



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**«Επιπτώσεις της φωτιάς στην αντοχή και ανθεκτικότητα
δομικών λίθων»**

ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΠΡΗΣ

A.M.: 05115406

ΑΘΗΝΑ 2020

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

- Καθ. Κ. Χαριτίδης, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π. (Επιστημονικά υπεύθυνη στη διαδικασία Erasmus+)
- Prof. E. Zendri, Ca' Foscari, Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica (Επιστημονικά υπεύθυνη στη διαδικασία Erasmus+)
- Δρ. Αικ. Δελέγκου, ΕΔΙΠ, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π.
- Δρ. Μ. Αποστολοπούλου, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π.

Τριμελής επιτροπή εξέτασης

- Καθ. Κ. Χαριτίδης, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
- Καθ. Λ. Ζουμπουλάκης, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π.
- Επ. Καθ. Δ. Μαμμά, Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων που επιφέρουν οι υψηλές θερμοκρασίες, που προσομοιώνουν το φαινόμενο της φωτιάς, στην αντοχή και την ανθεκτικότητα των δομικών λίθων Istria, Carrara και Lecce. Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, καθώς και στο Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica του Πανεπιστημίου Ca Foscari της Βενετίας στο πλαίσιο του προγράμματος Erasmus+.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την τέως Καθ. Ε.Μ.Π. Α. Μοροπούλου, καθώς και την Καθ. Ε. Zendri του Πανεπιστημίου Ca' Foscari, που μου ανέθεσαν τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και μου έδωσαν την ευκαιρία να εργαστώ τόσο στον εργαστηριακό χώρο του Ε.Μ.Π. όσο και του Πανεπιστημίου Ca' Foscari. Η εμπειρία αυτή αν και σύντομη, λόγω των έκτακτων συνθηκών της πανδημίας του Covid-19, με βοήθησε ιδιαίτερα ως προς την κατανόηση της διεπιστημονικής έρευνας και την ανάπτυξη πολλών δεξιοτήτων, όπως η συνεργασία και η προσαρμοστικότητα. Οι γνώσεις και οι πολύτιμες συμβουλές τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, συντέλεσαν στη διεύρυνση τόσο της επιστημονικών μου γνώσεων όσο και των πνευματικών μου οριζόντων στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών και του πολιτισμού. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Ε.Μ.Π. Κ. Χαριτίδη για τη βοήθειά και τις σημαντικές υποδείξεις του ως προς το κείμενο και την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω και την Δρ. Αικ. Δελέγκου, ΕΔΙΠ της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την αμέριστη βοήθειά της ως προς το επιστημονικό έργο καθώς και την αμέριστη συμπαράσταση που μου προσέφερε. Την ευχαριστώ ιδιαίτερα για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε και κυρίως για την αξιοσημείωτη υπομονή που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Δρ. Μαρία Αποστολοπούλου της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθειά της στην πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας συνολικά και ιδιαίτερα ως προς το κομμάτι των θερμικών αναλύσεων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων της φωτιάς στην αντοχή και ανθεκτικότητα δομικών λίθων. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκαν οι δομικοί λίθοι Istria, Carrara και Lecce της Ιταλίας, λόγω της εκτενούς χρήσης τους στην οικοδόμηση και διακόσμηση σημαντικών μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς της Ιταλικής χερσονήσου. Πιο αναλυτικά αναφέρονται τέτοιες περιπτώσεις μνημείων στο ειδικό θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Το φαινόμενο της φωτιάς προσομοιώθηκε με την έκθεση των δοκιμών των τριών αυτών διαφορετικών λιθότυπων σε διαφορετικές υψηλές θερμοκρασίες 300°C, 400°C, 600°C και 900°C σε φούρνο για 6 ώρες.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε, αφορούσε στον χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση του κάθε λιθότυπου μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων συγκεκριμένων τεχνικών, πριν και μετά την έκθεση των δοκιμών στις προαναφερθείσες διαφορετικές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τεχνικές: **Ψηφιακή μικροσκοπία (DM)**, για την αποτίμηση των μεταβολών στην υφή και τη μορφολογία των λίθων, **Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (Θερμοβαρυμετρική & Διαφορική Θερμική Ανάλυση, Tg/DTA)**, για την ποιοτική και ποσοτική μελέτη της χημικής σύστασης, **Υπερηχοσκόπηση (US)** για τον έλεγχο της συνοχής και αντοχής των λίθων, **Δοκιμές Εμβάπτισης** για τον προσδιορισμό του ποσοστού ροφημένου νερού, καθώς και του ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό, και **Χρωματομετρία** για την αποτίμηση των αισθητικών αλλοιώσεων των λίθων.

Διαπιστώνεται ότι τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων λίθων υποβαθμίζονται μετά την έκθεσή τους στις διαφορετικές υψηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιάσουν το φαινόμενο της φωτιάς. Τη χαμηλότερη ανθεκτικότητα παρουσίασε ο λίθος Lecce, ο οποίος μετά την έκθεσή του στους 900°C κατέρρευσε, θρυμματιζόμενος σε μικρά και μεγαλύτερα κομμάτια, ενώ και οι άλλοι δύο εξεταζόμενοι λιθότυποι στη συγκεκριμένη θερμοκρασία εμφάνισαν τα πιο απομειωμένα τους χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, παρουσίασαν απώλεια αυθεντικού υλικού και απώλεια της αρχικής κυβικής τους γεωμετρίας, καθώς και αισθητικές αλλοιώσεις.

Αναλυτικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης των δοκιμών όλων των λιθοτύπων οδηγεί στην μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων, γεγονός που συνεπάγεται μείωση της συνοχής τους και των μηχανικών αντοχών τους. Όμως, ο κάθε λιθότυπος παρουσιάζει διαφορετικά ποσοστά μεταβολής στην ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων ανά θερμοκρασιακό διάστημα. Έτσι, ο λίθος Istria παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στο διάστημα 300°C-400°C, το μάρμαρο Carrara στο διάστημα 400°C-600°C, ενώ ο λιθότυπος Lecce στο διάστημα 600°C-900°C, όπου καταρρέει.

Παράλληλα, με την αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης στα δοκίμια των λιθότυπων Istria και Carrara, παρατηρείται μεγάλη αύξηση του πορώδους, καθώς και του ποσοστού ροφημένου νερού (υδατική χωρητικότητα, WAC). Σε ότι αφορά όμως τον λιθότυπο Lecce, παρατηρείται ότι οι τιμές του πορώδους και του ποσοστού ροφημένου νερού, σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έκθεσης των δοκιμών παραμένουν αντίστοιχες, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο των πόρων που είναι προσβάσιμο στο νερό παραμένει παρόμοιο στο σύνολό του.

Τέλος, σε ότι αφορά την αισθητική αλλοίωση των εξεταζόμενων δοκιμών, όπως αυτή καταγράφεται από τη συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ, αξίζει να σημειωθεί ότι ο

λίθος Lecce εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές ΔΕ στις εξεταζόμενες θερμοκρασίες, σε σχέση με τους λιθότυπους Istria και Carrara, ενώ και οι τρεις λιθότυποι παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αισθητική αλλοίωση (δηλαδή τις μεγαλύτερες τιμές ΔΕ) στους 600°C.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study the effects of fire on the strength and durability of natural building stones. Particularly, the Italian natural building stones of Istria, Carrara and Lecce were studied, because of their extensive use in the construction and decoration of important cultural heritage sites of the Italian peninsula. Such cases of monuments are mentioned in more detail in the specific theoretical part of this thesis. The fire event was simulated by exposing the specimens of these three lithotypes to different high temperatures of 300°C, 400°C, 600°C and 900°C in an oven for 6 hours.

The methodological approach which was followed, concerned the characterization and evaluation of each lithotype, by comparing the results of specific techniques before and after the exposure of the specimens to the different temperatures, which were mentioned above. Specifically, the following techniques were used: **Digital microscopy (DM)**, for the evaluation of changes in texture and morphology of the stones, **Thermal analysis methods (Thermogravimetry & Differential Thermal Analysis, Tg/DTA)**, for the qualitative and quantitative study of chemical composition, **Ultrasound pulse velocity (US)** to examine the cohesion and the strength of the stones, **Immersion Tests** to determine the percentage of water absorbed, as well as the total open porosity accessible to water and **Colorimetry** to assess the aesthetic alterations of the stones.

It is observed that the properties of the examined stones degrade after their exposure to different high temperatures, used to simulate the fire event. The lowest durability was presented by Lecce stone, which, after its exposure to 900°C, collapsed and crumbled into smaller and larger pieces, whereas the other two examined stones revealed their most enhanced reduced properties, at that temperature. In particular, they presented loss of authentic material and loss of their original cubic geometry, as well as aesthetic alterations.

In more detail, the increase of all specimens lithotypes in the exposure temperature, leads to a reduction in ultrasound pulse velocity, which implies a reduction in their cohesion and mechanical strength. However, each lithotype demonstrates different rates of change in ultrasound pulse velocity per temperature interval. Thus, Istria stone shows a greater reduction in ultrasound pulse velocity in the temperature interval of 300°C-400°C, Carrara marble in the temperature range of 400°C-600°C and Lecce stone in the temperature interval of 600°C-900°C, where it collapses.

At the same time, as the exposure temperature of Istria and Carrara specimens increased, there was a large increase in the porosity, as well as in the percentage of absorbed water (water capacity, WAC). As far as the Lecce stone is concerned, it is observed that the values of porosity and the percentage of water absorbed remain the same, at all exposure temperatures, which indicates that the network of water-accessible pores remains the same too.

Finally, regarding the aesthetic alterations of the examined specimens, as they are recorded by the total color differences (ΔE), it is worth noting that Lecce stone exhibits the highest values of ΔE compared to Istria and Carrara stones, at the examined temperatures. All of the examined lithotypes show the greatest aesthetic alterations (i.e. the highest ΔE values) at 600°C.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| 1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 10 |
| 1.1. ΔΟΜΙΚΟΙ ΛΙΘΟΙ | 10 |
| 1.2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΘΟΡΑΣ ΛΙΘΩΝ | 26 |
| 2. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 34 |
| 2.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΘΩΝ | 34 |
| 2.1.1. ΛΙΘΟΥΠΟΣ ΙΣΤΡΙΑ | 34 |
| 2.1.2. ΜΑΡΜΑΡΟ CARRARA..... | 39 |
| 2.1.3. ΛΙΘΟΥΠΟΣ LECCE..... | 42 |
| 2.2. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ | 45 |
| 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... | 50 |
| 3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ | 50 |
| 3.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ | 53 |
| 3.2.1. ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ (DM) | 53 |
| 3.2.2. ΘΕΡΜΟΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (TG/DTA) | 54 |
| 3.2.3. ΥΠΕΡΧΟΣΚΟΠΗΣΗ..... | 56 |
| 3.2.4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΡΟΦΗΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ & ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΝΕΡΟ | 58 |
| 3.2.5. ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ | 61 |
| 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... | 63 |
| 4.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ-ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ – ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ & ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ, DM | 63 |
| 4.1.1. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ ΙΣΤΡΙΑ | 67 |
| 4.1.2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΡΜΑΡΟ CARRARA..... | 78 |
| 4.1.3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ LECCE | 87 |
| 4.1.4. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 97 |
| 4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (TG/DTA).... | 101 |
| 4.3. ΥΠΕΡΧΟΣΚΟΠΗΣΗ..... | 106 |
| 4.3.1. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ ΙΣΤΡΙΑ | 107 |
| 4.3.2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΡΜΑΡΟ CARRARA..... | 112 |
| 4.3.3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ LECCE | 116 |
| 4.3.4. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 122 |

| | |
|---|------------|
| 4.4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΡΟΦΗΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ & ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΝΕΡΟ | 127 |
| 4.4.1. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ ΙΣΤΡΙΑ | 128 |
| 4.4.2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΡΜΑΡΟ CARRARA | 132 |
| 4.4.3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ LECCE | 136 |
| 4.4.4. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 140 |
| 4.5. ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ..... | 148 |
| 4.5.1. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ ΙΣΤΡΙΑ | 148 |
| 4.5.2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΡΜΑΡΟ CARRARA | 152 |
| 4.5.3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΛΙΘΟ LECCE | 156 |
| 4.5.4. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 160 |
| | |
| 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 166 |
| | |
| 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 169 |

| Συντμήσεις | Πλήρης ονομασία | Περιγραφή |
|-------------------|---|---|
| DM | Digital Microscopy | Ψηφιακή Μικροσκοπία |
| Tg | Thermogravimetry | Θερμοβαρυμετρική ανάλυση |
| DTA | Differential Thermal Analysis | Διαφορική θερμική ανάλυση |
| US | Ultrasound pulse velocity | Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων |
| R.H. | Relative Humidity | Σχετική υγρασία |
| WAC | Water Capacity | Μέγιστο ποσοστό υγρασίας μέσω εμβάπτισης |
| P | Porosity | Ανοιχτό πορώδες |
| CIELab | «Commission Internationale de l'Éclairage» laboratory | Χρωματικό μοντέλο |

1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος

1.1. Δομικοί λίθοι

Ορυκτά-Πετρώματα

Ορυκτό είναι το φυσικό, ομογενές στερεό, το οποίο συνήθως σχηματίζεται με ανόργανες διαδικασίες, χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό ταξινομημένης ατομικής διατάξεως, και έχει χημική σύσταση και φυσικές ιδιότητες, οι οποίες είτε είναι σταθερές είτε κυμαίνονται εντός ορισμένων ορίων.

Πέτρωμα είναι το υλικό του στερεού φλοιού της γης, προϊόν γεωλογικών διεργασιών. Αποτελείται από ορυκτά, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζουν και τις φυσικοχημικές του ιδιότητες (1).

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που λογίζονται για την βέλτιστη επιλογή τους είναι (2):

- *Ορυκτολογική σύνθεση*: Οι περισσότερες ιδιότητες των πετρωμάτων βασίζονται στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ορυκτών που τα απαρτίζουν.
- *Ιστός / Υφή*: Αναφέρονται στον τρόπο εμφάνισης των ορυκτών συστατικών μέσα στη μάζα του πετρώματος, στο βαθμό κρυστάλλωσης το μέγεθος και το σχήμα τους.
- *Δομή της μάζας του πετρώματος*: τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά, η σχιστότητα, οι πτυχές, κ.α.

Τα πετρώματα διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση την γεωλογική διεργασία από την οποία δημιουργούνται (2), (3):

- Πυριγενή
- Ιζηματογενή
- Μεταμορφωμένα

Παρακάτω απεικονίζεται ο κύκλος σχηματισμού των πετρωμάτων.



Εικόνα 1. Κύκλος σχηματισμού των πετρωμάτων (1)

Πυριγενή πετρώματα

Πυριγενή είναι τα πετρώματα τα οποία δημιουργούνται μετά από στερεοποίηση του μάγματος (4). Όταν η στερεοποίηση του μάγματος λαμβάνει χώρα αργά μέσα στον φλοιό σε βάθος, τα πετρώματα που δημιουργούνται ονομάζονται βαθυγενή ή πλουτωνίτες, και καθώς η κρυστάλλωση είναι βραδεία οδηγεί στην δημιουργία μεσο/χονδρόκοκκων κρυστάλλων συχνά ορατών με γυμνό μάτι. Τέτοια πετρώματα είναι οι γρανίτες, οι διορίτες, οι συηνίτες, και οι γάββροι. Αντίθετα, όταν η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα απότομα στην επιφάνεια του φλοιού της γης, τα πετρώματα που δημιουργούνται ονομάζονται ηφαιστίτες ή εκρηξιγενή. Λόγω της απότομης ανόδου του μάγματος στην επιφάνεια, η θερμοκρασία του πέφτει απότομα και σχηματίζονται υαλώδεις ή μικροκρυσταλλικές μάζες. Τέτοια πετρώματα είναι ο βασάλτης, και ο ρυόλιθος. Όταν η στερεοποίηση γίνεται σε μικρά βάθη, τα πετρώματα ονομάζονται υποηφαιστιακά. Τέλος, όταν το μάγμα εισχωρήσει μέσα σε μεγάλα ρήγματα ή ανοίγματα δημιουργούνται τα φλεβικά πετρώματα (1).

Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τους ακόλουθους τύπους ιστών (2), (3):

- *Ολοκρυσταλλικός ή γρανιτικός ιστός:* Όταν κατά τον σχηματισμό βαθυγενών πυριγενών πετρωμάτων, η στερεοποίηση του μάγματος γίνεται με βραδύ ρυθμό, τα ορυκτά κρυσταλλώνονται πλήρως σχηματίζοντας ευμεγέθεις κρυστάλλους, οι οποίοι είναι ορατοί με γυμνό μάτι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πυριγενούς πετρώματος που εμφανίζει τον εν λόγω ιστό αποτελεί ο γρανίτης.
- *Υαλώδης ιστός:* Στα ηφαιστειακά πετρώματα, η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα απότομα στην επιφάνεια του φλοιού της γης και σχηματίζονται υαλώδεις μάζες. Όπως για παράδειγμα παρατηρείται στον ιστό του οψιδιανού.
- *Αφυρικός ιστός:* Επίσης εμφανίζεται στα ηφαιστειακά πετρώματα, η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα απότομα στην επιφάνεια του φλοιού της γης, αλλά αντί για τον σχηματισμό υαλωδών μαζών, πραγματοποιείται ο σχηματισμός μικροκρυσταλλικών μαζών.
- *Πορφυριτικός ιστός:* Στον εν λόγω τύπο ιστού, μέσα σε υαλώδη ή μικροκρυσταλλική μάζα βρίσκονται μικροί ή μεγάλοι και καλά μορφοποιημένοι κρύσταλλοι, οι οποίοι σχηματίζονται πριν την έκχυση της λάβας και οι οποίοι ονομάζονται *φαινοκρύσταλλοι*. Η διαφορά των κρυστάλλων είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών συνθηκών κρυστάλλωσης. Τέτοια διαφοροποίηση στην κρυστάλλωση μπορεί να οφείλεται για παράδειγμα σε επανατήξη του γρανίτη και ανάπτυξη μεγάλων κρυστάλλων, ή σε κρυστάλλωση σε δύο στάδια, το πρώτο αργά σε μεγάλα βάθη και το δεύτερο απότομα με μετατόπιση του μάγματος ή διάβρωση των υπερκείμενων πετρωμάτων.
- *Πηγματιτικός ιστός:* Η κρυσταλλική μάζα είναι συνήθως χονδρόκοκκη σε φλέβες και ρηγματώσεις του όγκου του πετρώματος, παρόλο που έχει συμβεί ταχεία κρυστάλλωση. Παρόλο που η ύπαρξη τέτοιων φλεβών θεωρείται διακοσμητική, επιφέρει αρκετά προβλήματα γιατί ευνοεί τον διαχωρισμό των μεγάλων κρυστάλλων αστρία, μαρμαρυγία και αμφιβόλων, ενώ μπορεί να λάβει χώρα και αποκόλληση της φλέβας από τον κύριο όγκο του πετρώματος.

- *Απλιτικός ιστός*: Το είδος αυτό ιστού εμφανίζεται σε ανοιχτού χρώματος, σακχαροειδούς κοκκοδιαβάθμισης πέτρωμα σε φλέβες, που αποτελείται κυρίως από ανοιχτόχρωμα ορυκτά (αστρίους και χαλαζία) με ταυτόχρονη απουσία σκουρόχρωμων ορυκτών.

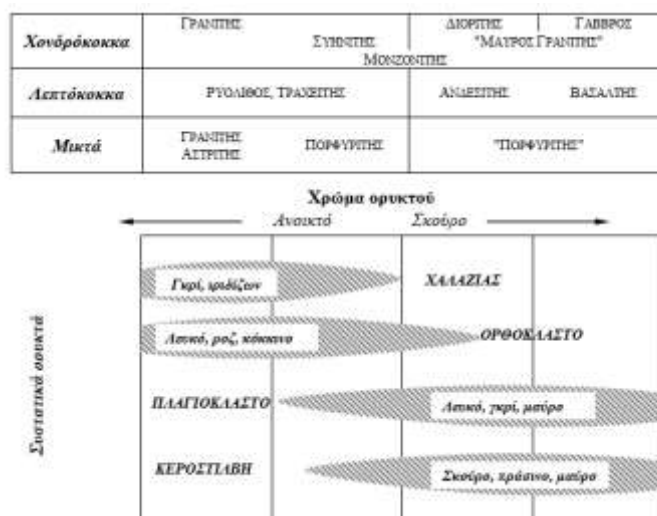
Υπάρχουν πολλοί τρόποι ταξινόμησης των πυριγενών πετρωμάτων. Ορισμένοι από αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω:

- Με βάση τον χρωματικό δείκτη (Χ.Δ.)-(εκτός των ηφαιστειακών), ο οποίος ορίζεται ως το ποσοστό των έγχρωμων συστατικών του πετρώματος (3):
 - 0-5% Ολολευκοκρατικά
 - 5-35% Λευκοκρατικά
 - 36-65% Μεσοκρατικά
 - 69-95% Μελανοκρατικά
 - 95-100% Ολομελανοκρατικά

Τα ορυκτά συστατικά των πετρωμάτων διακρίνονται σε:

- *Έγχρωμα ή φεμικά* (λόγω του Σιδήρου, Fe και του Μαγνησίου, Mg που συνήθως παρουσιάζονται σε αφθονία σ' αυτά τα ορυκτά), χαρακτηριστικά παραδείγματα της εν λόγω κατηγορίας αποτελούν οι μαρμαρυγίες (βιοτίτης $[K(Mg,Fe)_3(AlSi_3)O_{10}(OH)_2]$, μοσχοβίτης $[KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2]$) και οι αμφίβολοι (κεροσίλβη $[(Na,K)Ca_2(Mg,Fe,Al)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2]$)
- *Λευκά ή σαλικά* (λόγω του Πυριτίου, Si και του Αργιλίου, Al που παρουσιάζονται σε αφθονία στα ορυκτά αυτά), χαρακτηριστικά παραδείγματα της εν λόγω κατηγορίας αποτελούν ο χαλαζίας $[SiO_2]$, και οι άστριοι (αλκαλιούχοι άστριοι, πλαγιόκλαστα, αστριοειδή).
- Με βάση τη σύσταση του πετρώματος σε χαλαζία, αστριοειδή και την ποσοτική αναλογία αλκαλιούχων αστρίων προς πλαγιόκλαστα.
- Μια πολύ γενική χημική ταξινόμηση μπορεί να γίνει με βάση το ποσοστό του SiO_2 :
 - >63% *Όξινα*
 - 63-52% *Ενδιάμεσα*
 - 52-45% *Βασικά*
 - <45% *Υπερβασικά*

Μια απλοποιημένη κατάταξη τυπικών πυριγενών πετρωμάτων, ως προς την ορυκτολογική τους σύνθεση και το χρώμα των ορυκτών τους φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (2):



Εικόνα 2. Απλοποιημένη κατάταξη τυπικών πυριγενών πετρωμάτων, η ορυκτολογική τους σύνθεση και το χρώμα των ορυκτών τους (2)

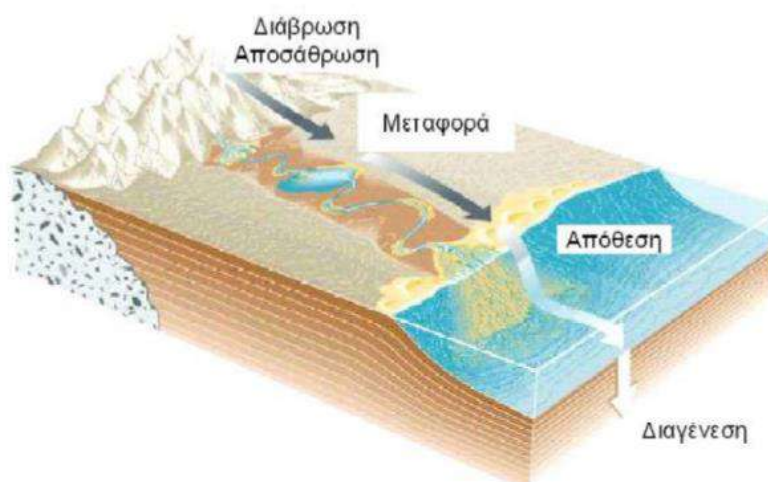
Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα σχηματίζονται από απόθεση ή καταβύθιση υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση μέσα σε ένα ρευστό μέσο (αέρας ή νερό) και τη μετέπειτα συγκόλληση των υλικών που αποτέθηκαν (3). Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα, η διαστρωμάτωση υλικών και τα απολιθώματα που βρίσκονται μέσα στα ιζήματα.

Οι διαδικασίες σχηματισμού των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι οι ακόλουθες (4):

- **Διάβρωση & αποσάθρωση**: Καταστροφή προϋπαρχόντων πετρωμάτων από φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες
- **Μεταφορά**: Τα υλικά αποσάθρωσης μεταφέρονται με τον άνεμο και το νερό σε περιοχές απόθεσης οι οποίες μπορεί να είναι είτε κοντά είτε μακριά από την περιοχή παραγωγής των προϊόντων αποσάθρωσης
- **Απόθεση**: Τα υλικά που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση εναποτίθενται σε διαδοχικά στρώματα
- **Διαγένεση**: Η διαδικασία μετατροπής ενός χαλαρού ιζήματος σε συμπαγές πέτρωμα με την βοήθεια της πίεσης των υπερκείμενων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται παραστατικά οι διεργασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων.



Εικόνα 3. Διεργασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων (3)

Ανάλογα με τον τρόπο που πραγματοποιείται η όλη διαδικασία δημιουργίας των ιζηματογενών πετρωμάτων έχουμε τα ακόλουθα (1):

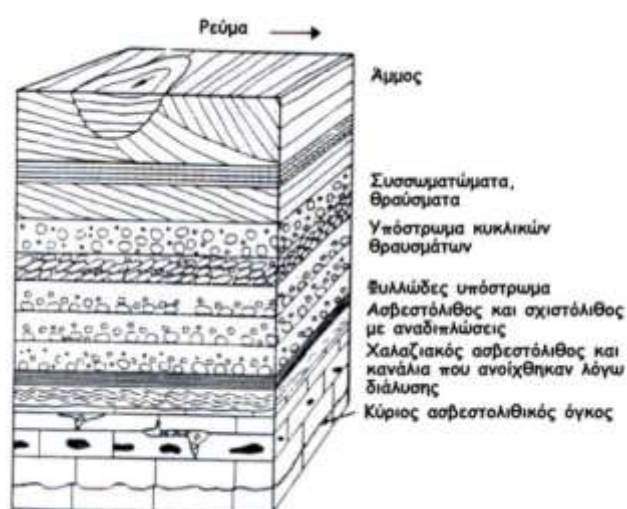
- *Μηχανικά ή κλαστικά ιζήματα:* Συγκέντρωση θραυσμάτων ή φερτών υλικών διαφόρων μεγεθών, σχημάτων, και σύνθεσης, τα οποία είναι προϊόντα της αποσάθρωσης άλλων πετρωμάτων. Τυπικά παραδείγματα των εν λόγω πετρωμάτων αποτελούν ο ψαμμίτης, τα λατυποπαγή και τα κροκαλοπαγή, ο πηλόλιθος, η άργιλος, η μάργα κ.α.
 - *Χημικά ιζήματα:* Απόθεση ορυκτών από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διαδικασίες. Τυπικά παραδείγματα των εν λόγω πετρωμάτων αποτελούν ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, ο τραβερτίνης, ο όνουχας, ο γύψος, το ορυκτό άλας κ.α.
 - *Οργανικά ή βιογενή ιζήματα:* Συσσώρευση οργανικής προέλευσης υλικού. Τυπικά παραδείγματα των εν λόγω πετρωμάτων αποτελούν η τύρφη, ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, ο κοραλλιογενής, κελυφογενής ή βιοκλαστικός ασβεστόλιθος κ.α.
- Κλαστικά Ιζήματα

Τα περισσότερα ορυκτά υλικά που περιέχονται στα κλαστικά ιζήματα προέρχονται από πρωτογενή μαγματικά πετρώματα ή την αποσάθρωση με μηχανικές διεργασίες προϋπαρχόντων ιζηματογενών ή μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων.

Η υφή των κλαστικών ιζημάτων αποτελείται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- *Ταξινόμηση*: βαθμός ομοιότητας του μεγέθους των κόκκων που επηρεάζεται από τους μηχανισμούς μεταφοράς.
- *Στρογγυλότητα*: αντιπροσωπεύει τον βαθμό τριβής των κόκκων (μεγάλη στρογγυλότητα υποδεικνύει ότι ο κόκκος έχει υποστεί μεγάλη τριβή).
- *Τάξη*: αντιπροσωπεύει την διεύθυνση στον χώρο των κόκκων και σχετίζεται με τα διαστήματα ανάμεσα στους κόκκους.

Ο ιστός των κλαστικών ιζημάτων αναφέρεται στον προσανατολισμό των κόκκων και είναι ισοτροπικός ή στρωσιγενής ανάλογα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας των υλικών. Παρακάτω απεικονίζεται μια τυπική δομή ιζηματογενών πετρωμάτων:



Εικόνα 4. Τυπική δομή ιζηματογενών πετρωμάτων (3)

Τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα αποτελούνται από συνδετικό υλικό και κόκκους. Το συνδετικό υλικό προέρχεται από την διάλυση ορυκτών από το νερό. Το διαλυμένο υλικό μεταφέρεται στους πόρους (διάκενα μεταξύ των κόκκων) του κλαστικού ιζήματος και με σταδιακή αφυδάτωση εναποτίθεται άμορφο συνδετικό υλικό μεταξύ των κόκκων, το οποίο στη συνέχεια και με τη διαδικασία "γήρανσης" κρυσταλλώνεται.

Η αντοχή και ανθεκτικότητα του λίθου εξαρτάται από την σύνθεση του συνδετικού υλικού και το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει (1):

- *Πυριτικό συνδετικό υλικό*: Συνήθως περιέχει λεπτοκρυσταλλικό χαλαζία. Τα πετρώματα με πυριτικό συνδετικό υλικό παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές ιδιαίτερα όταν πληρωθούν όλοι οι πόροι και δεν δημιουργείται στρώμα αργίλου γύρω από τους κόκκους.

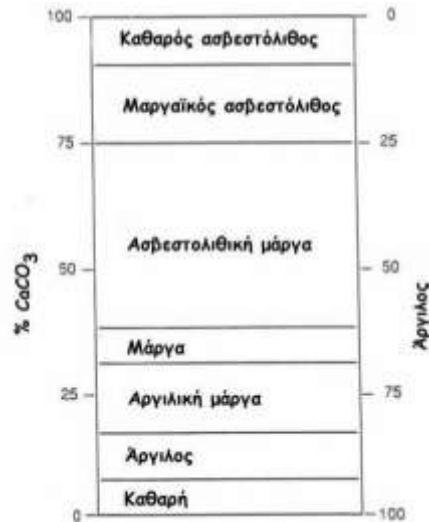
- *Ανθρακικό συνδετικό υλικό*: Το πλέον διαδεδομένο στα ιζηματογενή πετρώματα με μορφή κυρίως ασβεστίτη αλλά και δολομίτη. Παρουσιάζει ικανοποιητική ανθεκτικότητα.
- *Σιδηροξειδία και υδροξειδία*: Συνδετικό υλικό από λειμωνίτη ή αιματίτη, Παρουσιάζει ελάχιστη ανθεκτικότητα.
- *Αργιλικό συνδετικό υλικό*: Ιδιαίτερα διαδεδομένο. Ικανοποιητική συμπεριφορά σε ξηρά κλίματα και ελάχιστη αντοχή στα υγρά λόγω εξαλλοίωσης, διόγκωσης, κ.α.

Τα κυριότερα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα (2), (3), (4):

- *Κροκαλοπαγή*: Συμπαγή πετρώματα που σχηματίζονται από συγκόλλης κροκάλων (αποστρωγγυλεμένα θραύσματα πετρωμάτων) διαφόρων μεγεθών και χρωμάτων που συνδέονται (συχνά ισχυρά) μεταξύ τους με συνδετικό υλικό που αποτελείται από μικρούς κόκκους και άμμο.
- *Λατυποπαγή*: Ιζηματογενή πετρώματα από χονδρόκοκκα ή μεσόκοκκα γωνιώδη θραύσματα.
- *Ψαμμίτης*: Συμπαγές πέτρωμα που προκύπτει από διαγένεση της άμμου και αποτελείται από κόκκους μεγέθους άμμου, κυρίως χαλαζία, αστρίων, μοσχοβίτη, αλλά συχνά και ασβεστίτη, μαρμαρυγία και κεροσίλβη.
- *Πηλόλιθος*: Το αφθονότερο κλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα στην επιφάνεια της Γης. Αποτελείται από αργιλικά ορυκτά, χαλαζία, αστρίους, ασβεστίτη και οργανική ύλη. Το μέγεθος των συστατικών του κυμαίνεται από 1/250 έως 1/16mm.
- *Άργιλος*: Κλαστικό ίζημα που αποτελείται κυρίως από ορυκτά της αργίλου (καολινίτης, μοντμοριλλονίτης, ιλλίτης) και χλωρίτη. Το μέγεθος των κόκκων των ορυκτών είναι μικρότερο των 1/500 mm. Συνήθως η άργιλος έχει χαλαρή έως ημισυμπαγή υφή. Η διαγένεση της αργίλου οδηγεί στη σχιστή άργιλο ενώ η μεταμόρφωση σε αργιλικό σχιστόλιθο.
- *Μάργα*: Ιζηματογενής σχηματισμός που χημικά και ορυκτολογικά κυμαίνεται μεταξύ ασβεστολίθου και αργίλου.

