



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ &**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΓΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ- ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ  
ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»**



ΚΑΣΣΙΑΝΙΔΗ ΧΑΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΡΙΑ ΦΟΥΝΤΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Απρίλιος 2014  
Αθήνα



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κα Φούντη Μαρία για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το πολύ ενδιαφέρον θέμα της ανάλυσης της υγροθερμικής συμπεριφοράς της διογκωμένης πολυστερίνης στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ιωάννη Μανδηλαρά για την διαρκή επιστημονική του υποστήριξη και την καθοδήγηση του σε όλη της διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον Μετα- διδακτορικό συνεργάτη Δήμο Κοντογεώργο για τις πολύτιμες οδηγίες του κατά την συγγραφή της εργασίας και όλους τους ερευνητές του εργαστηρίου για τις συμβουλές τους και για το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που διατηρούσαν στο εργαστήριο.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή κο Γεώργιο Πουλάκο της σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, για την παραχώρηση της μετρητικής διάταξης μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας Guarded Hot Plate και την καθημερινή πρόσβαση που μου παρείχε στο Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών στο κτίριο Αντοχής Υλικών της Πολυτεχνειούπολης, Ζωγράφου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο Χαράλαμπο Μαυράκη για την πολύτιμη βοήθειά και για την απεριόριστη στήριξή του σε όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ανδρέα και Ελένη και τις αδερφές μου Δέσποινα, Στέλλα και Εύα και τους φίλους μου για την ηθική συμπαράσταση που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη των χωρών για εξοικονόμηση ενέργειας οδήγησε στην εκπόνηση ποικίλων μελετών σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στην βιομηχανία και στην καθημερινή ζωή. Εκτός από τον εντοπισμό των σημαντικότερων πηγών κατανάλωσης ενέργειας, πολλές μελέτες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη κατάλληλων μέτρων και την εφαρμογή παρεμβάσεων ώστε να επιτευχθεί η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων. Σύμφωνα με έρευνες, το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται για την θέρμανση και ψύξη των κτιρίων και ο βέλτιστος τρόπος για το περιορισμό της κατανάλωσης είναι η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτιριακών δομών με χρήση θερμομόνωσης στην τοιχοποιία. Η θερμομόνωση επιτυγχάνεται κυρίως με χρήση υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα εμποδίζουν την μετάδοση της θερμότητας και διατηρούν την θερμική άνεση εντός των εσωτερικών χώρων ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος που απαιτείται από την χρήση συσκευών θέρμανσης και κλιματισμού. Ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του μονωτικού υλικού διότι, όπως σε όλα τα υλικά, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και τα ακραία καιρικά φαινόμενα είναι πιθανό να επιδράσουν αρνητικά στο υλικό και να μειώσουν την μονωτική του ικανότητα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τρεις ενότητες και έχει ως αντικείμενο την μελέτη της υγρασιακής συμπεριφοράς της διογκωμένης πολυστερίνης, ενός πολύ διαδεδομένου υλικού θερμομόνωσης με υψηλή μονωτική ικανότητα. Συγκεκριμένα, μελετάται το ποσοστό απορρόφησης υγρασίας της διογκωμένης πολυστερίνης σε μερική και ολική εμβάπτιση ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες ατμοσφαιρικής υγρασίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας ώστε να εξεταστεί η εξάρτηση της με την υδαταπορρόφηση.

Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει ένα θεωρητικό τμήμα όπου παρατίθενται πληροφορίες σχετικά την με την διαδικασία παραγωγής και τις ιδιότητες του υλικού και τις διαφορετικές κατηγορίες του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Επίσης, περιλαμβάνει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας καθώς και τις πηγές και μηχανισμούς μεταφοράς της υγρασίας στα κτίρια και την επίδραση της στην θερμική απόδοση του κτιρίου. Η δεύτερη ενότητα επικεντρώνεται στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και στην ανάλυση των πειραματικών διατάξεων μόνιμης και μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας. Η μερική και η ολική εμβάπτιση των δοκιμίων διεξήχθη σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12087 και υπολογίστηκε η υδαταπορρόφηση όπως ορίζεται σε κάθε περίπτωση. Οι μόνιμες διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ήταν η Guarded Hot Plate και η Heat- Flow που περιγράφονται από τα πρότυπα ISO 8302 και ISO 8301 αντίστοιχα και ως μεταβατικές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν ο αναλυτής μεταφοράς θερμότητας ISOMET και ο μετατροπέας ρεύματος Ctmeter.

Η τελευταία ενότητα της διπλωματικής εργασίας αποτελείται από δύο τμήματα όπου γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων θερμικής αγωγιμότητας. Αρχικά, πραγματοποιείται μια αξιολόγηση των παραπάνω πειραματικών τεχνικών ώστε να διαπιστωθεί εάν οι συσκευές μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας δίνουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με τις πιο αξιόπιστες σταθερές τεχνικές. Στη συνέχεια μελετάται ενδελεχώς η υδαταπορρόφηση και η επίδραση της στην θερμική αγωγιμότητα. Τα αποτελέσματα έχουν ληφθεί με την μέθοδο Guarded Hot Plate πριν και μετά τις εμβάπτισεις των δοκιμίων και παρουσιάζονται συναρτήσει της υδαταπορρόφησης, της θερμοκρασίας και της φαινόμενης πυκνότητας. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την περιεχόμενη υγρασία ώστε να διεξαχθούν γενικευμένες μαθηματικές εξισώσεις που υπολογίζουν την συγκεκριμένη ιδιότητα για όλα τα δοκίμια διογκωμένης πολυστερίνης όταν είναι γνωστή η υδαταπορρόφηση και η αρχική θερμική αγωγιμότητα του υλικού που εξετάζεται.

---

## ABSTRACT

### **Experimental study of the hygrothermal behavior of expanded polystyrene- Methodologies and Instrumentations**

In recent years the countries' need for energy saving led to the conduction of various studies concerning the energy consumption in industry and in everyday life. In addition to identifying the major sources of energy consumption, many studies focus on developing appropriate measures and implement interventions to achieve the reduction of energy requirements. According to surveys, the largest percentage of the energy consumed for heating and cooling of buildings and the best way to reduce it is to improve the thermal behavior of building structures using thermal insulation in masonry. The insulation is mainly achieved by using materials which have the property of preventing heat transmission and maintain thermal comfort within the interiors while reducing the cost required by the use of heaters and air conditioning. However, caution should be exercised in the selection of insulating material because, like all materials, environmental conditions and extreme weather events are likely to have a negative impact on the material and reduce its insulating ability.

This thesis consists of three sections and its goal is to study of the hygrothermal behavior of expanded polystyrene, a very common material with high thermal insulation capacity. Specifically, the study is focused on the rate of moisture absorption of polystyrene due to partial and total immersion to simulate the conditions of atmospheric humidity. Then, the thermal conductivity is measured in order to examine its dependence with the water absorption.

The first section consists of a theoretical part which sets out information relating to the production process and the material properties and the different types of material used in the experiment. It also includes a literature review of heat and mass transfer and the sources and mechanisms of moisture transport in buildings and its impact on the thermal performance. The second section focuses on the description of the experimental procedure and the analysis of the experimental steady state and transient heat transfer techniques that were used in order to determine the thermal conductivity. The partial and total immersion of the specimens was performed according to the international standard ELOT EN 12087 and the water absorption was calculated as defined in each case. The steady state apparatus used for the measurements was the Guarded Hot Plate and Heat-Flow described by the standards ISO 8302 and ISO 8301 respectively and as for transitional techniques the heat transfer analyzer ISOMET and the current transformer Ctmeter were used.

The last unit of the thesis consists of two parts where thermal conductivity measurements are processed. At first, an evaluation of the experimental techniques performed in order to determine whether the transient heat transfer devices give results comparable to the most reliable steady- state techniques., the water absorption is thoroughly studied and its effect on the thermal conductivity. The results are obtained by the method Guarded Hot Plate before and after immersing the samples in water and are presented as a function of water absorption , temperature and bulk density. Particular emphasis is given to the dependence of thermal conductivity with moisture content and generalized mathematical equations are formed that calculate this specific property for all expanded polystyrene samples when the water absorption and the initial thermal conductivity of the material being tested is known.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>I. ΕΙΚΟΝΕΣ- ΠΙΝΑΚΕΣ</b> .....	<b>9</b>
<b>II. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Περιγραφή διογκωμένου πολυστυρενίου</b> .....	<b>17</b>
2.1. Ονοματολογία και ορισμοί.....	17
2.2. Ιστορία και Διαδικασία παραγωγής διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) .	18
2.2.1. Ανακάλυψη πολυστυρολίου.....	18
2.2.2. Διαδικασία παραγωγής EPS.....	18
2.2.3. Σημαντικές ιδιότητες της διογκωμένης πολυστερίνης.....	20
2.3. Εφαρμογές του EPS.....	23
2.4. Υλικά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.....	24
2.3.1. ISOPOR EPS 30/ 60/ 80/ 100/ 150 και 200.....	25
2.3.2. ISOPLAK EPS TX- TT 120 και BT 150.....	25
2.4.3. PERIPOR EPS AM 200 και 250.....	25
2.4.4. NEOPOR EPS THP 80, TX- TT 100 και BT 150.....	26
2.4.5. NEOPLAK EPS TX- TT 100, BT 150 και AM 200.....	26
2.4.6. Insulating Concrete Forms (ICF) EPS 200και 250.....	27
<b>3. Θεωρία και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας</b> .....	<b>28</b>
3.1. Μεταφορά θερμότητας.....	28
3.1.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	28
3.1.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	29
3.1.3. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	31
3.2. Ειδική θερμική αγωγιμότητα.....	31
3.3. Μεταφορά υγρασίας.....	38
3.3.1. Υγρασία στις κτιριακές δομές.....	38
3.3.2. Φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας.....	42
3.4. Επίδραση της υγρασίας στην μεταφορά θερμότητας.....	45
<b>4. Μεθοδολογία και πειραματική εγκατάσταση για την μέτρηση της υδαταπορρόφησης</b> .....	<b>49</b>
4.1. Μέθοδοι εμπάπτισης.....	49
4.2. Προδιαγραφές και προετοιμασία των δειγμάτων.....	49
4.3. Ανάλυση μεθόδων εμπάπτισης.....	50

4.3.1.	Μακροπρόθεσμη απορρόφηση ύδατος με Μερική εμβάπτιση.....	50
4.3.2.	Μακροπρόθεσμη απορρόφηση ύδατος με Ολική εμβάπτιση.....	51
4.4.	Σχεδιασμός δεξαμενών ολικής και μερικής βύθισης.....	53
4.5.	Εκτέλεση του πειράματος.....	54
4.6.	Συσκευασία και διατήρηση υγρασίας εμβαπτισμένων δειγμάτων .....	55
4.7.	Αποστράγγιση και διαδικασία συσκευασίας .....	59
<b>5.</b>	<b>Μεθοδολογία και συσκευές για τη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας.....</b>	<b>62</b>
5.1.	Γενικές πληροφορίες.....	62
5.2.	Κατηγορίες πειραματικών διατάξεων.....	62
5.3.	Guarded Hot Plate Test Method .....	63
5.3.1.	Αρχή λειτουργίας και τύποι πειραματικών διατάξεων GHP.....	63
5.3.2.	Κατασκευαστικοί- Λειτουργικοί περιορισμοί.....	63
5.3.3.	Περιγραφή των σημαντικότερων χαρακτηριστικών της διάταξης.....	65
5.3.4.	Παράμετροι διαδικασίας πειράματος.....	67
5.3.5.	Περιγραφή πειραματικής διάταξης TLP 300 DT.....	67
5.4.	Δυναμική μέθοδος CTmètre.....	73
5.4.1.	Περιγραφή διάταξης CTmètre.....	73
5.4.2.	Πειραματική διαδικασία.....	75
5.5.	Αναλυτής μεταφοράς θερμότητας ISOMET.....	77
5.5.1.	Περιγραφή διάταξης ISOMET 2104.....	78
5.5.2.	Πειραματική διαδικασία.....	79
5.6.	Heat Flow Meter Test Method .....	81
5.6.1.	Αρχή λειτουργίας και τύπος πειραματικής διάταξης.....	81
5.6.2.	Κατασκευαστικοί- Λειτουργικοί περιορισμοί.....	82
5.6.3.	Περιγραφή των σημαντικότερων χαρακτηριστικών της διάταξης.....	83
5.6.4.	Παράμετροι διαδικασίας πειράματος.....	85
5.6.5.	Περιγραφή πειραματικής διάταξης Heat Flow.....	85
<b>6.</b>	<b>Αξιολόγηση πειραματικών μεθοδολογιών και διατάξεων μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας.....</b>	<b>99</b>
6.1.	Διατάξεις μόνιμης μετάδοσης θερμότητας .....	99
6.1.1.	Ξηρά δοκίμια.....	101
6.1.2.	Υγρά δοκίμια.....	103
6.1.3.	Συμπεράσματα.....	106
6.2.	Διατάξεις μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας.....	108
6.2.1.	Ξηρά δοκίμια.....	109

6.2.2. Υγρά δοκίμια.....	111
6.2.3. Συμπεράσματα.....	115
<b>7. Πειραματικά αποτελέσματα.....</b>	<b>120</b>
7.1. Αποτελέσματα απορρόφησης υγρασίας.....	120
7.1.1. Ολική εμβάπτιση.....	120
7.1.2. Μερική εμβάπτιση.....	125
7.1.3. Συμπεράσματα.....	128
7.2. Αποτελέσματα μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας.....	129
7.2.1. Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας επί ξηρού.....	129
7.2.2. Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας επί υγρού.....	134
7.2.3. Επίδραση απορρόφησης ύδατος.....	141
7.2.4. Συμπεράσματα.....	154
<b>III. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>160</b>



## Ι) ΕΙΚΟΝΕΣ- ΠΙΝΑΚΕΣ

<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Περιγραφή διογκωμένου πολυστυρενίου.....</b>	<b>17</b>
Εικόνα 2.1: Κομμάτια υλικού EPS.....	17
Εικόνα 2.2: Δημιουργία πολυστερενίου.....	18
Εικόνα 2.3: Σχεδιάγραμμα παραγωγικής διαδικασίας διογκωμένης πολυστερίνης.....	19
Εικόνα 2.4: Δομή του EPS στο μικροσκόπιο.....	21
Εικόνα 2.5: ISOPOR EPS 200.....	25
Εικόνα 2.6: Σύγκριση ISOPOR EPS 30 (αριστερά) και ISOPOR EPS 200 (δεξιά).....	25
Εικόνα 2.7: ISOPLAK TX- TT 120.....	25
Εικόνα 2.8: PERIPOR AM EPS.....	26
Εικόνα 2.9: NEOPOR TX- TT EPS 100.....	26
Εικόνα 2.10: NEOPOR TX- TT EPS 100.....	27
Εικόνα 2.11: Σύγκριση NEOPOR (αριστερά) και NEOPLAK (δεξιά).....	27
Εικόνα 2.12: Σχηματική απεικόνιση ICF με σκυρόδεμα.....	27
Εικόνα 2.13: Τα δείγματα EPS που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.....	27
Πίνακας 2.1: Προδιαγραφές θερμομονωτικών προϊόντων EPS βάσει προτύπου EN 13163.....	24
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Θεωρία και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας.....</b>	<b>28</b>
Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση Νόμου Fourier.....	29
Εικόνα 3.2: Συναγωγή θερμότητας.....	30
Εικόνα 3.3: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας στερεών (αριστερά) και υγρών- αερίων (δεξιά) με την θερμοκρασία.....	32
Εικόνα 3.4: Παραδείγματα θερμογεφύρων σε διαφορετικές διατάξεις εξωστών.....	34
Εικόνα 3.5: Καμπύλη εξάρτησης θερμικής αγωγιμότητας- φαινόμενης πυκνότητας EPS.....	35
Εικόνα 3.6: Αλλαγές φάσεις υγρασίας.....	38
Πίνακας; 3.1: Θερμική αγωγιμότητα μονωτικών υλικών.....	31
Πίνακας 3.2: Μηχανισμοί μεταφοράς υγρασίας στις κτιριακές δομές.....	41
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Μεθοδολογία και πειραματική εγκατάσταση για την μέτρηση της υδαταπορρόφησης.....</b>	<b>49</b>
Εικόνα 4.1: Διάταξη αποστράγγισης.....	50
Εικόνα 4.2: Διάταξη εμβάπτισης κλουβί.....	52
Εικόνα 4.3: Δεξαμενή μερικής εμβάπτισης.....	52
Εικόνα 4.4: Δεξαμενή ολικής εμβάπτισης.....	53
Εικόνα 4.5: Ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια.....	54
Εικόνα 4.6: Μερικώς εμβαπτισμένα δοκίμια.....	54
Εικόνα 4.7: Καμπύλες απορρόφησης ύδατος υλικού EPS.....	55
Εικόνα 4.8: Σακούλες poly bag.....	56
Εικόνα 4.9: Μεμβράνη τροφίμων.....	57
Εικόνα 4.10: Θερμοκολλητική μηχανή.....	60
Εικόνα 4.11: Συσσκευασία δείγματος.....	60
Εικόνα 4.12: Συσσκευασία δείγματος με θερμοπίστολο.....	60
Εικόνα 4.13: Συσσκευασία δείγματος χωρίς θερμοπίστολο.....	60
Εικόνα 4.14: Συγκέντρωση υγρασίας στην επιφάνεια της συσκευασίας.....	61
Πίνακας 4.1: Τιμές θερμικής αγωγιμότητας δειγμάτων EPS με και χωρίς shrink bag με την μέθοδο GHP.....	58

<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Μεθοδολογία και συσκευές μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας.....</b>	<b>62</b>
Εικόνα 5.1: Μετρητικός θάλαμος GHP- Πρόσοψη.....	68
Εικόνα 5.2: Μετρητικός θάλαμος GHP- Πλάγια όψη.....	68
Εικόνα 5.3: Αισθητήρας θερμοστοιχείου.....	69
Εικόνα 5.4: Θερμοστοιχεία και φύλλο σιλικόνης.....	69
Εικόνα 5.5: Σωστή τοποθέτηση δειγμάτων.....	71
Εικόνα 5.6: Πλευρικές ενδείξεις τοποθέτησης.....	71
Εικόνα 5.7: Πάχος δείγματος.....	72
Εικόνα 5.8: Περιγραφή δείγματος.....	72
Εικόνα 5.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά μέτρησης.....	72
Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας.....	72
Εικόνα 5.11: Διάταξη CTmètre και αισθητήρες.....	73
Εικόνα 5.12: Μονάδα ελέγχου CTmètre.....	74
Εικόνα 5.13: Αισθητήρας θερμού νήματος ή σωλήνα.....	74
Εικόνα 5.14: Υπολογισμός θερμικής αγωγιμότητας στην διάταξη Ctmeter.....	76
Εικόνα 5.15: ISOMET model 2104 και αισθητήρας επιφάνειας.....	77
Εικόνα 5.16: Πλάγια όψη Heat- Flow meter.....	86
Εικόνα 5.17: Κάτοψη Heat- Flow meter.....	86
Εικόνα 5.18: Thermistor microBeta.....	88
Εικόνα 5.19: Σχέδιο και διαστάσεις thermistor Micro-BetaCHIP.....	88
Εικόνα 5.20: Θερμοροόμετρο σειράς HFS.....	89
Εικόνα 5.21: Εσωτερικό του heat-flux.....	89
Εικόνα 5.22: Σχήμα και διαστάσεις θερμοροομέτρων HFS_3, HFS_4.....	89
Εικόνα 5.23: Τοποθέτηση θερμοροομέτρου στο κέντρο της μεταλλικής πλάκας.....	92
Εικόνα 5.24: Παράμετροι λειτουργίας αισθητήρων.....	95
Εικόνα 5.25: Αποτελέσματα θερμοροής και θερμοκρασιών.....	96
Πίνακας 5.1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά Supercool PR-59.....	87
<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Αξιολόγηση πειραματικών μεθοδολογιών και διατάξεων μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας.....</b>	<b>99</b>
Πίνακας 6.1: Έλεγχος μεταβολής συντελεστών $C_1$ , $C_2$ μεθόδου Heat- Flow.....	100
<b>Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Πειραματικά αποτελέσματα.....</b>	<b>120</b>
Πίνακας 7.1: Επίπεδα μακροπρόθεσμης απορρόφησης ύδατος από ολική εμβάπτιση.....	120
Πίνακας 7.2: Ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή $\lambda$ των δοκιμών EPS- ολική εμβάπτιση.....	155
Πίνακας 7.3: Ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή $\lambda$ των δοκιμών EPS- μερική εμβάπτιση.....	157

## II) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Περιγραφή διογκωμένου πολυστυρενίου.....</b>	<b>17</b>
Διάγραμμα 2.1: Ποσοστά θερμομονωτικών υλικών στην Ε.Ε.....	20
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Θεωρία και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας.....</b>	<b>28</b>
Διάγραμμα 3.1: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές συντελεστή $\lambda$ δοκιμών ISOPOR βάσει πυκνότητας.....	36
Διάγραμμα 3.2: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές συντελεστή $\lambda$ δοκιμών ISOPLAK, PERIPOR βάσει πυκνότητας.....	37
Διάγραμμα 3.3: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές συντελεστή $\lambda$ δοκιμών NEOPLAK, NEOPOR βάσει πυκνότητας.....	37

<b>Κεφάλαιο 5°: Μεθοδολογία και συσκευές μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας.....</b>	<b>62</b>
Διάγραμμα 5.1: Συνολικό διάγραμμα θερμοκρασιών- χρόνου κατά την βαθμονόμηση των thermistor .....	90
Διάγραμμα 5.2: Απόκλιση της θερμοκρασίας των thermistor από τα set points.....	90
<b>Κεφάλαιο 6°: Αξιολόγηση πειραματικών μεθοδολογιών και διατάξεων μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας.....</b>	<b>99</b>
Διάγραμμα 6.1: Έλεγχος απόκλισης τιμών λ των τριών δοκιμών με την μέθοδο Heat Flow.....	100
Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών ISOPOR σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C.....	101
Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C.....	102
Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK και PERIPOR σε θερμοκρασία 20°C.....	102
Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK σε θερμοκρασία 20°C.....	104
Διάγραμμα 6.6: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR θερμοκρασίες 10, 20, 30°C.....	104
Διάγραμμα 6.7: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR, ISOPLAK σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C.....	105
Διάγραμμα 6.8: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C.....	105
Διάγραμμα 6.9: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK και PERIPOR σε θερμοκρασία 20°C.....	105
Διάγραμμα 6.10: Ποσοστιαία απόκλιση των μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow για τα ξηρά δείγματα.....	106
Διάγραμμα 6.11: Ποσοστιαία απόκλιση των μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow για μερικώς εμβαπτισμένα δείγματα.....	107
Διάγραμμα 6.12: Ποσοστιαία απόκλιση των μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow για ολικώς εμβαπτισμένα δείγματα.....	107
Διάγραμμα 6.13: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών ISOPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	109
Διάγραμμα 6.14: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά) .....	110
Διάγραμμα 6.15: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPLAK με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά) .....	110
Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών ISOPLAK με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά) .....	110
Διάγραμμα 6.17: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών PERIPOR με GHP- Ctmeter .....	111
Διάγραμμα 6.18: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	112
Διάγραμμα 6.19: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	112
Διάγραμμα 6.20: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	112
Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPLAK με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	113

Διάγραμμα 6.22: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων ISOPOR με GHP- Ctmeter.....	113
Διάγραμμα 6.23: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων ISOPOR με GHP- ISOMET.....	114
Διάγραμμα 6.24: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων NEOPLAK με GHP- CTmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	114
Διάγραμμα 6.25: Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων PERIPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά).....	114
Διάγραμμα 6.26: Θερμική αγωγιμότητας ξηρών και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων ICF με Ctmeter και ISOMET.....	115
Διάγραμμα 6.27: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια ISOPOR.....	117
Διάγραμμα 6.28: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια NEOPOR.....	117
Διάγραμμα 6.29: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια NEOPLAK.....	118
Διάγραμμα 6.30: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια ISOPLAK.....	118
Διάγραμμα 6.31: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια PERIPOR.....	119
<b>Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Πειραματικά αποτελέσματα.....</b>	<b>120</b>
Διάγραμμα 7.1: Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος $W_{It}$ των δοκιμίων EPS.....	121
Διάγραμμα 7.2: Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος $W_{It}$ των ομάδων EPS.....	122
Διάγραμμα 7.3: Σύγκριση μεγέθους $W_{It}$ και απορροφημένης υγρασίας των ομάδων EPS.....	123
Διάγραμμα 7.4: Επίδραση του πάχους στην ολική εμβάπτιση δοκιμίων κατηγοριών ISOPOR Eps 60, 80 και 200.....	124
Διάγραμμα 7.5: Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος $W_{Ip}$ των δοκιμίων EPS.....	125
Διάγραμμα 7.6: Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος $W_{Ip}$ των ομάδων EPS.....	126
Διάγραμμα 7.7: Επίδραση του πάχους στη μερική εμβάπτιση δοκιμίων κατηγοριών ISOPOR Eps 60, 80 και 200.....	127
Διάγραμμα 7.8: Αποτελέσματα υδαταπορρόφησης ολικής και μερικής εμβάπτισης δειγμάτων EPS.....	129
Διάγραμμα 7.9: Εξάρτηση συντελεστή λ με θερμοκρασία για ξηρά δοκίμια κατηγορίας ISOPOR.....	130
Διάγραμμα 7.10: Εξάρτηση συντελεστή λ με θερμοκρασία για ξηρά δοκίμια κατηγοριών NEOPOR και NEOPLAK.....	131
Διάγραμμα 7.11: Εξάρτηση συντελεστή λ με θερμοκρασία για ξηρά δοκίμια κατηγοριών ISOPLAK και PERIPOR.....	131
Διάγραμμα 7.12: Μεταβολή συντελεστή λ με την ξηρή πυκνότητα ξηρών δοκιμίων ISOPOR.....	132
Διάγραμμα 7.13: Μεταβολή συντελεστή λ με την ξηρή πυκνότητα ξηρών δοκιμίων NEOPOR, NEOPLAK.....	133
Διάγραμμα 7.14: Μεταβολή συντελεστή λ με την ξηρή πυκνότητα ξηρών δοκιμίων ISOPLAK, PERIPOR.....	133
Διάγραμμα 7.15: Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας ISOPOR.....	134
Διάγραμμα 7.16: Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας ISOPOR.....	134
Διάγραμμα 7.17: Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας NEOPOR.....	135

Διάγραμμα 7.18: Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας NEOPLAK.....	136
Διάγραμμα 7.19: Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας ISOPLAK.....	136
Διάγραμμα 7.20: Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας PERIPOR.....	137
Διάγραμμα 7.21: Μεταβολή συντελεστή λ των μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR με την ξηρή πυκνότητα.....	137
Διάγραμμα 7.22: Μεταβολή συντελεστή λ των ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR με την ξηρή πυκνότητα.....	138
Διάγραμμα 7.23: Μεταβολή συντελεστή λ των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR με την ξηρή πυκνότητα.....	139
Διάγραμμα 7.24: Μεταβολή συντελεστή λ των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK με την ξηρή πυκνότητα.....	139
Διάγραμμα 7.25: Μεταβολή συντελεστή λ των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPLAK με την ξηρή πυκνότητα.....	140
Διάγραμμα 7.26: Μεταβολή συντελεστή λ των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών PERIPOR με την ξηρή πυκνότητα.....	141
Διάγραμμα 7.27: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 30 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	142
Διάγραμμα 7.28: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 60 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	142
Διάγραμμα 7.29: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 80 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	142
Διάγραμμα 7.30: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	143
Διάγραμμα 7.31: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	143
Διάγραμμα 7.32: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 200 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	143
Διάγραμμα 7.33: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών NEOPOR THP 80 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	144
Διάγραμμα 7.34: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών NEOPOR TX- TT 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	144
Διάγραμμα 7.35: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών NEOPOR BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	145
Διάγραμμα 7.36: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών PERIPOR AM 200 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	145
Διάγραμμα 7.37: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών PERIPOR AM 250 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	146
Διάγραμμα 7.38: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών NEOPLAK TX- TT 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	146
Διάγραμμα 7.39: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών NEOPLAK BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	147
Διάγραμμα 7.40: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών NEOPLAK AM 200 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	147

Διάγραμμα 7.41: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων ISOPLAK TX- TT 120 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	148
Διάγραμμα 7.42: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων ISOPLAK BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία.....	148
Διάγραμμα 7.43: Μεταβολή συντελεστή λ δοκιμίων NEOPOR BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία- μέθοδος Heat Flow.....	149
Διάγραμμα 7.44: Μεταβολή συντελεστή λ δοκιμίων NEOPLAK TX- TT 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία- μέθοδος Heat Flow.....	149
Διάγραμμα 7.45: Μεταβολή συντελεστή λ δοκιμίων ISOPLAK BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία- μέθοδος Heat Flow.....	150
Διάγραμμα 7.46: Εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή λ με την περιεχόμενη υγρασία- ISOPOR...151	
Διάγραμμα 7.47: Εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή λ με την περιεχόμενη υγρασία- PERIPOR, ISOPLAK.....	151
Διάγραμμα 7.48: Εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή λ με την περιεχόμενη υγρασία- NEOPOR, NEOPLAK.....	151
Διάγραμμα 7.49: Συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης με την υδαταπορρόφηση για θερμοκρασία T= 10°C.....	152
Διάγραμμα 7.50: Συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης με την υδαταπορρόφηση για θερμοκρασία T= 20°C.....	153
Διάγραμμα 7.51: Συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης με την υδαταπορρόφηση για θερμοκρασία T= 30°C.....	153

## 1. Εισαγωγή

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην προσπάθεια να μειωθεί η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τα επίπεδα των εκλυόμενων ρύπων, θέσπισε στις 19 Μαΐου 2010 Οδηγία που ορίζει πως τα νέα κτίρια θα είναι υποχρεωτικά σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης. Με βάση τις προδιαγραφές της Οδηγίας, το υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα είτε θα πρέπει να κατεδαφιστεί είτε να αναβαθμιστεί ενεργειακά προκειμένου να ανταποκρίνεται στις νέες προδιαγραφές. Ο σχεδιασμός και η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων πρόκειται να αλλάξουν άμεσα, καθώς αυξάνεται η ενημέρωση του κοινού και ο εκσυγχρονισμός της νομοθεσίας σχετικά με την ανάγκη για ενεργειακή απόδοση και μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου. Η σημασία του περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας φαίνεται από το γεγονός πως το 40% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας στην Ευρώπη και το 60% στην Ελλάδα καταναλώνεται για τη θέρμανση και των κλιματισμό των κτιρίων. Επιστημονικές έρευνες έχουν δείξει πως χρησιμοποιώντας κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης ή παθητικά κτίρια, η υφιστάμενη ενεργειακή κατανάλωση είναι δυνατό να μειωθεί περίπου 70-80%.

Ο όρος «Κτίριο Χαμηλής Ενεργειακής Κατανάλωσης» αναφέρεται σε ένα τύπο κτιρίου που εξασφαλίζει μέγιστη άνεση στους ενοίκους κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του χειμώνα με ελάχιστη ή μηδενική συμβατική θέρμανση και χωρίς ενεργή ψύξη. Τα «Παθητικά Κτίρια» έχουν καθορισμένη ενεργειακή κατανάλωση 15kWh/m<sup>2</sup> το χρόνο και τα «Κτίρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης» έχουν πλήρη αυτάρκεια [41]. Σε όλες τις περιπτώσεις, η χαμηλή έως μηδενική ενεργειακή κατανάλωση επιτυγχάνεται με καλή **θερμομόνωση** με ελάχιστες θερμικές γέφυρες, χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων, αεροστεγανότητα και υψηλή ποιότητα ατμοσφαιρικού αέρα μέσω ενός συστήματος εξαερισμού με ανάκτηση θερμότητας.

Ως θερμομόνωση χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε μέτρο λαμβάνεται για την μείωση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αντικειμένων που βρίσκονται σε θερμική επαφή ή από θερμική ακτινοβολία. Για να χαρακτηριστεί καλή η θερμομόνωση σε ένα κτίριο πρέπει να εξασφαλίζει την υγιεινή, άνετη και ευχάριστη διαβίωση χωρίς να προκαλούνται σοβαρές θερμικές αλληλοεπιδράσεις κρύου ή ζέστης στο ανθρώπινο σώμα και να εξασφαλίζει οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας και τον περιορισμό του αρχικού κόστους κατασκευής της εγκατάστασης του συστήματος κεντρικής θέρμανσης ή κλιματισμού. Επίσης, μια σωστή θερμομόνωση μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης προβλημάτων που μπορεί να προκληθούν από αυξημένες της θερμοκρασίας όπως π.χ. η αποκόλληση κατασκευών από την επίδραση υδρατμών, ενώ παράλληλα προσφέρει προστασία από τους θορύβους και συνεισφέρει στην προστασία του περιβάλλοντος ελαττώνοντας την ποσότητα των εκλυόμενων καυσαερίων από την χρήση των συσκευών θέρμανσης και ψύξης.

Η θερμική μόνωση επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους ή διαδικασίες με σημαντικότερη την χρήση κατάλληλων αντικειμένων και υλικών που δεν επιτρέπουν την μετάδοση θερμότητας και ονομάζονται θερμομονωτικά υλικά. Τα θερμομονωτικά υλικά, ανάλογα με την προέλευσή τους και την επεξεργασία που υφίστανται πριν από την χρήση τους διαχωρίζονται σε [23]:

- Ανόργανα ή οργανικά ανάλογα με την προέλευση και την σύστασή τους
- Φυσικής προέλευσης ή τεχνητά, ανάλογα με το βαθμό επεξεργασίας που υφίστανται πριν διατεθούν για κατανάλωση
- Ανοικτών ή κλειστών κυψελών ή πόρων αέρα
- Μεγάλου ή μικρού φαινόμενου βάρους

Στην αγορά, υπάρχει μεγάλη ποικιλία μονωτικών υλικών όπως ο πετροβάμβακας, ο υαλοβάμβακας, η διογκωμένη πολυστερίνη, η εξηλασμένη πολυστερίνη, η πολυουρεθάνη και πληθώρα άλλων υλικών που επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες και την θερμική μόνωση που επιθυμεί ο καταναλωτής. Ωστόσο, δεν είναι όλα τα υλικά κατάλληλα για όλες τις εφαρμογές αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το αναγκαίο ποσό θερμότητας για την θέρμανση του κτιρίου που υπολογίζεται από το σύνολο των απωλειών και καθορίζεται από το κλίμα της περιοχής, τον προσανατολισμό του κτιρίου, την αναλογία μεταξύ όγκου και εξωτερικής κτιριακής επιφάνειας, την θερμοπερατότητα των εξωτερικών δομικών στοιχείων και τον τρόπο λειτουργίας και τη δυνατότητα ρύθμισης της εγκατάστασης θέρμανσης.

Οι θερμομονωτικές ιδιότητες ενός υλικού, επηρεάζονται από την θερμοκρασία και την υγρασία [23]. Ειδικά η υγρασία αποτελεί σημαντικό πρόβλημα διότι εκτοπίζοντας τον περιεχόμενο αέρα μπορεί να γεμίσει τους πόρους του μονωτικού υλικού, με αποτέλεσμα να μειωθούν προσωρινά ή οριστικά οι μονωτικές του ιδιότητες. Επειδή, η αναζήτηση αδιάβροχων μονωτικών υλικών δεν είναι ρεαλιστική, τις περισσότερες φορές αρκεί η χρήση υλικών που δεν εμφανίζουν έντονη τάση απορρόφησης νερού. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να διερευνηθεί κατά πόσο μεταβάλλεται η θερμομονωτική ιδιότητα των υλικών με την περιεχόμενη υγρασία ώστε να διαπιστωθούν τα όρια αστοχίας τους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της υγρασιακής συμπεριφοράς της διογκωμένης πολυστερίνης. Συγκεκριμένα μελετήθηκε το ποσοστό απορρόφησης υγρασίας της διογκωμένης πολυστερίνης σε μερική και ολική εμβάπτιση ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες ατμοσφαιρικής υγρασίας καθώς και η επίδραση της υδαταπορρόφησης στην θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας εξετάστηκαν και νέα, βελτιωμένα υλικά διογκωμένης πολυστερίνης που περιέχουν γραφίτη και εξετάστηκε η διαφορά των πειραματικών τιμών θερμικής αγωγιμότητας από τις θεωρητικές καμπύλες που ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με διαφορετικές τεχνικές ώστε να αξιολογηθούν οι μέθοδοι μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας μόνιμων και μεταβλητών συνθηκών με βάση την απόκλιση των πειραματικών τιμών που προέκυψε από κάθε διάταξη. Ένα μέρος των μετρήσεων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> πραγματοποιήθηκαν από το συνεργάτη του εργαστηρίου κ. Μπέλλα και δεν έχουν συμπεριληφθεί επίσημα σε καμία εργασία. Με την σύμφωνη γνώμη του κ. Μπέλλα παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.



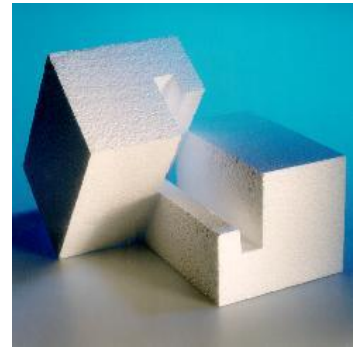
## 2. Περιγραφή διογκωμένης πολυστερίνης

### 2.1. Ονοματολογία και ορισμοί

Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13163:2001 «Θερμομονωτικά προϊόντα κτιρίων- Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)- Προδιαγραφή» το υλικό ορίζεται ως:

Άκαμπτο κυψελοειδές πλαστικό υλικό, που κατασκευάζεται με τη μορφοποίηση προδιογκωμένων σφαιριδίων διογκούμενης πολυστερίνης ή ενός εκ των συμπολυμερών της και έχει δομή κλειστών κυψελών γεμισμένων με αέρα.

Είναι ευρέως γνωστό σαν EPS από τα αρχικά της ονομασίας στα αγγλικά, που είναι Expanded Polystyrene.



**Εικόνα 2.1:** Κομμάτια υλικού EPS

Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμοί οι οποίοι παρατίθενται στο παραπάνω πρότυπο [5]:

- μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης

άκαμπτο προϊόν ή υλικό μόνωσης γενικά ορθογώνιου διατομής και με πάχος όχι σημαντικά μικρότερο από το πλάτος.

- τάβλα διογκωμένης πολυστερίνης

άκαμπτο μονωτικό προϊόν (διαμορφωμένο με κοπή, χύτευση ή συνεχή διόγκωση), ορθογωνίου σχήματος και διατομής και με το πάχος να είναι σημαντικά μικρότερο από τις άλλες διαστάσεις. Οι τάβλες μπορούν να είναι ομοιόμορφου πάχους ή εκλεπτυσμένες στα άκρα.

- ρολό διογκωμένης πολυστερίνης

τάβλες ή λουρίδες κολλημένες σε μια εύκαμπτη επένδυση, παρεχόμενες τυλιχτές ή διπλωτές, που όταν ξετυλίγονται σχηματίζουν ένα συνεχές μονωτικό στρώμα.

- προδιαμορφωμένα προϊόντα

μονωτικά τεμάχια διαμορφωμένα με κοπή ή τρόχισμα από μπλοκ ή από τάβλες ή με μορφοποίηση με χύτευση.

- επίπεδο

Η δεδομένη τιμή που αντιστοιχεί στο ανώτερο ή στο κατώτερο όριο μιας απαίτησης. Το επίπεδο δίνεται από την δηλωμένη τιμή του σχετικού χαρακτηριστικού.

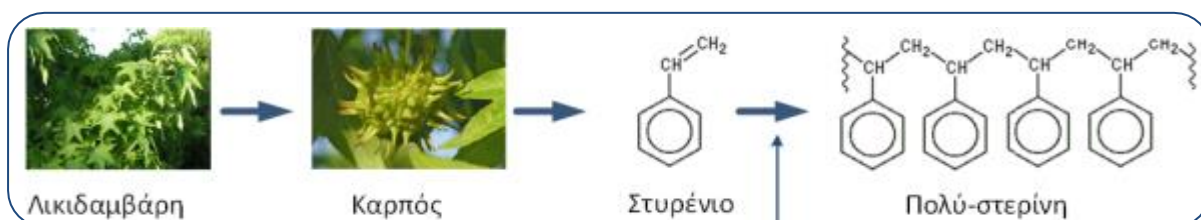
- κατηγορία

συνδυασμός δύο επιφανειών της ίδιας ιδιότητας, μεταξύ των οποίων πρέπει να βρίσκεται η απόδοση. Τα επίπεδα δίνονται από την δηλωμένη τιμή του σχετικού χαρακτηριστικού.

## 2.2. Ιστορία και Διαδικασία παραγωγής διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)

### 2.2.1. Ανακάλυψη πολυστυρολίου

Η πολυστερίνη αρχικά ανακαλύφθηκε το 1839 από τον φαρμακοποιό Eduard Simon στο Βερολίνο. Ο Eduard Simon από την φυσική ρητίνη του δέντρου Λικιδαμβάρη (*Liquidambar styraciflua*), έκανε απόσταξη μιας λιπαρής ουσίας, ενός μονομερούς, που το ονόμασε στυρόλιο. Αρκετές μέρες αργότερα διαπίστωσε ότι το στυρόλιο είχε αυξηθεί σε όγκο, πιθανόν λόγω οξειδώσεως, σε ένα είδος ζελέ που ονόμασε οξειδίο του στυρολίου. Ωστόσο χρειάστηκαν πάνω από 80 χρόνια για να ανακαλυφθεί ότι από την θέρμανση του στυρολίου ξεκινάει μια αλυσιδωτή αντίδραση που ονομάζεται χημικός πολυμερισμός και παράγει μακρομόρια. Αυτό τελικά οδήγησε την ουσία αυτή να πάρει την σημερινή της ονομασία πολυ-στερίνη.



**Εικόνα 2.2:** Δημιουργία πολυστερηνίου

Ο χημικός πολυμερισμός του στυρολίου που οδήγησε στην ανακάλυψη της «διογκωμένης πολυστερίνης» έγινε το 1949 και αποδίδεται στον γερμανό επιστήμονα Dr. Fritz Stastny της χημικής εταιρείας BASF- The Chemical Company.

### 2.2.2. Διαδικασία παραγωγής EPS

Η παραγωγή του EPS συμμορφώνεται με τους πιο αυστηρούς κανόνες υγείας και ασφάλειας στην Ευρώπη. Παράγεται με πρώτη ύλη το διογκώσιμο πολυστυρένιο. Από το πετρέλαιο παράγεται η νάφθα και από αυτή το βενζόλιο, το αιθυλένιο και το πεντάνιο. Η ένωση βενζολίου και αιθυλενίου δίνει το στυρένιο, το οποίο με την προσθήκη πεντανίου (ως διογκωτικό μέσο) και νερού πολυμερίζεται και δίνει το διογκώσιμο πολυστυρένιο, δηλαδή την πρώτη ύλη του EPS. Ουσιαστικά το Διογκωμένο Πολυστυρένιο αποτελεί παράγωγο του πετρελαίου. Από την συνολική παραγωγή πετρελαίου στον κόσμο μόνο το 0,1% χρησιμοποιείται για την παραγωγή του.

Η παραγωγή γίνεται σε πέντε στάδια:

#### i. Προ-διόγκωση

Οι κόκκοι πολυστερίνης διογκώνονται μέσω της ελεύθερης έκθεσης σε ατμό για να σχηματίσουν μεγαλύτερα σφαιρίδια, που το καθένα τους αποτελείται από μία σειρά μη-ενδοσυνδεδεμένα κύτταρα. Η πρώτη ύλη (σε κόκκους διαμέτρου 0,4-2,0mm) θερμαίνεται μέσα σε ειδικά μηχανήματα που ονομάζονται προδιογκωτές με τη βοήθεια ατμού σε θερμοκρασίες από 80°C έως 100°C και διογκώνεται. Με τη διόγκωση η πυκνότητα του υλικού πέφτει από τα 630kg/m<sup>3</sup> περίπου στα 10-

80kg/m<sup>3</sup> ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται. Οι μικροσκοπικοί κόκκοι της α΄ ύλης διογκώνονται έως και 50 φορές. Οι προδιογκωμένοι κόκκοι αποτελούνται από μικρές κλειστές κυψέλες που περιέχουν αέρα στο εσωτερικό τους.

## ii. Ωρίμανση

Μετά τη διόγκωση, τα σφαιρίδια περιέχουν ακόμα μικρές ποσότητες τόσο συμπυκνωμένου ατμού όσο και αερίου πεντανίου. Οι προδιογκωμένοι κόκκοι EPS αποθηκεύονται σε αεριζόμενα σιλό τα οποία διευκολύνουν τη διαφυγή του πεντανίου από το εσωτερικό τους και την αντικατάστασή του από αέρα. Κατά το στάδιο αυτό οι κόκκοι επίσης αποβάλλουν την όποια υγρασία περιέχουν.

## iii. Καλούπωμα

Οι σταθεροποιημένοι κόκκοι τοποθετούνται σε καλούπια για να σχηματίσουν πλάκες, πρίσματα ή προϊόντα κατά παραγγελία. Το καλούπι χρησιμεύει στη σχηματοποίηση του υλικού προ-διόγκωσης, και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ξανά ο ατμός για να συνεχιστεί η διόγκωση. Κατά τη διάρκεια του καλουπώματος, ο ατμός προκαλεί συγκόλληση του κάθε σφαιριδίου με τα γειτονικά του, κι έτσι σχηματίζεται ένα ομοιογενές προϊόν.

## iv. Σχηματοποίηση

Μετά από βραχεία περίοδο ψύξης, το καλουπωμένο πρίσμα αφαιρείται από την πρέσα και μετά από περαιτέρω ωρίμανση, μπορεί να κοπεί ή να σχηματοποιηθεί όπως απαιτείται, χρησιμοποιώντας θερμά σύρματα ή άλλες κατάλληλες τεχνικές.

## v. Μετά-παραγωγική διαδικασία

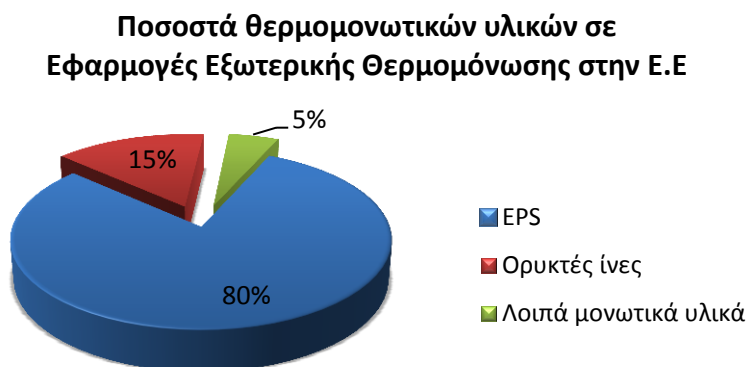
Το ολοκληρωμένο προϊόν μπορεί να πανελοποιηθεί με μεταλλικά ελάσματα, πλαστικά, πισσόχαρτα οροφής, ινώδεις πλάκες ή με άλλα διακοσμητικά όψης όπως με υλικά επικάλυψης στεγών ή τοίχων.



Εικόνα 2.3: Σχεδιάγραμμα παραγωγικής διαδικασίας διογκωμένης πολυστερίνης [41]

### 2.2.3. Σημαντικές ιδιότητες της διογκωμένης πολυστερίνης

Η εφαρμογή του EPS είναι εξαιρετικά διαδεδομένη διεθνώς. Ειδικότερα για την εξωτερική θερμομόνωση καλύπτει το 80% - 85% των εφαρμογών, ενώ για το 10% - 12% χρησιμοποιούνται ορυκτοβάμβακες, κυρίως στις Σκανδιναβικές χώρες. Το υπόλοιπο 2% - 3% κατασκευάζονται με ξυλόμαλλο, XPS, φορμαλδεΐδη και αφρώδες γυαλί.



**Διάγραμμα 2.1:** Ποσοστά θερμομονωτικών υλικών στην Ε.Ε [41]

Η επιλογή του σαν θερμομονωτικό υλικό οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες, πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές, απεριόριστη αντοχή στον χρόνο καθώς και εξαιρετικές αντισεισμικές ιδιότητες. Η ιδιότητα που ερευνάται στην συγκεκριμένη εργασία είναι η αντίσταση στην υγρασία και η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

- **Αντίσταση στην υγρασία**

Το EPS δεν απορροφά την υγρασία και οι μηχανικές και μονωτικές ιδιότητές του δεν μειώνονται εξαιτίας της παρουσίας νερού ή υγρασίας. Η συμπύκνωση των υδρατμών είναι μεγάλη απειλή για τη δομή του κτιρίου. Στα ψυχρά κλίματα, το νερό από το ζεστό, υγρό εσωτερικό αέρα μπορεί να διαχυθεί μέσα στους εξωτερικούς τοίχους και στις σοφίτες και μπορεί να συμπυκνωθεί καθώς ψύχεται. Στα ζεστά κλίματα, συμβαίνει το αντίθετο. Το νερό από το ζεστό, υγρό, εξωτερικό αέρα εισέρχεται στο κτίριο και καταλαμβάνει τις πιο κρύες περιοχές, όπου συμπυκνώνεται σε υγρό νερό. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που πολλά κτίρια, σε ψυχρά αλλά και θερμά κλίματα, έχουν προβλήματα με μούχλα και σάπια ξύλα. Στα θερμά κλίματα ιδιαίτερα αυτό συμβαίνει αφού τοποθετηθούν εκ των υστέρων κλιματιστικά.

Το EPS είναι ένα από τα πιο ανθεκτικά μονωτικά υλικά της αγοράς όσον αφορά την υγρασία. Η υγρασία που εξαπλώνεται μέσα στη κατασκευή ή μετά από τυχαία διαρροή θα επηρεάσει μόνο οριακά και πρόσκαιρα την θερμική απόδοση του EPS. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανθεκτικότητα του υλικού για όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Παρόλα αυτά, ο προσεκτικός σχεδιασμός είναι πολύ σημαντικός και πρέπει να περιλαμβάνει φράγματα υδρατμού, όπου χρειάζεται, για να αποτρέπουν τη συμπύκνωση, η οποία μπορεί να συμβεί σε κάθε μονωτικό υλικό κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ροής υδρατμού.

- **Ανάπτυξη βακτηρίων, μούχλας και μυκήτων**

Ένας σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι η παρεμπόδιση των αερομεταφερόμενων βακτηρίων, της μούχλας και άλλων μυκήτων να εισέλθουν στο σκελετό του

κτιρίου, με σωστό σχεδιασμό που να εμποδίζει την εμφάνιση υγρασίας. Στις ΗΠΑ ο Σύνδεσμος EPS Molders Association (EPSMA) χρηματοδότησε ένα πρόγραμμα δοκιμών που επικεντρώνεται στο EPS

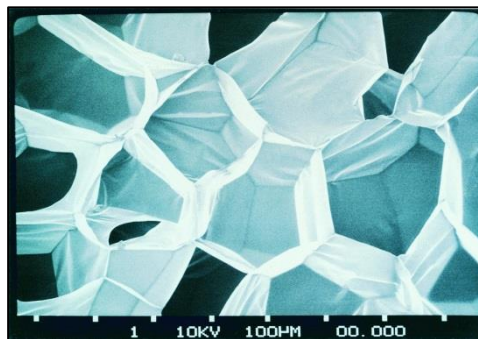
και την ανθεκτικότητα του στη μούχλα, τον Ιανουάριο του 2004.

Ο EPSMA ανέθεσε στην SGS U.S. Testing Company να διεξάγει ελέγχους στο EPS εφαρμόζοντας το πρότυπο ASTM C1338 «**Πρότυπη Μέθοδος για καθορισμό της ανθεκτικότητας των μονωτικών υλικών και των προσόψεων κτιρίων στους μύκητες**». Διεξήχθησαν ενδεικτικά τεστ για συνηθισμένα προϊόντα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των περισσότερων κτιρίων. Το EPS υποβλήθηκε στην επιρροή πέντε συγκεκριμένων ειδών μυκήτων προκειμένου να ελεγχθεί η ανάπτυξη τους. Παρόλο που το EPS δεν είναι πλήρως αδιαπέραστο, έχει μεγάλο βαθμό ανθεκτικότητας στην απορρόφηση της υγρασίας. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει την υγρασία και το φιλτράρισμα του αέρα, γεγονός το οποίο εμποδίζει την ανάπτυξη μούχλας.

- **Χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα**

Η διογκωμένη πολυστερίνη αποτελείται από 98% εγκλωβισμένο αέρα μέσα σε μια 2% κυψελωτή δομή και για το λόγο αυτό είναι πολύ ελαφρύ. Οι πυκνότητες του υλικού που κυμαίνονται μεταξύ 10 και 35 kg/m<sup>3</sup> καθιστούν το υλικό εύκολο στη χρήση. Το εξαιρετικά χαμηλό βάρος του EPS είναι σημαντικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα στα κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης που απαιτείται πιο μεγάλο πάχος μόνωσης

Σε ολόενα και περισσότερες περιπτώσεις, ο συνδυασμός του μικρού βάρους με τη σημαντική και ανθεκτική δύναμη συμπίεσης, χρησιμοποιείται EPS για εφαρμογές σε κατασκευές με μεγάλο μηχανικό φορτίο.



**Εικόνα 2.4:** Δομή του EPS στο μικροσκόπιο

- **Αντοχή, δομική σταθερότητα και αντοχή στην καταπόνηση (βατότητα)**

Το EPS είναι ένα εξαιρετικά σταθερό υλικό στο χρόνο, δεν γερνάει σε αντίθεση με άλλα θερμομονωτικά υλικά και δεν αποδομείται. Η διάρκεια εργάσιμης ζωής του ξεπερνά τα 100 χρόνια χωρίς καμιά αλλοίωση των τεχνικών του χαρακτηριστικών.

- **Σεισμική μόνωση (μείωση δυναμικών & στατικών φορτίων επιχωμάτων)**

Η δομή του υλικού είναι τέτοια που προσφέρει το πλεονέκτημα της μεγάλης αντοχής σε θλίψη. Η διαβροχή του υλικού δεν θα έχει ως αποτέλεσμα την καθίζηση του ή την αλλοίωση άλλων χαρακτηριστικών του. Αυτό σημαίνει πως είναι κατάλληλο για πολλές κατασκευές και εφαρμογές πολιτικού μηχανικού, ιδιαίτερα ως υλικό πλήρωσης, για παράδειγμα στην οδοποιία, σε σιδηροδρομικές γραμμές και σε υποδομές για γέφυρες. Το EPS έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, και παράγεται σε

μεγάλο εύρος πυκνοτήτων και κοκκομετρίας με αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες, ανάλογα με την τελική επιθυμητή χρήση.

- **Συμπεριφορά σε φωτιά**

Το EPS, σε αντίθεση με τα περισσότερα οργανικά δομικά υλικά, είναι **αυτοσβενύμενο**. Σε θερμοκρασίες πάνω από 100°C αρχίζει να μαλακώνει, να διαστέλλεται και τελικά να λιώνει. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες τα αέρια από την καύση σχηματίζονται από την αποσύνθεση της μάζας του λιωμένου υλικού. Εύφλεκτα αέρια σχηματίζονται μόνο σε θερμοκρασίες πάνω από 350°C.

Το EPS παράγεται, όπως και η πλειοψηφία των μονωτικών δομικών υλικών, ως «αυτοσβενύμενο» ('self extinguishing' (SE)), επειδή περιλαμβάνει στη μάζα του επιβραδυντικό φωτιάς. Τα υλικά με τους επιβραδυντές "SE" είναι πιο δύσκολο να αναφλεχθούν, μειώνουν σημαντικά την εξάπλωση της φωτιάς και προκαλούν αναστολή της πυρκαγιάς, έτσι ώστε όταν η πηγή φωτιάς απομακρυνθεί, το EPS θα σταματήσει να καίγεται.

- **Φιλικό προς το περιβάλλον**

Η διογκωμένη πολυστερίνη γενικά δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Αντίθετα συμβάλλει στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και της όξινης βροχής, διότι με την συνεισφορά του στην θερμομόνωση κτιρίων συμβάλλει στην μείωση της δαπανώμενης ενέργειας για την θέρμανση και ψύξη τους, συντελώντας στην δραστική μείωση των εκπομπών των αερίων ρυπαντών (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>).

- ↳ **Ασφάλεια**

Πρόκειται για ένα υλικό μη τοξικό και πλήρως αδρανές χημικά και βιολογικά, που δεν περιέχει χλωροφθοράνθρακες (CFCs), ούτε υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.

- ↳ **Ανακύκλωση**

Είναι 100% ανακυκλώσιμο προϊόν. Η ανακύκλωση του γίνεται με πολλούς τρόπους όταν δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί στην αρχική του μορφή. Μερικοί από αυτούς τους τρόπους είναι η απευθείας ανακύκλωσή του σε νέα κατασκευαστικά προϊόντα ή η χρήση του σαν καθαρό καύσιμο, με σκοπό να ανακτήσει το ενεργειακό περιεχόμενό του. Η επιλογή της μεθόδου ανακύκλωσης βασίζεται σε τεχνικές, περιβαλλοντολογικές και οικονομικές μελέτες.

- ↳ **Υγεία**

Το EPS δε θέτει σε κίνδυνο την υγεία τόσο στην εγκατάσταση όσο και κατά τη διάρκεια της χρήσης. Οι κανόνες των συνθηκών εργασίας δεν απαιτούν τη χρήση γαντιών ή μάσκας όταν χρησιμοποιείται ένα τόσο απαλό και συμπαγές υλικό. Εκτός αυτού είναι βιολογικά αδρανές και δεν παράγει καμία παθογενή σκόνη, ακόμα και μακροπρόθεσμα.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι δεν περιέχει θρεπτικά συστατικά για τους μύκητες και δεν ευνοεί την ανάπτυξη της μούχλας και των μυκήτων. Αυτό σημαίνει πως η ποιότητα του εσωτερικού αέρα δεν επηρεάζεται αρνητικά από την εμφάνιση τέτοιων μικροοργανισμών. Συνεπώς, το EPS είναι εξίσου ασφαλές τόσο στη χρήση του όσο και στην εγκατάστασή του.

- **Πλεονεκτήματα του EPS**

Επιγραμματικά τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της διογκωμένης πολυστερίνης είναι τα παρακάτω:

- Υψηλή θερμομονωτική ικανότητα
- Καλή ακουστική μόνωση
- Ανθεκτικότητα στην υγρασία
- Ευέλικτες μηχανικές ιδιότητες
- Υψηλή τάση θλίψης
- Χαμηλό βάρος

- Επιβράδυνση στην περίπτωση φωτιάς
- Φιλικό προς το περιβάλλον
- Μεγάλος κύκλος ζωής

## 2.3. Εφαρμογές του EPS

Δύο είναι οι κατηγορίες που χρησιμοποιείται κυρίως η διογκωμένη πολυστερίνη:

### a. Οικοδομικές και κατασκευαστικές εργασίες

Λόγω της φύσης και των ιδιοτήτων του υλικού, το EPS αποτελεί ένα ευέλικτο και δημοφιλές προϊόν στην δόμηση κτιρίων και γενικότερα κατασκευαστικών έργων. Χρησιμοποιείται ως εξής:

- ✓ Για θερμομόνωση και ηχομόνωση τοίχων (εξωτερική – εσωτερική), δαπέδων, οροφών δωματίων, πιλοτής.
- ✓ Σαν μονωτικό υπόστρωμα, για τη διάστρωση και κατασκευή δαπέδων από πάσης φύσεως υλικά καθώς επίσης για την κατασκευή εξωτερικών και εσωτερικών διακοσμητικών στοιχείων στα κτίρια.

Τα τελευταία χρόνια είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη η χρήση του EPS σαν γεωαφρός. Έτσι ονομάζεται ο τύπος διογκωμένης πολυστερίνης που παράγεται και πιστοποιείται, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 14933: «*Θερμομονωτικά και ελαφροβαρή προϊόντα πλήρωσης για εφαρμογές πολιτικού μηχανικού- Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) – Προδιαγραφή*». Οι εξαιρετικές ιδιότητες του γεωαφρού EPS οφείλονται στο γεγονός ότι έχει δυσανάλογα μεγάλη αντοχή σε σχέση με το βάρος του.

- Γεωαφρός θεμελίωσης, για την κατασκευή θεμελιώσεων κτιρίων, χωρίς τη χρήση ξυλοτύπων.
- Γεωαφρός υποδομών, για την κατασκευή ελαφρών επιχωμάτων σε έργα οδοποιίας, καθώς επίσης μεταβατικών επιχωμάτων σε έργα γεφυροποιίας.
- Γεωαφρός απόσβεσης εδαφικών ωθήσεων, για την στατική και σεισμική θωράκιση των κατασκευών (κτιρίων, τοίχων αντιστήριξης, ακροβάθρων γεφυρών, πυλώνων) έναντι στατικών και δυναμικών εδαφικών ωθήσεων.
- Γεωαφρός πλωτών κατασκευών, για την κατασκευή θεμελιώσεων πλωτών τεχνικών έργων (κατοικίες, λιμενικά).

### b. Προϊόντα και εφαρμογές συσκευασίας

Σημαντικές ποσότητες EPS χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές συσκευασίας. Η εξαιρετική απορροφητικότητα των κραδασμών το καθιστούν το ιδανικό υλικό για την αποθήκευση και την μεταφορά ευπαθών προϊόντων και ακριβών αντικειμένων όπως ηλεκτρονικός εξοπλισμός, κρασιά, χημικά και φαρμακευτικά προϊόντα. Επιπλέον, η υψηλή αντίσταση στην συμπίεση συμβάλλει στην αποθήκευση, τη διατήρηση και την ασφαλή μεταφορά τροφίμων. Είναι δυνατή ακόμα και η συσκευασία θαλασσινών και γενικότερα αναλώσιμων προϊόντων χάρη στην θερμομονωτική ιδιότητα και την στεγανότητα του υλικού.

## 2.4. Υλικά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία

Το νέο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13163:2001 «**Θερμομονωτικά προϊόντα κτιρίων-Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)-Προδιαγραφή**» ταξινομεί και κατηγοριοποιεί το διογκωμένο πολυστυρένιο σύμφωνα με τις ιδιότητες που παρουσιάζει. Αυτές είναι η επίδοση του υλικού σε αντοχές (όπως θλίψη, κάμψη, εφελκυσμός), τα τεχνικά χαρακτηριστικά (π.χ. συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ ) και οι αντοχές ανάλογα με την χρήση (όπως διαστάσεις, επιπεδότητα,).

Κάθε προϊόν ανάλογα με τις τεχνικές του ιδιότητες αποκτά μοναδική σήμανση όπως και ένα χαρακτηριστικό χρώμα. Το νούμερο που υπάρχει στην σήμανση εκφράζει την *θλιπτική τάση* σε παραμόρφωση 10%. Όσο μεγαλύτερη η θλιπτική τάση που αντέχει το δείγμα τόσο πιο πυκνό είναι και το υλικό.

ΠΡΟΤΥΠΑ / ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ :	EN 13163	EPS50	EPS60	EPS80	EPS100	EPS120	EPS150	EPS200
Θλιπτική τάση $\sigma_{10}$ (kPa)	EN 826	50	60	80	100	120	150	200
Καμπτική αντοχή $\sigma_b$ (kPa)	EN 12089	75	100	125	150	170	200	250
Διατμητική αντοχή $\tau$ (kPa)	EN 12090	35	50	60	75	85	100	125
Εφελκυστική αντοχή $\sigma_{mt}$ (kPa)	EN 1607	100	200	200	200	200	200	300
Θερμική Αγωγιμότητα $\lambda$ (W/mK)	EN 12667 ή	0,038	0,037	0,036	0,035	0,034	0,034	0,033
Θερ. Αντίσταση $R$ (m <sup>2</sup> K/W) για πάχος 50 χιλ	EN12939	1,316	1,351	1,389	1,429	1,471	1,471	1,515
Διαστασιακή σταθερότητα DS(N) %	EN 16036	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Ενδεικτική Πυκνότητα* $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	EN 1602	$\geq 12$	$\geq 14$	$\geq 16$	$\geq 19$	$\geq 21$	$\geq 25$	$\geq 30$
Αντίσταση διαπερατότητας υδρατμών $\mu$	EN 12086	20~40	20~40	20~40	30~70	30~70	40~70	60~100

**Πίνακας 2.1:** Προδιαγραφές θερμομονωτικών προϊόντων EPS βάσει προτύπου EN 13163 [41]

Τα δοκίμια προς επεξεργασία προμηθεύτηκαν από την βιομηχανία «Γ. Κ. ΡΙΖΑΚΟΣ Α.Β.Ε.Τ.Ε.» [43] από διαφορετικές κατηγορίες και σε διαστάσεις 200x200x30mm<sup>3</sup>. Επιλέχθηκε μικρότερο πάχος από το πάχος αναφοράς που είναι τα 50mm ώστε να εισχωρήσει περισσότερη υγρασία στα δείγματα και να σημειωθεί μεγαλύτερη μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Γενικές πληροφορίες:

- Αριθμός κατηγοριών: 6
- Αριθμός ομάδων: 18
- Δείγματα από κάθε ομάδα: 3
- Συνολικός αριθμός δοκιμών: 54
- Διαστάσεις: (200x200x30)mm εκτός από μία κατηγορία που είναι (200x100x30)mm

Στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά οι κατηγορίες και οι ομάδες με τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους.



### 1.3.1. ISOPOR EPS 30/ 60/ 80/ 100/ 150 και 200

Πρόκειται για κοφτό αυτοσβενύμενο διογκωμένο πολυστυρένιο, λευκού χρώματος με πληθώρα εφαρμογών στην κατασκευή κτιρίων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας στους 10°C κυμαίνονται από 0,034 W/mK μέχρι 0,044 W/mK και οι αρχικές πυκνότητες από 14,95 kg/m<sup>3</sup> έως 36,10 kg/m<sup>3</sup>. Είναι η μόνη από τις κατηγορίες με τέτοια ποικιλία αντοχής σε θλιπτική τάση για παραμόρφωση 10%.

Πρέπει να σημειωθεί πως η θλιπτική τάση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πορώδες του δοκιμίου, δηλαδή όσο υψηλότερη η αντοχή που αναγράφεται τόσο μικρότερο είναι το πορώδες του. Αυτό διαπιστώνεται και από τις παραπάνω φωτογραφία όπου και συγκρίνεται ένα δείγμα EPS 30 με ένα EPS 200.



Εικόνα 2.5: ISOPOR EPS 200



Εικόνα 2.6: Σύγκριση ISOPOR EPS 30 (αριστερά) και ISOPOR EPS 200 (δεξιά)

### 2.3.2. ISOPLAK EPS TX- TT 120 και BT 150



Η κατηγορία αυτή ξεχωρίζει από το γαλάζιο της χρώμα και χρησιμοποιείται κυρίως σε διπλές τοιχοποιίες, κεκλιμένες στέγες και στοιχεία από σκυρόδεμα.

Η ομάδα TX- TT 120 αποτελείται από πλάκες λείες από τις δυο πλευρές για θερμομόνωση διπλών εξωτερικών τοίχων με ή χωρίς συρόμενα στο διάκενο και κεκλιμένων στεγών. Η ομάδα BT 150 χρησιμοποιείται για θερμομόνωση στοιχείων από σκυρόδεμα. Οι πλάκες φέρουν επιφανειακές αυλακώσεις από τη μια πλευρά για καλύτερη πρόσφυση στο σκυρόδεμα και κυψέλες από την άλλη για καλύτερη πρόσφυση στα επιχρίσματα.

Εικόνα 2.7: ISOPLAK TX- TT 120

Η θερμική αγωγιμότητα στους 10°C είναι 0,035w/mK και για τις δύο ομάδες και η πυκνότητα παίρνει τιμές από 20,18 kg/m<sup>3</sup> μέχρι 22,79 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.4.3. PERIPOR EPS AM 200 και 250

Οι θερμομονωτικές πλάκες Peripor έχουν ροζ χρώμα και προσφέρουν σημαντικά μειωμένη απορρόφηση υγρασίας σε σχέση με τα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά. Το Peripor είναι αυτοσβενύμενο, υψηλής πυκνότητας και χαμηλής υδαταπορροφητικότητας υλικό. Λόγω αυτών των

ιδιοτήτων είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε αντεστραμμένα και φυτεμένα δωμάτια, σε θεμέλια και ζώνη στεγάνωσης υπόγειων τοιχίων.

Οι πυκνότητες των δειγμάτων μετρήθηκαν από 28,49 kg/m<sup>3</sup> μέχρι 35,82 kg/m<sup>3</sup> και τιμή συντελεστή  $\lambda = 0,031 - 0,034 \text{ W/mK}$ .



Εικόνα 2.8: PERIPOR AM EPS



Εικόνα 2.9: NEOPOR TX- TT EPS 100

#### 2.4.4. NEOPOR EPS THP 80, TX- TT 100 και BT 150

Το EPS είναι υλικό κλειστών κυψελών και συνεπώς η μετάδοση θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή και ακτινοβολία. Τα δείγματα κατηγορίας Neopor περιέχουν μικροσκοπικά μόρια γραφίτη κατά 3% στη σύνθεση του τα οποία λειτουργούν σαν ανακλαστήρες που μειώνουν τη μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, επιτρέποντας κυρίως στην αγωγή να συμβάλλει στην απώλεια θερμότητας. Σαν αποτέλεσμα οι θερμομονωτικές πλάκες έχουν 15%- 20% καλύτερες θερμομονωτικές ιδιότητες από το συμβατικό λευκό EPS.

Είναι κατάλληλο για θερμομόνωση τοιχοποιίας (TX 100), κεραμοσκεπών (TT 100), στοιχείων από σκυρόδεμα (BT 150) καθώς και για εξωτερική θερμομόνωση κτιρίων (THP 80).

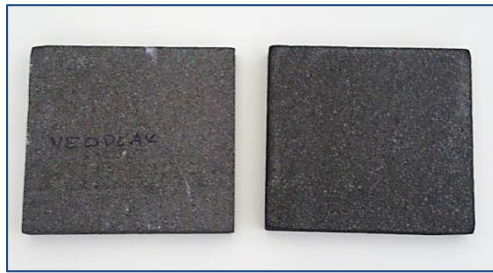
Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λαμβάνει τιμές 0,031 W/mK - 0,032 W/mK και οι πυκνότητες κυμάνθηκαν από 16,98 kg/m<sup>3</sup> έως 27,13 kg/m<sup>3</sup>.

#### 2.4.5. NEOPLAK EPS TX- TT 100, BT 150 και AM 200

Οι θερμομονωτικές πλάκες Neoplak παράγονται από εμπλουτισμένο γραφιτούχο αυτοσβενύμενο πρεσσαριστό διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS). Η διαφορά του με την προηγούμενη κατηγορία είναι πως σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το **Neopor® Plus** που περιέχει μόρια γραφίτη περισσότερο από 3% στη σύνθεση του με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει μικρότερο συντελεστή  $\lambda = 0,030 \text{ W/mK}$  ανεξάρτητα από το πάχος ή τον τύπο της πλάκας. Επίσης έχει πιο σκούρο χρώμα όπως αποδεικνύεται στις παρακάτω φωτογραφίες

Οι ιδιότητες του το καθιστούν κατάλληλο για θερμομόνωση διπλής τοιχοποιίας και κεκλιμένης στέγης (TX-TT 100), για θερμομόνωση στοιχείων από σκυρόδεμα (BT 150) και για θερμομόνωση δωματίων, δαπέδων ψυγείων και περιμετρικών υπόγειων τοιχίων (AM 200).

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι 0,030 W/mK για όλους τους τύπους και οι πυκνότητες υπολογίστηκαν από 21,16 kg/m<sup>3</sup> μέχρι 30,61 kg/m<sup>3</sup>.



**Εικόνα 2.10:** NEOPOR TX- TT EPS 100

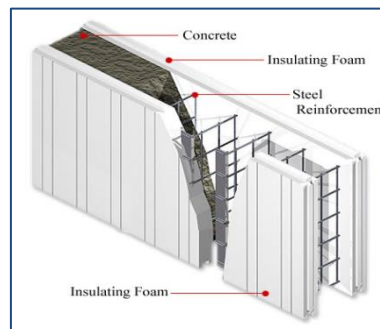


**Εικόνα 2.11:** Σύγκριση NEOPOR (αριστερά) και NEOPLAK (δεξιά)

#### 2.4.6. Insulating Concrete Forms (ICF) EPS 200 και 250

Αυτή η κατηγορία αποτελεί ένα σύστημα καλουπώματος για οπλισμένο σκυρόδεμα, που παραμένει στη θέση του ως μόνιμο εσωτερικό και εξωτερικό υπόστρωμα για τοίχους, δάπεδα και οροφές. Οι αρθρωτές μονάδες που αποτελούν το υπόστρωμα τοποθετούνται χωρίς κονίαμα, συνδέονται μεταξύ τους σαν τουβλάκια Lego και στη συνέχεια τοποθετείται στο διάκενο με το σκυρόδεμα.

Οι διαστάσεις των δοκιμών διαφέρουν σε σχέση με των υπολοίπων κατηγοριών και αντί για  $200 \times 200 \times 30 \text{ mm}^3$  είναι  $200 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$ . Οι πυκνότητες προέκυψαν μεταξύ  $37,53 \text{ kg/m}^3$  και  $42,97 \text{ kg/m}^3$ .



**Εικόνα 2.12:** Σχηματική απεικόνιση ICF με σκυρόδεμα

Επειδή δεν βρέθηκε κάποια καταγεγραμμένη τιμή του  $\lambda$  ώστε να χρησιμοποιηθεί σαν τιμή αναφοράς, έγιναν μετρήσεις με τις διατάξεις CTmetre και ISOMET πριν τη βύθιση του δοκιμίου. Οι τιμές που προέκυψαν στους  $22^\circ\text{C}$  περίπου και είναι  $0,033 \text{ W/mK}$  και  $0,035 \text{ W/mK}$  αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.13:** Τα δείγματα EPS που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία

## 3. Θεωρία και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας

### 3.1. Μεταφορά θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας, ή μετάδοση θερμότητας από ένα σώμα ή σύστημα μεγαλύτερης θερμοκρασίας προς ένα άλλο μικρότερης θερμοκρασίας, είναι ένα φυσικό φαινόμενο που πραγματοποιείται με τρεις δυνατούς μηχανισμούς.

- **Αγωγή:** η ανταλλαγή ενέργειας γίνεται μέσω της μάζας ενός στερεού σώματος ή διαμέσου σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή, αρκεί η θερμοκρασία να είναι πάνω από 0 Kelvin.
- **Συναγωγή:** η μεταφορά ενέργειας μέσω της κίνησης ενός ρευστού σε άλλα σώματα με τα οποία βρίσκεται σε επαφή. Η συναγωγή είναι αποτέλεσμα της μακροσκοπικής μετατόπισης των σωματιδίων που οφείλεται στην μεταβολή της πυκνότητας λόγω της θερμοκρασίας.
- **Ακτινοβολία:** η ανταλλαγή ενέργειας μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ακτινοβολίας στο υπέρυθρο φάσμα (1- 50 $\mu$ m).

#### 3.1.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή οφείλεται κυρίως στην μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Στα μέταλλα η θερμική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση των ηλεκτρονίων ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση των μορίων. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός, οι αλληλεπιδράσεις όμως μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες από ότι στα αέρια.

Ένα αέριο βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας μεταξύ δύο οριζόντιων επιπέδων σωμάτων. Υποτίθεται αρχικά ότι η θερμοκρασία τους είναι ίδια. Εάν μεταβληθεί η θερμοκρασία του υψηλότερου σώματος και μάλιστα αν γίνει μεγαλύτερη, μεταφέρεται θερμότητα με αγωγή προς την κατεύθυνση της μικρότερης θερμοκρασίας, δηλ. προς τα κάτω. Η ενεργειακή στάθμη του αερίου χαρακτηρίζεται σε κάθε σημείο από την θερμοκρασία και εκδηλώνεται με τυχαίες μεταφορικές κινήσεις τις οποίες εκτελούν τα μόριά του. Μόρια με υψηλή θερμοκρασία και συνεπώς υψηλή ενεργειακή στάθμη συγκρούονται με άλλα στα οποία μεταφέρουν μέρος της ενέργειάς τους ώστε να εμφανιστεί μεταφορά θερμότητας με αγωγή προς την κατεύθυνση της χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Με τη βοήθεια κατάλληλων σχέσεων περιγράφεται κατά τρόπο γενικό το φαινόμενο και υπολογίζεται η θερμότητα η οποία μεταφέρεται με αγωγή στην μονάδα του χρόνου.

- **Νόμος Fourier**

Ο νόμος Fourier περιγράφει την ροή θερμότητας που οφείλεται στην αγωγή. Αναφέρει πως ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας μέσα σε ένα υλικό είναι ανάλογος με την αρνητική κλίση της θερμοκρασίας και της περιοχής μέσω της οποίας ρέει, κάθετα στην εν λόγω κλίση. Ο νόμος διατυπώνεται σε διαφορεική μορφή όπου εξετάζονται τα ποσοστά ροής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο.

