25)$$

$$\forall t, \forall s_2 \in bu_{s, s_2}$$

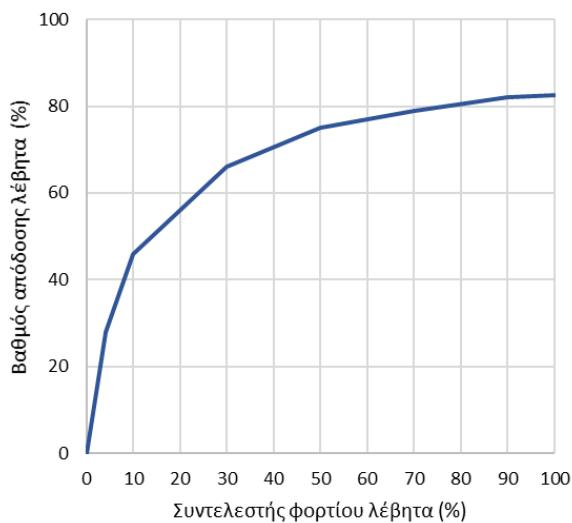
Η εξίσωση (5-26) αναπαριστά τη συμπαράγωγη ενεργειακών μορφών, όπως για παράδειγμα κατά τη λειτουργία ενός συστήματος μικρό-CHP ή λέβητα τριπλής ενεργείας που μπορεί να καλύψει ταυτόχρονα τις ανάγκες θέρμανσης και ΖΝΧ.

$$\Pi_{(h, k), (s, tt), o, t} = \beta_{(s, tt), (o, o')} \cdot \Pi_{(h, k), (s, tt), o', t} \quad \forall (h, k) \quad (5-26)$$

$$\forall (s, tt) | \beta > 0$$

Το μοντέλο χειρίζεται διακριτά μεγέθη για τον εξοπλισμό, λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη που διατίθενται στην αγορά (sz). Αυτό σημαίνει ότι για λέβητες κεντρικής θέρμανσης το μικρότερο δυνατό μέγεθος είναι της τάξης των 20 kW, ενώ για άλλες τεχνολογίες, όπως τα αυτόνομα συστήματα θέρμανσης με φυσικό αέριο και οι αντλίες θερμότητας, είναι διαθέσιμα στην αγορά και συστήματα μικρότερου μεγέθους, που μπορούν να φτάσουν μέχρι και έως 5 kW (για τις αεροθερμικές αντλίες θερμότητας). Όταν γίνεται επένδυση σε ένα σύστημα, το μοντέλο θεωρεί ότι η επένδυση γίνεται σε σύστημα συγκεκριμένου μεγέθους τέτοιου που να μπορεί να καλύψει τη ζήτηση ενέργειας στο κτήριο. Οι επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης μειώνουν τις θερμικές ανάγκες στα κτήρια και έτσι επιτρέπεται η επιλογή εξοπλισμού μικρότερου μεγέθους. Για τις τεχνολογίες όμως, που δε διατίθενται στην αγορά πληθώρα μεγεθών, όπως για παράδειγμα για τους λέβητες, η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος συνεπάγεται ένα μικρό συντελεστή φορτίου, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (5-27), λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια χρήσης της ενέργειας για κάθε χρήση, d_{ω} .

Εικόνα 20: Γραφική αναπαράσταση της συσχέτισης μεταξύ του συντελεστή φορτίου συμβατικού λέβητα αερίου για θέρμανση και του βαθμού απόδοσής του



Η εξίσωση (5-28) υπολογίζει την κατανάλωση καυσίμου για κάθε κατηγορία κτηρίου και εξοπλισμού. Για τον υπολογισμό αυτό, χρησιμοποιείται ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης του εξοπλισμού. Ειδικά για εξοπλισμούς που καταναλώνουν ενεργειακά προϊόντα διαφορετικά από τον ηλεκτρισμό, η ενεργειακή τους απόδοση (η) διαφέρει από την ονομαστική του απόδοση ($\bar{\eta}$) και εξαρτάται από το συντελεστή φορτίου. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιείται η «απόδοση ετήσιας εκμετάλλευσης καυσίμου» (annual fuel utilization efficiency - AFUE)¹³ και η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά, όπως στην Εικόνα 20, που δείχνει πως μεταβάλλεται ο βαθμός απόδοσης συμβατικού λέβητα αερίου βάσει του συντελεστή φορτίου. Συνεπώς, ένας υπερδιαστασιοποιημένος εξοπλισμός σε κτήριο που έχει επενδύσει σε ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης, και άρα έχει μειώσει τις θερμικές του ανάγκες, θα έχει πολύ χαμηλή ενεργειακή απόδοση και θα απαιτεί μεγάλη κατανάλωση καυσίμου.

$$UR_{(h,k),(s,tt),t} = \frac{\sum_o \Pi_{(h,k),(s,tt),o,t}}{\sum_{\omega \in mp_{(s,tt),\omega}} d_{(h,k),\omega,t}} / sz_{(s,tt)} \quad \forall (h,k) \quad \forall (s,tt) \in mp_{(h,k),s} \quad (5-27)$$

$$\forall t \geq tt$$

$$\sum_{f \in mp_{(s,tt),f}} \eta(UR_{(h,k),(s,tt),t}) \cdot F_{(h,k),(s,tt),f,t} = \sum_o \Pi_{(h,k),(s,tt),o,t} \quad \forall (h,k) \quad \forall (s,tt) \in mp_{(h,k),s} \quad (5-28)$$

$$\forall t \geq tt$$

Η εξίσωση (5-29), αναπαριστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής (Π), και κατανάλωσης (F) ενός ενεργειακού προϊόντος, της προμήθειάς του από την αγορά (M) και της πώλησης της πιθανής περίσσειας (Y) σε αυτήν. Το μοντέλο φράζει την ενέργεια που μπορεί η κάθε κατηγορία κτηρίου να πουλήσει στην αγορά, με ένα άνω όριο, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5-30), ώστε να αποφεύγεται το κτήριο να γίνεται καθαρός εξαγωγέας (net exporter), ο οποίος προγραμματίζει την παραγωγή του με στόχο τη μεγιστοποίηση των κερδών του. Εξασφαλίζεται μέσω αυτού του περιορισμού, ότι εάν τα κτήρια επιλέξουν εξοπλισμό αυτό-παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιούν ως οδηγό, τόσο κατά τη χρήση όσο και κατά την επένδυση σε αυτόν, την υποχρέωση κάλυψης των ενεργειακών τους αναγκών.

$$\sum_{tt \leq t} \sum_s \sum_{o \in mp_{o,f}} \Pi_{(h,k),(s,tt),o,t} + \sum_{tt \leq t} \sum_s F_{(h,k),(s,tt),f,t} \quad \forall (h,k) \quad (5-29)$$

$$= M_{(h,k),f,t} + \sum_{tt \leq t} \sum_{ss \in self(s)} Y_{(h,k),(s,tt),f,t} \quad \forall f, t$$

$$\sum_{tt \leq t} \sum_{ss \in self(s)} Y_{(h,k),(s,tt),f,t} \leq a_{(h,k),f,t} \cdot M_{(h,k),f,t} \quad \forall (h,k) \quad (5-30)$$

$$\forall f, t$$

¹³ Η μέθοδος για τον προσδιορισμό του AFUE για οικιακά συστήματα θέρμανσης προκύπτει από το πρότυπο 103 της ASHRAE

5.4.2. Διατύπωση επέκτασης δυναμικότητας του ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια

Το μοντέλο γνωρίζει την ηλικία του εξοπλισμού που λειτουργεί κάθε χρονική στιγμή για κάθε κατηγορία κτηρίου. Αυτό έχει σημασία, αφενός διότι οι τεχνολογίες έχουν έναν τεχνικό χρόνο ζωής (lt), που στο μοντέλο αναπαρίσταται μέσω μιας συνάρτησης επιβίωσης (sv) της μορφής Weibull (όπως και κατά τη μοντελοποίηση των επιλογών για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους). Αφετέρου, ο εξοπλισμός που έχει αγοραστεί μια χρονική στιγμή tt , «κληρονομεί» για κάθε επόμενη χρονική στιγμή ($t \geq tt$) τα τεχνικά χαρακτηριστικά της «γενιάς» του, τα οποία μάλιστα μπορεί να χειροτερεύουν με το χρόνο. Το τελευταίο έχει σημασία τόσο όσον αφορά τη λειτουργία του εξοπλισμού (και άρα τη δυνατότητά του να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου), όσο και για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους της κάθε επιλογής.

$$d_{(h,k),\omega,t} \cdot cf_{(s,tt)} \cdot sz_{(s,tt)} \cdot K_{(h,k),(s,tt),t} \geq \sum_{o \in mp_{o,\omega}} \Pi_{(h,k),(s,tt),o,t} \quad \begin{array}{l} \forall(h,k) \\ \forall(s,tt) \in mp_{(h,k),s} \end{array} \quad (5-31)$$

$$\forall \omega, \forall t \geq tt$$

$$K_{(h,k),(s,tt),t} = k0_{(h,k),(s,tt)} \cdot sv_{(h,k),(s,tt),t} + I_{(h,k),(s,tt)} \cdot sv_{(s,tt),t} - D_{(h,k),(s,tt),t} \quad \begin{array}{l} \forall(h,k) \\ \forall(s,tt) \in mp_{(h,k),s} \end{array} \quad (5-32)$$

$$\forall t \geq tt$$

Η εξίσωση (5-31) εξασφαλίζει ότι ο λειτουργών εξοπλισμός (K) θα είναι τόσος ώστε να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου. Για αυτό θα πρέπει σε κάθε χρονική στιγμή εντός του χρονικού ορίζοντα επίλυσης να γίνονται οι απαραίτητες επενδύσεις I , λαμβάνοντας υπόψη πόσες μονάδες από τον αρχικό εξοπλισμό, δηλαδή από τον εξοπλισμό στην αρχή της περιόδου επίλυσης ($k0$) έχουν επιβιώσει, και πόσες μονάδες εξοπλισμού αποσύρονται (D) (εξίσωση (5-32)).

5.4.3. Διατύπωση της οικονομικής βελτιστοποίησης για την παραγωγή ενέργειας από τον ενεργειακό εξοπλισμό στα κτήρια

Κάθε στρατηγική που αφορά στον ενεργειακό εξοπλισμό, περιλαμβάνει την επένδυση σε τεχνολογία s τη χρονική στιγμή tt , και προφανώς συνεπάγεται τη χρήση της τεχνολογίας αυτής, για κάθε χρονική στιγμή ($t \geq tt$), μέχρι να γίνει νέα επένδυση στην ίδια ($s^P = s$) ή σε άλλη τεχνολογία ($s^P \neq s$), στο τέλος του χρόνου ζωής της αρχικής τεχνολογίας (s^P) ή πρόωρα.

Όπως έγινε και στην κατάσρωση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την επιλογή των στρατηγικών για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, το μοντέλο υπολογίζει τα ισοδύναμα ετήσια κόστη της επενδυτικής δαπάνης της κάθε στρατηγικής.

Η εξίσωση (5-33) αναπαριστά το ισοδύναμο ετήσιο κόστος της επενδυτικής δαπάνης σε τεχνολογία s που αγοράζεται τη χρονική στιγμή tt για κάθε κατηγορία κτηρίου (h, k). Για τον υπολογισμό, χρησιμοποιείται και στην περίπτωση αυτή, συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, af , διαφορετικός για κάθε κατηγορία κτηρίου, υπολογισμένος βάσει του ιδιωτικού προεξοφλητικού επιτοκίου, ώστε να συμπεριλαμβάνονται ασφάλιστρα κινδύνου και παράγοντες αβεβαιότητας και ρίσκου σχετικά με τις επιλογές σε ενεργειακό εξοπλισμό. Η επενδυτική δαπάνη για τον εξοπλισμό, περιλαμβάνει εκτός από το κόστος αγοράς του

εξοπλισμού, ics , «κρυφά» κόστη που σχετίζονται με την εγκατάσταση του νέου εξοπλισμού, hc , και επιπλέον κόστη μετάβασης από τον προηγούμενο (s^p) στο νέο (s) εξοπλισμό, $tc_{(s^p,s)}$, εφόσον γίνεται αλλαγή στην τεχνολογία ($s^p \neq s$). Στα «κρυφά» κόστη περιλαμβάνεται για παράδειγμα η γεώτρηση στην περίπτωση εφαρμογής γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Στα κόστη μετάβασης περιλαμβάνονται, για παράδειγμα, τα κόστη για την αντικατάσταση των τερματικών μονάδων θέρμανσης, εάν γίνεται η αντικατάσταση λέβητα πετρελαίου ή αερίου με αντλία θερμότητας ή το κόστος κατασκευής καμινάδας, εάν γίνεται μετάβαση από μερική θέρμανση με ηλεκτρισμό σε θέρμανση με λέβητα βιομάζας.

$$ICS_{(h,k),(s,tt),t} = \left[\left(ics_{(s,tt)} + hc_{(h,k),(s,tt)} + \sum_{s^p | K_{s^p} \neq 0} tc_{(h,k),(s^p,s)} \right) \cdot I_{(h,k),(s,tt)} \cdot sz_{(s,tt)} \cdot ec(sz_{(s,tt)}) \cdot \left(1 + \sum_{s' \in sh(s')} aic_{(h,k),(s,s'),t} \right) \cdot lbd_{(s,tt),t} + \sum_{s_2 \in bu_{s,s_2}} ics_{(s_2,tt)} \cdot I_{(h,k),(s_2,tt)} \cdot sz_{(s_2,tt)} \cdot ec(sz_{(s_2,tt)}) \cdot lbd_{(s_2,tt)} \cdot se_{(s,tt),t} \cdot af_{(s,tt),t} \right] \cdot \forall(h,k) \cdot \forall(s,tt) \in mp_{(h,k),s} \quad (5-33) \quad \forall t$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το μοντέλο διαχειρίζεται διακριτά μεγέθη για τον εξοπλισμό ανάλογα με το τι διατίθεται στην αγορά, και η μοναδιαία επενδυτική δαπάνη για αυτόν μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθός του. Οι συμβατικές τεχνολογίες, όπως είναι οι λέβητες, αφενός διατίθενται σε μεγάλα μεγέθη, αφετέρου έχουν μεγάλες οικονομίες κλίμακος χάρη στην εδραίωση τους στην αγορά θέρμανσης για πάρα πολλά χρόνια. Αντίθετα, οι πολύ αποδοτικές αντλίες θερμότητας, οι οποίες είναι διαθέσιμες και σε πολύ μικρά μεγέθη, έχουν πολύ μικρότερες οικονομίες κλίμακος.

Μεταξύ των ενεργειακών εξοπλισμών για ενεργειακές χρήσεις, ο εξοπλισμός για θέρμανση έχει το μεγαλύτερο επενδυτικό κόστος και μάλιστα διάφορες τεχνολογίες, μπορούν είτε ως έχουν είτε με συγκεκριμένη διαμόρφωση να καλύπτουν και άλλες θερμικές ανάγκες. Τέτοιες περιπτώσεις είναι για παράδειγμα οι αεροθερμικές ή και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας που μπορούν να καλύπτουν τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και προετοιμασίας ΖΝΧ. Αντίστοιχα, τα αυτόνομα συστήματα θέρμανσης αερίου, μπορούν να καλύπτουν ταυτόχρονα τις ανάγκες θέρμανσης και προετοιμασίας ΖΝΧ. Το ίδιο ισχύει και με τους λέβητες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, που με μια επιπλέον διαμόρφωση (ώστε να μετατραπούν σε λέβητες τριπλής ενέργειας) και άρα επιπλέον κόστος, μπορούν να καλύπτουν και τις ανάγκες για προετοιμασία ΖΝΧ. Η εξίσωση (5-33) συμπεριλαμβάνει αυτό το επιπλέον κόστος, $aic_{s,sh(s')}$, το οποίο προστίθεται στην επενδυτική δαπάνη για την τεχνολογία θέρμανσης.

Η εξέλιξη της τεχνολογικής προόδου και η προσαρμογή και ανάπτυξη της κατασκευαστικής βιομηχανίας, συμπεριλαμβάνεται επίσης στο μοντέλο μέσω των παραμέτρων που αναπαριστούν τους παράγοντες learning, lbd . Οι παράγοντες αυτοί έχουν βασιστεί στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 4.3, και αναπαριστούν την επίπτωση της τεχνολογικής προόδου και των οικονομιών κλίμακος στο κόστος

των τεχνολογιών. Έτσι, οι παράγοντες αυτοί μπορεί να επιταχύνουν με την υπόθεση μιας έντονης τεχνολογικής μεταβολής. Θεωρώντας δηλαδή ότι και η κατασκευαστική βιομηχανία πρόκειται να προσαρμοστεί στις τεχνολογικές εξελίξεις και η μεγάλη διείσδυση των τεχνολογιών να αυξήσει τη ζήτηση για αυτές τις τεχνολογίες με αποτέλεσμα να μειωθεί το κόστος αγοράς τους.

Η εξίσωση (5-33) περιλαμβάνει και την επενδυτική δαπάνη για εφεδρικά συστήματα, s_2 , ανάλογα με την τεχνολογία, $s_2 \in bu_{s,s_2}$, και τις κλιματικές συνθήκες.

$$SA_{(h,k),(s,tt),t} = ics_{(s,tt)} / \left(\frac{t-tt}{lt_{(s,tt)}} \right) \cdot D_{(h,k),(s,tt),t} \cdot SZ_{(s,tt)} \cdot ec(SZ_{(s,tt)}) \cdot se_{(s,tt),t} \cdot af_{(h,k),(s,tt),t} \quad \forall (h,k) \\ \forall (s,tt) \in mp_{(h,k),s} \quad (5-34) \\ \forall t$$

Η απόσυρση του εξοπλισμού είναι δυναμική, συμπεριλαμβανομένης της πρόωρης απόσυρσης για οικονομικούς λόγους ή κατά την πραγματοποίηση ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης. Η εξίσωση (5-34) αναπαριστά την υπολειμματική αξία του κόστους μιας επένδυσης, η οποία έχει τιμή στην περίπτωση της πρόωρης απόσυρσης, όταν δηλαδή δεν έχει παρέλθει ο τεχνικός χρόνος ζωής της τεχνολογίας lt , και άρα ο όρος $\left(\frac{t-tt}{lt} \right)$ είναι θετικός.

$$OPC_{(h,k),(s,tt),t} = \sum_{f \in mp_{(s,tt),f}} \left(pf_{f,t} + sc_{(s,tt),t} + \sum_l cv_{l,t} - rv_{s,t} \right) \cdot \left(F_{(h,k),(s,tt),f,t} + \sum_{s_2 \in bu_{s,s_2}} F_{(h,k),(s_2,tt),f,t} \right) \cdot \left(1 + \sum_{f' \in mp_{(s',tt),f'} | s' \neq sh} afc_{(h,k),(f,f'),t} \right) + vc_{(s,tt)} \quad \forall (h,k) \\ \cdot \sum_{o \in mp_{(s,tt),o}} \Pi_{(h,k),(s,tt),o,t} \quad \forall (s,tt) \in mp_{(h,k),s} \quad (5-35) \\ \forall t \\ + \left(K_{(h,k),(s,tt),t} \cdot omc_{(s,tt)} + \sum_{s_2 \in bu_{s,s_2}} K_{(h,k),(s_2,tt),t} \cdot omc_{(s_2,tt)} \right) \cdot (1 + gomc_{(s,tt)})^{t-tt}$$

Η εξίσωση (5-35) αναπαριστά το ετήσιο λειτουργικό κόστος του ενεργειακού εξοπλισμού. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος (OPC) περιλαμβάνει το κόστος για την αγορά των ενεργειακών προϊόντων (καυσίμων) που καταναλώνει ο εξοπλισμός, το οποίο προσαυξάνεται από παράγοντες που αντιπροσωπεύουν αντιληπτά κόστη και αναπαριστούν αβεβαιότητα ή έλλειψη πληροφοριών σχετικά με τη λειτουργία του εξοπλισμού. Το κόστος καυσίμου τροποποιείται περαιτέρω, από τις μεταβλητές cv και rv , που είναι η

δυναμικές μεταβλητές των περιορισμών για τις εκπομπές και τη χρήση ΑΠΕ, και αναπαριστούν το οριακό κόστος επίτευξης του στόχου μείωσης των εκπομπών CO₂ και το οριακό όφελος επίτευξης του στόχου σχετικά με το μερίδιο των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση, αντίστοιχα. Το πως ορίζονται και ενσωματώνονται στη μοντελοποίηση οι μεταβλητές cv και rv αναλύεται σε επόμενη ενότητα (Ενότητα 5.5) με λεπτομέρεια.

Νωρίτερα αναφέρθηκε ότι το μοντέλο συμπεριλαμβάνει τις περιπτώσεις όπου ο ίδιος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για θέρμανση μπορεί είτε αυτούσιος είτε με κάποια διαμόρφωση να χρησιμοποιηθεί και για την κάλυψη άλλων αναγκών. Πέραν τούτου, και ακριβώς επειδή η ζήτηση ενέργειας για θέρμανση αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι της ζήτησης ενέργειας στα κτήρια, το καύσιμο που χρησιμοποιείται για θέρμανση μπορεί να οδηγεί και την επιλογή του καυσίμου που χρησιμοποιείται και για άλλες χρήσεις, ακόμα και εάν δεν χρησιμοποιείται ο ίδιος εξοπλισμός. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή, για παράδειγμα, μιας τεχνολογίας για θέρμανση που καταναλώνει φυσικό αέριο, μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή εξοπλισμού για προετοιμασία ΖΝΧ ή μαγείρεμα, που επίσης καταναλώνουν φυσικό αέριο. Το παραπάνω, συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση (5-35) (afc). Η εξίσωση περιλαμβάνει και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας (omc) του εξοπλισμού (τόσο του πρωτεύοντος όσο και του εφεδρικού, εφόσον υπάρχει), το οποίο αυξάνει με την ηλικία ($gomc$), αναπαριστώντας τη σταδιακή χειροτέρευση του εξοπλισμού με το χρόνο. Τέλος, στην εξίσωση (5-35) συμπεριλαμβάνονται και άλλα μεταβλητά κόστη (vc), όπως για παράδειγμα το κόστος ενοικίασης χώρου για αποθήκευση της βιομάζας ή του πετρελαίου, στην περίπτωση αυτών των επιλογών.

Η διάθεση της περίσσειας ενεργειακών προϊόντων στην αγορά, επιφέρει έσοδο στο κτήριο, όπως υπολογίζεται στην εξίσωση (5-36). Στη μοντελοποίηση έχει γίνει η υπόθεση ότι ο καταναλωτής πουλάει την τυχόν περίσσεια σε προκαθορισμένη τιμή χωρίς αβεβαιότητα. Αυτό, σε συνδυασμό με τον περιορισμό (5-30) για τη μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα της ενέργειας που ο καταναλωτής μπορεί να πουλάει στο δίκτυο, εξασφαλίζει ότι τα κτήρια δε γίνονται ποτέ «παίκτες» στην αγορά, απλά έχουν την ασφάλεια διάθεσης της περίσσειας.

$$RV_{(h,k),(s,tt),t} = \sum_{f \in mp(s,tt),f} b f_{f,t} \cdot Y_{(h,k),(s,tt),f,t} \quad \forall (h,k) \quad \forall (s,tt) \in self(s) \quad \forall t \quad (5-36)$$

Για να υπολογιστεί το καθαρό οικονομικό όφελος των στρατηγικών για ενεργειακό εξοπλισμό ανά κατηγορία κτηρίου, υπολογίζεται η Παρούσα Αξία του κόστους της κάθε στρατηγικής (εξίσωση (5-37)). Στον υπολογισμό, λαμβάνεται υπόψη το ισοδύναμο ετήσιο κόστος της επενδυτικής δαπάνης, το ετήσιο λειτουργικό κόστος κάθε στρατηγικής, η εναπομένουσα αξία του κόστους του εξοπλισμού όταν αποσύρεται και τυχόν έσοδα από πώληση περίσσειας ενέργειας στην αγορά. Για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας των ετήσιων χρηματοροών της κάθε στρατηγικής στην εξίσωση (5-37), χρησιμοποιείται, όπως έγινε και στη μοντελοποίηση των αποφάσεων για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, επιτόκιο (δt), το οποίο αναπαριστά την προτίμηση ως προς το χρόνο (preference over-time rate) της κάθε κατηγορίας κτηρίου.

$$pv(s_{(h,k),(s,tt)}) = \sum_t (ICS_{(h,k),(s,tt),t} + SA_{(h,k),(s,tt),t} + OPC_{(h,k),(s,tt),t} - RV_{(h,k),(s,tt),t}) \cdot (1 + \delta t_{h,t})^{-t} \quad \begin{array}{l} \forall (h, k) \\ \forall (s, tt) \\ \in mp_{(h,k),s} \end{array} \quad (5-37)$$

Το κριτήριο της παρούσας αξίας του κόστους, χρησιμοποιείται τελικά για την αξιολόγηση των στρατηγικών, οι οποίες ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά (από αυτήν με τη μικρότερη παρούσα αξία του κόστους σε αυτή με τη μεγαλύτερη) (εξίσωση (5-38)).

$$s_{(h,k),(s,tt)} = \underset{s_{(h,k),(s,tt)} \in \Phi_{h,k}}{\operatorname{argmin}} pv(s_{(h,k),(s,tt)}) \quad \begin{array}{l} \forall (h, k) \\ \forall (s, tt) \\ \in mp_{(h,k),s} \end{array} \quad (5-38)$$

$$:= \{s_{(h,k),(s,tt)} \mid s_{(h,k),(s,tt)} \in \Phi_{h,k} \cap \forall s'_{(h,k),(s,tt)} \in \Phi_{h,k}: pv(s_{(h,k),(s,tt)}) \leq pv(s'_{(h,k),(s,tt)})\}$$

Αφού οι στρατηγικές έχουν αξιολογηθεί και ταξινομηθεί με το κριτήριο της παρούσας αξίας του κόστους τους, τελικά, διατηρείται ένα πλήθος n , για κάθε κατηγορία κτηρίου (h, k) , που έχουν την καλύτερη επίδοση και αυτές συνθέτουν τη σύνθετη στρατηγική για κάθε κατηγορία. Έτσι, η κάθε κατηγορία κτηρίων (h, k) χαρακτηρίζεται και από τις n επικρατέστερες στρατηγικές που αντιστοιχούν στον ενεργειακό εξοπλισμό (h, k, n) .

Εφαρμόζοντας τη θεωρία των διακριτών επιλογών και χρησιμοποιώντας ως συνάρτηση αντιπροσωπευτικής χρησιμότητας μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών (των στρατηγικών) για ενεργειακό εξοπλισμό, την παρούσα αξία του κόστους αυτών, υπολογίζονται για κάθε κατηγορία κτηρίων οι συχνότητες εμφάνισης των n στρατηγικών, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5-39). Οι παράγοντες μ και θ αντιπροσωπεύουν και σε αυτήν την περίπτωση, παράγοντες τεχνολογικής ωριμότητας και υποκειμενικούς παράγοντες όσον αφορά την υιοθέτηση πολύ αποδοτικών τεχνολογιών, αντίστοιχα.

$$\phi_{(h,k,n),(s,tt)} = \theta_{(h,k),tt} \cdot \frac{\mu_{(h,k,n),(s,tt)} \cdot \exp(pv(s_{(h,k,n),(s,tt)}))}{\sum_{n',(s',tt')} \mu_{(h,k,n'),(s',tt')} \cdot \exp(pv(s_{(h,k,n'),(s',tt')}))} \quad \begin{array}{l} \forall (h, k) \\ \in (h, k, n) \\ \cap mp_{n,(s,tt)} \end{array} \quad (5-39)$$

$$+ (1 - \theta_{(h,k),tt}) \cdot \frac{\exp(pv(s_{(h,k,n),(s,tt)}))}{\sum_{(s',tt')} \exp(pv(s_{(h,k,n'),(s',tt')}))}$$

Βάσει των συχνοτήτων υπολογίζεται το πλήθος κάθε κατηγορίας κτηρίων, (h, k) , που έχουν επιλέξει την κάθε στρατηγική, n , ως επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού (εξίσωση (5-40)).

$$S_{(h,k,n),tt} = \sum_{s \in map_{n,(s,tt)}} \phi_{(h,k,n),(s,tt)} \cdot S_{(h,k),tt} \quad \begin{array}{l} \forall (h, k, n) \\ \forall tt \end{array} \quad (5-40)$$

Η εξίσωση (5-41), αναπαριστά περιορισμούς δυναμικότητας σχετικά με τις συνολικές ποσότητες ενεργειακών προϊόντων που μπορεί να προμηθεύσει η αγορά στο σύνολο των κτηρίων. Σε αυτή την περίπτωση ανήκουν περιορισμοί σε σχέση με την ύπαρξη ή τη δυναμικότητα υποδομής για το διανεμόμενο

αέριο ή τη διανεμόμενη θερμότητα. Ακόμα, περιορισμοί δυναμικότητας μπορεί να σχετίζονται και με το δυναμικό χρήσης βιομάζας: οι ποσότητες της βιομάζας είναι περιορισμένες και εκτός του ότι η βιομάζα χρησιμοποιείται από διάφορους τομείς του ενεργειακού συστήματος ως άμεσο ενεργειακό προϊόν, η χρήση της είναι απαραίτητη και σαν πρώτη ύλη (feedstock) για την παραγωγή βιοκαυσίμων, γεγονός που περιορίζει το δυναμικό χρήσης της σαν άμεσο ενεργειακό προϊόν.

$$\overline{MT}_{f,t} \geq MT_{f,t} = \sum_{(h,k,n)} S_{(h,k,n),t} \cdot M_{(h,k),f,t} \quad \forall f,t \quad (5-41)$$

Στο τέλος υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος ανά μονάδα ωφέλιμης ζήτησης ενέργειας, $OC_{h,t}$ βάσει της εξίσωσης (5-42), το οποίο χρησιμοποιείται στην εξίσωση (5-12) .

$$OC_{h,t} = \frac{\sum_{k,(\rho,tt)} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} \cdot \sum_{n,(s,tt) \in mp_{(s,tt),\omega} | \omega: \{sh,ac\}} \phi_{(h,k,n),(s,tt)} \cdot OPC_t(s_{(h,k,n),(s,tt)})}{U_{h,t}^d} \quad \begin{matrix} \forall h \\ \forall t \end{matrix} \quad (5-42)$$

Πίνακας 17: Ονοματολογία παραμέτρων που υπολογίζονται μετά την επίλυση του μοντέλου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής

| Ονοματολογία και σύμβολα | |
|---------------------------------|---|
| Παράμετροι | |
| $FTB_{h,t}$ | Τελική κατανάλωση ενέργειας για κάθε κατηγορία κτηρίου |
| $EMTB_{h,t}$ | Εκπομπές ρύπων για κάθε κατηγορία κτηρίων |
| $TCB_{h,t}$ | Συνολικό ετήσιο ενεργειακό κόστος (κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος, συμπεριλαμβανομένου του κόστους για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους) για κάθε κατηγορία κτηρίου |
| $SAVT_{tt}$ | Μέση ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους ετησίως |
| EQ_RATE_{tt} | Μέσος ετήσιος ρυθμός αντικατάστασης ενεργειακού εξοπλισμού για κάθε χρήση ενέργειας |
| $FT_{f,t}$ | Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο ή ενεργειακό προϊόν |
| $FT_{s,t}$ | Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τεχνολογία |
| $YT_{f,t}$ | Συνολική ποσότητα ενέργειας ανά καύσιμο ή ενεργειακό προϊόν που πωλείται στο δίκτυο |
| $KT_{s,t}$ | Απόθεμα τεχνολογίας που χρησιμοποιείται κάθε χρονική στιγμή |
| $EFFT_{s,t}$ | Μέσος ετήσιος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης κάθε τεχνολογίας |
| $AMBHP_{tt}$ | Θερμότητα περιβάλλοντος (ambient heat) από αντλίες θερμότητας |

Αντίστοιχα, μπορεί για κάθε κατηγορία κτηρίου να υπολογίζονται διάφορα μεγέθη. Έτσι, για παράδειγμα, η εξίσωση (5-43) υπολογίζει την τελική κατανάλωση ενέργειας για κάθε κατηγορία κτηρίου, η εξίσωση (5-44) υπολογίζει τις εκπομπές ρύπων συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών CO₂ για κάθε κατηγορία κτηρίου και η εξίσωση (5-45) υπολογίζει το συνολικό ετήσιο ενεργειακό κόστος (σταθερό και λειτουργικό κόστος, συμπεριλαμβανομένου του κόστους για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους) για κάθε κατηγορία κτηρίου.

$$FTB_{h,t} = \sum_{k,(\rho,tt)} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} \cdot \sum_{n,(s,tt)} \phi_{(h,k,n),(s,tt)} \cdot \sum_{f \in mp_{(s,tt),f}} F_t(S_{(h,k,n),(s,tt)}) \quad \forall h \quad (5-43)$$

$$\forall t$$

$$EMTB_{h,l,t} = \sum_{k,(\rho,tt)} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} \quad \forall h, \forall l \quad (5-44)$$

$$\cdot \sum_{n,(s,tt)} \phi_{(h,k,n),(s,tt)} \cdot \sum_{f \in mp_{(s,tt),f}} emf_{l,f} \cdot F_t(S_{(h,k,n),(s,tt)}) \quad \forall t$$

$$TCB_{h,t} = + \sum_{k,(\rho,tt)} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} \cdot \left(ICR_t(r_{(h,k),(\rho,tt)}) \quad \forall h \quad (5-45)$$

$$+ \sum_{n,(s,tt)} \phi_{(h,k,n),(s,tt)} \quad \forall t$$

$$\cdot (OPC_t(S_{(h,k,n),(s,tt)}) + ICS_t(S_{(h,k,n),(s,tt)})) \right)$$

Πέραν των υπολογισμών που γίνονται για κάθε κατηγορία κτηρίου, το μοντέλο υπολογίζει και συνολικά μεγέθη και δείκτες, δηλαδή σε επίπεδο χώρας και για το σύνολο της Ευρώπης. Οι δείκτες αυτοί είναι ενεργειακοί και κλιματικοί, και είναι οι δείκτες που εξετάζονται στο πλαίσιο της ενεργειακής πολιτικής. Έτσι, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει μελέτες επιπτώσεων που σχετίζονται με την επίτευξη ή όχι ενεργειακών και κλιματικών στόχων.

Στους δείκτες αυτούς περιλαμβάνονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- Ο μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (5-18), συνολικά αλλά και ανά κατηγορία ενεργειακής αναβάθμισης (μικρής έντασης, μεσαίας έντασης, μεγάλης έντασης)
- Η μέση ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους (με την έννοια της εξοικονόμησης ωφέλιμης ενέργειας για θέρμανση χάρη στην επέμβαση ενεργειακής αναβάθμισης), βάσει της εξίσωσης (5-46).

$$SAVT_{tt} = \frac{\sum_{(h,k),\rho \in mp_{k,(\rho,tt)} | \rho \neq \rho_0} S_{(h,k),tt} \cdot sav_{h,(\rho,tt)}}{\sum_{(h,k),\rho \in map_{k,(\rho,tt)}} S_{(h,k),tt} \cdot sav_{h,(\rho,tt)}} \quad \forall tt \quad (5-46)$$

- Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αντικατάστασης ενεργειακού εξοπλισμού για κάθε χρήση ενέργειας, βάσει της εξίσωσης (5-47)

$$EQ_RATE_{\omega,tt} = \frac{\sum_{(h,k,n) \in mp_{n,(s,tt)} \cap mp_{(s,tt),\omega} | s \neq s_p} S_{(h,k,n),tt}}{\sum_{(h,k,n) \in mp_{k,(s,tt)} \cap mp_{(s,tt),\omega}} S_{(h,k,n),tt}} \quad \forall \omega, tt \quad (5-47)$$

- Ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανακαίνισης των κτηρίων, ο οποίος είναι το άθροισμα του μέσου ετήσιου ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και του μέσου ετήσιου ρυθμού αντικατάστασης του εξοπλισμού για θέρμανση, χωρίς να γίνεται διπλομέτρηση εφόσον ένα κτήριο πραγματοποιεί και τις

δύο ενέργειες, δηλαδή και ενεργειακή αναβάθμιση στο κέλυφος και αντικατάσταση του εξοπλισμού για θέρμανση)

- Η τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο ή ενεργειακό προϊόν βάσει της εξίσωσης (5-48) (αντίστοιχα και ανά τεχνολογία).

Ειδικά για τον ηλεκτρισμό και τον διανεμόμενο ατμό, το μοντέλο χρησιμοποιώντας καμπύλες ωριαίας ζήτησης, κατατέμνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε ωριαία κατανάλωση ενέργειας, για τυπικές μέρες/ώρες.

$$FT_{f,t} = \sum_{(h,k,n)} S_{(h,k,n),t} \cdot \sum_{(s,tt) \in emp_{n,(s,tt)} \cap tt \leq t} F_{f,t}(S_{(h,k,n),(s,tt)}) \quad \forall f, t \quad (5-48)$$

- Η συνολική ποσότητα ενέργειας ανά καύσιμο ή ενεργειακό προϊόν που πωλείται στο δίκτυο βάσει της εξίσωσης (5-49).

$$YT_{f,t} = \sum_{(h,k,n)} S_{(h,k,n),t} \cdot \sum_{(s,tt) \in emp_{n,(s,tt)} \cap tt \leq t} Y_{f,t}(S_{(h,k,n),(s,tt)}) \quad \forall f, t \quad (5-49)$$

- Το απόθεμα του εξοπλισμού, ανά κατηγορία τεχνολογίας που χρησιμοποιείται κάθε χρονική στιγμή βάσει της εξίσωσης (5-50). Κατά αντιστοιχία, μπορούν να υπολογιστούν οι νέες επενδύσεις ή το πλήθος του εξοπλισμού που αποσύρεται κάθε χρονική στιγμή.

$$KT_{s,t} = \sum_{(h,k)} \sum_{(n,tt) \in emp_{n,(s,tt)} \cap tt \leq t} S_{(h,k,n),t} \cdot K_t(S_{(h,k,n),(s,tt)}) \quad \forall f, t \quad (5-50)$$

- Η μέση ενεργειακή απόδοση κάθε τεχνολογίας βάσει της εξίσωσης (5-51)

$$EFFT_{s,t} = \sum_{k,(\rho,tt)} \phi_{(h,k),(\rho,tt)} \cdot \sum_{(n,tt) \in emp_{n,(s,tt)} \cap tt \leq t} \phi_{(h,k,n),(s,tt)} \cdot \frac{\eta((S_{(h,k,n),(s,tt)})) \cdot K_t((S_{(h,k,n),(s,tt)}))}{K_t((S_{(h,k,n),(s,tt)}))} \quad \forall s, t \quad (5-51)$$

- Δεδομένου ότι στη μοντελοποίηση συμπεριλαμβάνονται ως ξεχωριστή επιλογή οι αντλίες θερμότητας το μοντέλο υπολογίζει τη θερμότητα περιβάλλοντος (ambient heat), η οποία συνεισφέρει στον υπολογισμό του δείκτη για το μερίδιο των ΑΠΕ στην κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη (Renewable Heating and Cooling indicator – RES H&C), βάσει της εξίσωσης (5-52) Στην εξίσωση χρησιμοποιείται ο μέσος εποχικός βαθμός απόδοσης των αντλιών θερμότητας (SPF) (εκείνων που τηρούν το κατώτατο όριο που θέτει η νομοθεσία προκειμένου οι αντλίες θερμότητας να μπορούν να συνυπολογιστούν στο δείκτη ΑΠΕ για θέρμανση και ψύξη)

$$AMBHP_t = \sum_{s=A\theta} FT_{s,t} \cdot (SPF_{s,t} - 1), \quad \forall t \quad (5-52)$$

όπου $SPF_{s,t} \equiv EFFT_{s,t}$ για $s = A\theta$

- Συνολικές εκπομπές CO₂ ανά καύσιμο και στο σύνολο του κτηριακού τομέα.

Το γεγονός ότι το μοντέλο υπολογίζει τους δείκτες που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, εξυπηρετεί στην αξιολόγηση πολιτικών που έχουν συγκεκριμένους στόχους ως προς αυτό.

Ομοίως, το γεγονός ότι το μοντέλο υπολογίζει την τελική κατανάλωση ενέργειας ανά ενεργειακό προϊόν αλλά και συνολικά, επιτρέπει την αξιολόγηση πολιτικών που έχουν συγκεκριμένους στόχους για την εξοικονόμηση τελικής κατανάλωσης ενέργειας. Το μοντέλο υπολογίζει την τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με τις συμβάσεις που αφορούν τα ενεργειακά ισοζύγια της Eurostat, και συνεπώς μπορεί να υπολογίζει το δείκτη της τελικής κατανάλωσης Europe 2020-2030, που είναι ο δείκτης που ορίζει το στόχο εξοικονόμησης στην τελική κατανάλωση ενέργειας στη νομοθεσία.

Αντίστοιχα, διαχωρίζοντας το μοντέλο τις ΑΠΕ, και έχοντας συμπεριλάβει τις αντλίες θερμότητας, μπορεί απολύτως να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς της Eurostat σχετικά με τους δείκτες για τις ΑΠΕ, ειδικά για το δείκτη για τις ΑΠΕ στη θέρμανση και ψύξη. Αυτό, επιτρέπει στο μοντέλο την αξιολόγηση πολιτικών που θέτουν συγκεκριμένους στόχους για τις ΑΠΕ.

Έπειτα, ο αναλυτικός υπολογισμός του κόστους, δηλαδή και του σταθερού και του λειτουργικού κόστους, επιτρέπει αναλύσεις που αφορούν στην αξιολόγηση των πολιτικών ως προς τις κοινωνικές επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων των πολιτικών στην ενεργειακή φτώχεια.

Τέλος, το γεγονός ότι το μοντέλο υπολογίζει τις εκπομπές CO₂ αναλυτικά επιτρέπει την αξιολόγηση πολιτικών που θέτουν συγκεκριμένους κλιματικούς στόχους, δηλαδή στόχους μείωσης των εκπομπών όπως είναι οι κλιματικοί στόχοι για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στη ΕΕ.

5.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

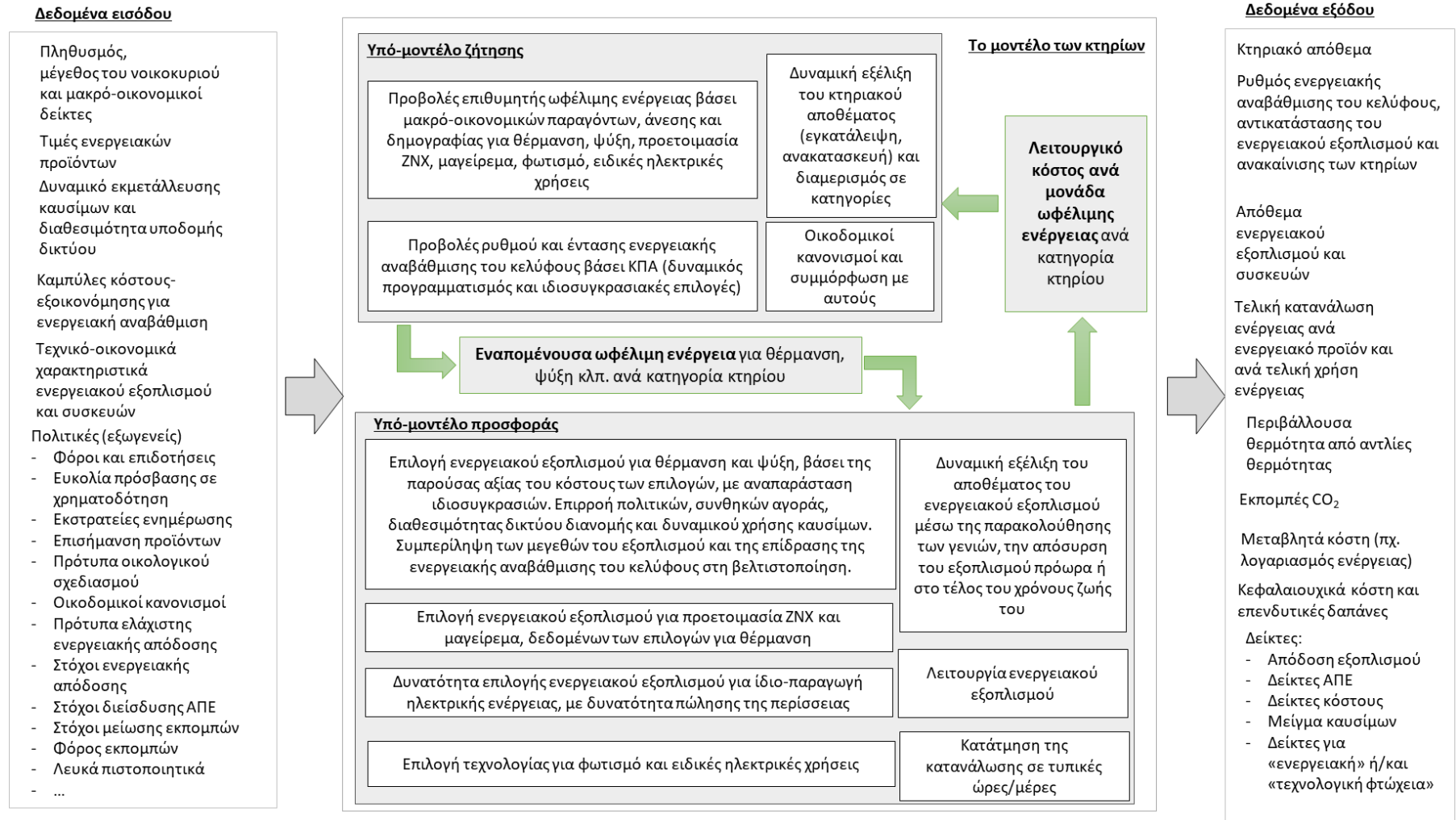
5.5.1. Περιγραφή ολόκληρου του μοντέλου

Όσα περιεγράφηκαν παραπάνω παρουσιάζουν τα διάφορα στάδια της μοντελοποίησης που περιλαμβάνονται στο προτεινόμενο μοντέλο, από τα οποία προκύπτουν τελικά οι προβολές για την κατανάλωση ενέργειας και την ενεργειακή αποδοτικότητα στον κτηριακό τομέα. Το μοντέλο στην πράξη επιλύει το πρόβλημα της ισορροπίας μεταξύ της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες (ωφέλιμες ενεργειακές χρήσεις) και της προσφοράς (επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού) που ικανοποιεί αυτή τη ζήτηση. Η εύρεση της ισορροπίας μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες καθορίζεται με βάση τις τιμές που επηρεάζουν την προσφορά και τη ζήτηση. Οι τιμές έχουν την έννοια του λειτουργικού κόστους ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας για κάθε κατηγορία κτηρίου, δηλαδή σε €/toe ωφέλιμης ενέργειας.

Το μοντέλο τελικά αποτελείται από δύο υπό-μοντέλα: το υπό-μοντέλο της ζήτησης και της προσφοράς. Το υπό-μοντέλο της ζήτησης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας ανά τελική χρήση και κατηγορία κτηρίου που εξαρτάται από τους δημογραφικούς και μακρο-οικονομικούς παράγοντες. Επιπλέον περιλαμβάνει την προσομοίωση της συμπεριφοράς σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους. Η έξοδος του υπό- μοντέλου της ζήτησης είναι η εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια, δηλαδή το τμήμα της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας που δεν καλύφθηκε από το κέλυφος, για τις χρήσεις για τις

οποίες η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους επιδρά στην επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια. Για τις υπόλοιπες χρήσεις, η έξοδος του υπό- μοντέλου της ζήτησης είναι η επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια. Το υπό- μοντέλο της προσφοράς περιλαμβάνει την προσομοίωση της συμπεριφοράς σχετικά με την επιλογή (τις επενδύσεις) και τη λειτουργία του ενεργειακού εξοπλισμού, υπό το βασικό περιορισμό ότι η προσφορά (με την έννοια της παραγωγής από τον ενεργειακό εξοπλισμό), καλύπτει την εναπομένουσα (ή την επιθυμητή, ανάλογα με τη χρήση) ωφέλιμη ενέργεια για κάθε χρήση και κατηγορία κτηρίου. Η έξοδος του υπό-μοντέλου της προσφοράς είναι το κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες για κάθε κατηγορία κτηρίου, το οποίο τροφοδοτείται εκ νέου στο υπό-μοντέλο της ζήτησης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να υπάρχει σύγκλιση για κάθε κατηγορία κτηρίου. Η Εικόνα 21 παρουσιάζει τη σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου μοντέλου.

Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση του συνολικού μοντέλου για την ενέργεια στα κτήρια



Κάθε υπό-μοντέλο αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα προβλήματα που έχουν διατυπωθεί βάσει των μαθηματικών σχέσεων που δόθηκαν προηγουμένως είναι προβλήματα μη-γραμμικού προγραμματισμού και κάθε πρόβλημα μετασχηματίζεται σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων. Μαθηματικά, δηλαδή, το μοντέλο επιλύει μη γραμμικά προβλήματα μεικτής συμπληρωματικότητας (mixed complementarity problem - MCP), που περιλαμβάνουν ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς.

Η χρήση της συμπληρωματικότητας κατά τη μοντελοποίηση γενικεύει το κάθε επιμέρους μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σε ένα σύστημα ισοτικών και ανισοτικών σχέσεων μέσω των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker (KKT conditions).

Ο μετασχηματισμός ενός προβλήματος βελτιστοποίησης σε ένα πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας έγκειται στην ακόλουθη λογική (Gabriel et al., 2012). Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει τη γενική μορφή:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize}_x f(x) \\ & \text{s. t.} \\ & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \end{aligned}$$

όπου το $x \in \mathbb{R}^n$ είναι η προς βελτιστοποίηση μεταβλητή, η συνάρτηση $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται, οι συναρτήσεις $h(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m_E}$ αναπαριστούν τους ισοτικούς περιορισμούς και οι συναρτήσεις $g(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m_I}$ αναπαριστούν τους ανισοτικούς περιορισμούς. Για να προκύψουν οι συνθήκες KKT του παραπάνω προβλήματος, προσδιορίζεται η συνάρτηση Lagrange αυτού ως εξής:

$$\mathcal{L} = f(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T g(x)$$

όπου οι $f(x)$, $h(x)$ και $g(x)$ είναι συνεχώς διαφορίσιμες για όλες τις εφικτές τιμές του x , δηλαδή στην περιοχή $(x \in \{x | h(x) = 0, g(x) \leq 0\})$. Οι μεταβλητές $\lambda \in \mathbb{R}^{m_E}$ και $\mu \in \mathbb{R}^{m_I}$ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange των ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών αντίστοιχα. Οι συνθήκες KKT έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0 & \rightarrow \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \lambda^T \frac{\partial h(x)}{\partial x} + \mu^T \frac{\partial g(x)}{\partial x} = 0 \\ & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & \mu^T g(x) = 0 \\ & \mu \geq 0 \end{aligned}$$

Η ερμηνεία των παραπάνω περιορισμών από τον πρώτο στον τελευταίο έχει ως εξής: η παράγωγος της συνάρτησης Lagrange στη βέλτιστη λύση x θα είναι ίση με 0, ισχύουν οι ισοτικοί περιορισμοί και οι ανισοτικοί περιορισμοί του αρχικού προβλήματος, το εσωτερικό γινόμενο του πολλαπλασιαστή Lagrange του ανισοτικού περιορισμού με τον ανισοτικό περιορισμό είναι μηδέν και τέλος ο πολλαπλασιαστής Lagrange του ανισοτικού περιορισμού είναι μη αρνητικός. Οι τρεις τελευταίοι περιορισμοί είναι γνωστοί ως συνθήκες συμπληρωματικότητας και μπορούν να γραφούν ισοδύναμα ως εξής:

$$0 \leq \mu \perp g(x) \leq 0$$

Το σύμβολο \perp υποδηλώνει ότι η μία από τις δύο ανισότητες ικανοποιείται ως ισότητα. Αναλυτικά το παραπάνω μπορεί να γραφεί:

$$g(x) > 0, \mu = 0 \perp g(x) = 0, \mu > 0$$

Με άλλα λόγια μπορεί να ισχύουν αποκλειστικά οι εξής δύο περιπτώσεις: εάν ο περιορισμός είναι αυστηρά ανισοτικός, τότε ο πολλαπλασιαστής Lagrange του περιορισμού είναι μηδέν, και εάν ο περιορισμός ικανοποιείται σαν ισότητα τότε ο πολλαπλασιαστής Lagrange του περιορισμού είναι διάφορος του μηδενός.

Το πρόβλημα της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες για κάθε χρήση προσδιορίζεται από τις εξισώσεις (5-1) έως (5-3) για κάθε κατηγορία κτηρίου. Ειδικά για τη θέρμανση και την ψύξη που μέρος της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας καλύπτεται από το κέλυφος και το υπόλοιπο από τον ενεργειακό εξοπλισμό, το πρόβλημα της ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες για κάθε κατηγορία κτηρίου προσδιορίζεται επιπλέον από τις εξισώσεις (5-7) έως (5-19). Για τις χρήσεις αυτές, το πρόβλημα της ζήτησης έγκειται στον προσδιορισμό των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης που συνεισφέρουν κατά ένα μέρος στην ικανοποίηση της επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας, μέσω της ενεργειακής εξοικονόμησης. Για το σκοπό αυτό, η κάθε κατηγορία κτηρίου επιλέγει τις στρατηγικές με το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος, όπως αυτό υπολογίζεται βάσει της ΚΠΑ της κάθε στρατηγικής. Λύνει δηλαδή η κάθε κατηγορία κτηρίου ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης του καθαρού οικονομικού οφέλους που προκύπτει από την επιλογή των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης, υπό δύο περιορισμούς: ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση που θα επιτευχθεί μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης δεν θα ξεπερνά το δυναμικό εξοικονόμησης της κάθε κατηγορίας (εξίσωση (5-54)) και ότι ο όγκος των ενεργειακών αναβαθμίσεων που θα πραγματοποιηθούν από όλες τις κατηγορίες κτηρίων, όπως αυτός αναπαρίσταται μέσω του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης (εξισώσεις (5-17) και (5-18)), δεν θα υπερβαίνει το δυναμικό της αγοράς (εξίσωση (5-55)). Συνεπώς, το πρόβλημα της ζήτησης για θέρμανση και ψύξη ορίζεται ως εξής:

$$\max_{r_{h,(\rho,tt)}} NPV = npv(r_{h,(\rho,tt)}) \quad \forall h \quad (5-53)$$

$$\sum_{(\rho,tt)} (r_{h,(\rho,tt)} \cdot sv_{h,(\rho,tt),t}) \cdot sav_{h,(\rho,tt)} = SAV_h \leq \overline{sav}_h \quad \forall h \quad (5-54)$$

$$RATER_{tt} \leq G(\overline{r}_{tt}) \quad \forall tt \quad (5-55)$$

Για την επίλυση του προβλήματος, ορίζεται η ακόλουθη συνάρτηση Lagrange, \mathcal{D} , όπου η μεταβλητή λ_d είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τον περιορισμό του δυναμικού εξοικονόμησης της κάθε κατηγορίας κτηρίου και η μεταβλητή m είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τον περιορισμό της δυναμικότητας της κατασκευαστικής βιομηχανίας (δηλαδή της αγοράς):

$$\mathcal{D} = npv(r_{h,(\rho,tt)}) + \lambda_d (\overline{sav}_h - SAV_h) + m_{tt} (G(\overline{r}_{tt}) - RATER_{tt}) \quad \forall h \quad (5-56)$$

Οι συνθήκες KKT έχουν ως εξής:

$$\frac{\partial \mathcal{D}}{\partial r_{(\rho,tt)}} \leq 0 \quad \perp \quad r_{h,(\rho,tt)} \geq 0 \quad \forall h \quad (5-57)$$

$$\frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \lambda d_h} \geq 0 \quad \perp \quad \lambda d_h \geq 0 \quad \forall h \quad (5-58)$$

$$\frac{\partial \mathcal{D}}{\partial m_{tt}} \geq 0 \quad \perp \quad m_{tt} \geq 0 \quad \forall tt \quad (5-59)$$

Υπολογίζοντας αναλυτικά τις παραγώγους προκύπτει τελικά το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων, το οποίο συμπεριλαμβάνοντας και τους ισοτικούς περιορισμούς (5-1) έως (5-3), (5-11) έως (5-13) και (5-15) έως (5-18), αποτελεί το υπό-μοντέλο της ζήτησης για θέρμανση και ψύξη, το οποίο λύνεται ως πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας.

$$\lambda d_h \left(\frac{\partial SAV_h}{\partial r_{h,(\rho,tt)}} \right) + m_{tt} \left(\frac{\partial RATER_{tt}}{\partial r_{h,(\rho,tt)}} \right) \geq \frac{\partial npv(r_{h,(\rho,tt)})}{\partial r_{h,(\rho,tt)}} \quad \perp \quad r_{h,(\rho,tt)} \geq 0 \quad \forall h \quad (5-60)$$

$$\overline{sav}_h - SAV_h \geq 0 \quad \perp \quad \lambda d_h \geq 0 \quad \forall h \quad (5-61)$$

$$G((\overline{r}_{tt}) - r_{tt} \geq 0 \quad \perp \quad m_{tt} \geq 0 \quad \forall h \quad (5-62)$$

Το αποτέλεσμα της λύσης του υπό-μοντέλου της ζήτησης για θέρμανση και ψύξη είναι η επιλογή των προκρινόμενων στρατηγικών που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους για κάθε κατηγορία κτηρίου, ώστε τελικά υπολογίζεται η εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια για κάθε κατηγορία και προκρινόμενη στρατηγική U^{eff} , βάσει της εξίσωσης (5-20). Για τις υπόλοιπες τελικές χρήσεις πλην της θέρμανσης και της ψύξης (δηλαδή για την προετοιμασία ΖΝΧ, το μαγείρεμα, τις ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και το φωτισμό), ισχύει $U^{eff} = U^d$. Η εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια χρησιμοποιείται ως είσοδος στο υπό-μοντέλο της προσφοράς.

Το πρόβλημα της παραγωγής ενεργειακών μορφών από κάθε κατηγορία κτηρίου προσδιορίζεται από τις εξισώσεις (5-21) έως (5-41) και έγκειται στον προσδιορισμό των στρατηγικών ενεργειακού εξοπλισμού που ικανοποιούν την εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια. Για το σκοπό αυτό, η κάθε κατηγορία κτηρίου επιλέγει τις στρατηγικές με το μικρότερο κόστος, όπως αυτό υπολογίζεται βάσει της παρούσας αξίας του κόστους της κάθε στρατηγικής. Λύνει δηλαδή η κάθε κατηγορία κτηρίου ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της παρούσας αξίας του κόστους που αντιστοιχεί στην επιλογή των στρατηγικών για ενεργειακό εξοπλισμό, υπό δύο περιορισμούς: ότι η παραγωγή από τον εξοπλισμό θα ικανοποιεί την εναπομένουσα ωφέλιμη ενέργεια (εξίσωση (5-64)) και ότι ο όγκος των διατιθέμενων ενεργειακών προϊόντων από την αγορά δεν θα ξεπερνά τη δυναμικότητα της αγοράς (εξίσωση (5-65)).

Εφόσον η πολιτική έχει ενεργειακούς/κλιματικούς στόχους για τον κτηριακό τομέα όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών CO₂, την εξοικονόμηση ενέργειας, και τη συνεισφορά των ΑΠΕ, το μοντέλο διατυπώνει

αυτούς τους στόχους με τη μορφή περιορισμών στο πρόβλημα της παραγωγής (εξισώσεις (5-65) έως (5-68), αντίστοιχα). Συνεπώς, το πρόβλημα της παραγωγής ορίζεται ως εξής:

$$\min_{S(h,k),(s,tt)} PV = pv(s_{(h,k),(s,tt)}) \quad \forall (h, k) \quad (5-63)$$

$$\sum_s \sum_{tt \leq t} \Pi_{(h,k),(s,tt),t} = \Pi B_{(h,k),t} \geq U_{(h,k),t}^{eff} \quad \forall (h, k), t \quad (5-64)$$

$$\overline{MT}_{f,t} \geq MT_{f,t} \quad \forall f | mp_{(s,tt),f} \quad (5-65)$$

$$\overline{EM}_{l,t} \geq EMMIS_{l,t} = \sum_f emf_{l,f} \cdot FT_{f,t} \quad \forall l, \forall t \quad (5-66)$$

$$\overline{EE}_t \geq FEC_t = \sum_f FT_{f,t} \quad \forall t \quad (5-67)$$

$$\sum_{f \in f_{RES}} FT_{f,t} = RES_t \geq \overline{RES}_t \quad \forall t \quad (5-68)$$

Για την επίλυση του προβλήματος, ορίζεται η ακόλουθη συνάρτηση Lagrange, \mathcal{S} , όπου η μεταβλητή λ_s είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τον περιορισμό της ικανοποίησης της ζήτησης για κάθε κατηγορία κτηρίου και η μεταβλητή μ_s είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τον περιορισμό της δυναμικότητας της αγοράς. Οι μεταβλητές cv , ev , και rv είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τους περιορισμούς που αντιστοιχούν στους κλιματικούς και ενεργειακούς στόχους και αναπαριστούν με τη σειρά το οριακό κόστος επίτευξης του στόχου μείωσης των εκπομπών CO₂ (ή την τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών), το οριακό κόστος επίτευξης του στόχου για την εξοικονόμηση ενέργειας (ή την τιμή των λευκών πιστοποιητικών) και το οριακό όφελος επίτευξης του στόχου για τη συνεισφορά των ΑΠΕ (ή το ύψος της επιδότησης πράσινων πιστοποιητικών).

$$\begin{aligned} \mathcal{S} = & pv(s_{(h,k),(s,tt)}) + \lambda_{s(h,k),t} (U_{(h,k),t}^{eff} - \Pi B_{(h,k),t}) + \mu_{s_{f,t}} (MT_{f,t} - \overline{MT}_{f,t}) \\ & + cv_{l,t} (EMMIS_{l,t} - \overline{EM}_{l,t}) + ev_t (FEC_t - \overline{EE}_t) \\ & + rv_t (\overline{RES}_t - RES_t) \end{aligned} \quad \forall (h, k) \quad (5-69)$$

Οι συνθήκες KKT έχουν ως εξής:

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \geq 0 \quad \perp \quad s_{(h,k),(s,tt)} \geq 0 \quad \forall (h, k) \quad (5-70)$$

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \lambda_{S(h,k),t}} \leq 0 \quad \perp \quad \lambda_{S(h,k),t} \geq 0 \quad \forall (h, k), t \quad (5-71)$$

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \mu_{S_f,t}} \leq 0 \quad \perp \quad \mu_{S_f,t} \geq 0 \quad \forall f | mp_{(s,tt),f} \quad (5-72)$$

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial cv_{l,t}} \leq 0 \quad \perp \quad cv_{l,t} \geq 0 \quad \forall l, \forall t \quad (5-73)$$

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial ev_t} \leq 0 \quad \perp \quad ev_t \geq 0 \quad \forall t \quad (5-74)$$

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial rv_t} \leq 0 \quad \perp \quad rv_t \geq 0 \quad \forall t \quad (5-75)$$

Υπολογίζοντας αναλυτικά τις παραγώγους προκύπτει τελικά το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων, το οποίο συμπεριλαμβάνοντας και τους ισοτικούς περιορισμούς (5-25) έως (5-37) και (5-39) έως (5-40) αποτελεί το υπό-μοντέλο της προσφοράς, το οποίο λύνεται ως πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας. Εάν δεν υπάρχουν στόχοι πολιτικής που αφορούν αποκλειστικά τον κτηριακό τομέα, τότε οι εξισώσεις (5-66) έως (5-68) δε συμπεριλαμβάνονται στο πρόβλημα. Ενεργειακοί και κλιματικοί στόχοι μπορεί να υπάρχουν, όμως, για το σύνολο του ενεργειακού συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, οι δυικές μεταβλητές cv , ev , και rv των περιορισμών, προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση ολόκληρου του ενεργειακού συστήματος (Ενότητα 5.5.2). Υπάρχει, τέλος, η περίπτωση να υπάρχουν ενεργειακοί και κλιματικοί στόχοι τόσο για τον κτηριακό τομέα όσο και για το ενεργειακό σύστημα συνολικά. Σε αυτήν την περίπτωση, ισχύουν και οι περιορισμοί του προβλήματος παραγωγής και οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης για όλο το ενεργειακό σύστημα.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial pv(s_{(h,k),(s,tt)})}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \\ & \geq \lambda_{S(h,k),t} \left(\frac{\partial PB_{(h,k),t}}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \right) + \mu_{S_f,t} \left(\frac{\partial MT_{f,t}}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \right) \\ & + cv_{l,t} \left(\frac{\partial EMMIS_{l,t}}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \right) + ev_t \left(\frac{\partial FEC_t}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \right) \\ & + rv_t \left(\frac{\partial RES_t}{\partial s_{(h,k),(s,tt)}} \right) \perp s_{(h,k),(s,tt)} \geq 0 \end{aligned} \quad \forall (h, k) \quad (5-76)$$

$$U_{(h,k),t}^{eff} - PB_{(h,k),t} \leq 0 \quad \perp \quad \lambda_{S(h,k),t} \geq 0 \quad \forall (h, k), t \quad (5-77)$$

$$MT_{f,t} - \overline{MT}_{f,t} \leq 0 \quad \perp \quad \mu_{S_f,t} \geq 0 \quad \forall f | map_{\sigma,f} \quad (5-78)$$

$$EMMIS_{l,t} - \overline{EM}_{l,t} \leq 0 \perp cv_{l,t} \geq 0 \quad \forall l, \forall t \quad (5-79)$$

$$FEC_t - \overline{EE}_t \leq 0 \perp ev_t \geq 0 \quad \forall t \quad (5-80)$$

$$\overline{RES}_t - RES_t \leq 0 \perp rv_t \geq 0 \quad \forall t \quad (5-81)$$

Το αποτέλεσμα της λύσης του υπό-μοντέλου της προσφοράς είναι η επιλογή των προκρινόμενων στρατηγικών που αφορούν στον ενεργειακό εξοπλισμό για κάθε κατηγορία κτηρίου. Το λειτουργικό κόστος ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας (για θέρμανση και ψύξη) $OC_{h,t}$ για κάθε κατηγορία κτηρίου h υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης (5-42) και χρησιμοποιείται ως είσοδος στο υπό-μοντέλο της ζήτησης (για την επιλογή των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους), στην επόμενη επανάληψη. Το ίδιο ισχύει και για τη δυική τιμή του περιορισμού για την ενεργειακή εξοικονόμηση (ev), η οποία χρησιμοποιείται στην εξίσωση (5-12) του υπό-μοντέλου της ζήτησης (για την επιλογή των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους).

Το υπό-μοντέλο της ζήτησης είναι αυτό που λύνεται πρώτο στην πρώτη επανάληψη. Στην πρώτη επανάληψη, όπου η τιμή του λειτουργικού κόστους $OC_{h,t}$ για κάθε κατηγορία κτηρίου είναι άγνωστη χρησιμοποιούνται εξωγενείς τιμές, που βασίζονται σε στατιστικά δεδομένα.

Τα μοντέλα που έχουν δυναμική συμπεριφορά ως προς το χρόνο και κάνουν μελλοντικές προβλέψεις μπορούν να ακολουθήσουν τέσσερις προσεγγίσεις αναφορικά με την προβλεψιμότητα (predictability/foresight): δύο ακραίες και δύο ενδιάμεσες. Το ένα άκρο αφορά μοντέλα που είναι μυωπικά. Τα μοντέλα αυτά δεν έχουν προβλεψιμότητα και βλέπουν μόνο το παρελθόν και το παρόν, δηλαδή βελτιστοποιούν αγνοώντας τις εξελίξεις του μέλλοντος. Το άλλο άκρο αφορά μοντέλα που έχουν πλήρη προβλεψιμότητα (full foresight/ intertemporal optimization), στα οποία η βελτιστοποίηση προκύπτει με πλήρη γνώση των μελλοντικών εξελίξεων. Ανάμεσα στις δύο ακραίες προσεγγίσεις υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις οι οποίες ευρέως μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής. Η μία ξεκινάει από την full foresight προσέγγιση, στην οποία μειώνει την προβλεψιμότητα (partial foresight), σε μερικές μόνο χρονιές και όχι σε όλο τον ορίζοντα επίλυσης. Η προβλεψιμότητα είναι μεν περιορισμένη αλλά υπάρχει. Η δεύτερη προσέγγιση είναι επέκταση της μυωπικής προσέγγισης, στην οποία εφαρμόζεται ατελής προβλεψιμότητα (partial expectation, error correction, dynamic adjustment): με βάση το παρελθόν γίνεται πρόβλεψη στο μέλλον (πχ. για την επόμενη χρονιά), όπως ακριβώς γίνεται στα μυωπικά μοντέλα. Η επόμενη χρονιά πραγματοποιείται μέσω του μοντέλου και χρησιμοποιείται για να διορθώσει την πρόβλεψη της αμέσως επόμενης χρονιάς. Δηλαδή φιλοσοφικά εξακολουθεί το μοντέλο να είναι μυωπικό αφού δεν έχει προβλεψιμότητα, όμως προσαρμόζει τη μυωπία του, δηλαδή είναι σαν να προσπαθεί να δει στο μέλλον, κάνοντας διορθώσεις του φάσματος ορατότητας.

Το προτεινόμενο μοντέλο συνολικά έχει έναν χρονικό ορίζοντα προβολής που φτάνει μέχρι το 2050 ή το 2070. Ωστόσο, κατά την επίλυση ο χρονικός ορίζοντας αυτός χωρίζεται σε επιμέρους κυλιόμενους ορίζοντες διάρκειας 20 ετών, δηλαδή ακολουθείται η partial foresight προσέγγιση. Συνεπώς, η διαχρονική βελτιστοποίηση, αφορά κάθε επιμέρους χρονικό ορίζοντα και όχι όλη τη χρονική διάρκεια προβολής. Η επιλογή των 20 ετών έγινε διότι αυτό το χρονικό διάστημα είναι ένα ρεαλιστικό χρονικό διάστημα πρόβλεψης (foresight) όσον αφορά τις ενεργειακές αποφάσεις στα κτήρια. Οι επιμέρους ορίζοντες είναι

κυλιόμενοι με την έννοια ότι οι αποφάσεις σε κάθε προηγούμενο ορίζοντα θεωρούνται δεδομένες κατά την επίλυση κάθε επόμενου ορίζοντα. Αυτό επί της ουσίας σημαίνει ότι στην αρχή κάθε επιμέρους ορίζοντα έχουν καταγραφεί οι γενιές (vintages) των επενδύσεων (ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και ενεργειακού εξοπλισμού) που έγιναν στον προηγούμενο, ώστε όχι μόνο είναι γνωστά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κελύφους και του εξοπλισμού στην αρχή κάθε επιμέρους χρονικού ορίζοντα αλλά και στην περίπτωση που εξακολουθεί η αποπληρωμή των δόσεων (δηλαδή του ισοδύναμου ετήσιου κόστους επένδυσης) για επενδύσεις που έγιναν στο τέλος του προηγούμενου χρονικού ορίζοντα, αυτή να συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς του νέου ορίζοντα.