○ Χημικά Ιζήματα

Τα χημικά ιζήματα είναι το αποτέλεσμα απόθεσης ορυκτών από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διαδικασίες (π.χ. εξάτμιση νερού). Στη φύση η διαφοροποίηση μεταξύ κλαστικών και χημικών ιζημάτων δεν είναι εύκολη. Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες έχουν συνήθως προσμίξεις ενώ αναμιγνύονται με άργιλο σε διάφορες αναλογίες, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 5. Ονοματολογία μιγμάτων ασβεστολίθου-αργίλου (2)

Τα κυριότερα χημικά ιζηματογενή πετρώματα είναι τα ακόλουθα (2), (3), (4):

- **Ασβεστόλιθος:** Ο ασβεστόλιθος είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο πέτρωμα στην Ελλάδα και αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη (CaCO_3) με λιγότερο από 5% αργιλικές προσμίξεις. Η απόθεση του CaCO_3 είναι είτε χημική π.χ. καθίζηση λόγω κορεσμού στο υδατικό διάλυμα, είτε βιογενής από τα σκελετικά στοιχεία ζωικών ή φυτικών οργανισμών. Οι ασβεστόλιθοι έχουν μεγάλο εύρος χρωμάτων και σύστασης που εξαρτώνται από την διαδικασία σχηματισμού τους.
- **Δολομίτης:** Πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από δολομίτη, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, και σχηματίζεται όταν ένα μέρος του Ca του ασβεστίτη αντικατασταθεί από Mg (δολομιτίωση). Οι δολομίτες σχηματίστηκαν κατά την Παλαιοζωική περίοδο, αντίθετα από τους ασβεστόλιθους που είναι πιο πρόσφατοι. Παρουσιάζουν σακχαροκοκκώδη μορφή και είναι σκληρότεροι, βαρύτεροι και πιο ψαθυροί από τους κλασσικούς ασβεστόλιθους. Υπάρχουν όλα τα ενδιάμεσα πετρώματα μεταξύ ασβεστόλιθου και δολομίτη.
- **Τραβερτίνης:** Πέτρωμα ανθρακικό, με ανοιχτό, καστανοκίτρινο χρώμα και πορώδη υφή. Είναι προϊόν χημικής ιζηματοποίησης κυρίως σε πηγές. Το πορώδες οφείλεται στην απόθεση CaCO_3 γύρω από φυτικά μέρη (τα οποία απορροφούν CO_2 και μειώνουν την διαλυτότητά του στο νερό), τα οποία μετά την αποσύνθεση τους απομακρύνονται και αφήνουν τους πόρους στο πέτρωμα. Οι ιταλικοί τραβερτίνες από το Τινόλι ήταν συνηθισμένο δομικό υλικό στην αρχαία Ρώμη (Κολοσσαίο, κ.α.).
- **Όνυχας-μάρμαρο(αλάβαστρο):** Ανακρυσταλλωμένη ποικιλία τραβερτίνη, λεπτόκοκκη και διαφανής με απαλούς τόνους χρώματος (πράσινο, κρεμ, χρυσό-καφέ) που οφείλεται στην ύπαρξη σιδήρου και στους διάφορους βαθμούς οξείδωσης. Το γεγονός ότι λεπτές τομές του είναι διαφανείς, επέτρεψε την χρήση του όνυχα-μαρμάρου σαν υποκατάστατο υαλοπινάκων, κυρίως στην περιοχή της Μεσογείου. Για παράδειγμα, τα παράθυρα στον θόλο της Αγιά Σοφιάς είναι από όνυχα-μάρμαρο.

- Οργανικά ή Βιογενή Ιζήματα

Τα κυριότερα οργανικά ιζήματα είναι τα ακόλουθα (1):

- Οργανογενείς ασβεστόλιθοι : Πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί, παραλαμβάνουν από το νερό το $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ και σχηματίζουν προστατευτικά κελύφη και όστρακα. Με τον θάνατο των οργανισμών αυτών τα ασβεστολιθικά τους μέρη συσσωρεύονται στο πυθμένα και σχηματίζουν ασβεστόλιθους ιδιαίτερων τύπων. Τέτοιοι ασβεστόλιθοι είναι ο κογχυλιογενής και ο κοραλλιογενής ασβεστόλιθος.
- Κιμωλία : Η κιμωλία (κρητίς) είναι λευκό, λεπτομερές, στιφρό, ασβεστολιθικό πέτρωμα που σχηματίζεται από λείψανα τρηματοφόρων. Παρουσιάζει μια σειρά ιδιαίτερων χαρακτηριστικών όπως λευκό χρώμα, υψηλό πορώδες, χαμηλές τιμές αντοχών και εύκολη τριβή.
- Κερατόλιθοι : Οι κερατόλιθοι είναι σκληρά, συμπαγή πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από κρυπτοκρυσταλλικό και άμορφο SiO_2 ενώ υπάρχουν και ξένες προσμίξεις αιματίτη, ασβεσίτη, και αργλικών ορυκτών. Οι κερατόλιθοι είναι σχετικά ανθεκτικοί στην φθορά, τουλάχιστον σε σχέση με τον ασβεστόλιθο. Η ύπαρξη, επομένως κερατολιθικών φλεβών σε ασβεστόλιθους μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικούς βαθμούς φθοράς με ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Μεταμορφωμένα πετρώματα

Μεταμορφωμένα πετρώματα είναι τα πετρώματα τα οποία προκύπτουν από άλλα προϋπάρχοντα μετά από ιστολογικές, ορυκτολογικές και χημικές μεταβολές χωρίς όμως να υποστούν τήξη (3), (5). Τα πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα υπόκεινται σε αυξημένες πιέσεις και θερμοκρασίες, και στην δράση θερμών διαλυμάτων και αερίων όταν βρεθούν λόγω γεωλογικών διεργασιών σε μεγάλα βάθη (π.χ. λόγω εναπόθεσης πάνω από αυτά νέων ιζηματογενών πετρωμάτων ή λόγω μετακινήσεων των γεωλογικών πλακών) και ανακρυσταλλώνονται σε πιο σταθερές ορυκτές φάσεις. Αναπτύσσονται έτσι νέα ορυκτά που χημικά προσομοιάζουν το μητρικό υλικό αλλά είναι πιο σταθερά στις νέες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διαδικασία είναι αργή και συχνά λαμβάνουν χώρα αναδιπλώσεις (λόγω κίνησης των μαζών). Η θερμότητα που οφείλεται στην γειτνίαση με πυριγενείς μάζες, ή στη γεωθερμική δραστηριότητα, επιφέρει πλαστικότητα στα πετρώματα, επιτρέποντας την μοριακή διάχυση από το ένα στρώμα στο άλλο, διαδικασία που διαρκεί εκατομμύρια χρόνια.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν συνήθως *σχιστοφυή* ιστό ο οποίος είναι αποτέλεσμα της στρωσιφυούς συγκέντρωσης ορυκτών στα πετρώματα (φυλλόμορφα και ινόμορφα). Τα αρχικά πετρώματα από τα οποία προέρχονται τα μεταμορφωμένα ονομάζονται πρωτόλιθοι. Όταν οι πρωτόλιθοι είναι πυριγενή πετρώματα το μεταμορφωμένο πέτρωμα παίρνει το πρόθεμα *ορθο-*, ενώ αντίστοιχα όταν οι πρωτόλιθοι είναι ιζηματογενείς το μεταμορφωμένο πέτρωμα παίρνει το πρόθεμα *παρα-* (1). Σε σχέση με τις αλλαγές στον ιστό, την ορυκτολογική και την χημική σύσταση που υπόκεινται τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουμε τις ακόλουθες μεταμορφώσεις (3):

- *Ισοφασική*: Μεταβολή μόνο του ιστού του προϋπάρχοντος πετρώματος. Για παράδειγμα, ο γρανίτης (ολοκρυσταλλικός) μεταμορφώνεται σε γνεύσιο (σχιστοφυής) περιέχοντας τα ίδια ορυκτά.
- *Αλλοφασική*: Αλλαγή της ορυκτολογικής σύστασης. Για παράδειγμα η άργιλος (αργιλικά ορυκτά) μεταμορφώνεται σε γνεύσιο (χαλαζίας, αστρίοι, μαρμαρυγίες).
- *Ισοχημική*: Η χημική σύσταση του πετρώματος παραμένει η ίδια. Για παράδειγμα, ο ασβεστόλιθος (περιέχει ασβεστίτη) μεταμορφώνεται μέσω ανακρυστάλλωσης του ασβεστίτη σε μάρμαρο (ίδια ορυκτολογική και χημική σύνθεση).
- *Αλλοχημική*: Αλλαγή της χημικής σύστασης του πετρώματος. Για παράδειγμα μεταμόρφωση ασβεστόλιθου σε skarn (ασβεστοπυριτικά ορυκτά).

Ανάλογα με την ένταση της δράσης των παραγόντων μεταμόρφωσης (πίεση, θερμοκρασία, θερμά διαλύματα και αέρια) έχουμε τους ακόλουθους βαθμούς μεταμόρφωσης:

- *Χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης*: οι μεταμορφικοί παράγοντες έχουν χαμηλές τιμές
- *Μέσου βαθμού μεταμόρφωση*
- *Υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης*: οι τιμές των παραγόντων είναι σε υψηλά επίπεδα

Τα κυριότερα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι τα ακόλουθα (1):

○ *Μάρμαρο*

Το μάρμαρο είναι μονόμεικτο πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη (CaCO_3) και αποτελεί προϊόν της ανακρυστάλλωσης ασβεστόλιθων. Έχει σκληρότητα 3 κατά Mohs, και ειδικό βάρος $2,7 \text{ g/cm}^3$. Εκτός από τον ασβεστίτη, το μάρμαρο μπορεί να περιέχει δολομίτη, ορυκτό σκληρότερο (3,5-4 κατά Mohs), και βαρύτερο ($2,9 \text{ g/cm}^3$). Η παρουσία στο δολομίτη καθιστά την κατεργασία του μαρμάρου πιο δυσχερή και επιταχύνει την φθορά του. Επίσης, πολύ συχνά περιέχει και άλλες προσμίξεις (αιματίτης, σιδηροπυρίτης, κ.α.) που διασχίζουν με την μορφή φλεβών την μάζα του μαρμάρου. Τα μάρμαρα διακρίνονται σε *λεπτοκοκκώδη* (διάμετρος κρυστάλλου ασβεστίτη ($d= 0,01-0,05 \text{ mm}$)), *μεσοκοκκώδη* ($d=0,6-2 \text{ mm}$) και *χονδροκοκκώδη* ($d=2-6 \text{ mm}$) ανάλογα με το μέγεθος των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Παρουσιάζει υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα στους παράγοντες φθοράς, εξαιτίας της μικροδομής που παρουσιάζει (περίπου 0,3%). Ωστόσο, καταστρέφεται εύκολα από φωτιά όπως και οι κοινοί ασβεστόλιθοι, γιατί περίπου στους 900°C , αποσυντίθεται το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) σε CaO και CO_2 . Το χρώμα του μπορεί να είναι λευκό, γκρι, ροζ, ή πράσινο, με διάφορες μπάντες και φλέβες.

○ *Γνεύσιος*

Ο γνεύσιος είναι πέτρωμα με γρανιτική όψη, μεσόκοκκο αλλά με έντονη παράλληλη διευθέτηση των κόκκων και συγκέντρωση των ορυκτών σε ζώνες. Χαρακτηρίζεται από έντονη σχιστότητα. Τα κυριότερα συστατικά του είναι χαλαζίας, αστρίοι και μαρμαρυγίες,

αλλά μπορεί να υπάρχουν και άλλα ορυκτά όπως κεροσίλβη κ.α.. Παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή σε συμπίεση όταν η φόρτιση γίνει κάθετα στον άξονα των κόκκων αλλά υστερεί όταν η φόρτιση γίνει παράλληλα με τους κόκκους. Μπορεί να προέλθει είτε από γρανίτη (όρθο-) είτε από αργιλικά πετρώματα (πάρα-).

○ Σχιστόλιθος

Ο σχιστόλιθος είναι πέτρωμα παρόμοιο με τον γνεύσιο αλλά είναι μικρότερου βαθμού μεταμόρφωσης. Περιέχει μικρότερα ποσοστά αστρίων και χαλαζία, αλλά μεγαλύτερες ποσότητες μαρμαρυγιών και κεροσίλβης. Υπόκειται σε εύκολη διάτμηση με χρήση σχετικά μικρού φορτίου.

○ Σερπεντίτης

Συχνά αποκαλείται και σερπεντίτης-μάρμαρο. Αποτελείται από το ορυκτό σερπεντίτης ($Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$), ενώ περιέχει και τάλκη, αμφίβολο και χλωρίτη. Το πέτρωμα έχει πράσινο χρώμα με λευκές φλέβες ασβεστίτη ή ανθρακικού μαγνησίου.

Ιδιότητες λίθων

1. Πορώδες

Η πλήρης και λεπτομερειακή περιγραφή της πορώδους δομής ανομοιογενών υλικών όπως οι δομικοί λίθοι είναι ουσιαστικά ανέφικτη, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί με τη βελτίωση των χρησιμοποιούμενων τεχνικών. Άλλωστε ο αντικειμενικός στόχος μιας τέτοιας διαδικασίας δεν είναι η απλή χαρτογράφηση του πορώδους χώρου, αλλά η προσεγγιστική αναπαράστασή του, ώστε να γίνει σχετικά εύκολα η μαθηματική περιγραφή των φαινομένων που πραγματοποιούνται στους πόρους. Η επιλογή και εφαρμογή των κατάλληλων πειραματικών μεθόδων εξαρτάται από το εύρος και κατανομή των πόρων του λίθου που εξετάζεται. Από τις πιο γνωστές και ευρύτατα χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι (1):

- Ποροσιμετρία υδραργύρου
- Ρόφηση-Εκρόφηση αζώτου (BET)
- Μικροσκοπική εξέταση τυχαίων (ποσοτική στερεολογία) ή διαδοχικών (σειριακή τομογραφία) επίπεδων τομών ενός πορώδους δείγματος.

Οι πόροι ενός πορώδους μέσου εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία ως προς το σχήμα, το μέγεθος και τον τρόπο της μεταξύ τους σύνδεσης (6). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διάφορα είδη των πόρων (1):

- Κλειστοί χαρακτηρίζονται οι πόροι που δεν έχουν καμία σύνδεση μεταξύ τους και δεν είναι διαπερατοί από κάποιο ρευστό.
- Ως νεκρού άκρου χαρακτηρίζονται οι ανοιχτοί πόροι που έχουν μία είσοδο, αλλά δεν είναι διαπερατοί. Έτσι, κάποιο ρευστό μπορεί εύκολα να εισέλθει σε αυτούς αλλά, είναι δύσκολο να εξέλθει.
- Μελανοδοχεία ονομάζονται οι πόροι με περισσότερα του ενός ανοίγματα που όμως είναι πολύ στενά (λαιμοί) με αποτέλεσμα να είναι δύσκολα διαπερατοί από ρευστά.
- Τέλος, μια άλλη κατηγορία πόρων είναι τα κανάλια, πόροι διαπερατοί από ρευστά και τα τηλεσκόπια των οποίων η διαπερατότητα είναι μεταξύ αυτής των καναλιών και τον μελανοδοχείων.

Η γνωστή μακροσκοπική ιδιότητα ενός πορώδους μέσου είναι το πορώδες Π , το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του κενού χώρου V_p (του όγκου δηλαδή των πόρων), προς τον ολικό όγκο V_s , ενός δείγματος του λίθου (1):

$$\Pi = \frac{V_p}{V_s}$$

Εξίσωση 1.

Το V_p αναφέρεται στο σύνολο των πόρων δηλαδή και στους ανοιχτούς και στους κλειστούς πόρους ανεξάρτητα αν αυτοί συνδέονται. Το πορώδες αυτό ονομάζεται απόλυτο ή ολικό. Το πορώδες θα ονομάζεται ανοιχτό, όταν στον προηγούμενο ορισμό, ο όγκος V_p αναφέρεται στον όγκο μόνο των ανοικτών πόρων και κλειστό, όταν αντίστοιχα ο όγκος V_p αναφέρεται στον όγκο μόνο των κλειστών πόρων. Το άθροισμα του ανοιχτού και του κλειστού πορώδους είναι ίσο με το ολικό πορώδες. Παρά το γεγονός ότι οι πόροι νεκρού άκρου αποτελούν ανοιχτούς πόρους, συνεισφέρουν αμελητέα στη ροή ενός ρευστού μέσα από αυτούς. Έτσι, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν εκείνοι οι πόροι, που συνδέονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ένα ρευστό να μπορεί να κινηθεί μέσα από αυτούς και να διαπεράσει το δείγμα από άκρο σε άκρο, στο σύνολο του όγκου του υλικού. Οι πόροι αυτοί συνιστούν το ενεργό ή συνεκτικό πορώδες, το οποίο αποτελεί ένα μέρος του ανοιχτού πορώδους (1).

2. Πυκνότητα

Η πυκνότητα είναι μια ιδιότητα του υλικού η οποία περιγράφεται με διάφορες μορφές (7). Ως πυκνότητα ορίζεται ο λόγος μάζας προς τον όγκο του υλικού. Ανάλογα με τον

ορισμό του όγκου του και τι αυτός περιλαμβάνει, περιγράφονται αντίστοιχα οι διάφοροι τύποι πυκνότητας. Όσον αφορά τους δομικούς λίθους, οι ορισμοί της πυκνότητας που κυρίως μας ενδιαφέρουν είναι οι ακόλουθοι (3), (7), (8), (9):

- ο Πραγματική πυκνότητα

Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του δείγματος προς τον πραγματικό όγκο του δείγματος (χωρίς τα κενά).

$$\rho = \frac{W}{V_s} = \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

Εξίσωση 2.

- ο Φαινόμενη πυκνότητα

Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του δείγματος προς το φαινόμενο όγκο του δείγματος (συμπεριλαμβάνονται τα κενά).

$$\rho_{app} = \frac{W}{V_{app}} = \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

Εξίσωση 3.

3. Διαπερατότητα-Συντελεστής Υδατοαπορρόφησης

Διαπερατότητα είναι η ιδιότητα των πορωδών υλικών να διαπερνώνται από αέρια λόγω διαφοράς πίεσης. Ο βασικός νόμος που διέπει τον υπολογισμό της διαπερατότητας είναι ο νόμος του Darcy, σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός ροής ενός ρευστού είναι απ' ευθείας ανάλογος της διαφοράς πίεσης που προκαλεί τη ροή (7).

Αν ρευστό όγκου V ρέει σε χρόνο t διαμέσου επιφάνειας με διατομή A , σε πάχος διαπερνώσης επιφάνειας h , και $\Delta p = p_{εις} - p_{εξ}$, η διαφορά πίεσης του αερίου, τότε η διαπερατότητα G_d για στρωτή ροή υπολογίζεται (7):

$$G_d = \frac{h}{A * \Delta p} * \frac{V}{t}$$

Εξίσωση 4.

Η υδαταπορροφητικότητα του λίθου εξαρτάται από (7), (10):

- το πορώδες.

Όσο πιο μεγάλο πορώδες έχει ο λίθος τόσο πιο μεγάλη απορροφητικότητα παρουσιάζει.

- την μορφή και το μέγεθος των πόρων που παρουσιάζει ο λίθος.

Πόροι μεγάλοι και ευθύγραμμοι επιτρέπουν εύκολα την είσοδο του νερού. Αντίθετα πόροι πολύ μικρής διαμέτρου, με δαιδαλώδη διάταξη και κλειστοί πόροι (που δεν συγκοινωνούν μεταξύ τους) δυσχεραίνουν τον εμποτισμό των λίθων από το νερό.

Λίθοι που παρουσιάζουν μικρή υδαταπορροφητικότητα, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην διαβρωτική δράση του νερού (τριχοειδή αναρρίχηση, κυκλοφορία αλάτων, κρυστάλλωση κ.α.) (4).

4. Σκληρότητα

Η σκληρότητα ορίζεται ως η αντίσταση του λίθου στη χάραξη ή λείανση. Η σκληρότητα δεν είναι εγγενής ιδιότητα ενός υλικού, καθώς η τιμή της δεν εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Οι δοκιμές σκληρότητας είναι απλά εμπειρικά τεστ που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και χαρακτηρισμό των υλικών (7).

5. Συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής, α_l , εκφράζει τη συμπεριφορά του λίθου, κατά τη θέρμανση. Σε κάθε θερμοκρασία μπορούμε να ορίσουμε ως συντελεστή θερμικής διαστολής:

$$\alpha_l = \frac{l - l_0}{l_0 * T}$$

Εξίσωση 5.

Το l είναι το μήκος του λίθου και T η θερμοκρασία (7).

6. Μηχανικές αντοχές λίθων

Οι μηχανικές δοκιμές χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας των λίθων και την αντοχή τους σε θλίψη ή εφελκυσμό, και στην δημιουργία καμπυλών τάσης – καταπόνησης, οι οποίες και παρέχουν πλήθος πληροφοριών όσον αφορά την μηχανική τους συμπεριφορά (11).

Επιδεκτικότητα στη φθορά

Η επιδεκτικότητα των λίθων στην φθορά είναι συνάρτηση των μηχανικών και δομικών παραμέτρων τους (12), (13):

- της αντοχής τους σε θλίψη
- του μέτρου συμπίεστότητας
- του πορώδους και της κατανομής του μεγέθους των πόρων
- της ειδικής επιφάνειας των πόρων

Παράλληλα όμως, αντιστρόφως ανάλογη της ανθεκτικότητας τους σε περιβαλλοντικά φορτία.

- Μελέτη μικροδομής – Χαρακτηρισμός & Συμπεριφορά Πορώδων Υλικών

Σκοπός της μελέτης μικροδομής είναι η συσχέτιση των χαρακτηριστικών μικροδομής, των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των υλικών και της συμπεριφοράς των πορώδων μέσων σε σχέση με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και ενέργειας (κύκλος ατμών/νερού στο περιβάλλον) (1).

Τα χαρακτηριστικά μικροδομής που έχουν ιδιαίτερη βαρύτητα είναι:

- ειδική επιφάνεια πόρων
- μέση ακτίνα/διάμετρος πόρων
- φαινόμενη πυκνότητα
- ανοιχτό πορώδες
- κατανομή μεγέθους πόρων
- σχήμα πόρων

ενώ αντίστοιχα οι ιδιότητες των υλικών που παίζουν σημαντικό ρόλο είναι (1):

- υδαταπορρόφηση
- διαπερατότητα σε υγρό και ατμούς
- ρόφηση – εκρόφηση αερίων και υγρών

Οι σημαντικότερες μέθοδοι εξέτασης των χαρακτηριστικών μικροδομής ενός υλικού είναι:

- Ποροσιμετρία υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry)
- Επεξεργασία ψηφιακής εικόνας (Digital Image Processing)
- Ρόφηση – Εκρόφηση αερίων (π.χ. αζώτου – BET)

- ο Μελέτη Ιδιοτήτων

Υδαταπορρόφηση

Η υδαταπορροφητική συμπεριφορά του υλικού, μελετάται με τις εξής τεχνικές (1):

- *Τριχοειδή αναρρίχηση:* η παρακολούθηση του εν λόγω φαινομένου πραγματοποιείται με υπέρυθρη θερμογραφία.
- *Εμβάπτιση και ζύγιση του δοκιμίου:* με σκοπό τον υπολογισμό του ποσοστού νερού που απορροφήθηκε.

Τριχοειδής απορρόφηση του νερού

Η ποσότητα του νερού που απορροφάται ανά μονάδα επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου σε πίεση (P) και θερμοκρασία (T) περιβάλλοντος για ένα δείγμα του οποίου η βάση του βρίσκεται σε επαφή με απιονισμένο νερό (1).

Διαπερατότητα

Ο ρυθμός ροής των υδρατμών συναρτήσει του χρόνου διαμέσου της επιφάνειας του υλικού κάτω από την επίδραση της διαφοράς πίεσης ανάμεσα στις δύο επιφάνειες σε συγκεκριμένες T και R.H. (1).

1.2. Φαινόμενα φθοράς λίθων

Φθορά λογίζεται η απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών κ.α.) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής κ.α.), της συνοχής, των διαστάσεων και της αισθητικής των υλικών (7). Τα φαινόμενα φθοράς κατατάσσονται ακολούθως:

- *Μηχανική ή φυσική φθορά:* Αφορά σε μηχανική χαλάρωση των δομών και διαχωρισμό των συστατικών του υλικού λόγω θλιπτικών, εφελκυστικών ή διατμητικών τάσεων, αναπτυσσόμενων δυνάμεων εντός του υλικού λόγω ανισοτροπίας ή διαδικασιών που σχετίζονται με την παρουσία διαλυτών αλάτων και των κύκλων ύγρανσης-ψύξης. Παράδειγμα φυσικής φθοράς είναι η απολέπιση λίθου λόγω δράσης αλάτων.
- *Χημική φθορά:* Περιλαμβάνει τις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο υλικό υπό την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων ή λόγω θερμοδυναμικής αστάθειας ορισμένων συστατικών του υλικού. Παράδειγμα χημικής φθοράς αποτελεί η επίδραση της όξινη βροχής σε δομικά υλικά.
- *Βιολογική φθορά:* Αφορά στην επίδραση διαφόρων οργανισμών στα υλικά και σχετίζεται με τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες φθοράς.

Τα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στη διεπιφάνεια μεταξύ του περιβάλλοντος και των υλικών ή και στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών και είναι συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων.

Ενδογενείς παράγοντες φθοράς

Όπως προαναφέρθηκε, η φθορά είναι συνάρτηση της αλληλεπίδρασης του υλικού με το περιβάλλον. Οι παράγοντες που αφορούν το υλικό (ενδογενείς παράγοντες) είναι οι ακόλουθοι (7):

- Είδος δομικού υλικού

Τα κύρια δομικά υλικά (μέταλλα, πέτρα, κονιάματα, κεραμικά και σύνθετα υλικά) συμπεριφέρονται διαφορετικά σε ίδιες περιβαλλοντικές φορτίσεις. Γενικά τα μέταλλα είναι πιο επιρρεπή σε συγκεκριμένους τύπους μηχανικής φθοράς όπως η τριβή και η κόπωση, και χημικής φθοράς όπως η ανάπτυξη σκωρίας. Αντίθετα, τα σχετικά ανομοιογενή – στην μακροδομή και μικροδομή τους καθώς και στην κατανομή των ιδιοτήτων δομικά υλικά όπως η πέτρα, τα κονιάματα και τα κεραμικά είναι πιο επιρρεπή σε διαφορετικού τύπου φθορές, όπως η δράση των διαλυτών αλάτων και των κύκλων ύγρανσης – ξήρανσης παρά σε φθορές που προαναφέρθηκαν για τα μέταλλα. Η συστηματική γνώση του είδους του υλικού και της γενικής συμπεριφοράς του είναι αναγκαία για τη σωστή διάγνωση των φαινομένων μεταφοράς του.

- Ιδιότητες υλικού

Οι ιδιότητες υλικού επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό από συγκεκριμένους εξωγενείς παράγοντες. Για παράδειγμα, οι θερμικές ιδιότητες του τσιμέντου είναι δυνατόν να μεταβληθούν μετά από την αύξηση του πορώδους αποτέλεσμα της δημιουργίας μικρορωγμών και της αποκόλλησης των κόκκων, το οποίο συνοδεύεται με μείωση της μηχανικής αντοχής. Είναι σημαντικό λοιπόν, να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του εφαρμοζόμενου εξωγενή παράγοντα και της ιδιότητας η οποία δύναται να μεταβληθεί, ώστε η συγκεκριμένη ιδιότητα να καταστεί εν τέλη μέτρο αξιολόγησης της φθοράς του υλικού.

- Μακροδομή & Μικροδομή

Η δομή του υλικού σε διάφορες κλίμακες επηρεάζει άμεσα την επιρροή του υλικού σε εξωγενείς παράγοντες. Η μικροδομή, ιδιαίτερα, η οποία διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στις ιδιότητες (μηχανικές, φυσικές, φυσικοχημικές) των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξάπλωση της φθοράς στο υλικό. Τα όρια της κλίμακας για το διαχωρισμό μεταξύ της μακροδομής και της μικροδομής εξαρτώνται από τη μετρούμενη ιδιότητα. Γενικά για μηχανικές ιδιότητες, η μικροδομή αντιστοιχεί στις κλίμακες μικρότερες μερικών μm, ενώ η μακροδομή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες κλίμακες. Η μικροδομή του δομικού υλικού, αποτελεί σημαντικό παράγοντα τόσο στην εξάπλωση της φθοράς όσο και στην αναγνώριση και κατάλληλη αντιμετώπιση.

- Προέλευση του υλικού & απόληψή του

Αδιαμφισβήτητα, η σύσταση και η μικροδομή του υλικού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την προέλευση του. Η προέλευση των υλικών καθιστάται ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση των σύνθετων υλικών όπως τα κονιάματα, όπου η προέλευση των πρώτων υλών καθορίζει άμεσα τη σύσταση του σύνθετου υλικού. Τα παραδοσιακά δομικά υλικά όπως η πέτρα και το μάρμαρο εξαρτώνται εξίσου από την προέλευση τους. Γενικά, τόσο στη φάση του σχεδιασμού, όσο και στις φάσεις της αποτίμησης της φθοράς και αποκατάστασης του υλικού, είναι σημαντική η γνώση της προέλευσης του υλικού και ο τρόπος απόληψης του καθώς και πως οι δύο αυτοί ενδογενείς παράγοντες επηρεάζουν τις ιδιότητες και τη μακροδομή του υλικού, ενώ προηγούμενη εμπειρία μπορεί να προσφέρει ειδικευμένες τεχνικές αποκατάστασης των υλικών αυτών.

- Τεχνολογία παραγωγής

Η τεχνολογία παραγωγής είναι δυνατόν σε ορισμένες περιπτώσεις να μεταβάλλει σημαντικά τη μικροδομή όσο και τις δυνατότητες των δομικών υλικών. Η τεχνολογία παραγωγής αποτελεί μέρος της 'ιστορίας' του υλικού και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλα τα στάδια της ζωής του.

- Συμβατότητα υλικού

Λογίζεται απαραίτητο, τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μια κατασκευή να είναι συμβατά μεταξύ τους. Η συμβατότητα μπορεί να αφορά διάφορους παράγοντες, όπως η χημική σύσταση (για παράδειγμα η χρήση ενισχυτικών ινών ανθεκτικές σε υψηλό pH), ο συντελεστής θερμικής διαστολής (όσο το δυνατόν παρόμοιες τιμές λαμβάνει ο εν λόγω συντελεστής των υλικών, ώστε κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων να μην παρατηρείται ανομοιογένεια στη διαστολή και συνεπαγόμενη ανάπτυξη τάσεων), η πυκνότητα (η πυκνότητα των υλικών οφείλει να παρουσιάζει παρόμοιες τιμές ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση) κ.α. Η συμβατότητα των υλικών καθορίζεται κάθε φορά ανάλογα με την επιθυμητή συμπεριφορά των υλικών, ενώ είναι δυνατό να οδηγήσει στην αστοχία τους, στη μείωση της διάρκειας ζωής τους ή στην εκλεκτική ένταση της φθοράς σε ένα από τα υλικά του δομικού συστήματος.

Εξωγενείς παράγοντες φθοράς

Οι παράγοντες που αναφέρονται στην επίδραση του περιβάλλοντος (εξωγενείς παράγοντες) είναι οι ακόλουθοι (7):

- Είδος περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων

Το είδος των περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως για παράδειγμα η βιομηχανική, αστική ή θαλασσινή ατμόσφαιρα καθορίζουν αντίστοιχα και τους μηχανισμούς φθοράς στα δομικά υλικά.

- Ένταση, διάρκεια και συχνότητα της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων

Σε γενικές γραμμές, η ένταση της φθοράς των δομικών υλικών αυξάνεται με αύξηση της έντασης, της διάρκειας και της συχνότητας της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων. Οι εν λόγω εξωγενείς παράγοντες, δρουν συνήθως αθροιστικά, αλλά τα αποτελέσματα τους εξαρτώνται σημαντικά από αρκετούς ενδογενείς παράγοντες όπως το είδος και η μικροδομή του υλικού. Αν και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και οι φορτίσεις μπορούν να αναγνωρισθούν, η ποσοτικοποίηση της έντασης, της διάρκειας και της συχνότητας επίδρασης τους είναι συχνά αδύνατη και μόνο έμμεσα, δηλαδή μέσω της έντασης της φθοράς, είναι δυνατή κάποια εκτίμηση.

- Είδος μηχανικών φορτίσεων

Το είδος των μηχανικών φορτίσεων δηλαδή, αν εφαρμόζονται εφελκυστικές, διατμητικές ή θλιπτικές τάσεις, θερμοκρασιακές μεταβολές, τριβή, διόγκωση υλικού λόγω χημικής αντίδρασης, κρυστάλλωση αλάτων και σχηματισμός πάγου, σεισμικές δονήσεις κ.α καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τους μηχανισμούς φθοράς των δομικών υλικών.

- Κατανομή περιβαλλοντικών παραγόντων

Η κατανομή, ο προσανατολισμός και η ένταση των περιβαλλοντικών παραγόντων ανάλογα με τη θέση του υλικού στην κατασκευή δρα συνήθως έμμεσα στην αστοχία και φθορά των υλικών. Για παράδειγμα, αν ένα υλικό υποβάλλεται σε διαφορετική θερμική φόρτιση, τότε η συνεπαγόμενη χωρική κατανομή των θερμικών καταπονήσεων οδηγεί σε ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων, που συχνά είναι τέτοιας έντασης που υπερβαίνουν την αντοχή του υλικού και έχουν σαν αποτέλεσμα την αστοχία τους. Είναι επίσης δυνατό, στο ίδιο υλικό να παρατηρούνται διαφορετικού τύπου φθορές ανάλογα με τη θέση του στην κατασκευή, όπως για παράδειγμα φθορά λόγω υγρασίας στα κατώτερα στρώματα της τοιχοποιίας και φθορά λόγω κρυστάλλωσης των αλάτων στα ανώτερα στρώματα.

- Συνθήκες χρήσης δομικού υλικού

Τα δομικά υλικά έχουν συχνά διαφορετικές χρήσεις. Τα περισσότερα δομικά υλικά βρίσκονται τόσο στα εξωτερικά τμήματα των κατασκευών, όσο και στο εσωτερικό αυτών, με αποτέλεσμα το ίδιο το υλικό να δέχεται την επίδραση διαφορετικών παραγόντων φθοράς στην ίδια κατασκευή. Οι συνθήκες χρήσης του υλικού καθορίζονται επομένως και από τους μηχανισμούς και από την ένταση της φθοράς.

- Μικροκλίμα, νερό & βιολογικοί παράγοντες

Η επίδρασή τους αναλύεται πιο διεξοδικά παρακάτω.

Παράγοντες φθοράς

- Θερμοκρασιακές μεταβολές

Οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και οι καθημερινοί ή εποχικοί κύκλοι ψύξης-θέρμανσης επιδρούν καθοριστικά στη μηχανική κόπωση των υλικών, λόγω της ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Τα φαινόμενα διαστολών και συστολών εμφανίζονται ως απόρροια της ύπαρξης διαφορετικών συντελεστών θερμικής μεταβολής μεταξύ των ορυκτών που τα απαρτίζουν και της ανισοτροπίας του κρυσταλλικού δεσμού. Η ανισοτροπία θερμικής

διαστολής των ορυκτών έχει μεγάλη σημασία στην αποσάθρωση των πετρωμάτων, και επομένως, στην τελική φθορά των φυσικών δομικών λίθων. Ακόμη, σοβαρή μηχανική φθορά προκαλείται λόγω της διαφορετικής απόκρισης στις θερμικές μεταβολές μεταξύ των διαφόρων υλικών, σε ένα μνημείο που συνυπάρχουν είτε από τις διάφορες κατασκευαστικές φάσεις, είτε από ασύμβατες επεμβάσεις.

Στα μνημεία οι καθημερινοί θερμοκρασιακοί κύκλοι μπορεί να είναι πιο σημαντικοί από τους εποχικούς. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας συμβαίνουν κύρια όταν υπάρχει συνεχής έκθεση της επιφάνειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και ψύξη τη νύχτα. Η θερμότητα που μπορεί να συσσωρευτεί στην πέτρα εξαιτίας ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι και τους 60°C. Τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι μπορούν θεωρητικά να αποκριθούν ελαστικά σε θερμικές τάσεις, οι οποίες προκαλούνται από θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες των 30°C. Ωστόσο, η παρουσία ζωνών αδυναμίας ή επιπέδων ασυνέχειας στα μάρμαρα καθιστά δυνατή την πρόκληση φθοράς, και κατά τους συνήθεις θερμοκρασιακούς κύκλους του περιβάλλοντος (7).

