



ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Ευάγγελος Τσίμης

Επιβλέπων

Αστέριος Μπακόλας

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022

~ Αυτή η σελίδα έμεινε σκόπιμα λευκή ~

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All right reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση, ή διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας (ή τμήματος αυτής) για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπούς μη κερδοσκοπικούς, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση της αναφοράς της πηγής προέλευσης και της διατήρησης του παρόντος μηνύματος. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέπων της εργασίας μου κ. Α. Μπακόλα, για το πολύ ενδιαφέρον θέμα με το οποίο μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ, αλλά και για την γνώση και στήριξη που μου παρείχε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας μου. Οφείλω να ευχαριστήσω τη Μ. Καρόγλου για την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε. Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Δ. Κολαΐτη για την καθοριστική βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας αλλά και τους Α. Κόκλα, Χ. Μαυράκη και Χ. Παλληκαράκη για τη φιλοξενία τους στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ και την πολύτιμη συμβολή τους στην εκτέλεση των πειραμάτων. Δε μπορώ να μην ευχαριστήσω τον Σ. Καλαφάτη, με τον οποίο υπήρξα συνοδοιπόρος σε μια παράλληλη πορεία σχεδόν ενός έτους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένειά μου για τη στήριξη τους.

~ Αυτή η σελίδα έμεινε σκόπιμα λευκή ~

Περίληψη

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές ακόμη και λίγων βαθμών Κελσίου μπορούν να προκαλέσουν μόνιμες φθορές στα μάρμαρα: ελάττωση των μηχανικών αντοχών, απώλεια υλικού από την επιφάνεια τους, μόνιμη παραμόρφωση. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υποστούν σημαντική φθορά μνημεία ανεκτίμητης αξίας. Λόγω της κλιματικής αλλαγής ο κίνδυνος τέτοιου είδους καταστροφών γίνεται όλο και μεγαλύτερος. Στη βιβλιογραφία έχει γίνει τεκμηρίωση της φθοράς που προκαλείται από την επίδραση της θερμότητας στα μάρμαρα και έχουν προταθεί αντίστοιχοι μηχανισμοί θερμικής υποβάθμισης του μαρμάρου. Κυριότερη αιτία θεωρείται η ανισότροπη θερμική διαστολή των κρυστάλλων ασβεσίτη, που αποτελεί το βασικό ορυκτό του μαρμάρου. Η ανισοτροπία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διακένων μεταξύ των κόκκων, παραμενουσών τάσεων στο εσωτερικό του υλικού και ελάττωση της συνοχής του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δοκίμια μαρμάρου Διονύσου υποβλήθηκαν σε θερμικές καταπονήσεις με κύκλους θέρμανσης-ψύξης και σε όλη τη διάρκεια παρακολούθηθηκε και καταγράφηκε η θερμοκρασία των δοκιμίων στο κέντρο τους, στην επιφάνεια αλλά και στον αέρα γύρω τους. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας έδωσαν πληροφορίες σχετικά με τη μετάδοση θερμότητας εντός του μαρμάρου Διονύσου, την απόκριση σε εξωτερικές μεταβολές θερμοκρασίας, τον απαιτούμενο χρόνο για να φτάσει το σύστημα σε θερμική ισορροπία.

Έπειτα κατασκευάστηκε μοντέλο μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό μαρμάρου Διονύσου, πεπερασμένων στοιχείων σε περιβάλλον ANSYS, με οριακές συνθήκες α) την επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου στη μία περίπτωση και β) τη συναγωγή με το περιβάλλον στη δεύτερη περίπτωση. Το μοντέλο ελέγχθηκε και για τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις θερμοκρασίας από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, ως οριακές συνθήκες και επιδιώκοντας προσέγγιση της πειραματικά μετρημένης θερμοκρασίας στο κέντρο των δοκιμίων.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι με χρήση της επιφανειακής θερμοκρασίας ως οριακής συνθήκης το μοντέλο μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά τη θερμοκρασία στο κέντρο των δοκιμίων κατά τη διάρκεια απλών θερμικών μεταβολών θέρμανσης-ψύξης. Η ακρίβεια πρόβλεψης ελαττώνεται σε απότομες μεταβολές των οριακών συνθηκών. Κατά την προσομοίωση θερμοκρασιακού προγράμματος επαναλαμβανόμενων κύκλων ταχείας θέρμανσης-ψύξης, διαπιστώθηκε ανεπάρκεια του μοντέλου. Στη συνέχεια η προσομοίωση επαναλήφθηκε με οριακή συνθήκη τη συναγωγή με το περιβάλλον. Σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα πρόβλεψης της θερμοκρασίας στο κέντρο του δοκιμίου ήταν ικανοποιητικά ενώ οι προβλέψεις για την θερμοκρασία της επιφάνειας δεν ήταν επαρκώς ακριβής.

Λέξεις κλειδιά: μάρμαρο Διονύσου, μεταφορά θερμότητας, θερμική καταπόνηση, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, προσομοίωση

Abstract

Temperature changes of even a few degrees Celsius can cause permanent damage to marbles: reduction of mechanical properties, exfoliation, permanent deformation. Invaluable monuments can suffer considerable damage in this way. Due to climate change, the risk of such problems is increasing. The deterioration caused by the effect of heat on marbles has been documented in the scientific literature and respective mechanisms of marble thermal degradation have been proposed. The main cause of thermal degradation of marble is considered to be the anisotropic thermal expansion of calcite crystals, the main mineral marble is composed of. This anisotropy results in the partial decohesion of calcite grains and a non-zero residual stress state inside the material.

In this thesis, samples of Dionysos marble were subjected to thermal treatment with heating-cooling cycles. Throughout the entire process the temperature of the samples center, surface and surrounding air was monitored and recorded. The temperature measurements provided information about the heat transfer within the marble, the response to external temperature changes and time required for the system to reach thermal equilibrium.

Then a finite element model of heat transfer inside Dionysos marble was created in ANSYS simulation software. The boundary conditions used where: a) the surface temperature of the marble and b) convection with the surrounding air. The model was tested for both cases using the temperature measurements from the previously done experiments. Surface and air temperature where respectively used as boundary conditions aiming to approximate the experimentally measured temperature at the center of the specimens.

The simulations showed that using the surface temperature as a boundary condition the model can sufficiently predict the temperature at the center of the specimens during gentle variations of the surface temperature. Prediction accuracy is reduced in cases of sudden change of boundary conditions. When simulating a temperature programming of repeated, rapid heating-cooling cycles, the model was found to be inadequate in predicting the specimen center temperature. The simulation was then repeated using convection with the external environment as boundary condition. In this case the temperature predictions for the specimen center were close enough to the experimental measurements, although the surface temperature ones were found not sufficiently accurate.

Keywords: Dionysos marble, heat transfer, thermal degradation, finite element method, simulation

~ Αυτή η σελίδα έμεινε σκόπιμα λευκή ~

Περιεχόμενα

Λίστα Πινάκων	11
Λίστα Διαγραμμάτων.....	12
Λίστα Εικόνων	14
1. Εισαγωγή	15
1.1. Σκοπός και προσδοκώμενα αποτελέσματα	15
1.2. Δομή της εργασίας.....	16
2. Μεταφορά Θερμότητας και Θερμική Συμπεριφορά των Υλικών.....	17
2.1. Εισαγωγή.....	17
2.2. Βασικές Έννοιες για τη Μεταφορά Θερμότητας	17
2.2.1. Θερμότητα	17
2.2.2. 1 ^{ος} Νόμος Θερμοδυναμικής.....	17
2.2.3. 2 ^{ος} Νόμος Θερμοδυναμικής.....	18
2.2.4. Μόνιμη και μεταβατική κατάσταση	18
2.2.5. Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και ροή θερμότητας	18
2.3. Μεταφορά Θερμότητας με Αγωγή	19
2.3.1. Γενικά	19
2.3.2. Αγωγή σε μόνιμη κατάσταση.....	19
2.3.3. Αγωγή σε μη μόνιμη κατάσταση	20
2.4. Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή	22
2.4.1. Γενικά	22
2.4.2. Νόμος ψύξης του Newton και συντελεστής συναγωγής	23
2.5. Μεταφορά Θερμότητας με Ακτινοβολία.....	23
2.6. Θερμικές Ιδιότητες των Υλικών	24
2.6.1. Θερμική αγωγιμότητα	24
2.6.2. Ειδική θερμότητα.....	24
2.6.3. Θερμική διαχυτότητα	25
2.6.4. Θερμική διαστολή.....	25
3. Το μάρμαρο και οι Ιδιότητές του.....	27
3.1. Ορυκτά και Πετρώματα	27
3.2. Ασβεστόλιθος και Μάρμαρο	27
3.3. Ασβεσίτης.....	28
3.4. Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Μαρμάρου	29
3.4.1. Πορώδες.....	29
3.4.2. Πυκνότητα.....	30
3.4.3. Διαπερατότητα – Υδατοαπορροφητικότητα	30

3.4.4.	Μηχανικές Ιδιότητες.....	31
3.4.5.	Θερμικές ιδιότητες.....	31
3.5.	Θερμική Καταπόνηση Μαρμάρου	32
3.5.1.	Γενικά	32
3.5.2.	Ο ρόλος της θερμικής διαστολής στη φθορά του μαρμάρου	33
3.5.3.	Επίδραση της θερμότητας στις φυσικομηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου	35
4.	Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διεργασιών.....	37
4.1.	Γενικές Αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων	37
4.2.	Μελέτη της Φθοράς του Μαρμάρου με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	37
5.	Πειραματική Διαδικασία	39
5.1.	Γενικά	39
5.1.1.	Σκοπός και σχεδιασμός πειραμάτων	39
5.1.2.	Δοκίμια.....	40
5.2.	Καταπόνηση με έναν Κύκλο Θέρμανσης-Ψύξης	40
5.2.1.	Προετοιμασία και εξοπλισμός.....	40
5.2.2.	Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 80°C.....	40
5.2.3.	Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 200 °C.....	41
5.3.	Θερμοκρασιακό Πρόγραμμα με Πολλαπλούς Κύκλους Θέρμανσης-Ψύξης.....	43
5.3.1.	Θερμοκρασιακός κύκλος	43
5.3.2.	Αλγόριθμος πειράματος	44
5.4.	Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης.....	45
6.	Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Μεταφοράς Θερμότητας σε Μάρμαρο Διονύσου	47
6.1.	Το Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS	47
6.2.	Παράμετροι Μοντέλου	48
6.3.	Προσομοίωση Θερμοκρασιακού Προγράμματος 80 °C.....	50
6.4.	Προσομοίωση Θερμοκρασιακού Προγράμματος 200 °C.....	50
6.5.	Προσομοίωση Θερμοκρασιακού Προγράμματος Πολλαπλών Κύκλων °C.....	51
6.6.	Αναλυτική Προσέγγιση	51
7.	Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	53
7.1.	Μετρήσεις Θερμοκρασιακού Προγράμματος 80 °C.....	53
7.2.	Μετρήσεις Θερμοκρασιακού Προγράμματος 200 °C.....	56
7.3.	Μετρήσεις Θερμοκρασιακού Προγράμματος Πολλαπλών Κύκλων.....	59
7.4.	Αποτελέσματα Μέτρησης Ειδικής Θερμοχωρητικότητας με Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης.....	62
7.5.	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	62
7.5.1.	Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C.....	62

7.5.2.	Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C.....	64
7.5.3.	Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων 66	
7.6.	Αποτελέσματα Αναλυτικών Προσεγγιστικών Λύσεων	71
7.7.	Γενική Συζήτηση.....	73
8.	Συμπεράσματα και Προοπτικές	75
	Προοπτικές.....	75
	Βιβλιογραφία	77

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Τυπικές τιμές συντελεστή συναγωγής	23
Πίνακας 2: Θερμική αγωγιμότητα ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου	24
Πίνακας 3: Ταξινόμηση πόρων με βάση το μέγεθός τους σύμφωνα με διαφορετικές μελέτες και πρότυπα	29
Πίνακας 4: Ορισμένες μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου	31
Πίνακας 5: Θερμικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου	32
Πίνακας 6: Θερμοκρασιακά δεδομένα προγράμματος πολλαπλών κύκλων.....	59
Πίνακας 7: Αποσαφήνιση κωδικοποιημένων ονομασιών καμπυλών.....	62

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Κύκλος θερμικής διαστολής-συστολής κατά μήκος δύο αξόνων. Με συνεχή γραμμή ο πρώτος άξονας, με διακεκομμένη ο δεύτερος. Τα βελάκια υποδεικνύουν την κατεύθυνση θέρμανσης. α) Ισότροπη διαστολή χωρίς παραμένουσα παραμόρφωση. β) Ανισότροπη διαστολή χωρίς παραμένουσα παραμόρφωση. γ) Ισότροπη διαστολή με παραμένουσα παραμόρφωση. δ) Ανισότροπη διαστολή με παραμένουσα παραμόρφωση.	33
Διάγραμμα 2: Θερμική διαστολή του ασβεστίτη παράλληλα και κάθετα στον κρυσταλλογραφικό του άξονα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία	34
Διάγραμμα 3: Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 80°C.....	41
Διάγραμμα 4: Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 200°C.....	43
Διάγραμμα 5: Θερμοκρασιακό Πρόγραμμα Πολλαπλών Κύκλων	45
Διάγραμμα 6: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα 80 °C.....	54
Διάγραμμα 7: Σχετική τυπική απόκλιση θερμοκρασίας επιφάνειας και αέρα για τον θερμοκρασιακό κύκλο των 80 °C	54
Διάγραμμα 8: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C.....	55
Διάγραμμα 9: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του μαρμάρου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C	55
Διάγραμμα 10: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού του μαρμάρου, σε βάθος 20mm, κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C.....	56
Διάγραμμα 11: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα 200 °C.....	57
Διάγραμμα 12: Σχετική τυπική απόκλιση θερμοκρασίας επιφάνειας για τον θερμοκρασιακό κύκλο των 200 °C.....	57
Διάγραμμα 13: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C.....	58
Διάγραμμα 14: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του μαρμάρου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C	58
Διάγραμμα 15: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού του μαρμάρου, σε βάθος 20mm, κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C.....	58
Διάγραμμα 16: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα πολλαπλών κύκλων. Σύνολο 30 κύκλων.	60
Διάγραμμα 17: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα πολλαπλών κύκλων. Πρώτοι 5 κύκλοι.....	60
Διάγραμμα 18: Ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας αέρα φούρνου, επιφάνειας και εσωτερικού του μαρμάρου, κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων.	61
Διάγραμμα 19: Μέσο προφίλ θερμοκρασιακού κύκλου. Με γκρι χρώμα η τυπική απόκλιση.	61
Διάγραμμα 20: Αποτελέσματα μέτρησης ειδικής θερμοχωρητικότητας μαρμάρου Διονύσου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	62
Διάγραμμα 21: Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C	63
Διάγραμμα 22: Απόκλιση προσομοίωσης από πειραματικές μετρήσεις.....	64
Διάγραμμα 23: Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C	65
Διάγραμμα 24: Απόκλιση προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C από πειραματικές μετρήσεις.....	65

Διάγραμμα 25: Αποτελέσματα προσομοίωσης αγωγής στο εσωτερικό κύβων μαρμάρου, σε βάθος 20 mm, με οριακή συνθήκη την θερμοκρασία των εξωτερικών τοιχωμάτων του	66
Διάγραμμα 26: Δοκιμές διαφορετικών τιμών συντελεστή συναγωγής σε προσομοίωση συναγωγής και σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις	67
Διάγραμμα 27: Δοκιμές τιμών συντελεστή συναγωγής 50 και 60 W/m ² K σε προσομοίωση συναγωγής και σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις	68
Διάγραμμα 28: Απόκλιση προσομοίωσης απο πειραματικά δεδομένα για τη δοκιμή με συντελεστή συναγωγής h=50 W/m ² K	68
Διάγραμμα 29: Απόκλιση προσομοίωσης απο πειραματικά δεδομένα για τη δοκιμή με συντελεστή συναγωγής h=60 W/m ² K	69
Διάγραμμα 30: Σύγκριση υπολογιζόμενων θερμοκρασιών επιφάνειας-εσωτερικού του μαρμάρου από προσομοίωση συναγωγής με h=50 W/m ² K	70
Διάγραμμα 31: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας εσωτερικού-επιφάνειας	70
Διάγραμμα 32: Σύγκριση υπολογιζόμενων θερμοκρασιών επιφάνειας-εσωτερικού του μαρμάρου από προσομοίωση συναγωγής με h=25 W/m ² K	71
Διάγραμμα 33: Σύγκριση προβλέψεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μαρμάρου, από προσομοίωση και από αναλυτική προσέγγιση, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, για το θερμοκρασιακό πρόγραμμα των 80 °C	72
Διάγραμμα 34: Σύγκριση προβλέψεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μαρμάρου, από προσομοίωση και από αναλυτική προσέγγιση, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, για το θερμοκρασιακό πρόγραμμα των 200 °C	72

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε στερεό επίπεδο σώμα.....	20
Εικόνα 2: Προσεγγιστικές λύσεις αγωγής πολλών διαστάσεων, εκπεφρασμένες ως γινόμενα λύσεων μονοδιάστατης αγωγής, για προβλήματα συναγωγής από όλες τις επιφάνειες	22
Εικόνα 3: Εξωτερική όψη μαρμάρου Διονύσου (Άτλας ΙΓΜΕ)	28
Εικόνα 4: Διάφορες κρυσταλλικές μορφές του ασβεστίτη (α-ε).....	29
Εικόνα 5: Παράδειγμα κυρτωμένων πλακών μαρμάρου	32
Εικόνα 6: Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μαρμάρου που έχει υποστεί κυκλική θερμική καταπόνηση	35
Εικόνα 7: Δοκίμιο μαρμάρου κατά την προετοιμασία του θερμοκρασιακού προγράμματος 80°C....	41
Εικόνα 8: Δοκίμια μαρμάρου κατά την προετοιμασία του θερμοκρασιακού προγράμματος 200°C..	42
Εικόνα 9: Δοκίμια μαρμάρου κατά την προετοιμασία του θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων	45
Εικόνα 10: Γεωμετρία και διακριτοποίηση μοντέλου	50

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός και προσδοκώμενα αποτελέσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του μαρμάρου Διονύσου, με χρήση πειραμάτων και λογισμικού προσομοίωσης. Έχει διαπιστωθεί ότι το μάρμαρο ως υλικό υπόκειται σε φθορά από την έκθεσή του σε θερμοκρασιακές μεταβολές, είτε πρόκειται για την καθημερινή θερμική καταπόνηση, λόγω της έκθεσης στον κύκλο μέρας-νύχτας και στα μετεωρολογικά φαινόμενα, είτε πρόκειται για μεμονωμένα περιστατικά έκθεσης σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. σε μια πυρκαγιά.

Λόγω της κλιματικής αλλαγής αναμένεται η θερμική καταπόνηση των δομικών υλικών των μνημείων να αυξηθεί. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και η επίδραση της αύξησης αυτής στο κλίμα, θα οδηγήσει σε πιο ακραίες θερμοκρασίες και θερμοκρασιακές μεταβολές, διαταραχή του κύκλου του νερού, ξηρασία και ερημοποίηση, ενώ ταυτόχρονα αναμένεται να αυξηθεί η συχνότητα πυρκαγιών [1]. Η Ελλάδα είναι από τις χώρες που αναμένεται να πληγούν πρώτες, ενώ στο πεδίο των πυρκαγιών, ήδη η χώρα έχει έρθει αντιμέτωπη με περιστατικά πυρκαγιών που πλησίασαν και απείλησαν αρχαιολογικούς χώρους, αλλά ακόμη και περιπτώσεις που οι φλόγες έφτασαν εντός σημαντικών αρχαιολογικών χώρων και τους έπληξαν [2], [3].

Το μάρμαρο Διονύσου αποτελεί το μοναδικό είδος μαρμάρου που εξορύσσεται σήμερα στο όρος Πεντέλη. Το σημείο εξόρυξής του βρίσκεται σε διαφορετική πλαγιά του όρους από αυτή που βρίσκονταν τα αρχαία λατομεία στα οποία γινόταν εξόρυξη του ξακουστού Πεντελικού μαρμάρου, από το οποίο κατασκευάστηκε μεγάλο πλήθος μνημείων της αρχαίας Αθήνας. Παρ' όλα αυτά υπάρχει μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των δύο ποικιλιών και δεδομένου του ότι τα αρχαία λατομεία έχουν εξαντληθεί, είτε η εξορυκτική δραστηριότητα έχει παυθεί για ιστορικούς λόγους, το μάρμαρο Διονύσου είναι η βασική ποικιλία μαρμάρου που χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση μνημείων από πεντελικό μάρμαρο, μεταξύ των οποίων και ο Παρθενώνας της Ακρόπολης των Αθηνών και αποτελεί το ειδικό αντικείμενο μελέτης της εργασίας [4].

Για την καλύτερη κατανόηση της θερμικής φθοράς των αυθεντικών υλικών, και των μηχανισμών μέσω των οποίων πραγματοποιείται, αλλά και για τον καλύτερο σχεδιασμό και εφαρμογή μεθόδων και υλικών συντήρησης είναι αναγκαία η μελέτη του τρόπου με τον οποίο γίνεται η μετάδοση της θερμότητας στο εκάστοτε υλικό ενδιαφέροντος, αλλά και καταγραφή της φθοράς και μελέτη του μηχανισμού. Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη μετάδοσης της θερμότητας σε μάρμαρο Διονύσου, μέσω αγωγής και συναγωγής.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται συνδυασμός πειράματος και προσομοιώσεων για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη θερμική συμπεριφορά του μαρμάρου Διονύσου/Πεντέλης. Η εργασία στοχεύει στην κατασκευή ενός αξιόπιστου υπολογιστικού μοντέλου μετάδοσης της θερμότητας εντός του μαρμάρου. Για να επιτευχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας σε δοκίμια μαρμάρου και χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των προβλέψεων των προσομοιώσεων.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας προσδοκείται να πραγματοποιηθεί η πρόδρομη εργασία που απαιτείται για την πλήρη μοντελοποίηση της θερμικής συμπεριφοράς πολύπλοκων κατασκευών μαρμάρου Διονύσου/Πεντέλης και ποσοτικοποίηση της θερμικής φθοράς μαρμάρου, μέσω της

κατασκευής ενός υπολογιστικού μοντέλου και καθορισμού των παραγόντων προσομοίωσης για απλή γεωμετρία και σε απλές περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας.

1.2. Δομή της εργασίας

Στα κεφάλαια 2-4 γίνεται παρουσίαση της απαραίτητης θεωρίας και επισκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας που σχετίζεται με το θέμα της εργασίας και στην οποία βασίστηκε ο σχεδιασμός των πειραμάτων και η εργασία στο σύνολό της. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το υπολογιστικό μοντέλο και οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των προσομοιώσεων και τέλος στο κεφάλαιο 8 εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα και εξετάζονται οι μελλοντικές προοπτικές έρευνας.

2. Μεταφορά Θερμότητας και Θερμική Συμπεριφορά των Υλικών

2.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας, καθώς και οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας, οι οποίοι σύμφωνα με την βιβλιογραφία διακρίνονται στους εξής τρεις:

1. Με αγωγή (conduction): ανταλλαγή ενέργειας μέσω ενός στερεού σώματος ή διαμέσου σωμάτων τα οποία βρίσκονται σε επαφή, από το σημείο επαφής.
2. Με συναγωγή (convection): μεταφορά ενέργειας μέσω της κίνησης ενός ρευστού μέσω της επαφής του ρευστού και των άλλων σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή.
3. Με ακτινοβολία (radiation): ανταλλαγή ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και απορρόφησης.

Οι τρεις παραπάνω μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας συνήθως συνυπάρχουν, συχνά όμως μελετάται μόνο ο κυρίαρχος μηχανισμός, για λόγους απλοποίησης. Όπως για παράδειγμα κατά την επαφή δύο στερεών σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία η μεταφορά θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω αγωγής, ένα θερμό σώμα στον αέρα ενός δωματίου χάνει θερμότητα κυρίως μέσω συναγωγής, ενώ ένα σώμα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, όπως π.χ. μια ηλεκτρική αντίσταση εκπέμπει θερμότητα κυρίως μέσω ακτινοβολίας [5].

2.2. Βασικές Έννοιες για τη Μεταφορά Θερμότητας

2.2.1. Θερμότητα

Ως θερμότητα ορίζεται η μορφή ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί από ένα σύστημα σε ένα άλλο ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τους. Η θερμότητα ρέει αυθόρμητα από το σώμα υψηλής θερμοκρασίας προς το σώμα χαμηλής θερμοκρασίας. Ως αποτέλεσμα το σύστημα τείνει προς κατάσταση θερμικής ισορροπίας, όπου η θερμοκρασία είναι πλέον ομοιόμορφη σε όλες τις περιοχές του. Διεθνής μονάδα μέτρησης στο SI είναι το Joule.

Η μετάδοση θερμότητας βασίζεται στους δυο θεμελιώδεις νόμους της θερμοδυναμικής, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.2.2. 1^{ος} Νόμος Θερμοδυναμικής

Κάθε φορά που ένα θερμοδυναμικό σύστημα υπόκειται σε μία φυσική ή χημική μεταβολή, η μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας (ΔU) ισούται με το άθροισμα της θερμότητας (Q) και του έργου (W) που υπεισέρχονται σε αυτή τη μεταβολή.

$$\Delta U = Q + W \quad (2.1)$$

Ο νόμος αυτός εκφράζει τη γενική αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Σε κάθε διεργασία δηλαδή, η ενέργεια ούτε δημιουργείται, ούτε καταστρέφεται, παρά μόνο αλλάζει μορφές.

2.2.3. 2^{ος} Νόμος Θερμοδυναμικής

Η συνολική εντροπία (S) στις μεταβολές ενός απομονωμένου συστήματος πάντα θα αυξάνεται.

$$\Delta S \geq 0 \quad (2.2)$$

Ο νόμος αυτός ορίζει την κατεύθυνση μεταφοράς της θερμότητας, η οποία είναι πάντοτε από τη θερμότερη στην ψυχρότερη περιοχή.

2.2.4. Μόνιμη και μεταβατική κατάσταση

Ένα σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση όταν δεν υπάρχει μεταβολή των ιδιοτήτων ως προς το χρόνο σε κάθε δεδομένο σημείο. Μπορεί όμως να υπάρχει μεταβολή των ιδιοτήτων από σημείο σε σημείο, η οποία προκαλεί και τη μεταφορά θερμότητας. Η μόνιμη κατάσταση δεν ταυτίζεται με την κατάσταση ισορροπίας, αφού στην κατάσταση ισορροπίας υπάρχει μη μεταβολή των ιδιοτήτων και ως προς το χώρο. Το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση όταν οι θερμοκρασία στα όρια του παραμένει σταθερή.

Όταν οι οριακές συνθήκες του συστήματος μεταβληθούν, αυτό μεταβαίνει στη μη μόνιμη κατάσταση, όπου υπάρχει μεταβολή των ιδιοτήτων ως προς το χώρο και ως προς το χρόνο. Αν η θερμοκρασία στα όρια του συστήματος μεταβεί από μια σταθερή τιμή σε μια άλλη σταθερή τιμή, τότε το σύστημα θα περάσει από μια μόνιμη κατάσταση, σε μία μη μόνιμη κατάσταση όταν αλλάξουν οι οριακές συνθήκες και έπειτα σε μια νέα μόνιμη κατάσταση όταν αυτή η αλλαγή αποσβεστεί.

2.2.5. Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και ροή θερμότητας

Κατά την εναλλαγή θερμότητας Q σε μια θερμική διεργασία ορίζεται ρυθμός μεταφοράς θερμότητας \dot{q} , που εκφράζει τη θερμότητα που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου. Οι μονάδες του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας στο S.I. είναι τα J/s ή W.

Για γνωστή συνάρτηση μεταβολής του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρθηκε σε χρόνο Δt μέσω της εξίσωσης:

$$Q = \int_{\Delta t} \dot{q} dt \quad (2.3)$$

Ορίζεται επίσης το μέγεθος \dot{q}'' , που ονομάζεται ροή θερμότητας και εκφράζει το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας, κάθετης στη διεύθυνση μεταφοράς θερμότητας:

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{A} \quad (2.4)$$

όπου A το εμβαδό της επιφάνειας [5].

2.3. Μεταφορά Θερμότητας με Αγωγή

2.3.1. Γενικά

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο, χωρίς να υπάρχει μακροσκοπική μετακίνηση της μάζας του υλικού από την μία θέση στην άλλη. Ουσιαστικά πρόκειται για μία διαδικασία διάχυσης (diffusion) κατά την οποία θερμική ενέργεια μεταφέρεται από θερμότερες περιοχές σε ψυχρότερες.

Σε ακίνητα ρευστά η μεταφορά αυτή της θερμότητας οφείλεται σε συγκρούσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την τυχαία κίνηση των μορίων όπου υπάρχει μεταφορά της ορμής και άρα της ενέργειας των μορίων, καθώς και στη μοριακή διάχυση που συμβαίνει κατά την οποία τα μόρια μετακινούνται σε διαφορετικές περιοχές, διατηρώντας τις ιδιότητές τους όπως π.χ. την κινητική τους ενέργεια. Μακροσκοπικά δεν παρατηρείται κίνηση του ρευστού, όμως σταδιακά η θερμότητα διαχέεται σε όλη την έκταση του ρευστού.

Στα στερεά η αγωγή θερμότητας γίνεται μέσω των ενεργειακών κυμάτων που δημιουργούνται από την ταλάντωση των μορίων του πλέγματος και από την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, σύμφωνα με τις επικρατέστερες θεωρίες.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή είναι ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογος του πάχους του υλικού.

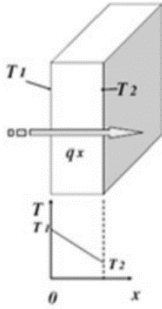
Σύμφωνα με τον νόμο του Fourier, η θερμορορή συνδέεται με τη βαθμίδα της θερμοκρασίας ως εξής:

$$\dot{q}''_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.5)$$

όπου \dot{q}''_x η ροή θερμότητας παράλληλα στον άξονα x και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας που είναι θερμική ιδιότητα χαρακτηριστική του υλικού.

2.3.2. Αγωγή σε μόνιμη κατάσταση

Η απλούστερη περίπτωση περίπτωση αγωγής είναι η μονοδιάστατη αγωγή σε μόνιμη κατάσταση, όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό τοιχώματος μεγάλων διαστάσεων, με σταθερές θερμοκρασίες στα όρια του τοιχώματος, βλ. Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε στερεό επίπεδο σώμα

Στην περίπτωση αυτή η βαθμίδα της θερμοκρασίας είναι σταθερή ποσότητα:

$$-\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.6)$$

όπου L το πάχος του τοιχώματος και T_1, T_2 οι θερμοκρασίες των οριακών επιφανειών του.