5.5.2. Ενσωμάτωση του μοντέλου των κτηρίων στο πλήρες μοντέλο ενεργειακής ισορροπίας της αγοράς

Η προηγούμενη ενότητα αφορά τη μαθηματική περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου. Το μοντέλο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή να ενσωματώνεται στο πλήρες μοντέλο ενεργειακής ισορροπίας της αγοράς.

Όταν το μοντέλο λειτουργεί αυτόνομα επιλύονται οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως και δεν υπάρχει ανάδραση με την αγορά, με την έννοια ότι οι τιμές των ενεργειακών προϊόντων (οι οποίες επηρεάζουν τη ζήτηση) είναι δεδομένες και δεν είναι αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Όμως, στην πραγματικότητα τα κτήρια μαζί και με τους υπόλοιπους τομείς της τελικής κατανάλωσης (δηλαδή τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τη γεωργία), διαμορφώνουν τη συνολική ζήτηση για ενεργειακά προϊόντα. Αυτή η ζήτηση πρέπει να ικανοποιείται από τον τομέα της προσφοράς ενέργειας, ο οποίος υπόκειται σε τεχνικούς και άλλους περιορισμούς. Ανάλογα με το καθεστώς ρύθμισης της αγοράς, διαμορφώνεται η τιμή ισορροπίας για τα ενεργειακά προϊόντα που ζητούν οι τελικοί καταναλωτές και παράγει ο τομέας της προσφοράς ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, μπορεί επιπλέον να υπάρχουν και συνολικοί περιορισμοί (δηλαδή για όλο το ενεργειακό σύστημα) που αντικατοπτρίζουν στόχους ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής ή περιορισμούς.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η τυποποιημένη μαθηματική περιγραφή ολόκληρου του ενεργειακού συστήματος.

Οι τομείς της ζήτησης (dem) μεγιστοποιούν τη χρησιμότητα ή ελαχιστοποιούν το κόστος υπό περιορισμούς εισοδήματος ή παραγωγής για να προσδιορίσουν το ενεργειακό μείγμα (FE), και άλλες δαπάνες ανεξάρτητες από την ενέργεια (NE). Το ενεργειακό μείγμα χωρίζεται σε ορυκτά καύσιμα (FFE), ηλεκτρισμό και διανεμόμενη θερμότητα (EC) και ΑΠΕ (συμπεριλαμβανόμενης της περιβάλλουσας θερμότητας από τις αντλίες θερμότητας) (CFE),

$$\underset{FFE, EC, CFE, NE}{Max} U_{dem} = \mathfrak{N}[\mathcal{F}(FFE, EC, CFE), NE] \quad \forall dem \quad (5-82)$$

$$\wp_{FFE}(FFE) \cdot FFE + \wp_{EC} \cdot EC + \wp_{CFE}(CFE) \cdot CFE + \wp_{NE} \cdot NE \leq R$$

Ειδικά για τον κτηριακό τομέα το σύστημα εξισώσεων (5-82), μπορεί να γραφεί σύμφωνα με τη μορφοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, συνοπτικά ως εξής:

$$\begin{aligned} \underset{FFE, EC, CFE, REN}{Min} \quad & Cost_{build} \\ & = \varphi_{FFE}(FFE) \cdot FFE + p_{EC} \cdot EC + \varphi_{CFE}(CFE) \cdot CFE + \varphi_{REN}(REN) \cdot REN \end{aligned} \quad (5-83)$$

$$U^{eff} + G(REN) \geq U^d$$

Το σύστημα εξισώσεων (5-83) περιγράφεται με απλά λόγια ως εξής: κάθε κατηγορία κτηρίου επιλέγει την ενεργειακή αναβάθμιση (REN) και τον ενεργειακό εξοπλισμό (FE) με το μικρότερο κόστος, ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή ωφέλιμη ενέργεια. Το σύστημα εξισώσεων (5-83) είναι, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, ένα πολύπλοκο πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας. Αντίστοιχα, και το σύστημα εξισώσεων (5-82) για κάθε άλλον τομέα της ζήτησης μπορεί επίσης να είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας.

Οι παραγωγοί ενεργειακών προϊόντων ελαχιστοποιούν το κόστος για την κάλυψη της ζήτησης για ενεργειακά προϊόντα (EC) και προσδιορίζουν το δικό τους ενεργειακό μείγμα, λαμβάνοντας υπόψη τις καμπύλες κόστους-προσφοράς για ορυκτά (φ_{CFE}) και καθαρά καύσιμα, πχ. ΑΠΕ, (φ_{CEC}), και τεχνικούς περιορισμούς, g (σύστημα εξισώσεων (5-84)).

$$\begin{aligned} \underset{FEC, CEC}{Min} \quad & C = \varphi_{FEC}(FEC) \cdot FEC + \varphi_{CEC}(CEC) \cdot CEC + cv \cdot e_{FEC} \cdot FEC \\ & g(FEC, CEC) \geq \frac{EC}{1 - los} \end{aligned} \quad (5-84)$$

Με βάση το κόστος για τους παραγωγούς και τις συνθήκες της αγοράς, μια ρουτίνα που υποδηλώνεται με \mathcal{H} καθορίζει τις τιμές των ενεργειακών προϊόντων και τα τιμολόγια που διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τελικό καταναλωτή (εξίσωση (5-85)).

$$p_{EC} = \mathcal{H}(C, EC) \quad (5-85)$$

Το σύστημα εξισώσεων (5-86) αναπαριστά τους περιβαλλοντικούς και ενεργειακούς περιορισμούς του προβλήματος, σε συνολικό επίπεδο (δηλαδή σε επίπεδο ενεργειακού συστήματος), συνήθως σε εθνικό επίπεδο (ή ακόμα και σε ευρωπαϊκό επίπεδο). Περιγράφονται οι εξισώσεις από πάνω προς τα κάτω: η πρώτη εξίσωση αναπαριστά τον περιορισμό που αφορά στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, και υπολογίζει τις συνολικές εκπομπές που εκλύονται από τα ορυκτά καύσιμα, βάσει του συντελεστή εκπομπών τους (e), και τις υποχρεώνει να είναι χαμηλότερες από μια ορισμένη ποσότητα (cap), η δεύτερη εξίσωση αναπαριστά τον περιορισμό που αφορά στη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα και υποχρεώνει το μερίδιο των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας να είναι μεγαλύτερο από μια ορισμένη ποσότητα (res) και η τελευταία εξίσωση αναπαριστά τον περιορισμό που αφορά στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Ο περιορισμός είναι εκφρασμένος σε όρους τελικής κατανάλωσης ενέργειας, και ορίζει ότι η τελική κατανάλωση ενέργειας πρέπει να είναι χαμηλότερη από μία συγκεκριμένη τιμή (sav). Ο περιορισμός για την ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί επίσης να είναι εκφρασμένος σε όρους πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας. Οι εξισώσεις είναι αντίστοιχες των εξισώσεων (5-79) έως (5-81), που ισχύουν όταν υπάρχουν ενεργειακοί ή/και κλιματικοί στόχοι που αφορούν μόνο τον κτηριακό τομέα, όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 5.5.1.

$$e_{FFE} \cdot FFE + e_{FEC} \cdot FEC \leq cap \perp cv$$

$$CFE + CEC \geq res \cdot \left(FFE + \frac{EC}{(1 - los)} + CFE \right) \perp rv \quad (5-86)$$

$$\mathcal{F}(FFE, EC, CFE) \leq sav \perp ev$$

Οι δυικές τιμές (ή σκιώδεις τιμές) των συνολικών περιορισμών του προβλήματος ισορροπίας της αγοράς επηρεάζουν τόσο τη ζήτηση όσο και την προσφορά ενέργειας. Στο προτεινόμενο μοντέλο, η δυική τιμή του περιορισμού για την ενεργειακή αποδοτικότητα εμφανίζεται στην εξίσωση (5-12) και έτσι επηρεάζει τις αποφάσεις σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους. Αντίστοιχα, οι δυικές τιμές των περιορισμών για τις ΑΠΕ και τις εκπομπές, χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (5-35) και έτσι επηρεάζουν αμέσως τις αποφάσεις σχετικά με την επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού. Από τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους ανά μονάδα ωφέλιμης ζήτησης ενέργειας, στην έξοδο του υπό-μοντέλου της προσφοράς του προτεινόμενου μοντέλου (εξίσωση (5-42)), που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο υπό-μοντέλο της ζήτησης σε κάθε επανάληψη, προκύπτει ότι οι δυικές μεταβλητές των περιορισμών για τις ΑΠΕ και τις εκπομπές επηρεάζουν (εμμέσως) και τις αποφάσεις σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους.

Το σύστημα των εξισώσεων (5-82) έως (5-86) μπορεί τελικά να λυθεί ως ένα ενιαίο πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και η συνάρτηση τιμολόγησης \mathcal{H} . Τελικά, το πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας που λύνει το μοντέλο των κτηρίων είναι φωλιασμένο μέσα σε ένα συνολικό πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας, που χρησιμοποιώντας μια ρουτίνα τιμολόγησης, μπορεί να προσομοιώσει την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης στο ενεργειακό σύστημα, υπό περιβαλλοντικούς και ενεργειακούς περιορισμούς.

5.6 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει μια μεγάλη ποικιλία μέτρων και πολιτικών που αποτελούν επιλογές πολιτικής για τον τομέα των κτηρίων. Επειδή το μοντέλο εφαρμόζεται επί του παρόντος για τα κράτη μέλη της ΕΕ, περιλαμβάνει μόνο τις πολιτικές που εφαρμόζονται στην ΕΕ και μπορούν να συνεισφέρουν στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ για την ενέργεια και το κλίμα.

Τα μέτρα πολιτικής που περιλαμβάνονται στη μοντελοποίηση μπορεί να είναι μέτρα οικονομικού και ρυθμιστικού χαρακτήρα, ή ακόμα και θεσμικά μέτρα που στοχεύουν στην ενημέρωση και πληροφόρηση των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων σχετικά με τα οφέλη της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Τα οικονομικά μέτρα που περιλαμβάνονται στο μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

- Ειδικό φόρο κατανάλωσης και ΦΠΑ που ισχύουν για όλα τα καύσιμα και ορίζονται βάσει της DG TAXUD. Επί του παρόντος, το μοντέλο έχει συμπεριλάβει την Οδηγία για τη φορολογία της ενέργειας (European Commission, 2003) και τα επίπεδα φορολογίας για κάθε καύσιμο, σύμφωνα με τις χρήσεις του, σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ βάσει του (Directorate-General Taxation and Customs Union, 2018).
- Η φορολόγηση των εκπομπών CO₂, ως μέσο για τη μείωση των εκπομπών CO₂ εφαρμόζεται στο μοντέλο με διάφορες μορφές. Μπορεί να εφαρμόζεται ως άμεσος φόρος για τις εκπομπές CO₂ με τη μορφή του κόστους δικαιωμάτων εκπομπής όταν τα κτήρια εντάσσονται στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων

Εκπομπών (ΣΕΔΕ) της ΕΕ (carbon tax). Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμόζεται ως έμμεσος φόρος για τις εκπομπές CO₂ (carbon value) όταν ο τομέας των κτηρίων δεν συμπεριλαμβάνεται στο ΣΕΔΕ της ΕΕ. Η τιμή του φόρου στη δεύτερη περίπτωση είναι η δυική τιμή του περιορισμού για το ανώτατο όριο εκπομπών CO₂ (εξίσωση (5-66)). Ο άμεσος φόρος για τις εκπομπές μέσω του ΣΕΔΕ συνεπάγεται πληρωμές φόρου στο κράτος από τους καταναλωτές, ενώ ο έμμεσος φόρος για τις εκπομπές, εξορισμού, δε συνεπάγεται πληρωμές. Ωστόσο, χρησιμεύει για να προωθεί τις τεχνολογικές επιλογές που έχουν χαμηλές εκπομπές και την εξοικονόμηση ενέργειας.

- Επιδοτήσεις ή συστήματα χρηματοδότησης, τα οποία επίσης εφαρμόζονται άμεσα ή έμμεσα στο μοντέλο. Όταν οι επιδοτήσεις και τα συστήματα χρηματοδότησης συμπεριλαμβάνονται άμεσα στη μοντελοποίηση, μπορούν να εφαρμόζονται είτε επί της επενδυτικής δαπάνης είτε επί του κόστους καυσίμου εφόσον ορίζεται ρητά μια τέτοια πολιτική. Η έμμεση αναπαράσταση των επιδοτήσεων στη μοντελοποίηση, λειτουργεί μέσω της μείωσης των παραγόντων που αναπαριστούν τα «αντιληπτά» κόστη που αντιστοιχούν στις επενδύσεις.
- Το έμμεσο χρηματικό όφελος που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (energy efficiency value) και προσομοιώνει την ένταση και τη φιλοδοξία των πολιτικών που στοχεύουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Με αυτόν τον τρόπο, οι επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας γίνονται οικονομικά πιο αποδοτικές. Το χρηματικό όφελος που προστίθεται στην εξοικονόμηση λογαριασμών ενέργειας μπορεί να αναπαριστά τη μοναδιαία αξία ή την τιμή εκκαθάρισης αγοράς πιστοποιητικών, των λεγόμενων λευκών πιστοποιητικών, ή την έμμεση αξία που αντιστοιχεί σε πολιτική που υποχρεώνει τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να πραγματοποιούν εξοικονόμηση ενέργειας στις εγκαταστάσεις των πελατών τους. Η τιμή αυτού του έμμεσου χρηματικού οφέλους είναι η δυική μεταβλητή του περιορισμού για την ενεργειακή αποδοτικότητα (εξίσωση (5-67)).
- Το έμμεσο χρηματικό όφελος που προστίθεται στο κόστος καυσίμου και προσομοιώνει πολιτικές που αναγνωρίζουν και επιβραβεύουν την επιλογή συγκεκριμένων τεχνολογιών ή/ και καυσίμων λόγω της συνεισφοράς τους στη διαμόρφωση του συνολικού δείκτη για την επίδοση σχετικά με τις ΑΠΕ (renewable value). Η τιμή αυτού του έμμεσου χρηματικού οφέλους είναι η δυική μεταβλητή του περιορισμού για τη συνεισφορά των ΑΠΕ (εξίσωση (5-68)).

Το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης ρυθμιστικά μέτρα όπως:

- Οικοδομικούς κανονισμούς. Οι οικοδομικοί κανονισμοί περιλαμβάνονται ρητά στο μοντέλο σε επίπεδο κράτους μέλους, με βάση την εκάστοτε εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία. Λόγω των διαφορετικών επιπέδων συμμόρφωσης με τους οικοδομικούς κανονισμούς και με βάση την ύπαρξη ή μη μηχανισμών που εξασφαλίζουν τη συμμόρφωση με τους οικοδομικούς κανονισμούς, το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν τη μη συμμόρφωση με τους οικοδομικούς κανονισμούς.
- Πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης για το κέλυφος του κτηρίου, τα οποία μπορεί να αντιπροσωπεύουν την έκδοση πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης που είναι απαραίτητα για την ενοικίαση ή την πώληση του ακινήτου.
- Πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης (Minimum Energy Performance standards - MEPS) για τον εξοπλισμό και τις συσκευές, τα οποία ορίζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Οδηγίας για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τέλος και θεσμικά μέτρα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν πολιτικές που στοχεύουν στην πληροφόρηση και ενημέρωση των καταναλωτών, όπως η χρήση επισημάνσεων στον εξοπλισμό σύμφωνα με τη σχετική Οδηγία. Οι πολιτικές αυτές συμβάλλουν στη βελτίωση της αντίληψης

των καταναλωτών σχετικά με την απόδοση και λειτουργία των τεχνολογιών. Οι πολιτικές αυτές αναπαρίστανται στη μοντελοποίηση τροποποιώντας τα «αντιληπτά» κόστη που σχετίζονται με συγκεκριμένες επενδύσεις ενεργειακής εξοικονόμησης. Επίσης, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη μέτρα που στοχεύουν στην εξέλιξη της έρευνας και την πρόοδο της τεχνολογίας. Τα μέτρα αυτά αναπαρίστανται στη μοντελοποίηση μέσω της βελτίωσης ή επιτάχυνσης του ρυθμού με τον οποίον ωριμάζουν τεχνικά συγκεκριμένες τεχνολογίες, και άρα επηρεάζονται οι παράγοντες learning. Επίσης, τέτοια μέτρα επηρεάζουν και τα βάρη που αναπαριστούν την προσαρμογή στις βέλτιστες συχνότητες, στον υπολογισμό των συχνοτήτων εμφάνισης των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης (εξίσωση (5-16)) και ενεργειακού εξοπλισμού (εξίσωση(5-39)).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να αναπαραστήσει το μοντέλο τα εμπόδια σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα, χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των εναλλακτικών στρατηγικών προεξοφλητικά επιτόκια που συμπεριλαμβάνουν ασφάλιστρα κινδύνου, την τεχνική αβεβαιότητα και τη δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση, και έχουν υποκειμενικό χαρακτήρα, διαφέροντας ανά κατηγορία καταναλωτή. Η υπόθεση εφαρμογής όλων ή ορισμένων από τα μέτρα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για την επίτευξη φιλόδοξων στόχων για την ενέργεια και το κλίμα στην ΕΕ, συνεπάγεται για τη μοντελοποίηση την κατ' αρχήν υπόθεση εφαρμογής σε μεγάλη έκταση πολιτικών που επιδιώκουν την άρση κάθε εμποδίου στη λήψη επενδυτικών αποφάσεων ενεργειακής εξοικονόμησης. Οι πολιτικές αυτές οδηγούν τους επενδυτές να θεωρούν εύλογου μεγέθους επιτόκια προεξόφλησης για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας των επενδύσεων στην ενεργειακή εξοικονόμηση.

5.7 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Η κωδικοποίηση του μοντέλου έγινε στο σύστημα βελτιστοποίησης GAMS και οι αλγόριθμοι επίλυσης είναι επαναληπτικοί και ο PATH (Dirkse & Ferris, 1995). Η γλώσσα μοντελοποίησης GAMS μεταφράζει με εύκολο τρόπο προβλήματα βελτιστοποίησης του πραγματικού κόσμου σε κώδικα υπολογιστή. Το σύστημα διαθέτει μεγάλη ποικιλία από solvers, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το σύστημα μπορεί να συνεργάζεται και με άλλα λογισμικά ή εργαλεία, τα οποία ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί για να εισάγει και να εξάγει δεδομένα, να γραφικοποιεί αποτελέσματα κ.ά.

Το προτεινόμενο μοντέλο αποτελείται από περίπου 60.000.000 μεταβλητές για τον οικιακό τομέα και 20.000.000 μεταβλητές για τον τομέα των υπηρεσιών. Το μοντέλο λύνεται σε cluster υπολογιστών και η διάρκεια επίλυσης για μια χώρα είναι περίπου 1:30 ώρα. Η χρήση cluster υπολογιστών για την επίλυση του μοντέλου έχει κριθεί απαραίτητη αφενός γιατί το μοντέλο είναι πολύ βαρύ για τους απλούς υπολογιστές, αφετέρου γιατί η επίλυση του μοντέλου για κάθε χώρα γίνεται παράλληλα στους υπολογιστές που αποτελούν το cluster, και έτσι ο συνολικός χρόνος επίλυσης του μοντέλου είναι 1:30 ώρα, είτε το μοντέλο λύνεται για μια χώρα είτε για πολλές χώρες μαζί.

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου οργανώνονται σε μεγάλα αρχεία Excel με τη μορφή βάσης δεδομένων, ανά χώρα και κτηριακό τομέα. Στον επίλογο του μοντέλου (δηλαδή μετά τη λύση του), υπάρχει κώδικας που υπολογίζει οικονομικούς και ενεργειακούς δείκτες, που αποτελούν την έξοδο του μοντέλου, και χρησιμεύουν για την επικοινωνία του με άλλα μοντέλα, προγράμματα ή λογισμικά. Ένα πρότυπο αρχείο excel για κάθε χώρα και κτηριακό τομέα τυπώνεται επίσης μετά το τέλος του μοντέλου, το οποίο περιλαμβάνει τα κύρια αποτελέσματα του μοντέλου.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΤΥΠΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

6.1 ΤΟ ΠΑΡΑΔΟΞΟ ΤΩΝ ΜΗ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ

6.1.1. Περιγραφή του προβλήματος

Οι αποφάσεις που αφορούν σε ενεργειακή αποδοτικότητα περιλαμβάνουν το συμβιβασμό που πρέπει να κάνουν οι καταναλωτές μεταξύ του αρχικού κόστους της επένδυσης και της εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους, που είναι αποτέλεσμα της επένδυσης. Υπονοείται δηλαδή ότι οι καταναλωτές όταν αποφασίζουν για ενεργειακή αποδοτικότητα, εμμέσως ή αμέσως πραγματοποιούν αυτήν την πράξη. Υπάρχει πληθώρα τεχνικών μελετών στη βιβλιογραφία (Hu, 2019; Teni et al., 2019; Zachariadis et al., 2018), που αναλύουν αυτήν την πράξη για επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα στον κτηριακό τομέα από μια καθαρά οικονομοτεχνική σκοπιά και καταλήγουν ότι οι επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα στον κτηριακό τομέα, ειδικά αυτές που οδηγούν σε υψηλή ενεργειακή εξοικονόμηση, είναι οικονομικά αποδοτικές. Με άλλα λόγια, η εφαρμογή μόνωσης στα κτήρια κατοικίας είναι σύμφωνα με τις οικονομοτεχνικές μελέτες μια οικονομικά αποδοτική επένδυση.

Σύμφωνα με τη μικροοικονομική θεωρία, δηλαδή ότι οι καταναλωτές αποφασίζουν ορθολογικά με στόχο να μεγιστοποιούν τη χρησιμότητα τους υπό τους εισοδηματικούς περιορισμούς ή να ελαχιστοποιούν το κόστος υπό τον περιορισμό να εξασφαλίσουν συγκεκριμένο επίπεδο χρησιμότητας, θα έπρεπε να επιλέγουν αυτές τις επενδύσεις, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά τους και το ρυθμιστικό πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργεί η αγορά. Ωστόσο, η οικονομική βιβλιογραφία έχει αποδείξει ότι οι καταναλωτές είναι απρόθυμοι να επενδύσουν σε ενεργειακή αποδοτικότητα, παρά την αποδεδειγμένη οικονομική αποδοτικότητα αυτών των επενδύσεων με καθαρά οικονομοτεχνικούς όρους. Η απροθυμία των καταναλωτών μπορεί να ερμηνευθεί ως μια φαινομενικά μη-ορθολογική συμπεριφορά των καταναλωτών, και στη βιβλιογραφία η συμπεριφορά αυτή αναφέρεται ως το «παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων για την ενεργειακή αποδοτικότητα».

Η διαπίστωση ότι η συμπεριφορά των καταναλωτών είναι φαινομενικά μη-ορθολογική και όχι στην πραγματικότητα υπονοεί ότι υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις, οι οποίοι μπορεί να είναι άγνωστοι στον οικονομοτεχνικό αναλυτή και για αυτό δεν έχουν συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς του. Η οικονομική βιβλιογραφία (Hausman, 1979; Howarth & Sanstad, 1995) δείχνει ότι η επενδυτική απροθυμία θα μπορούσε να αποδοθεί σε υψηλά υποκειμενικά προεξοφλητικά επιτόκια που αντικατοπτρίζουν πολλούς παράγοντες, όπως την έλλειψη πληροφόρησης, την αβεβαιότητα, την έλλειψη επαρκούς χρηματοδότησης, και τα «κρυφά» κόστη. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα και η βιβλιογραφία (βλ. (Ameli & Brandt, 2015)) προτείνει να συσχετιστούν τα εμπόδια αυτά με τις ιδιαιτερότητες των ενεργειακά αποδοτικών επενδύσεων. Οι μεγάλες περίοδοι αποπληρωμής και ο κίνδυνος και η αβεβαιότητα συνεπάγονται υψηλά προεξοφλητικά επιτόκια. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η τυπολογία των πιθανών αιτιών για τα υψηλά προεξοφλητικά επιτόκια μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- έλλειψη πληροφοριών σχετικά με το κόστος και τα οφέλη των βελτιώσεων από την ενεργειακή απόδοση
- έλλειψη γνώσεων σχετικά με τον τρόπο χρήσης των διαθέσιμων πληροφοριών

- υψηλό κόστος συναλλαγής για την απόκτηση αξιόπιστων πληροφοριών
- απουσία τεχνικής ωριμότητας των τεχνολογιών, που σχετίζεται με την κατασκευαστική βιομηχανία
- αβεβαιότητα για την τεχνική απόδοση των επενδύσεων
- αβεβαιότητα σχετικά με το ρυθμιστικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων στην ενεργειακή αποδοτικότητα
- έλλειψη επαρκούς κεφαλαίου για την αγορά ακριβότερων αλλά αποτελεσματικών προϊόντων
- επίπεδο εισοδήματος και, κατά συνέπεια, εξοικονόμηση πόρων.
- «κρυφά» κόστη, που σχετίζονται με τις συνθήκες άνεσης μετά την πραγματοποίηση της επένδυσης,
- «κρυφά» κόστη που αντιστοιχούν σε επιπλέον κόστη που σχετίζονται με την κατασκευή ή/και την εγκατάσταση της επένδυσης, ακόμα και το κόστος της πιθανής προσωρινής μετεγκατάστασης,
- συμπεριφορές αποστροφής κινδύνου που σχετίζονται με πιθανή οικονομική αποτυχία της επένδυσης
- κατάσταση ιδιοκτησίας έναντι κατάσταση ενοικίασης του κτηρίου.

Τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα παραμελούνται στους καθαρά οικονομοτεχνικούς υπολογισμούς, δηλαδή αυτούς που γίνονται στις προαναφερθείσες τεχνικές μελέτες. Για αυτό οι μελέτες αυτές αδυνατούν να αναπαραστήσουν επαρκώς τις συμπεριφορές των καταναλωτών σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η προσέγγιση της μοντελοποίησης στο προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο συνίσταται στην αναπαράσταση των (ορθολογικών) συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με τη βελτιστοποίηση της επιλογής τεχνολογίας και επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο (όπως στην τυπική μικροοικονομική θεωρία) υπό την παρουσία πολλαπλών οικονομικών και μη-οικονομικών εμποδίων, διαφορετικών ανά κατηγορία καταναλωτή, που δυσκολεύουν και στρεβλώνουν τη βελτιστοποίηση. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τις φαινομενικά μη-ορθολογικές συμπεριφορές, δηλαδή την απροθυμία των καταναλωτών να επενδύουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Η ενσωμάτωση με συστηματικό τρόπο των παραγόντων αυτών στη μοντελοποίηση της βελτιστοποίησης στην ουσία εφαρμόζουν τη θεωρία της περιορισμένης ορθολογικότητας (bounded rationality) (Simon, 1955).

Η αναπαράσταση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα στο προτεινόμενο μοντέλο γίνεται με βάση τη φύση τους, τα οποία, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε οικονομικά εμπόδια (market barriers), και σε μη-οικονομικά εμπόδια (non-market barriers). Τα οικονομικά εμπόδια σχετίζονται με δυσκολίες κόστους. Τα μη-οικονομικά εμπόδια περιλαμβάνουν αφενός «κρυφά» κόστη (δηλαδή, «αληθινά» κόστη τα οποία στην πραγματικότητα πληρώνουν οι καταναλωτές) και παράγοντες που σχετίζονται με την πρόσβαση σε χρηματοδότηση, και αφετέρου θεσμικά εμπόδια που αντιστοιχούν σε παράγοντες που δεν έχουν άμεσο πληρωτέο ή «αληθινό» κόστος. Το μοντέλο, ωστόσο, ποσοτικοποιεί τα θεσμικά εμπόδια ως «αντιληπτά» κόστη και μέσω της προσαύξησης των παραγόντων που αναπαριστούν ασφάλιστρα κινδύνου, όπως έκαναν και άλλοι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Valentová, 2010). Τα μη οικονομικά εμπόδια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τρεις ομάδες: α) την ασύμμετρη πληροφόρηση, β) την αβεβαιότητα σχετικά με τις οικονομικές και τεχνικές επιδόσεις των επενδυτικών επιλογών (συμπεριλαμβανομένου του κόστους ευκαιρίας των ιδίων και δανειακών κεφαλαίων), και γ) τη ρυθμιστική αβεβαιότητα (κανονιστικές διατάξεις).

Τα μη-οικονομικά εμπόδια χαρακτηρίζονται στη βιβλιογραφία και ατέλειες της αγοράς. Η άρση των εμποδίων ή η διόρθωση των ατελειών της αγοράς απαιτεί την ανάμιξη της πολιτείας με τη θέσπιση μέτρων και πολιτικών.

Τα μέτρα πολιτικής σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια περιλαμβάνουν:

- οικονομικά μέτρα, μέσω επιδοτήσεων της επενδυτικής ή της καταναλωτικής δαπάνης ή της εξοικονόμησης ενέργειας ή μέσω φορολογικών μέτρων,
- ρυθμιστικά μέτρα, μέσω της θέσπισης κανονισμών και προτύπων ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης
- και θεσμικά μέτρα, που στοχεύουν στην πληροφόρηση και ενημέρωση των καταναλωτών.

Σκοπός των μέτρων ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής είναι καταρχάς η επίτευξη συγκεκριμένων στόχων για την ενέργεια και το κλίμα μέσω της παροχής κινήτρων για την πραγματοποίηση των απαραίτητων επενδύσεων. Μία (οικονομική ή ρυθμιστική) πολιτική μπορεί μεν να στοχεύει αμέσως στην επίτευξη συγκεκριμένων ενεργειακών ή κλιματικών στόχων, ταυτόχρονα όμως δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος (enabling conditions) της άρσης των θεσμικών εμποδίων, των εμποδίων πληροφόρησης και της αβεβαιότητας. Για παράδειγμα, εάν ο κτηριακός τομέας ενταχθεί στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ), το μέτρο αυτό αμέσως οδηγεί σε μείωση των εκπομπών CO₂ από τα κτήρια, εμμέσως όμως αίρει και την αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη των μελλοντικών τιμών, πράγμα που αποτελεί ένα από τα μη-οικονομικά εμπόδια. Δηλαδή, η ένταξη του κτηριακού τομέα στο ΣΕΔΕ υποχρεώνει τους καταναλωτές να λαμβάνουν υπόψη στους υπολογισμούς τους το κόστος του φόρου, όταν αποφασίζουν για την ενεργειακή αναβάθμιση στο κέλυφος, με την έννοια ότι δεν μπορούν να ισχυρίζονται ότι έχουν αβεβαιότητα ως προς τη μελλοντική εξέλιξη των τιμών των ενεργειακών προϊόντων. Συγχρόνως αν η πολιτική περιλαμβάνει και εξειδικευμένα μέτρα, όπως συχνά συμπεριλαμβάνονται στις διάφορες Οδηγίες (πχ. Άρθρα 8-12 της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση), μέσω διατάξεων που έχουν σκοπό έμμεσα ή άμεσα την άρση τέτοιων εμποδίων (πχ μέσω των θεσμικών μέτρων), τότε ακόμα περισσότερο επιτυγχάνεται άρση των εμποδίων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Οι συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος ενσωματώνονται στη μοντελοποίηση, μειώνοντας δυναμικά τα «αντιληπτά κόστη» και τους άλλους παράγοντες που αναπαριστούν τα μη-οικονομικά εμπόδια και για αυτό η ένταση και η έκτασή τους τελικά επηρεάζει και την αποτελεσματικότητα των οικονομικών και ρυθμιστικών μέτρων πολιτικής. Προσομοιώνεται δηλαδή μια δυναμική ανάδραση μεταξύ των πολιτικών παροχής κινήτρων και των παραγόντων που αναπαριστούν τα μη-οικονομικά εμπόδια.

Το μοντέλο εφαρμόζει μια λεπτομερή κατηγοριοποίηση των τύπων κτηρίων και καταναλωτών αφενός για να αποτυπωθούν λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά τους, αφετέρου για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των πολιτικών ενεργειακής απόδοσης.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι μια απλή οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση όπως αυτή εφαρμόζεται σε τεχνικές μελέτες, αδυνατεί να αναπαραστήσει «το παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων στην ενεργειακή αποδοτικότητα», γιατί αδυνατεί να αναπαραστήσει την απροθυμία των καταναλωτών να επενδύουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Η ενσωμάτωση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα είναι απαραίτητη όχι μόνο για να μπορεί να αναπαρασταθεί η πραγματικότητα σχετικά με τις αποφάσεις για επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά κυρίως για να μπορεί να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα συγκεκριμένων εργαλείων και μέτρων πολιτικής. Διότι η απλή οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση που δεν λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες συμπεριφοράς και αβεβαιότητας, μπορεί τελικά να προτείνει πολιτικές μικρότερης έντασης και έκτασης που όμως τελικά δεν μπορούν να κινητοποιήσουν τις απαραίτητες επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Με άλλα λόγια, οι υποθέσεις σχετικά με την αποτελεσματικότητα ή μη των συνθηκών μόχλευσης/εναύσματος επηρεάζουν τελικά τόσο την ένταση όσο και την αποτελεσματικότητα των μέτρων πολιτικής. Το γεγονός ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί ξεχωριστό στόχο στο πλαίσιο της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής για την επίτευξη κλιματικής

ουδετερότητας, καθιστά αναγκαία την ανάλυση σε βάθος της αποτελεσματικότητας των διαφόρων πολιτικών.

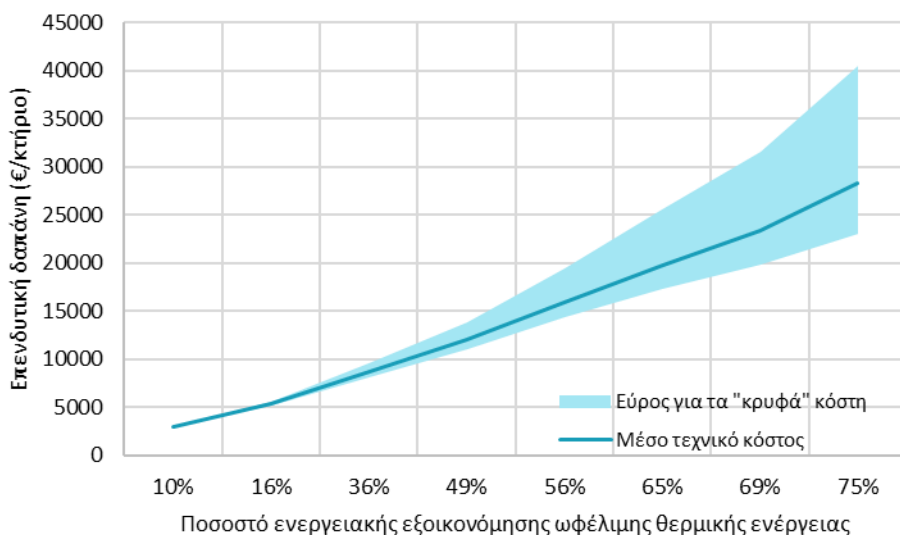
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αρχικά οι υποθέσεις σχετικά με τους παράγοντες που αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα στο προτεινόμενο μοντέλο. Έπειτα, παρουσιάζεται η επίδραση των παραγόντων αυτών στις προβολές της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω της εφαρμογής του μοντέλου σε ένα πλαίσιο στο οποίο οικονομικά και θεσμικά μέτρα αίρουν απολύτως τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα και σε ένα άλλο όπου τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα επηρεάζουν τις αποφάσεις. Τέλος, παρουσιάζεται η επίδραση των παραγόντων που αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα, στην ένταση των οικονομικών και ρυθμιστικών μέτρων πολιτικής.

6.1.2. Ενσωμάτωση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα στο προτεινόμενο μοντέλο

Στις Ενότητες 5.3 και 5.4 που παρουσιάζεται η μαθηματική διατύπωση του προτεινόμενου μοντέλου αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι που αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Σκοπός της παρούσας υπό-ενότητας είναι να συνοψίσει τις διάφορες παραμέτρους, με σαφή παραδείγματα ως προς το ποια εμπόδια επηρεάζουν την κάθε παράμετρο και τελικά να δοθεί ένα εύρος τιμών ανάλογα και με το πως οι πολιτικές μπορεί να επηρεάζουν τις παραμέτρους αυτές.

Ξεκινώντας με τα «κρυφά» κόστη που αναπαριστούν αληθινά επιπλέον κόστη για τις επενδύσεις σε ενεργειακή αποδοτικότητα, διαπιστώνουμε ότι αυτά ισχύουν τόσο στις επενδύσεις για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους όσο και στην επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού.

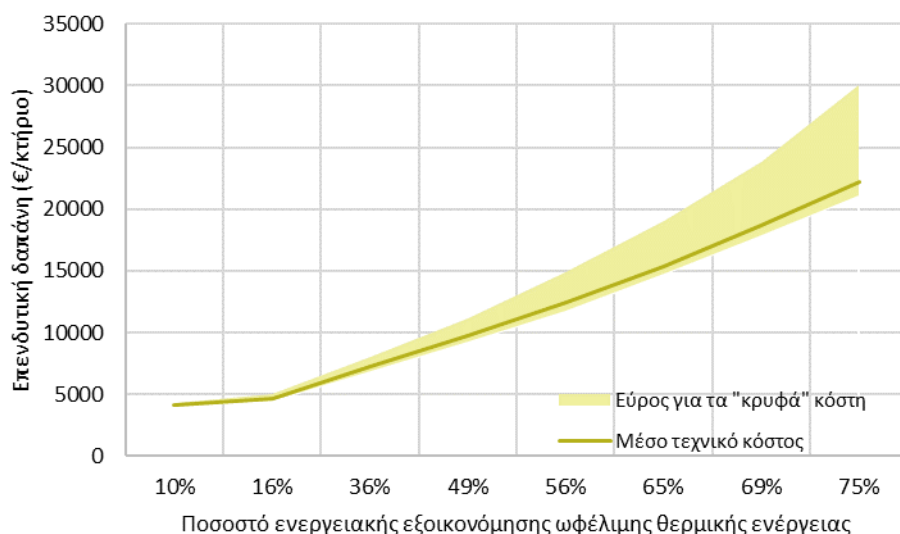
Εικόνα 22: Καμπύλες κόστους-δυναμικού εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, συμπεριλαμβανόμενων των παραγόντων «κρυφού» κόστους για βόρειες χώρες



Ειδικά για τις επενδύσεις σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, τα κόστη αυτά έχουν μεγάλη σημασία και κυρίως διαφέρουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κτηρίου. Τα γραφήματα 22 και 23 παρουσιάζουν το εύρος της επενδυτικής δαπάνης, συμπεριλαμβανομένου του «κρυφού» επιπλέον κόστους, για επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης αυξανόμενης έντασης σε χώρες της βόρειας (Εικόνα 22) και νότιας Ευρώπης (Εικόνα 23). Τα εύρη έχουν προκύψει λαμβάνοντας υπόψη τους βασικούς παράγοντες που

αντιστοιχούν στα «κρυφά» κόστη και το κτηριακό απόθεμα της κάθε περιοχής. Καταρχάς το κόστος εργασίας είναι πιο χαμηλότερο στις χώρες της νότιας Ευρώπης, κάτι που εξηγεί γιατί το καθαρά τεχνικό κόστος είναι χαμηλότερο στις χώρες αυτές. Το γεγονός ότι σε χώρες της νότιας Ευρώπης μεγάλο μέρος του κτηριακού αποθέματος είναι μεγαλύτερης ηλικίας από ό, τι στις χώρες της βόρειας Ευρώπης, εξηγεί γιατί στις πρώτες ακόμα και για ενεργειακές αναβαθμίσεις μικρής έντασης απαιτείται επιπλέον κόστος. Από την άλλη, τα κτήρια στις χώρες της βόρειας Ευρώπης, ειδικά στα κέντρα των πόλεων υπόκεινται συχνά σε αρχιτεκτονικούς περιορισμούς λόγω της ιστορικότητάς τους, γεγονός που εξηγεί το μεγαλύτερο εύρος στο επιπλέον κόστος όσον αφορά τις ενεργειακές επεμβάσεις μεγάλης έντασης στις χώρες αυτές. Τέλος, επειδή ο βαθμός αστικοποίησης είναι μεγαλύτερος στις χώρες της νοτιοανατολικής Ευρώπης εξηγείται το μικρότερο εύρος κόστους για ενεργειακές επεμβάσεις μεγάλης έντασης στις χώρες αυτές, πράγμα που δε συμβαίνει στις χώρες της βόρειας Ευρώπης. Σ' αυτές λόγω του χαμηλότερου βαθμού αστικοποίησης, οι εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης απαιτούν τη μετακίνηση εξειδικευμένου προσωπικού από τα αστικά κέντρα στην επαρχία.

Εικόνα 23: Καμπύλες κόστους-δυναμικού εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, συμπεριλαμβανόμενων των παραγόντων «κρυφού» κόστους για νότιες χώρες



Για τις επενδύσεις σε ενεργειακό εξοπλισμό, τα «κρυφά» επενδυτικά κόστη που συμπεριλαμβάνονται στη μοντελοποίηση και συχνά αγνοούνται στους οικονομοτεχνικούς υπολογισμούς είναι τα κόστη μετάβασης από την αρχική τεχνολογία στην επόμενη και τα κόστη που αντιστοιχούν στο εφεδρικό σύστημα. Η εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 24) παρουσιάζει γραφικά τη συνολική επενδυτική δαπάνη που αντιστοιχεί στην αντικατάσταση συστήματος θέρμανσης με λέβητα πετρελαίου από τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες. Στο σχήμα έχει σκιαγραφηθεί το κάθε μέρος της επενδυτικής δαπάνης, όπως αυτό χωρίζεται μεταξύ της επενδυτικής δαπάνης για αγορά του εξοπλισμού, για μετάβαση από την αρχική τεχνολογία στην τελική και για το εφεδρικό σύστημα, εφόσον αυτό είναι αναγκαίο. Στην εικόνα παρουσιάζονται οι εξής τέσσερις περιπτώσεις:

A. Αντικατάσταση του λέβητα πετρελαίου κεντρικής θέρμανσης με λέβητα φυσικού αερίου κεντρικής θέρμανσης: η αντικατάσταση αυτή είναι (εφόσον το κτήριο έχει πρόσβαση στο δίκτυο φυσικού αερίου), η

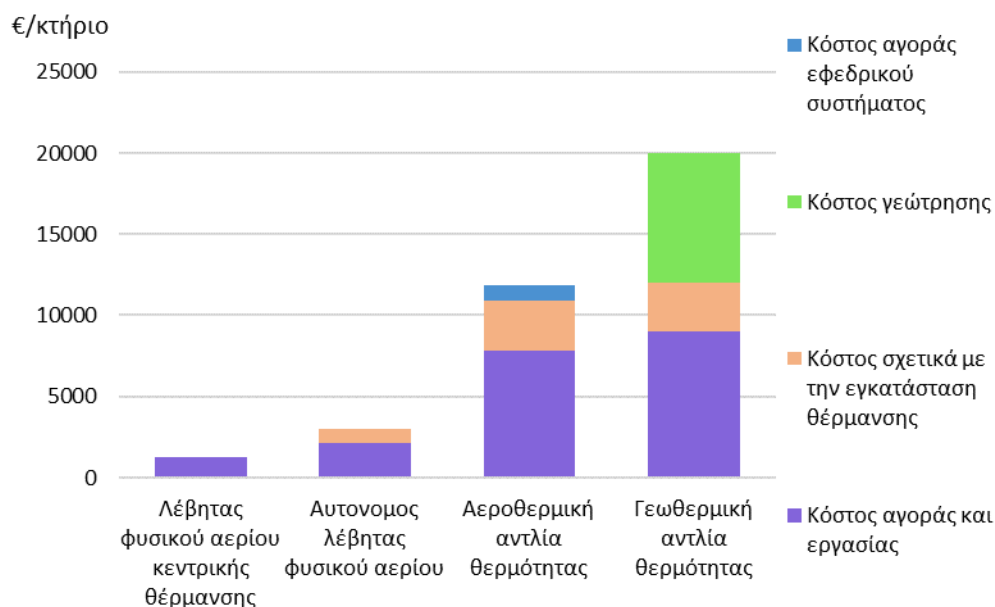
πιο συνήθης αντικατάσταση και η οποία απαιτεί τη λιγότερη επιπλέον επενδυτική δαπάνη. Συγκεκριμένα, η αντικατάσταση αυτή έγκειται επί της ουσίας σε απλή αντικατάσταση του καυστήρα. Δεν απαιτείται αντικατάσταση των τερματικών σωμάτων ούτε των σωληνώσεων.

Β. Αντικατάσταση του λέβητα πετρελαίου κεντρικής θέρμανσης με αυτόνομο λέβητα φυσικού αερίου: Στην περίπτωση αυτή η αντικατάσταση περιλαμβάνει το κόστος αγοράς του αυτόνομου λέβητα, κάποια περιορισμένη διαμόρφωση στις σωληνώσεις, και διατήρηση των τερματικών σωμάτων της αρχικής εγκατάστασης.

Γ. Αντικατάσταση του λέβητα πετρελαίου κεντρικής θέρμανσης με αεροθερμική αντλία θερμότητάς: Στην περίπτωση αυτή η αντικατάσταση περιλαμβάνει το κόστος αγοράς της αντλίας θερμότητας, κάποια περιορισμένη διαμόρφωση των σωληνώσεων και αντικατάσταση των τερματικών σωμάτων (εφόσον πρόκειται και για κτήριο που έχει υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους). Επιπλέον, απαιτείται επένδυση σε εφεδρικό σύστημα θέρμανσης για ορισμένες περιοχές.

Δ. Αντικατάσταση του λέβητα πετρελαίου κεντρικής θέρμανσης με γεωθερμική αντλία θερμότητας: Στην περίπτωση αυτή η αντικατάσταση περιλαμβάνει το κόστος αγοράς της αντλίας θερμότητας, το κόστος γεώτρησης για την εφαρμογή των γεωεναλλακτών θερμότητας, κάποια περιορισμένη διαμόρφωση των σωληνώσεων και αντικατάσταση των τερματικών σωμάτων (εφόσον πρόκειται και για κτήριο που έχει υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους).

Εικόνα 24: Κόστος μετάβασης από λέβητα πετρελαίου κεντρικής θέρμανσης σε άλλες τεχνολογίες θέρμανσης σε κτήριο κατοικίας



Σημείωση: Το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνει το κόστος αντικατάστασης των θερμαντικών σωμάτων ή/και των σωληνώσεων, διάνοιξη καμινάδας κ.ά.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω και όπως φαίνεται και στην εικόνα (Εικόνα 24), ενώ πράγματι το κόστος αγοράς του νέου εξοπλισμού αποτελεί σε όλες τις περιπτώσεις το μεγαλύτερο μέρος της επενδυτικής

δαπάνης, ωστόσο και οι υπόλοιποι παράγοντες επηρεάζουν τη συνολική επενδυτική δαπάνη και αριθμητικά αλλά και «ψυχολογικά», με την έννοια ότι όσο περισσότερες αλλαγές συνεπάγεται μια αντικατάσταση τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η απροθυμία αλλαγής του ενεργειακού εξοπλισμού. Το τελευταίο συνυπολογίζεται στη μοντελοποίηση ως επιπλέον «αντιληπτό κόστος».

Τα «κρυφά» κόστη που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ισχύουν ανεξαρτήτως πλαισίου πολιτικής, δηλαδή ισχύουν εξολοκλήρου είτε προσομοιώνεται με το μοντέλο μια κατάσταση ως έχει είτε προσομοιώνεται μια κατάσταση στην οποία εφαρμόζονται (ισχυρά) μέτρα ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα πολιτικές επιδότησης της επενδυτικής δαπάνης θα πρέπει να εφαρμόζονται επί του συνόλου της επενδυτικής δαπάνης, συμπεριλαμβανομένων δηλαδή των παραγόντων που αναπαριστούν «κρυφά» κόστη.

Σχετικά με την εξέλιξη της τεχνολογικής προόδου, το μοντέλο περιλαμβάνει δύο είδη εμποδίων ως προς αυτό: την απουσία της τεχνικής ωριμότητας για τις πολύ αποδοτικές τεχνολογίες και την αβεβαιότητα για την τεχνική απόδοση των επενδύσεων.

Στην πρώτη περίπτωση περιλαμβάνονται παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευαστική βιομηχανία η οποία έτσι και αλλιώς εξελίσσεται. Η εξέλιξη της βιομηχανίας (ως προς τη διαδικασία παραγωγής, την εκπαίδευση προσωπικού κλπ.), οδηγεί τελικά σε αυτόνομη πρόοδο του κόστους και της αποδοτικότητας των τεχνολογιών. Η εξέλιξη της βιομηχανίας μπορεί να επιταχυνθεί μέσω επενδύσεων στην έρευνα και την ανάπτυξη, τη δημιουργία προγραμμάτων επιμόρφωσης εξειδικευμένου προσωπικού, συμπεριλαμβανομένων στην περίπτωση των επενδύσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια, ενεργειακών επιθεωρητών και τεχνητών. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται ως παράγοντες εκμάθησης από την έρευνα (Learning-by-researching) (LBR).

Στη δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνονται παράγοντες που σχετίζονται με τις οικονομίες κλίμακας, οι οποίες μπορεί να οδηγούν σε μειωμένο κόστος λόγω της συσσωρευμένης εμπειρίας στην παραγωγή ή της δυνατότητας μαζικής παραγωγής ενός συγκεκριμένου προϊόντος. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται ως παράγοντες εκμάθησης από την πράξη (Learning-by-doing) (LBD), και ο ρυθμός βελτίωσής τους επιταχύνεται όταν υπάρχει η πρόβλεψη μιας αγοράς που θα αναπτυχθεί (δηλαδή ότι θα υπάρχει μεγάλη ζήτηση για ένα προϊόν).

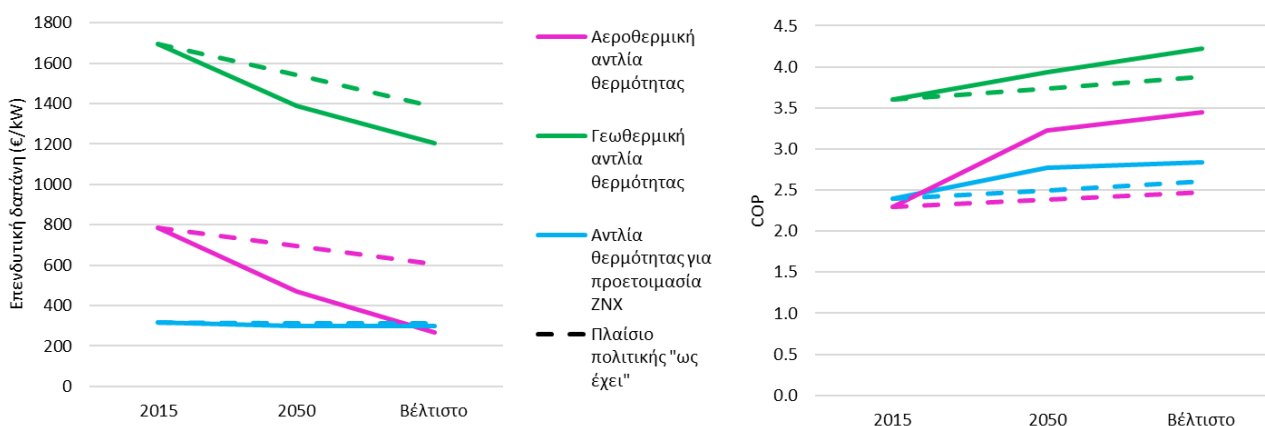
Στην πρώτη περίπτωση, οι παράγοντες εκμάθησης από την έρευνα (LBR) επηρεάζουν το πραγματικό κόστος αγοράς των τεχνολογιών, δηλαδή διαχρονικά οι καταναλωτές αναμένεται να πληρώνουν χαμηλότερο κόστος για τις διάφορες τεχνολογίες, και επιπλέον συγκεκριμένες πολιτικές που στοχεύουν στην έρευνα και ανάπτυξη μπορεί να επιταχύνουν αυτό το ρυθμό μείωσης του κόστους. Το μοντέλο περιλαμβάνει τους παράγοντες αυτούς ρητά στη μαθηματική διατύπωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης και οι αριθμητικές τιμές τους αντλούνται από τη βιβλιογραφία.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι παράγοντες εκμάθησης από την πράξη (LBD) αντιστοιχούν σε «αντιληπτά» κόστη τα οποία μπορεί να μειώνονται σε ένα πλαίσιο στο οποίο εφαρμόζονται ισχυρά μέτρα ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής, όπως για παράδειγμα σε αυτό που ισχύει για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, όπου υπονοείται μια τεχνολογική μεταβολή. Το μοντέλο περιλαμβάνει τους παράγοντες αυτούς μέσω των τιμών των παραγόντων μ στις εξισώσεις (5-16) και (5-39), οι οποίοι εκφράζουν παράγοντες τεχνολογικής αδράνειας (ή ωριμότητας) όσον αφορά την επιλογή ενεργειακών επενδύσεων. Επιπλέον, οι παράγοντες εκμάθησης από την πράξη (LBD) ενσωματώνονται και στον περιορισμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας

σχετικά με το μέγιστο όριο ενεργειακών αναβαθμίσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν κάθε χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, και επειδή για παράδειγμα ο στόχος της κλιματικής ουδετερότητας υπονοεί το μετασχηματισμό του κτηριακού αποθέματος, υποτίθεται ότι σε ένα ισχυρό πλαίσιο ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής γίνεται εκ των προτέρων η πρόβλεψη ότι η αγορά των ενεργειακών αναβαθμίσεων θα επεκταθεί και άρα το οριακό κόστος που αντιστοιχεί στις ενεργειακές αναβαθμίσεις όταν ο όγκος αυτών πλησιάζει το μέγιστο δυνατό όριο, μειώνεται σε σχέση με μια κατάσταση ως έχει.

Η Εικόνα 25 παρουσιάζει την εξέλιξη του κόστους και της απόδοσης (COP) διαφόρων τύπων αντλίας θερμότητας μέσα στο χρόνο (όπως αυτά χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο μοντέλο), τόσο σε ένα πλαίσιο ως έχει όσο και σε ένα ισχυρό πλαίσιο ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής. Η «βέλτιστη» κατάσταση που αναγράφεται στα σχήματα ενσωματώνει αισιόδοξες υποθέσεις τόσο για την αυτόνομη πρόοδο, όσο και για την ύπαρξη μιας αγοράς αρκετά μεγάλης που να μπορεί να οδηγήσει σε μειώσεις κόστους μέσω οικονομιών κλίμακας. Η «βέλτιστη» κατάσταση προσομοιάζει ένα τεχνικό δυναμικό και ένα κατώτατο κόστος.

Εικόνα 25: Εξέλιξη του κόστους και της ενεργειακής απόδοσης (COP) διαφόρων τύπων αντλιών θερμότητας μέσα στο χρόνο



Η έλλειψη πληροφοριών σχετικά με το κόστος και τα οφέλη των βελτιώσεων από την ενεργειακή απόδοση, η έλλειψη γνώσεων σχετικά με τον τρόπο χρήσης των διαθέσιμων πληροφοριών, το υψηλό κόστος συναλλαγής για την απόκτηση αξιόπιστων πληροφοριών όπως επίσης και η αβεβαιότητα σχετικά με τις εξελίξεις του μέλλοντος (συμπεριλαμβανομένου του υψηλού κόστους ευκαιρίας των ιδίων και δανειακών κεφαλαίων) αποτελούν τα βασικά μη-οικονομικά εμπόδια. Το μοντέλο, αντλώντας δεδομένα και από την οικονομική βιβλιογραφία πάνω «στο παράδοξο των μη ορθολογικών αποφάσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα», χρησιμοποιεί για να αναπαραστήσει τα μη-οικονομικά εμπόδια, (υψηλά) υποκειμενικά προεξοφλητικά επιτόκια.

Επίσης για να συμπεριληφθεί στη μοντελοποίηση η επίδραση του εισοδήματος και άρα η δυνατότητα πρόσβασης σε χρηματοδότηση καθώς, και συμπεριφορές αποστροφής ως προς τον κίνδυνο που σχετίζονται με πιθανή οικονομική αποτυχία της επένδυσης, τα υποκειμενικά προεξοφλητικά επιτόκια έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το εισόδημα, όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 2.

Η υπόθεση της ύπαρξης ισχυρών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων, υπονοεί την άρση των μη-οικονομικών εμποδίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επιπλέον, η

ύπαρξη στοχευμένων μέτρων πολιτικής, κυρίως διαφημιστικών εκστρατειών και προγραμμάτων επισήμανσης, μπορούν να συμβάλουν στην περαιτέρω άρση των εμποδίων που σχετίζονται με την πληροφόρηση και την αβεβαιότητα. Στο μοντέλο, η άρση των μη-οικονομικών εμποδίων αναπαρίσταται μέσω της μείωσης των προεξοφλητικών επιτοκίων. Ο Πίνακας 18 που ακολουθεί δίνει το εύρος της μείωσης για κάθε εισοδηματική κλάση στον οικιακό τομέα και στα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών. Η μείωση αυτή δεν είναι απαραίτητο να είναι της ίδιας έντασης για όλες τις κατηγορίες αναπαριστώντας έτσι και στοχευμένες πολιτικές ανά κατηγορία. Σε κάθε περίπτωση, η μείωση των προεξοφλητικών επιτοκίων μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας και τελικά στην επιλογή στρατηγικών (είτε ενεργειακής αναβάθμισης είτε επιλογής του ενεργειακού εξοπλισμού), που υπό άλλες συνθήκες δε θα επιλέγονταν.

Πίνακας 18: Εύρος της τελικής τιμής των επιτοκίων προεξόφλησης χάρη στην ύπαρξη πλαισίου πολιτικής που αίρει τα μη-οικονομικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα

| | Απόφαση για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού για θερμικές χρήσεις | Επιλογή ηλεκτρικών συσκευών |
|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| Οικιακός τομέας | | |
| Νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος | 13%-10% | 11.5%-9% |
| Νοικοκυριά μεσαίου εισοδήματος | 12%-9.5% | 10.5%-8.5% |
| Νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος | 10%-8.5% | 10%-7.5% |
| Τομέας Υπηρεσιών | 10%-9% | |

Το μοντέλο ενσωματώνει την επίδραση των μη-οικονομικών εμποδίων και μέσω των παραγόντων θ που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις (5-16) και (5-39) και επηρεάζουν το ρυθμό υιοθέτησης των βέλτιστων συχνοτήτων. Ένα ισχυρό πλαίσιο πολιτικής, όπως για παράδειγμα, η ένταξη των κτηρίων στο ΣΕΔΕ, μπορεί να οδηγήσει στην επιτάχυνση του ρυθμού υιοθέτησης των βέλτιστων συχνοτήτων (στη μείωση του παράγοντα θ). Επιπλέον, και όπως ήταν και η περίπτωση σχετικά με τα προεξοφλητικά επιτόκια, η ύπαρξη στοχευμένων πολιτικών που αφορούν στην προώθηση της πληροφόρησης σχετικά με τα οφέλη της ενεργειακής αποδοτικότητας μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση των παραγόντων θ .

6.1.3. Ευαισθησία των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου ως προς τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα

Για να παρουσιαστεί η επίδραση των παραγόντων που αναπαριστούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα στις αποφάσεις ενεργειακής εξοικονόμησης, αντιπαραβάλλονται στην υπό-ενότητα αυτή, τα αποτελέσματα του μοντέλου στο πλαίσιο δυο διαφορετικών καταστάσεων.

Οι καταστάσεις αυτές προσομοιώνονται στη μοντελοποίηση ως δύο ξεχωριστά σενάρια μακροχρόνιας στρατηγικής. Για το κάθε σενάριο γίνονται υποθέσεις σχετικά με την εφαρμογή μέτρων πολιτικής που θα συμβάλουν στην επίτευξη ενεργειακών ή/και κλιματικών στόχων. Τελικά, δηλαδή η ανάλυση στην παρούσα υπό-ενότητα, έγκειται στην αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου για δύο σενάρια μακροχρόνιας στρατηγικής.

Και στα δύο σενάρια, τίθεται κλιματικός στόχος για δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ από τα κτήρια μέχρι το 2050, τέτοια που να συμβαδίζει με την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο ενεργειακό σύστημα μέχρι το 2050. Επιπλέον, τίθεται στόχος (κατ' ελάχιστον) διπλασιασμού του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων και στους δύο τομείς, σε σχέση με τη σημερινή κατάσταση.

Στην πρώτη περίπτωση (σενάριο «χωρίς εμπόδια») υποτίθεται ότι ισχύει σε όλη τη διάρκεια της περιόδου προβολής (δηλαδή στο διάστημα 2021-2050) ένα ισχυρό πλαίσιο πολιτικής στο ενεργειακό σύστημα, τέτοιο που να εξασφαλίζει την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050. Στο πλαίσιο αυτό, υποτίθεται ότι ισχύουν συγκεκριμένα οικονομικά μέτρα για τον κτηριακό τομέα. Συγκεκριμένα, υποτίθεται:

α. η ένταξη του κτηριακού τομέα σε ένα νέο χωριστό ΣΕΔΕ. Ορίζεται φόρος για τις εκπομπές CO₂ που ξεκινάει από 30€/tCO₂ το 2025 και καταλήγει σε περισσότερο από 400€/tCO₂ στο τέλος της περιόδου προβολής.

β. η ύπαρξη οικονομικών κινήτρων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων, που αναπαρίσταται στο μοντέλο μέσω του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (energy efficiency value). Η τιμή του έμμεσου χρηματικού οφέλους ξεκινάει από 300 €/ (toe-εξοικονομούμενης ενέργειας) το 2025 και καταλήγει σε περισσότερο από 1900€/ (toe-εξοικονομούμενης ενέργειας) στο τέλος της περιόδου προβολής.

γ. η ύπαρξη οικονομικών κινήτρων για την επιλογή συγκεκριμένων τεχνολογιών ή/ και καυσίμων που μπορούν να συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του συνολικού δείκτη για την επίδοση σχετικά με τις ΑΠΕ, που αναπαρίσταται στο μοντέλο, μέσω του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο κόστος καυσίμου (renewable value). Η τιμή του έμμεσου χρηματικού οφέλους ξεκινάει από 600 €/ (toe- ενέργειας από ΑΠΕ) το 2025 και καταλήγει σε περισσότερο από 800 €/ (toe-ενέργειας από ΑΠΕ) στο τέλος της περιόδου προβολής.

Επιπλέον, υποτίθεται η ύπαρξη του απαραίτητου ρυθμιστικού πλαισίου που εξασφαλίζει ότι όλα τα νέα κτήρια θα συμμορφώνονται με τους οικοδομικούς κανονισμούς και ότι οι οικοδομικοί κανονισμοί γίνονται διαχρονικά πιο αυστηροί σε σχέση με αυτούς που ορίζονται από την τωρινή νομοθεσία.

Πέραν των οικονομικών μέτρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υποτίθεται επιπλέον η εφαρμογή θεσμικών μέτρων που στοχεύουν στην πληροφόρηση και στην ενημέρωση των καταναλωτών. Συγκεκριμένα, υποτίθεται:

α. η επιτυχής εφαρμογή των Άρθρων 8-12 της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση που στοχεύουν στην ενημέρωση και πληροφόρηση των τελικών καταναλωτών

β. η επιτυχής εφαρμογή των Άρθρων 10-18 της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων που στοχεύουν στην ενημέρωση και πληροφόρηση των τελικών καταναλωτών

γ. η επιτυχής εφαρμογή της Οδηγίας για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην πρώτη αυτή περίπτωση υποτίθεται ότι έχουν αρθεί απολύτως τα μη-οικονομικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα, τόσο μέσω του ισχυρού πλαισίου ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής που διαμορφώνουν τα οικονομικά μέτρα, όσο και μέσω των επιπλέον μέτρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Στη δεύτερη περίπτωση (σενάριο «με εμπόδια»), υποτίθεται ότι ισχύουν ακριβώς τα οικονομικά μέτρα της πρώτης περίπτωσης, διότι αυτά πράγματι μπορεί να επιτύχουν τους συγκεκριμένους κλιματικούς και ενεργειακούς στόχους που έχουν τεθεί. Ταυτόχρονα, όμως, υποτίθεται ότι τα μέτρα αυτά δεν διαμορφώνουν ένα ισχυρό πλαίσιο πολιτικής στο ενεργειακό σύστημα και γι' αυτό δεν καταφέρνουν να άρουν απολύτως τα μη-οικονομικά εμπόδια. Επιπλέον, υποτίθεται ότι δεν έχουν καμία εφαρμογή τα θεσμικά μέτρα της πρώτης περίπτωσης. Ο σκοπός της εξέτασης μια τέτοιας κατάστασης είναι εξολοκλήρου θεωρητικός γιατί, η φιλοσοφία της μοντελοποίησης είναι ότι ένα ισχυρό πλαίσιο πολιτικής (όπως αυτό που διαμορφώνεται όταν υπάρχει στόχος για κλιματική ουδετερότητα) διαμορφώνει τις κατάλληλες συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος της άρσης των θεσμικών εμποδίων, πληροφόρησης και αβεβαιότητας.

Ο σκοπός της αντιπαραβολής των δύο αυτών καταστάσεων, μέσω των αποτελεσμάτων του μοντέλου, είναι να παρουσιάσει το βαθμό που επηρεάζουν τα οικονομικά μέτρα πολιτικής την εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, εάν δεν έχουν αρθεί τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Ή διαφορετικά ο σκοπός της αντιπαραβολής είναι να παρουσιαστεί σε τι βαθμό επηρεάζουν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα τις σχετικές αποφάσεις και εάν πράγματι μπορούν να συσχετιστούν με την απροθυμία των καταναλωτών να επενδύουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

Πίνακας 19: Προβολές για την ενέργεια και τις εκπομπές CO₂ στον οικιακό τομέα στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια»

| ΕΕ | 2015 | 2020 | Σενάριο «χωρίς εμπόδια» | Σενάριο «με εμπόδια» |
|--|------|------|-------------------------|----------------------|
| | | | Περίοδος προβολής | |
| Μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους | 0.68 | 0.95 | 1.90 | 1.28 |
| Ένταση ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος του κτηρίου (% εξοικονόμηση ωφέλιμης ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση) | 11% | 28% | 54% | 39% |
| Μέσος ετήσιος ρυθμός αντικατάστασης εξοπλισμού για θέρμανση | 1.57 | 2.83 | 3.03 | 2.49 |
| Ποσοστό ηλεκτρικών συσκευών τουλάχιστον ενεργειακής κλάσης A | 7% | 11% | 28% | 24% |
| Ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας για θέρμανση (kWh/m ²) % μεταβολή από το 2015 | 77 | 79 | 54 | 65 |
| Μέση ετήσια απόδοση ενεργειακών εξοπλισμών κτηρίων για θέρμανση | 0.70 | 0.75 | 1.07 | 0.88 |
| Τελική κατανάλωση ενέργειας σε όλες τις θερμικές χρήσεις ανά μονάδα επιφάνειας κτηρίου (kWh/m ²) % μεταβολή από το 2015 | 113 | 116 | 81 | 94 |
| Εκπομπές CO ₂ (MtCO ₂) % μεταβολή από το 2015 | 312 | 304 | 39 | 127 |
| | 0% | -2% | -88% | -59% |

Οι Πίνακες 19 και 20 περιλαμβάνουν συνοπτικά αποτελέσματα που αφορούν στη ζήτηση ενέργειας και στις εκπομπές CO₂, στις δύο αντιπαραβαλλόμενες καταστάσεις, για τον οικιακό τομέα και των τομέα των υπηρεσιών αντίστοιχα.

Πίνακας 20: Προβολές για την ενέργεια και τις εκπομπές CO₂ στον τομέα των υπηρεσιών στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια»

| ΕΕ | 2015 | 2020 | Σενάριο «χωρίς εμπόδια» | Σενάριο «με εμπόδια» |
|--|------|------|-------------------------------|-------------------------|
| | | | Περίοδος προβολής | |
| Μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους | 0.39 | 0.54 | 1.13 | 0.76 |
| Ένταση ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος του κτηρίου (% εξοικονόμηση ωφέλιμης ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση) | 14% | 27% | 39% | 29% |
| Μέσος ετήσιος ρυθμός αντικατάστασης εξοπλισμού για θέρμανση | 2.26 | 4.25 | 3.43 | 3.13 |
| Ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας για θέρμανση (kWh/m ²) | 116 | 99 | 110 | 118 |
| % μεταβολή από το 2015 | 0% | -14% | -4% | 2% |
| Μέση ετήσια απόδοση ενεργειακών εξοπλισμών κτηρίων για θέρμανση | 0.80 | 0.84 | 1.31 | 1.02 |
| Τελική κατανάλωση ενέργειας σε όλες τις θερμικές χρήσεις ανά μονάδα επιφανείας κτηρίου (kWh/m ²) | 195 | 146 | 155 | 169 |
| % μεταβολή από το 2015 | 0% | -25% | -20% | -13% |
| Εκπομπές CO ₂ (MtCO ₂) | 142 | 107 | 21 | 60 |
| % μεταβολή από το 2015 | 0% | -25% | -85% | -58% |

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ενώ το σενάριο «χωρίς εμπόδια» επιτυγχάνει και τον κλιματικό και τον ενεργειακό στόχο, και στους δύο τομείς, το σενάριο «με εμπόδια» αποτυγχάνει απολύτως. Συγκεκριμένα, και στους δύο τομείς οι εκπομπές CO₂ είναι στο σενάριο «με εμπόδια» σχεδόν τριπλάσιες από ό, τι στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και ο ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους είναι σχεδόν υποδιπλάσιος στο σενάριο «με εμπόδια» σε σχέση με το σενάριο «χωρίς εμπόδια».

Η τεχνική αβεβαιότητα και η αβεβαιότητα ως προς το μέλλον όπως και η έλλειψη πληροφόρησης που έχουν αναπαρασταθεί στο σενάριο «με εμπόδια» από τη διατήρηση των υποκειμενικών προεξοφλητικών επιτοκίων στην αρχική τους (υψηλή) τιμή, εξηγούν τον υποδιπλασιασμό του ρυθμού και της έντασης της ενεργειακής αναβάθμισης. Βέβαια, επειδή στο σενάριο εφαρμόζεται και ο φόρος για τις εκπομπές CO₂ αλλά και το έμμεσο χρηματικό όφελος που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (energy efficiency value), ο ρυθμός αλλά και η ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους είναι μεγαλύτερα από τις ιστορικές (2015) ή σημερινές τιμές (2020). Η περιορισμένη ενεργειακή αναβάθμιση (τόσο ως προς το ρυθμό όσο και ως προς την ένταση), εξηγεί και το χαμηλότερο ρυθμό αντικατάστασης του εξοπλισμού για θέρμανση. Ο οποίος επιπλέον επηρεάζεται και από τους παράγοντες τεχνικής αβεβαιότητας και έλλειψης πληροφόρησης.

