



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«Τεχνοοικονομική ανάλυση για την εφαρμογή  
τηλεθέρμανσης στον οικισμό Άσπρα Σπίτια της Αλουμίνιον  
της Ελλάδος»*

**Του Φοιτητή**

**Χατζηελευθερίου Βασιλείου**

**Επιβλέπων**

**Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ**



*“The saddest aspect of life right now is that  
science gathers knowledge faster  
than society gathers wisdom.”*

*Isaac Asimov*



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αντικείμενο της εργασίας υπήρξε η μελέτη συστήματος τηλεθέρμανσης για τον οικισμό των Άσπρων Σπιτιών, εκμεταλλευόμενοι μέρος της παραγόμενης θερμικής ενέργειας από το σταθμό συμπαραγωγής του εργοστασίου « Αλουμίνιον της Ελλάδος ».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ.Σωτήριο Καρέλλα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα και για την πολύτιμη βοήθεια του. Επίσης, Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Άγγελο Δουκέλη για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, οφείλω ευχαριστίες στην οικογένεια μου η οποία με στήριξε όλο αυτό το διάστημα των σπουδών μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Βασίλειος Χατζηελευθερίου





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την τεχνοοικονομική μελέτη συστήματος τηλεθέρμανσης για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του οικισμού των Άσπρων Σπιτιών. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια θα παρέχεται από το σταθμό συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, ο οποίος καλύπτει τις απαιτήσεις σε ατμό μέσης και υψηλής πίεσης του εργοστασίου του Αλουμινίου της Ελλάδος για την παραγωγή αλουμινίου. Σκοπός είναι να μελετηθεί η επίδραση που θα είχε η υλοποίηση αυτού του έργου στη λειτουργία του σταθμού συμπαραγωγής, ελέγχοντας διαφορετικά σενάρια ως προς τον τρόπο κάλυψης του απαιτούμενου ποσού θερμικής ενέργειας για τηλεθέρμανση.

Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή για το εργοστάσιο και τον οικισμό και αναλύονται οι έννοιες της συμπαραγωγής και της τηλεθέρμανσης. Στη συνέχεια, έχοντας ως δεδομένο τη θερμική ζήτηση του οικισμού, εξετάζονται τέσσερα σενάρια για την κάλυψη της απαιτούμενης θερμότητας, και πως επηρεάζουν τη λειτουργία του εργοστασίου. Ακολούθως, πραγματοποιείται η διαστασιολόγηση του επιμέρους εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων του συστήματος σωληνώσεων μεταφοράς, των εναλλακτών θερμότητας, της θερμοδεξαμενής, καθώς επίσης και του υπολογισμού θερμικών απωλειών μέσω της σχετικής υπολογιστικής διαδικασίας. Με αυτά ως δεδομένα, πραγματοποιείται εκτίμηση και ανάλυση του κόστους του έργου με σκοπό να γίνει τελικά η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης και να βρεθεί το βέλτιστο σενάριο σε τεχνοοικονομικούς όρους.







## Abstract

The aim of this Diploma Thesis is to study the development of a district heating system in order to supply the village of “Aspra Spitia” with hot water for space heating, during winter. The thermal energy required for this process is provided by the cogeneration plant which is located inside the factory «Aluminium of Greece». Beside thermal and electrical power, the plant also produces high and medium pressure steam, for the production of aluminium. The main purpose of this Thesis is to study how the development of district heating would affect the operation of the cogeneration plant, by analysing different scenarios on how to obtain the necessary amount of energy for the district system.

An introduction is made about the factory and the history of the village and then, the concept of the cogeneration process and the district heating system are analysed. Given the thermal needs of the village, the dimensioning for each technological element is performed, including the pipeline system, the heat exchangers, and the heat storage tank through respective computational process for each case. Thermal losses from the pipes are calculated too. At the end, an economic analysis is performed, calculating the initial expenses and the annual earnings, in order to see if the development of this project is economically viable or not, and which scenario is more efficient.





## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	5
Περίληψη .....	7
Abstract .....	9
Περιεχόμενα Εικόνων .....	15
Περιεχόμενα Πινάκων .....	17
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων .....	19
<b>1 Εισαγωγή .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 Αλουμίνιον της Ελλάδος .....</b>	<b>21</b>
1.1.1 Ιστορική αναδρομή .....	21
1.1.2 Εγκαταστάσεις .....	21
1.1.3 Προϊόντα .....	21
<b>1.2 Ασπρα Σπίτια .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3 Συμπαγωγή .....</b>	<b>23</b>
1.3.1 Ορισμός .....	23
1.3.2 Δείκτες απόδοσης συστημάτων συμπαγωγής .....	25
1.3.3 Συστήματα συμπαγωγής με συνδυασμένο κύκλο .....	27
1.3.4 Συμπαγωγή στην Ελλάδα .....	28
1.3.5 Σταθμός Συμπαγωγής του Αλουμινίου της Ελλάδος .....	31
<b>1.4 Τηλεθέρμανση .....</b>	<b>32</b>
1.4.1 Ορισμός .....	32
1.4.2 Οφέλη Τηλεθέρμανσης έναντι συμβατικής θέρμανσης .....	33
1.4.3 Τηλεθέρμανση στην Ευρώπη .....	34
1.4.4 Τηλεθέρμανση στην Ελλάδα .....	35
1.4.4.1 Τηλεθέρμανση Κοζάνης .....	35
1.4.4.2 Τηλεθέρμανση Πτολεμαΐδας .....	35
1.4.4.3 Τηλεθέρμανση Μεγαλόπολης .....	36
1.4.4.4 Τηλεθέρμανση Αμυνταίου-Φιλότα-Λεβαίας .....	36
<b>2 Περιγραφή Συστημάτων Τηλεθέρμανσης .....</b>	<b>37</b>



2.1	Αρχές σχεδίασης συστημάτων τηλεθέρμανσης .....	37
2.2	Τρόποι διασύνδεσης συστήματος με τον χρήστη .....	38
2.3	Θερμικοί Υποσταθμοί.....	40
2.3.1	Εναλλάκτες Θερμότητας .....	40
2.4	Θερμοκρασίες νερού προσαγωγής και επιστροφής.....	41
2.4.1	Ζεστό νερό για χρήση .....	42
2.5	Δίκτυο Σωληνώσεων.....	43
2.5.1	Υλικά και εξαρτήματα σωληνώσεων .....	44
2.5.2	Διαστάσεις σωληνώσεων και θερμικές απώλειες .....	45
2.5.3	Αντλίες και πτώσεις πίεσης στους αγωγούς .....	46
2.6	Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	47
3	Διαστασιολόγηση τεχνολογικών στοιχείων συστήματος και ανάλυση των σεναρίων τηλεθέρμανσης .....	49
3.1	Διαστασιολόγηση Σωληνώσεων.....	49
3.1.1	Υπολογισμός θερμικών απωλειών των σωληνώσεων.....	52
3.2	Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας.....	57
3.2.1	Διαστασιολόγηση πλακοειδούς εναλλάκτη παρεμβύσματος.....	57
3.2.2	Διαστασιολόγηση εναλλάκτη αυλών-κελύφους.....	63
3.3	Διαστασιολόγηση Θερμοδεξαμενής.....	65
3.4	Ανάπτυξη σεναρίων τηλεθέρμανσης.....	66
3.4.1	Σενάριο 1: Χρήση των καυσαερίων του λέβητα για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης.....	67
3.4.2	Σενάριο 2: Απομάστευση ατμού μέσης πίεσης για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης.....	68
3.4.3	Σενάριο 3: Χρήση του τροφοδοτικού νερού για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης.....	69
3.4.4	Σενάριο 4: Χρήση του συμπυκνώματος επιστροφής για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης .....	73
4	Οικονομική ανάλυση και αξιολόγηση της επένδυσης .....	75
4.1	Οικονομικοί όροι .....	75
4.1.1	Επένδυση.....	75
4.1.2	Απλός και σύνθετος τόκος .....	75



4.1.3	Οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης.....	76
4.1.4	Ρυθμός Απόσβεσης (Depreciation Rate) .....	76
4.1.5	Επιτόκιο Αναγωγής.....	76
4.2	Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης επένδυσης .....	76
4.2.1	Κριτήριο Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV) .....	77
4.2.2	Κριτήριο του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης της Επένδυσης (Internal Rate of Return-IRR).....	77
4.2.3	Κριτήριο περιόδου αποπληρωμής (Payback Period-PBP) .....	78
4.3	Κοστολόγηση του συστήματος τηλεθέρμανσης.....	78
4.3.1	Αρχικό κόστος .....	78
4.3.1.1	Τιμή εναλλακτών θερμότητας.....	78
4.3.1.2	Τιμή θερμοδεξαμενής .....	79
4.3.1.3	Τιμή αγοράς και τοποθέτησης σωλήνων μεταφοράς.....	79
4.3.1.4	Τιμή αντλιών .....	80
4.3.1.5	Τιμή μετατροπής κατοικιών.....	80
4.3.2	Λειτουργικό κόστος .....	80
4.3.2.1	Κόστος λειτουργίας κεντρικής μηχανής.....	80
4.3.2.2	Κόστος από την μείωση της ηλεκτροπαραγωγής.....	81
4.3.2.3	Κόστος λειτουργίας μηχανολογικού εξοπλισμού( εναλλάκτες, θερμοδεξαμενή, αντλίες, σωληνώσεις).....	81
4.3.2.4	Κόστος προσωπικού.....	81
4.3.3	Ετήσια έσοδα .....	82
4.3.3.1	Ετήσια έσοδα από την πώληση της θερμικής ενέργειας.....	82
4.3.3.2	Ετήσια έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας .....	83
4.4	Οικονομική αξιολόγηση κάθε σεναρίου-Αποτελέσματα.....	87
4.4.1	Περίπτωση 1: Χρηματοδότηση από το «Αλουμίνιον της Ελλάδος» .....	88
4.4.1.1	Σενάριο 1 .....	88
4.4.1.2	Σενάριο 2 .....	93
4.4.1.3	Σενάριο 3 .....	95
4.4.2	Περίπτωση 2: Ένταξη του έργου σε πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης... ..	98
4.4.2.1	Σενάριο 1 .....	99
4.4.2.2	Σενάριο 2 .....	99



4.4.2.3	Σενάριο 3 .....	99
4.4.3	Περίπτωση 3: Ανάλυση ευαισθησίας της επένδυσης σε σχέση με το αρχικό κόστος... ..	100
5	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές ενέργειες .....	103
Παράρτημα:	Συνοπτικό Διάγραμμα Μονάδας Συμπαραγωγής .....	105
Βιβλιογραφία.....		107

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Κύκλος Bayer [4] .....	22
Εικόνα 2: Σύγκριση βαθμού απόδοσης συμπαραγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (οι αριθμοί στα βέλη παριστάνουν μονάδες ενέργειας) [9] .....	24
Εικόνα 3: Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου [10] .....	27
Εικόνα 4: Ενδεικτικές θερμοκρασιακές στάθμες σε συστήματα συμπαραγωγής [10] ...	27
Εικόνα 5: Σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης [10] .....	28
Εικόνα 6: Βασική ιδέα τηλεθέρμανσης .....	33
Εικόνα 7: Έμμεση διασύνδεση χρήστη .....	39
Εικόνα 8 : Άμεση διασύνδεση χρήστη .....	39
Εικόνα 9: Αναπαράσταση συστήματος Τηλεθέρμανσης [23] .....	42
Εικόνα 13: Προμονωμένος Χαλύβδινος Αγωγός [27] .....	44
Εικόνα 11: Διάταξη Θερμοδεξαμενής σε σύστημα τηλεθέρμανσης .....	48
Εικόνα 12: Λογικό διάγραμμα υπολογισμού διαμέτρου σωλήνα .....	50
Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση διαμέτρων και θερμικών αγωγιμοτήτων των υλικών .....	53
Εικόνα 14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πλάκας του εναλλάκτη [44] .....	58
Εικόνα 15: Λογικό διάγραμμα για τη διαδικασία διαστασιολόγησης πλακοειδούς εναλλάκτη παρεμβύσματος [43] .....	62
Εικόνα 16: Ψύξη του ατμού πριν την παραγωγή αλουμίνας, χωρίς τον εναλλάκτη για την τηλεθέρμανση .....	72
Εικόνα 17: Ψύξη του ατμού πριν την παραγωγή αλουμίνας, με τον εναλλάκτη για την τηλεθέρμανση .....	72
Εικόνα 18: Οικονομική ανάλυση σε περιβάλλον Excel .....	92







## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: ΣΗΘ στη Βιομηχανία (1985) [12] .....	29
Πίνακας 2: ΣΗΘ στη Βιομηχανία (1995) [12] .....	29
Πίνακας 3: Εγκαταστάσεις ΣΗΘ στην Ελλάδα (2005) [12] .....	29
Πίνακας 4: Δεδομένα Συμπαγωγής για την Ελλάδα, για την περίοδο 2006-2012 [12]	30
Πίνακας 5: Ποιότητα νερού για σύστημα Τηλεθέρμ [22],[23] .....	37
Πίνακας 6: Θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής στις μονάδες διασύνδεσης [22] .....	38
Πίνακας 7: Σύγκριση έμμεσης και άμεσης διασύνδεσης [24].....	39
Πίνακας 8: Θερμοκρασίες Σχεδιασμού Πρωτεύοντος/Δευτερεύοντος Δικτύου (°C) [25] .....	41
Πίνακας 9: Προτεινόμενες διαστάσεις για το περίβλημα και τη μόνωση ανάλογα με την ονομαστική διάμετρο χαλύβδινων σωλήνων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 253 [22].....	45
Πίνακας 10: Μέγιστα όρια ταχύτητας νερού σε σωλήνωση ανάλογα με την ονομαστική διάμετρο [29] .....	46
Πίνακας 12 : Αποτελέσματα υπολογισμών για τις σωληνώσεις .....	52
Πίνακας 12: Θερμικές Απώλειες για τους αγωγούς προσαγωγής και επιστροφής του νερού.....	55
Πίνακας 13: Συνολικές θερμικές απώλειες συστήματος τηλεθέρμανσης.....	55
Πίνακας 14: Σταθερές για τον υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας και πτώσης πίεσης σε πλακοειδείς εναλλάκτες παρεμβύσματος μίας φάσης, συναρτήσει του αριθμού Reynolds και της γωνίας αυλάκωσης [42] .....	61
Πίνακας 15: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών επικαθίσεων σε πλακοειδείς εναλλάκτες για διαφορετική ποιότητα νερού [44].....	61
Πίνακας 16: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη.....	67
Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά εναλλάκτη αυλών-κελύφους.....	67
Πίνακας 18: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη.....	70
Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά πλακοειδούς εναλλάκτη .....	70
Πίνακας 20: Σύσταση και συντελεστές για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας των καυσαερίων [52].....	71
Πίνακας 21: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη.....	73
Πίνακας 22: Χαρακτηριστικά πλακοειδούς εναλλάκτη .....	74
Πίνακας 23: Αρχικό κόστος επένδυσης.....	88
Πίνακας 24: Οικονομικά μεγέθη για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης.....	89
Πίνακας 25: Οικονομικοί δείκτες συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	90
Πίνακας 26: Αρχικό κόστος επένδυσης.....	93
Πίνακας 27: Οικονομικοί δείκτες συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	94



---

<b>Πίνακας 28: Αρχικό κόστος επένδυσης.....</b>	<b>95</b>
<b>Πίνακας 29: Οικονομικοί δείκτες συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.</b>	<b>96</b>



## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ποσοστό συμπαραγόμενου ηλεκτρισμού (1995 & 2010) [9] .....	31
Διάγραμμα 2: Ποσοστό χρήσης τηλεθέρμανσης σε οικιακό τομέα ανά χώρα [15] .....	34
Διάγραμμα 3 : Μεταβολή θερμοκρασίας προσαγωγής νερού συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά την παραγωγή ζεστού νερού για χρήση [23] .....	43
Διάγραμμα 4: Θερμικές απώλειες συναρτήσει του πάχους της μόνωσης.....	55
Διάγραμμα 5: Θερμικές απώλειες συναρτήσει του πάχους τοιχώματος του σωλήνα.....	56
Διάγραμμα 6: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού .....	56
Διάγραμμα 7: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της θερμοκρασίας του εδάφους.....	56
Διάγραμμα 8: Μεταβολή IRR συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	90
Διάγραμμα 9: Μεταβολή NPV συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας .....	91
Διάγραμμα 10: Μεταβολή PBP συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	91
Διάγραμμα 11: Μεταβολή IRR συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	94
Διάγραμμα 12: Μεταβολή NPV συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας ....	94
Διάγραμμα 13: Μεταβολή PBP συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	95
Διάγραμμα 14: Μεταβολή IRR συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	96
Διάγραμμα 15: Μεταβολή NPV συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας ....	97
Διάγραμμα 16: Μεταβολή PBP συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας.....	97
Διάγραμμα 17: Σύγκριση IRR συναρτήσει της τιμής θερμικής ενέργειας, για τα σενάρια 1 και 3.....	98
Διάγραμμα 18: Σύγκριση NPV συναρτήσει της τιμής θερμικής ενέργειας, για τα σενάρια 1 και 3 .....	98
Διάγραμμα 19: Μεταβολή IRR για κάθε σενάριο, συναρτήσει του αρχικού κόστους...	100
Διάγραμμα 20: Μεταβολή NPV για κάθε σενάριο, συναρτήσει του αρχικού κόστους..	101
Διάγραμμα 21: Μεταβολή PBP για κάθε σενάριο, συναρτήσει του αρχικού κόστους ..	101





## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Αλουμίνιον της Ελλάδος

#### 1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Το Αλουμίνιον της Ελλάδος είναι η εταιρεία στην οποία ανήκει το μοναδικό εργοστάσιο παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου στην Ελλάδα. Ιδρύθηκε το 1960 από τη γαλλική εταιρεία Πεσινέ, και τέθηκε σε λειτουργία το 1966. Το εργοστάσιο βρίσκεται στον Αΐλουκαΐτικο, στην κοιλάδα του αρχαίου Φωκικού Μεδεώνα, στη βόρεια ακτή του Κορινθιακού κόλπου, θέση που συνδυάζει τη γεινίαση με σημαντικά κοιτάσματα βωξίτη της Βοιωτίας και της Φωκίδας, την ευκολία θαλάσσιας επικοινωνίας και τη διακριτική ένταξη στο περιβάλλον [1].

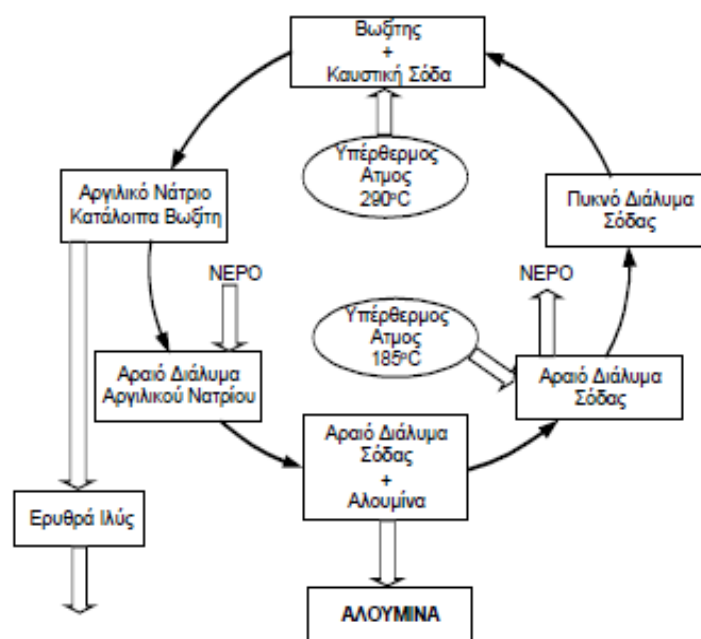
#### 1.1.2 Εγκαταστάσεις

Η έκταση των 1000 στρεμμάτων του εργοστασίου περιλαμβάνει τη μονάδα επεξεργασίας βωξίτη για την παραγωγή της αλουμίνας, τη μονάδα επεξεργασίας της αλουμίνας για την παραγωγή αλουμινίου, το λιμάνι του Αγίου Νικολάου και το Σταθμό συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ο οποίος κατασκευάστηκε αρκετά αργότερα, το 2008. Έτσι λοιπόν, το Αλουμίνιο της Ελλάδος έχει εξελιχθεί στη σημαντικότερη καθετοποιημένη μονάδα παραγωγής και εμπορίας αλουμίνας και αλουμινίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το αξιοσημείωτο είναι πως πρόκειται για σχεδόν μοναδική περίπτωση, σε παγκόσμιο επίπεδο, συνδυασμού στον ίδιο χώρο, μονάδας παραγωγής αλουμίνας και αλουμινίου. Συνήθως, τα εργοστάσια παραγωγής αλουμίνας κατασκευάζονται κοντά στα κοιτάσματα βωξίτη ενώ αυτά του αλουμινίου κοντά σε μεγάλα ηλεκτροπαραγωγικά κέντρα. Αυτό είναι και το βασικό του πλεονέκτημα που αποτελεί σημαντικό παράγοντα ανταγωνιστικότητας. Σήμερα απασχολεί περισσότερα από 1.500 άτομα και έχει αναδειχθεί σε μοχλό ανάπτυξης για την περιοχή αλλά και για ολόκληρη την Ελλάδα [1].

#### 1.1.3 Προϊόντα

Ο βωξίτης, η εξόρυξη του οποίου γίνεται από την εταιρεία *Δελφοί-Δίστομον Α.Ε.*, αποτελεί τη βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή της αλουμίνας και κατ' επέκταση του αλουμινίου. Πρόκειται για ένα ιζηματογενές πέτρωμα που πήρε την ονομασία του από τη γαλλική πόλη Baux, όπου ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά κοιτάσματά του. Το εργοστάσιο επεξεργάζεται ετησίως 1.400.000 τόνους ελληνικού βωξίτη που είναι διασπορικού τύπου και περίπου 200.000 τόνους εισαγόμενου τροπικού βωξίτη.

Η αλουμίνα είναι το βιομηχανικό προϊόν που παράγεται από το μέταλλευμα του βωξίτη με τη μέθοδο Bayer (**Εικόνα 1**), και μπορεί να είναι ένυδρη ή άνυδρη ανάλογα με το βαθμό επεξεργασίας της. Η άνυδρη αλουμίνα γνωστή και ως μεταλλουργική αλουμίνα, προκύπτει από το ψήσιμο της ένυδρης σε κατάλληλους φούρνους για την αφαίρεση των περιεχόμενων ποσοτήτων νερού. Η δυναμικότητα παραγωγής αλουμίνας του εργοστασίου εκτιμάται στους 750.000 τόνους ετησίως.



Εικόνα 1: Κύκλος Bayer [4]

Τέλος, μέσω της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης της άνυδρης αλουμίνας παράγεται το πρωτόχυτο αλουμίνιο με ετήσια δυναμικότητα παραγωγής 164.000 τόνους. Έπειτα, με τη διαδικασία της συνεχούς χύτευσης, το ρευστό αλουμίνιο μορφοποιείται σε κολόνες και πλάκες, όπου και είναι έτοιμο για μεταφορά και εξαγωγή [1],[2].

## 1.2 Άσπρα Σπίτια

Το 1963, η εγκατάσταση της βιομηχανικής μονάδας του Αλουμινίου της Ελλάδος, όντας απομακρυσμένη από τις κατοικημένες περιοχές του νομού Βοιωτίας, οργάνωσε τη δημιουργία μιας παρακείμενης, πρότυπης εργατικής κοινότητας που θα φιλοξενούσε τους εργαζόμενους και τις οικογένειές τους. Έτσι ανατέθηκε στον πολεοδόμο Κωνσταντίνο Δοξιάδη η ανέγερση του οικισμού αυτού σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα, σε απόσταση

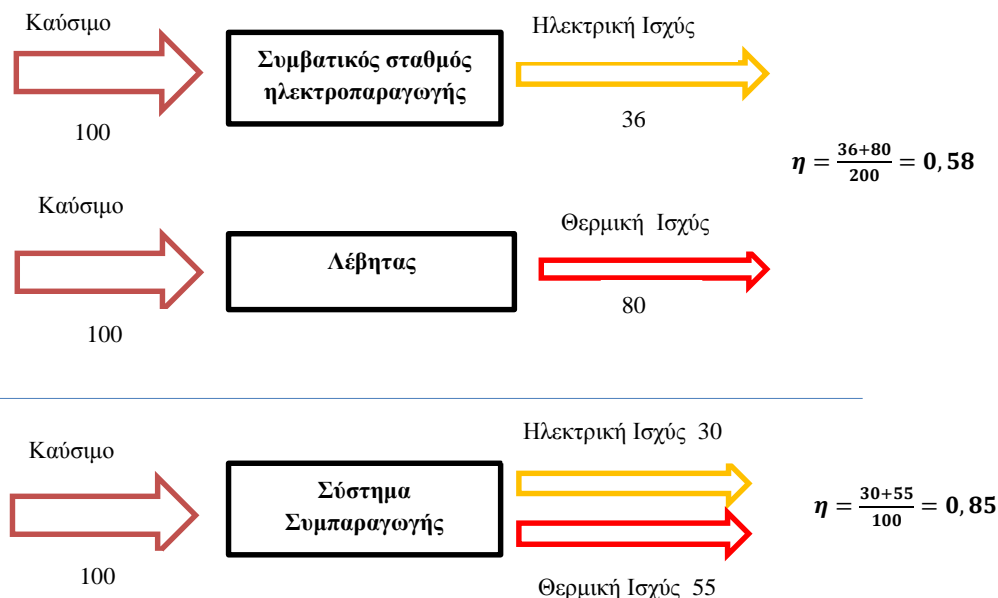
περίπου 6 χιλιομέτρων από το εργοστάσιο. Σήμερα, μετά από επεκτάσεις που έγιναν, ο οικισμός αποτελείται από 1.072 κατοικίες και 30 καταστήματα συνολικής επιφάνειας 130.500 τετραγωνικών μέτρων σε μια έκταση 613 στρεμμάτων. Φιλοξενεί περισσότερους από 3.000 κατοίκους παρέχοντας υψηλό βιοτικό επίπεδο [3].

## 1.3 Συμπαραγωγή

### 1.3.1 Ορισμός

Ως συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ή ΣΗΘ, ορίζεται η ταυτόχρονη παραγωγή δύο ή περισσότερων μορφών αξιοποιήσιμης ενέργειας, από μια μονάδα και στα πλαίσια μιας διαδικασίας. Αναλυτικότερα, στο σταθμό συμπαραγωγής η χημική ενέργεια του εκάστοτε καυσίμου μετατρέπεται σε μηχανική και θερμική. Η θερμική αξιοποιείται για θέρμανση του χώρου και διάφορων μέσων όπως νερό ή ατμός καθώς επίσης και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και εγχέεται στο δίκτυο ή καλύπτει τις ανάγκες της εγκατάστασης. Το βασικό προϊόν δηλαδή ενός σταθμού συμπαραγωγής είναι η θερμική ενέργεια που αξιοποιείται μέσω της χρήσης εναλλακτών και το παραπροϊόν της διεργασίας αποτελεί η ηλεκτρική ενέργεια [8].

Η ιδέα της συμπαραγωγής είναι αρκετά παλιά (1890) και αναπτύχθηκε λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης των συμβατικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης, η προσπάθεια περιορισμού της κατανάλωσης καυσίμου και της μείωσης των εκπομπών κάνουν ακόμα πιο επιτακτική την ανάγκη ανάκτησης της απορριπτόμενης στο περιβάλλον θερμότητας, ιδιαίτερα στους θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμπυκνωτή όπου ένα μεγάλο μέρος της προσφερόμενης ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Ο βαθμός απόδοσης των θερμικών ενεργειακών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με λιγνίτη κυμαίνεται στο 33-43% ενώ ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης σταθμών φυσικού αερίου είναι 40-50%. Με την κατασκευή συνδυασμένων σταθμών, και ειδικότερα σταθμών υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) αξιοποιούμε μέρος αυτής της απορριπτόμενης θερμότητας και οδηγούμαστε σε αύξηση του βαθμού απόδοσης μέχρι και 85-90% με παράλληλη μείωση των εκπομπών, και μάλιστα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει τοπική ζήτηση και των δύο μορφών ενέργειας έχουμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα [6]. Μια τυπική σύγκριση ως προς τον βαθμό απόδοσης της συμπαραγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2** [9].



Εικόνα 2: Σύγκριση βαθμού απόδοσης συμπαραγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (οι αριθμοί στα βέλη παριστάνουν μονάδες ενέργειας) [9]

Η υψηλή ενεργειακά απόδοση των συστημάτων συμπαραγωγής έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την υψηλή τους οικονομική απόδοση. Στην περίπτωση μάλιστα που λειτουργούν παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο, εξασφαλίζουν υψηλή αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, πράγμα ιδιαίτερης σημασίας για τους καταναλωτές όπως οι βιομηχανίες που έχουν αυστηρές απαιτήσεις.

Αν μάλιστα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο το φυσικό αέριο, τότε πετυχαίνουμε ένα ακόμα αποδοτικότερο σύστημα. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το φυσικό αέριο απέναντι σε άλλα καύσιμα το καθιστούν ως το πλέον τεχνοοικονομικά ενδεδειγμένο καύσιμο. Ενδεικτικά να αναφέρουμε πως τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι πρώτον, η καθαρότητα και ποιότητά του, που συντελούν στη μείωση των ρύπων και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ) άλλα και στην αύξηση ζωής της εγκατάστασης, και δεύτερον, η ευκολία στην αποθήκευση αλλά και μεταφορά του στα σημεία κατανάλωσης μέσω σωληνώσεων.



### 1.3.2 Δείκτες απόδοσης συστημάτων συμπαραγωγής

Για να περιγραφεί η ενεργειακή συμπεριφορά των συστημάτων συμπαραγωγής γίνεται χρήση ορισμένων χαρακτηριστικών δεικτών. Οι δείκτες που παρουσιάζονται παρακάτω βοηθούν αρχικά να αποτυπωθεί η θερμοδυναμική συμπεριφορά κάθε συστήματος, και στη συνέχεια, η δυνατότητα να συγκρίνονται διαφορετικά συστήματα [4].

- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_e = \frac{W_e}{H_f} = \frac{W_e}{m_f \cdot H_u}$$

Όπου:

- $W_e$  η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει το σύστημα (έχει αφαιρεθεί δηλαδή η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από το βοηθητικό εξοπλισμό)
- $H_f$  η ισχύς καυσίμου που καταναλώνει το σύστημα
- $m_f$  η παροχή καυσίμου
- $H_u$  η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα καυσίμου

-Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{th} = \frac{Q}{H_f} = \frac{Q}{m_f \cdot H_u}$$

- $Q$  η ωφέλιμη θερμική ισχύς που αποδίδει το σύστημα συμπαραγωγής

-Ολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \eta_e + \eta_{th} = \frac{W_e + Q}{m_f \cdot H_u}$$

Σε αυτό το σημείο, είναι πιο σωστό να οριστεί και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, για καλύτερη σύγκριση δύο συστημάτων. Αυτό γίνεται διότι η ποιότητα θερμικής ενέργειας είναι κατώτερη από αυτή της ηλεκτρικής οπότε δεν είναι απολύτως σωστό να αθροίζονται όπως έγινε παραπάνω.



-Θερμικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\zeta_{th} = \frac{E_Q}{E_f} = \frac{E_Q}{m_f \cdot \varepsilon_f}$$

Όπου:

- $E_Q$  ροή θερμικής εξέργειας που αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ  $Q$
- $E_f$  ροή εξέργειας καυσίμου
- $\varepsilon_f$  ειδική εξέργεια καυσίμου

-Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\zeta = \frac{W + E_Q}{E_f}$$

-Λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου:

$$FESR = \frac{H_{FS} - H_{FC}}{H_{FS}}$$

Όπου:

- $H_{FS}$  η ολική ισχύς καυσίμου για την χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ( $W$ ) και θερμικής ενέργειας ( $Q$ )
- $H_{FC}$  η ολική ισχύς καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ( $W$ ) και θερμικής ενέργειας ( $Q$ ) με συμπαραγωγή

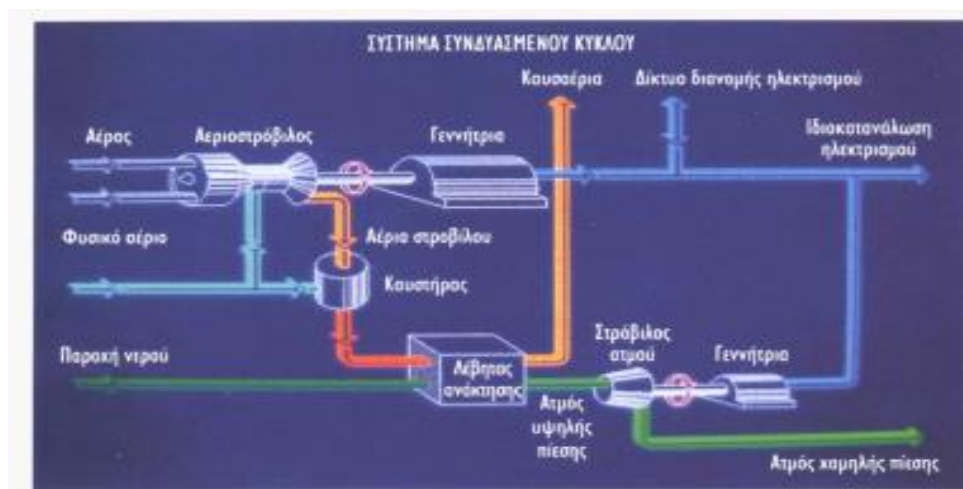
-Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα:

$$PHR = \frac{W}{Q}$$

Από τους ορισμούς προκύπτει η παρακάτω σχέση για τα  $\eta_e$ ,  $PHR$  :

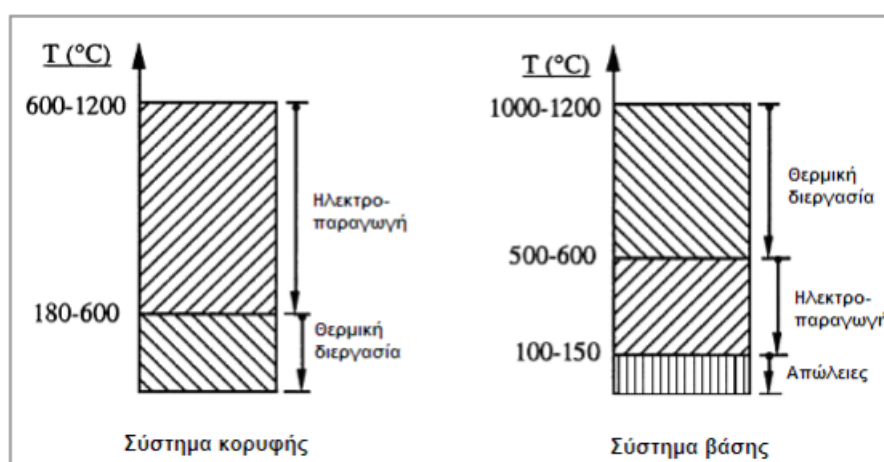
$$\eta = \eta_e \cdot \left(1 + \frac{1}{PHR}\right) \Rightarrow PHR = \frac{\eta_e}{\eta - \eta_e} = \frac{\eta_e}{\eta_{th}}$$

### 1.3.3 Συστήματα συμπαραγωγής με συνδυασμένο κύκλο



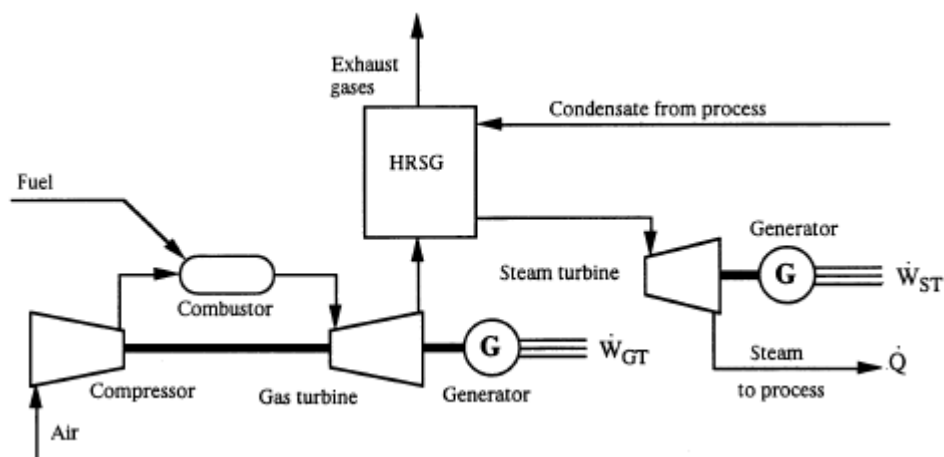
Εικόνα 3: Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου [10]

Είναι τα συστήματα που αποτελούνται από δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται με ένα εργαζόμενο μέσο και λειτουργούν σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Στα συστήματα βάσης παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας και έπειτα το ρευστό λειτουργίας, σε χαμηλότερη θερμοκρασία, διοχετεύεται στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας για την παραγωγή ατμού ο οποίος μέσω ατμοστροβίλου χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα συστήματα κορυφής το ρευστό λειτουργίας βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και παράγεται πρώτα ηλεκτρική ενέργεια, και έπειτα, η εναπομένουσα θερμότητα χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, όπως για παράδειγμα παραγωγή ζεστού νερού ή θέρμανση χώρων. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζονται τα δύο συστήματα [10].



Εικόνα 4: Ενδεικτικές θερμοκρασιακές στάθμες σε συστήματα συμπαραγωγής [10]

Το σύστημα αεριοστρόβιλου ανοιχτού τύπου και ατμοστρόβιλου αντίθλιψης (ή συμπύκνωσης) που χρησιμοποιείται κυρίως στους συνδυασμένους κύκλους είναι αυτό που φαίνεται στην **Εικόνα 5** σε απλοποιημένη μορφή. Οι βασικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι που διέπουν τη λειτουργία τους είναι ο κύκλος *Joule* και ο κύκλος *Rankine* [11].



Εικόνα 5: Σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης [10]

### 1.3.4 Συμπαραγωγή στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η συμπαραγωγή ξεκινά περίπου στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όταν Βέλγοι μηχανικοί εγκατέστησαν στον Βόλο σύστημα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας για τις ανάγκες της κεραμοποιίας Τσαλαπάτα, το οποίο και λειτούργησε μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '70. Έτσι εγκαταστάθηκαν μονάδες συμπαραγωγής και σε άλλες βιομηχανίες, με κύριο καύσιμο το πετρέλαιο και τα προϊόντα του, όπως για παράδειγμα χαρτιού, ζάχαρης, διυλιστηρίων πετρελαίου και ως εξέλιξη, πολλές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες τροποποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να καλύπτουν και θερμικές ανάγκες αστικών περιοχών με δίκτυα τηλεθέρμανσης [12].

Πίνακας 1: ΣΗΘ στη Βιομηχανία (1985) [12]

Βιομηχανικός Τομέας	MW <sub>e</sub>	%
Διυλιστήρια	93,50	27,00
Χάλυβας	80,00	23,10
Επεξεργασία Τροφίμων	56,00	16,10
Χημικά	47,80	13,66
Χαρτοπολτός και χαρτί	43,05	12,71
Υφαντουργία	14,35	4,11
Αλουμίνιο	11,60	3,32
<b>Σύνολο</b>	<b>346,30</b>	<b>100,00</b>

Το 1995, η αποβιομηχάνιση της χώρας είχε αρχίσει με αποτέλεσμα να κλείσουν πολλές βιομηχανίες και η εγκατεστημένη ΣΗΘ να μειωθεί σημαντικά όπως φαίνεται στον *Πίνακα 2*.

Πίνακας 2: ΣΗΘ στη Βιομηχανία (1995) [12]

Βιομηχανικός Τομέας	MW <sub>e</sub>	%
Διυλιστήρια	93,50	80,53
Αλουμίνιο	11,60	9,99
Χημικά	11,00	9,48
<b>Σύνολο</b>	<b>116,10</b>	<b>100,00</b>

Στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα, η κατάσταση για την ανάπτυξη ΣΗΘ βελτιώθηκε από την άποψη της θέσπισης νομικού πλαισίου και την ασφάλεια τροφοδοσίας του καυσίμου. Αυτό οφείλεται στην έκδοση του Ν.2773/99, για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για την απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας και τις σχετικές εξελίξεις στην προγραμματισμένη υποδομή για την χρήση του φυσικού αερίου. Έτσι η εγκατεστημένη ισχύς για ΣΗΘ στην Ελλάδα έφτασε στα 168,16 MW<sub>e</sub>, το 2005.

Πίνακας 3: Εγκαταστάσεις ΣΗΘ στην Ελλάδα (2005) [12]

Βιομηχανικός Τομέας	MW <sub>e</sub>	%
Διυλιστήρια	93,5	55,6
Αλουμίνιο	11,6	6,9
Χάλυβας	11,5	6,84
Χημικά	11	6,54
Τρόφιμα	4,5	2,68
Μέταλλα	2,72	1,62

<b>Τούβλο</b>	1,13	0,67
<b>Κλωστοϋφαντουργία</b>	1,1	0,65
<b>ΣΗΘ από φυσικό αέριο</b>	25,91	15,41
<b>Τριτογενή τομέας</b>	5,2	3,09
<b>Σύνολο ΣΗΘ</b>	<b>168,16</b>	<b>100</b>

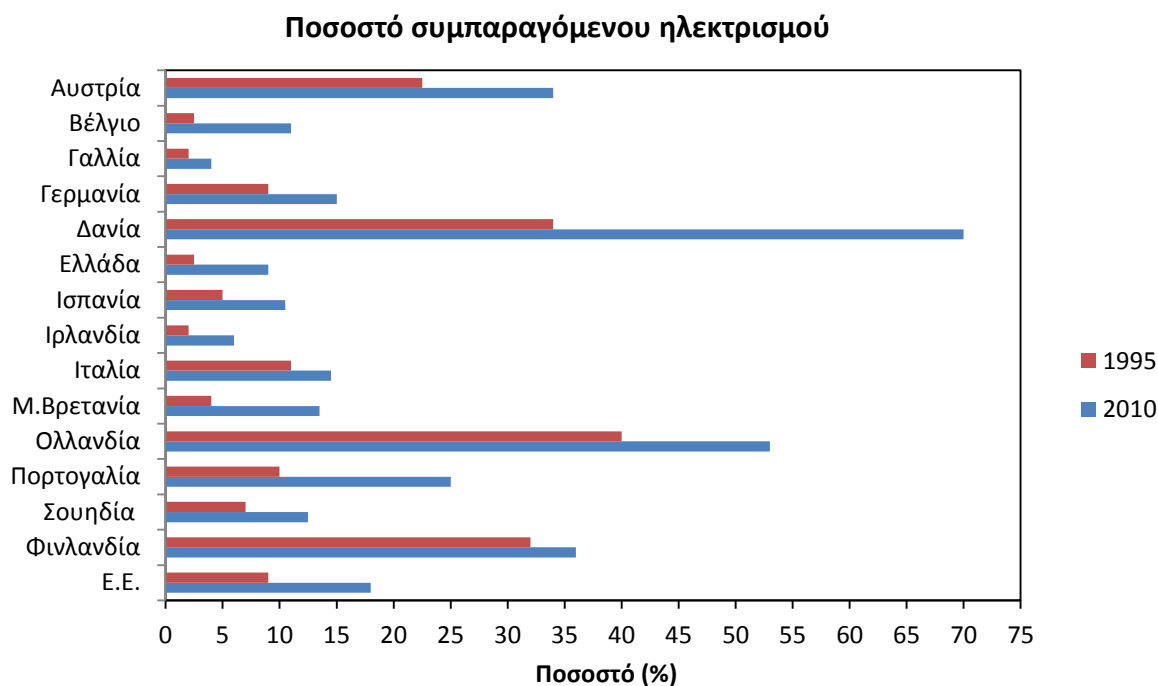
Σήμερα, η κατάσταση έχει αλλάξει σε πολλές από τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Ο **Πίνακας 4** παρουσιάζει τα στατιστικά της ΣΗΘ για την Ελλάδα, με βάση τα στοιχεία της *Eurostat* για την περίοδο από 2006 έως 2012 [12].

**Πίνακας 4: Δεδομένα Συμπαραγωγής για την Ελλάδα, για την περίοδο 2006-2012 [12]**

Έτος	Συνολική συμπαρογό μενη ΗΕ (TWh)	Ιδιοπαρω γοί (%)	Αυτοπαρω γοί (%)	Συμπαρω γοί ΗΕ επί του συνόλου (%)	Εγκατεστη μένη ισχύς ΣΗΘ (GW)	Συμπαρω γοί μενη θερμική ενέργεια (TWh)	Ιδιοπαρω γοί (%)	Αυτοπαρω γοί (%)	Εγκατεστη μένη θερμική ισχύς ΣΗΘ (GW)
2012	2,40	6,9	93,1	3,9	0,57	3,16	45,5	54,5	0,9
2011	2,67	11,6	88,4	4,5	0,59	3,83	55,2	44,8	0,8
2010	2,48	6,8	93,2	4,3	0,59	3,53	55,4	44,6	1,0
2009	1,84	10,1	89,9	3,0	0,51	3,00	28,6	71,4	0,8
2008	1,20	100,0	0,0	1,9	0,40	2,50	100,0	0,0	-
2007	1,02	100,0	0,0	1,6	0,22	2,64	100,0	0,0	-
2006	1,05	20,0	80,0	1,7	0,25	2,31	28,3	71,7	-

Παρά την εμπειρία 40 χρόνων στη ΣΗΘ, η Ελλάδα έχει ένα από τα χαμηλότερα ποσοστά συμπαρογόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των υπόλοιπων κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σύμφωνα με στοιχεία της *Eurostat*, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΣΗΘ σήμερα, είναι σταθερή τα τελευταία 5 χρόνια και υπολογίζεται στα 550 MW<sub>e</sub>. Ενώ το κατάλληλο νομικό πλαίσιο είναι σε θέση να προωθήσει τη συμπαρω γοί, η γραφειοκρατία στις διαδικασίες αδειοδότησης και η μακροπρόθεσμη έλλειψη σταθερότητας στη Ελλάδα, εμποδίζει τις επενδύσεις. Ένας επιπλέον βασικός αρνητικός παράγοντας ήταν οι τιμές ενέργειας, δηλαδή η υψηλή τιμή του φυσικού αερίου σε συνδυασμό με την οικονομική ύφεση. Ενώ μελέτες δείχνουν πως υπάρχει σοβαρό οικονομικό δυναμικό σε διάφορους τομείς της οικονομίας για τη συμπαρω γοί, όπως για παράδειγμα στην τηλεθέρμανση από συμπαρω γοίικούς σταθμούς, στη βιομηχανία, στον πρωτογενή και τριτογενή τομέα, που μπορούν να χρηματοδοτηθούν από κονδύλια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι παράγοντες που αναφέρθηκαν δυσκολεύουν τέτοιου είδους κινήσεις [12].

Διάγραμμα 1: Ποσοστό συμπαραγόμενου ηλεκτρισμού (1995 & 2010) [9]



### 1.3.5 Σταθμός Συμπαγωγής του Αλουμινίου της Ελλάδος

Το 2008 τέθηκε σε λειτουργία ο σταθμός συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης, ισχύος 334MW. Λειτουργεί με φυσικό αέριο και παράγει θερμότητα για την παραγωγική διαδικασία της αλουμίνιας καθώς και ηλεκτρική ενέργεια που διατίθεται στο εθνικό δίκτυο. Το εργοστάσιο αποτελείται από:

- Δύο αεριοστρόβιλους ονομαστικής ισχύος 2x125MW, καύσης φυσικού αερίου και απόδοσης 33,33%. Έπειτα από αναβαθμίσεις η ονομαστική τους ισχύς είναι πλέον 2x135 MW.
- Έναν ατμοστρόβιλο ονομαστικής ισχύος 84 MW με ελάχιστο φορτίο τα 5,6 MW.
- Έναν συμπυκνωτή που με τη χρήση θαλασσινού νερού συμπυκνώνει τον υγρό ατμό του ατμοστρόβιλου θερμοκρασίας 35 °C και πίεσης 0,062 bar.
- Δύο λέβητες ανάκτησης θερμότητας οι οποίοι τροφοδοτούν δυο σειρές για παραγωγή αλουμίνιας με ατμό υψηλής πίεσης 66 bar, θερμοκρασίας 517 °C, παροχής 100 t/h και ατμό μέσης πίεσης 14bar, θερμοκρασίας 220 °C και παροχής 21,1t/h. Υπάρχει και δυνατότητα μετάκαυσης για αύξηση της παραγωγής ατμού υψηλής πίεσης έως 35 t/h όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση.
- Έναν εφεδρικό λέβητα διπλού καυσίμου με δυνατότητα παραγωγής ατμού υψηλής πίεσης 63bar, θερμοκρασίας 485 °C και παροχής 100t/h με απόδοση 94% για φυσικό

αέριο, ο οποίος τίθεται σε λειτουργία μόνο όταν δεν δουλεύει κανένας από τους δύο αεριοστρόβιλους, και τροφοδοτεί με ατμό μόνο μια σειρά παραγωγής αλουμίνιας.

- Σύστημα προθέρμανσης φυσικού αερίου πριν την καύση, από τους 15 °C στους 70 °C, με τα συμπυκνώματα που επιστρέφουν από την αλουμίνια.

Σε καθημερινή βάση, οι αεριοστρόβιλοι του σταθμού λειτουργούν εναλλάξ, σε μέγιστο σχεδόν φορτίο. Έτσι ο ατμοστρόβιλος λειτουργεί περίπου στα 10 MW, δηλαδή σε πολύ χαμηλότερη ισχύ από την ονομαστική. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σκοπός του συγκεκριμένου σταθμού συμπαραγωγής είναι η τροφοδοσία της αλουμίνιας με ατμό μέσης και υψηλής πίεσης. Έτσι λοιπόν, υπάρχει άμεση σχέση και αλληλεξάρτηση μεταξύ των δύο εργοστασίων και αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη για συνεχή και σωστή λειτουργία του σταθμού.

## 1.4 Τηλεθέρμανση

### 1.4.1 Ορισμός

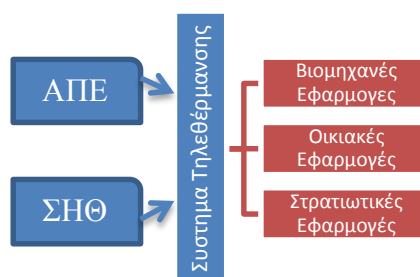
Ως τηλεθέρμανση ορίζεται το σύστημα διανομής θερμικής ενέργειας από μία κεντρική πηγή στους καταναλωτές. Η θερμική αυτή ενέργεια μεταφέρεται με τη μορφή ατμού ή ζεστού νερού μέσω δικτύου σωληνώσεων, και μπορεί να καλύψει ανάγκες σε οικίες και εμπορικά κτίρια αλλά και μικρές βιομηχανίες. Διαφέρει από την κλασσική μέθοδο παραγωγής και κατανάλωσης θερμότητας αφού πλέον η εγκατάσταση παραγωγής δεν βρίσκεται στον τόπο της κατανάλωσης αλλά αρκετά χιλιόμετρα μακριά. Ο σχεδιασμός του συστήματος τηλεθέρμανσης και η οργάνωση της θερμικής παραγωγής είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για τη βιωσιμότητα του συστήματος και έχουν ως πρωτεύοντα στόχο να το καταστήσουν πιο αποδοτικό από την ατομική θερμική παραγωγή [13].

Ένα σύστημα τηλεθέρμανσης αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Κεντρική μηχανή παραγωγής θερμότητας που είναι συνήθως ένας σταθμός παραγωγής θερμότητας ή συμπαραγωγής.
- Σύστημα μεταφοράς και διανομής θερμότητας, δηλαδή το δίκτυο των σωληνώσεων από την κεντρική μηχανή έως τις κατοικίες.
- Εγκαταστάσεις στις κατοικίες χρηστών, δηλαδή ο εξοπλισμός που επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας από το δίκτυο του συστήματος στο δίκτυο νερού των σπιτιών.
- Σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης της ορθής λειτουργίας του συστήματος.

Τα στοιχεία αυτά αλληλεπιδρούν και η διαστασιολόγηση τους είναι πολύ σημαντική για τη βιωσιμότητα και ομαλή λειτουργία του συστήματος.





Εικόνα 6: Βασική ιδέα τηλεθέρμανσης

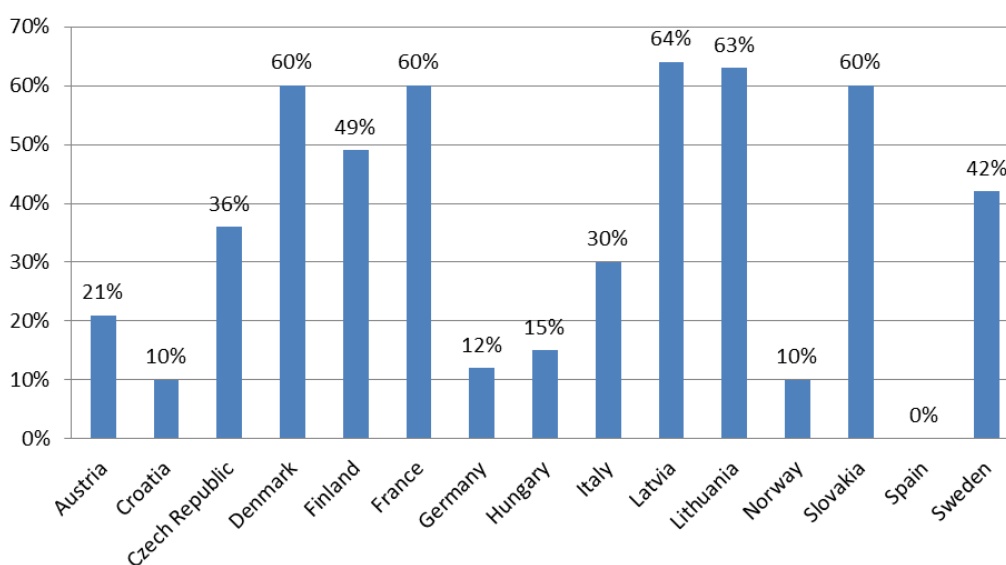
### 1.4.2 Οφέλη Τηλεθέρμανσης έναντι συμβατικής θέρμανσης

Η χρήση τηλεθέρμανσης πλεονεκτεί σε πολλά σημεία έναντι της συμβατικής θέρμανσης με λέβητα, ειδικά όταν οι ανάγκες για θέρμανση είναι συνεχείς και αυξημένες (Βόρεια Ευρώπη). Αρχικά, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμου καθώς η κεντρική μονάδα εκμεταλλεύεται σε ένα μεγάλο βαθμό απορριπτόμενη θερμότητα και βελτιώνει το βαθμό απόδοσης της λειτουργίας της. Κατά συνέπεια, ο χρήστης πληρώνει μόνο τη θερμική ενέργεια που έχει ανάγκη, η οποία του είναι άμεσα διαθέσιμη αποφεύγοντας έτσι επιπλέον απώλειες για την αποθήκευσή της. Επιπρόσθετα, η ευελιξία στη χρήση καυσίμου κάνει ακόμα πιο οικονομικό το σύστημα καθώς δεν επηρεάζεται τόσο σε τυχόν μεταβολές στις τιμές των καυσίμων και έτσι αυξάνεται και η ασφάλεια παροχής, κάτι που δεν είναι επιτεύξιμο στα ατομικά συστήματα θέρμανσης. Τα συστήματα τηλεθέρμανσης σχεδιάζονται έτσι ώστε να υπάρχει πάντα εφεδρική παροχή ισχύος σε περίπτωση βλάβης ή αυξημένης ζήτησης και διαθέτει το απαραίτητο προσωπικό για την επιδιόρθωση τυχόν βλαβών, πράγμα που αυξάνει την αξιοπιστία του. Με την αντικατάσταση του λέβητα από εναλλάκτη θερμότητας όχι μόνο εξοικονομείται χώρος αλλά το πιο σημαντικό είναι ότι μειώνεται η πιθανότητα ατυχήματος (έκρηξη, πυρκαγιά) εφόσον δεν υπάρχει πλέον αποθηκευμένο καύσιμο στην κατοικία. Επίσης, τα χαμηλά λειτουργικά έξοδα σε συνδυασμό με τη μειωμένη επένδυση που καλείται να κάνει ο χρήστης κάνουν το σύστημα οικονομικά προσιτό. Τέλος, πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της τηλεθέρμανσης είναι ή μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των ατμοσφαιρικών ρύπων στο ήδη επιβαρυσμένο περιβάλλον καθώς μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου και από τον χρήστη εφόσον έχει αντικατασταθεί ο οικιακός λέβητας [8],[14],[21].

### 1.4.3 Τηλεθέρμανση στην Ευρώπη

Το παλαιότερο σύστημα τηλεθέρμανσης της Ευρώπης, λειτουργικό έως σήμερα, βρίσκεται στη Γαλλία, στην πόλη Chaudes-Aigues και έχει ως πηγή θερμότητας τη γεωθερμία. Μελετώντας την υπάρχουσα τεχνολογία Αμερικανικών συστημάτων τηλεθέρμανσης, άρχισε να ωριμάζει και να αναπτύσσεται γρηγορότερα η ιδέα της τηλεθέρμανσης και στην Ευρώπη με πρωτοπόρο τη Γερμανία που ξεκίνησε πολλά έργα στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Σήμερα, η τηλεθέρμανση στην Ευρώπη βασίζεται στο μεγαλύτερο ποσοστό της στη συμπαραγωγή και ανακύκλωση ενέργειας από βιομηχανικές διεργασίες. Όπως αναφέρθηκε, η τηλεθέρμανση βρίσκει καλύτερη εφαρμογή σε βόρειες χώρες με πιο ψυχρά κλίματα και αποτελεί βασικό εργαλείο στον ενεργειακό σχεδιασμό κάθε χώρας. Ενδεικτικά, στη Δανία καλύπτει περισσότερο από 60% της θέρμανσης χώρων και νερού, και μάλιστα στη Κοπεγχάγη βρίσκεται το μεγαλύτερο δίκτυο τηλεθέρμανσης με θερμικό φορτίο αιχμής 663 MW, που καλύπτει ανάγκες για περίπου 275.000 νοικοκυριά. Στη Φινλανδία επίσης, η τηλεθέρμανση αντιπροσωπεύει το 50% της θερμικής ενέργειας που παράγεται κατά κύριο λόγο σε σταθμούς συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού [13].

Διάγραμμα 2: Ποσοστό χρήσης τηλεθέρμανσης σε οικιακό τομέα ανά χώρα [15]



## 1.4.4 Τηλεθέρμανση στην Ελλάδα

Η ανάπτυξη συστημάτων τηλεθέρμανσης στην Ελλάδα δεν συγκρίνεται με αυτή στην υπόλοιπη Ευρώπη. Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν υλοποιηθεί αρκετά έργα τηλεθέρμανσης και εκπονούνται πλήθος διερευνητικών μελετών για ανάπτυξη και βελτίωση τέτοιων συστημάτων, και σήμερα το συνδεδεμένο θερμικό φορτίο έχει ξεπεράσει κατά πολύ τα 350MW.

### 1.4.4.1 Τηλεθέρμανση Κοζάνης

Με συνολικό ύψος επένδυσης 110 εκατομμύρια ευρώ, λειτουργεί η τηλεθέρμανση Κοζάνης από το 1993 και θερμαίνει τουλάχιστον 27.000 διαμερίσματα. Η συνολική θερμική ισχύς ανέρχεται σε 137 MW<sub>th</sub> το μεγαλύτερο μέρος της οποίας παράγεται από τους ατμοστρόβιλους συμπύκνωσης III,IV,V του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου με τη βοήθεια διβάθμιας εγκατάστασης ατμού ενώ το υπόλοιπο, όταν απαιτείται, παράγεται σε λεβητοστάσιο αιχμής έξω από την πόλη το οποίο αποτελείται από τρεις λέβητες υπέρθερμου νερού των 10MW και δύο λέβητες των 27.5 MW, φλογοαυλωτοί τριπλής διαδρομής, που ο καθένας φέρει δυο καυστήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Επίσης, το σύστημα περιλαμβάνει ακόμα εναποθηκευτή θερμότητας 1.650m<sup>3</sup>, ενεργειακής χωρητικότητας 80 MWh, αντλιοστάσια μεταφοράς και διανομής και δίκτυο τροφοδότησης που ξεπερνά τα 450 χιλιόμετρα. Οι θερμοκρασίες προσαγωγής ζεστού νερού για την κάλυψη των αναγκών κυμαίνονται μεταξύ 90 °C και 120 °C ενώ το νερό επιστροφής μεταξύ 55 °C και 70 °C [16],[17].

### 1.4.4.2 Τηλεθέρμανση Πτολεμαΐδας

Το πρώτο μεγάλης κλίμακας σύστημα τηλεθέρμανσης στην Ελλάδα, τέθηκε σε λειτουργία το Δεκέμβριο του 1994 στην Πτολεμαΐδα και καλύπτει τις θερμικές ανάγκες για τους χειμερινούς μήνες του χρόνου. Η παραγωγή θερμότητας πραγματοποιείται μέσω καύσης λιγνίτη στις συμπαραγωγικές ατμοηλεκτρικές μονάδες του ΑΗΣ ΛΚΔΜ ισχύος 25MW<sub>th</sub>, της μονάδας III του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας ισχύος 50 MW<sub>th</sub> και των μονάδων III, IV του ΑΗΣ Καρδιάς, ισχύος 100 MW<sub>th</sub>, ενώ υπάρχει και λεβητοστάσιο αιχμής-εφεδρείας ισχύος 25 MW<sub>th</sub>. Το θερμό νερό των 115 °C-120 °C μεταφέρεται από το κεντρικό αντλιοστάσιο μέσω των κλάδων μεταφοράς (πρωτεύων δίκτυο) σε κεντρικούς υποσταθμούς μέσα στην πόλη η απευθείας στα κτίρια των καταναλωτών μέσω του θερμικού υποσταθμού κάθε σπιτιού (δευτερεύων δίκτυο). Η εναλλαγή θερμότητας γίνεται μέσω πλακοειδών εναλλακτών όπου και τελικά το νερό επιστρέφει για αναθέρμανση στους 65 °C. Τέλος, το σύστημα περιλαμβάνει τρεις κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 1.800m<sup>3</sup>, ύψους και διαμέτρου 15,7m και 7,66m αντίστοιχα, και πίεσης 6,5 bar, και δίκτυο προμονωμένων αγωγών συνολικού μήκους 295.176m, που περιλαμβάνουν και σύστημα ανίχνευσης διαρροών [18].



#### **1.4.4.3 Τηλεθέρμανση Μεγαλόπολης**

Η τηλεθέρμανση της Μεγαλόπολης λειτουργεί με συμπαραγωγή από την παρακείμενη μονάδα ΙΙΙ του ΑΗΣ Α΄-ΔΕΗ ΜΕΓ/ΛΗΣ εκμεταλλευόμενη ενέργεια από ανάκτηση και απομάστευση απορριπτόμενης θερμότητας στον πύργο ψύξης του σταθμού. Το σύστημα περιλαμβάνει εναλλάκτες θερμότητας, δίκτυο μεταφοράς και αντλιοστάσιο, λεβητοστάσιο αιχμής και δίκτυο διανομής μέσω των θερμικών υποσταθμών των χρηστών. Με το σύστημα αυτό της τηλεθέρμανσης προσφέρεται θερμότητα στους κατοίκους 40% πιο οικονομικά σε σχέση με τη θέρμανση με πετρέλαιο [19].

#### **1.4.4.4 Τηλεθέρμανση Αμυνταίου-Φιλώτα-Λεβαΐας**

Με συνολικό ύψος επένδυσης περίπου 25 εκατομμύρια ευρώ, το έργο αυτό ολοκληρώθηκε και άρχισε να λειτουργεί από το 2005. Η θερμική ενέργεια του συστήματος τηλεθέρμανσης λαμβάνεται από τον ΑΗΣ/ΔΕΗ Αμυνταίου μέσω διβάθμιας απομάστευσης ατμού των στροβίλων και είναι περίπου  $25\text{MW}_{\text{th}}$ . Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από δίδυμους προμονωμένους αγωγούς μήκους 9.900 μέτρων έκαστος, που ξεκινάνε από το κεντρικό αντλιοστάσιο και καταλήγουν στα χωριά. Το κεντρικό αντλιοστάσιο εξυπηρετεί την κυκλοφορία του νερού στα δίκτυα διανομής με ικανότητα  $620\text{ m}^3/\text{h}$  και περιλαμβάνει σύστημα κατεργασίας του νερού και σύστημα διατήρησης πίεσης και συμπλήρωσης νερού. Για την καλύτερη κατανομή των πιέσεων στα δίκτυα διανομής των τριών οικισμών, έχει κατασκευαστεί ένα ακόμα αντλιοστάσιο στην είσοδο του χωριού Φιλώτα, για την μείωση των πιέσεων μέσω υδραυλικού διαχωρισμού με εναλλάκτη θερμότητας, ισχύος  $13\text{MW}_{\text{th}}$ . Τέλος το σύστημα περιλαμβάνει δύο δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας  $1200\text{m}^3$  με ικανότητα τροφοδοσίας θερμικής ενέργειας  $9\text{MW}_{\text{th}}$  και θερμικούς υποσταθμούς των καταναλωτών, όπου εκεί θερμαίνεται μέσω εναλλάκτη το νερό για χρήση από το θερμό νερό που έρχεται από τα αντλιοστάσια [20].