Σε αυτή την περίπτωση ο νόμος του Fourier λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$\dot{q}'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.7)$$

Γενικεύοντας το νόμο του Fourier στις τρεις διαστάσεις, για ένα ισότροπο μέσο, προκύπτει η σχέση:

$$\dot{q}'' = -k \nabla T \quad (2.8)$$

2.3.3. Αγωγή σε μη μόνιμη κατάσταση

Τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας σε μη μόνιμη κατάσταση είναι αρκετά πιο πολύπλοκα από αυτά που αφορούν μόνιμη κατάσταση. Η απόκριση του συστήματος στις διαταραχές των οριακών συνθηκών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και πολλές φορές είναι δύσκολο να υπάρξουν αναλυτικές λύσεις. Για αυτό το λόγο γίνονται κατά περίπτωση απλοποιήσεις και προσεγγίσεις, είτε τα προβλήματα λύνονται αριθμητικά, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις απλής γεωμετρίας και απλής διαταραχής, υπάρχουν διαθέσιμες και αναλυτικές λύσεις[5], [6]

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για μονοδιάστατη αγωγή χωρίς παραγωγή θερμότητας είναι η εξής:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

Ορίζονται τα εξής αδιάστατα μεγέθη:

$$\text{Αδιάστατη θέση:} \quad x = \frac{x}{x_0} \quad (2.10)$$

$$\text{Αδιάστατος χρόνος ή Αριθμός Fourier (Fo):} \quad t^* = \frac{at}{x_0^2} \equiv Fo \quad (2.11)$$

Όπου x_0 μέγεθος χαρακτηριστικό της γεωμετρίας με μονάδες μήκους.

Αδιάστατη θερμοκρασία:

$$\theta^* = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.12)$$

Όπου T_i η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος και T_∞ η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας παίρνει την αδιάστατη μορφή της:

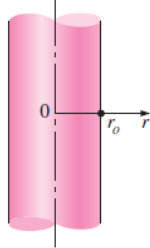
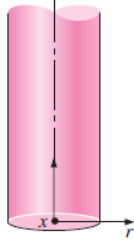
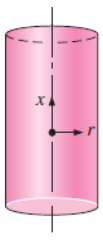
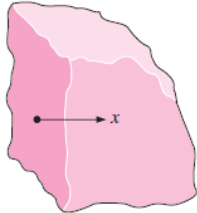
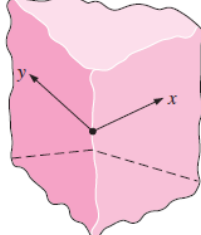
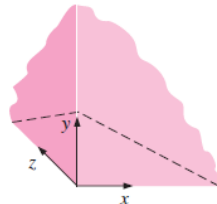
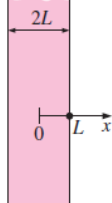
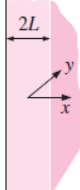
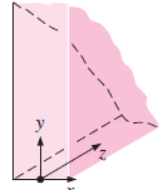
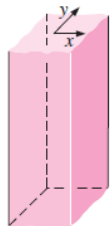
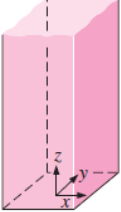
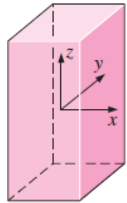
$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = a \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} \quad (2.13)$$

Για απλές γεωμετρίες και μπορεί να λυθεί αναλυτικά η εξίσωση 2.14, με οριακές συνθήκες συναγωγή με περιβάλλον θερμοκρασίας T_∞ , και αρχική θερμοκρασία T_i , είναι όμως αρκετά πολύπλοκη. Έτσι για μεγαλύτερους χρόνους επαφής δηλαδή $Fo > 0,2$ και για γεωμετρία πλάκας μεγάλου μήκους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστική λύση, σύμφωνα με την οποία η αδιάστατη θερμοκρασία στο επίπεδο συμμετρίας του τοιχώματος είναι η εξής:

$$\theta_0^* = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 \exp(-\lambda_1^2 t^*) \quad (2.15)$$

Για περιπτώσεις πολυδιάστατης αγωγής θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω λύση, όμως μόνο σε γεωμετρίες που αποτελούν τομή απλών γεωμετριών στις τρεις διαστάσεις (Εικόνα 2), όπου οι σταθερές A_1 και λ_1 δίνονται από τη βιβλιογραφία.

Το αποτέλεσμα είναι ίσο με το γινόμενο των τριών λύσεων στις τρεις διαστάσεις.

 <p>$\theta(r,t) = \theta_{\text{cyl}}(r,t)$ Infinite cylinder</p>	 <p>$\theta(x,r,t) = \theta_{\text{cyl}}(r,t) \theta_{\text{semi-inf}}(x,t)$ Semi-infinite cylinder</p>	 <p>$\theta(x,r,t) = \theta_{\text{cyl}}(r,t) \theta_{\text{wall}}(x,t)$ Short cylinder</p>
 <p>$\theta(x,t) = \theta_{\text{semi-inf}}(x,t)$ Semi-infinite medium</p>	 <p>$\theta(x,y,t) = \theta_{\text{semi-inf}}(x,t) \theta_{\text{semi-inf}}(y,t)$ Quarter-infinite medium</p>	 <p>$\theta(x,y,z,t) = \theta_{\text{semi-inf}}(x,t) \theta_{\text{semi-inf}}(y,t) \theta_{\text{semi-inf}}(z,t)$ Corner region of a large medium</p>
 <p>$\theta(x,t) = \theta_{\text{wall}}(x,t)$ Infinite plate (or plane wall)</p>	 <p>$\theta(x,y,t) = \theta_{\text{wall}}(x,t) \theta_{\text{semi-inf}}(y,t)$ Semi-infinite plate</p>	 <p>$\theta(x,y,z,t) = \theta_{\text{wall}}(x,t) \theta_{\text{semi-inf}}(y,t) \theta_{\text{semi-inf}}(z,t)$ Quarter-infinite plate</p>
 <p>$\theta(x,y,t) = \theta_{\text{wall}}(x,t) \theta_{\text{wall}}(y,t)$ Infinite rectangular bar</p>	 <p>$\theta(x,y,z,t) = \theta_{\text{wall}}(x,t) \theta_{\text{wall}}(y,t) \theta_{\text{semi-inf}}(z,t)$ Semi-infinite rectangular bar</p>	 <p>$\theta(x,y,z,t) = \theta_{\text{wall}}(x,t) \theta_{\text{wall}}(y,t) \theta_{\text{wall}}(z,t)$ Rectangular parallelepiped</p>

Εικόνα 2: Προσεγγιστικές λύσεις αγωγής πολλών διαστάσεων, εκπεφρασμένες ως γινόμενα λύσεων μονοδιάστατης αγωγής, για προβλήματα συναγωγής από όλες τις επιφάνειες

2.4. Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή

2.4.1. Γενικά

Στα ρευστά πραγματοποιείται πάντα μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, δηλαδή μέσω της κίνησης του ρευστού. Η κίνηση αυτή μπορεί να είναι εξωτερικά επιβαλλόμενη (εξαναγκασμένη κυκλοφορία), αλλά ακόμη και σε περιπτώσεις που το ρευστό είναι αρχικά ακίνητο, η θέρμανση μέρους του

ρευστού, προκαλεί διαστολή, άρα διαφορά πυκνότητας μεταξύ περιοχών του ρευστού. Με αυτό τον τρόπο προκαλείται και πάλι μετακίνηση ρευστού (φυσική κυκλοφορία).

Κατά την επαφή ρευστού με στερεό επίσης λαμβάνει χώρα συναγωγή. Έστω μια θερμή επιφάνεια θερμοκρασίας T_s που βρίσκεται σε επαφή ρευστό θερμοκρασίας T_∞ και ταχύτητας u_∞ , στην περίπτωση αυτή δημιουργείται οριακό στρώμα ταχύτητας πάχους δ_∞ , πάνω από το οποίο η ταχύτητα είναι ίση με u_∞ , ενώ το στρώμα που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του στερεού διατηρεί μηδενική ταχύτητα. Το πάχος του στρώματος αυξάνεται κατά μήκος της διεύθυνσης της ταχύτητας του ρευστού. Η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή στο πρώτο ακίνητο στρώμα, όμως όσο μεγαλώνει η απόσταση από την επιφάνεια, αυξάνεται και η ταχύτητα του ρευστού, με αποτέλεσμα ο κυρίαρχος τρόπος μετάδοσης της θερμότητας να είναι η συναγωγή. Οι μάζες θερμού ρευστού μεταφέρονται από τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια του στερεού, προς τα στρώματα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση. Σε σχετικά μικρή απόσταση από την επιφάνεια, επιτυγχάνεται θερμοκρασία T_∞ , δημιουργώντας ένα οριακό στρώμα θερμοκρασίας πάχους δ_T .

2.4.2. Νόμος ψύξης του Newton και συντελεστής συναγωγής

Η ροή θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ δύο οριακών επιφανειών θερμοκρασίας T_s και T_∞ αντίστοιχα, εκφράζεται μέσω της παρακάτω σχέσης, γνωστής και ως «νόμος ψύξης του Newton»:

$$\dot{q}'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.16)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί στην ουσία σχέση ορισμού του συντελεστή h , ο προσδιορισμός του οποίου αποτελεί και το μεγαλύτερο πρακτικό ζήτημα στα προβλήματα συναγωγής.

Ο συντελεστής συναγωγής h ουσιαστικά καθορίζει το πόσο μεγάλη ή μικρή θα είναι η θερμοροή για ένα δεδομένο δυναμικό θερμοκρασίας σε ένα δεδομένο σύστημα. Η τιμή του συντελεστή h , εκφρασμένη συνήθως σε $W/m^2 \cdot K$, δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητα του ρευστού δια μέσου του οποίου πραγματοποιείται η συναγωγή, αλλά προσδιορίζεται πειραματικά και εξαρτάται από τις ιδιαίτερες παραμέτρους του εκάστοτε συστήματος, όπως η γεωμετρία, τα χαρακτηριστικά κίνησης του ρευστού, οι ιδιότητές του και η ταχύτητα με την οποία κινείται. Σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατό να μετρηθεί ο συντελεστής συναγωγής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τιμές από τη βιβλιογραφία. Κάποιες τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγής δίνονται στον Πίνακα 1 [5], [6].

Πίνακας 1: Τυπικές τιμές συντελεστή συναγωγής

Πεδίο ροής	h ($W/m^2 \cdot K$)
Φυσική κυκλοφορία - Αέριο	2 – 25
Φυσική κυκλοφορία – Υγρό	10 – 1000
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία - Αέριο	25 – 250
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία – Υγρό	50 – 20000
Βρασμός και συμπύκνωση	2500 - 100000

2.5. Μεταφορά Θερμότητας με Ακτινοβολία

Όλα τα στερεά σώματα, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία εκπέμπουν και απορροφούν ακτινοβολία. Η μέγιστη θερμοροή που είναι δυνατό να ακτινοβολεί ένα σώμα, ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από την παρακάτω σχέση, γνωστή ως νόμος των Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q}'' = \sigma T_s^4 \quad (2.17)$$

Όπου T_s , η απόλυτη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος και σ , η σταθερά των Stefan-Boltzmann, ίση με $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Η παραπάνω σχέση αφορά ένα μέλαν σώμα, ένα σώμα δηλαδή, που εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή θερμική ισχύ. Στην πραγματικότητα τα σώματα εκπέμπουν μικρότερη θερμική ισχύ από τη μέγιστη. Για το λόγο αυτό ο νόμος των Stefan-Boltzmann διορθώνεται με τον συντελεστή ϵ , γνωστό ως συντελεστή εκπομπής, που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και εκφράζει, κατά πόσο το εκάστοτε σώμα προσεγγίζει τη συμπεριφορά μέλανος σώματος. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{q}'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.18)$$

Τα σώματα, εκτός από το να εκπέμπουν, ταυτόχρονα απορροφούν ακτινοβολία. Ορίζεται λοιπόν συντελεστής απορρόφησης α , ο οποίος είναι ίσος με το λόγο της ισχύος απορροφούμενης ακτινοβολίας G_{abs} , προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας G [5]:

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (2.19)$$

2.6. Θερμικές Ιδιότητες των Υλικών

2.6.1. Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να άγει τη θερμότητα. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k έχει μονάδες $\text{W/m} \cdot \text{K}$, υποδηλώνει δηλαδή το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα πάχους του υλικού, ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας. Τα υλικά με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, όπως π.χ. τα μέταλλα, επιτρέπουν τη γρήγορη μετάδοση της θερμότητας, σε αντίθεση με υλικά χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, που λειτουργούν ως μονωτές της θερμότητας. Στον Πίνακα 2 δίνονται κάποιες τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας διάφορων υλικών.

Πίνακας 2: Θερμική αγωγιμότητα ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου

Υλικό	k (W/m K)
Διαμάντι	2300
Χαλκός	401
Σίδηρος	80,2
Γυαλί	0,78
Νερό (υγρό)	0,607
Ξύλο (βελανιδιά)	0,17
Αέρας	0,026

2.6.2. Ειδική θερμότητα

Η ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα) c ορίζεται ως η ποσότητα της η ενέργεια που απαιτείται ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία μιας μονάδας μάζας κατά $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ειδική θερμότητα

αποτελεί το μέτρο της ικανότητας των υλικών να αποθηκεύουν ενέργεια χωρίς να μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους. Υλικά με υψηλή ειδική θερμότητα απαιτούν μεγάλη ενέργεια για να αυξήσουν τη θερμοκρασία τους κατά 1°C, σε αντίθεση με υλικά χαμηλής ειδικής θερμότητας, για τα οποία μικρά ποσά ενέργειας αρκούν για να αυξήσουν τη θερμοκρασία τους.

Η τιμή της ειδικής θερμότητας εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η διεργασία μεταβολής της θερμοκρασίας και έτσι διακρίνονται δύο μεγέθη: η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση c_p , και η ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο c_v . Τα δύο αυτά μεγέθη, όσον αφορά αέρια, διαφέρουν. Για ασυμπύεστα σώματα όμως, όπως τα υγρά και τα στερεά, τα μεγέθη ταυτίζονται και ισχύει

$$c_p \cong c_v \cong c \quad (2.20)$$

Η ειδική θερμότητα αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας, όμως πολλές φορές, για συνήθεις θερμοκρασίες και θερμοκρασιακές μεταβολές προσεγγίζεται καλά και με σταθερή τιμή.

2.6.3. Θερμική διαχυτότητα

Η θερμική διαχυτότητα, a , είναι μια ιδιότητα σημαντική σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας σε μεταβατική κατάσταση και αποτελεί μέτρο της ταχύτητας διάχυσης της θερμότητας σε ένα υλικό. Ορίζεται ως ο λόγος της αγόμενης θερμότητας προς την αποθηκευμένη θερμότητα:

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.21)$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού, k η θερμική αγωγιμότητα και c_p η ειδική θερμότητα. Η τιμή της θερμικής διαχυτότητας υποδηλώνει το αν το υλικό κατά κύριο λόγο αποθηκεύει τη θερμότητα που του αποδίδεται ή αν κατά κύριο λόγο την άγει [5], [6].

2.6.4. Θερμική διαστολή

Τα περισσότερα στερεά υλικά διαστέλλονται κατά τη θέρμανση και συστέλλονται κατά την ψύξη. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε ατομικό επίπεδο στην αύξηση της απόστασης μεταξύ των ατόμων με την άνοδο της θερμοκρασίας. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται το πλάτος ταλάντωσης των ατόμων και κατά συνέπεια η μέση απόσταση μεταξύ των ατόμων. Μακροσκοπικά η συμπεριφορά αυτή φανερώνεται ως αύξηση του όγκου του υλικού. Η μεταβολή του μήκους ενός υλικού μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (2.22)$$

Όπου l_0 το αρχικό μήκος, Δl η μεταβολή του μήκους, ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά και α_l ο γραμμικός συντελεστής της θερμικής διαστολής, μια ιδιότητα του υλικού ενδεικτική της μεταβολής του μήκους του, όταν αυτό αλλάζει θερμοκρασία.

Καθώς η επιμήκυνση ή συστολή υπό την επίδραση της θερμοκρασίας συμβαίνει σε όλες τις διαστάσεις, παρατηρείται συνολικά μεταβολή του όγκου του υλικού. Η ακόλουθη σχέση περιγράφει τη μεταβολή αυτή του όγκου του υλικού:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T \quad (2.23)$$

Όπου V_0 είναι ο αρχικός όγκος, ΔV η μεταβολή του όγκου και α_v ο κατ' όγκο συντελεστής θερμικής διαστολής. Για ισότροπα υλικά είναι περίπου ίσος με 3α .

3. Το μάρμαρο και οι Ιδιότητές του

3.1. Ορυκτά και Πετρώματα

Τα ορυκτά είναι φυσικά ομογενή στερεά, τα οποία είναι αποτέλεσμα ανόργανων διεργασιών, έχουν υψηλό βαθμό ατομικής διάταξης και αρκετά αυστηρά καθορισμένες φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση.

Τα πετρώματα είναι τα στερεά προϊόντα γεωλογικής δραστηριότητας που βρίσκονται στο φλοιό της γης και αποτελούνται από ορυκτά. Η ορυκτολογική σύνθεση των πετρωμάτων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες [7].

Τα πετρώματα ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

Πυριγενή: σχηματίζονται από τη στερεοποίηση του μάγματος.

Ιζηματογενή: σχηματίζονται από την καθίζηση υλικού που βρίσκεται σε αιώρηση μέσα σε νερό ή άλλο ρευστό και την ακόλουθη συγκόλληση του υλικού.

Μεταμορφωσιγενή: προϊόντα φυσικοχημικών μεταβολών προϋπαρχόντων πετρωμάτων, χωρίς τήξη. Οι μεταβολές συμβαίνουν υπό την επίδραση υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών και σε μια διεργασία που ονομάζεται μεταμόρφωση [8].

3.2. Ασβεστόλιθος και Μάρμαρο

Ο ασβεστόλιθος είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα αποτελούμενο κατά κύριο λόγο από το ορυκτό ασβεστίτης, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%. Άλλα ορυκτά που περιέχει είναι Αργιλικά, Χαλαζία, Αιματίτης, Σιδηροπυρίτης, Οξειδία του Μαγγανίου, Δολομίτης, ανθρακούχες ενώσεις [8].

Το μάρμαρο είναι μεταμορφωσιγενές πέτρωμα σχηματιζόμενο από την ανακρυστάλλωση ασβεστόλιθων. Αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη. Κάποια μάρμαρα περιέχουν επίσης δολομίτη καθώς και άλλες προσμίξεις [7].

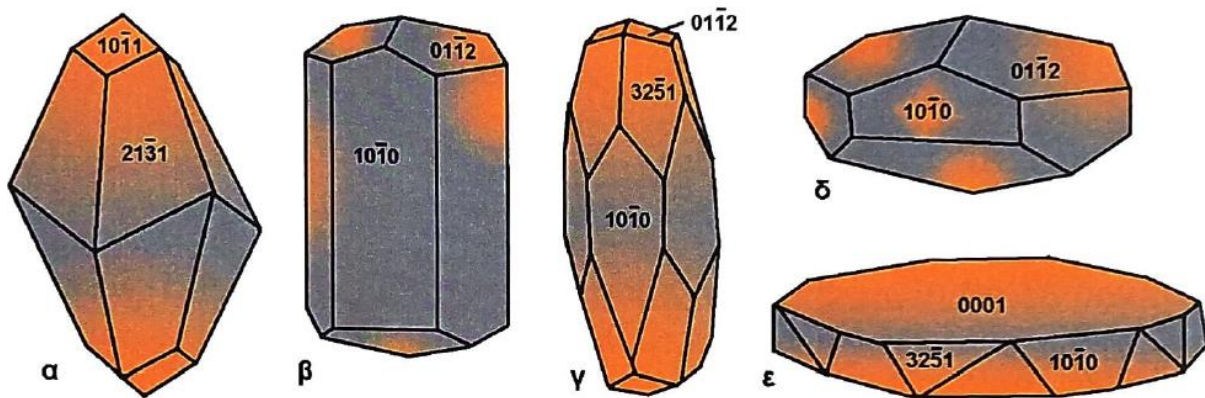
Το μάρμαρο Διονύσου που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής, είναι λευκό ασβεστιτικό μάρμαρο (Εικόνα 3) με ελάχιστη περιεκτικότητα σε δολομίτη. Εξορύσσεται στις βόρειες πλαγιές του όρους Πεντέλη, στην Αττική. Η καλύτερη φλέβα του Πεντελικού μαρμάρου την οποία εκμεταλλεύτηκαν οι αρχαίοι βρισκόταν στη νοτιοδυτική πλαγιά του όρους, όπου λειτούργησαν 25 λατομεία κατά την αρχαιότητα και εξορύχθηκαν πάνω από 400.000 κυβικά μέτρα μαρμάρου. Το μάρμαρο αυτό χρησιμοποιήθηκε σε πλήθος γλυπτών και μνημείων, με την αρχαιότερη χρήση να χρονολογείται στο 570 π.Χ. σε γλυπτά, ενώ σημαντική χρήση έγινε και κατά τον 5^ο αιώνα π.Χ. αλλά και κατά την Ελληνιστική και Ρωμαϊκή εποχή. Για την αποκατάσταση των μνημείων που αξιοποίησαν το συγκεκριμένο μάρμαρο, πλέον χρησιμοποιείται μάρμαρο Διονύσου [4].



Εικόνα 3: Εξωτερική όψη μαρμάρου Διονύσου (Άτλας ΙΓΜΕ)

3.3. Ασβεστίτης

Ο ασβεστίτης αποτελεί το κύριο ορυκτό συστατικό του μαρμάρου Διονύσου. Με χημικό τύπο CaCO_3 , συναντάται σε διάφορες κρυσταλλικές μορφές με κυριότερα κρυσταλλικά συστήματα το ρομβοεδρικό, το πρισματικό, το πινακοειδές και το το σκαλενοεδρικό. Οπτικές αναπαραστάσεις των συστημάτων αυτών περιλαμβάνονται στην Εικόνα 4 [9].



Εικόνα 4: Διάφορες κρυσταλλικές μορφές του ασβεστίτη (α-ε)

3.4. Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Μαρμάρου

Το μάρμαρο ως δομικό υλικό έχει από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα, περίοπτη θέση στην αρχιτεκτονική, με ένα πολύ ευρύ πεδίο εφαρμογών. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες ενός δομικού υλικού σχετίζονται άμεσα με το κατά πόσο το συγκεκριμένο υλικό πληροί τις προδιαγραφές, για την εκάστοτε χρήση του, καθώς και με την επιδεκτικότητά του στους διάφορους τύπους φθοράς. Παρακάτω καταγράφονται οι σημαντικότερες φυσικοχημικές ιδιότητες που αφορούν το μάρμαρο και γενικώς το λίθο.

3.4.1. Πορώδες

Τα περισσότερα στερεά υλικά δεν είναι συμπαγή στο εσωτερικό τους, αλλά περιλαμβάνουν κενούς χώρους που λέγονται πόροι.

Το πορώδες ενός υλικού ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των πόρων προς το συνολικό όγκο του υλικού. Μπορεί να διακριθεί σε κλειστό και ανοιχτό πορώδες. Το ανοιχτό πορώδες είναι κενοί χώροι που είναι προσβάσιμοι σε ρευστά, ενώ το κλειστό πορώδες αφορά τους μη προσβάσιμους πόρους, τα κενά αυτά δηλαδή που υπάρχουν στο εσωτερικό του υλικού, αλλά δεν συνδέονται με άλλους πόρους ή με το εξωτερικό. Η διάμετρος των πόρων μπορεί να διαφέρει πολύ ανάμεσα στα διάφορα υλικά, αλλά και εντός του ίδιου υλικού συνήθως συναντάται ένα εύρος διαφορετικών διαμέτρων πόρων. Με βάση τις διαμέτρους των πόρων αυτών τα υλικά κατατάσσονται σε μικροπορώδη, μεσοπορώδη και μακροπορώδη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3. Όσον αφορά το μάρμαρο Διονύσου, το ανοικτό πορώδες μετρήθηκε από το ΙΓΜΕ 0,5 % [10].

Πίνακας 3: Ταξινόμηση πόρων με βάση το μέγεθός τους σύμφωνα με διαφορετικές μελέτες και πρότυπα

	Μικροπόροι (μm)	Μεσοπόροι (μm)	Μακροπόροι (μm)
De Quervain (1967)	<5	5-200	200-2000
Klopfner (1985)	<0,1	0,1-1000	>1000
IUPAC (Gregg and Sing 1982)	<0,002	0,002-0,05	>0,05
DIN66131 (1993)	<0,002	0,002-0,05	>0,05

Το πορώδες σχετίζεται άμεσα με πολλές από τις φυσικές ιδιότητες των λίθων και γενικότερα των δομικών υλικών, αλλά και με τις διεργασίες φθοράς και υποβάθμισής τους. Το ολικό πορώδες αλλά και η κατανομή διαμέτρου των πόρων επηρεάζει σημαντικά την μεταφορά νερού και άλλων ρευστών εντός του υλικού, τα οποία με τη σειρά τους σχετίζονται με τη μεταφορά ρύπων και παραγόντων φθοράς, κατά συνέπεια το πορώδες διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη φθορά και αντοχή του υλικού. Επηρεάζει τη φαινόμενη πυκνότητα ενός υλικού, την επιδεκτικότητα σε φθορά από κρυστάλλωση αλάτων, την περατότητα σε ρευστά, την τριχοειδή αναρρίχηση, τα χαρακτηριστικά ξήρανσης [11], [12].

3.4.2. Πυκνότητα

Η πυκνότητα (ρ) ορίζεται ως ο λόγος μάζας (m) προς τον όγκο (V) ενός υλικού. Μπορεί να διακριθεί σε φαινόμενη και πραγματική (ή απόλυτη). Η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας προκύπτει χρησιμοποιώντας στον υπολογισμό τον μακροσκοπικό όγκο του υλικού, τον όγκο δηλαδή του υλικού συμπεριλαμβάνοντας τα εσωτερικά κενά που υπάρχουν υπό τη μορφή πόρων. Η τιμή της πραγματικής πυκνότητας είναι αυτή στον υπολογισμό της οποίας χρησιμοποιείται ο όγκος του υλικού χωρίς τα εσωτερικά κενά. Η φαινόμενη πυκνότητα του μαρμάρου Διονύσου μετρήθηκε από το ΙΓΜΕ 2720 kg/m³ [7], [11].

3.4.3. Διαπερατότητα – Υδατοαπορροφητικότητα

Διαπερατότητα ονομάζεται η ιδιότητα των πορωδών υλικών να επιτρέπουν τη διέλευση ρευστών από το εσωτερικό τους, η διεργασία προκαλείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων και περιγράφεται από το νόμο του Darcy.

Υδατοαπορροφητικότητα ονομάζεται η ιδιότητα του υλικού να απορροφά νερό στο εσωτερικό του όταν βρίσκεται σε επαφή με νερό. Το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της έλξης μεταξύ των μορίων του νερού και των τοιχωμάτων των πόρων. Η δύναμη αυτή είναι μεγαλύτερη στους πολύ μικρούς πόρους (τριχοειδείς).

Για την ποσοτικοποίηση της υδατοαπορρόφησης χρησιμοποιείται ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης, που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = \frac{\Delta B}{A \cdot t^2} \quad (3.1)$$

Όπου: ΔB είναι η διαφορά βάρους του δοκιμίου, A η επιφάνεια επαφής με το νερό και t ο χρόνος επαφής με το νερό [7].

Ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης για το μάρμαρο Διονύσου σε ατμοσφαιρική πίεση είναι 0,1 % κ.β. [10].

3.4.4. Μηχανικές Ιδιότητες

Οι λίθοι χρησιμοποιούνται στη δόμηση ως διακοσμητικά, αλλά και ως φέροντα στοιχεία, κατά συνέπεια είναι σημαντικές οι μηχανικές αντοχές τους και πιο συγκεκριμένα, η αντοχή στη θλίψη, στην κάμψη, στον εφελκυσμό, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και οι καμπύλες τάσης-καταπόνησης. Στον Πίνακα 4 δίνονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου [10], [13], [14].

Πίνακας 4: Ορισμένες μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου

Ιδιότητα	Τιμή
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	97
Αντοχή σε κάμψη υπό συγκεντρωμένο φορτίο (MPa)	18,9
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	9
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	77,02-88,77
Στατικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	84,5
Λόγος Poisson	0,26

3.4.5. Θερμικές Ιδιότητες

Στον Πίνακα 5 δίνονται οι βασικές θερμικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου [15][14].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική διαχυτότητα είναι σύνθετο μέγεθος, για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιούνται η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα του υλικού, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.21). Κατά συνέπεια βασική θερμική ιδιότητα των υλικών θεωρείται και η πυκνότητα. Προκύπτει από την εξίσωση υπολογισμού της ότι όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα ενός υλικού, τόσο χαμηλότερη η θερμική διαχυτότητα, για ίδιες τιμές θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής θερμοχωρητικότητας.

Το μάρμαρο γενικώς μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα υλικό με σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και διαχυτότητα, με αρκετά υψηλή όμως ειδική θερμότητα. Έχει δηλαδή δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλου ποσού θερμότητας στο εσωτερικό του. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί εμπειρικά, τα βράδια του καλοκαιριού αγγίζοντας μαρμάρινες επιφάνειες, που ήταν εκτεθειμένες στον ήλιο. Παρατηρεί κανείς, ότι όταν έχει προηγηθεί ιδιαίτερα ζεστή μέρα, το μάρμαρο συνεχίζει να διατηρεί θερμοκρασία υψηλότερη του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της νύχτας, πολλές ώρες μετά το πέρας της έκθεσης του υλικού στην ηλιακή ακτινοβολία.

Όσον αφορά τη θερμική διαστολή του μαρμάρου, υπόκειται και αυτό, όπως όλα τα υλικά σε μεταβολή των διαστάσεων του όταν δέχεται θερμοκρασιακές αλλαγές. Δεδομένου ότι τα περισσότερα ορυκτά από τα οποία συνιστώνται οι λίθοι παρουσιάζουν ανισότροπη θερμική διαστολή, αντίστοιχα, και οι διάφοροι λίθοι παρουσιάζουν έναν βαθμό ανισοτροπίας κατά τη θερμική διαστολή τους. Ο βαθμός ανισοτροπίας εξαρτάται από τη σύσταση του λίθου και άλλους παράγοντες. Όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο υποκεφάλαιο, η συμπεριφορά αυτή του μαρμάρου, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά θερμικής φθοράς του [11].