Η διαφορική μορφή του νόμου του Fourier δείχνει ότι η τοπική πυκνότητα ροής θερμότητας είναι ίση με το γινόμενο της θερμικής αγωγιμότητας και την αρνητική τοπική κλίση θερμοκρασίας:

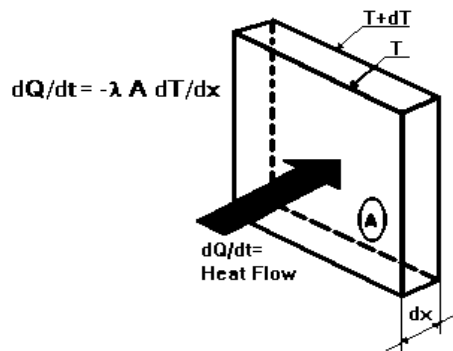
**Νόμος Fourier:**  $\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T$  όπου  $\vec{q}$  η ροή θερμότητας ( $W/m^2$ ),  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα του υλικού ( $W/mK$ ),  $\nabla T$  η θερμοκρασιακή κλίση ( $K/m$ )

Επειδή εφαρμόζεται η ιδανική συνθήκη της μονοδιάστατης θερμότητας, η εξίσωση απλοποιείται και προκύπτει:

$$q = -\lambda \cdot \Delta T / \Delta x \quad (3.1)$$

όπου  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας ( $^{\circ}C$  ή  $K$ ) και  $\Delta x$  η απόσταση σε  $m$  που είναι κάθετη στη θερμοροή, δηλ. το πάχος του εκάστοτε δείγματος. Η σταθερά  $\lambda$  αποτελεί την φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα, μια φυσική ιδιότητα που χαρακτηρίζει όλα τα ομογενή υλικά.

Η εξίσωση συνδέει την πυκνότητα της θερμοροής,  $q$  (ποσότητα θερμότητας που διαπερνάει ένα υλικό ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας) και την κλίση της θερμοκρασίας  $T$ , ή την θερμοκρασιακή διαφορά ανά μονάδα πάχους του υλικού.



**Εικόνα 3.1:** Σχηματική απεικόνιση Νόμου Fourier

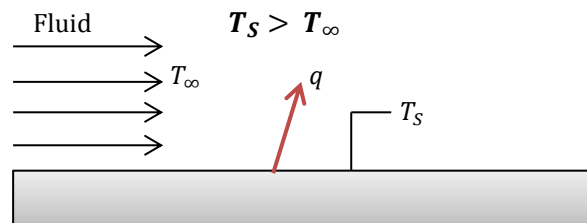
Η εξίσωση Fourier δείχνει ότι το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή σε μία δεδομένη κατεύθυνση (άξονας  $x$ ) είναι ανάλογο με την κλίση της θερμοκρασίας προς την κατεύθυνση αυτή. Η θερμότητα διαχέεται προς την κατεύθυνση στην οποία η θερμοκρασία ελαττώνεται και η κλίση της θερμοκρασίας γίνεται αρνητική όταν μειώνεται η θερμοκρασία με την αύξηση της απόστασης  $x$ . Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση εμφανίζεται διότι οι ποσότητες  $T$  και  $x$  μεταβάλλονται αντίστροφα, δηλαδή όσο αυξάνεται η απόσταση  $x$  από το επίπεδο της υψηλής θερμοκρασίας, τόσο ελαττώνεται η θερμοκρασία και εξασφαλίζει ότι η θερμοροή σε θετική κατεύθυνση  $x$  είναι μία θετική ποσότητα.

### 3.1.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η συναγωγή θερμότητας εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του ρευστού όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν.

Όταν η θερμοκρασία του στερεού είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του ρευστού, υπάρχει μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια στο ρευστό. Η συναγωγή θερμότητας ενισχύεται

κυρίως από τις τυχαίες μοριακές κινήσεις, τη διάχυση των μορίων και από την κίνηση του ρευστού. Η συνεισφορά της διάχυσης των μορίων στην συνολική μεταφερόμενη θερμότητα από το σώμα στο ρευστό ή και προς την αντίθετη κατεύθυνση υπερισχύει πλησίον της επιφάνειας. Στην συγκεκριμένη περιοχή, η ταχύτητα του ρευστού είναι χαμηλή και στα σημεία επαφής μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας του σώματος η θερμότητα μεταφέρεται μόνο με αγωγή.



**Εικόνα 3.2:** Συναγωγή θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή διακρίνεται στην εξαναγκασμένη και στην ελεύθερη ή φυσική συναγωγή. Η εξαναγκασμένη συναγωγή εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά αίτια δηλ. από έναν ανεμιστήρα, από ένα στροβιλοσυμπιεστή ή μια αντλία, ενώ τη ελεύθερη συναγωγή την προκαλούν δυνάμεις οι οποίες δημιουργούνται από την μεταβολή της πυκνότητας όταν στο ρευστό υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές. Ένα παράδειγμα ελεύθερης συναγωγής αποτελεί ένα θερμαντικό σώμα (καλοριφέρ) όταν λειτουργεί. Ο θερμαινόμενος αέρας είναι ελαφρότερος και καταλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα ενώ ο ψυχρότερος αέρας παρασύρεται προς το θερμαντικό σώμα για να ακολουθήσει και αυτός στην συνέχεια την πορεία του θερμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι ένας μηχανισμός ο οποίος οφείλεται στον συνδυασμό της αγωγής και της κίνησης του ρευστού, όπου μεταφέρεται η αισθητή θερμότητα. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις συναγωγής με μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας, όταν εμφανίζεται αλλαγή της φάσης του υγρού σε ατμό κατά την ατμοποίηση ή του ατμού σε υγρό κατά την συμπύκνωση.

Λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας του σώματος, δημιουργείται στο ρευστό μια περιοχή στην οποία η ταχύτητά του μεταβάλλεται από μηδέν (την τιμή που έχει πάνω στην επιφάνεια), στην πεπερασμένη τιμή  $u$  που έχει το ρευστό σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια. Η περιοχή αυτή είναι γνωστή ως υδροδυναμικό οριακό στρώμα.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας  $q$ , χρησιμοποιείται η σχέση του

**Newton:**

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

όπου  $q$  η τοπική ροή θερμότητας ( $W/m^2$ )

$h$  η ειδική συναγωγιμότητα του υλικού ( $W/m^2K$ )

$T_s, T_\infty$  οι θερμοκρασίες του στερεού και του ρευστού αντίστοιχα (K).

Το μέγεθος  $q$  είναι ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της επιφάνειας  $T_s$  και του ρευστού  $T_\infty$ . Ο συντελεστής  $h$  εμπεριέχει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την συναγωγή όπως τις συνθήκες στο οριακό στρώμα το οποίο εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας και από το είδος του ρευστού και της ροής του. Συνεπώς, η ειδική συναγωγιμότητα είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού, της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, του δυναμικού ιξώδους και της πυκνότητας του ρευστού και της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση.

### 3.1.3. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Στη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ των σωμάτων με τη βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και αρκετά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα συγχρόνως όμως απορροφούν και μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπουν άλλα σώματα. Στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας και ενώ στην αγωγή και στην συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για την μεταφορά, στην ακτινοβολία δεν συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία είναι δυνατό να εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα σε εντονότερο βαθμό.

Η μέγιστη πυκνότητα παροχής θερμότητας η οποία ακτινοβολείται από ένα σώμα υπολογίζεται με την σχέση Stefan- Boltzmann:

$$q = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3.3)$$

όπου  $q$  η πυκνότητα παροχής θερμότητας ( $W/m^2$ ),  $T_s$  η θερμοκρασία του σώματος (K),  $\sigma$  η σταθερά Stefan- Boltzmann ίση με  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $W/m^2K^4$ ),  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής του σώματος ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ )

## 3.2. Ειδική θερμική αγωγιμότητα

Η ειδική θερμική αγωγιμότητα αποτελεί σημαντική ιδιότητα των υλικών και ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που διαχέεται διαμέσου μιας μονάδας επιφάνειας του υλικού ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς ανηγμένης στο πάχος. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας συμβολίζεται με  $k$  ή  $\lambda$  ( $W/mK$ ), είναι χαρακτηριστικός για κάθε υλικό και εκφράζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Ανάλογα με την ευκολία της διάδοσης της θερμότητας τα υλικά διακρίνονται σε ευθερμαγωγά, ή καλοί αγωγοί θερμότητας και σε δυσθερμαγωγά, ή κακοί αγωγοί θερμότητας καθώς και σε θερμομονωτικά.

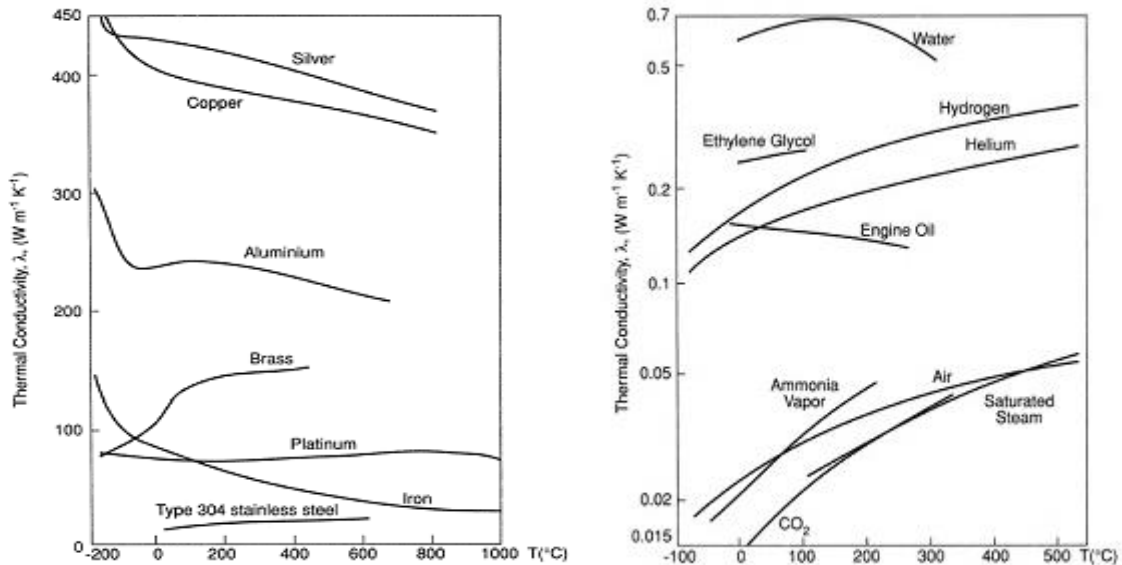
Η διαφορά της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των υλικών οφείλεται στην μικροδομή τους, δηλαδή στην διάταξη και την κίνηση των μικροσωματιδίων (μόρια ή άτομα) που τα αποτελούν [15]. Στη μεταφορά θερμότητας με αγωγή επικρατούν δύο μηχανισμοί. Ο πρώτος είναι η αλληλεπίδραση των μορίων, όπου μόρια με σχετικά υψηλή ενέργεια χαρακτηριζόμενη από την θερμοκρασία τους, μεταφέρουν ενέργεια σε γειτονικά μόρια με χαμηλότερη θερμοκρασία. Ο δεύτερος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή είναι με διάχυση ελεύθερων ηλεκτρονίων που περιέχονται σε καθαρά μεταλλικά σώματα. Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων ποικίλλει σημαντικά στα μεταλλικά κράματα και είναι πολύ χαμηλή στα αμέταλλα. Η ικανότητα των στερεών σωμάτων να μεταφέρουν ενέργεια εξαρτάται άμεσα από την συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τα καθαρά μέταλλα να είναι καλύτεροι αγωγοί θερμότητας. Έχει αναφερθεί παραπάνω πως μια ποσοτική έκφραση που συνδέει την θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή και με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και το είδος του υλικού είναι η σχέση Fourier.

Στα στερεά σώματα η ειδική θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του σώματος όσο και από την εσωτερική δομή του αλλά και από τις συνθήκες από τις οποίες διεξάγονται οι μετρήσεις. Ο κρυσταλλικός ιστός με την κανονική διάταξη των ατόμων σε κρυστάλλους παρουσιάζει εντονότερη θερμική αγωγή συγκριτικά με ένα άμορφο υλικό με άμορφη υφή και ακανόνιστη διάταξη των ατόμων, όπως είναι τα ρευστά. Συνεπώς καλύτερη αγωγιμότητα εμφανίζουν τα μέταλλα λόγω της κανονικής δομής των ατόμων σε τρισδιάστατους κρυστάλλους.

Η μονωτική ιδιότητα ορισμένων υλικών- των μονωτικών- οφείλεται στο γεγονός πως τα υλικά αυτά αποτελούνται από κόκκους ή ίνες δημιουργώντας αναριθμητους πόρους στους οποίους

περιέχεται αέρας που ως γνωστόν έχει πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες. Σε ένα μονωτικό σώμα διακρίνονται οι ακόλουθοι τρόποι μεταφοράς θερμότητας:

- Με αγωγή δια του στερεού υλικού
- Με αγωγή ή συναγωγή θερμότητας στον αέρα που περιέχεται στους πόρους
- Με ακτινοβολία στα τοιχώματα των πόρων (αν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή).



**Εικόνα 3.3:** Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας στερεών (αριστερά) και υγρών- αερίων (δεξιά) με την θερμοκρασία

Από τα σχήματα παρατηρείται πως για την πλειοψηφία των στερεών μετάλλων η ειδική θερμική αγωγιμότητα μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται και λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από την συνηθισμένη. Επίσης στην περίπτωση των μη μεταλλικών υγρών επικρατεί μείωση του συντελεστή  $\lambda$  για υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας με μοναδική εξαίρεση την γλυκερίνη και το νερό. Αντίθετα, στα αέρια η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται συνεχώς με αυξανόμενη θερμοκρασία.

Η κατάταξη των διαφόρων υλικών ως προς τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  με φθίνουσα σειρά είναι: καθαρά μέταλλα, μεταλλικά κράματα, υγρά μέταλλα, μη μεταλλικά στερεά, μη μεταλλικά υγρά, στερεά μονωτικά υλικά και αέρια.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μελέτη της υγροθερμικής συμπεριφοράς της διογκωμένης πολυστερίνης, ενός μονωτικού υλικού με ευρεία εφαρμογή στις κτιριακές δομές στην Ελλάδα. Στο σχήμα 3.4 παρατίθενται οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας ποικίλων μονωτικών υλικών ώστε να εξεταστεί το εύρος των τιμών που λαμβάνει ο συντελεστής  $\lambda$  για την συγκεκριμένη κατηγορία υλικών.



Μονωτικά υλικά	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
Αφρώδες γυαλί	0.036- 0.062
Υαλοβάμβακας	0.029- 0.048
Ορυκτοβάμβακας	0.030- 0.045
Διογκωμένη πολυστερίνη	0.029- 0.050
Εξηλασμένη πολυστερίνη	0.025- 0.035
Πολυουρεθάνη	0.021- 0.034
Φελλός	0.035- 0.052
Φαινολικός αφρός	0.024- 0.031
Προβατόμαλλο	0.031- 0.046
Ίνες αελουλόζης	0.035- 0.045
Ίνες πολυεστέρα	0.032- 0.048

**Πίνακα; 3.1:** Θερμική αγωγιμότητα μονωτικών υλικών [15]

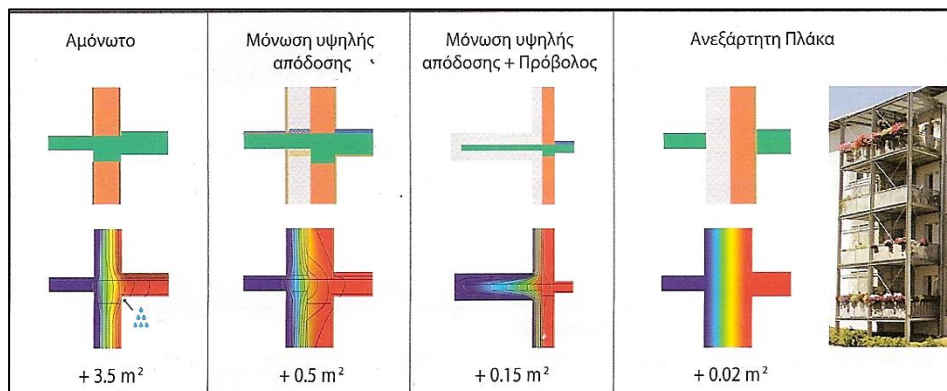
#### • Θερμικές γέφυρες

Σε ορισμένα σημεία ή σε επιφάνειες του κτιριακού κελύφους, παρατηρείται σημαντική μείωση της θερμικής αντίστασης των δομικών στοιχείων σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες. Τα σημεία αυτά ονομάζονται θερμικές γέφυρες και αποτελούν σημαντική πηγή θερμικών απωλειών, που σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει συμπύκνωση σε επιφάνειες ή ακόμα και ενδιάμεση συμπύκνωση. Συνήθως εμφανίζονται στην διεπιφάνεια δύο διαφορετικών δομικών στοιχείων ή δύο ίδιων υλικών διαφορετικού πάχους, σε συνδέσεις εξωτερικών δομικών στοιχείων και πλευρικά γύρω από ανοίγματα. Επίσης, δημιουργούνται σε σημεία ένωσης παραθύρων, σε σημεία συμβολής δοκών και υποστυλωμάτων χωρίς ή με ανεπαρκή θερμομόνωση, με θερμομονωμένα τμήματα των τοίχων.

Οι θερμογέφυρες χαρακτηρίζονται από πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητας και για τον λόγο αυτό δεν μπορούν να προσδιοριστούν από μονοδιάστατα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων. Οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε *κατασκευαστικές* και *γεωμετρικές* [38]. Οι πρώτες αφορούν σε σημεία συμβολής υλικών με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα όπως είναι οι ενώσεις και η διακοπή της θερμομόνωσης του κτιρίου από δομικά στοιχεία, κουφώματα, προβόλους και άλλα. Οι κατασκευαστικές θερμογέφυρες διακρίνονται με τη σειρά τους σε σημειακές ή γραμμικές, αναλόγως με το αν είναι επαναλαμβανόμενες ή απλά σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Οι γεωμετρικές οφείλονται στη διαφορά μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού εμβαδού μιας θερμομονωμένης επιφάνειας όπως σε μια θερμομονωμένη γωνία κτιρίου, όπου η επιφάνεια εξωτερικά είναι πάντα μεγαλύτερη από την εσωτερική, με αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της θερμικής αγωγιμότητας και τη δημιουργία θερμογέφυρας.

Ένα μεταλλικό πλαίσιο κατασκευής είναι πιο επιρρεπές στις θερμικές γέφυρες που προκαλούνται με αγωγή σε σύγκριση με μια ξύλινη κατασκευή. Η επίδραση της συναγωγής σε μια θερμογέφυρα εξαρτάται από την παρουσία κενών αέρος μέσα στην μόνωση και για την διασφάλιση στεγανότητας απαιτείται σωστή εφαρμογή του μονωτικού υλικού. Τα ουσιαστικά προβλήματα που προκύπτουν από την παρουσία θερμογεφύρων είναι η υποβάθμιση της θερμικής αντίστασης της τοιχοποιίας και τα πιθανά προβλήματα υγρασίας στον σκελετό και την εσωτερική επένδυση του κτιρίου. Ο σκελετός γίνεται πιο ψυχρός και μπορεί να εμφανίσει συμπύκνωση με αποτέλεσμα τα γειτονικά στοιχεία να γίνονται ψυχρότερα σε σχέση με αυτά που βρίσκονται πλησίον της μόνωσης. Ανάλογα με την θερμοκρασία του αέρα και τα επίπεδα υγρασίας του περιβάλλοντος, οι ψυχρότερες περιοχές είναι πιθανό να εμφανίσουν συμπύκνωση ενώ παράλληλα ευνοείται η ανάπτυξη μούχλας.

Ωστόσο, ο σωστός σχεδιασμός του κτιρίου και η ποιοτική εφαρμογή της θερμομόνωσης ελαχιστοποιούν τις θερμικές γέφυρες και συμβάλλουν στην σωστή απόδοση του κτιρίου.



**Εικόνα 3.4:** Παραδείγματα θερμογεφύρων σε διαφορετικές διατάξεις εξωστών

### Θερμική αγωγιμότητα διογκωμένης πολυστερίνης

Στις κτιριακές δομές, τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται, εξωτερικά και εσωτερικά της τοιχοποιίας, απαιτείται να έχουν χαμηλές τιμές συντελεστή ώστε να μην επηρεάζουν το εσωτερικό κλίμα. Οι χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας των μονωτικών υλικών, οφείλονται στην ποσότητα ξηρού και στάσιμου αέρα ή άλλων αερίων που ενσωματώνεται στην μάζα τους.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η υγραθερμική συμπεριφορά δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης μέσω της μεταβολής του συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας,  $\lambda$ , σε ξηρή και υγρή κατάσταση. Το διογκωμένο πολυστυρένιο, όπως και τα περισσότερα μονωτικά υλικά, είναι εξαιρετικά πορώδες και αποτελείται από μια στερεή μήτρα γεμάτη από μικρά κενά που περιλαμβάνουν το 90% και παραπάνω του συνολικού όγκου.

Στα πορώδη μονωτικά υλικά η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του υλικού είναι το μακροσκοπικό αποτέλεσμα των διαφόρων διαδρομών ενέργειας που υπάρχουν στην πολύπλοκη δομή των πόρων. Εφαρμόζοντας την υπόθεση πως η συνολική ροή θερμότητας στο υλικό είναι αποτέλεσμα της συμβολής της αγωγής στην στερεή και στην αέρια φάση, της συναγωγής και της ακτινοβολίας και πως δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών μηχανισμών μετάδοσης προκύπτει ότι:

$$\vec{q}_{total} = \vec{q}_{cd} + \vec{q}_{cv} + \vec{q}_{rd} \quad (3.4)$$

$$\vec{q}_{cd} = \vec{q}_s + \vec{q}_g$$

όπου  $q_{total}$ ,  $q_{cd} = q_s + q_g$ ,  $q_{cv}$ ,  $q_{rd}$ ,  $q_s$  και  $q_g$  είναι οι θερμοροές λόγω αγωγής στην υγρή και στην αέρια φάση, λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας.

Για εφαρμογές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μικρότερη των 50°C η ροή θερμότητας από φυσική συναγωγή θεωρείται αμελητέα και συνεπώς ο όρος  $q_{cv}$  παραλείπεται από το δεξί μέλος της προηγούμενης εξίσωσης και μένουν μόνο οι όροι αγωγής και ακτινοβολίας. Συνεπώς, η θερμική αγωγιμότητα χαρακτηρίζεται ως «φαινόμενη» διότι λαμβάνει υπόψη την αγωγή στην υγρή και την αέρια φάση και ορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας που επικρατούν σε ένα υλικό:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_{rd} \quad (3.5)$$

Από την εξίσωση είναι εμφανές πως η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα αποτελεί τη συμβολή της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στην υγρή και στην αέρια φάση και μεταφορά θερμότητας ακτινοβολία.

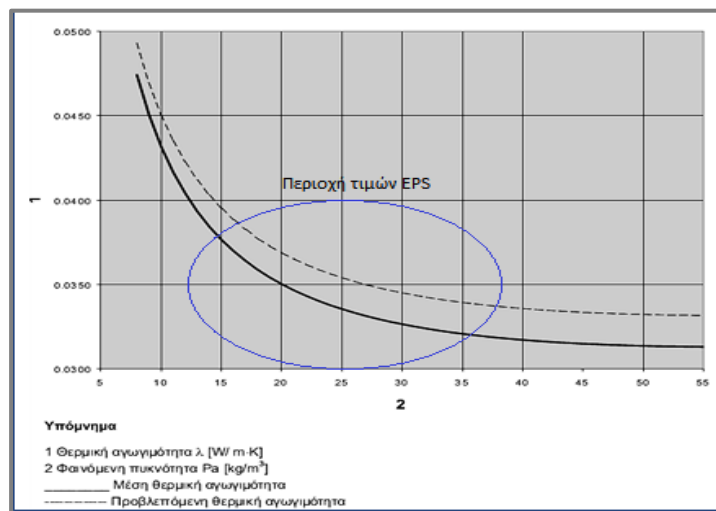
- **Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας**

Η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζεται σε **μικροσκοπικό** και **μακροσκοπικό** επίπεδο [4]. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται παράγοντες όπως το μέγεθος των κελιών, η διάμετρος και η διάταξη των ινών ή των πόρων, η διαφάνεια σε θερμική ακτινοβολία, ο τύπος και η πίεση του ενσωματωμένου αερίου και τα συγκολλητικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, λειτουργούν οι παράγοντες της πυκνότητας, της θερμοκρασίας, της περιεκτικότητας σε υγρασία και της ηλικίας του υλικού. Λόγω του μεγάλου πορώδους στην εσωτερική δομή του υλικού, η πυκνότητα που αναφέρεται αποτελεί την **φαινόμενη πυκνότητα** του υλικού που ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του υλικού προς τον φαινόμενο όγκο του, δηλαδή τον όγκο που περιλαμβάνει και τα κενά που υπάρχουν στη μάζα όπως είναι οι πόροι και οι κοιλότητες.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13163 «**Θερμομονωτικά προϊόντα κτιρίων- Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)- Προδιαγραφή**» ορίζει πως με αυξανόμενη την φαινόμενη πυκνότητα ( $d_{app}$ ) του δείγματος, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με την μορφή της καμπύλης της παρακάτω εικόνας.

Η εξίσωση που εκφράζει στατιστική απόκλιση για  $8\text{kg/m}^3 \leq d_{app} \leq 55\text{kg/m}^3$  είναι:

$$\lambda_{mean} = 0,025314 \frac{W}{mK} + 5,1743 \times 10^{-5} \frac{Wm^2}{kgK} \times d_{app} + 0,173606 \frac{Wkg}{m^4K} \times \frac{1}{d_{app}} \quad (3.6)$$

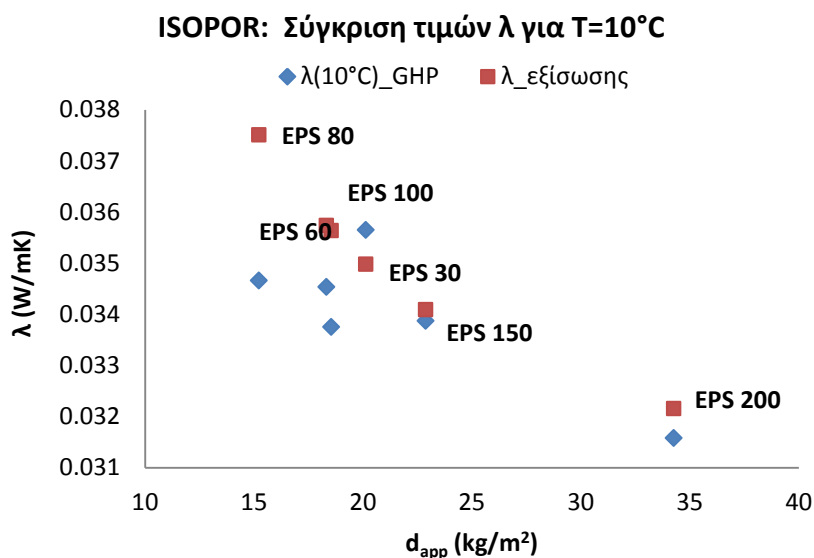


**Εικόνα 3.4:** Καμπύλη εξάρτησης θερμικής αγωγιμότητας- φαινόμενης πυκνότητας EPS [5]

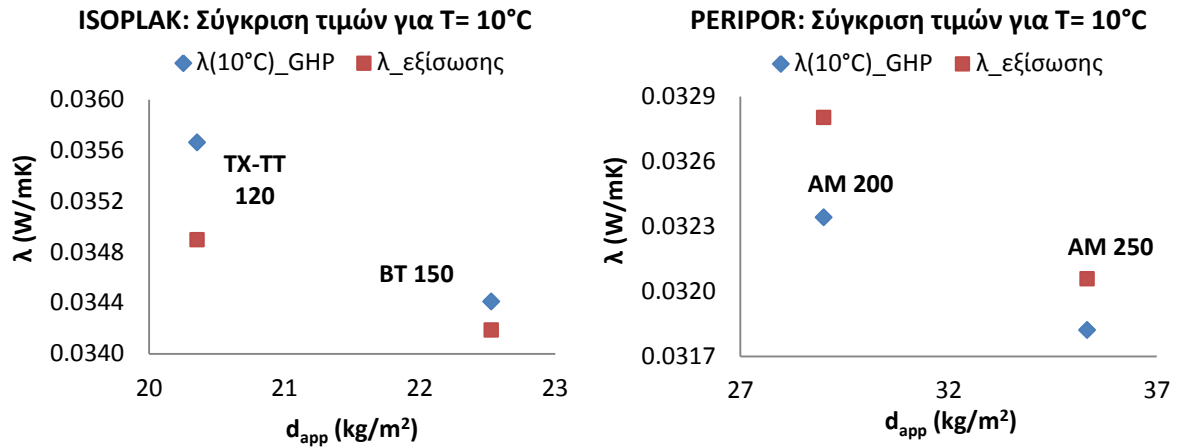
Οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμών EPS που εξετάζουμε κυμαίνονται από 14,95 έως 36,10kg/m<sup>3</sup> και περιλαμβάνονται στην σημειωμένη περιοχή. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα για  $d_{app} \leq 35\text{kg/m}^3$  η θερμική αγωγιμότητα δοκιμών EPS σε ξηρή κατάσταση μειώνεται απότομα ενώ για μεγαλύτερες τιμές η μείωση είναι σταδιακή. Ως μέση θερμοκρασία λαμβάνεται η  $\theta = 10^\circ\text{C}$  και ως πάχος αναφοράς 50mm.

Το πάχος των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές ολικής και μερικής εμβάπτισης είναι 30mm, ωστόσο η καμπύλη πυκνότητας- θερμικής αγωγιμότητας σε dry state είναι παρόμοια. Προφανώς η κάθε κατηγορία δειγμάτων EPS παρουσιάζει ξεχωριστή καμπύλη λόγω των ξεχωριστών ιδιοτήτων που έχει. Τα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζουν τις θεωρητικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας που προκύπτουν με βάση την προηγούμενη εξίσωση και τις πειραματικές τιμές σύμφωνα με την μέθοδο Guarded Hot Plate για θερμοκρασία 10°C.

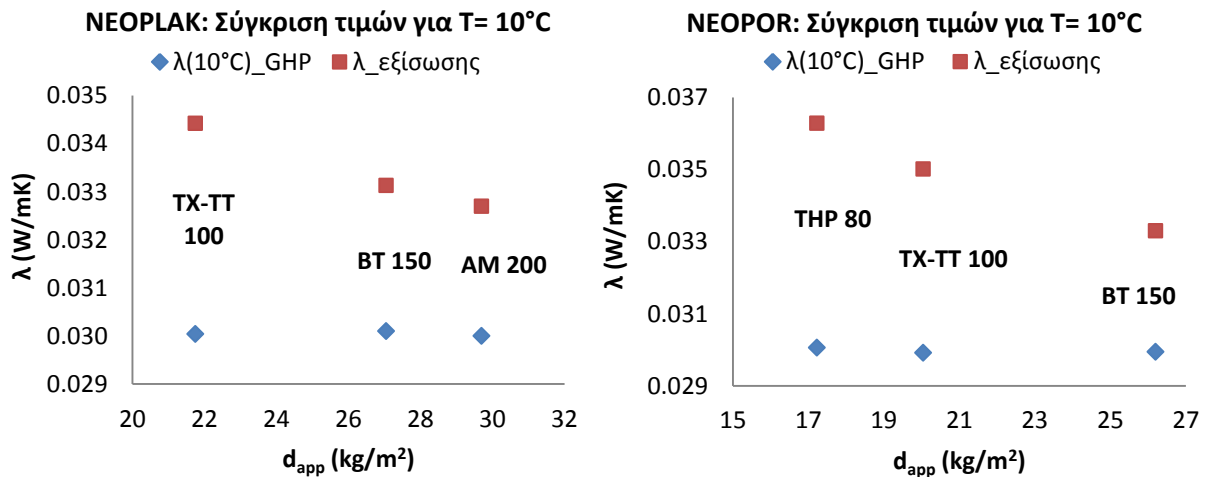
Στα μισά δείγματα κατηγορίας ISOPOR παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που προκύπτουν από την εξίσωση. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό πυκνότητας και αντοχής σε θλιπτική τάση που έχει κάθε δοκίμιο. Έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω πως βάσει προτύπου η αντοχή σε θλίψη είναι ανάλογη της πυκνότητας οπότε μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη επιτυγχάνεται με πυκνότερα υλικά τα οποία έχουν καλύτερη θερμική απόδοση. Ωστόσο στην συγκεκριμένη κατηγορία, είναι δυνατό η απαιτούμενη αντοχή να επιτυγχάνεται με EPS μικρότερης ή μεγαλύτερης πυκνότητας αναλόγως με την περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο υλικό. Η καμπύλη της εξίσωσης ακολουθεί την προσδιορισμένη μορφή, ωστόσο σύμφωνα με τις πειραματικές τιμές η απαιτούμενη αντοχή επιτυγχάνεται σε χαμηλότερη πυκνότητα με αποτέλεσμα να μην διαμορφώνεται παρόμοια καμπύλη όπως της εξίσωσης. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η πλειοψηφία των μετρούμενων τιμών είναι χαμηλότερες από της εξίσωσης.



**Διάγραμμα 3.1:** Θεωρητικές και πειραματικές τιμές συντελεστή  $\lambda$  δοκιμίων ISOPOR βάσει πυκνότητας



**Διάγραμμα 3.2:** Θεωρητικές και πειραματικές τιμές συντελεστή λ δοκιμών ISOPLAK, PERIPOR βάσει πυκνότητας



**Διάγραμμα 3.3:** Θεωρητικές και πειραματικές τιμές συντελεστή λ δοκιμών NEOPLAK, NEOPOR βάσει πυκνότητας

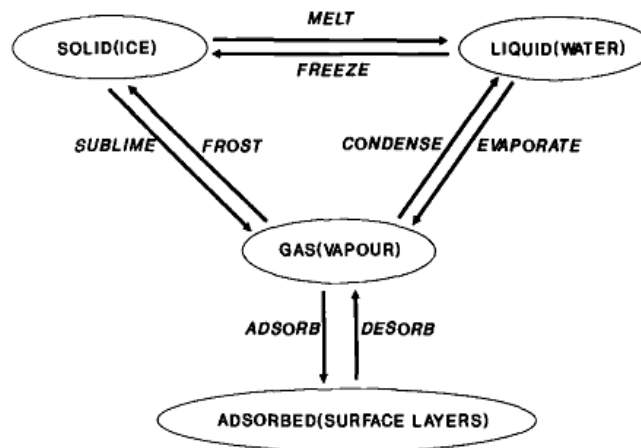
Οι κατηγορίες ISOPLAK και PERIPOR αποτελούνται μόνο από δύο ομάδες δειγμάτων και συνεπώς δεν είναι ξεκάθαρη η μορφή της καμπύλης της εξίσωσης και των τιμών που προέκυψαν από την διάταξη. Επειδή όμως, σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία, υπάρχει αναλογία στην σχέση αντοχής θλίψης και πυκνότητας, ο συντελεστής λ των πυκνότερων δειγμάτων είναι χαμηλότερος. Αξιοσημείωτο είναι πως τα δοκίμια ISOPLAK είναι τα μόνα που παρουσίασαν υψηλότερα, με ελάχιστη διαφορά, πειραματικά αποτελέσματα συγκριτικά με την εξίσωση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα των κατηγοριών NEOPOR και NEOPLAK, όπου η μετρούμενη θερμική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη του πάχους και της πυκνότητας της πλάκας και λαμβάνει σταθερή τιμή  $\lambda = 0,030 \text{ W/mK}$ . Αυτό οφείλεται στην πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους, η οποία επιτυγχάνει χαμηλότερη τιμή του συντελεστή λ. Η καμπύλη της εξίσωσης έχει την αναμενόμενη μορφή ενώ και η σειρά των ομάδων είναι σωστή, αφού υπάρχει ανάλογη σχέση αντοχής σε θλίψη με την πυκνότητα

### 3.3. Μεταφορά υγρασίας

Το νερό, όπως κάθε καθαρή ουσία, συναντάται σε τρεις φάσεις: στερεό (πάγος), υγρό (νερό) και αέριο (υδρατμοί). Στις κτιριακές δομές είναι πιθανό να εμφανιστεί νερό σε οποιαδήποτε μορφή καθώς επίσης και σε μία πρόσθετη που ονομάζεται φάση προσρόφησης. Τα δομικά υλικά έχουν την τάση να δεσμεύουν τα μόρια του νερού από τον περιβάλλοντα αέρα και να τα εντοπίζουν στην επιφάνειά τους. Το φαινόμενο ονομάζεται προσρόφηση και η μέγιστη ποσότητα προσροφημένης υγρασίας σε ένα στερεό εξαρτάται από την θερμοκρασία, την μερική πίεση υδρατμών και την επιφάνεια του υλικού.

Οι θερμοδυναμικές καταστάσεις του νερού στα υλικά εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την μερική πίεση ατμών. Μια μικρή μεταβολή στους δύο παράγοντες είναι πολύ πιθανό να επιφέρει αλλαγή στην δεδομένη φάση της υγρασίας με αποτέλεσμα μεταβολή στην κινητικότητα και το ενεργειακό περιεχόμενο- ιδιότητες που επηρεάζουν την υγρασιακή συμπεριφορά δομικών υλικών και στοιχείων.



Εικόνα 3.5.: Αλλαγές φάσεις υγρασίας [11]

#### 3.3.1. Υγρασία στις κτιριακές δομές

Η ποσότητα των υδρατμών στον εξωτερικό αέρα εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και το υψόμετρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Η ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται στον εσωτερικό αέρα εξαρτάται κυρίως από τους παράγοντες πληρότητας και τις δραστηριότητες ή διαδικασίες που διεξάγονται εντός του χώρου ή του κτιρίου [10].

Οι υδρατμοί που περιέχει ο αέρας εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότεροι υδρατμοί περιέχονται στον αέρα και αντιστρόφως. Όταν ο αέρας έρχεται σε επαφή με μία κρύα επιφάνεια και ψύχεται κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας που είναι γνωστή ως «σημείο δρόσου», οι αόρατοι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε ορατά σταγονίδια νερού πάνω στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **συμπύκνωση** και το συγκεντρωμένο νερό ονομάζεται συμπύκνωμα και είναι δυνατό να εμφανιστεί είτε ως ορατή συμπύκνωση στις επιφάνειες είτε στην εσωτερική δομή των υλικών του κτιρίου όπου

τότε το φαινόμενο ορίζεται ως **ενδιάμεση συμπύκνωση**. Σε κρύο καιρό η ενδιάμεση συμπύκνωση προκαλείται όταν οι υδρατμοί μέσα σε ένα κτίριο κινούνται προς τα έξω μέσω διάχυσης διαμέσου των διαπερατών στρώσεων των υλικών του κτιρίου ή όταν ο αέρας έρθει σε επαφή με μία επιφανειακή κοιλότητα του κτιρίου με θερμοκρασία κάτω από το σημείο δρόσου. Η συμπύκνωση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον έλεγχο της υγρασίας στα κτίρια και ειδικότερα η ενδιάμεση συμπύκνωση αποδεικνύεται πιο επιζήμια από την επιφανειακή διότι περνάει απαρατήρητη. Τα περισσότερα κτίρια δεν έχουν σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπουν την υγρασία να στεγνώνει από μέσα με αποτέλεσμα να φτάνει σε υψηλές τιμές και να θέτει σε κίνδυνο την αντοχή του κτιρίου και την υγεία των ενοίκων.

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην ανάπτυξη της συμπύκνωσης στα κτίρια είναι ουσιαστικά ένας ή και συνδυασμός από τους ακόλουθους:

- Υψηλά επίπεδα υγρασίας
- Χαμηλές θερμοκρασιακές τιμές στην εσωτερική δομή του κτιρίου
- Ανεξέλεγκτη ροή υδρατμών από μια πηγή σε μια περιοχή με χαμηλή θερμοκρασία

### **Πηγές υγρασίας στα κτίρια**

Στα ψυχρά κλίματα, ο έλεγχος της συμπύκνωσης στα κτίρια αφορά κυρίως τις εσωτερικές πηγές υγρασίας. Στα κλιματιζόμενα κτίρια σε ζεστά και υγρά κλίματα το κύριο μέλημα είναι η διείσδυση του θερμού και υγρού αέρα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο, πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά και να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε συγκεκριμένες εσωτερικές πηγές υγρασίας όπως είναι οι εσωτερικές πισίνες, οι εμπορικές κουζίνες και τα πλυντήρια καθώς και στην υγρασία που παράγεται από βιομηχανικές διαδικασίες [11].

### **Εσωτερικές πηγές**

#### ➤ *Ανθρώποι*

Σε όλα τα κτίρια που έχουν σχεδιαστεί για ανθρώπινη δραστηριότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η υγρασία του σώματος που παράγεται από τους ανθρώπους. Η υγρασία που απελευθερώνεται παράγεται από την αναπνοή και τον ιδρώτα και εξαρτάται από το επίπεδο της δραστηριότητας και από την θερμοκρασία του αέρα. Για τον προσδιορισμό της υγρασίας έχουν καθοριστεί οι τιμές για τις ακόλουθες ανθρώπινες δραστηριότητες σε ωριαία βάση και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C:

- Χαμηλή δραστηριότητα: από 0.03kg/h (0.07lb/h) έως 0.12kg/h (0.26lb/h)
- Μεσαία δραστηριότητα: από 0.12kg/h (0.26lb/h) έως 0.2kg/h (0.44lb/h)
- Υψηλή δραστηριότητα: από 0.2kg/h (0.44lb/h) έως 0.3kg/h (0.66lb/h)

#### ➤ *Εμπορικές επιχειρήσεις και Ιδρύματα*

Με βάση τα προηγούμενα δεδομένα και υποθέτοντας πως σε σχολεία, γραφεία, καταστήματα και μικρές βιομηχανικές επιχειρήσεις επικρατεί χαμηλό και μέσο επίπεδο ανθρώπινης δραστηριότητας για 8 ώρες κάθε μέρα, η μέγιστη τιμή υγρασίας είναι 1kg/day (2.2lb/day).

#### ➤ *Κατοικίες*

Με βάση διάφορα στοιχεία, το καθημερινό εσωτερικό φορτίο υγρασίας για μια οικογενειακή κατοικία ποικίλει από 4.3 έως 23kg/day. Το ανώτατο όριο όμως, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται στεγνωτήρια ρούχων ή λάμπες κηροζίνης που έρχονται σε απευθείας επαφή με τον εσωτερικό αέρα. Επίσης η ύπαρξη φυτών στο χώρο, θερμοκηπίων, ενυδρείων

και άλλων αντίστοιχων πηγών υγρασίας συμβάλλον πολύ στην αύξηση του καθημερινού φορτίου υγρασίας.

➤ *Μπάνια*

Η χρήση της μπανιέρας για χρονικό διάστημα 5min παράγει 0,6kg υδρατμών (1,3lb) ωστόσο αυτό η τιμή μπορεί να είναι χαμηλή λαμβάνοντας υπόψη ότι ο χρόνος που χρειάζεται για να γεμίσει και να αδειάσει μια μπανιέρα είναι μεγαλύτερος.

➤ *Οικιακές κουζίνες*

Σε μια κουζίνα, η ποσότητα υγρασίας που προκαλείται από την μαγειρική και το πλύσιμο των πιάτων για μια τετραμελή οικογένεια δημιουργεί περίπου 1,5kg/day (3.3lb/day). Ωστόσο, κουζίνες εστιατορίων και ξενοδοχείων παράγουν πολλαπλάσια υγρασία η οποία μπορεί να ξεφύγει σε κοινόχρηστους χώρους. Ο ατμός από ακάλυπτα κατσαρόλες και από τα πλυντήρια πιάτων έχει σαν αποτέλεσμα ο θερμός αέρας της κουζίνας να φτάνει σε σημείο κορεσμού.

➤ *Εξάτμιση από υγρές επιφάνειες*

Μερικά παραδείγματα υγρών επιφανειών σε κτίρια είναι τα παροδικά πλυμένα πατώματα, το πλύσιμο τροφών, οι πισίνες ακόμα και η συσσώρευση νερού σε μικρά κενά μεταξύ των επίπλων. Η εξάτμιση είναι ανάλογη με την διαφορά στην πίεση ατμών μεταξύ της υγρής επιφάνειας και του αέρα και του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας του νερού της υγρής επιφάνειας με τη θερμότητα να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την εξάτμιση. Γενικότερα, η υγρασία εξατμίζεται αργά από τις υγρές επιφάνειες ακόμα και στην περίπτωση που ο περιβάλλον αέρας είναι πολύ ξηρός ενώ η εξάτμιση γίνεται γρηγορότερα όταν το νερό που βρίσκεται στην επιφάνεια είναι θερμό.

➤ *Υγρασία στην κατασκευαστική δομή*

Τα περισσότερα δομικά υλικά περιέχουν υγρασία στο εσωτερικό τους η οποία απελευθερώνεται με πολύ αργούς ρυθμούς. Το σκυρόδεμα, πιο συγκεκριμένα, αποβάλλει περίπου 90kg/m<sup>3</sup> κατά τα δύο πρώτα έτη της κατασκευής του κτιρίου. Συνεπώς η ύπαρξη σκυροδέματος στην τοιχοποιία αποτελεί σοβαρή πηγή υγρασίας τα πρώτα έτη όμως δεν θα έπρεπε να αποτελεί μακροχρόνιο πρόβλημα. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης μια κατασκευής, ο ανεπαρκής αερισμός και η χρήση επιβραδυντικών ατμού εντείνουν το πρόβλημα της υγρασίας και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της πριν την ύπαρξη ουσιαστικής ξήρανσης.

### **Εξωτερικές πηγές**

➤ *Βροχή*

Στην περίπτωση που η βροχή εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο από τους τοίχους ή τις οροφές αποτελεί την σημαντικότερη πηγή υγρασίας. Το πραγματικό φορτίο υγρασίας λόγω των καιρικών συνθηκών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την ετήσια βροχόπτωση και την επιφάνεια επαφής. Παρά το γεγονός πως μια μικρή διαρροή νερού από μια καταιγίδα είναι απίθανο να προκαλέσει σοβαρό μακροπρόθεσμο πρόβλημα, οι μικρές διαρροές έχουν σαν αποτέλεσμα την συσσώρευση νερού στις κοιλότητες του κτιρίου. Στα κλιματιζόμενα κτίρια, η υγρασία μπορεί να εξατμιστεί όταν ο καιρός είναι ζεστός και να συμπυκνωθεί στις εσωτερικές ψυχρές επιφάνειες των τοίχων προκαλώντας ενδιάμεση συμπύκνωση. Εκτός αυτού, όταν το νερό της βροχής αφήνεται να μουλιάζει στα εξωτερικά δομικά υλικά, αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιδείνωσης της στεγανότητας των υλικών. Ειδικά στα θερμά



κλίματα αλλά και κατά ζέστης σε ψυχρά κλίματα, η υγρασία μέσα στα υλικά εξατμίζεται και μεταφέρεται με τη μορφή υδρατμών στον ψυχρότερο εσωτερικό αέρα των κλιματιζόμενων κτιρίων.

➤ *Πλημμυρισμένα- υγρά υπόγειοι και ενδιάμεσοι χώροι*

Το υγρό νερό, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας ρέει προς τα κάτω. Επίσης μπορεί να αναπτυχθεί υδροστατική πίεση και να αναγκάσει το νερό να εισέρθει στα δάπεδα και στους τοίχους μέσα από ανοίγματα. Ένα υγρό υπόγειο με επιφάνεια 60m<sup>2</sup> (645ft) μπορεί να εκπέμψει 6kg/hour (13lb/hour) ή 145kg/day (320lb/day). Ένα τμήμα της υγρασίας ξεφεύγει στην ύπαιθρο, στην πράξη όμως η μεγαλύτερη ποσότητα διεισδύει στην κτιριακή δομή μέσω των αγωγών και των πατωμάτων. Μια πρόσθετη φυσική διεργασία που επιτρέπει την είσοδο της υγρασίας στα θεμέλια είναι η τριχοειδής αναρρόφηση που μπορεί να μεταφέρει το συσσωρευμένο νερό που βρίσκεται κάτω από τα θεμέλια στον υπόγειο χώρο. Πρόκειται για την μεταφορά του νερού λόγω των επιφανειακών δυνάμεων τάσεις, μέσω των λεπτών πόρων στο έδαφος, το σκυρόδεμα, τα τούβλα, τα κονιάματα και άλλων δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στις κτιριακές κατασκευές.

➤ *Υγρός αέρας*

Στους κλιματιζόμενους χώρους, ο εξωτερικός αέρας του περιβάλλοντος που είναι συνήθως ζεστός και υγρός, είναι μια κύρια πηγή υγρασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανταλλαγή του εσωτερικού αέρα με τον εξωτερικό, τόσο αυξάνεται και το ποσοστό της υγρασίας που μεταφέρεται με την κίνηση του αέρα. Συνεπώς, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση από τον ρυθμό της διαρροής του αέρα και από τον ελεγχόμενο εξαερισμό του χώρου. Ο εξαερισμός απαιτείται για τους ανθρώπους καθώς και για τους απορροφητήρες και τους ανεμιστήρες ώστε να διατηρείται θετική πίεση αέρα στο κτίριο σε σχέση με τον εξωτερικό περιβάλλον. Σύμφωνα με το πρότυπο εγχειρίδιο ASHRAE σελ. 62- 89. "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", πρέπει να ικανοποιείται ελάχιστη απαίτηση φρέσκου αέρα 0,425-0,71m<sup>3</sup>/min (15- 25ft<sup>3</sup>/min) ανά άτομο και μεγαλύτερο σε περιπτώσεις που επιτρέπεται το κάπνισμα.

Στις κτιριακές εφαρμογές όπου η παρουσία ύδατος είναι πολύ συνηθισμένη και συναντάται κυρίως σε αέρια και σε υγρή φάση. Όπως αναφέρθηκε, για να περιγραφεί το φαινόμενο μεταφοράς της υγρασίας πρέπει να είναι γνωστή η κινητήριος δύναμη που εκκινεί την διαδικασία. Για την περίπτωση των δομικών υλικών παρατίθενται συγκεντρωμένα οι διαδικασίες μεταφοράς, οι φάσεις που συμμετέχουν και οι αιτίες που προκαλούν την μεταφορά, στον πίνακα 3.2 [11]

<b>Διαδικασία</b>	<b>Φάσεις</b>	<b>Αίτιο</b>
Αέρια διάχυση	Αέρια	Πίεση ατμών
Υγρή διάχυση	Υγρή	Συγκέντρωση
Επιφανειακή διάχυση	Προσρόφησης	Συγκέντρωση
Θερμική διάχυση	Αέρια, υγρή	Θερμοκρασία
Τριχοειδής ροή	Υγρή	Πίεση αναρρόφησης
Ροή συναγωγής	Αέρια	Πίεση αέρα
Βαρυτική ροή	Υγρή	Ύψος

**Πίνακας 3.2:** Μηχανισμοί μεταφοράς υγρασίας στις κτιριακές δομές [11]

### 3.3.2. Φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας

Η μεταφορά της υγρασίας σε ένα σώμα συνήθως οφείλεται στην μεταφορά θερμότητας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο περιοχών του υλικού (Νόμος Fourier) ή/και της μεταφοράς ηλεκτρονίων λόγω διαφοράς στην τάση (Νόμος Ohm). Γενικά, εξισώσεις μεταφοράς υγρασίας έχουν την παρακάτω μορφή:

$$J_B = -k \cdot \text{grad}\varphi_B \quad (3.7)$$

όπου η παράμετρος  $J_B$  δηλώνει το ρυθμό με το οποίο η ουσία B μεταφέρεται,  $\text{grad}\varphi_B$  είναι η κινητήριο δύναμη και  $k$  ο συντελεστής μεταφοράς, χαρακτηριστικός του υλικού που γίνεται η μεταφορά της υγρασίας.

Συνήθως ως  $J$  εκφράζεται ως το μέγεθος της ουσίας B που μεταφέρεται σε ένα επίπεδο της μοναδιαίας επιφάνειας κάθετα προς την κατεύθυνση της μεταφοράς στη μονάδα του χρόνου και ονομάζεται ροή ή ροή πυκνότητας της ουσίας B. Μια ροή είναι πολύ πιθανό να είναι τρισδιάστατη και συνεπώς πρέπει στο Καρτεσιανό σύστημα να αναλύεται σε τρεις συντεταγμένες  $J_{BX}$ ,  $J_{BY}$ ,  $J_{BZ}$  όπου περιγράφονται από την αντίστοιχη εξίσωση:

$$J_{Bi} = -k_i \cdot \left(\frac{d}{di}\right)\varphi_{Bi} \quad \text{όπου } i = X, Y, Z \text{ η κατεύθυνση της μεταφοράς υγρασίας και } k_i \text{ ο συντελεστής που περιγράφει την μεταφορά στον κάθε άξονα. Για τα ισότροπα υλικά δηλ. τα υλικά που διατηρούν τις ίδιες ιδιότητες σε ολόκληρο τον όγκο τους, ισχύει } k_x = k_y = k_z.$$

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία η εξίσωση μεταφοράς υγρασίας σε υγρή και αέρια φάση προκύπτουν ως εξής:

- Μεταφορά ατμών: 
$$m_v = -\mu \cdot \text{grad}p \quad (3.8)$$

με  $p$  (Pa) την πίεση ατμών,  $\mu$  (kg/ Pasm) η διαπερατότητα των υδρατμών

- Μεταφορά υγρού: 
$$m_l = -\mu_l \cdot \text{grad}c \quad (3.9)$$

όπου η εξίσωση περιγράφει ταυτόχρονα τις τρεις διαδικασίες της υγρής διάχυσης, της τριχοειδούς και της επιφανειακής ροής διότι είναι δύσκολο να διαχωριστούν.

Η πλειοψηφία των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στις κτιριακές κατασκευές είναι πορώδη με αποτέλεσμα οι πόροι να παρέχουν μεγάλη εσωτερική επιφάνεια για την συγκέντρωση μορίων νερού. Αντίθετα, ινώδη υλικά, όπως το ξύλο, παρατηρείται προσρόφηση υγρασίας στο ίδιο το κυτταρικό τοίχωμα. Η ποσότητα νερού που απορροφάται στα υγροσκοπικά υλικά εξαρτάται άμεσα από την σχετική υγρασία (RH) του περιβάλλοντα αέρα. Όταν η σχετική υγρασία αυξάνεται τα συγκεκριμένα υλικά απορροφούν υγρασία (προσρόφηση) και όταν ελαττώνεται χάνουν υγρασία (εκρόφηση). Η σχέση μεταξύ της σχετικής υγρασίας και της περιεκτικότητας σε υγρασία σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία απεικονίζεται με μια καμπύλη που ονομάζεται ισόθερμη καμπύλη προσρόφησης. Οι ισόθερμες καμπύλες που λαμβάνονται για την προσρόφηση δεν ταυτίζονται με εκείνες της εκρόφησης αλλά εμφανίζουν μια μικρή διαφορά που ονομάζεται υστέρηση. Σε υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, οι μικροί πόροι γεμίζουν με νερό μέσω της τριχοειδούς συμπύκνωσης. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία πρέπει να επιτυγχάνεται για 100% σχετική υγρασία, ωστόσο αυτό γίνεται πειραματικά μόνο σε συνθήκες κενού με βρασμό του υλικού ή με επαφή του υλικού με το νερό για εξαιρετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην πράξη, η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία ενός

πορώδους υλικού είναι χαμηλότερη και αυξάνει με την σχετική υγρασία, ειδικά αν η δεύτερη είναι πάνω από 80%, ενώ μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της υγρασίας.

- **Μηχανισμοί ροής υγρασίας**

Οι υδρατμοί και το υγρό νερό μεταφέρονται στο εσωτερικό του υλικού με μια ποικιλία μηχανισμών, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.2, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Διάχυση υδρατμών νερού με μερική κλίση πίεσης υδρατμών
- Μετατόπιση υδρατμών από την κίνηση του αέρα
- Τριχοειδής απορρόφηση του υγρού νερού σε πορώδη δομικά υλικά
- Ροή υγρού από τη βαρύτητα ή τις κλίσεις της πίεσης του αέρα.

Κατά το παρελθόν, οι στρατηγικές ελέγχου υγρασίας επικεντρωνόταν στην διάχυση υδρατμών μόνο. Η μετατόπιση των υδρατμών από την κίνηση του αέρα αντιμετωπιζόταν σαν επιφανειακό φαινόμενο και το νερό που προερχόταν από την βροχή ή το έδαφος αγνοούνταν τελείως. Ωστόσο, αυτοί οι μηχανισμοί είναι δυνατό να μετακινήσουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες υγρασίας σε σύγκριση με την διάχυση και συνεπώς η κίνηση του αέρα και του υγρού πρέπει να έχουν υψηλή προτεραιότητα στον έλεγχο της υγρασίας.

- **Διάχυση υδρατμών**

Η μεταφορά των υδρατμών πραγματοποιείται με διάχυση μέσω του αέρα στα οικοδομικά υλικά, συνήθως σε πολύ μικρές ποσότητες. Η διάχυση μπορεί να είναι σημαντική σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως εγκαταστάσεις ψύξης με ενσωματωμένα ψυγεία ή σε κτίρια όπου απαιτείται υψηλή εσωτερική μερική πίεση υδρατμών. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροής του ατμού νερού με διάχυση μέσω των υλικών, βασίζεται στο νόμο του Fick για τη διάχυση ενός πολύ αραιού αερίου (υδρατμός) σε ένα δυαδικό σύστημα (υδρατμών και ξηρού αέρα) σύμφωνα με την εξίσωση (3.7) που έχει δοθεί παραπάνω. Σύμφωνα με τη εξίσωση, η ροή υδρατμών με διάχυση παραλληλίζεται στενά με την εξίσωση Fourier για την ροή θερμότητας με αγωγή. Ωστόσο, η πραγματική διάχυση υδρατμών μέσω από ένα υλικό είναι πολύ πιο περίπλοκη από ό,τι υποδηλώνει η εξίσωση. Η διαπερατότητα υδρατμών είναι συνάρτηση της σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας και μπορεί να διαφέρει χωρικά λόγω των μεταβολών στο πορώδες του υλικού. Μέθοδοι δοκιμής για μέτρηση της διαπερατότητας υδρατμών περιγράφονται στο πρότυπο ASTM E96 "*Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Material*".

- **Ροή υδρατμών από τη κίνηση του αέρα**

Ο αέρας εκτός από θερμότητα μεταφέρει και τους υδρατμούς που περιέχει. Ακόμη και πικρές ροές αέρα μπορεί να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες υδρατμών σε σύγκριση με την διάχυση υδρατμών. Η ροή των υδρατμών λόγω του αέρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$m_v = Wm_a \approx \frac{0.62}{P_a} m_a p \quad (3.10)$$

όπου  $W$  ο λόγος υγρασίας του κινούμενου αέρα,  $m_a$  η ροή του αέρα,  $p$  η μερική πίεση υδρατμών,  $P_a$  η ατμοσφαιρική πίεση του αέρα.

- **Ροή νερού από τριχοειδή αναρρόφηση**

Η μοριακή έλξη της επιφάνειας και των μορίων νερού που αναπτύσσεται στο εσωτερικό των μικρών πόρων με διάμετρο μικρότερη από 0.1mm, προκαλεί τριχοειδή αναρρόφηση που ορίζεται ως:

$$s = \frac{2\cos\theta}{r} \quad (3.11)$$

όπου  $s$  η τριχοειδής αναρρόφησης,  $\sigma$  η επιφανειακή τάση του νερού,  $r$  η ισοδύναμη ακτίνα του τριχοειδούς,  $\theta$  η γωνία επαφής διαβροχής.

Η γωνία διαβροχής είναι η γωνία μεταξύ της καμπύλης επιφάνεια που σχηματίζει το νερό και η τριχοειδής επιφάνεια. Όσο μικρότερη είναι αυτή η γωνία, τόσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής αναρρόφηση. Σε υδρόφιλα υλικά, η επαφή διαβροχής είναι μικρότερη από  $90^\circ$  ενώ στα υδρόφοβα υλικά είναι μεταξύ  $90^\circ$  και  $180^\circ$ . Η τριχοειδής κίνηση του νερού διέπεται από τη κλίση της τριχοειδούς αναρρόφησης η οποία είναι μεγαλύτερη σε μικρότερα τριχοειδή αγγεία. Σε πόρους με σταθερή ισοδύναμη ακτίνα, το νερό κινείται προς τις ζώνες με μικρότερες γωνίες διαβροχής. Μολονότι η επιφανειακή τάση είναι φθίνουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας (με αυξημένη θερμοκρασία η επιφανειακή τάση μειώνεται) και το νερό κινείται προς ζώνες με χαμηλότερη θερμοκρασία, η επίδραση της είναι μικρή σε σύγκριση με την επίδραση της ισοδύναμης διαμέτρου πόρων και της γωνίας επαφής.

Ο όρος υγρασία περιλαμβάνει τον ατμό και το υγρό. Στην έναρξη του τριχοειδούς, εμφανίζεται ισοθερμική και μη ισοθερμική ροή υγρασίας στις φάσεις του υγρού και του ατμού στην περίπτωση που τα τριχοειδή δεν είναι εντελώς γεμάτα με νερό. Στη φάση ατμών η μεταφορά υγρασίας με διάχυση προκαλείται από διαφορά στην πίεση ατμών κορεσμού στα τριχοειδή αγγεία.

#### ➤ **Ισόθερμη ροή υγρασίας**

Στα πορώδη υδροσκοπικά υλικά, είναι σχεδόν αδύνατο να γίνει πειραματική διάκριση μεταξύ της ροής υγρού με αναρρόφηση και της ροής των υδρατμών με διάχυση. Αυτά τα υλικά έχουν πολύπλοκο πορώδες και κάθε επιφάνεια αποτελείται από τμήματα πόρων γεμάτων υγρό και τμήματα πόρων γεμάτων υδρατμών με αποτέλεσμα οι ροές υδρατμών και υγρού αντιμετωπίζονται ως παράλληλες διαδικασίες. Αυτό επιτρέπει την έκφραση της ροής υγρασίας ως το άθροισμα δύο εξισώσεων μεταφοράς, μίας που χρησιμοποιεί ως κινητήριο δύναμη την πίεση υδρατμών να οδηγήσει την ροή των υδρατμών με διάχυση και μίας που χρησιμοποιεί την τριχοειδή αναρρόφηση ή την σχετική υγρασία σαν κινητήριες δυνάμεις που οδηγούν το υγρό νερό.

Η εξίσωση της ισοθερμικής ροής υγρασίας, χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς  $k_\phi$  και  $k_s$  εάν η κινητήρια δύναμη είναι η σχετική υγρασία και η αναρρόφηση αντίστοιχα, είναι:

$$m_m = -k_s \text{grad}(s) - k_\phi \text{grad}(\phi) \quad (3.12)$$

με  $m_m$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) η ροή υγρασίας,  $k_s$  ( $\text{kg}/\text{msPa}$ ) η διαπερατότητα υγρασίας που σχετίζεται με την αναρρόφηση και  $k_\phi$  ( $\text{kg}/\text{msPa}$ ) η διαπερατότητα υγρασίας που σχετίζεται με την σχετική υγρασία.

#### ➤ **Μη ισόθερμη ροή υγρασίας**

Σε μη ισοθερμικές συνθήκες, η θερμοκρασία ενεργεί σαν πρόσθετη κινητήριος δύναμη. Η επίδρασή της στην ροή του υγρού είναι ήσσονος σημασίας αλλά μπορεί να είναι σημαντική για την ροή του ατμού. Η εξίσωση που περιγράφει την ροή της υγρασίας στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι:

$$m_m = -k_i \text{grad}(i) - k_T \text{grad}(T) \quad (3.13)$$

όπου  $i = s$ ,  $\phi$  ανάλογα με την παρουσία αναρρόφησης ή σχετικής υγρασίας,  $k_T$  ( $\text{kg}/\text{msPa}$ ) η θερμική διαπερατότητα υγρασίας και  $T$  η θερμοκρασία σε Kelvin.

### 3.4. Επίδραση της υγρασίας στην μεταφορά θερμότητας

Η υγρασία εισέρχεται σε ένα κτιριακό κέλυφος από ποικίλα σημεία ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν και η ενσωματωμένη υγρασία, τις διαρροές νερού, την βροχή καθώς και διαρροές από τα θεμέλια. Οι υδρατμοί ενεργοποιούν την αναρρόφηση στα υλικά του κελύφους και η ροή υδρατμών πάνω και μέσα στο κέλυφος μπορεί να προκαλέσει συμπύκνωση στις μη πορώδεις επιφάνειες [38]. Η ορατή και αόρατη υποβάθμιση που προκαλείται από την απορροφημένη υγρασία και την διαβροχή έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής ενός κτιρίου. Οι αόρατες συνέπειες περιλαμβάνουν την μείωση της θερμικής αντοχής του κτιρίου και των μονωτικών υλικών και την μείωση της αντοχής και της ακαμψίας των θεμέλιων υλικών. Τα ορατά αποτελέσματα της υγρασίας αποτελούν η μούχλα στις επιφάνειες, αποσύνθεση των υλικών με βάση το ξύλο, ο θρυμματισμός της τοιχοποιίας και του σκυροδέματος που προκαλούνται από κύκλους ψύξης-απόψυξης, η ενυδάτωση των πλαστικών υλικών, η διάβρωση των μετάλλων, η ζημιά από την διόγκωση των υλικών και η μείωση της εξωτερικής εμφάνισης του κτιρίου. Επιπλέον τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε δυσάρεστες οσμές και σπόρια μούχλας στον αέρα δυσχεραίνοντας τις συνθήκες διαβίωσης των κατοίκων και απειλώντας την υγεία τους.

Η διογκωμένη πολυστερίνη, όπως και όλα τα μονωτικά υλικά, χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα που έχουν να μειώνουν την ταχύτητα της μετάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό τους. Η θερμομονωτική τους ιδιότητα οφείλεται στην χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας που επιτυγχάνουν και που χαρακτηρίζει κάθε υλικό. Η χρησιμότητα της θερμομόνωσης συνίσταται στην αντιμετώπιση θεμάτων υγιεινής και ποιότητας των δομικών κατασκευών. Εξασφαλίζει άνετη και υγιεινή διαβίωση στους ενοίκους, μειώνει το κόστος εγκατάστασης θέρμανσης και ελαττώνει τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας.

Η παρουσία υγρασίας στα μονωτικά υλικά επηρεάζει την θερμομονωτική τους απόδοση καθώς το νερό έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τον αέρα ή άλλα αέρια πλήρωσης που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των υλικών. Στα πορώδη υλικά, που μπορούν να θεωρηθούν ως ένα στερεό μέσο με πόρους γεμάτους αέρα η υγρασία έχει τις εξής μορφές [11]:

- Σαν χύμα νερό στους χονδροειδής πόρους
- Σαν συμπυκνωμένο υγρό νερό υπό μορφή τριχοειδούς στους λεπτούς πόρους
- Σαν υδρατμοί στους γεμάτους αέρα πόρους
- Σαν απορροφημένες στοιβάδες μορίων νερού στην εσωτερική επιφάνεια των τοιχωμάτων των πόρων
- Σαν νερό φυσιο-χημικά δεσμευμένο στο υλικό που αντιπροσωπεύει τη στερεή μήτρα.

Η υγρασία έχει σαν συνέπεια να δημιουργούνται ποικίλα ρεύματα μεταφοράς θερμότητας στους πόρους ενός υλικού με κυριότερα εκείνα που δημιουργούνται λόγω αγωγής μεταξύ του στερεού υλικού με τον υγρό αέρα και του στερεού υλικού με τους πόρους, με αγωγή μεταξύ του νερού που είναι δεσμευμένο στα τοιχώματα των πόρων και με ακτινοβολία μεταξύ των τοιχωμάτων των πόρων. Μια πρόσθετη ροή θερμότητας αναπτύσσεται λόγω της ατμοποίησης και της συμπύκνωσης του νερού στο εσωτερικό των πόρων ή σε μια τοπική επιφάνεια. Η διαφορά θερμοκρασίας που επικρατεί στα τοιχώματα οδηγεί την υγρασία να κινείται προς μία κατεύθυνση σε φάση ατμών και να επιστρέφει σε υγρή φάση ακόμη και αν η διαφορά στην υγρασία είναι σχεδόν μηδενική.

Κατά την κίνηση της υγρασίας σε ένα υλικό, μεταφέρεται ενθαλπία η οποία συμβάλλει στην μεταφορά θερμότητας. Οι ροές υγρασίας που πραγματοποιούνται σε φάση ατμού έχουν πολύ υψηλότερη ενθαλπία από την υγρασία που ρέει σε υγρή φάση, διότι όταν συμβαίνουν αλλαγές φάσεις

η ενέργεια απελευθερώνεται και απορροφάται. Επίσης, είναι πιθανό σε ορισμένες περιπτώσεις να παρατηρείται και η στερεά φάση του νερού (πάγος) και τότε πρέπει να εξετάζονται και οι αλλαγές μεταξύ και των τριών φάσεων. Για να περιγραφούν και να αντιμετωπιστούν οι διαφορετικές επιπτώσεις της υγρασίας στην μεταφορά θερμότητας, συνηθίζεται να διαιρείται η ροή της θερμότητας σε τρεις συνιστώσες.

- I) Θερμορροή  $q_I \Rightarrow$  Η θερμορροή προκαλείται από μια θερμοκρασιακή κλίση σε συνθήκες ισορροπίας της υγρασίας, δηλαδή δεν παρατηρείται μεταφορά υγρασίας. Η ροή αυτή επηρεάζεται από διάφορους μηχανισμούς, μεταξύ των οποίων είναι και η περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία.
- II) Θερμορροή  $q_{II} \Rightarrow$  Μεταφορά θερμότητας από την ροή της υγρασίας όπου οι υδρατμοί και το νερό μεταφέρουν τις αντίστοιχες ενθαλπίες. Οι μηχανισμοί μεταφοράς υγρασίας θεωρούνται πως περιγράφονται πλήρως από την θερμοκρασιακή κλίση καθώς και μια κλίση στην περιεχόμενη υγρασία μαζί με άλλες σχετικές ιδιότητες του υλικού. Η μεταφορά υγρασία από τις κινήσεις του αέρα (συναγωγή υγρασίας) θεωρείται πως έχουν μόνο τοπικές επιπτώσεις.
- III) Θερμορροή  $q_{III} \Rightarrow$  Μεταφορά θερμότητας που οφείλεται στις αλλαγές φάσεων της υγρασίας.

Η ποσότητα και η κατανομή της υγρασίας σε ένα υλικό πάντοτε επηρεάζει το  $q_I$ . Για να είναι δυνατός ο καθορισμός της συγκεκριμένης συνιστώσας πρέπει να είναι γνωστές οι συνθήκες υγρασίας στο υλικό και η σχέση της περιεχόμενης υγρασίας και των συνεπειών στην θερμική αγωγιμότητα. Αυτή η σχέση είναι καθορισμένη για κάθε υλικό. Οι συνιστώσες  $q_{II}$  και  $q_{III}$  εξαρτώνται μόνο από το μέγεθος της μεταφοράς υγρασίας μέσα στο υλικό και για τον προσδιορισμό τους είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι κινήσεις της υγρασίας στο εσωτερικό του υλικού.

Για τα μονωτικά υλικά, όπως η διογκωμένη πολυστερίνη, οι θερμοροές  $q_{II}$ ,  $q_{III}$  λαμβάνονται ως μηδενικές. Αυτό συμβαίνει διότι είναι σχετικά αδιαπέραστα στην διάχυση ατμών με αποτέλεσμα οι ροές υγρασίας μέσα στο υλικό να είναι πολύ μικρές και οι παραπάνω συνιστώσες να λαμβάνουν πολύ μικρή τιμή συγκριτικά με την  $q_I$ . Η μεταφορά θερμότητας  $q_{III}$  λόγω των αλλαγών φάσης της υγρασίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε υλικά που είναι διαπερατά, όπως ο ορυκτοβάμβακας, επειδή μπορεί να είναι του ίδιου μεγέθους με την αύξηση της θερμορροής λόγω της παρουσίας υγρασίας στο υλικό.

#### • Ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας

Η πλήρης κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε πορώδη υλικά είναι αναγκαία για τον προσδιορισμό της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας στην υγρή μόνωση καθώς και για την αξιολόγηση της αύξησης της θερμορροής εξαιτίας της παρουσίας της υγρασίας. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος οφείλεται στην ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας και συνεπώς στη σύζευξη μεταξύ της θερμοκρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας, που περιγράφεται από ένα σύνολο συζευγμένων εξισώσεων όπως προκύπτουν από τους νόμους διατήρησης ενέργειας και μάζας.

Τα κλασσικά μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται θεωρούν δύο κινητήριες δυνάμεις για την έκφραση της μεταφοράς μάζας: τις κλίσεις θερμοκρασίας και υγρασίας. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι γενικά αποδεκτό πως η μεταφορά θερμότητας λόγω ροών υγρασίας είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την μεταφορά θερμότητας λόγω μεταβολών φάσης. Συνεπώς προκύπτει η γενικευμένη εξίσωση:

$$(\rho c)^* \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_l L D_{\theta v} \nabla \theta_l + (\lambda + \rho_l L D_{T v}) \nabla T) \quad (3.14)$$

όπου  $\theta_i$  η περιεχόμενη υγρασία (κατά όγκο),  $D_{\theta i}$  και  $D_{T i}$  οι συντελεστές μεταφοράς υγρασίας υγρής φάσης,  $D_{\theta v}$  και  $D_{T v}$  οι συντελεστές μεταφοράς υγρασίας αέριας φάσης,  $t$  ο χρόνος,  $T$  η θερμοκρασία,  $L$  η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης,  $(\rho c)^*$  η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα του πορώδους μέσου,  $\rho_i$  η πυκνότητα του υγρού και  $\lambda$  η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα στο υγρό πορώδες μέσο.

### Προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας υγρών μονωτικών υλικών

Σε ένα υγρό μονωτικό υλικό η ροή θερμότητας αποτελεί το άθροισμα της εξίσωσης Fourier και της θερμότητας που αναπτύσσεται από την μεταφορά των υδρατμών και του νερού κατά την ατμοποίηση και την συμπύκνωση:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T + g_v h_v + g_l h_l \quad (3.15)$$

όπου  $g_v$ ,  $g_l$  η πυκνότητα της ροής της υγρασίας και  $h_v$ ,  $h_l$  η ενθαλπία της δεδομένης φάσης.

Οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας σε ξηρά και σε υγρά δοκίμια γίνεται με μεθόδους μόνιμης και μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας.

### Μέθοδοι μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας

Μόλις εφαρμοστεί μια διαφορά θερμοκρασίας σε ένα υγρό υλικό, αναπτύσσεται κίνηση τόσο του υγρού όσο και του ατμού. Για τον προσδιορισμό της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας κρίνεται απαραίτητο να αποφεύγεται η κίνηση της υγρασίας σε οποιαδήποτε μορφή.

Οι τεχνικές μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας στα ξηρά υλικά βασίζονται στον νόμο μεταφοράς θερμότητας με αγωγή που λαμβάνει την μορφή:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{dry} \nabla T) \quad (3.16)$$

Στην περίπτωση των υγρών υλικών, η εξίσωση (3.13) χωρίς μετακίνηση και για χρονικά σταθερή κατανομή της υγρασίας ( $t=0$ ,  $\theta_i=0$ ) προκύπτει:

$$(\rho c)^* \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla((\lambda + \rho_l L D_{T v}) \nabla T) \quad (3.17)$$

Συγκρίνοντας τα μέλη των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει πως οι δυναμικές μέθοδοι μετρούν μια ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα η οποία είναι:

$$\lambda_{eq} = \lambda + \rho_l L D_{T v} \quad (3.18)$$

### Μέθοδοι μόνιμης μετάδοσης θερμότητας

Σε ένα κλειστό σύστημα που δεν υπάρχει συναλλαγή μάζας και επικρατούν σταθερές συνθήκες ισχύει:  $\vec{g} = \vec{g}_v + \vec{g}_l = 0$  και η εξίσωση (3.14) γίνεται:

$$\left. \begin{aligned} \vec{q} &= -\lambda \vec{\nabla} T + \vec{g}_v (h_v - h_l) \\ L &= h_v - h_l \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T + \vec{g}_v L \quad (3.19)$$

Η πυκνότητα της ροής της υγρασίας κατά την ατμώδη φάση μπορεί να γραφτεί

$\vec{g}_v = -\rho_l (D_{\theta v} \vec{\nabla} \theta_l + D_{T v} \vec{\nabla} T)$  που σε συνδυασμό με την εξίσωση (3.18) προκύπτει η σχέση:

$$\vec{g}_v = -\rho_l \left( D_{\theta v} \frac{D_T}{D_\theta} + D_{Tv} \right) \vec{\nabla} T \Rightarrow \vec{g}_v \approx -\rho_l D_{Tv} \vec{\nabla} T \quad (3.20)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις προκύπτει  $\vec{q} = -(\lambda + \rho_l D_{Tv} L) \vec{\nabla} T$  που δείχνει πως και οι μέθοδοι μόνιμης μετάδοσης θερμότητας υπολογίζουν μια ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα διαφορετική από την πραγματική θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$ :

$$\lambda_{eq} = \lambda + \rho_l L D_{Tv} \quad (3.21)$$

### **Ειδικές περιπτώσεις**

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η μεταφορά υγρασίας στην υγρή φάση είναι πολύ μικρή έως μηδενική και μπορεί να αγνοηθεί ( $\vec{g}_l = 0$ ), οπότε διαμορφώνεται η παρακάτω εξίσωση:

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T + \vec{g}_v h_v \Rightarrow \vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T + \vec{g}_v L$$

Δύο είναι οι περιπτώσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

- $\vec{g}_v L \ll \lambda \vec{\nabla} T$ , σε περιπτώσεις αδιαπέραστων υλικών που η διάχυση ατμού είναι πολύ χαμηλή όπως όπως είναι η περίπτωση της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)
- $\vec{g}_v = 0$ , για περιπτώσεις κλειστού συστήματος που έχει επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση.