## 2 Περιγραφή Συστημάτων Τηλεθέρμανσης

### 2.1 Αρχές σχεδίασης συστημάτων τηλεθέρμανσης

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενός συστήματος τηλεθέρμανσης είναι σημαντικό να υπάρχει ένα πρότυπο μοντέλο ως βάση, με σκοπό να υπάρχει δεδομένη αξιοπιστία και ποιότητα αλλά και περιθώρια βελτίωσης [22].

Αρχικά, η δημιουργία ενός συστήματος τηλεθέρμανσης έχει σημαντικό κόστος. Γίνεται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη το σύστημα να έχει μεγάλο χρόνο ζωής, να ξεπερνά δηλαδή τα 50 χρόνια και να μην είναι λιγότερο από 20. Αυτό επιτυγχάνεται με προσεκτικό σχεδιασμό και ακολουθώντας κάποια βιομηχανικά πρότυπα όπως για παράδειγμα το EN253, που αφορά τις σωληνώσεις του δικτύου, και με αυστηρό ποιοτικό έλεγχο κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου. Επίσης το δίκτυο σωληνώσεων πρέπει να περιλαμβάνει σύστημα εντοπισμού διαρροών ώστε να προλαμβάνονται τυχόν βλάβες, το οποίο είτε θα ελέγχεται τοπικά, είτε θα είναι συνδεδεμένο στο κεντρικό σύστημα ελέγχου. Πολύ σημαντική στο χρόνο ζωής των σωληνώσεων είναι και η ποιότητα του νερού, όπως παρουσιάζεται στον ακόλουθο **Πίνακα**.

Πίνακας 5: Ποιότητα νερού για σύστημα Τηλεθέρμ [22],[23]

Αγωγιμότητα	< 10 $\mu\text{S/cm}$
PH	9,5-10
Σκληρότητα	< 0,1 dH
Ποσότητα Fe	< 0,1 mg/kg
Ποσότητα O <sub>2</sub>	< 20 $\mu\text{g/kg}$
Ποσότητα Cl	< 50 mg/l

Η κύρια αρχή του σχεδιασμού του συστήματος τηλεθέρμανσης είναι η κάλυψη των θερμικών αναγκών των καταναλωτών. Αυτό επιτυγχάνεται αποτελεσματικά με τον έλεγχο και προσαρμογή της παροχής και θερμοκρασίας του ζεστού νερού. Σύμφωνα με εγχειρίδιο τηλεθέρμανσης για την πόλη του Λονδίνου [22], η μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού είναι 140°C και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 120°C. Έτσι η προτεινόμενη θερμοκρασία παροχής και επιστροφής ζεστού νερού είναι 110°C και 55°C αντίστοιχα. Για τις μονάδες διασύνδεσης θερμότητας με το χρήστη ισχύουν οι τιμές που αναγράφονται στον παρακάτω **Πίνακα**.

Πίνακας 6: Θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής στις μονάδες διασύνδεσης [22]

Θέρμανση Χώρων	Πρωτεύον Ρεύμα	Δευτερεύον Ρεύμα
Παροχή	110 °C	80 °C
Επιστροφή	55 °C	60 °C

Ζεστό νερό Χρήσης	Πρωτεύον Ρεύμα	Δευτερεύον Ρεύμα
Παροχή	70 °C	55 °C
Επιστροφή	25 °C	10 °C

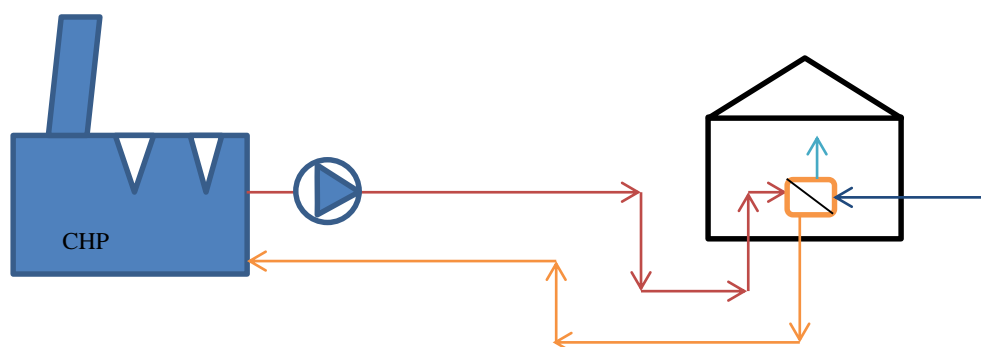
Τέλος, η πίεση του συστήματος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος λειτουργίας καθώς καθορίζει το μέγεθος και την λειτουργία των αντλιών, δεν επιτρέπει την ατμοποίηση του νερού σε οποιοδήποτε τμήμα του συστήματος και επηρεάζει την καταπόνηση των σωληνώσεων. Μέγιστη πίεση σχεδιασμού των συστημάτων τηλεθέρμανσης είναι τα **16 bar** ενώ τυπικές τιμές για πτώσεις πίεσης σε κεντρικές σωληνώσεις και μη κεντρικές σωληνώσεις είναι **100 Pa/m** και **250Pa/m** αντίστοιχα [22].

## 2.2 Τρόποι διασύνδεσης συστήματος με τον χρήστη

Πολύ σημαντικό κομμάτι του συστήματος τηλεθέρμανσης είναι η σύνδεση του χρήστη με τη μονάδα παραγωγής θερμικής ενέργειας, καθώς έχει άμεση σχέση με την ασφάλει και σωστή λειτουργία, διασφαλίζοντας τη καλή ποιότητα της εγκατάστασης και την αποτελεσματική αξιοποίηση της ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες [24].

Ως πρωτεύον δίκτυο σωληνώσεων ορίζεται το δίκτυο προσαγωγής και επιστροφής ζεστού νερού από την κεντρική μηχανή έως τα σπίτια των καταναλωτών, ενώ ως δευτερεύον δίκτυο ορίζεται το δίκτυο διανομής, δηλαδή αυτό που είναι εγκατεστημένο σε κάθε κτίριο, τροφοδοτεί τα σώματα θέρμανσης και παρέχει ζεστό νερό χρήσης. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι διασύνδεσης:

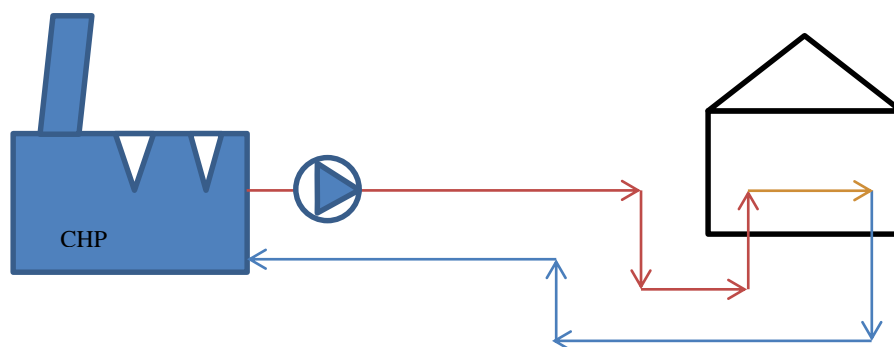
- **Έμμεση διασύνδεση του χρήστη με το πρωτεύον δίκτυο τηλεθέρμανσης**  
Αποτελεί τον πιο συχνό τρόπο διασύνδεσης. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7**, στο υποσταθμό κάθε σπιτιού υπάρχει ένας εναλλάκτης ο οποίος συναλλάσσει θερμότητα μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου και διαχωρίζει υδραυλικά τα δύο δίκτυα, δηλαδή το νερό που κυκλοφορεί στο πρωτεύον δίκτυο δεν έρχεται σε επαφή με το νερό του δευτερεύοντος δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο σύνδεσης, τα δύο δίκτυα μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις πράγμα που κάνει το σύστημα πιο ευέλικτο και αποδοτικό για μεγάλη ζήτηση θερμικής ενέργειας. Το μόνο μειονέκτημα που έχουν συγκριτικά με τον άμεσο τρόπο διασύνδεσης που θα σχολιαστεί παρακάτω είναι, ότι για το ίδιο θερμικό φορτίο, χρειάζονται μεγαλύτερη θερμοκρασία νερού προσαγωγής λόγω της ύπαρξης και του βαθμού απόδοσης του εναλλάκτη [24].



Εικόνα 7: Έμμεση διασύνδεση χρήστη

- **Άμεση διασύνδεση του χρήστη με το πρωτεύον δίκτυο τηλεθέρμανσης**

Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει εναλλάκτης στον υποσταθμό του σπιτιού οπότε το νερό του πρωτεύοντος δικτύου κυκλοφορεί και μέσα στο δίκτυο του σπιτιού. Είναι πιο οικονομικός τρόπος σύνδεσης από τον προηγούμενο αλλά το σύστημα γίνεται πιο ευαίσθητο οπότε είναι απαραίτητο να υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα διαρροών. Παρακάτω παρουσιάζεται και ένας συνοπτικός συγκριτικός Πίνακας με τους δύο τρόπους διασύνδεσης [24].



Εικόνα 8 : Άμεση διασύνδεση χρήστη

Πίνακας 7: Σύγκριση έμμεσης και άμεσης διασύνδεσης [24]

	Έμμεση Διασύνδεση	Άμεση Διασύνδεση
Θερμοκρασία Σχεδιασμού	έως 110° C	έως 90° C
Πίεση Σχεδιασμού	16 bar	6 bar
Έλεγχος Πίεσης	Δεν απαιτείται	Απαιτείται μείωση πίεσης στο δευτερεύον δίκτυο
Πιθανότητα βλάβης-διαρροής	Ελάχιστες λόγω υδραυλικού διαχωρισμού	Αυξημένες λόγω αυξημένης πίεσης στο δίκτυο του κτιρίου

## 2.3 Θερμικοί Υποσταθμοί

Οι θερμικοί υποσταθμοί καταναλωτών τοποθετούνται συνήθως στο χώρο του υπάρχοντος λεβητοστασίου, όπου πολλές φορές πραγματοποιείται ταυτόχρονα παραλληλισμός με τους λέβητες, έτσι ώστε να αποτελούν εφεδρεία σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας τους συστήματος τηλεθέρμανσης. Κάποιοι υποσταθμοί παρέχουν μόνο ζεστό νερό για θέρμανση ενώ άλλοι και ζεστό νερό για χρήση [25]. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός τους είναι η ρύθμιση του προσδιδόμενου θερμικού φορτίου ανάλογα με τη ζήτηση καθώς επίσης και η μέτρηση της αποδιδόμενης θερμότητας στους καταναλωτές. Οι θερμικοί υποσταθμοί διακρίνονται σε αυτούς του έμμεσου συστήματος οι οποίοι διαθέτουν εναλλάκτη θερμότητας και σε αυτούς του άμεσου συστήματος χωρίς εναλλάκτη, και θα πρέπει να τηρούν κάποιες προϋποθέσεις όπως για παράδειγμα χαμηλό κόστος, χαμηλά επίπεδα θορύβου, υψηλό χρόνο ζωής, ασφάλεια και ποιότητα υπηρεσιών, ακρίβεια στις μετρήσεις, εύκολη συντήρηση και χαμηλές θερμικές απώλειες. Ο κάθε υποσταθμός αποτελείται από ένα σύνολο οργάνων και εξαρτημάτων υπεύθυνα να πραγματοποιούν τις κάτωθι λειτουργίες [18]:

- Πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας (μόνο στην έμμεση διασύνδεση) υπεύθυνος για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου, για ενδεικτικά θερμοκρασιακά επίπεδα προσαγωγής-επιστροφής 110 °C - 65 °C για το πρωτεύον και 60 °C - 80 °C για το δευτερεύον.
- Διάταξη θερμιδομέτρησης εγκατεστημένη στο πρωτεύον κύκλωμα για την μέτρηση της προδιδόμενης θερμικής ενέργειας στο κτίριο. Περιλαμβάνει μετρητή ροής, αισθητήρα θερμοκρασιών.
- Αισθητήρα υπεύθυνο για τον περιορισμό της θερμοκρασίας επιστροφής του πρωτεύοντος κυκλώματος, με σκοπό να εξασφαλίζεται το επιθυμητό εύρος θερμοκρασιακής πτώσης στο σύστημα τηλεθέρμανσης.
- Κατάλληλο αισθητήρα με σκοπό τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας εσωτερικών χώρων στους 20 °C περίπου.
- Χρονοδιακόπτη, που μέσω εβδομαδιαίας ρύθμισης δίνει τη δυνατότητα επιλογής κανονικής ή περιορισμένης λειτουργίας του υποσταθμού με κριτήριο την επιθυμητή θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων.
- Σύστημα ελέγχου και ρύθμισης της παροχής του πρωτεύοντος κυκλώματος.

### 2.3.1 Εναλλάκτες Θερμότητας

Το πιο σημαντικό στοιχείο ενός υποσταθμού έμμεσης διασύνδεσης είναι ο εναλλάκτης θερμότητας. Είναι υπεύθυνος για τον υδραυλικό διαχωρισμό των δύο δικτύων και για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων. Υπάρχουν διάφορα ήδη εναλλακτών που είναι



ειδικά σχεδιασμένοι για συστήματα τηλεθέρμανσης, οι πιο διαδεδομένοι είναι όμως οι πλακοειδείς. Διακρίνονται σε παρεμβύσματα (gasket) και κολλητούς (brazed) και έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τύπων εναλλακτών, σε ότι αφορά τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Καταρχάς είναι αρκετά πιο οικονομικοί και λόγω της κατασκευής τους απαιτούν πολύ λιγότερο χώρο αφού έχουν πού μικρότερη επιφάνεια συναλλαγής, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι έχουν χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης θερμότητας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας επιστροφής του πρωτεύοντος και επιστροφής δευτερεύοντος δικτύου είναι μικρή και ίση περίπου με 1-3 °C, πράγμα πού επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος Τηλεθέρμανσης [8].

## 2.4 Θερμοκρασίες νερού προσαγωγής και επιστροφής

Κρίσιμο σημείο στη μελέτη ενός συστήματος τηλεθέρμανσης αποτελούν οι θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής των δικτύων. Μεγάλη πτώση θερμοκρασίας μεταξύ των ρευμάτων, οδηγεί σε μείωση της ροής, οπότε σε επιλογή μικρότερων σωληνώσεων και αντλιών, μειώνοντας έτσι τις απώλειες και τα κατασκευαστικά κόστη, με άλλα λόγια επηρεάζεται όλο το σύστημα σε μεγάλο βαθμό. Υπάρχουν συγκεκριμένες αρχές που αφορούν τα συστήματα θέρμανσης των κτιρίων, και διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα κάποιες θερμοκρασιακές τιμές για τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων.

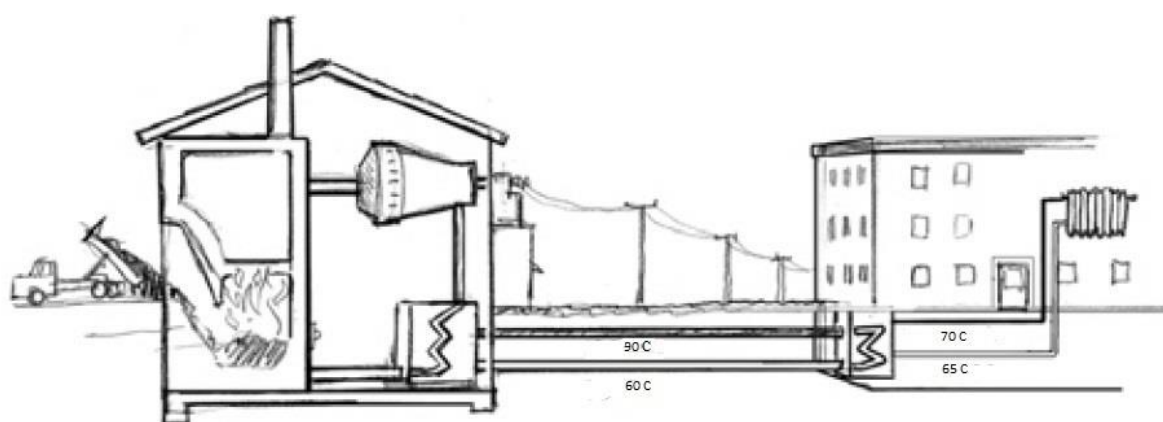
Πίνακας 8: Θερμοκρασίες Σχεδιασμού Πρωτεύοντος/Δευτερεύοντος Δικτύου (°C) [25]

Χώρα	Θέρμανση Χώρων $T_{pf}-T_{pr}/T_{sf}-T_{sf}$	Ζεστό νερό για χρήση $T_{pf}-T_{pr}/T_{cw}-T_{hw}$
Σουηδία	100-50/45-60	65-25/5-55
Δανία	70-40/40-40	60-40/10-45
Γερμανία	110-55/40-70	80-40/10-60
Πολωνία	135-75/70-90	70-35/5-55

Όπου οι δείκτες σημαίνουν:

- p: πρωτεύον δίκτυο
- s: δευτερεύον δίκτυο
- f: ρεύμα προσαγωγής νερού
- r: ρεύμα επιστροφής νερού
- cw: ρεύμα κρύου νερού
- hw: ρεύμα ζεστού νερού

Πολύ μεγάλη σημασία έχει η θερμοκρασία επιστροφής του πρωτεύοντος δικτύου. Όσο χαμηλότερη είναι, τόσο μεγαλύτερη η ωφέλιμη θερμική ενέργεια προς χρήση, και βελτιώνεται η απόδοση του συστήματος. Επίσης, επιστρέφοντας το νερό στην κεντρική μονάδα παραγωγής σε χαμηλή θερμοκρασία, κάτω από 65 °C, επιτρέπει καλύτερη ψύξη της μηχανής, εφόσον ψύχει τα συμπυκνώματα, και έτσι βελτιώνεται και η απόδοση του σταθμού. Το μοναδικό κόστος για να φτάσουμε σε χαμηλές θερμοκρασίες επιστροφής είναι αυτό του εναλλάκτη, που όπως είναι λογικό πρέπει να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής. Για αυτόν τον λόγο είναι σημαντικό τα κτίρια να μπορούν να απορροφήσουν αποδοτικά τη θερμική ενέργεια, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες [23].

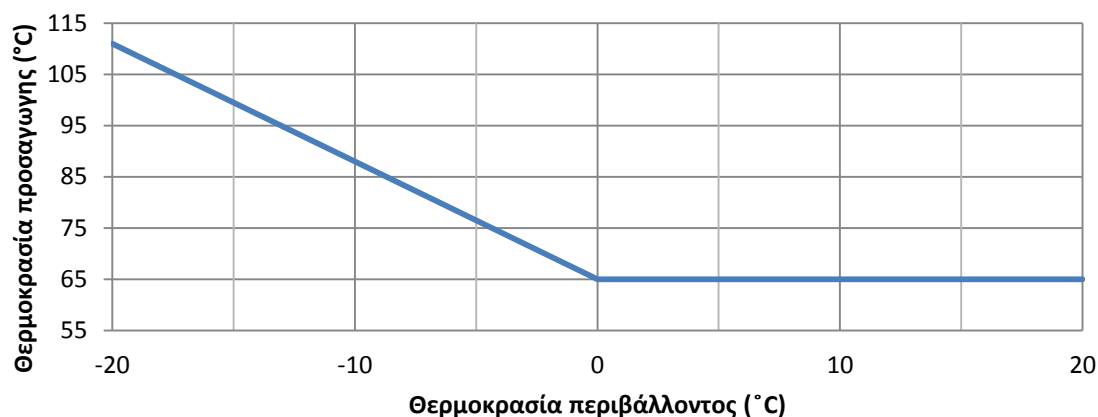


Εικόνα 9: Αναπαράσταση συστήματος Τηλεθέρμανσης [23]

#### 2.4.1 Ζεστό νερό για χρήση

Τα συστήματα τηλεθέρμανσης που παρέχουν και ζεστό νερό για χρήση θα πρέπει να λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, δηλαδή λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος, οπότε ο εναλλάκτης πρέπει να είναι διαστασιολογημένος με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η παραγωγή ζεστού νερού ακόμα και τους πιο κρύους μήνες. Θα πρέπει λοιπόν να μεταβάλλεται η θερμοκρασία παροχής ζεστού νερού του πρωτεύοντος δικτύου προσαρμοζόμενη στην εξωτερική θερμοκρασία. Έτσι το σύστημα θα είναι πιο αποδοτικό και θα ικανοποιεί πιο αποτελεσματικά τις ανάγκες των καταναλωτών. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στο παρακάτω *διάγραμμα*.

Διάγραμμα 3 : Μεταβολή θερμοκρασίας προσαγωγής νερού συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά την παραγωγή ζεστού νερού για χρήση [23]



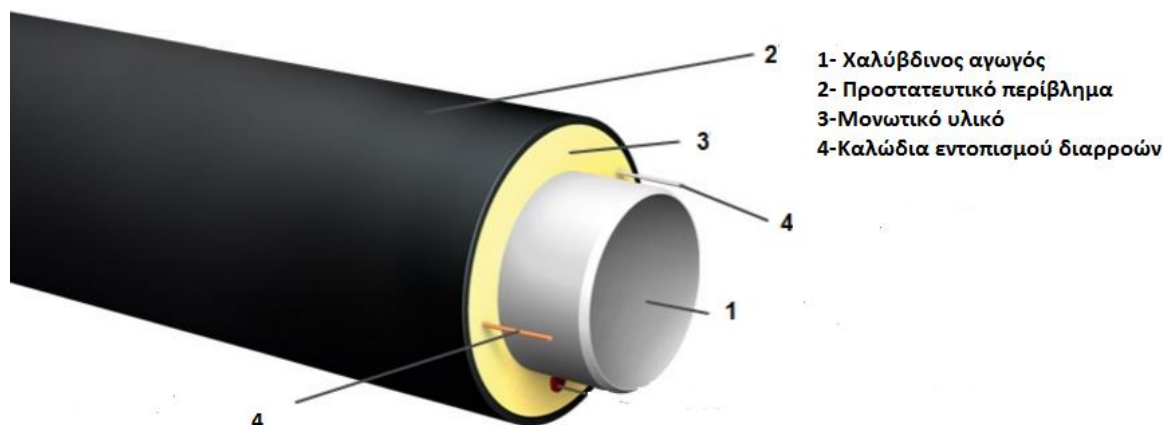
Είναι πολύ σημαντικό επίσης να τεθούν αυστηρά θερμοκρασιακά όρια στο νερό για χρήση. Η θερμοκρασία του δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους  $70^{\circ}\text{C}$  για τον ευνόητο λόγο ότι μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα, αλλά επίσης δεν πρέπει να είναι κάτω από  $55^{\circ}\text{C}$  καθώς είναι πλέον γνωστό ότι σε τέτοιες θερμοκρασίες αναπτύσσεται στο νερό ένα βακτήριο που ονομάζεται *Legionella*, το οποίο αν εισχωρήσει στον ανθρώπινο οργανισμό προκαλεί τη νόσο των λεγεωνάριων, μια μορφή πνευμονίας που δύναται να καταστεί θανατηφόρος [23],[25].

## 2.5 Δίκτυο Σωληνώσεων

Σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης, το δίκτυο σωληνώσεων αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία και επηρεάζει άμεσα τη βιωσιμότητα και τη λειτουργία του. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της κεντρικής μονάδας από το χώρο κατανάλωσης της θερμικής ενέργειας, τόσο μεγαλύτερο είναι και το μήκος των αγωγών, και κατά συνέπεια αυξάνεται το κόστος τους, οι θερμικές απώλειες και οι απώλειες πίεσης. Έτσι λοιπόν, είναι επιτακτική η ανάγκη της σωστής μελέτης για την επιλογή του κατάλληλου υλικού των σωληνώσεων, της μόνωσης αλλά και του μεγέθους, ώστε να επιτύχουμε τεχνοοικονομικά το βέλτιστο αποτέλεσμα.

## 2.5.1 Υλικά και εξαρτήματα σωληνώσεων

Ο πιο διαδεδομένος τύπος σωληνώσεων για συστήματα τηλεθέρμανσης είναι οι προμονωμένοι χαλύβδινοι αγωγοί, εγκατεστημένοι συνήθως κάτω από το έδαφος, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 253, EN 448, EN 488, EN 489 και EN 13941 [22]. Ο προστατευτικός και αδιάβροχος σωλήνας των αγωγών, το περίβλημα δηλαδή, είναι συνήθως κατασκευασμένο από σκληρό πολυαιθυλένιο και η θερμική μόνωση που τοποθετείται μεταξύ του αγωγού και του περιβλήματος είναι από στερεό αφρό πολυουρεθάνης [26]. Για τη σύνδεση των αγωγών χρησιμοποιούνται ειδικοί μονωτικοί σύνδεσμοι, ενώ για τις αλλαγές κατεύθυνσης μονωμένα εξαρτήματα καμπύλων διακλαδώσεων και συστολών. Κατά την εγκατάστασή των σωληνώσεων τοποθετούνται ειδικά τεμάχια από πλαστικό, στις θέσεις όπου οι υπόγειοι προμονωμένοι αγωγοί υφίστανται εγκάρσια μετατόπιση λόγω θερμικών συστολοδιαστολών, όπως για παράδειγμα διατάξεις διαστολών L και διακλαδώσεις T. Σκοπό έχουν να επιτρέπουν την ελεύθερη, κατά το δυνατό, εκτόνωση των αγωγών, που διαφορετικά θα παρεμποδιζόταν από το περιβάλλον έδαφος. Όπως έχει αναφερθεί, είναι πού σημαντικό το υπόγειο δίκτυο τηλεθέρμανσης να διαθέτει σύστημα εντοπισμού διαρροών με σκοπό τον έγκαιρο εντοπισμό υγρασίας στη μόνωση των σωλήνων λόγω πιθανής αστοχίας του προστατευτικού περιβλήματος. Έτσι κάθε σωλήνας του δικτύου θα πρέπει να περιέχει στη μόνωσή του δύο χάλκινα καλώδια, εκ των οποίων το ένα χρησιμεύει για τον εντοπισμό του προβλήματος, και το άλλο για τη μεταφορά ή επιστροφή των σημάτων προς τα κανάλια ελέγχου μέσω παλμών υψηλής ταχύτητας [18].



Εικόνα 10: Προμονωμένος Χαλύβδινος Αγωγός [27]

Τα τελευταία χρόνια με την μελέτη και την ανάπτυξη των θερμοπλαστικών υλικών, έχουν κατασκευαστεί σωληνώσεις από πολυμερή πλαστικά τα οποία έχουν διάφορα πλεονεκτήματα όπως χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, δηλαδή μικρότερες θερμικές απώλειες και χαμηλές απώλειες λόγω τριβών. Επίσης, δεν διαβρώνονται και έχουν μεγαλύτερη ευκολία στην

εγκατάστασή τους. Από την άλλη, κατασκευάζονται σε περιορισμένες διαστάσεις, έως DN 300 mm, και δουλεύουν σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα, μέχρι τους 95 °C και σε πιέσεις μέχρι 6 bar, το οποίο σημαίνει ότι είναι πιο κατάλληλες για μικρότερα συστήματα τηλεθέρμανσης, άμεσα διασυνδεδεμένα, όπου έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής [28].

## 2.5.2 Διαστάσεις σωληνώσεων και θερμικές απώλειες

Οι θερμικές απώλειες στις σωληνώσεις εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως από το υλικό και το πάχος της μόνωσης, το μήκος και το πάχος του σωλήνα και τα θερμοκρασιακά επίπεδα. Σε περιπτώσεις που οι αγωγοί δεν είναι καλά μονωμένοι, ή σε παλαιότερα συστήματα, οι θερμικές απώλειες μπορεί να είναι αρκετά υψηλές, της τάξεως του **30%**, με αποτέλεσμα να χάνονται μεγάλα ποσά θερμότητας. Στα πιο σύγχρονα συστήματα σωληνώσεων, όπου σαν μονωτικό υλικό χρησιμοποιείται πολυουρεθάνη, οι θερμικές απώλειες μειώνονται σημαντικά και καταλήγουν να είναι μικρότερες από το **3%** της συνολικής θερμικής ισχύος. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω **πίνακα**, ανάλογα με το πάχος του χαλύβδινου αγωγού που έχει εκλεχθεί, επιλέγεται και το κατάλληλο πάχος της μόνωσης και του περιβλήματος για τη βέλτιστη θερμική μόνωση και προστασία του [23].

**Πίνακας 9: Προτεινόμενες διαστάσεις για το περίβλημα και τη μόνωση ανάλογα με την ονομαστική διάμετρο χαλύβδινων σωληνών, σύμφωνα με το πρότυπο EN 253 [22]**

Ονομαστική Διάμετρος DN(mm)	Ελάχιστο Πάχος Σωλήνα (mm)	Εξωτερική Διάμετρος (mm)	Πάχος Μόνωσης (mm)	Συνολική Διάμετρος με περίβλημα (mm)
25	2,0	26,9	27	90
50	2,3	33,7	24	90
32	2,6	42,4	29	110
40	2,6	48,3	26	110
50	2,9	60,3	27	125
65	2,9	76,1	26	140
80	3,2	88,9	29	160
100	3,6	114,3	36	200
125	3,6	139,7	36	225
150	4,0	168,3	33	250
200	4,5	219,1	39	315
250	5,0	273,0	52	400
300	5,6	323,9	50	450
350	5,6	355,6	59	500
400	6,3	406,4	42	520
450	6,3	457,0	36	560
500	6,3	508,0	45	630

### 2.5.3 Αντλίες και πτώσεις πίεσης στους αγωγούς

Η κυκλοφορία του νερού από τη κεντρική μηχανή στην κατανάλωση επιτυγχάνεται μέσω αντλιών, που δημιουργούν την κατάλληλη διαφορά πίεσης ανάμεσα στους αγωγούς προσαγωγής και επιστροφής. Επίσης οι αντλίες σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να ξεπερνούν την αντίσταση της ροής λόγω τριβών και στροβιλισμών του ρευστού και τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται στο σημείο διασύνδεσης με το χρήστη. Ανάλογα με τη διάμετρο της σωλήνωσης, υπάρχει και περιορισμός για τη μέγιστη ταχύτητα ροής του νερού, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, καθώς αυξάνονται οι απώλειες τριβής και κατά συνέπεια οι απώλειες πίεσης, οπότε υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ της αντλίας.