Πίνακας 5: Θερμικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου

Ιδιότητα	Τιμή
Θερμική αγωγιμότητα (W/m·K)	2,90
Ειδική θερμότητα (J/Kg·K)	900
Θερμική διαχυτότητα (mm ² /s)	1,19
Συντελεστής θερμικής διαστολής για θερμοκρασίες 15-100 °C (°C ⁻¹)	9·10 ⁻⁶

3.5. Θερμική Καταπόνηση Μαρμάρου

3.5.1. Γενικά

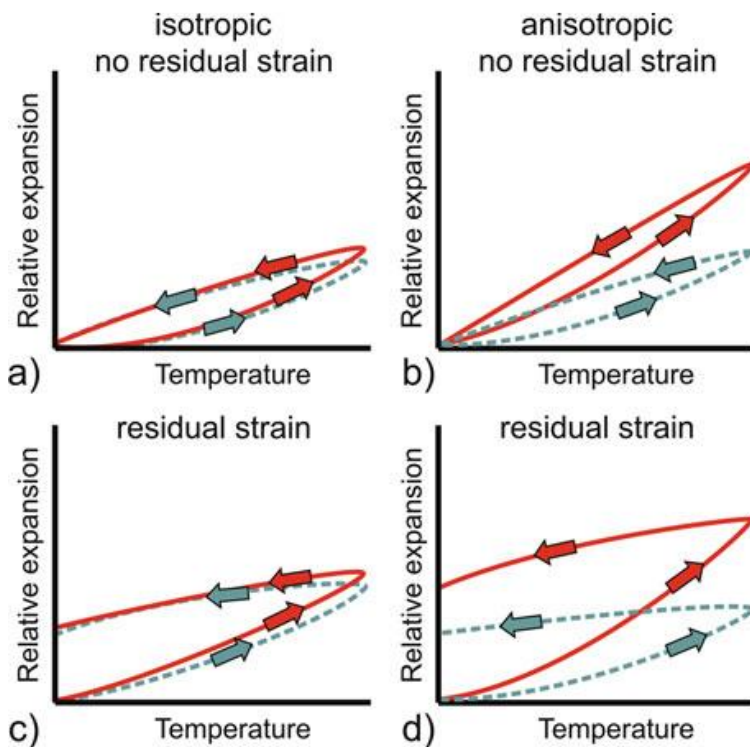
Η έκθεση των λίθων σε υψηλή θερμοκρασία και έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές έχει συνδεθεί με την παραμόρφωση λίθων, την ελάττωση της συνεκτικότητάς τους και των μηχανικών αντοχών τους. Χαρακτηριστική είναι η κύρτωση που εμφανίζουν μαρμάρινες πλάκες που χρησιμοποιούνται σε προσόψεις κτηρίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, και η οποία αποδίδεται στις καθημερινές θερμοκρασιακές μεταβολές που υπόκεινται. Ήδη από το 1934 ο Rayleigh μελέτησε το φαινόμενο και το συνέδεσε με τη θερμοκρασία [16]. Οι εργάτες στα ορυχεία μαρμάρου της Carrara της Ιταλίας χρησιμοποιούσαν για αιώνες το όρο «marmo cotto», δηλαδή «ψημένο μάρμαρο», αναφερόμενοι σε μάρμαρο χαμηλών μηχανικών αντοχών, αποδίδοντας τη συμπεριφορά αυτή του μαρμάρου στην θέρμανση του από την ηλιακή ακτινοβολία [17].



Εικόνα 5: Παράδειγμα κυρτωμένων πλακών μαρμάρου

3.5.2. Ο ρόλος της θερμικής διαστολής στη φθορά του μαρμάρου

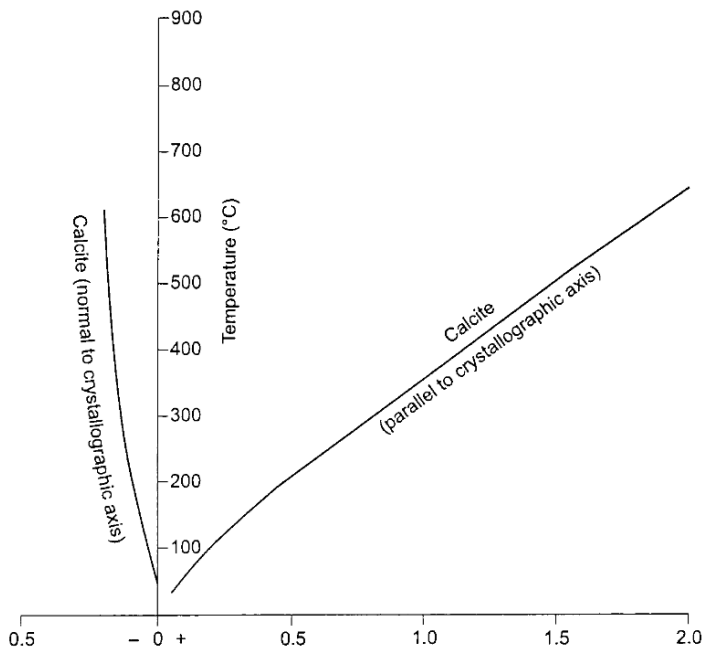
Κάθε λίθος έχει διαφορετική συμπεριφορά κατά τη θερμική διαστολή του. Η διαστολή μπορεί να είναι ισότροπη, κατά την οποία ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι ίσος σε όλους τους άξονες παραμόρφωσης. Στην αντίθετη περίπτωση ανισότροπης διαστολής, ο συντελεστής θερμικής διαστολής δεν είναι ίδιος σε όλους τους άξονες. Ταυτόχρονα, κατά τον κύκλο θέρμανσης-ψύξης και κατά συνέπεια διαστολής-συστολής, μπορεί το υλικό να επιστρέψει πλήρως στις αρχικές του διαστάσεις, είτε ένα ποσοστό της παραμόρφωσης να παραμείνει και μετά την επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία. Από τον συνδυασμό των παραπάνω χαρακτηριστικών, μπορούν να διακριθούν 4 βασικά είδη διασταλτικής συμπεριφοράς, όπως διακρίνονται στο Διάγραμμα 1 [11].



Διάγραμμα 1: Κύκλος θερμικής διαστολής-συστολής κατά μήκος δύο αξόνων. Με συνεχή γραμμή ο πρώτος άξονας, με διακεκομμένη ο δεύτερος. Τα βελάκια υποδεικνύουν την κατεύθυνση θέρμανσης. α) Ισότροπη διαστολή χωρίς παραμένουσα παραμόρφωση. β) Ανισότροπη διαστολή χωρίς παραμένουσα παραμόρφωση. γ) Ισότροπη διαστολή με παραμένουσα παραμόρφωση. δ) Ανισότροπη διαστολή με παραμένουσα παραμόρφωση.

Η μακροσκοπική θερμική διαστολή που παρατηρείται είναι αποτέλεσμα της διαστολής των κόκκων του ορυκτού που συμβαίνει σε μικροσκοπικό επίπεδο. Το μάρμαρο Διονύσου αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από ασβεσίτη, κατά συνέπεια μελετώντας τη θερμική διαστολή των κόκκων ασβεσίτη, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για τη συνολική συμπεριφορά του υλικού. Είναι γνωστό ότι οι μονοκρυσταλλοί ασβεσίτη διαστέλλονται έντονα κατά μήκος του κρυσταλλογραφικού άξονα c και συστέλλονται κάθετα σε αυτόν, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2. [18], [19]. Αυτού του είδους η συμπεριφορά διαταράσσει το πλέγμα των κόκκων, οι οποίοι είναι στενά διατεταγμένοι σε μία δεδομένη θερμοκρασία και όταν αυτή αυξάνεται και οι κόκκοι παραμορφώνονται θερμικά, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού τους, η διαστολή κάποιων κόκκων εμποδίζεται από τους γειτονικούς, με αποτέλεσμα το μη μηδενικό άθροισμα παραμενουσών τάσεων. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι, αν και υπό την επίδραση εξωτερικών μηχανικών τάσεων μπορεί να δημιουργηθούν παρόμοιες παραμορφώσεις των κόκκων, εντούτοις απαιτείται εφαρμογή ιδιαίτερα

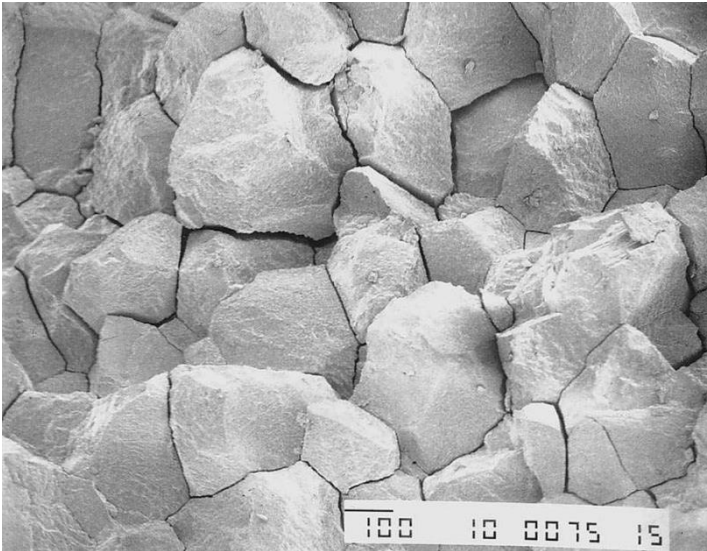
υψηλής τάσης, ώστε να δημιουργηθούν παραμορφώσεις αντίστοιχες με αυτές που προκαλεί η αύξηση της θερμοκρασίας μόνο κατά λίγους βαθμούς.



Διάγραμμα 2: Θερμική διαστολή του ασβεστίτη παράλληλα και κάθετα στον κρυσταλλογραφικό του άξονα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Έχει διαπιστωθεί ότι οι θερμοκρασιακές μεταβολές οδηγούν στη δημιουργία διακένων μεταξύ των κόκκων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, αν και οι κόκκοι παραμένουν ακέραιοι. Αύξηση της θερμοκρασίας 20-30 °C είναι αρκετή για να προκαλέσει τέτοιου είδους συμπεριφορά. Μακροσκοπικά παρατηρείται μόνιμη παραμόρφωση του υλικού [20].

Η κύρτωση που παρατηρείται σε πλάκες μαρμάρου που επενδύουν προσόψεις κτηρίων αποδίδεται επίσης στην ελάττωση της συνοχής του ιστού των κόκκων, λόγω της παρουσίας διακένων. Η παρουσία και ένταση του φαινομένου εξαρτάται από την ποικιλία μαρμάρου και διαφέρει σημαντικά από ποικιλία σε ποικιλία και ταυτόχρονα συνδέεται με την αντοχή στην κάμψη. Μάρμαρα με υψηλότερη αντοχή στην κάμψη εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίσταση στην κύρτωση [17].



Εικόνα 6: Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης μαρμάρου που έχει υποστεί κυκλική θερμική καταπόνηση

3.5.3. Επίδραση της θερμότητας στις φυσικομηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου

Η επίδραση της θερμότητας στις ιδιότητες του μαρμάρου είναι εμφανής σε υψηλές αλλά και πιο χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι Goudie et al. κατέγραψαν ελάττωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας μαρμάρου μετά από κυκλική θερμική καταπόνηση, με θερμοκρασιακούς κύκλους μεταξύ 25 και 80 °C. Εφάρμοσαν δύο διαφορετικούς κύκλους, έναν 24ωρης διάρκειας και έναν 3ωρης διάρκειας. Και στις δύο περιπτώσεις υπήρξε ελάττωση περίπου 10% του μέτρου ελαστικότητας στους πρώτους κύκλους και ελάχιστη διαφοροποίηση πέρα από αυτό το σημείο. Επίσης παρατήρησαν αύξηση των διακένων μεταξύ των κόκκων, μέσω εικόνων από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης [21].

Είναι επαρκώς τεκμηριωμένο από σχετικές μελέτες ότι η θλιπτική αντοχή, η αντοχή στην κάμψη και το μέτρο ελαστικότητας ελαττώνονται σε δοκίμια μαρμάρου που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε θερμοκρασίες 100-1000 °C, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Επίσης έχει διαπιστωθεί αύξηση του πορώδους, εμφάνιση μικρορωγμών και ελάττωση της ταχύτητας μετάδοσης υπερήχων, ιδιότητα η οποία συνδέεται με τη μηχανική συμπεριφορά, όσο μεγαλύτερη, τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες [22]–[25].

Σε θερμοκρασίες άνω των 600 °C παρατηρείται ασημαντή μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων, είτε και αποσύνθεση των δειγμάτων [26]–[28]. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς από τους 600 °C περίπου αρχίζει η θερμική αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου, βασικού συστατικού του μαρμάρου [29].

Οι Tang et al. μελέτησαν την επίδραση της διάρκειας της θερμότητας στο μάρμαρο. Θέρμαναν δοκίμια μαρμάρου σε θερμοκρασίες 20-600 °C για διάστημα 1-8 ωρών και διαπίστωσαν ότι όσον αφορά το πορώδες και τη ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων η θερμοκρασία είναι πιο επιδραστική από τη διάρκεια. Όσον αφορά τις θερμικές ιδιότητες, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμική διαχυτότητα ελαττώνεται με την αύξηση της διάρκειας θέρμανσης, ενώ η ειδική θερμοχωρητικότητα αυξάνονται ελαφρώς μέχρι το διάστημα των 4 ωρών και παραμένει περίπου σταθερή για μεγαλύτερα διαστήματα. Τέλος η διάρκεια θέρμανσης δε φαίνεται να επηρεάζει τη θλιπτική αντοχή του

μαρμάρου, παρατηρήθηκε όμως κάποια επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας στις υψηλότερες θερμοκρασίες κατεργασίας [30].

Οι Koca et al. σε έρευνα που πραγματοποίησαν, μελέτησαν τις αλλαγές στις ιδιότητες του μαρμάρου δύο κίωνων, στην είσοδο κτηρίου που είχαν εκτεθεί σε φωτιά. Από τον έλεγχο δοκιμίων από τους κίονες και τη σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο μπόρεσαν να κάνουν χαρτογράφηση της θερμοκρασίας στην οποία εκτέθηκαν οι διάφορες περιοχές των κίωνων με βάση μετρήσεις κρουσιμετρίας, ενώ διαπίστωσαν λογαριθμική συσχέτιση του ολικού πορώδους και της θερμοκρασίας [31].

4. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διεργασιών

4.1. Γενικές Αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) είναι μία ισχυρή υπολογιστική τεχνική (αριθμητική μέθοδος) με σκοπό τη λύση προβλημάτων που περιγράφονται με τη χρήση διαφορικών εξισώσεων σε διάφορους τομείς της μηχανικής των στερεών και υγρών, στη δομική μηχανική, στη θερμομηχανική, και γενικότερα στην εφαρμοσμένη επιστήμη. Η μέθοδος είναι γενίκευση κλασικών μεθόδων που βασίζονται στην ιδέα ότι η λύση u μίας διαφορικής εξίσωσης μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός άγνωστων παραμέτρων c_j και κατάλληλα επιλεγμένων συναρτήσεων ϕ_j σε ολόκληρο το πεδίο του προβλήματος. Οι παράμετροι c_j προσδιορίζονται στη συνέχεια έτσι ώστε η διαφορική εξίσωση να ικανοποιείται, συχνά, με την έννοια του σταθμισμένου – ολοκληρώματος. Οι συναρτήσεις ϕ_j , που ονομάζονται συναρτήσεις προσέγγισης, επιλέγονται έτσι ώστε να ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες [32]. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η κατάτμηση του υπό μελέτη χωρίου σε μικρότερα κομμάτια, τα πεπερασμένα στοιχεία, και τη χρήση μεθόδων από το λογισμό των μεταβολών με στόχο την επίλυση του προβλήματος. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται σε προβλήματα με σύνθετη γεωμετρική μορφή, διαφορετικά υλικά και σύνθετες συνοριακές συνθήκες [33].

Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται σε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

- Υποδιαίρεση του προβλήματος σε κόμβους και στοιχεία
- Παραδοχή μιας συνάρτησης που αντιπροσωπεύει τη φυσική συμπεριφορά ενός στοιχείου
- Ανάπτυξη εξισώσεων για ένα στοιχείο
- Συναρμολόγηση των στοιχείων για να παρουσιαστεί το συνολικό πρόβλημα με την κατασκευή του ολικού πίνακα ακαμψίας
- Εφαρμογή αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς και φορτίσεων
- Ταυτόχρονη επίλυση ενός συνόλου γραμμικών ή μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων έτσι ώστε να ληφθούν κομβικά αποτελέσματα (π.χ. τιμές θερμοκρασίας σε διαφορετικούς κόμβους)
- Λήψη αποτελεσμάτων.

4.2. Μελέτη της Φθοράς του Μαρμάρου με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Υπολογιστικά εργαλεία και ειδικότερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για να ερευνηθεί η επίδραση της θερμότητας στο μάρμαρο, ιδιαίτερα η μελέτη της μικροδομής του υλικού, των αλλαγών που επιφέρουν οι θερμοκρασιακές μεταβολές και της σύνδεσής τους με τις μακροσκοπικές ιδιότητες.

Οι Antill et al. [34] πραγματοποίησαν προσομοίωση φθοράς ασβεστόλιθου χρησιμοποιώντας πρωτότυπο κώδικα που κατασκεύασαν σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Προσομοίωσαν την

γυψοποίηση της επιφάνειας του λίθου και τη διακίνηση νερού και αλάτων στο εσωτερικό του σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φθοράς.

Οι Weiss et al. [35] πραγματοποίησαν ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, δύο διαστάσεων της μικροδομής ασβεστιτικού μαρμάρου, για να ερευνήσουν τη θερμομηχανική συμπεριφορά του. Χρησιμοποίησαν το λογισμικό OOF που ανέπτυξε το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ και εξειδικεύεται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε μικροδομές. Πραγματοποίησαν προσομοιώσεις για δυο διαφορετικές περιπτώσεις προσανατολισμού των κρυστάλλων ασβεστίτη. Διαπίστωσαν ότι μάρμαρα με έντονο προσανατολισμό των κρυστάλλων ασβεστίτη ανέπτυξαν μικρότερες θερμικές τάσεις και χαμηλότερη συνολική ενέργεια ελαστικών παραμορφώσεων, σε σχέση με μάρμαρα με μικρότερη προτίμηση προσανατολισμού .

Οι Saylor et al. [36] πραγματοποίησαν παρόμοιες προσομοιώσεις στο ίδιο λογισμικό, για 45 διαφορετικά είδη προσανατολισμού των κρυστάλλων ασβεστίτη αλλά και δολομίτη και κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα.

Οι Ferrero et al. [37] μελέτησαν το φαινόμενο της κύρτωσης πλακών μαρμάρου λόγω θερμικής καταπόνησης χρησιμοποιώντας αναλυτικό μοντέλο του βαθμού κύρτωσης ως συνάρτηση της βαθμίδας θερμοκρασίας κατά μήκος του πάχους της πλάκας και της κυκλικής μεταβολής της λόγω του μετεωρολογικού κύκλου. Βρήκαν εκθετική σχέση ανάπτυξης μικρορωγμών και αριθμού θερμοκρασιακών κύκλων. Κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές πλάκες πρόσοψης κτηρίου διαπιστώθηκε η ανάγκη βαθμονόμησης της μεθόδου ώστε να έχει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Οι Ferrero et al. [38] σε νεότερη έρευνα χρησιμοποίησαν δεδομένα πολωτικής μικροσκοπίας και ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων για να εξάγουν στατιστικές κατανομές μεγέθους κόκκων και προσανατολισμού του οπτικού τους άξονα. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης της κύρτωσης πλακών μαρμάρου και παρατηρήθηκε μεγάλο εύρος αριθμού θερμοκρασιακών κύκλων απαιτούμενο για τον ίδιο βαθμό κύρτωσης, στις διάφορες κατανομές προσανατολισμού των κόκκων.

Οι Shushakova et al. [39] πραγματοποίησαν προσομοιώσεις κυκλικής θερμικής καταπόνησης σε μικροδομή μαρμάρου, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MTEX και κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα με την έρευνα των Weiss et al. [35] σχετικά με την εξάρτηση των εσωτερικών τάσεων από τον προσανατολισμό των κόκκων.

Οι Ito et al. [40] κατασκεύασαν μαθηματικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο συνέδεσαν τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης με τη θερμότητα σε πλάκες μαρμάρου.

Σε επακόλουθη έρευνα τους οι Ito et al. [41] πρότειναν μεθοδολογία υπολογισμού θερμοκρασίας και τάσης στο εσωτερικό μαρμαρίνων πλακών προσόψεων κτηρίων, χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου με πειραματικά δεδομένα βρήκαν καλή συσχέτιση.

5. Πειραματική Διαδικασία

5.1. Γενικά

5.1.1. Σκοπός και σχεδιασμός πειραμάτων

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.5 οι θερμοκρασιακές μεταβολές προκαλούν διάφορες αλλαγές στις φυσικομηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου και σε τελική ανάλυση υποβαθμίζουν τα χαρακτηριστικά που απαιτείται να έχει ένα υλικό που χρησιμοποιείται στη δόμηση. Σκοπός των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι η παρατήρηση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο εξωτερικό και το εσωτερικό του μαρμάρου, κατά τη διάρκεια διαφορετικών θερμοκρασιακών μεταβολών του εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο και τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων θερμικών διεργασιών, με απώτερο σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων ενός μοντέλου μεταφοράς θερμότητας σε μάρμαρο Διονύσου, που να μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασιακή κατανομή στο εσωτερικό του μαρμάρου και να εξάγονται με αυτό τον τρόπο συμπεράσματα για την αναμενόμενη θερμική καταπόνηση διαφόρων αρχιτεκτονικών μελών σε μνημεία.

Οι λίθοι που χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά, κατά τη διάρκεια ζωής τους μπορούν να εκτεθούν σε δύο κύρια είδη θερμικών καταπονήσεων. Το πρώτο αφορά την κυκλική καταπόνηση σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες από περιοδική μεταβολή της θερμοκρασίας τους, π.χ. λόγω της έκθεσης στο ηλιακό φως και τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Το δεύτερο αφορά την εφάπαξ θέρμανση και ψύξη σε έναν θερμοκρασιακό κύκλο π.χ. από πυρκαγιά. Αυτά τα είδη θερμικής καταπόνησης επιχειρήθηκε να προσομοιωθούν σε εργαστηριακό περιβάλλον. Σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικά είδη θερμικής καταπόνησης σε εργαστηριακούς φούρνους, με σκοπό την προσέγγιση των πραγματικών διεργασιών.

Τα δοκίμια μαρμάρου υποβλήθηκαν σε θερμικές κατεργασίες, κατά τη διάρκεια των οποίων έφεραν θερμοστοιχεία και έγινε καταγραφή των θερμοκρασιακών μεταβολών καθ' όλη τη διάρκεια των διεργασιών.

Διαφορετικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για κάθε διεργασία καταπόνησης και κάποια δεν υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά για μετέπειτα μετρήσεις.

Επιπλέον έγινε διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης, τεχνική η οποία παρέχει ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες για τη σύσταση του υλικού, αλλά αποτελεί και ακριβή τρόπο μέτρησης της ειδικής θερμοχωρητικότητας ως συνάρτησης της θερμοκρασίας.

Τέλος, με βάση όλες τις παραπάνω μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε περιβάλλον ANSYS CFX και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά.

5.1.2. Δοκίμια

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δείγματα μαρμάρου Διονύσου διαμορφωμένα από το ίδιο κομμάτι μαρμάρου, με μήκος πλευράς περίπου 4,5 cm. Μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους, ζυγίστηκαν και φυλάχθηκαν σε ξηραντήρες, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία. Σε 5 δοκίμια έγιναν οπές βάθους 20 mm και διαμέτρου 3 mm, ώστε να εισαχθούν θερμοστοιχεία και να γίνει μέτρηση της θερμοκρασίας κοντά στο κέντρο του δοκιμίου.

5.2. Καταπόνηση με έναν Κύκλο Θέρμανσης-Ψύξης

5.2.1. Προετοιμασία και εξοπλισμός

Πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές θερμικές διεργασίες μεμονωμένου κύκλου θέρμανσης – ψύξης στις θερμοκρασίες 80 και 200 °C. Επιλέχθηκε μία χαμηλή θερμοκρασία, 80 °C, που μπορεί να επιτευχθεί με φυσικό τρόπο, από την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και μία υψηλή θερμοκρασία, 200 °C, η υψηλότερη που ήταν δυνατό να επιτευχθεί με τον διαθέσιμο εξοπλισμό και να εξασφαλιστεί η δυνατότητα παρακολούθησης της θερμοκρασίας με θερμοστοιχεία. Επιπλέον η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή, κατά συνέπεια αποφεύχθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες, στις οποίες αρχίζει να είναι σημαντική και η συμβολή της ακτινοβολίας στη μεταφορά θερμότητας [21].

Χρησιμοποιήθηκε φούρνος Carbolite PF-60. Η θέρμανση στον συγκεκριμένο φούρνο γίνεται μέσω αντιστάσεων που βρίσκονται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του, κατά συνέπεια η μεταφορά θερμότητας προς και από τα δοκίμια γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω συναγωγής. Επιπλέον ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε επιτρέπει την τοποθέτηση θερμοστοιχείων στα δοκίμια, εντός του φούρνου και τη σύνδεσή τους σε καταγραφική συσκευή, καθιστώντας δυνατή τη ζωντανή παρακολούθηση και καταγραφή της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία. Η παρακολούθηση έγινε μέσα από το λογισμικό LabVIEW σε υπολογιστή που λάμβανε τα δεδομένα από το καταγραφικό όργανο σε ζωντανό χρόνο και έκανε live monitoring και αποθήκευσή τους σε αρχείο Microsoft Excel, για μετ' έπειτα επεξεργασία. Η καταγραφή των θερμοκρασιών γινόταν ανά δευτερόλεπτο.

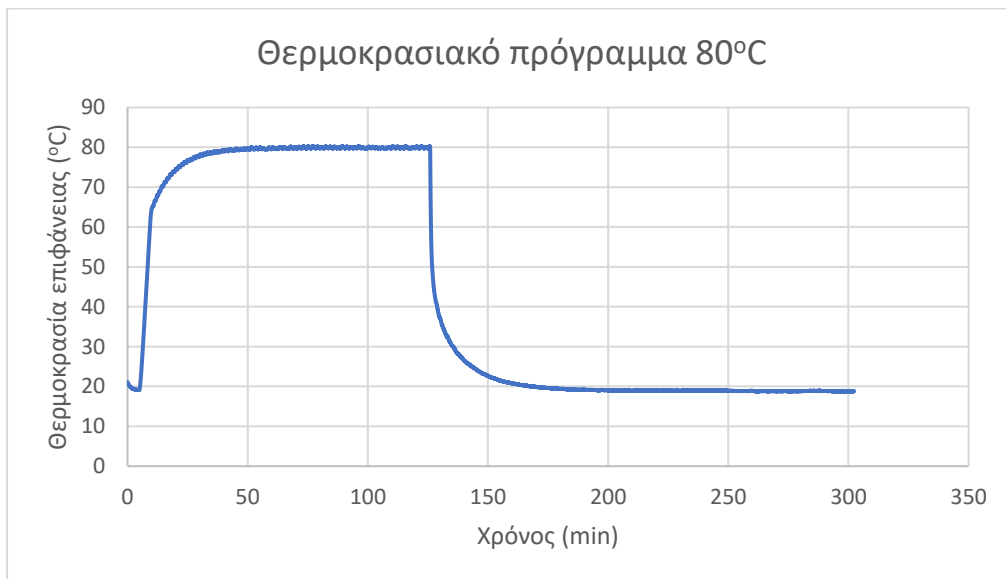
5.2.2. Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 80°C

Για το συγκεκριμένο στάδιο χρησιμοποιήθηκε ένα κυβικό δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου, μήκους πλευράς 4,5 cm. Έφερε θερμοστοιχεία στον αέρα σε ύψος περίπου 2 cm από πάνω του, στην επιφάνειά του και εντός οπής στο εσωτερικό του σε βάθος 20 mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Δοκίμιο μαρμάρου κατά την προετοιμασία του θερμοκρασιακού προγράμματος 80°C

Ο φούρνος ρυθμίστηκε στους 80°C, με μέγιστο ρυθμό θέρμανσης 12,8 °C/min. Αφού έφτασε σε ισορροπία, το σύστημα αφέθηκε σε αυτή τη θερμοκρασία για περίπου μια ώρα και έπειτα ανοίχθηκε η πόρτα και ο φούρνος απενεργοποιήθηκε και το σύστημα αφέθηκε να ψυχθεί στη θερμοκρασία δωματίου με μέγιστο ρυθμό ψύξης 18,4 °C/min, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3: Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 80°C

5.2.3. Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 200 °C

Για το συγκεκριμένο στάδιο χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκίμια, ένα εκ των οποίων είχε οπή, ώστε να τοποθετηθεί θερμοστοιχείο εντός της. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο φούρνο όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, με τρόπο τέτοιο ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή επαφή μεταξύ των δοκιμίων και της μεταλλικής βάσης, πάνω στην οποία στηρίζονταν. Έγινε παρακολούθηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του φούρνου με ένα θερμοστοιχείο, της επιφανειακής θερμοκρασίας 4 εκ των δοκιμίων με

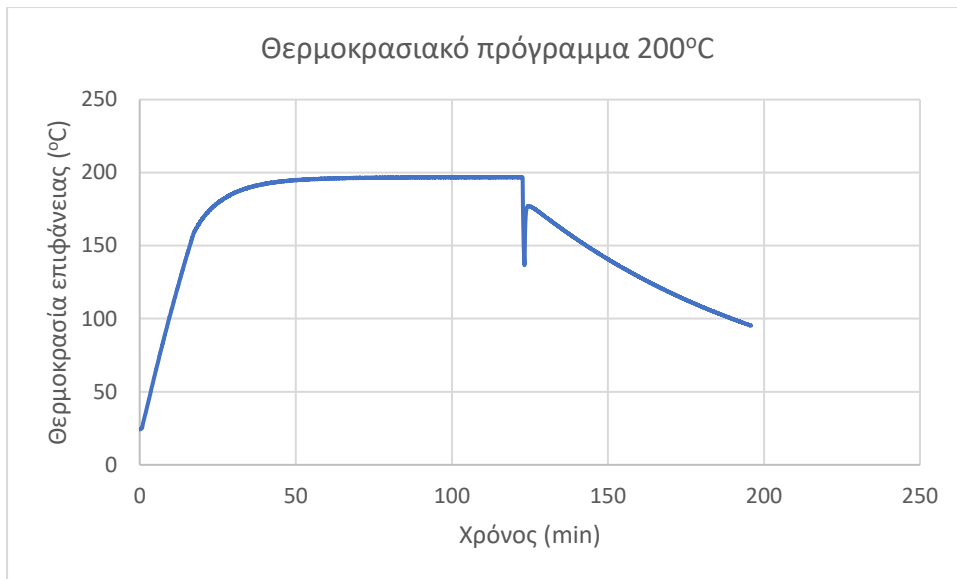
ισάριθμα θερμοστοιχεία, ενώ ένα δοκίμιο έφερε θερμοστοιχείο στο εσωτερικό του, εντός οπής σε βάθος 19 mm για παρακολούθηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του.