Στις δύο αυτές περιπτώσεις η θερμοροή προκύπτει από την περίπτωση της μονοδιάστατης ροής θερμότητας που χαρακτηρίζεται από τον νόμο Fourier και την εξίσωση (3.1)

$$q = -\lambda \cdot \Delta T / \Delta x$$

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, για τα ξηρά και εμβαπτισμένα δοκίμια διογκωμένης πολυστερίνης που εξετάζονται στην παρούσα πειραματική ανάλυση, οι σταθερές και οι δυναμικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν προσδιορίζουν την φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση.



## 4. Μεθοδολογία και πειραματική εγκατάσταση για την μέτρηση της υδαταπορρόφησης

### 4.1. Μέθοδοι εμβάπτισης

Όπως έχει προαναφερθεί, σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η μελέτη της μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας σε δείγματα διογκωμένου πολυστυρενίου κατά την απορρόφηση υγρασίας. Το πείραμα εκτελέστηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς που θέτει το πρότυπο για μερική και ολική βύθιση δειγμάτων από διάφορα υλικά: ΕΛΟΤ EN 12087 **«Θερμομονωτικά προϊόντα για κτιριακές εφαρμογές- Προσδιορισμός των μακροχρόνιας απορρόφησης με εμβάπτιση»**

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο υπάρχουν δύο μέθοδοι:

- Μέθοδος 1 => μερική εμβάπτιση
- Μέθοδος 2 => ολική εμβάπτιση

Η μακροπρόθεσμη απορρόφηση υγρασίας με τη μέθοδο της μερικής βύθισης σκοπό έχει να προσομοιώσει την απορρόφηση νερού που προκαλείται από την μακροπρόθεσμη έκθεση ενός υλικού σε συνθήκες υγρασίας. Αντίθετα η μέθοδος της ολικής εμβάπτισης δεν συνδέεται άμεσα με τις επικρατούσες συνθήκες, αλλά έχει αναγνωριστεί σαν διαδικασία ελέγχου για κάποια προϊόντα σε μερικές εφαρμογές.

Σημαντική προϋπόθεση και για τις δύο εμβάπτισεις είναι το νερό που χρησιμοποιείται να είναι σε θερμοκρασία  $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$  σε όλη την διάρκεια που είναι σε επαφή με τα υλικά. Η μέτρηση της θερμοκρασίας γινότανε καθημερινά με ειδικό πολύμετρο και παρατηρήθηκε πως η θερμοκρασία του νερού ήτανε πάντα μέσα στα όρια που επιβάλλονται από το πρότυπο.

### 4.2. Προδιαγραφές και προετοιμασία των δειγμάτων

Τα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν για την διεξαγωγή του πειράματος πρέπει να είναι τετράγωνα με τετράγωνες κομμένες άκρες και μήκος πλευρών  $(200\pm 1)\text{mm}$ . Το πάχος των δοκιμίων πρέπει να είναι προκαθορισμένο και να μην έχει προκύψει από οποιαδήποτε επεξεργασία παχύτερων δειγμάτων σε λεπτότερα. Επιλέχθηκε η τιμή των 30mm, που χρησιμοποιείται ευρέως στην εσωτερική θερμομόνωση κτιρίων.

Ο αριθμός τους καθορίζεται από το σχετικό ευρωπαϊκό πρότυπο για δείγματα EPS: ΕΛΟΤ EN 13163 **« Θερμομονωτικά προϊόντα κτιρίων- Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη- Προδιαγραφή»**. Για την περίπτωση της μακροχρόνιας απορρόφησης ύδατος από εμβάπτιση, ο ελάχιστος αριθμός δειγμάτων που απαιτούνται είναι τρία από κάθε ομάδα/κατηγορία.

Ο εγκλιματισμός των δειγμάτων πριν την βύθιση τους πρέπει να γίνεται σε χώρο θερμοκρασίας  $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$  για ελάχιστο διάστημα 6 ωρών. Σε περίπτωση αμφισβήτησης, τα δοκίμια πρέπει να φυλάσσονται σε συνθήκες θερμοκρασίας  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  και σχετικής υγρασίας  $(50\pm 5)\%$  RH για τουλάχιστο 14 ημέρες πριν την δοκιμή.

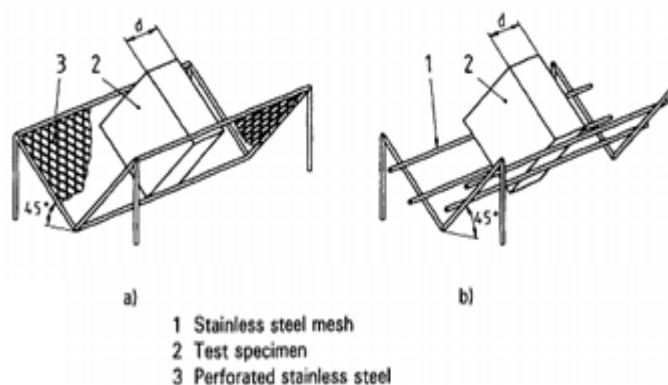
### 4.3. Ανάλυση μεθόδων εμφάπτισης

#### 4.3.1. Μακροπρόθεσμη απορρόφηση ύδατος με Μερική εμφάπτιση

Το δείγμα παραμένει μερικώς βυθισμένο σε νερό σταθερής στάθμης για ελάχιστη περίοδο 28 ημερών. Πριν την τοποθέτηση τους στη δεξαμενή, τα δείγματα ζυγίζονται σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας 0,01gr της εταιρείας OHAUS, για τον προσδιορισμό της αρχικής τους μάζας. Εν συνεχεία τοποθετούνται στην δεξαμενή και γίνεται η πρόσθεση του νερού μέχρις ότου η κάτω επιφάνεια των δειγμάτων απέχει  $(10 \pm 2)$ mm από την επιφάνεια του νερού. Η στάθμη πρέπει να διατηρείται σταθερή για όλο το χρονικό διάστημα με πρόσθεση της απαιτούμενης ποσότητας ύδατος. Η περίσσεια νερού που προσκολλάται στην επιφάνεια- δεν έχει απορροφηθεί από το δείγμα- απομακρύνεται με την μέθοδο της *αποστράγγισης* ή με την μέθοδο της *αφαίρεσης της αρχικής πρόσληψης νερού*.

- **Μέθοδος αποστράγγισης ύδατος**

Με το πέρας του απαραίτητου χρονικού διαστήματος των 28 ημερών τα δοκίμια αφήθηκαν να στραγγίξουν σε χαλύβδινη διάταξη πλέγματος με κλίση  $45^\circ$  για χρόνο  $(10 \pm 0,5)$  min. Αμέσως μετά προσδιορίστηκε με ζύγιση η νέα μάζα που προέκυψε λόγω της απορροφημένης υγρασίας.



**Εικόνα 4.1:** Διάταξη αποστράγγισης [6]

- **Μέθοδος της αφαίρεση της αρχικής πρόσληψης ύδατος**

Το δοκίμιο τοποθετείται στην δεξαμενή μερικής βύθισης όπως περιγράφηκε παραπάνω για 10s μόνο, αφού πρώτα έχει μετρηθεί η αρχική του μάζα. Στη συνέχεια πρέπει μέσα σε 5s να τοποθετηθεί σε ένα δοχείο γνωστής μάζας και τα ζυγίζουμε ώστε να προσδιοριστεί η συνολική μάζα με την αρχική πρόσληψη νερού. Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία, το δείγμα βυθίζεται και πάλι στη δεξαμενή σύμφωνα με τους κανονισμούς του προτύπου, όπου και παραμένει για 28 ημέρες. Όταν περάσει η συγκεκριμένη περίοδος επαναλαμβάνεται η διαδικασία της ζύγισης με χρήση του δοχείου γνωστής μάζας, οπότε προσδιορίζεται και η τελική μάζα του δοκιμίου.

Η μέθοδος εφαρμόζεται μόνο αν η αρχική πρόσληψη νερού είναι μικρότερη ή ίση με  $0,5 \text{kg/m}^2$ , η οποία υπολογίζεται από την εξής έκφραση:

$$\frac{m_1 - m_0}{A_p} \leq 0,5 \quad (4.1)$$

όπου  $m_0$  (kg) η αρχική μάζα του δείγματος όταν αυτό είναι τελείως στεγνό

$m_1$  (kg) η μάζα του δείγματος με την αρχική πρόσληψη νερού  
 $A_p$  (m<sup>2</sup>) το εμβαδό της βυθισμένης επιφάνειας του δείγματος.

- **Υπολογισμός απορρόφησης ύδατος**

Το μέγεθος που μας ενδιαφέρει στην μερική εμβάπτιση είναι η απορρόφηση χιλιογράμμων νερού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας του δοκιμίου:  **$W_{lp}$  [kg/m<sup>2</sup>]**. Ο καθορισμός της τιμής διαφέρει ανάλογα με την μέθοδο που έχει επιλεγεί για την απομάκρυνση της περίσσειας νερού από τις επιφάνειες του δοκιμίου.

- Αποστράγγιση:  $W_{lp} = (m_{28} - m_0) / A_p$  (4.2)

- Αφαίρεση αρχικής πρόσληψης νερού:  $W_{lp} = (m_{28} - m_1) / A_p$  (4.3)

όπου  $m_1$  (kg) η μάζα του δείγματος με την αρχική πρόσληψη νερού  
 $m_0$  (kg) η αρχική μάζα του δείγματος όταν αυτό είναι τελείως στεγνό  
 $m_{28}$  (kg) η τελική μάζα του δείγματος μετά από μερική βύθιση 28 ημερών  
 $A_p$  (m<sup>2</sup>) το εμβαδό της βυθισμένης επιφάνειας του δείγματος.

#### 4.3.2. Μακροπρόθεσμη απορρόφηση ύδατος με Ολική εμβάπτιση

Το δείγμα παραμένει ολικώς βυθισμένο σε νερό σταθερής στάθμης για περίοδο μεγαλύτερη των 28 ημερών, αφού έχει μετρηθεί η αρχική τους μάζα. Η στάθμη του νερού βάσει προτύπου είναι (50±2)mm πάνω από την άνω επιφάνεια του δείγματος και να διατηρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια. Η περίσσεια νερού απομακρύνεται με τρεις μεθόδους εκ των οποίων οι δύο είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

- **Αποστράγγιση ύδατος**

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω για την μερική βύθιση. Με το πέρας του απαραίτητου χρονικού διαστήματος των 28 ημερών τα δοκίμια αφέθηκαν να στραγγίξουν σε χαλύβδινη διάταξη πλέγματος με κλίση 45° για χρόνο (10±0,5)min. Αμέσως μετά προσδιορίστηκε με ζύγιση η νέα μάζα που προέκυψε λόγω της απορροφημένης υγρασίας.

- **Αφαίρεση της αρχικής πρόσληψης ύδατος**

Η μόνη διαφορά με την περίπτωση της μερικής εμβάπτισης είναι πως το δοκίμιο τοποθετείται για 10s στην δεξαμενή ολικής βύθισης και συνεπώς πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω έκφραση:

$$\frac{m_1 - m_0}{A_t} \leq 0,5 \quad (4.4)$$

όπου  $A_t$ (m<sup>2</sup>) η συνολική επιφάνεια του δείγματος που εκτίθεται στο νερό.

### • Υπολογισμός απορρόφησης ύδατος

Το μέγεθος που μας ενδιαφέρει στην ολική εμφάνιση είναι η απορρόφηση χιλιόγραμμων νερού ανά ποσοστό όγκου του δοκιμίου:  $W_{lt}$  [%]. Ο καθορισμός της τιμής διαφέρει ανάλογα με την μέθοδο που έχει επιλεγεί για την απομάκρυνση της περίσσειας νερού από τις επιφάνειες του δοκιμίου.

$$\text{- Αποστράγγιση: } W_{lt} = \frac{m_{28}-m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w} \quad (4.5)$$

$$\text{- Αφαίρεση αρχικής πρόσληψης νερού: } W_{lt} = \frac{m_{28}-m_1}{V} \times \frac{100}{\rho_w} \quad (4.6)$$

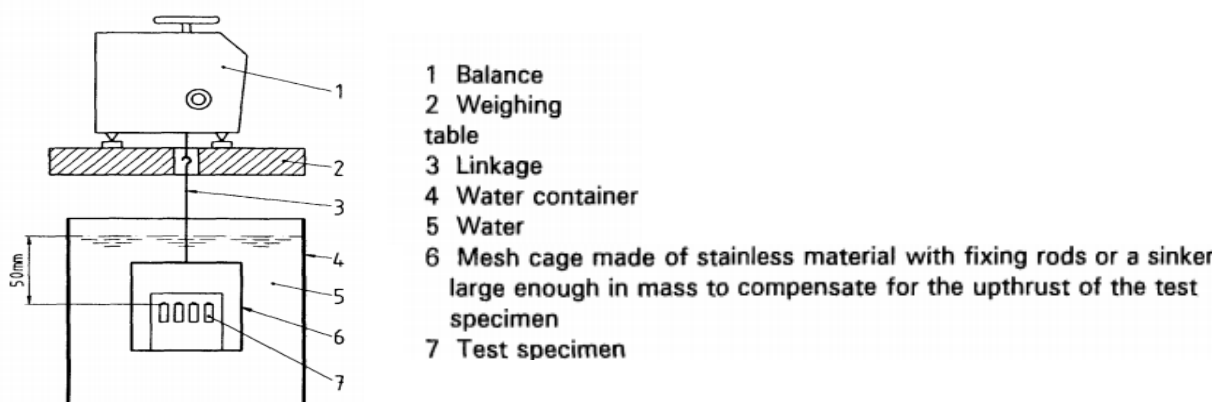
όπου  $m_1$ (kg) η μάζα του δείγματος με την αρχική πρόσληψη νερού  
 $m_0$  (kg) η αρχική μάζα του δείγματος όταν αυτό είναι τελείως στεγνό  
 $m_{28}$ (kg) η τελική μάζα του δείγματος μετά από ολική βύθιση 28 ημερών  
 $V$ (m<sup>3</sup>) ο αρχικός όγκος του δείγματος  
 $\rho_w$ η πυκνότητα του νερού, ίση με 1000kg/m<sup>3</sup>

Ωστόσο στην περίπτωση της ολικής εμφάνισης υπάρχει και μια τρίτη μέθοδος για τον προσδιορισμό της τελικής μάζας του βυθισμένου δοκιμίου που όμως δεν χρησιμοποιείται συχνά λόγω της πολυπλοκότητάς της.

### • Τρίτη μέθοδος- Εμβάπτιση με κλουβί

Αρχικά μετρούνται οι διαστάσεις του δείγματος ( $l_0, b_0, d_0$ ) σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN12085: «Thermal insulating products for building applications - Determination of linear dimensions of test specimens». Το δείγμα ζυγίζεται και τοποθετείται σε οριζοντίως σε ένα άδειο κλουβί γνωστής μάζας και βυθίζεται στην δεξαμενή ολικής βύθισης ενώ ταυτόχρονα κρέμεται από μια ζυγαριά, όπως ορίζει το πρότυπο για 28 ημέρες. Τυχόν φυσαλίδες που δημιουργούνται στην επιφάνεια του δείγματος, αφαιρούνται με μια βούρτσα ή με ανάδευση του νερού. Το κλουβί πρέπει να ισορροπεί έτσι ώστε πάντα η στάθμη του νερού να είναι σταθερή και σε απόσταση (50±2)mm από την άνω επιφάνεια του δείγματος.

Αφού περάσουν τουλάχιστον 28 ημέρες, καθορίζεται η νέα μάζα της βυθισμένης διάταξης και μετρούνται οι νέες διαστάσεις του δοκιμίου ( $l_1, b_1, d_1$ ) με ακρίβεια 0,5mm.



Εικόνα 4.2: Διάταξη εμβάπτισης κλουβί [6]

Ο υπολογισμός της απορρόφησης ύδατος  $W_{28}$  της συγκεκριμένης μεθόδου γίνεται με επίλυση της εξίσωσης:

$$W_{28} = \frac{m_{28} + V_1 \times \rho_w - m_0 - m_1}{V_0 \times \rho_w} \times 100(\%) \quad - \text{ γίνεται στρογγυλοποίηση στο } 0,1\% \quad (4.7)$$

όπου  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_{28}$  έχουν ορισθεί παραπάνω,  $V_0 = l_0 \times b_0 \times d_0$  ( $m^3$ ) ο αρχικός όγκος του δείγματος,  $V_1 = l_1 \times b_1 \times d_1$  ( $m^3$ ) ο τελικός όγκος του δείγματος,  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού, ίση με  $1000 \text{ kg/m}^3$

#### ➤ **Επιλογή μεθόδου υπολογισμού της απορροφημένης υγρασίας**

Λόγω του μεγάλου αριθμού των δειγμάτων και του περιορισμένου χρόνου, χρησιμοποιήθηκε η λιγότερο περίπλοκη μέθοδος που είναι αυτή της αποστράγγισης.

Συνεπώς οι σχέσεις (4.2) και (4.5) χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της υγρασίας που απορρόφησε κάθε δείγμα:

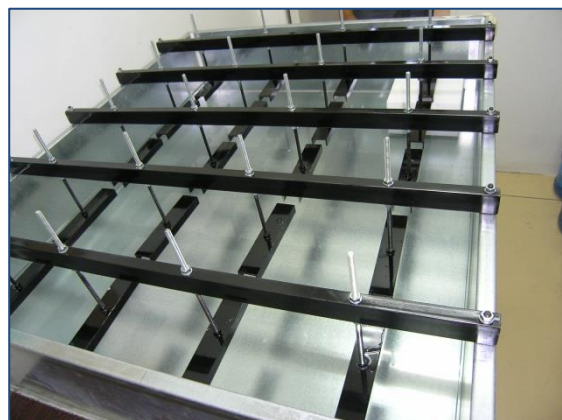
- Μερική εμβάπτιση:  $W_{tp} = \frac{(m_{28} - m_0)}{A_p} \text{ [kg/m}^2\text{]}$
- Ολική εμβάπτιση:  $W_{lt} = \frac{m_{28} - m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w} \text{ [%]}$

### 4.4. Σχεδιασμός δεξαμενών ολικής και μερικής βύθισης

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων κατασκευάστηκαν δύο δεξαμενές από λαμαρίνα γαλβανιζέ. Οι διαστάσεις της κάθε μίας είναι  $1.20 \times 1.00 \text{ m}^2$  και μπορεί να δεχτεί έως και  $5 \times 4 = 20$  δοκίμια. Για την στήριξη των δοκιμίων στην μερική εμβάπτιση κατασκευάστηκε πλέγμα αλουμινίου προφίλ σχήματος 'Π' και τοποθετήθηκε στον πάτο της δεξαμενής για να πατάνε σε αυτό τα δοκίμια. Επίσης χρειάστηκε η τοποθέτηση πρόσθετων ράβδων πάνω από τα βυθισμένα δείγματα με σκοπό να εξασφαλιστεί η σταθερότητάς τους σε μία συγκεκριμένη θέση.



**Εικόνα 4.3:** Δεξαμενή μερικής εμβάπτισης



**Εικόνα 4.4:** Δεξαμενή ολικής εμβάπτισης

Για την στήριξη των δοκιμίων με ολική εμβάπτιση, επειδή το υλικό επιπλέει αρκετά καλά, αρκούσε να του ασκηθεί μόνο μία δύναμη από πάνω, η οποία είναι ικανή να το κρατάει στη θέση του χωρίς να είναι απαραίτητα άλλα στηρίγματα. Η διάταξη φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

- **Ευθυγράμμιση δεξαμενών και βάσεων**

Ο πιο σημαντικός παράγοντας σε όλη τη διαδικασία εμφάνισης είναι η στάθμη του νερού να παραμένει σταθερή μέσα στα επιτρεπόμενα όρια. Για να εξασφαλισθεί όμως η ομοιομορφία στην απορρόφηση ύδατος πρέπει οι δεξαμενές και τα τραπέζια που χρησιμοποιούνται σαν βάσεις να είναι απολύτως ευθυγραμμισμένα ώστε να έχουμε μηδενική κλίση σε όλη την επιφάνεια του νερού.

Τα τραπέζια στα οποία τοποθετήθηκαν οι δύο αυτές δεξαμενές ευθυγραμμίστηκαν σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο με ψηφιακό αλφάδι και αλφάδι laser. Στη δεξαμενή μερικής εμφάνισης οι οδηγί ευθυγραμμίστηκαν επίσης με απόκλιση ως  $0,05^\circ$  και ελέγχτηκαν με αλφάδι laser. Στην δεξαμενή ολικής εμφάνισης έγινε ευθυγράμμιση του τραπεζιού και των χειλών της δεξαμενής με ακρίβεια  $0,05^\circ$ . Εν συνεχεία, τοποθετήθηκαν οι δοκοί και ρυθμίστηκε το βάθος των προφίλ με το laser με ακρίβεια  $\pm 1\text{mm}$ . Το κάθε προφίλ ελέγχθηκε ξεχωριστά.

- **Έλεγχος στάθμης ύδατος**

Για να είναι έγκυρο το πείραμα πρέπει το ύψος του νερού που είναι εμφάνισμένα τα δοκίμια να διατηρείται στις τιμές που ορίζει το πρότυπο. Ο έλεγχος της στάθμης γίνεται με την τοποθέτηση ενός σωλήνα τύπου U με την μία άκρη του βυθισμένη στο νερό και την άλλη στερεωμένη στο εξωτερικό τοίχωμα της κάθε δεξαμενής. Έτσι έχουμε συνεχή οπτική απεικόνιση της στάθμης του ύδατος και ανάλογα με τα όρια που προβλέπονται συμπληρώνουμε ή αφαιρούμε νερό.

## 4.5. Εκτέλεση του πειράματος

Όλα τα δοκίμια βυθίστηκαν εναλλάξ και στις δύο δεξαμενές με αποτέλεσμα το πείραμα να εκτελεστεί σε τέσσερις φάσεις. Αρχικά έγινε η εμφάνιση όλων των δοκιμίων της κατηγορίας ISOPOR (18 στον αριθμό) στην δεξαμενή ολικής βύθισης και ταυτόχρονα έγινε μερική εμφάνιση των δειγμάτων κατηγορίας NEOPOR, ISOPLAK καθώς και μιας ομάδας από την κατηγορία NEOPLAK.



**Εικόνα 4.5:** Ολικώς εμφάνισμένα δοκίμια



**Εικόνα 4.6:** Μερικώς εμφάνισμένα δοκίμια

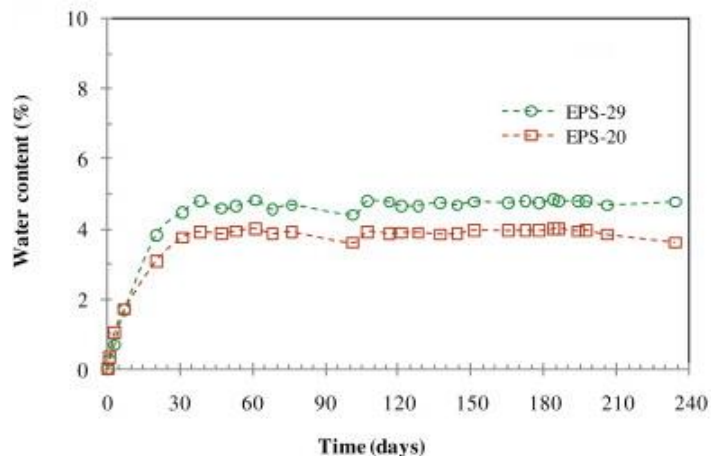
Αφού συμπληρωθεί το απαιτούμενο χρονικό διάστημα γίνεται σταδιακή εξαγωγή των δοκιμίων σε τριάδες και πραγματοποιούνται όλες οι προγραμματισμένες μετρήσεις για την εύρεση του νέου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που έχει προκύψει λόγω υγρασίας. Όταν αδειάσει μία δεξαμενή (πιο συγκεκριμένα η ολικής) πραγματοποιείται η δεύτερη φάση, που είναι η βύθιση των δεκαοχτώ περισσευόμενων δειγμάτων που δεν χωρέσανε αρχικά στις δεξαμενές. Αυτά είναι οι δύο ομάδες από την κατηγορία NEOPLAK και οι κατηγορίες PERIPOR και ICF. Όπως και προηγουμένως μετά από 28

επαναλαμβάνεται η διαδικασία των μετρήσεων για τον προσδιορισμό του μεγέθους που μας ενδιαφέρει.

Κατά την τρίτη φάση τα δοκίμια που υπεβλήθησαν αρχικά σε εμφύσηση, βυθίζονται εναλλάξ και πάλι στις δεξαμενές. Οπότε στην δεξαμενή ολικής βύθισης τοποθετούνται οι κατηγορίες NEOPOR, ISOPOR και η μια ομάδα από την κατηγορία NEOPOR ενώ στην μερικής τοποθετείται όλη η κατηγορία ISOPOR και παραμένουν εκεί για 28 μέρες. Πρώτα γίνεται η εξαγωγή των δειγμάτων που έχουν βυθισθεί μερικώς ώστε όταν αδειάσει η δεξαμενή να γίνει η εμφύσηση των περισσευούμενων ομάδων και να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Αυτή είναι η τέταρτη και τελευταία φάση του πειράματος.

#### • Καμπύλη Προσρόφησης Ύδατος

Σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή, μέχρι να ολοκληρωθούν οι μετρήσεις η πλειοψηφία των δειγμάτων παραμένει εμφύσηση για διάστημα μεγαλύτερο των 28 ημερών που ορίζεται από το πρότυπο για την μερική και την ολική εμφύσηση. Ωστόσο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα γιατί τα βυθισμένα υλικά μέχρι αυτό το διάστημα έχουν απορροφήσει το μέγιστο ποσό υγρασίας. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα [25], σε μηδενικές συνθήκες πίεσης υπάρχει ένα ανώτατο όριο υγρασίας που εισχωρεί σε ένα στεγνό δοκίμιο EPS, είτε πρόκειται για μερική ή ολική βύθιση. Το όριο αυτό δεν μεταβάλλεται ή μεταβάλλεται ελάχιστα για το επιπλέον χρονικό διάστημα παραμονής στην δεξαμενή, οπότε δεν επηρεάζει τις μετρήσεις του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



Εικόνα 4.7: Καμπύλες απορρόφησης ύδατος υλικού EPS [24]

#### 4.6. Συσκευασία και διατήρηση υγρασίας εμφύσητων δειγμάτων

Βασική προϋπόθεση για την εγκυρότητα των μετρήσεων, είναι η διατήρηση της μετρούμενης τιμής της υγρασίας για όλο το χρονικό διάστημα από την έξοδο τους από την δεξαμενή μέχρι και την ολοκλήρωση των μετρήσεων. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει τα δοκίμια μετά την αποστράγγιση να συσκευασθούν με ένα υλικό υψηλής στεγανότητας. Ωστόσο το υλικό συσκευασίας πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην μεταβάλλεται η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας (όσο πιο λεπτό τόσο μικρότερη η μεταβολή), να είναι διάφανο και ταυτόχρονα αρκετά ανθεκτικό για την προστασία του δείγματος από φθορές.

- **Μελέτη υλικών συσκευασίας**

Ως υλικό αναφοράς χρησιμοποιήθηκε τα δοκίμια κατηγορίας NEOPLAK BT 150. Στην αρχή μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα του δείγματος σε στεγνή κατάσταση με δύο διατάξεις, την CTmetre και την ISOMET 2104, των οποίων η λειτουργία επεξηγείται στο σχετικό κεφάλαιο. Η μέτρηση με την κάθε διάταξη επαναλήφθηκε 2 φορές το λιγότερο σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας της τάβλας προκειμένου να ελεγχθεί και η αξιοπιστία τους. Οι τιμές σύγκρισης αποτελούν το μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν. Στη συνέχεια το δείγμα συσκευάστηκε με κάποιο υλικό, επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις και έγινε η σύγκριση των δύο τιμών που προέκυψαν πριν και μετά.

→ **Χωρίς συσκευασία**

$$\text{ISOMET: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0344 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0340 \text{ W/mK} \\ \lambda^3 = 0,0342 \text{ W/mK} \\ \lambda^4 = 0,0341 \text{ W/mK} \\ \lambda^5 = 0,0343 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0342 \text{ W / mK}} \text{ και μέση θερ/σια } \theta = 23,65^\circ\text{C}$$

$$\text{CTmetre: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0312 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0312 \text{ W/mK} \\ \lambda^3 = 0,0308 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda \cong \mathbf{0,0311 \text{ W/mK}} \text{ και μέση θερ/σια } \theta = 20,83^\circ\text{C}$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές προκύπτουν δύο αρχικά συμπεράσματα:

- 1) Οι τιμές κάθε διάταξης μεταβάλλεται σύμφωνα με το σχετικό σφάλμα της κάθε μίας.
- 2) Οι τιμές των δύο διατάξεων διαφέρουν στο τρίτο σημαντικό ψηφίο.

- **Υλικά συσκευασίας**

Ο σχετικός κλάδος για να ξεκινήσει η έρευνα για το κατάλληλο υλικό ήταν η διατήρηση τροφίμων που όπως και τα δείγματα μας διατηρούνται σε ανάλογες συσκευασίες προκειμένου να διατηρούν την απαραίτητη υγρασία κατά τη συντήρησή τους. Τα υλικά που εξετάστηκαν αναφέρονται παρακάτω μαζί με τις αντίστοιχες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας.

→ **Σακούλα τύπου poly bag με zipper**

$$\text{CTmetre: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0321 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0321 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0321 \text{ W/mK}}$$

και μέση θερ/σια  $\theta = 21,16^\circ\text{C}$

$$\text{ISOMET: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0339 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0342 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,03405 \text{ W/mK}}$$

και μέση θερ/σια  $\theta = 24,71^\circ\text{C}$

Οι τιμές δεν διαφέρουν σημαντικά από τις αρχικές λόγω του μικρού πάχους του υλικού (60μm), ωστόσο η συγκεκριμένη επιλογή απορρίφθηκε διότι δεν παράγονται σακούλες στις διαστάσεις που θέλαμε.



**Εικόνα 4.8:** Σακούλες poly bag



### → Μεμβράνη τροφίμων

Το δείγμα συσκευάστηκε με την μεμβράνη πραγματοποιώντας ένα και δύο τυλίγματα μόνο. Για λόγους ανθεκτικότητας θα έπρεπε να γίνουν περισσότερα τυλίγματα μιας και η μεμβράνη έχει σχεδόν μηδενικό πάχος, όμως η χρήση μεμβράνης αποδείχθηκε χρονοβόρα και τα δείγματα θα χάνανε σημαντικό ποσοστό υγρασίας.

- Ένα τυλίγμα με μεμβράνη

$$\text{CTmetre: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0303 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0307 \text{ W/mK} \\ \lambda^3 = 0,0306 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0305 \text{ W/mK}}$$

και μέση θερ/ σια  $\theta = 22,11^\circ\text{C}$

$$\text{ISOMET: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0350 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0348 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0349 \text{ W/mK}}$$

και μέση θερ/ σια  $\theta = 25,12^\circ\text{C}$



**Εικόνα 4.9:** Μεμβράνη τροφίμων

Οι τιμές δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα από τις αρχικές ενώ οι τιμές του CTmetre είναι λίγο μειωμένες σε σχέση με τις αρχικές. Η μία επιφάνεια μεμβράνης όμως δεν είναι ανθεκτική με αποτέλεσμα να προκληθούν φθορές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

- Δύο τυλίγματα με μεμβράνη

$$\text{CTmetre: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0307 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0307 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0307 \text{ W/mK}}$$
 και μέση θερ/ σια  $\theta = 22,48^\circ\text{C}$

$$\text{ISOMET: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0356 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0352 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0354 \text{ W/mK}}$$
 και μέση θερ/ σια  $\theta = 25,77^\circ\text{C}$

Όπως και προηγουμένως οι τιμές είναι κοντινές, ωστόσο και πάλι παρουσιάστηκαν φθορές οπότε και η επιλογή της μεμβράνης απορρίφθηκε.

### → Σακούλα συρρίκνωσης (Shrink bag)

Η συγκεκριμένη σακούλα χρησιμοποιείται ευρύτατα στην συντήρηση τροφίμων επειδή έχει την ιδιότητα να συρρικνώνεται όταν θερμανθεί και να παίρνει το σχήμα του τροφίμου που περικλείει. Χρησιμοποιούνται κυρίως στα ευπαθή προϊόντα, όπως αλλαντικά, νωπό κρέας, τυρί επειδή είναι εξαιρετικά στεγανές και διασφαλίζουν την προστασία των προϊόντων κατά τη διατήρησή τους. Επίσης οι μηχανικές αντοχές της σακούλας την καθιστούν πολύ ανθεκτική και επιτρέπουν την θερμοσυγκόλληση της.

Οι τιμές με χρήση της σακούλας συρρίκνωσης σαν συσκευασία προέκυψαν ως εξής:

$$\text{ISOMET: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0345 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0348 \text{ W/mK} \\ \lambda^3 = 0,0345 \text{ W/mK} \\ \lambda^4 = 0,0346 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0346 \text{ W/mK}}$$
 και μέση θερ/ σια  $\theta = 23,71^\circ\text{C}$

$$\text{CTmetre: } \left. \begin{array}{l} \lambda^1 = 0,0327 \text{ W/mK} \\ \lambda^2 = 0,0329 \text{ W/mK} \\ \lambda^3 = 0,0326 \text{ W/mK} \\ \lambda^4 = 0,0325 \text{ W/mK} \\ \lambda^5 = 0,0327 \text{ W/mK} \\ \lambda^6 = 0,0327 \text{ W/mK} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0,0327 \text{ W / mK}} \text{ και μέση θερ/σια } \theta = 22,74^\circ\text{C}$$

Χωρίς συσκευασία οι τιμές είναι:  $\lambda = \mathbf{0,0342 \text{ W / mK}}$  με το ISOMET  
 $\lambda \cong \mathbf{0,0311 \text{ W/mK}}$  με το CTmetre

Η διαφορά των τιμών με το ISOMET είναι ελάχιστη και δικαιολογείται από το μικρό πάχος της σακούλας συρρίκνωσης (50μm). Αντίθετα το CTmetre δείχνει μεταβολή ελάχιστα μεγαλύτερη της ακρίβειας της διάταξης που είναι 5% και δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ωστόσο επειδή ικανοποιούνται τα κριτήρια της διαφάνειας και της ανθεκτικότητας που είναι πολύ σημαντικό, αποφασίστηκε να γίνει επιπλέον έλεγχος με μία ακόμα διάταξη η οποία μετράει σε σταθερές θερμοκρασίες και θεωρείται πιο έγκυρη.

- **Μέτρηση με Guarded Hot Plate**

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει την δυνατότητα να υπολογίζει σε μία μόνο μέτρηση, την θερμική αγωγιμότητα σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες που ορίζονται από τον χρήστη. Ο έλεγχος έγινε με τα στεγνά δοκίμια ISOPOR EPS 100 και NEOPOR EPS 80. Στον πίνακα παρατίθενται οι τιμές για θερμοκρασίες 10°C, 20°C και 30°C πριν και μετά την τοποθέτηση τους στη σακούλα συρρίκνωσης.

T (°C)	ISOPOR 100		NEOPOR 80	
	Χωρίς	Με	Χωρίς	Με
10	0,03453	0,03510	0,03006	0,03070
20	0,03558	0,03625	0,03109	0,03156
30	0,03696	0,03730	0,03256	0,03240

**Πίνακας 4.1:** Τιμές θερμικής αγωγιμότητας δειγμάτων EPS με και χωρίς shrink bag με την μέθοδο GHP

Τα ζευγάρια τιμών έχουν ελάχιστη απόκλιση -0.49% και φτάνει μέχρι 2.13%. Οι τιμές αυτές είναι μέσα στα όρια του σφάλματος της διάταξης που είναι ±3% οπότε συμπεραίνουμε πως η μεταβολή στις τιμές λόγω της σακούλας συρρίκνωσης είναι αμελητέα.

- **Απώλεια υγρασίας**

Η στεγανότητα της συσκευασίας αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα και είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί. Για το λόγο αυτό, πριν ξεκινήσει το πείραμα βυθίσαμε ένα EPS αναφοράς και το συσκευάσαμε προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει απώλεια υγρασίας και σε τι βαθμό. Για μία εβδομάδα σε καθημερινή βάση ζυγίζαμε το δοκίμιο αναφοράς και συγκρίναμε με το αρχικό βάρος. Διαπιστώθηκε πως η συσκευασία δεν ήταν απόλυτα στεγανή αλλά υπήρχε απώλεια υγρασίας. Όμως η απώλεια ήταν κατά μέσο όρο **0,05gr ανά ημέρα**, ποσοστό πολύ μικρό σε σχέση με την συνολική

απορροφημένη υγρασία και δεν επηρέαζε τις μετρήσεις.

Συνεπώς το συγκεκριμένο υλικό καλύπτει όλες τις προϋποθέσεις που τέθηκαν για την σωστή συσκευασία και την προστασία των εμβαπτισμένων δειγμάτων και οι οποίες επιγραμματικά είναι:

- Στεγανότητα
- Ανθεκτικότητα
- Αμελητέα μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας με και χωρίς συσκευασία
- Διαφάνεια

Η προμήθεια έγινε από την εταιρεία εξοπλισμού βιομηχανιών τροφίμων PEAMI ΕΠΕ.

#### 4.7. Αποστράγγιση και διαδικασία συσκευασίας

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία της αποστράγγισης σε χαλύβδινη διάταξη πλέγματος με κλίση 45° για χρόνο (10±0,5)min. Αμέσως μετά ακολουθεί η ζύγιση των δοκιμίων για τον υπολογισμό της αύξησης του βάρους λόγω απορρόφησης ύδατος και τέλος η τοποθέτηση τους στην ειδική σακούλα. Η ακρίβεια στην μέτρηση της μάζας των δοκιμίων πριν και μετά την εμβάπτιση αποτελεί σημαντικό παράγοντα, αφού σε μερικές περιπτώσεις οι διαφορές, ειδικά για την μερική βύθιση, είναι πολύ μικρές. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική ζυγαριά, της εταιρείας OHAUS, με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων.

- **Θερμοσυγκόλληση συσκευασίας**

Η θερμοκόλληση των ακμών της συσκευασίας έγινε με επιτραπέζια θερμοκολλητική μηχανή παλμών ME- 300HI της MERCIER Corporation.

Χαρακτηριστικά:

- Δυνατότητα συγκόλλησης πλαστικών υλικών με πάχος μέχρι και 0,2mm
- Μέγιστο πάχος συγκόλλησης 2,5mm
- Μέγιστο μήκος συγκόλλησης 300mm
- Ισχύς 500W
- Θερμοστάτης για την επιλογή της θερμοκρασίας ανάλογα με το πάχος της σακούλας.

Για μεγαλύτερη ασφάλεια και προστασία της υγρασίας έγινε διπλή θερμοκόλληση σε κάθε ακμή με απόσταση μεταξύ τους μερικά χιλιοστά. Πριν σφραγιστεί τελείως το δείγμα προσπαθήσαμε να αποβάλουμε όσο το δυνατόν περισσότερο αέρα μέσα από τη σακούλα ώστε να μην δημιουργείται διάκενο μεταξύ του αισθητήρα και του δείγματος.



**Εικόνα 4.10:** Θερμοκολλητική μηχανή



**Εικόνα 4.11:** Συσκευασία δείγματος

- **Θέρμανση συσκευασίας**

Η θέρμανση έγινε με θερμοπίστολο στους 150°C με αποτέλεσμα η σακούλα να συρρικνωθεί γύρω από το δοκίμιο. Παρατηρήθηκε όμως διαστολή του αέρα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και συγκέντρωση του στις παράπλευρες επιφάνειες με αποτέλεσμα η μεμβράνη να μην εφάπτεται στο EPS και σε κάποιες περιπτώσεις να δημιουργείται διάκενο. Σε μερικά από τα δείγματα το φαινόμενο ήταν τόσο έντονο και υπήρχε τέτοια πίεση που στο σημείο της θερμοσυγκόλλησης παρουσιάστηκε αστοχία με αποτέλεσμα να χάνεται σημαντικό ποσοστό της υγρασίας. Η παρουσία του αέρα επηρέαζε τις μετρήσεις καθώς δεν γινότανε καλή επαφή των αισθητήρων των διατάξεων με τις επιφάνειες του δείγματος.

Επειδή η διατήρηση της υγρασίας και η ακρίβεια των μετρήσεων αποτελεί τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην παρούσα έρευνα, αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί η ιδιότητα της συρρίκνωσης με θέρμανση.



**Εικόνα 4.12:** Συσκευασία δείγματος με θερμοπίστολο



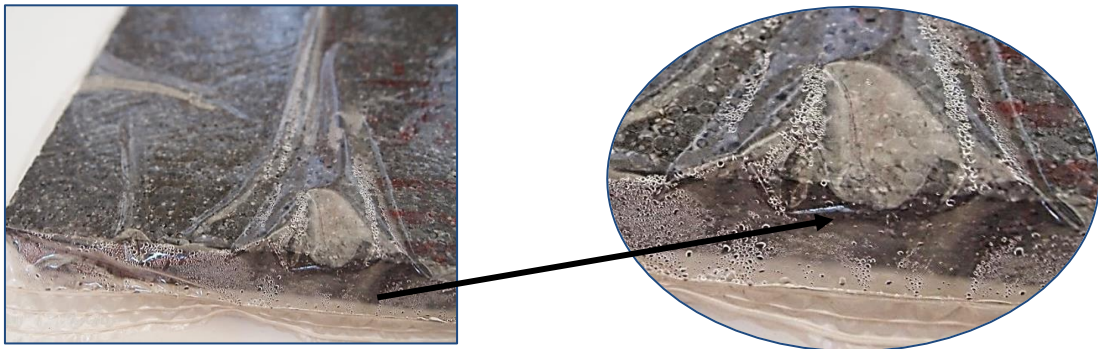
**Εικόνα 4.13:** Συσκευασία δείγματος χωρίς θερμοπίστολο

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ο βέλτιστος τρόπος να συσκευασθούν τα υλικά είναι με αποβολή όσο το δυνατόν περισσότερου αέρα με άσκηση πίεσης μετά την τοποθέτησή τους στη σακούλα και διπλή θερμοκόλληση στις ακμές για προστασία.

- **Συγκέντρωση υγρασίας**

Όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες, η υγρασία δημιουργεί συμπυκνώματα που είναι ορατά με γυμνό μάτι στις εσωτερικές επιφάνειες και κυρίως στις ακμές της συσκευασίας. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στα δοκίμια ολικής εμβάπτισης, καθώς έχουν απορροφήσει περισσότερα

γραμμάρια υγρασίας. Στις διατάξεις σταθερών συνθηκών που μετράται ολόκληρο το υλικό συμπεριλαμβάνεται στις μετρήσεις όλη η υγρασία εκτός από αυτή που έχει συγκεντρωθεί στις ακμές. Ωστόσο τα ορατά αυτά σταγονίδια αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής απορροφημένης υγρασίας και επηρεάζουν ελάχιστα έως καθόλου την τιμή του συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας. Αντιθέτως, στις διατάξεις μεταβλητών συνθηκών που η μέτρηση είναι τοπική και επιφανειακή, η συγκέντρωση υγρασίας μεταβάλλει τα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από μία μετρήσεις και στις δύο πλευρές του δοκιμίου ώστε να καλυφθεί η μεγαλύτερη επιφάνειά του και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών.



**Εικόνα 4.14:** Συγκέντρωση υγρασίας στην επιφάνεια της συσκευασίας

- **Εκτέλεση μετρήσεων**

Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γίνεται με τις μεθόδους μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης. Ο διαχωρισμός βασίζεται στο φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας και μάζας που πραγματοποιείται στο εσωτερικό του εμβαπτισμένου δοκιμίου.

Οι διατάξεις Guarded Hot Plate και Heat Flow meter ανήκουν στην πρώτη κατηγορία και η λαμβάνουν τη μέτρηση όταν έχουν αποκατασταθεί μόνιμες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο υλικό. Παρέχουν την δυνατότητα μέτρησης σε διαφορετικές θερμοκρασίες που ορίζονται από τον χρήστη και η τιμή που προκύπτει αντιπροσωπεύει ολόκληρη την μάζα του δοκιμίου.

Αντίθετα οι διατάξεις CTmetre και ISOMET ανήκουν στις μεθόδους μεταβατικής κατάστασης. Αυτό σημαίνει πως η μέτρηση πραγματοποιείται ανεξαρτήτως των φαινομένων μεταφοράς. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι πως η μέτρηση είναι επιφανειακή και τοπική, οπότε δεν είναι αντιπροσωπευτική του δείγματος. Τέλος, η θερμοκρασία του αισθητήρα δεν μπορεί να καθοριστεί αλλά επηρεάζεται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Αναλυτική περιγραφή των διατάξεων, της διαδικασίας των μετρήσεων και της αντίστοιχης θεωρίας παρατίθεται στο σχετικό κεφάλαιο.

## 5. Μεθοδολογία και συσκευές μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας

### 5.1. Γενικές πληροφορίες

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της αξιοπιστίας και ανάλυση των τιμών του συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας με χρήση διαφορετικών μεθόδων και διατάξεων μέτρησης. Για τις μετρήσεις δεν χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι που μεταβάλλουν τις φυσικές ιδιότητες και τις διαστάσεις των δειγμάτων.

Σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές τεχνικές με τις αντίστοιχες διατάξεις:

- i. Guarded Hot Plate Method με χρήση της συσκευής TLP 300
- ii. Heat Flow Method με χρήση ιδιοκατασκευής
- iii. Hot-Wire Dynamic Method με χρήση της συσκευής CTmètre
- iv. Hot Disk Dynamic method με χρήση της συσκευής ISOMET model 2104 Heat Transfer Analyzer

Όλες οι παραπάνω διατάξεις λειτουργούν με βάση εθνικά και διεθνή πρότυπα και επιτρέπουν την μέτρηση μονωτικών υλικών και γενικότερα δομικών υλικών με σχετικά υψηλή θερμική αντίσταση.

### 5.2. Κατηγορίες πειραματικών διατάξεων

Οι παραπάνω διατάξεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την μέθοδο λειτουργίας τους: σε μεθόδους μόνιμης μετάδοσης θερμότητας (steady state conditions) και μεθόδους μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας (transient conditions). Η διαφορά τους έγκειται στην αποκατάσταση ή όχι μόνιμων συνθηκών μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό του υλικού. Οι μέθοδοι Guarded Hot Plate και Heat-Flow ανήκουν στις μεθόδους μόνιμης κατάστασης ενώ οι διατάξεις CTmètre και ISOMET λειτουργούν σε μεταβατικές συνθήκες.

Μία ακόμα ουσιαστική διαφορά που προκύπτει σαν αποτέλεσμα της προηγούμενης είναι πως οι διατάξεις που απαιτούν για μέτρηση μόνιμες συνθήκες χρειάζονται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την λήψη των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας. Οι διατάξεις που μετρούν σε μεταβατικές συνθήκες δεν απαιτούν αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας με αποτέλεσμα να είναι γρήγορες. Ωστόσο επειδή οι μετρήσεις είναι επιτόπιες πρέπει να γίνονται πολλές μετρήσεις σε τυχαία σημεία της επιφάνειας και να υπολογίζεται μια μέση τιμή που θεωρείται και αντιπροσωπευτική του δείγματος. Τέλος, με την πρώτη ομάδα υπάρχει η δυνατότητα οι μετρήσεις να γίνονται σε παραπάνω από μία θερμοκρασίες που ορίζονται από τον χρήστη. Η διαδικασία ξεκινάει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να επιτευχθεί πρώτα η επιθυμητή θερμοκρασία και οι μόνιμες συνθήκες. Αντιθέτως, οι διατάξεις της δεύτερης κατηγορίας πραγματοποιούν τη μέτρηση στη θερμοκρασία κατά την οποία το δείγμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του, χωρίς αυτή να είναι προκαθορισμένη.

### 5.3. Guarded Hot Plate Test Method

Η μέθοδος Guarded Hot Plate (**GHP**) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων μόνιμης κατάστασης. Μετράει τη θερμορροή σε μια επίπεδη πλάκα δείγματος όταν το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας είναι μόνιμο. Το ευρωπαϊκό πρότυπο με όλες τις σχετικές πληροφορίες και τους περιορισμούς της μεθόδου είναι το ISO 8302: «*Thermal Insulation- Determination of steady-state thermal resistance and related properties- Guarded Hot Plate apparatus*» [13].

#### 5.3.1. Αρχή λειτουργίας και τύποι πειραματικών διατάξεων GHP

Η διάταξη σκοπό έχει να εφαρμόσει στα δείγματα μια μονοδιάστατη ροή θερμότητας ομοιόμορφης πυκνότητας σε σταθερές συνθήκες, ανάλογη με αυτή που θα υπήρχε σε μια πλάκα άπειρων διαστάσεων που οριοθετείται από δύο παράλληλες ισόθερμες επιφάνειες.

Με βάση αυτή την αρχή υπάρχουν δύο τύποι μετρητικών διατάξεων:

- ενός δείγματος
- δύο δειγμάτων (με μία κεντρική μονάδα θέρμανσης)

Παρακάτω ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των επιμέρους μονάδων μιας μετρητικής διάταξης δύο δειγμάτων όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

- **Πειραματική διάταξη δύο δειγμάτων**

Η μονάδα θέρμανσης στον συγκεκριμένο τύπο τοποθετείται ανάμεσα στα δύο πανομοιότυπα (κατά το δυνατόν) δείγματα. Πρόκειται για μία στρογγυλή ή τετράγωνη πλάκα που αποτελείται από ένα θερμαντήρα και από πλάκες με μεταλλική επιφάνεια. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω των δειγμάτων σε δύο ξεχωριστές στρογγυλές ή τετράγωνες ισόθερμες επίπεδες πλάκες που ονομάζονται μονάδες ψύξης.

- **Μονάδες θέρμανσης και ψύξης**

Η μονάδα θέρμανσης έχει ένα ξεχωριστό τμήμα μέτρησης που χαρακτηρίζεται από σταθερή, ομοιόμορφη και μονοδιάστατη ροή θερμότητας. Βασική προϋπόθεση για επίτευξη της ομοιομορφίας είναι η ύπαρξη ενός προστατευτικού δακτυλίου με ύπαρξη διακένου γύρω από την μονάδα θέρμανσης με ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους. Οι μονάδες ψύξης είναι προτιμότερο να έχουν μορφή παρόμοια με την μονάδα θέρμανσης αλλά είναι δυνατό να αποτελούνται και από συνεχείς επίπεδες πλάκες χωρίς την ύπαρξη του διάκενου.

#### 5.3.2. Κατασκευαστικοί- Λειτουργικοί περιορισμοί

Η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται από τη δυνατότητα της διάταξης να διατηρεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις της ροής θερμότητας καθώς και τις μετρούμενες τιμές ισχύος και θερμοκρασίας στα επιτρεπόμενα όρια. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει η ομοιότητα, η ομοιογένεια και η επιπεδότητα των δειγμάτων (στη διάταξη των δύο δειγμάτων) ώστε να λαμβάνονται ορθές μετρήσεις.

- **Περιορισμοί λόγω διάταξης**

Οι σημαντικότεροι περιορισμοί που επιβάλλει η διάταξη και επηρεάζουν την διαδικασία της μέτρησης προκαλούνται από τους εξής παράγοντες:

- Αντιστάσεις επαφής

Οποιαδήποτε ανομοιομορφία στην επιφάνεια των δειγμάτων δεν επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή των αντιστάσεων επαφής μεταξύ των δειγμάτων και των πλακών θέρμανσης και ψύξης. Συνεπώς δεν αναπτύσσεται ομοιόμορφη θερμορροή και προκαλούνται θερμικές στρεβλώσεις ενώ δυσκολεύει και η μέτρηση των επιφανειακών θερμοκρασιών.

- Ανώτατα όρια θερμικής αντίστασης

Περιορίζονται από τη σταθερότητα της ισχύος που παρέχει η μονάδα θέρμανσης, την ικανότητα των οργάνων να μετρούν την ισχύ και τις θερμικές απώλειες ή κέρδη που οφείλονται σε θερμοκρασιακή αστάθεια μεταξύ των τμημάτων μέτρησης, προστασίας των δειγμάτων και της μονάδας θέρμανσης.

- Όρια θερμοκρασιακής διαφοράς

Στην περίπτωση όπου οι μετρήσεις θερμοκρασίας γίνονται με θερμοστοιχεία τοποθετημένα σε κάθε επιφάνεια των δειγμάτων, για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων χρησιμοποιούνται διαφορές θερμοκρασίας 10- 20K. Υψηλότερες θερμοκρασιακές διαφορές περιορίζονται από την ικανότητα της διάταξης να δώσει αρκετή ισχύ διατηρώντας θερμοκρασιακή ομοιομορφία.

- Πάχος δοκιμίου

Το μέγιστο πάχος του δείγματος επηρεάζεται από τις οριακές συνθήκες στις άκρες του υλικού λόγω των επιπτώσεων της περιφερειακής μόνωσης, των βοηθητικών προστατευτικών θέρμανσης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αντίστοιχα το ελάχιστο πάχος για την μέτρηση ενός παράγοντα μεταφοράς περιορίζεται από τις επιφανειακές αντιστάσεις και την ακρίβεια των μετρητικών οργάνων.

- Καθορισμός περιοχής μέτρησης

Η περιοχή μέτρησης, δλδ. η περιοχή του δείγματος που διαπερνά η θερμορροή που τροφοδοτείται από την κεντρική μονάδα μέτρησης, σχετίζεται με το πάχος του δείγματος και το πλάτος του διάκενου. Για τον περιορισμό των σφαλμάτων το πάχος πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές το πλάτος του δοκιμίου.

- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας

Η συγκεκριμένη θερμοκρασία περιορίζεται από την οξειδωση, τη θερμική καταπόνηση ή και άλλους παράγοντες που μειώνουν την επιπεδότητα των επιφανειών και από αλλαγές στην ηλεκτρική αντίσταση των μονωτικών διεπιφανειών που επηρεάζουν την ακρίβεια όλων των μετρήσεων.

- Συνθήκες κενού

Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν η διάταξη λειτουργεί σε συνθήκες κενού επειδή επηρεάζονται τόσο τα υλικά όσο και η ίδια η μέτρηση. Υπάρχει κίνδυνος έκλυσης αερίων, εξωγενών θερμορροών και θερμοκρασιακές αποκλίσεις.

- Μέγεθος διάταξης

Οι διαστάσεις της μετρητικής συσκευής καθορίζεται από τις διαστάσεις των μετρούμενων δοκιμίων που συνήθως είναι 0,2 με 1m σε διάμετρο ή σε τετραγωνική ακμή.



- **Περιορισμοί λόγω δειγμάτων**

Οι περιορισμοί που επιβάλλονται λόγω των δειγμάτων οφείλονται στις θερμικές ιδιότητες των υλικών και είναι οι παρακάτω:

- Ομοιογένεια δείγματος

Η ομοιογένεια του υλικού είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλίζεται η μονοδιάστατη και ομοιόμορφη θερμορροή αλλιώς δημιουργούνται θερμικές στρεβλώσεις που οδηγούν σε σημαντικά λάθη. Τα ομογενή πορώδη υλικά πρέπει να είναι τέτοια ώστε όποια ανομοιογένεια να έχει διαστάσεις μικρότερες από 1/10 του πάχους. Πιο κρίσιμη είναι η περιοχή του δείγματος που εφάπτεται στην περιοχή μέτρησης και ειδικότερα κοντά στις ακμές.

- Συσχέτιση θερμοκρασιακής διαφοράς – Μέση θερμική αγωγιμότητα δοκιμίου

Η θερμική αντίσταση και η θερμική αγωγιμότητα συνήθως είναι συναρτήσεις των θερμοκρασιακών διαφορών κατά μήκος του δείγματος. Όλοι οι μηχανισμοί που συνιστούν στο φαινόμενο μεταφοράς έχουν άμεση εξάρτηση από την θερμοκρασιακή διαφορά που επιβάλλεται στο δείγμα. Επίσης σε οποιαδήποτε θερμοκρασία πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η θερμική αντίσταση είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασιακής διαφοράς που έχει καθοριστεί.

- Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αντίσταση ενός υλικού είναι γνωστό πως εξαρτάται από την ποσότητα της μεταφερόμενης θερμότητας στο εσωτερικό του δείγματος και συντελείται με τους μηχανισμούς της αγωγής της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Συνεπώς το μέγεθος που υπολογίζεται είναι η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα.

- Πάχος δείγματος

Από όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας μόνο η αγωγή παράγει θερμική αντίσταση ανάλογη του πάχους του υλικού. Όσο πιο λεπτό και λιγότερο πυκνό το υλικό τόσο πιο πιθανό είναι η αντίσταση να εξαρτάται από άλλες διεργασίες εκτός της αγωγής.

- Warping

Υπάρχουν υλικά με μεγάλους συντελεστές θερμικής διαστολής με αποτέλεσμα να παραμορφώνονται υπερβολικά όταν υποβάλλονται σε θερμοκρασιακή κλίση. Η μεγάλη παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει βλάβες στη διάταξη ή ακόμη και την ανάπτυξη πρόσθετης επιφανειακής αντίστασης και σαν συνέπεια λανθασμένη μέτρηση.

### 5.3.3. Περιγραφή των σημαντικότερων χαρακτηριστικών της διάταξης

Η περιγραφή που ακολουθεί αφορά τη μετρητική συσκευή δύο δειγμάτων, όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε για της μετρήσεις.

- **Κεντρική Μονάδα Θέρμανσης**

Ουσιαστικά πρόκειται για μία πλάκα, τοποθετημένη στο κέντρο, ανάμεσα στα δύο δείγματα και η οποία χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα, ένα κεντρικό τμήμα μέτρησης και ένα τμήμα προστασίας. Το πρώτο αποτελείται από έναν θερμαντήρα και επιφανειακές πλάκες ενώ το δεύτερο από έναν ή περισσότερους θερμαντήρες προστασίας και από πλάκες προστασίας. Οι πλάκες είναι συνήθως από υλικό υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Οι επιφάνειες των πλακών των μονάδων θέρμανσης και ψύξης δεν πρέπει να αντιδρούν χημικά με το δοκίμιο και να είναι επίπεδες. Προσοχή

πρέπει να δίνεται και στα υλικά κατασκευής της μονάδας για τις θερμοκρασίες που πρόκειται να λειτουργήσει. Επίσης απαραίτητη είναι η διασφάλιση ενός ικανοποιητικού ρυθμού θερμορροής καθώς και ομοιομορφία στην θερμοκρασία κατά τη λειτουργία, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνάει το 2% της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά μήκος του υλικού. Τέλος, όλες οι επιφάνειες πρέπει να έχουν και να

διατηρούν κατά τη λειτουργία, συντελεστή εκπομπής μεγαλύτερο από 0,8 για κάθε θερμοκρασία.

#### **- Διάκενο και περιοχή μέτρησης**

Για την επίτευξη σταθερής και μονοδιάστατης θερμικής ροής είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός διάκενου ανάμεσα στην πλάκα του τμήματος μέτρησης και του τμήματος προστασίας. Το μέγεθος του δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 5% της επιφάνειας μέτρησης.

- **Αισθητήρες αστάθειας**

Στην περίπτωση ανισορροπίας της θερμοκρασίας, ένα ποσό θερμότητας ρέει μεταξύ των συστημάτων προστασίας και μέτρησης είτε μέσω των δειγμάτων είτε μέσω του διάκενου. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται αισθητήρες αστάθειας των οποίων το σήμα οφείλεται στο συνδυασμένο αποτέλεσμα της θερμικής ισορροπίας μεταξύ των μεταλλικών πλακών των δύο τμημάτων και του ρυθμού θερμορροής από τις επιφάνειες στο δείγμα. Σωστή ισορροπία επιτυγχάνεται όταν η αντίσταση μεταξύ των πλακών και των αισθητήρων είναι αμελητέα σε σχέση με τις υπόλοιπες αντιστάσεις ή όταν η θερμορροή δεν διαπερνά τους αισθητήρες αστάθειας.

- **Μονάδες ψύξης**

Οι μονάδες ψύξης αποτελούνται από δύο μεταλλικές πλάκες που βρίσκονται εκατέρωθεν της θερμής πλάκας και εφάπτονται από τη μία πλευρά με το δείγμα. Οι διαστάσεις των μονάδων είναι ίδιες με αυτές της μονάδας θέρμανσης συμπεριλαμβανομένου του προστατευτικού δακτυλίου. Διατηρούνται σε σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία με απόκλιση 2% της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά μήκος του δείγματος και χαμηλότερη από εκείνη της θερμής πλάκας. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ενός υγρού σταθερής θερμοκρασίας, με ηλεκτρικούς θερμαντήρες, με χρήση θερμικής μόνωσης ομοιόμορφης θερμικής αντίστασης που εφαρμόζεται μεταξύ των εξωτερικών επιφανειών των θερμικών μονάδων και τέλος με χρήση κατάλληλων βοηθητικών ψυκτικών πλακών ή με συνδυασμό όλων των παραπάνω.

- **Γωνιακή μόνωση και θερμικές απώλειες**

Η απόκλιση από τη μονοδιάστατη ροή θερμότητας στο δοκίμιο οφείλεται στις μη αδιαβατικές συνθήκες στις άκρες του δοκιμίου και της μονάδας θέρμανσης. Επιπλέον, οι περιφερειακές θερμικές απώλειες προκαλούν πλευρική θερμοκρασιακή κλίση στο προστατευτικό τμήμα, δημιουργώντας απόκλιση από τη μονοδιάστατη θερμοροή. Η αποφυγή των απωλειών μπορεί να επιτευχθεί με πλευρική μόνωση, ελέγχοντας την θερμοκρασία περιβάλλοντος, με ένα πρόσθετο εξωτερικό περίβλημα, με μια γραμμική κλίση προστασίας ή με ένα συνδυασμό των παραπάνω.

- **Μετρήσεις θερμοκρασίας**

Οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια των δοκιμίων λαμβάνονται μέσω αισθητήρων θερμοκρασίας- όπως τα θερμοστοιχεία- που εφάπτονται μόνιμως με την επιφάνεια του δείγματος. Το πλήθος των θερμοστοιχείων σε κάθε πλευρά δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 2 ή  $N(\Lambda)^{1/2}$ - όπου  $N$  είναι μεγαλύτερο- όπου  $N = 10m^{-1}$  και  $\Lambda$  η επιφάνεια σε  $m^2$  της μιας πλευράς της μετρητικής πλάκας.

Λόγω πιθανής επίδρασης των επιφανειακών αντιστάσεων μεταξύ δοκιμίου- διάταξης χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού της θερμοκρασιακής διαφοράς στο δείγμα:

- Για μαλακά υλικά με επίπεδες επιφάνειες και θερμική αντίσταση  $\geq 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , λαμβάνεται απευθείας από τα θερμοστοιχεία.

- Για άκαμπτα υλικά (όπως και το EPS) πρέπει να τοποθετούνται φύλλα κατάλληλου ομογενούς υλικού ανάμεσα σε κάθε πλάκα και στο δείγμα. Η διαφορά θερμοκρασίας λαμβάνεται μόνο αν είναι γνωστή η θερμική αντίσταση των πρόσθετων φύλλων. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρήση πρόσθετων θερμοστοιχείων στο εσωτερικό επίπεδο, προς τις επιφάνειες του δείγματος.

### 5.3.4. Παράμετροι διαδικασίας πειράματος

Πριν από την τοποθέτηση των δειγμάτων στην διάταξη γίνεται ζύγιση με ακρίβεια καλύτερη από 0,5%, ποσοστό απόκλισης.

- **Πάχος και πυκνότητα υλικού**

Το πάχος του δείγματος λαμβάνεται στην αρχή της μέτρησης είτε από την ίδια την διάταξη μέσω της απόστασης μεταξύ των μονάδων θέρμανσης και ψύξης, όταν αυτές εφάπτονται πάνω στο δείγμα, είτε εκτός διάταξης με κατάλληλα όργανα. Με γνωστό το πάχος υπολογίζεται ο όγκος και έχοντας ήδη μετρήσει τη μάζα προκύπτει η φαινόμενη πυκνότητα.

- **Επιλογή και εξάρτηση από διαφορά θερμοκρασίας**

Η διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλή σύμφωνα όμως με την ακρίβεια της μέτρησης που θέλουμε να πετύχουμε και τις ιδιότητες του υλικού του δείγματος. Αν είναι άγνωστη η εξάρτηση των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας ενός υλικού με την θερμοκρασιακή διαφορά πρέπει να γίνει έλεγχος με τρεις μετρήσεις με πολύ διαφορετικές θερμοκρασιακές διαφορές. Αν είναι γνωστό πως έχουν γραμμική εξάρτηση χρειάζονται δύο μετρήσεις για να καθοριστεί η γραμμική συσχέτιση.

- **Συνολικός χρόνος και διαστήματα μέτρησης**

Οι μετρήσεις μονωτικών υλικών με χαμηλή θερμοχωρητικότητα και για περιπτώσεις όπου υπάρχει απορρόφηση ή εκρόφηση υγρασίας, με επακόλουθη λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας, το εσωτερικό του δείγματος μπορεί να απαιτεί ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για την επίτευξη θερμικής ισορροπίας. Ο χρόνος επίτευξης της ισορροπίας ποικίλει από λίγα λεπτά μέχρι μέρες αναλόγως τη διάταξη, το δείγμα και της μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

### 5.3.5. Περιγραφή πειραματικής διάταξης TLP 300 DT

#### *Γενικές πληροφορίες*

Η διάταξη με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, είναι η **TLP 300 DT** της εταιρείας TAURUS instruments GmbH στο εργαστήριο Τεχνικών Υλικών στο κτίριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ. Το μετρητικό σύστημα TLP χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αγωγής θερμότητας υλικών σύμφωνα με τη μέθοδο GHP όπως ορίζεται από τα πρότυπα ISO 8302, DIN 52612, DIN EN 1946-2, EN 12664, EN 12667 και EN 12939.

Το υπολογιστικό λογισμικό που εκτελεί τις απαραίτητες διεργασίες και τον απαραίτητο έλεγχο είναι το Lamda 2008 και τα τμήματα που αποτελούν τη μετρητική διάταξη είναι τα εξής [37]:

- μετρητικός θάλαμος και πόρτα
- ισοθερμικό μπλοκ
- 2 ψυχρές πλάκες
- 1 θερμή πλάκα με προστατευτικό δαχτυλίδι θέρμανσης
- ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης και ελέγχου
- 20 θερμοστοιχεία τύπου T, τοποθετημένα ανά 5 σε φύλλα
- 4 φύλλα σιλικόνης



**Εικόνα 5.1:** Μετρητικός θάλαμος GHP- Πρόσοψη



**Εικόνα 5.2:** Μετρητικός θάλαμος GHP- Πλάγια όψη

- **Πλάκα θέρμανσης**

Σκοπός της πλάκας είναι να παράγει ροή θερμότητας στο δείγμα. Για την μονωτική προστασία του υλικού, περιμετρικά και σε ελάχιστη απόσταση υπάρχει μια προστατευτική ζώνη (δαχτυλίδι) που εμποδίζει τη θερμότητα να διαφύγει από τις άκρες. Η πλάκα είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε η εισερχόμενη ισχύς να μετατρέπεται (σε όλη την επιφάνεια) σε εξερχόμενη θερμότητα. Αυτές οι ιδιότητες εξασφαλίζονται χάρη σε μια πολύ ομογενή δομή σε συνδυασμό με της χαμηλής θερμικής αντίστασης μαύρες αλουμινένιες πλάκες. Η μονάδα θέρμανσης έχει διαστάσεις 100x100mm και μαζί με την προστατευτική ζώνη είναι 300x300mm.

- **Ψυχρές πλάκες**

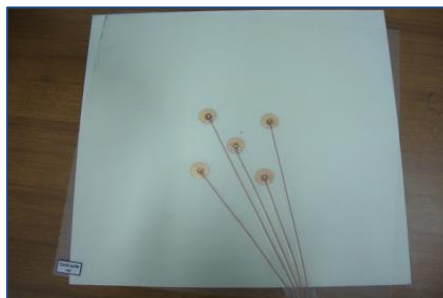
Η θερμοκρασία των ψυχρών πλακών ρυθμίζεται μέσω ενός ελεγκτή θερμοκρασίας Peltier ώστε να υπάρξει κλίση θερμοκρασίας από τη θερμή πλάκα περίπου 10K (εξαρτάται από τις εκάστοτε παραμέτρους). Το σχέδιο και το υλικό που έχουν επιλεγεί για μέτρηση συμβάλλουν στην ομοιογενή κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της πλάκας. Βρίσκονται εκατέρωθεν της θερμής πλάκας και κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό, έχουν μαύρο χρώμα και οι διαστάσεις τους είναι 300x300mm. Οι διαστάσεις του δείγματος μπορούν να είναι μικρότερες ή ίσες για να εξασφαλίζεται η μονοδιάστατη ροή θερμότητας.

- **Θερμοστοιχεία**

Τα θερμοστοιχεία λειτουργούν σύμφωνα με το πρότυπο DIN 52612 για τον άμεσο καθορισμό της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς. Είναι τύπου T, δηλαδή το υλικό κατασκευής είναι μείγμα χαλκού με

κοβάλτιο (Cu/ Co), έχουν κυκλικό σχήμα διαμέτρου 10mm και πάχος 0,4mm. Τα φύλλα στα οποία είναι ενσωματωμένα, τοποθετούνται στις άνω και κάτω επιφάνειες των δειγμάτων.

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8302: 1991, η εκκίνηση της μέτρησης γίνεται όταν έχει επιτευχθεί θερμική ισορροπία μεταξύ της συσκευής και του ατμοσφαιρικού αέρα. Η ομοιομορφία της μέτρησης της θερμοκρασίας πρέπει να προσδιορίζεται συγκρίνοντας την θερμοκρασία με τον αέρα του περιβάλλοντος.



**Εικόνα 5.3:** Αισθητήρας θερμοστοιχείου

**Εικόνα 5.4:** Θερμοστοιχεία και φύλλο σιλικόνης

- **Σύστημα ψύξης**

Η θερμοκρασία στις ψυχρές πλάκες ρυθμίζεται μέσω συσκευών Peltier. Κάθε πλάκα διαθέτει τέσσερις συσκευές Peltier για την μεταφορά θερμότητας. Η επιπλέον θερμότητα αποβάλλεται με τη βοήθεια ενός συνεχούς κύκλου ψύξης. Για να διασφαλιστεί ο ομοιόμορφος θερμοκρασιακός έλεγχος, το καθένα από τα στοιχεία ενεργοποιείται χωριστά. Επιπλέον, η θερμοκρασία της πλάκας μετριέται σε τέσσερα σημεία κοντά στα στοιχεία Peltier και η ένδειξη χρησιμοποιείται για την κατάλληλη προσαρμογή. Ένας αξιόπιστος κύκλος ψύξης είναι απαραίτητος για την σωστή λειτουργία του Θερμοκρασιακού ελέγχου. Για τον λόγο αυτό και για την πρόληψη των ζημιών που προκαλούνται από τυχόν δυσλειτουργία στην ψύξη, ενσωματώνεται ένας αισθητήρας ροής για τον έλεγχο της κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου.

### **Συλλογή δεδομένων και επεξεργασία**

- **Ηλεκτρονικός εξοπλισμός**

Ο μετρητικός εξοπλισμός ελέγχεται με τη χρήση λογισμικού. Οι μετρούμενες τιμές διαβάζονται από το λογισμικό μέσω της μονάδας μέτρησης και ελέγχου που αποτελείται κυρίως από ένα πολυπλέκτη, έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και έναν μικροελεγκτή. Όλες οι διαδικασίες καταγραφής των δεδομένων ελέγχονται από τον μικροελεγκτή που επικοινωνεί με το πρόγραμμα μέσω σειριακής θύρας. Τα σήματα των θερμοστοιχείων και των θερμοροομέτρων τροφοδοτούνται στην είσοδο του A/D μετατροπέα μέσω του πολυπλέκτη. Οι ηλεκτρονόμοι του πολυπλέκτη δεν παράγουν κανένα μετρήσιμο σφάλμα στη θερμοηλεκτρική τάση. Ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για την μετατροπή των τάσεων εισόδου σε ψηφιακές τιμές μέτρησης. Είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε οι απαιτήσεις ακριβείας να καλύπτουν τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 8302.

Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται σε κυκλικές δοκιμές. Για να γίνει αυτό, εξαιρετικά ακριβείς τάσεις βαθμονόμησης εφαρμόζονται στις εισόδους και οι μετρούμενες τιμές του εξοπλισμού συγκρίνονται με εκείνες ενός ψηφιακού βολτομέτρου, βαθμονομημένου από τη Γερμανική Υπηρεσία Βαθμονόμησης (DKD). Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με τάσεις που αντιστοιχούν σε 0% και 100% του εύρους εισόδου του μετρητικού συστήματος. Οι μετρητικές ενδείξεις επεξεργάζονται περαιτέρω στον Η/Υ με την μετατροπή των θερμοηλεκτρικών τάσεων σε θερμοκρασίες,

χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη τάση- ρεύματος του σχετικού θερμικού υλικού τύπου T. Το πρόγραμμα εμφανίζει εξίσου τις μετρηθείσες θερμοκρασίες και τις τάσεις σε mV, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ιχνυλασιμότητα της υπολογιστικής διαδικασίας.

- **Μέτρηση της θερμοκρασίας**

Η θερμοκρασία μετριέται με θερμοστοιχεία τύπου T (Cu/ Co), χρησιμοποιώντας υλικό που επιλέγεται από μία μόνο παρτίδα ώστε να έχουν ίδιες ιδιότητες. Η μετάβαση από το θερμικό υλικό στα καλώδια χαλκού γίνεται μέσα σε ένα ισοθερμικό μπλοκ, κατασκευασμένο από αλουμίνιο και θερμικά μονωμένο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η θερμοκρασία στις ενώσεις των καλωδίων μετριέται στο ισοθερμικό μπλοκ με έναν αισθητήρα αναφοράς Pt100, συνεπώς προσδιορίζονται οι θερμοηλεκτρικές τάσεις που οφείλονται μόνο στις ενώσεις.

Το θερμόμετρο αντίστασης Pt100 είναι τύπου 1/10 DINB και άρα πολύ ακριβές. Ο ηλεκτρονικός μετρητικός εξοπλισμός έχει μέγιστο σφάλμα 2uV, που αντιστοιχεί σε σφάλμα θερμοκρασίας 0,05K. Ένα ξεχωριστό μετρητικό σήμα παράγεται από τη διαφορά θερμοκρασίας καλωδιώνοντας τα θερμοστοιχεία των θερμών και των ψυχρών πλευρών σε διαφορική σύνδεση και όλα τα σήματα διαφοράς σε σύνδεση σειράς. Το αποτέλεσμα είναι ένα ενισχυμένο σήμα, απαλλαγμένο από σφάλματα λόγω θερμοηλεκτρικής τάσης που οφείλονται σε αυτό το είδος καλωδίωσης.

### ***Ανάλυση Πειραματικής Διαδικασίας***

Τα δείγματα τοποθετούνται στο μετρητικό θάλαμο με τρόπο κατάλληλο ώστε να αποφεύγονται τυχόν διάκενα μεταξύ των δειγμάτων, της θερμής πλάκας και των ψυχρών πλακών, εκτός αν προκαλούνται από το προφίλ της επιφάνειας του δείγματος. Το πάχος των δοκιμών που συμπίεζεται εύκολα ρυθμίζεται με προϋθμιση της δύναμης επαφής και με αργή οδήγηση των πλακών θέρμανσης στο δείγμα. Το διογκωμένο πολυστυρένιο θεωρείται σκληρό υλικό οπότε μια δύναμη 400N εξασφαλίζει την επαφή χωρίς διάκενο μεταξύ πλακών και δειγμάτων.

- **Προετοιμασία των δειγμάτων**

Οι επιφάνειες των στερεών πρέπει να είναι επίπεδες, παράλληλες και κατάλληλα επεξεργασμένες ώστε να μην έχουν κενά. Είναι αποδεκτό το γέμισμα των αρμών κατακόρυφα στο δείγμα αρκεί η περιοχή να μην είναι μεγαλύτερη από το 5% της συνολικής επιφάνειας. Πριν από τη δοκιμή, τα δείγματα ξηραίνονται μέχρι να αποκτήσουν σταθερό βάρος ως εξής:

- Υλικά με βάση το γύψο στους 40°C
- Αφρώδη πλαστικά στους 70°C
- Όλα τα υπόλοιπα υλικά στους 105°C

Τα αφρώδη πλαστικά (όπως το EPS) περιέχουν διογκωτικά μέσα των οποίων η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρότερη από εκείνη του αέρα και για αυτό φυλάσσονται το λιγότερο 6 εβδομάδες σε θερμοκρασίες δωματίου 18 έως 28°C πριν από την μέτρηση. Η φαινόμενη πυκνότητα και το πάχος των δοκιμών προσδιορίζονται πριν την τοποθέτησή τους στον μετρητικό θάλαμο.

