



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Βιώσιμος Σχεδιασμός Εσωτερικού Περιβάλλοντος Κτιρίων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Μοντελοποίηση και τεχνο-οικονομική βελτιστοποίηση
γεωθερμικών αντλιών θερμότητας»

Νέλλα Χριστοδούλου

Επιβλέπων καθηγητής: Τρύφων Ρουμπεδάκης

Αθήνα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Μοντελοποίηση και τεχνο-οικονομική βελτιστοποίηση
γεωθερμικών αντλιών θερμότητας»

Νέλλα Χριστοδούλου

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Τρύφων Ρουμπεδάκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Πανάρας

Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ

Αθήνα, Ιούνιος 2026

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών μου, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Τρύφωνα Ρουμπεδάκη, για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξή του, καθώς και στον κ. Πλάτωνα Πάλλη για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφερε.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον σύζυγο και καλύτερό μου φίλο, Δημήτρη, καθώς και στα παιδιά μας, Κωνσταντίνο και Γιώργο, για την τεράστια υπομονή, την ενθάρρυνση και τη σταθερή στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη μητέρα μου για την αγάπη και την πολύτιμη βοήθειά της.

Αφιερώνω όλη αυτή την προσπάθεια στον λατρεμένο μου μπαμπά, που δεν πρόλαβε να με δει να ολοκληρώνω αυτή τη διαδρομή, αλλά είμαι βέβαιη πως, από κάπου, συνεχίζει να με καμαρώνει...

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη μοντελοποίηση και την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση συστημάτων αντλιών θερμότητας για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης και ψύξης κατοικίας, με έμφαση στη γεωθερμική αντλία θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη. Η εφαρμογή πραγματοποιείται για κτήριο κατοικίας στη Λάρισα, με μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του ενεργειακού μοντέλου. Αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας, τις βασικές αρχές των γεωθερμικών συστημάτων και τις μεθοδολογίες ενεργειακής και οικονομικής αξιολόγησης. Στη συνέχεια αναπτύσσεται αριθμητικό μοντέλο υπολογισμού, μέσω του οποίου εκτιμώνται οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης και η ετήσια κατανάλωση ενέργειας των εξεταζόμενων συστημάτων.

Η ανάλυση περιλαμβάνει τη σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης, η οποία βασίζεται σε λέβητα πετρελαίου για θέρμανση και τοπικές μονάδες κλιματισμού για ψύξη, με τρία εναλλακτικά σενάρια. Το πρώτο σενάριο αφορά την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας αέρα-νερού, το δεύτερο την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη, ενώ το τρίτο εξετάζει τον συνδυασμό γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία αποθήκευσης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όλα τα εναλλακτικά σενάρια οδηγούν σε σημαντική μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η συνολική ετήσια τελική κατανάλωση μειώνεται από 43.010,90 kWh/έτος στην υφιστάμενη κατάσταση σε 7.406,44 kWh/έτος για το Σενάριο 1 και σε 4.250,76 kWh/έτος για τα Σενάρια 2 και 3. Στο Σενάριο 3, η χρήση Φ/Β και μπαταρίας δεν μειώνει την ηλεκτρική απαίτηση της ΓΑΘ, αλλά μειώνει την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο σε 2.664,05 kWh/έτος. Από οικονομική άποψη, το Σενάριο 1 εμφανίζει την ευνοϊκότερη συμπεριφορά, καθώς έχει τη μεγαλύτερη ΚΠΑ, τη μικρότερη έντοκη περίοδο αποπληρωμής και το χαμηλότερο LCOH/C. Επομένως, η εργασία αναδεικνύει ότι η ενεργειακά αποδοτικότερη λύση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την οικονομικά ευνοϊκότερη επιλογή.

Λέξεις – Κλειδιά

Γεωθερμική αντλία θερμότητας, αριθμητικό μοντέλο, τεχνο-οικονομική αξιολόγηση, φωτοβολταϊκό σύστημα, καθαρή παρούσα αξία

«Modeling and Techno-Economic Optimization of Ground Source Heat Pumps»

Nella Christodoulou

Abstract

This diploma thesis examines the modelling and techno-economic evaluation of heat pump systems for covering the heating and cooling needs of a residential building, with emphasis on a ground source heat pump coupled with a vertical ground heat exchanger. The case study is carried out for a residential building in Larissa, using monthly heating and cooling loads as input data for the energy model. Initially, a literature review is carried out regarding the operation of heat pumps, the basic principles of geothermal systems, and the main methods used for energy and economic assessment. A numerical calculation model is then developed in order to estimate the energy performance indicators and the annual energy consumption of the examined systems.

The analysis compares the existing condition, which is based on an oil boiler for heating and local air-conditioning units for cooling, with three alternative scenarios. The first scenario examines the installation of an air-to-water heat pump, the second scenario investigates a ground source heat pump with a vertical ground heat exchanger, while the third scenario considers the combination of a ground source heat pump with a photovoltaic system and battery storage.

The results show that all alternative scenarios lead to a significant reduction in final energy consumption compared with the existing condition. Total annual final energy consumption decreases from 43,010.90 kWh/year in the existing condition to 7,406.44 kWh/year for Scenario 1 and to 4,250.76 kWh/year for Scenarios 2 and 3. In Scenario 3, the use of the PV system and battery does not reduce the electricity demand of the ground source heat pump itself, but reduces the electricity purchased from the grid to 2,664.05 kWh/year. From an economic perspective, Scenario 1 presents the most favourable performance, as it has the highest NPV, the shortest discounted payback period, and the lowest LCOH/C. Therefore, the thesis highlights that the most energy-efficient solution does not necessarily coincide with the most economically favourable option.

Keywords

Ground source heat pump, numerical model, techno-economic evaluation, photovoltaic system, net present value

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 5.1 Χάρτης με παράμετρο τις λέξεις – κλειδιά των συγγραφέων των επιστημονικών άρθρων	36
Εικόνα 5.2 Χάρτης συγγραφικού δικτύου – έμφαση στον αριθμό δημοσιεύσεων	37
Εικόνα 5.3 Κυριότερο δίκτυο συνεργασίας συγγραφέων	38
Σχήμα 5.1 Ετήσια κατανομή δημοσιεύσεων	39
Πίνακας 5.1 Πλήθος δημοσιεύσεων ανά επιστημονικό περιοδικό	40
Σχήμα 7.1 Δομή και υπολογιστική ροή του ενεργειακού μοντέλου	63
Σχήμα 9.1 Εξέλιξη σωρευτικών καθαρών ταμειακών ροών εξεταζόμενων σεναρίων	136
Σχήμα 9.2 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$	138
Σχήμα 9.4 Ευαισθησία του LCOH/C [€/kWh] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$	141
Σχήμα 9.5 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145$ €/kWh	143
Σχήμα 9.6 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145$ €/kWh	144
Σχήμα 9.7 Ευαισθησία του LCOH/C ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145$ €/kWh	146
Σχήμα 9.8 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στην Καθαρή Παρούσα Αξία του Σεναρίου 3	148
Σχήμα 9.9 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στον δείκτη LCOH/C	149
Σχήμα 9.10 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στην πλεονάζουσα παραγωγή του φ/β συστήματος	149
Σχήμα 9.11 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στην ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο	150
Εικόνα Β.1 Κάτοψη, βασικές διαστάσεις και προσανατολισμός του κτιρίου	170

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1 Πλήθος δημοσιεύσεων ανά επιστημονικό περιοδικό	40
Πίνακας 7.1 Βασικές παράμετροι γεωεναλλάκτη και εδάφους	65
Πίνακας 7.2 Παράμετροι υπολογισμού αδιατάρακτης θερμοκρασίας εδάφους	67
Πίνακας 7.3 Παράμετροι υπολογισμού συντελεστή αλληλεπίδρασης Ψ	69
Πίνακας 7.4 Μηνιαίος υπολογισμός της συνάρτησης $g_{array}(\tau)$	73
Πίνακας 7.5 Μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία κτιρίου	75
Πίνακας 7.6 Υπολογιζόμενη θερμική απόκριση γεωεναλλάκτη και θερμοκρασία ρευστού	79
Πίνακας 7.7 Συντελεστές πολυωνυμικών σχέσεων υπολογισμού COP και EER	81
Πίνακας 7.8 Μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας ρευστού, COP και EER	81
Πίνακας 7.9 Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας	84
Πίνακας 7.10 Υφιστάμενη κατάσταση και εξεταζόμενα ενεργειακά σενάρια	86
Πίνακας 8.1 Μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση υφιστάμενης κατάστασης	97
Πίνακας 8.2 Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση Σεναρίου 1 - Αντλία θερμότητας αέρα-νερού	100
Πίνακας 8.3 Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση Σεναρίου 2 - Γεωθερμική αντλία θερμότητας	102
Πίνακας 8.4 Μηνιαίος υπολογισμός διαθέσιμης ενέργειας του Φ/Β συστήματος, κατανάλωσης από το δίκτυο και πλεονάζουσας παραγωγής στο Σενάριο 3	105
Πίνακας 8.5 Συγκεντρωτικά ετήσια ενεργειακά αποτελέσματα υφιστάμενης κατάστασης και σεναρίων	106
Πίνακας 9.1 Βασικές οικονομικές παραδοχές τεχνο-οικονομικής ανάλυσης	114
Πίνακας 9.2 Κόστος επένδυσης εξεταζόμενων σεναρίων σε όρους παρούσας αξίας	122
Πίνακας 9.3 Ετήσιο κόστος λειτουργίας και εξοικονόμηση κατά το πρώτο έτος	126
Πίνακας 9.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης	132
Πίνακας 9.5 Σωρευτικές καθαρές ταμειακές ροές εξεταζόμενων σεναρίων	135
Πίνακας 9.6 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$	137
Πίνακας 9.7 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$	139
Σχήμα 9.3 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$	139
Πίνακας 9.8 Ευαισθησία του LCOH/C [€/kWh] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$	140
Πίνακας 9.9 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$	142
Πίνακας 9.10 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$	144
Πίνακας 9.11 Ευαισθησία του LCOH/C [€/kWh] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$	145
Πίνακας 9.12 Παραμετρική διερεύνηση του Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων	148
Πίνακας B.1 Βασικά χαρακτηριστικά του κτιρίου	171
Πίνακας B.2 Αδιαφανή δομικά στοιχεία κτιριακού κελύφους	171
Πίνακας B.3 Διαφανή δομικά στοιχεία κτιριακού κελύφους	172

Πίνακας Β.4 Προσδιορισμός θερμικού φορτίου σχεδιασμού.....	173
Πίνακας Β.5 Προσδιορισμός ψυκτικού φορτίου σχεδιασμού.....	174

Κατάλογος Συμβόλων

A	επιφάνεια, m^2
C	κόστος, €
c_{el}	τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, €/kWh
C_{inv}	αρχικό κόστος επένδυσης, €
C_{op}	ετήσιο κόστος λειτουργίας, €/έτος
COP	συντελεστής απόδοσης σε λειτουργία θέρμανσης, –
c_p	ειδική θερμοχωρητικότητα, $J/(kg \cdot K)$
DPB	έντοκη περίοδος αποπληρωμής, έτη
E	ενέργεια, kWh
E_{grid}	ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο, kWh
EER	δείκτης ενεργειακής απόδοσης σε λειτουργία ψύξης, –
h	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, $W/(m^2 \cdot K)$
IRR	εσωτερικός βαθμός απόδοσης, %
L	μήκος, m
LCOH/C	σταθμισμένο κόστος κάλυψης θέρμανσης και ψύξης, €/kWh
$\dot{m}$	παροχή μάζας, kg/s
NPV	καθαρή παρούσα αξία, €
P	ισχύς, kW
Q	θερμική ή ψυκτική ενέργεια, kWh
$\dot{Q}$	θερμική ή ψυκτική ισχύς, kW
R	θερμική αντίσταση, $m \cdot K/W$
r	ακτίνα, m
SCOP	εποχιακός συντελεστής απόδοσης θέρμανσης, –
SEER	εποχιακός δείκτης ενεργειακής απόδοσης ψύξης, –
SPB	απλή περίοδος αποπληρωμής, έτη
SPF	εποχιακός συντελεστής απόδοσης συστήματος, –
T	θερμοκρασία, K
t	χρόνος, s
U	συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας, $W/(m^2 \cdot K)$

Ελληνικά σύμβολα

α	συντελεστής θερμικής διάχυσης, m^2/s
ΔT	διαφορά θερμοκρασίας, K
λ	θερμική αγωγιμότητα, $W/(m \cdot K)$
η	βαθμός απόδοσης, –
ρ	πυκνότητα, kg/m^3
τ	αδιάστατη χρονική μεταβλητή, –
Ψ	συντελεστής θερμικής αλληλεπίδρασης γεωτρήσεων, –

Δείκτες

a	αέρας
b	γεώτρηση
bat	μπαταρία / συσσωρευτής

c	ψύξη
cond	συμπυκνωτής
el	ηλεκτρική ενέργεια
evap	εξατμιστής
f	ρευστό
g	έδαφος ή γεώτρηση
grid	ηλεκτρικό δίκτυο
h	θέρμανση
in	είσοδος
out	έξοδος
op	λειτουργία
PV	φωτοβολταϊκό σύστημα
ref	τιμή αναφοράς
s	έδαφος
th	θερμική ενέργεια
tot	συνολική τιμή

Συντομογραφίες

A/Θ	αντλία θερμότητας
ΑΠΕ	ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
ΓΑΘ	γεωθερμική αντλία θερμότητας
ZNX	ζεστό νερό χρήσης
ΚΠΑ	καθαρή παρούσα αξία
ΕΠΑ	έντοκη περίοδος αποπληρωμής
Φ/Β	φωτοβολταϊκό σύστημα
ASHP	air source heat pump / αντλία θερμότητας αέρα
BHE	borehole heat exchanger / κατακόρυφος γεωεναλλάκτης
GSHP	ground source heat pump / γεωθερμική αντλία θερμότητας

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	x
Περιεχόμενα.....	xiv
1. Εισαγωγή.....	1
2. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας.....	5
2.1 Αρχές λειτουργίας Αντλιών Θερμότητας.....	5
2.2 Λειτουργία Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας	10
2.3 Συνήθεις τύποι Γεωθερμικών Συστημάτων	11
2.4 Μεταφορά θερμότητας και απόδοση γεωθερμικού συστήματος.....	14
3. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας ...	18
3.1 Θερμοκρασία και θερμικές ιδιότητες του εδάφους και γεωλογικές συνθήκες	18
3.2 Διαμόρφωση και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού εναλλάκτη	20
3.3 Θερμικό φορτίο και συνθήκες λειτουργίας.....	22
3.4 Παροχή και θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας	24
3.5 Επιλογή υλικών και ποιότητα κατασκευής γεωεναλλάκτη.....	25
4. Ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης.....	26
4.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις για την ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου	26
4.2 Προσομοίωση σταθερής κατάστασης και δυναμική προσομοίωση	32
4.3 Επιλογή Υπολογιστικού εργαλείου για την αριθμητική προσομοίωση.....	33
5. Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	35
5.1 Οργάνωση και Οπτικοποίηση Βιβλιογραφικών Πηγών	35
5.2 Ανάπτυξη Αριθμητικών Μοντέλων Προσομοίωσης.....	40
5.3 Παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας που επηρεάζουν την απόδοση των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας	46
5.4 Τεχνο-οικονομική Ανάλυση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας	49
6. Διατύπωση ερευνητικών ερωτημάτων και Μεθοδολογική Προσέγγιση	51
6.1 Διατύπωση Ερευνητικών Ερωτημάτων	51
6.2 Επιλογή και παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης.....	52
6.3 Βασικά βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης (flow chart).....	54
6.4 Αξιολόγηση της μεθοδολογικής προσέγγισης με SWOT Analysis.....	55
6.5 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της SWOT Analysis	57
7. Ανάπτυξη Ενεργειακού Μοντέλου για την Προσομοίωση Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας.....	60
7.1 Σκοπός και γενική περιγραφή του ενεργειακού μοντέλου.....	60
7.2 Δομή του υπολογιστικού φύλλου Energy Model.....	61
7.3 Δεδομένα εισόδου και τεχνικές παραδοχές του ενεργειακού μοντέλου	63
7.3.1 Παράμετροι γεωεναλλάκτη και εδάφους	63
7.3.2 Προσδιορισμός αδιατάρακτης θερμοκρασίας εδάφους	66
7.4 Υπολογιστική διαδικασία του ενεργειακού μοντέλου	68
7.4.1 Υπολογισμός συντελεστή αλληλεπίδρασης μεταξύ γεωτρήσεων.....	68
7.4.2 Χρονική μεταβλητή και συνάρτηση g	70
7.4.3 Εισαγωγή μηνιαίων θερμικών και ψυκτικών φορτίων στο ενεργειακό μοντέλο	74

7.4.4 Θερμική απόκριση γεωεναλλάκτη και θερμοκρασία ρευστού	76
7.4.5 Υπολογισμός COP και EER γεωθερμικής αντλίας θερμότητας	80
7.4.6 Υπολογισμός μηνιαίας ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ.....	82
7.5 Σύνδεση του ενεργειακού μοντέλου με τις εξεταζόμενες περιπτώσεις	85
7.5.1 Τεχνικές παραδοχές και προκαταρκτική διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος για το Σενάριο 3	87
7.5.2 Υπολογισμός διαθέσιμης φωτοβολταϊκής ενέργειας και κατανάλωσης από το δίκτυο	90
7.5.3 Μετάβαση στην ενεργειακή αξιολόγηση των σεναρίων.....	93
8. Ενεργειακή αξιολόγηση υφιστάμενης κατάστασης και εξεταζόμενων σεναρίων	94
8.1 Ενεργειακή κατανάλωση υφιστάμενης κατάστασης.....	95
8.2 Ενεργειακή κατανάλωση Σεναρίου 1 - Αντλία θερμότητας αέρα-νερού	98
8.3 Ενεργειακή κατανάλωση Σεναρίου 2 - Γεωθερμική αντλία θερμότητας	101
8.4 Ενεργειακή αξιολόγηση Σεναρίου 3 - ΓΑΘ με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία.....	103
8.5 Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση υφιστάμενης κατάστασης και σεναρίων	106
9. Τεχνο-οικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση Σεναρίων	108
9.1 Πλαίσιο της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης.....	108
9.2 Οικονομικές παραδοχές και δεδομένα εισόδου	110
9.3 Κόστος επένδυσης εξεταζόμενων σεναρίων	116
9.3.1 Σενάριο 1 : Αντλία θερμότητας αέρα-νερού.....	117
9.3.2 Σενάριο 2 : Γεωθερμική αντλία θερμότητας.....	118
9.3.3 Σενάριο 3 : Γεωθερμική αντλία θερμότητας με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία.....	120
9.4 Ετήσιο κόστος λειτουργίας και εξοικονόμηση	123
9.5 Οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης.....	128
9.7 Ανάλυση ταμειακών ροών και ευαισθησίας	134
9.7.1 Σωρευτικές καθαρές ταμειακές ροές.....	134
9.7.2 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας	137
9.7.3 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο	142
9.8 Παραμετρική διερεύνηση Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό Φ/Β πλαισίων.....	147
9.9 Σύνοψη τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης	152
10. Συμπεράσματα	153
10.1 Αποτελέσματα και ερευνητικά ευρήματα	153
10.2 Περιορισμοί και προκλήσεις κατά την ερευνητική διαδικασία	156
10.3 Συνεισφορά αποτελεσμάτων σε επιστημονικό και πρακτικό επίπεδο	158
10.4 Ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα	160
Βιβλιογραφία.....	162
Παράρτημα Α: thesaurus.txt	166
Παράρτημα Β: Συμπληρωματικά στοιχεία κτιρίου αναφοράς και προσδιορισμού ενεργειακών φορτίων	169
B.1 Περιγραφή κτιρίου αναφοράς.....	169
B.2 Γεωμετρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους.....	171
B.3 Προσδιορισμός φορτίων σχεδιασμού και μηνιαίων θερμικών και ψυκτικών φορτίων	172
Παράρτημα Γ: Ανάπτυξη σχέσης χρονικής επαλληλίας για τη θερμική απόκριση προηγούμενων μηνιαίων φορτίων.....	176

Παράρτημα Δ: Χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ	178
Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα προσομοίωσης PVGIS	180

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές, χάρη στην υψηλή τους ενεργειακή απόδοση αλλά και στην συμβολή τους στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αντίθετα με τις αντλίες θερμότητας αέρα-νερού, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική μείωση στην αποδοτικότητά τους όταν η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει σε πολύ χαμηλά ή πολύ υψηλά επίπεδα, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, αξιοποιώντας την σχεδόν σταθερή θερμοκρασία του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων, αποτελούν μία αξιόπιστη επιλογή για θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, όπως ισχύει και για τις αντλίες θερμότητας που αξιοποιούν άλλες πηγές θερμότητας για την λειτουργία τους, μεταβάλλεται σημαντικά όταν αυτές λειτουργούν εκτός του ονομαστικού τους σημείου, δηλαδή εκτός του φορτίου και των συγκεκριμένων συνθηκών για τις οποίες έχουν δηλωθεί οι επιδόσεις τους. Η περίπτωση αυτή εξάλλου αφορά τις περισσότερες εφαρμογές στην πράξη.

Επομένως, σε συνδυασμό με την ολοένα και πιο ευρεία χρήση τους, παρουσιάζεται η ανάγκη να μελετηθεί η λειτουργία τους υπό διαφορετικές, ρεαλιστικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα για χαμηλότερο ή υψηλότερο φορτίο από το ονομαστικό, για διαφορετική θερμοκρασία εδάφους ή για διαφορετική απαιτούμενη θερμοκρασία προσαγόμενου θερμαινόμενου μέσου. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να πραγματοποιηθεί η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση τους σε διαφορετικές εφαρμογές, καθώς και να εξυπηρετηθεί ο βιώσιμος σχεδιασμός τους ως σύστημα ψύξης/θέρμανσης ενσωματωμένο σε ενεργειακά αποδοτικά κτίρια.

Όπως προκύπτει ως ανάγκη με γνώμονα τα παραπάνω, σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς μίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Το αριθμητικό αυτό μοντέλο θα βασίζεται στην παραμετρική εξέταση των θερμοδυναμικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των βασικών επιμέρους υποσυστημάτων της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, όπως του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας, του συμπιεστή και των κυκλωμάτων κυκλοφορίας.

Το αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιείται για τη συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων, με βάση κοινές τεχνικές και οικονομικές παραδοχές. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ανάλυση της σχετικής ενεργειακής και τεχνο-οικονομικής συμπεριφοράς των εναλλακτικών λύσεων.

Συνεπώς, με την χρήση του αριθμητικού μοντέλου θα είναι δυνατή η ανάλυση και η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος καθώς και του κόστους εγκατάστασης και του κόστους λειτουργίας του για πραγματικές εφαρμογές στον οικιακό και στον τριτογενή τομέα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα μελέτη δεν εξετάζεται η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, αλλά εστιάζεται αποκλειστικά στην λειτουργία και απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για θέρμανση και ψύξη χώρων.

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής. Ξεκινάει με το θεωρητικό υπόβαθρο, δηλαδή τα Κεφάλαια 2-4, συνεχίζει με την βιβλιογραφική επισκόπηση των επιλεγμένων επιστημονικών δημοσιεύσεων και καταλήγει στην διατύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων και την παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης.

Στο Κεφάλαιο 2, αναλυτικότερα, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των αντλιών θερμότητας, εστιάζοντας στα γεωθερμικά συστήματα. Αναλύεται ο κύκλος συμπίεσης εκτόνωσης, με έμφαση στα επιμέρους υποσυστήματα (συμπιεστής, εξατμιστής, συμπυκνωτής, εκτονωτική βαλβίδα) καθώς και οι κατασκευαστικές και λειτουργικές ιδιαιτερότητες των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Εξετάζονται οι συνήθεις τύποι εγκαταστάσεων γεωθερμικών συστημάτων και μελετώνται οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας καθώς και ο υπολογισμός της απόδοσης των συστημάτων.

Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται ανάλυση των τεχνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Διερευνάται η επίδραση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του εδάφους και των γεωλογικών συνθηκών, της γεωμετρίας και της διάταξης των γεωεναλλακτών, των θερμικών φορτίων και των συνθηκών λειτουργίας, των παραμέτρων ροής του ρευστού του γεωεναλλάκτη καθώς και της ποιότητας κατασκευής και της επιλογής των υλικών του.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού μοντέλου, το οποίο συνδυάζει την θερμική ανταλλαγή μεταξύ του εδάφους και του γεωεναλλάκτη και

προσομοιάζει τον κύκλο συμπίεσης του ατμού. Αναλύονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις του μοντέλου και περιγράφεται τόσο η προσέγγιση σταθερής κατάστασης όσο και η δυναμική προσομοίωση για την ανάλυση της απόκρισης του συστήματος σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Επίσης εξετάζεται η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού για την δημιουργία και την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που βασίζεται σε επιλεγμένες επιστημονικές δημοσιεύσεις οι οποίες υποστηρίζουν την μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την λειτουργία, την αριθμητική μοντελοποίηση και την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Η μελέτη των δημοσιεύσεων αυτών αποσκοπεί στην συγκέντρωση και στην αξιοποίηση των ευρημάτων που εκμαιεύονται από αυτές προκειμένου να δομηθεί με ορθό τρόπο το μοντέλο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 6 ορίζονται τα ερευνητικά ερωτήματα της μελέτης, στην δημιουργία των οποίων μας καθοδηγεί το ερευνητικό πρόβλημα, δηλαδή η ανάγκη να μελετηθεί η λειτουργία τους υπό διαφορετικές συνθήκες από τις ονομαστικές. Επίσης περιγράφονται τα βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης που επιλέγεται να ακολουθηθεί για την ανάπτυξη και την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου καθώς και για την τεχνο-οικονομική αξιολόγησή της.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται η εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου στα εξεταζόμενα σενάρια. Περιγράφονται η υφιστάμενη κατάσταση και τα εναλλακτικά σενάρια που αξιολογούνται, καθώς και οι βασικές τεχνικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σύγκριση συμβατικών και εναλλακτικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, με στόχο την εκτίμηση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα της ανάλυσης. Υπολογίζονται και συγκρίνονται οι απαιτήσεις τελικής ενέργειας για την υφιστάμενη κατάσταση και τα τρία εξεταζόμενα σενάρια. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση της χρήσης γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, καθώς και η συνεισφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος και της μπαταρίας στη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο.

Στο Κεφάλαιο 9 πραγματοποιείται η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων. Αρχικά παρουσιάζονται οι οικονομικές παραδοχές, τα κόστη επένδυσης, τα ετήσια κόστη λειτουργίας και οι βασικοί δείκτες αξιολόγησης. Στη συνέχεια υπολογίζονται η Καθαρή Παρούσα Αξία, η Απλή και Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής, καθώς και το σταθμισμένο κόστος κάλυψης θέρμανσης και ψύξης. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς βασικές οικονομικές παραμέτρους και παραμετρική διερεύνηση του Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Στο Κεφάλαιο 10 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας. Παρουσιάζονται τα κύρια ερευνητικά ευρήματα, οι περιορισμοί της ανάλυσης, η συνεισφορά των αποτελεσμάτων σε επιστημονικό και πρακτικό επίπεδο, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Με τη δομή αυτή, η εργασία ξεκινά από τη θεωρητική παρουσίαση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και καταλήγει στην πρακτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων, τόσο ως προς την ενεργειακή τους απόδοση όσο και ως προς την οικονομική τους συμπεριφορά.

2. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή των βασικών εννοιών που σχετίζονται με την δομή και την λειτουργία των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας και τον τρόπο με τον οποίο εκμεταλλεύονται την θερμοκρασία του εδάφους και των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης.

2.1 Αρχές λειτουργίας Αντλιών Θερμότητας

Η αντλία θερμότητας είναι μία συσκευή που έχει την δυνατότητα να μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα άλλο μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της απορρόφησης θερμότητας από μία ψυχρή σχετικά πηγή, όπως είναι το υπόγειο νερό ή ο εξωτερικός αέρας και την μεταφορά της σε ένα θερμότερο μέσο όπως το νερό του δικτύου διανομής ή ο αέρας του εσωτερικού χώρου (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Τα κύρια στοιχεία που συγκροτούν μία αντλία θερμότητας είναι ο συμπιεστής, οι δύο εναλλάκτες θερμότητας (ο συμπυκνωτής και ο εξατμιστής) και η βαλβίδα εκτόνωσης, μέσω των οποίων πραγματοποιείται ο θερμοδυναμικός κύκλος του ψυκτικού ρευστού. Σε λειτουργία θέρμανσης, η αντλία θερμότητας απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον και την μεταφέρει στον εσωτερικό χώρο ενώ σε λειτουργία ψύξης την απομακρύνει από τον χώρο και την απορρίπτει στο περιβάλλον. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αντλία θερμότητας είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να είναι δυνατή η αντιστροφή του κύκλου λειτουργίας και επομένως να είναι δυνατή η χρήση της ίδιας συσκευής τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη του χώρου (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Τα βασικά μέρη που συγκροτούν μια αντλία θερμότητας είναι (Βραχόπουλος κ.ά., 2015):

- Ο συμπιεστής, ο οποίος κυκλοφορεί το ψυκτικό υγρό μέσα στο κύκλωμα και ο ρόλος του είναι να αυξήσει την πίεση και τη θερμοκρασίας του.
- Δύο εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι εναλλάσσουν τους ρόλους τους ανάλογα εάν βρίσκεται η αντλία θερμότητας σε λειτουργία ψύξης ή θέρμανσης. Σε λειτουργία ψύξης συγκεκριμένα ο ένας από τους δύο εναλλάκτες λειτουργεί ως εξατμιστής και

απορροφά θερμότητα από τον χώρο ενώ ο άλλος εναλλάκτης λειτουργεί ως συμπυκνωτής και απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον.

- Η βαλβίδα εκτόνωσης η οποία ελαττώνει την πίεση του υγρού που ατμοποιείται στην συνέχεια σε χαμηλή θερμοκρασία.
- Η τετράοδη βαλβίδα με την οποία είναι δυνατή η αλλαγή κατεύθυνσης της ροής του ψυκτικού υγρού και συνεπώς τη μετατροπή του ψυκτικού κύκλου σε κύκλο θέρμανσης και αντίστροφα
- Οι αυτοματισμοί που είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο και τη λειτουργία του συστήματος, όπως θερμοστάτες, αισθητήρες πίεσης/θερμοκρασίας κλπ.
- Σε κάποιες περιπτώσεις, συμπληρωματική ηλεκτρική αντίσταση η οποία ενεργοποιείται στην περίπτωση χαμηλής θερμικής απόδοσης του συστήματος όταν για παράδειγμα η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

Αναλυτικότερα η λειτουργία της αντλίας θερμότητας βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο συμπίεσης ατμού, ο οποίος επιτρέπει την μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας (Κατσαπρακάκης & Μονιάκης, 2015):

1. Ισεντροπική συμπίεση: Το ψυκτικό μέσο σε μορφή ξηρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης απορροφάται από τον συμπιεστή όπου υφίσταται συμπίεση με αποτέλεσμα να εξέρχεται από αυτόν ως υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Η μηχανική ισχύς που θεωρητικά απορροφάται από τον συμπιεστή είναι ίση με:

$$W_{compr} = \dot{m} \cdot (h_{compr,εξ} - h_{compr,εισ}) \quad (2.1)$$

όπου $\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου, $h_{compr,εξ} [kJ/kg]$ η ενθαλπία στην έξοδο και $h_{compr,εισ} [kJ/kg]$ στην είσοδο του συμπιεστή.

2. Ισοβαρής συμπύκνωση: Ο υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας εισάγεται στον συμπυκνωτή και προσδίδει θερμότητα στο μέσο συμπύκνωσης δηλαδή στον αέρα ή στο νερό, ανάλογα με τον τύπο του συστήματος. Το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον συμπυκνωτή, υπό ιδανικές συνθήκες, ως κορεσμένο υγρό

υψηλής πίεσης. Η αποβαλλόμενη θερμική ισχύς $Q_{\text{συμπ}} [W]$ στο περιβάλλον είναι ίση με:

$$Q_{\text{συμπ}} = \dot{m} \cdot (h_{\text{compr},\text{εξ}} - h_{\text{συμπ},\text{εξ}}) \quad (2.2)$$

όπου $\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου, $h_{\text{compr},\text{εξ}} [kJ/kg]$ η ενθαλπία στην έξοδο του συμπιεστή και $h_{\text{συμπ},\text{εξ}} [kJ/kg]$ η ενθαλπία στην έξοδο του συμπυκνωτή.

3. Ισενθαλπική εκτόνωση: Το ψυκτικό μέσο, υπό πλήρως υγρή φάση, διέρχεται από άεργη εκτονωτική βαλβίδα όπου η πίεση και η θερμοκρασία του μειώνονται απότομα και μετατρέπεται σε ένα μείγμα υγρού και ατμού χαμηλής πίεσης, προτού εισέλθει στον εξατμιστή.
4. Ισοβαρής ατμοποίηση: Στον εξατμιστή το ψυκτικό μέσο απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον του, εξατμίζεται και εξέρχεται από αυτόν ως ψυχρός κορεσμένος ατμός χαμηλής πίεσης.

$$Q_{\text{εξατμ}} = \dot{m} \cdot (h_{\text{compr},\text{εισ}} - h_{\text{εξατμ},\text{εισ}}) \quad (2.3)$$

Όπου $\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου, $h_{\text{compr},\text{εισ}} [kJ/kg]$ η ενθαλπία στην είσοδο του συμπιεστή και $h_{\text{συμπ},\text{εξ}} [kJ/kg]$ η ενθαλπία στην έξοδο του συμπυκνωτή.

Στον κύκλο θέρμανσης αντίστοιχα ακολουθούνται τα ίδια στάδια με τη διαφορά ότι αντιστρέφεται η λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας δηλαδή ο εξατμιστής λειτουργεί ως συμπυκνωτής και ο συμπυκνωτής ως εξατμιστής. Επομένως σε αυτήν την περίπτωση η αντλία θερμότητας απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον και τη μεταφέρει στον εσωτερικό χώρο.

Η θεωρητική απόδοση της αντλίας θερμότητας συγκρίνεται με το όριο του αντιστρεπτού κύκλου Carnot, όπου απαιτείται εξωτερικό έργο για να μεταφερθεί θερμότητα από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας σε μία υψηλότερη. Στην πράξη όμως η αντλία θερμότητας λειτουργεί με τον αντίστροφο ατμοσυμπιεστικό κύκλο.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, στη λειτουργία θέρμανσης η αντλία θερμότητας αντλεί ποσότητα θερμότητας (ενέργειας) $Q_{\text{εξατμ}}$ από το ψυχρό περιβάλλον, προσθέτει μηχανικό έργο W_{comp} στον συμπιεστή και αποδίδει ποσό θερμότητας (ενέργειας) $Q_{\text{συμπ}}$ στον χώρο. Αντίστοιχα στην λειτουργία ψύξης η αντλία θερμότητας αντλεί από το χώρο ποσότητα θερμότητας (ενέργειας) $Q_{\text{εξατμ}}$, προσθέτει μηχανικό έργο στον συμπιεστή W_{comp} και αποδίδει ποσό θερμότητας (ενέργειας) $Q_{\text{συμπ}}$ στο περιβάλλον.

Σύμφωνα με το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα έχουμε:

$$Q_{\text{συμπ}} = Q_{\text{εξατμ}} + W_{\text{comp}} \quad (2.4)$$

Κατά την λειτουργία της θέρμανσης, το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα είναι η ποσότητα θερμότητας $Q_{\text{συμπ}}$. Η αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας χαρακτηρίζεται από τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς COP (Coefficient of Performance):

$$COP_{th} = \frac{Q_{\text{συμπ}}}{W_{\text{comp}}} = \frac{Q_{\text{συμπ}}}{Q_{\text{συμπ}} - Q_{\text{εξατμ}}} \quad (2.5)$$

Η ιδανική απόδοση μίας αντλίας θερμότητας προσδιορίζεται από τον αντιστρεπτό κύκλο Carnot, όπου αντί των ποσών θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι θερμοκρασίες:

$$COP_{Carnot, \text{συμπ}} = \frac{T_{\text{συμπ}}}{T_{\text{συμπ}} - T_{\text{εξατμ}}} \quad (2.6)$$

όπου $T_{\text{συμπ}} [K]$ η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και $T_{\text{εξατμ}} [K]$ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (πχ. εξωτερικός αέρας ή έδαφος).

Κατά τη λειτουργία ψύξης αντίστοιχα, η αντλία θερμότητας λειτουργεί ως ψυκτική μηχανή και το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα είναι η ποσότητα θερμότητας $Q_{\text{εξατμ}}$ που αντλείται από τον χώρο. Η αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας σε αυτήν την περίπτωση χαρακτηρίζεται από τον θεωρητικό δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EER (Energy Efficiency Ratio):

$$EER_{th} = \frac{Q_{\text{εξατμ}}}{W_{\text{comp}}} = \frac{Q_{\text{εξατμ}}}{Q_{\text{συμπ}} - Q_{\text{εξατμ}}} \quad (2.7)$$

Στην ιδανική περίπτωση της ψυκτικής μηχανής Carnot, έχουμε:

$$COP_{Carnot, C} = \frac{T_{\text{εξατμ}}}{T_{\text{συμπ}} - T_{\text{εξατμ}}} \quad (2.8)$$

όπου $T_{εξ\alpha\tau\mu}[K]$ η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και $T_{συμπ}[K]$ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (πχ. εξωτερικός αέρας ή έδαφος).

Επειδή ο συντελεστής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος οι τιμές των συντελεστών COP και EER δεν είναι σταθερές. Όσο πλησιάζει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος την επιθυμητή θερμοκρασία του χώρου, τόσο αυξάνονται και οι τιμές των COP και EER. Επομένως διακρίνουμε τους εξής συντελεστές σε μια αντλία θερμότητας (Βραχόπουλος κ.ά., 2015):

1. Τους παράγοντες COP και EER που εκφράζουν την απόδοση της αντλίας θερμότητας σε καθορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και λειτουργίας. Οι θεωρητικές τιμές τους δίνονται από τον κατασκευαστή.
2. Τον ετήσιο ή εποχιακό συντελεστή SCOP, ο οποίος δίνεται από τον λόγο της θερμικής ενέργειας που παρήγαγε η αντλία θερμότητας προς την καταναλισκόμενη ενέργεια μέσα σε ένα έτος ή σε μια εποχή λειτουργίας της θέρμανσης ή και της ψύξης. Ο SCOP για τις περισσότερες περιοχές της χώρας είναι μεγαλύτερος από τον ονομαστικό COP καθώς η μέση θερμοκρασία κατά τη χειμερινή περίοδο είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα των ονομαστικών συνθηκών λειτουργίας που είναι 7°C.
3. Τον μέσο εποχιακό συντελεστή συμπεριφοράς SEER ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ετήσιας ανάγκης σε ψύξη προς τη συνολική καταναλισκόμενη ετησίως για την ψύξη. Ο SEER είναι χαμηλότερος από τον EER όταν η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας κατά τη θερινή περίοδο είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα των ονομαστικών συνθηκών λειτουργίας που είναι 35°C.
4. Ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης SPF ο οποίος αναφέρεται στην απόδοση της αντλίας θερμότητας σε μια ολόκληρη εποχή. Ισχύς εισόδου και εξόδου συσσωρεύονται για την εποχή και η συνολική εξόδου διαιρείται με τη συνολική εισόδου προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή του SPF:

$$SPF = \frac{\text{Συνολική ισχύς εξόδου (kWh)}}{\text{Σύνολο εισροών ενέργειας (kWh)}} \quad (2.9)$$

2.2 Λειτουργία Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας

Η μεταφορά της θερμότητας από ή προς το περιβάλλον επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση της κατάλληλης εξωτερικής πηγής. Στις αντλίες θερμότητας η πιο συνηθισμένη πηγή ενέργειας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, οι οποίες αξιοποιούν ως πηγή θερμότητας το έδαφος και το υπόγειο ή επιφανειακό νερό. Η μορφή αυτή ενέργειας καλείται αβαθής γεωθερμία και αποτελεί μία κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας κατά την οποία αξιοποιείται η θερμική ενέργεια του υπεδάφους σε μικρά βάθη μέσω ανακυκλοφορίας νερού σε κατάλληλα γεωθερμικά συστήματα είτε κλειστού είτε ανοικτού κυκλώματος (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Το μεγάλο πλεονέκτημα των υπόγειων νερών και του εδάφους ως πηγές θερμότητας σε σχέση με τον αέρα είναι ότι έχουν καθ' όλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους σταθερή θερμοκρασία. Από την άλλη, η χρήση υπογείων νερών μπορεί περιοριστεί από τη χαμηλή διαθεσιμότητα ή από την εποχιακή μεταβλητότητα (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Ένα γεωθερμικό σύστημα αντλίας θερμότητας αποτελείται από τρία βασικά υποσυστήματα τα οποία συνεργάζονται προκειμένου να επιτευχθεί η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του κτιρίου και του εδάφους (Βραχόπουλος κ.ά., 2015):

- Τον εναλλάκτη θερμότητας εντός του εδάφους (είτε γεωεναλλάκτης είτε υδρογεώτρηση). Αυτό το σύστημα μπορεί να είναι είτε κλειστό είτε ανοικτό. Στο κλειστό κύκλωμα οι γεωεναλλάκτες θερμότητας είναι είτε οριζόντιοι είτε κατακόρυφοι σωλήνες μέσα στο έδαφος, οι οποίοι περιέχουν ψυκτικό μέσο. Στο ανοικτό κύκλωμα το νερό αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, μεταδίδεται θερμότητα μέσω της αντλίας θερμότητας και το νερό επιστρέφει στην ίδια πηγή.
- Την αντλία θερμότητας, όπου το ψυκτικό μέσο πραγματοποιεί έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο συμπίεσης-ατμοποίησης, συμπεριλαμβανομένου των συστημάτων ελέγχου.
- Το σύστημα θέρμανσης ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών εντός του κτιρίου.

Το γεγονός ότι σε ένα γεωθερμικό σύστημα αξιοποιείται η εντός εδάφους υπάρχουσα σταθερή θερμοκρασία οδηγεί σε σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, δηλαδή στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής και πρωτογενούς ενέργειας και στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Επομένως τους χειμερινούς μήνες, το ρευστό που κυκλοφορεί στον γεωθερμικό εναλλάκτη απορροφά θερμότητα από το έδαφος και μέσω της αντλίας θερμότητας την αποδίδει στο κτήριο. Κατά τους θερινούς μήνες, όπου η αντλία θερμότητας λειτουργεί σε ψυκτικό κύκλο, το ρευστό απάγει θερμότητα από το κτήριο και μέσω του γεωθερμικού εναλλάκτη την αποδίδει στο χαμηλότερης θερμοκρασίας έδαφος (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

2.3 Συνήθεις τύποι Γεωθερμικών Συστημάτων

Οι κύριες διατάξεις με τις οποίες λειτουργούν οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι οι ΓΑΘ κλειστού κυκλώματος που είναι συνδεδεμένες με γεωεναλλάκτη στο έδαφος (ground coupled heat pumps) και οι ΓΑΘ ανοικτού κυκλώματος που λειτουργούν με υπόγεια νερά (ground water open loop heat pumps) (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας οφείλει να μην είναι τοξικό διαβρωτικό ή εύφλεκτο υγρό να είναι σταθερό στις θερμοκρασίες εφαρμογής και να μην έχει υψηλό κόστος. Ανάμεσα στα κυριότερα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα περιλαμβάνονται το R-407c και το R410 (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Οι γεωθερμικές αντλίες κλειστού κυκλώματος βασίζονται σε έναν κύκλο συμπίεσης ατμών, ο οποίος συνδέεται με υπεδάφιο εναλλάκτη θερμότητας (εδάφους-νερού) τοποθετημένο εντός του εδάφους. Η θερμοκρασία του εδάφους μένει σχεδόν σταθερή σε βάθη μεγαλύτερα των 5 μέτρων πλησιάζοντας τη μέση ετήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Όμως ακόμα και σε βάθος περίπου 2 μέτρων η θερμοκρασία του υπεδάφους μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τις εποχικές αλλαγές παρουσιάζοντας μικρές διακυμάνσεις και καθυστερημένη απόκριση. Σε αυτά τα βάθη η αποθηκευμένη θερμότητα στο έδαφος προέρχεται κυρίως από ηλιακή ακτινοβολία (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Σε ένα τυπικό σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας κλειστού κυκλώματος, νερό ή μείγμα νερού και αντιψυκτικού κυκλοφορεί σε σωληνώσεις που είναι θαμμένες στο έδαφος.

Το ρευστό, το οποίο δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το έδαφος, απορροφά θερμότητα από αυτό κατά τη χειμερινή περίοδο και την αποδίδει στο σύστημα θέρμανσης. Αντίστροφα κατά τη θερινή περίοδο μέσω του ίδιου κυκλώματος το ρευστό απορρίπτει θερμότητα πίσω στο έδαφος. Ανάλογα με το εάν η αντλία θερμότητας βρίσκεται σε λειτουργία θέρμανσης ή ψύξης αντίστοιχα το ρευστό διέρχεται είτε από τον εξατμιστή όταν δηλαδή απορροφά θερμότητα από το έδαφος είτε από τον συμπυκνωτή όταν αποδίδει θερμότητα στο έδαφος ολοκληρώνοντας έτσι το θερμοδυναμικό κύκλο (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Ανάλογα με τη γεωμετρία του γεωεναλλάκτη, τα γεωθερμικά συστήματα κλειστού κυκλώματος διαχωρίζονται σε κάθετα και οριζόντια. Τα κατακόρυφα γεωθερμικά συστήματα, ιδανικά για αστικά περιβάλλοντα και για περιπτώσεις εκσυγχρονισμού κτηρίων όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη έκταση για οριζόντια ανάπτυξη γεωεναλλακτών, καθώς είναι κατάλληλα για περιορισμένο χώρο, μπορούν να καλύψουν ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και δεν επηρεάζονται έντονα από τις εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας. Ο γεωθερμικός εναλλάκτης βυθίζεται κατακόρυφα στο υπέδαφος σε βάθος από 5 m έως συνήθως 100 m, ή υπό κατάλληλες προϋποθέσεις ακόμα περισσότερο, μέσα σε κατάλληλες γεωτρήσεις και λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς από και προς το έδαφος. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι η γεωθερμική ροή θερμότητας θεωρείται σημαντική στις εγκαταστάσεις που αναπτύσσονται σε βάθη μεγαλύτερα των 15 μέτρων, ενώ σε μικρότερα βάθη κυριαρχεί η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Τα κάθετα συστήματα συνήθως αποτελούνται από ένα ζεύγος σωληνώσεων διαμέτρου 20-40 mm, το οποίο συγκολλείται με θερμοκόλληση στο κάτω άκρο και οι σχηματίζεται αγωγός σχήματος U και το οποίο τοποθετείται σε μία ή περισσότερες κατακόρυφες γεωτρήσεις. Αποτελείται συνήθως από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Είναι σημαντικό τα υλικά των σωληνώσεων τα οποία επιλέγονται για να τοποθετηθούν στο υπέδαφος να μην είναι δηλητηριώδη και να είναι ανθεκτικά στη διάβρωση (Βραχόπουλος κ.ά., 2015). Το εσωτερικό των γεωτρήσεων γεμίζεται στην συνέχεια με θερμικά αγωγίμο υλικό, προκειμένου να διασφαλιστεί η θερμική σύζευξη του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και του εδάφους καθώς και να σφραγιστεί η γεώτρηση με την επιφάνεια ούτως ώστε να παρεμποδίζεται η είσοδος ρύπων και να

σφραγιστεί ο υδροφόρος που μπορεί να έχει διαπεραστεί με τη γεώτρηση (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Οι σωληνώσεις των κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών ενδείκνυται να τοποθετούνται σε παράλληλα κυκλώματα. Προτείνεται η διάμετρος της κάθε γεώτρησης να είναι 6-8 ίντσες και το βάθος τους να κυμαίνεται μεταξύ 60 και 100 μέτρων. Επίσης προτείνεται η απόσταση μεταξύ των κάθετων γεωτρήσεων να είναι μεγαλύτερη των 5-6 μέτρων. Η μέση απόδοση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη είναι 35-65 W/m, αναλόγως των γεωλογικών χαρακτηριστικών του εδάφους (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας του εναλλάκτη έχουν εφαρμοστεί και άλλες γεωμετρίες σωληνώσεων όπως τα διπλά ζεύγη και η σπειροειδής τοποθέτηση των αγωγών. (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Ωστόσο, οι 2 βασικοί σχεδιασμοί κατακόρυφων γεωεναλλακτών που εφαρμόζονται ευρέως είναι ο γεωεναλλάκτης τύπου U-σωλήνα και ο ομοαξονικός εναλλάκτης (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Στα οριζόντια γεωθερμικά συστήματα οι γεωεναλλάκτες τοποθετούνται επιφανειακά σε βάθη από 0,5 έως 5 m, όπου η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ηλιακή ακτινοβολία, τη γεωθερμική ροή καθώς και από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε μικρά βάθη η θερμοκρασία του εδάφους να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ηλιακή ακτινοβολία συμβάλλει θετικά στην απόδοση των οριζόντιων γεωεναλλακτών ωστόσο οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας καθώς και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των επιφανειακών στρωμάτων μειώνουν τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Τα οριζόντια γεωθερμικά συστήματα δεν αξιοποιούν άμεσα ούτε τη γεωθερμική ροή που έρχεται από το εσωτερικό της γης ούτε την ηλιακή ακτινοβολία ως πηγή θερμότητας. Όπως και τα υπόλοιπα συστήματα κανονικής γεωθερμίας κυρίως βασίζονται στην αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους δηλαδή στην θερμοχωρητικότητα και την θερμική διαχυτικότητα (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

2.4 Μεταφορά θερμότητας και απόδοση γεωθερμικού συστήματος

Πριν προχωρήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα εξετάσουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, είναι σκόπιμο να ορίσουμε ενδεικτικά τα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη και τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας για τα κλειστά, κατακόρυφα συστήματα εναλλακτών, ώστε να καλυφθεί το θεμελιώδες θεωρητικό πλαίσιο. Δεδομένης της πληθώρας λειτουργικών και γεωμετρικών παραλλαγών, δεν είναι πρακτικό να καλυφθούν όλα τα ενδεχόμενα και να παρουσιαστούν όλα τα αντίστοιχα θερμοδυναμικά μεγέθη.