Εικόνα 8: Δοκίμια μαρμάρου κατά την προετοιμασία του θερμοκρασιακού προγράμματος 200°C

Αφού τοποθετήθηκαν τα δοκίμια, ο φούρνος ρυθμίστηκε στην επιθυμητή θερμοκρασία των 200°C, ο ρυθμός θέρμανσης μετρήθηκε 9 °C/min και αφού η θερμοκρασία στο εσωτερικό του έφτασε σε αυτό το σημείο, το σύστημα αφέθηκε σε ισορροπία για περίπου 1 ώρα. Έπειτα ο φούρνος απενεργοποιήθηκε και το σύστημα αφέθηκε να ψυχθεί με φυσικό τρόπο, με την πόρτα του φούρνου κλειστή και ρυθμό ψύξης -1°C/min.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρειάστηκε να ανοιχθεί ο φούρνος για σύντομο χρονικό διάστημα, κατά το αρχικό στάδιο της ψύξης, με αποτέλεσμα να υπάρξει μια απότομη πτώση της θερμοκρασίας η οποία αποκαταστάθηκε μερικώς με το κλείσιμο της πόρτας, η καταγραφή της ψύξης συνεχίστηκε μέχρι τη θερμοκρασία των 90°C περίπου. Το πλήρες προφίλ της επιφανειακής θερμοκρασίας των δοκιμίων δίνεται στο Διάγραμμα 4.



Διάγραμμα 4: Θερμοκρασιακό πρόγραμμα 200°C

5.3. Θερμοκρασιακό Πρόγραμμα με Πολλαπλούς Κύκλους Θέρμανσης-Ψύξης

5.3.1. Θερμοκρασιακός κύκλος

Σε έρευνες που έγιναν μετρήσεις επιφανειακών θερμοκρασιών σε μνημεία που βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους είτε εξετάζουν την επίδραση του κύκλου θέρμανσης-ψύξης στη φυσικομηχανική συμπεριφορά μαρμάρου και άλλων λίθων, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα θερμοκρασιακά όρια. Οι κύκλοι που συναντώνται είναι είτε 24ωροι, βασισμένοι σε μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασιακής διακύμανσης δομικών στοιχείων και λίθων στη φύση, υπό την επίδραση του μετεωρολογικού κύκλου, είτε συντομότεροι κύκλοι, που χρησιμοποιούν παρόμοια όρια, με σκοπό την επιταχυνόμενη θερμική καταπόνηση.

Στη δημοσίευση των Maretsi et al. έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμοκάμερα στις επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου του Ναού του Ηφαίστου στην Αθήνα. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τις πρωινές ώρες (10:30-12:30) από τον Οκτώβριο του 2014 έως τον Ιούλιο του 2015). Κατά το διάστημα αυτό καταγράφηκαν σε διάφορα σημεία του ναού θερμοκρασιακές από 7,6 μέχρι 33,7 °C. Το γεγονός όμως ότι οι μετρήσεις έγιναν πρωινές ώρες υποδηλώνει ότι πιθανότατα κατά τις μεσημεριανές ώρες υπήρχε περεταίρω αύξηση της θερμοκρασίας του μαρμάρου [42].

Η Πέτσου στην εργασία της πραγματοποίησε μετρήσεις με θερμοκάμερα στον Παρθενώνα και κατέγραψε επιφανειακές θερμοκρασίες μαρμάρου μέχρι και 52,7 °C [43].

Οι Ito et al. κατέγραψαν θερμοκρασιακή διακύμανση κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου του Αυγούστου του 2007 από 20 έως 37 °C στην επιφάνεια της μαρμάρινης πρόσοψης του δικαστικού μεγάρου της Πεσκάρα στην Ιταλία [41].

Οι Goudie και Viles χρησιμοποίησαν στα πειράματά τους σε δείγματα πεντελικού μαρμάρου τον 24ωρο κύκλο Wadi Digla, που περιλαμβάνει θερμοκρασιακή μεταβολή της επιφάνειας μεταξύ 22 και 72 °C και βασίζεται σε μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας λίθων σε ερημικό περιβάλλον. Χρησιμοποίησαν επίσης έναν 3ωρο κύκλο με μεταβολή μεταξύ 25 και 80 °C. Πραγματοποίησαν 95

και 200 κύκλους αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις ταχύτητας μετάδοσης υπερήχων που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές παρατηρούνται στους αρχικούς κύκλους [21].

Λόγω της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας αναμένεται οι κλιματικές συνθήκες να επιδεινωθούν και να υπάρξουν ερημοποιήσεις σε θερμά και ξηρά κλίματα. Οι συνθήκες αυτές θέτουν σε κίνδυνο τα μνημεία που βρίσκονται σε τέτοιο περιβάλλον, λόγω μεταξύ άλλων και των θερμοκρασιών που επικρατούν [1].

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε να εφαρμοστεί ένας κύκλος που προσομοιώνει ακραίες κλιματικές συνθήκες με σημαντικές θερμοκρασιακές μεταβολές, όπως αυτές στην έρευνα των Goudie et al., επιδιώκοντας όμως συντομότερη διάρκεια κύκλου. Ως άνω όριο επιλέχθηκε η θερμοκρασία των 70 °C και ως κάτω όριο αυτή των 30 °C, δεδομένου ότι τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εποχή που επικρατούσαν θερμοκρασίες υψηλότερες των 20 βαθμών και η ψύξη έγινε με έκθεση των δοκιμίων στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ένα χαμηλότερο όριο θερμοκρασίας θα οδηγούσε σε μεγαλύτερο χρόνο ψύξης.

5.3.2. Αλγόριθμος πειράματος

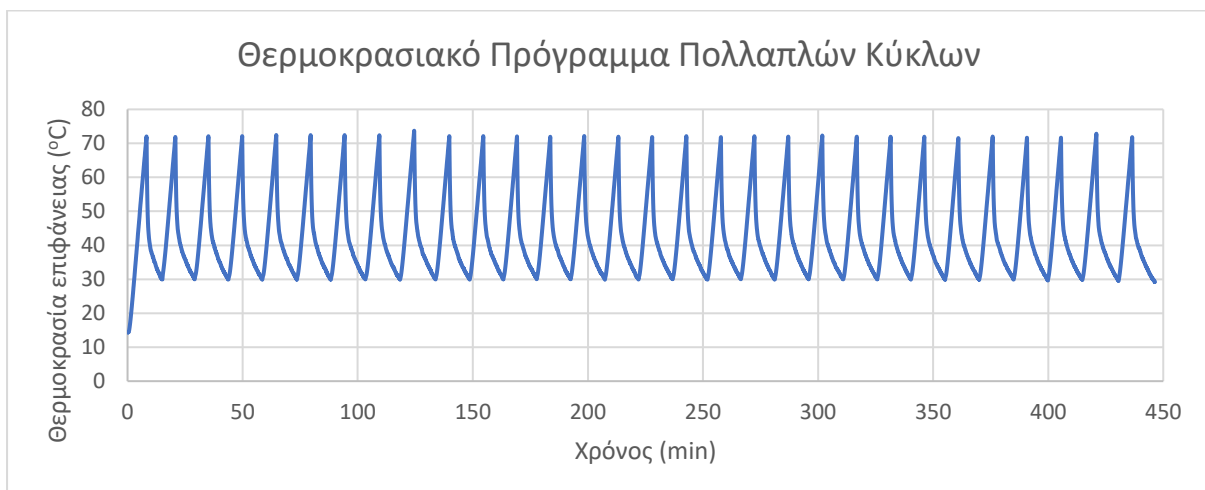
Για τη συγκεκριμένη κατεργασία χρησιμοποιήθηκε ο φούρνος Carbolite PF-60 . Η εφαρμογή του θερμοκρασιακού προγράμματος πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα με σβήσιμο και άνοιγμα του φούρνου για το στάδιο της ψύξης, ενώ στο ίδιο στάδιο τραβήχτηκαν και στιγμιότυπα με τη θερμική κάμερα. Ως θερμοκρασία αναφοράς για την έναρξη του κάθε σταδίου (θέρμανσης-ψύξης) του κύκλου, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος της επιφανειακής θερμοκρασίας όλων των δοκιμίων. Αφού τοποθετήθηκαν τα δοκίμια και τα θερμοστοιχεία στο φούρνο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Κλείσιμο της πόρτας του φούρνου
2. Ρύθμιση του φούρνου στους 200°C.
3. Όταν η μέση επιφανειακή θερμοκρασία αγγίξει τους 70°C, άνοιγμα της πόρτας
4. Ρύθμιση του φούρνου στους 0 °C
5. Όταν η μέση επιφανειακή θερμοκρασία αγγίξει τους 30°C, επανάληψη των βημάτων.

Πραγματοποιήθηκαν 30 κύκλοι, ο μέσος ρυθμός θέρμανσης υπολογίστηκε σε 12,4 °C/min και ο μέσος ρυθμός ψύξης 3,6 °C/min, ενώ η μέση διάρκεια κύκλου ήταν 14,9 min. Στο Διάγραμμα 5 φαίνεται το πλήρες θερμοκρασιακό πρόγραμμα για τους 30 κύκλους που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 9: Δοκίμια μαρμάρου κατά την προετοιμασία του θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων



Διάγραμμα 5: Θερμοκρασιακό Πρόγραμμα Πολλαπλών Κύκλων

5.4. Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης όπως η διαφορική θερμική ανάλυση (DTA), η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG), η θερμομηχανική ανάλυση (TMA), η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC) κ.ά. είναι τεχνικές ανάλυσης που επιτρέπουν την καταγραφή δεδομένων με τη μορφή θερμικών φασμάτων και την μέτρηση της μεταβολής διάφορων ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία.

Το όργανο διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης περιλαμβάνει δύο θέσεις υποδοχής δειγμάτων, μία για το δείγμα αναφοράς και η άλλη για δείγμα προς εξέταση (αναλύτης), κάθε μία περιλαμβάνει στοιχείο θέρμανσης, καθώς και θερμοστοιχείο για μέτρηση της θερμοκρασίας. Τα δείγματα τοποθετούνται σε ειδικά μικρά χωνευτήρια από υλικό που άγει καλά τη θερμότητα. Τα

δύο δείγματα ξεκινούν να θερμαίνονται ταυτόχρονα στην ίδια θερμοκρασία, σύμφωνα με το θερμοκρασιακό πρόγραμμα που έχει ορίσει ο χρήστης. Καθώς η θερμοκρασία του αναλύτη αποκλίνει ελάχιστα από αυτή του δείγματος αναφοράς, αυτή η διαφορά θερμοκρασίας ανιχνεύεται μέσω των θερμοστοιχείων. Η συσκευή διορθώνει την απόκλιση ελαττώνοντας την ροή θερμότητας στο ένα δείγμα και αυξάνοντας τη στο άλλο, με σκοπό να εκμηδενίσει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δειγμάτων. Με αυτό τον τρόπο η θερμοκρασία των δύο δειγμάτων διατηρείται ίση και η ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για να διατηρηθεί το κάθε δείγμα στη συγκεκριμένη θερμοκρασία καταγράφεται. Η διαφορά απαιτούμενης ισχύος μεταξύ αναφοράς και αναλύτη παρέχει πληροφορίες σχετικά με το εξεταζόμενο δείγμα. Καθώς Η συσκευή διαθέτει δύο κύκλους ελέγχου, έναν που ελέγχει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δειγμάτων και έναν που στοχεύει στη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας αναφοράς-αναλύτη ίση με αυτή που επιβάλλει το επιλεγμένο πρόγραμμα. Οι δύο κύκλοι ελέγχου εναλλάσσονται διαρκώς με σκοπό την ικανοποίηση και των δύο απαιτούμενων συνθηκών

Για τον προσδιορισμό της ειδικής θερμότητας κάποιου υλικού, αρχικά γίνεται ανάλυση με τα δύο χωνευτήρια κενά. Το όργανο ρυθμίζεται ώστε να εκτελέσει το θερμοκρασιακό πρόγραμμα θέρμανσης από θερμοκρασία $T_{αρχ}$ σε θερμοκρασία $T_{τελ}$, οι οποίες αποτελούν τα θερμοκρασιακά όρια της ανάλυσης. Με αυτό τον τρόπο καταγράφεται το συστηματικό σφάλμα μέτρησης, που οφείλεται στις ασυμμετρίες κατασκευής του οργάνου και παράγεται η καμπύλη βάσης. Έπειτα η ίδια ανάλυση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας στη μία θέση δείγμα αναφοράς γνωστής μάζας και γνωστής θερμοχωρητικότητας σε όλες τις θερμοκρασίες από $T_{αρχ}$ μέχρι $T_{τελ}$ και κενό χωνευτήρι στην άλλη θέση. Τέλος η ανάλυση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας εξεταζόμενο δείγμα γνωστής μάζας, αντί του δείγματος αναφοράς. Οι διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα στο δείγμα αναφοράς και στον αναλύτη χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η ειδική θερμοχωρητικότητα του αναλύτη σύμφωνα με την εξής σχέση [44], [45]:

$$\frac{\Delta T_{αναλύτη}}{c_{p_{αναλύτη}} m_{αναλύτη}} = \frac{\Delta T_{αναφοράς}}{c_{p_{αναφοράς}} m_{αναφοράς}} \quad (5.1)$$

Για την παρούσα εργασία σε όργανο DSC της Mettler Toledo έγινε διαφορική θερμιδομετρική ανάλυση σε μάρμαρο Διονύσου και μετρήθηκε η μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας σε θερμοκρασίες από 10 έως 500 °C, χρησιμοποιώντας ως υλικό αναφοράς ζαφείρι.

6. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Μεταφοράς Θερμότητας σε Μάρμαρο Διονύσου

6.1. Το Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιείται το λογισμικό ANSYS. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού που περιέχει περισσότερες από 100,000 γραμμές κώδικα και μπορεί να πραγματοποιήσει στατικές, δυναμικές και ηλεκτρομαγνητικές αναλύσεις, καθώς και αναλύσεις ρευστών και μετάδοσης θερμότητας. Το ANSYS είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και βρίσκεται σε κυκλοφορία πάνω από 25 χρόνια.

Το λογισμικό ANSYS δίνει στο χρήστη την δυνατότητα υλοποίησης όλων των παραπάνω σταδίων, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι κάποια από τα προαναφερθέντα στάδια δεν μπορούν να υλοποιηθούν σε άλλα περιβάλλοντα και τα αποτελέσματά τους να εισαχθούν, στη συνέχεια, στο ANSYS [46]. Τα στάδια μπορούν να υλοποιηθούν με πολλές μεθοδολογίες εντός του περιβάλλοντος του ANSYS. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε ορισμένες επιλογές ώστε να γίνει κατανοητή η πολύπλευρη αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων.

1ο. Στάδιο: Κατασκευή γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει, γενικά, με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία (keypoints), γραμμές (lines), επιφάνειες (areas) και τέλος όγκοι (volumes). Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευαστούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς τη δημιουργία γραμμών, είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους. Το τελευταίο μπορεί να φανεί πολύ εύχρηστο σε περιπτώσεις που χρειάζεται να κατασκευαστούν γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους, κυλίνδρους, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α. Στην περίπτωση που η γεωμετρία δημιουργηθεί σε άλλο σχεδιαστικό περιβάλλον η εισαγωγή της ANSYS γίνεται με τη μορφή αρχείου *.igs. Τέλος, η κατασκευή της γεωμετρίας μπορεί να γίνει στον προ-επεξεργαστή κάποιου άλλου προγράμματος που δίνει αρχείο εισόδου για περιβάλλον ANSYS.

2ο. Στάδιο: Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες αλλά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις μονάδες. Όλες οι μονάδες στο πρόγραμμα είναι στο S.I. εκτός αν οριστεί διαφορετικά. Δεν συνιστάται να γίνει αλλαγή μονάδων γιατί υπάρχει σημαντικός κίνδυνος λάθους. Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που πρόκειται να συμβεί. Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από την επίλυση, χωρίς να σημαίνει ότι δεν μπορεί να αλλάξει στη συνέχεια. Το σημαντικό είναι οι διαστάσεις και το είδος της καταπόνησης.

3ο. Στάδιο: Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών

Αφού έχει γίνει η επιλογή του στοιχείου μένει να γίνει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι: 1) αυτόματη δημιουργία πλέγματος (δεν προτείνεται στις περισσότερες περιπτώσεις), 2) ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές ή ορισμός μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος πλευράς ή ακμής)

καθώς και 3) η επιλογή του Smart Size η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή μικραίνει τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και το αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερα ανάγκη για λεπτή διαμέριση. Αφού επιλεχθούν τα παραπάνω, ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος. Γενικά οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πάρα πολλές και μπορούν να δώσουν πάρα πολλά και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που έχουν οριστεί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί το πρόγραμμα να γνωρίζει τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος, την ακρίβεια ή και το χρόνο επίλυσης, άρα πρέπει να αλλάξουν οι προεπιλογές που έχει. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να μην οριστούν γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου στο περιβάλλον του ANSYS και στη συνέχεια να γίνει η διακριτοποίηση, αλλά να κατασκευαστούν απευθείας κόμβοι και πεπερασμένα στοιχεία ή να εισαχθούν αφού έχουν υπολογιστεί με κάποιο άλλο προ-επεξεργαστή. Η επιβολή των οριακών συνθηκών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία όπου μπορούν αυτές να επιβληθούν. Μπορούν να επιβληθούν είτε σε γεωμετρικά στοιχεία (σημεία, γραμμές, επιφάνειες) είτε σε στοιχεία του πλέγματος.(κόμβους, στοιχεία). Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

4ο. Στάδιο: Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό – μη γραμμικό – μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση

Η επιλογή του τρόπου επίλυσης έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Συνήθως μια γραμμική στατική ανάλυση μικρών μετατοπίσεων καλύπτει τις ανάγκες μας. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να ερευνηθεί κάποιο μεταβατικό φαινόμενο ή τα υλικά που χρησιμοποιούνται να έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Όσον αφορά την επίλυση προσφέρονται πολλές δυνατότητες οι οποίες έχουν να κάνουν με διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης, που δεν θα δώσουν διαφορετικό αποτέλεσμα, αλλά θα έχουν διαφορετικό χρόνο επίλυσης. Υπάρχουν επιλύτες που χρησιμοποιούν περισσότερο τον σκληρό δίσκο για ενδιάμεσα αρχεία ή την φυσική μνήμη. Είναι προφανές ότι αφού η ταχύτητα της μνήμης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σκληρού δίσκου αυτή η μέθοδος είναι και πιο γρήγορη. Υπάρχει όμως περίπτωση να μην υπάρχει διαθέσιμη η απαιτούμενη για το πρόβλημα φυσική μνήμη ή για ορισμένες ειδικές περιπτώσεις να μην είναι όλοι οι επιλύτες ικανοί να αντιμετωπίσουν τη φύση του προβλήματος.

5ο. Στάδιο: Ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα μετά από την επίλυση καταγράφονται σε ένα αρχείο (*.rst). Η ανάγνωσή τους είναι ένα ζήτημα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα αποτελέσματα στους κόμβους (Nodal Solution) και τα αποτελέσματα στα στοιχεία (Element Solution). Στους κόμβους γίνεται δίνεται η τιμή του μέσου όρου που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία είναι κοινός και έχει συνεχή τιμή ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία έχουμε μία τιμή ανά στοιχείο (στα ισοπαραμετρικά μπορούμε να επιλέξουμε επιπλέον αποτελέσματα στα σημεία Gauss). Ακόμα, υπάρχει και η επιλογή του Element Table μέσω του οποίου μπορεί να γίνει ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω μέσο όρων (Element Table Average). Η τελευταία επιλογή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν συγκεντρωμένα φορτία και μπορεί να δημιουργηθούν τοπικά μέγιστα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα

6.2. Παράμετροι Μοντέλου

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης των διεργασιών που περιεγράφηκαν στα κεφάλαια 5.2 και 5.3 με σκοπό την εκτέλεση προσομοιώσεων και στόχο τον υπολογισμό της

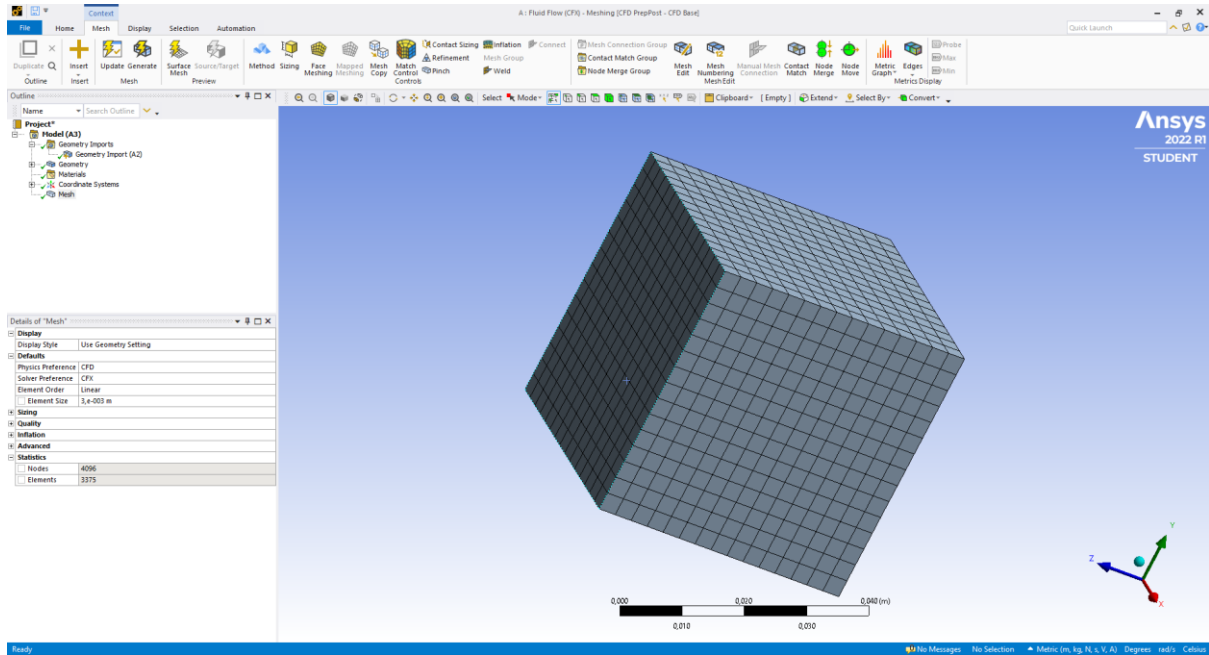
θερμοκρασίας στο εσωτερικό των δοκιμίων, δεδομένων συγκεκριμένων οριακών συνθηκών. Το σημείο ενδιαφέροντος στο εσωτερικό του μαρμάρινου κύβου στο οποίο υπολογίζεται η θερμοκρασία είναι αυτό που βρίσκεται στο κέντρο κάποιας έδρας και σε βάθος 20 mm, το σημείο δηλαδή στο οποίο υπήρχε θερμοστοιχείο στα πειράματα που έγιναν και καταγράφηκε η θερμοκρασία. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατό να γίνει σύγκριση της πρόβλεψης του μοντέλου και των πειραματικών μετρήσεων και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία του μοντέλου. Στο εξής θα γίνεται καταχρηστικά αναφορά στο συγκεκριμένο σημείο και ως «κέντρο» για λόγους ευκολίας, αν και δεν είναι το γεωμετρικό κέντρο του δοκιμίου.

Οι προσομοιώσεις έγιναν στο λογισμικό ANSYS, με το εργαλείο CFX και πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές δοκιμές, αλλάζοντας κάθε φορά διάφορες παραμέτρους των μοντέλων με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων.

Για τη δημιουργία του μοντέλου στο συγκεκριμένο λογισμικό είναι ανάγκη να καθοριστούν τα παρακάτω:

- **Γεωμετρία:** Στο σχεδιαστικό εργαλείο «Geometry» σχεδιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου. Στην παρούσα περίπτωση σχεδιάστηκε ένας κύβος με τις διαστάσεις των δοκιμίων μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή πλευράς 45mm.
- **Πλέγμα:** Στο εργαλείο «Mesh» κατασκευάζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο διαιρείται η γεωμετρία. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με δυο διαφορετικά πλέγματα, ένα σχετικά αραιό πλέγμα 3375 στοιχείων δηλαδή 15 στοιχείων ανά πλευρά (Εικόνα 10) και ένα πυκνότερο 74088 στοιχείων, δηλαδή με 42 στοιχεία ανά πλευρά.
- **Υλικό:** Γίνεται αντιστοίχιση υλικού στη γεωμετρία. Δημιουργήθηκε νέα καταχώρηση στη βάση δεδομένων υλικών του προγράμματος, όπου συμπληρώθηκαν οι ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου. Επειδή στην συγκεκριμένη περίπτωση σκοπός ήταν η προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας, οι ιδιότητες που ενδιέφεραν ήταν οι θερμικές. Χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιογραφικές τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 5. Εκτός από την ειδική θερμοχωρητικότητα, η οποία καταχωρήθηκε αρχικά ως σταθερή τιμή και έπειτα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την ανάλυση DSC που πραγματοποιήθηκε και έγιναν δοκιμές και στις δύο περιπτώσεις.
- **Αρχικές και οριακές συνθήκες:** Χρειάζεται να οριστούν αρχικές και οριακές συνθήκες για την επίλυση του προβλήματος. Ως αρχική θερμοκρασία ορίστηκε αυτή των 20 °C για όλες τις περιπτώσεις. Έγιναν δοκιμές με δυο ειδών οριακές συνθήκες: στην πρώτη ορίζοντας τη θερμοκρασία της επιφάνειας του δοκιμίου σε συνάρτηση με το χρόνο και στη δεύτερη ορίζοντας τη θερμοκρασία του αέρα γύρω από το δοκίμιο σε συνάρτηση με το χρόνο και το συντελεστή συναγωγής.
- **Αποτελέσματα:** Το πρόγραμμα κάνει επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα για κάθε χρονική στιγμή και σημείο του χώρου και αποθηκεύει τα δεδομένα αυτά. Με το εργαλείο «Results» είναι δυνατό να ανακτηθούν τα δεδομένα που θα επιλέξει ο χρήστης και να κατασκευαστούν πίνακες και διαγράμματα όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Οι δοκιμές προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν έγιναν αρχικά με πολλές απλοποιήσεις και παραδοχές, εξετάζοντας την απλούστερη περίπτωση των φαινομένων και στη συνέχεια, ελέγχοντας τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής, έγινε σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητας.



Εικόνα 10: Γεωμετρία και διακριτοποίηση μοντέλου

6.3. Προσομείωση Θερμοκρασιακού Προγράμματος 80 °C

Αρχικά πραγματοποιήθηκε προσομείωση αγωγής θερμότητας στο εσωτερικό μαρμάρινου κυβικού δοκιμίου. Δημιουργήθηκε πλέγμα 3375 στοιχείων. Έγινε η παραδοχή ότι η επιφανειακή θερμοκρασία παρέμεινε ομοιόμορφη σε όλες τις επιφάνειες του κύβου καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Ως οριακή συνθήκη δόθηκε η μέση επιφανειακή θερμοκρασία που καταγράφηκε πειραματικά κατά την πραγματοποίηση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C. Η αρχική θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 20 °C και η ειδική θερμοχωρητικότητα, ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και ίση με 900 J/kg·K. Αφού εκτελέστηκε η προσομείωση καταγράφηκε η υπολογιζόμενη θερμοκρασία στο σημείο όπου είχε τοποθετηθεί θερμοστοιχείο κατά το πείραμα, δηλαδή στο κέντρο μιας έδρας του κύβου και σε βάθος 20 mm.

Στην επόμενη δοκιμή πραγματοποιήθηκε η ίδια προσομείωση αλλά χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας που μετρήθηκαν στην ανάλυση DSC και η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

6.4. Προσομείωση Θερμοκρασιακού Προγράμματος 200 °C

Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν 2 δοκιμές, μία με σταθερή και μία με μεταβλητή ειδική θερμοχωρητικότητα, με τις ίδιες παραμέτρους με προηγούμενες, χρησιμοποιώντας όμως τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες από τις πειραματικές μετρήσεις του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C.

6.5. Προσομοίωση Θερμοκρασιακού Προγράμματος Πολλαπλών Κύκλων °C

Όμοια με τα άλλα δύο θερμοκρασιακά προγράμματα πραγματοποιήθηκαν οι εξής προσομοιώσεις:

- Οριακή συνθήκη η επιφανειακή θερμοκρασία από τις πειραματικές μετρήσεις με σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα και πλέγμα 3375 στοιχείων.
- Οριακή συνθήκη η επιφανειακή θερμοκρασία από τις πειραματικές μετρήσεις με ειδική θερμοχωρητικότητα εξαρτημένη από τη θερμοκρασία και πλέγμα 3375 στοιχείων.
- Οριακή συνθήκη η επιφανειακή θερμοκρασία από τις πειραματικές μετρήσεις με ειδική θερμοχωρητικότητα εξαρτημένη από τη θερμοκρασία και πλέγμα 74088 στοιχείων.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε μια σειρά από προσομοιώσεις όπου ως οριακή συνθήκη δόθηκε η θερμοκρασία του αέρα γύρω από το δοκίμιο μαρμάρου, υπό την παραδοχή ότι παραμένει ομοιόμορφη καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της επιφάνειας του κύβου, και η αγωγή στο εσωτερικό του κύβου. Κατά συνέπεια υπάρχουν δύο σημεία επαλήθευσης των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών με τις πειραματικές, δηλαδή αυτή της επιφάνειας και αυτή του εσωτερικού. Χρησιμοποιήθηκε πλέγμα 3375 στοιχείων και εξαρτημένη από τη θερμοκρασία ειδική θερμοχωρητικότητα.