Πίνακας 10: Μέγιστα όρια ταχύτητας νερού σε σωλήνωση ανάλογα με την ονομαστική διάμετρο [29]

Ονομαστική Διάμετρος (mm)	25	32	40	50	65	80	100	150	200	300	500
Ταχύτητα (m/s)	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9

Σε ένα δίκτυο γενικά, η συνολική πτώση πίεσης προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Delta P = \Delta P_R + \Delta P_m \text{ [Pa]}$$

Όπου  $\Delta P_R, \Delta P_m$  οι πτώσεις πίεσης λόγω τριβών και λόγω εξαρτημάτων αντιστοίχως, που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta P_R = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot \frac{L}{D} \text{ [Pa]}$$

$$\Delta P_m = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot u^2 \text{ [Pa]}$$

Όπου  $L$  [m] το μήκος της σωληνογραμμής,  $D$  [m] η εσωτερική διάμετρος,  $\rho$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ] η πυκνότητα του ρευστού,  $u$  [ $\frac{m}{s}$ ] η ταχύτητα του ρευστού,  $\zeta$  ο συντελεστής τοπικής αντίστασης λόγω διαφόρων εξαρτημάτων που περιγράφονται σε συγκεντρωτικούς πίνακες, και  $f$  ο συντελεστής αντίστασης ροής (*Darcy-Weisbach Friction Factor*) που δίδεται από τη σχέση:

➤  $f = \frac{64}{Re}$ , για στρωτή ροή με  $Re < 2300$

➤  $f = 0.25 \cdot \left[ \log \left( \frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{\epsilon}{3.7D} \right) \right]^{-2}$ , για τυρβώδη ροή με  $Re > 4000$  (σχέση *Swamee-Jain*)

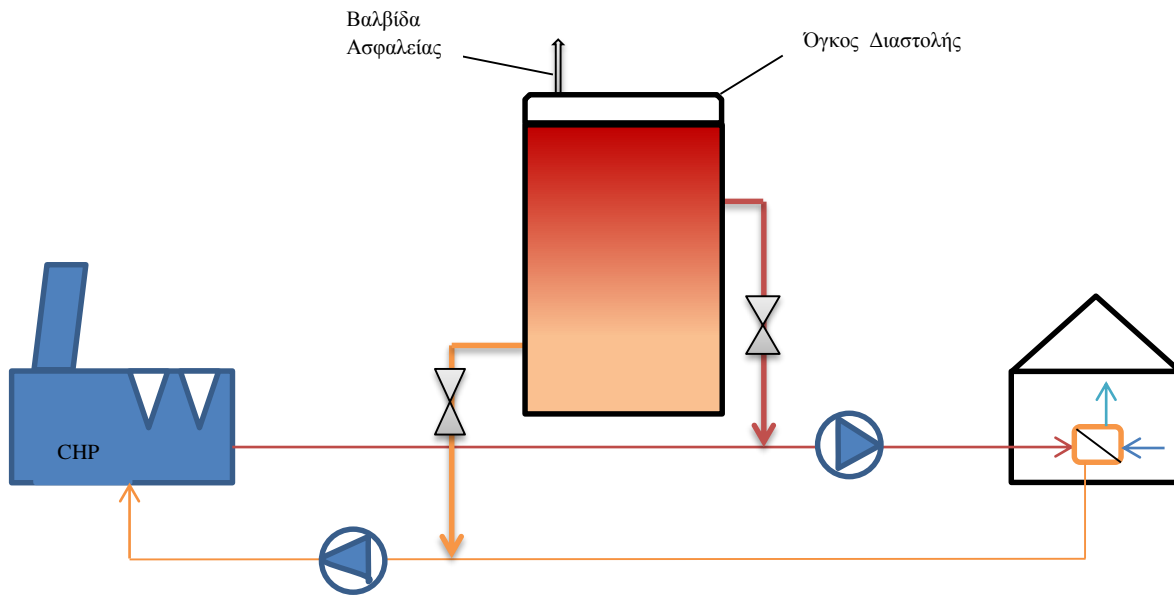
με  $\epsilon$  [m] την τραχύτητα του σωλήνα, και  $Re = \frac{u \cdot D}{\nu}$ , όπου  $\nu$  [ $\frac{m^2}{s}$ ] η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού [30].



## 2.6 Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα τηλεθέρμανσης, και κυρίως αυτά που έχουν ως κεντρική μονάδα παραγωγής θερμότητας εργοστάσιο συμπαραγωγής, περιλαμβάνουν δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ή αλλιώς θερμοδεξαμενή. Σκοπός της θερμοδεξαμενής είναι η εξισορρόπηση της προσφοράς θερμικής ισχύος σε σχέση με τη ζήτηση, είναι υπεύθυνη δηλαδή να τροφοδοτεί με θερμική ενέργεια το σύστημα σε ώρες αιχμής όπου η ζήτηση είναι αυξημένη. Η λειτουργία της έγκειται στο γεγονός ότι σε ώρες όπου η ζήτηση είναι χαμηλή, η θερμοδεξαμενή μπορεί να φορτίζεται γεμίζοντας και αποθηκεύοντας ζεστό νερό που περισσεύει, οπότε όταν αυξηθεί το απαιτούμενο φορτίο του συστήματος, αποφορτίζεται αφήνοντας ουσιαστικά ανεπηρέαστη τη λειτουργία της κεντρικής μηχανής. Όπως γίνεται κατανοητό, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση της θερμοδεξαμενής είναι πολλά. Αρχικά, γίνεται πιο ορθολογική διαχείριση της ενέργειας η οποία αποθηκεύεται αποτελεσματικά χάρη στη μεγάλη θερμοχωρητικότητα του νερού. Επίσης συνεισφέρει στην ομαλοποίηση της λειτουργίας των συμπαραγωγικών μονάδων αφού δεν απαιτείται πλέον η παρακολούθηση, σε στιγμιαία χρονική βάση, της θερμικής ζήτησης της πόλης ή του οικισμού και εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία του συστήματος ακόμα και αν παρουσιαστεί κάποια βλάβη. Συμβάλει επιπλέον στη διατήρηση της πίεσης στους αγωγούς του συστήματος ισοσταθμίζοντας τις ανάγκες των αντλιών. Συμπερασματικά λοιπόν, με τη χρήση θερμοδεξαμενής επιτυγχάνεται καλύτερη και οικονομικά αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος τηλεθέρμανσης [31],[32].

Οι θερμοδεξαμενές είναι συνήθως κατασκευασμένες από χάλυβα, βρίσκονται στην ίδια πίεση με το δίκτυο της τηλεθέρμανσης και φέρουν αντιδιαβρωτική προστασία, καθώς επίσης και μόνωση, κατά κύριο λόγο από πολυουρεθάνη. Στο πάνω μέρος τους περιέχουν τον όγκο εκτόνωσης που γεμίζεται με νιτρικό αέριο και λειτουργεί σαν μηχανισμός ασφαλείας σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης, ώστε να τεθεί η πίεση στο επιθυμητό επίπεδο μέσω των βαλβίδων ασφαλείας [31],[32]. Τέλος, διαθέτουν ειδικούς αναδευτήρες ώστε να ανακατεύεται το νερό μέσα στη δεξαμενή για να αποφευχθεί η θερμική διαστρωμάτωση, δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο το νερό που θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία παραμένει στην κορυφή της δεξαμενής αφήνοντας το κρύο νερό στα χαμηλότερα σημεία.



Εικόνα 11: Διάταξη Θερμοδεξαμενής σε σύστημα τηλεθέρμανσης



### 3 Διαστασιολόγηση τεχνολογικών στοιχείων συστήματος και ανάλυση των σεναρίων τηλεθέρμανσης

Σε αυτήν την ενότητα πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση των σωληνώσεων και ο υπολογισμός των θερμικών τους απωλειών, των εναλλακτών θερμότητας που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση, και της θερμοδεξαμενής, ώστε να γίνει στο επόμενο κεφάλαιο εκτίμηση κόστους του απαραίτητου εξοπλισμού. Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν με βάση τη θερμική ζήτηση του οικισμού για τηλεθέρμανση που έχει δοθεί και ανέρχεται στα 14 MW<sub>th</sub>, και τις θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής του πρωτεύοντος δικτύου, δηλαδή του κεντρικού δικτύου που ξεκινά από τον σταθμό συμπαραγωγής και καταλήγει στον οικισμό, που είναι 90 °C και 60 °C αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον **Excel**.

#### 3.1 Διαστασιολόγηση Σωληνώσεων

Πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση της κεντρικής σωλήνωσης του πρωτεύοντος δικτύου βάσει επαναληπτικής διαδικασίας, έχοντας πάντα ως δεδομένο το θερμικό φορτίο τηλεθέρμανσης, τις θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής και της διαθέσιμης πτώσης πίεσης που όπως αναφέρθηκε προτύτερα, εκλέγεται εμπειρικά  $\Delta P = 100 \frac{Pa}{m}$ , για κεντρικές σωληνώσεις [22]. Αρχικά λοιπόν υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή μάζας και όγκου του νερού από τις παρακάτω σχέσεις:

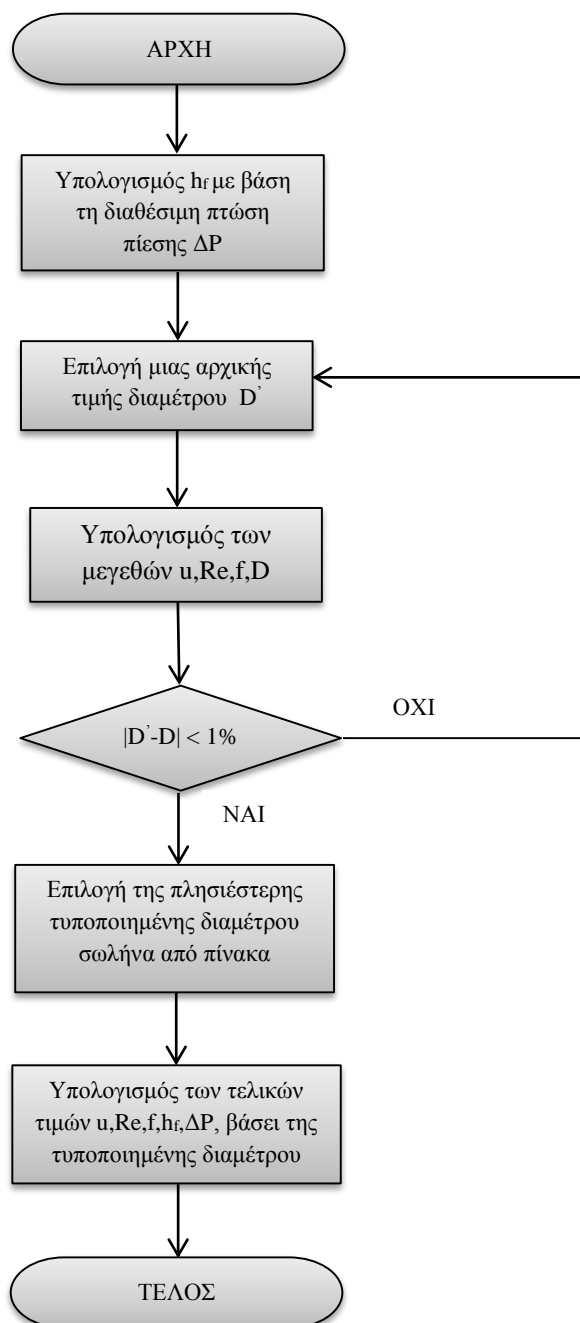
$$m = \frac{Q}{C_p \cdot (T_{sup} - T_{ret})}$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Όπου:

- $m [\frac{kg}{s}]$  η παροχή μάζας
- $V [\frac{m^3}{s}]$  η παροχή όγκου
- $Q [kW]$  το θερμικό φορτίο αιχμής
- $C_p [\frac{kJ}{kg \cdot K}]$  η θερμοχωρητικότητα του νερού
- $T_{sup}, T_{ret} [K]$  οι θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής αντίστοιχα
- $\rho [\frac{kg}{m^3}]$  η πυκνότητα του νερού

Δεδομένου των υπολογισμών αυτών υλοποιείται η παρακάτω επαναληπτική διαδικασία, σύμφωνα με το ακόλουθο λογικό διάγραμμα [33]:



Εικόνα 12: Λογικό διάγραμμα υπολογισμού διαμέτρου σωλήνα

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των πράξεων παρουσιάζονται παρακάτω [33],[50]:

$$h_f = \frac{\Delta P \cdot L}{\rho \cdot g}$$

$$u = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D'^2}$$

$$Re = \frac{u \cdot D'}{\nu}$$

$$f = 0.25 \cdot \left[ \log \left( \frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{\varepsilon}{3.7} \right) \right]^{-2}$$

$$D = \left( \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot V^2}{g \cdot h_f \cdot \pi^2} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Όπου:

- $h_f$  [m] οι γραμμικές απώλειες ροής
- $\Delta P$  [ $\frac{Pa}{m}$ ] η διαθέσιμη πτώση πίεσης
- $g$  [ $\frac{m}{s^2}$ ] η επιτάχυνση της βαρύτητας
- $Re$  [-] ο αριθμός Reynolds
- $\nu$  [ $\frac{m^2}{s}$ ] η κινηματική συνεκτικότητα του νερού
- $f$  [-] ο συντελεστής αντίστασης ροής
- $\varepsilon$  [m] η απόλυτη τραχύτητα του σωλήνα
- $L$  [m] το μήκος του σωλήνα
- $D'$  [m] η αρχικά εκλεγμένη διάμετρος
- $D$  [m] η τελική υπολογισμένη διάμετρος

Για τους υπολογισμούς έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Οι τυποποιημένες διαμέτροι DN λήφθηκαν από τον **Πίνακα 9**.
- Η απόλυτη τραχύτητα  $\varepsilon$  του σωλήνα θεωρήθηκε ίση με **0,00005m** για χαλύβδινο σωλήνα του εμπορίου.
- Η θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα και κινηματική συνεκτικότητα του νερού θεωρήθηκαν για τη μέση θερμοκρασία,  $T_{mean}=75$  °C, ως  $C_p=4,194$  [ $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ],  $\rho=975$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ],  $\nu=3,877 \cdot 10^{-7}$  [ $\frac{m^2}{s}$ ] [35].
- Το μήκος των αγωγών προσαγωγής και επιστροφής είναι  $L_1=6000m$  και  $L_2=6000$ , όση και η απόσταση του σταθμού συμπαραγωγής από το χωριό, δηλαδή συνολικά  **$L=12000m$** .

Πίνακας 11 : Αποτελέσματα υπολογισμών για τις σωληνώσεις

<b>D [m]</b>	0,3
<b>u [m/s]</b>	1,61
<b>f</b>	0,01426
<b>h<sub>f</sub> [m]</b>	75,78
<b>ΔP [bar]</b>	7,25

### 3.1.1 Υπολογισμός θερμικών απωλειών των σωληνώσεων

Οι θερμικές απώλειες σε ένα σύστημα σωληνώσεων οφείλονται κυρίως στη μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Ο νόμος του *Fourier* εφαρμοσμένος για κυλινδρικό σώμα, που περιγράφει το φαινόμενο αυτό είναι [36],[37]:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (1)$$

Όπου Q [W] το ρεύμα θερμότητας, k  $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$  η ειδική θερμική αγωγιμότητα του υλικού, ΔT [°C] η θερμοκρασιακή διαφορά, A=2·π·r·L [m<sup>2</sup>] η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας κατά το μήκος L [m] του σωλήνα και Δr [m] η ακτινική διαφορά στα διάφορα υλικά του σωλήνα.

Σε προβλήματα όπου υπάρχει κυλινδρική επιφάνεια, είναι απαραίτητο να οριστεί η λογαριθμική μέση επιφάνεια συναλλαγής A<sub>lm</sub>:

$$A_{lm} = \frac{A_o - A_i}{\ln\left(\frac{A_o}{A_i}\right)} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \left(\frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}\right) \quad (2)$$

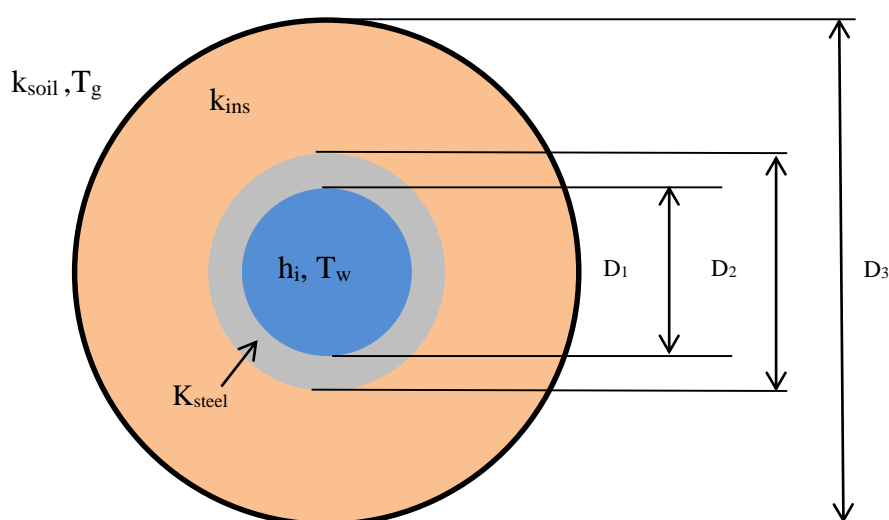
Με συνδυασμό των σχέσεων (1) και (2) προκύπτει τελικά η σχέση:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k \cdot \Delta T}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (3)$$

Στην περίπτωση μας, που έχουμε χαλύβδινο αγωγό με μονωτικό υλικό θαμμένο στο έδαφος, για να υπολογιστούν οι απώλειες θερμότητας ανά μέτρο σωλήνα μέσω αγωγής και συναγωγής θερμότητας, μετατρέπουμε τη σχέση (3) στην ακόλουθη μορφή [37],[38],[39],[40]:

$$Q' = \frac{Q}{L} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (T_w - T_g)}{\frac{2}{h_i \cdot D_1} + \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{k_{steel}} + \frac{\ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)}{k_{ins}} + \frac{1}{k_{soil} \cdot S}} \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (4)$$

Όπου  $T_w$  [°C] η θερμοκρασία του νερού,  $T_g$  [°C] η θερμοκρασία του εδάφους,  $h_i$  [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ] η θερμική συναγωγιμότητα του νερού,  $D$  [m] και  $k$  [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ] η διάμετρος και η θερμική αγωγιμότητα κάθε υλικού όπως φαίνονται στην *εικόνα* που ακολουθεί:



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση διαμέτρων και θερμικών αγωγιμοτήτων των υλικών

Στην εξίσωση (4) το  $S$  υποδηλώνει τον σχηματικό παράγοντα αγωγιμότητας (Conduction Shape Factor) και υπολογίζεται ως [41]:

$$S = \frac{2 \cdot \pi}{\cosh^{-1} \frac{Y}{D_3}}$$

Όπου  $Y$  [m] είναι το βάθος που είναι θαμμένος ο αγωγός, η απόσταση δηλαδή του κέντρου του αγωγού από το έδαφος .

Ο υπολογισμός της θερμικής συναγωγιμότητας του νερού έγινε βάσει των παρακάτω σχέσεων, έχοντας ως δεδομένα τα μεγέθη της ταχύτητας  $u$ , του αριθμού Reynolds  $Re$ , και

του συντελεστή αντίστασης της ροής  $f$ , για την υπολογισμένη τιμή της διαμέτρου, από την προηγούμενη **Ενότητα [3.1]**:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k_{water}}$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$h_i = \frac{Nu \cdot k_{water}}{D_1}$$

Όπου  $Pr$  ο αδιάστατος αριθμός Prandtl,  $\mu$  η δυναμική συνεκτικότητα του νερού  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$ ,  $Nu$  ο αριθμός Nusselt που υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση που εισήγαγε ο Gnielinski [42],  $k_{water}$  η θερμική αγωγιμότητα του νερού  $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$  και  $C_p$  η θερμοχωρητικότητα του  $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ .

Για τους υπολογισμούς έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Οι υπολογισμοί έγιναν δύο φορές για τις διαφορετικές θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής του νερού ( $T_c=60^\circ C$  και  $T_h=90^\circ C$ ) και κατά συνέπεια διαφορετικές ιδιότητες του νερού ( $\mu$ ,  $\nu$ ,  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $k_{water}$ ).
- Θεωρήθηκε ότι οι αγωγοί είναι θαμμένοι σε βάθος  $Y=1.2 m$ , με θερμοκρασία εδάφους  $T_g=13^\circ C$  και θερμική αγωγιμότητα εδάφους  $k_{soil}=1,5 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ .
- Η ονομαστική διάμετρος του σωλήνα υπολογίστηκε ως  $DN=300mm$  ( $D_1=307,9 mm$  η πραγματική τιμή της εσωτερικής διαμέτρου) στην **Ενότητα [3.1]**, οπότε από τον **Πίνακα 9** εκλέχθηκε το πάχος του σωλήνα ίσο με  $8 mm$  ( $D_2=323,9 mm$ ) και πάχος μόνωσης  $50 mm$  ( $D_3=423,9 mm$ ).
- Η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα είναι  $k_{steel}=16,5 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ , της μόνωσης από πολουρεθάνη  $k_{ins}=0,029 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$  και του νερού  $k_{water}=0,6753 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$  για  $90^\circ C$  και  $k_{water}=0,6485 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$  για  $60^\circ C$  [35].
- Το μήκος των αγωγών προσαγωγής και επιστροφής είναι  $L_1=6000m$  και  $L_2=6000$ .

Όπως φαίνεται στους παρακάτω **πίνακες**, από τους υπολογισμούς προκύπτει πως οι συνολικές θερμικές απώλειες ανέρχονται στο **3,2%** της θερμικής ισχύος, το οποίο είναι αποδεκτό ποσοστό για τα σύγχρονα συστήματα τηλεθέρμανσης όπως αναφέρθηκε πιο πριν.

**Πίνακας 12: Θερμικές Απώλειες για τους αγωγούς προσαγωγής και επιστροφής του νερού**

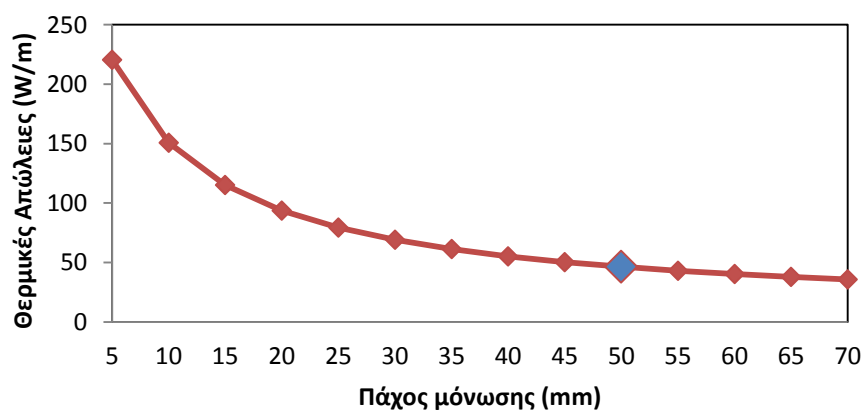
	Θερμικές Απώλειες [W/m]	Θερμικές Απώλειες [MW]	Ποσοστό Θερμικών Απωλειών [%]
Αγωγός Προσαγωγής	46,42	0,28	1,99
Αγωγός Επιστροφής	28,33	0,17	1,21

**Πίνακας 13: Συνολικές θερμικές απώλειες συστήματος τηλεθέρμανσης**

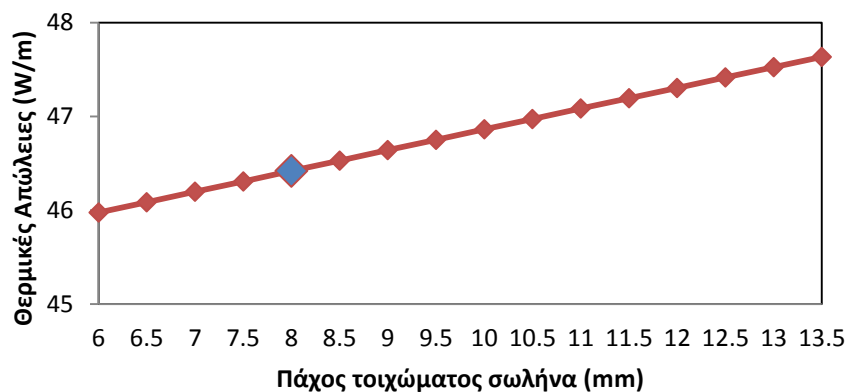
Συνολικές Θερμικές Απώλειες [W/m]	74,75
Συνολικές Θερμικές Απώλειες [MW]	0,45
Συνολικές Θερμικές Απώλειες [%]	3,20

Επίσης παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα, με σκοπό να παρατηρηθεί η μεταβολή των απωλειών θερμότητας συναρτήσει του πάχους της μόνωσης, του πάχους του τοιχώματος της σωλήνωσης, της θερμοκρασίας του νερού και του εδάφους. Διαπιστώνεται έτσι πως το πάχος της μόνωσης έχει καθοριστικό ρόλο στις απώλειες θερμότητας σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους, και για αυτόν το λόγο είναι σημαντικό να επιλεγεί με προσοχή για την πιο αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Με μπλε χρώμα φαίνονται τα σημεία με τα χαρακτηριστικά που έχουν επιλεγεί για το συγκεκριμένο σενάριο τηλεθέρμανσης

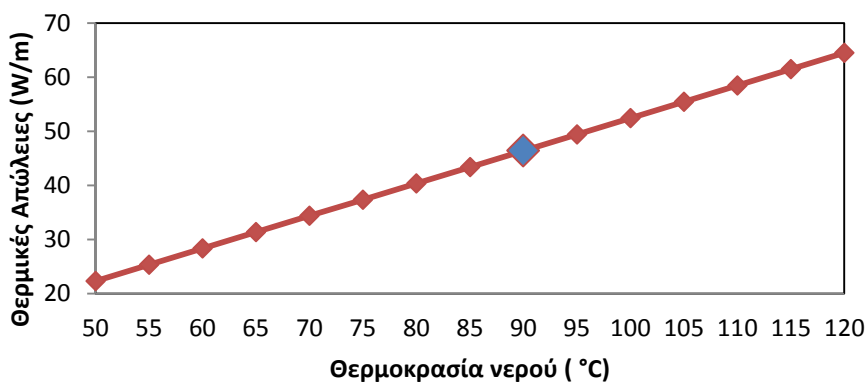
**Διάγραμμα 4: Θερμικές απώλειες συναρτήσει του πάχους της μόνωσης**



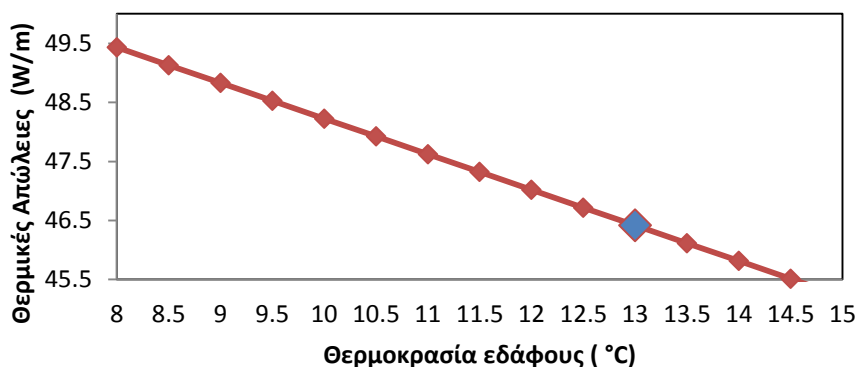
Διάγραμμα 5: Θερμικές απώλειες συναρτήσει του πάχους τοιχώματος του σωλήνα



Διάγραμμα 6: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού



Διάγραμμα 7: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της θερμοκρασίας του εδάφους





## 3.2 Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε, οι εναλλάκτες είναι υπεύθυνοι για τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών, από το θερμό ρεύμα στο ψυχρό. Στην περίπτωση μας, το ρευστό που θερμαίνεται από του 60°C στους 90°C είναι το νερό της τηλεθέρμανσης (ψυχρό ρεύμα), ενώ το ρευστό που δίνει θερμότητα διαφέρει ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο. Μελετήθηκαν λοιπόν δύο διαφορετικοί τύπων εναλλακτών, οι πλακοειδείς αντιροής, τύπου παρεμβύσματος (Gasket Plate heat exchangers) και οι εναλλάκτες αυλών-κελύφους (Shell-and-Tube heat exchangers), και παρακάτω αναλύεται η γενική διαδικασία διαστασιολόγησής τους, που προσαρμόζεται ανάλογα στο κάθε σενάριο.

### 3.2.1 Διαστασιολόγηση πλακοειδούς εναλλάκτη παρεμβύσματος

Αρχικά εφαρμόζεται ενεργειακός ισολογισμός στον εναλλάκτη [45]:

$$Q = m_h \cdot C p_h \cdot (T_{hi} - T_{ho}) = m_c \cdot C p_c \cdot (T_{co} - T_{ci})$$

Όπου οι δείκτες h, c συμβολίζουν το θερμό και ψυχρό ρεύμα αντίστοιχα, και οι δείκτες i, o την είσοδο και την έξοδο από τον εναλλάκτη. Έτσι με δοσμένη τη θερμική ισχύ  $Q=14.000$  [kW], τις θερμοκρασίες και την παροχή του ψυχρού ρεύματος που υπολογίστηκαν σε προηγούμενη **ενότητα**, τη θερμοκρασία εισόδου και τη παροχή του θερμού ρεύματος, μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου  $T_{ho}$ .

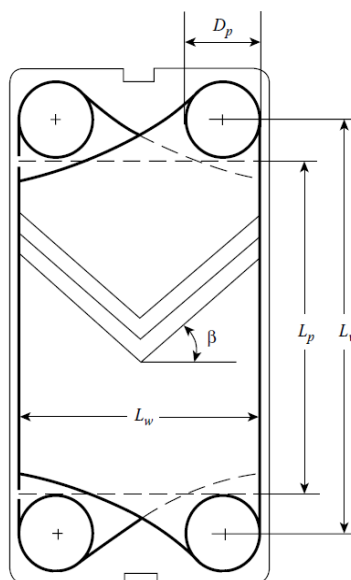
Πλέον μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς (*Logarithmic Mean Temperature Difference-LMTD*) για τον υπολογισμό της συνολικής απαιτούμενης επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας  $A_{req}$  [ $m^2$ ] ως [45]:

$$A_{req} = \frac{Q}{U \cdot LMTD}$$

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}\right)}$$

Με  $U$  τον ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]. Έτσι λοιπόν επιλύεται το παρακάτω σύστημα εξισώσεων μέσω επαναληπτικής διαδικασίας [43],[44], υποθέτοντας μια αρχική τιμή για την επιφάνεια  $A_{req}$ , το οποίο ολοκληρώνεται όταν η τελική τιμή της θερμικής ισχύος  $Q'$  γίνει ίση με τη ζητούμενη, όπως φαίνεται και στο λογικό διάγραμμα της **Εικόνας 15**.

Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός κάποιων χρήσιμων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εναλλάκτη υποθέτοντας τα ακόλουθα μεγέθη, που φαίνονται και στην παρακάτω **εικόνα**:



Εικόνα 14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πλάκας του εναλλάκτη [44]

- Πάχος πλάκας:  $t=0,8$  mm
- Απόσταση μεταξύ πλακών:  $b=4$  mm
- Γωνία Αυλακώσεων (Chevron Angle):  $\beta=60^\circ$
- Διάμετρος οπής εισόδου-εξόδου των ρευστών:  $D_p=200$  mm
- Πλάτος επιφάνειας συναλλαγής πλάκας:  $L_w=0,6$  m
- Ύψος επιφάνειας συναλλαγής πλάκας:  $L_{eff} = L_v=0,4$  έως 3,5 m

Ο συντελεστής μεγέθυνσης  $\varphi$ , ισούται με τον λόγο της πραγματικής επιφάνειας συναλλαγής της πλάκας  $A_{eff} = L_v \cdot L_w$  προς την προβαλλόμενη επιφάνεια  $A_p = L_p \cdot L_w = (L_v - D_p) \cdot L_w$ .

$$\varphi = \frac{A_{eff}}{A_p} = \frac{L_v}{L_v - D_p}$$

Επίσης υπολογίζεται η επιφάνεια του καναλιού μεταξύ των πλακών  $A_c$  [ $m^2$ ], και η υδραυλική διάμετρος  $D_h$  [m] του καναλιού για  $b \ll L_w$ , ως:

$$A_c = b \cdot L_w$$

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{2 \cdot (b - L_w \cdot \varphi)} = \frac{2 \cdot b}{\varphi}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο ακέραιος αριθμός των πλακών  $N_p$  και των καναλιών  $N_c$  κάθε ρεύματος ως:

$$N_p = \frac{A_T}{A_{eff}}$$

$$N_c = \frac{N_p - 1}{2}$$

Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός του  $U$  που επιτυγχάνεται από μία σειρά πράξεων σχετιζόμενες με τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του εναλλάκτη. Υπολογίζεται δηλαδή η μαζική ταχύτητα  $G_c$  [ $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$ ] στο κανάλι, ο τιμές των αριθμών Reynolds, Nusselt και Prandtl και τελικά η θερμική συναγωγιμότητα  $h$  του νερού σε κάθε ρεύμα [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ] [42].

$$G_c = \frac{m}{N_c \cdot A_c}$$

$$Re = \frac{G_c \cdot D_h}{\mu}$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k_{water}}$$

$$Nu = C_h \cdot (Re)^n (Pr)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17}$$

$$h = \frac{Nu \cdot k_{water}}{D_h}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{t}{k_{steel}} + R_f}$$

Όπου  $\mu_w$  η δυναμική συνεκτικότητα των ρευστών στη θερμοκρασία του τοιχώματος,  $R_f$  η αντίσταση λόγω επικαθίσεων που εκλέγεται σύμφωνα με τον **Πίνακα 15**, και  $C_h$ , η σταθερές που εκλέγονται από τον **Πίνακα 14**.