Αρχικά θα μελετήσουμε το πως διαχέεται η θερμότητα γύρω από τον σωλήνα ακτινικά στο έδαφος. Θεωρούμε ότι ο άξονας της γεώτρησης είναι γραμμική, δηλαδή μονοδιάστατη πηγή θερμότητας, που εκλύει ή απορροφά θερμότητα από ομογενές και ισοτροπικό έδαφος.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο $T(r, t)$ σε απόσταση $r[m]$ από τον άξονα του σωλήνα και τον χρόνο $t[s]$. Η ογκομετρική πυκνότητα του εδάφους συμβολίζεται με $\rho [kg/m^3]$, με $k[W/mK]$ η θερμική του αγωγιμότητα ενώ η ειδική θερμοχωρητικότητα με $c [J/kgK]$ (Κακάτσιος, 2008)

Στην περίπτωση που έχουμε σταθερή κατάσταση, δηλαδή χρονικά αμετάβλητη, τότε ισχύει $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ και η σχέση απλοποιείται ως:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (2.11)$$

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης $R_b [mK/W]$, η οποία ορίζει την αντίσταση που παρουσιάζει η γεώτρηση στη μεταφορά της θερμότητας μεταξύ ρευστού και εδάφους (Neves κ.ά., 2020).

$$R_b = R_g + \frac{R_p + R_{conv}}{2} \quad (2.12)$$

Όπου:

$R_p [mK/W]$ η θερμική αντίσταση του σωλήνα:

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{r_{pipe,ext}}{r_{pipe,in}}\right)}{2\pi k_{pipe}} \quad (2.13)$$

$R_g [mK/W]$ η θερμική αντίσταση του υλικού πλήρωσης (grout):

$$R_g = \frac{1}{4\pi k_{grout}} \left[\ln\left(\frac{r_{bore}}{r_{pipe,ext}}\right) + \ln\left(\frac{r_{bore}}{L_U}\right) + \left(\frac{k_{grout}-k}{k_{grout}+k}\right) \ln\left(\frac{r_{bore}^4}{r_{bore}^4 - \left(\frac{L_U}{2}\right)^4}\right) \right] \quad (2.14)$$

$R_{conv} [mK/W]$ η αντίσταση συναγωγής στο εσωτερικό του σωλήνα:

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_{pipe,in} h_{conv}} \quad (2.15)$$

και $k [W/mK]$ η θερμική αγωγιμότητα εδάφους, $r_{bore} [m]$ η ακτίνα γεώτρησης, $k_{grout} [W/mK]$ η θερμική αγωγιμότητα του υλικού πλήρωσης (ενδεικτικά grout), $r_{pipe,ext} [m]$ η εξωτερική ακτίνα του σωλήνα, $r_{pipe,in} [m]$ η εσωτερική ακτίνα του σωλήνα, $L_U [m]$ η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο κλάδων του U-σωλήνα και $h_{conv} [W/m^2K]$ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από συναγωγή.

Αφού ορίστηκε η ολική θερμική αντίσταση της γεώτρησης, μπορούν να διατυπωθούν οι βασικές σχέσεις που συνδέουν την ροή θερμότητας $Q_{\text{εναλ}} [W]$ με την διαφορά θερμοκρασίας στον γεωεναλλάκτη (Κατσαπρακάκης & Μονιάκης, 2015).

Μπορεί να οριστεί καταρχάς συναρτήσει της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης,

$$Q_{\text{εναλ}} = \frac{(T_{\text{εδαφ,αδιατ}} - T_{\text{fluid,μ}})}{R_b} \quad (2.16)$$

ως γενική σχέση εναλλάκτη θερμότητας

$$Q_{\text{εναλ}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{fluid,εισ}} - T_{\text{εδαφ}}) \quad (2.17)$$

ή ως ενεργειακό ισοζύγιο

$$Q_{\text{εναλ}} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{\text{fluid,εξ}} - T_{\text{fluid,εισ}}) \quad (2.18)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την θερμική ροή από το ρευστό του γεωεναλλάκτη προς το έδαφος ή αντίστροφα. $U [W/m^2K]$ είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης του εναλλάκτη, $A [m^2]$ η επιφάνεια συναλλαγής, $\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ρευστού στον γεωεναλλάκτη, $c [J/(kgK)]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα, $T_{\text{fluid,εισ}} [K]$ η θερμοκρασία εισόδου και $T_{\text{fluid,εξ}} [K]$ η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού, $T_{\text{fluid,μ}} [K]$ η μέση θερμοκρασία του ρευστού, $T_{\text{εδαφ}} [K]$ η θερμοκρασία εδάφους και $T_{\text{εδαφ,αδιατ}} [K]$ η θερμοκρασία του εδάφους σε τέτοια απόσταση από τον γεωεναλλάκτη που δεν έχει επηρεαστεί από την λειτουργία του.

Τα γεωθερμικά συστήματα ανοικτού κυκλώματος χρησιμοποιούν επιφανειακά υπόγεια νερά ως πηγή θερμότητας ή ψύξης μέσω άντλησης και επιστροφής του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία των συστημάτων αυτών απαιτείται ο προσεκτικός τους σχεδιασμός όσον αφορά τη γεώτρηση, την παροχή του υπόγειου νερού στον εναλλάκτη θερμότητας καθώς και τη διάθεση του νερού. Οι απαιτήσεις για σταθερή θερμοκρασία και ποιότητα νερού, τα προβλήματα

διάβρωσης και επικαθίσεων, η έκδοση αδειών καθώς και το κόστος γεώτρησης καθιστούν τα ανοικτά συστήματα κατάλληλα μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις.

3. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται ανάλυση των τεχνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Η περιγραφή και η κατανόηση των κρίσιμων αυτών μεταβλητών είναι μεγάλης σημασίας για την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας βασίζεται στην αξιολόγησή τους.

3.1 Θερμοκρασία και θερμικές ιδιότητες του εδάφους και γεωλογικές συνθήκες

Όσον αφορά τη θερμοκρασία του εδάφους διακρίνονται 3 ζώνες συμπεριφοράς. Η επιφανειακή ζώνη (surface zone), σε βάθος 0-1m, όπου η θερμοκρασία του εδάφους ανταποκρίνεται άμεσα στις ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της υγρασίας και του ανέμου. Ωστόσο, σε βάθος μεγαλύτερο από περίπου 1 m αυτές οι διακυμάνσεις εξασθενούν σημαντικά. Σε μεγαλύτερο βάθος βρίσκεται η ρηχή ζώνη (shallow one), σε βάθος 1-8 m σε ελαφριά εδάφη και έως 20 μέτρων σε βαριά υγρά εδάφη. Στη ζώνη αυτή η θερμοκρασία του εδάφους είναι σχεδόν σταθερή και παραμένει περίπου στα επίπεδα της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της περιοχής με μικρές μόνο εποχιακές μεταβολές. Κάτω από αυτές τις ζώνες (deep zone) βρίσκεται η βαθιά ζώνη όπου η θερμοκρασία του εδάφους είναι πρακτικά σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους και αυξάνεται πολύ αργά με το βάθος, περίπου 30° C/km. Από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε γεώτρηση για αυτό τον σκοπό στην Κύπρο έχει διαπιστωθεί ότι σε βάθος άνω των 5 μέτρων η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια του έτους περίπου σταθερή, περίπου τους 22° C τον χειμώνα και στους 24° C το καλοκαίρι. Για βάθος μεγαλύτερο των 20 μέτρων οι εποχιακές διακυμάνσεις συγκλίνουν σημαντικά ενώ σε βάθος μεγαλύτερο των 30 μέτρων είναι απολύτως σταθερή κατά την διάρκεια του έτους, περίπου στους 19° C (Florides & Kalogirou, 2007).

Η θερμική αγωγιμότητα λ ενός υλικού αποτελεί, όταν μετρείται εργαστηριακά, μια ιδιότητά του που δεν εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες παρά μόνο από τη σύνθεση και τη σύστασή του καθώς και την υγρασία του. Αντίθετα η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα λ_{eff} είναι μια πιο αντιπροσωπευτική παράμετρος που προκύπτει από Thermal Response Test (TRT) σε ολόκληρο τον γεωεναλλάκτη. Η λ_{eff} συνυπολογίζει τη μοριακή αγωγιμότητα του εδάφους, την αντίσταση του υλικού πλήρωσης και τη θερμική αντίσταση της γεώτρησης, R_b (Luo κ.ά., 2016).

Σύμφωνα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες στη Γερμανία, η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 0,15 έως 4,0 W/m·K αναλόγως της σύστασής του (Florides & Kalogirou, 2007). Τα πετρώματα που είναι πλούσια σε χαλαζία, όπως ο ψαμμίτης, έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, που υποδηλώνει ότι η θερμότητα διέρχεται εύκολα από αυτά. Τα πετρώματα που είναι πλούσια σε άργιλο ή οργανικό υλικό, όπως ο σχιστόλιθος και ο άνθρακας, έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, που σημαίνει ότι η θερμότητα διέρχεται πιο αργά από αυτά τα στρώματα. Εάν η ροή θερμότητας είναι σταθερή σε όλη την οπή γεώτρησης (δηλαδή το νερό δεν ρέει πάνω ή κάτω από την οπή), τότε είναι προφανές ότι τα στρώματα σχιστόλιθου χαμηλής αγωγιμότητας θα έχουν υψηλότερη γεωθερμική βαθμίδα σε σύγκριση με τα στρώματα ψαμμίτη υψηλής αγωγιμότητας (Florides & Kalogirou, 2007).

Κατά τον σχεδιασμό ενός γεωθερμικού συστήματος, η ενσωμάτωση ενός πολυστρωματικού μοντέλου όπου υπολογίζονται οι θερμικές ιδιότητες κάθε ζώνης επιτρέπει τον ακριβέστερο προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης ενώ η στάθμη και η ταχύτητα των υπόγειων νερών μας επιτρέπει την εκτίμηση του φορτίου θερμότητας που μεταφέρεται (Lee & Lam, 2012).

3.2 Διαμόρφωση και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού εναλλάκτη

Η διαμόρφωση του γεωεναλλάκτη επηρεάζει την απόδοση ενός γεωθερμικού συστήματος μέσω της θερμικής αντίστασης της διάτρησης και της ικανότητας ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος. Μεγαλύτερο βάθος της διάτρησης αυξάνει το χρόνο που έρχεται σε επαφή το μέσο του γεωεναλλάκτη με το σταθερότερης θερμοκρασίας υπέδαφος, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης (Pouloupatis κ.ά., 2017). Επίσης το μεγαλύτερο μήκος των σωληνώσεων αυξάνει την επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας και επομένως φέρνει τη θερμοκρασία του μέσου του γεωεναλλάκτη πιο κοντά στη θερμοκρασία του εδάφους. Η θερμική αντίσταση της γεώτρησης στα κατακόρυφα συστήματα καθορίζεται επίσης και από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού πλήρωσης (Florides & Kalogirou, 2007).

Η θερμική αντίσταση της διάτρησης ελαττώνεται όσο πιο κοντά στον τοίχο του ανοίγματος (borehole wall) τοποθετούνται τα σκέλη του U-σωλήνα. Όπως προκύπτει από προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, όταν τα σκέλη είναι πολύ κοντά στον τοίχο, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πτώσης της θερμοκρασίας στο μέσο του γεωεναλλάκτη και συνεπώς τη βελτίωση της τιμής COP του συστήματος (Pouloupatis κ.ά., 2017).

Μικρότερη διάμετρος των σωληνώσεων αυξάνει τον συντελεστή μεταφορά θερμότητας λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας του μέσου σε αυτόν αλλά και επιφέρει υψηλότερη πτώση πίεσης και συνεπώς μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την κυκλοφορία του ρευστού στον γεωεναλλάκτη (Florides & Kalogirou, 2007). Ωστόσο, η μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρος των σωληνώσεων του εναλλάκτη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ του μέσου στο γεωεναλλάκτη και του εδάφους ή νερού και συνεπώς την περαιτέρω μείωση της θερμικής αντίστασης της διάτρησης (Pouloupatis κ.ά., 2017).

Συνιστάται τουλάχιστον 2-3 m απόσταση μεταξύ γειτονικών γεωτρήσεων στα κάθετα συστήματα (Florides & Kalogirou, 2007; Pouloupatis κ.ά., 2017) και περίπου 0,3 m σε οριζόντια διάταξη γεωεναλλακτών (Florides & Kalogirou, 2007) ώστε να εξασφαλίζεται η υψηλή απόδοση του συστήματος. Διατηρώντας αυτά τα όρια των αποστάσεων αποτρέπεται η θερμική παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών γεωτρήσεων και διατηρείται η θερμοκρασία

του εδάφους σταθερή γύρω από κάθε διάταξη βελτιώνοντας το συνολικό COP. (Florides & Kalogirou, 2007; Pouloupatis κ.ά., 2017)

Η σπειροειδής τοποθέτηση των σωληνώσεων αυξάνει την επιφάνεια της εναλλαγής θερμότητας ανά μέτρο εκσκαφής, πράγμα που τη καθιστά ιδανική για τις περιπτώσεις που ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος. Αυτό φυσικά προϋποθέτει ότι και σε αυτή την περίπτωση πρέπει να τηρούνται τα όρια των αποστάσεων μεταξύ των σπειρών για να αποφευχθεί η θερμική παρεμβολή (Florides & Kalogirou, 2007).

Η εγκατάσταση 2 U-σωληνώσεων σε μια διάτρηση διπλασιάζει την επιφάνεια μεταφορά θερμότητας και συνεπώς μειώνει και περαιτέρω τον απαιτούμενο συνολικό αριθμό διατρήσεων (Pouloupatis κ.ά., 2017). Με την κατάλληλη διάταξη των σωληνώσεων σε γεωεναλλάκτη διπλού U-σωλήνα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά η πραγματική θερμική απόδοση. Όταν επιλέγεται η παράλληλη σύνδεση των σωληνώσεων, όπου κάθε είσοδος θα αντιστοιχεί σε διαγώνια τοποθετημένη έξοδο, επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη απόδοση καθώς περιορίζεται στο ελάχιστο η θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ των σκελών των σωληνώσεων (Conti κ.ά., 2016). Στην παράλληλη διάταξη το ρευστό κατανέμεται σε περισσότερους σωλήνες μειώνοντας έτσι την πτώση πίεσης ανά σωλήνα (Florides & Kalogirou, 2007). Ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση παρουσιάζει η σειριακή διάταξη, δηλαδή η διάταξη όπου το ρευστό περνάει πρώτα από το ένα U-σωλήνα και κατόπιν από τον άλλον, ωστόσο αποτελεί συχνά μια πρακτικότερη επιλογή σε πολλές εφαρμογές (Conti κ.ά., 2016).

Ειδικότερα ο τρόπος διάταξης των σωληνώσεων επηρεάζει άμεσα την εσωτερική αντίσταση του φρεατίου, δηλαδή την συνδυασμένη αντίσταση που περιλαμβάνει την αντίσταση που αντιμετωπίζει η μεταφορά θερμότητας από το υγρό στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα και τη διάχυση μέσα στο υλικό του τοιχώματος του σωλήνα και την αντίσταση μεταξύ των σκελών των σωληνίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των κλάδων του σωλήνα ή μεταξύ των διαφορετικών σωληνίων τόσο αυξάνεται η αντίσταση μεταξύ τους. Και ελαχιστοποιείται το θερμικό βραχυκύκλωμα και κατά συνέπεια μειώνεται η συνολική εσωτερική αντίσταση του φρεατίου. Έτσι επιτυγχάνεται χαμηλότερη πτώση της θερμοκρασίας του ρευστού και υψηλότερος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και συνεπώς προκύπτει καλύτερος βαθμός απόδοσης COP της αντλίας (Yang κ.ά., 2010).

Όσον αφορά τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, οι υψηλότερες ταχύτητες ρευστού βελτιώνουν μεν τη μεταφορά θερμότητας αλλά αυξάνουν την απαιτούμενη ισχύ της αντλίας που

κυκλοφορεί το ρευστό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του COP, εάν η αύξηση της αποδιδόμενης ενέργειας δεν είναι αρκετά μεγάλη ούτως ώστε να αντισταθμίσει την αύξηση της απαιτούμενης αύξησης της ισχύος της αντλίας (Florides & Kalogirou, 2007).

Επίσης, αν ορίσουμε τη ροή θερμότητας που απορροφά ή αποδίδει το ρευστό μέσα σε έναν γεωεναλλάκτη ανά μονάδα μήκους σωλήνα, $Q_L = \frac{Q_{\text{εναλ}}}{L}$, με L το συνολικό μήκος του σωλήνα, διαπιστώνουμε ότι για διαφορά θερμοκρασίας και παροχή ροής μάζας του ρευστού στον γεωεναλλάκτη, η Q_L παραμένει σταθερή. Επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του σωλήνα, τόσο περισσότερη συνολική θερμότητα μπορεί να αντληθεί ή αποδοθεί στο έδαφος (Saeidi κ.ά., 2024). Επομένως όσο υψηλότερη είναι η ζήτηση της θέρμανσης και της ψύξης του χώρου, δηλαδή όσο υψηλότερο είναι το θερμικό φορτίο τόσο μεγαλύτερο είναι το απαιτούμενο μέγεθος του γεωεναλλάκτη (Neves κ.ά., 2020).

3.3 Θερμικό φορτίο και συνθήκες λειτουργίας

Όπως συμπεραίνεται από το κεφάλαιο 2.1, ο σωστός προσδιορισμός του θερμικού φορτίου ενός εσωτερικού χώρου, δηλαδή η συνολική ποσότητα θερμότητας που πρέπει να προσφερθεί ή να απομακρυνθεί ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία του, είναι μια κρίσιμη διαδικασία. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του θερμικού φορτίου και των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας καθορίζει άμεσα την αποδοτικότητα των αντλιών θερμότητας. Η ανάγκη για μεγαλύτερη παροχή θερμότητας ή ψύξης οδηγεί σε μεγαλύτερη απαιτούμενη ισχύ του συμπιεστή και συνεπώς αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και μειωμένο συντελεστή απόδοσης COP.

Η ποσότητα και η χρονική κατανομή του θερμικού φορτίου σε έναν χώρο επηρεάζουν άμεσα τόσο τη θερμοκρασία του εδάφους όσο και των τοιχωμάτων των σωλήνων του γεωεναλλάκτη και επομένως και το συντελεστή απόδοσης του συστήματος COP. Μεγάλα συνεχόμενα φορτία έχουν ως αποτέλεσμα το σύστημα να απορρίπτει ή να απάγει μεγάλη ποσότητα θερμότητας στο έδαφος και η θερμοκρασία γύρω από τις γεωτρήσεις να αυξάνεται βαθμιαία (Cui κ.ά., 2008).

Η θερμοκρασία επιστροφής του ρευστού στην αντλία θερμότητας εξαρτάται από το πόση θερμότητα απορροφάται (στην περίπτωση θέρμανσης) ή εκλύεται (στην περίπτωση ψύξης). Όταν το θερμικό φορτίο είναι μεγάλο, για σταθερή ροή μάζας $\dot{m}$ και ειδική θερμότητα c_p ,

αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T_{\text{εξ}} - T_{\text{εισ}}$, καθώς $Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρευστό να εισέρχεται στην αντλία πιο ψυχρό ή πιο θερμό κατά την περίοδο θέρμανσης ή ψύξης αντίστοιχα. Αυτή η απόκλιση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του COP, καθώς και την αύξηση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Neves κ.ά., 2020).

Η εναλλαγή μεταξύ λειτουργίας ψύξης και θέρμανσης (για παράδειγμα για την παραγωγή ζεστού νερού σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ψύξης) ή οι διακοπές λειτουργίας (για παράδειγμα κατά τις νυχτερινές ώρες) επιτρέπουν στο έδαφος να επανέλθει προς την κανονική θερμοκρασία του. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η διαφορά θερμοκρασίας του εδάφους με αυτή του ψυκτικού μέσου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο COP της αντλίας (Cui κ.ά., 2008). Ωστόσο στην περίπτωση που το θερμικό φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό, ακόμα και τις νυχτερινές ώρες στις περιόδους ψύξης όταν η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει η θερμοκρασία του ρευστού παραμένει θερμότερη από αυτή του αέρα. Αυτό συμβαίνει επειδή το έδαφος δεν έχει προλάβει να αποκαταστήσει τη θερμοκρασία του και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αντλία να έχει μικρότερη απόδοση ακόμα και από μία συμβατική αντλία αέρα-αέρα (Neves κ.ά., 2020). Επομένως για να αποφευχθεί αυτό και η αντλία να διατηρήσει τον υψηλό της COP, απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός.

Σε εποχιακή κλίμακα όπου η απόδοση εκφράζεται μέσω του εποχιακού συντελεστή απόδοσης SPF, η σταθερότερη θερμοκρασία του εδάφους σε σχέση με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα παρέχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Στα θερμικά συστήματα αυτό αποτυπώνεται σε υψηλότερες τιμές SPF, ιδίως σε περιοχές με ακραίες κλιματικές συνθήκες (Ougazzou κ.ά., 2024).

Το θερμικό φορτίο του χώρου αναφέρεται στο πραγματικό στιγμιαίο φορτίο θέρμανσης ή ψύξης που απαιτείται για τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας στο κτήριο και όχι στο ονομαστικό δηλαδή πλήρες φορτίο σχεδιασμού της αντλίας θερμότητας. Διακρίνουμε 2 βασικούς τύπους αντλιών θερμότητας βάσει του τύπου του συμπιεστή. Στα συστήματα με συμπιεστή σταθερών στροφών (fixed speed), ο συμπιεστής λειτουργεί πάντα στην ονομαστική του ισχύ ανεξάρτητα από το πραγματικό θερμικό φορτίο, με αποτέλεσμα την μείωση του στιγμιαίου COP, όπως αυτός περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Όμως όταν το φορτίο είναι χαμηλό η αντλία σβήνει και ξεκινάει ξανά με αποτέλεσμα τις συχνές ενεργοβόρες εκκινήσεις. Οι απώλειες από τους κύκλους εκκίνησης διακοπής (on/off) καθώς και οι απώλειες από την κατάσταση αναμονής (stand-by mode) έχουν ως αποτέλεσμα τη

μείωση του εποχιακού δείκτη SPF, παρόλο που κατά τις περιόδους που το σύστημα δεν λειτουργεί δεν αποδίδει στο πλήρες φορτίο (García-Céspedes κ.ά., 2020).

Στα συστήματα με συμπιεστή μεταβλητών στροφών (inverter) ο συμπιεστής ρυθμίζει συνεχώς τη συχνότητα και την ισχύ του, προσαρμόζοντας έτσι την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον πραγματικό θερμικό φορτίο και βελτιώνοντας σημαντικά την ενεργειακή απόδοση της αντλίας θερμότητας σε σχέση με τη λειτουργία με συμπιεστή σταθερών στροφών, όχι μόνο εκφραζόμενος ως στιγμιαίος COP αλλά και ως SPF του συστήματος. Επίσης η λειτουργία με συμπιεστή inverter οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε αυτόν. Επομένως ο έλεγχος του μερικού φορτίου μέσω inverter έχει σημαντικό πλεονέκτημα τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο (Lee, 2010).

3.4 Παροχή και θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας

Η απόδοση και η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας εξαρτώνται άμεσα από την παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και από τη θερμοκρασία του κατά την είσοδο και έξοδο του για εναλλάκτη.

Το ρευστό που κυκλοφορεί στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη μεταφέρει θερμότητα προς τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας καθώς εισέρχεται σε θερμοκρασία $T_{fluid,εισ}$ και εξέρχεται σε θερμοκρασία $T_{fluid,εξ}$ αφού έχει αποδώσει θερμότητα στον εξατμιστή. Όσο υψηλότερη είναι η $T_{fluid,εισ}$, τόσο μικρότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται να υπερνικηθεί από τον συμπιεστή, αυξάνοντας συνεπώς τον COP (Ma & Xia, 2017). Εκτός από τη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού του γεωεναλλάκτη, η απόδοση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας εξαρτάται και από τη ροή μάζας $\dot{m}$. Όπως προκύπτει από την Εξίσωση 2.3, $Q_{εξατμ} = \dot{m} \cdot c \cdot (h_{compr,εισ} - h_{εξατμ,εισ})$, όπου $\dot{m}$ η παροχή μάζας του ρευστού, μεγαλύτερη παροχή αυξάνει την προσφερόμενη $Q_{εξατμ}$, μειώνοντας το έργο που απαιτείται από τον συμπιεστή και επομένως βελτιώνοντας τον COP.

Όσον αφορά τη θερμική ροή $Q_{εναλ}$ μεταξύ του εδάφους και του ρευστού του γεωεναλλάκτη, όπως διαπιστώνεται και από την Εξίσωση 2.18, $Q_{εναλ} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{fluid,εξ} - T_{fluid,εισ})$, η αύξηση της ροής παροχής μάζας $\dot{m}$, έχει ως συνέπεια, όπως

συμπεραίνεται από την Εξίσωση 2.16, $Q_{εναλ} = \frac{(T_{εδαφ,αδιατ} - T_{fluid,μ})}{R_b}$, μείωση της θερμικής αντίστασης R_b και συνεπώς αύξηση της $Q_{εναλ}$ και βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος (Yang κ.ά., 2010).

3.5 Επιλογή υλικών και ποιότητα κατασκευής γεωεναλλάκτη

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών κατασκευής και η αυστηρή τήρηση των προδιαγραφών για την κατασκευή του γεωεναλλάκτη είναι καθοριστικής σημασίας για την υψηλή απόδοση και αξιοπιστία ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Η χρήση υλικών υψηλής θερμικής αγωγιμότητας για τους σωλήνες των γεωεναλλακτών όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο μειώνει σημαντικά την θερμική αντίσταση του γεωεναλλάκτη (Florides & Kalogirou, 2007). Συγκεκριμένα το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) είναι η πιο διαδεδομένη επιλογή λόγω αντοχής στην διάβρωση και λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής του (Aresti κ.ά., 2018).

Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή υψηλής αγωγιμότητας υλικού πλήρωσης (backfill), συχνά κονίαμα πλήρωσης (grout) ενισχυμένο με προστιθέμενα σε αυτό υλικά υψηλής αγωγιμότητας. Με αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιείται η ροή θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του ρευστού του γεωεναλλάκτη και βελτιώνεται η συνολική απόδοση του συστήματος. Επομένως είναι πολύ σημαντικό για τους μελετητές των γεωθερμικών συστημάτων να επιλέγεται το βέλτιστο χαμηλού κόστους υλικό πλήρωσης που να ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες (Florides & Kalogirou, 2007, Noorollahi κ.ά., 2018, Yang κ.ά., 2010).

Επίσης, στην περίπτωση συστημάτων U-σωλήνα, η χρήση αποστατών (spacers) εξασφαλίζει ότι διατηρούνται τα σκέλη του γεωεναλλάκτη μακριά το ένα από το άλλο και διατηρείται η επαφή του σωλήνα με το τοίχωμα της γεώτρησης, αποτρέποντας να γεμίσουν τα κενά με grout. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης (Florides & Kalogirou, 2007). Πολύ σημαντική είναι βέβαια για την ελάχιστη θερμική αντίσταση της γεώτρησης και η σωστή τοποθέτηση των σωλήνων καθώς και η πλήρωσή τους με υλικό πλήρωσης χωρίς κενά αέρα (Aresti κ.ά., 2018).

4. Ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης

4.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις για την ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου

Στις προηγούμενες ενότητες εξετάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι σημαντικότεροι παράμετροι σχεδιασμού των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Για τη μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς των γεωθερμικών συστημάτων, θεμελιώδους σημασίας αποτελεί η ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν βασικές εξισώσεις που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου ολόκληρης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας δηλαδή από τον γεωθερμικό εναλλάκτη ως τον εξατμιστή, τον συμπιεστή, τον συμπυκνωτή και τη βαλβίδα εκτόνωσης.

Επειδή για κάθε υποσύστημα υπάρχουν πολλές λειτουργικές και γεωμετρικές παραλλαγές, όπως για παράδειγμα κατακόρυφοι και οριζόντιοι γεωεναλλάκτες, συμπιεστές σταθερών στροφών και inverter, κλπ., στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν είναι δυνατόν να καταγραφούν όλες οι εξειδικευμένες μαθηματικές σχέσεις που εντοπίζονται στην βιβλιογραφία. Για τον σκοπό αυτό, θα παρουσιαστούν οι πιο αντιπροσωπευτικές ενεργειακές εξισώσεις και οι σχέσεις μεταφοράς θερμότητας για κάθε υπό μελέτη υποσύστημα καθώς και οι συνήθεις απαραίτητες παραδοχές. Κάποιες από αυτές τις εξισώσεις παρατίθενται για λόγους πληρότητας, καθώς έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια (Κεφάλαιο 2.1 και Κεφάλαιο 2.4). Σημειώνεται ότι όσον αφορά τις εξισώσεις που αφορούν τον γεωεναλλάκτη, αυτές έχουν διατυπωθεί για την περίπτωση κάθετου γεωεναλλάκτη, καθώς για διαφορετικές γεωμετρίες και διατάξεις απαιτούνται κατάλληλες προσαρμογές.

Οι σχέσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται κυρίως ως θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των βασικών μηχανισμών λειτουργίας της ΓΑΘ και του γεωεναλλάκτη. Στο ενεργειακό μοντέλο της εργασίας που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία δεν επιλύεται πλήρως ο ψυκτικός κύκλος με βάση τις θερμοδυναμικές καταστάσεις του ψυκτικού μέσου. Η επίδραση της αντλίας θερμότητας ενσωματώνεται μέσω πολυωνυμικών σχέσεων υπολογισμού COP και EER, οι οποίες συσχετίζουν την απόδοση με τις θερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας.

Μονοδιάστατη εξίσωση θερμικής αγωγής

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

και για σταθερή κατάσταση

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

Όπου :

$r[m]$ η απόσταση από τον άξονα του σωλήνα

$t [s]$ ο χρόνος

$\rho [kg/m^3]$ η ογκομετρική πυκνότητα του εδάφους

$k[W/mK]$ η θερμική του αγωγιμότητα του εδάφους

$c [J/kgK]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του εδάφους

Θερμική αντίσταση της γεώτρησης

$$R_b = R_g + \frac{R_p + R_{conv}}{2}$$

Όπου, όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2.4:

$R_p[mK/W]$ η θερμική αντίσταση του σωλήνα

$R_g[mK/W]$ η θερμική αντίσταση του υλικού πλήρωσης (grout)

$R_{conv}[mK/W]$ η αντίσταση συναγωγής στο εσωτερικό του σωλήνα

Θερμική ροή ρευστού γεωεναλλάκτη από ή προς το έδαφος

$$Q_{\text{εναλ}} = \frac{(T_{\text{εδαφ,αδιατ}} - T_{\text{fluid,μ}})}{R_b}$$

$$Q_{\text{εναλ}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{fluid,εισ}} - T_{\text{εδαφ}})$$

$$Q_{\text{εναλ}} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{\text{fluid,εξ}} - T_{\text{fluid,εισ}})$$

Όπου:

$U [W/m^2K]$ είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη

$A [m^2]$ η επιφάνεια συναλλαγής

$\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ρευστού στον γεωεναλλάκτη

$c [J/(kgK)]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα

$T_{\text{fluid,εισ}} [K]$ η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού

$T_{\text{fluid,εξ}} [K]$ η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού

$T_{\text{fluid,μ}} [K]$ η μέση θερμοκρασία του ρευστού

$T_{\text{εδαφ}} [K]$ η θερμοκρασία εδάφους

$T_{\text{εδαφ,αδιατ}} [K]$ η θερμοκρασία του εδάφους σε τέτοια απόσταση από τον γεωεναλλάκτη που δεν έχει επηρεαστεί από την λειτουργία του

Ενεργειακό ισοζύγιο εξατμιστή

$$Q_{\text{εξατμ}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{εξατμ,εξ}} - T_{\text{εξατμ,εισ}}) \quad (4.1)$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει το ισοζύγιο ενέργειας στον εξατμιστή όπου η θερμότητα που απορροφάται από το ψυκτικό μέσο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του από $T_{\text{εξατμ,εξ}} [K]$ σε $T_{\text{εξατμ,εισ}} [K]$. Επίσης:

$c_p [J/kgK]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού μέσου

$\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου που διέρχεται από τον εναλλάκτη

Σημειώνεται ότι οι όροι της Εξίσωσης 4.1 καλύπτουν την ανάγκη να χρησιμοποιηθούν οι θερμοκρασίες αντί των ενθαλιπών, όπως στην Εξίσωση 2.3, καθώς στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός αριθμητικού μοντέλου γίνεται η προσέγγιση ότι το ρευστό που διέρχεται από τον εξατμιστή παραμένει στην ίδια φάση (υγρή ή αέρια).

Μηχανική ενέργεια που απορροφάται από τον συμπιεστή

$$W_{\text{compr}} = \dot{m} \cdot (h_{\text{compr,εξ}} - h_{\text{compr,εισ}})$$

Όπου:

$\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου

$h_{\text{compr,εξ}} [kJ/kg]$ η ενθαλπία στην έξοδο

$h_{\text{compr,εισ}} [kJ/kg]$ στην είσοδο του συμπιεστή

Εξίσωση συμπυκνωτή

$$Q_{\text{συμπ}} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{\text{συμπ,εισ}} - T_{\text{συμπ,εξ}}) \quad (4.2)$$

Αυτή η εξίσωση αναφέρεται στο ισοζύγιο ενέργειας στον συμπυκνωτή όπου η θερμότητα που απορρίπτεται από το ψυκτικό ρευστό οδηγεί στην μείωση της θερμοκρασίας του από $T_{\text{συμπ,εισ}} [K]$ σε $T_{\text{συμπ,εξ}} [K]$. Όπως και στην περίπτωση του εξατμιστή:

$c_p [J/kgK]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού μέσου

$\dot{m} [kg/s]$ η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου που διέρχεται από τον εναλλάκτη

Ισενθαλπική εκτόνωση

$$h_{\text{εκτ,εισ}} = h_{\text{εκτ,εξ}} \Rightarrow \Delta h = 0 \quad (4.3)$$

Η εξίσωση αυτή απεικονίζει την ισενθαλπική εκτόνωση του ψυκτικού μέσου πριν και μετά την βαλβίδα εκτόνωσης, όπου δηλαδή η εκτονωτική διαδικασία γίνεται υπό σταθερή ενθαλπία.

Ενεργειακός Ισολογισμός Κύκλου

$$Q_{\text{συμπ}} = Q_{\text{εξατμ}} + W_{\text{comp}}$$

Η σχέση αυτή εκφράζει ότι η θερμότητα που απορρίπτεται στον συμπυκνωτή $Q_{\text{συμπ}}$ ισούται με τη θερμότητα που απορροφά ο εξατμιστής $Q_{\text{εξατμ}}$ συν το έργο του συμπιεστή W_{comp} .

Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

$$P_{el} = \frac{W_{compr}}{\eta_{μηχ}\eta_{ηλ}} \quad (4.4)$$

Στην εξίσωση αυτή μετατρέπεται η μηχανική ισχύς του συμπιεστή W_{compr} σε πραγματική ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} , όπου:

$\eta_{μηχ}$ ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή

$\eta_{ηλ}$ ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα

Πραγματικός Συντελεστής συμπεριφοράς COP και Λόγος ενεργειακής απόδοσης EER

Στη χειμερινή περίοδο λειτουργίας της θέρμανσης, ο πραγματικός συντελεστής θερμότητας ορίζεται ως:

$$COP = \frac{Q_{συμπ}}{P_{el}}$$

Στη θερινή περίοδο λειτουργίας της ψύξης χρησιμοποιείται ο λόγος ενεργειακής απόδοσης EER, ο οποίος είναι ο αντίστοιχος πραγματικός COP για ψύξη και ορίζεται ως:

$$EER = \frac{Q_{εξατμ}}{P_{el}}$$

4.2 Προσομοίωση σταθερής κατάστασης και δυναμική προσομοίωση

Η απόδοση ενός γεωθερμικού συστήματος εξαρτάται από διεργασίες που εξελίσσονται όχι μόνο σε συνάρτηση μεταβλητών που έχουν σχέση με τον χώρο αλλά και μεταβλητών που έχουν σχέση με τον χρόνο (πχ μεταβαλλόμενα φορτία, εποχιακές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις). Ωστόσο, όπως διαπιστώνεται από την μελέτη της διεθνούς σχετικής βιβλιογραφίας, στα μοντέλα προσομοίωσης που αναπτύσσονται χρησιμοποιούνται 2 βασικές προσεγγίσεις, η δυναμική (transient) προσομοίωση και η σταθερής κατάστασης (steady state) προσομοίωση.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην δυναμική προσομοίωση επιλύεται η εξίσωση της μονοδιάστατης εξίσωσης θερμικής αγωγής στο έδαφος γύρω από τον άξονα κάθετου γεωεναλλάκτη:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

όπου ο πρώτος όρος της εξίσωσης εκφράζει την διάχυση θερμότητας στο έδαφος σε κυλινδρικές συντεταγμένες και ο δεύτερος όρος την απορρόφηση ή την έκλυση θερμότητας το έδαφος, δηλαδή την μεταβολή της θερμοκρασίας του λόγω της θερμοχωρητικότητάς του. Επίσης, οι τιμές εισόδου του ρευστού του γεωεναλλάκτη, δηλαδή $T_{fluid, εισ}(t)$ και η παροχή μάζας $\dot{m}(t)$ είναι χρονικές συναρτήσεις λόγω μεταβλητότητας του θερμικού φορτίου.

Στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης, η μεταβολή στον χρόνο δεν λαμβάνεται υπόψη και συνεπώς:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

Η επίλυση αυτής της εξίσωσης ως προς T δείχνει ότι η κατανομή θερμοκρασίας του ομοιογενούς και ισότροπου εδάφους γύρω από τον άξονα ενός κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη, εξαρτάται από τη ακτινική απόσταση r από τον σωλήνα. Επίσης στα πλαίσια της παραδοχής της σταθερής κατάστασης θεωρείται ότι οι συνθήκες λειτουργίας του γεωεναλλάκτη, δηλαδή η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού $T_{fluid, εισ}$ και η παροχή μάζας $\dot{m}$ θεωρούνται χρονικά αμετάβλητες και παίρνουν μία σταθερή τιμή.

Επομένως, η δυναμική προσομοίωση είναι ιδανική επιλογή όταν απαιτείται από τη φύση της μελέτης να εξετασθεί η χρονική απόκριση του συστήματος σε μεταβολές του θερμικού

φορτίου ή των συνθηκών περιβάλλοντος, όπως οι εποχιακές διακυμάνσεις ή υπερθέρμανση του εδάφους σε βάθος χρόνου. Ωστόσο απαιτεί λεπτομερέστερα δεδομένα εισόδου και πολύ πιο σύνθετη παραμετροποίηση με αποτέλεσμα οι δυναμικές προσομοιώσεις να είναι ιδιαίτερα απαιτητικές σε υπολογιστικό χρόνο. Επίσης απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ καθώς και εξειδικευμένα λογισμικά, γεγονός που περιορίζει την επιλογή τους σε περιβάλλοντα όπου είναι διαθέσιμοι οι κατάλληλοι πόροι.

Στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης εξετάζεται η αμετάβλητη στον χρόνο λειτουργία του συστήματος. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα πρακτική όταν το ζητούμενο είναι για παράδειγμα η γρήγορη προκαταρκτική διαστασιολόγηση ενός γεωθερμικού συστήματος ή μία πρώτη αξιόπιστη τεχνο-οικονομική ανάλυση. Οι υπολογισμοί στο μοντέλο σταθερής κατάστασης πραγματοποιούνται άμεσα χωρίς να απαιτείται σημαντικός υπολογιστικός χρόνος, καθιστώντας δυνατή ακόμα και την εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση με ελάχιστο κόστος.

4.3 Επιλογή Υπολογιστικού εργαλείου για την αριθμητική προσομοίωση

Προκειμένου να δημιουργηθεί και να εφαρμοσθεί το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης υπάρχει πληθώρα επιλογών υπολογιστικών εργαλείων, όπως διαπιστώνεται από τις μεθοδολογίες που περιγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Η επιλογή του κατάλληλου εργαλείου εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια της προσομοίωσης, τον ερευνητικό στόχο καθώς και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων.

Σε απλοποιημένες προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης δημοφιλής επιλογή είναι το Microsoft Excel, το οποίο σε σχέση με άλλα υπολογιστικά φύλλα είναι πιο βολικό και γρήγορο λόγω της πληρότητας των συναρτήσεων. Είναι δυνατός ο άμεσος αυτόματος επανυπολογισμός των εξισώσεων που υπολογίζουν τα ζητούμενα μεγέθη, πχ τη ροή θερμότητας σε έναν εναλλάκτη ή τον βαθμό απόδοσης, όταν αλλαχθεί η τιμή μίας παραμέτρου εισόδου. Επίσης μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας, εναλλάσσοντας την τιμή μίας εισόδου σε ένα καθορισμένο εύρος τιμών και εξετάζοντας πως αλλάζει ένα αποτέλεσμα, για παράδειγμα ένας δείκτης ενεργειακής απόδοσης ή ένας οικονομικός δείκτης αξιολόγησης (Christodoulides κ.ά., 2025).

Επομένως για απλές σταθερής κατάστασης εκτιμήσεις, η ταχύτητα και η πρακτικότητα του Excel το καθιστούν ένα ιδανικό εργαλείο. Ωστόσο, στην περίπτωση που απαιτείται η αποτύπωση της πλήρους χρονικής συμπεριφοράς ενός γεωθερμικού συστήματος τότε είναι απαραίτητο να στραφούμε σε εξειδικευμένα για αυτό το σκοπό εργαλεία τα οποία υποστηρίζουν δυναμική προσομοίωση και στα οποία μπορούμε να εισάγουμε περίπλοκα τεχνικά και κλιματικά δεδομένα. Λογισμικά του εμπορίου, τα οποία υποστηρίζουν αυτή τη δυνατότητα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, το COMSOL Multiphysics (Chen κ.ά., 2022; Saeidi κ.ά., 2024), το TRNSYS (Kwon κ.ά., 2023), EnergyPlus (Neves κ.ά., 2020), FlexPDE, TOUGHREACT, FEFLOW, GLD (Aresti κ.ά., 2018).

5. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

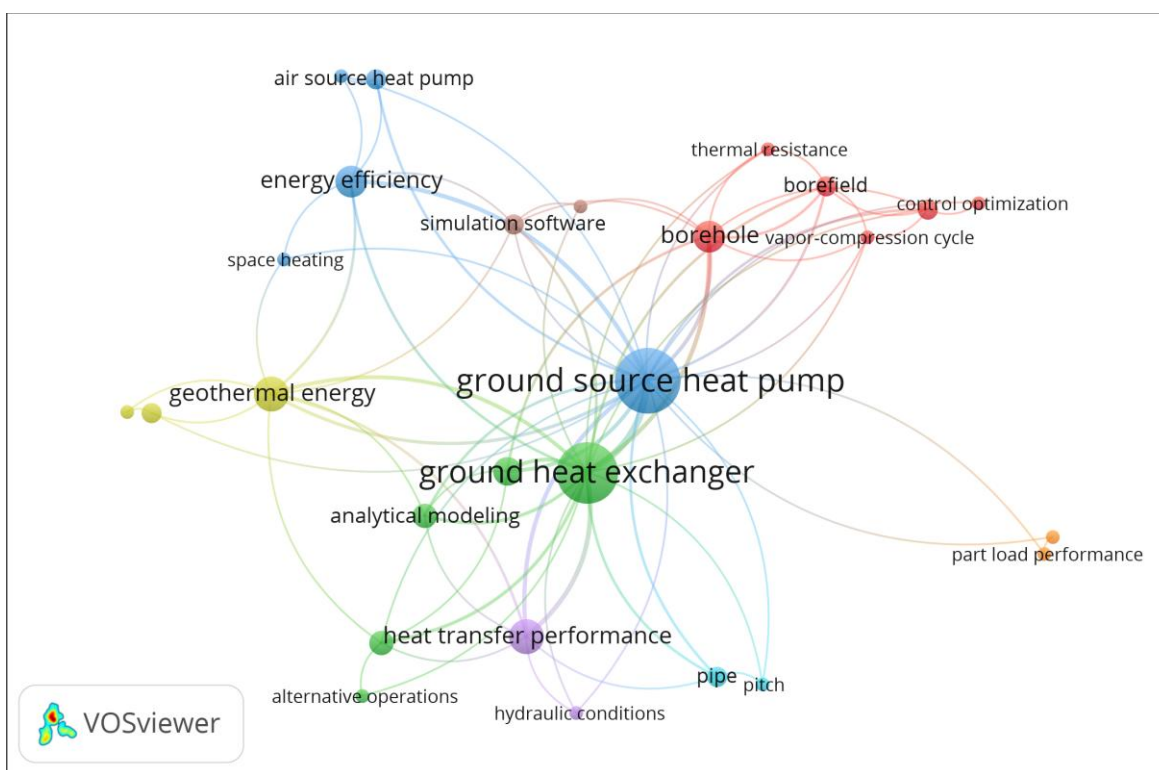
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που βασίζεται σε επιλεγμένες επιστημονικές δημοσιεύσεις οι οποίες υποστηρίζουν τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία, την αριθμητική μοντελοποίηση και την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Η μελέτη των δημοσιεύσεων αυτών αποσκοπεί στη συγκέντρωση και στην αξιοποίηση των ευρημάτων που εκμαιεύονται από αυτές προκειμένου να δομηθεί με ορθό τρόπο το μοντέλο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας.

5.1 Οργάνωση και Οπτικοποίηση Βιβλιογραφικών Πηγών

Προκειμένου να απεικονιστούν και να αναλυθούν οι σχέσεις μεταξύ των μελετών στις 21 επιστημονικές δημοσιεύσεις που συγκεντρώθηκαν, τα δεδομένα οργανώθηκαν αρχικά στο λογισμικό Mendeley και στην συνέχεια εξήχθησαν σε μορφή RIS. Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε με το VosViewer χρησιμοποιώντας τόσο το αρχείο ris με τα keywords των δημοσιεύσεων όσο και το αρχείο thesaurus.txt (βλ. Παράρτημα Α) για την ενοποίηση συνώνυμων θεματικών όρων. Ο χάρτης που προκύπτει (Εικόνα 5.1) αναδεικνύει τους κύριους θεματικούς άξονες, την συχνότητα των λέξεων-κλειδιών καθώς και τις συσχετίσεις μεταξύ των ερευνητικών πεδίων, δίνοντας την δυνατότητα να γίνει μία πρώτη εκτίμηση των τάσεων στην βιβλιογραφία που εντοπίστηκε.

Όπως διαπιστώνουμε από την απεικόνιση των επιστημονικών δημοσιεύσεων, οι δύο βασικές θεματικές ενότητες που ξεχωρίζουν είναι η «γεωθερμική αντλία θερμότητας» (ground source heat pump) και ο «γεωεναλλάκτης» (ground heat exchanger) οι οποίες αποτελούν τα δύο υποσυστήματα του γεωθερμικού συστήματος που θα μοντελοποιηθούν. Γύρω από αυτές τις έννοιες διακρίνουμε την «ενεργειακή απόδοση» (energy efficiency) και την «απόδοση μεταφοράς θερμότητας», που αποτελούν βασικά ερευνητικά πεδία για την αξιολόγηση της λειτουργίας σε ονομαστικό και μερικό φορτίο καθώς και τα «εργαλεία προσομοίωσης» (simulation software) που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του μοντέλου. Η εμφάνιση της «απόδοσης σε μερικό φορτίο» (part load performance) αναδεικνύει την ανάγκη για μελέτη της αποδοτικότητας των γεωθερμικών συστημάτων σε μερικά φορτία λειτουργίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάμεσα στις επιστημονικές δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν, υπάρχουν αρκετές μελέτες στις οποίες αναλύονται εκτενώς θέματα όπως το κόστος, η περίοδος απόσβεσης και η οικονομική βιωσιμότητα, ωστόσο οι συγγραφείς τους δεν συμπεριέλαβαν τους σχετικούς όρους στην λίστα με τα keywords. Συνεπώς στην απεικόνιση του VosViewer δεν σχηματίζεται ξεχωριστό ερευνητικό πεδίο. Αυτό φυσικά δεν μειώνει την αξία των εν λόγω δημοσιεύσεων για την εμπειριστατωμένη τεχνο-οικονομική ανάλυση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, καθώς προσφέρουν πολύτιμα δεδομένα και μεθοδολογίες για την αξιολόγηση της απόδοσης και της βιωσιμότητάς τους σε πραγματικές εφαρμογές.