Καθώς προσομοιώνεται συναγωγή στην συγκεκριμένη περίπτωση, η σημαντικότερη παράμετρος του μοντέλου που πρέπει να προσδιοριστεί είναι ο συντελεστής συναγωγής h . Ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε διέθετε ανεμιστήρα για την κυκλοφορία του αέρα όμως καθώς δεν ήταν δυνατό να υπολογιστεί ο συντελεστής συναγωγής λόγω έλλειψης δεδομένων, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές συντελεστή συναγωγής, με βάση τις βιβλιογραφικές τιμές για εξαναγκασμένη κυκλοφορία που αναφέρονται στον Πίνακα 1, ώστε μέσω σύγκρισης με τα πειραματικά δεδομένα να βρεθεί η βέλτιστη τιμή. Έγιναν δοκιμές για τιμές 3, 13, 18, 25, 35, 50, 60, 75 $W/m^2 \cdot K$.

6.6. Αναλυτική Προσέγγιση

Αν και δεν διατίθενται αναλυτικά προσεγγιστικά μοντέλα για προβλήματα μεταφοράς θερμότητας σε μεταβατική κατάσταση με πολύπλοκες οριακές συνθήκες όπως αυτά των κεφαλαίων 5.2 και 5.3, εντούτοις θεωρήθηκε δοκίμιο να γίνουν ορισμένες παραδοχές και να εξεταστούν οι αναλυτικές προσεγγιστικές λύσεις που είναι διαθέσιμες, όπως αναλύονται στο κεφάλαιο 2.3.3 και να γίνει σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς μπορούν να γίνουν εύκολα και γρήγορα και μπορούν να φανούν χρήσιμες.

Η προσεγγιστική λύση που δίνεται από την εξίσωση (2.15) μπορεί να χρησιμοποιηθεί θεωρώντας τη γεωμετρία κύβου του πειράματος ως τομή τριών τοιχωμάτων μεγάλου μήκους, πάχους 4,5 cm, το κάθε ένα παράλληλο τους άξονες x , y και z αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο λύνονται τρία διαφορετικά προβλήματα μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος των τριών αξόνων και η τελική λύση είναι ίση με το γινόμενο τους. Οι περιορισμοί και οι παραδοχές είναι οι εξής.

- Σώμα γνωστών διαστάσεων αρχικής θερμοκρασίας T_i
- Σε χρόνο $t=0$ τοποθετείται σε περιβάλλον θερμοκρασίας T_∞
- Πραγματοποιείται συναγωγή με το περιβάλλον γνωστού συντελεστή συναγωγής h

- Η λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για χρόνους επαφής $Fo > 0,2$
- Η λύση δίνει τη θερμοκρασία του δοκιμίου στον άξονα συμμετρίας του τοιχώματος. Κατά συνέπεια για τη σύνθετη γεωμετρία του κύβου, ως αποτέλεσμα επαλληλίας τριών κάθετων τοιχωμάτων, η λύση θα αφορά το κέντρο του κύβου.

Άρα η εξίσωση (2.15) μπορεί να δώσει αποτελέσματα σε περιπτώσεις που η οριακή συνθήκη δε μεταβάλλεται, το σώμα δηλαδή έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον στιγμιαία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν μεταβάλλεται. Όμως στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με θέρμανση μαρμάρων στους 80 και 200 °C η θερμοκρασία περιβάλλοντος (θερμοκρασία φούρνου) αλλάζει συνεχώς. Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί η αναλυτική λύση θεωρήθηκε ως αρχικός χρόνος επαφής t_0 η στιγμή που η θερμοκρασία του φούρνου είχε σχεδόν σταθεροποιηθεί. Ως τέτοια θεωρήθηκε αυθαίρετα η στιγμή που η θερμοκρασία φούρνου προσέγγισε την θερμοκρασία-στόχο στο 95%. Ως T_∞ χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα από το σημείο αυτό μέχρι πριν ξεκινήσει η ψύξη. Ενώ ως αρχική θερμοκρασία T_i χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία του κέντρου του δοκιμίου την ίδια χρονική στιγμή. Με αυτό τον τρόπο το πρόβλημα λαμβάνει επιλύσιμη μορφή και μπόρεσαν να γίνουν εκτιμήσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά το τελικό στάδιο της θέρμανσης, για τα πειράματα των 80 και 200 °C. Ως συντελεστής συναγωγής h χρησιμοποιήθηκε αυτός που βρέθηκε από την προσομοίωση ότι ανταποκρίνεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα.

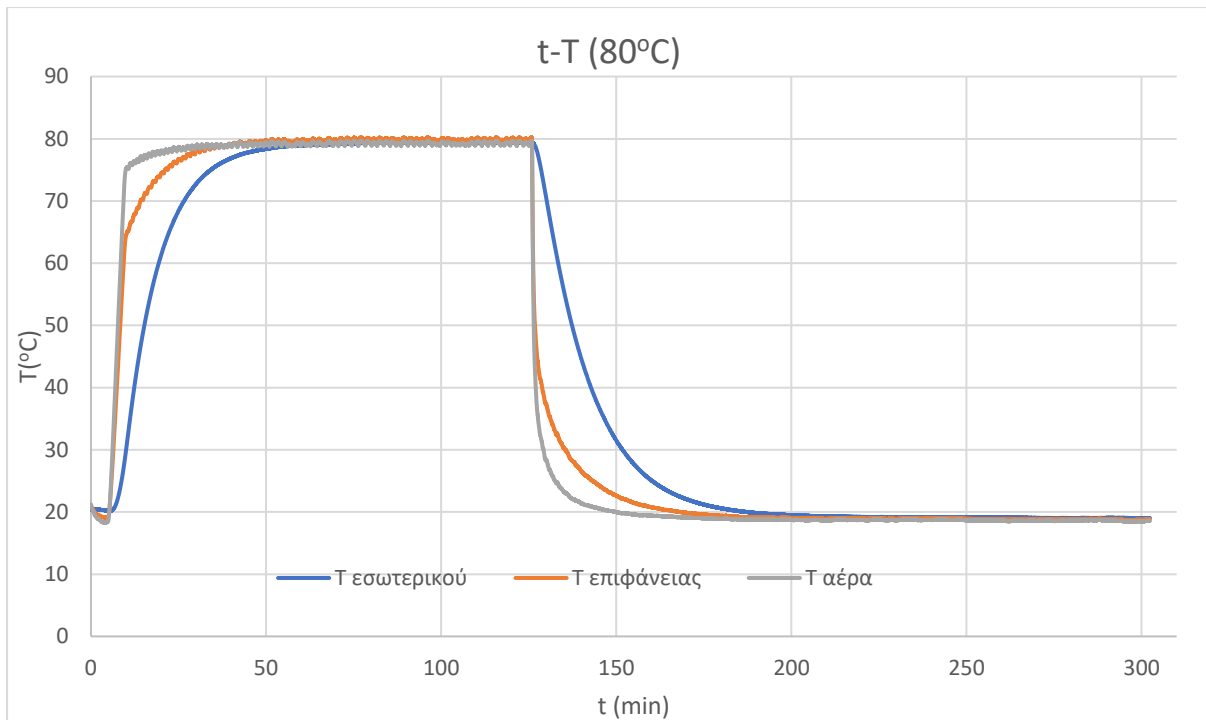
7. Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

7.1. Μετρήσεις Θερμοκρασιακού Προγράμματος 80 °C

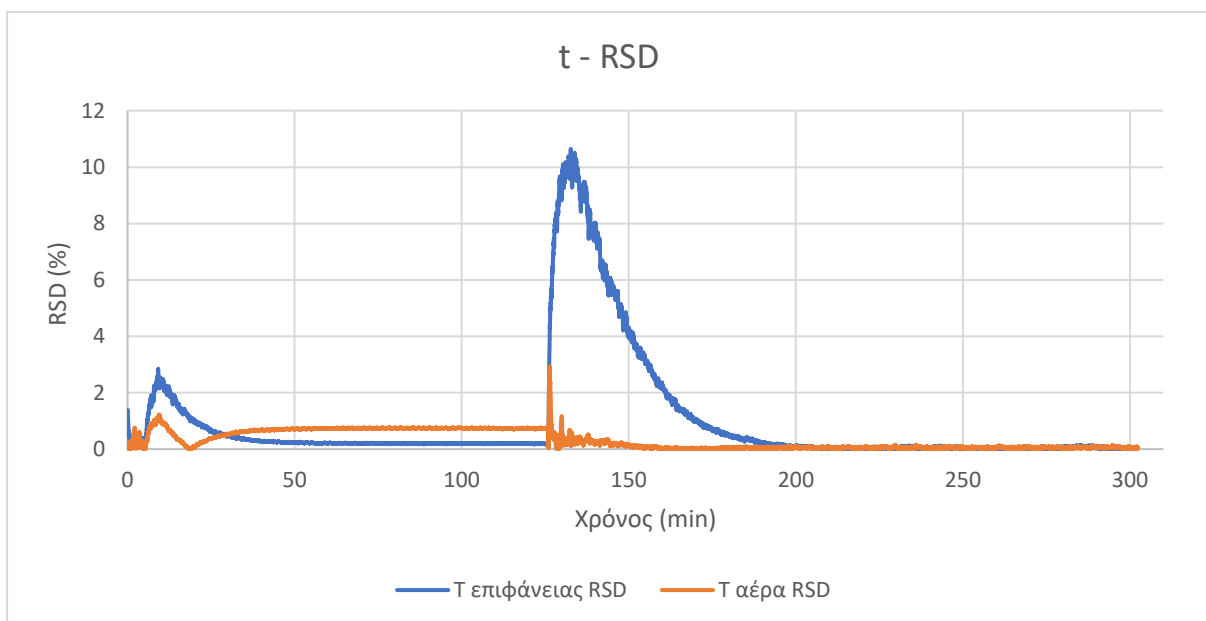
Στο Διάγραμμα 6 φαίνεται η διακύμανση των θερμοκρασιών αέρα φούρνου, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίου για τον θερμοκρασιακό κύκλο των 80 °C και στα Διαγράμματα 8,9 και 10 οι αντίστοιχοι ρυθμοί μεταβολής της θερμοκρασίας. Όπως αναμένεται η θερμοκρασία της επιφάνειας ακολουθεί με υστέρηση την θερμοκρασία του αέρα και με ακόμη μεγαλύτερη υστέρηση ακολουθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού. Η μέγιστη απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας είναι 1,45 °C/s ενώ η αντίστοιχη τιμή για το εσωτερικό του δοκιμίου σε βάθος 20 mm είναι 0,09 °C/s, και οι δύο τιμές επιτυγχάνονται κατά την ψύξη του συστήματος λόγω του ανοίγματος του φούρνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας επιφάνειας του μαρμάρου ταυτίζεται με αυτόν του αέρα του φούρνου. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα εξωτερικά στρώματα του μαρμάρου υπόκεινται πολύ πιο έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές και κατά συνέπεια υποβάλλονται σε μεγαλύτερες τάσεις λόγω θερμότητας και μεγαλύτερη φθορά.

Η καταγραφή της θερμοκρασίας έγινε από 2 θερμοστοιχεία επιφάνειας στις δύο πάνω πλευρές του κυβικού δοκιμίου από 2 θερμοστοιχεία στον αέρα πάνω από το δοκίμιο, δεξιά και αριστερά του και από ένα θερμοστοιχείο στο εσωτερικό του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Προφανώς οι θερμοκρασίες που κατέγραψαν τα 2 θερμοστοιχεία επιφάνειας διαφέρουν, όπως και αυτές από τα θερμοστοιχεία στον αέρα. Στο Διάγραμμα 6 σχεδιάστηκαν οι μέσοι όροι των 2 μετρήσεων και στο Διάγραμμα 7 η σχετική τυπική απόκλιση των μέσων όρων των δύο θερμοκρασιών. Όπως φαίνεται από τα δύο διαγράμματα η τυπική απόκλιση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα όταν το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση και οι θερμοκρασίες δεν μεταβάλλονται. Αντιθέτως, σε μεταβατικές καταστάσεις, κατά τη θέρμανση και την ψύξη και ιδιαίτερα όταν η κλίση της θερμοκρασίας είναι υψηλή, εξίσου υψηλή είναι και η τυπική απόκλιση. Οι υψηλές τυπικές αποκλίσεις υποδηλώνουν διαφορά στις τιμές θερμοκρασίας που καταγράφουν τα δύο θερμοστοιχεία, κάτι που δικαιολογείται δεδομένου ότι κατά το αρχικό στάδιο της ψύξης, η πόρτα του φούρνου ανοίγει και ο θερμός αέρας του εσωτερικού έρχεται σε επαφή με τον κατά 60 °C ψυχρότερο αέρα του δωματίου. Δεδομένου ότι ο ανεμιστήρας στο εσωτερικό του φούρνου συνεχίζει να διακινεί τον αέρα στο εσωτερικό του φούρνου, η πλευρά που τυχαίνει να έρθει σε επαφή πρώτη με μια ψυχρή μάζα αέρα ψύχεται γρηγορότερα.

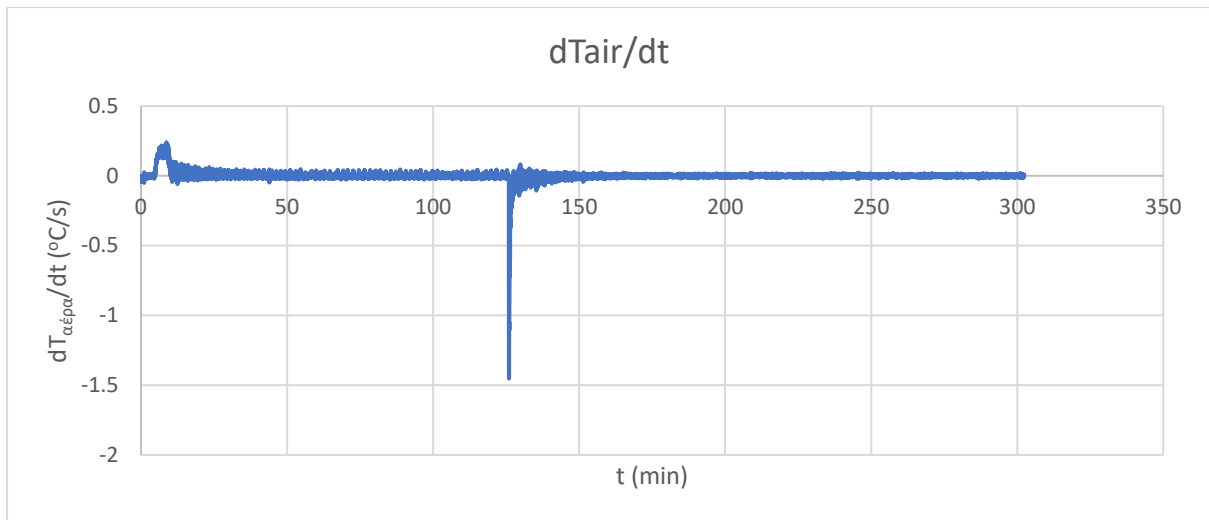
Η σχετική τυπική απόκλιση της επιφανειακής θερμοκρασίας φτάνει το 10 % κατά το αρχικό στάδιο της ψύξης, ενώ αυτή της θερμοκρασίας αέρα το 2 %. Η διάφορα αυτή της μέγιστης τυπικής απόκλισης μεταξύ των δύο θερμοκρασιών επίσης δικαιολογείται, αφού όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6 ο αέρας ανταποκρίνεται γρηγορότερα από την επιφάνεια του μαρμάρου στις μεταβολές της θερμορροής, κατά συνέπεια οι ανομοιομορφίες στη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή είναι μικρότερες και αποκαθίστανται γρηγορότερα.



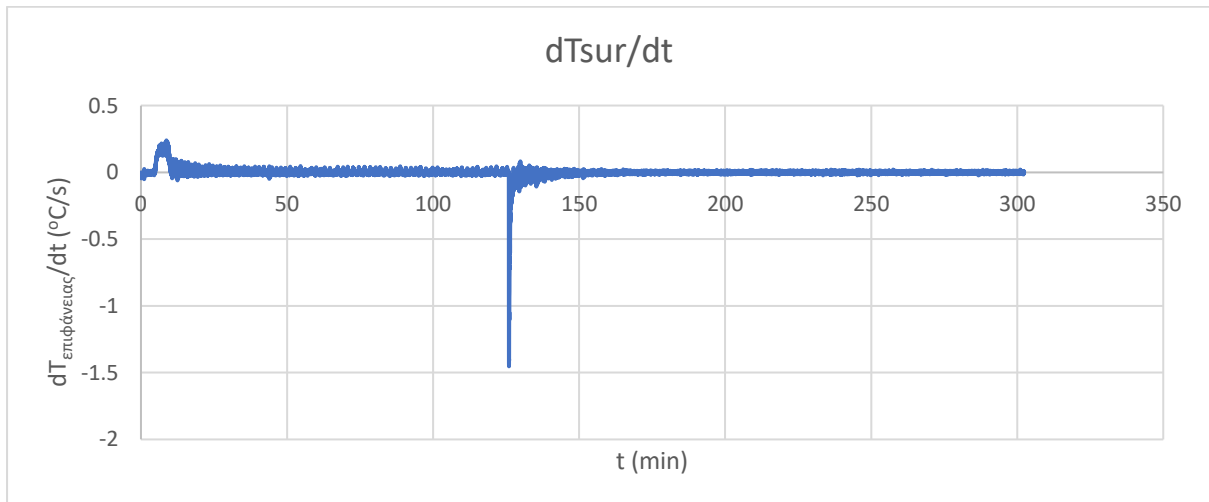
Διάγραμμα 6: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα 80 °C



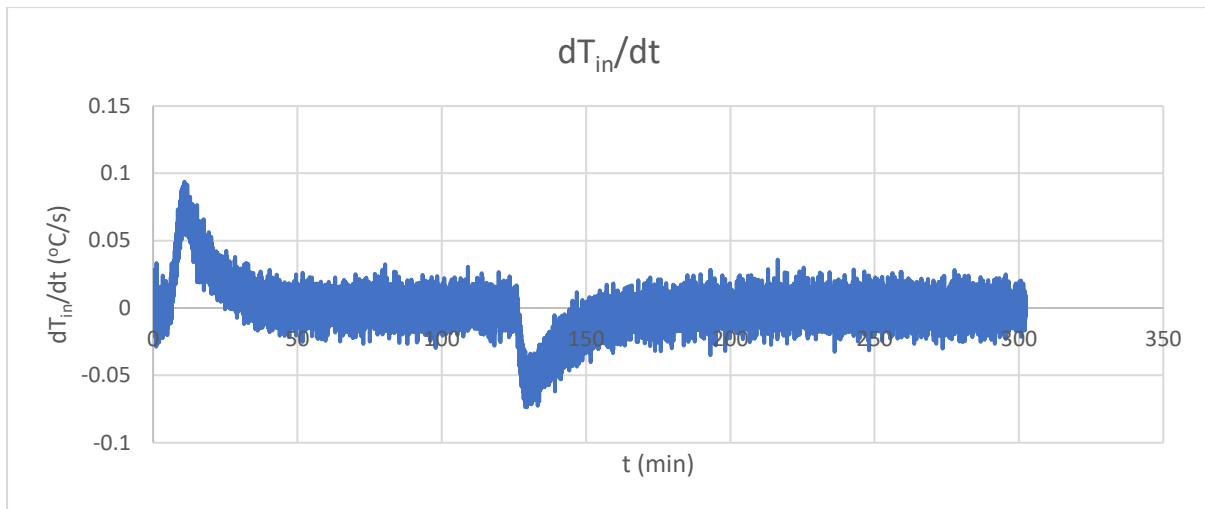
Διάγραμμα 7: Σχετική τυπική απόκλιση θερμοκρασίας επιφάνειας και αέρα για τον θερμοκρασιακό κύκλο των 80 °C



Διάγραμμα 8: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C



Διάγραμμα 9: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του μαρμάρου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C

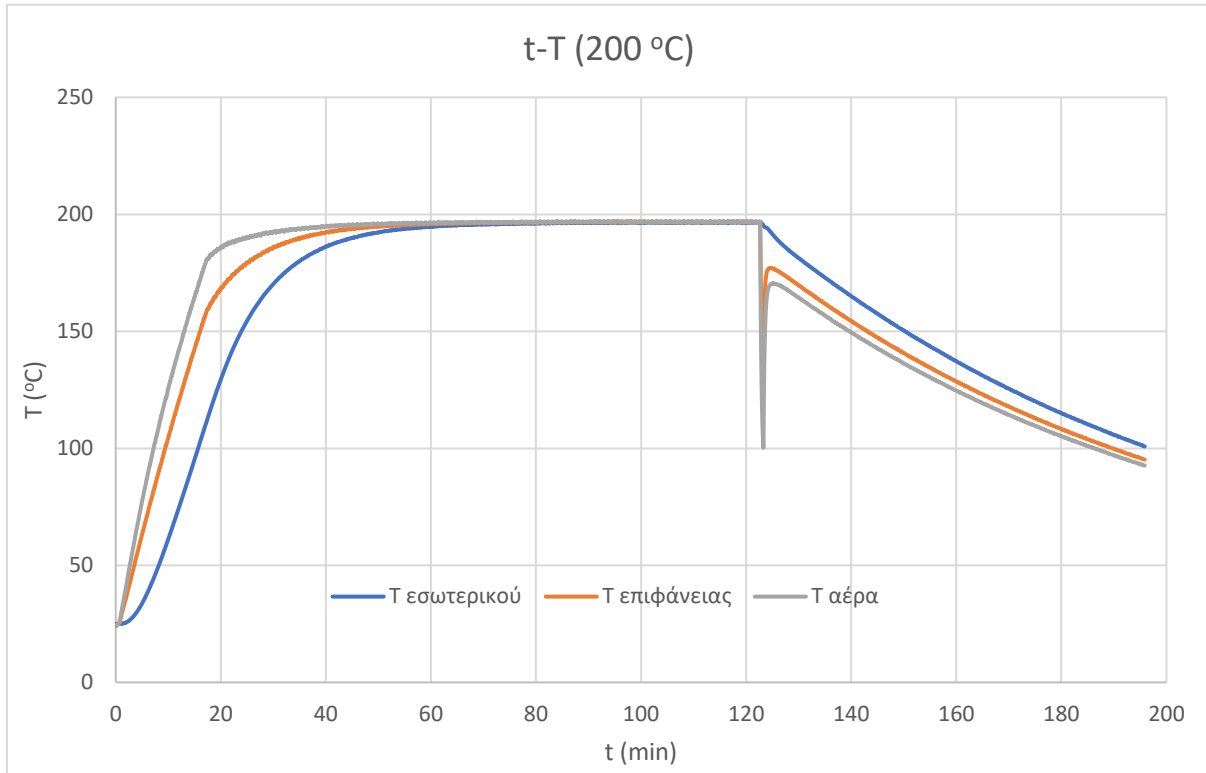


Διάγραμμα 10: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού του μαρμάρου, σε βάθος 20mm, κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C

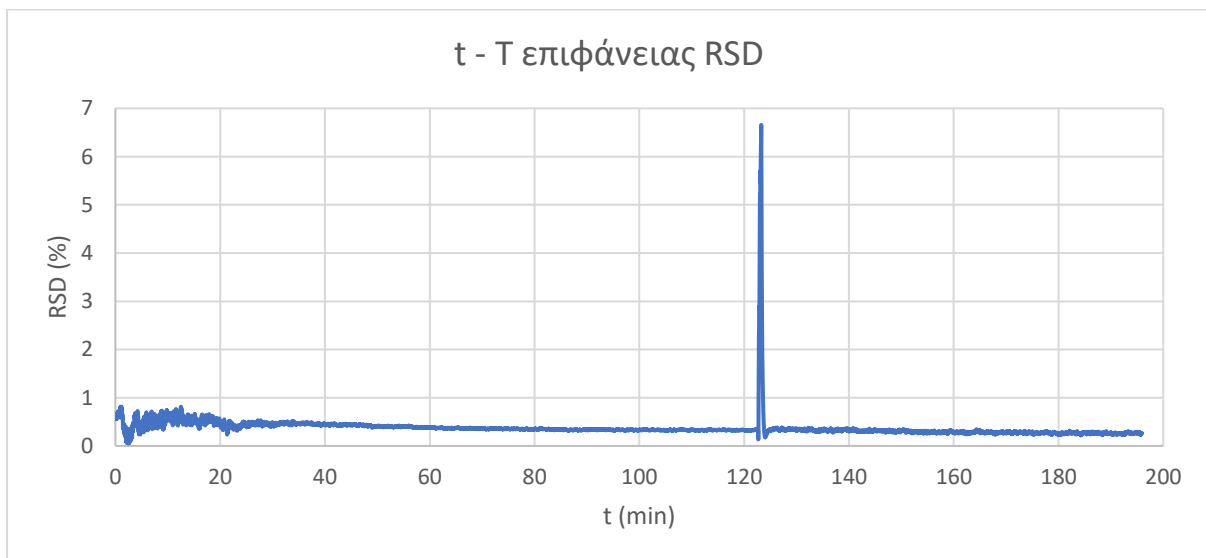
7.2. Μετρήσεις Θερμοκρασιακού Προγράμματος 200 °C

Στο Διάγραμμα 11 δίνονται οι μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού, που καταγράφηκαν και στο Διάγραμμα 12 η σχετική τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας επιφάνειας, που καταγραφόταν από 4 θερμοστοιχεία, το κάθε ένα σε διαφορετικό δοκίμιο. Οι θερμοκρασίες αέρα και εσωτερικού καταγράφηκαν από μοναδικά θερμοστοιχεία. Στα Διαγράμματα 13,14 και 15 δίνεται ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα φούρνου, επιφάνειας και εσωτερικού του μαρμάρου.

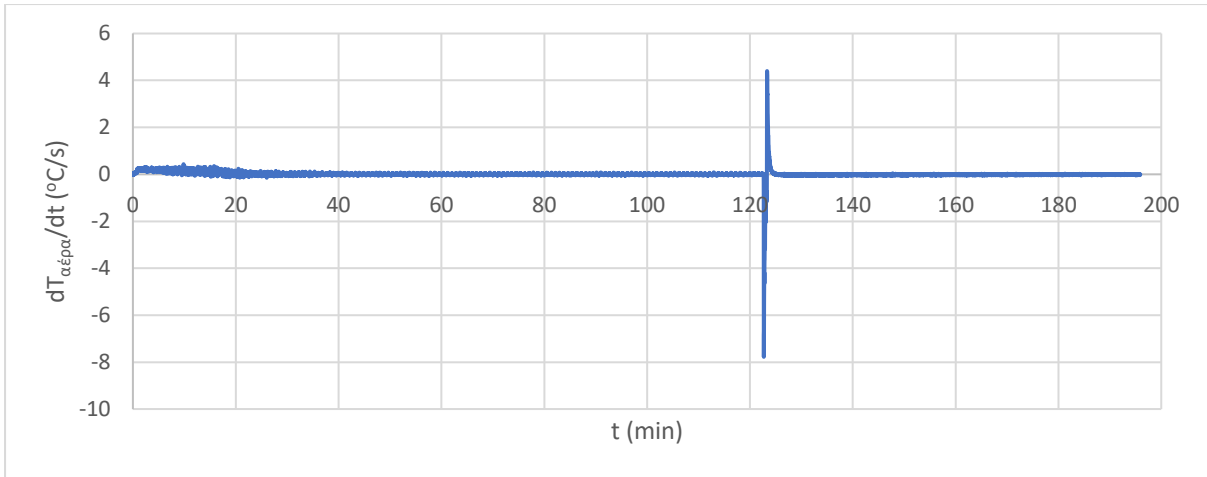
Όμοια με πριν η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση καταγράφεται τη στιγμή που ανοίγει στιγμιαία ο φούρνος και μεγιστοποιείται ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας και αποκαθίσταται στις προηγούμενες τιμές του, αφού η πόρτα κλείσει. Η ψύξη σε αυτή την περίπτωση γίνεται με κλειστή πόρτα, κατά συνέπεια αρκετά πιο ήπια σε σχέση με τον κύκλο των 80 °C.



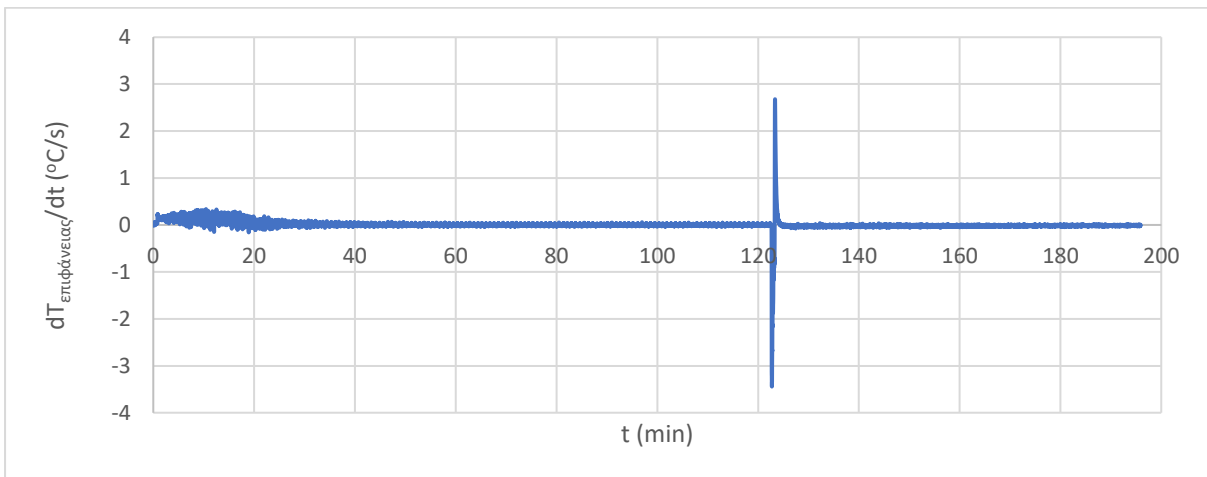
Διάγραμμα 11: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα 200 °C



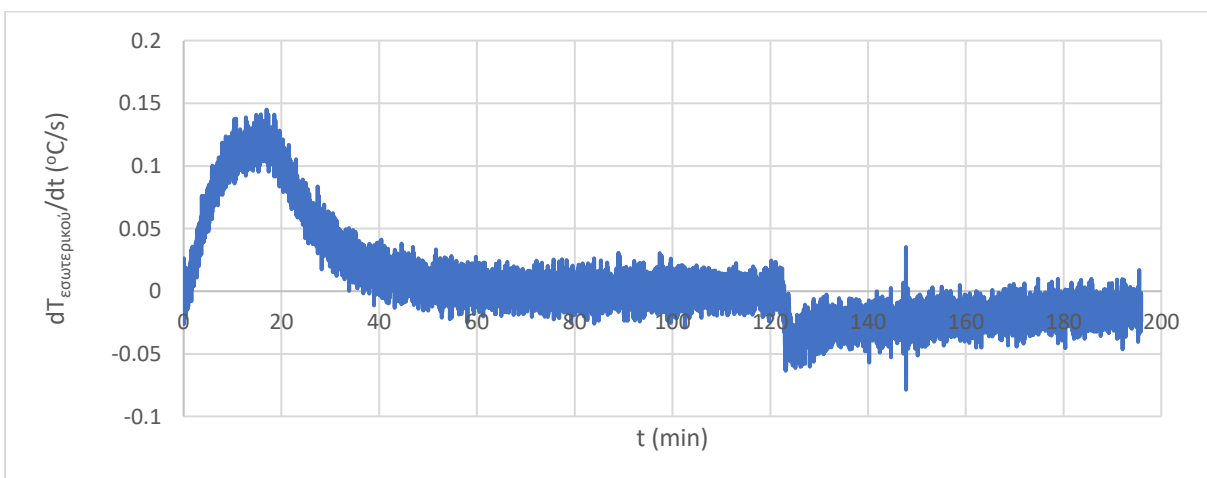
Διάγραμμα 12: Σχετική τυπική απόκλιση θερμοκρασίας επιφάνειας για τον θερμοκρασιακό κύκλο των 200 °C



Διάγραμμα 13: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C



Διάγραμμα 14: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του μαρμάρου κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C



Διάγραμμα 15: Ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού του μαρμάρου, σε βάθος 20mm, κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C

7.3. Μετρήσεις Θερμοκρασιακού Προγράμματος Πολλαπλών Κύκλων

Στο Διάγραμμα 16 δίνονται οι θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού για το θερμοκρασιακό πρόγραμμα πολλαπλών κύκλων για το σύνολο των 30 κύκλων. Καθώς η συμπεριφορά των δοκιμίων φαίνεται να μην παρουσιάζει μεγάλες διαφορές πέραν των πρώτων κύκλων, στο Διάγραμμα 17 δίνονται οι πρώτοι 5 κύκλοι για καλύτερη ευκρίνεια. Επιπλέον στο Διάγραμμα 18 δίνονται οι ρυθμοί μεταβολής των τριών καταγεγραμμένων θερμοκρασιών σε συνάρτηση με το χρόνο.