Τέλος υπολογίζεται η νέα ισχύς  $Q' = A_{req} \cdot U \cdot LMTD$  και συγκρίνεται με τη δοσμένη. Εφόσον διαφέρουν σημαντικά, επαναλαμβάνεται η διαδικασία, δίνοντας διαφορετικές τιμές στην επιφάνεια  $A_T$  έως ότου αυτή να συγκλίνει. Σε αυτή το σημείο είναι απαραίτητο να υπολογιστούν και οι πτώσεις πίεσης  $\Delta P$  [Pa] κάθε ρεύματος που θα πρέπει να είναι μικρότερες από τις μέγιστες επιτρεπόμενες πτώσεις πίεσης  $\Delta P_{max}$  που δίνονται από τον κατασκευαστή του εναλλάκτη. Για τον υπολογισμό της συνολικής πτώσης πίεσης κάθε ρεύματος έγιναν οι εξής υπολογισμοί [43],[44]:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p$$

Με  $\Delta P_f$  συμβολίζονται οι πτώσεις πίεσης λόγω τριβών στα κανάλια μεταξύ των πλακών και με  $\Delta P_p$  οι πτώσεις πίεσης κατά μήκος του καναλιού των οπών του εναλλάκτη και προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\Delta P_f = \frac{2 \cdot f \cdot L_v \cdot N_p \cdot G_c^2}{D_h \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.17}$$

$$f = \frac{K_p}{Re^m}$$

$$\Delta P_p = 1.4 \cdot N_p \cdot \frac{G_p^2}{2 \cdot \rho}$$

$$G_p = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D_p^2}$$

Όπου  $K_p$ ,  $m$  σταθερές που δίνονται από τον **Πίνακα 14**,  $N_p$  ο αριθμός των περασμάτων και  $G_p$  [ $\frac{kg}{m^2s}$ ] η μαζική ταχύτητα στις οπές.

Για τους υπολογισμούς έγιναν οι εξής παραδοχές:

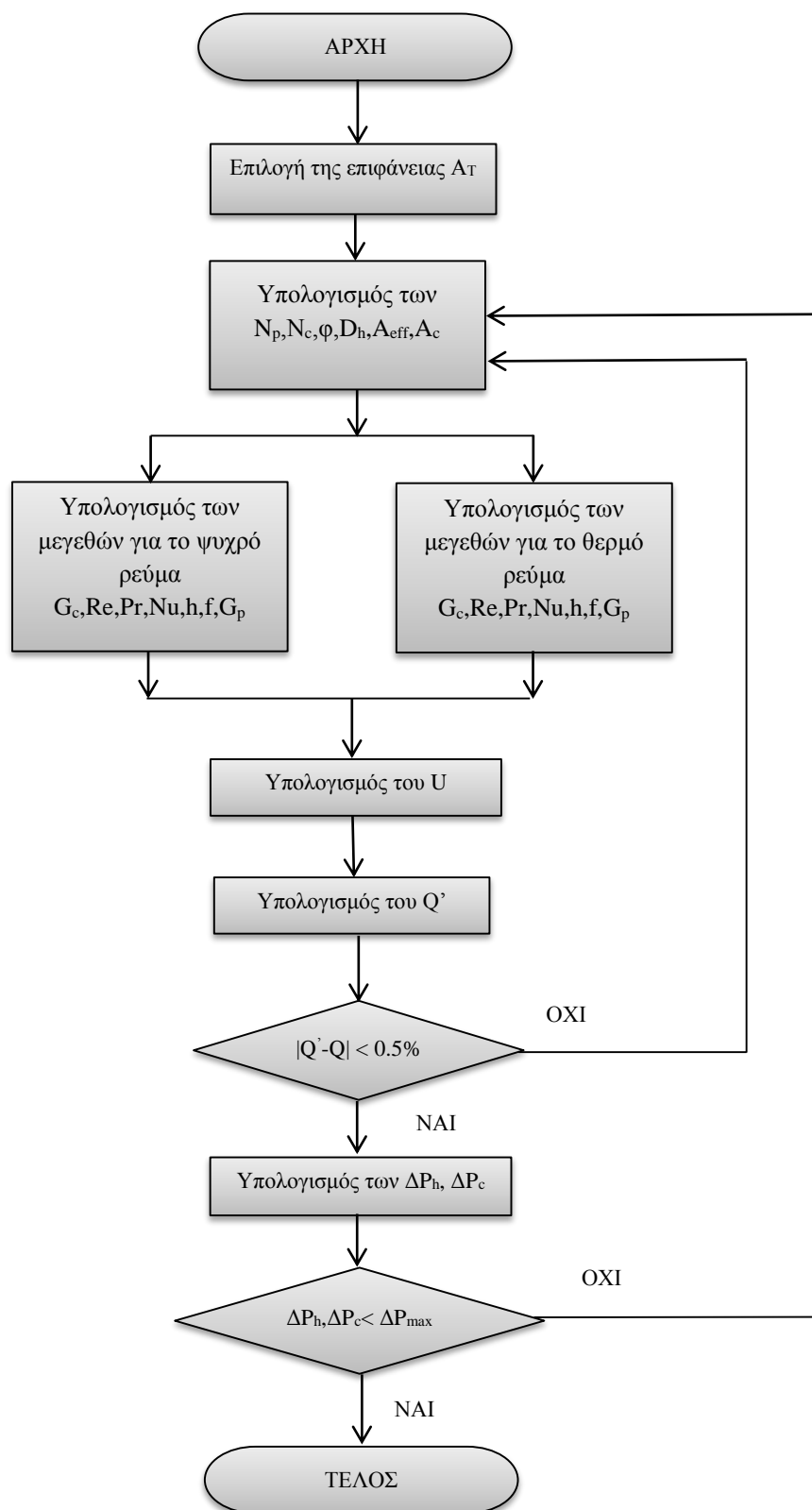
- Οι ιδιότητες του νερού ( $C_p$ ,  $\rho$ ,  $k$ ,  $\mu$ ) υπολογίστηκαν για τις μέσες θερμοκρασίες κάθε ρεύματος.
- Υλικό πλάκας επιλέχθηκε το ανοξείδωτο ατσάλι με θερμική αγωγιμότητα  $k_{steel}=16,5$  [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ].
- Αριθμός περασμάτων  $N_p=1$ .
- Η αντίσταση επικαθίσεων των δύο ρευμάτων εκτιμήθηκε σύμφωνα με τον **Πίνακα 15**.

**Πίνακας 14: Σταθερές για τον υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας και πτώσης πίεσης σε πλακοειδείς εναλλάκτες παρεμβύσματος μίας φάσης, συναρτήσει του αριθμού Reynolds και της γωνίας αυλάκωσης [42]**

Γωνία αυλάκωσης (°)	Αριθμός Reynolds	Μεταφορά Θερμότητας		Απώλειες Πίεσης	
		$C_h$	$n$	$K_p$	$m$
≤30	<10	0,718	0,349	50,000	1,000
	10-100	-	-	19,400	0,589
	>100	0,348	0,663	2,990	0,183
45	<15	0,718	0,349	47,000	1,000
	15-300	0,400	0,598	18,290	0,652
	>300	0,300	0,663	1,441	0,206
50	<20	0,630	0,333	34,000	1,000
	20-300	0,291	0,591	11,250	0,631
	>300	0,130	0,732	0,772	0,161
60	<40	0,562	0,326	24,000	1,000
	40-400	0,306	0,529	3,240	0,457
	>400	0,108	0,703	0,760	0,215
≥65	<50	0,562	0,326	24,000	1,000
	50-500	0,331	0,503	2,800	0,451
	>500	0,087	0,718	0,639	0,213

**Πίνακας 15: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών επικαθίσεων σε πλακοειδείς εναλλάκτες για διαφορετική ποιότητα νερού [44]**

Ποιότητα Νερού	Συντελεστής Επικαθίσεων [ $m^2K/W$ ]
Απιονισμένο	0,0000017
Μαλακό	0,0000034
Σκληρό	0,0000086
Θαλασσινό (Ακτής)	0,000086
Θαλασσινό (Ωκεανός)	0,000052
Ποταμίσιο	0,000086



Εικόνα 15: Λογικό διάγραμμα για τη διαδικασία διαστασιολόγησης πλακοειδούς εναλλάκτη παρεμβύσματος [43]

### 3.2.2 Διαστασιολόγηση εναλλάκτη αυλών-κελύφους

Για τη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη αυλών-κελύφους, έγινε χρήση έτοιμου εργαλείου σε περιβάλλον *Excel*. Να σημειωθεί πως επιλέχτηκε εναλλάκτης με σωλήνες που περιέχουν περύγια (*Finned Tubes*), τα οποία αυξάνουν την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας  $A$ , και ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $U$ , υπολογίζονται όπως και πριν, με τη μέθοδο της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασίας των δύο μέσων, σύμφωνα με τις γνωστές σχέσεις [45],[48]:

$$Q = A \cdot U \cdot LMTD$$

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}\right)}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}}$$

όπου:

- $d_{o/i}$  (m) : εξωτερική/εσωτερική διάμετρος σωλήνων
- $\lambda$  (W/m K) : θερμική αγωγιμότητα του υλικού των σωλήνων
- $h_o$  (W/m<sup>2</sup> K) : συντελεστής συναγωγής θερμότητας εργαζόμενου μέσου (καυσαέριο ή ατμός, αναλόγως το σενάριο)
- $h_i$  (W/m<sup>2</sup> K) : συντελεστής συναγωγής θερμότητας νερού

Παρακάτω γίνεται αναφορά των μεγεθών και παραμέτρων που έχει σαν είσοδο, και των υπολογισμένων μεγεθών που έχει σαν έξοδο το πρόγραμμα, για κάθε τμήμα του εναλλάκτη [46],[47].

#### Παράμετροι εισόδου για τους σωλήνες

- Εξωτερική και εσωτερική διάμετρος
- Απόσταση σωλήνων στο επίπεδο και κατά ύψος
- Αριθμός σωλήνων
- Υλικό και θερμική αγωγιμότητα

#### Υπολογιζόμενα μεγέθη για τους σωλήνες

- Πάχος τοιχώματος
- Αριθμός σωλήνων κάθετοι στη ροή του εργαζόμενου μέσου
- Συνολικό μήκος



- Συνολική εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια

#### Χαρακτηριστικά εισόδου για τα πτερύγια

- Ύψος και πάχος
- Αριθμός πτερυγίων ανά μήκος σωλήνα
- Υλικό και θερμική αγωγιμότητα

#### Υπολογιζόμενα μεγέθη για τα πτερύγια

- Μέγιστο και ισοδύναμο ύψος
- Εξωτερική διάμετρος
- Βήμα των πτερυγίων
- Συντελεστής εμπόδισης

#### Χαρακτηριστικά εισόδου για το κανάλι

- Πλάτος και ύψος

#### Υπολογιζόμενα μεγέθη για το κανάλι

- Μήκος
- Συνολική και ελεύθερη επιφάνεια καναλιού

#### Χαρακτηριστικά εισόδου για το εξωτερικά εργαζόμενο μέσο (στο κέλυφος)

- Παροχή
- Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου
- Δυναμική συνεκτικότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και πυκνότητα
- Θερμική αγωγιμότητα στη μέση θερμοκρασία

#### Υπολογιζόμενα μεγέθη για το εξωτερικά εργαζόμενο μέσο

- Αριθμός Prandtl
- Ταχύτητα και αριθμό Reynolds
- Πτώση πίεσης
- Αριθμός Nusselt
- Συντελεστής συναγωγής βάσει της εξωτερικής επιφάνειας των σωλήνων
- Ισοδύναμος συντελεστής συναγωγής



### Χαρακτηριστικά εισόδου για το εσωτερικά εργαζόμενο μέσο (στους σωλήνες)

- Παροχή
- Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου
- Μέση θερμοκρασία τοιχώματος
- Δυναμική συνεκτικότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και πυκνότητα στη μέση θερμοκρασία και στη θερμοκρασία τοιχώματος
- Θερμική αγωγιμότητα στη μέση θερμοκρασία και στη θερμοκρασία τοιχώματος

### Υπολογιζόμενα μεγέθη για το εσωτερικά εργαζόμενο μέσο

- Αριθμός Prandtl στη μέση θερμοκρασία και θερμοκρασία τοιχώματος
- Ταχύτητα και αριθμό Reynolds
- Συντελεστής αντίστασης ροής
- Πτώση πίεσης
- Αριθμός Nusselt
- Συντελεστής συναγωγής

## 3.3 Διαστασιολόγηση Θερμοδεξαμενής

Όπως αναφέρθηκε, η θερμοδεξαμενή σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης, χρησιμοποιείται για την κάλυψη της αυξημένης ζήτησης θερμικής ενέργειας που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Δηλαδή, όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση, η δεξαμενή αποφορτίζεται στέλνοντας ζεστό νερό στον οικισμό, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, φορτίζεται, αποθηκεύοντας το πλεόνασμα θερμού νερού. Καθώς το προφίλ της θερμικής ζήτησης του οικισμού δεν είναι διαθέσιμο, για να γίνει εκτίμηση του όγκου της δεξαμενής, γίνεται η υπόθεση πως, για την πιο κρύα μέρα του χειμώνα, η θερμική ζήτηση μπορεί να αυξηθεί κατά 50%, δηλαδή να φτάσει  $Q_{max} = 21 \text{ MW}_{th}$ . Έτσι λοιπόν, θεωρώντας πως η θερμοδεξαμενή πρέπει να καλύψει την πλεονάζουσα ζήτηση από τη μέση τιμή, κατά τις ώρες της ημέρας που λειτουργεί η τηλεθέρμανση, υπολογίζουμε την απαιτούμενη ενέργεια  $E$  [MWh] ως [32]:

$$E = (Q_{max} - Q) \cdot t$$

Όπου:

- $Q_{max} = 21 \text{ MW}_{th}$  η μέγιστη θερμική ζήτηση
- $Q = 14 \text{ MW}_{th}$  η μέση θερμική ζήτηση
- $t = 5 \text{ h}$  το χρονικό διάστημα που λειτουργεί η τηλεθέρμανση

Έτσι υπολογίζεται ότι η ενέργεια που πρέπει να διαθέσει η θερμοδεξαμενή ισούται με:

$$E = 35 \text{ MWh} = 126.000 \text{ MJ} = 126.000.000 \text{ kJ}$$

Για τον υπολογισμό του όγκου της δεξαμενής εφαρμόζεται η σχέση:

$$E = C_{p,water} \cdot \Delta T \cdot \rho_{water} \cdot V \rightarrow V = \frac{E}{C_{p,water} \cdot \Delta T \cdot \rho_{water}}$$

Όπου  $E=126.000.000 \text{ kJ}$ ,  $\Delta T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{water}=978 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ ,  $C_p=4,191 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} \right]$ . Έτσι ο όγκος που προκύπτει είναι:

$$V=1025 \text{ m}^3$$

Σε ότι αφορά τις διαστάσεις, οι περισσότερες θερμοδεξαμενές έχουν σχήμα κυλινδρικό, και σχεδιάζονται συνήθως με κριτήριο το λόγο ύψους/διάμετρο, που θα πρέπει να ξεπερνά το 1,5. Με βάση την ενέργεια που προσδίδει η θερμοδεξαμενή, θα εκτιμηθεί παρακάτω και το αντίστοιχο κόστος της [32].

### 3.4 Ανάπτυξη σεναρίων τηλεθέρμανσης

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται η επιλογή και η ανάλυση τεσσάρων διαφορετικών σεναρίων παραγωγής της απαιτούμενης θερμικής ισχύος που θα χρησιμοποιηθεί για τη τηλεθέρμανση του οικισμού, από το σταθμό συμπαραγωγής. Μελετάται η επίδραση που θα έχει η εφαρμογή κάθε σεναρίου στην λειτουργία του σταθμού, η αποδοτικότητά τους αλλά και το κόστος υλοποίησης, ώστε τελικά να γίνει σύγκριση και να βρεθεί η βέλτιστη επιλογή.

Το μέσο θερμικό φορτίο της τηλεθέρμανσης είναι δεδομένο και ίσο με  $14 \text{ MW}_{th}$ , ενώ η ετήσια απαιτούμενη ενέργεια ισούται με  $8.400 \text{ MWh}$ . Με βάση αυτά τα στοιχεία η μελέτη έγινε για 600 ώρες τηλεθέρμανσης το χρόνο, δηλαδή για τη χρήση ζεστού νερού θέρμανσης κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών (4 μήνες επί 5 ώρες ημερησίως). Τέλος, να αναφερθεί πως αξιοποιήθηκε *αρχείο δεδομένων* του εργοστασίου, με τις ωριαίες μετρήσεις διαφόρων μεγεθών που σχετίζονται με τη λειτουργία του σταθμού, για το έτος 2014.

### 3.4.1 Σενάριο 1: Χρήση των καυσαερίων του λέβητα για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης

Εδώ μελετήθηκε η περίπτωση να χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης αυλών-κελύφους και να τοποθετηθεί στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας κατάντι τού προθερμαντήρα (ECO). Έτσι, στο κέλυφος θα εισέρχεται το καυσαέριο που θα δίνει μέρος της θερμότητάς του στο νερό, το οποίο θα κυκλοφορεί στους αυλούς. Για τη διασφάλιση της συνεχούς λειτουργίας της τηλεθέρμανσης και της παροχής ζεστού νερού, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δύο τέτοιοι εναλλάκτες, ένας σε κάθε λέβητα ανάκτησης θερμότητας, καθώς όπως αναφέρθηκε ο σταθμός διαθέτει δύο σειρές αεριοστρόβιλων που λειτουργούν εναλλάξ. Με βάση τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων (**Πίνακας 16**) πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση του εναλλάκτη και τα αποτελέσματα καταγράφονται στον **Πίνακα 17**.

Πίνακας 16: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη

	Νερό Τηλεθέρμανσης	Καυσαέρια
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)	60	168
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	90	137,4
Παροχή (kg/s)	111,27	417,21
Πτώση Πίεσης (mbar)	226	1

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά εναλλάκτη αυλών-κελύφους

Τύπος εναλλάκτη	Αυλών-Κελύφους
Υλικό	St35.8
Ύψος (m)	17,7
Πλάτος (m)	5,7
Επιφάνεια Εναλλαγής Θερμότητας (m <sup>2</sup> )	2826
Συνολικό Μήκος Σωλήνων (m)	16.655
Ολικός Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (W/m <sup>2</sup> K)	63,7

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 16**, με τη χρήση του εναλλάκτη αξιοποιείται περαιτέρω η θερμότητα των καυσαερίων, δηλαδή η απορριπτόμενη στο περιβάλλον θερμότητα. Επίσης η πτώση πίεσης κατά τη ροή των καυσαερίων μέσα από τον εναλλάκτη υπολογίστηκε αρκετά μικρή, το οποίο είναι θετικό καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα επηρεαζόταν η λειτουργία του αεριοστρόβιλου σε επίπεδο ισχύος και βαθμού απόδοσης. Το μόνο αρνητικό που παρουσιάζεται κατά την υλοποίηση αυτού του σεναρίου είναι ο περιορισμένος διαθέσιμος χώρος εντός του λέβητα. Πρέπει δηλαδή να τροποποιηθεί κατάλληλα ο λέβητας ώστε να χωρέσει ο εν λόγω εναλλάκτης, χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία του.

### 3.4.2 Σενάριο 2: Απομάστευση ατμού μέσης πίεσης για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης

Εδώ εξετάστηκε η περίπτωση για θέρμανση του νερού της τηλεθέρμανσης με τη χρήση απομαστευόμενου ατμού μέσης πίεσης. Για την εναλλαγή θερμότητας των δύο ρευμάτων, υπολογίστηκε η απαιτούμενη ποσότητα του ατμού με ισολογισμό ενέργειας, και έγινε διαστασιολόγηση τριών εναλλακτών αυλών-κελύφους σε σειρά, καθώς ο ατμός που χρησιμοποιείται αλλάζει φάση κατά τη διάρκεια της μετάδοσης θερμότητας. Έπειτα από υπολογισμούς προκύπτει ότι η απαιτούμενη παροχή ατμού είναι  $m_D = 5,16 \frac{kg}{s} = 18,576 \frac{t}{h}$  και η συνολική επιφάνεια των εναλλακτών ισούται με  $A=403 m^2$ .

Μειώνοντας την παροχή του ατμού στον αμοστρόβιλο θα μειωθεί και η ηλεκτρική ισχύς, που είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ώστε να γίνει η οικονομική αξιολόγηση κάθε σεναρίου. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται όμως σε αυτό το σημείο είναι το εξής. Ο αμοστρόβιλος έχει τεχνικό ελάχιστο λειτουργίας περίπου ίσο με  $5.6 MW$ , το οποίο σημαίνει πως δεν μπορεί να μειωθεί κάτω από αυτή την τιμή η ηλεκτρική ισχύς. Καθώς όμως στο μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου λειτουργεί σε μερικό φορτίο (περίπου  $8MW$ ), η απομάστευση ατμού για την τηλεθέρμανση είναι πιθανό να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή κάτω από το τεχνικό ελάχιστο. Εξετάστηκε λοιπόν, για το διάστημα του χρόνου που λειτουργεί η τηλεθέρμανση, πόσες ώρες η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πέφτει κάτω από το ελάχιστο όριο, και πόσο επιπλέον καύσιμο χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί στη μετάκαυση, ώστε να εξασφαλιστεί η λειτουργία του αμοστρόβιλου τουλάχιστον στο επίπεδο του τεχνικού ελαχίστου.

Κάνοντας χρήση του προγράμματος *GateCycle*, στο οποίο υπάρχει ήδη μοντελοποιημένη η λειτουργία του σταθμού, προστέθηκε ο ζητούμενος εναλλάκτης και παρατηρήθηκε ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγει ο αμοστρόβιλος μειώνεται κατά  $4,035 MW_e$ . Έτσι, για τις 600 ώρες λειτουργίας της τηλεθέρμανσης, με βάση το αρχείο *Excel* που περιέχει όλες τις μετρήσεις, υπολογίστηκε σε ποιές ώρες αυτού του διαστήματος απαιτείται επιπλέον μετάκαυση, και πόσο φυσικό αέριο πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ώστε η ηλεκτροπαραγωγή να μην πέσει χαμηλότερα από το τεχνικό ελάχιστο των  $5,6MW_e$ .

Ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος  $Q_f$  [MW] που απαιτείται από το καύσιμο ώστε να παραχθεί ο ζητούμενος ατμός γίνεται με τη σχέση:

$$Q_f = \frac{m_D' \cdot \Delta h}{n_b}$$

- $m_D'$  η παροχή ατμού που χρειάζεται ώστε η παραγωγή ισχύος να φτάσει το κατώτατο όριο των 5,6MW<sub>e</sub>.
- $\Delta h = 2,4 \frac{MJ}{kg}$  η διαφορά ενθαλπίας του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο του λέβητα ανάκτησης θερμότητας.
- $n_b = 0,7$  ο βαθμός απόδοσης του λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπως προκύπτει από τα δεδομένα (DCS).

Όπως υπολογίστηκε πιο πάνω, η απομάστευση ατμού παροχής μάζας  $m_D = 18,576 \frac{t}{h}$  ισοδυναμεί με μείωση της παραγόμενης ισχύος κατά 4,035 MW, δηλαδή η απομείωση της ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με  $\frac{4,035 MW}{18,576 \frac{t}{h}} = 0,217 MWh$  ανά τόνο ατμού. Αυτό σημαίνει πως, για παράδειγμα, αν η ισχύς του αμοστροβίλου έχει πέσει στα 3,965 MW, τότε απαιτείται αύξηση κατά  $(5,6-3,965)MW = 1,635 MW$ , δηλαδή ο ατμός που πρέπει να παραχθεί με τη μετάκαυση ισούται με  $m_D' = \frac{1,635 MW}{0,217 \frac{MWh}{t}} = 7,53 \frac{t}{h}$ . Στο παράδειγμα αυτό, που αφορά μια συγκεκριμένη ώρα λειτουργίας του σταθμού, προκύπτει από τα παραπάνω ότι  $Q_f = 7,13MW$ . Ομοίως υπολογίζεται για κάθε ώρα η θερμική ισχύς του καυσίμου που απαιτείται.

Συνοπτικά λοιπόν, σε αυτό το σενάριο, η λειτουργία της τηλεθέρμανσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ισχύος του αμοστροβίλου, και σε ορισμένες περιπτώσεις, την επιπλέον καύση φυσικού αερίου το οποίο προφανώς θα έχει αρνητική επίδραση στην οικονομική ανάλυση, που θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

### 3.4.3 Σενάριο 3: Χρήση του τροφοδοτικού νερού για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης

Εξετάστηκε η περίπτωση να χρησιμοποιηθεί πλακοειδής εναλλάκτης με τον οποίο θα επιτυγχάνεται συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του τροφοδοτικού νερού (feeding water) πριν την εισαγωγή του στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας, και του νερού τηλεθέρμανσης. Σε αυτό το σημείο γίνεται η παραδοχή πως η μείωση της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού δεν επηρεάζει την αμοσπαραγωγή αλλά μόνο τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Στον **Πίνακα 18** καταγράφονται τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων, και στον **Πίνακα 19** τα χαρακτηριστικά του εναλλάκτη, όπως αυτά προέκυψαν από τη διαδικασία της διαστασιολόγησης.

Πίνακας 18: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη

	Νερό Τηλεθέρμανσης	Τροφοδοτικό νερό
Θερμοκρασία Εισόδου ( °C)	60	125
Θερμοκρασία Εξόδου ( °C)	90	70,7
Παροχή (kg/s)	111,27	61,1
Πτώση Πίεσης (mbar)	163	52

Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά πλακοειδούς εναλλάκτη

Τύπος εναλλάκτη	Εναλλάκτης Παρεμβύσματος
Υλικό	Ανοξείδωτο Ατσάλι
Ύψος (m)	1,8
Πλάτος (m)	0,6
Επιφάνεια Εναλλαγής Θερμότητας (m <sup>2</sup> )	285
Αριθμός πλακών	265
Ολικός Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (W/m <sup>2</sup> K)	2397,66

Επίσης, υπολογίζεται και η νέα θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων με την ακόλουθη διαδικασία:

Αρχικά, υπολογίζεται η θερμοχωρητικότητα  $C_p$  των καυσαερίων, σύμφωνα με τη σύστασή τους, από την ακόλουθη σχέση [52]:

$$\begin{aligned}
 C_p = & (b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3 + b_4 \cdot \theta^4) \cdot X_{N_2} \\
 & + (b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3 + b_4 \cdot \theta^4) \cdot X_{O_2} \\
 & + (b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3 + b_4 \cdot \theta^4) \cdot X_{CO_2} \\
 & + (b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3 + b_4 \cdot \theta^4) \cdot X_{H_2O} \\
 & + (b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3 + b_4 \cdot \theta^4) \cdot X_{Ar}
 \end{aligned}$$

Όπου οι τιμές των συντελεστών  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  και η σύσταση των καυσαερίων φαίνονται στον **Πίνακα 20**. Οι υπολογισμοί γίνονται για τη μέση θερμοκρασία των καυσαερίων, τα οποία εισέρχονται στον λέβητα στους 550°C και εξέρχονται στους 168°C στην κανονική λειτουργία του σταθμού.

Πίνακας 20: Σύσταση και συντελεστές για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας των καυσαερίων [52]

	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ar
<b>b0</b>	1,03693	0,90243	0,828204	1,85042	0.5192
<b>b1</b>	2,78472E-05	0,000361332	0,000981404	0,000288423	-
<b>b2</b>	3,92985E-07	-1,64362E-07	-7,9005E-07	7,14063E-07	-
<b>b3</b>	-3,13739E-10	2,16244E-11	3,28413E-10	-4,78786E-10	-
<b>b4</b>	7,20044E-14	3,54211E-15	-5,466E-14	9,43951E-14	-
<b>Σύσταση X</b>	0,7439	0,1361	0,0324	0,0787	0,0089

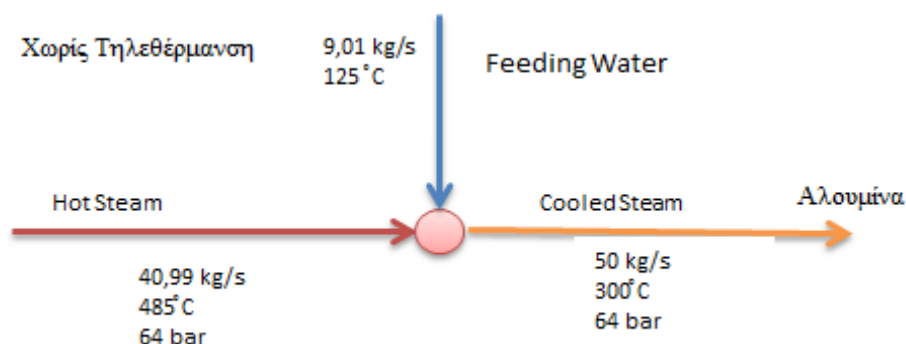
Στη συνέχεια εφαρμόζεται ισολογισμός ενέργειας στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας [52], [53]:

$$Q_{\text{AA}\theta} = m_G \cdot c_{pG} \cdot (\theta_{G_{in}} - \theta_{G_{out}}) = [m_D \cdot (h_u - h_w)]_{M\Pi} + [m_D \cdot (h_u - h_w)]_{Y\Pi} + Q_{\text{A}\Pi\Omega\Lambda}$$

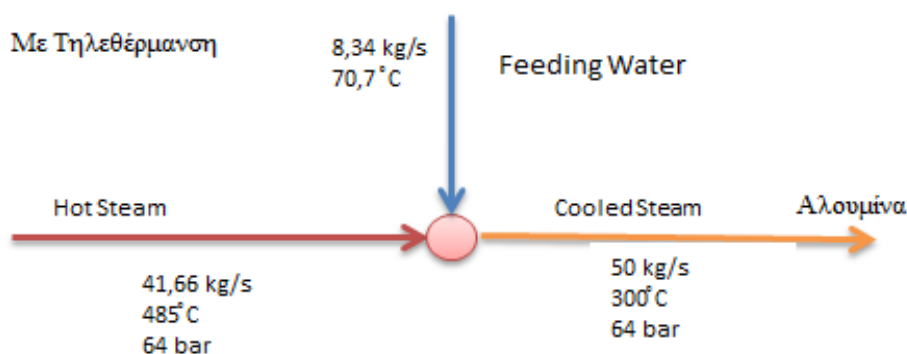
- $m_g, m_D$  οι παροχές του καυσαερίου και του ατμού αντίστοιχα [kg/s].
- $Q_{\text{A}\Pi\Omega\Lambda} = 0,04 \times Q_{\text{AA}\theta}$ , το ποσοστό των απωλειών.
- $\theta_{G_{in}}, \theta_{G_{out}}$  οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του καυσαερίου από τον λέβητα.
- $h_u, h_w$  οι ενθαλπίες του ατμού και του νερού αντίστοιχα, που υπολογίζονται από διαθέσιμους πίνακες νερού-ατμού.
- Οι δείκτες ΜΠ, ΥΠ αναφέρονται στη μέση και στην υψηλή πίεση του ατμού που παράγεται στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Έτσι υπολογίστηκε ότι η νέα θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι **140.1 °C**, το οποίο σημαίνει πως εφαρμόζοντας αυτό το σενάριο, όπως και στο **σενάριο 1**, αξιοποιείται μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τηλεθέρμανσης.

