

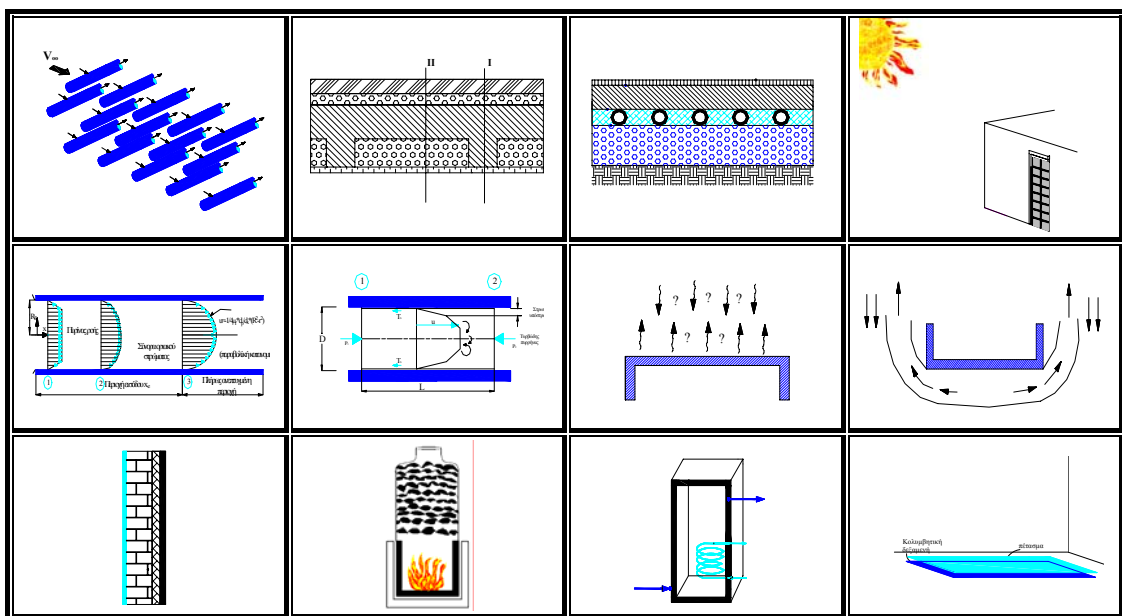
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Πρόγραμμα Σπουδών Επιλογής
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Πτυχιακή Μελέτη

«Διερεύνηση πρακτικών εφαρμογών μετάδοσης θερμότητας
από ενεργειακή σκοπιά»

Εισηγητής: Κτενιαδάκης Μιχ.

Επιμέλεια: Στρατάκη Ανθούλα



Ηράκλειο Ιούνιος 2005

Πρόλογος

Αυτή η πτυχιακή εργασία αποτελείται από δεκαπέντε (15) ανεξάρτητες μελέτες στις οποίες παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές των φαινομένων της Μετάδοσης Θερμότητας, που διερευνώνται όμως από την άποψη κυρίως της επίδρασης των φαινομένων αυτών και των παραμέτρων που τα διέπουν στην κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις εξετάζεται και η οικονομική επίπτωση (όφελος ή ζημία) που προκύπτει, λόγω της μεταβολής κάποιας παραμέτρου (π.χ. θερμοκρασίας) ή μιας επέμβασης (π.χ. της αύξησης του πάχους μόνωσης).

Για τους υπολογισμούς της μεταφοράς θερμότητας στις διάφορες επιφάνειες θα εφαρμοστούν οι θεμελιώδεις μαθηματικές εξισώσεις, που περιγράφουν το αντίστοιχο φαινόμενο. Για την αξιολόγηση οικονομικά μιας επένδυσης, που αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, θα χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες μεθοδολογίες. Αυτές στηρίζονται στην χρήση οικονομοτεχνικών κριτηρίων που καθορίζουν την βιωσιμότητα μιας επένδυσης.

Στο κείμενο περιέχεται επαρκές υλικό και θεωρητικό υπόβαθρο για την σωστή κατανόηση της διαδικασίας επίλυσης της κάθε μελέτης. Ωστόσο μια μικρή επαφή με την Μηχανική Ρευστών ίσως βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση κάποιων σημείων.

Η παρουσίαση κάθε μελέτης ακολουθεί μια κλασική γραμμή, επεξηγώντας τις εξισώσεις που αφορούν την μεταφορά θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία και εφαρμόζοντάς τις κάθε φορά ανάλογα με την περίπτωση.

Αρκετές από τις μελέτες απαιτούν, για να επιλυθούν, την χρήση επαναλαμβανόμενων προσεγγίσεων (υποθέσεων), πέραν των βασικών παραδοχών της μελέτης. Δηλαδή υποθέτουμε ένα στοιχείο, με την βοήθεια του οποίου προκύπτουν κάποια αποτελέσματα. Σωστή είναι η υπόθεση το αποτέλεσμα της οποίας ικανοποιεί μια συγκεκριμένη συνθήκη.

Κατά μήκος του κειμένου τοποθετούνται πίνακες και διαγράμματα για την παρουσίαση των λύσεων. Στο τέλος υπάρχει ένα συνοπτικό Παράρτημα, που παρουσιάζει τις περισσότερες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και Πίνακες με τα απαραίτητα τεχνικά κλπ στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.

Οι δεκαπέντε μελέτες της πτυχιακής έχουν κατηγοριοποιηθεί με τον παρακάτω τρόπο :

1^η Ενότητα : Μετάδοση θερμότητας με αγωγή και συναγωγή σε οριζόντια επίπεδα και κυλινδρικά τοιχώματα.

1. Μονωμένες και αμόνωτες οροφές προστατευμένες ή εκτεθειμένες - Τεχνοοικονομική διερεύνηση.
2. Θερμικές απώλειες οροφής (με ψευδοροφή) – Διερεύνηση για το βέλτιστο πάχος μόνωσης.
3. Διαμόρφωση δαπέδου σε δαπεδοθέρμανση – Θερμικές ροές προς τα πάνω και προς τα κάτω – Βέλτιστη θερμομόνωση.
4. Μονωμένα και αμόνωτα επίπεδα τοιχώματα – Τεχνοοικονομική διερεύνηση.
5. Θερμομόνωση σωληνώσεων ζεστού νερού – Η επίδραση του πάχους μόνωσης σε σχέση με τη διάμετρο – Βέλτιστο πάχος μόνωσης σωληνώσεων.

2^η Ενότητα : Συναλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία και ηλιακή ακτινοβολία.

6. Πίστα παγοδρομίου – Μείωση απωλειών ακτινοβολίας – Εξοικονόμηση Ενέργειας.
7. Μπαλκονόπορτα με διπλά τζάμια – Μείωση απωλειών ακτινοβολίας.
8. Κολυμβητική δεξαμενή – Μείωση απωλειών ακτινοβολίας – Εξοικονόμηση Ενέργειας.
9. Οροφή ψυκτικού θαλάμου υπό την επίδραση και της ηλιακής ακτινοβολίας.

3^η Ενότητα : Υπολογισμός συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας – Αξιολόγηση μόνωσης.

10. Αμόνωτη ή μονωμένη κυλινδρική δεξαμενή ζεστού νερού – Υπολογισμός συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας – Οικονομική αξιολόγηση μόνωσης.
11. Θερμομόνωση επιφάνειας ξηρατηρίου – Υπολογισμός συντελεστών μεταβίβασης της θερμότητας – Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση μόνωσης.

4^η Ενότητα : Εναλλάκτες θερμότητας.

12. Βυθισμένος εναλλάκτης θερμότητας επανάψυξης νερού – Βελτίωση του COP ψύκτη.
13. Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων – Υπολογισμός του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.
14. Προθερμαντήρας μαζούτ και υπολογισμός θερμικών απωλειών του.
15. Πλακοειδής εναλλάκτης – Επίπτωση της θερμοκρασίας εισόδου θερμαντικού μέσου και της επικάθισης των αλάτων.

Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει κυρίως εφαρμογές σε οριζόντια (οροφές, δάπεδα) και κυλινδρικά (σωληνώσεις) τοιχώματα. Σε κάθε ξεχωριστή μελέτη εφαρμόζουμε τις μαθηματικές εκφράσεις που αναλογούν σε κάθε φαινόμενο μετάδοσης θερμότητας, κυρίως μονοδιάστατη αγωγή με την ταυτόχρονη επίδραση και της συναγωγής. Στην συνέχεια μέσω κριτηρίων αξιολόγησης όπως η Καθαρά Παρούσα Αξία και η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής, εξετάζουμε κατά πόσο οι επεμβάσεις με την προσθήκη μονώσεων είναι οικονομικά βιώσιμες. Τέλος με την βοήθεια διαγραμμάτων προκύπτουν τα ανάλογα συμπεράσματα.

Στην δεύτερη ενότητα εξετάζουμε φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία. Ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία διαφέρει σε δύο σημαντικά σημεία από τους τρόπους μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και συναγωγή α) ότι δεν απαιτείται μέσο (ύλη) και β) η μεταφορά ενέργειας είναι ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας των εμπλεκόμενων σωμάτων. Στηριζόμενοι στις μαθηματικές εξισώσεις που αναφέρονται στην ακτινοβολία μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμική ισχύ που μεταβιβάζεται μέσω ακτινοβολίας. Βασικοί μέθοδοι μείωσης της μεταβιβαζόμενης με ακτινοβολία ισχύος είναι η χρήση ανακλαστικών επιστρώσεων ή/και πετασμάτων. Με τα προηγούμενα οικονομικά κριτήρια μπορούμε πάλι να κρίνουμε κατά πόσο οι επεμβάσεις αυτές είναι εφικτές και συμφέρουσες.

Στην τρίτη ενότητα ασχολούμαστε κυρίως με την μεταφορά θερμότητας σε ρευστά των οποίων η κίνηση οφείλεται σε πρόσδοση εξωτερικού έργου, δηλαδή έχουμε

εξαναγκασμένη συναγωγή, στρωτή ή τυρβώδη. Εκτός από την εξαναγκασμένη συναγωγή ασχολούμαστε και με την φυσική ή ελεύθερη συναγωγή, όπου το ρευστό κινείται υπό την επίδραση ανοδικών δυνάμεων προερχόμενων από μεταβολές στην πυκνότητα, λόγω θερμοκρασιακών διαφορών. Οι σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή συναγωγής (μεταβίβασης της θερμότητας) που αναφέρονται στην βιβλιογραφία είναι για συγκεκριμένες γεωμετρικές διαμορφώσεις. Επιλέγονται βάσει κάποιων κριτηρίων, όπως ο αριθμός Prandtl και Rayleigh. Εκτός από τον υπολογισμό του συντελεστή μεταβίβασης σ αυτήν την ενότητα βρίσκουμε την εξοικονόμηση ενέργεια που επιτυγχάνουμε με την προσθήκη μονωτικών υλικών στις συγκεκριμένες εφαρμογές. Αυτό γίνεται συγκρίνοντας την κατάσταση πριν και μετά, και αξιολογώντας οικονομικά το όφελος που προκύπτει σε σχέση με το κόστος που είχε η επένδυση.

Στην τέταρτη ενότητα ασχολούμαστε και μελετούμε διάφορους τύπους εναλλακτών θερμότητας, σε σχέση και με την ενεργειακή τους συμπεριφορά. Αρχικά βρίσκουμε τους συντελεστές συναγωγής με την βοήθεια συγκεκριμένων υπολογιστικών σχέσεων, όπως κάναμε και στην προηγούμενη ενότητα. Βασικά ζητούμενα σ αυτές τις μελέτες είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη καθώς και το απαιτούμενο εμβαδόν της επιφάνειας, ώστε να μεταφέρεται θερμότητα με ένα δεδομένο ρυθμό για δεδομένες θερμοκρασίες και ρυθμούς ροής ρευστών. Ακόμα βλέπουμε πως επηρεάζεται η λειτουργία του εναλλάκτη με αλλαγές στις συνθήκες, οι θερμικές απώλειες από την προσθήκη μονώσεων, καθώς και πως οι επικαθίσεις αλάτων επηρεάζουν την αποδοτικότητα του εναλλάκτη.

Ως συμβουλευτικά βοηθήματα χρησιμοποιήθηκαν, κυρίως οι Σημειώσεις παραδόσεων του κ. Κτενιαδάκη Μιχ., τα λιγοστά ελληνικά συγγράμματα καθώς και αρκετά ξένα (αγγλικά) βιβλία Μετάδοσης Θερμότητας.

Ευχαριστώ όλους όσους βοήθησαν, με οποιοδήποτε θετικό ή αρνητικό σχόλιο και προτάσεις, στην περαιώση και αρτιότερη εμφάνιση της πτυχιακής.

A. Στρατάκη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ..... 5

Μελέτη 1^η .

Μονωμένες και αμόνωτες οροφές, προστατευόμενες ή εκτεθειμένες –

Τεχνικοοικονομική διερεύνηση. 5

Λύση: 6

Ερώτημα Α:..... 8

Ερώτημα Β:..... 11

Ερώτημα Γ:..... 12

Συμπέρασμα:..... 19

Μελέτη 2^η.

Θερμικές απώλειες οροφής (Με ψευδοροφή) – Διερεύνηση για το βέλτιστο

πάχος μόνωσης..... 20

Ερώτημα Α:..... 21

Ερώτημα Β:..... 24

Ερώτημα Γ:..... 25

Ερώτημα Δ:..... 27

Ερώτημα Ε..... 29

Συμπέρασμα:..... 31

Μελέτη 3^η.

Διαμόρφωση δαπέδου σε δαπεδοθέρμανση – Θερμικές ροές προς τα πάνω και

προς τα κάτω – Βέλτιστη θερμομόνωση..... 33

Λύση: 34

Ερώτημα Α:..... 34

Ερώτημα Β:..... 36

Ερώτημα Γ:..... 37

Ερώτημα Δ:..... 38

Ερώτημα Ε:..... 39

Συμπέρασμα:..... 42

Μελέτη 4^η

Μονωμένα και αμόνωτα επίπεδα τοιχώματα – Τεχνικοοικονομική διερεύνηση. 43

Λύση: 44

Ερώτημα Α:..... 44

Ερώτημα Β:..... 45

Ερώτημα Γ:..... 49

Ερώτημα Δ:..... 51

Συμπέρασμα:..... 54

Μελέτη 5^η.

Θερμομόνωση σωληνώσεων ζεστού νερού – Η επίδραση του πάχους μόνωσης

σε σχέση με τη διάμετρο – Βέλτιστο πάχος μόνωσης σωληνώσεων..... 56

Λύση: 57

Ερώτημα Α:..... 57

Ερώτημα Β:..... 58

Ερώτημα Γ:..... 60

Ερώτημα Δ:..... 67

Συμπέρασμα:..... 71

2. ΣΥΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.	72
Μελέτη 6 ^η	
Πίστα παγοδρομίου - Μείωση απωλειών ακτινοβολίας - Εξοικονόμηση Ενέργειας.....	72
Λύση :	73
Ερώτημα Α:.....	73
Ερώτημα Β:.....	75
Ερώτημα Γ:.....	76
Ερώτημα Ε:.....	79
Συμπέρασμα:.....	83
Μελέτη 7 ^η	
Μπαλκονόπορτα με διπλά τζάμια μείωση απωλειών ακτινοβολίας.....	84
Λύση:	84
Ερώτημα Α:.....	85
Ερώτημα Β:.....	86
Ερώτημα Γ:.....	87
Ερώτημα Δ:.....	88
Συμπέρασμα:.....	90
Μελέτη 8 ^η .	
Κολυμβητική δεξαμενή μείωση απωλειών ακτινοβολίας – Εξοικ. Ενέργειας.....	92
Λύση:	93
Ερώτημα Α:.....	93
Ερώτημα Β:.....	95
Ερώτημα Γ:.....	99
Ερώτημα Δ:.....	101
Συμπέρασμα:.....	102
Μελέτη 9 ^η .	
Οροφή ψυκτικού θαλάμου υπό την επίδραση και της ηλιακής ακτινοβολίας.....	103
Λύση:	104
Ερώτημα Α:.....	104
Ερώτημα Β:.....	105
Υποερώτημα Β1.....	105
Υποερώτημα Β2.....	107
Ερώτημα Γ:.....	108
Συμπέρασμα:.....	115
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΒΙΒΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΩΣΗΣ	116
Μελέτη 10 ^η .	
Αμόνωτη ή μονωμένη κυλινδρική δεξαμενή ζεστού νερού – Υπολογισμός συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας – Οικονομική αξιολόγηση μόνωσης..	116
Λύση:	117
Ερώτημα Α:.....	117
Ερώτημα Β:.....	127
Ερώτημα Γ:.....	128
Ερώτημα Δ:.....	135
Συμπέρασμα:.....	137

Μελέτη 11 ^η .	
Θερμομόνωση επιφάνειας ξηραντήριου – Υπολογισμός συντελεστών μεταβίβασης της θερμότητας –Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση μόνωσης. ...	139
Λύση:	140
Ερώτημα Α:.....	140
Ερώτημα Β:.....	146
Ερώτημα Γ:.....	151
Συμπέρασμα:.....	153
4.ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	155
Μελέτη 12 ^η	
Βυθισμένος εναλλάκτης θερμότητας Επανάψυξης νερού – Βελτίωση του COP ψύκτη.....	155
Λύση:	156
Ερώτημα Α:.....	156
Ερώτημα Β:.....	158
Ερώτημα Γ:.....	159
Ερώτημα Δ:.....	160
Συμπέρασμα:.....	166
Μελέτη 13 ^η .	
Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων – Υπολογισμός του συνολικού συντελ. μετάδοσης θερμότητας	167
Λύση:	168
Ερώτημα Α, Β:.....	168
Ερώτημα Γ:.....	184
Ερώτημα Δ:.....	192
Συμπέρασμα:.....	193
Μελέτη 14 ^η .	
Προθερμαντήρας μαζούτ και υπολογισμός θερμικών απωλειών του.	194
Λύση:	195
Ερώτημα Α:.....	195
Ερώτημα Β:.....	207
Ερώτημα Γ:.....	210
Συμπέρασμα:.....	218
Μελέτη 15 ^η .	
Πλακοειδής εναλλάκτης - Επίπτωση της θερμοκρασίας εισόδου θερμαντικού μέσου και της επικάλυψης των αλάτων	219
Λύση:	220
Ερώτημα Α:.....	220
Ερώτημα Β:.....	224
Ερώτημα Γ:.....	226
Συμπέρασμα:.....	230
Παράρτημα 1. Επεξηγήσεις εξισώσεων.	231
Επεξήγηση εξισώσεων Μετάδοσης Θερμότητας.	231
1. Μετάδοση θερμότητας με αγωγή – συναγωγή.	231
2. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.	233
3. Σχέσεις υπολογισμού συντελεστών συναγωγής για φυσική συναγωγή.	236
4. Σχέσεις υπολογισμού συντελ. συναγωγής για εξαναγκασμένη συναγωγή....	238
5. Σχέσεις υπολογισμού για εναλλάκτες θερμότητας.	240
6. Επεξήγηση εξισώσεων Εξοικονόμησης ενέργειας.	243

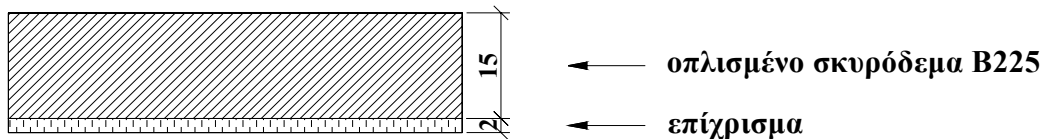
Παράρτημα 2. Πίνακες.	246
Πίνακας A1. Συντελεστές θερμική αγωγιμότητας υλικών	246
Πίνακας A2. Συντελεστές θερμικής μετάβασης (από αέρα σε οικοδομικό τοίχωμα και αντίστροφα)	252
Πίνακας A3. Τιμές του συντελεστή μεταβίβασης της θερμότητας (α_i, α_o)	252
Πίνακας A4. Θερμοκρασιών και άλλων στοιχείων πόλεων.	253
Πίνακας A5. Συντελεστής ολικής εκπομπής (ακτινοβολίας) διαφόρων επιφανειών.	255
Πίνακας A6. Συντελεστής απορρόφησης διαφόρων επιφανειών ως προς την ηλιακή ακτινοβολία(α_s)	260
Πίνακας A7. Θερμογόνος δύναμη καυσίμων.	260
Πίνακας A8. Πυκνότητα υγρών και αέριων καυσίμων.	261
Πίνακας A9. Συντελεστές μετατροπής μονάδων ενέργειας.	261
Πίνακας A10. Συντελεστές μετατροπής μονάδων ισχύος.	261
Βιβλιογραφία.	262
Διαδικτυακοί Τόποι.	262

1. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.

Μελέτη 1^η.

Μονωμένες και αμόνωτες οροφές, προστατευόμενες ή εκτεθειμένες – Τεχνικοοικονομική διερεύνηση.

Στο παρακάτω σχήμα δείχνεται η οροφή ισόγειας κατοικίας σε τομή. (Οι διαστάσεις σε cm.) η κατοικία βρίσκεται στην Αθήνα και θερμαίνεται έτσι ώστε η θερμοκρασία των χώρων της να είναι 20 °C.



Αρχικά η οροφή βρίσκεται εκτεθειμένη στο εξωτερικό περιβάλλον, διότι ο ιδιοκτήτης σκοπεύει να συνεχίσει μελλοντικά την ανέγερση ορόφου, ο οποίος θα θερμαίνεται από την ίδια εγκατάσταση.

Ο ιδιοκτήτης προβληματίζεται αν πρέπει να προχωρήσει σε μια απλή θερμομόνωση της οροφής, προκειμένου να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες επί όσο χρονικό διάστημα δεν θα υπάρχει ο όροφος. Η θερμομόνωση θα γίνει με επικάλυψη της οροφής με διογκωμένη πολυουρεθάνη, σε πάχος 4cm και τελική επικάλυψη γαρμπιλοσκυροδέματος 1700 kg/m³, σε πάχος 5cm.

A. Να υπολογισθεί η μείωση των απωλειών θερμότητας από την οροφή και της καταναλισκόμενης αντίστοιχα ετήσιας ποσότητας πετρελαίου (diesel), αφού προηγουμένως υπολογισθούν (με προσέγγιση χιλιοστού) όλοι οι απαιτούμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας.

Υποθέστε: -Συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης θέρμανσης 80%.

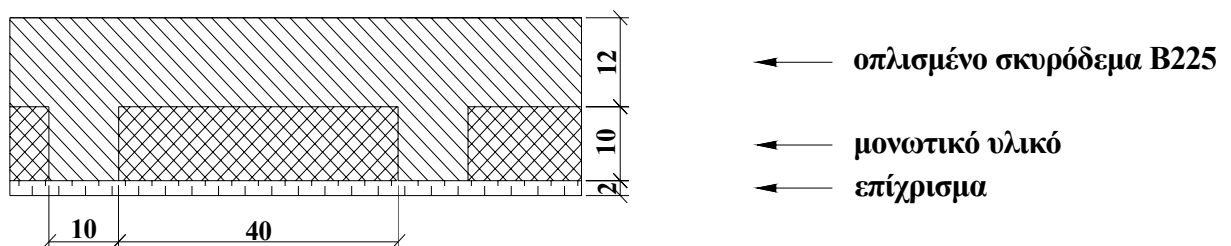
B. Να βρεθεί για πόσα (τουλάχιστον) χρόνια αν καθυστερήσει η ανέγερση του ορόφου θα είναι συμφέρουσα η τοποθέτηση της μόνωσης.

Υποθέστε: - Κόστος της μόνωσης 35 €/m².

- Επιτόκιο δανεισμού (αποπληθωρισμένο) 5%.

- Κόστος καυσίμου 0,60 €/L.

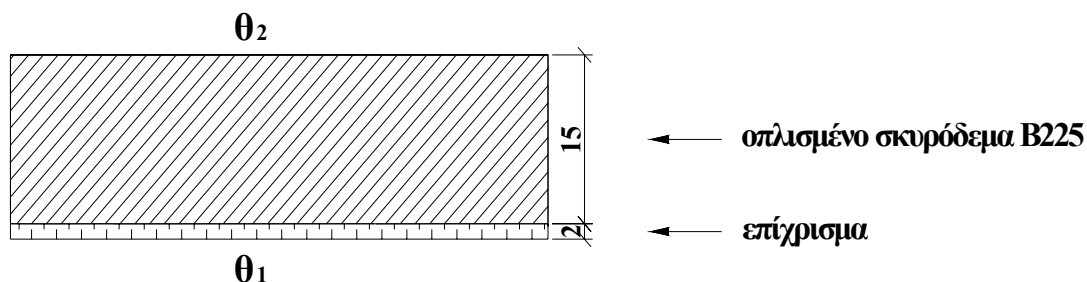
Γ. Να επαναληφθούν τα ερωτήματα A και B, αλλά για την περίπτωση που η οροφή είναι τύπου Z\lner, όπως στο παρακάτω σχήμα (Οι διαστάσεις σε cm).



Λύση:

Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τους συντελεστές θερμοπερατότητας που θα έχουμε στην περίπτωση αμόνωτης οροφής και τον συντελεστή θερμοπερατότητας στην περίπτωση που υπάρχει μόνωση πάνω από την οροφή.

α) Περίπτωση: Χωρίς μόνωση.



Σχήμα 1. Τομή της οροφής χωρίς την προσθήκη μονωτικού υλικού.

Στρώσεις	d (m)	λ (kcal/m h °C)
1. Οπλισμένο σκυρόδεμα B225	0,15	1,75
2. Ασβεστοτσιμεντοκονιάμα	0,02	0,75

Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας βρίσκονται από τον Πίνακα Α1 του παραρτήματος 2.

$$K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

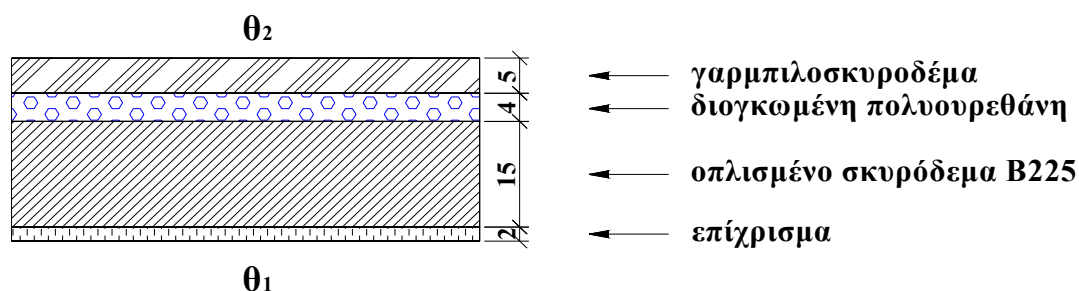
α_i :	Εσωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/hm ² °C
α_0 :	Εξωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/hm ² °C
δ_1 :	Πάχος στρώματος οπλισμένου σκυροδέματος	m
δ_2 :	Πάχος στρώματος ασβεστοτσιμεντοκονιάματος	m

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{οροφής}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_i}} \\ \alpha_0 &= 20 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}, \delta_1 = 0,15 \text{ m} \\ \delta_2 &= 0,02 \text{ m}, \lambda_1 = 1,75 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \\ \lambda_2 &= 0,75 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \\ \alpha_i &= 7 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \end{aligned} \right\} K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,15}{1,75} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{1}{7}} = 3,276 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

$$K_{\text{οροφής}} = 3,276 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

β) Περίπτωση: Με μόνωση.



Σχήμα 2. Τομή της οροφής με την προσθήκη μονωτικού υλικού.

Στρώσεις	d (m)	λ (kcal/m h °C)
1. Γαρπιλοσκυρόδεμα 1700 kg/m ³	0,05	0,70
2. Διογκωμένη πολυουρεθάνη	0,04	0,035
3. Οπλισμένο σκυρόδεμα B225	0,15	1,75
4. Ασβεστοτσιμεντοκονιάμα	0,02	0,75

$$K'_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

α_i :	Εσωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/hm ² °C
α_0 :	Εξωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/hm ² °C
δ_1 :	Πάχος στρώματος γαρπιλοσκυροδέματος 1700 kg/m ³	m
δ_2 :	Πάχος στρώματος διογκωμένης πολυουρεθάνης	m
δ_3 :	Πάχος στρώματος οπλισμένου σκυροδέματος	m
δ_4 :	Πάχος στρώματος ασβεστοτσιμεντοκονιάματος	m

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$K'_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_i}}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \alpha_0 = 20 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}, \quad \delta_1 = 0,05 \text{ m} \\
 \delta_2 = 0,04 \text{ m}, \quad \delta_3 = 0,02 \text{ m}, \quad \delta_4 = 0,15 \text{ m}, \\
 \lambda_1 = 0,70 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}, \\
 \lambda_2 = 0,035 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}, \\
 \lambda_3 = 0,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}, \\
 \lambda_4 = 1,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}, \\
 \alpha_i = 7 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}
 \end{array} \right\} K'_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0,05}{0,70} + \frac{0,04}{0,035} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{0,15}{1,75} + \frac{1}{7}}$$

$$= 0,658 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

$$K'_{\text{οροφής}} = 0,658 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

Ερώτημα Α:

Οι απώλειες θερμότητας που θα έχουμε ανά m^2 της οροφής θα βρεθεί με την χρήση του παρακάτω τύπου. Συγκρίνοντας τις απώλειές που έχουμε χωρίς την μόνωση και με την ύπαρξη της μόνωσης βρίσκουμε την μείωση των απωλειών.

$$q = K_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

q:	Οι απώλειες θερμότητας της οροφής	kcal/hm ²
K _{ορ.} :	Συντελεστής θερμοπερατότητας οροφής	kcal/hm ² °C
θ ₁ :	Εσωτερική θερμοκρασία χώρου	°C
θ ₂ :	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C

Η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου σύμφωνα με τα δεδομένα είναι ίση με $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος για την περιοχή της Αθήνας σύμφωνα με τον Πίνακα Α4 του παραρτήματος 2 είναι $+1^\circ\text{C}$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) για κάθε περίπτωση αντίστοιχα προκύπτει:

α) Περίπτωση: Χωρίς μόνωση.

$$\left. \begin{array}{l} q_a = K_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ K_{\text{οροφής}} = 3,276 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \\ \theta_1 = 20^\circ\text{C}, \theta_2 = 1^\circ\text{C} \end{array} \right\} q_a = 3,276 \cdot (20 - 1) = 62,24 \text{ kcal/hm}^2$$

$$q_a = 62,24 \text{ kcal/hm}^2$$

β) Περίπτωση: Με μόνωση.

$$\left. \begin{array}{l} q_b = K'_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ K'_{\text{οροφής}} = 0,658 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \\ \theta_1 = 20^\circ\text{C}, \theta_2 = 1^\circ\text{C} \end{array} \right\} q_b = 0,658 \cdot (20 - 1) = 12,50 \text{ kcal/hm}^2$$

$$q_b = 12,50 \text{ kcal/hm}^2$$

Η μείωση θερμικής ισχύος εξαιτίας τοποθέτηση της μόνωσης είναι ίση με:

$$\Delta q = q_a - q_b \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta q = q_a - q_b \\ q_a = 62,24 \text{ kcal/hm}^2 \\ q_b = 12,50 \text{ kcal/hm}^2 \end{array} \right\} \Delta q = 62,24 - 12,50 = 49,74 \text{ kcal/hm}^2$$

$$\Delta q = 49,74 \text{ kcal/hm}^2$$

Το ποσοστό μείωσης των απωλειών είναι:

$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{\Delta q}{q_a} \\ \Delta q = 49,74 \text{ kcal/hm}^2 \\ q_a = 62,24 \text{ kcal/hm}^2 \end{array} \right\} P = \frac{49,74}{62,24} = 0,799 \quad \mathbf{P\% \approx 80 \%}$$

Για να βρούμε την μείωση της ποσότητας πετρελαίου που θα έχουμε εξαιτίας της τοποθέτησης της μόνωσης θα πρέπει πρώτα να βρούμε τη θερμική ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια μπορούμε να βρούμε την ενέργεια που εξοικονομούμε λόγω της τοποθέτησης της μόνωσης.

Η ολικές ενεργειακές απώλειες χωρίζονται στις θερμικές απώλειες λόγω θερμοπερατότητας (αγωγιμότητας) και στις θερμικές απώλειες λόγω αερισμού.

$$E_{ολ.} = E_m + E_a \text{ (Εξίσωση 5)}$$

όπου:

- $E_{ολ.}$: Ολική ενεργειακή απώλεια.
- E_m : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμότητας
- E_a : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αερισμού

- Θερμικές απώλειες λόγω αγωγιμότητας:

$$E_m = K_{op} \cdot F_{ολ} \cdot DD_h \cdot 24 \text{ (Εξίσωση 6)}$$

όπου:

- E_m : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμότητας kcal/y
- K_{op} : Συντελεστής θερμοπερατότητας kcal/h m² °C.
- $F_{ολ}$: Συνολική επιφάνεια m²
- DD_h : Βαθμοημέρες θέρμανσης °C·day

- Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αερισμού:

$$E_a = \frac{Q_a \cdot DD_h \cdot 24}{\Delta\theta} \text{ (Εξίσωση 7)}$$

όπου:

- E_a : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αερισμού kcal/y
- Q_a : Απώλειες αερισμού kcal/h
- DD_h : Βαθμοημέρες θέρμανσης °C·day
- $\Delta\theta$: Θερμοκρασιακή διαφορά °C

Για να έχουμε θερμικές απώλειες λόγω αερισμού πρέπει να υπάρχουν ανοίγματα έτσι ώστε η είσοδος αέρα από της χαραμάδες τους να αυξάνει τις απώλειες. Στην περίπτωση μας η οροφή δεν διαθέτει ανοίγματα, άρα δεν υπάρχουν απώλειες λόγω αερισμού (ή αν υπάρχουν είναι όμοια στις δύο περιπτώσεις).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) και ανά μονάδα επιφάνειας της μόνωσης προκύπτουν οι παρακάτω απώλειες λόγω αγωγιμότητας για κάθε περίπτωση:

α) Περίπτωση: Χωρίς μόνωση.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{E_{m\alpha}}{F_{\text{ολ.}}} = K_{\text{οπ.}} \cdot DD_h \cdot 24 \\ K_{\text{οπ.}} = 3,276 \text{ kcal/hm}^2 \text{ }^\circ\text{C} \\ DD_h = 1100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d/y} \end{array} \right\} \frac{E_{m\alpha}}{F_{\text{ολ.}}} = 3,276 \cdot 1100 \cdot 24 = 86486,4 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

$$\frac{E_{m\alpha}}{F_{\text{ολ.}}} = 86486 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

β) Περίπτωση: Με μόνωση.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{E_{m\beta}}{F_{\text{ολ.}}} = K'_{\text{οπ.}} \cdot DD_h \cdot 24 \\ K'_{\text{οπ.}} = 0,658 \text{ kcal/hm}^2 \text{ }^\circ\text{C} \\ DD_h = 1100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d/y} \end{array} \right\} \frac{E_{m\beta}}{F_{\text{ολ.}}} = 0,658 \cdot 1100 \cdot 24 = 17371,2 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

$$\frac{E_{m\beta}}{F_{\text{ολ.}}} = 17371 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

Η εξοικονομούμενη ενέργεια είναι ίση με:

$$\Delta E = E_{m\alpha} - E_{m\beta} \text{ (Εξίσωση 8)}$$

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη εξίσωση προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta E = E_{m\alpha} - E_{m\beta} \\ E_{m\alpha} = 86486 \text{ kcal/m}^2\text{y} \\ E_{m\beta} = 17371 \text{ kcal/m}^2\text{y} \end{array} \right\} \Delta E = 86486 - 17371 = 69115 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

$$\Delta E = 69115 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

Για την μείωση της ετήσιας κατανάλωσης πετρελαίου θα πρέπει να γίνει χρήση του παρακάτω τύπου:

$$\Delta G = \frac{\Delta E}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \text{ (Εξίσωση 9)}$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	kg/m ² y
ΔE :	Εξοικονόμηση ενέργειας	kcal/ m ² y
Θ_{κ} :	Κατώτερα θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kcal/ kg
n:	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (9) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta G = \frac{\Delta E}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \\ \Delta E = 69115 \text{ kcal/m}^2\text{y} \\ n = 0,80 \\ \Theta_{\kappa} = 10250 \text{ kcal/kg} \end{array} \right\} \Delta G = \frac{69115}{0,80 \cdot 10250} = 8,43 \text{ kg/m}^2\text{y} \quad \Delta G = \mathbf{8,43 \text{ kg/m}^2\text{y}}$$

Όμως η πυκνότητα του diesel είναι ίση με 0,84 kg /L, έτσι:

$$\Delta G = \frac{8,43 \text{ kg/m}^2\text{y}}{0,84 \text{ kg/L}} = 10,04 \text{ L/m}^2\text{y} \Rightarrow \Delta G \cong \mathbf{10 \text{ L/m}^2\text{y}}$$

Ερώτημα Β:

Για να είναι συμφέρουσα η τοποθέτηση της μόνωσης θα πρέπει να έχουμε κερδίσει πίσω τα χρήματα που ξοδέψαμε για αυτή την επένδυση πριν την ανέγερση του πάνω ορόφου. Το χρονικό αυτό διάστημα, και για ένα συγκεκριμένο αποπληθωρισμένο επιτόκιο θα μας το δώσει η Εντοκή Περίοδος Αποπληρωμής (Ε.Π.Α). Το χρονικό διάστημα στο οποίο μηδενίζεται η Καθαρά Παρούσα Αξία (Κ.Π.Α) είναι η Ε.Π.Α. Ο τύπος που θα μας δώσει την Ε.Π.Α. είναι ο παρακάτω:

$$EPA = \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{AKE}{KEOO}\right]}{\ln(1+r)} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Και το ΕΟΟ ισούται με:

$$EOO = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

EPA:	Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής	years
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	
AKE:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης	Ευρώ
KEOO:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	Ευρώ/y
τ_{κ} :	Τιμή καυσίμου	€/L

Επομένως αντικαθιστώντας στην εξίσωση (11) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} EOO = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \\ \Delta G = 10 \text{ L/m}^2\text{y} \\ \tau_{\kappa} = 0,60 \text{ €/L} \end{array} \right\} EOO = 10 \cdot 0,60 = 6 \text{ €/m}^2\text{y} \quad \mathbf{EOO = 6 \text{ €/m}^2\text{y}}$$

Επειδή δεν έχουμε άλλα έξοδα λειτουργίας, συντήρησης το ΕΟΟ είναι και ΚΕΟΟ. Το καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος είναι ίσο με $\mathbf{KEOO = 6 \text{ €/m}^2 \text{ y}}$.

Το ΑΚΕ από τα δεδομένα μας είναι ίσο με 35 €/m².

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) προκύπτει:

$$EPA = \frac{-\ln[1 - r \cdot \frac{AKE}{KEOO}]}{\ln(1+r)}$$

$$EPA = \frac{-\ln[1 - 0,05 \cdot \frac{35}{6}]}{\ln(1+0,05)} \approx 7,06 \text{ years}$$

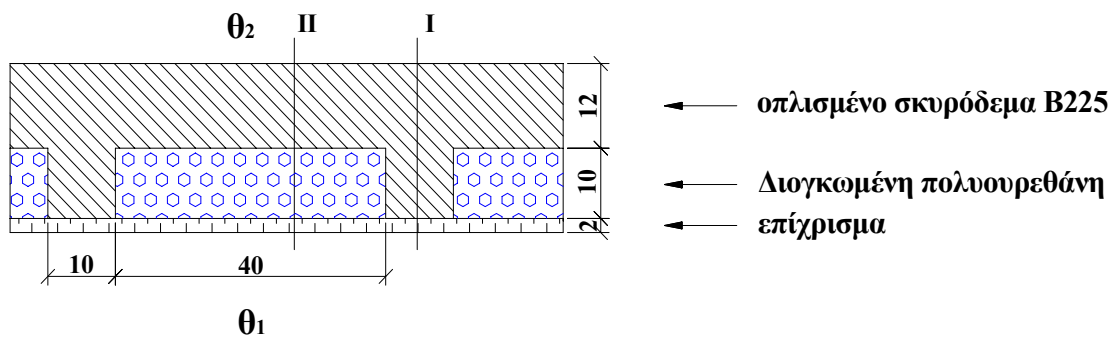
$r = 0,05 \quad AKE = 35 \text{ €/m}^2 \quad KEOO = 6 \text{ €/m}^2 \text{y}$

EPA ≈ 7,06 years

Ερώτημα Γ:

Για το τρίτο ερώτημα θα πρέπει να υπολογίσουμε συντελεστή θερμοπερατότητας όταν η οροφή είναι τύπου Z\l\lner και τον συντελεστή θερμοπερατότητας που θα έχουμε όταν σ' αυτόν τον τύπο οροφής προστεθεί επιπλέον μόνωση. Η διαδικασία υπολογισμού αυτών των συντελεστών αναλύεται παρακάτω.

α) Περίπτωση: Οροφή τύπου Z\l\lner.



Σχήμα 3. Τομή της οροφής τύπου Z\l\lner.

Στρώσεις	I_m^d (m)	II_m^d (m)	λ (kcal/m h°C)
1. Οπλισμένο σκυρόδεμα B225	0,22	0,12	1,75
2. Διογκωμένη πολυουρεθάνη	-	0,10	0,035
3. Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0,02	0,02	0,75

Για το κομμάτι της οροφής που δεν έχει μόνωση I:

$$K_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

Για το κομμάτι της οροφής που έχει μόνωση II:

$$K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας της οροφής τύπου Z\l\lner με αυτές τις διαστάσεις της μόνωσης ισούται με:

$$K_z = \frac{10}{50} \cdot K_I + \frac{40}{50} \cdot K_{II} \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (12) τα δεδομένα που έχουμε προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{aligned}
 K_I &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_0}} \\
 \alpha_i &= 7 \text{ kcal/hm}^2\text{C}, \quad \delta_1 = 0,22 \text{ m} \\
 \lambda_1 &= 1,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_2 = 0,02 \text{ m} \\
 \lambda_2 &= 0,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}, \quad \alpha_0 = 20 \text{ kcal/hm}^2\text{C}
 \end{aligned} \right\} K_I = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,22}{1,75} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{1}{20}}$$

$$= 2,896 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{K_I = 2,896 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (12) τα δεδομένα που έχουμε προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{aligned}
 K_{II} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_0}} \\
 \alpha_i &= 7 \text{ kcal/hm}^2\text{C}, \quad \delta_1 = 0,12 \text{ m} \\
 \lambda_1 &= 1,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_2 = 0,10 \text{ m} \\
 \lambda_2 &= 0,035 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_3 = 0,02 \text{ m} \\
 \lambda_3 &= 0,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \\
 \alpha_0 &= 20 \text{ kcal/hm}^2\text{C}
 \end{aligned} \right\} K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,12}{1,75} + \frac{0,10}{0,035} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{1}{20}}$$

$$= 0,318 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

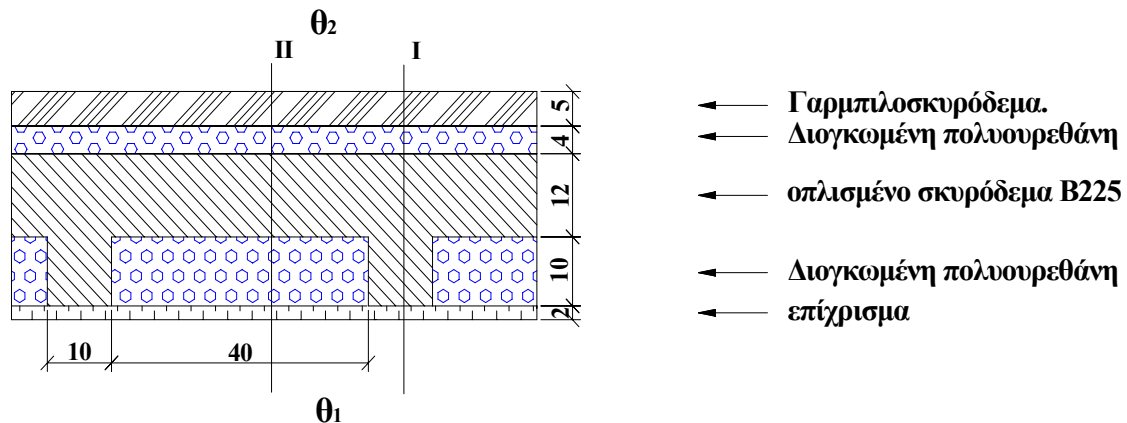
$$\mathbf{K_{II} = 0,318 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$$

Ο συντελεστής της οροφής τύπου Z\l\lner σύμφωνα με την εξίσωση (14) προκύπτει στην περίπτωση μας ίσος με:

$$\left. \begin{aligned}
 K_z &= \frac{10}{50} \cdot K_I + \frac{40}{50} \cdot K_{II} \\
 K_I &= 2,896 \text{ kcal/hm}^2\text{°C} \\
 K_{II} &= 0,318 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}
 \end{aligned} \right\} K_z = \frac{10}{50} \cdot 2,896 + \frac{40}{50} \cdot 0,318 = 0,833 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

$$K_z = 0,833 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

β) Περίπτωση: Οροφή τύπου Z\llner με επιπλέον μόνωση.



Σχήμα 4. Τομή της οροφής τύπου Z\llner με την επιπλέον προσθήκη μόνωσης.

Στρώσεις	I_m^d (m)	II_m^d (m)	λ (kcal/m h °C)
1. Γαρμπιλοσκυρόδεμα 1700 kg/m ³	0,05	0,05	0,70
2. Διογκωμένη πολυουρεθάνη	0,04	0,04	0,035
3. Οπλισμένο σκυρόδεμα	0,22	0,12	1,75
4. Διογκωμένη πολυουρεθάνη	-	0,10	0,035
5. Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0,02	0,02	0,75

Για το κομμάτι της οροφής που δεν έχει διπλή μόνωση I:

$$K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{Εξίσωση 15})$$

Για το κομμάτι της οροφής που έχει διπλή μόνωση:

$$K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

Ο συντελεστής θερμπερατότητας της οροφής και σε αυτή την περίπτωση θα δοθεί από την εξίσωση (14).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (15) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}
K_I &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_0}} \\
\alpha_i &= 7 \text{ kcal/hm}^2\text{C}, \quad \delta_1 = 0,05 \text{ m} \\
\lambda_1 &= 0,70 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_2 = 0,04 \text{ m} \\
\lambda_2 &= 0,035 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_3 = 0,22 \text{ m} \\
\lambda_3 &= 1,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_5 = 0,02 \text{ m} \\
\lambda_5 &= 0,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \alpha_0 = 20 \text{ kcal/hm}^2\text{C}
\end{aligned} \right\} K_I = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,05}{0,70} + \frac{0,04}{0,035} + \frac{0,22}{1,75} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{1}{20}}$$

$$= 0,641 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{K_I = 0,641 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (16) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}
K_{II} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_0}} \\
\alpha_i &= 7 \text{ kcal/hm}^2\text{C}, \quad \delta_1 = 0,05 \text{ m} \\
\lambda_1 &= 0,70 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_2 = 0,04 \text{ m} \\
\lambda_2 &= 0,035 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_3 = 0,12 \text{ m} \\
\lambda_3 &= 1,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_4 = 0,10 \text{ m} \\
\lambda_4 &= 0,035 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \delta_5 = 0,02 \text{ m} \\
\lambda_5 &= 0,75 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \\
\alpha_0 &= 20 \text{ kcal/hm}^2\text{C}
\end{aligned} \right\} K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,05}{0,70} + \frac{0,04}{0,035} + \frac{0,12}{1,75} + \frac{0,10}{0,035} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{1}{20}}$$

$$= 0,229 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{K_{II} = 0,229 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$$

Ο συντελεστής της οροφής τύπου Ζ\|ηηη σύμφωνα με την εξίσωση (14) προκύπτει στην περίπτωση μας ίσος με:

$$\left. \begin{aligned}
K_z &= \frac{10}{50} \cdot K_I + \frac{40}{50} \cdot K_{II} \\
K_I &= 0,641 \text{ kcal/hm}^2\text{C} \\
K_{II} &= 0,229 \text{ kcal/hm}^2\text{C}
\end{aligned} \right\} K_z = \frac{10}{50} \cdot 0,641 + \frac{40}{50} \cdot 0,229 = 0,311 \text{ kcal/hm}^2\text{C}$$

$$\mathbf{K_z = 0,311 \text{ kcal/hm}^2\text{C}}$$

Έχοντας τους συντελεστές θερμοπερατότητας για την οροφή τύπου Z\l\lner και με την επιπλέον μόνωση μπορούμε να βρούμε την μείωση της πυκνότητας θερμορροής λόγω της τοποθέτησης της επιπλέον μόνωσης.

α) Περίπτωση: Η πυκνότητα θερμορροής για την οροφή τύπου Z\l\lner δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$q_z = K_z \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 17})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (17) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} q_z = K_z \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ K_z = 0,833 \text{ kcal/hm}^2\text{C} \\ \theta_1 = 20^\circ\text{C}, \theta_2 = 1^\circ\text{C} \end{array} \right\} q_z = 0,833 \cdot (20 - 1) = 15,83 \text{ kcal/hm}^2$$

$$q_z = 15,83 \text{ kcal/hm}^2$$

β) Περίπτωση: Η πυκνότητα θερμορροής για την οροφή τύπου Z\l\lner με επιπλέον μόνωση δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$q_{z\mu} = K_{z\mu} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 18})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (18) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} q_{z\mu} = K_{z\mu} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ K_{z\mu} = 0,311 \text{ kcal/hm}^2\text{C} \\ \theta_1 = 20^\circ\text{C}, \theta_2 = 1^\circ\text{C} \end{array} \right\} q_{z\mu} = 0,311 \cdot (20 - 1) = 5,91 \text{ kcal/hm}^2$$

$$q_{z\mu} = 5,91 \text{ kcal/hm}^2$$

Η μείωση πυκνότητας θερμορροής εξαιτίας τοποθέτησης της μόνωσης είναι ίση με:

$$\Delta q = q_z - q_{z\mu} \quad (\text{Εξίσωση 19})$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta q = q_z - q_{z\mu} \\ q_z = 15,83 \text{ kcal/hm}^2 \\ q_{z\mu} = 5,91 \text{ kcal/hm}^2 \end{array} \right\} \Delta q = 15,83 - 5,91 = 9,92 \text{ kcal/hm}^2 \quad \Delta q = 9,92 \text{ kcal/hm}^2$$

Το ποσοστό μείωσης των απωλειών είναι:

$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{\Delta q}{q_z} \\ \Delta q = 9,92 \text{ kcal/hm}^2 \quad q_z = 15,83 \text{ kcal/hm}^2 \end{array} \right\} P = \frac{9,92}{15,83} = 0,626 \quad P\% \approx 62,7 \%$$

Οι θερμικές απώλειες λόγω αγωγιμότητας δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_m = K \cdot F_{ολ} \cdot DD_h \cdot 24 \quad (\text{Εξίσωση 20})$$

όπου:

E_m :	Θερμικές απώλειες λόγω αγωγιμότητας	kcal/y
K :	Συντελ. θερμοπερατότητας χωρίς ή με επιπλέον μόνωση	kcal/h m ² °C.
$F_{ολ}$:	Συνολική επιφάνεια	m ²
DD_h :	Βαθμοημέρες θέρμανσης	°C·day

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (20) για τις δύο αυτές περιπτώσεις, και ανά μονάδα επιφάνειας της μόνωσης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :

α) Περίπτωση: Χωρίς επιπλέον μόνωση.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{E_{m\alpha}}{F_{ολ}} = K_z \cdot DD_h \cdot 24 \\ K_z = 0,833 \text{ kcal/hm}^2 \text{ }^\circ\text{C} \\ DD_h = 1100 \text{ }^\circ\text{Cd/y} \end{array} \right\} \frac{E_{m\alpha}}{F_{ολ}} = 0,833 \cdot 1100 \cdot 24 = 21991 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

$$\frac{E_{m\alpha}}{F_{ολ}} = 21991 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

β) Περίπτωση: Με επιπλέον μόνωση.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{E_{m\beta}}{F_{ολ}} = K_{z\mu} \cdot DD_h \cdot 24 \\ K_{z\mu} = 0,311 \text{ kcal/hm}^2 \text{ }^\circ\text{C} \\ DD_h = 1100 \text{ }^\circ\text{Cd/y} \end{array} \right\} \frac{E_{m\beta}}{F_{ολ}} = 0,311 \cdot 1100 \cdot 24 = 8210 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

$$\frac{E_{m\beta}}{F_{ολ}} = 8210 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

Η εξοικονομούμενη ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση (8) προκύπτει ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta E = E_{m\alpha} - E_{m\beta} \\ E_{m\alpha} = 21991 \text{ kcal/m}^2\text{y} \\ E_{m\beta} = 8210 \text{ kcal/m}^2\text{y} \end{array} \right\} \Delta E = 21991 - 8210 = 13781 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

$$\Delta E = 13781 \text{ kcal/m}^2\text{y}$$

Η μείωση της ετήσιας κατανάλωσης πετρελαίου σύμφωνα με την εξίσωση (9) προκύπτει ίση με:

$$\left. \begin{aligned} \Delta G &= \frac{\Delta E}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \\ \Delta E &= 13781 \text{ kcal/m}^2\text{y} \\ n &= 0,80, \\ \Theta_{\kappa} &= 10250 \text{ kcal/kg} \end{aligned} \right\} \Delta G = \frac{13781}{0,80 \cdot 10250} = 1,68 \text{ kg/m}^2\text{y}$$

$$\Delta G = 1,68 \text{ kg/m}^2\text{y}$$

Και:

$$\Delta G = \frac{1,68 \text{ Kg/m}^2\text{y}}{0,84 \text{ Lt/Kg}} = 2 \text{ Lt/m}^2\text{y} \quad \Rightarrow \quad \Delta G = 2 \text{ Lt/m}^2\text{y}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (11) το ετήσιο οικονομικό όφελος που θα έχουμε από την επιπλέον προσθήκη μόνωσης στην οροφή τύπου Z)llner θα είναι:

$$\left. \begin{aligned} \text{EOO} &= \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \\ \Delta G &= 2 \text{ Lt/m}^2\text{y} \\ \tau_{\kappa} &= 0,60 \text{ €/Lt} \end{aligned} \right\} \text{EOO} = 2 \cdot 0,60 = 1,2 \text{ €/m}^2\text{y} \quad \text{EOO} = 1,2 \text{ €/m}^2\text{y}$$

Άρα το Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος είναι ίσο **Κ.Ε.Ο.Ο . = 1,2 €/m² y**

Η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής θα είναι ίση με:

$$\left. \begin{aligned} \text{ΕΠΑ} &= \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{\text{AKE}}{\text{ΚΕΟΟ}}\right]}{\ln(1+r)} \\ r &= 0,05, \text{ AKE} = 35 \text{ €/m}^2, \text{ ΚΕΟΟ} = 1,2 \text{ €/m}^2\text{y} \end{aligned} \right\} \text{ΕΠΑ} = \frac{-\ln\left[1 - 0,05 \cdot \frac{35}{1,2}\right]}{\ln(1+0,05)} \approx \infty$$

$$\text{ΕΠΑ} \approx \infty \text{ year}$$

Συμπέρασμα:

Με την συγκεκριμένη άσκηση διαπιστώνουμε ότι η προσθήκη μονωτικού υλικού σε μια εκτεθειμένη οροφή μπορεί να μειώσει την πυκνότητα θερμορροής ακόμη και κατά 80 %.

Συγκρίνοντας το οικονομικό όφελος που έχουμε από την προσθήκη μονωτικού υλικού σε ένα κτίριο που βρίσκεται στην Αθήνα σε σχέση με το κόστος για την προσθήκη αυτή, βλέπουμε ότι κάνουμε απόσβεση (με ένα αποπληθωρισμένο επιτόκιο 5%) του αρχικού κόστους επένδυσης σε 7 περίπου χρόνια. Αν η οροφή σε λιγότερο διάστημα από τα 7 χρόνια έχει πάψει να είναι εκτεθειμένη, λόγω ανέγερσης ενός επιπλέον ορόφου, τότε η προσθήκη μόνωσης χάνει την χρησιμότητά της, άρα δεν καταφέρνουμε να αποσβέσουμε το αρχικό κόστος της επένδυσης.

Στην περίπτωση όμως που η προσθήκη μόνωσης γίνεται σε μια οροφή όπου υπάρχει ήδη μόνωση τοποθετημένη μέσα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, (τύπου Z\lner) τότε η μείωση της πυκνότητας θερμορροής είναι περίπου ίση με 63 %. Το κόστος που θα έχει τώρα η επιπλέον προσθήκη μόνωσης σε σχέση με το οικονομικό όφελος που θα έχουμε είναι πολύ μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα ο χρόνος στον οποίο θα κάνουμε απόσβεση να είναι πολύ μεγάλος. Για το λόγο αυτό δεν δικαιολογείται η επιπλέον μόνωση σε μια οροφή που υπάρχει ήδη μόνωση, διότι η επιπλέον εξοικονόμηση σε σχέση με το κόστος της επένδυσης είναι πολύ μικρή.

Μελέτη 2^η.

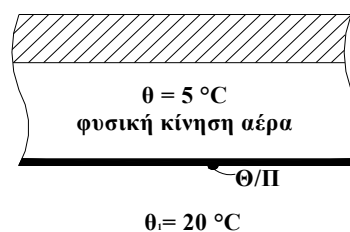
Θερμικές απώλειες οροφής (Με ψευδοροφή) – Διερεύνηση για το βέλτιστο πάχος μόνωσης.

Στην αγορά διατίθενται προκατασκευασμένες θερμομονωμένες πλάκες - πάνελ (Θ/Π), για χρησιμοποίησή τους στην κατασκευή ψευδοροφών (εσωτ. Χώρου). Οι πλάκες αποτελούνται από ένα στρώμα ελαφρού σκυροδέματος (με ανάμικτα αδρανή), πάχους 1cm πάνω στο οποίο έχει κατάλληλα επικολληθεί διογκωμένο μονωτικό υλικό, πάχους 3 cm.

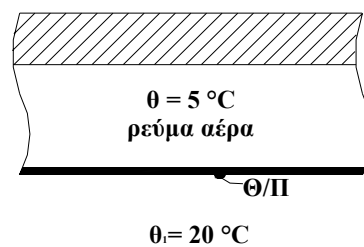
Οι Θ/Π τοποθετούνται ως ψευδοροφή, σε θερμαινόμενο κατάστημα, εμβαδού 200m² (η πλευρά με το ελαφρό σκυρόδεμα προς τον χώρο). Η θερμοκρασία του χώρου θα διατηρείται στους 20 °C, όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι 1,5 °C. Να μελετηθεί η θερμική συμπεριφορά των Θ/Π στις παρακάτω περιπτώσεις και συγκεκριμένα:

A. Δεχόμαστε ότι το κενό πάνω από τις Θ/Π είναι αέρας φυσικά κινούμενος (περίπου όπως και μέσα σ' ένα δωμάτιο), που έχει σταθερή θερμοκρασία 5°C. Ζητούνται οι απώλειες θερμότητας από την οροφή καθώς και η θερμοκρασία στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών των Θ/Π.

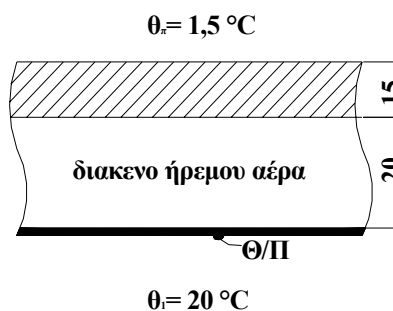
[Χρησιμοποιείτε τους συντελεστές μεταβίβασης της θερμότητας (συναγωγής) από τον σχετικό Πίνακα].



B. Δεχόμαστε ότι το κενό πάνω από τις Θ/Π είναι αέρας σταθερής θερμοκρασίας πάλι 5°C, αλλά θεωρούμε ότι αυτός κινείται σημαντικά και, γι' αυτό το λόγο, εκτιμούμε ότι ο συντελεστής μεταβίβασης της θερμότητας (συναγωγής) από το θερμομονωτικό υλικό προς τον αέρα αυτόν θα έχει τιμή 14 W/m²K. Ζητούνται οι νέες απώλειες θερμότητας από την οροφή.



Γ. Στην πραγματικότητα πάνω από τις πλάκες υπάρχει διάκενο - στρώμα σχετικά ήρεμου αέρα, πάχους 20 cm, και πάνω απ' αυτό υπάρχει η τελική πλάκα της οικοδομής, από οπλισμένο σκυρόδεμα (B225), πάχους 15cm. Ζητούνται οι πραγματικές απώλειες θερμότητας από την οροφή καθώς και η μικρότερη θερμοκρασία στο διάκενο αέρα.



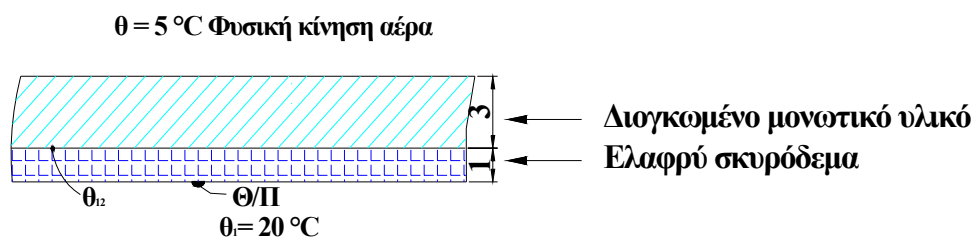
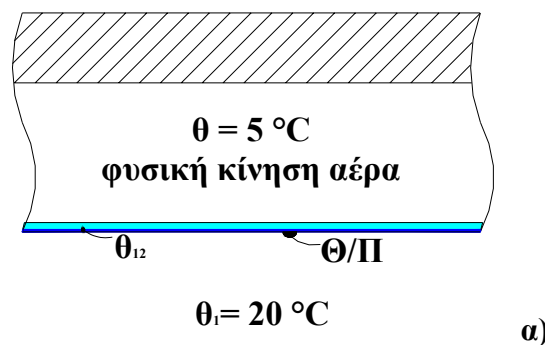
Ποια από τις παραδοχές ήταν πλησιέστερα στην πραγματικότητα : η A ή η B;

Δ. Στην περίπτωση Γ, να γίνει το διάγραμμα μεταβολής των θερμικών απωλειών, σε συνάρτηση με το πάχος του διογκωμένου μονωτικού υλικού των πλακών. (Πάχος από 0 έως 7 cm-ανά1cm). Για ποιο πάχος μονωτικού ικανοποιείται η απαίτηση του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτηρίων, ως προς τον συντελεστή θερμοπερατότητας της οροφής;

Ε. Στην περίπτωση Γ, θεωρείστε ότι το κατάστημα είναι δυνατόν να βρίσκεται στο Ηράκλειο ή στην Αθήνα ή στη Θεσσαλονίκη. Να γίνει διεύρυνση για το οικονομικό πάχος του διογκωμένου μονωτικού υλικού των πλακών, σε κάθε πόλη, λαμβάνοντας υπόψη:

- Κόστος των μονωτικών πλακών, τοποθετημένων : $3+4 \cdot x$ (€/m²), όπου x το πάχος του μονωτικού υλικού σε cm.
- Επιτόκιο δανεισμού (αποπληθωρισμένο) 7%.
- Κόστος καυσίμου 0,60 €/L.
- Βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης θέρμανσης 80%.
- Διάρκεια τεχνολογικής ζωής της θερμομόνωσης N = 15 έτη

Ερώτημα Α:



Σχήμα 1. α) Τομή της οροφής με φυσική κίνηση αέρα μεταξύ της θερμομονωμένης πλάκας - πάνελ και της οροφής, β) Λεπτομέρεια (τομή) της Θ/Π.

Οι απώλειες θερμότητας της οροφής θα υπολογισθούν σύμφωνα με τον τύπο:

$$Q = K_{\text{οροφής}} \cdot F_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

Q:	Απώλειες θερμότητας οροφής	kcal/ h
$K_{\text{οροφής}}$:	Συντελεστής θερμοπερατότητας οροφής	kcal/m ² h°C
F:	Επιφάνεια οροφής καταστήματος	m ²
θ_1 :	Θερμοκρασία στο χώρο του καταστήματος	°C
θ_2 :	Θερμοκρασία κινούμενου αέρα	°C

Στην περίπτωση αυτή ανάμεσα στην θερμομονωμένη πλάκα - πάνελ και την οροφή υπάρχει φυσικά κινούμενος αέρας θερμοκρασίας 5 °C. Λόγω της ύπαρξης αυτής οι απώλειες της οροφής θα στηρίζονται στην θερμοκρασιακή διαφορά που υπάρχει μεταξύ της θερμοκρασίας στο χώρο του καταστήματος και της θερμοκρασίας μεταξύ της Θ/Π και της οροφής. Επίσης ο συντελεστής θερμοπερατότητας που θα υπολογιστεί θα αφορά μόνο την Θ/Π διότι είναι το μόνο υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ του χώρου του καταστήματος και του κενού που υπάρχει.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας θα υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Στρώσεις	d (m)	λ (kcal/m h°C)
1. Διογκωμένο μονωτικό υλικό	0,03	0,035
2. Ελαφρύ σκυρόδεμα (ανάμικτα αδρανή)	0,01	0,50

Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας βρίσκονται από τον πίνακα A1 του πατήματος 2.

όπου:

α_i :	Εσωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/m ² h°C
α_0 :	Συντελεστής θερμικής μετάβασης στο κενό πάνω από την Θ/Π	kcal/m ² h°C
δ_1 :	Πάχος στρώματος διογκωμένου συνθετικού υλικού	m
δ_2 :	Πάχος στρώματος ελαφρού σκυροδέματος με ανάμικτα αδρανή	m
$\lambda_{1,2}$:	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αντίστοιχων υλικών	kcal/mh°C

Από τον Πίνακα A3 του παραρτήματος 2 βρήκαμε ότι $\alpha_i = 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ και $\alpha_0 = 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) τα δεδομένα μας προκύπτουν τα παρακάτω:

$$K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_0}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_i = 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}, \\ \delta_1 = 0,03 \text{ m}, \delta_2 = 0,01 \text{ m} \\ \lambda_1 = 0,035 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\ \lambda_2 = 0,50 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\ \alpha_0 = 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C} \end{array} \right\} K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,03}{0,035} + \frac{0,01}{0,50} + \frac{1}{7}} = 0,860 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$K_{\text{οροφής}} \approx 0,860 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

Οι απώλειες της οροφής σύμφωνα με την εξίσωση (2) είναι:

$$\left. \begin{aligned} Q &= K_{\text{οροφής}} \cdot F_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ K_{\text{οροφής}} &= 0,860 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \\ F_{\text{οροφής}} &= 200 \text{ m}^2, \theta_1 = 20^\circ\text{C} \\ \theta_2 &= 5^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} Q = 0,860 \cdot 200 \cdot (20 - 5) = 2580 \text{ kcal/h}$$

$$Q = 2580 \text{ kcal/h}$$

Η θερμοκρασία στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών των Θ/Π θα βρεθεί από την παρακάτω σχέση λύνοντας ως προς θ_{12} .

$$Q = \frac{(\theta_1 - \theta_{12}) \cdot F_{\text{οροφής}}}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

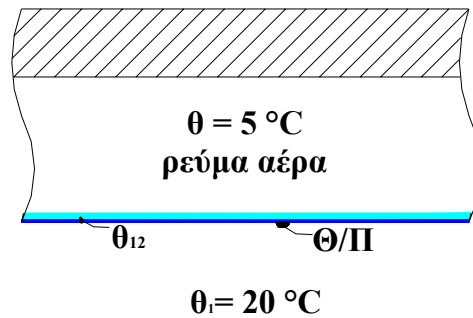
Q:	Απώλειες θερμότητας οροφής	kcal/h
θ_1 :	Θερμοκρασία στο χώρο του καταστήματος	$^\circ\text{C}$
θ_{12} :	Θερμοκρασία στη διαχωριστική επιφάνεια των υλικών της Θ/Π	$^\circ\text{C}$
F:	Επιφάνεια οροφής καταστήματος	m^2
α_i :	Εσωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
δ_2 :	Πάχος στρώματος ελαφρού σκυροδέματος με ανάμικτα αδρανή	m
λ_2 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ελαφρού σκυροδέματος	$\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$

Λύνοντας ως προς το θ_{12} και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα.

$$\left. \begin{aligned} \theta_{12} &= \frac{F_{\text{οροφής}} \cdot \theta_1 - Q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right)}{F_{\text{οροφής}}} \\ F_{\text{οροφής}} &= 200 \text{ m}^2, \theta_1 = 20^\circ\text{C} \\ Q &= 2580 \text{ kcal/h}, \\ \delta_2 &= 0,01 \text{ m} \\ \lambda_2 &= 0,50 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \\ \alpha_i &= 7 \text{ kcal/hm}^2\text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \theta_{12} = \frac{200 \cdot 20 - 2580 \cdot \left(\frac{1}{7} + \frac{0,01}{0,50}\right)}{200} = 17,90^\circ\text{C}$$

$$\theta_{12} = 17,90^\circ\text{C}$$

Ερώτημα Β:



Σχήμα 2. Τομή της οροφής με ρεύμα αέρα μεταξύ της θερμομονωμένης πλάκας - πάνελ και της οροφής.

Στο περίπτωση αυτή ανάμεσα στην θερμομονωμένη πλάκα - πάνελ και την οροφή υπάρχει ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 5 °C. Επειδή δεν είναι φυσικά κινούμενος αέρας χαρακτηρίζεται από διαφορετικό συντελεστή μεταβίβασης της θερμότητας. Σύμφωνα με τα δεδομένα ο συντελεστής μεταβίβασης της θερμότητας εκτιμάται ίσος με :
 $\alpha_0 = 14 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ή $\alpha_0 = 12,04 \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας σύμφωνα με την εξίσωση (2) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned}
 K_{\text{οροφής}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_0}} \\
 \alpha_i &= 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}, \\
 \delta_1 &= 0,03 \text{ m}, \quad \delta_2 = 0,01 \text{ m} \\
 \lambda_1 &= 0,035 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\
 \lambda_2 &= 0,50 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\
 \alpha_0 &= 12,04 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}
 \end{aligned} \right\} K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,03}{0,035} + \frac{0,01}{0,50} + \frac{1}{12,04}}$$

$$= 0,907 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{K_{\text{οροφής}} \approx 0,907 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}}$$

Οι απώλειες θερμότητας της οροφής θα υπολογισθούν σύμφωνα με την εξίσωση (1) και για τα δεδομένα αυτής της περίπτωσης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{aligned}
 Q &= K_{\text{οροφής}} \cdot F_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\
 K_{\text{οροφής}} &= 0,907 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C} \\
 F_{\text{οροφής}} &= 200 \text{ m}^2, \quad \theta_1 = 20^\circ\text{C} \\
 \theta_2 &= 5^\circ\text{C}
 \end{aligned} \right\} Q = 0,907 \cdot 200 \cdot (20 - 5) = 2721 \text{ kcal/h}$$

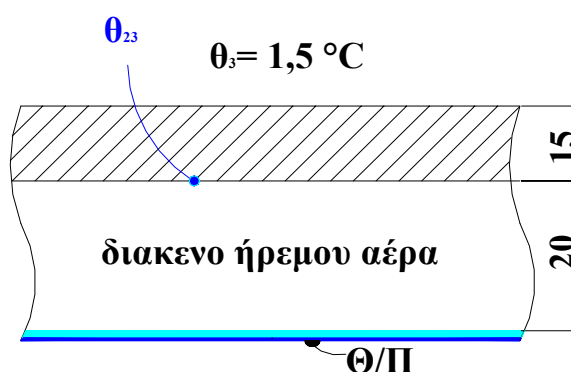
$$\mathbf{Q = 2721 \text{ kcal/h}}$$

Η θερμοκρασία στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών των Θ/Π θα βρεθεί λύνοντας ως προς το θ_{12} την εξίσωση (3) και αντικαθιστώντας.

$$\left. \begin{aligned} \theta_{12} &= \frac{F_{\text{οροφής}} \cdot \theta_1 - Q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)}{F_{\text{οροφής}}} \\ F_{\text{οροφής}} &= 200 \text{ m}^2, \quad \theta_1 = 20^\circ \text{C} \\ Q &= 2721 \text{ kcal/h}, \quad \delta_2 = 0,01 \text{ m} \\ \lambda_2 &= 0,50 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C} \quad \alpha_i = 7 \text{ kcal/hm}^2\text{C} \end{aligned} \right\} \theta_{12} = \frac{200 \cdot 20 - 2721 \cdot \left(\frac{1}{7} + \frac{0,01}{0,50} \right)}{200} = 17,78^\circ \text{C}$$

$$\theta_{12} \approx 17,8^\circ \text{C}$$

Ερώτημα Γ:



$$\theta_i = 20^\circ \text{C}$$

Σχήμα 3. Τομή της οροφής με διάκενο ήρεμου αέρα φυσική κίνηση αέρα μεταξύ της θερμομονωμένης πλάκας - πάνελ και της οροφής.

Στην περίπτωση αυτή έχουμε διάκενο ήρεμου αέρα το οποίο χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη αντίσταση θερμοδιαφυγής και δεν έχει σταθερή θερμοκρασία. Έτσι η θερμοκρασιακή διαφορά που θα δημιουργεί τις απώλειες θερμότητας θα είναι μεταξύ της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του καταστήματος και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας θα υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Στρώσεις	d (m)	λ (kcal/m h°C)
1. Οπλισμένο σκυρόδεμα B225	0,15	1,75
2. Διάκενο (από πίνακα Κ.Θ.Κ)	0,20	$\delta/\lambda=0,19(\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal})$
3. Διογκωμένο μονωτικό υλικό	0,03	0,035
4. Ελαφρύ σκυρόδεμα (ανάμικτα αδρανή)	0,01	0,50

όπου:

α_i :	Εσωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/m ² h°C
α_0 :	Συντελ. θερμικής μετάβασης εξωτερικά πάνω από την οροφή	kcal/m ² h°C
δ_1 :	Πάχος στρώματος οπλισμένου σκυροδέματος	m
δ_2 :	Πάχος διάκενου	m
δ_3 :	Πάχος στρώματος διογκωμένο μονωτικού υλικού	m
δ_4 :	Πάχος στρώματος ελαφρού σκυροδέματος (ανάμικτα αδρανή)	m
$\lambda_{1,2,3,4}$:	Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας αντίστοιχων υλικών	kcal/mh°C

Ο εσωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης είναι ίσος με $\alpha_i = 7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ και ο εξωτερικός συντελεστής $\alpha_0 = 20 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ (Από Πίνακα Α2 του παραρτήματος 2).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_0}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_i = 7 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\ \delta_1 = 0,15 \text{ m}, \delta_2/\lambda_2 = 0,19 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal} \\ \delta_3 = 0,03 \text{ m}, \delta_4 = 0,01 \text{ m} \\ \lambda_1 = 1,75 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\ \lambda_3 = 0,035 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}, \\ \lambda_4 = 0,50 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \alpha_0 = 20 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{array} \right\} K_{\text{οροφής}} = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{0,15}{1,75} + 0,19 + \frac{0,03}{0,035} + \frac{0,01}{0,50} + \frac{1}{20}}$$

$$= 0,743 \text{ kcal/hm}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$K_{\text{οροφής}} = 0,743 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

Οι απώλειες θερμότητας της οροφής θα υπολογισθούν και σε αυτή την περίπτωση σύμφωνα με την εξίσωση (1) έτσι προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} Q = K_{\text{οροφής}} \cdot F_{\text{οροφής}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ K_{\text{οροφής}} = 0,743 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \\ F_{\text{οροφής}} = 200 \text{ m}^2, \theta_1 = 20^\circ\text{C} \\ \theta_2 = \theta_3 = 1,5^\circ\text{C} \end{array} \right\} Q = 0,743 \cdot 200 \cdot (20 - 1,5) = 2749 \text{ kcal/h}$$

$$Q = 2749 \text{ kcal/h}$$

Η μικρότερη θερμοκρασία στο διάκενο αέρα είναι η θερμοκρασία που έχει το οπλισμένο σκυροδέμα από την πλευρά που είναι το διάκενο. Η θερμοκρασία αυτή θα βρεθεί από την παρακάτω σχέση λύνοντας ως προς θ_{23} .

$$Q = \frac{(\theta_{23} - \theta_3) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

Q:	Απώλειες θερμότητας οροφής	kcal/h
θ_{23} :	Θερμοκρασία πάνω στην εσωτερική πλευρά του σκυροδέματος	°C
θ_3 :	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C
F:	Επιφάνεια οροφής καταστήματος	m ²
α_0 :	Εξωτερικός συντελεστής θερμικής μετάβασης	kcal/m ² h°C
δ_1 :	Πάχος στρώματος οπλισμένου σκυροδέματος	m
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας οπλισμένου σκυροδέματος	kcal/mh°C

Η θερμοκρασία πάνω στην εσωτερική πλευρά του σκυροδέματος θα βρεθεί από την εξίσωση (5) λύνοντας ως προς το θ_{23} και αντικαθιστώντας:

$$\theta_{23} = \frac{(F_{\text{οροφής}} \cdot \theta_3) + Q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)}{F_{\text{οροφής}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} F_{\text{οροφής}} = 200 \text{ m}^2, \\ Q = 2749 \text{ kcal/h}, \\ \delta_1 = 0,15 \text{ m } \theta_3 = 1,5^\circ \text{C} \\ \lambda_1 = 1,75 \text{ kcal/hm}^\circ \text{C} \\ \alpha_0 = 20 \text{ kcal/hm}^2^\circ \text{C} \end{array} \right\} \theta_{12} = \frac{(200 \cdot 1,5) + 2749 \cdot \left(\frac{1}{20} + \frac{0,15}{1,75}\right)}{200} = 3,37^\circ \text{C}$$

$$\theta_{23} \approx 3,4^\circ \text{C}$$

Η παραδοχή που ήταν πλησιέστερα στην πραγματικότητα από τις δύο περιπτώσεις ήταν η περίπτωση Β.

Ερώτημα Δ:

Στο ερώτημα Δ πρέπει να γίνει το διάγραμμα μεταβολής των θερμικών απωλειών σε συνάρτηση με το πάχος του διογκωμένου μονωτικού υλικού μεταβάλλοντας το από 0 έως 6cm - ανά 1cm. Το διάγραμμα αυτό θα γίνει εφαρμόζοντας τα δεδομένα της Γ περίπτωσης.

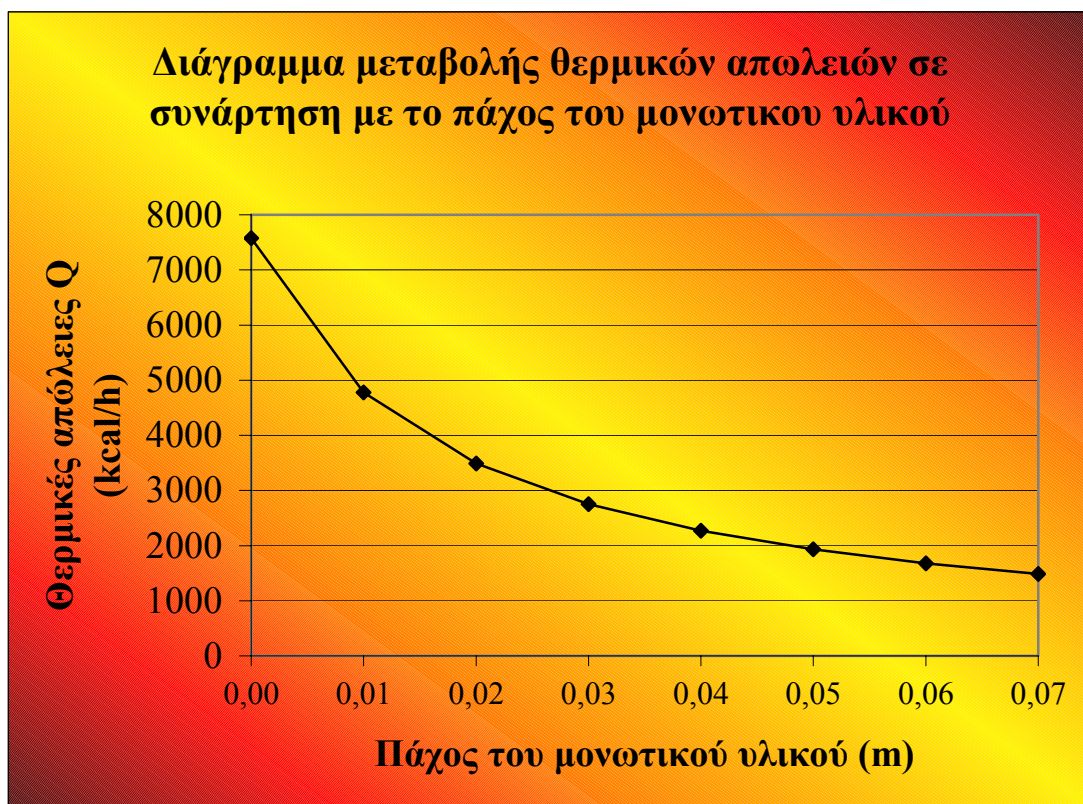
Για να προκύψει το παρακάτω διάγραμμα θα πρέπει να βρίσκουμε κάθε φορά το συντελεστή θερμοπερατότητας σύμφωνα με την εξίσωση 4 και αλλάζοντας το πάχος του μονωτικού από 0 έως 7 cm - ανά 1cm.

Στην συνέχεια θα βρίσκουμε για κάθε συντελεστή θερμοπερατότητας τις αντίστοιχες απώλειες σύμφωνα με την εξίσωση (1).

Ο πίνακας που προκύπτει και το διάγραμμα παρουσιάζονται παρακάτω.

δ_m (cm)	K (kcal/m ² h°C)	Q (kcal/h)
0,00	2,047	7574
0,01	1,292	4780
0,02	0,943	3489
0,03	0,743	2749
0,04	0,613	2268
0,05	0,522	1931
0,06	0,454	1680
0,07	0,402	1487

Πίνακας 1. Υπολογισμού των θερμικών απωλειών για πάχος μονωτικού υλικού από 0 έως 7 cm - ανά 1cm.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή των θερμικών απωλειών σε συνάρτηση με το πάχος του μονωτικού υλικού. Οι τιμές που δίνουμε στο πάχος του μονωτικού υλικού είναι από 0 έως 7cm - ανά 1cm.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων ο συντελεστής θερμοπερατότητας της οροφής ανεξάρτητα από την ζώνη πρέπει να είναι ίσος με $K_{οροφ.} \leq 0,4 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$. Από τον πίνακα βλέπουμε ότι το πάχος του μονωτικού για το οποίο το $K_{οροφ.} \approx 0,4 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ είναι τα 7 cm.

Ερώτημα Ε.

Στο ερώτημα Δ ζητείται να διερευνήσουμε ποιό είναι το βέλτιστο πάχος μόνωσης ανάλογα με την τοποθεσία που θα μπορούσε να βρίσκεται το κατάστημα. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος που θα μας οδηγούσε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα είναι η χρήση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Κ.Π.Α.). Ο τύπος που θα μας δώσει την Κ.Π.Α. είναι ο παρακάτω:

$$\text{Κ.Π.Α} = -\text{Α.Κ.Ε} + \frac{(1+r)^N}{r \cdot (1+r)^N} \cdot \text{Κ.Ε.Ο.Ο} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

- Κ.Π.Α: Καθαρά Παρούσα Αξία
Α.Κ.Ε: Αρχικό Κόστος Επένδυσης
r: Αποπληθωρισμένο επιτόκιο δανεισμού
N: Έτη
Κ.Ε.Ο.Ο: Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος

Το αρχικό κόστος επένδυσης σύμφωνα με τα δεδομένα της άσκησης, θα δίνεται από την σχέση $3 + 4 \cdot x$ (€/m²), όπου x το πάχος του μονωτικού σε cm, πολλαπλασιάζοντας το κάθε φορά με το εμβαδόν της οροφής.

Ο μόνος άγνωστος που μένει στον παραπάνω τύπο είναι το Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος. Για να μπορέσουμε να το βρούμε θα ακολουθούμε κάθε φορά την παρακάτω διαδικασία:

Θα βρίσκουμε τις απώλειες της οροφής χωρίς την τοποθέτηση μόνωσης και με την τοποθέτηση της μόνωσης.

Οι ολικές ενεργειακές απώλειες της οροφής χωρίζονται στις θερμικές απώλειες λόγω θερμοπερατότητας (αγωγιμότητα) και στις θερμικές απώλειες λόγω αερισμού.

$$E_{\text{ολ}} = E_m + E_a \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

όπου:

- $E_{\text{ολ}}$: Ολική ενεργειακή απώλεια.
 E_m : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμότητας
 E_a : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αερισμού

Στην περίπτωση αυτή επειδή η οροφή δεν έχει ανοίγματα δεν έχουμε απώλειες λόγω αερισμού.

Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμότητας χωρίς την τοποθέτηση μόνωσης:

$$E_m = K_{\text{op}} \cdot F_{\text{ολ}} \cdot DD_h \cdot 24 \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

- E_m : Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμ. χωρίς μόνωση kcal/y
 K_{op} : Συντελεστής θερμοπερατότητας χωρίς την ύπαρξη μόνωσης kcal/h m² °C.
 $F_{\text{ολ}}$: Συνολική επιφάνεια οροφής m²
 DD_h : Βαθμοημέρες θέρμανσης της πόλης που βρίσκεται το κτίριο °C · day

Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμότητας με την τοποθέτηση μόνωσης:

$$E_m' = K_{op}' \cdot F_{ολ} \cdot DD_h \cdot 24 \text{ (Εξίσωση 9)}$$

όπου:

E_m' :	Θερμικές ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγιμ. με την μόνωση	kcal/y
K_{op}' :	Συντελεστής θερμοπερατότητας με την ύπαρξη μόνωσης	kcal/h m ² °C.
$F_{ολ}$:	Συνολική επιφάνεια	m ²
DD_h :	Βαθμοημέρες θέρμανσης της πόλης που βρίσκεται το κτίριο	°C · day

Η διαφορά των απωλειών αυτών θα μας δώσει την εξοικονομούμενη ενέργεια ΔE που έχουμε τον χρόνο.

Το εξοικονομούμενο καύσιμο θα βρίσκεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta G = \frac{\Delta E}{n \cdot \Theta_k} \text{ (Εξίσωση 10)}$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	kg/y
ΔE :	Εξοικονόμηση ενέργειας	kcal/ y
Θ_k :	Κατώτερα θερμογόνος δύναμη καυσίμου	kcal/ kg
n :	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	

Η κατώτερα θερμογόνος δύναμη (Από τον Πίνακα Α7 του παραρτήματος 2) του καυσίμου σε kcal /L είναι ίση με:

$$\Theta_k = 10250 \text{ kcal/kg} \cdot 0,84 \text{ kg/L} = 8610 \text{ kcal/L.}$$

$$\Theta_k = 8610 \text{ kcal/L}$$

Το ετήσιο οικονομικό όφελος θα προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του καυσίμου που εξοικονομούμε επί την τιμή του καυσίμου από τα δεδομένα μας.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα παρακάτω.

Για το Ηράκλειο οι βαθμοημέρες θέρμανσης είναι: $DD_h = 782 \text{ °Cd/y.}$

dm (m)	$K_{οροφ}$ (kcal/m ² h°C)	$K_{οροφ}'$ (kcal/m ² h°C)	E_m (kcal/y)	E_m' (kcal/y)	ΔE (kcal/y)	ΔG (Lt/y)	τ_k (€/Lt)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε (€)	Κ.Π.Α (€)
0,01	2,047	1,292	7683619	4849651	2833968	411,4	0,60	246,84	1.400	2.126,29
0,02	2,047	0,943	7683619	3539645	4143974	601,6	0,60	360,96	2.200	2.956,57
0,03	2,047	0,743	7683619	2788925	4894694	710,6	0,60	426,36	3.000	3.090,86
0,04	2,047	0,613	7683619	2300957	5382662	781,5	0,60	468,90	3.800	2.898,57
0,05	2,047	0,522	7683619	1959379	5724240	831,0	0,60	498,60	4.600	2.522,86
0,06	2,047	0,454	7683619	1704134	5979485	868,1	0,60	520,86	5.400	2.040,86
0,07	2,047	0,402	7683619	1508947	6174672	896,4	0,60	537,84	6.200	1.483,43
0,08	2,047	0,360	7683619	1351296	6332323	919,3	0,60	551,58	7.000	879,71
0,09	2,047	0,327	7683619	1227427	6456192	937,3	0,60	562,38	7.800	234,00

Πίνακας 1. Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας για την πόλη του Ηρακλείου.