- Σεισμικές δονήσεις

Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα κτίρια ανάλογα με:

- το είδος των δυναμικών καταπονήσεων
- τη διάρκεια τους
- τη μέγιστη εφαρμοζόμενη καταπόνηση
- τον τρόπο δόνησης (χαρακτηριστικά εδαφικών επιταχύνσεων)
- την πρότερη δομική κατάσταση του κτιρίου
- την απόκριση του κτιρίου σε δυναμικές φορτίσεις

Η δυναμική καταπόνηση των κτιρίων μπορεί να προκαλέσει βλάβες όταν οι συχνότητες αυτής κυμαίνονται μεταξύ 8-80Hz. Γενικά, βλάβες συνήθως παρουσιάζονται για μέγιστη ταχύτητα καταπόνησης μεγαλύτερη από 10mm/s (7), (14). Χαρακτηριστικές σχετικές μετατοπίσεις σπονδύλων σε κλασικά αρχιτεκτονήματα είναι ενδείξεις παλαιών σεισμικών δονήσεων.

- Ατμοσφαιρικά σωματίδια

Πρόκειται για τα τεμάχια της ύλης στερεής και υγρής κατάστασης που βρίσκονται διεσπαρμένα στην ατμόσφαιρα. Το μέγεθος τους κυμαίνεται μεταξύ 0,2-5·10⁵nm. Η μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος αλλά και στη χημική τους σύσταση οφείλεται στο πλήθος των πηγών από τις οποίες προέρχονται (φυσικές, ανθρωπογενείς ή συνδυασμός τους) (7).

Στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται το έδαφος, οι πυρκαγιές, η εξάτμιση αερομεταφερόμενων υγρών σωματιδίων από τη θάλασσα, οι ακτές από τις οποίες σηκώνονται σωματίδια νερού και άμμος και η ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι βιομηχανικές δραστηριότητες, οι διάφορες εστίες καύσης (τέφρα και σωματίδια άνθρακα), οι οικοδομικές εργασίες, η αστική κυκλοφορία (αιωρούμενα σωματίδια, μόλυβδος και τα άλατα αυτού) και οι κεντρικές θερμάνσεις.

Με βάση τη διάρκεια αιώρησης τους τα ατμοσφαιρικά σωματίδια διακρίνονται σε (7), (15):

- *Ανάπλυτα ή σκόνη*: στερεά αιωρούμενα σωματίδια μεγάλου μεγέθους (>10mm), με μικρό χρόνο αιώρησης και σημαντική ταχύτητα καθίζησης. Τα ανάπλυτα, ανάλογα με την προέλευση τους, παρουσιάζουν διαφορές και ως προς τη χημική τους σύσταση. Η περιεκτικότητα των ανάπλυτων ως προς Fe_2O_3 , CaO SO_4^{-2} είναι μεγαλύτερη σε βιομηχανικές περιοχές παρά σε αστικές, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τα SiO_2 , Cl^- .
- *Αιωρούμενα σωματίδια*: στερεά, υγρά ή μίγμα στερεών και υγρών σωματιδίων με μεγάλο χρόνο αιώρησης και μέγεθος 1 έως 10 μm . Τα αιωρούμενα σωματίδια ταξινομούνται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Τα πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται απευθείας από την πηγή. Τα δευτερογενή σωματίδια παράγονται από χημικές αντιδράσεις αέριων φάσεων.
- *Καπνός*: αιωρούμενα σωματίδια μαύρου χρώματος που μεταφέρονται με τον αέρα και προκύπτουν από ατελείς καύσεις, με κύρια συστατικά τον άνθρακα και άλλα καμένα ή άκαυστα υπολείμματα των καύσιμων υλών, με μέγεθος 5-50nm.

ο Νερό

Το νερό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών και στις τρεις φάσεις του. Ελέγχει τη μεταφορά, κρυστάλλωση, ανακρυστάλλωση και ενυδάτωση των αλάτων στο λίθο και ευθύνεται για την ανάπτυξη ισχυρών οσμωτικών πιέσεων όταν συντρέχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις. Μέσα στο νερό μεταφέρονται οι αέριοι ρύποι μέσω της βροχής ή συμπύκνωσης, οι οποίοι σχηματίζουν όξινα διαλύματα ιδιαίτερα επιβλαβή, κυρίως για τους λίθους ανθρακικής σύστασης. Πληθώρα αντιδράσεων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της πέτρας λαμβάνουν χώρα μόνο παρουσία νερού, όπως για παράδειγμα η ιοντοεναλλαγή, η εξαλλοίωση ορυκτών, η υδρόλυση και η πέψη αργίλων (15). Το νερό μεταφέρεται στα δομικά υλικά (7):

- *Μέσω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων* (νερό της βροχής), η χημική σύσταση των οποίων συνδέεται άμεσα με την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Η διαβρωτική και διαλυτική δράση του νερού της βροχής οφείλεται στα ιόντα που διαλύει αποπλένοντας τα ατμοσφαιρικά σωματίδια (όξινη βροχή). Ο μηχανισμός της εισχώρησης του στις κτίρια εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, την κατάσταση της επιφάνειας, την ένταση της βροχής και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες (διεύθυνση και ένταση ανέμων κ.α.).
- *Με τριχοειδή αναρρίχηση από το έδαφος* (υπόγεια νερά, θάλασσα), όπου το νερό ανέρχεται αυθόρμητα μέσα στα τριχοειδή, στην περίπτωση που οι δυνάμεις έλξης

προς τα τοιχώματά τους είναι ισχυρότερες από αυτές μεταξύ των μορίων του νερού. Η ένταση της αναρρόφησης εξαρτάται από τη φύση της επιφάνειας των τριχοειδών και τη διάμετρο τους. Η τάση προς αναρρίχηση αυξάνει καθώς η διάμετρος τους ελαττώνεται. Η τάση αυτή είναι συχνά αρκετά μεγάλη, ώστε να υπερβαίνει τη βαρύτητα και να προκαλεί άνοδο του νερού μέσα στο δίκτυο των τριχοειδών της πέτρας.

- *Με συμπύκνωση της ατμοσφαιρικής υγρασίας*, όπου με τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές είναι δυνατόν να αποθεθούν σημαντικές ποσότητες νερού στην επιφάνεια και στο εσωτερικό των τοίχων, εφόσον η ατμόσφαιρα περιέχει σχετικά μεγάλο ποσοστό υγρασίας. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας της πέτρας πέφτει κάτω από το σημείο δρόσου των ατμών, κοντά στην επιφάνεια.
- *Με απευθείας μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα*, όπου τα σταγονίδια μπορούν να φτάσουν στα διάφορα σημεία ενός κτιρίου, άλλοτε άμεσα μέσω του αφρισμού και άλλοτε με τη βοήθεια του ανέμου σε απόσταση μερικών μέτρων έως και χιλιομέτρων από τη θάλασσα, ανάλογα με τη διεύθυνση και την ένταση των ανέμων καθώς και την γεωμορφολογία της περιοχής.

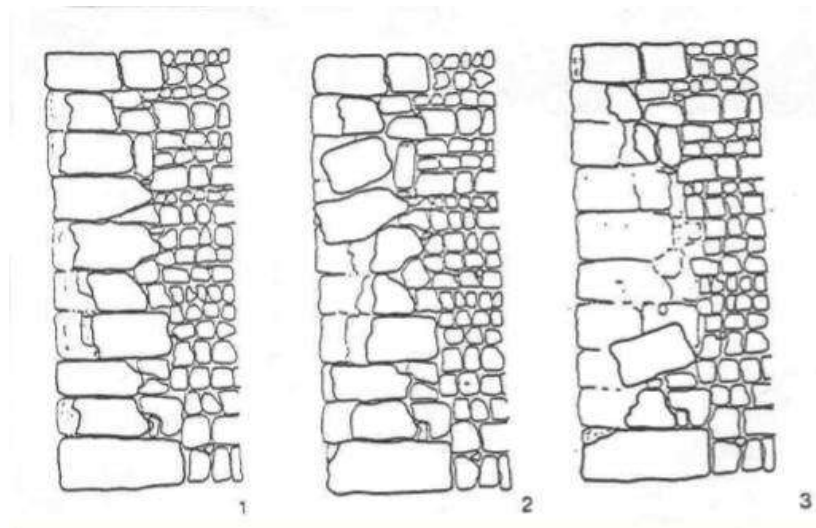
ο Διαλυτά άλατα

Τα διαλυτά άλατα αποτελούν μαζί με το νερό έναν από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών. Τα διαλυτά άλατα που κυκλοφορούν εντός και στην επιφάνεια των λίθων είναι κυρίως θειικά, νιτρικά, ανθρακικά, χλωριούχα, αλκάλια και αλκαλικές γαίες. Η κίνηση των διαλυτών αλάτων μέσα στην πέτρα γίνεται μέσω των μηχανισμών ιοντικής διάχυσης σε πλήρως διαπερατά από το νερό πετρώματα, τριχοειδούς μεταφοράς σε ψαμμίτες και ιοντικής όσμωσης διαπίδυσης σε κλειστούς πόρους ανθρακικών πετρωμάτων.

Τα κυριότερα διαλυτά άλατα που εμφανίζονται στα μνημεία είναι χλωριούχα θειικά, νιτρικά και ανθρακικά. Τα υδατικά διαλύματα των αλάτων μετακινούνται με έναν από τους προαναφερθέντες μηχανισμούς προς την επιφάνεια της πέτρας, όπου πραγματοποιείται εξάτμιση του διαλύτη (συνήθως νερού). Αποτέλεσμα της εξάτμισης είναι η κρυστάλλωση των αλάτων εντός των πόρων. Ένα άλας είναι δυνατό να κρυσταλλωθεί μόνο όταν ο περιβάλλον αέρας έχει τιμή σχετικής υγρασίας μικρότερη από του κορεσμένου διαλύματος του άλατος στην ισορροπία. Μια μεγάλη κατηγορία διαβρωτικών φαινομένων ερμηνεύεται μέσω των κυκλικών μεταβολών της ατμοσφαιρικής υγρασίας, ιδιαίτερα παρουσία διαλυτών αλάτων.

Γενικότερα, ανεξάρτητα από την παρουσία διαλυτών αλάτων που προέρχονται από εξωγενείς παράγοντες φθοράς, η θιξοτροπία και η διόγκωση του πλέγματος αρισμένων αργίλων (σμηκτίτες) είναι φαινόμενα που σχετίζονται με τις αλλαγές της ατμοσφαιρικής υγρασίας. Όταν το διάλυμα καταστεί υπέρκορο σε άλατα, οι κρύσταλλοι κατακρημνίζονται και παρατηρούνται τα μακροσκοπικά φαινόμενα διάβρωσης που παρουσιάζονται παρακάτω και έχουν ως αίτιο την κρυστάλλωση των διαλυτών αλάτων (15), (16):

- *Εξάνθηση*: κατά την οποία η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από της εξάτμισης και τα άλατα κρυσταλλώνονται έξω από τους πόρους, σχηματίζοντας αποθέσεις. Εξανθήσεις εμφανίζονται στα όρια υγρής και στερεής περιοχής, όπως επίσης και σε περιοχές που υπάρχουν ρωγμές. Όταν το νερό διεισδύει, εξανθήσεις εμφανίζονται στο σημείο που εξέρχεται.
- *Κρυπτοεξανθήσεις*: κατά την οποία η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή της εξάτμισης και έτσι το υδάτινο μέτωπο υποχωρεί στο εσωτερικό της πέτρας και η κρυστάλλωση γίνεται μέσα στους πόρους. Ο εν λόγω τύπος κρυστάλλωσης των αλάτων κρίνεται επικίνδυνος για τη ζωτικότητα της κατασκευής, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη πιέσεων, που εξαρτώνται από τον τύπο των αλάτων, και το μέγεθος και κατανομή των πόρων.
- *Κυψέλωση*: κατά την οποία η επιφάνεια της πέτρας εκφυλίζεται με τη δημιουργία σπηλαιώσεων. Η κυψέλωση εμφανίζεται σε περιοχές της κατασκευής που εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο μηχανισμός κατάρρευσης τοιχοποιίας λόγω κυψέλωσης.



Εικόνα 6. Μηχανισμός κατάρρευσης τοιχοποιίας λόγω κυψέλωσης (16)

- Αποθέσεις σε ξηρή ή υγρή φάση (επιφανειακή φθορά)
 - Ο μηχανισμός της *εν ξηρώ απόθεσης* συνίσταται στη συσσώρευση ρυπαντών αέριας ή σωματιδιακής προέλευσης στην επιφάνεια της πέτρας.
 - Κατά την *απόθεση σε υγρή φάση*, οι αέριοι ρύποι μεταφέρονται στην πέτρα διαλυμένοι στο νερό, μέσω των κατακρημνίσεων και της συμπύκνωσης που συμβαίνει στην επιφάνεια των κτιρίων.

2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος

2.1. Ιδιότητες και χαρακτηριστικά λίθων

2.1.1. Λιθότυπος Istria

Ιστορικά στοιχεία

Ο λιθότυπος Istria είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους δομικούς λίθους στη Βενετία, χάρη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, που τον κάνουν ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάβρωση (17), (18).

Ο λιθότυπος Istria μεταφέρεται στην πόλη της Βενετίας από τη δυτική πλευρά της χερσονήσου Istria, που βρίσκεται στην ανατολική ακτή της Αδριατικής θάλασσας, μεταξύ του δεύτερου μισού του 13^{ου} αιώνα και τα τέλη του 20^{ου}. Μια ενδιαφέρουσα, αρκετά πρώιμη χρήση του λίθου Istria, ήταν η χρήση του ως θεμελιώδους υλικού για την αναχαίτιση του ανερχόμενου παλιρροιακού νερού από τα κανάλια, μια λειτουργία που έκανε πολύ πιο αποτελεσματικά από έναν ψαμμίτη από τους πρόποδες των ανατολικών Άλπεων (Miocenic molasse), που ήταν το βασικό υλικό έως τα τέλη του 13^{ου} αιώνα. Οι κάτοικοι της Βενετίας εξήγαγαν το λίθο σε κτήσεις της στην ηπειρωτική χώρα (Triveneto και Λομβαρδία), στις ακτές της νότιας Αδριατικής και σε ορισμένα από τα εδάφη της στην Ανατολική Μεσόγειο. Ίσως, το πιο απομακρυσμένο σημείο στο οποίο εξήχθη ο συγκεκριμένος λιθότυπος, ήταν η Θεσσαλονίκη, όπου χρησιμοποιήθηκε στη σαρκοφάγο, τα στηρίγματα και τους γείσους του τάφου του Λουκά Σπανδωνή, μέσα στον ναό του Αγίου Δημήτριου. Ο λίθος Istria, όταν είναι καλής ποιότητας, αποτελεί πολύ καθαρό και ομοιογενές ασβεστόλιθο και οι προσόψεις πολλών Βενετσιάνικων μνημείων, όπως το Ducal Palace και πολλές εκκλησίες Μπαρόκ και Αναγεννησιακού ρυθμού, οφείλουν την καλή κατάστασή τους στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του (19).

Αν εξαιρέσουμε το ναό του Αγίου Μάρκου, τα κτίσματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε αυτός ο ασβεστόλιθος χρονολογούνται από τον 14^ο αιώνα και μετά και πριν από αυτή την περίοδο, χρησιμοποιούταν κυρίως για διακοσμητικούς λόγους. Ύστερα και συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια του 14^{ου} αιώνα και τουλάχιστον μέρους του 15^{ου}, η πιο συνηθισμένη χρήση του λίθου ήταν για αγάλματα και για διάφορα χαρακτηριστικά γοθτικών κτιρίων (σκαλιστά πορτάκια, πλαίσια σκαλισμένα με βενετσιάνικες τεχνικές, υδρορροές, καμάρες κλπ.), το λευκό του οποίου συνήθως ξεχώριζε από το κόκκινο τούβλο. Εξαιρεση σε αυτόν τον κανόνα είναι το Doge's Palace, όπου ο λίθος Istria χρησιμοποιήθηκε τόσο για δομικούς σκοπούς όσο και για την επικάλυψη των προσόψεων. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε διαφορετικά και πολύ πιο συχνά, κυρίως ως μορφή επένδυσης και υλικό πρόσοψης (ειδικά σε προσόψεις και δάπεδα, από τον 16^ο έως τον 18^ο αιώνα) και για τη θεμελίωση κτιρίων. Μεγάλες ποσότητες του λίθου Istria συνέχιζαν να χρησιμοποιούνται στην περιοχή της Βενετίας κατά τον 19^ο αιώνα. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η χρήση του για την κατασκευή του Salvi Palazzina καθώς και της γέφυρας που ενώνει τη Βενετία με την ηπειρωτική χώρα. Με την ενοποίηση της Ιταλίας, πολλοί ακόμη λίθοι με

παρόμοια χαρακτηριστικά ήταν διαθέσιμοι και συνεπώς οι εισαγωγές του λίθου Istria σταδιακά μειώθηκαν έως ότου σταμάτησαν στα πρώτα χρόνια του 20^{ου} αιώνα (19).

Λατομεία

Τα σημαντικότερα λατομεία εξόρυξης του ασβεστόλιθου Istria, είναι αυτά του Vrsar και Rovinj, τα οποία είναι επίσης τα πιο δημοφιλή και καλά διατηρημένα.



Εικόνα 7. Άποψη από το ανατολικό τμήμα του λατομείου Vrsar (η πόλη φαίνεται στο φόντο) (19)



Εικόνα 8. Άποψη από τη δυτική πλευρά του μεγάλου λατομείου του Rovinj (19)

Ο λίθος Istria, όπως όλοι οι πολύ συμπαγείς ασβεστόλιθοι, είναι δύσκολο να σμιλευτεί, ειδικά σε σύγκριση με ένα μάρμαρο (χωρίζει εύκολα και εμφανίζει ένα κογχοειδές ρήγμα και δεν επιτρέπει στον γλύπτη τον πλήρη έλεγχο των σμιλεών). Από την άλλη πλευρά, προσφέρεται για φινίρισμα με σφυριά, συμπεριλαμβανομένων των

οδοντωτών τύπων, και είναι εύκολο να λειανθεί και να γυαλιστεί καθώς και με τη συμπαγή του επιφάνεια παρέχει καλή στήριξη για επιχρύσωση και βαφή.

Χαρακτηρισμός λιθότυπου Istria

Από πετρογραφική άποψη, ο λιθότυπος Istria (PIETRA D' ISTRIA) μπορεί να χαρακτηριστεί ως μικριτικός ασβεστόλιθος (20) ή mudstone (21), δηλαδή πέτρωμα που σχηματίζεται μέσω της διαγένεσης μιας ασβεστολιθικής λάσπης και διαμορφώθηκε κατά την Αν. Ιουρασική (Upper Jurassic) - Κρητιδική (Cretaceous) περίοδο (22). Αποτελείται από πολύ λεπτόκοκκους κρυπτο-κρυστάλλους ασβεστίτη (<4μm) και αφαντική συνδετική μάζα. Η υφή του είναι συμπαγής, ενώ παρατηρούνται ελάχιστοι μικροί πόροι (μικροπορώδες). Είναι μικρο-κρυσταλλικός ασβεστίτης με μικρο-απολιθώματα, ισο-προσανατολισμένες φλέβες και μικρο-κοιλότητες από δευτερογενή ασβεστίτη, χαλαζία, πυρίτη και λεμονίτη. Μια τυπική χημική σύσταση του λιθότυπου Istria είναι: CaO: 97,50%, MgO: 0,08%, SiO₂: 1,02%, Fe₂O₃: 0,43% και Al₂O₃: 0,98% (18). Η παρουσία στυλόλιθων στην μάζα του είναι χαρακτηριστική, διότι συνήθως είναι χρωματισμένοι (κίτρινη ώχρα) από την κυκλοφορία υδροξειδίων του σιδήρου, ενώ παρατηρούνται αποθέσεις αργιλικών ορυκτών, λίγοι κλάστες χαλαζία και μικροφυλλάρια σερικήτη και χλωρίτη. Σε αυτή την περίπτωση, οι σύνδεσμοι και οι στυλόλιθοι συμπεριφέρονται σαν επιφάνειες με μικρή συνοχή και υψηλό πορώδες και κατά συνέπεια χάνουν την αντοχή τους στη φθορά. (23).

Από φυσικο-μηχανικής άποψης, η πιο σημαντική ιδιότητα του ασβεστόλιθου Istria είναι το πολύ χαμηλό πορώδες του και κατά συνέπεια η μεγάλη συνεκτικότητά του, γεγονός που τον κάνει λίθο υψηλής ποιότητας. Μετρήσεις ποροσιμετρίας, που έγιναν με τη μέθοδο ποροσιμετρίας υδραργύρου (MIP), έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για το πορώδες και τη φαινόμενη πυκνότητα (19):

$$\text{Πορώδες} = 0,5-0,6\%$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα} = 2,67-2,69 \text{ g/ml}$$

Το μέσο μέγεθος των πόρων είναι περίπου 16,7 μm. Μπορούμε να πούμε ότι ο λίθος έχει εξαιρετικά χαμηλή απορρόφηση νερού ≈0,2% (24). Αυτές οι χαμηλές τιμές ολικού πορώδους και τα μικρά ποσοστά μικρών πόρων (<1μm), χαρακτηρίζουν το λίθο Istria ως πολύ συμπαγή και ανθεκτικό στον παγετό, καθιστώντας τον ιδανικό φράγμα έναντι υψηλών τιμών υγρασίας. Από αυτήν την άποψη, η σωστή εγκατάσταση των λίθων/πλακών είναι πολύ σημαντική. Τα πιθανά επίπεδα ασυνέχειας πρέπει να προσανατολίζονται κάθετα προς την κατεύθυνση της κίνησης του νερού. Τέλος, μετρήσεις ως προς τη μηχανική αντοχή (25) δίνουν μέση κάθετη μονο-αξονική αντοχή σε θλίψη ≈1800 kg/cm² και παράλληλη ≈1350 kg/cm², γεγονός που πάλι επιβεβαιώνει ότι ο ασβεστόλιθος Istria κατατάσσεται μεταξύ των καλύτερων διαθέσιμων ασβεστόλιθων στη φύση για δομική αρχιτεκτονική χρήση (19).

Τύποι φθοράς στο λιθότυπο Istria

Όταν ο λίθος δεν βαφόταν, η επιφάνεια του συχνά υποβαλλόταν σε επεξεργασία με φυσικές οργανικές ουσίες (όπως λιπαντικά, κεριά, καζεΐνη κ.λπ.), με στόχο να τον προστατεύσουν και να διατηρήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο το ευαίσθητο «ανοιχτό μπεζ» χρώμα του. Δυστυχώς, αυτή η απόχρωση τείνει πλέον να αντικατασταθεί από μια λευκή στοιβάδα (patina) ή ακόμα χειρότερα από μια περισσότερο ή λιγότερο παχιά μαύρη κρούστα, που αποτελείται από ατμοσφαιρικά σωματίδια ρύπων σχηματισμένα από γύψο.

Η πιο κοινή γενική μορφή φθοράς στο λίθο Istria είναι η «λεύκανση» λόγω της ενανθράκωσης και της θείωσης στην επιφάνεια των βενετσιάνικων αντικειμένων, η οποία εμποδίζει τον θεατή να δει το πραγματικό χρώμα και τη φύση του λίθου. Το νερό της βροχής αλλάζει το χρώμα του λίθου, σε εκτεθειμένες επιφάνειες, έτσι ώστε να γίνεται ένα ομοιόμορφο λευκό, λόγω της διάλυσης του κύριου συστατικού του (πρωτογενής ασβεστίτης), το οποίο σχηματίζει όξινο ανθρακικό ασβέστιο, παρουσία διοξειδίου του άνθρακα. Το όξινο ανθρακικό ασβέστιο είναι ένα διαλυτό άλας που καθιζάνει σε ανθρακικό ασβέστιο (δευτερογενής ασβεστίτης) μέσω εξάτμισης. Αυτό είναι συνήθως εξαιρετικά λεπτό, καθαρό και πολύ λευκό και σχηματίζει στρώματα διαφορετικού πάχους που προσκολλώνται στο πρωτογενές ασβεστολιθικό υπόστρωμα. Όπου ο λίθος είναι καλά διατηρημένος (με βάση την τεχνική που προαναφέρθηκε και στα μέρη των βενετσιάνικων μνημείων που εκτίθενται περισσότερο στη βροχή) φτάνει σε πάχος μέχρι και μερικές εκατοντάδες μm και αποτελεί την πραγματική φυσική επικάλυψη του λίθου Istria. Τα τελευταία 200 χρόνια, αυτή η επικάλυψη έγινε όλο και πιο σπάνια στη Βενετία λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που προκαλείται από τις ενώσεις θείου. Είναι κατανοητό ότι οι ενώσεις θείου μπορούν να παράγουν θειικό οξύ, το οποίο αντιδρά εύκολα με το ανθρακικό ασβέστιο στο λίθο και ακόμη πιο εύκολα με την εξαιρετικά λεπτή στοιβάδα που περιγράφεται παραπάνω, για να σχηματίσει γύψο (δι-ένυδρο θειικό ασβέστιο). Αυτός ο επιφανειακός γύψος χαρακτηρίζεται από ανάπτυξη ινωδών ακτινοβολούμενων κρυστάλλων κάθετα στην επιφάνεια. Αν και είναι πολύ διαλυτός στο νερό, καθίσταται αρκετά σταθερός, ακόμη και σε μέτρια πλυμένες με βροχή επιφάνειες, επειδή διαλύεται και ανακρυσταλλώνεται εύκολα από τα εναπομείναντα υπολείμματα. Βοηθά λοιπόν στο σχηματισμό της λευκής στοιβάδας (λεύκανση), η οποία παραμένει στα δάχτυλα με τη μορφή λευκής σκόνης, όταν βουρτσίζεται η σχετική επιφάνεια. Εάν αυτά τα λεπτά στρώματα ασβεστίτη και γύψου, που αποτελούν τη στοιβάδα, περιέχουν επίσης ανθρακούχα σωματίδια που έχουν απομείνει από την καύση ξύλου ή ορυκτών καύσιμων, το αποτέλεσμα είναι μια ελαφρώς γκριζα επικάλυψη. Εάν τότε αυτά τα σωματίδια είναι πιο άφθονα, η στοιβάδα γίνεται μαύρη κρούστα, η οποία αποτελεί μια παραμορφωτική επικάλυψη, που είναι επικίνδυνη για την επιφάνεια. Τέλος, εάν ο λίθος είναι κακής ποιότητας, ειδικά εάν περιέχει ακόμη και ένα μικρό κλάσμα αργιλο-πυριτικών ενώσεων (συχνά ορατό με γυμνό μάτι επειδή δίνει μια κιτρινωπή απόχρωση στο λίθο), τότε τείνει να φθαρεί δομικά και να καταρρεύσει (19).



Εικόνα 9. Η επιφάνεια του λίθου Istria είναι καλυμμένη με λευκή στοιβάδα - Jacopo della Quercia, the Judgement of king Salomon (2^ο μισό του 15^{ου} αιώνα), Ducal Palace (19)

2.1.2. Μάρμαρο Carrara

Ιστορικά στοιχεία

Το μάρμαρο Carrara είναι ένας τύπος λευκού ή μπλε-γκρίζου μαρμάρου που είναι δημοφιλής στο χώρο της γλυπτικής και της διακόσμησης κτιρίων. Το μάρμαρο Carrara χρησιμοποιείται από την εποχή της Αρχαίας Ρώμης και ονομαζόταν "μάρμαρο Lunì" (26). Τον 17^ο και 18^ο αιώνα, τα λατομεία του μαρμάρου ανήκαν στις οικογένειες Cybo και Malaspina, που κυβέρνησαν στη Massa και στη Carrara. Μετά την εξαφάνιση των οικογενειών Cybo-Malaspina, το κράτος κυβερνήθηκε από τη Βουλή της Αυστρίας και η διαχείριση των λατομείων ανήκε σε αυτά (27).

Το μάρμαρο Carrara έχει χρησιμοποιηθεί σε κάποια από τα πιο σημαντικά κτίρια της αρχαίας Ρώμης όπως (26):

- Temple of Proserpina - later reused in many buildings in Valletta
- The Pantheon
- Trajan's Column
- Column of Marcus Aurelius

καθώς επίσης και σε άλλες περιπτώσεις όπως:

- Marble Arch, London, UK
- Victoria Memorial, London, UK
- Duomo di Siena, Siena, Italy
- Sarcophagus of St. Hedwig (Queen of Poland), Cracow, Poland
- Manila Cathedral (εσωτερικό), Manila, Philippines
- First Canadian Place, Toronto, Canada
- Sheikh Zayed Mosque, Abu Dhabi, UAE
- Hill of Hope, Hiroshima, Japan



Εικόνα 10. Το μνημείο Hill of Hope στη Χιροσίμα είναι κατασκευασμένο από 5.000m² μάρμαρο Carrara (28)

Λατομεία

Στην περιοχή των Άλπεων πάνω από την περιοχή Carrara (Apuan), δίνονται στοιχεία για τουλάχιστον 650 τοποθεσίες λατομείων, με περίπου τις μισές όμως από αυτές να έχουν πλέον εγκαταλειφτεί. Τα λατομεία Carrara παράγαν περισσότερο μάρμαρο από οποιοδήποτε άλλο μέρος της γης (29).

Χαρακτηρισμός λιθότυπου Carrara

Το μάρμαρο Carrara, όπως και όλοι οι άλλοι τύποι μαρμάρου, είναι ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα, που αποτελείται από μικροσκοπικούς κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου. Πρόκειται για ομοιογενές μάρμαρο με λευκό έως γκρίζο χρώμα, λαμπερούς λεπτούς κόκκους και γκρίζες φλέβες. Οι γκρίζες αυτές φλέβες οφείλονται σε διείδυση υπερ-λεπτόκοκκου ανθρακικού υλικού. Ο ιστός του είναι γρανοβλαστικός και ελαφρά ανισοκοκκώδης. Η υφή του είναι συμπαγής και ακανόνιστη με ταινιώσεις. Ορυκτολογικά, αποτελείται από ασβεστίτη σε ποσοστό >98%, ενώ παρατηρούνται κόκκοι αδιαφανών μεταλλικών ορυκτών (κυρίως Ca, Mg και λιγότερο Sr και άλλα ιχνοστοιχεία (30)) είτε διάσπαρτοι, είτε υπό μορφή φλεβιδίων. Σε υπιδιόμορφους κυρίως κρυστάλλους του μαρμάρου διαστάσεων που κυμαίνονται από 0,05mm έως 0,3mm, παρατηρείται η παρουσία ασβεστίτη. Ο τρόπος σύνδεσης αυτών των κρυστάλλων είναι τύπου «τριπλών σημείων επαφής» και «ευθύγραμμων τμημάτων» (23), (31), (32).

Το μάρμαρο Carrara είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στην πειραματική μελέτη παραμορφώσεων σε λίθους, λόγω της εξαιρετικής καθαρότητάς του (>98% CaCO₃) και του χαμηλού έως καθόλου αρχικού πορώδους του (30). Η διαφορετική ποιότητα αυτού του λίθου εξαρτάται από το χρώμα του εδάφους. Συγκεκριμένα, διακρίνουμε τους παρακάτω δύο τύπους μαρμάρου (31):

- Bianco di Carrara C (πιο ανοιχτό χρώμα εδάφους)
- Bianco di Carrara CD (πιο σκούρο χρώμα εδάφους)

Πιθανή χρωματική αλλοίωση (πορτοκαλί κηλίδες) μπορεί να παρουσιαστεί με την πάροδο του χρόνου, λόγω οξειδωσης των σιδηρούχων ορυκτών από την αυξημένη υγρασία (23).

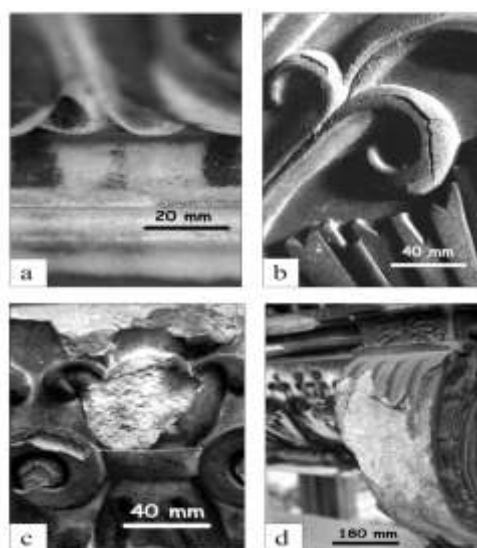
Τύποι φθοράς στο μάρμαρο Carrara

Η θείωση θεωρείται μία από τις κύριες αιτίες που ευθύνονται για τις διαδικασίες φθοράς των ανθρακικών πετρωμάτων σε αστικό περιβάλλον. Η πλούσια σε γύψο στοιβάδα αναπτύσσεται σε διάφορα μάρμαρα και ασβεστολιθικά μνημεία, ως μαύρες κρούστες διαφόρων μεγεθών. Η φθορά ξεκινά με το σχηματισμό κρούστας γύψου λόγω της αντίδρασης μεταξύ μικρών ποσοτήτων θειικού οξέος από μολυσμένο αέρα και ανθρακικών ορυκτών. Κυρίως λόγω φυσικών παραγόντων όπως ο παγετός, η ηλιακή ακτινοβολία και η υγρασία, ο γύψος ξεκινά την απολέπιση. Μια νέα στοιβάδα πλούσια σε γύψο αρχίζει να

σχηματίζεται στη φρέσκια επιφάνεια του μαρμάρου. Οι πρωτογενείς και δευτερογενείς κρούστες διαφέρουν ήδη σε μακροσκοπική κλίμακα. Η δεύτερη είναι συνήθως λεπτότερη και αναπτύσσεται σε φρέσκια επιφάνεια λίθου που εκτίθεται μετά την απολέπιση των πρωτογενών κρουστών (33).

Στις περιοχές της στοιβάδας που είναι πλούσιες σε γύψο υπάρχουν διάφοροι μικροοργανισμοί όπως βακτήρια, μικρο-μυκήτες, φύκη και λειχήνες. Η δραστηριότητά τους επιταχύνει τη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων μέσω των πεπτικών τους προϊόντων και της συσσώρευσης της υγρασίας. Η δράση των μικροοργανισμών ευνοεί τη συσσώρευση επιθετικών αλάτων και ατμοσφαιρικών ρύπων στο εξωτερικό στρώμα του λίθου. Οι μικρο-μυκήτες μπορούν να παρατηρηθούν σε διαφορετικά στάδια θείωσης του ανθρακικού ασβεστίου. Ο αριθμός των ειδών τους που υπάρχουν στα μέρη του μαρμάρου Carrara κυμαίνεται από 4-11. Μερικά κυρίαρχα είδη βιο-καταστροφών, π.χ. Το *Aureobasidium pullulans*, *Cladosporium sphaerospermum*, υπάρχουν σε όλα τα στάδια της ανάπτυξης του φλοιού. Χαρακτηρίζονται από έντονη αντίσταση σε δυσμενή ατμοσφαιρική επίδραση. Τα κύτταρα αυτών των μυκήτων περιέχουν χρωστικές μελανίνης που τους προστατεύουν. Σχηματίζουν μικρές αποικίες και μυκήλια στις ρωγμές των κρυστάλλων γύψου (33).