Ο Πίνακας 21 παρουσιάζει το πλήθος κτηρίων κατοικίας ανά τεχνολογία θέρμανσης. Ο περιορισμένος ρυθμός αντικατάστασης του εξοπλισμού για θέρμανση αποτυπώνεται και στο μείγμα τεχνολογιών για θέρμανση: στο σενάριο «με εμπόδια», υπάρχει μικρότερη μετακίνηση προς αποδοτικές τεχνολογίες ή καθαρές τεχνολογίες σε σχέση με το σενάριο «χωρίς εμπόδια», κάτι που εξηγείται από την επιμονή των εμποδίων τεχνικής αβεβαιότητας σε αυτή την περίπτωση. Βέβαια η εφαρμογή του φόρου για τις εκπομπές CO₂, έχει οπωσδήποτε οδηγήσει σε μια στροφή από τα καύσιμα με υψηλές εκπομπές CO₂ (πχ πετρέλαιο), προς άλλα με χαμηλότερες (πχ. αέριο) ή και καθόλου, σε σχέση με τη σημερινή κατάσταση.

Μεταξύ των παραγόντων που υποτίθεται ότι δεν έχουν περιοριστεί στο σενάριο «με εμπόδια» είναι και οι παράγοντες εκμάθησης. Η διατήρηση των παραγόντων αυτών εξηγεί και την περιορισμένη διείσδυση των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών στα κτήρια αλλά και το χαμηλότερο ποσοστό ηλεκτρικών συσκευών πολύ υψηλής ενεργειακής κλάσης.

Πίνακας 21: Προβολές ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια κατοικίας στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια»

| ΕΕ | 2015 | 2020 | Σενάριο «χωρίς εμπόδια» | Σενάριο «με εμπόδια» |
|---|-------|-------|-------------------------------|----------------------------|
| | | | Περίοδος προβολής | |
| Πλήθος κτηρίων κατοικίας ανά τεχνολογία θέρμανσης (χιλ. κτήρια) | | | | |
| Λέβητες συμβατικοί | | | | |
| αερίου | 28186 | 29935 | 24790 | 27393 |
| πετρελαίου | 16185 | 14751 | 354 | 6268 |
| Λέβητες τεχνολογίας συμπύκνωσης | | | | |
| αερίου | 18101 | 19224 | 15648 | 17883 |
| πετρελαίου | 7315 | 6667 | 414 | 3637 |
| Αυτόνομο σύστημα αερίου | 29566 | 31400 | 22901 | 27979 |
| Αντλίες θερμότητας | 9622 | 10279 | 53858 | 33729 |
| Λέβητας βιομάζας | 46622 | 48072 | 43183 | 44685 |
| Γεωθερμία | 39 | 42 | 225 | 268 |
| Διανεμόμενη θερμότητα | 17534 | 18513 | 32787 | 29726 |
| Αυτόνομες συσκευές μερικής θέρμανσης χώρων | 12930 | 11801 | 1736 | 4329 |

Οι Πίνακες 22 και 23, δείχνουν την επίπτωση της άρσης των εμποδίων στο ετήσιο κόστος απόκτησης ωφέλιμων ενεργειακών υπηρεσιών από τους καταναλωτές του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών, αντίστοιχα.

Τα πάγια ετήσια κόστη για τις επενδύσεις (CAPEX), είναι χαμηλότερα στο σενάριο «με εμπόδια» σε σχέση με το σενάριο «χωρίς εμπόδια». Ειδικά τα πάγια ετήσια κόστη για τις επενδύσεις που αφορούν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους είναι σημαντικά χαμηλότερα όταν παραμένουν τα εμπόδια, όπως είναι αναμενόμενο άλλωστε. Από την άλλη, τα μεταβλητά ετήσια κόστη για αγορά ενέργειας (OPEX) είναι σαφώς μεγαλύτερα στο σενάριο «με εμπόδια», σε σχέση με το σενάριο «χωρίς εμπόδια», λόγω και της υψηλότερης ωφέλιμης ενέργειας (λόγω του χαμηλότερου ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης), αλλά και του χαμηλότερου ρυθμού αντικατάστασης του εξοπλισμού.

Τελικά, και επειδή τα πάγια ετήσια κόστη για τις επενδύσεις είναι σημαντικά λιγότερα σε σχέση με το πόσο μεγαλύτερα είναι τα μεταβλητά κόστη για αγορά ενέργειας, το συνολικό ετήσιο κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες (Paltsev & Carros, 2013) είναι χαμηλότερο στο σενάριο «με εμπόδια» σε σχέση με το σενάριο «χωρίς εμπόδια». Συνεπώς και το ετήσιο κόστος εξυπηρέτησης κεφαλαίου ανά μονάδα δαπάνης για αγορά ενέργειας είναι μεγαλύτερο στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» σε σχέση με το σενάριο «με εμπόδια». Βέβαια, αν ως μέσο της αποτελεσματικότητας, ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα του κάθε σεναρίου, υπολογιστεί το συνολικό κόστος ανά μονάδα εξοικονομούμενης ενέργειας, είναι φανερό ότι και στον οικιακό και στον τομέα των υπηρεσιών, ο δείκτης αυτός είναι διπλάσιος στο σενάριο «με εμπόδια» από το σενάριο «χωρίς εμπόδια».

Πίνακας 22: Κόστη στον οικιακό τομέα στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» και στο σενάριο «με εμπόδια»

| ΕΕ | 2015 - 2020 | Σενάριο «χωρίς εμπόδια» | Σενάριο «με εμπόδια» |
|---|-------------|-------------------------------|-------------------------|
| | | Περίοδος προβολής | |
| Πάγια ετήσια κόστη για επενδύσεις (CAPEX) (δισ. €) | 136 | 340 | 295 |
| Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους | 15 | 119 | 85 |
| Για την αγορά εξοπλισμού | 121 | 221 | 210 |
| Για θέρμανση και ψύξη | 29 | 75 | 70 |
| Για ηλεκτρικές συσκευές και φωτισμό | 93 | 145 | 140 |
| Μεταβλητά ετήσια κόστη για αγορά ενέργειας (OPEX) (δισ. €) | 266 | 276 | 285 |
| Συνολικό ετήσιο κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες (δισ. €) | 402 | 616 | 580 |
| Συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες ανά κτήριο (ετήσιο στην περίοδο, €/κτήριο) | 2132 | 3147 | 2960 |
| Ετήσιο κόστος εξυπηρέτησης κεφαλαίου ανά μονάδα δαπάνης για αγορά ενέργειας (λόγος CAPEX/OPEX) | 51% | 123% | 103% |
| Δείκτης αποτελεσματικότητας ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα (€/εξοικ. kWh) | | 0.36 | 0.68 |

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η ένταση των μέτρων οικονομικής πολιτικής δε θα ήταν αρκετή για να οδηγήσει στην επίτευξη των συγκεκριμένων κλιματικών και ενεργειακών στόχων, εάν το πλαίσιο που διαμορφώνουν οι πολιτικές αυτές ως προς την τεχνική και οικονομική αβεβαιότητα και την έλλειψη πληροφόρησης δεν ήταν αρκετό ώστε να έχουν αρθεί τα σχετικά εμπόδια.

Η αποτυχία του σεναρίου «με εμπόδια» μπορεί τελικά να ερμηνευθεί με δύο τρόπους:

- Εάν στη μοντελοποίηση δεν είχαν συμπεριληφθεί τα μη-οικονομικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα, τα αποτελέσματα του σεναρίου μπορεί να αντιστοιχούσαν σε προβολές της ενεργειακής ζήτησης που επιτυγχάνουν τους ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους. Όμως, αυτό δεν θα ήταν εφικτό στην πραγματικότητα. Δηλαδή εάν στην πράξη εφαρμόζονταν τα οικονομικά μέτρα που υποθέτει το σενάριο, αυτά δεν θα οδηγούσαν στην κινητοποίηση των απαραίτητων επενδύσεων σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων και αντικατάσταση του ενεργειακού εξοπλισμού, τέτοιων που ο τομέας των κτηρίων να πετύχαινε τους δεδομένους ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους, διότι στην πραγματικότητα οι αποφάσεις των καταναλωτών επηρεάζονται από τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα.
- Εάν η μοντελοποίηση, ενώ έχει συμπεριλάβει τα μη-οικονομικά στην ενεργειακή αποδοτικότητα, μέσω των παραγόντων «κρυφού» και «αντιληπτού» κόστους, ωστόσο δε λάμβανε υπόψη ότι ένα ισχυρό πλαίσιο ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής, και επιπλέον η υπόθεση αποτελεσματικής εφαρμογής των θεσμικών μέτρων, μπορούν να διαμορφώσουν τις κατάλληλες «συνθήκες μόχλευσης - εναύσματος» που αίρουν τα εμπόδια πληροφόρησης και αβεβαιότητας, τότε θα δινόταν η εντύπωση ότι τα οικονομικά και ρυθμιστικά μέτρα δεν είναι αρκετά σε ένταση και άρα τελικά το πλαίσιο της πολιτικής είναι αναποτελεσματικό.

Και οι δύο ερμηνείες, υποδηλώνουν τη σημαντική συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των μέτρων πολιτικής και των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα και τελικά στην αποτελεσματική χάραξη ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής.

Πίνακας 23: Κόστη στον τομέα των υπηρεσιών στο σενάριο χωρίς εμπόδια και στο σενάριο με εμπόδια

| ΕΕ | 2015 - 2020 | Σενάριο «χωρίς εμπόδια» | Σενάριο «με εμπόδια» |
|--|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| | | Περίοδος προβολής | |
| Πάγια ετήσια κόστη για επενδύσεις (CAPEX) (δισ. €) | 29 | 101 | 93 |
| Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους | 2 | 20 | 16 |
| Για την αγορά εξοπλισμού | 26 | 80 | 77 |
| Για θέρμανση και ψύξη | 18 | 64 | 61 |
| Για ηλεκτρικές συσκευές και φωτισμό | 8 | 16 | 16 |
| Μεταβλητά ετήσια κόστη για αγορά ενέργειας (OPEX) (δισ. €) | 160 | 180 | 184 |
| Συνολικό ετήσιο κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες (δισ. €) | 189 | 281 | 277 |
| Συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες ανά κτήριο (ετήσιο στην περίοδο, €/κτήριο) | 21034 | 30841 | 30409 |
| Ετήσιο κόστος εξυπηρέτησης κεφαλαίου ανά μονάδα δαπάνης για αγορά ενέργειας (λόγος CAPEX/OPEX) | 18% | 56% | 50% |
| Δείκτης αποτελεσματικότητας ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα (€/εξοικ. kWh) | | 0.45 | 0.78 |

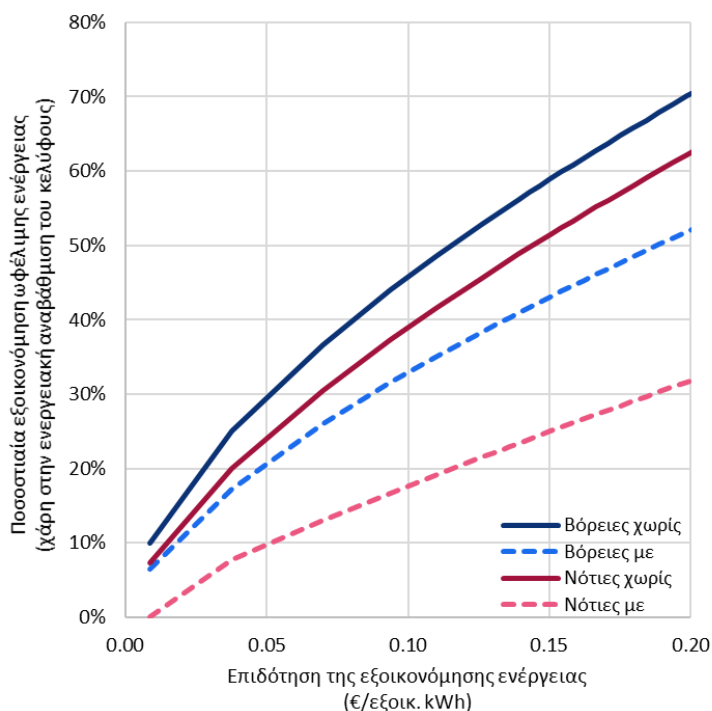
6.1.4. Αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου

Στην υπό-ενότητα αυτή παρουσιάζεται η αιτιοκρατική σχέση μεταξύ των μέτρων πολιτικής και δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας σε δύο καταστάσεις (όπως και προηγουμένως): σε μία κατάσταση όπου δεν αίρονται τα μη-οικονομικά εμπόδια και σε μία που αίρονται. Η συσχέτιση αυτή αναπαρίσταται γραφικά. Τα γραφήματα αναπαριστούν τους γεωμετρικούς τόπους των σημείων που συσχετίζουν τα εκάστοτε μέτρα με τους διάφορους δείκτες, όπως αυτοί έχουν προκύψει από τα αποτελέσματα του μοντέλου: κάθε σημείο των γεωμετρικών τόπων (δηλαδή των καμπυλών) που αναπαριστούν τη συσχέτιση μεταξύ των μέτρων πολιτικής και των δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας σε κάθε κατάσταση («με» ή «χωρίς εμπόδια»), είναι αποτέλεσμα εφαρμογής του μοντέλου σε διάφορα σενάρια όπως αυτά που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, για τα οποία υποτίθεται η εφαρμογή διαφόρων μέτρων πολιτικής κλιμακούμενης έντασης. Με άλλα λόγια, οι καμπύλες που παρουσιάζονται δε χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο μοντέλο, αλλά έχουν κατασκευασθεί εκ των υστέρων χρησιμοποιώντας δεδομένα εισόδου του μοντέλου (δηλαδή την ένταση των μέτρων πολιτικής) και δεδομένα εξόδου (δηλαδή τους δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας), προκειμένου να παρουσιαστεί γραφικά η επίπτωση των παραμέτρων κόστους που ποσοτικοποιούν τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα στις αποφάσεις ενεργειακής αποδοτικότητας.

Η Εικόνα 26 αναπαριστά τη συσχέτιση μεταξύ του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (energy efficiency value) (επιδότηση της εξοικονόμησης ενέργειας) και της αποδοτικότητας στο κέλυφος, δηλαδή της εξοικονόμησης ωφέλιμης θερμικής ενέργειας χάρη σε επενδύσεις στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους. Οι μεγάλες τιμές εξοικονόμησης αντιστοιχούν σε ενεργειακές αναβαθμίσεις μεγάλης έντασης (deep renovation). Η συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών παραγόντων είναι διαφορετική στις βρειότερες χώρες σε σχέση με τις πιο νότιες, όπου οι ανάγκες θέρμανσης είναι χαμηλότερες. Και στις δύο περιοχές όμως η άρση των εμποδίων επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερης εξοικονόμησης με χαμηλότερη τιμή επιδότησης, δηλαδή οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» έχουν μετατεθεί προς τα αριστερά και πάνω.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 26, η επίδραση των εμποδίων είναι πιο έντονη στις νότιες χώρες, που έχουν χαμηλότερη ζήτηση για θέρμανση, γι' αυτό και οι δύο καμπύλες («Νότιες χωρίς» και «Νότιες με» εμπόδια) αποκλίνουν περισσότερο σε σχέση με αυτές που αντιστοιχούν στις βόρειες χώρες («Βόρειες χωρίς» και «Βόρειες με» εμπόδια). Με άλλα λόγια, η άρση των εμποδίων είναι συγκριτικά περισσότερο απαραίτητη στις νότιες χώρες, ώστε να μη χρειάζεται οι επιδοτήσεις να έχουν μια υπερβολική τιμή. Το γεγονός ότι οι ανάγκες θέρμανσης είναι μεγαλύτερες στις βόρειες χώρες σε σχέση με τις νότιες, εξηγεί επίσης το ότι οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις βόρειες χώρες είναι και στις δύο περιπτώσεις («χωρίς» και «με» εμπόδια) πιο αριστερά και πιο πάνω από τις αντίστοιχες για τις νότιες χώρες: η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας χάρη στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους είναι εξαρχής πιο οικονομικά αποδοτική στις βόρειες χώρες, σε σχέση με τις νότιες, και άρα οι επιδοτήσεις κατάλληλου ύψους μπορούν αμέσως να υποκινήσουν τις σχετικές επενδύσεις.

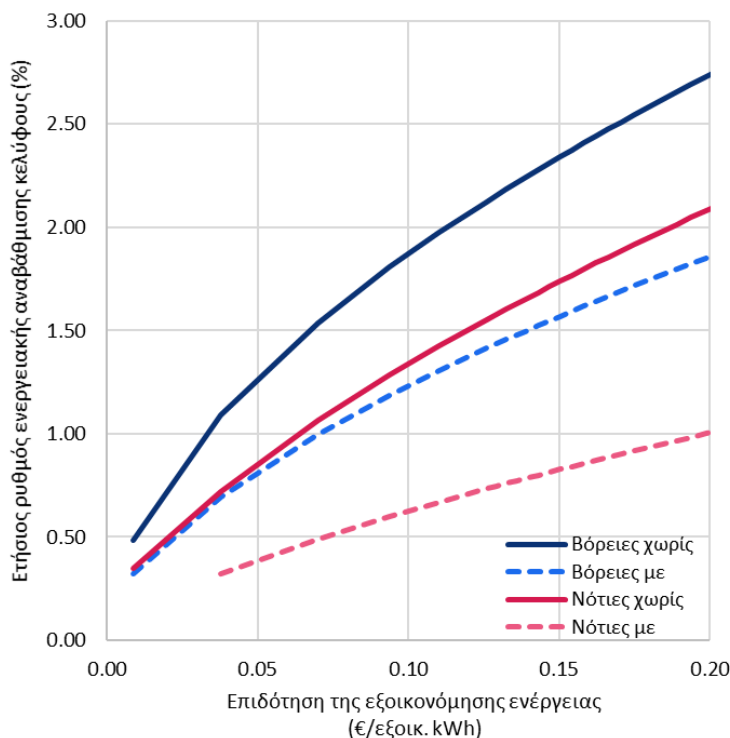
Εικόνα 26: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και της αποδοτικότητας στο κέλυφος για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)



Η Εικόνα 27 αναπαριστά τη συσχέτιση μεταξύ του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (επιδότηση της εξοικονόμησης ενέργειας) και του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Η άρση των εμποδίων σε αυτήν την περίπτωση περιλαμβάνει και την κατάλληλη προετοιμασία της κατασκευαστικής βιομηχανίας όσον αφορά την ύπαρξη αρκετών εξειδικευμένων συνεργείων που να μπορούν να αναλάβουν εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης χωρίς να υπάρχει συμφόρηση στην αγορά. Και σε αυτήν την περίπτωση η συσχέτιση μεταξύ των δύο παραγόντων που παρουσιάζεται γραφικά διαφοροποιείται μεταξύ των βόρειων και νότιων χωρών. Όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως ισχύουν και εδώ. Επιπλέον αυτών, οι καμπύλες που αναπαριστούν τη συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους στις βόρειες χώρες έχουν μεγαλύτερη κλίση από τις αντίστοιχες για τις νότιες χώρες, με την

έννοια ότι ακόμα και χαμηλά ποσά επιδότησης μπορεί να υποκινήσουν επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Το τελευταίο μάλιστα ισχύει στις βόρειες χώρες για τις περισσότερες κατηγορίες κτηρίων, κάτι που δεν ισχύει στις νότιες χώρες, στις οποίες ακριβώς λόγω των χαμηλότερων αναγκών θέρμανσης αλλά και της κατανομής του πληθυσμού (για παράδειγμα στην Ελλάδα το 20% των νοικοκυριών ανήκει στην κατηγορία πολύ χαμηλού εισοδήματος, ενώ στην Ολλανδία το αντίστοιχο ποσοστό είναι 15%), η αύξηση του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης απαιτεί πολύ μεγαλύτερα ποσά επιδότησης. Η συγκεκριμένη διαπίστωση έχει σημασία, ειδικά εάν η ενεργειακή πολιτική στρέφεται στην υιοθέτηση στόχου για το ρυθμό ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η συσχέτιση μεταξύ του ποσού της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα υπονοεί ότι δεν θα ήταν δυνατόν να επιτευχθεί ένας ευρωπαϊκός στόχος εάν όλα τα κράτη μέλη επιδοτούσαν με το ίδιο ποσό την εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά θα έπρεπε το μέτρο αυτό να διαφοροποιηθεί ανά κράτος μέλος.

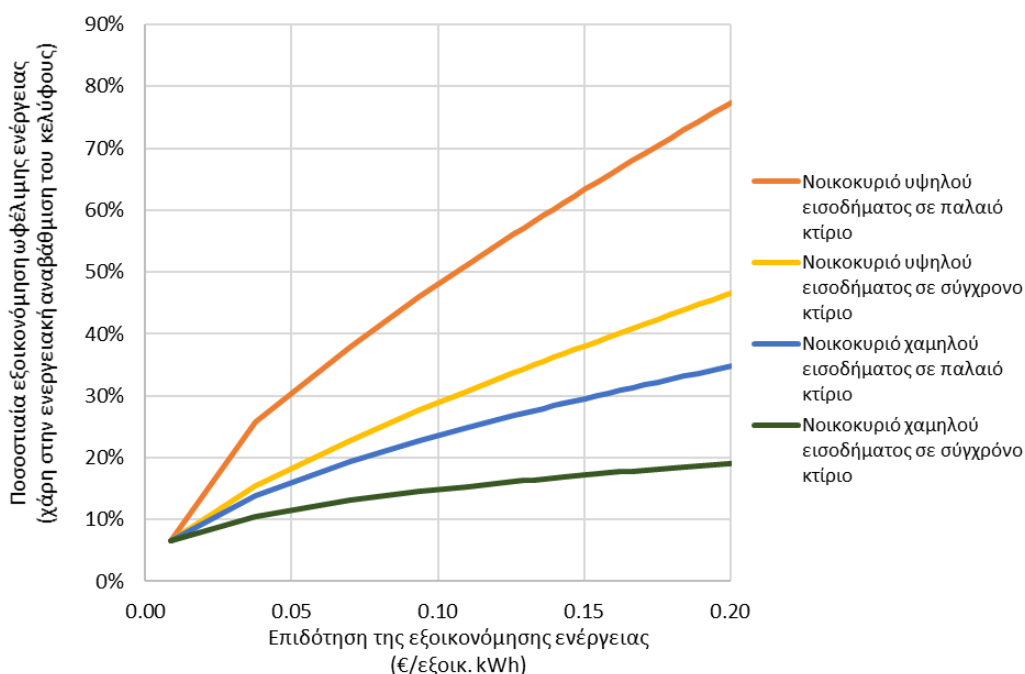
Εικόνα 27: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)



Η Εικόνα 28 απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (επιδότηση της εξοικονόμησης ενέργειας) και της αποδοτικότητας στο κέλυφος για διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών. Στο σχήμα φαίνεται ότι επειδή τα «αντιληπτά» κόστη που σχετίζονται με το εισόδημα μετακινούν τις καμπύλες κόστους-ενεργειακής εξοικονόμησης (βλ. Εικόνα 9) προς τα αριστερά και πάνω, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος θα χρειάζονται υψηλότερες επιδοτήσεις για να επιτύχουν το ίδιο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας από αυτές που χρειάζονται τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος (για κτήρια ίδιας ηλικίας). Μια αύξηση του μοναδιαίου

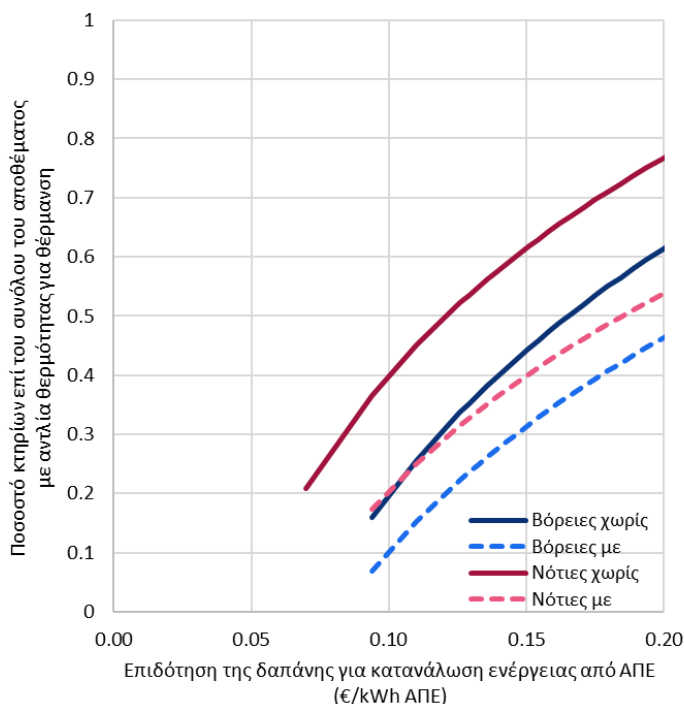
κόστους της επενδυτικής δαπάνης για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους που αντιστοιχεί σε επιπλέον ενεργειακή εξοικονόμηση, όταν τα προεξοφλητικά επιτόκια είναι υψηλά αντικατοπτρίζοντας υποκειμενικούς παράγοντες (δηλαδή στα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος), προκαλεί αύξηση του κόστους των ιδίων κεφαλαίων και τα ασφάλιστρα κινδύνου συνεπάγονται μετατόπιση των καμπυλών κόστους-ενεργειακής εξοικονόμησης προς τα αριστερά και πάνω. Η ελλιπής πληροφόρηση και η τεχνική αβεβαιότητα συνεπάγονται επίσης παρόμοια μετατόπιση των καμπυλών. Έτσι, όταν το μοναδιαίο κόστος της επενδυτικής δαπάνης για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους μεγαλώνει, οι επιδοτήσεις πρέπει να αυξηθούν για να επιτευχθεί ένα δεδομένο επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας από την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων.

Εικόνα 28: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας και της αποδοτικότητας στο κέλυφος για διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών



Η Εικόνα 28 δείχνει ότι τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος θα απαιτούσαν υψηλότερη επιδότηση εξοικονόμησης ενέργειας σε σύγκριση με τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος για να επιτευχθεί το ίδιο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας. Τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος είναι ιδιαίτερα ευάλωτα και αντιμετωπίζουν μεγάλες προκλήσεις για την πραγματοποίηση επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης επειδή έχουν περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση. Επομένως, εάν μια πολιτική επιδότησης εφαρμοζόταν ομοιόμορφα για όλα τα νοικοκυριά θα συνεπαγόταν χαμηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας για νοικοκυριά με χαμηλό εισόδημα σε σχέση με εκείνα με υψηλό εισόδημα. Ομοίως, η έλλειψη θεσμικών μέτρων που αποσκοπούν στην άρση της αβεβαιότητας και τη βελτίωση της πληροφόρησης μπορεί να συνεπάγεται χαμηλή αποτελεσματικότητα στην εξοικονόμηση ενέργειας για ένα δεδομένο επίπεδο επιδότησης. Η ένταξη των παραγόντων «κρυφού» και «αντιληπτού» κόστους στη μοντελοποίηση, επιπλέον του τεχνικού κόστους των επενδύσεων, υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποδίδει αρνητική καθαρή παρούσα αξία σε στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης που διαφορετικά θα είχαν πιθανότητα να επιλεγούν, αναπαριστώντας κατ' αυτόν τον τρόπο το «παράδοξο των μη-ορθολογικών αποφάσεων».

Εικόνα 29: Συσχέτιση μεταξύ της επιδότησης της δαπάνης για κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ και του όγκου των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)



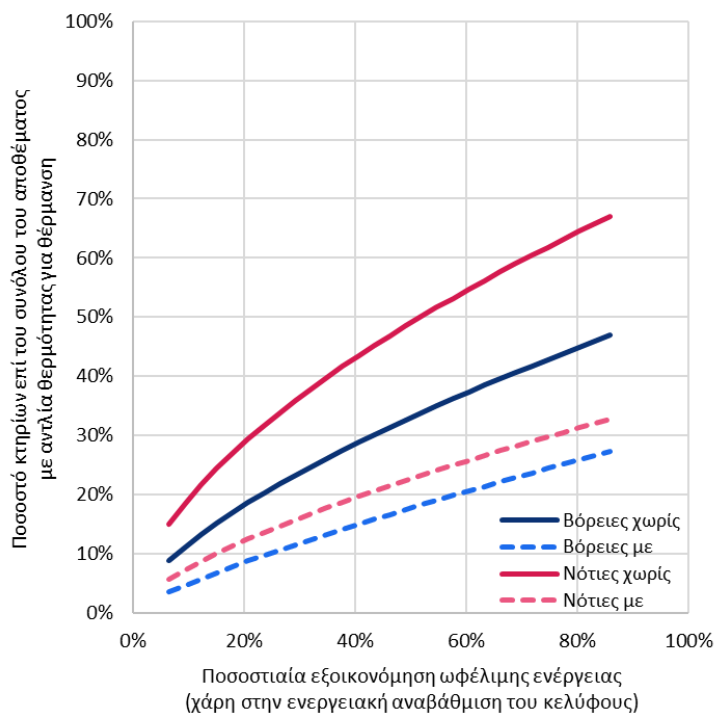
Η Εικόνα 29 απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο κόστος καυσίμου και προσομοιώνει πολιτικές που αναγνωρίζουν και επιβραβεύουν την επιλογή συγκεκριμένων τεχνολογιών ή/ και καυσίμων λόγω της συνεισφοράς τους στη διαμόρφωση του συνολικού δείκτη για την επίδοση σχετικά με τις ΑΠΕ (renewable value) (επιδότηση της δαπάνης για κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ) και της διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια.

Τα εμπόδια σε αυτή την περίπτωση αφορούν την τεχνική αβεβαιότητα ως προς την απόδοση των αντλιών θερμότητας, την έλλειψη πληροφόρησης σχετικά με τα οφέλη από τη χρήση τους και την ανωριμότητα της τεχνολογίας, λόγω του ότι παρότι δεν είναι μια νέα τεχνολογία ως προς την αρχή λειτουργίας της, ωστόσο δεν έχει εδραιωθεί στην αγορά ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση. Εμπόδιο στην μαζική διείσδυση των αντλιών θερμότητας στο τεχνολογικό μείγμα για θέρμανση αποτελούν και οι καιρικές συνθήκες, και αυτό αναπαρίσταται γραφικά στο σχήμα. Συγκεκριμένα, οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες στις βόρειες χώρες που απαιτούν τη συμπλήρωση της θερμικής ζήτησης με χρήση εφεδρικού συστήματος, υπονοούν ότι ο μέσος εποχικός βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης (το οποίο στις βόρειες χώρες είναι τελικά ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει την αντλία θερμότητας με έναν αυτόνομο λέβητα αερίου ενώ στις νότιες χώρες είναι ένα σύστημα που λειτουργεί αμιγώς με την αντλία θερμότητας), θα είναι μικρότερος σε αυτές και συνεπώς θα είναι μεγαλύτερη η μέση ετήσια δαπάνη για αγορά ενέργειας. Επιπλέον, οι νότιες χώρες επωφελούνται από την επιλογή της αντλίας θερμότητας για θέρμανση, από το γεγονός ότι η ίδια τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κάλυψη των αναγκών ψύξης. Έτσι, στον υπολογισμό του συνολικού κόστους για ενεργειακές υπηρεσίες που λαμβάνεται υπόψη στις αποφάσεις, στις νότιες χώρες δεν

συμπεριλαμβάνεται επιπλέον επενδυτική δαπάνη σε ενεργειακό εξοπλισμό για κάλυψη των ψυκτικών αναγκών των κτηρίων.

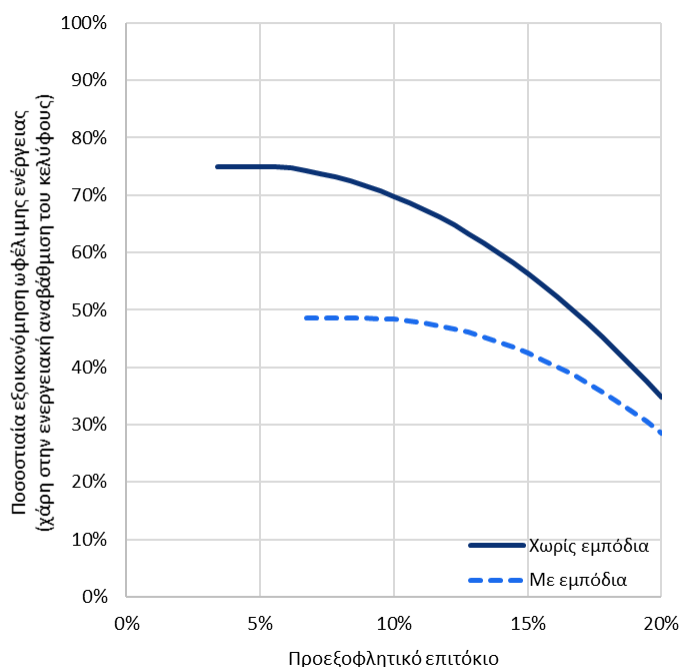
Όσα περιεγράφηκαν παραπάνω αναπαρίστανται γραφικά και στο σχήμα: οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη συσχέτιση μεταξύ επιδότησης της δαπάνης για κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ και διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια στις νότιες χώρες έχουν αφενός μεγαλύτερη κλίση από ό, τι στις βόρειες και επιπλέον η κλίση αυτή γίνεται πολύ πιο έντονη με την άρση των εμποδίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με άλλα λόγια, στις νότιες χώρες ακόμα και ένα χαμηλό ποσό επιδότησης μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του ρυθμού διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού.

Εικόνα 30: Συσχέτιση μεταξύ της αποδοτικότητας του κελύφους και του όγκου των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών για βόρειες και νότιες χώρες, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» (χωρίς) και «με εμπόδια» (με)



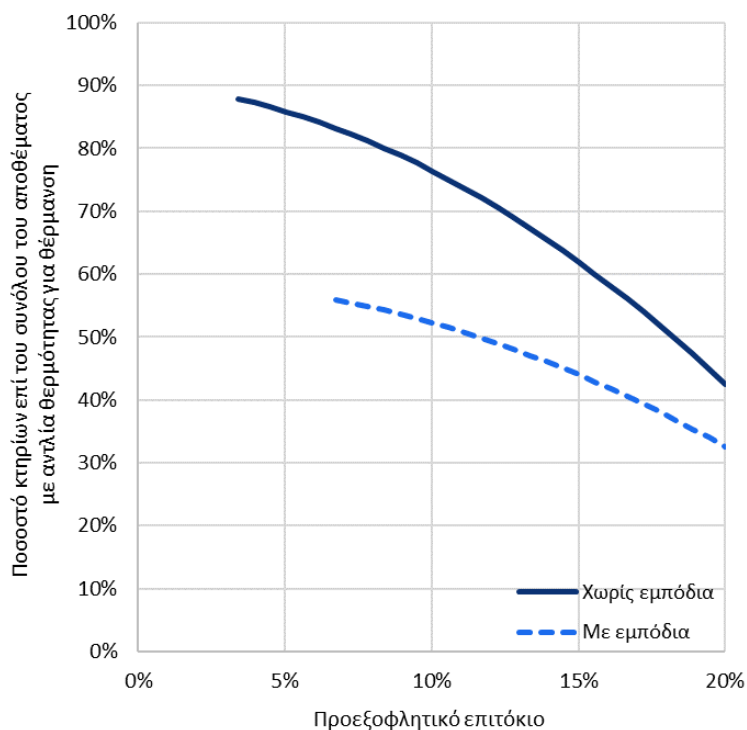
Η Εικόνα 30 απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ της αποδοτικότητας του κελύφους, δηλαδή της εξοικονόμησης ωφέλιμης θερμικής ενέργειας χάρη στις επενδύσεις στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και της διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια. Καταρχάς, οι αντλίες θερμότητας είναι η πιο οικονομικά αποδοτική λύση σε κτήρια με χαμηλές ανάγκες θέρμανσης (δηλαδή σε κτήρια που έχουν υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης), διότι οι αντλίες θερμότητας είναι διαθέσιμες και σε πολύ μικρά μεγέθη που ταιριάζουν σε κτήρια με χαμηλές ανάγκες θέρμανσης. Πέραν αυτού, και όπως φαίνεται στο σχήμα, ισχύει και σε αυτή τη συσχέτιση η διαφοροποίηση μεταξύ νότιων και βόρειων χωρών όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η οποία είναι αποτέλεσμα των χαμηλότερων θερμοκρασιών που ισχύουν στις βόρειες χώρες κατά τη διάρκεια του χειμώνα, οι οποίες υποχρεώνουν τη συμπλήρωση των θερμικών αναγκών με εφεδρικό σύστημα.

Εικόνα 31: Συσχέτιση μεταξύ του επιτοκίου προεξόφλησης και της αποδοτικότητας στο κέλυφος, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια»



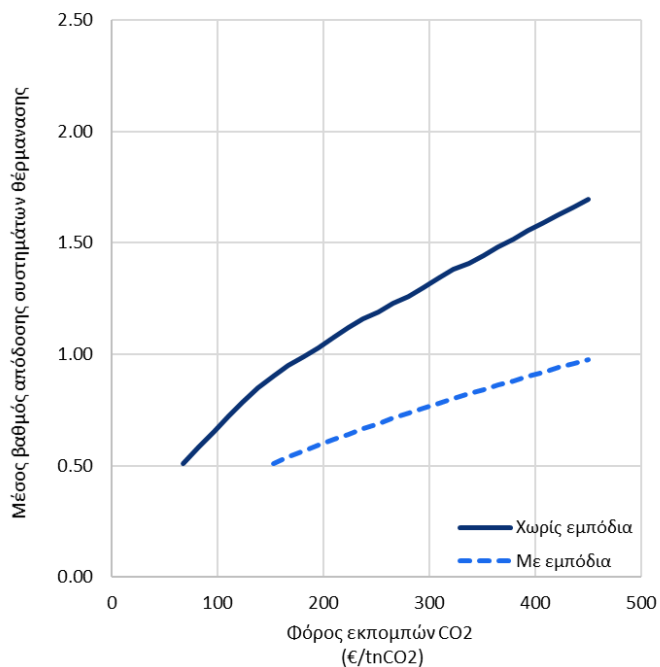
Η Εικόνα 31 απεικονίζει την αιτιοκρατική σχέση μεταξύ του επιτοκίου προεξόφλησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ετήσιας προσόδου της επενδυτικής δαπάνης για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και της αποδοτικότητας του κελύφους. Αντίστοιχα, η Εικόνα 32 απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ του επιτοκίου προεξόφλησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ετήσιας προσόδου της επενδυτικής δαπάνης για αγορά ενεργειακού εξοπλισμού και της διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού. Το ύψος του προεξοφλητικού επιτοκίου αντικατοπτρίζει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, την αβεβαιότητα σχετικά με τις εξελίξεις του μέλλοντος, την έλλειψη πληροφόρησης και παράγοντες που αναπαριστούν ασφάλιστα κινδύνου. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι οι ίδιοι μη-οικονομικά εμπόδια, και η άρση τους σημαίνει μείωση των προεξοφλητικών επιτοκίων. Επιπλέον όμως αυτών στην κάθε περίπτωση που αναπαρίσταται γραφικά υπονοούνται και τα συγκεκριμένα εμπόδια που τους αντιστοιχούν. Έτσι, στην Εικόνα 31 η καμπύλη που αναπαριστά τη συσχέτιση μεταξύ των επιτοκίων προεξόφλησης και της αποδοτικότητας στο κέλυφος υπό την επίδραση των εμποδίων, αναφέρεται στην αβεβαιότητα σε σχέση με την ύπαρξη συνεργείων που αναλαμβάνουν αυτά τα έργα, ή την έλλειψη πληροφόρησης σχετικά με τα οφέλη της ενεργειακής αναβάθμισης. Η άρση των εμποδίων αυτών με ταυτόχρονη μείωση των προεξοφλητικών επιτοκίων που αναπαριστά την άρση και των εμποδίων που σχετίζονται με τη δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση και την αβεβαιότητα σχετικά με την απόδοση της επένδυσης οδηγεί σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Στην Εικόνα 32 η καμπύλη που αναπαριστά τη συσχέτιση μεταξύ των επιτοκίων προεξόφλησης και της διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού, αναφέρεται στην τεχνική αβεβαιότητα σε σχέση με την απόδοση των αντλιών θερμότητας, και τους παράγοντες εκμάθησης (LBD, LBR). Και σε αυτή την περίπτωση, η άρση των εμποδίων αυτών με ταυτόχρονη μείωση των προεξοφλητικών επιτοκίων οδηγεί σε μεγαλύτερη διείσδυση των αντλιών θερμότητας στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού.

Εικόνα 32: Συσχέτιση μεταξύ του επιτοκίου προεξόφλησης και του όγκου των αντλιών θερμότητας στο μείγμα τεχνολογιών, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια»

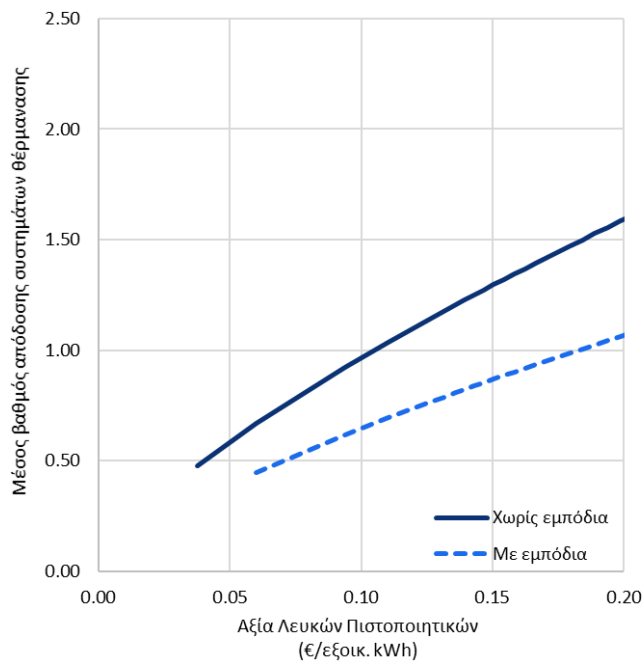


Η Εικόνα 33 αναπαριστά τη συσχέτιση μεταξύ του φόρου που αντιστοιχεί στις εκπομπές CO₂ με το μέσο βαθμό απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης. Η εικόνα αυτή αντιπαραβάλλεται και με την Εικόνα 34 που αναπαριστά τη συσχέτιση μεταξύ της αξίας των Λευκών Πιστοποιητικών και του μέσου βαθμού απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης. Πολύ υψηλές τιμές του φόρου μπορεί να οδηγήσουν σε ενεργειακή εξοικονόμηση, ακόμα κι αν δεν έχουν αρθεί τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Αυτό όμως δεν ισχύει στην περίπτωση των Λευκών Πιστοποιητικών (ή της επιδότησης εν γένει), με τη έννοια ότι η αξία των Λευκών Πιστοποιητικών που μπορεί να οδηγήσει σε στροφή προς πολύ αποδοτικές τεχνολογίες για θέρμανση και ψύξη θα έπρεπε να ήταν πάρα πολύ μεγάλη σε ένα πλαίσιο στο οποίο δεν έχουν αρθεί τα μη-οικονομικά εμπόδια. Τα Λευκά Πιστοποιητικά επιδρούν επί των αποφάσεων ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους, όπως και η φορολόγηση των εκπομπών CO₂, αλλά η φορολόγηση των εκπομπών CO₂ επιδρά σε λιγότερο βαθμό στις αποφάσεις για ενεργειακή αναβάθμιση. Γιατί ο φόρος εφαρμόζεται μόνο στους καταναλωτές που καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα και η επίπτωσή του εξαρτάται από το συντελεστή εκπομπών του κάθε καυσίμου (άρα μεγαλύτερη επιβάρυνση έχουν για παράδειγμα τα νοικοκυριά που χρησιμοποιούν στερεά ορυκτά καύσιμα για θέρμανση παρά αυτά που χρησιμοποιούν αέριο, και καθόλου αυτά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο διανεμόμενης θερμότητας). Με άλλα λόγια, η πολιτική φορολόγησης χωρίς την άρση των εμποδίων δεν μπορεί να οδηγήσει σε ενεργειακές αναβαθμίσεις μεγάλης έντασης, και εάν τα εμπόδια δεν έχουν αρθεί τότε αυτό σημαίνει ότι ο φόρος θα εφαρμόζεται σε μια μεγαλύτερη ζήτηση ενέργειας, πράγμα που μπορεί τελικά να οδηγήσει ξαφνικά σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της θέρμανσης, (δηλαδή σε αντικατάσταση εξοπλισμού) πολύ κοντά σε αυτή που θα επιτυγχανόταν όταν έχουν αρθεί τα εμπόδια.

Εικόνα 33: Συσχέτιση μεταξύ του φόρου που αντιστοιχεί στις εκπομπές CO₂ με το μέσο βαθμό απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια»



Εικόνα 34: Συσχέτιση μεταξύ της αξίας των Λευκών Πιστοποιητικών και του μέσου βαθμού απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, σε κατάσταση «χωρίς εμπόδια» και «με εμπόδια»



6.2 ΠΩΣ ΜΠΟΡΕΙ Ο ΚΤΗΡΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ ΝΑ ΕΠΙΤΥΧΕΙ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ

6.2.1. Περιγραφή του προβλήματος

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει υπογράψει τη συμφωνία των Παρισίων (Paris Agreement), στην οποία τα συμβαλλόμενα μέρη έχουν συμφωνήσει να λάβουν μέτρα και πολιτικές ώστε να καταβάλουν κάθε δυνατή προσπάθεια για τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας παγκοσμίως κατά λιγότερο από 1,5°C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Στο πλαίσιο αυτό η ΕΕ έχει εγκρίνει με το πέρασμα των χρόνων πακέτα πολιτικής που μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη αυτού του κλιματικού στόχου. Αρχικά, το 2019 η ΕΕ ενέκρινε το πακέτο πολιτικής με τίτλο «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους» που έθετε δεσμευτικούς στόχους για την ενέργεια και το κλίμα στο σύνολο της ΕΕ μέχρι το 2030. Οι στόχοι αυτοί περιλάμβαναν μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40-45% κάτω από τα επίπεδα του 1990, βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 32.5% (μείωση πρωτογενούς και τελικής ενέργειας συγκριτικά με το σενάριο του 2007 για το έτος 2030 πριν από την οικονομική κρίση) και 32% μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας. Η επίτευξη όμως του στόχου του περιορισμού της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά λιγότερο από 1,5°C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα απαιτεί μηδενισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αμέσως μετά το 2050 και κατά το δεύτερο ήμισυ του αιώνα, και άρα επιβάλλει και αύξηση των στόχων για το 2030 σχετικά με τη μείωση των εκπομπών στον ενεργειακό τομέα. Έτσι, το 2021 η ΕΕ ενέκρινε τη δέσμη προτάσεων «Fit for 55» ώστε να επιτευχθεί μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 που ως απώτερο στόχο έχει η ΕΕ να καταστεί η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος στον κόσμο έως το 2050.

Η επίτευξη του στόχου κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 συνεπάγεται ότι όλοι οι τομείς της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας πρέπει να υποστούν ριζικό μετασχηματισμό για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απανθρακοποίηση. Οι κύριοι πυλώνες του μετασχηματισμού για τους τομείς της ζήτησης θα πρέπει να είναι η ενεργειακή εξοικονόμηση και η μετάβαση σε τεχνολογίες χαμηλών ή και μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, συμπεριλαμβανομένου του εξηλεκτρισμού των τελικών χρήσεων. Για τον τομέα της προσφοράς ο μετασχηματισμός θα πρέπει να βασιστεί στην απανθρακοποίηση μέσω της ευρείας διείσδυσης των μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην ηλεκτροπαραγωγή.

Ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για σχεδόν το 20% των συνολικών εκπομπών CO₂ στο ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα. Έτσι, η συμβολή του κτηριακού τομέα για τη συνολική μείωση των εκπομπών είναι σημαντική. Επιπλέον, ο κτηριακός τομέας είναι ο μεγαλύτερος τελικός καταναλωτής στην ΕΕ (37,2% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας αντιστοιχούσε στην τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια το 2019). Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα κτήρια είναι βασικός πυλώνας του μετασχηματισμού προς την κλιματική ουδετερότητα και επίσης η βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του ενεργειακού συστήματος αποτελεί αυτόνομο στόχο της πολιτικής που ορίζει η νέα δέσμη προτάσεων «Fit for 55». Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών και, μέσω της ορθολογικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας και των άλλων καυσίμων, διευκολύνει τους τομείς του ενεργειακού εφοδιασμού να αντιμετωπίσουν τον κίνδυνο της έλλειψης πόρων που έχουν χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το προτιμώμενό μέσο για τη μείωση των εκπομπών σε συγκεκριμένες χρήσεις που παραδοσιακά χρησιμοποιούσαν ορυκτά καύσιμα, όπως η θέρμανση, και επίσης μπορεί να χρησιμεύσει ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου και συνθετικού μεθανίου. Χωρίς ισχυρή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης όμως, η ζήτηση ηλεκτρικής

ενέργειας θα αυξανόταν υπερβολικά και αυτό θα αποτελούσε πρόκληση ως προς την ανάπτυξη των ΑΠΕ (βασικά ηλιακών και αιολικών πάρκων) και την εξισορρόπηση του συστήματος που θα αποτελούνταν εξολοκλήρου από μεγάλους όγκους στοχαστικά μεταβλητών ΑΠΕ.

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα κτήρια βασίζεται στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των παλαιών κτηρίων και στην επιλογή αποδοτικού ενεργειακού εξοπλισμού για όλες τις θερμικές και ηλεκτρικές χρήσεις. Οι αντλίες θερμότητας είναι μεταξύ των προτιμώμενων τεχνολογικών επιλογών γιατί άλλωστε η επιλογή τους συνάδει με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους μεγάλης έντασης. Έτσι, αναπτύσσεται ο εξηλεκτρισμός ενώ βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση. Όμως, οι αντλίες θερμότητας δεν μπορούν να υποκαταστήσουν πλήρως το αέριο σε συγκεκριμένες χρήσεις ή/και κατηγορίες κτηρίων. Επίσης, η μεγάλης έκτασης διείσδυσή τους στα κτήρια προϋποθέτει ότι τα διάφορα εμπόδια που αντιμετωπίζουν οι καταναλωτές όταν καλούνται να επιλέξουν τις αντλίες θερμότητας έναντι άλλων τεχνολογικών επιλογών και σχετίζονται με παράγοντες αβεβαιότητας και έλλειψης πληροφόρησης όσον αφορά τη λειτουργία και απόδοση τους, θα πρέπει να έχουν αρθεί. Επιπλέον, η μεγάλης έκτασης διείσδυση των αντλιών θερμότητας στα κτήρια προϋποθέτει ότι και η ίδια η αγορά θα έχει αναπτυχθεί έχοντας προβλέψει την αύξηση της ζήτησης για αυτές επιτρέποντας την ταχύτερη τεχνική ωριμότητα της τεχνολογίας αυτής και άρα μεγαλύτερους δείκτες εκμάθησης (learning-by doing και learning-by-researching) και μειώσεις κόστους. Για τους παραπάνω λόγους, έχει προκύψει το δίλημμα του κατά πόσον απαιτούνται υδρογόνο, συνθετικό μεθάνιο και βιοαέριο για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα κτήρια. Και ως προς αυτό, υπάρχει και μια επιπλέον δυσκολία: τα καύσιμα αυτά θα πρέπει να είναι κλιματικά ουδέτερα, δηλαδή να έχουν μηδενικές εκπομπές σε όλο τον κύκλο ζωής τους για να υποστηρίξουν την κλιματική ουδετερότητα στο συνολικό ενεργειακό σύστημα. Αυτό επί της ουσίας σημαίνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου και συνθετικού μεθανίου θα πρέπει να έχει παραχθεί από ΑΠΕ επειδή οι άλλες επιλογές που είναι απαλλαγμένες από εκπομπές άνθρακα, όπως τα πυρηνικά και η ηλεκτροπαραγωγή με ταυτόχρονη δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα (CCS), έχουν περιορισμένες δυνατότητες για διάφορους λόγους. Όμως, οι τεχνολογίες παραγωγής του υδρογόνου και του συνθετικού μεθανίου έχουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση, δηλαδή απαιτούν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο σημαίνει ότι εάν ο όγκος των ζητούμενων ποσοτήτων από αυτά τα κλιματικά ουδέτερα ενεργειακά προϊόντα είναι πολύ μεγάλος, η ηλεκτροπαραγωγή θα πρέπει να αναπτυχθεί σε υπερβολικό βαθμό, το οποίο τελικά ενέχει κινδύνους για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι χωρίς ισχυρή εξοικονόμηση ενέργειας, δεν θα ήταν βιώσιμο να εξαιρεθούν όλα τα ορυκτά καύσιμα με κλιματικά ουδέτερα ενεργειακά προϊόντα λόγω της υπονοούμενης τεράστιας ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Τα βιοκαύσιμα δεν μπορούν να είναι η κύρια λύση λόγω της περιορισμένης δυναμικότητας των πρώτων υλών για την παραγωγή τους. Η άμεση χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να καλύψει όλες τις χρήσεις ενέργειας εκτός εάν αναπτυχθούν ταχύτατα τεχνολογίες που επί του παρόντος έχουν μικρή διείσδυση στο τεχνολογικό μείγμα. Όλα τα άλλα κλιματικά ουδέτερα ενεργειακά προϊόντα που μπορούν να βασιστούν σε γνωστές τεχνολογίες απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας είναι το κλειδί για τον περιορισμό της ποσότητας ενέργειας που θα πρέπει να παρέχει άμεσα ή έμμεσα το ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα. Ωστόσο, η εξοικονόμηση ενέργειας από μόνη της δεν μπορεί να προσφέρει πλήρως την κλιματική ουδετερότητα, ακόμη και αν υποθέσει κανείς μια αισιόδοξη ανάπτυξη επί του παρόντος αβέβαιων λύσεων ενεργειακής απόδοσης.

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιάσει πως μπορεί τελικά ο κτηριακός τομέας να επιτύχει την κλιματική ουδετερότητα. Ο προβληματισμός αυτός εκτίθεται από πλευράς δυναμικότητας, με την έννοια του κατά πόσο μπορεί να συμβάλει η κάθε επιλογή στην εξάλειψη των εκπομπών στον κτηριακό τομέα αλλά και από οικονομικής πλευράς. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, συγκρίνονται προβολές του προτεινόμενου μοντέλου με βάση διαφορετικές επιλογές πολιτικής και υποθέσεις που μπορεί να οδηγήσουν στην κλιματική ουδετερότητα.

Η ενότητα αυτή οργανώνεται με τον ακόλουθο τρόπο: πρώτα παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση των ιστορικών τάσεων της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, ενώ εκτίθεται και το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής στην ΕΕ σχετικά με την ενεργειακή απόδοση και τη μείωση των εκπομπών στα κτήρια. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός βασικού σεναρίου που επιτυγχάνει το στόχο της κλιματικής ουδετερότητας, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η συνεισφορά της ενεργειακής αποδοτικότητας, μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους και της επιλογής τεχνολογιών υψηλής απόδοσης, και του εξηλεκτρισμού, στην πορεία του μετασχηματισμού προς τη δραστική μείωση των εκπομπών και την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια. Τελικά, τα αποτελέσματα του προηγούμενου σεναρίου αντιπαραβάλλονται με τα αποτελέσματα δύο σεναρίων που καταρρίπτουν τις υποθέσεις του βασικού σεναρίου: στην πρώτη περίπτωση, υποτίθεται ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση και ο εξηλεκτρισμός αποτυγχάνουν. Στη δεύτερη περίπτωση, υποτίθεται ότι ενώ η ενεργειακή εξοικονόμηση μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους επιτυγχάνει να αναπτυχθεί όσο και στο βασικό σενάριο, οι αντλίες θερμότητας αποτυγχάνουν να αξιοποιήσουν το πλήρες δυναμικό εκμάθησης που υπέθετε το βασικό σενάριο, με αποτέλεσμα να διατίθενται με πολύ υψηλό κόστος, να μην υπάρχει βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης λόγω στασιμότητας της τεχνολογικής προόδου και επιπλέον να υπάρχει μεγάλη έλλειψη πληροφόρησης ως προς τα οφέλη από τη χρήση τους. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, που αντιπαραβάλλονται με το βασικό σενάριο, απαιτείται η μεγάλης έκτασης ανάπτυξη των συνθετικών καυσίμων και του υδρογόνου, ώστε να μην αποτύχει ο κτηριακός τομέας να εξαλείψει τις εκπομπές του. Οι περιπτώσεις αυτές αντιπαραβάλλονται τελικά ως προς το κόστος και τις συνολικές απαιτήσεις που προϋποθέτουν από το ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα, και σκοπός της μελέτης είναι να προσδιοριστεί τελικά η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων και του εξηλεκτρισμού των θερμικών χρήσεων στην επίτευξη των φιλόδοξων ενεργειακών και κλιματικών στόχων.

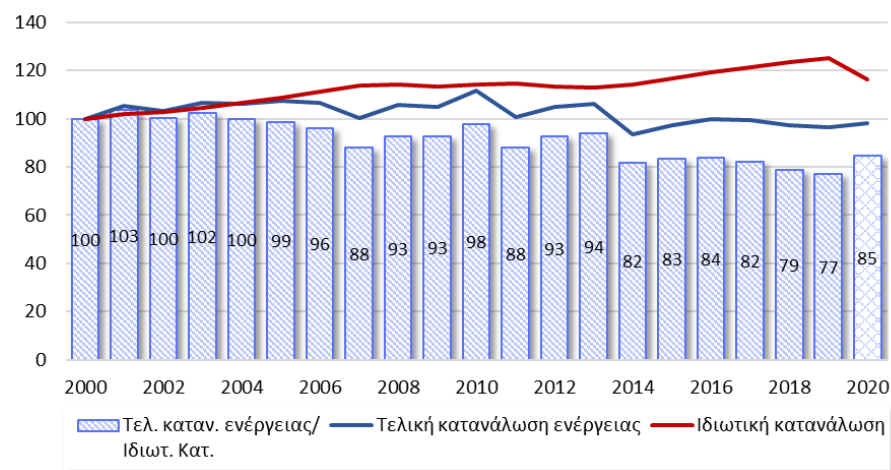
6.2.2. Συνοπτική παρουσίαση των ιστορικών τάσεων και της σημερινής κατάστασης σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια

Στην υπό-ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί συνοπτικά η εξέλιξη των ιστορικών τάσεων της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών. Η παρουσίαση θα εστιάσει αφενός στη συσχέτιση της κατανάλωσης ενέργειας στους τομείς των κτηρίων με τους αντίστοιχους οικονομικούς δείκτες αλλά και στη διάρθρωση της ζήτησης και κατανάλωσης ενέργειας τόσο ως προς τις τελικές χρήσεις όσο και ως προς το μείγμα καυσίμων. Η παρουσίαση αυτή είναι αναγκαία ώστε να οριστεί η υπάρχουσα κατάσταση η οποία προσδιορίζει και το δυναμικό ενεργειακής εξοικονόμησης αλλά και μείωσης των εκπομπών CO₂.

Οι Εικόνες 35 και 36 δείχνουν την παρατηρημένη τελική κατανάλωση ενέργειας για την Ευρώπη των 27 (δείκτης Europe 2020-2030) για τον οικιακό τομέα και τον τομέα των υπηρεσιών, αντίστοιχα, με βάση τα ενεργειακά ισοζύγια της Eurostat για την περίοδο 2000 έως 2019. Τα σχήματα περιλαμβάνουν επίσης τους οικονομικούς δείκτες που επηρεάζουν τη ζήτηση ενέργειας στον κάθε τομέα, ενώ έχουν υπολογιστεί και

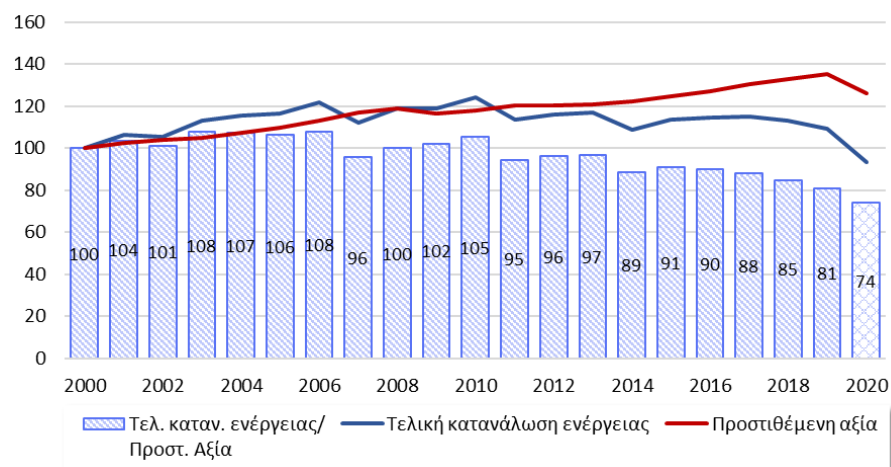
παρουσιάζονται δείκτες (δηλαδή, ο λόγος της τελικής κατανάλωσης του κάθε τομέα ως προς τον αντίστοιχο οικονομικό δείκτη) που αποτυπώνουν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Στα σχήματα έχουν συμπεριληφθεί επίσης οι τιμές όλων των μεγεθών για το έτος 2020: η τελική κατανάλωση ενέργειας είναι αποτέλεσμα του μοντέλου, όμως το έτος 2020 δεν είναι έτος προβολής αλλά πρόγνωσης (δεδομένου ότι η τελευταία χρονιά για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα πλήρη στατιστικά δεδομένα από τα ενεργειακά ισοζύγια είναι το 2019), και έχει συμπεριλάβει τις επιπτώσεις την πανδημικής κρίσης του COVID -19. Οι μακροοικονομικοί δείκτες για το 2020 έχουν προέλθει από τη στατιστική.

Εικόνα 35: Τελική κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα για την περίοδο 2000 έως 2019 και ενεργειακή ένταση ως προς την ιδιωτική κατανάλωση (δείκτης 2000=100)



Πηγή: Για το διάστημα 2000-2019 (Eurostat, 2022; Eurostat [nama_10_co3_p3], 2022). Για το 2020: πρόγνωση με χρήση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων

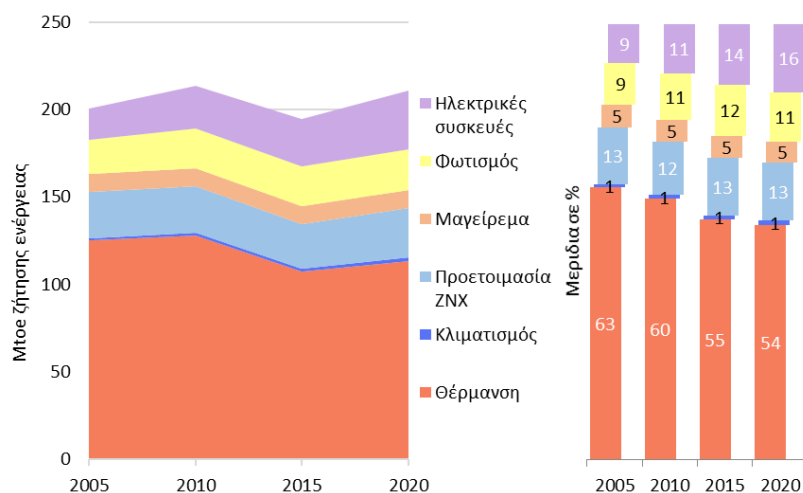
Εικόνα 36: Τελική κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών για την περίοδο 2000 έως 2019 και ενεργειακή ένταση ως προς την Προστιθέμενη Αξία (δείκτης 2000=100)



Πηγή: Για το διάστημα 2000-2019 (Eurostat, 2022; Eurostat [NAMA_10_A64], 2022). Για το 2020: πρόγνωση με χρήση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων

Το ξέσπασμα της COVID-19 το 2020, προκάλεσε μια απότομη πτώση της οικονομικής δραστηριότητας που οδήγησε σε ισχυρή μείωση της δραστηριότητας σχεδόν σε όλους του κλάδους της οικονομίας. Οι τομείς των υπηρεσιών, όπως τα καταστήματα λιανικής, ο τουρισμός και η εστίαση, επλήγησαν ιδιαίτερα από την πανδημία του COVID-19. Ο κύκλος εργασιών του τουρισμού και της εστίασης στο τέλος του 2020 ήταν μόνο περίπου το μισό του προηγούμενου έτους. Η απότομη στροφή στην εργασία από το σπίτι οδήγησε σε μικρή αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα.

Εικόνα 37: Διάρθρωση της (ωφέλιμης) ζήτησης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020.

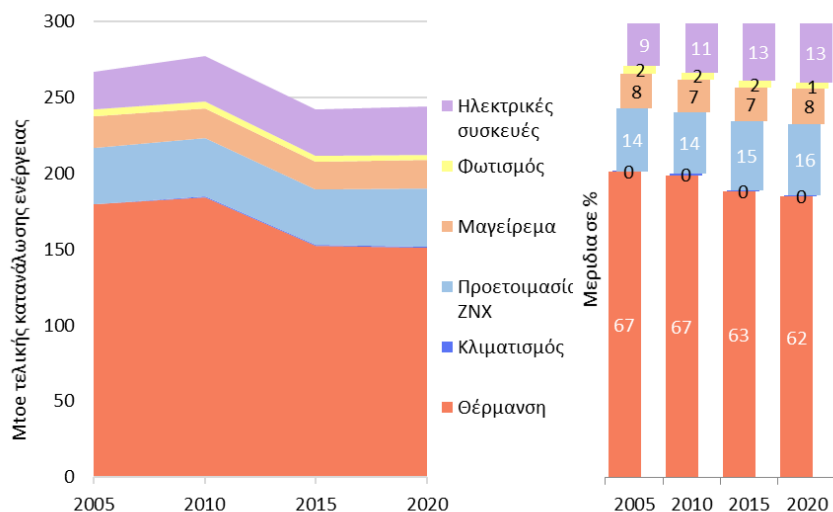


Σημείωση: Υπολογισμοί της συγγραφέα βάσει των δεδομένων για την τελική κατανάλωση ενέργειας

Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία και για τους δύο τομείς δείχνουν ότι μετά από την κορύφωση το 2006, η τάση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας έτεινε να παρουσιάζει φθίνουσα κλίση. Υπάρχει σαφώς μια πτώση της κατανάλωσης από το έτος 2007 και μετά: η περίοδος μετά το 2007-2009 χαρακτηρίζεται από την παγκόσμια οικονομική κρίση και επιπλέον στην Ευρώπη από την υιοθέτηση της δέσμης ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής για το 2020 (τη λεγόμενη δέσμη 20-20-20), η οποία είχε πυροδοτήσει πολιτικές ενεργειακής απόδοσης στα κράτη μέλη. Το 2010, η τελική κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει σημαντική αύξηση και στους δύο τομείς, που είναι αποτέλεσμα του ότι οι μέσες θερμοκρασίες τον χειμώνα του έτους εκείνου ήταν αρκετά χαμηλές και συνεπώς η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση τόσο στον οικιακό όσο και στον τομέα των υπηρεσιών παρουσίασε μεγάλη αύξηση. Έκτοτε η τελική κατανάλωση ενέργειας έχει ξεκάθαρα μια πτωτική τάση και στους δύο τομείς και έχει αρχίσει να παρατηρείται η αποσύνδεση της ζήτησης ενέργειας από την οικονομική ανάπτυξη. Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν συμβάλει και οι διάφορες Οδηγίες που προωθούν την ενεργειακή απόδοση στα κτήρια: η Οδηγία για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων τέθηκε σε εφαρμογή το 2009, η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων τέθηκε σε εφαρμογή το 2010 και η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση τέθηκε σε ισχύ το 2014. Συνεπώς, η αποσύνδεση της ζήτησης ενέργειας από την οικονομική ανάπτυξη οφείλεται στη βελτίωση της αποδοτικότητας ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής βελτίωσης (φωτισμός, ηλεκτρικές συσκευές, αντλίες θερμότητας) και των πολιτικών στήριξης της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων. Έτσι, στο διάστημα 2010-2019 υπάρχει μια σταδιακή βελτίωση της ενεργειακής έντασης. Κατά το έτος 2020, η τελική

ενεργειακή κατανάλωση μειώθηκε σημαντικά στον τομέα των υπηρεσιών και αυξήθηκε ελάχιστα στον οικιακό τομέα ως αποτέλεσμα των περιοριστικών μέτρων για την αντιμετώπιση της πανδημίας. Όμως, από το 2021 εμφανίζεται και πάλι ανάκαμψη της ζήτησης ενέργειας.