Όπως έχει αναφερθεί, το μεγαλύτερο μέρος του ατμού μέσης και υψηλής πίεσης που παράγεται στο λέβητα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή της αλουμίνας, ενώ το υπόλοιπο κινεί τον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ένα μέρος του τροφοδοτικού νερού, πριν αυτό εισαχθεί στον λέβητα, απάγεται και ψεκάζει τον ατμό, για να τον ψύξει στην επιθυμητή θερμοκρασία που απαιτείται, για την παραγωγή της αλουμίνας. Εφόσον λοιπόν μειώνεται η θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού (από τους 125 °C στους 70,7 °C) τότε είναι λογικό να απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού, δηλαδή περισσότερη ποσότητα ατμού, όπως φαίνεται στις παρακάτω **εικόνες**:



Εικόνα 16: Ψύξη του ατμού πριν την παραγωγή αλουμίνιας, χωρίς τον εναλλάκτη για την τηλεθέρμανση



Εικόνα 17: Ψύξη του ατμού πριν την παραγωγή αλουμίνιας, με τον εναλλάκτη για την τηλεθέρμανση

Η μικρή αυτή αύξηση της παροχής του ατμού, που υπολογίστηκε με ισολογισμό ενέργειας και μάζας στο σημείο του κόμβου, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ατμού που καταλήγει στον αμοστρόβιλο κατά  $0,67 \frac{kg}{s} = 2,416 \frac{t}{h}$ , που αντιστοιχεί σε μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος κατά  $0,4463 MW_e$  όπως υπολογίστηκε με ισολογισμό ενέργειας στην άτρακτο του αμοστροβίλου [52],[53]:



$$P_{\eta\lambda} = n_m \cdot n_G \cdot m_D \cdot (h_{D_{in}} - h_{D_{out}})$$

- $n_m, n_G$  οι μηχανικοί βαθμοί απόδοσης του στροβίλου και της γεννήτριας.
- $m_D$  η νέα παροχή ατμού στον αμοστροβίλο.
- $h_{D_{in}}, h_{D_{out}}$  η ενθαλπία του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο του αμοστροβίλου.

Όλα οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών σε κάθε σενάριο, προέκυψαν από τις καταγραφές του συστήματος ελέγχου της μονάδας (Digital Control System-DCS).

### 3.4.4 Σενάριο 4: Χρήση του συμπυκνώματος επιστροφής για θέρμανση του νερού τηλεθέρμανσης

Το τελευταίο σενάριο που μελετήθηκε είναι η θέρμανση του νερού από το συμπύκνωμα (Condensate Water) που επιστρέφει από την αλουμίνα. Το συμπύκνωμα αυτό είναι ουσιαστικά ο ατμός που έδωσε τη θερμότητα για την επεξεργασία του βωξίτη και έγινε νερό, το οποίο επιστρέφει πάλι πίσω στο σταθμό συμπαραγωγής και καταλήγει στο τροφοδοτικό δοχείο (Feeding water tank) για να συνεχίσει τον κύκλο και να ξαναγίνει ατμός. Έτσι λοιπόν, για τη μετάδοση θερμότητας και σε αυτή την περίπτωση, έγινε διαστασιολόγηση πλακοειδούς εναλλάκτη παρεμβύσματος με το θερμό ρεύμα να είναι το συμπύκνωμα επιστροφής και το ψυχρό ρεύμα να είναι το νερό τηλεθέρμανσης που θα καταλήξει στον οικισμό των Άσπρων Σπιτιών. Τα χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 21** και τα χαρακτηριστικά του εναλλάκτη στον **Πίνακα 22**, όπως αυτά υπολογίστηκαν:

Πίνακας 21: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη

	Νερό Τηλεθέρμανσης	Νερό Συμπυκνωμάτων
Θερμοκρασία Εισόδου (°C)	60	150
Θερμοκρασία Εξόδου (°C)	90	87,6
Παροχή (kg/s)	111,27	52,8
Πτώση Πίεσης (mbar)	177	43

Πίνακας 22: Χαρακτηριστικά πλακοειδούς εναλλάκτη

Τύπος εναλλάκτη	Εναλλάκτης Παρεμβύσματος
Υλικό	Ανοξείδωτο Ατσάλι
Ύψος (m)	1
Πλάτος (m)	0,6
Επιφάνεια Εναλλαγής Θερμότητας (m <sup>2</sup> )	112
Αριθμός πλακών	187
Ολικός συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (W/m <sup>2</sup> *K)	2996,61

Σε αυτό το σημείο διαπιστώνεται πως τα συμπυκνώματα πλέον επιστρέφουν ως υπόψυκτο νερό στους 87,6°C , πράγμα το οποίο θα δημιουργήσει πρόβλημα και θα επηρεάσει τη λειτουργία του συστήματος.

Αρχικά, ένα μέρος του συμπυκνώματος αυτού χρησιμοποιείται για τη προθέρμανση του φυσικού αερίου της εγκατάστασης όπου η τυπική θερμοκρασία προθέρμανσης είναι 70 °C, οπότε μειώνοντας τη θερμοκρασία του θα επηρεάζεται και η διαδικασία της προθέρμανσης.

Το υπόλοιπο συμπύκνωμα πριν καταλήξει στο τροφοδοτικό δοχείο, περνάει από το δοχείο αποτόνωσης (Flash Tank), όπου και διαχωρίζεται σε ατμό ο οποίος εισέρχεται στον απαεριωτή (Deaerator), και σε νερό το οποίο εισέρχεται στο τροφοδοτικό δοχείο. Όμως, καθώς το συμπύκνωμα στην πίεση του δοχείου αποτόνωσης είναι πλέον εκτός της διαφασικής περιοχής, υπόψυκτο νερό, επηρεάζεται η λειτουργία του δοχείου αποτόνωσης το οποίο είναι σχεδιασμένο ώστε να δέχεται νερό σε διαφασική κατάσταση και να το διαχωρίζει. Κατά συνέπεια, επηρεάζεται και η λειτουργία του απαεριωτή, ο οποίος βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το τροφοδοτικό δοχείο.

Συμπερασματικά λοιπόν, με την εφαρμογή αυτού του σεναρίου, έπειτα από τη μελέτη που έγινε παρατηρείται ότι παρουσιάζονται πολλές τεχνικές επιπλοκές. Για να είναι λοιπόν εφαρμόσιμο, πρέπει να γίνει αναθέρμανση του συμπυκνώματος με ατμό, πριν το δοχείο αποτόνωσης, ώστε η ελάχιστη θερμοκρασία του σε εκείνο το σημείο να είναι 130 °C. Όπως διαπιστώνεται λοιπόν, το σενάριο αυτό δεν συμφέρει να υλοποιηθεί οπότε δεν θα μελετηθεί περαιτέρω στην οικονομική ανάλυση που θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

## 4 Οικονομική ανάλυση και αξιολόγηση της επένδυσης

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά κάποιοι οικονομικοί όροι και οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης μιας επένδυσης, ώστε να πραγματοποιηθεί στη συνέχεια οικονομική ανάλυση κάθε σεναρίου, αφού γίνει πρώτα η κοστολόγηση του απαιτούμενου εξοπλισμού και υπολογιστούν τα έξοδα και τα έσοδα σε κάθε περίπτωση. Σκοπός δηλαδή είναι να διαπιστωθεί πιο σενάριο είναι πιο αποδοτικό από οικονομικής άποψης, και τελικά, να αξιολογηθεί αν μια τέτοια επένδυση είναι συμφέρουσα ή όχι.

### 4.1 Οικονομικοί όροι

#### 4.1.1 Επένδυση

Επένδυση ονομάζεται η μετατροπή του αποταμιευτικού κεφαλαίου (χρήματα) σε πραγματικό κεφάλαιο (μηχανήματα, εγκαταστάσεις). Με άλλα λόγια, επένδυση είναι η διάθεση χρηματικών ποσών για τη δημιουργία νέου παραγωγικού κεφαλαίου, το όφελος της οποίας προκύπτει μελλοντικά, βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα. Προτού πραγματοποιηθεί μια επένδυση, είναι απαραίτητο να γίνει οικονομική αξιολόγηση με τη χρήση διαφόρων κριτηρίων, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι συμφέρουσα, και σε πιο χρονικό διάστημα θα αρχίσει να αποδίδει κέρδη. Στην περίπτωση μας, η χρήση κεφαλαίου για τη δημιουργία του συστήματος τηλεθέρμανσης αποτελεί μια επένδυση, η οποία όμως δεν αποσκοπεί καθαρά στην δημιουργία χρηματικού κέρδους για την επιχείρηση, αλλά κυρίως στην εξυπηρέτηση των κατοίκων του οικισμού, ώστε να προμηθεύονται θερμική ισχύ σε καλύτερη τιμή. Καθώς λοιπόν το βασικό κόστος των συστημάτων τηλεθέρμανσης είναι το αρχικό, επιδιώκεται η διαστασιολόγηση του συστήματος για μεγάλο χρονικό ορίζοντα, με ταυτόχρονη μείωση του λειτουργικού κόστους, το οποίο εκτιμάται ότι είναι περίπου το 1-2% του συνολικού κόστους [54],[55].

#### 4.1.2 Απλός και σύνθετος τόκος

Ως τόκος ορίζεται η αποζημίωση σε χρήματα που είναι υποχρεωμένος να δώσει ο οφειλέτης στο δανειστή για μια συγκεκριμένη περίοδο. Χωρίζεται στον απλό τόκο, ο οποίος χρεώνεται μόνο στο αρχικό κεφάλαιο, και στον σύνθετο τόκο, στην περίπτωση του οποίου σε κάθε περίοδο υπολογίζεται ο αντίστοιχος τόκος και κεφαλαιοποιείται έτσι ώστε ο τόκος της επόμενης περιόδου να υπολογίζεται επί των κεφαλαιοποιημένων ποσών των προηγούμενων περιόδων. Στην περίπτωση μας, θεωρείται ότι τα κεφάλαια που χρησιμοποιούνται για την επένδυση είναι ίδια κεφάλαια, χωρίς να έχει γίνει κάποιος δανεισμός [54],[55].



### 4.1.3 Οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης

Ως οικονομικός κύκλος ζωής μιας επένδυσης θεωρείται η χρονική περίοδος κατά τη διάρκεια της οποίας ανακτάται το αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο. Κατά κανόνα, ο οικονομικός κύκλος πρέπει να είναι ίσος ή μικρότερος της πραγματικής ζωής του βασικού εξοπλισμού της επένδυσης. Στη συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχθηκε ως οικονομικός κύκλος ζωής τα 20 χρόνια.

### 4.1.4 Ρυθμός Απόσβεσης (Depreciation Rate)

Στην οικονομική ανάλυση που πραγματοποιείται, χρησιμοποιείται η μέθοδος της σταθερής απόσβεσης, σύμφωνα με την οποία ο συντελεστής απόσβεσης είναι σταθερός κάθε χρόνο και ο υπολογισμός με βάση το συντελεστή γίνεται πάντοτε από την αρχική αξία του στοιχείου. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ετήσιος συντελεστής απόσβεσης ίσος με 10%.

### 4.1.5 Επιτόκιο Αναγωγής

Το επιτόκιο αναγωγής  $i$  εκφράζει την επιθυμητή απόδοση των ιδίων κεφαλαίων. Στην Ελλάδα η τιμή του κυμαίνεται από 6-9%. Η τιμή που επιλέχθηκε είναι  $i=8\%$ .

## 4.2 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης επένδυσης

Προκειμένου να είναι οικονομικά βιώσιμη μια επένδυση θα πρέπει η συνολική αξία των ωφελειών που θα προκύψουν στον κύκλο ζωής της, να είναι μεγαλύτερη από τις συνολικές δαπάνες, δηλαδή το αρχικό κόστος και το κόστος λειτουργίας. Υπάρχουν λοιπόν κάποια κριτήρια έτσι ώστε να μπορεί ο επενδυτής να αξιολογήσει αν τον συμφέρει να χρηματοδοτήσει το έργο ή όχι [55].

#### 4.2.1 Κριτήριο Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV)

Καθαρή παρούσα αξία είναι το όφελος μια επένδυσης που προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά το κύκλο ζωής της επένδυσης. Μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση [55]:

$$NPV = -k + \sum_{t=1}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} + \frac{SV_N}{(1+i)^N}$$

- $k$  η αρχική δαπάνη
- $N$  ο οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης
- $R_t$  το ετήσιο καθαρό όφελος
- $i$  το επιτόκιο αναγωγής που εκφράζει την επιθυμητή απόδοση των ιδίων κεφαλαίων
- $SV_N$  η απομένουσα αξία της επένδυσης στο τέλος του οικονομικού κύκλου ζωής  $N$

Έτσι διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις μετά τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας:

- $NPV > 0$ , που σημαίνει πως η επένδυση είναι βιώσιμη.
- $NPV = 0$ , που σημαίνει πως η επένδυση είναι οριακά βιώσιμη.
- $NPV < 0$ , που σημαίνει πως η επένδυση είναι μη συμφέρουσα.

#### 4.2.2 Κριτήριο του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης της Επένδυσης (Internal Rate of Return-IRR)

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR είναι η τιμή του επιτοκίου αγοράς, που κάνει την παρούσα αξία μια σειράς πληρωμών και εισπράξεων ίση με το μηδέν [55]. Για την αξιολόγηση της επένδυσης λοιπόν, συγκρίνεται ο βαθμός αυτός με το επιτόκιο αναγωγής και διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- $IRR < i$ , η επένδυση είναι αντιοικονομική
- $IRR > i$ , η επένδυση είναι βιώσιμη

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης από το επιτόκιο αναγωγής, τόσο πιο συμφέρουσα χαρακτηρίζεται η επένδυση.

### 4.2.3 Κριτήριο περιόδου αποπληρωμής (Payback Period-PBP)

Η περίοδος αποπληρωμής εκφράζει τον ακριβή χρόνο απόσβεσης της επένδυσης, δηλαδή το χρόνο όπου η καθαρά παρούσα αξία γίνεται θετική για πρώτη φορά. Υπολογίζεται απλά με τη μέθοδο των τριών, ανάμεσα στο τελευταίο έτος που έχουμε αρνητική σχέση εσόδων-αρχικού κόστους, και στο πρώτο έτος που η σχέση αυτή είναι θετική [55].

## 4.3 Κοστολόγηση του συστήματος τηλεθέρμανσης

Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της επένδυσης, πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί το κόστος της, το οποίο χωρίζεται στο αρχικό κόστος και στο ετήσιο κόστος λειτουργίας, αλλά και τα ετήσια έσοδα, ώστε με την εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων να κρίνει ο επενδυτής αν είναι συμφέρουσα ή όχι. Έτσι λοιπόν παρακάτω, υπολογίζεται για κάθε σενάριο το αρχικό κόστος του τεχνολογικού εξοπλισμού όπως αυτός διαστασιολογήθηκε, τα ετήσια έξοδα λειτουργίας του συστήματος, και γίνεται εκτίμηση των ετήσιων εσόδων.

### 4.3.1 Αρχικό κόστος

Το αρχικό κόστος είναι αυτό το οποίο καλείται να πληρώσει ο επενδυτής κυρίως για την απόκτηση του τεχνολογικού εξοπλισμού, και αποτελεί το πιο βασικό κόστος στα συστήματα τηλεθέρμανσης. Το συγκεκριμένο σύστημα τηλεθέρμανσης που μελετάται έχει τα εξής αρχικά έξοδα:

#### 4.3.1.1 Τιμή εναλλακτών θερμότητας

Οι τιμές των εναλλακτών θερμότητας για κάθε σενάριο εκτιμήθηκαν σε σχέση με εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται ήδη στο σταθμό συμπαραγωγής, ανάλογα με τον τύπο του εναλλάκτη και τη συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Το κόστος του πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας στο *σενάριο 3 (κατασκευάστρια εταιρεία Alfa Laval)* με διαστάσεις αυτές που προέκυψαν από τη διαστασιολόγηση είναι:

$$\text{Κόστος πλακοειδή εναλλάκτη} = 99.750\text{€}$$

Για τους σωληνοειδείς εναλλάκτες των *σεναρίων 1 και 2*, εκτιμήθηκε η τιμή τους με βάση τη συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, και το κόστος αγοράς προέκυψε αντίστοιχα για κάθε σενάριο:

$$\text{Κόστος σωληνοειδή εναλλάκτη} = 2 \times 419.490 = 838.980 \text{€}$$

$$\text{Κόστος σωληνοειδή εναλλάκτη} = 80.119 \text{€}$$

*Υπενθύμιση:* Στο σενάριο 1, απαιτούνται δύο εναλλάκτες θερμότητας, ένας για κάθε λέβητα.

#### 4.3.1.2 Τιμή θερμοδεξαμενής

Για τη θερμοδεξαμενή, σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει, το κόστος εκτιμάται ως 0,1-10 €/kWh [57]. Έτσι στην περίπτωση μας, υπολογίζεται :

$$\text{Κόστος θερμοδεξαμενής} = 300.000 \text{€}$$

#### 4.3.1.3 Τιμή αγοράς και τοποθέτησης σωλήνων μεταφοράς

Στα συστήματα τηλεθέρμανσης, το κόστος αγοράς και τοποθέτησης των σωληνώσεων μεταφοράς αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του αρχικού κόστους, και για αυτόν ακριβώς τον λόγο απαιτείται πολύ προσεκτικός σχεδιασμός. Όπως είναι λογικό, όσο πιο μακριά βρίσκεται η κεντρική μηχανή από το σημείο κατανάλωσης της θερμικής ενέργειας, τόσο περισσότερο αυξάνεται και το κόστος των σωληνώσεων. Επίσης, το κόστος τους εξαρτάται από τη διάμετρο, το υλικό που είναι κατασκευασμένοι, το υλικό και το πάχος της μόνωσης καθώς επίσης πρέπει να συμπεριληφθεί και το κόστος εγκατάστασης, το οποίο είναι αρκετά μεγάλο, ειδικά στην περίπτωση όπου πρέπει να γίνουν έργα εκσκαφής, ώστε οι σωλήνες να τοποθετηθούν κάτω από το έδαφος. Έπειτα από έρευνα που έγινε για το συγκεκριμένο τύπο σωλήνωσης που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το κόστος αγοράς και τοποθέτησης εκτιμάται περίπου σε 100-140 €/m [8]. Για L=12.000m, για τον σωλήνα προσαγωγής και επιστροφής, επιλέγοντας τιμή 120 €/m, υπολογίζεται:

$$\text{Κόστος κεντρικής σωλήνωσης} = 1.440.000 \text{€}$$

Συνυπολογίζοντας και το κόστος των σωληνώσεων που θα χρησιμοποιηθούν εντός της πόλης για τη διανομή του νερού, και τις προσαρμογές που θα γίνουν στο δίκτυο, προστίθεται και ένα 20% επιπλέον κόστος σε σχέση με το κόστος της κεντρικής σωλήνωσης. Έτσι:

$$\text{Συνολικό κόστος σωληνώσεων} = 1.728.000 \text{€}$$

#### 4.3.1.4 Τιμή αντλιών

Στο αντλιοστάσιο που θα τοποθετηθεί κοντά στον οικισμό, θα υπάρχουν αντλίες και το κόστος τους, μαζί με τον κινητήρα εκτιμήθηκε από παρόμοιες αντλίες που λειτουργούν στο χώρο του σταθμού. Έτσι για **3 αντλίες** έχουμε κόστος αγοράς:

$$\text{Τιμή αντλιών} = \frac{40.000}{\text{τεμάχιο}} = 120.000 \text{ €}$$

#### 4.3.1.5 Τιμή μετατροπής κατοικιών

Το κόστος αυτό αφορά τον εξοπλισμό που απαιτείται στον υποσταθμό που θα τοποθετηθεί σε κάθε σπίτι. Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι το κόστος αυτό θα επιβαρύνει τους καταναλωτές.

### 4.3.2 Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος είναι πολύ μικρό σε σχέση με το αρχικό, και αφορά κυρίως το κόστος συντήρησης του μηχανολογικού εξοπλισμού, το κόστος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, και το κόστος πληρωμής του προσωπικού. Πιο αναλυτικά:

#### 4.3.2.1 Κόστος λειτουργίας κεντρικής μηχανής

Στην περίπτωση μας, καθώς η κεντρική μηχανή υπάρχει ήδη και λειτουργεί, δεν θα συμπεριληφθούν έξοδα λειτουργίας. Το μόνο λοιπόν λειτουργικό κόστος που υπολογίζεται εδώ, αφορά τη καύση του επιπρόσθετου φυσικού αερίου, σε όσα σενάρια κρίθηκε αυτό απαραίτητο. Το κόστος του επιπλέον φυσικού αερίου σε ευρώ [€] υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Κόστος φυσικού αερίου [€]} = \frac{Q_f}{n} \cdot \text{ΜΤΦΑ}_\eta$$



Όπου:

- $Q_f$  [MWh<sub>th</sub>] η συνολική θερμική ισχύς του καυσίμου που χρειαζόμαστε όπως αυτή υπολογίστηκε για κάθε σενάριο.
- $\eta = 0,9$  ο συντελεστής μετατροπής της Κατωτέρας Θερμογόνου Ικανότητας (Κ.Θ.Ι) σε ανωτέρα Θερμογόνο Ικανότητα (Α.Θ.Ι) [58] .
- $MT\Phi A_{\eta}$  [€/MWh<sub>th</sub>] η ανά μήνα μέση μοναδιαία τιμή πώλησης του φυσικού αερίου ανωτέρας θερμογόνου ικανότητας (Α.Θ.Ι), η οποία ορίζεται με μέριμνα της Διεύθυνσης Πετρελαϊκής Πολιτικής του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής και κοινοποιείται ανά μήνα στον ΛΑΓΗΕ [59].

#### **4.3.2.2 Κόστος από την μείωση της ηλεκτροπαραγωγής**

Σε κάποια σενάρια, εφαρμόζοντας το σύστημα τηλεθέρμανσης, παρατηρείται μείωση της ηλεκτροπαραγωγής από τον αμοστρόβιλο της εγκατάστασης. Αυτό συνεπάγει μείωση των εσόδων που θα προέκυπταν από την πώληση αυτού του ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε είναι σημαντικό να συνυπολογιστεί και να προστεθεί στα υπόλοιπα λειτουργικά έξοδα, το οποίο είναι εύκολο εφόσον έχει υπολογιστεί ήδη το ποσό της απομείωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **4.3.2.3 Κόστος λειτουργίας μηχανολογικού εξοπλισμού( εναλλάκτες, θερμοδεξαμενή, αντλίες, σωληνώσεις)**

Βάση εκτιμήσεων βασισμένων σε εφαρμογές συστημάτων τηλεθέρμανσης, το λειτουργικό κόστος του μηχανολογικού εξοπλισμού ανέρχεται στο 1% του αρχικού κόστους.

#### **4.3.2.4 Κόστος προσωπικού**

Το κόστος προσωπικού μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο σε σχέση με τα υπόλοιπα κόστη καθώς τα σύγχρονα συστήματα τηλεθέρμανσης είναι πλήρως αυτοματοποιημένα λόγω της ύπαρξης συστημάτων ελέγχου, οπότε η ανθρώπινη εργασία απαιτείται ελάχιστα, και κυρίως σε περιπτώσεις εμφάνισης βλάβης στο σύστημα. Έτσι λοιπόν, δεν αναμένεται επιπλέον απαίτηση σε προσωπικό, για τη συντήρηση του εξοπλισμού της τηλεθέρμανσης.

### 4.3.3 Ετήσια έσοδα

#### 4.3.3.1 Ετήσια έσοδα από την πώληση της θερμικής ενέργειας

Τα ετήσια αυτά έσοδα προκύπτουν από το γινόμενο της παραγόμενης θερμικής ενέργειας (8.400 MWh<sub>th</sub>) και της τιμής πώλησης της θερμικής ενέργειας. Η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας που θα επιλεγεί παίζει καθοριστικό ρόλο για την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος τηλεθέρμανσης. Αρχικά, πρέπει να είναι ανταγωνιστική σε σχέση με τη τιμή που έχουν άλλες πηγές θέρμανσης που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης, όπως για παράδειγμα η θέρμανση με φυσικό αέριο. Επίσης, στο συγκεκριμένο σύστημα τηλεθέρμανσης, αποτελεί τη κύρια πηγή εσόδων, οπότε παίζει καθοριστικό ρόλο για το αν η επένδυση αυτή θα καταστεί βιώσιμη, και καθορίζει το χρονικό ορίζοντα στον οποίο θα γίνει η απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου. Στην παρούσα εργασία, όπως ζητήθηκε από την εταιρεία του Αλουμινίου της Ελλάδος, η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας θα αποτελέσει παράμετρο, με βασικό κριτήριο το χρόνο απόσβεσης της επένδυσης, ο οποίος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 20 χρόνια. Να τονιστεί πως σκοπός αυτής της επένδυσης είναι η εξυπηρέτηση των κατοίκων του οικισμού, και η προσφορά θερμικής ενέργειας σε τιμή καλύτερη από την ήδη υπάρχουσα, και όχι η επιδίωξη κέρδους. Φυσικά, λόγω του μεγάλου αρχικού κεφαλαίου που θα πρέπει να διατεθεί, είναι σημαντικό η οικονομική ανάλυση να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής, ώστε να γνωρίζει η εταιρεία τον χρόνο απόσβεσης του κεφαλαίου που πρόκειται να διαθέσει, ώστε μακροπρόθεσμα να μην ζημιωθεί. Ενδεικτικά να αναφερθεί, πως σε άλλα συστήματα τηλεθέρμανσης, για παράδειγμα στην Πτολεμαΐδα, η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας από το 2010 είναι περίπου 37,74 €/MWh<sub>th</sub> χωρίς Φ.Π.Α. Η τιμή αυτή καθορίζεται ετησίως από το Διοικητικό Συμβούλιο της ΔΕΤΗΠ, με βάση τα στοιχεία κόστους και με κριτήριο την βιωσιμότητα της δημοτικής επιχείρησης, χωρίς την επιδίωξη κέρδους, και δεν θα υπερβαίνει το 70% της τιμής κόστους του πετρελαίου θέρμανσης, ώστε να είναι ανταγωνιστική [60].

Στον οικισμό των Άσπρων σπιτιών, γίνεται χρήση πετρελαίου για θέρμανση. Πρέπει λοιπόν να υπολογιστεί το ποσό που πληρώνουν οι κάτοικοι για τις 8400 MWh θερμικής ενέργειας, ώστε η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας να μην ξεπερνά αυτή την τιμή. Έτσι γίνεται ο εξής υπολογισμός, με δεδομένη την τιμή του πετρελαίου θέρμανσης 0,92 €/lt, και την ανωτέρα θερμογόνο ικανότητα, H=11,5 kWh/lt και βαθμό απόδοσης του λέβητα η=0,9.

$$\text{Κόστος πετρελαίου θέρμανσης} = 8400 \text{ MWh} \cdot \frac{0,92 \frac{\text{€}}{\text{lt}}}{11,5 \frac{\text{MWh}}{\text{lt}}} \cdot \frac{1}{\eta} = 746.667 \text{ €}$$

Επίσης θα πρέπει να υπολογιστεί και το αντίστοιχο κόστος, αν το καύσιμο ήταν φυσικό αέριο, ώστε η επιλογή θέρμανσης μέσω του συστήματος τηλεθέρμανσης, να είναι πιο οικονομική για τον χρήστη ακόμα και από τη θέρμανση με φυσικό αέριο. Έτσι αντίστοιχα, υπολογίζεται το κόστος παραγωγής 8400 MWh θερμικής ενέργειας με τη χρήση φυσικού αερίου ως:

$$\text{Κόστος φυσικού αερίου [€]} = 8400 \text{ MWh} \cdot \text{ΜΤΦΑ} \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot \frac{1}{\eta} = 494.667 \text{ €}$$

Όπου:

- $\eta = 0,9$  ο βαθμός απόδοσης του λέβητα.
- $\text{ΜΤΦΑ} = 53 \text{ €/MWh}_{\text{th}}$  η μέση τιμή πώλησης του φυσικού αερίου για οικιακή χρήση [58].

#### 4.3.3.2 Ετήσια έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας

Τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο προκύπτουν από το γινόμενο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της τιμής πώλησης, η οποία καθορίζεται βάσει της υπάρχουσας νομοθεσίας.

Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, υπάρχουν κάποια κριτήρια σύμφωνα με τα οποία υπολογίζεται σε πόσο από το διάστημα λειτουργίας του, ο σταθμός θεωρείται πλήρως συμπαραγωγικός. Σύμφωνα με τη νομοθεσία, τις ώρες που ο σταθμός είναι σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από όταν ο σταθμός είναι μερικής συμπαραγωγής. Έτσι λοιπόν, σε αυτή την ενότητα μελετάται πώς επηρεάζεται η συμπαραγωγική λειτουργία του σταθμού εφαρμόζοντας το κάθε σενάριο, ώστε να υπολογιστούν τα έσοδα που θα υπάρξουν αν αυξηθούν οι πλήρως συμπαραγωγικές ώρες λειτουργίας του σταθμού, αναφερόμενοι πάντα στο διάστημα που μας ενδιαφέρει, δηλαδή το χρονικό διάστημα που λειτουργεί η τηλεθέρμανση. Με άλλα λόγια δηλαδή, στην οικονομική ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί παρακάτω, δεν συνυπολογίζονται όλα τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού, αλλά μόνο η αύξηση των εσόδων σε σχέση με τα αρχικά, όταν αυξάνονται οι πλήρως συμπαραγωγικές ώρες.

Σύμφωνα με το νόμο **4254** που έχει δημοσιευτεί στην **ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ** [61], η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς επιδότηση, για υπάρχουσες μονάδες ΣΗΘΥΑ ισχύος  $>35\text{MW}$ , με χρήση φυσικού αερίου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας} \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = T_{\text{CHP}} = 68 + \text{ΠΤ}$$

Όπου ΠΤ είναι η παράμετρος που αναφέρεται στην προσαρμογή του φυσικού αερίου ώστε να καλύπτει τις διακυμάνσεις του κόστους του φυσικού αερίου και υπολογίζεται ως [61]:

$$ΠΤ = \left( 1 - \frac{(\eta - \eta_e)}{\eta_{hr}} \right) \cdot (ΜΤΦΑ_t - 26)$$

Όπου [61]:

- $\eta_e = 35 \%$  ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας συμπαραγωγής
- $\eta_{hr} = 81 \%$  η τιμή αναφοράς του βαθμού απόδοσης για χωριστή παραγωγή θερμικής ενέργειας
- $\eta = 67 \%$  ο ολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας συμπαραγωγής
- $ΜΤΦΑ_t \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  η ανά μήνα μέση μοναδιαία μικτή τιμή του φυσικού αερίου η οποία περιλαμβάνει την τιμή πώλησης με το κόστος μεταφοράς και τον ειδικό φόρο κατανάλωσης στην οποία προστίθεται και το μέσο κόστος  $CO_2$  που αντιστοιχεί στην ηλεκτροπαραγωγή θερμικής ενέργειας

Το μέσο κόστος  $CO_2$  υπολογίζεται και εν συνεχεία η τιμή  $ΜΤΦΑ_t$  από τις σχέσεις [61]:

$$\text{Μέσο Κόστος } CO_2 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = 0.37 \cdot \eta_e \cdot \text{Μέση Τιμή Δικαιωμάτων } CO_2 \left[ \frac{\text{€}}{t} \right]$$

$$ΜΤΦΑ_t \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = ΜΤΦΑ_\eta + \text{Μέσο Κόστος } CO_2$$

Η μέση τιμή δικαιωμάτων  $CO_2$  λαμβάνεται ίση με  $8 \frac{\text{€}}{t}$ .

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε περιβάλλον *Excel*, σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες που έχουν δημοσιευτεί στην **ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ** [62] ώστε να υπολογιστεί για κάθε σενάριο, πως μεταβάλλονται οι ώρες κατά τις οποίες ο σταθμός λειτουργεί σε κατάσταση πλήρους και μερικής συμπαραγωγής. Υπάρχουν δύο κριτήρια τα οποία καθορίζουν για κάθε χρονική στιγμή, αν ο σταθμός είναι υψηλής απόδοσης και λειτουργεί σε κατάσταση πλήρους συμπαραγωγής [62]:

- Η συμπαραγωγή πρέπει να εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας τουλάχιστον κατά 10% σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω πρέπει  $PESR_{CHP} > 10\%$ ).
- Η συμπαραγωγή επιτυγχάνει ολικό βαθμό απόδοσης τουλάχιστον ίσο με 75% ( $n_{tot} \geq 0,75$ ).