- **Οδηγίες τοποθέτησης**

Αρχικά ανοίγουμε την πόρτα του θαλάμου και οδηγούμε την άνω ψυχρή πλάκα και την θερμαινόμενη πλάκα στην ανώτατη θέση. Ακολουθεί η τοποθέτηση των δειγμάτων εκατέρωθεν της θερμής πλάκας με προσοχή ώστε να είναι όσο το δυνατόν στο κέντρο. Για να εξασφαλιστεί η καλή

διεπαφή των θερμοστοιχείων με το EPS γίνεται χρήση φύλλων σιλικόνης πάχους 2mm μαζί με την τοποθέτηση των φύλλων που είναι ενσωματωμένα τα θερμοστοιχεία, σε κάθε πλευρά του δείγματος.

Για την εξασφάλιση της σωστής σειράς τοποθέτησης, υπάρχουν στα φύλλα των θερμοστοιχείων και στις πλαϊνές συνδέσεις, πληροφορίες σχετικά με τη θέση που τοποθετείται το κάθε φύλλο. Το υλικό των πρόσθετων φύλλων έχει επιλεγεί ώστε να εισάγει ελάχιστη θερμική αντίσταση που απαλείφεται με κατάλληλη διόρθωση. Στη συνέχεια χαμηλώνουμε την άνω ψυχή και την θερμή πλάκα μέχρι να έρθουν σε επαφή με τα αντίστοιχα δείγματα όπου και σταματούν. Η δύναμη επαφής που ασκείται ρυθμίζεται από ένα κομβίο ελέγχου στη σχετική μονάδα. Επειδή το EPS θεωρείται σκληρό υλικό εφαρμόζεται δύναμη 400N χωρίς να υπάρχει μεταβολή του πάχους και άρα της θερμικής αγωγιμότητας. Η ταχύτητα ελέγχεται με ποτενσιόμετρο που βρίσκεται στην πρόσοψη και πρέπει να μειώνεται όσο πλησιάζει το κάτω δείγμα. Η τοποθέτηση έχει ολοκληρωθεί όταν δεν υπάρχουν διάκενα μεταξύ των δοκιμίων, των φύλλων και των πλακών.

- **Αριθμός μετρήσεων**

Η μέθοδος Guarded Hot Plate θεωρείται η πιο έγκυρη επειδή οι τιμές που προκύπτουν αφορούν ολόκληρη τη μάζα του υλικού αλλά κυρίως γιατί η μέτρηση πραγματοποιείται σε ελεγχόμενες συνθήκες και σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες μέσα σε ένα μετρητικό θάλαμο. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι πως η διαδικασία απαιτεί πολύ χρόνο μέχρι και την λήψη της τελευταίας μέτρησης.

Ωστόσο επειδή προσφέρει μεγάλη ακρίβεια μετρήθηκαν όλες οι ομάδες δειγμάτων σε στεγνή κατάσταση χωρίς συσκευασία και μετά από μερική και ολική βύθιση με την συσκευασία.



**Εικόνα 5.5:** Σωστή τοποθέτηση δειγμάτων



**Εικόνα 5.6:** Πλευρικές ενδείξεις τοποθέτησης

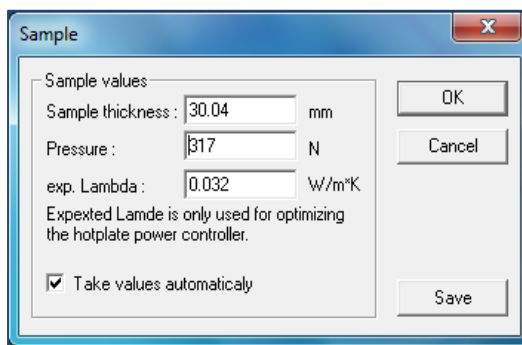
### **Περιγραφή προγράμματος Lamda2009**

Η λειτουργία του μετρητικού συστήματος TLP γίνεται μέσω του λογισμικού πακέτου Lamda2009. Όλα τα δεδομένα επεξεργασίας όπως οι θερμοκρασίες, οι θερμοκρασιακές διαφορές, οι ροές θερμότητας, τα ρεύματα και οι τάσεις καθορίζονται και παρακολουθούνται από το πρόγραμμα. Επίσης παράμετροι όπως οι χρόνοι σάρωσης, παράμετροι ελέγχου ή θερμοκρασιών καθορίζονται από το λογισμικό. Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα σημαντικά δεδομένα της επεξεργασίας και οι μετρήσεις να είναι διαθέσιμα και να μπορούν να παρακολουθούνται συνεχώς. Με αυτή τη δυνατότητα οτιδήποτε συμβαίνει κατά τη διάρκεια παρακολουθείται κάθε στιγμή. Στο τέλος της διαδικασίας τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε ένα γράφημα μιας αναφοράς με τις σημαντικότερες πληροφορίες της μέτρησης και των δειγμάτων.

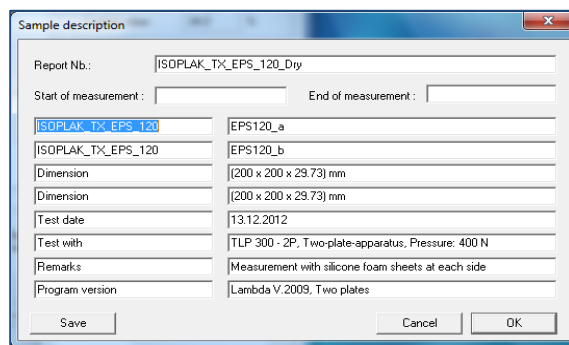
• Διαδικασία μέτρησης

Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της μέτρησης είναι η πόρτα να παραμένει κλειστή για όλο το χρονικό διάστημα. Για την έναρξη και την ολοκλήρωση εκτελούνται τα παρακάτω βήματα:

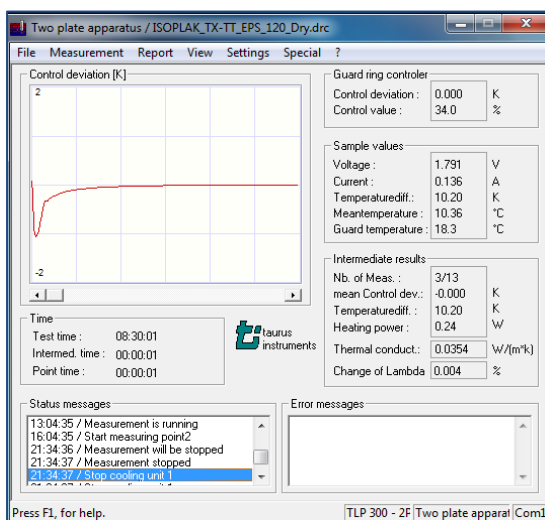
1. Τοποθέτηση των δειγμάτων στο μετρητικό θάλαμο.
2. Ενεργοποίηση του συστήματος μέτρησης και ελέγχου.
3. Εκκίνηση του προγράμματος Lamda2009. Στην επιλογή του μενού Measurement και πριν ξεκινήσει η μέτρηση, γίνονται οι παρακάτω ρυθμίσεις:
  - 3.1 Στην επιλογή του μενού Sample συμπληρώνουμε το πάχος του υλικού σε mm όπως αυτό έχει μετρηθεί από τη διάταξη.
  - 3.2 Στο παράθυρο διαλόγου Sample description γίνεται μια βασική περιγραφή του δοκιμίου π.χ. ονοματολογία, ημερομηνία, χαρακτηριστικές τιμές του υλικού (αν υπάρχουν).
  - 3.3 Στην επιλογή Parameters καθορίζονται συγκεκριμένες παράμετροι που είναι απαραίτητες για την διεξαγωγή της μέτρησης π.χ. η μέση θερμοκρασία δείγματος (°C), η διαφορά θερμοκρασίας (K) των θερμών και των ψυχρών πλευρών, ο συνολικός χρόνος μέτρησης (min) για μια μέση θερμοκρασία.
4. Εκκίνηση της μέτρησης με την επιλογή Start measurement.
5. Διακοπή της διαδικασίας είτε με την ολοκλήρωσή της είτε χειροκίνητα με την επιλογή Stop.
6. Αποθήκευση του αρχείου αποτελεσμάτων και εκτύπωση .



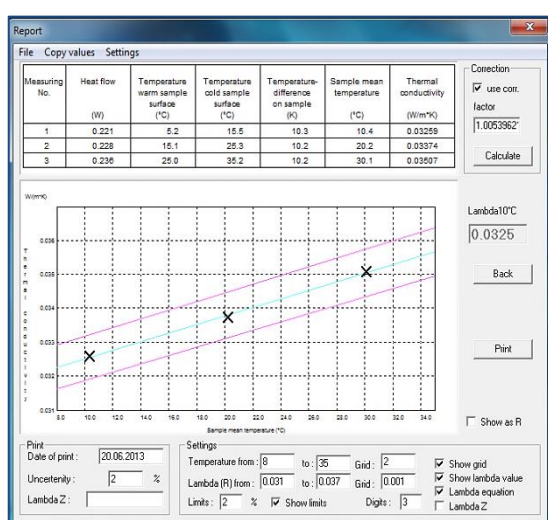
Εικόνα 5.7: Πάχος δείγματος



Εικόνα 5.8: Περιγραφή δείγματος



Εικόνα 5.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά μέτρησης



Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας



## 5.4. Δυναμική μέθοδος CTmètre

Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει τον καθορισμό των θερμικών χαρακτηριστικών ομογενών και ιστροπικών υλικών σε μικρό χρονικό διάστημα. Η σημαντικότερη διαφορά με τις μεθόδους Guarded Hot Plate και Heat Flow meter είναι πως η μέτρηση πραγματοποιείται χωρίς να έχει αποκατασταθεί η θερμική ισορροπία στο εσωτερικό του υλικού με αποτέλεσμα να έχουμε μεταβατικές συνθήκες μετάδοσης θερμότητας. Επίσης η μέτρηση είναι τοπική και επιφανειακή, αφορά δηλαδή μόνο το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα και δεν είναι αντιπροσωπευτική ολόκληρης της μάζας του δείγματος.



**Εικόνα 5.11:** Διάταξη CTmètre και αισθητήρες

Η προμήθεια της διάταξης και του εγχειριδίου λειτουργίας έγινε από το γαλλικό επιστημονικό κέντρο Centre Scientifique et Technique du Bâtiment που ειδικεύεται στις καινοτόμες λύσεις σε κτιριακές εφαρμογές.

- **Αρχή λειτουργίας**

Η λειτουργία της διάταξης καθορίζεται από μια δυναμική τεχνική που ονομάζεται **Transient Hot Wire** (THW) method. Η τεχνική βασίζεται στη μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας που προκαλείται από μια γραμμική πηγή θερμότητας που είναι ενσωματωμένη στο μετρούμενο δείγμα, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα [36]. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας υπολογίζεται από την κλίση της θερμοκρασίας  $\Delta T$  με την λογαριθμική καμπύλη του χρόνου, η οποία επιβάλλει σημαντικούς περιορισμούς σχετικά με την ακρίβεια των μετρήσεων.

### 5.4.1. Περιγραφή διάταξης CTmètre

Δύο είναι τα κύρια μέρη που απαρτίζουν την πειραματική συσκευή:

- **Μονάδα ελέγχου**

Η μονάδα ελέγχου παράγει την απαραίτητη θερμική ισχύ και αναλύει την καμπύλη της θερμοκρασιακής αύξησης που επάγεται στο υλικό. Στην μπροστινή πλευρά υπάρχει ένα πληκτρολόγιο για την είσοδο των παραμέτρων, που εξαρτώνται από τον τύπο του αισθητήρα και μια οθόνη για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Στο εσωτερικό υπάρχει ένας ηλεκτρονικός μικροεπεξεργαστής για την διαχείριση των εντολών ελέγχου.



Εικόνα 5.12: Μονάδα ελέγχου CTmètre

- **Αισθητήρες θερμοκρασιών**

Οι **αισθητήρες** έχουν σκοπό έχουν την μετάδοση της θερμικής ισχύος και τον υπολογισμό της επαγόμενης θερμοκρασίας με τα ενσωματωμένα θερμοστοιχεία. Υπάρχουν τέσσερα είδη ανάλογα με το υλικό και τα μεγέθη που θέλουμε να υπολογίσουμε.

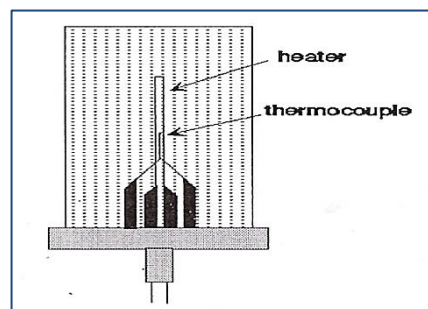
→ Κυλινδρικός αισθητήρας (cylindrical probe), κατασκευασμένος από κράμα Ni- Cr με μήκος 10mm, διάμετρο 3,5mm και πάχος 0,07mm.

→ Δακτυλιοειδής αισθητήρας (ring probe), αποτελούμενος από ένα πολυστρωματικό φιλμ χαλκού-πολυαμιδίου- κωνσταντάνης με πάχος 0,2mm και διαστάσεις 60x90mm. Ένα κυκλικό στοιχείο θέρμανσης κωνσταντάνης και ένα θερμοστοιχείο τύπου J ενσωματώνονται σε ένα φύλλο πολυαμιδίου.

→ Αισθητήρας θερμού νήματος ή σωλήνα (wire or tube probe), κατασκευασμένος από πολυστρωματικό φιλμ χαλκού- πολυαμιδίου- κωνσταντάνης με πάχος 0,2mm και μήκος 50mm. Όπως και στον προηγούμενο ένας κυλινδρικός θερμαντήρας κωνσταντάνης και ένα θερμοστοιχείο τύπου J ενσωματώνονται σε ένα φύλλο πολυαμιδίου.

→ Αισθητήρας σιδήρου (iron probe) που αποτελείται από ένα καθετήρα σύρματος τοποθετημένο σε μια επιφάνεια μιας πλάκας με γνωστή θερμική αγωγιμότητα. Με αυτόν τον καθετήρα είναι δυνατό να γίνει μέτρηση σε επίπεδες επιφάνειες με πλάτος ίδιο με την επιφάνεια επαφής του.

Όλοι οι αισθητήρες εκτός από τον τελευταίο τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο δείγματα του ίδιου ομογενούς και ισότροπου υλικού με κατάλληλα επεξεργασμένες επιφάνειες ώστε να εξασφαλίζεται η επιπεδότητα. Ο κυλινδρικός και ο καθετήρας θερμού νήματος προσδιορίζουν μόνο την θερμική αγωγιμότητα σε αντίθεση με τον δακτυλιοειδή αισθητήρα όπου μετράει και την ειδική θερμοχωρητικότητα ( $\text{KJ/m}^3\text{K}$ ).



Εικόνα 5.13: Αισθητήρας θερμού νήματος ή σωλήνα

- **Επιλογή και χαρακτηριστικά αισθητήρα**

Ο κατάλληλος αισθητήρας για τις μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας στα δοκίμια EPS είναι ο hot wire probe με μήκος 0,05m και αντίσταση 7,730hms. Αφού τοποθετηθεί ανάμεσα στα δύο δοκίμια και για να μείνει σταθερός σε ένα σημείο τοποθετούμε ένα βάρος 10kg στην ανώτερη επιφάνεια για όσο διαρκεί η μέτρηση.

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας υπολογίζει μόνο τη θερμική αγωγιμότητα και το συντελεστή συσχέτισης που εκφράζει την εγκυρότητα της μέτρησης. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του είναι:

- ✓ Θερμική αγωγιμότητα: 0,02 έως 5W/mK
  - Ακρίβεια μετρήσεων:  $\pm 5\%$
  - Επαναληψιμότητα:  $\pm 2\%$
- ✓ Παρεχόμενη ισχύς: 0 έως 1W (0- 1A με βήμα 32,25mA)
- ✓ Θερμοκρασία: -20 έως 80°C με διακριτική ικανότητα 0,025°C
- ✓ Χρόνος θέρμανσης/ μέτρησης: 1- 500s
- ✓ Συντελεστής συσχέτισης: 0,98- 1, όπου 1 είναι η βέλτιστη τιμή

#### 5.4.2. Πειραματική διαδικασία

- **Παράμετροι**

Για την εκκίνηση της διαδικασίας πρέπει να εισαχθούν κάποιες παράμετροι στο πρόγραμμα, οι οποίες ορίζονται από τον τύπο του αισθητήρα που έχει επιλεγεί. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τον αισθητήρα θερμού νήματος είναι:

- Μήκος: 0,05m
- Αντίσταση: 7,730hms
- Ισχύς που χρειάζεται ο θερμαντήρας σε Watts, η οποία ποικίλει σύμφωνα με την τάξη μεγέθους της θερμικής αγωγιμότητας από 0,1 έως 0,8W.
- Διακύμανση θερμοκρασίας:  $dT = 10 \div 15$ , προκειμένου να είναι επιτυχής η μέτρηση. Αν είναι μικρότερο από 10, αυξάνουμε τη θερμική ισχύ ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 15 την μειώνουμε.
- Χρόνος θέρμανσης/ μέτρησης: μέγιστος χρόνος 500s. Συνήθεις τιμές που καλύπτουν το 95% των περιπτώσεων κυμαίνονται μεταξύ 120 και 240s.
- Χρονικό βήμα: 1s

- **Διαδικασία μέτρησης**

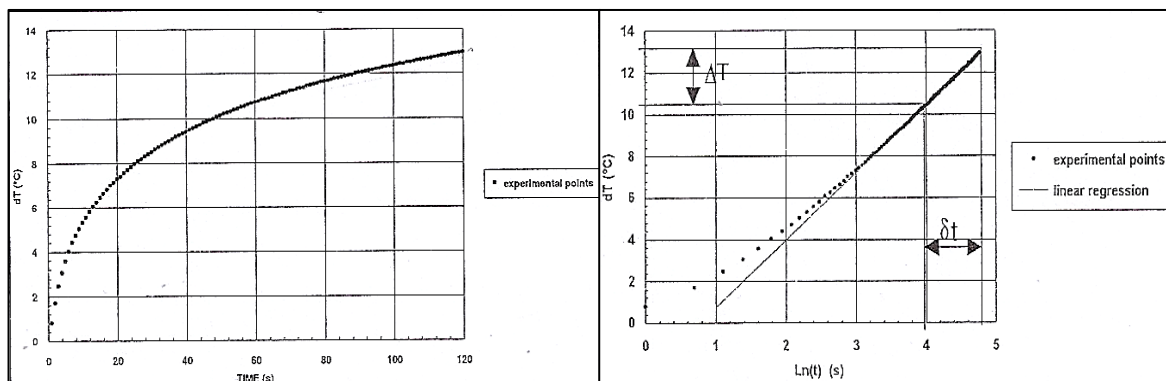
Αφού γίνει η τοποθέτηση του αισθητήρα, η μονάδα ελέγχου πραγματοποιεί ακολουθίες δοκιμών μέτρησης της θερμοκρασίας κάθε 6sec για 60sec. Αν κατά τη διάρκεια η θερμοκρασία ποικίλει περισσότερο από  $\pm 3\%$  δεν ενεργοποιείται ο κύκλος θέρμανσης. Η θέρμανση ξεκινάει μόνο μετά από έναν επιτυχή έλεγχο σταθερής θερμοκρασίας και ολοκληρώνεται με το πέρας του προκαθορισμένου χρόνου θέρμανσης/ μέτρησης. Ωστόσο για λόγους εγκυρότητας η θερμοκρασία προσδιορίζεται κάθε 1- 5sec με ακρίβεια το λιγότερο 0,03°C.

Η πειραματική διάταξη υπολογίζει τη θερμική αγωγιμότητα από την κλίση της θερμοκρασίας  $\Delta T$  με την λογαριθμική καμπύλη του χρόνου  $\ln(t)$  στο γραμμικό κομμάτι μέσω της σχέσης:

$$\Delta T = \frac{R \cdot I^2}{L} \times \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \times (\ln(t) + C^{te}) \quad (5.1)$$

όπου R η ωμική αντίσταση (Ω)  
I το ρεύμα θέρμανσης (A)  
L το μήκος του θερμαντήρα (m)  
λ η θερμική αγωγιμότητα (W/mK)  
t ο χρόνος (s)

Η τιμή της θερμοκρασίας λαμβάνεται μέσω της ηλεκτρικής αντίστασης και το λ προσδιορίζεται αυτόματα μέσω της μονάδας ελέγχου. Ο αλγόριθμος υπολογίζει το συντελεστή συσχέτισης, που στην περίπτωση που είναι μικρότερος από 0,98 η μέτρηση πρέπει να επαναληφθεί.



**Εικόνα 5.14:** Υπολογισμός θερμικής αγωγιμότητας στην διάταξη Ctmeter [36]

#### • Αριθμός μετρήσεων και τιμές παραμέτρων

Έχει ήδη αναφερθεί πως η διάταξη CTmètre δίνει τοπικές και επιφανειακές μετρήσεις. Για να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για την κάθε ομάδα EPS πραγματοποιούνται 3 με 4 μετρήσεις σε τυχαία σημεία με όλους τους συνδυασμούς των ανά δύο δοκιμών (δηλ. a+b, b+c, a+c) και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Στην μερική βύθιση όπου μία πλευρά παραμένει στεγνή ο αισθητήρας τοποθετήθηκε ανάμεσα στις στεγνές πλευρές και τις υγρές πλευρές των δειγμάτων. Επειδή ο κύκλος θέρμανσης/ μέτρησης οδηγεί σε υπερθέρμανση του υλικού πρέπει να παρεμβάλλεται λίγος χρόνος ώστε να κρυώσει πρώτα το υλικό πριν την επόμενη μέτρηση.

Για την επίτευξη ικανοποιητικών μετρήσεων απαιτείται σωστός συνδυασμός ισχύος, χρόνου θέρμανσης/ μέτρησης ώστε να προκύπτει η διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα στα όρια,  $dT = 10 \div 15$ . Όπως έχει προαναφερθεί η παρουσία υγρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που σημαίνει πως αλλάζει ο συνδυασμός ανάλογα με το ποσό υγρασίας που έχει απορροφήσει κάθε ομάδα EPS. Οι τιμές των παραμέτρων σε στεγνή κατάσταση, μετά από μερική και ολική βύθιση διαμορφώθηκαν ως εξής:

1. Σε στεγνά δοκίμια οι μετρήσεις έγιναν με ισχύ  $P = 0,072W$  και χρόνο θέρμανσης/ μέτρησης  $dt = 120s$ .
2. Στην μερική βύθιση όταν ο αισθητήρας ήταν ανάμεσα στις στεγνές πλευρές οι τιμές παρέμειναν ίδιες ( $P = 0,072W$  και  $dt = 120s$ ). Στις μετρήσεις όπου ο αισθητήρας εφάπτεται στις υγρές πλευρές

έγινε αύξηση της ισχύος επειδή με τις προηγούμενες τιμές προέκυπτε  $dT \leq 10$ . Επειδή όμως με αυξημένη τιμή και χρόνο 120s το  $dT$  ήταν εκτός του ανώτατου ορίου έγινε μείωση του χρόνου και συνεπώς χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $P = 0,128W$  και  $dt = 100s$ .

3. Στην ολική βύθιση όπου το δείγμα έχει απορροφήσει υγρασία στη μάζα του και καμία πλευρά δεν παραμένει στεγνή, χρειάστηκε αυξημένη ισχύς και μεγαλύτερος χρόνος θέρμανσης/ μέτρησης για να αναπτυχθεί κλίση θερμοκρασίας. Συνεπώς ο κατάλληλος συνδυασμός ήταν  $P = 0,128W$  και  $dt = 120s$ .

Επισημαίνεται πως δεν μετρήθηκαν όλα τα δοκίμια μερικής και ολικής βύθισης με την διάταξη λόγω περιορισμένου χρόνου, αλλά μόνο όσα είχαν βυθιστεί στις δεξαμενές στην πρώτη φάση και μερικά από την δεύτερη φάση. Ωστόσο οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν αρκετές για να ελεγχθεί η αξιοπιστία της και να γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

## 5.5. Αναλυτής μεταφοράς θερμότητας ISOMET

Το μοντέλο ISOMET 2104 αποτελεί ένα φορητό όργανο για άμεση μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων μεγάλου εύρους υλικών. Όπως και η διάταξη CTmètre πραγματοποιεί τοπικές και επιφανειακές μετρήσεις σε μη μόνιμες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας και μάζας οπότε ο χρόνος εκτέλεσης είναι περίπου 12min.

Η προμήθεια της διάταξης έγινε από τον οργανισμό Applied Precision Ltd. που εδράζεται στη Σλοβακία και ειδικεύεται στον τομέα των συσκευών μετρήσεων και ελέγχου σύμφωνα με το πρότυπο ποιότητας ISO 9001: 2008.

Ο αναλυτής ISOMET αποτελεί ένα όργανο πολλαπλών λειτουργιών που προσδιορίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ ), την θερμική διάχυση ( $m^2/s$ ), την ειδική θερμοχωρητικότητα ( $J/m^3K$ ) και την θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ ) [35]. Χρησιμοποιείται ευρέως σε έργα πολιτικού μηχανικού, στην χημική και ξυλουργική βιομηχανία, στην κλωστοϋφαντουργία και σε γεωλογικές έρευνες.



**Εικόνα 5.15:** ISOMET model 2104 και αισθητήρας επιφάνειας

- **Αρχή λειτουργίας**

Η μέτρηση βασίζεται στην ανάλυση της θερμοκρασιακής απόκρισης του μετρούμενου υλικού σε παλμούς ροής θερμότητας. Η θερμοροή παράγεται μέσω ηλεκτρικής θέρμανσης του θερμαντήρα που είναι ενσωματωμένος στον αισθητήρα και βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του

δείγματος. Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοχωρητικότητας γίνεται με περιοδική δειγματοληψία των καταγεγραμμένων θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου υπό τον όρο ότι η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται σε απεριόριστο μέσο.

### 5.5.1. Περιγραφή διάταξης ISOMET 2104

Η διάταξη αποτελείται από δύο κύρια μέρη όπως και η προηγούμενη, από την κεντρική μονάδα και τους αισθητήρες μέτρησης.

- **Κεντρική μονάδα**

Η μονάδα μετρήσεων και ελέγχου παράγει την θερμική ισχύ για την ανάπτυξη θερμοκρασιακής κλίσης και αναλύει την θερμοκρασιακή απόκριση του υλικού ώστε να προκύψουν τα κατάλληλα αποτελέσματα. Στην πρόσοψη της συσκευής διακρίνονται 40 κουμπιά και μια οθόνη τεσσάρων γραμμών για την είσοδο των παραμέτρων και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων αντίστοιχα, επιτρέποντας την διαδραστική επικοινωνία με τον χρήστη.

- **Καθετήρες και αισθητήρες θερμοκρασιών**

Υπάρχουν δύο ειδών αισθητήρες: οι τύπου βελόνης για πορώδη, ινώδη και γενικότερα μαλακά υλικά και οι επιφανειακοί για σκληρά υλικά. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή και παράθεση των χαρακτηριστικών των αισθητήρων:

→ Τύπου βελόνης

Παρέχουν δυνατότητα μέτρησης στερεών μαλακών υλικών με συνεχή επαφή του καθετήρα και του δοκιμίου ή με διάτρηση του για την εισαγωγή της βελόνης. Οι τέσσερις καθετήρες του συγκεκριμένου τύπου προσδιορίζουν τιμές θερμικής αγωγιμότητας από 0,015 W/mK μέχρι 0,1 W/mK ανάλογα με την επιλογή του αισθητήρα. Η ακρίβεια της μέτρησης δεν αλλοιώνεται ακόμα και για τους χαμηλής αγωγής αφρούς πολυουρεθάνης όμως μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από σκληρότερα υλικά μέσω ανακρίβειας στην διάνοιξη της οπής. Το ελάχιστο πάχος του υλικού γύρω από τον καθετήρα κυμαίνεται από 10- 15mm, αναλόγως με την θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Το τμήμα του αισθητήρα αρχίζει 15mm από την άκρη του καθετήρα και έχει μήκος 50mm. Η βελόνα του αισθητήρα θα πρέπει να εισαχθεί πλήρως στο μετρούμενο υλικό μέχρι λαβή της, προκειμένου να επιτύχει την καλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων, αλλά 80mm βάθος εισαγωγής είναι αποδεκτό στις περισσότερες περιπτώσεις.

→ Επιφανειακοί αισθητήρες

Οι συγκεκριμένοι είναι ιδανικοί για στερεά σκληρά υλικά. Έχουνε στρογγυλό σχήμα με διάμετρο 60mm, οπότε πρέπει να δίνεται προσοχή οι διαστάσεις των δειγμάτων να είναι ίσες ή μεγαλύτερες. Είναι κατάλληλοι για μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας από 0,04 έως 6W/mK. Η απαίτηση για επιπεδότητα των επιφανειών αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή του λ του δείγματος το οποίο πρέπει να έχει ελάχιστο πάχος 10- 15mm. Όπως και με τους αισθητήρες τύπου βελόνα είναι δυνατή η μέτρηση αφρών χαμηλής αγωγιμότητας. Ωστόσο πρέπει να διευκρινιστεί πως οι επιφανειακές ιδιότητες του υλικού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από εκείνες στην εσωτερική δομή του δοκιμίου (ειδικά στην περίπτωση των χαμηλής αγωγής αφρών γεμισμένων με αέριο λόγω της διάχυσης του αερίου πλήρωσης).

- **Επιλογή και χαρακτηριστικά αισθητήρα**

Η διογκωμένη πολυστερίνη είναι σκληρό υλικό και εφόσον τα δείγματα έχουν επίπεδες επιφάνειες και διαστάσεις μεγαλύτερες από 60mm, η επιλογή γίνεται μεταξύ των επιφανειακών αισθητήρων. Η τάξη μεγέθους του συντελεστή  $\lambda$  είναι  $10^{-2}$  οπότε ο κατάλληλος αισθητήρας είναι ο Surface Probe API 210411 με τα παρακάτω λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- Εύρος τιμών θερμικής αγωγιμότητας: 0,04- 0,30W/mK
- Εύρος τιμών θερμοκρασίας : -15 έως 50°C
- Ακρίβεια μέτρησης: 5% της ένδειξης +0,003W/mK για τιμές 0,015- 0,050W/mK
- Επαναληψιμότητα: 3% της ένδειξης +0,001W/mK

- **Παράγοντες επιρροής ακρίβειας**

Η μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων υλικών με το ISOMET μπορεί, όπως όλες οι μετρήσεις, να επηρεαστεί από τις επικρατούσες συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Οι παράγοντες με τις σημαντικότερες επιπτώσεις είναι:

- ✓ Η ποιότητα της θερμικής επαφής του αισθητήρα και της επιφάνειας του υλικού
- ✓ Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας
- ✓ Οι πεπερασμένες διαστάσεις του δοκιμίου
- ✓ Η ανομοιογένεια του υλικού του δείγματος
- ✓ Η ανισοτροπία του υλικού του δείγματος
- ✓ Η παρουσία υγρασίας στο δοκίμιο

### 5.5.2. Πειραματική διαδικασία

Το πρώτο βήμα είναι η ενεργοποίηση της συσκευής ISOMET και η τοποθέτηση του αισθητήρα σε ένα τυχαίο σημείο στην επιφάνεια του δείγματος. Στην συνέχεια με την επιλογή του προγράμματος Configuration (F3) υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της ισχύος που θα διαχυθεί στον αισθητήρα ή η επιλογή της βελτιστοποίησης της μέσω της διάταξης.

Στη συνέχεια με την επιλογή Temperature (F1) αρχίζουν περιοδικές μετρήσεις της θερμοκρασίας που διαρκούν μέχρι να επιτευχθεί κατάσταση θερμοκρασιακής ισορροπίας στο υλικό ώστε να ακολουθήσουν ακριβείς μετρήσεις των θερμικών ιδιοτήτων του. Επειδή η τιμή δεν διατηρείται πρέπει να γίνει καταγραφή πριν ξεκινήσει η διαδικασία μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό γίνεται επιλέγοντας την Thermal Conductivity (F2). Η διαδικασία εκτελείται σύμφωνα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις. Αρχικά εκτελείται μια προεργασία όπου υπολογίζεται η κλίση της θερμοκρασίας μέχρι να λάβει ελάχιστη τιμή και συνεπώς να φτάσει σε μόνιμη κατάσταση. Ακολούθως προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή ισχύος, στην περίπτωση που έχει ρυθμιστεί, αλλιώς με την προκαθορισμένη τιμή ξεκινάει η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας.

Κατά τη διάρκεια εμφανίζονται στην οθόνη οι εξής πληροφορίες:

- Η θερμοκρασία του αισθητήρα (°C) που αυξάνεται όσο ο αισθητήρας θερμαίνεται.
- Το ποσοστό (%) της θερμικής ισχύος με την ένδειξη ON, OFF δίπλα στην τιμή που δείχνει την λειτουργία του θερμαντήρα.

- Το ποσοστό (%) ολοκλήρωσης της μέτρησης. Μέχρι να φτάσει 50% ρέει θερμική ισχύς στο υλικό και δίπλα στη θερμική ισχύ σημειώνεται η ένδειξη ON, ενώ για τον υπόλοιπο χρόνο ενεργοποιείται η ένδειξη OFF.

Με την περάτωση της διαδικασίας εμφανίζονται στην οθόνη τα αποτελέσματα των συντελεστών της θερμικής αγωγιμότητας, θερμοκρασιακής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας.

- **Ισχύς αισθητήρα**

Ο προσδιορισμός της ισχύς γίνεται με την εισαγωγή μιας ποσοστιαίας τιμής που εκφράζει το ποσοστό της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο αισθητήρα. Όπως αναφέρθηκε μπορεί να γίνει είτε απευθείας από το χρήστη είτε με την επιλογή μενού Power Optimization ON/ OFF. Στην δεύτερη περίπτωση ξεκινάει αμέσως μετά τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας και πριν τον υπολογισμό του συντελεστή λ, μια διεργασία λίγων δευτερολέπτων κατά την οποία υπολογίζεται η ακριβής μέγιστη ισχύς της μέτρησης. Πρέπει να σημειωθεί πως η βέλτιστη ισχύς που θα διαχυθεί εξαρτάται από το υλικό και τον τύπο του αισθητήρα.

- **Αριθμός μετρήσεων**

Μία μέτρηση με τη διάταξη δεν είναι ενδεικτική του δείγματος αφού οι μετρήσεις είναι τοπικές και επιφανειακές. Ειδικά μετά τις βυθίσεις που η υγρασία δεν είναι ισοκατανομημένη στην επιφάνεια του υλικού αλλά δημιουργεί συγκεντρώσεις. Για να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για την κάθε ομάδα EPS πραγματοποιούνται από 3 μετρήσεις σε τυχαία σημεία σε όλα τα δείγματα και υπολογίζονται οι μέσοι όροι θερμικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας. Στην περίπτωση της μερικής βύθισης, επειδή μόνο η μία επιφάνεια έχει έρθει σε επαφή με το νερό εκτελούνται 3 μετρήσεις σε κάθε πλευρά των δοκιμίων και υπολογίζεται η μέση τιμή στεγνών και εμβαπτισμένων πλευρών ξεχωριστά.

Αντίστοιχα με την πειραματική διάταξη CTmètre, δεν μετρήθηκαν όλα τα δοκίμια μερικής και ολικής βύθισης με την διάταξη λόγω περιορισμένου χρόνου, αλλά μόνο όσα είχαν βυθιστεί στις δεξαμενές στην πρώτη φάση και μερικά από την δεύτερη φάση. Ο αριθμός των μετρήσεων όμως ήτανε ικανοποιητικός για να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία της μεθόδου και της σύγκρισης με τις υπόλοιπες.



## 5.6. Heat Flow Meter Test Method

Η μέθοδος Heat Flow (**HF**) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων μόνιμης κατάστασης. Μετράει τη θερμοροή και τις ιδιότητες μιας επίπεδης πλάκας δείγματος όταν το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας είναι μόνιμο και αμετάβλητο στο χρόνο. Το ευρωπαϊκό πρότυπο με όλες τις σχετικές πληροφορίες και τους περιορισμούς της μεθόδου είναι το ISO 8301: «*Thermal Insulation- Determination of steady- state thermal resistance and related properties- Heat Flow meter apparatus*» [12].

### 5.6.1. Αρχή λειτουργίας και τύπος πειραματικής διάταξης

Η μέθοδος βασίζεται στην δημιουργία μιας μονοδιάστατης και ομοιόμορφης ροής θερμότητας η οποία διασχίζει ταυτόχρονα την περιοχή της μέτρησης ενός (ή δύο) μετρητή ροής θερμότητας και την κεντρική περιοχή ενός ή δύο πανομοιότυπων δειγμάτων με μορφή πλάκας. Η μέτρηση πραγματοποιείται σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, με σταθερή τη μέση θερμοκρασία και τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των μονάδων θέρμανσης και ψύξης που οριοθετούν το δείγμα (ή τα δείγματα) με το ενσωματωμένο θερμοροόμετρο(-α).

Η ιδανική συνθήκη της μονοδιάστατης θερμοροής δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε ολόκληρη την επιφάνεια της πλάκας και του μετρητή ροής θερμότητας. Συνεπώς πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους εξής παράγοντες:

- i) Στις απώλειες θερμότητας από τις άκρες των δοκιμίων και των μετρητών θερμοροής.
- ii) Στις διαφορές μεταξύ των γεωμετρικών και θερμικών χαρακτηριστικών των προτύπων και των μετρούμενων δειγμάτων.
- iii) Τυχόν διαφορές στις οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, ανάμεσα στον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης των πρότυπων δειγμάτων που έχουν μετρηθεί με τη διάταξη GHP και της βαθμονόμησης της συγκεκριμένης διάταξης μέσω των πρότυπων.

#### • Τύποι πειραματικής διάταξης

Τα κύρια στοιχεία μιας διάταξης HF είναι οι μονάδες θέρμανσης και ψύξης, τα θερμοροόμετρα και τα δείγματα του υλικού. Ανάλογα με την σειρά που τοποθετούνται είναι δυνατό να προκύψουν απλές αλλά και πολύπλοκες διατάξεις. Επιγραμματικά είναι:

- Ασύμμετρη διάταξη μονού δείγματος, όπου ένα δείγμα τοποθετείται ανάμεσα στην θερμή και την ψυχρή πλάκα αλλά υπάρχει μόνο ένα θερμοροόμετρο τοποθετημένο στην ψυχρή πλάκα.
- Συμμετρική διάταξη μονού δείγματος, όπου το δείγμα είναι τοποθετημένο όπως και πριν αλλά υπάρχουν δύο θερμοροόμετρα- ένα σε κάθε πλευρά.
- Συμμετρική διάταξη δύο δειγμάτων, όπου δύο πανομοιότυπα δείγματα εφάπτονται έχοντας ανάμεσα έναν αισθητήρα και οριοθετούνται από τις δύο πλάκες.
- Διπλή διάταξη, όπου τα δοκίμια είναι τοποθετημένα εκατέρωθεν μιας κεντρικής μονάδας θέρμανσης και οριοθετούνται από τις μονάδες ψύξης. Ανάλογα με την κατασκευή υπάρχει δυνατότητα μέτρησης περισσότερων από δύο δοκιμίων.

Οι πληροφορίες που παρατίθεται στη συνέχεια αφορούν την συμμετρική διάταξη μονού όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

### 5.6.2. Κατασκευαστικοί- Λειτουργικοί περιορισμοί

Η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται από τη δυνατότητα της διάταξης να διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της θερμοροής καθώς και τις μετρούμενες τιμές ισχύος και θερμοκρασίας στα επιτρεπόμενα όρια. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει η ομοιογένεια και η επιπεδότητα των δειγμάτων ώστε να λαμβάνονται ορθές μετρήσεις.

- **Περιορισμοί λόγω διάταξης**

Η χρήση της διάταξης περιορίζεται από παράγοντες που σχετίζονται με την βαθμονόμηση και περιορισμούς που θέτει το πάχος του δείγματος. Οι παράγοντες είναι οι παρακάτω:

- Βαθμονόμηση

Η μέθοδος δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε θερμοκρασίες διαφορετικές από αυτές της βαθμονόμησης. Επίσης οι πυκνότητες της θερμοροής πρέπει να είναι συγκρίσιμες με αυτές που έχουν εφαρμοστεί στη βαθμονόμηση ανάλογα όμως με το είδος του υλικού, το πάχος του δείγματος και την διαφορά θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

- Απόσταση θερμής ψυχρής πλάκας

Το συνδυασμένο πάχος του δοκιμίου, των θερμοροομέτρων και τυχόν υλικών απόσβεσης ισούται με την απόσταση ανάμεσα στην θερμή και την ψυχρή πλάκα και πρέπει να περιορίζεται ώστε να μειώνονται οι γωνιακές απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Οι απώλειες αυτές επηρεάζονται από την περιφερειακή μόνωση και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των δύο πλακών σχετίζεται με το μήκος της πλευράς της διάταξης, με το μήκος της πλευράς της περιοχής μέτρησης, με το πλάτος της υπόλοιπης περιοχής, με την κατασκευή της διάταξης και με τις ιδιότητες του υλικού που μετράται. Το ελάχιστο πάχος του δοκιμίου καθορίζεται από τις επιφανειακές αντιστάσεις. Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας, το ελάχιστο πάχος περιορίζεται και από την ακρίβεια των οργάνων μέτρησής του.

- Επιφανειακές αντιστάσεις

Στα άκαμπτα υλικά που η πίεση των δύο πλακών δεν μεταβάλλει το σχήμα του δοκιμίου, τυχόν μικρές ανομοιομορφίες στην επιπεδότητα των επιφανειών τους εισάγουν αντιστάσεις ανομοιόμορφα κατανεμημένες στις εργαζόμενες επιφάνειες. Το αποτέλεσμα είναι ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοροής και ανάπτυξη θερμικών στρεβλώσεων στο εσωτερικό του υλικού καθώς και δυσκολία στη λήψη ακριβών επιφανειακών θερμοκρασιών.

- **Περιορισμοί λόγω δειγμάτων**

Οι περιορισμοί που επιβάλλονται λόγω των δειγμάτων οφείλονται στις θερμικές ιδιότητες των υλικών και είναι οι παρακάτω:

- Ομοιογένεια δείγματος

Η ομοιογένεια στην πλάκα του υλικού είναι πολύ σημαντική ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή και μονοδιάστατη ροή θερμότητας. Η ύπαρξη θερμικών στρεβλώσεων στο εσωτερικό μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά λάθη στον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή λ. Πιο κρίσιμη είναι η περιοχή του δείγματος που εφάπτεται στην περιοχή μέτρησης και ειδικότερα κοντά στις ακμές.

➤ Διαφορά θερμοκρασίας

Η θερμική αγωγιμότητα και η αντίσταση συνήθως είναι συναρτήσεις της θερμοκρασιακής διαφοράς που αναπτύσσεται στο υλικό μέσω των πλακών θέρμανσης και ψύξης. Για το λόγο αυτό πρέπει να αναφέρεται η διαφορά θερμοκρασίας με βάση την οποία προέκυψαν οι μετρηθείσες τιμές.

➤ Μέση θερμική αγωγιμότητα δοκιμίου

Για τον υπολογισμό του μεγέθους πρέπει να ικανοποιούνται όλα τα προηγούμενα κριτήρια και επιπροσθέτως να εξασφαλίζεται η ομοιογένεια των υλικών. Τα ομογενή πορώδη υλικά πρέπει να είναι τέτοια ώστε όποια ανομοιογένεια να έχει διαστάσεις μικρότερες από το 1/10 του πάχους. Επίσης σε οποιαδήποτε θερμοκρασία πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η θερμική αντίσταση είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασιακής διαφοράς που έχει καθοριστεί.

Η θερμική αντίσταση ενός υλικού είναι γνωστό πως εξαρτάται από το μέγεθος της μεταφοράς θερμότητας που πραγματοποιείται στο εσωτερικό του δείγματος και εκτελείται με τους μηχανισμούς της αγωγής, της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Όλες οι διαδικασίες που αποτελούν το φαινόμενο μεταφοράς έχουν άμεση εξάρτηση από την θερμοκρασιακή διαφορά που επιβάλλεται στο δείγμα.

➤ Πάχος δείγματος

Από όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας μόνο η αγωγή παράγει θερμική αντίσταση ανάλογη του πάχους του υλικού. Όσο πιο λεπτό και λιγότερο πυκνό το υλικό τόσο πιο πιθανό είναι η αντίσταση να εξαρτάται από άλλες διεργασίες εκτός της αγωγής.

### 5.6.3. Περιγραφή των σημαντικότερων χαρακτηριστικών της διάταξης

Η περιγραφή που ακολουθεί αφορά τη μετρητική συσκευή ενός δείγματος, όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε για της μετρήσεις.

- **Μονάδες θέρμανσης και ψύξης**

Οι δύο μονάδες πρέπει να είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε οι εργαζόμενες επιφάνειες τους να είναι ισόθερμες. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μιας ηλεκτρικής περιέλιξης ομοιόμορφης ισχύος ανάμεσα σε δύο μεταλλικές πλάκες ή με την κυκλοφορία ενός υγρού σταθερής θερμοκρασίας ή και με συνδυασμό των δύο μεθόδων. Οι εργαζόμενες επιφάνειες των μονάδων αποτελούνται από μέταλλο υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να διατηρούν επιπεδότητα με απόκλιση 0,025%. Οι θερμοκρασίες των εργαζόμενων επιφανειών και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνεια επαφής του θερμορροόμετρου και του δείγματος δεν πρέπει να μεταβάλλονται περισσότερο από το 0,5% της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά μήκος του δείγματος. Οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις μπορούν να μειωθούν με την εισαγωγή ενός λεπτού στρώματος από μονωτικό υλικό ανάμεσα στους μετρητές και στις εργαζόμενες πλευρές.

- **Μετρητής ροής θερμότητας**

Σκοπός του είναι η μέτρηση της θερμοροής σε όλο το δοκίμιο μέσω της θερμοκρασιακής διαφοράς που επιβάλλεται από τις μονάδες θέρμανσης και ψύξης. Αποτελείται από έναν ομογενή πυρήνα και από ανιχνευτές επιφανειακής διαφοράς θερμοκρασίας και επιφανειακών θερμοκρασιών

#### → Πυρήνας

Ο πυρήνας κατασκευάζεται από μη- υγροσκοπικό, ομοιόμορφο και ισοτροπικό υλικό και διαθέτει παράλληλες επιφάνειες που εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη θερμορροή. Το υλικό πρέπει επίσης να είναι σκληρό, με χαμηλή συμπιεστότητα και ικανό να παραμένει σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνήθη υλικά είναι τα σκληρά ελαστομερή, κεραμικά και φαινολικά πολυμερή.

#### → Θερμοζεύγη

Η μέτρηση της θερμοκρασιακής διαφοράς στον πυρήνα πραγματοποιείται με συστοιχίες από μικροσκοπικά θερμοζεύγη, τοποθετημένα στη σειρά ώστε να αυξάνουν την τάση εξόδου. Κάθε θερμοζεύγος αποτελεί ένωση δύο διαφορετικών μετάλλων με αποτέλεσμα να παράγουν διαφορά δυναμικού όταν βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Επειδή τα θερμοζεύγη είναι τοποθετημένα εναλλάξ στις επιφάνειες του θερμοροομέτρου, στην ίδια θερμοκρασία παράγουν δυναμικό ίσου μέτρου αλλά αντίθετης φοράς. Άρα το συνολικό δυναμικό που αναπτύσσεται είναι μηδενικό.

Ωστόσο κατά τη διάρκεια της μέτρησης, λόγω της παρουσίας θερμορροής, οι πλευρές του αισθητήρα έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα κάθε θερμοζεύγος να παράγει δυναμικό διαφορετικού μέτρου. Το αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη μιας συνισταμένης τιμής από όλη τη συστοιχία των θερμοζευγών.

Με την εύρεση του συνολικού δυναμικού εύκολα προσδιορίζεται η θερμοκρασία και με γνωστό τον παράγοντα βαθμονόμησης υπολογίζεται και η ροή θερμότητας.

- **Μετρήσεις θερμοκρασίας**

Η θερμοκρασία της θερμής και της ψυχρής πλάκας λαμβάνεται μέσω κατάλληλων αισθητήρων π.χ. θερμοστοιχεία, που είναι μονίμως τοποθετημένα σε αυλάκια πάνω στις εργαζόμενες επιφάνειες. Το πλήθος των θερμοστοιχείων σε κάθε πλευρά δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 2 ή  $10(\Lambda)^{1/2}$ - όπου  $\Lambda$  είναι μεγαλύτερο- όπου  $\Lambda$  η επιφάνεια σε  $m^2$  της μετρητικής επιφάνειας. Για επιφάνειες μικρότερες από  $0,04m^2$  ένα θερμοστοιχείο είναι αρκετό ενώ για μεγαλύτερες χρειάζονται τουλάχιστον δύο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θερμοστοιχείων ανάλογα με το εύρος της θερμοκρασίας και τα όρια του σφάλματος που θέλουμε. Τα θερμοστοιχεία είναι κατασκευασμένα από σύρμα διαμέτρου μικρότερης από  $0,6mm$  ή και μικρότερης από  $0,2mm$ .

- **Περιφερειακή μόνωση και θερμικές απώλειες**

Οι πλευρικές θερμικές απώλειες εξαρτώνται από τον τύπο της διάταξης και απαιτούν διαφορετικές λύσεις για την ελαχιστοποίησή τους. Η συμμετρική διάταξη μονού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε είναι η λιγότερο ευαίσθητη στις γωνιακές συνθήκες με την προϋπόθεση πως ο μέσος όρος των ενδείξεων των δύο αισθητήρων αποτελεί τον ρυθμό ροής θερμότητας μέσα στο δείγμα. Επειδή πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη παραδοχή στις μετρήσεις, δεν χρειάστηκε πρόσθετος υπολογισμός των γωνιακών απωλειών.

### 5.6.4. Παράμετροι διαδικασίας πειράματος

Πριν από την τοποθέτηση των δειγμάτων στην διάταξη γίνεται ζύγιση με ακρίβεια καλύτερη από 0,5%, ποσοστό απόκλισης.

- **Πάχος και πυκνότητα υλικού**

Το πάχος της πλάκας του υλικού λαμβάνεται είτε μέσω της απόστασης των μονάδων μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου, είτε με τα κατάλληλα μετρητικά όργανα. Με γνωστό το πάχος υπολογίζεται ο όγκος και προκύπτει η φαινόμενη πυκνότητα. Επειδή η μέτρηση με την διάταξη GHP είχε προηγηθεί της μεθόδου HF οι τιμές του πάχους ήταν γνωστές και με βάση αυτές έγιναν οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

- **Επιλογή διαφοράς θερμοκρασίας**

Η επιλογή της τιμής εξαρτάται από τις ιδιότητες και τις προδιαγραφές του προϊόντος και του συστήματος καθώς και τις συνθήκες χρήσης του δείγματος. Αν η σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας και της θερμοκρασίας είναι άγνωστη, χρησιμοποιείται διαφορά θερμοκρασίας τουλάχιστον 5 με 10K.

- **Συνολικός χρόνος και μέτρηση**

Ο συνολικός χρόνος και το διάστημα των επιμέρους μετρήσεων καθορίζεται μέσω του λογισμικού από τον χρήστη. Η παρακολούθηση των ενδιάμεσων τιμών της θερμοροής σε συνδυασμό με την θερμοκρασία είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του χρονικού διαστήματος όπου επικρατεί θερμική ισορροπία. Ο υπολογισμός της μέσης θερμοροής και των μέσων επιφανειακών θερμοκρασιών γίνεται μόνο για το συγκεκριμένο διάστημα.

### 5.6.5. Περιγραφή πειραματικής διάταξης Heat Flow

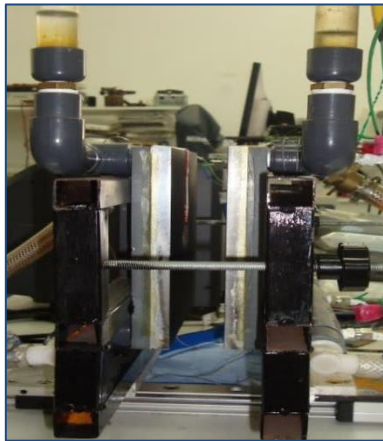
#### *Γενικές πληροφορίες*

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί πρότυπο μοντέλο κατασκευασμένο στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι προδιαγραφές και η λειτουργία της διάταξης πραγματοποιήθηκαν με βάση το διεθνές πρότυπο ISO 8301.

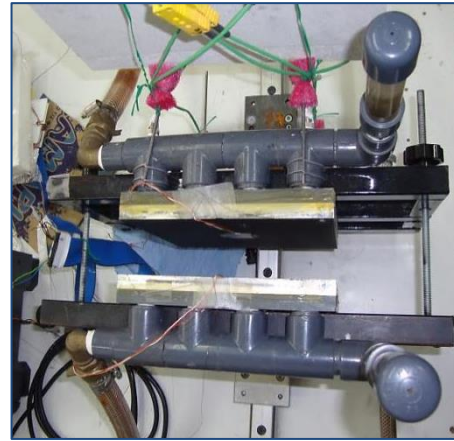
Τα τμήματα που αποτελούν τη συμμετρική διάταξη ενός δείγματος είναι τα εξής [31]:

- 1 πλάκα θέρμανσης
- 1 πλάκα ψύξης
- 2 μετρητές ροής θερμότητας
- 6 θερμίστορ των 10KOhms (στους 25°C)
- 1 κύκλωμα ψύξης- θέρμανσης νερού
- ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης και ελέγχου

Το υπολογιστικό λογισμικό LABVIEW εκτελεί τις απαραίτητες διεργασίες και τον απαραίτητο έλεγχο.



**Εικόνα 5.16:** Πλάγια όψη Heat- Flow meter



**Εικόνα 5.17:** Κάτοψη Heat- Flow meter

- **Πλάκες θέρμανσης και ψύξης**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την ανάπτυξη θερμοροής σε ένα υλικό είναι απαραίτητη η δημιουργία κλίσης της θερμοκρασίας. Τον σκοπό αυτό εξυπηρετούν οι δύο μεταλλικές πλάκες από αλουμίνιο με διαστάσεις 200x200mm. Στο εσωτερικό τους φέρουν αυλακώσεις για την κυκλοφορία νερού σταθερής θερμοκρασίας ώστε να επικρατεί ομοιόμορφη θερμοκρασία στις επιφάνειες. Ο καθορισμός της θερμοκρασίας των πλακών γίνεται μέσω του νερού που τις διαρρέει. Στην θερμή πλάκα απαιτείται θέρμανση του νερού πριν την είσοδο του ενώ στην ψυχρή απαιτείται αντίστοιχα ψύξη. Για την θέρμανση/ ψύξη του νερού που κυκλοφορεί στην διάταξη χρησιμοποιούνται δύο διατάξεις Peltier.

- **Πλαίσιο στήριξης**

Από τις φωτογραφίες διακρίνεται ότι η πειραματική διάταξη λειτουργεί κάθετα. Συνεπώς πρέπει να εξασφαλιστεί η παραμονή του δείγματος ανάμεσα στις πλάκες για όσο διαρκεί η μέτρηση. Επίσης είναι σημαντικό να μην παρεμβάλλεται αέρας μεταξύ των εφραπτόμενων επιφανειών ώστε να μην αλλοιώνονται οι μετρηθείσες τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση σπειρωμάτων σε κάθε πλευρά της διάταξης. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη με δύο ροδέλες να αυξομειώσει την απόσταση των δύο πλακών και με κατάλληλη πίεση να καθορίσει την αεροστεγή συγκράτηση του δοκιμίου. Οι πλάκες είναι τοποθετημένες σε μεταλλικό πλαίσιο για να είναι σταθερές και όλη η κατασκευή συνδέεται με έναν οδηγό για να είναι δυνατή η οριζόντια κίνησή του.

- **Κύκλωμα ψύξης- θέρμανσης νερού**

Η κλίση της θερμοκρασίας εφαρμόζεται μέσω των διαφορετικών επιφανειακών θερμοκρασιών. Το νερό έχει μια σταθερή θερμοκρασία και για να λάβει την επιθυμητή τιμή σε κάθε πλάκα πρέπει το νερό αντίστοιχα να θερμανθεί ή να ψυχθεί. Η διεργασία γίνεται από τις διατάξεις Peltier των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο. Πρόκειται για ένα θερμοηλεκτρικό φαινόμενο που παρατηρείται όταν η επαφή δύο αγωγών ή ημιαγωγών κατασκευασμένων από διαφορετικά υλικά διαρρέεται από ρεύμα. Ανάλογα με τη φορά του ρεύματος η επαφή απορροφά θερμότητα (ψύξη νερού) ή εκλύει θερμότητα (θέρμανση νερού). Το ποσό της θερμότητας προσλαμβάνεται από το νερό μέσω μιας ψήκτρας. Τα στοιχεία Peltier είναι τοποθετημένα σε μια διάταξη και βρίσκονται σε μόνιμη επαφή με το νερό που ρέει μέσα στις ψήκτρες.

- **Σύστημα ελέγχου**

Για τον έλεγχο της διάταξης Peltier που καθορίζει την θερμοκρασία του νερού που διαρρέει στις πλάκες χρησιμοποιείται το σύστημα θερμοκρασιακού ελέγχου PR-59 της εταιρείας Supercool. Το σύστημα αποτελείται από τον ελεγκτή και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Ο ελεγκτής επικοινωνεί με τον Η/Υ μέσω μιας σειριακής θύρας ώστε να αποστέλλονται παράμετροι λειτουργίας στον ελεγκτή και να εμφανίζονται τα αποτελέσματα στον Η/Υ.

Ο έλεγχος που πραγματοποιείται είναι μορφής PID (ελεγκτής 3 όρων), όπου συγκρίνεται η προκαθορισμένη από τον χρήστη θερμοκρασία, *set point*, με την τρέχουσα θερμοκρασία, *process value*, και υπολογίζεται το σφάλμα  $e = SP - PV$  για να διορθωθεί. Το σύστημα πρέπει να γνωρίζει την θερμοκρασία της κάθε πλάκας για να είναι δυνατή η ρύθμιση της θερμοκρασίας στις διατάξεις Peltier. Αυτό γίνεται με τη σύνδεση ενός από τα θερμίστορ κάθε πλάκας με τον ελεγκτή.

<b>Power Consumption (max)</b>	<b>500W</b>
<b>Input Voltage</b>	<b>+12 → +30Vdc</b>
<b>Maximum Load</b>	<b>15A or 450W</b>
<b>Control Temperature</b>	<b>-20 → +100°C</b>

**Πίνακας 5.1:** Λειτουργικά χαρακτηριστικά Supercool PR-59 [45]

### Αισθητήρες μέτρησης

Η πειραματική μέθοδος απαιτεί συνεχή μέτρηση της θερμοροής και της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του δείγματος. Ο προσδιορισμός των επιφανειακών θερμοκρασιών εκτελείται με κατάλληλα τοποθετημένα θερμίστορ των 10KOhms και ο προσδιορισμός της θερμοροής με θερμοροόμετρα. Τα σήματα από τους αισθητήρες μετατρέπονται μέσω του συστήματος συλλογής δεδομένων σε θερμοκρασιακές τιμές και καταλήγουν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου και γίνεται η επεξεργασία τους.

- **Θερμίστορ**

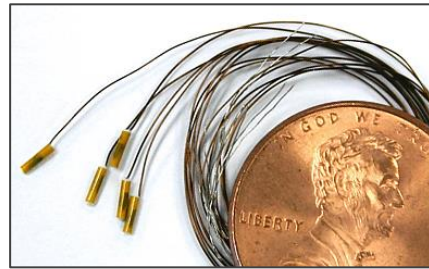
Τα θερμίστορ είναι αισθητήρες μέτρησης θερμότητας που η λειτουργία τους βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής τους αντίστασης με οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στις ιδιότητες του ημιαγωγού που συνήθως κατασκευάζεται από οξειδία μετάλλων, κυρίως νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού και τιτανίου. Ο διαχωρισμός τους σε κατηγορίες γίνεται με βάση την κίνηση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας. Στον τύπο PTC αύξηση της θερμοκρασίας του ημιαγωγού οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων στην ζώνη και συνεπώς σε αύξηση του ρεύματος που διαρρέει το υλικό. Αντίθετα λειτουργεί ο τύπος NTC, όπου αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των ηλεκτρονίων που μεταφέρουν φορτίο και συνεπώς μείωση του ρεύματος.

Στις μετρήσεις μας χρησιμοποιήθηκαν θερμίστορ είναι τύπου NTC, έχουν δηλαδή αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας. Η σχέση που συσχετίζει την αντίσταση με την θερμοκρασία είναι η **Steinhart & Hart** [16]:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.2)$$

όπου T η απόλυτη θερμοκρασία (K), R η ηλεκτρική αντίσταση (Ω) και a, b, c σταθερές της εξίσωσης

Οι τιμές των σταθερών συντελεστών εξαρτώνται από το τύπο, το υλικό κατασκευής των ημιαγωγών και το εύρος της θερμοκρασίας που λειτουργεί. Για την εύρεση των τιμών χρειάζονται τρεις τιμές αντίστασης για τρεις γνωστές θερμοκρασίες και προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων 3x3 με τρεις αγνώστους. Η διαδικασία έγινε μαζί με την βαθμονόμηση των αισθητήρων και αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.



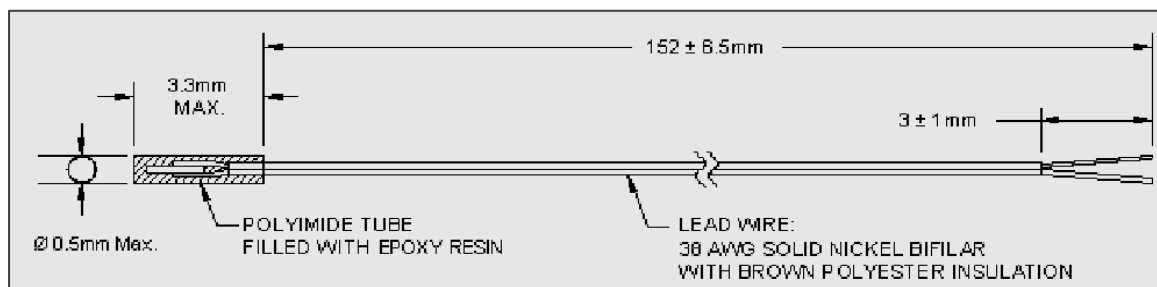
Εικόνα 5.18: Thermistor microBeta

#### → Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Οι αισθητήρες είναι κατηγορίας Thermistor Micro-BetaCHIP, κατασκευασμένοι από συμπαγές δίκλωνο καλώδιο νικελίου (καλώδιο που αποτελείται από δύο αγωγούς) και μονώσεις τύπου πολυεστέρα. Η μονάδα μέτρησης είναι ενσωματωμένη σε ένα σωλήνα πολυαμιδίου με τη βοήθεια εποξικής ρητίνης. Το σχήμα, οι διαστάσεις με λεπτομέρειες ανοχών φαίνονται στην φωτογραφία.

Οι σημαντικότερες προδιαγραφές του συγκεκριμένου τύπου αισθητήρα είναι:

- ✓ Ηλεκτρική αντίσταση (25°C): 10KOhms
- ✓ Ακρίβεια αντίστασης (25°C):  $\pm 0,2^\circ\text{C}$
- ✓ Χρόνος απόκρισης: 200m/secs
- ✓ Σταθερά απόσβεσης σε αέρα 25°C: 0,3mW/°C



Εικόνα 5.19: Σχέδιο και διαστάσεις thermistor Micro-BetaCHIP

#### • Θερμορόμετρα

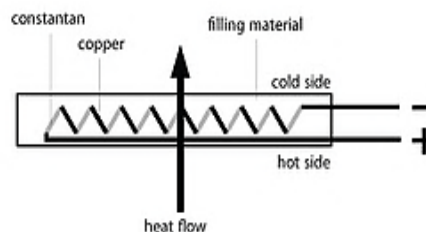
Ο αισθητήρας ροής θερμότητας είναι ένας μετατροπέας που παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με το συνολικό ποσοστό θερμότητας που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του αισθητήρα. Η μετρούμενη τιμή θερμότητας διαιρείται με την επιφάνεια του αισθητήρα για τον προσδιορισμό της ροής θερμότητας σε  $\text{W}/\text{m}^2$ . Γενικά έχουν το σχήμα μιας επίπεδης πλάκας και παρουσιάζουν ευαισθησία σε κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια του αισθητήρα. Πάνω στην πλάκα είναι ενσωματωμένα θερμοζεύγη συνδεδεμένα σε σειρές που ονομάζονται θερμοστήλες και που η λειτουργία τους έχει εξηγηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα θερμορόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι της σειράς HFS της εταιρείας OMEGA και προσφέρονται σε δύο κλίμακες ευαισθησίας: HFS-3 και HFS-4. Η μόνη διαφορά τους είναι ο διαφορετικός αριθμός κόμβων των θερμοζευγών κάθε μοντέλου. Όλα τα μοντέλα χρησιμοποιούν θερμοστήλες, τοποθετημένες στην επιφάνεια ενός φιλμ πολυαμιδίου.





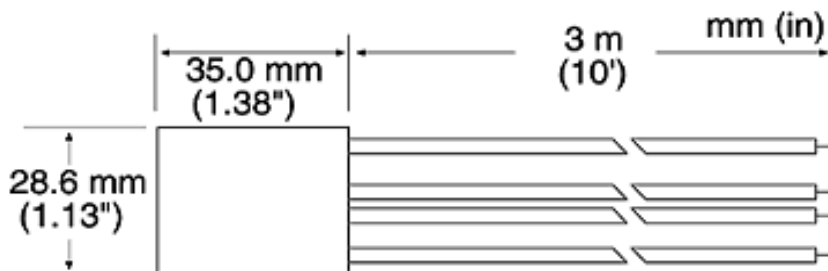
**Εικόνα 5.20:** Θερμοροόμετρο σειράς HFS



**Εικόνα 5.21:**Εσωτερικό του heat-flux

Οι λειτουργικές και κατασκευαστικές προδιαγραφές των θερμοροόμετρων είναι:

- ✓ Θερμοκρασιακό εύρος: -200 με 150°C
- ✓ Αριθμός κόμβων: HFS\_3- 54 και HFS\_4- 112
- ✓ Αντιστάσεις μετρητών: HFS\_3- 140 Ohm και HFS\_4- 175 Ohm
- ✓ Lead Wires: 30 AWG Solid Copper, PFA Insulated color coded



**Εικόνα 5.22:** Σχήμα και διαστάσεις θερμοροόμετρων HFS\_3, HFS\_4

### **Βαθμονόμηση αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας**

Πριν από την έναρξη των μετρήσεων έγινε βαθμονόμηση των αισθητήρων ώστε να καθοριστεί η κλίμακα μέτρησης. Η διάταξη βαθμονόμησης είναι της εταιρείας διαπίστευσης **FLUKE** και λειτουργεί σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

Για την εκκίνηση της διαδικασίας, τα θερμίστορ τοποθετήθηκαν στον πυρήνα του βαθμονομητή. Η θερμοκρασία τις πλάκας βαθμονόμησης ρυθμίζεται σε διαφορετικές τιμές και παράλληλα καταγράφονται οι τιμές που λαμβάνουν τα θερμίστορ ώστε να εξακριβωθεί η απόκλιση και να διορθωθεί το σφάλμα.

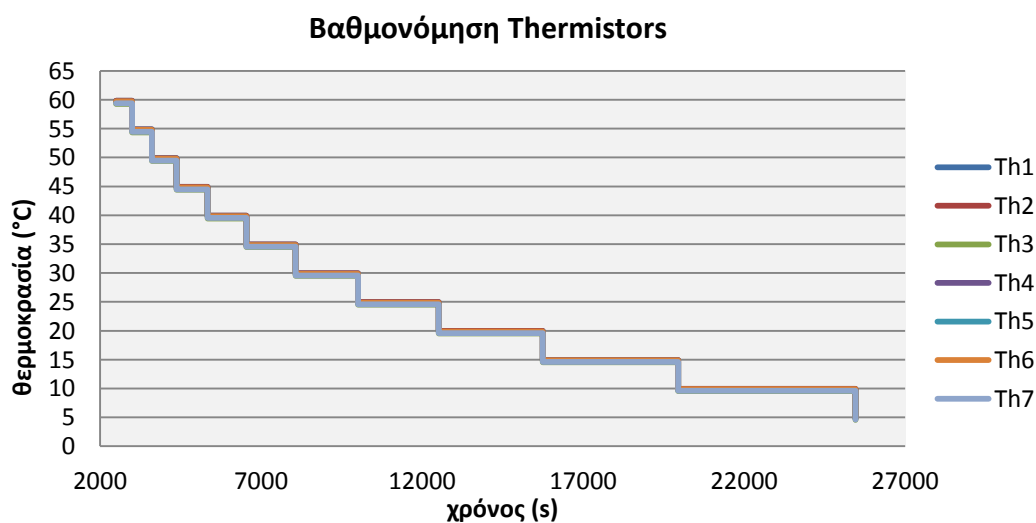
Η θερμοκρασία βαθμονόμησης ρυθμίστηκε σε 12 διαφορετικές τιμές (set points), από 5 έως 60°C με βήμα +5°C και καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες των θερμίστορ σε σχέση με το κάθε set point και ο χρόνος της μέτρησης σε δευτερόλεπτα. Η μέτρηση ξεκίνησε από την υψηλότερη θερμοκρασία στην χαμηλότερη και διήρκεσε συνολικά περίπου 26000sec, δηλ. λίγο παραπάνω από 7 ώρες. Όλες οι τιμές θερμοκρασιών και χρόνου αποθηκεύονταν σε αρχείο του προγράμματος LABVIEW ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους.

Από το σχετικό διάγραμμα μπορούμε να καταλήξουμε σε τρία συμπεράσματα:

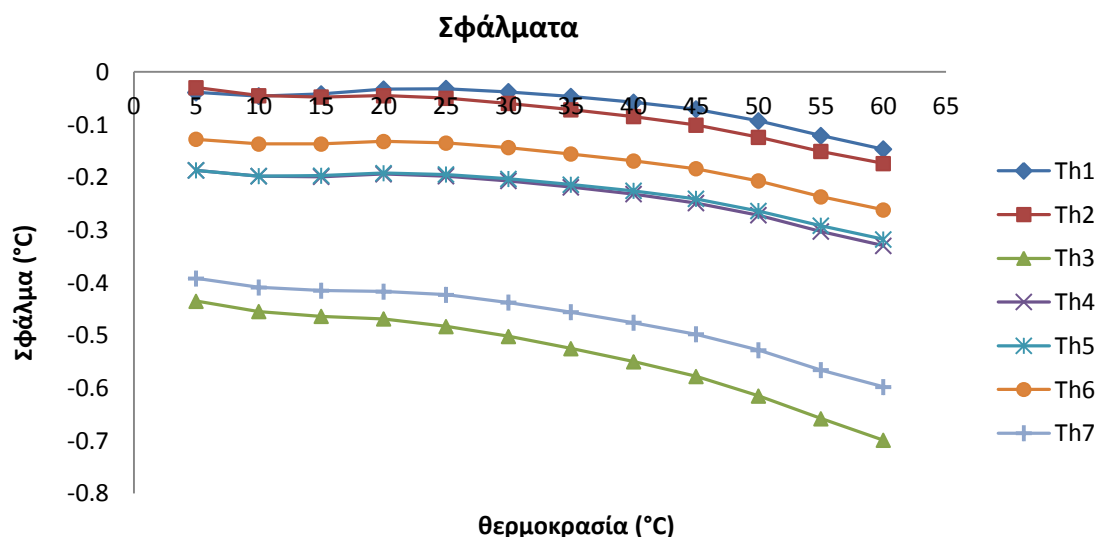
- i. Οι τιμές των αισθητήρων για όλες τις θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη απόκλιση από τα set points.

- ii. Όσο το set point μειώνεται, η ακρίβεια των θερμίστορ αυξάνεται και μικραίνει η απόκλιση.
- iii. Για μικρότερες θερμοκρασίες απαιτείται περισσότερος χρόνος μέχρι να ψυχθεί η πλάκα σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία καθότι η ψύξη είναι μια αργή διαδικασία και χρειάζεται χρόνος για να σταθεροποιηθεί πλήρως η θερμοκρασία.

Να σημειωθεί πως έγινε βαθμονόμηση 7 θερμοστοιχείων, εκ των οποίων το ένα προοριζότανε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ωστόσο κόπηκε το καλώδιο στην πρώτη μέτρηση και στη συνέχεια αποφασίστηκε η θερμοκρασία να προσδιορίζεται με ειδικό θερμόμετρο πριν από κάθε μέτρηση.



**Διάγραμμα 5.1:** Συνολικό διάγραμμα θερμοκρασιών- χρόνου κατά την βαθμονόμηση των thermistor



**Διάγραμμα 5.2:** Απόκλιση της θερμοκρασίας των thermistor από τα set points

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα σφαλμάτων και με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής, είναι δυνατός ο υπολογισμός της διορθωμένης θερμοκρασίας για κάθε θερμίστορ.

### **Προσδιορισμός σταθερών συντελεστών εξίσωσης *Steinhart & Hart***

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα θερμίστορ είναι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας που η λειτουργία τους βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής τους αντίστασης με οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμοκρασία. Η σχέση που εκφράζει την λειτουργία των ημιαγωγών και συνδέει την αντίσταση με την θερμοκρασία είναι η εξίσωση ***Steinhart & Hart***:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c \cdot (\ln(R))^3$$

όπου T η απόλυτη θερμοκρασία (K), R η ηλεκτρική αντίσταση ( $\Omega$ ) και a, b, c σταθερές της εξίσωσης

Οι τιμές των σταθερών συντελεστών δεν είναι κοινές για όλα τα θερμίστορ αλλά εξαρτώνται από το τύπο, το υλικό κατασκευής των ημιαγωγών και το εύρος της θερμοκρασίας που λειτουργεί. Πρέπει λοιπόν να βρεθούν οι συντελεστές για κάθε ένα από τα θερμίστορ ξεχωριστά.

Κατά την βαθμονόμηση, ουσιαστικά μελετάται η μεταβολή της αντίστασης των θερμίστορ και μέσω της εξίσωσης υπολογίζεται η θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί. Με χρήση του προγράμματος MATLAB, συντάσσεται κώδικας ο οποίος διαβάζει τις τιμές των αντιστάσεων και τις θερμοκρασίες σε όλα τα set points και με το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει για κάθε θερμίστορ υπολογίζονται οι συντελεστές.

Οι εξισώσεις για κάθε thermistor διαμορφώνονται ως εξής:

$$\text{Th}_1: \frac{1}{T_1} = 1,10415 \cdot 10^{-3} + 0,238076 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.24695 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.3)$$

$$\text{Th}_2: \frac{1}{T_2} = 1,10925 \cdot 10^{-3} + 0,237106 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.71168 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.4)$$

$$\text{Th}_3: \frac{1}{T_3} = 1,09971 \cdot 10^{-3} + 0,237994 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.26249 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.5)$$

$$\text{Th}_4: \frac{1}{T_4} = 1,10415 \cdot 10^{-3} + 0,238076 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.24695 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.6)$$

$$\text{Th}_5: \frac{1}{T_5} = 1,10925 \cdot 10^{-3} + 0,237106 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.71167 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.7)$$

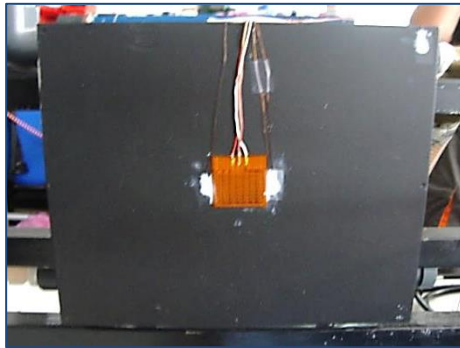
$$\text{Th}_6: \frac{1}{T_6} = 1,09971 \cdot 10^{-3} + 0,237994 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.26249 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.8)$$

$$\text{Th}_7: \frac{1}{T_7} = 1,09971 \cdot 10^{-3} + 0,237994 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(R) + 7.26249 \cdot 10^{-8} \cdot (\ln(R))^3 \quad (5.9)$$

### **Τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας και θερμοροής**

Η σωστή τοποθέτηση των θερμοροομέτρων και των θερμίστορ είναι απαραίτητη για την ακρίβεια των μετρήσεων. Είναι σημαντικό να υπάρχει μόνιμη και σταθερή επαφή με τις επιφάνειες τόσο των μεταλλικών πλακών όσο και των δειγμάτων σε όλη την διάρκεια και κυρίως να εξασφαλίζεται η απουσία αέρα που αλλοιώνει τις τιμές.