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κρυστάλλων γύψου, που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των ανθρακικών πετρωμάτων στο αστικό περιβάλλον, δείχνουν ότι οι διαδικασίες ανάπτυξης και διαλυτοποίησης αντικαθιστούν η μία την άλλη. Η διάλυση, η πυρήνωση και η ανάπτυξη κρυστάλλων λαμβάνει χώρα παρουσία πολυάριθμων μικροοργανισμών. Γενικά, ο βαθμός θείωσης των ανθρακικών πετρωμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες, οι ρωγμές και το πορώδες του λίθου, οι ιδιαιτερότητες της δομής/υφής και η σύνθεση του λίθου. Όλοι οι παράγοντες είναι εξίσου σημαντικοί (33).



Εικόνα 11. Τα βασικά στάδια θείωσης στην επιφάνεια του μαρμάρου Carrara (A.I. Kosikovski monument): a) αρχή σχηματισμού πρωτογενούς μαύρης κρούστας, b) πρωτογενής μαύρη κρούστα με ρωγμές, c) φρέσκια και σκληρή επιφάνεια μαρμάρου μετά την απολέπιση της γύψινης κρούστας, d) αρχή σχηματισμού δευτερογενούς μαύρης κρούστας (33)

2.1.3. Λιθότυπος Lecce

Ιστορικά στοιχεία

Στη νότια Ιταλία, ο λίθος Lecce χρησιμοποιείται ευρέως τόσο για δομικούς όσο και για διακοσμητικούς σκοπούς. Η εκτεταμένη χρήση του οφείλεται στη λεπτή υφή του, η οποία τον καθιστά εύκολο στο να λατομηθεί και να επεξεργαστεί καθώς και στην ευρεία διαθεσιμότητά του. Ο λίθος Lecce είναι το βασικό υλικό της μπαρόκ κληρονομιάς της νότιας Ιταλίας ('Baroque Leccese'). Έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως κατά την αρχαϊκή (6^{ος} π.Χ.) και ελληνιστική περίοδο (4^{ος}-5^{ος} π.Χ.) έως και την ρωμαϊκή εποχή (οχυρωματικά τείχη της Μεσσαπίας). Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα ερείπια του ρωμαϊκού αμφιθεάτρου του Luriae (ο αρχαίος ρωμαϊκός οικισμός στη θέση Lecce), και το λιμάνι που χτίστηκε από τον Αδριανό στις ακτές της Αδριατικής. Ο λίθος Lecce χρησιμοποιήθηκε επίσης για την κατασκευή αξιόλογων ρωμανικών εκκλησιών κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα, καθώς και στρατιωτικών κατασκευών, όπως κάστρα, οχυρωμένες πόλεις και πύργοι οχυρώσεων κατά την περίοδο της Αναγέννησης. Μεγάλες κατοικίες και αρχοντικά του 19^{ου} και του 20^{ου} αιώνα συμπληρώνουν την αρχιτεκτονική κληρονομιά που χτίστηκε με αυτόν το λίθο (34).



Εικόνα 12. Ερείπια ρωμαϊκού αμφιθεάτρου στο Lecce (34)

Λατομεία

Ο κύριος τόπος εξαγωγής στο παρελθόν ήταν η περιοχή γύρω από την πόλη Lecce (35). Η ποικιλία που ονομάζεται «pietra gentile» ή «leccisu» προτιμήθηκε ως οικοδομικό υλικό επειδή θεωρήθηκε ότι έχει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από τα μαλακά και υγροσκοπικά «saronara» και τα ετερογενή είδη «bastarda». Σήμερα, ο λίθος Lecce εξάγεται κυρίως από τη νότια επαρχία της πόλης Lecce (επαρχία Cursi-Melpignano). Όπως στο παρελθόν έτσι και σήμερα παράγονται διαφορετικές ποικιλίες (34):

- «mazgara»: χονδρόκοκκο με ετερογενή υφή
- «rigomafu»: γκρίζο-πρασινωπό, μαλακό και ανομοιογενές, χρησιμοποιείται ως πυρίμαχο υλικό στην κατασκευή παραδοσιακών φούρνων

- «cucuzzara»: λευκό-γκριζωπό με ανομοιογενή υφή, χρησιμοποιείται ως υλικό ανθεκτικό στη φωτιά, μερικές φορές για κτίρια
- «dura»: γκριζο-υπόλευκο, λεπτό με συμπαγή υφή, χρησιμοποιείται για στέγες
- «bianca»: υπόλευκο, λεπτό με συμπαγή υφή, χρησιμοποιείται κυρίως ως διακοσμητικό υλικό
- «dolce»: κιτρινωπό με λεπτή και συμπαγή υφή, χρησιμοποιείται κυρίως για διακόσμηση κτιρίων και γλυπτών
- «saropara»: γκριζο-υπόλευκο, πολύ μαλακό και υγροσκοπικό
- «gaggiara»: λευκό-ανοιχτό κίτρινο, χρησιμοποιείται για επένδυση και διακόσμηση
- «nera»: καφέ-γκρίζο, χρησιμοποιείται ελάχιστα λόγω του χρώματος

Οι ποικιλίες που προσδιορίζονται από τους λατόμους έχουν διαφορετικές ορυκτολογικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Ο ασβεστίτης με χαμηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο είναι το κύριο ορυκτολογικό συστατικό, αλλά ποικίλες ποσότητες αδιάλυτων υπολειμμάτων έχουν βρεθεί στις πέτρινες ποικιλίες (36). Αποτελείται από αργυλο-πυριτικά ορυκτά (όπως γλαυκονίτης, λίτης, καολινίτης, σημηκίτης και χλωρίτης) και άμορφες ενώσεις σε ποσοστά από 3-14%. Υπάρχει επίσης ένα αμελητέο κλάσμα πυριτικών ορυκτών (χαλαζία, άστριοι και μίκες) και οξειδίων του σιδήρου. Η ποσότητα και η σύνθεση του αδιάλυτου κλάσματος καθορίζουν το χρώμα των ποικιλιών της πέτρας (34).

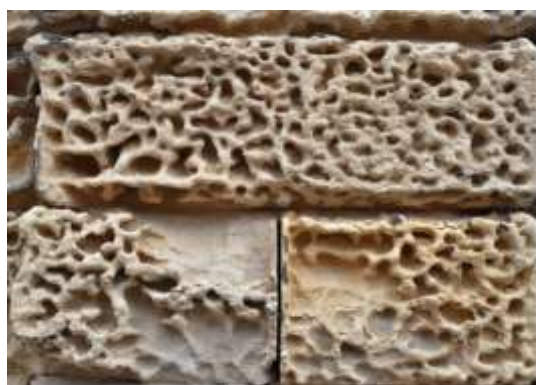
Χαρακτηρισμός λιθότυπου Lecce

Ο λίθος Lecce είναι ένα ασβεστολιθικό πέτρωμα με χαρακτηριστικό απαλό κίτρινο χρώμα, που συγκεκριμένα ανήκει στην οικογένεια καλκαρενιτών (calcarenite, ψαμμιτικός ασβεστόλιθος) και χρονολογείται από την περίοδο του Μειόκαινου (Miocene) (πριν από 21 εκ. χρόνια) (37). Αποτελείται από άμμο ασβεστόλιθου και στοιχεία οργανικής προέλευσης, όπως σκελετούς θηλαστικών, θραύσματα κοραλλιών και διάφορα μικροσκοπικά θαλάσσια ζώα συγκολλημένα από ασβεστιτικής σύστασης τσιμέντο. Κατά την πετρογραφική εξέταση, η πέτρα του Λέτσε, φαίνεται να αποτελείται από ένα κοκκώδες μείγμα (μικρο-απολιθώματα, θραύσματα απολιθωμάτων, ενδοκλάστες και pellets) συγκολλημένο από ασβεστιτικό τσιμέντο. Το ανθρακικό ασβέστιο είναι επομένως το θεμελιώδες ορυκτολογικό συστατικό. Υπάρχει άφθονη μήτρα φτιαγμένη από λεπτά ασβεστολιθικά υπολείμματα, που συχνά αναμιγνύεται με αργιλο-πυριτικά ορυκτά. Ο γλαυκονίτης παρατηρείται συχνά ως γέμισμα κοιλοτήτων μικρο-απολιθωμάτων (23), (34), (38), (39).

Ο λιθότυπος Lecce έχει πορώδη δομή και εμφανίζει καλές λειτουργικές ιδιότητες λόγω των πολύ υψηλών δεικτών θερμομόνωσης και ηχο-απορρόφησης. Το πορώδες του λίθου Lecce είναι γενικά υψηλό και κυμαίνεται από 31-45%. Το δίκτυο πορώδους αποτελείται κυρίως (50-70% των πόρων) από πόρους με ακτίνα μεταξύ 0,5μm και 4-6μm, με το υπόλοιπο κλάσμα κάτω από 1 μm. Εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή απορρόφηση του νερού (το πορώδες το οποίο είναι προσβάσιμο από νερό είναι περίπου 40%) (23), (34), (38), (39). Τέλος, η πυκνότητα του λιθότυπου κυμαίνεται μεταξύ 1,644 και 1,667 g/ml (40).

Τύποι φθοράς στο λιθότυπο Lecce

Ο λιθότυπος Lecce είναι λίθος χαμηλής αντοχής. Το υψηλό πορώδες και ο χαμηλός βαθμός συνεκτικότητας είναι οι κύριοι παράγοντες που καθιστούν αυτό το υλικό ευαίσθητο σε φθορά όταν εκτίθεται σε εξωτερικούς χώρους (34). Ο λίθος Lecce επηρεάζεται από πολλά φαινόμενα φθοράς, όπως η κυψέλωση, η διαφορική διάβρωση, αυξανόμενες διαδικασίες υγρασίας και κρυστάλλωσης αλάτων. Σε όλες αυτές τις διεργασίες το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στην αποσύνθεση (39). Οι μορφές αποσύνθεσης που παρατηρούνται συχνότερα είναι η μαζική βιολογική ανάπτυξη και η κυψέλωση. Πράγματι, το υψηλό πορώδες επιτρέπει εύκολα στο νερό να διεισδύσει και να παραμείνει μέσα στο λίθο, ενώ η βιολογική ανάπτυξη σχηματίζει σημεία επιλεκτικής αποσύνθεσης, λόγω της δομικής ετερογένειας. Η κυψέλωση είναι αναμφίβολα η πιο επικίνδυνη και επιθετική μορφή διάβρωσης για τον ασβεστόλιθο Lecce. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που ενισχύουν την κυψέλωση προτάθηκαν πριν από αρκετές δεκαετίες (41) και είναι: το υψηλό πορώδες του λίθου και κυρίως η ετερογενής του δομή, η υψηλή αλλά εξαιρετικά μεταβλητή περιεκτικότητα σε νερό, η άφθονη παρουσία υδατο-διαλυτών αλάτων και τέλος οι ευμετάβλητες περιβαλλοντικές συνθήκες. Πιθανώς λόγω της σημαντικής παρουσίας μικροπόρων (<0,5 μm), που επιβραδύνουν την οριζόντια μεταφορά υγρών υδάτων και διαλυμάτων νερού και λόγω της ευκολίας εξάτμισης από την επιφάνεια, η κρυστάλλωση αλάτων πραγματοποιείται κατά προτίμηση κάτω από αυτή (42). Είναι προφανές ότι το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στην αποσύνθεση αυτού του λίθου (παρατηρείται συχνά υγρασία λόγω διείσδυσης νερού, είτε από την οροφή είτε από την άνοδο από το έδαφος). Το σκάλισμα του λίθου μπορεί επίσης να επιταχύνει τη φθορά. Το αποτέλεσμα της χρήσης εργαλείων στην επιφάνεια του λίθου είναι η μηχανική καταπόνηση, η δημιουργία μικρορωγμών και η διόγκωση της συγκεκριμένης επιφάνειας του λίθου. Αυτό τέλος, επιφέρει μεγαλύτερη απορρόφηση νερού από ό, τι σε λείες επιφάνειες (34).



Εικόνα 13. Φαινόμενο κυψέλωσης σε τοιχοποιία από λίθο Lecce (34)

2.2. Η επίδραση της φωτιάς στις ιδιότητες των δομικών λίθων

Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερη έρευνα επικεντρώθηκε στην επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στους δομικούς λίθους. Η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών επηρεάζει διάφορα χαρακτηριστικά ενός λίθου. Οι πετρογραφικές, ορυκτολογικές, χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μπορεί να αλλάξουν ανάλογα με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, τα χαρακτηριστικά του λίθου, το χρονικό πλαίσιο του συμβάντος υψηλής θερμοκρασίας και τον τρόπο ψύξης. Η αξιολόγηση της επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιών στους δομικούς λίθους μιας δομής, ιδίως μετά από ένα καταστροφικό γεγονός, όπως η πυρκαγιά, είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης και τον σχεδιασμό κατάλληλων μέτρων αποκατάστασης (43). Η αξιολόγηση αυτή είναι ακόμη πιο σημαντική στην περίπτωση μνημειακών δομών, όπου οι ιστορικοί δομικοί λίθοι είναι "πολύτιμοι" και θα πρέπει, αν είναι δυνατόν, να αντικατασταθούν στον ελάχιστο βαθμό.



Εικόνα 14. Φωτιά στο κάστρο Windsor (44)



Εικόνα 15. Εικόνα από τη φωτιά στο Μοναστήρι της Παναγίας Βαρνάκοβας (2017) (45)



Εικόνα 16. Πυρκαγιά στην Παναγία των Παρισίων (ώρα 19:50) (46)



Εικόνα 17. Πυρκαγιά στον αρχαιολογικό χώρο των Μυκηνών (47)

Η επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας σε ένα δομικό λίθο είναι ένας σύνθετος μηχανισμός και οι διάφορες ιδιότητες του πρέπει να εξετάζονται προκειμένου να επιτευχθεί μια ολιστική εικόνα της επίδρασης της πυρκαγιάς. Η οπτική παρατήρηση παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση ενός συμβάντος πυρκαγιάς, δεδομένου ότι πολλές ζημιές και μοτίβα αποσύνθεσης είναι ευκρινή μακροσκοπικά, συμπεριλαμβανομένων των ρωγμών, της επιφανειακής απώλειας αυθεντικού υλικού, των μεταβολών του χρώματος και της φθοράς από τη συσσώρευση της καπναιθάλης (48), (49), (50), (51).

Η πετρογραφική ανάλυση βοηθά όχι μόνο στον χαρακτηρισμό ενός λιθότυπου, αλλά επίσης αποκαλύπτει τη σύνθεση, την υφή, τον τύπο του συνδετικού υλικού, τη μικρομορφολογία και βοηθά στην αξιολόγηση της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας, εξετάζοντας τις μεταβολές που παρατηρούνται σε αυτά τα χαρακτηριστικά (52), (53), (54), (43). Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί δια-κρυσταλλικές και ενδο-κρυσταλλικές επιπτώσεις σε ένα λίθο. Οι δια-κρυσταλλικές επιπτώσεις συνδέονται με την ανάπτυξη μικρο-ρωγμών εντός της μήτρας του υλικού και είναι συνήθως αποτέλεσμα διαφορετικών χαρακτηριστικών των συστατικών του λίθου. Οι ενδο-κρυσταλλικές επιπτώσεις εκδηλώνονται μέσω της ανάπτυξης μικρο-ρωγμών εντός των ίδιων των κόκκων (55). Εγγενής ανισοτροπία των λίθων είναι ένα παράδειγμα της υποβάθμισης στην περίπτωση

των θερμικών φορτίων. Για παράδειγμα, η εγγενής ανισοτροπία των κόκκων του ασβεστίτη, όταν θερμαίνεται, θεωρείται ως ο βασικός παράγοντας για την αποσύνθεση του μαρμάρου και των ασβεστόλιθων (56), (49).

Η ορυκτολογική ανάλυση αποκαλύπτει την αλλοίωση των ορυκτολογικών ενώσεων. Έτσι, η απουσία ή η μείωση μιας ένωσης μετά την πυρκαγιά είναι ενδεικτικό γεγονός ότι η πυρκαγιά έφθασε σε μια θερμοκρασία στην οποία η δομή της ένωσης συμπύσσεται αμετάκλητα ή/και μετατρέπεται σε μια άμορφη ένωση που δεν είναι πλέον ανιχνεύσιμη (52). Η χημική ανάλυση μπορεί να αποκαλύψει μεταβολές στη σύνθεση του λίθου, η οποία συνδέεται επίσης με μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Αυτές οι μεταβολές περιλαμβάνουν οξείδωση, αφυδάτωση και άλλες διεργασίες (57), (58). Από αυτές τις διεργασίες μπορούμε να συμπεράνουμε μετατροπές στη μήτρα ενός δομικού υλικού ή/και χρωματικές μεταβολές, όπως ερυθρότητα (π.χ. όταν τα σιδηρούχα μέταλλα περιλαμβάνονται στο λίθο). Έτσι, για παράδειγμα, η περιεκτικότητα των οξειδίων-υδροξειδίων του αργιλίου και του σιδήρου σε ένα λίθο, μπορεί να είναι καθοριστικός παράγοντας για μια σειρά μετασχηματισμών που προκαλούνται από τη θερμότητα (59).

Η ανάλυση της μικροδομής είναι επίσης υψίστης σημασίας, δεδομένου ότι η αλλοίωση των μικρο-διαρθρωτικών χαρακτηριστικών επηρεάζει άλλες ιδιότητες, όπως η συμπεριφορά ενός λίθου κάτω από τα υγρό-θερμικά φορτία και την αντοχή σε συμπίεση (55), (52), (60), (53), (57), (54), (61). Το πορώδες συνήθως αυξάνεται όταν ένα υλικό υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες (55), (60), ενώ η πυκνότητα μειώνεται λόγω της απώλειας υλικών και της σύνθετης αποσύνθεσης, της αφυδροξυλίωσης και των διεργασιών αφυδάτωσης. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για τη δομητική επάρκεια των κατασκευών. Η αντοχή συνήθως μειώνεται λόγω της ανάπτυξης μικρο-ρωγμών ή/και της αύξησης του πορώδους (62), (61).

Η επίδραση της φωτιάς και οι επακόλουθες μεταβολές που προκαλούνται στα χαρακτηριστικά ενός λίθου εξαρτώνται σαφώς από τον ίδιο το λίθο. Κάθε τύπος λίθου παρουσιάζει μια διαφορετική συμπεριφορά στην έκθεση σε φωτιά, ανάλογα με τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά, χημική σύνθεση, πορώδες και ανισοτροπίας των συστατικών του, κλπ. Για παράδειγμα, οι γρανίτες είναι πιο επιρρεπείς σε ρωγμή όταν υποστούν θερμικό σοκ, σε σύγκριση με άλλους μαλακότερους λίθους (63). Στους ψαμμίτες, που είναι πλούσιοι σε χαλαζία, λόγω του ανοιχτού πορώδους τους, καθώς και λόγω της ασβεστιτικής μήτρας τους, οι μικρο-τάσεις λόγω της επέκτασης του χαλαζία (όταν μετατρέπεται από $\alpha \rightarrow \beta$ στους $\sim 575^\circ\text{C}$), απορροφώνται από τη μήτρα (55). Έτσι, η γνώση του τύπου του λίθου και η παράλληλη αξιολόγηση των μεταβολών που μελετώνται σε συναφείς έρευνες και πρακτικές μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη των αλλοιώσεων που προκαλούνται σε έναν ορισμένο λιθότυπο σε περίπτωση πυρκαγιάς (48). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά ορισμένες από τις επιπτώσεις της φωτιάς σε διάφορους λιθότυπους (43):

Πίνακας 1. Επιπτώσεις της φωτιάς που παρατηρούνται μακροσκοπικά και μικροσκοπικά σε διάφορους λιθότυπους (43)

| Θερμοκρασία έκθεσης | Λιθότυπος | | | |
|---------------------|--|--|--|---|
| | Ασβεστόλιθος | Ψαμμίτης | Μάρμαρο | Γρανίτης |
| 250°C | Αποχρωματισμός → ροζ ή καστανέρυθρη χροιά (μη αντιληπτός <400°C) | Αποχρωματισμός → κόκκινη χροιά (μη αντιληπτός <400°C) | Μη αντιστρεπτή διόγκωση (θερμική υστέρηση) | <1°C/min → πλήρως αντιστρεπτή διόγκωση |
| 300°C | | | | |
| 400°C | Αποχρωματισμός → καστανέρυθρη χροιά | >573°C → διάρρηξη κόκκων χαλαζία → μείωση ανθεκτικότητας και ευθραυστότητα | | Διαφορική διόγκωση → |
| 600°C | CaCO ₃ →CaO | Αποσύνθεση αργλικών ορυκτών σε μήτρα (καολινίτης <600°C, χλωρίτης >600°C) | ευθραυστότητα & μετατροπή σε σκόνη | |
| 800°C | CaCO ₃ → γκρι-λευκή σκόνη → μείωση ανθεκτικότητας | Αποχρωματισμός → κόκκινη χροιά CaCO ₃ → γκρίζα-λευκή σκόνη → διάλυση | | Διαφορική διόγκωση (>900°C) → εφελκυσμός & συμπίεση → μόνιμη καταπόνηση |
| 1000°C+ | Τήξη | Τήξη | Τήξη | Τήξη |

Όσον αφορά στη φυσικο-μηχανική και δομική σταθερότητα του μνημείου, είναι ζωτικής σημασίας να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος των ζημιών από πυρκαγιά. Σε συνέχεια της ανωτέρω συζήτησης, οι έμμεσες συνέπειες των υψηλών θερμοκρασιών, πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια μιας διαγνωστικής μελέτης. Μια άλλη σημαντική πτυχή που πρέπει να διερευνηθεί είναι η μεταβλητότητα των παραμέτρων της πυρκαγιάς στους διαφορετικούς τύπους λίθων ανάλογα με τις ποικίλες θερμοκρασίες, τη διάρκεια του συμβάντος, ή άλλους συνεργικούς παράγοντες (π.χ. απομονωμένος λίθος ή ενταγμένος σε τοιχοποιία). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, ο αντίκτυπος της πυρκαγιάς πρέπει να αντιμετωπιστεί αρχικά από την άποψη των δομικών λίθων.

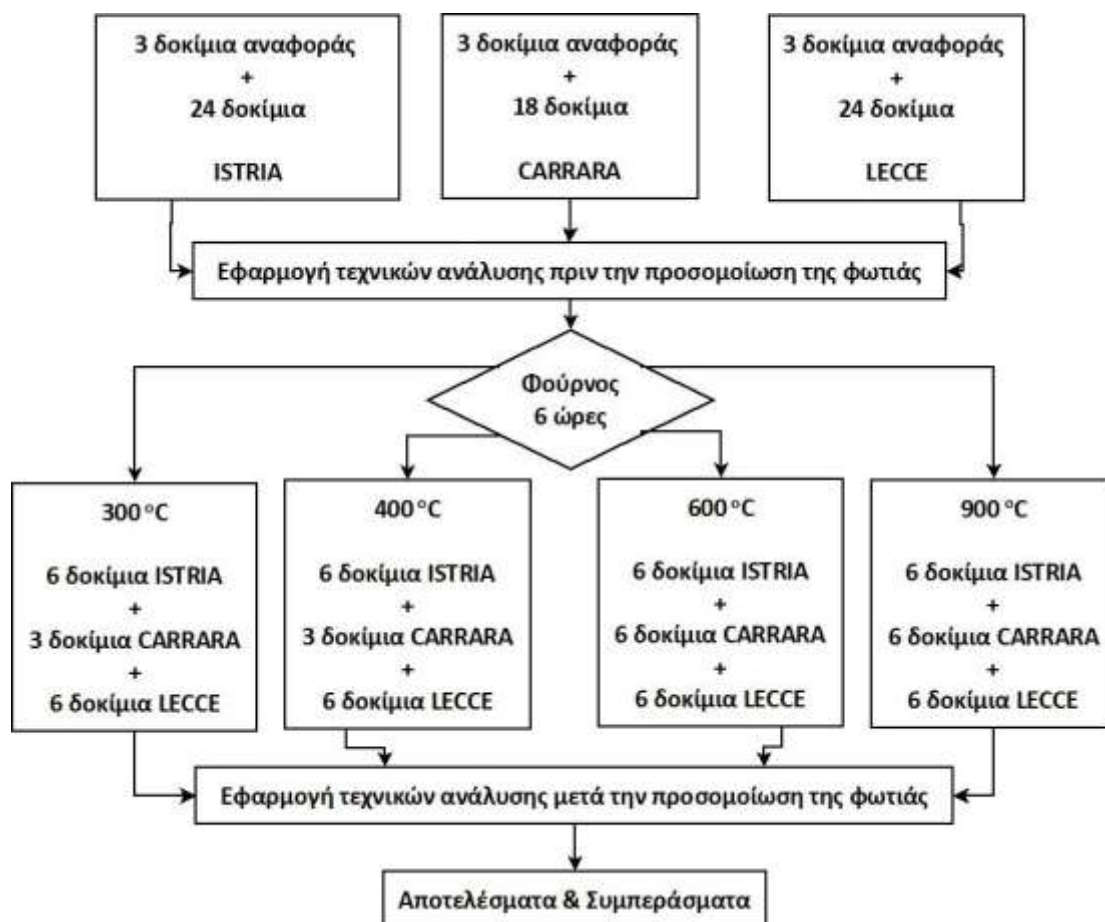
Ιδιαίτερα σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, που χαρακτηρίζουν τη σημερινή εποχή, η μελέτη των επιπτώσεων της φωτιάς τόσο σε μνημεία όσο και σε κτίρια κρίνεται

καθοριστική. Γι' αυτό τον λόγο εδώ και τρεις δεκαετίες πραγματοποιούνται πολλές σημαντικές επιστημονικές μελέτες από ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, με βάση τις οποίες γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της πυρκαγιάς και μελέτης των επιπτώσεων της φωτιάς στα φυσικο-μηχανικά χαρακτηριστικά των λίθων. Αυτές οι μελέτες περιλάμβαναν κυρίως εργαστηριακές προσομοιώσεις της φωτιάς, μέσω χρήσης φούρνου και έκθεσης δοκιμίων λίθων, που προέρχονται από λατομεία, σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Παρ' όλα αυτά, αυτές οι προσομοιώσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τη στάχτη και τις αναθυμιάσεις (64). Άλλες προσεγγίσεις μικρότερης κλίμακας περιλαμβάνουν μελέτες πραγματικής πυρκαγιάς (65), (66), (67), (68) καθώς και εφαρμογές με λέιζερ για την μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας και των σχετικών χημικών αντιδράσεων σε λίθους (48). Ενδιαφέρον, τέλος, παρουσιάζουν μελέτες στις οποίες η προσομοίωση της φωτιάς δεν έγινε με τη χρήση φούρνου αλλά μέσω καύσης ξύλου, ώστε να καθίσταται δυνατό να εκτιμηθεί η επίδραση των καπνών και της στάχτης (48), (69).

3. Πειραματικό Μέρος

3.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ο χαρακτηρισμός τριών διαφορετικών λιθότυπων (λίθος Istria, μάρμαρο Carrara, λίθος Lecce), ως προς την αντοχή και την ανθεκτικότητά τους, πριν και μετά την επίδραση της φωτιάς. Το φαινόμενο της φωτιάς προσομοιώθηκε με τη χρήση φούρνου και συγκεκριμένα με θέρμανση των δοκιμίων σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες (300°C, 400°C, 600°C και 900°C) για 6 ώρες. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν 27 δοκίμια για τον λίθο Istria (εκ των οποίων 3 αναφοράς), 27 δοκίμια για τον λίθο Lecce (εκ των οποίων 3 αναφοράς) και τέλος 21 δοκίμια για το μάρμαρο Carrara (εκ των οποίων 3 αναφοράς). Αυτά χωρίστηκαν σε ομάδες των 6 για κάθε θερμοκρασία και λιθότυπο (εκτός του μαρμάρου που για τις θερμοκρασίες 300°C και 400°C μελετήθηκαν από 3 δοκίμια αντίστοιχα). Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 5cmx5cmx5cm. Οι τεχνικές ανάλυσης που αναπτύσσονται παρακάτω εφαρμόστηκαν πριν και μετά την προσομοίωση της φωτιάς για κάθε δοκίμιο. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Εικόνα 18. Πειραματική διαδικασία της έκθεσης των τριών λιθότυπων σε υψηλές θερμοκρασίες με σκοπό την προσομοίωση του φαινομένου της φωτιάς

Οι τεχνικές ανάλυσης που εφαρμόστηκαν στο εργαστήριο για το χαρακτηρισμό των λίθων και για τη διάγνωση της φθοράς τους είναι:

1. Ψηφιακή Μικροσκοπία (DM, AM3113T Dino-Lite Premier & i-scope Moritex, x50)

Εφαρμογή για εξέταση της μορφολογίας και της υφής των κυβικών δοκιμίων μετά την επίδραση της φωτιάς.

2. Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (TG/DTA, Regulus 2500 Netzch)

Εφαρμογή για ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ενώσεων κάθε λιθότυπου.

3. Υπερηχοσκόπηση

Εφαρμογή της μη καταστρεπτικής μεθόδου για την εκτίμηση της αντοχής και ανθεκτικότητας κάθε λιθότυπου μετά την επίδραση της φωτιάς.

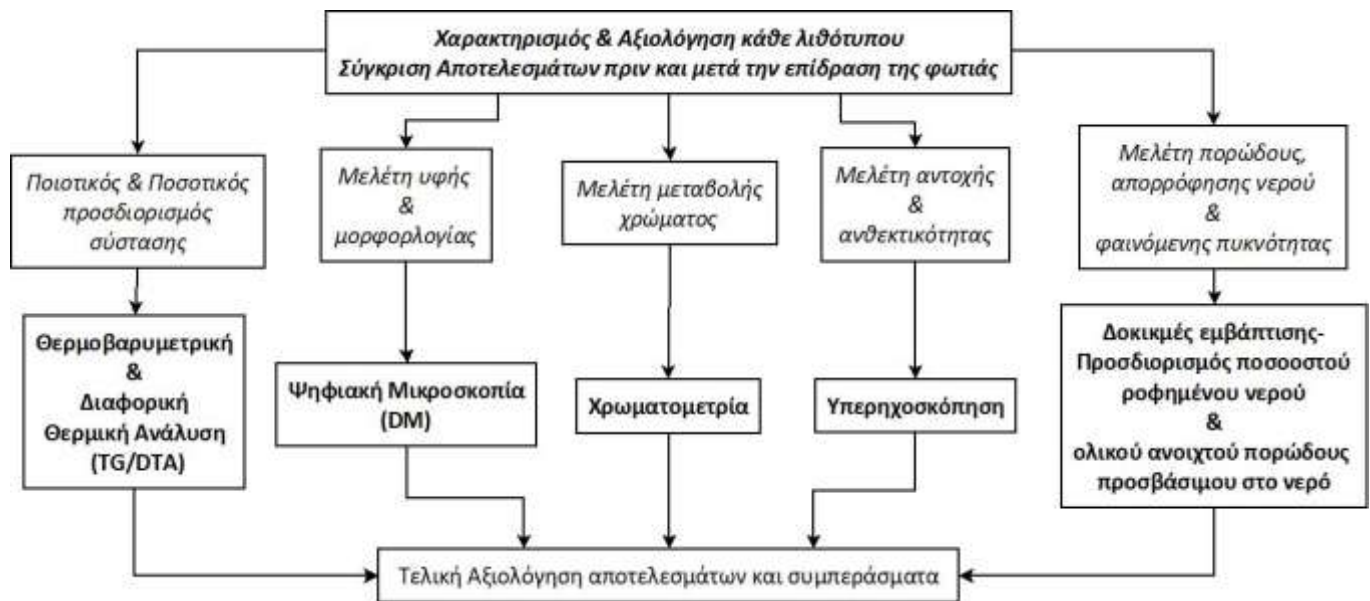
4. Δοκιμές εμβάπτισης – Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού & ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό

Εφαρμογή για την εκτίμηση του πορώδους προσβάσιμου στο νερό (με ολική εμβάπτιση), της ικανότητας απορρόφησης νερού και της φαινόμενης πυκνότητας για κάθε λιθότυπο μετά την επίδραση της φωτιάς.

5. Χρωματομετρία (SpectraMagic NX & Dr. Lange colorimeter LMG268)

Εφαρμογή για την εξέταση της μεταβολής του χρώματος μετά την επίδραση της φωτιάς, για κάθε λιθότυπο.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται σχηματικά στο διάγραμμα ροής της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 19. Μεθοδολογική προσέγγιση μελέτης δειγμάτων

3.2. Τεχνικές Χαρακτηρισμού των Λίθων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αρχές των πειραματικών μεθόδων μέσω των οποίων έγινε ο χαρακτηρισμός διαφόρων εξεταζόμενων λιθότυπων.

3.2.1. Ψηφιακή Μικροσκοπία (DM)

Η Ψηφιακή Μικροσκοπία αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδο εξέτασης των υλικών, η οποία σε συνδυασμό με άλλες μη καταστρεπτικές μεθόδους, μπορεί να μας δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης των εξεταζόμενων υλικών. Ο μη καταστρεπτικός χαρακτήρας των μεθόδων αυτών αποτελεί σπουδαιότατο πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες μεθόδους εξέτασης των υλικών, αφού σε κατασκευές μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας, όπου επιβάλλεται η διάγνωση των τύπων φθοράς και η αντιμετώπιση αυτών, η δειγματοληψία υλικού για εργαστηριακές αναλύσεις είναι ιδιαίτερα δύσκολη ή και αδύνατη. Για το λόγο αυτό, οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών, καθίστανται μεγαλύτερης αξίας και χρησιμότητας. Το μικροσκόπιο αποτελεί φορητή διάταξη, με αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή, η επί τόπου εξέταση της επιφάνειας που μας ενδιαφέρει (π.χ. ολόκληρη η επιφάνεια ενός ιστορικού συνόλου) δίχως να απαιτείται η προ-κατεργασία ή αλλοίωση των ιστορικών υλικών.

Η Ψηφιακή Μικροσκοπία, χρησιμοποιείται στο εργαστήριο επιστήμης και τεχνικές των υλικών, για την επί τόπου ταξινόμηση δομικών υλικών, τον έλεγχο της ποιότητας σε δομικά υλικά, την εξέταση της μορφολογίας αρχιτεκτονικών επιφανειών, την αναγνώριση των τύπων φθοράς, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων εφαρμογών μεθόδων συντήρησης, καθαρισμού, στερέωσης και προστασίας. Επίσης, χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της μικροδομής του υλικού, την επί τόπου παρατήρηση σύνθετων υλικών (κονιάματος, κ.α.), διεπιφανειακών φαινομένων, κλπ. (14), (70), (71), (72). Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι (71):

- Λάμπα αλογόνου, που λειτουργεί στα 100W
- Έλεγχος έντασης φωτός

Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται από το χρώμα και το υλικό του αντικειμένου. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα.

- Σύστημα εστίασης
- Αντικειμενικοί φακοί

Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μπορεί να αλλάξει κανείς περισσότερους φακούς, με σκοπό να πάρει εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων (οι δυνατές λαμβανόμενες μεγεθύνσεις είναι x25, x50, x100). Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών. Στις αρχές λειτουργίας τους βασίζεται και η λειτουργία της μεθόδου.