Για την Αθήνα οι βαθμομέρες θέρμανσης είναι: $DD_h = 1110 \text{ }^\circ\text{Cd/y}$.

dm (m)	$K_{οροφ}$ (kcal/m ² h ^o C)	$K_{οροφ}'$ (kcal/m ² h ^o C)	Em (kcal/y)	Em' (kcal/y)	ΔE (kcal/y)	ΔG (Lt/y)	τ_k (€/Lt)	KEEO (€/y)	A.K.E (€)	K.Π.A (€)
0,01	2,047	1,292	10906416	6883776	4022640	584,0	0,60	350,40	1.400	3.605,71
0,02	2,047	0,943	10906416	5024304	5882112	854,0	0,60	512,40	2.200	5.120,00
0,03	2,047	0,743	10906416	3958704	6947712	1008,7	0,60	605,22	3.000	5.646,00
0,04	2,047	0,613	10906416	3266064	7640352	1109,2	0,60	665,52	3.800	5.707,43
0,05	2,047	0,522	10906416	2781216	8125200	1179,6	0,60	707,76	4.600	5.510,86
0,06	2,047	0,454	10906416	2418912	8487504	1232,2	0,60	739,32	5.400	5.161,71
0,07	2,047	0,402	10906416	2141856	8764560	1272,4	0,60	763,44	6.200	4.706,29
0,08	2,047	0,360	10906416	1918080	8988336	1304,9	0,60	782,94	7.000	4.184,86
0,09	2,047	0,327	10906416	1742256	9164160	1330,5	0,60	798,30	7.800	3.604,29

Πίνακας 2. Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας για την πόλη της Αθήνας.

Για την Θεσσαλονίκη οι βαθμομέρες θέρμανσης είναι: $DD_h = 1725 \text{ }^\circ\text{Cd/y}$.

dm (m)	$K_{οροφ}$ (kcal/m ² h ^o C)	$K_{οροφ}'$ (kcal/m ² h ^o C)	Em (kcal/y)	Em' (kcal/y)	ΔE (kcal/y)	ΔG (Lt/y)	τ_k (€/Lt)	KEEO (€/y)	A.K.E (€)	K.Π.A (€)
0,01	2,047	1,292	16947383	10693727	6253656	907,6	0,60	544,56	1.400	6.379,43
0,02	2,047	0,943	16947383	7811321	9136063	1327,1	0,60	796,26	2.200	9.175,14
0,03	2,047	0,743	16947383	6152866	10794517	1567,5	0,60	940,50	3.000	10.435,71
0,04	2,047	0,613	16947383	5075306	11872077	1723,8	0,60	1034,28	3.800	10.975,43
0,05	2,047	0,522	16947383	4318927	12628456	1833,2	0,60	1099,92	4.600	11.113,14
0,06	2,047	0,454	16947383	3758755	13188628	1914,9	0,60	1148,94	5.400	11.013,43
0,07	2,047	0,402	16947383	3327210	13620173	1977,4	0,60	1186,44	6.200	10.749,14
0,08	2,047	0,360	16947383	2984552	13962831	2027,9	0,60	1216,74	7.000	10.382,00
0,09	2,047	0,327	16947383	2705882	14241501	2067,6	0,60	1240,56	7.800	9.922,29

Πίνακας 3. Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας για την πόλη της Θεσσαλονίκης

Συμπέρασμα:

Οι συνθήκες του αέρα που βρίσκεται μεταξύ οροφής και της ψευδοροφής επηρεάζουν σημαντικά τις απώλειες που έχουμε από το χώρο. Συγκρίνοντας την περίπτωση που ο αέρας κινείται φυσικά με την περίπτωση που ο αέρας κινείται σαν ρεύμα αέρα βλέπουμε ότι περισσότερες απώλειες έχουμε όταν ο αέρας κινείται σαν ρεύμα αέρα. Αυτό συμβαίνει διότι ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας όταν ο αέρας κινείται είναι μεγαλύτερος.

Οι πραγματικές συνθήκες όμως που επικρατούν είναι πολύ διαφορετικές σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις που συγκρίναμε. Οι απώλειες που έχουμε στις πραγματικές συνθήκες είναι ακόμα μεγαλύτερες και από την περίπτωση που είχαμε κίνηση του αέρα σαν ρεύμα, που είναι και η πλησιέστερη περίπτωση από τις δύο στην πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει διότι παρά την αντίσταση θερμοδιαφυγής που προσθέτει το διάκενο του αέρα αυτό δεν αντισταθμίζεται με την μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά που έχουμε (εσωτερικού και εξωτερικού χώρου), την μικρή

αντίσταση θερμοδιαφυγής του σκυροδέματος και τον συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας του περιβάλλοντος που είναι αυξημένος.

Διερευνώντας πως επηρεάζονται οι απώλειες από την οροφή σε συνάρτηση με το πάχος του μονωτικού υλικού που προσθέτουμε προκύπτει το Διάγραμμα (1). Από το Διάγραμμα (1) βλέπουμε ότι η μείωση των απωλειών είναι ανάλογη της αύξησης του μονωτικού υλικού. Για να τηρείται ο Κ.Θ.Κ. που ορίζει συντελεστή θερμοπερατότητας για την οροφή $K_{οροφ.} \leq 0,4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (ανεξάρτητα από ζώνη στην οποία βρίσκεται η οροφή) θα πρέπει να τοποθετήσουμε 7 cm μονωτικού υλικού.

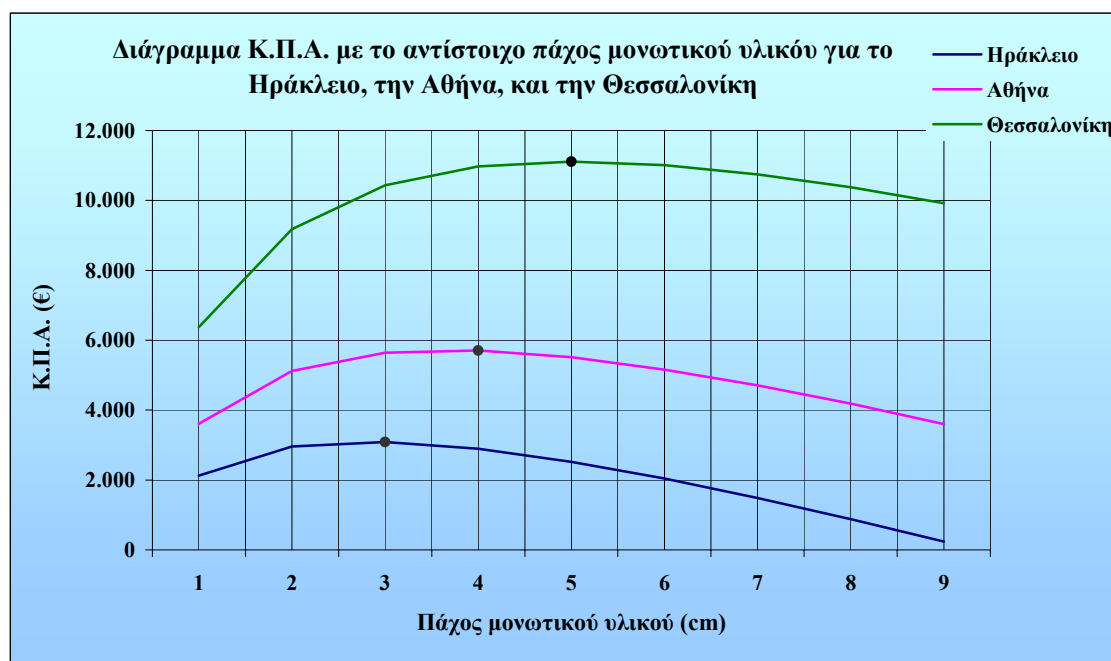
Στην συνέχεια διερευνώντας ποιο είναι το βέλτιστο πάχος της μόνωσης για πόλεις που βρίσκονται στις τρεις διαφορετικές κλιματολογικές ζώνες που χαρακτηρίζουν την Ελλάδα και με κριτήριο την Κ.Π.Α. (Η Κ.Π.Α. έχει υπολογιστεί για 15 χρόνια τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού και αποπληθωρισμένο επιτόκιο 7%) βλέπουμε ότι:

Α). Για το Ηράκλειο, μια πόλη που βρίσκεται στην Α ζώνη, η μέγιστη Κ.Π.Α. άρα και το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού επιτυγχάνονται για 3 cm μονωτικού υλικού (Κ.Π.Α. = 3.090,86 €).

Β). Για την Αθήνα, μια πόλη που βρίσκεται στην Β ζώνη, η μέγιστη Κ.Π.Α. άρα και το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού επιτυγχάνονται για 4 cm μονωτικού υλικού (Κ.Π.Α. = 5.707,43 €).

Γ). Για την Θεσσαλονίκη, μια πόλη που βρίσκεται στην Γ ζώνη, η μέγιστη Κ.Π.Α. άρα και το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού επιτυγχάνονται για 5 cm μονωτικού υλικού (Κ.Π.Α. = 11.113,14 €).

Για να τηρείται ο Κ.Θ.Κ. πρέπει να έχουμε όμως 7 cm μονωτικού υλικού ανεξάρτητα από την ζώνη. Η Κ.Π.Α. για 7 cm μονωτικού υλικού είναι αρκετά μικρότερη τόσο για το Ηράκλειο όσο και για την Αθήνα και την Θεσσαλονίκη.



Διάγραμμα 2. Κ.Π.Α. με το αντίστοιχο πάχος μονωτικού υλικού για το Ηράκλειο, την Αθήνα, και την Θεσσαλονίκη.

Μελέτη 3^η.

Διαμόρφωση δαπέδου σε δαπεδοθέρμανση – Θερμικές ροές προς τα πάνω και προς τα κάτω – Βέλτιστη θερμομόνωση.

Το δάπεδο του σχήματος ανήκει σε κτίριο που θερμαίνεται με εγκατάσταση θέρμανσης δαπέδου (δαπεδοθέρμανση). Μέσα στο ενδιάμεσο στρώμα, πάχους 16 mm, έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα οι πλαστικοί σωλήνες κυκλοφορίας του θερμαντικού νερού. Έτσι, το στρώμα αυτό αποκτά ενιαία σ' όλη τη μάζα του θερμοκρασία, οπότε θερμότητα μεταβιβάζεται τόσο προς τον θερμαινόμενο χώρο (ωφέλιμη) όσο και προς το έδαφος (απώλεια).

Σ' αυτές τις θερμάνσεις, η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας του δαπέδου είναι 29 °C, ενώ ο ολικός συντελεστής μεταβίβασης της θερότητας από το δάπεδο στο θερμαινόμενο χώρο λαμβάνεται 11,67 W/m²K. Δίνονται:

- Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας πλαστικού	: 0,235 W/mK
- Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας θερμοπετόν	: 1,38 W/mK
- Θερμοκρασία χώρου	: 20 °C
- Θερμοκρασία εδάφους	: 13 °C
- Πλαστικοί σωλήνες θερμού νερού : Εξωτ. διάμετρος 16 mm – Πάχος 2 mm	
- Συντελεστής εκπομπής του πλαστικού PVC	: 0,90

Ζητούνται :

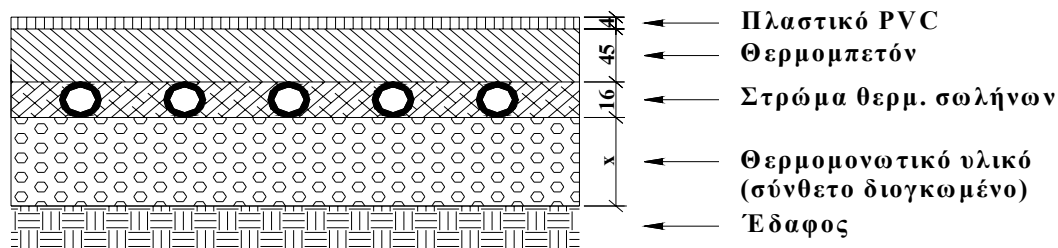
A. Η (μέγιστη) πυκνότητα θερμοροής που μπορεί να μεταβιβασθεί από το σύστημα προς το χώρο, η θερμοκρασία στην άνω πλευρά του θερμοπετόν και η θερμοκρασία που αποκτά το στρώμα τοποθέτησης των θερμαντικών σωλήνων.

B. Πόσο ποσοστό από την πυκνότητα θερμοροής (του A. ερωτήματος) μεταβιβάζεται στο χώρο με ακτινοβολία. (θεωρείστε ότι τα τοιχώματα του χώρου έχουν την ίδια θερμοκρασία με τον αέρα του χώρου).

Γ. Αν επιθυμούμε η πυκνότητα θερμοροής προς το έδαφος να είναι το 10% της θερμοροής προς το χώρο, πόσο πρέπει να είναι το πάχος του μονωτικού υλικού (κάτω από το στρώμα τοποθέτησης των θερμαντικών σωλήνων).

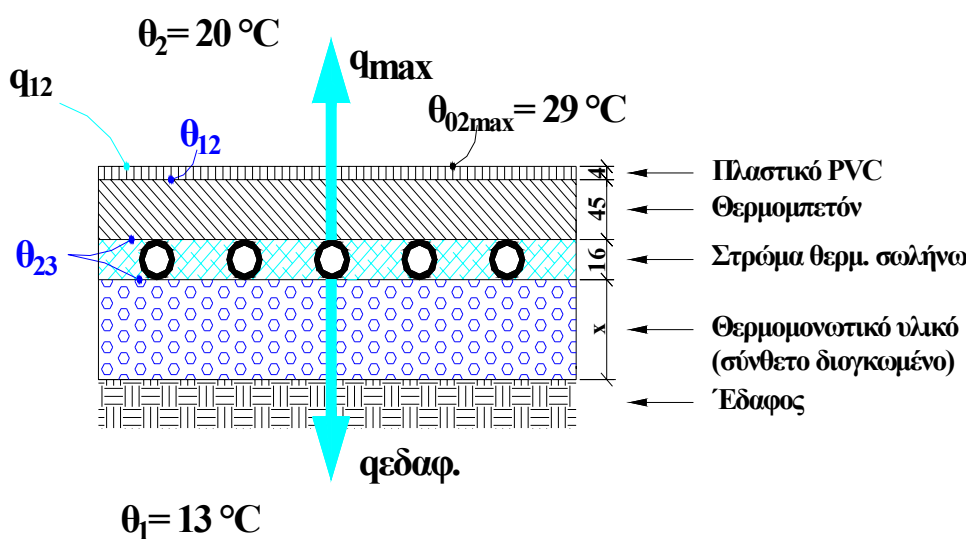
Δ. Να γίνει το διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού απωλειών προς το έδαφος σε συνάρτηση με το πάχος του μονωτικού υλικού. (Τιμές από 1 έως 10 cm – ανά 1 cm).

Ε. Να βρεθεί το βέλτιστο πάχος της μόνωσης αυτής, με το δεδομένο ότι το θερμό νερό της εγκατάστασης παράγεται σε λέβητα με καυστήρα πετρελαίου ντίζελ, με βαθμό απόδοσης 80%. Το κόστος πετρελαίου είναι 0,55 ευρώ/L και η εγκατάσταση λειτουργεί 2000 ώρες το έτος. Θεωρείστε μικτό (αποπληθωρισμένο) ετήσιο επιτόκιο 8% και διάρκεια ζωής 25 έτη. Το κόστος της μόνωσης είναι 6+5 · x €/m², όπου x το πάχος του μονωτικού σε cm.



Σχήμα 1. Τομή εγκατάστασης δαπέδου θέρμανσης (οι διαστάσεις σε mm).

Λύση:



Σχήμα 2. Τομή εγκατάστασης δαπέδου θέρμανσης και συνθήκες που επικρατούν στο χώρο.

Ερώτημα Α:

Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής που θα μεταβιβαστεί από το σύστημα προς το χώρο είναι αυτή που θα “φύγει”, από την επιφάνεια του πλαστικού όταν αυτό έχει την μέγιστη θερμοκρασία 29 °C και θα μεταδοθεί μέσω της συναγωγής στο χώρο.

Η πυκνότητα θερμορροής αυτή θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση.

$$q_{\max} = \alpha \cdot (\theta_{02} - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

q_{\max} :	Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής από το σύστημα στο χώρο	W/m^2
α :	Ολικός συντ. μεταβίβασης θερμότητας από το δάπεδο στο χώρο	W/m^2K
θ_{02} :	Θερμοκρασία πάνω στην επιφάνεια του πλαστικού	$^{\circ}C$
θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^{\circ}C$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} q_{\max} = \alpha \cdot (\theta_{02} - \theta_2) \\ \alpha = 11,67 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \theta_{02} = 29 \text{ }^\circ\text{C}, \theta_2 = 20^\circ\text{C} \end{array} \right\} q_{\max} = 11,67 \cdot (29 - 20) = 105,03 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\max} \cong 105 \text{ W/m}^2$$

Η θερμοκρασία που αποκτά η άνω επιφάνεια του θερμομοπετόν θα βρεθεί από τον παρακάτω τύπο μετάδοσης με αγωγή για επίπεδα τοιχώματα λύνοντας ως προς θ_{12} .

$$q_{\max} = \frac{\theta_{12} - \theta_{02}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

q_{\max} :	Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής από το σύστημα στο χώρο	W/m^2
θ_{12} :	Θερμοκρασία πάνω στην άνω πλευρά του θερμομοπετόν	$^\circ\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία πάνω στην επιφάνεια του πλαστικού	$^\circ\text{C}$
δ_1 :	Πάχος του πλαστικού	m
λ_1 :	Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας πλαστικού	W/mK

Λύνοντας την εξίσωση (2) ως προς θ_{12} και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{12} = (q_{\max} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1}) + \theta_{02} \\ q_{\max} = 105 \text{ W/m}^2, \delta_1 = 0,004 \text{ m}, \\ \lambda = 0,235 \text{ W/mK}, \theta_{02} = 29^\circ\text{C} \end{array} \right\} \theta_{12} = (105 \cdot \frac{0,004}{0,235}) + 29 \cong 31^\circ\text{C} \quad \theta_{12} \cong 31^\circ\text{C}$$

Η πυκνότητα θερμορροής μπορεί να δοθεί και από την παρακάτω σχέση λαμβάνοντας υπ' όψιν την αγωγή μεταξύ των τοιχωμάτων και την συναγωγή από το σύστημα στο χώρο.

$$q_{\max} = \frac{\theta_{23} - \theta_2}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

q_{\max} :	Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής από το σύστημα στο χώρο	W/m^2
α :	Ολικός συντ. μεταβ. θερμότη. από το δάπεδο στον χώρο	$\text{W/m}^2\text{K}$
θ_{23} :	Θερμοκρασία στρώματος τοποθέτησης των σωλήνων	$^\circ\text{C}$
θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^\circ\text{C}$
δ_1 :	Πάχος του πλαστικού	m
λ_1 :	Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας πλαστικού	W/mK
δ_2 :	Πάχος του θερμομοπετόν	m
λ_2 :	Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας του θερμομοπετόν	W/mK

Λύνοντας ως προς θ_{23} την εξίσωση (3) και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{23} = q_{\max} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) + \theta_2 \\ q_{\max} = 105 \text{ W/m}^2, \\ \alpha = 11,67 \text{ W/m}^2\text{K}, \delta_1 = 0,004 \text{ m} \\ \delta_2 = 0,045 \text{ m}, \lambda_1 = 0,235 \text{ W/mK} \\ \lambda_2 = 1,38 \text{ W/mK}, \theta_2 = 20^\circ\text{C} \end{array} \right\} \theta_{23} = 105 \cdot \left(\frac{1}{11,67} + \frac{0,004}{0,235} + \frac{0,045}{1,38} \right) + 20 = 34,2^\circ\text{C}$$

$$\theta_{23} = 34,2^\circ\text{C}$$

Ερώτημα Β:

Για να βρούμε το ποσοστό της πυκνότητας θερμορροής που μεταβιβάζεται στο χώρο με ακτινοβολία θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εξίσωση.

$$q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

q_{12} :	Η πυκνότητα θερμ. με ακτινοβολία από το πλαστικό στο χώρο	W/m^2
ε_{12} :	Συντελεστής εκπομπής του πλαστικού	
T_{02} :	Απόλυτη θερμοκρασία πλαστικού ($\Theta_{02}=T_{02}/100$)	K
T_2 :	Απόλυτη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($\Theta_2=T_2/100$)	K

Το Θ_{02} είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \Theta_{02} = \frac{\theta_{02} + 273}{100} \\ \theta_{02} = 29^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Theta_{02} = \frac{29 + 273}{100} = 3,02 \text{ K} \quad \Theta_{02} = 3,02 \text{ K}$$

Και το Θ_2 είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \Theta_2 = \frac{\theta_2 + 273}{100} \\ \theta_2 = 20^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Theta_2 = \frac{20 + 273}{100} = 2,93 \text{ K} \quad \Theta_2 = 2,93 \text{ K}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\ \varepsilon_{12} = 0,90 \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ \Theta_{02} = 3,02 \text{ K}, \quad \Theta_2 = 2,93 \text{ K} \end{array} \right\} q_{12} = 0,90 \cdot 5,67 \cdot (3,02^4 - 2,93^4) \cong 48,4 \text{ W/m}^2$$

$$q_{12} \cong 48,4 \text{ W/m}^2$$

Το ποσοστό της πυκνότητας θερμορροής που μεταβιβάζεται στο χώρο με ακτινοβολία θα δοθεί από την σχέση:

$$P\% = \frac{q_{12}}{q_{\max}} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

$P\%$:	Το ποσοστό της θερμορροής που μεταβιβάζεται με ακτινοβολία	%
q_{12} :	Η πυκνότητα θερμ. με ακτινοβολία από το πλαστικό στο χώρο	W/m^2
q_{\max} :	Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής που μεταβιβάζει το σύστημα	W/m^2

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} P\% = \frac{q_{12}}{q_{\max}} \\ q_{12} = 48,4 \text{ W/m}^2 \quad q_{\max} = 105 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} P\% = \frac{48,4}{105} = 0,46 \quad \mathbf{P\% = 46 \%}$$

Ερώτημα Γ:

Αν θέλουμε η πυκνότητα θερμορροής προς το έδαφος να είναι το 10% του ρεύματος θερμότητας προς το χώρο τότε θα την βρούμε από την παρακάτω εξίσωση.

$$q_{\text{εδαφ.}} = q_{\text{χωρ.}} \cdot 10\% \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη εξίσωση προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} q_{\text{εδαφ.}} = q_{\text{χωρ.}} \cdot 10\% \\ q_{\text{χωρ.}} = 105 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} q_{\text{εδαφ.}} = 105 \cdot 10\% = 10,5 \text{ W/m}^2 \quad \mathbf{q_{\text{εδαφ.}} = 10,5 \text{ W/m}^2}$$

Το πάχος που θα πρέπει να έχει το μονωτικό υλικό για να έχουμε απώλειες προς το έδαφος ίσες με το 10% της πυκνότητα θερμορροής προς το χώρο θα βρεθεί από την παρακάτω εξίσωση λύνοντας ως προς δ_{μ} .

$$q_{\text{εδαφ.}} = \frac{\theta_{23} - \theta_1}{\frac{\delta_{\mu}}{\lambda_{\mu}}} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

όπου:

$q_{\text{εδαφ.}}$:	Η πυκνότητα θερμορροής προς το έδαφος	W/m^2
θ_{23} :	Θερμοκρασία στο στρώμα των θερμοαντικών σωλήνων	$^{\circ}C$
θ_1 :	Θερμοκρασία εδάφους	$^{\circ}C$
λ_{μ} :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μονωτικού	W/mK
δ_{μ} :	Πάχος μονωτικού υλικού	m

Λύνοντας την εξίσωση (7) ως προς δ_{μ} και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\mu} &= \frac{\lambda_{\mu} \cdot (\theta_{23} - \theta_1)}{q_{\text{εδαφ.}}} \\ \lambda_{\mu} &= 0,041 \text{ W/mK}, \\ \theta_{23} &= 34,2^{\circ}\text{C}, \quad \theta_1 = 13^{\circ}\text{C}, \\ q_{\text{εδαφ.}} &= 10,5 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \right\} \delta_{\mu} = \frac{0,041 \cdot (34,2 - 13)}{10,5} = 0,0827 \text{ m} \quad \delta_{\mu} \cong 8,3 \text{ cm}$$

Ερώτημα Α:

Για να γίνει το διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού απωλειών προς το έδαφος σε συνάρτηση με το πάχος του μονωτικού υλικού θα πρέπει να χρησιμοποιούμε την εξίσωση (7). Δίνοντας στο πάχος του μονωτικού υλικού τιμές από 1 cm έως 10 cm ανά 1 cm, θα βρίσκουμε την πυκνότητα θερμορροής προς το έδαφος, και στην συνέχεια με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης θα βρίσκουμε το ποσοστό των απωλειών προς το έδαφος εξαιτίας της προσθήκης της μόνωσης.

$$P\% = \frac{q_{\text{εδαφ.}}}{q_{\text{max}}} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

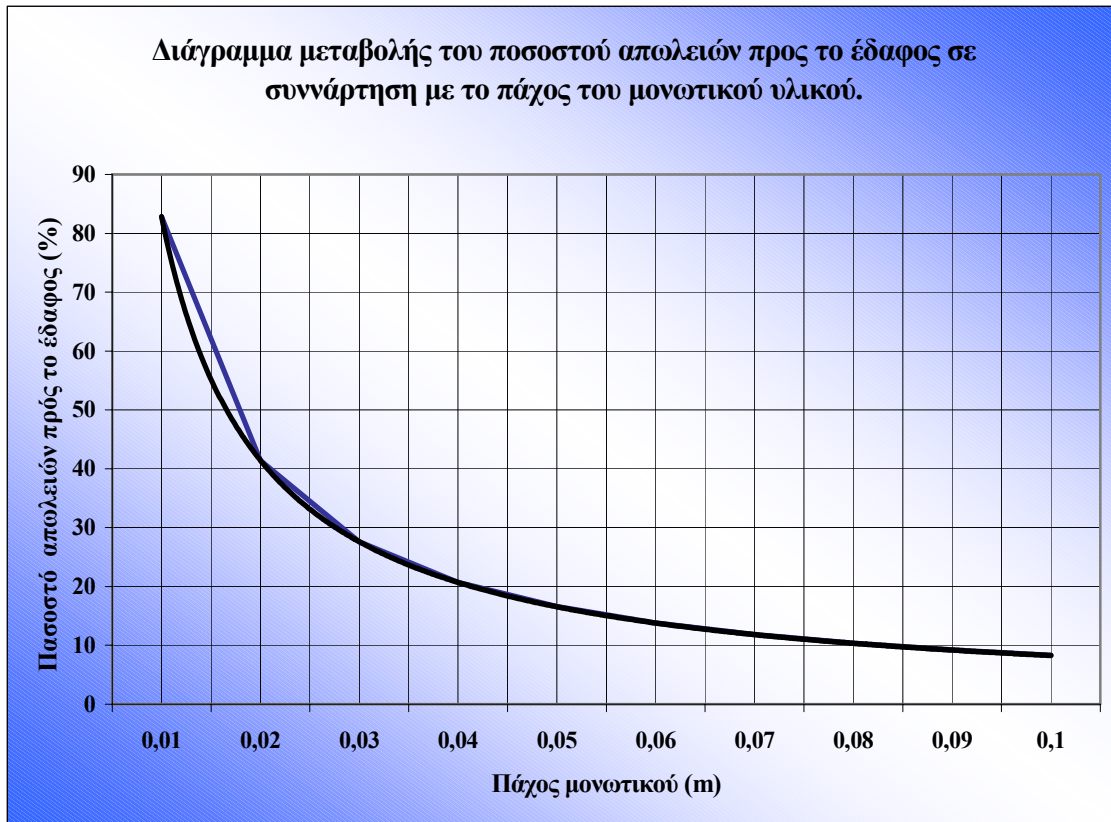
όπου:

P%:	Το ποσοστό των απωλειών προς το έδαφος	%
$q_{\text{εδαφ.}}$:	Η πυκνότητα θερμορροής προς το έδαφος	W/m^2
q_{max} :	Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής προς το χώρο	W/m^2

Ο πίνακας και το διάγραμμα που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω.

$d_{\text{μονωτ.}}$ (m)	$q_{\text{εδαφ.}}$ (W/m^2)	q_{max} (W/m^2)	P %
0,01	86,92	105,03	82,76
0,02	43,46	105,03	41,38
0,03	28,97	105,03	27,59
0,04	21,73	105,03	20,69
0,05	17,38	105,03	16,55
0,06	14,49	105,03	13,79
0,07	12,42	105,03	11,82
0,08	10,87	105,03	10,34
0,09	9,66	105,03	9,20
0,1	8,69	105,03	8,28

Πίνακας 1. Μεταβολή του ποσοστού των απωλειών σε συνάρτηση με το πάχος του μονωτικού.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή του ποσοστού απωλειών προς το έδαφος σε συνάρτηση με το πάχος του μονωτικού υλικού.

Ερώτημα Ε:

Για να μπορέσει το σύστημα να δώσει την μέγιστη πυκνότητα θερμορροής στο χώρο θα πρέπει να παράγει συνολικά μαζί και την πυκνότητα θερμορροής που χάνεται στο έδαφος έτσι ώστε να μην μειώνεται η θερμότητα που πρέπει να πάει στο χώρο.

Έτσι η συνολική ισχύς που πρέπει να παράγει το ενδοδαπέδιο σύστημα είναι ίση:

$$q_{ολ} = q_{max} + q_{εδωφ.} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Θεωρούμε ότι το σύστημα μας αρχικά έχει 1 cm πάχος μόνωσης.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7) μπορούμε να βρούμε την πυκνότητα θερμορροής που χάνουμε προς το έδαφος για 1 cm πάχος μονωτικού υλικού. (Όπως στον Πίνακα 1)

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{εδαφ.}} &= \frac{\theta_{23} - \theta_1}{\frac{\delta_{\mu}}{\lambda_{\mu}}} \\
 \theta_{23} &= 34,2^{\circ}\text{C}, \quad \theta_1 = 13^{\circ}\text{C}, \\
 \lambda_{\mu} &= 0,041 \text{ W/mK} \\
 \delta_{\mu} &= 0,01 \text{ m},
 \end{aligned} \right\} q_{\text{εδαφ.}} = \frac{34,2 - 13}{\frac{0,01}{0,041}} = 86,92 \text{ W/m}^2 \quad \mathbf{q_{\text{εδαφ.}} = 86,92 \text{ W/m}^2}$$

Το μέγιστο ρεύμα θερμότητας προς το χώρο είναι ίσο με 105 W/m^2 .

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (9) προκύπτει το ολικό ρεύμα θερμότητας για 1 cm μονωτικού υλικού.

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{ολπρίν}} &= q_{\text{max}} + q_{\text{εδαφ.}} \\
 q_{\text{max}} &= 105 \text{ W/m}^2, \\
 q_{\text{εδαφ.}} &= 86,92 \text{ W/m}^2
 \end{aligned} \right\} q_{\text{ολπρίν}} = 105 + 86,92 = 191,92 \text{ W/m}^2 \quad \mathbf{q_{\text{ολπρίν}} = 191,92 \text{ W/m}^2}$$

Αλλάζοντας το πάχος του μονωτικού υλικού στην εξίσωση (7) και δίνοντας του τιμές από 2 cm έως 10 cm ανά 1 cm θα βρούμε την πυκνότητα θερμορροής που θα είχαμε για το αντίστοιχο πάχος μονωτικού υλικού.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την εξίσωση (9) θα βρούμε την ολική πυκνότητα θερμορροής για το συγκεκριμένο πάχος μονωτικού υλικού.

Η μείωση της πυκνότητας θερμορροής εξαιτίας της αύξησης της μόνωσης πάνω από 1 cm που είχαμε αρχικά είναι ίση με:

$$\Delta q = q_{\text{ολπρίν}} - q_{\text{ολ.2cm-10cm}} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

Δq :	Μείωση της πυκνότητας θερμορροή λόγω μονωτικού	W/m^2
$q_{\text{ολπρίν.}}$:	Η πυκνότητα θερμορροής για 1 cm μόνωσης	W/m^2
$q_{\text{ολ.2 cm-10 cm}}$:	Η πυκνότητα θερμορροής από 2 – 10 cm μόνωσης ανά 1 cm	W/m^2

Η εξοικονομούμενη ενέργεια σε κάθε περίπτωση θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta EE = \Delta q \cdot h/\text{year} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

ΔEE :	Εξοικονομούμενη ενέργεια	$\text{kWh/m}^2\text{y}$
Δq :	Μείωση της πυκνότητας θερμορροή λόγω μονωτικού	kW/m^2
h/year	Ώρες λειτουργίας το χρόνο	h/y

Η εγκατάσταση λειτουργεί 2000 ώρες το χρόνο.

Το εξοικονομούμενο καύσιμο θα βρίσκεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \text{ (Εξίσωση 12)}$$

όπου:

ΔG :	Ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου	kg/y
ΔEE :	Εξοικονόμηση ενέργειας	kWh/m ² y
Θ_{κ} :	Κατώτερα θερμογόνος δύναμη καυσίμου	kWh/ kg
n:	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	=80%

Η κατώτερα θερμογόνος δύναμη του πετρελαίου ντίζελ σε kWh/L είναι ίση με:

$$\Theta_{\kappa} = 11,92 \text{ kWh/kg} \cdot 0,84 \text{ kg/L} = 10,13 \text{ kWh/L} \quad \Theta_{\kappa} = \mathbf{10,13 \text{ kWh/L}}$$

Το Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος είναι ίσο με το Ετήσιο Οικονομικό Όφελος, διότι δεν έχουμε λειτουργικές δαπάνες, και αυτό είναι ίσο με:

$$ΚΕΟΟ = \Delta G \cdot \text{Κόστος καυσίμου} \text{ (Εξίσωση 13)}$$

Το Αρχικό Κόστος Επένδυσης είναι ίσο με:

$$Α.Κ.Ε. = 6 + 5 \cdot x \text{ (Εξίσωση 14)}$$

Όπου x το πάχος του μονωτικού υλικού σε cm.

Η καθαρά παρούσα αξία θα δίνεται από τον τύπο:

$$Κ.Π.Α. = -Α.Κ.Ε. + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot Κ.Ε.Ο.Ο. \text{ (Εξίσωση 15)}$$

όπου:

Κ.Π.Α.:	Καθαρά Παρούσα Αξία	€
Α.Κ.Ε.:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης.	€
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	
Κ.Ε.Ο.Ο.:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
N:	Έτη τεχνολογικής ζωής	

Η διερεύνηση φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 2.

$d_{\text{μονωτ.}}$ (m)	q_{max} (W/m ²)	$q_{\text{εδαφ}}$ (W/m ²)	$q_{\text{οληρίν}}$ (W/m ²)	$q_{\text{ολ2 cm-10}}$ cm (W/m ²)	Δq (W/m ²)	$\Delta E E$ (kWh/m ² y)	ΔG (L/m ² y)	$K E E O$ (€/m ² y)	$A K E$ (€/m ²)	$K Π A$ (€/m ²)
0,01	105	86,92	191,92	191,92	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	-11,00
0,02	105	43,46	191,92	148,46	43,46	86,92	10,85	5,97	16,00	47,73
0,03	105	28,97	191,92	133,97	57,95	115,90	14,46	7,95	21,00	63,86
0,04	105	21,73	191,92	126,73	65,19	130,38	16,27	8,95	26,00	69,54
0,05	105	17,38	191,92	122,38	69,54	139,08	17,36	9,55	31,00	70,94
0,06	105	14,49	191,92	119,49	72,43	144,86	18,08	9,94	36,00	70,11
0,07	105	12,42	191,92	117,42	74,50	149,00	18,61	10,24	41,00	68,31
0,08	105	10,87	191,92	115,87	76,05	152,10	18,99	10,44	46,00	65,44
0,09	105	9,66	191,92	114,66	77,26	154,52	19,29	10,61	51,00	62,26
0,1	105	8,70	191,92	113,70	78,22	156,44	19,54	10,75	56,00	58,75

Πίνακας 2. Η Κ.Π.Α.της μόνωσης προς το δάπεδο συναρτῆσει του πάχους του μονωτικού υλικού.

Από τον πίνακα βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη Κ.Π.Α. αντιστοιχεί στα 5 cm μονωτικού υλικού άρα αυτό είναι και το βέλτιστο πάχος μόνωσης.

Συμπέρασμα:

Ένας τρόπος θέρμανσης κτιρίων είναι οι εγκαταστάσεις θέρμανσης δαπέδου (δαπεδοθέρμανση). Κατά την χρήση μιας τέτοιας εγκατάστασης, εκτός από το ρεύμα θερμότητας που πάει στο χώρο, ένα μέρος από το ρεύμα θερμότητας πηγαίνει και στο έδαφος. Για να μπορέσει ο χώρος να αποκτήσει μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, θα πρέπει οι θερμοκρασίες που θα αποκαθίστανται τόσο στο στρώμα τοποθέτησης των σωλήνων όσο και στην επιφάνεια του δαπέδου να είναι αρκετά μεγαλύτερες.

Με την χρήση ενός ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης εκτός από την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από το δάπεδο στο χώρο έχουμε και μεταφορά θερμότητας στο χώρο με ακτινοβολία. Το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία σε σχέση με την μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής συναγωγής είναι περίπου 46%. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν η μισή μεταφορά θερμότητας στο χώρο γίνεται με ακτινοβολία.

Λόγο της ύπαρξης απωλειών προς το έδαφος, για να μπορέσει να δώσει το σύστημα το απαραίτητο ρεύμα θερμότητας προς το χώρο, θα πρέπει να παράγει μαζί συνολικά και το ρεύμα θερμότητας που χάνεται στο έδαφος. Έτσι δεν θα μειώνεται η θερμότητα προς το χώρο.

Από το διάγραμμα του ποσοστού των απωλειών σε σχέση με το πάχος του μονωτικού υλικού βλέπουμε ότι καθώς αυξάνεται το πάχος του μονωτικού υλικού μειώνεται το ποσοστό των απωλειών. Για να μπορέσουμε να μειώσουμε τις απώλειες προς το έδαφος στο 10% του ρεύματος θερμότητας στο χώρο, για την συγκεκριμένη εφαρμογή θα πρέπει να προσθέσουμε περίπου 8 cm μονωτικού υλικού.

Θεωρώντας ότι αρχικά το ενδοδαπέδιο σύστημα έχει 1 cm μονωτικού υλικού και υπολογίζοντας το όφελος που θα είχαμε αν αυξάναμε το πάχος του μονωτικού υλικού βλέπουμε, με βάση την Κ.Π.Α. κάθε περίπτωσης, ότι το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού είναι τα 5 cm.

Μελέτη 4^η

Μονωμένα και αμόνωτα επίπεδα τοιχώματα – Τεχνοοικονομική διερεύνηση.

Για την θερμομόνωση των χαλύβδινων τοιχωμάτων ενός κλιβάνου, διατίθενται τα εξής δύο είδη πυρότουβλων:

ΤΟΥΒΛΟ (α): Πάχους 25 cm, που έχει συντ. θερμικής αγωγιμότη. $\lambda = 0,88 \text{ W/mK}$.

ΤΟΥΒΛΟ (β): Πάχους 30 cm, που έχει συντ. θερμικής αγωγιμότη. $\lambda = 1,10 \text{ W/mK}$.

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κλιβάνου διατηρείται στους 450°C και η (μέση) θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνεται 20°C .

Οι συνολικοί συντελεστές μεταβίβασης θερμότητας είναι: εσωτερικά του κλιβάνου $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ και εξωτερικά του κλιβάνου $10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Τα μεταλλικά τοιχώματα του κλιβάνου αγνοούνται.

A. Αν τα δυο είδη πυρότουβλων είναι οικονομικά ισοδύναμα, ποιο από τα δύο είδη τούβλων πρέπει να επιλεγεί;

B. Αν το τούβλο (α) κοστίζει 40 €/m^2 , και το τούβλο (β) κοστίζει 35 €/m^2 , ποιο από τα δύο είδη τούβλων πρέπει να επιλεγεί;

Ο κλιβανος λειτουργεί 1500 h το έτος και θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Υποθέστε: - Επιτόκιο δανεισμού (αποπληθωρισμένο) 8,5 %.

- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας $0,065 \text{ €/kWh}$.

- Διάρκεια ζωής του κλιβάνου 15 έτη.

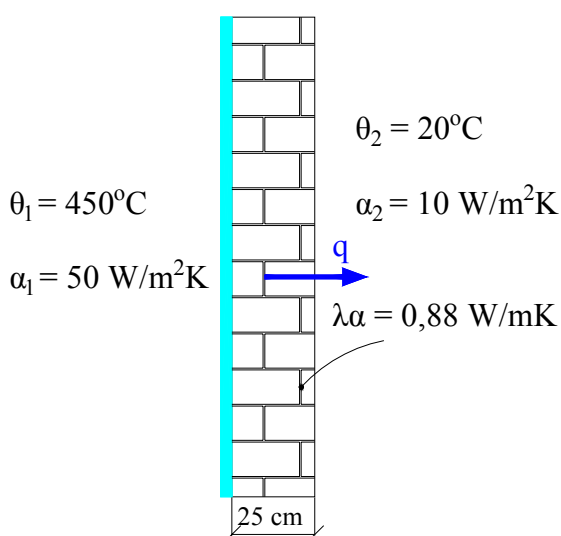
Γ. Για το επιλεγμένο τούβλο (της B. περίπτωσης), να βρεθεί η ποσοστιαία μείωση των απωλειών θερμότητας, αν γίνει βελτίωση της μόνωσης με επικόλληση, στην εξωτερική πλευρά των τούβλων, στρώματος αφρώδους μονωτικού υλικού, πάχους 5 cm, που θα επικαλύπτεται τελικά από ασβεστο-τσιμεντοκονίαμα πάχους 2 cm.

Δ. Το κόστος της μόνωσης είναι 50 €/m^2 . Να γίνουν διαγράμματα μεταβολής:

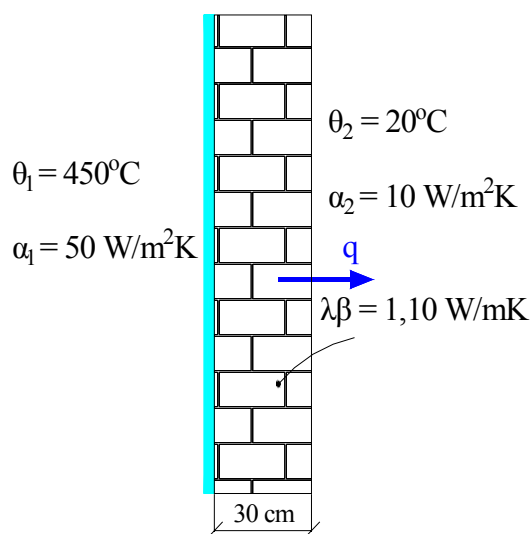
- Της Κ.Π.Α. της μόνωσης σε συνάρτηση με το (αποπληθωρισμένο) επιτόκιο και να βρεθεί ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Ε.Σ.Α.)

- Της Κ.Π.Α. της μόνωσης σε συνάρτηση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Για ποιο κόστος της kWh η επένδυση θα ήταν ασύμφορη;

Λύση:



Σχήμα 1. Τομή τοποθέτησης τούβλου 25 cm στον κλίβανο (α περίπτωση)



Σχήμα 2. Τομή τοποθέτησης τούβλου 30 cm στον κλίβανο (β περίπτωση)

Ερώτημα Α:

Για να επιλέξουμε τούβλο θα πρέπει να βρούμε σε ποια περίπτωση έχουμε μικρότερο ρεύμα θερμότητας.

Το ρεύμα θερμότητας μετά την τοποθέτηση του τούβλου θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση αντικαθιστώντας τα δεδομένα της κάθε περίπτωσης.

$$q_{\text{μετά}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

$q_{\text{μετά}}$:	Ρεύμα θερμότητας από τον κλίβανο στο χώρο με το τούβλο	W/m ²
θ_1 :	Θερμοκρασία μέσα στον κλίβανο	°C
θ_2 :	Θερμοκρασία μέσα στο χώρο	°C
α_1 :	Συντ. συναγωγής από τον κλίβανο στα τοιχώματα του	W/m ² K
α_2 :	Συντ. συναγωγής από το τοίχωμα του κλιβάνου στο χώρο	W/m ² K
δ_1 :	Πάχος χαλύβδινου τοιχώματος	m
δ_2 :	Πάχος του τούβλου σε κάθε περίπτωση	m
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαλύβδινου τοιχώματος	W/mK
λ_2 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τούβλου	W/mK

Ο λόγος δ_1/λ_1 είναι πολύ μικρός διότι τα χαλύβδινα τοιχώματα είναι πολύ λεπτά με μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας γι' αυτό και αγνοούνται.

Στη συνέχεια θα αντικαθιστούμε τα δεδομένα μας για τις δύο παρακάτω περιπτώσεις:

α) Περίπτωση: Τούβλο 25 cm με συντ. θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 0,88 \text{ W/mK}$.

β) Περίπτωση: Τούβλο 30 cm με συντ. θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 1,10 \text{ W/mK}$.

α) Περίπτωση.

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{μετά}(\alpha)} &= \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \\
 \theta_1 &= 450^\circ \text{C}, \quad \theta_2 = 20^\circ \text{C} \\
 \alpha_1 &= 50 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \alpha_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\
 \delta_2 &= 0,25 \text{ m}, \quad \lambda_2 = 0,88 \text{ W/mK}
 \end{aligned} \right\} q_{\text{μετά}(\alpha)} = \frac{(450 - 20)}{\frac{1}{50} + \frac{0,25}{0,88} + \frac{1}{10}} = 1064,11 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{μετά}(\alpha)} = 1064,1 \text{ W/m}^2$$

β) Περίπτωση.

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{μετά}(\beta)} &= \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \\
 \theta_1 &= 450^\circ \text{C}, \quad \theta_2 = 20^\circ \text{C} \\
 \alpha_1 &= 50 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \alpha_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\
 \delta_2 &= 0,30 \text{ m}, \quad \lambda_2 = 1,10 \text{ W/mK}
 \end{aligned} \right\} q_{\text{μετά}(\beta)} = \frac{(450 - 20)}{\frac{1}{50} + \frac{0,30}{1,10} + \frac{1}{10}} = 1094,90 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{μετά}(\beta)} = 1094,9 \text{ W/m}^2$$

Το τούβλο που πρέπει να επιλεγεί είναι αυτό της α περίπτωσης, διότι έχει το μικρότερο ρεύμα θερμότητας.

Ερώτημα Β:

Επειδή στην περίπτωση αυτή έχουμε διαφορά στο αρχικό κόστος επένδυσης θα επιλέξουμε το τούβλο με βάση την Κ.Π.Α. Το τούβλο που θα επιλεγεί είναι αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερη Κ.Π.Α. για 15 έτη μετά από την τοποθέτηση του.

Η καθαρά παρούσα αξία δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Κ.Π.Α.} = -\text{Α.Κ.Ε.} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

Κ.Π.Α.:	Καθαρά Παρούσα Αξία	€/m ²
Α.Κ.Ε.:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης.	€/m ²
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	%
Κ.Ε.Ο.Ο.:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/m ² y
N:	Έτη τεχνολογικής ζωής	y

Το αρχικό κόστος επένδυσης ανά μονάδα επιφάνειας είναι δεδομένο για κάθε περίπτωση.

Το Κ.Ε.Ο.Ο. θα το βρούμε για κάθε περίπτωση αφού πρώτα βρούμε την εξοικονόμηση ενέργειας που έχουμε από την προσθήκη του τούβλου.

Αρχικά το ρεύμα θερμότητας από τον κλίβανο πριν την τοποθέτηση του τούβλου είναι ίσο με:

$$q_{\text{πριν}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

$q_{\text{πριν}}$:	Ρεύμα θερμότητας από τον κλίβανο στο χώρο χωρίς το τούβλο	W/m^2
θ_1 :	Θερμοκρασία μέσα στον κλίβανο	$^{\circ}\text{C}$
θ_2 :	Θερμοκρασία μέσα στο χώρο	$^{\circ}\text{C}$
α_1 :	Συντ. συναγωγής από τον κλίβανο στα τοιχώματα του	$\text{W/m}^2\text{K}$
α_2 :	Συντ. συναγωγής από το τοίχωμα του κλιβάνου στο χώρο	$\text{W/m}^2\text{K}$
δ_1 :	Πάχος χαλύβδινου τοιχώματος	m
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαλύβδινου τοιχώματος	W/mK

Ο λόγος δ_1/λ_1 είναι πολύ μικρός διότι τα χαλύβδινα τοιχώματα είναι πολύ λεπτά με μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας γι' αυτό και αγνοούνται.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) προκύπτει.

$$\left. \begin{array}{l} q_{\text{πριν}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \\ \alpha_1 = 50 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \theta_1 = 450^{\circ}\text{C}, \theta_2 = 20^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} q_{\text{πριν}} = \frac{(450 - 20)}{\frac{1}{50} + \frac{1}{10}} = 3583,3 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{πριν}} = 3583,3 \text{ W/m}^2$$

Η μείωση που έχουμε από την προσθήκη των τούβλων θα δίνεται από την διαφορά του ρεύματος θερμότητας πριν και μετά την τοποθέτηση του τούβλου για κάθε περίπτωση έτσι:

$$\Delta q = q_{\text{πριν}} - q_{\text{μετά}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

α) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta q_{(\alpha)} = q_{\text{πριν}} - q_{\text{μετά}} \\ q_{\text{πριν}} = 3583,3 \text{ W/m}^2 \\ q_{\text{μετά}(\alpha)} = 1064,1 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} \Delta q_{(\alpha)} = 3583,3 - 1064,1 = 2519,2 \text{ W/m}^2$$

$$\Delta q_{(\alpha)} = 2519,2 \text{ W/m}^2$$

β) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta q_{(\beta)} = q_{\text{πρὶν}} - q_{\text{μετά}} \\ q_{\text{πρὶν}} = 3583,3 \text{ W/m}^2 \\ q_{\text{μετά}(\beta)} = 1094,9 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} \Delta q_{(\beta)} = 3583,3 - 1094,9 = 2488,4 \text{ W/m}^2$$

$$\Delta q_{(\beta)} = 2488,4 \text{ W/m}^2$$

Η ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta EE = \Delta q \cdot h / \text{year} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

ΔEE :	Ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια	kWh/y m ²
Δq :	Μείωση πυκνότητας θερμοροής	W/m ²
h/year	Ωρες λειτουργίας το χρόνο	h/y

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) για κάθε περίπτωση προκύπτει:

α) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta.E.E._{(\alpha)} = \Delta q_{(\alpha)} \cdot h / \text{year} \\ \Delta q_{(\alpha)} = 2519,2 \text{ W/m}^2 \\ h / \text{year} = 1500 \text{ h/y} \end{array} \right\} \Delta.E.E._{(\alpha)} = 2519,2 \cdot 1500 = 3778800 \text{ Wh/ym}^2$$

$$\Delta.E.E._{(\alpha)} = 3778800 \text{ Wh/ym}^2 = 3778,8 \text{ kWh/ym}^2$$

β) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta.E.E._{(\beta)} = \Delta q_{(\beta)} \cdot h / \text{year} \\ \Delta q_{(\beta)} = 2488,4 \text{ W/m}^2 \\ h / \text{year} = 1500 \text{ h/y} \end{array} \right\} \Delta.E.E._{(\beta)} = 2488,4 \cdot 1500 = 3732600 \text{ Wh/ym}^2$$

$$\Delta.E.E._{(\beta)} = 3732600 \text{ Wh/ym}^2 \cong 3732,6 \text{ kWh/ym}^2$$

Το Ε.Ο.Ο., που στην περίπτωση μας είναι και Κ.Ε.Ο.Ο. διότι δεν έχουμε λειτουργικές δαπάνες, θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$Κ.Ε.Ο.Ο. = \Delta.E.E. \cdot \tau_{\eta\lambda.} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

Κ.Ε.Ο.Ο.:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
$\Delta.E.E.$:	Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	kWh/ym ²
$\tau_{\eta\lambda.}$:	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	€/kWh

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει:

α) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Κ.Ε.Ο.Ο.}_{(α)} = \Delta.\text{Ε.Ε.}_{(α)} \cdot \tau_{\eta\lambda.} \\ \Delta.\text{Ε.Ε.}_{(α)} = 3778,8 \text{ kWh/ym}^2 \\ \tau_{\eta\lambda.} = 0,065 \text{ €/kWh} \end{array} \right\} \text{Κ.Ε.Ο.Ο.}_{(α)} = 3778,8 \cdot 0,065 = 245,62 \text{ €/ym}^2$$

$$\text{Κ.Ε.Ο.Ο.}_{(α)} = 245,62 \text{ €/ym}^2$$

β) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Κ.Ε.Ο.Ο.}_{(β)} = \Delta.\text{Ε.Ε.}_{(β)} \cdot \tau_{\eta\lambda.} \\ \Delta.\text{Ε.Ε.}_{(β)} = 3732,6 \text{ kWh/ym}^2 \\ \tau_{\eta\lambda.} = 0,065 \text{ €/kWh} \end{array} \right\} \text{Κ.Ε.Ο.Ο.}_{(β)} = 3732,6 \cdot 0,065 = 242,62 \text{ €/ym}^2$$

$$\text{Κ.Ε.Ο.Ο.}_{(β)} = 242,62 \text{ €/ym}^2$$

Ξέροντας το Κ.Ε.Ο.Ο. μπορούμε να βρούμε την Κ.Π.Α. για κάθε περίπτωση αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2).

α) Περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \text{ΚΠΑ}_{(α)} = -\text{ΑΚΕ} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{ΚΕΟΟ}_{(α)} \\ \text{ΑΚΕ}_{(α)} = 40 \text{ €/m}^2, \quad r = 8,5\%, \\ \text{ΚΕΟΟ}_{(α)} = 245,62 \text{ €/m}^2 \\ N = 15 \text{ years,} \end{array} \right\} \text{Κ.Π.Α.}_{(α)} = -40 + \frac{(1+0,085)^{15} - 1}{0,085 \cdot (1+0,085)^{15}} \cdot 245,62 =$$

$$= 1999,68 \text{ €/m}^2$$

$$\text{Κ.Π.Α.}_{(α)} \cong 2000 \text{ €/m}^2$$

β) Περίπτωση.

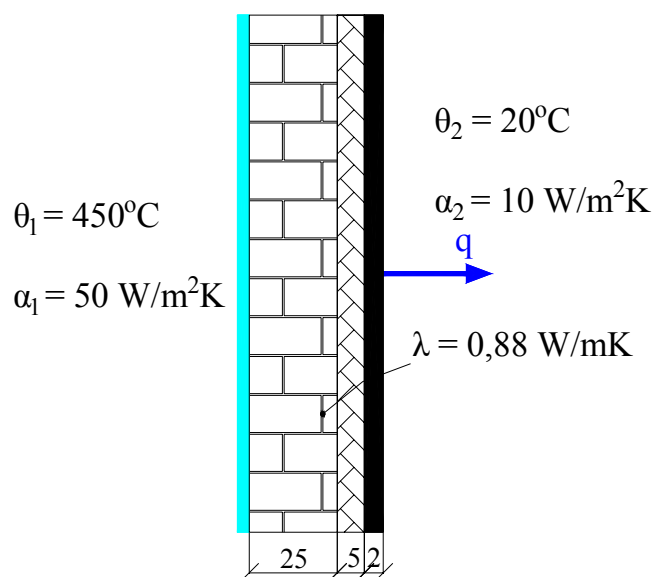
$$\left. \begin{array}{l} \text{ΚΠΑ}_{(β)} = -\text{ΑΚΕ}_{(β)} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{ΚΕΟΟ}_{(β)} \\ \text{ΑΚΕ}_{(β)} = 35 \text{ €/m}^2, \quad r = 8,5\%, \\ \text{ΚΕΟΟ}_{(β)} = 242,62 \text{ €/m}^2 \\ N = 15 \text{ years,} \end{array} \right\} \text{ΚΠΑ}_{(β)} = -35 + \frac{(1+0,085)^{15} - 1}{0,085 \cdot (1+0,085)^{15}} \cdot 242,62 =$$

$$= 1979,77 \text{ €/m}^2$$

$$\text{ΚΠΑ}_{(β)} = 1980 \text{ €/m}^2$$

Το τούβλο που πρέπει να επιλεγεί είναι αυτό με την μεγαλύτερη Κ.Π.Α. Από την προηγούμενα αποτελέσματα βλέπουμε ότι το τούβλο με την μεγαλύτερη Κ.Π.Α. είναι το τούβλο της Α περίπτωσης.

Ερώτημα Γ:



Οι διαστάσεις σε cm

Σχήμα 3. Τοποθέτηση μόνωσης πάνω από το τούβλο στον κλίβανο.

Στρώσεις	d (m)	λ (W/mK)
1. Χαλύβδινο τοίχωμα	-	-
2. Πυρότουβλο	0,25	0,88
3. Αφρώδες μονωτικό υλικό	0,05	0,041
4. Ασβεστοσιμεντοκονίαμα	0,02	0,87

Πίνακας 1. Υλικά κατακόρυφου τοιχώματος του κλιβάνου με την μόνωση.

Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας βρίσκονται από τον Πίνακα A1 του Παραρτήματος 2.

Η ποσοστιαία μείωση των απωλειών θερμότητας θα δοθεί από την εξίσωση:

$$P = 1 - \frac{q'_{\text{μετά}}}{q'_{\text{πριν}}} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

όπου:

P:	Ποσοστιαία μείωση απωλειών θερμότητας	%
$q'_{\text{μετά}}$:	Ρεύμα θερμ. από τον κλίβ. στο χώρο με τη βελτίωση της μόνωσης	W/m ²
$q'_{\text{πριν}}$:	Ρεύμα θερμ. από τον κλίβ. στο χώρο μόνο με το πυρότουβλο	W/m ²

Το επιλεγμένο τούβλο του Β ερωτήματος είναι αυτό της α περίπτωσης και το ρεύμα θερμότητας με την τοποθέτηση μόνο του τούβλου έχει βρεθεί, σύμφωνα με την εξίσωση (1), και είναι ίσο με 1064,1 W/m².

Το ρεύμα θερμότητας με την προσθήκη της επιπλέον μόνωσης και του ασβεστοσιμεντοκονιάματος θα βρεθεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$q'_{\text{μετά}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

$q'_{\text{μετά}}$:	Ρεύμα θερμ. από τον κλίβανο με τη βελτίωση της μόνωσης	W/m^2
θ_1 :	Θερμοκρασία μέσα στον κλίβανο	$^{\circ}\text{C}$
θ_2 :	Θερμοκρασία μέσα στο χώρο	$^{\circ}\text{C}$
α_1 :	Συντ. συναγωγής από τον κλίβανο στα τοιχώματά του	$\text{W/m}^2\text{K}$
α_2 :	Συντ. συναγωγής από το τοίχωμα του κλιβάνου στο χώρο	$\text{W/m}^2\text{K}$
δ_1 :	Πάχος χαλύβδινου τοιχώματος	m
δ_2 :	Πάχος του τούβλου	m
δ_3 :	Πάχος αφρώδους μονωτικού υλικού	m
δ_4 :	Πάχος ασβεστοτσιμεντοκονιάματος	m
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμ. χαλύβδινου τοιχώματος	W/mK
λ_2 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμ. τούβλου	W/mK
λ_3 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμ. αφρώδους μονωτικού υλικού	W/mK
λ_4 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμ. ασβεστοτσιμεντοκονιάματος	W/mK

Ο λόγος δ_1/λ_1 είναι πολύ μικρός διότι τα χαλύβδινα τοιχώματα είναι πολύ λεπτά με μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας γι' αυτό και αγνοούνται.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} q'_{\text{μετά}} &= \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2}} \\ \theta_1 &= 450^{\circ}\text{C}, \quad \theta_2 = 20^{\circ}\text{C} \\ \alpha_1 &= 50 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \alpha_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \delta_2 &= 0,25 \text{ m}, \quad \delta_3 = 0,05 \text{ m} \\ \delta_4 &= 0,02 \text{ m}, \quad \lambda_2 = 0,88 \text{ W/mK} \\ \lambda_3 &= 0,041 \text{ W/mK}, \quad \lambda_4 = 0,87 \text{ W/mK} \end{aligned} \right\} q'_{\text{μετά}} = \frac{(450 - 20)}{\frac{1}{50} + \frac{0,25}{0,88} + \frac{0,05}{0,041} + \frac{0,02}{0,87} + \frac{1}{10}} =$$

$$= 261,14 \text{ W/m}^2$$

$$q'_{\text{μετά}} = 261,14 \text{ W/m}^2$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7) βρίσκουμε την ποσοστιαία μείωση που έχει η βελτίωση αυτή της μόνωσης.

$$\left. \begin{aligned} P &= 1 - \frac{q'_{\text{μετά}}}{q'_{\text{πρίν}}} \\ q'_{\text{μετά}} &= 261,14 \text{ W/m}^2 \quad q'_{\text{πρίν}} = 1064,1 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \right\} P = 1 - \frac{261,14}{1064,1} = 0,754 \quad P\% \approx 75\%$$

Ερώτημα Δ:

Για να προκύψουν τα διαγράμματα αυτά θα πρέπει πρώτα να βρούμε την εξοικονόμηση ενέργειας και το καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος που έχουμε σ' αυτή την περίπτωση.

Η μείωση του ρεύματος θερμότητας σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta q = q_{\text{πριν}} - q_{\text{μετά}} \\ q_{\text{πριν}} = 1064,1 \text{ W/m}^2 \\ q_{\text{μετά}} = 261,14 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} \Delta q = 1064,1 - 261,14 = 802,96 \text{ W/m}^2 \quad \Delta q \approx \mathbf{803 \text{ W/m}^2}$$

Η ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση (5) προκύπτει ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta.E.E = \Delta q \cdot h/\text{year} \\ \Delta q = 803 \text{ W/m}^2 \\ h/\text{year} = 1500 \text{ h/y} \end{array} \right\} \Delta.E.E = 803 \cdot 1500 = 1204500 \text{ Wh/ym}^2$$

$$\Delta.E.E = \mathbf{1204500 \text{ Wh/ym}^2} = \mathbf{1204,5 \text{ kWh/ym}^2}$$

Το καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος προκύπτει σύμφωνα με την εξίσωση (6) ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} = \Delta.E.E. \cdot \tau_{\eta\lambda.} \\ \Delta.E.E. = 1204,5 \text{ kWh/ym}^2 \\ \tau_{\eta\lambda.} = 0,065 \text{ €/kWh} \end{array} \right\} \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} = 1204,5 \cdot 0,065 = 78,29 \text{ €/ym}^2$$

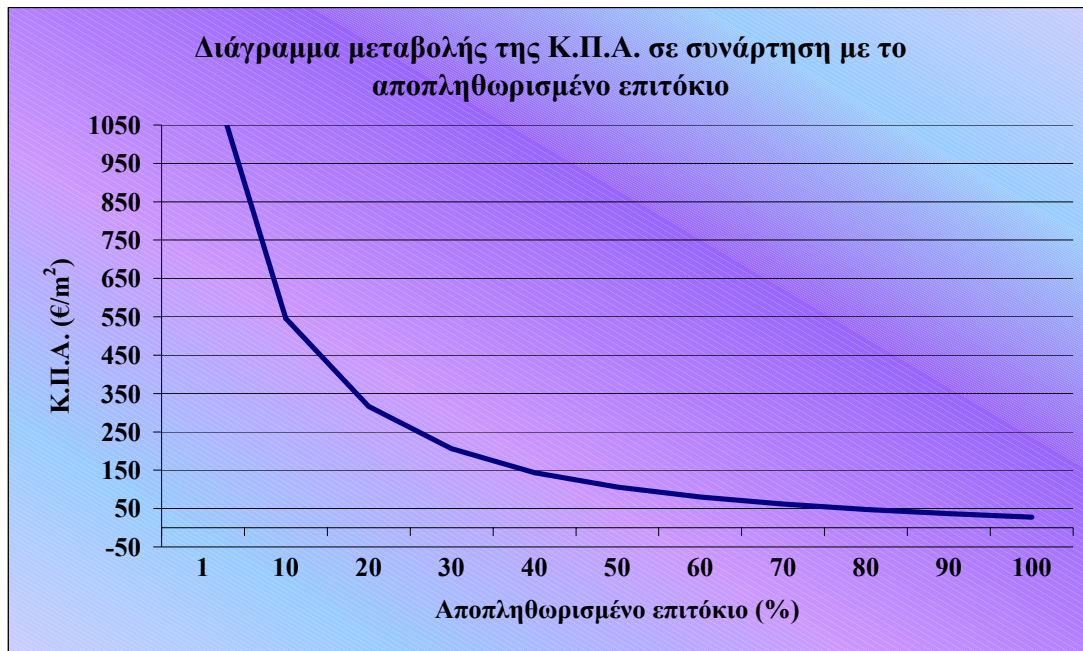
$$\text{Κ.Ε.Ο.Ο.} = \mathbf{78,29 \text{ €/ym}^2}$$

Για να γίνει το διάγραμμα μεταβολής της καθαρής παρούσας αξίας σε συνάρτηση με το επιτόκιο θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (2) μεταβάλλοντας την τιμή του επιτοκίου (r) από 1% έως 100% ανά 10%. Ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι το επιτόκιο για το οποίο μηδενίζεται η Καθαρά Παρούσα Αξία. Το αρχικό κόστος της επένδυσης για την προσθήκη της μόνωσης είναι 50 €/m², τα έτη τεχνολογικής ζωής της μόνωσης 15, και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας 0,065 €/kWh.

Ο πίνακας και το διάγραμμα που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω.

r (%)	Κ.Ε.Ο.Ο. (€/m ² y)	ΚΠΑ (€/m ²)
1	78,29	1255
10	78,29	546
20	78,29	316
30	78,29	206
40	78,29	144
50	78,29	106
60	78,29	80
70	78,29	62
80	78,29	48
90	78,29	37
100	78,29	28

Πίνακας 1. Αποτελέσματα Κ.Π.Α. για διάφορες τιμές του αποπληθωρισμένου επιτοκίου.



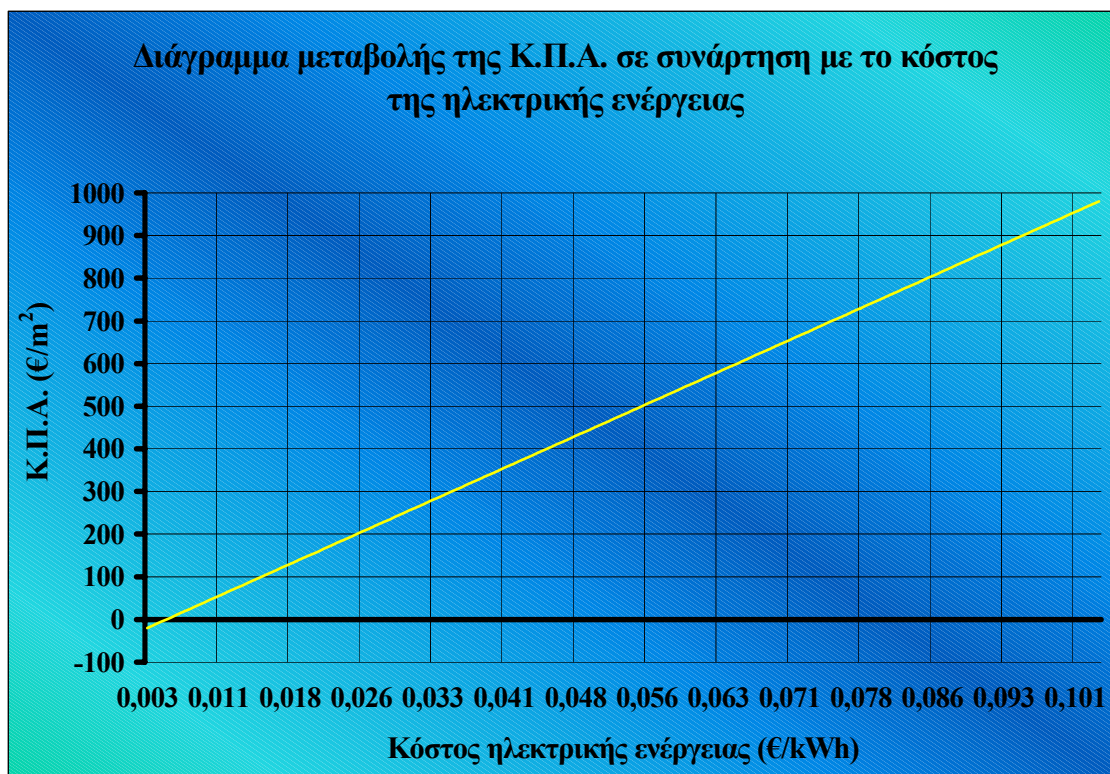
Διάγραμμα 1. Μεταβολής της Κ.Π.Α. σε συνάρτηση με το (αποπληθωρισμένο) επιτόκιο.

Για να προκύψει το διάγραμμα της μεταβολής της Καθαρής Παρούσας Αξίας σε συνάρτηση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να βρίσκουμε πρώτα το Κ.Ε.Ο.Ο. μέσω της εξίσωσης (6) για τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας από 0,003 €/kWh έως 0,1 €/kWh. Στη συνέχεια θα βρίσκουμε την Καθαρά Παρούσα Αξία μέσω της εξίσωσης (2). Η τιμή της ενέργειας για την οποία η επένδυση θα ήταν ασύμφορη είναι αυτή που μας παρουσιάζει αρνητική Καθαρά Παρούσα Αξία.

Ο πίνακας και το διάγραμμα που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω.

$\tau_{\eta\lambda}$ (€/kWh)	Δq (W/m ²)	Κ.Ε.Ο.Ο. (€/m ² y)	Α.Κ.Ε. (€/m ²)	Κ.Π.Α. (€/m ²)
0,003	803	3,61	50	-20,02
0,0035	803	4,22	50	-14,96
0,004	803	4,82	50	-9,97
0,0045	803	5,42	50	-4,99
0,005	803	6,02	50	-0,01
0,01	803	12,05	50	50,07
0,015	803	18,07	50	100,06
0,02	803	24,09	50	150,06
0,025	803	30,11	50	200,05
0,03	803	36,14	50	250,12
0,035	803	42,16	50	300,12
0,04	803	48,18	50	350,11
0,045	803	54,20	50	400,10
0,05	803	60,23	50	450,18
0,055	803	66,25	50	500,17
0,06	803	72,27	50	550,17
0,065	803	78,29	50	600,16
0,07	803	84,32	50	650,24
0,075	803	90,34	50	700,23
0,08	803	96,36	50	750,22
0,085	803	102,38	50	800,21
0,09	803	108,41	50	850,29
0,095	803	114,43	50	900,28
0,1	803	120,45	50	950,28

Πίνακας 2. Αποτελέσματα της Κ.Π.Α. για διάφορες τιμές του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 2. Μεταβολή της Κ.Π.Α. σε συνάρτηση με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας.

Συμπέρασμα:

Από την διερεύνηση των δύο προηγούμενων περιπτώσεων βλέπουμε πόσο επηρεάζει ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού το ρεύμα θερμότητας που περνάει από ένα τοίχωμα.

Έτσι, στην α΄ περίπτωση, παρόλο που το πάχος του τούβλου είναι κατά 5 cm μικρότερο από αυτό της β΄ περίπτωσης, το ρεύμα θερμότητας που προκύπτει είναι μικρότερο. Αυτό συμβαίνει διότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του τούβλου της α΄ περίπτωσης είναι κατά 20% μικρότερος από αυτόν της β΄ περίπτωσης.

Εξετάζοντας το ενδεχόμενο τα δύο τούβλα να μην έχουν το ίδιο κόστος, και με την χρήση της Κ.Π.Α. βλέπουμε ότι:

Για ένα αποπληθωρισμένο επιτόκιο 8,5% και διάρκεια ζωής του κλιβάνου 15 έτη η επένδυση με την μεγαλύτερη Κ.Π.Α. είναι πάλι της α΄ περίπτωσης. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται διότι η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας εξαιτίας του μικρότερου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αντισταθμίζει το μεγαλύτερο κόστος που έχει η επένδυση.

Κατά την προσθήκη μονωτικού υλικού πάνω από την επιφάνεια του τούβλου επιτυγχάνεται μια μείωση στο ρεύμα θερμότητας κατά 75%. Κατά την διερεύνηση του πώς επηρεάζεται η Κ.Π.Α. σ΄ αυτήν την περίπτωση, αν μεταβάλλεται το επιτόκιο και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

α). Η Κ.Π.Α. για τιμές επιτοκίου από 1% έως 100% ανά 10% είναι πάντα θετική, απλώς μειώνεται κατά την αύξηση του επιτοκίου. Αυτό σημαίνει ότι η επένδυση αυτή είναι πάντα κερδοφόρα ανεξάρτητα με το επιτόκιο.

β). Η τιμή της kWh για την οποία προκύπτει αρνητική Κ.Π.Α. (δηλαδή η επένδυση είναι ασύμφορη) είναι πολύ μικρή, 0,005 €/kWh. Η επένδυση δηλαδή αυτή είναι συμφέρουσα και για πολύ μικρό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς αυξάνεται το

κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται το οικονομικό όφελος που έχουμε, λόγω της εξοικονομούμενης ενέργειας, και επομένως η επένδυση γίνεται όλο και πιο συμφέρουσα.

Μελέτη 5^η.

Θερμομόνωση σωληνώσεων ζεστού νερού – Η επίδραση του πάχους μόνωσης σε σχέση με τη διάμετρο – Βέλτιστο πάχος μόνωσης σωληνώσεων.

Το δίκτυο διανομής του ζεστού νερού χρήσης σ' ένα ξενοδοχείο είναι κατασκευασμένο από χαλκοσωλήνες διαφόρων διαμέτρων, που θα μονωθούν με κυλινδρικούς μανδύες, πάχους 9 mm, από κάποιο μονωτικό υλικό. Το ζεστό νερό ρέει μέσα στους σωλήνες με μεγάλη ταχύτητα και οι χαλκοσωλήνες θεωρούνται λεπτότοιχοι.

Ο συντελεστής συναγωγής προς τον αέρα του περιβάλλοντος έχει τιμές: Όταν οι σωλήνες είναι γυμνοί $15 \text{ W/m}^2\text{K}$, ενώ όταν είναι μονωμένοι $10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

A. Αν θέλουμε με τη μόνωση, στους σωλήνες που έχουν εξωτερική διάμετρο 18 mm, να επιτύχουμε μείωση των απωλειών κατά 70 %, ποιος ο κατάλληλος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού υλικού;

B. Χρησιμοποιώντας τη μόνωση του A. ερωτήματος, πόσο θα είναι το ποσοστό μείωσης των απωλειών, αν την εφαρμόσουμε (με το ίδιο πάχος) στους σωλήνες που έχουν εξωτερική διάμετρο 42 mm.

Σχολιάστε το αποτέλεσμα και διατυπώστε τα συμπεράσματά σας.

Γ. Το παραπάνω δίκτυο διανομής του ζεστού νερού χρήσης, είναι συνολικού μήκους 1000 m. Θεωρείται ότι οι σωληνώσεις έχουν μέση εξωτερική διάμετρο 22 mm, βρίσκονται σε χώρους (μέσης) θερμοκρασίας 20°C , το νερό έχει θερμοκρασία 50°C και η εγκατάσταση λειτουργεί 18 ώρες/ημέρα, επί 250 ημέρες το χρόνο.

Γ1. Αν ο σωλήνας μονωθεί με υλικό του A. ερωτήματος, να βρεθεί η θερμότητα που εξοικονομείται ανά ώρα λειτουργίας (σε σχέση με το γυμνό σωλήνα) για τα εξής εναλλακτικά πάχη μόνωσης: 6 mm - 9 mm - 13 mm.

Γ2. Το θερμό νερό παράγεται σε λέβητα με καυστήρα υγραερίου, που εργάζεται με μέσο βαθμό απόδοσης 85 %. Το υγραέριο κοστίζει 0,55 ευρώ/kg. Να υπολογιστεί το ετήσιο οικονομικό όφελος λόγω της θερμομόνωσης, για τα τρία παραπάνω πάχη μόνωσης.

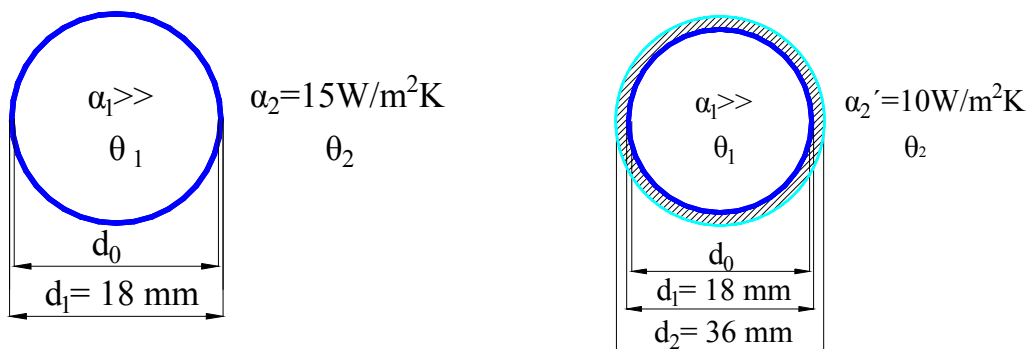
Γ3. Το κόστος θερμομόνωσης ανά μέτρο σωλήνα είναι ως εξής:

- Για πάχος 6 mm : 7 ευρώ/m
- Για πάχος 9 mm : 8 ευρώ/m
- Για πάχος 13 mm : 10 ευρώ/m

Αν το μικτό (αποπληθωρισμένο) επιτόκιο για την εγκατάσταση της μόνωσης είναι 10%, να βρεθεί ποιο από τα παραπάνω είναι το βέλτιστο πάχος θερμομόνωσης, αν η διάρκεια τεχνολογικής ζωής της θερμομόνωσης ληφθεί 8 έτη.

Δ. Να γίνει διερεύνηση για το πώς επηρεάζεται η Καθαρά Παρούσα Αξία της επένδυσης από την αλλαγή της τιμής του καυσίμου, του επιτοκίου, και της τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού. Να γίνουν τα σχετικά διαγράμματα.

Λύση:



Σχήμα 1. Σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου 18 mm χωρίς μόνωση. **Σχήμα 2.** Σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου 18 mm με μόνωση, πάχους 9 mm.

Ερώτημα Α:

Για να βρούμε τον κατάλληλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) του μονωτικού υλικού, πάχους 9 mm εξωτερικά του σωλήνα, έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες κατά 70 % θα πρέπει να λύσουμε την παρακάτω εξίσωση ως προς λ .

$$q_{\text{μετά}} = 0,30 \cdot q_{\text{πριν}} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

Η πυκνότητα θερμορροής στο γυμνό αγωγό ($q_{\text{πριν}}$) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{\text{πριν}} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_0} + \frac{1}{2\lambda_{\text{σωλ.}}} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{\alpha_2 d_1}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Η πυκνότητα θερμορροής στο μονωμένο αγωγό ($q_{\text{μετά}}$) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{\text{μετά}} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_0} + \frac{1}{2\lambda_{\text{σωλ.}}} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{2\lambda_{\text{μον.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

$q_{\text{πριν}}$:	Πυκνότητα θερμορροής χωρίς μόνωση	W/m
$q_{\text{μετά}}$:	Πυκνότητα θερμορροής με την προσθήκη μόνωσης	W/m
θ_1 :	Θερμοκρασία ζεστού νερού	°C
θ_2 :	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C
α_1 :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σωλήνα	W/m ² K
α_2 :	Συντελεστής συναγωγής από το σωλήνα στο περιβάλλον	W/m ² K
α_2' :	Συντελεστής συναγωγής από την μόνωση στο περιβάλλον	W/m ² K
d_0 :	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d_1 :	Εξωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος μονωτικού υλικού	m
$\lambda_{\text{σωλ.}}$:	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σωλήνα	W/mK
$\lambda_{\text{μον.}}$:	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης	W/mK

Στις εξισώσεις (2) και (3) ο λόγος $1/(\alpha_1 d_0)$ τείνει στο μηδέν, διότι η ταχύτητα του νερού είναι πολύ μεγάλη, άρα και ο συντελεστής συναγωγής α_1 . Επίσης ο λόγος $1/(2\lambda_{\text{σωλ.}}) \cdot \ln [d_1/d_0]$ τείνει στο μηδέν διότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού είναι μεγάλος και ο σωλήνας είναι λεπτότοιχος.

Αναπτύσσοντας τους τύπους στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$0,30 \cdot \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 d_1}} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μιν.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}}$$

Λύνοντας ως προς $\lambda_{\text{μιν.}}$:

$$0,30 \cdot \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{μιν.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2} \right) = \frac{1}{\alpha_2 d_1}$$

$$\left. \begin{array}{l} 0,30 \cdot \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{μιν.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2} \right) = \frac{1}{\alpha_2 d_1} \\ d_2 = 0,036 \text{ m}, \quad d_1 = 0,018 \text{ m} \\ \alpha_2 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \alpha_2' = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \end{array} \right\} 0,30 \cdot \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{μιν.}}} \ln \frac{0,036}{0,018} + \frac{1}{10 \cdot 0,036} \right) = \frac{1}{15 \cdot 0,018}$$

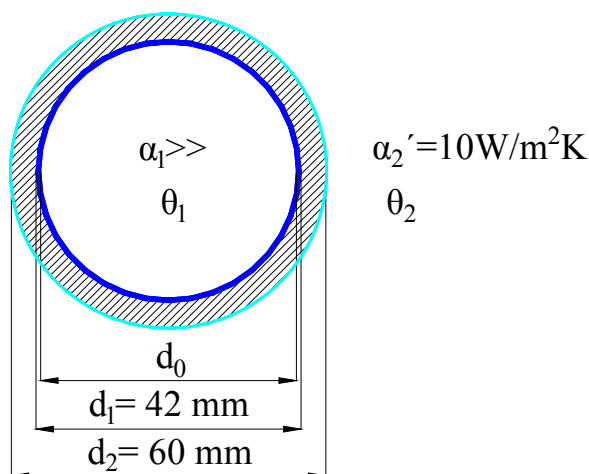
$$0,30 \cdot \frac{1}{2\lambda_{\text{μιν.}}} \ln \frac{0,036}{0,018} + 0,30 \cdot \frac{1}{10 \cdot 0,036} = \frac{1}{15 \cdot 0,018}$$

$$\frac{0,30}{2\lambda_{\text{μιν.}}} \cdot 0,693 + 0,833 = 3,704$$

$$\frac{0,2079}{2\lambda_{\text{μιν.}}} = 2,871 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\text{μιν.}} = 0,0362 \text{ W/mK.}$$

Ερώτημα Β:

Σ' αυτήν την περίπτωση έχουμε το ίδιο μονωτικό υλικό ίδιου πάχους, αλλά σε μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνα και ψάχνουμε να βρούμε την μείωση των απωλειών που επιτυγχάνεται σ' αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 3. Σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου 42 mm με προσθήκη μόνωσης 9 mm.

Η εξίσωση που θα μας δώσει το ποσοστό μείωσης των απωλειών είναι η παρακάτω:

$$P\% = \frac{q_{\text{πρὶν}} - q_{\text{μετά}}}{q_{\text{πρὶν}}} = 1 - \frac{q_{\text{μετά}}}{q_{\text{πρὶν}}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι εξισώσεις (2) και (3) μόνο που αλλάζει η διάμετρος του σωλήνα. Έτσι αντικαθιστώντας:

$$P\% = 1 - \frac{\frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{2\lambda_{\text{μ.ο.ν.}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}}}{\frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 d_1}}} = 1 - \frac{\frac{1}{\alpha_2 d_1}}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μ.ο.ν.}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}}}$$

$$P\% = 1 - \frac{\frac{1}{\alpha_2 d_1}}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μ.ο.ν.}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_2 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \alpha_2' = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_1 = 0,042 \text{ m}, \quad d_2 = 0,060 \text{ m} \\ \lambda_{\text{μ.ο.ν.}} = 0,0362 \text{ W/mK}, \end{array} \right\} P\% = 1 - \frac{15 \cdot 0,042}{\frac{1}{2 \cdot 0,0362} \ln \frac{0,060}{0,042} + \frac{1}{10 \cdot 0,060}}$$

$$= 1 - 0,2408 = 0,7592 = 75,92\%$$

$$P\% \approx 76\%$$

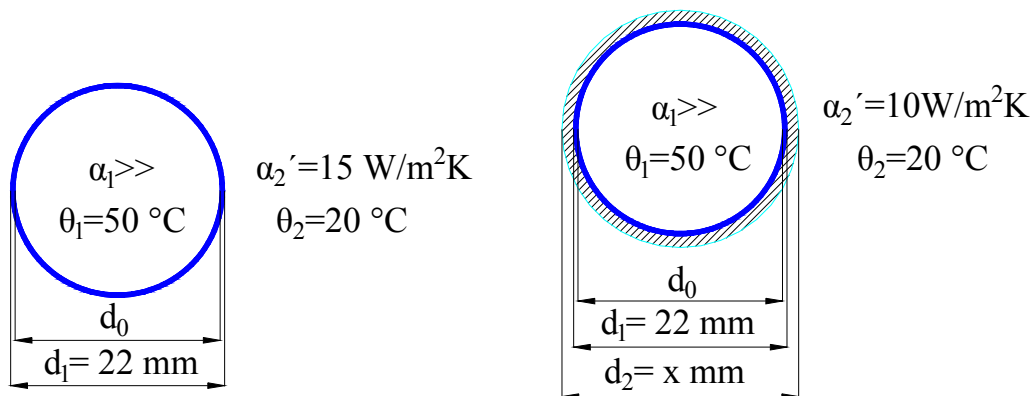
Όταν η διάμετρος του σωλήνα ήταν 18 mm η μείωση των απωλειών γι' αυτό το μονωτικό ήταν 70 %, τώρα που η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 42 mm η μείωση των απωλειών είναι 76%. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα δίκτυο σωλήνων που μονώνονται με ίδιο μονωτικό, ίδιου πάχους το ποσοστό μείωσης

των απωλειών είναι μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των σωλήνων.

Ερώτημα Γ:

Θεωρείται ότι το δίκτυο σωληνώσεων έχει εξωτερική διάμετρο 22 mm και συνολικό μήκος 1000 m.

Υποερώτημα Γ1:



Σχήμα 4. Σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου 22 mm χωρίς μόνωση.

Σχήμα 5. Σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου 22 mm με προσθήκη μονωτικού υλικού 6 mm ή 9mm ή 13mm.