Εικόνα 38: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020



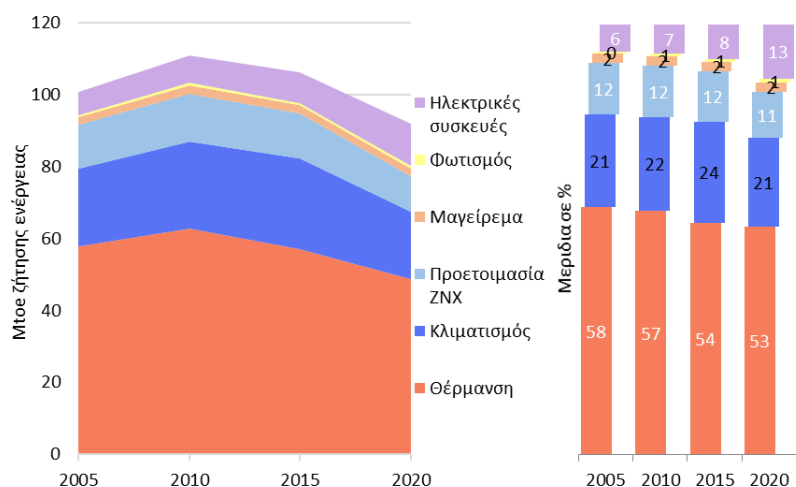
Πηγή: Για το διάστημα 2005-2015: (Eurostat [nrg_d_hhq], 2022). Για το 2020: πρόγνωση με χρήση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων

Οι Εικόνες 37 και 38 παρουσιάζουν την (ωφέλιμη) ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση στον οικιακό τομέα για την Ευρώπη των 27 για το διάστημα 2005 έως 2020, αντίστοιχα. Οι τιμές της τελικής κατανάλωσης για τα έτη 2005 έως 2015 έχουν προκύψει από τα δεδομένα της Eurostat, για την τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τελική χρήση και καύσιμο (Eurostat [nrg_d_hhq], 2022). Οι τιμές για το 2020 αποτελούν πρόγνωση με χρήση του μοντέλου, βάσει των στατιστικών στοιχείων που είναι διαθέσιμα μέχρι το 2019 και των επιπτώσεων της υγειονομικής κρίσης στην κατανάλωση ενέργειας. Όσον αφορά την (ωφέλιμη) ζήτηση ενέργειας, η θέρμανση έχει διαχρονικά το μεγαλύτερο μερίδιο αν και το μερίδιο αυτό μειώνεται στο χρόνο. Οι υπόλοιπες θερμικές χρήσεις έχουν διαχρονικά σταθερό μερίδιο, με τον κλιματισμό να έχει το μικρότερο μεταξύ αυτών λόγω της περιορισμένης διείσδυσης κλιματιστικών συσκευών στα κτήρια κατοικίας. Ο φωτισμός και ειδικά οι ηλεκτρικές συσκευές αυξάνουν το μερίδιο τους διαχρονικά, το οποίο αντικατοπτρίζει τις τάσεις της οικονομικής ανάπτυξης και την οικονομική ευημερία. Όσον αφορά την τελική κατανάλωση ενέργειας, η διάρθρωση είναι αντίστοιχη με αυτή της (ωφέλιμης) ζήτησης ενέργειας. Αξιοσημείωτη είναι η συνεισφορά των Οδηγιών για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων και για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας στην εξέλιξη της τελικής κατανάλωσης, αφού το μερίδιο της τελικής κατανάλωσης για τον φωτισμό και τις ηλεκτρικές συσκευές πέφτει και σταθεροποιείται αντίστοιχα διαχρονικά, γεγονός που υποδηλώνει ότι ενώ ο όγκος των ηλεκτρικών συσκευών μπορεί να αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, δε συμβαίνει το ίδιο με την τελική τους κατανάλωση.

Οι Εικόνες 39 και 40 παρουσιάζουν την (ωφέλιμη) ζήτηση και τελική κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση στον τομέα των υπηρεσιών για την Ευρώπη των 27 για το διάστημα 2005 έως 2020, αντίστοιχα. Οι τιμές της

τελικής κατανάλωσης για τα έτη 2005 έως 2015 έχουν προκύψει από τα ενεργειακά ισοζύγια της Eurostat, σε συνδυασμό με τα δεδομένα που βρίσκονται στη βάση δεδομένων EU BSO. Οι τιμές για το 2020 αποτελούν πρόγνωση με χρήση του μοντέλου, βάσει των στατιστικών στοιχείων που είναι διαθέσιμα μέχρι το 2019 και των επιπτώσεων της υγειονομικής κρίσης στην κατανάλωση ενέργειας. Όσον αφορά την (ωφέλιμη) ζήτηση ενέργειας, η θέρμανση έχει διαχρονικά, όπως και στον οικιακό τομέα, το μεγαλύτερο μερίδιο. Από τις υπόλοιπες θερμικές χρήσεις ο κλιματισμός έχει το σημαντικότερο μερίδιο ως προς τη συνολική (ωφέλιμη) ζήτηση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών, αφού μεγάλο ποσοστό των κτηρίων που ανήκουν στον τομέα των υπηρεσιών (πχ. νοσοκομεία, κτήρια γραφείων, πανεπιστήμια), διαθέτουν κεντρικές κλιματιστικές εγκαταστάσεις ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και αερισμού. Ο φωτισμός και ειδικά οι ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις (που περιλαμβάνουν τους υπολογιστές, τους εκτυπωτές, τα μόνιτορ κλπ.), αυξάνουν το μερίδιο τους στην (ωφέλιμη) ζήτηση ενέργειας, αντικατοπτρίζοντας την οικονομική ανάπτυξη του τομέα των υπηρεσιών που υπονοεί ότι οι εργαζόμενοι έχουν στη διάθεση τους (ή αναλογούν σε αυτούς), περισσότερα τηλεπικοινωνιακά μέσα σε σχέση με το παρελθόν. Ειδικά για το 2020, η επίπτωση της στροφής προς την τήλε-εργασία είναι εμφανής στη διάρθρωση της ζήτησης ενέργειας αφού υπάρχει πτώση του μεριδίου των χρήσεων που σχετίζονται με την παρουσία εργαζομένων, πελατών κλπ. στους χώρους των κτηρίων (δηλαδή θέρμανση, κλιματισμός, και προετοιμασία ZNX), με ταυτόχρονη αύξηση του μεριδίου των ηλεκτρικών συσκευών που παρέμεναν ανοιχτές στους χώρους των κτηρίων καθόλη τη διάρκεια της περιόδου εντός του 2020 που ίσχυαν τα περιοριστικά μέτρα. Όσον αφορά την τελική κατανάλωση ενέργειας, η διάρθρωση είναι αντίστοιχη με αυτή της (ωφέλιμης) ζήτησης ενέργειας. Η συνεισφορά των Οδηγιών για τον Οικολογικό Σχεδιασμό των Προϊόντων και για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας είναι κυρίως αισθητή στον τομέα των υπηρεσιών στην τελική κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό που παρουσιάζει εντυπωσιακή μείωση ενώ η ζήτηση ενέργειας για αυτόν αυξάνεται διαχρονικά.

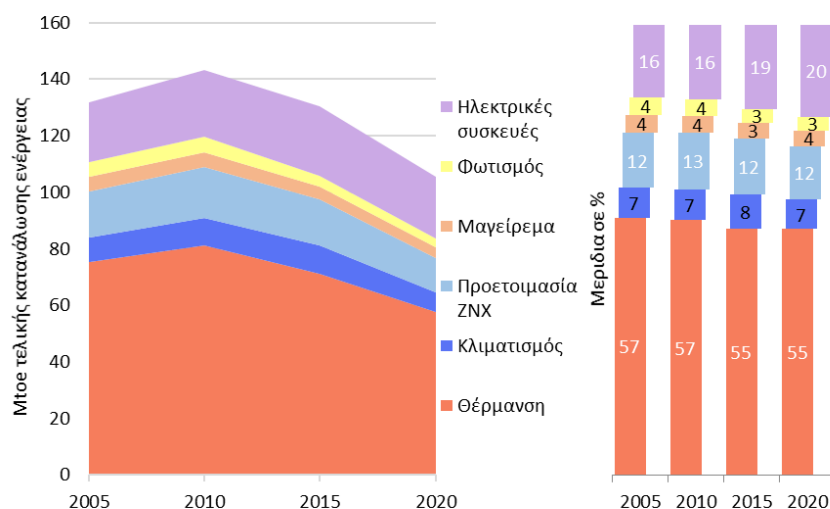
Εικόνα 39: Διάρθρωση της (ωφέλιμης) ζήτησης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020



Σημείωση: Υπολογισμοί της συγγραφέα βάσει των δεδομένων για την τελική κατανάλωση ενέργειας

Η Εικόνα 41 παρουσιάζει τη διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά καύσιμο για το διάστημα 2005-2020. Όπως και πριν, οι τιμές για το διάστημα 2005 έως 2015 αντλούνται από τη Eurostat και οι τιμές για το 2020 είναι η πρόγνωση του μοντέλου. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μερίδιο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα αφορά τη θέρμανση, είναι λογικό και το μεγαλύτερο μέρος της τελικής κατανάλωσης ενέργειας να αποτελείται από ορυκτά καύσιμα. Εξ αυτών το φυσικό αέριο έχει το μεγαλύτερο μερίδιο, ενώ τα υγρά ορυκτά καύσιμα (πετρελαιοειδή), μειώνουν διαχρονικά το μερίδιό τους. Τα υγρά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη θέρμανση (πετρέλαιο θέρμανσης) αντικαθίστανται από βιομάζα και για αυτό το μερίδιο της βιομάζας αυξάνεται διαχρονικά. Αντίστοιχα, τα υγρά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στο μαγείρεμα (υγραέριο) αντικαθίστανται από ηλεκτρισμό. Έτσι, η αύξηση του μεριδίου του ηλεκτρισμού οφείλεται κατά ένα μέρος στην αύξηση του μεριδίου του ηλεκτρισμού στο μαγείρεμα και κατά ένα άλλο στη διαχρονική αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας των ειδικών ηλεκτρικών χρήσεων. Η διανεμόμενη θερμότητα διατηρεί ένα σταθερό μερίδιο διαχρονικά, αφού τα δίκτυα διανομής διανεμόμενου ατμού δεν έχουν επεκταθεί τα τελευταία χρόνια.

Εικόνα 40: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά τελική χρήση για το διάστημα 2005-2020



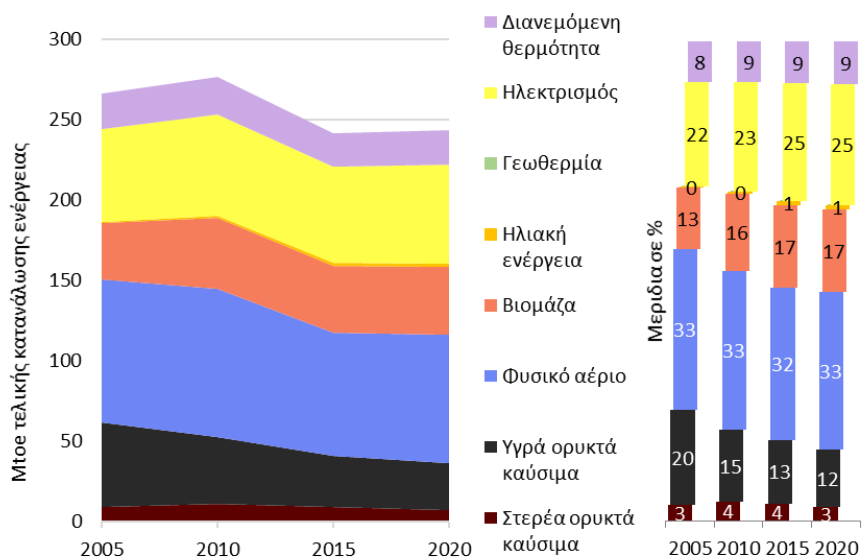
Πηγή: Για το διάστημα 2005-2015 (Eurostat [nrg_d_hhq], 2022). Για το 2020: πρόγνωση με χρήση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων

Όσον αφορά τη διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τελική χρήση και καύσιμο, ισχύουν τα εξής: τα στερεά ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται σχεδόν εξολοκλήρου στη θέρμανση ενώ τα υγρά ορυκτά καύσιμα και η βιομάζα χρησιμοποιούνται κυρίως στη θέρμανση και έπειτα, κατά σειρά, στο μαγείρεμα και για την προετοιμασία ΖΝΧ. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται κατά το μεγαλύτερο μέρος στη θέρμανση, και έπειτα, κατά σειρά, στην προετοιμασία ΖΝΧ και στο μαγείρεμα. Η διανεμόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται σχεδόν εξολοκλήρου στη θέρμανση και κατά ένα μικρότερο μερίδιο στην προετοιμασία ΖΝΧ. Ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται κυρίως στις ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και τον φωτισμό, και έπειτα κατά σειρά στη θέρμανση, την προετοιμασία ΖΝΧ, το μαγείρεμα και την ψύξη. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται

εξολοκλήρου στην προετοιμασία ΖΝΧ και η γεωθερμία εξολοκλήρου στη θέρμανση. Τα μερίδια και των δύο αυτών ανανεώσιμων ενεργειακών προϊόντων είναι πολύ μικρά στο σύνολο της τελικής κατανάλωσης.

Η Εικόνα 42 παρουσιάζει τη διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά καύσιμο για το διάστημα 2005-2020. Όπως και πριν, οι τιμές για το διάστημα 2005 έως 2015 αντλούνται από τη Eurostat και οι τιμές για το 2020 είναι η πρόγνωση του μοντέλου. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μερίδιο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών αφορά τη θέρμανση, είναι λογικό και το μεγαλύτερο μέρος της τελικής κατανάλωσης ενέργειας να αποτελείται από ορυκτά καύσιμα. Εξ αυτών το φυσικό αέριο έχει το μεγαλύτερο μερίδιο, ενώ τα υγρά ορυκτά καύσιμα (πετρελαιοειδή), μειώνουν διαχρονικά το μερίδιο τους. Σε αντίθεση με την τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο στον οικιακό τομέα, στον τομέα των υπηρεσιών γίνεται η στροφή από τα υγρά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη θέρμανση προς τον ηλεκτρισμό. Οι τεχνολογίες σε αυτή την περίπτωση είναι κεντρικές κλιματιστικές εγκαταστάσεις που καλύπτουν τη ζήτηση για θέρμανση, ψύξη και αερισμό. Έτσι, η αύξηση του μεριδίου του ηλεκτρισμού οφείλεται κατά ένα μέρος στην αύξηση του μεριδίου του ηλεκτρισμού στη θέρμανση και κατά ένα άλλο στην διαχρονική αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας των ειδικών ηλεκτρικών χρήσεων. Γενικά, στον τομέα των υπηρεσιών το μερίδιο του ηλεκτρισμού είναι διαχρονικά πολύ μεγαλύτερο από ό, τι στον οικιακό τομέα και μάλιστα το 2020 φτάνει στο 50% της συνολικής τελικής κατανάλωσης. Σε αυτό συμβάλλει και το γεγονός ότι ο κλιματισμός αποτελεί μεγαλύτερο μερίδιο της συνολικής τελικής κατανάλωσης στον τομέα των υπηρεσιών σε σχέση με τον οικιακό τομέα, και ο κλιματισμός καταναλώνει βασικά ηλεκτρισμό. Η διανεμόμενη θερμότητα διατηρεί ένα σχεδόν σταθερό μερίδιο διαχρονικά, όπως και στον οικιακό τομέα.

Εικόνα 41: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά καύσιμο για το διάστημα 2005-2020

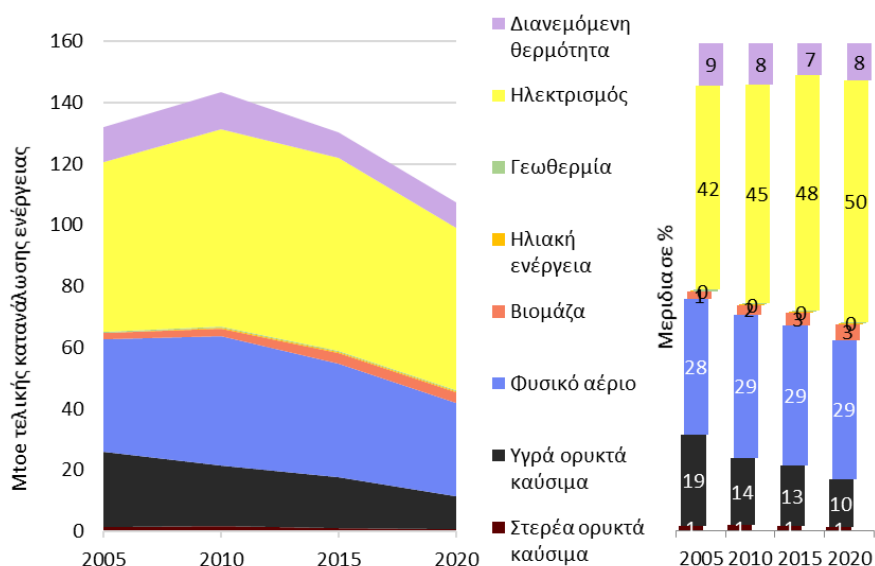


Πηγή: Για το διάστημα 2005-2015: (Eurostat, 2022). Για το 2020: πρόγνωση με χρήση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων

Όσον αφορά τη διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τελική χρήση και καύσιμο, ισχύουν τα εξής: τα στερεά καύσιμα (συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας) χρησιμοποιούνται εξολοκλήρου στη

θέρμανση και τα υγρά ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται κυρίως στη θέρμανση και έπειτα, κατά σειρά, στο μαγείρεμα και για την προετοιμασία ZNX. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται κατά το μεγαλύτερο μέρος στη θέρμανση, και έπειτα, κατά σειρά, στην προετοιμασία ZNX και στο μαγείρεμα. Η διανεμόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται εξολοκλήρου στη θέρμανση. Ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται κυρίως στις ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και το φωτισμό, και έπειτα κατά σειρά στη θέρμανση, τον κλιματισμό, την προετοιμασία ZNX και το μαγείρεμα. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εξολοκλήρου στην προετοιμασία ZNX και η γεωθερμία εξολοκλήρου στη θέρμανση. Τα μερίδια και των δύο αυτών ανανεώσιμων ενεργειακών προϊόντων είναι πολύ μικρά στο σύνολο της τελικής κατανάλωσης.

Εικόνα 42: Διάρθρωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών ανά καύσιμο για το διάστημα 2005-2020



Πηγή: Για το διάστημα 2005-2015: (Eurostat, 2022). Για το 2020: πρόγνωση με χρήση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων

Σύμφωνα με τα προηγούμενα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα, τα οποία είναι χρήσιμα για τον προσδιορισμό του δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης και μείωσης των εκπομπών CO₂, για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κτηριακό τομέα, που πρόκειται να αναλυθεί στην επόμενη υπό-ενότητα.

- Το γεγονός ότι η θέρμανση αποτελεί το μεγαλύτερο μερίδιο της συνολικής τελικής κατανάλωσης και στους δύο τομείς των κτηρίων, αποδεικνύει ότι υπάρχει μεγάλο δυναμικό ενεργειακής εξοικονόμησης, που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων.
- Ο τομέας των υπηρεσιών έχει μια πιο αυθόρμητη τάση στροφής προς τον ηλεκτρισμό και ήδη το 2020 το 50% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας του τομέα αποτελείται από ηλεκτρική ενέργεια.
- Ο οικιακός τομέας έχει μεγαλύτερο περιθώριο μείωσης των εκπομπών αφού περίπου το 50% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας το 2020 αποτελείται από ορυκτά καύσιμα, τα οποία βασικά χρησιμοποιούνται στη θέρμανση. Το αντίστοιχο ποσοστό στον τομέα των υπηρεσιών είναι 40%.
- Η εντυπωσιακή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των ηλεκτρικών συσκευών και του φωτισμού ήδη μέχρι το 2020 και στους δύο τομείς υπονοεί ότι η αύξηση της ζήτησης για τις χρήσεις αυτές που μπορεί

να συμβαδίζει με την οικονομική ανάπτυξη και την ευημερία, σε καμία περίπτωση δεν θα θέσει σε κίνδυνο συγκεκριμένους στόχους σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα, αφού αναμένεται η τεχνολογική πρόοδος στον ηλεκτρικό εξοπλισμό να συνεχίσει και στα επόμενα χρόνια και μάλιστα με ακόμα ταχύτερους ρυθμούς για ορισμένους τύπους τεχνολογιών που έχουν περιθώρια τεχνικής εξέλιξης (όπως για παράδειγμα τα στεγνωτήρια, οι ψύκτες κ.ά.).

6.2.3. Η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων και του εξηλεκτρισμού για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας

Στην υπό-ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου σχετικά με την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κτηριακό τομέα. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις ενεργειακές προβολές του μοντέλου ύστερα από την επίλυση ενός σεναρίου που επιτυγχάνει δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050. Η ανάλυση θα ξεκινήσει με τις υποθέσεις πολιτικής που συμπεριλαμβάνονται στο σενάριο, και έπειτα θα γίνει αποσύνθεση των προβολών της τελικής κατανάλωσης και των εκπομπών CO₂, στους παράγοντες που τις επηρεάζουν και τις οδηγούν προς τα κάτω. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορέσει να αναδειχθεί η συμβολή της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων, του εξηλεκτρισμού των θερμικών χρήσεων, της επιλογής αποδοτικού ενεργειακού εξοπλισμού και συσκευών, και της χρήσης κλιματικά ουδέτερων ενεργειακών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων του υδρογόνου και του συνθετικού μεθανίου, στο μείγμα καυσίμων, στη μεγάλης έντασης ενεργειακή αποδοτικότητα και μείωση των εκπομπών CO₂ στον κτηριακό τομέα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ΕΕ έχει εγκρίνει, από το 2019 που δεσμεύτηκε με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) (European Commission, 2019) να καταστεί η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος στον κόσμο έως το 2050, σε δύο φάσεις πακέτα πολιτικής που στοχεύουν στην επίτευξη αυτού του κλιματικού στόχου. Αρχικά, το 2019 ενέκρινε το πακέτο πολιτικής «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους» που έθετε δεσμευτικό στόχο μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου σε 40% τουλάχιστον κάτω από τα επίπεδα του 1990 στο σύνολο της ΕΕ μέχρι το 2030. Επειδή οι αναλύσεις έδειξαν ότι η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050, απαιτεί την αύξηση της φιλοδοξίας σχετικά με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030, η ΕΕ ενέκρινε το 2021 το πακέτο πολιτικής «Fit-for-55» που ανεβάζει τη φιλοδοξία του στόχου σχετικά με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε 55% τουλάχιστον κάτω από τα επίπεδα του 1990 έως το 2030.

Το πακέτο πολιτικής «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους» περιλάμβανε και επιπλέον δεσμευτικούς στόχους για την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη συνεισφορά των ΑΠΕ, οι οποίοι επίσης ανανεώθηκαν στο πακέτο πολιτικής «Fit-for-55». Οι νέοι στόχοι περιλαμβάνουν βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 36% (μείωση τελικής ενέργειας συγκριτικά με το σενάριο του 2007 για το έτος 2030 πριν από την οικονομική κρίση) και 40% μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας.

Στο πλαίσιο του πακέτου πολιτικής «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους» τα κράτη μέλη όφειλαν να εκπονήσουν το 2019 Εθνικά Σχέδια για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) για την περίοδο μέχρι το 2030, στα οποία αναλύονταν οι εθνικοί στόχοι που έθετε η κάθε χώρα ώστε να συμβάλει στην εκπλήρωση των ενωσιακών στόχων για το 2030. Τα ΕΣΕΚ ανέφεραν επίσης τις Προτεραιότητες Πολιτικής και τα μέτρα για την υλοποίησή τους. Όσον αφορά στην προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον κτηριακό τομέα, τα κράτη μέλη κατέθεσαν το 2020 στο πλαίσιο του ΕΣΕΚ, μακροπρόθεσμες στρατηγικές ανακαίνισης του εθνικού κτηριακού τους αποθέματος. Οι στρατηγικές

περιλαμβάναν τεχνική-οικονομική ανάλυση για την ανακαίνιση του κτηριακού αποθέματος της κάθε χώρας και κατέληξαν στην ανάδειξη των βέλτιστων οικονομικών και ρυθμιστικών μέτρων που θα συμβάλλουν στη μόχλευση επενδύσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτηριακού αποθέματος. Οι στρατηγικές διαμορφώνουν έναν οδικό χάρτη για την επίτευξη μεγάλης κλίμακας εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια. Ο οδικός χάρτης περιλαμβάνει ποσοτικούς δείκτες για την παρακολούθηση της προόδου εφαρμογής των μέτρων και πολιτικών, καθώς και χρονικά ορόσημα επίτευξής τους. Οι στρατηγικές εστιάζουν στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων, η οποία θα πρέπει να συνοδεύεται από αλλαγή του μείγματος ενέργειας που χρησιμοποιείται στις θερμικές χρήσεις, μέσω της προώθησης του ηλεκτρισμού και των ΑΠΕ.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι σαφές ότι η αύξηση της φιλοδοξίας του στόχου για το 2030 που μπορεί να εξασφαλίσει την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050, όπως ορίστηκε στο πακέτο πολιτικής «Fit for 55», καταρχάς ενσωματώνει τις εθνικές και ενωσιακές πολιτικές που αντιστοιχούν στα ΕΣΕΚ, οι οποίες υποτίθεται ότι εξακολουθούν και μετά το 2030 χωρίς όμως να εντατικοποιούνται. Στο πλαίσιο της ανάλυσης στην υπό-ενότητα αυτή αλλά και στην επόμενη και προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί και να αξιολογηθεί η επιπλέον προσπάθεια, τόσο ως προς την ενεργειακή ένταση όσο και ως προς το κόστος, που απαιτείται για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας σε σχέση με τα ΕΣΕΚ, ποσοτικοποιείται με το μοντέλο και ένα σενάριο (σενάριο που αναπαριστά το «υπάρχον πλαίσιο πολιτικής») που προσομοιώνει τα ΕΣΕΚ μέχρι το 2030 και υποθέτει τη συνέχιση των πολιτικών αυτών και μετά το 2030, έως το 2050.

Στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», τίθεται κλιματικός στόχος για δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ από τα κτήρια μέχρι το 2050, τέτοιος που να συμβαδίζει με την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο ενεργειακό σύστημα. Επιπλέον, τίθεται στόχος (κατ' ελάχιστον) διπλασιασμού του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων και στους δύο τομείς, σε σχέση με τη σημερινή κατάσταση.

Στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», υποτίθεται ότι ισχύει σε όλη τη διάρκεια της περιόδου προβολής (δηλαδή στο διάστημα 2021-2050) ένα ισχυρό πλαίσιο πολιτικής στο ενεργειακό σύστημα, τέτοιο που να εξασφαλίζει την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050. Στο πλαίσιο αυτό, υποτίθεται ότι ισχύουν συγκεκριμένα οικονομικά, ρυθμιστικά και θεσμικά μέτρα για τον κτηριακό τομέα, ίδια με αυτά που ίσχυαν στο σενάριο «χωρίς εμπόδια» που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα (6.1.3).

Όπως παρουσιάστηκε στην επισκόπηση των ιστορικών τάσεων και της σημερινής κατάστασης σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια στην Ενότητα 6.2.2, το φυσικό αέριο έχει σήμερα το μεγαλύτερο μερίδιο στο μείγμα της τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα. Φυσικά, η συνέχιση της χρήσης ορυκτού φυσικού αερίου δεν είναι συμβατή με το στόχο της κλιματικής ουδετερότητας. Από την άλλη πλευρά, η υποδομή του δικτύου διανεμόμενου αερίου αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα και θα απαιτούσε μεγάλο κόστος η κατάργησή της. Η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας απαιτεί τη σταδιακή τροποποίηση του ανθρακικού αποτυπώματος των αερίων καυσίμων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Γι' αυτό, το σενάριο υποθέτει ότι μετά το 2030, μειώνεται προοδευτικά ο μέσος συντελεστής εκπομπών του διανεμόμενου αερίου μέσω της ανάμειξης βιομεθανίου, υδρογόνου και κλιματικά ουδέτερου συνθετικού μεθανίου στο δίκτυο διανομής του αερίου. Η παραγωγή του βιομεθανίου απαιτεί τη χρήση βιομάζας, η οποία όμως έχει γενικά περιορισμένο δυναμικό. Επιπλέον, πρέπει να χρησιμοποιείται και σε άλλες εφαρμογές στο ενεργειακό σύστημα, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης της για την παραγωγή βιοκαυσίμων που μπορούν να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα σε τομείς των μεταφορών (πχ. αεροπορία), που είναι δύσκολο να επιτύχουν κλιματική ουδετερότητα μέσω άλλων

ενεργειακών φορέων, όπως ο ηλεκτρισμός. Το παραπάνω αποτελεί προτεραιότητα όσον αφορά τη χρήση της βιομάζας. Έτσι, το ποσοστό ανάμειξης του βιομεθανίου δεν μπορεί να υπερβαίνει το 20% του συνολικού διανεμόμενου αερίου μέχρι το 2050. Αντίστοιχα, αλλά αυτή τη φορά λόγω τεχνικών περιορισμών, η ανάμειξη του υδρογόνου στην υπάρχουσα υποδομή έχει επίσης ανώτερα όρια και το ποσοστό ανάμειξης του υδρογόνου δεν μπορεί να υπερβαίνει το 20% του συνολικού διανεμόμενου αερίου μέχρι το 2050. Έτσι, η εξάλειψη ολόκληρου του ορυκτού φυσικού αερίου από το δίκτυο διανομής απαιτεί την παραγωγή κλιματικά ουδέτερου συνθετικού μεθανίου σε σημαντική κλίμακα, και το ποσοστό ανάμειξης του φτάνει μέχρι και το 60% του συνολικού διανεμόμενου αερίου μέχρι το 2050.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι σαφές ότι στη μοντελοποίηση του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» αξιοποιούνται στο έπακρο οι συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος σε ότι αφορά στην άρση των μη-οικονομικών εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, τόσο μέσω του ισχυρού πλαισίου ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής που διαμορφώνουν τα οικονομικά μέτρα, όσο και μέσω των επιπλέον θεσμικών μέτρων Συγκεκριμένα, υποτίθεται ότι:

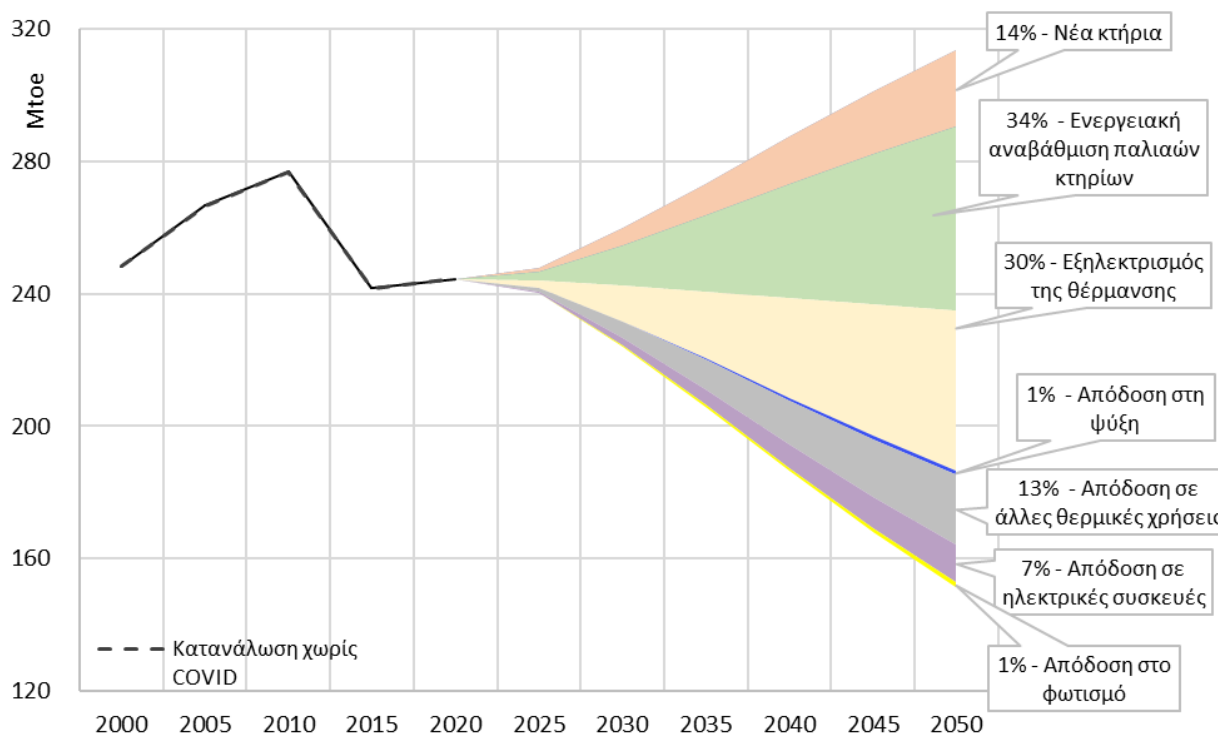
- Η άρση των παραγόντων που αναπαριστούν την αβεβαιότητα σχετικά με το ρυθμιστικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων στην ενεργειακή αποδοτικότητα και την έλλειψη πληροφοριών και ενημέρωσης σχετικά με το κόστος και τα οφέλη των βελτιώσεων από την ενεργειακή απόδοση, οδηγούν τους επενδυτές να θεωρούν εύλογου μεγέθους επιτόκια προεξόφλησης για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας των επενδύσεων στην ενεργειακή εξοικονόμηση. Επιπλέον, η τιμή των επιτοκίων προεξόφλησης μειώνεται διότι υποτίθεται ότι υπάρχουν ευκαιρίες πρόσβασης σε χρηματοδότηση για όλες τις κατηγορίες κτηρίων (ακόμα και εάν αυτό δεν ισχύει με την ίδια ένταση για όλες τις κατηγορίες). Αυτό αφορά τόσο τα επιτόκια που χρησιμοποιούνται στη λήψη απόφασης για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους όσο και τα επιτόκια που χρησιμοποιούνται για την επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού.
- Υπάρχει ταχεία εξέλιξη της τεχνολογικής προόδου, και αυτό περιλαμβάνει δραστική άρση των εμποδίων σχετικά με την πρόοδο της τεχνικής ωριμότητας των πολύ αποδοτικών τεχνολογιών και την αβεβαιότητα για την τεχνική απόδοση των επενδύσεων. Αυτό επί της ουσίας συνεπάγεται τη βελτίωση των παραγόντων εκμάθησης (LBR και LBD), για τις πολύ αποδοτικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των αντλιών θερμότητας, οι οποίες φτάνουν στη «βέλτιστη» κατάσταση (δηλαδή την τεχνολογία που αντιστοιχεί στο τεχνικό δυναμικό και κατώτατο κόστος) πριν το 2050.

Όσον αφορά την υπόθεση για την εξέλιξη της τεχνολογικής προόδου, ειδικά για τις αντλίες θερμότητας, η υπόθεση αυτή είναι πολύ ισχυρή και έχει μεγάλη σημασία διότι επηρεάζει την οικονομική βιωσιμότητα και το κατά πόσον είναι εφικτή η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κτηριακό τομέα.

Αντίστοιχα και σε ό, τι αφορά τις τεχνολογίες που παράγουν κλιματικά ουδέτερα καύσιμα (δηλαδή το υδρογόνο και το συνθετικό μεθάνιο), η βιβλιογραφία συμφωνεί (Albrecht et al., 2017; Alenazey et al., 2015; Dincer & Acar, 2017; Evely & Gebreegziabher, 2018; Herz et al., 2018; Schmidt et al., 2017), ότι οι τεχνολογίες αυτές έχουν μεγάλες δυνατότητες εκμάθησης, αν και υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη του κόστους τους. Στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» υποτίθεται ότι γίνεται εκμετάλλευση του πλήρους δυναμικού εκμάθησης των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του κλιματικά ουδέτερου μεθανίου (δηλαδή της ηλεκτρόλυσης, των τεχνολογιών δέσμωσης του CO₂ και της μεθανοποίησης), και άρα το κόστος παραγωγής του εξαρτάται βασικά από το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι η κύρια είσοδος στην τεχνολογία ηλεκτρόλυσης. Κι αυτή όμως είναι μια ισχυρή υπόθεση, και μάλιστα αφορά τεχνολογίες που είναι ανώριμες σήμερα (πχ. τη δέσμωση του CO₂ από

τον αέρα (Ericsson, 2017; Heidel et al., 2011; Ishimoto et al., 2017; Naims, 2016) και επίσης επηρεάζει την οικονομική βιωσιμότητα και το κατά πόσον είναι εφικτή η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κτηριακό τομέα. Όσον αφορά το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων, στη μοντελοποίηση θεωρείται ότι η συνέργεια μεταξύ της χημικής αποθήκευσης (δηλαδή μέσω της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων) και των ΑΠΕ μπορεί να σταθεροποιήσει ή και ακόμα να μειώσει μακροπρόθεσμα το κόστος της .

Εικόνα 43: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»

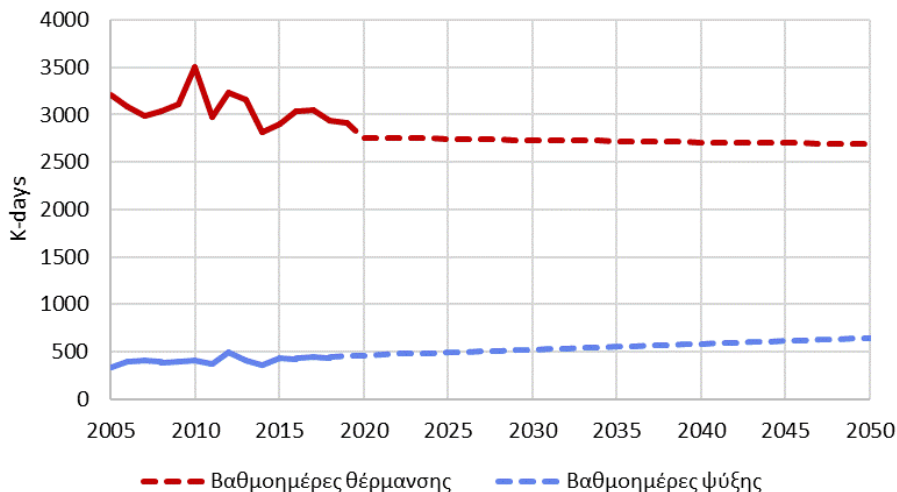


Ενώ η χρήση των συνθετικών καυσίμων και του υδρογόνου έχει την αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και τις ανάγκες για επιπλέον ΑΠΕ για την παραγωγή τους, ωστόσο, στον τομέα των κτηρίων το μείγμα των αερίων τελικά θα χρησιμοποιείται σε συμβατικές τεχνολογίες που είναι ώριμες σήμερα και δεν έχουν πολύ μεγάλο κόστος, όπως είναι οι λέβητες κεντρικής θέρμανσης και τα αυτόνομα συστήματα αερίου. Από την πλευρά της ζήτησης δηλαδή, η ανάπτυξη των συνθετικών καυσίμων είναι πιο βέβαιη και βιώσιμη επιλογή και δεν εξαρτάται από την τεχνολογική πρόοδο του ενεργειακού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στα κτήρια. Ωστόσο, τα συνθετικά καύσιμα είναι επί του παρόντος τουλάχιστον δύο ή τρεις φορές ακριβότερα από τα αντίστοιχα ορυκτά καύσιμα. Όσον αφορά το δίλημμα αυτό και τις προεκτάσεις του, η ανάλυση θα γίνει στην επόμενη Ενότητα 6.2.4.

Η Εικόνα 43 παρουσιάζει τη συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στον οικιακό τομέα μέχρι το 2050. Το σχήμα προκύπτει από την αποσύνθεση (decomposition) της συνολικής ενεργειακής εξοικονόμησης που αντιστοιχεί στην διαφορά της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα για

κάθε χρονική στιγμή της περιόδου προβολής μεταξύ των προβολών της τελικής κατανάλωσης ενέργειας δύο σεναρίων. Η καμπύλη με την θετική κλίση αναπαριστά την προβολή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ενός υποθετικού σεναρίου («Σταθερό σενάριο») στο οποίο όλοι οι δείκτες που σχετίζονται με την ενεργειακή αποδοτικότητα δεν βελτιώνονται σε σχέση με τη χρονιά βάσης (δηλαδή το 2020) και υποτίθεται αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας η οποία επηρεάζεται από οικονομικούς και κλιματικούς δείκτες. Η καμπύλη με την αρνητική κλίση αναπαριστά την προβολή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του υπό μελέτη σεναρίου, δηλαδή του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας»..

Εικόνα 44: Προβολή βαθμομερών θέρμανσης και ψύξης στην Ευρώπη



Πηγή: Για το διάστημα 2005-2019 (Eurostat [NRG_CHDDR2_A];, 2022)

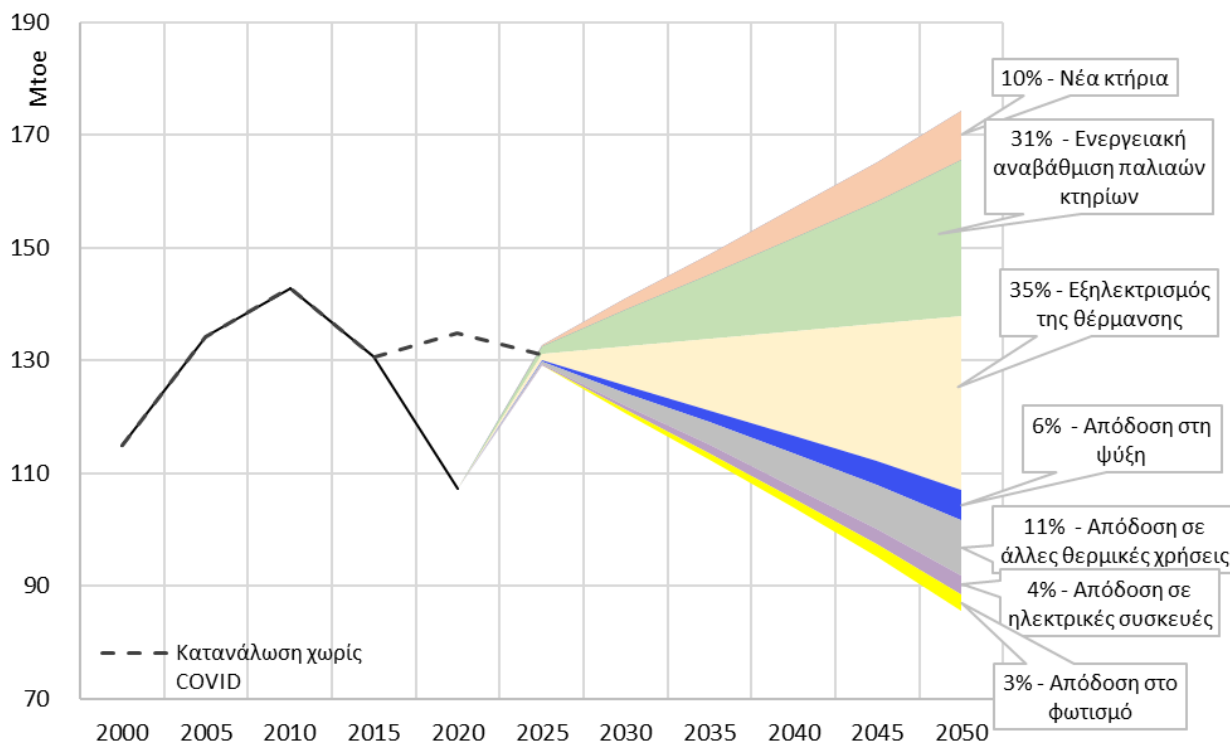
Η καμπύλη που αναπαριστά την προβολή της τελικής κατανάλωσης του «Σταθερού σεναρίου» αντιπροσωπεύει την επίδραση της οικονομικής ανάπτυξης στη ζήτηση ενέργειας ανά τελική χρήση, η οποία έχει ανοδική τάση. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στην αύξηση της τελικής κατανάλωσης του «Σταθερού σεναρίου» σχετίζεται με την αύξηση της ζήτησης ενέργειας για θέρμανση: ενώ η προβολή των βαθμομερών θέρμανσης (heating degree days) που επιδρά στη ζήτηση ενεργείας για θέρμανση βαίνει μειούμενη στο χρόνο λόγω της κλιματικής αλλαγής, το εισόδημα των νοικοκυριών αναμένεται να αυξάνεται στο χρόνο και η αύξηση αυτή θα είναι για την Ευρώπη της τάξης του 67% από το 2020 έως το 2050. Η αύξηση της ζήτησης ενέργειας για θέρμανση υπονοεί την τάση της ωφέλιμης ενέργειας για θέρμανση να προσεγγίσει το ανώτερο όριο της θεωρητικά επιθυμητής ωφέλιμης ενέργειας, το οποίο στην πράξη μπορεί να αναπαριστά τη θέρμανση μεγαλύτερου μέρους της κατοικίας ή την επιλογή υψηλότερης θερμοκρασίας θερμοστάτη. Επίσης σημαντική συνεισφορά στην αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του «Σταθερού σεναρίου» έχει η αύξηση της ζήτησης ενέργειας για ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και φωτισμό. Και σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του εισοδήματος οδηγεί σε μεγαλύτερη ζήτηση για ηλεκτρικές συσκευές, με την έννοια ότι τα νοικοκυριά έχοντας στη διάθεση τους μεγαλύτερο εισόδημα θέλουν να αγοράσουν περισσότερες μικρές συσκευές, όπως υπολογιστές, tablet, στερεοφωνικά κ.ά. Η μικρότερη συνεισφορά στην αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του «Σταθερού σεναρίου» προκύπτει από την αύξηση της ζήτησης ενέργειας για κλιματισμό. Στην αύξηση αυτή συνεισφέρουν τόσο οι βαθμομέρες ψύξης (cooling degree days) όσο και το εισόδημα των νοικοκυριών. Οι βαθμομέρες ψύξης βαίνουν αυξανόμενες στο χρόνο, κάτι που έχει αποτυπωθεί και στη στατιστική ήδη από τα τελευταία χρόνια, και η τάση αυτή

αναμένεται να ισχύει και στο μέλλον, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η αύξηση του εισοδήματος στα νοικοκυριά, συνεπάγεται ότι περισσότερα νοικοκυριά θα διαθέτουν ένα ή περισσότερα κλιματιστικά για την κάλυψη των αναγκών κλιματισμού.

Η αυξητική τάση που θα είχε η κατανάλωση ενέργειας όπως αυτή προβάλλεται από το «Σταθερό σενάριο», εάν δηλαδή όλοι οι δείκτες που σχετίζονται με την ενεργειακή αποδοτικότητα δεν βελτιώνονταν διαχρονικά σε σχέση με τη χρονιά βάσης (δηλαδή το 2020) και η τελική κατανάλωση ενέργειας κατευθυνόταν αποκλειστικά από την οικονομική ανάπτυξη, υπονοεί μεγάλης έκτασης εξοικονόμηση ενέργειας σε όλες τις τελικές χρήσεις για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

Η μεγαλύτερη συνεισφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έγκειται στις επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων (με μερίδιο 48% επί της συνολικής εξοικονόμησης). Οι επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων επιδρούν στην ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση (και ψύξη), η οποία έχει και το μεγαλύτερο μερίδιο διαχρονικά στη ζήτηση ενέργειας στον οικιακό τομέα, όπως φάνηκε και στην Εικόνα 38.

Εικόνα 45: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»



Στα νέα κτήρια εφαρμόζονται αυστηρές προδιαγραφές αναφορικά με την ενεργειακή απόδοση του κελύφους, που αντιστοιχούν σε αυστηρούς οικοδομικούς κανονισμούς. Επειδή όμως ο ρυθμός κατασκευής νέων κτηρίων είναι σχετικά μικρός και αναμένεται να διατηρηθεί χαμηλός στο μέλλον, η ενεργειακή αναβάθμιση παλαιών κτηρίων είναι πολύ μεγάλης σημασίας στη συνολική ενεργειακή εξοικονόμηση. Η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 και ταυτόχρονα ο στόχος για τουλάχιστον διπλασιασμό του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης σε σχέση με τις σημερινές τιμές υπονοεί ότι το σύνολο σχεδόν του

κτηριακού αποθέματος το 2050 θα έχει υποστεί ενεργειακή αναβάθμιση. Όχι μόνο ο ρυθμός αλλά και η ένταση των ενεργειακών αναβαθμίσεων είναι πολύ μεγαλύτερα στο σενάριο της «Κλιματικής Ουδετερότητας» από τις σημερινές πρακτικές και αυτό εξηγεί τη μεγάλη συνεισφορά των ενεργειακών αναβαθμίσεων στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Η μεγάλης έκτασης μείωση της ζήτησης ενέργειας στα κτήρια λόγω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους καθιστά τη χρήση αντλιών θερμότητας πιο συμφέρουσα συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες θέρμανσης χώρων. Επίσης, οι κλιματικές συνθήκες σε πολλές χώρες (κυρίως της νότιας και νότιο-ανατολικής Ευρώπης) είναι συμβατές με τις τεχνικές δυνατότητες των αντλιών θερμότητας και η ανάγκη συμπλήρωσης της θέρμανσης με χρήση εφεδρικού συστήματος είναι πολύ περιορισμένη σε αυτές. Επομένως, ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης συμβαδίζει με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων και είναι οικονομικά αποδοτικός, όταν επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η αναμενόμενη μείωση του κόστους αγοράς των αντλιών θερμότητας λόγω της εξελισσόμενης τεχνολογικής προόδου.

Επιπλέον της φυσικής τάσης προς τον εξηλεκτρισμό της θέρμανσης (λόγω της συνέργειας των αντλιών θερμότητας με τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κελύφους), οι πολιτικές που αναγνωρίζουν και επιβραβεύουν τη συνεισφορά των αντλιών θερμότητας στη διαμόρφωση του συνολικού δείκτη για την επίδοση σχετικά με τις ΑΠΕ, επίσης συμβάλλουν στην αύξηση του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης.

Για τους παραπάνω λόγους ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενεργειακή εξοικονόμηση (με μερίδιο 30% επί της συνολικής εξοικονόμησης). μετά τις επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων.

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις άλλες θερμικές χρήσεις και στις ηλεκτρικές συσκευές, έχουν την τρίτη (με μερίδιο 13% επί της συνολικής εξοικονόμησης) και τέταρτη θέση (με μερίδιο 7% επί της συνολικής εξοικονόμησης), αντίστοιχα, ως προς τη συνεισφορά στην ενεργειακή εξοικονόμηση. Στις περιπτώσεις αυτές η ενεργειακή εξοικονόμηση έγκειται στην επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού και συσκευών υψηλής απόδοσης, δηλαδή στη στροφή από τις συμβατικές τεχνολογίες σε πιο αποδοτικές. Οι υποθέσεις σχετικά με την ταχύτητα της τεχνολογικής προόδου και της τεχνικής ωριμότητας των πολύ αποδοτικών και επί του παρόντος ακριβών τεχνολογιών, συμβάλλουν σε αυτή τη κατεύθυνση.

Η χαμηλότερη συνεισφορά στη συνολική ενεργειακή εξοικονόμηση αντιστοιχεί στην απόδοση στην ψύξη και στο φωτισμό (με μερίδιο 1% επί της συνολικής εξοικονόμησης και για τις δύο χρήσεις). Και σε αυτή την περίπτωση, η ενεργειακή εξοικονόμηση στις χρήσεις αυτές έγκειται στην στροφή από τις συμβατικές τεχνολογίες σε πιο αποδοτικές, ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής προόδου και ωριμότητας των τεχνολογιών αυτών. Το γεγονός ότι και οι δύο αυτές χρήσεις έχουν το μικρότερο μερίδιο επί της συνολικής ζήτησης ενέργειας στα κτήρια κατοικίας, εξηγεί και γιατί έχουν τη μικρότερη συνεισφορά στη συνολική ενεργειακή εξοικονόμηση.

Η Εικόνα 45 παρουσιάζει τη συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών μέχρι το 2050. Και σε αυτή την περίπτωση το σχήμα έχει προκύψει από την αποσύνθεση της συνολικής ενεργειακής εξοικονόμησης που αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του «Σταθερού σεναρίου» και του υπό μελέτη σεναρίου. Στο σχήμα αναπαρίσταται και η επίδραση της υγειονομικής κρίσης του COVID-19 στην τελική κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών, η οποία μειώνεται δραματικά το 2020 αλλά ανακάμπτει ήδη από το 2021 και το 2025 φτάνει σχεδόν στα επίπεδα που ήταν τα προηγούμενα χρόνια. Αυτό, επί της ουσίας σημαίνει ότι στην περίοδο

2020-2025 δεν υπάρχει στην πραγματικότητα ενεργειακή εξοικονόμηση αλλά μόνο αύξηση της ζήτησης και κατανάλωσης ενέργειας, η οποία αρχίζει να μειώνεται μετά το 2025 χάρη στην εφαρμογή των μέτρων ενεργειακής πολιτικής και την υποχρέωση επίτευξης των κλιματικών και ενεργειακών στόχων.

Η καμπύλη που αναπαριστά την προβολή της τελικής κατανάλωσης του «Σταθερού σεναρίου» αντιπροσωπεύει την επίδραση της οικονομικής ανάπτυξης στη ζήτηση ενέργειας ανά τελική χρήση, η οποία έχει ανοδική τάση. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στην αύξηση της τελικής κατανάλωσης του «Σταθερού σεναρίου» σχετίζεται με την αύξηση της ζήτησης ενέργειας για θέρμανση, όπως ίσχυε και στον οικιακό τομέα. Επειδή η ζήτηση ενέργειας για κλιματισμό έχει μεγαλύτερο μερίδιο στη συνολική ζήτηση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών σε σχέση με τον οικιακό τομέα, η αύξηση της ζήτησης ενέργειας για κλιματισμό (και αερισμό) λόγω της αύξησης των βαθμομερών ψύξης και της οικονομικής ανάπτυξης σε όλους τους υπό-τομείς στον τομέα των υπηρεσιών, έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά στην αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας του «Σταθερού σεναρίου». Αντίστοιχης συνεισφοράς είναι και η αύξηση της ζήτησης ενέργειας για ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και φωτισμό, η οποία επίσης εξηγείται από την οικονομική ανάπτυξη. Ο όγκος της ζήτησης ενέργειας που αντιστοιχεί στις ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις συμπεριλαμβάνει και τη ζήτηση ενέργειας από τα κέντρα δεδομένων (data centers), τα οποία αναπτύσσονται ή πρόκειται να αναπτυχθούν σε διάφορα κράτη μέλη, όπως τα ίδια έχουν ανακοινώσει στα ΕΣΕΚ τους.

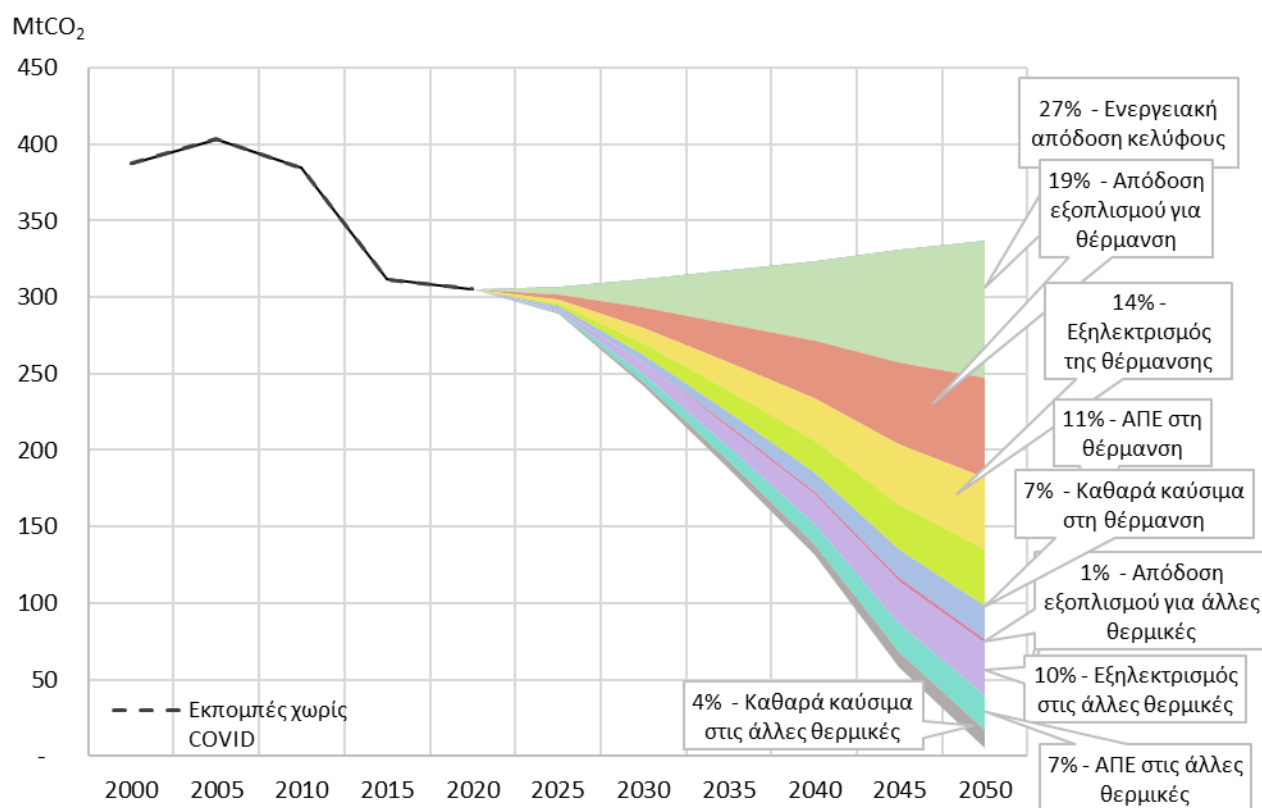
Η μεγαλύτερη συνεισφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έγκειται και στον τομέα των υπηρεσιών στις επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων (με μερίδιο 41% επί της συνολικής εξοικονόμησης). Συγκριτικά, με τον οικιακό τομέα το μέγεθος της συνεισφοράς των επεμβάσεων ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων είναι κατά λίγο μικρότερο. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου του ότι το κτηριακό απόθεμα του τομέα των υπηρεσιών έχει καλύτερη θερμική συμπεριφορά σε σχέση με το αντίστοιχο του οικιακού τομέα και αρά έχει μικρότερο δυναμικό εξοικονόμησης, δηλαδή πραγματοποιούνται επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης μικρότερης έντασης.

Η χρήση των αντλιών θερμότητας για θέρμανση υποκινείται και στον τομέα των υπηρεσιών, όπως και στον οικιακό, από την μεγάλης έκτασης μείωση της ζήτησης ενέργειας λόγω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων και των πολιτικών που επιβραβεύουν τη συμβολή των ΑΠΕ. Στον τομέα των υπηρεσιών, υπάρχει όμως και η φυσική τάση αντικατάστασης των συμβατικών συστημάτων για θέρμανση με ηλεκτρικά συστήματα, όπως φάνηκε και από τη στατιστική (Εικόνα 42). Όλα τα παραπάνω εξηγούν το μεγάλο μερίδιο της συνεισφοράς του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης (με μερίδιο 35% επί της συνολικής εξοικονόμησης), στη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών.

Όσον αφορά, τη συνεισφορά των υπόλοιπων χρήσεων στην εξοικονόμηση ενέργειας, το μερίδιο της συνεισφοράς της κάθε χρήσης συσχετίζεται με το μερίδιο που έχει η κάθε χρήση στη συνολική κατανάλωση ενέργειας και στο δυναμικό εξοικονόμησης που άπτεται του τεχνικού δυναμικού των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε κάθε χρήση. Η εξοικονόμηση ενέργειας από όλες τις υπόλοιπες χρήσεις προκύπτει από τη στροφή από τις συμβατικές τεχνολογίες σε πιο αποδοτικές, και έτσι σχετίζεται με τις υποθέσεις σχετικά με την τεχνολογική πρόοδο και ωριμότητα των τεχνολογιών. Αξιοσημείωτη είναι η συνεισφορά της απόδοσης στην ψύξη (με μερίδιο 6% επί της συνολικής εξοικονόμησης), η οποία οφείλεται στους πολύ υψηλούς βαθμούς απόδοσης που έχουν οι πολύ αποδοτικές κεντρικές κλιματιστικές μονάδες στη λειτουργία ψύξης. Τέλος, σημαντική είναι και η συνεισφορά της απόδοσης στις ηλεκτρικές συσκευές (με μερίδιο 4% επί της συνολικής εξοικονόμησης) και στο φωτισμό (με μερίδιο 3% επί της συνολικής εξοικονόμησης) στη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, τόσο στον οικιακό όσο και στον τομέα των υπηρεσιών, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κελύφους των κτηρίων (είτε μέσω των νέων κτηρίων που συμμορφώνονται με τους οικοδομικούς κανονισμούς είτε μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης των παλαιών κτηρίων) και ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης συνεισφέρουν κατά περίπου 80% στη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας. Το μερίδιο αυτό είναι λίγο μεγαλύτερο στον οικιακό τομέα, λόγω και των μεγαλύτερων αναγκών θέρμανσης στον τομέα αυτών, αλλά σε κάθε περίπτωση γίνεται σαφές ότι αυτοί είναι οι δύο πυλώνες που μπορούν να εξασφαλίσουν μεγάλης έκτασης ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια. Το υπόλοιπο περίπου 20% της ενεργειακής εξοικονόμησης αντιστοιχεί στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του λοιπού εξοπλισμού και άρα σχετίζεται με το ρυθμό της τεχνολογικής προόδου και της τεχνικής ωριμότητας των τεχνολογιών.

Εικόνα 46: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»



Οι Εικόνες 46 και 47 παρουσιάζουν τη συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα και στον τομέα των υπηρεσιών αντίστοιχα, μέχρι το 2050. Τα σχήματα προκύπτουν κατά αντιστοιχία των σχημάτων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως για την αποσύνθεση της συνολικής ενεργειακής εξοικονόμησης: γίνεται αποσύνθεση της διαφοράς των εκπομπών CO₂ κάθε τομέα για κάθε χρονική στιγμή της περιόδου προβολής μεταξύ της προβολής των εκπομπών CO₂ του «Σταθερού σεναρίου» και της προβολής των εκπομπών CO₂ του υπό μελέτη σεναρίου. Η καμπύλη που αναπαριστά την προβολή των εκπομπών CO₂ του «Σταθερού σεναρίου» αναπαριστά τις εκπομπές CO₂ που αντιστοιχούν στην τελική κατανάλωση ενέργειας του «Σταθερού σεναρίου» με μείγμα καυσίμων και μέσο συντελεστή εκπομπών ίδια με αυτά στη χρονιά βάσης (δηλαδή το 2020). Είναι αυτονόητο ότι οι εκπομπές CO₂ αντιστοιχούν στις

εκπομπές της θέρμανσης και των άλλων θερμικών χρήσεων (δηλαδή της προετοιμασίας ΖΝΧ και του μαγειρέματος), επειδή αυτές είναι οι χρήσεις που δεν είναι αμιγώς ηλεκτρικές και άρα έχουν εκπομπές CO₂. Δηλαδή, η αποσύνθεση της μείωσης των εκπομπών CO₂ εκ των πραγμάτων δεν περιλαμβάνει αλλαγές στη χρήση της ενέργειας στην ψύξη, τις ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις και το φωτισμό. Το παραπάνω εξηγεί και τον λόγο για τον οποίο η καμπύλη που αντιστοιχεί στις εκπομπές CO₂ του «Σταθερού σεναρίου» για τον τομέα των υπηρεσιών έχει μικρότερη κλίση από την αντίστοιχη του οικιακού τομέα, αφού στον πρώτο η αύξηση της ζήτησης και κατ' επέκταση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας που αναπαριστά το «Σταθερό σενάριο» οφείλεται κατά σχεδόν διπλάσιο ποσοστό στον τομέα των υπηρεσιών στην αύξηση της ζήτησης για κλιματισμό και ειδικές ηλεκτρικές χρήσεις σε σχέση με τον οικιακό τομέα.

Η μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών CO₂ για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον οικιακό τομέα προέρχεται από τις επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων (με μερίδιο 27% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών). Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί:

α. η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση αποτελεί το μεγαλύτερο μερίδιο της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα και το μείγμα καυσίμων στη θέρμανση αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από ορυκτά καύσιμα (συμπεριλαμβανομένων στερεών ορυκτών καυσίμων). Άρα οι συνολικές εκπομπές CO₂ που θα αντιστοιχούσαν στη θέρμανση εάν δεν είχαν συμβεί επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων θα αποτελούσαν το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών CO₂ στον τομέα.

β. Οι επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων είχαν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην εξοικονόμηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα.

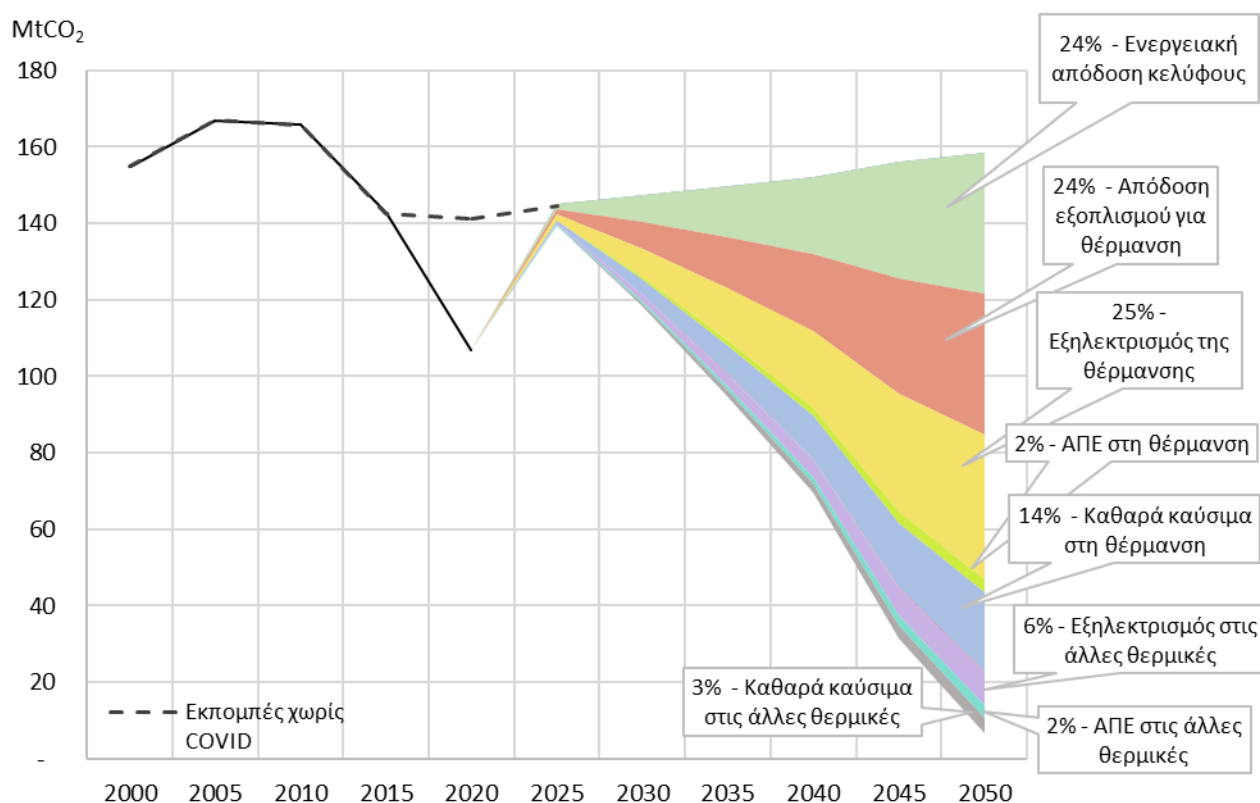
Τη δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα έχει η βελτίωση της απόδοσης του εξοπλισμού για θέρμανση (με μερίδιο 19% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών). Η βελτίωση της απόδοσης του εξοπλισμού για θέρμανση σχετίζεται (όπως και στις αντίστοιχες περιπτώσεις στην αποσύνθεση της εξοικονόμησης ενέργειας) με την τεχνολογική πρόοδο και ωριμότητα των τεχνολογιών. Με άλλα λόγια, το σύνολο του ενεργειακού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη θέρμανση έχει πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από ό, τι είχε τη χρονιά βάσης, και αυτό περιλαμβάνει όλα τα είδη τεχνολογιών, από τους λέβητες μέχρι τις αντλίες θερμότητας. Ειδικά η θεαματική βελτίωση του βαθμού απόδοσης (COP) των αντλιών θερμότητας που επιλέγονται από τους καταναλωτές χάρη στη μείωση του κόστους τους (λόγω των υποθέσεων για τους παράγοντες LBR και LBD) και επιπλέον η προώθηση πολύ αποδοτικών αντλιών θερμότητας μέσω των πολιτικών που στοχεύουν στη διείσδυση των ΑΠΕ, παίζει σημαντικό ρόλο στη συνεισφορά της βελτίωσης της απόδοσης του εξοπλισμού για θέρμανση στη μείωση των εκπομπών CO₂.

Όσον αφορά τη συνεισφορά του μείγματος καυσίμων στη θέρμανση στη μείωση των εκπομπών CO₂, μεγαλύτερη είναι αυτή της στροφής προς την ηλεκτρική ενέργεια (με μερίδιο 14% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών), ακολουθούμενη από τη στροφή στις ΑΠΕ (με μερίδιο 11% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών) και τελευταία είναι η συνεισφορά των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων (δηλαδή του υδρογόνου, του συνθετικού μεθανίου και του βιομεθανίου) (με μερίδιο 7% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών).

Η συνεισφορά των ΑΠΕ είναι σχετικά περιορισμένη και αυτό σχετίζεται με τη σχετική αύξηση της σπανιότητας της βιομάζας (λόγω χρήσης της στην παραγωγή βιοκαυσίμων και βιομεθανίου), η οποία οδηγεί

σε αύξηση των τιμών που αποθαρρύνει τα νοικοκυριά να τις επιλέγουν για θέρμανση χώρων. Επιπλέον, η μοντελοποίηση λαμβάνει υπόψη ρυθμιστικές παρεμβάσεις που μπορεί να ισχύουν σε διαφορά κράτη μέλη και αποτρέπουν την εκπομπή σωματιδίων και άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων από την καύση βιομάζας σε κτήρια που βρίσκονται σε αστικές περιοχές. Όσον αφορά τη συνεισφορά των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων στη μείωση των εκπομπών CO₂, αυτή είναι η χαμηλότερη όσον αφορά το μείγμα καυσίμων στη θέρμανση αφού γίνεται μεγάλη εκμετάλλευση του δυναμικού εξηλεκτρισμού. Τελικά, δηλαδή, η χρήση αερίου για θέρμανση περιορίζεται είτε σε ορισμένες κατηγορίες κτηρίων που για διάφορους λόγους δεν μπορούν να επιλέξουν αντλίες θερμότητας (πχ. αυτονόμηση διαμερίσματος σε πολυκατοικία με κεντρική θέρμανση αερίου), είτε στην καύση αερίου από τα εφεδρικά συστήματα στις βόρειες χώρες, όπου απαιτείται για ορισμένο χρονικό διάστημα να συμπληρώνονται οι ανάγκες θέρμανσης με εφεδρικό σύστημα.

Εικόνα 47: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»



Όσον αφορά τις υπόλοιπες θερμικές χρήσεις, δηλαδή την προετοιμασία ZNX και το μαγείρεμα, η αλλαγή του μείγματος καυσίμων εκεί έχει μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ σε σύγκριση με τη βελτίωση της απόδοσης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε αυτές. Ο εξηλεκτρισμός των άλλων θερμικών χρήσεων έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών CO₂ (με μερίδιο 10% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών), ακολουθούμενη από τη χρήση ΑΠΕ (με μερίδιο 7% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών) και τελικά από τη χρήση κλιματικά ουδέτερων καυσίμων (με μερίδιο 4% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών). Ο εξηλεκτρισμός έγκειται κυρίως στη στροφή προς τη χρήση

ηλεκτρικής ενέργειας στο μαγείρεμα και η χρήση ΑΠΕ, στη χρήση ηλιακής ενέργειας για την προετοιμασία ΖΝΧ.