Κατά τη διαδικασία της μικροσκοπικής εξέτασης το φως πρέπει να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος και να ανακλάται πίσω διαμέσου των αντικειμενικών φακών. Σε θέσεις πλάγιες σχετικά με τη δέσμη φωτός, χαρακτηριστικά της επιφάνειας εμφανίζουν μεγαλύτερο κοντράστ από την υπόλοιπη εικόνα, διότι ανακλάσεις με γωνίες μεγαλύτερες του μέτρου ικανότητας συλλογής φωτός, An , συνεπάγονται απώλειες φωτός. Συνεπώς, η μορφή της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και ο βαθμός τραχύτητας αυτής, αποτελούν σημαντική παράμετρο της μεθόδου, καθώς σε μια επίπεδη επιφάνεια ο φακός του μικροσκοπίου προσαρμόζεται πολύ καλύτερα, λαμβάνοντας έτσι εικόνες καλύτερης ποιότητας.

Το Ψηφιακό Μικροσκόπιο, όπως και το οπτικό μικροσκόπιο, χρησιμοποιεί ως φωτεινή πηγή λευκό φως, συγκεκριμένα λάμπα αλογόνου. Το λευκό φως χαρακτηρίζεται από μήκη κύματος από 400nm έως 760nm περίπου. Επειδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων κυμαίνονται από 0,15 έως 2nm, είναι δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερα, οι κρύσταλλοι αποτυπώνονται σαν συνεχές μέσον όταν φωτίζονται από το λευκό φως. Οι οπτικές ιδιότητες των άμορφων και των κρυσταλλικών σωμάτων οφείλονται στην αλληλεπίδραση τους με το προσπίπτον φως. Τα κύρια φαινόμενα που καθορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η απορρόφηση. Τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονται στην οπτική μικροσκοπία με βάση τις εξισώσεις Maxwell για ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Συγκεκριμένα, η φωτεινή πηγή περιγράφεται σαν ένας αρμονικός ταλαντωτής που χαρακτηρίζεται από τις μεταβολές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο. Όλες οι σχέσεις που διέπουν την οπτική μικροσκοπία βασίζονται στην πόλωση του φωτός που επιτυγχάνεται με τα πρίσματα Nicols. Στη ψηφιακή μικροσκοπία χρησιμοποιείται όμως, λευκό φως, το οποίο δεν είναι πολωμένο ούτε μονοχρωματικό, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η ποσοτικοποίηση των συμπερασμάτων που εξαγονται. Αυτό βέβαια δεν αναιρεί τη σημασία των ποιοτικών παρατηρήσεων (11), (71), (73).

Οι μεγεθύνσεις που μπορεί να αποδώσει το όργανο ποικίλουν ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο φακό. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα λήψης εικόνων 15, 50 και 100 φορές μεγαλύτερες της πραγματικής. Η χρήση κάποιου συγκεκριμένου φακού, ώστε να εξάγουμε την αντίστοιχη μεγέθυνση αποτελεί άμεση συνάρτηση του εξεταζόμενου υλικού (73), (72).

3.2.2. Θερμοβαρμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (TG/DTA)

Οι μέθοδοι θερμικής ανάλυσης μελετούν την συμπεριφορά ενός υλικού (φυσική ή χημική) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, όταν αυτό υποβάλλεται σε θερμοκρασιακό πρόγραμμα υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Το θερμοκρασιακό πρόγραμμα μπορεί να περιέχει ψύξη ή θέρμανση του δείγματος με καθορισμένο ρυθμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος, το οποίο ονομάζεται θερμογράφημα και είναι χαρακτηριστικό του κάθε υλικού. Με τη μελέτη του θερμογραφήματος λαμβάνονται πληροφορίες για την δομή του δείγματος και τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτό

κατά την εκάστοτε θερμοκρασιακή μεταβολή. Συνεπώς, αυτό το είδος μεθόδων ανάλυσης χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον χαρακτηρισμό υλικών (7), (73).

- ο Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)

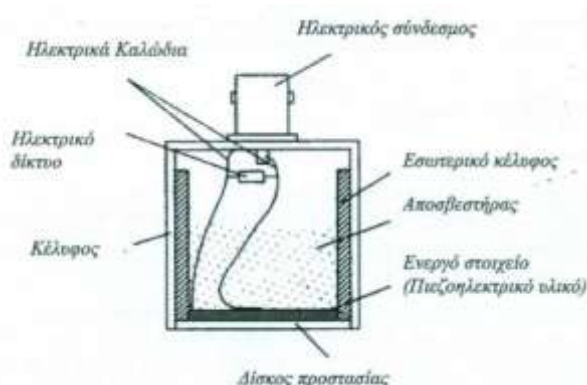
Όταν ένα υλικό υπόκειται σε θέρμανση ή ψύξη, λαμβάνουν χώρα χημικές ή φυσικές μεταβολές κατά την διάρκεια των οποίων παρατηρούνται ενδόθερμα ή εξώθερμα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Η Διαφορική Θερμική Ανάλυση ή DTA (Differential Thermal Analysis) μετρά την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εξεταζόμενης ουσίας και ενός υλικού αναφοράς (TR) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, όταν τα δυο υλικά υπόκεινται σε προγραμματισμένη θερμοκρασιακή μεταβολή (συνήθως θέρμανση, γραμμικά με το χρόνο). Το όργανο καταγράφει την διαφορά $\Delta T = T_S - T_R$ και την παρουσιάζει σε θερμογράφημα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του δείγματος (T_S). Οι κορυφές ενός θερμογραφήματος αντιστοιχούν σε φυσικές ή χημικές μεταβολές του υλικού κατά την θέρμανσή του και η κατεύθυνση των κορυφών αυτών εξαρτάται από το αν η μεταβολή είναι εξώθερμη ή ενδόθερμη. Φυσικές ενδόθερμες μεταβολές είναι η τήξη, η εξάτμιση, η εξάχνωση, η απορρόφηση και η εκρόφηση, ενώ εξώθερμες είναι η προσρόφηση και η κρυστάλλωση. Αντίστοιχα, χημικές ενδόθερμες μεταβολές αποτελούν η αφυδάτωση, η διάσπαση και η αναγωγή, ενώ η οξείδωση, ο πολυμερισμός και οι καταλυτικές αντιδράσεις αποτελούν εξώθερμες. Η DTA χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό σημείων βρασμού και τήξης, τον εντοπισμό μετασχηματισμών φάσεων, και γενικότερα για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς και της σύνθεσης υλικών (7), (73).

- ο Θερμοβαρυμετρική ανάλυση-Θερμοζυγός (TG)

Κατά την θερμοβαρυμετρική ανάλυση γίνεται συνεχής καταγραφή της μάζας του δείγματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου, καθώς το δείγμα υποβάλλεται σε αύξηση της θερμοκρασίας με συγκεκριμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα, σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Η διάταξη αποτελείται από αναλυτικό ζυγό τοποθετημένο μέσα σε φούρνο, του οποίου το εσωτερικό ρυθμίζεται σε αδρανή ή και δραστική ατμόσφαιρα, ανάλογα με το δείγμα. Το σύστημα αυτό συνδέεται με Η/Υ για έλεγχο του οργάνου και συλλογή δεδομένων, τα οποία παρουσιάζει σε μορφή θερμογραφήματος. Τα θερμογραφήματα ονομάζονται και καμπύλες θερμικής διάσπασης και είναι διαγράμματα που απεικονίζουν το ποσοστό απώλειας μάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Βασικότερες εφαρμογές της μεθόδου είναι η μελέτη θερμικής σταθερότητας και θερμικής διάσπασης, αλλά αποτελεί χρήσιμο εργαλείο και για τον χαρακτηρισμό υλικών. Με τη δημιουργία της διαφορικής καμπύλης (DTG) είναι δυνατός και ο ακριβής υπολογισμός της μεταβολής της μάζας και της αντίστοιχης θερμοκρασίας στην οποία έγινε η μεταβολή (7).

3.2.3. Υπερηχοσκόπηση

Η παραγωγή υπερήχων πραγματοποιείται από διατάξεις που ονομάζονται μορφοτροπίες (transducers). Το κύριο στοιχείο των περισσότερων ακουστικών μετατροπέων είναι το πιεζο-ηλεκτρικό υλικό, το οποίο έχει την ιδιότητα όταν παραμορφώνεται από εξωτερική μηχανική πίεση, να δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνεια του. Η φυσική αρχή λοιπόν, στην οποία στηρίζεται η μέθοδος της υπερηχοσκόπησης είναι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο όταν ένα πιεζο-ηλεκτρικό υλικό υποβληθεί σε εφελκυσμό ή θλίψη, τότε στις επιφάνειές του σχηματίζονται ηλεκτρικά φορτία. Αντίστροφα, αν στην κατάλληλα προσανατολισμένη επιφάνεια του πιεζο-ηλεκτρικού υλικού επιβληθεί ηλεκτρικό πεδίο, τότε αυτό εφελκύεται ή θλίβεται ανάλογα με τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Αν μάλιστα το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο, τότε μπορεί να προκληθεί ταλάντωση υπερηχητικής συχνότητας. Τα κυριότερα πιεζο-ηλεκτρικά υλικά είναι τα κεραμικά, όπως το $BaTiO_3$ ή το σύστημα στερεού διαλύματος $PbZrO_3-PbTiO_3$. Βέβαια υπάρχουν και πιεζο-ηλεκτρικοί κρύσταλλοι από χαλαζία αλλά λόγω κόστους και περιορισμένων ιδιοτήτων, δεν χρησιμοποιούνται πλέον (7), (72). Η διάταξη ενός τυπικού μορφοτροπέα περιλαμβάνει το ενεργό στοιχείο (πιεζο-ηλεκτρικό υλικό) που μετατρέπει ηλεκτρικά σήματα σε μηχανικές ταλαντώσεις (κατάσταση εκπεμπόμενου) ή μηχανικές ταλαντώσεις σε ηλεκτρικά σήματα (κατάσταση δέκτη) (74). Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα βασικά τμήματα μίας διάταξης τυπικού μορφοτροπέα.



Εικόνα 20. Διάταξη τυπικού μορφοτροπέα, που παρουσιάζει τα βασικά του τμήματα (72)

Αρκετοί παράγοντες, όπως τα υλικά, η μηχανική κατασκευή (επιφάνεια εκπομπής, μηχανική απόσβεση, κέλυφος κλπ), η ηλεκτρική κατασκευή και οι εξωτερικές μηχανικές και ηλεκτρικές συνθήκες φόρτισης μπορούν να επηρεάσουν τις επιδόσεις ενός μορφοτροπέα.

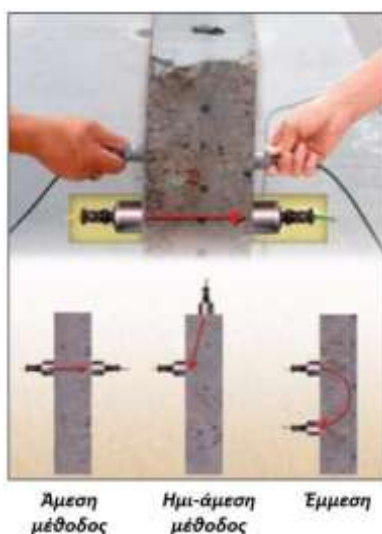
- ο Πειραματική διάταξη

Η μετρούμενη τιμή του χρόνου διάδοσης των κυμάτων τάσης διαμέσου του λίθου εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα του υπερήχου και από τους κενούς χώρους (μέγεθος

και πλήθος πόρων, ρωγμές) στο λίθο. Ενώ, είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση όσο το δυνατόν υψηλότερων συχνοτήτων, προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ανάλυση, υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της συχνότητας και της εξασθένησης του σήματος. Συνεπώς, η βέλτιστη συχνότητα προκύπτει σταθμίζοντας τους δύο περιοριστικούς παράγοντες, την εξασθένηση και τις απαιτήσεις σε ανάλυση. Υπάρχουν τρεις βασικές διατάξεις εφαρμογής της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης:

- Άμεση
- Ημι-άμεση
- Έμμεση

Η άμεση διάταξη, δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα, γιατί με την τοποθέτηση των ακροδεκτών αντικριστά αφενός επιτυγχάνεται η μεταφορά της μέγιστης ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη και αφετέρου είναι πιο ακριβής η μέτρηση του διανυόμενου μήκους εντός του ελεγχόμενου δοκιμίου σκυροδέματος από το υπερηχητικό κύμα. Στις περιπτώσεις της ημι-άμεσης και της έμμεσης διάταξης γίνεται η απλουστευτική παραδοχή ότι το διανυόμενο μήκος ισούται με την απόσταση των κέντρων των δύο ακροδεκτών (74). Στην παρακάτω εικόνα γίνεται μία αναπαράσταση των βασικών διατάξεων εφαρμογής της μεθόδου, όπως αυτές προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 21. Αναπαράσταση των βασικών διατάξεων εφαρμογής της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης (72)

- Μέθοδος ταχύτητας μετάδοσης υπερήχων (άμεση μέθοδος υπερηχοσκόπησης)

Η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων αποτελεί καλή ένδειξη της φυσικο – μηχανικής συμπεριφοράς των λίθων. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η συσκευή PUNDIT, ως μη καταστρεπτική μέθοδος. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος του άξονα του πυρήνα του δείγματος και μετρείται ο χρόνος μετάδοσης παλμού πηγής 54khz. Λιπαντική ύλη, καλυμμένη με ειδική μεμβράνη χρησιμοποιείται ως συνδετικό μέσο για την αύξηση της ηχητικής επαφής μεταξύ του δείγματος και του μετατροπέα. Το όργανο διαβαθμίζεται

με πρότυπο αλουμινίου. Διορθώσεις του πάχους και του χρόνου μετάδοσης υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ του πραγματικού και των μετρούμενων χρόνων. Η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας του λίθου, όπως με το λόγο Poisson και με το μέτρο Young. Στην εν λόγω μέθοδο χρησιμοποιούνται κανονικοποιημένα δοκίμια, είτε κυλινδρικά, είτε κυβικά. (7), (72).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, με γνώμονα τη ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων σε ένα επίπεδο κάθε κυβικού δοκιμίου, μελετήθηκε η αντοχή κι η ανθεκτικότητα αυτών για κάθε εξεταζόμενο λιθότυπο.

3.2.4. Δοκιμές Εμβάπτισης – Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού & ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό

- Ανοιχτό πορώδες

Ανοιχτό πορώδες ονομάζεται το σύνολο των ανοιχτών πόρων (75).

- Ποσοστό ροφημένης υγρασίας μέσω εμβάπτισης (Mi%)

Ποσοστό ροφημένης υγρασίας μέσω εμβάπτισης είναι η ποσότητα του νερού που ροφάται από το βυθιζόμενο λίθο σε απιονισμένο νερό, σε πίεση και θερμοκρασία δωματίου, μετρούμενη στα βέλτιστα χρονικά διαστήματα, εκφρασμένη ως το ποσοστό της ξηρής μάζας του δείγματος (75).

- Υδατική χωρητικότητα μέσω απορρόφησης (WAC)

Η υδατική χωρητικότητα μέσω απορρόφησης είναι ίση με τη μέγιστη ποσότητα του νερού που απορροφάται από ένα υλικό σε πίεση και θερμοκρασία δωματίου, κάτω από συνθήκες κορεσμού, εκφρασμένη ως το ποσοστό της ξηρής μάζας του δείγματος (75).

- Όγκος ανοικτών πόρων (V_{op}),

Ο όγκος των ανοικτών πόρων ισούται με το συνολικό όγκο του νερού που απορροφάει το δείγμα. Επειδή η πυκνότητα του νερού θεωρείται 1 gr/cm^3 στους 4°C , η διαφορά του βάρους του δείγματος πριν και μετά την κατάσταση κορεσμού αυτού σε νερό, αποτελεί έκφραση του όγκου των ανοικτών πόρων (75).

Ο προσδιορισμός της υδαταπορροφητικής ικανότητας των λίθων αποτελεί μία πολύ χρήσιμη εργαστηριακή αξιολόγηση των λίθων με σκοπό τον χαρακτηρισμό των πόρων του υλικού, την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας του υλικού στη φθορά και την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων συντήρησης (76).

Πειραματική διαδικασία

Αρχικά, τα δείγματα ξηπλένονται με απιονισμένο νερό, με σκοπό την απομάκρυνση των σωματιδίων σκόνης και άλλων επικαθίσεων στην επιφάνεια του δείγματος. Στη συνέχεια, θερμαίνονται στο φούρνο σε θερμοκρασία 60°C, για 24 ώρες. Έπειτα, τοποθετούνται στον ξηραντήρα, το κάτω μέρος του οποίου καλύπτεται με αφυδατωμένη silica, έως ότου αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου. Τα δείγματα ζυγίζονται κάθε μισή ώρα. Η διαδικασία ξήρανσης διαρκεί έως ότου η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων της μάζας να μην ξεπερνά το 0,1%. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της ξήρανσης, καταγράφεται η τελική σταθερή μάζα, m_0 .

Ύστερα, τα δείγματα τοποθετούνται σε γυάλινους ογκομετρικούς κυλίνδρους και σταδιακά καλύπτονται με απιονισμένο νερό έως ότου η στάθμη του νερού ξεπεράσει την επιφάνεια του δείγματος κατά 2cm. Μέσα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, τα δείγματα εξάγονται από τα δοχεία βύθισης και αφού πρώτα απομακρυνθούν τα επιφανειακά νερά με απορροφητικό χαρτί, καταγράφεται η μάζα των νωπών δειγμάτων, m_i . Τα χρονικά διαστήματα που κρίνεται απαραίτητη η μέτρηση της μάζας των δοκιμών, κατά τις πρώτες 24 ώρες της εμβάπτισης, εξαρτώνται από τον απορροφητικό χαρακτήρα του δείγματος. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τους λίθους, τα δοκίμια λογίζεται απαραίτητο να ζυγίζονται μετά τα πρώτα πέντε λεπτά εμβάπτισης αυτών και έπειτα κάθε μία ώρα μέχρι το πέρας των τριών πρώτων ωρών εμβάπτισης. Στη συνέχεια, τα δοκίμια ζυγίζονται μετά από οκτώ ώρες εμβάπτισης και έπειτα ανά 24 ώρες έως ότου η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων ζύγισης, να μην είναι μεγαλύτερη του 1%.

Στη συνέχεια, όταν πλέον τα δείγματα έχουν αποκτήσει την τελική σταθερή μάζα m_s , εξάγονται από το λουτρό και υπολογίζεται ο φαινόμενος όγκος τους, V_a . Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας το συνολικό όγκο που εκτρέπει το δοκίμιο, όταν αυτό τοποθετηθεί σε ποτήρι ζέσεως με νερό. Τέλος, τα δοκίμια θερμαίνονται πάλι στο φούρνο σε θερμοκρασία 60°C και ξηραίνονται έως ότου αποκτήσουν τελική σταθερή μάζα m_d (75), (76).

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Οι μετρήσεις της υδατικής απορρόφησης ($M_i\%$), της υδατικής χωρητικότητας (WAC) και του ανοιχτού πορώδους (Vop), πραγματοποιούνται βάσει προτυποποιημένης διαδικασίας και σύμφωνα με τους παρακάτω υπολογισμούς (75).

- Υδατική Απορρόφηση ($M_i\%$)

$$M_i\% = \left(\frac{m_i - m_0}{m_0} \right) \cdot 100$$

Εξίσωση 6.

Όπου :

m_i = μάζα νωπού δείγματος σε χρόνο t_i (gr)

m_0 = μάζα ξηρού δείγματος (gr)

- Υδατική χωρητικότητα (WAC)

$$WAC = \left(\frac{m_s - m_d}{m_d} \right) \cdot 100$$

Εξίσωση 7.

Όπου :

m_s = μάζα δείγματος με το μέγιστο ποσοστό απορρόφησης (gr)

m_d = μάζα ξηρού δείγματος, μετά την εμβάπτιση (gr)

- Όγκος ανοικτών πόρων (V_{op})

$$V_{op} = m_s - m_d$$

Εξίσωση 8.

Όπου:

V_{op} = όγκος των ανοιχτών πόρων (cm^3)

m_s = μάζα δείγματος με το μέγιστο ποσοστό απορρόφησης (gr)

m_d = μάζα ξηρού δείγματος, μετά την εμβάπτιση (gr)

- Ανοιχτό πορώδες (%)

$$open\ porosity\ \% = \frac{V_{op}}{V_a} \cdot 100$$

Εξίσωση 9.

Όπου:

V_{op} = όγκος ανοιχτών πόρων (cm^3)

V_a = φαινόμενος όγκος (cm^3)

- Φαινόμενη πυκνότητα (ρ_a)

$$\rho_a = \frac{m_d}{V_a}$$

Εξίσωση 10.

Όπου:

m_d = μάζα ξηρού δείγματος, μετά την εμβάπτιση (gr)

V_a = φαινόμενος όγκος (cm^3)

3.2.5. Χρωματομετρία

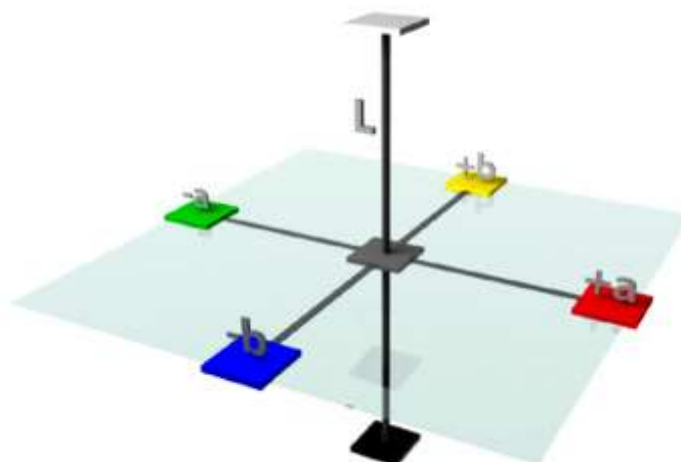
Το χρώμα είναι μια ιδιότητα των σωμάτων, η αντίληψη της οποίας, δημιουργείται όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο ορατό φάσμα φτάνει από το σώμα στο μάτι, στον αμφιβληστροειδή χιτώνα και αισθητήρια νεύρα μετατρέπουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα και επιτρέπουν στον εγκέφαλο να αντιληφθεί το χρώμα. Η ικανότητα ακριβούς αντίληψης της ιδιότητας αυτής εξαρτάται όχι μόνο από την ακρίβεια διέγερσης των φωτοευαίσθητων κυττάρων του παρατηρητή, αλλά και από τις συνθήκες παρατήρησης, για παράδειγμα τον φωτισμό.

Η χρωματομετρία ως επιστήμη έκανε την εμφάνισή της το 1930 από την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) με την διεξαγωγή πειραμάτων οπτικής. Τα χρωματομετρικά συστήματα της CIE είναι τα μόνα παγκοσμίως αποδεκτά για την μέτρηση του χρώματος με συνέπεια όλα τα διεθνή πρότυπα να είναι βασισμένα σε αυτά που ορίζονται από αυτή (77). Τα συστήματα της CIE βασίζονται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την έκφραση του χρώματος ενός σώματος, δηλαδή χώρων που σε κάθε χρώμα αντιστοιχούν αριθμητικές συντεταγμένες. Ένα από τα σημαντικότερα μοντέλα που εισήγαγε η CIE είναι το μοντέλο RGB με βάση την αρχή των τριών διεγέρσεων του ανθρώπινου οφθαλμού στο κόκκινο (RED) στο πράσινο (GREEN) και στο μπλε (BLUE).

Στην παρούσα εργασία τα πειράματα διεξήχθησαν με το μοντέλο CIE Lab, το οποίο παρουσίασε η CIE Lab το 1976 (78). Το μοντέλο CIE Lab πρόκειται για ένα ομοιόμορφο οπτικά χρωματικό χώρο ο οποίος προσομοιάζει καλύτερα από όλα τα χρωματικά συστήματα ή μοντέλα την ανθρώπινη αντίληψη των χρωματικών διαφορών. Αποτελεί ένα υπερσύνολο όλων των άλλων χρωματικών μοντέλων. Το κάθε χρώμα περιγράφει από 3 κανάλια ή συντεταγμένες ή παράγοντες όπως και στον χρωματικό χώρο RGB, οι οποίες είναι οι εξής (78), (79), (80):

- L^* (Lightness): αποθηκεύει όλη την πληροφορία φωτεινότητας της εικόνας παίρνοντας τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό)
- a^* : θετικές τιμές του οποίου αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κόκκινου και αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του πράσινου χωρίς όριο στις αριθμητικές τους τιμές
- b^* : θετικές τιμές του οποίου αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κίτρινου και αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του μπλε. Και σε αυτόν τον παράγοντα δεν υπάρχει όριο στις αριθμητικές τιμές που μπορεί να πάρει.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχηματικά το μοντέλο χρωματομετρίας CIELab.



Εικόνα 22. Χρωματικό μοντέλο CIELab (81)

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτού του μοντέλου είναι η ανεξαρτησία των πληροφοριών φωτεινότητας και χρώματος που δίνει πάρα πολλές δυνατότητες. Ο παράγοντας L^* δηλαδή περιγράφει την άσπρη-μαύρη εκδοχή του προς εξέταση αντικειμένου με διευρυμένο συνήθως φάσμα. Τέλος πολύ σημαντικό είναι ότι το μοντέλο CIELab είναι «device independent», δηλαδή ανεξάρτητο από ιδιότητες συσκευών καταγραφής ή απεικόνισης κάτι που δεν συμβαίνει με τα υπόλοιπα χρωματικά μοντέλα.

Στην παρούσα εργασία, όπου είναι επιθυμητή η εκτίμηση της μεταβολής του χρώματος στα δοκίμια κάθε λιθότυπου, η διαφορά χρώματος υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Εξίσωση 11.

Όπου:

$$\Delta L = L_{\text{μετά τη φωτιά}} - L_{\text{πριν τη φωτιά}} \quad \text{Εξίσωση 12.}$$

$$\Delta a = a_{\text{μετά τη φωτιά}} - a_{\text{πριν τη φωτιά}} \quad \text{Εξίσωση 13.}$$

$$\Delta b = b_{\text{μετά τη φωτιά}} - b_{\text{πριν τη φωτιά}} \quad \text{Εξίσωση 14.}$$

4. Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

4.1. Παρουσίαση Δοκιμών-Δομικών Λίθων – Μακροσκοπική & Μικροσκοπική Ανάλυση με Ψηφιακή Μικροσκοπία, DM

Τα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν στις αναλυτικές τεχνικές που αναπτύχθηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται περιγραφικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2. Περιγραφή εξεταζόμενων δοκιμών του λιθότυπου Istria

| Κωδικός | Περιγραφή |
|-----------|---|
| A1r | Δοκίμιο Αναφοράς λιθότυπου Istria |
| A2r | Δοκίμιο Αναφοράς λιθότυπου Istria |
| A3r | Δοκίμιο Αναφοράς λιθότυπου Istria |
| A1_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| A2_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| A3_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| A4_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| A5_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| A6_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| A19_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| A20_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| A21_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| A22_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| A23_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| A24_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| A7_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| A8_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| A9_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| A10_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| A11_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| A18_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| A12_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| A13_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| A14_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| A15_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| A16_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| A17_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |

Πίνακας 3. Περιγραφή εξεταζόμενων δοκιμών του μαρμάρου Carrara

| Κωδικός | Περιγραφή |
|------------------|---|
| B1r | Δοκίμιο Αναφοράς μαρμάρου Carrara |
| B2r | Δοκίμιο Αναφοράς μαρμάρου Carrara |
| B3r | Δοκίμιο Αναφοράς μαρμάρου Carrara |
| B7_300°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| B8_300°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| B9_300°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| B10_400°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| B11_400°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| B12_400°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| B1_600°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| B2_600°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| B3_600°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| B13_600°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| B14_600°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| B15_600°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| B4_900°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| B5_900°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| B6_900°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| B16_900°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| B17_900°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| B18_900°C | Δοκίμιο μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |

Πίνακας 4. Περιγραφή εξεταζόμενων δοκιμών του λιθότυπου Lesce

| Κωδικός | Περιγραφή |
|-----------|--|
| C1r | Δοκίμιο Αναφοράς λιθότυπου Lesce |
| C2r | Δοκίμιο Αναφοράς λιθότυπου Lesce |
| C3r | Δοκίμιο Αναφοράς λιθότυπου Lesce |
| C1_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| C2_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| C3_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| C4_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| C5_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| C6_300°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 300°C για 6 ώρες |
| C7_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| C8_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| C9_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| C10_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| C11_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| C12_400°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 400°C για 6 ώρες |
| C13_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| C14_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| C15_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| C16_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| C17_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| C18_600°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες |
| C19_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| C20_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| C21_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| C22_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| C23_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |
| C24_900°C | Δοκίμιο λιθότυπου Lesce μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες |

Για τη μελέτη των μορφολογικών χαρακτηριστικών των τριών ειδών λίθων, εφαρμόστηκε η μέθοδος της Ψηφιακής Μικροσκοπίας (DM). Χρησιμοποιήθηκαν οι συσκευές AM3113T Dino-Lite Premier στο εργαστήριο του πανεπιστημίου Ca' Foscari και i-score, Moritex στο εργαστήριο του Ε.Μ.Π. Η λήψη των εικόνων έγινε αποκλειστικά σε μεγέθυνση 50x. Εκτελέστηκαν 2 μετρήσεις σε 1 επιφάνεια για κάθε δοκίμιο. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι επιφάνειες με τις λιγότερες αλλοιώσεις. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αυτοσχέδια «μάσκα» με διαστάσεις 5cm x 5cm, ώστε να διακρίνονται τα ακριβή σημεία που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η «μάσκα» που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.












Εικόνα 23. «Μάσκα» εντοπισμού σημείων που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις



















Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες για κάθε δοκίμιο πριν και μετά τη θέρμανση στο φούρνο, καθώς και γίνεται σύντομος σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.



















4.1.1. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Istria

Πίνακας 5. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών αναφοράς του λιθότυπου Istria

| Κωδικός | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|---|--|---|
| | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| A1r |  |  |  |
| A2r |  |  |  |
| A3r |  |  |  |

Πίνακας 6. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 300°C




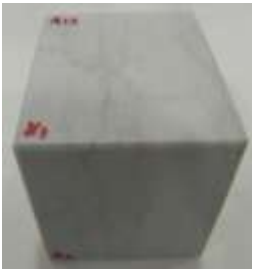








| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|-----------------------|---|--|---|--------|
| | | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| A1 | Πριν τη φωτιά |  |  |  | |
| | Μετά τη φωτιά (300°C) |  |  |  | |
| A2 | Πριν τη φωτιά |  |  |  | |
| | Μετά τη φωτιά (300°C) |  |  |  | |
| A3 | Πριν τη φωτιά |  |  |  | |
| | Μετά τη φωτιά (300°C) |  |  |  | |



















| | | | | |
|----|------------------------------|---|--|---|
| A4 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  |
| A5 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  |
| A6 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  |







Ύστερα από τη θέρμανση του λίθου Istria στους 300°C, μακροσκοπικά δεν παρατηρείται καμία αλλαγή ως προς την υφή και τη μορφολογία των δοκιμών. Αντίθετα, μικροσκοπικά παρατηρείται χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα τα δοκίμια φαίνεται να

αποκτούν πιο ερυθρή χροιά. Επίσης, **οι φλέβες, που παρατηρούνται, μετά την επίδραση της φωτιάς απέκτησαν πιο ερυθρή χροιά**, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται θετική μεταβολή της χρωματικής παραμέτρου a ($\Delta a > 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρώματος του λιθότυπου προς το κόκκινο. **Η παρατηρούμενη ερυθρή χροιά των δοκιμών αποδίδεται στην οξείδωση των κλασμάτων του σιδήρου, που βρίσκονται στο λιθότυπο Istria.**

Πίνακας 7. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 400°C



















| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| A19 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |
| A20 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |













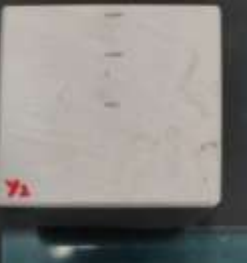





| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| A21 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |
| A22 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |
| A23 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |

| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| A24 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |

Ύστερα από τη θέρμανση του λίθου Istria στους 400°C μακροσκοπικά δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στη μορφολογία, ενώ **ο λιθότυπος φαίνεται να αποκτάει πιο γκριζα χροιά**. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται μείωση της χρωματικής παραμέτρου L ($\Delta L < 0$) και κατά συνέπεια μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λίθου. Μικροσκοπικά παρατηρείται χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα η επιφάνεια φαίνεται να γίνεται πιο μπλε, ενώ οι παρατηρούμενες φλέβες φαίνεται να αποκτούν καστανέρυθρη χροιά. Αυτό δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται αρνητική μεταβολή για τις χρωματικές παραμέτρους a και b ($\Delta a < 0$ και $\Delta b < 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρωματικής χροιάς της επιφάνειας του λίθου προς το πράσινο και το μπλε αντίστοιχα. Αυτό βέβαια πιθανώς οφείλεται στο ότι το όργανο του εργαστηρίου του ΕΜΠ, όπου μετρήθηκαν τα δοκίμια μετά την είσοδό τους στον φούρνο, είναι διαφορετικό από αυτό του εργαστηρίου του Ca' Foscari, όπου μετρήθηκαν τα δοκίμια πριν την είσοδό τους στον φούρνο.

Πίνακας 8. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 600°C













| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|-----------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| A7 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (600°C) |  |  |  |
| A8 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (600°C) |  |  |  |
| A9 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (600°C) |  |  |  |



















| | | | | |
|-----|-----------------------|---|--|---|
| A10 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (600°C) |  |  |  |
| A11 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (600°C) |  |  |  |
| A18 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (600°C) |  |  |  |





Μετά τη θέρμανση του λίθου Istria στους 600°C, μακροσκοπικά **παρατηρείται έντονη γκρίζα χροιά**, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται μείωση της χρωματικής παραμέτρου L ($\Delta L < 0$) και

κατά συνέπεια μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λίθου. Η παρατηρούμενη γκριζα χροιά αποδίδεται στην αποσύνθεση του CaCO_3 . Μικροσκοπικά φαίνεται το δοκίμιο να έχει αποκτήσει πιο γκριζο-μπλε χρωματικά χαρακτηριστικά, γεγονός που δε συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται αρνητική μεταβολή των χρωματικών παραμέτρων a και b ($\Delta a < 0$ και $\Delta b < 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρωματικής χροιάς της επιφάνειας του λίθου προς το πράσινο και το μπλε αντίστοιχα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι το όργανο του εργαστηρίου του ΕΜΠ, με το οποίο μετρήθηκαν τα δοκίμια μετά την είσοδό τους στον φούρνο, είναι διαφορετικό από αυτό του εργαστηρίου του Ca Foscarì, όπου μετρήθηκαν τα δοκίμια πριν την είσοδό τους στον φούρνο. Ακόμη, τόσο μικροσκοπικά όσο και μακροσκοπικά παρατηρούνται ρωγμές, οι οποίες δεν υπήρχαν πριν την είσοδο των δοκιμίων στο φούρνο.