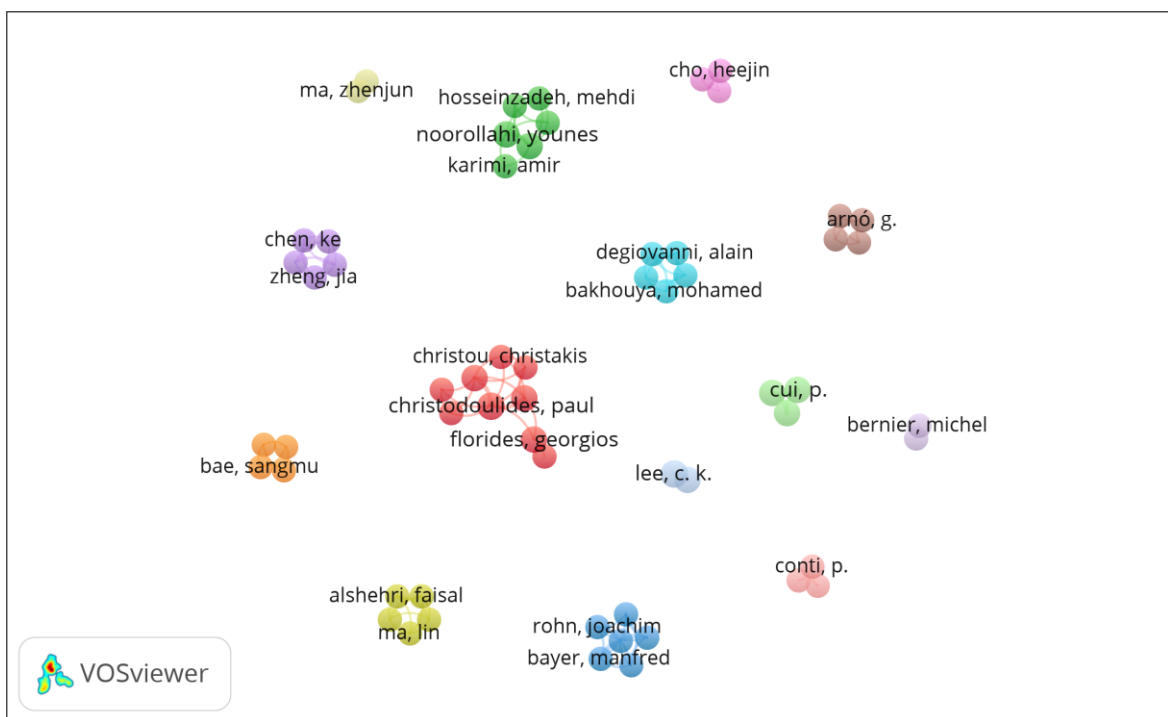


Εικόνα 5.1 Χάρτης με παράμετρο τις λέξεις – κλειδιά των συγγραφέων των επιστημονικών άρθρων

Όσον αφορά την οπτικοποίηση ως προς τις δημοσιεύσεις και τις συνεργασίες μεταξύ των συγγραφέων, καταρχάς σημειώνεται ότι στις 21 βιβλιογραφικές πηγές εμφανίζονται συνολικά 59 συγγραφείς. Οι συγγραφείς που παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο αριθμό δημοσιεύσεων είναι οι εξής:

Florides, Georgios (4 δημοσιεύσεις), Christodoulides, Paul (3 δημοσιεύσεις), Lee, C.K. (3 δημοσιεύσεις)

Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης συγγραφικού δικτύου (Εικόνα 5.2).



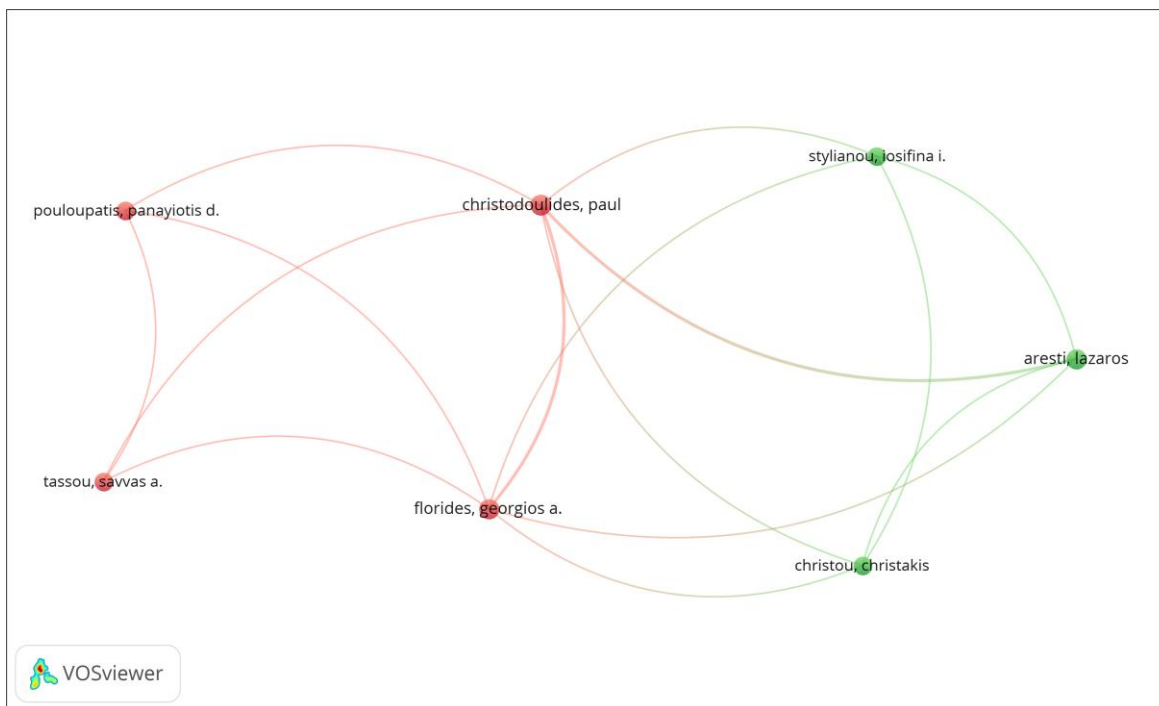
Εικόνα 5.2 Χάρτης συγγραφικού δικτύου – έμφαση στον αριθμό δημοσιεύσεων

Αυτοί οι συγγραφείς που παρουσιάζουν την ισχυρότερη τιμή Total Link Strength είναι εκείνοι που παρουσιάζουν και τις ισχυρότερες συνεργασίες στην επιστημονική κοινότητα, στα πλαίσια πάντα του μικρού αριθμού των δημοσιεύσεων που διερευνάμε.

- Ο Christodoulides, Paul έχει τιμή Total Link Strength ίση με 9
- Ο Florides, Georgios έχει τιμή Total Link Strength ίση με 7
- Ακολουθούν 3 συγγραφείς που έχουν τιμή Total Link Strength ίση με 6:

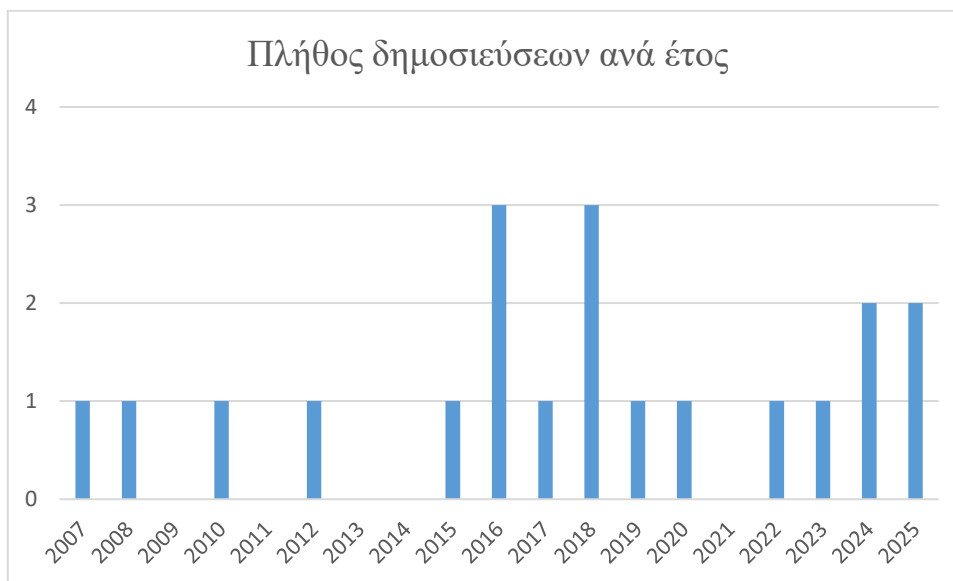
Aresti Lazaros, Noorollahi Younes, Saeidi Reza

Στον παρακάτω χάρτη συγγραφικού δικτύου, απεικονίζεται το μεγαλύτερο δίκτυο συνεργασίας ανάμεσα στους συγγραφείς (Εικόνα 5.3), το οποίο αποτελείται από 7 από αυτούς.



Εικόνα 5.3 Κυριότερο δίκτυο συνεργασίας συγγραφέων

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.1) φαίνεται πως κατανέμονται οι δημοσιεύσεις ανά έτος. Σημειώνεται ότι παρά το γεγονός ότι η πλειονότητα των μελετών που εντοπίστηκαν και εξετάστηκαν ανήκει στην πρόσφατη βιβλιογραφία, επιλέχθηκαν και κάποιες παλαιότερες δημοσιεύσεις. Η επιλογή αυτών των πηγών πραγματοποιήθηκε με βάση την επιστημονική τους αξία καθώς και την καταλληλότητα του περιεχομένου τους ως προς τον σκοπό της διπλωματικής εργασίας, καθώς προσέφεραν χρήσιμες θεωρητικές προσεγγίσεις καθώς και μεθόδους ανάλυσης που εξακολουθούν να είναι αξιοποιήσιμες.



Σχήμα 5.1 Ετήσια κατανομή δημοσιεύσεων

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1) στην πρώτη στήλη παρουσιάζονται οι τίτλοι των επιστημονικών περιοδικών από τα οποία προέρχονται οι επιλεγμένες δημοσιεύσεις, στην δεύτερη το πλήθος των δημοσιεύσεων που επιλέχθηκαν από το κάθε επιστημονικό περιοδικό και στην τρίτη στήλη τον δείκτη H-index του κάθε περιοδικού που αντικατοπτρίζει την ακαδημαϊκή του επιρροή.

	Πλήθος Δημοσιεύσεων	H-index
Applied Energy	2	323
Applied Thermal Engineering	3	224
Energy	1	274
Energy and Buildings	1	246
Energy Conversion and Management	1	274
Energy Efficiency	1	65
Energy Procedia	1	130
Energy Reports	1	108
Geothermics	2	100

Journal of Building Engineering	2	114
Renewable and Sustainable Energy Reviews	1	464
Renewable Energy	4	270
Science and Technology for the Built Environment	1	74

Πίνακας 5.1 Πλήθος δημοσιεύσεων ανά επιστημονικό περιοδικό

Πριν την παρουσίαση της βιβλιογραφικής επισκόπησης, πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, εκτός από τα επιστημονικά άρθρα που οπτικοποιήθηκαν μέσω VOSViewer, για την ανάπτυξη του γνωστικού αντικειμένου στα πλαίσια της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα τέσσερα βιβλία, μεταξύ άλλων, για τις μεθόδους μεταφοράς θερμότητας (Κακάτσιος, 2008), για την ανάλυση του ψυκτικού κύκλου με συμπίεση ατμού (Κατσαπρακάκης & Μονιάκης, 2015), για τα πρακτικά θέματα λειτουργίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004) και για τον ορθό σχεδιασμό των γεωθερμικών συστημάτων και κυρίως των γεωεναλλακτών (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

5.2 Ανάπτυξη Αριθμητικών Μοντέλων Προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση μεθοδολογιών ανάπτυξης αριθμητικών μοντέλων στα πλαίσια διαφορετικών αντίστοιχων μελετών. Στα πλαίσια αυτής της διαδικασίας, θα γίνει για κάθε μελέτη μια σύντομη περιγραφή της μεθοδολογικής προσέγγισης καθώς και των βασικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης.

Στην πρώτη εργασία (Chen κ.ά., 2022) που εξετάστηκε, αναπτύχθηκαν τρισδιάστατα γεωμετρικά μοντέλα διπλού U-σωλήνα και ενισχυμένου ομοαξονικού (coaxial) γεωεναλλάκτη, λαμβάνοντας υπόψη τη διήθηση υπόγειων υδάτων στο περιβάλλοντα βράχο και έδαφος και τις διαφορετικές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας κάθε γεωλογικού στρώματος. Αυτά τα μοντέλα επικυρώθηκαν σε σχέση με δεδομένα πεδίου καθώς και με πραγματικά δεδομένα λειτουργίας του συστήματος και προσομοιώθηκε η απόδοση

μεταφοράς θερμότητας και των 2 γεωεναλλακτών υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Έγινε η παραδοχή ότι οι διατομές και στις 2 περιπτώσεις είναι ίσες προκειμένου να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί. Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής βασικές εξισώσεις:

Για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος του εναλλάκτη:

$$Q_1 = G \cdot C_p \cdot |t - t_0| \quad (5.1)$$

όπου t η θερμοκρασία εξόδου και t_0 η θερμοκρασία εισόδου.

Ο νόμος του Darcy που περιγράφει τη ροή του υγρού μέσα από πορώδες μέσο, στην προκειμένη περίπτωση του υπόγειου νερού:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla(\rho v) = Q_m, v = -\frac{k}{\mu} \nabla \quad (5.2)$$

όπου ε_p το πορώδες κλάσμα, ρ η πυκνότητα του ρευστού, v η ταχύτητα των υπόγειων νερών, Q_m η πηγή μάζας, k η διαπερατότητα του πορώδους μέσου, μ το ιξώδες του ρευστού

Η θερμοκρασιακή μεταφορά σε πορώδες μέσο:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (5.3)$$

$$q = -k_{eff} \nabla T \quad (5.4)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού μέσα στον σωλήνα, C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα, q η θερμική ροή, u η ταχύτητα των υπογείων νερών και k_{eff} η θερμική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου.

Η ρευστομηχανική ροή μέσα στον σωλήνα:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (5.5)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \{-\rho I + \mu[\nabla u + (\nabla u)^T]\} \quad (5.6)$$

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (5.7)$$

όπου Re αριθμός Reynolds, l η διάμετρος του σωλήνα, μ το ιξώδες του ρευστού, u η ταχύτητα εντός του σωλήνα.

Στην επόμενη μελέτη (Cui κ.ά., 2008) αναπτύχθηκε ένα αξονομετρικό αριθμητικό μοντέλο για έναν γεωεναλλάκτη τύπου U-σωλήνα και προσομοιώθηκε η εξαρτώμενη με το χρόνο αγωγή θερμότητας μέσω του τοιχώματος του σωλήνα, του υλικού πλήρωσης (grout) και του εδάφους. Λόγω της αξονοσυμμετρικής διάταξης των σωλήνων, μοντελοποιήθηκε μόνο το μισό εγκάρσιο τμήμα της γεώτρησης και εφαρμόστηκε στην ευθεία της συμμετρίας η αδιαβατική οριακή συνθήκη. Το πεδίο των υπολογισμών διαιρέθηκε σε 3 ζώνες, πρώτον στον τοίχο του σωλήνα, δεύτερον στο υλικό πλήρωσης που γεμίζει την οπή της γεώτρησης και τρίτον στο περιβάλλον έδαφος. Στο εξωτερικό όριο του πεδίου τέθηκε η αδιαβατική συνθήκη, ενώ στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν ορίστηκε θερμοκρασία αλλά θερμική ροή. Χρησιμοποιήθηκαν η εξής βασική εξίσωση για την ανάπτυξη του μοντέλου:

Διάχυση θερμότητας σε κάθε υλικό σε κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta^2} \quad (5.8)$$

Όπου r είναι η ακτινική απόσταση από τον άξονα της γεώτρησης και θ η γωνία γύρω από τον άξονα, ενώ $i = p, g, s$ για σωλήνα, grout και έδαφος αντίστοιχα.

Η επόμενη μελέτη (Viviescas & Bernier, 2024)) παρουσιάζει ένα αριθμητικό, σταθερής κατάστασης μοντέλο υδρόψυκτης αντλίας θερμότητας με inverter συμπιεστή, στο οποίο περιγράφονται τα επιμέρους υποσυστήματα, δηλαδή οι πλακοειδείς εναλλάκτες (εξατμιστής και συμπυκνωτής), η εκτονωτική βαλβίδα και ο συμπιεστής. Το μοντέλο απεικονίζει πλήρως τον κύκλο του ψυκτικού μέσου και τον τρόπο με τον οποίο ο συμπιεστής inverter συνεργάζεται με τον γεωεναλλάκτη και το κύκλωμα θέρμανσης, προβλέποντας θερμοδυναμικές παραμέτρους σε κάθε σημείο λειτουργίας. Με βάση αυτές

τις προβλέψεις, γίνεται εφικτός ο βέλτιστος σχεδιασμός γεωθερμικών συστημάτων υψηλής απόδοσης.

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι:

Η πολυωνυμική εξίσωση για τον συμπιεστή

$$\begin{aligned} X = & C_0 + C_1 T_S + C_2 T_D + C_3 T_S^2 + C_4 T_D^2 + C_5 T_S T_D S^2 + C_6 T_S^2 T_D S^2 + C_7 T_S T_D^2 S^2 + \\ & C_8 T_S T_D S + C_9 T_S^2 T_D S + C_{10} T_S T_D^2 S + C_{11} T_S T_D + C_{12} T_S^2 T_D + C_{13} T_S T_D^2 + C_{14} T_S^3 + \\ & C_{15} T_D^3 + C_{16} S + C_{17} T_S S + C_{18} T_D S + C_{19} T_S^2 S + C_{20} T_D^2 S + C_{21} T_S^3 S + C_{22} T_D^3 S + \\ & C_{23} S^2 + C_{24} T_S S^2 + C_{25} T_D S^2 + C_{26} T_S^2 S^2 + C_{27} T_D^2 S^2 + C_{28} T_S^3 S^2 + C_{29} T_D^3 S^2 \quad (5.9) \end{aligned}$$

Όπου X είναι η είτε η παροχή μάζας $\dot{m}$ του ψυκτικού μέσου είτε η ηλεκτρική ισχύς P του συμπιεστή, T_S η θερμοκρασία σημείου δρόσου στην αναρρόφηση, T_D η θερμοκρασία σημείου δρόσου στην έξοδο και S η συχνότητα λειτουργίας. Οι συντελεστές C_0 έως C_{29} λαμβάνονται από τα στοιχεία του εκάστοτε συμπιεστή για τον υπολογισμό της παροχής μάζας ή της ισχύος του συμπιεστή αντίστοιχα.

Η παροχή του ψυκτικού σε πραγματικές συνθήκες δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{m}_{corrected} = \left\{ 1 + F_V \left[\left(\frac{v_{rated}}{v_{corrected}} \right) - 1 \right] \right\} \cdot \dot{m}_{rated} \quad (5.10)$$

όπου F_V ο διορθωτικός συντελεστής ογκομετρικής απόδοσης, $\dot{m}_{rated}$ η παροχή του ψυκτικού υγρού σε ονομαστικές συνθήκες, ενώ v_{rated} και $v_{corrected}$ οι ειδικοί όγκοι στις αντίστοιχες συνθήκες

Το θερμικό φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{load} = \dot{m}_{WL} \cdot C_{PWL} \cdot (T_{WLout,d} - T_{WLin}) \quad (5.11)$$

Όπου $\dot{m}_{WL}$ είναι η παροχή νερού στο κύκλωμα θέρμανσης, C_{PWL} η ειδική θερμότητα του νερού, $T_{WLout,d}$ η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου και T_{WLin} η θερμοκρασία επιστροφής.

Επομένως το μοντέλο αυτό μοντελοποιεί ολόκληρο τον ψυκτικό κύκλο, υπολογίζει για κάθε συχνότητα λειτουργίας S την θερμική ισχύ Q_{load} και την ηλεκτρική ισχύ P και βάσει της εξίσωσης $COP = \frac{Q_{load}}{P}$, μπορεί να υπολογισθούν εκείνες οι συνθήκες λειτουργίας όπου μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα του συστήματος.

Στα πλαίσια άλλης μελέτης (Lee, 2010) αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για μια γεωθερμική αντλία θερμότητας (GSHP) εξοπλισμένη με συμπιεστή inverter και κάθετο γεωεναλλάκτη, τύπου U-σωλήνα, εγκατεστημένο σε γεώτρηση στο υπέδαφος, ως συνδυασμός δύο υποσυστημάτων: Ενός τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου για τη διάχυση θερμότητας στο έδαφος γύρω από τις γεωτρήσεις, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια άλλης μελέτης (Lee & Lam, 2008), και ενός παραμετρικού μοντέλου για τη λειτουργία του συμπιεστή με έλεγχο του μετατροπέα συχνότητας. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ του υπεδάφους και του συστήματος ψύξης/θέρμανσης.

Οι βασικές εξισώσεις στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη του τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου θερμοκρασιακής κατανομής γύρω από τις γεωτρήσεις είναι (Lee & Lam, 2008):

Η διαφορική εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος:

$$\frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t} = a_g \left(\frac{T_{i,j+1,m}^{n+1} - 2T_{i,j,m}^{n+1} + T_{i,j-1,m}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j,m+1}^{n+1} - 2T_{i,j,m}^{n+1} + T_{i,j,m-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{i+1,j,m}^{n+1} - 2T_{i,j,m}^{n+1} + T_{i-1,j,m}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \right) \quad (5.12)$$

όπου υπολογίζεται η θερμοκρασία T του εδάφους σε τρισδιάστατο πλέγμα σε χρονικό βήμα Δt

Η εξίσωση για την θερμική ροή από το ρευστό στο έδαφος μέσα στην οπή:

$$qb_i = \sum_{u=1}^N (-1)^{m1} M c_f \frac{Tf_{i+1,u} - Tf_{i,u}}{dz_i} \quad (5.13)$$

όπου η qb_i η ισχύς θερμότητας που αποδίδει το ρευστό στο i -οστό τμήμα της γεώτρησης ως άθροισμα στα N πόδια του U -σωλήνα γεωεναλλάκτη, $m1 = 1$ για ροή προς τα κάτω και 2 για ροή προς τα πάνω, M η παροχή μάζας του ρευστου, c_f η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού και $Tf_{i+1,u}$ και $Tf_{i,u}$ οι θερμοκρασίες του ρευστού στην αρχή και το τέλος του τμήματος μήκους dz_i .

Οι βασικές εξισώσεις στις οποίες βασίστηκε το παραμετρικό μοντέλο της λειτουργίας του συμπιεστή είναι:

Η εξίσωση για την ροή μάζας του ψυκτικού

$$m_r = V_c \omega \rho_{r,suc} \left(1 + C_v \left(\frac{P_{r,cond}}{P_{r,evap}} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (5.14)$$

Η εξίσωση για την μεταβολή της ενθαλπίας στον συμπιεστή

$$\Delta h_{comp} = h_{r,dis} - h_{r,suc} = \frac{n}{n-1} \frac{P_{r,evap}}{\rho_{r,suc}} \left(\left(\frac{P_{r,cond}}{P_{r,evap}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (5.15)$$

Η εξίσωση για την ισχύ εισόδου στον συμπιεστή

$$W_{in} = \frac{m_r \Delta h_{comp}}{\eta_{comp}} \quad (5.16)$$

Η εξίσωση για την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας μέσω της μεθόδου NTU:

Όταν το ψυκτικό μέσο βρίσκεται εντός της κορεσμένης περιοχής:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}, NTU = \frac{x'UA}{C_f} \quad (5.17)$$

όπου x' είναι το κλάσμα του εναλλάκτη που βρίσκεται σε κορεσμό.

Όταν το ψυκτικό είναι εκτός κορεσμένης περιοχής

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-C_r/C_f)}}{1 - (C_r/C_f)e^{-NTU(1-C_r/C_f)}}, NTU = \frac{x'UA}{C_f} \quad (5.18)$$

Για τον αεροψύκτη η κατάσταση είναι πιο σύνθετη καθώς μπορεί να συμβεί συμπύκνωση. Γι' αυτό ακολουθείται προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών: ο αεροψύκτης διαιρείται σε πολλά τμήματα (n_{ac}) και για κάθε τμήμα η μεταφερόμενη θερμότητα υπολογίζεται από το ισοζύγιο

$$\Delta H = \frac{UA(T_a - T_r)}{n_{ac}} = -m_a \Delta h_a = m_r \Delta h_r \quad (5.19)$$

Η συνολική απόδοση του αεροψύκτη προκύπτει στη συνέχεια λύνοντας τα τμήματα διαδοχικά, το ένα μετά το άλλο.

5.3 Παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας που επηρεάζουν την απόδοση των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι κυριότεροι παράμετροι που, σε συνδυασμό, επηρεάζουν τη συνολική ενεργειακή και οικονομική αποδοτικότητα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και στις οποίες εστιάζονται πληθώρα μελετών. Η θερμική αγωγιμότητα k του εδάφους είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος, η οποία ανάλογα με την γεωλογία μπορεί να πάρει ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών, ενδεικτικά από 1,5 W/mK σε ιζηματογενή πετρώματα και μπορεί να φτάσει τα 4 W/mK. Αυτές οι μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας μεταφράζονται ακολούθως σε μεγάλο εύρος των αντίστοιχων τιμών της

θερμικής αντίστασης R_b της γεώτρησης, δηλαδή 0,06-0,18 K/(W/m) (Florides & Kalogirou, 2007). Προκειμένου να είναι δυνατή η έκλυση ή η απορρόφηση θερμότητας στο έδαφος, αξιοποιώντας αυτές τις ιδιότητες, ανοίγονται γεωτρήσεις σε βάθος περίπου 20-200 mm και διάμετρο περίπου 75 – 200 mm. Ενδεικτικά οι γεωεναλλάκτες τύπου U-σωλήνα που εγκαθίστανται έχουν διάμετρο 19–38 mm (Florides & Kalogirou, 2007; Yang κ.ά., 2010). Η αντικατάσταση σωλήνων διαμέτρου 32 χιλιοστών με 40 χιλιοστών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του COP στην ψύξη κατά 0,2 έως 0,5 μονάδες και την αύξηση του COP στη θέρμανση κατά 0,1 μονάδες, ενώ μειώνεται ο απαιτούμενος αριθμός γεωτρήσεων (Pouloupatis κ.ά., 2017)

Η διάταξη των γεωεναλλακτών μπορεί να περιλαμβάνει γεωτρήσεις οργανωμένες σε συστοιχίες από μίας έως εκατοντάδων οπών ούτως ώστε να επιμερίζεται η θερμική ροή (Yang κ.ά., 2010). Οι αναλύσεις έχουν δείξει ότι οι γεωτρήσεις με έναν μόνο U-σωλήνα παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη αντίσταση γεώτρησης από τις γεωτρήσεις με διπλό U-σωλήνα. Οι διπλοί U-σωλήνες σε παράλληλη διάταξη παρέχουν καλύτερη θερμική απόδοση από εκείνες σε σειρά. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι οι γεωτρήσεις με διπλό U-σωλήνα πλεονεκτούν σε σχέση εκείνες του μονού U-σωλήνα, με μείωση της αντίστασης γεώτρησης κατά 30-90%. Οι υπολογισμοί σε τυπικές γεωτρήσεις δείχνουν ότι η απόσταση μεταξύ των σκελών του U-σωλήνα (shank spacing) και η θερμική αγωγιμότητα του υλικού πλήρωσης είναι οι κυρίαρχοι παράγοντες σε όλες τις διαμορφώσεις που λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης (Florides & Kalogirou, 2007). Επίσης η αντικατάσταση του υλικού πλήρωσης από μπετονίτη σε άμμο χαλαζία και η χρήση διαχωριστικών για να διατηρούνται οι πλαστικοί σωλήνες σε επαφή με το τοίχωμα της γεώτρησης, μπορούν να μειώσουν την θερμική αντίσταση της γεώτρησης R_b κατά περίπου 30% και να ανεβάσουν τη θερμοκρασία εξάτμισης της αντλίας θερμότητας έως και +2 K (Florides & Kalogirou, 2007). Επομένως συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός των κατάλληλων ιδιοτήτων του εδάφους και της κατάλληλης γεωμετρίας και διάταξης των γεωτρήσεων παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση των γεωεναλλακτών, στην προκειμένη περίπτωση των κατακόρυφων εναλλακτών θερμότητας.

Όμως εκτός από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και των γεωεναλλακτών, ουσιαστικό ρόλο στην απόδοση του γεωεναλλάκτη και συνεπώς του συνολικού γεωθερμικού συστήματος παίζουν οι υδραυλικές παράμετροι του ρευστού που ρέει σε αυτόν. Όταν η ροή του ρευστού

είναι πολύ αργή δηλαδή για μικρή παροχή $\dot{m}$, όπου η ροή γίνεται στρωτή, αυξάνεται η ολική θερμική αντίσταση τις γεώτρησης με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδιδόμενη ισχύς. Αντίθετα, σε υψηλές παροχές το ρευστό παραμένει τυρβώδες και αποφεύγονται επιπλέον θερμικές αντιστάσεις συναγωγής. Επίσης η παράλληλη διάταξη διπλού U-σωλήνα παρουσιάζει χαμηλότερη ολική θερμική αντίσταση R_b σε σχέση με τη μονή διάταξη U-σωλήνα, γεγονός που οφείλεται στις μικρότερες υδραυλικές απώλειες και στην αυξημένη συναγωγή (Conti κ.ά., 2016).

Όπως διαπιστώθηκε από μελέτη σχετικά με την εποχιακή ενεργειακή απόδοση και τις εποχιακές διακυμάνσεις του φορτίου, η ενεργειακή κάλυψη (energy coverage), δηλαδή το ποσοστό του υψηλότερου στιγμιαίου θερμικού φορτίου που μπορεί να καλύψει η αντλία θερμότητας, αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό από την κάλυψη αιχμής (effect coverage), δηλαδή το ποσοστό του συνολικού ετήσιου θερμικού φορτίου που καλύπτεται από την αντλία θερμότητας. Για παράδειγμα για κάλυψη αιχμής 60% η ενεργειακή κάλυψη είναι 93%. Επίσης το μήκος της γεωθερμικής γεώτρησης κανονικοποιημένο ως προς το μήκος που απαιτείται για 100% της κάλυψης αιχμής (effect coverage), αυξάνεται γραμμικά μέχρι το 60% του effect coverage, φτάνοντας στο 75% του μέγιστου μήκους, και μετά αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό (Viviescas & Bernier, 2024).

Όσον αφορά τον έλεγχο λειτουργίας του συμπιεστή, εξετάστηκαν 3 διαφορετικά σχήματα ελέγχου, συγκεκριμένα πρώτον χωρίς έλεγχο ταχύτητας (on/off), δεύτερον με inverter μόνο στην ψύξη και τρίτον με inverter στην ψύξη και στην θέρμανση. Το τρίτο σχήμα έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις υπό μελέτη κλιματικές ζώνες (Hong Kong, Kunming και Beijing). Συγκεκριμένα το τρίτο σχήμα σε σχέση με το πρώτο οδήγησε στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 27%, 28% και 31% αντίστοιχα, αν και μια μικρή αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας της αντλίας κυκλοφορίας του υγρού του γεωεναλλάκτη ήταν αναπόφευκτη. Αντίστοιχα το τρίτο σχήμα σε σχέση με το πρώτο είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη της μείωσης του μήκους της γεώτρησης κατά 4,2%, 9,7% και 7,9% αντίστοιχα, διατηρώντας τον ίδιο επιτρεπτό μέγιστο ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Η εξοικονόμηση στο κόστος διάτρησης της γεώτρησης σχεδόν αντιστάθμισε το κόστος των πρόσθετων μετατροπέων συχνότητας (inverters), ενώ το κόστος λειτουργίας μειώθηκε λόγω της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος. Η απόσβεση ήταν άμεση για

χρήση στο Hong Kong, ενώ οι περίοδοι απόσβεσης δεν ξεπέρασαν τα 0,4 έτη για χρήση στο Kunming και το Beijing (Lee, 2010).

5.4 Τεχνο-οικονομική Ανάλυση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση ολοκληρωμένων μελετών που λαμβάνουν υπόψη τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους με σκοπό την ανάπτυξη πολυπαραμετρικών μοντέλων που, σε συνδυασμό με μεθόδους βελτιστοποίησης, να συμβάλουν στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για εφαρμογές στον οικιακό και τριτογενή τομέα.

Σε αριθμητικό μοντέλο δυναμικής προσομοίωσης για γεωθερμικό σύστημα σε 15όροφο κτήριο κατοικιών στη Νότια Κορέα, ελήφθησαν υπ' όψιν όχι μόνο οικονομικοί παράμετροι αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Καταρχάς εκτιμάται το αρχικό κόστος της επένδυσης όπως για παράδειγμα η αντλία θερμότητας και το κόστος της διατήρησης, καθώς και το ετήσιο λειτουργικό κόστος βάσει των οικιακών και κοινόχρηστων χρεώσεων. Ωστόσο, υπολογίζονται επίσης οι ετήσιες εκπομπές CO₂ από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και οι τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου TOE. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είχε ως αποτέλεσμα την μείωση περίπου κατά 49% των εκπομπών CO₂ και 44,5% των TOE σε σχέση με την χρήση συμβατικών συστημάτων. (Kwon κ.ά., 2023)

Σε μελέτη προσομοίωσης γεωθερμικής αντλίας θερμότητας καθώς και αερόψυκτης αντλίας θερμότητας σε 6 κλιματικές ζώνες στο Μαρόκο, γίνεται σύγκριση μεταξύ των 2 συστημάτων, χωρίς ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου. Διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα που αφορούν μία από τις υπό εξέταση περιοχές (Ouarzazate), ότι ενώ το αρχικό κεφάλαιο για μία γεωθερμική αντλία θερμότητας είναι σχεδόν διπλάσιο, το συνολικό κόστος του συστήματος σε βάθος 20 ετών μειώνεται κατά περίπου 21%. Στην ίδια περιοχή η απλή περίοδος απόσβεσης (payback period) είναι μόλις στα 9,38 έτη και οι ετήσιες εξοικονομήσεις κόστους ηλεκτρικής ενέργειας φθάνουν στο 32%. Αυτά τα συμπεράσματα έχουν ιδιαίτερη βαρύτητα καθώς, ενώ η διάρκεια των αερόψυκτων αντλιών θερμότητας είναι περίπου 10-15 έτη, η διάρκεια ζωής ενός γεωθερμικού συστήματος μπορεί να ανέρθει στα 20-25 έτη (Ougazzou κ.ά., 2024).

Σε παρόμοια, ως προς τον σκοπό της, μελέτη αξιολογείται η τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε σχέση με συμβατική αερόψυκτη αντλία για εγκατάσταση σε ένα τυπικό κτήριο στη Σαουδική Αραβία. Συγκεκριμένα συγκρίνονται η αρχική επένδυση και οι ετήσιες λειτουργικές δαπάνες μεταξύ των 2 εξεταζόμενων συστημάτων και διαπιστώνεται και σε αυτήν την περίπτωση ότι παρά το διπλάσιο αρχικό κόστος της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, η διαφορά στο κόστος ενέργειας οδηγεί σε σημαντικό συνολικό οικονομικό όφελος στην διάρκεια ζωής της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, η οποία υπολογίζεται στα 22 έτη δηλαδή διπλάσια από αυτήν της αερόψυκτης αντλίας θερμότητας. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης η απλή περίοδος απόσβεσης είναι αρκετά υψηλή, συγκεκριμένα στα 15,7 έτη. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι και σε αυτό το μοντέλο συνεκτιμώνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εγκατάστασης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε σχέση με την αερόψυκτη αντλία, καθώς διαπιστώθηκε ετήσια μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 67,900 Kg, δηλαδή περίπου 40% (Alshehri κ.ά., 2019).

Τέλος, σε μελέτη στα πλαίσια της οποίας πραγματοποιείται τεχνο-οικονομική αξιολόγηση ενός γεωθερμικού συστήματος σε τυποποιημένο μοντέλο μονοκατοικία στο Μέμφις των ΗΠΑ, το αρχικό κόστος εγκατάστασης ήταν μειωμένο εξ αρχής λόγω του φορολογικού κινήτρου του 30% της επένδυσης και της επιδότησης των 250\$ ανά μονάδα, διαμορφώνοντάς το από 16.000\$ σε 10.950\$. Η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος σε EnergyPlus εξήγαγε ως αποτέλεσμα την ετήσια μείωση κατανάλωσης κατά 6780 kWh όπου με τιμολόγιο 0,1070\$/kWh, αποδίδεται ετήσια εξοικονόμηση 725\$. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα η απλή περίοδος απόσβεσης (SPP) ανέρχεται στα 15,1 έτη, ενώ η έντοκη περίοδος αποπληρωμής (DDP) φτάνει τα 15,8 έτη για επιτόκιο 3% και τα 25,6 έτη για επιτόκιο 7%. Ωστόσο, από έρευνα που πραγματοποιήθηκε για άλλο σύστημα εκμετάλλευσης ΑΠΕ, μία αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής είναι τα 7,2 έτη. Για να επιτευχθεί αυτή η περίοδος αποπληρωμής, απαιτείται συνολικό πακέτο κινήτρων 7.400\$, δηλαδή $(7.400\$/16.000\$)=46,25\%$ του κόστους της επένδυσης. Σε αυτήν την περίπτωση, σε 15 χρόνια ο ιδιοκτήτης της κατοικίας θα έχει ανακτήσει το αρχικό κεφάλαιο συν 8.730\$, γεγονός που επιβεβαιώνει την μακροπρόθεσμη οικονομική βιωσιμότητα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας παρά το αρχικό συγκριτικά υψηλό αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται για την εγκατάστασή τους (Neves κ.ά., 2020).

6. Διατύπωση ερευνητικών ερωτημάτων και Μεθοδολογική Προσέγγιση

Στο κεφάλαιο αυτό καθορίζονται και διατυπώνονται τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας και περιγράφεται ακολούθως το πλαίσιο της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί για την απάντησή τους, συνδέοντας τον ερευνητικό στόχο με την υλοποίηση της έρευνας.

6.1 Διατύπωση Ερευνητικών Ερωτημάτων

Βάσει του σκοπού της εργασίας, όπως αυτός διατυπώθηκε στην Εισαγωγή της παρούσας εργασίας, καθώς και του θεωρητικού υπόβαθρου, που αναπτύχθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, διαμορφώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα. Η διερεύνησή τους θα καθοδηγήσει την ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου όσο και την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

1^ο Ερευνητικό Ερώτημα

Πως μπορεί να αναπτυχθεί ένα αξιόπιστο αριθμητικό μοντέλο, ικανό για την προσομοίωση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, ως προς την εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP και του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EER, σε συνθήκες μερικού μη σταθερού φορτίου;

2ο Ερευνητικό Ερώτημα

Πώς μεταβάλλονται ο συντελεστής συμπεριφοράς COP και ο δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας EER των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, τόσο στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας όσο και εκτός αυτού, και για διάφορες διαμορφώσεις γεωθερμικών εναλλακτών θερμότητας;

3ο Ερευνητικό Ερώτημα

Πώς μπορεί να εφαρμοστεί το αριθμητικό μοντέλο που θα αναπτυχθεί για την τεχνο-οικονομική βελτιστοποίηση της απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, μέσω της παραμετρικής διερεύνησης βασικών τεχνικών μεταβλητών (όπως η θερμοκρασία εισόδου ή το βάθος του γεωθερμικού εναλλάκτη) και οικονομικών μεταβλητών (όπως το κόστος εγκατάστασης και το κόστος λειτουργίας), στο πλαίσιο οικιακών και τριτογενών εφαρμογών.

6.2 Επιλογή και παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης

Προκειμένου να απαντηθούν τα 3 βασικά ερευνητικά ερωτήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω πρέπει να υπάρχει κατάλληλος και στοχευμένος, σε αυτόν τον σκοπό, σχεδιασμός των βημάτων της μεθοδολογικής προσέγγισης που θα επιλεγεί.

Επομένως η μεθοδολογία της ερευνητικής διαδικασίας θα διαμορφωθεί με γνώμονα την διερεύνηση της ακρίβειας του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης, της ανάλυση της συμπεριφοράς λειτουργίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας καθώς και την τεχνο-οικονομική βελτιστοποίησή τους σε ρεαλιστικές συνθήκες.

Αρχικά κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί περεταίρω πιο μεθοδική και πιο εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση της διαθέσιμης επιστημονικής βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας υπόψη τα κενά που εντοπίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Επόμενο βήμα θα είναι η ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης με χρήση Excel σε επίπεδο βασικών υποσυστημάτων της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, με βάση τις θεμελιώδεις εξισώσεις ενεργειακού ισολογισμού, τις σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή απόδοσης (COP) και του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας (EER), καθώς και τις σχέσεις που αφορούν τη θερμική ισχύ του συστήματος (Q) και τη συνολική θερμική αντίσταση του γεωθερμικού εναλλάκτη (Βραχόπουλος κ.ά., 2015).

Στη συνέχεια, καθορίζονται τα σενάρια λειτουργίας και οι απαραίτητες παραδοχές της ανάλυσης. Τα σενάρια επιλέγονται ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά διαφορετικών τεχνικών λύσεων και συνθηκών λειτουργίας, περιλαμβάνοντας τόσο την υφιστάμενη κατάσταση όσο και εναλλακτικά συστήματα αντλιών θερμότητας. Για κάθε σενάριο

καθορίζονται οι βασικές θερμικές, ψυκτικές και γεωμετρικές παράμετροι, καθώς και οι τεχνικές παραδοχές που απαιτούνται για την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου.

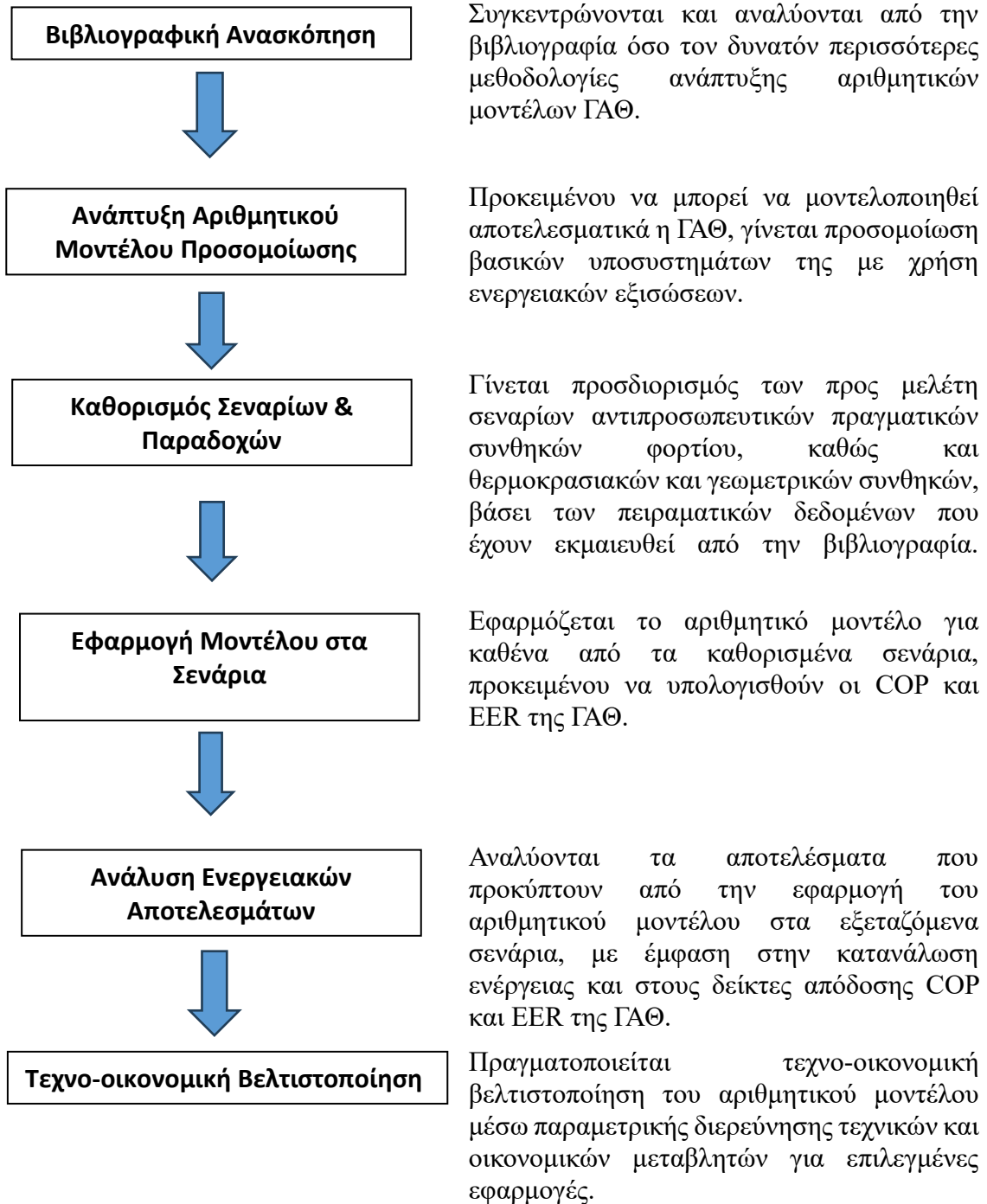
Ακολούθως, οι μεταβλητές κάθε σεναρίου εισάγονται στο αριθμητικό μοντέλο, με στόχο τον υπολογισμό των ενεργειακών αποτελεσμάτων. Μέσω της εφαρμογής του μοντέλου υπολογίζονται οι συντελεστές COP και EER, η απαιτούμενη ηλεκτρική κατανάλωση και η ενεργειακή συμπεριφορά των εξεταζόμενων λύσεων.

Μετά την ολοκλήρωση των ενεργειακών υπολογισμών, πραγματοποιείται ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα εξεταζόμενα σενάρια. Η σύγκριση επικεντρώνεται στη μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, στη διαφοροποίηση της απόδοσης των συστημάτων και στην επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών κάθε λύσης στη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά.

Τέλος, πραγματοποιείται τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων και παραμετρική διερεύνηση επιλεγμένων τεχνικών και οικονομικών μεταβλητών. Η αξιολόγηση αυτή επιτρέπει την αποτίμηση όχι μόνο της ενεργειακής απόδοσης των λύσεων, αλλά και της οικονομικής τους συμπεριφοράς κατά την περίοδο υπολογισμού.

6.3 Βασικά βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης (flow chart)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης, που περιεγράφηκε παραπάνω, μέσα από ένα διάγραμμα ροής.



6.4 Αξιολόγηση της μεθοδολογικής προσέγγισης με SWOT Analysis

Παρακάτω γίνεται αξιολόγηση της μεθοδολογικής προσέγγισης μέσω της ανάλυσης SWOT.

S (Strengths)	W (Weaknesses)
• Η αλληλουχία των βημάτων της μεθοδολογίας είναι σαφής και καθένα συνεισφέρει στην απάντηση ενός ή περισσότερων ερευνητικών ερωτημάτων, συνεισφέροντας στην συνοχή της ερευνητικής προσέγγισης. (Cui κ.ά., 2008; Kwon κ.ά., 2023) • Υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου που περιγράφεται στη μεθοδολογία σε διαφορετικά σενάρια εφαρμογών μέσω πολυπαραμετρικής προσομοίωσης που βασίζεται σε διερεύνηση τεχνικών, θερμικών αλλά και οικονομικών μεταβλητών. (Alshehri κ.ά., 2019; Ougazzou κ.ά., 2024) • Είναι δυνατή η ελεύθερη εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένου λογισμικού και με ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων. (Ougazzou κ.ά., 2024)	• Το Excel ως εργαλείο προσομοίωσης δεν έχει την δυνατότητα να υπολογίσει τιμές εισόδου μεταβαλλόμενες με τον χρόνο. (Alshehri κ.ά., 2019; Kwon κ.ά., 2023; Ougazzou κ.ά., 2024) • Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου ενδέχεται να είναι μειωμένη λόγω αναγκαστικών απλουστεύσεων και παραδοχών. (Alshehri κ.ά., 2019; Neves κ.ά., 2020)
O (Opportunities)	T (Threats)
• Να χρησιμοποιηθεί το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης ως εργαλείο μελέτης και πρακτικό εργαλείο τεκμηριωμένης διερεύνησης των παραγόντων που επηρεάζουν τους συντελεστές απόδοσης μίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. (Ougazzou κ.ά., 2024)	• Τα κόστη τα οποία μπαίνουν ως τιμές εισόδου μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από τα πραγματικά κόστη λόγω υψηλής μεταβλητότητας, πχ κόστος εγκατάστασης, με αποτέλεσμα την ελλιπή αξιοπιστία της τεχνο-οικονομικής ανάλυσης. (Ougazzou κ.ά., 2024)

• Να χρησιμοποιηθεί το αριθμητικό μοντέλο στον αρχικό σχεδιασμό μίας αντλίας θερμότητας για την σύγκριση εναλλακτικών διαμορφώσεων και την επιλογή κατάλληλου σεναρίου παραμέτρων. (Alshehri κ.ά., 2019) • Διαρκής εμπλουτισμός βιβλιογραφικών πηγών και αξιοποίηση των εκμαιευμένων δεδομένων για την συνεχή τεκμηρίωση του αριθμητικού μοντέλου. (Kwon κ.ά., 2023) • Σε επόμενο μελλοντικό στάδιο να επεκταθεί το μοντέλο σε λογισμικό που να υποστηρίζει δυναμική προσομοίωση. (Alshehri κ.ά., 2019)	
---	--

6.5 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της SWOT Analysis

Σύνδεση δυνατών σημείων (Strengths) με ευκαιρίες (Opportunities)

Η συνοχή στην αλληλουχία των βημάτων της μεθοδολογίας την καθιστά εύκολη στην επανάληψή της, με αποτέλεσμα να μπορεί από κάποιον τρίτον να αναπτυχθεί και να χρησιμοποιηθεί το αριθμητικό μοντέλο που θα προκύψει ως πρακτικό εργαλείο εξέτασης των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Το γεγονός ότι το αριθμητικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς εξειδικευμένο λογισμικό δυναμικής προσομοίωσης το καθιστά πρακτικό εργαλείο προκαταρκτικής και συγκριτικής αξιολόγησης. Η αξία του εντοπίζεται κυρίως στη δυνατότητα γρήγορης διερεύνησης εναλλακτικών σεναρίων υπό κοινές παραδοχές και όχι στην αντικατάσταση μιας πλήρους μελέτης εφαρμογής ή λεπτομερούς δυναμικής προσομοίωσης.