Αρχικά οι αισθητήρες τοποθετούνται από τη μία άκρη στα κανάλια ενός πολυπλέκτη, του οποίου η λειτουργία αναλύεται στη συνέχεια. Η άλλη πλευρά στερεώνεται πάνω σε μία από τις δύο μονάδες θέρμανσης και ψύξης που απέχουν αρκετά μεταξύ τους χάρη στον οδηγό, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή. Σε κάθε πλάκα τοποθετούνται ένα θερμοροόμετρο και από τρία θερμίστορ. Τα θερμοροόμετρα αφού καθαριστούν από τυχόν υπολείμματα υλικών και σκόνη εφαρμόζονται στο κέντρο των πλακών με διπλή μονωτική ταινία που κολλάει στην μία πλευρά του μετρητή και στην μεταλλική επιφάνεια. Δεξιά και αριστερά του heat- flux τοποθετούνται σε ελάχιστη απόσταση δύο θερμίστορ. Επειδή το πάχος τους είναι πολύ μικρό δεν αρκεί κολλητική ταινία για την σταθεροποίηση τους σε στις θέσεις. Για το λόγο αυτό έχουν σκαφτεί μικρά αυλάκια πάνω στις επιφάνειες που τα γεμίζουμε με θερμοαγώγιμο υλικό και πάνω εφαρμόζονται οι αισθητήρες. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται και λίγη ταινία για ασφάλεια. Ένα τρίτο θερμίστορ τοποθετείται με τον ίδιο τρόπο στις άνω γωνίες των πλακών, για να γίνεται και λήψη πλευρικής θερμοκρασίας για έλεγχο των θερμικών απωλειών.



**Εικόνα 5.23:** Τοποθέτηση θερμοροόμετρου στο κέντρο της μεταλλικής πλάκας

### ***Ανάλυση Πειραματικής Διαδικασίας***

Τα δείγματα τοποθετούνται στο μετρητικό θάλαμο με τρόπο κατάλληλο ώστε να αποφεύγονται τυχόν διάκενα μεταξύ των δειγμάτων, τις θερμής πλάκας και τις ψυχρής πλάκας, εκτός αν προκαλούνται από το προφίλ τις επιφάνειας του δείγματος. Η διογκωμένη πολυστερίνη είναι σκληρό υλικό, οπότε όση δύναμη και να ασκηθεί μέσω των σπειρωμάτων δεν μεταβάλλεται το πάχος του δείγματος.

Οι επιφάνειες των στερεών πρέπει να είναι επίπεδες, παράλληλες και κατάλληλα επεξεργασμένες ώστε να μην έχουν κενά.

- **Διαδικασία μέτρησης**

Απαραίτητη προϋπόθεση για την λήψη μιας σωστής μέτρησης είναι η συνεχή παρακολούθηση των τιμών θερμοροής και θερμοκρασίας για όλο το χρονικό διάστημα. Για την έναρξη και την ολοκλήρωση εκτελούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Άνοιγμα παροχής νερού ψύξης, θέρμανσης στη δεξαμενή και ρύθμιση των θερμοκρασιακών ορίων  $L_1$ ,  $L_2$  για θέρμανση ή ψύξη του νερού σε μια αρχική θερμοκρασία, κοντινή σε αυτή των μετρήσεων. Το βήμα αυτό γίνεται για να μην επιβαρύνονται οι διατάξεις Peltier και εκτελείται αρκετή ώρα πριν την έναρξη τις μέτρησης γιατί χρειάζεται χρόνος μέχρι το νερό να αποκτήσει την ορισμένη θερμοκρασία.
2. Σύνδεση των αντλιών  $A_1$ ,  $A_2$  για την μεταφορά του νερού από την δεξαμενή στην διάταξη.

3. Σύνδεση τροφοδοτικού του νερού των μονάδων θέρμανσης και ψύξης.
4. Ρύθμιση τις θερμοκρασίας κάθε πλάκας μέσω των προγραμμάτων του συστήματος ελέγχου, Plate-SC\_1 και Plate-SC\_2. Η ακριβής τιμή τις θερμοκρασίας καταγράφεται στην επιλογή Regulator με την προϋπόθεση ότι οι πλάκες είναι απενεργοποιημένες. Μετά συνδέουμε το ρεύμα και με την ένδειξη Send στέλνεται η εντολή τις διατάξεις Peltier που ρυθμίζουν ακριβώς την θερμοκρασία του νερού.
5. Εκκίνηση του προγράμματος LABVIEW. Πρώτα πρέπει να γίνει αποσύνδεση των παραπάνω προγραμμάτων, αφού οι πλάκες έχουν αποκτήσει την προκαθορισμένη τιμή. Το πρόγραμμα ελέγχει και καταγράφει τις τιμές των αισθητήρων. Προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να παρακολουθεί την πορεία τις μέτρησης είτε με ανάγνωση των αποτελεσμάτων είτε με παρακολούθηση σχετικών διαγραμμάτων.
6. Μέτρηση του δείγματος αναφοράς για την βαθμονόμηση των θερμοροομέτρων.
7. Εκτέλεση των μετρήσεων των δοκιμίων.

- **Συλλογή και καταγραφή δεδομένων**

Η συλλογή των δεδομένων γίνεται μέσω τις συστήματος (DAQ system) της εταιρείας Agilent, που επικοινωνεί με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το σύστημα λαμβάνει τα σήματα από τις αισθητήρες και με κατάλληλη επεξεργασία τα μετατρέπει σε θερμοκρασίες. Τα σήματα αποτελούνται από μεταβολές στην ηλεκτρική τάση των θερμοστοιχείων και στην αντίσταση των θερμίστορ με τη θερμοκρασία. Η επεξεργασία τους σε θερμοκρασιακές τιμές γίνεται με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων που συσχετίζουν την τάση και την αντίσταση με τη θερμοκρασία.

Στο εσωτερικό του συστήματος βρίσκεται ο πολυπλέκτης με τα 20 κανάλια που είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες και ένα ψηφιακό πολύμετρο για την σάρωση των καναλιών. Κατά τη διάρκεια τις σάρωσης το μηχάνημα συνδέει το πολύμετρο σε κάθε κανάλι ξεχωριστά για την λήψη τις μέτρησης. Το πολύμετρο διαθέτει έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (A/D converter) που μεταβάλλει το ηλεκτρικό σήμα από τις τάσεις των θερμοροομέτρων και τις αντιστάσεις των θερμίστορ σε ψηφιακές τιμές.

Το σύστημα Agilent επικοινωνεί με τον Η/Υ μέσω μιας σειριακής θύρας ώστε να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του συστήματος και του λογισμικού LABVIEW, για να εισάγονται οι παράμετροι και να καταγράφονται τα αποτελέσματα.

- **Αριθμός μετρήσεων**

Η μέθοδος Heat- Flow έχει το πλεονέκτημα πως μετράει τη θερμική αγωγιμότητα σε όλο το δείγμα σε μικρό χρονικό διάστημα, συγκριτικά με την μέθοδο GHP. Έτσι υπήρχε η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν πολλές και ποικίλες μετρήσεις κυρίως με **διαφορετικά ποσοστά υγρασίας**, ώστε να μελετηθεί η μεταβολή της θερμική αγωγιμότητας. Τα δείγματα προκειμένου να χάσουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό απορροφημένου ύδατος, θερμάνθηκαν σε φούρνο στους 60°C και στη συνέχεια συσκευάστηκαν με τη σακούλα συρρίκνωσης όπως έχει περιγραφεί παραπάνω. Ο έλεγχος της ξήρανσης ενός δοκιμίου γινότανε επαναλαμβανόμενη ζύγιση μέχρι να φτάσει την επιθυμητή μάζα. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων επιλέχθηκαν τα δείγματα εκείνα που παρουσίασαν τη μεγαλύτερη απορρόφηση, σε συνδυασμό με την μικρότερη απώλεια υγρασίας την ημέρα της μέτρησης.

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι μετρήσεις για ολική και μερική εμβάπτιση των δοκιμών ξεχωριστά:

➤ **Ολική εμβάπτιση**

- Τα δείγματα NEOPLAK TX-TT 100\_b, NEOPOR BT 150\_b και ISOPLAK BT 150\_b μετρήθηκαν στις τρεις θερμοκρασίες 10, 20, 30°C σε στεγνή κατάσταση και για ποσοστά υγρασίας 100% και 50%. Η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε κάθε φορά που άλλαζε η θερμοκρασία.
- Τα δείγματα PERIPOR AM 200\_a, AM 250\_a και NEOPLAK BT 150\_a, AM 200\_a μετρήθηκαν μόνο σε θερμοκρασία 20°C τελείως στεγνά και με όλη την απορροφημένη υγρασία. Για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων η βαθμονόμηση με το δείγμα αναφοράς πραγματοποιήθηκε πριν από κάθε μέτρηση. Την ημέρα της μέτρησης οι πλάκες της πρώτης κατηγορίας είχαν χάσει από 16% και 19% ποσοστό υγρασίας αντίστοιχα ενώ τα άλλα δύο από 9% και 12%.

➤ **Μερική εμβάπτιση**

- Τα δοκίμια ISOPOR 30\_b, 60\_a και 200\_b υπεβλήθησαν σε μετρήσεις για θερμοκρασίες 10°C, 20°C, 30°C σε στεγνή κατάσταση και με όλο το ποσοστό υγρασίας. Με γνωστά τα αποτελέσματα από τις προηγούμενες μετρήσεις, κρίθηκε απαραίτητη η βαθμονόμηση πριν από κάθε μέτρηση και όχι μόνο όταν αλλάζει η θερμοκρασία
- Τα δείγματα NEOPOR THP 80\_b, TX-TT 100\_a και BT 150\_c, ISOPLAK TX-TT 120\_b και BT 150\_b και NEOPLAK TX-TT 100\_b μετρήθηκαν μόνο σε θερμοκρασία 20°C απολύτως στεγνά και με όση υγρασία είχε απομείνει την ημέρα της μέτρησης. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση πριν από κάθε μέτρηση. Οι πλάκες της πρώτης κατηγορίας είχαν χάσει 23%- 27% του συνολικού απορροφημένου ύδατος, τις δεύτερης παραπάνω από το μισό με τιμές 60% και 84% αντίστοιχα και το τελευταίο δείγμα είχε χάσει περίπου 39% της συνολικής υγρασίας του.

### **Περιγραφή προγράμματος LABVIEW**

Ο έλεγχος, η καταγραφή και η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα LABVIEW. Τα περισσότερα συστήματα προγραμματισμού χρησιμοποιούν γλώσσα σε κείμενο για να δημιουργήσουν κώδικα ενώ το LABVIEW χρησιμοποιεί μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού για τη δημιουργία προγραμμάτων σε ένα διάγραμμα ροής παραλείποντας συντακτικές λεπτομέρειες [30].

• **Δομή προγράμματος**

Το LabView χρησιμοποιεί κυρίως εικονίδια και γραφικά σύμβολα παρά γλώσσα κειμένου. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται ονομάζεται G και ουσιαστικά αποτελείται από εικονίδια που αντιπροσωπεύουν υπορουτίνες οι οποίες ονομάζονται «εικονικά εργαλεία»- (VIs) και εκτελούν μαθηματικές πράξεις. Κάθε VI αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

- Το front panel, που ουσιαστικά αποτελεί τη διαλογική σύνδεση με τον χρήστη και περιέχει κουμπιά ρύθμισης, κουμπιά επαφής, γραφικές παραστάσεις και πολλά άλλα όργανα, τα οποία αποτελούν τις εισόδους του χρήστη και δείκτες που αποτελούν τις εξόδους του προγράμματος.
- Το block diagram, που βρίσκεται κάτω από το front panel αποτελεί τον πηγαίο κώδικα και ενώ φαίνεται εικονογραφημένο, είναι το πραγματικό εκτελέσιμο πρόγραμμα. Αποτελείται από εικονίδια (ομοιώματα- είσοδοι του front panel), βασικές συναρτήσεις και δομές ελέγχου του προγράμματος. Η

σύνδεση των εικονιδίων γίνεται με «καλώδια» που υποδεικνύουν τη ροή των δεδομένων και τα βήματα της μέτρησης.

- Τα εικονίδια με τις συνδέσεις τους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα εικονίδια αντιπροσωπεύουν υπορουτίνες που εκτελούν προκαθορισμένες μαθηματικές πράξεις.

#### • Περιβάλλον εργασίας μέτρησης

Το πρόγραμμα λαμβάνει τις τιμές από τους αισθητήρες θερμοκρασίας και θερμοροής από το σύστημα συλλογής και επεξεργασίας μετρήσεων (DAQ) του Agilent που συνδέεται με τον Η/Υ μέσω μιας σειριακής θύρας. Για την εισαγωγή των παραμέτρων της μέτρησης και της παρακολούθησης των αποτελεσμάτων έχει δημιουργηθεί ένα περιβάλλον εργασίας που αποτελείται από πέντε παράθυρα εργασίας. Τα τρία αφορούν τις παραμέτρους διαμόρφωσης εισόδου/εξόδου του συστήματος συλλογής δεδομένων Agilent και των παραμέτρων λειτουργίας των controllers όπου ο χρήστης δεν πραγματοποιεί καμία ενέργεια. Οι άλλες δύο οθόνες αναλύονται παρακάτω.

#### ➤ Παράμετροι αισθητήρων

Στο συγκεκριμένο παράθυρο φαίνονται οι παράμετροι των αισθητήρων, όπως ο τύπος τους, οι θέσεις των αισθητήρων στις πλάκες και τα κανάλια που είναι συνδεδεμένα, οι συντελεστές της εξίσωσης Steinhart- Hart και οι συντελεστές βαθμονόμησης. Η μόνη παρέμβαση του χρήστη είναι σε κάθε μέτρηση η αντικατάσταση των παλιών συντελεστών βαθμονόμησης των θερμοροομέτρων, με τους νέους που προκύπτουν από την βαθμονόμηση του δείγματος αναφοράς. Αυτό γίνεται γιατί με κάθε μέτρηση και ειδικότερα με κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας των πλακών οι τιμές των μεταβάλλονται.

Name	Location	Unit	Type	Calibration Coefficients	Temperature T
Sens001	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens002	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens003	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens004	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens005	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens006	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens007	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens008	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens009	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens010	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens011	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens012	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens013	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens014	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens015	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens016	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens017	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens018	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens019	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens020	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000
Sens021	100	mm	Thermistor	1.0000000000000000e+000	0.0000000000000000e+000

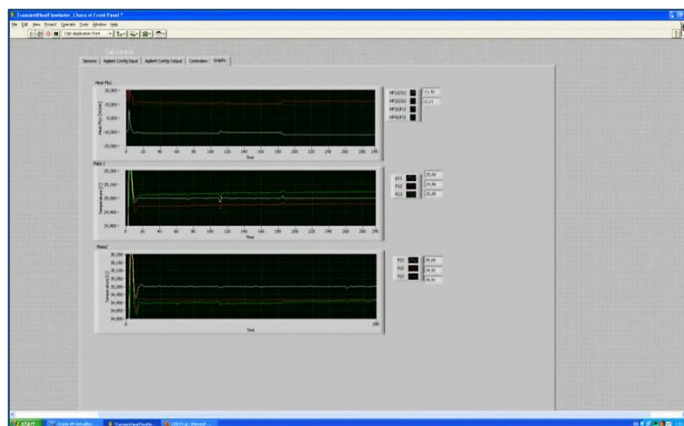
Εικόνα 5.24: Παράμετροι λειτουργίας αισθητήρων

#### ➤ Παράθυρο αποτελεσμάτων

Απεικονίζονται γραφικά οι μετρηθείσες τιμές σε τρία διαγράμματα όπως φαίνεται από την ακόλουθη φωτογραφία. Στο πρώτο απεικονίζονται οι τιμές των δύο θερμοροών, στο δεύτερο οι θερμοκρασίες της ψυχρής πλάκας και στο τρίτο οι θερμοκρασίες της θερμής πλάκας σε όλη την διάρκεια της μέτρησης. Οι τιμές της θερμοροής έχουν αντίθετο πρόσημο επειδή έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, προερχόμενες από τις μονάδες θέρμανσης και ψύξης. Οι τρεις θερμοκρασίες στα επόμενα δύο διαγράμματα προέρχονται από τα δύο θερμίστορ που έχουν τοποθετηθεί στο κέντρο και στην άνω γωνία σε κάθε πλάκα.

Η γραφική διαμόρφωση των αποτελεσμάτων επιτρέπει στο χρήστη να εντοπίζει το χρονικό διάστημα όπου οι θερμοροές είναι σταθερές ή έχουν τις ελάχιστες διακυμάνσεις ώστε να γίνεται σωστός υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας.

Πριν από την έναρξη της διαδικασίας, δημιουργούνται αρχεία εισόδου- εξόδου τα οποία ζητούνται από το πρόγραμμα. Κάθε πλάκα έχει από ένα αρχείο εισόδου μορφής .txt που περιλαμβάνει τις τρεις θερμοκρασίες σε °C και τον ολικό χρόνο της μέτρησης σε milliseconds. Το αρχείο εξόδου είναι κοινό και περιέχει τα αποτελέσματα των αισθητήρων, τις ορισμένες και τις τρέχουσες θερμοκρασίες ελέγχου στις πλάκες και τεχνικές πληροφορίες



**Εικόνα 5.24:** Αποτελέσματα θερμοροής και θερμοκρασιών

### Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις με την μέθοδο Heat- Flow δεν είναι απευθείας τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αλλά τιμές θερμοροής και θερμοκρασιών. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο .txt που αποτελείται από 13 στήλες και έχει την παρακάτω μορφή:

Time[s]	SV1	PV1	SV2	PV2	HFP1	HFP2	PL11	PL12	PL13	PL21	PL22	PL23
0,864	15,000	15,000	25,000	24,999	14,785	13,818	14,972	14,880	15,003	25,000	24,993	24,981

Η πρώτη στήλη περιλαμβάνει τις τιμές του χρόνου σε seconds, για τις ποιές πραγματοποιείται λήψη των τιμών. Στις στήλες SV1 και SV2 καταγράφεται η προκαθορισμένη τιμή θερμοκρασίας για τον έλεγχο και αντίστοιχα στις στήλες PV1 και PV2 οι τρέχουσες τιμές την ώρα της μέτρησης. Οι επόμενες δύο στήλες HFP1 και HFP2 αποθηκεύουν τις θερμοροές ενώ οι τελευταίες έξι PL11, PL12, PL13, PL21, PL22 και PL23 τις θερμοκρασιακές τιμές στο κέντρο και στην άνω γωνία κάθε πλάκας.

Σε κάθε μέτρηση δοκιμίου καταγράφονται περίπου 36 σειρές τιμών και πρέπει να βρεθεί το χρονικό διάστημα εκείνο που η θερμοροή είναι σταθερή. Η επιλογή γίνεται σε συνδυασμό με τα σχετικά γραφήματα όπου η σταθερότητα φαίνεται από την μηδενική κλίση των καμπυλών των θερμοροών. Στη συνέχεια οι τιμές εκείνες αντιγράφονται σε ένα αρχείο του προγράμματος Excel για να είναι δυνατή η επεξεργασία τους. Συνήθως μόνο 10 έως 20 μετρήσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή λ.



Στη συνέχεια υπολογίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος, ο μέσος όρος των στηλών που έχουν αντιγραφεί στο αρχείο .xls και ακολουθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί του μεγέθους που θέλουμε.

- i. Υπολογισμός της διαφοράς θερμοκρασίας στο κέντρο του δείγματος. Οι τιμές που αξιοποιούνται είναι εκείνες που λαμβάνονται από τα θερμίστορ στο κέντρο της κάθε πλάκας. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$\Delta T = \frac{(PL21 + PL22)}{2} - \frac{(PL11 + PL12)}{2} \quad (5.10)$$

όπου οι εκφράσεις PL αντιστοιχούν στις μετρηθείσες θερμοκρασίες.

- ii. Προσδιορισμός της συνολικής θερμοροής που αναπτύσσεται στο δείγμα μέσω των μονάδων θέρμανσης και ψύξης από την εξίσωση:

$$q_{av} = \frac{(-HFP1 + HFP2)}{2} \quad (5.11)$$

όπου HFP1, HFP2 οι τιμές των θερμοροών.

- iii. Εύρεση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με βάση τον νόμο Fourier και την σχέση:

$$q_{av} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \Rightarrow \lambda = q_{av} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (5.12)$$

όπου  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας (°C) και  $\Delta x$  η απόσταση (m) που είναι κάθετη στη θερμοροή, δηλ. το πάχος του εκάστοτε δείγματος. Το πάχος λαμβάνεται από τη μέτρηση που πραγματοποιεί η διάταξη GHP.

- iv. Καθορισμός της κάθε θερμοροής που αναπτύσσεται σε κάθε πλάκα για πληρότητα των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες σχέσεις:

$$\lambda_1 = -HFP1 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad \text{και} \quad \lambda_2 = HFP2 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (5.13)$$

όπου στην πρώτη σχέση το αρνητικό πρόσημο δηλώνει την αντίθετη κατεύθυνση της θερμοροής αφού οι δύο πλάκες είναι τοποθετημένες αντικριστά και συνεπώς οι ροές έχουν αντίθετη κατεύθυνση.

#### • Βαθμονόμηση με δείγμα αναφοράς

Πριν από κάθε μέτρηση αποφασίστηκε να γίνεται βαθμονόμηση επειδή αλλάζουν οι συντελεστές  $C_1$  και  $C_2$  των αισθητήρων μέτρησης θερμότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί το σήμα από τους αισθητήρες αυτούς είναι πολύ μικρό (της τάξεως των μερικών  $\mu V$ ) και συνεπώς συγκρίσιμο με συστηματικά σφάλματα που μπορεί να εισάγονται στις μετρήσεις εξαιτίας ποικίλων παραμέτρων (π.χ. επίδραση της θερμοκρασίας του χώρου στις σταθερές βαθμονόμησης του πολυμέτρου). Σαν δοκίμιο αναφοράς επιλέγεται μία πλάκα υλικού, ήδη μετρημένη με την μέθοδο Guarded Hot Plate ώστε να είναι γνωστή η θερμική αγωγιμότητα. Είναι προτιμότερο, το δείγμα να είναι στεγνό και χωρίς συσκευασία επειδή η μέτρηση είναι ακριβής και δεν μεταβάλλεται λόγω παρουσίας υγρασίας ή πρόσθετης θερμικής αντίστασης.

Κατά την βαθμονόμηση γίνεται έλεγχος του δοκιμίου αναφοράς στις θερμοκρασίες που θέλουμε να μετρήσουμε. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί σε αρχείο .xls, μαζί με το πάχος του δείγματος, την θερμική αγωγιμότητα που προέκυψε από τη διάταξη GHP και του συντελεστές βαθμονόμησης των θερμοροομέτρων που έγινε η μέτρηση. Ουσιαστικά γίνεται σύγκριση της γνωστής τιμής  $\lambda_{GHP}$  που θεωρείται πιο έγκυρη με την τιμή  $\lambda_{HF}$  που προκύπτει και πραγματοποιείται κατάλληλη διόρθωση.

Ο ελεγκτής αφού υλοποιήσει τον απαραίτητο έλεγχο στα θερμοροόμετρα, δίνει το σήμα εξόδου που είναι της μορφής  $q = kE/C$ , όπου  $k$  είναι μια σταθερή παράμετρος ελέγχου και  $E/C$  το μέτρο της τάσης όπως διαμορφώνεται σε κάθε μέτρηση. Αρχικά, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, υπολογίζονται η διαφορά θερμοκρασίας, η μέση θερμορροή, η θερμορροή και η αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα κάθε πλάκας. Όλες αυτές οι τιμές έχουν σαν παραμέτρους τους παλιούς συντελεστές  $C_{1old}$ ,  $C_{2old}$  βαθμονόμησης των θερμοροόμετρων.

Οι νέοι συντελεστές προκύπτουν από την παρακάτω διαδικασία:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{GHP} &= \frac{q_{GHP} \cdot \Delta x}{\Delta T} \\ \lambda_{HF1} &= \frac{q_{HF1} \cdot \Delta x}{\Delta T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\lambda_{GHP}}{\lambda_{HF1}} = \frac{q_{GHP}}{q_{HF1}}, \text{ αφού } \Delta x \text{ και } \Delta T \text{ είναι κοινά για τις δύο διατάξεις.}$$

Επειδή όμως  $q = kE/C$  με  $kE$  σταθερό, η εξίσωση γίνεται:  $\frac{C_{1new}}{C_{1old}} = \frac{\lambda_{HF1}}{\lambda_{GHP}}$  (5.14)

όπου  $C_{1new}$  ο καινούριος συντελεστής βαθμονόμησης.

Ομοίως υπολογίζεται ο συντελεστής  $C_{2new}$ :  $C_{2new} = \frac{\lambda_{HF2}}{\lambda_{GHP}} \cdot C_{2old}$  (5.15)

Οι νέες παράμετροι συμπληρώνονται στο πρόγραμμα LabView και ακολουθούν οι μετρήσεις των δειγμάτων που θέλουμε.

## 6. Αξιολόγηση πειραματικών μεθοδολογιών και διατάξεων μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας

### 6.1. Διατάξεις μόνιμης μετάδοσης θερμότητας

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της μεθόδου μόνιμης κατάστασης είναι πως προϋποθέτει αποκατάσταση της θερμικής ισορροπίας στο υλικό. Πρέπει δηλαδή χρονικά να μην παρατηρείται μεταφορά θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό του υλικού, ώστε να πραγματοποιείται η μέτρηση σε μόνιμες συνθήκες. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο έχουν αναλυθεί τα περαιτέρω χαρακτηριστικά της μεθόδου και εδώ παρατίθενται επιγραμματικά:

- ✓ Μεγάλη χρονική διάρκεια μέτρησης
- ✓ Θερμοκρασιακές τιμές που ορίζονται από τον χρήστη
- ✓ Δυνατότητα μέτρησης σε παραπάνω από μία θερμοκρασίες

Οι διατάξεις που λειτουργούν σε μόνιμες συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας είναι:

1. **Guarded Hot Plate Method** με χρήση της συσκευής TLP 300
2. **Heat Flow Method** με χρήση ιδιοκατασκευής

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι στηρίζονται στην ίδια βασική αρχή, ωστόσο έχουν μερικές ουσιαστικές διαφορές που αναλύονται στην αντίστοιχη ενότητα. Η πιο σημαντική είναι πως η μέθοδος Heat Flow απαιτεί βαθμονόμηση πριν από κάθε μέτρηση διότι μεταβάλλονται οι συντελεστές των θερμοροομέτρων λόγω συστηματικών σφαλμάτων και απαιτούν διόρθωση. Συνεπώς τα αποτελέσματα αξιολογούνται με βάση τις μετρήσεις GHP που είναι απόλυτη μέθοδος και πραγματοποιείται σε ελεγχόμενο περιβάλλον μέσα σε ειδικό μετρητικό θάλαμο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί πως χρειάζονται δύο δείγματα για την πρώτη μέθοδο ενώ για την δεύτερη χρησιμοποιήθηκε συμμετρική διάταξη μονού δείγματος. Επειδή τα δείγματα κάθε ομάδας προέρχονται από το ίδιο μπλοκ έχουν τις ίδιες ιδιότητες και κοινή θερμική αγωγιμότητα. Επομένως θεωρούνται αντιπροσωπευτικά της ομάδας και είναι δυνατό να γίνει η σύγκριση των τιμών που προέκυψαν.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται σε συγκεντρωτικά διαγράμματα ή πίνακες για τις **ομάδες** EPS που τοποθετήθηκαν στις δύο διατάξεις καθώς και τις ποσοστιαίες διαφορές των αποτελεσμάτων.

#### ➤ **Μέθοδος Heat Flow**

Για την εκτέλεση των μετρήσεων με την μέθοδο Heat Flow χρησιμοποιήθηκε συμμετρική ιδιοκατασκευή μονού δείγματος. Στο αντίστοιχο κεφάλαιο αναφέρθηκε πως η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται από την δυνατότητα της διάταξης να διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της θερμοροής. Για τον λόγο αυτό πρέπει να αντικαθίστανται οι συντελεστές βαθμονόμησης των θερμοροομέτρων με νέους που προκύπτουν από μέτρηση με ένα δείγμα αναφοράς.

• **Διαδικασία μετρήσεων**

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία των μετρήσεων των επιλεγμένων δειγμάτων, πρέπει να προηγηθεί έλεγχος στην μεταβολή των συντελεστών βαθμονόμησης των θερμοροομέτρων  $C_1$  και  $C_2$  ώστε να δούμε αν αλλάζουν σε κάθε μέτρηση και κατά πόσο αυτή η αλλαγή επηρεάζει τον συντελεστή  $\lambda$  και πόσο συχνά χρειάζεται βαθμονόμηση. Για την διαδικασία αυτή έγινε βαθμονόμηση στους 20°C με το στεγνό δείγμα Isopor 200b και προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας του δείγματος Neoplak TX-TT 100b. Τα αποτελέσματα διαμορφώθηκαν ως εξής:

Μέτρηση	Συντελεστές	Isopor 200b	Neoplak 100b
1)	$C_1$	1.60712786	0.03513626
	$C_2$	1.76424375	
2)	$C_1$	1.608885208	0.034409726
	$C_2$	1.765397758	
3)	$C_1$	1.602603345	0.03476994
	$C_2$	1.76976419	

**Πίνακας 6.1:** Έλεγχος μεταβολής συντελεστών  $C_1$ ,  $C_2$  μεθόδου Heat- Flow

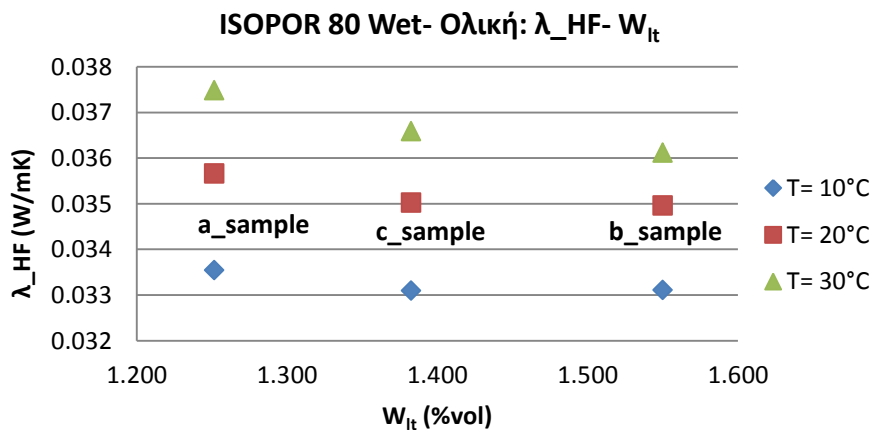
Παρατηρούμε πως οι συντελεστές δεν παραμένουν σταθεροί αφού αλλάζουν στο 3<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο και οδηγούν σε αποτελέσματα της μορφής:

$$\lambda_{NPK\_100b} = 0,0035 \pm 0.0007W/mK, \text{ υπάρχει δηλαδή περιθώριο σφάλματος } \pm 0,7mW/mK.$$

Εφόσον με βαθμονόμηση πριν από κάθε μέτρηση ενός δοκιμίου, ο συντελεστής μεταβάλλεται στο 4<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο, η βαθμονόμηση δεν είναι απαραίτητη πριν από κάθε μέτρηση παρά μόνο όταν αλλάζει η θερμοκρασία για την οποία θέλουμε να υπολογιστεί η θερμική αγωγιμότητα.

• **Έλεγχος δειγμάτων**

Πριν την έναρξη των μετρήσεων έγιναν δοκιμάστηκες μετρήσεις σε όλα τα δείγματα μιας ομάδας μιας κατηγορίας για να δούμε αν ένα δείγμα μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό της ομάδας. Η ομάδα που επιλέχθηκε ήταν η ISOPOR EPS 80 μετά από ολική εμφύσηση και ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για τις τρεις γνωστές θερμοκρασίες.



**Διάγραμμα 6.1:** Έλεγχος απόκλισης τιμών  $\lambda$  των τριών δοκιμίων με την μέθοδο Heat Flow

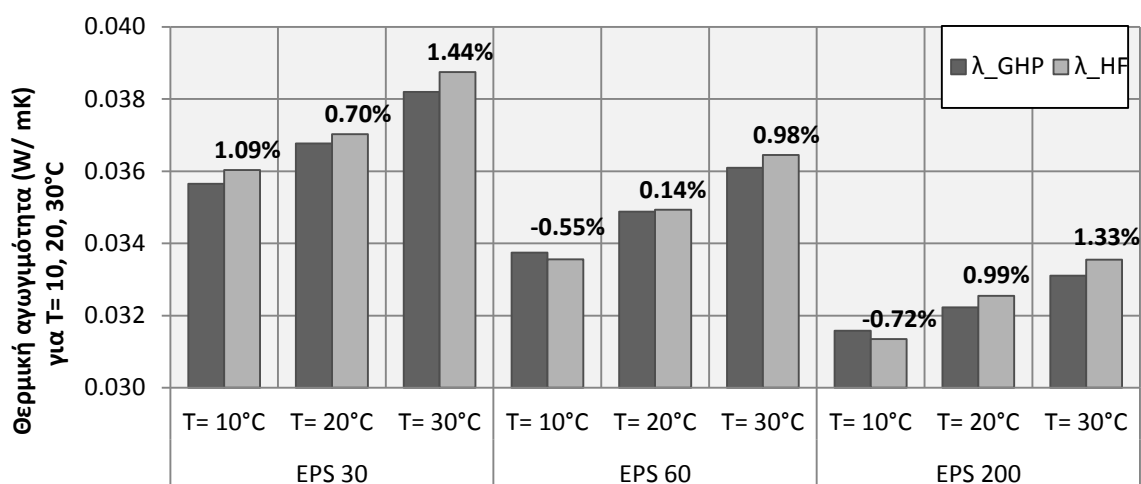
Βλέπουμε πως τα δείγματα παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές θερμικής αγωγιμότητας. Η μέγιστη μεταβολή που παρατηρείται είναι περίπου 3,8%, μεταξύ των δειγμάτων a και c και είναι μικρότερη από το σχετικό σφάλμα της διάταξης που είναι 5% και δεν θεωρήθηκε αρκετή ώστε να επιβάλλεται η μέτρηση και των τριών δοκιμών μιας ομάδας ενώ αρκεί ένα δείγμα για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Συνεπώς όλα τα δείγματα θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά της ομάδας τους, καθώς έχουν τις ίδιες ιδιότητες και είχαν απορροφήσει παρόμοια ποσοστά υγρασίας. Στα διαγράμματα οι τιμές των ποσοστών απορρόφησης και φαινόμενης πυκνότητας είναι **ο μέσος όρος** όλης της ομάδας.

Η επιλογή των δειγμάτων δεν έγινε αυθαίρετα αλλά με βάση κάποια κριτήρια. Ο πρώτος περιορισμός ήταν οι κατηγορίες που είχαν υποστεί ολική βύθιση την συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Όλα τα δοκίμια ζυγίστηκαν για να βρεθούν εκείνα που είχαν το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας κατ' όγκο σε συνδυασμό με μια αρχική φαινόμενη πυκνότητα σύμφωνη με τις προδιαγραφές ISO. Τέλος, προτιμήθηκαν τα δείγματα που είχαν ήδη μετρηθεί στην διάταξη GHP και δεν είχαν χάσει σημαντικό ποσοστό νερού κατά την διάρκεια της μέτρησης.

### 6.1.1. Ξηρά δοκίμια

Με τον όρο «**Ξηρά δοκίμια**» αναφέρονται οι πλάκες EPS πριν την εμβάπτιση τους, όπως παραδόθηκαν από την κατασκευαστική εταιρεία και κατά την αποθήκευσή τους για τουλάχιστον 6h σε θερμοκρασία (23±5)°C. Ο προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας σε ξηρή κατάσταση για θερμοκρασίες 10,20 και 30°C έγινε για όλες τις ομάδες του υλικού στη διάταξη Guarded Hot Plate. Στη δεύτερη διάταξη τοποθετήθηκαν δείγματα από όλες τις κατηγορίες και ο υπολογισμός του συντελεστή έγινε είτε για όλες τις θερμοκρασιακές τιμές είτε μόνο για 20°C. Οι τιμές που αναγράφονται αφορούν την ποσοστιαία απόκλιση με βάση την μέθοδο Guarded Hot Plate.

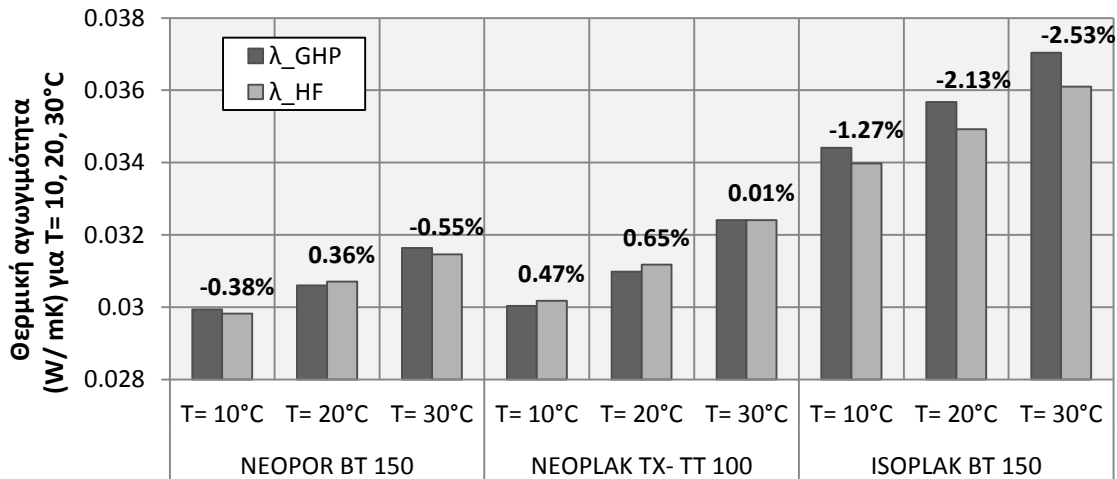


**Διάγραμμα 6.2:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών ISOPOR σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται πως οι πειραματικές τιμές των ξηρών δοκιμών που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους είναι παραπλήσιες με δεδομένο ότι το σφάλμα των μετρήσεων με GHP είναι μικρότερο του ±3% και με την διάταξη Heat Flow είναι τουλάχιστον ±3% σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα δείγματα

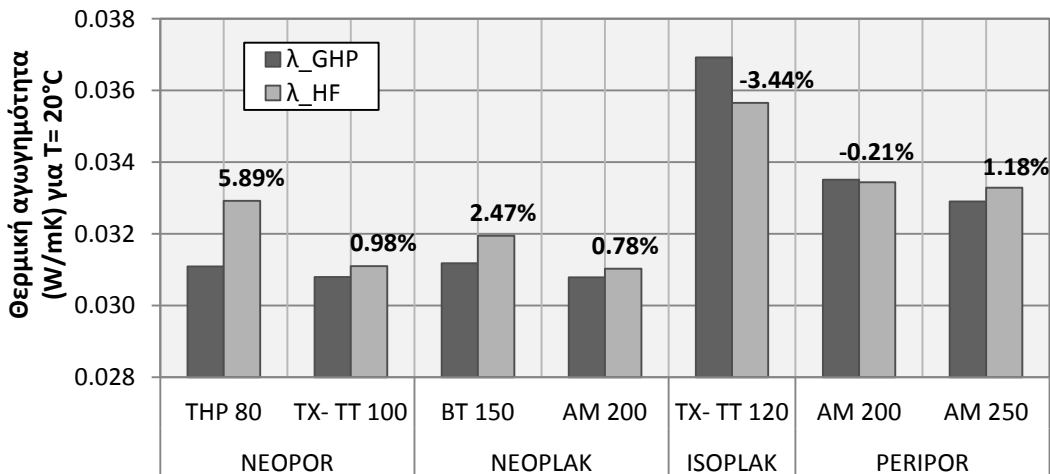
Isopor EPS 30, 60, 200, Neopor BT 150 και Neoplak TX- TT 100 στις τρεις θερμοκρασίες είναι  $\pm 1.44\%$ .

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες ομάδες, τα αποτελέσματα του συντελεστή  $\lambda$  της ομάδας Isoplak BT 150 με τη μέθοδο Heat Flow προέκυψαν μικρότερα σε όλες τις θερμοκρασίες μέτρησης από τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη μέθοδο Guarded Hot Plate. Η ποσοστιαία διαφορά των τιμών είναι αυξημένη συγκριτικά με των παραπάνω ομάδων, ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη πως το σταθερό σφάλμα της μετρητικής διάταξης GHP είναι  $\pm 3\%$  διαπιστώνεται πως τα αποτελέσματα είναι εντός των ορίων των σφαλμάτων των μεθόδων.



**Διάγραμμα 6.3:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C

Γενικά, παρατηρείται πως για τα ξηρά δοκίμια η μικρότερη συνολικά ποσοστιαία απόκλιση των δύο μεθόδων μόνιμης μετάδοσης θερμότητας επικρατεί για θερμοκρασία 10°C. Επίσης, στην συγκεκριμένη θερμοκρασία η διάταξη Heat Flow εμφανίζει κυρίως χαμηλότερες τιμές από την διάταξη GHP ενώ η πλειοψηφία των αντίστοιχων τιμών στους 20°C και 30°C είναι υψηλότερες.



**Διάγραμμα 6.4:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK και PERIPOR σε θερμοκρασία 20°C

Το διάγραμμα 6.4 παρουσιάζει συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα ομάδων Eps μόνο για την ενδιάμεση τιμή θερμοκρασίας. Οι περισσότερες ομάδες εμφανίζουν ικανοποιητικά

αποτελέσματα όμως οι ομάδες Neopor THP 80 και Isorlak TX- TT 120 αποκλίνουν περισσότερο από τα όρια του μετρητικού σφάλματος GHP.

Η πιθανότερη αιτία των μεταβολών στις τιμές θερμικής αγωγιμότητας είναι το περιβάλλον της μεθόδου Heat Flow. Τα ηλεκτρονικά τμήματα της διάταξης καθώς και το μετρούμενο δείγμα βρίσκονται σε απευθείας επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα και επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και από τα ρεύματα αέρος που υπάρχουν στον εργαστηριακό χώρο. Παρόλα αυτά, το συμπέρασμα που προκύπτει από την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων των μεθόδων, όσον αφορά τα δοκίμια πριν εμβαπτιστούν, είναι πως οι δύο μέθοδοι είναι εξίσου κατάλληλες για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

### 6.1.2. Υγρά δοκίμια

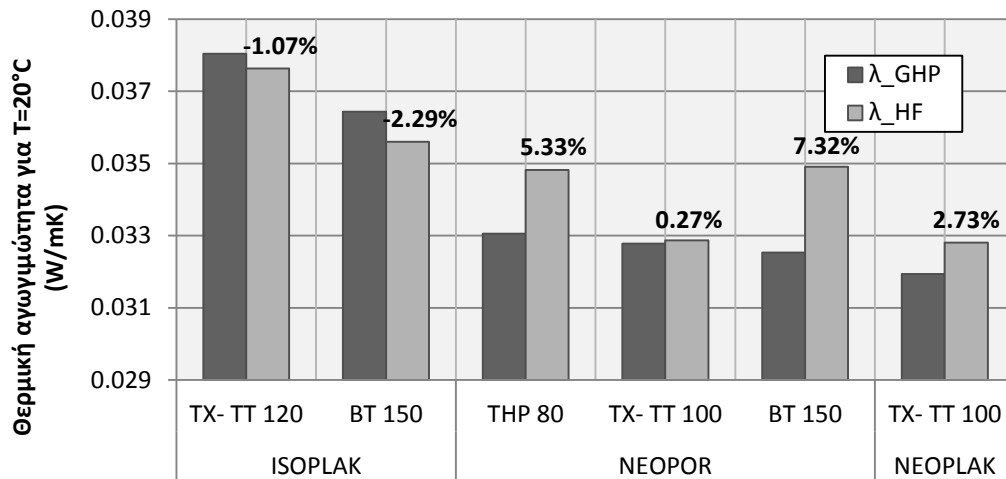
Είναι γνωστό πως η παρουσία υγρασίας στα δείγματα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Εκτός αυτού όμως, κατά την διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για την λήψη μιας μέτρησης και από τις δύο πειραματικές διατάξεις. Αυτό συμβαίνει διότι στις περιπτώσεις που υπάρχει απορρόφηση υγρασίας, με επακόλουθη λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας, απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την επίτευξη της θερμικής ισορροπίας στο εσωτερικό του δοκιμίου. Ειδικότερα για τα ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια που η υδαταπορρόφηση ήτανε πολλαπλάσια, αντίστοιχα χρειαζότανε και περισσότερος χρόνος.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται αν η υγρασία μεταβάλλει την απόκλιση των πειραματικών μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow. Οι περιπτώσεις της μερικής και της ολικής εμβάπτισης εξετάστηκαν ξεχωριστά και αναλύονται ακολούθως.

- **Μερική εμβάπτιση**

Τα δείγματα που τοποθετήθηκαν στην ειδική δεξαμενή και μετρήθηκαν στις ανωτέρω πειραματικές διατάξεις ανήκουν στις ομάδες Isopor EPS 30,60 και 200, Isorlak TX- TT 120 και BT 150, Neopor THP 80, TX- TT 100 και BT 150 και Neorlak TX- TT 100. Για την πρώτη κατηγορία πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός του  $\lambda$  και στις τρεις θερμοκρασίες ενώ για τις υπόλοιπες ομάδες μόνο στους 20°C. Οι τιμές που αναγράφονται στα διαγράμματα αφορούν την απόκλιση των πειραματικών τιμών ως προς την μέθοδο Guarded Hot Plate.

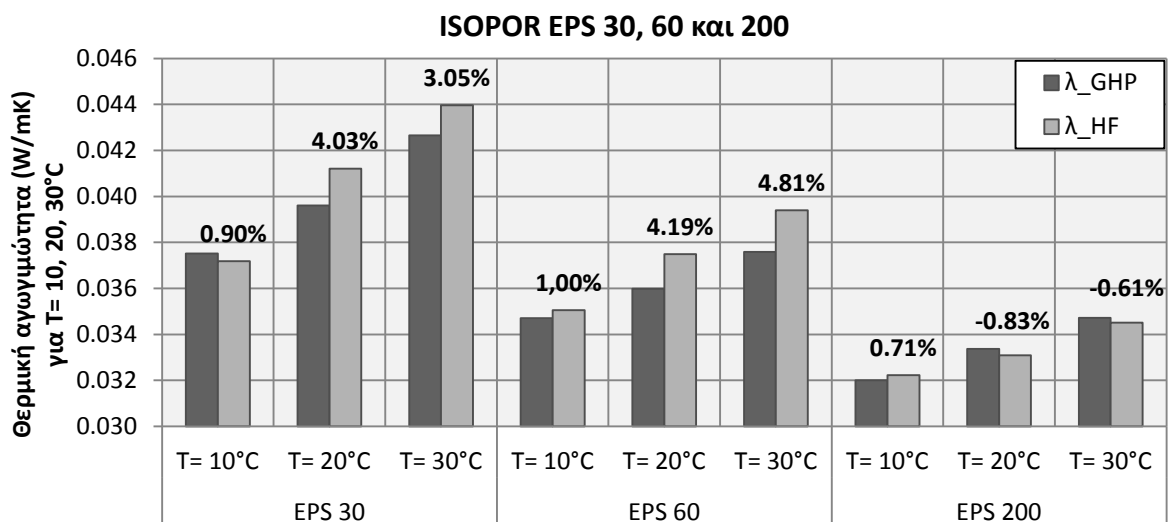
Με βάση τα διαγράμματα παρατηρείται πως η εισχώρηση της υγρασίας στα δοκίμια έχει σαν συνέπεια τα εννιά από τα συνολικά δεκαπέντε ζευγάρια τιμών να εμφανίζουν αυξημένη απόκλιση ενώ δεν παρατηρείται ανάλογη σχέση της ποσότητας υγρασίας με την ποσοστιαία διαφορά των τιμών. Η μέθοδος Heat Flow έδωσε πειραματικά αποτελέσματα που ξεπέρασαν τα αντίστοιχα της GHP σε ποσοστό το 4% για τις ομάδες Isopor 30, 60 και Neopor 80, 150 ενώ οι τιμές των ομάδων κατηγορίας Isorlak προέκυψαν μικρότερες. Τέλος, οι κοντινότερες τιμές των πειραματικών διατάξεων εξακολουθούν να προκύπτουν για την μικρότερη θερμοκρασία.



**Διάγραμμα 6.5:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK σε θερμοκρασία 20°C

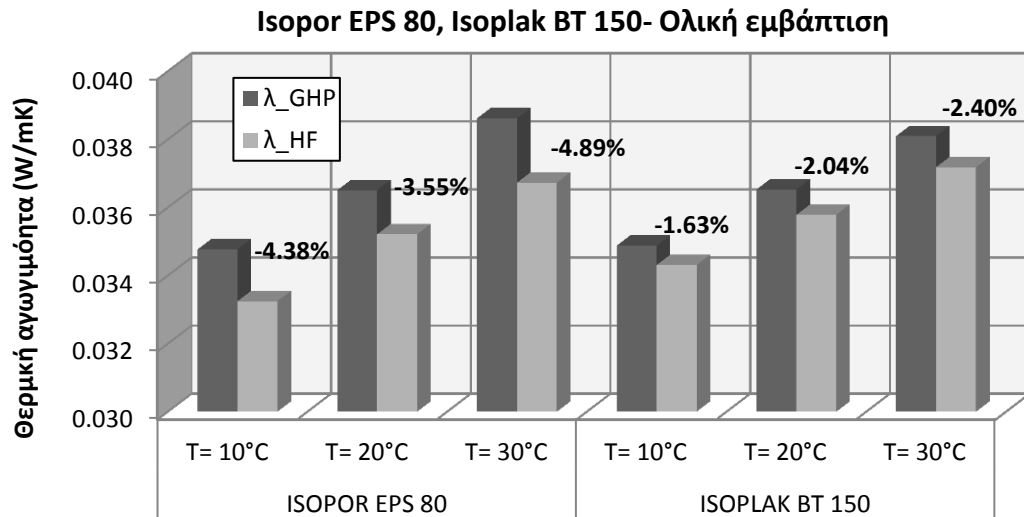
• **Ολική εμβάπτιση**

Η σύγκριση των μεθόδων μόνιμης κατάστασης με μετρήσεις των μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών δεν βοήθησε στην εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων. Για την πληρότητα της αξιολόγησης πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των πειραματικών τιμών θερμικής αγωγιμότητας από δείγματα που είχαν εμβαπτιστεί ολκώς και ανήκουν στις ομάδες Isopor EPS 80, Isoplak BT 150, Neopor BT 150, Peripor AM 200α και AM 250 και τα Neoplak TX- TT 100, BT 150 και AM 200. Όπως και προηγουμένως για κάποιες από τις ομάδες υπάρχουν αποτελέσματα σε τρεις θερμοκρασιακές τιμές ενώ για κάποιες μόνο για την μέση θερμοκρασία. Ομοίως αναγράφονται οι αποκλίσεις των πειραματικών τιμών ως προς την μέθοδο Guarded Hot Plate.

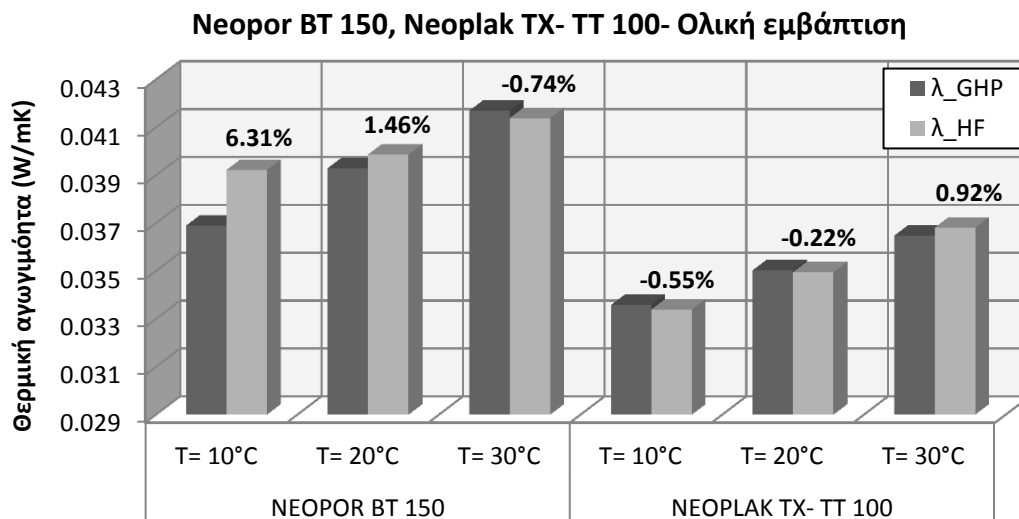


**Διάγραμμα 6.6:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C

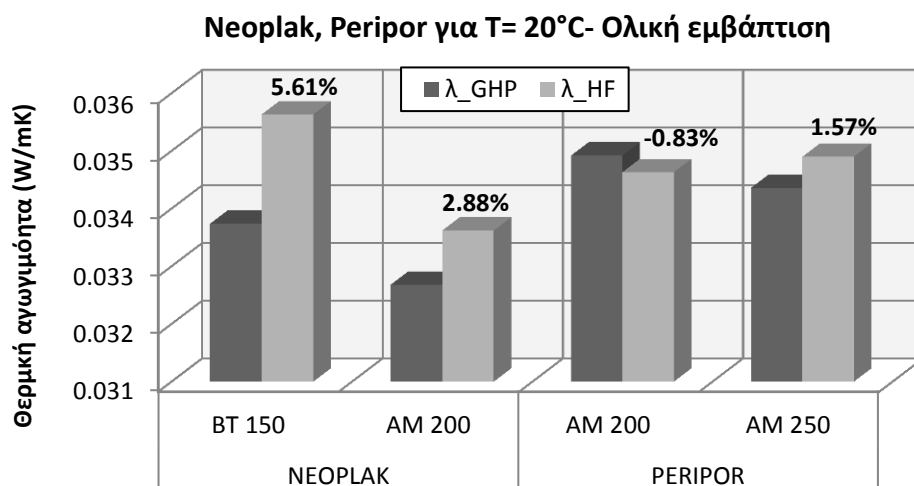




**Διάγραμμα 6.7:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR, ISOPLAK σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C



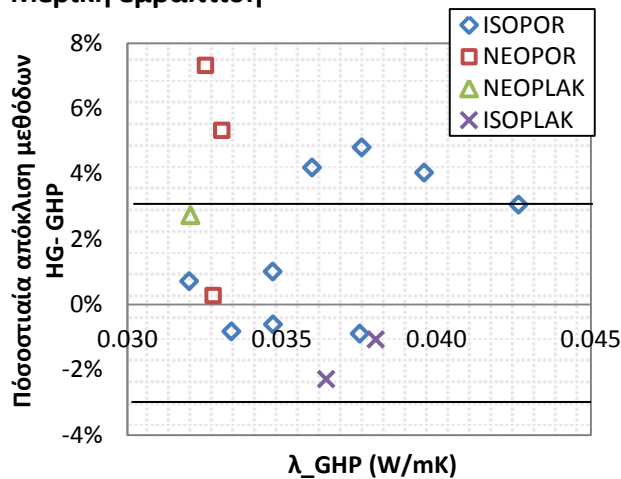
**Διάγραμμα 6.8:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK σε θερμοκρασίες 10, 20, 30°C



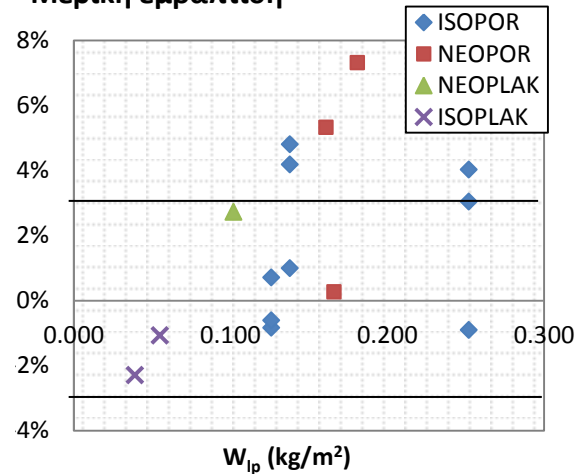
**Διάγραμμα 6.9:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK και PERIPOR σε θερμοκρασία 20°C



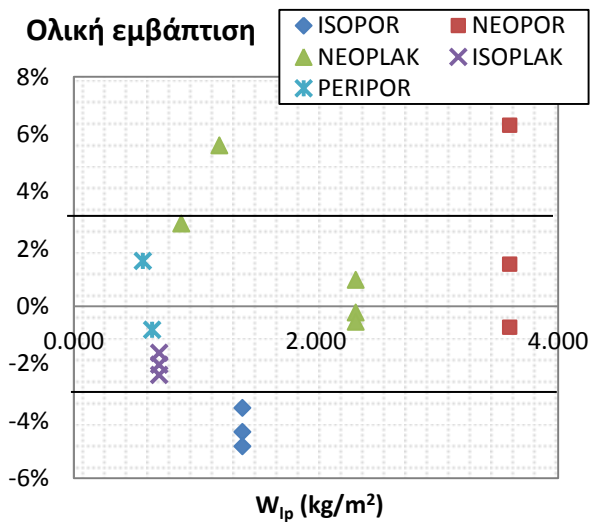
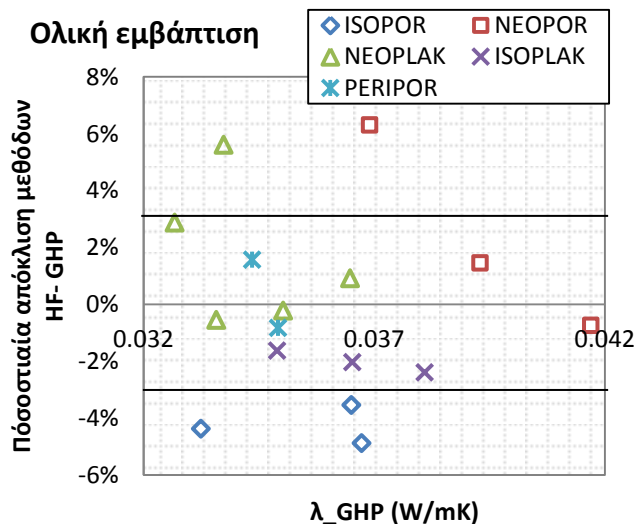
### Μερική εμβάπτιση



### Μερική εμβάπτιση



**Διάγραμμα 6.11:** Ποσοστιαία απόκλιση των μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow για μερικώς εμβαπτισμένα δείγματα



**Διάγραμμα 6.12:** Ποσοστιαία απόκλιση των μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow για ολικώς εμβαπτισμένα δείγματα

Από τα διαγράμματα 6.11, 6.12 φαίνεται η αύξηση της ποσοστιαίας διαφοράς των διατάξεων με την παρουσία της υγρασίας. Η διασπορά των σημείων στα γραφήματα δείχνει πως συνολικά για όλα τα δείγματα δεν διαμορφώνεται κάποια σχέση εξάρτησης του ποσοστού υδαταπορρόφησης που να επηρεάζει την απόκλιση των πειραματικών τιμών. Ωστόσο αν εξεταστεί κάθε κατηγορία ξεχωριστά διακρίνονται κάποια πρότυπα. Παρατηρείται πως η εισχώρηση της υγρασίας στα δείγματα Isopor έχει σαν αποτέλεσμα να μεγαλώνει το σφάλμα των μεθόδων. Ειδικά λόγω οικής εμβάπτισης προέκυψε συστηματικά πάνω από  $\pm 3\%$ . Για τις ομάδες Peripor που εμφάνισαν από τα μικρότερα ποσοστά απόκλισης σε όλες τις μετρήσεις η παραπάνω υγρασία οδήγησε σε σχεδόν παραπλήσιες πειραματικές τιμές. Στην περίπτωση της κατηγορίας Isoplak που όλες οι τιμές σύγκρισης προέκυψαν αρνητικές, η υδαταπορρόφηση είχε θετική επίδραση. Όσον αφορά τις κατηγορίες Neoplak, τα αποτελέσματα συνήθως είναι εντός του σφάλματος τις διάταξης Guarded Hot Plate ενώ δεν προκύπτει κάποιο συμπέρασμα για την κατηγορία Neopor.

Συμπεραίνεται τελικά πως η παρουσία υγρασίας στο εσωτερικό των υλικών μεταβάλλει την μετρητική διαδικασία. Εκτός αυτού η χρονική διάρκεια των μετρήσεων αυξανόταν σημαντικά με την υγρασία. Παρατηρήθηκε πως οι διαδοχικές τιμές της θερμορροής στη διάρκεια μιας και μόνο μέτρησης μεταβάλλονταν σημαντικά και δεν σταθεροποιούνταν γύρω από μια μέση τιμή με αποτέλεσμα να μην θεωρείται σωστή η μέτρηση. Αυτό συνέβαινε διότι οι πλάκες θέρμανσης και ψύξης δεν σταθεροποιούνταν εύκολα στις επιλεγμένες θερμοκρασίες και χρειάστηκαν αρκετές επαναλήψεις της διαδικασίας μέχρι την λήψη μιας έγκυρης μέτρησης για τον υπολογισμό του συντελεστή λ.

Η πιθανότερη αιτία είναι το περιβάλλον της μέτρησης όπου δεν είναι ελεγχόμενο και επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες όπως εξωτερική θερμοκρασία, ρεύματα αέρος ή ακόμα και τον αριθμό των ατόμων στο χώρο.

## 6.2. Διατάξεις μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας

Οι διατάξεις της συγκεκριμένης κατηγορίας έχουν ως βασικό πλεονέκτημα πως δεν απαιτούν την αποκατάσταση μόνιμων συνθηκών μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό του υλικού για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μετρήσεις να ολοκληρώνονται σε πολύ συντομότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις μεθόδους μόνιμης μετάδοσης θερμότητας. Η μόνη συνθήκη για την λειτουργία των μεθόδων είναι να πετύχει ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στην πειραματική διαδικασία, θερμική ισορροπία με το περιβάλλον. Παρατίθενται επιγραμματικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά τα οποία αναλύονται στην σχετική ενότητα:

- ✓ Τοπικές και επιφανειακές μετρήσεις
- ✓ Δυνατότητα μέτρησης μόνο σε μία θερμοκρασία
- ✓ Μικρή χρονική διάρκεια μετρήσεων

Οι τεχνικές που αξιολογούνται και χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα με τις μεθόδους μόνιμης μετάδοσης θερμότητας στην διάρκεια του πειράματος είναι:

1. **Hot-Wire Dynamic Method** με χρήση της συσκευής CTmètre
2. **Hot Disk Dynamic method** με χρήση της συσκευής ISOMET model 2104 Heat Transfer Analyzer

Στην πρώτη διάταξη χρειάζονται δύο δείγματα από κάθε ομάδα για την λήψη της θερμικής αγωγιμότητας και στην δεύτερη μόνο ένα. Επειδή η θερμική αγωγιμότητα αφορά μόνο την επιφάνεια του δοκιμίου που εφάπτεται στον αισθητήρα, τοποθετήθηκε σε περισσότερα από ένα σημεία ώστε να βρεθεί ο μέσος όρος των λήψεων και να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική η τιμή. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο που περιγράφεται κάθε διάταξη ξεχωριστά.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν ομάδες που μετρήθηκαν με τις δύο παραπάνω πειραματικές διατάξεις πριν και μετά την μερική ή την ολική εμβάπτιση. Ταυτόχρονα παρατίθενται οι τιμές της μεθόδου Guarded Hot Plate που θεωρείται η πιο έγκυρη μέθοδος, στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Ο λόγος που δεν υπάρχουν μετρήσεις για όλες τις ομάδες δειγμάτων είναι διότι χάλασε η ποιότητα της θερμικής επαφής των αισθητήρων που ήταν κατάλληλοι για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Εξετάστηκε η αντικατάστασή τους με έτερους αισθητήρες που περιλαμβάνονται στην κάθε διάταξη αλλά δεν κρίθηκε κανένας κατάλληλος λόγω των εσφαλμένων αποτελεσμάτων που έδιναν.

Στο σημείο αυτό, υπενθυμίζεται πως η θερμοκρασία στην οποία κάθε διάταξη πραγματοποιεί μέτρηση ποικίλλει γιατί εξαρτάται άμεσα από τον τύπο αισθητήρα καθώς και από την θερμοκρασία

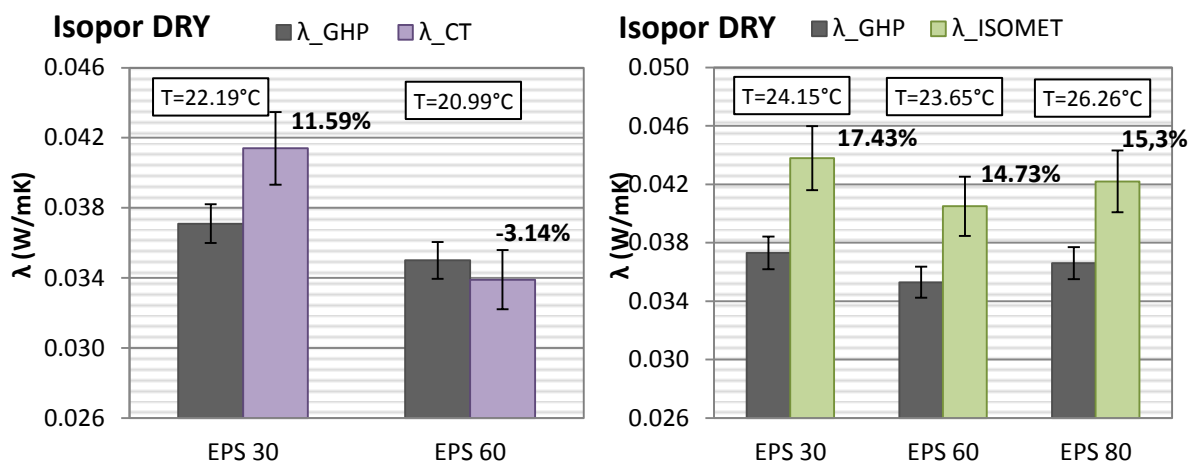
του περιβάλλοντος την δεδομένη στιγμή. Παρατηρήθηκε επίσης πως για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις η θερμοκρασία μέτρησης αυξανότανε, διότι ο αισθητήρας επηρεαζότανε από τον ενσωματωμένο θερμαντήρα και λάμβανε συνεχώς υψηλότερες τιμές στις ακόλουθες μετρήσεις.

Τέλος, στις προηγούμενες ενότητες είχε αναφερθεί πως οι πλάκες κατηγορίας ICF λόγω διαστάσεων δεν ήτανε δυνατό να τοποθετηθούν στις διατάξεις Guarded Hot Plate και Heat flow meter. Ωστόσο οι διατάξεις CTmeter και ISOMET παρέχουν την δυνατότητα μέτρησης υλικών αντίστοιχων διαστάσεων και συνεπώς όλες οι μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας των ξηρών και υγρών δειγμάτων ICF έγινε με τις προαναφερθείσες τεχνικές.

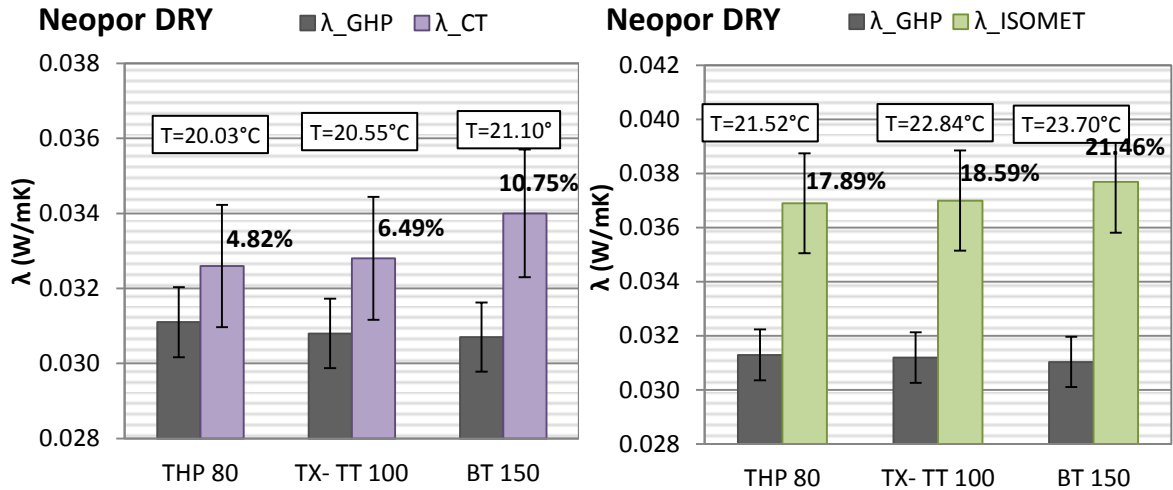
### 6.2.1. Ξηρά δοκίμια

Οι περισσότερες μετρήσεις ξηρών δειγμάτων προέρχονται κατά την πειραματική διαδικασία της μερικής εμβάπτισης όπου έγιναν ξεχωριστές μετρήσεις για το υγρό και το ξηρό τμήμα της πλάκας του υλικού. Αυτό σημαίνει πως τα δείγματα ήτανε συσκευασμένα με την ειδική σακούλα συρρίκνωσης. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρθηκε πως η μεταβολή λόγω συσκευασίας είναι αμελητέα στην περίπτωση του ISOMET ενώ οι ενδείξεις του CTmeter αυξάνονται περίπου κατά 5%, όσο και η ακρίβεια της διάταξης. Εκτός των ξηρών ομάδων ICF, οι ομάδες Neoporak BT 150 και AM 200 επίσης δεν ήτανε συσκευασμένες κατά την λήψη των μετρήσεων.

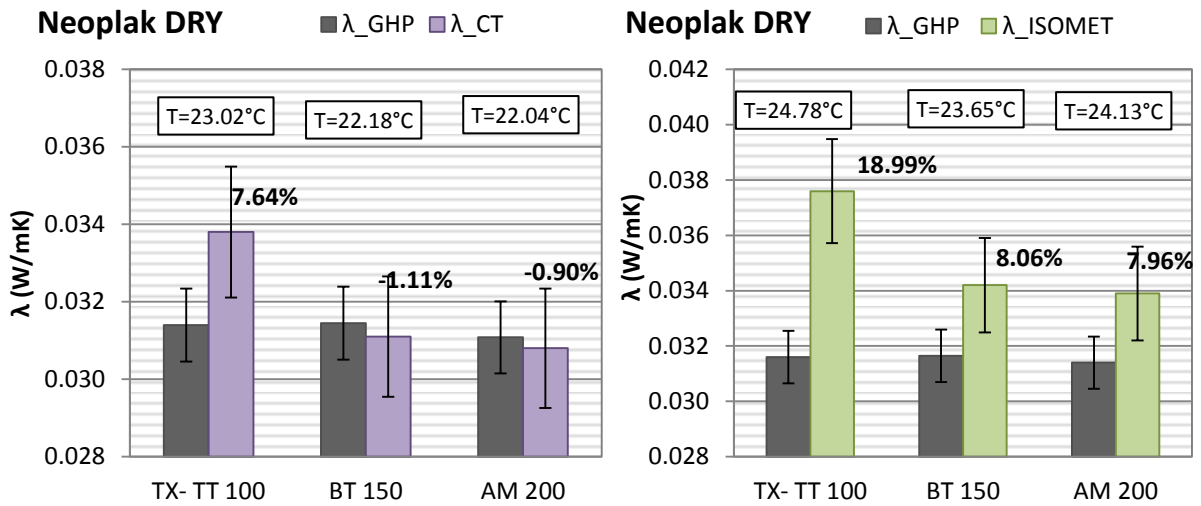
Στα γραφήματα εμφανίζονται οι πειραματικές τιμές με την ακρίβεια των διατάξεων ( $\pm 5\%$  για τις μεταβατικές και  $\pm 3\%$  για την GHP) καθώς και οι θερμοκρασίες που πραγματοποιήθηκε κάθε μέτρηση στις διατάξεις CTmeter και ISOMET. Για να υπολογιστούν οι τιμές της Guarded Hot Plate στις αντίστοιχες θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή.



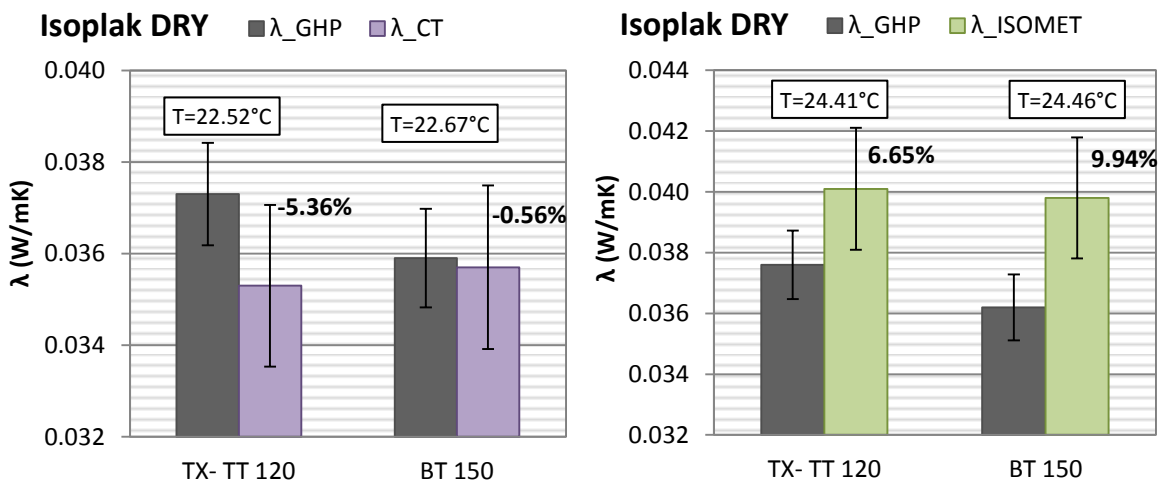
**Διάγραμμα 6.13:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμίων ISOPOR με GHP- CTmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)



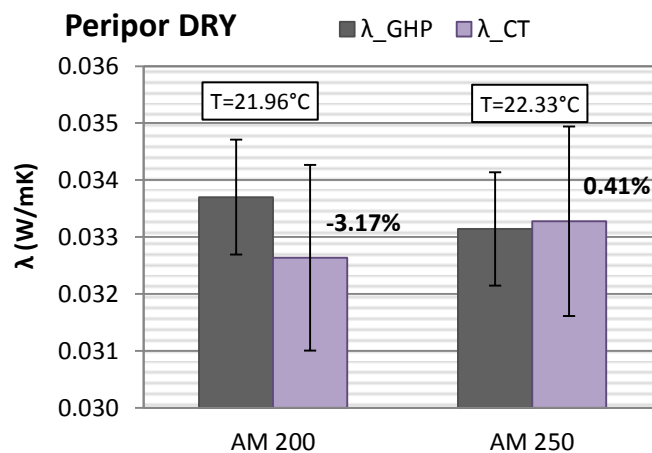
**Διάγραμμα 6.14:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPOR με GHP- Ctmetre (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)



**Διάγραμμα 6.15:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών NEOPLAK με GHP- Ctmetre (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)



**Διάγραμμα 6.16:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμών ISOPLAK με GHP- Ctmetre (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)



**Διάγραμμα 6.17:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ξηρών δοκιμίων PERIPOR με GHP- Ctmeter

Είναι φανερό πως οι τιμές του συντελεστή  $\lambda$  που προκύπτουν από διάταξη CTmeter έχουν μικρότερη απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές της GHP ενώ η διάταξη ISOMET παρουσιάζει κατά μέσο όρο 11% υψηλότερα αποτελέσματα. Στις περιπτώσεις των ομάδων Neorlak BT 150 και AM 200 και Isorlak BT 150 οι ενδείξεις του CTmeter σχεδόν ταυτίζονται με εκείνες της απόλυτη μεθόδου. Γενικότερα, συγκρίνοντας τις τιμές, παρατηρείται πως από τις τοπικές και επιφανειακές μετρήσεις δεν προκύπτει η αντίστοιχη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των ομάδων κάθε κατηγορίας με αυτήν που δείχνει η Guarded Hot Plate.

### 6.2.2. Υγρά δοκίμια

Είναι γνωστό πως η υγρασία δεν είναι κατανομημένη ομοιόμορφα στον όγκο και πως δημιουργεί συγκεντρώσεις ανάλογα με την ανομοιογένεια του υλικού. Για να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας για την κάθε ομάδα EPS πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από μία μετρήσεις σε τυχαία σημεία σε όλα τα δείγματα και υπολογίζονται οι μέσοι όροι θερμικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας.