Οι επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων, η απόδοση του ενεργειακού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη θέρμανση και ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης συνεισφέρουν σχεδόν εξίσου στη μείωση των εκπομπών CO₂ για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα των υπηρεσιών, με τον εξηλεκτρισμό να συνεισφέρει κατά λίγο περισσότερο (με μερίδιο ίσο με 25% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών, έναντι μεριδίου 24% για τα υπόλοιπα).

Η συνεισφορά των επεμβάσεων ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων στην εξοικονόμηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ήταν συγκρίσιμη στους δύο τομείς, επιδρώντας επί της ζήτησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη. Επειδή, όμως η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη αποτελεί σημαντικότερο μερίδιο της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των υπηρεσιών χωρίς όμως να έχει αντίκτυπο στις εκπομπές CO₂ στον τομέα, η συνεισφορά των επεμβάσεων ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων του τομέα των υπηρεσιών στη συνολική μείωση των εκπομπών CO₂ είναι λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη στον οικιακό τομέα.

Η τάση εξηλεκτρισμού της θέρμανσης στον τομέα των υπηρεσιών έχει παρατηρηθεί ήδη από τη στατιστική, και είναι πιο έντονη σε σχέση με την αντίστοιχη στον οικιακό τομέα λόγω της ευκολίας που παρέχει η χρήση των κεντρικών κλιματιστικών μονάδων όχι μόνο στη θέρμανση αλλά και για τον κλιματισμό και αερισμό των κτηρίων. Για το λόγο αυτό, εξηγείται όχι μόνο γιατί η συνεισφορά του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης στη συνολική μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των υπηρεσιών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στον οικιακό τομέα, αλλά και γιατί ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης έχει (έστω και με πολύ μικρή διαφορά) τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των υπηρεσιών.

Η μεγάλη συνεισφορά του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης στη μείωση των εκπομπών CO₂ εξηγεί κατά ένα μέρος και τη σημαντική συνεισφορά που έχει η χρήση των κλιματικά ουδετέρων καυσίμων (με μερίδιο ίσο με 14% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών). Συγκεκριμένα η χρήση τους αντιστοιχεί σε μεγάλο βαθμό στη συμπλήρωση της θέρμανσης από τις αντλίες θερμότητας (ή/και τις κεντρικές κλιματιστικές εγκαταστάσεις) μέσω του εφεδρικού συστήματος. Εκτός αυτού, ορισμένες κατηγορίες κτηρίων, όπως για παράδειγμα κτήρια σχολείων, που χρησιμοποιούν αέριο για θέρμανση μπορεί να μην επιλέγουν την αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος θέρμανσης με σύστημα που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια, και άρα υπάρχει μια ποσότητα αερίου που διατηρείται σε όλη την περίοδο προβολής, του οποίου όμως ο μέσος συντελεστής εκπομπής μειώνεται με το χρόνο.

Η συνεισφορά του μείγματος καυσίμων στις υπόλοιπες θερμικές χρήσεις στη μείωση των εκπομπών CO₂ είναι πολύ περιορισμένη όπως ήταν και στον οικιακό τομέα, με μεγαλύτερη τη συνεισφορά από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας (με μερίδιο ίσο με 6% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών), ακολουθούμενη από τη χρήση των ΑΠΕ (με μερίδιο ίσο με 2% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών) και των κλιματικά ουδετέρων καυσίμων (με μερίδιο ίσο με 3% επί της συνολικής μείωσης των εκπομπών).

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι σαφές, ότι οι επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης στο κέλυφος των κτηρίων και ο εξηλεκτρισμός των θερμικών χρήσεων είναι μέγιστης σημασίας για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κτηριακό τομέα. Όπως φάνηκε από την αποσύνθεση της μείωσης των εκπομπών CO₂, η συνεισφορά των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων, δηλαδή του υδρογόνου, του συνθετικού μεθανίου και του βιομεθανίου, συνεισφέρουν επίσης στην επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας, όμως η συνεισφορά

τους είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με τους άλλους δύο παράγοντες. Αυτό σχετίζεται εξολοκλήρου με το σκοπό της δημιουργίας ενός βιώσιμου πλαισίου στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, τόσο ως προς την αξιοποίηση του δυναμικού του κάθε τομέα όσο και ως προς το κόστος που ο μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος ενέχει. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί ότι η πορεία προς την κλιματική ουδετερότητα είναι τεχνικά εφικτή και ότι επίσης δεν συνεπάγεται υπερβολικά κόστη για τους τελικούς καταναλωτές. Στην επόμενη υπό-ενότητα θα αναλυθούν αυτά τα στοιχεία με λεπτομέρεια.

6.2.4. Το δίλημμα κατά πόσον απαιτούνται κλιματικά ουδέτερα καύσιμα για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα κτήρια

Στην υπό-ενότητα αυτή εξετάζεται η επίπτωση που θα είχε η αποτυχία της πλήρους εκμετάλλευσης του δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης και του εξηλεκτρισμού των θερμικών χρήσεων στον τομέα των κτηρίων για το μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα, στο πλαίσιο της επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας. Για το σκοπό αυτό ποσοτικοποιούνται με το προτεινόμενο μοντέλο δύο εναλλακτικά σενάρια που επιτυγχάνουν την ίδια μείωση εκπομπών με το βασικό σενάριο κλιματικής ουδετερότητας που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υπό-ενότητα (σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας») και στους δύο τομείς μέχρι το 2050, αλλά διαφοροποιούνται ως προς αυτό σύμφωνα με τα παρακάτω.

A. Σενάριο «Αποτυχίας Ενεργειακής Εξοικονόμησης»:

Στο σενάριο υποτίθεται ότι:

- ισχύει η ένταξη του κτηριακού τομέα σε ένα νέο χωριστό ΣΕΔΕ, όπως και στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»,
- υπάρχουν πολύ περιορισμένα οικονομικά μέτρα που να εξασφαλίζουν τη μόχλευση των επενδύσεων σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων, και άρα δεν υπάρχει και στόχος διπλασιασμού του ετήσιου ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων σε σχέση με τη σημερινή κατάσταση,
- οι οικοδομικοί κανονισμοί για τις νέες κατασκευές δεν αυστηροποιούνται διαχρονικά και δεν υπάρχει ρυθμιστικό πλαίσιο που να εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με αυτούς,
- δεν υπάρχουν οικονομικά μέτρα που να επιβραβεύουν την επιλογή των αντλιών θερμότητας υψηλής απόδοσης χάρη στη συνεισφορά τους στη διαμόρφωση του συνολικού δείκτη για την επίδοση σχετικά με τις ΑΠΕ,
- μετά το 2030, μειώνεται προοδευτικά ο μέσος συντελεστής εκπομπών του διανεμόμενου αερίου μέσω της ανάμειξης βιομεθανίου, υδρογόνου και κλιματικά ουδέτερου συνθετικού μεθανίου στο δίκτυο διανομής αερίου (όπως στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»).
- δεν εφαρμόζονται τα θεσμικά μέτρα που σχετίζονται με την επιτυχή εφαρμογή των συγκεκριμένων Άρθρων της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση, της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων, και της Οδηγίας για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας που στοχεύουν στην ενημέρωση και πληροφόρηση των καταναλωτών.

Ως αποτέλεσμα των προηγούμενων, οι συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος που υποτίθενται ότι διαμορφώνονται στο σενάριο χάρη στις πολιτικές παροχής κινήτρων και μπορούν να οδηγήσουν στην άρση των μη-οικονομικών εμποδίων είναι πολύ πιο περιορισμένες σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής

Ουδετερότητας». Αυτό αφορά τόσο στην τιμή του υποκειμενικού προεξοφλητικού επιτοκίου που χρησιμοποιείται για τις λήψεις των επενδυτικών αποφάσεων (σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και σε επιλογή ενεργειακού εξοπλισμού), το οποίο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που ισχύει στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» όσο και στις υποθέσεις σχετικά με την τεχνολογική πρόοδο και την τεχνική ωριμότητα των πολύ αποδοτικών τεχνολογιών, που ακολουθεί έναν πιο αργό ρυθμό σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας».

Σκοπός του πλαισίου πολιτικής και των υποθέσεων σχετικά με την άρση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» είναι να αναπαραστήσει μια στρατηγική επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας που δεν εστιάζει στην ενεργειακή εξοικονόμηση, ούτε μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων ούτε μέσω της επιλογής αποδοτικού ενεργειακού εξοπλισμού σε όλες τις χρήσεις ενέργειας στα κτήρια, συμπεριλαμβανομένων των αντλιών θερμότητας. Ως εκ τούτου, το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» αναπαριστά μια στρατηγική επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας, στην οποία ο μοναδικός κλιματικά ουδέτερος ενεργειακός φορέας που μπορεί να επιτύχει δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ είναι τα κλιματικά ουδέτερα αέρια καύσιμα (δηλαδή το υδρογόνο, το συνθετικό μεθάνιο, και το βιομεθάνιο).

Β. Σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού»:

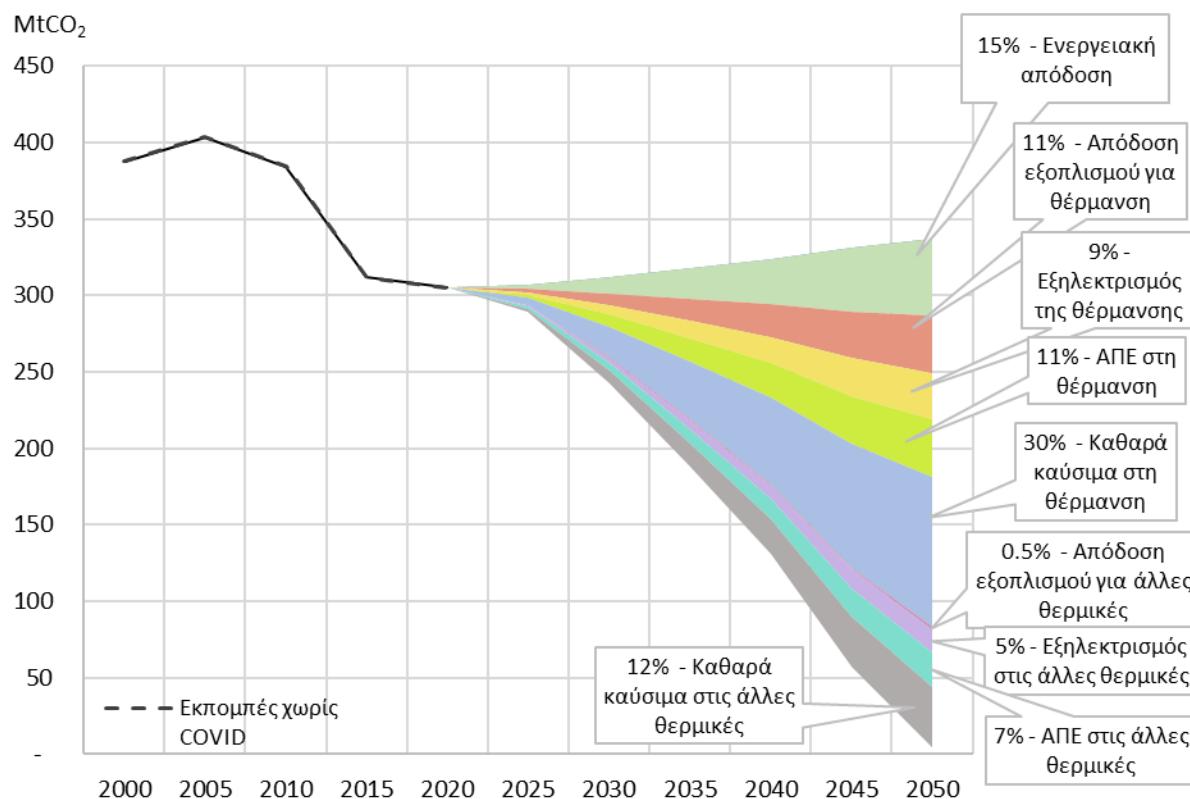
Στο σενάριο υποτίθεται ότι:

- ισχύει η ένταξη του κτηριακού τομέα σε ένα νέο χωριστό ΣΕΔΕ, όπως και στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»,
- ισχύουν τα οικονομικά μέτρα που εξασφαλίζουν τη μόχλευση των επενδύσεων σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων, και ισχύει ο στόχος διπλασιασμού του ετήσιου ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων σε σχέση με τη σημερινή κατάσταση, όπως και στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»,
- οι οικοδομικοί κανονισμοί για τις νέες κατασκευές αυστηροποιούνται διαχρονικά και υπάρχει ρυθμιστικό πλαίσιο που να εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με αυτούς, όπως και στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»,
- δεν υπάρχουν οικονομικά μέτρα που να επιβραβεύουν την επιλογή των αντλιών θερμότητας υψηλής απόδοσης χάρη στη συνεισφορά τους στη διαμόρφωση του συνολικού δείκτη για την επίδοση σχετικά με τις ΑΠΕ,
- μετά το 2030, μειώνεται προοδευτικά ο μέσος συντελεστής εκπομπών του διανεμόμενου αερίου μέσω της ανάμιξης βιομεθανίου, υδρογόνου και κλιματικά ουδέτερου συνθετικού μεθανίου στο δίκτυο διανομής αερίου (όπως στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»).
- εφαρμόζονται τα θεσμικά μέτρα που σχετίζονται με την επιτυχή εφαρμογή των συγκεκριμένων Άρθρων της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση, της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων, και της Οδηγίας για την Επισήμανση της Κατανάλωσης Ενέργειας που στοχεύουν στην ενημέρωση και πληροφόρηση των καταναλωτών.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» διαφέρει ουσιαστικά από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» μόνο ως προς το πλαίσιο πολιτικής και τις υποθέσεις σχετικά με τις συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος που αφορούν στην επιλογή των αντλιών θερμότητας για θέρμανση. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις υποθέσεις σχετικά με την τεχνολογική πρόοδο και την τεχνική ωριμότητα

των αντλιών θερμότητας (δηλαδή τους παράγοντες LBR και LBD), θεωρείται ότι ακολουθούν έναν πολύ αργό έως και στατικό ρυθμό, με αποτέλεσμα το κόστος και ο βαθμός απόδοσης των αντλιών θερμότητας που είναι διαθέσιμες το 2050 να είναι στα σημερινά επίπεδα.

Εικόνα 48: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης»

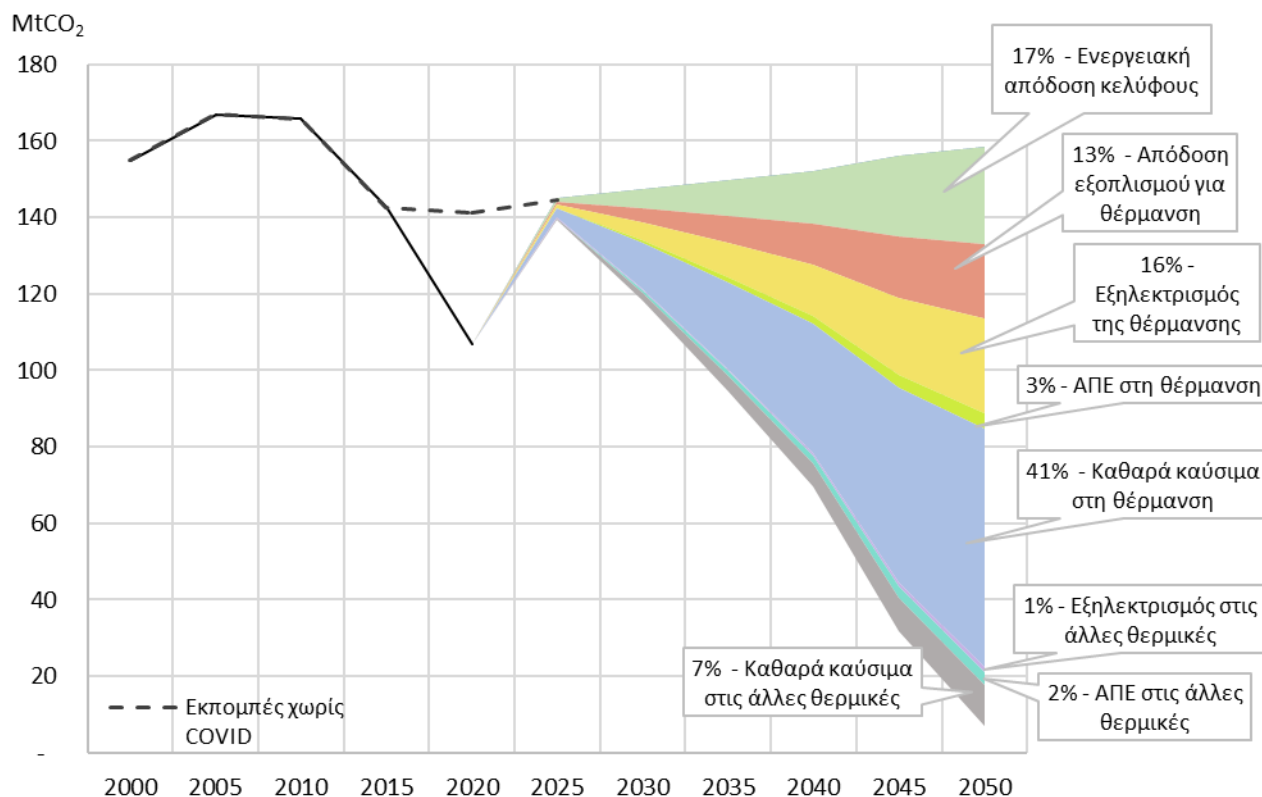


Σκοπός του πλαισίου πολιτικής και των υποθέσεων στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» είναι να αναπαραστήσει μια στρατηγική επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας που ενώ δίνει έμφαση στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, τόσο μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους όσο και μέσω της προώθησης των αποδοτικών τεχνολογιών για τις διάφορες χρήσεις της ενέργειας στα κτήρια, ωστόσο δεν εστιάζει καθόλου στον εξηλεκτρισμό της θέρμανσης, με την έννοια ότι δεν υπάρχει το κατάλληλο πλαίσιο που να επιτρέπει τη μεγάλης έκτασης διείσδυση των αντλιών θερμότητας για θέρμανση στα κτήρια. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης», ο μοναδικός κλιματικά ουδέτερος ενεργειακός φορέας που μπορεί να επιτύχει τη δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ στη θέρμανση είναι τα κλιματικά ουδέτερα αέρια καύσιμα (δηλαδή το υδρογόνο, το συνθετικό μεθάνιο, και το βιομεθάνιο).

Οι προβολές των δύο εναλλακτικών σεναρίων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως (σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» και σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού») αντιπαραβάλλονται με τις προβολές του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» και για τους δύο τομείς, και αυτό αφορά τόσο τις ενεργειακές προβολές όσο και τα κόστη που αντιστοιχούν στο κάθε σενάριο. Πρώτα όμως, παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της αποσύνθεσης της μείωσης των εκπομπών CO₂ σε κάθε τομέα κατ' αντιστοιχία αυτών

που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υπό-ενότητα για το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Τέλος, υπολογίζεται η επίπτωση κάθε μιας στρατηγικής στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής όσον αφορά τις απαιτήσεις σε νέες επενδύσεις σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες που θα παράγουν την κλιματικά ουδέτερη ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή του υδρογόνου και συνθετικού μεθανίου.

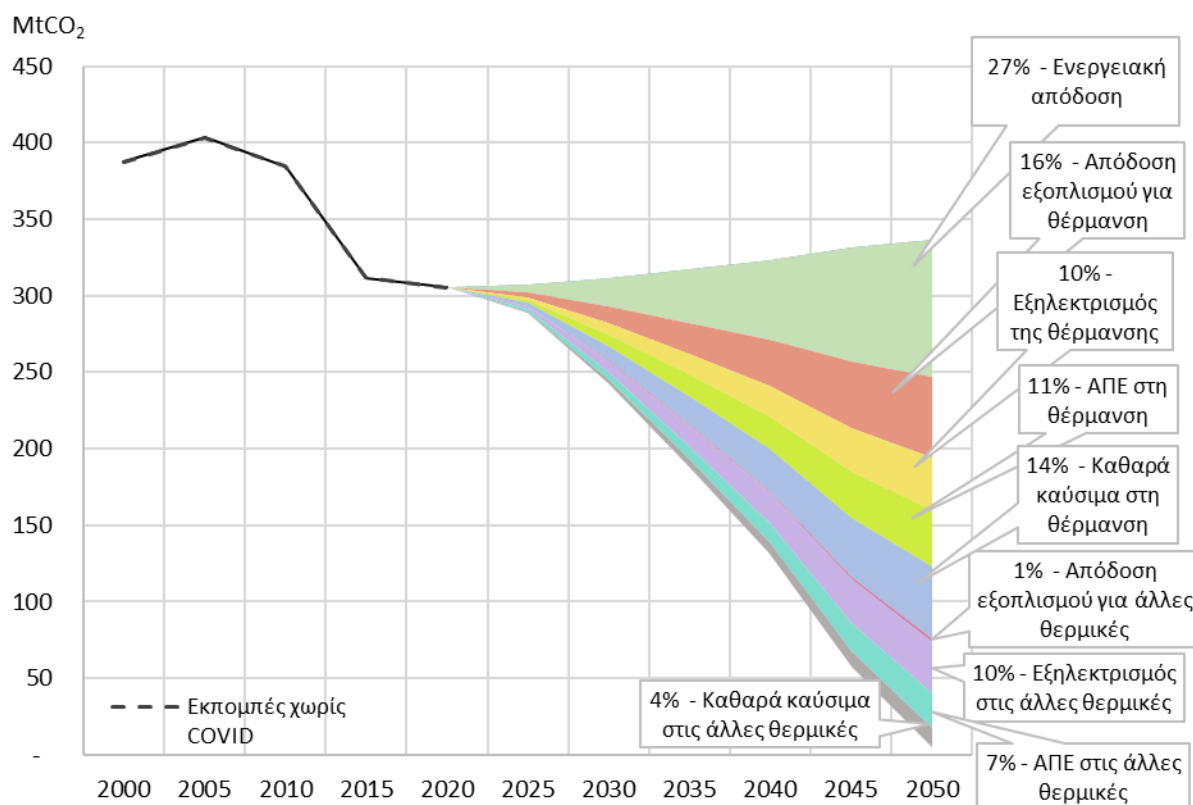
Εικόνα 49: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης»



Οι Εικόνες 48 και 49 παρουσιάζουν τη συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα και στον τομέα των υπηρεσιών αντίστοιχα μέχρι το 2050 για το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης». Και στους δύο τομείς είναι φανερό, όπως ήταν και αναμενόμενο άλλωστε από τις υποθέσεις του σεναρίου, ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών CO₂ έχει η χρήση των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων στη θέρμανση. Επίσης έχει διπλασιαστεί η συνεισφορά τους στη μείωση των εκπομπών CO₂ από τη χρήση τους σε άλλες θερμικές χρήσεις σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Οι επεμβάσεις ενεργειακής απόδοσης έχουν και στους δύο τομείς την αμέσως μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών CO₂ αν και το μερίδιο της συνεισφοράς τους έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Αντίστοιχη μείωση στη συνεισφορά τους ως προς τη μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ έχουν ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης και των άλλων θερμικών χρήσεων. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού ο μετασχηματισμός της κατανάλωσης ενέργειας γίνεται μέσω της στροφής προς τα κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, των οποίων μάλιστα ο όγκος αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», εν τη απουσία της ενεργειακής

εξοικονόμησης που προσφέρει η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους. Μείωση στη συνεισφορά τους ως προς τη μείωση των εκπομπών CO₂ στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» έχει και η απόδοση του ενεργειακού εξοπλισμού. Ο ενεργειακός εξοπλισμός που χρησιμοποιεί τα κλιματικά ουδέτερα καύσιμα στα κτήρια για την κάλυψη των θερμικών αναγκών είναι οι συμβατικές τεχνολογίες λεβήτων (συμπυκνώσεως ή απλοί) και αυτόνομων συστημάτων, οι οποίες είναι σήμερα αρκετά ώριμες (τεχνικά και οικονομικά) και άρα έχουν σε μεγάλο βαθμό εξαντλήσει το δυναμικό βελτίωσης της απόδοσής τους από τεχνική άποψη.

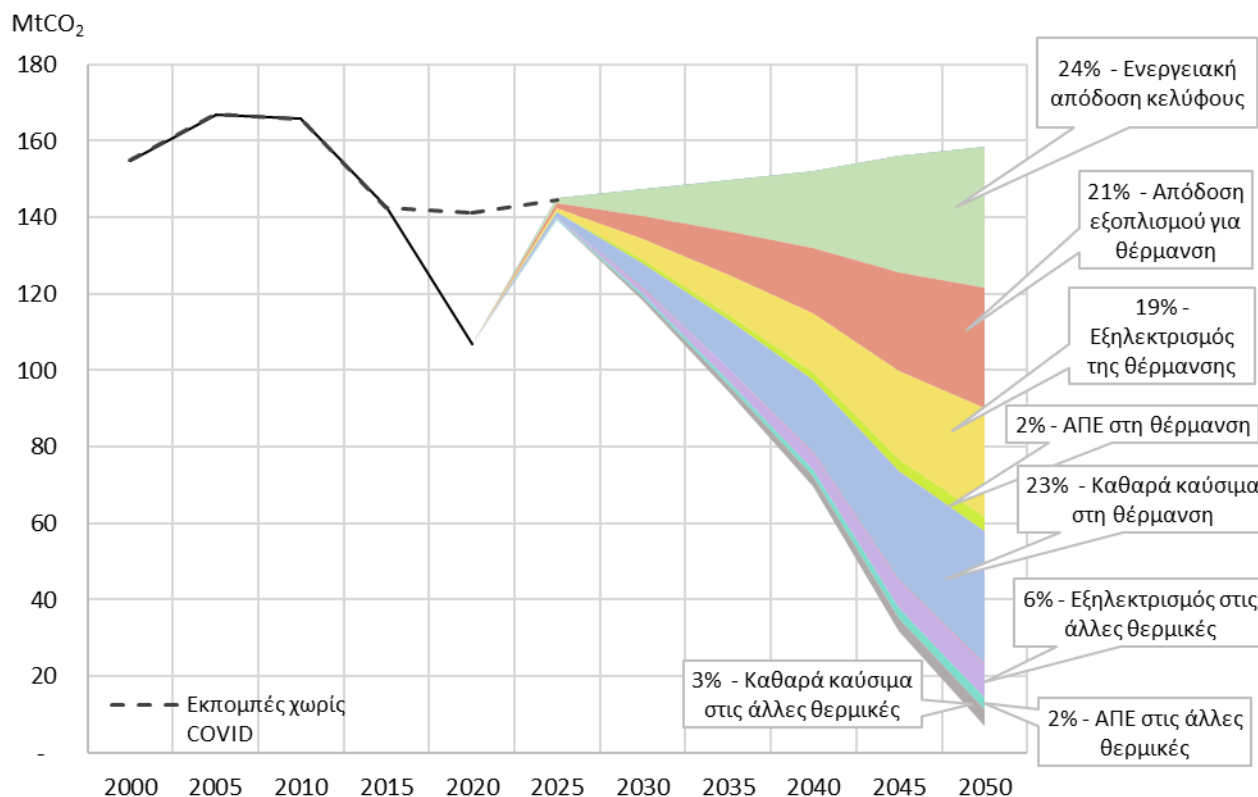
Εικόνα 50: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού»



Οι Εικόνες 50 και 51 παρουσιάζουν τη συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα και στον τομέα των υπηρεσιών αντίστοιχα, μέχρι το 2050 για το σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού». Οι διαφορές του σεναρίου αυτού σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» έγκεινται βασικά στη συνεισφορά των διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με τη θέρμανση αφού εξ υποθέσεως το σενάριο θεωρεί τους ίδιους στόχους και μέτρα πολιτικής σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και την επιλογή του εξοπλισμού για τις υπόλοιπες θερμικές χρήσεις. Και στους δύο τομείς έχει αυξηθεί το μερίδιο της συνεισφοράς της χρήσης κλιματικά ουδέτερων καυσίμων στη συνολική μείωση των εκπομπών CO₂ σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», όμως η αύξηση είναι μικρότερη σε σχέση με το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης». Αντίστοιχα έχει μειωθεί η συνεισφορά του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης και της απόδοσης του εξοπλισμού για θέρμανση στη συνολική μείωση των εκπομπών CO₂ σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» αλλά η μείωση

αυτή είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» γιατί το σενάριο υποθέτει την ίδια τεχνολογική πρόοδο με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» για όλες τις υπόλοιπες τεχνολογίες (πλην των αντλιών θερμότητας), η οποία όμως εκ των πραγμάτων δεν είναι θεαματική αφού οι τεχνολογίες αυτές είναι ήδη σήμερα τεχνικά ώριμες. Όσον αφορά την επιλογή του ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού», οι συμβατικοί λέβητες αντικαθίστανται με λέβητες συμπύκνωσης ή αυτόνομα συστήματα αερίου που έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τους πρώτους.

Εικόνα 51: Συνεισφορά διαφόρων παραγόντων στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των υπηρεσιών για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού»



Οι Πίνακες 24 και 25 αντιπαραβάλλουν τις ενεργειακές και κλιματικές προβολές των δύο εναλλακτικών σεναρίων με τις προβολές του σεναρίου «Κλιματικής ουδετερότητας» για το 2050 για τον οικιακό τομέα και τον τομέα των υπηρεσιών, αντίστοιχα. Για σκοπούς ανάλυσης, οι Πίνακες περιλαμβάνουν και τις προβολές που αντιστοιχούν σε σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής. Οι ενεργειακές προβολές επιβεβαιώνουν τα σχήματα που αποσυνέθεταν τη μείωση των εκπομπών CO₂ και στους δύο τομείς και στα δύο εναλλακτικά σεναρία.

Στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» ο μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» αλλά λίγο μεγαλύτερος από αυτόν που θα επιτυγχανόταν έως το 2050 εάν επικρατούσε το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής.

Πίνακας 24: Προβολές ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO₂ στα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας στον οικιακό τομέα

| ΕΕ | 2050 | | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | Υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | Σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | Σενάριο «Αποτυχίας Ενεργειακής Εξοικονόμησης» | Σενάριο «Αποτυχίας Εξηλεκτρισμού» |
| Μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους | 0.85% | 1.95% | 1.02% | 1.95% |
| Ένταση ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος του κτηρίου (% εξοικονόμηση ωφέλιμης θερμικής ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση) | 30% | 53% | 30% | 53% |
| Τελική κατανάλωση ενέργειας (Mtoe) | 194.14 | 136.17 | 181.89 | 144.66 |
| Στερεά και υγρά ορυκτά καύσιμα | 11.80 | 0.13 | 0.16 | 0.14 |
| Αέριο | 48.29 | 21.87 | 48.93 | 34.42 |
| εκ του οποίου | | | | |
| Ορυκτό φυσικό αέριο | 48.28 | 0.44 | 0.37 | 0.40 |
| Συνθετικό μεθάνιο | 0.00 | 13.08 | 39.26 | 25.30 |
| Βιοαέριο | 0.01 | 4.07 | 4.07 | 4.07 |
| Υδρογόνο | 0.00 | 4.29 | 5.23 | 4.64 |
| ΑΠΕ | 43.68 | 24.36 | 36.68 | 28.55 |
| εκ των οποίων | | | | |
| Βιομάζα | 40.34 | 20.55 | 30.95 | 24.08 |
| Ηλιακή ενέργεια | 3.28 | 3.68 | 5.54 | 4.32 |
| Γεωθερμία | 0.07 | 0.12 | 0.19 | 0.15 |
| Διανεμόμενη θερμότητα | 22.03 | 15.80 | 22.08 | 16.78 |
| Ηλεκτρισμός | 68.34 | 74.02 | 74.04 | 64.78 |
| Μερίδιο ηλεκτρισμού στην τελική κατανάλωση (%) | 35% | 54% | 41% | 45% |
| Μερίδιο συνθετικών καυσίμων στην τελική κατανάλωση (%) | 0% | 13% | 24% | 21% |
| Εξοικονόμηση τελικής κατανάλωσης από το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής (%) | 0% | -30% | -6% | -25% |
| Μέση ετήσια απόδοση ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση | 0.83 | 1.08 | 0.85 | 0.96 |
| Εκπομπές CO ₂ (MtCO ₂) | 152.09 | 1.27 | 1.27 | 1.27 |

Η ύπαρξη του φόρου για τις εκπομπές CO₂ που ισχύει στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» είναι ο βασικός οδηγός αυτής της επιπλέον ενεργειακής αναβάθμισης, σε σχέση με το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής. Ο φόρος για τις εκπομπές CO₂ εξηγεί και την απομάκρυνση από τα στερεά και υγρά ορυκτά καύσιμα στη σύγκριση του σεναρίου «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» με το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής. Όσον αφορά το μείγμα καυσίμων στην τελική κατανάλωση, το αέριο έχει αυξήσει σημαντικά το μερίδιό του στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και ταυτόχρονα ο ηλεκτρισμός έχει μειώσει το δικό του.

Πίνακας 25: Προβολές ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO₂ στα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα των υπηρεσιών

| ΕΕ | 2050 | | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | Υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | Σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | Σενάριο «Αποτυχίας Ενεργειακής Εξοικονόμησης» | Σενάριο «Αποτυχίας Εξηλεκτρισμού» |
| Μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους | 0.47% | 1.14% | 0.58% | 1.14% |
| Ένταση ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος του κτηρίου (% εξοικονόμηση ωφέλιμης θερμικής ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση) | 18% | 40% | 20% | 40% |
| Τελική κατανάλωση ενέργειας (Mtoe) | 115.05 | 92.31 | 101.40 | 96.27 |
| Στερεά και υγρά ορυκτά καύσιμα | 2.94 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Αέριο | 26.31 | 15.87 | 26.26 | 21.67 |
| εκ του οποίου | | | | |
| Ορυκτό φυσικό αέριο | 24.84 | 0.30 | 0.15 | 0.15 |
| Συνθετικό μεθάνιο | 0.00 | 9.00 | 18.83 | 13.59 |
| Βιοαέριο | 1.46 | 3.62 | 3.62 | 3.62 |
| Υδρογόνο | 0.00 | 2.95 | 3.66 | 4.31 |
| ΑΠΕ | 10.54 | 5.43 | 7.72 | 7.23 |
| εκ των οποίων | | | | |
| Βιομάζα | 7.52 | 2.44 | 3.47 | 3.25 |
| Ηλιακή ενέργεια | 1.00 | 1.18 | 1.68 | 1.58 |
| Γεωθερμία | 2.02 | 1.80 | 2.56 | 2.40 |
| Διανεμόμενη θερμότητα | 10.09 | 5.87 | 6.06 | 6.13 |
| Ηλεκτρισμός | 65.17 | 65.12 | 61.33 | 61.22 |
| Μερίδιο ηλεκτρισμού στην τελική κατανάλωση (%) | 57% | 71% | 60% | 64% |
| Μερίδιο συνθετικών καυσίμων στην τελική κατανάλωση (%) | 0% | 13% | 22% | 19% |
| Εξοικονόμηση τελικής κατανάλωσης από το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής (%) | 0% | -20% | -12% | -16% |
| Μέση ετήσια απόδοση ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση | 1.06 | 1.32 | 1.18 | 1.19 |
| Εκπομπές CO ₂ (MtCO ₂) | 67.37 | 0.70 | 0.70 | 0.70 |

Το μερίδιο του αερίου στο μείγμα καυσίμων στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» είναι μεγαλύτερο από αυτό που αντιστοιχεί στο υπάρχον πλαίσιο πολιτικής αλλά με πολύ μικρότερο συντελεστή εκπομπών, γιατί στο τελευταίο σημαντικό μερίδιο στην τελική κατανάλωση ενέργειας έχει και η βιομάζα, η οποία όμως λόγω σπανιότητας στα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας έχει μικρότερο μερίδιο (αν και το μερίδιο αυτό είναι μεγαλύτερο στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» από το αντίστοιχο στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»). Ως αποτέλεσμα των παραπάνω η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας του σεναρίου «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» αλλά μικρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής.

Πίνακας 26: Σύγκριση κόστους μεταξύ των σεναρίων πολιτικής για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον οικιακό τομέα

| ΕΕ | 2021-2050 | | | |
|--|---------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | Υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | Σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | Σενάριο «Αποτυχίας Ενεργειακής Εξοικονόμησης» | Σενάριο «Αποτυχίας Εξηλεκτρισμού» |
| Επενδυτική δαπάνη (αθροιστική για την περίοδο, δισ. €) | 4129 | 5199 | 4344 | 5188 |
| Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους | 917 | 1924 | 1126 | 1924 |
| Για την αγορά εξοπλισμού κάθε είδους | 3212 | 3275 | 3218 | 3264 |
| Πάγια κόστη για επενδύσεις (CAPEX) (ετήσια στην περίοδο, δισ. €) | 293 | 384 | 312 | 382 |
| Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους | 79 | 165 | 96 | 165 |
| Για την αγορά εξοπλισμού κάθε είδους | 215 | 219 | 215.1 | 216.7 |
| Μεταβλητά κόστη για αγορά καυσίμου (OPEX) (ετήσια στην περίοδο, δισ. €) | 287 | 275 | 360 | 284 |
| Συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες (ετήσιο στην περίοδο, δισ. €) | 580 | 659 | 672 | 666 |
| Συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες ανά κτήριο (ετήσιο στην περίοδο, €/κτήριο) | 2926 | 3321 | 3388 | 3356 |
| % αλλαγή του CAPEX, από το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 0% | 31% | 6% | 30% |
| % αλλαγή του OPEX, από το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 0% | -4% | 26% | -1% |
| % αλλαγή του CAPEX, από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | | 0% | -19% | -1% |
| % αλλαγή του OPEX, από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | | 0% | 31% | 3% |
| Μέση ετήσια δαπάνη αγοράς καυσίμου ως ποσοστό του εισοδήματος (σε %) | 2.93 | 2.81 | 3.68 | 2.90 |

Το μείγμα καυσίμων στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» είναι περίπου ανάμεσα σε αυτό του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» και σε αυτό του σεναρίου «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης», όμως η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας είναι πιο κοντά σε αυτή του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» χάρη στη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που έχει επιτευχθεί μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους (που είναι στα δύο σενάρια η ίδια ως προς την ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση). Η αποτυχία διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» ευθύνεται για τη διαφορά στην τελική κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των δύο σεναρίων και αντικατοπτρίζεται και στη μέση ετήσια απόδοση του ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση.

Οι Πίνακες 26 και 27 αντιπαραβάλλουν τα κόστη των δύο εναλλακτικών σεναρίων με αυτά του σεναρίου «Κλιματικής ουδετερότητας» για τη διάρκεια της περιόδου προβολής για τον οικιακό τομέα και τον τομέα

των υπηρεσιών, αντίστοιχα. Για σκοπούς ανάλυσης, οι Πίνακες περιλαμβάνουν και τα κόστη που αντιστοιχούν στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής.

Πίνακας 27: Σύγκριση κόστους μεταξύ των σεναρίων πολιτικής για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα των υπηρεσιών

| ΕΕ | 2021-2050 | | | |
|--|---------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | Υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | Σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | Σενάριο «Αποτυχίας Ενεργειακής Εξοικονόμησης» | Σενάριο «Αποτυχίας Εξηλεκτρισμού» |
| Επενδυτική δαπάνη (αθροιστική για την περίοδο, δις. €) | 1581 | 1743 | 1579 | 1651 |
| Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους | 158 | 286 | 217 | 286 |
| Για την αγορά εξοπλισμού κάθε είδους | 1423 | 1456 | 1362 | 1365 |
| Πάγια κόστη για επενδύσεις (CAPEX) (ετήσια στην περίοδο, δις. €) | 105 | 120 | 107 | 119 |
| Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους | 15 | 28 | 21 | 28 |
| Για την αγορά εξοπλισμού κάθε είδους | 90 | 92 | 86.3 | 91.2 |
| Μεταβλητά κόστη για αγορά καυσίμου (OPEX) (ετήσια στην περίοδο, δις. €) | 182 | 184 | 206 | 187 |
| Συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες (ετήσιο στην περίοδο, δις. €) | 287 | 304 | 314 | 306 |
| Συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες ανά κτήριο (ετήσιο στην περίοδο, €/κτήριο) | 32027 | 33884 | 34799 | 33954 |
| % αλλαγή του CAPEX, από το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 0% | 14% | 2% | 13% |
| % αλλαγή του OPEX, από το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | 0% | 1% | 13% | 3% |
| % αλλαγή του CAPEX, από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | | 0% | -11% | -1% |
| % αλλαγή του OPEX, από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | | 0% | 12% | 2% |

Τα πάγια ετήσια κόστη για επενδύσεις (CAPEX) τόσο ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους όσο και αγοράς ενεργειακού εξοπλισμού είναι σημαντικά μεγαλύτερα στο σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» σε σχέση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, όπως είναι αναμενόμενο. Η σημαντικά υψηλότερη επένδυση στο σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» επιτυγχάνει να μειώσει τα ετήσια μεταβλητά κόστη για αγορά ενέργειας (OPEX) σε σύγκριση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, όμως η εξοικονόμηση στον ενεργειακό λογαριασμό δεν αντισταθμίζει το επιπρόσθετο CAPEX, και για αυτό το συνολικό ετήσιο κόστος απόκτησης ωφέλιμων ενεργειακών υπηρεσιών (το άθροισμα CAPEX και OPEX) (Paltsev & Carpos, 2013) είναι μεγαλύτερο στο σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» σε σχέση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής.

Το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» βασίζεται λιγότερο στην ενεργειακή απόδοση και περισσότερο στη δυνατότητα χρήσης κλιματικά ουδέτερου μεθανίου και υδρογόνου. Όσον αφορά την

ευκολία για τους καταναλωτές και την αποφυγή διαταραχών στον τρόπο χρήσης και διανομής της ενέργειας στον κτηριακό τομέα, το σενάριο αυτό είναι πιο αξιόπιστο από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Ωστόσο, το συνολικό ετήσιο κόστος απόκτησης ωφέλιμων ενεργειακών υπηρεσιών είναι σημαντικά υψηλότερο. Ενώ τα πάγια ετήσια κόστη για επενδύσεις (CAPEX) του σεναρίου είναι σημαντικά μικρότερα από αυτά του σεναρίου «Κλιματικής ουδετερότητας», τα μεταβλητά ετήσια κόστη για αγορά ενέργειας (OPEX) είναι σημαντικά μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου «Κλιματικής ουδετερότητας». Σε αυτό ευθύνεται το γεγονός ότι όχι μόνο ο όγκος των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων είναι μεγαλύτερος στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» αλλά και το γεγονός ότι το μερίδιο του συνθετικού μεθανίου είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του υδρογόνου στο μείγμα του αερίου, το οποίο έχει και μεγαλύτερη τιμή. Σε σύγκριση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, το συνολικό κόστος για ενεργειακές υπηρεσίες είναι σημαντικά μεγαλύτερο στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης». Το CAPEX, άρα και οι επενδυτικές δαπάνες, διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ των δύο και άρα η αύξηση του κόστους είναι ολόκληρη λόγω της αύξησης του OPEX και της πολύ μεγαλύτερης τιμής των κλιματικά ουδέτερων αερίων καυσίμων έναντι των συμβατικών (που χρησιμοποιούνται στο υπάρχον πλαίσιο πολιτικής). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας προϋποθέτουν την αξιοποίηση του συνόλου των δυνατοτήτων learning by doing για την παραγωγή των συνθετικών καυσίμων. Η δομή του κόστους των συνθετικών καυσίμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το μερίδιο κόστους της μεθανοποίησης γίνεται σχετικά μικρό μετά την εκμετάλλευση του δυναμικού εκμάθησης για τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Βέβαια, σημαντική αβεβαιότητα περιβάλλει και το κόστος της δέσμευσης CO₂ από τον αέρα και, σε μικρότερο βαθμό, από βιογενείς πόρους. Οι υποθέσεις του σεναρίου είναι αισιόδοξες για αυτά τα κόστη.

Το σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» έχει σαφώς μεγαλύτερο συνολικό ετήσιο κόστος απόκτησης ωφέλιμων ενεργειακών υπηρεσιών από το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», αλλά λίγο μικρότερο από το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης», χάρη στα οφέλη από την ενεργειακή αναβάθμιση, και άρα από τη μείωση της δαπάνης για αγορά ενέργειας σε σχέση με αυτό. Η αύξηση του συνολικού κόστους σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση του OPEX, λόγω αφενός της ζήτησης μεγαλύτερου όγκου σε κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, αφετέρου του μεγαλύτερου μεριδίου που έχει το συνθετικό μεθάνιο στο μείγμα αυτό.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, ως προς τον τελικό καταναλωτή, δηλαδή τον κτηριακό τομέα στην προκειμένη περίπτωση, η αποτυχία των δύο εναλλακτικών σεναρίων έγκειται βασικά στο ότι έχουν μεγαλύτερο συνολικό ετήσιο κόστος απόκτησης ωφέλιμων ενεργειακών υπηρεσιών, το οποίο με τη σειρά του οφείλεται αποκλειστικά στα μεταβλητά ετήσια κόστη για αγορά ενέργειας, σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Αυτό λοιπόν συνεπάγεται και αποτυχία των εναλλακτικών σεναρίων και από τη σκοπιά της χάραξης πολιτικής, διότι οποιαδήποτε από τις δύο εναλλακτικές και να ακολουθείτο θα οδηγούσε τους καταναλωτές να πληρώνουν μεγαλύτερο μερίδιο του εισοδήματός τους για τους λογαριασμούς ενέργειας σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Ειδικά μάλιστα στο σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης», η σημαντική αύξηση του OPEX υπονοεί ότι τα νοικοκυριά θα έπρεπε να δίνουν σχεδόν μια ποσοστιαία μονάδα παραπάνω μερίδιο του εισοδήματός τους για τους λογαριασμούς ενέργειας και σε σχέση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, και αυτό οπωσδήποτε δεν είναι επιτυχία της στρατηγικής, και μάλιστα λαμβάνοντας υπόψη ότι στο πλαίσιο του πακέτου μέτρων «Fit-for-55», αποτελεί προτεραιότητα πολιτικής η αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας.

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι όλα τα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας υποθέτουν ότι οι τεχνολογίες για την παραγωγή των συνθετικών καυσίμων ακολουθούν μια ταχεία τεχνολογική πρόοδο και αυτό συνεπάγεται ότι οι τιμές των καυσίμων αυτών μειώνονται διαχρονικά και μάλιστα με γρήγορο ρυθμό. Με το μοντέλο έγινε ανάλυση ευαισθησίας, ως προς την υπόθεση της τεχνολογικής προόδου των τεχνολογιών που παράγουν τα κλιματικά ουδέτερα καύσιμα και επομένως των τιμών των προϊόντων αυτών για τους τελικούς καταναλωτές, δηλαδή τα νοικοκυριά και τις υπηρεσίες στην προκειμένη. Εάν οι τιμές του υδρογόνου και του συνθετικού μεθανίου ήταν διπλάσιες από αυτές που υποτίθενται στα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας, τότε η μέση ετήσια δαπάνη για τους λογαριασμούς ενέργειας θα ήταν 3% μεγαλύτερη στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και 4% και 6% μεγαλύτερη στα σενάρια «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» και «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» αντίστοιχα, σε σχέση με αυτές που υπολογίζονται στη βασική άσκηση. Όπως προκύπτει, η μικρότερη είναι η επίπτωση στα σενάρια που επιτυγχάνουν μεγάλη ενεργειακή εξοικονόμηση χάρη στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, και ειδικά στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» που εκμεταλλεύεται και τα οφέλη ενεργειακής εξοικονόμησης που παρέχει ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης. Άρα το συμπέρασμα είναι ότι η εξοικονόμηση ενέργειας προστατεύει τους καταναλωτές έναντι της αβεβαιότητας σχετικά με την εξέλιξη των τιμών των κλιματικά ουδέτερων αερίων (ή αλλιώς ότι η εξοικονόμηση ενέργειας κάνει price hedging ως προς την αβεβαιότητα της εξέλιξης των τιμών των κλιματικά ουδέτερων αερίων). Ως προς τις τιμές του ηλεκτρισμού οι καταναλωτές δεν έχουν την ίδια αβεβαιότητα, γιατί ο ηλεκτρισμός σε κάθε περίπτωση παράγεται από ΑΠΕ, και μικρές διακυμάνσεις στις τιμές ηλεκτρισμού, των οικιακών καταναλωτών και των καταναλωτών του τομέα των υπηρεσιών, που σχετίζονται με τη ζήτηση σε κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, μπορεί πράγματι να συμβούν, όμως το εύρος διακύμανσης των τιμών του ηλεκτρισμού είναι πολύ πιο περιορισμένο. Σύμφωνα με τα παραπάνω αναδεικνύεται η σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

Στον Πίνακα 28 παρουσιάζεται η επίπτωση στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής που έχουν τα εναλλακτικά σενάρια κλιματικής ουδετερότητας. Ο στόχος της κλιματικής ουδετερότητας υπονοεί ότι τα συνθετικά καύσιμα θα πρέπει να είναι κλιματικά ουδέτερα σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Αυτό σημαίνει ότι ο ηλεκτρισμός που είναι πρώτη ύλη για την παραγωγή τους θα πρέπει να έχει παραχθεί με κλιματικά ουδέτερο τρόπο. Ανάμεσα στις επιλογές που υπάρχουν στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής αυτό σημαίνει ότι ο ηλεκτρισμός θα πρέπει τελικά να παραχθεί από ΑΠΕ, γιατί οι άλλες εναλλακτικές επιλογές, δηλαδή η πυρηνική ενέργεια και η δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα (CCS – Carbon Capture and Storage), αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς λόγω των πολιτικών αδειοδότησης στα διάφορα κράτη μέλη της ΕΕ, καθώς και χρηματοδότησης, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας πιθανών τοποθεσιών. Ως προς τις ΑΠΕ, τα αιολικά και τα ηλιακά είναι αυτά που θα μπορούσαν να παράγουν την επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των συνθετικών καυσίμων.

Το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» έχει σχεδόν τριπλάσια ζήτηση σε συνθετικό μεθάνιο σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», και η αντίστοιχη αύξηση στη ζήτηση στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» είναι διπλασιασμός. Και τα δύο σενάρια έχουν περίπου 1,2 φορές περισσότερη ζήτηση σε υδρογόνο σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και ταυτόχρονα έχουν μικρότερη ζήτηση ηλεκτρισμού: το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» έχει 48TWh λιγότερη ζήτηση ηλεκτρισμού σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και η αντίστοιχη διαφορά στο σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» (σε σχέση με το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας») είναι 153TWh. Όμως η μείωση στη ζήτηση ηλεκτρισμού δεν αντισταθμίζει την αύξηση στη ζήτηση για συνθετικά καύσιμα γιατί ο

απευθείας ηλεκτρισμός έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από ό, τι η χρήση του ηλεκτρισμού για παραγωγή των συνθετικών καυσίμων.

Πίνακας 28: Επιπτώσεις των σεναρίων κλιματικής ουδετερότητας στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής

| ΕΕ | 2020 | 2050 | | | |
|---|------|---------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | | Υπάρχον πλαίσιο πολιτικής | Σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» | Σενάριο «Αποτυχίας Ενεργειακής Εξοικονόμησης» | Σενάριο «Αποτυχίας Εξηλεκτρισμού» |
| Ζήτηση στα κτήρια (TWh) | | | | | |
| Ηλεκτρισμού | 1334 | 1553 | 1618 | 1574 | 1465 |
| Υδρογόνου | 0 | 0 | 84 | 103 | 104 |
| Συνθετικού μεθανίου | 0 | 0 | 257 | 675 | 452 |
| Ηλεκτροπαραγωγή (TWh gross) | | | | | |
| Από ΑΠΕ | 1050 | 2542 | 6116 | 6707 | 6272 |
| Υδροηλεκτρική ενέργεια | 336 | 368 | 427 | 428 | 428 |
| Αιολικά πάρκα | 389 | 1350 | 3728 | 4146 | 3823 |
| Ηλιακά πάρκα | 142 | 601 | 1298 | 1443 | 1331 |
| Άλλες ΑΠΕ | 183 | 222 | 663 | 690 | 690 |
| Εγκατεστημένη ισχύς (GWe) | | | | | |
| Από ΑΠΕ | 472 | 1203 | 2752 | 3034 | 2821 |
| Υδροηλεκτρικά | 128 | 133 | 148 | 148 | 148 |
| Αιολικά πάρκα | 178 | 508 | 1347 | 1499 | 1382 |
| Ηλιακά πάρκα | 126 | 514 | 1112 | 1237 | 1140 |
| Άλλες ΑΠΕ | 40 | 49 | 145 | 151 | 151 |
| Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στα κτήρια (€/MWh) | | | | | |
| Κόστος υδρογόνου στα κτήρια (€/MWh) | 193 | 206 | 216 | 220 | 219 |
| Κόστος συνθετικού μεθανίου (€/MWh) | | | 124 | 122 | 123 |
| Κόστος συνθετικού μεθανίου (€/MWh) | | | 141 | 139 | 140 |

Η επιπλέον ζήτηση ηλεκτρισμού, που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων, μεταφράζεται τελικά σε αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών και των ηλιακών πάρκων. Το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» απαιτεί την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ κατά 480% σε σχέση με το 2020., το οποίο είναι ήδη μια πολύ μεγάλη αύξηση. Το σενάριο «Αποτυχίας ενεργειακής εξοικονόμησης» απαιτεί να αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ κατά 540% σε σχέση με το 2020 και η αντίστοιχη αύξηση για το σενάριο «Αποτυχίας εξηλεκτρισμού» είναι 497%.

Η κυριαρχία των μεταβλητών ΑΠΕ απαιτεί την ύπαρξη υψηλού επιπέδου εφεδρείας και ευελιξίας στο σύστημα. Παραδοσιακά οι ανάγκες ευελιξίας καλύπτονται από στρεφόμενες θερμικές μονάδες, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, μέσω των διασυνδέσεων και σε μικρότερο βαθμό μέσω της απόκρισης στη ζήτηση (demand-response). Η ανάγκη απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος όμως υπονοεί ότι οι ανάγκες ευελιξίας δεν μπορούν να καλύπτονται από θερμικές μονάδες (που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα). Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα, οι θερμικές μονάδες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα να συνδυάζονται με CCS αποφεύγοντας να επιβαρύνουν τις εκπομπές, αλλά οι δυνατότητες αποθήκευσης του CO₂ εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα των υπόγειων υποδομών αποθήκευσης (IEA, 2019). Εναλλακτικά, οι

Θερμικές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιούν κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, όμως αυτό θα απαιτούσε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ. Συνεπώς, στο πλαίσιο της μετάβασης προς την κλιματική ουδετερότητα οι ανάγκες ευελιξίας μπορούν να καλύπτονται από μονάδες αποθήκευσης. Οι διάφορες μονάδες αποθήκευσης καλύπτουν διαφορετικούς τύπους ευελιξίας: η ηλεκτροχημική αποθήκευση μέσω των μπαταριών είναι κατάλληλη για τη βραχυπρόθεσμη κάλυψη των αναγκών ευελιξίας, και η χημική αποθήκευση μέσω των τεχνολογιών power-to-X (P2X) για τη μακροπρόθεσμη (Blanco et al., 2018). Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν αφενός να καλύψουν τις ανάγκες ευελιξίας και αφετέρου καθιστούν τη διαχείριση του συστήματος με πολύ μεγάλη συμμετοχή ΑΠΕ απολύτως αξιόπιστη. Μάλιστα, το σύστημα μπορεί να επιτύχει σημαντικές μειώσεις στο κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας χάρη στη συνέργεια μεταξύ της χημικής αποθήκευσης και των ΑΠΕ: προγραμματίζοντας την παραγωγή υδρογόνου και συνθετικού μεθανίου όταν υπάρχει αφθονία ΑΠΕ και τη χρήση των συνθετικών καυσίμων (στις θερμικές μονάδες) όταν υπάρχει έλλειψη ΑΠΕ (Capros et al., 2019).

Από τα παραπάνω είναι σαφές, ότι η υπερβολική ζήτηση για κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, ενέχει πολλές προκλήσεις για το υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα, και κυρίως για το ηλεκτρικό σύστημα. Ταυτόχρονα η αβεβαιότητα σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη των τεχνολογιών που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις αυτές, αναδεικνύουν τη σημασία της μέγιστης εκμετάλλευσης του δυναμικού ενεργειακής εξοικονόμησης σε όλους τους τομείς της τελικής κατανάλωσης, συμπεριλαμβανομένων των κτηρίων, ώστε να εξασφαλισθεί ότι η μετάβαση προς την κλιματική ουδετερότητα θα είναι βιώσιμη.

6.3 Η ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ ΚΑΙ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΦΤΩΧΕΙΑ

6.3.1. Περιγραφή του προβλήματος

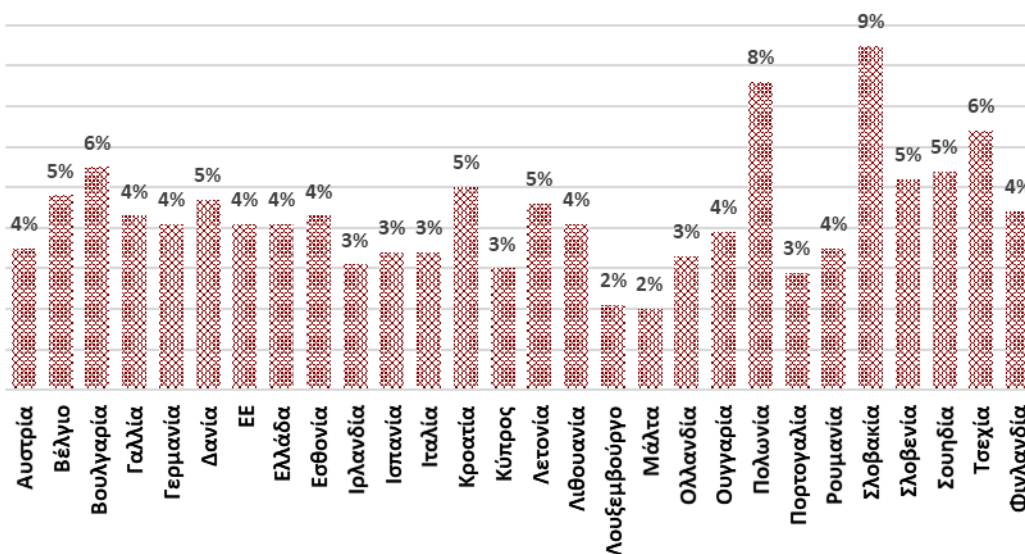
Ο μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) μέχρι το 2050 απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες τόσο στον τομέα της προφοράς όσο και στον τομέα της ζήτησης ενέργειας. Ο κτηριακός τομέας όντας ο μεγαλύτερος τελικός καταναλωτής στην Ευρώπη μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη του κλιματικού στόχου, όπως εκτέθηκε στην προηγούμενη Ενότητα (6.2). Οι βασικοί πυλώνες του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια με τέτοιο τρόπο που να συμβαδίζει με τον κλιματικό στόχο είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα και ο εξηλεκτρισμός των θερμικών χρήσεων. Η ενεργειακή αποδοτικότητα στον κτηριακό τομέα αφορά κατά κύριο λόγο την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων (μέσω κυρίως της ενεργειακής ανακαίνισης του παλαιού κτηριακού αποθέματος, και δευτερευόντως της εφαρμογής οικοδομικών κανονισμών στις νέες κατασκευές), όμως και η επιλογή πολύ αποδοτικού ενεργειακού εξοπλισμού συμβάλλει επίσης σε πολύ μεγάλο βαθμό στην επίτευξη δραστικής μείωσης των εκπομπών στον κτηριακό τομέα. Ο εξηλεκτρισμός των θερμικών χρήσεων έγκειται στην αντικατάσταση του ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση, που αποτελείται σήμερα κυρίως από συμβατικές τεχνολογίες (πχ. λέβητες), με αντλίες θερμότητας υψηλής απόδοσης. Η χρήση αντλιών θερμότητας για θέρμανση συνάδει με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων, δηλαδή σε κτήρια που έχουν αναβαθμιστεί ενεργειακά ή σε νέα κτήρια που συμμορφώνονται με τους οικοδομικούς κανονισμούς. Έτσι, ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης συμβαδίζει με τη μεγάλη ένταξη ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους, δεδομένου όμως ότι η αναμενόμενη αυξημένη ζήτηση και άλλοι παράγοντες της αγοράς, μπορούν να εξασφαλίσουν μια ταχεία τεχνολογική πρόοδο και ωριμότητα για αυτές. Οι αντλίες θερμότητας, πέραν του ότι συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών CO₂, είναι επίσης η πιο αποδοτική ενεργειακά επιλογή στη θέρμανση και έτσι η διεύθυνσή τους στο μείγμα του ενεργειακού εξοπλισμού εξασφαλίζει ταυτόχρονα και ενεργειακή αποδοτικότητα.

Και οι δύο αυτοί παράγοντες, δηλαδή η ενεργειακή αποδοτικότητα και ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης στον κτηριακό τομέα, είναι καίριας σημασίας για την επίτευξη μιας βιώσιμης, τεχνικά εφικτής και οικονομικά αποδοτικής κλιματικής ουδετερότητας, για το σύνολο του ενεργειακού συστήματος. Γιατί, εάν αποτύχουν αυτοί οι δύο πυλώνες του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στον κτηριακό τομέα, η μόνη εναπομένουσα επιλογή, η οποία συνάδει με την κλιματική ουδετερότητα είναι τα κλιματικά ουδέτερα αέρια καύσιμα, δηλαδή το συνθετικό μεθάνιο, το βιομεθάνιο και το υδρογόνο, τα οποία όμως δεν μπορούν να υποκαταστήσουν το ρόλο της εξοικονόμησης ενέργειας. Συνεπώς, η αποτυχία της ενεργειακής αποδοτικότητας και του εξηλεκτρισμού στον κτηριακό τομέα, υπονοεί την κατακόρυφη αύξηση της ζήτησης σε κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, πράγμα που με τη σειρά του προϋποθέτει αφενός την πολύ μεγάλη επέκταση του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, μέσω επενδύσεων σε ΑΠΕ (δηλαδή σε αιολικά και ηλιακά πάρκα), και αφετέρου υπερβολικά υψηλό μεταβλητό κόστος για τους καταναλωτές του οποίου μάλιστα η εξέλιξη είναι αβέβαιη, με την έννοια ότι οι τιμές των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων εξαρτώνται από την τεχνολογική πρόοδο των διεργασιών μέσω των οποίων παράγονται.

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να αναλύσει τις κοινωνικές-οικονομικές επιπτώσεις του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο ενεργειακό σύστημα μέχρι το 2050, στις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών, συμπεριλαμβανομένων των νοικοκυριών χαμηλού εισοδήματος. Η πολύ αναλυτική κατηγοριοποίηση του οικιακού κτηριακού αποθέματος στο προτεινόμενο μοντέλο επιτρέπει αυτήν την ανάλυση η οποία μάλιστα είναι απαραίτητη δεδομένης και της

σημαντικής έξαρσης της ενεργειακής φτώχειας στην Ευρώπη τα τελευταία χρόνια (Bouzarovski et al., 2020; Chlechowicz et al., 2021). Σύμφωνα με τον πρώτο επίσημο ορισμό για την ενεργειακή φτώχεια (Csiba, 2017), «ένα νοικοκυριό θεωρείται ότι είναι ενεργειακά φτωχό εάν χρειάζεται να δαπανάει περισσότερο από το 10% του εισοδήματός του για θέρμανση». Οι στατιστικές υπηρεσίες δε διαθέτουν το ποσό των χρημάτων που τα νοικοκυριά δαπανούν αποκλειστικά για την κάλυψη των δαπανών θέρμανσης. Αντ’ αυτού όμως διατίθεται το ποσοστό της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα των νοικοκυριών. Η Εικόνα 52 παρουσιάζει αυτό το μέσο δείκτη για τις διάφορες χώρες της Ευρώπης, επί του παρόντος, όπως διατίθεται από τη Eurostat.

Εικόνα 52: Ποσοστό της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα για τις χώρες της ΕΕ το 2019



Πηγή: (Eurostat [nama_10_co3_p3], 2022)

Τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος είναι πιο εκτεθειμένα στους κινδύνους της ενεργειακής φτώχειας από ό,τι αυτά μεγαλύτερου εισοδήματος, όμως η μεγάλης έντασης εξοικονόμηση ενέργειας (όπως αυτή που αντιστοιχεί στο μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας) περιορίζει τους λογαριασμούς ενέργειας για όλες τις κατηγορίες καταναλωτών. Το μοντέλο υπολογίζει το δείκτη του ποσοστού της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα, για τις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών.

Για τη μοντελοποίηση του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο ενεργειακό σύστημα μέχρι το 2050 έχει υποτεθεί η επιτυχής εφαρμογή σειράς μέτρων και εργαλείων πολιτικής που όχι μόνο παρέχουν κίνητρα για επενδύσεις ενεργειακής εξοικονόμησης αλλά διαμορφώνουν και τις απαραίτητες συνθήκες μόχλευσης/εναύσματος για την άρση των μη-οικονομικών εμποδίων, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.1.1. Οι επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος των κτηρίων έχουν και τη μεγαλύτερη συνεισφορά τόσο στην εξοικονόμηση ενέργειας (Εικόνα 45) όσο και στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό τομέα (Εικόνα 46). Ταυτόχρονα όμως οι αντίστοιχες επενδύσεις είναι εντάσεως κεφαλαίου και η πολιτική, όπως έχει υποτεθεί στην έως τώρα μοντελοποίηση δεν έχει μεριμνήσει ειδικά για συγκεκριμένες κατηγορίες νοικοκυριών. Με άλλα λόγια, η πολιτική εφαρμόζεται ομοιόμορφα σε όλες της κατηγορίες νοικοκυριών ώστε το σύνολο του

οικιακού τομέα να συνεισφέρει στην επίτευξη των συγκεκριμένων κλιματικών και ενεργειακών στόχων. Σκοπός λοιπόν της ενότητας αυτής, είναι:

α. να μελετήσει τις οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις που έχει το πλαίσιο πολιτικής του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» (με την έννοια ότι το σενάριο επιτυγχάνει αξιοσημείωτη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής) στις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών, και να απαντήσει στα εξής ερωτήματα:

- Ποιες κατηγορίες νοικοκυριών επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας από την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους; Σε τι είδους επεμβάσεις επενδύουν αυτές για να επιτύχουν τη συγκεκριμένη εξοικονόμηση ενέργειας;
- Ποιο είναι το ύψος της επενδυτικής δαπάνης για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και πόση είναι η εξοικονόμηση της δαπάνης για αγορά ενέργειας, χάρη στην ενεργειακή αναβάθμιση, για κάθε κατηγορία νοικοκυριού;

β. να μελετήσει τις κοινωνικές – οικονομικές επιπτώσεις που έχει η εφαρμογή δύο εναλλακτικών πολιτικών παροχής κινήτρων, στις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών. Συγκεκριμένα εξετάζεται, μέσω σεναρίου πολιτικής που ποσοτικοποιούνται με το μοντέλο, η εφαρμογή πολιτικής τιμολόγησης (price policy), η οποία έχει ως στόχο να καταστήσει τις επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης πιο ελκυστικές και η εφαρμογή ρυθμιστικής πολιτικής (regulation policy), η οποία έχει ως στόχο να καταστήσει τις επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης μερικώς υποχρεωτικές. Άλλωστε αυτά τα δύο μέτρα πολιτικής αποτελούν το βασικό δίλημμα που υπάρχει στη δημόσια πολιτική, δίλημμα μεταξύ της εφαρμογής οικονομικών κινήτρων ή της επιβολής προτύπων. Στην πολιτική τιμολόγησης, τα μέτρα πολιτικής είναι επιδοτήσεις ενεργειακής εξοικονόμησης που συνυπολογίζονται απευθείας από τα νοικοκυριά και αντιπροσωπεύουν το έμμεσο χρηματικό όφελος που προστίθεται στην εξοικονόμηση της δαπάνης για αγορά ενέργειας, δηλαδή στην εξοικονόμηση των ενεργειακών λογαριασμών. Οι επιδοτήσεις ενεργειακής εξοικονόμησης μπορούν επίσης να αντιπροσωπεύουν τη μοναδιαία αξία ή την τιμή εκκαθάρισης των εμπορεύσιμων Λευκών Πιστοποιητικών ή την έμμεση αξία που αντιστοιχεί σε πολιτική που απαιτεί από τις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας να πραγματοποιούν επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας στις εγκαταστάσεις των πελατών τους. Στη ρυθμιστική πολιτική, τα μέτρα πολιτικής είναι πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, τα οποία ορίζουν ανώτατο όριο στην ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση, για παράδειγμα ανά τετραγωνικό μέτρο του κτηρίου. Το οριακό κόστος συμμόρφωσης με τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης αντιστοιχεί στο ποσό επιδότησης της πολιτικής τιμολόγησης που επιτυγχάνει παρόμοια εξοικονόμηση ενέργειας με τη ρυθμιστική πολιτική. Επιπλέον, για καθεμία από τις εναλλακτικές πολιτικές εξετάζονται δύο παραλλαγές: η ενιαία εφαρμογή του μέτρου πολιτικής σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών ή η διαφοροποίηση του μέτρου πολιτικής ανά κατηγορία βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των νοικοκυριών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ορίζεται τελικά ένας πίνακας τεσσάρων παραλλαγών σεναρίων πολιτικής, τα αποτελέσματα των οποίων αντιπαραβάλλονται και αναλύονται στην ενότητα αυτή. Σκοπός της ανάλυσης είναι να αξιολογηθεί η κατανομή της προσπάθειας ενεργειακής εξοικονόμησης μεταξύ των κατηγοριών νοικοκυριών που προκύπτει από την εφαρμογή κάθε εναλλακτικής στρατηγικής και των παραλλαγών της με διάφορα κριτήρια.