Η δυνατότητα εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου σε πολυπαραμετρικά σενάρια μπορεί να αξιοποιηθεί για την χρήση του ως εργαλείο λήψης αποφάσεων για την επιλογή παραμέτρων κατά τον αρχικό σχεδιασμό μίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Σύνδεση δυνατών σημείων (Strengths) με απειλές (Threats)

Η ενιαία εφαρμογή των παραδοχών σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ενισχύει τη δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, ακόμη και σε συνθήκες αβεβαιότητας. Παρότι οι τιμές εισόδου, όπως το κόστος ενέργειας, το κόστος εγκατάστασης και το προεξοφλητικό επιτόκιο, μπορούν να διαφοροποιηθούν σημαντικά στην πράξη, η χρήση κοινής μεθοδολογίας επιτρέπει την αξιολόγηση της σχετικής συμπεριφοράς των σεναρίων.

Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας ως προς βασικές οικονομικές παραμέτρους συμβάλλει στον περιορισμό της αβεβαιότητας, καθώς δείχνει πώς μεταβάλλονται οι οικονομικοί δείκτες όταν αλλάζουν οι βασικές παραδοχές. Με τον τρόπο αυτό, η μεθοδολογία δεν περιορίζεται σε ένα μοναδικό αποτέλεσμα, αλλά επιτρέπει την εκτίμηση της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων λύσεων σε διαφορετικές συνθήκες.

Σύνδεση αδύναμων σημείων (Weaknesses) με ευκαιρίες (Opportunities)

Το Excel ως εργαλείο προσομοίωσης δεν υποστηρίζει τον υπολογισμό με δεδομένα μεταβαλλόμενα με τον χρόνο και αυτό μπορεί να λειτουργήσει ως βασικό κίνητρο για την επέκταση του μοντέλου σε πιο εξειδικευμένα λογισμικά.

Σύνδεση αδύναμων σημείων (Weaknesses) με απειλές (Threats)

Ο κίνδυνος να μην βρεθούν επαρκή δεδομένα από την διαθέσιμη βιβλιογραφία σε συνδυασμό με το γεγονός ότι αυτά τα δεδομένα διαθέτουν αγνώστου βαθμού αξιοπιστία, μπορεί να απειλήσει την αξιοπιστία του αριθμητικού μοντέλου.

Το γεγονός ότι το Excel αδυνατεί να διαχειριστεί χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές εισόδου ενισχύει την πιθανότητα οι τιμές που θα εισαχθούν για την προσομοίωση της λειτουργίας της ΓΑΘ να μην ταυτίζονται με τις πραγματικές συνθήκες.

Η μειωμένη ακρίβεια του αριθμητικού μοντέλου λόγω των απλουστεύσεων και των παραδοχών, που αναγκαστικά γίνονται, σε συνδυασμό με την πιθανότητα απόκλισης των οικονομικών τιμών εισόδου από τις πραγματικές ισχύουσες τιμές, αυξάνει τον κίνδυνο για την διεξαγωγή λανθασμένων ή αναξιόπιστων αποτελεσμάτων από την τεχνο-οικονομική ανάλυση του μοντέλου και συνεπώς οδηγεί σε σημαντικά περιορισμένο περιθώριο εφαρμογής του.

Μετατροπή αδύναμων σημείων (Weaknesses) σε δυνατά σημεία (Strengths)

«Το Excel ως εργαλείο προσομοίωσης δεν έχει την δυνατότητα να υπολογίσει τιμές εισόδου μεταβαλλόμενες με τον χρόνο» ⇒

Το μοντέλο που προκύπτει είναι ευρέως προσβάσιμο και αξιοποιήσιμο και προσφέρεται για την ανάλυση λειτουργίας της ΓΑΘ σε προκαταρκτικό επίπεδο θέτοντας την βάση να επεκταθεί μελλοντικά σε λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης.

«Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου ενδέχεται να είναι μειωμένη λόγω απλουστεύσεων και παραδοχών» ⇒

Το απλουστευμένο λόγω σαφών παραδοχών μοντέλο το καθιστά πιο πρακτικό και αποδοτικό στην εφαρμογή του και στη γρήγορη αξιολόγηση των σεναρίων λειτουργίας.

Μετατροπή απειλών (Threats) σε ευκαιρίες (Opportunities)

«Τα κόστη τα οποία μπαίνουν ως τιμές εισόδου μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από τα πραγματικά κόστη λόγω υψηλής μεταβλητότητας, πχ κόστος εγκατάστασης, με αποτέλεσμα την ελλιπή αξιοπιστία της τεχνο-οικονομικής ανάλυσης»⇒

Δημιουργείται το κίνητρο και η ευκαιρία να δημιουργηθεί ένας πλήρης πίνακας όλων των οικονομικών μεταβλητών, που θα επικαιροποιείται με καθορισμένη ελάχιστη συχνότητα ή εκτάκτως όταν υπάρχουν μεταβολές λόγω απρόβλεπτων οικονομικών ή κοινωνικών παραγόντων. Οι μεταβλητές θα δίνονται ως εύρος διακύμανσης, αλλά και προαιρετικά ως μέσες τιμές για την εισαγωγή στο αριθμητικό μοντέλο. Μετά την επιλογή του βέλτιστα τεχνο-οικονομικά σεναρίου θα υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας αυτής της τιμής στον εκάστοτε εξεταζόμενο οικονομικό δείκτη αξιολόγησης.

7. Ανάπτυξη Ενεργειακού Μοντέλου για την Προσομοίωση Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας

7.1 Σκοπός και γενική περιγραφή του ενεργειακού μοντέλου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το ενεργειακό μοντέλο που αναπτύχθηκε με σκοπό την προσομοίωση της λειτουργικής συμπεριφοράς γεωθερμικής αντλίας θερμότητας συνδεδεμένης με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη. Το μοντέλο δημιουργήθηκε σε Microsoft Excel και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θερμικής απόκρισης του εδάφους, της θερμοκρασίας του ρευστού στον γεωεναλλάκτη καθώς και της ενεργειακής απόδοσης της αντλίας θερμότητας σε συνθήκες θέρμανσης και ψύξης.

Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίζεται στη σύνδεση των τεχνικών χαρακτηριστικών του γεωεναλλάκτη με τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου. Τα φορτία αυτά προέκυψαν από προηγούμενη ενεργειακή ανάλυση μονοώροφης κατοικίας επιφάνειας 96,74 m², η οποία βρίσκεται στη Λάρισα, στην κλιματική ζώνη Γ, και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο ενεργειακό μοντέλο. Τα γεωμετρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, ο προσανατολισμός των όψεων και των ανοιγμάτων, καθώς και η μεθοδολογική βάση προσδιορισμού των θερμικών και ψυκτικών φορτίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β. Η μηνιαία κατανομή των φορτίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.5.

Αρχικά εισάγονται οι γεωμετρικές και θερμικές παράμετροι του γεωθερμικού πεδίου καθώς και οι βασικές παραδοχές λειτουργίας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους, η χρονική μεταβλητή της προσομοίωσης, η συνάρτηση θερμικής απόκρισης και η επίδραση της διάταξης των γεωτρήσεων. Με βάση τα παραπάνω, προσδιορίζεται η θερμική απόκριση του γεωεναλλάκτη και η αντίστοιχη θερμοκρασία του ρευστού σε αυτόν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας δεν θεωρείται σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Επομένως ο συντελεστής απόδοσης COP και ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης EER υπολογίζονται με βάση τις θερμοκρασίες που προκύπτουν από το ενεργειακό μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο

επιτυγχάνεται η σύνδεση μεταξύ της θερμικής συμπεριφοράς του γεωεναλλάκτη και της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος.

Το ενεργειακό μοντέλο λειτουργεί επομένως ως το βασικό υπολογιστικό εργαλείο της παρούσας εργασίας για την εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Τα αποτελέσματά του αξιοποιούνται στην συνέχεια στα επόμενα κεφάλαια τόσο για την ανάλυση της τεχνικής απόδοσης του συστήματος όσο και για την τεχνο-οικονομική αξιολόγησή του.

7.2 Δομή του υπολογιστικού φύλλου Energy Model

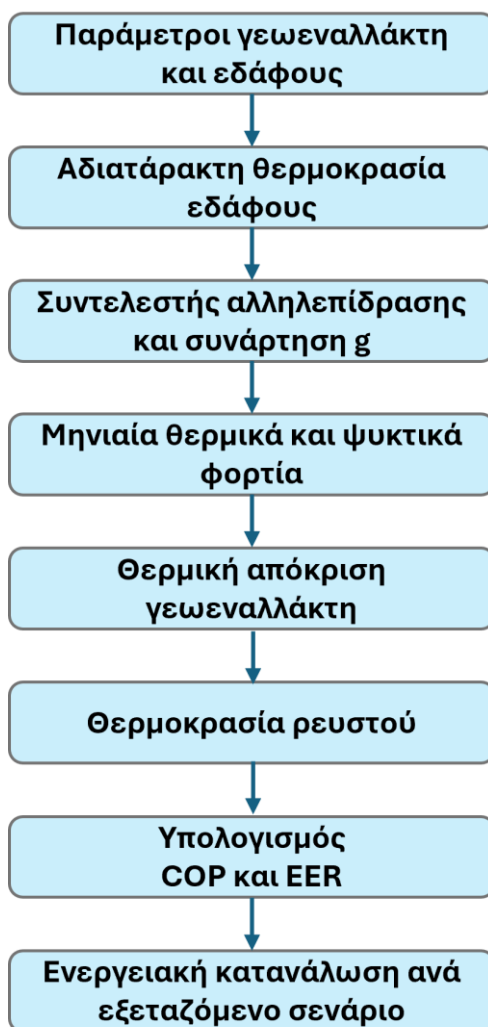
Το ενεργειακό μοντέλο οργανώθηκε σε διακριτές καρτέλες εργασίας, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο στάδιο της υπολογιστικής διαδικασίας. Η δομή αυτή επιλέχθηκε ώστε να είναι σαφής η πορεία των υπολογισμών από την εισαγωγή των αρχικών παραμέτρων έως την εκτίμηση των βαθμών απόδοσης και της ενεργειακής κατανάλωσης. Συνεπώς, με τον τρόπο αυτό, κάθε επιμέρους τμήμα του μοντέλου μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα ενώ επιτυγχάνεται η σύνδεση μεταξύ των διαδοχικών υπολογιστικών βημάτων.

Στην αρχική καρτέλα εισάγονται οι βασικές παράμετροι του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη και του εδάφους, όπως ο αριθμός και το βάθος των γεωτρήσεων, η απόσταση μεταξύ τους, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα κατά όγκο του εδάφους. Στη συνέχεια, σε ξεχωριστή καρτέλα υπολογίζεται η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους, η οποία χρησιμοποιείται ως θερμοκρασιακή βάση αναφοράς για τους επόμενους υπολογισμούς.

Ακολουθούν οι καρτέλες που σχετίζονται με τη θερμική συμπεριφορά του γεωεναλλάκτη. Σε αυτές υπολογίζεται ο συντελεστής αλληλεπίδρασης μεταξύ των γεωτρήσεων, η χρονική μεταβλητή της προσομοίωσης και η συνάρτηση g , η οποία περιγράφει τη χρονικά εξαρτώμενη θερμική απόκριση της διάταξης των γεωτρήσεων. Οι υπολογισμοί αυτοί αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας του γεωεναλλάκτη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

Στη συνέχεια, στην αντίστοιχη καρτέλα εισάγονται τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου, τα οποία εκμαιευθήκαν, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από προηγούμενη μελέτη. Τα φορτία αυτά μετατρέπονται σε μέση μηνιαία ισχύ και σε ειδικό θερμικό φορτίο ανά μέτρο γεωεναλλάκτη, ώστε να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της θερμικής απόκρισης. Στην αντίστοιχη καρτέλα υπολογίζονται η θερμοκρασία του γεωεναλλάκτη και η θερμοκρασία του ρευστού, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το τρέχον μηνιαίο φορτίο όσο και τη συμβολή των προηγούμενων μηνών λειτουργίας.

Τέλος, το μοντέλο περιλαμβάνει καρτέλες για τον υπολογισμό των βαθμών απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε θέρμανση και ψύξη. Οι τιμές COP και EER προσδιορίζονται με βάση πολυωνμικές σχέσεις, στις οποίες εισάγονται οι θερμοκρασίες λειτουργίας που έχουν προκύψει από το προηγούμενο βήμα. Οι τελικές τιμές αξιοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης και τη σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων.



Σχήμα 7.1 Δομή και υπολογιστική ροή του ενεργειακού μοντέλου

Όπως φαίνεται παραπάνω (Σχήμα 7.1), η υπολογιστική διαδικασία ακολουθεί διαδοχική ροή, ξεκινώντας από τις παραμέτρους του γεωεναλλάκτη και του εδάφους και καταλήγοντας στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης ανά εξεταζόμενο σενάριο.

7.3 Δεδομένα εισόδου και τεχνικές παραδοχές του ενεργειακού μοντέλου

7.3.1 Παράμετροι γεωεναλλάκτη και εδάφους

Η πρώτη καρτέλα του υπολογιστικού μοντέλου περιλαμβάνει τα βασικά δεδομένα εισόδου που αφορούν τη γεωμετρία του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους. Συγκεκριμένα, ορίζονται η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων, ο αριθμός των

γεωτρήσεων, το βάθος κάθε γεώτρησης και το συνολικό μήκος του γεωεναλλάκτη. Στην εξεταζόμενη περίπτωση οι γεωμετρικές παράμετροι του γεωεναλλάκτη δεν προκύπτουν από μελέτη εφαρμογής συγκεκριμένου έργου, αλλά υιοθετούνται ως τεχνικές παραδοχές εισόδου για τη διαμόρφωση ενός ενδεικτικού σεναρίου αναφοράς. Η επιλογή 25 κατακόρυφων γεωτρήσεων βάθους 20 m, με απόσταση 6 m μεταξύ τους, θεωρείται αντιπροσωπευτική για τις ανάγκες της παρούσας προσομοίωσης, καθώς οδηγεί σε συνολικό μήκος γεωεναλλάκτη 500 m και επιτρέπει την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος υπό ρεαλιστικές συνθήκες μοντελοποίησης.

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελεί σενάριο αναφοράς, το οποίο επιτρέπει τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος υπό ενιαίες παραδοχές. Σε πραγματική εφαρμογή, ο αριθμός, το βάθος και η χωροθέτηση των γεωτρήσεων θα πρέπει να προκύψουν από ειδική μελέτη εφαρμογής, διαθέσιμη επιφάνεια οικοπέδου, γεωλογικά δεδομένα και τυχόν περιορισμούς αδειοδότησης.

Επιπλέον, στο ίδιο φύλλο εισάγονται οι βασικές θερμικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η θερμική αγωγιμότητα και η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα. Στην παρούσα εφαρμογή, το έδαφος θεωρήθηκε αργιλώδες/αργιλολασπώδες και κορεσμένο με νερό, ώστε να επιλεγούν αντιπροσωπευτικές τιμές θερμικών ιδιοτήτων από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, υιοθετήθηκε θερμική αγωγιμότητα ίση με $\lambda = 1,7 \text{ W/(mK)}$, ενώ η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα θεωρήθηκε ίση με $\rho c = 2,40 \times 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ (Βραχόπουλος κ.ά., 2015). Οι παραδοχές αυτές είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της θερμικής απόκρισης του εδάφους κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Η θερμική διαχυτότητα του εδάφους δεν εισήχθη ανεξάρτητα στο μοντέλο, αλλά υπολογίστηκε από τη θερμική αγωγιμότητα και την ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, σύμφωνα με τη σχέση $\alpha = k_s/(\rho c)$. Με βάση τις παραπάνω τιμές, προκύπτει θερμική διαχυτότητα $\alpha = 7,08 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, η οποία αντιστοιχεί σε $\alpha = 6,12 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{day}$. (Βραχόπουλος κ.ά., 2015). Η μετατροπή σε ημερήσια βάση χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της αδιατάρακτης θερμοκρασίας εδάφους, καθώς η χρονική μεταβλητή της σχέσης εκφράζεται σε ημέρες.

Στο μοντέλο λαμβάνονται επίσης υπόψη η θερμική αντίσταση της γεώτρησης και ο συντελεστής αλληλεπίδρασης μεταξύ γεωτρήσεων, ώστε να αποτυπωθεί η επίδραση της διάταξης του γεωθερμικού πεδίου στη συνολική θερμική συμπεριφορά. Από τα δεδομένα

εισόδου προκύπτουν παράγωγα μεγέθη, όπως η θερμική διαχυτότητα του εδάφους και ο χαρακτηριστικός χρόνος, τα οποία χρησιμοποιούνται στα επόμενα στάδια της προσομοίωσης.

Οι βασικές παράμετροι εισόδου και τα παράγωγα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στο ενεργειακό μοντέλο παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 7.1.).

Κατηγορία	Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Γεωμετρία γεωεναλλάκτη	Απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων	s	m	6
Γεωμετρία γεωεναλλάκτη	Αριθμός γεωτρήσεων	N	-	25
Γεωμετρία γεωεναλλάκτη	Βάθος γεώτρησης	H	m	20
Γεωμετρία γεωεναλλάκτη	Συνολικό μήκος γεωεναλλάκτη	L	m	500
Θερμικές ιδιότητες εδάφους	Θερμική αγωγιμότητα	k_s	W/mK	1,7
Θερμικές ιδιότητες εδάφους	Ογκομετρική θερμοχωρητικότητα	ρc	J/m ³ K	$2,40 \cdot 10^6$
Παράμετροι γεώτρησης	Θερμική αντίσταση γεώτρησης	R_b	mK/W	0,1
Παράμετροι γεώτρησης	Συντελεστής αλληλεπίδρασης	C	-	2
Παράγωγα μεγέθη	Θερμική διαχυτότητα εδάφους	α	m ² /s	$7,8 \cdot 10^{-7}$
Παράγωγα μεγέθη	Χαρακτηριστικός χρόνος	t_s	s	$6,27 \cdot 10^7$

Πίνακας 7.1 Βασικές παράμετροι γεωεναλλάκτη και εδάφους

7.3.2 Προσδιορισμός αδιατάρακτης θερμοκρασίας εδάφους

Για τον προσδιορισμό της αδιατάρακτης θερμοκρασίας του εδάφους χρησιμοποιήθηκε η σχέση Kusuda–Achenbach, η οποία επιτρέπει την εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους ως συνάρτηση του βάθους και του χρόνου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση λαμβάνει υπόψη τη μέση ετήσια θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους, το πλάτος της ετήσιας θερμοκρασιακής μεταβολής, τη θερμική διαχυτότητα του εδάφους και τη χρονική μετατόπιση που σχετίζεται με την ημέρα εμφάνισης της ελάχιστης θερμοκρασίας.

Η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους υπολογίστηκε επομένως από τη σχέση Kusuda–Achenbach:

$$T(z, t) = T_s - \Delta T_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} - \theta\right) \quad (7.1)$$

όπου:

- $T(z, t)$ είναι η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z και χρόνο t ,
- T_s η μέση ετήσια θερμοκρασία αυτός επιφάνειας του εδάφους,
- ΔT_s το πλάτος αυτός ετήσιας θερμοκρασιακής μεταβολής,
- α η θερμική διαχυτότητα του εδάφους, τ η ετήσια περίοδος και
- θ η χρονική μετατόπιση που αντιστοιχεί στην ημέρα ελάχιστης θερμοκρασίας.

Στην παρούσα εφαρμογή, οι θερμοκρασιακές παράμετροι αυτός επιφάνειας του εδάφους προσδιορίστηκαν με βάση αυτός μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες 24ώρου αυτός περιοχής αυτός Λάρισας, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1 αυτός TOTEE 20701-3. Από αυτός μηνιαίες τιμές υπολογίστηκε η μέση ετήσια θερμοκρασία επιφάνειας του εδάφους ίση με $T_s = 15,85^\circ\text{C}$, καθώς και το πλάτος αυτός ετήσιας θερμοκρασιακής μεταβολής ίσο με $\Delta T_s = 11,05^\circ\text{C}$. Το πλάτος προέκυψε ως το ήμισυ αυτός διαφοράς μεταξύ αυτός μέγιστης και αυτός ελάχιστης μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας.

Για τον υπολογισμό αυτός αδιατάρακτης θερμοκρασίας του εδάφους εφαρμόστηκε η σχέση Kusuda–Achenbach για βάθος $z = 10\text{ m}$. Η τιμή $z=10\text{ m}$ χρησιμοποιήθηκε ως βάθος αναφοράς για την εκτίμηση αυτός αδιατάρακτης θερμοκρασίας του εδάφους. Η επιλογή

αυτή επιτρέπει την αποφυγή υπερεκτίμησης αυτός επίδρασης των επιφανειακών εποχικών μεταβολών, καθώς η θερμοκρασιακή διακύμανση μειώνεται σημαντικά με το βάθος. Συνεπώς, η θερμοκρασία που προκύπτει από τη σχέση Kusuda Achenbach σε βάθος 10 m θεωρείται κατάλληλη για την περιγραφή αυτός αρχικής, μη διαταραγμένης θερμικής κατάστασης του εδάφους.

Ως ημέρα ελάχιστης θερμοκρασίας θεωρήθηκε η 15η ημέρα του έτους, δηλαδή $\theta = 15$, καθώς κατά τον μήνα Ιανουάριο σημειώνεται η χαμηλότερη μέση μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου, ενώ η περίοδος αυτός ετήσιας μεταβολής λήφθηκε ίση με $\tau = 365$ ημέρες. Η θερμική διαχυτότητα του εδάφους λήφθηκε ίση με $\alpha = 7,08 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, ή ισοδύναμα $\alpha = 6,12 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{day}$, ώστε να είναι συμβατή με τη χρονική μονάδα αυτός περιόδου και του χρόνου υπολογισμού.

Από τον υπολογισμό προέκυψε ότι, σε βάθος 10 m, η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους παρουσιάζει πολύ περιορισμένη ετήσια διακύμανση, με τιμές που κυμαίνονται περίπου από 15,59 °C έως 16,11 °C. Επομένως, αν και η εποχική μεταβολή δεν εξαλείφεται πλήρως, σε αυτό το βάθος η θερμοκρασία του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σταθερή, με μέση τιμή πολύ περίπου 15,85 °C.

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Μέση ετήσια θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους	T_s	°C	15,85
Πλάτος ετήσιας μεταβολής θερμοκρασίας	ΔT_s	°C	11,05
Ημέρα ελάχιστης θερμοκρασίας	θ	ημέρα	15
Θερμική διαχυτότητα εδάφους	α	m^2/s	$7,08 \cdot 10^{-7}$
Θερμική διαχυτότητα εδάφους	α	m^2/day	$6,12 \cdot 10^{-2}$
Περίοδος ετήσιας μεταβολής	τ	days	365
Βάθος υπολογισμού	z	m	10

Πίνακας 7.2 Παράμετροι υπολογισμού αδιατάρακτης θερμοκρασίας εδάφους

7.4 Υπολογιστική διαδικασία του ενεργειακού μοντέλου

7.4.1 Υπολογισμός συντελεστή αλληλεπίδρασης μεταξύ γεωτρήσεων

Προκειμένου να είναι δυνατή η αποτύπωση αυτός θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των γεωτρήσεων υπολογίστηκε ο συντελεστής αλληλεπίδρασης Ψ . Ο συντελεστής αυτός είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί καθώς σε ένα πεδίο πολλαπλών γεωτρήσεων η θερμική συμπεριφορά κάθε γεώτρησης δεν είναι ανεξάρτητη αλλά αντιθέτως επηρεάζεται από την απόσταση και τη σχετική θέση των γειτονικών γεωτρήσεων.

$$\Psi = C \cdot \frac{1}{N} \sum_{j \neq i} \ln\left(1 + \frac{H}{d_{ij}}\right) \quad (7.2)$$

όπου:

- Ψ είναι ο συντελεστής θερμικής αλληλεπίδρασης του πεδίου των γεωτρήσεων,
- C είναι εμπειρικός ή διορθωτικός συντελεστής της σχέσης,
- N είναι ο συνολικός αριθμός των γεωτρήσεων,
- H είναι το βάθος της γεώτρησης ή του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη,
- d_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ της γεώτρησης (i) και της γεώτρησης (j),

Ο όρος $j \neq i$ δηλώνει ότι στον υπολογισμό δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση μιας γεώτρησης με τον εαυτό της, αλλά μόνο με τις υπόλοιπες γεωτρήσεις του πεδίου, ενώ το άθροισμα της εξίσωσης υπολογίζει τη συνολική επίδραση των γειτονικών γεωτρήσεων στη γεώτρηση αναφοράς.

Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε διάταξη 25 κατακόρυφων γεωτρήσεων σε κάναβο 5×5 , με γεώτρηση αναφοράς την κεντρική γεώτρηση της διάταξης. Για κάθε γειτονική γεώτρηση υπολογίστηκε η απόσταση από τη γεώτρηση αναφοράς και στη συνέχεια ο αντίστοιχος λογαριθμικός όρος που εκφράζει τη σχετική θερμική επίδραση της γεώτρησης αυτής. Ο συντελεστής Ψ προέκυψε από το άθροισμα των επιμέρους όρων, λαμβάνοντας υπόψη το βάθος της γεώτρησης, τις αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων και τον συντελεστή C , ο οποίος χρησιμοποιείται ως συντελεστής προσαρμογής της εκτιμώμενης θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των γεωτρήσεων. Ο συντελεστής αυτός αποτελεί παραδοχή του υπολογιστικού μοντέλου, προκειμένου η επίδραση της αλληλεπίδρασης να αποτυπώνεται σε ένα πιο ρεαλιστικό εύρος τιμών και λαμβάνεται $C = 2$.

Στην παραπάνω διάταξη το άθροισμα των λογαριθμικών όρων υπολογίστηκε ίσο με 25,048, ενώ ο τελικός συντελεστής θερμικής αλληλεπίδρασης προέκυψε ίσος με $\Psi = 2,004$. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στα επόμενα στάδια του μοντέλου για την προσαρμογή της θερμικής απόκρισης της διάταξης των γεωτρήσεων σε σχέση με τη συμπεριφορά μίας μεμονωμένης γεώτρησης.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Αριθμός γεωτρήσεων	N	25
Διάταξη γεωτρήσεων	-	5×5
Γεώτρηση αναφοράς	i	13
Απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων	s	6 m
Βάθος γεώτρησης	H	20 m
Συντελεστής προσαρμογής	C	2
Άθροισμα λογαριθμικών όρων	Σ	25,048
Συντελεστής αλληλεπίδρασης	Ψ	2,004

Πίνακας 7.3 Παράμετροι υπολογισμού συντελεστή αλληλεπίδρασης Ψ

7.4.2 Χρονική μεταβλητή και συνάρτηση g

Στο επόμενο στάδιο της δομής του ενεργειακού μοντέλου εκτιμάται η θερμική απόκριση του γεωεναλλάκτη μέσω του προσδιορισμού της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου. Για τον σκοπό αυτό, στο υπολογιστικό μοντέλο ο χρόνος λειτουργίας εκφράζεται σε σωρευτική μορφή, ώστε να λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο το φορτίο του τρέχοντος μήνα αλλά και η επίδραση των φορτίων των προηγούμενων μηνών στη θερμοκρασία του εδάφους.

Αρχικά, για κάθε μήνα υπολογίζεται η χρονική του διάρκεια σε ώρες και στη συνέχεια σε δευτερόλεπτα. Ο σωρευτικός χρόνος λειτουργίας (t) προσδιορίζεται στο τέλος κάθε μήνα, ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση της χρονικά εξαρτώμενης θερμικής απόκρισης του γεωεναλλάκτη. Ο χρόνος αυτός κανονικοποιείται ως προς τον χαρακτηριστικό χρόνο του γεωεναλλάκτη t_s , ο οποίος εκφράζει τη χαρακτηριστική χρονική κλίμακα διάχυσης της θερμότητας στο έδαφος.

Η αδιάστατη χρονική μεταβλητή ορίζεται ως:

$$\tau = \frac{t}{t_s} \quad (7.3)$$

όπου:

- t είναι ο σωρευτικός χρόνος λειτουργίας σε δευτερόλεπτα και
- t_s ο χαρακτηριστικός χρόνος του γεωεναλλάκτη.

Ο χαρακτηριστικός χρόνος του γεωεναλλάκτη t_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_s = \frac{H^2}{9\alpha} \quad (7.4)$$

όπου:

- H είναι το βάθος της γεώτρησης και
- α η θερμική διαχυτότητα του εδάφους.

Η θερμική διαχυτότητα, με την σειρά της, προκύπτει από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{k_s}{\rho c} \quad (7.5)$$

όπου:

- k_s είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και
- ρc η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα του εδάφους.

Στην παρούσα εφαρμογή, όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 7.1, για $k_s = 1,7 \text{ W/(mK)}$ και $\rho c = 2,40 \cdot 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$, η θερμική διαχυτότητα υπολογίζεται ίση με:

$$\alpha = 7,08 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Επομένως, για βάθος γεώτρησης $H = 20 \text{ m}$, ο χαρακτηριστικός χρόνος προκύπτει:

$$t_s = \frac{20^2}{9 \cdot 7,08 \cdot 10^{-7}} = 6,27 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Η αδιάστατη χρονική μεταβλητή τ χρησιμοποιείται ως είσοδος στη συνάρτηση θερμικής απόκρισης g , η οποία περιγράφει τη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά του γεωεναλλάκτη. Στο μοντέλο γίνεται διάκριση μεταξύ της απόκρισης μεμονωμένης γεώτρησης και της συνολικής απόκρισης της διάταξης των γεωτρήσεων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δύο μορφές της συνάρτησης, η $g_{single}(\tau)$, που αφορά μία μεμονωμένη γεώτρηση, και η $g_{array}(\tau)$, που αφορά τη συνολική διάταξη των γεωτρήσεων.

Αναλυτικότερα, η θερμική απόκριση αρχικά εκφράζεται για την περίπτωση μίας μεμονωμένης γεώτρησης μέσω της απλοποιημένης λογαριθμικής σχέσης:

$$g_{single}(\tau) = A_{single} + B_{single} \ln(\tau) \quad (7.6)$$

όπου:

- A_{single} και B_{single} είναι οι συντελεστές της λογαριθμικής προσέγγισης για μεμονωμένη γεώτρηση.

Στην παρούσα εφαρμογή λαμβάνονται:

$$A_{single} = 0,5$$

$$B_{single} = 1,5$$

Για τη μετάβαση από τη μεμονωμένη γεώτρηση στη συνολική διάταξη των γεωτρήσεων, η επίδραση της θερμικής αλληλεπίδρασης ενσωματώνεται μέσω του συντελεστή Ψ . Έτσι, ο σταθερός όρος της λογαριθμικής σχέσης προσαρμόζεται ως:

$$A_{array} = A_{single} + \Psi \quad (7.7)$$

ενώ ο συντελεστής B διατηρείται ίσος με:

$$B_{array} = B_{single} \quad (7.8)$$

Με βάση τα παραπάνω, η συνάρτηση θερμικής απόκρισης για τη διάταξη των γεωτρήσεων γράφεται:

$$g_{array}(\tau) = A_{array} + B_{array} \ln(\tau) \quad (7.9)$$

Στην παρούσα εφαρμογή, για $\Psi = 2,004$, προκύπτει:

$$A_{array} = 0,5 + 2,004 = 2,504$$

και επομένως:

$$g_{array}(\tau) = 2,504 + 1,5 \ln(\tau)$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.4), παρουσιάζονται οι μηνιαίες τιμές που προκύπτουν για την συνάρτηση θερμικής απόκρισης $g_{array}(\tau)$.

Μήνας	$t_{\text{end}} [s]$	$\tau = t / t_s [-]$	$\ln(\tau) [-]$	$g_{\text{array}}(\tau) [-]$
Ιανουάριος	$2,68 \cdot 10^6$	0,043	-3,154	-2,227
Φεβρουάριος	$5,10 \cdot 10^6$	0,081	-2,510	-1,262
Μάρτιος	$7,78 \cdot 10^6$	0,124	-2,088	-0,628
Απρίλιος	$1,04 \cdot 10^7$	0,165	-1,800	-0,197
Μάιος	$1,30 \cdot 10^7$	0,208	-1,571	0,148
Ιούνιος	$1,56 \cdot 10^7$	0,249	-1,389	0,420
Ιούλιος	$1,83 \cdot 10^7$	0,292	-1,231	0,657
Αύγουστος	$2,10 \cdot 10^7$	0,335	-1,095	0,862
Σεπτέμβριος	$2,36 \cdot 10^7$	0,376	-0,978	1,036
Οκτώβριος	$2,63 \cdot 10^7$	0,419	-0,871	1,198
Νοέμβριος	$2,89 \cdot 10^7$	0,460	-0,777	1,339
Δεκέμβριος	$3,15 \cdot 10^7$	0,503	-0,688	1,472

Πίνακας 7.4 Μηνιαίος υπολογισμός της συνάρτησης $g_{\text{array}}(\tau)$

7.4.3 Εισαγωγή μηνιαίων θερμικών και ψυκτικών φορτίων στο ενεργειακό μοντέλο

Στο επόμενο στάδιο του υπολογιστικού μοντέλου εισάγονται σε μονάδες ενέργειας τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου και αντιστοιχούν στις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φορτία αυτά δεν υπολογίζονται εκ νέου στην παρούσα εργασία, καθώς το κύριο αντικείμενό της είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και η διερεύνηση της επίδρασης του γεωεναλλάκτη στη μηνιαία ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος. Η μετατροπή των μηνιαίων φορτίων σε μέσες μηνιαίες ισχύεις εξυπηρετεί την ενεργειακή αξιολόγηση και τη σύνδεση του φορτίου με τη θερμική απόκριση του γεωεναλλάκτη.

Για κάθε μήνα υπολογίζεται η χρονική διάρκεια λειτουργίας σε ώρες, με βάση τον αριθμό ημερών του μήνα:

$$\Delta t_i = d_i \cdot 24$$

όπου:

- Δt_i είναι η διάρκεια του μήνα *i* σε ώρες και
- d_i ο αριθμός ημερών του αντίστοιχου μήνα.

Στη συνέχεια, τα μηνιαία φορτία μετατρέπονται σε τιμές μέσης μηνιαίας ισχύος, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της θερμικής αλληλεπίδρασης με το έδαφος. Επομένως, η μέση ισχύς θέρμανσης και ψύξης υπολογίζεται αντίστοιχα ως:

$$P_{h,i} = \frac{E_{h,i}}{\Delta t_i}, \quad P_{c,i} = \frac{E_{c,i}}{\Delta t_i} \quad (7.10)$$

όπου:

- $E_{h,i}$ και $E_{c,i}$ είναι τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία σε [kWh]
- $P_{h,i}$ και $P_{c,i}$ είναι οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές ισχύος σε [kW]

Οι μέσες μηνιαίες τιμές ισχύος που προκύπτουν από τα παραπάνω φορτία χρησιμοποιούνται στα επόμενα στάδια της ανάπτυξης του μοντέλου για τον προσδιορισμό του φορτίου που ανταλλάσσεται με το έδαφος και στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της θερμικής απόκρισης του γεωεναλλάκτη.

Για τους μήνες στους οποίους δεν υπάρχει απαίτηση θέρμανσης ή ψύξης, το αντίστοιχο φορτίο λαμβάνεται ίσο με μηδέν. Με τον τρόπο αυτό μπορεί και διατηρείται η εποχική διαφοροποίηση της λειτουργίας του συστήματος, καθώς η γεωθερμική αντλία θερμότητας λειτουργεί σε θέρμανση κατά τους ψυχρούς μήνες και σε ψύξη κατά τους θερινούς μήνες.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.5) παρουσιάζονται τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία, η διάρκεια κάθε μήνα του έτους [h] και οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές ισχύος που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο ενεργειακό μοντέλο.

Μήνας	$\Delta t[h]$	$E_h [GJ]$ Θερμικό Φορτίο	$E_c [GJ]$ Ψυκτικό Φορτίο	$E_h [kWh]$ Θερμικό Φορτίο	$E_c [kWh]$ Ψυκτικό Φορτίο	$P_h [kW]$ Μέση ισχύς θέρμανσης	$P_c [kW]$ Μέση ισχύς ψύξης
Ιανουάριος	744	14,250	0,000	3958,365	0,000	5,320	0,000
Φεβρουάριος	672	11,270	0,000	3130,581	0,000	4,659	0,000
Μάρτιος	744	9,480	0,000	2633,354	0,000	3,539	0,000
Απρίλιος	720	4,310	0,000	1197,232	0,000	1,663	0,000
Μάιος	744	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ιούνιος	720	0,000	2,590	0,000	719,450	0,000	0,999
Ιούλιος	744	0,000	4,260	0,000	1183,343	0,000	1,591
Αύγουστος	744	0,000	3,330	0,000	925,007	0,000	1,243
Σεπτέμβριος	720	0,000	0,330	0,000	91,667	0,000	0,127
Οκτώβριος	744	1,900	0,000	527,782	0,000	0,709	0,000
Νοέμβριος	720	7,650	0,000	2125,017	0,000	2,951	0,000
Δεκέμβριος	744	12,820	0,000	3561,140	0,000	4,786	0,000

Πίνακας 7.5 Μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία κτιρίου

7.4.4 Θερμική απόκριση γεωεναλλάκτη και θερμοκρασία ρευστού

Μετά την εισαγωγή των μηνιαίων θερμικών και ψυκτικών φορτίων και τον υπολογισμό των αντίστοιχων μέσων ισχύων, προσδιορίζεται το φορτίο που ανταλλάσσεται με το έδαφος μέσω του γεωεναλλάκτη. Το φορτίο αυτό δεν ταυτίζεται πλήρως με το θερμικό ή ψυκτικό φορτίο της εγκατάστασης, καθώς εξαρτάται από τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας.

Κατά τη λειτουργία θέρμανσης, το φορτίο που απορροφάται από το έδαφος είναι μικρότερο από το θερμικό φορτίο που αποδίδεται στο σύστημα, καθώς μέρος της αποδιδόμενης θερμότητας αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει η αντλία θερμότητας. Αντίθετα, κατά τη λειτουργία ψύξης, το φορτίο που απορρίπτεται στο έδαφος είναι μεγαλύτερο από το ψυκτικό φορτίο, καθώς περιλαμβάνει και τη θερμότητα που αντιστοιχεί στην ηλεκτρική ισχύ λειτουργίας της αντλίας θερμότητας.

Το ειδικό φορτίο ανά μονάδα μήκους γεώτρησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_i = \frac{(P_{ground,h,i} - P_{ground,c,i})}{L} \quad (7.11)$$

όπου:

- q_i [W/m] το ειδικό θερμικό φορτίο του μήνα i ,
- $P_{ground,h,i}$ [kW] η ισχύς που απορροφάται από το έδαφος κατά τη θέρμανση
- $P_{ground,c,i}$ [kW] η ισχύς που απορρίπτεται στο έδαφος κατά την ψύξη
- L το συνολικό μήκος του γεωεναλλάκτη

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του Πίνακα 7.1, το συνολικό μήκος του γεωεναλλάκτη υπολογίζεται ως:

$$L = N \cdot H = 25 \cdot 20m = 500m$$

Η θερμική απόκριση του γεωεναλλάκτη υπολογίζεται με τη χρήση της συνάρτησης g_{array} , η οποία περιγράφει τη χρονικά εξαρτώμενη θερμική συμπεριφορά της συνολικής διάταξης των γεωτρήσεων. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του γεωεναλλάκτη λόγω του επιβαλλόμενου φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta T_b(t) = \frac{q}{2\pi k_s} g_{array}(\tau) \quad (7.12)$$

όπου:

- $\Delta T_b(t)$ είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του γεωεναλλάκτη,
- q το ειδικό θερμικό φορτίο ανά μέτρο γεωεναλλάκτη,
- k_s η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και
- $g_{array}(\tau)$ η συνάρτηση θερμικής απόκρισης της διάταξης των γεωτρήσεων.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής κατάστασης του γεωεναλλάκτη δεν εξετάζεται κάθε μήνας ανεξάρτητα, αλλά λαμβάνεται υπόψη και η συσσωρευμένη επίδραση των προηγούμενων μηνών λειτουργίας. Δηλαδή η συνολική θερμοκρασιακή μεταβολή σε έναν μήνα προκύπτει από τη συμβολή του τρέχοντος φορτίου και των φορτίων που έχουν, καθώς η επίδραση ενός μηνιαίου φορτίου δεν παύει αμέσως μετά το τέλος του αντίστοιχου μήνα, αλλά συνεχίζει να επηρεάζει τη θερμοκρασιακή κατάσταση του γεωεναλλάκτη. Με χρήση της λογαριθμικής προσέγγισης της συνάρτησης g_{array} , η επιμέρους συνεισφορά γράφεται:

$$\Delta T_{b,m \rightarrow i} = \frac{B_{array}}{2\pi k_s} q_m \ln \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,start}}{t_{i,end} - t_{m,end}} \right) \quad (7.13)$$

όπου:

- q_m είναι το ειδικό θερμικό φορτίο του μήνα m ,
- k_s η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους,
- B_{array} ο συντελεστής της λογαριθμικής συνάρτησης θερμικής απόκρισης και
- $t_{i,end}$, $t_{m,start}$, $t_{m,end}$ οι χρονικές στιγμές λήξης του εξεταζόμενου μήνα, έναρξης και λήξης του μήνα εφαρμογής του φορτίου, αντίστοιχα.

Η συνολική θερμοκρασιακή μεταβολή στο τέλος του μήνα i προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους συνεισφορών του τρέχοντος και των προηγούμενων μηνιαίων φορτίων. Η αλγεβρική ανάπτυξη της παραπάνω σχέσης παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ.

Μετά τον υπολογισμό της συνολικής θερμοκρασιακής μεταβολής, προσδιορίζεται η θερμοκρασία του γεωεναλλάκτη $T_b(t)$. Η θερμοκρασία αυτή προκύπτει λαμβάνοντας

υπόψη την αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους και τη μεταβολή που προκαλείται από τη λειτουργία του συστήματος.

$$T_b(t) = T_g + \Delta T_b(t) \quad (7.14)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η θερμοκρασία του ρευστού $T_f(t)$, η οποία αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για την εκτίμηση της απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Η $T_f(t)$ χρησιμοποιείται στα επόμενα φύλλα της ανάπτυξης του μοντέλου για τον υπολογισμό των βαθμών απόδοσης COP και EER.

Μέσω αυτής της διαδικασίας καθίσταται δυνατή η σύνδεση των μηνιαίων ενεργειακών φορτίων του κτιρίου με τη θερμική συμπεριφορά του γεωεναλλάκτη και στην συνέχεια με τις συνθήκες λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο δεν περιορίζεται σε έναν στατικό υπολογισμό, αλλά λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη των φορτίων και τη σταδιακή επίδρασή τους στη θερμοκρασία του εδάφους και του ρευστού που κυκλοφορεί στον γεωεναλλάκτη.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.6) παρουσιάζεται η μηνιαία θερμική αλληλεπίδραση του γεωεναλλάκτη με το έδαφος. Θετικές τιμές του q_i δηλώνουν απορρόφηση θερμότητας από το έδαφος, ενώ αρνητικές τιμές δηλώνουν απόρριψη θερμότητας προς το έδαφος. Οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες $T_b(t)$ και $T_f(t)$ χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των μηνιαίων τιμών COP και EER. Θετικές τιμές του q_i αντιστοιχούν σε απορρόφηση θερμότητας από το έδαφος κατά τη λειτουργία θέρμανσης, ενώ αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε απόρριψη θερμότητας προς το έδαφος κατά τη λειτουργία ψύξης.

Μήνας	$P_{\text{ground,h}}$ [kW]	$P_{\text{ground,c}}$ [kW]	q_i [W/m]	$\Delta T_b(t)$ [°C]	$T_b(t)$ [°C]	$T_f(t)$ [°C]
Ιανουάριος	4,297	0,000	8,593	-1,792	14,206	13,347
Φεβρουάριος	3,748	0,000	7,495	-2,435	13,433	12,683
Μάρτιος	2,852	0,000	5,704	-2,202	13,544	12,974
Απρίλιος	1,345	0,000	2,691	-1,705	13,934	13,665
Μάιος	0,000	0,000	0,000	-0,973	14,618	14,618
Ιούνιος	0,000	1,184	-2,368	-0,203	15,410	15,647
Ιούλιος	0,000	1,889	-3,778	0,455	16,152	16,530
Αύγουστος	0,000	1,478	-2,955	0,654	16,478	16,774
Σεπτέμβριος	0,000	0,151	-0,302	0,274	16,234	16,264
Οκτώβριος	0,581	0,000	1,161	-0,163	15,898	15,782
Νοέμβριος	2,399	0,000	4,799	-1,111	14,997	14,518
Δεκέμβριος	3,869	0,000	7,739	-1,786	14,300	13,526

Πίνακας 7.6 Υπολογιζόμενη θερμική απόκριση γεωεναλλάκτη και θερμοκρασία ρευστού

7.4.5 Υπολογισμός COP και EER γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

Μετά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ρευστού που κυκλοφορεί στον γεωεναλλάκτη $T_f(t)$, ακολουθεί ο υπολογισμός των βαθμών απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Η απόδοση της αντλίας δεν θεωρείται σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανά μήνα, καθώς εξαρτάται από τις θερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας.

Για τη λειτουργία θέρμανσης χρησιμοποιείται ο βαθμός απόδοσης COP, ενώ για τη λειτουργία ψύξης χρησιμοποιείται ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης EER. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται μέσω πολυωνυμικών σχέσεων δεύτερου βαθμού, οι οποίες συνδέουν την απόδοση της αντλίας θερμότητας με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες λειτουργίας.

Η γενική μορφή της πολυωνυμικής σχέσης είναι:

$$f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2$$

όπου:

- x και y είναι οι θερμοκρασιακές μεταβλητές του συστήματος και
- $p_{00}, p_{10}, p_{01}, p_{20}, p_{11}, p_{02}$ είναι οι συντελεστές της πολυωνυμικής σχέσης.

Στην υπό μελέτη περίπτωση, ως x λαμβάνεται η θερμοκρασία νερού στην πλευρά της αντλίας θερμότητας, ενώ ως y λαμβάνεται η θερμοκρασία του ρευστού του γεωεναλλάκτη $T_f(t)$. Με τον τρόπο αυτό, οι τιμές COP και EER υπολογίζονται ως συνάρτηση τόσο της απαιτούμενης θερμοκρασίας στο σύστημα διανομής όσο και της θερμοκρασιακής κατάστασης του γεωεναλλάκτη.

Για τη λειτουργία θέρμανσης, η πολυωνυμική σχέση εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του COP. Στην παρούσα ανάλυση, ως θερμοκρασία νερού στην πλευρά χρήσης λαμβάνεται η θερμοκρασία προσαγωγής προς το σύστημα θέρμανσης, ίση με 35°C, ενώ ως θερμοκρασία στην πλευρά του γεωεναλλάκτη χρησιμοποιείται η μηνιαία τιμή $T_f(t)$.

Αντίστοιχα, για τη λειτουργία ψύξης, η αντίστοιχη πολυωνυμική σχέση εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του EER, με θερμοκρασία νερού στην πλευρά ψύξης ίση με 7°C και θερμοκρασία γεωεναλλάκτη τη μηνιαία τιμή $T_f(t)$.

Οι συντελεστές των πολυωνυμικών σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των COP και EER παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7.

Συντελεστής	COP	EER
p_{00}	9,8713	7,819
p_{10}	-0,2525	-0,1744
p_{01}	0,2520	-0,1155
p_{20}	0,0021	0,005256
p_{11}	-0,0040	0,002438
p_{02}	0,00053848	0,0003536

Πίνακας 7.7 Συντελεστές πολυωνυμικών σχέσεων υπολογισμού COP και EER

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν οι μηνιαίες τιμές COP και EER (Πίνακας 7.8) που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Οι τιμές COP παρουσιάζονται για τους μήνες λειτουργίας θέρμανσης, ενώ οι τιμές EER για τους μήνες λειτουργίας ψύξης. Για τους μήνες χωρίς αντίστοιχη απαίτηση, το αντίστοιχο πεδίο παραμένει κενό.

Μήνας	$T_f(t)$ [°C]	COP	EER
Ιανουάριος	13,347	5,197	-
Φεβρουάριος	12,683	5,113	-
Μάρτιος	12,974	5,150	-
Απρίλιος	13,665	5,237	-
Μάιος	14,618	-	-
Ιούνιος	15,647	-	5,402
Ιούλιος	16,530	-	5,325
Αύγουστος	16,774	-	5,304
Σεπτέμβριος	16,264	-	5,348
Οκτώβριος	15,782	5,508	-
Νοέμβριος	14,518	5,346	-
Δεκέμβριος	13,526	5,220	-

Πίνακας 7.8 Μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας ρευστού, COP και EER

7.4.6 Υπολογισμός μηνιαίας ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ

Μετά τον υπολογισμό των μηνιαίων τιμών COP και EER, τελευταίο και σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη του ενεργειακού μοντέλου αποτελεί ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής κατανάλωσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Σε αυτό το τελικό στάδιο συνδέονται τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος.