Για να βρίσκουμε την εξοικονομούμενη ενέργεια θα πρέπει να βρίσκουμε την μεταδιδόμενη θερμική ισχύ όταν ο σωλήνας είναι γυμνός και όταν ο σωλήνας είναι μονωμένος με 6mm, ή 9mm, ή 13mm μόνωσης. Έτσι:

Η μεταδιδόμενη θερμική ισχύς πριν την προσθήκη της μόνωσης είναι ίση με:

$$Q_{\text{πριν}} = \frac{\pi(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\frac{1}{\alpha_2 d_1}} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Η μεταδιδόμενη θερμική ισχύς με την προσθήκη της μόνωσης είναι για κάθε μονωτικό αντιστοιχα $d_2 = 22 + (2 \cdot 6) = 34$ mm, $d_2 = 22 + (2 \cdot 9) = 40$ mm, $d_2 = 22 + (2 \cdot 13) = 48$ mm αντίστοιχα για 6 mm, 9 mm, 13 mm μόνωσης.

$$Q_{\text{μετά}} = \frac{\pi(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μον.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

Η εξοικονομούμενη θερμορροή θα δίνεται από τη διαφορά της μεταδιδόμενης θερμικής ισχύος όταν ο σωλήνας είναι γυμνός και όταν είναι μονωμένος.

$$\Delta Q = Q_{\text{πριν}} - Q_{\text{μετά}} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Η εξοικονομούμενη ενέργεια θα δίνεται κάθε φορά από τον πολλαπλασιασμό της εξοικονομούμενης θερμορροής με τις ώρες που δουλεύει η εγκατάσταση.

$$\Delta EE = \Delta Q \cdot h/d \cdot d/y \text{ (Εξίσωση 8)}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{πρίν}} = \frac{\pi(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\alpha_2 d_1} \\ \theta_1 = 50^\circ\text{C}, \theta_2 = 20^\circ\text{C} \\ l = 1000 \text{ m}, \alpha_2 = 15 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_1 = 0,022 \text{ m} \end{array} \right\} Q_{\text{πρίν}} = \frac{\pi(50 - 20) \cdot 1000}{15 \cdot 0,022} = 31102 \text{ W}$$

$$Q_{\text{πρίν}} = 31102 \text{ W} = 26743 \text{ kcal/h}$$

α) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 6 mm:

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{μετά}} = \frac{\pi(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μον.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}} \\ \theta_1 = 50^\circ\text{C}, \theta_2 = 20^\circ\text{C} \\ d_1 = 0,022 \text{ m}, d_2 = 0,034 \text{ m} \\ \alpha_2' = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \lambda_{\text{μον.}} = 0,0362 \text{ W/mK} \\ l = 1000 \text{ m} \end{array} \right\} Q_{\text{μετά}} = \frac{\pi(50 - 20) \cdot 1000}{\frac{1}{2 \cdot 0,0362} \ln \frac{0,034}{0,022} + \frac{1}{10 \cdot 0,034}} = 10526 \text{ W}$$

$$Q_{\text{μετά}} = 10526 \text{ W} \cong 9051 \text{ kcal/h}$$

Η εξοικονομούμενη θερμορροή σύμφωνα με την εξίσωση (7) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = Q_{\text{πρίν}} - Q_{\text{μετά}} \\ Q_{\text{πρίν}} = 31102 \text{ W} \\ Q_{\text{μετά}} = 10526 \text{ W} \end{array} \right\} \Delta Q = 31102 - 10526 = 20576 \text{ W}$$

$$\Delta Q = 20576 \text{ W} = 17692 \text{ kcal/h}$$

Η εξοικονομούμενη ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση (8) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta EE = \Delta Q \cdot h/d \cdot d/y \\ \Delta Q = 20576 \text{ W}, h/d = 18h \\ d/y = 250d \end{array} \right\} \Delta EE = 20576 \cdot 18 \cdot 250 = 92592000 \text{ Wh/y}$$

$$\Delta EE = 92592000 \text{ Wh/y} \text{ ή } 92592 \text{ kWh/y}$$

β) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 9 mm:

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{μετά}} = \frac{\pi(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μον.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}} \\ \theta_1 = 50^\circ\text{C}, \theta_2 = 20^\circ\text{C}, \\ \alpha_2' = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_1 = 0,022 \text{ m}, d_2 = 0,040 \text{ m} \\ \lambda_{\text{μον.}} = 0,0362 \text{ W/mK} \\ l = 1000 \text{ m} \end{array} \right\} Q_{\text{μετά}} = \frac{\pi(50 - 20) \cdot 1000}{\frac{1}{2 \cdot 0,0362} \ln \frac{0,040}{0,022} + \frac{1}{10 \cdot 0,040}} = 8761 \text{ W}$$

$$Q_{\text{μετά}} = 8761 \text{ W} = 7533 \text{ kcal/h}$$

Η εξοικονομούμενη θερμότητα σύμφωνα με την εξίσωση (7) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = Q_{\text{πρίν}} - Q_{\text{μετά}} \\ Q_{\text{πρίν}} = 31102 \text{ W}, \\ Q_{\text{μετά}} = 8761 \text{ W} \end{array} \right\} \Delta Q = 31102 - 8761 = 22341 \text{ W}$$

$$\Delta Q = 22341 \text{ W} = 19210 \text{ kcal/h}$$

Η εξοικονομούμενη ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση (8) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta EE = \Delta Q \cdot h/d \cdot d/y \\ \Delta Q = 22341 \text{ W}, h/d = 18h \\ d/y = 250d \end{array} \right\} \Delta EE = 22341 \cdot 18 \cdot 250 = 100534500 \text{ Wh/y}$$

$$\Delta EE = 10534500 \text{ Wh/y} \text{ ή } 100535 \text{ kWh/y}$$

γ) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 13 mm:

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει:

$$Q_{\text{μετά.}} = \frac{\pi(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\frac{1}{2\lambda_{\text{μov.}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2' d_2}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta_1 = 50^\circ\text{C}, \theta_2 = 20^\circ\text{C}, d_2 = 0,048 \text{ m} \\ l = 1000 \text{ m}, \alpha_2' = 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_1 = 0,022 \text{ m}, \lambda_{\text{μov.}} = 0,0362 \text{ W/mK} \end{array} \right\} Q_{\text{μετά.}} = \frac{\pi(50 - 20) \cdot 1000}{\frac{1}{2 \cdot 0,0362} \ln \frac{0,048}{0,022} + \frac{1}{10 \cdot 0,048}}$$

$$= 7329 \text{ W}$$

$$Q_{\text{μετά.}} = 7329 \text{ W} = 6302 \text{ kcal/h}$$

Η εξοικονομούμενη θερμότητα σύμφωνα με την εξίσωση (7) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = Q_{\text{πρίν.}} - Q_{\text{μετά.}} \\ Q_{\text{πρίν.}} = 31102 \text{ W} \\ Q_{\text{μετά.}} = 7329 \text{ W} \end{array} \right\} \Delta Q = 31102 - 7329 = 23773 \text{ W}$$

$$\Delta Q = 23773 \text{ W} = 20441 \text{ kcal/h}$$

Η εξοικονομούμενη ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση (8) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta EE = \Delta Q \cdot h/d \cdot d/y \\ \Delta Q = 23773 \text{ Wh/d} = 18h \\ d/y = 250d \end{array} \right\} \Delta EE = 23773 \cdot 18 \cdot 250 = 106978500 \text{ Wh/y}$$

$$\Delta EE = 106978500 \text{ Wh/y} \text{ ή } 106979 \text{ kWh/y}$$

Υποερώτημα Γ2:

Για να βρούμε το ετήσιο οικονομικό όφελος που θα έχουμε από την εξοικονόμηση ενέργειας λόγω προσθήκης της μόνωσης θα πρέπει να βρούμε πόσο καύσιμο εξοικονομούμε, σε κάθε περίπτωση.

Η εξοικονόμηση καυσίμου θα δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot H_{\text{υγρ.}}} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Το ετήσιο οικονομικό όφελος θα δίνεται κάθε φορά από το παρακάτω γινόμενο:

$$E.O.O. = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονομούμενη ποσότητα καυσίμου.	kg/y
ΔEE :	Η εξοικονομούμενη ενέργεια	kWh/y
n :	Ο μέσος βαθμός απόδοσης του καυστήρα	
$H_{\text{υγρ.}}$:	Κατωτέρα θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kWh/kg
$E.O.O.$:	Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y

τ_{κ} : Τιμή καυσίμου €/kg

α) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 6 mm:

Από την εξίσωση (9) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot H_{\text{υγρ.}}} \\ \Delta EE = 92592 \text{ kWh/y} \\ H_{\text{υγρ.}} = 12,73^* \text{ kWh/kg} \\ n = 0,85 \end{array} \right\} \Delta G = \frac{92592}{0,85 \cdot 12,73} = 8557 \text{ kg/y} \quad \Delta G = 8557 \text{ kg/y}$$

* Βρίσκεται από τον Πίνακα Α7 του παραρτήματος 2 μετά από την κατάλληλη μετατροπή μονάδων.

Το ετήσιο οικονομικό όφελος είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{E.O.O.} = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \\ \Delta G = 8557 \text{ kg/y} \\ \tau_{\kappa} = 0,55 \text{ €/kg} \end{array} \right\} \text{E.O.O.} = 8557 \cdot 0,55 = 4706 \text{ €/y} \quad \text{E.O.O.} = 4706 \text{ €/y}$$

β) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 9 mm:

Από την εξίσωση (9) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot H_{\text{υγρ.}}} \\ \Delta EE = 100535 \text{ kWh/y} \\ H_{\text{υγρ.}} = 12,73 \text{ kWh/kg} \\ n = 0,85 \end{array} \right\} \Delta G = \frac{100535}{0,85 \cdot 12,73} = 9291 \text{ kg/y} \quad \Delta G = 9291 \text{ kg/y}$$

Το ετήσιο οικονομικό όφελος είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{E.O.O.} = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \\ \Delta G = 9291 \text{ kg/y} \\ \tau_{\kappa} = 0,55 \text{ €/kg} \end{array} \right\} \text{E.O.O.} = 9291 \cdot 0,55 = 5110 \text{ €/y} \quad \text{E.O.O.} = 5110 \text{ €/y}$$

γ) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 13 mm:

Από την εξίσωση (9) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot H_{\text{υγρ.}}} \\ \Delta EE = 106979 \text{ kWh/y} \\ H_{\text{υγρ.}} = 12,73 \text{ kWh/Kg} \\ n = 0,85 \end{array} \right\} \Delta G = \frac{106979}{0,85 \cdot 12,73} = 9887 \text{ kg/y} \quad \Delta G = 9887 \text{ kg/y}$$

Το ετήσιο οικονομικό όφελος είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{E.O.O.} = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \\ \Delta G = 9887 \text{ Kg/y} \\ \tau_{\kappa} = 0,55 \text{ €/Kg} \end{array} \right\} \text{E.O.O.} = 9887 \cdot 0,55 = 5438 \text{ €/y} \quad \text{E.O.O.} = 5438 \text{ €/y}$$

Υποερώτημα Γ3:

Το βέλτιστο οικονομικό πάχος μόνωσης είναι αυτό για το οποίο η επένδυση παρουσιάζει την μεγαλύτερη Καθαρά Παρούσα Αξία.

Η Καθαρά Παρούσα Αξία θα δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Κ.Π.Α.} = -\text{Α.Κ.Ε.} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Το αρχικό κόστος επένδυσης θα δίνεται από το γινόμενο του κόστους του μονωτικού με το μήκος του δικτύου.

$$\text{Α.Κ.Ε.} = K_{\text{μον.}} \cdot l_{\text{δικτ.}} \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

όπου:		
Κ.Π.Α.:	Καθαρά Παρούσα Αξία	€
Α.Κ.Ε.:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης.	€
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	
Κ.Ε.Ο.Ο.:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
N:	Έτη τεχνολογικής ζωής	
K _{μον.} :	Κόστος μόνωσης	€/m
l _{δικτ.} :	Μήκος δικτύου σωληνώσεων	m

Το καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με το ετήσιο οικονομικό όφελος, διότι δεν έχουμε ετήσιες λειτουργικές δαπάνες.

α) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 6 mm:

Το αρχικό κόστος επένδυσης σύμφωνα με την εξίσωση (12) είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{A.K.E.} = K_{\text{μον.}} \cdot l_{\text{δικτ.}} \\ K_{\text{μον.}} = 7 \text{ €/m} \\ l_{\text{δικτ.}} = 1000 \text{ m} \end{array} \right\} \text{A.K.E.} = 7 \cdot 1000 = 7000 \text{ €} \quad \text{A.K.E.} = 7000 \text{ €}$$

Η Καθαρά Παρούσα Αξία σύμφωνα με την εξίσωση (11) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Κ.Π.Α.} = -\text{A.K.E.} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} \\ \text{A.K.E.} = 7000 \text{ €} \\ r = 10\%, N = 8 \\ \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} = 4706 \text{ €/y} \end{array} \right\}$$

$$\text{Κ.Π.Α.} = -7000 + \frac{(1+0,10)^8 - 1}{0,10 \cdot (1+0,10)^8} \cdot 4706 = 18108 \text{ €} \quad \text{Κ.Π.Α} = 18108 \text{ €}$$

β) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 9 mm:

Το αρχικό κόστος επένδυσης σύμφωνα με την εξίσωση (12) είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{A.K.E.} = K_{\text{μον.}} \cdot l_{\text{δικτ.}} \\ K_{\text{μον.}} = 8 \text{ €/m} \\ l_{\text{δικτ.}} = 1000 \text{ m} \end{array} \right\} \text{A.K.E.} = 8 \cdot 1000 = 8000 \text{ €} \quad \text{A.K.E.} = 8000 \text{ €}$$

Η Καθαρά Παρούσα Αξία σύμφωνα με την εξίσωση (11) είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Κ.Π.Α.} = -\text{A.K.E.} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} \\ \text{A.K.E.} = 8000 \text{ €} \\ r = 10\%, N = 8 \\ \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} = 5110 \text{ €/y} \end{array} \right\}$$

$$\text{Κ.Π.Α.} = -8000 + \frac{(1+0,10)^8 - 1}{0,10 \cdot (1+0,10)^8} \cdot 5110 = 19262 \text{ €} \quad \text{Κ.Π.Α} = 19262 \text{ €}$$

γ) Περίπτωση: προσθήκη μονωτικού υλικού 13 mm:

Το αρχικό κόστος επένδυσης σύμφωνα με την εξίσωση (12) είναι ίσο με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{A.K.E.} = K_{\text{μον.}} \cdot l_{\text{δικτ.}} \\ K_{\text{μον.}} = 10 \text{ €/m} \\ l_{\text{δικτ.}} = 1000 \text{ m} \end{array} \right\} \text{A.K.E.} = 10 \cdot 1000 = 10000 \text{ €} \quad \text{A.K.E.} = 10000 \text{ €}$$

Η καθαρά παρούσα αξία σύμφωνα με την εξίσωση (11) είναι ίση με:

$$\left. \begin{aligned} \text{Κ.Π.Α.} &= -\text{Α.Κ.Ε.} + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} \\ \text{Α.Κ.Ε.} &= 10000 \text{ €} \\ r &= 10\%, N = 8 \\ \text{Κ.Ε.Ο.Ο.} &= 5438 \text{ €/y} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{Κ.Π.Α.} = -10000 + \frac{(1+0,10)^8 - 1}{0,10 \cdot (1+0,10)^8} \cdot 5438 = 19011 \text{ €} \quad \text{Κ.Π.Α} = 19011 \text{ €}$$

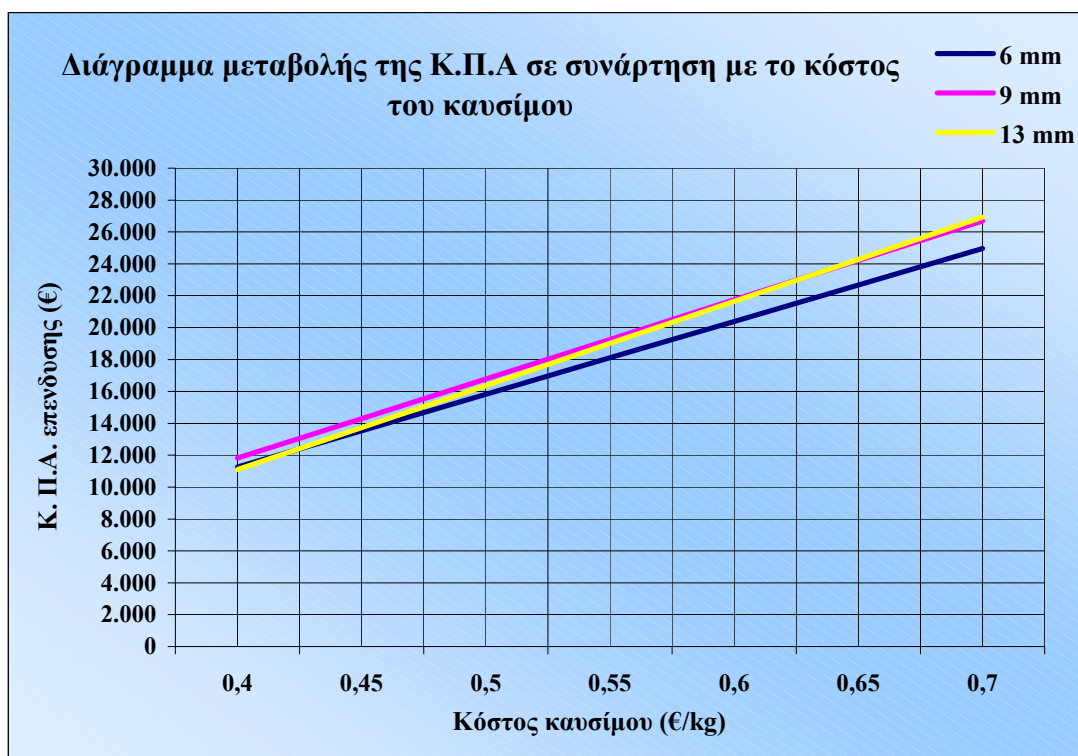
Συνεπώς το βέλτιστο οικονομικό πάχος είναι το (β): 9mm.

Ερώτημα Δ:

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (10) για την Κ.Π.Α και βρίσκοντας κάθε φορά το Ε.Ο.Ο. από την εξίσωση (9) για διάφορες τιμές του καυσίμου, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για 6mm, 9 mm και για 13 mm μονωτικού υλικού. Οι τιμές του καυσίμου είναι από 0,4 €/kg έως 0,7 €/kg ανά 0,05 €/kg το αποπληθωρισμένο επιτόκιο (r) είναι ίσο με 10% και η διάρκεια τεχνολογικής ζωής της μόνωσης 8 έτη.

τκ (€/kg)	Α. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 6 mm				Β. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 9 mm				Γ. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 13 mm			
	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€)	Κ.Π.Α. (€)	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€/m)	Κ.Π.Α. (€)	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€/m)	Κ.Π.Α. (€)
0,4	8.557	3.423	7.000	11.260	9.291	3.716	8.000	11.827	9.887	3.955	10.000	11.099
0,45	8.557	3.851	7.000	13.543	9.291	4.181	8.000	14.305	9.887	4.449	10.000	13.736
0,5	8.557	4.279	7.000	15.825	9.291	4.646	8.000	16.783	9.887	4.944	10.000	16.373
0,55	8.557	4.706	7.000	18.108	9.291	5.110	8.000	19.262	9.887	5.438	10.000	19.011
0,6	8.557	5.134	7.000	20.391	9.291	5.575	8.000	21.740	9.887	5.932	10.000	21.648
0,65	8.557	5.562	7.000	22.673	9.291	6.039	8.000	24.218	9.887	6.427	10.000	24.285
0,7	8.557	5.990	7.000	24.956	9.291	6.504	8.000	26.697	9.887	6.921	10.000	26.922

Πίνακας 1. Κ.Π.Α. της επένδυσης μεταβάλλοντας το κόστος του καυσίμου για 6 mm, 9 mm και για 13 mm μονωτικού υλικού.



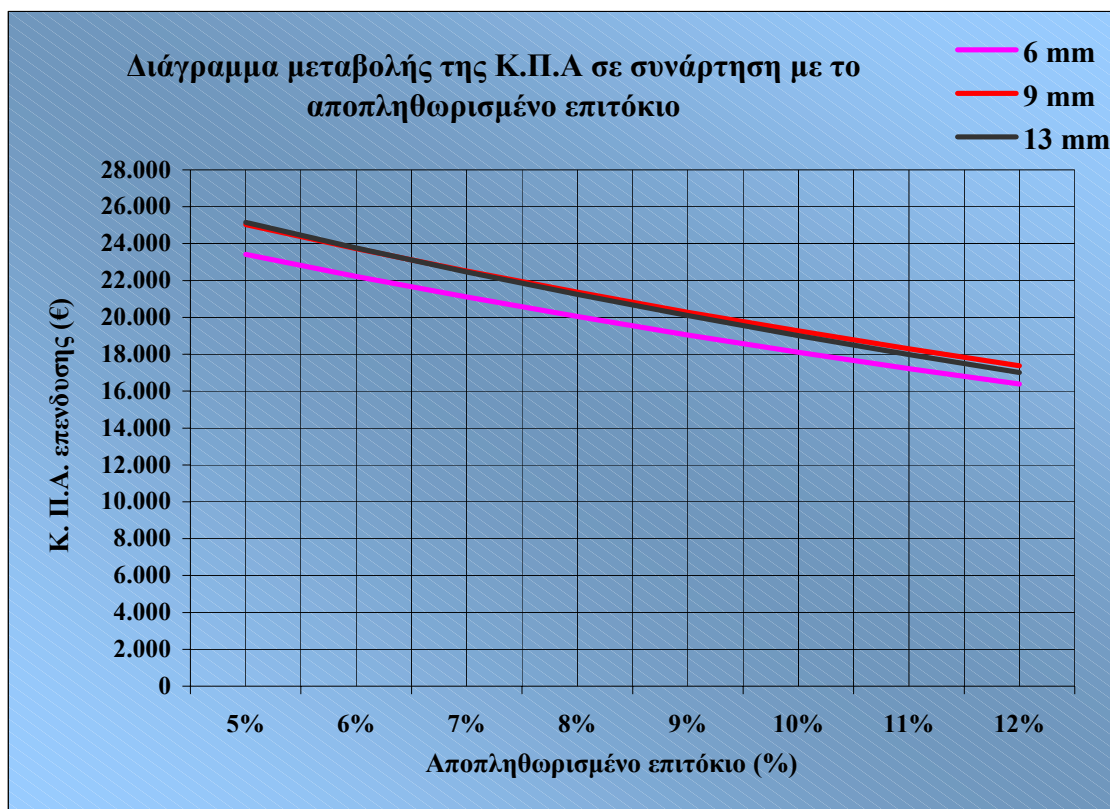
Διάγραμμα 1. Μεταβολή της Κ.Π.Α. σε συναρτήσει με το κόστος του καυσίμου για 6 mm, 9 mm, και για 13 mm μονωτικού υλικού.

Παρατηρούμε ότι για τιμή του καυσίμου μέχρι 0,60 €/kg το βέλτιστο πάχος μόνωσης είναι τα 9 mm διότι έχουν την μεγαλύτερη Κ.Π.Α. Για τιμή καυσίμου πάνω από 0,60 €/kg μεγαλύτερη Κ.Π.Α. παρουσιάζουν τα 13 mm και είναι το βέλτιστο πάχος μόνωση όταν αυξάνεται η τιμή του καυσίμου.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας πάλι την εξίσωση (10) και αλλάζοντας την τιμή του (αποπληθωρισμένου επιτοκίου) r προκύπτουν οι παρακάτω τιμές της Κ.Π.Α. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα είναι για κόστος καυσίμου 0,55 € /kg , αποπληθωρισμένο επιτόκιο (r) μεταβλητό με τιμές από 5% έως 12% ανά 1% και χρόνο τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού 8 έτη.

r (%)	Α. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 6 mm				Β. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 9 mm				Γ. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 13 mm			
	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€)	Κ.Π.Α. (€)	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€/m)	Κ.Π.Α. (€)	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€/m)	Κ.Π.Α. (€)
5%	8.557	4.706	7.000	23.418	9.291	5.110	8.000	25.027	9.887	5.438	10.000	25.146
6%	8.557	4.706	7.000	22.225	9.291	5.110	8.000	23.732	9.887	5.438	10.000	23.768
7%	8.557	4.706	7.000	21.103	9.291	5.110	8.000	22.514	9.887	5.438	10.000	22.471
8%	8.557	4.706	7.000	20.046	9.291	5.110	8.000	21.366	9.887	5.438	10.000	21.249
9%	8.557	4.706	7.000	19.049	9.291	5.110	8.000	20.283	9.887	5.438	10.000	20.098
10%	8.557	4.706	7.000	18.108	9.291	5.110	8.000	19.262	9.887	5.438	10.000	19.011
11%	8.557	4.706	7.000	17.219	9.291	5.110	8.000	18.297	9.887	5.438	10.000	17.984
12%	8.557	4.706	7.000	16.379	9.291	5.110	8.000	17.385	9.887	5.438	10.000	17.013

Πίνακας 2. Κ.Π.Α. μεταβάλλοντας την τιμή του επιτοκίου (r) για 6 mm, 9 mm και για 13 mm μονωτικού υλικού.



Διάγραμμα 2. Μεταβολή της Κ.Π.Α σε συνάρτηση με το αποπληθωρισμένο επιτόκιο (r).

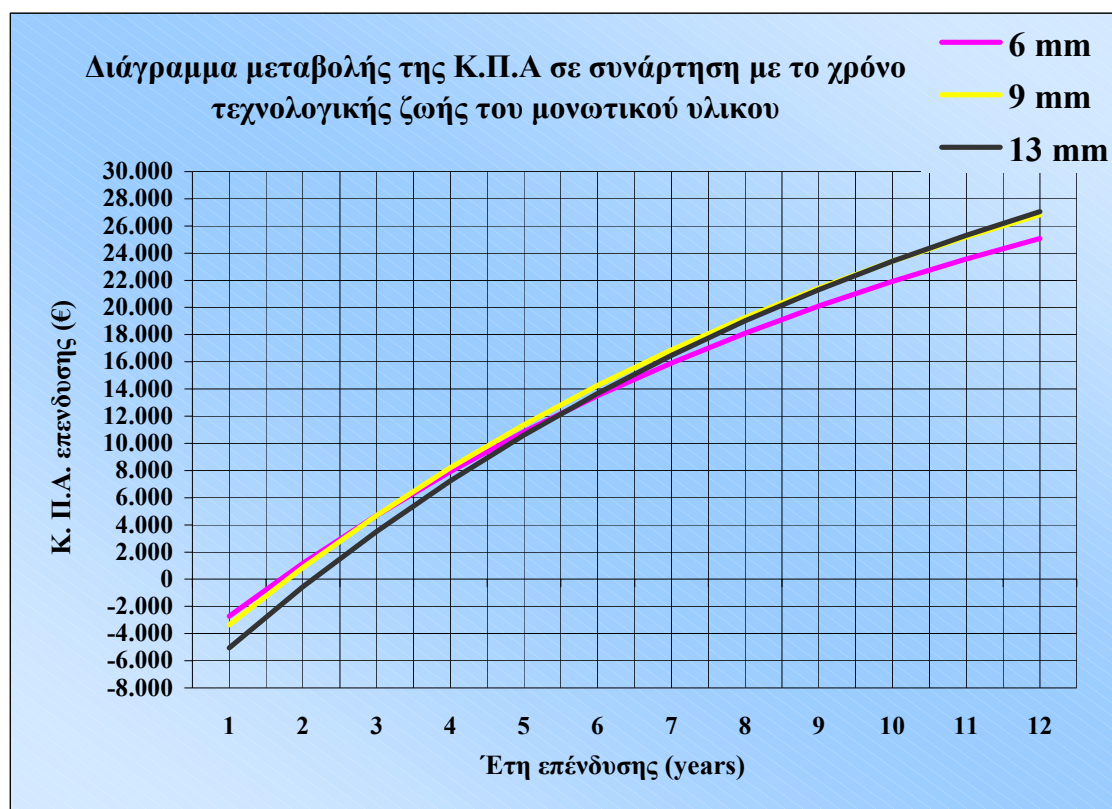
Από τον πίνακα και το διάγραμμα παρατηρούμε για τιμή επιτοκίου μέχρι 6% μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται για τα 13 mm μονωτικού υλικού άρα είναι και το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Από 7% επιτόκιο και πάνω η μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται για τα 9 mm μονωτικού υλικού άρα γι' αυτές τις τιμές επιτοκίου το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού είναι τα 9 mm.

Στη συνέχεια αλλάζοντας την τιμή της τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού και χρησιμοποιώντας πάλι την εξίσωση (10) για τον υπολογισμό της Κ.Π.Α. προκύπτουν οι παρακάτω τιμές.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα είναι για κόστος καυσίμου 0,55 € / kg, αποπληθωρισμένο επιτόκιο (r) 10% και χρόνο τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού μεταβλητό με τιμές από 1 έως 12 ανά 1.

N	Α. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 6 mm				Β. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 9 mm				Γ. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. 13 mm			
	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€)	Κ.Π.Α. (€)	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€/m)	Κ.Π.Α. (€)	ΔG (kg/y)	ΚΕΕΟ (€/y)	Α.Κ.Ε. (€/m)	Κ.Π.Α. (€)
1	8.557	4.706	7.000	-2.722	9.291	5.110	8.000	-3.355	9.887	5.438	10.000	-5.057
2	8.557	4.706	7.000	1.168	9.291	5.110	8.000	869	9.887	5.438	10.000	-562
3	8.557	4.706	7.000	4.704	9.291	5.110	8.000	4.708	9.887	5.438	10.000	3.523
4	8.557	4.706	7.000	7.918	9.291	5.110	8.000	8.198	9.887	5.438	10.000	7.237
5	8.557	4.706	7.000	10.841	9.291	5.110	8.000	11.371	9.887	5.438	10.000	10.614
6	8.557	4.706	7.000	13.497	9.291	5.110	8.000	14.256	9.887	5.438	10.000	13.683
7	8.557	4.706	7.000	15.912	9.291	5.110	8.000	16.878	9.887	5.438	10.000	16.474
8	8.557	4.706	7.000	18.108	9.291	5.110	8.000	19.262	9.887	5.438	10.000	19.011
9	8.557	4.706	7.000	20.104	9.291	5.110	8.000	21.429	9.887	5.438	10.000	21.317
10	8.557	4.706	7.000	21.918	9.291	5.110	8.000	23.399	9.887	5.438	10.000	23.413
11	8.557	4.706	7.000	23.568	9.291	5.110	8.000	25.190	9.887	5.438	10.000	25.319
12	8.557	4.706	7.000	25.068	9.291	5.110	8.000	26.818	9.887	5.438	10.000	27.052

Πίνακας 3. Κ.Π.Α. μεταβάλλοντας την τεχνολογική ζωή του μονωτικού υλικού για 6 mm, 9 mm και για 13 mm μονωτικού υλικού.



Διάγραμμα 3. Μεταβολή της Κ.Π.Α σε συνάρτηση με το χρόνο τεχνολογικής ζωής της επένδυσης.

Από το διάγραμμα και τον πίνακα προκύπτει ότι για χρόνο τεχνολογικής ζωής της μόνωσης από 1 έως 2 έτη η μέγιστη Κ.Π.Α. είναι για τα 6 mm μονωτικού υλικού άρα αυτό είναι και το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Για τιμές τεχνολογικής ζωής από 3 έως 9 η μέγιστη Κ.Π.Α παρουσιάζεται για τα 9 mm μονωτικού υλικού, δηλαδή τα 9 mm

είναι το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Από 10 έως 12 έτη τεχνολογικής ζωής η μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται στα 13 mm μονωτικού υλικού. Δηλ. καθώς μεγαλώνει ή τεχνολογική ζωή του υλικού εμφανίζουν μεγαλύτερη Κ.Π.Α. τα πιο παχιά μονωτικά υλικά.

Συμπέρασμα:

Η ροή θερμότητας ή πυκνότητα θερμορροής ενός μονωμένου σωλήνα επηρεάζεται τόσο από τις συνθήκες στις οποίες αυτό βρίσκεται (θερμοκρασίες, συντελεστές συναγωγής) όσο και από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και το πάχος του μονωτικού υλικού. Εκτός όμως από τα παραπάνω βασικό ρόλο στην μεταβολή της πυκνότητας θερμορροής παίζει και η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα.

Από τα αποτελέσματα της άσκησης διαπιστώσαμε ότι για το ίδιο πάχος μονωτικού υλικού με τον ίδιο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας έχουμε μεγαλύτερη μείωση των απωλειών όσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια συναλλαγής του σωλήνα τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες και τόσο καλύτερη είναι η μείωση των απωλειών που έχουμε από την προσθήκη μονωτικού υλικού.

Αυξάνοντας το πάχος του μονωτικού υλικού αυξάνεται και το Ε.Ο.Ο. που έχουμε εξαιτίας του. Αντισταθμίζοντας το όφελος που έχουμε σε σχέση με το αρχικό κόστος που έχει η επένδυση, χρησιμοποιώντας την Κ.Π.Α., βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη Κ.Π.Α. άρα και το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού επιτυγχάνεται για τα 9mm μονωτικού υλικού.

Διερευνώντας πώς επηρεάζεται η Κ.Π.Α. από την αλλαγή της τιμής του καυσίμου, το αποπληθωρισμένο επιτόκιο και τα έτη της τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού για 6mm, 9mm και 13mm μονωτικού υλικού συμπεραίνουμε τα παρακάτω:

A). Μεταβάλλοντας την τιμή του καυσίμου από 0,4 €/kg έως 0,7 €/kg ανά 0,05 €/kg με επιτόκιο $r=10\%$, και έτη τεχνολογικής ζωής της μόνωσης $N=8$ παρατηρούμε ότι για τιμή του καυσίμου μέχρι 0,60 €/kg το βέλτιστο πάχος μόνωσης είναι τα 9 mm διότι έχει την μεγαλύτερη Κ.Π.Α. Για τιμή καυσίμου πάνω από 0,60 €/kg μεγαλύτερη Κ.Π.Α. παρουσιάζουν τα 13 mm και είναι το βέλτιστο πάχος μόνωση όταν αυξάνεται η τιμή του καυσίμου.

B). Για τιμή καυσίμου $\tau_k=0,55$ €/kg, έτη τεχνολογικής ζωής $N=8$ και μεταβλητό αποπληθωρισμένο επιτόκιο r από 5% έως 12% ανά 1%, βλέπουμε ότι μέχρι 6% επιτόκιο η μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται για τα 13 mm μονωτικού υλικού άρα είναι και το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Από 7% επιτόκιο και πάνω η μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται για τα 9 mm μονωτικού υλικού άρα γι' αυτές τις τιμές επιτοκίου το βέλτιστο πάχος μονωτικού υλικού είναι τα 9 mm.

Γ). Αλλάζοντας τα έτη τεχνολογικής ζωής του μονωτικού υλικού από 1 έως 12 έτη ανά 1, για επιτόκιο 10% και τιμή καυσίμου 0,55 €/kg προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Για χρόνο τεχνολογικής ζωής της μόνωσης από 1 έως 2 έτη η μέγιστη Κ.Π.Α. είναι για τα 6 mm μονωτικού υλικού άρα αυτό είναι και το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Για τιμές τεχνολογικής ζωής από 3 έως 9 η μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται για τα 9 mm μονωτικού υλικού, δηλαδή τα 9 mm είναι το βέλτιστο πάχος μόνωσης. Από 10 έως 12 έτη τεχνολογικής ζωής η μέγιστη Κ.Π.Α. παρουσιάζεται στα 13 mm μονωτικού υλικού. Δηλαδή καθώς μεγαλώνει ή τεχνολογική ζωή του υλικού εμφανίζουν μεγαλύτερη Κ.Π.Α. τα πιο παχιά μονωτικά.

2. ΣΥΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.

Μελέτη 6^η

Πίστα παγοδρομίου - Μείωση απωλειών ακτινοβολίας - Εξοικονόμηση Ενέργειας.

Η πίστα ενός κλειστού παγοδρομίου έχει διαστάσεις 27 m x 60 m και ο (λείος) πάγος διατηρείται σε θερμοκρασία -4°C . Η οροφή του έχει ίδιες διαστάσεις, βρίσκεται σε θερμοκρασία 16°C , το δε υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη έχει ολικό συντελεστή εκπομπής 0,9. Η οροφή απέχει από το δάπεδό 7,5 m. (Αυτή η απόσταση μας επιτρέπει να θεωρήσουμε τις δύο επιφάνειες πολύ μεγάλες, για το υπολογισμό του συντελεστή αλληλεκπομπής).

A. Να βρεθεί η θερμική ισχύς που δέχεται με ακτινοβολία η πίστα από την οροφή.

B. Να βρεθεί η τιμή που πρέπει να έχει ο ολικός συντελεστής εκπομπής ενός υλικού, με το οποίο επικαλύπτεται (με επικόλληση) εσωτερικά η οροφή, ώστε η θερμική ισχύς που δέχεται η πίστα να μειωθεί κατά 60%.

Γ. Ένας άλλος τρόπος για να μειωθεί η θερμική ισχύς προς την πίστα, είναι να παρεμβληθεί μεταξύ οροφής και πίστας ένα λεπτό πέτασμα, ιδίων διαστάσεων, από υλικό χαμηλού συντελεστή εκπομπής. Αν το πέτασμα είναι από λεπτά φύλλα αλουμινίου (στεγάστρων) και τοποθετηθεί σε απόσταση 0,50 m κάτω από την οροφή, να υπολογισθεί η θερμική ισχύς που δέχεται η πίστα.

Δ. Για το B. ερώτημα, να γίνει το διάγραμμα μεταβολής της θερμικής ισχύος που δέχεται η πίστα σε συνάρτηση με το συντελεστή εκπομπής του υλικού, με το οποίο θα επικαλύπτεται (με επικόλληση) εσωτερικά η οροφή (τιμές από 0,15 έως 0,95 – ανά 0,1).

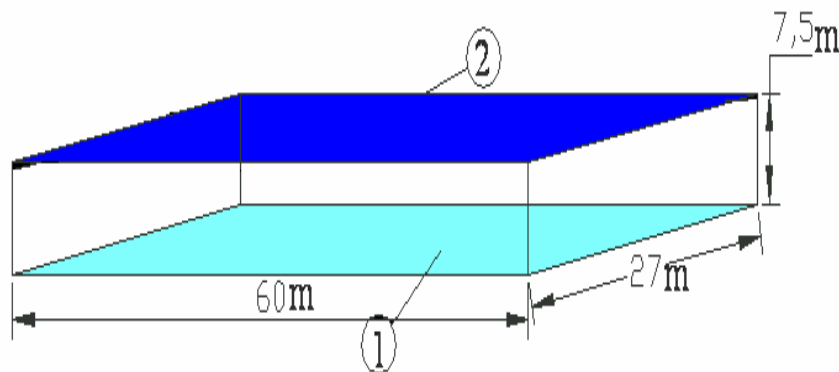
Ε. Η ψυκτική εγκατάσταση του παγοδρομίου εργάζεται με μέσο συντελεστή συμπεριφοράς (COP) 1,9 και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0,1€/kWh, ενώ στην πραγματικότητα, η θερμοκρασία της οροφής του παγοδρομίου μεταβάλλεται στη διάρκεια μιας τυπικής φθινοπωρινής ημέρας όπως παρακάτω:

Ωρα	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Ωρα	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)
1	13	13	16
2	13	14	16
3	13	15	17
4	13	16	17
5	12	17	18
6	12	18	18
7	13	19	16
8	13	20	16
9	14	21	15
10	14	22	15
11	15	23	14
12	15	24	14

Να υπολογισθεί το ενεργειακό και οικονομικό όφελος που επιτυγχάνεται σε μια περίοδο 100 ημερών το φθινόπωρο, για όλες τις περιπτώσεις μεταβολής του συντελεστή εκπομπής του ερωτήματος Δ.

Να γίνει σχετικό γράφημα.

Λύση :



Σχήμα 1. Κλειστό παγοδρόμιο.

1: πίστα.

2: οροφή.

θ_1 : -4 °C.

θ_2 : 16 °C.

ε_2 : 0,9.

Ερώτημα Α:

Η θερμική ισχύς που δέχεται με ακτινοβολία η πίστα από την οροφή δίνεται από την σχέση:

$$Q_{21} = \varepsilon_{21} \cdot \varphi_{21} \cdot C_{\mu} \cdot F_2 \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_1^4) \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

Q_{21} : Η ισχύς που δέχεται με ακτινοβολία η πίστα από την οροφή W

ε_{21} : Ο συντελεστής αλληλεκπομπής από την οροφή στην πίστα.

φ_{21} : Ο συντελεστής θέας από την οροφή στην πίστα.

C_{μ} : Η σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος.

$$= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

F_2 : Το εμβαδόν της επιφάνειας 2.

m^2

$$\Theta_1 = \frac{\theta_1 + 273}{100} = \frac{-4 + 273}{100} \Rightarrow \Theta_1 = 2,69 \text{ K.}$$

$$\Theta_2 = \frac{\theta_2 + 273}{100} = \frac{16 + 273}{100} \Rightarrow \Theta_2 = 2,89 \text{ K.}$$

Ο συντελεστής αλληλεκπομπής ε_{21} θα βρεθεί από την σχέση:

$$\varepsilon_{21} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Η οροφή έχει συντελεστή ολικής εκπομπής $\varepsilon_2 = 0,9$.

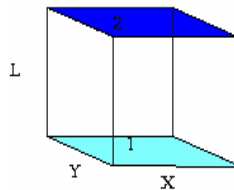
Η πίστα έχει συντελεστή ολικής εκπομπής $\varepsilon_1 = 0,966$.

Οι συντελεστές ολικής εκπομπής βρίσκονται από τον Πίνακα Α5 του Παραρτήματος 2

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{21} &= \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \\ \varepsilon_1 &= 0,9, \quad \varepsilon_2 = 0,966 \end{aligned} \right\} \varepsilon_{21} = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,966} - 1} \Rightarrow \varepsilon_{21} = \mathbf{0,872}$$

Ο συντελεστής θέας από την οροφή στην πίστα θα βρεθεί από τις εξής σχέσεις που ισχύουν στην περίπτωση που έχουμε δυο επιφάνειες, απέναντι η μια στην άλλη.



$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{X}{L}, \quad \bar{Y} = \frac{Y}{L} \\ \varphi_{21} &= \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} \right. \\ &\quad \left. + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\} \quad (\text{Εξίσωση 3}) \end{aligned}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (3) στην δική μας περίπτωση, παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:

$$\bar{X} = \frac{60}{7,5} = 8, \quad \bar{Y} = \frac{27}{7,5} = 3,6$$

$$\begin{aligned} \varphi_{21} &= \frac{2}{\pi \cdot 8 \cdot 3,6} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + 8^2) \cdot (1 + 3,6^2)}{1 + 8^2 + 3,6^2} \right]^{1/2} + 8 \cdot (1 + 3,6^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{8}{(1 + 3,6^2)^{1/2}} \right. \\ &\quad \left. + 3,6 \cdot (1 + 8^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{3,6}{(1 + 8^2)^{1/2}} - 8 \cdot \tan^{-1} 8 - 3,6 \cdot \tan^{-1} 3,6 \right\} \end{aligned}$$

$$\varphi_{21} = \mathbf{0,689}.$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} Q_{21} &= \varepsilon_{21} \cdot \varphi_{21} \cdot C\mu \cdot F_2 \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_1^4) \\ \varepsilon_{21} &= 0,872, \quad \varphi_{21} = 0,689, \\ C\mu &= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \quad F_2 = 1620 \text{ m}^2 \\ \Theta_1 &= 2,69 \text{ K}, \quad \Theta_2 = 2,89 \text{ K} \end{aligned} \right\} Q_{21} = 0,872 \cdot 0,689 \cdot 5,67 \cdot 1620 \cdot (2,89^4 - 2,69^4)$$

$$\approx 96000 \text{ W.}$$

$$Q_{21} \approx \mathbf{96000 \text{ W}}$$

Ερώτημα Β:

Με το υλικό που επικαλύπτεται εσωτερικά στην οροφή η θερμική ισχύς μειώνεται κατά 60%. Έτσι η νέα θερμική ισχύς δίνεται από την εξίσωση:

$$Q'_{21} = Q_{21} \cdot 0,40 \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q'_{21} = Q_{21} \cdot 0,40 \\ Q_{21} = 96000 \text{ W} \end{array} \right\} Q'_{21} = 96000 \cdot 0,40 = 38400 \text{ W} \quad \mathbf{Q'_{21} = 38400 \text{ W}}$$

Ο συντελεστής ολικής εκπομπής του υλικού θα βρεθεί από την σχέση:

$$Q'_{21} = \varepsilon'_{21} \cdot \varphi_{21} \cdot C\mu \cdot F_2 \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_1^4) \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

ε'_{21} : ο συντελεστής αλληλεκπομπής του υλικού με την πίστα.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) και λύνοντας ως προς ε'_{21} προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q'_{21} = \varepsilon'_{21} \cdot \varphi_{21} \cdot C\mu \cdot F_2 \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_1^4) \\ Q'_{21} = 38400 \text{ W}, \quad \varphi_{21} = 0,689, \\ C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, F_2 = 1620 \text{ m}^2 \\ \Theta_1 = 2,69 \text{ K}, \Theta_2 = 2,89 \text{ K} \end{array} \right\} 38400 = \varepsilon'_{21} \cdot 0,689 \cdot 5,67 \cdot 1620 \cdot (2,89^4 - 2,69^4)$$
$$\Rightarrow \quad \mathbf{\varepsilon'_{21} = 0,3488}$$

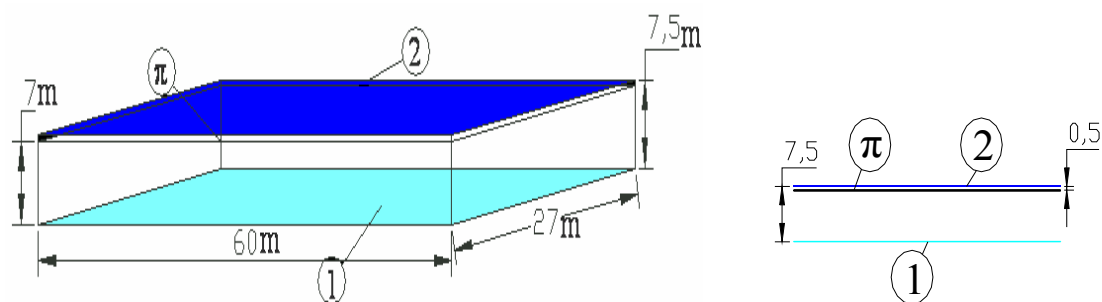
Ο συντελεστής ολικής εκπομπής του υλικού θα βρεθεί λύνοντας την παρακάτω εξίσωση ως προς ε'_2 .

$$\varepsilon'_{21} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon'_2} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon'_{21} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon'_2} - 1} \\ \varepsilon'_{21} = 0,3488, \quad \varepsilon_1 = 0,966 \end{array} \right\} 0,3488 = \frac{1}{\frac{1}{0,966} + \frac{1}{\varepsilon'_2} - 1} \Rightarrow$$

$$1 = 0,3488 \cdot \left(\frac{1}{0,966} + \frac{1}{\varepsilon'_2} - 1 \right) \Rightarrow \quad \mathbf{\varepsilon'_2 = 0,353}$$

Ερώτημα Γ:



Σχήμα 2. Τοποθέτηση πετάσματος στο κλειστό παγοδρόμιο.

1: πίστα.

2: οροφή.

π : το πέτασμα από λεπτά φύλλα αλουμινίου

θ_1 : -4 °C

θ_2 : 16 °C

ϵ_1 : 0,966 (από πίνακα)

ϵ_2 : 0,9

ϵ_π : 0,216 (από πίνακα).

Για την οροφή, την πίστα και το πέτασμα γράφουμε τις σχέσεις που μας δίνουν την ισχύ που δέχονται με ακτινοβολία.

Η ισχύς με ακτινοβολία από την οροφή στο πέτασμα $Q_{2\pi}$:

$$Q_{2\pi} = \epsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi} \cdot C\mu \cdot F_2 \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_\pi^4) \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Η ισχύς με ακτινοβολία από το πέτασμα στην πίστα $Q_{\pi 1}$:

$$Q_{\pi 1} = \epsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} \cdot C\mu \cdot F_\pi \cdot (\Theta_\pi^4 - \Theta_1^4) \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Όταν το πέτασμα ισορροπήσει θερμικά:

$$Q_{\pi 1} = Q_{2\pi} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (9) προκύπτει:

$$\epsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} \cdot C\mu \cdot F_\pi \cdot (\Theta_\pi^4 - \Theta_1^4) = \epsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi} \cdot C\mu \cdot F_2 \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_\pi^4)$$

Επειδή όμως $F_2 = F_\pi$:

$$\epsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} \cdot (\Theta_\pi^4 - \Theta_1^4) = \epsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi} \cdot (\Theta_2^4 - \Theta_\pi^4)$$

Λύνοντας ως προς Θ_π^4 :

$$\Theta_\pi^4 = \frac{\epsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} \cdot \Theta_1^4 + \epsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi} \cdot \Theta_2^4}{\epsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} + \epsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi}} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Ο συντελεστής αλληλεκπομπής από το πέτασμα στην πίστα:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{\pi 1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\pi}} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1} \\ \varepsilon_{\pi} = 0,216, \varepsilon_1 = 0,966 \end{array} \right\} \varepsilon_{\pi 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,216} + \frac{1}{0,966} - 1} = 0,214 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{\pi 1} = \mathbf{0,214}$$

Ο συντελεστής αλληλεκπομπής από την οροφή στο πέτασμα:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{2\pi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\pi}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \\ \varepsilon_{\pi} = 0,216, \varepsilon_2 = 0,9 \end{array} \right\} \varepsilon_{2\pi} = \frac{1}{\frac{1}{0,216} + \frac{1}{0,9} - 1} = 0,211 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{2\pi} = \mathbf{0,211}$$

Ο συντελεστής θέας από το πέτασμα στην πίστα θα βρεθεί από την εφαρμογή της σχέσης για τον υπολογισμό του συντελεστή θέας ως εξής:

$$\bar{X} = \frac{60}{7} = 8,57, \quad \bar{Y} = \frac{27}{7} = 3,85$$

$$\varphi_{\pi 1} = \frac{2}{\pi \cdot 8,57 \cdot 3,85} \left\{ \ln \left[\frac{(1+8,57^2) \cdot (1+3,85^2)}{1+8,57^2+3,85^2} \right]^{1/2} + 8,57 \cdot (1+3,85^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{8,57}{(1+3,85^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + 3,85 \cdot (1+8,57^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{3,85}{(1+8,57^2)^{1/2}} - 8,57 \tan^{-1} 8,57 - 3,85 \tan^{-1} 3,85 \right\}$$

$$\varphi_{\pi 1} = \mathbf{0,705}$$

Ο συντελεστής θέας από την οροφή στο πέτασμα θα βρεθεί από την εφαρμογή της σχέσης ως εξής:

$$\bar{X} = \frac{60}{0,5} = 120, \quad \bar{Y} = \frac{27}{0,5} = 54$$

$$\varphi_{2\pi} = \frac{2}{\pi \cdot 120 \cdot 54} \left\{ \ln \left[\frac{(1+120^2) \cdot (1+54^2)}{1+120^2+54^2} \right]^{1/2} + 120 \cdot (1+54^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{120}{(1+54^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + 54 \cdot (1+120^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{54}{(1+120^2)^{1/2}} - 120 \tan^{-1} 120 - 54 \tan^{-1} 54 \right\}$$

$$\varphi_{2\pi} = \mathbf{0,977}$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επειδή η απόσταση των δύο επιφανειών είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις διαστάσεις τους, θα μπορούσε να ληφθεί, προσεγγιστικά, $\varphi_{2\pi} \approx 1$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{\pi}^4 &= \frac{\varepsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} \cdot \Theta_1^4 + \varepsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi} \cdot \Theta_2^4}{\varepsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} + \varepsilon_{2\pi} \cdot \varphi_{2\pi}} \\ \varepsilon_{\pi 1} &= 0,214, \quad \varphi_{\pi 1} = 0,705, \\ \Theta_1 &= 2,69 \text{ K}, \quad \Theta_2 = 2,89 \text{ K} \\ \varphi_{2\pi} &= 0,977, \quad \varepsilon_{2\pi} = 0,211 \end{aligned} \right\} \Theta_{\pi}^4 = \frac{0,214 \cdot 0,705 \cdot 2,69^4 + 0,211 \cdot 0,977 \cdot 2,89^4}{0,214 \cdot 0,705 + 0,211 \cdot 0,977}$$

$$= 62,41 \text{ K}^4$$

$$\Theta_{\pi} = 2,811 \text{ K} \quad \Rightarrow \quad T_{\pi} = 281,1 \quad \Rightarrow \quad \theta_{\pi} = 8,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Η θερμική ισχύς που δέχεται τώρα η πίστα είναι σύμφωνα με την εξίσωση (8) είναι ίση με:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\pi 1} &= \varepsilon_{\pi 1} \cdot \varphi_{\pi 1} \cdot C_{\mu} \cdot F_{\pi} \cdot (\Theta_{\pi}^4 - \Theta_1^4) \\ \varepsilon_{\pi 1} &= 0,214, \quad \varphi_{\pi 1} = 0,705, \\ C_{\mu} &= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \\ F_{\pi} &= 1620 \text{ m}^2, \quad \Theta_{\pi} = 2,811 \text{ K} \\ \Theta_1 &= 2,69 \text{ K} \end{aligned} \right\} Q_{\pi 1} = 0,214 \cdot 0,705 \cdot 5,67 \cdot 1620 \cdot (2,811^4 - 2,69^4) = 13963 \text{ W}$$

$$Q_{\pi 1} = 13963 \text{ W}$$

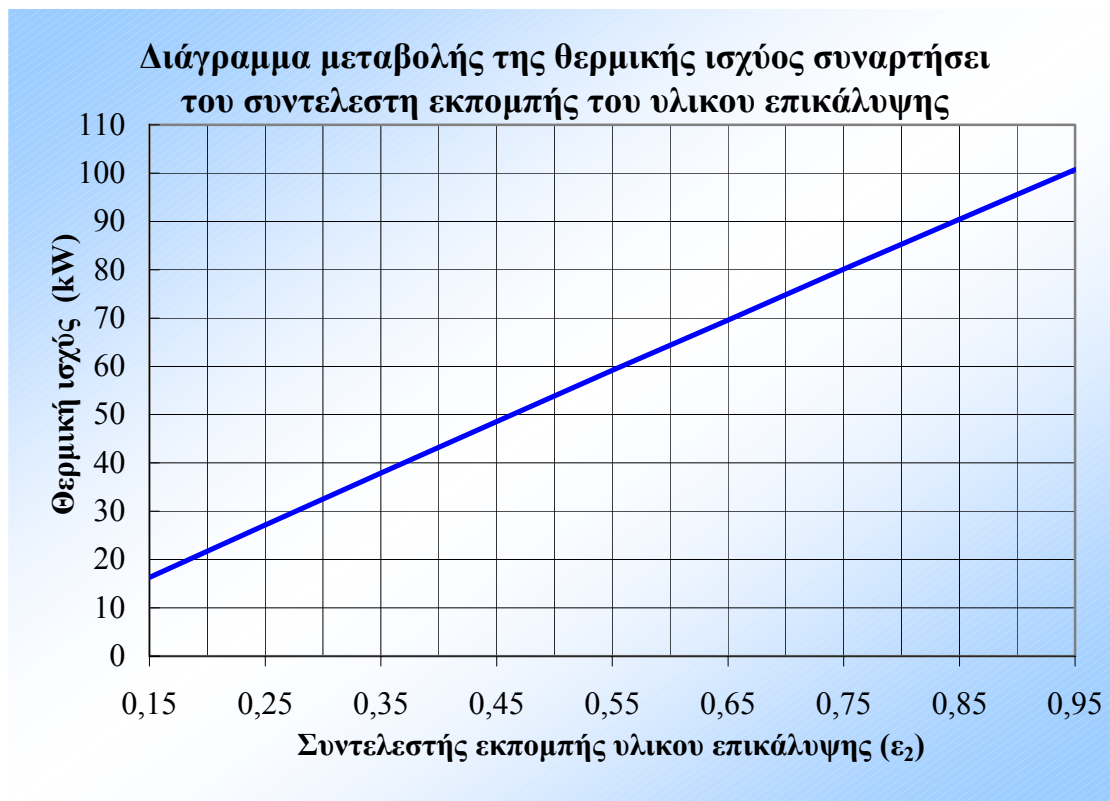
Ερώτημα Α:

Για να γίνει το διάγραμμα μεταβολής της θερμικής ισχύος που δέχεται η πίστα συναρτήσει του συντελεστή εκπομπής του υλικού με το οποίο επικαλύπτεται εσωτερικά η οροφή, (Ερώτημα Β) θα πρέπει να βρίσκουμε την ισχύ κάθε φορά χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1). Ο συντελεστής αλληλεκπομπής θα προκύπτει κάθε φορά από τη εξίσωση (2) αντικαθιστώντας και δίνοντας τιμές στο $\varepsilon_1=0,966$ και στο ε_2 από 0,15 έως 0,95-ανά 0,1

Ακολουθεί ο σχετικός πίνακας και το διάγραμμα.

ε_2	ε_1	ε_{21}	$Q_{21} \text{ (KW)}$
0,15	0,966	0,149	16,33
0,25	0,966	0,248	27,19
0,35	0,966	0,346	37,93
0,45	0,966	0,443	48,56
0,55	0,966	0,540	59,19
0,65	0,966	0,635	69,61
0,75	0,966	0,731	80,13
0,85	0,966	0,825	90,43
0,95	0,966	0,919	100,74

Πίνακας 1. Υπολογισμού της θερμικής ισχύος που δέχεται η πίστα σε σχέση με το υλικό επικάλυψης.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή της θερμικής ισχύος που δέχεται η πίστα συναρτήσει του συντελεστή εκπομπής του υλικού επικάλυψης.

Ερώτημα Ε:

Για να υπολογίσουμε το ενεργειακό και οικονομικό όφελος που επιτυγχάνεται για τη συγκεκριμένη περίοδο θα πρέπει να βρίσκουμε κάθε φορά την ισχύ που δέχεται η πίστα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) για διάφορα ϵ_{21} , όπως έχουν ήδη βρεθεί στο ερώτημα Δ.

Γι' αυτό, κάθε φορά το Θ_2^4 θα προκύπτει από τον πίνακα με τις θερμοκρασίες που έχει η οροφή ανά ώρα. Θα βρίσκουμε την θερμική ισχύ ανά ώρα και το άθροισμα τους θα μας δίνει τις kWh ανά ημέρα. Πολλαπλασιάζοντας το άθροισμα αυτό με το 100 βρίσκουμε την θερμική ενέργεια για την περίοδο των 100 ημερών. Στη συνέχεια αφού ξέρουμε το COP μπορούμε να βρούμε την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουμε (για τους διάφορους συντελεστές εκπομπής) χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση

$$COP = \frac{Q_{\Psi}}{W} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

COP: Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής εγκαταστ. παγοδρομίου.

Q_{Ψ} : Ψυκτική ενέργεια (δηλ. η θερμική ενέργεια που δέχεται η πίστα) kWh

W: Ηλεκτρική ενέργεια ψυκτικού συστήματος kWh

Την ενέργεια αυτή θα την συγκρίνουμε κάθε φορά με την ενέργεια που καταναλώνουμε όταν δεν έχουμε καμία επικάλυψη ($\epsilon=0,9$). Έτσι θα βρούμε την ενέργεια που εξοικονομούμε. Πολλαπλασιάζοντας την ενέργεια που εξοικονομούμε

με το κόστος που έχουμε ανά kWh βρίσκουμε το οικονομικό όφελος που έχουμε για την συγκεκριμένη περίοδο.

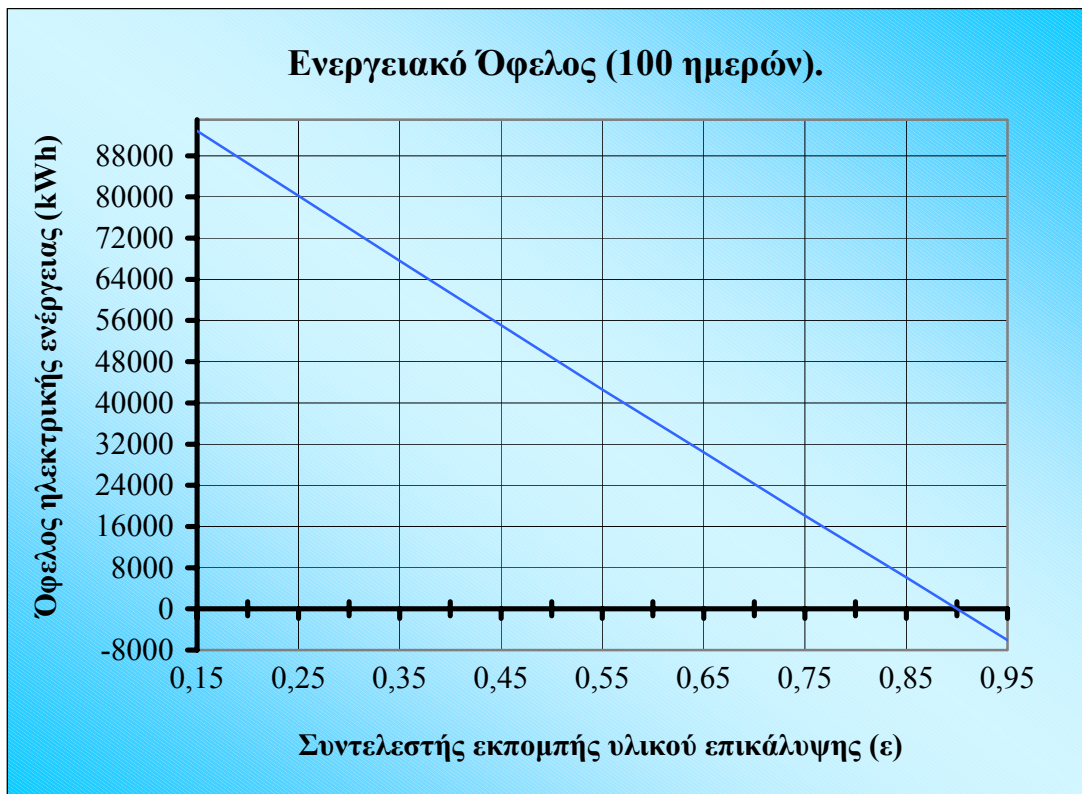
Οι πίνακες και τα διαγράμματα που προκύπτουν ακολουθούν.

Ωρα	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K ⁴)	θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K ⁴)
1	13	2,86	66,91	-4	2,69	52,36
2	13	2,86	66,91			
3	13	2,86	66,91			
4	13	2,86	66,91			
5	12	2,85	65,98			
6	12	2,85	65,98			
7	13	2,86	66,91			
8	13	2,86	66,91			
9	14	2,87	67,85			
10	14	2,87	67,85			
11	15	2,88	68,80			
12	15	2,88	68,80			
13	16	2,89	69,76			
14	16	2,89	69,76			
15	17	2,9	70,73			
16	17	2,9	70,73			
17	18	2,91	71,71			
18	18	2,91	71,71			
19	16	2,89	69,76			
20	16	2,89	69,76			
21	15	2,88	68,80			
22	15	2,88	68,80			
23	14	2,87	67,85			
24	14	2,87	67,85			

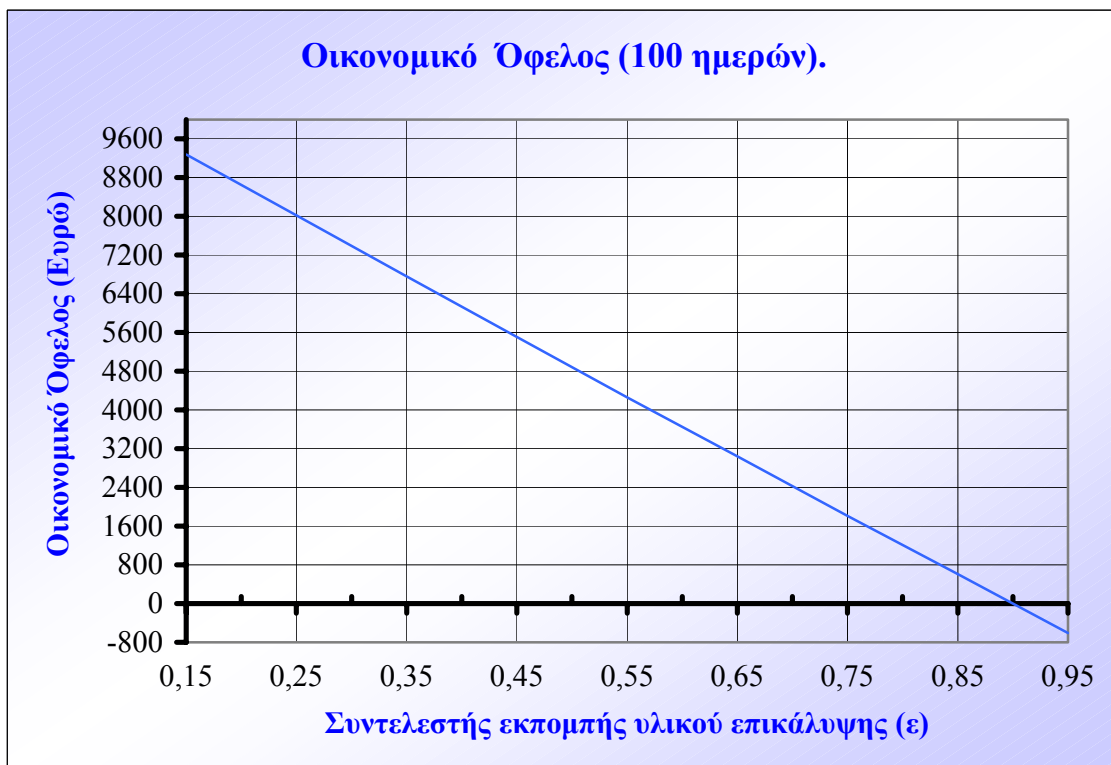
Πίνακας 2. Υπολογισμός του Θ_2^4 .

	ϵ_2									
	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95
	ϵ_{21}									
	0,149	0,248	0,346	0,443	0,540	0,635	0,731	0,825	0,872	0,919
Q ₁ (Watt)	13720	22737	31722	40615	49508	58218	67020	75638	79947	84256
Q ₂ (Watt)	13720	22737	31722	40615	49508	58218	67020	75638	79947	84256
Q ₃ (Watt)	13720	22737	31722	40615	49508	58218	67020	75638	79947	84256
Q ₄ (Watt)	13720	22737	31722	40615	49508	58218	67020	75638	79947	84256
Q ₅ (Watt)	12843	21284	29694	38019	46344	54497	62736	70803	74837	78871
Q ₆ (Watt)	12843	21284	29694	38019	46344	54497	62736	70803	74837	78871
Q ₇ (Watt)	13720	22737	31722	40615	49508	58218	67020	75638	79947	84256
Q ₈ (Watt)	13720	22737	31722	40615	49508	58218	67020	75638	79947	84256
Q ₉ (Watt)	14607	24206	33771	43239	52707	61979	71350	80524	85112	89699
Q ₁₀ (Watt)	14607	24206	33771	43239	52707	61979	71350	80524	85112	89699
Q ₁₁ (Watt)	15503	25691	35843	45891	55939	65781	75725	85463	90332	95201
Q ₁₂ (Watt)	15503	25691	35843	45891	55939	65781	75725	85463	90332	95201
Q ₁₃ (Watt)	16408	27191	37936	48571	59206	69622	80147	90454	95607	100760
Q ₁₄ (Watt)	16408	27191	37936	48571	59206	69622	80147	90454	95607	100760
Q ₁₅ (Watt)	17323	28707	40050	51278	62506	73503	84615	95496	100936	106377
Q ₁₆ (Watt)	17323	28707	40050	51278	62506	73503	84615	95496	100936	106377
Q ₁₇ (Watt)	18247	30238	42187	54014	65841	77424	89129	100591	106321	112052
Q ₁₈ (Watt)	18247	30238	42187	54014	65841	77424	89129	100591	106321	112052
Q ₁₉ (Watt)	16408	27191	37936	48571	59206	69622	80147	90454	95607	100760
Q ₂₀ (Watt)	16408	27191	37936	48571	59206	69622	80147	90454	95607	100760
Q ₂₁ (Watt)	15503	25691	35843	45891	55939	65781	75725	85463	90332	95201
Q ₂₂ (Watt)	15503	25691	35843	45891	55939	65781	75725	85463	90332	95201
Q ₂₃ (Watt)	14607	24206	33771	43239	52707	61979	71350	80524	85112	89699
Q ₂₄ (Watt)	14607	24206	33771	43239	52707	61979	71350	80524	85112	89699
Ψυκτική ενέργεια (kWh/day)	365	605	844	1081	1318	1550	1784	2013	2128	2243
Σύνολο ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/day)	192	318	444	569	694	816	939	1059	1120	1181
Ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	19200	31800	44400	56900	69400	81600	93900	105900	112000	118100
Κόστος ενέργειας (€)	1920	3180	4440	5690	6940	8160	9390	10590	11200	11810
Όφελος ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	92800	80200	67600	55100	42600	30400	18100	6100	0	-6100
Οικονομικό Όφελος (€)	9280	8020	6760	5510	4260	3040	1810	610	0	-610

Πίνακας 3. Υπολογισμός του ενεργειακού και οικονομικού οφέλους.



Διάγραμμα 2. Ενεργειακό όφελος συναρτήσει του συντελεστή εκπομπής του υλικού επικάλυψης της οροφής, για μια χρονική περίοδο 100 ημερών.



Διάγραμμα 3. Οικονομικό όφελος για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο συναρτήσει του συντελεστή εκπομπής του υλικού επικάλυψης της οροφής, για μια χρονική περίοδο 100 ημερών.

Συμπέρασμα:

Η ολική ακτινοβολούμενη ισχύς επί τον αντίστοιχο χρόνο, δηλώνει την ακτινοβολούμενη θερμική ενέργεια που φεύγει από μια επιφάνεια. Η ισχύς αυτή εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα που έχουν οι επιφάνειες και τον συντελεστή ολικής εκπομπής που έχει το υλικό στις θερμοκρασίες αυτές.

Στην συγκεκριμένη άσκηση βλέπουμε ότι, είτε με την προσθήκη κάποιας επίστρωσης είτε με την προσθήκη κάποιου πετάσματος, μειώνεται η συναλλασσόμενη ισχύς με ακτινοβολία. Αυτό ισχύει αν ο συντελεστής ολικής εκπομπής του πετάσματος είναι μικρότερος του συντελεστή ολικής εκπομπής της επιφάνειας που γίνεται η συναλλαγή.

Συγκεκριμένα από το Διάγραμμα (1) συμπεραίνουμε ότι η συναλλασσόμενη με ακτινοβολία μειώνεται γραμμικά με την μείωση του συντελεστή ολικής εκπομπής του υλικού. Στα διαγράμματα (2) και (3) βλέπουμε ότι η ενέργεια που θα μπορέσουμε να εξοικονομήσουμε με την προσθήκη κάποιας επίστρωσης ή πετάσματος, καθώς και το οικονομικό όφελος που θα είχαμε από την εξοικονόμηση της ενέργειας αυτής, αυξάνει όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ολικής εκπομπής του υλικού που θα χρησιμοποιήσουμε ως επίστρωση. Αν όμως το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε έχει μεγαλύτερο συντελεστή ολικής εκπομπής από αυτόν που έχει το υλικό επικάλυψης, τότε δεν έχουμε ενεργειακά και οικονομικά οφέλη αλλά αντίθετα αυξάνονται οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας. Δηλαδή δεν έχουμε πλέον εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά χάνεται περισσότερη ενέργεια από αυτή που θα χανόταν αν δεν υπήρχε η επικάλυψη.

Μελέτη 7^η

Μπαλκονόπορτα με διπλά τζάμια μείωση απωλειών ακτινοβολίας.

Θεωρείστε μια μπαλκονόπορτα με διπλά κοινά τζάμια, σε απόσταση 20 mm μεταξύ τους, ανάμεσα στα οποία υπάρχει αέρας ήρεμος. Μια καλοκαιρινή μέρα το εξωτερικό τζάμι αποκτά θερμοκρασία 35°C και το εσωτερικό 25°C.

Με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής ολικής εκπομπής του γυαλιού είναι ανεξάρτητος της θερμοκρασίας, ζητούνται:

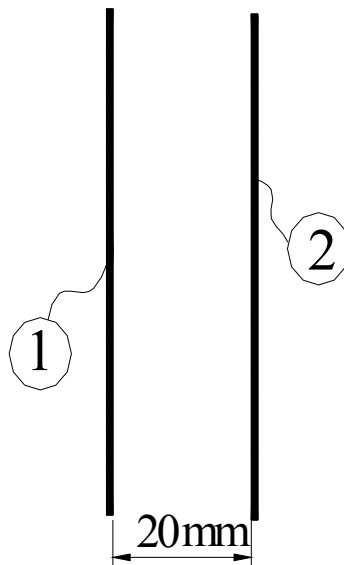
A. Πόση η πυκνότητα ροής της μεταδιδόμενης με ακτινοβολία θερμότητας διαμέσου (των τζαμιών) της μπαλκονόπορτας. Πόσος ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία ανάμεσα στα δυο τζάμια.

B. Με σκοπό τη μείωση της θερμορροής του A. ερωτήματος κατά 80%, οι δύο εσωτερικές πλευρές των τζαμιών μπορούν να καλυφθούν με ανακλαστική επίστρωση χαμηλού συντελεστή εκπομπής ϵ . Πόσος θα πρέπει να είναι ο ϵ της επίστρωσης ;

Γ. Με σκοπό τη μείωση της θερμορροής του A. ερωτήματος, μπορεί ανάμεσα στα δύο τζάμια να παρεμβληθεί ένα τρίτο παρόμοιο τζάμι. Πόση θα είναι σ' αυτή την περίπτωση η πυκνότητα ροής της μεταδιδόμενης με ακτινοβολία θερμότητας διαμέσου της μπαλκονόπορτας.

Δ. Για την περίπτωση A. να γίνουν διαγράμματα για τον συντελεστή μεταβίβασης της θερμότητας με ακτινοβολία, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού τζαμιού (Τιμές από 25 έως 50°C - ανά 5°C), αλλά για τις εξής τρεις διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας του εσωτερικού τζαμιού : 15°C - 20°C - 25°C.

Λύση:



Σχήμα 1. Τομή της μπαλκονόπορτας με δύο τζάμια τοποθετημένα σε μεταξύ τους απόσταση 20 mm.

$$\theta_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_\tau = 0,937 \text{ (Από Πίνακα A5 παραρτήματος 2)}$$

Ερώτημα Α:

Η πυκνότητα ροής της μεταδιδόμενης με ακτινοβολία θερμότητας προκύπτει με την χρήση της σχέσης:

$$q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

- q_{12} : Η πυκνότητα θερμοροής από το τζάμι 1 στο τζάμι 2. W/m^2
 ε_{12} : Ο συντ. αλληλεκπομπής από το τζάμι 1 στο τζάμι 2.
 φ_{12} : Ο συντελεστής θέας από το τζάμι 1 στο τζάμι 2.
 $C\mu$: Η σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος. W/m^2K^4

$$\Theta_1 = \frac{100}{\theta_1 + 273} = \frac{100}{32 + 273} \Rightarrow \Theta_1 = 3,08 \text{ K}$$

$$\Theta_2 = \frac{\theta_2 + 273}{100} = \frac{25 + 273}{100} \Rightarrow \Theta_2 = 2,98 \text{ K}$$

Ο συντελεστής θέας $\varphi_{12} = 1$ διότι η απόσταση μεταξύ τους είναι πολύ μικρή έτσι ώστε όλη η ακτινοβολία από το ένα τζάμι να πέφτει στο άλλο.

Ο συντελεστής αλληλεκπομπής ε_{12} είναι ίσος με:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \\ \varepsilon_1 = 0,937, \quad \varepsilon_2 = 0,937 \end{array} \right\} \varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{0,937} + \frac{1}{0,937} - 1} = 0,881 \Rightarrow \varepsilon_{12} = 0,881.$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) \\ \varepsilon_{12} = 0,881, \quad \varphi_{12} = 1 \\ C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ \Theta_1 = 3,08 \text{ K}, \Theta_2 = 2,98 \text{ K} \end{array} \right\} q_{12} = 0,881 \cdot 1 \cdot 5,67 \cdot (3,08^4 - 2,98^4) = 55,60 \text{ W/m}^2$$

$$q_{12} = 55,60 \text{ W/m}^2$$

Ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία θα βρεθεί με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης (3) λύνοντας ως προς α_r

$$q_{12} = \alpha_r \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Λύνοντας ως προς α_r και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_r = \frac{q_{12}}{(\theta_1 - \theta_2)} \\ q_{12} = 55,60 \text{ W/m}^2 \\ \theta_1 = 35^\circ \text{C}, \theta_2 = 25^\circ \text{C} \end{array} \right\} \alpha_r = \frac{55,60}{(35 - 25)} = 5,56 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_r = 5,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ερώτημα Β:

Η νέα πυκνότητα θερμορροής είναι μειωμένη κατά 80%. Άρα θα βρεθεί με την χρήση της σχέσης:

$$q_{12}' = q_{12} - (q_{12} \cdot 0,80) = 0,2 \cdot q_{12} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} q_{12}' = 0,2 \cdot q_{12} \\ q_{12} = 55,60 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} q_{12}' = 0,2 \cdot 55,60 = 11,12 \text{ W/m}^2 \quad q_{12}' = 11,12 \text{ W/m}^2$$

Για να βρούμε το συντελεστή εκπομπής που θα πρέπει να έχει η επίστρωση έτσι ώστε να μειωθεί η πυκνότητα θερμορροής κατά 80%, θα λύσουμε την παρακάτω εξίσωση ως προς ε'_{12} .

$$q'_{12} = \varepsilon'_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

- q'_{12} : Η πυκν. θερμορ. από τα τζάμια με την επίστρωση (μειωμένη κατά 80%) W/m^2
 ε'_{12} : Ο συντ. αλληλεκπομπής από το τζάμι 1 στο τζάμι 2 με την επίστρωση

Στη συνέχεια θα αντικαθιστούμε στην παρακάτω σχέση και θα βρούμε το συντελεστή εκπομπής που πρέπει να έχει η επίστρωση που θα βάλουμε στο τζάμι λύνοντας ως προς ε , διότι $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$.

$$\varepsilon'_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

Λύνοντας ως προς ε'_{12} την εξίσωση (5) και αντικαθιστώντας προκύπτει:

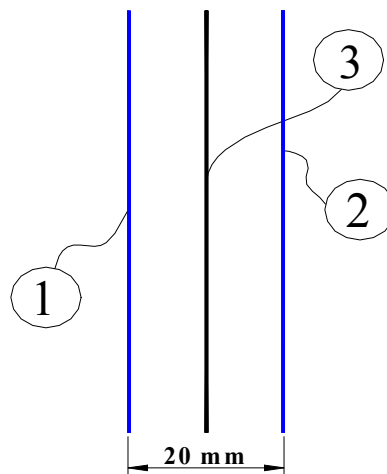
$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon'_{12} = \frac{q'_{12}}{\varphi_{12} \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4)} \\ q'_{12} = 11,12 \text{ W/m}^2, \varphi_{12} = 1 \\ C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \\ \Theta_1 = 3,08 \text{ K}, \Theta_2 = 2,98 \text{ K} \end{array} \right\} \varepsilon'_{12} = \frac{11,12}{1 \cdot 5,67 \cdot (3,08^4 - 2,98^4)} = 0,176 \quad \varepsilon'_{12} = 0,176$$

Λύνοντας ως προς ε την εξίσωση (6) και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon'_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} \\ \varepsilon'_{12} = 0,176 \end{array} \right\} 0,176 = \frac{1}{\frac{2-\varepsilon}{\varepsilon}} \Rightarrow 0,176 \cdot (2-\varepsilon) = \varepsilon \Rightarrow$$

$$1,176 \cdot \varepsilon = 0,352 \Rightarrow \varepsilon = \frac{0,352}{1,176} \quad \varepsilon = 0,299 \approx 0,3$$

Ερώτημα Γ:



Σχήμα 2. Τομή τη μαλκονόπορτας με την προσθήκη του τρίτου τζαμιού που δρα ως πέτασμα.

$$\theta_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,937 \text{ (Από Πίνακα A5 παραρτήματος 2)}$$

Η πυκνότητα θερμορροής με ακτινοβολία από το τζάμι 1 στο τζάμι 2 (q_{12}) είναι ίση με:

$$q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) \text{ (Εξίσωση 7)}$$

Η πυκνότητα θερμορροής με ακτινοβολία από το τζάμι 1 στο τζάμι 3 (q_{13}) είναι ίση με:

$$q_{13} = \varepsilon_{13} \cdot \varphi_{13} \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_3^4) \text{ (Εξίσωση 8)}$$

Η πυκνότητα θερμορροής με ακτινοβολία από το τζάμι 3 στο τζάμι 2 (q_{32}) είναι ίση με:

$$q_{32} = \varepsilon_{32} \cdot \varphi_{32} \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_3^4 - \Theta_2^4) \text{ (Εξίσωση 9)}$$

Όταν οι επιφάνειες ισορροπήσουν θερμικά, θα ισχύει:

$$q_{13} = q_{32}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{13} \cdot \varphi_{13} \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_3^4) &= \varepsilon_{32} \cdot \varphi_{32} \cdot C\mu \cdot (\Theta_3^4 - \Theta_2^4) \\ \Theta_1^4 - \Theta_3^4 &= \Theta_3^4 - \Theta_2^4 \\ 2\Theta_3^4 &= \Theta_1^4 + \Theta_2^4\end{aligned}$$

$$\Theta_3^4 = \frac{\Theta_1^4 + \Theta_2^4}{2} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Αντικαθιστώντας το ανάπτυγμα της εξίσωσης (10) στην εξίσωση (8) προκύπτει:

$$\begin{aligned}q_{13} &= \varepsilon_{13} \cdot \varphi_{13} \cdot C\mu \cdot \left(\Theta_1^4 - \left(\frac{\Theta_1^4 + \Theta_2^4}{2} \right) \right) \\ &= \varepsilon_{13} \cdot \varphi_{13} \cdot C\mu \cdot \left(\Theta_1^4 - \frac{\Theta_1^4 - \Theta_2^4}{2} \right) \\ &= \varepsilon_{13} \cdot \varphi_{13} \cdot C\mu \cdot \left(\frac{\Theta_1^4 - \Theta_2^4}{2} \right) \\ &= \frac{\varepsilon_{13} \cdot \varphi_{13} \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4)}{2}\end{aligned}$$

Αλλά: $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{13}$ και $\varphi_{12} = \varphi_{13} = 1$

Οπότε:

$$q_{13} = \frac{q_{12}}{2} = q_{32} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (11) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}q_{13} &= \frac{q_{12}}{2} = q_{32} \\ q_{13} &= 55,60 \text{ W/m}^2\end{aligned} \right\} q_{13} = \frac{55,60}{2} = 27,80 \text{ W/m}^2 \quad \mathbf{q_{13} = 27,80 \text{ W/m}^2}$$

Βλέπουμε ότι η προσθήκη ενός τζαμιού στο ενδιάμεσο μείωσε την πυκνότητα θερμορροής στο μισό. Αποδεικνύεται ότι η παρουσία δύο τζαμιών θα μείωνε την αρχική πυκνότητα θερμορροής στο 1/3 και γενικά η παρουσία n παρόμοιων τζαμιών την μειώνουν στο 1/n+1.

Ερώτημα Δ:

Στο ερώτημα Δ ζητείται να γίνει το διάγραμμα του συντελεστή μεταβίβασης της θερμότητας με ακτινοβολία σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού τζαμιού για τιμές από 25 έως 50 °C και για τις εξής τρεις διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας του εσωτερικού τζαμιού: 15 °C - 20 °C - 25 °C.

Για να προκύψει αυτό το διάγραμμα θα εργαστούμε ως εξής:

Θα αντικαθιστούμε τα δεδομένα μας στην εξίσωση 1 αλλάζοντας κάθε φορά τις θερμοκρασίες, δίνοντας τιμές από 25 έως 50 °C ανά 5°C για να το εξωτερικό τζάμι και 15 °C - 20 °C - 25 °C για το εσωτερικό. Έτσι θα βρίσκουμε την πυκνότητα θερμορροής για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια θα βρίσκουμε το συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας λύνοντας την εξίσωση (3) ως προς α_r για τις διάφορες πυκνότητες θερμορροής που βρήκαμε στο προηγούμενο βήμα.

Σ' όλες τις περιπτώσεις $\varphi_{12}=1$ και $\varepsilon_{12}=0,881$

Δηλαδή:

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_{12} \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4)}{(\theta_1 - \theta_2)} \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

Οι πίνακες και το διάγραμμα που προκύπτουν είναι οι παρακάτω.

$\theta_2=15 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\theta_1=25-50 \text{ }^\circ\text{C}$							
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K ⁴)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K ⁴)	q_{12} (W/m ²)	α_r (W/m ² K)
25	2,98	78,86	15	2,88	68,80	50,25	5,03
30	3,03	84,29	15	2,88	68,80	77,38	5,16
35	3,08	89,99	15	2,88	68,80	105,85	5,29
40	3,13	95,98	15	2,88	68,80	135,77	5,43
45	3,18	102,26	15	2,88	68,80	167,14	5,57
50	3,23	108,85	15	2,88	68,80	200,06	5,72

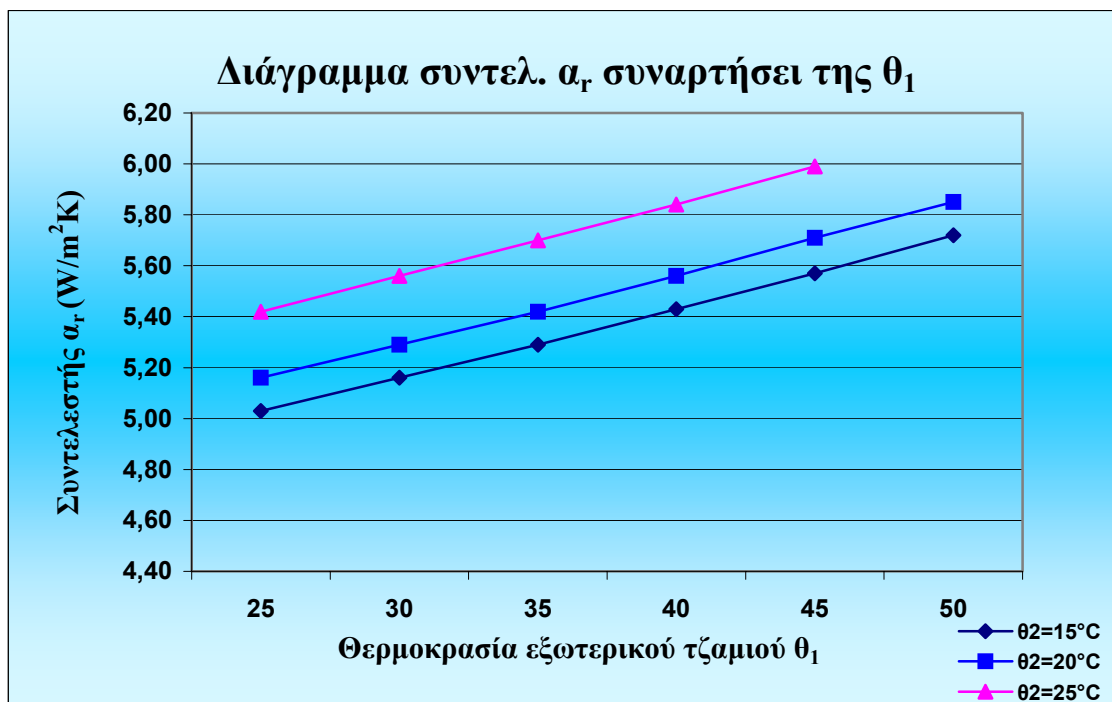
Πίνακας 1. Για θερμοκρασίες εξωτερικού τζαμιού από 25 έως 50 °C και θερμοκρασία εσωτερικού τζαμιού 15 °C.

$\theta_2=20 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\theta_1=25-50 \text{ }^\circ\text{C}$							
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K ⁴)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K ⁴)	q_{12} (W/m ²)	α_r (W/m ² K)
25	2,98	78,86	20	2,93	73,70	25,78	5,16
30	3,03	84,29	20	2,93	73,70	52,90	5,29
35	3,08	89,99	20	2,93	73,70	81,37	5,42
40	3,13	95,98	20	2,93	73,70	111,29	5,56
45	3,18	102,26	20	2,93	73,70	142,66	5,71
50	3,23	108,85	20	2,93	73,70	175,58	5,85

Πίνακας 2. Για θερμοκρασίες εξωτερικού τζαμιού από 25 έως 50 °C και θερμοκρασία εσωτερικού τζαμιού 20 °C.