Πίνακας 9. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| A12 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  |  |  |
| A13 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  |  |  |










| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| A14 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  |  |  |
| A15 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  |  |  |
| A16 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  |  |  |

| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| A17 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  |  |  |

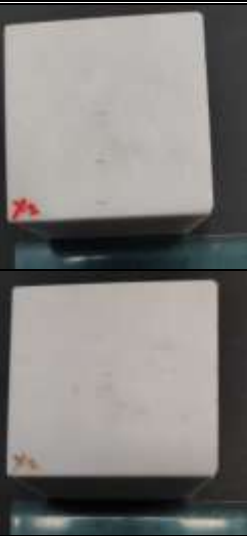

















Μετά τη θέρμανση του λίθου Istria στους 900°C, μακροσκοπικά παρατηρείται πλήρης παραμόρφωση των δοκιμίων, με ταυτόχρονη απώλεια αυθεντικού υλικού στις ακμές και τις γωνίες τους. Γίνεται φανερή η διάρρηξη ρωγμών, γεγονός που υποδεικνύει την απώλεια αυθεντικού υλικού στις περιοχές εμφάνισής τους. Με τον όρο «αυθεντικό υλικό» ορίζεται η χημική σύσταση και η δομή του λίθου-δοκιμίου. Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 1., στους ασβεστόλιθους σε θερμοκρασίες >800°C, μέρος του CaCO_3 , που δεν έχει μετατραπεί σε CO , αποσυντίθεται και δημιουργείται γκρίζα-λευκή σκόνη, γεγονός που μπορεί να εξηγήσει την απώλεια τμήματος (μικρή ή μεγαλύτερη) του υλικού του κυβικού δοκιμίου, αυτού δηλαδή που ορίζεται «αυθεντικό υλικό». Οι παρατηρούμενες ρωγμές έχουν πλέον αποκτήσει καστανέρυθρη χροιά, γεγονός που δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται αρνητική μεταβολή των χρωματικών παραμέτρων a και b ($\Delta a < 0$ και $\Delta b < 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρωματικής χροιάς της επιφάνειας του λίθου προς το πράσινο και το μπλε αντίστοιχα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι το όργανο του εργαστηρίου του ΕΜΠ, με το οποίο μετρήθηκαν τα δοκίμια μετά την είσοδό τους στον φούρνο, είναι διαφορετικό από αυτό του εργαστηρίου του Ca Foscarì, όπου μετρήθηκαν τα δοκίμια πριν την είσοδό τους στον φούρνο. Τέλος, είναι φανερή η πλήρης αισθητική και γεωμετρική αλλοίωση των δοκιμίων.

4.1.2. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο μάρμαρο Carrara

Πίνακας 10. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων αναφοράς του μαρμάρου Carrara













| Κωδικός | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|---|---|---|
| | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| B1r |  |  |  |
| B2r |  |  |  |
| B3r |  |  |  |

Πίνακας 11. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 300°C

| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|-----------------------|---|--|---|--------|
| | | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| B7 | Πριν τη φωτιά |  |  |  | |
| | Μετά τη φωτιά (300°C) |  |  |  | |
| B8 | Πριν τη φωτιά |  |  |  | |
| | Μετά τη φωτιά (300°C) |  |  |  | |
| B9 | Πριν τη φωτιά |  |  |  | |
| | Μετά τη φωτιά (300°C) |  |  |  | |

Ύστερα από τη θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 300°C, μακροσκοπικά δεν παρατηρείται καμία αλλαγή ως προς την υφή και τη μορφολογία των δοκιμών. Αντίθετα, μικροσκοπικά παρατηρείται πως τα προσανατολισμένα χαράγματα του εργαλείου κοπής δεν διακρίνονται στον ίδιο βαθμό. Με βάση αυτή την παρατήρηση, υποθέτουμε πως επέρχεται λείανση των χαραγμάτων αυτών και κατά συνέπεια είναι πιθανή μικρή απώλεια αυθεντικού υλικού.







Πίνακας 12. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 400°C



















| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| B10 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |
| B11 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |













| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| B12 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |

Ύστερα από τη θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 400°C, μακροσκοπικά δεν παρατηρείται καμία αλλαγή ως προς την υφή και τη μορφολογία των δοκιμίων. Παρόλα αυτά, μικροσκοπικά παρατηρείται **πάλι πως τα προσανατολισμένα χαράγματα του εργαλείου κοπής δεν διακρίνονται στον ίδιο βαθμό και άρα υποθέτουμε πως επέρχεται λείανση των χαραγμάτων αυτών, δηλαδή πιθανή μικρή απώλεια αυθεντικού υλικού**. Επίσης, φαίνεται, ότι στα δοκίμια μετά τη θέρμανση, αυξάνονται οι κόκκοι υψηλής λαμπρότητας, γεγονός που συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται θετική μεταβολή της χρωματικής παραμέτρου L ($\Delta L > 0$), δηλαδή αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του μαρμάρου.

Πίνακας 13. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 600°C

















| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| B1 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
















| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| B2 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
| B3 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
| B13 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |

| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| B14 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
| B15 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |

Ύστερα από τη θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 600°C, μακροσκοπικά γίνεται εμφανής η αλλοίωση τόσο των γεωμετρικών όσο και των αισθητικών στοιχείων του μαρμάρου. Παρατηρείται η απώλεια ακμών και γωνιών, καθώς και η αλλοίωση της επιφανειακής μικροδομής των δοκιμίων. Μικροσκοπικά παρατηρείται χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα η επιφάνεια φαίνεται να γίνεται πιο μπεζ, γεγονός που δε συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται θετική μεταβολή της χρωματικής παραμέτρου a και αρνητική μεταβολή της χρωματικής παραμέτρου b ($\Delta a < 0$ και $\Delta b < 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρωματικής χροιάς της επιφάνειας του λίθου προς το κόκκινο και το μπλε αντίστοιχα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι το όργανο του εργαστηρίου του ΕΜΠ, με το οποίο μετρήθηκαν τα δοκίμια μετά την είσοδό τους στον φούρνο, είναι διαφορετικό από αυτό του εργαστηρίου του Ca Foscarì, όπου μετρήθηκαν τα δοκίμια πριν την είσοδό τους στον φούρνο.

Πίνακας 14. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|--|---|
| | | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| B4 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  | |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> |  | |  |  |
| B5 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  | |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - | |  |  |
| B6 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  | |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - | |  |  |










| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| B16 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - |  |  |
| B17 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - |  |  |
| B18 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - |  |  |

Ύστερα από τη θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 900°C, μακροσκοπικά φαίνεται να έχουμε πλήρη παραμόρφωση των δοκιμίων, καθώς και απώλεια του αυθεντικού τους υλικού. Υπάρχει συνολική αλλοίωση της επιφανειακής μικροδομής του λίθου, καθώς και των γεωμετρικών και αισθητικών του χαρακτηριστικών. Επίσης,



















παρατηρείται απώλεια αυθεντικού υλικού στις ακμές και τις γωνίες των δοκιμίων. Μικροσκοπικά παρατηρείται χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα η επιφάνεια φαίνεται να γίνεται πιο μπεζ. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται θετική μεταβολή των χρωματικών παραμέτρων a και b ($\Delta a > 0$ και $\Delta b > 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρώματος της επιφάνειας του λιθότυπου προς το κόκκινο και το κίτρινο αντίστοιχα. Τέλος, **παρατηρούνται λευκές περιοχές, διαφορετικής υφής, στην επιφάνεια του δοκιμίου,** που πιθανόν οφείλονται σε εναπομείναν υλικό των τμημάτων που έχουν απομακρυνθεί από το δοκίμιο, εξαιτίας της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας.



















4.1.3. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Lecce

Πίνακας 15. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών αναφοράς του λιθότυπου Lecce

| Κωδικός | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|---|--|---|
| | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| C1r |  |  |  |
| C2r |  |  |  |
| C3r |  |  |  |

Πίνακας 16. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Lesce μετά την έκθεση στους 300°C













| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|---|--------|
| | | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| C1 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  | |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  | |
| C2 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  | |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  | |
| C3 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  | |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  | |



















| | | | | |
|----|------------------------------|---|--|---|
| C4 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  |
| C5 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  |
| C6 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (300°C)</u> |  |  |  |


Ύστερα από τη θέρμανση του λίθου Lecce στους 300°C, μακροσκοπικά δεν παρατηρείται καμία αλλαγή ως προς την υφή και τη μορφολογία των δοκιμίων. Αντίθετα, μικροσκοπικά παρατηρείται χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα τα δοκίμια φαίνεται

να αποκτούν πιο καστανέρυθρη χροιά, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται θετική μεταβολή των χρωματικών παραμέτρων a και b ($\Delta a > 0$ και $\Delta b > 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρώματος της επιφάνειας του λιθότυπου προς το κόκκινο και το κίτρινο αντίστοιχα. Η παρατηρούμενη ερυθρή χροιά των δοκιμών αποδίδεται στην οξείδωση των κλασμάτων του σιδήρου, που βρίσκονται στο λιθότυπο Lesce.

Πίνακας 17. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Lesce μετά την έκθεση στους 400°C

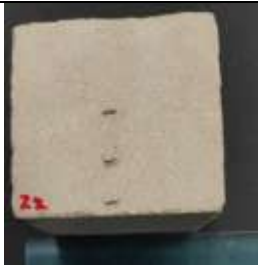





| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|-----------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| C7 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (400°C) |  |  |  |
| C8 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (400°C) |  |  |  |







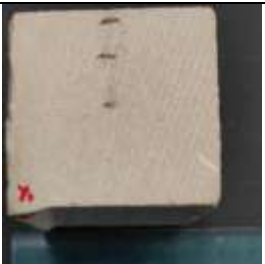











| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| C9 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |
| C10 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |
| C11 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |













| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| C12 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (400°C)</u> |  |  |  |

Ύστερα από τη θέρμανση του λίθου Lesce στους 400°C, μακροσκοπικά δεν παρατηρούνται ουσιαστικές αλλαγές ως προς την υφή και τη μορφολογία των δοκιμίων. Αντίθετα, μικροσκοπικά **παρατηρείται πάλι χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα τα δοκίμια φαίνεται να αποκτούν πιο καστανέρυθρη χροιά**. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται θετική μεταβολή της χρωματικής παραμέτρου a ($\Delta a > 0$), δηλαδή μετατόπιση της χρώματος της επιφάνειας του λιθότυπου προς το κόκκινο.

Πίνακας 18. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων του λιθότυπου Lesce μετά την έκθεση στους 600°C














| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|------------------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| C13 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |







| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| C14 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
| C15 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
| C16 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |

| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| C17 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |
| C18 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (600°C)</u> |  |  |  |

Μετά τη θέρμανση του λίθου Lesce στους 600°C, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά παρατηρείται χρωματική αλλοίωση των δοκιμών. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια φαίνεται από μπλε να αποκτούν μια πιο γκρίζα χροιά, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας, όπου παρατηρείται μείωση της χρωματικής παραμέτρου L ($\Delta L < 0$) και κατά συνέπεια μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λίθου. Η παρατηρούμενη γκρίζα χροιά αποδίδεται στην αποσύνθεση του CaCO_3 . Δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της γεωμετρίας των δοκιμών, εκτός από μικρο-απώλειες στις ακμές τους, οι οποίες δείχνουν να στρογγυλοποιούνται.

Πίνακας 19. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Lesce μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | Κατάσταση | Φωτογραφία | Ψηφιακή Μικροσκοπία | |
|---------|-----------------------|---|--|---|
| | | | Θέση 1 | Θέση 2 |
| C19 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (900°C) |  | - | - |
| C20 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (900°C) | - | - | - |
| C21 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (900°C) | - | - | - |
| C22 | Πριν τη φωτιά |  |  |  |
| | Μετά τη φωτιά (900°C) | - | - | - |

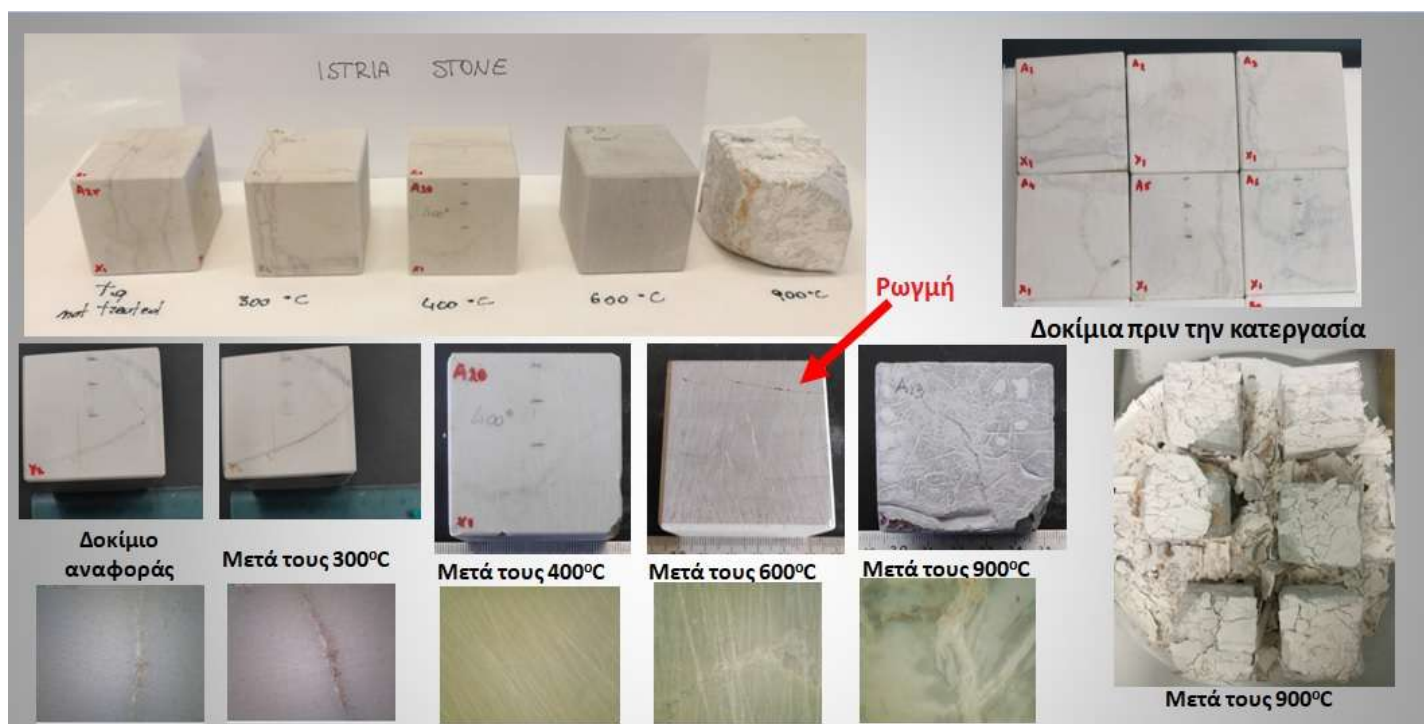
| | | | | |
|-----|------------------------------|---|--|---|
| C23 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - | - | - |
| C24 | <u>Πριν τη φωτιά</u> |  |  |  |
| | <u>Μετά τη φωτιά (900°C)</u> | - | - | - |

Μετά τη θέρμανση του λίθου Leccese στους 900°C, **έχουμε πλήρη κατάρρευση των δοκιμίων** όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου απεικονίζονται τα έξι δοκίμια που εξήχθησαν από το φούρνο μετά τη θέρμανσή τους στους 900°C.



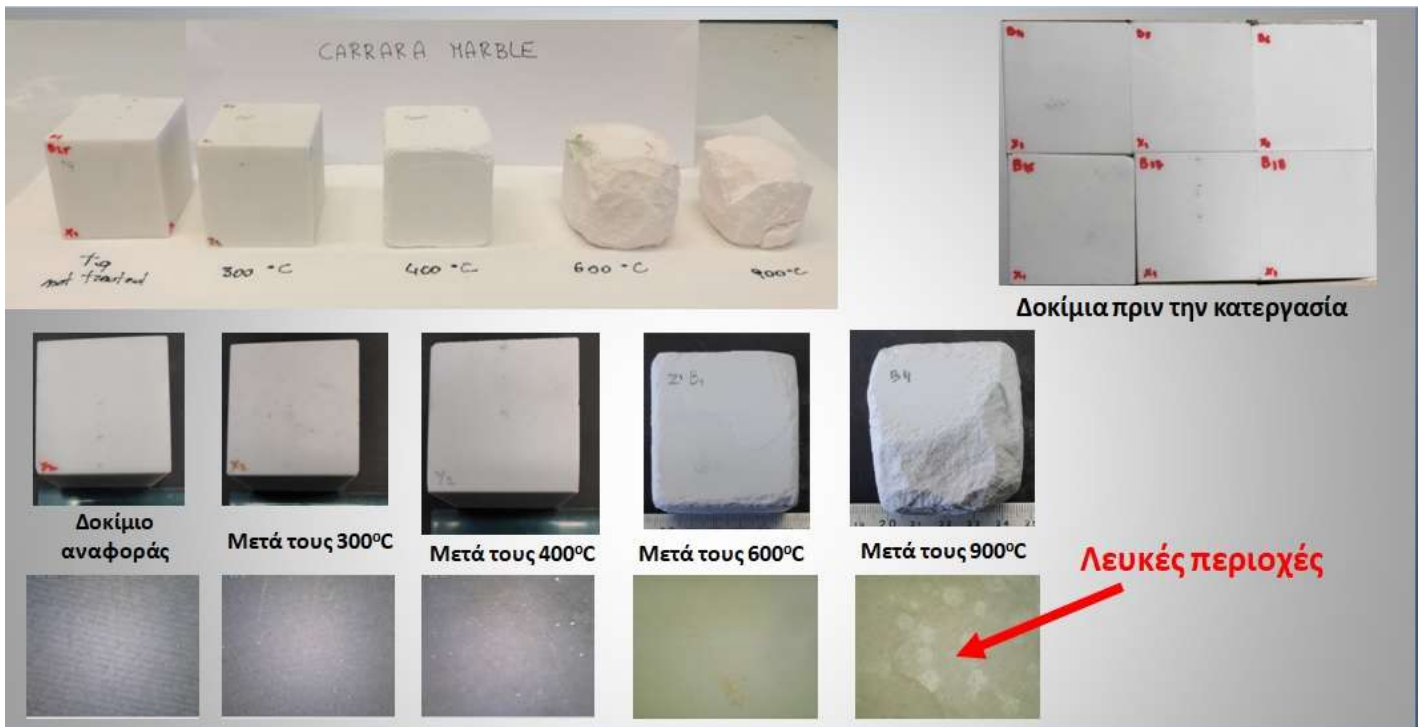
Εικόνα 24. Λιθότυπος Leccese μετά την έκθεση στους 900°C

4.1.4. Μερικά Συμπεράσματα



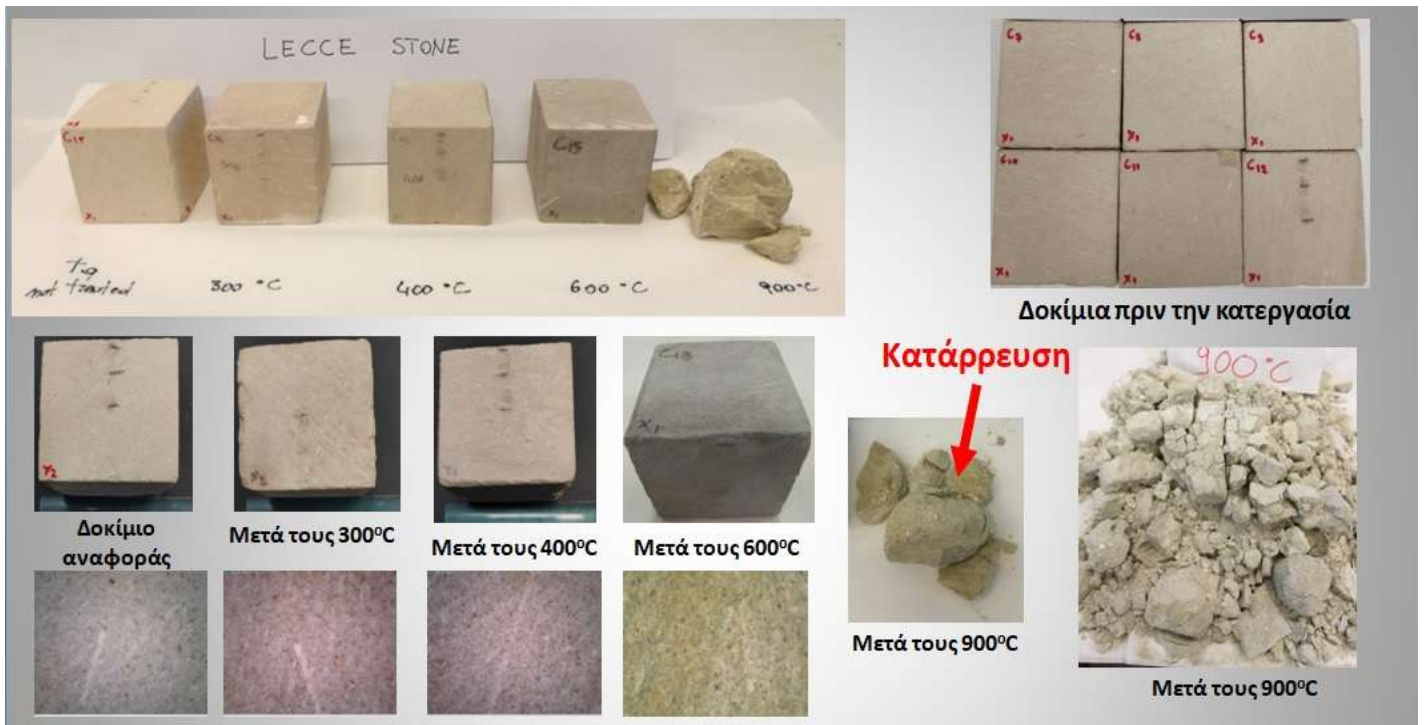
Εικόνα 25. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Istria για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος Istria, μετά την έκθεσή του στους 300°C, **εμφανίζει πιο ερυθρή χροιά** σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Μετά την έκθεση στους 400°C η επιφάνειά του λιθότυπου **αποκτά πιο γκρίζα χροιά**. Επίσης, στους 600°C, **παρατηρείται πιο έντονη γκρίζα χροιά, ενώ αναπτύσσονται και μικρές ρωγμές**. Σε όλες τις προαναφερθείσες θερμοκρασίες, δεν παρατηρούνται μεταβολές της γεωμετρίας των δοκιμών. Αντίθετα, μετά την έκθεση του λιθότυπου Istria στους 900°C, **παρατηρούνται έντονες μεταβολές της γεωμετρίας των δοκιμών και συγκεκριμένα πλήρης παραμόρφωσή τους, με ταυτόχρονη απώλεια αυθεντικού υλικού στις ακμές και τις γωνίες τους (απολέπιση και αποφλοίωση)**. Επιπλέον, μετά την έκθεση των δοκιμών στους 900°C, **παρατηρείται έντονη χρωματική αλλοίωση με ταυτόχρονη διάρρηξη ρωγμών, οι οποίες αποκτούν καστανέρυθρη χροιά**. Τέλος, **είναι φανερή η πλήρης αισθητική και γεωμετρική αλλοίωση των δοκιμών που εξετάστηκαν στους 900°C**.



Εικόνα 26. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του μαρμάρου Carrara για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι το μάρμαρο Carrara μετά την έκθεσή του στους 300°C και 400°C, **εμφανίζει μικρή μεταβολή στη μορφολογία του**, ενώ δεν παρατηρούνται μεταβολές της γεωμετρίας των δοκιμών. Συγκεκριμένα, **τα προσανατολισμένα χαράγματα του εργαλείου κοπής δεν φαίνονται στον ίδιο βαθμό**, όπως στο δοκίμιο αναφοράς και κατά συνέπεια έχει επέλθει λείανση των συγκεκριμένων χαραγμάτων και πιθανή απώλεια αυθεντικού υλικού. Μετά την έκθεση των δοκιμών του μαρμάρου Carrara στους 600°C και 900°C, **παρατηρείται έντονη μεταβολή της μορφολογίας και της μικροδομής των δοκιμών**. Συγκεκριμένα, **παρατηρούνται μεταβολές στη γεωμετρία των δοκιμών με ταυτόχρονη απώλεια αυθεντικού υλικού από τις γωνίες και τις ακμές τους** και ιδιαίτερα στα δοκίμια που εξετέθησαν στους 900°C. Τέλος, στην επιφάνεια των δοκιμών που έχουν εκτεθεί στους 900°C, **εμφανίζονται λευκές περιοχές διαφορετικής υφής**, που πιθανόν οφείλονται σε εναπομείναν υλικό των τμημάτων που έχουν απομακρυνθεί από το δοκίμιο, εξαιτίας της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας.



Εικόνα 27. Μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμών του λιθότυπου Lecce για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος Lecce μετά την έκθεσή του στους 300°C και 400°C, **εμφανίζει μικρή χρωματική αλλοίωση και συγκεκριμένα τα δοκίμια αποκτούν πιο καστανέρυθρη χροιά**. Επιπλέον, μετά την έκθεση των δοκιμών σε αυτές τις θερμοκρασίες δεν παρατηρούνται μεταβολές στη γεωμετρία τους. Μετά την έκθεση των δοκιμών του λιθότυπου Lecce στους 600°C, **παρατηρούνται πάλι μεταβολές στο χρώμα των δοκιμών, που αυτή τη φορά αποκτούν πιο γκρίζα χροιά**. Επίσης, στους 600°C δεν παρατηρούνται μεταβολές στη γεωμετρία των δοκιμών, εκτός από ορισμένες μικρο-απώλειες στις ακμές τους, οι οποίες στρογγυλοποιούνται. Τέλος, μετά την έκθεση του λιθότυπου Lecce στους 900°C, **τα δοκίμια καταρρέουν**.

Πίνακας 20. Συγκριτικός πίνακας παρατηρούμενων μεταβολών & αλλοιώσεων κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση για όλους τους λιθότυπους για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Λιθότυπος | Θερμοκρασία έκθεσης | Μεταβολές & Αλλοιώσεις | | | | | |
|-----------|---------------------|------------------------|---------|-----------|------------|---------------------------|------------|
| | | Χρώμα | Ρωγμές | Γεωμετρία | Μορφολογία | Απώλεια αυθεντικού υλικού | Κατάρρευση |
| Istria | 300°C | Ερυθρή | - | - | - | - | - |
| | 400°C | Ερυθρή | - | - | - | - | - |
| | 600°C | Γκρίζα | Μικρές | - | - | - | - |
| | 900°C | Γκρίζα & Καστανέρυθρη | Μεγάλες | Μεγάλη | Μεγάλη | Μεγάλη | - |
| Carrara | 300°C | - | - | - | Μικρή | - | - |
| | 400°C | - | - | - | Μικρή | - | - |
| | 600°C | - | - | Μεγάλη | Μεγάλη | Μικρή | - |
| | 900°C | - | - | Μεγάλη | Μεγάλη | Μεγάλη | - |
| Lecce | 300°C | Καστανέρυθρη | | - | - | - | - |
| | 400°C | Καστανέρυθρη | | - | - | - | - |
| | 600°C | Γκρίζα | - | Μικρή | - | Μικρή | - |
| | 900°C | - | - | Μεγάλη | Μεγάλη | Μεγάλη | ΝΑΙ |

4.2. Αποτελέσματα Θερμοβαρυμετρικής και Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (TG/DTA)

Η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG) και η διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) διεξήχθησαν σε στους προς εξέταση λιθότυπους που προαναφέρθηκαν. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τρία κυβικά δοκίμια για κάθε λιθότυπο (το δοκίμιο αναφοράς, ένα δοκίμιο μετά τους 600°C και ένα δοκίμιο μετά τους 900°C. Μόνο στην περίπτωση του λίθου Lecce, μελετήθηκαν δύο δοκίμια (το δοκίμιο αναφοράς και το δοκίμιο μετά τους 600°C), λόγω έλλειψης του δοκιμίου στους 900°C. Χρησιμοποιήθηκε το Regulus 2500 της Netzch στο θερμοκρασιακό διάστημα 30-1000°C, με ρυθμό θέρμανσης 10°C/min, σε ατμόσφαιρα αζώτου.

Σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα λαμβάνουν χώρα, μεταξύ άλλων, οι κάτωθι διεργασίες:

- η απώλεια μάζας που παρατηρείται στο θερμοκρασιακό διάστημα <120°C οφείλεται στην απώλεια φυσικά ροφημένου νερού,
- η απώλεια μάζας που ανιχνεύεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 120-200°C αποδίδεται στην απώλεια κρυσταλλικών νερών,
- η απώλεια μάζας που παρατηρείται στο θερμοκρασιακό διάστημα 200-600°C αποδίδεται στο χημικά δεσμευμένο νερό ένυδρων ορυκτών φάσεων,
- η απώλεια μάζας που παρατηρείται στο θερμοκρασιακό διάστημα άνω των 600°C αποδίδεται στην διάσπαση ανθρακικών ενώσεων (έκλυση CO₂).

Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται οι απώλειες μάζας που παρατηρήθηκαν σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά διαστήματα σε επιλεγμένα δείγματα λίθων, ενώ έχει υπολογιστεί και το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου, θεωρώντας ότι η απώλεια μάζας μετά τους 600°C οφείλεται αποκλειστικά στη διάσπαση ανθρακικού ασβεστίου. Στα δείγματα που παρουσιάζουν περιεχόμενο δολομίτη, το ποσοστό ανθρακικών ενώσεων είναι υψηλότερο από το υπολογιζόμενο.

Πίνακας 21. Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης (TG/DTA) για όλους τους λιθότυπους

| Λιθότυπος | Κωδικός | Αντίστοιχα Διαγράμματα | Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | | | | Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (%) |
|-----------|-----------|------------------------|---|-----------|-----------|--------|----------------------------------|
| | | | <120°C | 120-200°C | 200-600°C | >600°C | |
| Istria | A2r | 1 | 0,03 | 0,02 | 0,68 | 42,81 | 97,30 |
| | A18_600°C | 2 | 0,02 | 0,06 | 0,45 | 42,63 | 96,89 |
| | A13_900°C | 3 | 0,05 | 0,07 | 0,46 | 43,07 | 97,89 |
| Carrara | B2r | 4 | 0,03 | 0,19 | 0,50 | 42,61 | 96,84 |
| | B1_600°C | 5 | 0,00 | 0,01 | 0,59 | 43,00 | 97,73 |
| | B4_900°C | 6 | 0,00 | 0,03 | 0,47 | 42,68 | 97,00 |
| Lecce | C1r | 7 | 0,38 | 0,25 | 1,90 | 39,26 | 89,23 |
| | C15_600°C | 8 | 0,48 | 0,12 | 1,33 | 39,3 | 89,32 |

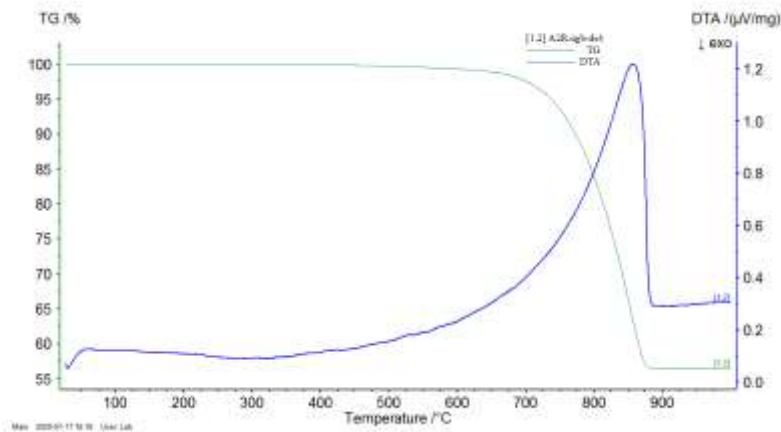
Όλοι οι εξεταζόμενοι λιθότυποι **παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά CaCO_3** , πριν την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως αναμενόταν με βάση τη βιβλιογραφία (23). Ο λιθότυπος Lecce παρουσιάζει υψηλό μεν ποσοστό CaCO_3 ($\approx 89\%$) αλλά το χαμηλότερο από τους τρεις εξεταζόμενους λιθότυπους. Τα υψηλά ποσοστά του CaCO_3 διατηρούνται και μετά την έκθεση των δοκιμών στις υψηλές θερμοκρασίες (600°C και 900°C).

Στα θερμοκρασιακά διαστήματα $<120^\circ\text{C}$ και $120-200^\circ\text{C}$, όπου ανιχνεύονται οι απώλειες μάζας του φυσικά προσροφημένου νερού και των κρυσταλλικών νερών αντίστοιχα, **παρατηρείται μικρή αύξηση των ποσοστών απώλειας μάζας** μετά την έκθεση των δοκιμών στις υψηλές θερμοκρασίες (600°C και 900°C) για όλους τους λιθότυπους, εκτός από το μάρμαρο Carrara. Στην τελευταία περίπτωση, **παρατηρείται μείωση των ήδη χαμηλών ποσοστών απώλειας μάζας** μετά την έκθεση των δοκιμών στις υψηλές θερμοκρασίες.

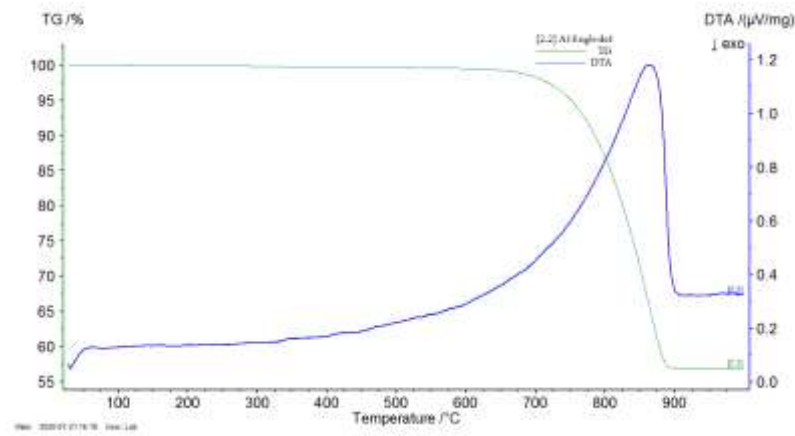
Στο θερμοκρασιακό διάστημα $200-600^\circ\text{C}$, όπου ανιχνεύονται οι απώλειες μάζας του χημικά δεσμευμένου νερού ένυδρων ορυκτών φάσεων των εξεταζόμενων λιθότυπων, **παρατηρείται για τους λιθότυπους Istria και Lecce μικρή μείωση του ποσοστού απώλειας μάζας** μετά την έκθεση των δοκιμών στις υψηλές θερμοκρασίες (600°C και 900°C). Στην περίπτωση του μαρμάρου Carrara, **παρατηρείται μικρή αύξηση του ποσοστού μετά την έκθεση στους 600°C , ενώ μετά τους 900°C έχουμε μικρή μείωση**. Πιο συγκεκριμένα, για το λιθότυπο Istria (μετά την έκθεσή του στους 900°C), **παρατηρείται ασθενής ενδόθερμη κορυφή στους 392°C που συνοδεύεται από μικρή απώλεια μάζας ($0,18\%$)**. Αυτή η κορυφή μπορεί να αποδοθεί σε απώλεια χημικά δεσμευμένου νερού υδροξειδίων του σιδήρου και πιο συγκεκριμένα του γκαιτίτη και σχηματισμό του αιματίτη. Ο γκαιτίτης αποτελεί συστατικό του λεμονίτη, ο οποίος απαντάται σε μικρές ποσότητες ($\approx 0,5\%$) στο συγκεκριμένο πέτρωμα (82), (83), (18). Για το μάρμαρο Carrara, στην περίπτωση της έκθεσής του στους 900°C , **παρατηρείται ασθενής ενδόθερμη κορυφή στους 415°C που συνοδεύεται από μικρή απώλεια μάζας ($0,1\%$)**, η οποία μπορεί να αποδοθεί σε απώλεια χημικά δεσμευμένου νερού του βρουσίτη ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Η παρουσία βρουσίτη δεν μας εκπλήσσει, μιας και στο δοκίμιο αναφοράς ανιχνεύεται ανθρακικό ασβέστιο και μαγνήσιο (δολομίτης), από την καμπύλη της πρώτης παραγωγού της διαφορικής θερμικής ανάλυσης, που εμφανίζει διπλή κορυφή.

Στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^\circ\text{C}$, όπου έχουμε διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων και παράλληλη έκλυση CO_2 , παρατηρείται πολύ μικρή αύξηση του ποσοστού απώλειας μάζας μετά την έκθεση των δοκιμών στις υψηλές θερμοκρασίες (600°C και 900°C) για όλους τους λιθότυπους. Στην περίπτωση του δοκιμίου του λιθότυπου Lecce που έχει εκτεθεί στους 600°C , **παρατηρείται μικρή μετατόπιση της κορυφής διάσπασης του CaCO_3 σε σχέση με αυτή του δοκιμίου αναφοράς**. Αυτό πιθανόν οφείλεται στη **διαφοροποίηση της κρυσταλλικότητας των κόκκων CaCO_3** , που επέρχεται ύστερα από την έκθεση του λιθότυπου στους 600°C . Τέλος, στις περιπτώσεις του λίθου Istria και του μαρμάρου Carrara που έχουν εκτεθεί στους 900°C **ανιχνεύεται CaCO_3 σε αντίστοιχα υψηλά ποσοστά με αυτά των δοκιμών αναφοράς**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την έκθεση των δοκιμών στους 900°C το μέρος του CaCO_3 που μετατράπηκε σε CaO κατέρρευσε και το εναπομείναν CaCO_3 που αρχικά βρισκόταν εσωτερικά, βγήκε στην επιφάνεια.

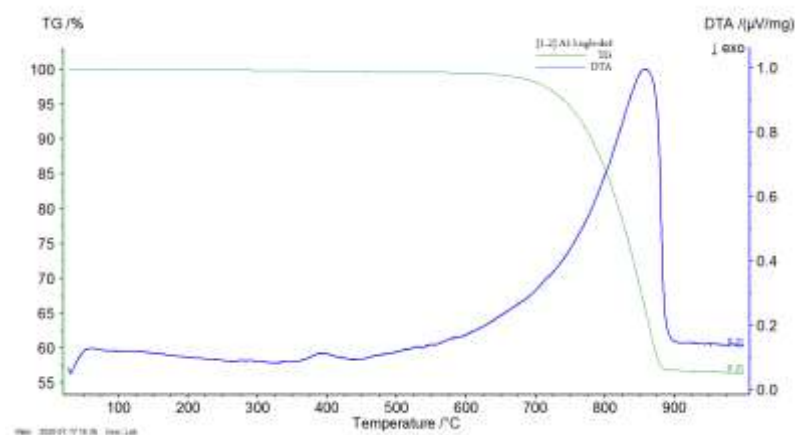
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμικής ανάλυσης (TG/DTA) των εξεταζόμενων λιθότυπων.



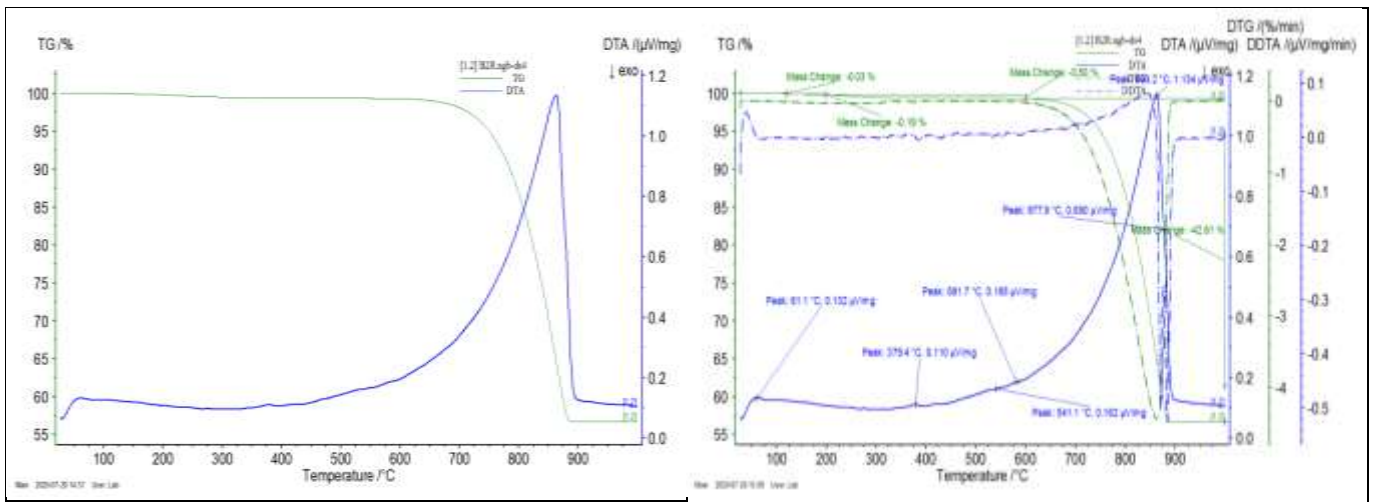
Διάγραμμα 1. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου αναφοράς του λιθότυπου Istria-A2r



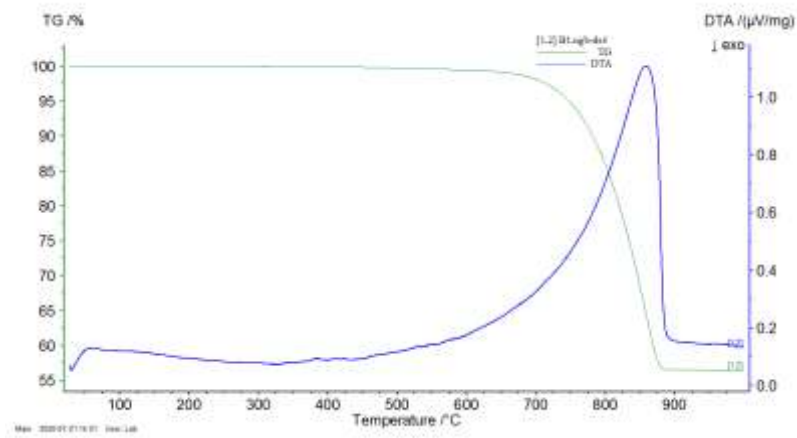
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου του λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες-A18



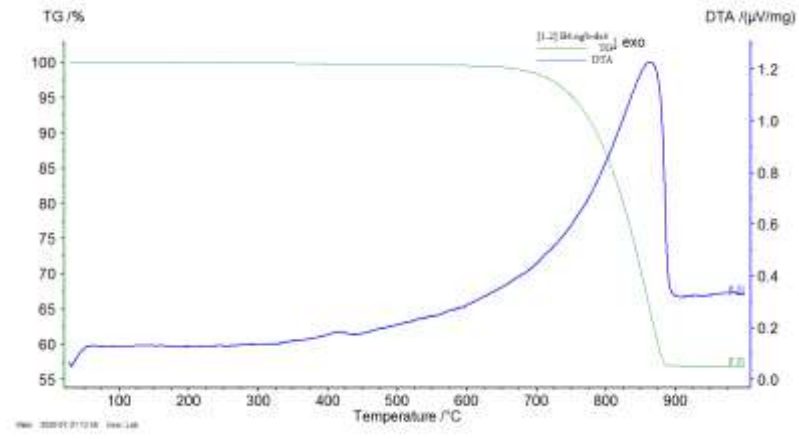
Διάγραμμα 3. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου του λιθότυπου Istria μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες-A13



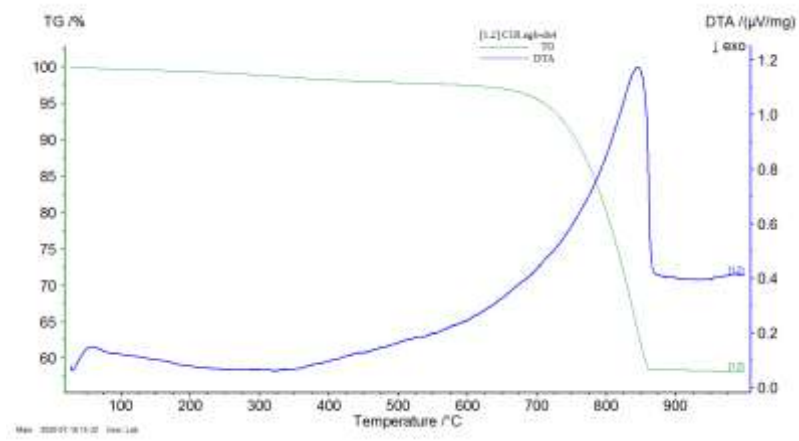
Διάγραμμα 4. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης και διάγραμμα με την πρώτη παράγωγο της διαφορικής θερμικής ανάλυσης δοκιμίου αναφοράς του μαρμάρου Carrara-B2r



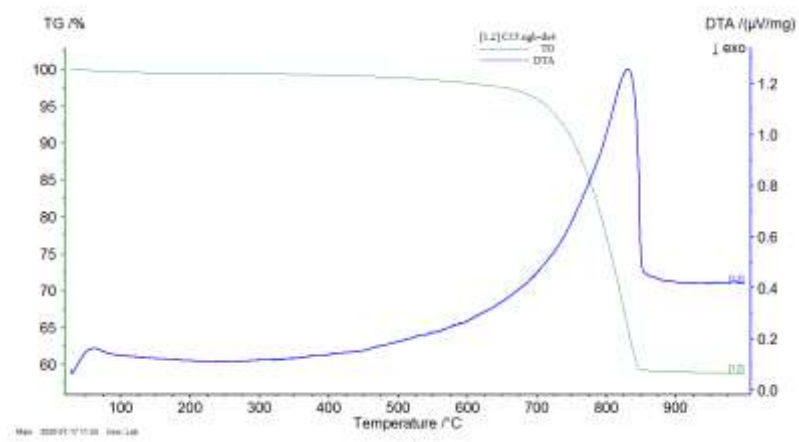
Διάγραμμα 5. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου του μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες-B1



Διάγραμμα 6. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου του μαρμάρου Carrara μετά από έκθεση στους 900°C για 6 ώρες-B4



Διάγραμμα 7. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου αναφοράς του λιθότυπου Lecce-C1r



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δοκιμίου του λιθότυπου Lecce μετά από έκθεση στους 600°C για 6 ώρες-C15

4.3. Υπερηχοσκόπηση

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερήχων κατά μήκος των λίθινων κυβικών δοκιμίων, διαστάσεων 5cmx5cmx5cm, εφαρμόστηκε η μέθοδος την άμεσης σημειακής υπερηχοσκόπησης σε όλα τα δείγματα ξεχωριστά. Έγιναν συνολικά εννέα διαδοχικές μετρήσεις, ως προς μία μόνο κατεύθυνση, σε κάθε δοκίμιο. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν τρεις μετρήσεις για κάθε ένα από τα τρία σημεία της μετρούμενης επιφάνειας. Τα τρία σημεία στις μετρούμενες απέναντι επιφάνειες κάθε δοκιμίου, απέχουν 0.25cm, 1.25cm, και 2.5cm αντίστοιχα από την κορυφή, όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα:



1^ο σημείο απέχει 0.25cm από την κορυφή (us1)

2^ο σημείο απέχει 1.25cm από την κορυφή (us2)

3^ο σημείο απέχει 2.5cm από την κορυφή (us3)

Εικόνα 28. Σημεία όπου εκτελέστηκαν οι μετρήσεις υπερηχοσκόπησης

Ως ταχύτητα διάδοσης υπερήχων (US), για κάθε δοκίμιο σε κάθε σημείο (ύψος), λήφθηκε η μέση τιμή των τριών υπολογισμένων ταχυτήτων για κάθε σημείο. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων και των τριών σημείων κάθε δοκιμίου, καθώς και η μέση ταχύτητα διάδοσης υπερήχων του συνόλου των δοκιμίων ανά λιθότυπο. Όλες οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν με τον ίδιο τρόπο στο σύνολο των δοκιμίων και μετά την επίδραση της προσομοίωσης την φωτιάς. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) ανά δοκίμιο του εκάστοτε λιθότυπου, αλλά και κάθε είδους λίθου γενικότερα, πριν και μετά την προσομοίωση της φωτιάς.

4.3.1. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Istria

Πίνακας 22. Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων (US) ανά δοκίμιο και σημείο για το λιθότυπο Istria

| Κωδικός | Κατάσταση | us1 (m/s) | us2 (m/s) | us3 (m/s) | % απόκλισης us ανά σημείο | | | US ανά δοκίμιο (m/s) | |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|--------------|--------------|----------------------|----------|
| | | | | | us1 / us2 | us1 / us3 | us2 / us3 | Μέση Τιμή | Απόκλιση |
| A1r | Πριν | 2669,0 | 2673,8 | 2717,4 | 0,18% | 1,81% | 1,63% | 2686,7 | ±26,6 |
| A2r | | 2762,4 | 2727,3 | 2697,8 | 1,27% | 2,34% | 1,08% | 2729,2 | ±32,3 |
| A3r | | 2681,8 | 2715,7 | 2701,1 | 1,26% | 0,72% | 0,54% | 2699,5 | ±17,0 |
| A1 | Πριν | 2725,8 | 2648,3 | 2643,6 | 2,84% | 3,01% | 0,18% | 2672,6 | ±46,1 |
| | Μετά (300°C) | 2672,0 | 2701,1 | 2696,2 | 1,09% | 0,90% | 0,18% | 2689,8 | ±15,6 |
| A2 | Πριν | 2708,1 | 2627,6 | 2547,5 | 2,97% | 5,93% | 3,05% | 2627,7 | ±80,3 |
| | Μετά (300°C) | 2717,9 | 2752,7 | 2632,2 | 1,28% | 3,15% | 4,38% | 2701,0 | ±62,0 |
| A3 | Πριν | 2649,6 | 2659,0 | 2682,8 | 0,36% | 1,25% | 0,90% | 2663,8 | ±17,1 |
| | Μετά (300°C) | 2777,4 | 2726,8 | 2721,8 | 1,82% | 2,00% | 0,18% | 2742,0 | ±30,7 |
| A4 | Πριν | 2659,0 | 2626,3 | 2673,2 | 1,23% | 0,54% | 1,79% | 2652,8 | ±24,0 |
| | Μετά (300°C) | 2756,9 | 2726,8 | 2751,8 | 1,09% | 0,18% | 0,92% | 2745,2 | ±16,1 |
| A5 | Πριν | 2571,4 | 2621,1 | 2621,1 | 1,93% | 1,93% | 0,00% | 2604,5 | ±28,7 |
| | Μετά (300°C) | 2667,9 | 2653,6 | 2667,9 | 0,53% | 0,00% | 0,54% | 2663,1 | ±8,2 |
| A6 | Πριν | 2648,9 | 2621,1 | 2653,6 | 1,05% | 0,18% | 1,24% | 2641,2 | ±17,6 |
| | Μετά (300°C) | 2741,3 | 2716,4 | 2648,9 | 0,91% | 3,37% | 2,48% | 2702,2 | ±47,8 |
| A19 | Πριν | 2655,3 | 2655,3 | 2650,5 | 0,00% | 0,18% | 0,18% | 2653,7 | ±2,7 |
| | Μετά (400°C) | 2230,8 | 2071,4 | 2240,9 | 7,14% | 0,45% | 8,18% | 2181,0 | ±95,1 |
| A20 | Πριν | 2733,7 | 2699,5 | 2723,8 | 1,25% | 0,36% | 0,90% | 2719,0 | ±17,6 |
| | Μετά (400°C) | 2206,1 | 2113,4 | 2307,3 | 4,20% | 4,59% | 9,17% | 2209,0 | ±97,0 |
| A21 | Πριν | 2730,3 | 2695,7 | 2657,1 | 1,27% | 2,68% | 1,43% | 2694,4 | ±36,6 |
| | Μετά (400°C) | 2285,7 | 2204,4 | 2285,7 | 3,56% | 0,00% | 3,69% | 2258,6 | ±46,9 |
| A22 | Πριν | 2707,6 | 2707,6 | 2707,6 | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 2707,6 | 0,0 |
| | Μετά (400°C) | 2293,6 | 2202,6 | 2293,6 | 3,96% | 0,00% | 4,13% | 2263,3 | ±52,5 |
| A23 | Πριν | 2776,1 | 2676,3 | 2657,1 | 3,60% | 4,29% | 0,71% | 2703,2 | ±63,9 |
| | Μετά (400°C) | 2275,2 | 2204,4 | 2285,7 | 3,11% | 0,46% | 3,69% | 2255,1 | ±44,2 |
| A24 | Πριν | 2314,4 | 2326,4 | 2405,4 | 0,52% | 3,93% | 3,39% | 2348,7 | ±49,4 |
| | Μετά (400°C) | 1943,7 | 1894,5 | 1935,3 | 2,53% | 0,43% | 2,16% | 1924,5 | ±26,3 |
| A7 | Πριν | 2712,5 | 2688,2 | 2659,6 | 0,90% | 1,95% | 1,06% | 2686,7 | ±26,5 |
| | Μετά (600°C) | 2202,6 | 2193,0 | 2212,4 | 0,44% | 0,44% | 0,88% | 2202,7 | ±9,7 |
| A8 | Πριν | 2729,3 | 2704,4 | 2600,0 | 0,91% | 4,74% | 3,86% | 2677,9 | ±68,6 |
| | Μετά (600°C) | 2041,3 | 2041,3 | 2016,3 | 0,00% | 1,22% | 1,22% | 2033,0 | ±14,4 |
| A9 | Πριν | 2724,8 | 2670,9 | 2670,9 | 1,98% | 1,98% | 0,00% | 2688,8 | ±31,1 |
| | Μετά (600°C) | 2133,6 | 1972,1 | 1644,5 | 7,57% | 22,92% | 16,61% | 1916,8 | ±249,2 |

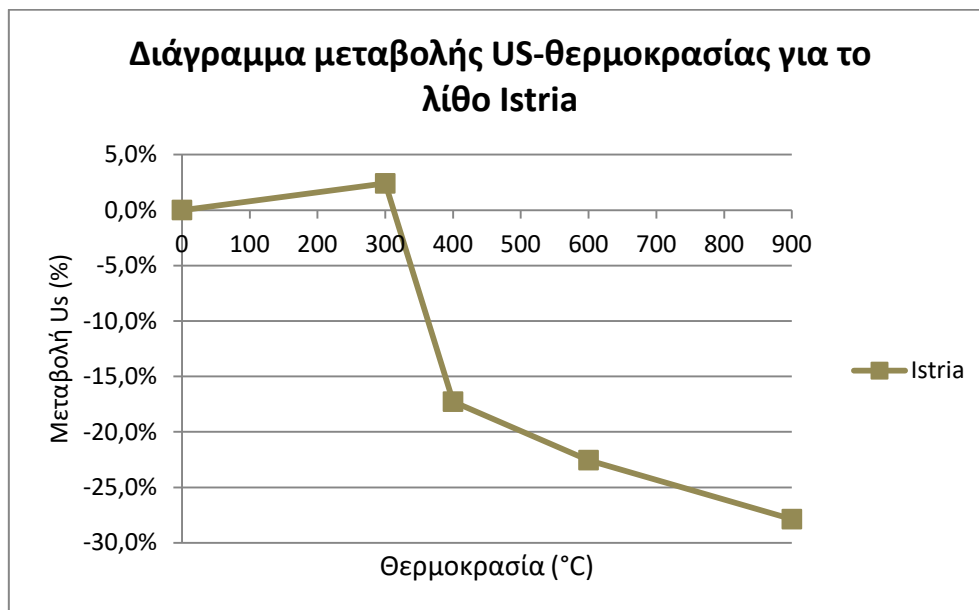
| | | | | | | | | | |
|-----|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|
| A10 | Πριν | 2666,1 | 2642,3 | 2637,7 | 0,89% | 1,07% | 0,18% | 2648,7 | ±15,2 |
| | Μετά (600°C) | 2079,8 | 2088,6 | 2088,6 | 0,42% | 0,42% | 0,00% | 2085,7 | ±5,1 |
| A11 | Πριν | 2683,8 | 2683,8 | 2659,8 | 0,00% | 0,89% | 0,89% | 2675,8 | ±13,8 |
| | Μετά (600°C) | 2206,7 | 2216,5 | 2206,7 | 0,45% | 0,00% | 0,44% | 2210,0 | ±5,7 |
| A18 | Πριν | 2707,6 | 2688,2 | 2669,0 | 0,72% | 1,42% | 0,71% | 2688,3 | ±19,3 |
| | Μετά (600°C) | 2055,1 | 1921,8 | 2006,0 | 6,49% | 2,39% | 4,38% | 1994,3 | ±67,4 |
| A12 | Πριν | 2673,5 | 2692,5 | 2702,1 | 0,71% | 1,07% | 0,36% | 2689,4 | ±14,6 |
| | Μετά (900°C) | 2167,4 | 1947,3 | 1902,7 | 10,16% | 12,21% | 2,29% | 2005,8 | ±141,7 |
| A13 | Πριν | 2665,8 | 2656,3 | 2661,0 | 0,36% | 0,18% | 0,18% | 2661,0 | ±4,7 |
| | Μετά (900°C) | 1887,8 | 1754,4 | 1644,0 | 7,07% | 12,91% | 6,29% | 1762,1 | ±122,1 |
| A14 | Πριν | 2641,0 | 2604,0 | 2693,5 | 1,40% | 1,99% | 3,44% | 2646,2 | ±45,0 |
| | Μετά (900°C) | 1945,5 | 1872,7 | 1976,3 | 3,75% | 1,58% | 5,53% | 1931,5 | ±53,2 |
| A15 | Πριν | 2732,2 | 2673,8 | 2645,5 | 2,14% | 3,17% | 1,06% | 2683,8 | ±44,2 |
| | Μετά (900°C) | 1864,2 | 2016,3 | 2041,3 | 8,16% | 9,50% | 1,24% | 1973,9 | ±95,9 |
| A16 | Πριν | 2665,5 | 2660,7 | 2627,7 | 0,18% | 1,42% | 1,24% | 2651,3 | ±20,6 |
| | Μετά (900°C) | 1655,6 | 2066,1 | 2314,8 | 24,79% | 39,81% | 12,04% | 2012,2 | ±332,9 |
| A17 | Πριν | 2762,4 | 2727,3 | 2717,4 | 1,27% | 1,63% | 0,36% | 2735,7 | ±23,7 |
| | Μετά (900°C) | 1953,1 | 1818,2 | 1938,0 | 6,91% | 0,78% | 6,59% | 1903,1 | ±73,9 |

Γενικότερα, παρατηρείται ότι σε κάθε κυβικό δοκίμιο του λιθότυπου Istria, η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές σε όλα τα σημεία της μετρούμενης επιφάνειας, διατηρώντας σχεδόν καθολικά ποσοστό απόκλισης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά σημείο μικρότερο του 3%. Αυτό μάλιστα φαίνεται και από τη συνολική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας διάδοσης κάθε δοκιμίου, που κυμαίνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου κάτω των ± 50 m/s. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές ως προς την ταχύτητα διάδοσης υπερήχων μεταξύ των τριών σημείων της μετρούμενης επιφάνειας. Δηλαδή, **η συνοχή του λιθότυπου Istria δεν μεταβάλλεται σημαντικά όσο κατευθυνόμαστε προς το εσωτερικό του δοκιμίου**, ακόμα και για τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C και είναι ανεξάρτητες του σημείου μέτρησης. Παρατηρείται αντίθετα ότι κάποια δοκίμια του λιθότυπου Istria που έχουν εκτεθεί στους 900°C εμφανίζουν ποσοστό απόκλισης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά σημείο μέχρι και 39,81%, με αντίστοιχη συνολική απόκλιση μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων $\pm 332,9$ m/s.

Πίνακας 23. Συνολική μέση τιμή ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) για το λιθότυπο Istria για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | Κατάσταση | Μέση τιμή | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) | Μέση τιμή για κάθε θερμοκρασία | | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) |
|---------|--------------|-----------|---|--------------------------------|--------|---|
| | | | | Πριν | Μετά | |
| A1 | Πριν | 2672,6 | 0,64% | 2643,8 | 2707,2 | +2,40% |
| | Μετά (300°C) | 2689,8 | | | | |
| A2 | Πριν | 2627,7 | 2,79% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2701,0 | | | | |
| A3 | Πριν | 2663,8 | 2,94% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2742,0 | | | | |
| A4 | Πριν | 2652,8 | 3,48% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2745,2 | | | | |
| A5 | Πριν | 2604,5 | 2,25% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2663,1 | | | | |
| A6 | Πριν | 2641,2 | 2,31% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2702,2 | | | | |
| A19 | Πριν | 2653,7 | -17,81% | 2637,8 | 2181,9 | -17,28% |
| | Μετά (400°C) | 2181,0 | | | | |
| A20 | Πριν | 2719,0 | -18,76% | | | |
| | Μετά (400°C) | 2209,0 | | | | |
| A21 | Πριν | 2694,4 | -16,17% | | | |
| | Μετά (400°C) | 2258,6 | | | | |
| A22 | Πριν | 2707,6 | -16,41% | | | |
| | Μετά (400°C) | 2263,3 | | | | |
| A23 | Πριν | 2703,2 | -16,58% | | | |
| | Μετά (400°C) | 2255,1 | | | | |
| A24 | Πριν | 2348,7 | -18,06% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1924,5 | | | | |
| A7 | Πριν | 2686,7 | -18,01% | 2677,7 | 2073,8 | -22,55% |
| | Μετά (600°C) | 2202,7 | | | | |
| A8 | Πριν | 2677,9 | -24,08% | | | |
| | Μετά (600°C) | 2033,0 | | | | |
| A9 | Πριν | 2688,8 | -28,71% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1916,8 | | | | |
| A10 | Πριν | 2648,7 | -21,26% | | | |
| | Μετά (600°C) | 2085,7 | | | | |
| A11 | Πριν | 2675,8 | -17,41% | | | |
| | Μετά (600°C) | 2210,0 | | | | |
| A18 | Πριν | 2688,3 | -25,82% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1994,3 | | | | |

| | | | | | | |
|-----|--------------|--------|---------|--------|--------|---------|
| A12 | Πριν | 2689,4 | -25,42% | 2677,9 | 1931,4 | -27,88% |
| | Μετά (900°C) | 2005,8 | | | | |
| A13 | Πριν | 2661,0 | -33,78% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1762,1 | | | | |
| A14 | Πριν | 2646,2 | -27,01% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1931,5 | | | | |
| A15 | Πριν | 2683,8 | -26,45% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1973,9 | | | | |
| A16 | Πριν | 2651,3 | -24,11% | | | |
| | Μετά (900°C) | 2012,2 | | | | |
| A17 | Πριν | 2735,7 | -30,43% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1903,1 | | | | |



Διάγραμμα 9. Μεταβολή μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) ανά θερμοκρασία για το λιθότυπο Istria

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα και το διάγραμμα, έπειτα από την έκθεση των δοκιμίων του λιθότυπου Istria στους 300°C έχουμε μικρή αύξηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη διόγκωση των κρυστάλλων ασβεστίτη και στην παράλληλη συρρίκνωση των, μικρής περιεκτικότητας, αργλικών ορυκτών (84). Αντίθετα, ύστερα από την έκθεση των δοκιμίων σε υψηλότερες θερμοκρασίες (400°C, 600°C και 900°C) παρατηρείται σημαντική μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων και μάλιστα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης τόσο μειώνεται και η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων. Συγκεκριμένα, στους 900°C έχουμε το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ίσο με -

27,88%. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C με ποσοστό μείωσης ίσο με -22,55% και τέλος αυτά που εξετέθησαν στους 400°C, με ποσοστό μείωσης ίσο με -17,28%. Τα υψηλά ποσοστά μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μετά την έκθεση στους 600°C και 900°C, πιθανόν να **οφείλονται στις μακροσκοπικά αντιληπτές ρωγμές** που εμφανίστηκαν μετά την είσοδο των δοκιμίων στο φούρνο. Αυτά τα αποτελέσματα μας υποδεικνύουν ότι **έχουμε μείωση της συνεκτικότητας των λίθων και των αναμενόμενων μηχανικών αντοχών τους με την αύξηση της θερμοκρασίας του φούρνου.**

Πίνακας 24. Διαφορά ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το λιθότυπο Istria

| Κωδικός | Μέση τιμή για κάθε θερμοκρασία | | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) | Διαφορά ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής ανά θερμοκρασιακό διάστημα (%) | |
|--------------------|--------------------------------|--------|---|---|-------------|
| | Πριν | Μετά | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | Ποσοστό (%) |
| A _{300°C} | 2643,8 | 2707,2 | +2,40% | 25°C-300°C | +2,40% |
| A _{400°C} | 2637,8 | 2181,9 | -17,28% | 300°C-400°C | -19,68% |
| A _{600°C} | 2677,7 | 2073,8 | -22,55% | 400°C-600°C | -5,27% |
| A _{900°C} | 2677,9 | 1931,4 | -27,88% | 600°C-900°C | -5,32% |

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 300°C-400°C, με τιμή -19,68%. Αυτό υποδεικνύει ότι σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, **επιτυγχάνεται και η μεγαλύτερη σε ποσοστό απομείωση της αντοχής και ανθεκτικότητας του λιθότυπου Istria.** Ύστερα, μικρότερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C με τιμή -5,32%, χωρίς όμως μεγάλη απόσταση από αυτή του θερμοκρασιακού διαστήματος 400°C-600°C με τιμή -5,27%. Τέλος, στο θερμοκρασιακό διάστημα 25°C-300°C έχουμε θετική διαφορά της τάξης του +2,40%, που είναι και η μικρότερη σε απόλυτη τιμή.