Κατά τον υπολογισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης λαμβάνονται υπόψη, εκτός από τον βαθμό απόδοσης της αντλίας θερμότητας, και οι απώλειες του συστήματος διανομής και των τερματικών μονάδων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι βαθμοί απόδοσης η_s και η_{em} , οι οποίοι αντιστοιχούν αντίστοιχα στο σύστημα διανομής και στις τερματικές μονάδες.

Στην παρούσα εφαρμογή λαμβάνονται:

$$\eta_s = 0,95$$

$$\eta_{em} = 0,95$$

Για τη λειτουργία θέρμανσης, η ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ υπολογίζεται από το αντίστοιχο θερμικό φορτίο, τη μηνιαία τιμή του COP και τους βαθμούς απόδοσης του συστήματος διανομής και των τερματικών μονάδων:

$$E_{el,h,i} = \frac{E_{h,i}}{COP_i \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}} \quad (7.15)$$

όπου:

- $E_{el,h,i}$ είναι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για θέρμανση τον μήνα i ,
- $E_{h,i}$ είναι το θερμικό φορτίο του ίδιου μήνα και
- COP_i είναι ο μηνιαίος βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας στη λειτουργία θέρμανσης.
- η_s είναι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος διανομής και
- η_{em} είναι ο βαθμός απόδοσης των τερματικών μονάδων

Αντίστοιχα, για τη λειτουργία ψύξης, η ηλεκτρική κατανάλωση υπολογίζεται από το ψυκτικό φορτίο, τη μηνιαία τιμή του EER και τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης:

$$E_{el,c,i} = \frac{E_{c,i}}{EER_i \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}} \quad (7.16)$$

όπου:

- $E_{el,c,i}$ είναι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για ψύξη τον μήνα i ,
- $E_{c,i}$ είναι το ψυκτικό φορτίο και
- EER_i είναι ο μηνιαίος δείκτης ενεργειακής απόδοσης στη λειτουργία ψύξης
- η_s είναι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος διανομής και
- η_{em} είναι ο βαθμός απόδοσης των τερματικών μονάδων

Επομένως, η συνολική μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας προκύπτει ως άθροισμα της ηλεκτρικής κατανάλωσης για θέρμανση και ψύξη:

$$E_{el,GSHP,i} = E_{el,h,i} + E_{el,c,i} \quad (7.17)$$

Όπως είναι αναμενόμενο, για τους μήνες στους οποίους δεν υπάρχει απαίτηση θέρμανσης ή ψύξης η αντίστοιχη τιμή της ηλεκτρικής κατανάλωσης λαμβάνεται ίση με μηδέν. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η εποχική λειτουργία του συστήματος και αποφεύγεται η εισαγωγή κατανάλωσης σε μήνες όπου δεν υπάρχει αντίστοιχο φορτίο.

Η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας υπολογίζεται από το άθροισμα των μηνιαίων τιμών:

$$E_{el,GSHP,annual} = \sum_{i=1}^{12} E_{el,GSHP,i} \quad (7.18)$$

Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 7.9) παρουσιάζονται τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία, οι αντίστοιχες τιμές COP και EER και η υπολογιζόμενη ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Όπως αναφέρθηκε ήδη παραπάνω, Η ηλεκτρική κατανάλωση υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες του συστήματος διανομής και των τερματικών μονάδων, με $\eta_s = 0,95$ και $\eta_{em} = 0,95$. Για μήνες χωρίς απαίτηση θέρμανσης ή ψύξης, το αντίστοιχο πεδίο παραμένει μηδενικό ή κενό.

Μήνας	$E_{h,i}$ [kWh]	COP_i	$E_{el,h,i}$ [kWh]	$E_{c,i}$ [kWh]	EER_i	$E_{el,c,i}$ [kWh]	$E_{el,GSHP,i}$ [kWh]
Ιανουάριος	3958,37	5,197	843,94	0,000	-	0,000	843,94
Φεβρουάριος	3130,58	5,113	678,36	0,000	-	0,000	678,36
Μάρτιος	2633,35	5,150	566,57	0,000	-	0,000	566,57
Απρίλιος	1197,23	5,237	253,29	0,000	-	0,000	253,29
Μάιος	0,00	-	0,00	0,000	-	0,000	0,00
Ιούνιος	0,00	-	0,00	719,45	5,402	147,57	147,57
Ιούλιος	0,00	-	0,00	1183,34	5,325	246,22	246,22
Αύγουστος	0,00	-	0,00	925,01	5,304	193,23	193,23
Σεπτέμβριος	0,00	-	0,00	91,67	5,348	18,99	18,99
Οκτώβριος	527,78	5,508	106,17	0,000	-	0,000	106,17
Νοέμβριος	2125,02	5,346	440,46	0,000	-	0,000	440,46
Δεκέμβριος	3561,14	5,220	755,95	0,000	-	0,000	755,95
ΣΥΝΟΛΟ	17133,47	-	3644,75	2919,47	-	606,01	4250,76

Πίνακας 7.9 Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

7.5 Σύνδεση του ενεργειακού μοντέλου με τις εξεταζόμενες περιπτώσεις

Μετά την ανάπτυξη του ενεργειακού μοντέλου της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Ως κατάσταση αναφοράς λαμβάνεται η υφιστάμενη εγκατάσταση θέρμανσης με πετρέλαιο, έναντι της οποίας συγκρίνονται τρία εναλλακτικά σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης.

Η υφιστάμενη κατάσταση αφορά τη λειτουργία συστήματος θέρμανσης με πετρέλαιο, όπως είναι η συνήθης περίπτωση στις παλαιότερες κατοικίες, και χρησιμοποιείται ως βάση σύγκρισης τόσο σε ενεργειακό όσο και σε τεχνο-οικονομικό επίπεδο. Το Σενάριο 1 αφορά την αντικατάσταση του υφιστάμενου συστήματος με αντλία θερμότητας αέρα-νερού σε συνδυασμό με fan coils ως τερματικές μονάδες. Το Σενάριο 2 αφορά την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη και, επίσης, με fan coils. Τέλος, το Σενάριο 3 βασίζεται στο Σενάριο 2, με την προσθήκη φωτοβολταϊκού συστήματος και μπαταρίας για την κάλυψη μέρους της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Σημειώνεται ότι το ενεργειακό μοντέλο που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες αφορά κυρίως τη λειτουργία της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και επομένως χρησιμοποιείται άμεσα για τα Σενάρια 2 και 3. Η μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ, όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 7.9, αποτελεί την κατανάλωση του Σεναρίου 2 και ταυτόχρονα το βασικό δεδομένο εισόδου για το Σενάριο 3.

Στο Σενάριο 3, η ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας συγκρίνεται με τη διαθέσιμη παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες αποθήκευσης μέσω μπαταρίας. Στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή ότι η μπαταρία χρησιμοποιείται με σκοπό την αύξηση της αξιοποίησης της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας από τη γεωθερμική αντλία θερμότητας. Η αποθηκευμένη ενέργεια θεωρείται ότι διατίθεται αποκλειστικά για την κάλυψη της κατανάλωσης της ΓΑΘ και δεν εξετάζεται διάθεση ενέργειας προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Για τον λόγο αυτό, τυχόν παραγωγή από το Φ/Β σύστημα που υπερβαίνει τη μηνιαία ζήτηση της ΓΑΘ χαρακτηρίζεται ως πλεονάζουσα και δεν προσμετράται ως επιπλέον ενεργειακό ή οικονομικό όφελος.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.10), παρουσιάζεται συνοπτικά η περιγραφή των υπό εξέταση σεναρίων.

Περίπτωση	Περιγραφή συστήματος	Βασική πηγή ενέργειας
Υφιστάμενη κατάσταση	Σύστημα θέρμανσης με πετρέλαιο	Πετρέλαιο
Σενάριο 1	Αντλία θερμότητας αέρα-νερού με fan coils	Ηλεκτρική ενέργεια
Σενάριο 2	Γεωθερμική αντλία θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη και fan coils	Ηλεκτρική ενέργεια
Σενάριο 3	Γεωθερμική αντλία θερμότητας όπως Σενάριο 2 με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία	Ηλεκτρική ενέργεια και Φ/Β σύστημα

Πίνακας 7.10 Υφιστάμενη κατάσταση και εξεταζόμενα ενεργειακά σενάρια

7.5.1 Τεχνικές παραδοχές και προκαταρκτική διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος για το Σενάριο 3

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο Σενάριο 3 εξετάζεται η προσθήκη φωτοβολταϊκού συστήματος σε συνδυασμό με μπαταρία, με σκοπό την κάλυψη μέρους της ηλεκτρικής κατανάλωσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Η παραγωγή του Φ/Β συστήματος δεν εξετάζεται ως ανεξάρτητο σύστημα, αλλά συνδέεται άμεσα με την κατανάλωση της ΓΑΘ, όπως αυτή υπολογίστηκε από το ενεργειακό μοντέλο στις προηγούμενες ενότητες.

Για τη διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος επιλέγεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο τύπου JA SOLAR JAM66D45-605/LB. Το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή παρατίθεται στο Παράρτημα Δ, ενώ τα βασικά χαρακτηριστικά του πλαισίου που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς είναι η ονομαστική ισχύς, η επιφάνεια, ο βαθμός απόδοσης και οι συντελεστές που επηρεάζουν την πραγματική λειτουργία του.

Η ονομαστική ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι:

$$P_{panel} = 605 \text{ W}_p = 0,605 \text{ kW}_p$$

ενώ η επιφάνεια κάθε πλαισίου λαμβάνεται ίση με:

$$A_{panel} = 2,70 \text{ m}^2$$

Στην συνέχεια, η εγκατεστημένη ισχύς του Φ/Β συστήματος προκύπτει από τον αριθμό των πλαισίων και την ονομαστική ισχύ κάθε πλαισίου:

$$P_{PV} = n \cdot P_{panel}$$

όπου:

- P_{PV} είναι η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος,
- n είναι ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων και
- P_{panel} είναι η ονομαστική ισχύς κάθε πλαισίου.

Η επιλογή του αριθμού των πλαισίων πραγματοποιείται με βάση το ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο, σε προκαταρκτικό στάδιο, μεταξύ της ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ και της ωφέλιμης φωτοβολταϊκής παραγωγής μετά την αποθήκευση στη μπαταρία. Συγκεκριμένα, επιλέγεται το ελάχιστο ακέραιο πλήθος φωτοβολταϊκών πλαισίων για το οποίο η ωφέλιμη

ετήσια παραγωγή, μετά την εφαρμογή του βαθμού απόδοσης πλήρους κύκλου της μπαταρίας, προσεγγίζει την ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ.

Από το ενεργειακό μοντέλο προκύπτει ότι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας είναι:

$$E_{el,GSHP,annual} = 4250,76 \text{ kWh/έτος}$$

Η εκτίμηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής πραγματοποιείται με χρήση του εργαλείου PVGIS. Τα αναλυτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης για σύστημα αναφοράς εγκατεστημένης ισχύος 1 kW_p παρατίθενται στο Παράρτημα Ε. Με βάση τα δεδομένα αυτά, η ειδική ετήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή λαμβάνεται ίση με:

$$e_{PV,annual} = 1443,20 \text{ kWh/kW}_p$$

Σε σχετικές μελέτες, η απόδοση πλήρους κύκλου μπαταρίας λαμβάνεται συχνά περίπου ίση με 90%

Για την προσομοίωση της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιείται η απόδοση πλήρους κύκλου φόρτισης–εκφόρτισης της μπαταρίας, γνωστή ως round-trip efficiency (RTE). Η παράμετρος αυτή εκφράζει το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι τελικά διαθέσιμο μετά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης.

Στη βιβλιογραφία, η απόδοση πλήρους κύκλου μπαταρίας μπορεί να λαμβάνεται περίπου ίση με 90% (Lykas κ.ά., 2026), όπου το σύστημα αποθήκευσης μπαταρίας τροφοδοτείται από μέρος της ηλεκτρικής παραγωγής των φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, η πραγματικά αξιοποιήσιμη ενέργεια μπορεί να μειώνεται όταν λαμβάνονται υπόψη πρόσθετες απώλειες του συστήματος, όπως απώλειες μετατροπών και απώλειες φόρτισης–εκφόρτισης. Ενδεικτικά, η ετήσια απόδοση πλήρους κύκλου συστήματος μπαταρίας μπορεί να κυμαίνεται σε αρκετά ευρύ εύρος, από 23% έως 77%, ανάλογα με τις απώλειες και τη διάρκεια αποθήκευσης (Go κ.ά., 2023). Για τον λόγο αυτό, στο παρόν μοντέλο, ως συνολικός συντελεστής αξιοποίησης της φωτοβολταϊκής ενέργειας μετά την αποθήκευση, εφαρμόζεται η συντηρητική τιμή:

$$RTE = 0,70$$

Με βάση τα παραπάνω, ο απαιτούμενος αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n = \frac{E_{el,GSHp,annual}}{P_{panel} \cdot e_{PV,annual} \cdot RTE} \quad (7.19)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές:

$$n = \frac{4250,76}{0,605 \cdot 1443,20 \cdot 0,70} = 6,96 \Rightarrow n = 7$$

Συνεπώς, για τη βασική περίπτωση του Σεναρίου 3 επιλέγονται επτά φωτοβολταϊκά πλαίσια και η αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

$$P_{PV} = 7 \cdot 0,605 = 4,235 \text{ kW}_p$$

Η συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων προκύπτει ως:

$$A_{PV} = n \cdot A_{panel} = 7 \cdot 2,70 \text{ m}^2 \Rightarrow$$

$$A_{PV} = 18,90 \text{ m}^2$$

Για την εγκατεστημένη ισχύ των $4,235 \text{ kW}_p$, η συνολική ετήσια παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος εκτιμάται ως:

$$E_{PV,annual} = P_{PV} \cdot e_{PV,annual} = 4,235 \cdot 1443,20 \text{ kWh/έτος} \Rightarrow$$

$$E_{PV,annual} = 6111,95 \text{ kWh/έτος}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό απόδοσης της μπαταρίας, η ωφέλιμη ετήσια φωτοβολταϊκή ενέργεια μετά την αποθήκευση υπολογίζεται ως:

$$E_{PV,bat,annual} = E_{PV,annual} \cdot RTE = 6111,95 \cdot \frac{0,70 \text{ kWh}}{\text{έτος}} \Rightarrow$$

$$E_{PV,bat,annual} = 4.278,37 \text{ kWh/έτος}$$

Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στην ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ, η οποία υπολογίστηκε ίση με $4250,76 \text{ kWh/έτος}$. Επομένως, τα επτά φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν το ελάχιστο ακέραιο πλήθος πλαισίων που ικανοποιεί το προκαταρκτικό ετήσιο κριτήριο κάλυψης.

Αξίζει φυσικά να σημειωθεί ότι η επιλογή αυτή δεν συνεπάγεται πλήρη κάλυψη της κατανάλωσης της ΓΑΘ σε μηνιαία βάση, καθώς η παραγωγή του Φ/Β συστήματος και η ζήτηση της αντλίας θερμότητας παρουσιάζουν διαφορετική εποχική κατανομή. Για τον λόγο αυτό, η μηνιαία σύγκριση μεταξύ παραγωγής Φ/Β, διαθέσιμης ενέργειας μετά την μπαταρία, κατανάλωσης ΓΑΘ, κατανάλωσης από το δίκτυο και πλεονάζουσας παραγωγής πραγματοποιείται αναλυτικά στη συνέχεια.

Μικρότερος αριθμός πλαισίων θα οδηγούσε σε χαμηλότερη ωφέλιμη ετήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή, ενώ μεγαλύτερος αριθμός πλαισίων θα αύξανε την πιθανότητα πλεονάζουσας παραγωγής, δεδομένου ότι στο παρόν μοντέλο δεν εξετάζεται έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο. Για τον λόγο αυτό, η διάταξη των επτά πλαισίων χρησιμοποιείται ως βασική περίπτωση του Σεναρίου 3, ενώ η επίδραση διαφορετικού αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να εξεταστεί στο πλαίσιο παραμετρικής διερεύνησης.

7.5.2 Υπολογισμός διαθέσιμης φωτοβολταϊκής ενέργειας και κατανάλωσης από το δίκτυο

Μετά τον καθορισμό της εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπολογίζεται η μηνιαία παραγωγή του και η διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη της ηλεκτρικής κατανάλωσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Η μηνιαία παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{PV,i} = P_{PV} \cdot e_{PV,i} \quad (7.20)$$

όπου:

- $E_{PV,i}$ είναι η μηνιαία παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος,
- P_{PV} είναι η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος και

- $e_{PV,i}$ είναι η μηνιαία παραγωγή ανά εγκατεστημένο kW_p , όπως προκύπτει από τα δεδομένα PVGIS.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στο Σενάριο 3 λαμβάνεται υπόψη η χρήση μπαταρίας, ούτως ώστε μέρος της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας να μπορεί να αξιοποιηθεί σε χρόνο διαφορετικό από τον χρόνο παραγωγής της. Η διαθέσιμη ενέργεια του Φ/Β συστήματος μετά την αποθήκευση υπολογίζεται με βάση τον βαθμό απόδοσης πλήρους κύκλου της μπαταρίας:

$$E_{PV,bat,i} = E_{PV,i} \cdot RTE \quad (7.21)$$

όπου:

- $E_{PV,bat,i}$ είναι η διαθέσιμη ενέργεια του Φ/Β συστήματος μετά τη μπαταρία και
- RTE είναι ο βαθμός απόδοσης πλήρους κύκλου φόρτισης–εκφόρτισης, όπως προσδιορίστηκε παραπάνω

Επιπλέον, επειδή η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος και η κατανάλωση της ΓΑΘ δεν ταυτίζονται χρονικά πλήρως, εισάγεται συντελεστής ταυτοχρονισμού $f_{sync,i}$. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το μέρος της διαθέσιμης φωτοβολταϊκής ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί πραγματικά από τη ΓΑΘ σε μηνιαία βάση. Η προσέγγιση της λειτουργίας της μπαταρίας μέσω του συνολικού βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ταυτοχρονισμού, παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της μείωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο σε μηνιαία βάση.

Η τελικά αξιοποιήσιμη ενέργεια του Φ/Β συστήματος για την κάλυψη της κατανάλωσης της ΓΑΘ υπολογίζεται ως:

$$E_{PV,avail,i} = E_{PV,bat,i} \cdot f_{sync,i} \quad (7.22)$$

όπου $E_{PV,avail,i}$ είναι η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή ενέργεια προς τη ΓΑΘ μετά τη μπαταρία και τον συντελεστή ταυτοχρονισμού.

Στη συνέχεια, για κάθε μήνα i , εξετάζεται κατά πόσο η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή παραγωγή επαρκεί για την κάλυψη της ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ. Το μέρος της

κατανάλωσης που δεν καλύπτεται από το Φ/Β σύστημα θεωρείται ότι διατίθεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και υπολογίζεται ως:

$$E_{grid,i} = \max(E_{el,GSHP,i} - E_{PV,avail,i}, 0) \quad (7.23)$$

Αντίθετα, όταν η διαθέσιμη παραγωγή του Φ/Β συστήματος υπερβαίνει τη μηνιαία κατανάλωση της ΓΑΘ, η διαφορά θεωρείται πλεονάζουσα μη αξιοποιούμενη ενέργεια:

$$E_{surplus,i} = \max(E_{PV,avail,i} - E_{el,GSHP,i}, 0) \quad (7.24)$$

Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται αρνητικές τιμές και διαχωρίζονται καθαρά οι δύο περιπτώσεις, δηλαδή η ανάγκη κάλυψης από το δίκτυο και η περίσσεια φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Στο παρόν μοντέλο θεωρείται ότι η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κάλυψη της ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ. Δεν εξετάζεται επιστροφή ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο ούτε εκμετάλλευση της πλεονάζουσας παραγωγής. Συνεπώς, τυχόν παραγωγή του Φ/Β συστήματος που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη της κατανάλωσης της ΓΑΘ χαρακτηρίζεται ως πλεονάζουσα.

7.5.3 Μετάβαση στην ενεργειακή αξιολόγηση των σεναρίων

Με την ολοκλήρωση των υπολογιστικών βημάτων όπως περιεγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, το ενεργειακό μοντέλο παρέχει τα βασικά μεγέθη που απαιτούνται για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων. Συγκεκριμένα, έχουν προσδιοριστεί η μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, η παραγωγή του Φ/Β συστήματος του Σεναρίου 3, η διαθέσιμη ενέργεια μετά την αποθήκευση στη μπαταρία, καθώς και η αντίστοιχη κατανάλωση από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη βάση για την ενεργειακή σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης και των τριών εναλλακτικών σεναρίων. Η υφιστάμενη κατάσταση, η οποία αφορά τη χρήση πετρελαίου για τη θέρμανση, χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς. Έναντι αυτής της κατάστασης αξιολογούνται το Σενάριο 1 με αντλία θερμότητας αέρα-νερού, το Σενάριο 2 με γεωθερμική αντλία θερμότητας και το Σενάριο 3 με γεωθερμική αντλία θερμότητας σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα ενεργειακά αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης και των τριών εξεταζόμενων σεναρίων. Η σύγκριση βασίζεται στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κάθε περίπτωσης και στην κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο ή από συμβατικό καύσιμο. Ειδικά για το Σενάριο 3, εξετάζεται επιπλέον η κάλυψη μέρους της κατανάλωσης της ΓΑΘ από το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη μπαταρία. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη βάση για την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση του Κεφαλαίου 9.

8. Ενεργειακή αξιολόγηση υφιστάμενης κατάστασης και εξεταζόμενων σεναρίων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης και των εξεταζόμενων σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης. Στόχος είναι η σύγκριση της σημερινής λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης με πετρέλαιο με τρεις εναλλακτικές λύσεις ενεργειακής αναβάθμισης, δηλαδή την αντλία θερμότητας αέρα-νερού, τη γεωθερμική αντλία θερμότητας και τη γεωθερμική αντλία θερμότητας σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με κοινή βάση τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου, ώστε οι εναλλακτικές λύσεις να συγκρίνονται ως προς την κάλυψη της ίδιας ενεργειακής ζήτησης. Για το Σενάριο 1, η ηλεκτρική κατανάλωση της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού υπολογίζεται κάνοντας την παραδοχή για σταθερές τιμές απόδοσης $COP = 3,00$ για τη θέρμανση και $EER = 3,00$ για την ψύξη. Στον υπολογισμό, όπως και στην περίπτωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, λαμβάνονται επίσης υπόψη οι απώλειες του συστήματος διανομής και των τερματικών μονάδων, με $\eta_s = 0,95$ και $\eta_{em} = 0,95$.

Για το Σενάριο 2 χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του ενεργειακού μοντέλου της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για το Σενάριο 3, η ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ συγκρίνεται με την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος και τη διαθέσιμη ενέργεια μετά την αποθήκευση στη μπαταρία, ώστε να υπολογιστεί η τελική κατανάλωση από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η σύγκριση των περιπτώσεων πραγματοποιείται με βάση την ετήσια κατανάλωση ενέργειας, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ή καυσίμου, καθώς και τη δυνατότητα κάλυψης μέρους της ζήτησης μέσω φωτοβολταϊκής παραγωγής στην περίπτωση του Σεναρίου 3. Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου αποτελούν τη βάση για την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση που ακολουθεί στο Κεφάλαιο 9.

8.1 Ενεργειακή κατανάλωση υφιστάμενης κατάστασης

Η υφιστάμενη κατάσταση αφορά την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης του κτιρίου μέσω λέβητα πετρελαίου και των αναγκών ψύξης μέσω τοπικών αντλιών θερμότητας αέρα-αέρα χαμηλής απόδοσης. Η περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς για τη σύγκριση με τα εναλλακτικά σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων, χρησιμοποιούνται τα ίδια μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία με αυτά που εφαρμόζονται και στα υπό εξέταση σενάρια. Το ετήσιο θερμικό φορτίο του κτιρίου, όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 7.9, είναι:

$$E_{h,annual} = 17.133,47 \text{ kWh/έτος}$$

ενώ το ετήσιο ψυκτικό φορτίο είναι:

$$E_{c,annual} = 2.919,47 \text{ kWh/έτος}$$

Για τη θέρμανση της υφιστάμενης κατάστασης λαμβάνεται υπόψη ότι το θερμικό φορτίο του κτιρίου καλύπτεται από λέβητα πετρελαίου, μέσω υφιστάμενου συστήματος διανομής και τερματικών μονάδων. Επομένως, η απαιτούμενη ενέργεια καυσίμου δεν ταυτίζεται με το ωφέλιμο θερμικό φορτίο, αλλά προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τους επιμέρους βαθμούς απόδοσης του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης παραγωγής θερμότητας του λέβητα πετρελαίου συμβολίζεται με η_{gen} και εκφράζει την απόδοση μετατροπής της ενέργειας του καυσίμου σε ωφέλιμη θερμότητα. Στην παρούσα περίπτωση λαμβάνεται:

$$\eta_{gen} = 0,65$$

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος διανομής συμβολίζεται με η_s και λαμβάνει υπόψη τις απώλειες κατά τη μεταφορά της θερμότητας από τον λέβητα προς τους χώρους και λαμβάνεται ως:

$$\eta_s = 0,80$$

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης των τερματικών μονάδων συμβολίζεται με η_{em} και εκφράζει την απόδοση με την οποία η θερμότητα αποδίδεται τελικά στον εσωτερικό χώρο. Στην παρούσα μελέτη λαμβάνεται:

$$\eta_{em} = 0,80$$

Συνεπώς, η συνολική απόδοση του υφιστάμενου συστήματος θέρμανσης προκύπτει ως:

$$\eta_{tot} = \eta_{gen} \cdot \eta_s \cdot \eta_{em} \quad (8.1)$$

$$\eta_{tot} = 0,65 \cdot 0,80 \cdot 0,80 = 0,416$$

Η απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{con,h,i} = \frac{E_{h,i}}{\eta_{gen} \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}} \quad (8.2)$$

Για την ψύξη μέσω τοπικών αντλιών θερμότητας αέρα-αέρα λαμβάνεται:

$$EER = 2,00$$

ενώ θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες δικτύου διανομής, καθώς πρόκειται για τοπικές μονάδες, επομένως

$$\eta_s = 1,00$$

ενώ για τις τερματικές μονάδες λαμβάνεται:

$$\eta_{em} = 0,80$$

Αντίστοιχα με την περίπτωση της θέρμανσης, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{con,c,i} = \frac{E_{c,i}}{EER \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}} \quad (8.3)$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8.1) παρουσιάζονται τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία της υφιστάμενης κατάστασης, καθώς και την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.

Μήνας	$E_{h,i}$ [kWh]	$E_{c,i}$ [kWh]	$E_{con,h,i}$ [kWh]	$E_{con,c,i}$ [kWh]
Ιανουάριος	3.958,37	0,00	9.515,30	0,00
Φεβρουάριος	3.130,58	0,00	7.525,43	0,00
Μάρτιος	2.633,35	0,00	6.330,18	0,00
Απρίλιος	1.197,23	0,00	2.877,96	0,00
Μάιος	0,00	0,00	0,00	0,00
Ιούνιος	0,00	719,45	0,00	449,66
Ιούλιος	0,00	1.183,34	0,00	739,59
Αύγουστος	0,00	925,01	0,00	578,13
Σεπτέμβριος	0,00	91,67	0,00	57,29
Οκτώβριος	527,78	0,00	1.268,71	0,00
Νοέμβριος	2.125,02	0,00	5.108,21	0,00
Δεκέμβριος	3.561,14	0,00	8.560,43	0,00
ΣΥΝΟΛΟ	17.133,47	2.919,47	41.186,23	1.824,67

Πίνακας 8.1 Μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση υφιστάμενης κατάστασης

Σημειώνεται ότι η κατανάλωση θέρμανσης αφορά την απαιτούμενη ενέργεια καυσίμου για τη λειτουργία του λέβητα πετρελαίου, ενώ η κατανάλωση ψύξης αφορά την ηλεκτρική ενέργεια των τοπικών κλιματιστικών μονάδων.

Από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση της υφιστάμενης κατάστασης είναι:

$$E_{con,h,annual} = 41.186,23 \frac{kWh}{\acute{\epsilon}τος}$$

ενώ η αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη είναι:

$$E_{con,c,annual} = 1.824,67 kWh/\acute{\epsilon}τος$$

και το συνολικό ετήσιο άθροισμα, το οποίο σημειώνεται ότι εκφράζει τελική κατανάλωση ενέργειας που συμπεριλαμβάνει ενέργεια καυσίμου για θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια για ψύξη:

$$E_{con,annual} = 41.186,23 \frac{kWh}{\acute{\epsilon}τος} + 1.824,67 \frac{kWh}{\acute{\epsilon}τος} \Rightarrow$$

$$E_{con,exist,annual} = 43.010,90 kWh/\acute{\epsilon}τος$$

Οι τιμές αυτές αποτελούν τη βάση αναφοράς για τη σύγκριση με τα σενάρια αντλιών θερμότητας που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

8.2 Ενεργειακή κατανάλωση Σεναρίου 1 - Αντλία θερμότητας αέρα-νερού

Στο Σενάριο 1 εξετάζεται η αντικατάσταση του υφιστάμενου συστήματος με αντλία θερμότητας αέρα-νερού, η οποία καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου μέσω fan coils. Για να είναι δυνατή η σύγκριση, χρησιμοποιούνται τα ίδια μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία με αυτά της υφιστάμενης κατάστασης και των υπόλοιπων σεναρίων.

Για τη λειτουργία θέρμανσης λαμβάνεται σταθερός βαθμός απόδοσης:

$$COP = 3,00$$

ενώ για τη λειτουργία ψύξης λαμβάνεται:

$$EER = 3,00$$

Η χρήση σταθερών τιμών COP και EER για το Σενάριο 1 αποτελεί μια παραδοχή, καθώς το σενάριο αυτό χρησιμοποιείται ως τεchnικοοικονομικό σημείο αναφοράς για μια τυπική αντλία θερμότητας αέρα-νερού. Αντίθετα, στο Σενάριο 2 η απόδοση της ΓΑΘ υπολογίζεται αναλυτικότερα, με βάση τη θερμοκρασία του ρευστού του γεωεναλλάκτη.

Κατά τον υπολογισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες του συστήματος διανομής και των τερματικών μονάδων. Για το Σενάριο 1 χρησιμοποιούνται οι τιμές για το σύστημα διανομής:

$$\eta_s = 0,95$$

ενώ για τις τερματικές μονάδες λαμβάνεται:

$$\eta_{em} = 0,95$$

Η ηλεκτρική κατανάλωση για θέρμανση ανά μήνα i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{con,h,i} = \frac{E_{h,i}}{COP \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}} \quad (8.4)$$

ενώ η αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη υπολογίζεται ως:

$$E_{con,c,i} = \frac{E_{c,i}}{EER \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}}$$

Η συνολική μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση του Σεναρίου 1 προκύπτει ως:

$$E_{con,AWHP,i} = E_{con,h,i} + E_{con,c,i} \quad (8.5)$$

όπου $E_{con,AWHP,i}$ είναι η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού για τον μήνα i .

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 8.2) παρουσιάζει τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία, καθώς και την αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση για τη θέρμανση και την ψύξη του Σεναρίου 1.

Μήνας	$E_{h,i}$ [kWh]	$E_{c,i}$ [kWh]	CO P [-]	EER [-]	$E_{con,h,i}$ [kWh]	$E_{con,c,i}$ [kWh]	$E_{con,AWHP,i}$ [kWh]
Ιανουάριος	3.958,37	0,00	3,00	-	1.462,00	0,00	1.462,00
Φεβρουάριος	3.130,58	0,00	3,00	-	1.156,26	0,00	1.156,26
Μάρτιος	2.633,35	0,00	3,00	-	972,61	0,00	972,61
Απρίλιος	1.197,23	0,00	3,00	-	442,19	0,00	442,19
Μάιος	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00
Ιούνιος	0,00	719,45	-	3,00	0,00	265,72	265,72
Ιούλιος	0,00	1.183,34	-	3,00	0,00	437,06	437,06
Αύγουστος	0,00	925,01	-	3,00	0,00	341,65	341,65
Σεπτέμβριος	0,00	91,67	-	3,00	0,00	33,86	33,86
Οκτώβριος	527,78	0,00	3,00	-	194,93	0,00	194,93
Νοέμβριος	2.125,02	0,00	3,00	-	784,86	0,00	784,86
Δεκέμβριος	3.561,14	0,00	3,00	-	1.315,29	0,00	1.315,29
ΣΥΝΟΛΟ	17.133,47	2.919,47			6.328,15	1.078,29	7.406,44

Πίνακας 8.2 Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση Σεναρίου 1 - Αντλία θερμότητας αέρα-νερού

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση του Σεναρίου 1 για θέρμανση είναι:

$$E_{con,h,annual} = 6.328,15 \text{ kWh/έτος}$$

ενώ η αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη είναι:

$$E_{con,c,annual} = 1.078,29 \text{ kWh/έτος}$$

Συνεπώς, η συνολική ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση του Σεναρίου 1 είναι:

$$E_{con,AWHP,annual} = 6.328,15 + 1.078,29 = 7.406,44 \text{ kWh/έτος}$$

Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη σύγκριση του Σεναρίου 1 με την υφιστάμενη κατάσταση και με τα σενάρια γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

8.3 Ενεργειακή κατανάλωση Σεναρίου 2 - Γεωθερμική αντλία θερμότητας

Στο Σενάριο 2 εξετάζεται η κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου μέσω γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, η οποία συνδέεται με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη και τερματικές μονάδες fan coils. Αντίστοιχα με προηγουμένως, προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ των υπό εξέταση περιπτώσεων, χρησιμοποιούνται τα ίδια μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία με αυτά της υφιστάμενης κατάστασης και του Σεναρίου 1.

Σε αντίθεση με το Σενάριο 1, όπου έγινε η παραδοχή σταθερών τιμών COP και EER για την Α/Θ αέρα - νερού, στο Σενάριο 2 οι βαθμοί απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μεταβάλλονται ανά μήνα. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από το ενεργειακό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 7, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμική απόκριση του γεωεναλλάκτη και τη θερμοκρασία του ρευστού που κυκλοφορεί σε αυτόν.

Η ηλεκτρική κατανάλωση για τη λειτουργία θέρμανσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{con,h,i} = \frac{E_{h,i}}{COP_i \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}}$$

ενώ η ηλεκτρική κατανάλωση για τη λειτουργία ψύξης υπολογίζεται ως:

$$E_{con,c,i} = \frac{E_{c,i}}{EER_i \cdot \eta_s \cdot \eta_{em}}$$

όπου $E_{h,i}$ και $E_{c,i}$ είναι τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία, COP_i και EER_i οι μηνιαίες τιμές απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, ενώ η_s και η_{em} είναι οι βαθμοί απόδοσης του συστήματος διανομής και των τερματικών μονάδων αντίστοιχα.

Για το Σενάριο 2 λαμβάνονται:

$$\eta_s = 0,95 \quad \text{και} \quad \eta_{em} = 0,95$$

Ομοίως με το Σενάριο 1, η συνολική μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας προκύπτει ως:

$$E_{con,GSHP,i} = E_{con,h,i} + E_{con,c,i}$$

όπου $E_{con,GSHP,i}$ είναι η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ τον μήνα i .

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 8.3) παρουσιάζει τα μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία, τις τιμές COP_i και EER_i , καθώς και την αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση του Σεναρίου 2.

Μήνας	$E_{h,i}$ [kWh]	$E_{c,i}$ [kWh]	COP [-]	EER [-]	$E_{con,h,i}$ [kWh]	$E_{con,c,i}$ [kWh]	$E_{con,GSHP,i}$ [kWh]
Ιανουάριος	3.958,37	0,00	5,197	-	843,94	0,00	843,94
Φεβρουάριος	3.130,58	0,00	5,113	-	678,36	0,00	678,36
Μάρτιος	2.633,35	0,00	5,150	-	566,57	0,00	566,57
Απρίλιος	1.197,23	0,00	5,237	-	253,29	0,00	253,29
Μάιος	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00
Ιούνιος	0,00	719,45	-	5,402	0,00	147,57	147,57
Ιούλιος	0,00	1.183,34	-	5,325	0,00	246,22	246,22
Αύγουστος	0,00	925,01	-	5,304	0,00	193,23	193,23
Σεπτέμβριος	0,00	91,67	-	5,348	0,00	18,99	18,99
Οκτώβριος	527,78	0,00	5,508	-	106,17	0,00	106,17
Νοέμβριος	2.125,02	0,00	5,346	-	440,46	0,00	440,46
Δεκέμβριος	3.561,14	0,00	5,220	-	755,95	0,00	755,95
ΣΥΝΟΛΟ	17.133,47	2.919,47	-	-	3.644,75	606,01	4.250,76

Πίνακας 8.3 Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση Σεναρίου 2 - Γεωθερμική αντλία θερμότητας

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση του Σεναρίου 2 για θέρμανση είναι:

$$E_{con,h,annual} = 3.644,74 \text{ kWh/έτος}$$

ενώ η αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη είναι:

$$E_{con,c,annual} = 606,01 \frac{kWh}{\acute{\epsilon}τος}$$

Συνεπώς, η συνολική ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας είναι:

$$E_{con,GSHP,annual} = 3.644,74 + 606,01 = 4.250,75 kWh/\acute{\epsilon}τος$$

Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη ηλεκτρική κατανάλωση του Σεναρίου 1, γεγονός που οφείλεται στις υψηλότερες μηνιαίες τιμές *COP* και *EER* της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Το αποτέλεσμα αυτό χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως βάση για το Σενάριο 3, όπου εξετάζεται η μερική κάλυψη της κατανάλωσης της ΓΑΘ από φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία.

8.4 Ενεργειακή αξιολόγηση Σεναρίου 3 - ΓΑΘ με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία

Στο Σενάριο 3 εξετάζεται η συνδυασμένη λειτουργία της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία. Το σενάριο αυτό βασίζεται στο Σενάριο 2, καθώς η ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ παραμένει η ίδια, ενώ διαφοροποιείται ως προς τον τρόπο κάλυψης μέρους της κατανάλωσης μέσω της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Η μεθοδολογία υπολογισμού της φωτοβολταϊκής παραγωγής, της διαθέσιμης ενέργειας μετά την αποθήκευση στη μπαταρία, του συντελεστή ταυτοχρονισμού, της κατανάλωσης από το δίκτυο και της πλεονάζουσας παραγωγής παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.5.2. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ενεργειακά αποτελέσματα που προκύπτουν για τη βασική περίπτωση του Σεναρίου 3.

Από τους μηνιαίους υπολογισμούς του Πίνακα 7.11 προκύπτει ότι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ είναι:

$$E_{el,GSHP,annual} = 4.250,76 kWh/\acute{\epsilon}τος$$

Η αντίστοιχη ετήσια παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

$$E_{PV,annual} = 6.111,95 \text{ kWh/έτος}$$

Μετά την εφαρμογή του βαθμού απόδοσης της μπαταρίας, η διαθέσιμη φωτοβολταϊκή ενέργεια υπολογίζεται σε:

$$E_{PV,bat,annual} = 4.278,37 \text{ kWh/έτος}$$

Ωστόσο, λόγω του μη πλήρους ταυτοχρονισμού μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, η ενέργεια που μπορεί τελικά να αξιοποιηθεί για την κάλυψη της κατανάλωσης της ΓΑΘ είναι μικρότερη. Η ετήσια κατανάλωση από το ηλεκτρικό δίκτυο προκύπτει ίση με:

$$E_{grid,annual} = 2.664,05 \text{ kWh/έτος}$$

ενώ η μη αξιοποιούμενη πλεονάζουσα παραγωγή του Φ/Β συστήματος είναι:

$$E_{surplus,annual} = 1.437,67 \text{ kWh/έτος}$$

Συνεπώς, η παραγωγή του Φ/Β συστήματος και η μπαταρία μειώνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο σε σχέση με το Σενάριο 2. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί στην ποσότητα ενέργειας που καλύπτεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα:

$$E_{PV,used,annual} = E_{el,GSHP,annual} - E_{grid,annual}$$

$$E_{PV,used,annual} = 4250,76 \frac{\text{kWh}}{\text{έτος}} - 2664,05 \frac{\text{kWh}}{\text{έτος}} \Rightarrow$$

$$E_{PV,used,annual} = 1586,71 \text{ kWh/έτος}$$

Επομένως, η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο:

$$\frac{1586,71}{4250,76} \cdot 100 = 37,3\%$$

της ετήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8.4) παρουσιάζονται σε μηνιαία βάση τα ενεργειακά αποτελέσματα του Σεναρίου 3. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται η ηλεκτρική κατανάλωση της ΓΑΘ, η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος ανά εγκατεστημένο kW σύμφωνα με τα δεδομένα PVGIS, η συνολική φωτοβολταϊκή παραγωγή του συστήματος, η διαθέσιμη

ενέργεια μετά την αποθήκευση στη μπαταρία, η τελικά αξιοποιούμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια, η κατανάλωση από το ηλεκτρικό δίκτυο και η πλεονάζουσα παραγωγή.

Μήνας	$E_{el,GSHP,i}$ [kWh]	$e_{pv,i}$ [kWh/kWp]	$E_{pv,i}$ [kWh]	$E_{pv,bat,i}$ [kWh]	$f_{sync,i}$ [-]	$E_{pv,avail,i}$ [kWh]	$E_{grid,i}$ [kWh]	$E_{surplus,i}$ [kWh]
Ιανουάριος	843,94	86,30	365,48	255,84	0,50	127,92	716,02	0,00
Φεβρουάριος	678,36	90,40	382,84	267,99	0,50	134,00	544,37	0,00
Μάρτιος	566,57	121,00	512,44	358,70	0,50	179,35	387,22	0,00
Απρίλιος	253,29	135,10	572,15	400,50	0,50	200,25	53,04	0,00
Μάιος	0,00	145,90	617,89	432,52	0,90	389,27	0,00	389,27
Ιούνιος	147,57	147,50	624,66	437,26	0,90	393,54	0,00	245,97
Ιούλιος	246,22	162,40	687,76	481,43	0,90	433,29	0,00	187,07
Αύγουστος	193,23	159,70	676,33	473,43	0,90	426,09	0,00	232,85
Σεπτέμβριος	18,99	131,00	554,79	388,35	0,90	349,51	0,00	330,52
Οκτώβριος	106,17	106,70	451,87	316,31	0,50	158,16	0,00	51,98
Νοέμβριος	440,46	82,10	347,69	243,39	0,50	121,69	318,77	0,00
Δεκέμβριος	755,95	75,10	318,05	222,63	0,50	111,32	644,63	0,00
ΣΥΝΟΛΟ	4250,76	1443,20	6111,95	4278,37	-	3024,38	2664,05	1437,67

Πίνακας 8.4 Μηνιαίος υπολογισμός διαθέσιμης ενέργειας του Φ/Β συστήματος, κατανάλωσης από το δίκτυο και πλεονάζουσας παραγωγής στο Σενάριο 3

8.5 Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση υφιστάμενης κατάστασης και σεναρίων

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωμένα, προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ τους, τα ενεργειακά αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης και των τριών εξεταζόμενων σεναρίων. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε ετήσια βάση, ώστε να αποτυπωθεί η συνολική ενεργειακή επίδραση κάθε σεναρίου.

Η υφιστάμενη κατάσταση περιλαμβάνει κατανάλωση ενέργειας καυσίμου για τη θέρμανση και ηλεκτρική κατανάλωση για την ψύξη. Αντίθετα, στα Σενάρια 1 και 2 η κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων πραγματοποιείται αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια μέσω αντλιών θερμότητας. Στο Σενάριο 3, η απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας της ΓΑΘ παραμένει ίδια με το Σενάριο 2, ωστόσο μέρος της καλύπτεται από την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος και τη μπαταρία.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8.5) συγκεντρώνονται συνοπτικά τα ετήσια ενεργειακά αποτελέσματα υφιστάμενης κατάστασης και σεναρίων, όπως περιεγράφηκαν παραπάνω.

Υπό μελέτη περίπτωση	Τελική κατανάλωση για θέρμανση [kWh/έτος]	Τελική κατανάλωση για ψύξη [kWh/έτος]	Συνολική τελική κατανάλωση [kWh/έτος]	Ενέργεια από καύσιμο ή δίκτυο [kWh/έτος]	Αξιοποιούμενη Φ/Β ενέργεια [kWh/έτος]
Υφιστάμενη κατάσταση	41.186,23	1.824,67	43.010,90	43.010,90	—
Σενάριο 1 Α/Θ αέρα-νερού	6.328,15	1.078,29	7.406,44	7.406,44	—
Σενάριο 2 ΓΑΘ	3.644,75	606,01	4.250,76	4.250,76	—
Σενάριο 3 ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία	3.644,75	606,01	4.250,76	2.664,05	1.586,71

Πίνακας 8.5 Συγκεντρωτικά ετήσια ενεργειακά αποτελέσματα υφιστάμενης κατάστασης και σεναρίων

Σημειώνεται ότι στο Σενάριο 3 η συνολική ηλεκτρική απαίτηση της ΓΑΘ παραμένει ίση με αυτή του Σεναρίου 2. Η διαφοροποίηση αφορά τη μείωση της κατανάλωσης από το ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω αξιοποίησης μέρους της παραγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μετάβαση από την υφιστάμενη κατάσταση στο Σενάριο 1 οδηγεί σε σημαντική μείωση της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αντικατάσταση του λέβητα πετρελαίου και των υφιστάμενων αντλιών θερμότητας αέρα-αέρα χαμηλής απόδοσης από αντλία θερμότητας αέρα-νερού.

Το Σενάριο 2 παρουσιάζει ακόμη χαμηλότερη ηλεκτρική κατανάλωση σε σχέση με το Σενάριο 1. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην υψηλότερη απόδοση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, καθώς η θερμοκρασία του γεωεναλλάκτη παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τον εξωτερικό αέρα.

Στο Σενάριο 3, η συνολική ηλεκτρική απαίτηση της ΓΑΘ δεν μεταβάλλεται σε σχέση με το Σενάριο 2. Ωστόσο, η κατανάλωση από το ηλεκτρικό δίκτυο μειώνεται από 4.250,76 kWh/έτος σε 2.664,05 kWh/έτος

Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε αξιοποιούμενη ενέργεια:

$$E_{PV,used,annual} = 1586,71 \frac{kWh}{έτος}$$

δηλαδή περίπου 37,3% της ετήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης της ΓΑΘ.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση αντλιών θερμότητας μειώνει σημαντικά την τελική ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η γεωθερμική αντλία θερμότητας εμφανίζει καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά από την αντλία θερμότητας αέρα-νερού, ενώ η προσθήκη φωτοβολταϊκού συστήματος και μπαταρίας μειώνει περαιτέρω την εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα ενεργειακά αυτά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στο επόμενο κεφάλαιο ως βάση για την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων περιπτώσεων.

9. Τεχνο-οικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση Σεναρίων

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των τριών εξεταζόμενων σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης. Η αξιολόγηση βασίζεται στα ενεργειακά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 8 και έχει ως στόχο την εκτίμηση τόσο του κόστους λειτουργίας όσο και της οικονομικής βιωσιμότητας κάθε λύσης.

Ως βάση αναφοράς λαμβάνεται η υφιστάμενη κατάσταση, η οποία περιλαμβάνει θέρμανση με πετρέλαιο και ψύξη μέσω τοπικών κλιματιστικών μονάδων. Με βάση αυτήν, αξιολογούνται το Σενάριο 1, που συμπεριλαμβάνει την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας αέρα-νερού, το Σενάριο 2, που αφορά την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, και το Σενάριο 3, στο οποίο η, εξεταζόμενη στο Σενάριο 2, γεωθερμική αντλία θερμότητας συνδυάζεται με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία.

Η τεχνο-οικονομική ανάλυση περιλαμβάνει τον υπολογισμό του αρχικού κόστους επένδυσης, του ετήσιου κόστους λειτουργίας, της ετήσιας εξοικονόμησης σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση και βασικών οικονομικών δεικτών. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value - NPV), η Απλή Περίοδος Αποπληρωμής (Simple Payback Period – SPB) η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (Discounted Payback Period - DPB) και το σταθμισμένο κόστος θερμότητας (Levelized Cost of Heating - LCOH).

Συνεπώς, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται μόνο στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά εξετάζει και το κατά πόσο κάθε σενάριο ενεργειακής αναβάθμισης της υφιστάμενης κατάστασης αποτελεί οικονομικά βιώσιμη λύση.

9.1 Πλαίσιο της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης

Η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται με σκοπό τη σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης με τα τρία εξεταζόμενα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης, όχι μόνο ως προς την ενεργειακή τους συμπεριφορά, αλλά και ως προς την οικονομική τους αποδοτικότητα. Τα ενεργειακά αποτελέσματα που προέκυψαν στο Κεφάλαιο 8 αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους λειτουργίας κάθε περίπτωσης.

Ως βάση για την αξιολόγηση λαμβάνεται η υφιστάμενη κατάσταση, η οποία περιλαμβάνει κατανάλωση πετρελαίου για τη θέρμανση και ηλεκτρικής ενέργειας για την ψύξη. Τα υπό εξέταση σενάρια συγκρίνονται με την υφιστάμενη κατάσταση ως προς το αρχικό κόστος επένδυσης, το ετήσιο κόστος λειτουργίας και την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης.