Η ενότητα οργανώνεται ως εξής: πρώτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» όσον αφορά το ποσοστό του εισοδήματος που τα νοικοκυριά διαθέτουν για τους ενεργειακούς λογαριασμούς στις χώρες της ΕΕ και ο δείκτης αυτός αντιπαραβάλλεται με τον αντίστοιχο που

ισχύει σήμερα. Έπειτα, γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» ανά κατηγορία νοικοκυριού και αυτά αντιπαραβάλλονται με τα αντίστοιχα του σεναρίου που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που μελετούν την εφαρμογή των δύο εναλλακτικών πολιτικών παροχής κινήτρων και των παραλλαγών τους για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

Για την ευκολία παρουσίασης των αποτελεσμάτων στην παρούσα ενότητα, ομαδοποιούνται οι κατηγορίες κτηρίων του οικιακού τομέα που θεωρεί το μοντέλο σε έξι «τυπικές» κατηγορίες, με τέτοιο τρόπο ώστε οι κατηγορίες που προκύπτουν να έχουν το μεγαλύτερο χάσμα μεταξύ τους όσον αφορά τις αποφάσεις ενεργειακής αναβάθμισης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα χαρακτηριστικά του κτηρίου όσο και του νοικοκυριού. Η ομαδοποίηση γίνεται τελικά με κριτήριο το εισόδημα του νοικοκυριού και την ηλικία κατασκευής του κτηρίου. Οι κατηγορίες που προκύπτουν και για τις οποίες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι οι εξής:

- Κτήρια κατοικίας παλαιάς κατασκευής νοικοκυριού χαμηλού εισοδήματος (Παλαιό-Χαμηλού)
- Κτήρια κατοικίας παλαιάς κατασκευής νοικοκυριού μεσαίου εισοδήματος (Παλαιό-Μεσαίου)
- Κτήρια κατοικίας παλαιάς κατασκευής νοικοκυριού υψηλού εισοδήματος (Παλαιό-Υψηλού)
- Κτήρια κατοικίας πρόσφατης κατασκευής νοικοκυριού χαμηλού εισοδήματος (Πρόσφατο-Χαμηλού)
- Κτήρια κατοικίας πρόσφατης κατασκευής νοικοκυριού μεσαίου εισοδήματος (Πρόσφατο -Μεσαίου)
- Κτήρια κατοικίας πρόσφατης κατασκευής νοικοκυριού υψηλού εισοδήματος (Πρόσφατο -Υψηλού)

Στα κτήρια κατοικίας παλαιάς κατασκευής περιλαμβάνονται τα κτήρια που έχουν κατασκευαστεί πριν το 1970, και τα κτήρια κατοικίας πρόσφατης κατασκευής περιλαμβάνουν τα κτήρια τα οποία έχουν κατασκευαστεί από το 1970 έως το 2000.

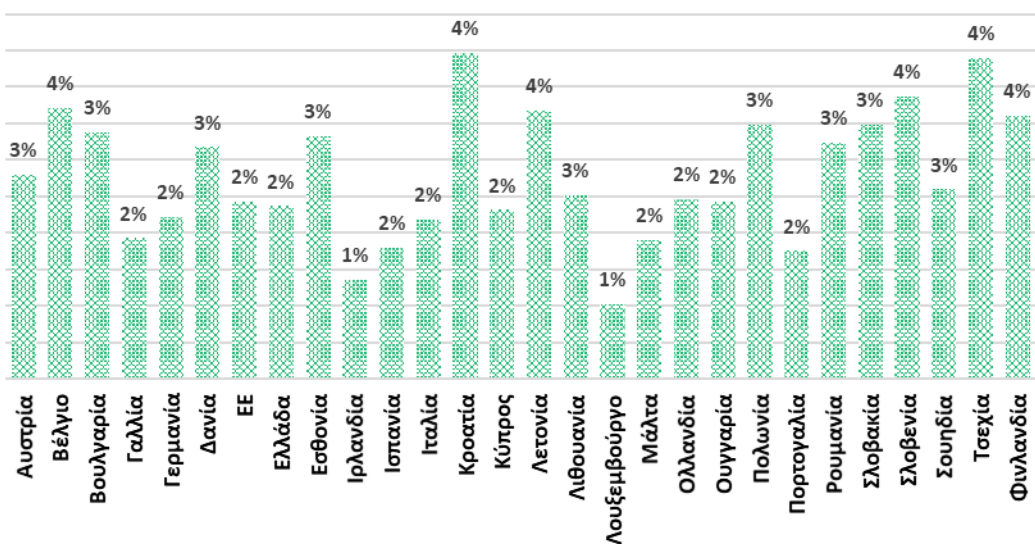
6.3.2. Όγκος επενδύσεων και επιμερισμός σε κατηγορίες κτηρίων και κατηγορίες καταναλωτών

Το σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τη σημερινή κατανάλωση ενέργειας τόσο στον οικιακό τομέα όσο και στον τομέα των υπηρεσιών. Ο περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας, έχει ως άμεσο επακόλουθο τη μείωση της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας. Η Εικόνα 53 παρουσιάζει το ποσοστό της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα των νοικοκυριών το 2050 για όλες τις χώρες της ΕΕ, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του μοντέλου για το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας». Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο δείκτης αυτός, έχει ελαττωθεί για όλες τις χώρες της ΕΕ, σε σχέση με τη σημερινή κατάσταση, όπως προκύπτει από τη σύγκριση της Εικόνας 52 με την Εικόνα 53. Η μείωση αυτή φτάνει σε έως και 5% (πχ. Σλοβακία), ενώ για την πλειονότητα των χωρών είναι πάνω από μια ποσοστιαία μονάδα. Η ανομοιομορφία της μείωσης μεταξύ των χωρών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, που σχετίζονται τόσο με το κτηριακό απόθεμα και τις κλιματικές συνθήκες της κάθε χώρας, όσο και με την οικονομική τους ανάπτυξη.

Ανάμεσα στα μέτρα πολιτικής που υποθέτει το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» είναι και η υπόθεση εφαρμογής οικονομικών κινήτρων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων. Αυτά τα οικονομικά κίνητρα αναπαρίστανται στο μοντέλο μέσω του έμμεσου χρηματικού οφέλους που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης αγοράς ενέργειας (και συμπίπτει με τη δυική τιμή του περιορισμού για την ενεργειακή αποδοτικότητα). Στην πράξη, αυτό το έμμεσο χρηματικό όφελος θα μπορούσε να αντικατοπτρίζεται ποσό επιδότησης επί της δαπάνης για αγορά ενέργειας. Θα μπορούσε επίσης να αντιστοιχεί στην ύπαρξη συστήματος ανώτατων ορίων και εμπορικών συναλλαγών (cap and trade schemes), είτε

εναλλακτικά, στην ύπαρξη συστήματος φορολογίας. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το εργαλείο πολιτικής είναι η επιδότηση για την εξοικονόμηση ενέργειας. Στα συστήματα φορολογίας, για παράδειγμα, το εργαλείο πολιτικής μπορεί να λειτουργεί με τη μορφή κυρώσεων για τη μη εξοικονόμηση ενέργειας, με τις οποίες επιβαρύνονται επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που έχουν την υποχρέωση να πραγματοποιούν εξοικονόμηση ενέργειας στις εγκαταστάσεις των πελατών τους. Ομοίως, ένα σύστημα λευκών πιστοποιητικών, το οποίο εφαρμόζει καθεστώς ανώτατου ορίου και εμπορικών συναλλαγών, μπορεί να επιβάλει κυρώσεις στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που υπόκεινται σε παρόμοιες υποχρεώσεις. Η τιμή εκκαθάρισης ή το οριακό κόστος τέτοιων συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν ως ισοδύναμα ποσά επιδότησης. Σε κάθε περίπτωση, στο εξής, το ποσό επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας θα αναφέρεται στο έμμεσο χρηματικό όφελος που προστίθεται στο όφελος από τη μείωση της δαπάνης για αγορά ενέργειας, και αποτελεί το μέσον με το οποίο εφαρμόζεται η πολιτική τιμολόγησης στη μοντελοποίηση. Συνοψίζοντας, το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» εφαρμόζει, μεταξύ άλλων, πολιτική τιμολόγησης για την επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια του οικιακού τομέα, μέσω της εφαρμογής ενιαίας επιδότησης εξοικονόμησης ενέργειας σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών.

Εικόνα 53: Ποσοστό της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα για τις χώρες της ΕΕ το 2050 για το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας»



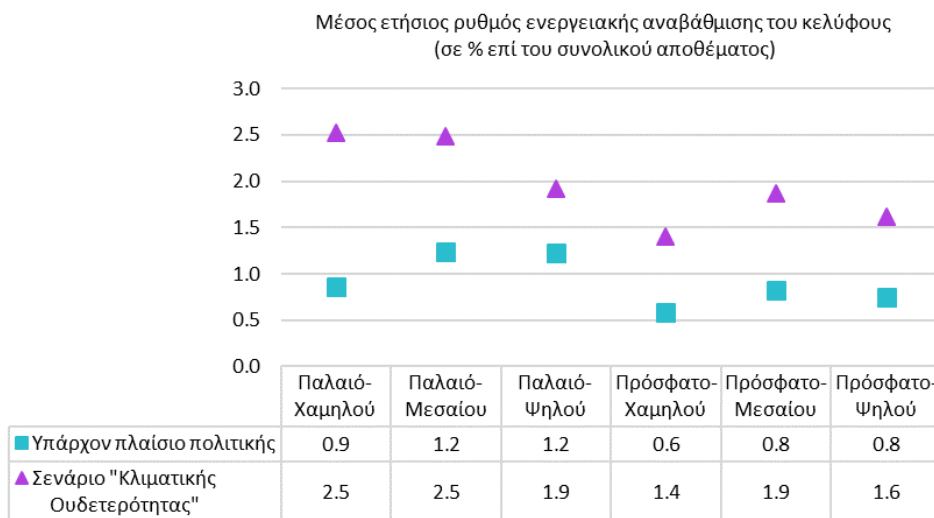
Για να αναδειχθεί η επίδραση της ενιαίας πολιτικής επιδότησης που εφαρμόζεται στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» στην εντατικοποίηση της προσπάθειας για ενεργειακή εξοικονόμηση μεγάλης έντασης, ή με άλλα λόγια στις αποφάσεις για επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης, αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» για τις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών με τα αντίστοιχα του σεναρίου που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής.

Η (ενιαία) επιδότηση στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» έχει μια μέση τιμή (όπως υπολογίζεται για όλη τη διάρκεια της περιόδου προβολής) που είναι της τάξης των 0,14 €/kWh-εξοικονομούμενης ενέργειας). Πρόκειται για μια σχετικά υψηλή επιδότηση σε σύγκριση με τη μέση τιμή του κόστους καυσίμου για θέρμανση που τα τελευταία χρόνια είναι κοντά στα 0,080 €/kWh- στην ΕΕ. Από μια άλλη οπτική σκοπιά, όμως, αυτό το επίπεδο επιδότησης δεν είναι τόσο υψηλό λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του φόρου για τις

εκπομπές CO₂. Συγκεκριμένα, η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 απαιτεί την αύξηση της τιμής του φόρου μακροπρόθεσμα ο οποίος μπορεί να φτάσει και έως τα 400 €/tCO₂, μετά το 2050. Με αυτήν την τιμή του φόρου για τις εκπομπές CO₂, η μέση τιμή του κόστους καυσίμου για θέρμανση θα ανέβαινε και θα έφτανε σε έως και 0,36 €/kWh και άρα, η επιδότηση που αντιπροσωπεύει περίπου το 40% (αυτής) της μέσης τιμής του κόστους καυσίμου για θέρμανση (δηλαδή συμπεριλαμβανομένου του φόρου για τις εκπομπές CO₂), είναι σχετικά χαμηλή και, παρά το γεγονός αυτό, μπορεί να μειώσει σημαντικά τη ζήτηση ενέργειας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των κατηγοριών νοικοκυριών τόσο ως προς το ρυθμό όσο και ως προς την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης που τελικά επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων μετά την ενεργειακή αναβάθμιση, που επιτυγχάνεται χάρη στο ενιαίο ποσό επιδότησης.

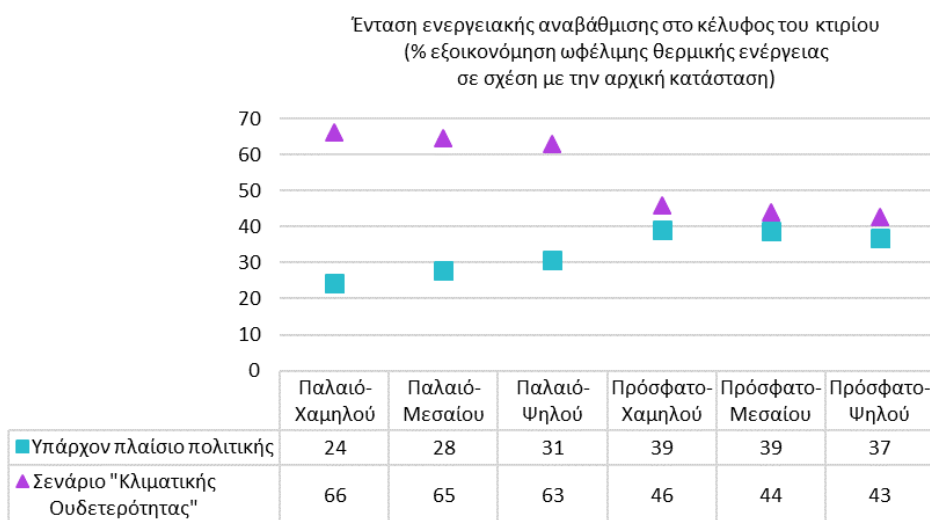
Εικόνα 54: Μέσος ετήσιος ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής



Ο ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων, αυξάνει σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», σε σύγκριση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, ως αποτέλεσμα της επιδότησης και των υπόλοιπων πολιτικών. Το συγκεκριμένο σενάριο που περιλαμβάνει τις πολιτικές και τα μέτρα των ΕΣΕΚ, στοχεύει στην επίτευξη των στόχων ενεργειακής αναβάθμισης που έχουν δεσμευτεί τα κράτη μέλη να επιτύχουν στο πλαίσιο αυτών (συμπεριλαμβανομένων των δεσμεύσεων που εκτίθενται στις Εθνικές Μακροπρόθεσμες Στρατηγικές για την Ανακαίνιση του Κτηριακού Αποθέματος). Στο ίδιο σενάριο, ο ρυθμός ενεργειακής αναβάθμισης είναι υψηλότερος για τα νοικοκυριά μεσαίου και υψηλού εισοδήματος από ότι για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, καθώς αυτές οι κατηγορίες νοικοκυριών αντιλαμβάνονται εκ των πραγμάτων τις επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης με χαμηλότερο κίνδυνο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες κατηγορίες νοικοκυριών χαμηλού εισοδήματος. Με άλλα λόγια ακόμα και αν το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής δεν είναι πολύ ισχυρό, αυτές οι κατηγορίες νοικοκυριών επιλέγουν αυθορμήτως να επενδύσουν στην ενεργειακή αναβάθμιση. Στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», που όχι μόνο το πλαίσιο πολιτικής έχει γίνει πιο φιλόδοξο σε

σύγκριση με το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής αλλά και τα μη-οικονομικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα έχουν αρθεί, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος αυξάνουν θεαματικά το ρυθμό ενεργειακής αναβάθμισης. Μάλιστα, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος που ζουν σε κτήρια παλαιάς κατασκευής σχεδόν τριπλασιάζουν το μέσο ετήσιο ρυθμό ενεργειακής αναβάθμισης, σε σύγκριση με το σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής. Αυτό είναι λογικό γιατί τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος χρησιμοποιούν για θέρμανση συνήθως ορυκτά καύσιμα. Έτσι, για αυτά ο φόρος των εκπομπών CO₂ είναι πολύ μεγάλος, και επιδρά ως επιπλέον κίνητρο για την πραγματοποίηση επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης. Όσον αφορά το ρυθμό ενεργειακής αναβάθμισης βάσει της ηλικίας των κτηρίων, αυτός είναι συστηματικά μεγαλύτερος για τις κατηγορίες κτηρίων παλαιάς κατασκευής σε σχέση με τις αντίστοιχες πιο πρόσφατης κατασκευής λόγω του μεγάλου δυναμικού εξοικονόμησης στις πρώτες.

Εικόνα 55: Ένταση ενεργειακής αναβάθμισης στο κέλυφος των κτηρίων ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής



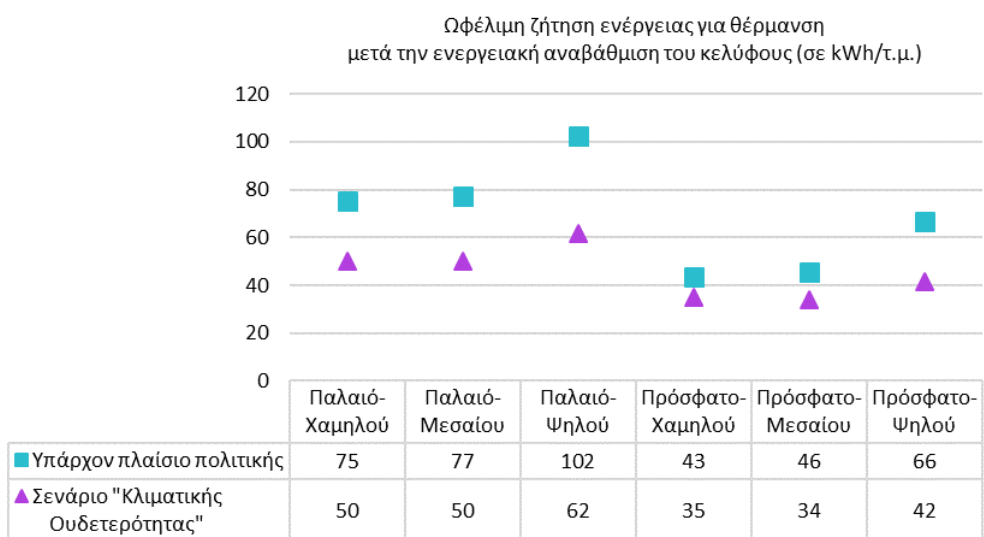
Υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων μετά την ενεργειακή αναβάθμιση. Το επίπεδο εισοδήματος επηρεάζει την ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση, πριν από την ενεργειακή αναβάθμιση, και ταυτόχρονα την τάση για πραγματοποίηση επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης. Η ηλικία του κτηρίου επηρεάζει επίσης την ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας πριν από την ενεργειακή αναβάθμιση ή με άλλα λόγια την ενεργειακή απόδοση του κελύφους του κτηρίου, καθώς κτήρια πιο πρόσφατης κατασκευής μπορεί να υπόκεινται σε οικοδομικούς κανονισμούς. Το μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας συνεπάγεται μεγάλα οφέλη από τη μείωση της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας και εάν ταυτόχρονα το εισόδημα είναι υψηλό, η κεφαλαιακή επιβάρυνση είναι πιθανώς διαχειρίσιμη. Το αντίθετο ισχύει για περιπτώσεις χαμηλού εισοδήματος και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχουν μεικτές καταστάσεις. Μια ενιαία επιδότηση ξεκλειδώνει τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας με διαφορετικό τρόπο σε κάθε περίπτωση.

Όσον αφορά την ένταση της ενεργειακής αναβάθμισης, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πλαίσιο πολιτικής του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού εξοικονόμησης ωφέλιμης ενέργειας για θέρμανση (σε σχέση με την κατάσταση του κτηρίου πριν την ενεργειακή αναβάθμιση) για

όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών. Ειδικά για τα κτήρια παλαιάς κατασκευής το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σχεδόν τριπλασιάζεται στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» σε σχέση με το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής. Η αύξηση αυτή είναι πιο έντονη για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος και αυτό εξηγείται και πάλι από το μείγμα καυσίμων για θέρμανση σε αυτά.

Το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής αρκεί για να παρακινήσει τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος να προβούν σε ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης, αλλά όχι τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος που απαιτούν φιλόδοξες πολιτικές ενεργειακής απόδοσης για να επενδύσουν σε ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης. Η υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται στα κτήρια παλαιάς κατασκευής, όπως αναμενόταν, καθώς τα κτήρια πρόσφατης κατασκευής έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση, άρα το εναπομένον δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας είναι χαμηλότερο σε αυτά και το οριακό κόστος ανακαίνισης είναι υψηλότερο. Η εφαρμογή ενιαίας επιδότησης σε όλους τους τύπους κτηρίων συνεπάγεται πολύ χαμηλότερη παραγωγικότητα της επιδότησης στα κτήρια πιο πρόσφατης κατασκευής σε σχέση με τα κτήρια παλαιάς κατασκευής.

Εικόνα 56: Ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής

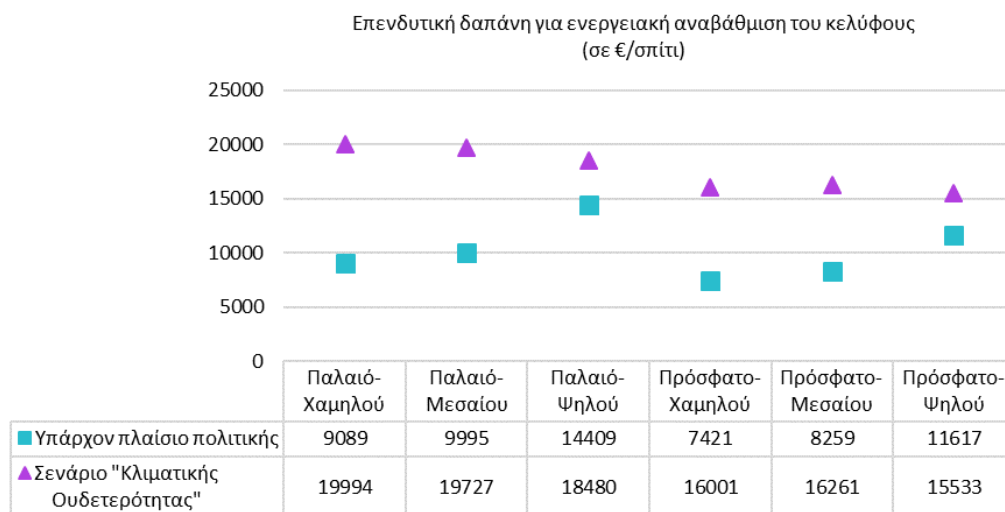


Το ποσοστό ενεργειακής εξοικονόμησης που αντιστοιχεί στις επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων οδηγεί σε ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας όπως φαίνεται στην Εικόνα 56. Τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος έχουν γενικά μεγαλύτερη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση και αυτό είναι αποτέλεσμα της συμπεριφοράς τους ως προς τη χρήση ενέργειας (όπως για παράδειγμα ότι μπορεί να θέτουν το θερμοστάτη σε μεγαλύτερη τιμή). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 56, το πλαίσιο πολιτικής του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» επιτυγχάνει σχεδόν να εξισορροπήσει την ωφέλιμη ζήτηση θερμικής ενέργειας (ή αλλιώς τη θερμική συμπεριφορά) των παλαιών κτηρίων με τα πιο πρόσφατα. Το ενιαίο ποσό επιδότησης που εφαρμόζεται στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και η ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση στο σύνολο του οικιακού κτηριακού αποθέματος είναι σχεδόν 43 kWh/τ.μ. κατά μέσο όρο. Αυτό το επίπεδο ενεργειακής απόδοσης, όντας σημαντικά χαμηλότερο από τα τρέχοντα επίπεδα, εξακολουθεί να είναι υψηλότερο αλλά αρκετά κοντά στις

προδιαγραφές των παθητικών κατοικιών ή των κτηρίων χαμηλής ζήτησης ενέργειας, σύμφωνα με τους ορισμούς των (Boertmans et al., 2011).

Η επενδυτική δαπάνη για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους που παρουσιάζεται στην Εικόνα 57 αφορά το τεχνικό κόστος της επένδυσης, δηλαδή το κόστος υλικών και εργασίας. Τα μέτρα ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης που αντιστοιχούν στην εφαρμογή μονωτικών υλικών μεγάλου πάχους στην πρόσοψη και την οροφή του κτηρίου και στην αντικατάσταση των υαλοπινάκων με νέους χαμηλότερης θερμικής διαπερατότητας κοστίζουν μέχρι και τρεις φορές περισσότερο από τα μέτρα ενεργειακής αναβάθμισης που αντιστοιχούν μόνο σε αντικατάσταση των υαλοπινάκων.

Εικόνα 57: Επενδυτική δαπάνη για ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής

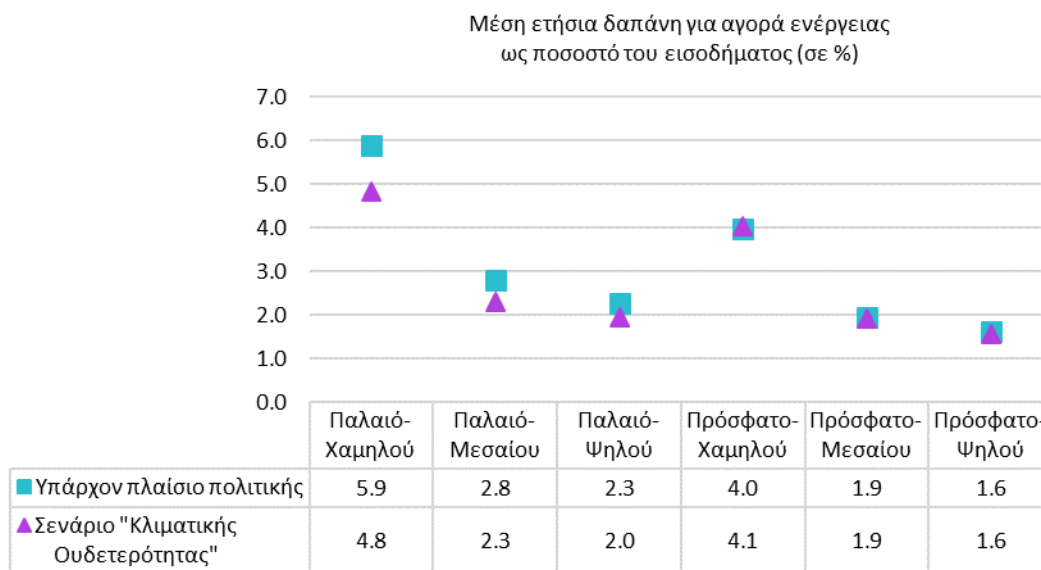


Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επενδυτική δαπάνη ανά κατηγορία νοικοκυριού αυξάνεται στο σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» ανάλογα με την αντίστοιχη μέση εξοικονόμηση ενέργειας. Στο πρόσφατο παρελθόν, οι εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης αντιπροσώπευαν απλές ανακαινίσεις με μικρή ένταση (που αντιστοιχούσαν σε λιγότερο από 10% εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση του κτηρίου). Στο υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, η επενδυτική δαπάνη ανά κατηγορία νοικοκυριού αυξάνεται σε σύγκριση με το πρόσφατο παρελθόν για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, αλλά πολύ λιγότερο από ό,τι στο σενάριο «Κλιματικής ουδετερότητας» .

Οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης επιτρέπουν την αύξηση της έντασης της ενεργειακής αναβάθμισης και μειώνουν τη δαπάνη για αγορά ενέργειας, για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών σχεδόν ομοιόμορφα. Σε σύγκριση με το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, οι διαφορές αυτού του λόγου της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως ποσοστό του εισοδήματος μεταξύ των νοικοκυριών μειώνονται στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» χάρη στην ενιαία πολιτική επιδότησης, αλλά δεν εξαλείφονται. Στο πρόσφατο παρελθόν, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος έπρεπε να χρησιμοποιούν περισσότερο από 2,7 φορές μεγαλύτερο μέρος του εισοδήματός τους για την αγορά ενέργειας ανά μονάδα εισοδήματος, σε σύγκριση με τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος. Στο υπάρχον πλαίσιο πολιτικής, η διαφορά αυτή πέφτει στις 2,6 φορές και στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος διαθέτουν λιγότερο από 2,5 φορές μεγαλύτερο μέρος του εισοδήματός τους από τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος.

Συνεπώς, η ενιαία πολιτική επιδότησης στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» διατηρεί τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των καταναλωτών. Στην επόμενη υπό-ενότητα αναλύεται η παραλλαγή του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας», που διαφοροποιεί το μέτρο πολιτικής (ή το κίνητρο ενεργειακής απόδοσης) ανά κατηγορία νοικοκυριού, με στόχο να αντιμετωπίσει αυτήν την αδυναμία της πολιτικής.

Εικόνα 58: Μέση ετήσια δαπάνη για αγορά ενέργειας ως ποσοστό του εισοδήματος ανά κατηγορία νοικοκυριού στο σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας» και στο σενάριο που αναπαριστά το υπάρχον πλαίσιο πολιτικής



6.3.3. Μέτρα πολιτικής αναφορικά με την πρόκληση των επενδύσεων και την ενεργειακή φτώχεια

Το σενάριο «Κλιματικής Ουδετερότητας», όπως έχει παρουσιαστεί ως τώρα, εφαρμόζει πολιτική τιμολόγησης που βασίζεται στη διάθεση (ενιαίας) επιδότησης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, για την προώθηση της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κτηρίων.

Στην υπό-ενότητα αυτή εξετάζεται η επίλυση εκ νέου του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας», με την υπόθεση ότι η προώθηση της ενεργειακής αναβάθμισης γίνεται μέσω ρυθμιστικής πολιτικής που βασίζεται σε πρότυπα ενεργειακής απόδοσης.

Αντιπαραβάλλονται δηλαδή στο πλαίσιο του ίδιου σεναρίου, το οποίο μάλιστα υποθέτει την άρση των μη-οικονομικών εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, δυο εναλλακτικές πολιτικές παροχής κινήτρων για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Η μια πολιτική είναι πολιτική τιμολόγησης, με τη μορφή παροχής επιδοτήσεων, που καθιστούν ελκυστικές τις επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης. Η εναλλακτική πολιτική, είναι ρυθμιστικού χαρακτήρα με την έννοια ότι επιβάλλει πρότυπα, όπως είναι για παράδειγμα τα πρότυπα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης, και υποχρεώνει τους καταναλωτές να πραγματοποιήσουν επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης προκειμένου να συμμορφωθούν με αυτά.

Οι δύο εναλλακτικές πολιτικές παροχής κινήτρων εξετάζουν περαιτέρω δύο παραλλαγές: την εφαρμογή του μέτρου πολιτικής ενιαία σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών ή τη διαφοροποίηση της έντασης του μέτρου ανά κατηγορία νοικοκυριού βάσει κριτηρίων.

Στη μοντελοποίηση, οι επιδοτήσεις ισχύουν ετησίως και αυξάνουν την καθαρή παρούσα αξία των στρατηγικών που συνεπάγονται υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας επειδή η χρηματική αξία της εξοικονόμησης, γίνεται μεγαλύτερη. Καθώς οι στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης που αντιστοιχούν σε ενεργειακή εξοικονόμηση μεγαλύτερης έντασης αποκτούν μεγαλύτερη (καθαρή παρούσα) αξία χάρη στην επιδότηση, η πιθανότητα επιλογής τους αυξάνεται.

Κατά συνέπεια, η εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνεται αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και η επενδυτική δαπάνη για κάθε κατηγορία κτηρίου, όπως προκύπτει από τις μη-γραμμικές καμπύλες κόστους - δυναμικού εξοικονόμησης. Το σχήμα των καμπυλών αυτών (Εικόνα 9) διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κτηρίου, και η αντίληψη των καταναλωτών για το κόστος κεφαλαίου (που αναπαρίσταται μέσω των διαφορετικών επιτοκίων προεξόφλησης, που με τη σειρά τους αναπαριστούν τις διαφορετικές δυνατότητες χρηματοδότησης) διαφέρει ανά κατηγορία εισοδήματος. Επομένως, μια πολιτική ενιαίας επιδότησης για όλα τα νοικοκυριά συνεπάγεται διαφορετικές επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης, εξοικονόμηση ενέργειας και δαπάνες ανά νοικοκυριό.

Η επιβολή προτύπου ενεργειακής απόδοσης, εκφράζεται στο μοντέλο ως περιορισμός για τη μοναδιαία (ωφέλιμη) ζήτηση ενέργειας (σε kWh/τ.μ.) για θέρμανση κάθε κατηγορίας κτηρίου. Έτσι το μοντέλο συνδέει μια δυική μεταβλητή με τον περιορισμό, η τιμή της οποίας αντιστοιχεί στο ποσό επιδότησης της εξοικονόμησης ενέργειας που θα είχε μια τιμολογιακή πολιτική προκειμένου να επιτύχει την ίδια εξοικονόμηση ενέργειας (με την πολιτική που βασίζεται στα πρότυπα). Υπάρχει δηλαδή μια σχέση δυαδικότητας μεταξύ του επιπέδου του προτύπου ενεργειακής απόδοσης και του ποσού επιδότησης.

Η επιλογή του ρυθμού και της έντασης της ενεργειακής αναβάθμισης εξαρτάται από τη συσχέτιση μεταξύ του οριακού κόστους των καμπυλών κόστους – δυναμικού εξοικονόμησης και του ενεργειακού κόστους που απομένει μετά την επένδυση σε ενεργειακή αναβάθμιση. Η επιλογή διαφέρει ανά νοικοκυριό επειδή διαφέρουν τόσο το οριακό κόστος όσο και το κόστος κεφαλαίου. Η παροχή ενιαίας επιδότησης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών αυξάνει τα οικονομικά οφέλη των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, ωστόσο η αύξηση είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία.

Ένα ενιαίο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή ένα ανώτατο όριο για τη μοναδιαία ζήτηση ενέργειας που είναι κοινό για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, συνεπάγεται διαφορετικό οριακό κόστος συμμόρφωσης με το πρότυπο ανά νοικοκυριό. Διαφοροποιώντας τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η εξίσωση του οριακού κόστους συμμόρφωσης με αυτά για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, διαμορφώνεται μια ρυθμιστική πολιτική που είναι δυική της τιμολογιακής πολιτικής που εφαρμόζει ενιαίες επιδοτήσεις σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών.

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για την ανάλυση έχει ως εξής:

A. Πολιτική τιμολόγησης

Για τις παραλλαγές της πολιτικής τιμολόγησης, θεωρείται ως μεταβλητή ελέγχου το ποσό της επιδότησης, που ορίζεται σε €/kWh εξοικονομούμενης ενέργειας). Χάρη στην εφαρμογή της επιδότησης γίνονται ελκυστικές, στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης που διαφορετικά δε θα επιλέγονταν. Επίσης, η ένταση

της ενεργειακής αναβάθμισης αυξάνεται με το ποσό της επιδότησης. Οι αποφασίζοντες σε κάθε κατηγορία καθορίζουν τη βέλτιστη απόφαση ενεργειακής αναβάθμισης αποδεχόμενοι να επιβαρυνθούν με επιπλέον οριακό κόστος όσο το ποσό της επιδότησης. Καθώς οι κατηγορίες νοικοκυριών διαθέτουν διαφορετικές καμπύλες οριακού κόστους για την ενεργειακή αναβάθμιση, λόγω των χαρακτηριστικών του κτηρίου, του εισοδήματος τους και της συμπεριφοράς τους, πραγματοποιούν επενδύσεις σε ενεργειακή αναβάθμιση που συνεπάγονται διαφορετική εξοικονόμηση ενέργειας όταν έχουν λάβει το ίδιο ποσό επιδότησης. Με άλλα λόγια υπάρχει μεγάλη ασυμμετρία μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών σχετικά με τις επενδυτικές δυνατότητες. Για παράδειγμα, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος μπορεί να θεωρούν ότι το συγκεκριμένο ποσό επιδότησης είναι ανεπαρκές κίνητρο για να τα οδηγήσει να επενδύσουν σε ενεργειακή αναβάθμιση στο κέλυφος των κτηρίων, ενώ για τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος το ίδιο ποσό επιδότησης μπορεί να είναι αρκετό. Μην έχοντας επιλέξει να επενδύσουν σε ενεργειακή αναβάθμιση, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος θα συνεχίσουν να επιβαρύνονται με υψηλούς λογαριασμούς ενέργειας, για την πληρωμή των οποίων θα πρέπει να συνεχίσουν να διαθέτουν μεγάλο μέρος του εισοδήματός τους. Αντίθετα, τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος, έχοντας επιλέξει να επενδύσουν σε ενεργειακή αναβάθμιση, θα μειώσουν τους λογαριασμούς ενέργειας και κατ' επέκταση το μερίδιο του εισοδήματός τους που διαθέτουν για την πληρωμή τους.

Εάν η πολιτική ενιαίας επιδότησης αξιολογηθεί από ενεργειακή άποψη, μπορεί να διαφέρουν τα συμπεράσματα. Τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος έχουν συνήθως χαμηλότερη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση από τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος για διάφορους λόγους. Αυτό συνεπάγεται ότι το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να είναι υψηλότερο για τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος παρά για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος και επομένως από ενεργειακής άποψης είναι πιθανό να είναι προτιμότερο να εφαρμόζονται επιδοτήσεις τέτοιου μεγέθους ώστε τουλάχιστον να υποκινούνται επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης από τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος, ακόμα και αν μια τέτοια πολιτική έχει αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις.

Θεωρητικά, κατά την κατανομή μιας συνολικής προσπάθειας σε έναν αριθμό μεμονωμένων δραστηριοτήτων που έχουν διαφορετικές καμπύλες κόστους (στην προκειμένη τις μη γραμμικές καμπύλες κόστους-δυναμικού εξοικονόμησης από την ενεργειακή αναβάθμιση, Εικόνα 9), η μέγιστη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, που εκφράζεται από την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της συνολικής προσπάθειας, επιτυγχάνεται όταν όλες οι επιμέρους δραστηριότητες πραγματοποιούν τόση προσπάθεια όσο αυτή που αντιστοιχεί στην εξίσωση του οριακού κόστους (της προσπάθειας) για όλες τις δραστηριότητες. Στην προκειμένη περίπτωση, η μέγιστη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής τιμολόγησης, επιτυγχάνεται, όταν το εργαλείο της πολιτικής (δηλαδή οι επιδοτήσεις εξοικονόμησης ενέργειας) εφαρμόζονται ενιαία σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών.

Εάν σκοπός της πολιτικής είναι πέραν της επίτευξης της απαιτούμενης εξοικονόμησης ενέργειας, να αμβλύνει και τις αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις που επιμένουν όταν οι επιδοτήσεις παρέχονται ενιαία σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, αυτό είναι βέβαιο εφικτό αλλά διακυβεύοντας τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής. Η αύξηση του ποσού της επιδότησης για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, θα οδηγούσε σε περισσότερες επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης από αυτά και άρα θα μείωνε παραπάνω τους λογαριασμούς ενέργειας για αυτά.

Ο βαθμός διαφοροποίησης των ποσών επιδότησης μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών εξαρτάται κατ' αρχήν από το πως σταθμίζουν οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής το συμβιβασμό μεταξύ της σχέσης κόστους-

αποτελεσματικότητας της πολιτικής και των κοινωνικών επιπτώσεων αυτής. Εάν η πολιτική εστιάζει σε υπέρμετρο βαθμό στην άμβλυση των κοινωνικών επιπτώσεων για τα ευάλωτα νοικοκυριά, μπορεί να οδηγήσει σε τέτοια διαφοροποίηση των ποσών επιδότησης που θα καθιστούσε ανέφικτη την επίτευξη του επιθυμητού γενικού στόχου εξοικονόμησης ενέργειας. Στη μοντελοποίηση οι κοινωνικές επιπτώσεις από την εφαρμογή πολιτικής επιδότησης υπολογίζονται ως ο λόγος της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα.

B. Ρυθμιστική πολιτική

Για τις παραλλαγές της ρυθμιστικής πολιτικής, απαιτείται πρώτα ο καθορισμός του προτύπου ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης, το οποίο αντιστοιχεί σε ανώτατο όριο ωφέλιμης ζήτησης ενέργειας για θέρμανση ανά μονάδα επιφάνειας για τα παλαιά κτήρια. Η συμμόρφωση με το πρότυπο, απαιτεί την πραγματοποίηση επένδυσης ενεργειακής αναβάθμισης. Ένα κτήριο πολύ παλαιάς κατασκευής που όμως θερμαίνεται πλήρως μπορεί να δυσκολεύεται να συμμορφωθεί με ένα αυστηρό πρότυπο, σε σύγκριση με ένα νεότερης κατασκευής ή μερικώς θερμαινόμενο κτήριο.

Πρώτο βήμα, είναι ο προσδιορισμός μέσω επαναλήψεων, του προτύπου ενεργειακής απόδοσης, που εάν εφαρμοστεί ενιαία σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών θα οδηγήσει στην επιθυμητή συνολική εξοικονόμηση ενέργειας. Όταν το πρότυπο ενεργειακής απόδοσης είναι ίδιο για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, τότε όλες οι κατηγορίες θα πρέπει να συμμορφώνονται με αυτό το πρότυπο. Δεδομένου όμως ότι τα κτήρια ανά κατηγορία νοικοκυριού έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, τα νοικοκυριά θα κάνουν διαφορετικές επιλογές για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους και θα επιβαρύνονται με διαφορετικό κόστος για τη συμμόρφωση με το ίδιο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης. Η συμμόρφωση όλων των νοικοκυριών με το ίδιο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης αντιστοιχεί σε διαφορετικό οριακό κόστος ανά μονάδα εξοικονομούμενης ενέργειας για κάθε νοικοκυριό, από αυτό που αντιστοιχούσε στην πραγματοποίηση επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης χάρη στην εφαρμογή ενιαίου ποσού επιδότησης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, αν και, και τα δύο μέτρα πολιτικής οδηγούν στην ίδια συνολική εξοικονόμηση ενέργειας.

Ως εκ τούτου, η πολιτική που απαιτεί όλες οι κατηγορίες νοικοκυριών να συμμορφώνονται με το ίδιο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης δεν αντιστοιχεί στη μέγιστη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής, επειδή το ενιαίο πρότυπο συνεπάγεται διαφορετικό οριακό κόστος συμμόρφωσης με αυτό για τις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών. Η εφαρμογή ενιαίου ποσού επιδότησης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών είχε οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση των συνολικών δαπανών επιδότησης ανά μονάδα εξοικονομούμενης ενέργειας συνολικά, διότι αντιστοιχούσε σε εξίσωση του οριακού κόστους ενεργειακής αναβάθμισης για όλες τις κατηγορίες. Η εφαρμογή ενιαίου προτύπου ενεργειακής απόδοσης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών ενεργεί διαφορετικά και οδηγεί σε διαφορετικό οριακό κόστος ενεργειακής αναβάθμισης για κάθε κατηγορία.

Επιπλέον, η πολιτική που απαιτεί όλες οι κατηγορίες νοικοκυριών να συμμορφώνονται με το ίδιο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης συνεπάγεται αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις, πιθανώς πιο έντονες από την πολιτική που εφαρμόζει ενιαίες επιδοτήσεις. Τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος μπορεί να δυσκολεύονται να συμμορφωθούν με αυστηρά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, επειδή το κεφαλαιουχικό κόστος της ενεργειακής αναβάθμισης που απαιτείται για αυτόν το σκοπό μπορεί να εξαντλεί το εισόδημά τους. Ταυτόχρονα, τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος μπορεί να συμμορφώνονται με το ίδιο αυτό (αυστηρό) πρότυπο ενεργειακής απόδοσης πολύ πιο εύκολα, χάρη στην ευκολία συλλογής επενδυτικών

κονδυλίων. Επομένως, εάν η πολιτική σκοπεύει να αμβλύνει τις δυσμενείς κοινωνικές επιπτώσεις που ισχύουν όταν όλα τα νοικοκυριά πρέπει να συμμορφώνονται με τα ίδια πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, τότε η πολιτική θα πρέπει να διαφοροποιήσει το επίπεδο του προτύπου ενεργειακής απόδοσης μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών βάσει κριτηρίων.

Από τη σχέση δυαδικότητας μεταξύ της πολιτικής επιδότησης και της πολιτικής που βασίζεται στα πρότυπα, συνάγεται ότι εάν τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης διαφοροποιηθούν ανά κατηγορία νοικοκυριού με τέτοιο τρόπο που να αντιστοιχούν στην εξίσωση του οριακού κόστους συμμόρφωσης με αυτά, η πολιτική θα οδηγούσε ακριβώς στην ίδια κατανομή της προσπάθειας (δηλαδή της ενεργειακής εξοικονόμησης) με την πολιτική που εφαρμόζει ενιαία επιδότηση μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών.

Αυτή η κατανομή, όπως αποδείχθηκε όμως και προηγουμένως, μπορεί να είναι ανεπιθύμητη ως προς τις κοινωνικές της επιπτώσεις. Επομένως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί επιπλέον ένας κοινωνικός δείκτης για να καθορίσει πως θα διαφοροποιηθούν τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία νοικοκυριού. Το συμπέρασμα, δηλαδή, είναι ίδιο με πριν: ο τρόπος διαφοροποίησης των προτύπων ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία νοικοκυριού πρέπει να προκύπτει από ένα συνδυασμό στόχων πολιτικής, ιδίως όσον αφορά τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητα και τις κοινωνικές επιπτώσεις αυτής.

Οι κοινωνικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της ρυθμιστικής πολιτικής που βασίζεται σε πρότυπα ενεργειακής απόδοσης υπολογίζονται στη μοντελοποίηση ως ο λόγος του πάγιου ετήσιου κόστους της επένδυσης σε ενεργειακή αναβάθμιση προς το εισόδημα. Σε αυτή την περίπτωση πολιτικής, χρησιμοποιείται ως δείκτης των κοινωνικών επιπτώσεων της πολιτικής, ο λόγος του πάγιου κόστους ως προς το εισόδημα, αντί του λόγου του μεταβλητού κόστους ως προς το εισόδημα (που χρησιμοποιείται στην πολιτική επιδότησης), επειδή η συμμόρφωση με τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης απαιτεί την πραγματοποίηση επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης, για τις οποίες όμως κάποιες κατηγορίες νοικοκυριών μπορεί να μη διαθέτουν το απαιτούμενο κεφάλαιο. Η διαφοροποίηση των προτύπων ενεργειακής απόδοσης με τα οποία πρέπει να συμμορφώνονται οι διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών, με βάση κοινωνικά κριτήρια (πχ. το εισόδημα) είναι μάλλον αδύνατο να εφαρμοστεί στην πράξη. Αντίθετα, η διαφοροποίηση των επιδοτήσεων με κοινωνικά κριτήρια είναι αρκετά δυνατή στην πράξη.

Και οι δύο επιλογές πολιτικής, δηλαδή η πολιτική επιδότησης και η ρυθμιστική πολιτική που βασίζεται στη συμμόρφωση με πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, είναι δημόσιες παρεμβάσεις στην αγορά και η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να είναι χαμηλότερη από ό,τι θα περίμεναν οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής κατά τη διαμόρφωσή τους. Ο βαθμός αναποτελεσματικότητας κατά την εφαρμογή της πολιτικής εξαρτάται από τη φύση του εργαλείου πολιτικής. Η μοντελοποίηση δεν έχει συμπεριλάβει παράγοντες αναποτελεσματικότητας που σχετίζονται με τις πολιτικές.

Οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης που βασίζονται σε παροχή επιδοτήσεων παρουσιάζουν αναποτελεσματικότητα λόγω της κακής χρήσης των εσόδων που προκύπτουν από την επιδότηση. Η κακή χρήση οδηγεί σε χαμηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας από την αναμενόμενη ως αποτέλεσμα είτε διαρροών χρημάτων είτε υπερτιμολόγησης υλικών ή υπηρεσιών.

Στην πρώτη περίπτωση, οι καταναλωτές μπορεί να αποφασίσουν να ξοδέψουν λιγότερα χρήματα για επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης και να χρησιμοποιήσουν το υπόλοιπο ποσό της επιδότησης ενεργειακής απόδοσης για άλλους σκοπούς κατά τις εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι κατασκευαστές ή οι έμποροι λιανικής ενδέχεται να χρεώνουν πολύ υψηλή τιμή για τα υλικά ή τις υπηρεσίες. Χαμηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας από την αναμενόμενη μπορεί να προκύψει και από τη λεγόμενη επίδραση του αντίρροπου αποτελέσματος (rebound effect) (Greening et al., 2000; Herring & Roy, 2007). Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κελύφους του κτηρίου συνεπάγεται μείωση του λογαριασμού ενέργειας που, με τη σειρά της, επιτρέπει την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας παραμένοντας εντός των ορίων του προϋπολογισμού. Το μοντέλο έχει ενσωματώσει την επίδραση του αντίρροπου αποτελέσματος, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.3.

Οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης που επιβάλλουν πρότυπα ενεργειακής απόδοσης παρουσιάζουν αναποτελεσματικότητα με άλλους τρόπους. Εάν το πρότυπο ενεργειακής απόδοσης είναι πολύ αυστηρό, η πιθανότητα μη συμμόρφωσης με το πρότυπο αυξάνεται και η επιβολή γίνεται πιο δύσκολη για κοινωνικούς λόγους. Από την άλλη, εάν τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης δεν είναι αρκετά αυστηρά, η πολιτική μπορεί να αποτύχει στην επίτευξη των στόχων. Δεν είναι μόνο πιο δύσκολο να καθοριστεί ένα επαρκές επίπεδο για το πρότυπο ενεργειακής απόδοσης, σε σύγκριση με τον καθορισμό ενός ποσού επιδότησης, αλλά είναι επίσης δύσκολο να τροποποιείται το πρότυπο (για παράδειγμα εντός κάποιων ετών) για να βελτιωθεί το πλαίσιο πολιτικής που έχει ορίσει.

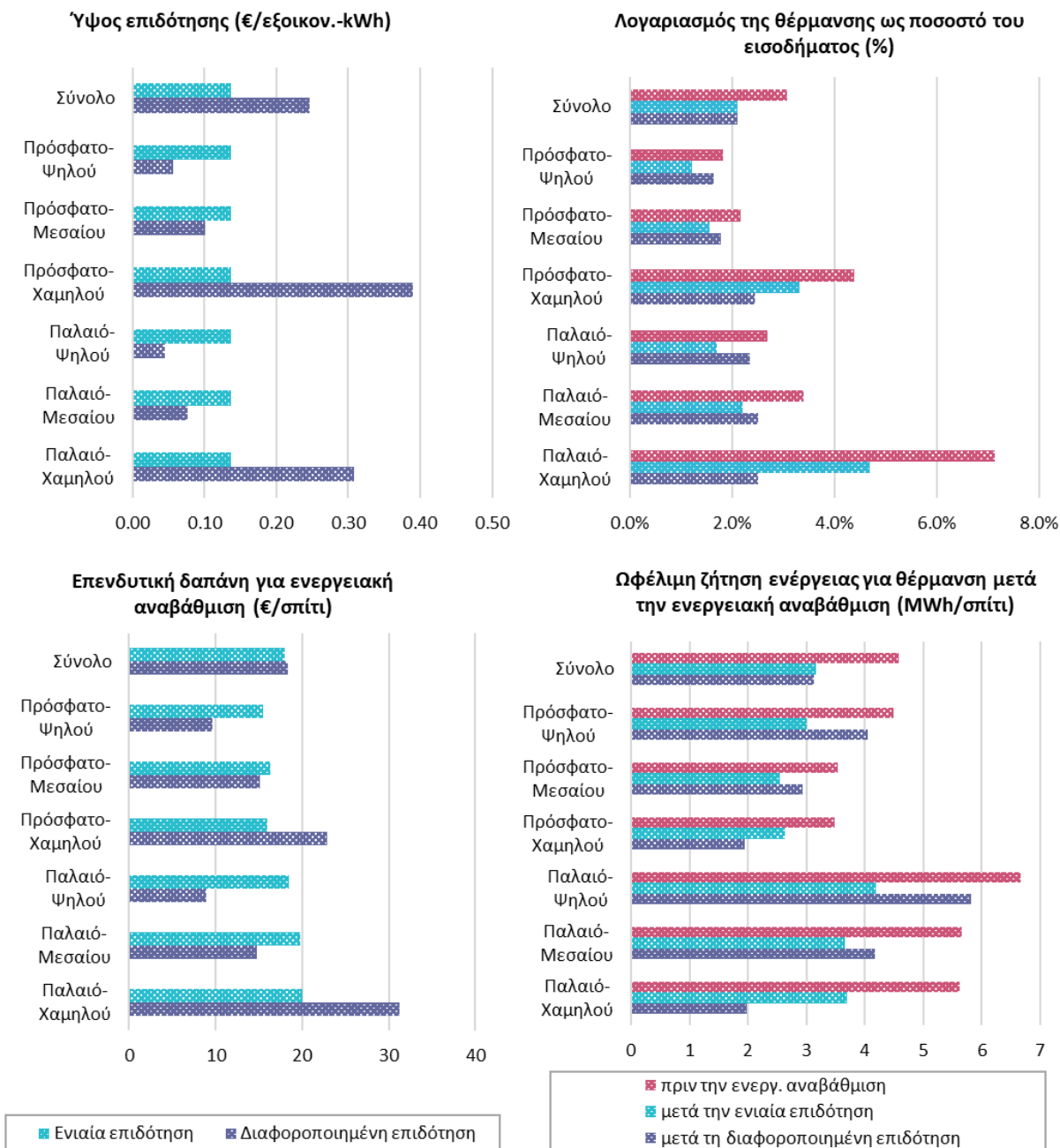
Όπως αναφέρθηκε, ο δείκτης που χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση για να μετρήσει τις κοινωνικές επιπτώσεις της πολιτικής επιδότησης, είναι ο λόγος της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα. Ο ίδιος δείκτης χρησιμοποιείται και στις αναλύσεις που μελετούν τις επιπτώσεις της ενεργειακής φτώχειας (energy poverty). Τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος ενδέχεται να περιορίσουν τις δαπάνες για αγορά ενέργειας προκειμένου να καλύψουν άλλες δαπάνες (άσχετες με την ενέργεια) δεδομένου του περιορισμένου οικογενειακού προϋπολογισμού. Με αυτόν τον τρόπο, ενδέχεται να στερηθούν βασικές ενεργειακές υπηρεσίες. Ομοίως, μια ανεπαρκής επιδότηση για εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να διατηρήσει το λόγο της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα σε υψηλά επίπεδα.

Η εφαρμογή, ρυθμιστικής πολιτικής που βασίζεται στην επιβολή προτύπων ενεργειακής απόδοσης δεν μπορεί, στην πράξη, να αντιμετωπίσει τις κοινωνικές επιπτώσεις της πολιτικής, καθώς είναι αδύνατον να διαφοροποιηθεί η αυστηρότητα του προτύπου ενεργειακής απόδοσης με βάση κοινωνικά κριτήρια. Τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος που αδυνατούν να αντέξουν οικονομικά το κόστος συμμόρφωσης με ένα αυστηρό πρότυπο ενεργειακής απόδοσης, θα επενδύσουν ανεπαρκώς στην ενεργειακή αναβάθμιση και θα συνεχίσουν να ζουν σε ένα «κατώτερο» κτήριο από τεχνολογική άποψη. Αυτή η κατάσταση που περιγράφεται ως «τεχνολογική φτώχεια» (technology poverty) μπορεί επίσης να οδηγήσει σε στέρηση βασικών ενεργειακών υπηρεσιών. Οι ρυθμιστικές πολιτικές που βασίζονται στα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης από μόνες τους δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν την τεχνολογική φτώχεια, καθώς δεν είναι πρακτικό να προστεθούν κοινωνικά κριτήρια σε μια πολιτική που βασικά σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κτηρίου.

6.3.4. Σύγκριση μεταξύ πολιτικών με βάση επιδοτήσεις και με βάση τεχνικές προδιαγραφές και πρότυπα

Στην υπό-ενότητα αυτή αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» που εφαρμόζει τους εναλλακτικούς τρόπους εφαρμογής της πολιτικής επιδότησης και αυτά του σεναρίου «Κλιματικής Ουδετερότητας» που εφαρμόζει τους εναλλακτικούς τρόπους εφαρμογής της πολιτικής η οποία βασίζεται στην επιβολή προτύπων ενεργειακής απόδοσης. Τέλος, τα αποτελέσματα όλων των παραλλαγών συγκρίνονται μεταξύ τους.

Εικόνα 59: Αποτελέσματα του μοντέλου για την στρατηγική τιμολογιακής πολιτικής



Για να αναπαραστήσει το μοντέλο τις κοινωνικές επιπτώσεις της πολιτικής επιδότησης υπολογίζει ως δείκτη για αυτόν το σκοπό, το λόγο της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα για κάθε κατηγορία νοικοκυριού. Η ενιαία πολιτική επιδότησης διατηρεί και ελαφρώς τονίζει τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των νοικοκυριών, όταν συγκρίνεται ο δείκτης των κοινωνικών επιπτώσεων πριν και μετά την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους (Εικόνα 59). Η πολιτική επιδότησης μειώνει τους λογαριασμούς ενέργειας για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, μειώνοντας σημαντικά και μάλλον ομοιόμορφα την κατανάλωση ενέργειας για όλους τους καταναλωτές. Ωστόσο, οι διαφορές στη μέση ετήσια

δαπάνη για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών, που υπήρχαν πριν από την ενεργειακή αναβάθμιση, επιμένουν. Μάλιστα, οι διαφορές του δείκτη των κοινωνικών επιπτώσεων μεταξύ των κατηγοριών νοικοκυριών που κατοικούν σε πρόσφατες κατασκευές, αυξάνονται σε μέγεθος αν και ελαφρά: πριν από την ενεργειακή αναβάθμιση, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος έπρεπε να διαθέτουν 2,3 φορές μεγαλύτερο μέρος του εισοδήματός τους για την αγορά ενέργειας για θέρμανση ανά μονάδα εισοδήματος, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος και η διαφορά αυτή γίνεται 2,6 φορές μεγαλύτερη, μετά την ενεργειακή αναβάθμιση ως αποτέλεσμα της πολιτικής ενιαίων επιδοτήσεων. Όσον αφορά τα νοικοκυριά μεσαίου εισοδήματος, για αυτά η ενιαία πολιτική επιδότησης γεφύρωσε σε ένα βαθμό το χάσμα που υπήρχε σε σχέση με τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος. Τελικά, η πολιτική ενιαίας επιδότησης μειώνει τη μέση ετήσια δαπάνη για αγορά ενέργειας για όλους τους καταναλωτές αλλά δεν αντιμετωπίζει τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των εισοδηματικών τάξεων.

Για τη διαφοροποίηση της επιδότησης ανά κατηγορία νοικοκυριού είναι δύσκολο να οριστεί ένας «αντικειμενικός» κανόνας. Στην πραγματικότητα, η διαφοροποίηση του ποσού της επιδότησης εξαρτάται από τη σχετική βαρύτητα που αποδίδει ο υπεύθυνος χάραξης πολιτικής στις κοινωνικές επιπτώσεις της πολιτικής σε σχέση με άλλα κριτήρια. Ο σχεδιασμός της πολιτικής είναι δηλαδή, ένα πρόβλημα απόφασης πολλαπλών κριτηρίων, καθώς ο αρμόδιος για αυτόν θα πρέπει να αποδεχτεί εκ των προτέρων ένα συμβιβασμό μεταξύ της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής, και των κοινωνικών της επιπτώσεων. Η διαφοροποίηση του ποσού επιδότησης λαμβάνοντας υπόψη την πληθώρα των καταναλωτών που υπάρχουν είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην πράξη και να παρακολουθηθεί ως προς την αποτελεσματική εφαρμογή της. Η υπερβολική εστίαση στα κοινωνικά κριτήρια μπορεί να αποδυναμώσει σημαντικά τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής. Για το σκοπό της ανάλυσης, ορίζεται ένα σχήμα αυθαίρετης διαφοροποίησης των επιδοτήσεων που βασίζεται αποκλειστικά στις εισοδηματικές διαφορές μεταξύ των νοικοκυριών. Υποτίθεται ότι τα ποσά επιδότησης διαφοροποιούνται κατά τέτοιον τρόπο μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών ώστε όλα τα νοικοκυριά να διαθέτουν μετά την ενεργειακή αναβάθμιση το ίδιο μερίδιο του εισοδήματός τους για αγορά ενέργειας για θέρμανση. Τα διαφοροποιημένα ποσά επιδότησης προσδιορίζονται ακολουθώντας μια επαναληπτική διαδικασία: σε κάθε επανάληψη αλλάζει το ποσό επιδότησης της κάθε κατηγορίας νοικοκυριού με τέτοιον τρόπο ώστε ο λόγος της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος να πέφτει και ο αντίστοιχος για τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος να αυξάνεται, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι το συνολικό ποσό εξοικονόμησης ενέργειας δεν μειώνεται σε επίπεδο χαμηλότερο από αυτό που επιτυγχάνεται στο πλαίσιο της εφαρμογής της ενιαίας επιδότησης.

Όπως αναμενόταν, τα διαφοροποιημένα ποσά επιδότησης οδηγούν στη διαφοροποίηση της έντασης της ενεργειακής αναβάθμισης και άρα της εξοικονόμησης ενέργειας και συνεπώς της επενδυτικής δαπάνης ανά κατηγορία νοικοκυριού. Οι καταναλωτές χαμηλού εισοδήματος επενδύουν περισσότερο στην ενεργειακή αναβάθμιση σε σύγκριση με την περίπτωση της ενιαίας επιδότησης, μειώνοντας έτσι περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι θα μπορούν να χρηματοδοτήσουν αυτές τις επενδύσεις. Δεδομένου ότι τα μη-οικονομικά εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα έχουν αρθεί δεν υπάρχει ή τουλάχιστον έχει περιοριστεί η δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση. Ωστόσο, η δυνατότητα συλλογής των επενδυτικών κονδυλίων αξίζει να ληφθεί υπόψη από την προοπτική εφαρμογής της πολιτικής και αποτελεί προϋπόθεση ώστε τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος να μπορούν να κάνουν το συμβιβασμό

μεταξύ εξοικονόμησης της δαπάνης για αγορά ενέργειας και της επενδυτικής δαπάνης για πραγματοποίηση της ενεργειακής αναβάθμισης. Αντίθετα, τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος είναι λιγότερο εκτεθειμένα σε ζητήματα πρόσβασης σε χρηματοδότηση στο πλαίσιο ενός καθεστώτος επιδοτήσεων που διαφοροποιείται ανά κατηγορία νοικοκυριού: λαμβάνοντας χαμηλότερη επιδότηση από ό,τι στο πλαίσιο της ενιαίας πολιτικής επιδότησης, πραγματοποιούν επενδύσεις ενεργειακής αναβάθμισης μικρότερης έντασης και ενώ εξοικονομούν λιγότερο στους λογαριασμούς ενέργειας για θέρμανση, η μεταβολή του λόγου της μέσης ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση ως προς το εισόδημα είναι αμελητέα. Όσον αφορά τα νοικοκυριά σε κτήρια πιο πρόσφατης κατασκευής, το διαφορικό των κοινωνικών επιπτώσεων των δύο καθεστώτων επιδότησης είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό για τα νοικοκυριά σε κτήρια παλαιάς κατασκευής, λόγω της (εκ των προτέρων) καλής θερμικής συμπεριφοράς τους. Με άλλα λόγια, η εφαρμογή της πολιτικής διαφοροποιώντας το ποσό της επιδότησης ανά κατηγορία νοικοκυριού αποδίδει κυρίως στην περίπτωση των κτηρίων παλαιάς κατασκευής.

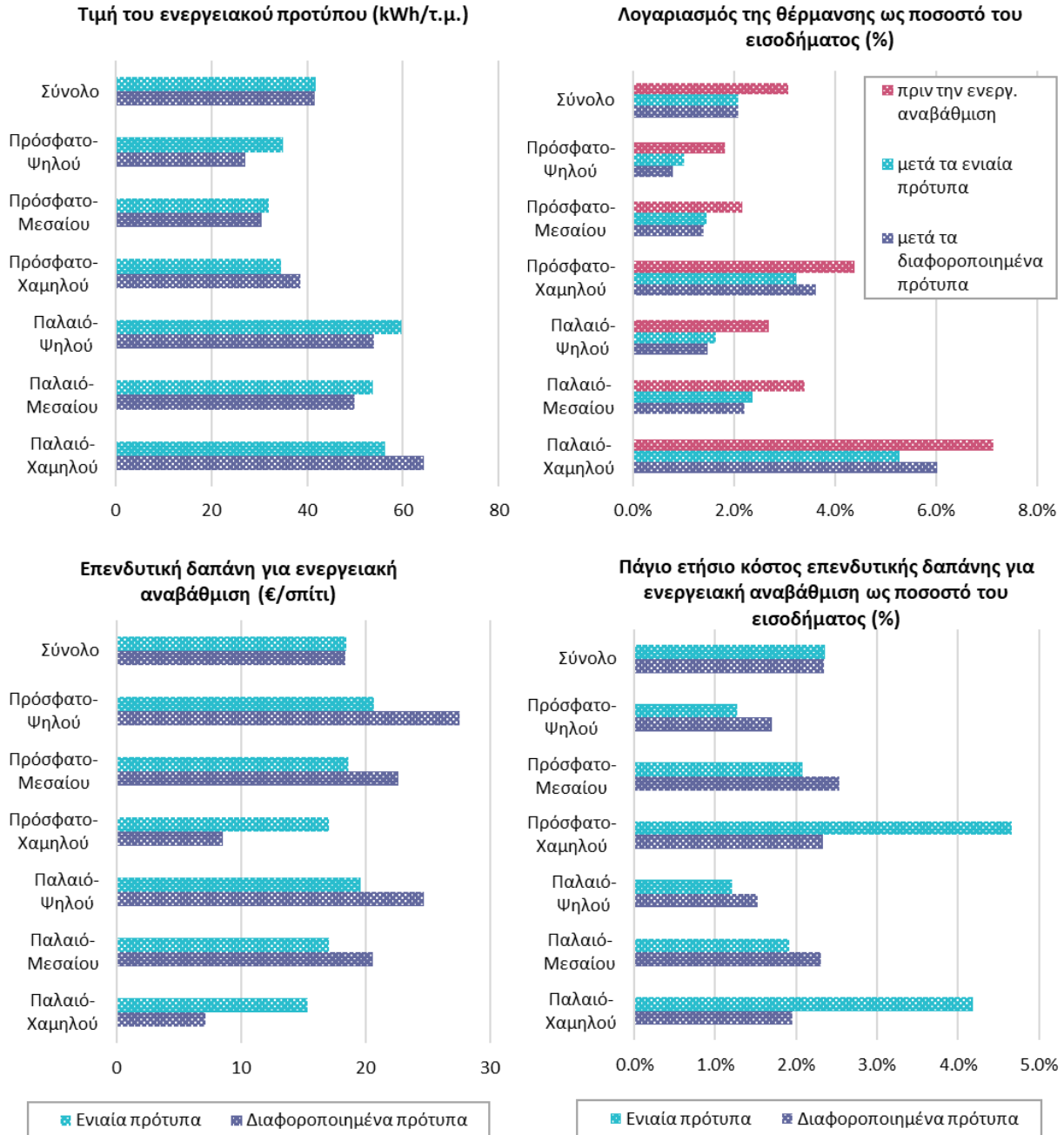
Εξετάζοντας τη ρυθμιστική πολιτική που βασίζεται στην επιβολή προτύπων ενεργειακής απόδοσης (Εικόνα 60), έχει ήδη αναφερθεί, ότι η εφαρμογή ενός ενιαίου προτύπου είναι αναποτελεσματική καθώς συνεπάγεται διαφορετικό οριακό κόστος συμμόρφωσης για τους καταναλωτές. Για να είναι ρεαλιστική η προσομοίωση, ορίζονται διαφορετικά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης μεταξύ παλαιών και πρόσφατων κατοικιών, αλλά στην περίπτωση της επιβολής ενιαίων προτύπων ενεργειακής απόδοσης, δεν διαφοροποιείται το επίπεδο του προτύπου ανάλογα με το εισόδημα των νοικοκυριών. Αυτή η κατανομή είναι ρεαλιστική από την άποψη της εφαρμογής και προφανώς οδηγεί σε διαφορετικό οριακό κόστος συμμόρφωσης με το πρότυπο μεταξύ των εισοδηματικών κατηγοριών.

Για να αναπαραστήσει το μοντέλο τις κοινωνικές επιπτώσεις της πολιτικής που βασίζεται στα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης υπολογίζει ως δείκτη για αυτόν το σκοπό, το λόγο του πάγιου ετήσιου κόστους της επενδυτικής δαπάνης (δηλαδή του κεφαλαιουχικού κόστους) για ενεργειακή αναβάθμιση ως προς το εισόδημα για κάθε κατηγορία νοικοκυριού. Θεωρείται, δηλαδή, ότι ο πόρος που βρίσκεται σε σπανιότητα είναι η δυνατότητα χρηματοδότησης και άρα πραγματοποίησης της επένδυσης ενεργειακής αναβάθμισης που θα οδηγήσει σε συμμόρφωση με το πρότυπο.

Όταν όλες οι κατηγορίες νοικοκυριών πρέπει να συμμορφώνονται με το ίδιο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος πρέπει να ξοδεύουν σημαντικό μέρος του εισοδήματός τους για τη χρηματοδότηση των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης που θα οδηγήσουν σε συμμόρφωση με το πρότυπο. Αυτό το μερίδιο είναι περισσότερο από τρεις φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο για τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος. Ταυτόχρονα, παρά την υψηλή επενδυτική προσπάθεια, τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος θα πρέπει να διαθέτουν παραπάνω από 2,5 φορές μεγαλύτερο μέρος τους εισοδήματός τους για τους λογαριασμούς ενέργειας για θέρμανση μετά την ενεργειακή αναβάθμιση σε σχέση με τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος, διαφορά που επικρατούσε και πριν από την ενεργειακή αναβάθμιση. Επομένως, η επιβολή ενιαίων (ανά ηλικιακή κατηγορία των κτηρίων) προτύπων ενεργειακής απόδοσης έχει αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις.

Όσο η δυνατότητα πρόσβασης σε χρηματοδότηση και η άντληση κεφαλαίων εξακολουθεί να αποτελεί εμπόδιο για τα νοικοκυριά με χαμηλό εισόδημα, οι κοινωνικές επιπτώσεις της ρυθμιστικής πολιτικής που επιβάλλει τη συμμόρφωση με ενιαία πρότυπα ενεργειακής απόδοσης είναι αρνητικές, είτε αυτές υπολογίζονται με δείκτες που χρησιμοποιούν πάγια κόστη, είτε υπολογίζονται με δείκτες που χρησιμοποιούν μεταβλητά κόστη.