Για τους παρακάτω υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής στοιχεία, τα οποία έγιναν γνωστά από το αρχείο δεδομένων του σταθμού:

- $E_C$  [MWh] η συνολική ηλεκτρική ενέργεια.
- $H_{CHP}$  [MWh] η συνολική θερμική ενέργεια του ατμού μέσης και υψηλής πίεσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της αλουμίνιας, από την οποία έχει αφαιρεθεί η ενέργεια του ατμού που χρησιμοποιείται σε άλλες λειτουργίες (συγκεκριμένα χρησιμοποιείται στον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας-IPP).
- $F_C$  [MWh] η συνολική θερμική ενέργεια του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε, υπολογισμένη με βάση την Ανωτέρα Θερμογόνο Ικανότητα.
- $E_{max}$  [MWh] η ηλεκτρική ενέργεια της μονάδας σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπίκνωσης, που ορίζεται όταν η μονάδα περιλαμβάνει αμοστρόβιλο συμπίκνωσης-απομάστευσης.
- $\eta_{hr}$  [%] η τιμή αναφοράς του βαθμού απόδοσης για χωριστή παραγωγή θερμικής ενέργειας.
- $\eta_{er}$  [%] η τιμή αναφοράς του βαθμού απόδοσης για χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Έτσι, για το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει, υπολογίζεται η ηλεκτρική ενέργεια  $E$  [MWh] από συμπαραγωγή, θεωρώντας ότι η μονάδα αποτελείται από δύο μέρη, το συμπαραγωγικό (συμβολίζεται με CHP) και το μη-συμπαραγωγικό (συμβολίζεται με non-CHP). Ο υπολογισμός αυτός γίνεται εφαρμόζοντας τις παρακάτω σχέσεις [62]:

$$E_{CHP} = H_{CHP} \cdot C$$

$$E_{non-CHP} = E_C - E_{CHP}$$

Ο λόγος ηλεκτρικής προς θερμική ενέργεια του συμπαραγωγικού μέρους,  $C$ , προσδιορίζεται με την ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά υπολογίζονται ο ηλεκτρικός, ο θερμικός και ο ολικός βαθμός απόδοσης.

$$\eta_e = \frac{E_C}{F_C}, \quad \eta_t = \frac{H_{CHP}}{F_C}, \quad \eta_{tot} = \eta_e + \eta_t$$

Έπειτα υπολογίζεται ο ολικός βαθμός απόδοσης του συμπαραγωγικού μέρους σύμφωνα με τη συνθήκη:

$$\text{Αν } \eta_{CHP} \geq \eta_{κατ} \text{ τότε } \eta_{CHP} = \eta_{tot}$$

$$\text{Αν } \eta_{CHP} < \eta_{κατ} \text{ τότε } \eta_{CHP} = \eta_b$$

Όπου  $\eta_{κατ} = 0,75$  είναι το κατώφλι του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει, προκειμένου η μονάδα να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους συμπαραγωγής, και  $\eta_b = 0,8145$ , ο βαθμός απόδοσης λειτουργίας του σταθμού για το προηγούμενο έτος.

Υπολογίζεται έπειτα ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{e,max}$  της μονάδας σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπύκνωσης (είναι η λειτουργία κατά την οποία δεν απομαστεύεται ατμός προς παροχή χρήσιμης θερμότητας), και ο συντελεστής απώλειας ηλεκτρικής ισχύος  $\beta$  και τελικά η τιμή  $C$ .

$$\eta_{e,max} = \frac{E_{max}}{F_C}$$

$$\beta = \frac{E_{max} - E_C}{H_{CHP}}$$

$$C = \frac{\eta_{e,max} - \beta \cdot \eta_{CHP}}{\eta_{CHP} - \eta_{e,max}}$$

Επίσης υπολογίζεται και η ενέργεια του καυσίμου του συμπαραγωγικού μέρους  $F_{CHP}$  [MWh<sub>th</sub>] και του μη συμπαραγωγικού  $F_{non-CHP}$  [MWh<sub>th</sub>] μέρους από τις σχέσεις:

$$F_{CHP} = \frac{E_{CHP} + H_{CHP}}{\eta_{CHP}}$$

$$F_{non-CHP} = F_C - F_{CHP}$$

Ο υπολογισμό της εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, έγινε ως εξής. Εάν τα ενεργειακά προϊόντα  $E_C$  και  $H_{CHP}$  παράγονταν χωριστά (για παράδειγμα από μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και λέβητα, αντίστοιχα), τότε η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας θα ήταν:

$$F_E = \frac{E_C}{\eta_{er}}$$

$$F_H = \frac{H_{CHP}}{\eta_{hr}}$$

Επομένως, η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας (Primary Energy Savings-PES) [MWh<sub>th</sub>] που οφείλεται στη μονάδα συμπαραγωγής, και ο αντίστοιχος λόγος εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας (Primary Energy Savings Ratio-PESR) [%] προκύπτουν:

$$PES = F_E + F_H - F_C$$
$$PESR = \frac{F_E + F_H - F_C}{F_E + F_H} = \frac{PES}{F_E + F_H}$$

Τέλος, υπολογίζονται η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας του συμπαραγωγικού μέρους PES<sub>CHP</sub> [MWh<sub>th</sub>] και ο αντίστοιχος λόγος PESR<sub>CHP</sub> [%], ο οποίος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 10%, ώστε να έχουμε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ):

$$PES_{CHP} = F_{E,CHP} + F_H - F_{CHP}$$
$$PESR_{CHP} = \frac{PES_{CHP}}{F_{E,CHP} + F_H}$$
$$F_{E,CHP} = \frac{E_{CHP}}{\eta_{er}}$$

Όπου  $F_{E,CHP}$  η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια από συμπαραγωγή  $E_{CHP}$ , παραγόταν από μονάδα ηλεκτροπαραγωγής βαθμού απόδοσης  $\eta_{er}$ .

#### 4.4 Οικονομική αξιολόγηση κάθε σεναρίου-Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται η οικονομική αξιολόγηση κάθε σεναρίου, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις, όπως ζητήθηκε από το Αλουμίνιον της Ελλάδος. Στην πρώτη, το ίδιο το Αλουμίνιο θα αναλάβει τα έξοδα υλοποίησης του έργου, και θα τεθεί ως παράμετρος η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας, ώστε η επένδυση να αποσβένεται σε λιγότερο από 20 χρόνια. Στην δεύτερη περίπτωση, η ανάλυση θα γίνει δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του αρχικού κεφαλαίου (i. 70%, ii. 100%), χρηματοδοτείται από πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στο οποίο εντάσσεται η συγκεκριμένη επένδυση, και το υπόλοιπο το χρηματοδοτεί

η ίδια η εταιρεία. Γίνεται καταγραφή λοιπόν, για κάθε σενάριο, του αρχικού και του λειτουργικού κόστους, αλλά και το σύνολο των εσόδων ανά έτος λειτουργίας, ώστε να αξιολογηθεί με βάση τους δείκτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τέλος, πραγματοποιείται για κάθε σενάριο, ανάλυση ευαισθησίας της επένδυσης, σε σχέση με το αρχικό της κόστος, έχοντας θέσει σταθερή τη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας.

#### 4.4.1 Περίπτωση 1: Χρηματοδότηση από το «Αλουμίνιον της Ελλάδος»

##### 4.4.1.1 Σενάριο 1

Ξεκινώντας από τα κόστη προκύπτει ότι:

Πίνακας 23: Αρχικό κόστος επένδυσης

Εξοπλισμός	Κόστος [€]
Εναλλάκτης	838.980
Αντλίες	120.000
Θερμοδεξαμενή	300.000
Σωληνώσεις	1.728.000
<b>Συνολικά</b>	<b>2.986.980</b>

Καθώς εδώ δεν μειώνεται ούτε η ηλεκτροπαραγωγή αλλά ούτε καταναλώνεται επιπλέον καύσιμο, το λειτουργικό κόστος υπολογίζεται ως:

$$\text{Λειτουργικό κόστος} = 1\% \text{ του αρχικού κόστους} = 29.869,8 \text{ €}$$

Έπειτα από υπολογισμούς, προκύπτει ότι εφαρμόζοντας το σύστημα τηλεθέρμανσης σύμφωνα με το συγκεκριμένο σενάριο, αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής, και έτσι προκύπτει κέρδος από την πώληση αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας σε καλύτερη τιμή. Το κέρδος αυτό ισούται με:

$$\text{Κέρδος}_{HE} = (E_{nonCHP} - E_{nonCHP}^{new}) \cdot (T_{CHP} - T_{nonCHP}) = 10.108,72\text{€}$$

Όπου:

- $(E_{nonCHP} - E_{nonCHP}^{new})$  εκφράζει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας [MWh] που έγινε από μη συμπαραγωγικό, συμπαραγωγικό.



- $T_{CHP} = 68 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σε κατάσταση πλήρους συμπαραγωγής που υπολογίστηκε σύμφωνα με την **Ενότητα 4.3.3.2**.
- $T_{nonCHP} = 54,8 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σε κατάσταση μη πλήρους συμπαραγωγής που υπολογίστηκε βάσει δεδομένων τιμών από την ιστοσελίδα του ΛΑΓΗΕ [64].

Το κέρδος από την πώληση της θερμικής ενέργειας προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{Κέρδος}_{\theta E} [\text{€}] = \frac{8400 \text{ MWh}_{th}}{n} \cdot \text{Τιμή πώλησης θερμικής ισχύος} \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{th}}$$

Όπου:

- $n = 0,9$  ο συντελεστής μετατροπής της Κατωτέρας Θερμογόνου Ικανότητα (Κ.Θ.Ι) σε ανωτέρα Θερμογόνο Ικανότητα (Α.Θ.Ι).

Η τιμή πώλησης θερμικής ισχύος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τη τιμή του φυσικού αερίου για οικιακή χρήση, δηλαδή τα 53 €/MWh<sub>th</sub>, ώστε οι κάτοικοι να προτιμήσουν τη τηλεθέρμανση, από τη θέρμανση με φυσικό αέριο.

Τελικά, το συνολικό ετήσιο κέρδος προκύπτει από το άθροισμα:

$$\text{Συνολικό Κέρδος} = \text{Κέρδος}_{HE} + \text{Κέρδος}_{\theta E}$$

Στον **Πίνακα 24**, καταγράφονται τα οικονομικά μεγέθη που επιλέχθηκαν, και στην **Εικόνα 18**, παρουσιάζεται ενδεικτικά η μορφή του πίνακα που υπολογίζονται οι χρηματοροές για κάθε έτος, ώστε να προκύψει τελικά ο χρόνος που θα γίνει η αποπληρωμή, και να υπολογιστούν οι οικονομικοί δείκτες NPV, IRR, PBP.

Πίνακας 24: Οικονομικά μεγέθη για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης

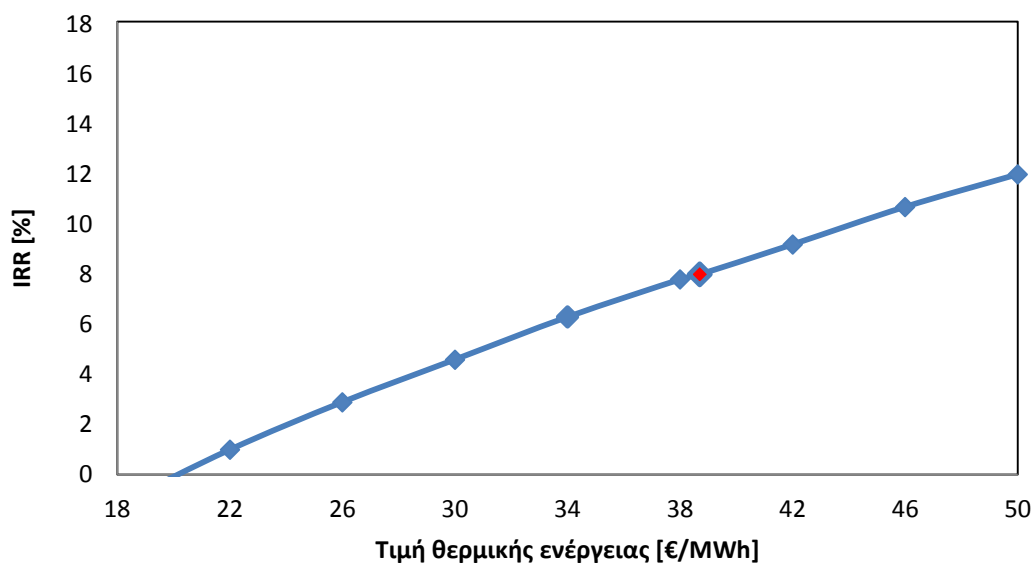
Οικονομικά μεγέθη	Τιμή
Επιτόκιο αναγωγής $i$	8%
Ετήσιος ρυθμός απόσβεσης	10%
Ιδία κεφάλαια	100%
Επιχορήγηση	0%
Δάνειο	0%
Φόρος	0%
Χρονικός ορίζοντας μελέτης	20 χρόνια

Έτσι, μεταβάλλοντας τη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας, καταγράφονται τα αποτελέσματα στον ακόλουθο πίνακα και σχεδιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Με κόκκινο σημειώνεται η τιμή της θερμικής ενέργειας, για την οποία η επένδυση γίνεται οριακά συμφέρουσα.

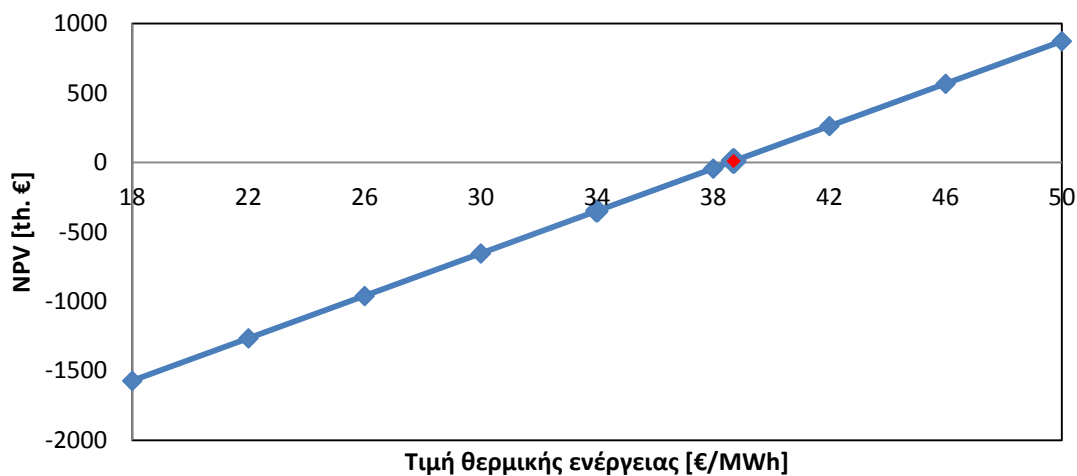
Πίνακας 25: Οικονομικοί δείκτες συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας

Τιμή [€/MWh]	IRR [%]	NPV [th. €]	PBP [έτη]
18	-1,2	-1570,8	20
22	1	-1265,4	18,1
26	2,9	-959,9	15,04
30	4,6	-654,5	12,86
34	6,3	-349	11,24
38	7,8	-43,6	9,98
<b>38,7</b>	<b>8</b>	<b>9,9</b>	<b>9,78</b>
42	9,2	261,9	8,97
46	10,7	567,3	8,15
50	12	872,8	7,46

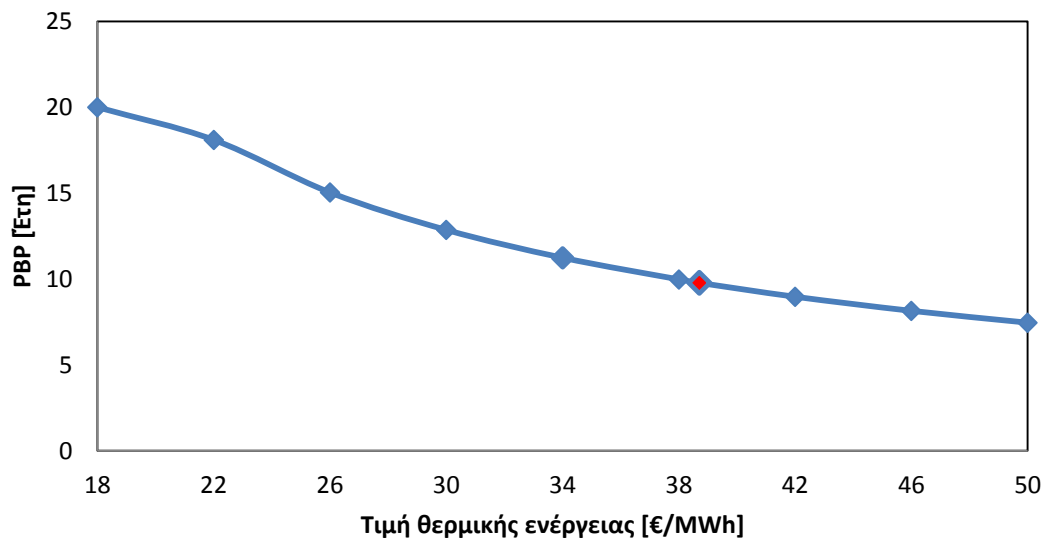
Διάγραμμα 8: Μεταβολή IRR συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας



Διάγραμμα 9: Μεταβολή NPV συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας



Διάγραμμα 10: Μεταβολή PBP συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας



ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (χιλιάδες €)									
Έτος	Εσοδα	Λειτουργικά έξοδα	Απόσβεση	Κέρδος (προ φόρων)	Καθαρό κέρδος	Ροή χρημάτων	Αποπληρωμή		
0						-2247,75			
1	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-1991,02		
2	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-1734,30		
3	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-1477,57		
4	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-1220,85		
5	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-964,12		
6	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-707,40		
7	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-450,67		
8	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	-193,95		
9	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	62,78		
10	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	319,50		
11	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	576,23		
12	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	832,95		
13	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	1089,68		
14	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	1346,40		
15	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	1603,13		
16	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	1859,85		
17	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	2116,58		
18	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	2373,30		
19	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	2630,03		
20	303,51	46,79	224,78	31,95	31,95	256,73	2886,75		

Εικόνα 18: Οικονομική ανάλυση σε περιβάλλον Excel

Έτσι, για το **σενάριο 1**, υπολογίστηκε ότι η επένδυση είναι οικονομικά βιώσιμη εφόσον η τιμή της θερμικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από **38,7 [€/MWh]**, το οποίο σημαίνει πως οι κάτοικοι του οικισμού επωφελούνται με έκπτωση 51,6% σε σχέση με τη θέρμανση με πετρέλαιο και 26,98% σε σχέση με τη θέρμανση με φυσικό αέριο. Ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης σε αυτή την οριακή κατάσταση είναι 9 χρόνια, 9 μήνες και 11 ημέρες, με NPV=99.000€.

#### 4.4.1.2 Σενάριο 2

Τα αρχικά κόστη της επένδυσης είναι:

Πίνακας 26: Αρχικό κόστος επένδυσης

Εξοπλισμός	Κόστος [€]
Εναλλάκτης	80.119
Αντλίες	120.000
Θερμοδεξαμενή	300.000
Σωληνώσεις	1.728.000
<b>Συνολικά</b>	<b>2.228.119</b>

Τα λειτουργικά έξοδα, προκύπτουν από το παρακάτω άθροισμα:

$$\begin{aligned}
 \text{Λειτουργικό κόστος} &= \\
 &= 1\% \text{ του αρχικού κόστους} + \text{Κόστος επιπλέον καυσίμου} \\
 &+ \text{Κόστος μείωσης ηλεκτροπαραγωγής} = \\
 &= 22.281,19\text{€} + 90.096,03\text{€} + 95.791,52\text{€} = 208.168,74\text{€}
 \end{aligned}$$

Ομοίως και εδώ, προκύπτει ότι εφαρμόζοντας το σύστημα τηλεθέρμανσης σύμφωνα με το συγκεκριμένο σενάριο, αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής, και έτσι προκύπτει κέρδος από την πώληση αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας σε καλύτερη τιμή. Το ετήσιο αυτό κέρδος ισούται με:

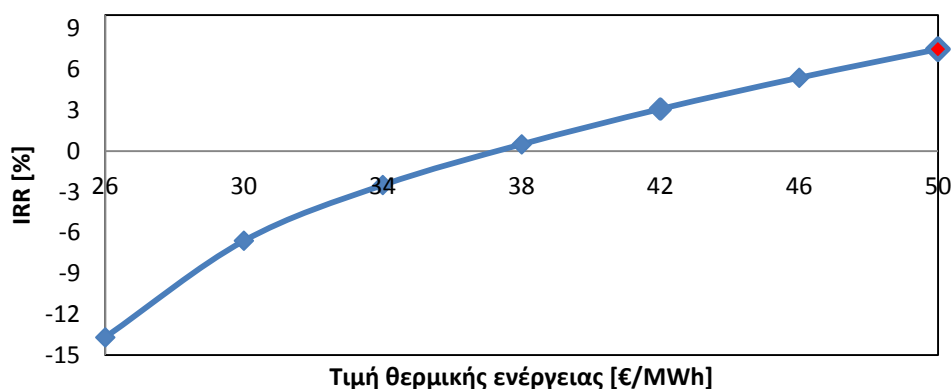
$$\text{Κέρδος}_{HE} = (E_{nonCHP} - E_{nonCHP}^{new}) \cdot (T_{CHP} - T_{nonCHP}) = 6.773,56\text{€}$$

Όπως και πριν, μεταβάλλοντας τη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

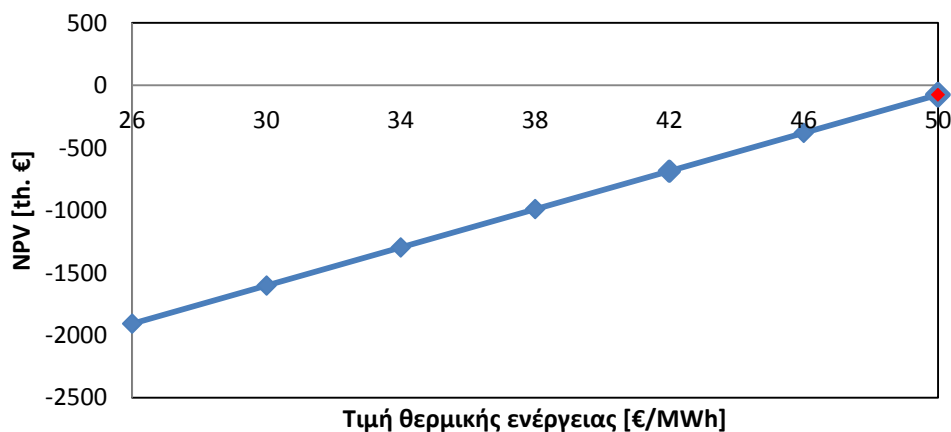
Πίνακας 27: Οικονομικοί δείκτες συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας

Τιμή [€/MWh]	IRR [%]	NPV [th. €]	PBP [έτη]
26	-13.7	-1908.5	26
30	-6.6	-1603	23
34	-2.5	-1297.6	21
38	0.5	-992.1	18.91
42	3.1	-686.7	14.72
46	5.4	-381.2	12.04
50	7.5	-75.8	10.19
<b>51</b>	<b>8</b>	<b>0.6</b>	<b>9.82</b>

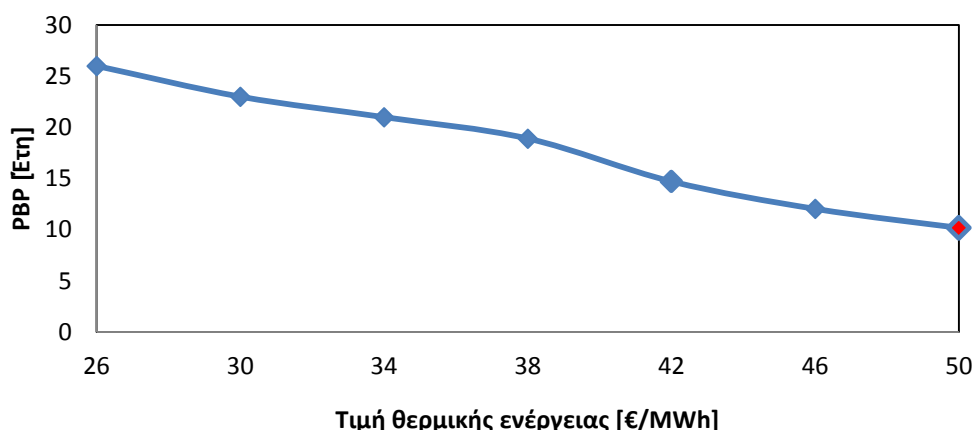
Διάγραμμα 11: Μεταβολή IRR συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας



Διάγραμμα 12: Μεταβολή NPV συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας



Διάγραμμα 13: Μεταβολή PBP συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας



Όπως προκύπτει λοιπόν, αυτό το σενάριο είναι οικονομικά βιώσιμο μόνο εφόσον η θερμική ενέργεια πωλείται στους κατοίκους με τιμή 51[€/MWh], τιμή που είναι αφενός χαμηλότερη από την τιμή πετρελαίου, αλλά αφετέρου σχεδόν ίδια με τη τιμή του φυσικού αερίου πράγμα το οποίο καθιστά τη συγκεκριμένη επένδυση μη ανταγωνιστική. Αυτό οφείλεται στη αύξηση των λειτουργικών εξόδων λόγω της μείωσης της ηλεκτροπαραγωγής του ατμοστροβίλου και στην επιπλέον καύση φυσικού αερίου. Έτσι δηλαδή, η επένδυση για αυτό το σενάριο δεν είναι συμφέρουσα.

#### 4.4.1.3 Σενάριο 3

Τα αρχικά κόστη της επένδυσης είναι:

Πίνακας 28: Αρχικό κόστος επένδυσης

Εξοπλισμός	Κόστος [€]
Εναλλάκτης	99.750
Αντλίες	120.000
Θερμοδεξαμενή	300.000
Σωληνώσεις	1.728.000
<b>Συνολικά</b>	<b>2.247.750</b>

Τα λειτουργικά έξοδα, προκύπτουν από το παρακάτω άθροισμα:

$$\begin{aligned}
 \text{Λειτουργικό κόστος} &= \\
 &= 1\% \text{ του αρχικού κόστους} + \text{Κόστος επιπλέον καυσίμου} \\
 &+ \text{Κόστος μείωσης ηλεκτροπαραγωγής} = \\
 &= 22.477,5\text{€} + 4.807,09\text{€} + 19.501,24\text{€} = 46.785,83\text{€}
 \end{aligned}$$

Ομοίως και εδώ, για τα ετήσια έσοδα ισχύει:

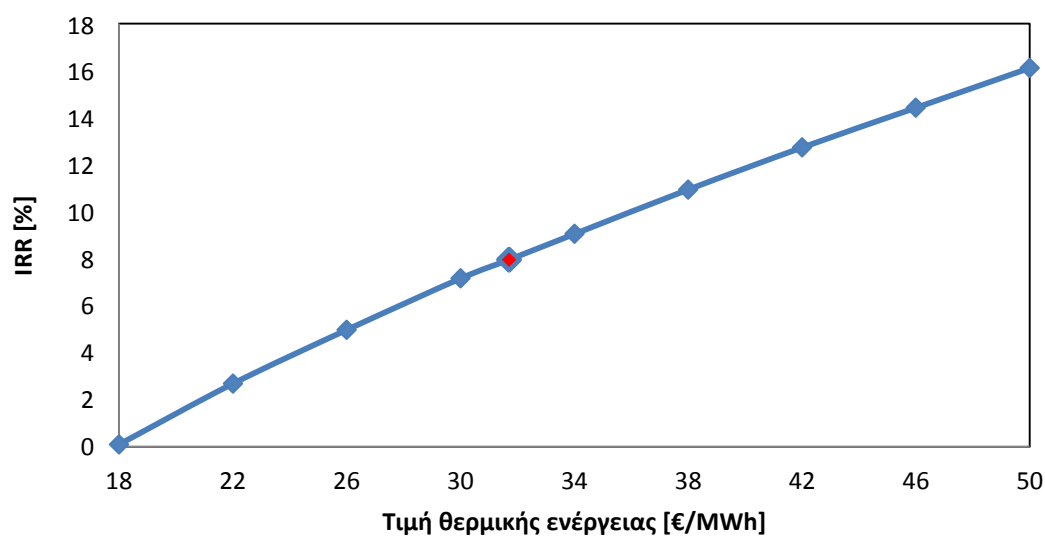
$$\text{Κέρδος}_{HE} = (E_{\text{nonCHP}} - E_{\text{nonCHP}}^{\text{new}}) \cdot (T_{\text{CHP}} - T_{\text{nonCHP}}) = 9.510,84\text{€}$$

Μεταβάλλοντας πάλι την τιμή της θερμικής ισχύος προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας 29: Οικονομικοί δείκτες συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας

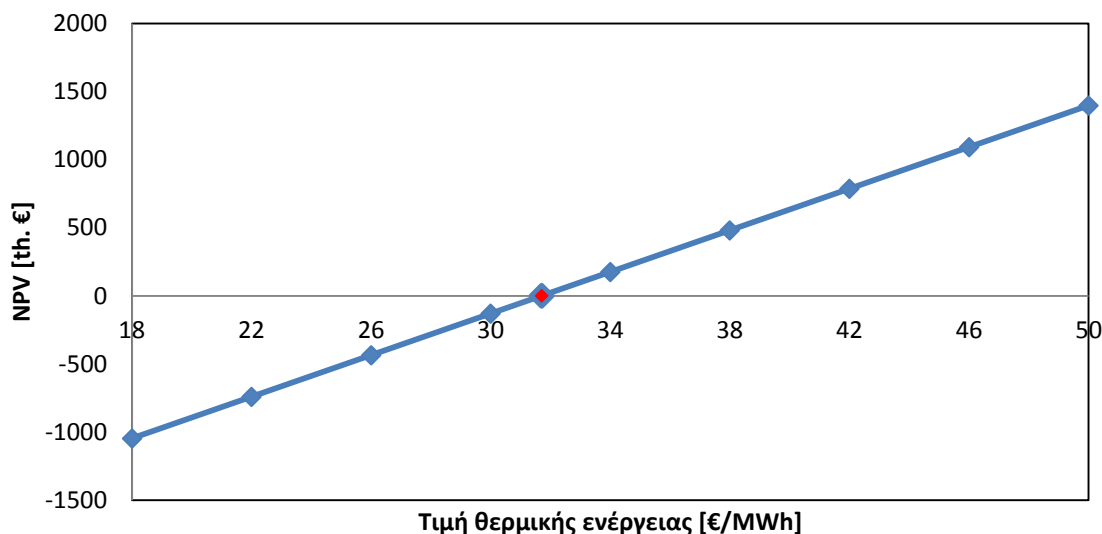
Τιμή [€/MWh]	IRR [%]	NPV [th. €]	PBP [έτη]
18	0.1	-1045.6	19.73
22	2.7	-740.1	15.24
26	5	-434.7	12.41
30	7.2	-129.2	10.47
31.7	8	0.6	9.45
34	9.1	176.2	9.05
38	11	481.7	7.97
42	12.8	787.1	7.12
46	14.5	1092.6	6.44
50	16.2	1398.1	5.87

Διάγραμμα 14: Μεταβολή IRR συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας

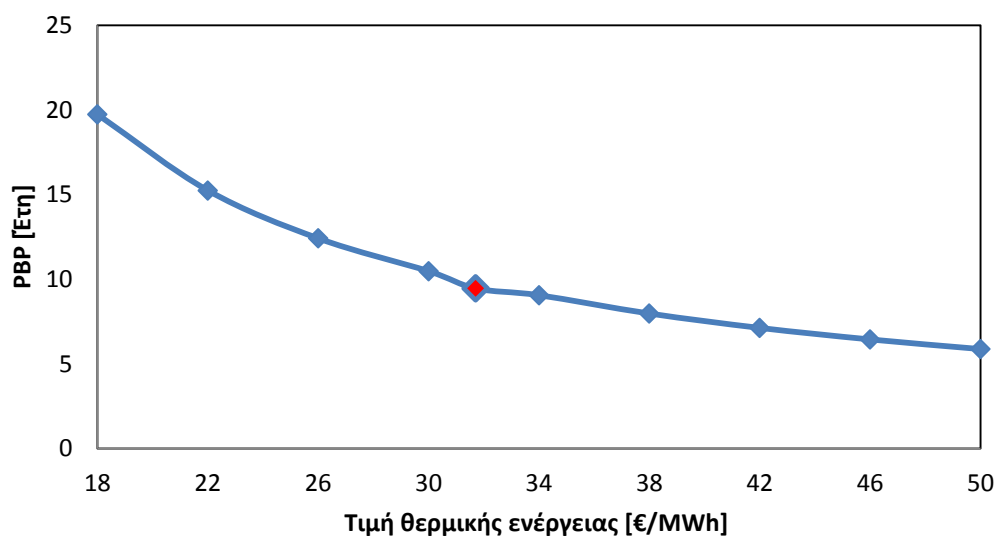




Διάγραμμα 15: Μεταβολή NPV συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας

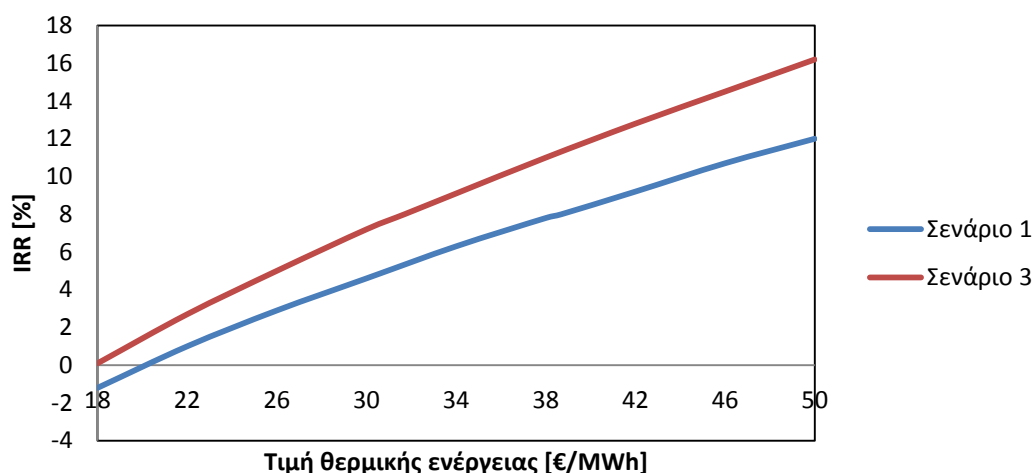


Διάγραμμα 16: Μεταβολή PBP συναρτήσει της τιμής πώλησης θερμικής ενέργειας

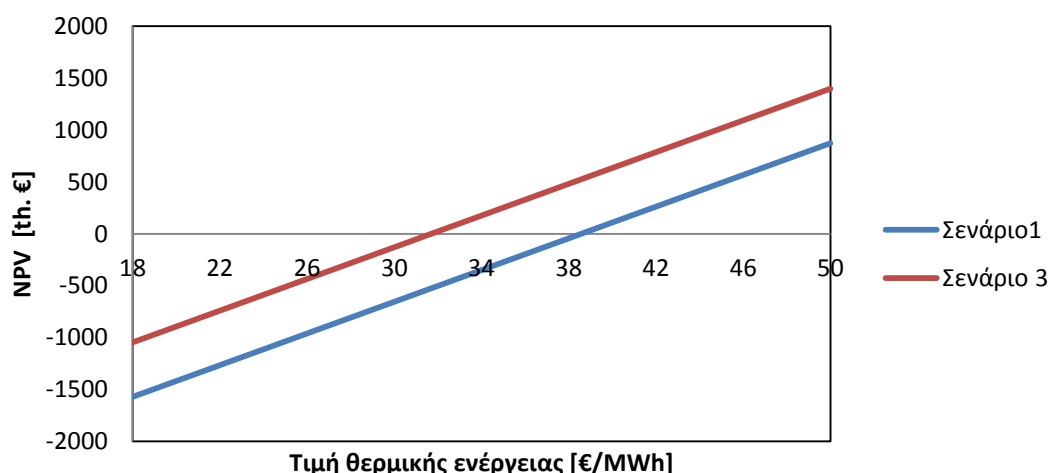


Τελικά, για το σενάριο αυτό υπολογίστηκε ότι η επένδυση είναι οικονομικά βιώσιμη εφόσον η τιμή της θερμικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από **31,7 [€/MWh]**, δηλαδή οι κάτοικοι του οικισμού επωφελούνται με έκπτωση 60,4% σε σχέση με τη θέρμανση με πετρέλαιο και 40,19% σε σχέση με τη θέρμανση με φυσικό αέριο για την περίπτωση αυτή. Ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης σε αυτή την οριακή κατάσταση είναι 9 χρόνια, 5 μήνες και 12 ημέρες, με NPV=6.000€. Έτσι, όπως φαίνεται από τα ακόλουθα συνδυαστικά διαγράμματα με τους οικονομικούς δείκτες, το **σενάριο 3** είναι επενδυτικά καλύτερη επιλογή από το **σενάριο 1**.