Για κάθε σενάριο υπολογίζεται αρχικά το ετήσιο κόστος λειτουργίας, με βάση την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας, τις τιμές των ενεργειακών φορέων και τα κόστη συντήρησης που υιοθετούνται στην παρούσα εργασία. Η ετήσια εξοικονόμηση κάθε σεναρίου προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του κόστους λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης και του κόστους λειτουργίας του εξεταζόμενου σεναρίου.

$$S_{j,t} = CO_{op,ref,t} - CO_{op,j,t} \quad (9.1)$$

όπου:

- $S_{j,t}$ είναι η εξοικονόμηση του σεναρίου j κατά το έτος t ,
- $CO_{op,ref,t}$ είναι το κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης κατά το ίδιο έτος και
- $CO_{op,j,t}$ είναι το κόστος λειτουργίας του εξεταζόμενου σεναρίου. Το κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει το κόστος ενέργειας καθώς, το ετήσιο κόστος συντήρησης.

Επειδή η ανάλυση πραγματοποιείται σε πολυετή ορίζοντα, η εξοικονόμηση μεταβάλλεται από έτος σε έτος, ανάλογα με την ετήσια αύξηση του κόστους ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, οι ετήσιες εξοικονομήσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως ταμειακές ροές για τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών.

Η αξιολόγηση των σεναρίων γίνεται με τη χρήση βασικών οικονομικών δεικτών, οι οποίοι επιτρέπουν τη σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης ως προς την οικονομική τους βιωσιμότητα και συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), η Απλή Περίοδος Αποπληρωμής (SPB) η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (DPB) και το σταθμισμένο κόστος θερμότητας (LCOH).

9.2 Οικονομικές παραδοχές και δεδομένα εισόδου

Για την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων απαιτείται ο καθορισμός των βασικών οικονομικών παραδοχών της ανάλυσης. Οι παραδοχές αυτές αφορούν την περίοδο υπολογισμού, το προεξοφλητικό επιτόκιο, την ετήσια μεταβολή του κόστους ενέργειας, καθώς και τις τιμές των ενεργειακών φορέων που χρησιμοποιούνται στην υφιστάμενη κατάσταση και στα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης.

Η περίοδος υπολογισμού λαμβάνεται ίση με:

$$L_b = 20 \text{ έτη}$$

Η επιλογή της περιόδου αυτής επιτρέπει την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης των σεναρίων σε ρεαλιστικά μακροχρόνιο ορίζοντα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το αρχικό κόστος επένδυσης όσο και τα ετήσια κόστη λειτουργίας.

Για την προεξόφληση των μελλοντικών ταμειακών ροών χρησιμοποιείται προεξοφλητικό επιτόκιο, μέσω το οποίου μελλοντικές δαπάνες και εξοικονομήσεις εκφράζονται σε όρους παρούσας αξίας. Η τιμή αυτή λαμβάνεται ως παραδοχή της παρούσας τεχνο-οικονομικής ανάλυσης και χρησιμοποιείται για την αναγωγή των μελλοντικών δαπανών και εξοικονομήσεων σε παρούσα αξία. Η επιλογή του προεξοφλητικού επιτοκίου επηρεάζει τους οικονομικούς δείκτες, όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία και η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής.:

$$p = 7\%$$

Για την αναγωγή των χρηματικών ροών στο έτος αναφοράς χρησιμοποιούνται χρηματοοικονομικοί συντελεστές, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο p και την περίοδο υπολογισμού L_b .

Ο συντελεστής προεξόφλησης του έτους i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D_{f(i)} = \frac{1}{(1+p)^i} \quad (9.2)$$

και χρησιμοποιείται για την αναγωγή μιας μελλοντικής χρηματικής ροής του έτους i σε παρούσα αξία.

Ο συντελεστής παρούσας αξίας ετήσιας σταθερής και ληξιπρόθεσμης ράντας υπολογίζεται ως:

$$PVF_{f(i)} = \frac{1-(1+p)^{-i}}{p} \quad (9.3)$$

και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή σταθερών ετήσιων χρηματικών ροών σε συνολική παρούσα αξία έως το έτος i . Για το σύνολο της περιόδου υπολογισμού τίθεται $i = L_b$.

Ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CRF_{f(i)} = \frac{p}{1-(1+p)^{-i}} \quad (9.4)$$

και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μιας παρούσας αξίας σε ισοδύναμο ετήσιο κόστος έως το έτος i .

Ο συντελεστής χρεωλυσίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SFF_{f(i)} = \frac{p}{(1+p)^i - 1} \quad (9.5)$$

και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μιας μελλοντικής αξίας σε ισοδύναμη σταθερή ετήσια αξία έως το έτος i .

Στην παρούσα ανάλυση, ο συντελεστής $D_{f(i)}$ χρησιμοποιείται για την προεξόφληση των ετήσιων ταμειακών ροών, ενώ οι συντελεστές $PVF_{f(i)}$, $CRF_{f(i)}$ και $SFF_{f(i)}$ χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται μετατροπή μεταξύ παρούσας αξίας, ισοδύναμου ετήσιου κόστους και μελλοντικής αξίας.

Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη ετήσια αύξηση του κόστους ενέργειας:

$$f = 1,5\%$$

Η παραδοχή αυτή εφαρμόζεται στα ετήσια κόστη λειτουργίας, ώστε να είναι δυνατή η πιθανή συνεκτίμηση της αύξησης των τιμών ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου υπολογισμού.

Επομένως, η τιμή ενέργειας κατά το έτος t υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_{energy,t} = c_{energy,1} \cdot (1 + f)^{t-1} \quad (9.6)$$

όπου:

- $c_{energy,t}$ είναι η τιμή ενέργειας κατά το έτος t ,
- $c_{energy,1}$ είναι η τιμή ενέργειας κατά το πρώτο έτος της ανάλυσης και
- f είναι ο ετήσιος ρυθμός αύξησης του κόστους ενέργειας.

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής αυτός εφαρμόζεται αρχικά στις τιμές της ενέργειας. Στην παρούσα ανάλυση, για λόγους απλοποίησης και ενιαίας αντιμετώπισης των ετήσιων λειτουργικών δαπανών, η ίδια ετήσια αύξηση εφαρμόζεται και στα κόστη συντήρησης. Επομένως, ο συντελεστής f χρησιμοποιείται συνολικά για την ετήσια αναπροσαρμογή του κόστους λειτουργίας κάθε περίπτωσης.

Για την υφιστάμενη κατάσταση, η οποία αποτελεί την βάση αναφοράς για την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές πηγές ενέργειας, πετρέλαιο για τη θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια για την ψύξη. Επομένως, το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης υπολογίζεται ως:

$$CO_{op,ref,t} = E_{oil,ref} \cdot c_{oil,t} + E_{el,c,ref} \cdot c_{el,t} + CO_{maint,ref,t} \quad (9.7)$$

όπου:

- $CO_{op,ref,t}$ είναι το κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης κατά το έτος t ,
- $E_{oil,ref}$ είναι η ετήσια κατανάλωση ενέργειας πετρελαίου για θέρμανση,
- $c_{oil,t}$ είναι η τιμή του πετρελαίου κατά το έτος t ,
- $E_{el,c,ref}$ είναι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη,
- $c_{el,t}$ είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά το έτος t και
- $CO_{maint,ref,t}$ είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης της υφιστάμενης εγκατάστασης.

Για τα Σενάρια 1 και 2, στα οποία η κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων γίνεται με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από αντλίες θερμότητας, το ετήσιο κόστος λειτουργίας υπολογίζεται ως:

$$CO_{op,j,t} = E_{cons,j} \cdot c_{el,t} + CO_{maint,j,t} \quad (9.8)$$

όπου:

- $j = 1,2$ ο αριθμός του Σεναρίου αντίστοιχα
- $E_{cons,j}$ είναι η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του αντίστοιχου σεναρίου και
- $CO_{maint,j,t}$ είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης.

Για το Σενάριο 3, το οποίο περιλαμβάνει γεωθερμική αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς και μπαταρία, το κόστος λειτουργίας υπολογίζεται με βάση την τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Η ενέργεια του φ/β συστήματος που αξιοποιείται από τη ΓΑΘ μειώνει την απαιτούμενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η πλεονάζουσα παραγωγή δεν αξιολογείται οικονομικά στην παρούσα ανάλυση. Σημειώνεται πως η παραδοχή αυτή καθιστά το Σενάριο 3 συντηρητικό από οικονομική άποψη, καθώς δεν αποδίδεται αξία στην πλεονάζουσα παραγωγή του Φ/Β συστήματος. Σε διαφορετικό σχήμα λειτουργίας, όπου η πλεονάζουσα ενέργεια θα μπορούσε να αποζημιωθεί ή να συμψηφιστεί οικονομικά, οι οικονομικοί δείκτες του Σεναρίου 3 θα μπορούσαν να διαφοροποιηθούν. Συνεπώς:

$$CO_{op,3,t} = E_{grid,3} \cdot c_{el,t} + CO_{maint,3,t} \quad (9.9)$$

όπου $E_{grid,3}$ είναι η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο στο Σενάριο 3.

Τα ετήσια κόστη συντήρησης εκτιμώνται ως ποσοστό του αρχικού κόστους επένδυσης των επιμέρους συστημάτων. Για τις αντλίες θερμότητας λαμβάνεται ετήσιο κόστος συντήρησης ίσο με 2% της αντίστοιχης αρχικής επένδυσης, ενώ για τον κατακόρυφο γεωεναλλάκτη λαμβάνεται χαμηλότερο ποσοστό, ίσο με 0,2%, λόγω της περιορισμένης ανάγκης συντήρησης. Για το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη μπαταρία λαμβάνεται ετήσιο κόστος συντήρησης ίσο με 2% και 1% αντίστοιχα του αρχικού τους κόστους.

Συγκεκριμένα για το Σενάριο 1, το ετήσιο κόστος συντήρησης υπολογίζεται ως:

$$CO_{maint,1} = 0,02 \cdot CO_{inv,1}$$

Για το Σενάριο 2:

$$CO_{maint,2} = 0,02 \cdot CO_{GSHP} + 0,002 \cdot CO_{GHE}$$

Για το Σενάριο 3:

$$CO_{maint,3} = 0,02 \cdot CO_{GSHP} + 0,002 \cdot CO_{GHE} + 0,02 \cdot CO_{PV} + 0,01 \cdot CO_{bat}$$

όπου:

- CO_{GSHP} είναι το κόστος της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και των τερματικών μονάδων,
- CO_{GHE} είναι το κόστος του γεωεναλλάκτη,
- CO_{PV} είναι το κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος και
- CO_{bat} είναι το κόστος της μπαταρίας.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 9.1) παρουσιάζονται οι βασικές οικονομικές παραδοχές που προκύπτουν για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση από τα κόστη επένδυσης, που έχουν θεωρηθεί και περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο, και χρησιμοποιούνται στην τεchnο-οικονομική ανάλυση στα επόμενα κεφάλαια.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα / Παρατήρηση
Περίοδος υπολογισμού	L_b	20	έτη
Προεξοφλητικό επιτόκιο	p	7	%
Ετήσια αύξηση κόστους ενέργειας	f	1,5	%/έτος
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας πρώτου έτους	$c_{el,1}$	0,145	€/kWh
Τιμή πετρελαίου θέρμανσης πρώτου έτους	$c_{oil,1}$	0,119	€/kWh
Κόστος συντήρησης υφιστάμενης κατάστασης	$CO_{maint,ref}$	200,00	€/έτος
Κόστος συντήρησης Σεναρίου 1	$CO_{maint,1}$	248,00	€/έτος
Κόστος συντήρησης Σεναρίου 2	$CO_{maint,2}$	258,50	€/έτος
Κόστος συντήρησης Σεναρίου 3	$CO_{maint,3}$	432,08	€/έτος

Πίνακας 9.1 Βασικές οικονομικές παραδοχές τεchnο-οικονομικής ανάλυσης

Αξίζει να σημειωθεί, όσον αφορά την τιμή πετρελαίου, για την υφιστάμενη κατάσταση, η τιμή του πετρελαίου θέρμανσης εκφράζεται σε €/kWh, ώστε να είναι συγκρίσιμη με την

τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τιμή αγοράς του πετρελαίου θέρμανσης λαμβάνεται ίση με 1,182 €/L. Για τη μετατροπή της σε κόστος ανά μονάδα ενέργειας χρησιμοποιείται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του πετρελαίου και η πυκνότητά του.

Η ενεργειακή περιεκτικότητα ανά λίτρο πετρελαίου υπολογίζεται ως:

$$H_{oil} = H_u \cdot \rho_{oil} \quad (9.10)$$

όπου $H_u = 11,92 \text{ kWh/kg}$ είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του πετρελαίου και $\rho_{oil} = 0,83 \text{ kg/L}$ η πυκνότητά του. Επομένως:

$$H_{oil} = 11,92 \cdot 0,83 = 9,894 \text{ kWh/L}$$

Συνεπώς, η τιμή του πετρελαίου ανά μονάδα ενέργειας προκύπτει ως:

$$c_{oil,1} = \frac{1,182}{9,894} = 0,119 \text{ €/kWh}$$

9.3 Κόστος επένδυσης εξεταζόμενων σεναρίων

Στο παρόν κεφάλαιο προσδιορίζεται το κόστος επένδυσης των εξεταζόμενων σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης. Το κόστος αυτό αποτελεί βασικό μέγεθος της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης, καθώς επηρεάζει άμεσα την οικονομική βιωσιμότητα κάθε επιλογής και χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών αξιολόγησης.

Η υφιστάμενη κατάσταση λαμβάνεται ως βάση αναφοράς και δεν περιλαμβάνει νέο αρχικό κόστος επένδυσης. Αντίθετα, για τα τρία σενάρια υπολογίζεται το κόστος επένδυσης των αντίστοιχων συστημάτων. Το κόστος επένδυσης κάθε σεναρίου εκφράζεται σε όρους παρούσας αξίας και περιλαμβάνει, όπου απαιτείται, το αρχικό κόστος εγκατάστασης, τα κόστη διάθεσης στο τέλος της διάρκειας ζωής, τις ενδιάμεσες αντικαταστάσεις, όταν και αν προβλέπεται, και τις τυχόν υπολειμματικές αξίες εξοπλισμού.

Γενικά, το καθαρό κόστος επένδυσης ενός σεναρίου j μπορεί να εκφραστεί ως:

$$CO_{inv,j} = CO_{init,j} + CO_{rep,πα,j} + CO_{disposal,πα,j} - VAL_{fin,πα,j} \quad (9.11)$$

όπου:

- $CO_{inv,j}$ είναι το κόστος επένδυσης του σεναρίου j σε όρους παρούσας αξίας,
- $CO_{init,j}$ είναι το αρχικό κόστος εγκατάστασης,
- $CO_{rep,πα,j}$ είναι το κόστος αντικαταστάσεων ανηγμένο σε παρούσα αξία,
- $CO_{disposal,πα,j}$ είναι το κόστος διάθεσης ανηγμένο σε παρούσα αξία και
- $VAL_{fin,πα,j}$ είναι η υπολειμματική αξία ανηγμένη σε παρούσα αξία.

Για την αναγωγή των μελλοντικών αξιών στο έτος αναφοράς χρησιμοποιούνται οι χρηματοοικονομικοί συντελεστές που ορίστηκαν στην Ενότητα 9.2. Πιο συγκεκριμένα, τα κόστη διάθεσης και οι υπολειμματικές αξίες μετατρέπονται σε παρούσα αξία, ώστε να είναι λογική η σύγκριση του τελικού κόστους επένδυσης κάθε σεναρίου.

9.3.1 Σενάριο 1 : Αντλία θερμότητας αέρα-νερού

Για το Σενάριο 1, το οποίο αφορά την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας αέρα-νερού και των απαιτούμενων τερματικών μονάδων, το αρχικό κόστος επένδυσης λαμβάνεται ίσο με:

$$CO_{init,1} = 12.400 \text{ €}$$

Η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού θεωρείται ίση με την περίοδο υπολογισμού:

$$L_m = L_b = 20 \text{ έτη}$$

Συνεπώς, δεν προκύπτει υπολειμματική αξία στο τέλος της περιόδου υπολογισμού και δεν απαιτείται ενδιάμεση αντικατάσταση εξοπλισμού.

Το κόστος διάθεσης στο τέλος της διάρκειας ζωής λαμβάνεται ίσο με 2% του αρχικού κόστους επένδυσης:

$$CO_{disposal,1} = 0,02 \cdot CO_{init,1}$$

$$CO_{disposal,1} = 0,02 \cdot 12.400 = 248 \text{ €}$$

Για την αναγωγή του κόστους διάθεσης σε παρούσα αξία, το μελλοντικό κόστος μετατρέπεται αρχικά σε ισοδύναμη σταθερή ετήσια ληξιπρόθεσμη αξία με χρήση του συντελεστή χρεωλυσίου $SFF_{f(L_b)}$. Για $p = 7\%$ και $L_b = 20$ έτη προκύπτει:

$$SFF_{f(20)} = 0,024$$

Άρα η ισοδύναμη ετήσια αξία του κόστους διάθεσης είναι:

$$CO_{disposal,ann,1} = CO_{disposal,1} \cdot SFF_{f(20)}$$

$$CO_{disposal,ann,1} = 248 \cdot 0,024 = 6,05 \text{ €/έτος}$$

Στη συνέχεια, η ετήσια αυτή αξία ανάγεται σε παρούσα αξία με χρήση του συντελεστή παρούσας αξίας $PVF_{f(20)}$:

$$PVF_{f(20)} = 10,594$$

Επομένως, το κόστος διάθεσης σε παρούσα αξία είναι:

$$CO_{disposal, \pi\alpha, 1} = CO_{disposal, ann, 1} \cdot PVF_{f(20)}$$

$$CO_{disposal, \pi\alpha, 1} = 6,05 \cdot 10,594 = 64,09 \text{ €}$$

Το συνολικό κόστος επένδυσης του Σεναρίου 1, σε όρους παρούσας αξίας, υπολογίζεται ως:

$$CO_{inv, 1} = CO_{init, 1} + CO_{disposal, \pi\alpha, 1}$$

$$CO_{inv, 1} = 12.400 + 64,09 = 12.464,09 \text{ €}$$

9.3.2 Σενάριο 2 : Γεωθερμική αντλία θερμότητας

Για το Σενάριο 2, το οποίο αφορά την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη, το συνολικό κόστος επένδυσης υπολογίζεται ξεχωριστά για τον εξοπλισμό χωρίς τον γεωεναλλάκτη και για τον γεωεναλλάκτη. Ο διαχωρισμός αυτός πραγματοποιείται επειδή οι δύο κατηγορίες εξοπλισμού έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής.

Για τον εξοπλισμό πλην γεωεναλλάκτη, το αρχικό κόστος επένδυσης λαμβάνεται ίσο με:

$$CO_{init, GSHP, 2} = 11.400 \text{ €}$$

Η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού θεωρείται ίση με την περίοδο υπολογισμού, δηλαδή:

$$L_m = L_b = 20 \text{ έτη}$$

Συνεπώς, δεν προκύπτει υπολειμματική αξία στο τέλος της περιόδου υπολογισμού. Το κόστος διάθεσης λαμβάνεται ίσο με 2% του αρχικού κόστους:

$$CO_{disposal, GSHP, 2} = 0,02 \cdot 11.400 = 228 \text{ €}$$

Μετά την αναγωγή του κόστους διάθεσης σε παρούσα αξία, με χρήση των συντελεστών $SFF_{f(20)}$ και $PVF_{f(20)}$, ομοίως με προηγούμενως, προκύπτει:

$$CO_{disposal, \pi\alpha, GSHP, 2} = 58,92 \text{ €}$$

Επομένως, το κόστος επένδυσης του εξοπλισμού πλην γεωεναλλάκτη, σε όρους παρούσας αξίας, είναι:

$$CO_{inv,GSHP,2} = CO_{init,GSHP,2} + CO_{disposal,πα,GSHP,2}$$

$$CO_{inv,GSHP,2} = 11.400 + 58,92 = 11.458,92 \text{ €}$$

Για τον γεωεναλλάκτη, το αρχικό κόστος επένδυσης λαμβάνεται ίσο με:

$$CO_{init,GHE,2} = 15.250 \text{ €}$$

Η διάρκεια ζωής του γεωεναλλάκτη θεωρείται ίση με:

$$L_m = 50 \text{ έτη}$$

Επειδή η διάρκεια ζωής του γεωεναλλάκτη είναι μεγαλύτερη από την περίοδο υπολογισμού της ανάλυσης, στο τέλος της περιόδου $L_b = 20$ έτη προκύπτει υπολειμματική αξία.

Το κόστος διάθεσης του γεωεναλλάκτη, ανηγμένο σε παρούσα αξία, προκύπτει ίσο με:

$$CO_{disposal,πα,GHE,2} = 0,79 \text{ €}$$

Η υπολειμματική αξία του γεωεναλλάκτη, ανηγμένη στο έτος αναφοράς, υπολογίζεται ίση με:

$$VAL_{fin,πα,GHE,2} = 3.543,48 \text{ €}$$

Επομένως, το κόστος επένδυσης του γεωεναλλάκτη σε όρους παρούσας αξίας υπολογίζεται ως:

$$CO_{inv,GHE,2} = CO_{init,GHE,2} + CO_{disposal,πα,GHE,2} - VAL_{fin,πα,GHE,2}$$

$$CO_{inv,GHE,2} = 15.250 + 0,79 - 3.543,48 = 11.707,32 \text{ €}$$

Το συνολικό κόστος επένδυσης του Σεναρίου 2 προκύπτει ως:

$$CO_{inv,2} = CO_{inv,GSHP,2} + CO_{inv,GHE,2}$$

$$CO_{inv,2} = 11.458,92 + 11.707,32 = 23.166,24 \text{ €}$$

9.3.3 Σενάριο 3 : Γεωθερμική αντλία θερμότητας με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία

Για το Σενάριο 3, το οποίο περιλαμβάνει γεωθερμική αντλία θερμότητας, κατακόρυφο γεωεναλλάκτη, φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία, το συνολικό κόστος επένδυσης υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους εξοπλισμών του συστήματος. Επειδή οι επιμέρους συνιστώσες έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής, λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά τα κόστη διάθεσης, οι ενδιάμεσες αντικαταστάσεις και οι υπολειμματικές αξίες.

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας πλην γεωεναλλάκτη θεωρείται ότι έχει διάρκεια ζωής ίση με την περίοδο υπολογισμού, δηλαδή:

$$L_m = L_b = 20 \text{ έτη}$$

Συνεπώς, δεν προκύπτει υπολειμματική αξία στο τέλος της περιόδου υπολογισμού. Το αντίστοιχο κόστος επένδυσης σε όρους παρούσας αξίας είναι ίδιο με αυτό που υπολογίστηκε στο Σενάριο 2:

$$CO_{inv,GSHP,3} = 11.458,92 \text{ €}$$

Ο γεωεναλλάκτης θεωρείται ότι έχει διάρκεια ζωής $L_m = 50$ έτη. Επομένως, στο τέλος της περιόδου υπολογισμού παραμένει μη αξιοποιημένο τμήμα της διάρκειας ζωής του, το οποίο λαμβάνεται υπόψη ως υπολειμματική αξία. Το κόστος του γεωεναλλάκτη σε όρους παρούσας αξίας είναι:

$$CO_{inv,GHE,3} = 11.707,32 \text{ €}$$

Το φωτοβολταϊκό σύστημα έχει αρχικό κόστος:

$$CO_{init,PV} = 5.929 \text{ €}$$

και διάρκεια ζωής:

$$L_m = 25 \text{ έτη}$$

Επειδή η διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι μεγαλύτερη από την περίοδο υπολογισμού $L_b = 20$ έτη, στο τέλος της περιόδου υπολογισμού προκύπτει υπολειμματική αξία.

Το κόστος διάθεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος σε παρούσα αξία είναι:

$$CO_{disposal,πα,PV} = 19,86 \text{ €}$$

ενώ η υπολειμματική αξία του φωτοβολταϊκού συστήματος σε παρούσα αξία είναι:

$$VAL_{fin,πα,PV} = 539,08 \text{ €}$$

Επομένως, το κόστος επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος σε όρους παρούσας αξίας υπολογίζεται ως:

$$CO_{inv,PV} = CO_{init,PV} + CO_{disposal,πα,PV} - VAL_{fin,πα,PV}$$

$$CO_{inv,PV} = 5.929 + 19,86 - 539,08 = 5.409,78 \text{ €}$$

Για τη μπαταρία, το αρχικό κόστος λαμβάνεται ίσο με:

$$CO_{init,bat} = 5.500 \text{ €}$$

και η διάρκεια ζωής της θεωρείται ίση με:

$$L_m = 10 \text{ έτη}$$

Επειδή η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι μικρότερη από την περίοδο υπολογισμού $L_b = 20$ έτη, απαιτείται αντικατάσταση στο έτος 10. Η δεύτερη μπαταρία ολοκληρώνει τη διάρκεια ζωής της στο τέλος της περιόδου υπολογισμού, επομένως δεν προκύπτει υπολειμματική αξία στο τέλος της ανάλυσης.

Στο κόστος της μπαταρίας λαμβάνονται υπόψη το αρχικό κόστος, το κόστος αντικατάστασης σε παρούσα αξία και τα αντίστοιχα κόστη διάθεσης. Το συνολικό κόστος της μπαταρίας σε όρους παρούσας αξίας υπολογίζεται ίσο με:

$$CO_{inv,bat} = 8.380,27 \text{ €}$$

Συνεπώς, το συνολικό κόστος επένδυσης του Σεναρίου 3 είναι:

$$CO_{inv,3} = CO_{inv,GSHP,3} + CO_{inv,GHE,3} + CO_{inv,PV} + CO_{inv,bat}$$

$$CO_{inv,3} = 11.458,92 + 11.707,32 + 5.409,78 + 8.380,27$$

$$CO_{inv,3} = 36.956,29 \text{ €}$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9.2) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κόστη επένδυσης των εξεταζόμενων σεναρίων σε όρους παρούσας αξίας.

Εξοπλισμός	Σενάριο 1 [€]	Σενάριο 2 [€]	Σενάριο 3 [€]
Αντλία θερμότητας αέρα-νερού και θερματικές μονάδες fan coil	12.464,09	—	—
Γεωθερμική αντλία θερμότητας νερού-νερού και θερματικές μονάδες fan coil	—	11.458,92	11.458,92
Κατακόρυφος γεωεναλλάκτης	—	11.707,32	11.707,32
Φωτοβολταϊκό σύστημα	—	—	5.409,78
Μπαταρία	—	—	8.380,27
Συνολικό κόστος επένδυσης	12.464,09	23.166,24	36.956,29

Πίνακας 9.2 Κόστος επένδυσης εξεταζόμενων σεναρίων σε όρους παρούσας αξίας

Οι τιμές του Πίνακα 9.2 χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας, της Απλής και Έντοκης Περιόδου Αποπληρωμής και του σταθμισμένου κόστους θερμότητας

9.4 Ετήσιο κόστος λειτουργίας και εξοικονόμηση

Στην παρούσα ενότητα υπολογίζεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης και των εξεταζόμενων σεναρίων. Ο υπολογισμός βασίζεται στις ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας που προέκυψαν από την ενεργειακή αξιολόγηση του Κεφαλαίου 8 και στις οικονομικές παραδοχές που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 9.2.

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει το κόστος ενέργειας και το ετήσιο κόστος συντήρησης. Αρχικά υπολογίζεται το κόστος λειτουργίας του πρώτου έτους για κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια, για τα επόμενα έτη της περιόδου υπολογισμού, το κόστος λειτουργίας αναπροσαρμόζεται με βάση τον ετήσιο συντελεστή αύξησης f .

Στην παρούσα ανάλυση, ο συντελεστής f εφαρμόζεται αρχικά στις τιμές της καταναλισκόμενης ενέργειας. Για λόγους απλοποίησης και ενιαίας αντιμετώπισης των ετήσιων λειτουργικών δαπανών, η ίδια ετήσια αύξηση εφαρμόζεται και στα κόστη συντήρησης. Επομένως, ο συντελεστής f χρησιμοποιείται συνολικά για την συνολική ετήσια αναπροσαρμογή του κόστους λειτουργίας κάθε περίπτωσης.

Για την υφιστάμενη κατάσταση, η οποία αποτελεί την κατάσταση αναφοράς, το κόστος λειτουργίας του πρώτου έτους περιλαμβάνει το κόστος πετρελαίου για τη θέρμανση, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για την ψύξη και το κόστος συντήρησης:

$$CO_{op,ref,1} = E_{oil,ref} \cdot c_{oil,1} + E_{el,c,ref} \cdot c_{el,1} + CO_{maint,ref,1}$$

όπου:

- $CO_{op,ref,1}$ είναι το κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης κατά το πρώτο έτος,
- $E_{oil,ref}$ είναι η ετήσια κατανάλωση ενέργειας πετρελαίου για θέρμανση,
- $c_{oil,1}$ είναι η τιμή πετρελαίου κατά το πρώτο έτος,
- $E_{el,c,ref}$ είναι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη,
- $c_{el,1}$ είναι η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας κατά το πρώτο έτος και
- $CO_{maint,ref,1}$ είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης της υφιστάμενης εγκατάστασης.

Για τα Σενάρια 1 και 2, στα οποία η κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων γίνεται με συστήματα αντλιών θερμότητας με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος λειτουργίας του πρώτου έτους υπολογίζεται ως:

$$CO_{op,j,1} = E_{cons,j} \cdot c_{el,1} + CO_{maint,j,1}$$

όπου:

- $j = 1,2$ το υπό εξέταση σενάριο
- $E_{cons,j}$ είναι η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση του αντίστοιχου σεναρίου και
- $CO_{maint,j,1}$ είναι το κόστος συντήρησης του πρώτου έτους.

Για το Σενάριο 3, το οποίο περιλαμβάνει γεωθερμική αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία, το κόστος λειτουργίας υπολογίζεται με βάση την τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Η ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος που αξιοποιείται από τη ΓΑΘ μειώνει την απαιτούμενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η πλεονάζουσα παραγωγή δεν αξιολογείται οικονομικά στην παρούσα ανάλυση. Συνεπώς:

$$CO_{op,3,1} = E_{grid,3} \cdot c_{el,1} + CO_{maint,3,1}$$

όπου:

- $E_{grid,3}$ είναι η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο στο Σενάριο 3.

Για κάθε επόμενο έτος i , το κόστος λειτουργίας υπολογίζεται με βάση το κόστος λειτουργίας του πρώτου έτους και τον συντελεστή ετήσιας αύξησης f :

$$CO_{op,j,i} = CO_{op,j,1} \cdot (1 + f)^{i-1}$$

Αντίστοιχα, για την υφιστάμενη κατάσταση:

$$CO_{op,ref,i} = CO_{op,ref,1} \cdot (1 + f)^{i-1}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση κάθε σεναρίου υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του κόστους λειτουργίας της υφιστάμενης κατάστασης και του κόστους λειτουργίας του εξεταζόμενου σεναρίου:

$$S_{j,i} = CO_{op,ref,i} - CO_{op,j,i}$$

όπου:

- $S_{j,i}$ είναι η ετήσια εξοικονόμηση του σεναρίου j κατά το έτος i .

Οι ετήσιες εξοικονομήσεις $S_{j,i}$ αποτελούν τις ετήσιες ταμειακές ροές της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης. Κατά τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών, και ειδικότερα της Καθαρής Παρούσας Αξίας και της Έντοκης Περιόδου Αποπληρωμής, οι ροές αυτές ανάγονται στο έτος αναφοράς με χρήση του συντελεστή προεξόφλησης $D_{f(i)}$, όπως παρουσιάζεται στην Ενότητα 9.5.

Στον Πίνακα 9.3 παρουσιάζονται το ετήσιο κόστος λειτουργίας και η ετήσια εξοικονόμηση για το πρώτο έτος της ανάλυσης.

Περίπτωση	Είδος ενεργειακής κατανάλωσης	Κατανάλωση από καύσιμο ή δίκτυο [kWh/έτος]	Κόστος ενέργειας [€/έτος]	Κόστος συντήρησης [€/έτος]	Ετήσιο κόστος λειτουργίας [€/έτος]	Ετήσια εξοικονόμηση [€/έτος]
Υφιστάμενη κατάσταση	Πετρέλαιο θέρμανσης + ηλεκτρική ενέργεια ψύξης	41.186,23 + 1.824,67	5.185,14	200,00	5.385,14	—
Σενάριο 1: Α/Θ αέρα-νερού	Ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο	7.406,44	1.073,93	248,00	1.321,93	4.063,21
Σενάριο 2: ΓΑΘ	Ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο	4.250,76	616,36	258,50	874,86	4.510,28
Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία	Ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο μετά την αξιοποίηση Φ/Β	2.664,05	386,29	432,08	818,37	4.566,77

Πίνακας 9.3 Ετήσιο κόστος λειτουργίας και εξοικονόμηση κατά το πρώτο έτος

Από τον Πίνακα 9.3 προκύπτει ότι όλα τα εξεταζόμενα σενάρια οδηγούν σε σημαντική μείωση του ετήσιου κόστους λειτουργίας σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης πετρελαίου και των τοπικών μονάδων ψύξης με συστήματα αντλιών θερμότητας υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης.

Το Σενάριο 1 παρουσιάζει σημαντική εξοικονόμηση σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, λόγω της μετάβασης σε αντλία θερμότητας αέρα-νερού. Το Σενάριο 2 οδηγεί

σε ακόμη χαμηλότερο κόστος λειτουργίας, καθώς η γεωθερμική αντλία θερμότητας εμφανίζει μικρότερη ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση.

Το Σενάριο 3 παρουσιάζει το χαμηλότερο ετήσιο κόστος λειτουργίας μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέρος της ηλεκτρικής κατανάλωσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας καλύπτεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη μπαταρία, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο.

Ωστόσο, η τελική οικονομική αξιολόγηση δεν εξαρτάται μόνο από το ετήσιο κόστος λειτουργίας του πρώτου έτους, αλλά και από τη χρονική εξέλιξη των ετήσιων λειτουργικών δαπανών, το κόστος επένδυσης και την προεξόφληση των μελλοντικών ταμειακών ροών. Για τον λόγο αυτό, τα μεγέθη του Πίνακα 9.3 χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών αξιολόγησης, προκειμένου να διεξαχθούν αξιοποιήσιμα συμπεράσματα.

9.5 Οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση της οικονομικής αποδοτικότητας των εξεταζόμενων σεναρίων χρησιμοποιούνται βασικοί οικονομικοί δείκτες, οι οποίοι επιτρέπουν τη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Οι δείκτες που εξετάζονται είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), η Απλή Περίοδος Αποπληρωμής (SPB) ή Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (DPB) και το σταθμισμένο κόστος θερμότητας και ψύξης (LCOH/C).

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης της οικονομικής αποδοτικότητας μιας επένδυσης, καθώς λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος επένδυσης όσο και τις μελλοντικές ετήσιες εξοικονομήσεις, εκφρασμένες σε όρους παρούσας αξίας. Στην παρούσα ανάλυση, οι ετήσιες εξοικονομήσεις $S_{j,i}$ προκύπτουν από τη μείωση του κόστους λειτουργίας κάθε σεναρίου σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Για την αναγωγή των ετήσιων εξοικονομήσεων σε παρούσα αξία χρησιμοποιείται ο συντελεστής προεξόφλησης:

$$D_{f(i)} = \frac{1}{(1+p)^i}$$

όπου:

- p είναι το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο και
- i το έτος της περιόδου υπολογισμού.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία του σεναρίου j υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} NPV_j &= \sum_{i=1}^{L_b} S_{j,i} \cdot D_{f(i)} - CO_{inv,j} \Rightarrow \\ NPV_j &= \sum_{i=1}^{L_b} \frac{S_{j,i}}{(1+p)^i} - CO_{inv,j} \end{aligned} \quad (9.12)$$

όπου:

- $CO_{inv,j}$ είναι το κόστος επένδυσης του σεναρίου j , εκφρασμένο σε όρους παρούσας αξίας.

Θετική τιμή της NPV δείχνει ότι το εξεταζόμενο σενάριο είναι οικονομικά αποδοτικό σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση κατά την περίοδο υπολογισμού.

Η ετήσια εξοικονόμηση μπορεί να θεωρηθεί μεταβαλλόμενη με τον χρόνο, λόγω της ετήσιας αύξησης του κόστους ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, η εξοικονόμηση του έτους t υπολογίζεται ως:

$$S_{j,t} = S_{j,1} \cdot (1 + f)^{t-1}$$

όπου $S_{j,1}$ είναι η εξοικονόμηση του πρώτου έτους και f είναι ο ετήσιος ρυθμός αύξησης του κόστους ενέργειας.

Η Απλή Περίοδος Αποπληρωμής εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται ώστε η αρχική επένδυση να ανακτηθεί μέσω της ετήσιας εξοικονόμησης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η χρονική αξία του χρήματος. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SPB_j = \frac{C_{inv,j}}{S_{j,1}} \quad (9.13)$$

όπου:

- SPB_j είναι η απλή περίοδος αποπληρωμής του σεναρίου j .

Μικρότερη τιμή της Απλής Περιόδου Αποπληρωμής υποδηλώνει ταχύτερη ανάκτηση του αρχικού κόστους επένδυσης.

Η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (DPB) εκφράζει την περίοδο ανάκτησης του κόστους επένδυσης λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος. Ουσιαστικά αντιστοιχεί στο χρονικό σημείο στο οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία μηδενίζεται. Στην παρούσα ανάλυση, επειδή οι ετήσιες εξοικονομήσεις θεωρείται ότι αυξάνονται με σταθερό ρυθμό f , η DPB υπολογίζεται από τη σχέση (Κακαράς κ.ά., 2017):

$$DPB_j = \frac{\ln\left[SPB_j \cdot (1+p) \cdot \left(\frac{x}{1+p} - 1\right) + 1\right]}{\ln\left(\frac{x}{1+p}\right)} \quad (9.14)$$

όπου:

- SPB_j είναι η απλή περίοδος αποπληρωμής του σεναρίου j ,
- p είναι το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο και
- $x = 1 + f$ με f τον ετήσιο ρυθμό αύξησης του κόστους λειτουργίας.

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της περιόδου αποπληρωμής όταν οι ετήσιες καθαρές ταμειακές εισροές δεν παραμένουν σταθερές, αλλά μεταβάλλονται ετησίως με

βάση τον συντελεστή f . Αν η τιμή της DPB υπερβαίνει την περίοδο υπολογισμού L_b , τότε το εξεταζόμενο σενάριο θεωρείται ότι δεν αποπληρώνεται εντός της περιόδου της ανάλυσης.

Τέλος, υπολογίζεται το σταθμισμένο κόστος θερμότητας και ψύξης $LCOH/C$, το οποίο εκφράζει το κόστος παραγωγής της ωφέλιμης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης. Σημειώνεται ότι, επειδή τα εξεταζόμενα σενάρια καλύπτουν τόσο τις ανάγκες θέρμανσης όσο και τις ανάγκες ψύξης του κτιρίου, δεν χρησιμοποιείται δείκτης που αφορά αποκλειστικά τη θέρμανση. Αντί αυτού, χρησιμοποιείται ο δείκτης $LCOH/C$, ο οποίος εκφράζει το σταθμισμένο κόστος ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης.

Ο δείκτης υπολογίζεται με βάση το συνολικό κόστος του σεναρίου σε παρούσα αξία, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ισοδύναμο ετήσιο κόστος μέσω του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου $CRF_{f(L_b)}$:

$$LCOH/C_j = \frac{CRF_{f(L_b)} \cdot (CO_{inv,j} + \sum_{i=1}^{L_b} CO_{op,j,i} \cdot D_{f(i)})}{E_{h,annual} + E_{c,annual}} \quad (9.15)$$

όπου:

- $CO_{inv,j}$ είναι το κόστος επένδυσης του σεναρίου j ,
- $CO_{op,j,i}$ είναι το κόστος λειτουργίας του σεναρίου κατά το έτος i ,
- $D_{f(i)}$ είναι ο συντελεστής προεξόφλησης,
- $CRF_{f(L_b)}$ είναι ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για την περίοδο υπολογισμού L_b ,
- $E_{h,annual}$ είναι η ετήσια ωφέλιμη ενέργεια θέρμανσης και
- $E_{c,annual}$ είναι η ετήσια ωφέλιμη ενέργεια ψύξης

Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται $E_{h,annual} + E_{c,annual} = 20.052,94 \text{ kWh/έτος}$

Οι παραπάνω δείκτες χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, καθώς κάθε ένας αποτυπώνει διαφορετική διάσταση της οικονομικής αξιολόγησης. Η Καθαρή Παρούσα Αξία δείχνει τη συνολική οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης, οι περίοδοι αποπληρωμής δείχνουν

τον χρόνο ανάκτησης του αρχικού κόστους, ενώ ο δείκτης LCOH/C εκφράζει το κόστος παρεχόμενης ενέργειας σε όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης.

9.6 Αποτελέσματα τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης. Η υφιστάμενη κατάσταση χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς, ενώ τα σενάρια αξιολογούνται ως προς το αρχικό κόστος επένδυσης, το ετήσιο κόστος λειτουργίας, την ετήσια εξοικονόμηση και τους οικονομικούς δείκτες που ορίστηκαν στην Ενότητα 9.5.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση την περίοδο ανάλυσης και τις οικονομικές παραδοχές που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 9.2. Για κάθε σενάριο υπολογίζονται η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), η Απλή Περίοδος Αποπληρωμής (SPB) ή Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (DPB) και το Σταθμισμένο Κόστος Θερμότητας και Ψύξης (LCOH/C).

Στον Πίνακα 9.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης.

Δείκτης αξιολόγησης	Σύμβολο	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα- νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
Κόστος επένδυσης [€]	$CO_{inv,j}$	12.464,09	23.166,23	36.956,28
Ετήσια εξοικονόμηση πρώτου έτους [€/έτος]	$S_{j,1}$	4.063,21	4.510,28	4.566,77
Καθαρή Παρούσα Αξία [€]	NPV_j	35.699,51	30.296,78	17.176,38
Απλή Περίοδος Αποπληρωμής [έτη]	SPB_j	3,07	5,14	8,09
Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής [έτη]	DPB_j	3,50	6,29	11,16
Σταθμισμένο Κόστος Θερμότητας και Ψύξης [€/kWh]	$LCOH/C_j$	0,13	0,16	0,22

Πίνακας 9.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι και τα τρία εξεταζόμενα σενάρια εμφανίζουν θετική Καθαρή Παρούσα Αξία, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι οικονομικά αποδοτικά σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση κατά την περίοδο υπολογισμού των 20 ετών. Η υψηλότερη τιμή NPV εμφανίζεται στο Σενάριο 1, το οποίο αφορά την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας αέρα-νερού. Παρότι το συγκεκριμένο σενάριο δεν παρουσιάζει τη μέγιστη ετήσια εξοικονόμηση, το χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης οδηγεί σε ευνοϊκότερη NPV.

Το Σενάριο 2, το οποίο περιλαμβάνει την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, παρουσιάζει υψηλότερη εξοικονόμηση πρώτου έτους σε σχέση με το Σενάριο 1, λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, το αυξημένο κόστος επένδυσης του γεωθερμικού εναλλάκτη οδηγεί σε μεγαλύτερη απλή και έντοκη περίοδο αποπληρωμής και σε χαμηλότερη NPV σε σχέση με το Σενάριο 1.

Το Σενάριο 3 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση, καθώς μέρος της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη μπαταρία. Παρ' όλα αυτά, η προσθήκη των επιμέρους συστημάτων αυξάνει σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης, με αποτέλεσμα η NPV να είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τα δύο προηγούμενα σενάρια και η έντοκη περίοδος αποπληρωμής να είναι μεγαλύτερη.

Ως προς την απλή και την έντοκη περίοδο αποπληρωμής, το Σενάριο 1 εμφανίζει τον μικρότερο χρόνο ανάκτησης του κόστους επένδυσης. Η απλή περίοδος αποπληρωμής SPB υπολογίζεται σε 3,07 έτη, ενώ η έντοκη περίοδος αποπληρωμής DPB σε 3,50 έτη. Για το Σενάριο 2 οι αντίστοιχες τιμές είναι 5,14 και 6,29 έτη, ενώ για το Σενάριο 3 είναι 8,09 και 11,16 έτη. Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερη από την απλή περίοδο αποπληρωμής, καθώς οι μελλοντικές ετήσιες εξοικονομήσεις ανάγονται σε παρούσα αξία μέσω του συντελεστή προεξόφλησης. Επομένως, κάθε μελλοντική εξοικονόμηση έχει μικρότερη αξία στο έτος αναφοράς σε σχέση με την ονομαστική της τιμή, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την ανάκτηση του αρχικού κόστους επένδυσης.

Τέλος, ο δείκτης LCOH/C εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή για το Σενάριο 1, ίση με 0,132 €/kWh. Το Σενάριο 2 παρουσιάζει τιμή 0,158 €/kWh, ενώ το Σενάριο 3 εμφανίζει την υψηλότερη τιμή, ίση με 0,220 €/kWh. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι, παρότι η αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος και της μπαταρίας μειώνει την ηλεκτρική ενέργεια που

αγοράζεται από το δίκτυο, η μείωση αυτή δεν είναι αρκετή ώστε να αντισταθμίσει το αυξημένο κόστος επένδυσης που εισάγεται στον υπολογισμό του LCOH/C. Δεδομένου ότι οι ετήσιες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης είναι ίδιες σε όλα τα σενάρια, η υψηλότερη τιμή του δείκτη στο Σενάριο 3 οφείλεται κυρίως στον μεγαλύτερο αριθμητή του δείκτη, δηλαδή στο υψηλότερο κόστος επένδυσης σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα κόστη λειτουργίας της περιόδου υπολογισμού.

9.7 Ανάλυση ταμειακών ροών και ευαισθησίας

Πέρα από τους βασικούς οικονομικούς δείκτες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 9.6, κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση της οικονομικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων σεναρίων. Για τον σκοπό αυτό εξετάζεται αφενός η χρονική εξέλιξη των σωρευτικών καθαρών ταμειακών ροών και αφετέρου η ευαισθησία των κύριων οικονομικών δεικτών αξιολόγησης σε μεταβολές βασικών οικονομικών παραμέτρων.

Η ανάλυση των σωρευτικών ταμειακών ροών επιτρέπει την απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο ανακτάται σταδιακά το αρχικό κόστος επένδυσης κάθε σεναρίου. Αντίστοιχα, η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει τον βαθμό στον οποίο οι δείκτες οικονομικής αξιολόγησης επηρεάζονται από μεταβολές στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και στο πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο.

9.7.1 Σωρευτικές καθαρές ταμειακές ροές

Οι σωρευτικές καθαρές ταμειακές ροές υπολογίζονται λαμβάνοντας ως αρχική αρνητική ταμειακή ροή το κόστος επένδυσης κάθε σεναρίου και προσθέτοντας σε κάθε επόμενο έτος τις αντίστοιχες ετήσιες εξοικονομήσεις. Με τον τρόπο αυτό αποτυπώνεται η χρονική εξέλιξη της οικονομικής απόδοσης κάθε εναλλακτικής λύσης.

Η σωρευτική καθαρή ταμειακή ροή του σεναρίου j έως το έτος k υπολογίζεται ως:

$$CCF_{j,k} = -CO_{inv,j} + \sum_{i=1}^k S_{j,i} \quad (9.16)$$

όπου:

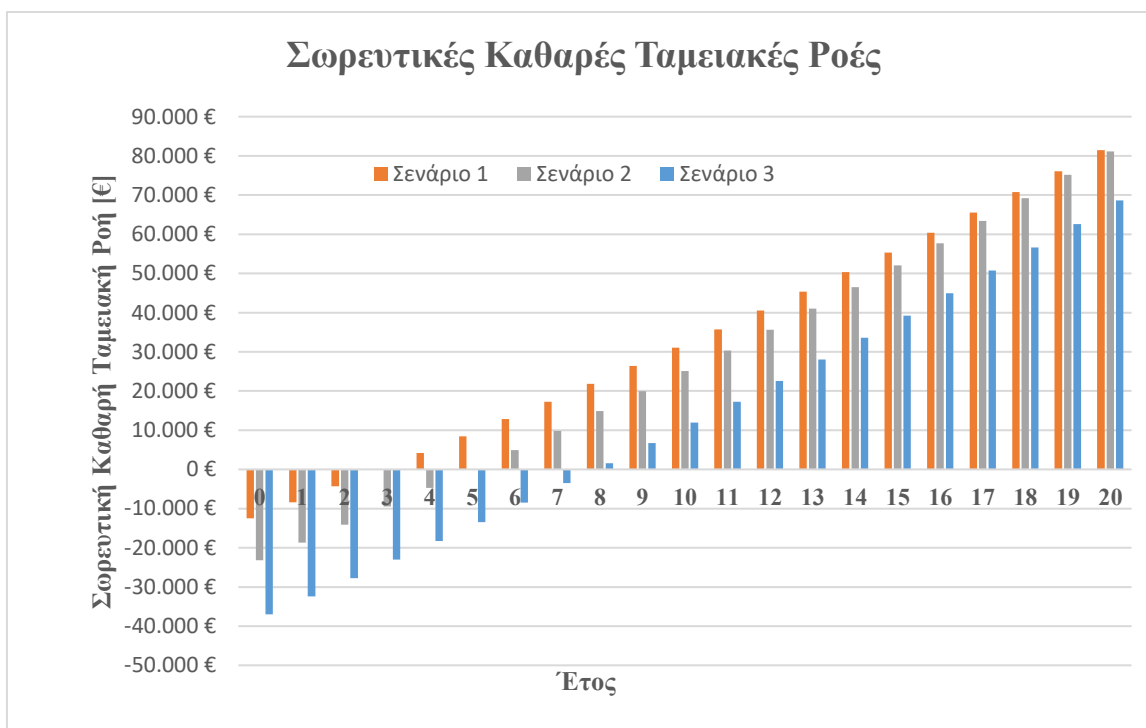
- $CCF_{j,k}$ είναι η σωρευτική καθαρή ταμειακή ροή έως το έτος k ,
- $CO_{inv,j}$ είναι το κόστος επένδυσης του σεναρίου j και
- $S_{j,i}$ είναι η ετήσια εξοικονόμηση κατά το έτος i .