Εικόνα 60: Αποτελέσματα του μοντέλου για την στρατηγική ρυθμιστικής πολιτικής



Όπως αναφέρθηκε ήδη, η διαφοροποίηση του προτύπου ενεργειακής απόδοσης βάσει κοινωνικών κριτηρίων είναι αδύνατον να εφαρμοστεί στη πράξη, όμως για να ολοκληρωθεί η ανάλυση στο πλαίσιο της έρευνας, εξετάζεται και η περίπτωση αυτή. Η διαφοροποίηση των προτύπων ενεργειακής απόδοσης έχει στόχο να αμβλύνει τις κοινωνικές επιπτώσεις της πολιτικής που επιβάλλει σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών τη συμμόρφωση με το ίδιο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης. Ο κανόνας δηλαδή που χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση των προτύπων ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία νοικοκυριού είναι να εξισωθεί για όλες τις κατηγορίες εισοδήματος (ανά ηλικιακή κατηγορία) ο λόγος του πάγιου

ετήσιου κόστους της επενδυτικής δαπάνης για ενεργειακή αναβάθμιση ως προς το εισόδημα. Η διαδικασία έχει ως εξής: τροποποιείται το πρότυπο, με την έννοια της αύξησης του ορίου της μοναδιαίας ωφέλιμης ενέργειας για θέρμανση ανά τετραγωνικό μέτρο για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος και με την έννοια της μείωσης του ίδιου ορίου για τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος, προκειμένου να μειωθεί η επενδυτική δαπάνη για τα πρώτα και να αυξηθεί για τα δεύτερα μέχρις ότου να εξισωθεί ο δείκτης των κοινωνικών επιπτώσεων της πολιτικής μεταξύ των νοικοκυριών. Η τροποποίηση εκτελείται επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό συνολικό επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας.

Πίνακας 29: Σύγκριση των εναλλακτικών στρατηγικών πολιτικής ως προς τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας

| | | Παλιό-Χαμηλού | Παλιό -Μεσαίου | Παλιό -Ψηλού | Πρόσφατο-Χαμηλού | Πρόσφατο-Μεσαίου | Πρόσφατο-Ψηλού | Σύνολο |
|--|---------------------------|---------------|----------------|--------------|------------------|------------------|----------------|--------|
| Προϋπολογισμός της πολιτικής (δισ. €) | Ενιαία επιδότηση | 5.4 | 5.6 | 3.5 | 3.5 | 4.2 | 3.7 | 25.8 |
| | Διαφοροποιημένη επιδότηση | 21.8 | 2.3 | 0.4 | 17.1 | 1.8 | 0.4 | 43.8 |
| | Ενιαία πρότυπα | 2.4 | 3.3 | 3.6 | 4.1 | 5.9 | 7.1 | 26.3 |
| | Διαφοροποιημένα πρότυπα | 0.3 | 5.2 | 5.5 | 0.3 | 10.8 | 14.5 | 36.7 |
| Ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση μετά την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους (KWh/τ.μ.) | Ενιαία επιδότηση | 50 | 50 | 62 | 35 | 34 | 42 | 43 |
| | Διαφοροποιημένη επιδότηση | 25 | 58 | 87 | 25 | 39 | 57 | 42 |
| | Ενιαία πρότυπα | 57 | 54 | 60 | 34 | 32 | 34 | 42 |
| | Διαφοροποιημένα πρότυπα | 66 | 51 | 54 | 40 | 30 | 26 | 42 |
| Σχέση κόστους αποτελεσματικότητας της πολιτικής (€ επιδότησης ανά εξοικονομούμενη kWh) | Ενιαία επιδότηση | 0.138 | 0.138 | 0.138 | 0.138 | 0.138 | 0.138 | 0.138 |
| | Διαφοροποιημένη επιδότηση | 0.283 | 0.079 | 0.048 | 0.352 | 0.101 | 0.060 | 0.233 |
| | Ενιαία πρότυπα | 0.083 | 0.098 | 0.134 | 0.151 | 0.169 | 0.196 | 0.141 |
| | Διαφοροποιημένα πρότυπα | 0.023 | 0.131 | 0.181 | 0.021 | 0.273 | 0.307 | 0.196 |

Η «χαλάρωση» του προτύπου ενεργειακής απόδοσης για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος διευκολύνει τη συμμόρφωση τους με αυτό, αφού μειώνεται σημαντικά η επενδυτική δαπάνη που αντιστοιχεί στην επένδυση ενεργειακής αναβάθμισης προκειμένου να συμμορφωθεί με το πρότυπο. Ταυτόχρονα βέβαια οδηγεί σε λιγότερη εξοικονόμηση ενέργειας και μεγαλύτερους λογαριασμούς ενέργειας σε σχέση με την πολιτική των ενιαίων προτύπων. Η μείωση του πάγιου ετήσιου κόστους της επενδυτικής δαπάνης για ενεργειακή αναβάθμιση ως προς το εισόδημα για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος είναι σημαντική στην περίπτωση των διαφοροποιημένων προτύπων, αποτέλεσμα που υποδηλώνει το βαθμό δυσκολίας άμβλυνσης των κοινωνικών επιπτώσεων κατά την εφαρμογή μιας πολιτικής βασισμένης σε πρότυπα, αφού στην πραγματικότητα δεν μπορούν να διαφοροποιηθούν τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία εισοδήματος.

Ένα αξιοσημείωτο δίλημμα τίθεται κατά τη σύγκριση των δύο εναλλακτικών στρατηγικών πολιτικής. Το δίλημμα προκύπτει αναφορικά με το δείκτη μέτρησης των κοινωνικών επιπτώσεων που χρησιμοποιείται ως καθοδήγηση για τη διαφοροποίηση της κατανομής της προσπάθειας μεταξύ των νοικοκυριών και την ελάφρυνση του φόρτου για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος. Η πολιτική επιδότησης που διαφοροποιεί

το επίπεδο επιδότησης ανά κατηγορία νοικοκυριού οδηγεί σε μείωση της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας για θέρμανση, σε βάρος του πάγιου ετήσιου κόστους της επένδυσης σε ενεργειακή αναβάθμιση, το οποίο αυξάνει. Η ρυθμιστική πολιτική που διαφοροποιεί τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία νοικοκυριού, οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα, δηλαδή σε μείωση του πάγιου κόστους σε βάρος του μεταβλητού κόστους, το οποίο αυξάνεται. Η χρήση του δείκτη που βασίζεται στο μεταβλητό κόστος για την κοινωνική πολιτική δίνει προτεραιότητα στην αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας, ενώ η επιλογή του δείκτη που βασίζεται στο πάγιο κόστος θέτει ως στόχο τη διασφάλιση ενεργειακής αναβάθμισης επαρκούς έντασης για όλα τα νοικοκυριά, μια επιλογή που θέτει την αντιμετώπιση της «τεχνολογικής» φτώχειας ως προτεραιότητα.

Ο Πίνακας 29 συνοψίζει τις πληροφορίες για την αξιολόγηση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών στρατηγικών πολιτικής και των παραλλαγών τους. Υπολογίζεται η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, με συνήθη τρόπο, ως η αναλογία των συνολικών δαπανών που συνεπάγεται άμεσα η πολιτική προς την προκύπτουσα εξοικονόμηση ενέργειας. Ο υπολογισμός είναι απλός στην περίπτωση της πολιτικής που βασίζεται σε επιδοτήσεις για την οποία ο προϋπολογισμός της πολιτικής είναι ο πολλαπλασιασμός των ποσών επιδότησης με το ποσό της εξοικονόμησης ενέργειας. Για να γίνει ο ίδιος υπολογισμός για την πολιτική που βασίζεται σε πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, προσδιορίζεται πρώτα το ποσό επιδότησης που αντιστοιχεί στη δυική τιμή του περιορισμού που θέτει ανώτατο όριο (ίσο με το πρότυπο ενεργειακής απόδοσης) στη μοναδιαία ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση ανά κατηγορία νοικοκυριού.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα ότι η πολιτική που βασίζεται σε ενιαίες επιδοτήσεις αποδίδει σημαντικά καλύτερα όσον αφορά τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας από την πολιτική που βασίζεται σε επιδοτήσεις που διαφοροποιούνται ανά εισοδηματική κατηγορία. Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας (δηλαδή σε € ανά εξοικονομούμενη ενέργεια) για την πολιτική που παρέχει διαφορετικές επιδοτήσεις ανά κατηγορία νοικοκυριού είναι περισσότερο από 1,5 φορές υψηλότερη από αυτή που παρέχει ενιαία ποσά επιδότησης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών. Αυτή είναι μια σημαντική απώλεια αποτελεσματικότητας σε βάρος της άμβλυνσης των κοινωνικών επιπτώσεων.

Η πολιτική που βασίζεται σε ενιαία πρότυπα ενεργειακής απόδοσης εφαρμόζει τα ίδια πρότυπα μόνο ανά ηλικιακή κατηγορία και η διαφοροποίηση γίνεται μόνο μεταξύ κατηγοριών εισοδήματος στην αντίστοιχη παραλλαγή πολιτικής. Τα ενιαία πρότυπα ενεργειακής απόδοσης συνεπάγονται διαφορετικό οριακό κόστος συμμόρφωσης, αλλά οι διαφορές σε σύγκριση με την περίπτωση της ενιαίας επιδότησης είναι μικρές επειδή οι διαφορές οφείλονται στα χαρακτηριστικά του κτηρίου (όπως είναι λογικό για τεχνικούς λόγους) και όχι στα οικονομικά χαρακτηριστικά του νοικοκυριού. Αυτό εξηγεί γιατί η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής που επιβάλλει ενιαία πρότυπα ενεργειακής απόδοσης είναι παρόμοια αν και ελαφρώς χειρότερη από την πολιτική που βασίζεται στην παροχή ενιαίων επιδοτήσεων.

Τα διαφοροποιημένα πρότυπα ανά κατηγορία εισοδήματος στοχεύουν στην ελάφρυνση της επιβάρυνσης του κόστους κεφαλαίου για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, και για το σκοπό αυτό τροποποιούνται τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης με βάση κοινωνικά κριτήρια και αγνοώντας το πως διαφοροποιούνται τα οριακά κόστη που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του κτηρίου. Αυτό οδηγεί σε σημαντική απόκλιση από τη βέλτιστη κατανομή του προϋπολογισμού της πολιτικής. Γι' αυτό, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας (δηλαδή σε € ανά εξοικονομούμενη ενέργεια) της πολιτικής που επιβάλλει διαφορετικά πρότυπα

Η ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ ΚΑΙ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΦΤΩΧΕΙΑ

ενεργειακής απόδοσης ανά κατηγορία νοικοκυριού είναι 1,4 φορές υψηλότερη από αυτήν που επιβάλλει ενιαία πρότυπα ενεργειακής απόδοσης.

7. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ

Το μαθηματικό μοντέλο ενεργειακής οικονομίας που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή έχει σχεδιαστεί για την πρόβλεψη της ενεργειακής ζήτησης και αποδοτικότητας στον κτηριακό τομέα και της επιλογής τεχνολογίας στις διάφορες ενεργειακές χρήσεις σε μακροχρόνια προοπτική. Το μοντέλο ακολουθεί μία καινοτόμο προσέγγιση σχετικά με την αναπαράσταση των συμπεριφορών των καταναλωτών για τους οποίους γίνεται η υπόθεση ότι λόγω ελλιπούς πληροφόρησης, αβεβαιοτήτων και εμποδίων έχουν περιορισμένη ορθολογικότητα στη λήψη επενδυτικών αποφάσεων για την ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια. Ταυτόχρονα όμως το μοντέλο προσομοιώνει δυναμική προσαρμογή προς ορθολογικές επενδύσεις υπό την επήρεια κατάλληλων πολιτικών οι οποίες αναπαρίστανται αναλυτικά και με μεγάλη ποικιλία. Επιπλέον, το μοντέλο είναι πολύ αναλυτικό και η αριθμητική του εφαρμογή περιλαμβάνει λεπτομερή κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος και των καταναλωτών σε κατηγορίες. Η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου περιλαμβάνει:

- κατάστρωση της μακροχρόνιας επένδυσης σε ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων και της επιλογής ενεργειακού εξοπλισμού για την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας στα κτήρια ως πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού που ενσωματώνεται σε πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας στο οποίο εφαρμόζονται περιορισμοί πολιτικής με τη μορφή στόχων και προδιαγραφών
- αναπαράσταση ετερογενών ιδιοσυγκρασιών για τις καταναλωτικές και επενδυτικές συμπεριφορές τόσο μεταξύ των κατηγοριών καταναλωτών και τύπων κτηρίων, όσο και εντός κάθε κατηγορίας, με βάση τη θεωρία των διακριτών επιλογών.

Στο μοντέλο αναπαρίστανται μέσω παραμέτρων κατάλληλα ποσοτικοποιημένων ποικιλία οικονομικών και μη-οικονομικών εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, που δυσκολεύουν και στρεβλώνουν τη λήψη ορθολογικών επενδυτικών αποφάσεων. Επίσης, το μοντέλο αναπαριστά πληθώρα οικονομικών, ρυθμιστικών και θεσμικών πολιτικών, όπως είναι οι επιδοτήσεις, οι φόροι, τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, χρηματοδοτικές διευκολύνσεις, στόχοι πολιτικής, κ.ά. Με την επίλυση του μοντέλου κατά σενάριο μπορεί να γίνεται ανάλυση επιπτώσεων των μέτρων πολιτικής. Η αριθμητική εφαρμογή του μοντέλου έγινε για όλες τις ευρωπαϊκές χώρες, και για τα κτήρια του οικιακού τομέα και του τομέα των κτηρίων γραφείων και υπηρεσιών. Ο χρονικός ορίζοντας επίλυσης είναι το έτος 2050 ή 2070, χωρισμένος σε πενταετή βήματα.

Η πολύπλοκη μαθηματική διατύπωση του μοντέλου, που βασίζεται στις αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας για να αναπαραστήσει τις συμπεριφορές σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια και ταυτόχρονα ενσωματώνει τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα, η λεπτομερής κατηγοριοποίηση του κτηριακού αποθέματος, η εφαρμογή της θεωρίας των διακριτών επιλογών, για να αναπαραστήσει την ετερογένεια ως προς τις επιλογές και τις αποφάσεις των καταναλωτών, και η σαφής αναπαράσταση των πολιτικών αποδείχθηκαν μεγάλης αξίας για την αξιολόγηση των ευρωπαϊκών πολιτικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου επιτρέπουν την αξιολόγηση και σύγκριση συγκεκριμένων μέσων πολιτικής όσον αφορά τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και τις πιθανές αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις τους. Με άλλα λόγια το μοντέλο, έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει αναλύσεις που μελετούν την αποτελεσματικότητα των πολιτικών στο πλαίσιο επίτευξης συγκεκριμένων ενεργειακών και κλιματικών

στόχων, και τις επιπτώσεις από την επιτυχία ή αποτυχία εφαρμογής τους στην κοινωνία, στο υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα, και στο περιβάλλον. Θα ήταν αδύνατο να αποτυπωθούν όλες οι πτυχές που απαιτούνται για την αξιολόγηση της ενεργειακής πολιτικής χωρίς την πολυπλοκότητα που εφαρμόζεται στο μοντέλο.

Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στην αξιολόγηση των επιλογών ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής που εστιάζουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον κτηριακό τομέα στην Ευρώπη, όπως αυτά μπορούν να επιτευχθούν μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των παλαιών κτηρίων, την επιλογή ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού για όλες τις χρήσεις ενέργειας στα κτήρια και την αναδιάρθρωση του μείγματος καυσίμων προς τον ηλεκτρισμό και τα συνθετικά καύσιμα.

Η διερεύνηση στο πλαίσιο της διατριβής έγκειται στην παρουσίαση και στην ανάλυση σε βάθος των αποτελεσμάτων του μοντέλου στο πλαίσιο συγκεκριμένων εφαρμογών, που αποτελούν ζητήματα πολιτικής. Η δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 αποτελεί κοινό άξονα σε όλες τις εφαρμογές που παρουσιάζονται στη διατριβή, διότι αυτός ο κλιματικός στόχος είναι πολύ φιλόδοξος και απαιτεί το μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, και άρα αποτελεί κατάλληλο πλαίσιο για την ανάδειξη του εύρους των αναλύσεων που μπορεί να υποστηρίξει το μοντέλο.

Η πρώτη εφαρμογή, σκοπεύει να αναδείξει την επίδραση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα, η ενσωμάτωση των οποίων στη μοντελοποίηση, στην ουσία εφαρμόζει τη θεωρία της περιορισμένης ορθολογικότητας ως κατάλληλης σε συνδυασμό με τη λεπτομερή κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος για την προσομοίωση των φαινομενικά μη-ορθολογικών συμπεριφορών σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας. Η δεύτερη εφαρμογή, παρουσιάζει τους βασικούς πυλώνες του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στον κτηριακό τομέα, για επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, αντιπαραβάλλοντας εναλλακτικές στρατηγικές πολιτικής και υπολογίζοντας τις επιπτώσεις κάθε στρατηγικής τόσο στον κτηριακό τομέα όσο και στο υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα. Τέλος, η ανάλυση εστιάζει στον οικιακό τομέα και παρουσιάζονται οι επιπτώσεις, από πλευράς κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας, του ριζικού μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια κατοικίας σε διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών. Η ανάλυση τελικά επικεντρώνεται στην ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων, που είναι επένδυση εντάσεως κεφαλαίου για τα νοικοκυριά, και ταυτόχρονα η επιλογή που έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά τόσο στην εξοικονόμηση ενέργειας όσο και στη μείωση των εκπομπών CO₂. Εξετάζονται εναλλακτικές στρατηγικές πολιτικής που μπορούν να κινητοποιήσουν τις απαραίτητες επενδύσεις ώστε να επιτευχθεί η εξοικονόμηση ενέργειας που απαιτεί ο στόχος της κλιματικής ουδετερότητας και μελετώνται οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις που έχουν διαφορετικοί τρόποι εφαρμογής των υπό μελέτη πολιτικών στις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιείται για να αναλύσει και να αξιολογήσει τις πολιτικές της ΕΕ που σκοπεύουν να οδηγήσουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον τομέα των κτηρίων. Δεδομένου του αργού ρυθμού ανακατασκευής του κτηριακού αποθέματος και της ηλικιακής του δομής (το μεγαλύτερο μέρος του κτηριακού αποθέματος στην ΕΕ έχει χτιστεί πριν από το 1990), η ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης του κελύφους των παλαιών κτηρίων είναι απαραίτητη για την επίτευξη φιλόδοξων στόχων ενεργειακής απόδοσης. Η σύγχρονη πολιτική της ΕΕ, αναγνωρίζοντας αυτό το γεγονός, έχει δώσει μεγάλη

έμφαση στη μόχλευση των επενδύσεων ενεργειακής αναβάθμισης στον κτηριακό τομέα μέσω διαφόρων μέσων πολιτικής, ποικίλης φύσης, συμπεριλαμβανομένων θεσμικών μέτρων, οικονομικών κινήτρων, προσανατολισμένων στη χρηματοδότηση, και ρυθμιστικών μέτρων. Η παρακολούθηση της πορείας των ευρωπαϊκών Οδηγιών έχει ήδη δείξει ότι η πολιτική αντιμετωπίζει δυσκολίες για την επιτυχή παροχή κινήτρων για την εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Τόσο οι εθνικές εκθέσεις όσο και η ακαδημαϊκή βιβλιογραφία έχουν εντοπίσει ότι πολλά οικονομικά και μη-οικονομικά εμπόδια κάνουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να συμπεριφέρονται με φαινομενικά μη ορθολογικό τρόπο όσον αφορά τις αποφάσεις για επενδύσεις σε ενεργειακή απόδοση. Τα μη-οικονομικά εμπόδια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τρεις ομάδες: α) την (ασύμμετρη) πληροφόρηση, β) την αβεβαιότητα σχετικά με τις οικονομικές και τεχνικές επιδόσεις των επενδυτικών επιλογών (συμπεριλαμβανομένου του κόστους ευκαιρίας των ιδίων και δανειακών κεφαλαίων), και γ) τη ρυθμιστική αβεβαιότητα (κανονιστικές διατάξεις). Τα μη-οικονομικά εμπόδια και η δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση παραμορφώνουν τις αντιλήψεις των καταναλωτών όσον αφορά τα οφέλη από την ενεργειακή αποδοτικότητα και μειώνουν τα οικονομικά οφέλη της ενεργειακής αναβάθμισης που υπολογίζουν οι τεχνικές μελέτες οι οποίες βασίζονται σε καθαρά οικονομοτεχνικούς υπολογισμούς.

Η αναπαράσταση των συμπεριφορών των καταναλωτών και η ενσωμάτωση των μη-οικονομικών εμποδίων στη μοντελοποίηση είναι δύσκολα εγχειρήματα για δύο βασικούς λόγους. Δεν υπάρχει καθιερωμένη μέθοδος σχετικά με τις παραμέτρους που αναπαριστούν φαινομενικά μη-ορθολογικές συμπεριφορές και οποιοδήποτε τέτοιο μοντέλο μπορεί να υπόκειται σε κριτική λόγω έλλειψης εμπειρικής βάσης. Το μοντέλο που ανέπτυξε η διατριβή, προκειμένου να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις, εφαρμόζει λεπτομερή κατάτμηση του κτηριακού αποθέματος σε κατηγορίες. Έτσι, αφενός αναπαριστά την ετερογένεια των συμπεριφορών, αφετέρου αντιστοιχεί τα εμπόδια στην ενεργειακή αποδοτικότητα στην κατηγορία που αφορούν, εφαρμόζοντας στην ουσία τη θεωρία της περιορισμένης ορθολογικότητας.

Ως εκ τούτου, οι προκλήσεις για την κατασκευή ενός τέτοιου μοντέλου αφορούν την πολυπλοκότητα της διατύπωσης, τη συλλογή δεδομένων και το μέγεθος του μοντέλου. Η κατασκευή του προτεινόμενου μοντέλου ήταν σύνθετη έρευνα μεγάλης κλίμακας και το μοντέλο σχεδιάστηκε με γνώμονα την προαναφερθείσα ερευνητική φιλοδοξία.

Στην προσέγγιση του μοντέλου οι παράγοντες που αναπαριστούν τα μη-οικονομικά εμπόδια (δηλαδή τα θεσμικά εμπόδια, τα εμπόδια πληροφόρησης και τις αβεβαιότητες) έχουν δυναμική εξέλιξη προσομοιώνοντας την ανάδραση που έχει το πλαίσιο πολιτικής που διαμορφώνουν φιλόδοξες πολιτικές ενεργειακής απόδοσης στις συμπεριφορές των καταναλωτών. Για τους σκοπούς της ανάλυσης στο πλαίσιο της διατριβής, σχεδιάζεται ένα σενάριο που έχει στόχο επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050, και για αυτό περιλαμβάνει μια σειρά πολιτικών παροχής κινήτρων. Ταυτόχρονα θεωρεί ότι δεν εφαρμόζονται ή αποτυγχάνουν θεσμικά μέτρα πολιτικής, και επιπλέον υποθέτει ότι το πλαίσιο πολιτικής που διαμορφώνουν οι πολιτικές παροχής κινήτρων δεν είναι αρκετό για να αρθούν τα μη-οικονομικά εμπόδια σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω υποθέσεων πολιτικής το σενάριο αποτυγχάνει ως προς την απαιτούμενη μείωση των εκπομπών CO₂.

Ο στόχος της παραπάνω ανάλυσης είναι να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των μη-οικονομικών εμποδίων στις αποφάσεις ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτήρια και να αναδειχθεί η σημασία ενσωμάτωσής τους τόσο στους υπολογισμούς του μοντέλου όσο και όταν αξιολογείται η αποτελεσματικότητα πολιτικών παροχής κινήτρων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν, ότι οικονομικά και ρυθμιστικά μέτρα μόνα τους

αδυνατούν να επιτύχουν συγκεκριμένους ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους ή πρέπει να έχουν υπερβολικά υψηλές τιμές, γεγονός που καθιστά την πολιτική αναποτελεσματική, ως προς τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Επίσης, ισχύει η υπόθεση ότι ένα ισχυρό πλαίσιο πολιτικής, όπως για παράδειγμα αυτό που ισχύει για να εξασφαλίσει την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050, μπορεί πράγματι να περιορίσει τους παράγοντες αβεβαιότητας και έλλειψης πληροφόρησης, που αποτελούν τα σημαντικότερα μη-οικονομικά εμπόδια. Έτσι για παράδειγμα, η υπόθεση ένταξης του τομέα των κτηρίων στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ), ως ένα οικονομικό μέτρο πολιτικής που μπορεί να οδηγήσει στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, υπονοεί ότι οι καταναλωτές δεν έχουν αβεβαιότητα σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη των τιμών, και άρα οι παράγοντες αβεβαιότητας, που στη μοντελοποίηση αναπαρίστανται, μεταξύ άλλων, μέσω των υψηλών επιτοκίων προεξόφλησης, μπορούν να περιοριστούν δυναμικά. Εφόσον οι παράγοντες αβεβαιότητας έχουν περιοριστεί, η τιμή του φόρου για τις εκπομπές CO₂ στα κτήρια δεν θα χρειαστεί να είναι τόσο υψηλή όσο αυτή που θα έπρεπε να ισχύει εάν δεν είχαν αρθεί τα εμπόδια αβεβαιότητας. Το παραπάνω συμπέρασμα, είναι πολύ μεγάλης σημασίας όσον αφορά την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων πολιτικής και επίσης αναδεικνύει τη σημασία συνυπολογισμού των μη-οικονομικών εμποδίων στη μοντελοποίηση των αποφάσεων για ενεργειακή αποδοτικότητα.

Το συμπέρασμα επίσης μπορεί να προκύψει και αλλιώς: η άρση των μη-οικονομικών εμποδίων έχει μεγάλη σημασία για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO₂ στα κτήρια. Μέρος του στόχου της ενεργειακής απόδοσης και της μείωσης των εκπομπών CO₂ μπορεί να καλυφθεί μόνο από τα θεσμικά μέτρα και τις συνθήκες μόχλευσης -εναύσματος (enabling conditions) που διαμορφώνουν οι πολιτικές παροχής κινήτρων για επενδύσεις ενεργειακής εξοικονόμησης και οδηγούν στην άρση των θεσμικών εμποδίων, πληροφόρησης και αβεβαιότητας. Με άλλα λόγια, είναι αναπόφευκτη η θέσπιση οικονομικών ή/και ρυθμιστικών πολιτικών για την επίτευξη του στόχου κλιματικής ουδετερότητας, αλλά η αξιοποίηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών CO₂ που μπορεί να προσφέρει η άρση των μη-οικονομικών εμποδίων, έχει μεγάλη σημασία για τη χάραξη αποτελεσματικής πολιτικής.

Η ανάλυση στο πλαίσιο της διατριβής για την ανάδειξη των βασικών πυλώνων του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο ενεργειακό σύστημα της ΕΕ έως το 2050 στηρίζεται σε σύγκριση προβολών με χρήση του προτεινόμενου μοντέλου. Οι προβολές προέκυψαν από την ποσοτική εκτίμηση επιπτώσεων σεναρίων με διαφορετικό μείγμα πολιτικής που σκοπεύουν να οδηγήσουν σε δραστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂ στον κτηριακό τομέα μέχρι το 2050, ώστε αυτός να συνεισφέρει στη δέσμευση της ΕΕ να γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος μέχρι το 2050. Η σύγκριση των προβολών είναι χρήσιμη, καθώς δείχνει εάν οι πολιτικές επαρκούν για την επίτευξη των στόχων για το 2050, επιτρέπει την αξιολόγηση τους ως προς το κόστος και ως προς τις κοινωνικές τους επιπτώσεις, και μπορεί να καταδείξει κατά πόσον οδηγούν σε εξάντληση των δυνατοτήτων στον κτηριακό τομέα και στο ενεργειακό σύστημα συνολικά.

Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των σεναρίων δείχνουν ότι είναι εφικτό να επιτευχθεί πολύ φιλόδοξη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση των εκπομπών CO₂ στον κτηριακό τομέα της ΕΕ έως το 2050 με προσιτό κόστος. Το κλειδί στο μετασχηματισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια είναι η επιτάχυνση του ρυθμού ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των παλαιών κτηρίων, η επιλογή επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης και ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης.

Οι καταναλωτές δυσκολεύονται να εκμεταλλευθούν ορθολογικά τις οικονομικά αποδοτικές δυνατότητες της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων λόγω ελλιπούς πληροφόρησης, αβεβαιότητας και οικονομικών και μη-οικονομικών εμποδίων που επηρεάζουν τις συμπεριφορές τους. Η άρση των εμποδίων, η κινητοποίηση επενδυτικής χρηματοδότησης και η υποστήριξη των νοικοκυριών χαμηλού εισοδήματος είναι οι κύριες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσει η πολιτική. Με μόχλευση των σχετικών επενδύσεων μεγιστοποιούνται οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της χρήσης ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού και συσκευών. Οι αντλίες θερμότητας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο μετασχηματισμό, καταρχάς επειδή αποτελούν την προτιμώμενη επιλογή για κτήρια που έχουν εφαρμόσει επέμβαση ενεργειακής αναβάθμισης μεγάλης έντασης. Επιπλέον, καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια πολύ αποδοτικά και μπορούν επίσης να συμβάλουν στους στόχους για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Υπάρχουν βέβαια εμπόδια και ως προς την ορθολογική επιλογή των αντλιών θερμότητας, που σχετίζονται με την τεχνική τους ωριμότητα και την πληροφόρηση των καταναλωτών ως προς τα οφέλη από τη χρήση τους, τα οποία και πάλι η πολιτική πρέπει να άρει. Οι προβολές του μοντέλου επιβεβαιώνουν ότι η φιλόδοξη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης αποδίδει περισσότερο εφόσον συνδυάζεται με αυξανόμενο ρυθμό εξηλεκτρισμού της θέρμανσης. Η επίτευξη πολύ δραστικής μείωσης των εκπομπών CO₂ στον κτηριακό τομέα, χρειάζεται και συνεισφορά των κλιματικά ουδέτερων αερίων καυσίμων, δηλαδή υδρογόνου, συνθετικού μεθανίου και βιοαερίου, που αντικαθιστούν το φυσικό αέριο στο δίκτυο διανεμόμενου ατμού, στην τελική κατανάλωση στα κτήρια. Όμως η συνεισφορά αυτή είναι περιορισμένη συγκριτικά με τον εξηλεκτρισμό και την εξοικονόμηση ενέργειας από αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει με σαφήνεια ότι η εξοικονόμηση ενέργειας και εκπομπών χάρη στην ενεργειακή αναβάθμιση μεγάλης έντασης του κελύφους των παλαιών κτηρίων, στον εξηλεκτρισμό της θέρμανσης και στην επιλογή αποδοτικού ενεργειακού εξοπλισμού και συσκευών πρέπει να αποτελούν τους βασικούς πυλώνες του μετασχηματισμού της κατανάλωσης ενέργειας στον κτηριακό τομέα, και τα κλιματικά ουδέτερα αέρια πρέπει να παίζουν δευτερεύοντα ρόλο ως προς αυτό. Αυτό προκύπτει από τη σύγκριση των προβολών σεναρίων στα οποία γίνεται υπόθεση περιορισμένης προόδου σχετικά με την ενεργειακή εξοικονόμηση και τον εξηλεκτρισμό και στα οποία περιλαμβάνεται εκτεταμένη χρήση κλιματικά ουδέτερων αερίων προκειμένου να επιτευχθεί η δραστική μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μακροχρόνια. Σε ένα τέτοιο σενάριο οι επενδύσεις στον κτηριακό τομέα είναι μικρότερες συγκριτικά με σενάρια επίτευξης μεγάλης ενεργειακής εξοικονόμησης και εξηλεκτρισμού της θέρμανσης, ωστόσο έχει πολύ μεγαλύτερο μεταβλητό κόστος, επειδή οι τιμές των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων είναι πολύ υψηλές. Και τούτο, παρά την υπόθεση της πλήρους εκμετάλλευσης του δυναμικού εκμάθησης από την πράξη για την παραγωγή υδρογόνου, τη μεθανοποίηση και τη δέσμευση CO₂ από τον αέρα και βιογενείς πηγές. Επίσης, η αυξημένη ζήτηση κλιματικά ουδέτερων καυσίμων συνεπάγεται αύξηση της ισχύος των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2050 που μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλότερα εμπόδια συγκριτικά με το σενάριο αυξημένης ενεργειακής αποδοτικότητας. Προκύπτει ότι ο απευθείας εξηλεκτρισμός της θέρμανσης σε συνδυασμό με τη μόνωση των κτηρίων είναι ενεργειακά πολύ πιο αποδοτική λύση, τεχνικά και οικονομικά, από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου και εξ αυτού συνθετικών υδρογονανθράκων.

Η στρατηγική πολιτικής που εστιάζει στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στον εξηλεκτρισμό της θέρμανσης μπορεί στην πράξη να δυσκολευθεί και να μην επιφέρει την αναμενόμενη ενεργειακή εξοικονόμηση λόγω των εμποδίων που επηρεάζουν τις αποφάσεις των καταναλωτών σχετικά με επενδύσεις σε ενεργειακή

αποδοτικότητα. Μπορεί επίσης να αποτύχει σε αρκετές εισοδηματικές κατηγορίες αν οι πολιτικές δεν παρέχουν τις απαραίτητες οικονομικές διευκολύνσεις για τη μόχλευση των απαιτούμενων επενδύσεων.

Όμως, η αβεβαιότητα σχετικά με τα κλιματικά ουδέτερα συνθετικά καύσιμα είναι πολύ μεγαλύτερη και αφορά στην τεχνολογική πρόοδο και παραγωγή σε μεγάλη βιομηχανική κλίμακα γιατί αλλιώς δεν θα επιτευχθεί μετριασμός των τιμών και του κόστους. Ανάλυση ευαισθησίας που έγινε με το μοντέλο σχετικά με την εξέλιξη των τιμών των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων, έδειξε ότι εάν η ενεργειακή εξοικονόμηση αποτύχει, η αύξηση των τιμών των κλιματικά ουδέτερων καυσίμων λόγω μεγάλων επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή θα είχε σημαντική επίπτωση στις ετήσιες δαπάνες για αγορά ενέργειας για τους οικιακούς καταναλωτές. Κατά συνέπεια, η εξοικονόμηση ενέργειας προστατεύει τους καταναλωτές έναντι της αβεβαιότητας σχετικά με την εξέλιξη των τιμών των κλιματικά ουδέτερων αερίων.

Η εφαρμογή του μοντέλου στο πλαίσιο της διατριβής διερεύνησε τις δυνατότητες του μοντέλου όχι μόνο αναφορικά με την προσομοίωση των συμπεριφορών ενεργειακής απόδοσης αλλά και για την αξιολόγηση εναλλακτικών μέσων πολιτικής. Ένα δίλημμα της δημόσιας πολιτικής είναι μεταξύ των τιμολογιακών έναντι των ρυθμιστικών πολιτικών για τη διόρθωση των ατελειών της αγοράς. Δηλαδή το δίλημμα μεταξύ κρατικής ενίσχυσης με μορφή επιδότησης ή φορολογίας έναντι παρέμβασης μέσω θέσπισης υποχρέωσης σεβασμού προτύπων, προδιαγραφών ή στόχων (standards).

Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον τομέα των κτηρίων, η τιμολογιακή πολιτική θα μπορούσε να περιλαμβάνει επιδοτήσεις επενδύσεων, φορολόγηση καυσίμων και εφαρμογή μηχανισμού πιστοποιητικών (π.χ. Λευκών Πιστοποιητικών τα οποία είναι αντικείμενο αγοράς σε δημοπρασία για τη δικαιολόγηση κατανάλωσης πέραν του επιτρεπόμενου ορίου). Μέσω των τιμολογιακών παρεμβάσεων το Κράτος επηρεάζει την οικονομική αξιολόγηση από τους ιδιώτες επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Η ρυθμιστική πολιτική θα μπορούσε να περιλαμβάνει υποχρέωση σεβασμού προτύπων ενεργειακής απόδοσης ωθώντας τους καταναλωτές να επενδύουν ώστε να συμμορφωθούν προς τα πρότυπα. Κάθε κρατική παρέμβαση στην αγορά επιφέρει κόστος για τον ιδιώτη αλλά έχει και όφελος στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στις εκπομπές. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών στρατηγικών πολιτικής ως προς τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητα είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό κάθε πολιτικής. Αυτό ακριβώς αποτέλεσε αντικείμενο αναλύσεων με τη χρήση του μοντέλου της διατριβής.

Πέραν όμως του κόστους που κάθε πολιτική συνεπάγεται για το κράτος, τόσο η στρατηγική τιμολογιακής πολιτικής όσο και η στρατηγική ρυθμιστικής πολιτικής έχουν σημαντικές κοινωνικές επιπτώσεις για τα νοικοκυριά, ιδίως όσον αφορά ζητήματα που σχετίζονται με τη δυνατότητα κάλυψης των δαπανών για αγορά ενέργειας ή τη δυνατότητα συλλογής επενδυτικών κονδυλίων για την πραγματοποίηση μιας επένδυσης. Και τα δύο αυτά στοιχεία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος. Τα μη-οικονομικά εμπόδια επηρεάζουν έντονα τις ορθολογικές αποφάσεις σε τέτοιες κατηγορίες νοικοκυριών και ταυτόχρονα, μια πολιτική που αγνοεί τέτοια ζητήματα θα είχε κακή επίδοση όσον αφορά την αποτελεσματικότητά της. Επομένως, ο τρόπος που μια πολιτική μπορεί να αντιμετωπίσει τις δυσμενείς κοινωνικές επιπτώσεις στις διάφορες κατηγορίες νοικοκυριών πρέπει να είναι εγγενές χαρακτηριστικό του σχεδιασμού της πολιτικής.

Για την ανάλυση της έρευνας στο πλαίσιο της διατριβής, έγιναν διάφορα πειράματα εφαρμογής του μοντέλου, με διαφορετικές υποθέσεις σχετικά με τα μέτρα πολιτικής είτε στο πλαίσιο της τιμολογιακής πολιτικής (δηλαδή του ποσού της επιδότησης) είτε της ρυθμιστικής πολιτικής (δηλαδή του προτύπου ενεργειακής απόδοσης) ανά κατηγορία νοικοκυριού. Ο προσδιορισμός της έντασης κάθε μέτρου πολιτικής

ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του νοικοκυριού, που στη βιβλιογραφία ονομάζεται «ρύθμιση βάσει χαρακτηριστικών» (attribute-based), αποδείχθηκε σημαντική για όλες τις πτυχές αξιολόγησης της πολιτικής: σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής, κόστος συμμόρφωσης με την πολιτική, κοινωνικές επιπτώσεις κ.λπ. Η κοινωνική αποδοχή της πολιτικής προφανώς διευκολύνεται εάν η ένταση του μέτρου διαφοροποιείται ανά κατηγορία καταναλωτή, αλλά στην πράξη η εφαρμογή και παρακολούθηση μιας τέτοιας πολιτικής είναι διοικητικά δυσχερές, ιδίως όταν η διαφοροποίηση γίνεται ανά κατηγορία νοικοκυριού και για πολλές κατηγορίες νοικοκυριών.

Η πολιτική που εφαρμόζει ενιαία επιδότηση σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών βρέθηκε ότι έχει το χαμηλότερο συνολικό κόστος κρατικής ενίσχυσης ανά μονάδα εξοικονόμησης ενέργειας. Η πολιτική ενιαίας επιδότησης, όμως, έχει δυσμενείς κοινωνικές επιπτώσεις, γιατί αν και συμβάλλει στη μείωση των λογαριασμών ενέργειας για όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών, αδυνατεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ των νοικοκυριών χαμηλού και των νοικοκυριών υψηλού εισοδήματος, πράγμα που οφείλεται στην μεγάλη ασυμμετρία σχετικά με τις επενδυτικές δυνατότητες των εισοδηματικών κατηγοριών.

Η μελέτη χρησιμοποίησε το λόγο των λογαριασμών ενέργειας ως προς το εισόδημα ως δείκτη για τη μέτρηση των κοινωνικών επιπτώσεων της πολιτικής επιδότησης και ως κριτήριο για τη διαφοροποίηση του ποσού επιδότησης ανά κατηγορία νοικοκυριού. Η πολιτική που στοχεύει να αμβλύνει τις κοινωνικές διαφορές μεταξύ των νοικοκυριών καθορίζει υψηλότερες τιμές επιδότησης για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος από ό,τι για τα νοικοκυριά υψηλού εισοδήματος. Όμως, η διαφοροποίηση των επιδοτήσεων μειώνει τη μέτρηση κόστους-αποτελεσματικότητας της πολιτικής, επειδή υψηλό κόστος επικεντρώνεται στην επιδότηση χαμηλών εισοδημάτων που όμως έχουν μικρές καταναλώσεις να εξοικονομήσουν. Αντίθετα όμως, η πολιτική διαφοροποιημένων επιδοτήσεων έχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα ως προς τη μόχλευση επενδύσεων, ώστε να διασφαλιστεί η συλλογή χρηματοδότησης επενδύσεων για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, πράγμα που σημαίνει ότι αυξάνονται οι πιθανότητες αποτελεσματικότητας ως προς το στόχο εξοικονόμησης ενέργειας συγκριτικά με την πολιτική ενιαίας επιδότησης επενδύσεων.

Η ρυθμιστική πολιτική που βασίζεται σε πρότυπα ενεργειακής απόδοσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, ιδίως την ηλικία του κτηρίου. Η επιβολή ενιαίου προτύπου ενεργειακής απόδοσης σε όλες τις κατηγορίες νοικοκυριών αγνοεί τη δυνατότητα επενδύσεων των χαμηλών εισοδηματικών κατηγοριών τις οποίες ενδεχομένως επιβαρύνει υπέρμετρα. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή αυστηρού προτύπου στα κτήρια χωρίς διευκόλυνση επενδύσεων για τις χαμηλές εισοδηματικές κατηγορίες επιφέρει αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις όπως αυτές που προκύπτουν από την πολιτική που εφαρμόζει ενιαία επιδότηση για όλες τις εισοδηματικές κατηγορίες. Όμως από πρακτικής πλευράς, είναι μάλλον αδύνατο να διαφοροποιούνται τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων με βάση το εισόδημα των νοικοκυριών, για πολλούς λόγους, συμπεριλαμβανομένων των δυσκολιών παρακολούθησης και ελέγχου μιας τέτοιας πολιτικής. Η πολιτική που βασίζεται στις επιδοτήσεις είναι επομένως πιο ευέλικτη από την πολιτική που βασίζεται σε πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για την αντιμετώπιση των κοινωνικών επιπτώσεων, όσον αφορά την πρακτική εφαρμογή της.

Συνδυασμός βέβαια πολιτικής επιδοτήσεων με εισοδηματικά κριτήρια και αυστηρών προτύπων κατά τύπο κτηρίου θα είχε βέλτιστη απόδοση ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης πολιτικών. Οι εφαρμογές του μοντέλου χρησιμοποίησαν έναν δείκτη μεταβλητού κόστους (δηλαδή της ετήσιας δαπάνης για αγορά ενέργειας ως προς το εισόδημα) για τη διαφοροποίηση των επιδοτήσεων ανά κατηγορία νοικοκυριού και ένα δείκτη παγίου ετήσιου κόστους (δηλαδή του κόστους κεφαλαίου που αντιστοιχεί στην επενδυτική δαπάνη ως προς

το εισόδημα) για τη διαφοροποίηση των προτύπων ενεργειακής απόδοσης μεταξύ των κατηγοριών των νοικοκυριών. Ουσιαστικά, η πρώτη επιλογή δίνει προτεραιότητα στην αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας, ενώ η δεύτερη επιλογή στοχεύει στην αύξηση της ενεργειακής αναβάθμισης ώστε να αποφευχθεί η «τεχνολογική» φτώχεια (που εκδηλώνεται με τη διατήρηση κτηρίων στο κτηριακό απόθεμα με χαμηλή ενεργειακή απόδοση).

Το βέλτιστο μείγμα πολιτικών προέρχεται προφανώς από ένα συμβιβασμό μεταξύ της επίτευξης βέλτιστης σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας (δηλαδή της ελαχιστοποίησης του προϋπολογισμού της πολιτικής) και της αντιμετώπισης των κοινωνικών επιπτώσεων αυτής. Για το τελευταίο, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στο είδος της οικονομικής επιβάρυνσης που στοχεύει να αντιμετωπιστεί η πολιτική κατά προτεραιότητα για τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος. Αυτός ο συμβιβασμός θα πρέπει να καθοδηγεί το σχετικό μείγμα επιδοτήσεων και προτύπων ενεργειακής απόδοσης.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η μελέτη αγνόησε τυχόν ελλιπή εφαρμογή των μέτρων πολιτικής, όπως συμβαίνει πάντοτε στην πραγματικότητα. Οι πολιτικές που βασίζονται σε επιδοτήσεις έχουν μικρότερα αποτελέσματα από τα θεωρητικά αναμενόμενα λόγω της χρήσης μέρους της επιδότησης για άλλους σκοπούς πέραν αυτών για τους οποίους δόθηκαν. Οι πολιτικές που βασίζονται σε πρότυπα ενεργειακής απόδοσης έχουν επίσης μικρότερα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα όταν ο βαθμός συμμόρφωσης με τα πρότυπα δεν είναι πλήρης. Και οι δύο επιλογές θα οδηγούσαν, στην πραγματικότητα, σε χαμηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας από αυτήν που υπολογίζεται με τη χρήση του μοντέλου.

Υφίσταται επίσης η λεγόμενη επίδραση του αντίρροπου αποτελέσματος (rebound effect): η εξοικονόμηση ενέργειας, που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση χρηματικών πόρων, οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση αγαθών και υπηρεσιών, και μεταξύ αυτών και ενέργειας, έτσι ώστε τελικά η εξοικονόμηση ενέργειας να γίνεται μικρότερη της αρχικά αναμενόμενης. Το μοντέλο διαθέτει μηχανισμό εκτίμησης της επίδρασης του αντίρροπου αποτελέσματος αφού περιλαμβάνει παραμέτρους ελαστικότητας της ζήτησης ωφέλιμης ενέργειας ως προς το κόστος, το οποίο μειώνεται χάρη στην εξοικονόμηση ενέργειας. Όμως πρέπει να επισημανθεί ότι η ποσοτική εκτίμηση αυτή είναι πάντα αβέβαιη και έτσι το μοντέλο ενδεχομένως υπερεκτιμά την αποτελεσματικότητα της πολιτικής για την ενεργειακή αποδοτικότητα.

7.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια είναι μεγάλης σημασίας για τη χάραξη ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής, επειδή ο κτηριακός τομέας είναι ο μεγαλύτερος τελικός καταναλωτής και ο μετασχηματισμός της κατανάλωσης ενέργειας σε αυτόν μπορεί να συνεισφέρει στην επίτευξη φιλόδοξων στόχων για την ενέργεια και το κλίμα. Στο πλαίσιο αυτό, και αναγνωρίζοντας τη συνεισφορά που μπορεί να έχει το προτεινόμενο μοντέλο σε μελέτες επιπτώσεων και σε αναλύσεις σχετικά με την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής συγκεκριμένων μέτρων πολιτικής, προτείνονται παρακάτω ερευνητικές κατευθύνσεις για τη βελτίωση του μοντέλου και για συνέχιση της έρευνας.

- Η ενσωμάτωση στη μοντελοποίηση των εμποδίων στην ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω παραγόντων που ποσοτικοποιούν τα εμπόδια αυτά αποτελεί πρωτοτυπία της διατριβής, όπως αναφέρθηκε. Στην παρούσα διαμόρφωση της διατριβής οι παράγοντες αυτοί οι οποίοι εκφράζουν παραμέτρους αβεβαιότητας, συμπεριφορές ως προς το κίνδυνο, την πρόοδο της εκμάθησης (learning) των τεχνολογικών επιλογών και την προσδοκία των καταναλωτών ως προς αυτό, καθώς και την έλλειψη πληροφόρησης και γνώσεων, μεταβάλλονται εξωγενώς ανάλογα με το πλαίσιο (σενάριο) πολιτικής που

μελετάει το μοντέλο. Οι παράγοντες αυτοί που ενσωματώνονται στη μοντελοποίηση με τη μορφή κόστους («αντιληπτά» κόστη) και μέσω της χρήσης υψηλών προεξοφλητικών επιτοκίων, μειώνονται εξωγενώς αντικατοπτρίζοντας καταρχάς την επίδραση θεσμικών μέτρων πολιτικής που δρουν για την αντιμετώπισή τους και επιπλέον δυναμικά ανάλογα με τη φιλοδοξία του πλαισίου πολιτικής που προσομοιώνεται με το μοντέλο. Εναλλακτικά όμως θα είχε ερευνητική αξία οι παράμετροι που ποσοτικοποιούν τα εμπόδια (γενικότερα την περιορισμένη ορθολογικότητα) να μεταβάλλονται δυναμικά ενδογενώς ως αποτέλεσμα των επιτευγμάτων σχετικά με τις επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Δηλαδή να ενσωματώνεται στη γνώση του αποφασίζοντα η συνάρτηση που συσχετίζει τη μεταβολή των εμποδίων με τη μεγέθυνση των επενδύσεων. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο θα κλείσει την ανάδραση από το αποτέλεσμα στην αιτία που επηρεάζει το αποτέλεσμα και θα συμμορφωθεί έτσι προς την κριτική του Lucas (Lucas critique¹⁴) και την υπόθεση των ορθολογικών προσδοκιών (rational expectations), η οποία στο πλαίσιο της εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου θα μπορούσε να συνοψιστεί στο εξής: οι ίδιες οι υποκειμενικές συμπεριφορές επηρεάζονται από την πολιτική και επομένως το ίδιο το μοντέλο πρέπει να κλείσει την ανάδραση της προβολής που κάνει στο μέλλον με τις υποκειμενικές συμπεριφορές που καθορίζουν τις προβολές. Δεδομένου ότι το μοντέλο έχει προβλεψιμότητα και οι αποφασίζοντες είναι ορθολογικοί, μπορούν να τροποποιούν τις προσδοκίες τους με ορθολογικό τρόπο, ως αποτέλεσμα της πολιτικής που προσομοιώνεται. Ιδιαίτερη σημασία ως προς αυτό έχει ότι η ενδογενής τροποποίηση των παραγόντων που ενσωματώνουν τις υποκειμενικές συμπεριφορές στη μοντελοποίηση θα πρέπει να επηρεάζονται από το συνολικό πλαίσιο της πολιτικής. Η παραπάνω βελτίωση του προτεινόμενου μοντέλου είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα λόγω της μη κυρτότητας που εισάγεται.

- Η βελτίωση της ακρίβειας των δεδομένων εισόδου είναι μεταξύ των προτεραιοτήτων της έρευνας βραχυπρόθεσμα. Το μοντέλο χρησιμοποιεί ως είσοδο μια πολύ μεγάλη βάση δεδομένων, λόγω της πολύ λεπτομερούς κατάτμησης του κτηριακού αποθέματος και για τους δύο τομείς. Η ευθυγράμμιση των δεδομένων εισόδου του μοντέλου με μια μόνο πηγή και μάλιστα έγκριτη, είναι μεγάλης σημασίας τόσο για την εγκυρότητα του μοντέλου όσο και για την ευκολία στη χρήση του. Στο ίδιο πλαίσιο, η επέκταση της κατάτμησης του κτηριακού αποθέματος, η λεπτομερής αναπαράσταση τεχνικών παραγόντων τόσο για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους όσο και για τον ενεργειακό εξοπλισμό για κάθε κατηγορία κτηρίου και επιλογή και η θεώρηση περισσότερων τεχνολογικών επιλογών, οπωσδήποτε θα συμβάλουν σε μια ακόμα πιο ρεαλιστική αναπαράσταση των συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με την βελτιστοποίηση της επιλογής τεχνολογίας και επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας, ταυτόχρονα όμως θα αυξήσει και το χρόνο επίλυσης.

¹⁴ Στον Dr. Robert E Lucas απονεμήθηκε το Nobel Prize Οικονομικών το 1995 για τη συνεισφορά του στη θεωρία των ορθολογικών προσδοκιών. Η Lucas Critique υποστηρίζει ότι παράμετροι ποσοτικοποιημένοι με βάση παρελθούσες παρατηρήσεις δεν έχουν αξία σε ένα μοντέλο προβλέψεων γιατί οι αποφασίζοντες αναπροσαρμόζουν τις προσδοκίες τους με βάση τα αναμενόμενα αποτελέσματα των πράξεων τους και επομένως αναθεωρούν έτσι τις αρχικές παραμέτρους. Αν δεν ληφθεί υπόψη η ανάδραση αυτή, η αξιολόγηση μέτρων πολιτικής μπορεί να είναι εσφαλμένη. Στο ίδιο πλαίσιο σκέψης, η θεωρία της ενδογενούς ανάπτυξης αποτελεί συνέχεια της Lucas Critique: η τεχνολογική πρόοδος εξαρτάται από τον όγκο της επένδυσης ενδογενώς και επομένως η ορθολογική προσδοκία των επενδυτών οφείλει να προεξοφλεί τη συσχέτιση μεταξύ επένδυσης και της εξ αυτής βελτίωσης του κόστους της τεχνολογίας.

- Η ενδογενής μοντελοποίηση του κτηριακού αποθέματος (housing stock modelling), για την κατεδάφιση και κατασκευή νέων κτηρίων, όπως και για τη μετακίνηση του πληθυσμού μεταξύ των πόλεων και της επαρχίας αποτελεί βελτίωση του προτεινόμενου μοντέλου, η οποία βεβαίως εντάσσεται στον επιστημονικό κλάδο της οικονομικής γεωγραφίας και δημογραφίας. Στην υπάρχουσα διαμόρφωσή του το μοντέλο χρησιμοποιεί εξωγενείς δείκτες κατεδάφισης και ανακατασκευής νέων κτηρίων, δείκτες για τους ρυθμούς αστικοποίησης κλπ. οι οποίοι αντλούνται από στατιστικά δεδομένα και μεταβάλλονται διαχρονικά με εξωγενή τρόπο. Τελικά το κτηριακό απόθεμα προσδιορίζεται εξωγενώς και δεν επηρεάζεται από τις ενεργειακές/κλιματικές πολιτικές. Στην πραγματικότητα όμως, η δυναμική εξέλιξη του κτηριακού αποθέματος είναι συνδυασμός κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων και επηρεάζεται από την πολιτική για την ενέργεια. Ειδικά το δίλημμα μεταξύ της κατεδάφισης ή της εγκατάλειψης ενός κτηρίου καθώς και για την κατασκευή νέου ή της ριζικής ανακαίνισης του, θα έπρεπε να είναι ενδογενές στο μοντέλο. Όμως, η επιτυχής αναπαράσταση του μηχανισμού εκφεύγει του επιστημονικού αντικειμένου που θεραπεύει η διατριβή.
- Η διατύπωση της λειτουργίας του ενεργειακού εξοπλισμού μπορεί να βελτιωθεί συμπεριλαμβάνοντας στη μοντελοποίηση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις δυνατότητες αυτό-παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκού συστήματος ή μικρού αιολικού όπως και τις δυνατότητες θερμικής και ηλεκτρικής αποθήκευσης ώστε να αναπαρασταθεί και η δυνατότητα της ίδιο-κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας στον κτηριακό τομέα (prosuming). Ο prosumer είναι «ένας καταναλωτής ενέργειας που παράγει ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (ή άλλες τεχνολογίες αν είναι επιτρεπτές στο πλαίσιο της κλιματικής ουδετερότητας, όπως μικρό-κυψέλες πράσινου υδρογόνου) στο κτήριο κατοικίας ή υπηρεσίας και είτε αποθηκεύει την πλεονάζουσα ενέργεια για μελλοντική χρήση είτε την πουλάει σε ενδιαφερόμενους πελάτες μέσω ενός έξυπνου δικτύου» (Rathnayaka et al., 2015). Σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς καταναλωτές που αποκλειστικά καταναλώνουν ενέργεια από το δίκτυο, οι prosumers παράγουν, καταναλώνουν και μεταφέρουν ενεργά ή αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια (Pal et al., 2016; Rathnayaka et al., 2012). Επίσης, οι prosumer χρησιμοποιούν έξυπνους μετρητές κατά την παραγωγή ενέργειας και τους συνδυάζουν με οικιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας, με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, με ηλεκτρικά οχήματα και με συστήματα vehicle-to-grid (V2G) για να μπορούν να ενσωματωθούν αποτελεσματικά σε ένα έξυπνο δίκτυο (Espe et al., 2018). Η ενσωμάτωση των prosumers στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακόμα αργή αλλά αναμένεται να επιταχυνθεί στα επόμενα χρόνια. Άλλωστε και τα πακέτα πολιτικής της ΕΕ εστιάζουν σε νέα σχέδια για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας που θα δίνει έμφαση στον ενισχυμένο ρόλο των τελικών χρηστών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Zepter et al., 2019).
- Επέκταση της μοντελοποίησης βάσει της προηγούμενης βελτίωσης αποτελεί και η μοντελοποίηση της ενεργειακής ζήτησης και αποδοτικότητας στον κτηριακό τομέα και της επιλογής τεχνολογίας στις διάφορες ενεργειακές χρήσεις σε μέσο-κλίμακα (mezzo scale), δηλαδή σε επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου ή συγκροτήματος κτηρίων. Σε αυτήν την κλίμακα, οι καταναλωτές μπορούν να εκμεταλλευτούν τις οικονομίες κλίμακος πληθώρας τεχνολογιών (όπως για παράδειγμα των τεχνολογιών της θερμικής αποθήκευσης), να χρησιμοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα από μια κοντινή βιομηχανία και να επενδύουν σε ΑΠΕ για ίδιο-κατανάλωση και παραγωγή ενέργειας. Η επιστημονική κοινότητα έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια (Good & Mancarella, 2019; Mancarella, 2014; Martínez Ceseña et al., 2018) να δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον στη μοντελοποίηση των ενεργειακών αποφάσεων και συμπεριφορών στον κτηριακό τομέα σε επίπεδο μέσο-κλίμακας, η οποία έχει μάλιστα σημασία στο πλαίσιο της αποκέντρωσης των ενεργειακών συστημάτων. Η μοντελοποίηση σε επίπεδο μέσο-κλίμακας μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω μέσω της εξέτασης και της λειτουργίας των demand-

response and micro-RES aggregators. Αυτοί αναλαμβάνουν να βελτιστοποιούν τη λειτουργία του ενεργειακού εξοπλισμού ενός συγκροτήματος κτηρίων που περιλαμβάνει τεχνολογίες αυτό-παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τεχνολογίες αποθήκευσης, κ.ά., συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας πώλησης της περίσσειας ενέργειας στο δίκτυο, και με κατάλληλα ηλεκτρονικά συστήματα συμμετέχουν στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Τελικά, οι aggregators δεν θα είναι παθητικοί δέκτες των τιμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά θα επιδιώκουν να τις εκμεταλλευτούν με κατάλληλες προσφορές arbitraging..

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

Theofano Fotiou, Pantelis Capros, and Panagiotis Fragkos, "Policy Modelling for Ambitious Energy Efficiency Investment in the EU Residential Buildings", *Energies* 15, no. 6: 2233, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15062233>

Renato Rodrigues, Robert Pietzcker, Panagiotis Fragkos, James Price, Will McDowall, Pelopidas Siskos, **Theofano Fotiou**, Gunnar Luderer, Pantelis Capros, "Narrative-driven alternative roads to achieve mid-century CO₂ net neutrality in Europe", *Energy*, Volume 239, Part A, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121908>

Theofano Fotiou, Alessia de Vita, and Pantelis Capros, "Economic-Engineering Modelling of the Buildings Sector to Study the Transition towards Deep Decarbonisation in the EU", *Energies* 12, no. 14: 2745, 2019.. <https://doi.org/10.3390/en12142745>

Pantelis Capros, Georgios Zazias, Stavroula Evangelopoulou, Maria Kannavou, **Theofano Fotiou**, Pelopidas Siskos, Alessia de Vita and Konstantinos P. Sakellaris. "Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality." *Energy Policy*, Volume 134, November 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110960>

ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ/ΕΚΘΕΣΕΙΣ

De Vita, A; Capros, P; Paroussos, L; Fragkiadakis, K; Karkatsoulis, P; Höglund-Isaksson, Lena; Winiwarter, Wilfried; Purohit, Pallav; Gómez-Sanabria, Adriana; Rafaj, Peter; Warnecke, Laura; Deppermann, Andre; Gusti, Mykola; Frank, Stefan; Lauri, Pekka; Fulvio, Fulvio di; Florou, A; Kannavou, M; Forsell, Nicklas; **Fotiou, T**; Siskos, P; Havlík, Petr; Tsiropoulos, I; Evangelopoulou, S; Witzke, Peter; Kesting, Monika; Katoufa, N; Mitsios, I; Asimakopoulou, G; Kalokyris, T. "EU Reference Scenario 2020: Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050"; Publications Office of the European Union, 2021. ISBN 978-92-76-39356-6 doi: 10.2833/35750 Available online: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-219903975>

«Έκθεση μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την ανακαίνιση του κτιριακού αποθέματος», 2021, <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-02/2020%20LTRS%20EL.pdf>

Antoine Levesque, Oreane Edelenbosch, Giacomo Marangoni, **Theofano Fotiou**, Panagiotis Fragkos, Project report for the H2020 project INNOPATHS "D3.8 Report on decarbonisation in residential and services sectors" , 2020, Available online: https://innopath.eu/wp-content/uploads/2020/12/INNOPATHS_Deliverable38_v6.pdf

De Vita, Alessia, Izabela Kielichowska, Pavla Mandatowa, Pantelis Capros, Elli Dimopoulou, Stavroula Evangelopoulou, **Theofano Fotiou**, Maria Kannavou, Pelopidas Siskos, Georgios Zazias, Louise De Vos, Ali Dadkhah, and Guillaume Dekelver. 2018. Technology Pathways in Decarbonisation Scenarios, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/994817>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 30: Βασικές πηγές που χρησιμοποιούνται συνδυαστικά για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων του μοντέλου

| Πηγή | Αναφορά στην πηγή | Χρήση στο μοντέλο |
|-------------------------------|---|--|
| TABULA | TABULA, 2017 | EN 13790:2008 για προσδιορισμό θερμικών απωλειών από το κέλυφος του κτηρίου |
| BPIE | BPIE, 2011 | Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας των δομικών στοιχείων του κελύφους του υπάρχοντος κτηριακού αποθέματος |
| EU Building Stock Observatory | EU BSO | Πλήθος κτηρίων ανά κατηγορία για την περίοδο έως το 2019 |
| | | Επιφάνεια κτηρίων ανά κατηγορία για την περίοδο έως το 2019 |
| | | Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας των δομικών στοιχείων του κελύφους του υπάρχοντος κτηριακού αποθέματος |
| | | Ρυθμός ενεργειακής ανακαίνισης κτηρίων για τη περίοδο έως το 2019 |
| | | Είδος ενεργειακής ανακαίνισης κτηρίων για τη περίοδο έως το 2019 |
| Eurostat | Distribution of population by degree of urbanization, dwelling type and income group [ilc_lvho01] | Ταξινόμηση κτηρίων οικιακού τομέα ανά εισοδηματική κατηγορία και προσδιορισμός των προτύπων αγοραστικής δύναμης για κάθε κατηγορία για την περίοδο έως το 2020 |
| | Average number of rooms per person by degree of urbanization [ilc_lvho04d] | Ταξινόμηση κτηρίων οικιακού τομέα ανά κατηγορία για την περίοδο έως το 2020 |
| | Demographic balance and crude rates [demo_gind] | |
| | Household characteristics by urbanisation degree [hbs_car_t315] | |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

| | | |
|---|--|--|
| | Living conditions - cities and greater cities [urb_clivcon] | |
| | Energy balances | Τελική κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα και τον τομέα των υπηρεσιών ανά καύσιμο έως το 2019 |
| | Disaggregated final energy consumption in households [nrg_d_hhq] | Τελική κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα ανά καύσιμο και χρήση για τη περίοδο έως το 2019 |
| Heat Roadmap Europe | Profile of heating and cooling demand in 2015, 2017[12] | Διάρθρωση τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά χρήση στο τομέα των υπηρεσιών |
| The Housing statistics | Haffner, 2010 | Μέση ωφέλιμη (θερμαινόμενη) επιφάνεια ανά κτήριο και ανά κάτοικο (τα δεδομένα αφορούν μόνο το 2010) |
| ODYSEE-MURE | ODYSEE Database | Πλήθος και τελική κατανάλωση ενεργειακού εξοπλισμού στα κτήρια του οικιακού τομέα |
| BRG Building Solutions | The European Heating Product Markets,2018 | Πλήθος βασικών τεχνολογιών για θέρμανση, και προετοιμασία ZNX στο κτηριακό τομέα |
| EurObserv'ER | Heat pumps barometer 2020 | Πλήθος αντλιών θερμότητας |
| 2050 Pathways for Domestic Heat – Final Report – DELTA Energy & Environment | | |
| Spon's Mechanical and Electrical Services Price Book 2015 | | Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για τον ενεργειακό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη στα κτήρια του οικιακού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών |
| Updated Buildings Sector Appliance and Equipment Costs and Efficiencies – EIA | | |
| IRENA-IEA-ETSAP Technology Brief 3: Heat Pumps | | |
| Heat Pump Implementation Scenarios until 2030 – ECOFYS | | |

| | | |
|---|--|---|
| Technology Roadmap – Energy Efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment – IEA | | |
| Online available brochures of manufacturers and retailers | | |
| Eco-Design directive | EuP Lot 22 Domestic and Commercial Ovens | |
| | EuP lot 23 Domestic and Commercial Hobs and Grills | |
| | ENER Lot 20 – Local Room Heating Products | |
| | EUP, 2017 | Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για τον ενεργειακό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη στα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών |
| “Omnibus” Review Study on Cold Appliances, Washing Machines, Dish Washers, Washer-Driers. Lighting, Set-top Boxes and Pumps | | Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για τις ηλεκτρικές συσκευές στον οικιακό τομέα |
| Buildings Energy Data Book (2011) – U.S. Department of Energy | | |
| ENTRANZE Project | Entranze, 2017 | Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των κτηρίων |
| Eco-Design directive | EUP, 2017 | Τεχνικό-οικονομικά δεδομένα για τον ενεργειακό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη στα κτήρια του τομέα των υπηρεσιών |

Πίνακας 31: Επιλογές ενεργειακού εξοπλισμού για θέρμανση και κλιματισμό στο προτεινόμενο μοντέλο

| Χρήση | Καύσιμο | Τεχνολογία |
|-----------------------|----------------------------|---|
| Θέρμανση | Πετρέλαιο | Συμβατικός λέβητας |
| | | Λέβητας συμπυκνωμάτων |
| | Αέριο | Συμβατικός λέβητας |
| | | Λέβητας συμπυκνωμάτων |
| | | Αυτόνομο σύστημα αερίου |
| | | Αντλία θερμότητας αερίου (αέρα-νερού) |
| | | μικρό-CHP |
| | Βιομάζα | Λέβητας πέλλετ |
| | Ηλεκτρισμός | Αεροθερμική αντλία θερμότητας (αέρα-αέρα/νερού) |
| | | Υδροθερμική αντλία θερμότητας (νερού-νερού) |
| | | Γεωθερμική αντλία θερμότητας (εδάφους-νερού) |
| | | Αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα |
| Ηλιακή ενέργεια | Ηλιοθερμικά συστήματα | |
| Διανεμόμενη θερμότητα | Εναλλάκτης θερμότητας | |
| Γεωθερμία | Γεωθερμικά συστήματα | |
| Στερεά καύσιμα | Σόμπα | |
| Υγραέριο | Αυτόνομο σύστημα υγραερίου | |
| | Σόμπα | |
| Κλιματισμός | Ηλεκτρισμός | Αεροθερμική αντλία θερμότητας (αέρα-αέρα) |
| | | Υδροθερμική αντλία θερμότητας (νερού-νερού) |
| | | Γεωθερμική αντλία θερμότητας (εδάφους-νερού) |
| | | Κλιματιστικά τύπου split |
| | | Κεντρικές κλιματιστικές μονάδες |
| | Αέριο | Αντλία θερμότητας αερίου (αέρα-νερού) |
| | | Ψύκτης προσρόφησης |
| | | Ψύκτης απορρόφησης |
| | Διανεμόμενη ψύξη | Εναλλάκτης θερμότητας |

Πίνακας 32: Επιλογές ενεργειακού εξοπλισμού για προετοιμασία ZNX και μαγείρεμα στο προτεινόμενο μοντέλο

| Χρήση | Καύσιμο | Τεχνολογία |
|-----------------------|----------------------------|--|
| Προετοιμασία ZNX | Πετρέλαιο | Συμβατικός λέβητας |
| | | Λέβητας συμπυκνωμάτων |
| | Αέριο | Συμβατικός λέβητας |
| | | Λέβητας συμπυκνωμάτων |
| | | Αυτόνομο σύστημα αερίου |
| | | Αντλία θερμότητας αερίου (αέρα-νερού) |
| | | μικρό-CHP |
| | Βιομάζα | Λέβητας πέλλετ |
| | Ηλεκτρισμός | Αεροθερμική αντλία θερμότητας (αέρα-νερού) |
| | | Υδροθερμική αντλία θερμότητας (νερού-νερού) |
| | | Γεωθερμική αντλία θερμότητας (εδάφους-νερού) |
| | | Αντλία θερμότητας για ZNX |
| | | Ηλεκτρικός θερμοσίφωνα |
| Ηλιακή ενέργεια | Ηλιοθερμικός θερμοσίφωνα | |
| Διανεμόμενη θερμότητα | Εναλλάκτης θερμότητας | |
| Γεωθερμία | Γεωθερμικά συστήματα | |
| Στερεά καύσιμα | Σόμπα | |
| Υγραέριο | Αυτόνομο σύστημα υγραερίου | |
| Μαγείρεμα | Αέριο | Κουζίνα |
| | Βιομάζα | |
| | Ηλεκτρισμός | |
| | Υγραέριο | |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 33: Δεδομένα του προγράμματος ENTRANZE για το κόστος και τη θερμική συμπεριφορά ενεργειακών επεμβάσεων αυξανόμενης έντασης ανά οικοδομικό υλικό και τύπο κτηρίου.

| | | | Πολυκατοικία | | Μονοκατοικία | |
|------------------------|--------|-----------------|--------------------|--|--------------------|--|
| | | | Uvalue | Επενδυτική δαπάνη | Uvalue | Επενδυτική δαπάνη |
| Πόλη | Ένταση | Δομικό στοιχείο | W/m ² K | €/ (m ² - επιφάνειας στοιχείου) | W/m ² K | €/ (m ² - επιφάνειας στοιχείου) |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 2 | Τοίχος | 0.8 | 61 | 0.8 | 68 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 3 | Τοίχος | 0.4 | 71 | 0.4 | 79 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 4 | Τοίχος | 0.3 | 82 | 0.3 | 91 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 2 | Οροφή | 0.8 | 15 | 0.8 | 18 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 3 | Οροφή | 0.4 | 22 | 0.4 | 26 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 4 | Οροφή | 0.3 | 29 | 0.3 | 34 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 33 | 0.8 | 36 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 38 | 0.4 | 42 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 43 | 0.3 | 48 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 1 | Παράθυρα | 5.8 | 61 | 5.8 | 66 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 2 | Παράθυρα | 2.6 | 322 | 2.6 | 358 |
| Σεβίλλη (Ισπανία) | 3 | Παράθυρα | 1.7 | 417 | 1.7 | 457 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Ρώμη (Ιταλία) | 2 | Τοίχος | 0.8 | 56 | 0.8 | 62 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 3 | Τοίχος | 0.4 | 64 | 0.4 | 70 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 4 | Τοίχος | 0.3 | 71 | 0.3 | 79 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Ρώμη (Ιταλία) | 2 | Οροφή | 0.8 | 12 | 0.8 | 13 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 3 | Οροφή | 0.4 | 22 | 0.4 | 24 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 4 | Οροφή | 0.3 | 31 | 0.3 | 34 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Ρώμη (Ιταλία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 46 | 0.8 | 51 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 53 | 0.4 | 58 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 59 | 0.3 | 65 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 1 | Παράθυρα | 3.0 | 91 | 3.0 | 101 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 2 | Παράθυρα | 2.6 | 275 | 2.6 | 303 |
| Ρώμη (Ιταλία) | 3 | Παράθυρα | 1.7 | 303 | 1.7 | 333 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 2 | Τοίχος | 0.4 | 32 | 0.8 | 33 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 3 | Τοίχος | 0.3 | 38 | 0.4 | 39 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 4 | Τοίχος | 0.2 | 44 | 0.3 | 44 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 2 | Οροφή | 0.3 | 22 | 0.8 | 22 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 3 | Οροφή | 0.2 | 25 | 0.4 | 25 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 4 | Οροφή | 0.1 | 32 | 0.3 | 31 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 27 | 0.8 | 25 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 33 | 0.4 | 33 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 40 | 0.3 | 41 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 1 | Παράθυρα | 2.7 | 15 | 2.7 | 14 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 2 | Παράθυρα | 1.7 | 147 | 1.7 | 147 |
| Βουκουρέστι (Ρουμανία) | 3 | Παράθυρα | 1.0 | 177 | 1.0 | 177 |

| | | | Πολυκατοικία | | Μονοκατοικία | |
|---------------------|--------|-----------------|--------------------|--|--------------------|--|
| | | | Υψαιε | Επενδυτική δαπάνη | Υψαιε | Επενδυτική δαπάνη |
| Πόλη | Ένταση | Δομικό στοιχείο | W/m ² K | €/ (m ² – επιφάνειας στοιχείου) | W/m ² K | €/ (m ² - επιφάνειας στοιχείου) |
| Παρίσι (Γαλλία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Παρίσι (Γαλλία) | 2 | Τοίχος | 0.4 | 59 | 0.8 | 62 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 3 | Τοίχος | 0.3 | 64 | 0.4 | 67 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 4 | Τοίχος | 0.2 | 69 | 0.3 | 73 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Παρίσι (Γαλλία) | 2 | Οροφή | 0.3 | 47 | 0.8 | 47 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 3 | Οροφή | 0.2 | 48 | 0.4 | 48 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 4 | Οροφή | 0.1 | 49 | 0.3 | 49 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Παρίσι (Γαλλία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 86 | 0.8 | 86 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 88 | 0.4 | 88 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 90 | 0.3 | 90 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 1 | Παράθυρα | 3.4 | 76 | 3.4 | 97 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 2 | Παράθυρα | 2.6 | 306 | 2.6 | 306 |
| Παρίσι (Γαλλία) | 3 | Παράθυρα | 1.7 | 348 | 1.7 | 348 |
| Πράγα (Τσεχία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Πράγα (Τσεχία) | 2 | Τοίχος | 0.4 | 44 | 0.8 | 46 |
| Πράγα (Τσεχία) | 3 | Τοίχος | 0.3 | 50 | 0.4 | 52 |
| Πράγα (Τσεχία) | 4 | Τοίχος | 0.2 | 56 | 0.3 | 59 |
| Πράγα (Τσεχία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Πράγα (Τσεχία) | 2 | Οροφή | 0.3 | 16 | 0.8 | 17 |
| Πράγα (Τσεχία) | 3 | Οροφή | 0.2 | 20 | 0.4 | 21 |
| Πράγα (Τσεχία) | 4 | Οροφή | 0.1 | 28 | 0.3 | 29 |
| Πράγα (Τσεχία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Πράγα (Τσεχία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 32 | 0.8 | 34 |
| Πράγα (Τσεχία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 41 | 0.4 | 43 |
| Πράγα (Τσεχία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 51 | 0.3 | 53 |
| Πράγα (Τσεχία) | 1 | Παράθυρα | 2.7 | 25 | 2.7 | 25 |
| Πράγα (Τσεχία) | 2 | Παράθυρα | 1.7 | 184 | 1.7 | 196 |
| Πράγα (Τσεχία) | 3 | Παράθυρα | 1.0 | 238 | 1.0 | 253 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 2 | Τοίχος | 0.4 | 73 | 0.8 | 73 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 3 | Τοίχος | 0.3 | 84 | 0.4 | 84 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 4 | Τοίχος | 0.2 | 96 | 0.3 | 96 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 2 | Οροφή | 0.3 | 15 | 0.8 | 15 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 3 | Οροφή | 0.2 | 25 | 0.4 | 25 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 4 | Οροφή | 0.1 | 45 | 0.3 | 45 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 28 | 0.8 | 29 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 37 | 0.4 | 37 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 52 | 0.3 | 52 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 1 | Παράθυρα | 2.7 | 76 | 2.7 | 76 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 2 | Παράθυρα | 1.0 | 325 | 1.0 | 325 |
| Βερολίνο (Γερμανία) | 3 | Παράθυρα | 0.7 | 367 | 0.7 | 367 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

| | | | Πολυκατοικία | | Μονοκατοικία | |
|--------------------|--------|-----------------|--------------------|--|--------------------|--|
| | | | Uvalue | Επενδυτική δαπάνη | Uvalue | Επενδυτική δαπάνη |
| Πόλη | Ένταση | Δομικό στοιχείο | W/m ² K | €/m ² – επιφάνειας στοιχείου) | W/m ² K | €/m ² - επιφάνειας στοιχείου) |
| Βιέννη (Αυστρία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Βιέννη (Αυστρία) | 2 | Τοίχος | 0.4 | 60 | 0.8 | 60 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 3 | Τοίχος | 0.3 | 65 | 0.4 | 65 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 4 | Τοίχος | 0.2 | 70 | 0.3 | 70 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Βιέννη (Αυστρία) | 2 | Οροφή | 0.3 | 38 | 0.8 | 38 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 3 | Οροφή | 0.2 | 40 | 0.4 | 40 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 4 | Οροφή | 0.1 | 45 | 0.3 | 45 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Βιέννη (Αυστρία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 42 | 0.8 | 44 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 50 | 0.4 | 50 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 70 | 0.3 | 70 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 1 | Παράθυρα | 2.6 | 84 | 2.6 | 84 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 2 | Παράθυρα | 1.7 | 240 | 1.7 | 240 |
| Βιέννη (Αυστρία) | 3 | Παράθυρα | 1.0 | 270 | 1.0 | 270 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 1 | Τοίχος | | | | |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 2 | Τοίχος | 0.4 | 100 | 0.8 | 105 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 3 | Τοίχος | 0.3 | 108 | 0.4 | 114 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 4 | Τοίχος | 0.2 | 116 | 0.3 | 122 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 1 | Οροφή | | | | |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 2 | Οροφή | 0.3 | 14 | 0.8 | 14 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 3 | Οροφή | 0.2 | 18 | 0.4 | 18 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 4 | Οροφή | 0.1 | 27 | 0.3 | 27 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 1 | Δάπεδο | | | | |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 2 | Δάπεδο | 0.8 | 29 | 0.8 | 29 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 3 | Δάπεδο | 0.4 | 37 | 0.4 | 37 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 4 | Δάπεδο | 0.3 | 52 | 0.3 | 52 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 1 | Παράθυρα | 2.5 | 68 | 2.5 | 71 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 2 | Παράθυρα | 1.0 | 360 | 1.0 | 360 |
| Ελσίνκι (Φιλανδία) | 3 | Παράθυρα | 0.7 | 473 | 0.7 | 473 |

Σημείωση: Οι κωδικοί (1-4) στη στήλη ένταση αντιστοιχούν σε επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης αυξανόμενης έντασης. Οι κωδικοί αυτοί συνδυάζονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους για να προκύψουν τα 8 επίπεδα έντασης που χρησιμοποιεί το προτεινόμενο μοντέλο. Η επενδυτική δαπάνη περιλαμβάνει το κόστος εργασίας και υλικών, το κόστος απομάκρυνσης και απόθεσης των υπαρχόντων δομικών στοιχείων που αντικαθίστανται, το κέρδος της εταιρείας που αναλαμβάνει τις εργασίες και άλλα τεχνικά έξοδα.