Διάγραμμα 17: Σύγκριση IRR συναρτήσει της τιμής θερμικής ενέργειας, για τα σενάρια 1 και 3



Διάγραμμα 18: Σύγκριση NPV συναρτήσει της τιμής θερμικής ενέργειας, για τα σενάρια 1 και 3



#### 4.4.2 Περίπτωση 2: Ένταξη του έργου σε πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Εδώ πραγματοποιείται παρόμοια ανάλυση, με το σκεπτικό ότι η ανάπτυξη του έργου θα ενταχθεί σε κάποιο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα, το οποίο θα χρηματοδοτήσει το i. 70%, ii. 100%, του αρχικού κόστους της επένδυσης, ενώ το υπόλοιπο θα επιβαρύνει το «Αλουμίνιον της Ελλάδος». Έτσι μεταβάλλονται μόνο τα αρχικά έξοδα σε κάθε σενάριο, ενώ τα λειτουργικά έξοδα παραμένουν ίδια με πριν. Στόχος λοιπόν είναι να βρεθεί η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας σε κάθε σενάριο, χωρίς την επιδίωξη κέρδους, ώστε να επένδυση να είναι βιώσιμη.



#### 4.4.2.1 Σενάριο 1

- 70% χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα αρχικά έξοδα διαμορφώνονται ίσα με **896.094€**. Για να είναι οριακά βιώσιμη η επιχείρηση (IRR=8%, NPV=1.700 €, ), η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας είναι **13,24 [€/MWh]**, με χρόνο απόσβεσης τα 9 χρόνια, 9 μήνες και 18 ημέρες.

- 100% χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα αρχικά έξοδα μηδενίζονται. Έτσι, η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας πρέπει να είναι **2,36€**, ώστε τα έσοδα να καλύπτουν τα λειτουργικά έξοδα του συστήματος τηλεθέρμανσης.

#### 4.4.2.2 Σενάριο 2

- 70% χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα αρχικά έξοδα διαμορφώνονται ίσα με **668.436€**. Για να είναι οριακά βιώσιμη η επιχείρηση (IRR=8%, NPV=1.500 €, ), η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας είναι **32,1 [€/MWh]**, με χρόνο απόσβεσης τα 9 χρόνια, 9 μήνες και 14 ημέρες.

- 100% χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα αρχικά έξοδα μηδενίζονται. Έτσι, η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας πρέπει να είναι **24,1€**, ώστε τα έσοδα να καλύπτουν τα λειτουργικά έξοδα του συστήματος τηλεθέρμανσης.

#### 4.4.2.3 Σενάριο 3

- 70% χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα αρχικά έξοδα διαμορφώνονται ίσα με **674.325€**. Για να είναι οριακά βιώσιμη η επιχείρηση (IRR=8%, NPV=2.000 €, ), η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας είναι **12,64 [€/MWh]**, με χρόνο απόσβεσης τα 9 χρόνια, 9 μήνες και 14 ημέρες.

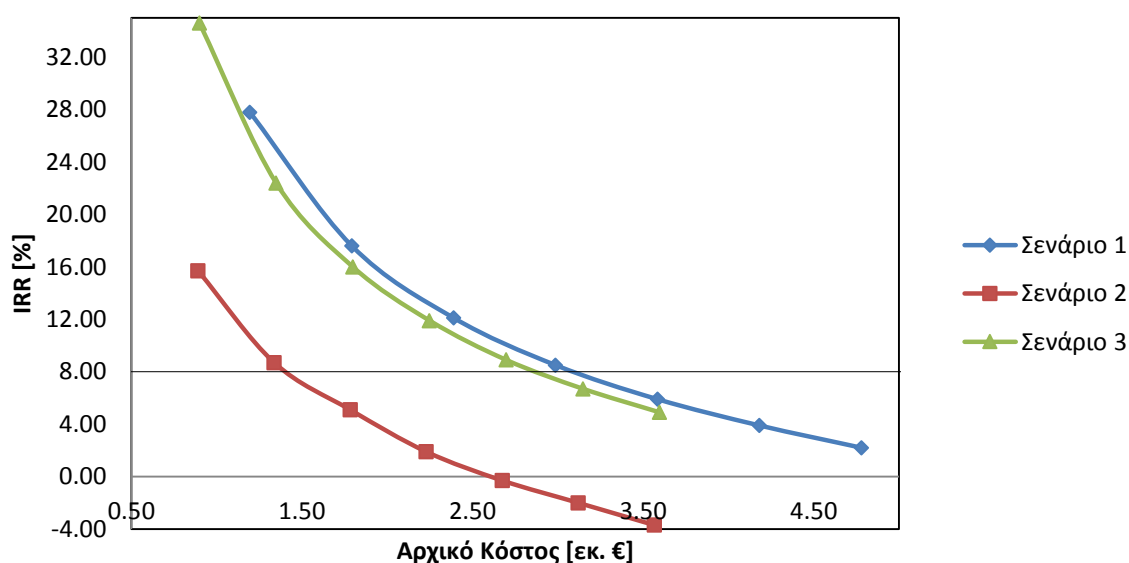
- 100% χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα αρχικά έξοδα μηδενίζονται. Έτσι, η ελάχιστη τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας πρέπει να είναι **4,45€**, ώστε τα έσοδα να καλύπτουν τα λειτουργικά έξοδα του συστήματος τηλεθέρμανσης.

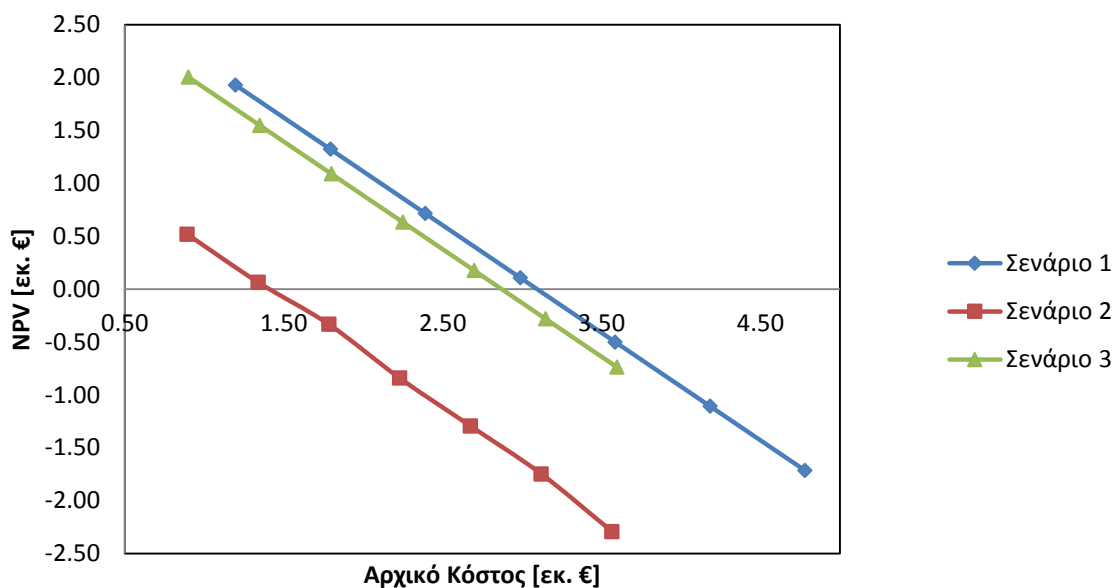
#### 4.4.3 Περίπτωση 3: Ανάλυση ευαισθησίας της επένδυσης σε σχέση με το αρχικό κόστος

Σε αυτή την ενότητα, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας της επένδυσης σε σχέση με το αρχικό κόστος, έχοντας ως σταθερή τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας στα **40 [€/MWh]**, δηλαδή 24,5% πιο οικονομικά από τη θέρμανση με φυσικό αέριο και 50% από την θέρμανση με πετρέλαιο. Αυτή η ανάλυση είναι σημαντική, καθώς το αρχικό κόστος της επένδυσης, δηλαδή το κόστος του τεχνολογικού εξοπλισμού, αποτελεί εκτίμηση, και μπορεί εύκολα να μεταβληθεί. Έτσι λοιπόν, τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τη μεταβολή για τους οικονομικούς δείκτες κάθε σεναρίου, συναρτήσει του αρχικού κόστους επένδυσης.

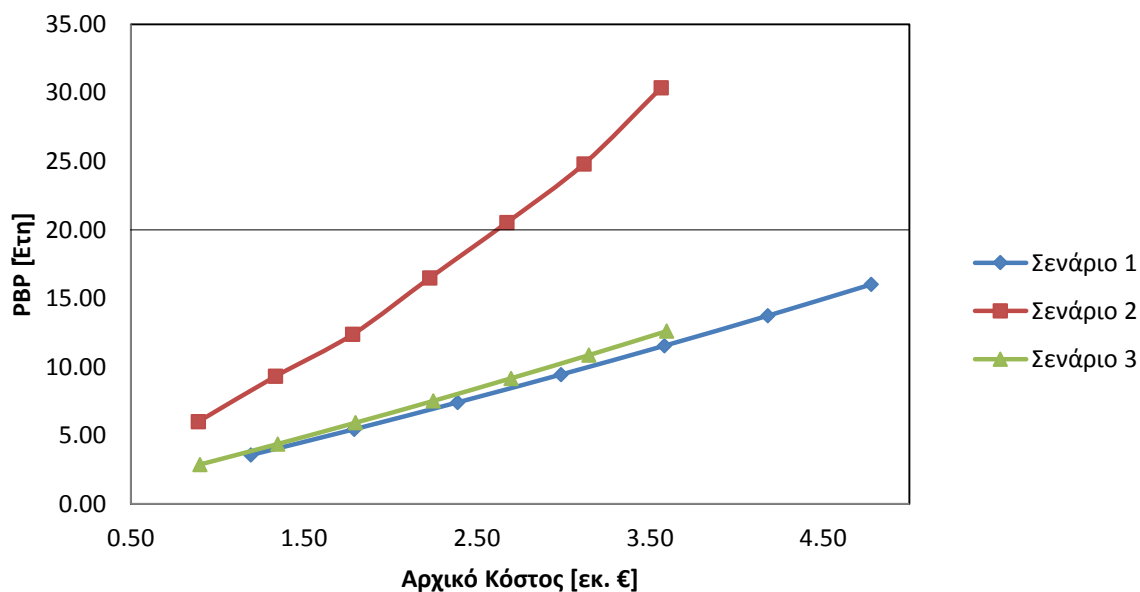
Διάγραμμα 19: Μεταβολή IRR για κάθε σενάριο, συναρτήσει του αρχικού κόστους



Διάγραμμα 20: Μεταβολή NPV για κάθε σενάριο, συναρτήσει του αρχικού κόστους



Διάγραμμα 21: Μεταβολή PBP για κάθε σενάριο, συναρτήσει του αρχικού κόστους



Όπως αναμενόταν, οι οικονομικοί δείκτες επηρεάζονται πολύ όταν μεταβάλλεται το αρχικό κόστος της επένδυσης, καθώς όπως έχει αναφερθεί, στα συστήματα τηλεθέρμανσης, το πιο σημαντικό κόστος είναι το αρχικό.



## 5 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές ενέργειες

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ανάπτυξη συστήματος τηλεθέρμανσης, το οποίο θα παρέχει ζεστό νερό για θέρμανση στους χρήστες του οικισμού «Άσπρα Σπίτια» κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Το σύστημα αυτό θα αξιοποιεί ένα μέρος της ενέργειας που παράγει ο σταθμός συμπαραγωγής του Αλουμινίου της Ελλάδος, ώστε να καλύπτει τη ζήτηση θερμικής ισχύος που ανέρχεται στα 14 MW<sub>th</sub>. Δηλαδή, η ιδέα της τηλεθέρμανσης είναι ότι η επιθυμητή ποσότητα νερού, θα θερμαίνεται από τους 60 °C στους 90 °C στον σταθμό συμπαραγωγής (κεντρική μηχανή), μέσω εναλλακτών θερμότητας, και θα οδηγείται στον οικισμό (σημείο κατανάλωσης), μέσω συστήματος υπόγειων σωληνώσεων, με τη χρήση αντλιών. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν 4 διαφορετικά σενάρια, που περιγράφουν τρόπους παραγωγής της ζητούμενης θερμικής ισχύος. Σκοπός της εργασίας είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζεται η λειτουργία του σταθμού, εφόσον εφαρμοστεί το σύστημα της τηλεθέρμανσης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης για τα τρία σενάρια, με τη χρήση συγκεκριμένων οικονομικών κριτηρίων, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι οικονομικά βιώσιμη, και πιο σενάριο είναι πιο αποδοτικό. Αυτό έγινε εκτιμώντας το κόστος του τεχνολογικού εξοπλισμού, και υπολογίζοντας τα λειτουργικά έξοδα αλλά και τα έσοδα σε ετήσια βάση. Η ανάλυση αυτή έδειξε πως το **σενάριο 3**, δηλαδή η θέρμανση του νερού με την χρήση του τροφοδοτικού νερού πριν εισαχθεί στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας, είναι η οικονομικά βέλτιστη επιλογή, καθώς, για τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας από **31,7 [€/MWh]** και πάνω, η επένδυση συμφέρει και έχει χρόνο απόσβεσης 9 χρόνια και 5 μήνες. Με άλλα λόγια, εφαρμόζοντας την τηλεθέρμανση, οι κάτοικοι θα θερμαίνονται το χειμώνα κατά **60,4 %** πιο οικονομικά από την υπάρχουσα κατάσταση (θέρμανση με πετρέλαιο), και παράλληλα, το Αλουμίνιον της Ελλάδος θα έχει κάνει μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση. Στην περίπτωση δε, που υπάρχει κάποιου είδους χρηματοδότηση με την ένταξη του έργου σε κάποιο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα, η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας στους κατοίκους μπορεί να φτάσει σε πολύ χαμηλές τιμές, όπως έδειξε η αντίστοιχη ανάλυση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα τηλεθέρμανσης έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος, οπότε, σε περίπτωση συγχρηματοδότησης του αρχικού κεφαλαίου, η επένδυση γίνεται σημαντικά πιο ελκυστική. Εν κατακλείδι, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε δείχνει πως η ανάπτυξη συστήματος τηλεθέρμανσης είναι εφικτή, και οικονομικά βιώσιμη, αρκεί να γίνει προσεχτικός και σωστός σχεδιασμός του μηχανολογικού εξοπλισμού, ιδιαίτερα του δικτύου σωληνώσεων, που αποτελεί το ακριβότερο και πιο σημαντικό τμήμα του συστήματος.

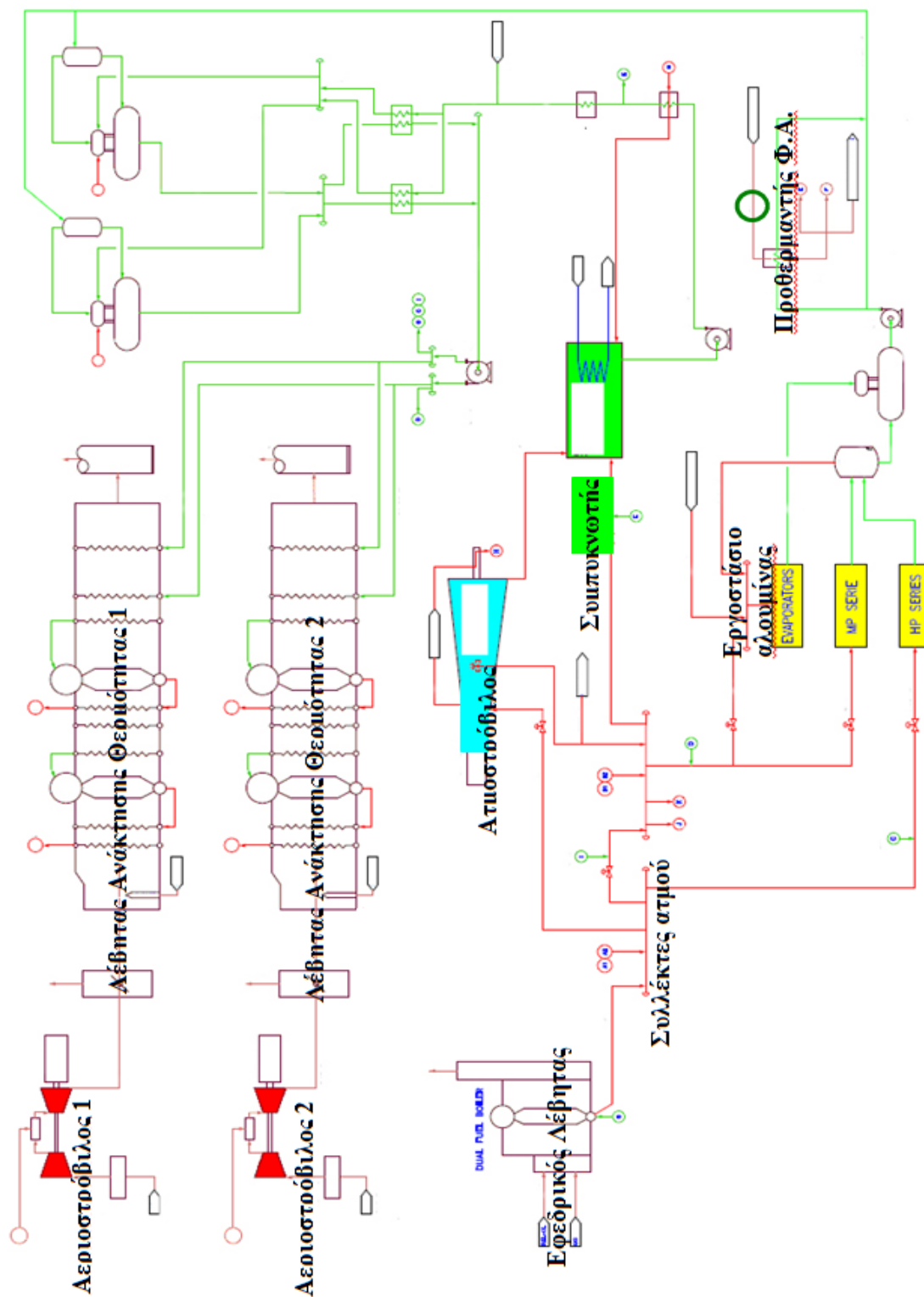


Για την πληρότητα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάζονται παρακάτω κάποιες προτάσεις για επιπλέον μελλοντική έρευνα.

- Έρευνα για τον υπολογισμό του ακριβούς προφίλ ζήτησης θερμικής ενέργειας του οικισμού, ώστε το σύστημα τηλεθέρμανσης να διαστασιολογηθεί και να προσαρμοστεί αναλόγως.
- Ακριβής μελέτη του δικτύου παροχής νερού τηλεθέρμανσης στον οικισμό.
- Διαστασιολόγηση και εκτίμηση του κόστους των υποσταθμών που πρέπει να τοποθετηθούν σε κάθε κτίριο, καταργώντας τους λέβητες πετρελαίου.
- Περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη του συστήματος τηλεθέρμανσης, ώστε να λειτουργεί όλο το χρόνο και να παρέχει στους καταναλωτές ζεστό νερό για χρήση καθώς επίσης και ψύξη (district cooling).



## Παράρτημα: Συνοπτικό Διάγραμμα Μονάδας Συμπααραγωγής





## Βιβλιογραφία

- [1] «Αλουμίνιον της Ελλάδος»: Επίσημος ιστότοπος [www.alhellas.com](http://www.alhellas.com)
- [2] [www.viotikoskosmos.winidot.com/pesine](http://www.viotikoskosmos.winidot.com/pesine)
- [3] [www.el.wikipedia.org/wiki/Άσπρα\\_Σπίτια\\_Βοιωτίας](http://www.el.wikipedia.org/wiki/Άσπρα_Σπίτια_Βοιωτίας)
- [4] **Α. Περδίκη:** Μοντελοποίηση και παραμετρική μελέτη συστήματος συμπαραγωγής για την εταιρεία Αλουμίνιο της Ελλάδος, Αθήνα, Οκτώβριος 2002, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [5] **Υπουργείο Ανάπτυξης:** Το Ελληνικό Ενεργειακό Σύστημα, Φεβρουάριος 2009
- [6] **Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας:** Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας & ψύξης-Εγκαταστάσεις σε κτήρια, Αθήνα, Απρίλιος 2012
- [7] **Cogeneration Observatory and Dissemination Europe (CODE2):** First draft of final CHP roadmap GREECE, May 2013
- [8] **Φ. Τσαούση:** Τεχνοοικονομική ανάλυση για την διαστασιολόγηση μικρών αποκεντρωμένων συστημάτων τηλεθέρμανσης με συμπαραγωγή, Αθήνα, Απρίλιος 2014, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [9] **Π. Δημητρακόπουλος:** Συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής με αξιοποίηση των πηγών βιομάζας και ηλιακής ενέργειας μέσω συνδυασμού των κύκλων ORC-VCC, Αθήνα, Φεβρουάριος 2013, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [10] **Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης:** Κεφ.7. Συμπαραγωγή Θερμότητας-Ηλεκτρισμού
- [11] **Ευρωπαϊκή Επιτροπή:** Συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας
- [12] **Cogeneration Observatory and Dissemination Europe (CODE2), Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΕΣΣΗΘ):** Οδικός χάρτης Συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για την Ελλάδα, Νοέμβριος 2014
- [13] **Τ. Λασποπούλου:** Μελέτη τηλεθέρμανσης της πόλης των Γρεβενών με ενεργειακή αξιοποίηση της δασικής βιομάζας της περιοχής, Αθήνα, Μάρτιος 2008, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [14] **P. Ulloa:** Potential for CHP and District Heating and Cooling from Waste-to-Energy facilities in the US, Columbia University, 2007
- [15] **EU Handbook District Heating Market:** [www.crossborderbioenergy.eu](http://www.crossborderbioenergy.eu)
- [16] **Τηλεθέρμανση Κοζάνης:** [www.deykozanis.gr/?page\\_id=7](http://www.deykozanis.gr/?page_id=7)



- [17] **Π. Γραμμέλης:** Τηλεθέρμανση Κοζάνης-παρούσα κατάσταση και μελλοντικές προοπτικές ανάπτυξης, Αθήνα, 1 Απριλίου 2013, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης
- [18] **Δημοτική Επιχείρηση Τηλεθέρμανσης Πτολεμαΐδας-Δ.Ε.ΤΗ.Π:** Ενημερωτικό Τεύχος: «Τεχνική Περιγραφή Συστήματος Τηλεθέρμανσης Πτολεμαΐδας»
- [19] **Δήμος Μεγαλόπολης:** [www.megalopoli.gov.gr](http://www.megalopoli.gov.gr)
- [20] **Δημοτική Επιχείρηση Τηλεθέρμανσης Ευρύτερης Περιοχής Αμύνταιου (ΔΕΤΕΠΑ):** [www.detepa.gr/tecnica-stoixeia.html](http://www.detepa.gr/tecnica-stoixeia.html)
- [21] **European Commission:** Background Report on EU-27 District Heating and Cooling Potentials, Barriers, Best Practice and Measures of Promotion
- [22] **Greater London Authority:** District Heating Manual for London, February 2013
- [23] **Dafnoss:** District heating systems used in Western Europe, Chapter 2
- [24] **Euroheat & Power:** Guidelines for district heating substations, October 2008
- [25] **SWEP:** Heat Exchangers for Heating and Sanitary Applications - A Technical Handbook
- [26] **Dafnoss:** District heating systems used in Western Europe, Chapter 5
- [27] <http://www.fintherm.com/solutions/preinsulated-pipes-for-special-applications.aspx>
- [28] **M. Whettall-Engineering Pipework Solutions:** Steel or Polymer Pipes for District Heating?
- [29] **Δ.Σ. Μαθιουλάκης, Ι.Σ. Αναγνωστόπουλος, Δ.Φ. Τουζόπουλος:** Βιομηχανική Ρευστομηχανική, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006
- [30] **Ελληνικό Ινστιτούτο Ανάπτυξης Χαλκού (Ε.Ι.Α.Χ.):** Ιούνιος 2014, Τεύχος 30
- [31] **J. Persson, M.Larsson:** Innovations in District Heating, InnoHeat Project, February 2014
- [32] **M. Martin, Dr P. Thornley:** The potential for thermal storage to reduce the overall carbon emissions from district heating systems, Tyndall Centre for Climate Change Research, January 2013
- [33] **Α.Ι. Στάμου:** Εφαρμοσμένη Υδραυλική-Μηχανική των Ρευστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [34] **UFThermoLabs:** [https://www.youtube.com/watch?v=DzV0KE\\_Wvv8](https://www.youtube.com/watch?v=DzV0KE_Wvv8) (φίλμ)
- [35] [http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d\\_162.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html)



- [36] **P.S. Navalon:** Evaluation of Heat Losses From a Domestic Hot Water Circulation System, June 2015, University of Galve
- [37] [http://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/heatlossinsulatedpipe](http://www.engineersedge.com/heat_transfer/heatlossinsulatedpipe)
- [38] **Rod.E. Sjoberg:** Soil Thermal Properties and Heat Loss From Buried Pipes, University of Saskatchewan
- [39] Heat Transfer Calculations
- [40] **Z.K. Morvay, D.D. Gcozdenac:** Fundamentals for analysis and calculation of energy and environmental performance (Part III)
- [41] Steady-State Conduction-Multiple Dimensions, Chapter 3
- [42] **Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. Dewitt:** Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition
- [43] **Heat Transfer In Plate Heat Exchangers:** Lappeenranta University of Technology, June 2006
- [44] **Sadic Kakac, Hongtan Liu, Anchasa Pramuanjaroenkij:** Heat Exchangers-Selection, Rating and Thermal Design, Third Edition
- [45] **Ξ. Κακάτσιος:** Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, 2006
- [46] **A. Zukauskas, R. Ulinskas:** Banks of plain and finned tubes
- [47] **Ε. Κακαράς, Δ. Γιαννακοπουλος, Α. Δουκέλης:** Σχεδιασμός Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας σε Εγκατάσταση Ηλεκτροπαραγωγής, Απρίλιος 2004, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [48] **UFThermoLabs:** <https://www.youtube.com/watch?v=NherLU3IVPY> (φίλμ)
- [49] **Robert L. Mott, Joseph A. Untener:** Εφαρμοσμένη Μηχανική Ρευστών (Εβδομη Έκδοση)
- [50] **Α.Ι. Στάμου:** Θεωρητική Ανάλυση της Ροής σε Σωλήνες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [51] Logstor: [www.calc.logstor.com/en/](http://www.calc.logstor.com/en/)
- [52] **Ν. Παπαγεωργίου:** Ατμοπαραγωγοί Ι: Γενικές Αρχές, Αθήνα 1991
- [53] **Σ. Καρέλλας, Ε. Κακαράς, Ν. Παπαγεωργίου, Χ. Παπαπούλου:** Ασκήσεις-Θέματα Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων, Αθήνα 2007
- [54] **Β. Παναγιώτου:** Τεχνοοικονομική μελέτη συστημάτων μικρο-συμπαράγωγής στον οικιακό τομέα, Ιούλιος 2011, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



- [55] **Δ. Παναγιωτακόπουλος:** Συστημική μεθοδολογία και τεχνική οικονομική, εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη 2008
- [56] **Alfa Laval:** [www.alfaalaval.com](http://www.alfaalaval.com)
- [57] **International Renewable Energy Agency (IRENA):** Thermal Energy Storage – Technology Brief, January 2013
- [58] **Αέριο Αττικής:** <http://www.aerioattikis.gr>
- [59] **ΛΑΓΗΕ (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) :** <http://www.lagie.gr/>
- [60] **ΔΕΤΗΠ:** [http://www.tpt.gr/pdf/Timologio\\_tpt\\_2012.pdf](http://www.tpt.gr/pdf/Timologio_tpt_2012.pdf)
- [61] **ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟ:** Αριθμός φύλλου 85, ΝΟΜΟΣ ΥΠ’ ΑΡΙΘ. 4254. ΜΕΤΡΑ ΣΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ Ν.4046/2012, 7 Απριλίου 2014
- [62] **ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, ΤΕΥΧΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ:** Αριθμός φύλλου 1420, Απόφαση Αριθμ. Δ5-ΓΛ/Γ/Φ1/οικ.15606. Καθορισμός εναρμονισμένων τιμών αναφοράς των βαθμών απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, 15 Ιουλίου 2009
- [63] **ΛΑΓΗΕ (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας):** <http://www.lagie.gr/agora/analysisi-agoras/miniaia-deltia-iep/>
- [64] **Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας:** Δικτυακός Τόπος Διαβουλεύσεων - <http://www.opengov.gr/minenv/?p=5729&cpage=19#comments>
- [65] **Κ. ΘΕΟΦΥΛΑΚΤΟΣ:** Η Συμπαρογωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας σε Κτήρια έχει Μέλλον στην Ελλάδα., ΕΣΣΗΘ, ASHRAE Hellenic Chapter, Αθήνα, Μάρτιος 2015