Τα αποτελέσματα των σωρευτικών καθαρών ταμειακών ροών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 9.5).

έτος (i)	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα-νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
0	-12.464,09 €	-23.166,23 €	-36.956,28 €
1	-8.400,88 €	-18.655,95 €	-32.389,51 €
2	-4.276,72 €	-14.078,01 €	-27.754,23 €
3	-90,70 €	-9.431,41 €	-23.049,42 €
4	4.158,11 €	-4.715,10 €	-18.274,04 €
5	8.470,65 €	71,95 €	-13.427,03 €
6	12.847,88 €	4.930,80 €	-8.507,32 €
7	17.290,77 €	9.862,54 €	-3.513,81 €
8	21.800,31 €	14.868,26 €	1.554,61 €
9	26.377,48 €	19.949,06 €	6.699,05 €
10	31.023,31 €	25.106,07 €	11.920,65 €
11	35.738,84 €	30.340,44 €	17.220,58 €
12	40.525,09 €	35.653,32 €	22.600,01 €
13	45.383,14 €	41.045,90 €	28.060,13 €
14	50.314,05 €	46.519,36 €	33.602,15 €
15	55.318,94 €	52.074,93 €	39.227,31 €
16	60.398,89 €	57.713,83 €	44.936,84 €
17	65.555,05 €	63.437,32 €	50.732,01 €
18	70.788,54 €	69.246,65 €	56.614,11 €
19	76.100,54 €	75.143,13 €	62.584,44 €
20	81.492,22 €	81.128,05 €	68.644,33 €

Πίνακας 9.5 Σωρευτικές καθαρές ταμειακές ροές εξεταζόμενων σεναρίων

Η αντίστοιχη γραφική απεικόνιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1 Εξέλιξη σωρευτικών καθαρών ταμειακών ροών εξεταζόμενων σεναρίων

Από την εξέλιξη των σωρευτικών καθαρών ταμειακών ροών προκύπτει ότι το Σενάριο 1 ανακτά το αρχικό κόστος επένδυσης νωρίτερα από τα υπόλοιπα σενάρια. Η σωρευτική καθαρή ταμειακή ροή του Σεναρίου 1 γίνεται θετική μεταξύ του 3ου και του 4ου έτους.

Το Σενάριο 2 παρουσιάζει θετική σωρευτική καθαρή ταμειακή ροή μεταξύ του 4ου και του 5ου έτους, ενώ το Σενάριο 3 γίνεται θετικό μεταξύ του 7ου και του 8ου έτους. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται κυρίως στο αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης του Σεναρίου 3, λόγω της προσθήκης του φωτοβολταϊκού συστήματος και της μπαταρίας.

Στο τέλος της περιόδου υπολογισμού, οι σωρευτικές καθαρές ταμειακές ροές είναι θετικές και για τα τρία σενάρια. Το Σενάριο 1 και το Σενάριο 2 παρουσιάζουν παρόμοια τελική σωρευτική καθαρή ταμειακή ροή, ενώ το Σενάριο 3 εμφανίζει χαμηλότερη τελική τιμή. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι, παρότι το Σενάριο 3 μειώνει περισσότερο το ετήσιο κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης επηρεάζει σημαντικά τη συνολική οικονομική του συμπεριφορά.

9.7.2 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων, καθώς όλα τα εναλλακτικά σενάρια βασίζονται στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, διατηρώντας σταθερό το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο στην τιμή αναφοράς:

$$p = 7\%$$

Η τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

$$c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$$

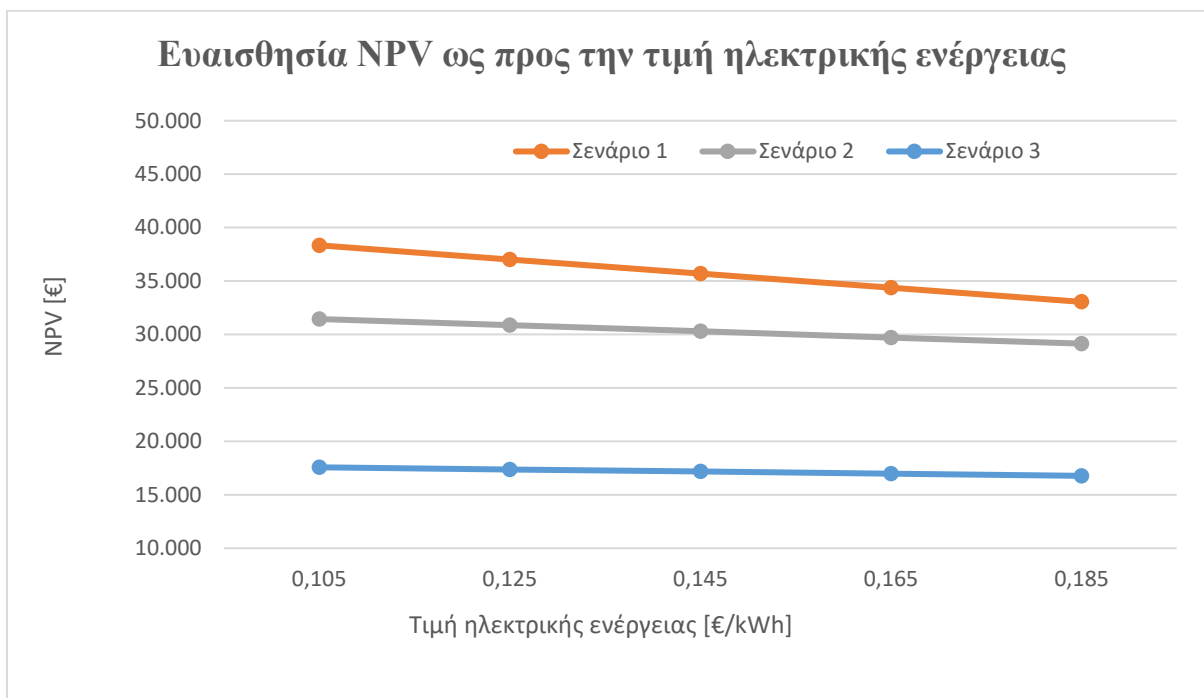
ενώ εξετάζεται εύρος τιμών από 0,105 έως 0,185 €/kWh.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9.6) παρουσιάζεται η μεταβολή της Καθαρής Παρούσας Αξίας ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας [€/kWh]	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα- νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
0,105	38.346,07	31.447,10	17.574,37 €
0,125	37.022,79	30.871,94	17.375,37 €
0,145	35.699,51	30.296,78	17.176,38 €
0,165	34.376,23	29.721,62	16.977,38 €
0,185	33.052,95	29.146,47	16.778,39 €

Πίνακας 9.6 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$

Η αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9.2.



Σχήμα 9.2 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μείωση της NPV και στα τρία σενάρια. Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλεται αποκλειστικά η αρχική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η τιμή του πετρελαίου θέρμανσης διατηρείται σταθερή στην τιμή αναφοράς. Η παραδοχή αυτή είναι επιβαρυντική για την NPV των εναλλακτικών σεναρίων, καθώς αυξάνεται το κόστος λειτουργίας των αντλιών θερμότητας, χωρίς αντίστοιχη αύξηση του βασικού κόστους θέρμανσης της υφιστάμενης κατάστασης. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αύξηση του κόστους λειτουργίας των εναλλακτικών σεναρίων, δεδομένου ότι η λειτουργία των αντλιών θερμότητας βασίζεται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η επίδραση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εντονότερη στα Σενάρια 1 και 2, ενώ στο Σενάριο 3 είναι πιο περιορισμένη. Αυτό συμβαίνει επειδή στο Σενάριο 3 μέρος της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και τη μπαταρία, με αποτέλεσμα η εξάρτηση από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο να είναι μικρότερη.

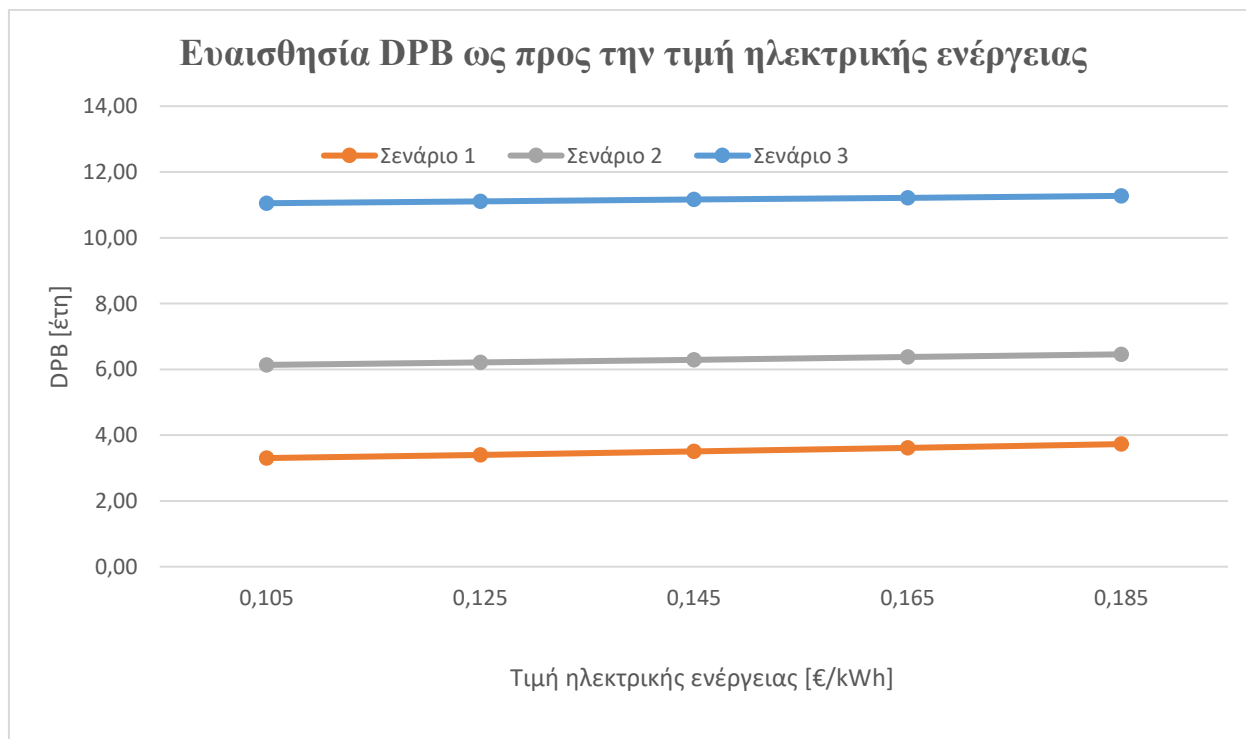
Παρά τη μεταβολή της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας, η κατάταξη των σεναρίων ως προς την NPV δεν διαφοροποιείται. Το Σενάριο 1 διατηρεί την υψηλότερη NPV, το Σενάριο 2 ακολουθεί, ενώ το Σενάριο 3 εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή σε όλο το εξεταζόμενο εύρος.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 9.7) παρουσιάζεται η μεταβολή της έντοκης περιόδου αποπληρωμής ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας [€/kWh]	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα-νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
0,105	3,30	6,13	11,05
0,125	3,40	6,21	11,10
0,145	3,50	6,29	11,16
0,165	3,61	6,37	11,22
0,185	3,73	6,46	11,27

Πίνακας 9.7 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$

Η αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9.3.



Σχήμα 9.3 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$

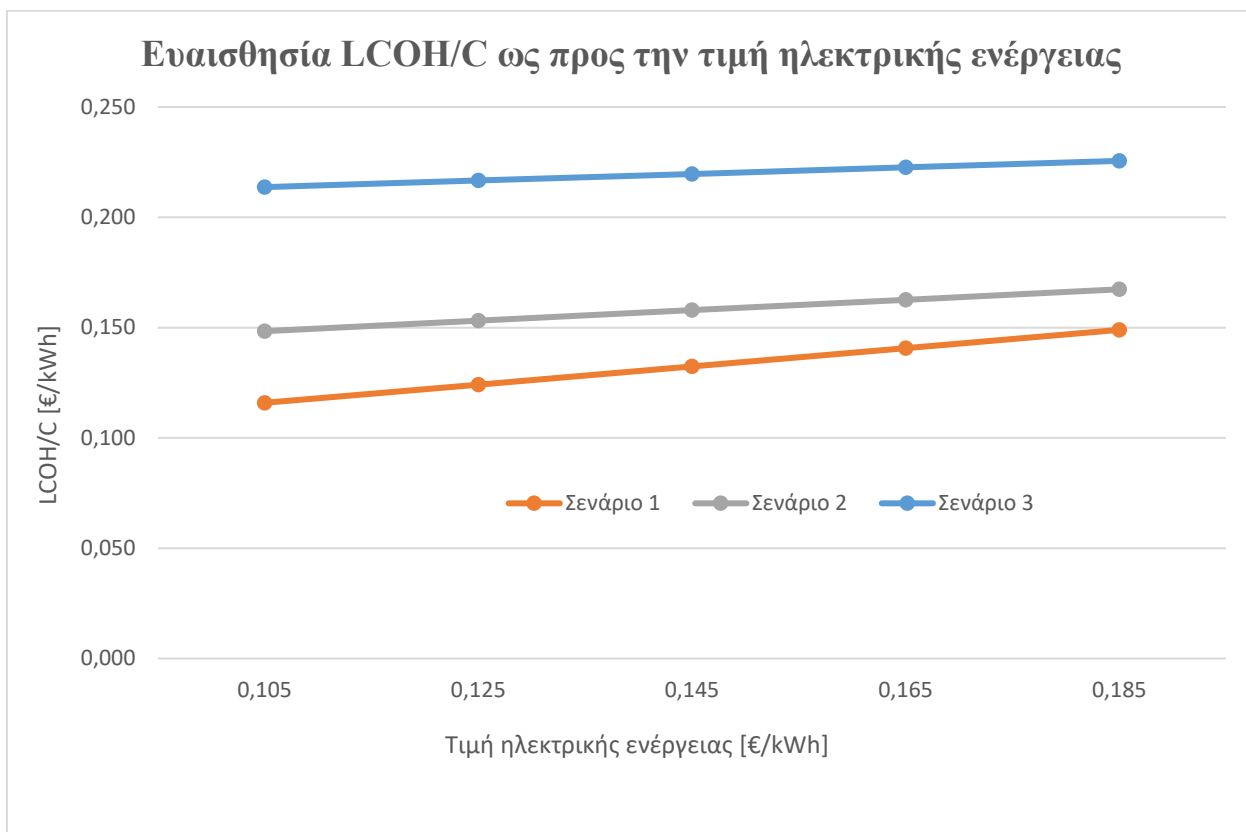
Η αύξηση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μικρή αύξηση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής. Το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται με τη μείωση των καθαρών ετήσιων εξοικονομήσεων, καθώς αυξάνεται το κόστος λειτουργίας των σεναρίων. Ωστόσο, η επίδραση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στην DPB είναι σχετικά περιορισμένη, όπως παρατηρούμε.

Στην συνέχεια, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 9.8) παρουσιάζεται η ευαισθησία του δείκτη LCOH/C ως προς την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας [€/kWh]	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα- νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
0,105	0,116	0,148	0,214
0,125	0,124	0,153	0,217
0,145	0,132	0,158	0,220
0,165	0,141	0,163	0,223
0,185	0,149	0,167	0,226

Πίνακας 9.8 Ευαισθησία του LCOH/C [€/kWh] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$

Η αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9.4.



Σχήμα 9.4 Ευαισθησία του LCOH/C [€/kWh] ως προς την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, για $p = 7\%$

Η αύξηση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε αύξηση του δείκτη LCOH/C, καθώς αυξάνεται το κόστος λειτουργίας που συμμετέχει στον υπολογισμό του δείκτη. Το Σενάριο 1 διατηρεί τη χαμηλότερη τιμή LCOH/C σε όλο το εξεταζόμενο εύρος, ενώ το Σενάριο 3 εμφανίζει σταθερά την υψηλότερη τιμή. Η διαφορά αυτή συνδέεται κυρίως με το υψηλότερο κόστος επένδυσης του Σεναρίου 3.

9.7.3 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο

Το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο επηρεάζει άμεσα την παρούσα αξία των μελλοντικών εξοικονομήσεων και επομένως αποτελεί σημαντική παράμετρο της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης. Για τη διερεύνηση της επίδρασής του πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για εύρος τιμών από 5% έως 9%, διατηρώντας σταθερή την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην τιμή αναφοράς:

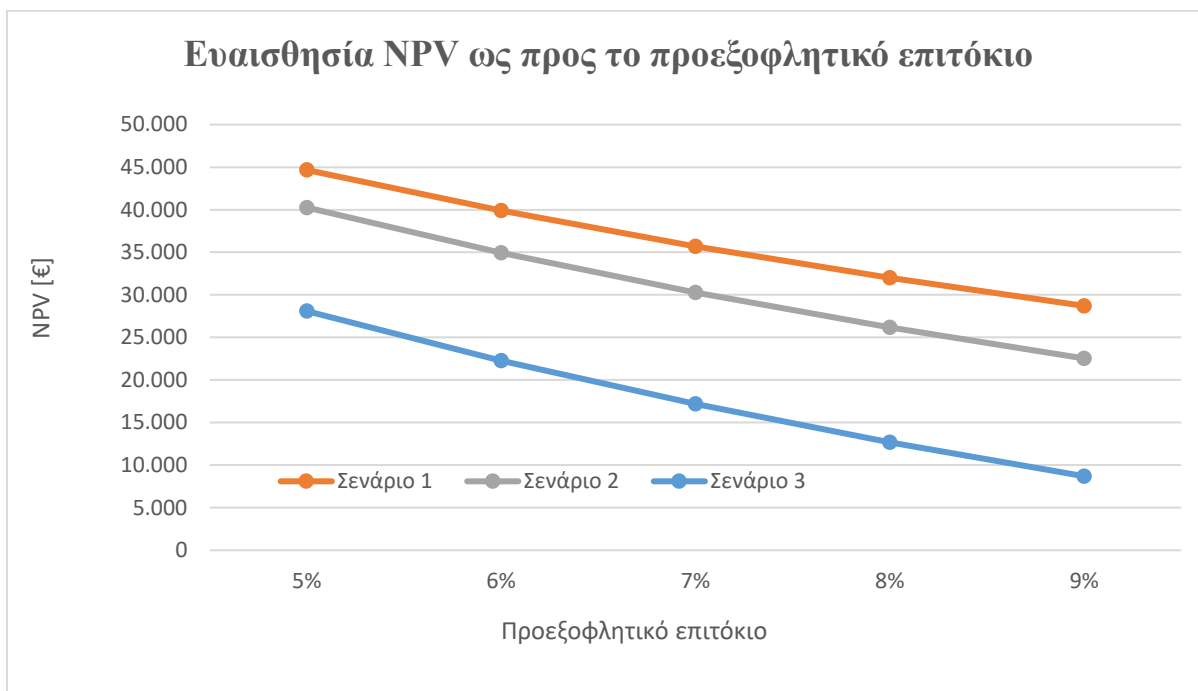
$$c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9.9) παρουσιάζεται η μεταβολή της Καθαρής Παρούσας Αξίας ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο.

Προεξοφλητικό επιτόκιο	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα- νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
5%	44.668,29 €	40.257,86 €	28.088,96 €
6%	39.896,93 €	34.958,50 €	22.283,92 €
7%	35.699,51 €	30.296,78 €	17.176,38 €
8%	31.994,22 €	26.181,79 €	12.676,16 €
9%	28.712,24 €	22.537,04 €	8.704,20 €

Πίνακας 9.9 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$

Η αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9.5.



Σχήμα 9.5 Ευαισθησία της NPV [€] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η αύξηση του προεξοφλητικού επιτοκίου οδηγεί σε σημαντική μείωση της NPV για όλα τα σενάρια. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μελλοντικές εξοικονομήσεις ανάγονται σε μικρότερη παρούσα αξία όσο αυξάνεται το προεξοφλητικό επιτόκιο.

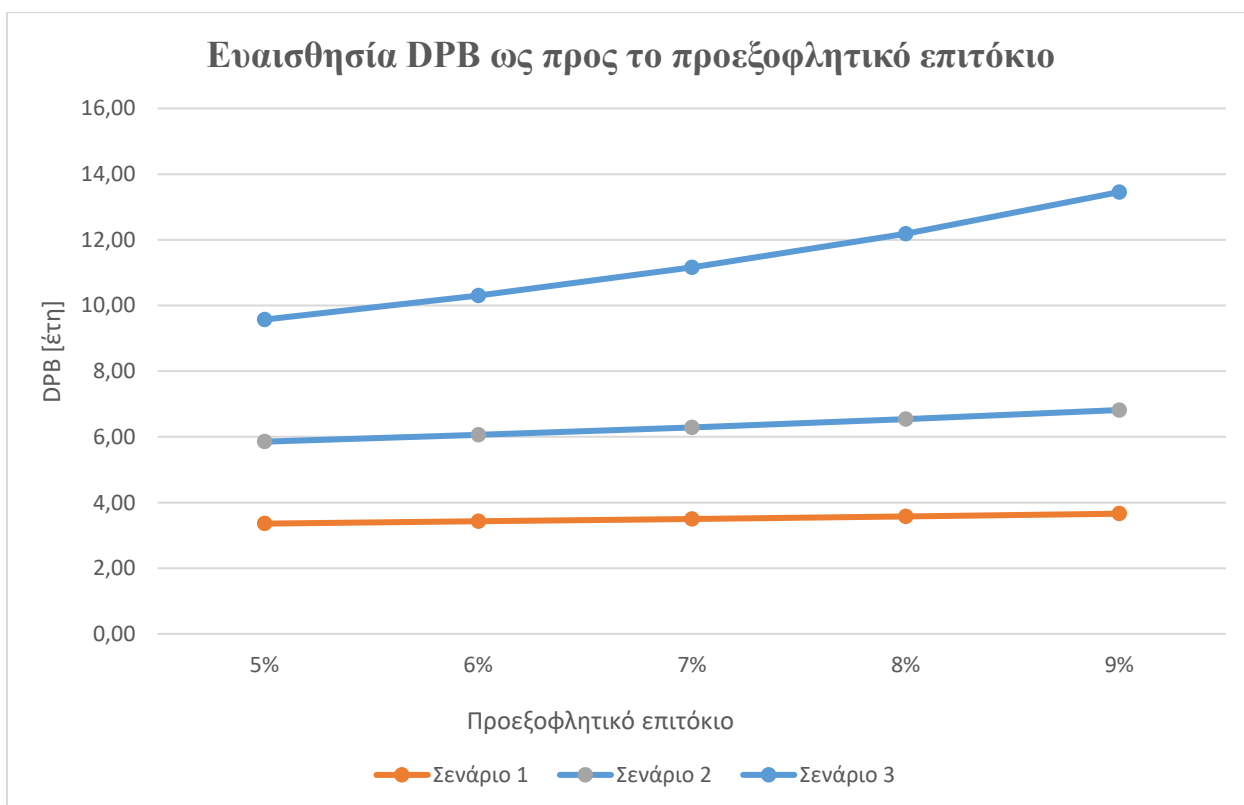
Η επίδραση είναι ακόμα πιο σημαντική στο Σενάριο 3, καθώς το συγκεκριμένο σενάριο έχει το υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης και απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την ανάκτησή του μέσω των ετήσιων εξοικονομήσεων. Ωστόσο σημειώνεται ότι η NPV παραμένει θετική για όλα τα σενάρια σε όλο το εξεταζόμενο εύρος τιμών του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 9.11 παρουσιάζεται η ευαισθησία της έντοκης περιόδου αποπληρωμής ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο.

Προεξοφλητικό επιτόκιο	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα- νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
5%	3,36 έτη	5,85 έτη	9,57 έτη
6%	3,43 έτη	6,06 έτη	10,30 έτη
7%	3,50 έτη	6,29 έτη	11,16 έτη
8%	3,58 έτη	6,54 έτη	12,18 έτη
9%	3,66 έτη	6,82 έτη	13,45 έτη

Πίνακας 9.10 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$

Η αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9.6.



Σχήμα 9.6 Ευαισθησία της DPB [έτη] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145 \text{ €/kWh}$

Η αύξηση του προεξοφλητικού επιτοκίου οδηγεί σε αύξηση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μελλοντικές εξοικονομήσεις αποκτούν μικρότερη αξία στο έτος αναφοράς, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την ανάκτηση του αρχικού κόστους επένδυσης.

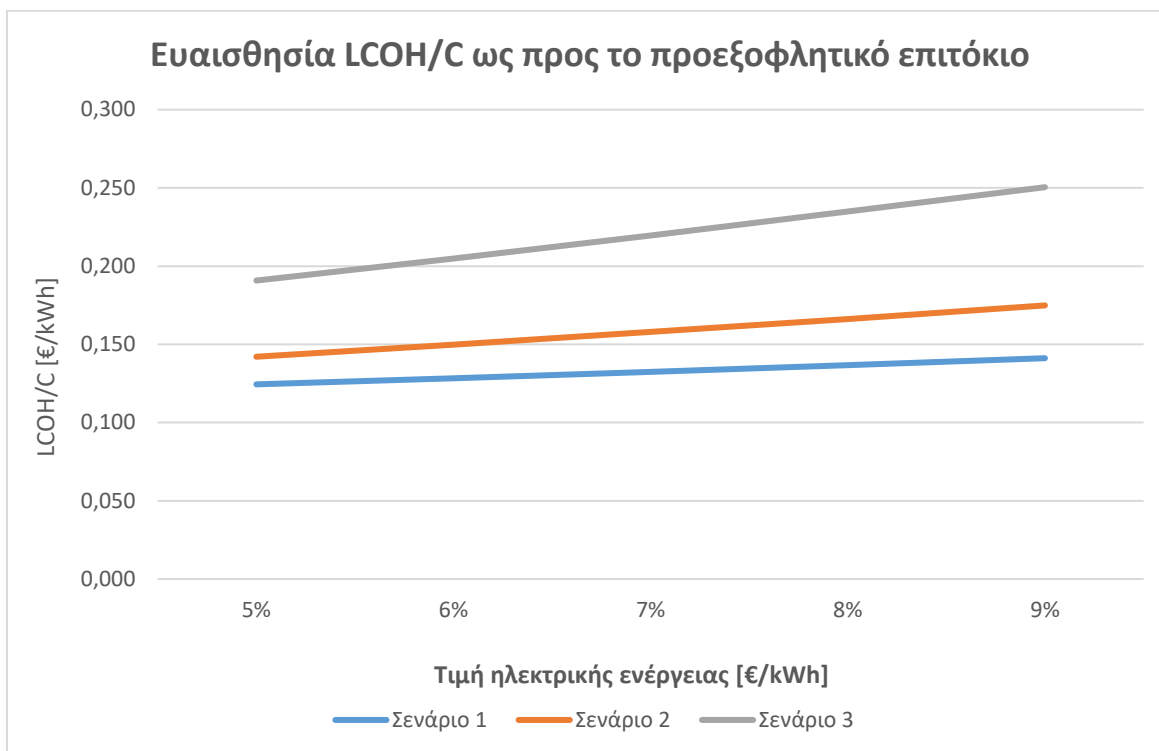
Η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη στο Σενάριο 3, λόγω του υψηλότερου αρχικού κόστους επένδυσης. Αντίθετα, το Σενάριο 1 παρουσιάζει μικρότερη μεταβολή της έντοκης περιόδου αποπληρωμής, γεγονός που δείχνει ότι είναι λιγότερο ευαίσθητο στις μεταβολές του προεξοφλητικού επιτοκίου.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9.11) παρουσιάζεται η ευαισθησία του δείκτη LCOH/C ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο.

Προεξοφλητικό επιτόκιο	Σενάριο 1: Α/Θ αέρα- νερού	Σενάριο 2: ΓΑΘ	Σενάριο 3: ΓΑΘ + Φ/Β + μπαταρία
5%	0,124 €/kWh	0,142 €/kWh	0,191 €/kWh
6%	0,128 €/kWh	0,150 €/kWh	0,205 €/kWh
7%	0,132 €/kWh	0,158 €/kWh	0,220 €/kWh
8%	0,137 €/kWh	0,166 €/kWh	0,235 €/kWh
9%	0,141 €/kWh	0,175 €/kWh	0,250 €/kWh

Πίνακας 9.11 Ευαισθησία του LCOH/C [€/kWh] ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145$ €/kWh

Η αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9.7.



Σχήμα 9.7 Ευαισθησία του LCOH/C ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο, για $c_{el,1} = 0,145$ €/kWh

Η αύξηση του προεξοφλητικού επιτοκίου οδηγεί σε αύξηση του δείκτη LCOH/C. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το προεξοφλητικό επιτόκιο επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο αποτιμώνται τα κόστη και οι μελλοντικές ταμειακές ροές κατά την περίοδο υπολογισμού. Το Σενάριο 1 εξακολουθεί να παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή του δείκτη, ενώ το Σενάριο 3 εμφανίζει την υψηλότερη τιμή σε όλο το εξεταζόμενο εύρος.

Συνολικά, η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει ότι το Σενάριο 1 παραμένει το οικονομικά ευνοϊκότερο σενάριο στο εξεταζόμενο εύρος τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και προεξοφλητικού επιτοκίου. Το Σενάριο 2 παρουσιάζει ενδιάμεση οικονομική συμπεριφορά, ενώ το Σενάριο 3, αν και επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη μείωση της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, επηρεάζεται περισσότερο από τις οικονομικές παραμέτρους λόγω του υψηλότερου αρχικού κόστους επένδυσης.

9.8 Παραμετρική διερεύνηση Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό Φ/Β πλαισίων

Μετά την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των βασικών σεναρίων και σε συνέχεια της διαπίστωσης της δυσμενέστερης οικονομικής συμπεριφοράς του Σεναρίου 3, πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνησή του ως προς τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στόχος της διερεύνησης είναι να εξεταστεί κατά πόσο η αύξηση της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος μπορεί να βελτιώσει την οικονομική απόδοση του συστήματος, μειώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση διατηρούνται σταθερά τα βασικά χαρακτηριστικά του Σεναρίου 3, δηλαδή η γεωθερμική αντλία θερμότητας, ο κατακόρυφος γεωεναλλάκτης και η μπαταρία αποθήκευσης. Η παράμετρος που μεταβάλλεται είναι αποκλειστικά ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση υπολογίζονται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα, η ενέργεια που αξιοποιείται από το σύστημα αντλίας θερμότητας, η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο και οι αντίστοιχοι οικονομικοί δείκτες.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{PV} = n_{PV} \cdot P_{panel}$$

όπου:

- P_{PV} είναι η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος,
- n_{PV} ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων και
- P_{panel} η ονομαστική ισχύς κάθε πλαισίου

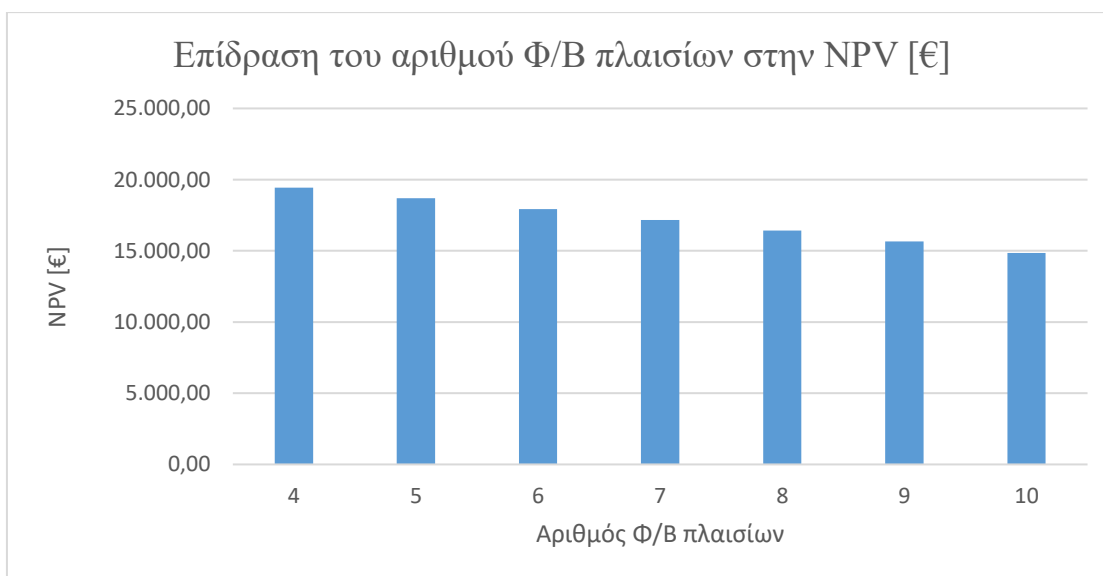
Για κάθε εξεταζόμενη τιμή του n_{PV} , υπολογίζεται εκ νέου η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο, $E_{grid,3}$, καθώς και οι αντίστοιχοι οικονομικοί δείκτες NPV, DPB και LCOH/C.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.12.

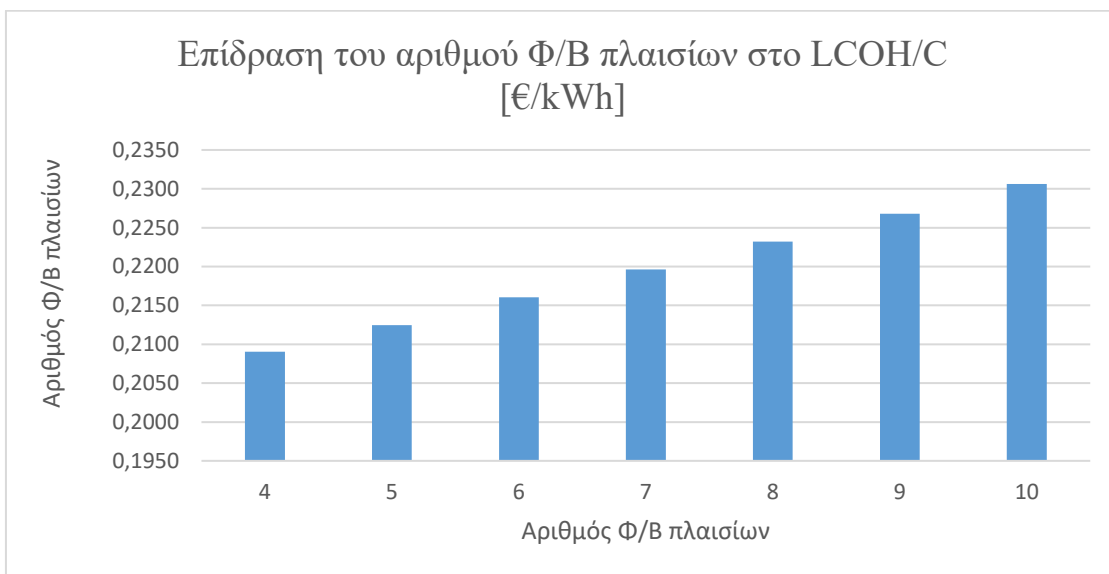
NPV	P _{pv} [kW _p]	Παραγωγή Φ/Β [kWh/έτος]	Αξιοπ. Φ/Β [kWh/έτος]	Πλεόνασμα [kWh/έτος]	E _{grid,3} [kWh/έτος]	CO _{inv,3} [€]	NPV [€]	DPB [έτη]	LCOH/C [€/kWh]
4	2,42	3.492,54	1.196,12	532,10	3.054,64	34.637,81	19.425,91	10,25	0,2090
5	3,03	4.365,68	1.336,85	823,43	2.913,92	35.410,63	18.694,17	10,54	0,2125
6	3,63	5.238,82	1.461,78	1.130,55	2.788,98	36.183,46	17.935,27	10,85	0,2161
7	4,24	6.111,95	1.586,71	1.437,67	2.664,05	36.956,28	17.176,38	11,16	0,2196
8	4,84	6.985,09	1.711,64	1.744,79	2.539,12	37.729,11	16.417,48	11,48	0,2232
9	5,45	7.858,22	1.832,40	2.056,09	2.418,36	38.501,94	15.651,41	11,80	0,2268
10	6,05	8.731,36	1.928,73	2.391,82	2.322,04	39.274,76	14.843,34	12,14	0,2306

Πίνακας 9.12 Παραμετρική διερεύνηση του Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων

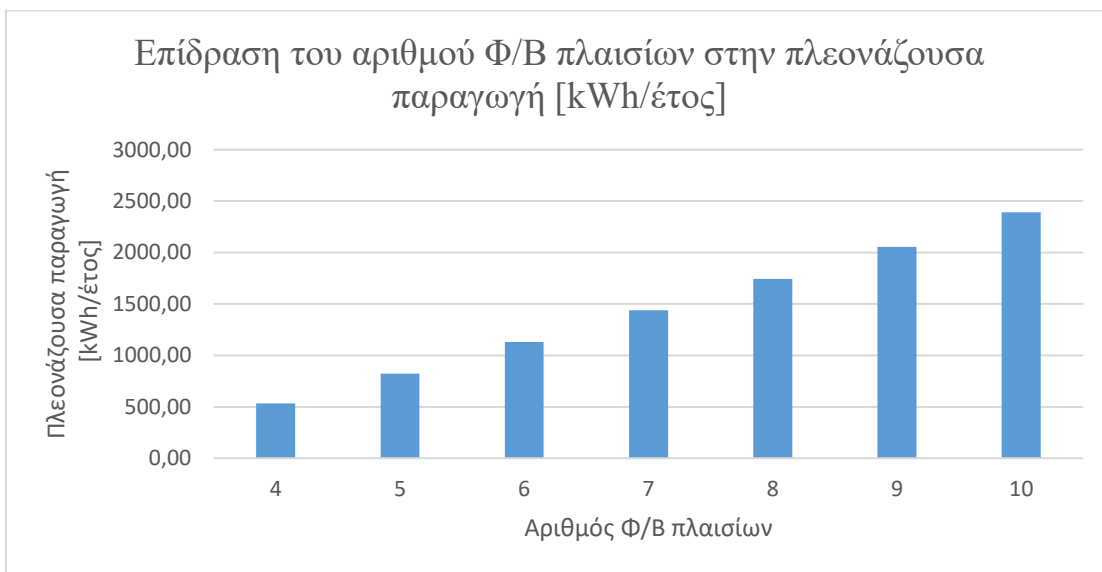
Η μεταβολή των βασικών ενεργειακών και οικονομικών μεγεθών παρουσιάζεται στα Σχήματα 9.4 έως 9.7.



Σχήμα 9.8 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στην Καθαρή Παρούσα Αξία του Σεναρίου 3



Σχήμα 9.9 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στον δείκτη LCOH/C



Σχήμα 9.10 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στην πλεονάζουσα παραγωγή του φ/β συστήματος



Σχήμα 9.11 Επίδραση του αριθμού φ/β πλαισίων στην ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο

Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης προκύπτει ότι η αύξηση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων οδηγεί, όπως είναι αναμενόμενο, σε αύξηση της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος και της συνολικής ετήσιας παραγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος. Συγκεκριμένα, η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται από 2,42 kWp για 4 πλαίσια σε 6,05 kWp για 10 πλαίσια, ενώ η ετήσια παραγωγή του φ/β συστήματος αυξάνεται από 3.492,54 kWh/έτος σε 8.731,36 kWh/έτος.

Η αύξηση αυτή έχει θετική επίδραση στην ενεργειακή λειτουργία του συστήματος, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο μειώνεται από 3.054,64 kWh/έτος για 4 πλαίσια σε 2.322,04 kWh/έτος για 10 πλαίσια. Αντίστοιχα, η αξιοποιούμενη παραγωγή του φ/β συστήματος αυξάνεται από 1.196,12 kWh/έτος σε 1.928,73 kWh/έτος. Επομένως, η αύξηση του αριθμού των πλαισίων συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης του συστήματος από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ωστόσο, η προσθήκη επιπλέον φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν οδηγεί σε ανάλογη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο. Παρότι η συνολική παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος αυξάνεται σημαντικά, η επιπλέον ενέργεια δεν αξιοποιείται πλήρως από τη γεωθερμική αντλία θερμότητας. Αυτό φαίνεται στην αύξηση της πλεονάζουσας παραγωγής, η οποία αυξάνεται από 532,10 kWh/έτος για 4 πλαίσια σε 2.391,82 kWh/έτος για 10 πλαίσια. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι, όσο αυξάνεται η

εγκατεστημένη ισχύς, μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας δεν συμπίπτει χρονικά με τις ανάγκες του συστήματος ή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως μέσω της μπαταρίας.

Από οικονομική άποψη, η αύξηση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν οδηγεί σε βελτίωση των οικονομικών δεικτών. Αντίθετα, η Καθαρή Παρούσα Αξία μειώνεται από 19.425,91 € για 4 πλαίσια σε 14.843,34 € για 10 πλαίσια. Παράλληλα, η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής αυξάνεται από 10,25 έτη σε 12,14 έτη, ενώ ο δείκτης LCOH/C αυξάνεται από 0,2090 €/kWh σε 0,2306 €/kWh.

Η τάση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο δεν είναι αρκετή ώστε να αντισταθμίσει το πρόσθετο κόστος επένδυσης των επιπλέον φωτοβολταϊκών πλαισίων. Με άλλα λόγια, η προσθήκη περισσότερων πλαισίων μειώνει το ετήσιο κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αυξάνει ταυτόχρονα το αρχικό κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος και το αντίστοιχο κόστος συντήρησης.

Συνεπώς, στο εξεταζόμενο εύρος των 4 έως 10 φωτοβολταϊκών πλαισίων, η περίπτωση των 4 πλαισίων εμφανίζει την καλύτερη οικονομική συμπεριφορά, καθώς παρουσιάζει την υψηλότερη NPV, τη μικρότερη DPB και τη χαμηλότερη τιμή του δείκτη LCOH/C. Αντίθετα, η περίπτωση των 10 πλαισίων επιτυγχάνει τη μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, αλλά εμφανίζει τη χαμηλότερη οικονομική απόδοση.

Συνεπώς, η παραμετρική διερεύνηση δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων βελτιώνει την ενεργειακή αυτονομία του Σεναρίου 3, αλλά δεν οδηγεί απαραίτητα σε βελτίωση της οικονομικής του απόδοσης. Με βάση τις παραδοχές της παρούσας τεχνο-οικονομικής ανάλυσης, η οικονομικά ευνοϊκότερη επιλογή αντιστοιχεί στον μικρότερο αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων που εξετάστηκε, δηλαδή στα 4 πλαίσια.

9.9 Σύνοψη τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης

Η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων ανέδειξε τη σημασία της ταυτόχρονης εξέτασης του αρχικού κόστους επένδυσης και του ετήσιου κόστους λειτουργίας. Η ενεργειακά αποδοτικότερη λύση δεν αποτελεί απαραίτητα και την οικονομικά βέλτιστη επιλογή, καθώς το αυξημένο κόστος εγκατάστασης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την περίοδο αποπληρωμής και τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα κάθε υποψήφιας ενεργειακής αναβάθμισης.

Πιο συγκεκριμένα, το Σενάριο 1, με αντλία θερμότητας αέρα-νερού, χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης σε σχέση με τα γεωθερμικά σενάρια, ενώ επιτυγχάνει σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το Σενάριο 2, με γεωθερμική αντλία θερμότητας, εμφανίζει μεν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, αλλά παρουσιάζει χαμηλότερη ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της αυξημένης απόδοσης του συστήματος.

Το Σενάριο 3 οδηγεί στη μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, λόγω της αξιοποίησης φωτοβολταϊκής παραγωγής και μπαταρίας. Ωστόσο, το σημαντικά υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης καθιστά αναγκαία την αξιολόγηση της οικονομικής του αποδοτικότητας με βάση τους δείκτες NPV, DPB και LCOH/C.

Η παραμετρική διερεύνηση του Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων έδειξε ότι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος μειώνει την κατανάλωση από το δίκτυο, αλλά δεν οδηγεί απαραίτητα σε καλύτερη οικονομική επίδοση. Αυτό οφείλεται στο αυξημένο αρχικό κόστος και στην πιθανή αύξηση της πλεονάζουσας παραγωγής, η οποία δεν αξιοποιείται οικονομικά στην παρούσα ανάλυση.

Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου αποτελούν τη βάση για τη διατύπωση των συνολικών συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας στο Κεφάλαιο 10.

10. Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα και τα κύρια ευρήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σκοπός της εργασίας ήταν η μοντελοποίηση και τεχνο-οικονομική αξιολόγηση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, με έμφαση στη διερεύνηση της ενεργειακής και οικονομικής συμπεριφοράς διαφορετικών τεχνικών λύσεων για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης κτιρίου. Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκε αρχικά η υφιστάμενη κατάσταση, η οποία βασίζεται σε λέβητα πετρελαίου για τη θέρμανση και τοπικές μονάδες κλιματισμού για την ψύξη, και στη συνέχεια αναλύθηκαν τρία εναλλακτικά σενάρια.

Το Σενάριο 1 αφορά την αντικατάσταση του υφιστάμενου συστήματος με αντλία θερμότητας αέρα-νερού, το Σενάριο 2 αφορά την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη, ενώ το Σενάριο 3 επεκτείνει το γεωθερμικό σύστημα με την προσθήκη φωτοβολταϊκού συστήματος και μπαταρίας αποθήκευσης. Η σύγκριση των σεναρίων πραγματοποιήθηκε τόσο ως προς την τελική κατανάλωση ενέργειας όσο και ως προς τους οικονομικούς δείκτες αξιολόγησης.

Τα συμπεράσματα οργανώνονται σε τέσσερις ενότητες. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα και τα ερευνητικά ευρήματα της εργασίας. Στη συνέχεια αναφέρονται οι περιορισμοί και οι προκλήσεις που συνδέονται με τη μεθοδολογία και τις παραδοχές της ανάλυσης. Ακολουθεί η αποτίμηση της συνεισφοράς των αποτελεσμάτων σε επιστημονικό και πρακτικό επίπεδο, ενώ στο τέλος διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

10.1 Αποτελέσματα και ερευνητικά ευρήματα

Από την ενεργειακή αξιολόγηση προέκυψε ότι όλα τα εναλλακτικά σενάρια οδηγούν σε σημαντική μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η συνολική ετήσια τελική κατανάλωση της υφιστάμενης κατάστασης υπολογίστηκε σε 43.010,90 kWh/έτος, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος αφορά την κατανάλωση πετρελαίου για θέρμανση. Η αντικατάσταση του υφιστάμενου συστήματος από αντλία θερμότητας αέρα-νερού στο Σενάριο 1 μειώνει την ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση, για θέρμανση και ψύξη, σε 7.406,44 kWh/έτος. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα

σημαντική και οφείλεται στην υψηλότερη απόδοση της αντλίας θερμότητας σε σχέση με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης.

Το Σενάριο 2 παρουσιάζει ακόμη καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά, καθώς η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας υπολογίστηκε σε 4.250,76 kWh/έτος. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει το ενεργειακό πλεονέκτημα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, οι οποίες αξιοποιούν τη σχετικά σταθερή θερμοκρασία του εδάφους και λειτουργούν με υψηλότερους βαθμούς απόδοσης σε σχέση με τις αντλίες θερμότητας αέρα-νερού, ιδιαίτερα σε συνθήκες αυξημένων θερμικών ή ψυκτικών απαιτήσεων.

Στο Σενάριο 3, η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας παραμένει ίση με εκείνη του Σεναρίου 2, δηλαδή 4.250,76 kWh/έτος. Ωστόσο, λόγω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκού συστήματος και μπαταρίας, η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο μειώνεται σε 2.664,05 kWh/έτος. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει το γεγονός ότι ο συνδυασμός γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με επί τόπου παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποθήκευση μπορεί σε μεγάλο βαθμό να περιορίσει περαιτέρω την εξάρτηση του συστήματος από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ωστόσο, παρουσιάζει η εξέταση των εναλλακτικών σεναρίων από την σκοπιά της οικονομικής βιωσιμότητας. Η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση έδειξε ότι και τα τρία εναλλακτικά σενάρια εμφανίζουν θετική Καθαρή Παρούσα Αξία κατά την περίοδο υπολογισμού των 20 ετών. Το Σενάριο 1 παρουσιάζει την υψηλότερη NPV, ίση με 35.699,51 €, γεγονός που οφείλεται στον συνδυασμό σημαντικής μείωσης του κόστους λειτουργίας και σχετικά, σε σύγκριση με τα άλλα δύο σενάρια, χαμηλού κόστους επένδυσης. Το Σενάριο 2 παρουσιάζει επίσης θετική οικονομική απόδοση, με NPV ίση με 30.296,78 €, όμως το αυξημένο αρχικό κόστος του γεωθερμικού συστήματος περιορίζει το οικονομικό του πλεονέκτημα σε σχέση με το Σενάριο 1.

Το Σενάριο 3 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση πρώτου έτους, καθώς η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο μειώνεται λόγω της συνεισφοράς του φωτοβολταϊκού συστήματος και της μπαταρίας. Παρ' όλα αυτά, το αυξημένο κόστος επένδυσης οδηγεί σε χαμηλότερη NPV, ίση με 17.176,38 €, και σε μεγαλύτερη έντοκη περίοδο αποπληρωμής, ίση με 11,16 έτη. Επομένως, το Σενάριο 3 βελτιώνει την ενεργειακή αυτονομία του συστήματος, αλλά δεν αποτελεί την οικονομικά ευνοϊκότερη επιλογή με βάση τις παραδοχές της παρούσας ανάλυσης.

Η σύγκριση των περιόδων αποπληρωμής επιβεβαιώνει την οικονομική υπεροχή του Σεναρίου 1. Η απλή περίοδος αποπληρωμής του Σεναρίου 1 υπολογίστηκε σε 3,07 έτη και η έντοκη περίοδος αποπληρωμής σε 3,50 έτη. Για το Σενάριο 2 οι αντίστοιχες τιμές είναι 5,14 και 6,29 έτη, ενώ για το Σενάριο 3 είναι 8,09 και 11,16 έτη.