Η θερμοκρασία του αέρα καταγράφηκε από 4 θερμοστοιχεία σε διάφορα σημεία του φούρνου, η επιφανειακή από 8 θερμοστοιχεία σε 7 διαφορετικά δοκίμια και αυτή στο εσωτερικό του μαρμάρου από ένα θερμοστοιχείο. Η τυπική απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων των διαφόρων θερμοστοιχείων υπολογίστηκε για κάθε στιγμή και βρέθηκε μέγιστη σχετική τυπική απόκλιση της επιφανειακής θερμοκρασίας ίση με 9,1 % της μέσης τιμής και της θερμοκρασίας αέρα 6,7%.

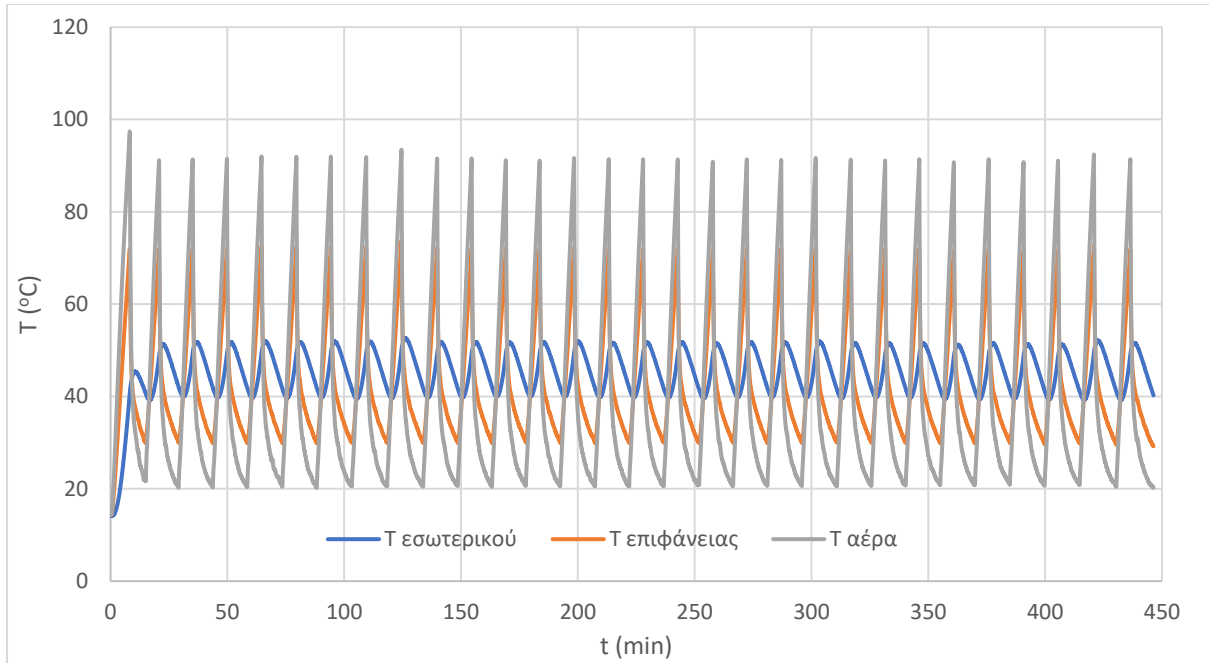
Για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας της κυκλικής θέρμανσης και ψύξης κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 19, όπου οι κύκλοι θέρμανσης-ψύξης χωρίστηκαν και σχεδιάστηκαν ξεχωριστά με κοινή αρχή. Υπολογίστηκε σε κάθε χρονική στιγμή η τυπική απόκλιση της στιγμιαίας θερμοκρασίας μεταξύ των 30 κύκλων και σχεδιάστηκε επίσης στο διάγραμμα. Η μέγιστη τυπική απόκλιση που καταγράφηκε ήταν ίση με το 9,4 % της μέσης στιγμιαίας θερμοκρασίας.

Επιπλέον, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν το αρχικό τμήμα των καμπυλών όπου το σύστημα δεν είχε αναπτύξει ακόμα την περιοδικότητα που φαίνεται να αναπτύσσει από τον τρίτο κύκλο και έπειτα, σημειώθηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 6. Στον ίδιο πίνακα περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Τέλος μετρήθηκε ο χρόνος από ελάχιστο σε ελάχιστο της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας και υπολογίστηκε η μέση διάρκεια κύκλου ίση με 891,8 s με τυπική απόκλιση 21,1 s.

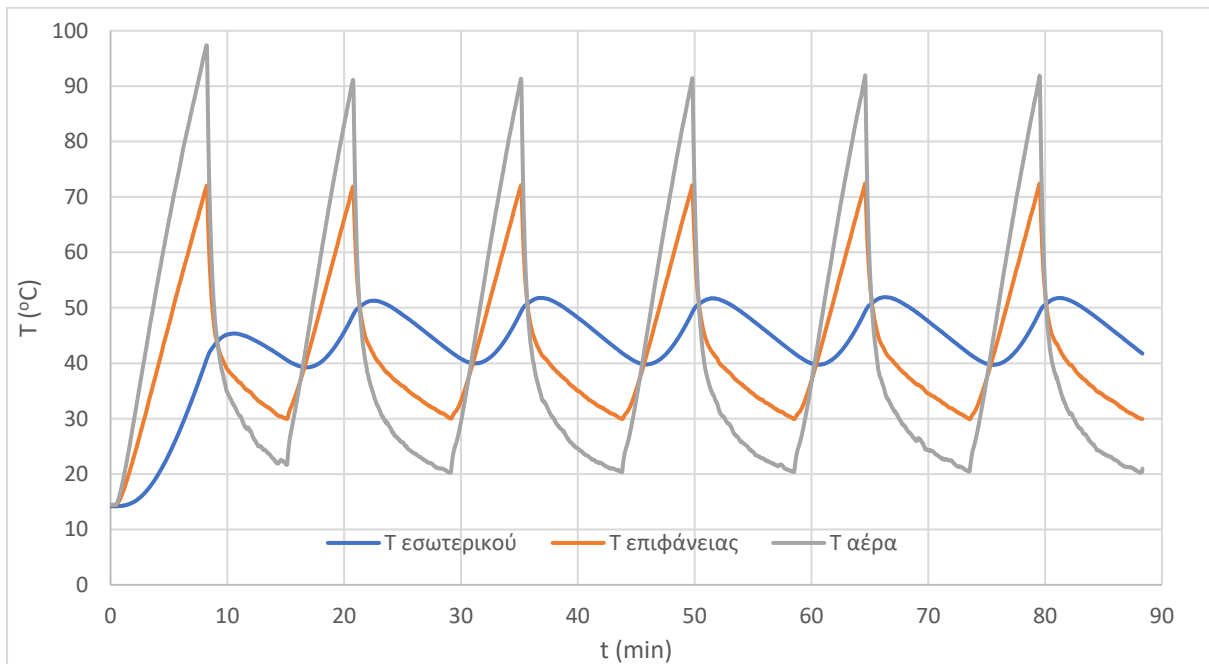
Έτσι η θερμοκρασία αέρα έχει εύρος 76,54 °C, αυτή της επιφάνειας 44,52 °C και αυτή του εσωτερικού 13,31 °C σε βάθος 20 mm.

Πίνακας 6: Θερμοκρασιακά δεδομένα προγράμματος πολλαπλών κύκλων

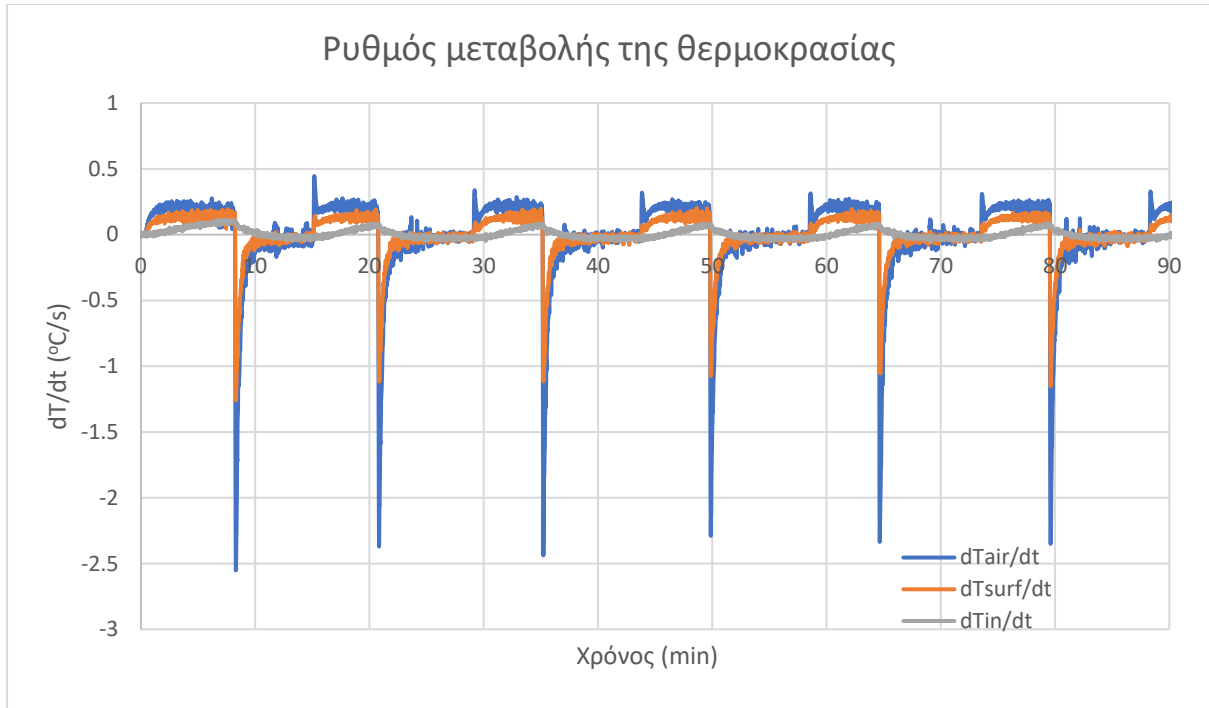
Αέρας	Μέγιστη T αέρα (°C)	96,73
	Ελάχιστη T αέρα (°C)	20,19
	Εύρος T αέρα (°C)	76,54
	Μέγιστος ρυθμός θέρμανσης αέρα (°C/s)	0,44
	Μέγιστος ρυθμός ψύξης αέρα (°C/s)	-2,79
Επιφάνεια	Μέγιστη T επιφάνειας (°C)	73,73
	Ελάχιστη T επιφάνειας (°C)	29,31
	Εύρος T επιφάνειας (°C)	44,52
	Μέγιστος ρυθμός θέρμανσης επιφάνειας (°C/s)	0,23
	Μέγιστος ρυθμός ψύξης επιφάνειας (°C/s)	-1,26
Εσωτερικό	Μέγιστη T εσωτερικού (°C)	52,57
	Ελάχιστη T εσωτερικού (°C)	39,26
	Εύρος T εσωτερικού (°C)	13,31
	Μέγιστος ρυθμός θέρμανσης εσωτερικού (°C/s)	0,11
	Μέγιστος ρυθμός ψύξης εσωτερικού (°C/s)	-0,06



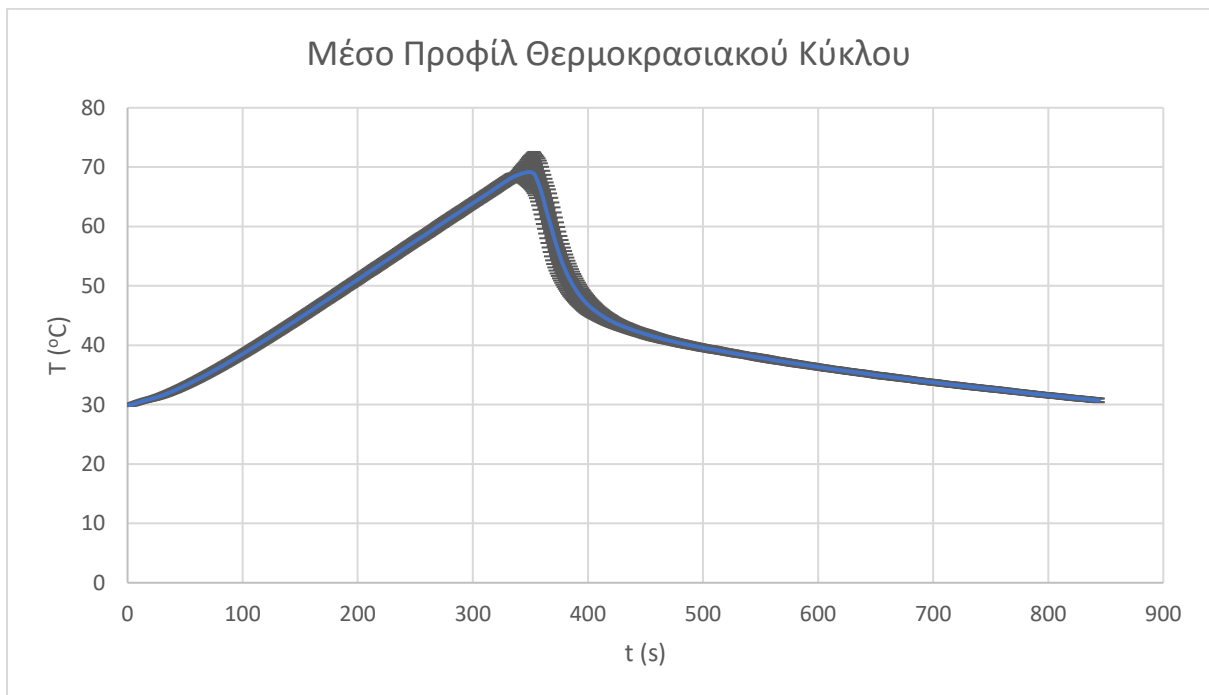
Διάγραμμα 16: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα πολλαπλών κύκλων. Σύνολο 30 κύκλων.



Διάγραμμα 17: Καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες αέρα, επιφάνειας και εσωτερικού δοκιμίων στο θερμοκρασιακό πρόγραμμα πολλαπλών κύκλων. Πρώτοι 5 κύκλοι.



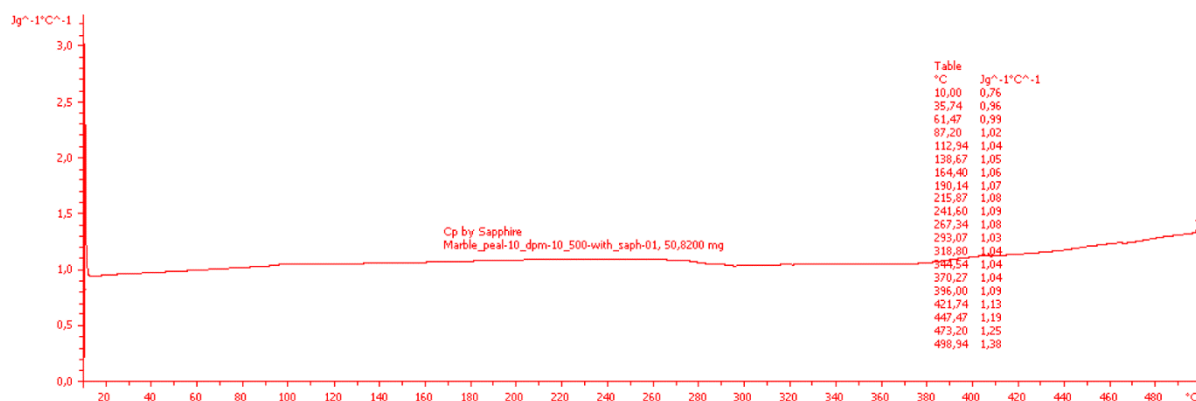
Διάγραμμα 18: Ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας αέρα φούρνου, επιφάνειας και εσωτερικού του μαρμάρου, κατά τη εκτέλεση του θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων.



Διάγραμμα 19: Μέσο προφίλ θερμοκρασιακού κύκλου. Με γκρι χρώμα η τυπική απόκλιση.

7.4. Αποτελέσματα Μέτρησης Ειδικής Θερμοχωρητικότητας με Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης

Η μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας έγινε για θερμοκρασίες από 10 έως 500 °C. Στο Διάγραμμα 20 δίνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης.



Διάγραμμα 20: Αποτελέσματα μέτρησης ειδικής θερμοχωρητικότητας μαρμάρου Διονύσου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

7.5. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον του ANSYS. Για λόγους οικονομίας χώρου στα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν, έχουν χρησιμοποιηθεί κωδικοποιημένες ονομασίες για την ονομασία των διαφόρων καμπυλών. Στον Πίνακα 7 δίνονται κάποιες επεξηγήσεις για την ευκολότερη ανάγνωση των διαγραμμάτων και τη διάκριση των διαφόρων δοκιμών.

Πίνακας 7: Αποσαφήνιση κωδικοποιημένων ονομασιών καμπυλών

Κωδικοποιημένη ονομασία	Επεξήγηση
T air	Θερμοκρασία αέρα
T sur	Θερμοκρασία επιφάνειας
T in	Εσωτερική θερμοκρασία
exp	Από πείραμα
sim	Από προσομοίωση
cp(const)	Σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα
cp(T)	Θερμοχωρητικότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας από ανάλυση DSC
fm	Πυκνό πλέγμα (fine mesh)
h25	Συντελεστής συναγωγής ίσος με τον αριθμό δίπλα από το h (σε W/m ² ·K)

7.5.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C

Στο Διάγραμμα 21 δίνονται οι θερμοκρασία της επιφάνειας του μαρμάρου που μετρήθηκε πειραματικά και χρησιμοποιήθηκε ως οριακή συνθήκη για την προσομοίωση, η υπολογιζόμενη από

την προσομοίωση τιμή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό, κοντά στο κέντρο του μαρμάρου, και η πειραματικά μετρημένη θερμοκρασία στο ίδιο σημείο για σύγκριση.

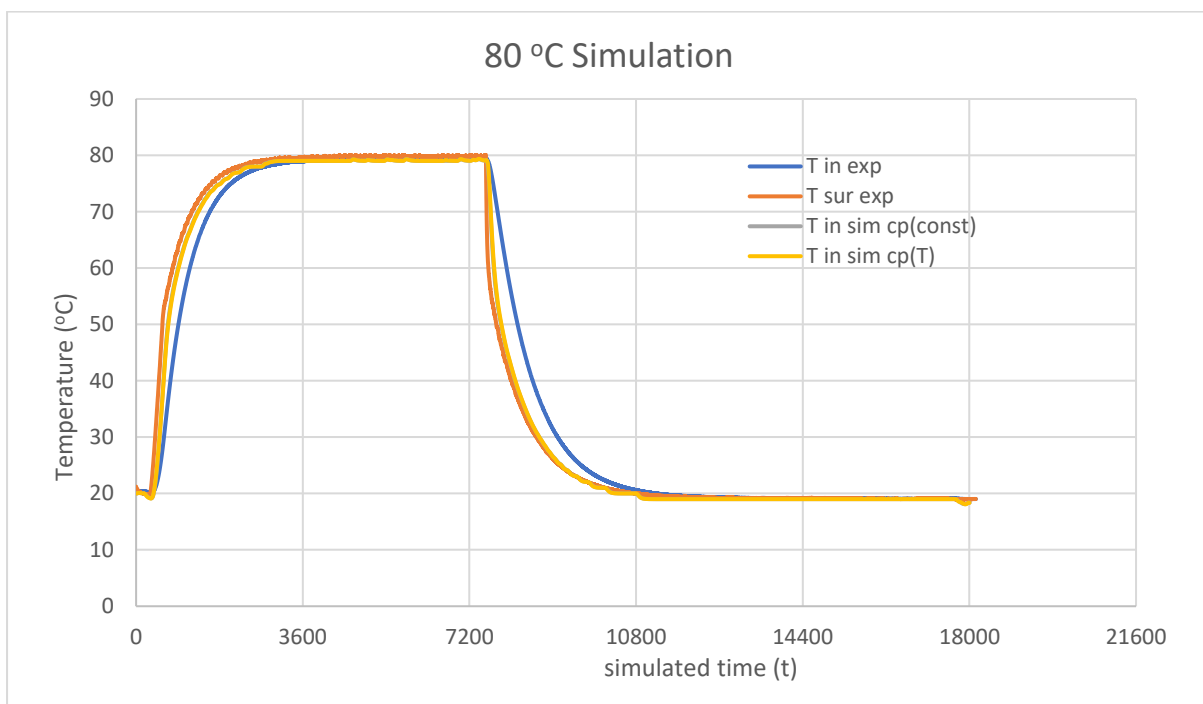
Η υπολογισμένη θερμοκρασία στο εσωτερικό του μαρμάρου με σταθερή και με εξαρτημένη από της θερμοκρασία ειδική θερμοχωρητικότητα ουσιαστικά ταυτίζονται και για αυτό το λόγο δεν είναι και οι δύο ευδιάκριτες στο διάγραμμα.

Για τη αποτίμηση του μοντέλου υπολογίστηκε το σφάλμα προσομοίωσης, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά της πρόβλεψης θερμοκρασίας μέσω προσομοίωσης, από την πειραματικά καταγεγραμμένη τιμή και κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 22 στο οποίο φαίνεται η απόκλιση (ή σφάλμα) των προβλέψεων του μοντέλου που εξετάζεται, από τις πραγματικές τιμές. Κατά τη θέρμανση παρατηρείται θετική απόκλιση από την πειραματικά μετρημένη θερμοκρασία, ενώ κατά τη φάση ψύξης η απόκλιση είναι αρνητική. Το μοντέλο δηλαδή προβλέπει ταχύτερη ψύξη αλλά και ταχύτερη θέρμανση, δηλαδή εν γένει ταχύτερη απόκριση του συστήματος στις διαταραχές των οριακών συνθηκών. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται όταν υπάρχει έντονη μεταβολή των οριακών συνθηκών.

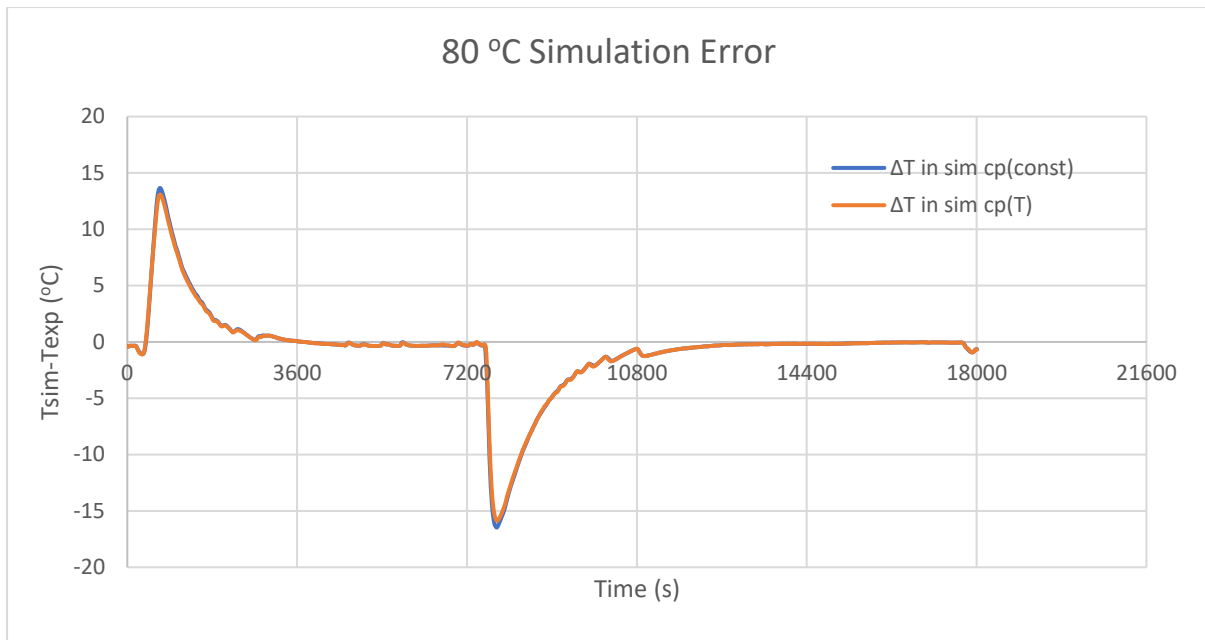
Η μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης με σταθερή τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας (μπλε γραμμή, Διάγραμμα 22) είναι 2,03 °C με τυπική απόκλιση 3,55 °C η αντίστοιχα 9,98% και 17,47% επί της πειραματικά καταγεγραμμένης τιμής. Η μέγιστη απόκλιση που καταγράφηκε ήταν ίση με το 81,11% της πειραματικής τιμής.

Όσον αφορά την προσομοίωση με μεταβαλλόμενη ως προς τη θερμοκρασία ειδική θερμοχωρητικότητα (πορτοκαλί γραμμή, Διάγραμμα 22), το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι 1,75 °C με τυπική απόκλιση 3,27 °C ή 13,85 % και 16,17 % αντίστοιχα επί της πειραματικής θερμοκρασίας. Η μέγιστη απόκλιση ήταν ίση με το 78,44 % της πειραματικής τιμής.

Κατά συνέπεια η προσομοίωση με μεταβαλλόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα είναι ελάχιστα αλλά αμελητέα πιο ακριβής από την προσομοίωση με σταθερή. Και οι δύο όμως προσεγγίζουν καλά τη συμπεριφορά του συστήματος.



Διάγραμμα 21: Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 80 °C



Διάγραμμα 22: Απόκλιση προσομοίωσης από πειραματικές μετρήσεις

7.5.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C

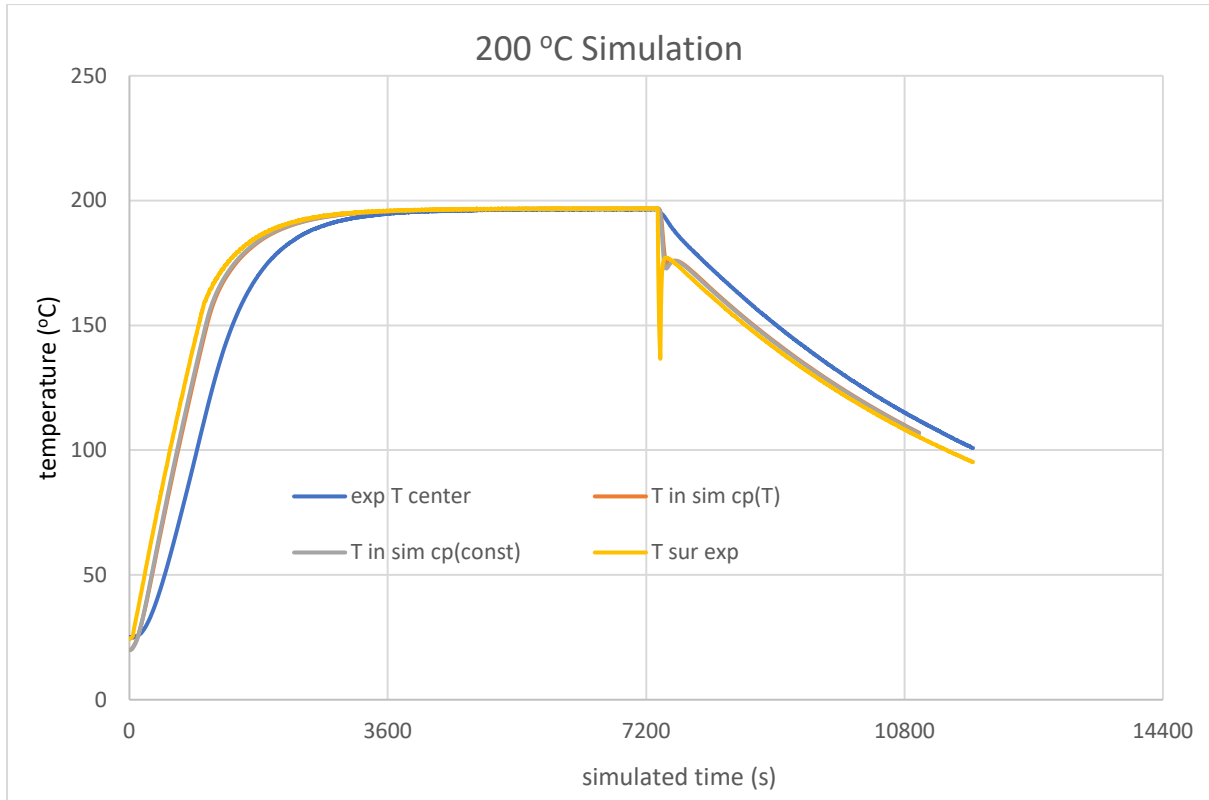
Στο Διάγραμμα 23 συγκρίνονται οι τιμές θερμοκρασίας των προσομοιώσεων με τις πειραματικές τιμές θερμοκρασίας στο εσωτερικό, κοντά στο κέντρο του μαρμάρου. Στο ίδιο γράμμα υπάρχει και η πειραματικά καταγεγραμμένη θερμοκρασία της επιφάνειας του μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκε ως οριακή συνθήκη για τις προσομοιώσεις.