$\theta_2=25\text{ }^\circ\text{C}$ και $\theta_1=25-50\text{ }^\circ\text{C}$							
θ_1 ($^\circ\text{C}$)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K^4)	θ_2 ($^\circ\text{C}$)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K^4)	q_{12} (W/m^2)	a_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
25	2,98	78,86	25	2,98	78,86	0,00	0,00
30	3,03	84,29	25	2,98	78,86	27,12	5,42
35	3,08	89,99	25	2,98	78,86	55,60	5,56
40	3,13	95,98	25	2,98	78,86	85,52	5,70
45	3,18	102,26	25	2,98	78,86	116,89	5,84
50	3,23	108,85	25	2,98	78,86	149,81	5,99

Πίνακας 3. Για θερμοκρασίες εξωτερικού τζαμιού από 25 έως 50 $^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία εσωτερικού τζαμιού 25 $^\circ\text{C}$.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή του συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού τζαμιού θ_1 για διάφορες θερμοκρασίες εσωτερικού τζαμιού θ_2 .

Συμπέρασμα:

Επιφάνειες που εκτίθενται σε ηλιακή ακτινοβολία, όπως μπαλκονόπορτες με διπλά τζάμια, χαρακτηρίζονται από μια πυκνότητα ροής από το εξωτερικό τζάμι στο εσωτερικό τζάμι λόγω της ακτινοβολίας. Η πυκνότητα ροής αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία που θα σταθεροποιηθεί στο εξωτερικό τζάμι και από το συντελεστή ολικής εκπομπής που έχει το τζάμι αυτό.

Για να μπορέσουμε να έχουμε μια μείωση της πυκνότητας ροής θα πρέπει να προσθέσουμε μια επίστρωση στο τζάμι η οποία να έχει συντελεστή ολικής εκπομπής μικρότερο από τον συντελεστή ολικής εκπομπής του τζαμιού.

Με την προσθήκη ενός πετάσματος το οποίο είναι από το ίδιο υλικό, δηλαδή ένα πέτασμα από τζάμι (με ίδιο συντελεστή ολικής εκπομπής) καταφέραμε την μείωση της πυκνότητας θερμοροής στο μισό. Εύκολα αποδεικνύεται ότι η χρήση ενός

δεύτερου πετάσματος από το ίδιο υλικό μειώνει την συναλλασσόμενη πυκνότητα θερμορροής στο $1/3$ και γενικά παρουσία n πετασμάτων την μειώνουν στο $1/n+1$.

Ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία (α_r) επηρεάζεται έντονα από τις θερμοκρασίες που σταθεροποιούνται πάνω στα δύο τζάμια. Στο διάγραμμα 1 βλέπουμε πως μεταβάλλεται ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία συναρτήσει της θερμοκρασίας του εξωτερικού και εσωτερικού τζαμιού. Σύμφωνα με το διάγραμμα ο μικρότερος συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία επιτυγχάνεται όταν έχουμε τις μικρότερες θερμοκρασίες στο εξωτερικό και στο εσωτερικό τζάμι, ενώ ο μεγαλύτερος συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας επιτυγχάνεται όταν έχουμε τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες εξωτερικού και εσωτερικού τζαμιού. Γενικά καθώς αυξάνονται οι θερμοκρασίες των τζαμιών αυξάνεται και ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία.

Μελέτη 8^η.

Κολυμβητική δεξαμενή μείωση απωλειών ακτινοβολίας – Εξοικ. Ενέργειας.

Μέσα σ' ένα κλειστό αθλητικό κέντρο, αρκετά μεγάλων διαστάσεων, βρίσκεται μια κολυμβητική δεξαμενή (πισίνα) με διαστάσεις 12 m x 25 m και το νερό της διατηρείται σε θερμοκρασία 26°C. Η δεξαμενή βρίσκεται μέσα σε κλειστό χώρο, του οποίου η θερμοκρασία μεταβάλλεται στη διάρκεια μιας τυπικής χειμερινής ημέρας όπως παρακάτω. (Την ίδια θερμοκρασία θεωρείται ότι έχουν και τα τοιχώματα του).

Ωρα	Θερμοκρασία (°C)	Ωρα	Θερμοκρασία (°C)
1	9	13	15
2	9	14	15
3	9	15	15
4	8	16	14
5	8	17	14
6	8	18	14
7	9	19	13
8	10	20	12
9	11	21	11
10	12	22	10
11	13	23	10
12	14	24	9

A. Να βρεθούν οι ενεργειακές απώλειες λόγω ακτινοβολίας, ανά 24ωρο, από την επιφάνεια της πισίνας.

B. Κατά τη διάρκεια της νύχτας (ώρες 20:00 έως 8:00), η δεξαμενή σκεπάζεται, σ' όλη της την επιφάνεια, με ένα λεπτό κάλυμμα από αλουμινόφυλλο, σε πολύ μικρή απόσταση από την επιφάνεια του νερού. Ο συντελεστής ολικής εκπομπής του αλουμινόφυλλου είναι 0,4.

Να βρεθούν οι ενεργειακές απώλειες λόγω ακτινοβολίας, ανά 24ωρο, από την επιφάνεια της πισίνας, σ' αυτή την περίπτωση.

Γ. Η κολυμβητική δεξαμενή λειτουργεί, υπό τις παρακάτω (μέσες) συνθήκες, 150 ημέρες το έτος. Η θέρμανση του νερού της δεξαμενής γίνεται με λέβητα πετρελαίου (diesel) και κατάλληλους εναλλάκτες θερμότητας, με συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης 75%.

Να υπολογισθεί η μείωση της καταναλισκόμενης ετησίως ποσότητας πετρελαίου, λόγω της χρήσης του καλύμματος.

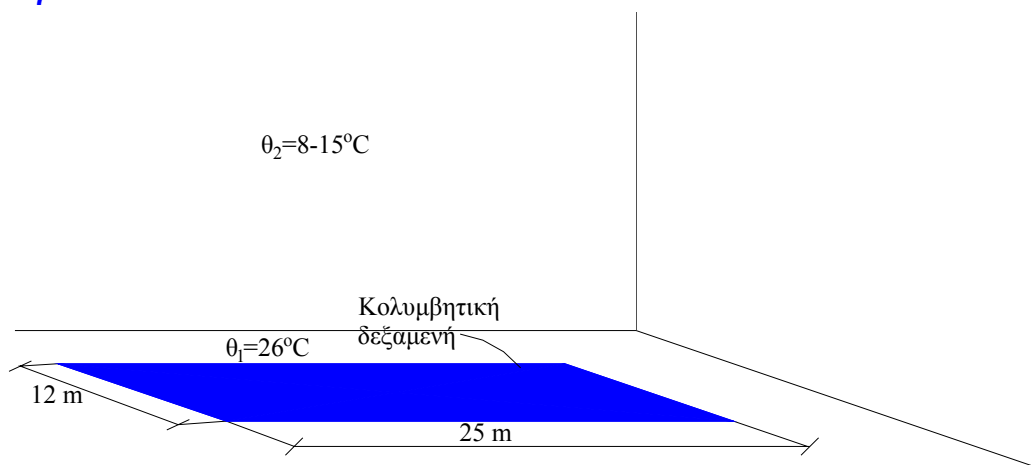
Δ. Η αγορά και εγκατάσταση του καλύμματος κοστίζει 15 €/m², ενώ το λειτουργικό κόστος για την καθημερινή του λειτουργία εκτιμάται σε 7 €.

Να βρεθεί η έντοκη περίοδος αποπληρωμής για την αγορά, εγκατάσταση και χρήση του καλύμματος.

Υποθέστε: - Επιτόκιο δανεισμού (αποπληθωρισμένο) 9%.

- Κόστος καυσίμου 0,40 €/L.

Λύση:



- 1: Πισίνα.
- 2: Αθλητικό Κέντρο

Σχήμα 1. Κολυμβητική δεξαμενή σε κλειστό αθλητικό κέντρο αρκετά μεγάλων διαστάσεων 12 m x 25 m.

Ερώτημα Α:

Οι ενεργειακές απώλειες ακτινοβολίας ανά ώρα της ημέρας θα βρεθούν από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot C_{\mu} \cdot F_1 \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

Q_{12} :	Θερμική ισχύς λόγω ακτινοβολίας από την πισίνα στο χώρο	W
ε_{12} :	Συντελεστής αλληλεκπομπής από την πισίνα στο χώρο	
φ_{12} :	Συντελεστής θέας από την πισίνα στο χώρο	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
F_1 :	Εμβαδόν της πισίνας	m^2
T_1 :	Απόλυτη θερμοκρασία της πισίνας (και $\Theta_1 = T_1/100$)	K
T_2 :	Απόλυτη θερμοκρασία του χώρου (και $\Theta_2 = T_2/100$)	K

Επειδή η πισίνα είναι σε κλειστό χώρο ολόκληρη η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την πισίνα προσπίπτει στις επιφάνειες του χώρου. Γι' αυτό το λόγο ο συντελεστής θέας φ_{12} αυτή την περίπτωση είναι ίσος με 1. ($\varphi_{12} = 1$).

Επιπλέον η επιφάνεια της πισίνας είναι πολύ μικρότερη από την επιφάνεια του αθλητικού κέντρου ($F_1 \ll F_2$) γι' αυτό το λόγο $\varepsilon_{12} \cong \varepsilon_1$.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) βρίσκουμε τις ενεργειακές απώλειες για κάθε ώρα της ημέρας. Το άθροισμα τους μας δίνει την ενέργεια που χάνεται από την πισίνα για μία ημέρα.

Ο πίνακας που προκύπτει είναι ο παρακάτω.

Ωρες	θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K ⁴)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K ⁴)	$Q_{\text{πρὶν}}$ (Wh)
1	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	27.155
2	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	27.155
3	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	27.155
4	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	28.603
5	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	28.603
6	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	28.603
7	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	27.155
8	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	25.690
9	26	2,99	79,93	11	2,84	65,05	24.210
10	26	2,99	79,93	12	2,85	65,98	22.697
11	26	2,99	79,93	13	2,86	66,91	21.184
12	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	19.654
13	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	18.109
14	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	18.109
15	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	18.109
16	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	19.654
17	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	19.654
18	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	19.654
19	26	2,99	79,93	13	2,86	66,91	21.184
20	26	2,99	79,93	12	2,85	65,98	22.697
21	26	2,99	79,93	11	2,84	65,05	24.210
22	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	25.690
23	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	25.690
24	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	27.155

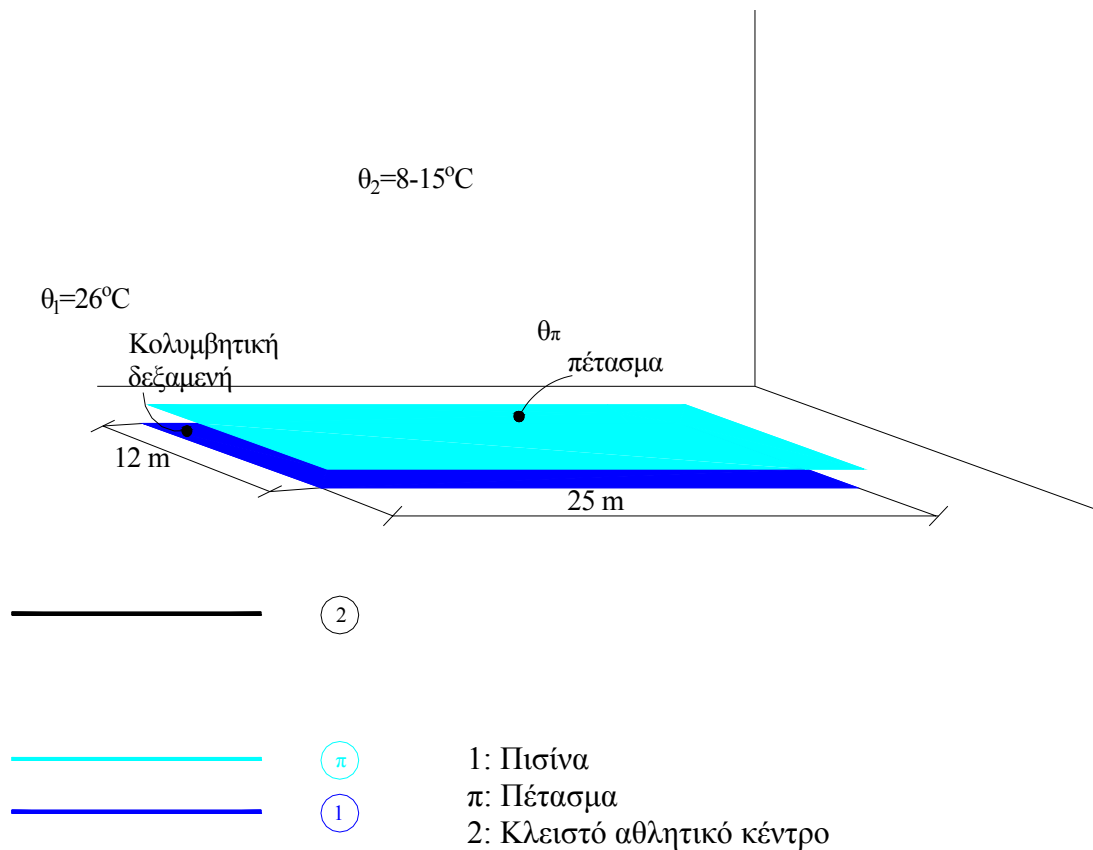
Σύνολο (Wh): 567.779

Σύνολο (kWh): 567,78

Πίνακας 1. Ενεργειακές απώλειες λόγω ακτινοβολίας, υπολογισμένες βάσει της εξίσωσης (1), ανά ώρα της ημέρας από τη πισίνα στο χώρο του αθλητικού κέντρου.

Οι ενεργειακές θερμικές απώλειες από την πισίνα ανά 24ωρο είναι ίσες με **567,78 kWh**.

Ερώτημα Β:



Σχήμα 2. Τοποθέτηση καλύμματος πάνω από την κολυμβητική δεξαμενή που δρα σαν πέτασμα στην μείωση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας.

Η χρήση λεπτού καλύμματος σε πολύ μικρή απόσταση από την πισίνα μειώνει την συναλλασσόμενη με ακτινοβολία θερμότητα διότι δρα σαν πέτασμα.

Η μεταδιδόμενη θερμική ισχύς από την πισίνα στο πέτασμα είναι ίση με:

$$Q_{1\pi} = \varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} \cdot C_m \cdot F_1 \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_\pi^4) \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

$Q_{1\pi}$:	Θερμική ισχύς λόγω ακτινοβ. από την πισίνα στο πέτασμα	W
$\varepsilon_{1\pi}$:	Συντελεστής αλληλεκπομπής από την πισίνα στο πέτασμα	
$\varphi_{1\pi}$:	Συντελεστής θέας από την πισίνα στο πέτασμα	
C_m :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος	$\text{W/m}^2\text{K}$
F_1 :	Εμβαδόν της πισίνας	m^2
T_1 :	Απόλυτη θερμοκρασία της πισίνας (και $\Theta_1 = T_1/100$)	K
T_π :	Απόλυτη θερμοκρασία του πετάσματος (και $\Theta_\pi = T_\pi/100$)	K

Επειδή η απόσταση του πετάσματος είναι πολύ μικρή θεωρούμε ότι όλη η εκπεμπόμενη με ακτινοβολία ισχύς προσπίπτει πάνω στο πέτασμα γι' αυτό $\varphi_{1\pi} = 1$.

Ο συντελεστής αλληλεκπομπής από την πισίνα στο πέτασμα θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon_{1\pi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_\pi} - 1} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

$\varepsilon_{1\pi}$: Συντελεστής αλληλεκπομπής από την πισίνα στο πέτασμα

ε_1 : Συντελεστής ολικής εκπομπής νερού

ε_π : Συντελεστής ολικής εκπομπής αλουμινόφυλλου

Η μεταδιδόμενη θερμική ισχύς από την πισίνα στο πέτασμα είναι ίση με:

$$Q_{\pi 2} = \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2} \cdot C\mu \cdot F_\pi \cdot (\Theta_\pi^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

$Q_{\pi 2}$: Θερμική ισχύς λόγω ακτινοβ. από το πέτασμα στο χώρο W

$\varepsilon_{\pi 2}$: Συντελεστής αλληλεκπομπής από το πέτασμα στο χώρο

$\varphi_{\pi 2}$: Συντελεστής θέας από το πέτασμα στο χώρο

$C\mu$: Σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος W/m^2K

F_π : Εμβαδόν της πετάσματος m^2

T_π : Απόλυτη θερμοκρασία του πετάσματος (και $\Theta_\pi = T_\pi/100$) K

T_2 : Απόλυτη θερμοκρασία του χώρου (και $\Theta_2 = T_2/100$) K

Ο συντελεστής αλληλεκπομπής από το πέτασμα στο χώρο είναι ίσος με $\varepsilon_{\pi 2} \cong \varepsilon_\pi$ διότι η επιφάνεια του πετάσματος είναι μικρότερη από την επιφάνεια του αθλητικού κέντρου ($F_1 \ll F_2$).

Ο συντελεστής θέας είναι ίσος με $\varphi_{\pi 2} = 1$ διότι η μια επιφάνεια περικλείεται από την άλλη.

Για να μπορέσουμε να βρούμε τις ενεργειακές απώλειες σ' αυτή την περίπτωση θα πρέπει να βρούμε πρώτα την θερμοκρασία που αποκαθίσταται ανά ώρα πάνω στο πέτασμα.

Όταν το πέτασμα θα ισορροπήσει θερμικά ισχύει:

$$Q_{1\pi} = Q_{\pi 2} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Αντικαθιστώντας το ανάπτυγμα της προκύπτει:

$$\varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} \cdot C\mu \cdot F_1 \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_\pi^4) = \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2} \cdot C\mu \cdot F_\pi \cdot (\Theta_\pi^4 - \Theta_2^4)$$

Όμως $F_1 = F_\pi$ γι' αυτό:

$$\varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_\pi^4) = \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2} \cdot (\Theta_\pi^4 - \Theta_2^4)$$

Λύνοντας ως προς Θ_{π}^4 προκύπτει:

$$\varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} \cdot \Theta_{\pi}^4 + \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2} \cdot \Theta_{\pi}^4 = \varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} \cdot \Theta_1^4 + \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2} \cdot \Theta_2^4$$

$$\Theta_{\pi}^4 = \frac{\varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} \cdot \Theta_1^4 + \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2} \cdot \Theta_2^4}{\varepsilon_{1\pi} \cdot \varphi_{1\pi} + \varepsilon_{\pi 2} \cdot \varphi_{\pi 2}}$$

Όμως για τους λόγους που εξηγήσαμε $\varphi_{1\pi}=1$, και $\varphi_{\pi 2}=1$ γι' αυτό τα απαλείφουμε από την εξίσωση, έτσι:

$$\Theta_{\pi}^4 = \frac{\varepsilon_{1\pi} \cdot \Theta_1^4 + \varepsilon_{\pi 2} \cdot \Theta_2^4}{\varepsilon_{1\pi} + \varepsilon_{\pi 2}} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6) και τις θερμοκρασίες που έχουμε στο χώρο και στην πισίνα ανά ώρα της ημέρας μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία που έχει κάθε φορά το πέτασμα.

Ο συντελεστής αλληλεκτομής από την πισίνα στο πέτασμα ($\varepsilon_{1\pi}$) που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (6) προκύπτει αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) τα δεδομένα μας και είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1\pi} &= \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{\pi}} - 1} \\ \varepsilon_1 &= \frac{0,95 + 0,936}{2} \approx 0,96, \quad \varepsilon_{\pi} = 0,40 \end{aligned} \right\} \varepsilon_{1\pi} = \frac{1}{\frac{1}{0,96} + \frac{1}{0,40} - 1} = 0,39 \quad \varepsilon_{1\pi} = \mathbf{0,39}$$

Οι συντελ. ολικής εκπομπής (ακτινοβολίας) βρίσκονται από τον πίνακα A5 του παραρτήματος 2

Ο συντελεστής αλληλεκτομής από το πέτασμα στο χώρο είναι ίσος με το συντελεστή του πετάσματος $\varepsilon_{\pi} = 0,4$ ($\varepsilon_{\pi 2} \cong \varepsilon_{\pi}$).

Ο πίνακας που προκύπτει είναι ο παρακάτω.

Ωρες	$\varepsilon_{1\pi}$	ε_{π}	θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K ⁴)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K ⁴)	Θ_{π}^4 (K ⁴)	θ_{π} (°C)
1	0,39	0,40	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	71,48	17,8
2	0,39	0,40	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	71,48	17,8
3	0,39	0,40	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	71,48	17,8
4	0,39	0,40	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	71,03	17,3
5	0,39	0,40	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	71,03	17,3
6	0,39	0,40	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	71,03	17,3
7	0,39	0,40	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	71,48	17,8
8	0,39	0,40	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	71,94	18,2
9	0,39	0,40	26	2,99	79,93	11	2,84	65,05	72,40	18,7
10	0,39	0,40	26	2,99	79,93	12	2,85	65,98	72,86	19,2
11	0,39	0,40	26	2,99	79,93	13	2,86	66,91	73,34	19,6
12	0,39	0,40	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	73,81	20,1
13	0,39	0,40	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	74,29	20,6
14	0,39	0,40	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	74,29	20,6
15	0,39	0,40	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	74,29	20,6
16	0,39	0,40	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	73,81	20,1
17	0,39	0,40	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	73,81	20,1
18	0,39	0,40	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	73,81	20,1
19	0,39	0,40	26	2,99	79,93	13	2,86	66,91	73,34	19,6
20	0,39	0,40	26	2,99	79,93	12	2,85	65,98	72,86	19,2
21	0,39	0,40	26	2,99	79,93	11	2,84	65,05	72,40	18,7
22	0,39	0,40	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	71,94	18,2
23	0,39	0,40	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	71,94	18,2
24	0,39	0,40	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	71,48	17,8

Πίνακας 2. Θερμοκρασίες πετάσματος ανά ώρα της ημέρας, που προκύπτουν σύμφωνα με την εξίσωση (6).

Οι ενεργειακές θερμικές απώλειες για την περίπτωση που η πισίνα καλύπτεται με κάλυμμα θα βρεθούν από της 8:00 έως της 19:00 (δηλαδή για 12 ώρες) από την εξίσωση (2) και από της 20:00 έως της 7:00 δηλαδή για τις 12 ώρες που η πισίνα δεν είναι σκεπασμένη από την εξίσωση (1).

Ο πίνακας που προκύπτει είναι ο παρακάτω.

Ωρες	θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	Θ_1^4 (K ⁴)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Θ_2^4 (K ⁴)	θ_{π} (°C)	Θ_{π} (K)	Θ_{π}^4 (K ⁴)	$Q_{\text{μετά}}$ (Wh)
1	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	17,8	2,91	71,71	5.453
2	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	17,8	2,91	71,71	5.453
3	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	17,8	2,91	71,71	5.453
4	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	17,3	2,9	70,73	6.103
5	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	17,3	2,9	70,73	6.103
6	26	2,99	79,93	8	2,81	62,35	17,3	2,9	70,73	6.103
7	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	17,8	2,91	71,71	5.453
8	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	18,2	2,91	71,71	25.690
9	26	2,99	79,93	11	2,84	65,05	18,7	2,92	72,70	24.210
10	26	2,99	79,93	12	2,85	65,98	19,2	2,92	72,70	22.697
11	26	2,99	79,93	13	2,86	66,91	19,6	2,93	73,70	21.184
12	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	20,1	2,93	73,70	19.654
13	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	20,6	2,94	74,71	18.109
14	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	20,6	2,94	74,71	18.109
15	26	2,99	79,93	15	2,88	68,80	20,6	2,94	74,71	18.109
16	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	20,1	2,93	73,70	19.654
17	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	20,1	2,93	73,70	19.654
18	26	2,99	79,93	14	2,87	67,85	20,1	2,93	73,70	19.654
19	26	2,99	79,93	13	2,86	66,91	19,6	2,93	73,70	21.184
20	26	2,99	79,93	12	2,85	65,98	19,2	2,92	72,70	4.796
21	26	2,99	79,93	11	2,84	65,05	18,7	2,92	72,70	4.796
22	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	18,2	2,91	71,71	5.453
23	26	2,99	79,93	10	2,83	64,14	18,2	2,91	71,71	5.453
24	26	2,99	79,93	9	2,82	63,24	17,8	2,91	71,71	5.453

Σύνολο (Wh): 313.980

Σύνολο (kWh): 313,98

Πίνακας 3. Ενεργειακές απώλειες λόγω ακτινοβολίας, υπολογισμένες βάση της εξίσωσης (1) ανά ώρα της ημέρας από τη πισίνα στο χώρο του αθλητικού κέντρου, με την χρήση καλύμματος για τις 12 από τις 24 ώρες της ημέρας.

Οι ενεργειακές θερμικές απώλειες από την πισίνα ανά 24ωρο με την προσθήκη του καλύμματος είναι ίσες με **313,98kWh**.

Ερώτημα Γ:

Για να βρούμε την μείωση της καταναλισκόμενης ετησίως ποσότητας πετρελαίου λόγω χρήσης του καλύμματος πρέπει πρώτα να βρούμε την ενεργειακή εξοικονόμηση που κάνουμε.

Η εξοικονομούμενη ενέργεια που έχουμε ημερησίως είναι:

$$\Delta E = E_{\text{πρὶν}} - E_{\text{μετά}} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta E = E_{\text{πρὶν}} - E_{\text{μετά}} \\ E_{\text{πρὶν}} = 567,78 \text{ kWh} \\ E_{\text{μετά}} = 313,98 \text{ kWh} \end{array} \right\} \Delta E = 567,78 - 313,98 = 253,8 \text{ kWh} \quad \Delta E = \mathbf{253,8 \text{ kWh}}$$

Η ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta EE = \Delta E \cdot d/\text{year} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

ΔEE :	Ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια	kWh/y
ΔE :	Ημερήσια εξοικονομούμενη ενέργεια	kWh
h/year	Ωρες λειτουργίας το χρόνο	d/y

Η εγκατάσταση λειτουργεί 150 ημέρες το χρόνο.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta EE = \Delta E \cdot d/\text{year} \\ \Delta E = 253,8 \text{ kWh} \\ 150 \text{ d/year} \end{array} \right\} \Delta EE = 253,8 \cdot 150 = 38.070 \text{ kWh/y} \quad \Delta EE = \mathbf{38.070 \text{ kWh/y}}$$

Το εξοικονομούμενο καύσιμο θα βρίσκεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	kg/y
ΔEE :	Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	kWh/y
Θ_{κ} :	Κατώτερα θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kWh/kg
n:	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (9) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \\ \Delta EE = 38.070 \text{ kWh/y} \\ \Theta_{\kappa} = 11,92 \text{ kWh/kg}, \quad n = 75\% \end{array} \right\} \Delta G = \frac{38.070}{0,75 \cdot 11,92} = 4247 \text{ kg/y}$$

$$\Delta G = 4247 \text{ kg/y} = \frac{4247}{0,84} = \mathbf{5056 \text{ lt/y}}$$

Ερώτημα Δ:

Το χρονικό διάστημα στο οποίο μηδενίζεται η Καθαρά Παρούσα Αξία (Κ.Π.Α) είναι η Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής. Ο τύπος που θα μας δώσει την Ε.Π.Α. είναι ο παρακάτω:

$$E.P.A. = \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{A.K.E.}{K.E.O.O.}\right]}{\ln(1+r)} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

E.Π.Α.:	Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής	years
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	%
A.K.E.:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης	Ευρώ
K.E.O.O.:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	Ευρώ/y

Για να μπορέσουμε να βρούμε την Ε.Π.Α. πρέπει πρώτα να βρούμε το Κ.Ε.Ο.Ο. και το Α.Κ.Ε.

Το Κ.Ε.Ο.Ο. ισούται με:

$$K.E.O.O. = E.O.O. - \text{Έξοδα Λειτουργίας} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Το ΕΟΟ ισούται με:

$$E.O.O. = \Delta G \cdot \tau_k \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

όπου:

E.O.O.:	Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	Kg/y
τ_k :	Τιμή καυσίμου	Ευρώ

Επομένως αντικαθιστώντας στην εξίσωση (12) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} E.O.O. = \Delta G \cdot \tau_k \\ \Delta G = 5056 \text{ lt/y} \\ \tau_k = 0,40 \text{ €/lt} \end{array} \right\} \begin{array}{l} E.O.O. = 5056 \cdot 0,40 = 2022 \text{ €/y} \\ \mathbf{E.O.O. = 2022 \text{ €/y}} \end{array}$$

Τα έξοδα λειτουργίας για ένα έτος είναι ίσα με:

$$\text{Έξοδα Λειτουργίας} = \text{Έξοδα ημέρας} \cdot d/y = 7 \text{ €/d} \cdot 150 \text{ d/y} = 1050 \text{ €/y.}$$

$$\mathbf{\text{Έξοδα Λειτουργίας} = 1050 \text{ €/y}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (11) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} K.E.O.O. = E.O.O. - \text{έξοδα λειτουργίας} \\ E.O.O. = 2022 \text{ €/y} \\ \text{Έξοδα λειτουργίας} = 1050 \text{ €/y} \end{array} \right\} \begin{array}{l} K.E.O.O. = 2022 - 1050 = 972 \text{ €/y} \\ \mathbf{K.E.O.O. = 972 \text{ €/y}} \end{array}$$

Το αρχικό κόστος επένδυσης ισούται με:

$$A.K.E. = \text{Κόστος αγοράς \& εγκατ. ανά } m^2 \cdot F\pi \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (13) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} A.K.E. = \text{Κόστος αγοράς \& εγκατ. ανά } m^2 \cdot F\pi \\ \text{Κόστος αγοράς \& εγκατ. ανά } m^2 = 15 \text{ €/m}^2 \\ F\pi = 300 \text{ m}^2 \end{array} \right\} A.K.E. = 15 \cdot 300 = 4500 \text{ €}$$

$$A.K.E. = 4500 \text{ €}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} E.P.A. = \frac{-\ln[1 - r \cdot \frac{A.K.E.}{K.E.O.O.}]}{\ln(1+r)} \\ A.K.E. = 4.500 \text{ €} \\ K.E.O.O. = 975,6 \text{ €/y} \\ r = 9 \text{ \%} \end{array} \right\} E.P.A. = \frac{-\ln[1 - 0,09 \cdot \frac{4.500}{972}]}{\ln(1 + 0,09)} = 6,25 \text{ y}$$

$$E.P.A. = 6,25 \text{ y}$$

Συμπέρασμα:

Σε μια θερμαινόμενη κολυμβητική δεξαμενή οι απώλειες που υπάρχουν είναι τόσο λόγω αγωγής και συναγωγής όσο και λόγω ακτινοβολίας. Η μείωση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας μπορεί να γίνει με την χρήση καλύμματος από υλικό με μικρότερο συντελεστή ολικής εκπομπής από το νερό.

Διερευνώντας την πιθανότητα τοποθέτησης καλύμματος σε μια πισίνα και συγκρίνοντας τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας χωρίς και με την χρήση του καλύμματος βλέπουμε ότι αυτές μειώνονται στο 55% ημερησίως. Η μείωση αυτή είναι εμφανές ότι είναι αρκετά μεγάλη.

Κατά την σύγκριση του καθαρού ετήσιου οικονομικού οφέλους και του αρχικού κόστους επένδυσης, με την χρησιμοποίηση της εξίσωσης της έντοκης περιόδου αποπληρωμής, βλέπουμε ότι η Ε.Π.Α. που προκύπτει είναι ίση με 6,25 y. Το χρονικό διάστημα των 6,25 ετών για να καταφέρουμε να αποσβέσουμε το αρχικό μας κεφάλαιο είναι ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα πράγμα που σημαίνει ότι η χρήση πλέον του καλύμματος μπορεί να μην είναι εφικτή. Το μεγάλο χρονικό αυτό διάστημα δεν οφείλεται στην εξοικονόμηση ενέργειας διότι αυτή είναι αρκετά μεγάλη, αλλά στηρίζεται στο γεγονός ότι τα λειτουργικά έξοδα είναι αρκετά μεγάλα καθώς και το αρχικό κόστος της επένδυσης.

Αν η τιμή του καυσίμου είναι της τάξης των 0,60 €/L, είναι προφανές ότι η Ε.Π.Α. θα προκύψει μειωμένη αρκετά, και συγκεκριμένα γίνεται 2,65 έτη. Τότε η αγορά και τοποθέτηση του καλύμματος είναι σαφώς συμφέρουσα.

Μελέτη 9^η.

Οροφή ψυκτικού θαλάμου υπό την επίδραση και της ηλιακής ακτινοβολίας

Η οροφή ενός ψυκτικού θαλάμου κατάψυξης αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία (πανέλα), τα οποία έχουν κατασκευασθεί από σκληρό αφρό διογκωμένης πολυουρεθάνης ($\lambda = 0,0253 \text{ W/mK}$), πάχους 20 cm, ανάμεσα σε φύλλα γαλβανισμένης λαμαρίνας, αμελητέου πάχους. Ο αέρας του θαλάμου διατηρείται σε θερμοκρασία $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ και ο συντελεστής συναγωγής από την κάτω πλευρά της οροφής προς τον ψυκτικό θάλαμο έχει τιμή $8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Η πάνω πλευρά της οροφής είναι εκτεθειμένη στο περιβάλλον και στην ηλιακή ακτινοβολία.

Ένα καλοκαιρινό μεσημέρι, που ο αέρας περιβάλλοντος έχει θερμοκρασία $30 \text{ }^\circ\text{C}$, η οροφή δέχεται, επί αρκετή ώρα, ηλιακή ακτινοβολία που ισοδυναμεί με πυκνότητα θερμοροής (κάθετης πρόσπτωσης) 700 W/m^2 . Ο συντελεστής καθαρής συναγωγής μεταξύ της πάνω πλευράς της οροφής και του αέρα περιβάλλοντος είναι $29 \text{ W/m}^2\text{K}$.

A. Πόσο θα εύρισκε κάποιος το ρεύμα θερμότητας διαμέσου της οροφής, αγνοώντας την επίδραση της ακτινοβολίας (και θεωρώντας, επομένως, ότι η τιμή $29 \text{ W/m}^2\text{K}$ αντιπροσωπεύει τον ολικό συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας στην εξωτερική πλευρά της οροφής).

B. Στην πραγματικότητα, λόγω απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία στην πάνω λαμαρίνα της οροφής θα σταθεροποιηθεί σε τιμή μεγαλύτερη από του περιβάλλοντος. Έτσι, στην κατάσταση θερμοκτικής ισορροπίας, εκτός από την απορρόφηση και εκπομπή ακτινοβολίας από τη λαμαρίνα, υπάρχει και θερμοροή προς το περιβάλλον λόγω (καθαρής) συναγωγής και προς το εσωτερικό του θαλάμου (αγωγή - συναγωγή).

B1. Να υπολογισθεί η θερμοκρασία που θα αποκατασταθεί στην πάνω πλευρά της οροφής (θεωρείστε την πάνω λαμαρίνα ως γκριζα οξειδωμένη).

B2. Μα υπολογισθεί το πραγματικό ρεύμα θερμότητας δια μέσου της οροφής καθώς και το σφάλμα (ποσοστό) που έγινε στον υπολογισμό της A. περίπτωσης.

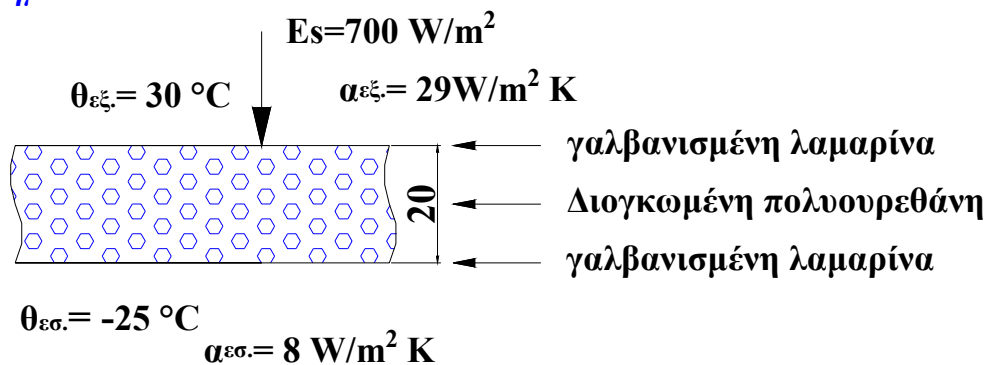
Γ. Υποθέστε ότι ο ψυκτικός θάλαμος βρίσκεται στο Ηράκλειο και εξετάζεται μία καλοκαιρινή ημέρα του Ιουλίου.

- Η ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταβάλλεται κατά το πρότυπο ASHRAE με μέγιστη θερμοκρασία ημέρας $30 \text{ }^\circ\text{C}$ και ημερήσια διακύμανση $7 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Η μέση ανά ώρα πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο θα αναζητηθεί στη βιβλιογραφία ή στο Φ/Β εργαστήριο ή στο Εργαστήριο Βιοκλ. Κατοικίας.

Να γίνουν οι γραφικές παραστάσεις του (πραγματικού) ρεύματος θερμότητας διαμέσου της οροφής, για κάθε ώρα της ημέρας καθώς και του αντίστοιχου σφάλματος που γίνεται, αν οι σχετικοί υπολογισμοί γίνονται με την απλοποίηση της A. περίπτωσης.

Λύση:

Ερώτημα Α:



Σχήμα 1. Τομή της οροφής του ψυκτικού θαλάμου.

Αν αγνοήσουμε την επίδραση της ακτινοβολίας και θεωρήσουμε ότι η τιμή $29 \text{ W/m}^2\text{K}$ αντιπροσωπεύει τον ολικό συντελεστή μεταβίβασης της θερμότητας από την πάνω μεριά της οροφής στο περιβάλλον, θα πρέπει για να βρούμε το ρεύμα θερμότητας διαμέσου της οροφής να χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο.

$$q = \frac{\theta_{\epsilon\xi.} - \theta_{\epsilon\sigma.}}{\frac{1}{\alpha_{\epsilon\xi.}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon\sigma.}}} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

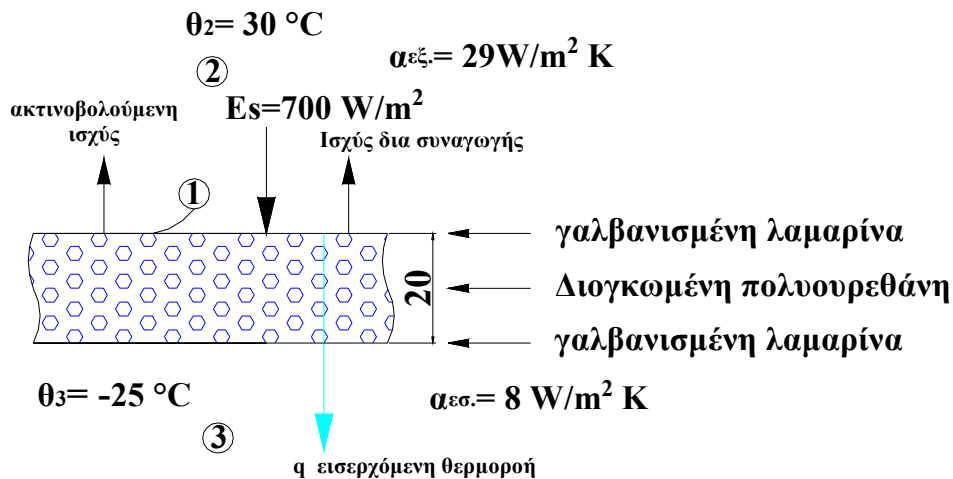
q :	Ρεύμα θερμότητας διαμέσου οροφής	W/m^2
$\theta_{\epsilon\xi.}$:	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	$^\circ\text{C}$
$\theta_{\epsilon\sigma.}$:	Θερμοκρασία εσωτερική του θαλάμου.	$^\circ\text{C}$
$\alpha_{\epsilon\xi.}$:	Συντελ. καθαρής συναγωγής από την οροφή στο περιβάλλον	$\text{W/m}^2\text{K}$
$\alpha_{\epsilon\sigma.}$:	Συντελ. καθαρής συναγωγής από την οροφή στο θάλαμο	$\text{W/m}^2\text{K}$
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	W/mK
δ_1 :	Πάχος διογκωμένης πολυουρεθάνης	(m)

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} q = \frac{\theta_{\epsilon\xi.} - \theta_{\epsilon\sigma.}}{\frac{1}{\alpha_{\epsilon\xi.}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon\sigma.}}} \\ \theta_{\epsilon\xi.} = 30 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \theta_{\epsilon\sigma.} = -25 \text{ }^\circ\text{C} \\ \alpha_{\epsilon\xi.} = 29 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \delta_1 = 0,2 \text{ m} \\ \lambda_1 = 0,0253 \text{ W/mK}, \\ \alpha_{\epsilon\sigma.} = 8 \text{ W/m}^2\text{K} \end{array} \right\} q = \frac{30 - (-25)}{\frac{1}{29} + \frac{0,2}{0,0253} + \frac{1}{8}} = 6,82 \text{ W/m}^2$$

$$q = 6,82 \text{ W/m}^2$$

Ερώτημα Β:



Σχήμα 2. Τομή της οροφής του ψυκτικού θαλάμου.

Ο ψυκτικός θάλαμος όμως βρίσκεται εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως η θερμοκρασία που θα έχει η οροφή του θαλάμου θα είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Εξαιτίας αυτής της θερμοκρασίας που έχει η γαλβανισμένη λαμαρίνα ακτινοβολεί προς το περιβάλλον. Συγχρόνως η θερμοροή που εισέρχεται στον θάλαμο θα είναι διαφορετική, διότι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας στην πάνω λαμαρίνα και στο εσωτερικό του θαλάμου είναι διαφορετική.

Υποερώτημα Β1.

Για να μπορέσουμε να βρούμε την θερμοκρασία που θα σταθεροποιηθεί στην οροφή θα πρέπει να γράψουμε την εξίσωση όπου συμμετέχουν όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος στην περίπτωση αυτή, και να δούμε τι συμβαίνει όταν κάποια στιγμή αποκατασταθεί η θερμοκή ισορροπία.

Η εξίσωση που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$Q_{12} = \varepsilon_1 \cdot C_{\mu} \cdot F \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) - \alpha_s \cdot F_s \cdot E_s + \alpha_{εξ} \cdot F \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \frac{(\theta_1 - \theta_3)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{εσ}}} \cdot F \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

Q_{12} :	Μεταδιδόμενη θερμική ισχύς προς το περιβάλλον	W
ε_1 :	Συντελεστής ολικής εκπομπής της γαλβανισμένης λαμαρίνας	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος.	$W/m^2 K^4$
F :	Εμβαδόν της οροφής θαλάμου	m^2
Θ_1 :	$= (\theta_1 + 273)/100$	K
Θ_2 :	$= (\theta_2 + 273)/100$	K
α_s :	Συντελεστής απορρόφησης της γαλβ. λαμαρίνας στην ηλιακή ακτινοβολία	
F_s :	Επιφάνεια της γαλβανισμένης λαμαρίνας	m^2

E_s :	Πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην γαλβανισμένη λαμαρίνα	W/m^2
$\alpha_{εξ}$:	Συντελ. καθαρής συναγωγής από την οροφή στο περιβάλλον	W/m^2K
θ_1 :	Θερμοκρασία πάνω στην επιφάνεια της εκτεθειμένης οροφής	$^{\circ}C$
θ_2 :	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	$^{\circ}C$
θ_3 :	Θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου	$^{\circ}C$
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	W/mK
δ_1 :	Πάχος διογκωμένης πολυουρεθάνης	m
$\alpha_{εσ}$:	Συντελ. καθαρής συναγωγής από την οροφή στο θάλαμο	W/m^2K

Απλοποιώντας την εξίσωση (2) ως προς την επιφάνεια που παραμένει ίδια προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{12} = \varepsilon_1 \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) - \alpha_s \cdot E_s + \alpha_{εξ} \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \frac{(\theta_1 - \theta_3)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{εσ}}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Όταν επέλθει η ισορροπία $Q_{12}=0$. Επομένως η εξίσωση (3) διαμορφώνεται ως εξής:

$$\alpha_s \cdot E_s = \varepsilon_1 \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) + \alpha_{εξ} \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \frac{(\theta_1 - \theta_3)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{εσ}}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Από πίνακα βρέθηκε ο συντελεστής απορρόφησης της γαλβανισμένης λαμαρίνας ίσος με $\alpha_s = 0,89$. Και ο συντελεστής ολική εκπομπής της γαλβανισμένης λαμαρίνας ίσος με $\varepsilon_1 = 0,276$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει η παρακάτω ισότητα:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s \cdot E_s &= \varepsilon_1 \cdot C\mu \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) + \alpha_{εξ} \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \frac{(\theta_1 - \theta_3)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{εσ}}} \\ \varepsilon_1 &= 0,276, \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \quad \theta_2 = 30^{\circ}C, \quad \theta_3 = -25^{\circ}C \\ \Theta_2 &= 3,03 \text{ K}, \quad \alpha_{εξ} = 29 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \alpha_{εσ} = 8 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \delta_1 &= 0,20 \text{ m}, \quad \lambda_1 = 0,0253 \text{ W/mK}, \quad \alpha_s = 0,89, \quad E_s = 700 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \right\}$$

$$0,276 \cdot 5,67 \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) + 29 \cdot (\theta_1 - 30) + \frac{(\theta_1 - (-25))}{\frac{0,20}{0,0253} + \frac{1}{8}} = 0,89 \cdot 700$$

$$29\theta_1 + \frac{\theta_1}{8,03} = 29 \cdot 30 + \frac{-25}{8,03} - 1,565(\Theta_1^4 - \Theta_2^4) + 623 \quad \Rightarrow$$

$$29,12\theta_1 = 1489,88 - 1,565(\Theta_1^4 - \Theta_2^4) \quad \Rightarrow$$

$$\theta_1 = 51,15 - 0,0537(\Theta_1^4 - 3,03^4) \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Για να βρούμε την θερμοκρασία θ_1 θα δίνουμε τιμές στο θ_1 μέχρι τα δύο μέλη της εξίσωσης να γίνουν ίσα.

για $\theta_1 = 50^\circ \text{C}$ το β μέλος γίνεται ίσο με $\theta_1 = 49,83^\circ \text{C}$

για $\theta_1 = 49,84^\circ \text{C}$ το β μέλος γίνεται ίσο με $\theta_1 = 49,84^\circ \text{C}$

Άρα η θερμοκρασία που θα σταθεροποιηθεί στην πάνω πλευρά της γαλβανισμένης λαμαρίνας είναι ίση με $\theta_1 = 49,84^\circ \text{C}$.

Υποερώτημα B2.

Επειδή η θερμοκρασία που έχει η γαλβανισμένη λαμαρίνα είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος λόγω της θέρμανσης από τον ήλιο το πραγματικό ρεύμα θερμότητας θα υπολογισθεί τώρα εφαρμόζοντας τον παρακάτω τύπο:

$$q' = \frac{\theta_1 - \theta_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{εσ}}}} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

q:	Ρεύμα θερμότητας διαμέσου οροφής	W/m ²
θ_1 :	Θερμοκρασία πάνω στην επιφάνεια της λαμαρίνας	°C
θ_3 :	Θερμοκρασία εσωτερική του θαλάμου.	°C
$\alpha_{\text{εσ}}$:	Συντελ. καθαρής συναγωγής από την οροφή στο θάλαμο	W/m ² K
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης	W/mK
δ_1 :	Πάχος διογκωμένης πολυουρεθάνης	m

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει :

$$\left. \begin{array}{l} q' = \frac{\theta_1 - \theta_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{εσ}}}} \\ \theta_1 = 49,84^\circ \text{C}, \quad \theta_3 = -25^\circ \text{C} \\ \delta_1 = 0,2 \text{ m}, \quad \lambda_1 = 0,0253 \text{ W/mK} \\ \alpha_{\text{εσ}} = 8 \text{ W/m}^2\text{K} \end{array} \right\} q' = \frac{49,84 - (-25)}{\frac{0,2}{0,0253} + \frac{1}{8}} = 9,32 \text{ W/m}^2$$

$$q' = 9,32 \text{ W/m}^2$$

Ο τύπος που θα μας δώσει το σφάλμα είναι ο παρακάτω.

$$n = \frac{q' - q}{q'} \cdot 100 \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

όπου:

n:	Ποσοστό σφάλματος.	%
q:	Ρεύμα θερμότητας οροφής αγνοώντας την ακτινοβολία	W/m ²
q':	Ρεύμα θερμότητας οροφής συμπεριλαμβάνοντας την ακτινοβολία	W/m ²

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7) προκύπτουν:

$$\left. \begin{array}{l} n = \frac{q' - q}{q'} \cdot 100 \\ q' = 9,32 \text{ W/m}^2 \\ q = 6,82 \text{ W/m}^2 \end{array} \right\} n = \frac{9,32 - 6,82}{9,32} \cdot 100 = 26,8 \% \qquad \mathbf{n = 26,8 \%}$$

Ερώτημα Γ:

Στο Γ ερώτημα ζητείται να γίνει η γραφική παράσταση του πραγματικού ρεύματος θερμότητας διαμέσου της οροφής για κάθε ώρα της μέρας καθώς και του αντίστοιχου σφάλματος που έχουμε αν αγνοήσουμε την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για να βρούμε το πραγματικό ρεύμα θερμότητας της οροφής για κάθε ώρα της ημέρας θα πρέπει να υπολογίσουμε την θερμοκρασία που έχει το περιβάλλον ανά ώρα σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE.

Ο πίνακας υπολογισμού του φαίνεται παρακάτω.

Ώρες Ημέρας	θ κατά ASHRAE
1:00	23,9
2:00	23,6
3:00	23,3
4:00	23,1
5:00	23
6:00	23,1
7:00	23,5
8:00	24,1
9:00	25
10:00	26,1
11:00	27,3
12:00	28,4

Ώρες Ημέρας	θ κατά ASHRAE
13:00	29,2
14:00	29,8
15:00	30
16:00	29,8
17:00	29,3
18:00	28,5
19:00	27,6
20:00	26,7
21:00	25,9
22:00	25,2
23:00	24,7
0:00	24,3

Πίνακας 1. Υπολογισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά το πρότυπο ASHRAE

Στη συνέχεια θα πρέπει να βρούμε από το εργαστήριο των Φ/Β την μέση ανά ώρα πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για την **15 του Ιουλίου** η μέση ανά ώρα πυκνότητα ροής φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Ώρες Ημέρας	GHI (W/m ²)	Ώρες Ημέρας	GHI (W/m ²)
1:00	0	13:00	913
2:00	0	14:00	873
3:00	0	15:00	787
4:00	0	16:00	636,8
5:00	0	17:00	441,7
6:00	49,6	18:00	225,4
7:00	204,8	19:00	53,6
8:00	404,6	20:00	0
9:00	588,3	21:00	0
10:00	745	22:00	0
11:00	855	23:00	0
12:00	912	0:00	0

Πίνακας 2. Μέση ανά ώρα πυκνότητα ροής για την 15 του μήνα Ιουλίου του 1997.

Έχοντας την πυκνότητα ροής εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας και την ωριαία μεταβολή της θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορούμε να βρούμε, λύνοντας κάθε φορά την εξίσωση (4) ως προς θ_1 , την θερμοκρασία που έχει ανά ώρα η εκτεθειμένη επιφάνεια στον ήλιο, με διαδοχικές δοκιμές στην εξίσωση που προκύπτει.

Ξέροντας και την θερμοκρασία που έχει η εκτεθειμένη στον ήλιο επιφάνεια μπορούμε με την βοήθεια της εξίσωσης (6) και της εξίσωσης (7) να βρούμε το πραγματικό ρεύμα θερμότητας και το ποσοστό σφάλματος.

Το ρεύμα θερμότητας στην περίπτωση που αγνοούμε την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας θα βρίσκεται πάντα από την εξίσωση (1).

Οι πίνακες που προκύπτουν και τα διαγράμματα είναι τα παρακάτω.

Πίνακες υπολογισμού της θ_1 ανά ώρα της ημέρας.

Ώρα 1:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
23,70	2,967	23,9	2,969	0
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=23,70$ (°C)				

Ώρα 2:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
23,40	2,964	23,6	2,966	0
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=23,40$ (°C)				

Ωρα 3:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
23,10	2,961	23,3	2,963	0
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=23,11$ (°C)				

Ωρα 4:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
22,91	2,959	23,1	2,961	0
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=22,91$ (°C)				

Ωρα 5:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
22,81	2,958	23	2,96	0
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=22,81$ (°C)				

Ωρα 6:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
24,34	2,9734	23,1	2,961	49,6
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=24,34$ (°C)				

Ωρα 7:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
29,22	3,022	23,5	2,965	204,8
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=29,22$ (°C)				

Ωρα 8:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
35,57	3,0857	24,1	2,971	404,6
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=35,57$ (°C)				

Ωρα 9:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
41,73	3,1473	25	2,98	588,3
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=41,73$ (°C)				

Ωρα 10:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
47,29	3,2029	26,1	2,991	745
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=47,29$ (°C)				

Ωρα 11:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
51,61	3,2461	27,3	3,003	855
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=51,61$ (°C)				

Ωρα 12:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
54,31	3,2731	28,4	3,014	912
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=54,31$ (°C)				

Ωρα 13:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
55,12	3,2812	29,2	3,022	913
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=55,12$ (°C)				

Ωρα 14:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
54,57	3,2757	29,8	3,028	873
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=54,57$ (°C)				

Ωρα 15:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
52,33	3,2533	30	3,03	787
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=52,33$ (°C)				

Ωρα 16:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
47,85	3,2085	29,8	3,028	636,8
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=47,85$ (°C)				

Ωρα 17:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
41,78	3,1478	29,3	3,023	441,7
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=41,78$ (°C)				

Ωρα 18:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
34,78	3,0778	28,5	3,015	225,4
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=34,78$ (°C)				

Ωρα 19:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
28,93	3,0194	27,6	3,006	53,6
θ_1 προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: $\theta_1=28,93$ (°C)				

Ωρα 20:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
26,49	2,9949	26,7	2,997	0
θ ₁ προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: θ₁=26,49 (°C)				

Ωρα 21:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
25,69	2,9869	25,9	2,989	0
θ ₁ προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: θ₁=25,69(°C)				

Ωρα 22:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
25,00	2,98	25,2	2,982	0
θ ₁ προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: θ₁=25,00 (°C)				

Ωρα 23:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
24,50	2,975	24,7	2,977	0
θ ₁ προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: θ₁=24,50 (°C)				

Ωρα 24:00				
θ_1 (°C)	Θ_1 (K)	θ_2 (°C)	Θ_2 (K)	Es
24,10	2,971	24,3	2,973	0
θ ₁ προερχόμενο από αντικατάσταση σχέσης: θ₁=24,10 (°C)				

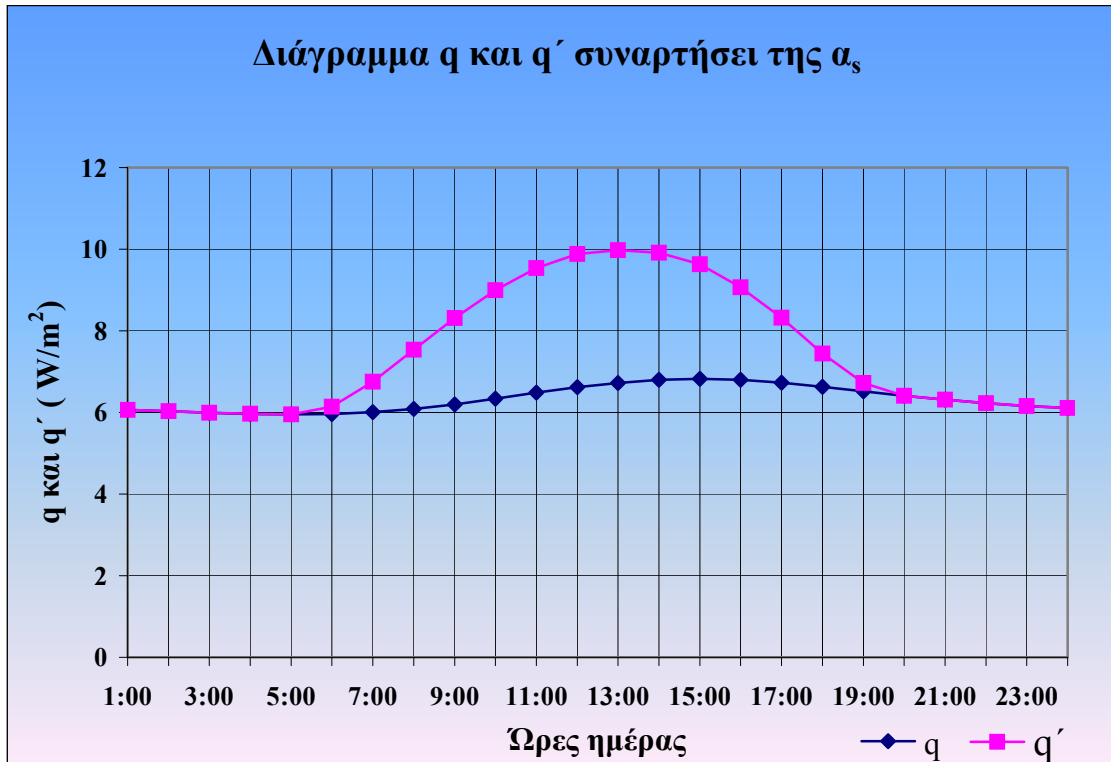
Ωρες Ημέρας	θ_1 (°C)
1:00	23,70
2:00	23,40
3:00	23,11
4:00	22,91
5:00	22,81
6:00	24,34
7:00	29,22
8:00	35,57
9:00	41,73
10:00	47,29
11:00	51,61
12:00	54,31

Ωρες Ημέρας	θ_1 (°C)
13:00	55,12
14:00	54,57
15:00	52,33
16:00	47,85
17:00	41,78
18:00	34,78
19:00	28,93
20:00	26,49
21:00	25,69
22:00	25,00
23:00	24,50
0:00	24,10

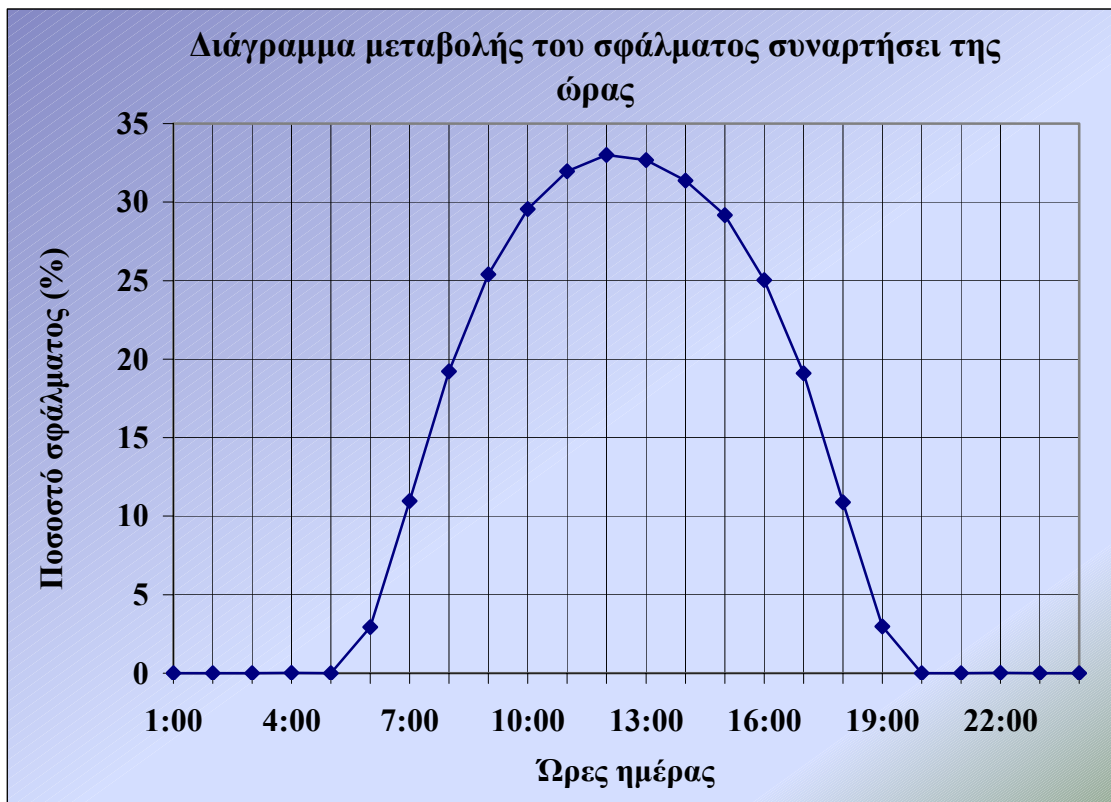
Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας της θ_1 ανά ώρα ημέρας.

Ώρες Ημέρας	θ_2 κατά ASHRAE	GHI (W/m ²)	θ_1 (°C)	Προσεγγιστικό q (W/m ²)	Πραγματικό q' (W/m ²)	Σφάλμα (%)
1:00	23,9	0	23,70	6,06	6,06	0,00
2:00	23,6	0	23,40	6,03	6,03	0,00
3:00	23,3	0	23,11	5,99	5,99	0,00
4:00	23,1	0	22,91	5,96	5,97	0,03
5:00	23	0	22,81	5,95	5,95	0,00
6:00	23,1	49,6	24,34	5,96	6,14	2,93
7:00	23,5	204,8	29,22	6,01	6,75	10,96
8:00	24,1	404,6	35,57	6,09	7,54	19,23
9:00	25	588,3	41,73	6,20	8,31	25,39
10:00	26,1	745	47,29	6,34	9,00	29,56
11:00	27,3	855	51,61	6,49	9,54	31,97
12:00	28,4	912	54,31	6,62	9,88	33,00
13:00	29,2	913	55,12	6,72	9,98	32,67
14:00	29,8	873	54,57	6,80	9,91	31,38
15:00	30	787	52,33	6,82	9,63	29,18
16:00	29,8	636,8	47,85	6,80	9,07	25,03
17:00	29,3	441,7	41,78	6,73	8,32	19,11
18:00	28,5	225,4	34,78	6,63	7,44	10,89
19:00	27,6	53,6	28,93	6,52	6,72	2,98
20:00	26,7	0	26,49	6,41	6,41	0,00
21:00	25,9	0	25,69	6,31	6,31	0,00
22:00	25,2	0	25,00	6,23	6,23	0,02
23:00	24,7	0	24,50	6,16	6,16	0,00
0:00	24,3	0	24,10	6,11	6,11	0,00

Πίνακας 4. Υπολογισμού του πραγματικού ρεύματος θερμότητας και του ρεύματος θερμότητας που προκύπτει αγνοώντας την επίδραση της ακτινοβολίας καθώς και του αντίστοιχου σφάλματος.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή του πραγματικού ρεύματος θερμότητας και του ρεύματος θερμότητας που προκύπτει αγνοώντας την επίδραση της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας.



Διάγραμμα 2. Μεταβολή του ποσοστού του σφάλματος κατά την διάρκεια της ημέρας.

Συμπέρασμα:

Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει το ρεύμα θερμότητας δια μέσου μιας επίπεδης επιφάνειας διότι η πλευρά που είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία αποκτά μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος. Ακόμα η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία είναι ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας των εμπλεκόμενων σωμάτων.

Από την συγκεκριμένη διερεύνηση βλέπουμε ότι αγνοώντας την ηλιακή ακτινοβολία και θεωρώντας μια τιμή που αντιπροσωπεύει τον ολικό συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας, κάνουμε ένα σφάλμα στον υπολογισμό του ρεύματος θερμότητας σε σχέση με το πραγματικό ρεύμα θερμότητας περίπου 28%. Αυτό εξηγείται διότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που αποκαθίσταται στην πάνω πλευρά του θαλάμου. Μελετώντας την μεταβολή του πραγματικού ρεύματος θερμότητας κατά την διάρκεια της ημέρας, και συγκρίνοντας το με το ρεύμα θερμότητας που προκύπτει αγνοώντας την επίδραση της ακτινοβολίας (θεωρώντας έναν ολικό συντελεστή μεταβίβασης από την εξωτερική πλευρά του θαλάμου στο περιβάλλον) βλέπουμε ότι:

Τις βραδινές ώρες δεν έχουμε διαφορά στο ρεύμα θερμότητας που υπολογίζεται στις δύο περιπτώσεις, ενώ τις μεσημεριανές ώρες εμφανίζονται οι μέγιστες διαφορές. Το βράδυ, λόγω μη ύπαρξης της ηλιακής ακτινοβολίας δεν έχουμε σφάλμα στον υπολογισμό μας. Καθώς ανατέλλει ο ήλιος, αυξάνεται η επιρροή της ακτινοβολίας και αρχίζει να υπάρχει ένα σφάλμα στους υπολογισμούς, το οποίο μεγιστοποιείται το μεσημέρι και είναι ίσο με 33%.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΒΙΒΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΩΣΗΣ.

Μελέτη 10^η.

Αμόνοτη ή μονωμένη κυλινδρική δεξαμενή ζεστού νερού – Υπολογισμός συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας – Οικονομική αξιολόγηση μόνωσης

Για την αποθήκευση ζεστού νερού σε σταθερή θερμοκρασία 75°C μια βιομηχανία διαθέτει κλειστό κυλινδρικό δοχείο, διαμέτρου 70cm και μήκους 4m, κατασκευασμένο από γαλβανισμένη λαμαρίνα (αμελητέου πάχους). Το δοχείο βρίσκεται μέσα σε (μεγάλο) μηχανοστάσιο, όπου επικρατεί θερμοκρασία 20°C.

Ο συντελεστής μεταβίβασης της θερμότητας (συναγωγής) από το νερό στο τοίχωμα έχει τιμή 300W/m²K. Ζητούνται:

A. Ο υπολογισμός των συνολικών συντελεστών μεταβίβασης της θερμότητας από το κυλινδρικό τμήμα και τις δύο βάσεις του δοχείου προς το περιβάλλον.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: για τους συντελεστές συναγωγής να γίνει χρήση κατάλληλων εμπειρικών σχέσεων, ενώ για τους συντελεστές ακτινοβολίας να θεωρηθεί ότι τα τοιχώματα του μηχανοστασίου έχουν την ίδια θερμοκρασία με του αέρα μέσα σ' αυτό.

B. Οι συνολικές (δηλαδή από το κυλινδρικό τμήμα και τις δύο βάσεις)θερμικές απώλειες του δοχείου.

Γ. Τόσο στο κυλινδρικό τμήμα όσο και στις δύο βάσεις του δοχείου, εφαρμόζεται πάπλωμα υαλοβάμβακα, πάχους 4cm, το οποίο φέρει επικάλυψη με αλουμινόφυλλο (αμελητέου πάχους). Ζητούνται:

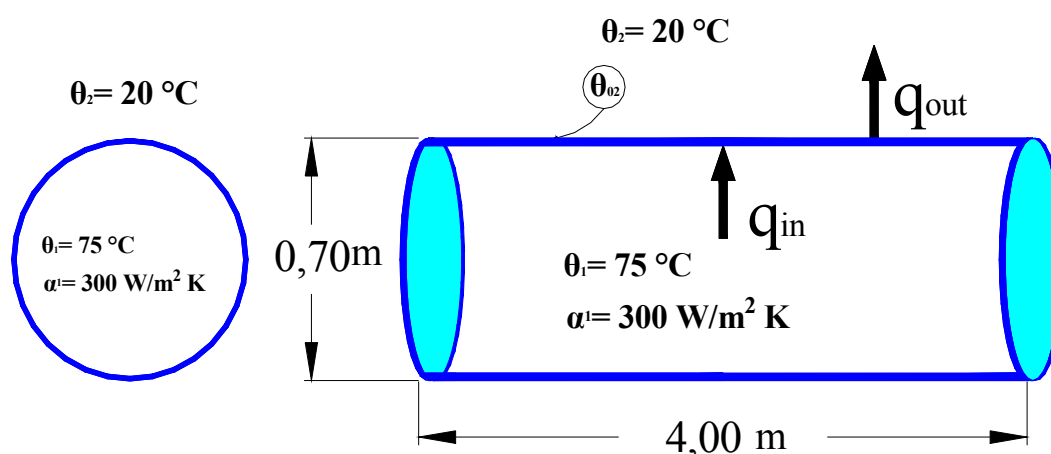
Γ1. Ο υπολογισμός των **νέων συνολικών** συντελεστών μεταβίβασης της θερμότητας από το κυλινδρικό τμήμα και τις δύο βάσεις του δοχείου προς το περιβάλλον

Γ2. Οι νέες συνολικές θερμικές απώλειες του δοχείου.

Δ. Να υπολογισθεί η έντοκη περίοδος αποπληρωμής για την επέμβαση της θερμομόνωσης του δοχείου με τις παρακάτω παραδοχές:

- Κόστος θερμομόνωσης 15 ευρώ /m².
- Κόστος θερμικής ενέργεια 0,09 ευρώ /Mcal.
- Μικτό (αποπληθωρισμένο) επιτόκιο 10%.
- Ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης 4000 ανά έτος.

Λύση:



Σχήμα 1. Τομή οριζόντιου κυλινδρικού δοχείου.

$\theta_1 = 75^\circ\text{C}$
 $\alpha_1 = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$
 $d_2 = 0,70 \text{ m}$

Ερώτημα Α:

Στο ερώτημα Α ζητούνται οι συνολικοί συντελεστές μεταβίβασης θερμότητας από το κυλινδρικό τμήμα και τις δύο βάσεις.

Ο συνολικός συντελεστής μεταβίβασης για τον κύλινδρο και τις δύο βάσεις ισούται:

$$\alpha_{\text{ολ.}} = \alpha_c + \alpha_r \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

$\alpha_{\text{ολ.}}$: Συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας $\text{W/m}^2\text{K}$
 α_c : Συντελ. συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια προς τον αέρα. $\text{W/m}^2\text{K}$
 α_r : Συντελ. ακτινοβολίας από την γαλβ. λαμαρίνα προς το περιβάλλον. $\text{W/m}^2\text{K}$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας δίνεται από την εξίσωση.

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

α_r : Συντελ. ακτινοβολίας από το δοχείο στο περιβάλλον. $\text{W/m}^2\text{K}$
 ε : Συντελ. ολικής εκπομπής επιφάνειας δοχείου.
 C_{μ} : Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος $\text{W/m}^2\text{K}^4$
 θ_{02} : Θερμοκρασία επιφάνειας κυλίνδρου (γαλβ. λαμαρίνα) $^\circ\text{C}$
 θ_2 : Θερμοκρασία μέσα στο μηχανοστάσιο $^\circ\text{C}$
 $\Theta_{02} = \frac{\theta_{02} + 273}{100}$ K
 $\Theta_2 = \frac{\theta_2 + 273}{100}$ K

Στη συγκεκριμένη άσκηση για να μπορέσουμε να βρούμε το συντελεστή συναγωγής θα πρέπει να ξέρουμε το είδος της συναγωγής και αν έχουμε τυρβώδη ή στρωτή ροή.

Από τα δεδομένα της άσκησης συμπεραίνουμε ότι η συναγωγή είναι φυσική.

Για να βρούμε αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδη θα πρέπει να ξέρουμε τον αριθμό Prandtl και τον αριθμό Grashof. Εμπειρικά η μετάβαση από την στρωτή στην στροβιλώδη ροή συμβαίνει όταν το γινόμενο του αριθμού Prandtl και του αριθμού Grashof (αριθμός Rayleigh) ισούται κατά προσέγγιση με 10^9 .

Ο αριθμός Prandtl δίνεται σε πίνακες αν ξέρεις την θερμοκρασία και το αέριο ή το ρευστό που έχουμε.

Για να βρούμε τον αριθμό Grashof και Rayleigh θα πρέπει να υποθέτουμε μια θερμοκρασία για την επιφάνεια του κυλίνδρου (γαλβανισμένης λαμαρίνας) διότι είναι απαραίτητη για να βρούμε την μέση θερμοκρασία στρώματος T_f . Με βάση την μέση θερμοκρασία στρώματος υπολογίζονται οι ιδιότητες του ρευστού που θα χρησιμοποιηθούν για τις παρακάτω εξισώσεις. Από τον παρακάτω πίνακα με γραμμική παρεμβολή στις θερμοκρασίες που ανάμεσα είμαστε υπολογίζουμε τον αριθμό Prandtl, το κινηματικό ιξώδες ν , και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k .

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} + 273 \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

- T_f : Μέση θερμοκρασία στρώματος K
 T_s : Θερμοκρασία επιφάνειας κυλίνδρου (γαλβ. λαμαρίνας.) °C
 T_∞ : Θερμοκρασία χώρου °C

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	μ (kg/m·s)	ν (m ² /s)	k (W/m·K)	α (m ² /s)	Pr
Αέρας							
200	1,7684	1,0061	$1,3289 \cdot 10^{-5}$	$7,490 \cdot 10^{-6}$	0,01809	$0,1016 \cdot 10^{-4}$	0,739
250	1,4128	1,0053	1,5990	11,310	0,02227	0,1568	0,722
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,690	0,02624	0,2216	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,4636	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680

Πίνακας 1 (SI). Τιμές ιδιοτήτων αερίων σε ατμοσφαιρική πίεση. (Από το βιβλίο «Μεταφορά θερμότητας» Δεύτερη έκδοση. Των Donald Pitts, Leighton Sisson.

Ο αριθμός **Grashof** ισούται με:

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \approx \frac{\text{δυνάμεις άνωσης}}{\text{ιξώδεις δυνάμεις}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

- g : Επιτάχυνση βαρύτητας =9,8 m/s²

β :	Ο συντελεστής διαστολής όγκου.	K^{-1}
T_s :	Θερμοκρασία επιφάνειας του κυλίνδρου(γαλβ. λαμαρίνας)	$^{\circ}C$
T_{∞} :	Θερμοκρασία αέρα μέσα στο μηχανοστάσιο	$^{\circ}C$
L :	Μήκος επιφάνειας (χαρακτηριστικό μήκος)	m
ν :	Κινηματικό ιξώδες	m^2/s

Ο αριθμός **Rayleigh**:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \text{ (Εξίσωση 5)}$$

όπου:

Ra_L : Αριθμός Rayleigh.

Gr_L : Αριθμός Grashof για επιφάνεια μήκους L .

Pr : Αριθμός Prandtl.

Λιαδικασία εύρεσης συντελεστή συναγωγής οριζόντιας επιφάνειας.

Αρχικά βρίσκουμε τον μέσο αριθμό Nusselt για τον οριζόντιο κύλινδρο από την παρακάτω σχέση και πάντα για την μέση θερμοκρασία στρώματος.

Για τον οριζόντιο κύλινδρο.

Υπολογισμός μέσης τιμής του αριθμού **Nusselt**:

Ο αριθμός Nusselt θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση των Churchill και Chu:

$$\overline{Nu_D} = \frac{\alpha \cdot D}{k} = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \text{ (Εξίσωση 6)}$$

όπου:

$\overline{Nu_D}$: Μέσος αριθμός Nusselt για διάμετρο κυλίνδρου D

α : Συντελεστής συναγωγής από τον κύλινδρο στο περιβάλλον W/m^2K

k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T_f (W/mK)

Ra_D : Αριθμός Rayleigh για διάμετρο κυλίνδρου D

Pr : Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία στρώματος T_f

Η προηγούμενη σχέση ισχύει για $10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$.

Βρίσκοντας κάθε φορά τον μέσο αριθμό Nusselt ανάλογα με την θερμοκρασία που έχουμε θα λύνουμε ως προς το συντελεστή συναγωγής.

Επειδή όλα τα στοιχεία για τις προηγούμενες σχέσεις υπολογίζονται με βάση την θερμοκρασία T_f , που εμπεριέχει την θερμοκρασία που αποκτά η γαλβανισμένη λαμαρίνα που εμείς υποθέσαμε θα πρέπει να την υπολογίσουμε την θερμοκρασία που θα αποκτήσει η γαλβανισμένη λαμαρίνα αφού έχουμε βρει πλέον τον συντελεστή συναγωγής.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της λαμαρίνας θα υπολογιστεί εξισώνοντας το ρεύμα θερμότητας μέσα και έξω από τον κύλινδρο. Έτσι:

$$q_{in} = q_{out} \text{ (Εξίσωση 7)}$$

$$q_{\text{lin}} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad \text{και}$$

$$q_{\text{lout}} = \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{λαμ.}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)$$

Άρα:

$$\frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} = \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{λαμ.}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

θ_1 :	Θερμοκρασία νερού.	°C
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας κυλίνδρου (γαλβ. λαμαρίνα)	°C
α_1 :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στη γαλβ.λαμαρίνα	W/m ² K
d_1 :	Εσωτερική διάμετρος λαμαρίνας	m
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος λαμαρίνας	m
λ :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γαλβ. λαμαρίνας	W/mK
α_2 :	Συντελ. συναγωγής από τη γαλβ.λαμαρίνα στο περιβάλλον	W/m ² K
$\varepsilon_{\text{λαμ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής γαλβ. λαμαρίνας	
$C\mu$:	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	W/m ² K ⁴
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100}$	K

Αντικαθιστώντας και λύνοντας την προηγούμενη σχέση ως προς θ_{02} κάθε φορά θα καταλήγουμε σε μια εξίσωση της μορφής :

$$\theta_{02} = \alpha - \beta \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \quad \text{όπου } \alpha > 0, \beta > 0, \alpha > \beta \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Στην εξίσωση αυτή σωστή είναι η θερμοκρασία που ικανοποιεί την ισότητα.

Ο σωστός συντελεστής συναγωγής είναι αυτός που επαληθεύει την σχέση για τον κύλινδρο:

$$q_{\text{lin}} = q_{\text{lout}}$$

και η θ_{02} που υποθέσαμε στην αρχή είναι ίση με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση (9) για να βρούμε την μέση θερμοκρασία στρώματος του ρευστού.

Διαδικασία εύρεσης συντελεστή συναγωγής κάθετης επιφάνειας.

Ο αριθμός Grashof και Rayleigh σ' αυτή την περίπτωση είναι ίδια διότι $L=D$

Υπολογισμός μέσης τιμής του αριθμού **Nusselt** για κάθετη επιφάνεια:

Για κατακόρυφη πλάκα:

Ο μέσος αριθμός Nusselt θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση των Churchill και Chu για την κατακόρυφη πλάκα :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\alpha \cdot L}{k} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

- \overline{Nu}_L : Μέσος αριθμός Nusselt για κατακόρυφη πλάκα μήκους L
 α : Συντελεστής συναγωγής από την πλάκα στο περιβάλλον W/m²K
 k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T_f W/mK
 Ra_L : Αριθμός Rayleigh για κατακόρυφη πλάκα μήκους L
 Pr : Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία στρώματος T_f

Η σχέση αυτή ισχύει σε όλη την περιοχή Ra_L .

Για περισσότερη ακρίβεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στρωτή ροή η σχέση:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\alpha \cdot L}{k} = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Η σχέση αυτή ισχύει για $Ra_L \leq 10^9$.

Η θερμοκρασία για την γαλβανισμένη λαμαρίνα δεν αλλάζει, είναι ίδια με αυτήν που έχει ο κύλινδρος.

Εφόσον ξέρουμε την θερμοκρασία της λαμαρίνας θα βρίσκουμε το ρεύμα θερμότητας για την κάθετη πλάκα εσωτερικά από την σχέση.

$$q_{in} = \alpha_1 \cdot (\theta_1 - \theta_{02}) \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

όπου:

- q_{in} : Ρεύμα θερμότητας εσωτερικά της κάθετης πλάκας W/m²
 α_1 : Συντελ. συναγωγής από το νερό στην κάθετη βάση W/m²K
 θ_1 : Θερμοκρασία νερού . °C
 θ_{02} : Θερμοκρασία της γαλβανισμένης λαμαρίνας °C

Το ρεύμα θερμότητας από την λαμαρίνα στο περιβάλλον θα δίνεται από την σχέση:

$$q_{out} = \alpha_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\lambda\alpha\mu.} \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

όπου:

- θ_2 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος. °C
 θ_{02} : Θερμοκρασία επιφάνειας κυλίνδρου (γαλβ. λαμαρίνα) °C
 α_2 : Συντελ. συναγωγής από την γαλβ.λαμαρίνα στο περιβάλλον W/m²K
 $\varepsilon_{\lambda\alpha\mu.}$: Συντελ. ολικής εκπομπής γαλβ. λαμαρίνας
 C_{μ} : Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος =5,67 W/m²K⁴
 Θ_{02} : = $\frac{\theta_{02} + 273}{100}$ K

$$\Theta_2: = \frac{\theta_2 + 273}{100}$$

K

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορες θερμοκρασίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

θ_{02} (°C) (θέτω)	T_f (K)	ν (m ² /s)	κ (W/m·K)	Pr	β (K ⁻¹)	Gr	Ra
75	320,5	17,77 · 10 ⁻⁶	0,0278	0,7035	0,00310	1,815 · 10 ⁹	1,277 · 10 ⁹
73,75	319,9	17,71	0,0277	0,7036	0,00310	1,786	1,256
70	318	17,52	0,0276	0,7040	0,00310	1,697	1,195

θ_{02} (°C) (θέτω)	T_f (K)	\overline{Nu}_D (κύλινδρος)	α_2 (W/m ² K) (κύλινδρος)	\overline{Nu}_D (βάση)	α_2 (W/m ² K) (βάση)	θ_{02} (°C) (από εξίσ.9)
75	320,5	124,87	4,959	132,32	5,255	73,74
73,75	319,9	124,23	4,916	131,66	5,210	73,75
70	318	122,30	4,822	129,65	5,112	73,77

θ_{02} (°C)	T_f (K)	q_{lin} (κύλινδρος) (W/m)	q_{lout} (κύλινδρος) (W/m)	$ \Delta q $ (κύλινδρος) (W/m)	q_{in} (βάση) (W/m ²)	q_{out} (βάση) (W/m ²)	$ \Delta q $ (βάση) (W/m ²)
75	320,5	824,67	829,88	5,210	378	293,33	18,33
73,75	319,9	824,67	824,96	0,290	375	390,94	15,94
70	318	811,47	814,18	2,71	369	385,82	16,82

Το αποτέλεσμα για το οποίο επαληθεύονται οι δύο προηγούμενες απαιτήσεις είναι η περίπτωση που υποθέσαμε ότι $\theta_{02} = 73,75^\circ\text{C}$. Αυτό ισχύει διότι έχουμε σχετικά μικρή διαφορά μεταξύ q_{lin} και q_{lout} για τον κύλινδρο και η θερμοκρασία που υποθέσαμε στην αρχή είναι η ίδια με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση της μορφής (9). Η μεγάλη διαφορά μεταξύ του q_{in} και του q_{out} της βάση οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνολικός συντελεστής από το νερό στην γαλβανισμένη λαμαρίνα είναι, στην πραγματικότητα, μεγαλύτερος διότι έχουμε μια κάθετη πλάκα.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Υποθέτοντας $\theta_{02} = 73,75^\circ\text{C}$.

Η μέση θερμοκρασία στρώματος T_f είναι ίση με:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} + 273 \Rightarrow T_f = \frac{73,75 + 20}{2} + 273 \approx 319,9^\circ\text{C} \Rightarrow T_f = 319,9^\circ\text{C}$$

Από τον πίνακα 1 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0,7036 \\ k &= 0,0277 \quad \text{W/mK} \\ \nu &= 17,71 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \\ \beta &= \frac{1}{T_f} = \frac{1}{319,9} = 0,00310 \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

Για τον κύλινδρο:

Ο αριθμός Grashof σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \text{Gr}_D &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \quad \beta = 0,00310 \text{ K}^{-1} \\ T_s &= 73,75^\circ \text{C}, \quad T_\infty = 20^\circ \text{C} \\ L &= 0,7 \text{ m}, \nu = 17,71 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \text{Gr}_D = \frac{9,8 \cdot 0,00310 \cdot (73,75 - 20) \cdot 0,7^3}{0,00001771^2} \\ = 1,786 \cdot 10^9 \quad \quad \quad \mathbf{\text{Gr}_D = 1,786 \cdot 10^9}$$

Ο αριθμός Rayleigh σύμφωνα με την εξίσωση (5) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \text{Ra}_L &= \text{Gr}_D \cdot \text{Pr} \\ \text{Gr}_D &= 1,786 \cdot 10^9 \\ \text{Pr} &= 0,7036 \end{aligned} \right\} \text{Ra}_L = 1,786 \cdot 10^9 \cdot 0,7036 = 1,256 \cdot 10^9 \quad \quad \mathbf{\text{Ra}_L = 1,256 \cdot 10^9}$$

Ο αριθμός Nusselt σύμφωνα με την εξίσωση (6) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \overline{\text{Nu}}_D &= \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot \text{Ra}_D^{1/6}}{[1 + (0,559/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ \text{Ra}_D &= 1,256 \cdot 10^9, \quad \text{Pr} = 0,7036 \end{aligned} \right\} \overline{\text{Nu}}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot (1,256 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,559/0,7036)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ = 124,23 \quad \quad \quad \mathbf{\overline{\text{Nu}}_D = 124,23}$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή συναγωγής:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\overline{\text{Nu}}_D \cdot k}{D} \\ \overline{\text{Nu}}_D &= 124,23 \\ k &= 0,0277 \text{ W/mK} \\ D &= 0,7 \text{ m} \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{124,23 \cdot 0,0277}{0,7} = 4,916 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \quad \mathbf{\alpha_c = 4,916 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Υπολογισμός του θ_{02} .

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8) τα δεδομένα μας για την κυλινδρική επιφάνεια :

$$\frac{\pi \cdot (75 - \theta_{02})}{\frac{1}{300 \cdot 0,70} + \frac{1}{0,2\lambda \ln \frac{d_2}{d_1}}} = 4,916 \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot (\theta_{02} - 20) + 0,276 \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot 5,67 \cdot (\Theta_{02}^4 - 2,93^4)$$

Ο λόγος $\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$ τείνει στο μηδέν διότι η λαμαρίνα έχει πολύ μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και ο λόγος d_2/d_1 είναι μικρότερος του 1,15.

$$\text{και } \Theta_2 = \frac{20 + 273}{100} = 2,93 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} 49480,08 - 659,73\theta_{02} &= 10,81\theta_{02} - 216,21 + 3,441(\Theta_{02}^4 - 2,93^4) \\ -670,654\theta_{02} &= -49696,3 + 3,441(\Theta_{02}^4 - 2,93^4) \\ \theta_{02} &= 74,11 - 0,00513(\Theta_{02}^4 - 73,70) \end{aligned}$$

α. Για $\theta_{02} = 74^\circ\text{C}$ το β' μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με $73,74^\circ\text{C}$

β. Για $\theta_{02} = 74,8^\circ\text{C}$ το β' μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με $73,75^\circ\text{C}$

γ. Για $\theta_{02} = 73,75^\circ\text{C}$ το β' μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με $73,75^\circ\text{C}$. (αποδεκτό)

Η σωστή απάντηση είναι η γ, και η θερμοκρασία που προκύπτει είναι ίση με την θερμοκρασία που υποθέσαμε αρχικά.