Αντίστοιχα, ο δείκτης LCOH/C επιβεβαιώνει ότι το Σενάριο 1 παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης, με τιμή 0,132 €/kWh. Το Σενάριο 2 εμφανίζει τιμή 0,158 €/kWh, ενώ το Σενάριο 3 παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή, ίση με 0,220 €/kWh. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται, όπως και στην περίπτωση της κυρίως στο αυξημένο κόστος επένδυσης του Σεναρίου 3, το οποίο δεν αντισταθμίζεται πλήρως από τη μείωση του κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι τα αποτελέσματα επηρεάζονται τόσο από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και από το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο. Η αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μείωση της NPV και σε αύξηση του LCOH/C, καθώς αυξάνεται το κόστος λειτουργίας των σεναρίων. Αντίστοιχα, η αύξηση του προεξοφλητικού επιτοκίου μειώνει την παρούσα αξία των μελλοντικών εξοικονομήσεων και οδηγεί σε αύξηση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής. Παρά τις μεταβολές αυτές, η γενική οικονομική κατάταξη των σεναρίων παραμένει σταθερή στο εξεταζόμενο εύρος τιμών.

Η παραμετρική διερεύνηση του Σεναρίου 3 ως προς τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανέδειξε ότι η αύξηση της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος μειώνει την ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο και αυξάνει την αξιοποιούμενη παραγωγή φωτοβολταϊκού συστήματος. Ωστόσο, η αύξηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνοδεύεται από αύξηση του κόστους επένδυσης και της πλεονάζουσας παραγωγής. Στο εξεταζόμενο εύρος των 4 έως 10 πλαισίων, η περίπτωση των 4 πλαισίων εμφανίζει την καλύτερη οικονομική συμπεριφορά, ενώ η περίπτωση των 10 πλαισίων παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας αποτελούν ιδιαίτερα αποδοτική λύση από ενεργειακή άποψη, καθώς μειώνουν σημαντικά την τελική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με συμβατικά συστήματα. Ωστόσο, η οικονομική αποδοτικότητα κάθε επιλογής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αρχικό κόστος επένδυσης, το κόστος λειτουργίας, τις ισχύουσες τιμές ενέργειας και τη δυνατότητα

αξιοποίησης της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας. Το βασικό ερευνητικό εύρημα είναι ότι η ενεργειακά αποδοτικότερη λύση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την οικονομικά βέλτιστη επιλογή. Η παρούσα τεχνο-οικονομική αξιολόγηση δείχνει ότι το χαμηλότερο αρχικό κόστος του Σεναρίου 1 υπερσχύει του ενεργειακού πλεονεκτήματος της ΓΑΘ. Έτσι, υπό τις βασικές παραδοχές της εργασίας, το Σενάριο 1 αποτελεί την οικονομικά ευνοϊκότερη επιλογή, ενώ το Σενάριο 2 αποτελεί την ενεργειακά αποδοτικότερη λύση μεταξύ των δύο σεναρίων αντλιών θερμότητας. Το Σενάριο 3 μειώνει περαιτέρω την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, αλλά η προσθήκη Φ/Β και μπαταρίας δεν αντισταθμίζει οικονομικά το αυξημένο αρχικό κόστος, ιδίως εφόσον η πλεονάζουσα παραγωγή δεν αποτιμάται οικονομικά στο μοντέλο.

10.2 Περιορισμοί και προκλήσεις κατά την ερευνητική διαδικασία

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε αριθμητική μοντελοποίηση και σε συγκεκριμένες τεχνικές και οικονομικές παραδοχές, οι οποίες ήταν απαραίτητες για τη συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων. Παρότι η μεθοδολογία επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση διαφορετικών επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που συνδέονται με το εύρος και τις παραδοχές της ανάλυσης.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά τον τρόπο προσομοίωσης της λειτουργίας των συστημάτων. Η ενεργειακή αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση υπολογιστική προσέγγιση και χαρακτηριστικές ετήσιες ή μηνιαίες τιμές, χωρίς να εφαρμόζεται πλήρης δυναμική προσομοίωση σε ωριαίο χρονικό βήμα. Κατά συνέπεια, δεν αποτυπώνονται πλήρως οι στιγμιαίες διακυμάνσεις των φορτίων θέρμανσης και ψύξης, καθώς και οι αντίστοιχες μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών. Ο περιορισμός αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για το Σενάριο 3, στο οποίο η απόδοση του συστήματος επηρεάζεται από τη χρονική κατανομή της φωτοβολταϊκής παραγωγής, το προφίλ κατανάλωσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, τη λειτουργία της μπαταρίας και τον βαθμό ταυτοχρονισμού μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Στην παρούσα εργασία οι παράμετροι αυτές προσεγγίστηκαν με απλοποιημένο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η ενσωμάτωσή τους στο συνολικό αριθμητικό μοντέλο.

Ένας ακόμη περιορισμός σχετίζεται με τις οικονομικές παραδοχές. Οι τιμές ενέργειας, τα κόστη εξοπλισμού, τα κόστη συντήρησης, το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο και ο ετήσιος συντελεστής αύξησης του κόστους λειτουργίας λαμβάνονται ως τιμές αναφοράς για τις ανάγκες της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης. Ωστόσο, οι παράμετροι αυτές μπορούν να μεταβληθούν σημαντικά στην πράξη, επηρεάζοντας την τελική οικονομική απόδοση των σεναρίων. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση βασικών οικονομικών παραμέτρων στα αποτελέσματα.

Επιπλέον, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένο κτήριο και συγκεκριμένες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Τα αποτελέσματα επομένως δεν μπορούν να γενικευθούν άμεσα σε όλα τα κτίρια ή σε όλες τις κλιματικές περιοχές, χωρίς προηγούμενη προσαρμογή των τεχνικών δεδομένων. Παράμετροι όπως το μέγεθος του κτιρίου, η θερμομονωτική επάρκεια του κελύφους, το προφίλ χρήσης, η διαθεσιμότητα χώρου για γεωεναλλάκτη και φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθώς και οι τοπικές εδαφικές και κλιματικές συνθήκες μπορούν να διαφοροποιήσουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Τέλος, στην παρούσα εργασία δεν εξετάστηκε αναλυτικά η επίδραση πιθανών επιδοτήσεων, χρηματοδοτικών σχημάτων ή μηχανισμών συμψηφισμού της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ένταξη τέτοιων παραμέτρων θα μπορούσε να μεταβάλει σημαντικά την οικονομική κατάταξη των σεναρίων, ιδιαίτερα στην περίπτωση του Σεναρίου 3, όπου το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης επηρεάζει καθοριστικά την οικονομική του απόδοση.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, οι παραδοχές εφαρμόστηκαν με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Επομένως, τα αποτελέσματα επιτρέπουν τη μεταξύ τους σύγκριση και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την ενεργειακή και οικονομική απόδοση κάθε υπό εξέταση τεχνικής λύσης. Η αξία της ανάλυσης έγκειται στη συνεπή εφαρμογή των ίδιων παραδοχών σε όλα τα σενάρια, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση της σχετικής ενεργειακής και οικονομικής τους συμπεριφοράς. Αντίθετα, για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε πραγματικό έργο απαιτείται συμπληρωματική μελέτη με ωριαία φορτία, πραγματικά γεωτεχνικά δεδομένα, επιβεβαίωση κόστους αγοράς και λεπτομερή προσομοίωση Φ/Β–μπαταρίας.

10.3 Συνεισφορά αποτελεσμάτων σε επιστημονικό και πρακτικό επίπεδο

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στη διερεύνηση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης συστημάτων αντλιών θερμότητας, με έμφαση στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και στη σύγκρισή τους με εναλλακτικές λύσεις ενεργειακής αναβάθμισης, που συναντώνται στην ελληνική αγορά. Η βασική συνεισφορά της έγκειται στον συνδυασμό ενεργειακής προσομοίωσης και τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης, ώστε να εξεταστεί όχι μόνο η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά και η οικονομική βιωσιμότητα κάθε σεναρίου. Εξάλλου το τελευταίο είναι και το κύριο σημείο ενδιαφέροντος της πλειοψηφίας των χρηστών.

Σε επιστημονικό επίπεδο, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ολοκληρωμένης αξιολόγησης των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Η σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων δείχνει ότι η ενεργειακά αποδοτικότερη λύση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την οικονομικά βέλτιστη επιλογή. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς υπογραμμίζει την ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ενεργειακοί όσο και οι οικονομικοί δείκτες κατά τη διαδικασία επιλογής ενός συστήματος.

Η εργασία συμβάλλει επίσης στην κατανόηση της συμπεριφοράς των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε σύγκριση με τις αντλίες θερμότητας αέρα-νερού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να επιτύχουν χαμηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αξιοποίησης του εδάφους ως πηγής ή αποδέκτη θερμότητας. Ωστόσο, το αυξημένο αρχικό κόστος του γεωθερμικού εναλλάκτη επηρεάζει σημαντικά την οικονομική απόδοση του συστήματος.

Ιδιαίτερη συνεισφορά αποτελεί και η αξιολόγηση του συνδυασμού γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία. Η ανάλυση έδειξε ότι η προσθήκη επιτόπιας παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειώσει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, αλλά δεν οδηγεί απαραίτητα σε βελτίωση των οικονομικών δεικτών. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει τη σημασία της ορθής διαστασιολόγησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της μπαταρίας, ώστε να αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση και η αύξηση της πλεονάζουσας παραγωγής.

Σε πρακτικό επίπεδο, η εργασία παρέχει ένα πλαίσιο σύγκρισης διαφορετικών τεχνικών λύσεων για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης κτιρίων. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε μπορεί να αξιοποιηθεί ως βάση για την προκαταρκτική αξιολόγηση

παρεμβάσεων σε αυτό το πλαίσιο σε κτίρια μικρής κλίμακας, πριν από τη λήψη τεχνικών ή επενδυτικών αποφάσεων από τους ιδιοκτήτες ή τους χρήστες.

Τα αποτελέσματα μπορούν να είναι χρήσιμα για μηχανικούς, μελετητές και ιδιοκτήτες κτιρίων, καθώς δείχνουν ότι η επιλογή ενός συστήματος δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση. Αντίθετα, απαιτείται συνεκτίμηση του κόστους επένδυσης, του κόστους λειτουργίας, της περιόδου αποπληρωμής και του συνολικού κόστους ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας.

Επιπλέον, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ανάλυσης ευαισθησίας σε τεχνο-οικονομικές μελέτες. Η διερεύνηση της επίδρασης της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας και του προεξοφλητικού επιτοκίου έδειξε ότι οι οικονομικοί δείκτες μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από τις βασικές οικονομικές παραδοχές. Επομένως, η αξιολόγηση τέτοιων συστημάτων είναι σκόπιμο να μην περιορίζεται σε μία μόνο τιμή αναφοράς, αλλά να εξετάζει εύρος πιθανών συνθηκών, καθώς η μελλοντική εξέλιξη των οικονομικών παραμέτρων δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα.

Συνολικά, η συνεισφορά της εργασίας εντοπίζεται στην ανάπτυξη μιας συγκροτημένης μεθοδολογίας σύγκρισης τεχνικών σεναρίων, η οποία συνδυάζει ενεργειακά αποτελέσματα, οικονομικούς δείκτες και παραμετρική διερεύνηση. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία υποστηρίζει τη λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων για την επιλογή συστημάτων θέρμανσης και ψύξης υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

10.4 Ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω διερεύνηση της ενεργειακής και τεχνο-οικονομικής συμπεριφοράς γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, καθώς και του συνδυασμού τους με συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Μία βασική κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αφορά την εφαρμογή δυναμικής προσομοίωσης σε ωριαίο χρονικό βήμα. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαν να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι μεταβολές των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και η πραγματική λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια του έτους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναλυτικότερη διερεύνηση του Σεναρίου 3, στο οποίο συνδυάζονται γεωθερμική αντλία θερμότητας, φωτοβολταϊκό σύστημα και μπαταρία. Σε μελλοντική εργασία θα μπορούσε να εξεταστεί λεπτομερέστερα η διαχείριση της πλεονάζουσας φωτοβολταϊκής παραγωγής, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας επιστροφής της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ενσωμάτωση ενός κατάλληλου μηχανισμού συμψηφισμού ή αποζημίωσης της παραγόμενης ενέργειας θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά την οικονομική αξιολόγηση του Σεναρίου 3, καθώς μέρος της ενέργειας που δεν αξιοποιείται άμεσα από το σύστημα θα μπορούσε να αποκτήσει οικονομική αξία.

Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών μεγεθών φωτοβολταϊκού συστήματος και διαφορετικών χωρητικοτήτων μπαταρίας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την κάλυψη των αναγκών του συστήματος, αλλά και τη δυνατότητα αξιοποίησης της πλεονάζουσας παραγωγής μέσω του ηλεκτρικού δικτύου.

Σε οικονομικό επίπεδο, μελλοντικές αναλύσεις θα μπορούσαν να ενσωματώσουν περισσότερα σενάρια εξέλιξης των τιμών ενέργειας, του κόστους εξοπλισμού και των επιτοκίων. Η διερεύνηση αυτή είναι σημαντική, καθώς οι οικονομικές παράμετροι παρουσιάζουν αβεβαιότητα και μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά την τελική κατάταξη των εξεταζόμενων λύσεων. Επίσης, θα ήταν χρήσιμη η εξέταση της επίδρασης πιθανών επιδοτήσεων, χρηματοδοτικών εργαλείων ή διαφορετικών σχημάτων συμψηφισμού της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα για συστήματα με υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε επίσης να εξετάσει την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων, κλιματικές ζώνες και προφίλ χρήσης. Η ενεργειακή και

οικονομική απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας εξαρτάται από τις θερμικές και ψυκτικές ανάγκες του κτιρίου, τα χαρακτηριστικά του κελύφους, τη διαθεσιμότητα χώρου για την εγκατάσταση γεωεναλλάκτη και φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και τις τοπικές εδαφικές και κλιματικές συνθήκες. Επομένως, η εφαρμογή της ανάλυσης σε περισσότερες περιπτώσεις θα μπορούσε να ενισχύσει τη εφαρμοσιμότητα των συμπερασμάτων.

Συνολικά, η μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει στη λεπτομερέστερη προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων, στη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας, στη διαχείριση της πλεονάζουσας παραγωγής και στη διεύρυνση της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης υπό διαφορετικές τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσε να διαμορφωθεί ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης για την επιλογή συστημάτων θέρμανσης και ψύξης υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

Βιβλιογραφία

- Βραχόπουλος, Μ., Κούκου, Μ., & Καρύτσας, Κ. (2015). *ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ - ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- Κακάτσιος, Ξ. (2008). *ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ*. Κλειδάριθμος.
- Κατσαπρακάκης, Δ., & Μονιάκης, Μ. (2015). *Θέρμανση – Ψύξη – Κλιματισμός*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://hdl.handle.net/11419/6167>
- Φυτίκας, Μ., & Ανδρίτσος, Ν. (2004). *Γεωθερμία*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Alshehri, F., Beck, S., Ingham, D., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2019). Techno-economic analysis of ground and air source heat pumps in hot dry climates. *Journal of Building Engineering*, 26, 100825. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100825>
- Aresti, L., Christodoulides, P., & Florides, G. (2018). A review of the design aspects of ground heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.053>
- Chen, K., Zheng, J., Li, J., Shao, J., & Zhang, Q. (2022). Numerical study on the heat performance of enhanced coaxial borehole heat exchanger and double U borehole heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 203, 117916. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117916>
- Christodoulides, P., Christou, C., Aresti, L., Stylianou, I. I., & Florides, G. A. (2025). Operation performance of a ground source heat pump system in the mediterranean climate zone. First results. *Energy Efficiency*, 18(3), 21. <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10307-3>

- Conti, P., Testi, D., & Grassi, W. (2016). Revised heat transfer modeling of double-U vertical ground-coupled heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 106, 1257–1267.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.097>
- Cui, P., Yang, H., & Fang, Z. (2008). Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes. *Energy and Buildings*, 40(6), 1060–1066. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.005>
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32(15), 2461–2478.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>
- García-Céspedes, J., Arnó, G., Herms, I., & De Felipe, J. J. (2020). Characterisation of efficiency losses in ground source heat pump systems equipped with a double parallel stage: A case study. *Renewable Energy*, 147, 2761–2773.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.029>
- Go, J., Byun, J., Orehounig, K., & Heo, Y. (2023). Battery-H₂ storage system for self-sufficiency in residential buildings under different electric heating system scenarios. *Applied Energy*, 337, 120742. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120742>
- Kwon, Y., Bae, S., Chae, H., & Nam, Y. (2023). Economic and performance analysis of ground source heat pump system for high-rise residential buildings considering practical applications. *Energy Reports*, 10, 4359–4373. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.086>
- Lee, C. K. (2010). Dynamic performance of ground-source heat pumps fitted with frequency inverters for part-load control. *Applied Energy*, 87(11), 3507–3513.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.029>

- Lee, C. K., & Lam, H. N. (2008). Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems. *Renewable Energy*, 33(6), 1286–1296.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.07.006>
- Lee, C. K., & Lam, H. N. (2012). A modified multi-ground-layer model for borehole ground heat exchangers with an inhomogeneous groundwater flow. *Energy*, 47(1), 378–387.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.056>
- Lykas, P., Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2026). Dynamic investigation of a multiple energy production and storage system for a residential building. *Renewable Energy*, 256, 123938.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123938>
- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., & Xiang, W. (2015). Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. *Geothermics*, 53, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.004>
- Ma, Z., & Xia, L. (2017). Model-based Optimization of Ground Source Heat Pump Systems. *Energy Procedia*, 111, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.003>
- Neves, R., Cho, H., & Zhang, J. (2020). Techno-economic analysis of geothermal system in residential building in Memphis, Tennessee. *Journal of Building Engineering*, 27, 100993.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100993>
- Noorollahi, Y., Saeidi, R., Mohammadi, M., Amiri, A., & Hosseinzadeh, M. (2018). The effects of ground heat exchanger parameters changes on geothermal heat pump performance – A review. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1645–1658.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.111>
- Ougazzou, M., El Maakoul, A., Khay, I., Degiovanni, A., & Bakhouya, M. (2024). Techno-economic and environmental analysis of a ground source heat pump for heating and

cooling in Moroccan climate regions. *Energy Conversion and Management*, 304, 118250.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118250>

Pouloupatis, P. D., Tassou, S. A., Christodoulides, P., & Florides, G. A. (2017). Parametric analysis of the factors affecting the efficiency of ground heat exchangers and design application aspects in Cyprus. *Renewable Energy*, 103, 721–728.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.006>

Saeidi, R., Karimi, A., & Noorollahi, Y. (2024). The novel designs for increasing heat transfer in ground heat exchangers to improve geothermal heat pump efficiency. *Geothermics*, 116, 102844. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102844>

Viviescas, G., & Bernier, M. (2024). A variable speed water-to-water heat pump model used for ground-source applications. *Science and Technology for the Built Environment*, 30(3), 266–279. <https://doi.org/10.1080/23744731.2023.2295822>

Yang, H., Cui, P., & Fang, Z. (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy*, 87(1), 16–27.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.038>

Παράρτημα Α: thesaurus.txt

label, replace by

part-load factor, part load performance

partialisation losses, part load performance

part-load ratio, part load performance

opengeosys (ogs), simulation software

gld software, simulation software

high-rise residential building, residential

frequency inverters, variable speed

variable speed pumps, variable speed

spiral pipe, pipe

numerical heat transfer, numerical modeling

numerical simulation, numerical modeling

three-dimensional model, numerical modeling

geothermal, geothermal energy

geothermal investigation, geothermal energy

geothermal systems, geothermal energy

recovery of shallow geothermal reservoir, geothermal energy

ground source heat pump (gshp) system, ground source heat pump

ground source heat pump (gshp), ground source heat pump

ground source heat pump system, ground source heat pump

ground source heat pumps, ground source heat pump

ground-source heat pump, ground source heat pump

ground-source heat pump systems, ground source heat pump

ground-coupled heat pump, ground source heat pump

gshp, ground source heat pump

gshp systems, ground source heat pump

hybrid ground-coupled heat pump, ground source heat pump

ground heat exchangers, ground heat exchanger

ground heat exchangers (ghe), ground heat exchanger

borehole heat exchanger (bhe), ground heat exchanger

borehole field, ground heat exchanger

borehole thermal resistance, ground heat exchanger

double-u boreholes, ground heat exchanger

energy piles, ground heat exchanger

enhanced coaxial bhe, ground heat exchanger

helicoidal coil, ground heat exchanger

hghe, ground heat exchanger

horizontal ground heat exchanger, ground heat exchanger

hydraulic conditioner, ground heat exchanger

thermal response test, ground heat exchanger

cylindrical-source model, analytical modeling

line-source model, analytical modeling

heat exchanger models, analytical modeling

coefficient of performance (cop), energy efficiency

coefficient of performance, energy efficiency

energy efficiency ratio (eer), energy efficiency

system performance, energy efficiency

energetic performance, energy efficiency

energy savings, energy efficiency

energy consumption, energy efficiency

long-term sustainability and efficiency, energy efficiency

heat transfer, heat transfer performance

heat exchange rate, heat transfer performance

heat transfer rate, heat transfer performance

ghe efficiency, heat transfer performance

thermal properties, heat transfer performance

groundwater table, ground conditions

groundwater, ground conditions

moist soil, ground conditions

secondary soil, ground conditions

ground temperature, ground conditions

incentive, techno-economic analysis

payback, techno-economic analysis

techno-economic, techno-economic analysis...

Παράρτημα Β: Συμπληρωματικά στοιχεία κτιρίου αναφοράς και προσδιορισμού ενεργειακών φορτίων

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στοιχεία του κτιρίου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων και, στη συνέχεια, για την εφαρμογή του ενεργειακού μοντέλου. Παρατίθενται η κάτοψη και ο προσανατολισμός του κτιρίου, τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους, οι επιφάνειες των αδιαφανών και διαφανών δομικών στοιχείων, καθώς και οι βασικές παραδοχές όσον αφορά τις τιμές θερμοπερατότητας.

Τα στοιχεία αυτά επιτρέπουν τη σύνδεση των χαρακτηριστικών του κτιρίου με τα φορτία θέρμανσης και ψύξης που χρησιμοποιούνται στην ενεργειακή και τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων.

Ο προσδιορισμός των θερμικών απωλειών και των ψυκτικών φορτίων πραγματοποιήθηκε με βάση τα γεωμετρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής της Λάρισας και τις παραδοχές της TOTEE 20701-1/2017, στο πλαίσιο της προηγούμενης ενεργειακής ανάλυσης του κτιρίου

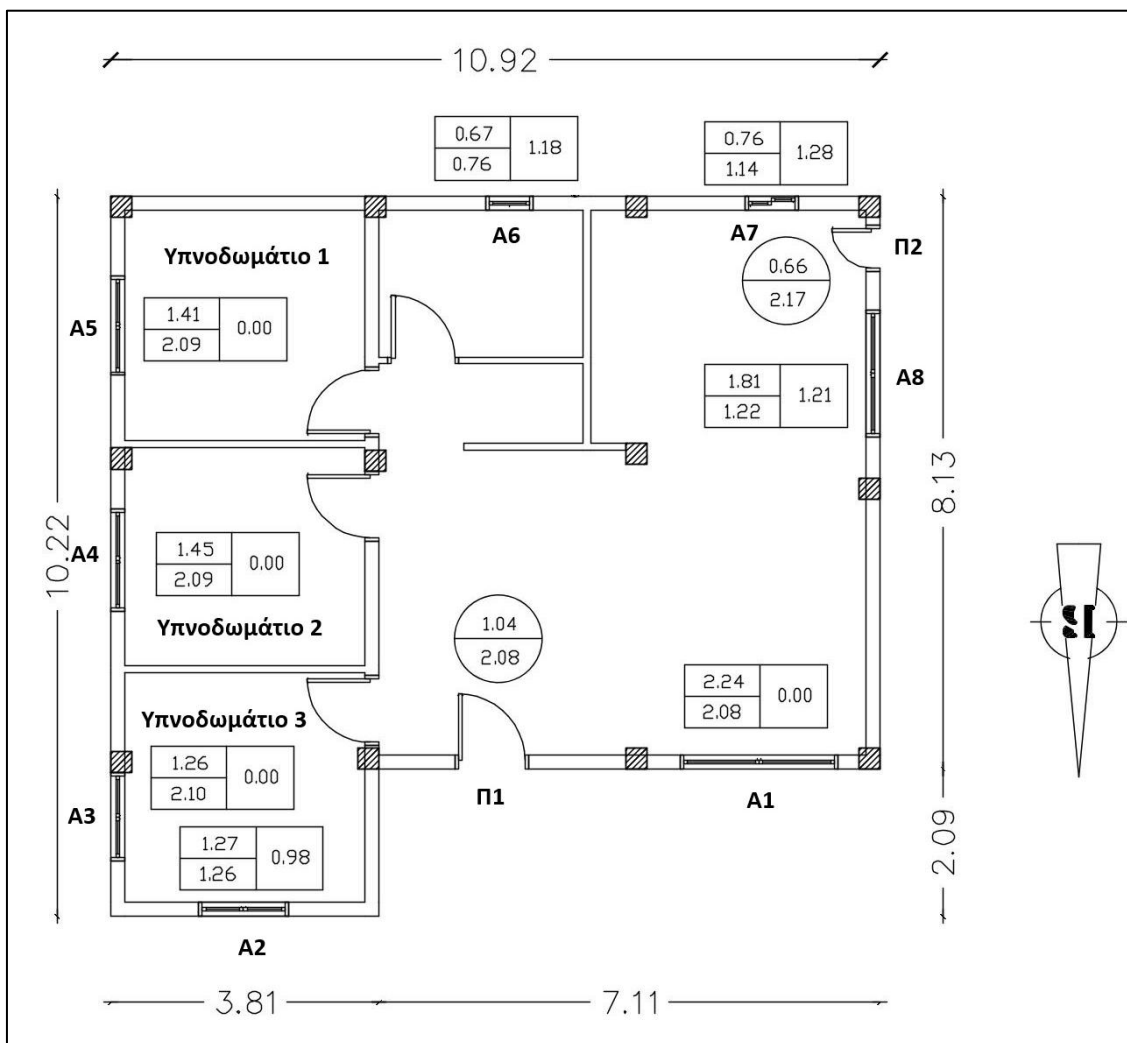
Β.1 Περιγραφή κτιρίου αναφοράς

Το υπό μελέτη κτήριο πρόκειται για κτήριο ενός ορόφου, χρήση κατοικίας, στην Λάρισα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.4 της TOTEE 20701-1/2017, η Λάρισα ανήκει στην κλιματική ζώνη Γ. Το έτος κτίσης είναι το 1988.

Η εξωτερική τοιχοποιία είναι κατασκευασμένη από μπαιτική οπτοπλινθοδομή, επιχρισμένη και από τις δύο όψεις. Η εσωτερική τοιχοποιία είναι σε κάποιους χώρους κατασκευασμένη από μπαιτική και σε κάποιους από δρομική οπτοπλινθοδομή. Υπάρχει δώμα σε επαφή με εξωτερικό αέρα, ενώ το δάπεδο έρχεται σε επαφή με το δάπεδο.

Θεωρούμε ότι έχει γίνει πλημμελής εφαρμογή του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίου και αναλόγως θα θεωρηθούν οι αντίστοιχες συντελεστές θερμοπερατότητας στην συνέχεια.

Παρακάτω παρουσιάζεται η κάτοψη του υπό μελέτη κτιρίου (Εικόνα Β.1).



Εικόνα Β.1 Κάτοψη, βασικές διαστάσεις και προσανατολισμός του κτιρίου

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Δ.1) συνοψίζονται τα βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη κτιρίου.

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή / τιμή
Χρήση κτιρίου	Κατοικία
Τύπος κτιρίου	Μονόωροφη κατοικία
Θέση	Λάρισα
Κλιματική ζώνη	Γ
Έτος κατασκευής	1988
Επιφάνεια δαπέδου	96,74 m ²
Εξωτερική τοιχοποιία	Μπατική Οπτοπλινθοδομή, επιχρισμένη και από τις δύο πλευρές
Οροφή	Δώμα σε επαφή με εξωτερικό αέρα
Δάπεδο	Δάπεδο επί εδάφους
Κουφώματα	Ξύλινα πλαίσια με μονούς υαλοπίνακες
Εξωτερικές πόρτες	Ξύλινες

Πίνακας Β.1 Βασικά χαρακτηριστικά του κτιρίου

Β.2 Γεωμετρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αδιαφανή και διαφανή στοιχεία του κελύφους που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των φορτίων. Οι συντελεστές θερμοπερατότητας περιλαμβάνουν την προσαύξηση λόγω θερμογεφυρών, σύμφωνα με τις παραδοχές της ενεργειακής ανάλυσης.

Σύμβολο	Τύπος Στοιχείου	Προσανατολισμός	Μήκος / Πλάτος [m]	Ύψος [m]	Επιφάνεια [m ²]	Συντελεστής Θερμοπερατότητας [W/m ² K]
T1	Εξωτερικός Τοίχος	B	7,11	3,10	15,22	1,08
Π1	Εξωτερική Πόρτα	B	1,04	2,08	2,16	3,50
T2	Εξωτερικός Τοίχος	Δ	2,09	3,10	6,48	1,08
T3	Εξωτερικός Τοίχος	B	3,81	3,10	10,21	1,08
T4	Εξωτερικός Τοίχος	A	10,22	3,10	23,06	1,08
T5	Εξωτερικός Τοίχος	N	10,92	3,10	32,48	1,08
T6	Εξωτερικός Τοίχος	Δ	8,13	3,10	21,56	1,08
Π2	Εξωτερική Πόρτα	Δ	0,66	2,17	1,43	3,50
O1	Συμβατικού τύπου δώμα				96,74	1,05
Δ1	Δάπεδο επί εδάφους				96,74	1,05

Πίνακας Β.2 Αδιαφανή δομικά στοιχεία κτιριακού κελύφους

Σύμβολο	Τύπος Στοιχείου	Προσανατολισμός	Μήκος / Πλάτος [m]	Ύψος [m]	Επιφάνεια [m ²]	Συντελεστής Θερμοπερατότητας [W/m ² K]
A1	Ανοιγόμενο Κούφωμα	B	2,24	2,08	4,66	4,20
A2	Ανοιγόμενο Κούφωμα	B	1,27	1,26	1,60	4,00
A3	Ανοιγόμενο Κούφωμα	A	1,26	2,10	2,65	4,20
A4	Ανοιγόμενο Κούφωμα	A	1,45	2,09	3,03	4,20
A5	Ανοιγόμενο Κούφωμα	A	1,41	2,09	2,95	4,20
A6	Ανοιγόμενο Κούφωμα	N	0,67	0,76	0,51	4,30
A7	Ανοιγόμενο Κούφωμα	N	0,76	1,14	0,87	4,30
A8	Ανοιγόμενο Κούφωμα	Δ	1,81	1,22	2,21	4,00

Πίνακας Β.3 Διαφανή δομικά στοιχεία κτιριακού κελύφους

Β.3 Προσδιορισμός φορτίων σχεδιασμού και μηνιαίων θερμικών και ψυκτικών φορτίων

Στο πλαίσιο προηγούμενης ενεργειακής ανάλυσης του κτιρίου προσδιορίστηκαν τόσο τα φορτία σχεδιασμού θέρμανσης και ψύξης όσο και οι αντίστοιχες μηνιαίες ενεργειακές ανάγκες. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στα γεωμετρικά και θερμικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους, στον προσανατολισμό των αδιαφανών και διαφανών στοιχείων, στις συνθήκες χρήσης του κτιρίου και στα κλιματικά δεδομένα της περιοχής της Λάρισας.

Για τον προσδιορισμό των φορτίων σχεδιασμού εφαρμόστηκαν οι σχετικές σχέσεις και παραδοχές της TOTEE 20701-1/2017. Για την αναγωγή των ενεργειακών αναγκών σε μηνιαία βάση χρησιμοποιήθηκαν οι βαθμοήμερες θέρμανσης και οι βαθμοώρες ψύξης της Λάρισας, σύμφωνα με την TOTEE 20701-3/2010.

Το θερμικό φορτίο σχεδιασμού προσδιορίστηκε από τις θερμικές απώλειες μέσω του κτιριακού κελύφους και τις απώλειες λόγω διείσδυσης αέρα. Οι επιμέρους συνιστώσες παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.4.

Συνιστώσα θερμικού φορτίου	Τιμή [kW]
Απώλειες μέσω αδιαφανών και διαφανών στοιχείων κελύφους	11,33
Απώλειες λόγω διείσδυσης αέρα	2,62
Συνολικό θερμικό φορτίο σχεδιασμού	13,95

Πίνακας Β.4 Προσδιορισμός θερμικού φορτίου σχεδιασμού

Η τιμή αυτή εκφράζει τη μέγιστη απαιτούμενη θερμική ισχύ του κτιρίου υπό χειμερινές συνθήκες σχεδιασμού. Για την εκτίμηση των μηνιαίων ενεργειακών αναγκών θέρμανσης εφαρμόστηκε η μέθοδος των βαθμομερών θέρμανσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε συντελεστής θερμικών απωλειών ίσος με:

$$(UA)_b = A \cdot U_m + \frac{\dot{V}}{3} = 415,47 \text{ W/K}$$

όπου:

- A είναι η συνολική εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου,
- U_m ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας και
- $\dot{V}$ η παροχή αέρα λόγω διείσδυσης.

Η μηνιαία χρήσιμη θερμική ενέργεια υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$E_h = 24 \cdot (UA)_b \cdot DD_h \quad (\text{B.1})$$

όπου:

- $DD_{h,m}$ είναι οι βαθμομέρες θέρμανσης του αντίστοιχου μήνα, με θερμοκρασία βάσης 18°C .

Με κατάλληλη μετατροπή των μονάδων, προέκυψαν οι μηνιαίες τιμές θερμικού φορτίου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5 του Κεφαλαίου 7.

Αντίστοιχα, το ψυκτικό φορτίο σχεδιασμού προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα θερμικά κέρδη μέσω των αδιαφανών και διαφανών στοιχείων του κελύφους, τα εσωτερικά κέρδη από τους χρήστες, τον φωτισμό και τις συσκευές, καθώς και το φορτίο λόγω διείσδυσης αέρα. Οι επιμέρους συνιστώσες παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.5.

Συνιστώσα ψυκτικού φορτίου	Τιμή [kW]
Φορτίο μέσω αδιαφανών στοιχείων κελύφους	3,19
Φορτίο μέσω διαφανών στοιχείων κελύφους	3,00
Εσωτερικά κέρδη από χρήστες	0,39
Εσωτερικά κέρδη από φωτισμό και συσκευές	0,26
Φορτίο λόγω διείσδυσης αέρα	1,12
Συνολικό ψυκτικό φορτίο σχεδιασμού	7,95

Πίνακας Β.5 Προσδιορισμός ψυκτικού φορτίου σχεδιασμού

Το συνολικό ψυκτικό φορτίο σχεδιασμού επομένως είναι ίσο με 7,95 kW και εκφράζει τη μέγιστη απαιτούμενη ψυκτική ισχύ του κτιρίου υπό θερινές συνθήκες σχεδιασμού. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό ισοδύναμου συντελεστή θερμικής μεταφοράς για την περίοδο ψύξης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$(UA)_b = \frac{(P_{gen})'}{\Delta T} = \frac{7,95 \text{ kW}}{10,5 \text{ K}} = 757,14 \text{ (W/K)}$$

όπου:

- $(P_{gen})'$ το ψυκτικό φορτίο σχεδιασμού και
- ΔT η διαφορά μεταξύ της εξωτερικής θερμοκρασίας σχεδιασμού για την ψύξη και της εσωτερικής θερμοκρασίας άνεσης. Για την περιοχή της Λάρισας θεωρήθηκε εξωτερική θερμοκρασία σχεδιασμού 36,5 °C και εσωτερική θερμοκρασία 26 °C, οπότε προκύπτει $\Delta T = 36,5 - 26 = 10,5 \text{ K}$

Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια σε συνδυασμό με τις βαθμοώρες ψύξης συνέχεια σε συνδυασμό της Λάρισας για τον υπολογισμό των μηνιαίων ψυκτικών φορτίων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_c = (UA)_c \cdot DH_c \quad (\text{B.2})$$

όπου:

- DH_c είναι οι βαθμώρες ψύξης του αντίστοιχου μήνα.

Τα μηνιαία ψυκτικά φορτία που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5 του Κεφαλαίου 7 και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο ενεργειακό μοντέλο.

Παράρτημα Γ: Ανάπτυξη σχέσης χρονικής επαλληλίας για τη θερμική απόκριση προηγούμενων μηνιαίων φορτίων

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζεται η ανάπτυξη της σχέσης που χρησιμοποιείται στο αριθμητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής επίδρασης προηγούμενων μηνιαίων φορτίων στη θερμική κατάσταση του γεωεναλλάκτη. Η ανάπτυξη βασίζεται στη σχέση θερμικής απόκρισης της διάταξης:

όπου:

$$\tau = \frac{t}{t_s}$$

και:

$$t_s = \frac{H^2}{9\alpha}$$

Για τη θερμική απόκριση της διάταξης χρησιμοποιείται η λογαριθμική μορφή:

$$g_{array}(\tau) = A_{array} + B_{array} \ln(\tau)$$

Η συνεισφορά ενός προηγούμενου μηνιαίου φορτίου m στη θερμοκρασιακή μεταβολή στο τέλος του μήνα i , για $m < i$, υπολογίζεται ως διαφορά της θερμικής απόκρισης μεταξύ της έναρξης και της λήξης του φορτίου:

$$\Delta T_{b,m \rightarrow i} = \frac{q_m}{2\pi k_s} \left[g_{array} \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,start}}{t_s} \right) - g_{array} \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,end}}{t_s} \right) \right] \quad (\Gamma.1)$$

Με αντικατάσταση της λογαριθμικής σχέσης προκύπτει:

$$\Delta T_{b,m \rightarrow i} = \frac{q_m}{2\pi k_s} \left[A_{array} + B_{array} \ln \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,start}}{t_s} \right) - A_{array} - B_{array} \ln \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,end}}{t_s} \right) \right] \quad (\Gamma.2)$$

Ο όρος A_{array} απαλείφεται, οπότε:

$$\Delta T_{b,m \rightarrow i} = \frac{q_m B_{array}}{2\pi k_s} \left[\ln \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,start}}{t_s} \right) - \ln \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,end}}{t_s} \right) \right] \quad (\Gamma.3)$$

Με χρήση της ιδιότητας των λογαρίθμων:

$$\ln a - \ln b = \ln \left(\frac{a}{b} \right)$$

προκύπτει:

$$\Delta T_{b,m \rightarrow i} = \frac{q_m B_{array}}{2\pi k_s} \ln \left[\frac{\frac{t_{i,end} - t_{m,start}}{t_s}}{\frac{t_{i,end} - t_{m,end}}{t_s}} \right]$$

Ο χαρακτηριστικός χρόνος t_s απαλείφεται στον λόγο και η τελική σχέση γράφεται:

$$\Delta T_{b,m \rightarrow i} = \frac{B_{array}}{2\pi k_s} q_m \ln \left(\frac{t_{i,end} - t_{m,start}}{t_{i,end} - t_{m,end}} \right) \quad (\Gamma.4)$$

Στην παραπάνω σχέση, q_m είναι το μέσο θερμικό φορτίο του μήνα m , k_s η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους, B_{array} ο συντελεστής της θερμικής απόκρισης της διάταξης, $t_{i,end}$ ο χρόνος στο τέλος του μήνα i , ενώ $t_{m,start}$ και $t_{m,end}$ είναι οι χρόνοι έναρξης και λήξης του προηγούμενου μηνιαίου φορτίου m .

Παράρτημα Δ: Χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ

JA SOLAR

Harvest the Sunshine

630W



JAM66D45 LB

n-type Double Glass Bifacial Modules

Premium Cells



MBB Half-Cell Technology

26%

Up To

Cell Conversion Efficiency

Premium Modules



Higher power generation better LCOE



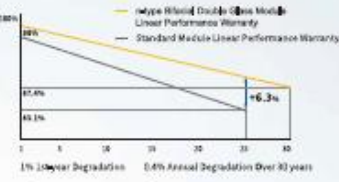
n-type with very Lower LID



Better Temperature Coefficient



Better low irradiance response



1% 10-year Degradation 0.4% Annual Degradation Over 30 years



12-year product warranty



30-year linear power output warranty

Comprehensive Certificates

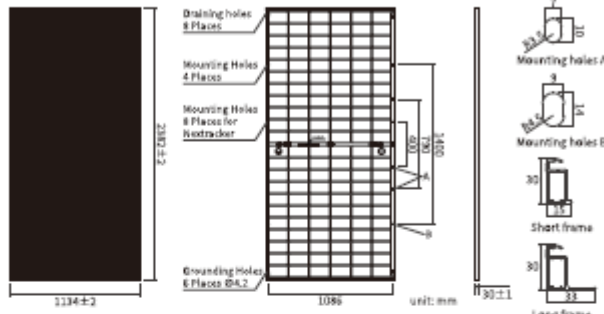
- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems
- IEC 62941: 2019 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Quality system for PV module manufacturing







JAM66D45 LB n-type Double Glass Bifacial Modules



MECHANICAL PARAMETERS

Cell	Mono
Weight	33.1kg
Dimensions	2382±2mm×1134±2mm×30±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC), 12 AWG(UL)
No. of cells	132(6×22)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10+351/ MC4-EVO2A
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-) Landscape: 1500mm(+)/1500mm(-)
Front Glass/Back Glass	2.0mm/2.0mm
Packaging Configuration	36pcs/Pallet, 720pcs/40HQ Container

Remark: customized frame color and cable length available upon request

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM66D45 -605/LB	JAM66D45 -610/LB	JAM66D45 -615/LB	JAM66D45 -620/LB	JAM66D45 -625/LB	JAM66D45 -630/LB
Rated Maximum Power(P _{max}) [W]	605	610	615	620	625	630
Open Circuit Voltage (V _{oc}) [V]	47.90	48.10	48.30	48.50	48.70	48.90
Maximum Power Voltage(V _{mp}) [V]	39.60	39.77	39.96	40.21	40.45	40.70
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	16.00	16.05	16.10	16.13	16.15	16.18
Maximum Power Current(I _{mp}) [A]	15.28	15.34	15.39	15.42	15.45	15.48
Module Efficiency [%]	22.4	22.6	22.8	23.0	23.1	23.3
Power Tolerance	0~+3%					
Temperature Coefficient of I _{sc} /α _{Isc}	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of V _{oc} (β _{Voc})	-0.250%/°C					
Temperature Coefficient of P _{max} (α _{Pmp})	-0.290%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

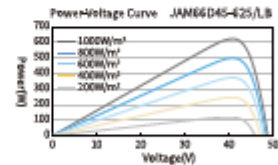
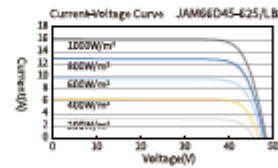
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH 10% SOLAR IRRADIATION RATIO

TYPE	JAM66D45 -605/LB	JAM66D45 -610/LB	JAM66D45 -615/LB	JAM66D45 -620/LB	JAM66D45 -625/LB	JAM66D45 -630/LB
Rated Max Power(P _{max}) [W]	653	659	664	670	675	680
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	47.90	48.10	48.30	48.50	48.70	48.90
Max Power Voltage(V _{mp}) [V]	39.60	39.77	39.96	40.21	40.45	40.70
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	17.28	17.33	17.39	17.42	17.44	17.47
Max Power Current(I _{mp}) [A]	16.50	16.56	16.62	16.65	16.69	16.72
Irradiation Ratio (rear/front)	10%					

* For Heatstack installations, maximum static load please take compatibility approve letter between JA Solar and Heatstack for reference.

CHARACTERISTICS



OPERATING CONDITIONS

Maximum System Voltage	1500V DC
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	35A
Maximum Static Load, Front*	5400Pa(112 lb/ft ²)
Maximum Static Load, Back*	2400Pa(50 lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Bifaciality	80%±5%
Safety Class	Class III
Fire Performance	UL Type 29/Class C



Headquarters

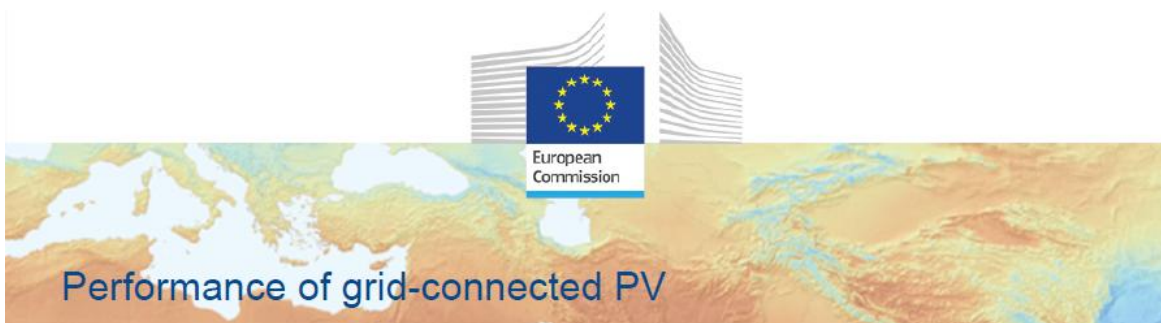
No. 8 Building, Huade Center, No.1 Courtyard, East Auto Museum Road,
Fengtai District, Beijing
Tel: +86 10 6361 1888 Fax: +86 10 6361 1999
E-mail: sales@jasolar.com marketing@jasolar.com www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests.
JA Solar reserves the right of final interpretation.

Version No.: Global-EH-20241105A

Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα προσομοίωσης PVGIS

Στο παρόν παράρτημα παρατίθεται η αναφορά που εξήχθη από το εργαλείο PVGIS της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής στο Σενάριο 3. Η θέση υπολογισμού επιλέχθηκε στον χάρτη του PVGIS στην περιοχή της Λάρισας και αντιστοιχεί στις γεωγραφικές συντεταγμένες $39,635^{\circ}$ Β και $22,421^{\circ}$ Α. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για φωτοβολταϊκό σύστημα αναφοράς ισχύος 1 kWp, με κλίση 35° , νότιο προσανατολισμό και απώλειες συστήματος 14%. Τα μηνιαία αποτελέσματα της αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο για την αναγωγή της παραγωγής στις εξεταζόμενες εγκατεστημένες τιμές ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος.



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

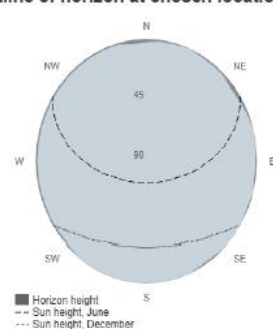
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 39.635,22.421
Horizon: Calculated
Database used: PVGIS-SARAH3
PV technology: Cryst Sil Original
PV installed: 1 kWp
System loss: 14 %

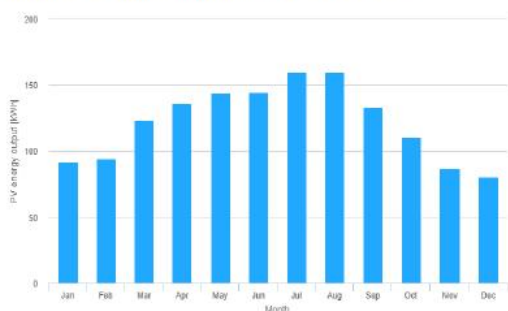
Simulation outputs

Slope angle: 35 °
Azimuth angle: 0 °
Yearly PV energy production: 1462.93 kWh
Yearly in-plane irradiation: 1925 kWh/m²
Year-to-year variability: 43.90 kWh
Changes in output due to:
Angle of incidence: -2.68 %
Spectral effects: 0.72 %
Temperature and low irradiance: -9.85 %
Total loss: -24 %

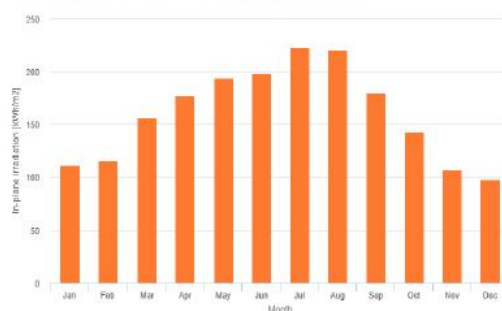
Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



Monthly PV energy and solar irradiation

Month	E_m	H(i)_m	SD_m
January	91.6	111.1	17.6
February	93.8	115.7	14.6
March	123.6	156.6	12.1
April	135.7	177.3	11.1
May	144.2	193.7	8.8
June	144.6	198.9	6.9
July	159.8	222.4	4.5
August	159.3	220.6	6.0
September	133.3	179.6	9.4
October	110.3	143.4	15.9
November	86.5	107.8	13.1
December	80.4	98.0	14.2

E_m: Average monthly electricity production from the defined system [kWh].
H(i)_m: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m²].
SD_m: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].

The European Commission maintains this website to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. Our goal is to keep this information timely and accurate. If errors are brought to our attention, we will try to correct them. However, the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.

It is our goal to minimise disruption caused by technical errors. However, some data or information on this site may have been created or structured in files or formats that are not error-free and we cannot guarantee that our service will not be interrupted or otherwise affected by such problems. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems incurred as a result of using this site or any linked external sites.

For more information, please visit https://ec.europa.eu/info/legal-notice_en

PVGIS ©European Union, 2001-2026.
Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged, save where otherwise stated.

Report generated on 2026/06/17

Joint
Research
Centre

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.