Για αποτίμηση των προσομοιώσεων και σύγκριση των διαφόρων δοκιμών με διαφορετικές παραμέτρους κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 24 όπου αποτυπώνεται η απόκλιση των προβλέψεων των προσομοιώσεων από την πραγματική καταγεγραμμένη θερμοκρασία. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται και πάλι όταν υπάρχουν έντονη μεταβολή των οριακών συνθηκών, δηλαδή κατά την αρχική φάση θέρμανσης αλλά και κατά το στιγμιαίο άνοιγμα της πόρτας του φούρνου που προκάλεσε ψύξη της επιφάνειας του μαρμάρου.

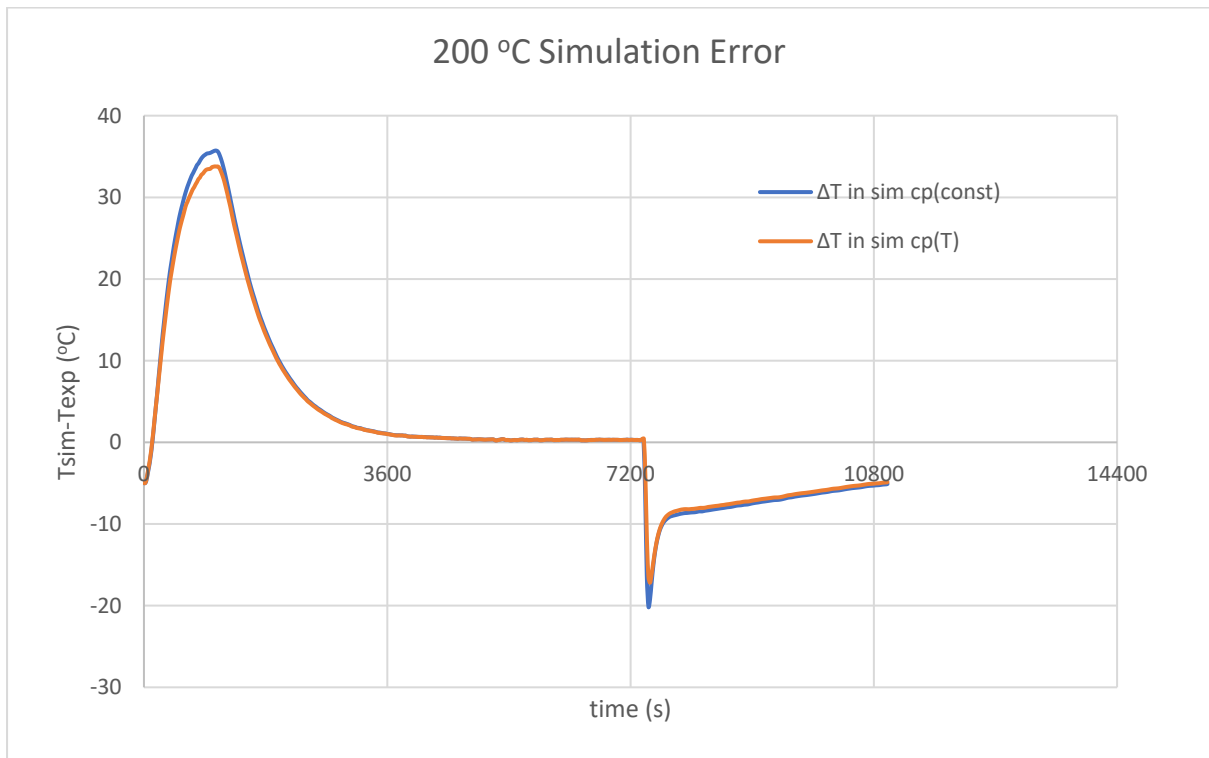
Το μέσο απόλυτο σφάλμα για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης με σταθερή τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας είναι 7,57 °C με τυπική απόκλιση 9,93 °C ή αντίστοιχα 27,63% και 39,69% επί της πειραματικά καταγεγραμμένης τιμής. Η μέγιστη απόκλιση που καταγράφηκε ήταν ίση με το 142,31% της πειραματικής τιμής.

Όσον αφορά την προσομοίωση με μεταβαλλόμενη ως προς τη θερμοκρασία ειδική θερμοχωρητικότητα, το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι 7,07 °C με τυπική απόκλιση 9,27 °C ή 25,58 % και 37,82 % αντίστοιχα επί της πειραματικής θερμοκρασίας. Η μέγιστη απόκλιση ήταν ίση με το 134,71 % της πειραματικής τιμής.

Όπως και προηγουμένως και όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 24 η δοκιμή με μεταβαλλόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα σχεδόν ταυτίζεται με την δοκιμή με σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα. Παρ' όλα αυτά οι υπολογιζόμενες τιμές από την προσομοίωση είναι πολύ κοντά στις πραγματικές.



Διάγραμμα 23: Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C



Διάγραμμα 24: Απόκλιση προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος 200 °C από πειραματικές μετρήσεις

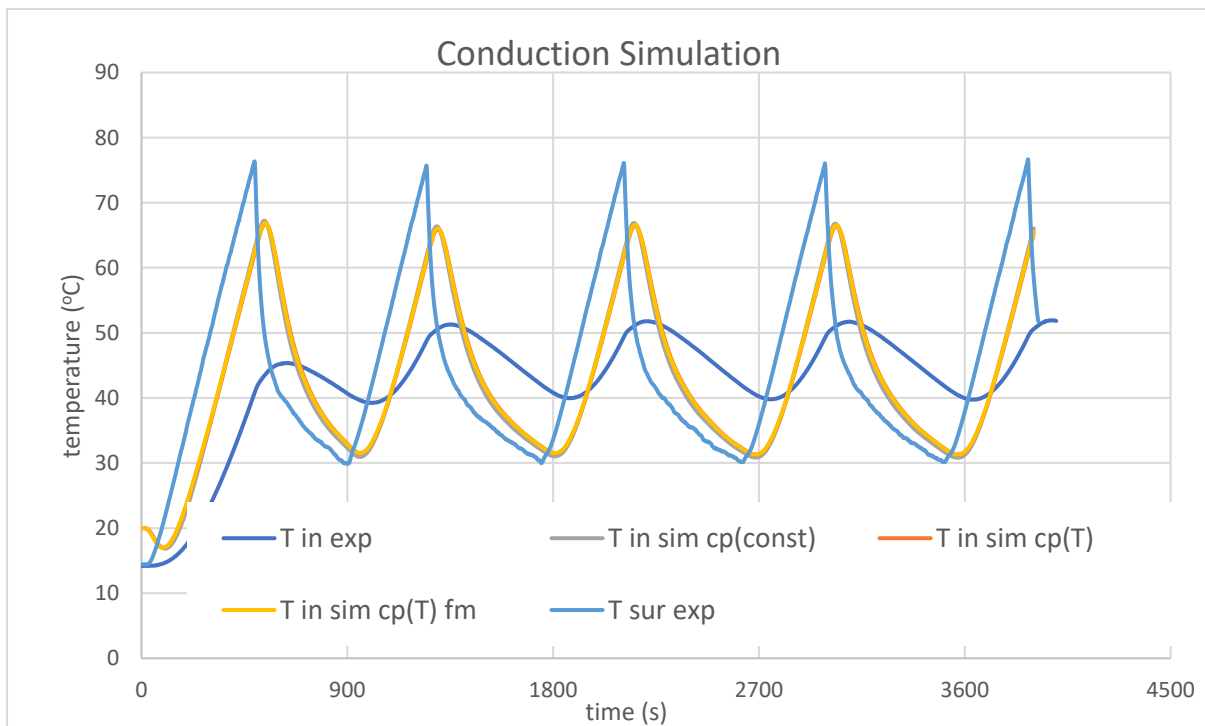
7.5.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων

7.5.3.1. Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή

Όσον αφορά το πρόγραμμα πολλαπλών θερμοκρασιακών κύκλων πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις όπου δόθηκε ως αρχική συνθήκη η επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου. Έγιναν δοκιμές με σταθερή και μεταβαλλόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, καθώς και με μεταβαλλόμενη αι πυκνότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο Διάγραμμα 25 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η προσομοίωση έγινε για χρονικό διάστημα ίσο με αυτό των πρώτων πέντε κύκλων, αφού διαπιστώθηκε πως ούτε στο φυσικό πείραμα, αλλά ούτε και στις προσομοιώσεις μεταβάλλεται η συμπεριφορά του συστήματος.

Η επιπλέον παράμετρος της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας με τη θερμοκρασία, αλλά και το πυκνότερο πλέγμα, δεν βελτίωσαν τα αποτελέσματα σε σχέση με την δοκιμή με σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, οι γραμμές που αντιστοιχούν στις τρεις δοκιμές (γκρι, πορτοκαλί και κίτρινη) ουσιαστικά ταυτίζονται.

Το μοντέλο περιγράφει ποιοτικά την διεργασία, αφού προβλέπει αυξομείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοκιμίου με μικρή χρονική υστέρηση σε σχέση με την επιφάνεια, αλλά όχι ποσοτικά, καθώς η θερμοκρασία του εσωτερικού με βάση την προσομοίωση ακολουθεί στενότερα τη διαταραχή των οριακών συνθηκών σε σχέση με τις πειραματικές παρατηρήσεις.

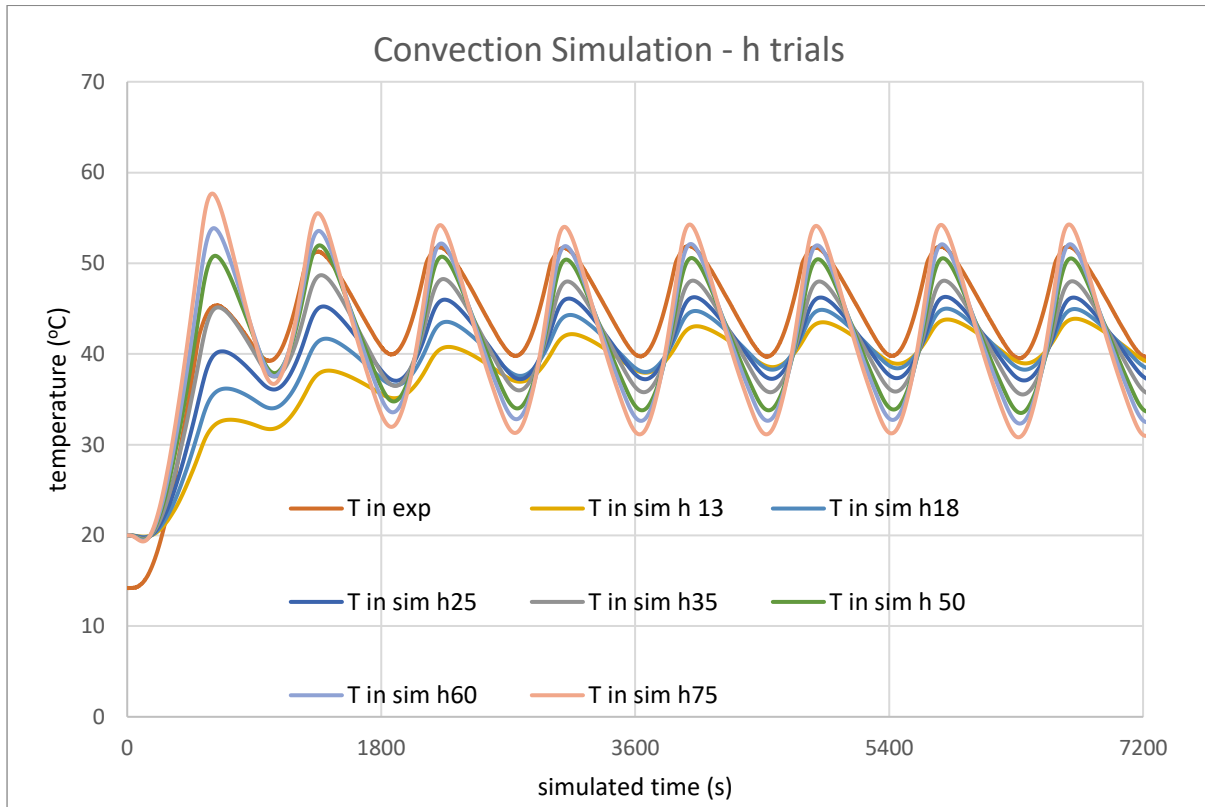


Διάγραμμα 25: Αποτελέσματα προσομοίωσης αγωγής στο εσωτερικό κύβου μαρμάρου, σε βάθος 20 mm, με οριακή συνθήκη την θερμοκρασία των εξωτερικών τοιχωμάτων του

7.5.3.2. Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

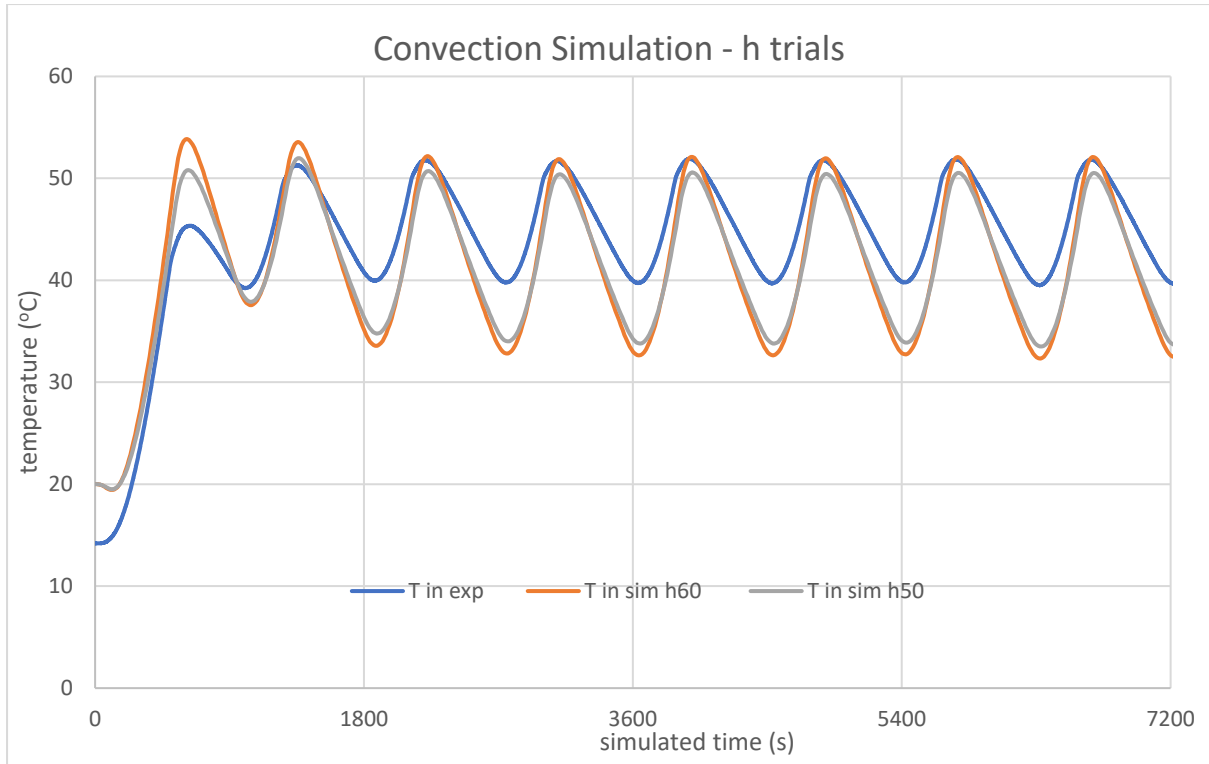
Στο παρόν στάδιο δόθηκε ως οριακή συνθήκη η θερμοκρασία του αέρα γύρω από το δοκίμιο και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διάφορους συντελεστές συναγωγής.

Στο Διάγραμμα 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών και φαίνεται η γενική συμπεριφορά του μοντέλου συναρτήσει του h . Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής συναγωγής h , τόσο εντονότερη είναι η θερμοκρασιακή διακύμανση του εσωτερικού του μαρμάρου.

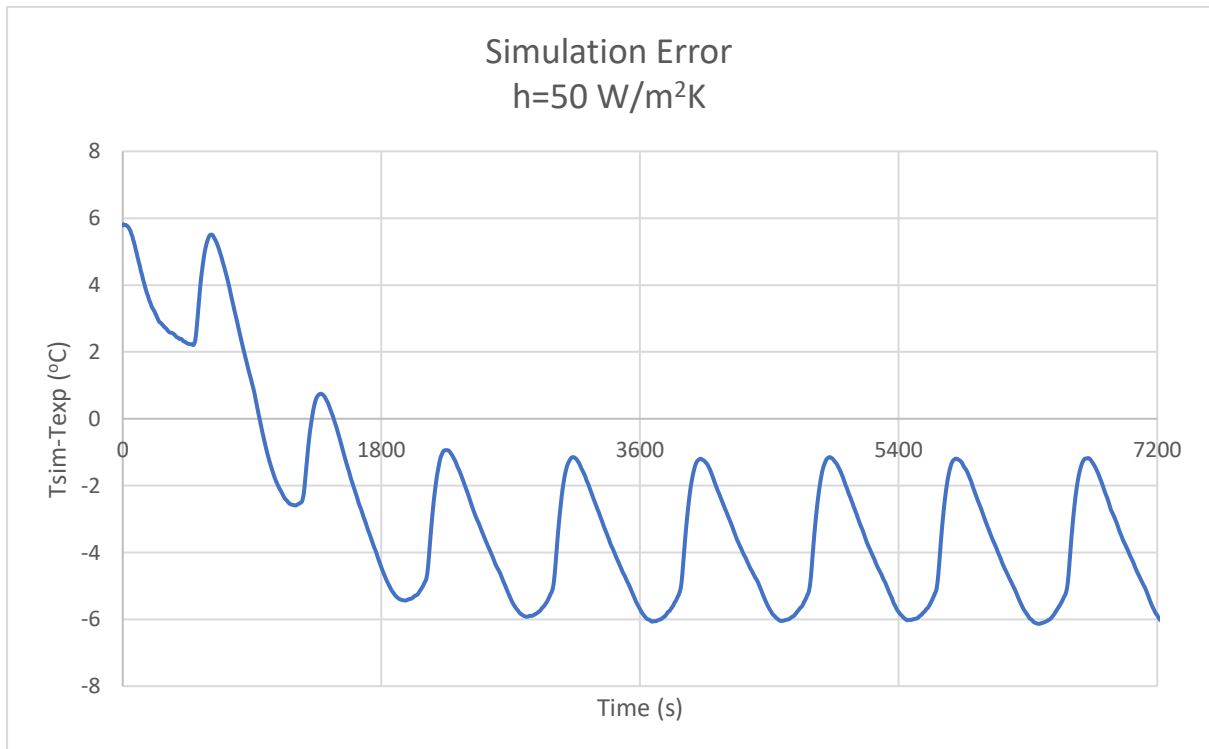


Διάγραμμα 26: Δοκιμές διαφορετικών τιμών συντελεστή συναγωγής σε προσομοίωση συναγωγής και σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις

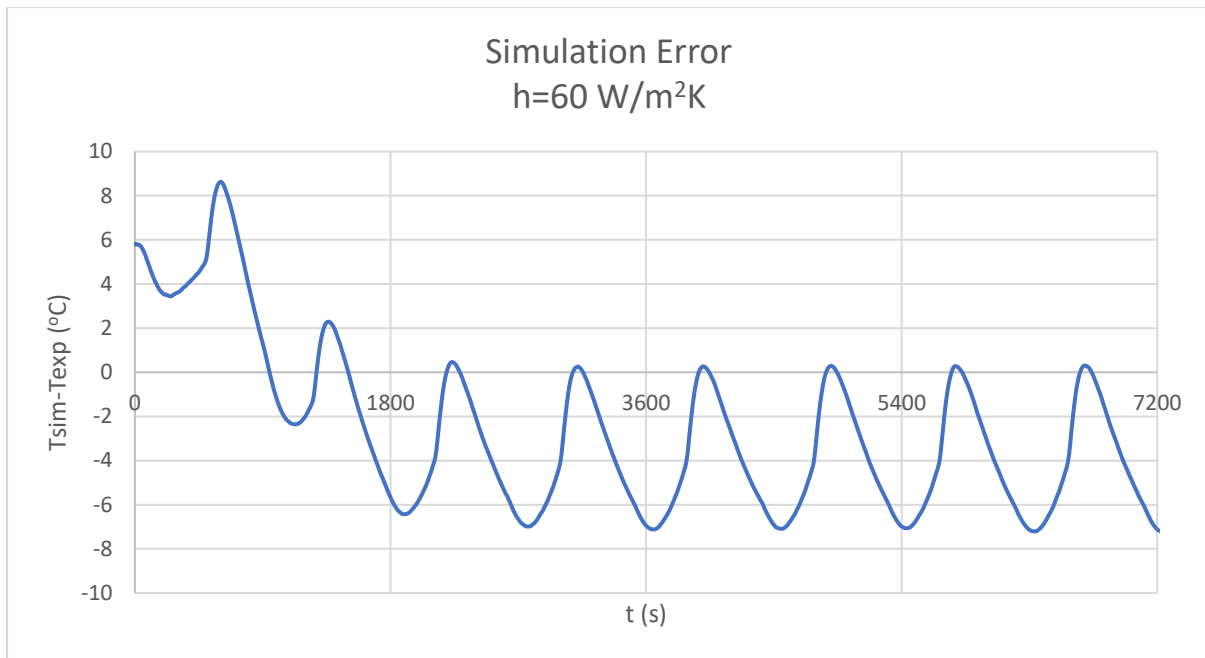
Στο Διάγραμμα 27 παρουσιάζονται μόνο οι δοκιμές με $h=50 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $h=60 \text{ W/m}^2\text{K}$ οι οποίες εμφανίζουν και την καλύτερη προσαρμογή στις πειραματικές μετρήσεις, ενώ στο Διάγραμμα 28 και Διάγραμμα 29 φαίνεται η διαφορά των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών από τις πειραματικά μετρημένες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για τη δοκιμή με $h=50 \text{ W/m}^2\text{K}$ είναι $3,78 \text{ }^\circ\text{C}$ με τυπική απόκλιση $1,77 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ το μέγιστο σφάλμα είναι $6,29 \text{ }^\circ\text{C}$. Όσον αφορά την δοκιμή με $h=60 \text{ W/m}^2\text{K}$ το μέσο σφάλμα ήταν $3,96 \text{ }^\circ\text{C}$ με τυπική απόκλιση $2,36 \text{ }^\circ\text{C}$ και μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή $8,63 \text{ }^\circ\text{C}$. Κατά συνέπεια, η καλύτερη προσέγγιση επιτυγχάνεται με $h=50 \text{ W/m}^2\text{K}$, αφού η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση αλλά και η μέγιστη τιμή είναι μικρότερα σε αυτή την περίπτωση.



Διάγραμμα 27: Δοκιμές τιμών συντελεστή συναγωγής 50 και 60 W/m²K σε προσομοίωση συναγωγής και σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις

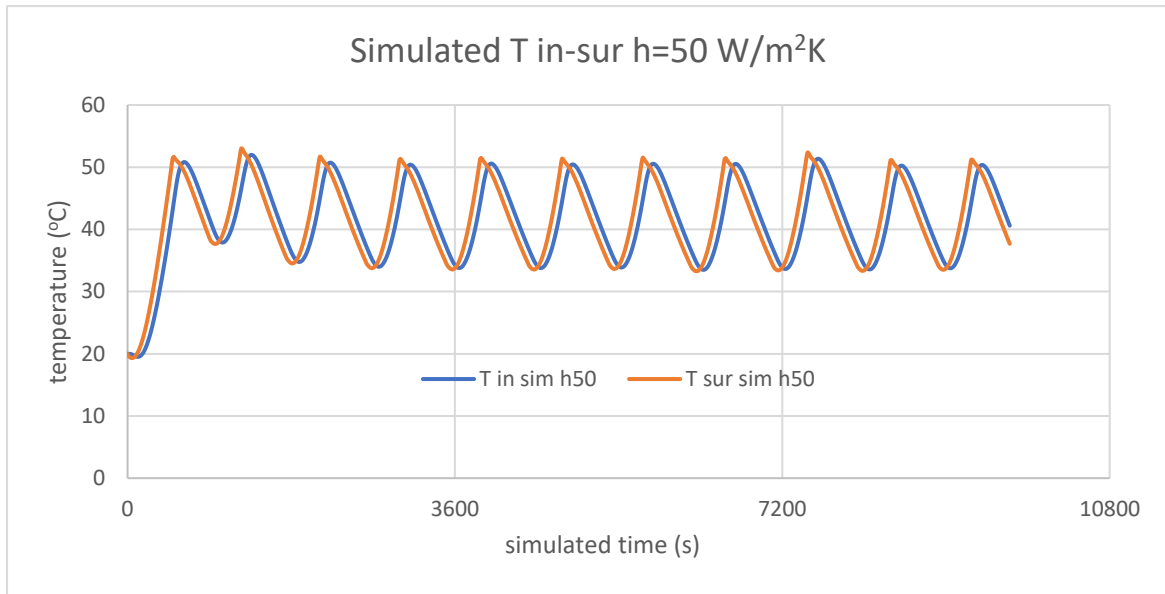


Διάγραμμα 28: Απόκλιση προσομοίωσης απο πειραματικά δεδομένα για τη δοκιμή με συντελεστή συναγωγής h=50 W/m²K

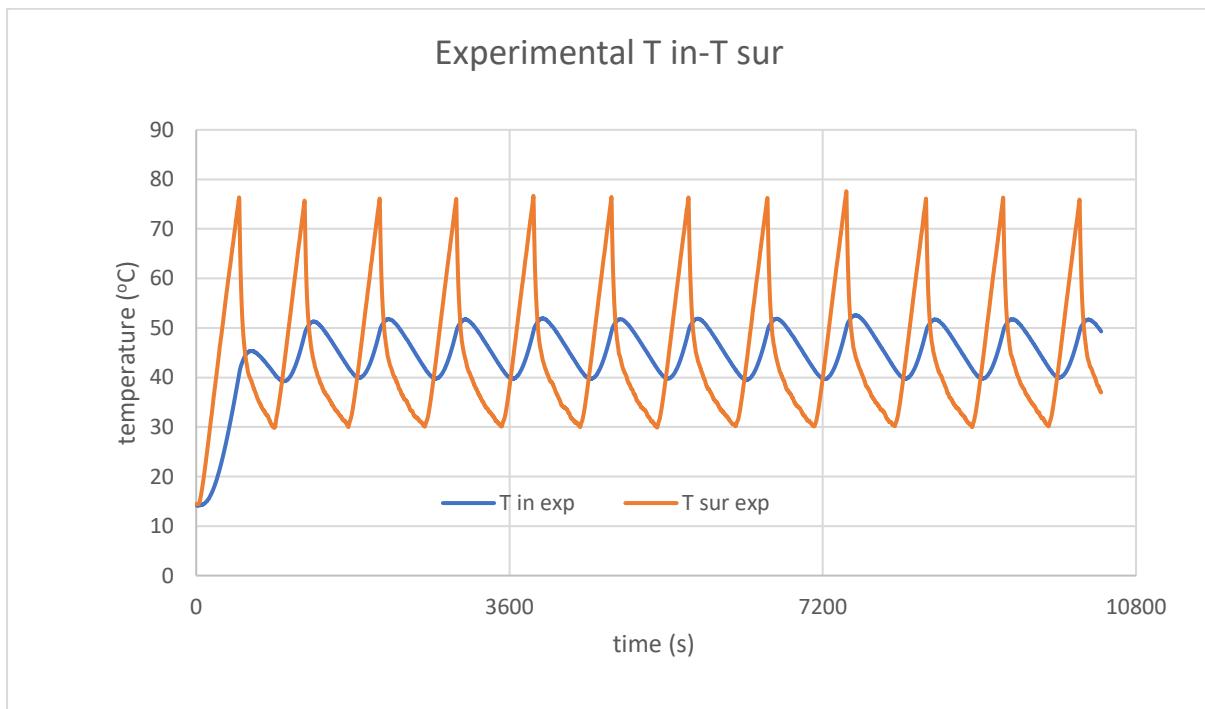


Διάγραμμα 29: Απόκλιση προσομοίωσης από πειραματικά δεδομένα για τη δοκιμή με συντελεστή συναγωγής $h=60 \text{ W/m}^2\text{K}$