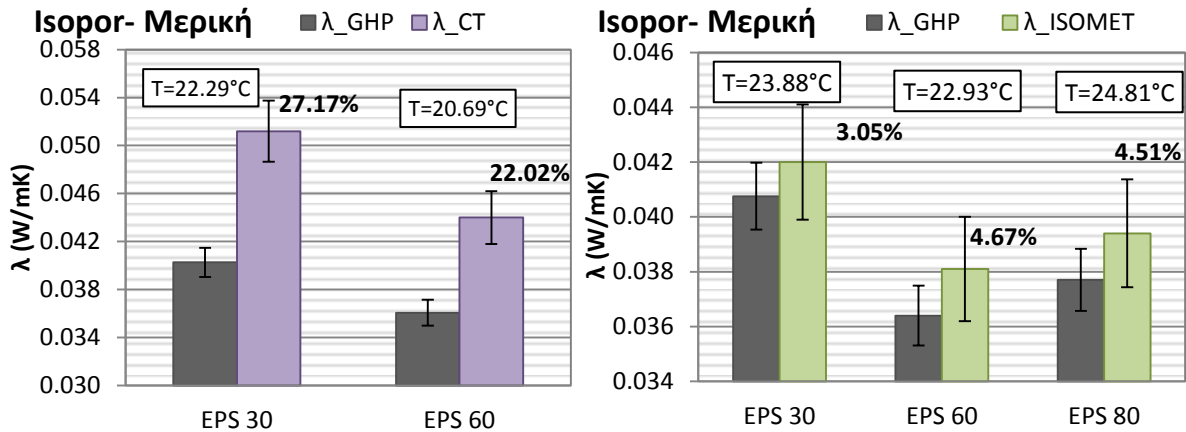
Όπως στην προηγούμενη ενότητα, οι τιμές της μερικής και της ολικής εμβάπτισης υπολογίστηκαν ξεχωριστά και αναλύονται παρακάτω.

- **Μερική εμβάπτιση**

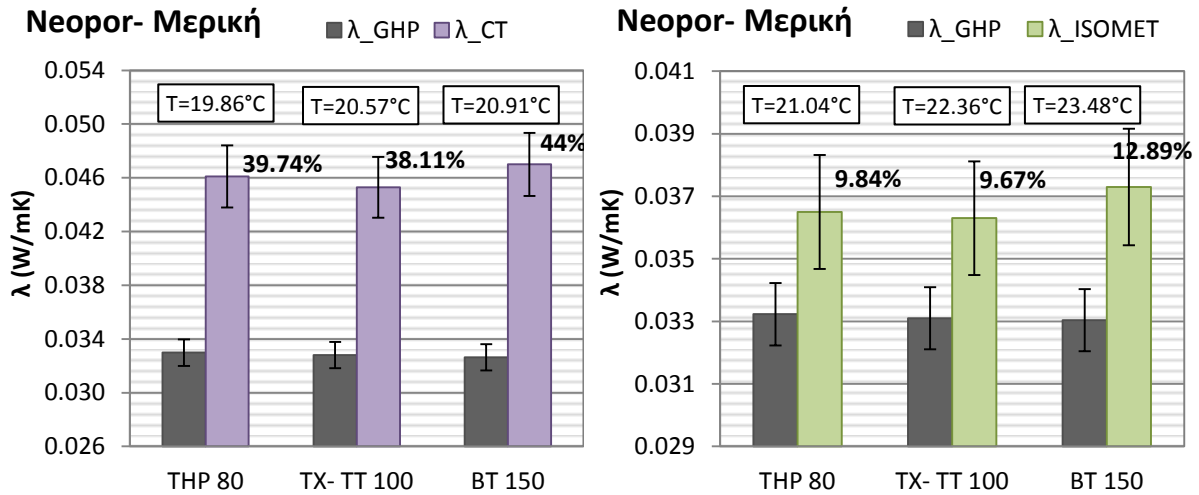
Η μερική εμβάπτιση των δειγμάτων στην δεξαμενή συνίσταται στην τοποθέτηση ενός τμήματος του δοκιμίου υπό την επιφάνεια του νερού. Η επιφανειακή υγρασία δεν είναι ισοκατανομημένη ώστε να δημιουργεί ένα ομοιόμορφο φιλμ πάνω στο δείγμα αλλά δημιουργεί συγκεντρώσεις τοπικά. Συνεπώς, η τελική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας στις τεχνικές που εξετάζονται  $\lambda$  αμβάνεται ο μέσος όρος των επιτόπιων μετρήσεων μόνο στις υγρές πλευρές.

Οι ομάδες δοκιμίων που εξετάστηκαν με τις μεθόδους μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας στην περίπτωση της μερικής υδαταπορρόφησης ανήκουν στις κατηγορίες Isopor, Neopor και Isorlak. Στα ακόλουθα γραφήματα φαίνεται πως η παρουσία της επιφανειακής υγρασίας μεταβάλλει διαφορετικά τα αποτελέσματα ως προς την αύξηση του συντελεστή  $\lambda$ . Είναι αξιοσημείωτο πως οι πειραματικές τιμές της διάταξης ISOMET προέκυψαν μικρότερες από τις αρχικές ενώ του θερμού νήματος είναι αυξημένες από 7% μέχρι 44%. Συνεπώς, η υδαταπορρόφηση έχει σαν συνέπεια η διάταξη ISOMET να είναι εκείνη που προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές GHP. Επίσης, πάλι οι πειραματικές

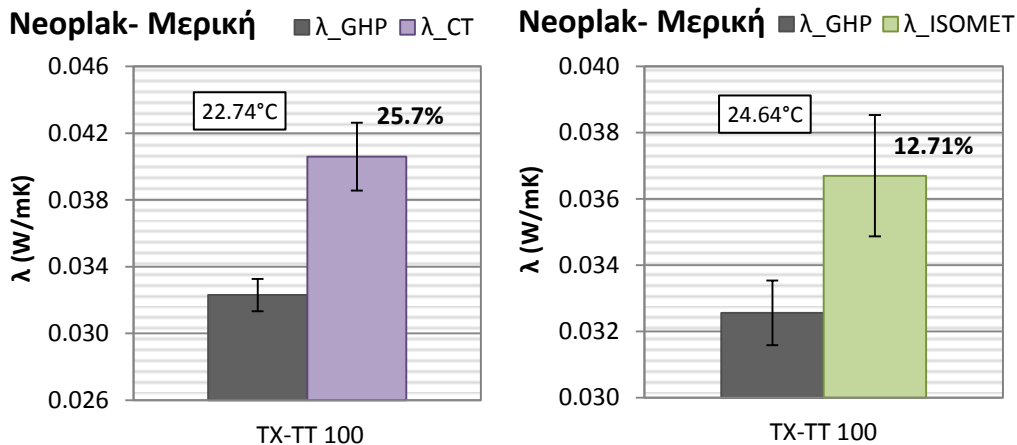
τιμές των δυναμικών μεθόδων δεν ακολουθούν την μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας που δείχνει η Guarded Hot Plate για τις ομάδες κάθε κατηγορίας.



**Διάγραμμα 6.18:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)

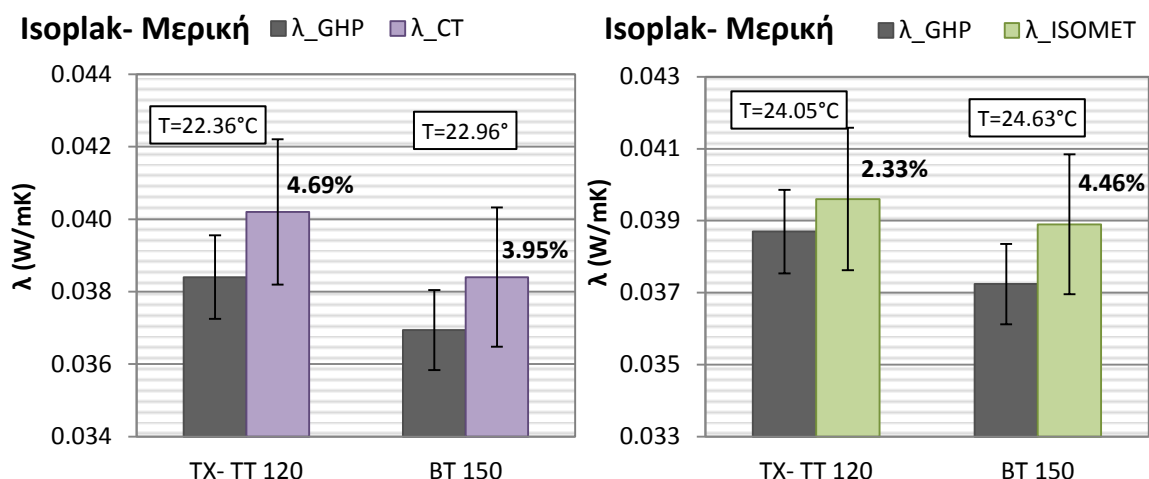


**Διάγραμμα 6.19:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)



**Διάγραμμα 6.20:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK με GHP Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)

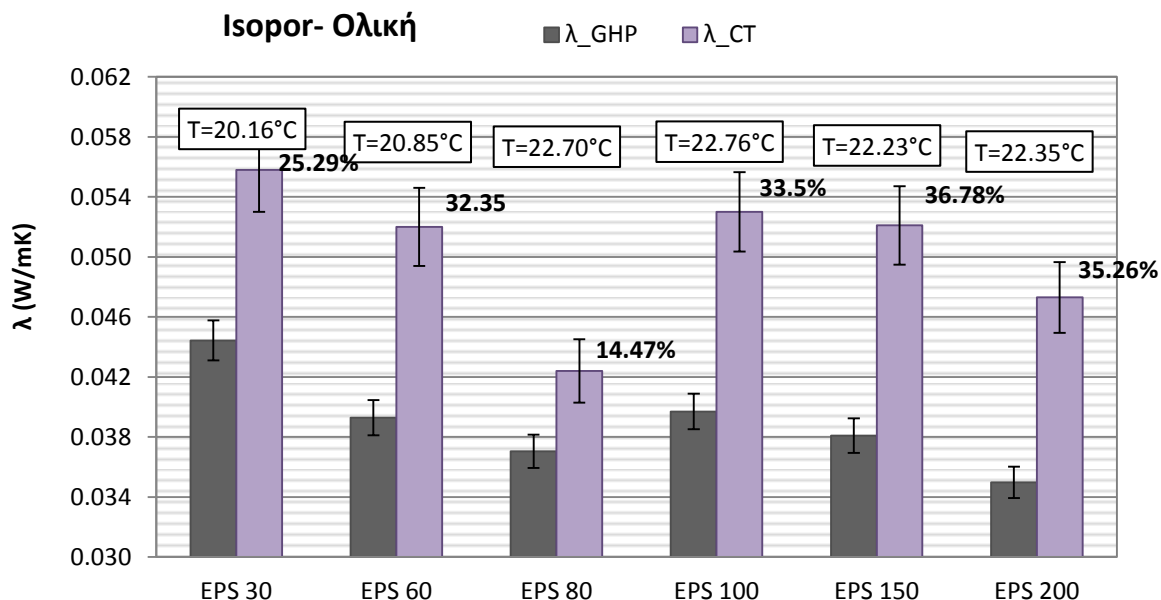




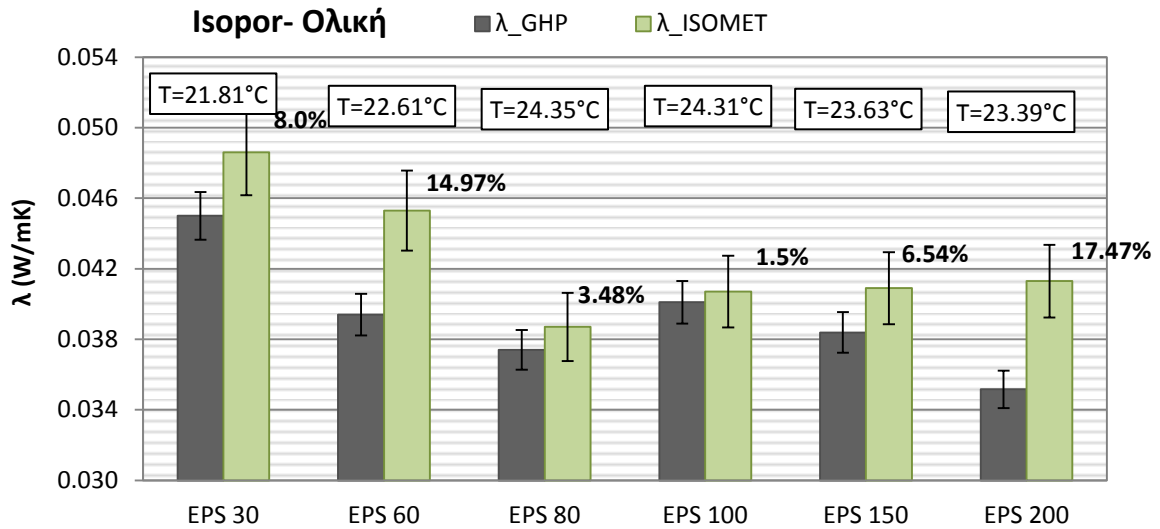
**Διάγραμμα 6.21:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPLAK με GHP- Ctmeter (αριστερά) και GHP- ISOMET (δεξιά)

• **Ολική εμβάπτιση**

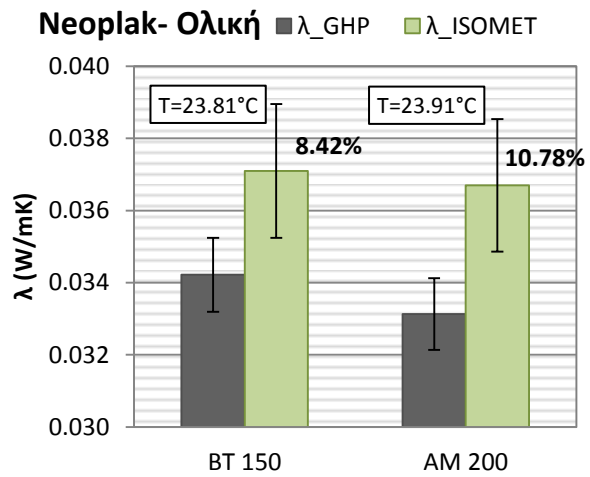
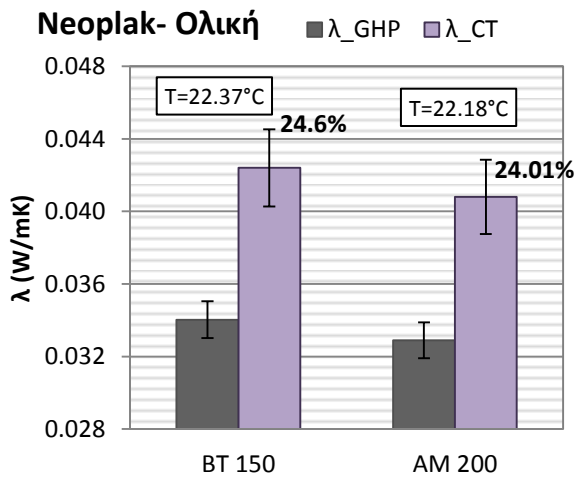
Όπως και στην μέθοδο μόνιμης μετάδοσης θερμότητας, χρειάζονται και τα αποτελέσματα της ολικής εμβάπτισης για να αξιολογηθούν οι διατάξεις CTmeter και ISOMET. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας αποτελεί τον μέσο όρο όλων των τοπικών μετρήσεων και στις δύο πλευρές της πλάκας. Τα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζουν τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας με το ποσοστιαίο σφάλμα κάθε διάταξης και την θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση.



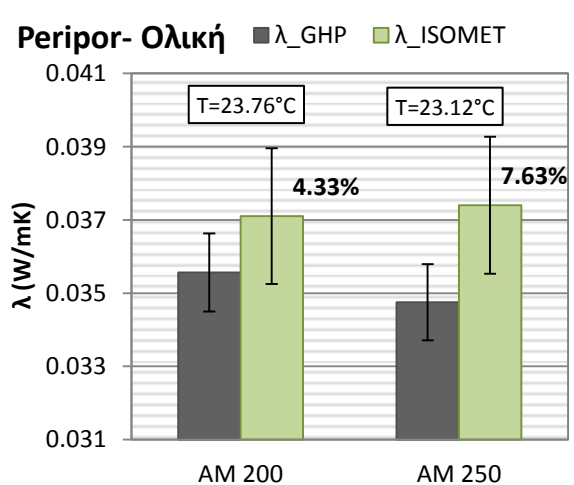
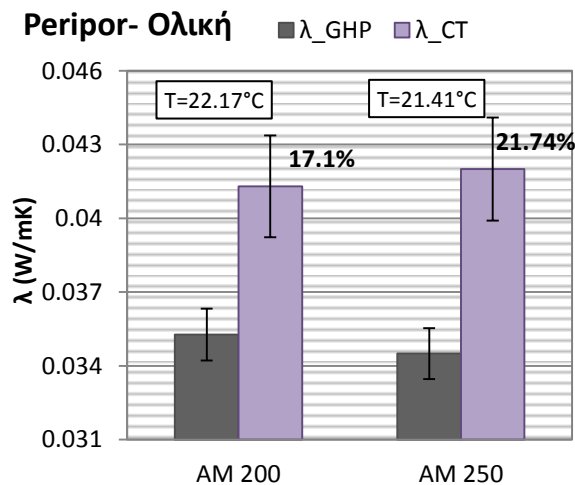
**Διάγραμμα 6.22:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR με GHP Ctmeter



**Διάγραμμα 6.23:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ISOPOR με GHP-ISOMET



**Διάγραμμα 6.24:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK με GHP-CTmeter (αριστερά) και GHP-ISOMET (δεξιά)

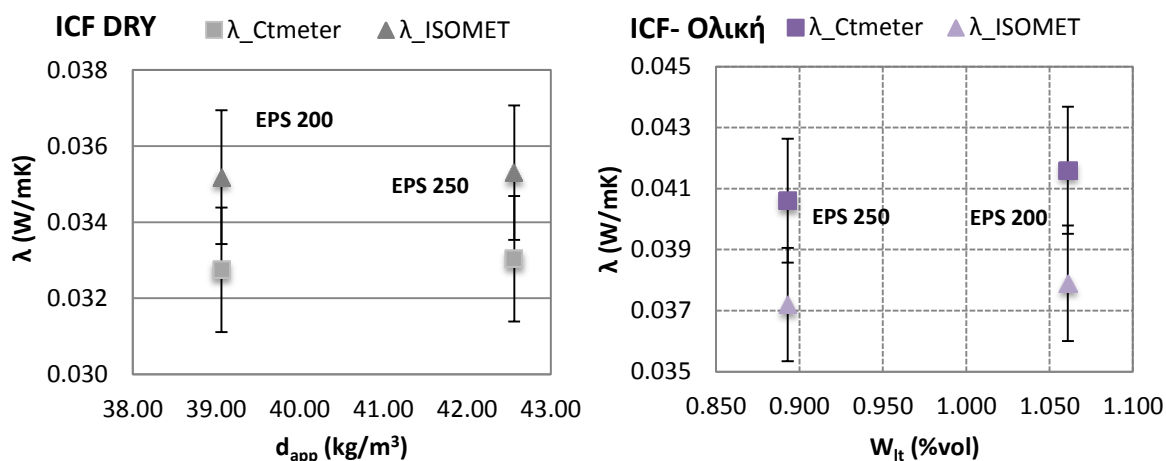


**Διάγραμμα 6.25:** Σύγκριση τιμών θερμικής αγωγιμότητας ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών PERIPOR με GHP-CTmeter (αριστερά) και GHP-ISOMET (δεξιά)

Σύμφωνα με τα διαγράμματα 6.21 έως 6.24 παρατηρείται πως στην υγρή κατάσταση η τεχνική ISOMET δίνει για δεύτερη φορά παραπλήσια αποτελέσματα με εκείνα της GHP. Ωστόσο, σύμφωνα με το ύψος των τιμών  $\lambda$  στο γράφημα, οι διατάξεις CTmeter και GHP επιτυγχάνουν παρόμοια κατανομή. Επίσης, επιβεβαιώνεται πως η ευαισθησία του αισθητήρα της διάταξης CTmeter είναι μεγαλύτερη όσον αφορά την υγρασία αφού οι ληφθείσες τιμές ξεπερνάνε τις αντίστοιχες της διάταξης ISOMET μέχρι 24%. Ωστόσο, ένα μέρος της ποσοστιαίας διαφοράς οφείλεται στην συσκευασία που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αυξάνει τις τιμές στην πρώτη περίπτωση και έχει αμελητέα επίδραση στην δεύτερη.

#### • Μετρήσεις δοκιμών ICF

Έχει αναφερθεί πως για τα δοκίμια κατηγορίας ICF, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας προσδιορίστηκε μόνο με τις μεθόδους μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα με τις διατάξεις CTmeter και ISOMET σε ξηρή κατάσταση συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας και μετά από ολική εμβάπτιση συναρτήσει του ποσοστού υδαταπορρόφησης.



**Διάγραμμα 6.26:** Θερμική αγωγιμότητας ξηρών και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών ICF με CTmeter και ISOMET

Όσον αφορά τα δείγματα κατηγορίας ICF, η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την περιεχόμενη υγρασία. Η φαινόμενη πυκνότητα των ομάδων είναι παραπλήσιες μετά την ολική εμβάπτιση και λαμβάνει τιμή 49,78 για την ομάδα Eps 200 και 48,82 για την ομάδα Eps 250. Οι τιμές που προέκυψαν από την μέθοδο ISOMET δείχνουν αύξηση 7,7% και 5,4% των αρχικών τιμών των ομάδων. Από την άλλη, οι τελικές τιμές της διάταξης CTmeter δείχνουν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας 27% και 22,9% αντίστοιχα.

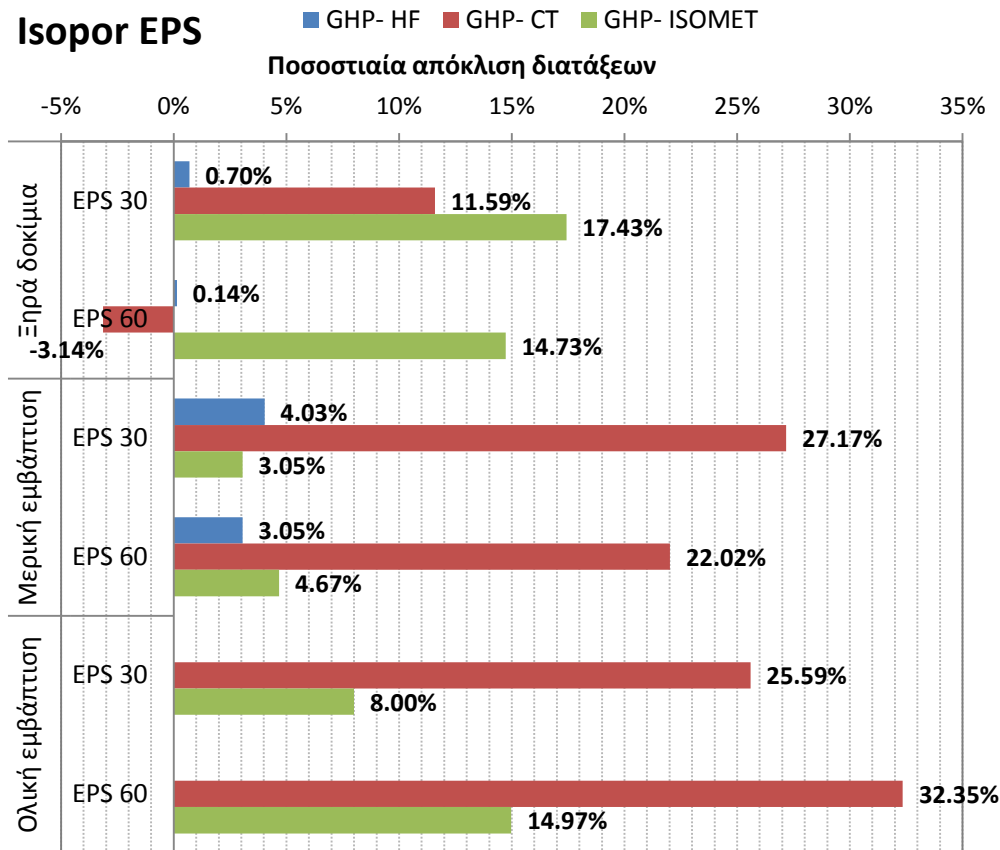
### 6.2.3. Συμπεράσματα

Οι μέθοδοι μόνιμης μετάδοσης θερμότητας θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστες για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας υλικών διότι μετράνε ολόκληρη την μάζα του υλικού. Ο αυστηρός όμως περιορισμός που επιβάλλουν στις διαστάσεις των υλικών σε συνδυασμό με την μεγάλη χρονική διάρκεια των μετρήσεων και τον όγκο των διατάξεων δεν τις καθιστούν ιδιαίτερα εύχρηστες. Οι διατάξεις θερμού νήματος και δίσκου που λειτουργούν σε μεταβλητές συνθήκες είναι ελαφρύτερες, μετράνε επιφανειακά όλα τα δοκίμια με μεγαλύτερες διαστάσεις από τους αισθητήρες

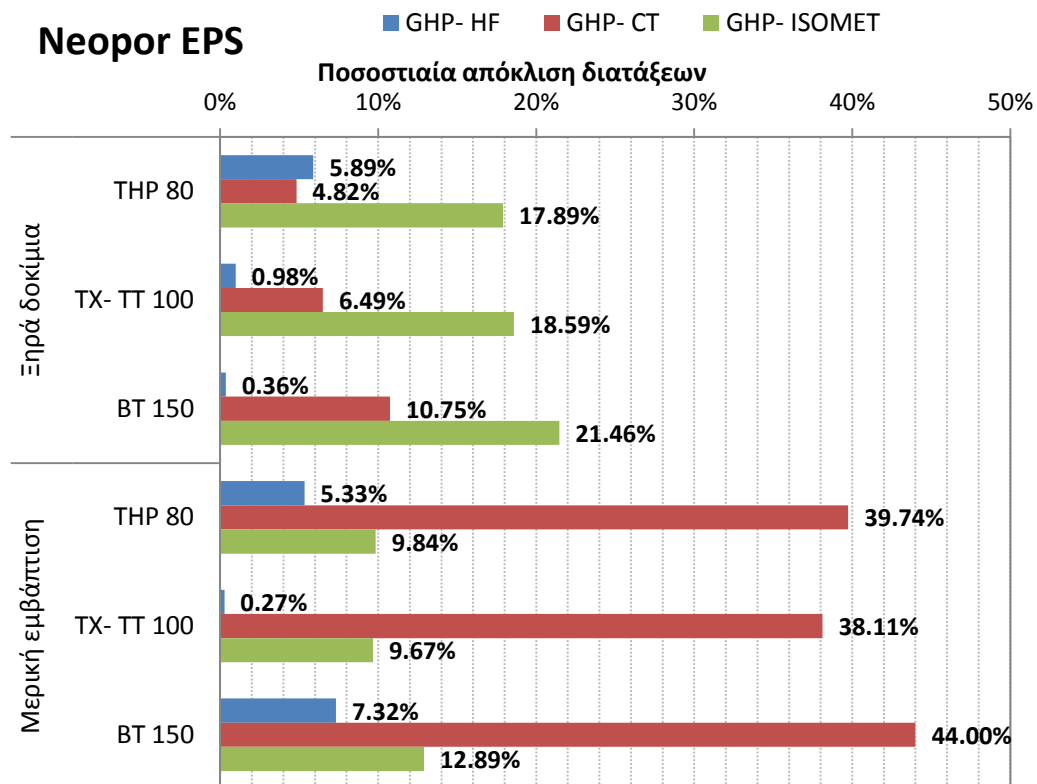
τους και προσφέρουν εξοικονόμηση χρόνου. Η παραπάνω μελέτη έγινε για να ερευνηθεί αν οι επιφανειακές μετρήσεις που εκτελούν οι διατάξεις ISOMET και CTmeter είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες της πειραματικής τεχνικής Guarded Hot Plate. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- a) Η μέθοδος θερμού νήματος CTmeter αποδείχθηκε καταλληλότερη στον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας των ξηρών μονωτικών υλικών. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων πέτυχε ποσοστιαία απόκλιση μικρότερη του  $\pm 5\%$  από τις αντίστοιχες τιμές της απόλυτης μεθόδου. Από την άλλη, η μέθοδος θερμού δίσκου σημείωσε κατά μέσο όρο 16% υψηλότερες τιμές συγκριτικά με την μέθοδο GHP.
- b) Οι μετρήσεις υγρών δειγμάτων δεν ενδείκνυται να γίνονται με καμία από τις διατάξεις μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας. Η μέγιστη διαφορά που εμφάνισε η διάταξη ISOMET με τις τιμές σύγκρισης  $\lambda_{GHP}$  υπολογίστηκε μέχρι το +14%. Αντίθετα, η επιφανειακή υγρασία επηρέασε περισσότερο τις ενδείξεις  $\lambda_{CT}$  που αυξήθηκαν αισθητά, σημείωσαν απόκλιση έως και 40% των αποτελεσμάτων της αξιόπιστης μεθόδου.
- c) Είναι απαραίτητο να εκτελούνται πολλές επιτόπιες μετρήσεις ώστε να υπολογίζεται μια μέση τιμή του συντελεστή  $\lambda$  διότι παρατηρήθηκαν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των μετρήσεων, κυρίως στα υγρά δείγματα.
- d) Σε αντίθεση με τις μεθόδους μόνιμης κατάστασης, η παρουσία υγρασίας δεν αύξησε τον χρόνο της μέτρησης καθώς δεν χρειάζεται η αποκατάσταση σταθερών συνθηκών στο εσωτερικό του δείγματος.

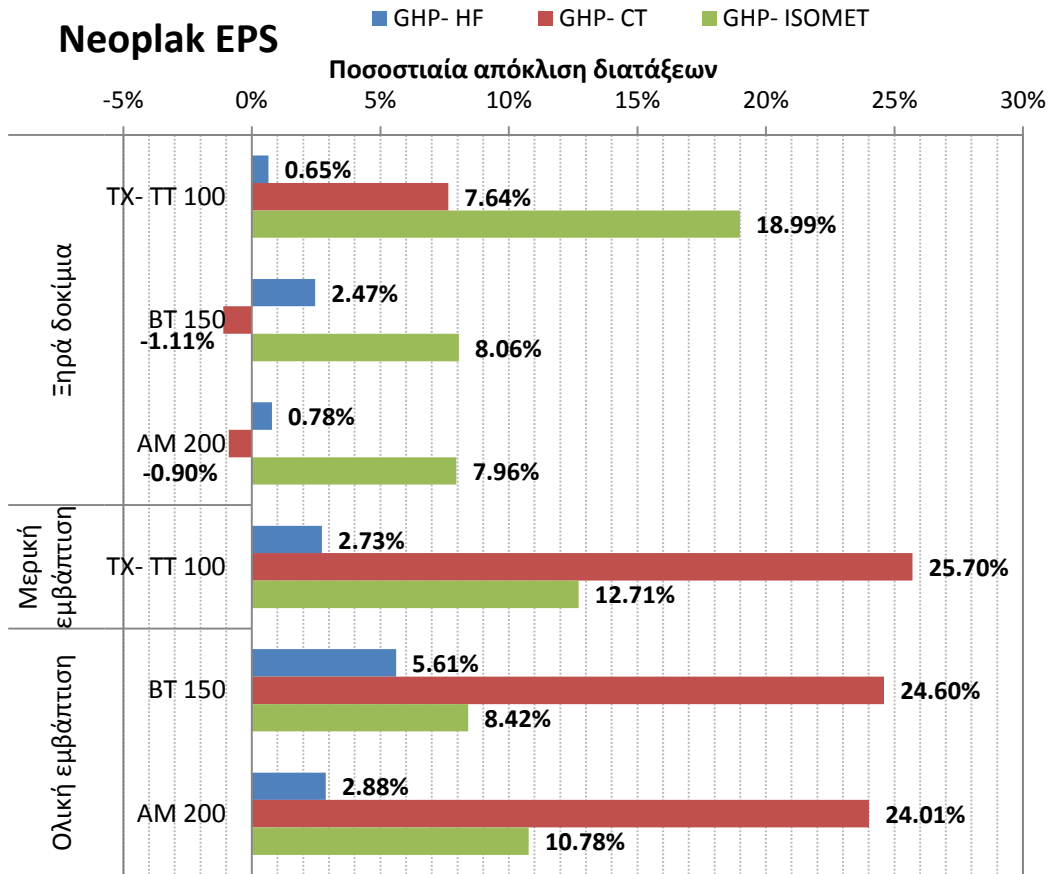
Στην συνέχεια παρατίθενται μερικά συγκεντρωτικά διαγράμματα ομάδων EPS για τις οποίες προσδιορίστηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε ξηρά, σε μερικώς και σε ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια με τουλάχιστον τρεις από τις μεθόδους. Τα αποτελέσματα των μεθόδων Guarded Hot Plate και Heat Flow αφορούν την μέση θερμοκρασία 20°C ενώ των μεταβατικών μεθόδων η θερμοκρασία δεν είναι σταθερή διότι εξαρτάται από την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες που έγιναν μετρήσεις στην διάταξη CTmeter κυμάνθηκαν από 19,86 έως 23,02°C και στην διάταξη ISOMET από 21,04 μέχρι 24,78°C.



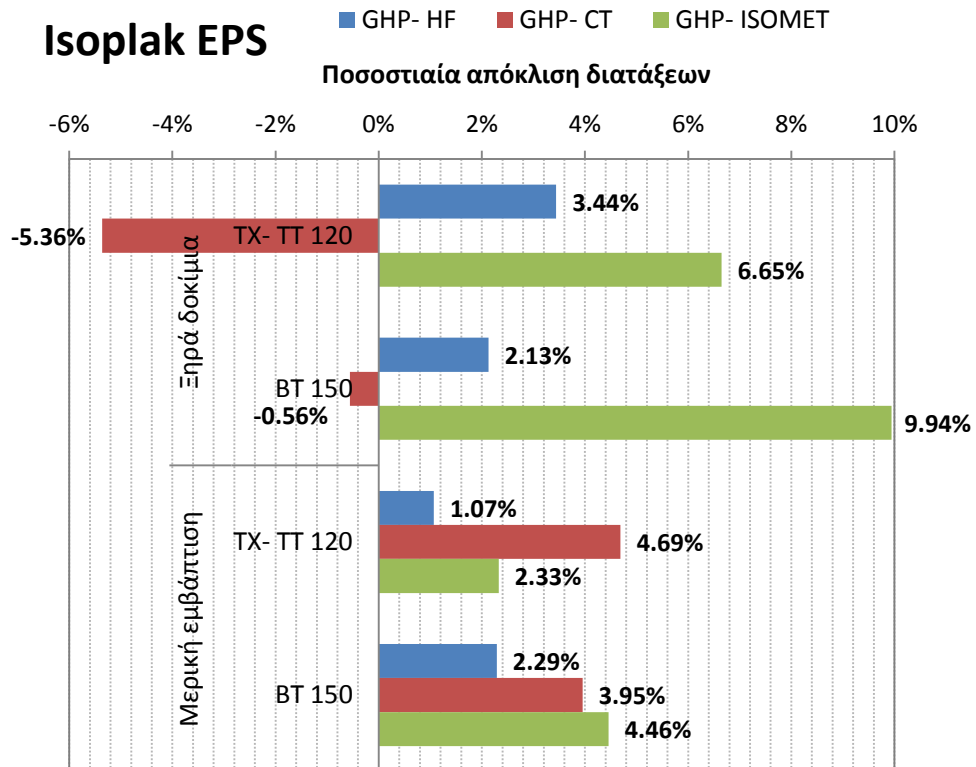
**Διάγραμμα 6.27:** Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια ISOPOR



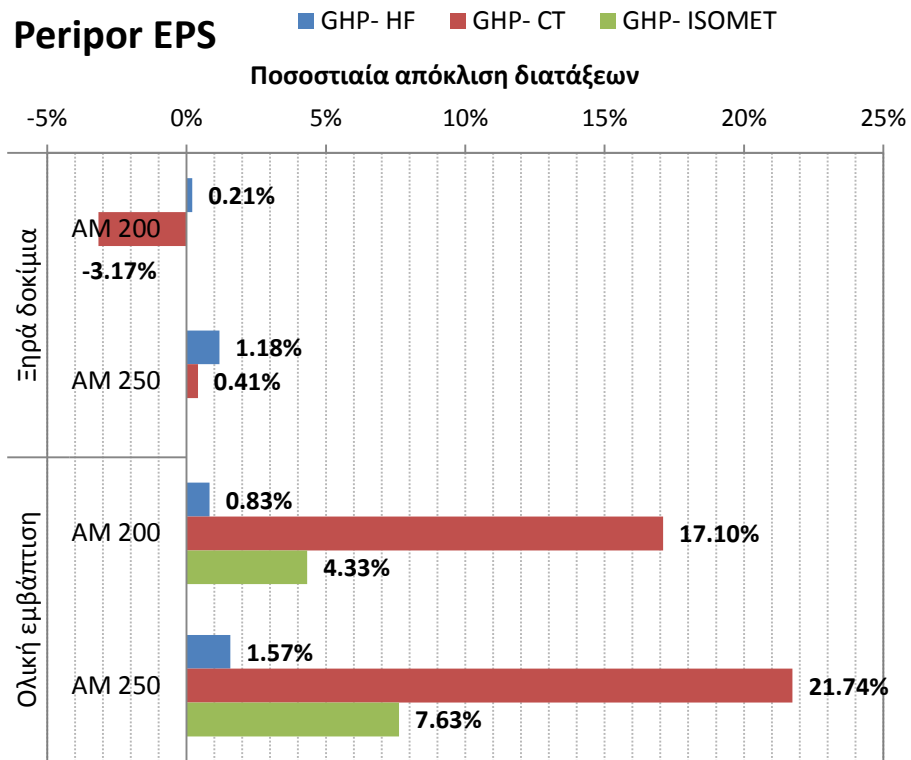
**Διάγραμμα 6.28:** Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια NEOPOR



Διάγραμμα 6.29: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια NEOPLAK



Διάγραμμα 6.30: Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια ISOPLAK



**Διάγραμμα 6.31:** Ποσοστιαία απόκλιση των διατάξεων συγκριτικά με την μέθοδο GHP για τα δοκίμια PERIPOR

## 7. Πειραματικά αποτελέσματα

### 7.1. Αποτελέσματα απορρόφησης υγρασίας

#### 7.1.1. Ολική εμβάπτιση

Όλες οι κατηγορίες διογκωμένου πολυστυρενίου (EPS) βυθίστηκαν στην δεξαμενή ολικής βύθισης, με σκοπό να διερευνηθεί η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με το ποσοστό απορρόφησης υγρασίας. Τα δοκίμια παρέμειναν βυθισμένα για ελάχιστο χρονικό διάστημα 28 ημερών, όπως ορίζεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12087.

Οι κυριότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στην απορρόφηση υγρασίας είναι:

- Η **πυκνότητα** του δείγματος και η **τάση συμπίεσης** κατά την καλούπωση. Η απορρόφηση νερού αυξάνεται όταν η πυκνότητα του EPS μειώνεται, κι αυτό συμβαίνει γιατί μεγαλώνει ο όγκος του ύδατος που διαπερνά το πορώδες.
- Το **πάχος** του δοκιμίου. Η σχέση του ποσοστού του νερού είναι ανάλογη με το πάχος των EPS.
- Η **ύπαρξη νερού** σε υγρή και αέρια φάση. Στην περίπτωση της αέριας φάσης σημαντικό ρόλο παίζει η μεταβολή της θερμοκρασίας στην μάζα, που είναι και ο λόγος κίνησης του υδρατμού στο υλικό. Για την υγρή φάση η συσσώρευση νερού εξαρτάται από την πίεση και την μεταβολή της πίεσης στη μάζα του υλικού.

Τα δοκίμια διαστάσεων (200x200x30)mm<sup>3</sup> κοπήκαν από τάβλες EPS με διαφορετικές τιμές πυκνοτήτων που κυμαίνονται από 14 μέχρι 43kg/m<sup>3</sup>. Το μέγεθος που ενδιαφέρει στην ολική εμβάπτιση είναι η απορρόφηση χιλιογράμμων νερού ανά ποσοστό όγκου του δοκιμίου: **W<sub>lt</sub> [%]**. Λόγω του μεγάλου αριθμού των δειγμάτων και του περιορισμένου χρόνου, χρησιμοποιήθηκε η λιγότερο περιπλοκή μέθοδος υπολογισμού με αποστράγγιση των δειγμάτων και τη σχέση:

$$W_{lt} = \frac{m_{28} - m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w} \quad [\%]$$

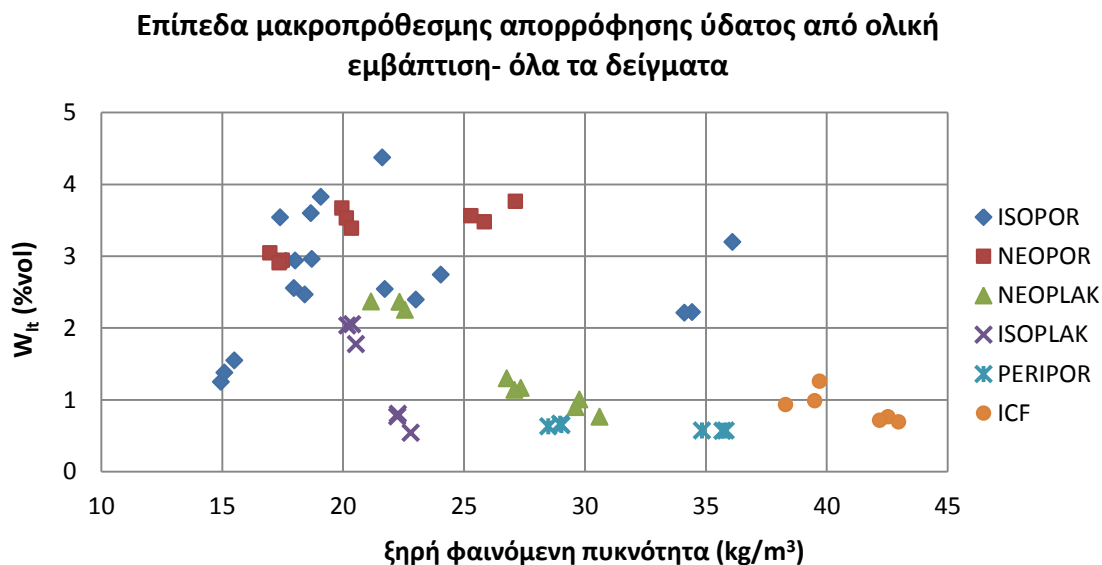
όπου  $m_0$  (kg) η αρχική μάζα του ξηρού δείγματος,  $m_{28}$ (kg) η τελική μάζα του δείγματος μετά από ολική βύθιση 28 ημερών,  $V$ (m<sup>3</sup>) ο αρχικός όγκος του δείγματος,  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού, ίση με 1000kg/m<sup>3</sup>

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κανένα αποτέλεσμα δοκιμής απορρόφησης ύδατος από ολική εμβάπτιση  $W_{lt}$ , δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή που δίνεται στον παρακάτω πίνακα, για το δηλωθέν επίπεδο. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα συναρτήσεως της αρχικής πυκνότητας όλων των δειγμάτων.

Επίπεδα	Απαίτηση %
<b>WL(T)5</b>	≤5,0
<b>WL(T)3</b>	≤3,0
<b>WL(T)2</b>	≤2,0
<b>WL(T)1</b>	≤1,0

**Πίνακας 7.1:** Επίπεδα μακροπρόθεσμης απορρόφησης ύδατος από ολική εμβάπτιση [5]





**Διάγραμμα 7.1:** Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος  $W_{lt}$  των δοκιμίων EPS

Όπως παρατηρείται όλα τα δείγματα συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 13163 που ορίζει ως ανώτατο όριο το  $WL(T)5$ , δηλ. πρέπει να ισχύει  $W_{lt} \leq 5\%$  κατ' όγκο. Είναι αξιοσημείωτο πως 42 από τις 54 συνολικά εμβαπτισμένες πλάκες παρουσίασαν απορρόφηση μικρότερη του 3 vol%, ενώ το 46% των πλακών απορρόφησε λιγότερο από 2 vol%. Συνεπώς η πλειοψηφία των δειγμάτων δεν υπερβαίνουν τις ανώτερες τιμές που καθορίζονται από τα επίπεδα  $WL(T)2$  και  $WL(T)3$ . Επίσης να σημειωθεί πως την ελάχιστη τιμή  $W_{lt}$  την παρουσίασε το δείγμα ISOPLAK BT 150a και την μέγιστη το δοκίμιο ISOPOR 30b. Ωστόσο, συνολικά η ομάδα PERIPOR AM 250 ήταν εκείνη με τις μικρότερες τιμές ενώ η ISOPOR 30 εκείνη με τις υψηλότερες.

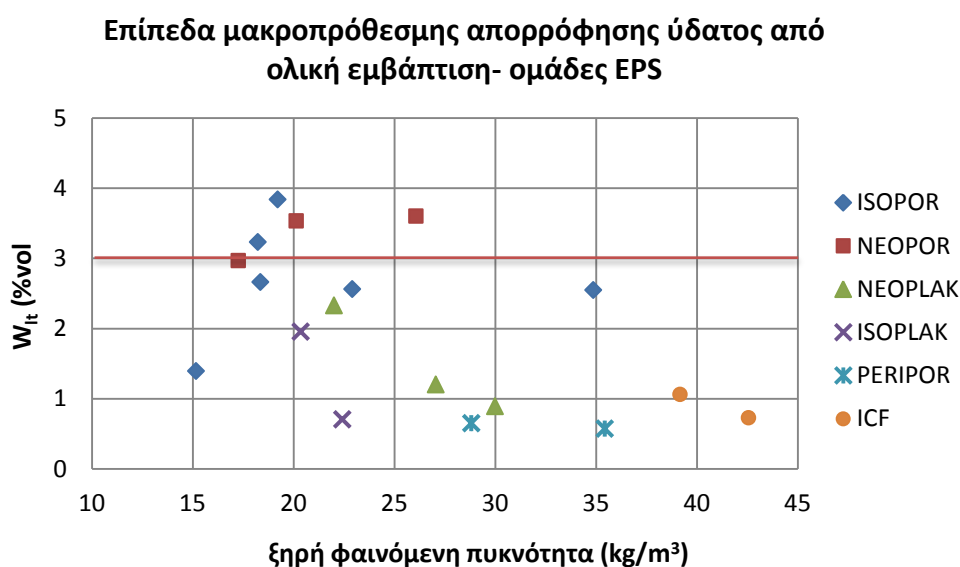
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η απορρόφηση νερού αυξάνεται όταν η πυκνότητα του EPS μειώνεται. Ο γενικός αυτός κανόνας ισχύει για δοκίμια που ανήκουν στην ίδια κατηγορία, καθώς η πρόσθετη επεξεργασία και η προσθήκη μορίων γραφίτη μεταβάλλουν τις ιδιότητες του υλικού και συμβάλλουν στην απορρόφηση υγρασίας. Από το διάγραμμα διακρίνεται ότι όλα τα δείγματα κατηγοριών NEOPLAK, ISOPLAK, PERIPOR και ICF ακολουθούν τον κανόνα με ελάχιστες αποκλίσεις. Αντίθετα, μερικά δείγματα από την κατηγορία ISOPOR και η πλειοψηφία της κατηγορίας NEOPOR δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη εξάρτηση. Ειδικότερα η ομάδα ISOPOR EPS<sub>80</sub> που έχει την χαμηλότερη πυκνότητα, έχει απορροφήσει την λιγότερη υγρασία από τις υπόλοιπες ομάδες πιθανώς λόγω τις περιεκτικότητάς του σε ανακυκλωμένο υλικό.

### Επίδραση απορροφημένης υγρασίας

Έχει ήδη αναφερθεί πως η ακρίβεια στην μέτρηση της μάζας των δοκιμίων πριν και μετά την εμβάπτιση αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα. Η υγρασία που απορροφήθηκε κυμαίνεται από 4,16 έως 52,48gr που υπολογίστηκε για τα δείγματα ICF 250\_c και ISOPOR 30\_b αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί πως η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε για τις ομάδες δοκιμίων EPS και όχι για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Η ομαδοποίηση δεν προσθέτει κάποιο σφάλμα στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αφού τα δείγματα κάθε ομάδας προέρχονται από το ίδιο μπλοκ υλικού και συνεπώς έχουν ίδιες ιδιότητες και κοντινές τιμές φαινόμενης πυκνότητας σε στεγνή κατάσταση. Επίσης από τους υπολογισμούς προέκυψε πως τα δοκίμια μια ομάδας απορρόφησαν την ίδια περίπου υγρασία, δίνοντας και παραπλήσιες τιμές  $W_{lt}$  [%].

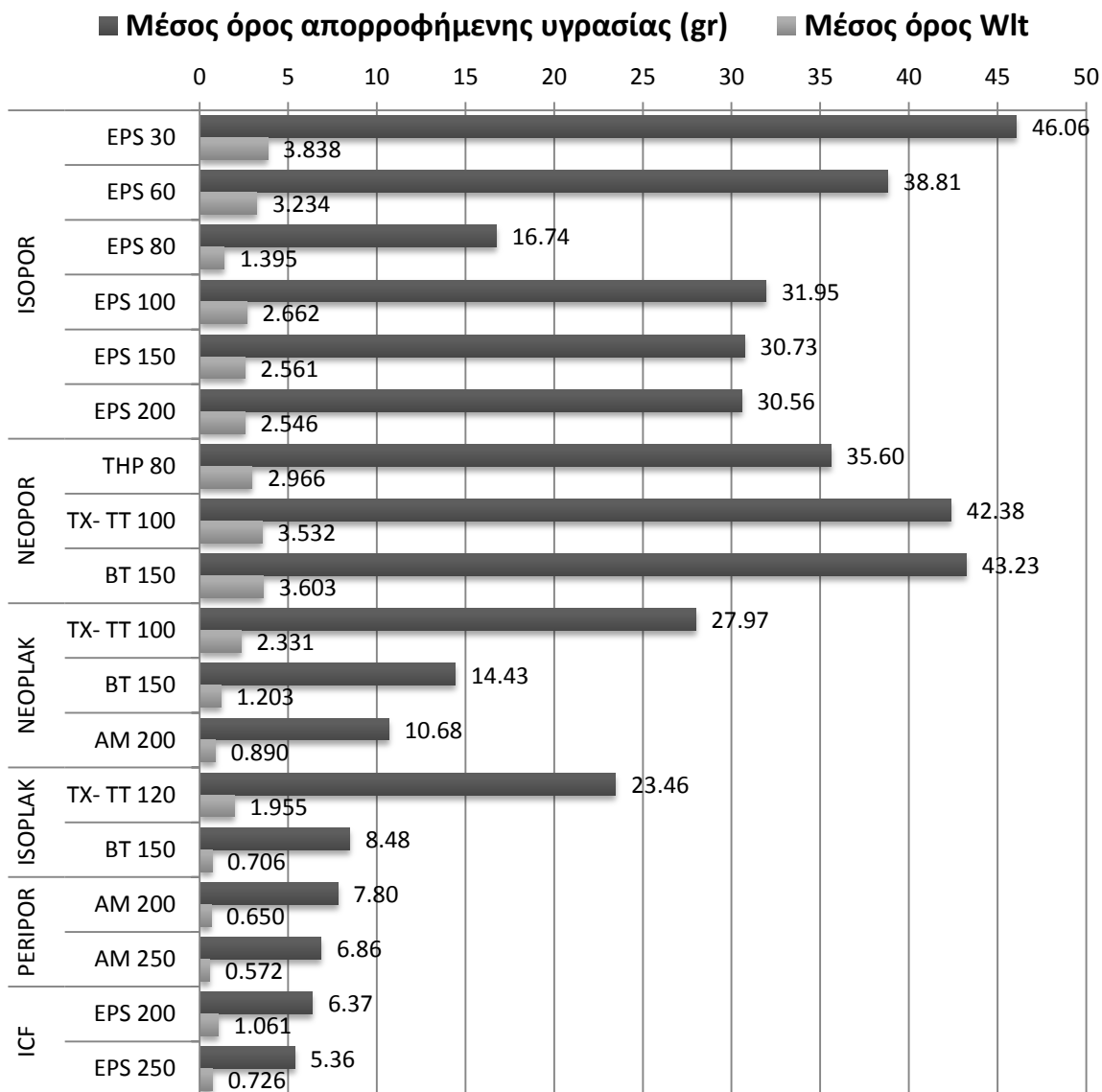
Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στη συνέχεια και η σύγκριση που γίνεται αναφέρονται στις 18 ομάδες EPS, τα αποτελέσματα των οποίων προκύπτουν ως μέσοι όροι είτε απευθείας λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιείται (GHP) είτε με επεξεργασία των επιμέρους τιμών (CTmétre, ISOMET). Στην περίπτωση της μεθόδου Heat- Flow πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο στο δείγμα εκείνο κάθε ομάδας που είχε το απορροφήσει και διατηρήσει την περισσότερη υγρασία. Συνεπώς θεωρείται αντιπροσωπευτικό της ομάδας αφού έχει υποστεί τις μεγαλύτερες μεταβολές στην θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα της ομάδας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαμορφώνεται αντίστοιχο διάγραμμα επιπέδων απορρόφησης ύδατος για τις ομάδες των EPS όπου διακρίνεται πως η πλειοψηφία των ομάδων βρίσκεται κάτω από το επίπεδο WL(T)3.



**Διάγραμμα 7.2:** Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος  $W_{lt}$  των ομάδων EPS

Ένα δεύτερο συμπέρασμα που προκύπτει από την ζύγιση των δοκιμών είναι πως το υπολογισμένο μέγεθος  $W_{lt}$  είναι ανάλογο της απορροφημένης υγρασίας όταν τα δοκίμια έχουν τον ίδιο όγκο. Όσο περισσότερη υγρασία έχει εισχωρήσει στο εσωτερικό του υλικού μιας ομάδας τόσο αυξάνεται το ποσοστό  $W_{lt}$ . Αντίστοιχα τα δείγματα της κατηγορίας ICF που έχουν τον μισό όγκο, για λιγότερη υγρασία έχουν αυξημένο ποσοστό.



**Διάγραμμα 7.3:** Σύγκριση μεγέθους  $W_{it}$  και απορροφημένης υγρασίας των ομάδων EPS

Οι κατηγορίες ISOPOR και NEOPOR παρουσίασαν την μεγαλύτερη απορροφητικότητα και αντίστοιχα τα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας ανά μονάδα όγκου δείγματος. Για τις υπόλοιπες ομάδες παρατηρείται πως με αύξηση της αντοχής του δείγματος σε θλιπτική τάση και επομένως της πυκνότητάς του, μειώνεται η εισχώρηση ύδατος στο εσωτερικό του. Από αυτές και χωρίς να ληφθεί υπόψη η κατηγορία ICF που έχει διαφορετικό όγκο, η κατηγορία PERIPOR που έχει υποστεί και ειδική επεξεργασία παρουσίασε την χαμηλότερη υδαταπορροφητικότητα.

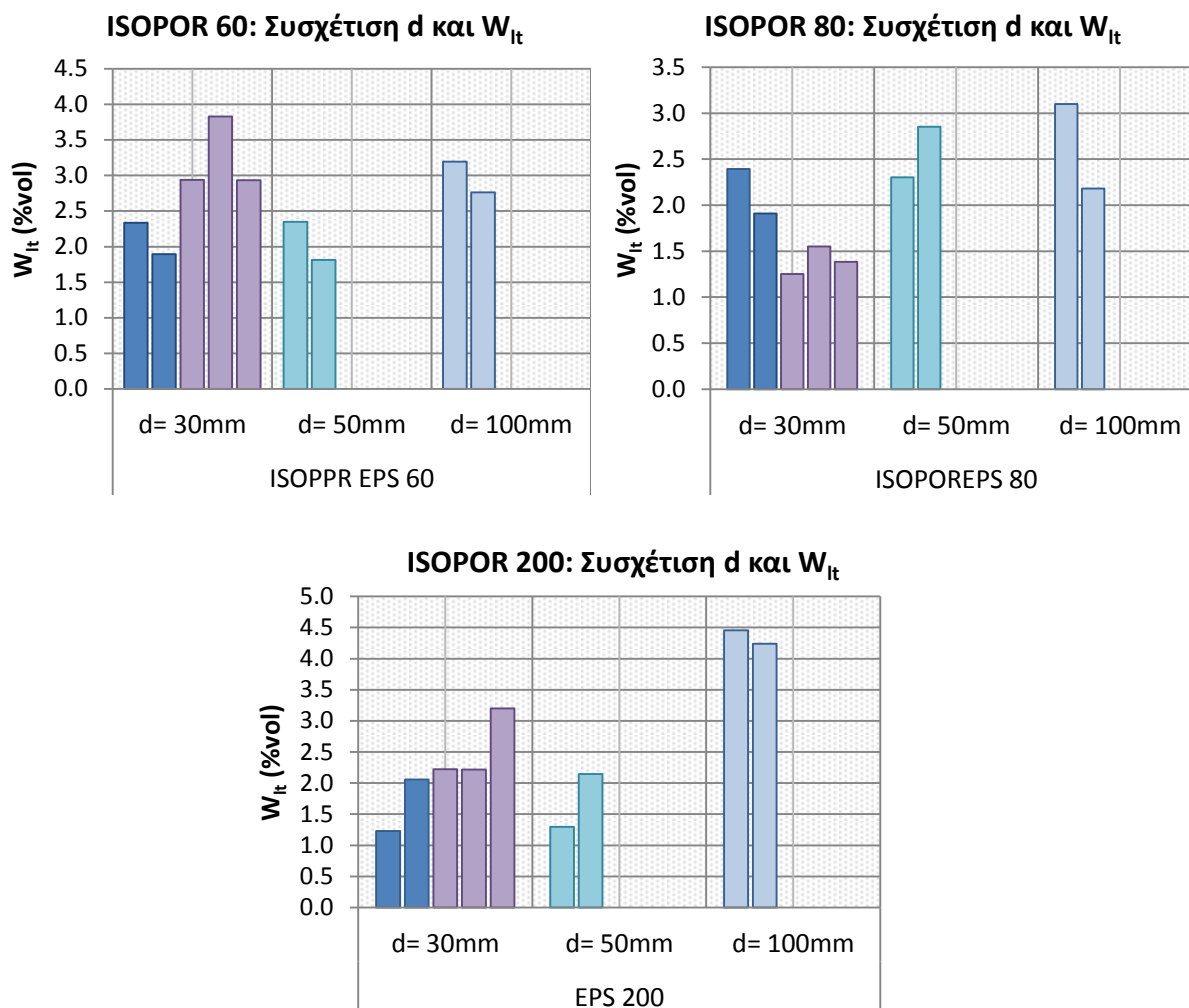
### Επίδραση πάχους στην ολική εμβάπτιση

Έχει αναφερθεί παραπάνω πως το πάχος του δοκιμίου αποτελεί ένα από τους κυριότερους παράγοντες που συμβάλλουν στην απορρόφηση υγρασίας. Θεωρητικά για αυξανόμενο πάχος το ποσοστό της υδαταπορρόφησης αυξάνεται.

Συνολικά εξετάστηκαν 18 δείγματα κατηγορίας ISOPOR και ομάδων EPS 60, 80 και 200 σε τρία διαφορετικά πάχη:  $d=30mm$ ,  $d=50mm$  και  $d=100mm$ . Τα δείγματα, δύο από κάθε ομάδα, παρέμειναν σε δεξαμενή μερικής εμβάπτισης για ελάχιστο διάστημα 28 ημερών όπως ορίζεται από το

ISO 12087. Με την έξοδο τους από την δεξαμενή τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε ψηφιακή ζυγαριά και υπολογίστηκε το μέγεθος  $W_{it}$  από την γνωστή σχέση.

Το κάθε χρώμα στο ίδιο σύμβολο αναφέρεται το διαφορετικό πάχος. Οι τιμές που συμβολίζονται με διαφορετικό χρώμα σε κάθε γράφημα είναι οι αντίστοιχες της ομάδας, για πάχος 30mm, που εξετάστηκε και στην παρούσα εργασία.



**Διάγραμμα 7.4:** Επίδραση του πάχους στην ολική εμβάπτιση δοκιμών κατηγοριών ISOPOR Eps 60, 80 και 200

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται πως για κάθε ομάδα υπάρχει γενικότερα αύξηση του ποσοστού του νερού που απορρόφησε κάθε δείγμα συναρτήσει του πάχους των δοκιμών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τιμή νερού που απορρόφησε το δοκίμιο ISOPOR 200 πάχους 100mm, καθώς είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες.

Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με της παρούσας εργασίας παρατηρείται πως υπάρχουν διαφορές σε κάθε ομάδα στην υδαταπορρόφηση. Πιο συγκεκριμένα, δοκίμια Isopor EPS 60 που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία έχουν υψηλότερες τιμές υδαταπορρόφησης από τα αντίστοιχα, όπως και από εκείνα με πάχος 50mm ενώ ένα ξεπέρασε και την τιμή των 100mm. Ομοίως, η ομάδα Isopor 200 συγκράτησε περισσότερο νερό συγκριτικά με τα δοκίμια ίδιου πάχους και των 50mm. Αντίθετα με τις δύο προηγούμενες, η ομάδα EPS 80 παρουσίασε την χαμηλότερη υδαταπορρόφηση ακόμη και από τα δείγματα του ίδιου πάχους.

Αξίζει να σημειωθούν και τα αποτελέσματα μείωσης της υγρασίας μετά από χρονικό διάστημα 5 και 72 ωρών. Τα δείγματα παρέμειναν στον εργαστηριακό χώρο σε συνθήκες θερμοκρασίας  $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$  και σχετικής υγρασίας  $(50\pm 5)\%$ . Με το πέρας των ωρών τα δοκίμια ζυγίστηκαν και υπολογίστηκε η νέα τιμή του μεγέθους  $W_{it}$ . Σύμφωνα με τα αποτελέσματά του οι εμβαπτισμένες πλάκες, ήδη από τις 5 πρώτες ώρες τις απομάκρυνσης τους από την δεξαμενή, χάσανε περίπου το 50% της συνολικής υγρασίας. Μετά από 72 ώρες παραμονής στο χώρο του εργαστηρίου τα δοκίμια σχεδόν επανήλθαν στις αρχικές τους συνθήκες.

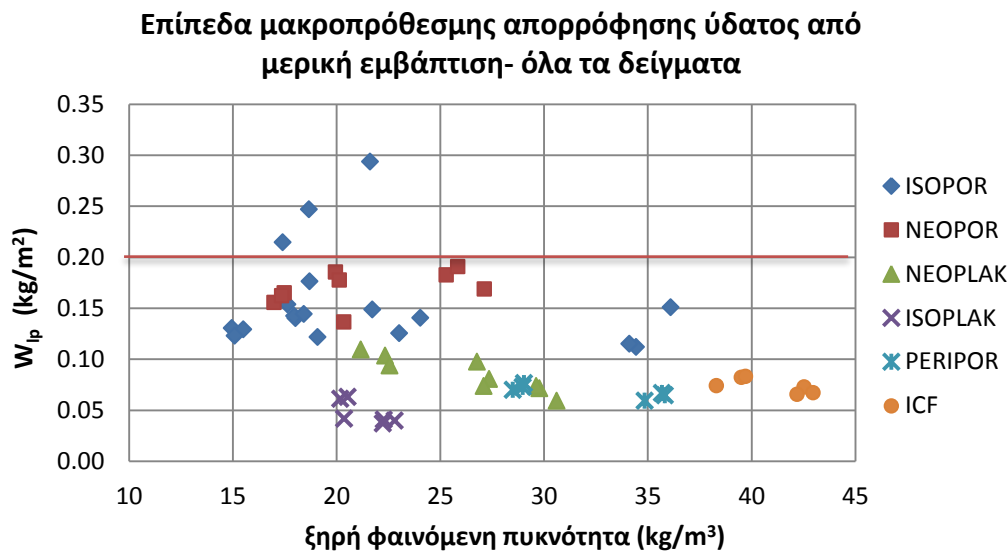
### 7.1.2. Μερική εμβάπτιση

Η μερική εμβάπτιση των δοκιμών έγινε σε ξεχωριστή δεξαμενή, κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε το νερό στις εμβαπτισμένες πλάκες EPS να φτάνει σε ύψος  $(10\pm 2)\text{mm}$  που ορίζεται από ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12087. Με την ολοκλήρωση του ελάχιστου χρονικού διαστήματος των 28 ημερών, τα δείγματα αποστραγγίστηκαν και υπολογίστηκε η απορρόφηση χιλιόγραμμων νερού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας του δοκιμίου:

$$W_{lp} = \frac{(m_{28} - m_0)}{A_p} \quad [\text{kg/m}^2]$$

όπου  $m_0$  (kg) η αρχική μάζα του δείγματος όταν αυτό είναι τελείως στεγνό,  $m_{28}$ (kg) η τελική μάζα του δείγματος μετά από μερική βύθιση 28 ημερών,  $A_p$ ( $\text{m}^2$ ) το εμβαδό της βυθισμένης επιφάνειας του δείγματος.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 13163, κανένα αποτέλεσμα δοκιμής απορρόφησης ύδατος από μερική εμβάπτιση δεν πρέπει να υπερβαίνει τη τιμή  $0,5\text{kg/m}^2$ . Η συνθήκη αυτή επιβεβαιώνεται από το ακόλουθο διάγραμμα, όπου φαίνεται πως όλα τα δείγματα εμφάνισαν τιμές χαμηλότερες μάλιστα από την τιμή  $W_{lp} < 0,3(\text{kg/m}^2)$ .

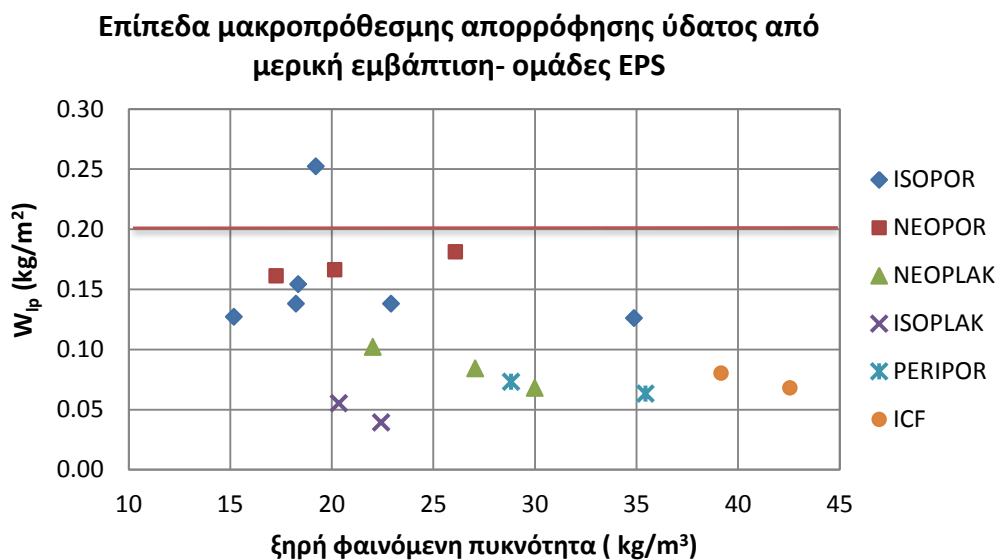


Παρατηρείται πως 51 από τα 54 συνολικά δοκίμια δεν υπερβαίνουν ούτε την τιμή  $0,2 \text{ kg/m}^2$  ενώ το 25% είχε πολύ χαμηλή απορρόφηση και δεν ξεπέρασε το ελάχιστο όριο του  $0,1 \text{ kg/m}^2$ . Την χαμηλότερη υδαταπορρόφηση στην μερική εμβάπτιση την παρουσίασε το δείγμα ISOPLAK BT 150\_c και την μεγαλύτερη το ISOPOR 30b. Γενικότερα η πλειοψηφία των δοκιμών με χαμηλό  $W_{ip}$  ανήκουν στις ομάδες NEOPLAK, ISOPLAK και PERIPOR οι οποίες έχουν επεξεργαστεί ώστε να έχουν μικρή υδαταπορρόφηση και μικρή θερμική αγωγιμότητα.

### Επίδραση απορροφημένης υγρασίας

Η υγρασία που απορροφήθηκε κυμάνθηκε από 1,31gr έως 11,74gr για τα δοκίμια ICF\_250c και ISOPOR\_30b αντίστοιχα. Το δεύτερο δείγμα ήταν εκείνο που εμφάνισε και τη μέγιστη τιμή  $W_{ip}$ , ενώ η ελάχιστη αποδίδεται στο δείγμα ISOPLAK BT\_150c γιατί τα δείγματα κατηγορίας ICF έχουν το μισό εμβαδό από τα υπόλοιπα. Θεωρητικά ήδη είναι γνωστό από την προηγούμενη ενότητα πως τα δοκίμια που θα παρουσιάσουν την μεγαλύτερη κατακράτηση ύδατος στην μερική εμβάπτιση είναι εκείνα που απορρόφησαν την περισσότερη υγρασία κατά την ολική εμβάπτιση, ωστόσο εξετάστηκε αν ισχύει πρακτικά.

Όπως και προηγουμένως, η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε για τις ομάδες δοκιμών EPS και όχι για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, χωρίς όμως να προστίθεται κάποιο σφάλμα στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αφού τα δείγματα κάθε ομάδας προέρχονται από το ίδιο μπλοκ υλικού και συνεπώς έχουν ίδιες ιδιότητες. Αντίστοιχα, με την μέθοδο Heat- Flow πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο στο δείγμα εκείνο κάθε ομάδας που είχε το απορροφήσει και διατηρήσει την περισσότερη υγρασία και θεωρείται αντιπροσωπευτικό της ομάδας.



**Διάγραμμα 7.6:** Πειραματικές τιμές απορρόφησης ύδατος  $W_{ip}$  των ομάδων EPS

Είναι προφανές πως τα δοκίμια παρουσίασαν την αναμενόμενη συγκράτηση υγρασίας. Τα δείγματα που απορρόφησαν το περισσότερο νερό στην ολική εμβάπτιση είναι τελικά εκείνα που εμφάνισαν την μεγαλύτερη συγκράτηση υγρασίας και κατά την μερική εμβάπτιση. Οι κατηγορίες ISOPOR και NEOPOR αποδείχθηκαν και πάλι οι λιγότερο υδατοστεγείς και ενώ η κατηγορία ISOPLAK εμφάνισε την μικρότερη υδαταπορροφητικότητα καθώς μετρήθηκαν τα λιγότερα χιλιόγραμμα νερού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας ( $W_{ip}$ ). Για τις υπόλοιπες ομάδες παρατηρείται- όπως και στην ολική εμβάπτιση- πως με αύξηση της πυκνότητάς του, μειώνεται η εισχώρηση ύδατος στο εσωτερικό του.

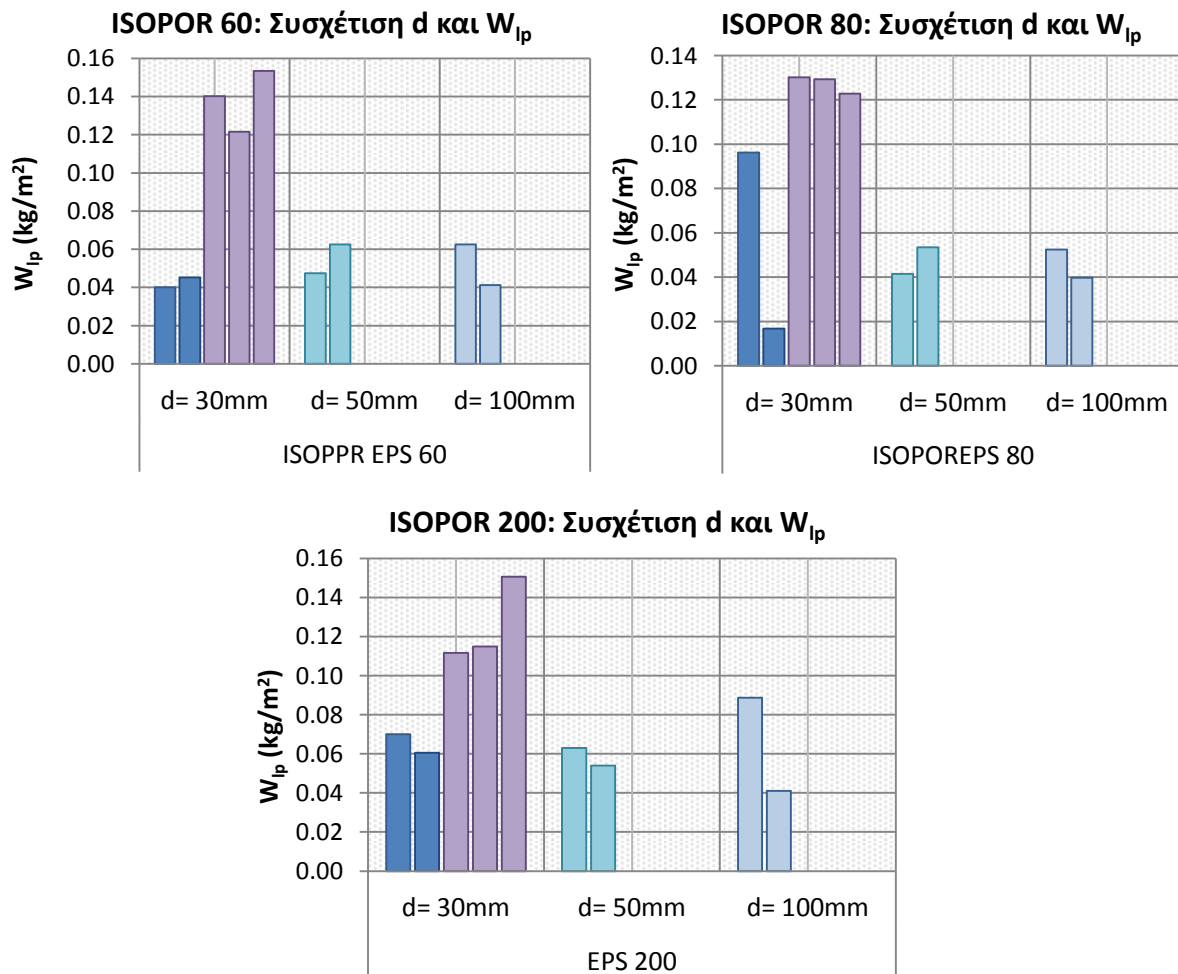
Σε αντίθεση με την μερική βύθιση, αξίζει να σημειωθεί πως στην ολική βύθιση η κατηγορία PERIPOR παρουσίασε την ελάχιστη διείσδυση νερού στο εσωτερικό των δειγμάτων και την μικρότερη τιμή  $W_{It}$ . Συνεπώς επιβεβαιώνεται πως η συγκεκριμένη κατηγορία έχει υποστεί ειδική επεξεργασία για να πετυχαίνει χαμηλές τιμές υδαταπορρόφησης.

### Επίδραση πάχους στην μερική εμβάπτιση

Όπως παρατηρήθηκε στην ολική εμβάπτιση υπάρχει ανάλογη σχέση του πάχους του εμβαπτισμένου δείγματος με το ποσοστό υδαταπορρόφησης  $W_{It}$ . Κατά την μερική εμβάπτιση όπου στην δεξαμενή μόνο ένα τμήμα του συνολικού όγκου του δείγματος είναι κάτω από την επιφάνεια του νερού αναμένεται να υπάρχει αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση της υδαταπορρόφησης με το συνολικό όγκο του υλικού λόγω του αυξημένου πάχους.

Για να αξιολογηθεί η επίδραση του πάχους τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή μερικής εμβάπτισης δύο δείγματα από τις ομάδες Isopor EPS 60, 80 και 200 με διαφορετικά πάχη 30, 50 και 100mm. Τα δείγματα παρέμειναν σε δεξαμενή μερικής εμβάπτισης για ελάχιστο διάστημα 28 ημερών όπως ορίζεται από το ISO 12087. Όπως και προηγουμένως, ακολούθησε η ζύγιση των δοκιμίων με την εξαγωγή τους από την δεξαμενή και ο προσδιορισμός του μεγέθους  $W_{Ip}$  ως ποσοστό επί του συνολικού όγκου.

Τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα είναι διαμορφωμένα με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παραπάνω ενότητα για τα ολικώς εμβαπτισμένα δείγματα.



**Διάγραμμα 7.7:** Επίδραση του πάχους στη μερική εμβάπτιση δοκιμίων κατηγοριών ISOPOR Eps 60, 80 και 200

Παρατηρείται πως το πάχος δεν επηρεάζει την υδαταπορρόφηση στην μερική εμβάπτιση διότι το μέγεθος  $W_{lp}$  είναι ανεξάρτητο του πάχους και συμπεριλαμβάνει μόνο το εμβαδό της επιφάνειας που είναι βυθισμένη στο νερό. Ωστόσο είναι αντιληπτό πως η έκφραση του μεγέθους στο συνολικό όγκο της πλάκας  $Eps$  δείχνει αντίστροφη εξάρτηση της εισερχόμενης υγρασίας με το πάχος.

Τέλος, φαίνεται πως οι τιμές που προέκυψαν από την μερική εμβάπτιση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέκυψαν μεγαλύτερες.

Αντίστοιχα με τα ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια, τα υγρά δοκίμια έμειναν σε περιβαλλοντικές συνθήκες για 5 και 72 ώρες ώστε να εκτιμηθούν οι νέες τιμές  $W_{lp}$ . Από τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν φαίνεται πως ήδη από τις πρώτες ώρες η παραμένουσα υγρασία αποτελεί μόνο το 20% της αρχικής και μετά από τις 72 ώρες μειώθηκε περίπου στο 10%.