Τώρα πρέπει να ελέγξουμε αν ισχύει και η ισότητα θερμοροών για την κυλινδρική επιφάνεια:

$$q_{\text{lin}} = q_{\text{out}}$$

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{lin}} &= \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}} \\ \theta_1 &= 75^\circ\text{C}, \theta_{02} = 73,75^\circ\text{C} \\ \alpha_1 &= 300 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_1 &= 0,70 \text{ m} \end{aligned} \right\} q_{\text{lin}} = \frac{\pi \cdot (75 - 73,75)}{\frac{1}{300 \cdot 0,70}} = 824,67 \text{ W/m}$$

$$q_{\text{lin}} = 824,67 \text{ W/m}$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{Iout}} &= \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\lambda\alpha\mu} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\
 \alpha_2 &= 4,916 \text{ W/m}^2\text{K}, d_2 = 0,7 \text{ m}, \theta_{02} = 73,75^\circ\text{C}, \theta_2 = 20^\circ\text{C} \\
 \varepsilon_{\lambda\alpha\mu} &= 0,276, C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \Theta_{02} = 3,46 \text{ K}, \Theta_2 = 2,93 \text{ K}
 \end{aligned} \right\}$$

$$q_{\text{Iout}} = 4,916 \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot (73,75 - 20) + 0,276 \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot 5,67 \cdot (3,4675^4 - 2,93^4) =$$

$$= 824,96 \text{ W/m}$$

$$q_{\text{Iout}} = 824,96 \text{ W/m}$$

Άρα η διαφορά μεταξύ τους είναι:

$$|\Delta q_i| = q_{\text{Iout}} - q_{\text{Iin}} \Rightarrow |\Delta q_i| = 824,67 - 824,96 \approx 0,29 \text{ W/m.} \quad |\Delta q_i| = 0,29 \text{ W/m}$$

Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή και επειδή η θερμοκρασία που υποθέσαμε ότι έχει η επιφάνεια τις λαμαρίνας για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του νερού είναι ίδια με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση (9) αποδεχόμαστε αυτή την λύση.

Για την κάθετη επιφάνεια:

Η μέγιστη επιφάνεια που θα πάρουμε για την κυκλική βάση έχει μήκος ίσο με τη διάμετρο της, δηλαδή για την περίπτωση αυτή $L=D$. Γι' αυτό το λόγο Gr_L και Ra_L είναι ίδια με της κυλινδρικής επιφάνειας. Έτσι:

$$Gr_L = 1,786 \cdot 10^9 \text{ και } Ra_L = 1,256 \cdot 10^9$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}
 \overline{Nu}_L &= \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\
 Ra_L &= 1,256 \cdot 10^9, Pr = 0,7036
 \end{aligned} \right\} \overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (1,256 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,492/0,7036)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$= 131,66$$

$$\overline{Nu}_L = 131,66$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή συναγωγής:

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha &= \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \\
 \overline{Nu}_L &= 131,66 \\
 k &= 0,0277 \text{ W/mK} \\
 L &= 0,7 \text{ m}
 \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{131,66 \cdot 0,0277}{0,7} = 5,210 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_c = 5,210 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Τώρα ξέρουμε ότι η θερμοκρασία που αποκαθίσταται στην επιφάνεια της λαμαρίνα είναι $73,75^\circ\text{C}$.

Το ρεύμα θερμότητας από το νερό στην επιφάνεια της λαμαρίνας αντικαθιστώντας στην εξίσωση (12) είναι ίσο με:

$$\left. \begin{aligned} q_{in} &= \alpha_1 \cdot (\theta_1 - \theta_{02}) \\ \alpha_1 &= 300 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \theta_1 &= 75^\circ\text{C}, \theta_{02} = 73,75^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} q_{in} = 300 \cdot (75 - 73,75) = 375 \text{ W/m}^2$$

$$q_{in} = 375 \text{ W/m}^2$$

Το ρεύμα θερμότητας από την λαμαρίνα της βάσης στο χώρο του μηχανοστασίου είναι:

$$\left. \begin{aligned} q_{out} &= \alpha_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\lambda\alpha\mu.} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\ \alpha_2 &= 5,210 \text{ W/m}^2\text{K}, \theta_{02} = 73,75^\circ\text{C}, \\ \theta_2 &= 20^\circ\text{C}, \varepsilon_{\lambda\alpha\mu.} = 0,276, \\ C\mu &= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \\ \Theta_{02} &= \frac{20 + 273}{100} = 2,93 \text{ K}, \\ \Theta_2 &= \frac{73,75 + 273}{100} = 3,46 \text{ K} \end{aligned} \right\}$$

$$q_{out} = 5,210 \cdot (73,75 - 20) + 0,276 \cdot 5,67 \cdot (3,4675^4 - 2,93^4) = 390,94 \text{ W/m}^2$$

$$q_{out} = 390,94 \text{ W/m}^2$$

Άρα η διαφορά μεταξύ τους είναι:

$$|\Delta q| = q_{out} - q_{in} \Rightarrow |\Delta q| = 390,94 - 375 \approx 15,94 \text{ W/m}^2.$$

$$|\Delta q| = 15,94 \text{ W/m}^2$$

Η θερμοκρασία της επιφάνειας της γαλβανισμένης λαμαρίνας είναι ίδια τόσο στο κυλινδρικό όσο και στο κάθετο κομμάτι του δοχείου. Η σχετικά μεγάλη αυτή διαφορά στα εσωτερικό και εξωτερικό ρεύμα θερμότητας συμβαίνει διότι πιθανότατα έχουμε διαφορετικό συντελεστή συναγωγής από το νερό στην κάθετη επιφάνεια της γαλβανισμένης λαμαρίνας.

Ο νέος συντελεστής συναγωγής από το νερό στην κάθετη επιφάνεια θα βρεθεί ως εξής:

Θεωρούμε ότι το q_{in} είναι ίσο με το q_{out} και λύνουμε την παρακάτω σχέση ως προς το συντελεστή συναγωγής.

$$q_{in} = 390,94 = \alpha' \cdot (\theta_1 - \theta_{02})$$

Λύνοντας ως προς το συντελεστή συναγωγής α' :

$$\alpha' = \frac{390,94}{(75 - 73,75)} = 312,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha' = 312,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Από την προηγούμενη διαδικασία μπορέσαμε να βρούμε ποιοι είναι οι συντελεστές συναγωγής. Τώρα πρέπει να βρούμε το συντελεστή ακτινοβολίας.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_r &= \frac{\varepsilon \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2} \\ \varepsilon &= 0,276 \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ \Theta_{02} &= 3,4675 \text{ K}, \Theta_2 = 2,93 \text{ K} \\ \theta_{02} &= 73,75^\circ \text{C} \quad \theta_2 = 20^\circ \text{C} \end{aligned} \right\} \alpha_r = \frac{0,276 \cdot 5,67 \cdot (3,46^4 - 2,93^4)}{73,75 - 20} = 2,063 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_r = 2,063 \text{ W/m}^2\text{K}$

Ο συνολικός συντελεστής για το κυλινδρικό κομμάτι του δοχείου σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ολ.} &= \alpha_c + \alpha_r \\ \alpha_c &= 4,916 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \alpha_r &= 2,063 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned} \right\} \alpha_{ολ.} = 4,916 + 2,063 = 6,979 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_{ολ.} = 6,979 \text{ W/m}^2\text{K} \approx 7 \text{ W/m}^2\text{K}$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας από τις βάσεις είναι ίδιος με το κυλινδρικό κομμάτι του δοχείου, έτσι:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ολ.} &= \alpha_c + \alpha_r \\ \alpha_c &= 5,210 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \alpha_r &= 2,063 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned} \right\} \alpha_{ολ.} = 5,210 + 2,063 = 7,273 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_{ολ.} = 7,273 \text{ W/m}^2\text{K} \approx 7,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Ερώτημα Β:

Οι συνολικές απώλειες από τις δύο βάσεις και το κυλινδρικό τοίχωμα του δοχείου θα βρεθούν ως εξής:

Για τον κύλινδρο:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{κυλ}} &= q_{\text{Iout}} \cdot l \\ q_{\text{Iout}} &= 824,96 \text{ W/m} \\ l &= 4 \text{ m} \end{aligned} \right\} Q_{\text{κυλ}} = 824,96 \cdot 4 = 3299,84 \text{ W}$$

$Q_{\text{κυλ}} = 3299,84 \text{ W} \approx 3300 \text{ W}$

Για τις δύο βάσεις του δοχείου:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\beta\alpha\sigma.} &= q_{out} \cdot F_{\beta\alpha\sigma.} \cdot 2 \\ F_{\beta\alpha\sigma.} &= \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} = 0,384 \text{ m}^2 \\ q_{out} &= 390,94 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \right\} Q_{\beta\alpha\sigma.} = 390,94 \cdot 0,384 \cdot 2 = 300,24 \text{ W}$$

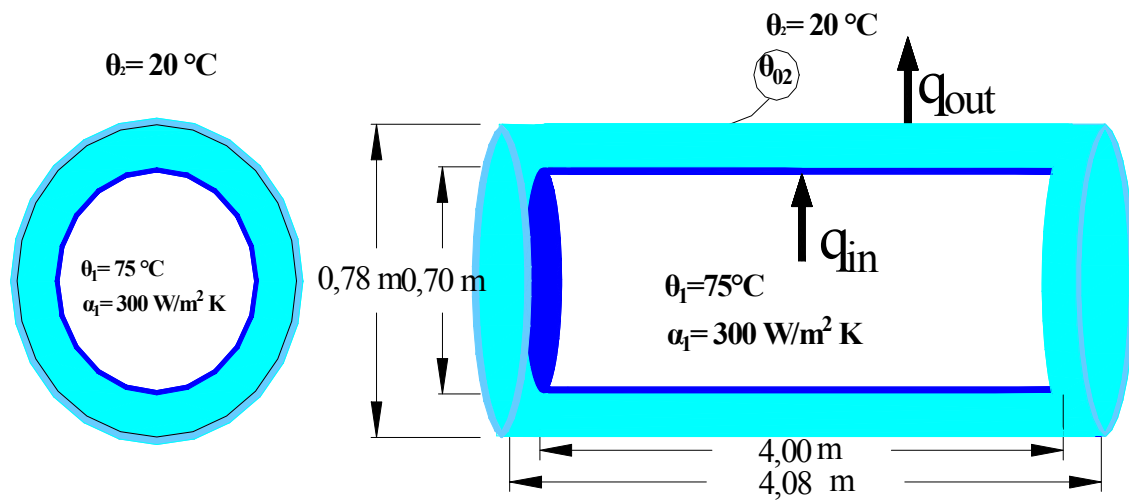
$$Q_{\beta\alpha\sigma.} = 300,24 \text{ W} \approx 300 \text{ W}$$

Έτσι οι συνολικές απώλειες του δοχείου είναι:

$$Q_{ολ.} = Q_{κνλ.} + Q_{\beta\alpha\sigma.} = 3300 + 300 = 3600 \text{ W}$$

$$Q_{ολ.} = 3600 \text{ W}$$

Ερώτημα Γ:



Υποερώτημα Γ1:

Για να μπορέσουμε να βρούμε τους νέους συνολικούς συντελεστές μεταβίβασης της θερμότητας τόσο από τις δύο βάσεις όσο και από τον κύλινδρο προς το περιβάλλον θα ακολουθήσουμε μια διαδικασία όμοια με το ερώτημα Α. Οι διαφορές που θα υπάρχουν θα είναι στην προσθήκη της μόνωσης, στον συντελεστή ολικής εκπομπής που αλλάζει επειδή τώρα έχουμε επικάλυψη με αλουμινοφύλλο και στους τύπους που χρησιμοποιούμε ανάλογα με τι είδους ροή έχουμε (στρωτή ή τυρβώδη). Έτσι:

Ο σωστός συντελεστής συναγωγής είναι αυτός που επαληθεύει την σχέση για τον κύλινδρο:

$$q_{in} = q_{out}$$

και η θ_{02} που υποθέσαμε στην αρχή είναι ίση με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση (9) για να βρούμε την μέση θερμοκρασία στρώματος του ρευστού.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορες θερμοκρασίες είναι τα παρακάτω.

θ_{02} (°C) (θέτω)	T_f (K)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	Pr	β (K ⁻¹)	Gr	Ra
50	308	$16,50 \cdot 10^{-6}$	0,0268	0,7098	0,0032	$1,6399 \cdot 10^9$	$1,1640 \cdot 10^9$
40	303	15,99	0,0264	0,7073	0,0033	1,2005	0,8491
31,40	298,7	15,58	0,0262	0,7084	0,0033	0,7208	0,5106

θ_{02} (°C) (θέτω)	T_f (K)	\overline{Nu}_D (κύλινδρος)	α_2 (W/m ² K) (κύλινδρος)	\overline{Nu}_D (βάση)	α_2 (W/m ² K) (βάση)	θ_{02} (°C) (από εξίσ.9)
50	308	121,44	4,173	128,75	4,424	29,37
40	303	109,90	3,720	88,43	2,993	30,18
31,40	298,7	93,73	3,148	77,96	2,619	31,40

θ_{02} (°C)	T_f (K)	q_{lin} (κύλινδρος) (W/m)	q_{out} (κύλινδρος) (W/m)	$ \Delta q $ (κύλινδρος) (W/m)	q_{in} (βάση) (W/m ²)	q_{out} (βάση) (W/m ²)	$ \Delta q $ (βάση) (W/m ²)
50	308	108,31	107,83	0,480	46,64	46,35	0,29
40	303	106,36	106,07	0,290	45,80	35,90	9,90
31,40	298,7	103,42	103,14	0,280	44,54	36,06	8,48

Το αποτέλεσμα για το οποίο επαληθεύονται οι δύο προηγούμενες απαιτήσεις είναι η περίπτωση που υποθέσαμε ότι $\theta_{02} = 31,40^\circ\text{C}$. Αυτό ισχύει διότι έχουμε μικρή διαφορά μεταξύ q_{lin} και q_{out} για τον κύλινδρο και η θερμοκρασία που υποθέσαμε στην αρχή είναι η ίδια με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση της μορφής 9. Η κάπως μεγάλη διαφορά μεταξύ του q_{in} και του q_{out} της βάση οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνολικός συντελεστής από το νερό στην γαλβανισμένη λαμαρίνα αλλάζει διότι έχουμε μια κάθετη πλάκα.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Υποθέτοντας $\theta_{02} = 31,40^\circ\text{C}$.

Η μέση θερμοκρασία στρώματος T_f είναι ίση με:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} + 273 \Rightarrow T_f = \frac{31,4 + 20}{2} + 273 = 298,7^\circ\text{C} \Rightarrow T_f = 298,7^\circ\text{C}$$

Από τον πίνακα 1 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει:

$$\begin{aligned} Pr &= 0,7084 \\ k &= 0,0262 \quad \text{W/mK} \\ \nu &= 15,58 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \\ \beta &= \frac{1}{T_f} = \frac{1}{298,7} = 0,0033 \quad \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Για τον κύλινδρο:

Ο αριθμός Grashof σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Gr}_D &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\
 g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \quad \beta = 0,0033 \text{ K}^{-1} \\
 T_s &= 31,40^\circ \text{C}, \quad T_\infty = 20^\circ \text{C} \\
 L &= 0,78 \text{ m}, \quad \nu = 15,58 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}
 \end{aligned} \right\} \text{Gr}_D = \frac{9,8 \cdot 0,0033 \cdot (31,40 - 20) \cdot 0,78^3}{0,00001558^2}$$

$$= 0,7208 \cdot 10^9$$

$$\text{Gr}_D = \mathbf{0,7208 \cdot 10^9}$$

Ο αριθμός Rayleigh σύμφωνα με την εξίσωση (5) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Ra}_L &= \text{Gr}_D \cdot \text{Pr} \\
 \text{Gr}_D &= 0,7208 \cdot 10^9 \\
 \text{Pr} &= 0,7084
 \end{aligned} \right\} \text{Ra}_L = 0,7208 \cdot 10^9 \cdot 0,7084 = 0,5106 \cdot 10^9 \quad \text{Ra}_L = \mathbf{0,5106 \cdot 10^9}$$

Ο αριθμός Nusselt σύμφωνα με την εξίσωση (6) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned}
 \overline{\text{Nu}}_D &= \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot \text{Ra}_D^{1/6}}{[1 + (0,559/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\
 \text{Ra}_D &= 0,5106 \cdot 10^9, \quad \text{Pr} = 0,7084
 \end{aligned} \right\} \overline{\text{Nu}}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot (0,5106 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,559/0,7084)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$= 93,73$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = \mathbf{93,73}$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή συναγωγής:

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha &= \frac{\overline{\text{Nu}}_D \cdot k}{D} \\
 \overline{\text{Nu}}_D &= 93,73 \\
 k &= 0,0262 \text{ W/mK} \\
 D &= 0,78 \text{ m}
 \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{93,73 \cdot 0,0262}{0,78} = 3,148 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_c = \mathbf{3,148 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Υπολογισμός του θ_{02} .

Η νέα εξίσωση που έχουμε για α και για τον συντελεστή συναγωγής που προκύπτει για την κυλινδρική επιφάνεια είναι:

$$\frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_\mu} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \epsilon_{\omega\lambda} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot 5,67 \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)$$

(Εξίσωση 14)

όπου:

θ_1 :	Θερμοκρασία νερού.	$^{\circ}\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας κυλίνδρου (αλουμινόφυλλο)	$^{\circ}\text{C}$
α_1 :	Συντελεστής εσωτ. συναγωγής από το νερό στο δοχείο	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
d_1 :	Εσωτερική διάμετρος δοχείου	m
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος μόνωσης	m
λ_{μ} :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μονωτικού	W/mK
α_2 :	Συντελ. συναγωγής από το αλουμιν. στο περιβάλλον	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$\varepsilon_{\text{αλ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής αλουμινόφυλλου	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100} = \frac{20 + 273}{100} = 2,93$	K

λ_{μ} : Από τον Πίνακα A1 του παραρτήματος 2 βρίσκεται $\lambda_{\mu}=0,041 \text{ W}/\text{mK}$

$\varepsilon_{\text{αλ.}}$: Από τον Πίνακα A5 του παραρτήματος 2 βρίσκεται $\varepsilon_{\text{αλ.}}=0,09$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14):

$$\frac{\pi \cdot (75 - \theta_{02})}{\frac{1}{300 \cdot 0,70} + \frac{1}{2 \cdot 0,041} \ln \frac{78}{70}} = 3,148 \cdot \pi \cdot 0,78 \cdot (\theta_{02} - 20) + 0,09 \cdot \pi \cdot 0,78 \cdot 5,67 \cdot (\Theta_{02}^4 - 2,93^4)$$

$$\begin{aligned} 177,90 - 2,372 \theta_{02} &= 7,713 \theta_{02} - 154,279 + 1,250 (\Theta_{02}^4 - 2,93^4) \\ -10,108 \theta_{02} &= -332,181 + 1,250 (\Theta_{02}^4 - 73,70) \\ \theta_{02} &= 32,93 - 0,1239 (\Theta_{02}^4 - 73,70) \end{aligned}$$

α. Για $\theta_{02} = 32^{\circ}\text{C}$ το β' μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με $31,32^{\circ}\text{C}$

β. Για $\theta_{02} = 30^{\circ}\text{C}$ το β' μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με $31,60^{\circ}\text{C}$

γ. Για $\theta_{02} = 31,40$ το β' μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με $31,40^{\circ}\text{C}$. (αποδεκτό)

Η σωστή λύση επομένως είναι η γ, και η θερμοκρασία που προκύπτει είναι ίση με αυτήν που υποθέσαμε αρχικά.

Τώρα πρέπει να ελέγξουμε αν ισχύει και η ισότητα για την κυλινδρική επιφάνεια:

$$Q_{\text{lin}} = Q_{\text{lout}}$$

Η εξίσωση που δίνει το ρεύμα θερμότητας εσωτερικά του κυλίνδρου είναι η παρακάτω. Αντικαθιστώντας προκύπτει.

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{lin}} &= \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\mu}} \ln \frac{d_2}{d_1}} \\
 \theta_1 &= 75^\circ \text{C}, \theta_{02} = 31,40^\circ \text{C} \\
 \alpha_1 &= 300 \text{ W/m}^2\text{K}, d_1 = 0,70 \text{ m}, \\
 \lambda_{\mu} &= 0,041 \text{ W/mK}, d_2 = 0,78 \text{ m}
 \end{aligned} \right\} q_{\text{lin}} = \frac{\pi \cdot (75 - 31,40)}{\frac{1}{300 \cdot 0,70} + \frac{1}{2 \cdot 0,041} \ln \frac{78}{70}}$$

$$= 103,42 \text{ W/m}$$

$$q_{\text{lin}} = 103,42 \text{ W/m}$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{\text{out}} &= \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\omega} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\
 \alpha_2 &= 3,148 \text{ W/m}^2\text{K}, d_2 = 0,78 \text{ m}, \theta_{02} = 31,40^\circ \text{C}, \theta_2 = 20^\circ \text{C} \\
 \varepsilon_{\omega} &= 0,09, C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \Theta_{02} = 3,044 \text{ K}, \Theta_2 = 2,93 \text{ K}
 \end{aligned} \right\}$$

$$q_{\text{out}} = 3,148 \cdot \pi \cdot 0,78 \cdot (31,40 - 20) + 0,09 \cdot \pi \cdot 0,78 \cdot 5,67 \cdot (3,044^4 - 2,93^4) = 103,14 \text{ W/m}$$

$$q_{\text{out}} = 103,14 \text{ W/m}$$

Άρα η διαφορά μεταξύ τους είναι:

$$|\Delta q| = q_{\text{out}} - q_{\text{lin}} = 103,42 - 103,14 = 0,28 \text{ W/m.} \quad |\Delta q| = 0,28 \text{ W/m.}$$

Η διαφορά αυτή στο ρεύμα θερμότητας είναι μικρή και αφού η θερμοκρασία που θεωρήσαμε είναι ίδια με αυτή που προκύπτει αποδεχόμαστε αυτή την απάντηση.

Για την κάθετη επιφάνεια:

Η μέγιστη επιφάνεια που να πάρουμε για την κυκλική βάση έχει μήκος ίσο με τη διάμετρο της δηλαδή για την περίπτωση αυτή $L=D$. Έτσι το Gr και Ra_L ισούται με $Gr_L = 0,7208 \cdot 10^9$ και $Ra_L = 0,5106 \cdot 10^9$

Επειδή ο αριθμός Grashof και ο αριθμός Rayleigh είναι μικρότερος του 10^9 θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (11). Άρα:

$$\left. \begin{aligned}
 \overline{Nu}_L &= 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \\
 Ra_D &= 0,5106 \cdot 10^9, Pr = 0,7084
 \end{aligned} \right\} \overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 \cdot (0,5106 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,492 / 0,7084)^{9/16}]^{4/9}} = 77,96$$

$$\overline{Nu}_L = 77,96$$

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha &= \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \\
 \overline{Nu}_L &= 77,96 \\
 k &= 0,0262 \text{ W/mK} \\
 L &= 0,78 \text{ m}
 \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{77,96 \cdot 0,0262}{0,78} = 2,619 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_c = 2,619 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Τώρα ξέρουμε ότι η θερμοκρασία που αποκαθίσταται στην επιφάνεια του αλουμινοφύλλου είναι $31,40^{\circ}\text{C}$. Το ρεύμα θερμότητας από το νερό στην επιφάνεια της λαμαρίνας είναι ίσο με:

$$q_{\text{in}} = \frac{(\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}} \quad (\text{Εξίσωση 15})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (15) προκύπτουν:

$$\left. \begin{array}{l} q_{\text{in}} = \frac{(\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}} \\ \theta_1 = 75^{\circ}\text{C}, \quad \theta_{02} = 31,40^{\circ}\text{C} \\ \alpha_1 = 300 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \delta_1 = 0,04 \text{ m} \\ \lambda_1 = 0,041 \text{ W/mK} \end{array} \right\} q_{\text{in}} = \frac{(75 - 31,40)}{\frac{1}{300} + \frac{0,04}{0,041}} = 44,54 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{in}} = 44,54 \text{ W/m}^2$$

Το ρεύμα θερμότητας από το αλουμινοφύλλου της βάσης στο χώρο του μηχανοστασίου είναι:

$$\left. \begin{array}{l} q_{\text{out}} = \alpha_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\omega.} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\ \alpha_2 = 2,619 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \theta_{02} = 31,40^{\circ}\text{C}, \\ \theta_2 = 20^{\circ}\text{C}, \quad \varepsilon_{\omega.} = 0,09, \\ C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \\ \Theta_{02} = \frac{20 + 273}{100} = 2,93 \text{ K} \\ \Theta_2 = \frac{31,40 + 273}{100} = 3,044 \text{ K} \end{array} \right\}$$

$$q_{\text{out}} = 2,619 \cdot (31,40 - 20) + 0,09 \cdot 5,67 \cdot (3,044^4 - 2,93^4) = 36,06 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{out}} = 36,06 \text{ W/m}^2$$

Άρα η διαφορά μεταξύ τους είναι:

$$|\Delta q| = 39,06 - 44,54 = 8,48 \text{ W/m}^2.$$

$$|\Delta q| = 8,48 \text{ W/m}^2$$

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του αλουμινοφύλλου είναι ίδια τόσο στο κυλινδρικό όσο και στο κάθετο κομμάτι του δοχείου. Η διαφορά στο εσωτερικό και εξωτερικό ρεύμα θερμότητας συμβαίνει διότι πιθανότατα έχουμε διαφορετικό συντελεστή συναγωγής από το νερό στην κάθετη επιφάνεια της γαλβανισμένης λαμαρίνας.

Ο νέος συντελεστής συναγωγής από το νερό στην βάση του κυλίνδρου θα βρεθεί ως εξής:

Θα θεωρούμε ότι το q_{in} είναι ίσο με το q_{out} και λύνουμε την εξίσωση (15) ως προς το συντελεστή συναγωγής.

Αντικαθιστώντας:

$$q_{in} = 36,06 = \frac{(75 - 31,40)}{\frac{1}{\alpha_1} + 0,041}$$

Λύνοντας ως προς το συντελεστή συναγωγής α' :

$$\alpha' = \frac{36,06}{8,387} = 4,29 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha' = 4,29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Από την προηγούμενη διαδικασία μπορέσαμε να βρούμε ποιοι είναι οι συντελεστές συναγωγής. Τώρα πρέπει να βρούμε το συντελεστή ακτινοβολίας.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_r = \frac{\varepsilon \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2} \\ \varepsilon = 0,09 \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ \Theta_{02} = 3,044 \text{ K} \quad \Theta_2 = 2,93 \text{ K} \\ \theta_{02} = 31,40^\circ\text{C} \quad \theta_2 = 20^\circ\text{C} \end{array} \right\} \alpha_r = \frac{0,09 \cdot 5,67 \cdot (3,044^4 - 2,93^4)}{31,40 - 20} = 0,544 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_r = 0,544 \text{ W/m}^2\text{K}$

Ο συνολικός συντελεστής για το κυλινδρικό κομμάτι του δοχείου σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_{ολ.} = \alpha_c + \alpha_r \\ \alpha_c = 3,148 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \alpha_r = 0,544 \text{ W/m}^2\text{K} \end{array} \right\} \alpha_{ολ.} = 3,148 + 0,544 = 3,692 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_{ολ.} = 3,692 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας από τις βάσεις είναι ίδιος με το κυλινδρικό κομμάτι του δοχείου, έτσι:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_{ολ.} = \alpha_c + \alpha_r \\ \alpha_c = 2,619 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \alpha_r = 0,544 \text{ W/m}^2\text{K} \end{array} \right\} \alpha_{ολ.} = 2,619 + 0,544 = 3,163 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_{ολ.} = 3,163 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Υποερώτημα Γ₂:

Οι συνολικές απώλειες από τις δύο βάσεις και το κυλινδρικό τοίχωμα του δοχείου θα βρεθούν ως εξής:

Για τον κύλινδρο:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{κυλ.}} &= q_{\text{out}} \cdot l_m \\ l_m &= 4 + \frac{0,08}{2} = 4,04 \text{ m} \\ q_{\text{out}} &= 10314 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \right\} Q_{\text{κυλ.}} = 10314 \cdot 4,04 = 41669 \text{ W}$$

$$Q_{\text{κυλ.}} = 416,69 \text{ W} \approx 416,7 \text{ W}$$

Το l_m είναι το μέσο μήκος του κυλινδρικού κομματιού του δοχείου. Παίρνοντας ένα μέσο μήκος για το κυλινδρικό κομμάτι και ένα μέσο μήκος για την κυκλική επιφάνεια χωρίζουμε τις απώλειες που αφορούν την ένωση της κυλινδρικής επιφάνειας με την κάθετη.

Για τις δύο βάσεις του δοχείου:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{βασ.}} &= q_{\text{out}} \cdot F_{\text{βασ.}} \cdot 2 \\ F_{\text{βασ.}} &= \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,739^2}{4} = 0,428 \text{ m}^2 \\ d_m &= \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{0,78 - 0,70}{\ln \frac{0,78}{0,70}} = 0,739 \text{ m} \\ q_{\text{out}} &= 36,06 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \right\} Q_{\text{βασ.}} = 36,06 \cdot 0,428 \cdot 2 = 30,87 \text{ W}$$

$$Q_{\text{βασ.}} = 30,87 \text{ W} \approx 30,9 \text{ W}$$

Έτσι οι συνολικές απώλειες του δοχείου είναι:

$$Q_{\text{ολ.}} = Q_{\text{κυλ.}} + Q_{\text{βασ.}} = 416,7 + 30,9 = 447,6 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ολ.}} = 447,6 \text{ W}$$

Ερώτημα Δ:

Ζητείται η Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής. Η παρακάτω εξίσωση θα μας δώσει την Ε.Π.Α.

$$ΕΠΑ = \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{ΑΚΕ}{ΚΕΟΟ}\right]}{\ln(1+r)} \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

όπου:

ΕΠΑ:	Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής	years
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	
ΑΚΕ:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης	€
ΚΕΟΟ:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/year

Το Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος θα βρεθεί αφού πρώτα υπολογισθεί η εξοικονομούμενη ισχύς και ενέργεια.

$$\Delta Q = Q_{\text{πριν.}} - Q_{\text{μετά.}} \quad (\text{Εξίσωση 17})$$

όπου:		
ΔQ :	Μείωση απωλειών.	W
$Q_{\text{πριν}}$:	Οι θερμικές απώλειες χωρίς την μόνωση	W
$Q_{\text{μετά}}$:	Οι θερμικές απώλειες με την μόνωση	W

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (17) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = Q_{\text{πριν}} - Q_{\text{μετά}} \\ Q_{\text{πριν}} = 3600 \text{ W} \\ Q_{\text{μετά}} = 447,6 \text{ W} \end{array} \right\} \Delta Q = 3600 - 447,6 = 3152,4 \text{ W}$$

$$\Delta Q = 3152,4 \text{ W}$$

Η ενέργεια που εξοικονομούμε είναι ίση με:

$$\Delta EE = \Delta Q \cdot h/\text{year} \text{ (Εξίσωση 18)}$$

όπου:		
ΔEE :	Εξοικονομούμενη ενέργεια	Wh/y
ΔQ :	Μείωση απωλειών.	W
h/year	Ωρες λειτουργίας το χρόνο	h/y

Η εγκατάσταση λειτουργεί 4000 ώρες το χρόνο. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (18) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta EE = \Delta Q \cdot h / \text{year} \\ \Delta Q = 3152,4 \text{ W} \\ h / \text{year} = 4000 \end{array} \right\} \Delta EE = 3152,4 \cdot 4000 = 12609600 \text{ Wh / y}$$

$$\Delta EE = 12609600 \text{ Wh/y} \approx 12610 \text{ kWh/y}$$

$$\Delta EE = 12610 \cdot 859,84 = 10842582 \text{ kcal/y} = 10842,6 \text{ Mcal/y}$$

$$\Delta EE = 10842,6 \text{ Mcal/y}$$

Το Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος είναι ίσο με:

$$KEOO = \Delta EE \cdot \tau_{\text{ηλ.}} \text{ (Εξίσωση 19)}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (19) προκύπτει:

$$KEOO = 10842,6 \text{ Mcal/y} \cdot 0,09 \text{ €/Mcal} \approx 975,8 \text{ €}$$

$$KEOO = 975,8 \text{ €}$$

Το μόνο που μας λείπει για να μπορέσουμε να βρούμε την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής είναι το Αρχικό Κόστος Επένδυσης.

Για να μπορέσουμε να το βρούμε θα πρέπει να βρούμε την επιφάνεια που θα καλύψουμε με μονωτικό υλικό για να μπορέσουμε να βρούμε τα m^2 που χρειαζόμαστε.

Το εμβαδόν του δοχείου είναι ίσο με:

$$Εμβ_{δοχ.} = Εμβ_{κυλ.} + 2 \cdot Εμβ_{βασ.} \text{ (Εξίσωση 20)}$$

όπου:

Εμβ _{δοχ.} :	Εμβαδόν δοχείου	m ²
Εμβ _{κυλ.} :	Εμβαδόν κυλίνδρου	m ²
Εμβ _{βασ.} :	Εμβαδόν βάσης	m ²

$$\left. \begin{aligned} Εμβ_{κυλ.} &= \text{Περίμετρος} \cdot \text{Ύψος} \\ \text{Περίμετρος} &= \pi \cdot d = \pi \cdot 0,7 = 2,199 \text{ m} \end{aligned} \right\} Εμβ_{κυλ.} = 2,199 \cdot 4 = 8,796 \text{ m}^2$$

$$Εμβ_{βασ.} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,78^2}{4} = 0,478 \text{ m}^2$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (17):

$$Εμβ_{δοχ.} = 8,796 + 2 \cdot 0,478 = 9,752 \text{ m}^2 \qquad \mathbf{Εμβ_{δοχ.} = 9,752 \text{ m}^2}$$

Το Αρχικό Κόστος Επένδυσης είναι ίσο με:

$$Α.Κ.Ε. = Εμβ_{δοχ.} \cdot \text{Κόστος θερμομόνωσης. (Εξίσωση 21)}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (21):

$$Α.Κ.Ε. = 9,752 \text{ m}^2 \cdot 15 \text{ €/m}^2 = 146,3 \text{ €} \qquad \mathbf{Α.Κ.Ε = 146,3 \text{ €}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (16) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} ΕΠΑ &= \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{Α.Κ.Ε.}{Κ.Ε.Ο.Ο.}\right]}{\ln(1+r)} \\ Α.Κ.Ε. &= 146,3 \text{ €} \\ Κ.Ε.Ο.Ο. &= 975,8 \text{ €} \\ r &= 10\% \end{aligned} \right\} ΕΠΑ = \frac{-\ln\left[1 - 0,1 \cdot \frac{146,3}{975,8}\right]}{\ln(1+0,1)} = 0,158 \text{ y}$$

$$\mathbf{ΕΠΑ = 0,158 \text{ y}}$$

Η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής είναι ίση με 0,158 χρόνια, δηλ. περίπου 2 μήνες.

Συμπέρασμα:

Κατά την αποθήκευση ζεστού νερού χρήσης σε μεταλλικά κυλινδρικά δοχεία το ρεύμα θερμότητας δημιουργείται τόσο λόγω της αγωγής και συναγωγής όσο και λόγω της ακτινοβολίας. Οι απώλειες που δημιουργούνται λόγω ακτινοβολίας είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ολικής εκπομπής του υλικού.

Από την διαδικασία εύρεσης του συντελεστή συναγωγής από το δοχείο στο περιβάλλον βλέπουμε ότι αυτός επηρεάζεται σημαντικά από τη μέση θερμοκρασία

στρώματος ($T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} + 273$) δηλ. τη μέση θερμοκρασία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας και του περιβάλλοντος.

Η προσθήκη μόνωσης στο δοχείο και η επικάλυψη της με υλικό από μικρό συντελεστή ολικής εκπομπής μειώνουν τις απώλειες λόγω αγωγής εξαιτίας της μόνωσης. Καθώς και τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας εξαιτίας του υλικού επικάλυψης. Συγχρόνως, η θερμοκρασία της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται και ο συντελεστής συναγωγής και ακτινοβολίας από το δοχείο στο περιβάλλον.

Συγκρίνοντας τις συνολικές απώλειες από τις δύο βάσεις και τον κύλινδρο πριν και μετά την προσθήκη της μόνωσης βλέπουμε ότι έχουμε μια μείωση περίπου 88% εξαιτίας του μονωτικού υλικού και της επικάλυψης.

Διερευνώντας οικονομοτεχνικά την επένδυση αυτή βλέπουμε ότι λόγω της μεγάλης μείωση των απωλειών η έντοκη περίοδος αποπληρωμής του κεφαλαίου που διαθέσαμε για αυτή την επένδυση είναι περίπου 2 μήνες. Γεγονός που κάνει την επένδυση μας πολύ κερδοφόρα αν αναλογιστούμε ότι η τεχνολογική ζωή των υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη.

Μελέτη 11^η.

Θερμομόνωση επιφάνειας ξηραντήριου – Υπολογισμός συντελεστών μεταβίβασης της θερμότητας – Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση μόνωσης.

Μέσα σε μεγάλο εργασιακό χώρο, του οποίου η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή και ίση με 27°C, είναι εγκατεστημένο (κατακόρυφα) ένα ξηραντήριο, με εξωτερική διάμετρο 2 m. Τα τοιχώματα του ξηραντηρίου είναι από χαλυβδόφυλλα (οξειδωμένα), πάχους 10 mm. Στο αρχικό του τμήμα, μήκους 1 m, ο θερμός αέρας ξήρανσης έχει θερμοκρασία τέτοια ώστε να ανεβάζει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων στους 120°C, πρακτικά ίδια σ' όλο το πάχος τους.

A. Αν το τμήμα αυτό είναι αμόνωτο, ζητείται να υπολογισθεί ο (ολικός) συντελεστής μεταβίβασης της θερμότητας από τα τοιχώματα στον αέρα του εργοστασίου και να βρεθούν οι θερμικές απώλειες από το τμήμα αυτό του ξηραντηρίου, στις εξής δύο περιπτώσεις :

A1. Θεωρώντας τα τοιχώματα του ξηραντηρίου κυλινδρικά (όπως πράγματι είναι).

A2. Θεωρώντας τα τοιχώματα συνολικά του ξηραντηρίου ως επίπεδη επιφάνεια (επειδή η διάμετρος του ξηραντηρίου είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τα πάχη τοιχώματος).

Συγκρίνετε και σχολιάσετε τις απαντήσεις A1 και A2.

B. Το παραπάνω κυλινδρικό τμήμα μονώνεται με πάπλωμα ορυκτοβάμβακα, πάχους 40 mm, που φέρει εξωτερικά επικάλυψη από γαλβανισμένη λαμαρίνα (γκρίζα – οξειδωμένη), αμελητέου πάχους. Ο ορυκτοβάμβακας έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μεταβαλλόμενο με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση $\lambda = 0,06 + 0,0001 \theta$ [σε W/mK όταν θ σε °C].

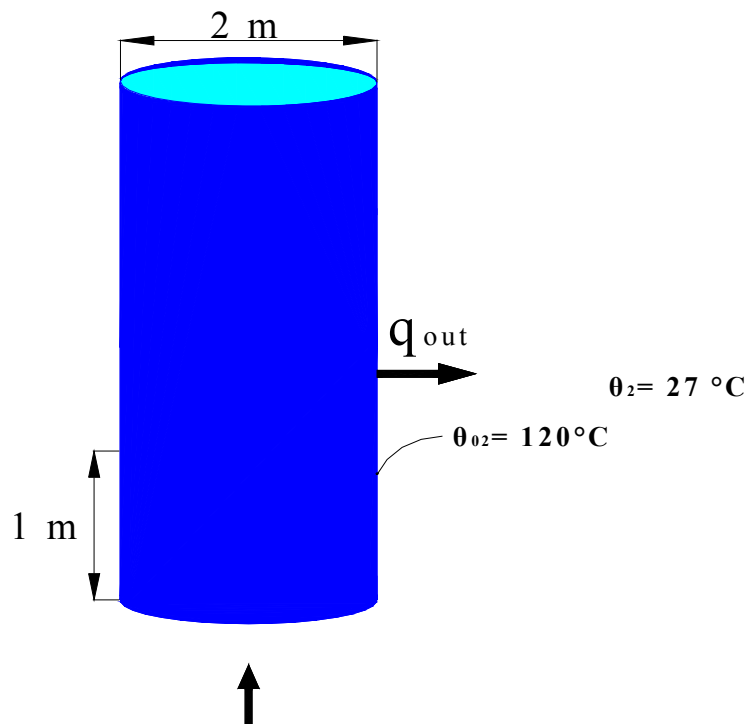
Θεωρώντας τα τοιχώματα ως επίπεδη επιφάνεια (περίπτωση A2), ζητείται να υπολογισθεί το ποσοστό μείωσης των θερμικών απωλειών από το μονωμένο τώρα τμήμα του ξηραντηρίου, με την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία των χαλυβδόφυλλων παραμένει η ίδια. Επίσης να βρεθεί η θερμοκρασία πάνω στην επιφάνεια της λαμαρίνας.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ – ΥΠΟΔΕΙΞΗ: να επιλυθεί με διαδοχικές δοκιμές θεωρώντας αρχικά μια τιμή του ολικού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας, γύρω στο 6W/m²K. Στη συνέχεια, για τους συντελεστές συναγωγής να γίνει χρήση κατάλληλων εμπειρικών σχέσεων, ενώ για τους συντελεστές ακτινοβολίας να θεωρηθεί ότι τα τοιχώματα του μηχανοστασίου έχουν την ίδια θερμοκρασία με του αέρα μέσα σ' αυτό.

Γ. Θεωρείστε ότι ο αέρας ξήρανσης θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου στο ξηραντήριο (περίπου 130°C), με τη βοήθεια αερολέβητα, με καυστήρα μαζούτ 3500 και εργάζεται με μέσο συνολικό βαθμό απόδοσης 80 %. Το κόστος προμήθειας του μαζούτ είναι 0,30 ευρώ /kg και η εγκατάσταση λειτουργεί 1200 ώρες το έτος.

Να υπολογισθεί η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της παραπάνω θερμομόνωσης του αρχικού τμήματος του ξηραντηρίου η οποία κοστίζει 18 ευρώ /m². Θεωρείστε (αποπληθωρισμένο) ετήσιο επιτόκιο 10 %

Λύση:



Είσοδος ξηραντηρίου

Σχήμα 1. Κατακόρυφο ξηραντήριο.

Ερώτημα Α:

Στο ερώτημα Α ζητούνται οι συνολικοί συντελεστές μεταβίβασης θερμότητας από τα τοιχώματα του ξηραντηρίου στον αέρα του εργοστασίου.

Ο συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θα βρεθεί από την εξίσωση:

$$\alpha_{\text{ολ.}} = \alpha_c + \alpha_r \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

$\alpha_{\text{ολ.}}$:	Συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας	$\text{W/m}^2\text{K}$
α_c :	Συντελ. συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια προς τον αέρα.	$\text{W/m}^2\text{K}$
α_r :	Συντελ. ακτινοβολίας από την γαλβ. λαμαρίνα προς το περιβάλλον.	$\text{W/m}^2\text{K}$

Διαδικασία εύρεσης συντελεστή συναγωγής :

Στη φυσική συναγωγή για να μπορέσουμε να βρούμε το συντελεστή συναγωγής θα πρέπει να ξέρουμε τις ιδιότητες του αέρα (κινηματικό ιξώδες, αριθμό Prandtl συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας) υπολογισμένους στη μέση θερμοκρασία στρώματος T_f . Η θερμοκρασία T_f είναι ίση με :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

T_f :	Μέση θερμοκρασία στρώματος	K
T_s :	Θερμοκρασία επιφάνειας ξηραντηρίου	$^\circ\text{C}$

T_{∞} : Θερμοκρασία χώρου $^{\circ}\text{C}$

Με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα, θα βρίσκουμε με γραμμική παρεμβολή το κινηματικό ιξώδες, τον αριθμό Prandtl και το συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, υπολογισμένους στη μέση θερμοκρασία στρώματος T_f .

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	μ (kg/m·s)	ν (m ² /s)	k (W/m·K)	Pr
Αέρας						
200	1,7684	1,0061	$1,3289 \cdot 10^{-5}$	$7,490 \cdot 10^{-6}$	0,01809	0,739
250	1,4128	1,0053	1,5990	11,310	0,02227	0,722
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,690	0,02624	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,680

Πίνακας 1 (SI). Τιμές ιδιοτήτων αερίων σε ατμοσφαιρική πίεση.
(Από το βιβλίο «Μεταφορά θερμότητας» Δεύτερη έκδοση. Των Donald Pitts, Leighton Sisson.)

Ο αριθμός Grashof θα δίνεται από την εξίσωση:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2} \approx \frac{\text{δυνάμεις άνωσης}}{\text{ιξώδεις δυνάμεις}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

Gr:	Αριθμός Grashof	
g:	Επιτάχυνση βαρύτητας	=9,81m/s ²
β :	Ο συντελεστής διαστολής όγκου	K ⁻¹
T_s :	Θερμοκρασία επιφάνειας του κυλίνδρου (χαλυβδόφυλλα)	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞} :	Θερμοκρασία αέρα μέσα στο μηχανοστάσιο	$^{\circ}\text{C}$
L:	Μήκος επιφάνειας	m
ν :	Κινηματικό ιξώδες	m ² /s

Ο συντελεστής διαστολής όγκου β ισούται με: $\beta = \frac{1}{T_f}$

Ο αριθμός Rayleigh θα δίνεται από την εξίσωση:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

Ra:	Αριθμός Rayleigh.
Gr:	Αριθμός Grashof
Pr:	Αριθμός Prandtl.

Ο αριθμός Nusselt για κάθετους κυλίνδρους:

Στην βιβλιογραφία ο υπολογισμός του αριθμού Nusselt για μεγάλους κάθετους κυλίνδρους όπου ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{D}{L} > \frac{35}{Gr^{1/4}} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

κατατάσσονται στις ίδιες σχέσεις με τις κατακόρυφες πλάκες. Έτσι ο αριθμός Nusselt για μια σταθερή θερμοκρασία της επιφάνειας δίνεται από την σχέση των Churchill και Chu οι οποίοι πρότειναν τον ακόλουθο συσχετισμό που ισχύει για όλη την περιοχή των αριθμών Rayleigh με ιδιότητες υπολογισμένες στην T_f .

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{k} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

- \overline{Nu} : Μέσος αριθμός Nusselt για κατακόρυφη πλάκα μήκους L
 α : Συντελεστής συναγωγής από την πλάκα στο περιβάλλον W/m^2K
 k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T_f W/mK
 Ra_L : Αριθμός Rayleigh για κατακόρυφη πλάκα μήκους L
 Pr : Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία στρώματος T_f

Ελαφρώς βελτιωμένη σε ακρίβεια είναι η παρακάτω σχέση που ισχύει για μια σταθερή θερμοκρασία T_s , για $Ra_L \leq 10^9$ και ιδιότητες υπολογισμένες στην T_f .

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{k} = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας θα δίνεται από την εξίσωση.

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

- α_r : Συντελ. ακτινοβολίας από το ξηραντήριο στο περιβάλλον. W/m^2K
 ε : Συντελ. ολικής εκπομπής επιφάνειας ξηραντηρίου.
 C_{μ} : Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος $= 5,67 W/m^2K^4$
 θ_{02} : Θερμοκρασία επιφάνειας κυλίνδρου (χαλυβδόφυλλα) $^{\circ}C$
 θ_2 : Θερμοκρασία μέσα στο μηχανοστάσιο $^{\circ}C$
 Θ_{02} : $= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$ K
 Θ_2 : $= \frac{\theta_2 + 273}{100}$ K

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} T_f = \frac{(T_s + T_{\infty})}{2} \\ T_s = 120^{\circ}C \\ T_{\infty} = 27^{\circ}C \end{array} \right\} T_f = \frac{120 + 27}{2} = 73,5^{\circ}C \quad \text{ή} \quad 346,5K \quad \Rightarrow \quad T_f = 346,5K$$

Από τον πίνακα 1 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0,6978 \\ k &= 0,02976 \text{ W/mK} \\ \nu &= 20,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \beta &= \frac{1}{346,5} = 0,0029 \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \text{Gr} &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2, \quad \beta = 0,0029 \text{ K}^{-1} \\ T_s &= 120^\circ \text{C}, \quad T_\infty = 27^\circ \text{C} \\ L &= 1 \text{ m}, \quad \nu = 20,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \text{Gr}_L = \frac{9,8 \cdot 0,0029 \cdot (120 - 27) \cdot 1^3}{(20,41 \cdot 10^{-6})^2} = 6,345 \cdot 10^9$$

$$\mathbf{Gr}_L = 6,345 \cdot 10^9$$

Ο αριθμός Rayleigh σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \text{Ra} &= \text{Gr} \cdot \text{Pr} \\ \text{Gr}_L &= 6,345 \cdot 10^9 \\ \text{Pr} &= 0,6978 \end{aligned} \right\} \text{Ra}_L = 6,345 \cdot 10^9 \cdot 0,6978 = 4,427 \cdot 10^9 \quad \mathbf{Ra}_L = 4,427 \cdot 10^9$$

Ο αριθμός Rayleigh είναι μεγαλύτερος του 10^9 . Γι' αυτό ο αριθμός Nusselt θα υπολογισθεί από την εξίσωση (6), δεδομένου ότι:

$$\frac{D}{L} = \frac{2}{1} = 2 \quad \text{και} \quad \frac{35}{\text{Gr}^{1/4}} = \frac{35}{(6,345 \cdot 10^9)^{0,25}} = 0,124$$

άρα ισχύει η εξίσωση (5).

$$\left. \begin{aligned} \overline{\text{Nu}}_L &= \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot \text{Ra}_L^{1/6}}{[1 + (0,492 / \text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ \text{Ra}_L &= 4,427 \cdot 10^9, \quad \text{Pr} = 0,6978 \end{aligned} \right\} \overline{\text{Nu}}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (4,427 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,492 / 0,6978)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$= 194,71$$

$$\mathbf{\overline{\text{Nu}}_L = 194,71}$$

Λύνοντας την εξίσωση (6) ως προς α και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{k}{L} \cdot \overline{Nu}_L \\ k = 0,02976 \text{ W/mK} \\ L = 1 \text{ m, } \overline{Nu}_L = 194,71 \end{array} \right\} \alpha = \frac{0,02976}{1} \cdot 194,71 = 5,795 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_c = 5,795 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας, σύμφωνα με την εξίσωση (8), προκύπτει ίσος με:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_r = \frac{\varepsilon \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2} \\ \varepsilon_{\text{χαλ.}} = 0,8, \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ \theta_{02} = 120^\circ\text{C}, \quad \theta_2 = 27^\circ\text{C} \\ \Theta_{02} = 3,93 \text{ K} \quad \Theta_2 = 3,00 \text{ K} \end{array} \right\} \alpha_r = \frac{0,8 \cdot 5,67 \cdot (3,93^4 - 3,00^4)}{120 - 27} = 7,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_r = 7,68 \text{ W/m}^2\text{K}$

Υποερώτημα Α1:

Οι θερμικές απώλειες από τον ξηραντήρα θεωρώντας τον κυλινδρικό, όπως και όντως είναι, δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{κυλ.}} = q_{\text{Iout}} \cdot l = (\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{χαλ.}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)) \cdot l \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

όπου:

θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^\circ\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας ξηραντήρα (χαλυβδόφυλλα)	$^\circ\text{C}$
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος χαλυβδόφυλλων	m
α_2 :	Συντελ. συναγωγής από τα χαλυβδόφυλλα στο περιβάλλον	$\text{W/m}^2\text{K}$
$\varepsilon_{\text{χαλ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής χαλυβδόφυλλων	
$C\mu$:	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	$= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100}$	K

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας στην εξίσωση (9):

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{κυλ.}} = q_{\text{Iout}} \cdot l = (\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{χαλ.}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)) \cdot l \\ \alpha_2 = 5,795 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad d_2 = 2,0 \text{ m}, \quad \theta_{02} = 120^\circ\text{C}, \quad \theta_2 = 27^\circ\text{C}, \\ \varepsilon_{\text{χαλ.}}^* = 0,8, \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \quad l = 1 \text{ m} \\ \Theta_{02} = \frac{120 + 273}{100} = 3,93 \text{ K} \quad \Theta_2 = \frac{27 + 273}{100} = 3,00 \text{ K} \end{array} \right\}$$

$$Q_{\text{κυλ.}} = (5,795 \cdot \pi \cdot 2,0 \cdot (120 - 27) + 0,8 \cdot \pi \cdot 2,0 \cdot 5,67 \cdot (3,93^4 - 3,0^4)) \cdot 1 = 7876 \text{ W}$$

$$Q_{\text{κυλ.}} = 7876 \text{ W}$$

*Ο συντελεστής ολικής εκπομπής του χαλυβδόφυλλου βρίσκεται από τον Πίνακα Α5 του παραρτήματος 2.

Υποερώτημα Α2:

Οι θερμικές απώλειες από τον ξηραντήρα, θεωρώντας τον κάθετη επιφάνεια, είναι ίσες με:

$$Q_{\text{καθ.}} = q \cdot F_2 = (\alpha_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{χαλ.}} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)) \cdot F_2 \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^{\circ}\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας ξηραντήρα (χαλυβδόφυλλα)	$^{\circ}\text{C}$
α_2 :	Συντελ. συναγωγής από τα χαλυβδόφυλλα στο περιβάλλον	$\text{W/m}^2\text{K}$
$\varepsilon_{\text{χαλ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής χαλυβδόφυλλων	
$C\mu$:	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	$= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100}$	K

Το εμβαδόν της επιφάνειας F_2 που θα είχε ο ξηραντήρας αν ήταν κάθετη επιφάνεια είναι ίσο με εμβαδόν της επιφάνειας του κυλίνδρου και δίνεται από την εξίσωση:

$$F_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας στην εξίσωση (11) και (10) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} F_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \\ r = 1 \text{ m}, l = 1 \text{ m} \end{array} \right\} F_2 = 2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1 = 6,283 \text{ m}^2 \quad \mathbf{F_2 = 6,283 m^2}$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{καθ.}} = q \cdot F_2 = (\alpha_2 \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{χαλ.}} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)) \cdot F_2 \\ \alpha_2 = 5,795 \text{ W/m}^2\text{K}, \theta_{02} = 120^{\circ}\text{C}, \theta_2 = 27^{\circ}\text{C}, \\ \varepsilon_{\text{χαλ.}} = 0,8, C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, F_2 = 6,283 \text{ m}^2, \\ \Theta_{02} = \frac{120 + 273}{100} = 3,93 \text{ K} \quad \Theta_2 = \frac{27 + 273}{100} = 3,00 \text{ K} \end{array} \right\}$$

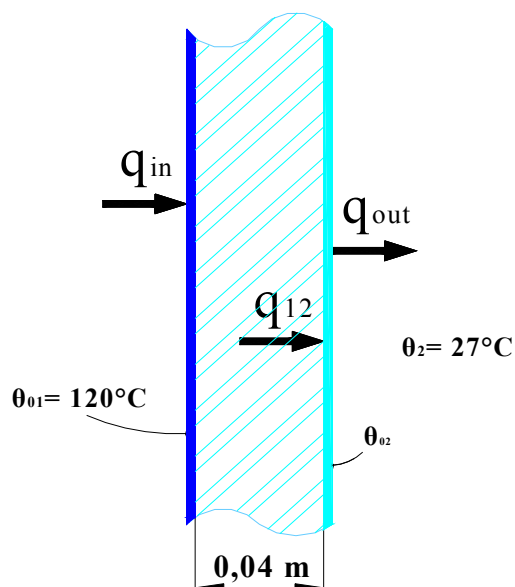
$$Q_{\text{καθ.}} = (5,795 \cdot (120 - 27) + 0,8 \cdot 5,67 \cdot (3,93^4 - 3,0^4)) \cdot 6,283 = 7876 \text{ W}$$

$$Q_{\text{καθ.}} = 7876 \text{ W}$$

Βλέπουμε ότι βρίσκουμε το ίδιο αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις είτε χρησιμοποιώντας τους τύπους για κυλινδρικές επιφάνειες είτε τους τύπους για κάθετες επιφάνειες. Αυτό συμβαίνει διότι ο συντελεστής συναγωγής υπολογίστηκε

από τις ίδιες σχέσεις, που ισχύουν προσεγγιστικά για κατακόρυφο επίπεδο τοίχωμα και μεγάλους κάθετους κυλίνδρους.

Ερώτημα Β:



Σχήμα 2. Τομή του ξηραντήρα με την προσθήκη μονωτικού υλικού και επικάλυψης από γαλβανισμένη λαμαρίνα

Στο Β ερώτημα ζητείται το ποσοστό μείωσης των θερμικών απωλειών εξαιτίας της προσθήκης της μόνωσης στο κυλινδρικό ξηραντήριο. Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε για να μπορέσουμε να βρούμε το ποσοστό μείωσης των θερμικών απωλειών είναι η παρακάτω:

Θα κάνουμε διαδοχικές δοκιμές δίνοντας μια τιμή στον ολικό συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας.

Η θερμοροή μεταξύ των χαλυβδόφυλλων και της γαλβανισμένης λαμαρίνας (αγωγή) για συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του ορυκτοβάμβακα μεταβαλλόμενο συναρτήσεται της θερμοκρασίας δίνονται από την σχέση:

$$q_{12} = \frac{\alpha}{\delta} \cdot (\theta_{01} - \theta_{02}) + \frac{\beta}{2\delta} (\theta_{01}^2 - \theta_{02}^2) \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

Η θερμοροή μεταξύ της γαλβανισμένης λαμαρίνας και του χώρου στο μηχανοστάσιο είναι ίση με:

$$q_{out} = \alpha_{ολ.} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) = \alpha_c \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{γαλ.} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

Όμως:

$$q_{12} = q_{out} \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

Με την βοήθεια αυτής της ισότητας μπορούμε να βρούμε την θ_{02} , δηλαδή την θερμοκρασία πάνω στην γαλβανισμένη λαμαρίνα. Έτσι:

$$\frac{\alpha}{\delta} \cdot (\theta_{01} - \theta_{02}) + \frac{\beta}{2\delta} (\theta_{01}^2 - \theta_{02}^2) = \alpha_{\text{ολ.}} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) \quad (\text{Εξίσωση 15})$$

Αντικαθιστώντας κάθε φορά στην εξίσωση (15) τα δεδομένα μας θα καταλήγουμε σε μια εξίσωση της μορφής:

$$\alpha \cdot \theta_{02}^2 + \beta \cdot \theta_{02} - \gamma = 0 \quad \alpha, \beta, \gamma \neq 0 \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

Η δευτεροβάθμια αυτή εξίσωση καταλήγει σε δύο λύσεις. Αποδεκτή είναι η λύση που είναι μέσα στις δυνατές θερμοκρασίες που μπορεί να έχει η γαλβανισμένη λαμαρίνα.

Μόλις βρούμε την θερμοκρασία που έχει η επιφάνεια της γαλβανισμένης λαμαρίνας μπορούμε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το ερώτημα Α να βρούμε τον συντελεστή συναγωγής και τον συντελεστή ακτινοβολίας.

Σωστό είναι το αποτέλεσμα που:

- α). Το $\alpha_{\text{ολ.}}$ που προκύπτει από το άθροισμα του συντελεστή συναγωγής και του συντελεστή ακτινοβολίας είναι ίσο με το $\alpha_{\text{ολ.}}$ που υποθέσαμε αρχικά και
- β). Το q_{12} που προκύπτει είναι ίσο με το q_{out} .

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορους συντελεστές συναγωγής είναι τα παρακάτω.

$\alpha_{\text{ολ.}}$ (W/m ² K) (θέτω)	θ_{02} (°C)	T_f (K)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	Pr	β (K ⁻¹)
6,00	47,62	310,31	16,74·10 ⁻⁶	0,02702	0,7103	0,00322
5,80	48,18	310,59	16,76	0,02704	0,7103	0,00322
5,787	48,22	310,61	16,77	0,02704	0,7103	0,00322

$\alpha_{\text{ολ.}}$ (W/m ² K) (θέτω)	Gr	Ra	\overline{Nu}_L	α_c (W/m ² K)	α_r (W/m ² K)	$\alpha_{\text{ολ.}}$ (W/m ² K)
6,00	2,322·10 ⁹	1,649·10 ⁹	143,44	3,876	1,872	5,748
5,8	2,379	1,690	144,53	3,908	1,878	5,786
5,787	2,381	1,691	144,56	3,909	1,878	5,787

$\alpha_{\text{ολ.}}$ (W/m ² K) (θέτω)	q_{out} (W/m ²)	q_{12} (W/m ²)	$ \Delta q $ (W/m ²)
6,00	118,53	123,74	5,21
5,80	122,54	122,83	0,29
5,77	122,80	122,76	0,04

Πίνακας 2. Αποτελέσματα της διαδικασίας εύρεσης του ολικού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας.

Το αποτέλεσμα για το οποίο επαληθεύονται οι δύο προηγούμενες απαιτήσεις είναι η περίπτωση που υποθέσαμε ότι $\alpha_{ολ.} = 5,787 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Υποθέτοντας $\alpha_{ολ.} = 5,787 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (15) υπολογίζουμε την θ_{02} :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\alpha}{\delta} \cdot (\theta_{01} - \theta_{02}) + \frac{\beta}{2\delta} (\theta_{01}^2 - \theta_{02}^2) &= \alpha_{ολ.} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) \\ \lambda &= 0,06 + 0,0001\theta \text{ (W/mK)}, \theta_2 = 27^\circ\text{C} \\ \theta_{01} &= 120^\circ\text{C}, \alpha_{ολ.} = 5,77 \text{ W/m}^2\text{K}, \delta = 0,04 \text{ m} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{0,06}{0,04} \cdot (120 - \theta_{02}) + \frac{0,0001}{2 \cdot 0,04} (120^2 - \theta_{02}^2) = 5,787 \cdot (\theta_{02} - 27)$$

$$1,5 \cdot (120 - \theta_{02}) + 0,00125\theta_{02}^2 = 5,787\theta_{02} - 156,25$$

$$180 - 1,5\theta_{02} + 18 - 0,00125\theta_{02}^2 = 5,787\theta_{02} - 156,25$$

$$0,00125\theta_{02}^2 + 7,287\theta_{02} - 354,25 = 0$$

$$\Delta = \beta^2 - 4 \cdot \alpha \cdot \gamma = 7,287^2 - 4 \cdot 0,00125 \cdot (-354,25) = 54,872$$

$$x_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\Delta}}{2 \cdot \alpha} \Rightarrow x_1 = \frac{-7,287 + \sqrt{54,872}}{2 \cdot 0,00125} \approx 48,22^\circ\text{C} \quad \text{Δεκτό } \theta_{02} = 48,22^\circ\text{C}$$

$$x_2 = \frac{-7,277 - \sqrt{54,872}}{2 \cdot 0,00125} = -5877,82^\circ\text{C} \quad \text{Απορρίπτεται}$$

Δεκτή είναι η λύση όπου προκύπτει $\theta_{02} = 48,22^\circ\text{C}$ διότι είναι στα λογικά όρια της άσκησης μας.

Η μέση θερμοκρασία στρώματος T_f σύμφωνα με την εξίσωση (2) είναι ίση με:

$$T_f = \frac{48,22 + 27}{2} + 273 = 310,61^\circ\text{C} \quad \mathbf{T_f = 310,61^\circ\text{C}}$$

Από τον πίνακα 1 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει:

$$\begin{aligned} Pr &= 0,7103 \\ k &= 0,02704 \quad \text{W/mK} \\ \nu &= 16,77 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \\ \beta &= 0,00322 \quad \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε το συντελεστή συναγωγής θεωρώντας το ξηραντήριο ως κάθετη επίπεδη επιφάνεια

Ο αριθμός Grashof σύμφωνα με την εξίσωση (3) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \text{Gr} &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2, \quad \beta = 0,00322 \text{ K}^{-1} \\ T_s &= 48,22^\circ \text{C}, \quad T_\infty = 27^\circ \text{C} \\ L &= 1 \text{ m}, \quad \nu = 16,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \text{Gr}_L = \frac{9,8 \cdot 0,00322 \cdot (48,22 - 27) \cdot 1^3}{(16,77 \cdot 10^{-6})^2} = 2,381 \cdot 10^9$$

$$\text{Gr}_L = 2,381 \cdot 10^9$$

Ο αριθμός Rayleigh σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \text{Ra}_L &= \text{Gr} \cdot \text{Pr} \\ \text{Gr}_L &= 2,381 \cdot 10^9 \\ \text{Pr} &= 0,7103 \end{aligned} \right\} \text{Ra}_L = 2,381 \cdot 10^9 \cdot 0,7103 = 1,691 \cdot 10^9 \quad \text{Ra}_L = 1,691 \cdot 10^9$$

Ο αριθμός Nusselt σύμφωνα με την εξίσωση (6) προκύπτει ίσος:

$$\left. \begin{aligned} \overline{\text{Nu}}_L &= \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot \text{Ra}_L^{1/6}}{[1 + (0,492/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ \text{Ra}_L &= 1,691 \cdot 10^9, \text{Pr} = 0,7103 \end{aligned} \right\} \overline{\text{Nu}}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (1,691 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,492/0,7103)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$= 144,56$$

$$\overline{\text{Nu}}_L = 144,56$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή συναγωγής:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{k}{L} \cdot \overline{\text{Nu}}_L \\ k &= 0,02704 \text{ W/mK} \\ L &= 1 \text{ m}, \quad \overline{\text{Nu}}_L = 144,56 \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{0,02704}{1} \cdot 144,56 = 3,909 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_c = 3,909 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας σύμφωνα με την εξίσωση (8) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_r &= \frac{\varepsilon \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2} \\ \varepsilon_{\lambda\mu} &= 0,276, \\ \theta_{02} &= 48,22^\circ \text{C}, \quad \theta_2 = 27^\circ \text{C} \\ C\mu &= 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ \Theta_{02} &= 3,212, \quad \Theta_2 = 3,00 \end{aligned} \right\} \alpha_r = \frac{0,276 \cdot 5,67 \cdot (3,212^4 - 3,00^4)}{48,22 - 27} = 1,878 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_r = 1,878 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο συνολικός συντελεστής συναγωγής σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι ίσος με:

$$\alpha_{ολ.} = 3,909 + 1,878 = 5,787 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_{ολ.} = 5,787 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο συνολικός συντελεστής συναγωγής που βρήκαμε από αυτή την διαδικασία είναι ίσος με αυτόν που υποθέσαμε αρχικά. Τώρα μένει να ελέγξουμε αν ισχύει και η σχέση:

$$q_{12} = q_{out}$$

Επομένως αντικαθιστούμε στην εξίσωση (12) και (13):

$$\left. \begin{aligned} q_{12} &= \frac{\alpha}{\delta} \cdot (\theta_{01} - \theta_{02}) + \frac{\beta}{2\delta} (\theta_{01}^2 - \theta_{02}^2) \\ \lambda &= 0,06 + 0,0001\theta, \quad \theta_{01} = 120^\circ \text{C}, \\ \theta_{02} &= 48,22^\circ \text{C}, \quad \delta = 0,004 \text{ m} \end{aligned} \right\}$$

$$q_{12} = \frac{0,06}{0,04} \cdot (120 - 48,22) + \frac{0,0001}{2 \cdot 0,04} (120^2 - 48,22^2) = 122,76 \text{ W/m}^2$$

$$q_{12} = 122,76 \text{ W/m}^2$$

$$\left. \begin{aligned} q_{out} &= \alpha_c \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{γαλ.} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\ \alpha_c &= 3,909 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \theta_{02} = 48,22^\circ \text{C}, \quad \theta_2 = 27^\circ \text{C}, \\ \varepsilon_{γαλ.} &= 0,276^* , \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \\ \Theta_{02} &= \frac{120 + 273}{100} = 3,2122 \text{ K} \quad \Theta_2 = \frac{27 + 273}{100} = 3,00 \text{ K} \end{aligned} \right\}$$

$$q_{out} = 3,909 \cdot (48,22 - 27) + 0,276 \cdot 5,67 \cdot (3,2122^4 - 3,00^4) = 122,80 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$q_{out} = 122,80 \text{ W/m}^2$$

* Ο συντελεστής ολικής εκπομ. βρίσκεται από τον Πίνακα Α5 του παραρτήματος 2.

Άρα η διαφορά μεταξύ τους είναι:

$$|\Delta q| = q_{12} - q_{out} \Rightarrow |\Delta q| = 122,76 - 122,80 = 0,04 \text{ W/m}^2 \Rightarrow |\Delta q| = 0,04 \text{ W/m}^2$$

Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή επομένως ο συνολικός συντελεστής συναγωγής που υποθέσαμε είναι ο ίδιος με αυτόν που προκύπτει.

Οι θερμικές απώλειες από το κομμάτι αυτό είναι ίσες με:

$$Q = q_{out} \cdot F_2$$

Το εμβαδόν της επιφάνειας του ξηραντηρίου σύμφωνα με την εξίσωση (11) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} F_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \\ r = 1 \text{ m}, l = 1 \text{ m} \end{array} \right\} F_2 = 2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1 = 6,283 \text{ m}^2 \quad \mathbf{F_2 = 6,283 m^2}$$

Επομένως:

$$\left. \begin{array}{l} Q = q_{\text{out}} \cdot F_2 \\ q_{\text{out}} = 122,80 \text{ W/m}^2 \\ F_2 = 6,283 \text{ m} \end{array} \right\} Q = 122,80 \cdot 6,283 = 772 \text{ W} \quad \mathbf{Q = 772 W}$$

Το ποσοστό μείωσης είναι ίσο με:

$$P\% = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} \cdot 100 = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} \cdot 100 \quad (\text{Εξίσωση 17})$$

όπου:

P%:	Το ποσοστό μείωσης των θερμικών απωλειών.	%
Q _A :	Οι θερμικές απώλειες χωρίς μονωτικό (Ερώτημα Α)	W
Q _B :	Οι θερμικές απώλειες με την προσθήκη μονωτικού (Ερώτημα Β)	W

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (17):

$$\left. \begin{array}{l} P\% = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} \\ Q_B = 772 \text{ W}, Q_A = 7876 \text{ W} \end{array} \right\} P\% = 1 - \frac{772}{7876} = 0,902 \text{ ή } 90,2\% \quad \mathbf{P\% = 90,2\%}$$

Έχουμε μια μείωση κατά 90,2 %.

Ερώτημα Γ:

Στο Γ ερώτημα ζητείται η Ε.Π.Α. Ο τύπος της έντοκης περιόδου αποπληρωμής είναι:

$$EPA = \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{AKE}{KEOO}\right]}{\ln(1+r)} \quad (\text{Εξίσωση 18})$$

όπου:

EPA:	Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής	years
r:	Αποπληθωρισμένο επιτόκιο	
AKE:	Αρχικό Κόστος Επένδυσης	€
KEOO:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/year

Το καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος θα βρεθεί αφού πρώτα προσδιοριστεί η εξοικονομούμενη θερμική ισχύς και ενέργεια.

$$\Delta Q = Q_A - Q_B. \quad (\text{Εξίσωση 19})$$

όπου:

ΔQ :	Μείωση απωλειών.	W
Q_A :	Οι θερμικές απώλειες χωρίς την μόνωση (Ερώτημα Α)	W
Q_B :	Οι θερμικές απώλειες με την μόνωση (Ερώτημα Β)	W

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (19):

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = Q_A - Q_B \\ Q_B = 772 \text{ W} \\ Q_A = 7876 \end{array} \right\} \Delta Q = 7876 - 772 = 7104 \text{ W} \quad \Delta Q = 7104 \text{ W}$$

Η ενέργεια που εξοικονομούμε είναι ίση με:

$$\Delta EE = \Delta Q \cdot h/\text{year} \quad (\text{Εξίσωση 20})$$

όπου:

ΔEE :	Εξοικονομούμενη ενέργεια	Wh/y
ΔQ :	Μείωση απωλειών.	W
h/year	Ωρες λειτουργίας το χρόνο	h/y

Η εγκατάσταση λειτουργεί 1200 ώρες το χρόνο.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (20) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta EE = \Delta Q \cdot h/\text{year} \\ \Delta Q = 7104 \text{ W} \\ h/\text{year} = 1200 \text{ h} \end{array} \right\} \Delta EE = 7104 \cdot 1200 = 8524800 \text{ Wh/y} = 8524,8 \text{ kWh/y}$$

$$\Delta EE = 8524,8 \cdot 859,84 = 7329964 \text{ kcal/y} \quad \Delta EE = 7329964 \text{ kcal/y}$$

Το εξοικονομούμενο καύσιμο θα βρίσκεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta G = \frac{\Delta E}{n \cdot \Theta_k} \quad (\text{Εξίσωση 21})$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	kg/y
ΔE :	Εξοικονόμηση ενέργειας	kcal/y
Θ_k :	Κατωτέρα θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kcal/kg
n:	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (21) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \\ \Delta EE = 7329964 \text{ kcal/y} \\ n = 80\% \quad \Theta_{\kappa} = 9800 \text{ kcal/kg} \end{array} \right\} \Delta G = \frac{7329964}{0,80 \cdot 9800} = 934,94 \text{ kg/y} \quad \Delta G = \mathbf{934,94 \text{ kg/y}}$$

Επειδή δεν έχουμε λειτουργικές δαπάνες το Κ.Ε.Ο.Ο είναι ίσο με Ε.Ο.Ο. και γι αυτό είναι ίσο με:

$$ΚΕΟΟ = \Delta G \cdot \tau_{\kappa} \quad (\text{Εξίσωση 22})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (22) προκύπτει:

$$ΚΕΟΟ = 934,94 \text{ kg/y} \cdot 0,30 \text{ €/kg} = 280,48 \text{ €} \quad \mathbf{ΚΕΟΟ = 280,48 \text{ €}}$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να βρούμε το Αρχικό Κόστος Επένδυσης, διότι είναι το μόνο στοιχείο που λείπει για να μπορέσουμε να βρούμε την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής:

Το Αρχικό Κόστος Επένδυσης είναι ίσο με:

$$Α.Κ.Ε. = \text{Εμβαδόν επιφάνειας} \cdot \text{Κόστος θερμομόνωσης ανά } m^2. \quad (\text{Εξίσωση 23})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (23) προκύπτει:

$$Α.Κ.Ε. = 6,283 \text{ m}^2 \cdot 18 \text{ €/m}^2 = 113,1 \text{ €} \quad \mathbf{Α.Κ.Ε = 113,1 \text{ €}}$$

Επομένως αντικαθιστούμε στην εξίσωση (18):

$$\left. \begin{array}{l} ΕΠΑ = \frac{-\ln[1 - r \cdot \frac{ΑΚΕ}{ΚΕΟΟ}]}{\ln(1+r)} \\ Κ.Ε.Ο.Ο. = 280,48 \text{ €} \\ ΑΚΕ = 113,1 \text{ €} \\ r = 10\%, \end{array} \right\} ΕΠΑ = \frac{-\ln[1 - 0,10 \cdot \frac{113,1}{280,48}]}{\ln(1 + 0,10)} = 0,432 \text{ y}$$

$$\mathbf{Ε.Π.Α. = 0,432 \text{ y.}}$$

Η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής προκύπτει ότι είναι ίση με 0,432 χρόνια δηλ. περίπου 5,2 μήνες.

Συμπέρασμα:

Ο συντελεστής συναγωγής από μια επιφάνεια στο περιβάλλον επηρεάζεται σημαντικά τόσο από την κατακόρυφη ή οριζόντια θέση όσο και από το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας.

Στην συγκεκριμένη άσκηση έχουμε ένα κυλινδρικό ξηραντήριο κατακόρυφα τοποθετημένο. Διερευνώντας την βιβλιογραφία πάνω σ' αυτή την περίπτωση διαπιστώνουμε ότι οι σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή συναγωγής από την

επιφάνεια του ξηραντηρίου στο περιβάλλον είναι ίδιες για κατακόρυφες πλάκες και μεγάλους κατακόρυφους κυλίνδρους.

Επειδή δεν αλλάζει ο συντελεστής συναγωγής και η επιφάνεια του κυλίνδρου είναι ίση με την κάθετη επιφάνεια οι θερμικές απώλειες που προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις είναι ίσες.

Θεωρώντας ότι η επιφάνεια του ξηραντηρίου είναι κάθετη προσθέτουμε μονωτικό υλικό με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Βλέπουμε ότι εξαιτίας της μόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία στην πάνω εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης και οι απώλειες σε σχέση με την αμόνωτη επιφάνεια μειώνονται κατά 90,2%.

Αξιολογώντας την μεγάλη μείωση των απωλειών και συνάμα την μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμου, συμπεραίνουμε ότι το Κ.Ε.Ο.Ο. είναι πολύ μεγάλο. Θεωρώντας ότι έχουμε ένα αποπληθωρισμένο επιτόκιο (r) ίσο με 10% η έντοκη περίοδος αποπληρωμής είναι ίση με 0,432 y , δηλαδή σε λιγότερο από μισό χρόνο έχουμε κερδίσει το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης.

4.ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Μελέτη 12^η

Βυθισμένος εναλλάκτης θερμότητας Επανάψυξης νερού – Βελτίωση του COP ψύκτη.

Σε ψυκτική εγκατάσταση ενός ξενοδοχείου, η θερμική ισχύς που πρέπει να παράγεται από τον συμπυκνωτή της έχει υπολογισθεί σε 250.000 kcal/h. Ως μέσο απαγωγή της θερμότητας θα χρησιμοποιηθεί νερό 35°C, που θα πρέπει να επαναψύχεται σε 30°C. Το νερό των 35°C θα διοχετεύεται και θα κυκλοφορεί μέσα σε σωλήνα Φ150/160 mm από πολυαιθυλένιο ($\lambda=0,42$ W/mK), ο οποίος θα βυθιστεί στη θάλασσα, που θεωρείται ότι έχει σταθερή θερμοκρασία 15°C. Έτσι ο σωλήνας δουλεύει ως εναλλάκτης μονορροής.

Δίδονται:

- Συντελεστής συναγωγής από το νερό στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα : 2000 W/m²K
- Συντελεστής συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα στο θαλασσινό νερό : 600 W/m²K
- Ειδική θερμότητα νερού: 4178 J/kgK

Ζητούνται:

A. Να υπολογισθεί ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη και η παροχή του νερού που ψύχεται.

B. Να υπολογισθεί το αναγκαίο μήκος L του σωλήνα που θα είναι βυθισμένο στη θάλασσα.

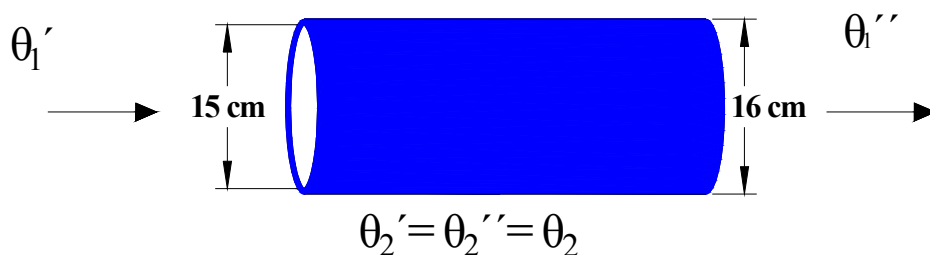
Γ. Από σχετική Βιβλιογραφία μπορούμε να βρούμε ότι η τιμή του συντελεστή συναγωγής στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα μεταβάλλεται με την ταχύτητα V του νερού (στο συγκεκριμένο σωλήνα) κατά τη σχέση: $\alpha = 3000 \cdot V^{0,8}$ (σε W/m²K όταν V σε m/s).

Ζητείται να χαραχθεί το διάγραμμα μεταβολής του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη σε συνάρτηση με την ταχύτητα του νερού στο σωλήνα (Τιμές από 0,5 έως 3 m/s - ανά 0,5).

Δ. Να αναζητηθεί (από συγκεκριμένο κατασκευαστικό Οίκο) ένα υδρόψυκτο ψυκτικό συγκρότημα, με ψυκτική ικανότητα τέτοια που να αντιστοιχεί στην παραπάνω (ονομαστική) ισχύ του συμπυκνωτή. Να καταγραφούν οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς (COP) σε συνάρτηση με τις θερμοκρασίες συμπύκνωσης.

Στη συνέχεια να διερευνηθεί το απαιτούμενο μήκος L του βυθισμένου σωλήνα, για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου / εξόδου του νερού συμπύκνωσης και η συσχέτιση του με τον επιτυγχανόμενο (COP) του ψυκτικού συγκροτήματος.

Λύση:



Σχήμα 1. Σωλήνας από πολυαιθυλένιο βυθισμένος μέσα σε θαλασσινό νερό.

$$Q_{\Sigma} = 250000 \text{ kcal/h} \Rightarrow Q_{\Sigma} = 250000 \text{ kcal/h} \cdot 1,163 = 290750 \text{ W.}$$

$$\theta_1' = 35^{\circ}\text{C.}$$

$$\theta_1'' = 30^{\circ}\text{C.}$$

$$\theta_2' = \theta_2'' = 15^{\circ}\text{C} = \theta_2.$$

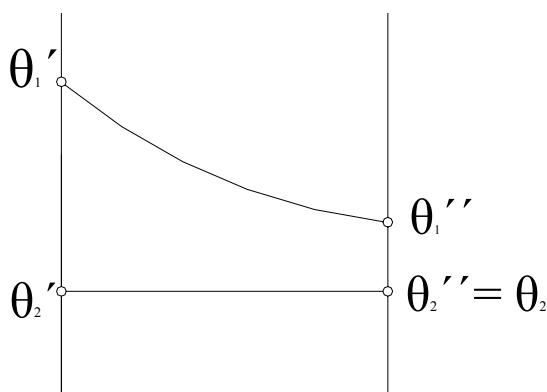
Φ150/160 Πολυαιθυλένιο.

$$\lambda = 0,42 \text{ W/mK}$$

$$\alpha_1 = 2000 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

$$\alpha_2 = 600 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

$$C_{\text{νερού}} = 4178 \text{ J/kgK}$$



Σχήμα 2. Μεταβολή της θερμοκρασίας των ρευστών σε εναλλάκτη μονορροής

Ερώτημα Α:

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη θα δοθεί από την σχέση:

$$K_0 = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

K_0 : Συνολικός συντελεστής μετάδοσης εναλλάκτη $\text{W/m}^2\text{K}$

K_R : Συντελεστής θερμοπερατότητας κυλινδρικού τοιχώματος W/mK

d_m : Μέση διάμετρος κυλινδρικού τοιχώματος m

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας κυλινδρικού τοιχώματος είναι ίσος με:

$$K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

K_R :	Συντελεστής θερμοπερατότητας κυλινδρικού τοιχώματος	W/mK
α_1 :	Συντελεστής συναγωγής στο εσωτερικό του σωλήνα	W/m ² K
α_2 :	Συντελεστής συναγωγής στο εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα	W/m ² K
d_1 :	Εσωτερική διάμετρος του σωλήνα	m
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα	m
λ :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πολυαιθυλενίου	W/mK

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα της άσκησης στην εξίσωση (2) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l}
 K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \\
 \alpha_1 = 2000 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad d_1 = 0,15 \text{ m} \\
 \alpha_2 = 600 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad d_2 = 0,16 \text{ m} \\
 \lambda = 0,42 \text{ W/mK}
 \end{array} \right\} K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{2000 \cdot 0,15} + \frac{1}{2 \cdot 0,42} \cdot \ln \frac{0,16}{0,15} + \frac{1}{600 \cdot 0,16}}$$

$$= 34,68 \text{ W/m}$$

$$K_R = 34,68 \text{ W/mK}$$

Ο σωλήνας μας είναι λεπτότοιχος διότι ισχύει η παρακάτω ανισότητα:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{16}{15} = 1,06 < 1,15$$

Επειδή ο σωλήνας είναι λεπτότοιχος η μέση διάμετρος του θα βρεθεί από την εξίσωση:

$$d_m = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l}
 d_m = \frac{d_1 + d_2}{2} \\
 d_1 = 15 \text{ cm}, \\
 d_2 = 16 \text{ cm}
 \end{array} \right\} d_m = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ cm} \quad \quad \quad d_m = 15,5 \text{ cm}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτει ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη:

$$\left. \begin{array}{l} K_0 = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \\ K_R = 34,68 \text{ W/mK} \\ d_m = 0,155 \text{ m} \end{array} \right\} K_0 = \frac{34,68}{\pi \cdot 0,155} = 71,22 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \mathbf{K_0 = 71,22 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Η παροχή του νερού που ψύχεται θα βρεθεί από την παρακάτω εξίσωση λύνοντας ως προς m_1 :

$$Q = m_1 \cdot c \cdot (\theta_1' - \theta_1'') \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

Q:	Θερμική ισχύς του συμπυκνωτή.	W
m_1 :	Παροχή νερού	kg/s
c:	Ειδική θερμότητα νερού	J/kgK
θ_1' :	Θερμοκρασία εισόδου του νερού	° C
θ_1'' :	Θερμοκρασία εξόδου του νερού	° C

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q = m_1 \cdot c \cdot (\theta_1' - \theta_1'') \\ Q = 290750 \text{ W}, \quad c = 4178 \text{ J/kgK} \\ \theta_1' = 35 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \theta_1'' = 30 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} 290750 = m_1 \cdot 4178 \cdot (35 - 30) \quad \Rightarrow$$

$$m_1 = \frac{290750}{20890} = 13,92 \text{ kg/s} \quad \mathbf{m_1=13,92 \text{ kg/s}}$$

Ερώτημα Β:

Το αναγκαίο μήκος L θα βρεθεί λύνοντας ως προς L την επόμενη σχέση:

$$F = \pi \cdot d_m \cdot L \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

F:	Η επιφάνεια του εναλλάκτη	m^2
d_m :	Η μέση διάμετρος του σωλήνα	m

Η επιφάνεια θα βρεθεί από την παρακάτω εξίσωση λύνοντας ως προς F:

$$Q = K_0 \cdot F \cdot \Delta\theta_m \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

Q= Q ₂ :	Θερμική ισχύς του συμπυκνωτή.	W
K ₀ :	Συνολικό συντελεστής μετάδοσης εναλλάκτη	W/m ² K
F:	Η επιφάνεια του εναλλάκτη	m ²
$\Delta\theta_m$:	Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά	° C

Θα πρέπει πρώτα να βρούμε την $\Delta\theta_m$.

Για εναλλάκτες μονορροής η $\Delta\theta_m$ ισούται με:

$$\Delta\theta_m = \frac{\theta_1' - \theta_1''}{\ln \frac{\theta_1' - \theta_2}{\theta_1'' - \theta_2}} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_m &= \frac{\theta_1' - \theta_1''}{\ln \frac{\theta_1' - \theta_2}{\theta_1'' - \theta_2}} \\ \theta_1' &= 35^\circ \text{C}, \quad \theta_1'' = 30^\circ \text{C}, \quad \theta_2 = 15^\circ \text{C} \end{aligned} \right\} \Delta\theta_m = \frac{35 - 30}{\ln \frac{35 - 15}{30 - 15}} = 17,38^\circ \text{C} \quad \Delta\theta_m = 17,38^\circ \text{C}$$

Λύνοντας την εξίσωση (6) ως προς F και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{Q}{K_0 \cdot \Delta\theta_m} \\ Q &= 290750 \text{ W}, \\ K_0 &= 71,22 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \Delta\theta_m &= 17,38^\circ \text{C} \end{aligned} \right\} F = \frac{290750}{71,22 \cdot 17,38} = 234,89 \text{ m}^2 \quad F = 234,89 \text{ m}^2$$

Στην συνέχεια λύνοντας την εξίσωση (5) ως προς L και αντικαθιστώντας προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{F}{\pi \cdot d_m} \\ F &= 234,89 \text{ m}^2, \quad d_m = 0,155 \text{ m} \end{aligned} \right\} L = \frac{234,89}{\pi \cdot 0,155} = 482,4 \text{ m} \quad L = 482,4 \text{ m}$$

Ερώτημα Γ:

Στο Γ ερώτημα ζητείται το διάγραμμα μεταβολής του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη σε συνάρτηση με την ταχύτητα στο εσωτερικό του σωλήνα αν αυτός μεταβάλλεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, και για τιμές της ταχύτητας από 0,5 έως 3 m/s - ανά 0,5.