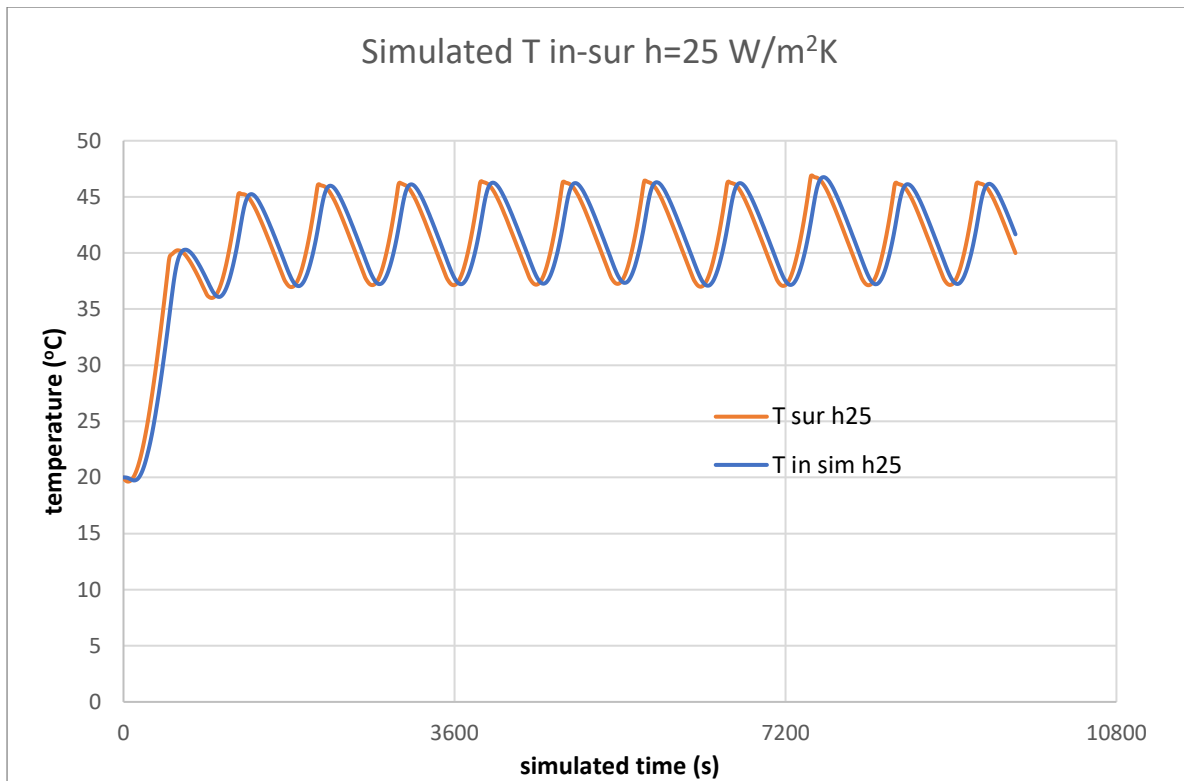
Στο Διάγραμμα 30 συγκρίνεται η υπολογιζόμενη κατά την προσομοίωση θερμοκρασία επιφάνειας σε σχέση με τη θερμοκρασία εσωτερικού του μαρμάρου για την προσομοίωση συναγωγής με $h=50 \text{ W/m}^2\text{K}$, που αποτελεί και την ακριβέστερη προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του εσωτερικού του μαρμάρου. Συγκρίνοντας το Διάγραμμα 30 με το Διάγραμμα 31 στο οποίο δίνονται οι αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις επιφάνειας-εσωτερικού, διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά της επιφάνειας που προβλέπει το μοντέλο απέχει αρκετά από την πειραματική. Σύμφωνα με το μοντέλο η θερμοκρασία επιφάνειας δεν απέχει σε καμία χρονική στιγμή πάνω από $8,35 \text{ }^\circ\text{C}$ από την αντίστοιχη του κέντρου. Από τα πειραματικά δεδομένα όμως προκύπτει ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ κέντρου και επιφάνειας φτάνει μέχρι $31,29 \text{ }^\circ\text{C}$ κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου και στη συνέχεια φτάνει μέχρι και $23,71 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ίδια συμπεριφορά, δηλαδή πολύ κοντινές τιμές θερμοκρασίας μεταξύ κέντρου και επιφάνειας παρατηρούνται σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικούς συντελεστές συναγωγής. Ενδεικτικά δίνεται το Διάγραμμα 32 που αφορά τη δοκιμή με $h=25 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Διάγραμμα 30: Σύγκριση υπολογιζόμενων θερμοκρασιών επιφάνειας-εσωτερικού του μαρμάρου από προσομοίωση συναγωγής με $h=50 \text{ W/m}^2\text{K}$



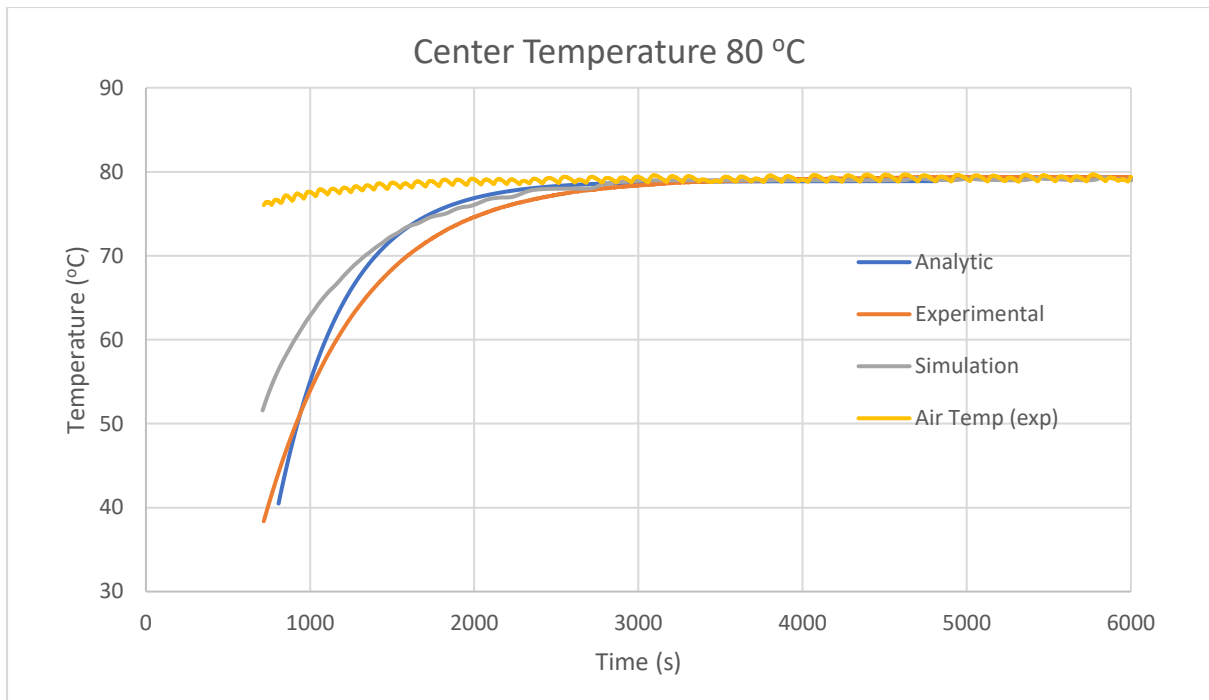
Διάγραμμα 31: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας εσωτερικού-επιφάνειας



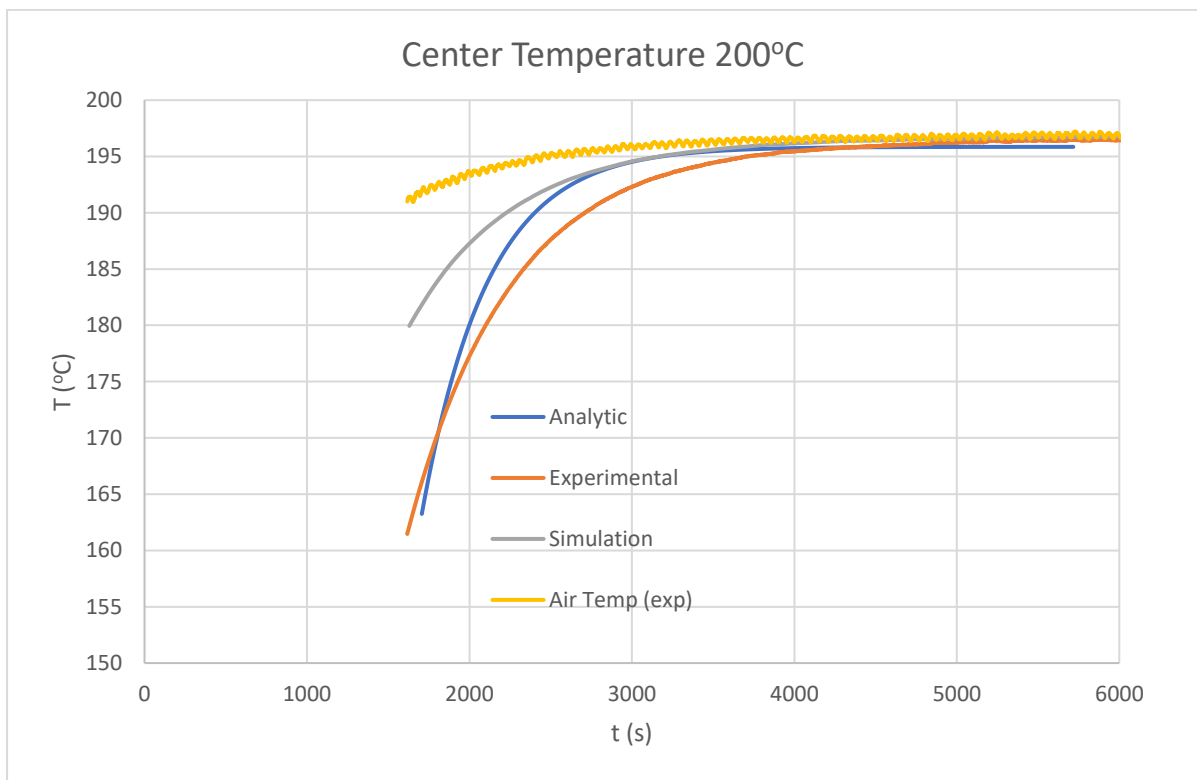
Διάγραμμα 32: Σύγκριση υπολογιζόμενων θερμοκρασιών επιφάνειας-εσωτερικού του μαρμάρου από προσομοίωση συναγωγής με $h=25 \text{ W/m}^2\text{K}$

7.6. Αποτελέσματα Αναλυτικών Προσεγγιστικών Λύσεων

Στα Διαγράμματα 33 και 34α γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αναλυτικής προσέγγισης με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα πειραματικά δεδομένα. Όπως φαίνεται οι καμπύλες που σχηματίζονται και στις δύο περιπτώσεις προσεγγίζουν αρκετά τις πειραματικές αλλά και αυτές που προέρχονται από την προσομοίωση, αν και αφορούν μόνο ένα τμήμα της συνολικής διεργασίας.



Διάγραμμα 33: Σύγκριση προβλέψεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μαρμάρου, από προσομοίωση και από αναλυτική προσέγγιση, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, για το θερμοκρασιακό πρόγραμμα των 80 °C



Διάγραμμα 34: Σύγκριση προβλέψεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μαρμάρου, από προσομοίωση και από αναλυτική προσέγγιση, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, για το θερμοκρασιακό πρόγραμμα των 200 °C

7.7. Γενική Συζήτηση

Η χειροκίνητη πραγματοποίηση του θερμοκρασιακού προγράμματος πολλαπλών κύκλων θέρμανσης-ψύξης έδειξε καλή επαναληψιμότητα. Το προφίλ θερμοκρασιών παρέμεινε σχεδόν ίδιο σε κάθε κύκλο, η τυπική απόκλιση των θερμοκρασιών μεταξύ των κύκλων παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα, ενώ και η διάρκεια των κύκλων είχε επίσης χαμηλή τυπική απόκλιση.

Όπως έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη υγρασίας επηρεάζει τη φθορά του μαρμάρου κατά την επαναλαμβανόμενη θέρμανση και ψύξη [47]. Στην παρούσα εργασία δεν ήταν δυνατή η παρακολούθηση και ο έλεγχος της υγρασίας κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Θα πρέπει όμως να ερευνηθεί κατά πόσο επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας και τις θερμικές ιδιότητες του μαρμάρου. Σε περίπτωση μελλοντικής έρευνας, η χρήση θαλάμου επιταχυνόμενης γήρανσης για την κυκλική θερμική καταπόνηση μπορεί να προσφέρει καλύτερο έλεγχο της διεργασίας, αφού πολλά μοντέλα προσφέρουν δυνατότητα θέρμανσης αλλά και ψύξης σε θερμοκρασία χαμηλότερη του περιβάλλοντος, επιλογή ρυθμού θέρμανσης και ψύξης, έλεγχο της υγρασίας και άλλων παραγόντων [48].

Το εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών που υπόκειται ένα σημείο υλικού που εκτίθεται σε μετεωρολογικά φαινόμενα εξαρτάται από το βάθος στο οποίο βρίσκεται σε σχέση με την εξωτερική επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια του προγράμματος κυκλικής θέρμανσης και ψύξης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η θερμοκρασία της επιφάνειας του μαρμάρου κινήθηκε σε εύρος 44,52 °C και αυτή του κέντρου του δοκιμίου σε εύρος 13,31 °C. Το εύρος αυτό σχετίζεται με την επιμήκυνση των κρυστάλλων ασβεσίτη και κατά συνέπεια με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του μαρμάρου [19][35]. Κατά συνέπεια οι εξωτερικές επιφάνειες των μαρμάρινων κατασκευών είναι αυτές που δέχονται τη μεγαλύτερη επιβάρυνση από θερμική φθορά.

Η παραδοχή ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του μαρμάρου είναι σταθερή και ανεξάρτητη της της θερμοκρασίας στις προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, δεν οδήγησε σε σημαντικά σφάλματα. Η βιβλιογραφική ειδική θερμοχωρητικότητα που χρησιμοποιήθηκε στις θερμοκρασίες του πειράματος (20-200 °C) διαφέρει μέχρι και 16% από την τιμή που καταγράφηκε στην ανάλυση διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης.

Η προσομοίωση μεμονωμένων κύκλων θέρμανσης-ψύξης στους 80 και 200 °C, με οριακή συνθήκη την επιφανειακή θερμοκρασία του μαρμάρου, έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα και προέβλεψε τη θερμοκρασία στο κέντρο του δοκιμίου με ικανοποιητική ακρίβεια. Η μεγαλύτερη απόκλιση από την πειραματική συμπεριφορά εμφανίστηκε κατά τα αρχικά στάδια θέρμανσης και ψύξης, αμέσως μετά δηλαδή από σημεία απότομης μεταβολής των οριακών συνθηκών. Στην πραγματικότητα, οι θερμοκρασιακές μεταβολές που υπόκεινται τα διάφορα κτήρια υπό την επίδραση του μετεωρολογικού κύκλου και περιβαλλοντικών παραγόντων είναι πολύ πιο ήπιες. Κατά συνέπεια είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι το μοντέλο αγωγής της θερμότητας που κατασκευάστηκε μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη θερμική συμπεριφορά του μαρμάρου σε πραγματικά κτήρια, αν είναι γνωστές οι οριακές συνθήκες, δηλαδή οι επιφανειακές θερμοκρασίες. Το πλεονέκτημα που έχει το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ότι δεν απαιτούνται δεδομένα για τη συναγωγή που λαμβάνει χώρα μεταξύ υλικού και περιβάλλοντος, όπως η εξωτερική θερμοκρασία και ο συντελεστής συναγωγής η εύρεση του οποίου είναι συνήθως ένα αρκετά απαιτητικό πρόβλημα. Έτσι μπορούν να γίνουν προβλέψεις θερμικής συμπεριφοράς μαρμάρινων μελών και κτηρίων χρησιμοποιώντας μετρήσεις θερμογραφίας υπερύθρου, που αποτελεί έναν εύκολο και γρήγορο τρόπο μέτρησης των εν λόγω θερμοκρασιών [42], [43].

Το μοντέλο αγωγής της θερμότητας με οριακή συνθήκη την επιφανειακή θερμοκρασία που κατασκευάστηκε δεν περιγράφει ικανοποιητικά συνθήκες επαναλαμβανόμενων μεταβολών της θερμοκρασίας, με υψηλό ρυθμό μεταβολής της. Αυτό δικαιολογείται, καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται μόνο στη στιγμιαία θερμοκρασία της επιφάνειας για να προβλέψει τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του υλικού, αγνοεί όμως τη θερμορροή από ή προς το υλικό. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε ότι η χρήση της συναγωγής με το περιβάλλον ως οριακής συνθήκης μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα για έντονα μεταβατικές καταστάσεις. Για ένα τέτοιο μοντέλο απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η οποία στην προκειμένη περίπτωση ήταν η θερμοκρασία αέρα που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος θερμικής καταπόνησης με πολλαπλούς θερμοκρασιακούς κύκλους. Επιπλέον απαιτείται η γνώση του συντελεστή συναγωγής, ο οποίος στην συγκεκριμένη περίπτωση βρέθηκε με δοκιμές και επαλήθευση των πειραματικών δεδομένων, και το τελικό μοντέλο προσέγγισε με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του κέντρου του μαρμάρινου δοκιμίου.

Παρ' όλα αυτά η θερμοκρασία που προβλέπει το μοντέλο για την επιφάνεια του μαρμάρου απέχει από τις πειραματικές μετρήσεις. Κατά συνέπεια δεν περιγράφει με επαρκή ακρίβεια τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος, παρά μόνο αυτή του κέντρου. Περαιτέρω πειράματα και κατάλληλη ρύθμιση παραμέτρων του μοντέλου απαιτούνται για να προσεγγιστεί καλύτερα η συνολική συμπεριφορά

Όσον αφορά την αναλυτική προσέγγιση, λόγω των περιορισμών σχετικά με τη γεωμετρία και τον τύπο οριακών συνθηκών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις σε προβλήματα με συνεχώς μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες όπως, αυτές που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία. Παρ' όλα αυτά λόγω της ευκολίας της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη εκτίμηση, σε συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων με επαρκή ακρίβεια.

8. Συμπεράσματα και Προοπτικές

1. Η πειραματική θερμική καταπόνηση υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια σε συμβατικό εργαστηριακό φούρνο, ρυθμίζοντας κατάλληλα τη θερμοκρασία του φούρνου βάσει χρονικού προγράμματος.
2. Η ζωντανή παρακολούθηση και καταγραφή της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του δοκιμίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επαλήθευση και επικύρωση μοντέλων μεταφοράς θερμότητας.
3. Οι εξωτερικές θερμοκρασιακές μεταβολές επηρεάζουν το εσωτερικό με κάποια χρονική υστέρηση.
4. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του μαρμάρου δεν μεταβάλλεται αρκετά στις συνήθεις θερμοκρασίες και η μεταβολή της δεν επηρεάζει σημαντικά την θερμική συμπεριφορά του.
5. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του μαρμάρου μπορεί να προβλεφθεί με σημαντική ακρίβεια κατά τη διάρκεια ήπιων θερμοκρασιακών μεταβολών, με τη βοήθεια προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία και οριακή συνθήκη την επιφανειακή θερμοκρασία.
6. Κατά την προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας με έντονες και γρήγορες θερμοκρασιακές μεταβολές η χρήση της συναγωγής με τον περιβάλλοντα αέρα ως οριακής συνθήκης δίνει αρκετά ακριβείς προβλέψεις θερμοκρασίας.
7. Οι αναλυτικές προσεγγίσεις προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας στην μεταβατική κατάσταση αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για γρήγορους υπολογισμούς σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μελέτης απλής γεωμετρίας και απλών διαταραχών των οριακών συνθηκών.

Προοπτικές

Η παρούσα έρευνα μπορεί να συνεχιστεί μελλοντικά στοχεύοντας στη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας, στην περαιτέρω διερεύνηση των θερμικών ιδιοτήτων του μαρμάρου αλλά και στη σύνδεσή του με αναμενόμενες μεταβολές στο μικροσκοπικό επίπεδο.

Στη βελτίωση του μοντέλου μπορούν να συμβάλλουν οι παρακάτω προσθήκες και αλλαγές:

- Πέραν της μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας με τη θερμοκρασία, που ερευνήθηκε στην παρούσα εργασία θα ήταν χρήσιμη η γνώση της μεταβολής με τη θερμοκρασία και των άλλων δύο θερμικών ιδιοτήτων του μαρμάρου, δηλαδή της πυκνότητας και της θερμικής αγωγιμότητας, μέσω της πραγματοποίησης κατάλληλων πειραμάτων. Η χρήση συναρτήσεων που περιγράφουν την ακριβή συμπεριφορά των ιδιοτήτων αυτών, είναι πιθανό να βελτιώσουν την ακρίβεια του μοντέλου.
- Η χρήση πιο πιστών στην πραγματικότητα οριακών συνθηκών μπορεί να βελτιώσει συνολικά την ακρίβεια του μοντέλου. Θερμογραφία υπερύθρου ή μετρήσεις με θερμοστοιχεία σε πολλαπλά σημεία ενδιαφέροντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
- Η διερεύνηση του ρόλου της υγρασίας εντός του υλικού στη μεταφορά θερμότητας και η επιρροή της στις θερμικές ιδιότητες του υλικού.
- Η συμπερίληψη της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στο μοντέλο, ειδικά σε περιπτώσεις προσομοίωσης διεργασιών που περιλαμβάνουν έκθεση υλικού σε ηλιακή ακτινοβολία θα προσδώσει επίσης μεγαλύτερη ακρίβεια.

- Η πλήρης μοντελοποίηση της ροής ρευστού γύρω από τη γεωμετρία σε συνδυασμό με την ακριβή αποτύπωση της γεωμετρίας ενδιαφέροντος. Αν και η προσομοίωση με βάση ένα τέτοιο μοντέλο απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, αναμένεται να παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Με βάση τις υπολογιζόμενες θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να γίνουν προβλέψεις σχετικά με τη μικροδομή του υλικού όπως π.χ. η μεταβολή του πορώδους αλλά και σύνδεση με μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων, με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, είτε με νέα εξειδικευμένα πειράματα και με αυτό τον τρόπο να υποδειχθούν τα επικίνδυνα σημεία του εκάστοτε αντικειμένου μελέτης που χρίζουν συντήρησης.

Βιβλιογραφία

- [1] E. Sesana, A. S. Gagnon, C. Ciantelli, J. A. Cassar, and J. J. Hughes, "Climate change impacts on cultural heritage: A literature review," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 12, no. 4. John Wiley and Sons Inc, Jul. 01, 2021. doi: 10.1002/wcc.710.
- [2] "Πρώτη εκτίμηση για την πυρκαγιά στον αρχαιολογικό χώρο των Μυκηνών," *Γραφείο τύπου ΥΠΠΟΑ*, Aug. 30, 2020. <https://www.culture.gov.gr/el/Information/SitePages/view.aspx?nID=3443> (accessed Sep. 22, 2022).
- [3] "Ανακοίνωση από το Γραφείο Τύπου ΥΠΠΟΑ," *Γραφείο Τύπου ΥΠΠΟΑ*, Jul. 10, 2022. <https://www.culture.gov.gr/el/Information/SitePages/view.aspx?nID=4289> (accessed Sep. 22, 2022).
- [4] Τ. Σοιραμπίδης, *Τα ελληνικά μάρμαρα & άλλα ελληνικά πετρώματα*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press, 1996.
- [5] Δ. Ασημακόπουλος, Β. Λυγερού, and Γ. Αραμπατζής, *Μεταφορά θερμότητας και μάζας*. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2012.
- [6] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Μεταφορά μάζας και θερμότητας*, 4th ed. Εκδόσεις Τζιόλα, 2014.
- [7] Α. Μοροπούλου and Γ. Μπάτης, *Δομικά Υλικά*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2016.
- [8] Μ. Μπεάζη Κατσιώτη, *Ειδικά Κεφάλαια Ανόργανης Χημείας*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015.
- [9] Σ. Σαββίδης, *Βασικές Αρχές και Εφαρμογές Ορυκτολογίας*. Κοζάνη: Σεραφείμ Σαββίδης, 2014.
- [10] Συλλογικό, *Άτλαντας Ελληνικών Διακοσμητικών Πετρωμάτων & Δομικών Λίθων*. ΙΓΜΕ, 2016.
- [11] S. Siegesmund and R. Snethlage, Eds., *Stone in Architecture*, 4th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-14475-2.
- [12] Α. Μοροπούλου and Ν. Κουλουμπή, *Φθορά και Προστασία Υλικών*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2017.
- [13] Moropoulou A, Bakolas A, Aggelakopoulou E, and Pineli T, "ESTIMATION OF ELASTIC CONSTANTS OF STONES, USED IN HISTORIC MONUMENTS, USING ULTRASONIC TECHNIQUE AND CORRELATION TO THEIR MICROSTRUCTURE PARAMETERS," The 3rd International Conference on Non-Destructive Testing of the Hellenic Society for NDT 15-18 October 2003, pp. 242-245. Chania, Crete, Greece, 2003.
- [14] Γ. Εξαδάκτυλος, *Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων, Σημειώσεις Διδασκαλίας*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.
- [15] Γ. Πουλάκος, "Ιδιότητες και συμπεριφορά δαπέδων σε σχέση με τη θερμότητα," *Τεχνικά Χρονικά*, no. 2, 2010.
- [16] Lord Rayleigh, "The bending of marble," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 144, no. 852, pp. 266–279, Mar. 1934, doi: 10.1098/rspa.1934.0048.

- [17] G. Royer-Carfagni, "Some considerations on the warping of marble façades: the example of Alvar Aalto's Finland Hall in Helsinki," *Constr Build Mater*, vol. 13, no. 8, pp. 449–457, Dec. 1999, doi: 10.1016/S0950-0618(99)00036-7.
- [18] J. L. Rosenholtz and D. T. Smith, "Linear thermal expansion of calcite, var. Iceland spar, and Yule marble," *American Mineralogist*, vol. 34, no. 11–12, pp. 846–854, Dec. 1949.
- [19] C. Widhalm, E. Tschegg, and W. Eppensteiner, "Acoustic Emission and Anisotropic Expansion when Heating Marble," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 11, no. 1, pp. 35–40, Feb. 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(1997)11:1(35).
- [20] G. F. Royer-Carfagni, "On the thermal degradation of marble." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, pp. 119-126, 1999
- [21] A. Goudie and H. A. Viles, "The thermal degradation of marble," *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, vol. 35, pp. 7–16, Jan. 2000.
- [22] Z. Zhu, H. Tian, G. Jiang, and W. Cheng, "Effects of High Temperature on the Mechanical Properties of Chinese Marble," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 51, no. 6, pp. 1937–1942, Jun. 2018, doi: 10.1007/s00603-018-1426-0.
- [23] J. Peng, G. Rong, M. Cai, M. di Yao, and C. B. Zhou, "Physical and mechanical behaviors of a thermal-damaged coarse marble under uniaxial compression," *Eng Geol*, vol. 200, pp. 88–93, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.12.011.
- [24] F. Vagnon *et al.*, "Effects of thermal treatment on physical and mechanical properties of Valdieri Marble - NW Italy," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 116, pp. 75–86, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.006.
- [25] Q. Guo, H. Su, J. Liu, Q. Yin, H. Jing, and L. Yu, "An experimental study on the fracture behaviors of marble specimens subjected to high temperature treatment," *Eng Fract Mech*, vol. 225, p. 106862, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2019.106862.
- [26] A. Ozguven and Y. Ozcelik, "Investigation of some property changes of natural building stones exposed to fire and high heat," *Constr Build Mater*, vol. 38, pp. 813–821, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.072.
- [27] H. Su, H. Jing, Q. Yin, L. Yu, Y. Wang, and X. Wu, "Strength and deformation behaviors of veined marble specimens after vacuum heat treatment under conventional triaxial compression," *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, vol. 33, no. 5, pp. 886–898, Oct. 2017, doi: 10.1007/s10409-017-0653-z.
- [28] Y. L. Chen, J. Ni, W. Shao, and R. Azzam, "Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 56, pp. 62–66, 2012, doi: 10.1016/j.ijrmms.2012.07.026.
- [29] I. Halikia, L. Zoumpoulakis, I. Christodoulou, and D. Prattis, "Kinetic study of the thermal decomposition of calcium carbonate by isothermal methods of analysis," *Eur. J. Miner. Process. Environ. Prot.*, vol. 1, Jan. 2001.
- [30] Z. C. Tang, M. Sun, and J. Peng, "Influence of high temperature duration on physical, thermal and mechanical properties of a fine-grained marble," *Appl Therm Eng*, vol. 156, pp. 34–50, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.039.

- [31] M. Y. Koca, G. Ozden, A. B. Yavuz, C. Kincal, T. Onargan, and K. Kucuk, "Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, no. 4, pp. 520–530, 2006, doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.09.007.
- [32] J. N. Reddy and D. K. Gartlink, *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics Third Edition*. 2010. doi: <https://doi.org/10.1201/9781439882573>.
- [33] Σ. Γεώργιος, Ε. Σταυρουλάκης, Μ. Ε. Σταυρουλάκης, Α. Δ. Μουράντοβα, and Ε. Μυστακίδης, *Υπολογιστική Μηχανική Κριτικός αναγνώστης Συντελεστές έκδοσης*. [Online]. Available: www.kallipos.gr
- [34] S. J. Antill and H. A. Viles, "Examples of the use of computer simulation as a tool for stone weathering research," *Build Environ*, vol. 38, no. 9–10, pp. 1243–1250, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(03)00081-7.
- [35] T. Weiss, S. Siegesmund, and E. R. Fuller, "Thermal degradation of marble: Indications from finite-element modelling," *Build Environ*, vol. 38, no. 9–10, pp. 1251–1260, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(03)00082-9.
- [36] D. M. Saylor, E. R. Fuller, and T. Weiss, "Thermal-elastic response of marble polycrystals: Influence of grain orientation configuration," *International Journal of Materials Research*, vol. 98, no. 12, pp. 1256–1263, Dec. 2007, doi: 10.3139/146.101589.
- [37] A. M. Ferrero, M. Migliazza, and A. Spagnoli, "Theoretical modelling of bowing in cracked marble slabs under cyclic thermal loading," *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 6, pp. 2151–2159, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.015.
- [38] A. M. Ferrero, M. Migliazza, A. Spagnoli, and M. Zucali, "Micromechanics of intergranular cracking due to anisotropic thermal expansion in calcite marbles," *Eng Fract Mech*, vol. 130, pp. 42–52, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.004.
- [39] V. Shushakova, E. R. Fuller, F. Heidelbach, D. Mainprice, and S. Siegesmund, "Marble decay induced by thermal strains: Simulations and experiments," *Environ Earth Sci*, vol. 69, no. 4, pp. 1281–1297, Jun. 2013, doi: 10.1007/s12665-013-2406-z.
- [40] W. H. Ito, A. M. Ferrero, and P. I. B. de Queiroz, "Numerical analysis of bowing phenomenon due to thermal stresses in marble slabs," *Materials*, vol. 13, no. 19, pp. 1–17, Oct. 2020, doi: 10.3390/ma13194367.
- [41] W. H. Ito *et al.*, "On the thermal stresses due to weathering in natural stones," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 3, pp. 1–14, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11031188.
- [42] A. Maretsi, M. Karoglou, A. Bakolas, and A. Moropoulou, "Thermal Infrared Investigation of Hephaestus Temple in Ancient Agora of Athens," in *Springer Proceedings in Materials*, Springer Nature, 2019, pp. 75–90. doi: 10.1007/978-3-030-25763-7_6.
- [43] Α. Πέτσου, "Μελέτη της θερμικής καταπόνησης του πεντελικού μαρμάρου σε αρχαία μνημεία", Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2017.
- [44] R. F. Speyer, *Thermal Analysis of Materials*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [45] Α. Μοροπούλου, Μ. Κουή, Μ. Κροκίδα, and Α. Μπακόλας, *Σημειώσεις Ασκήσεων του Μαθήματος Δομικά Υλικά 9ου Εξαμήνου Χ-Μ ΕΜΠ*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2016.

- [46] Χ. Προβατίδης, “Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές - Σημειώσεις ANSYS,” 2007.
- [47] A. Koch and S. Siegesmund, “The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble,” in *Environmental Geology*, Aug. 2004, vol. 46, no. 3–4, pp. 350–363. doi: 10.1007/s00254-004-1037-9.
- [48] Συλλογικό, *Φθορά και Προστασία Υλικών 9ο Εξάμηνο Χ-Μ Εργαστηριακός Οδηγός*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2017.