### 7.1.3. Συμπεράσματα υδαταπορρόφησης

Προκειμένου να εξεταστεί η υγρασία που απορρόφησαν τα δείγματα κατά τις δύο εμβάπτισεις πρέπει τα μεγέθη  $W$  να είναι συγκρίσιμα. Για να γίνει αυτό, το μέγεθος  $W_{lp}$  μετατράπηκε σε ποσοστό επί τον όγκο του δοκιμίου χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$W_{lp}(\%) = \frac{W_{lp}}{thickness} \times \frac{100}{\rho_w} \quad \text{όπου } thickness = 0,030m \text{ για όλα τα δείγματα και } \rho_w = 1000kg/m^3$$

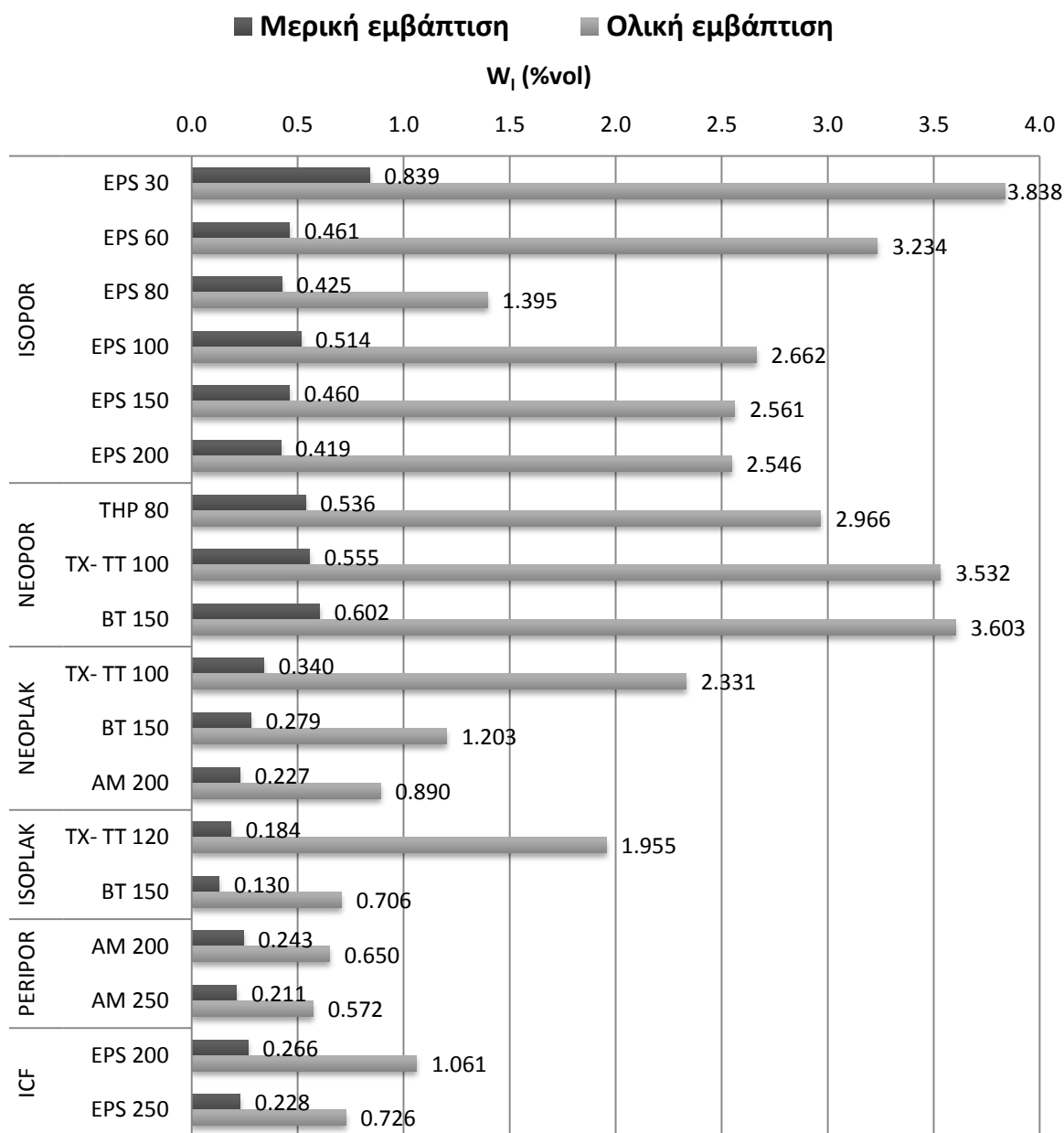
Συνεπώς προκύπτει το συνδυαστικό γράφημα 7.8 με τις ποσοστιαίες τιμές απορρόφησης υγρασίας ως προς την απορροφημένη υγρασία κατ' όγκο για την μερική και την ολική εμβάπτιση για όλα τα δοκίμια.

Το EPS αποτελεί ένα εξαιρετικά υδρόφοβο μονωτικό υλικό που σε συνθήκες ολικής υγρασίας η συνολική απορρόφηση δεν ξεπερνάει την οριακή τιμή 5% ανά μονάδα όγκου του υλικού. Κατά την μερική εμβάπτιση όλες οι πλάκες EPS απορρόφησαν νερό λιγότερο από το 1% του συνολικού τους όγκου. Τα δείγματα δεν εμφάνισαν ένα μόνο πρότυπο απορρόφησης νερού συνολικά, αλλά κάθε κατηγορία ανάλογα με τις ιδιότητες της και τον τρόπο παραγωγής της εμφάνισε ξεχωριστή συμπεριφορά. Στην πλειοψηφία τους οι ομάδες  $Eps$  είχαν αντίστοιχα αποτελέσματα συγκράτησης ύδατος στο εσωτερικό τους για τις δύο εμβάπτισεις ενώ ουσιαστική διαφορά στις τιμές των ομάδων κάθε κατηγορίας φάνηκε στην ολική εμβάπτιση όπου η απορρόφηση ήταν μεγαλύτερη.

Πιο αναλυτικά, η κατηγορία  $Isorlak$  αποδείχθηκε η πιο ανθεκτική στην παρουσία της υγρασίας στην δεξαμενή μερικής εμβάπτισης, όμως μετά την ολική επαφή με το νερό οι τιμές υδαταπορρόφησης της ομάδα  $TX- TT 120$  αυξηθήκανε πολύ. Συνολικά, η ελάχιστη διείσδυση νερού σημειώθηκε στα πυκνότερα δείγματα  $Perigor$  που πέτυχαν χαμηλές τιμές απορρόφησης σε όλη την διάρκεια του πειράματος. Αντιθέτως οι ομάδες  $Isoror$ ,  $Neorlak$  και  $Neoror$  παρέμειναν υδατοστεγείς μόνο στην μερική επαφή με το υγρό περιβάλλον. Ειδικότερα η κατηγορία  $Neoror$  περιλαμβάνει τις πιο υδρόφιλες ομάδες αφού σημείωσε, συνολικά, τα υψηλότερα ποσοστά υγρασίας ανά μονάδα όγκου.

Όσον αφορά την γεωμετρία των δειγμάτων, η υδαταπορρόφηση έχει ανάλογη εξάρτηση του πάχους στην ολική εμβάπτιση και αντιστρόφως ανάλογη στην μερική. Αυτό συμβαίνει διότι στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται η επιφάνεια επαφής ενώ στην δεύτερη αυξάνεται ο όγκος που κατανέμεται η υγρασία. Η επίδραση της γεωμετρίας φαίνεται και από τα δοκίμια  $ICF$  που συγκράτησαν την λιγότερη υγρασία αλλά λόγω του μικρότερου μεγέθους τους οι τιμές  $W$  προέκυψαν συγκρίσιμες με των υπολοίπων ισομεγεθών δειγμάτων.





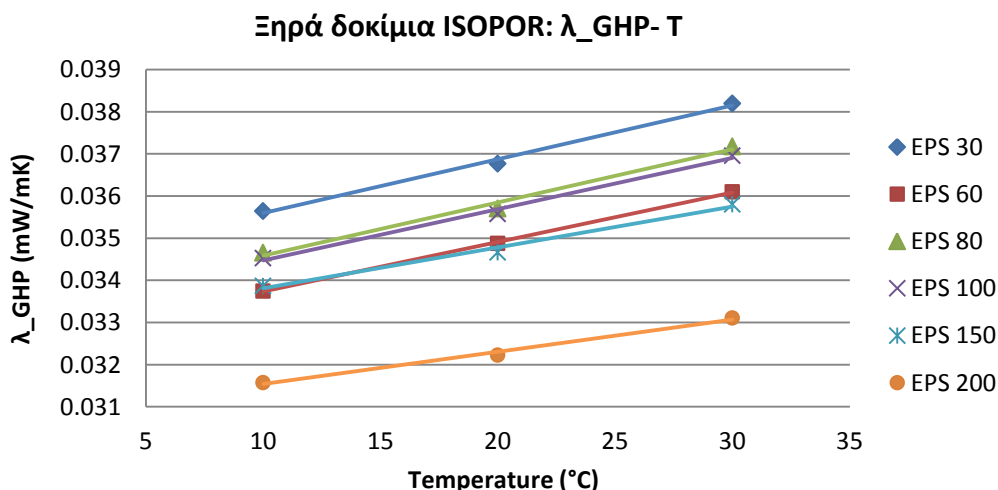
**Διάγραμμα 7.8:** Αποτελέσματα υδαταπορρόφησης ολικής και μερικής εμβάπτισης δειγμάτων EPS

## 7.2. Αποτελέσματα μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας

### 7.2.1. Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας επί ξηρού

Στην Ελλάδα επικρατεί μεσογειακό κλίμα που χαρακτηρίζεται από ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και κρύους, υγρούς χειμώνες. Η μέση θερμοκρασία όλο το χρόνο κυμαίνεται από 12 μέχρι 27°C και για τον λόγο αυτό η θερμική αγωγιμότητα,  $\lambda$ , μετρήθηκε για τιμές θερμοκρασίας  $T = 10, 20, 30^\circ\text{C}$ . Η σχέση συντελεστή  $\lambda$  και θερμοκρασίας είναι ανάλογη, ενώ για τα στεγνά μονωτικά υλικά η προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί γραμμική [22].

Ο προσδιορισμός του μεγέθους στα στεγνά δοκίμια έγινε με χρήση της μεθόδου Guarded Hot Plate, η οποία παρέχει εξαιρετικά αποτελέσματα με αβεβαιότητα μόνο 3% για υλικά σε ξηρή κατάσταση. Τα αποτελέσματα της μεθόδου, πριν την έναρξη του πειράματος, φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα που παρουσιάζονται οι μετρηθείσες τιμές για τις κατηγορίες ISOPOR, NEOPOR, NEOPLAK, ISOPLAK, PERIPOR. Τα δοκίμια ICF, έχει ήδη αναφερθεί πως λόγω μικρότερων διαστάσεων δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί μέτρηση με την συγκεκριμένη διάταξη.

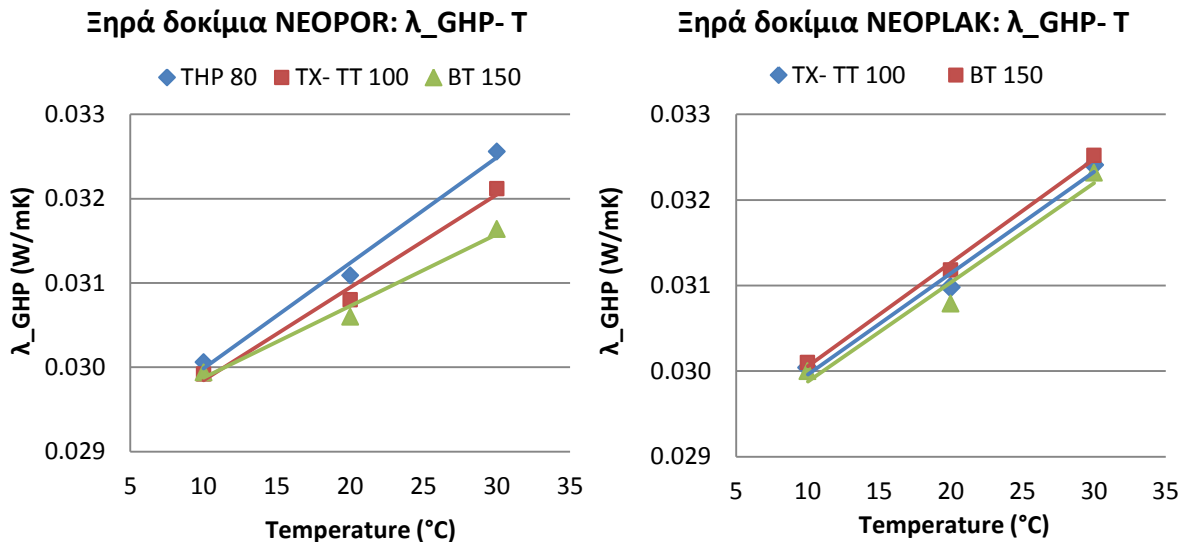


**Διάγραμμα 7.9:** Εξάρτηση συντελεστή  $\lambda$  με θερμοκρασία για ξηρά δοκίμια κατηγορίας ISOPOR

Από το διάγραμμα επιβεβαιώνεται η γραμμική εξάρτηση του συντελεστή με την θερμοκρασία. Σύμφωνα με το κεφάλαιο της περιγραφής των υλικών, η αύξηση της πυκνότητας του υλικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής σε θλιπτική τάση και τη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Παρατηρείται πως οι υψηλότερες τιμές ανήκουν στην ομάδα με την χαμηλότερη αντοχή σε θλιπτική τάση, ενώ οι χαμηλότερες σε εκείνη με την μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη. Ωστόσο οι τιμές των υπολοίπων κατηγοριών δεν παρουσιάζουν την αναμενόμενη σειρά. Αυτό συμβαίνει διότι οι πυκνότητες των δοκιμών ανά κατηγορία, προέκυψαν διαφορετικές από τις πυκνότητες που ορίζονται από το πρότυπο EN 1602 «*Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density*». Βάσει προτύπου η αντοχή σε θλίψη είναι ανάλογη της πυκνότητας οπότε μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη επιτυγχάνεται με πυκνότερα υλικά τα οποία έχουν καλύτερη θερμική απόδοση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως σύμφωνα με την εταιρεία κατασκευής των δειγμάτων EPS, «Γ. Κ. ΡΙΖΑΚΟΣ Α.Β.Ε.Τ.Ε.», οι τιμές που ορίζονται στο πρότυπο είναι ενδεικτικές και είναι πιο σημαντικό να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αντοχή. Επίσης κάποια υλικά έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο υλικό με αποτέλεσμα αυξημένη μάζα και πυκνότητα αλλά μειωμένη αντοχή.

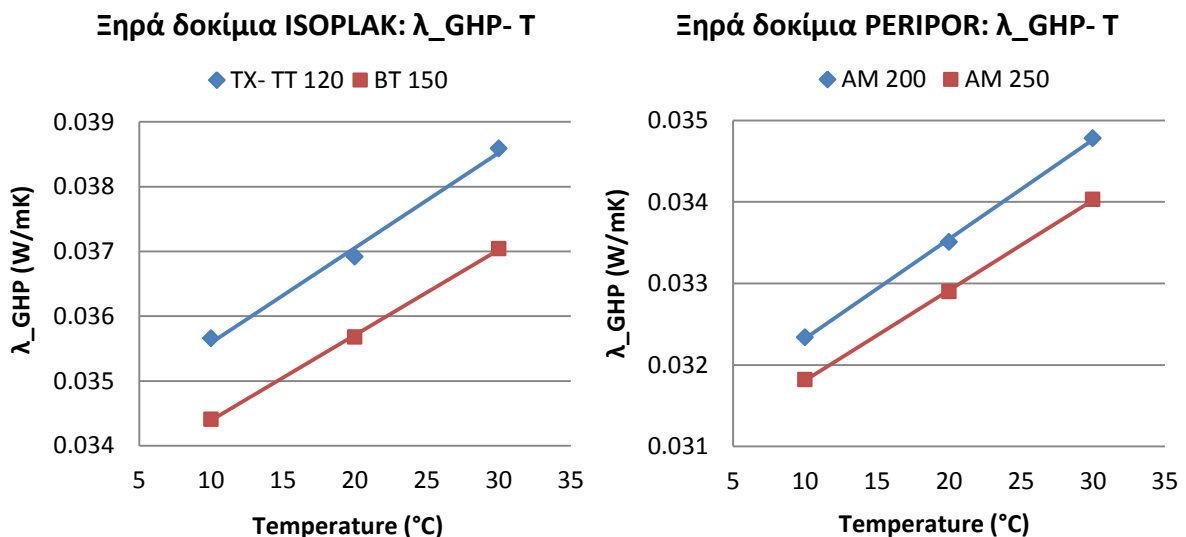
Οι διαφορετικές τιμές πυκνότητας δεν αποτελούν πρόβλημα στην διεξαγωγή του πειράματος διότι οι τιμές που λαμβάνονται και η απορρόφηση υγρασίας σχετίζονται με την συγκεκριμένη πυκνότητα και η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλεται αναλόγως.



**Διάγραμμα 7.10:** Εξάρτηση συντελεστή λ με θερμοκρασία για ξηρά δοκίμια κατηγοριών NEOPOR και NEOPLAK

Παρατηρείται πως για την κατηγορία Neopor σε θερμοκρασία 10°C οι τιμές διαφέρουν ελάχιστα ενώ όσο αυξάνεται η θερμοκρασία η διαφορά μεταξύ τους αυξάνεται συνεχώς. Οι τιμές του λ φαίνεται ότι αποκλίνουν από τη γραμμική καμπύλη, ωστόσο επειδή οι διαφορές είναι της τάξεως των 0,0002W/mK, η προσέγγιση μπορεί να χαρακτηριστεί γραμμική.

Ομοίως για την κατηγορία Neoplak οι τιμές του λ φαίνεται ότι αποκλίνουν από τη γραμμική καμπύλη, όμως επειδή οι διαφορές είναι πολύ μικρές, η προσέγγιση θεωρείται και σε αυτήν την περίπτωση γραμμική. Για όλες τις θερμοκρασίες οι τιμές μεταξύ των ομάδων είναι κοντινές παρόλο που έχουν διαφορετικές πυκνότητες διότι χάρη στην πρώτη ύλη **Neopor® Plus** που έχει χρησιμοποιηθεί επιτυγχάνεται μικρότερη θερμική αγωγιμότητα.



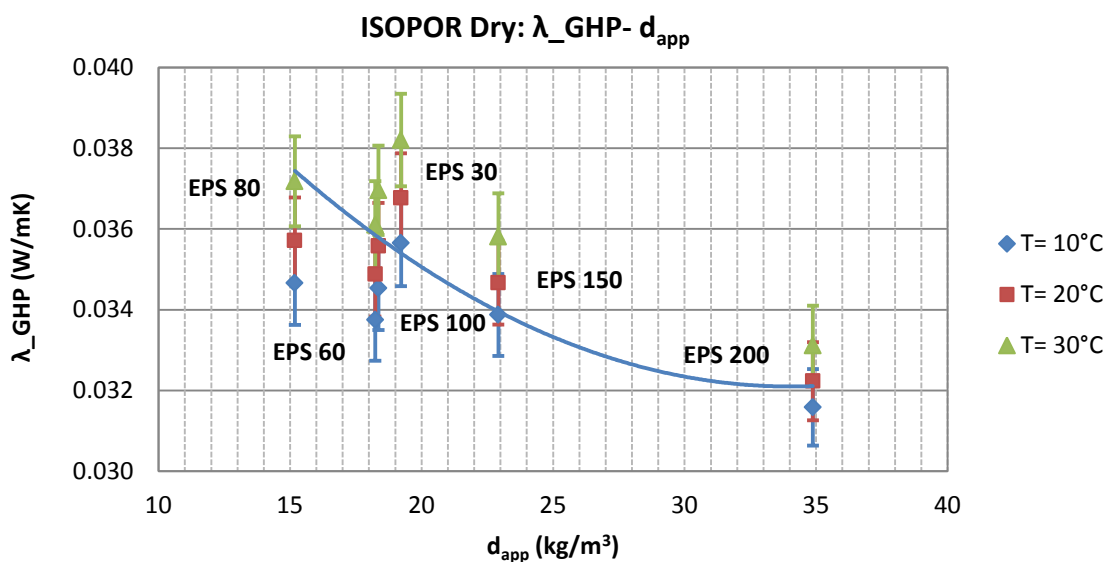
**Διάγραμμα 7.11:** Εξάρτηση συντελεστή λ με θερμοκρασία για ξηρά δοκίμια κατηγοριών ISOPLAK και PERIPOR

Τα δοκίμια κατηγορίας ISOPLAK επιβεβαιώνουν την γραμμική εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την θερμοκρασία και παράλληλα υπάρχει μια σχεδόν σταθερή διαφορά του 1,5mW/K μεταξύ των ομάδων για κάθε θερμοκρασία. Για τις ομάδες της κατηγορίας PERIPOR ισχύει η γραμμική εξάρτηση των μεγεθών που απεικονίζονται παραπάνω. Επίσης η ομάδα AM 200 που είχε χαμηλότερες τιμές πυκνότητας έχει την χαμηλότερη αντοχή σε συνδυασμό με την υψηλότερη θερμική

αγωγιμότητα, σε αντίθεση με την ομάδα AM 250. Τέλος, αν και δεν είναι εμφανές στο διάγραμμα, η απόκλιση των τιμών  $\lambda$  στην ίδια θερμοκρασία μεγαλώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας.

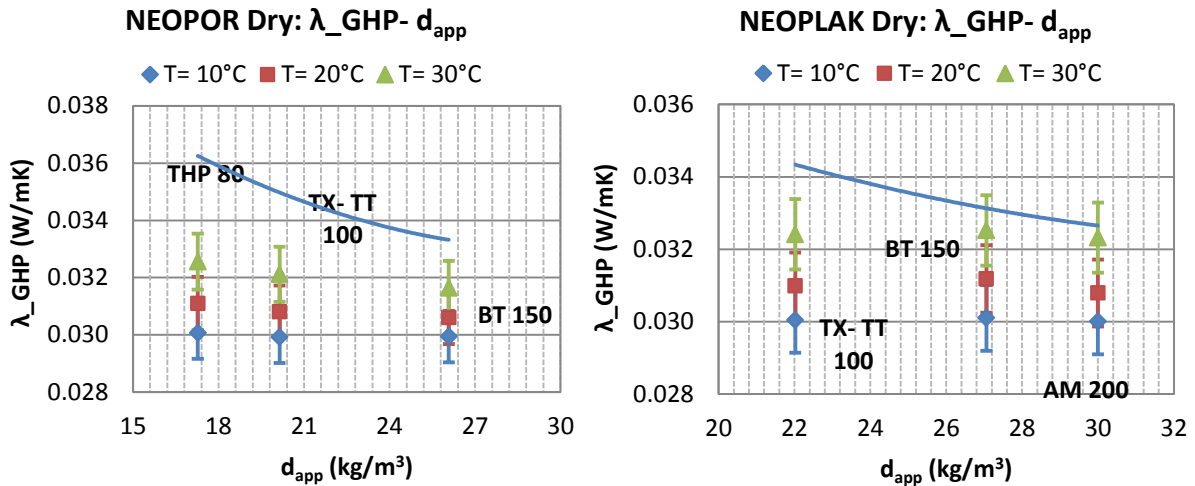
### Σχέση θερμικής αγωγιμότητας και φαινόμενης πυκνότητας επί ξηρού

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13163 «Θερμομονωτικά προϊόντα κτιρίων- Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)- Προδιαγραφή» ορίζει πως με αυξανόμενη την φαινόμενη πυκνότητα ( $d_{app}$ ) του δείγματος, η θερμική αγωγιμότητα των ξηρών πλακών EPS μειώνεται με την μορφή της καμπύλης που έχει περιγραφεί στην θεωρία και που αφορά την θερμοκρασία  $T=10^{\circ}\text{C}$ . Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του συντελεστή  $\lambda$  συναρτήσει της πυκνότητας των ξηρών δοκιμίων ανά κατηγορία EPS και για θερμοκρασίες  $T= 10, 20, 30^{\circ}\text{C}$



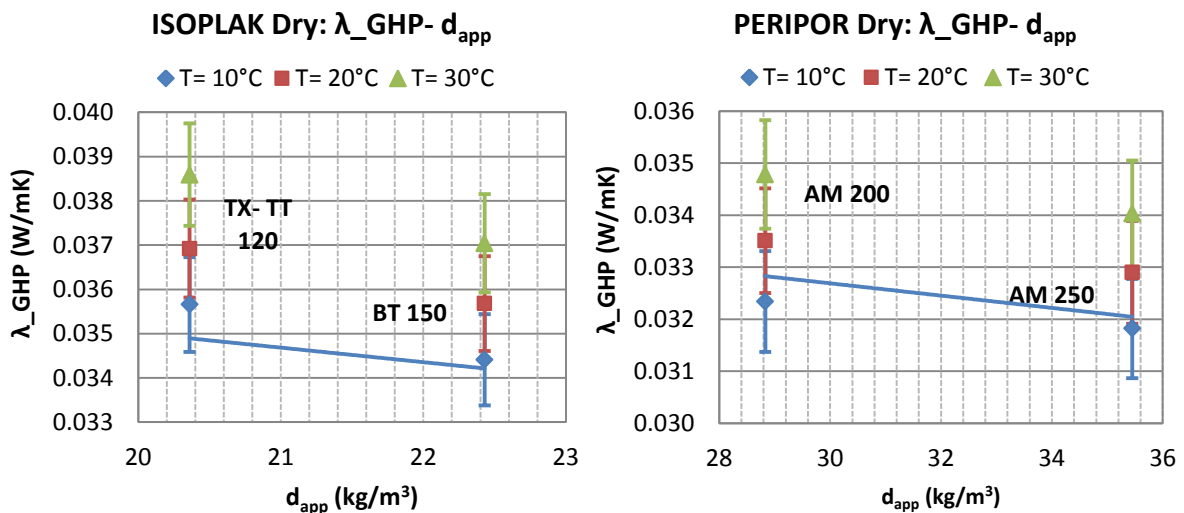
**Διάγραμμα 7.12:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  με την ξηρή πυκνότητα ξηρών δοκιμίων ISOPOR

Η διασπορά των πειραματικών τιμών στο γράφημα, δείχνει πως για την κατηγορία Isopor επικρατεί γενικά η τάση η θερμική αγωγιμότητα να μειώνεται με την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας. Έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο πως η πτωτική τάση των πειραματικών τιμών δεν είναι ομαλή όπως της εξίσωσης διότι στις ομάδες αυτής της κατηγορίας, η απαιτούμενη αντοχή επιτυγχάνεται με EPS μικρότερης ή μεγαλύτερης πυκνότητας αναλόγως με την περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο υλικό που επηρεάζει το συντελεστή  $\lambda$ . Επίσης υπάρχει ένα ποσοστό σφάλματος λόγω της διάταξης GHP που επηρεάζει τα αποτελέσματα και μεταβάλλει την αντίστοιχη καμπύλη.



**Διάγραμμα 7.13:** Μεταβολή συντελεστή λ με την ξηρή πυκνότητα ξηρών δοκιμών NEOPOR, NEOPLAK

Στην κατηγορία Neopor παρατηρείται μείωση της θερμικής αγωγιμότητας με την ξηρή πυκνότητα ενώ στην κατηγορία Neoplak δεν φαίνεται αντίστοιχη εξάρτηση των δύο μεγεθών. Οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα για τις τρεις θερμοκρασίες. Ειδικά για την θερμοκρασία T=10°C λαμβάνει σταθερή τιμή  $\lambda = 0,030$  W/mK. Αυτό οφείλεται στην πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους, το Neopor® Plus, η οποία επιτυγχάνει χαμηλότερη τιμή του συντελεστή λ ανεξάρτητα από το πάχος της πλάκας και συνεπώς της πυκνότητας. Παρόλο που χρησιμοποιείται η ίδια πρώτη ύλη, παρατηρείται πως οι ομάδες Neopor πετυχαίνουν τα ίδια αποτελέσματα σε χαμηλότερη πυκνότητα συγκριτικά με τις ομάδες Neoplak. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο εμπλουτισμός του υλικού με γραφίτη έχει σαν συνέπεια οι θεωρητικές τιμές στην χαμηλότερη θερμοκρασία να είναι υψηλότερες σε σχέση με τις πειραματικές ακόμη και για μεγαλύτερες θερμοκρασιακές τιμές.



**Διάγραμμα 7.14:** Μεταβολή συντελεστή λ με την ξηρή πυκνότητα ξηρών δοκιμών ISOPLAK, PERIPOR

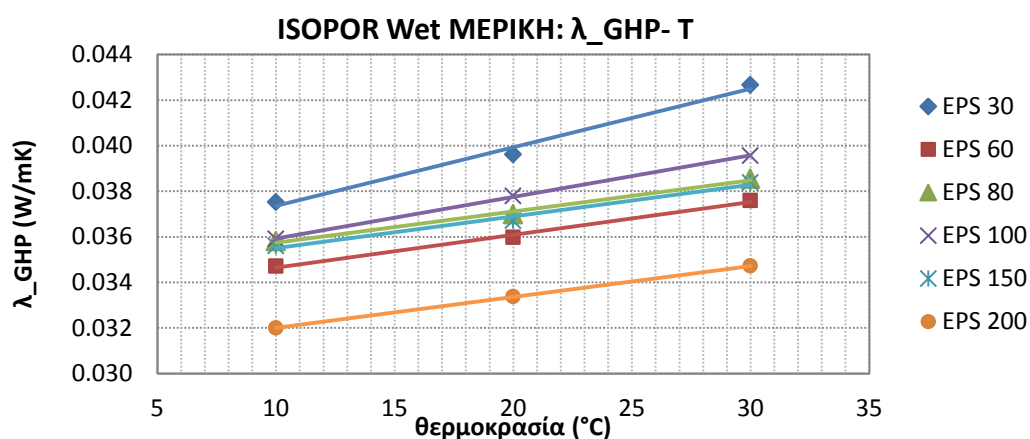
Από τα διαγράμματα είναι φανερό πως για τις ομάδες Isoplak και Peripor η σχέση του συντελεστή λ και της πυκνότητας είναι αντιστρόφως ανάλογη. Η κατηγορία Peripor λόγω της μεγάλης πυκνότητάς της έχει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από την κατηγορία Isoplak. Τέλος, παρατηρείται πως οι πως για τις συγκεκριμένες κατηγορίες τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν μικρή απόκλιση από τις τιμές της εξίσωσης που ορίζει το ευρωπαϊκό πρότυπο.

## 7.2.2. Επίδραση θερμοκρασίας και πυκνότητας επί υγρού

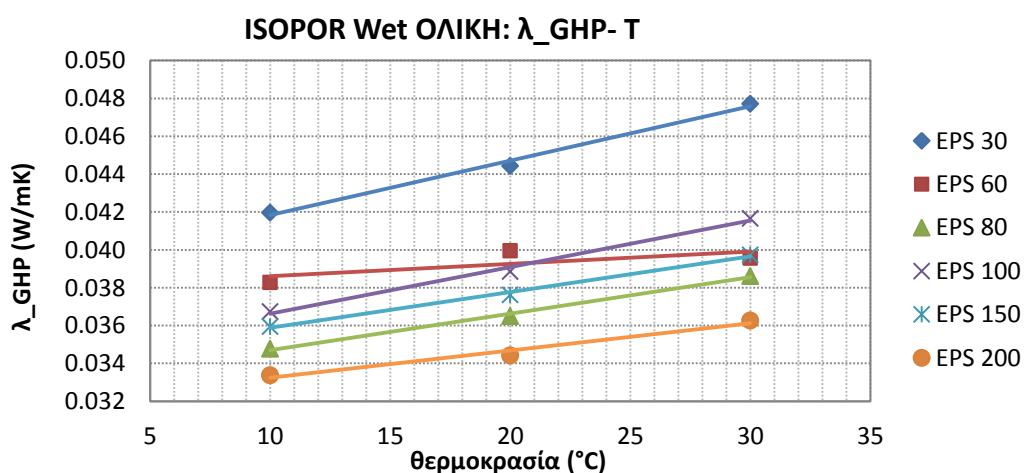
Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε η επίδραση της υδαταπορρόφησης στην θερμική αγωγιμότητα των δοκιμών για τις τρεις θερμοκρασίες  $T = 10, 20, 30^{\circ}\text{C}$  και προέκυψαν κάποιες συγκεντρωτικές σχέσεις. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο ερευνάται η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των ομάδων EPS λόγω της εισερχόμενης υγρασίας συναρτήσει της θερμοκρασίας και της υγρής φαινόμενης πυκνότητας. Για κάθε κατηγορία παρατίθενται τα διαγράμματα των πειραματικών τιμών του μετά την μερική και την ολική εμβάπτιση.

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες μεταβολής του συντελεστού θερμικής αγωγιμότητας. Για τα στεγνά μονωτικά υλικά, είναι γνωστό η θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζει θετική γραμμική εξάρτηση με την θερμοκρασία για τιμές μικρότερες των  $30^{\circ}\text{C}$ . Για τα ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια αναμένεται αύξηση του συντελεστή  $\lambda$ , λόγω της απορροφημένης υγρασίας, ωστόσο δεν είναι γνωστό αν υπάρχει κάποια σταθερή σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών.

Οι μετρήσεις έγιναν την μέθοδο GHP, την ίδια που χρησιμοποιήθηκε και στα στεγνά δοκίμια και για θερμοκρασίες 10, 20 και  $30^{\circ}\text{C}$ . Για την διατήρηση της υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων, τα δοκίμια συσκευάστηκαν με κατάλληλη μεμβράνη.

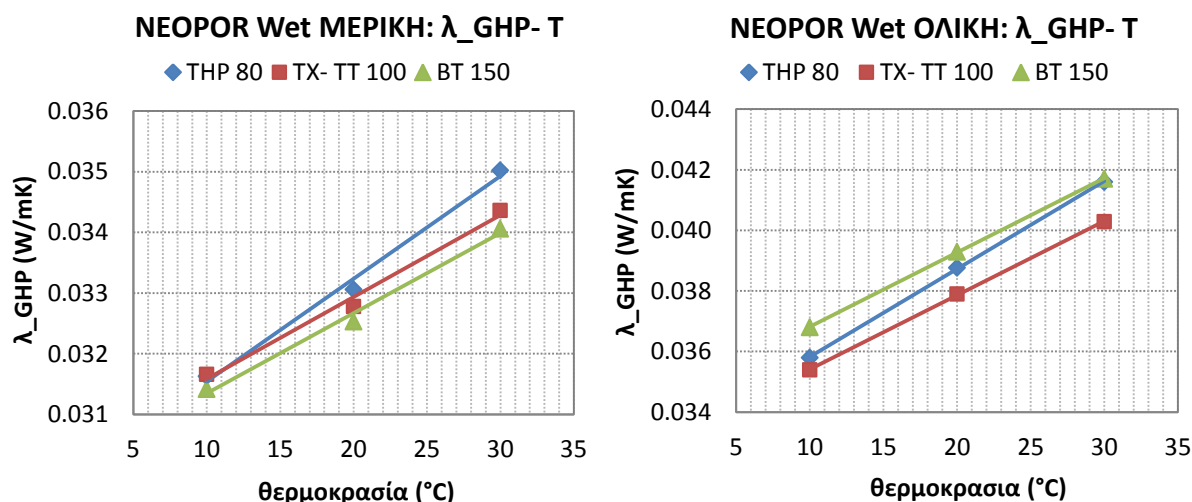


**Διάγραμμα 7.15:** Εξάρτηση συντελεστή  $\lambda$  με την θερμοκρασία για μερικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας ISOPOR



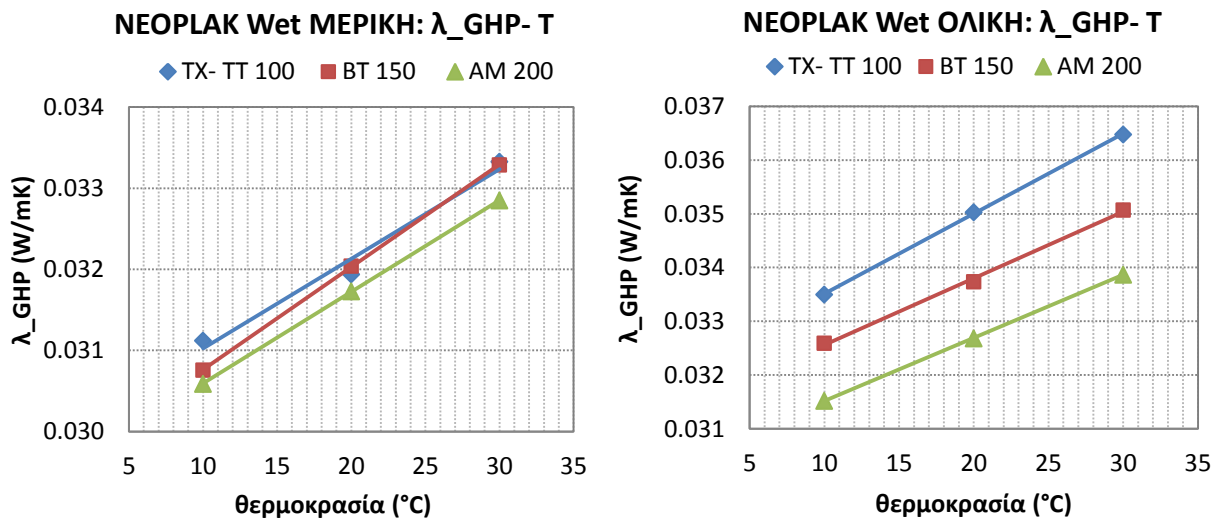
**Διάγραμμα 7.16:** Εξάρτηση συντελεστή  $\lambda$  με την θερμοκρασία για ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας ISOPOR

Αρχικά παρατηρείται πως η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας ανεξάρτητα από την ποσότητα της εισερχόμενης υγρασίας. Η σχέση των δύο εξακολουθεί να παρουσιάζει μια γραμμικότητα όπως στη ξηρή κατάσταση παρόλη την περιεχόμενη υγρασία στην μάζα των δοκιμίων. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η ομάδα EPS 60 στην ολική εμβάπτιση όπου η θερμική αγωγιμότητα που έχει μετρηθεί στους 20°C είναι υψηλότερη από εκείνη στους 30°C. Δεν πρόκειται για λάθος μέτρηση άλλα οφείλεται σε αστοχία της συσκευασίας η οποία λόγω της πίεσης που ασκείται πάνω στο δείγμα, υπέστη ρωγμή. Η τρύπα που δημιουργήθηκε σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο είχε σαν αποτέλεσμα να χαθεί σημαντικό ποσοστό νερού μέχρι να ολοκληρωθεί και η τελευταία μέτρηση και συνεπώς να προκύψει χαμηλότερη τιμή.



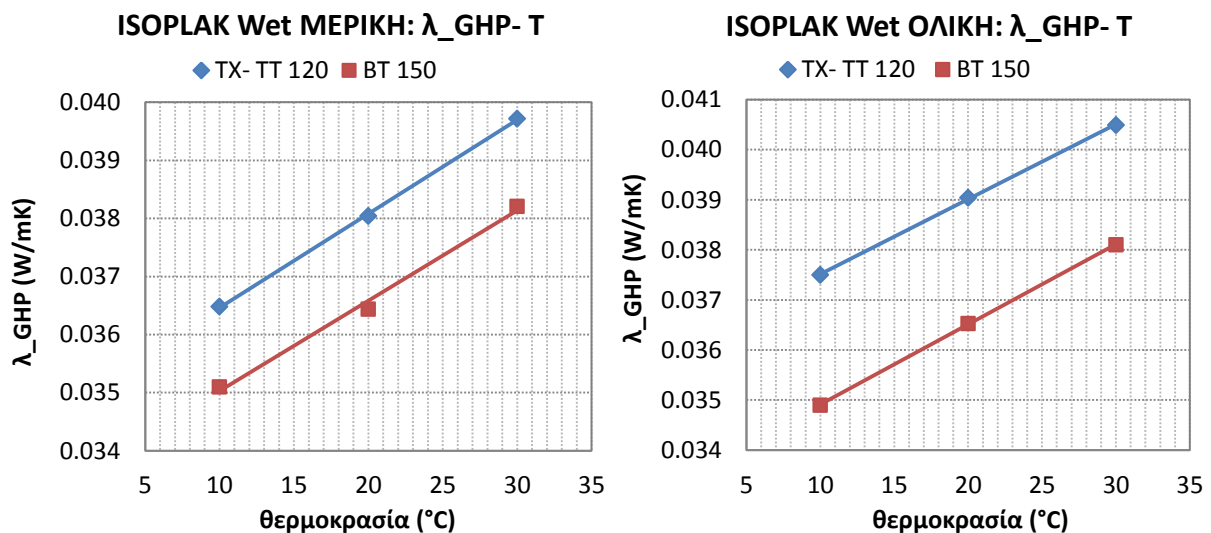
**Διάγραμμα 7.17:** Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας NEOPOR

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως ισχύει η γραμμικότητα των αποτελεσμάτων ισχύει. Μερικές τιμές στην κατηγορία Neopor έχουν μια μικρή απόκλιση από την καμπύλη, όμως είναι μέσα στα όρια του σφάλματος της διάταξης και δεν μεταβάλλουν το συμπέρασμα της γραμμικής εξάρτησης των μεγεθών. Πρέπει να σημειωθεί πως η μέτρηση των πειραματικών τιμών λόγω της μερικής εμβάπτισης πραγματοποιήθηκε περίπου στο τέλος Μαΐου όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν ιδιαίτερα υψηλή και επηρέασε την μέτρηση. Η διάταξη λόγω της ζέστης στο χώρο δεν μπορούσε να φτάσει το ελάχιστο όριο των 10°C που είχε τεθεί με αποτέλεσμα ο μετρητικός θάλαμος να γεμίζει υγρασία. Συνεπώς, αποφασίστηκε να προσδιοριστεί ο συντελεστής λ μόνο στους 20°C και 30°C, με πρώτη μέτρηση στην υψηλή θερμοκρασία. Στη συνέχεια, η τιμή του λ στους 10°C προσδιορίστηκε με γραμμική παρεμβολή αφού συμπερασματικά προκύπτει πως η γραμμική σχέση διατηρείται.



**Διάγραμμα 7.18:** Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας NEOPLAK

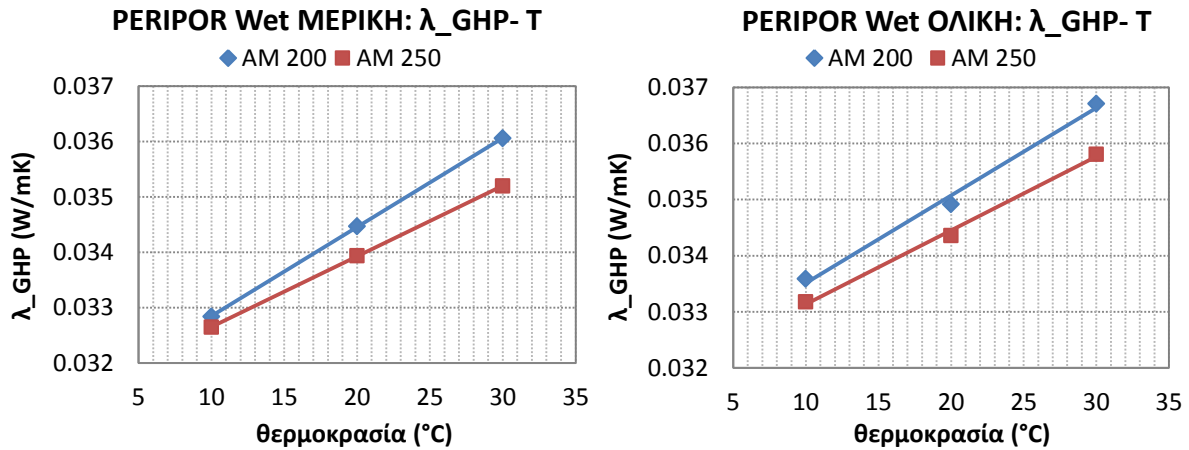
Όπως και προηγουμένως, για τα δοκίμια Neoplak επιβεβαιώνεται πως με χρήση τις μεθόδου GHP, η θερμική αγωγιμότητα έχει ανάλογη και γραμμική σχέση με την θερμοκρασία. Επίσης η μέτρηση της ομάδας TX- TT 100 κατά την ολική εμβάπτιση και των υπολοίπων ομάδων στην μερική εμβάπτιση, σε θερμοκρασία 10°C έγινε με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.



**Διάγραμμα 7.19:** Εξάρτηση συντελεστή λ με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας ISOPLAK

Με βάση τις καμπύλες που διαμορφώνονται από τις τιμές του λ για τις τρεις επιλεγμένες θερμοκρασίες, είναι σαφές πως για τις ομάδες ISOPLAK και PERIPOR, τα δύο μεγέθη διατηρούν γραμμική σχέση παρόλη την περιεχόμενη υγρασία. Τέλος, να σημειωθεί πως στην χαμηλή θερμοκρασία υπολογίστηκαν με γραμμική παρεμβολή οι τιμές των ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων ISOPLAK και των μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων PERIPOR.



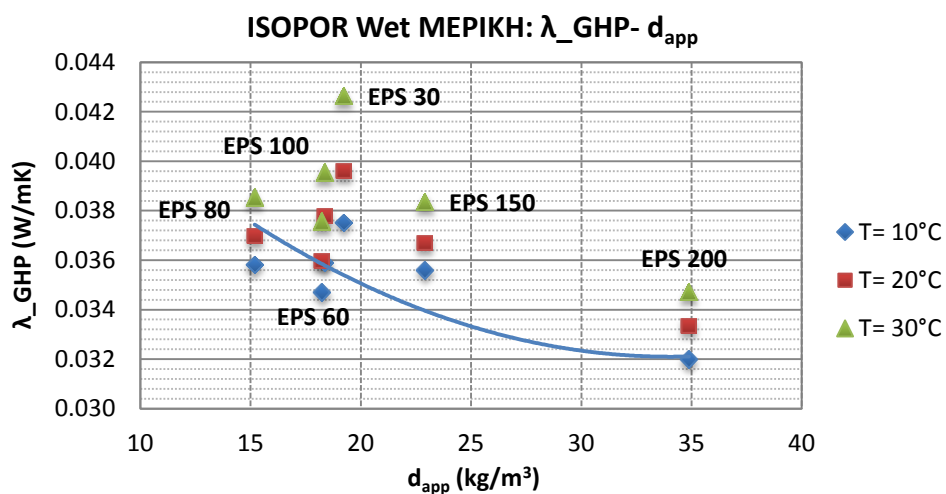


**Διάγραμμα 7.20:** Εξάρτηση συντελεστή  $\lambda$  με την θερμοκρασία για μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένα δοκίμια κατηγορίας PERIPOR

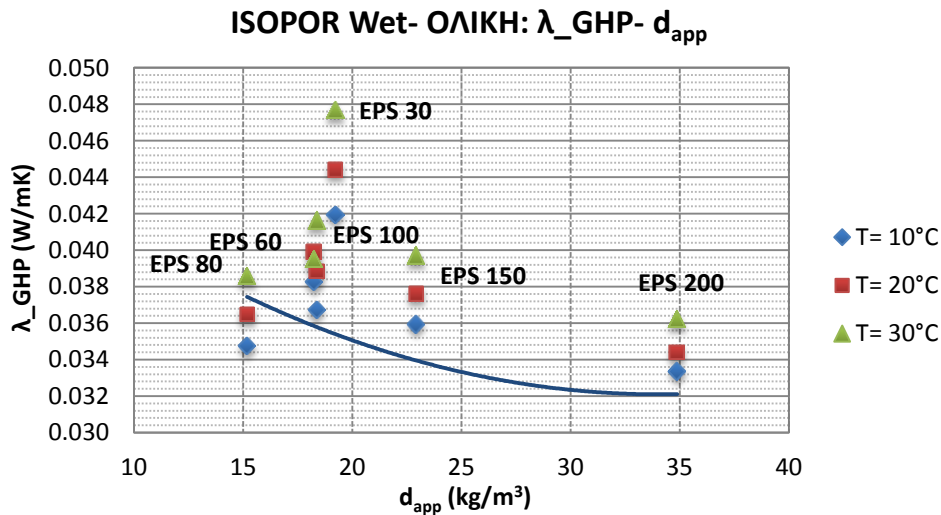
### Σχέση θερμικής αγωγιμότητας και φαινόμενης πυκνότητας επί υγρού

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει αναφερθεί πως σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13163, μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα ( $d_{app}$ ) του δείγματος συνάδει με μειωμένη θερμική αγωγιμότητα. Στα στεγνά δοκίμια, η σχέση των δύο μεγεθών περιγράφεται με τη μορφή μιας συγκεκριμένης καμπύλης όμως δεν υπάρχει συγκεκριμένη πληροφορία για εμβαπτισμένα δοκίμια. Ωστόσο είναι γνωστό πως τα πυκνότερα υλικά έχουν μικρότερη θερμική αγωγιμότητα και το νερό εισέρχεται με δυσκολία στην εσωτερική δομή του υλικού λόγω του μικρού πορώδους. Αντίθετα, τα λιγότερο πυκνά δείγματα απορροφούν περισσότερη υγρασία με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά η μάζα τους και η αντίστοιχη φαινόμενη πυκνότητά τους.

Συνεπώς, στα εμβαπτισμένα δοκίμια, δεν υπάρχει κάποια σταθερή σχέση που να εκφράζει την εξάρτηση του συντελεστή  $\lambda$  από την πυκνότητα, γεγονός το οποίο απεικονίζεται και στα ακόλουθα διαγράμματα που προέκυψαν με βάση την μέθοδο GHP. Τα αποτελέσματα δίνονται συναρτήσει της αρχικής πυκνότητας των ξηρών δοκιμίων ώστε να εξεταστεί πόσο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές ακόμα και για δυσμενείς συνθήκες όπως είναι η παρουσία υγρασίας. Η καμπύλη χρώματος μπλε αντιπροσωπεύει την θερμική αγωγιμότητα ξηρών δοκιμίων στους 10°C με βάση την εξίσωση που ορίζεται σε προηγούμενη ενότητα.



**Διάγραμμα 7.21:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  των μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων ISOPOR με την ξηρή πυκνότητα

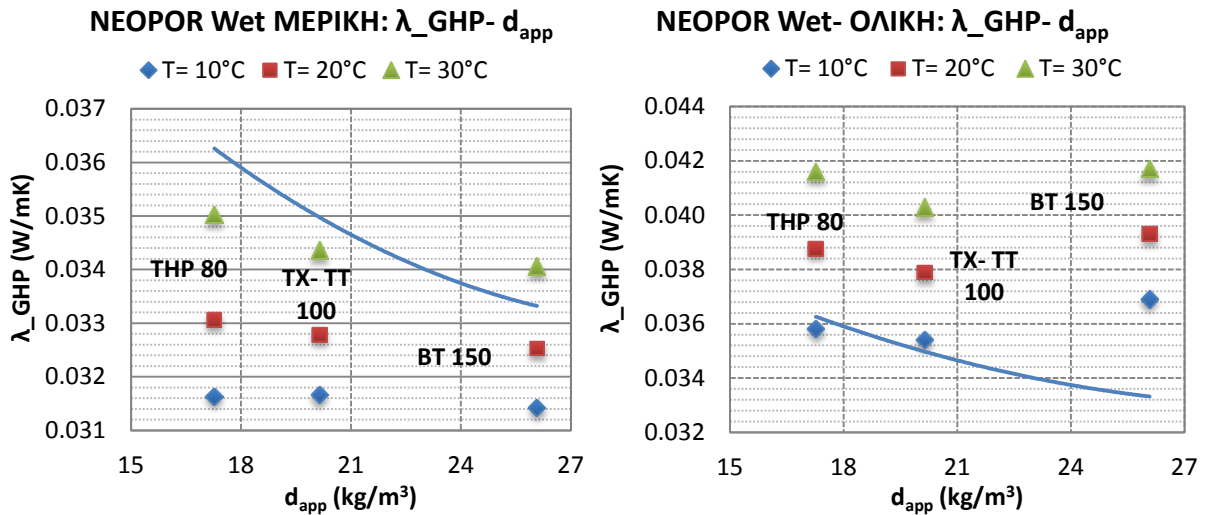


**Διάγραμμα 7.22:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  των ολικώς εμβάπτισμένων δοκιμίων ISOPOR με την ξηρή πυκνότητα

Η πρώτη διαπίστωση είναι πως το διάγραμμα της μερικής εμβάπτισης δεν διαφέρει πολύ από το αντίστοιχο για τα ξηρά δοκίμια διότι τα δοκίμια έχουν απορροφήσει λίγη υγρασία. Παρατηρείται πως οι ομάδες Eps 30 και 150 έχουν σχεδόν ίδια φαινόμενη πυκνότητα ενώ η πρώτη ομάδα έχει εμφανώς υψηλότερες τιμές  $\lambda$  γιατί απορρόφησε περίπου διπλάσια ποσότητα νερού σε σχέση με την δεύτερη ομάδα. Τέλος τα Eps 200 που είχαν το χαμηλότερο  $W_{ip}$  παραμένουν η πιο πυκνή ομάδα της κατηγορίας με τις μικρότερες τιμές  $\lambda$  σε όλες τις θερμοκρασίες.

Όσον αφορά την ολική εμβάπτιση παρατηρείται πως η πυκνότητα του δείγματος με την αντοχή στην θλιπτική τάση δεν έχουν πλέον ανάλογη σχέση μετά την ολική εμβάπτιση. Για παράδειγμα οι ομάδες EPS 30, 200 ενώ έχουν παραπλήσιες τιμές φαινόμενης πυκνότητας εμφανίζουν σημαντική διαφορά στην θερμική τους αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει διότι η ομάδα Eps 200 αποτελείται από πυκνά δείγματα με χαμηλό συντελεστή  $\lambda$  που απορρόφησαν λίγη υγρασία σε αντίθεση με τα δείγματα της ομάδας Eps 30 που έχουν μικρή πυκνότητα αλλά απορρόφησαν πολύ νερό που οδήγησε σε αύξηση της μάζας τους, της φαινόμενης πυκνότητάς τους και του αντίστοιχου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ . Για τις ομάδες που είχαν παραπλήσιες τιμές πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας πριν την ολική εμβάπτιση, όπως οι ομάδες Eps 60 (18,24kg/m<sup>3</sup>) και 100 (18,36kg/m<sup>3</sup>), η εισερχόμενη υγρασία είναι η παράμετρος που μεγάλωσε την απόκλιση στις τιμές των δύο ομάδων.

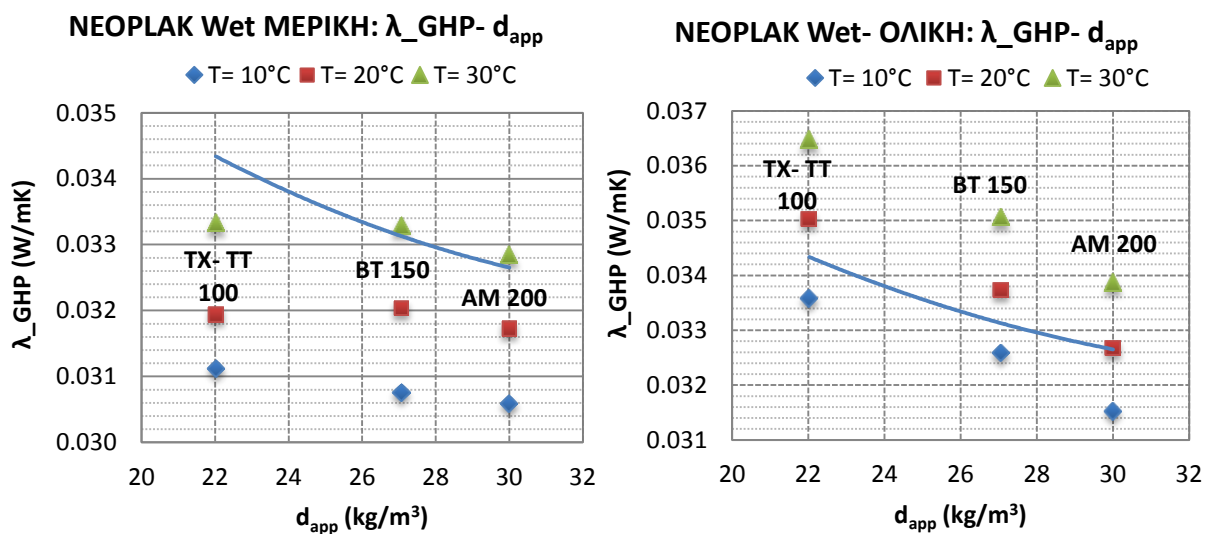
Οι τιμές του συντελεστή κατά την μερική εμβάπτιση προφανώς και πλησιάζουν περισσότερο τις θεωρητικές τιμές σε σχέση με την ολική εμβάπτιση.



**Διάγραμμα 7.23:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPOR με την ξηρή πυκνότητα

Οι ομάδες Neopor παρουσιάζουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση της θερμικής αγωγιμότητας με την φαινόμενη πυκνότητα που έχει προκύψει μετά την μερική βύθιση. Παρόλο που η πυκνότερη ομάδα είχε και την υψηλότερη τιμή  $W_{lp}$ , παρατηρείται ότι διατήρησε τις χαμηλότερες τιμές  $\lambda$  της κατηγορίας. Επίσης η περιεχόμενη υγρασία δεν ήταν αρκετή ώστε να μεταβάλλει την ανάλογη εξάρτηση της αντοχής σε θλιπτική τάση με την πυκνότητα.

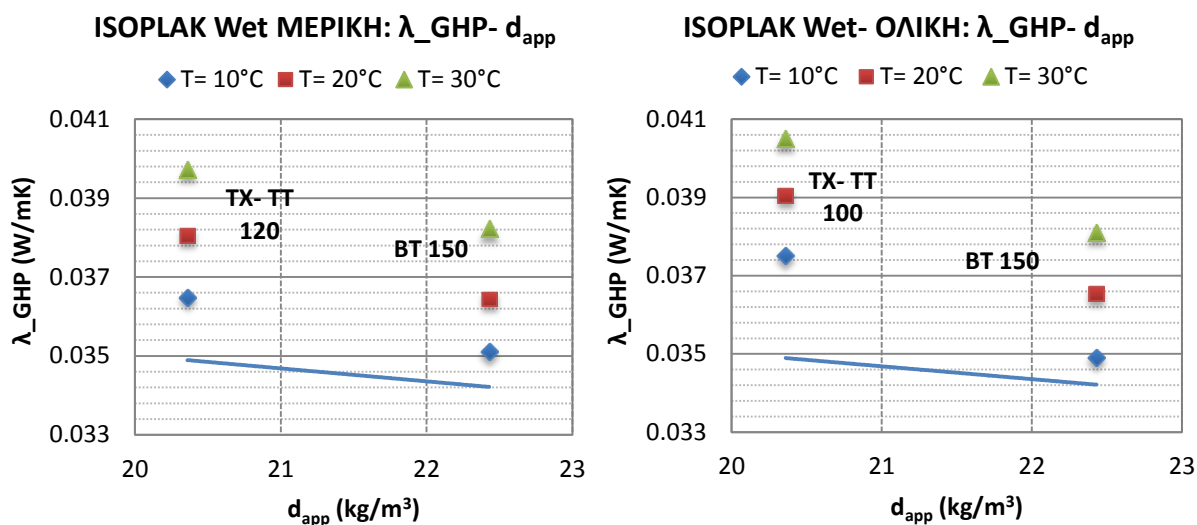
Η ανάλογη σχέση αντοχής σε θλιπτική τάση και φαινόμενης πυκνότητας διατηρείται ακόμη και μετά την ολική εμβάπτιση. Αυτό συνέβη διότι υπήρξε ανάλογη απορρόφηση ύδατος, παρόλο που υποθετικά οι πιο πυκνές ομάδες αναμενόταν να έχουν μικρότερο ποσοστό  $W_{lt}$ . Επίσης, η ομάδα TX-TT 100 εμφανίζει μικρότερες τιμές από την ομάδα THP 80 επειδή κατά την διάρκεια της μέτρησης με την μέθοδο GHP κάθε δείγμα έχασε περίπου 10gr υγρασίας (το 1/4 της συνολικής απορρόφησης) και επηρέασε τα αποτελέσματα. Η πίεση που ασκεί η διάταξη σε συνδυασμό με κακής ποιότητας θερμοκόλλησης της συσκευασίας είχε σαν αποτέλεσμα την απώλεια υγρασίας.



**Διάγραμμα 7.24:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών NEOPLAK με την ξηρή πυκνότητα

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως οι τιμές των ομάδων της κατηγορίας Neoplak διαφέρουν ελάχιστα. Γενικά οι τιμές του συντελεστή μειώνονται με αυξανόμενη πυκνότητα, εκτός της τιμής  $\lambda_{20^\circ\text{C}}$  της ομάδας BT 150 είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της ομάδας TX- TT 100. Η διαφορά ωστόσο είναι μέσα στα όρια του σφάλματος της διάταξης GHP, συμπεραίνεται πως η εξάρτηση της αγωγιμότητας με την πυκνότητα για τα δοκίμια NEOPLAK είναι αντιστρόφως ανάλογη. Τέλος, παρατηρείται και πάλι πως όσο πιο πυκνά τα δοκίμια τόσο μεγαλώνει η αντοχή τους σε θλίψη.

Αντίθετα με την προηγούμενη κατηγορία, οι ομάδες Neoplak μετά την ολική εμβάπτιση εμφανίζουν ανάλογη σχέση φαινόμενης πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας. Στο διάγραμμα, οι πυκνότερες ομάδες ήταν εκείνες με την μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα πριν την εμβάπτιση, που λόγω της αραιής εσωτερικής δομής τους είχαν και μεγαλύτερη συγκράτηση νερού με συνέπεια τις υψηλότερες τιμές πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας.

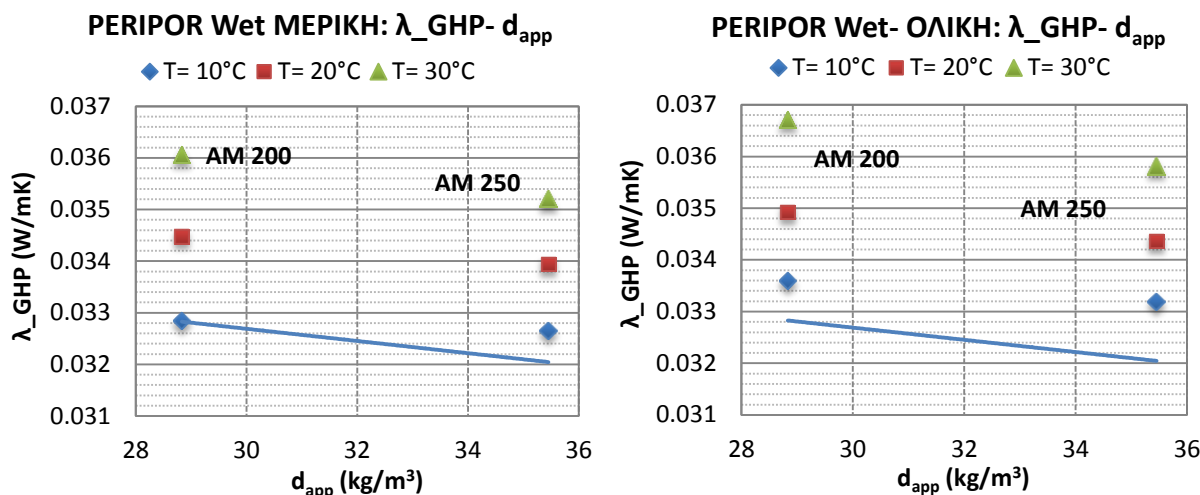


**Διάγραμμα 7.25:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων ISOPLAK με την ξηρή πυκνότητα

Τα μερικώς εμβαπτισμένα δείγματα Isoplak απορροφήσανε την λιγότερη υγρασία με αποτέλεσμα να μην σημειωθεί ιδιαίτερη αύξηση της φαινόμενης πυκνότητά τους. Από το γράφημα επιβεβαιώνεται η αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την φαινόμενη πυκνότητα κατά την μερική εμβάπτιση. Τέλος παρατηρούμε πως διατηρείται η θλιπτική αντοχή μέσω της πυκνής εσωτερικής δομής των υλικών.

Ωστόσο κατά την ολική εμβάπτιση η ομάδα Isoplak, η TX- TT 120 απορρόφησε σχεδόν τριπλάσια υγρασία από την BT 150 με αποτέλεσμα να προκύψει πυκνότερη. Επίσης οι τιμές του  $\lambda$  ήτανε μεγαλύτερες και κατά την ξηρή κατάσταση, όμως η διαφορά μεταξύ των τιμών των ομάδων αυξήθηκε με την υγρασία.

Τα δείγματα Peripor είχανε από τις μικρότερες τιμές υδαταπορρόφησης στην μερική εμβάπτιση και τις χαμηλότερες στην ολική. Από τα γραφήματα επιβεβαιώνεται η αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την φαινόμενη πυκνότητα στην διάρκεια του πειράματος για τις ειδικώς επεξεργασμένες ομάδες Eps. Τέλος παρατηρούμε πως διατηρείται η θλιπτική αντοχή μέσω της πυκνής εσωτερικής δομής των υλικών. Η ομάδα Peripor AM 200 αν και αραιότερη από την AM 250 πριν την εκτέλεση του πειράματος, δεν επέτρεψε να εισχωρήσει αρκετό νερό στην μάζα της ώστε να αυξηθεί η φαινόμενη πυκνότητά της περισσότερο από την δεύτερη ομάδα και οι τιμές  $\lambda$  αυξήθηκαν αναλόγως.



**Διάγραμμα 7.26:** Μεταβολή συντελεστή λ των μερικώς και ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμών PERIPOR με την ξηρή πυκνότητα

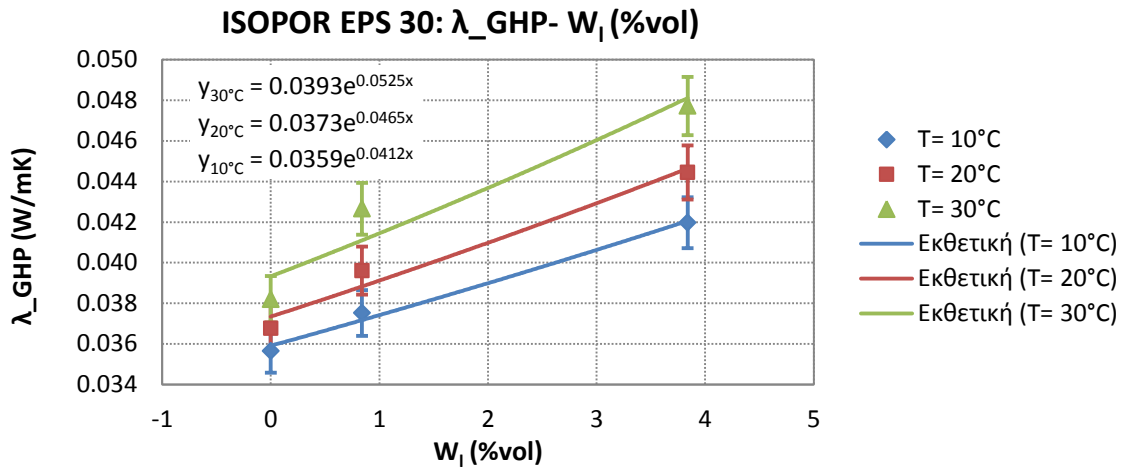
### 7.2.3. Επίδραση απορρόφησης ύδατος

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταβολής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε δομικά έργα για εξωτερική και εσωτερική θερμομόνωση και για αυτό το λόγο δόθηκε έμφαση στη μελέτη της μεταβολής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που προκαλεί η υγρασία.

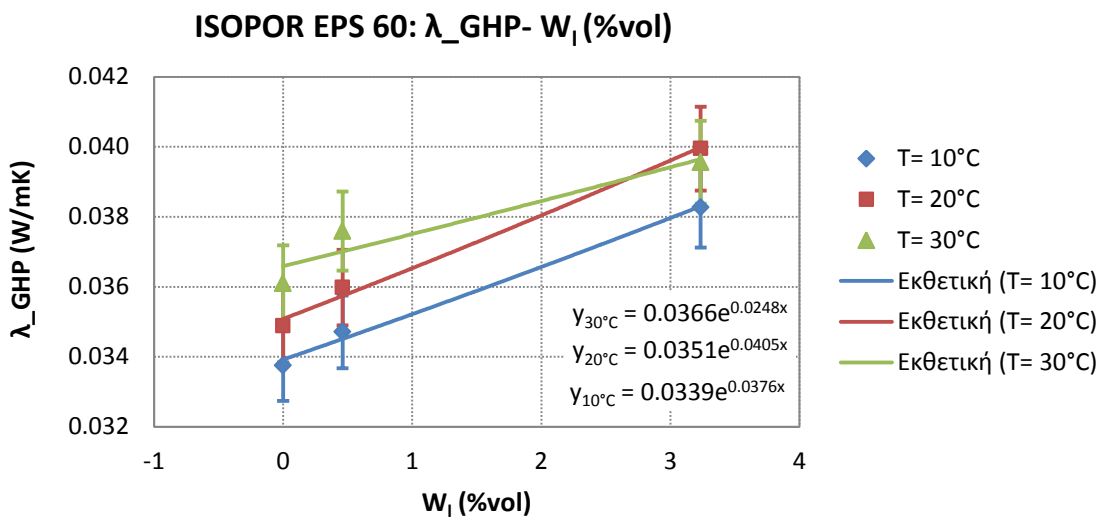
Πρέπει να σημειωθεί πως η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε για τις ομάδες δοκιμών EPS και όχι για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Η ομαδοποίηση δεν προσθέτει κάποιο σφάλμα στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αφού τα δείγματα κάθε ομάδας προέρχονται από το ίδιο μπλοκ υλικού και συνεπώς έχουν ίδιες ιδιότητες και κοντινές τιμές φαινόμενης πυκνότητας σε στεγνή κατάσταση. Επίσης από τους υπολογισμούς προέκυψε πως τα δείγματα μια ομάδας απορρόφησαν την ίδια περίπου υγρασία, δίνοντας και παραπλήσιες τιμές **W<sub>I</sub> [%]**.

Είναι γνωστό από την θεωρία πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται εκθετικά με την περιεχόμενη υγρασία. Επειδή γενικά ενδιαφέρει η παρουσία της υγρασίας ως ποσοστό προς το συνολικό όγκο των δοκιμών, το μέγεθος  $W_p$  μετατράπηκε σε αδιάστατο μέγεθος χρησιμοποιώντας την εξίσωση  $W_{lp}(\%) = \frac{W_{lp}}{thickness} \times \frac{100}{\rho_w}$  που έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα.

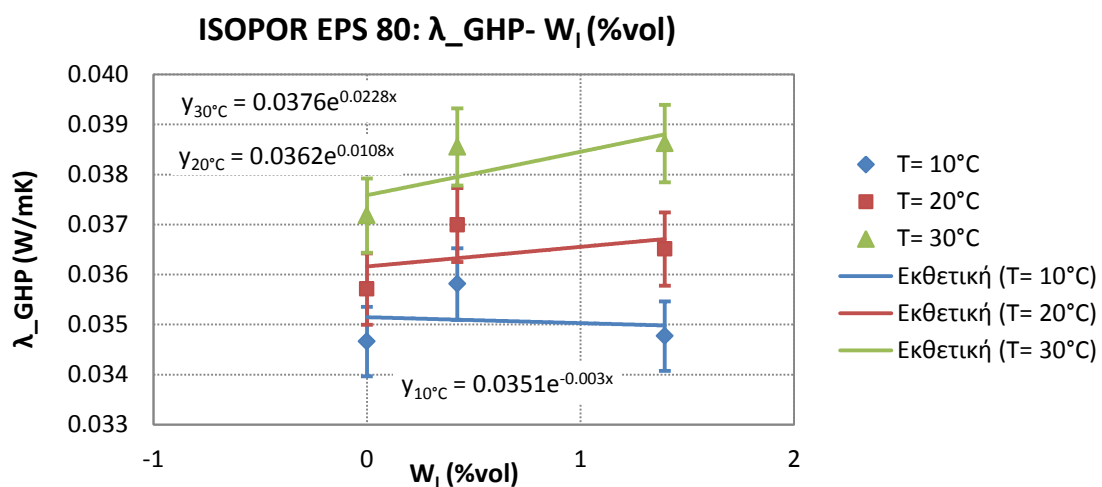
Τα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζουν, ξεχωριστά για κάθε ομάδα, τις τιμές του λ στις θερμοκρασίες T= 10, 20 και 30°C για ξηρά δοκίμια και μετά από μερική και ολική εμβάπτιση. Οι τιμές προέρχονται από την διάταξη Guarded Hot Plate καθώς θεωρείται η πιο έγκυρη μέθοδος με ποσοστό σφάλματος ±3%.