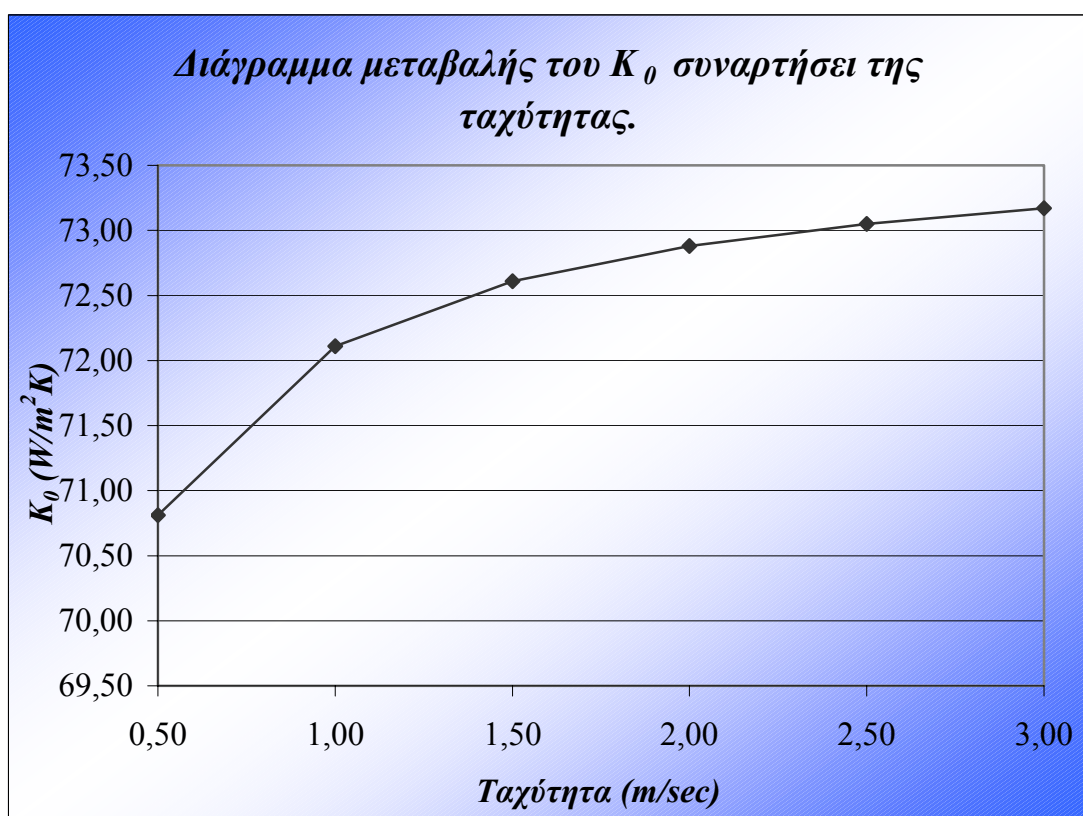
$$\alpha = 3000 \cdot V^{0,8} \quad (\text{σε W/m}^2\text{K όταν V σε m/s}). \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Για να κάνουμε το γράφημα θα δώσουμε στην ταχύτητα (V) τιμές από 0,5 έως 3 m/s - ανά 0,5 και θα βρίσκουμε τον αντίστοιχο συντελεστή συναγωγής α_1 . Θα αντικαθιστούμε τον συντελεστή συναγωγής στην εξίσωση 2 και έτσι θα βρίσκουμε κάθε φορά το K_R . Στη συνέχεια θα βρίσκουμε το K_0 κάθε φορά από την εξίσωση 1 για κάθε K_R που έχουμε βρει.

Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες και τα διαγράμματα.

V (m/s)	α (W/m ² K)	K _R (W/mK)	K ₀ (W/m ² K)
0,50	1723,05	34,48	70,81
1,00	3000,00	35,11	72,11
1,50	4149,49	35,36	72,61
2,00	5223,30	35,49	72,88
2,50	6244,15	35,57	73,05
3,00	7224,67	35,63	73,17

Πίνακας 1. Υπολογισμός του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη για διάφορες τιμές της ταχύτητας του νερού.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη σε συνάρτηση με την ταχύτητα του νερού στο σωλήνα.

Ερώτημα Δ:

Αναζητήσαμε στον κατασκευαστικό οίκο της Carrier έναν υδρόψυκτο ψύκτη νερού ο οποίος να έχει ψυκτική απόδοση $Q_{\Sigma} = 250000 \text{ kcal/h} \cdot 1,163 = 290750 \text{ W}$. Ο υδρόψυκτος ψύκτης που επιλέξαμε είναι ο **AQUASNAP 30RW/RWA**.



Υδρόψυκτος ψύκτης AQUASNAP 30RW/RWA.

Από τους διάφορους τύπους που κατασκευάζεται ο υδρόψυκτος αυτός ψύκτης εμείς επιλέξαμε ανάλογα με την ψυκτική απόδοση που θέλουμε τον 30RW275 ή 30RW300 σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

ΤΥΠΟΣ		30RW135	30RW150	30RW160	30RW185	30RW210	30RW245	30RW275	30RW300	
Ψυκτική απόδοση	kW	140,2	154	159,4	182,5	217,7	248,8	285,6	331,5	
Απορροφούμενη ισχύς	kW	33,99	37,37	38,34	44,23	46,5	54,44	61,93	69,89	
Παροχή νερού	l/h	24120	26280	37660	31320	37080	42480	48600	53280	
Ψυκτικό κύκλωμα		1			2					
Τύπος συμπιεστή		scroll/2			scroll/4					
Μανομετρικό αντλ. νερ. εξατμιστή	kPa	136	116	202	186	195	170	147	120	
Τύπος σύνδεσης		3" Victaulic								
Όγκος δοχείου διαστολής	L	25			35			50		
Παροχή νερού στο συμπυκνωτή	l/h	29880	32760	33840	38880	45720	52200	60120	65520	
Διαθέσιμη πίεση νερού	KPa	177	167		140	192	167	151	125	
Όγκος δοχείου διαστολής	L	25			35			50		
Διαστάσεις (ΥxΜxΠ)	mm	1750x2004x893			1950x2952x893					
Βάρος σε λειτουργία	kg	1052	1072	1004	1469	1697	1811	1897		
Ηλεκτρική παροχή	V-p-Hz	400V-3Ph-50Hz								

Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά του AQUASNAP 30RW/RWA.

Από τον παρακάτω πίνακα του κατασκευαστή βρίσκουμε για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου τον συντελεστή επίδοσης (COP) του υδρόψυκτου συστήματος.

30RW Θερμοκρασία εισόδου νερού στο συμπυκνωτή ° C									
Μέγεθος	LWT ° C	30		35		40		45	
		CAP	COMP	CAP	COMP	CAP	COMP	CAP	COMP
		kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
135	5	130	34,1	123	38,1	115	42,5	107	47,4
150		139	37,4	132	41,8	124	46,7	115	52
160		151	35,6	143	40	135	45	126	51
185		171	42,7	161	47,9	150	54	138	60
210		201	49,4	190	55	178	62	165	69
245		230	57	217	64	204	71	190	79
275		265	65	251	72	236	81	220	90
300		290	71	275	80	259	89	242	99
135	6	135	35,3	127	38,2	119	42,7	111	47,6
150		144	37,6	136	42	128	46,9	119	52
160		157	35,6	148	40	139	45,1	130	51
185		177	42,8	166	48	155	54	143	61
210		208	49,5	197	55	184	62	171	69
245		238	57	225	64	211	71	197	79
275		274	65	260	73	244	81	228	90
300		300	71	285	80	268	89	250	99
135	7	139	34,4	132	38,4	123	42,8	115	47,8
150		149	37,7	141	42,2	132	47	123	52
160		162	35,7	154	40,1	144	45,1	135	51
185		183	42,8	172	48,1	161	54	149	61
210		216	49,6	204	55	191	62	178	69
245		247	58	233	64	219	71	204	80
275		284	65	269	73	253	81	236	91
300		310	72	295	80	278	90	259	100

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά διάφορων τύπων του AQUASNAP 30RW/RWA

LWT: (Leaving water temperature ° C.) Θερμοκρασία εξόδου κρύου νερού.
 CAP (kW) : (Cooling capacity) Ψυκτική Ικανότητα
 COMP (kW): (Compressor power input) Ισχύς εισόδου συμπιεστή.

Για το ψυκτικό σύστημα αυτό η θερμοκρασιακή διαφορά του νερού στην είσοδο και έξοδο του συμπυκνωτή και εξατμιστή είναι 5 K.

Χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση μπορούμε να βρούμε το συντελεστή επίδοσης του ψυκτικού συστήματος.

$$\text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Για τον **30RW275**:

για $\theta_1' = 30^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 25^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 284 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 65 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{284}{65} = 4,36 \quad \Rightarrow \quad \text{COP} = \mathbf{4,36}$$

για $\theta_1' = 35^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 30^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 269 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 73 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{269}{73} = 3,68 \quad \Rightarrow \quad \text{COP} = \mathbf{3,68}$$

για $\theta_1' = 40^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 35^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 253 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 81 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{253}{81} = 3,12 \quad \Rightarrow \quad \text{COP} = \mathbf{3,12}$$

για $\theta_1' = 45^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 40^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 236 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 91 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{236}{91} = 2,59 \Rightarrow \text{COP} = \mathbf{2,59}$$

Για τον **30RW300**:

για $\theta_1' = 30^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 25^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 310 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 72 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{310}{72} = 4,30 \Rightarrow \text{COP} = \mathbf{4,30}$$

για $\theta_1' = 35^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 30^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 295 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 80 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{295}{80} = 3,68 \Rightarrow \text{COP} = \mathbf{3,68}$$

για $\theta_1' = 40^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 35^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 278 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 90 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{278}{90} = 3,08 \Rightarrow \text{COP} = \mathbf{3,08}$$

για $\theta_1' = 45^\circ\text{C}$ και $\theta_1'' = 40^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{COP} = \frac{\text{CAP}}{\text{COMP}} \\ \text{CAP} = 259 \text{ kW} \\ \text{COMP} = 100 \text{ kW} \end{array} \right\} \text{COP} = \frac{259}{100} = 2,59 \Rightarrow \text{COP} = \mathbf{2,59}$$

Οι πίνακες που προκύπτουν είναι οι παρακάτω.

θ_1' (°C)	COP
30	4,36
35	3,68
40	3,12
45	2,59

Πίνακας 4. Συγκεντρωτικός πίνακας του συντελεστή επίδοσης για τον **30RW275**, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στον συμπυκνωτή.

θ_1' (°C)	COP
30	4,30
35	3,68
40	3,08
45	2,59

Πίνακας 5. Συγκεντρωτικός πίνακας του συντελεστή επίδοσης για τον **30RW300**, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στον συμπυκνωτή.

Ξέροντας τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού και ότι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι ίσος με $71,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ μπορούμε να βρούμε το απαιτούμενο μήκος του σωλήνα ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

Μέσω της εξίσωσης (7) θα βρίσκουμε τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά ($\Delta\theta_m$) για κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια λύνοντας την εξίσωση (6) ως προς F θα βρίσκουμε την επιφάνεια του εναλλάκτη, και την εξίσωση (5) ως προς L θα βρίσκουμε σε κάθε περίπτωση το απαιτούμενο μήκος του εναλλάκτη. Η ισχύς του υδροψυκτου συστήματος για την εξίσωση (6) θα βρίσκεται από τον πίνακα 3.

Οι πίνακες που προκύπτουν είναι οι παρακάτω.

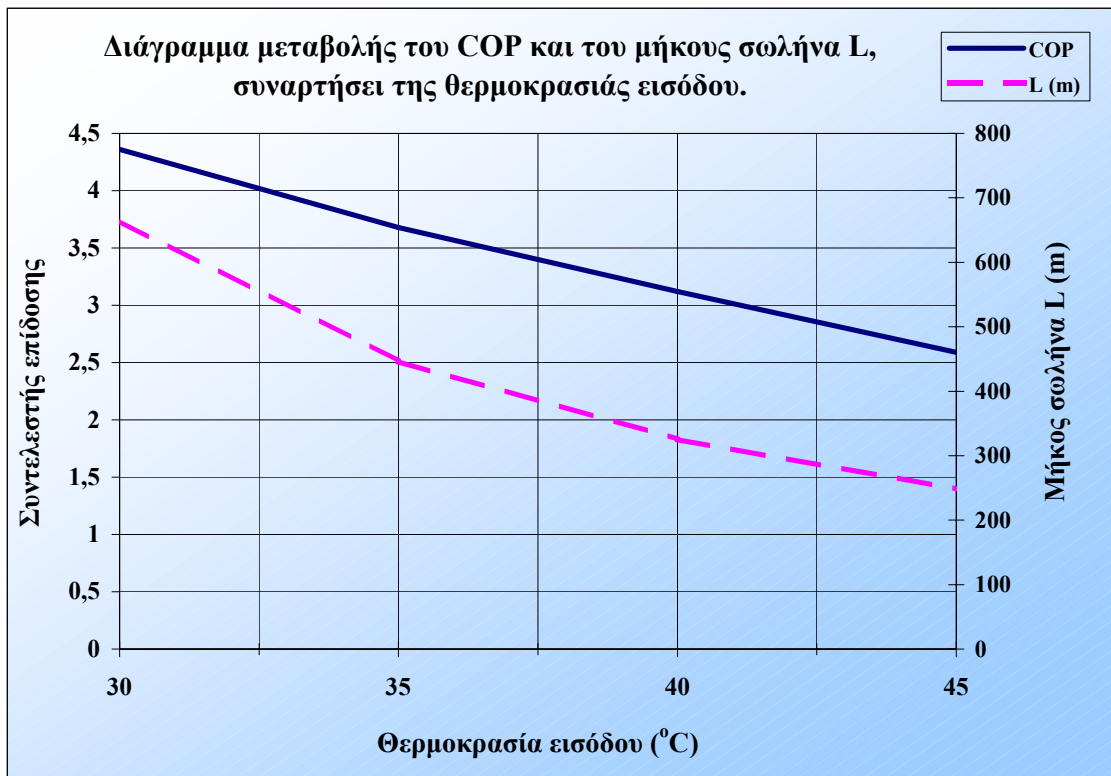
θ_1' (°C)	θ_1'' (°C)	θ_2 (°C)	K_0 (W/m ² K)	$\Delta\theta_m$ (°C)	Q (W)	F (m ²)	L (m)	COP
30	25	15	71,22	12,33	284.000	323,41	664,2	4,36
35	30	15	71,22	17,38	269.000	217,32	446,3	3,68
40	35	15	71,22	22,41	253.000	158,52	325,5	3,12
45	40	15	71,22	27,42	236.000	120,85	248,2	2,59

Πίνακας 6. Συγκεντρωτικός πίνακας του απαιτούμενου μήκους L με τον συντελεστή επίδοσης του συστήματος για τον **30RW275**.

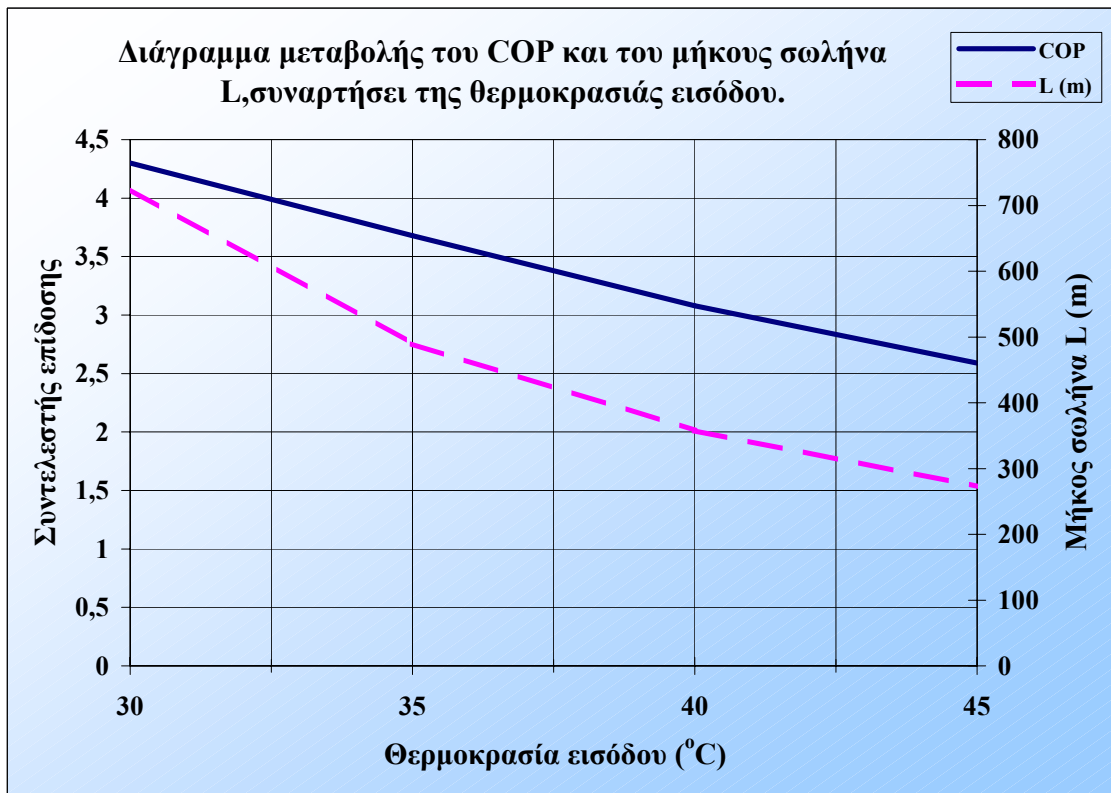
θ_1' (°C)	θ_1'' (°C)	θ_2 (°C)	K_0 (W/m ² K)	$\Delta\theta_m$ (°C)	Q (W)	F (m ²)	L (m)	COP
30	25	15	71,22	12,33	310.000	353,02	725,0	4,30
35	30	15	71,22	17,38	295.000	238,33	489,4	3,68
40	35	15	71,22	22,41	278.000	174,18	357,7	3,08
45	40	15	71,22	27,42	259.000	132,63	272,4	2,59

Πίνακας 7. Συγκεντρωτικός πίνακας του απαιτούμενου μήκους L με τον συντελεστή επίδοσης του συστήματος για τον **30RW300**.

Τα διαγράμματα που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω.



Διάγραμμα 2. Μεταβολή του COP του υδρόψυκτου συστήματος 30RW275 και του απαραίτητου μήκους του σωλήνα, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου.



Διάγραμμα 3. Μεταβολής του COP του υδρόψυκτου συστήματος 30RW300 και του απαραίτητου μήκους του σωλήνα, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου.

Συμπέρασμα:

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για ένα εναλλάκτη επηρεάζεται κυρίως από τους συντελεστές μεταβίβασης θερμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι οι εναλλάκτες συνήθως έχουν μεταλλικές επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας με μηδενική θερμική αντίσταση, και δικαιολογεί την παράλειψη τους από τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας του εναλλάκτη (K_o). Όταν μειωθεί ο συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας του εναλλάκτη μειώνεται και η αποδοτικότητα του. Αν ο εσωτερικός και ο εξωτερικός συντελεστής μεταβίβασης διαφέρουν δραματικά τότε βλέπουμε ότι ο K_o καθορίζεται από τον μικρότερο συντελεστή μεταβίβασης.

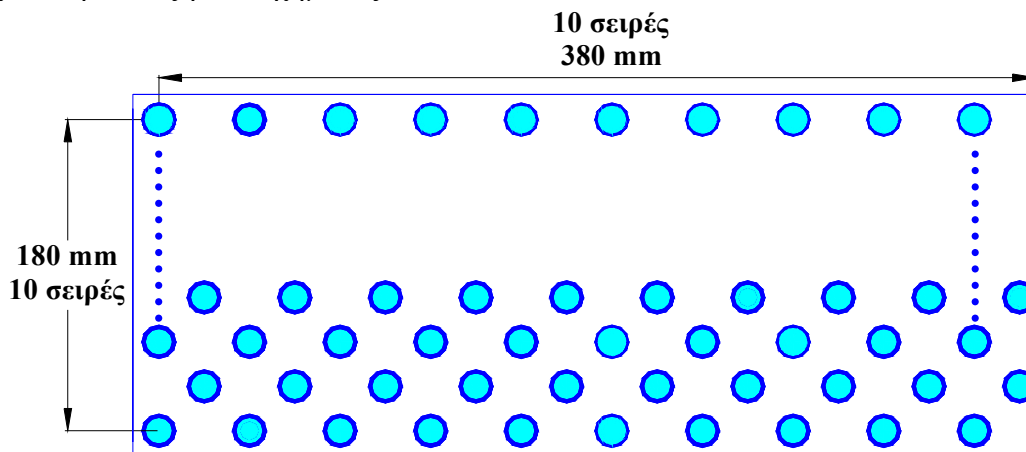
Στην μελέτη αυτή διερευνήσαμε τη συμβαίνει όταν μεταβάλεται η ταχύτητα στο εσωτερικό του σωλήνα. Στο διάγραμμα 1 βλέπουμε ότι όταν αυξάνεται η ταχύτητα του νερού μέσα στο σωλήνα αυξάνεται και ο συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας του εναλλάκτη. Μεγαλύτερος συντελεστής συναγωγής σημαίνει ότι έχουμε καλύτερες συνθήκες μεταβίβασης θερμότητας με συναγωγή.

Εξετάζοντας πως επηρεάζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς του υδρόψυκτου συστήματος, συμπεραίνουμε ότι αλλάζοντας την θερμοκρασία συμπύκνωσης αλλάζει και ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος. Συγκεκριμένα βλέποντας τα διαγράμματα 2 και 3 καταλαβαίνουμε ότι αυξάνοντας την θερμοκρασία συμπύκνωσης μειώνεται ο συντελεστής συμπεριφοράς του συγκροτήματος. Για να μπορέσει να γίνει η συμπύκνωση θα πρέπει η θερμοκρασία συμπύκνωσης να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του μέσου που θα γίνει η απόρριψη θερμότητας. Λογικό είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία συμπύκνωσης τόσο δυσκολότερα θα μπορέσουμε να την αποβάλουμε στο περιβάλλον, δηλ. θα προκύψει μικρότερος COP.

Ακόμα από τα διαγράμματα 2 και 3 βλέπουμε πως μεταβάλλεται το μήκος του απαιτούμενου σωλήνα σε συνάρτηση με τον συντελεστή συμπεριφοράς του συγκροτήματος. Έτσι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία συμπύκνωσης μειώνεται το απαιτούμενο μήκος του εναλλάκτη και ελαττώνεται ο συντελεστής συμπεριφοράς δηλαδή καθώς ελαττώνεται ο COP ελαττώνεται και το απαιτούμενο μήκος του σωλήνα.

Μελέτη 13^η.
Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων – Υπολογισμός του συνολικού
συντελ. μετάδοσης θερμότητας

Με σκοπό την ανάκτηση θερμότητας των καυσαερίων ενός λέβητα, πρόκειται να κατασκευασθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας, αποτελούμενος από συστοιχία 100 χαλκοσωλήνων εξωτερικής διαμέτρου 18mm και πάχους 1mm. Μέσα στους σωλήνες θα κυκλοφορεί νερό υπό πίεση, που θα θερμαίνεται από 35°C σε 85°C από τα καυσαέρια τα οποία θα εισέρχονται με θερμοκρασία 210°C και θα εξέρχονται με θερμοκρασία 100°C, περιρρέοντας τους χαλκοσωλήνες σε διάταξη απλής σταυρορροής. Η παροχή του προς θέρμανση νερού είναι 1kg/s, ενώ οι σωλήνες θα έχουν τη διάταξη του σχήματος.



Ζητούνται:

A. Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη. (Η ακτινοβολία αμελείται).

B. Η απαιτούμενη παροχή καυσαερίων και το απαιτούμενο μήκος των χαλκοσωλήνων (αγνοώντας τις απώλειες από το κέλυφος του εναλλάκτη).

Γ. Για να μην υπάρχει κίνδυνος συμπύκνωσης διαβρωτικών αερίων που περιέχονται στα καυσαέρια, πρέπει η θερμοκρασία στην έξοδο τους να μην πέσει κάτω από 100°C.

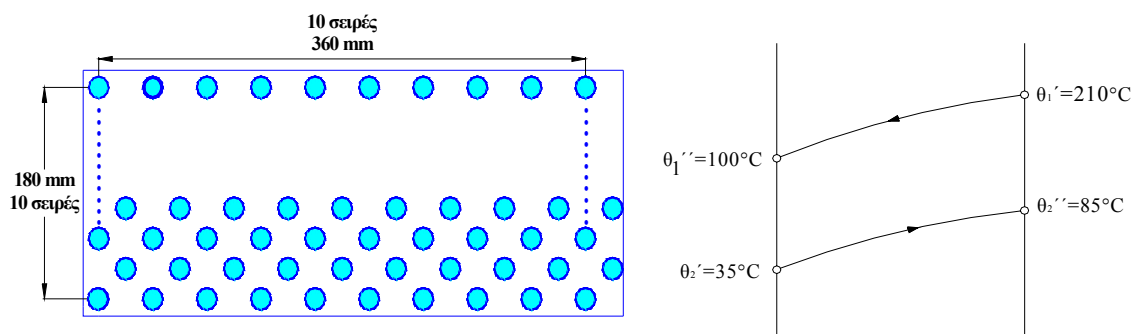
Σε κάποια φάση λειτουργίας, η (ίδια) παροχή των καυσαερίων που περιέχονται στα καυσαέρια, εισέρχεται στον εναλλάκτη με θερμοκρασία 190°C και το νερό με 35°C. Υπολογίστε πόση πρέπει να είναι τώρα η παροχή του νερού ώστε να μην πέσει η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων κάτω από 100°C.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Να γίνει παραδοχή αμετάβλητου συνολικού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας αλλά μετά να διερευνηθεί η πραγματική κατάσταση που θα δημιουργηθεί.

Δ. Να γίνει ένα διάγραμμα μεταβολής/ρύθμισης της παροχής του προς θέρμανση νερού ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος συμπύκνωσης διαβρωτικών αερίων, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων (Τιμές από 220°C έως 180°C – ανά 10°C).

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Όπως προηγουμένως.

Λύση:



Σχήμα 1. Διάταξη σωλήνων απλής σταυρορροής, και διάγραμμα μεταβολής στις θερμοκρασίες των ρευστών στον εναλλάκτη.

Ερώτημα A, B:

Στο A ερώτημα ζητείται ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη K_o ο οποίος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$K_o = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

K_o :	Συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας εναλλάκτη	$\text{W/m}^2\text{K}$
K_R :	Συντελεστής θερμοπερατότητας σωλήνων εναλλάκτη	W/mK
d_m :	Μέση διάμετρος σωλήνα	m

Η μέση διάμετρος σωλήνα δίνεται από την εξίσωση:

$$d_m = \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Στην περίπτωση όπου $d_2/d_1 < 1,15$ η μέση διάμετρος σωλήνα δίνεται από την εξίσωση

$$d_m = \frac{d_2 + d_1}{2} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

d_m :	Μέση διάμετρος σωλήνα	m
d_1 :	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος σωλήνα	m

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη είναι ίσος με:

$$K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{a_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_\sigma \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{a_2 d_2}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

a_1 :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σωλήνα	$\text{W/m}^2\text{K}$
a_2 :	Συντελεστής συναγωγής από το σωλήνα στο καυσαέριο	$\text{W/m}^2\text{K}$

d_1 :	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d_2 :	Εξωτερική διάμετρος σωλήνα	m
λ_{σ} :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σωλήνα	W/mK

Για να μπορέσουμε να βρούμε τον συντελεστή θερμοπερατότητας του εναλλάκτη πρέπει πρώτα να βρούμε τον εσωτερικό και εξωτερικό συντελεστή συναγωγής

Διαδικασία εύρεσης εσωτερικού συντελεστή συναγωγής (Internal Flow)



Σχήμα 2. Στρωτό υδροδυναμικό οριακό στρώμα στην περιοχή ανάπτυξης του μέσα σε κυκλικό αγωγό

Εξαναγκασμένη συναγωγή. Τυρβώδης ροή.

Μια εύχρηστη εξίσωση που μπορεί να μας δώσει τον αριθμό Nusselt και στην συνέχεια το συντελεστή συναγωγής για τυρβώδη ροή μέσα σε κυκλικό αγωγό είναι η εξίσωση Dittus – Boelter:

$$Nu_D = \frac{\alpha \cdot D}{k} = (0,023) \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

Nu_D :	Αριθμός Nusselt για σωλήνα διαμέτρου D	
α :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σωλήνα	W/m ² K
D :	Διάμετρος σωλήνα	m
k :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμα. T_b	W/mK
Re_D :	Αριθμός Reynolds για σωλήνα διαμέτρου D	
Pr :	Αριθμός Prandtl	
n :	Σταθερά	

Η σταθερά n είναι ίση με:

$$n = \begin{cases} 0,4 & \text{για θερμαινόμενο ρευστό} \\ 0,3 & \text{για ψυχόμενο ρευστό} \end{cases}$$

Η εξίσωση (5) χρησιμοποιείται για ιδιότητες υπολογισμένες στη μέση (bulk) θερμοκρασία T_b και ισχύει για $0,7 \leq Pr \leq 120$, $10\,000 < Re_D < 120\,000$ $L/D > 60$.

Όλες οι ιδιότητες του ρευστού βρίσκονται ως προς την μέση θερμοκρασία \bar{T}_b του νερού.

Η μέση θερμοκρασία (bulk) T_b δίνεται από την εξίσωση:

$$\overline{T}_b = \frac{T_{bin} + T_{bout}}{2} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

- \overline{T}_b : Μέση θερμοκρασία του ρευστού °C
 T_{bin} : Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού °C
 T_{bout} : Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού °C

Μπορούμε μέσω του παρακάτω πίνακα και κάνοντας γραμμική παρεμβολή στις κατάλληλες θερμοκρασίες να υπολογίσουμε τις ιδιότητες που αφορούν το ρευστό (νερό) μέσα στο σωλήνα (Pr,ν,κ).

t (°C)	ρ (kg/m ³)	c _p (J/kgK)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	Pr	β (K ⁻¹)
Water H ₂ O						
20	1000,52	4,1818 · 10 ³	1,006 · 10 ⁻⁶	0,597	7,02	0,18 · 10 ⁻³
40	994,59	4,1784	0,658	0,628	4,34	
60	985,46	4,1843	0,478	0,651	3,02	
80	974,08	4,1964	0,364	0,668	2,22	
100	960,63	4,2161	0,294	0,680	1,74	
120	945,25	4,250	0,247	0,685	1,446	
140	928,27	4,283	0,214	0,684	1,241	

Πίνακας 1 (SI). Τιμές ιδιοτήτων κορεσμένου νερού.

(Από το βιβλίο «Μεταφορά θερμότητας» Δεύτερη έκδοση. Των Donald Pitts, Leighton Sisson

Εξαναγκασμένη συναγωγή. Στρωτή ροή.

Οι συσχετίσεις συναγωγής για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος στην περίπτωση στρωτής ροής εξαρτώνται και αυτές από το αν η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη ή όχι.

Για πλήρως ανεπτυγμένες κατανομές ταχύτητας και θερμοκρασίας ο αριθμός Nusselt είναι ίσος με:

$$Nu_D = 3,66 \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Ο αριθμός που θα καθορίσει αν έχουμε στρωτή ή τυρβώδη ροή είναι ο αριθμός Reynolds.

Η εξίσωση που θα μας δώσει τον αριθμό Reynolds είναι:

$$Re_D = V_\infty \cdot \frac{D}{\nu} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

- Re_D : Ο αριθμός Reynolds στο εσωτερικό του σωλήνα διαμέτρου D
 V_∞ : Η ταχύτητα του ρευστού (νερό) m/s
 D : Η εσωτερική διάμετρος σωλήνα m
 ν : Κινηματικό ιξώδες m²/s

Για να μπορέσουμε να βρούμε τον αριθμό Reynolds θα πρέπει πρώτα να βρούμε την ταχύτητα του ρευστού. Έτσι:

$$Q_{\sigma\omega\lambda} = \frac{m_{\sigma\omega\lambda}}{\rho} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

όπου:

$Q_{\sigma\omega\lambda}$:	Παροχή όγκου του νερού για έναν σωλήνα του εναλλάκτη	m^3/s
$m_{\sigma\omega\lambda}$:	Παροχή μάζας για ένα σωλήνα του εναλλάκτη	kg/s
ρ :	Πυκνότητα του νερού στην δεδομένη θερμοκρασία	kg/m^3

Η παροχή μάζας του σωλήνα είναι:

$$m_{\sigma\omega\lambda} = \frac{m_2}{A} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

$m_{\sigma\omega\lambda}$:	Παροχή νερού για έναν σωλήνα του εναλλάκτη	kg/s
m_2 :	Παροχή για όλους τους σωλήνες του εναλλάκτη	kg/s
A :	Ο αριθμός των σωλήνων	

Η πυκνότητα του νερού θα βρεθεί από τον πίνακα 1 με γραμμική παρεμβολή στις κατάλληλες θερμοκρασίες.

Η ταχύτητα του νερού θα βρεθεί από την χρήση της σχέσης λύνοντας ως προς την ταχύτητα V_{∞} :

$$Q = V_{\infty} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

$Q_{\sigma\omega\lambda}$:	Παροχή όγκου του νερού για έναν σωλήνα του εναλλάκτη	m^3/s
V_{∞} :	Ταχύτητα του νερού	kg/s
ρ :	Πυκνότητα του νερού στην δεδομένη θερμοκρασία	kg/m^3

Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες σχέσεις βρίσκουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει η μέση θερμοκρασία (bulk) T_b .

$$\left. \begin{array}{l} \overline{T}_b = \frac{T_{\text{bin}} + T_{\text{bout}}}{2} \\ T_{\text{bin}} = 35^\circ\text{C}, \quad T_{\text{bout}} = 85^\circ\text{C} \end{array} \right\} \overline{T}_b = \frac{35 + 85}{2} = 60^\circ\text{C} \quad \overline{T}_b = 60^\circ\text{C}$$

Οι ιδιότητες του νερού σ' αυτή την θερμοκρασία όπως προκύπτουν από τον πίνακα 1 είναι.

$$\begin{aligned} Pr &= 3,02 \\ k &= 0,6510 \text{ W/mK} \\ \nu &= 0,478 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \rho &= 985,46 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Από την εξίσωση (10) προκύπτει η παροχή μάζας του νερού για κάθε σωλήνα.

$$\left. \begin{array}{l} m_{\sigma\omega\lambda} = \frac{m_2}{100} \\ m_2 = 1 \text{ kg/s} \end{array} \right\} m_{\sigma\omega\lambda} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ kg/s} \quad \mathbf{m_{\sigma\omega\lambda} = 0,01 \text{ kg/s}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (9) προκύπτει η παροχή του νερού για κάθε σωλήνα.

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\sigma\omega\lambda} = \frac{m_{\sigma\omega\lambda}}{\rho} \\ m_{\sigma\omega\lambda} = 0,01 \text{ kg/s} \\ \rho = 985,46 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right\} Q_{\sigma\omega\lambda} = \frac{0,01}{985,46} = 0,00001015 \text{ m}^3/\text{s} \quad \mathbf{Q_{\sigma\omega\lambda} = 0,00001015 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Λύνοντας ως προς την ταχύτητα V_{∞} την εξίσωση (11) και αντικαθιστώντας προκύπτει η ταχύτητα του νερού:

$$\left. \begin{array}{l} V_{\infty} = \frac{4 \cdot Q_{\sigma\omega\lambda}}{\pi \cdot D^2} \\ Q_{\sigma\omega\lambda} = 0,00001015 \text{ m}^3/\text{s} \\ D = 0,016 \text{ m} \end{array} \right\} V_{\infty} = \frac{4 \cdot 0,00001015}{\pi \cdot 0,016^2} = 0,050 \text{ m/s} \quad \mathbf{V_{\infty} = 0,050 \text{ m/s}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8) βρίσκουμε τον αριθμό Reynolds.

$$\left. \begin{array}{l} Re_D = V_{\infty} \cdot \frac{D}{\nu} \\ V_{\infty} = 0,050 \text{ m/s} \\ D = 0,016 \text{ m} \\ \nu = 0,478 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} Re_D = 0,050 \cdot \frac{0,016}{0,478 \cdot 10^{-6}} = 1674 \quad \mathbf{Re_D = 1674}$$

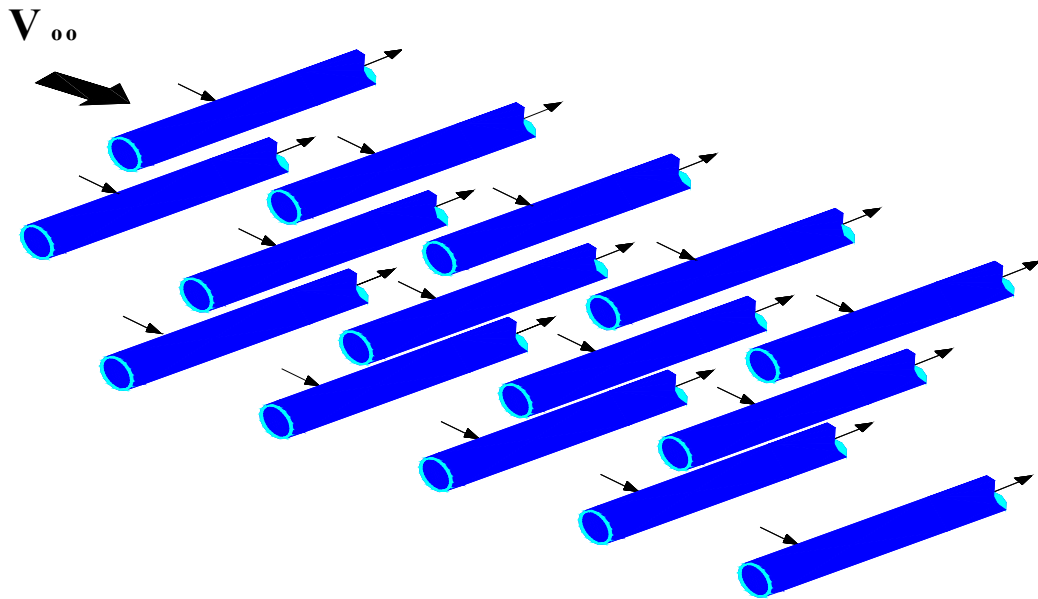
Από τα αποτελέσματα του αριθμού Reynolds βλέπουμε ότι η ροή είναι στρωτή. Έτσι ο αριθμός Nusselt σύμφωνα με την εξίσωση (7) είναι ίσος με.

$$\mathbf{Nu_D = 3,66}$$

Λύνοντας ως προς τον εσωτερικό συντελεστή συναγωγής βρίσκουμε:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{k}{D} \cdot Nu_D \\ D = 0,016, \quad Nu_D = 3,66 \\ k = 0,6510 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \alpha = \frac{0,6510}{0,016} \cdot 3,66 = 148,92 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \mathbf{\alpha_{εσ.} = 148,92 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Διαδικασία εύρεσης εξωτερικού συντελεστή συναγωγής (External flow).



Σχήμα 4. Εξωτερική ροή σε αγωγό.

Ο εξωτερικός συντελεστής συναγωγής θα βρεθεί με την διαδικασία δοκιμών. Θα ακολουθήσουμε την διαδικασία των δοκιμών διότι είναι άγνωστο το μήκος του εναλλάκτη πράγμα που επηρεάζει την ταχύτητα των καυσαερίων άρα και το συνολικό συντελεστή συναγωγής.

Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε είναι η παρακάτω:

Αρχικά πρέπει να βρούμε την παροχή μάζας του καυσαερίου. Η παρακάτω σχέση θα μας δώσει την παροχή μάζας.

$$Q = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_1' - \theta_1'') = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_2'' - \theta_2') \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

όπου:

Q:	Η συνολικά συναλλασσόμενη θερμική ισχύς	W
\dot{m}_1 :	Συνολική παροχή μάζας καυσαερίων	kg/s
\dot{m}_2 :	Συνολική παροχή μάζας νερού	kg/s
c_1 :	Ειδική θερμότητα καυσαερίων	J/kgK
c_2 :	Ειδική θερμότητα νερού	J/kgK
θ_1' :	Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων	°C
θ_1'' :	Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	°C
θ_2' :	Θερμοκρασία εισόδου νερού	°C
θ_2'' :	Θερμοκρασία εξόδου νερού	°C

Η ειδική θερμότητα των καυσαερίων και του νερού για τις συγκεκριμένες θερμοκρασίες, με γραμμική παραμβολή στον πίνακα 1 και 2, είναι ίσες με:

$$C_2 = C_{\text{πνερού}}(\text{στους } 60^\circ\text{C}) = 4184,3 \text{ J/kgK}$$

$$C_1 = C_{\text{ρκανσ.}}(\text{στους } \frac{210+100}{2} = 155^\circ\text{C} = 428 \text{ K}) = 1017,8 \text{ J/kgK}$$

Λύνοντας ως προς m_1 την εξίσωση (12) και αντικαθιστώντας προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα .

$$\left. \begin{aligned} Q &= m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta'_1 - \theta''_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta'_2 - \theta''_2) \\ c_1 &= 1017,8 \text{ J/kgK}, \quad c_2 = 4184,3 \text{ J/kgK} \\ \theta'_2 &= 35^\circ\text{C}, \quad \theta''_2 = 85^\circ\text{C} \\ \theta'_1 &= 210^\circ\text{C}, \quad \theta''_1 = 100^\circ\text{C} \\ \dot{m}_2 &= 1 \text{ kg/s} \end{aligned} \right\} Q = m_1 \cdot 1017,8 \cdot (210 - 100) = 1 \cdot 4184,3 \cdot (85 - 35) \quad \mathbf{m_1 = 1,87 \text{ kg/s}}$$

Από τον παρακάτω πίνακα μπορούμε να βρούμε τις ιδιότητες των καυσαερίων.

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	μ (kg/m·s)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	Pr
Αέρας						
400	0,8826	1,0140·10 ³	2,286·10 ⁻⁵	25,90·10 ⁻⁶	0,03365	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,27	0,04360	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,682
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,684

Πίνακας 2 (SI). Τιμές ιδιοτήτων αερίων σε ατμοσφαιρική πίεση.

(Από το βιβλίο «Μεταφορά θερμότητας» Δεύτερη έκδοση. Των Donald Pitts, Leighton Sisson.)

Η πυκνότητα του αέρα για την μέση θερμοκρασία των καυσαερίων δηλαδή 155°C ή 428 K είναι $\rho_{\kappa} = \mathbf{0,8270 \text{ kg/m}^3}$.

Η παροχή των καυσαερίων προκύπτει ίση με:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{καυσ.}} &= \frac{m_1}{\rho} \\ m_1 &= 1,87 \text{ kg/s} \\ \rho &= 0,8270 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \right\} Q_{\text{καυσ.}} = \frac{1,87}{0,8270} = 2,261 \text{ m}^3/\text{s} \quad \mathbf{Q_{\text{καυσ.}} = 2,261 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Στη συνέχεια θα υποθέτουμε ένα μήκος L και με την χρήση της παρακάτω σχέσης θα βρίσκουμε την ταχύτητα των καυσαερίων.

$$V_{\text{καυσ.}} = \frac{Q}{x \cdot L} \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

όπου:

$V_{\text{καυσ.}}$:	Ταχύτητα καυσαερίων	m/s
Q :	Παροχή καυσαερίων	m ³ /s
x :	Πλάτος εναλλάκτη	m
L :	Μήκος εναλλάκτη	m

Ο αριθμός Reynolds δίνεται από την εξίσωση:

$$Re_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max}} \cdot D}{\nu} \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

όπου:

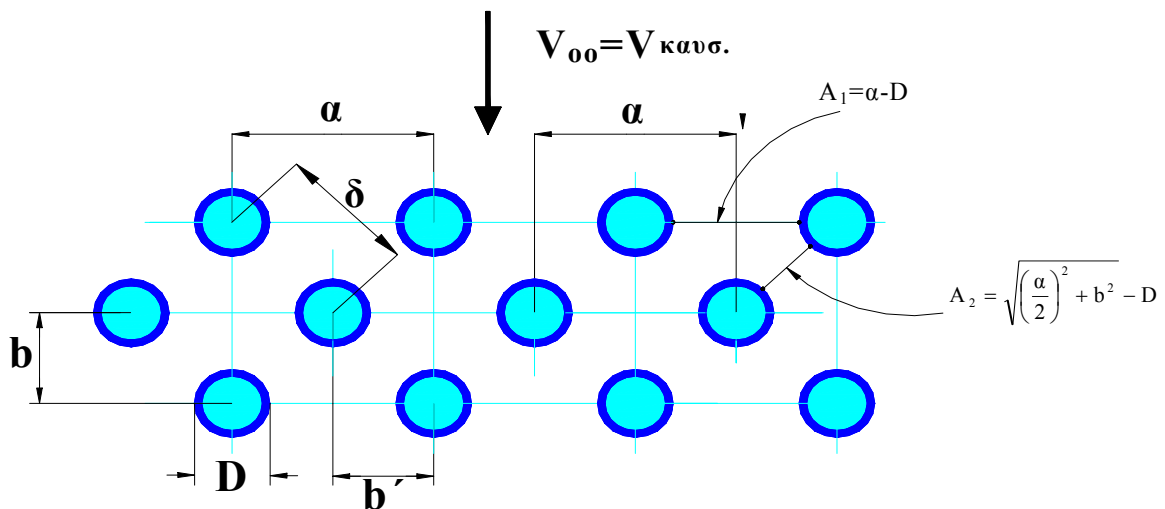
Re_{max} :	Ο αριθμός Reynolds για την μέγιστη ταχύτητα καυσαερίων	
D :	Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα	m
ν :	Κινηματικό ιξώδες υπολογισμένο με βάση την T_b	m ² /s

Η μέγιστη ταχύτητα με βάση την οποία υπολογίζεται ο Re_{max} εμφανίζεται στην ελάχιστη διάδο της ροής ανάμεσα από τους σωλήνες.

Για την διάταξη απλής σταυροροής σωλήνων θα πρέπει να υπολογίσουμε την ελάχιστη διάδο, όπου και έχουμε την μέγιστη τάχυντα. Συγκρίνοντας τα $A_1/2$ και A_2 όπως φαίνεται στο σχήμα προκύπτει:

$$\frac{A_1}{2} = \frac{\alpha - D}{2} = \frac{40 - 18}{2} = 11 \text{ mm}$$

$$A_2 = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + b^2} - D = \sqrt{\left(\frac{40}{2}\right)^2 + 20^2} - 18 = 10,28 \text{ mm}$$



Σχήμα 5. Τριγωνική διάταξη σωλήνων.

$\alpha = 40 \text{ mm}$
 $D = 18 \text{ mm}$
 $b = 20 \text{ mm}$
 $b' = 20 \text{ mm}$

Αφού $A_2 < A_1$ τότε η μέγιστη ταχύτητα είναι ίση με:

$$V_{\max} = \frac{\alpha}{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + b^2} - D \right)} \cdot V_{\text{καυσ.}} \quad (\text{Εξίσωση 15})$$

όπου:

V_{\max} : Η μέγιστη ταχύτητα καυσαερίων m/s
 $V_{\text{καυσ.}}$: Η ταχύτητα του καυσαερίου m/s
 D : Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα m
 α : Η απόσταση των σωλήνων στη ίδια σειρά (Σχήμα 3) m
 b : Η απόσταση των σωλήνων διαφορετικών σειρών (Σχήμα 3) m

Μια από τις εξισώσεις που μπορεί να μας δώσει τον αριθμό Nusselt για εξωτερική ροή, είναι των Chen και Wung για διατάξεις σταυροροής .

$$\overline{Nu}_D = 0,35 \cdot \left(\frac{b}{b'}\right)^{0,2} \cdot Re_{D_{\max}}^{0,60} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

για $b/b' < 2$, και

$$\overline{Nu}_D = 0,40 \cdot Re_{D_{\max}}^{0,60} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (\text{Εξίσωση 17})$$

για $b/b' \geq 2$

όπου:

\overline{Nu}_D : Ο αριθμός Nusselt για εξωτερική ροή στην σταυροροή.
 b : Καθεται απόσταση σωλήνων m
 b' : Οριζόντια απόσταση σωλήνων m
 Re_{\max} : Ο αριθμός Reynolds για μέγιστη ταχύτητα
 Pr : Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία T_b
 Pr_s : Αριθμός Prandtl για την θερμοκρασία της επιφάνειας T_s

Οι εξισώσεις (16) και (17) ισχύουν για περιοχή Reynolds από $10^3 < Re_{D_{\max}} < 2 \cdot 10^5$.

Όλες οι ιδιότητες των καυσαερίων είναι υπολογισμένες στην μέση θερμοκρασία της μάζας του ρευστού T_b . Εκτός από τις ιδιότητες που έχουν τον δείκτη s όπου η ιδιότητα αυτή του αερίου είναι υπολογισμένη στην θερμοκρασία που έχει η επιφάνεια του σωλήνα.

Η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων θα δίνεται από την εξίσωση (6) για τις θερμοκρασίες βέβαια που αφορούν τα καυσαέρια.

Επειδή η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σωλήνα δεν είναι γνωστή θα πρέπει να την υποθετούμε. Στην συνέχεια θα βρισκόμαστε τον αριθμό Nusselt και τον εξωτερικό συντελεστή συναγωγής με βάση τις προηγούμενες εξισώσεις.

Σωστή είναι η υπόθεση της θερμοκρασίας που κάναμε και ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{lin} = q_{out} \quad (\text{Εξίσωση 18})$$

$$q_{lin} = \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_o} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_o}} \quad \text{και} \quad q_{out} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}}$$

Άρα:

$$\frac{\pi \cdot (\theta_{02} - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_o} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_o}} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}} \quad (\text{Εξίσωση 19})$$

όπου:

θ_1 :	Θερμοκρασία καυσαερίων.	$^{\circ}\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας σωλήνα = T_s	$^{\circ}\text{C}$
θ_2 :	Θερμοκρασία νερού	
α_2 :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο χαλκοσωλήνα	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
d_o :	Εσωτερική διάμετρος χαλκοσωλήνα	m
d_1 :	Εξωτερική διάμετρος χαλκοσωλήνα	m
λ :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαλκοσωλήνα	W/mK
α_1 :	Συντελ. συναγωγής από τον χαλκοσωλήνα στα καυσαέρια	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

Σαν θ_1 και θ_2 παίρνουμε την μέση θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού και των καυσαερίων αντίστοιχα

Μόλις βρούμε και τον εξωτερικό και τον εσωτερικό συντελεστή συναγωγής μπορούμε να βρούμε από την εξίσωση (4) το συντελεστή θερμοπερατότητας του εναλλάκτη και στη συνέχεια από την εξίσωση (1) τον συνολικό συντελεστή μετάδοσης του εναλλάκτη.

Στη συνέχεια θα βρίσκουμε τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά από μια σχέση που εφαρμόζεται στους εναλλάκτες αντιρροής. Έτσι:

$$\Delta\theta_{m_{αντ.}} = \frac{(\theta'_1 - \theta''_2) - (\theta''_1 - \theta'_2)}{\ln \frac{\theta'_1 - \theta''_2}{\theta''_1 - \theta'_2}} \quad (\text{Εξίσωση 20})$$

όπου:

θ'_1 :	Θερμοκρασία εισόδου του καυσαερίου	$^{\circ}\text{C}$
θ'_2 :	Θερμοκρασία εισόδου του νερού	$^{\circ}\text{C}$
θ''_1 :	Θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου	$^{\circ}\text{C}$
θ''_2 :	Θερμοκρασία εξόδου του νερού	$^{\circ}\text{C}$

Η θερμοκρασία αυτή θα διορθώνεται κατά ένα συντελεστή ε ο οποίος θα βρίσκεται από το παρακάτω διάγραμμα με βάση τους λόγους :

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{m_2 \cdot c_2}{m_1 \cdot c_1} \quad (\text{Εξίσωση 21})$$

και

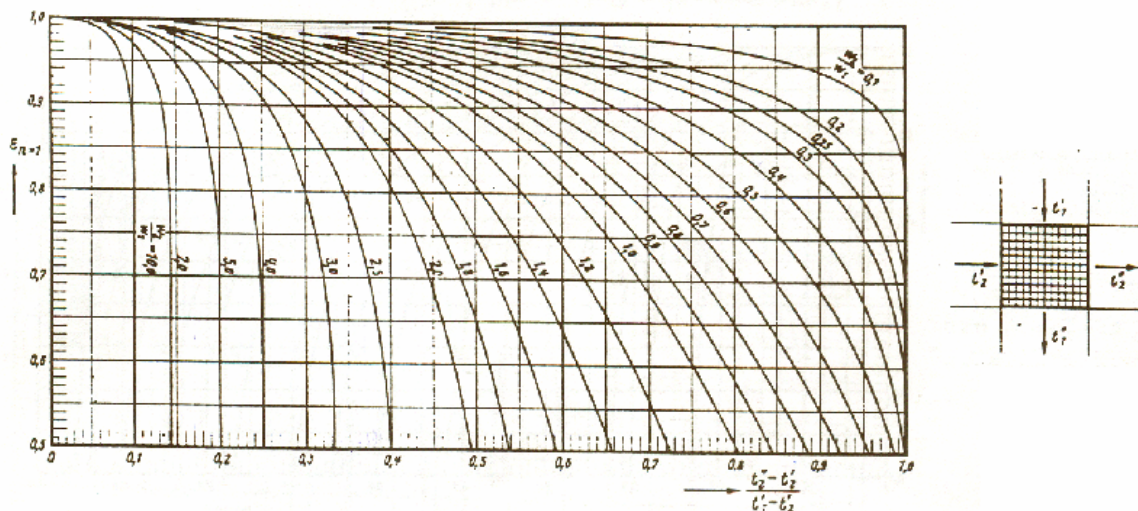
$$\frac{\theta_2'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2'} \quad (\text{Εξίσωση 22})$$

όπου:

w_1 :	Θερμοχωρητική παροχή καυσαερίου	W/K
w_2 :	Θερμοχωρητική παροχή νερού	W/K
\dot{m}_1 :	Συνολική παροχή μάζας καυσαερίων	kg/s
\dot{m}_2 :	Συνολική παροχή μάζας νερού	kg/s
c_1 :	Ειδική θερμότητα καυσαερίων	J/kgK
c_2 :	Ειδική θερμότητα νερού	J/kgK

Επομένως:

$$\Delta\theta_{\text{σταυρ.}} = \Delta\theta_{\text{αντ.}} \cdot \varepsilon \quad (\text{Εξίσωση 23})$$



Διάγραμμα 1. Απλώς διασταυρούμενη ροή. (για πολλαπλώς διασταυρούμενα ρεύματα σε αντirroή: $\varepsilon_n = \sqrt[n]{\varepsilon_{n+1}}$.

Η συνολικά συναλλασσόμενη θερμική ισχύς εκτός από την εξίσωση (12) δίνεται και από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = K_o \cdot F \cdot \Delta\theta_m \quad (\text{Εξίσωση 24})$$

όπου:

Q :	Η συνολική θερμική ισχύς	W
K_o :	Συνολικός συντελεστής μετάδοσης εναλλάκτη	W/m ² K
F :	Η συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη	m ²
$\Delta\theta_m$:	Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά (σταυροροής)	°C

Από την εξίσωση (24) λύνοντας ως προς F μπορούμε να βρούμε την συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη. Όμως :

$$F = \pi \cdot dm \cdot L_{\text{συν.}} \quad (\text{Εξίσωση 25})$$

όπου:

$F_{\text{συν.}}$: Η συνολική επιφάνεια του εναλλάκτη m^2
 dm : Η μέση διάμετρος σωλήνα m
 $L_{\text{συν.}}$: Συνολικό μήκος σωλήνων εναλλάκτη m

Από την εξίσωση (25) λύνοντας ως προς $L_{\text{συν.}}$ βρίσκουμε το συνολικό μήκος του σωλήνα του εναλλάκτη. Όμως ο εναλλάκτης αποτελείται από 100 σωλήνες άρα το μήκος του εναλλάκτη είναι ίσο με το συνολικό μήκος του σωλήνα δια 100 που είναι ο αριθμός των σωλήνων.

Από όλα τα μήκη που δοκιμάσαμε στην εξίσωση (13) σωστή είναι η λύση όπου το μήκος του εναλλάκτη που υποθέσαμε είναι ίσο με αυτό που προκύπτει από την εξίσωση (25) λύνοντας ως προς $L_{\text{συν.}}$ και διαιρώντας με τον αριθμό των σωλήνων.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορα μήκη L είναι αυτά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήκος L (m) (Θέτω)	Q (m ³ /s)	V _{κωσ.} (m/s)	V _{max.} (m/s)	Re _{max}	\overline{Nu}_D	$\alpha_{εσ_2}$ (W/m ² K)	$\alpha_{εξ_2}$ (W/m ² K)
12	2,261	1,047	2,036	1257	22,02	148,92	43,57
13		0,966	1,879	1160	20,99		41,51
14,3		0,878	1,707	1054	19,82		39,2
15		0,837	1,628	1005	19,26		38,09

Μήκος L (m) (Θέτω)	θ_{02} (°C)	K _R (W/mK)	K _o (W/m ² K)	$\Delta\theta_{m\text{σταυρ.}}$ (°C)	F (m ²)	L _{συν.} (m)	L _{εναλ.} (m)
12	83,59	1,854	34,71	85,33	70,64	1323	13,2
13	82,69	1,787	33,46		73,28	1372	13,7
14,3	81,71	1,710	32,02		76,57	1434	14,3
15	81,29	1,673	31,33		78,26	1465	14,7

Πίνακας 4. Αποτελέσματα διαδικασίας εύρεσης απαιτούμενου μήκους χαλκοσωλήνων

Το αποτέλεσμα για το οποίο το μήκος του κάθε σωλήνα του εναλλάκτη που υποθέσαμε είναι ίδιο με αυτό που προκύπτει από την εξίσωση (25) είναι για μήκος σωλήνα $L = 14,3 \text{ m}$.

Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουμε υποθέτοντας ότι $L = 14,3 \text{ m}$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει η μέση θερμοκρασία (bulk) T_b .

$$\left. \begin{array}{l} \overline{T}_b = \frac{T_{bin} + T_{bout}}{2} \\ T_{bin} = 210^\circ \text{C}, T_{bout} = 100^\circ \text{C} \end{array} \right\} \overline{T}_b = \frac{210 + 100}{2} = 155^\circ \text{C} \quad \overline{T}_b = 155^\circ \text{C}$$

Από τον πίνακα (2) με γραμμική παρεμβολή προκύπτουν οι παρακάτω ιδιότητες για το καυσαέριο στην μέση θερμοκρασία (428 K):

$$\begin{array}{ll} Pr = & 0,685 \\ k = & 0,0356 \quad \text{W/mK} \\ \nu = & 29,15 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \end{array}$$

Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του σωλήνα είναι ίση με $81,71^\circ\text{C}$ βρίσκουμε τις ιδιότητες των καυσαερίων που είναι υπολογισμένες με βάση αυτήν.

Έτσι η μέση θερμοκρασία στρώματος είναι ίση με:

$$Pr_s = 0,696$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (13) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{καυσ.}} = \frac{Q}{x \cdot L} \\ Q = 2,261 \text{ m}^3/\text{s} \\ x = 0,18 \text{ m} \\ L = 14,3 \text{ m} \end{array} \right\} V_{\text{καυσ.}} = \frac{2,261}{0,18 \cdot 14,3} = 0,878 \text{ m/s} \quad V_{\text{καυσ.}} = 0,878 \text{ m/s}$$

Η μέγιστη ταχύτητα για την ελάχιστη διατομή διόδου του καυσαερίου όπως προκύπτει από την εξίσωση (15) είναι:

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{max}} = \frac{\alpha}{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 + b^2} - D \right)} \cdot V_{\text{καυσ.}} \\ \alpha = 0,040 \text{ m}, D = 0,018 \text{ m}, \\ b = 0,020 \text{ m}, \\ V_{\text{καυσ.}} = 0,878 \text{ m/s} \end{array} \right\} V_{\text{max}} = \frac{0,040}{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{0,040}{2} \right)^2 + 0,020^2} - 0,018 \right)} \cdot 0,878 =$$

$$= 1,707 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{max}} = 1,707 \text{ m/s}$$

Ο αριθμός Reynolds αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14) προκύπτει ίσως με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Re}_{\max} = \frac{V_{\max} \cdot D}{v_f} \\ V_{\max} = 1,707 \text{ m/s}, D = 18 \text{ mm}, \\ v_f = 29,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} \text{Re}_{\max} = \frac{1,707 \cdot 0,018}{29,15 \cdot 10^{-6}} = 1054 \quad \text{Re}_{\max} = 1054$$

Ο λόγος b/b' σύμφωνα με το σχήμα 5 είναι ίσως με:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{b}{b'} \\ b = 0,020 \text{ m}, b' = 0,020 \text{ m} \end{array} \right\} \frac{b}{b'} = \frac{0,020}{0,020} = 1$$

Άρα ο αριθμός Nusselt θα δοθεί από την εξίσωση (16).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (16) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \overline{\text{Nu}}_D = 0,35 \cdot \left(\frac{b}{b'}\right)^{0,2} \cdot \text{Re}_{D_{\max}}^{0,60} \cdot \text{Pr}^{0,36} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s}\right)^{0,25} \\ \frac{b}{b'} = 1, \text{Re}_{D_{\max}} = 1054, \text{Pr} = 0,685, \text{Pr}_s = 0,696 \end{array} \right\} \overline{\text{Nu}}_D = 0,35 \cdot 1^{0,2} \cdot 1054^{0,60} \cdot 0,685^{0,36} \cdot \left(\frac{0,685}{0,696}\right)^{0,25} \\ = 19,82$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = 19,82$$

Ο συντελεστής εξωτερικής συναγωγής προκύπτει ίσως με:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{k}{D} \cdot \overline{\text{Nu}}_D \\ \overline{\text{Nu}}_D = 19,82, D = 18 \text{ mm}, \\ k = 0,0356 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \alpha = \frac{0,0356}{0,018} \cdot 19,82 = 39,20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_{\text{εξ}} = 39,20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Αντικαθιστούμε στην εξίσωση (19) τώρα που έχουμε και τον εξωτερικό συντελεστή συναγωγής, για να δούμε αν η υποθεση της θερμοκρασια της επιφάνειας του χαλκοσωλήνα που κάναμε (81,71°C) είναι σωστή.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_0} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_0}} &= \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\alpha_1 \cdot d_1} \\ \theta_2 &= 60^\circ\text{C}, \quad \theta_1 = 155^\circ\text{C}, \\ \lambda &= 383,79 \text{ W/mK} \\ \alpha_2 &= 148,92 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha_1 &= 39,20 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_0 &= 0,016 \text{ m}, d_1 = 0,018 \text{ m} \end{aligned} \right\} \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - 60)}{\frac{1}{148,92 \cdot 0,016} + \frac{1}{2 \cdot 383,79} \cdot \ln \frac{0,018}{0,016}} = \frac{\pi \cdot (155 - \theta_{02})}{39,20 \cdot 0,018}$$

$$7,48\theta_{02} + 2,22\theta_{02} = 343,59 + 448,97 \quad \Rightarrow \quad \theta_{02} = \frac{792,56}{9,70} = 81,71^\circ\text{C}$$

$$\theta_{02} = 81,71^\circ\text{C}$$

Η μέση διάμετρος όπως προκύπτει από την εξίσωση (3):

$$d_m = \frac{d_2 + d_1}{2} = \frac{16 + 18}{2} = 17 \text{ mm} \quad \mathbf{d_m = 17 \text{ mm}}$$

Ο συντελεστής K_R σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίσως με:

$$\left. \begin{aligned} K_R &= \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_2 d_0} + \frac{1}{2\lambda_\sigma} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{\alpha_1 d_1}} \\ \alpha_2 &= 148,92 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha_1 &= 39,20 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \lambda_\sigma &= 383,79 \text{ W/mK}, \\ d_0 &= 16 \text{ mm}, \\ d_1 &= 18 \text{ mm}, \end{aligned} \right\} K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{148,92 \cdot 0,016} + \frac{1}{2 \cdot 383,79} \ln \frac{18}{16} + \frac{1}{39,20 \cdot 0,018}}$$

$$= 1,710 \text{ W/mK}$$

$$\mathbf{K_R = 1,710 \text{ W/mK}}$$

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι ίσως με:

$$\left. \begin{aligned} K_o &= \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \\ K_R &= 1,710 \text{ W/mK}, \\ d_m &= 17 \text{ mm} \end{aligned} \right\} K_o = \frac{1,710}{\pi \cdot 0,017} = 32,02 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \mathbf{K_o = 32,02 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Για να βρούμε το απαραίτητο μήκος του εναλλάκτη θα πρέπει πρώτα να βρούμε την μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά.

Έτσι αντικαθιστώντας στην εξίσωση (20) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta m_{\text{αντ.}} &= \frac{(\theta'_1 - \theta''_2) - (\theta''_1 - \theta'_2)}{\ln \frac{\theta'_1 - \theta''_2}{\theta''_1 - \theta'_2}} \\ \theta'_1 &= 210^\circ\text{C}, \text{ και } \theta''_1 = 100^\circ\text{C} \\ \theta'_2 &= 35^\circ\text{C}, \text{ και } \theta''_2 = 85^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \Delta\theta m_{\text{αντ.}} = \frac{(210 - 85) - (100 - 35)}{\ln \frac{210 - 85}{100 - 35}} = 91,75^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta m_{\text{αντ.}} = 91,75^\circ\text{C}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (21) και (22) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{aligned} \frac{w_2}{w_1} &= \frac{m_2 \cdot c_2}{c \cdot c_1} = \\ m_2 &= 1 \text{ Kg/s}, \\ m_1 &= 1,87 \text{ Kg/s} \\ c_1 &= 1017,8 \text{ J/KgK}, \\ c_2 &= 4184,3 \text{ J/KgK} \end{aligned} \right\} \frac{w_2}{w_1} = \frac{1 \cdot 4184,3}{1,87 \cdot 1017,8} = 2,20 \quad \frac{w_2}{w_1} = 2,20$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} \\ \theta'_1 &= 210^\circ\text{C}, \theta'_2 = 35^\circ\text{C}, \\ \theta''_2 &= 85^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} = \frac{85 - 35}{210 - 35} = 0,29 \quad \frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} = 0,29$$

Από το διάγραμμα (1) προκύπτει $\varepsilon = 0,93$

Άρα από την εξίσωση (23) αντικαθιστώντας:

$$\Delta\theta m_{\text{σταυρ.}} = 91,75 \cdot 0,93 = 85,33^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad \Delta\theta m_{\text{σταυρ.}} = 85,33^\circ\text{C}$$

Λύνοντας την εξίσωση (24) ως προς F βρίσκουμε την συνολική επιφάνεια των σωλήνων του εναλλάκτη. Έτσι:

$$\left. \begin{aligned}
 F &= \frac{Q}{K_o \cdot \Delta\theta m_{\text{σταυρ.}}} \\
 Q &= 209215 \text{ W}, \\
 K_o &= 32,02 \text{ W/m}^2\text{K} \\
 \Delta\theta m_{\text{σταυρ.}} &= 85,33^\circ\text{C}
 \end{aligned} \right\} F = \frac{209215}{32,02 \cdot 85,33} = 76,57 \text{ m}^2 \quad \mathbf{F = 76,57 \text{ m}^2}$$

Το συνολικό μήκος που θα έχει ο εναλλάκτης προκύπτει σύμφωνα με την εξίσωση (25) ίσο με:

$$\left. \begin{aligned}
 F &= \pi \cdot dm \cdot L_{\text{συν.}} \\
 F &= 76,57 \text{ m}^2, \\
 dm &= 0,017 \text{ m}
 \end{aligned} \right\} L_{\text{συν.}} = \frac{F}{\pi \cdot dm} = \frac{76,57}{\pi \cdot 0,017} = 1433,7 \text{ m} \quad \mathbf{L_{\text{συν.}} \approx 1434 \text{ m}}$$

Το μήκος που θα έχει ο κάθε σωλήνας είναι ίσο με:

$$\left. \begin{aligned}
 L_{\text{σωλ.}} &= \frac{L_{\text{συν.}}}{100} \\
 L_{\text{συν.}} &= 1434
 \end{aligned} \right\} L_{\text{σωλ.}} = \frac{1434}{100} = 14,3 \text{ m} \quad \mathbf{L_{\text{συν.}} = 14,3 \text{ m.}}$$

Το μήκος αυτό που προκύπτει είναι ίσο με αυτό που υποθέσαμε αρχικά.

Ερώτημα Γ:

Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων μπορεί να πέσει σε χαμηλότερα επίπεδα από τους 210°C έτσι ώστε να υπάρχει κίνδυνος να συμπυκνωθούν διαβρωτικά αέρια. Για να μην συμβεί αυτό θα πρέπει η έξοδος των αερίων να μην πέσει σε χαμηλότερα επίπεδα από τους 100°C . Για να το πετύχουμε αυτό θα αλλάξουμε την παροχή του νερού που θα εισέρχεται στον εναλλάκτη. Αρχικά θα υπολογίσουμε την παροχή αυτή θεωρώντας ότι έχουμε ένα αμετάβλητο συνολικό συντελεστή μετάδοσης του εναλλάκτη και στην συνέχεια θα εξετάζουμε τη πραγματικά συμβαίνει. Έτσι:

Θεωρώντας ότι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης του εναλλάκτη είναι ίσος με αυτόν που προέκυψε από το Ερώτημα Α, θα ακολουθήσουμε την εξής διαδικασία για να βρούμε την παροχή του νερού. Η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων είναι ίση με 190°C και η θερμοκρασία εξόδου τους δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 100°C .

Επειδή αλλάζουν οι θερμοκρασίες αλλάζει και η συνολικά συναλλασσόμενη ισχύς του εναλλάκτη.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (12) τα δεδομένα που έχουμε για το καυσαέριο θα βρούμε την νέα συνολικά συναλλασσόμενη ισχύς του εναλλάκτη. Έτσι:

$$\left. \begin{aligned} Q &= m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_1' - \theta_1'') \\ m_1 &= 1,87 \text{ Kg/s} \\ c_1 &= 1016,4 \text{ J/KgK} \\ \theta_1' &= 190^\circ\text{C} \\ \theta_1'' &= 100^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} Q = 1,87 \cdot 1016,4 \cdot (190 - 100) = 171060 \text{ W}$$

$$Q = 171060 \text{ W}$$

Επειδή θεωρούμε ότι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης του εναλλάκτη είναι ίσος με αυτόν του Ερωτήματος Α, μπορούμε λύνοντας την εξίσωση (24) ως προς $\Delta\theta_{m_{\text{σταυρ.}}}$ να βρίσκουμε την μέση λογαριθμική θερμοκρασία του εναλλακτη σταυρορής, έτσι:

$$\left. \begin{aligned} Q &= K_o \cdot F \cdot \Delta\theta_{m_{\text{σταυρ.}}} \\ Q &= 171060 \text{ W} \\ K_o &= 32,02 \text{ W/m}^2\text{K} \\ F &= 76,57 \text{ m}^2 \end{aligned} \right\} \Delta\theta_{m_{\text{σταυρ.}}} = \frac{Q}{K_o \cdot F} = \frac{171060}{32,02 \cdot 76,57} = 69,77^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{m_{\text{σταυρ.}}} = 69,77^\circ\text{C}$$

Στην συνέχεια θα κάνουμε διάφορες δοκιμές με βάση τον συντελεστή διόρθωσης του εναλλάκτη ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

Θεωρούμε έναν συντελεστή ε , και βρίσκουμε στην συνέχεια μέσω της εξίσωσης (23) την μέση λογαριθμική θερμοκρασία του εναλλάκτη αντιρροής λύνοντας την ως προς $\Delta\theta_{m_{\text{αντ.}}}$.

Για να μπορέσουμε να βρούμε την θερμοκρασία εξόδου του νερού θα λύσουμε την εξίσωση (20) ως προς θ_2'' και θα επαληθεύουμε την εξίσωση που προκύπτει με δοκιμές. Έτσι προκύπτει:

$$\Delta\theta_{m_{\text{αντ.}}} = \frac{(\theta_1' - \theta_2'') - (\theta_1'' - \theta_2')}{\ln \frac{\theta_1' - \theta_2''}{\theta_1'' - \theta_2'}}$$

$$\theta_2'' = \Delta\theta_{m_{\text{αντ.}}} \cdot \left(\ln \frac{\theta_1' - \theta_2''}{\theta_1'' - \theta_2'} \right) + \theta_1' + (\theta_1'' - \theta_2')$$

Ξέροντας την θερμοκρασία εξόδου του νερού και λύνοντας την εξίσωση (12) ως προς m_2 θα βρίσκουμε την νέα παροχή του νερού έτσι ώστε να μην έχουμε την δημιουργία συμπυκνωμάτων λόγω εισόδου των καυσαερίων στους 190°C . Στη συνέχεια με την βοήθεια των λόγων w_2/w_1 και $(\theta_2'' - \theta_1') / (\theta_1' - \theta_2')$ και του διαγράμματος (1) θα βρίσκουμε τον πραγματικό συντελεστή διόρθωσης ε . Σωστή είναι η δοκιμή όπου ο συντελεστής διόρθωσης που υποθέσαμε είναι ίδιος με αυτόν που προκύπτει.

Λύνοντας την εξίσωση (23) ως προς $\Delta\theta_{\text{αντ.}}$ προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\theta_{\text{αντ.}} = \frac{\Delta\theta_{\text{σταυρ.}}}{\varepsilon} \\ \Delta\theta_{\text{σταυρ.}} = 69,77^\circ\text{C}, \quad \varepsilon = 0,905 \end{array} \right\} \Delta\theta_{\text{αντ.}} = \frac{69,77}{0,905} = 77,09^\circ\text{C} \quad \Delta\theta_{\text{αντ.}} = 77,09^\circ\text{C}.$$

$$\theta_2'' = \Delta\theta_{\text{αντ.}} \cdot \left(\ln \frac{\theta_1' - \theta_2''}{\theta_1'' - \theta_2'} \right) + \theta_1' + (\theta_1'' - \theta_2')$$

- α) Για $\theta_2'' = 90^\circ\text{C}$ το β' μέλος είναι ίσο με: $92,5^\circ\text{C}$
 β) Για $\theta_2'' = 102^\circ\text{C}$ το β' μέλος είναι ίσο με: $101,4^\circ\text{C}$
 γ) Για $\theta_2'' = 99,2^\circ\text{C}$ το β' μέλος είναι ίσο με: $99,2^\circ\text{C}$

Επομένως η σωστή απάντηση είναι η γ. Υποθέτοντας συντελεστή διόρθωσης 0,905. Τώρα πρέπει να δούμε αν ο συντελεστής διόρθωσης που υποθέσαμε είναι σωστός.

Η παροχή του νερού προκύπτει ίση μέσω της εξίσωσης (12) με:

$$\left. \begin{array}{l} Q = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_2'' - \theta_2') \\ Q = 171060 \text{ W} \\ c_2 = 4188,6 \text{ J/kgK} \\ \theta_2' = 35^\circ\text{C} \\ \theta_2'' = 99,2^\circ\text{C} \end{array} \right\} m_2 = \frac{171060}{4188,6 \cdot (99,2 - 35)} = 0,636 \text{ kg/s}$$

$$m_2 = 0,636 \text{ kg/s}$$

Η παροχή του νερού έτσι ώστε να μην πέσει η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων κάτω από 100°C θα πρέπει να είναι ίση ή λιγότερη από $0,636 \text{ kg/s}$, εάν η θερμοκρασία εισόδου είναι ίση με 190°C .

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (21) και (22) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{w_2}{w_1} = \frac{m_2 \cdot c_2}{m_1 \cdot c_1} = \\ m_2 = 0,636 \text{ kg/s}, \\ m_1 = 1,87 \text{ kg/s} \\ c_1 = 1016,4 \text{ J/kgK}, \\ c_2 = 4188,6 \text{ J/kgK} \end{array} \right\} \frac{w_2}{w_1} = \frac{0,636 \cdot 4188,6}{1,87 \cdot 1016,4} = 1,40 \quad \frac{w_2}{w_1} = 1,40$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\theta_2'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2'} \\ \theta_1' = 190^\circ\text{C}, \theta_2' = 35^\circ\text{C}, \\ \theta_2'' = 99,2^\circ\text{C} \end{array} \right\} \frac{\theta_2'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2'} = \frac{99,2 - 35}{190 - 35} = 0,41 \quad \frac{\theta_2'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2'} = \mathbf{0,41}$$

Από το διάγραμμα (1) προκύπτει $\varepsilon = \mathbf{0,905}$, άρα η αρχική υπόθεση που κάναμε για τον συντελεστή διώρθωσης ήταν σωστή.

Τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι σωστά με την προϋπόθεση ότι ισχύουν οι προηγούμενες παράμετροι που εμείς θεωρήσαμε ότι ισχύουν, δηλαδή ο συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας του εναλλάκτη είναι ίσος με $32,02 \text{ W/m}^2\text{K}$. Στην πραγματικότητα όμως δεν συμβαίνει αυτό. Γι' αυτό θα πρέπει να εξετάσουμε τι συμβαίνει αν η παροχή του νερού είναι $m_2 = 0,636 \text{ kg/s}$ και η θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι ίση με $99,2^\circ\text{C}$. Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε είναι η παρακάτω.

Διαδικασία εύρεσης εσωτερικού συντελεστή συναγωγής (Internal Flow):

Θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με αυτή του Ερωτήματος Α.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει η μέση θερμοκρασία (bulk) T_b .

$$\left. \begin{array}{l} \overline{T_b} = \frac{T_{\text{bin}} + T_{\text{bout}}}{2} \\ T_{\text{bin}} = 35^\circ\text{C}, T_{\text{bout}} = 99,2^\circ\text{C} \end{array} \right\} \overline{T_b} = \frac{35 + 99,2}{2} = 67,1^\circ\text{C} \quad \overline{T_b} = \mathbf{67,1^\circ\text{C}}$$

Οι ιδιότητες του νερού σ' αυτή την θερμοκρασία όπως προκύπτουν από τον πίνακα 1 είναι.

$$\begin{aligned} Pr &= 2,736 \\ k &= 0,657 \text{ W/mK} \\ \nu &= 0,438 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \rho &= 981,42 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Από την εξίσωση (10) προκύπτει η παροχή μάζας του νερού για κάθε σωλήνα.

$$\left. \begin{array}{l} m_{\text{σωλ.}} = \frac{m_2}{100} \\ m_2 = 0,636 \text{ kg/s} \end{array} \right\} m_{\text{σωλ.}} = \frac{0,636}{100} = 0,00636 \text{ kg/s} \quad m_{\text{σωλ.}} = \mathbf{0,00636 \text{ kg/s}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (9) προκύπτει η παροχή του νερού για κάθε σωλήνα.

$$\left. \begin{aligned} Q_{\sigma\omega\lambda} &= \frac{\dot{m}_{\sigma\omega\lambda}}{\rho} \\ \dot{m}_{\sigma\omega\lambda} &= 0,00636 \text{ kg/s} \\ \rho &= 981,42 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \right\} Q_{\sigma\omega\lambda} = \frac{0,00636}{981,42} = 0,00000648 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\sigma\omega\lambda} = 0,00000648 \text{ m}^3/\text{s}$$

Λύνοντας ως προς την ταχύτητα V_{∞} την εξίσωση (11) και αντικαθιστώντας προκύπτει η ταχύτητα του νερού:

$$\left. \begin{aligned} V_{\infty} &= \frac{4 \cdot Q_{\sigma\omega\lambda}}{\pi \cdot D^2} \\ Q_{\sigma\omega\lambda} &= 0,00000648 \text{ m}^3/\text{s} \\ D &= 0,016 \text{ m} \end{aligned} \right\} V_{\infty} = \frac{4 \cdot 0,00000648}{\pi \cdot 0,016^2} = 0,032 \text{ m/s} \quad V_{\infty} = 0,032 \text{ m/s}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8) βρίσκουμε τον αριθμό Reynolds.

$$\left. \begin{aligned} Re_D &= V_{\infty} \cdot \frac{D}{\nu} \\ V_{\infty} &= 0,032 \text{ m/s} \\ D &= 0,016 \text{ m} \\ \nu &= 0,438 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} Re_D = 0,032 \cdot \frac{0,016}{0,438 \cdot 10^{-6}} = 1169 \quad Re_D = 1169$$

Από τα αποτελέσματα του αριθμού Reynolds βλέπουμε ότι η ροή είναι στρωτή. Έτσι ο αριθμός Nusselt σύμφωνα με την εξίσωση (7) είναι ίσος με.

$$Nu_D = 3,66$$

Λύνοντας ως προς τον εσωτερικό συντελεστή συναγωγής βρίσκουμε:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{k}{D} \cdot Nu_D \\ D &= 0,016, \quad k = 0,657 \\ Nu_D &= 3,66 \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{0,657}{0,016} \cdot 3,66 = 150,3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_{\text{εξ.}} = 150,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Λαδιακασία εύρεσης εξωτερικού συντελεστή συναγωγής (External flow).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει η μέση θερμοκρασία (bulk) T_b .

$$\left. \begin{array}{l} \bar{T}_b = \frac{T_{bin} + T_{bout}}{2} \\ T_{bin} = 190^\circ \text{C}, T_{bout} = 100^\circ \text{C} \end{array} \right\} \bar{T}_b = \frac{190 + 100}{2} = 145^\circ \text{C} \quad \bar{T}_b = 145^\circ \text{C}$$

Από τον πίνακα (2) με γραμμική παρεμβολή προκύπτουν οι παρακάτω ιδιότητες για το καυσαέριο στην μέση θερμοκρασία (418 K):

$$\begin{array}{ll} Pr = & 0,686 \\ k = & 0,0349 \quad \text{W/mK} \\ \nu = & 27,99 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \end{array}$$

Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του σωλήνα είναι ίση με $84,68^\circ\text{C}$ βρίσκουμε τις ιδιότητες των καυσαερίων που είναι υπολογισμένες με βάση αυτήν.

Έτσι η μέση θερμοκρασία στρώματος είναι ίση με:

$$Pr_s = 0,695$$

Η πυκνότητα του αέρα για την μέση θερμοκρασία των καυσαερίων δηλαδή 145°C ή 418 K είναι $\rho_k = 0,8469 \text{ kg/m}^3$.

Η παροχή των καυσαερίων προκύπτει ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{καυσ.}} = \frac{m_1}{\rho} \\ m_1 = 1,87 \text{ kg/s} \\ \rho = 0,8469 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right\} Q_{\text{καυσ.}} = \frac{1,87}{0,8469} = 2,208 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_{\text{καυσ.}} = 2,208 \text{ m}^3/\text{s}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (13) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{καυσ.}} = \frac{Q}{\alpha \cdot L} \\ Q = 2,208 \text{ m}^3/\text{s} \\ x = 0,18 \text{ m} \\ L = 14,3 \text{ m} \end{array} \right\} V_{\text{καυσ.}} = \frac{2,208}{0,18 \cdot 14,3} = 0,858 \text{ m/s} \quad V_{\text{καυσ.}} = 0,858 \text{ m/s}$$

Η μέγιστη ταχύτητα για την ελάχιστη διατομή διόδου του καυσαερίου όπως προκύπτει από την εξίσωση (15) είναι:

$$V_{\max} = \frac{\alpha}{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + b^2} - D \right)} \cdot V_{\text{κασ.}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0,040 \text{ m}, D = 0,018 \text{ m}, \\ b = 0,020 \text{ m}, \\ V_{\text{κασ.}} = 0,858 \text{ m/s} \end{array} \right\} V_{\max} = \frac{0,040}{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{0,040}{2}\right)^2 + 0,020^2} - 0,018 \right)} \cdot 0,858 =$$

$$= 1,669 \text{ m/s}$$

$$V_{\max} = 1,669 \text{ m/s}$$

Ο αριθμός Reynolds αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14) προκύπτει ίσως με:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Re}_{\max} = \frac{V_{\max} \cdot D}{\nu_f} \\ V_{\max} = 1,66 \text{ m/s}, D = 18 \text{ mm}, \\ \nu = 27,99 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} \text{Re}_{\max} = \frac{1,669 \cdot 0,018}{27,99 \cdot 10^{-6}} = 1073 \quad \text{Re}_{\max} = 1073$$

Ο λόγος b/b' σύμφωνα με το σχήμα 5 είναι ίσως με:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{b}{b'} \\ b = 0,020 \text{ m}, b' = 0,020 \text{ m} \end{array} \right\} \frac{b}{b'} = \frac{0,020}{0,020} = 1$$

Άρα ο αριθμός Nusselt θα δοθεί από την εξίσωση (16).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (16) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \overline{\text{Nu}}_D = 0,35 \cdot \left(\frac{b}{b'}\right)^{0,2} \cdot \text{Re}_{D_{\max}}^{0,60} \cdot \text{Pr}^{0,36} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s}\right)^{0,25} \\ \frac{b}{b'} = 1, \text{Re}_{D_{\max}} = 1073, \text{Pr} = 0,686, \text{Pr}_s = 0,695 \end{array} \right\} \overline{\text{Nu}}_D = 0,35 \cdot 1^{0,2} \cdot 1073^{0,60} \cdot 0,686^{0,36} \cdot \left(\frac{0,686}{0,695}\right)^{0,25}$$

$$= 20,06$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = 20,06$$

Ο συντελεστής εξωτερικής συναγωγής προκύπτει ίσως με:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{k}{D} \cdot \overline{\text{Nu}}_D \\ \overline{\text{Nu}}_D = 20,06 \quad D = 18 \text{ mm}, \\ k = 0,0349 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \alpha = \frac{0,0349}{0,018} \cdot 20,06 = 38,89 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_{\varepsilon\xi} = 38,89 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Αντικαθιστούμε στην εξίσωση (19) τώρα που έχουμε και τον εξωτερικό συντελεστή συναγωγής, για να δούμε αν η υποθεση της θερμοκρασια της επιφάνειας του χαλκοσωλήνα που κάναμε (84,68°C) είναι σωστή.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_0} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_0}} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\alpha_1 \cdot d_1} \\ \theta_2 = 67,1^\circ\text{C}, \quad \theta_1 = 145^\circ\text{C}, \\ \lambda = 383,79 \text{ W/mK} \\ \alpha_2 = 150,3 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha_1 = 38,89 \text{ W/m}^2\text{K} \\ d_0 = 0,016 \text{ m}, d_1 = 0,018 \text{ m} \end{array} \right\} \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - 67,1)}{\frac{1}{150,3 \cdot 0,016} + \frac{1}{2 \cdot 383,79} \cdot \ln \frac{0,018}{0,016}} = \frac{\pi \cdot (145 - \theta_{02})}{38,89 \cdot 0,018}$$

$$7,55\theta_{02} + 2,2\theta_{02} = 318,88 + 506,75 \quad \Rightarrow \quad \theta_{02} = \frac{825,63}{9,75} = 84,68^\circ\text{C}$$

$$\theta_{02} = 84,68^\circ\text{C}$$

Η μέση διάμετρος όπως προκύπτει από την εξίσωση (3):

$$d_m = \frac{d_2 + d_1}{2} = \frac{16 + 18}{2} = 17 \text{ mm}$$

$$d_m = 17 \text{ mm}$$

Ο συντελεστής K_R σύμφωνα με την εξίσωση (4) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{array}{l} K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_2 d_0} + \frac{1}{2\lambda_\sigma} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{\alpha_1 d_1}} \\ \alpha_2 = 150,3 \text{ W/m}^2\text{K}, \\ \alpha_1 = 38,89 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \lambda_\sigma = 383,79 \text{ W/mK}, \\ d_0 = 16 \text{ mm}, \\ d_1 = 18 \text{ mm}, \end{array} \right\} K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{150,3 \cdot 0,016} + \frac{1}{2 \cdot 383,79} \ln \frac{18}{16} + \frac{1}{38,89 \cdot 0,018}}$$

$$= 1,703 \text{ W/mK}$$

$$K_R = 1,703 \text{ W/mK}$$

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{array}{l} K_o = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \\ K_R = 1,703 \text{ W/mK}, \\ d_m = 17 \text{ mm} \end{array} \right\} K_o = \frac{1,703}{\pi \cdot 0,017} = 31,89 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \mathbf{K_o = 31,89 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

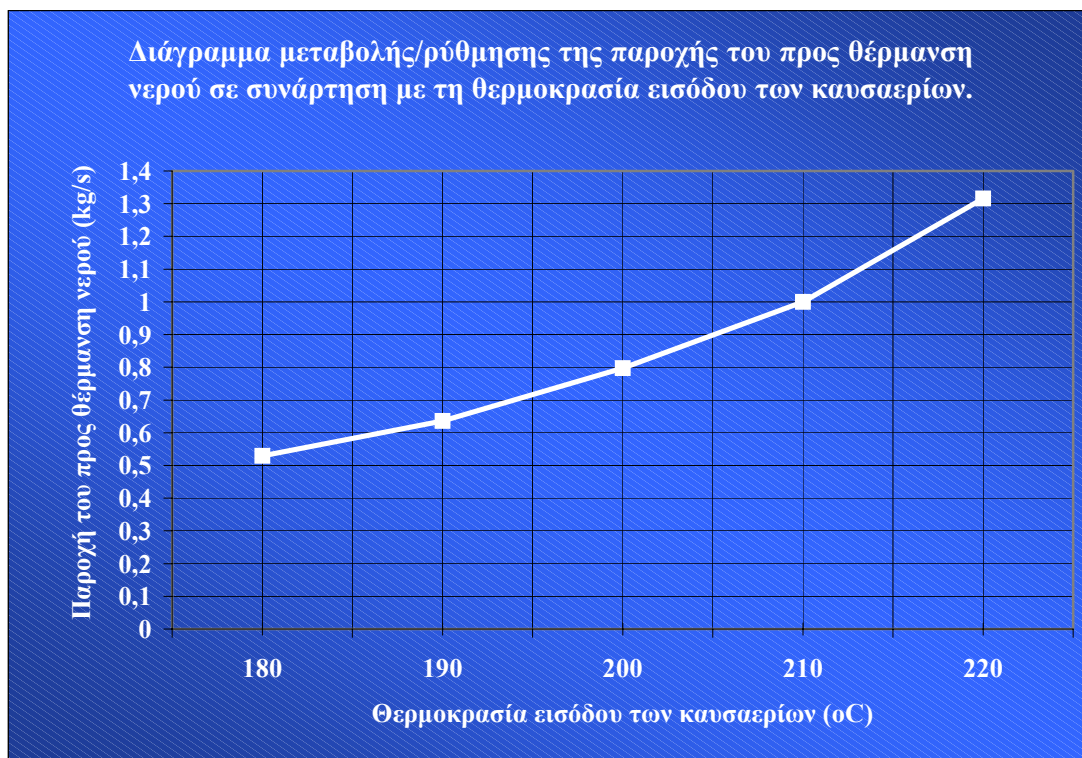
Η απόκλιση με τον K_o που βρήκαμε και υποθέσαμε ($K_o = 32,02 \text{ W/m}^2\text{K}$) είναι αμελειτέα και επομένως δεχόμαστε τα αποτελέσματα που ήδη βρήκαμε.