Πίνακας 34: Εξέλιξη των τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο για τον οικιακό τομέα

| | Τεχνικός χρόνος ζωής | Κόστος Σ&Λ | Κόστος αγοράς | | | | | | | Βαθμός απόδοσης | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|-------------|---------------|------|------|-------|----------|------|------|-----------------|------|-----|-----|----------|-----|-----|
| | | | Σήμερα | 2030 | | | Βέλτιστο | | | Σήμερα | 2030 | | | Βέλτιστο | | |
| | | | | Από | Έως | Από | Έως | Από | Έως | | Από | Έως | Από | Έως | | |
| Θέρμανση | Χρόνια | €/kW | €/kW | | | | | | | % | | | | | | |
| Λέβητας πετρελαίου (συμβατικός) | 20 | 5 | 157 | 154 | 180 | 220 | 148 | 179 | 217 | 87 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Λέβητας πετρελαίου (συμπυκνωμάτων) | 20 | 5 | 177 | 191 | 224 | 273 | 171 | 210 | 237 | 103 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 |
| Λέβητας αερίου (συμβατικός) | 20 | 5 | 162 | 158 | 185 | 226 | 153 | 174 | 223 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 |
| Λέβητας αερίου (συμπυκνωμάτων) | 20 | 5 | 201 | 196 | 230 | 281 | 176 | 216 | 244 | 99 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 |
| Λέβητας πέλλετ | 30 | 13 | 410 | 401 | 471 | 610 | 373 | 442 | 590 | 72 | 74 | 77 | 79 | 74 | 79 | 81 |
| Αεροθερμική αντλία θερμότητας | 20 | 15 | 784 | 603 | 835 | 1080 | 267 | 673 | 1030 | 247 | 266 | 307 | 334 | 268 | 391 | 457 |
| Υδροθερμική αντλία θερμότητας | 20 | 15 | 1036 | 847 | 1104 | 1428 | 487 | 960 | 1287 | 330 | 355 | 410 | 452 | 358 | 498 | 573 |
| Γεωθερμική αντλία θερμότητας | 20 | 15 | 1695 | 1385 | 1805 | 2335 | 1203 | 1570 | 1774 | 360 | 388 | 447 | 493 | 390 | 543 | 594 |
| Αντλία θερμότητας αερίου | 20 | 15 | 1176 | 904 | 1194 | 1512 | 400 | 942 | 1339 | 130 | 140 | 161 | 178 | 141 | 196 | 214 |
| Αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα | 20 | | 60 | 60 | 76 | 80 | 60 | 69 | 79 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Αυτόνομο σύστημα αερίου | 20 | 5 | 134 | 133 | 168 | 221 | 132 | 161 | 218 | 82 | 87 | 91 | 93 | 88 | 95 | 103 |
| Ηλιοθερμικό | 20 | 5 | 1250 | 1158 | 1383 | 1635 | 860 | 1080 | 1212 | 58 | 59 | 61 | 62 | 60 | 63 | 65 |
| Συμπαγωγή MEK | 20 | 10 | 2800 | 2345 | 2840 | 3145 | 1945 | 2450 | 2975 | 65 | 66 | 68 | 69 | 66 | 70 | 71 |
| Συμπαγωγή κυψέλη καυσίμου | 20 | 10 | 10000 | 8456 | 9945 | 11467 | 3502 | 4576 | 5600 | 65 | 69 | 71 | 73 | 71 | 73 | 75 |
| Τηλεθέρμανση | 20 | 5 | 91 | 88 | 107 | 133 | 83 | 100 | 131 | 72 | 73 | 74 | 75 | 74 | 76 | 78 |
| Ψύξη | Χρόνια | €/kW | €/kW | | | | | | | % | | | | | | |
| Κλιματιστικό διαιρούμενου τύπου | 10 | 15 | 195 | 189 | 262 | 353 | 177 | 250 | 348 | 234 | 242 | 293 | 334 | 256 | 375 | 432 |
| Κεντρική κλιματιστική μονάδα | 15 | 15 | 434 | 421 | 584 | 786 | 395 | 557 | 775 | 250 | 259 | 313 | 357 | 273 | 367 | 434 |

Σημείωση: Ο βαθμός απόδοσης των αεροθερμικών αντλιών θερμότητας μεταβάλλεται ανά χώρα, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Ο βαθμός απόδοσης για τις μονάδες συμπαγωγής αναφέρεται στο θερμικό βαθμό απόδοσης. Το κόστος για το ηλιοθερμικό περιλαμβάνει και το κόστος για το θερμοδοχείο νερού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 35: Εξέλιξη των τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο για τον οικιακό τομέα (συνέχεια)

| | Τεχνικός χρόνος ζωής | Κόστος Σ&Λ | Κόστος αγοράς | | | | | | Βαθμός απόδοσης | | | | | | | |
|--|----------------------|-------------|-------------------|------|-----|-----|----------|-----|--------------------|--------|------|-----|-----|----------|-----|-----|
| | | | Σήμερα | 2030 | | | Βέλτιστο | | | Σήμερα | 2030 | | | Βέλτιστο | | |
| | | | | Από | Έως | | Από | Έως | | | Από | Έως | | Από | Έως | |
| Ηλεκτρικές συσκευές | Χρόνια | | €/ συσκευή | | | | | | kWh/συσκευή | | | | | | | |
| Στεγνωτήριο | 10 | | 554 | 495 | 685 | 803 | 387 | 680 | 791 | 316 | 280 | 226 | 214 | 272 | 175 | 144 |
| Πλυντήριο πιάτων | 10 | | 489 | 470 | 543 | 765 | 436 | 539 | 753 | 249 | 235 | 214 | 185 | 232 | 200 | 133 |
| Ψυγείο | 10 | | 574 | 547 | 733 | 867 | 496 | 728 | 854 | 219 | 215 | 171 | 152 | 210 | 115 | 72 |
| Πλυντήριο ρούχων | 10 | | 585 | 539 | 604 | 795 | 454 | 538 | 783 | 212 | 198 | 176 | 144 | 195 | 155 | 84 |
| Προετοιμασία ΖΝΧ | Χρόνια | €/kW | €/kW | | | | | | % | | | | | | | |
| Λέβητας πετρελαίου | 20 | 5 | 342 | 334 | 392 | 479 | 323 | 390 | 492 | 70 | 72 | 75 | 77 | 72 | 77 | 80 |
| Λέβητας αερίου | 20 | 5 | 188 | 183 | 224 | 264 | 174 | 207 | 260 | 77 | 81 | 86 | 88 | 82 | 90 | 99 |
| Ηλεκτρικός θερμοσίφωνα | 20 | | 110 | 109 | 122 | 149 | 92 | 110 | 140 | 90 | 91 | 93 | 95 | 92 | 96 | 99 |
| Ηλιακός θερμοσίφωνα | 20 | 5 | 254 | 240 | 290 | 343 | 215 | 288 | 338 | 58 | 59 | 61 | 63 | 60 | 63 | 65 |
| Αντλία θερμότητας για προετοιμασία ΖΝΧ | 20 | 15 | 318 | 311 | 352 | 382 | 298 | 300 | 319 | 240 | 260 | 288 | 301 | 264 | 308 | 360 |
| Μαγείρεμα | Χρόνια | | €/kW | | | | | | % | | | | | | | |
| Ηλεκτρική κουζίνα | 10 | 0 | 183 | 171 | 187 | 260 | 150 | 180 | 231 | 79 | 80 | 82 | 87 | 80 | 87 | 93 |
| Κουζίνα αερίου | 10 | 0 | 191 | 179 | 195 | 258 | 157 | 188 | 240 | 42 | 42 | 44 | 45 | 43 | 46 | 47 |

Πίνακας 36: Εξέλιξη των τεχνικό-οικονομικών χαρακτηριστικών των βασικότερων τεχνολογιών ανά χρήση που περιλαμβάνει το μοντέλο για τον τομέα των υπηρεσιών

| | Τεχνικός χρόνος ζωής | Κόστος Σ&Λ | Κόστος αγοράς | | | | | | Βαθμός απόδοσης | | | | | | | |
|--|----------------------|-------------|---------------|------|------|------|----------|------|-----------------|--------|------|-----|-----|----------|-----|-----|
| | | | Σήμερα | 2030 | | | Βέλτιστο | | | Σήμερα | 2030 | | | Βέλτιστο | | |
| | | | | Από | Έως | Από | Έως | Από | Έως | | Από | Έως | | | | |
| Θέρμανση | Χρόνια | €/kW | €/kW | | | | | | % | | | | | | | |
| Λέβητας αερίου (συμβατικός) | 20 | 2 | 118 | 115 | 135 | 165 | 105 | 127 | 163 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 |
| Λέβητας αερίου (συμπυκνωμάτων) | 20 | 2 | 156 | 153 | 179 | 219 | 136 | 167 | 205 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 |
| Αεροθερμική αντλία θερμότητας | 20 | 4 | 549 | 422 | 585 | 756 | 187 | 471 | 669 | 247 | 266 | 307 | 334 | 268 | 391 | 457 |
| Υδροθερμική αντλία θερμότητας | 20 | 4 | 725 | 593 | 773 | 999 | 341 | 672 | 837 | 330 | 355 | 410 | 452 | 358 | 498 | 573 |
| Γεωθερμική αντλία θερμότητας | 20 | 4 | 1187 | 970 | 1264 | 1635 | 842 | 1099 | 1153 | 360 | 388 | 447 | 493 | 390 | 543 | 594 |
| Τηλεθέρμανση | 20 | 2 | 73 | 60 | 78 | 101 | 72 | 92 | 105 | 72 | 73 | 74 | 75 | 74 | 76 | 78 |
| Ψύξη | Χρόνια | €/kW | €/kW | | | | | | % | | | | | | | |
| Κεντρική κλιματιστική μονάδα (ηλεκτρισμός) | 10 | 4 | 137 | 126 | 177 | 229 | 105 | 160 | 226 | 275 | 290 | 336 | 372 | 294 | 409 | 528 |
| Κεντρική κλιματιστική μονάδα (αέριο) | 10 | 4 | 578 | 501 | 524 | 574 | 335 | 351 | 388 | 130 | 132 | 148 | 160 | 135 | 171 | 214 |
| Κεντρική κλιματιστική μονάδα (ατμός) | 10 | 4 | 155 | 149 | 163 | 187 | 144 | 151 | 154 | 71 | 72 | 73 | 74 | 73 | 75 | 77 |

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahamed, J. U., Saidur, R., Masjuki, H. H., Mekhilef, S., Ali, M. B., & Furqon, M. H. (2011). An application of energy and exergy analysis in agricultural sector of Malaysia. *Energy Policy*, *39*(12), 7922–7929. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.045>
- Akerlof, G. A. (1970). The Market for “Lemons”: Quality Uncertainty and the Market Mechanism. *The Quarterly Journal of Economics*, *84*(3), 488. <https://doi.org/10.2307/1879431>
- Albrecht, F. G., König, D. H., Baucks, N., & Dietrich, R. U. (2017). A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – A case study. *Fuel*, *194*, 511–526. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.003>
- Alenazey, F., Alyousef, Y., Almisned, O., Almutairi, G., Ghouse, M., Montinaro, D., & Ghigliazza, F. (2015). Production of synthesis gas (H₂ and CO) by high-temperature Co-electrolysis of H₂O and CO₂. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*(32), 10274–10280. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.034>
- Ameli, N., & Brandt, N. (2015). What impedes household investment in energy efficiency and renewable energy? *International Review of Environmental and Resource Economics*, *8*(1), 101–138. <https://doi.org/10.1561/101.00000067>
- Anderson, B. R., Chapman, P. F., Cutland, N. G., Dickson, C. M., Henderson, G., Henderson, J. H., Iles, J., Kosmina, L., & Shorrocks, L. D. (2001). *BREDEM-12 Model description*. Building Research Establishment Watford, UK.
- Arcipowska, A., Anagnostopoulos, F., Mariottini, F., & Kunkel, S. (2014). *Energy Performance Certificates (EPC) across the EU Mapping of national approaches*. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). http://bpie.eu/publication/energy-performance-certificates-across-the-eu/#.VDZi_vmSx9V
- Arran, J., & Slowe, J. (2012). 2050 Pathways for Domestic Heat - Final Report. In *Delta Energy and Environment*. <https://pdf4pro.com/amp/view/2050-pathways-for-domestic-heat-energy-1178fb.html>
- Arrow, K. J., Cropper, M. L., Gollier, C., Groom, B., Heal, G. M., Newell, R. G., Nordhaus, W. D., Pindyck, R. S., Pizer, W. A., Portney, P. R., Sterner, T., Tol, R. S. J., & Weitzman, M. L. (2014). Should governments use a declining discount rate in project analysis? *Review of Environmental Economics and Policy*, *8*(2), 145–163. <https://doi.org/10.1093/reep/reu008>
- Atanasiu, B., & Constantinescu, T. (2011). A comparative analysis of the energy performance certificates schemes within the European Union: Implementing options and policy recommendations. *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings, May 2010*, 10. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2011/2-current-energy-efficiency-policies-on-stage-and-backstage/a-comparative-analysis-of-the-energy-performance-certificates-schemes-within-the-european-union-implementing-options
- Aydin, D., Casey, S. P., & Riffat, S. (2015). The latest advancements on thermochemical heat storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baffert, C., Brajković, J., Grgurev, I., De Miglio, R., & Deane, P. (2015). Energy poverty and vulnerable consumers in the energy sector across the EU: analysis of policies and measures. In *INSIGHT_E Policy Report* (Vol. 2). European Commission. http://www.insightenergy.org/static_pages/publications#?publication=15
- Bellman, R. (1954). Some Problems in the Theory of Dynamic Programming. *Econometrica*, 22(1), 37–48. <https://doi.org/10.2307/1909830>
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming* (Sixth Prin). Princeton University Press.
- Berkovec, J., Hausman, J. A., & Rust, J. (1983). *Heating System and Appliance Choice*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Economics,.
- Bernard, J. (1996). *An Integrated Total Energy Demand Model for the Province of Québec*. https://www.cors.ca/sites/default/files/bulletin/v35n1_1e.pdf
- Bettgenhäuser, K., Offermann, M., Boemans, T., Bosquet, M., Grözinger, J., von Manteuffel, B., & Surmeli, N. (2013). *Heat Pump Implementation Scenarios until 2030*. https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03._Media/03.02_Studies_and_reports/Heat_Pump_Implementation_Scenarios.pdf
- Bhattacharyya, S. C. (2006). Renewable energies and the poor: niche or nexus? *Energy Policy*, 34(6), 659–663. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.009>
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics* (2nd ed.). Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7468-4>
- Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2009). Energy demand models for policy formulation : a comparative study of energy demand models. In *World Bank Policy Research Working Paper* (Vol. 4866). <http://ideas.repec.org/p/wbk/wbrwps/4866.html>
- Birchall, S., Wallis, I., Churcher, D., Pezzutto, S., Fedrizzi, R., & Causse, E. (2014). *D2.1a Survey on the energy needs and architectural features of the EU building stock*. European Commission. https://inspire-fp7.eu/wp-content/uploads/2016/08/WP2_D2.1a_20140523_P18_Survey-on-the-energy-needs-and-architectural-features.pdf
- Blanco, H., Nijs, W., Ruf, J., & Faaij, A. (2018). Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization. *Applied Energy*, 232(June), 617–639. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.216>
- Boermans, T., Hermelink, A., Schimschar, S., Grözinger, J., Offermann, M., & Bertoldi, P. (2011). *Principles for nearly Zero-energy Buildings*. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). <https://www.bpie.eu/publication/principles-for-nearly-zero-energy-buildings/>
- Boneta, M. F. (2013). *Cost of energy efficiency measures in buildings refurbishment : a summary report on target countries*. http://www.entranze.eu/files/downloads/D3_1/D3.1_Summary_cost_data__T3.4__-_Def_v5.pdf
- Bossmann, T., Eichhammer, W., & Esland, R. (2012). *Contribution of Energy Efficiency Measures to Climate Protection within the European Union until 2050*. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) and Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2012/BMU_Policy_Paper_201210

22.pdf

- Bourrelle, J. S. (2014). Zero energy buildings and the rebound effect: A solution to the paradox of energy efficiency? *Energy and Buildings*, *84*, 633–640. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.012>
- Bouzarovski, S., Thomson, H., Cornelis, M., Varo, A., Guyet, R., & European Commission. Directorate-General for Energy. (2020). *Towards an inclusive energy transition in the European Union : confronting energy poverty amidst a global crisis*. <https://doi.org/10.2833/103649>
- BPIE. (2011). *Europe's Buildings Under The Microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings*. https://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf
- Braungardt, S., Eichhammer, W., Elsland, R., Fleiter, T., Klobasa, M., Krail, M., Pfluger, B., Reuter, M., Schlomann, B., Sensfuss, F., & Sohaib, T. (2014). *Study evaluating the current energy efficiency policy framework in the EU and providing orientation on policy options for realising the cost-effective energy-efficiency/saving potential until 2020 and beyond*. Fraunhofer ISI, TU Vienna, PwC. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_report_2020-2030_eu_policy_framework.pdf
- Brelh, N., Goeders, G., & Litiu, A. (2009). *Health-based ventilation guidelines for Europe*. REHVA - Federation of European HVAC associations. http://www.rehva.eu/fileadmin/EU_projects/HealthVent/HealthVent_WP5_-_Final_Report.pdf
- Brown, M. A. (2001). Market failures and barriers as a basis for clean energy policies. *Energy Policy*, *29*(14), 1197–1207. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00067-2)
- Capasso, A., Grattieri, W., Lamedica, R., & Prudenzi, A. (1994). A bottom-up approach to residential load modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, *9*(2), 957–964. <https://doi.org/10.1109/59.317650>
- Capros, P., Zazias, G., Evangelopoulou, S., Kannavou, M., Fotiou, T., Siskos, P., De Vita, A., & Sakellaris, K. (2019). Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality. *Energy Policy*, *134*(March), 110960. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110960>
- Carlo, J., Ghisi, E., & Lamberts, R. (2003). The use of computer simulation to establish energy efficiency parameters for a building code of a city in Brazil. *Eighth International IBPSA Conference*.
- Carrier. (n.d.). *Η λύση της Carrier για πλήρη συμμόρφωση με το νέο ευρωπαϊκό κανονισμό φθοριούχων αερίων (F-Gas Regulation)*. Retrieved March 11, 2022, from https://ahi-carrier.gr/carrier_news/lysi-carrier-symmorfosi-evropaiko-kanonismo-f-gas-regulation/
- Charlier, D., & Kahouli, S. (2019). From residential energy demand to fuel poverty: Income-induced Non-linearities in the Reactions of Households to Energy Price Fluctuations. *Energy Journal*, *40*(2), 101–137. <https://doi.org/10.5547/01956574.40.2.dcha>
- Charlier, D., Mosiño, A., & Pommeret, A. (2011). Energy-saving Technology Adoption under Uncertainty in the Residential Sector. *Annals of Economics and Statistics*, *103/104*, 43. <https://doi.org/10.2307/41615493>
- Chen, Y., Wang, Z., Li, X., Yao, X., Wang, C., Li, Y., Xue, W., Yu, D., Kim, S. Y., Yang, F., Kushima, A., Zhang, G., Huang, H., Wu, N., Mai, Y. W., Goodenough, J. B., & Li, J. (2020). Li metal deposition and stripping in a solid-state battery via Coble creep. *Nature*, *578*(7794), 251–255.

- <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1972-y>
- Chlechowicz, M., Reuter, M., Rousselot, M., & Townend, A. (2021). *Energy Poverty in the EU*. <https://doi.org/10.2833/103649>
- Clarke, J. A., Ghauri, S., Johnstone, C. M., Kim, J. M., & Tuohy, P. G. (2008). The EDEM methodology for housing upgrade analysis, carbon and energy labelling and national policy development. *ESim*. <https://strathprints.strath.ac.uk/16468/6/strathprints016468.pdf>
- Clinch, J. P., & Healy, J. D. (2003). Valuing improvements in comfort from domestic energy-efficiency retrofits using a trade-off simulation model. *Energy Economics*, 25(5), 565–583. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(03\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(03)00051-3)
- Clinch, J. P., Healy, J. D., & King, C. (2001). Modelling improvements in domestic energy efficiency. *Environmental Modelling and Software*, 16(1), 87–106. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00067-0)
- Coffey, B., Borgeson, S., Selkowitz, S., Apte, J., Mathew, P., & Haves, P. (2009). Towards a very low-energy building stock: Modelling the US commercial building sector to support policy and innovation planning. *Building Research and Information*, 37(5–6), 610–624. <https://doi.org/10.1080/09613210903189467>
- Concerted Action EPBD. (2016). *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. ADENE. <http://www.buildup.eu/en/practices/publications/2016-implementing-energy-performance-buildings-directive-epbd-part>
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., Werner, S., Möller, B., Persson, U., Boermans, T., Trier, D., Østergaard, P. A., & Nielsen, S. (2014). Heat roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy*, 65, 475–489. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.035>
- Corrado, V., Ballarini, I., Paduos, S., Primo, E., & Torino, P. (2016). The Rebound Effect after the Energy Refurbishment of Residential Buildings towards High Performances. *4th International High Performance Buildings Conference*, 1–10.
- Csiba, K. (2017). Energy Poverty: handbook. In *European Parliament*. European Parliament. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/94270>
- CSPM. (2001). Economic analysis of demand-side management programs and projects. In *California Standard Practice Manual*. http://www.calmac.org/events/SPM_9_20_02.pdf
- Daikin. (n.d.). *ΔΤ_Daikin_Βρείτε ποια αντλία θερμότητας είναι σωστή επιλογή για εσάς με βάση την εφαρμογή της*. Retrieved March 11, 2022, from https://www.daikin.gr/el_gr/press-releases/_daikin_-_ _ _ _ _ .html
- Danish Ministry of Climate Energy and Utilities. (2019). *Denmark’s Integrated National Energy and Climate Plan*. <https://kefm.dk/media/7095/denmarks-national-energy-and-climate-plan.pdf>
- De Vita, A., Kielichowska, I., Mandatowa, P., Capros, P., Dimopoulou, E., Evangelopoulou, S., Fotiou, T., Kannavou, M., Siskos, P., & Zazias, G. (2018). *Technology pathways in decarbonisation scenarios*. E3-Modelling, Ecofys, Tractebel. <https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2833/994817>

- DeCanio, S. J. (1993). Barriers within firms to energy-efficient investments. *Energy Policy*, 21(9), 906–914. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90178-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90178-1)
- Dincer, I., & Acar, C. (2017). Innovation in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(22), 14843–14864. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.107>
- Ding, Y., & Riffat, S. B. (2013). Thermochemical energy storage technologies for building applications: a state-of-the-art review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(2), 106–116. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts004>
- Directorate-General for Energy (European Commission). (2019). Clean energy for all Europeans. In *European Union*. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/21366>
- Directorate-General Taxation and Customs Union. (2018). *Excise Duty Tables - Part II Energy products and Electricity* (pp. 1–105). European Commission. https://ec.europa.eu/taxation_customs/sites/taxation/files/resources/documents/taxation/excise_duties/energy_products/rates/excise_duties-part_ii_energy_products_en.pdf
- Dirkse, S. P., & Ferris, M. C. (1995). The path solver: a nonmonotone stabilization scheme for mixed complementarity problems. *Optimization Methods and Software*, 5(2), 123–156. <https://doi.org/10.1080/10556789508805606>
- Dol, K., & Haffner, M. (2010). *Housing Statistics in the European Union 2010* (p. 150). Delft University of Technology.
- Dubin, J. A. (1992). Market Barriers to Conservation: Are Implicit Discount Rates Too High? In *Social Science Working Paper*. <https://authors.library.caltech.edu/80913/1/sswp802.pdf>
- Economidou, M. (2012). Energy performance requirements for buildings in Europe. *REHVA Journal, March 2012*, 16–21. <https://www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/03-2012/energy-performance-requirements-for-buildings-in-europe.pdf>
- Edelenbosch, O., Rovelli, D., Levesque, A., Marangoni, G., & Tavoni, M. (2021). Long term, cross-country effects of buildings insulation policies. *Technological Forecasting and Social Change*, 170(821124), 120887. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120887>
- EnergyHUB for ALL. (n.d.). *Τι είναι το κτίριο σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης*. Retrieved March 11, 2022, from <http://www.cres.gr/energyhubforall/3.1.html>
- Ericsson, K. (2017). *Biogenic carbon dioxide as feedstock for production of chemicals and fuels*. [https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/biogenic-carbon-dioxide-as-feedstock-for-production-of-chemicals-and-fuels\(67d3a737-cf7c-4109-bc4f-a6346956d6a2\).html](https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/biogenic-carbon-dioxide-as-feedstock-for-production-of-chemicals-and-fuels(67d3a737-cf7c-4109-bc4f-a6346956d6a2).html)
- Espe, E., Potdar, V., & Chang, E. (2018). Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. *Energies*, 11(10), 2528. <https://doi.org/10.3390/en11102528>
- EU BSO. (n.d.). *EU Building Stock Observatory*. Retrieved March 11, 2022, from <https://data.europa.eu/data/datasets/building-stock-observatory?locale=en>
- EU Reference Scenario 2020*. (n.d.). Retrieved March 11, 2022, from https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- European Commission. (2003). Council Directive 2003/96/EC of 27 October 2003: restructuring the Community framework for the taxation of energy products and electricity. *Official Journal of the European Union*, 283, 51–70.
- European Commission. (2009). 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 (recast). *Official Journal of the European Union*, 285, 10–35.
- European Commission. (2010a). Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products (recast). *Official Journal of the European Union*, 153, 1–12.
- European Commission. (2010b). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, 153, 13–35.
- European Commission. (2012). 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. *Official Journal of the European Union*, 315, 1–56.
- European Commission. (2014). Financing the energy renovation of buildings with Cohesion Policy funding. In *European Commission*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4ef2fc24-67d0-45c2-a6d1-c677574e6d26/language-en>
- European Commission. (2016a). EU Reference Scenario 2016: Energy, transport, GHG emissions and trends to 2050. In *European Commission*. <https://data.europa.eu/data/datasets/energy-modelling?locale=en>
- European Commission. (2016b). Impact Assessment accompanying the document “Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency.” In *SWD(2016) 405 final*. European Commission. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:56466305-b7f6-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
- European Commission. (2018a). A Clean Planet for all - A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. In *Com(2018) 773 final*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>
- European Commission. (2018b). Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*, 156, 75–91.
- European Commission. (2018c). Regulation (EU) 2018/1999 on the Governance of the Energy Union and Climate Action. *Official Journal of the European Union*, 328(1), 1–77.
- European Commission. (2019). The European Green Deal. In *COM(2019) 640 final*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>
- European Commission. (2020). A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives. *COM(2020) 662 Final*. <https://eur->

lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0638aa1d-0f02-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF

European Commission. (2021a). ANNEXES to the Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). *COM(2021) 802 Final*, 10–27. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0802>

European Commission. (2021b). Fit for 55 - Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality. *COM(2021) 550 Final*, 15. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>

European Commission. (2021c). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). *COM(2021) 802 Final*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0802>

European Environment Agency. (n.d.). *EEA greenhouse gases - data viewer*. Retrieved March 18, 2022, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>

Eurostat. (n.d.). *Energy balances*. Eurostat. Retrieved February 26, 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>

Eurostat [hbs_car_t315]. (n.d.). *Household characteristics by degree of urbanisation*. Eurostat. Retrieved November 24, 2019, from https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=hbs_car_t315&lang=en

Eurostat [ilc_lvho04]. (n.d.). *Average number of rooms per person by type of household and income group from 2003*. Eurostat. Retrieved November 24, 2019, from https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc_lvho04&lang=en

Eurostat [NAMA_10_A64]. (n.d.). *National accounts aggregates by industry (up to NACE A*64)*. Eurostat. Retrieved March 22, 2022, from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NAMA_10_A64__custom_2338037/default/table?lang=en

Eurostat [nama_10_co3_p3]. (n.d.). *Final consumption expenditure of households by consumption purpose (COICOP 3 digit)*. Eurostat. Retrieved March 22, 2022, from https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nama_10_co3_p3&lang=en

Eurostat [NRG_CHDDR2_A]. (n.d.). *Cooling and heating degree days by NUTS 3 regions - annual data*. Eurostat. Retrieved March 22, 2022, from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_CHDDR2_A__custom_2339701/default/table?lang=en

Eurostat [nrg_d_hhq]. (n.d.). *Disaggregated final energy consumption in households - quantities*. Eurostat. Retrieved February 26, 2022, from https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_d_hhq&lang=en

Eurostat [urb_clivcon]. (n.d.). *Living conditions - cities and greater cities*. Eurostat. Retrieved November 24, 2019, from https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=urb_clivcon&lang=en

Eveloy, V., & Gebreegziabher, T. (2018). A Review of Projected Power-to-Gas Deployment Scenarios. *Energies*, 11(7), 1824. <https://doi.org/10.3390/en11071824>

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Fabbri, M., Glicker, J., Schmatzberger, S., & Roscini, A. V. (2020). A Guidebook to European Building Policy - Key Legislation and Initiatives. In *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*. <https://www.bpie.eu/publication/a-guidebook-to-european-building-policy-key-legislation-and-initiatives/>
- Filippini, M., Hunt, L. C., & Zorić, J. (2014). Impact of energy policy instruments on the estimated level of underlying energy efficiency in the EU residential sector. *Energy Policy*, 69(2014), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.047>
- Fina, B., Auer, H., & Friedl, W. (2019). Profitability of active retrofitting of multi-apartment buildings: Building-attached/integrated photovoltaics with special consideration of different heating systems. *Energy and Buildings*, 190, 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.034>
- Fleiter, T., Braungardt, S., Sohaib, T., Schlomann, B., Eichhammer, W., Elsland, R., & Jakob, M. (2015). Assessing the impact of the EU Ecodesign Directive on a member state level. *Proceedings of the Energy Efficient Economy Summer Study; ECEEE*, 1927–1938. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2015/8-monitoring-and-evaluation-building-confidence-and-enhancing-practices/assessing-the-impact-of-the-eu-ecodesign-directive-on-a-member-state-level/
- Fleiter, T., Steinbach, J., & Ragwitz, M. (2016). *Mapping and analyses for the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel development (fossil/renewables)*. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/x/projekte/mapping-heating_331945.php
- Foster, S., Lyons, S., & Walker, I. (2017). *Hybrid Heat Pumps - Final report for Department for Business, Energy & Industrial Strategy*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/700572/Hybrid_heat_pumps_Final_report-.pdf
- Fotiou, T., De Vita, A., & Capros, P. (2019). Economic-Engineering Modelling of the Buildings Sector to Study the Transition towards Deep Decarbonisation in the EU. *Energies*, 12(14), 2745. <https://doi.org/10.3390/en12142745>
- Friege, J., & Chappin, E. (2014a). Modelling decisions on energy-efficient renovations: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.091>
- Friege, J., & Chappin, É. J. L. (2014b). Simulating the influence of socio-spatial structures on energy-efficient renovations. *5th World Congress on Social Simulation*. <https://doi.org/10.18564/jasss.2941>
- Fujita, K., Dale, L., & Fujita, K. S. (2008). *An Analysis of the Price Elasticity of Demand for Household Appliances*. <https://doi.org/10.2172/929429>
- Gabriel, S., Conejo, A., Fuller, D., Hobbs, B., & Ruiz, C. (2012). *Complementarity modeling in energy markets* (Vol. 180). Springer Science & Business Media. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Q6OdkTmPvE8C&oi=fnd&pg=PR2&dq=Profiles+in+Operations+Research&ots=vufk95gzp2&sig=VGSPABTkW7JMllvvtuuvD5Kxlso>
- Gaigalis, V., Skema, R., Marcinauskas, K., & Korsakiene, I. (2016). A review on Heat Pumps implementation in Lithuania in compliance with the National Energy Strategy and EU policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 841–858. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.029>

- Gillingham, K., & Palmer, K. (2014). Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(1), 18–38. <https://doi.org/10.1093/reep/ret021>
- Goett, A., & McFadden, D. (1982). *Residential end-use energy planning system (REEPS)*.
- Golove, W. H., & Eto, J. H. (1996). Market barriers to energy efficiency: A critical reappraisal of the rationale for public policies to promote energy efficiency. In *Urban Studies* (Vol. 49, Issue 11). <https://doi.org/10.2172/270751>
- Good, N., & Mancarella, P. (2019). Flexibility in Multi-Energy Communities With Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 503–513. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2745559>
- Gorshkov, A., Murgul, V., & Oliynyk, O. (2016). Forecasted Payback Period in the Case of Energy-Efficient Activities. *MATEC Web of Conferences*, 53(November 2009), 01045. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165301045>
- Greening, L., Greene, D. L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Policy*, 28(6–7), 389–401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5)
- Günther, D., Wapler, J., Langern, R., Helmling, S., Dr.-Ing. Marek Miara, Dr.-Ing. David Fischer, Zimmermann, D., Wolf, T., & Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann. (2020). *Abschlussbericht: Wärmepumpen in Bestandssgebäuden* (Vol. 1).
- Gür, T. M. (2018). Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science*, 11(10), 2696–2767. <https://doi.org/10.1039/C8EE01419A>
- Harrison, G. W., Lau, M. I., & Williams, M. B. (2002). Estimating Individual Discount Rates in Denmark: A Field Experiment. *American Economic Review*, 92(5), 1606–1617. <https://doi.org/10.1257/000282802762024674>
- Harrison, M. (2010). *Valuing the future: the social discount rate in cost benefit analysis* (Issue April). Productivity Commission.
- Hartman, R. S. (1979). Frontiers in Energy Demand Modeling. *Annual Review of Energy*, 4(1), 433–466. <https://doi.org/10.1146/annurev.eg.04.110179.002245>
- Hartman, R. S. (1986). Energy conservation programmes. *Energy Policy*, 14(5), 413–424. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(86\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0301-4215(86)90039-X)
- Hassett, K. A., & Metcalf, G. E. (1993). Energy conservation investment. *Energy Policy*, 21(6), 710–716. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90294-p](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90294-p)
- Hausman, J. A. (1979). Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. *The Bell Journal of Economics*, 10(1), 33. <https://doi.org/10.2307/3003318>
- Heidel, K., Keith, D., Singh, A., & Holmes, G. (2011). Process design and costing of an air-contactor for air-capture. *Energy Procedia*, 4, 2861–2868. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.192>
- Hermelink, A. H., & De Jager, D. (2015). *Evaluating our future: The crucial role of discount rates in European Commission energy system modelling*. https://c2e2.unepdtu.org/kms_object/evaluating-our

- future-the-crucial-role-of-discount-rates-in-european-commission-energy-system-modelling/
- Herring, H., & Roy, R. (2007). Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect. *Technovation*, 27(4), 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2006.11.004>
- Herz, G., Reichelt, E., & Jahn, M. (2018). Techno-economic analysis of a co-electrolysis-based synthesis process for the production of hydrocarbons. *Applied Energy*, 215(August 2017), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.007>
- Hirst, E., & Brown, M. (1990). Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. *Resources, Conservation and Recycling*, 3(4), 267–281. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(90\)90023-W](https://doi.org/10.1016/0921-3449(90)90023-W)
- Hirvonen, J. (2017). The Heat Pump Market , Its Market Drivers and How to Have an Impact on Them in Finland. *12th IEA Heat Pump Conference 2017*.
- Hogeling, J., Corgnati, S., Dziergwa, A., & Ceyhan, I. (2021). The REHVA European HVAC Journal. *Volume 54, Issue 2, 58(4)*, 6–14.
- Howarth, R. B., & Andersson, B. (1993). Market barriers to energy efficiency. *Energy Economics*, 15(4), 262–272. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(93\)90016-K](https://doi.org/10.1016/0140-9883(93)90016-K)
- Howarth, R. B., & Sanstad, A. H. (1995). Discount rates and energy efficiency. *Contemporary Economic Policy*, 13(3), 101–109. <https://doi.org/10.1111/j.1465-7287.1995.tb00726.x>
- Hu, M. (2019). Cost-Effective Options for the Renovation of an Existing Education Building toward the Nearly Net-Zero Energy Goal—Life-Cycle Cost Analysis. *Sustainability*, 11(8), 2444. <https://doi.org/10.3390/su11082444>
- Huang, Y., & Brodrick, J. (2000). A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire U.S. building stock. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. <https://escholarship.org/uc/item/5hv2t661>
- IAEA. (2006). Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2) User’s Manual. *International Atomic Energy Agency*, 196 pp. <https://www.iaea.org/publications/7430/model-for-analysis-of-energy-demand-maed-2>
- IEA-ETSAP, & IRENA. (2012). *Space Heating and Cooling* (Issue June 2012).
- IEA-ETSAP, & IRENA. (2013). *Heat Pumps* (Issue January 2013). https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E19IR_Heat_Pumps_HN_Jan2013_GSOK.pdf
- IEA. (2012a). *Technology roadmap, energy-efficient buildings: heating and cooling equipment*. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-efficient-buildings-heating-and-cooling-equipment>
- IEA. (2012b). *Technology Roadmap Solar Heating and Cooling*. IEA. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-heating-and-cooling>
- IEA. (2016). *Achievements of Appliance Energy Efficiency Standards and Labelling Programs: A Global Assessment in 2016*. IEA. https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2016/07/4E_2016_S_L_Report_Final.pdf
- IEA. (2018). *Energy Efficiency 2018, Market Report Series*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy->

efficiency-2018

- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities* (Issue June, p. 203). IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- Innopaths. (2020). *D3.8 Report on decarbonisation in residential and services sectors* (Issue 730403). Innovation pathways, strategies and policies for the Low-Carbon Transition in Europe. <https://innopaths.eu/2020/12/18/d-3-8-report-on-decarbonisation-in-residential-and-services-sectors/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Climate Change 2007. In *Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change* (Vol. 9780521880). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013>
- Ishimoto, Y., Sugiyama, M., Kato, E., Moriyama, R., Tsuzuki, K., & Kurosawa, A. (2017). Putting Costs of Direct Air Capture in Context. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2982422>
- Jaccard, M., Bailie, A., & Nyboer, J. (1996). CO2 Emission Reduction Costs in the Residential Sector: Behavioral Parameters in a Bottom-Up Simulation Model. *The Energy Journal*, 17(4), 107–134. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol17-No4-5>
- Jaffe, A. B., & Stavins, R. N. (1994). The energy-efficiency gap What does it mean? *Energy Policy*, 22(10), 804–810. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90138-4](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90138-4)
- Jakob, M. (2007). Modeling the Choice of Renovation Modes of Single Family Home Owners With Respect To Energy - Efficiency. *EAERE 2007 Proceedings. 15th Annual Conference*.
- Jenkins, K., Sovacool, B. K., & McCauley, D. (2018). Humanizing sociotechnical transitions through energy justice: An ethical framework for global transformative change. *Energy Policy*, 117(February), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.036>
- Jones, P. J., Lannon, S., & Williams, J. (2001, November). Modelling building energy use at urban scale. *Seventh International IBPSA Conference*. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2001/BS01_0175_180.pdf
- Kadian, R., Dahiya, R. P., & Garg, H. P. (2007). Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi. *Energy Policy*, 35(12), 6195–6211. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.07.014>
- Kamel, R. S., Fung, A. S., & Dash, P. R. H. (2015). Solar systems and their integration with heat pumps: A review. *Energy and Buildings*, 87, 395–412. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.030>
- Kannan, R., & Strachan, N. (2009). Modelling the UK residential energy sector under long-term decarbonisation scenarios: Comparison between energy systems and sectoral modelling approaches. *Applied Energy*, 86(4), 416–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.08.005>
- Kazjonovs, J., Sipkevics, A., Jakovics, A., Dancigs, A., Bajare, D., & Dancigs, L. (2014). Performance Analysis of Air-to-Water Heat Pump in Latvian Climate Conditions. *Environmental and Climate Technologies*, 14(1), 18–22. <https://doi.org/10.1515/rtulect-2014-0009>
- Kemna, R., & Acedo, J. (2014). Average EU building heat load for HVAC equipment. *Final Report of Framework Contract ENER C, August*. <https://studylib.net/doc/18716221/average-eu-building-heat->

load-for-hvac-equipment

- Kesicki, F., & Ekins, P. (2012). Marginal abatement cost curves: a call for caution. *Climate Policy*, 12(2), 219–236. <https://doi.org/10.1080/14693062.2011.582347>
- Kokoni, S., & Leach, M. (2021). Policy mechanisms to support heat pump deployment: A UK case study based on techno-economic modelling. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 1(October), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100009>
- Koomey, J. G., Webber, C. A., Atkinson, C. S., & Nicholls, A. (2001). Addressing energy-related challenges for the US buildings sector: results from the clean energy futures study. *Energy Policy*, 29(14), 1209–1221. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00068-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00068-4)
- Korkmaz, P., Gardumi, F., Avgerinopoulos, G., Blesl, M., & Fahl, U. (2020). A comparison of three transformation pathways towards a sustainable European society - An integrated analysis from an energy system perspective. *Energy Strategy Reviews*, 28, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100461>
- Labandeira, X., Labeaga, J. M., & López-Otero, X. (2017). A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. *Energy Policy*, 102(April 2016), 549–568. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.002>
- Leibowicz, B. D., Lanham, C. M., Brozynski, M. T., Vázquez-Canteli, J. R., Castejón, N. C., & Nagy, Z. (2018). Optimal decarbonization pathways for urban residential building energy services. *Applied Energy*, 230(August), 1311–1325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.046>
- Lind, R. C., Arrow, K. J., Corey, G. R., Dasgupta, P., Sen, A. K., Stauffer, T., Stiglitz, J. E., & Stockfish, J. A. (2013). *Discounting for Time and Risk in Energy Policy*. RFF Press. <https://doi.org/10.4324/9781315064048>
- Loga, T., Stein, B., & Diefenbach, N. (2013). TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy and Buildings*, 132, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094>
- Long-term renovation strategies*. (n.d.). Retrieved March 11, 2022, from https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/long-term-renovation-strategies_en
- Löschel, A., & Schymura, M. (2013). Modeling Technological Change in Economic Models of Climate Change. In *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics* (Vols. 1–3, pp. 89–97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375067-9.00063-2>
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- MacGregor, W. A., Hamdullahpur, F., & Ugursal, V. I. (1993). Space heating using small-scale fluidized beds: A technoeconomic evaluation. *International Journal of Energy Research*, 17(6), 445–466. <https://doi.org/10.1002/er.4440170602>
- Mafalda Matos, A., Delgado, J. M. P. Q., & Guimarães, A. S. (2022). Linking Energy Poverty with Thermal Building Regulations and Energy Efficiency Policies in Portugal. *Energies*, 15(1), 329. <https://doi.org/10.3390/en15010329>

- Mancarella, P. (2014). MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, *65*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- Marí-Dell'Olmo, M., Novoa, A. M., Camprubí, L., Peralta, A., Vázquez-Vera, H., Bosch, J., Amat, J., Díaz, F., Palència, L., Mehdipanah, R., Rodríguez-Sanz, M., Malmusi, D., & Borrell, C. (2017). Housing Policies and Health Inequalities. *International Journal of Health Services*, *47*(2), 207–232. <https://doi.org/10.1177/0020731416684292>
- Martínez Ceseña, E. A., Good, N., Syrri, A. L. A., & Mancarella, P. (2018). Techno-economic and business case assessment of multi-energy microgrids with co-optimization of energy, reserve and reliability services. *Applied Energy*, *210*(April 2017), 896–913. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.131>
- Mastrucci, A., Baume, O., Stazi, F., & Leopold, U. (2014). Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. *Energy and Buildings*, *75*, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.032>
- Max Jamieson, Brajterman, O., Verstraeten, Y., & Arbon, J. (2016). Energy Performance of Buildings. In S.-N. Boemi, O. Irulegi, & M. Santamouris (Eds.), *ICF International: Fairfax*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20831-2>
- McFadden, D. (1974). Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. In *Frontiers in Econometrics* (pp. 105–142). Academic Press. <https://eml.berkeley.edu/reprints/mcfadden/zarembka.pdf>
- McNeill, D. L., & Wilkie, W. L. (1979). Public Policy and Consumer Information: Impact of the New Energy Labels. *Journal of Consumer Research*, *6*(1), 1. <https://doi.org/10.1086/208743>
- Meijer, F., Visscher, H., Nieboer, N., & Kroese, R. (2012). *Jobs Creation Through Energy Renovation of the Housing Stock*. https://conference.iza.org/conference_files/neujobs_2014/4.pdf
- Metcalfe, G. E. (1994). Economics and rational conservation policy. *Energy Policy*, *22*(10), 819–825. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90140-6)
- Miara, M. (n.d.). *How well do heat pumps really work in existing buildings?* Retrieved March 17, 2022, from <https://blog.innovation4e.de/en/2021/03/03/how-well-do-heat-pumps-really-work-in-existing-buildings/>
- Mikulić, D., Bakarić, I. R., & Slijepčević, S. (2016). The economic impact of energy saving retrofits of residential and public buildings in Croatia. *Energy Policy*, *96*, 630–644. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.040>
- Moore, C., Shrestha, S., & Gokarakonda, S. (2019). *Building energy standards and labelling in Europe Imprint*. https://www.switch-asia.eu/site/assets/files/2287/building_energy_standards_and_labelling_in_europe.pdf
- Mundaca, L., Busch, H., & Schwer, S. (2018). ‘Successful’ low-carbon energy transitions at the community level? An energy justice perspective. *Applied Energy*, *218*(February), 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.146>
- N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(9), 2385–2396.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.008>

Nägeli, C., Jakob, M., Catenazzi, G., & Ostermeyer, Y. (2020). Policies to decarbonize the Swiss residential building stock: An agent-based building stock modeling assessment. *Energy Policy*, *146*, 111814. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111814>

Naims, H. (2016). Economics of carbon dioxide capture and utilization—a supply and demand perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(22), 22226–22241. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6810-2>

Natarajan, S., & Levermore, G. J. (2007). Predicting future UK housing stock and carbon emissions. *Energy Policy*, *35*(11), 5719–5727. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.05.034>

Newell, R. G., & Siikamäki, J. (2014). Nudging Energy Efficiency Behavior: The Role of Information Labels. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, *1*(4), 555–598. <https://doi.org/10.1086/679281>

Nordhaus, W. (2007). Critical Assumptions in the Stern Review on Climate Change. *Science*, *317*(5835), 201–202. <https://doi.org/10.1126/science.1137316>

Nowak, T. (2018). *Heat Pumps: Integrating technologies to decarbonise heating and cooling*. European Copper Institute. <https://www.ehpa.org/about/news/article/white-paper-heat-pumps-integrating-technologies-to-decarbonise-heating-and-cooling/>

Nowak, T. (2021a). European heat pump market. *REHVA Journal*, August 2021, 40–43. [https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/european-heat-pump-market#:~:text=Despite a challenging market environment,units \(see Figure 1\).](https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/european-heat-pump-market#:~:text=Despite a challenging market environment,units (see Figure 1).)

Nowak, T. (2021b). *European Heat Pump Market and Statistics Report*. <https://www.ehpa.org/market-data/market-report-2021/>

Ó Broin, E., Nässén, J., & Johnsson, F. (2015). Energy efficiency policies for space heating in EU countries: A panel data analysis for the period 1990–2010. *Applied Energy*, *150*(2015), 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.063>

Observ'ER. (2021). *Heat pumps barometer*. EurObserv'ER.

Odukamaiya, A., Woods, J., James, N., Kaur, S., Gluesenkamp, K. R., Kumar, N., Mumme, S., Jackson, R., & Prasher, R. (2021). Addressing energy storage needs at lower cost via on-site thermal energy storage in buildings. *Energy & Environmental Science*, *14*(10), 5315–5329. <https://doi.org/10.1039/D1EE01992A>

Paardekooper, S., Lund, R. S., Mathiesen, B. V., Chang, M., Petersen, U. R., Grundhal, L., David, A., Dahlbaek, J., Kapetanakis, I. A., Lund, H., Bartelsen, N., Hansen, K., Drysdale, D. W., & Persson, U. (2018). *Heat Roadmap Europe 4: Quantifying the Impact of Low-Carbon Heating and Cooling Roadmaps*.

Paiho, S., & Ahvenniemi, H. (2017). Non-Technical Barriers to Energy Efficient Renovation of Residential Buildings and Potential Policy Instruments to overcome Them—Evidence from Young Russian Adults. *Buildings*, *7*(4), 101. <https://doi.org/10.3390/buildings7040101>

Pal, R., Chelmiss, C., Frincu, M., & Prasanna, V. (2016). MATCH for the Prosumer Smart Grid The

- Algorithmics of Real-Time Power Balance. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 27(12), 3532–3546. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2016.2544316>
- Palm, J., & Reindl, K. (2018). Understanding barriers to energy-efficiency renovations of multifamily dwellings. *Energy Efficiency*, 11(1), 53–65. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9549-9>
- Palmer, J., Boardman, B., Bottrill, C., Darby, S., Hinnells, M., Killip, G., & Lovell, H. (2006). *Reducing the environmental impact of housing*. <http://healthimpactassessment.pbworks.com/f/Reducing+the+environmental+impact+of+housing+-+RCEP+UK+-+2006.pdf>
- Paltsev, S., & Capros, P. (2013). Cost concepts for climate change mitigation. *Climate Change Economics*, 04(supp01), 1340003. <https://doi.org/10.1142/S2010007813400034>
- Pellegrini-Masini, G., Pirni, A., & Maran, S. (2020). Energy justice revisited: A critical review on the philosophical and political origins of equality. *Energy Research & Social Science*, 59(April 2018), 101310. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101310>
- Petersdorff, C., Boermans, T., & Harnisch, J. (2006). Mitigation of CO2 Emissions from the EU-15 Building Stock. Beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. *Environmental Science and Pollution Research - International*, 13(5), 350–358. <https://doi.org/10.1065/espr2005.12.289>
- PF4EE Expert Support Facility. (2019). Energy Efficiency Projects in Europe. In *adelphi consult GmbH* (Issue March). https://pf4ee.eib.org/sites/default/files/2019-06/PF4EE-ESF_MAR2019_EE_Examples_Europe.pdf
- Pietrobon, M., Armani, R., Zangheri, P., & Pagliano, L. (2013). *Report on Cost/Energy curves calculation*.
- Popovski, E., Fleiter, T., Santos, H., Leal, V., & Fernandes, E. O. (2018). Technical and economic feasibility of sustainable heating and cooling supply options in southern European municipalities-A case study for Matosinhos, Portugal. *Energy*, 153, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.036>
- Prinzing, M., Berthold, M., Eschmann, M., & Bertsch, S. (2020). *Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2019/20* (Issue September).
- Rämä, M., & Wahlroos, M. (2018). Introduction of new decentralised renewable heat supply in an existing district heating system. *Energy*, 154, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>
- Rathnayaka, A. J. D., Potdar, V. M., Dillon, T., Hussain, O., & Kuruppu, S. (2012). Analysis of energy behaviour profiles of prosumers. *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, 236–241. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2012.6301138>
- Rathnayaka, A. J. D., Potdar, V. M., Dillon, T., & Kuruppu, S. (2015). Framework to manage multiple goals in community-based energy sharing network in smart grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.008>
- Republic of Cyprus. (2020). *Cyprus Integrated National Energy and Climate Plan*. <https://mec.gov.cy/assets/modules/wnp/articles/202101/103/docs/cynecp.pdf>
- Risch, A., & Salmon, C. (2017). What matters in residential energy consumption: evidence from France. *International Journal of Global Energy Issues*, 40(1/2), 79. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2017.080767>

- Rivers, N., & Jaccard, M. (2006). Useful models for simulating policies to induce technological change. *Energy Policy*, 34(15), 2038–2047. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.02.003>
- Robinson, J. B. (1991). The proof of the pudding. *Energy Policy*, 19(7), 631–645. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(91\)90095-6](https://doi.org/10.1016/0301-4215(91)90095-6)
- Rodrigues, R., Pietzcker, R., Fragkos, P., Price, J., McDowall, W., Siskos, P., Fotiou, T., Luderer, G., & Capros, P. (2022). Narrative-driven alternative roads to achieve mid-century CO2 net neutrality in Europe. *Energy*, 239, 121908. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121908>
- Sadler, M. (2003). *Home Energy Preferences & Policy: Applying Stated Choice Modeling To a Hybrid Energy Economy Model*. Natural Resources Canada©.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., & Rybach, L. (2003). Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32(4–6), 579–588. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00060-9)
- Sanstad, A. H. ., Blumstein, C. ., & Stoft, S. E. . (1995). How high are option values in energy-efficiency investments? *Energy Policy*, 23(9), 739–743. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)00065-Q](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)00065-Q)
- Sanstad, A. H., & Howarth, R. B. (1994a). Consumer Rationality and Energy Efficiency. *Proceedings of the ACEEE 1994 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 22(10), 1–14. https://www.aceee.org/files/proceedings/1994/data/papers/SS94_Panel1_Paper21.pdf
- Sanstad, A. H., & Howarth, R. B. (1994b). ‘Normal’ markets, market imperfections and energy efficiency. *Energy Policy*, 22(10), 811–818. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90139-2](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90139-2)
- Sanstad, A., & McMahon, J. E. (2008). Summary for Policymakers. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (pp. 1–30). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Schild, P. G., Klinski, M., & Catherine, O. G. (2010). *Analyse og sammenlikning av krav til energieffektivitet i bygg i Norden og Europa*.
- Schimschar, S., Grözinger, J., Korte, H., Boermans, T., Lilova, V., & Bhar, R. (2011). *Panorama of the European non-residential construction sector*.
- Schleich, J., Gassmann, X., Faure, C., & Meissner, T. (2016). Making the implicit explicit: A look inside the implicit discount rate. *Energy Policy*, 97, 321–331. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.044>
- Schleich, J., & Gruber, E. (2008). Beyond case studies: Barriers to energy efficiency in commerce and the services sector. *Energy Economics*, 30(2), 449–464. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.08.004>
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470–30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>
- Schulte, I., & Heindl, P. (2017). Price and income elasticities of residential energy demand in Germany. *Energy Policy*, 102(November 2016), 512–528. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.055>
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>

- Shorrock, L., & Dunster, J. (1997). The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. *Energy Policy*, 25(12), 1027–1037. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00130-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00130-4)
- Simon, H. A. (1955). A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 69(1), 99. <https://doi.org/10.2307/1884852>
- Solar Energy Reserch Institute. (1981). *A New Prosperity, Building a Sustainable Energy Future: The SERI Solar Conservation Study*. Brick House Pub.
- Solé, A., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2015). State of the art on gas–solid thermochemical energy storage systems and reactors for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 386–398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.077>
- Sovacool, B. K., Martiskainen, M., Hook, A., & Baker, L. (2019). Decarbonization and its discontents: a critical energy justice perspective on four low-carbon transitions. *Climatic Change*, 155(4), 581–619. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02521-7>
- Steinbach, J., & Staniaszek, D. (2015). Discount rates in energy system analysis. In *BPIE, Fraunhofer ISI* (Vol. 6, Issue May). https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Discount_rates_in_energy_system-discussion_paper_2015_ISI_BPIE.pdf
- Stern, N., & Taylor, C. (2007). Climate Change: Risk, Ethics, and the Stern Review. *Science*, 317(5835), 203–204. <https://doi.org/10.1126/science.1142920>
- Stern, P. C. (1986). Blind Spots in Policy Analysis: What Economics Doesn't Say about Energy Use. *Journal of Policy Analysis and Management*, 5(2), 200. <https://doi.org/10.2307/3323541>
- Sutherland, R. J. (1991). Market Barriers to Energy-Efficiency Investments. *The Energy Journal*, 12(3), 15–34. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol12-No3-3>
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>
- Swan, L. G., Ugursal, V. I., & Beausoleil-Morrison, I. (2008). A New Hybrid End-Use Energy and Emissions Model of the Canadian Housing Stock. *Proceedings of the Third SBRN and SESCI 33rd Joint Conference*.
- Teni, M., Čulo, K., & Krstić, H. (2019). Renovation of Public Buildings towards nZEB: A Case Study of a Nursing Home. *Buildings*, 9(7), 153. <https://doi.org/10.3390/buildings9070153>
- The Carbon Trust and Rawlings Support Services. (2016). *Evidence gathering – Low Carbon Heating Technologies*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/565248/Heat_Pumps_Combined_Summary_report_-_FINAL.pdf
- The Oxford Institute for Energy Studies. (2021). *Cop 26 — Examining the Balance Between Ambitious Pledges and Realistics Expectations*. 129. <https://www.oxfordenergy.org/publications/oxford-energy-forum-cop-26-examining-the-balance-between-ambitious-pledges-and-realistic-expectations-issue-129/>
- Train, K. E. . (1985). Discount rates in consumers' energy-related decisions: A review of the literature.

- Energy*, 10(12), 1243–1253. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(85\)90135-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(85)90135-5)
- Train, K. E. . (2003). *Discrete Choice Methods with Simulation*. In *Cambridge University Press*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753930>
- Ugarte, S., Van Der Ree, B., Voogt, M., Eichhammer, W., Ordoñez, José Antonio; Reuter, M., Schlomann, B., Lloret, P., & Villafáfila, R. (2016). Energy Efficiency for Low-Income Households. *Energy Research & Social Science*, 10(November), 123–132. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/595339/IPOL_STU\(2016\)595339_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/595339/IPOL_STU(2016)595339_EN.pdf)
- UNIDO. (2015). Energy efficiency in buildings. In *Sustainable energy regulation and policymaking for Africa - Introduction and user manual* (pp. 18.1-18.114). https://www.unido.org/sites/default/files/2009-04/training_manual_on_sustainable_energy_regulation_and_policymaking_for_Africa_0.pdf
- Valancius, R., Singh, R. M., Jurelionis, A., & Vaiciunas, J. (2019). A Review of Heat Pump Systems and Applications in Cold Climates: Evidence from Lithuania. *Energies*, 12(22), 4331. <https://doi.org/10.3390/en12224331>
- Valentová, M. (2010). Barriers to Energy Efficiency – Focus on Transaction Costs. *Acta Polytechnica*, 50(4), 87–93. <https://doi.org/10.14311/1247>
- van Bommel, N., & Höffken, J. I. (2021). Energy justice within, between and beyond European community energy initiatives: A review. *Energy Research & Social Science*, 79(June), 102157. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102157>
- van Delft, Y., & de Kler, R. (2017). *Matching processes with electrification technologies Final report of the E-match project* (Issue January). <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5b1/553/076/5b1553076ae1c420216728.pdf>
- Vieites, E., Vassileva, I., & Arias, J. E. (2015). European Initiatives Towards Improving the Energy Efficiency in Existing and Historic Buildings. *Energy Procedia*, 75, 1679–1685. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.418>
- Von Utfall Danielsson, C. (2009). *The Rebound Effect: Theory, Evidence and Implications for Energy Policy* [Lunds Universitet]. In *Thesis*. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1551040&fileId=1647193>
- Wan, K. S. Y., & Yik, F. H. W. (2004). Representative building design and internal load patterns for modelling energy use in residential buildings in Hong Kong. *Applied Energy*, 77(1), 69–85.
- Wilkerson, J. T., Cullenward, D., Davidian, D., & Weyant, J. P. (2013). End use technology choice in the National Energy Modeling System (NEMS): An analysis of the residential and commercial building sectors. *Energy Economics*, 40, 773–784. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.023>
- Wills, A. D. (2018). *On the Modelling and Analysis of Converting Existing Canadian Residential Communities to Net-Zero Energy*. 447. <https://curve.carleton.ca/4d094939-8ea8-4c92-b92a-7916e7edd59f>
- World Bank. (2005). *Primer on Demand-Side Management : With an Emphasis on Price-Responsive Programs* (Issue February). <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/8252> License: CC BY 3.0 IGO

- Wu, W., Wang, B., Shi, W., & Li, X. (2014). Absorption heating technologies: A review and perspective. *Applied Energy*, 130, 51–71. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.027>
- Ximenes, R. (2015). *Energy Demand Model To Support the Definition of Sustainable Energy Systems: Residential Sector*. Tecnico Lisboa.
- Xu, X., & Chen, C. fei. (2019). Energy efficiency and energy justice for U.S. low-income households: An analysis of multifaceted challenges and potential. *Energy Policy*, 128(June 2018), 763–774. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.020>
- Yao, R., & Steemers, K. (2005). A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and Buildings*, 37(6), 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.007>
- Yu, N., Wang, R. Z., & Wang, L. W. (2013). Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(5), 489–514. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.004>
- Zachariadis, T., Michopoulos, A., Vougiouklakis, Y., Piripitsi, K., Ellinopoulos, C., & Struss, B. (2018). Determination of Cost-Effective Energy Efficiency Measures in Buildings with the Aid of Multiple Indices. *Energies*, 11(1), 191. <https://doi.org/10.3390/en11010191>
- Zepter, J. M., Lüth, A., Crespo del Granado, P., & Egging, R. (2019). Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. *Energy and Buildings*, 184, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.003>
- Zwickl-Bernhard, S., & Auer, H. (2022). Demystifying natural gas distribution grid decommissioning: An open-source approach to local deep decarbonization of urban neighborhoods. *Energy*, 238, 121805. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121805>
- Zwickl-Bernhard, S., Auer, H., & Golab, A. (2022). Equitable decarbonization of heat supply in residential multi-apartment rental buildings: Optimal subsidy allocation between the property owner and tenants. *Energy and Buildings*, 262, 112013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112013>
- Αναθεώρηση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. (n.d.). Retrieved March 11, 2022, from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/qanda_21_6686
- Βραχόπουλος, Μ., Κούκου, Μ., & Καρύτσας, Κ. (2015). Κεφάλαιο 3: Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. In *Κανονική γεωθερμία - Αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές* (pp. 42–65). Kallipos, Open Academic Editions.
- Γιαννάκος, Ν. (2014). *Αντλίες θερμότητας σε συστήματα θέρμανσης Σχεδιασμός - Ενεργειακή αξιολόγηση*. Αριστοτέλειο Πναεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Κάπρος, Π., & Ντελκής, Κ. (2007). *Οικονομική Ανάλυση Επιχειρήσεων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχανικών Υπολογιστών - Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος.
- Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017. (2017). Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017: Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων Για Τον Υπολογισμό Της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων Και Την Έκδοση Του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης. 188.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας. (2020). Ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων, ΣΘ και ΣΚ Στατιστική ανάλυση για το έτος 2019 και της χρονικής περιόδου 2011-2019.