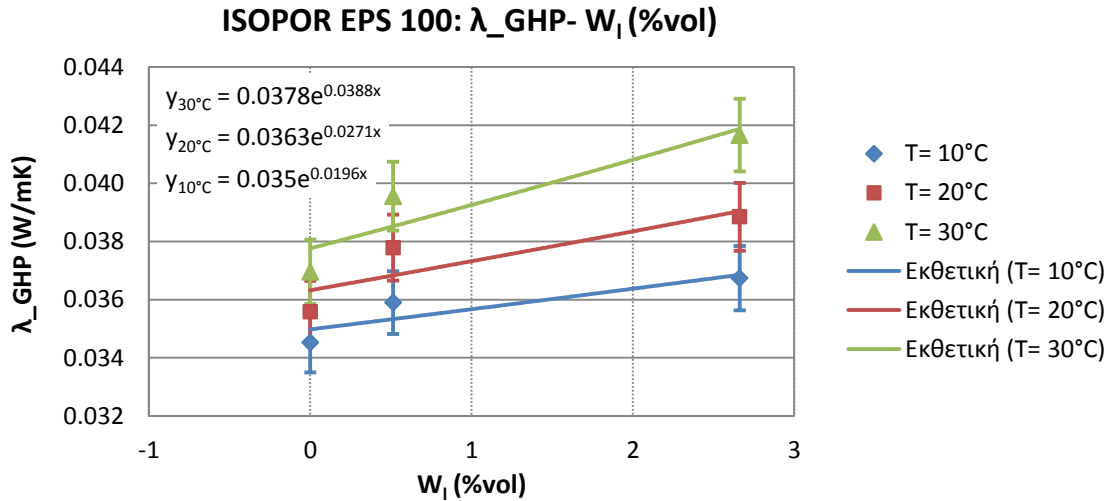
**Διάγραμμα 7.27:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 30 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία



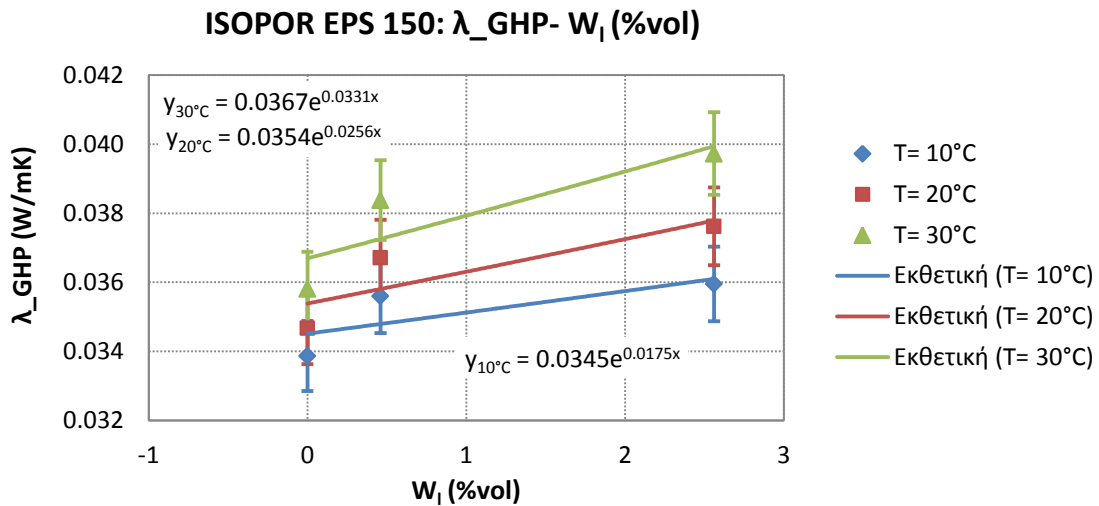
**Διάγραμμα 7.28:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 60 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία



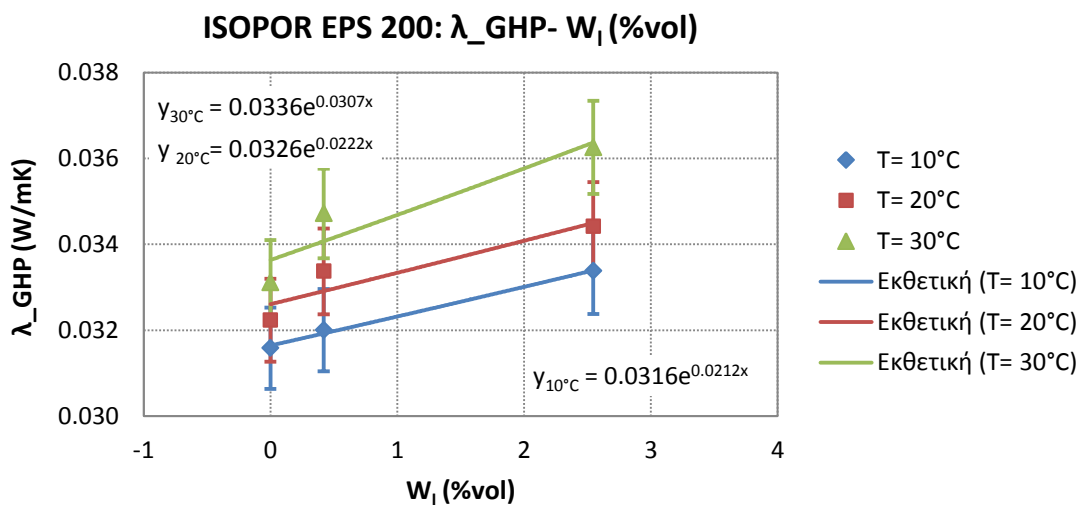
**Διάγραμμα 7.29:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 80 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία



**Διάγραμμα 7.30:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

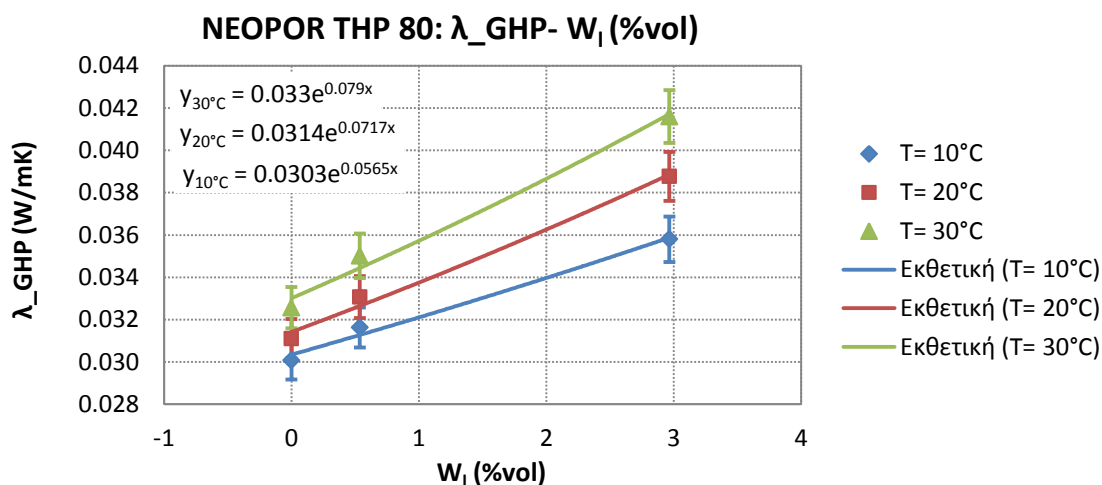


**Διάγραμμα 7.31:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

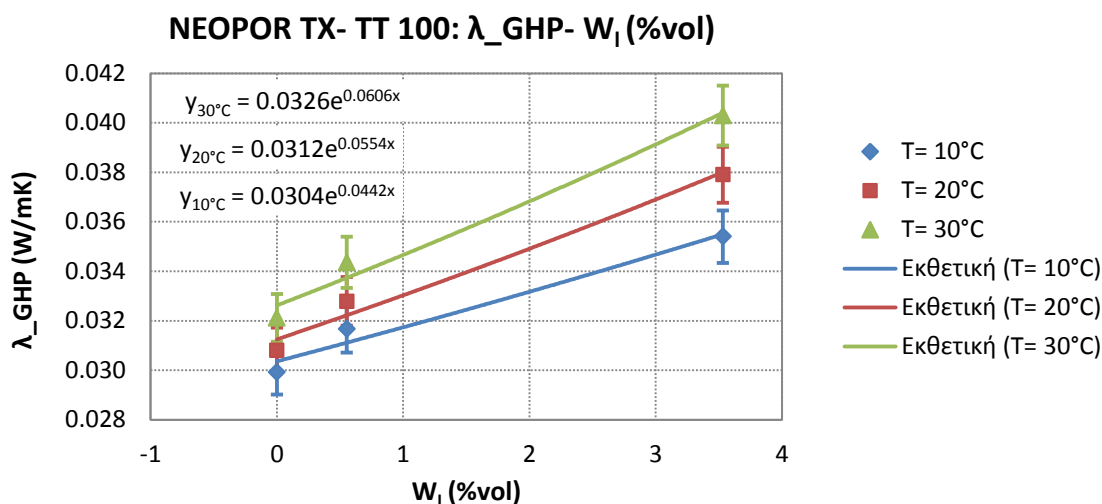


**Διάγραμμα 7.32:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμών ISOPOR 200 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως οι πειραματικές τιμές του συντελεστή λ επιβεβαιώνουν την θεώρηση πως η θερμική αγωγιμότητα των δειγμάτων αυξάνεται εκθετικά με την υγρασία. Γενικότερα παρατηρείται πως η εκθετική καμπύλη διαμορφώνεται στα όρια του σφάλματος της μετρητικής διάταξης ενώ είναι αξιοσημείωτο πως σε μερικά δοκίμια και για θερμοκρασία 10°C, προσεγγίζει ακριβώς τις τιμές. Η μοναδική ομάδα που η καμπύλη δεν σημειώνει αύξηση είναι η Eps 80 για την μικρότερη θερμοκρασία μέτρησης. Αυτό συμβαίνει διότι οι τιμές του λ στην ολική εμβάπτιση προέκυψαν χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στην μερική ξεπερνώντας και τα όρια του σφάλματος. Εφόσον δεν διαπιστώθηκε απώλεια υγρασίας, το αποτέλεσμα πιθανόν οφείλεται σε αστοχία κατά την μέτρηση στην διάταξη.

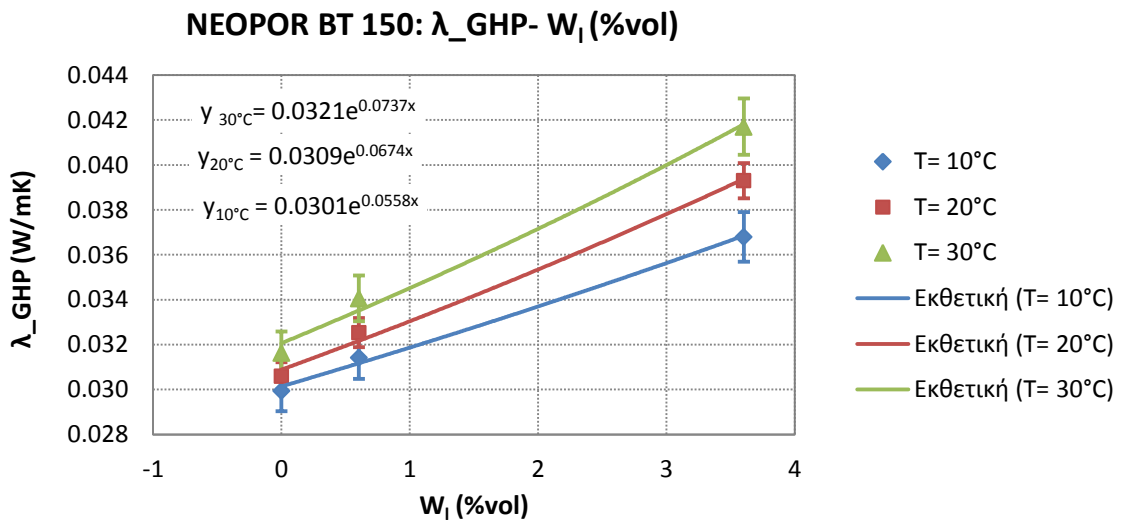


**Διάγραμμα 7.33:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων NEOPOR THP 80 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία



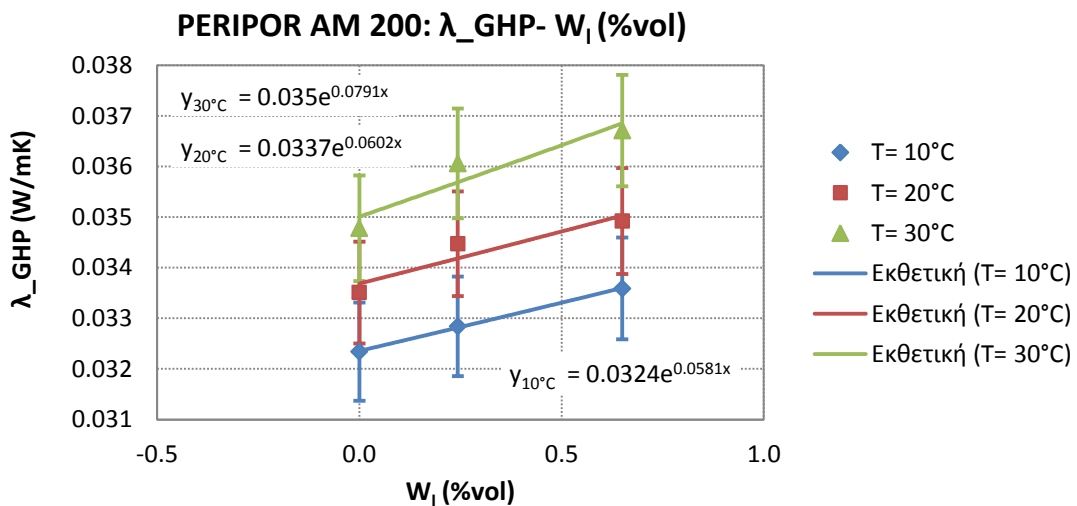
**Διάγραμμα 7.34:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων NEOPOR TX- TT 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία



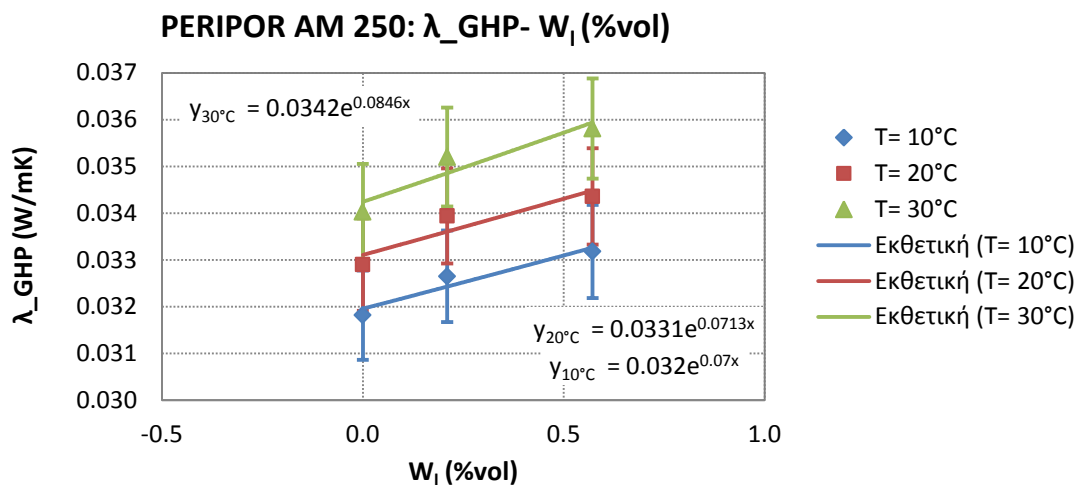


**Διάγραμμα 7.35:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων NEOPOR BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

Οι ομάδες της κατηγορίας Neopor ακολουθούν τον κανόνα της εκθετικής αύξησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Οι καμπύλες προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα αποτελέσματα σε όλες τις θερμοκρασίες. Εκτός αυτού, παρατηρείται η μεγάλη υδαταπορρόφηση των δειγμάτων κατά την μακροπρόθεσμη παραμονή τους στην δεξαμενή ολικής εμβάπτισης σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν από την μερική επαφή με το νερό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική επιδείνωση της θερμομονωτικής ικανότητας των δειγμάτων μέσω της μεγάλης αύξησης του συντελεστή  $\lambda$ .

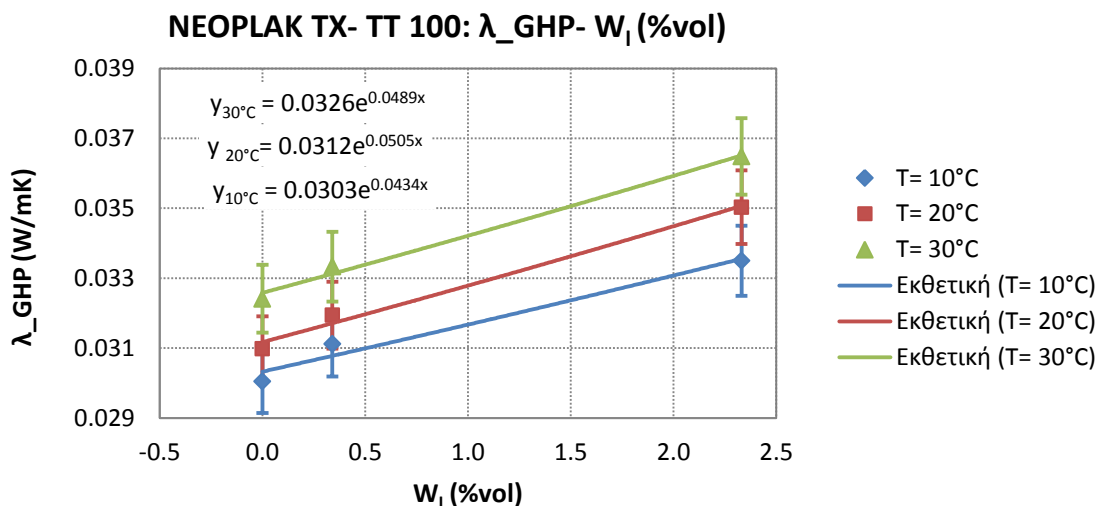


**Διάγραμμα 7.36:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων PERIPOR AM 200 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

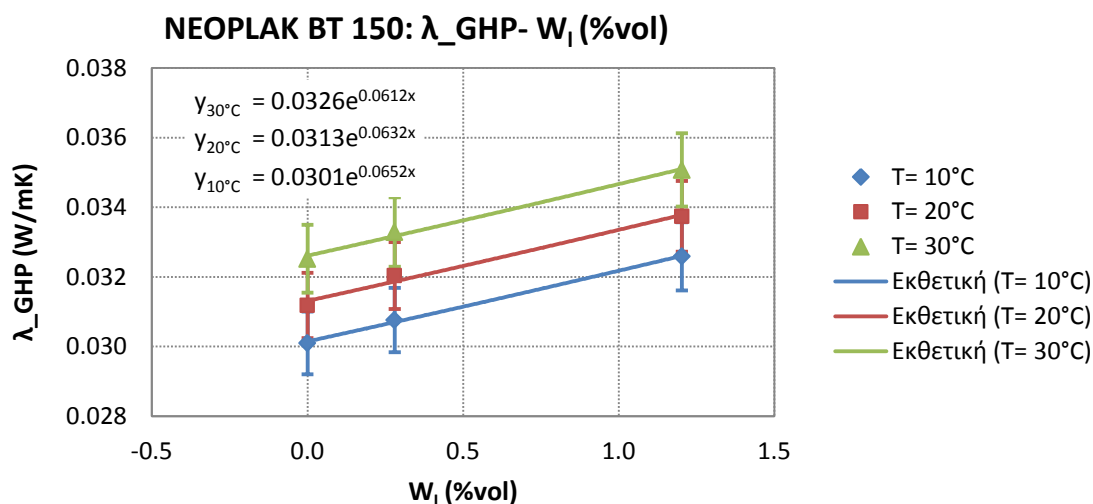


**Διάγραμμα 7.37:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων PERIPOR AM 250 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

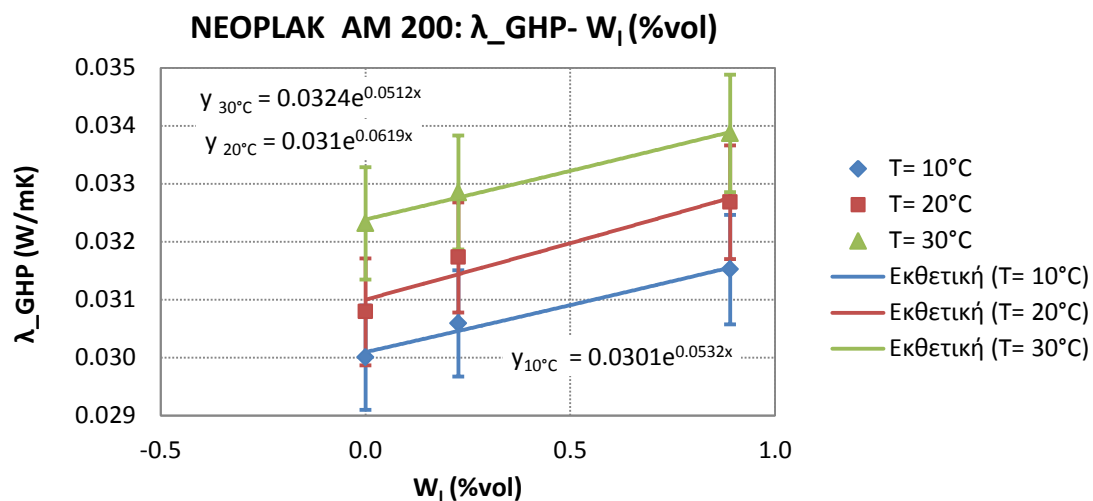
Παρατηρείται πως και η κατηγορία Peripor περιγράφει την αναμενόμενη εξάρτηση των δύο μεγεθών. Επίσης αποδεικνύεται από τις χαμηλές τιμές  $W_i$ , πως πρόκειται για ειδικά επεξεργασμένα δοκίμια που έχουν ιδιαίτερα υψηλή αντοχή στην υγρασία, που σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία, διατηρούνται χαμηλές και στην ολική εμβάπτιση. Συνολικά η κατηγορία Peripor παρουσίασε τις μικρότερες τιμές  $W_{it}$  συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες και συνεπώς ο συντελεστής  $\lambda$  δεν μεταβλήθηκε ιδιαίτερα.



**Διάγραμμα 7.38:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων NEOPLAK TX- TT 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

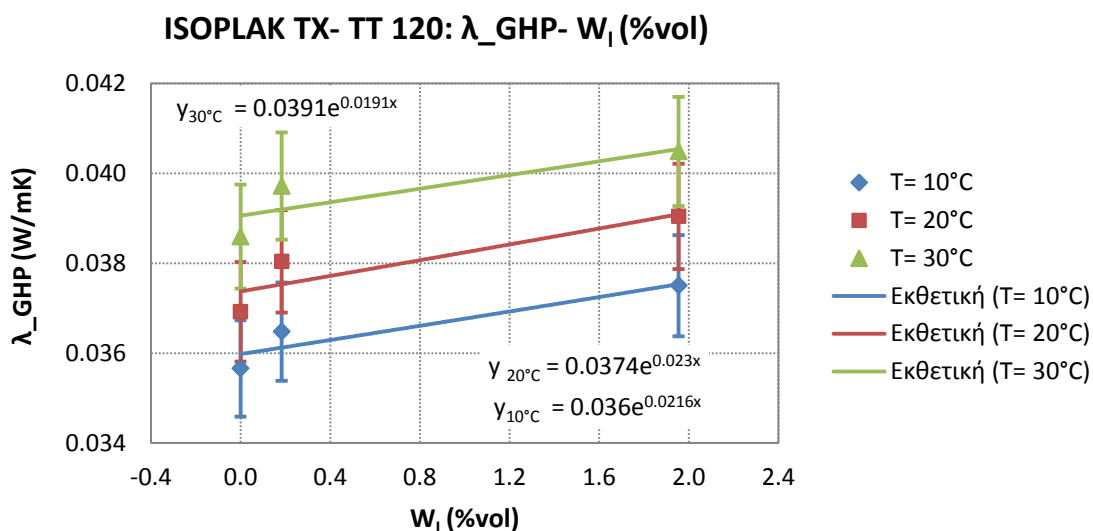


**Διάγραμμα 7.39:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων NEOPLAK BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

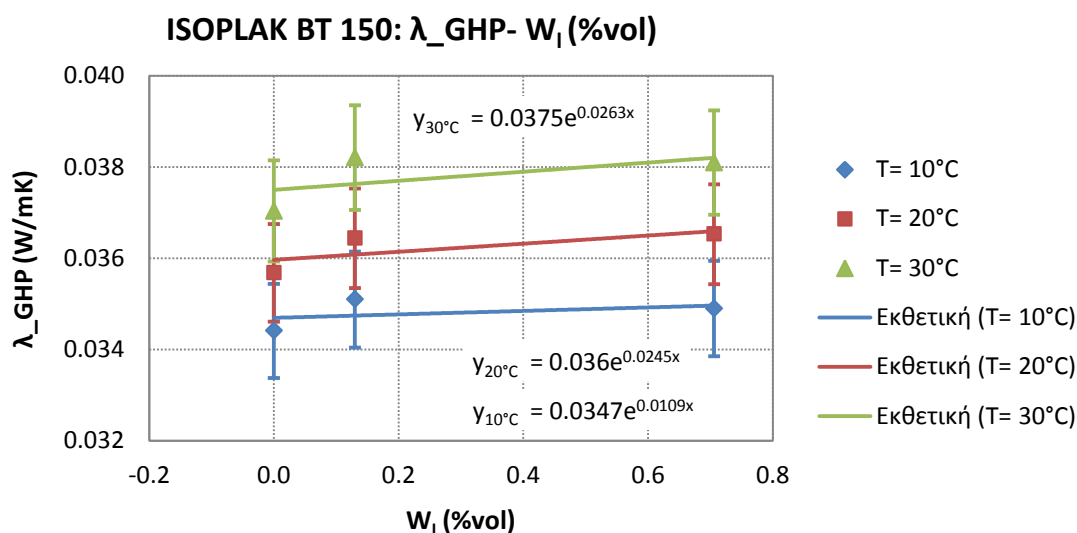


**Διάγραμμα 7.40:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων NEOPLAK AM 200 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

Όλα τα δείγματα της κατηγορίας Neoplak με την εισχώρηση της υγρασίας στο εσωτερικό τους παρουσίασαν εκθετική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Επειδή στο εσωτερικό τους οι πλάκες περιέχουν μόρια γραφίτη σε μεγαλύτερη σύνθεση από τις πλάκες Neopor, επιτυγχάνουν υψηλότερες πυκνότητες και δεν απορροφούν τόσο μεγάλο ποσοστό υγρασίας.



**Διάγραμμα 7.41:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων ISOPLAK TX- TT 120 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία



**Διάγραμμα 7.42:** Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας δοκιμίων ISOPLAK BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία

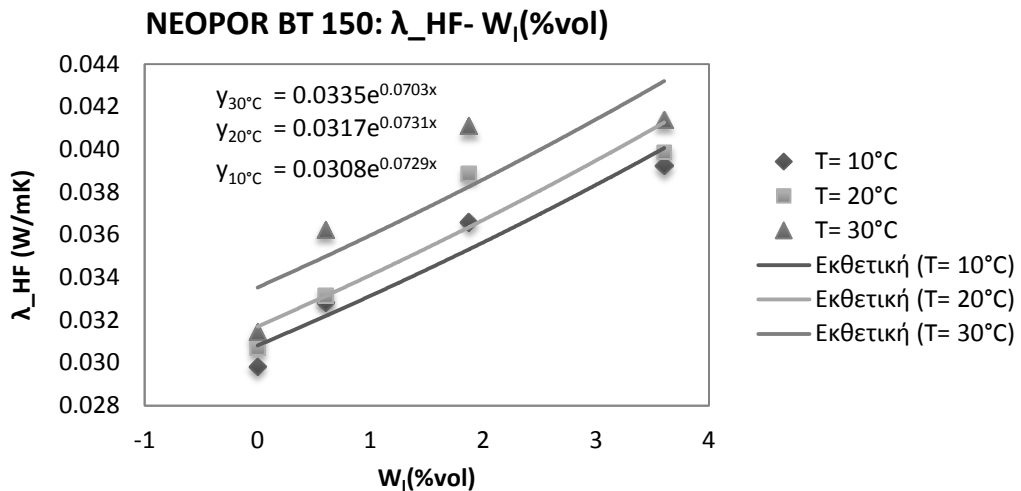
Από τα γραφήματα φαίνεται πως η εκθετική καμπύλη διαμορφώνεται με την προσθήκη του μετρητικού σφάλματος και όχι απευθείας από τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι δύο ομάδες απορρόφησαν τα λιγότερα γραμμάρια ύδατος κατά την μερική εμβάπτιση ενώ η ομάδα BT 150 διατήρησε το χαμηλό ποσοστό και στην ολική εμβάπτιση. Αντίστοιχα, το  $\lambda$  παρουσίασε πολύ μικρή αύξηση λόγω της περιεχόμενης υγρασίας ειδικότερα για την δεύτερη ομάδα της κατηγορίας.

- **Μέθοδος Heat Flow**

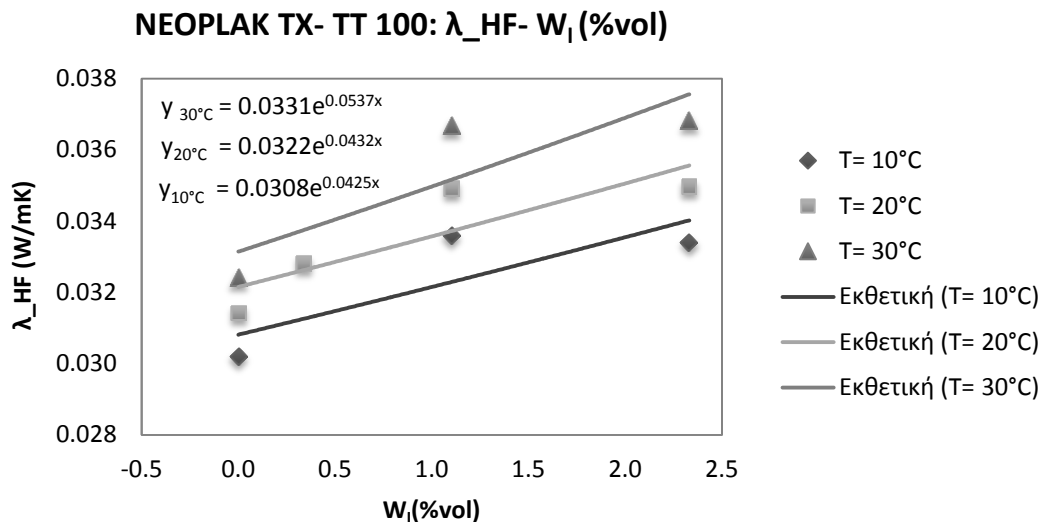
Αποδείχθηκε παραπάνω πως η διάταξη Guarded Hot Plate, στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζει εκθετική εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την περιεχόμενη υγρασία. Για να εξεταστεί αν οφείλεται στην διάταξη που χρησιμοποιείται ή αν ισχύει γενικότερα, πραγματοποιήθηκαν μερικές συμπληρωματικές μετρήσεις σε τυχαία δείγματα με την μέθοδο Heat Flow. Η θερμική

αγωγιμότητα υπολογίστηκε σε ένα επιπλέον σημείο που προκύπτει από την ξήρανση των υλικών μετά την ολική εμφύσηση ώστε να σημειωθεί απώλεια τσε ποσοστό 50% της συνολικής αρχικής υγρασίας.

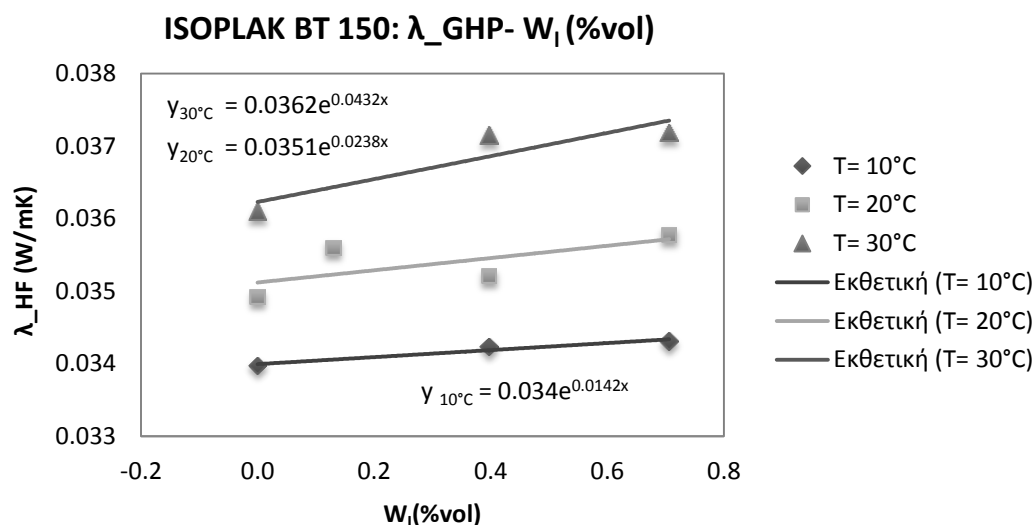
Για να χάσουν τα υλικά ένα συγκεκριμένο ποσοστό απορροφημένου ύδατος, θερμάνθηκαν σε φούρνο στους 60°C και στη συνέχεια συσκευάστηκαν με τη σακούλα συρρίκνωσης όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Ο έλεγχος της ξήρανσης ενός δοκιμίου γινόταν με επαναλαμβανόμενη ζύγιση μέχρι να φτάσει την επιθυμητή μάζα. Στην αρχή τα δείγματα έχαναν πολύ γρήγορα υγρασία καθώς η απώλεια μάζας προερχόταν από την επιφανειακή υγρασία. Στη συνέχεια όμως χρειαζόταν περισσότερο χρόνος για να εξατμιστεί η παραμένουσα υγρασία που βρισκόταν δεσμευμένη στους πόρους των υλικών.



**Διάγραμμα 7.43:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  δοκιμίων NEOPOR BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία- μέθοδος Heat Flow



**Διάγραμμα 7.44:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  δοκιμίων NEOPLAK TX- TT 100 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία- μέθοδος Heat Flow



**Διάγραμμα 7.45:** Μεταβολή συντελεστή  $\lambda$  δοκιμίων ISOPLAK BT 150 με την περιεχόμενη υγρασία και την θερμοκρασία- μέθοδος Heat Flow

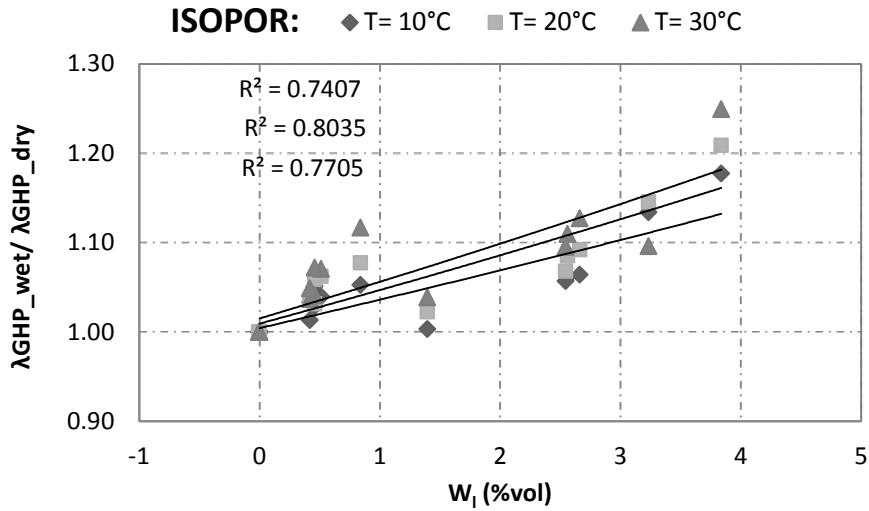
Από την διασπορά των σημείων στα γραφήματα παρατηρείται πως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η θερμική αγωγιμότητα έχει ανάλογη εξάρτηση από την υγρασία. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δείχνουν εκθετική προσέγγιση για την ομάδα Isorlak σε όλες τις θερμοκρασίες, ωστόσο αποκλίνουν περισσότερο στις άλλες δύο ομάδες. Η πιο σημαντική διαπίστωση ωστόσο είναι πως το  $\lambda$  παρουσιάζει απότομη αύξηση μέχρι μια ορισμένη ποσότητα εισερχόμενου νερού, που αντιστοιχεί στο 50% της συνολικής απορρόφησης. Από το όριο αυτό και μετά η θερμική αγωγιμότητα εξακολουθεί να αυξάνεται αλλά με μικρότερη κλίση.

Τέλος, παρατηρείται στο δεύτερο διάγραμμα πως η θερμική αγωγιμότητα του δοκιμίου Neorlak TX- TT 100 όταν έχει αφαιρεθεί η μισή ποσότητα απορροφημένης υγρασίας, είναι λίγο μεγαλύτερη από ότι όταν το δείγμα διατηρεί όλη του την υγρασία. Το ίδιο συμβαίνει και στο δοκίμιο Isorlak για λιγότερη υγρασία. Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξηγήθηκε η ευαισθησία της διάταξης στους αστάθμητους περιβαλλοντικούς παράγοντες και συνεπώς τα αποτελέσματα θεωρούνται ικανοποιητικά και δείχνουν την τάση της αύξησης του συντελεστή  $\lambda$ .

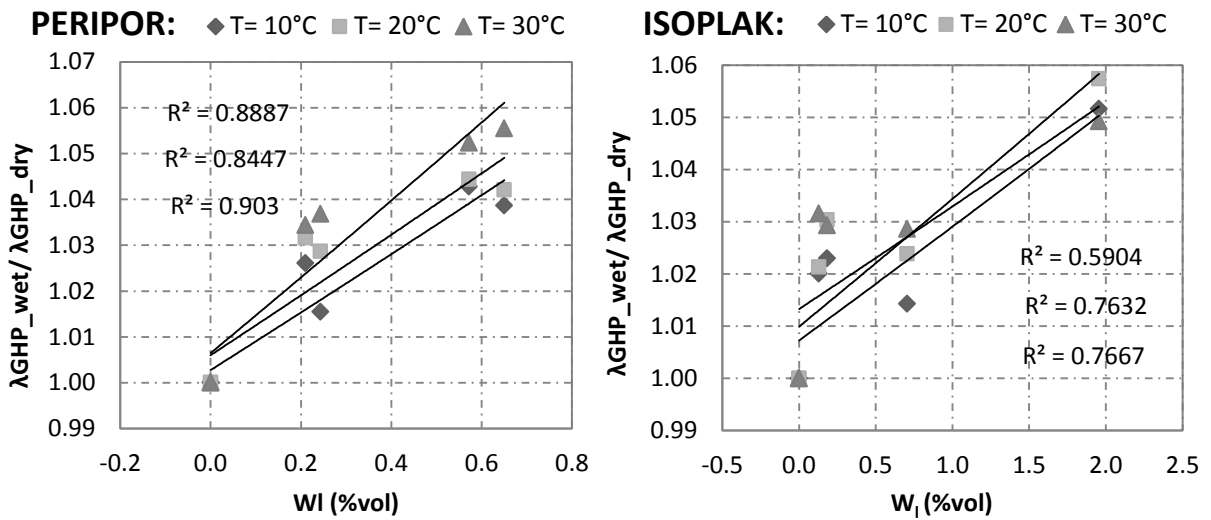
### Συσχέτιση θερμικής αγωγιμότητας

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε η επίδραση των παραμέτρων της θερμοκρασίας και της απορρόφησης ύδατος στην θερμική αγωγιμότητα των δοκιμίων για κάθε κατηγορία. Όπως παρατηρήθηκε από τις μετρηθείσες τιμές πως οι δύο συγκεκριμένοι παράγοντες μειώνουν σημαντικά την θερμομονωτική ικανότητα των υλικών, μέσω της αύξησης του συντελεστή  $\lambda$  και ανάλογα με τις ιδιότητες της κάθε κατηγορίας.

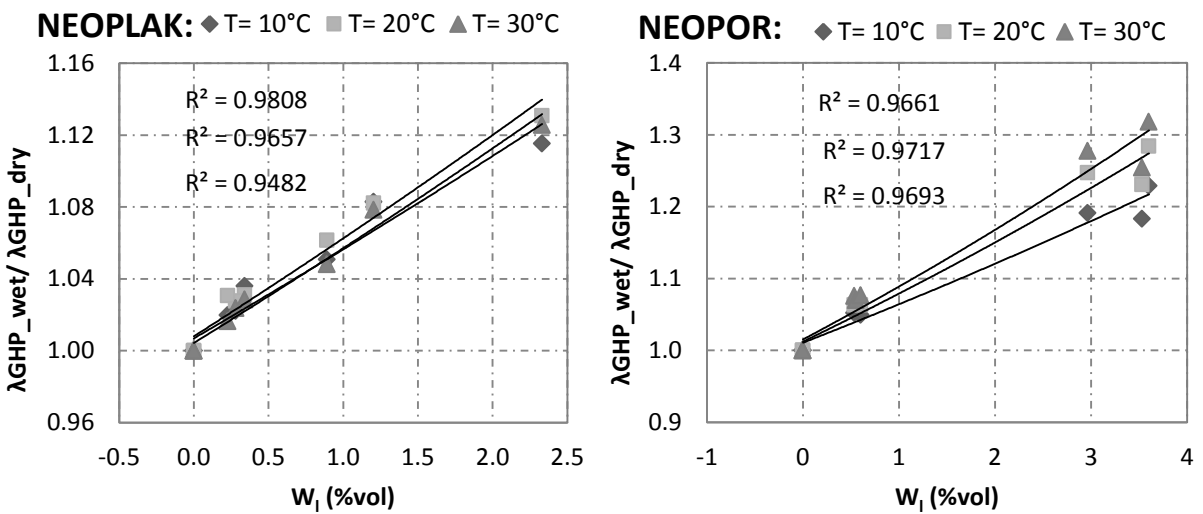
Όλα πειραματικά αποτελέσματα είναι δυνατό να εκφραστούν από μία εκθετική καμπύλη χρησιμοποιώντας την **Μέθοδο της Γραμμικής παλινδρόμησης** [31]. Ο υπολογισμός των σταθερών συντελεστών της γραμμικής εξίσωσης δεν είναι απαραίτητος καθώς ο σκοπός είναι ο προσδιορισμός του **συντελεστή συσχέτισης  $R^2$** . Πρόκειται για έναν δείκτη που λαμβάνει τιμές στο διάστημα 0- 1 και εκφράζει πόσο καλή είναι προσέγγιση των πειραματικών τιμών στην γραμμική καμπύλη αναδρομής. Ο προσδιορισμός του γίνεται απευθείας μέσω του προγράμματος Excel.



**Διάγραμμα 7.46:** Εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή λ με την περιεχόμενη υγρασία- ISOPOR



**Διάγραμμα 7.47:** Εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή λ με την περιεχόμενη υγρασία- PERIPOR, ISOPLAK



**Διάγραμμα 7.48:** Εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή λ με την περιεχόμενη υγρασία- NEOPOR, NEOPLAK

Η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα για τις κατηγορίες Neopor, Neoplak και Peripor επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια γεγονός που σημαίνει πως είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η γραμμική εξίσωση για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για ενδιάμεσα ποσοστά υγρασίας στις τρεις θερμοκρασίες. Η προσέγγιση είναι λιγότερο ακριβής για τις κατηγορίες Isopor και Isoplak λόγω των ακραίων τιμών που μειώνουν τον συντελεστή συσχέτισης.

Συνεπώς, με γνωστή την θερμική αγωγιμότητα των ξηρών δοκιμίων και για υγρά δοκίμια με ποσοστό υδαταπορρόφησης  $W_1 \leq 5\%$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εξισώσεις:

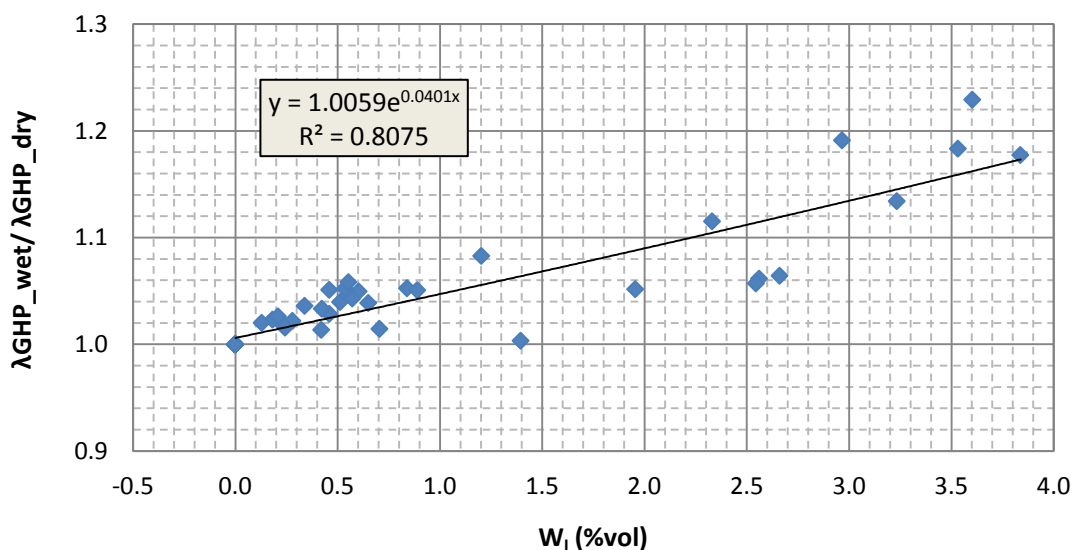
$$ISOPOR \Rightarrow \begin{cases} 10^\circ\text{C}: y = 1.0044e^{0.0312x} \\ 20^\circ\text{C}: y = 1.0094e^{0.0365x} \\ 30^\circ\text{C}: y = 1.0153e^{0.0396x} \end{cases}, \quad NEOPOR \Rightarrow \begin{cases} 10^\circ\text{C}: y = 1.0108e^{0.0516x} \\ 20^\circ\text{C}: y = 1.0123e^{0.0639x} \\ 30^\circ\text{C}: y = 1.0153e^{0.07x} \end{cases}$$

$$NEOPLAK \Rightarrow \begin{cases} 10^\circ\text{C}: y = 1.0068e^{0.048x} \\ 20^\circ\text{C}: y = 1.008e^{0.0527x} \\ 30^\circ\text{C}: y = 1.0043e^{0.0512x} \end{cases}, \quad ISOPLAK \Rightarrow \begin{cases} 10^\circ\text{C}: y = 1.0073e^{0.0214x} \\ 20^\circ\text{C}: y = 1.0099e^{0.024x} \\ 30^\circ\text{C}: y = 1.0133e^{0.0192x} \end{cases}$$

$$PERIPOR \Rightarrow \begin{cases} 10^\circ\text{C}: y = 1.0028e^{0.0623x} \\ 20^\circ\text{C}: y = 1.006e^{0.0644x} \\ 30^\circ\text{C}: y = 1.0065e^{0.0813x} \end{cases} \quad \text{όπου } y = \frac{\lambda_{GHP\_wet}}{\lambda_{GHP\_dry}}, \quad x = W_1(\%vol)$$

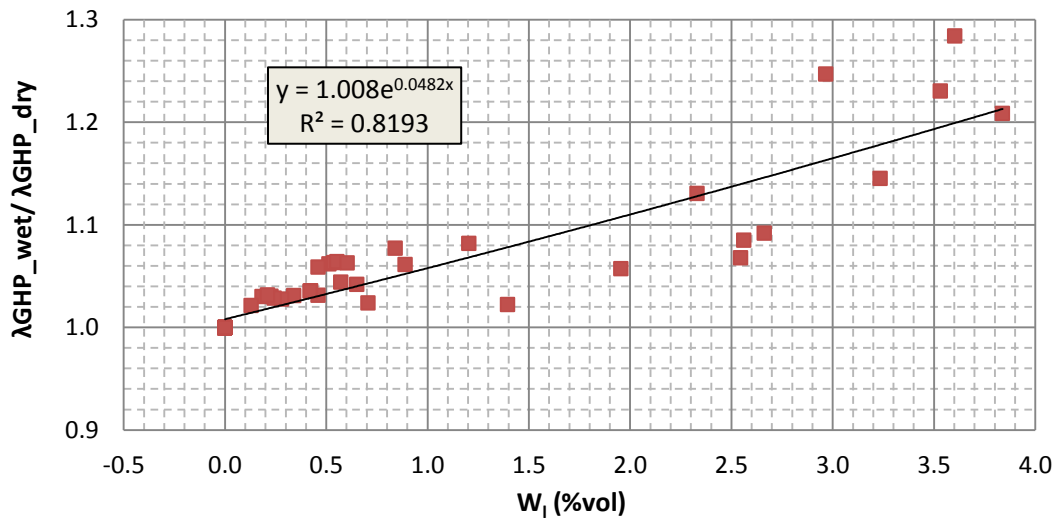
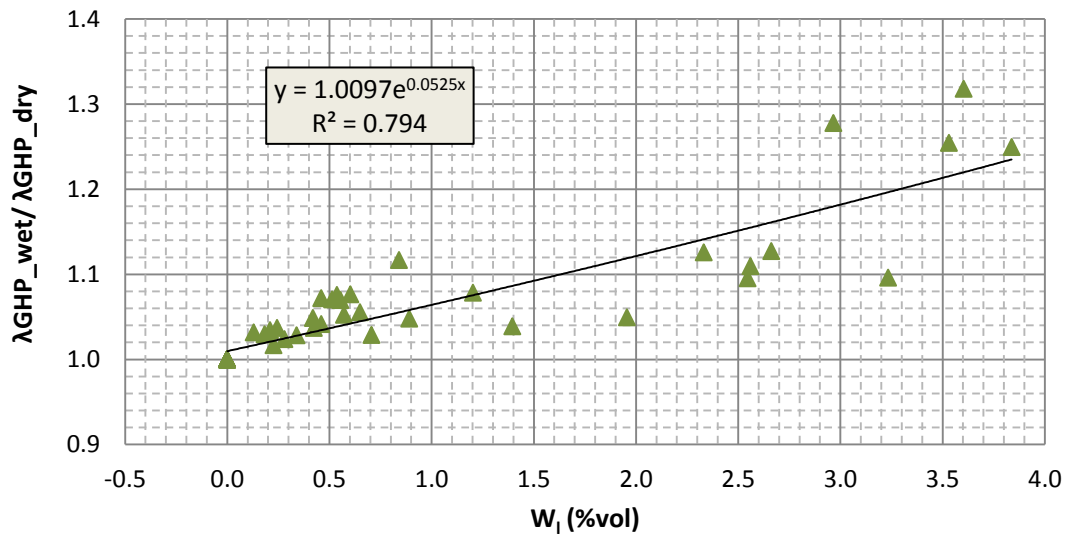
Οι παραπάνω εξισώσεις προσεγγίζουν τα αποτελέσματα των κατηγοριών συγκεκριμένα. Ο σκοπός είναι να βρεθεί μία προσεγγιστική σχέση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων συνολικά ώστε να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου δεν είναι γνωστή η κατηγορία αλλά μόνο το υλικό. Εξετάστηκε η περίπτωση της κάθε θερμοκρασίας και προέκυψαν τα γραφήματα με τα αποτελέσματα των εξισώσεων που προκύπτουν και των αντίστοιχων συντελεστών συσχέτισης.

**Συσχέτιση  $\lambda_{GHP}$  με το ποσοστό  $W_1$  (%vol) για  $T = 10^\circ\text{C}$**



**Διάγραμμα 7.49:** Συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης με την υδαταπορρόφηση για θερμοκρασία  $T = 10^\circ\text{C}$



Συσχέτιση  $\lambda_{\text{GHP}}$  με το ποσοστό  $W_1$  (%vol) για  $T= 20^\circ\text{C}$ **Διάγραμμα 7.50:** Συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης με την υδαταπορρόφηση για θερμοκρασία  $T= 20^\circ\text{C}$ Συσχέτιση  $\lambda_{\text{GHP}}$  με το ποσοστό  $W_1$  (%vol) για  $T= 30^\circ\text{C}$ **Διάγραμμα 7.51:** Συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης με την υδαταπορρόφηση για θερμοκρασία  $T= 30^\circ\text{C}$

#### 7.2.4. Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη ενότητα εξετάστηκε η απορρόφηση υγρασίας και η επίδραση της στην θερμική αγωγιμότητα ενώ δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην συσχέτιση των δύο μεγεθών και στην διαμόρφωση εξισώσεων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

Αρχικά εξετάστηκαν οι τιμές της υδαταπορρόφησης για μερική και ολική εμβάπτιση τα ως δοκιμίων διογκωμένης πολυστερίνης. Όλα τα δοκίμια EPS, ανεξάρτητα από την κατηγορία και την ομάδα στην οποία ανήκουν παρουσίασαν χαμηλές τιμές υδαταπορρόφησης κατά την ολική και μερική εμβάπτιση. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση η πλειοψηφία των δοκιμίων δεν ξεπέρασαν το επίπεδο υγρασίας WL(T)3 όπως ορίζεται από το διεθνές πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13163. Τα ποσοστά απορρόφησης υγρασίας επιβεβαιώνουν πως η ομάδα PERIPOR που υπόκειται σε ειδική επεξεργασία ώστε να είναι υδατοστεγή, εμφάνισε την λιγότερη υγρασία στην συνολική μάζα των δοκιμίων. Στην μερική εμβάπτιση όμως όπου μόνο ένα τμήμα των δοκιμίων είναι κάτω από το νερό, η κατηγορία ISOPLAK αποδείχθηκε η πιο υδρόφοβη εμφανίζοντας τις μικρότερες τιμές. Ωστόσο σύμφωνα και με το διάγραμμα 7.8 στην πλειοψηφία τους οι ομάδες Eps είχαν αντίστοιχα αποτελέσματα συγκράτησης ύδατος στο εσωτερικό τους για τις δύο εμβάπτισεις. Σε επίπεδο ομάδων, αξίζει να σημειωθεί πως την μέγιστη υγρασία την απορρόφησε η ομάδα ISOPOR 30 και στις δύο περιπτώσεις, ενώ την ελάχιστη η ομάδα PERIPOR AM 250 στην ολική και η ομάδα ISOPLAK BT 150 στην μερική οι οποίες είναι και οι πυκνότερες ομάδες της κατηγορίας τους.

Επίσης, ενδιαφέρον παρουσίασε η εξάρτηση της υγρασίας που απορρόφησαν τα δοκίμια ανάλογα με το πάχος τους. Η μελέτη έγινε μόνο για τα δοκίμια ISOPOR, τα συμπεράσματα όμως μπορούν να γενικευθούν για όλες τις κατηγορίες. Στην ολική εμβάπτιση που τα δοκίμια είναι τοποθετημένα ολόκληρα μέσα στο νερό, η υγρασία εισχωρούσε από μεγαλύτερη επιφάνεια στα πιο μεγάλα δοκίμια και οδήγησε σε υψηλότερες τιμές  $W_{it}(\%vol)$ . Αντίθετα, στην μερική εμβάπτιση το πρότυπο ορίζει πως τα δοκίμια είναι βυθισμένα έτσι ώστε η επιφάνεια που είναι κάτω από την επιφάνεια του ύδατος να βρίσκεται σε απόσταση 10mm από αυτήν. Άρα, είναι κατανοητό πως το συνολικό πάχος του δοκιμίου δεν είχε επίδραση στο μετρούμενο μέγεθος  $W_{ip}(kg/m^2)$  που λαμβάνει υπόψη μόνο την βυθισμένη επιφάνεια ενώ επιδρά στην έκφραση της μερικής υγρασίας στην συνολική μάζα των υλικών,  $W_{ip}(\%vol)$ .

Ένα τρίτο σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται εκθετικά με την υδαταπορρόφηση για το σύνολο των δοκιμίων. Η εκθετική καμπύλη προσεγγίζει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα για το σύνολο των δοκιμίων για κάθε κατηγορία αλλά και για κάθε ομάδα ξεχωριστά. Συνεπώς, συμπεραίνεται πως η εκθετική προσέγγιση είναι η καλύτερη για να περιγράψει την σχέση της θερμικής αγωγιμότητας με την περιεχόμενη υγρασία- σύμφωνα με τα τελικά συγκεντρωτικά διαγράμματα που προέκυψαν για κάθε θερμοκρασία- για οποιοδήποτε δείγμα διογκωμένης πολυστερίνης ακόμη και αν δεν είναι γνωστή η ομάδα ή η κατηγορία που ανήκει. Επίσης η μέθοδος Guarded Hot Plate επιβεβαίωσε την γραμμική εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την θερμοκρασία για τα ξηρά δοκίμια ενώ με βάση τα αποτελέσματα η υδαταπορρόφηση δεν ήταν αρκετή ώστε να μεταβάλει την εξάρτηση που παρέμεινε γραμμική παρόλη την αύξηση των τιμών του συντελεστή λ.

Η επίδραση της φαινόμενης πυκνότητας στην θερμική αγωγιμότητα αποδείχθηκε σημαντική τόσο στην υδαταπορρόφηση όσο και στην θερμική αγωγιμότητα. Γενικά παρατηρήθηκε πως η πυκνότητα περιορίζει την εισχώρηση της υγρασίας με μερικές εξαιρέσεις, κυρίως κατά την ολική εμβάπτιση. Τα αποτελέσματα της μεθόδου GHP συναρτήσεως της πυκνότητας παρατέθηκαν συγκριτικά με την θεωρητική καμπύλη των ξηρών δοκιμίων που προκύπτει από την εξίσωση (3.6) και για θερμοκρασία 10°C. Σε τρεις από τις συνολικά πέντε κατηγορίες EPS οι πειραματικές τιμές έχουν μικρή

απόκλιση από τις θεωρητικές ενώ μερικές διαφορές στην κατηγορία ISOPOR επεξηγούνται από την ύπαρξη ανακυκλωμένου υλικού στην μάζα των δοκιμίων. Ωστόσο, παρατηρήθηκε πως οι καινούριες κατηγορίες NEOPOR και NEOPLAK που κυκλοφορούν στην αγορά και που περιέχουν μόρια γραφίτη ώστε να εμποδίζεται η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, επιτυγχάνουν πολύ μικρότερες τιμές σε σχέση με την εξίσωση ακόμα και για θερμοκρασία 30°C. Όσον αφορά τις μετρήσεις των υγρών δοκιμίων, προφανώς οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας των ολικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων προέκυψαν υψηλότερες από των μερικώς εμβαπτισμένων δοκιμίων με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγαλύτερη διαφορά από την θεωρητική καμπύλη. Παρόλα αυτά, οι εμπλουτισμένες με γραφίτη κατηγορίες εξακολουθούν να διατηρούν χαμηλότερες τιμές μετά τη μερική εμβάπτιση ενώ η κατηγορία NEOPLAK που περιέχει περισσότερο γραφίτη, εμφάνισε χαμηλές τιμές για 10°C ακόμη και μετά την ολική εμβάπτιση.

Παραπάνω αναφέρθηκε η επίδραση της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της φαινόμενης πυκνότητας στην θερμική αγωγιμότητα των δειγμάτων EPS. Ωστόσο έχει ενδιαφέρον να ερευνηθεί εάν υπάρχει εξάρτηση της ποσοστιαίας μεταβολής του μεγέθους λόγω της υδαταπορρόφησης στην μερική και στην ολική εμβάπτιση σε κάθε θερμοκρασία.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απορρόφησης υγρασίας στην ολική εμβάπτιση και της ποσοστιαίας μεταβολής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στις τρεις θερμοκρασίες για όλες τις ομάδες εκτός της ICF, με βάση τις μετρήσεις που έγιναν με την μέθοδο Guarded Hot Plate.

		Ποσοστιαία μεταβολή λ (%)			
		Μέσο $W_{lt}$ (%vol)	T= 10°C	T= 20°C	T= 30°C
ISOPOR	EPS 30	3.838	17.73	20.86	24.92
	EPS 60	3.234	13.39	14.54	9.58
	EPS 80	1.395	0.32	2.24	3.87
	EPS 100	2.662	6.40	9.19	12.72
	EPS 150	2.561	6.14	8.51	10.95
	EPS 200	2.546	5.70	6.79	9.51
NEOPOR	THP 80	2.966	19.10	24.70	27.76
	TX- TT 100	3.532	18.32	23.05	25.44
	BT 150	3.603	22.91	28.43	31.80
NEOPLAK	TX- TT 100	2.331	11.52	13.07	12.56
	BT 150	1.203	8.27	8.21	7.84
	AM 200	0.890	5.07	6.14	4.80
ISOP LAK	TX- TT 120	1.955	5.16	5.74	4.92
	BT 150	0.706	1.42	2.38	2.86
PERIP OR	AM 200	0.650	3.87	4.21	5.55
	AM 250	0.572	4.27	4.44	5.23

**Πίνακας 7.2:** Ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή λ των δοκιμίων EPS- ολική εμβάπτιση

Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές, για την ίδια ομάδα, η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή  $\lambda$  είναι σχετικά ανάλογη της ποσοστιαίας απορρόφησης υγρασίας. Ωστόσο για το σύνολο των ομάδων η μεταβολή του  $\lambda$ , δεν είναι ανάλογη της ποσοστιαίας απορρόφησης υγρασίας μόνο αλλά εξαρτάται και από τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν κάθε ομάδα καθώς και την πυκνότητα του υλικού. Για παράδειγμα σε κοντινές τιμές  $W_{it}$  η μεταβολή του  $\lambda$  δεν είναι αντίστοιχη, όπως π.χ. οι ομάδες ISOPOR EPS 200 και NEOPLAK TX-TT 100, ενώ παρουσιάζουν παραπλήσια απορρόφηση υγρασίας, 2.546% και 2.331% αντίστοιχα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταβλήθηκε κατά 5.70% και 11.52% στην χαμηλή θερμοκρασία.

Οι ομάδες ISOPOR EPS 80 και ISOPLAK BT 150 παρουσίασαν την μικρότερη αύξηση θερμικής αγωγιμότητας ενώ συνολικά η κατηγορία PERIPOR που απορρόφησε και την λιγότερη υγρασία είχε σαν αποτέλεσμα την χαμηλότερη μεταβολή  $\lambda$ . Αντίθετα, την μεγαλύτερη μεταβολή την παρουσίασε η ομάδα Neopor AM 200. Ενώ η δεύτερη ομάδα είχε αντίστοιχα την υψηλότερη τιμή  $W_{it}$ , δεν ισχύει το αντίστοιχα η χαμηλότερη τιμή στην ομάδα ISOPLAK BT 150.

Εκτός των άλλων, η ποσοστιαία μεταβολή των τιμών θερμικής αγωγιμότητας των κατηγοριών Peripor, Neopor και της ομάδας Isoplak BT 150, αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως συνέβη και στα δοκίμια των ομάδων Isopor. Όσον αφορά την ομάδα Isoplak TX- TT 120 και όλες τις ομάδες Neoplak, διαπιστώνουμε ότι στους 20°C η ποσοστιαία μεταβολή είναι υψηλότερη συγκριτικά με εκείνη στους 10°C, όμως μειώνεται για τους 30°C.

Είναι αξιοσημείωτη η υψηλή αύξηση που παρουσίασε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των δειγμάτων κατηγορίας NEOPOR, με την απορρόφηση υγρασίας. Οι κατηγορίες NEOPOR και NEOPLAK επιτυγχάνουν σε στεγνά υλικά τιμές  $\lambda = 0.030 \pm 0.001$  W/mK, όμως μόνο η πρώτη κατηγορία παρουσιάζει σημαντική αύξηση του συντελεστή που έφτασε και το 28% της αρχικής τιμής. Τέλος, να σημειωθεί πως η ομάδα **NEOPLAK AM 200** είναι εκείνη που παρουσίασε την χαμηλότερη τιμή συντελεστή μετά την ολική εμβάπτιση των δοκιμίων.

Ομοίως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απορρόφησης υγρασίας στην μερική εμβάπτιση και η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Είναι προφανές από τα αποτελέσματα πως η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται λιγότερο συγκριτικά με την ολική εμβάπτιση όπου τα δοκίμια έχουν απορροφήσει περισσότερη υγρασία. Γενικά, φαίνεται πως και στην περίπτωση της μερικής εμβάπτισης, υπάρχει μια σχετική θετική αναλογία της ποσοστιαίας αύξησης του συντελεστή  $\lambda$  με την περιεχόμενη υγρασία, με λίγες εξαιρέσεις. Επίσης σε όλες τις ομάδες εκτός από εκείνες που ανήκουν στην κατηγορία NEOPLAK, ισχύει η αύξηση της μεταβολής για μεγαλύτερη θερμοκρασία. Συνολικά, η κατηγορία NEOPOR παρουσιάζει σημαντική υδαταπορρόφηση και αντίστοιχα σημαντική μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας. Παρόλα αυτά, η ομάδα ISOPOR EPS 30 ήταν εκείνη με την μεγαλύτερη μεταβολή σε αντίθεση με την ολική εμβάπτιση, ενώ την μικρότερη την εμφανίζει ξανά η ομάδα NEOPLAK AM 200 και για τις τρεις θερμοκρασίες. Συνεπώς, συμπεραίνεται με ασφάλεια πως η συγκεκριμένη ομάδα είναι η πιο ανθεκτική στις μεταβολές της θερμικής αγωγιμότητας λόγω της παρουσίας νερού στο εσωτερικό του υλικού.

Αντίστοιχα με προηγούμενες, για το σύνολο των ομάδων η μεταβολή του  $\lambda$  δεν είναι ανάλογη της ποσοστιαίας απορρόφησης υγρασίας μόνο αλλά εξαρτάται και από τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν κάθε ομάδα καθώς και την πυκνότητα του υλικού. Για παράδειγμα σε κοντινές τιμές  $W_{in}$  η μεταβολή του  $\lambda$  δεν είναι αντίστοιχη, όπως π.χ. οι ομάδες ISOPOR EPS 100 και NEOPOR THP 80, ενώ έχουν κοντινές τιμές υγρασίας, 0.514% και 0.536% αντίστοιχα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταβλήθηκε κατά 3.97% και 5.22%.

		Ποσοστιαία μεταβολή λ (%)			
		Μέσο $W_{ip}$ (%vol)	T= 10°C	T= 20°C	T= 30°C
ISOPOR	EPS 30	0.839	5.25	7.72	11.68
	EPS 60	0.461	2.84	3.15	4.13
	EPS 80	0.425	3.32	3.58	3.68
	EPS 100	0.514	3.97	6.21	7.03
	EPS 150	0.460	5.11	5.88	7.18
	EPS 200	0.419	1.33	3.54	4.86
NEOPOR	THP 80	0.536	5.22	6.34	7.56
	TX- TT 100	0.555	<b>5.82</b>	<b>6.43</b>	<b>6.97</b>
	BT 150	0.602	4.94	6.31	7.65
NEOPLAK	TX- TT 100	0.340	3.60	3.10	2.84
	BT 150	0.279	2.19	2.76	2.37
	AM 200	0.227	<b>1.97</b>	<b>3.05</b>	<b>1.64</b>
ISOP LAK	TX- TT 120	0.184	2.30	3.03	2.93
	BT 150	0.130	2.01	2.13	3.16
PERIP OR	AM 200	0.243	1.55	2.86	3.68
	AM 250	0.211	2.61	3.16	3.44

**Πίνακας 7.3:** Ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή λ των δοκιμών EPS- μερική εμβάπτιση

### 7.3. Αξιολόγηση της πειραματικής διαδικασίας και συμπεράσματα των μετρήσεων

Σε αυτήν την ενότητα συγκεντρώνονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα σχετικά με την διαδικασία του πειράματος, τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις.

#### **Πειραματική διαδικασία**

Η εμβάπτιση των δοκιμίων και η κατασκευή των δεξαμενών δεν αποτέλεσε δύσκολη διαδικασία. Παρόλα αυτά είναι σημαντική η διατήρηση της στάθμης του νερού στις τιμές που ορίζονται από το διεθνές πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12087. Τον χειμώνα που ξεκίνησε το πείραμα δεν υπήρχε σημαντική επιφανειακή εξάτμιση, ενώ το καλοκαίρι που ο καιρός είναι θερμότερος η επιφανειακή εξάτμιση ήταν μεγάλη με αποτέλεσμα να μειώνεται η στάθμη και να απαιτείται καθημερινή συμπλήρωση ύδατος στις δεξαμενές.

Όσον αφορά την συσκευασία των δοκιμίων για την διατήρηση υγρασίας, καταλληλότερη θεωρήθηκε η σακούλα συρρίκνωσης με χρήση θερμοκολλητικής μηχανής για την κόλληση των ελεύθερων ακμών. Θέλει ιδιαίτερη προσοχή κατά την θερμοκόλληση διότι η πίεση που ασκούν μερικές διατάξεις στα συσκευασμένα δοκίμια μπορεί να προκαλέσει αστοχία της συσκευασίας. Η υγρασία που μένει δεν απορροφάται και συγκεντρώνεται στις ακμές αποτελεί ένα ελάχιστο ποσοστό της συνολικής υγρασίας και δεν μεταβάλλει τις μετρήσεις.

#### **Διατάξεις μόνιμης μετάδοσης θερμότητας**

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτών των μεθόδων είναι πως μετρούν την θερμική αγωγιμότητα σε όλη την μάζα του υλικού. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για το σύνολο των μετρήσεων θερμικής αγωγιμότητας σε ξηρά και υγρά δοκίμια ήταν η Guarded Hot Plate διότι έχει το μικρότερο σφάλμα. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αποδείχθηκε πως η μέθοδος Heat Flow εμφανίζει απόκλιση περίπου 5% συγκριτικά με την GHP ενώ το ποσοστό είναι μικρότερο για μετρήσεις σε ξηρά δοκίμια.

Παρατηρήθηκε πως όσο περισσότερη υγρασία είχαν απορροφήσει τα υλικά, τόσο μεγαλύτερη χρονική διάρκεια είχε η λήψη των μετρήσεων διότι χρειαζόταν περισσότερος χρόνος για να επιτευχθεί ισορροπία στο εσωτερικό. Επίσης, η αύξηση της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας επηρέασε αρνητικά στην διάταξη GHP καθώς οι πλάκες ψύξης δεν μπορούσαν να ψυχθούν αρκετά ώστε να προκύψουν τιμές του συντελεστή λ για θερμοκρασία 10°C.

#### **Διατάξεις μεταβατικής μετάδοσης θερμότητας**

Οι συγκεκριμένες διατάξεις εκτελούν μόνο επιτόπιες και επιφανειακές μετρήσεις και για τον λόγο αυτό συνιστάται η πραγματοποίηση τριών τουλάχιστον μετρήσεων σε ένα δείγμα και υπολογισμός της μέσης τιμής. Η διάταξη Ctmeter αποδείχθηκε κατάλληλη για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας μόνο των ξηρών δοκιμίων EPS διότι η υδαταπορρόφηση επηρεάζει πολύ τις μετρήσεις με συνέπεια να προκύπτουν πολύ υψηλές τιμές σε σχέση με της GHP. Η πειραματική τεχνική ISOMET δεν θεωρείται αξιόπιστη καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παρουσίασε μεγάλη απόκλιση από την GHP.

### **Υδαταπορρόφηση**

Η διογκωμένη πολυστερίνη ανήκει στην κατηγορία των υδρόφοβων μονωτικών υλικών. Η μακροπρόθεσμη μερική εμβάπτιση χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της απορρόφησης νερού που προκαλείται από την μακροπρόθεσμη έκθεση ενός υλικού σε συνθήκες υγρασίας περιβάλλοντος. Η ολική εμβάπτιση εξετάστηκε ώστε να διαπιστωθεί το συνολικό μέγεθος νερού που μπορεί να απορροφήσει το εξεταζόμενο υλικό και την επίπτωση που έχει στην θερμική απόδοση του υλικού.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την υδροφοβικότητα του EPS αφού κανένα δοκίμιο δεν ξεπέρασε το ανώτατο όριο του 5% υγρασία στον συνολικό όγκο του ενώ στην μερική εμβάπτιση οι τιμές υδαταπορρόφησης δεν ξεπέρασαν το 1% του συνολικού όγκου. Επίσης, διαπιστώθηκε θετική εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με το πάχος των δοκιμίων στην ολική εμβάπτιση. Για μεγαλύτερο πάχος υλικού, αυξανόταν ανάλογα και η απορροφημένη υγρασία, ενώ δεν παρατηρήθηκε ίδια εξάρτηση στην μερική εμβάπτιση όπου στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια. Τέλος, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η υδαταπορρόφηση ήταν μικρότερη στα δοκίμια με μεγαλύτερη πυκνότητα καθώς περιοριζόταν από την πολύπλοκη εσωτερική δομή του υλικού.

### **Θερμική αγωγιμότητα**

Η μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε με βάση το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας, την θερμοκρασία και την φαινόμενη πυκνότητα. Οι μετρήσεις έγιναν για τα δοκίμια EPS σε ξηρή και υγρή κατάσταση και συνοψίζονται στα εξής:

- Ο συντελεστής λ αυξάνεται εκθετικά με την υδαταπορρόφηση. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης, προέκυψαν γενικευμένες σχέσεις που ισχύουν για όλες τις κατηγορίες διογκωμένης πολυστερίνης με συντελεστή συσχέτισης  $R= 0,8$  για τις τρεις θερμοκρασίες.
- Η θερμοκρασία και η θερμική αγωγιμότητα έχουν γραμμική εξάρτηση που την διατηρούν ακόμη και μετά την μερική και την ολική εμβάπτιση.
- Η θεωρητική καμπύλη που ορίζεται από το πρότυπο EN 13163 για ξηρά δοκίμια προσεγγίζει ικανοποιητικά μερικές από τις κατηγορίες EPS. Ωστόσο για τα νέα υλικά που είναι εμπλουτισμένα με γραφίτη υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών. Συνεπώς θα πρέπει να θεσπιστεί νέα μαθηματική εξίσωση που να εκφράζει την εξάρτηση των βελτιωμένων υλικών EPS με την φαινόμενη πυκνότητα.
- Στα εμβαπτισμένα δοκίμια παρατηρήθηκε γενικότερα μείωση της θερμικής αγωγιμότητας με την ξηρή φαινόμενη πυκνότητα για την ίδια κατηγορία υλικών. Είναι αναμενόμενο, καθώς όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στα πυκνότερα δείγματα η υγρασία δεν εισέρχεται με την ίδια ευκολία με αποτέλεσμα να λαμβάνει χαμηλότερες τιμές και να επηρεάζει αντίστοιχα τον συντελεστή λ.

Τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να χαρακτηριστούν ικανοποιητικά και είναι ιδιαίτερα σημαντική η εξαγωγή των γενικευμένων σχέσεων που στηρίχτηκαν σε αυτά. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια στην προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας στις κτιριακές δομές παρατηρείται συνεχή βελτίωση της θερμικής απόδοσης της διογκωμένης πολυστερίνης κυρίως με την χρήση διαφόρων υλικών στο εσωτερικό του EPS. Για τα καινούρια υλικά, πολύ πιθανόν να ισχύουν νέες σχέσεις όσο αφορά την υδαταπορρόφηση και να παρουσιάζουν διαφορετική εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με την θερμοκρασία και την φαινόμενη πυκνότητα.

### III) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Agoua E., Allognon-Houessou E., Adjovi E., Togbedji B., Thermal conductivity of composites made of wastes of wood and expanded polystyrene, *Construction and Building Materials* 41 (2013) 557–562
- [2] ASHRAE, Handbook- Fundamentals (SI), Chapter 22, Thermal and Moisture Control in Insulated Assemblies—Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1997
- [3] Binder A., Zirkelbach D., Künzel H., Test Method To Quantify The Wicking Properties Of Porous Insulation Materials Designed To Prevent Interstitial Condensation, *AIP Conference Proceedings* (2010) Vol. 1254 Issue 1, 242
- [4] Dominguez-Munoz F., Anderson B., Cejudo-López J. M., Carrillo-Andrés A., Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials, *Energy and Buildings* 42 (2010) 2159–2168
- [5] EN 13163:2001, Thermal insulation products for buildings- Factory made products of expanded polystyrene (EPS)- Specification, European Committee for Standardisation, 2001
- [6] EN 12087:1997, Thermal insulating products for building applications- Determination of long term water absorption by immersion, European Committee for Standardisation, 1997
- [7] FprEN 1745:2011 E, Masonry and products- Methods for determining thermal properties,, European Committee for Standardisation, 2011
- [8] Gnip I, Vėjelis S., Vaitkus S., Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10oC and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50oC, *Energy and Buildings*, 52 (2012) 107-111
- [9] Gnip I.Y, Kersulis V., Vėjelis S., Vaitkus S., Water absorption of expanded polystyrene boards, *Polymer Testing* 25 (2006) 635-641
- [10] Heinz R. Trechel, Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes, ASTM Manual No. 40, Astm Manual Series, Philadelphia, 2001
- [11] Heinz R. Trechel, Moisture Control in buildings, ASTM Manual No. 18, Astm Manual Series, Ann Arbor, 1994
- [12] ISO 8301, Thermal Insulation– Determination of Steady-state Thermal Resistance and Related Properties– Heat Flow Meter Apparatus, International Organization for Standardisation, 1991
- [13] ISO 8302, Thermal Insulation– Determination of Steady-state Thermal Resistance and Related Properties– Guarded Hot Plate Apparatus, International Organization for Standardisation, 1991
- [14] Jerman M., Černý R., Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials, *Energy and Buildings* 53 (2012) 39–46
- [15] Κακάτσιος Ξ., Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Συμεών, Αθήνα 2006
- [16] Καράλης Δημήτρης, Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές Αισθητήρων Θερμοκρασίας, Διπλωματική Εργασία, Χανιά 2010



- [17] Karamanos A., Hاديarakou S., Papadopoulos A.M., The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1402–1411
- [18] Korjenic A., Petránek V., Zach J., Hroudová J., Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2518–2523
- [19] Κορωνάιος Αιμ. Γ., Πουλάκος Ι. Γ., Τεχνικά υλικά, Τόμος 2, Αθήνα 2005
- [20] Mahlia T.M.I., Taufiq B.N., Ismail, Masjuki H.H., Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall, *Energy and Buildings* 39 (2007) 182–187
- [21] Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 539–552
- [22] Ochs F., Müller-Steinhagen H., Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials, NATO Advanced Study Institute on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption (TESSEC), Izmir, Cesme, 2005
- [23] Οδηγός Εξοικονόμησης Ενέργειας Μέσω Θερμομόνωσης, ΚΑΠΕ, 1999,
- [24] Ojamen T., Kokko E., Moisture Performance Analysis of EPS Frost Insulation, *Insulation Materials Testing and Applications*, 3<sup>rd</sup> Vol. pages 442-455, Ann Arbor, 1997
- [25] Ossa A., Romo M.P., Confining Stress Influence on EPS Water Absorption Capability, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 35 (2012), 132-137
- [26] Παπαδόπουλος Α.μ., Χαδιαράκου Σ., Καραμάνος Α., Η Επίδρασή της Υγρασίας στον Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας σε Θερμομονωτικά Προϊόντα Πετροβάμβακα, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008
- [27] Pavlík Z., Černý R., Determination of Moisture Diffusivity as a Function of Both Moisture and Temperature, *International Journal of Thermophysics* (2012), Vol. 33, 1704-1714
- [28] Pavlík Z., Černý R., Hygrothermal performance study of an innovative interior thermal insulation system, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1941–1946
- [29] Pavlík Z., Černý R., Experimental assessment of hygrothermal performance of an interior thermal insulation system using a laboratory technique simulating on-site conditions, *Energy and Buildings* 40 (2008) 673–678
- [30] Πυρομάλης Δ., Σημειώσεις για το Εργαστήριο: «Συστήματα Συλλογής Δεδομένων», Αθήνα 2004
- [31] Σιμόπουλος Σ.Ε., Μετρήσεις τεχνικών Μεγεθών, Β Έκδοση, Αθήνα 1989
- [32] Στεργιούλης Σ., Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Δομικών Υλικών με Βάση Μάρμαρο και Υλικά Αλλαγής Φάσης, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2008
- [33] Wulf R., Gerald B., Gross U., Intercomparison of Insulation Thermal Conductivities Measured by Various Methods, *International Journal of Thermophysics* 28 (2007) 1679–1692
- [34] Willix J., Lovatt S.J., Amos N.D., Additional Thermal Conductivity Values of Foods Measured by a Guarded Hot Plate, *Journal of Food Engineering* 37 (1998) 159-174
- [35] Χουτάλας Θ.Δ., Φαινόμενα Μεταφοράς και Εφαρμογές Αυτών, Β Έκδοση, Αθήνα 1989
- [36] Applied Precision, ISOMET model 2104, user's guide

- [37] CSTB, Determination of thermal conductivity dynamic method, CTmetre, user's guide.
- [38] TAURUS instruments GmbH, Guarded Hot Plate, Documentation TLP 300DT, 2009
- [39] Australian Institute of Architects, Information HandBook: Condensation in Buildings, Australian Building Codes Board, 2011, <http://www.abcb.gov.au/education-events-resources/publications>
- [40] EPS Industry Alliance, Moisture Resistance, <http://www.epsindustry.org/building-construction>
- [41] NEWPORT Electronics, Inc., Thin-Film Heat Flux Sensors- Ideal for Precise Heat Transfer Measurement, <http://www.newportus.com/ppt/HFS.html>
- [42] Πανελλήνιος Σύνδεσμος Διογκωμένης Πολυστερίνης, Περιγραφή διογκωμένης πολυστερίνης, <http://www.epshellas.com/index.php/eps>
- [43] Peltier Thermoelectric Coolers, Φαινόμενο Peltier, <http://new-electronics.gr/peltier>
- [44] ΡΙΖΑΚΟΣ Γ.Κ. ΑΒΕΤΕ, Κατηγορίες διογκωμένης πολυστερίνης <http://www.rizakos.gr/gr>
- [45] RS Components Ltd., PWM Programmable PID Controller, <http://uk.rs-online.com/web/p/peltier-module-controllers/4901553/>