Ερώτημα Δ:

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτή του ερωτήματος Γ για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων προκύπτει ο παρακάτω πίνακας, μεταβάλλοντας την παροχή του προς θέρμανση νερού έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος συμπύκνωσης διαβρωτικών αερίων.

θ_1' (°C)	ε	m_2 (kg/s)	θ_2'' (°C)	θ_{02} (°C)	K_o (W/m ² K)
180	0,882	0,529	103,6	85,24	31,85
190	0,905	0,636	99,2	84,68	31,89
200	0,915	0,797	92,0	83,13	31,98
210	0,93	1,00	85,0	81,71	32,02
220	0,94	1,316	76,5	79,82	32,15

Πίνακας 5. Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου του νερού μεταβάλλοντας την θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων.



Διάγραμμα 2. Μεταβολής της παροχής του προς θέρμανση νερού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων.

Συμπέρασμα:

Για την ανάκτηση της θερμότητας που περιέχουν τα καυσαέρια ενός λέβητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας εναλλάκτης σταυρορροής για να θερμάνει ζεστό νερό χρήσης.

Κατά την προσπάθεια υπολογισμού των εξωτερικών και εσωτερικών συντελεστών συναγωγής αναζητήσαμε στην βιβλιογραφία τις κατάλληλες εξισώσεις για τον συγκεκριμένο εναλλάκτη.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν βλέπουμε ότι ο εξωτερικός και ο εσωτερικός συντελεστής συναγωγής διαφέρουν. Ο εσωτερικός συντελεστής συναγωγής είναι μεγαλύτερος του εξωτερικού συντελεστή συναγωγής. Κατά τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας του εναλλάκτη βλέπουμε ότι την μεγαλύτερη επιρροή στο αποτέλεσμα έχει ο εξωτερικός συντελεστής συναγωγής. Γενικά στους εναλλάκτες αν ένας από τους δύο συντελεστές συναγωγής είναι μικρότερος από τον άλλο τότε ο μικρότερος καθορίζει την τιμή του συνολικού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας του εναλλάκτη.

Μεταβάλλοντας τις συνθήκες που επικρατούν στον εναλλάκτη και συγκεκριμένα την θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων βλέπουμε, ότι για να διατηρήσουμε την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων σταθερή θα πρέπει: καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου τους να μπορούμε να αυξάνουμε την παροχή του προς θέρμανση νερού, και καθώς μειώνεται η θερμοκρασία εισόδου πρέπει να μειώνεται η παροχή του προς θέρμανση νερού. (για να μην υπάρξει κίνδυνος συμπύκνωσης διαβρωτικών αερίων που περιέχονται στα καυσαέρια)

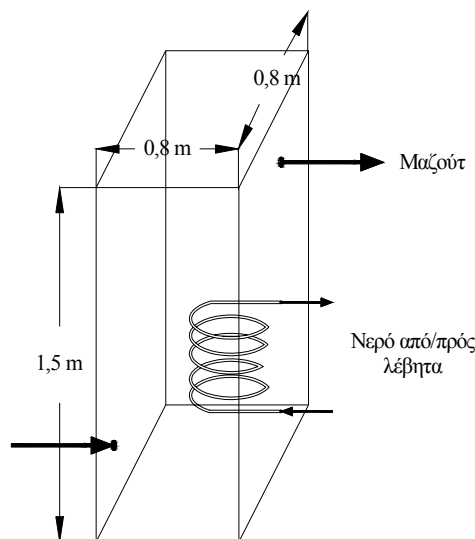
Μελέτη 14^η.

Προθερμαντήρας μαζούτ και υπολογισμός θερμικών απωλειών του.

Στον προθερμαντήρα μαζούτ του σχήματος, η προθέρμανση του μαζούτ από 5°C σε 75°C γίνεται με ένα θερμαντικό στοιχείο (σερπαντίνα) που έχει εμβαπτισθεί μέσα στον προθερμαντήρα. Το θερμαντικό στοιχείο είναι κατασκευασμένο από σιδηροσωλήνα χωρίς ραφή DN20 (Φ26,9 x 2,3), και τροφοδοτείται με θερμό νερό από λέβητα, θερμοκρασίας 85°C, παροχής 576 L/h.

Η παροχή του μαζούτ που προθερμαίνεται είναι 193,5 L/h.

Οι διαστάσεις του σχήματος είναι οι εξωτερικές διαστάσεις του προθερμαντήρα, ο οποίος βρίσκεται σε εξωτερικό στεγανό χώρο(υπόστεγο).



Δίδονται:

- | | |
|-------------------------------------|---------------|
| - Πυκνότητα μαζούτ (σταθερή) | : 0,93 kg/L |
| - Ειδική θερμότητα μαζούτ (σταθερή) | : 2210 J/kg.K |
| - Πυκνότητα νερού (σταθερή) | : 1 kg/L |
| - Ειδική θερμότητα νερού (σταθερή) | : 4190 J/kg.K |

A. Να υπολογισθεί ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη. (Να θεωρηθεί, κατά προσέγγιση, φυσική κυκλοφορία του μαζούτ γύρω από τον σωλήνα του εναλλάκτη ή πολύ χαμηλή ταχύτητα)

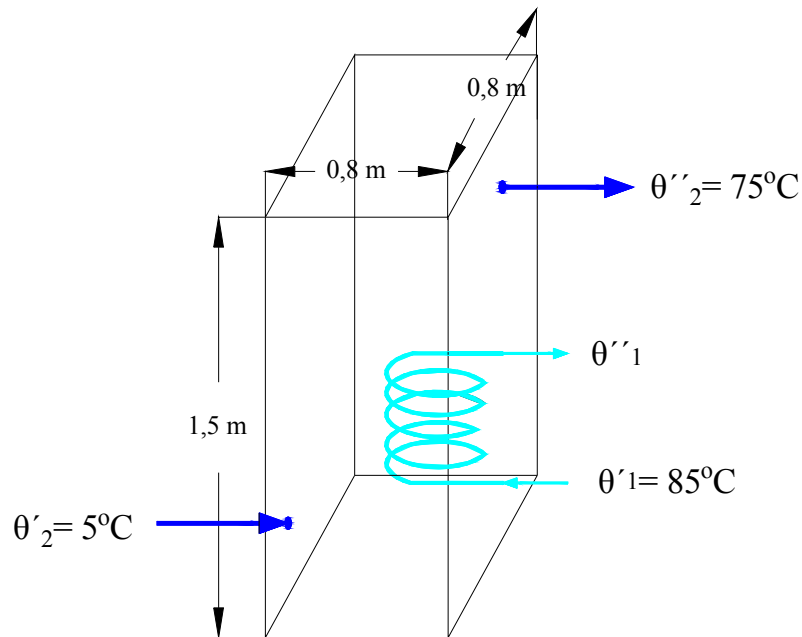
B. Αν ολόκληρη η εξωτερική επιφάνεια του εναλλάκτη είναι πολύ καλά μονωμένη, τότε οι απώλειες θερμότητας από το μαζούτ στο περιβάλλον θεωρούνται αμελητέες.

Ζητούνται: Η θερμοκρασία εξόδου του θερμού νερού και το απαιτούμενο μήκος του σωλήνα του θερμαντικού στοιχείου. (Θεωρείται ότι πρόκειται για εναλλάκτη μικτής διάταξης ροής, δηλ. απλής ομοροής-αντιροής)

Γ. Αν ο εναλλάκτης είναι αμόνωντος από όλες τις πλευρές, τότε η επιφάνεια αυτή αποκτά (περίπου) τη μέση θερμοκρασία εισόδου-εξόδου του μαζούτ. Η αμόνωντη επιφάνεια είναι χαλυβδόφυλλο πολύ οξειδωμένο.

Ζητείται: Η θερμική ενέργεια που χάνεται συνολικά προς το περιβάλλον, θεωρώντας (μέση) θερμοκρασία περιβάλλοντος 10°C, για 4000 h λειτουργίας ετησίως. Ποια η επιπλέον κατανάλωση μαζούτ ετησίως εξαιτίας των απωλειών αυτών, αν ο βαθμός απόδοσης καύσης ληφθεί 80%.

Λύση:



Σχήμα 1. Διάταξη προθερμαντήρα. Είσοδοι - έξοδοι ρευστών

Ερώτημα Α:

Στο Α ερώτημα ζητείται ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη K_o ο οποίος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$K_o = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

K_o :	Συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας εναλλάκτη	W/m^2K
K_R :	Συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη	W/mK
d_m :	Μέση διάμετρος σωλήνα	m

Η μέση διάμετρος σωλήνα δίνεται από την εξίσωση:

$$d_m = \frac{d_1 - d_o}{\ln \frac{d_1}{d_o}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

για την περίπτωση όπου $d_1/d_o > 1,15$ και

$$d_m = \frac{d_o + d_1}{2} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

για την περίπτωση όπου $d_1/d_o < 1,15$.

όπου:

d_m :	Μέση διάμετρος σωλήνα	m
d_o :	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d_1 :	Εξωτερική διάμετρος σωλήνα	m

Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 26,9 mm και το πάχος του 2,3 mm. Έτσι η εσωτερική διάμετρος είναι ίση με:

$$d_o = d_1 - 2 \cdot \text{πάχος σωλήνα} = 26,9 - (2 \cdot 2,3) = 22,3 \text{ mm} \quad \mathbf{d_o = 22,3 \text{ mm}}$$

Όμως $d_1/d_o = 1,206 > 1,15$.

Άρα η μέση διάμετρος θα υπολογιστεί από την εξίσωση (2). Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$d_m = \frac{d_1 - d_o}{\ln \frac{d_1}{d_o}} \quad \left. \begin{array}{l} d_1 = 26,9 \text{ mm}, \quad d_o = 22,3 \text{ mm} \end{array} \right\} d_m = \frac{26,9 - 22,3}{\ln \frac{26,9}{22,3}} = 24,53 \text{ mm} \quad \mathbf{d_m = 24,53 \text{ mm}}$$

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη είναι ίσος με:

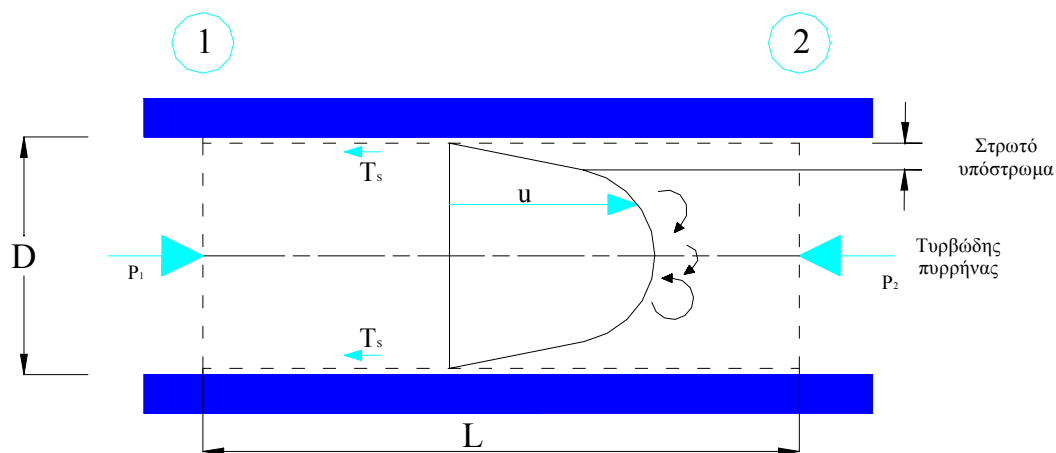
$$K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_o} + \frac{1}{2\lambda_\sigma} \ln \frac{d_1}{d_o} + \frac{1}{\alpha_2 d_1}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

K_R :	Συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη	W/mK
α_1 :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σωλήνα	W/m ² K
α_2 :	Συντελεστής συναγωγής από το σωλήνα στο καύσιμο	W/m ² K
d_o :	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d_1 :	Εξωτερική διάμετρος σωλήνα	m
λ_σ :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σωλήνα	W/mK

Για να μπορέσουμε να βρούμε των συντελεστή θερμοπερατότητας του εναλλάκτη πρέπει πρώτα να βρούμε τον εσωτερικό και εξωτερικό συντελεστή συναγωγής

Λιαδικασία εύρεσης εσωτερικού συντελεστή συναγωγής (Internal Flow):



Σχήμα 2. Εσωτερική ροή σε αγωγό.

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τον εσωτερικό συντελεστή συναγωγής θα πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε τον αριθμό Reynolds, τον αριθμό Nusselt για την συγκεκριμένη περίπτωση και στην συνέχεια τον εσωτερικό συντελεστή συναγωγής.

Μια εύχρηστη εξίσωση που μπορεί να μας δώσει τον αριθμό Nusselt και στην συνέχεια το συντελεστή συναγωγής είναι η εξίσωση Dittus – Boelter:

$$Nu_D = \frac{\alpha \cdot D}{k} = (0,023) \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

- Nu_D : Αριθμός Nusselt για σωλήνα διαμέτρου D
 α : Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σωλήνα W/m²K
 D : Διάμετρος σωλήνα m
 k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T_b W/mK
 Re_D : Αριθμός Reynolds για σωλήνα διαμέτρου D
 Pr : Αριθμός Prandtl
 n : Σταθερά

Η σταθερά n είναι ίση με:

$$n = \begin{cases} 0,4 & \text{για θερμαινόμενο ρευστό} \\ 0,3 & \text{για ψυχόμενο ρευστό} \end{cases}$$

Η εξίσωση (5) χρησιμοποιείται για ιδιότητες υπολογισμένες στη μέση (bulk) θερμοκρασία T_b και ισχύει για $0,7 \leq Pr \leq 120$, $10\,000 < Re_D < 120\,000$, $L/D > 60$.

Αν η περιοχή του αριθμού Reynolds είναι μεταξύ $5000 < Re_{D,b} < 1,25 \cdot 10^5$, $2 < Pr < 14,0$, $0 \leq \mu_b/\mu_s \leq 40$ τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και την εξίσωση Petukhov.

$$\overline{Nu}_D = \frac{(f/8) Re_D Pr}{1,07 + 12,7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:

- \overline{Nu}_D : Αριθμός Nusselt για σωλήνα διαμέτρου D
 Re_D : Αριθμός Reynolds για σωλήνα διαμέτρου D
 Pr : Αριθμός Prandtl
 f : Παράγοντας τριβής.

Ο παράγοντας τριβής μπορεί να ληφθεί από το διάγραμμα Moody. Όλες οι ιδιότητες του ρευστού είναι υπολογισμένες στη μέση θερμοκρασία (bulk) \overline{T}_b .

Η εξίσωση που θα μας δώσει τον αριθμό Reynolds είναι:

$$Re_D = V_\infty \cdot \frac{D}{\nu} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

όπου:

- Re_D : Ο αριθμός Reynolds στο εσωτερικό του σωλήνα διαμέτρου D
 V_∞ : Η ταχύτητα του ρευστού m/s
 D : Η εσωτερική διάμετρος σωλήνα m

ν : Κινηματικό ιξώδες m^2/s

Για να μπορέσουμε να βρούμε τον αριθμό Reynolds θα πρέπει πρώτα να βρούμε την ταχύτητα του ρευστού. Η ταχύτητα του ρευστού V_∞ θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = V_\infty \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

όπου:

Q : Παροχή νερού από τον λέβητα m^3/s
 V_∞ : Η ταχύτητα του ρευστού m/s
 D : Η εσωτερική διάμετρος σωλήνα m

Όλες οι ιδιότητες του ρευστού για της προηγούμενες εξισώσεις είναι υπολογισμένες στη μέση θερμοκρασία (bulk) \bar{T}_b , η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{T}_b = \frac{T_{\text{bin}} + T_{\text{bout}}}{2} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

όπου:

\bar{T}_b : Μέση θερμοκρασία του ρευστού $^\circ\text{C}$
 T_{bin} : Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού $^\circ\text{C}$
 T_{bout} : Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού $^\circ\text{C}$

Βρίσκοντας την \bar{T}_b του νερού μπορούμε, μέσω του παρακάτω πίνακα, και κάνοντας γραμμική παρεμβολή στις κατάλληλες θερμοκρασίες, να υπολογίσουμε τις ιδιότητες που αφορούν το ρευστό μέσα στο σωλήνα (Pr, ν, k).

t ($^\circ\text{C}$)	ρ (kg/m^3)	μ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	ν (m^2/s)	k (W/mK)	Pr	β (K^{-1})
Water H ₂ O						
20	1000,52	$4,1818 \cdot 10^{-5}$	$1,006 \cdot 10^{-6}$	0,597	7,02	$0,18 \cdot 10^{-3}$
40	994,59	4,1784	0,658	0,628	4,34	
60	985,46	4,1843	0,478	0,651	3,02	
80	974,08	4,1964	0,364	0,668	2,22	
100	960,63	4,2161	0,294	0,680	1,74	
120	945,25	4,250	0,247	0,685	1,446	
140	928,27	4,283	0,214	0,684	1,241	

Πίνακας 1 (SI). Τιμές ιδιοτήτων νερού.

(Από το βιβλίο «Μεταφορά θερμότητας» Δεύτερη έκδοση. Των Donald Pitts, Leighton Sisson.)

Από την προηγούμενη εξίσωση φαίνεται ότι πρέπει να υπολογίσουμε την θερμοκρασία εξόδου του νερού διότι χωρίς αυτή δεν μπορούμε να βρούμε την μέση θερμοκρασία \bar{T}_b .

Η θερμοκρασία εξόδου του νερού θα βρεθεί από την εξίσωση.

$$Q = m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta'_1 - \theta''_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta''_2 - \theta'_2) \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

Q:	Συνολικά συναλλασσόμενη θερμική ισχύς	W
m_1 :	Παροχή θερμού νερού από λέβητα	kg/s
m_2 :	Παροχή μαζούτ	kg/s
c_1 :	Ειδική θερμότητα νερού	J/kgK
c_2 :	Ειδική θερμότητα μαζούτ	J/kgK
θ'_1 :	Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (λέβητα)	°C
θ''_1 :	Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού (λέβητα)	°C
θ'_2 :	Θερμοκρασία εισόδου μαζούτ	°C
θ''_2 :	Θερμοκρασία εξόδου μαζούτ	°C

Η παροχή του νερού και του μαζούτ είναι ίση με:

Για το νερό:

$$\left. \begin{array}{l} m_1 = 576 \text{ lt/h} \\ \rho_1 = 1 \text{ kg/lt} \end{array} \right\} m_1 = 576 \cdot 1 = 576 \text{ kg/h} = 0,16 \text{ kg/s} \quad \mathbf{m_1 = 0,16 \text{ kg/s}}$$

Για το μαζούτ:

$$\left. \begin{array}{l} m_2 = 193,5 \text{ lt/h} \\ \rho_2 = 0,93 \text{ kg/lt} \end{array} \right\} m_2 = 193,5 \cdot 0,93 = 179,96 \text{ kg/h} = 0,050 \text{ kg/s} \quad \mathbf{m_2 = 0,05 \text{ kg/s}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) ως προς το ρευστό 2 (μαζούτ) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta''_2 - \theta'_2) \\ m_2 = 0,05 \text{ kg/s} \\ c_2 = 2210 \text{ J/kgK} \\ \theta''_2 = 5^\circ \text{C}, \theta'_2 = 75^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q = 0,05 \cdot 2210 \cdot (75 - 5) = 7735 \text{ W} \quad \mathbf{Q = 7735 \text{ W}}$$

Λύνοντας τώρα την εξίσωση (10) για το ρευστό 1 (νερό) ως προς την θερμοκρασία εξόδου του νερού και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \theta''_1 = \frac{-Q + m_1 \cdot c_1 \cdot \theta'_1}{m_1 \cdot c_1} \\ Q = 7735 \text{ W}, m_1 = 0,16 \text{ kg/s} \\ c_1 = 4190 \text{ J/kgK}, \theta'_1 = 85^\circ \text{C} \end{array} \right\} \theta''_1 = \frac{-7735 + 0,16 \cdot 4190 \cdot 85}{0,16 \cdot 4190} = 73,46^\circ \text{C}$$

$$\mathbf{\theta''_1 = 73,5^\circ \text{C}}$$

Η μέση θερμοκρασία \overline{T}_b σύμφωνα με την εξίσωση (9) προκύπτει ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} \overline{T}_b = \frac{T_{bin} + T_{bout}}{2} \\ T_{bin} = 85^\circ \text{C}, T_{bout} = 73,5^\circ \text{C} \end{array} \right\} \overline{T}_b = \frac{85 + 73,5}{2} = 79,25^\circ \text{C} \quad \overline{T}_b = \mathbf{79,25^\circ \text{C}}$$

Με την χρησιμοποίηση του πίνακα 1 και κάνοντας γραμμική παρεμβολή στις κατάλληλες θερμοκρασίες προκύπτουν οι ιδιότητες του νερού.

Οι ιδιότητες του νερού για θερμοκρασία $\overline{T}_b = 79,25^\circ \text{C}$ είναι:

$$\begin{aligned} Pr &= 2,25 \\ k &= 0,667 \text{ W/mK} \\ \nu &= 0,368 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \rho &= 974,64 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Στην συνέχεια βρίσκουμε την παροχή όγκου του νερού από την εξίσωση:

$$Q_1 = \frac{m_1}{\rho_1} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

$$\begin{array}{lll} Q_1: & \text{Παροχή όγκου του νερού} & \text{m}^3/\text{s} \\ m_1: & \text{Παροχή μάζας του νερού} & \text{kg/s} \\ \rho_1: & \text{Πυκνότητα νερού στην συγκεκριμένη θερμοκρασία} & \text{kg/m}^3 \end{array}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (11) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q_1 = \frac{m_1}{\rho_1} \\ m_1 = 0,16 \text{ kg/s}, \\ \rho_1 = 974,64 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right\} Q_1 = \frac{0,16}{974,64} = 0,000164 \text{ m}^3/\text{s} \quad \mathbf{Q_1 = 0,000164 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Λύνοντας την εξίσωση (8) ως προς V_∞ και αντικαθιστώντας προκύπτει.

$$\left. \begin{array}{l} V_\infty = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \\ Q = 0,000164 \text{ m}^3/\text{s}, \\ D = 0,0223 \text{ m} \end{array} \right\} V_\infty = \frac{4 \cdot 0,000164}{\pi \cdot 0,0223^2} \approx 0,420 \text{ m/s} \quad \mathbf{V_\infty \approx 0,420 \text{ m/s}}$$

Αντικαθιστώντας τα αποτελέσματα στην εξίσωση (7) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Re}_D = V_\infty \cdot \frac{D}{\nu} \\ V_\infty = 0,420 \text{ m/s,} \\ D = 0,0223 \text{ m} \\ \nu = 0,368 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} \text{Re}_D = 0,420 \cdot \frac{0,0223}{0,368 \cdot 10^{-6}} = 25451,09 \quad \text{Re}_D = \mathbf{25451}$$

Βλέπουμε ότι για τον αριθμό Reynolds που προκύπτει μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και την εξίσωση (5) και την εξίσωση (6). Ο συντελεστής συναγωγής θα προκύψει από τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων της εξίσωσης (5) και (6).

Έτσι ο μέσος όρος που θα μας δώσει τον συντελεστή συναγωγής είναι:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha'_1 + \alpha''_1}{2} \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

όπου:

$$\begin{array}{ll} \alpha_1: & \text{Εσωτερικός συντελ. συναγωγ. από το νερό στο σωλήνα} & \text{W/m}^2\text{K} \\ \alpha'_1: & \text{Εσωτερικός συντελ. συναγ. από το νερό στο σωλήνα (εξισ.5)} & \text{W/m}^2\text{K} \\ \alpha''_1: & \text{Εσωτερικός συντελ. συναγ. από το νερό στο σωλήνα (εξισ.6)} & \text{W/m}^2\text{K} \end{array}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) προκύπτει.

$$\left. \begin{array}{l} \overline{\text{Nu}}_D = 0,023 \cdot \text{Re}_D^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3} \\ \text{Re}_D = 25451,09 \\ \text{Pr} = 2,25 \end{array} \right\} \overline{\text{Nu}}_D = 0,023 \cdot 25451,09^{0,8} \cdot 2,25^{0,3} = 98,16$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = \mathbf{98,16}$$

Ο συντελεστής συναγωγής χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5) προκύπτει ίσος με:

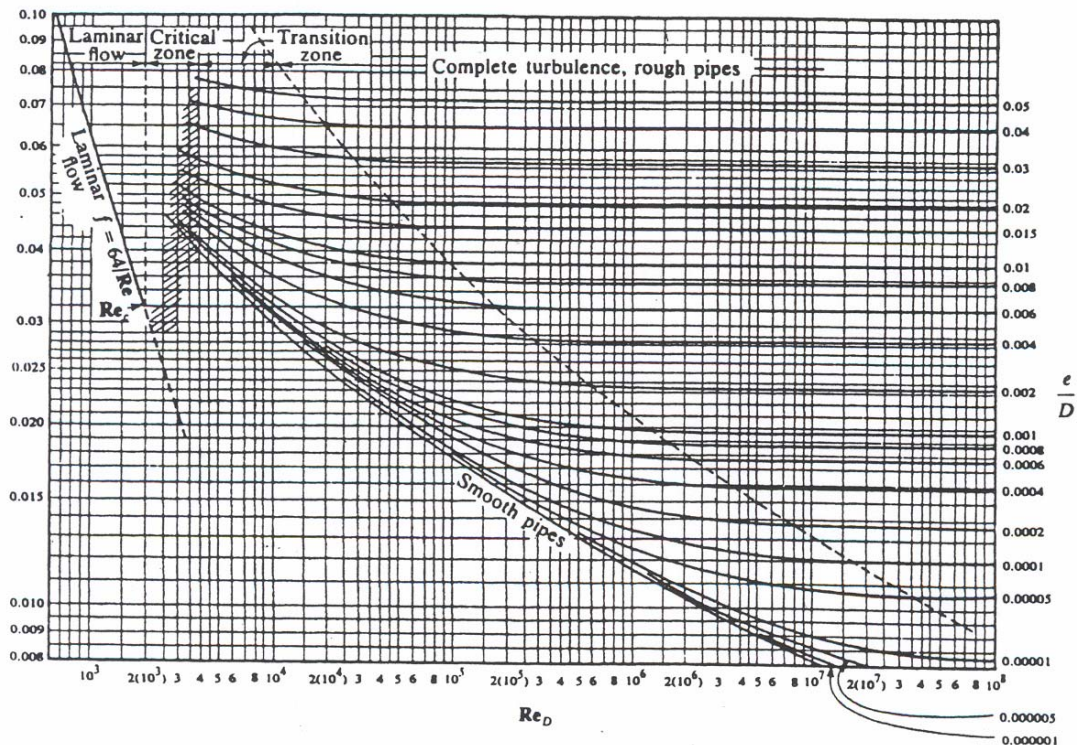
$$\left. \begin{array}{l} \alpha'_1 = \frac{k}{D} \cdot \overline{\text{Nu}}_D \\ k = 0,667 \text{ W/mK} \\ D = 0,0223 \text{ m} \\ \overline{\text{Nu}}_D = 98,16 \end{array} \right\} \alpha'_1 = \frac{0,667}{0,0223} \cdot 98,16 = 2936 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha'_1 = \mathbf{2936 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Για να μπορέσουμε να βρούμε τον αριθμό Nusselt μέσω της εξίσωσης (6) θα πρέπει να βρούμε πρώτα τον παράγοντα τριβής f .

Επιλέγοντας την κατάλληλη μέση τραχύτητα για τον συγκεκριμένο αγωγό μπορούμε να βρούμε την σχετική τραχύτητα (ϵ/D) , και στην συνέχεια από το διάγραμμα Moody προκύπτει ο παράγοντας τριβής f .

Τύπος	e (mm)
Τραβηχτός σωλήνας	0,0015
Ορείχαλκος, μόλυβδος, γυαλί, τσιμέντο με εσωτερικές ίνες	0,0076
Εμπορικό ατσάλι ή σφυρηλατημένος σίδηρος	0,046
Χυτοσίδηρος (μαντέμι) εμβαπτισμένος σε άσφαλτο	0,12
Γαλβανισμένος σίδηρος	0,15
Συναρμολογημένο ξύλο	0,18 σε 0,91
Χυτοσίδηρος (μαντέμι) (χωρίς επικάλυψη)	0,259
Σκυρόδεμα	0,30 σε 3,05
Πριτσινωμένο ατσάλι	0,91 σε 9,1

Πίνακας 3. Μέση τραχύτητα εμπορικών αγωγών.



Διάγραμμα 1. Παράγοντες τριβής για ροή σε αγωγό. [Προσαρμοσμένο μετά από άδεια από L.F.Moody, Trans. ASME, 66:672,1944, The American Society of Mechanical Engineers.]

Επιλέγοντας τον τύπο σωλήνα από τον πίνακα 3 (εμπορικό ατσάλι ή σφυρηλατημένος σίδηρος) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{e}{D} \\ e = 0,046 \text{ mm}, D = 22,3 \text{ mm} \end{array} \right\} \frac{e}{D} = \frac{0,046}{22,3} = 0,002$$

Από το παραπάνω διάγραμμα Moody και για τραχύτητα ίση με 0,002 ο παράγοντας τριβής f προκύπτει ίσος με: 0,029.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) προκύπτει.

$$\overline{Nu}_D = \frac{(f/8) \cdot Re_D \cdot Pr}{1,07 + 12,7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \left. \vphantom{\overline{Nu}_D} \right\} \overline{Nu}_D = \frac{(0,029/8) \cdot 25451,09 \cdot 2,25}{1,07 + 12,7(0,029/8)^{1/2} (2,25^{2/3} - 1)} =$$

$$= 128,27$$

Nu_D = 128,27

Ο συντελεστής συναγωγής χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6) προκύπτει ίσος με:

$$\alpha_1'' = \frac{k}{D} \cdot \overline{Nu}_D \left. \vphantom{\alpha_1''} \right\} \alpha_1'' = \frac{0,667}{0,0223} \cdot 128,27 \approx 3837 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_1'' \approx 3837 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$k = 0,667 \text{ W/mK}$
 $D = 0,0223 \text{ m}$
 $\overline{Nu}_D = 128,27$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (12) βρίσκουμε τον μέσο όρο του συντελεστή συναγωγής από το νερό στον σωλήνα.

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1' + \alpha_1''}{2} \left. \vphantom{\alpha_1} \right\} \alpha_1 = \frac{2936 + 3837}{2} = 3386,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_1 = 3386,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_1' = 2936 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $\alpha_1'' = 3837 \text{ W/m}^2\text{K}$

Λαδιακασία εύρεσης εξωτερικού συντελεστή συναγωγής. (External flow)

Η εξίσωση που δίνει τον αριθμό Nusselt γύρω από μακρείς οριζόντιους κυλίνδρους και στην συνέχεια τον συντελεστή συναγωγής από την επιφάνεια του σωλήνα στο μαζούτ (φυσική συναγωγή) είναι η παρακάτω.

$$\overline{Nu}_f = C \cdot Ra_D^m \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

όπου:

- \overline{Nu}_f : Αριθμός Nusselt ως προς την θερμοκρασία στρώματος \overline{T}_f
- Ra_D : Αριθμός Rayleigh ως προς την διάμετρο D του σωλήνα
- C: Συντελεστής για μακρείς οριζόντιους κυλίνδρους
- m: Συντελεστής για μακρείς οριζόντιους κυλίνδρους

Οι συντελεστές C και m θα επιλεγούν από τον παρακάτω πίνακα ανάλογα με την περιοχή του αριθμού Rayleigh για τον οριζόντιο κύλινδρο.

Γεωμετρικό σχήμα	$Gr_D Pr_D$	C	m
Οριζόντιοι κύλινδροι	$10^{-10} - 10^{-2}$	0,675	0,058
	$10^{-2} - 10^2$	1,02	0,148
	$10^2 - 10^4$	0,850	0,188
	$10^4 - 10^7$	0,480	1/4
	$10^7 - 10^{12}$	0,125	1/3

Πίνακας 2. Συντελεστές C,m για την εξίσωση (13) ανάλογα με τον αριθμό Rayleigh

Ο αριθμός Grashof δίνεται από την εξίσωση.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \approx \frac{\text{δυνάμεις άνωσης}}{\text{ιξώδεις δυνάμεις}} \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

όπου:

Gr:	Αριθμός Grashof	
g:	Επιτάχυνση βαρύτητας	=9,81m/s ²
β:	Ο συντελεστής διαστολής όγκου	K ⁻¹
T _s :	Θερμοκρασία επιφάνειας του σωλήνα	°C
T _∞ :	Θερμοκρασία νερού	°C
L:	Μήκος επιφάνειας	m
ν:	Κινηματικό ιξώδες	m ² /s

Ο αριθμός Rayleigh θα δοθεί από την εξίσωση.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (\text{Εξίσωση 15})$$

όπου:

Ra:	Αριθμός Rayleigh.
Gr:	Αριθμός Grashof
Pr:	Αριθμός Prandtl.

Οι ιδιότητες του μαζούτ για τις προηγούμενες εξισώσεις έχουν υπολογιστεί στην μέση θερμοκρασία στρώματος \bar{T}_f . Η μέση θερμοκρασία στρώματος θα δοθεί από την εξίσωση.

$$\bar{T}_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

όπου:

\bar{T}_f :	Μέση θερμοκρασία στρώματος	°C
T _∞ :	Μέση θερμοκρασία μαζούτ	°C
T _s :	Μέση θερμοκρασία επιφάνειας σωλήνα	°C

Οι ιδιότητες του μαζούτ σ' αυτή την θερμοκρασία θα προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή στις κατάλληλες θερμοκρασίες από τον παρακάτω πίνακα, που αφορά λάδι τύπου MK (με παρεμφερείς ιδιότητες).

t (°C)	ρ (kg/m ³)	μ·10 ⁴ (kg/ms)	ν·10 ⁶ (m ² /s)	k (W/m°C)	Pr	β·10 ⁴ (K ⁻¹)
Λάδι τύπου MK						
20	903,0	18560	1514	0,1485	15800	8,64
30	894,5	6180	691,2	0,1461	7450	8,71
40	887,5	3031	342,0	0,1437	3810	8,79
50	879,0	1638	186,2	0,1413	2140	8,86
60	871,5	961,4	110,7	0,1389	1320	8,95
70	864,0	603,3	69,3	0,1363	858	9,03
80	856,0	399,3	46,6	0,1340	591	9,12
90	848,2	273,7	32,3	0,1314	424	9,20
100	840,7	202,1	24,0	0,1290	327	9,28

Πίνακας 4. Ιδιότητες του λαδιού τύπου MK σε σχέση με την θερμοκρασία.

Επειδή η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σωλήνα δεν είναι γνωστή θα πρέπει να ακολουθήσουμε την παρακάτω διαδικασία για να την βρούμε. Στην συνέχεια με την βοήθεια των προηγούμενων σχέσεων θα βρούμε τον εξωτερικό συντελεστή συναγωγής

Αρχικά θα υποθέτουμε μια θερμοκρασία για την επιφάνεια του σωλήνα και στην συνέχεια με την βοήθεια των προηγούμενων εξισώσεων θα βρούμε τον εξωτερικό συντελεστή συναγωγής για την συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Αφού ξέρουμε και τους δύο συντελεστές συναγωγής εσωτερικό και εξωτερικό μπορούμε να λύσουμε την παρακάτω εξίσωση ως προς θ_{02} και να βρούμε την θερμοκρασία που προκύπτει.

$$q_{lin} = q_{lout} \quad (\text{Εξίσωση 17})$$

$$q_{lin} = \frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_o} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_o}} \quad \text{και} \quad q_{lout} = \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_1}}$$

Άρα:

$$\frac{\pi \cdot (\theta_1 - \theta_{02})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_o} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_1}{d_o}} = \frac{\pi \cdot (\theta_{02} - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_1}} \quad (\text{Εξίσωση 18})$$

όπου:

θ_1 :	Θερμοκρασία νερού.	°C
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας σιδηροσωλήνα = T_s	°C
θ_2 :	Θερμοκρασία μαζούτ	°C
α_1 :	Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σιδηροσωλήνα	W/m ² K
d_o :	Εσωτερική διάμετρος σιδηροσωλήνα	m
d_1 :	Εξωτερική διάμετρος σιδηροσωλήνα	m
λ :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σιδηροσωλήνα	W/mK
α_2 :	Συντελ. συναγωγής από τον σιδηροσωλήνα στο νερό	W/m ² K

Σαν θ_1 και θ_2 παίρνουμε την μέση θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού και του μαζούτ αντίστοιχα

Από όλες τις υποθέσεις που κάνουμε για την θερμοκρασία της επιφάνειας του σιδηροσωλήνα, σωστά είναι τα αποτελέσματα που ικανοποιείται η εξίσωση (17) και η θερμοκρασία που υποθέσαμε είναι ίση με αυτή που προκύπτει λύνοντας ως προς θ_{02} .

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορες θερμοκρασίες που υποθέσαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

θ_{02} (°C) (θέτω)	T_f (K)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	Pr	β (K ⁻¹)	Gr	Ra
76	58	0,0001258	0,1394	1484	0,0008932	387,59	575184
78,17	59,09	0,00011757	0,1391	1395	0,0008942	471,03	657087
80	60	0,0001107	0,1389	1320	0,000895	557,28	735610

θ_{02} (°C) (θέτω)	T_f (°C)	\overline{Nu}_D	α_2 (W/m ² K)	θ_{02} (°C) (από εξίσ.18)
76	58	13,22	68,51	78,20
78,17	59,09	13,67	70,69	78,17
80	60	14,06	72,60	78,14

Η περίπτωση που η υπόθεση της θερμοκρασίας που κάναμε είναι ίση με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση (18) είναι για 78,14 °C. Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

$$\text{Υποθέτοντας } \theta_{02} = 78,17 = T_s$$

Η μέση θερμοκρασία στρώματος T_f είναι ίση με:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \Rightarrow T_f = \frac{78,17 + 40}{2} = 59,09^\circ\text{C} \Rightarrow T_f = 59,09^\circ\text{C}$$

Σαν θερμοκρασία του μαζούτ T : παίρνουμε την μέση θερμοκρασία εισόδου εξόδου του μαζούτ δηλαδή 40°C.

Από τον πίνακα 3 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει:

$$\begin{aligned} Pr &= 1395 \\ k &= 0,1391 \quad \text{W/mK} \\ \nu &= 0,00011757 \quad \text{m}^2/\text{s} \\ \beta &= 0,0008942 \quad \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Ο αριθμός Grashof σύμφωνα με την εξίσωση (14) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} Gr_D &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3}{\nu^2} \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \quad \beta = 0,0008942 \text{ K}^{-1} \\ T_s &= 78,17^\circ\text{C}, \quad T_\infty = 40^\circ\text{C} \\ D &= 0,0269 \text{ m}, \nu = 0,00011757 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} Gr_D = \frac{9,8 \cdot 0,0008942 \cdot (78,17 - 40) \cdot 0,0269^3}{0,00011757^2} =$$

$$= 471,03$$

$$\mathbf{Gr_D = 471,03}$$

Ο αριθμός Rayleigh:

$$\left. \begin{aligned} Ra_D &= Gr_D \cdot Pr \\ Gr_D &= 471,03 \\ Pr &= 1395 \end{aligned} \right\} Ra_D = 471,03 \cdot 1395 = 657087$$

$$\mathbf{Ra_D = 657087}$$

Ο αριθμός Nusselt σύμφωνα με την εξίσωση (13) είναι ίσος με:

$$\left. \begin{array}{l} \overline{Nu}_f = C \cdot Ra_D^m \\ Ra_D = 657087 \\ C = 0,480, m = 1/4 \end{array} \right\} \overline{Nu}_f = 0,48 \cdot 657087^{1/4} = 13,67 \quad \overline{Nu}_f = 13,67$$

Οι συντελεστές C και m ανάλογα με τον αριθμό Rayleigh προκύπτουν από τον πίνακα 2 ίση με 0,480 και 1/4 αντίστοιχα. Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή συναγωγής προκύπτει:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_f \cdot k}{D} = \frac{13,67 \cdot 0,1391}{0,0269} = 70,69 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \alpha_2 = 70,69 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη σύμφωνα με την εξίσωση (4) προκύπτει ίσος με:

$$\left. \begin{array}{l} K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_o} + \frac{1}{2\lambda_\sigma \ln \frac{d_1}{d_o}} + \frac{1}{\alpha_2 d_1}} \\ \alpha_1 = 3386,5 \text{ W/m}^2\text{K}, d_o = 0,0223 \text{ m} \\ \lambda_\sigma = 58,15 \text{ W/mK}, d_1 = 0,0269 \text{ m} \\ \alpha_2 = 70,69 \text{ W/m}^2\text{K} \end{array} \right\}$$

$$K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{3386,5 \cdot 0,0223} + \frac{1}{2 \cdot 58,15 \ln \frac{0,0269}{0,0223}} + \frac{1}{70,69 \cdot 0,0269}} = 5,81 \text{ W/mK}$$

$$K_R = 5,81 \text{ W/mK}$$

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη προκύπτει σύμφωνα με την εξίσωση (1).

$$\left. \begin{array}{l} K_o = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m} \\ K_R = 5,81 \text{ W/mK} \\ d_m = 0,02453 \text{ m} \end{array} \right\} K_o = \frac{5,81}{\pi \cdot 0,02453} = 75,39 \text{ W/m}^2\text{K} \quad K_o = 75,39 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ερώτημα Β:

Το αναγκαίο μήκος L θα βρεθεί λύνοντας ως προς L την επόμενη σχέση.

$$F = \pi \cdot d_m \cdot L \text{ (Εξίσωση 19)}$$

όπου:

$$F: \text{ Η επιφάνεια του εναλλάκτη } \text{ m}^2$$

$$d_m: \text{ Η μέση διάμετρος του σωλήνα } \text{ m}$$

Η επιφάνεια θα βρεθεί από την παρακάτω εξίσωση λύνοντας ως προς F:

$$Q = K_o \cdot F \cdot \Delta\theta_m \quad (\text{Εξίσωση 20})$$

όπου:

Q:	Συνολικά συναλλασσόμενη θερμική ισχύς	W
K _o :	Συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εναλλάκτη	W/m ² K
F:	Επιφάνεια συναλλαγής εναλλάκτη	m ²
Δθ _m :	Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλάκτη	°C

Για να μπορέσουμε να βρούμε την απαιτούμενη επιφάνεια συναλλαγής του εναλλάκτη θα πρέπει πρώτα να βρούμε τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά που έχει ο συγκεκριμένος εναλλάκτης.

Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά του εναλλάκτη μικτής διάταξης θα δοθεί από την εξής διαδικασία:

Θα βρίσκουμε αρχικά την μέση λογαριθμική θερμοκρασία για εναλλάκτη αντιρροής μέσω της εξίσωσης:

$$\Delta\theta_{\text{αντ}} = \frac{(\theta'_1 - \theta''_2) - (\theta''_1 - \theta'_2)}{\ln \frac{\theta'_1 - \theta''_2}{\theta''_1 - \theta'_2}} \quad (\text{Εξίσωση 21})$$

όπου:

θ' ₁ :	Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (λέβητα)	°C
θ'' ₁ :	Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού (λέβητα)	°C
θ' ₂ :	Θερμοκρασία εισόδου μαζούτ	°C
θ'' ₂ :	Θερμοκρασία εξόδου μαζούτ	°C

Στην συνέχεια θα διορθώνουμε την θερμοκρασία που προκύπτει από την εξίσωση (21) κατά ένα συντελεστή ε που προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα με βάση τα νούμερα που προκύπτουν από τις εξισώσεις:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{m_2 \cdot c_2}{m_1 \cdot c_1} \quad (\text{Εξίσωση 22})$$

όπου:

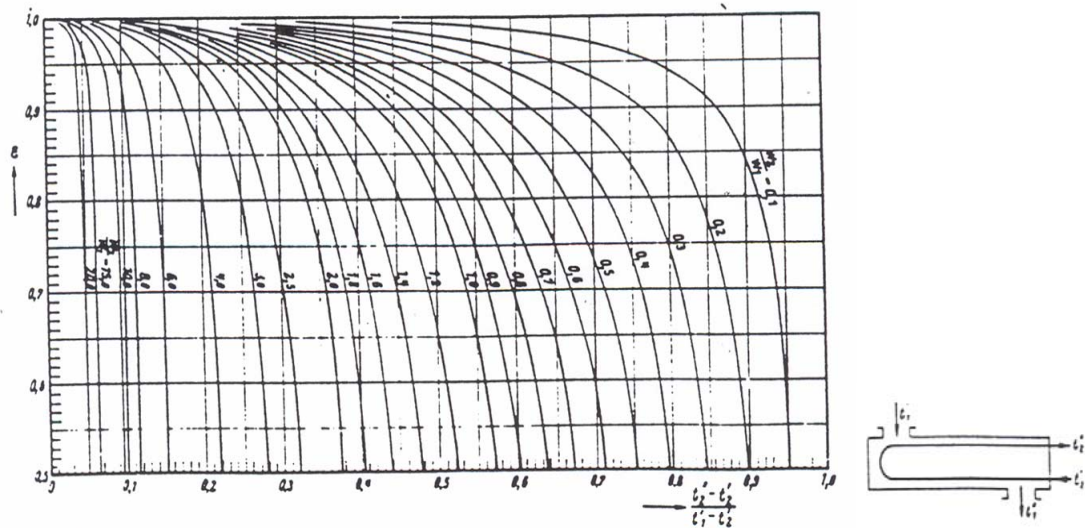
w ₁ :	Θερμοχωρητική παροχή νερού	kg/s
w ₂ :	Θερμοχωρητική παροχή μαζούτ	kg/s
m ₁ :	Συνολική παροχή νερού	kg/s
m ₂ :	Συνολική παροχή μαζούτ	kg/s
c ₁ :	Ειδική θερμότητα νερού	J/kgK
c ₂ :	Ειδική θερμότητα μαζούτ	J/kgK

και

$$\frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} \quad (\text{Εξίσωση 23})$$

Επομένως:

$$\Delta\theta_{\text{μικτ.}} = \Delta\theta_{\text{αντ.}} \cdot \varepsilon \quad (\text{Εξίσωση 24})$$



Διάγραμμα 2. Μικτή διάταξη ροής. Ομορροή – αντιρροή. 1) Διαδρομή στο κέλυφος 2) διαδρομές στους σωλήνες.

Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (21) προκύπτει:

$$\Delta\theta_{\text{avt.}} = \frac{(\theta'_1 - \theta''_2) - (\theta''_1 - \theta'_2)}{\ln \frac{\theta'_1 - \theta''_2}{\theta''_1 - \theta'_2}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta'_1 = 85^\circ\text{C}, \theta''_1 = 73,5^\circ\text{C} \\ \theta'_2 = 5^\circ\text{C}, \theta''_2 = 75^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Delta\theta_{\text{avt.}} = \frac{(85 - 75) - (73,5 - 5)}{\ln \frac{85 - 75}{73,5 - 5}} = 30,40^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{\text{avt.}} = 30,40^\circ\text{C}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (22) και (23) προκύπτουν:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{w_2}{w_1} = \frac{m_2 \cdot c_2}{m_1 \cdot c_1} = \frac{0,050 \cdot 2210}{0,16 \cdot 4190} = 0,165 \\ m_2 = 0,050 \text{ kg/s} \quad m_1 = 0,16 \text{ kg/s} \\ c_1 = 4190 \text{ J/kgK} \quad c_2 = 2210 \text{ J/kgK} \end{array} \right\} \frac{w_2}{w_1} = 0,165$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} \\ \theta'_1 = 85^\circ\text{C}, \theta'_2 = 5^\circ\text{C}, \theta''_2 = 75^\circ\text{C} \end{array} \right\} \frac{75 - 5}{85 - 5} = 0,875$$

Από το διάγραμμα 2 προκύπτει $\varepsilon = 0,805$.

Άρα από την εξίσωση (24) προκύπτει αντικαθιστώντας:

$$\Delta\theta_{\text{μικτ.}} = 30,40 \cdot 0,805 = 24,47^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{\text{μικτ.}} = 24,47^\circ\text{C}$$

Λύνοντας την εξίσωση (20) ως προς F και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} F = \frac{Q}{K_o \cdot \Delta\theta_m} \\ Q = 7735 \text{ W}, \\ K_o = 75,39 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \Delta\theta_m = 24,47 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} F = \frac{7735}{75,39 \cdot 24,47} \approx 4,20 \text{ m}^2 \quad F \approx 4,20 \text{ m}^2$$

Στην συνέχεια λύνοντας την εξίσωση (19) ως προς L και αντικαθιστώντας προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$\left. \begin{array}{l} L = \frac{F}{\pi \cdot d_m} \\ F = 4,20 \text{ m}^2, d_m = 0,02453 \text{ m} \end{array} \right\} L = \frac{4,20}{\pi \cdot 0,02453} = 54,50 \text{ m} \quad L = 54,50 \text{ m}$$

Ερώτημα Γ:

Ο συντελεστής συναγωγής που προκύπτει για τις παράπλευρες επιφάνειες είναι διαφορετικός τόσο από το συντελεστή συναγωγής της πάνω βάσης όσο και από το συντελεστή συναγωγής της κάτω βάσης.

Οι εξισώσεις που θα μας δώσουν την ισχύ που χάνεται είναι ή παρακάτω.

Για την κάθετη επιφάνεια:

$$Q_{\text{καθ.}} = \alpha_{\text{καθ.}} \cdot F_{\text{καθ.}} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{χαλ.}} \cdot F_{\text{καθ.}} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \text{ (Εξίσωση 25)}$$

όπου:

$Q_{\text{καθ.}}$:	Συνολική συναλλασσόμενη ισχύς από τις κάθετες επιφάνειες	W
θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^\circ\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας προθερμαντήρα (χαλυβδόφυλλο)	$^\circ\text{C}$
$F_{\text{καθ.}}$:	Εμβαδόν κάθετων επιφανειών	m^2
$\alpha_{\text{καθ.}}$:	Συντελ. συναγ. από την κάθετη επιφάνεια στο χώρο	$\text{W/m}^2\text{K}$
$\varepsilon_{\text{χαλ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής χαλυβδόφυλλων	
$C\mu$:	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	$\text{W/m}^2\text{K}^4$
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100}$	K

Για την άνω οριζόντια βάση:

$$Q_{\text{ανω.}} = \alpha_{\text{ανω.}} \cdot F_{\text{βασ.}} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\text{χαλ.}} \cdot F_{\text{βασ.}} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \text{ (Εξίσωση 26)}$$

όπου:

$Q_{\text{ανω.}}$:	Συνολική συναλλασσόμενη ισχύς από την άνω βάση	W
---------------------	--	---

θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^{\circ}\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας προθερμαντήρα (χαλυβδόφυλλο)	$^{\circ}\text{C}$
$F_{\beta\alpha\sigma.}$:	Εμβαδόν άνω βάσης	m^2
$\alpha_{\text{ανω.}}$:	Συντελ. συναγωγής από την άνω βάση στο χώρο	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$\epsilon_{\text{χαλ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής χαλυβδόφυλλων	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100}$	K

Για την κάτω οριζόντια βάση:

$$Q_{\text{κατ.}} = \alpha_{\text{κατ.}} \cdot F_{\beta\alpha\sigma.} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \epsilon_{\text{χαλ.}} \cdot F_{\beta\alpha\sigma.} \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \quad (\text{Εξίσωση 27})$$

όπου:

$Q_{\text{κατ.}}$:	Συνολική συναλλασσόμενη ισχύς από την κάτω βάση	W
θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου	$^{\circ}\text{C}$
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας προθερμαντήρα (χαλυβδόφυλλο)	$^{\circ}\text{C}$
$F_{\beta\alpha\sigma.}$:	Εμβαδόν κάτω βάσης	m^2
$\alpha_{\text{κατ.}}$:	Συντελ. συναγωγής από την κάτω βάση στο χώρο	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$\epsilon_{\text{χαλ.}}$:	Συντελεστής ολικής εκπομπής χαλυβδόφυλλων	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100}$	K

Οι συνολικές απώλειες από τον εναλλάκτη θα είναι:

$$Q_{\text{συν.}} = Q_{\text{καθ.}} + Q_{\text{ανω}} + Q_{\text{κατ.}} \quad (\text{Εξίσωση 28})$$

Κάθετη επιφάνεια.

Για να βρεθεί ο συντελεστής συναγωγής από τις κάθετες επιφάνειες στο περιβάλλον θα πρέπει να βρούμε τον αριθμό Nusselt. Ο αριθμός Nusselt θα βρεθεί από την εξίσωση των Churchill και Chu:

$$\overline{\text{Nu}}_L = \frac{\alpha \cdot L}{k} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot \text{Ra}_L^{1/6}}{[1 + (0,492/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Εξίσωση 29})$$

όπου:

$\overline{\text{Nu}}_L$:	Μέσος αριθμός Nusselt για κατακόρυφη πλάκα μήκους L	
α :	Συντελεστής συναγωγής από την πλάκα στο περιβάλλον	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
k :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	W/mK
Ra_L :	Αριθμός Rayleigh για κατακόρυφη πλάκα μήκους L	
Pr :	Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία στρώματος T_f	

Η σχέση αυτή ισχύει σε όλη την περιοχή Ra_L ($10^{-1} < \text{Ra}_L < 10^{12}$).

Ο αριθμός Grashof και Rayleigh θα δοθούν από την εξίσωση (14) και (15) αντίστοιχα, για το ύψος της κάθετης επιφάνειας. Όλες οι ιδιότητες είναι υπολογισμένες στην μέση θερμοκρασία στρώματος T_f .

Η μέση θερμοκρασία στρώματος T_f , αφού η επιφάνεια αποκτάει τη μέση θερμοκρασία εισόδου – εξόδου του μαζούτ, και η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 10°C είναι ίση με:

$$\left. \begin{array}{l} T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} + 273 \\ T_s = 40^\circ\text{C} \\ T_\infty = 10^\circ\text{C} \end{array} \right\} T_f = \frac{40 + 10}{2} + 273 = 25 + 273 = 298^\circ\text{C} \quad T_f = 298^\circ\text{C}$$

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	μ (kg/ms)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	Pr
200	1,7684	1,0061	$1,3289 \cdot 10^{-5}$	$7,490 \cdot 10^{-6}$	0,01809	0,739
250	1,4128	1,0053	1,5990	11,310	0,02227	0,722
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,690	0,02624	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,680

Πίνακας 4 (SI). Τιμές ιδιοτήτων αερίων σε ατμοσφαιρική πίεση.

(Από το βιβλίο «Μεταφορά θερμότητας» Δεύτερη έκδοση. Των Donald Pitts, Leighton Sisson.)

Οι ιδιότητες του αέρα για θερμοκρασία $T_f = 298^\circ\text{C}$ όπως προκύπτουν από τον παρακάτω πίνακα με γραμμική παρεμβολή είναι:

$$\begin{aligned} Pr &= 0,709 \\ k &= 0,0261 \quad \text{W/mK} \\ \nu &= 15,51 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s} \\ \beta &= 0,0033557 \quad \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14) προκύπτει ο αριθμός Grashof:

$$\left. \begin{array}{l} Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\ g = 9,8 \text{m/s}^2, \quad \beta = 0,0033557 \text{K}^{-1} \\ T_s = 40^\circ\text{C}, \quad T_\infty = 10^\circ\text{C} \\ L = 1,5 \text{ m}, \quad \nu = 15,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} Gr_L = \frac{9,8 \cdot 0,0033557 \cdot (40 - 10) \cdot 1,5^3}{(15,51 \cdot 10^{-6})^2} = 1,384 \cdot 10^{10}$$

$$Gr_L = 1,384 \cdot 10^{10}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (15) προκύπτει ο αριθμός Rayleigh.

$$\left. \begin{array}{l} Ra_L = Gr_L \cdot Pr \\ Gr_L = 1,384 \cdot 10^{10} \\ Pr = 0,709 \end{array} \right\} Ra_L = 1,384 \cdot 10^{10} \cdot 0,709 = 9,813 \cdot 10^9 \quad \mathbf{Ra_L = 9,813 \cdot 10^9}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (29) προκύπτει:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \left. \begin{array}{l} \\ Ra_L = 9,813 \cdot 10^9, Pr = 0,709 \end{array} \right\} \overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (9,813 \cdot 10^9)^{1/6}}{[1 + (0,492/0,709)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$= 250,73$$

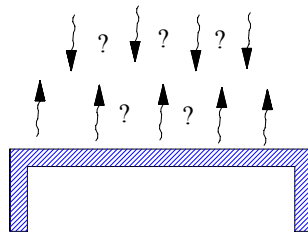
$$\overline{Nu}_L = \mathbf{250,73}$$

Λύνοντας ως προς α προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{k}{L} \cdot \overline{Nu}_L \\ k = 0,0261 \text{ W/mK}, \\ L = 1,5 \text{ m}, \overline{Nu}_L = 250,73 \end{array} \right\} \alpha = \frac{0,0261}{1,5} \cdot 250,73 = 4,363 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\mathbf{\alpha_{καθ.} = 4,363 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Άνω οριζόντια βάση.



Σχήμα 3. Θερμαινόμενη οριζόντια επιφάνεια προς τα πάνω.

Για να βρεθεί ο συντελεστής συναγωγής από την άνω οριζόντια βάση θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εξίσωση για να βρούμε τον αριθμό Nusselt.

$$\overline{Nu}_{Lc} = 0,15 \cdot Ra_{Lc}^{1/3} \quad (\text{Εξίσωση 30})$$

όπου:

\overline{Nu}_{Lc} : Μέσος αριθμός Nusselt για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Ra_{Lc} : Αριθμός Rayleigh για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Η προηγούμενη σχέση ισχύει για $10^7 < Ra_{Lc} < 3 \cdot 10^{10}$. Ο αριθμός Grashof θα δοθεί από την εξίσωση (14) αλλά για το κατάλληλο μήκος L_c .

Το χαρακτηριστικό μήκος L_c δίνεται από την εξίσωση:

$$L_c = \frac{\text{Εμβαδόν Επιφάνειας}}{\text{Περίμετρος Επιφάνειας}} \quad (\text{Εξίσωση 31})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (31) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} L_c &= \frac{\text{Εμβαδόν Επιφάνειας}}{\text{Περίμετρος Επιφάνειας}} \\ F &= 0,8 \cdot 0,8 = 0,64 \text{ m}^2 \\ \text{Περίμετρος} &= 0,8 \cdot 4 = 3,2 \text{ m} \end{aligned} \right\} L_c = \frac{0,64}{3,2} = 0,2 \text{ m} \quad \mathbf{L_c = 0,2 \text{ m}}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14) προκύπτει ο αριθμός Grashof.

$$\left. \begin{aligned} Gr_{Lc} &= \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2, \quad \beta = 0,033556 \text{ K}^{-1} \\ T_s &= 40^\circ \text{ C}, \quad T_\infty = 10^\circ \text{ C} \\ L &= 0,2 \text{ m}, \quad \nu = 15,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} Gr_{Lc} = \frac{9,8 \cdot 0,0033556 \cdot (40 - 10) \cdot 0,2^3}{(15,51 \cdot 10^{-6})^2} = 3,281 \cdot 10^7$$

$\mathbf{Gr_{Lc} = 3,281 \cdot 10^7}$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (15) προκύπτει ο αριθμός Rayleigh.

$$\left. \begin{aligned} Ra_{Lc} &= Gr_{Lc} \cdot Pr \\ Gr_{Lc} &= 3,281 \cdot 10^7 \\ Pr &= 0,709 \end{aligned} \right\} Ra_L = 3,281 \cdot 10^7 \cdot 0,709 = 2,326 \cdot 10^7 \quad \mathbf{Ra_{Lc} = 2,326 \cdot 10^7}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (30) προκύπτει.

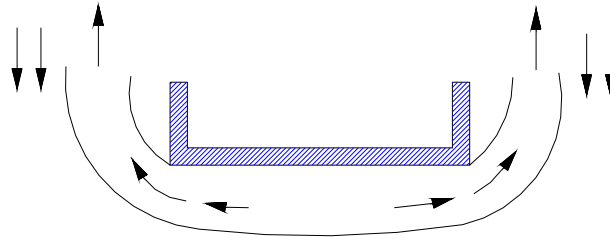
$$\left. \begin{aligned} \overline{Nu}_{Lc} &= 0,15 \cdot Ra_{Lc}^{1/3} \\ Ra_{Lc} &= 2,326 \cdot 10^7 \end{aligned} \right\} \overline{Nu}_{Lc} = 0,15 \cdot (2,326 \cdot 10^7)^{1/3} = 42,82 \quad \mathbf{\overline{Nu}_{Lc} = 42,82}$$

Λύνοντας ως προς α προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{k}{L} \cdot \overline{Nu}_L \\ k &= 0,0261 \text{ W/mK}, \\ L &= 0,2 \text{ m}, \quad \overline{Nu}_L = 42,82 \end{aligned} \right\} \alpha = \frac{0,0261}{0,2} \cdot 42,82 = 5,588 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\mathbf{\alpha_{ανο.} = 5,588 \text{ W/m}^2\text{K}}$

Κάτω οριζόντια βάση.



Σχήμα 4. Θερμαινόμενη οριζόντια επιφάνεια προς τα κάτω.

Για να βρεθεί ο συντελεστής συναγωγής από την κάτω βάση θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εξίσωση.

$$\overline{Nu}_{Lc} = 0,27 \cdot Ra_{Lc}^{1/4} \quad (\text{Εξίσωση 32})$$

όπου:

\overline{Nu}_{Lc} : Μέσος αριθμός Nusselt για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Ra_{Lc} : Αριθμός Rayleigh για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Η προηγούμενη σχέση ισχύει για $3 \cdot 10^5 < Ra_{Lc} < 3 \cdot 10^{10}$

Επειδή η κάτω βάση έχει το ίδιο χαρακτηριστικό μήκος με την άνω βάση ο αριθμός Grashof και Rayleigh παραμένουν ίδιοι και ίσοι με $Gr=3,281 \cdot 10^7$ και $Ra_{Lc} = 2,326 \cdot 10^7$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (32) προκύπτει.

$$\left. \begin{array}{l} \overline{Nu}_{Lc} = 0,27 \cdot Ra_{Lc}^{1/4} \\ Ra_{Lc} = 2,326 \cdot 10^7 \end{array} \right\} \overline{Nu}_{Lc} = 0,27 \cdot (2,326 \cdot 10^7)^{1/4} = 18,75 \quad \overline{Nu}_{Lc} = \mathbf{18,75}$$

Λύνοντας ως προς α προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \frac{k}{L} \cdot \overline{Nu}_L \\ k = 0,0261 \text{ W/mK}, \\ L = 0,2 \text{ m}, \quad \overline{Nu}_L = 18,75 \end{array} \right\} \alpha = \frac{0,0261}{0,2} \cdot 18,75 = 2,447 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_{\text{κατ.}} = \mathbf{2,447 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Υπολογισμός απωλειών από την κάθετη επιφάνεια.

Το εμβαδόν της κάθετης επιφάνειας είναι ίσο με:

$$F_{\text{καθ.}} = (1,5 \cdot 0,8) \cdot 4 = 4,8 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{καθ.}} = \mathbf{4,8 \text{ m}^2}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (25) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{\kappa\alpha\theta} &= \alpha_{\kappa\alpha\theta} \cdot F_{\kappa\alpha\theta} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\chi\alpha\lambda} \cdot F_{\kappa\alpha\theta} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\
 \alpha_{\kappa\alpha\theta} &= 4,363 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad F_{\kappa\alpha\theta} = 4,8 \text{ m}^2, \quad \theta_{02} = 40^\circ\text{C}, \quad \theta_2 = 10^\circ\text{C} \\
 \varepsilon_{\chi\alpha\lambda} &= 0,81, \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \quad \Theta_{02}^4 = \frac{40 + 273}{100} = 3,13 \text{ K} \\
 \Theta_{02}^4 &= \frac{10 + 273}{100} = 2,83 \text{ K}
 \end{aligned} \right\}$$

$$Q_{\kappa\alpha\theta} = 4,363 \cdot 4,8 \cdot (40 - 10) + 0,81 \cdot 4,8 \cdot 5,67 \cdot (3,13^4 - 2,83^4) = 1330 \text{ W}$$

$$Q_{\kappa\alpha\theta} = 1330 \text{ W}$$

Υπολογισμός απωλειών από την άνω οριζόντια επιφάνεια.

Το εμβαδόν της οριζόντιας επιφάνειας είναι ίσο με:

$$F_{\text{ανω}} = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{ανω}} = 0,64 \text{ m}^2$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (26) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{\text{ανω}} &= \alpha_{\text{ανω}} \cdot F_{\beta\alpha\sigma} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\chi\alpha\lambda} \cdot F_{\beta\alpha\sigma} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\
 \alpha_{\text{ανω}} &= 5,588 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad F_{\beta\alpha\sigma} = 0,64 \text{ m}^2, \quad \theta_{02} = 40^\circ\text{C}, \quad \theta_2 = 10^\circ\text{C} \\
 \varepsilon_{\chi\alpha\lambda} &= 0,81, \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \quad \Theta_{02}^4 = \frac{40 + 273}{100} = 3,13 \text{ K} \\
 \Theta_{02}^4 &= \frac{10 + 273}{100} = 2,83 \text{ K}
 \end{aligned} \right\}$$

$$Q_{\text{ανω}} = 5,588 \cdot 0,64 \cdot (40 - 10) + 0,81 \cdot 0,64 \cdot 5,67 \cdot (3,13^4 - 2,83^4) = 201 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ανω}} = 201 \text{ W}$$

Υπολογισμός απωλειών από την κάτω οριζόντια επιφάνεια.

Το εμβαδόν της οριζόντιας επιφάνειας είναι ίσο με:

$$F_{\kappa\alpha\tau} = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64 \text{ m}^2$$

$$F_{\kappa\alpha\tau} = 0,64 \text{ m}^2$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (27) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{\kappa\alpha\tau} &= \alpha_{\kappa\alpha\tau} \cdot F_{\beta\alpha\sigma} \cdot (\theta_{02} - \theta_2) + \varepsilon_{\chi\alpha\lambda} \cdot F_{\beta\alpha\sigma} \cdot C\mu \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4) \\
 \alpha_{\kappa\alpha\tau} &= 2,447 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad F_{\beta\alpha\sigma} = 0,64 \text{ m}^2, \quad \theta_{02} = 40^\circ\text{C}, \quad \theta_2 = 10^\circ\text{C} \\
 \varepsilon_{\chi\alpha\lambda} &= 0,81, \quad C\mu = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4, \quad \Theta_{02}^4 = \frac{40 + 273}{100} = 3,13 \text{ K} \\
 \Theta_{02}^4 &= \frac{10 + 273}{100} = 2,83 \text{ K}
 \end{aligned} \right\}$$

$$Q_{\kappa\alpha\tau} = 2,447 \cdot 0,64 \cdot (40 - 10) + 0,81 \cdot 0,64 \cdot 5,67 \cdot (3,13^4 - 2,83^4) = 141 \text{ W}$$

$$Q_{\kappa\alpha\tau} = 141 \text{ W}$$

Οι ολικές απώλειες από τον προθερμαντήρα σύμφωνα με την εξίσωση (28) είναι:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{συν.}} &= Q_{\text{καθ.}} + Q_{\text{ανω}} + Q_{\text{κατ.}} \\ Q_{\text{καθ.}} &= 1330 \text{ W}, \quad Q_{\text{ανω}} = 201 \text{ W} \\ Q_{\text{κατ.}} &= 141 \text{ W} \end{aligned} \right\} Q_{\text{συν.}} = 1330 + 201 + 141 = 1672 \text{ W}$$

$$Q_{\text{συν.}} = 1672 \text{ W}$$

Η ενέργεια που χάνεται λόγω μη ύπαρξης της μόνωσης θα δοθεί από την σχέση.

$$\Delta EE = Q \cdot h/\text{year} \quad (\text{Εξίσωση 33})$$

όπου:

ΔEE :	Ετήσια σπαταλούμενη ενέργεια	Wh/y
Q :	Απώλειες λόγω μη ύπαρξης μόνωσης	W
h/year	Ωρες λειτουργίας το χρόνο	h/y

Η εγκατάσταση λειτουργεί 4000 ώρες το χρόνο.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (33) προκύπτει.

$$\left. \begin{aligned} \Delta EE &= Q_{\text{συν.}} \cdot h/\text{year} \\ Q_{\text{συν.}} &= 1672 \text{ W}, \quad h = 4000 \text{ h/y} \end{aligned} \right\} \Delta EE = 1672 \cdot 4000 = 6688000 \text{ Wh/y}$$

$$\Delta EE = 6688000 \text{ Wh/y} = 6688 \text{ kWh/y}$$

Το εξοικονομούμενο καύσιμο θα βρίσκεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta G = \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \quad (\text{Εξίσωση 34})$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	kg/y
ΔE :	Εξοικονόμηση ενέργειας	kWh/y
Θ_{κ} :	Κατωτέρα θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kWh/kg
n :	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (34) για το μαζούτ 1500 προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \Delta G &= \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \\ \Delta EE &= 6688 \text{ kWh/y}, \quad n = 80\%, \\ \Theta_{\kappa} &= 11,46 \text{ kWh/kg} \end{aligned} \right\} \Delta G = \frac{6688}{0,80 \cdot 11,46} \approx 730 \text{ kg/y} \quad \Delta G = 730 \text{ kg/y}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (34) για το μαζούτ 3500 προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \Delta G &= \frac{\Delta EE}{n \cdot \Theta_{\kappa}} \\ \Delta EE &= 6688 \text{ kWh/y, } n = 80\%, \\ \Theta_{\kappa} &= 11,40 \text{ kWh/kg} \end{aligned} \right\} \Delta G = \frac{6688}{0,80 \cdot 11,40} \approx 733 \text{ kg/y} \quad \Delta G = 733 \text{ kg/y}$$

Συμπέρασμα:

Ο συγκεκριμένος εναλλάκτης είναι μικτής διάταξης ροής, και η μεταφορά θερμότητας γίνεται με ένα θερμαντικό στοιχείο που έχει εμβαπτιστεί μέσα στον προθερμαντήρα. Χρησιμοποιείται για την προθέρμανση μαζούτ που θερμαίνεται από το νερό ενός λέβητα.

Κατά την διαδικασία υπολογισμού του συνολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη, βλέπουμε ότι ο μικρότερος συντελεστής συναγωγής (από τον σωλήνα στο μαζούτ) επηρεάζει περισσότερο τον συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη.

Θεωρώντας ότι ο εναλλάκτης δεν έχει κάποιο μονωτικό υλικό για να μειώσει τις απώλειες και στην επιφάνεια του αποκαθίσταται θερμοκρασία 40°C, υπολογίζουμε τις συνολικές απώλειες τόσο από την κάθετη επιφάνεια όσο και από την άνω και κάτω οριζόντια βάση.

Υπολογίζοντας τους συντελεστές συναγωγής από τον προθερμαντήρα στο περιβάλλον, συμπεράναμε ότι ο μεγαλύτερος συντελεστής συναγωγής προκύπτει από την άνω οριζόντια βάση ενώ ο μικρότερος από την κάτω οριζόντια βάση.

Οι περισσότερες όμως απώλειες δεν προκύπτουν από την άνω οριζόντια βάση, αλλά από τις κάθετες επιφάνειες. Η κάθετη επιφάνεια παρόλο που έχει μικρότερο συντελεστή συναγωγής από την πάνω βάση έχει όμως μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας. Σημαντικές επίσης είναι και οι απώλειες που έχουμε λόγω ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση.

Αν ο βαθμός απόδοσης της καύσης ληφθεί 80%, προκύπτει ότι η επιπλέον ετήσια κατανάλωση μαζούτ λόγω των απωλειών αυτών είναι περίπου 730 kg.

Μελέτη 15^η.

Πλακοειδής εναλλάκτης - Επίπτωση της θερμοκρασίας εισόδου θερμαντικού μέσου και της επικαθίσης των αλάτων

Για τη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης (ζνχ) σε ξενοδοχείο χρησιμοποιείται ένας πλακοειδής εναλλάκτης, όπως στο απέναντι σχήμα, του οποίου η επιφάνεια συναλλαγής είναι $0,429 \text{ m}^2$. Από τα τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή βρίσκουμε ότι όταν στον εναλλάκτη εισέρχονται 3042 kg/h θερμό νερό (από λέβητα) θερμοκρασίας 85°C , τότε ο εναλλάκτης έχει συναλασσόμενη θερμική ισχύ 81410 W και μπορεί να θερμάνει 2800 kg/h ζεστό νερό χρήσης (ζνχ), που εισέρχεται στον εναλλάκτη με θερμοκρασία 15°C . Ο εναλλάκτης θα εργάζεται – πρακτικά- σε καθαρή αντιρροή.

Η ειδική θερμότητα του νερού θεωρείται σταθερή και ίση με $4,187 \text{ kJ/kgK}$.

A. Να υπολογισθούν οι θερμοκρασίες εξόδου του θερμού νερού και του ζνχ, καθώς και ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη.

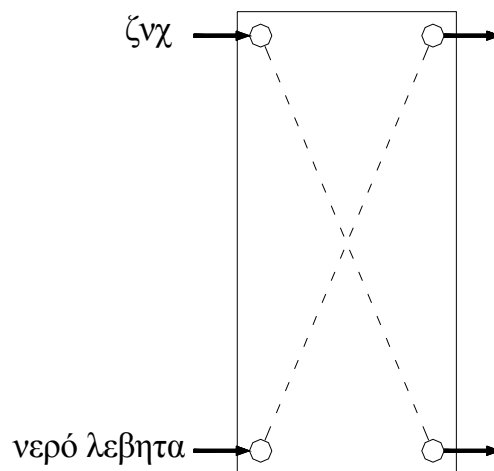
Πόση η αποδοτικότητα του εναλλάκτη;

B. Ο ίδιος εναλλάκτης πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για να θερμάνει ζνχ, αλλά χρησιμοποιώντας θερμό νερό που προέρχεται από συστοιχία ηλιακών συλλεκτών, θερμοκρασίας 55°C . Οι παροχές τόσο του θερμού νερού όσο και του ζνχ παραμένουν όπως προηγουμένως και το ζνχ εισέρχεται στον εναλλάκτη πάλι με θερμοκρασία 15°C .

Να υπολογισθούν οι νέες θερμοκρασίες εξόδου του θερμού νερού και του ζνχ, καθώς και η θερμική ισχύς και η αποδοτικότητα του εναλλάκτη σ' αυτή την περίπτωση.

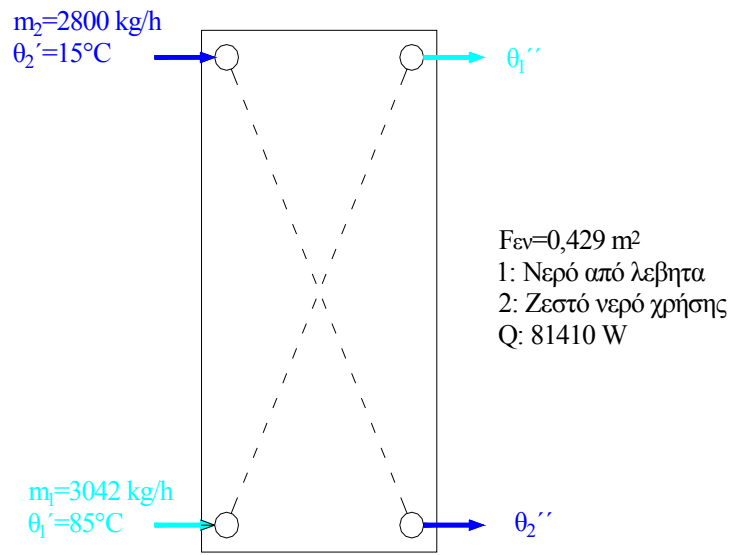
Γ. Μετά από μακρόχρονη λειτουργία, ο εναλλάκτης "ρυπαίνεται", λόγω επικαθίσεων αλάτων, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από ένα συντελεστή ρύπανσης (fouling factor) ίσο με $0,0002 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Να υπολογισθούν οι θερμοκρασίες εξόδου του θερμού νερού και του ζνχ, καθώς και η αποδοτικότητα του εναλλάκτη για τον "βρόμικο" εναλλάκτη, και τις δύο παραπάνω περιπτώσεις (δηλ. θερμό νερό από λέβητα ή από ηλιακά).

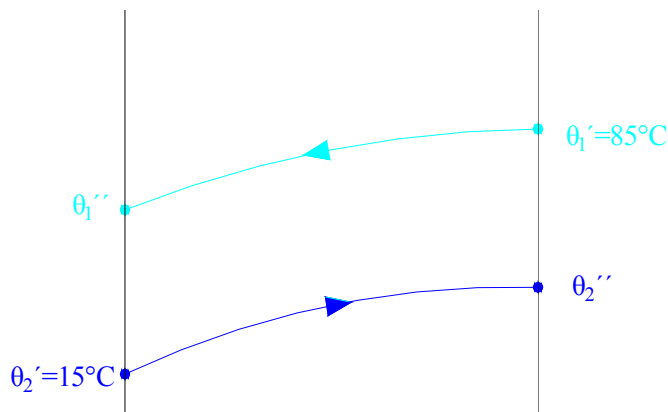


Σχήμα 1. Εναλλάκτης θέρμανσης ζεστού νερού χρήση καθαρής αντιρροής.

Λύση:



Σχήμα 2. Συνθήκες εργασίας πλακοειδούς εναλλάκτη για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης σε ξενοδοχείο.



Σχήμα 3. Μεταβολή της θερμοκρασίας των ρευστών σε εναλλάκτη αντιρροής.

Ερώτημα Α:

Το συνολικά μεταδιδόμενο ποσό θερμότητας (σύμφωνα με την βασική εξίσωση της θερμομετρίας) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$Q = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_1' - \theta_1'') = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_2'' - \theta_2') \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου:

- | | | |
|----------------|---|-------|
| Q: | Συνολικά συναλασσομένη θερμική ισχύς | W |
| \dot{m}_1 : | Παροχή θερμού νερού από λέβητα | kg/s |
| \dot{m}_2 : | Παροχή ζεστού νερού χρήσης | kg/s |
| c_1, c_2 : | Ειδική θερμότητα νερού | J/kgK |
| θ_1' : | Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (λέβητα) | °C |
| θ_1'' : | Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού (λέβητα) | °C |
| θ_2' : | Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού χρήσης | °C |

θ_2'' : Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού χρήσης °C

Λύνοντας την εξίσωση (1) για το ρευστό 1 ως προς την θερμοκρασία εξόδου θ_1'' και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1'' &= \frac{(\dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot \theta_1') - Q}{\dot{m}_1 \cdot c_1} \\ Q &= 81410 \text{ W} \\ \dot{m}_1 &= \frac{3042}{3600} = 0,845 \text{ kg/s} \\ c_1 &= 4187 \text{ J/kgK}, \theta_1' = 85^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \theta_1'' = \frac{(0,845 \cdot 4187 \cdot 85) - 81410}{0,845 \cdot 4187} = 61,99^\circ\text{C}$$

$$\theta_1'' \cong 62^\circ\text{C}$$

Λύνοντας την εξίσωση (1) για το ρευστό 2 ως προς την θερμοκρασία εξόδου θ_2'' και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \theta_2'' &= \frac{Q + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2')}{\dot{m}_2 \cdot c_2} \\ Q &= 81410 \text{ W} \\ \dot{m}_2 &= \frac{2800}{3600} = 0,777 \text{ kg/s} \\ c_2 &= 4187 \text{ J/kgK}, \theta_2' = 15^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \theta_2'' = \frac{81410 + (0,777 \cdot 4187 \cdot 15)}{0,777 \cdot 4187} = 39,99^\circ\text{C}$$

$$\theta_2'' \cong 40^\circ\text{C}$$

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη θα δοθεί από την παρακάτω εξίσωση λύνοντας ως προς K_o .

$$Q = K_o \cdot F \cdot \Delta\theta_{\text{αντ}} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

όπου:

Q:	Συνολικά συναλλασσόμενη θερμική ισχύς	W
K_o :	Συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εναλλάκτη	W/m ² K
F:	Επιφάνεια συναλλαγής εναλλάκτη	m ²
$\Delta\theta_{\text{αντ}}$:	Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλάκτη	°C

Για να μπορέσουμε να βρούμε το συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη θα πρέπει πρώτα να βρούμε τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά που έχει ο συγκεκριμένος εναλλάκτης.

Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά του εναλλάκτη αντιρροής δίνεται από τον τύπο :

$$\Delta\theta_{\text{αντ}} = \frac{(\theta_1' - \theta_2'') - (\theta_1'' - \theta_2')}{\ln \frac{\theta_1' - \theta_2''}{\theta_1'' - \theta_2'}} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

θ_1' : Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (λέβητα) °C

θ_1'' :	Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού (λέβητα)	$^{\circ}\text{C}$
θ_2' :	Θερμοκρασία εισόδου στον ζεστό νερού χρήσης	$^{\circ}\text{C}$
θ_2'' :	Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού χρήσης	$^{\circ}\text{C}$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3) προκύπτει:

$$\Delta\theta m_{\text{avt}} = \frac{(\theta_1' - \theta_2'') - (\theta_1'' - \theta_2')}{\ln \frac{\theta_1' - \theta_2''}{\theta_1'' - \theta_2'}} \left. \begin{array}{l} \theta_1' = 85^{\circ}\text{C}, \theta_1'' = 62^{\circ}\text{C} \\ \theta_2' = 15^{\circ}\text{C}, \\ \theta_2'' = 40^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \Delta\theta m_{\text{avt}} = \frac{(85 - 40) - (62 - 15)}{\ln \frac{85 - 40}{62 - 15}} = 45,99^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta m_{\text{avt}} \cong 46^{\circ}\text{C}$$

Λύνοντας την εξίσωση (2) ως προς K_o και αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$K_o = \frac{Q}{F \cdot \Delta\theta m_{\text{avt}}} \left. \begin{array}{l} Q = 81410 \text{ W} \\ F = 0,429 \text{ m}^2 \\ \Delta\theta m_{\text{avt}} = 46^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} K_o = \frac{81410}{0,429 \cdot 46} = 4126 \text{ W/m}^2\text{K} \quad K_o = 4126 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Η αποδοτικότητα του εναλλάκτη θα δοθεί από την εξίσωση:

$$n_E = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{max}}} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

όπου:

n_E :	Αποδοτικότητα του εναλλάκτη	
Q_{actual} :	Η ενέργεια που μεταδίδεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό	W
Q_{max} :	Η μέγιστη συναλλασσόμενη θερμική ισχύς	W

Η ενέργεια που μεταδίδεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό (Q_{actual}) θα δοθεί από την εξίσωση:

$$Q_{\text{actual}} = w_1 \cdot (\theta_1' - \theta_1'') \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

όπου:

Q_{actual} :	Ενέργεια που μεταδίδεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό	W
w_1 :	Θερμοχωρητική παροχή νερού (λέβητα)	W/K
θ_1' :	Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (λέβητα)	$^{\circ}\text{C}$
θ_1'' :	Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού (λέβητα)	$^{\circ}\text{C}$

Η μέγιστη συναλλασσόμενη ενέργεια θα δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{max}} = w_2 \cdot (\theta_1' - \theta_2') \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου:		
Q_{\max} :	Μέγιστη συναλασσόμενη ενέργεια	W
w_2 :	Θερμοχωρητική παροχή ζεστού νερού χρήσης	W/K
θ'_1 :	Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (λέβητα)	°C
θ'_2 :	Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού χρήσης	°C

Η θερμοχωρητική παροχή για το ζεστό νερό χρήσης είναι ίση με:

$$w_2 = \dot{m}_2 \cdot c_2 \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} w_2 = \dot{m}_2 \cdot c_2 \\ \dot{m}_2 = 0,7778 \text{ kg/s} \\ c_2 = 4187 \text{ KJ/kgs} \end{array} \right\} w_2 = 0,7778 \cdot 4187 = 3256,6 \text{ W/K} \quad \mathbf{w_2 = 3256,6 \text{ W/K}}$$

Αντικαθιστώντας όλα μας τα δεδομένα στην εξίσωση (6) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\max} = w_2 \cdot (\theta'_1 - \theta'_2) \\ w_2 = 3256,6 \text{ W/K} \\ \theta'_1 = 85^\circ \text{C}, \theta'_2 = 15^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q_{\max} = 3256,6 \cdot (85 - 15) = 227962 \text{ W}$$

$Q_{\max} = 227962 \text{ W}$

Η συναλασσόμενη θερμική ισχύς του εναλλάκτη (Q_{actual}) είναι 81410 W.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} n_E = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\max}} \\ Q_{\text{actual}} = 81410 \text{ W} \\ Q_{\max} = 227962 \text{ W} \end{array} \right\} n_E = \frac{81410}{227962} = 0,357 = 35,7\% \quad \mathbf{n_E = 35,7\%}$$

Ένας άλλος τρόπος να βρεθεί η αποδοτικότητα του εναλλάκτη είναι η χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$n_E = \frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη εξίσωση προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} n_E = \frac{\theta''_2 - \theta'_2}{\theta'_1 - \theta'_2} \\ \theta'_1 = 85^\circ \text{C}, \theta'_2 = 15^\circ \text{C}, \theta''_2 = 40^\circ \text{C} \end{array} \right\} n_E = \frac{40 - 15}{85 - 15} = 0,357 = 35,7\% \quad \mathbf{n_E = 35,7\%}$$

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ίδιο.

Ερώτημα Β:

Επειδή ο εναλλάκτης δεν αλλάζει αλλά ούτε και οι συνθήκες ροής ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη παραμένει ίσος με 4126 W/m² K.

Η θερμοκρασία εξόδου του νερού που προέρχεται από την συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών θα βρεθεί από την παρακάτω σχέση λύνοντας ως προς θ₁^{''}:

$$\theta_1' - \theta_1'' = (\theta_1' - \theta_2') \cdot \frac{1 - e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}}{1 - \frac{m_1 \cdot c_1}{m_2 \cdot c_2} \cdot e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

όπου:

- θ₁[']: Θερμοκρασία εισόδου ζεστού νερού (ηλιακοί συλλέκτες) °C
- θ₁^{''}: Θερμοκρασία εξόδου ζεστού νερού (ηλιακοί συλλέκτες) °C
- θ₂[']: Θερμοκρασία εισόδου στον ζεστό νερού χρήσης °C
- K_o: Συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη W/m²K
- m₁: Παροχή ζεστού νερού (ηλιακών) kg/s
- m₂: Παροχή ζεστού νερού χρήσης kg/s
- F: Επιφάνεια συναλλαγής εναλλάκτη m²

Λύνοντας την εξίσωση (9) ως προς θ₁^{''} προκύπτει:

$$\theta_1'' = - \left[(\theta_1' - \theta_2') \cdot \frac{1 - e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}}{1 - \frac{m_1 \cdot c_1}{m_2 \cdot c_2} \cdot e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}} \right] + \theta_1' \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) προκύπτει:

$$\theta_1'' = - \left[(\theta_1' - \theta_2') \cdot \frac{1 - e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}}{1 - \frac{m_1 \cdot c_1}{m_2 \cdot c_2} \cdot e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}} \right] + \theta_1'$$

$\theta_1' = 55^\circ \text{C}, \theta_2' = 15^\circ \text{C} \quad K_o = 4126 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $m_1 = 0,845 \text{ kg/s}, m_2 = 0,7778 \text{ kg/s}$
 $c_1 = c_2 = 4187 \text{ J/kgK}, F = 0,429 \text{ m}^2$

$$\theta_1'' = - \left[(55 - 15) \cdot \frac{1 - e^{-4126 \cdot \left(\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187} \right) \cdot 0,429}}{1 - \frac{0,845 \cdot 4187}{0,7778 \cdot 4187} \cdot e^{-4126 \cdot \left(\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187} \right) \cdot 0,429}} \right] + 55 = 41,85^\circ \text{C}$$

$$\theta_1'' = 41,85^\circ \text{C}$$

Για να βρούμε την θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) ως προς το ρευστό 1, μπορούμε αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας να βρούμε την συναλλασσόμενη θερμική ισχύ που έχει ο εναλλάκτης σ' αυτή την περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} Q' = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_1' - \theta_1'') \\ \dot{m}_1 = 0,845 \text{ kg/s} \\ c_1 = 4187 \text{ J/kgK} \\ \theta_1' = 55^\circ \text{C}, \theta_1'' = 41,85^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q' = 0,845 \cdot 4187 \cdot (55 - 41,85) = 46525 \text{ W}$$

$$Q' = 46525 \text{ W}$$

Χρησιμοποιώντας πάλι την εξίσωση (1) για το ρευστό 2 και λύνοντας ως προς θ_2'' μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης.

$$Q' = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_2'' - \theta_2') \quad \Rightarrow \quad \theta_2'' = \frac{Q' + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2')}{\dot{m}_2 \cdot c_2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta_2'' = \frac{Q' + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2')}{\dot{m}_2 \cdot c_2} \\ Q' = 46525 \text{ W}, \dot{m}_2 = 0,7778 \text{ kg/s} \\ c_2 = 4187 \text{ J/kgK}, \theta_2' = 15^\circ \text{C} \end{array} \right\} \theta_2'' = \frac{46525 + (0,7778 \cdot 4187 \cdot 15)}{0,7778 \cdot 4187} = 29,23^\circ \text{C}$$

$$\theta_2'' = 29,23^\circ \text{C}$$

Για να μπορέσουμε να βρούμε την νέα αποδοτικότητα του εναλλάκτη θα πρέπει πρώτα να βρούμε την νέα μέγιστη μεταφορά θερμότητας.

Αντικαθιστώντας τα νέα δεδομένα μας στην εξίσωση (6) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} Q'_{\max} = w_2 \cdot (\theta_1' - \theta_2') \\ w_2 = 3256,6 \text{ W/K} \\ \theta_1' = 55^\circ \text{C}, \theta_2' = 15^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q'_{\max} = 3256,5 \cdot (55 - 15) = 130264 \text{ W}$$

$$Q'_{\max} = 130264 \text{ W}$$

Η συναλλασσόμενη θερμική ισχύς του εναλλάκτη (Q' actual) σ' αυτή την περίπτωση είναι 46525 W.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} n'_E = \frac{Q'_{\text{actual}}}{Q'_{\text{max}}} \\ Q'_{\text{actual}} = 46525 \text{ W} \\ Q'_{\text{max}} = 130264 \text{ W} \end{array} \right\} n'_E = \frac{46525}{130264} = 0,357 \quad n'_E = 35,7\%$$

Ερώτημα Γ:

Εφόσον ο συντελεστής ρύπανσης (fouling factor) είναι γνωστός από τα δεδομένα μας μπορούμε χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση να βρούμε το συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του εναλλάκτη μετά την επικάλυψη των αλάτων.

$$Rf = \frac{1}{K_{\text{οεπικ}}} - \frac{1}{K_{\text{οκαθ.}}} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

Rf :	Συντελεστής ρύπανσης (fouling factor)	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
$K_{\text{οεπικ}}$:	Συνολικός συντελ. μεταδ. θερμ. μετά την επικάλυψη αλάτων	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$K_{\text{οκαθ.}}$:	Συνολικός συντελ. μεταδ. θερμ. καθαρού εναλλάκτη	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

Λύνοντας την εξίσωση (11) ως προς $K_{\text{οεπικ}}$ προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} K_{\text{οεπικ}} = \frac{1}{Rf + \frac{1}{K_{\text{οκαθ.}}}} \\ Rf = 0,0002 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}, K_{\text{οκαθ.}} = 4126 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \end{array} \right\} K_{\text{οεπικ}} = \frac{1}{0,0002 + \frac{1}{4126}} = 2260,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$$

$$K_{\text{οεπικ}} = 2260,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$$

Ξέροντας τον συνολικό συντελεστή μετάδοσης του εναλλάκτη μπορούμε να βρούμε τις νέες θερμοκρασίες εξόδου του νερού από το λέβητα, καθώς και του ζεστού νερού χρήσης τόσο στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το λέβητα όσο και στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τα ηλιακά.

Α) Περίπτωση. Χρήση νερού λέβητα για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) τα δεδομένα που έχουμε στην περίπτωση που το νερό θερμαίνεται με την χρήση νερού που προέρχεται από τον λέβητα, προκύπτει.

$$\theta_1'' = - \left[\frac{(\theta_1' - \theta_2') \cdot \frac{1 - e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}}{1 - \frac{m_1 \cdot c_1}{m_2 \cdot c_2} \cdot e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}}}{1 - \frac{m_1 \cdot c_1}{m_2 \cdot c_2} \cdot e^{-K_o \cdot (\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2}) \cdot F}} \right] + \theta_1'$$

$\theta_1' = 85^\circ \text{C}, \theta_2' = 15^\circ \text{C}$ $K_{\text{οεπικ}} = 2260,5 \text{ W/m}^2 \text{K}$
 $m_1 = 0,845 \text{ kg/s}, m_2 = 0,7778 \text{ kg/s}$
 $c_1 = c_2 = 4187 \text{ J/kgK}, F = 0,429 \text{ m}^2$

$$\theta_1'' = - \left[\frac{(85 - 15) \cdot \frac{1 - e^{-2260,5 \cdot (\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187}) \cdot 0,429}}{1 - \frac{0,845 \cdot 4187}{0,7778 \cdot 4187} \cdot e^{-2260 \cdot (\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187}) \cdot 0,429}}}{1 - \frac{0,845 \cdot 4187}{0,7778 \cdot 4187} \cdot e^{-2260 \cdot (\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187}) \cdot 0,429}} \right] + 85 \cong 70,1^\circ \text{C}$$

$$\theta_1'' = 70,1^\circ \text{C}$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) για το ρευστό 1 προκύπτει η συναλλασσόμενη θερμική ισχύς που έχει ο εναλλάκτης στην περίπτωση που έχουμε επικάθιση αλάτων.

$$\left. \begin{array}{l} Q'' = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_1' - \theta_1'') \\ \dot{m}_1 = 0,845 \text{ kg/s} \\ c_1 = 4187 \text{ J/kgK} \\ \theta_1' = 85^\circ \text{C}, \theta_1'' = 70,1^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q'' = 0,845 \cdot 4187 \cdot (85 - 70,1) = 52716 \text{ W}$$

$$Q'' = 52716 \text{ W}$$

Χρησιμοποιώντας πάλι την εξίσωση (1) για το ρευστό 2 και λύνοντας ως προς θ_2'' μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης σ' αυτή την περίπτωση.

$$Q'' = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_2'' - \theta_2') \quad \Rightarrow \quad \theta_2'' = \frac{Q'' + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2')}{\dot{m}_2 \cdot c_2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta_2'' = \frac{Q'' + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2')}{\dot{m}_2 \cdot c_2} \\ Q'' = 52716 \text{ W}, \dot{m}_2 = 0,7778 \text{ kg/s} \\ c_2 = 4187 \text{ J/kgK}, \theta_2' = 15^\circ \text{C} \end{array} \right\} \theta_2'' = \frac{52716 + (0,7778 \cdot 4187 \cdot 15)}{0,7778 \cdot 4187} = 31,20^\circ \text{C}$$

$$\theta_2'' = 31,20^\circ \text{C}$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας στην εξίσωση (6) προκύπτει η μέγιστη μεταφορά θερμότητας στην περίπτωση αυτή.

$$\left. \begin{aligned} Q''_{\max} &= w_2 \cdot (\theta'_1 - \theta'_2) \\ w_2 &= 3256,6 \text{ W/K} \\ \theta'_1 &= 85^\circ \text{C}, \theta'_2 = 15^\circ \text{C} \end{aligned} \right\} Q''_{\max} = 3256,5 \cdot (85 - 15) = 227962 \text{ W}$$

$$Q''_{\max} = 227962 \text{ W}$$

Η συναλλασσόμενη θερμική ισχύς του εναλλάκτη (Q'_{actual}) σ' αυτή την περίπτωση είναι 52716 W.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} n''_E &= \frac{Q''_{\text{actual}}}{Q''_{\max}} \\ Q''_{\text{actual}} &= 52716 \text{ W} \\ Q''_{\max} &= 227962 \text{ W} \end{aligned} \right\} n''_E = \frac{52716}{227962} = 0,231 \quad n''_E = 23,1\%$$

B) Περίπτωση. Χρήση νερού από ηλιακά για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (10) τα δεδομένα που έχουμε στην περίπτωση που το νερό θερμαίνεται με την χρήση νερού που προέρχεται από ηλιακά συστήματα προκύπτει.

$$\left. \begin{aligned} \theta''_1 &= - \left[(\theta'_1 - \theta'_2) \cdot \frac{1 - e^{-K_o \cdot \left(\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2} \right) \cdot F}}{1 - \frac{m_1 \cdot c_1}{m_2 \cdot c_2} \cdot e^{-K_o \cdot \left(\frac{1}{m_1 \cdot c_1} - \frac{1}{m_2 \cdot c_2} \right) \cdot F}} \right] + \theta'_1 \\ \theta'_1 &= 55^\circ \text{C}, \theta'_2 = 15^\circ \text{C} \quad K_{\text{οεπικ}} = 2260,5 \text{ W/m}^2\text{K} \\ m_1 &= 0,845 \text{ kg/s}, m_2 = 0,7778 \text{ kg/s} \\ c_1 &= c_2 = 4187 \text{ J/kgK}, F = 0,429 \text{ m}^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\theta''_1 = - \left[(55 - 15) \cdot \frac{1 - e^{-2260,5 \cdot \left(\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187} \right) \cdot 0,429}}{1 - \frac{0,845 \cdot 4187}{0,7778 \cdot 4187} \cdot e^{-2260 \cdot \left(\frac{1}{0,845 \cdot 4187} - \frac{1}{0,7778 \cdot 4187} \right) \cdot 0,429}} \right] + 55 \cong 46,5^\circ \text{C}$$

$$\theta''_1 = 46,5^\circ \text{C}$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) ως προς την πρώτη ισότητα προκύπτει η συναλλασσόμενη θερμική ισχύς που έχει ο εναλλάκτης στην περίπτωση που έχουμε επικάλυψη αλάτων.

$$\left. \begin{array}{l} Q''' = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (\theta'_1 - \theta''_1) \\ \dot{m}_1 = 0,845 \text{ kg/s} \\ c_1 = 4187 \text{ J/kgK} \\ \theta'_1 = 55^\circ \text{C}, \theta''_1 = 46,5^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q''' = 0,845 \cdot 4187 \cdot (55 - 46,5) = 30073 \text{ W}$$

$$Q''' = 30073 \text{ W}$$

Χρησιμοποιώντας πάλι την εξίσωση (1) ως προς την δεύτερη ισότητα και λύνοντας ως προς θ''_2 μπορούμε να βρούμε την θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης σ' αυτή την περίπτωση.

$$Q''' = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (\theta''_2 - \theta'_2) \quad \Rightarrow \quad \theta''_2 = \frac{Q''' + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta'_2)}{\dot{m}_2 \cdot c_2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta''_2 = \frac{Q''' + (\dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot \theta'_2)}{\dot{m}_2 \cdot c_2} \\ Q''' = 30073 \text{ W}, \dot{m}_2 = 0,7778 \text{ kg/s} \\ c_2 = 4187 \text{ J/kgK}, \theta'_2 = 15^\circ \text{C} \end{array} \right\} \theta''_2 = \frac{30073 + (0,7778 \cdot 4187 \cdot 15)}{0,7778 \cdot 4187} = 24,2^\circ \text{C}$$

$$\theta''_2 = 24,2^\circ \text{C}$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα μας στην εξίσωση (6) προκύπτει η μέγιστη μεταφορά θερμότητας στην περίπτωση αυτή.

$$\left. \begin{array}{l} Q'''_{\text{max}} = w_2 \cdot (\theta'_1 - \theta'_2) \\ w_2 = 3256,6 \text{ W/K} \\ \theta'_1 = 55^\circ \text{C}, \theta'_2 = 15^\circ \text{C} \end{array} \right\} Q'''_{\text{max}} = 3256,6 \cdot (55 - 15) = 130264 \text{ W}$$

$$Q'''_{\text{max}} = 130264 \text{ W}$$

Η συναλλασσόμενη θερμική ισχύς του εναλλάκτη (Q'''_{actual}) σ' αυτή την περίπτωση είναι 30073 W.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} n'''_E = \frac{Q'''_{\text{actual}}}{Q'''_{\text{max}}} \\ Q'''_{\text{actual}} = 30073 \text{ W} \\ Q'''_{\text{max}} = 130264 \text{ W} \end{array} \right\} n'''_E = \frac{30073}{130264} = 0,230 \quad \mathbf{n'''_E = 23\%}$$

Συμπέρασμα:

Στην άσκηση αυτή μελετάμε την αποδοτικότητα που έχει ένας εναλλάκτης για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης όταν:

- A). Χρησιμοποιείται νερό υψηλής θερμοκρασίας εισόδου από λέβητα και
- B). Χρησιμοποιείται νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας εισόδου, που προέρχεται από συστοιχία ηλιακών συλλεκτών.

Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι η αποδοτικότητα του εναλλάκτη και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδια και ίση με 35,7%. Η θερμοκρασία εξόδου όμως του ζεστού νερού χρήσης είναι πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση που το νερό προέρχεται από τον λέβητα (40°C) σε σχέση με όταν προέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες (29°C). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ανάλογα με τις θερμοκρασίες εισόδου του θερμού νερού προκύπτουν οι θερμοκρασίες εξόδου του ζεστού νερού χρήσης. Όμως ο λόγος της ενέργειας που μεταδίδεται στο ρευστό προς την μέγιστη συναλλασσόμενη θερμική ισχύ παραμένει ίδιος. Ωστόσο η θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης που προέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες είναι λίγο χαμηλή.

Μετά την επικάλυψη αλάτων η αποδοτικότητα του εναλλάκτη πέφτει στα 23% και στις δύο περιπτώσεις δηλαδή το ποσοστό μείωσης της αποδοτικότητας του εναλλάκτη είναι ίσο με 35%. Οι θερμοκρασίες που αποκτά το ζεστό νερό χρήσης πλέον είναι στην περίπτωση του λέβητα 31,2°C ενώ των ηλιακών συλλεκτών 24,2°C. Βλέπουμε ότι η επικάλυψη των αλάτων μειώνει τις θερμοκρασίες εξόδου του ζεστού νερού χρήσης και ιδιαίτερα στην περίπτωση των ηλιακών συλλεκτών να είναι εξαιρετικά χαμηλή.

Παράρτημα 1. Επεξηγήσεις εξισώσεων.

Επεξήγηση εξισώσεων Μετάδοσης Θερμότητας.

1. Μετάδοση θερμότητας με αγωγή – συναγωγή.

- Υπολογιστικός τύπος μετάδοσης θερμότητας **από ρευστό σε ρευστό μέσω στερεού επίπεδου τοιχώματος.**

$$Q = K \cdot F \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\text{Γενικά: } \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_o}$$

όπου:

Q:	Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας	kcal/h ή W
K:	Συντελεστής θερμοπερατότητας τοιχώματος	kcal/hm ² °C ή W/ m ² K
F:	Εμβαδόν επιφάνειας επίπεδου τοιχώματος	m ²
θ ₁ :	Θερμοκρασία ρευστού 1	°C
θ ₂ :	Θερμοκρασία ρευστού 2	°C
α _i :	Συντελ. θερμικής μετάβασης ρευστού 1	kcal/hm ² °C ή W/ m ² K
α _o :	Συντελ. θερμικής μετάβασης ρευστού 2	kcal/hm ² °C ή W/ m ² K
δ _j :	Πάχη στρωμάτων	m
λ _j :	Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.	kcal/hm °C ή W/ mK

Η πυκνότητα θερμορροής για την μετάδοση από ρευστό σε ρευστό μέσω επίπεδου τοιχώματος είναι ίση με:

$$q = \frac{Q}{F}$$

όπου:

q:	Πυκνότητα θερμορροής μέσω επίπεδου τοιχώματος	kcal/hm ² ή W/ m ²
Q:	Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας	kcal/h ή W
F:	Εμβαδόν επιφάνειας επίπεδου τοιχώματος	m ²

- Υπολογιστικός τύπος μετάδοσης θερμότητας **από ρευστό σε ρευστό μέσω κυλινδρικού τοιχώματος.**

$$q_1 = K_R \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

όπου:

q ₁ :	Ρεύμα θερμότητας για σύνθετο κυλινδρικό τοίχωμα	kcal/mh ή W/m
K _R :	Συντελ. θερμοπερατότητας κυλινδρικού τοιχώματος	kcal/hm°C ή W/ mK
θ ₁ :	Θερμοκρασία ρευστού 1	°C
θ ₂ :	Θερμοκρασία ρευστού 2	°C

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή θερμοπερατότητας κυλινδρικού τοιχώματος.**

$$K_R = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_1} + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{1}{2\lambda_j} \cdot \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} + \frac{1}{\alpha_o \cdot d_{n+1}}}$$

όπου:

K_R :	Συντελ. θερμοπερατότητας κυλινδρικού τοιχώματος	kcal/hm°C ή W/ mK
α_i :	Συντελ. θερμικής μετάβασης ρευστού 1 (εσωτ.)	kcal/hm ² °C ή W/ m ² K
α_o :	Συντελ. θερμικής μετάβασης ρευστού 2 (εξωτ.)	kcal/hm ² °C ή W/ m ² K
λ_j :	Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.	kcal/hm °C ή W/ mK
d :	Διάμετροι των υλικών του κυλινδρικού τοιχώματος	m

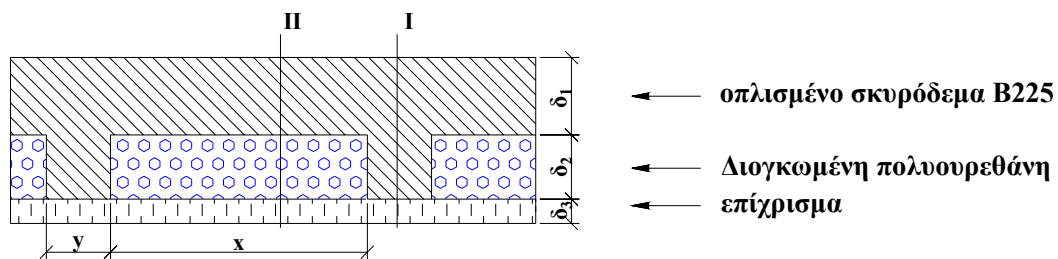
Και για τη μετάδοση θερμότητας από ρευστό σε ρευστό μέσω κυλινδρικού τοιχώματος θα ισχύει ο τύπος:

$$Q = q_1 \cdot l$$

όπου:

Q :	Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας	kcal/h ή W
q_1 :	Ρεύμα θερμότητας για σύνθετο κυλινδρικό τοίχωμα	kcal/mh ή W/m
l :	Μήκος κυλινδρικού τοιχώματος	m

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή θερμοπερατότητας πλάκας τύπου Zöllner.**



Για το κομμάτι της οροφής που δεν έχει μόνωση I:

$$K_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{(\delta_1 + \delta_2)}{\lambda_1} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

Για το κομμάτι της οροφής που έχει μόνωση II:

$$K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας της οροφής τύπου Zöllner με αυτές τις διαστάσεις της μόνωσης ισούται με:

$$K_z = \frac{y}{x+y} \cdot K_I + \frac{x}{x+y} \cdot K_{II}$$

όπου:

α_i :	Εσωτερικός συντελεστής συναγωγής	W/m ² K
α_o :	Εξωτερικός συντελεστής συναγωγής	W/m ² K
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:	Συντ. θερμικής αγωγιμότητας	W/mK
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$:	Πάχη των στρωμάτων, όπως το σχήμα	m
x, y :	Διαστάσεις από το σχήμα	m

2. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

- Υπολογιστικός τύπος για **συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας.**

$$Q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot C_{\mu} \cdot F_1 \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4)$$

όπου:

Q_{12} :	Θερμική ισχύς λόγω ακτινοβολίας από την επιφάνεια 1 στη 2	kcal/h ή W
ε_{12} :	Συντελεστής αλληλεκπομπής επιφανειών 1 και 2	
φ_{12} :	Συντελεστής θέας της F_1 ως προς την F_2	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	= 5,67 W/ m ² K ⁴
F_1 :	Μικρότερη επιφάνεια συναλλαγής	m ²
T_1 :	Απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας 1 ($\Theta_1=T_1/100$)	Kelvin
T_2 :	Απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας 2 ($\Theta_2=T_2/100$)	Kelvin

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή ακτινοβολίας.**

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon \cdot C_{\mu} \cdot (\Theta_{02}^4 - \Theta_2^4)}{\theta_{02} - \theta_2}$$

όπου:

α_r :	Συντελ. ακτινοβολίας	W/m ² K
ε :	Συντελ. ολικής εκπομπής επιφάνειας	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	= 5,67 W/m ² K ⁴
θ_{02} :	Θερμοκρασία επιφάνειας	°C
θ_2 :	Θερμοκρασία χώρου (η επιφάνεια προς την οποία ακτινοβολεί)	°C
Θ_{02} :	$= \frac{\theta_{02} + 273}{100} = \frac{T_{02}}{100}$	K
Θ_2 :	$= \frac{\theta_2 + 273}{100} = \frac{T_2}{100}$	K

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή αλληλεκπομπής παράλληλων (άπειρων) επιφανειών.**

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

όπου:

ε_{12} :	Συντελεστής αλληλεκπομπής επιφανειών 1 και 2
ε_1 :	Συντελεστής ολικής εκπομπής επιφάνειας 1
ε_2 :	Συντελεστής ολικής εκπομπής επιφάνειας 2

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή αλληλεκπομπής για επιφάνειές που περικλείουν η μια την άλλη.**

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

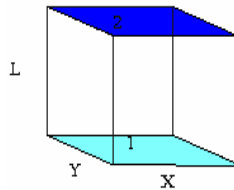
όπου:

ε_{12} :	Συντελεστής αλληλεκπομπής επιφανειών 1 και 2
ε_1 :	Συντελεστής ολικής εκπομπής επιφάνειας 1
ε_2 :	Συντελεστής ολικής εκπομπής επιφάνειας 2

F_1 :	Εμβαδόν επιφάνειας 1	m^2
F_2 :	Εμβαδόν επιφάνειας 2	m^2

Ειδικές περιπτώσεις:

- 1) Αν $F_1 \ll F_2$ τότε $\varepsilon_{12} \cong \varepsilon_1$. Αυτή είναι η περίπτωση που ένα σώμα μικρών διαστάσεων βρίσκεται μέσα σ' έναν μεγάλο χώρο.
 - 2) Επίσης αν $\varepsilon_2 = 1$ τότε $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1$. Αυτή είναι η περίπτωση που η περικλείουσα επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως μαύρο σώμα.
- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή θέας για επίπεδες επιφάνειες, απέναντι η μια στην άλλη.**



$$\bar{X} = \frac{X}{L}, \quad \bar{Y} = \frac{Y}{L}$$

$$\varphi_{12} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} \right.$$

$$\left. + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$$

όπου:

φ_{12} :	Συντελεστής θέας για τις επιφάνειες 1 και 2	
X :	Μήκος επιφάνειας	m
Y :	Πλάτος επιφάνειας	m
L :	Ύψος μεταξύ των επιφανειών (απόσταση τους)	m

Ειδικές περιπτώσεις:

Όταν η (κυρτή) επιφάνεια F_1 περικλείεται πλήρως από την F_2 ώστε ολόκληρη η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την 1 να προσπίπτει στην 2 τότε $\varphi_{12} = 1$.

- Υπολογιστικός τύπος **για την συναλλαγή θερμότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, αγνοώντας τη συναγωγή.**

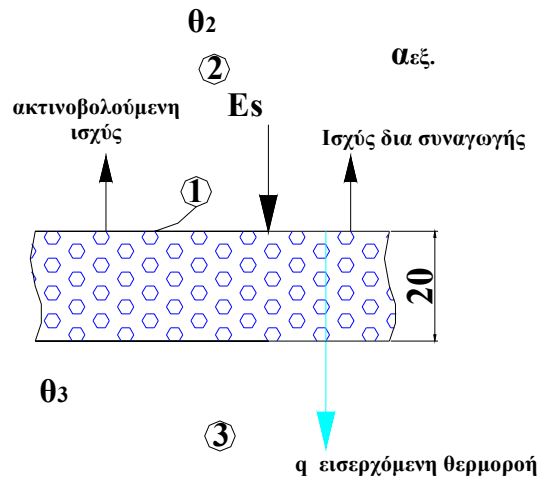
$$Q_{12} = \varepsilon \cdot C_{\mu} \cdot F \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) - \alpha_s \cdot F_s \cdot E_s$$

όπου:

Q_{12} :	Ακτινοβολούμενη ισχύς από την επιφάνεια F του σώματος	W
ε :	Συντελεστής ολικής εκπομπής σώματος	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας του μαύρου σώματος	W/m^2K^4
F :	Επιφάνεια	m^2
T_1 :	Απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας 1 ($\Theta_1 = T_1/100$)	Kelvin
T_2 :	Απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας 2 ($\Theta_2 = T_2/100$)	Kelvin
α_s :	Συντ. απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας του σώματος	
F_s :	Επιφάνεια του σώματος που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία	m^2

E_s : Πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην εξεταζόμενη επιφάνεια W/m^2

- Υπολογιστικός τύπος μετάδοσης θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία και ταυτόχρονη αγωγή και συναγωγή.



$$Q_{13} = \varepsilon_1 \cdot C_{\mu} \cdot F \cdot (\Theta_1^4 - \Theta_2^4) - \alpha_s \cdot F_s \cdot E_s + \alpha_{\varepsilon\xi} \cdot F \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \frac{(\theta_1 - \theta_3)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{\varepsilon\sigma}}} \cdot F$$

όπου:

Q_{13} :	Μεταδιδόμενη θερμική ισχύς	kcal/h ή W
ε :	Συντελεστής ολική εκπομπής της επιφάνειας	
C_{μ} :	Σταθερά ολικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος.	W/m^2K^4
F :	Εμβαδόν της επιφάνειας	m^2
Θ_1 :	$= (\theta_1 + 273)/100$	K
Θ_2 :	$= (\theta_2 + 273)/100$	K
α_s :	Συντελεστής απορρόφησης της ηλ. ακτινοβ. της επιφάνειας	
F_s :	Εμβαδόν της επιφάνειας	m^2
E_s :	Πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην εξεταζόμενη επιφάνεια	W/m^2
$\alpha_{\varepsilon\xi}$:	Εξωτερικός συντελ. καθαρής συναγωγής	W/m^2K
θ_1 :	Θερμοκρασία πάνω στην εκτεθειμένη επιφάνεια	$^{\circ}C$
θ_2 :	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	$^{\circ}C$
θ_3 :	Θερμοκρασία εσωτερική	$^{\circ}C$
λ_1 :	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τοιχώματος	W/mK
δ_1 :	Πάχος τοιχώματος	m
$\alpha_{\varepsilon\sigma}$:	Εσωτερικός συντελ. καθαρής συναγωγής	W/m^2K

- Υπολογιστικός τύπος συναλλασσόμενης με ακτινοβολία θερμοροής α_r .

$$Q_r = \alpha_r \cdot F \cdot (\theta_r - \theta_a)$$

όπου:

Q_r :	Συναλλασσόμενη με ακτινοβολία θερμοροή	W
α_r :	Συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας με ακτινοβολία	W/m^2K
F :	Επιφάνεια	m^2
θ_r :	Θερμοκρασία τοιχώματος	$^{\circ}C$

θ_a : Κατάλληλη θερμοκρασία αναφοράς °C

3. Σχέσεις υπολογισμού συντελεστών συναγωγής για φυσική συναγωγή.

- Υπολογιστικός τύπος **αριθμού Grashof**

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \approx \frac{\text{δυνάμεις άνωσης}}{\text{ιξώδεις δυνάμεις}}$$

όπου:

g:	Επιτάχυνση βαρύτητας	=9,8 m/s ²
β:	Ο συντελεστής διαστολής όγκου.	
T _s :	Θερμοκρασία επιφάνειας	°C
T _∞ :	Θερμοκρασία ρευστού (χώρου)	°C
L:	Μήκος επιφάνειας	m
ν:	Κινηματικό ιξώδες	m ² /s

- Υπολογιστικός τύπος **αριθμού Rayleigh**:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr$$

όπου:

Ra _L :	Αριθμός Rayleigh.
Gr _L :	Αριθμός Grashof για επιφάνεια μήκους L.
Pr:	Αριθμός Prandtl.

- Υπολογιστικός τύπος **μέσης θερμοκρασίας στρώματος**.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} + 273$$

όπου:

T _f :	Μέση θερμοκρασία στρώματος	K
T _s :	Θερμοκρασία επιφάνειας	°C
T _∞ :	Θερμοκρασία ρευστού (χώρου)	°C

- Υπολογιστικός τύπος **μέσης τιμής του αριθμού Nusselt για οριζόντιο κύλινδρο. Φυσική συναγωγή.**

$$\overline{Nu}_D = \frac{\alpha \cdot D}{k} = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

όπου:

\overline{Nu}_D :	Μέσος αριθμός Nusselt για διάμετρο κυλίνδρου D	
α:	Συντελεστής συναγωγής από τον κύλινδρο στο περιβάλλον	W/m ² K
k:	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T _f	(W/m·K)
Ra _D :	Αριθμός Rayleigh για διάμετρο κυλίνδρου D	
Pr:	Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία στρώματος T _f	

- Υπολογιστικός τύπος μέσης τιμής του αριθμού Nusselt για κατακόρυφη πλάκα. Φυσική συναγωγή

$$\overline{Nu}_L = \frac{\alpha \cdot L}{k} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

όπου:

- \overline{Nu}_L : Μέσος αριθμός Nusselt για κατακόρυφη πλάκα μήκους L
 α : Συντελεστής συναγωγής από την πλάκα στο περιβάλλον W/m²K
 k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T_f W/mK
 Ra_L : Αριθμός Rayleigh για κατακόρυφη πλάκα μήκους L
 Pr : Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία στρώματος T_f

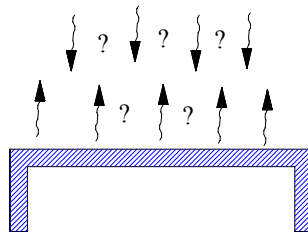
Η σχέση αυτή ισχύει σε όλη την περιοχή Ra_L .

Για περισσότερη ακρίβεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στρωτή ροή η σχέση:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\alpha \cdot L}{k} = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

Η σχέση αυτή ισχύει για $Ra_L \leq 10^9$.

- Υπολογιστικός τύπος μέσης τιμής του αριθμού Nusselt για άνω οριζόντια πλάκα. Φυσική συναγωγή



Σχήμα. Θερμαινόμενη οριζόντια επιφάνεια προς τα πάνω.

$$\overline{Nu}_{Lc} = 0,15 \cdot Ra_{Lc}^{1/3}$$

όπου:

- \overline{Nu}_{Lc} : Μέσος αριθμός Nusselt για χαρακτηριστικό μήκος L_c
 Ra_{Lc} : Αριθμός Rayleigh για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Η προηγούμενη σχέση ισχύει για $10^7 < Ra_{Lc} < 3 \cdot 10^{10}$.

Το χαρακτηριστικό μήκος L_c δίνεται από την εξίσωση:

$$L_c = \frac{\text{Εμβαδόν Επιφάνειας}}{\text{Περίμετρος Επιφάνειας}}$$

- Υπολογιστικός τύπος μέσης τιμής του αριθμού Nusselt για κάτω οριζόντια πλάκα. Φυσική συναγωγή.

$$\overline{Nu}_{Lc} = 0,27 \cdot Ra_{Lc}^{1/4}$$

όπου:

\overline{Nu}_{L_c} : Μέσος αριθμός Nusselt για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Ra_{L_c} : Αριθμός Rayleigh για χαρακτηριστικό μήκος L_c

Η προηγούμενη σχέση ισχύει για $3 \cdot 10^5 < Ra_{L_c} < 3 \cdot 10^{10}$

4. Σχέσεις υπολογισμού συντελ. συναγωγής για εξαναγκασμένη συναγωγή.

- Υπολογιστικός τύπος **αριθμού Reynolds για εσωτερική ροή σε σωλήνα.**

$$Re_D = V_\infty \cdot \frac{D}{\nu}$$

όπου:

Re_D : Ο αριθμός Reynolds στο εσωτερικό του σωλήνα διαμέτρου D

V_∞ : Η ταχύτητα του ρευστού m/s

D : Η εσωτερική διάμετρος σωλήνα m

ν : Κινηματικό ιξώδες m²/s

- Υπολογιστικός τύπος **εσωτερικού συντελεστή συναγωγής για εσωτερική ροή σε σωλήνα. Εξαναγκασμένη συναγωγή.(Εξίσωση Dittus – Boelter).**

$$Nu_D = \frac{\alpha \cdot D}{k} = (0,023) \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

όπου:

Nu_D : Αριθμός Nusselt για σωλήνα διαμέτρου D

α : Συντελεστής συναγωγής από το νερό στο σωλήνα W/m²K

D : Διάμετρος σωλήνα m

k : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για μέση θερμ. στρώμ. T_b W/m·K

Re_D : Αριθμός Reynolds για σωλήνα διαμέτρου D

Pr : Αριθμός Prandtl

n : Σταθερά

Η σταθερά n είναι ίση με:

$$n = \begin{cases} 0,4 & \text{για θερμαινόμενο ρευστό} \\ 0,3 & \text{για ψυχόμενο ρευστό} \end{cases}$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για ιδιότητες υπολογισμένες στη μέση (bulk) θερμοκρασία T_b και ισχύει για $0,7 \leq Pr \leq 120$, $10\,000 < Re_D < 120\,000$, $L/D > 60$.

- Υπολογιστικός τύπος **εσωτερικού συντελεστή συναγωγής για εσωτερική ροή σε σωλήνα. Εξαναγκασμένη συναγωγή.(Εξίσωση Petukhov).**

Για περιοχή του αριθμού Reynolds μεταξύ $5000 < Re_{D,b} < 1,25 \cdot 10^5$, $2 < Pr < 14,0$, $0 \leq \mu_b/\mu_s \leq 40$ τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση

$$\overline{Nu}_D = \frac{(f/8) Re_D Pr}{1,07 + 12,7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}$$

όπου:

- \overline{Nu}_D : Αριθμός Nusselt για σωλήνα διαμέτρου D
 Re_D : Αριθμός Reynolds για σωλήνα διαμέτρου D
 Pr : Αριθμός Prandtl

Όλες οι ιδιότητες του ρευστού για την προηγούμενη εξίσωση είναι υπολογισμένες στη μέση θερμοκρασία (bulk) \overline{T}_b .

- Υπολογιστικός τύπος **μέσης θερμοκρασίας (bulk) T_b για εξαναγκασμένη ροή μέσα σε σωλήνα.**

$$\overline{T}_b = \frac{T_{bin} + T_{bout}}{2}$$

όπου:

- \overline{T}_b : Μέση θερμοκρασία του ρευστού °C
 T_{bin} : Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού °C
 T_{bout} : Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού °C

- Υπολογιστικός τύπος **αριθμού Nusselt για εξωτερική ροή από σωλήνα (Εξίσωση Chen και Wung) για διατάξεις σταυροροής. Εξαναγκασμένη συναγωγή.**

$$\overline{Nu}_D = 0,35 \cdot \left(\frac{b}{b'}\right)^{0,2} \cdot Re_{D_{max}}^{0,60} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25}$$

για $b/b' < 2$ και

$$\overline{Nu}_D = 0,40 \cdot Re_{D_{max}}^{0,60} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25}$$

για $b/b' \geq 2$

όπου:

- \overline{Nu}_D : Ο αριθμός Nusselt για εξωτερική ροή στην σταυροροή.
 b : Καθετη απόσταση σωλήνων m
 b' : Οριζόντια απόσταση σωλήνων m
 Re_{max} : Ο αριθμός Reynolds για μέγιστη ταχύτητα
 Pr : Αριθμός Prandtl για μέση θερμοκρασία T_b
 Pr_s : Αριθμός Prandtl για την θερμοκρασία της επιφάνειας T_s

Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν για περιοχή Reynolds από $10^3 < Re_{D_{max}} < 2 \cdot 10^5$.

- Υπολογιστικός τύπος **αριθμού Reynolds για εξωτερική ροή από σωλήνα. Εξαναγκασμένη συναγωγή, σε συστοιχία σωλήνων.**

$$Re_{max} = \frac{V_{max} \cdot D}{\nu_f}$$

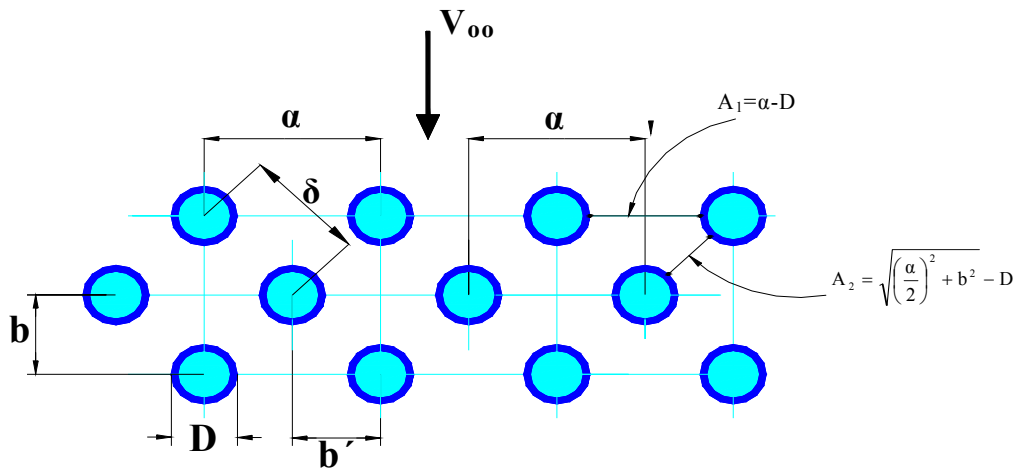
όπου:

- Re_{max} : Ο αριθμός Reynolds για την μέγιστη ταχύτητα καυσαερίων
 D : Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα m
 ν_f : Κινηματικό ιξώδες υπολογισμένο με βάση την T_f m²/s

V_{\max} : Η μέγιστη ταχύτητα καυσαερίων

m/s

- Υπολογιστικός τύπος **μέγιστης ταχύτητας για τριγωνική διάταξη σωλήνων**. δίνεται από τον τύπο:



$$V_{\max} = \frac{\alpha}{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + b^2} - D \right)} \cdot V_{\infty}$$

όπου:

- V_{\max} : Η μέγιστη ταχύτητα του ρευστού m/s
- V_{∞} : Η ταχύτητα του ρευστού m/s
- D : Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα m
- α : Η απόσταση των σωλήνων στη ίδια σειρά (Σχήμα) m
- b : Η απόσταση των σωλήνων διαφορετικών σειρών (Σχήμα) m

5. Σχέσεις υπολογισμού για εναλλάκτες θερμότητας.

- Υπολογιστικός τύπος **μετάδοσης θερμότητας εναλλάκτη (εσωτερική εξίσωση)**.

$$Q = K_o \cdot F \cdot \Delta\theta_m$$

όπου:

- Q : Συνολικά συναλασσόμενη θερμοροή στον εναλλάκτη W
- K_o : Συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εναλλάκτη W/m^2K
- F : Συνολική επιφάνεια συναλλαγής εναλλάκτη m^2
- $\Delta\theta_m$: Θερμοκρασιακή διαφορά, ανάλογα με τον τύπο του εναλλάκτη $^{\circ}C$

- Υπολογιστικός τύπος συνολικού **συντελεστή μετάδοσης θερμότητας εναλλάκτη**.

$$K_o = \frac{K_R}{\pi \cdot d_m}$$

όπου:

- K_o : Συνολικός συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας εναλλάκτη W/m^2K
- K_R : Συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη W/mK
- d_m : Μέση διάμετρος σωλήνα m

- Υπολογιστικός τύπος μέσης διαμέτρου σωλήνα εναλλάκτη.

$$dm = \frac{d_o - d_1}{\ln \frac{d_o}{d_1}}$$

όπου:

dm :	Μέση διάμετρος σωλήνα	m
d _o :	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	m
d ₁ :	Εξωτερική διάμετρος σωλήνα	m

Αν όμως d_o/d₁ < 1,15 τότε:

$$dm = \frac{d_o + d_1}{2}$$

- Υπολογιστικός τύπος συναλλασσόμενης ισχύος εναλλάκτη (εξωτερική εξίσωση).

$$Q = m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta'_1 - \theta''_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta''_2 - \theta'_2)$$

όπου:

Q:	Η συνολικά συναλλασσόμενη θερμική ισχύς	W
m ₁ :	Συνολική παροχή μάζας ρευστού 1	kg/s
m ₂ :	Συνολική παροχή μάζας ρευστού 2	kg/s
c ₁ :	Ειδική θερμότητα ρευστού 1	J/kgK
c ₂ :	Ειδική θερμότητα ρευστού 2	J/kgK
θ' ₁ :	Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 1	°C
θ'' ₁ :	Θερμοκρασία εξόδου ρευστού 1	°C
θ' ₂ :	Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 2	°C
θ'' ₂ :	Θερμοκρασία εξόδου ρευστού 2	°C

- Υπολογιστικός τύπος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς εναλλάκτη αντιρροής.

$$\Delta\theta_{m_{αντ.}} = \frac{(\theta'_1 - \theta''_2) - (\theta''_1 - \theta'_2)}{\ln \frac{\theta'_1 - \theta''_2}{\theta''_1 - \theta'_2}}$$

όπου:

θ' ₁ :	Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 1	°C
θ' ₂ :	Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 2	°C
θ'' ₁ :	Θερμοκρασία εξόδου ρευστού 1	°C
θ'' ₂ :	Θερμοκρασία εξόδου ρευστού 2	°C

- Υπολογιστικός τύπος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς εναλλάκτη μονορροής.

$$\Delta\theta_m = \frac{\theta'_1 - \theta''_1}{\ln \frac{\theta'_1 - \theta'_2}{\theta''_1 - \theta''_2}}$$

όπου:

θ_1' :	Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 1	$^{\circ}\text{C}$
θ_2 :	Θερμοκρασία ρευστού 2 (σταθερή)	$^{\circ}\text{C}$
θ_1'' :	Θερμοκρασία εξόδου ρευστού 1	$^{\circ}\text{C}$

- Υπολογιστικός τύπος **μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς για εναλλάκτη σταυρορροής.**

$$\Delta\theta_{m_{\text{εναλ.}}} = \Delta\theta_{m_{\text{αντ.}}} \cdot \varepsilon$$

όπου:

$\Delta\theta_{m_{\text{εναλ.}}}$: Μέση λογαρ. θερμ. διαφορά εναλ. σταυρορροής $^{\circ}\text{C}$

$\Delta\theta_{m_{\text{αντ.}}}$: Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλάκτη αντιρροής $^{\circ}\text{C}$

ε : Διορθωτικός συντελεστής από κατάλληλο διάγραμμα $^{\circ}\text{C}$

- Υπολογιστικός τύπος **επιφάνειας εναλλάκτη.**

$$F = \pi \cdot d_m \cdot L$$

όπου:

F: Η επιφάνεια του εναλλάκτη m^2

d_m : Η μέση διάμετρος του σωλήνα m

L: Απαραίτητο μήκος εναλλάκτη m

- Υπολογιστικός τύπος **αποδοτικότητας του εναλλάκτη**

$$n_E = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{max}}}$$

όπου:

n_E : Αποδοτικότητα του εναλλάκτη

Q_{actual} : Η ενέργεια που μεταδίδεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό W

Q_{max} : Η μέγιστη συναλλασσόμενη θερμική ισχύς W

Ένας άλλος τρόπος να βρεθεί η αποδοτικότητα του εναλλάκτη είναι η χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$n_E = \frac{\theta_2'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2'}$$

όπου:

θ_1' : Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 1 $^{\circ}\text{C}$

θ_2' : Θερμοκρασία εισόδου ρευστού 2 $^{\circ}\text{C}$

θ_2'' : Θερμοκρασία εξόδου ρευστού 2 $^{\circ}\text{C}$

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή ρύπανσης (fouling factor).**

$$R_f = \frac{1}{K_{\text{οεπικ}}} - \frac{1}{K_{\text{οκαθ.}}} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

όπου:

R_f : Συντελεστής ρύπανσης (fouling factor) $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$

$K_{\text{οεπικ}}$: Συνολικός συντελ. μεταδ. θερμ. μετά την επικάλυψη αλάτων $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

$K_{\text{οκαθ}}$: Συνολικός συντελ. μεταδ. θερμ. καθαρού εναλλάκτη

W/m^2K

6. Επεξήγηση εξισώσεων Εξοικονόμησης ενέργειας.

- Υπολογιστικός τύπος **ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας**

$$\Delta EE = \Delta Q \cdot h / \text{year}$$

όπου:

ΔEE :	Ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια	kWh/y
ΔQ :	Μείωση ισχύος	W
h/year	Ωρες λειτουργίας το χρόνο	h/y

- Υπολογιστικός τύπος **ετήσιου οικονομικού οφέλους στην περίπτωση χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας**

$$E.O.O. = \Delta.E.E. \cdot \tau_{\text{ηλ.}}$$

όπου:

E.O.O.:	Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
$\Delta.E.E.$:	Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας	kWh/y
$\tau_{\text{ηλ.}}$:	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	€/kWh

- Υπολογιστικός τύπος **ετήσιου οικονομικού οφέλους εξοικονόμησης καυσίμου.**

$$E.O.O. = \Delta.G. \cdot \tau_{\text{κ.}}$$

όπου:

E.O.O.:	Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
$\Delta.G.$:	Ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου	kWh/y
$\tau_{\text{κ.}}$:	Τιμή καυσίμου	€/kg

- Υπολογιστικός τύπος **Καθαρού Ετήσιου Οικονομικού Οφέλους.**

$$K.E.O.O. = E.O.O. - E.A.A.$$

όπου:

K.E.O.O.:	Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
E.O.O.:	Ετήσιο Οικονομικό Όφελος	€/y
E.A.A.:	Ετήσιες Λειτουργικές Δαπάνες	€/y

- Υπολογιστικός τύπος **εξοικονόμησης κάποιου καυσίμου.**

$$\Delta G = \frac{\Delta E}{n \cdot \Theta_{\text{κ}}}$$

όπου:

ΔG :	Εξοικονόμηση καυσίμου	kg/m ² y
ΔE :	Εξοικονόμηση ενέργειας	kcal/ m ² y
$\Theta_{\text{κ}}$:	Κατώτερα θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kcal/ kg
n:	Ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης	

- Υπολογιστικός τύπος **αποπληθωρισμένου επιτοκίου**.

$$r = \frac{(1+d)}{(1+i)} - 1 = \frac{d-i}{1+i}$$

όπου:

r: Αποπληθωρισμένο επιτόκιο
i: Ετήσιος πληθωρισμός
d: Επιτόκιο αναγωγής

- Υπολογιστικός τύπος **Καθαρής Παρούσας αξίας**.

$$Κ.Π.Α. = -Α.Κ.Ε. + \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \cdot Κ.Ε.Ο.Ο.$$

όπου:

Κ.Π.Α.: Καθαρά Παρούσα Αξία €
Α.Κ.Ε.: Αρχικό Κόστος Επένδυσης €
r: Αποπληθωρισμένο επιτόκιο
Κ.Ε.Ο.Ο.: Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος €/y
N: Έτη τεχνολογικής ζωής y

- Υπολογιστικός τύπος **Έντοκης Περιόδου Αποπληρωμής**.

$$ΕΠΑ = \frac{-\ln\left[1 - r \cdot \frac{ΑΚΕ}{ΚΕΟΟ}\right]}{\ln(1+r)}$$

όπου:

ΕΠΑ: Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής years
r: Αποπληθωρισμένο επιτόκιο
ΑΚΕ: Αρχικό Κόστος Επένδυσης €
ΚΕΟΟ: Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος €/y

- Υπολογιστικός τύπος **Απλής Περιόδου Αποπληρωμής**.

$$Α.Π.Α. = \frac{Α.Κ.Ε.}{Ε.Ο.Ο.}$$

όπου:

Α.Π.Α.: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής years
ΑΚΕ: Αρχικό Κόστος Επένδυσης €
ΕΟΟ: Ετήσιο Οικονομικό Όφελος €/y

- Υπολογιστικός τύπος **λόγου οφέλους κόστους**.

$$B/C = \frac{\text{Παρούσα αξία εισροών}}{\text{Παρούσα αξία εκροών}}$$

Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι το αποπληθωρισμένο επιτόκιο για το οποίο η Κ.Π.Α. μηδενίζεται.

- Υπολογιστικός τύπος **ολικών ενεργειακών απωλειών**.

$$E_{ολ.} = E_m + E_a$$

όπου:

- $E_{ολ.}$: Ολική ενεργειακή απώλεια.
 E_m : Θερμικές απώλειες λόγω αγωγιμότητας
 E_a : Θερμικές απώλειες λόγω αερισμού

- Υπολογιστικός τύπος **θερμικών απωλειών λόγω αγωγιμότητας**.

$$E_m = K_m \cdot F_{ολ} \cdot DD_h \cdot 24$$

όπου:

- E_m : Θερμικές απώλειες λόγω αγωγιμότητας kcal/y
 K_m : Συντελεστής θερμοπερατότητας kcal/h m² °C
 $F_{ολ}$: Συνολική επιφάνεια m²
 DD_h : Βαθμοημέρες θέρμανσης °C·day

- Υπολογιστικός τύπος **θερμικών απωλειών λόγω αερισμού**.

$$E_a = \frac{Q_a \cdot DD_h \cdot 24}{\Delta\theta}$$

όπου:

- E_a : Θερμικές απώλειες λόγω αερισμού kcal/y
 Q_a : Απώλειες αερισμού (ισχύς) kcal/h
 DD_h : Βαθμοημέρες θέρμανσης °C·day
 $\Delta\theta$: Θερμοκρασιακή διαφορά (υπολογισμού) °C

- Υπολογιστικός τύπος **συντελεστή επίδοσης ψυκτικής διάταξης**.

$$COP = \frac{Q_\psi}{W}$$

όπου:

- COP: Συντελεστής συμπεριφοράς ψυκτικής διάταξης
 Q_ψ : Ψυκτική ισχύς kW
 W : Ισχύς απορροφούμενη για τη λειτουργία kW

Παράρτημα 2. Πίνακες.

(ΑΝΤΙΓΡΑΦΑ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ : "Μετάδοσης θερμότητας" Μ.Κτενιαδακη Σ.Τ.ΕΦ. – Τμήμα Μηχανολογίας και "Εξοικονομηση και Διαχείριση ενέργειας" Μ.Κτενιαδακη Π.Σ.Ε. – ΕΝΠΕΤ.)

Πίνακας Α1. Συντελεστές θερμική αγωγιμότητας υλικών

Υ λ ι κ ά	Φαινομένη πυκνότητας kg/m ³	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ	
		kcal/mh ^ο C	W/mK
1. Δομικά υλικά			
1.1. Λίθοι			
1.1.1 Συμπαγείς λίθοι (ασβεστό- λίθος, μάρμαρον, γρανίτης, βασάλτης κλπ).		3,00	3,49
1.1.2. Πορώδεις λίθοι			
1.1.2.1. Ψαμμίτης		2,00	2,33
1.1.2.2. Πλάκες τύπου Μάλτας		0,90	1,05
1.1.3. Άμμος φυσικής προελεύ- σεως με φυσικήν υγρασίαν		1,20	1,40
1.2. Άργιλλος			
1.2.1. Πλίνθοι συμπαγείς ωμοί		0,80	0,93
1.2.2. Πλίνθοι μετ'αχύρου ωμοί		0,60	0,70
1.3. Σηρά υλικά πληρώσεως τοπο- θετούμενα χύδην εις διάκενα οροφών, τοίχων κλπ			
1.3.1. Άμμος διαμέτρου κόκκου ≤ 5 mm		0,50	0,58
1.3.2. Ψηφίδες διαμέτρου κόκκου 5-10 mm συλλεκταί και θραυ- σταί		0,70	0,81
1.3.3. Χονδρόκοκκος κίσσηρις		0,16	0,19
1.3.4. Θραύσματα οπτοπλίνθων και κεράμων		0,35	0,41
1.3.5. Περγλίτης διωγκωμένος		0,055	0,064

Υ λ ι κ ά	Φαινομένη πυκνότητα kg/m ³	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότη- τος λ	
		kcal/mh ⁰ c	W/mk
1.4. Επιχρίσματα (εσωτερικά και εξωτερικά), συνδετική κονία αμμών εξ:			
1.4.1. Ασβεστοκονιάματος και α-σβεστοτσιμεντοκονιάματος		0,75	0,87
1.4.2. Τσιμεντοκονιάματος		1,20	1,39
1.5. Σκυροδέματα και ελαφρά σωροδέματα (εις κατασκευαστικά στοιχεία άνευ αμμών και εις μεγάλου μεγέθους πλάκας)			
1.5.1. Σκυρόδεμα δια συλλεκτών ή θραυστών αδρανών κλειστής δομής			
-Κατηγορία σκυροδέματος ≤ B120		1,30	1,51
-Κατηγορία σκυροδέματος ≥ B160		1,75	2,03
1.5.2. Γαρμπιλοσκυρόδεμα	1500	0,55	0,64
	1700	0,70	0,81
	1900	0,95	1,10
1.5.3. Κιτσηρόδεμα	800	0,25	0,29
	1000	0,30	0,35
	1200	0,40	0,46
1.5.4. Κυψελωτόν σκυρόδεμα σκληρυνθέν δι' ατμού	400	0,12	0,14
	500	0,16	0,19
	600	0,20	0,23
	800	0,25	0,29
	1000	0,30	0,35

Υ λ ι κ ά	Φαινόμενη πυκνότης kg/m ³	Συντελεστής θερ- μικής αγωγιμότη- τος λ	
		kcal/mh ⁰ c	W/mk
1.5.5. Περλιτόδεμα			
τσιμέντο:περλίτης (κατ'όγκον)			
1 : 4		0,170	0,198
1 : 5		0,140	0,163
1 : 6		0,125	0,145
1 : 7		0,115	0,134
1 : 8		0,110	0,128
1 : 20		0,070	0,081
1.5.6. Πλάκες εκ σκυροδέματος, γύψου και αμιαντοτσιμέντου			
1.5.6.1. Πλάκες εκ κισσηροδέ- ματος			
	800	0,25	0,29
1.5.6.2. Πλάκες εξ ελαφρού σκυ- ροδέματος με ανάμικτα αδρα- νή			
	1400	0,50	0,58
1.5.6.3. Γυψοσανίδες			
	1200	0,50	0,58
1.5.6.4. Πλάκες εξ αμιαντοτσι- μέντου			
	1800	0,30	0,35
1.5.7. Τοιχοποιζα εκ τσιμεντο- πλίνθων συμπεριλαμβανομέ- νου και του κονιάματος των αρμών ⁽¹⁾			
1.5.7.1. Τσιμεντόλιθοι πλήρεις με ασβεστολιθικά αδρανή			
	1600	0,68	0,79
	1800	0,85	0,99
	2000	0,95	1,10
1.5.7.2. Τσιμεντόλιθοι διάτρη- τοι με ασβεστολιθικά αδρα- νή			
	1200 ⁽²⁾	0,48	0,56
	1400 ⁽²⁾	0,60	0,70
	1600 ⁽²⁾	0,68	0,79

Υ λ ι κ ά	Φαινόμενη Συντελεστής θερμο- πικνότητας ής αγωγιμότητας λ		
	kg/m ³	kcal/mh ⁰ c	W/mk
1.5.7.3. Τσιμεντόλιθοι με διά- μενα, με ασβεστολιθικά ά- δρανή	1000 ⁽²⁾	0,43	0,50
	1200 ⁽²⁾	0,48	0,56
1.5.7.4 Κιςσηρόλιθοι πλήρεις	800	0,35	0,41
	1000	0,40	0,46
	1200	0,45	0,52
	1400	0,55	0,64
	1600	0,68	0,79
1.5.7.5. Κιςσηρόλιθοι με διά- μενα, 2 διακένων	1000 ⁽³⁾	0,38	0,44
	1200 ⁽³⁾	0,42	0,49
	1400 ⁽³⁾	0,48	0,56
1.5.7.6. Κιςσηρόλιθοι με διά- μενα, 3 διακένων	1400 ⁽³⁾	0,42	0,49
	1600 ⁽³⁾	0,48	0,56
1.5.7.7. Πλίνθοι εκ κυψελωτού σκυροδέματος εσκληρωμένοι δι' ατμού	600	0,30	0,35
	800	0,35	0,41
	1000	0,40	0,46
1.5.7.8. Πλίνθοι εκ κυψελωτού σκυροδέματος εσκληρωμένοι εις τον αέρα	800	0,38	0,44
	1000	0,48	0,56
	1200	0,60	0,70
1.5.8. Τοιχοποιία εξ' οπτοπλίν- θων συμπεριλαμβανομένου και του κονιάματος των αρμών ⁽¹⁾			

Υ λ ι κ ά	Φαινομένη πυκνότης kg/m ³	Συντελεστής θερμι- κής αγωγιμότητος λ	
		kcal/mh ⁰ c	W/mK
1.5.8.1. Οπτόπλινθοι πλήρεις	1000	0,40	0,46
	1200	0,45	0,52
	1400	0,52	0,60
	1800	0,68	0,79
1.5.8.2. Οπτόπλινθοι διάτρητοι	1000 ⁽⁴⁾	0,40	0,46
	1200	0,45	0,52
	1400	0,52	0,60
1.5.8.3. Πλακίδια επιστρώσεως	2000	0,90	1,05
2. Ξύλα			
2.1. Δρυς	750	0,18	0,21
2.2. Οξυά		0,15	0,17
2.3. Κωνοφόρα (πεύκο, έλατο κλπ)	430	0,12	0,14
2.4. Κόντρα πλακέ, πλακάς κλπ.		0,12	0,14
2.5. Μορισσανίδες	900	0,15	0,17
3. Μέταλλα-Ύαλος			
3.1. Ύαλος		0,70	0,81
3.2. Χυτοσίδηρος και χάλυψ		50	58,15
3.3. Χαλκός		330	383,79
3.4. Ορείχαλκος		55	63,96
3.5. Αλουμίνιο		175	203,52
4. Συνθετικά και Ασφαλτικά υλικά επιστρώσεως			
4.1. Δινόλευοιμ	1200	0,16	0,19
4.2. Ασφαλτικό σκυρόδεμα	2100	0,60	0,70
4.3. Ασφαλτος	1050	0,15	0,17
4.4. Ασφαλτόχαρτο	1100	0,16	0,19
5. Θερμομονωτικά υλικά			
5.1. Πλάκες εξ υαλοβάμβακος βα- κελιτούχες και εκ λιθοβάμ- βακος (ορυκτοβάμβαξ)		0,035	0,041

Υ λ ι κ ά	Φαινομένη πυκνότης kg/m ³	Συντελεστής θερμι- κής αγωγιμότητος λ	
		kcal/mh ^ο c	W/mK
5.2. Υαλοβάμβαξ μη μορφοποιημέ- νος	50	0,035	0,041
5.3. Πλάκες ελαφρών κατασκευών εκ ξυλομάλλου μετά ανοργά- νου συνθετικής κονίας πά- χους 15 mm	570	0,12	0,14
25 έως 35 mm	460-415	0,080	0,093
50 mm και μεγαλύτερου	390 και μικρότερο	0,070	0,081
5.4. Πλάκες εκ διωγκωμένου φελ- λού	120	0,035	0,041
	160	0,038	0,044
	200	0,040	0,046
5.5. Πλακίδια εκ φελλού	450	0,055	0,064
5.6. Διωγκωμένα συνθετικά υλι- κά (5) (7)		0,035	0,041
5.7. Σκληροί αφροί εκ συνθετικών υλικών (6) (7)		0,035	0,041

- (1) Οι αναγραφόμενοι φαινόμενοι πυκνότητες, εφόσον δεν ορίζεται άλλως, αφορούν εις τα στοιχεία (λίθους, πλίνθους) και όχι εις τον τοίχον.
- (2) Η φαινόμενη πυκνότης αναφέρεται εις ολόκληρων το στοιχείων (λίθον) συμπεριλαμβανομένων και των κενών.
- (3) Η φαινόμενη πυκνότης αναφέρεται επί του κισσηροδέματος αφαιρούμενων των κενών.
- (4) Η φαινόμενη πυκνότης αναφέρεται εις ολόκληρων το στοιχείον (πλίνθον) συμπεριλαμβανομένων και των κενών.
- (5) Απαγορεύεται η χρησιμοποίησης διωγκωμένων συνθετικών υλικών βάρους μικρότερου των 20 kg/m³.
- (6) Απαγορεύεται η χρησιμοποίησης σκληρών αφρών εκ συνθετικών υλικών βάρους μικρότερου των 10 kg/m³.
- (7) Απαγορεύεται η χρησιμοποίησης εις εσωτερικούς χώρους και εις ακάλυπτα τμήματα της οικοδομής μη συνεχόμενα μετά των υποχρεωτικός ακάλυπτων χώρων (φωταγωγοί, αεραγωγοί κλπ), συνθετικών θερμομονωτικών υλικών τα οποία, κατά την καύσιν των, παράγουν τοξικά αέρια. Εις ότι αφορά την αναφλεξιμότητα των υλικών αυτών οφείλουν να ακολουθούν τους κανονισμούς πυρασφάλειας.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Ο ΠΙΝΑΚΑΣ 1 είναι αντίγραφο από το Π.Δ. της 1.6.1979 "Κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων". (ΦΕΚ 362 Δ της 4.7.79)

Πίνακας Α2. Συντελεστές θερμικής μετάβασης (από αέρα σε οικοδομικό τοίχωμα και αντίστροφα)

	$Kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$	$W/m^2 \cdot K$
1) Στίς εσωτερικές πλευρές κλειστών χώρων, με φυσική κίνηση αέρα		
- για τοίχους, θύρες, παράθυρα κλπ	$\alpha_i = 7$	$\alpha_i = 8,14$
- για δάπεδα και οροφές όταν η ροή θερμότητας είναι προς τα πάνω	$\alpha_i = 7$	$\alpha_i = 8,14$
- για δάπεδα και οροφές όταν η ροή θερμότητας είναι προς τα κάτω	$\alpha_i = 5$	$\alpha_i = 5,81$
2) Στίς εξωτερικές πλευρές με μέση ταχύτητα ανέμου περίπου $2 m/s$	$\alpha_o = 20$	$\alpha_o = 23,26$

Πίνακας Α3. Τιμές του συντελεστή μεταβίβασης της θερμότητας (α_i, α_o)

	$W/m^2 \cdot K$
- φυσική κυκλοφορία αέρα ή ατμού	5 - 25
- φυσική κυκλοφορία νερού	70 - 700
- Βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα	12 - 250
- Βεβιασμένη κυκλοφορία νερού	600 - 6000
- Ατμοποιούμενο νερό	3000 - 6000
- Συμπυκνούμενος υδρατμός	6000 - 30000

Πίνακας Α4. Θερμοκρασιών και άλλων στοιχείων πόλεων.

Όνομα πόλης	Μέση ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία °C	Υψόμετρο σταθμού m	Επικρατούντες άνεμοι κατά τους μήνες Ιανουάριο - Φεβρουάριο	Ζώνη
1	2	3	4	5
Αγρίνιο	-3	45,8	A	B
Αθήνα - Αστεροσκοπείο	+1	107,0	B και N.	B
Αίγιο	0	64,0	B.Δ.	B
Αλεξανδρούπολη	-7	2,5	B.A.	Γ
Αλίαρτος	-2	110,0	B.Δ.	B
Ανάβρυτα	-2	290,0	B. και N.Δ.	B
Αργοστόλιον	+1	1,7	B.A και N.Δ.	A
Άρτα	-2	42,0	B.A και N.	B
Βόλος	-3	2,7	B.	B
Δράμα	-8	74,0	N.Δ.	Γ
Έδεσσα	-7	237,0	B.	Γ
Ελευσίνα	0	29,5	B.	B
Ελληνικό Αττικής	+2	10,2	B.	B
Ζάκυνθος	+2	6,6	B.A.	A
Ηράκλειο	3	38,5	N.Δ.	A
Θάσος	-6	2,0	B.A.	Γ
Θεσ/νίκη Μίκρα	-5	2,8	B.Δ.	Γ
Θήρα	+3	208,0	B.	A
Ιεράπετρα	+4	13,0	B.	A
Ιωάννινα	-6	483,0	N.A	Γ
Καβάλα	-8	62,8	N.A.	Γ
Καλάβρυτα	-6	731,0	B. και N.	Γ
Καλαμάτα	+1	4,6	B.	A
Καλαμπάκα	-6	226,5	Δ.	Γ
Κάρπαθος	+5	9,0	Δ.	A
Κάρυστος	+1	10,0	B.	B
Κατερίνη	-5	31,5	B.	Γ
Κέρκυρα	0	1,0	N.A.	B
Κοζάνη	-10	625,0	B.	Γ
Κομοτηνή	-7	30,0	B.A.	Γ
Κόνιτσα	-6	542,0	B.	Γ
Κόρινθος	+1	14,4	N.	B
Κύθηρα	+4	166,0	B.A.	A
Κύμη	0	221,1	B.	B
Κώς	+3	10,0	N.	A
Λαμία	-4	143,0	Δ.	B

Όνομα πόλης	Μέση ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία °C	Υψόμετρο σταθμού m	Επικρατούντες άνεμοι κατά τους μήνες Ιανουάριο - Φεβρουάριο	Ζώνη
Λάρισα	-7	72,7	Β. και Α.	Γ
Λευκάς	0	2,4	Ν.Α.	Α
Λήμνος	0	12,3	Β.Α.	Β
Μέγαρα	0	36,0	Β.Δ.	Β
Μεθώνη	+1	33,0	Β.Α. και Δ.	Α
Μεσολόγγι	-2	1,0	Δ. και Β.Δ.	Β
Μήλος	+3	182,0	Ν.Δ.	Α
Μυτιλήνη	+2	3,2	Ν.	Β
Νάξος	+4	9,0	Ν.	Α
Ναύπλιον	0	1,5	Β.	Β
Νέα Φιλαδέλφεια				
Αττικής	0	136,0	Β.Α.	Β
Ξάνθη	-8	82,0	Β.	Γ
Ορεστιάδα	-9	43,0	Β.Δ.	Γ
Παλλαιόχωρα -Κρήτης	+5	8,0	Β.	Α
Πάτρα	-1	1,0	Ν.Δ.	Β
Πειραιαιεύς	+2	2,0	Β.Α.	Β
Πόλυγυρος	-8	550,0	Β.Α. και Β.	Γ
Πρέβεζα	0	11,8	Β.Α.	Β
Πτολεμαίδα	-12	601,0	β.δ.	Γ
Πύργος	-1	132,0	Β.Δ.	Β
Ρέθυμνον	+3	16,0	Ν. και Β.	Α
Ρόδος	3	34,7	Ν. και Δ.	Α
Σάμος	+3	48,4	Ν.Α. και Β.Δ.	Α
Σέρρες	-9	32,5	Α.	Γ
Σητεία	+4	25,2	Β.Δ.	Α
Σκύρος	+2	4,0	Β.Α.	Α
Σουφλί	-10	15,0	Β.	Γ
Σπάρτη	0	212,0	Β.	Β
Σταυρός Χαλκιδικής	-7	10,0	Δ.	Γ
Σύρος	+3	25,0	Β.	Α
Τανάγρα	-2	138,8	Δ.	Β
Τρίκαλα	-6	116,0	Β.Δ.	Γ
Τρίπολις	-5	661,4	Β. και Ν.Δ.	Γ
Φλώρινα	-11	661,0	Δ.	Γ
Χαλκίδα	+2	4,0	Β.	Β
Χανιά	+3	62,5	Ν.Δ.	Α
Χίος	+3	60,0	Β.	Α

Πίνακας Α5. Συντελεστής ολικής εκπομπής (ακτινοβολίας) διαφόρων επιφανειών.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	θ ^ο C	ε	Πηγή
<u>Μέταλλα και οξειδία τους</u>			
Αλουμίνιο, καλά χυαλισμένο	225-275	0,039-0,057	1,2,4
" , απλά χυαλισμένο	23	0,04	4
" , χυτό, τραχύ	26	0,055	1
" , σε φύλλα εμπορίου	22-100	0,09	2,3
" , οξειδωμένο στους 600 ^ο C	200-600	0,11-0,19	1,4
" , οξείδιο	275-825	0,63-0,26	4
" , πολύ οξειδωμένο	20-505	0,20-0,31	2
" , εξελασμένο	170-900	0,049-0,060	5
" , σε φύλλα στεγάστρων	38	0,216	2
Αργυρος, λειασμένος, καθαρός	225-625	0,020-0,032	1,2,3,4
" , λειασμένος	38-370	0,022-0,031	2
Ατσάλι, λειασμένο, χυτό	770-1040	0,52-0,56	1
" , καλά λειασμένο	100	0,066	2
" , σε φύλλα (ελάσματα)	940-1100	0,55-0,61	1
" , μαλακό, καθαρό	22	0,12	3
" , μαλακό, μέτρια οξειδωμένο	230-1065	0,20-0,32	2
" , οξειδωμένο στους 600 ^ο C	200-600	0,80	1
" , πολύ οξειδωμένο	25	0,80-0,82	1,2
" , ανοξειδωτο, λειασμένο	100	0,074	2
Βισμούθιο, καθαρό	80	0,366	5
Βολφράμιο	25-1500	0,024-0,23	5
" , νήμα	25-3315	0,03-0,35	3,4
Θόριο, οξείδιο	275-825	0,58-0,21	4
Κάδμιο	22	0,62	4
Κασσίτερος, λαμπρός	25-50	0,043-0,064	1,2,3,4,5
" , οξείδιο	20	0,32	5
Μαχνήσιο, οξείδιο	275-825	0,55-0,20	2
" , "	22	0,55	3
Μολυβδένιο, συμπαχές, λειασμένο	100	0,071	2
" , νήμα	725-2600	0,096-0,292	1,2,4

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	θ°C	ε	Πηγή
Μόλυβδος, μη οξειδωμένος, καθαρός	125-225	0,057-0,075	2,4
" " "	100	0,05	5
" , οξειδωμένος στους 200°C	200	0,63	1
" , οξειδωμένος, γκρίδος	25	0,28	1,2,3,4
Manganin (κράμα Cu-Mn), εξελασμένο	118	0,057	5
Monel (κράμα Ni-Cu), οξ. στους 600°C	200-600	0,41-0,46	2
Monel, καθαρισμένο, λειασμένο	24	0,17	4
Νικέλιο, καθαρό, ανορθωμένο	225-375	0,070-0,087	1
" , λειασμένο	100	0,072	2
" , ηλεκτρολυτικό, λειασμένο	22	0,045	3,4
" , οξειδωμένο στους 600°C	200-600	0,37-0,48	1,4
" , οξείδιο	650-1255	0,59-0,86	1,2,4
" , σύρμα	185-1000	0,096-0,186	1,4
-επινικελωμένος (με εμβάπ.) σίδηρος	20	0,11	1
-κράμα ασημονικέλιο, λειασμένο	22-100	0,135-0,140	3,4
-κράμα χαλκονικέλιο, λειασμένο	100	0,059	2,4
-κράμα χρωμιονικέλιο	125-1034	0,64-0,76	1
- " " , σύρμα, λαμπερό	40-1000	0,65-0,79	2,4
- " " , σύρμα, οξειδ.	40-500	0,95-0,98	2,4
Οξείδιο ουρανίου	1123	0,79	5
Ορείχαλκος, καλά λειασμένος	250-375	0,028-0,038	2
" , φύλλο εξελασμένο	22	0,06	1,4
" , φύλλο λειασμένο (σφυρ)	22	0,20	1,4
" , θαμπός	50-350	0,22	1,2
" , οξειδωμένος στους 600°C	200-600	0,61-0,59	1,4
Πλατίνα, φύλλο καθαρό λειασμένο	22-625	0,054-0,104	1,2,3
" , λωρίδα	925-1115	0,12-0,17	1
" , νήμα	25-1230	0,036-0,192	1
" , σύρμα	225-1375	0,073-0,182	1
Σίδηρος, χημ. καθαρός, λειασμένος	175-980	0,05-0,37	4
" , λειασμένος	425-1020	0,144-0,377	1,2
" , σφυρήλατος, λειασμένος	40-250	0,28	4
" , " , θαμπός, οξειδ.	22	0,94	3

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	θ°C	ε	Πηγή
Σίδηρος, πρόσφατα κατεργασμένος	20	0,242	1
" , με σκούρα γκρι επιφάνεια	100	0,31	2
" , εξελασμένος	830-990	0,60-0,70	1
" , πλάκες οξειδωμένες	20	0,69	4
" , οξειδωμένος	100	0,736	1
" , οξειδωμένος, λείος	125-525	0,78-0,82	1,4
" , οξείδιο	500-1200	0,85-0,95	1
" , πολύ οξειδωμένος	40-250	0,95	4
" , οξειδωμένος στους 600°C	200-600	0,64-0,78	1
" , τήγμα	1500-1770	0,40-0,45	4
" , πλίνθωμα τραχύ	925-1115	0,87-0,95	2
-χαλβανισμένος σίδηρος, λαμπερός	28	0,228	1,2,4
-χαλβανισμένος σίδηρος, γκριός, οξ.	24	0,276	1,4
Ταντάλιο, νήμα	1325-3000	0,194-0,33	4
Υδράργυρος, μεγάλης καθαρότητας	0-100	0,09-0,12	1,4
Χαλκός, ηλεκτρολυτικός, χυαλισμένος	80-115	0,018-0,023	1,2,4
" , φύλλα εμπορίου, χυαλισμένα	20	0,03	4
" , εμπορίου, καλά χυαλισμένος	100	0,052	2
" , εμπορίου, απλά χυαλισμένος	22	0,072	1,3
" , οξειδωμένος στους 600°C	200-600	0,57-0,87	1,4
" , οξειδωμένος	130	0,725	5
" , πλάκα, με λεπτό στρ. οξειδίου	25	0,78	2,4
" , οξείδιο	800-1000	0,66-0,54	1,4
" , τήγμα	1075-1275	0,16-0,13	1,4
Χρυσός, καθαρός, καλά χυαλισμένος	225-635	0,018-0,035	1,2,4
" , καλά χυαλισμένος	20	0,02	3
Χρώμιο, χυαλισμένο	40-1090	0,08-0,36	1,2,4
" , στιλπνό	150	0,071	5
Χυτοσίδηρος, πρόσφατα κατεργασμένο	22	0,44	2,3
" , μη κατεργασμένος	925-1115	0,87-0,95	1
" , κατεργ. & θερμασμένος	880-990	0,60-0,70	2
" , τήγμα	1535	0,29	5
Ψευδάργυρος, εμπορίου, καθαρ. 99, 1%	225-325	0,045-0,053	1,4
" , οξειδωμένος στους 400°C	400	0,11	1

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	θ°C	ε	Πηγή
<u>Υλικά επικαλύψεων, οικοδομικά υλικά, ξύλα κ.λπ.</u>			
Αιθάλη λάμπας	90-270	0,952	1
" , πολύ λεπτό στρώμα	100-185	0,959-0,947	1
" , στρώμα πάχους >75 mm	40-370	0,945	1
Αλουμίνα (μέγεθος κόκκου 10 μm)	1000-1565	0,30-0,18	2
" (" " 50 μm)	1000-1565	0,39-0,28	2,4
" (" " 100 μm)	1000-1565	0,50-0,40	2
Αμίαντος, φύλλο	24	0,96	1,2
" "	40-370	0,93-0,945	1,4
Ανθρακας, μήσουντεθ/νος, στάχτη 0,9%	125-625	0,81-0,79	1,2,4
" , νήμα	1040-1405	0,526	1,2
" , πλάκα, αδρής επιφάνειας	100-320	0,77	2
Ασβεστοκονίαμα, επίστρωμα τραχύ	10-88	0,91	1,3
Ασβεστόλιθος	63-193	0,36-0,90	3
Ασφαλτος	10-540	0,90-0,98	4
Βαλανιδιά, πλανισμένη	20	0,895	1,3
Γραφίτης	-	0,65	3
Γυαλί, κοινό, λείο	22	0,937	1,2,3
" , πυράντοχο	260-540	0,95-0,85	2
Γύψος, λείας επιφάνειας	20	0,903	1,3
Γυψοσανίδα	21	0,91	1
Καουτσούκ, σκληρό στιλπνό	23	0,945	1,2,3
" , μαλακό, τραχύ (βουλκαν.)	24	0,859	1,3,4
Κιμωλία	130	0,34	3
Κορούνδιο, σκληρό, λειασμένο	80	0,84	5
Μάρμαρο, ανοιχτό χκρί, λειασμένο	22	0,931	1,3
Νερό	0-100	0,95-0,963	1,2
Οξυά, πλανισμένη	70	0,935	5
Πάχος, λείος	0	0,966	5
" , τραχειάς επιφάνειας	0	0,985	5
Πλίνθος πυρίμαχος	-	0,80-0,90	1
Πορσελάνη, εξυαλωμένη (στιλπνή)	22	0,924	1,2,3
Σκυρόδεμα	0-200	0,90-0,97	
" , πλίνθοι	1000	0,63	2

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	θ°C	ε	Πηγή
Σμάλτο λευκό, μετά τήξη	19	0,897	1
Τούβλο, μη εξυαλωμένο, τραχύ	100	0,80	1
" , εξυαλωμένο, τραχύ	1100	0,85	1
" , πυρότουβλο, εξυαλωμένο	1000	0,75	1,2,3
" , κόκκινο, τραχύ	20	0,93	1,2,3
Χαλασίνας, τραχύς, μετά τήξη	20	0,932	1,2
Χαρτί, λευκό, σε μεταλ. επιφάνεια	19	0,924	1,3
" , στέγης, πλισσόχαρτο	20	0,91	2
Χώμα. Ξηρό. συμπαχές	20	0,41	3

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	θ°C	ε	Πηγή
<u>Χρώματα, βερνίκια κ.λπ.</u>			
Αλουμινομποξιά, ανάλογα με περ. Al	100	0,67-0,27	1,2,4
" , μετά θέρμανση	150-315	0,35	1
Βερνίκι, άσπρου σμάλτου, σε σιδηρ.	23	0,906	1,2,3
" , μαύρο, στιλπνό, σε σιδηρ.	25	0,875	1,2
" , μαύρο, χοντρό στρώμα	22-95	0,96-0,98	1,2,3
" , μαύρο, γυαλιστερό	21	0,821	1,2
" , μαύρο, ματ	75-145	0,91	1,2,3
" , λευκό	40-95	0,80-0,95	1,2
" , αλουμινίου, σε τραχύ σιδ.	20	0,39	1,3
Λαδομποξιές, όλων των χρωμάτων	100	0,92-0,96	1

Μικρή οπή σε τοίχωμα μεγάλου κιβω- τίου ή σφαίρας ή κλιβάνου	10-540	0,97-0,99	3

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Ο ΠΙΝΑΚΑΣ 4 συντάχθηκε με στοιχεία που πάρθηκαν από ανάλογους Πίνακες των βιβλίων:

1. Μ. ΜΙΚΗΕΕV, Μετάδοση θερμότητας, Έκδοση ΠΛΑΙΣΙΟ.
2. J.P. HOLMAN, Heat Transfer, 5th Edition, McGRAW- HILL, 1981
3. ASHRAE HANDBOOK, Fundamentals, 1977
4. "Marks' STANDARD HANDBOOK FOR MECHANICAL ENGINEERS", McGRAW - JI.; BOOK CO., 1978
5. VDI - WARMETLAS, Μετάδοση θερμότητας (Μετάφρασις εκ του Γερμανικού, επιμέλεια Κ. Παττά - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Πίνακας Α6. Συντελεστής απορρόφησης διαφόρων επιφανειών ως προς την ηλιακή ακτινοβολία(α_s)

Επιφάνεια	α_s
Αιθάλη	0,95
Αλουμίνιο, γυαλισμένο καλά	0,15
Αλουμίνιο ανορθωμένο	0,26
Άσφαλτος	0,89
Ατσάλι, γυαλισμένο	0,37
Γραφίτης	0,85
Κεραμίδια στεγής, κόκκινα και καφέ	0,65 - 0,74
Μάρμαρο, λευκό	0,46
Μπογιά, άσπρη	0,12 - 0,16
Μπογιά μαύρη	0,90 - 0,96
Σίδηρος, λειασμένος	0,45
Σίδηρος, οξειδωμένος	0,74
-γαλβανισμένος σίδηρος, καινούριος	0,66
-γαλβανισμένος σίδηρος, παλιός	0,89
Τούβλο κόκκινο	0,70 - 0,77
Χαλίκια	0,29
Χαλκός, ανορθωμένος	0,26
Χαλκός γυαλισμένος καλά	0,18
Χαρτί άσπρο	0,27
Χυτοσίδηρος	0,94

Πίνακας Α7. Θερμογόνος δύναμη καυσίμων.

BENZINH	10400 kcal/kg
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΝΤΗΖΕΛ	10250 kcal/kg
ΜΑΖΟΥΤ 3500	9800 kcal/kg
ΜΑΖΟΥΤ 1500	9850 kcal/kg
ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΑΣ	6500 kcal/kg
ΛΙΓΝΙΤΗΣ (ξηρός, ΔΕΗ.)	1365 kcal/kg
ΛΙΓΝΙΤΗΣ (καύσιμο βιομ.)	2000 kcal/kg
ΚΑΥΣΟΞΥΛΑ	3500 kcal/kg
ΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟ	4000 kcal/kg
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΟ ΚΩΚ	7000 kcal/kg
ΜΙΓΜΑ ΑΕΡΙΩΝ (LPG)	10950 kcal/kg
ΠΡΟΠΑΝΙΟ	11050 kcal/kg
Φ. ΑΕΡΙΟ (Ρωσικό)	8700 kcal/Nm ³
Φ.ΑΕΡΙΟ(Αλγερινό)	9000 kcal/Nm ³
ΑΕΡΙΟ ΔΕΦΑ	8200 kcal/Nm ³

Πίνακας Α8. Πυκνότητα υγρών και αέριων καυσίμων.

LPG (25% προπάνιο, 75 βουτάνιο)	0,57 kg/lit
BENZINH	0,74 kg/lit
DIEZEL	0,84 kg/lit
ΜΑΖΟΥΤ 3500	0,92 kg/lit
Φ.ΑΕΡΙΟ (Ρώσικο)	0,685 kg/Nm ³
Φ.ΑΕΡΙΟ (Αλγερινό)	0,78 kg/Nm ³
ΑΕΡΑΣ	1,293 kg/m ³ (υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης)

1 Nm³ = 1 m³ σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.
(T = 15°C, p = 1 atm 1013 mbar)

Πίνακας Α9. Συντελεστές μετατροπής μονάδων ενέργειας.

	kJ	BTU	kcal	kWh	ΤΠΠ
kJ	1	0,9478	0,2388	0,000278	2,38·10 ⁻⁸
BTU	1,0551	1	0,252	0,000293	2,52·10 ⁻⁸
kcal	4,187	3,9683	1	0,001163	1·10 ⁻⁷
kWh	3600	3411	859,84	1	0,000086
ΤΠΠ	4,187·10 ⁷	3,9683·10 ⁷	1·10 ⁷	11630	1
R.T. (Ψυκτικός Τόνος)		12.000			

Πίνακας Α10. Συντελεστές μετατροπής μονάδων ισχύος.

	kW	BTU/h	kcal/h	HP
kW	1	3,412	860	1,341
BTU/h	0,000293	1	0,252	0,000393
kcal/h	0,001163	3,9683	1	0,00156
HP	0,7457	2,544	641,19	1

Βιβλιογραφία.

- Κτενιαδάκης Μ., **Σημειώσεις Εξοικονόμησης Ενέργειας**, ΤΕΙ Κρήτης Ηράκλειο 2002.
- Κτενιαδάκης Μ., **Σημειώσεις Μετάδοσης θερμότητας**, ΤΕΙ Κρήτης Ηράκλειο 1999.
- Κτενιαδάκης Μ., **Σημειώσεις Κτιριακές Εγκαταστάσεις III**, ΤΕΙ Κρήτης Ηράκλειο 2001.
- Donald R. Pitts & Leighton E. Sissom, **Μεταφορά θερμότητας**, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2001.
- J.P.Holman, **Heat Transfer**, εκδόσεις McGraw-Hill, New York 1986.
- Frank P. Incropera & David P. DeWitt, **Introduction to Heat Transfer**, εκδόσεις John Wiley & Sons, New York 1990.
- Aubrey I. Brown & Salvatore M. Marco, **Introduction to Heat Transfer**, εκδόσεις McGraw-Hill, New York 1958.
- Alan J.Chapman, **Heat Transfer**, εκδόσεις Macmillan New York & Collier Macmillan London 1974.
- Κανονισμός Υ.Α. Δ6/Β/οικ. 11038–ΦΕΚ 1526/Β/27-7-1999, **Διαδικασίες, απαιτήσεις και κατευθύνσεις για τη διεξαγωγή ενεργειακών επιθεωρήσεων**, Αθήνα 1999.
- Staff of Reasearch and Education Association, Dr. M.Fogiel, **The Heat Transfer Problem Solver**, Reasearch and Education Association 1991.

Διαδικτυακοί Τόποι.

- Carrier Ελλάς Κλιματισμός Α.Ε.: www.carrier.gr.