4.3.2. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο μάρμαρο Carrara

Πίνακας 25. Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων (US) ανά δοκίμιο και σημείο για το μάρμαρο Carrara

| Κωδικός | Κατάσταση | us1 (m/s) | us2 (m/s) | us3 (m/s) | % απόκλιση us ανά σημείο | | | US ανά δοκίμιο (m/s) | |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|----------|
| | | | | | us1 / us2 | us1 / us3 | us2 / us3 | Μέση τιμή | Απόκλιση |
| B1r | Πριν | 2541,4 | 2495,0 | 2558,7 | 1,82% | 0,68% | 2,55% | 2531,7 | ±32,9 |
| B2r | | 2566,3 | 2570,7 | 2531,9 | 0,17% | 1,34% | 1,51% | 2556,3 | ±21,3 |
| B3r | | 2477,0 | 2464,8 | 2501,7 | 0,49% | 1,00% | 1,50% | 2481,1 | ±18,8 |
| B7 | Πριν | 2525,3 | 2495,8 | 2451,0 | 1,16% | 2,94% | 1,80% | 2490,7 | ±37,4 |
| | Μετά (300°C) | 2118,6 | 2092,1 | 2124,6 | 1,26% | 0,28% | 1,56% | 2111,8 | ±17,3 |
| B8 | Πριν | 2500,0 | 2447,0 | 2447,0 | 2,12% | 2,12% | 0,00% | 2464,7 | ±30,6 |
| | Μετά (300°C) | 2193,0 | 2161,4 | 2155,2 | 1,44% | 1,72% | 0,29% | 2169,8 | ±20,3 |
| B9 | Πριν | 2592,8 | 2557,6 | 2544,7 | 1,36% | 1,85% | 0,51% | 2565,0 | ±24,9 |
| | Μετά (300°C) | 2090,0 | 2053,1 | 2033,7 | 1,77% | 2,70% | 0,94% | 2058,9 | ±28,6 |
| B10 | Πριν | 2509,1 | 2476,3 | 2460,3 | 1,31% | 1,94% | 0,65% | 2481,9 | ±24,9 |
| | Μετά (400°C) | 1807,1 | 1767,2 | 1769,2 | 2,21% | 2,10% | 0,12% | 1781,2 | ±22,5 |
| B11 | Πριν | 2427,5 | 2479,4 | 2483,5 | 2,14% | 2,31% | 0,16% | 2463,5 | ±31,2 |
| | Μετά (400°C) | 1767,3 | 1722,9 | 1711,1 | 2,51% | 3,18% | 0,68% | 1733,8 | ±29,6 |
| B12 | Πριν | 2540,4 | 2506,6 | 2498,3 | 1,33% | 1,66% | 0,33% | 2515,1 | ±22,3 |
| | Μετά (400°C) | 1798,6 | 1792,2 | 1775,3 | 0,36% | 1,29% | 0,94% | 1788,7 | ±12,0 |
| B1 | Πριν | 2529,5 | 2487,6 | 2475,2 | 1,66% | 2,15% | 0,50% | 2497,4 | ±28,4 |
| | Μετά (600°C) | 1204,8 | 1141,6 | 1171,0 | 5,25% | 2,81% | 2,58% | 1172,4 | ±31,7 |
| B2 | Πριν | 2484,4 | 2472,2 | 2452,1 | 0,49% | 1,30% | 0,81% | 2469,6 | ±16,3 |
| | Μετά (600°C) | 1066,7 | 1038,1 | 1082,8 | 2,68% | 1,51% | 4,30% | 1062,6 | ±22,6 |
| B3 | Πριν | 2587,6 | 2518,4 | 2485,1 | 2,68% | 3,96% | 1,32% | 2530,4 | ±52,3 |
| | Μετά (600°C) | 1331,6 | 1277,4 | 1310,7 | 4,07% | 1,57% | 2,61% | 1306,5 | ±27,3 |
| B13 | Πριν | 2612,1 | 2559,1 | 2580,9 | 2,03% | 1,19% | 0,85% | 2584,0 | ±26,6 |
| | Μετά (600°C) | 1166,3 | 1127,2 | 1169,0 | 3,35% | 0,23% | 3,70% | 1154,2 | ±23,4 |
| B14 | Πριν | 2536,1 | 2465,7 | 2422,2 | 2,78% | 4,49% | 1,77% | 2474,7 | ±57,5 |
| | Μετά (600°C) | 1248,1 | 1191,9 | 1212,0 | 4,50% | 2,89% | 1,69% | 1217,4 | ±28,5 |
| B15 | Πριν | 2499,2 | 2466,4 | 2499,2 | 1,31% | 0,00% | 1,33% | 2488,2 | ±18,9 |
| | Μετά (600°C) | 1097,4 | 1078,5 | 1145,0 | 1,72% | 4,34% | 6,16% | 1106,9 | ±34,3 |
| B4 | Πριν | 2586,5 | 2517,5 | 2525,9 | 2,67% | 2,34% | 0,33% | 2543,3 | ±37,6 |
| | Μετά (900°C) | 1025,5 | 999,0 | 964,6 | 2,58% | 5,94% | 3,45% | 996,3 | ±30,5 |
| B5 | Πριν | 2582,1 | 2521,7 | 2534,4 | 2,34% | 1,85% | 0,50% | 2546,1 | ±31,8 |
| | Μετά (900°C) | 1017,2 | 1038,1 | 1049,0 | 2,06% | 3,12% | 1,04% | 1034,8 | ±16,2 |
| B6 | Πριν | 2507,5 | 2470,6 | 2466,6 | 1,47% | 1,63% | 0,16% | 2481,5 | ±22,5 |
| | Μετά (900°C) | 1024,4 | 998,0 | 936,8 | 2,57% | 8,55% | 6,13% | 986,4 | ±44,9 |

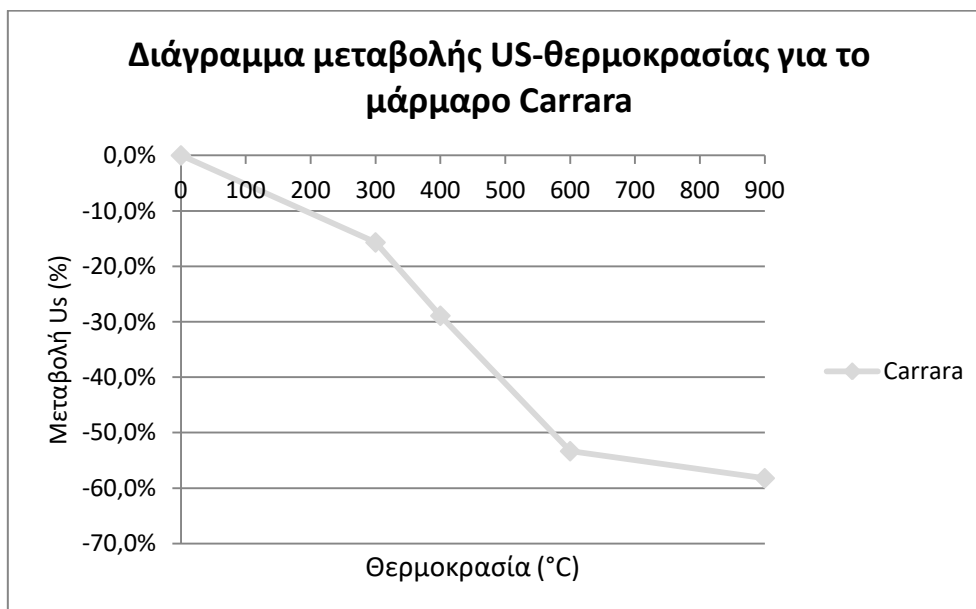
| | | | | | | | | | |
|------------|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|---------------|-------|
| B16 | Πριν | 2564,8 | 2509,2 | 2517,6 | 2,17% | 1,84% | 0,34% | 2530,5 | ±30,0 |
| | Μετά (900°C) | 1039,4 | 1128,4 | 1077,4 | 8,56% | 3,66% | 4,52% | 1081,7 | ±44,6 |
| B17 | Πριν | 2518,3 | 2473,0 | 2453,0 | 1,80% | 2,59% | 0,81% | 2481,4 | ±33,5 |
| | Μετά (900°C) | 1113,7 | 1192,7 | 1089,6 | 7,09% | 2,16% | 8,64% | 1132,0 | ±53,9 |
| B18 | Πριν | 2530,3 | 2496,7 | 2443,9 | 1,33% | 3,41% | 2,11% | 2490,3 | ±43,6 |
| | Μετά (900°C) | 1072,8 | 1096,3 | 1035,1 | 2,19% | 3,51% | 5,58% | 1068,1 | ±30,9 |

Γενικότερα παρατηρείται ότι σε κάθε κυβικό δοκίμιο του μαρμάρου Carrara, η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές σε όλα τα σημεία της μετρούμενης επιφάνειας, διατηρώντας σχεδόν καθολικά ποσοστό απόκλισης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά σημείο μικρότερο του 3%. Αυτό μάλιστα φαίνεται και από τη συνολική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας διάδοσης κάθε δοκιμίου, που κυμαίνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου κάτω των ±50 m/s. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές ως προς την ταχύτητα διάδοσης υπερήχων μεταξύ των τριών σημείων της μετρούμενης επιφάνειας. Δηλαδή, **η μηχανική αντοχή και η συνοχή του μαρμάρου Carrara είναι μεγέθη ανεξάρτητα του σημείου της μετρούμενης επιφάνειας.**

Πίνακας 26. Συνολική μέση τιμή ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) για το μάρμαρο Carrara για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | Κατάσταση | Μέση τιμή | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) | Μέση τιμή για κάθε θερμοκρασία | | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) |
|------------|--------------|---------------|---|--------------------------------|---------------|---|
| | | | | Πριν | Μετά | |
| B7 | Πριν | 2490,7 | -15,21% | 2506,8 | 2113,5 | -15,69% |
| | Μετά (300°C) | 2111,8 | | | | |
| B8 | Πριν | 2464,7 | -11,96% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2169,8 | | | | |
| B9 | Πριν | 2565,0 | -19,73% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2058,9 | | | | |
| B10 | Πριν | 2481,9 | -28,23% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1781,2 | | | | |
| B11 | Πριν | 2463,5 | -29,62% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1733,8 | | | | |
| B12 | Πριν | 2515,1 | -28,88% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1788,7 | | | | |
| B1 | Πριν | 2497,4 | -53,06% | 2507,4 | 1170,0 | -53,34% |
| | Μετά (600°C) | 1172,4 | | | | |
| B2 | Πριν | 2469,6 | -56,97% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1062,6 | | | | |

| | | | | | | |
|------------|--------------|---------------|---------|---------------|---------------|---------|
| B3 | Πριν | 2530,4 | -48,37% | 2512,2 | 1049,9 | -58,21% |
| | Μετά (600°C) | 1306,5 | | | | |
| B13 | Πριν | 2584,0 | -55,33% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1154,2 | | | | |
| B14 | Πριν | 2474,7 | -50,81% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1217,4 | | | | |
| B15 | Πριν | 2488,2 | -55,51% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1106,9 | | | | |
| B4 | Πριν | 2543,3 | -60,83% | | | |
| | Μετά (900°C) | 996,3 | | | | |
| B5 | Πριν | 2546,1 | -59,36% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1034,8 | | | | |
| B6 | Πριν | 2481,5 | -60,25% | | | |
| | Μετά (900°C) | 986,4 | | | | |
| B16 | Πριν | 2530,5 | -57,25% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1081,7 | | | | |
| B17 | Πριν | 2481,4 | -54,38% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1132,0 | | | | |
| B18 | Πριν | 2490,3 | -57,11% | | | |
| | Μετά (900°C) | 1068,1 | | | | |



Διάγραμμα 10. Μεταβολή μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) ανά θερμοκρασία για το μάρμαρο Carrara

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα και το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι ύστερα από την έκθεση των δοκιμών σε υψηλές θερμοκρασίες (300°C, 400°C, 600°C και 900°C) έχουμε σημαντική μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων και μάλιστα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης των δοκιμών, τόσο μειώνεται και η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων. Συγκεκριμένα, στους 900°C έχουμε το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ίσο με -58,21%. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C με ποσοστό μείωσης ίσο με -53,34% και αυτά που εξετέθησαν στους 400°C, με ποσοστό μείωσης ίσο με -28,91%. Τέλος, τα δοκίμια που εξετέθησαν στους 300°C, εμφανίζουν ποσοστό μείωσης μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ίσο με -15,69%. Τα ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μετά την έκθεση των δοκιμών στους 600°C και 900°C, συμβαδίζουν με τα συμπεράσματα της μακροσκοπικής και μικροσκοπικής ανάλυσης, όπου μετά την είσοδό τους στο φούρνο, τα δοκίμια παρουσιάζουν εμφανή αλλοίωση τόσο των γεωμετρικών όσο και των αισθητικών τους στοιχείων. Αυτά τα αποτελέσματα μας υποδεικνύουν ότι η **αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης των δοκιμών συνεπάγεται μεγαλύτερη μείωση της συνοχής και των μηχανικών αντοχών του μαρμάρου Carrara.**

Πίνακας 27. Διαφορά ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το μάρμαρο Carrara

| Κωδικός | Μέση τιμή για κάθε θερμοκρασία | | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) | Διαφορά ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής ανά θερμοκρασιακό διάστημα (%) | |
|--------------------|--------------------------------|--------|---|---|-------------|
| | Πριν | Μετά | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | Ποσοστό (%) |
| B _{300°C} | 2506,8 | 2113,5 | -15,69% | 25°C-300°C | -15,69% |
| B _{400°C} | 2486,8 | 1767,9 | -28,91% | 300°C-400°C | -13,22% |
| B _{600°C} | 2507,4 | 1170,0 | -53,34% | 400°C-600°C | -24,43% |
| B _{900°C} | 2512,2 | 1049,9 | -58,21% | 600°C-900°C | -4,87% |

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 400°C-600°C, με τιμή -36,06%. Αυτό υποδεικνύει ότι σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, **επιτυγχάνεται και η μεγαλύτερη σε ποσοστό απομείωση της αντοχής και ανθεκτικότητας του μαρμάρου Carrara.** Ύστερα, μικρότερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 25°C-300°C με τιμή -15,69% και στη συνέχεια στο διάστημα 300°C-400°C με τιμή -13,22%. Τέλος, στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C παρατηρείται η μικρότερη ποσοστιαία διαφορά με τιμή -4,87%. Η μικρή ποσοστιαία μείωση υποδεικνύει πως σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, **έχει επιτευχθεί σημαντική απομείωση της συνεκτικότητας και των μηχανικών αντοχών του μαρμάρου Carrara, ήδη από τα προηγούμενα θερμοκρασιακά διαστήματα και ιδιαίτερα στο 400°C-600°C.**

4.3.3. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Lecce

Πίνακας 28. Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων (US) ανά δοκίμιο και σημείο για το λιθότυπο Lecce

| Κωδικός | Κατάσταση | us1 (m/s) | us2 (m/s) | us3 (m/s) | % απόκλιση us ανά σημείο | | | US ανά δοκίμιο (m/s) | |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------|----------|
| | | | | | us1 / us2 | us1 / us3 | us2 / us3 | Μέση τιμή | Απόκλιση |
| C1r | Πριν | 2035,1 | 2021,5 | 1992,1 | 0,67% | 2,12% | 1,46% | 2016,2 | ±22,0 |
| C2r | | 2145,7 | 2140,0 | 2148,6 | 0,27% | 0,14% | 0,41% | 2144,8 | ±4,4 |
| C3r | | 1934,0 | 1948,8 | 1936,5 | 0,77% | 0,13% | 0,64% | 1939,8 | ±8,0 |
| C1 | Πριν | 2052,0 | 2005,3 | 2013,4 | 2,27% | 1,88% | 0,40% | 2023,6 | ±24,9 |
| | Μετά (300°C) | 2018,8 | 1965,9 | 1978,9 | 2,62% | 1,98% | 0,66% | 1987,9 | ±27,6 |
| C2 | Πριν | 1858,4 | 1875,0 | 1849,1 | 0,89% | 0,50% | 1,38% | 1860,8 | ±13,1 |
| | Μετά (300°C) | 1786,1 | 1794,9 | 1797,1 | 0,49% | 0,61% | 0,12% | 1792,7 | ±5,8 |
| C3 | Πριν | 2054,1 | 2032,1 | 2029,4 | 1,07% | 1,20% | 0,13% | 2038,6 | ±13,6 |
| | Μετά (300°C) | 1984,3 | 1968,9 | 1984,3 | 0,78% | 0,00% | 0,78% | 1979,2 | ±8,9 |
| C4 | Πριν | 2037,9 | 1992,1 | 1968,6 | 2,25% | 3,40% | 1,18% | 1999,5 | ±35,2 |
| | Μετά (300°C) | 1963,5 | 1948,3 | 1963,5 | 0,78% | 0,00% | 0,78% | 1958,4 | ±8,8 |
| C5 | Πριν | 1872,2 | 1849,0 | 1835,4 | 1,24% | 1,97% | 0,74% | 1852,2 | ±18,6 |
| | Μετά (300°C) | 1830,9 | 1802,2 | 1791,4 | 1,57% | 2,16% | 0,60% | 1808,1 | ±20,4 |
| C6 | Πριν | 2039,6 | 2020,6 | 2004,6 | 0,93% | 1,72% | 0,79% | 2021,6 | ±17,5 |
| | Μετά (300°C) | 2047,8 | 2036,9 | 2036,9 | 0,54% | 0,54% | 0,00% | 2040,5 | ±6,3 |
| C7 | Πριν | 2010,6 | 1997,4 | 2015,9 | 0,66% | 0,27% | 0,93% | 2008,0 | ±9,6 |
| | Μετά (400°C) | 1855,7 | 1853,5 | 1849,0 | 0,12% | 0,37% | 0,24% | 1852,7 | ±3,5 |
| C8 | Πριν | 2146,5 | 2128,5 | 2107,9 | 0,84% | 1,80% | 0,97% | 2127,6 | ±19,3 |
| | Μετά (400°C) | 1905,0 | 1876,8 | 1845,0 | 1,48% | 3,15% | 1,69% | 1875,6 | ±30,0 |
| C9 | Πριν | 2043,2 | 2021,4 | 1989,5 | 1,07% | 2,63% | 1,58% | 2018,0 | ±27,0 |
| | Μετά (400°C) | 1852,9 | 1848,4 | 1873,6 | 0,24% | 1,12% | 1,36% | 1858,3 | ±13,4 |
| C10 | Πριν | 2062,2 | 2037,2 | 2028,9 | 1,22% | 1,62% | 0,40% | 2042,8 | ±17,3 |
| | Μετά (400°C) | 1884,4 | 1845,2 | 1856,5 | 2,08% | 1,48% | 0,62% | 1862,0 | ±20,2 |
| C11 | Πριν | 2046,9 | 2030,6 | 2058,0 | 0,80% | 0,54% | 1,35% | 2045,2 | ±13,8 |
| | Μετά (400°C) | 1848,7 | 1800,7 | 1794,4 | 2,59% | 2,94% | 0,35% | 1814,6 | ±29,7 |
| C12 | Πριν | 2069,4 | 2033,4 | 2033,4 | 1,74% | 1,74% | 0,00% | 2045,4 | ±20,8 |
| | Μετά (400°C) | 1823,7 | 1791,5 | 1815,0 | 1,77% | 0,48% | 1,31% | 1810,1 | ±16,7 |
| C13 | Πριν | 1779,6 | 1752,9 | 1798,6 | 1,50% | 1,07% | 2,61% | 1777,0 | ±23,0 |
| | Μετά (600°C) | 1249,4 | 1144,8 | 925,0 | 8,37% | 25,96% | 19,20% | 1106,4 | ±165,5 |
| C14 | Πριν | 2042,5 | 2023,4 | 2020,7 | 0,94% | 1,07% | 0,13% | 2028,9 | ±11,9 |
| | Μετά (600°C) | 1492,6 | 1413,2 | 1458,1 | 5,32% | 2,31% | 3,18% | 1454,6 | ±39,8 |
| C15 | Πριν | 2090,0 | 2064,3 | 2055,9 | 1,23% | 1,63% | 0,41% | 2070,1 | ±17,8 |
| | Μετά (600°C) | 1538,2 | 1488,2 | 1501,5 | 3,25% | 2,39% | 0,90% | 1509,3 | ±25,9 |

| | | | | | | | | | |
|-----|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|
| C16 | Πριν | 2059,2 | 2031,5 | 2053,6 | 1,34% | 0,27% | 1,09% | 2048,1 | ±14,6 |
| | Μετά (600°C) | 1538,1 | 1497,0 | 1542,8 | 2,67% | 0,31% | 3,06% | 1526,0 | ±25,2 |
| C17 | Πριν | 1871,7 | 1871,7 | 1832,9 | 0,00% | 2,07% | 2,07% | 1858,8 | ±22,4 |
| | Μετά (600°C) | 1216,0 | 1154,4 | 891,5 | 5,07% | 26,69% | 22,78% | 1087,3 | ±172,4 |
| C18 | Πριν | 2068,4 | 2037,7 | 2043,2 | 1,48% | 1,22% | 0,27% | 2049,8 | ±16,3 |
| | Μετά (600°C) | 1354,8 | 1100,4 | 938,5 | 18,78% | 30,73% | 14,71% | 1131,3 | ±209,9 |
| C19 | Πριν | 2000,0 | 1994,7 | 1992,1 | 0,26% | 0,40% | 0,13% | 1995,6 | ±4,0 |
| | Μετά (900°C) | x | x | x | x | x | x | x | x |
| C20 | Πριν | 1933,2 | 1867,2 | 1923,5 | 3,41% | 0,50% | 3,01% | 1908,0 | ±35,6 |
| | Μετά (900°C) | x | x | x | x | x | x | x | x |
| C21 | Πριν | 2069,5 | 2061,0 | 2063,8 | 0,41% | 0,27% | 0,14% | 2064,7 | ±4,3 |
| | Μετά (900°C) | x | x | x | x | x | x | x | x |
| C22 | Πριν | 2128,7 | 2084,7 | 2099,2 | 2,07% | 1,39% | 0,69% | 2104,2 | ±22,4 |
| | Μετά (900°C) | x | x | x | x | x | x | x | x |
| C23 | Πριν | 2120,1 | 2062,5 | 2059,7 | 2,72% | 2,85% | 0,14% | 2080,8 | ±34,1 |
| | Μετά (900°C) | x | x | x | x | x | x | x | x |
| C24 | Πριν | 2012,0 | 2006,6 | 1977,8 | 0,26% | 1,70% | 1,44% | 1998,8 | ±18,4 |
| | Μετά (900°C) | x | x | x | x | x | x | x | x |



Εικόνα 29. Λιθότυπος Lecce μετά την έκθεση στους 900°C-Κατάρρευση

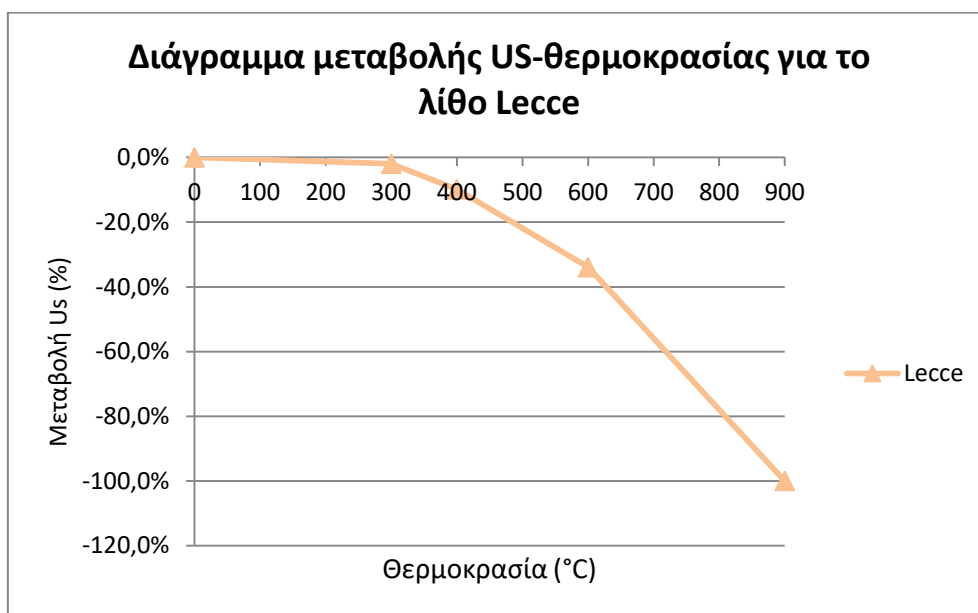
Παρατηρείται ότι σε κάθε κυβικό δοκίμιο του λιθότυπου Lecce, η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές σε όλα τα σημεία της μετρούμενης επιφάνειας, διατηρώντας σχεδόν καθολικά ποσοστό απόκλισης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά σημείο μικρότερο του 3%. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη συνολική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας διάδοσης κάθε δοκιμίου, που κυμαίνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου κάτω των ± 30 m/s. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές ως προς την ταχύτητα διάδοσης υπερήχων μεταξύ των τριών σημείων της μετρούμενης επιφάνειας. Δηλαδή, **η μηχανική αντοχή και η συνοχή του λιθότυπου Lecce είναι μεγέθη ανεξάρτητα του σημείου της μετρούμενης επιφάνειας και**

δεν μεταβάλλονται σημαντικά όσο κατευθυνόμαστε προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Παρατηρείται όμως ότι κάποια δοκίμια του λιθότυπου Lecce που έχουν εκτεθεί στους 900°C εμφανίζουν ποσοστό απόκλισης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά σημείο μέχρι και 30,73%, με αντίστοιχη συνολική απόκλιση μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων $\pm 209,9$ m/s. Τέλος, για τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 900°C, δεν κατέστη δυνατό να υπολογίσουμε το ποσοστό απόκλισης ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά σημείο, επειδή κατέρρευσαν.

Πίνακας 29. Συνολική μέση τιμή ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) για το λιθότυπο Lecce για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | Κατάσταση | Μέση τιμή | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) | Μέση τιμή για κάθε θερμοκρασία | | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) |
|---------|--------------|-----------|---|--------------------------------|--------|---|
| | | | | Πριν | Μετά | |
| C1 | Πριν | 2023,6 | -1,76% | 1966,1 | 1927,8 | -1,95% |
| | Μετά (300°C) | 1987,9 | | | | |
| C2 | Πριν | 1860,8 | -3,66% | | | |
| | Μετά (300°C) | 1792,7 | | | | |
| C3 | Πριν | 2038,6 | -2,91% | | | |
| | Μετά (300°C) | 1979,2 | | | | |
| C4 | Πριν | 1999,5 | -2,06% | | | |
| | Μετά (300°C) | 1958,4 | | | | |
| C5 | Πριν | 1852,2 | -2,38% | | | |
| | Μετά (300°C) | 1808,1 | | | | |
| C6 | Πριν | 2021,6 | 0,93% | | | |
| | Μετά (300°C) | 2040,5 | | | | |
| C7 | Πριν | 2008,0 | -7,73% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1852,7 | | | | |
| C8 | Πριν | 2127,6 | -11,84% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1875,6 | | | | |
| C9 | Πριν | 2018,0 | -7,91% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1858,3 | | | | |
| C10 | Πριν | 2042,8 | -8,85% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1862,0 | | | | |
| C11 | Πριν | 2045,2 | -11,28% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1814,6 | | | | |
| C12 | Πριν | 2045,4 | -11,50% | | | |
| | Μετά (400°C) | 1810,1 | | | | |
| C13 | Πριν | 1777,0 | -37,74% | 1972,1 | 1302,5 | -33,96% |
| | Μετά (600°C) | 1106,4 | | | | |

| | | | | | | |
|------------|--------------|---------------|----------|---------------|--------------------------|----------|
| C14 | Πριν | 2028,9 | -28,31% | 2025,1 | 0 (κατάρρευση) | -100,00% |
| | Μετά (600°C) | 1454,6 | | | | |
| C15 | Πριν | 2070,1 | -27,09% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1509,3 | | | | |
| C16 | Πριν | 2048,1 | -25,49% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1526,0 | | | | |
| C17 | Πριν | 1858,8 | -41,51% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1087,3 | | | | |
| C18 | Πριν | 2049,8 | -44,81% | | | |
| | Μετά (600°C) | 1131,3 | | | | |
| C19 | Πριν | 1995,6 | -100,00% | | | |
| | Μετά (900°C) | 0 | | | | |
| C20 | Πριν | 1908,0 | -100,00% | | | |
| | Μετά (900°C) | 0 | | | | |
| C21 | Πριν | 2064,7 | -100,00% | | | |
| | Μετά (900°C) | 0 | | | | |
| C22 | Πριν | 2104,2 | -100,00% | | | |
| | Μετά (900°C) | 0 | | | | |
| C23 | Πριν | 2080,8 | -100,00% | | | |
| | Μετά (900°C) | 0 | | | | |
| C24 | Πριν | 1998,8 | -100,00% | | | |
| | Μετά (900°C) | 0 | | | | |



Διάγραμμα 11. Μεταβολή μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (US) ανά θερμοκρασία για το λιθότυπο Lecce

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα και το διάγραμμα, έπειτα από την έκθεση των δοκιμών του λιθότυπου Lecce σε υψηλές θερμοκρασίες (300°C, 400°C, 600°C και 900°C) παρατηρείται μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων και μάλιστα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης τόσο μειώνεται και η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων. Συγκεκριμένα, μετά την έκθεση των δοκιμών στους 900°C, όπου αυτά καταρρέουν, έχουμε το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ίσο με -100,00%, αφού ο λιθότυπος πλέον έχει χάσει πλήρως τη συνοχή του. **Η κατάρρευση του λίθου Lecce μετά την έκθεση στους 900°C, πιθανώς οφείλεται στην παρουσία χαλαζία και ορισμένων αργιλο-πυριτικών ορυκτών στο λιθότυπο (34).** Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1. της ενότητας 2.2, ο χαλαζίας σε θερμοκρασίες >573°C παρουσιάζει θερμική διόγκωση, ενώ στους 900°C αυξάνονται οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, με αποτέλεσμα να δέχεται μέγιστη και μόνιμη καταπόνηση. Επιπλέον, οι αργιλο-πυριτικές ενώσεις σε θερμοκρασίες >600°C αποσυντίθενται. Το αμέσως μικρότερο ποσοστό μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων το συναντάμε στα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C, με τιμή ίση με -33,96%. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 400°C με ποσοστό μείωσης ίσο με -9,88% και τέλος αυτά που εξετέθησαν στους 300°C, με ποσοστό μείωσης ίσο με -1,95%. Αυτά τα αποτελέσματα μας υποδεικνύουν ότι έχουμε μείωση της συνεκτικότητας των λίθων και των αναμενόμενων μηχανικών αντοχών τους με την αύξηση της θερμοκρασίας του φούρνου.

Πίνακας 30. Διαφορά ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το λιθότυπο Lecce

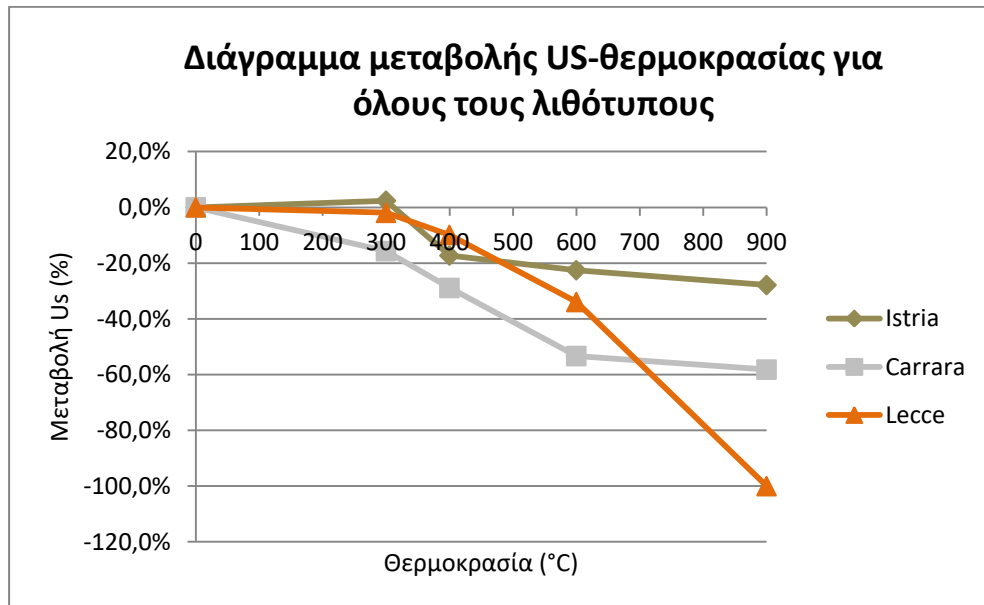
| Κωδικός | Μέση τιμή για κάθε θερμοκρασία | | Ποσοστό μεταβολής μέσης τιμής μετά την προσομοίωση της φωτιάς (%) | Διαφορά ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής ανά θερμοκρασιακό διάστημα (%) | |
|--------------------|--------------------------------|--------|---|---|-------------|
| | Πριν | Μετά | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | Ποσοστό (%) |
| C _{300°C} | 1966,1 | 1927,8 | -1,95% | 25°C-300°C | -1,95% |
| C _{400°C} | 2047,8 | 1845,6 | -9,88% | 300°C-400°C | -7,93% |
| C _{600°C} | 1972,1 | 1302,5 | -33,96% | 400°C-600°C | -24,08% |
| C _{900°C} | 2025,4 | 0 | -100,00% (κατάρρευση) | 600°C-900°C | -66,04% |

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής μέσης τιμής εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C, με ποσοστό -66.04%, όπου τα δοκίμια καταρρέουν και έχουν χάσει πλήρως τη συνοχή τους. Η κατάρρευση των δοκιμών, όπως προαναφέρθηκε, πιθανώς οφείλεται στην παρουσία χαλαζία και αργιλο-πυριτικών ορυκτών στο λιθότυπο. Αυτό υποδεικνύει ότι σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, **επιτυγχάνεται και η μεγαλύτερη σε ποσοστό απομείωση της αντοχής και ανθεκτικότητας του λιθότυπου Lecce.** Ύστερα, η αμέσως μικρότερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 400°C-600°C με τιμή -

24,08% και στη συνέχεια στο διάστημα 300°C-400°C με τιμή -7.93%. Τέλος, στο θερμοκρασιακό διάστημα 25°C-300°C παρατηρείται ότι έχουμε τη μικρότερη ποσοστιαία διαφορά με τιμή -1.95%. Αυτή η πολύ μικρή ποσοστιαία διαφορά, υποδεικνύει πως σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, δεν επιτυγχάνεται σημαντική απομείωση της συνεκτικότητας και των μηχανικών αντοχών του λιθότυπου Lecce, κάτι βέβαια που συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό στα επόμενα θερμοκρασιακά διαστήματα και ιδιαίτερα στο 600°C-900°C.

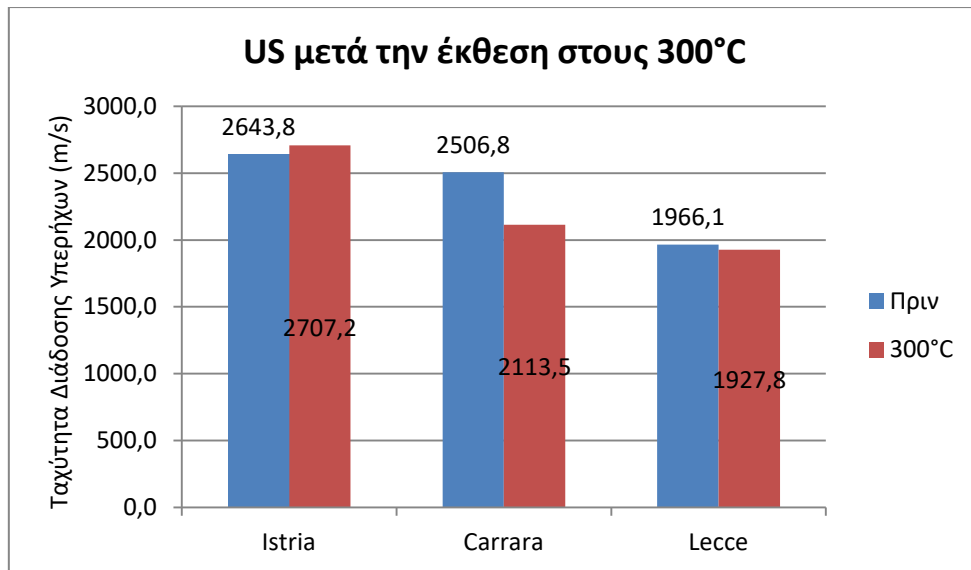
4.3.4. Μερικά συμπεράσματα

Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών λιθότυπων, ως προς την ταχύτητα διάδοσης υπερήχων, για κάθε θερμοκρασία.



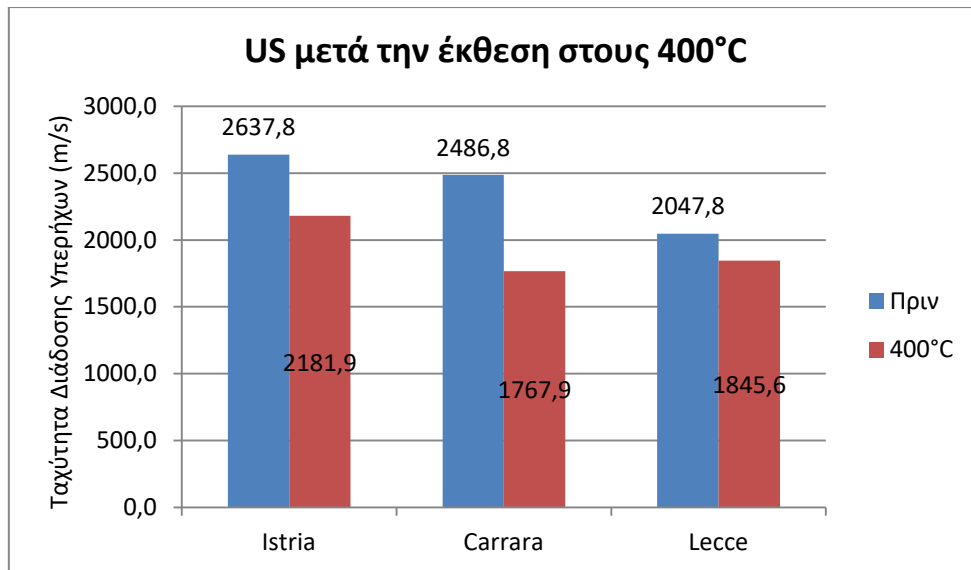
Διάγραμμα 12. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά θερμοκρασία για όλους τους λιθότυπους

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως το μάρμαρο Carrara εμφανίζει τη μεγαλύτερη μείωση της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε όλες τις θερμοκρασίες, εκτός αυτής των 900°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία **τη μεγαλύτερη μείωση την παρουσιάζει ο λιθότυπος Lecce, ο οποίος και καταρρέει**. Η κατάρρευση του λίθου Lecce στους 900°C πιθανόν οφείλεται στην παρουσία χαλαζία και αργιλο-πυριτικών ορυκτών στο λιθότυπο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται πιο λεπτομερής περιγραφή των αποτελεσμάτων και σύγκριση ως προς τη μέση τιμή ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μεταξύ των τριών λιθότυπων, για κάθε θερμοκρασία.



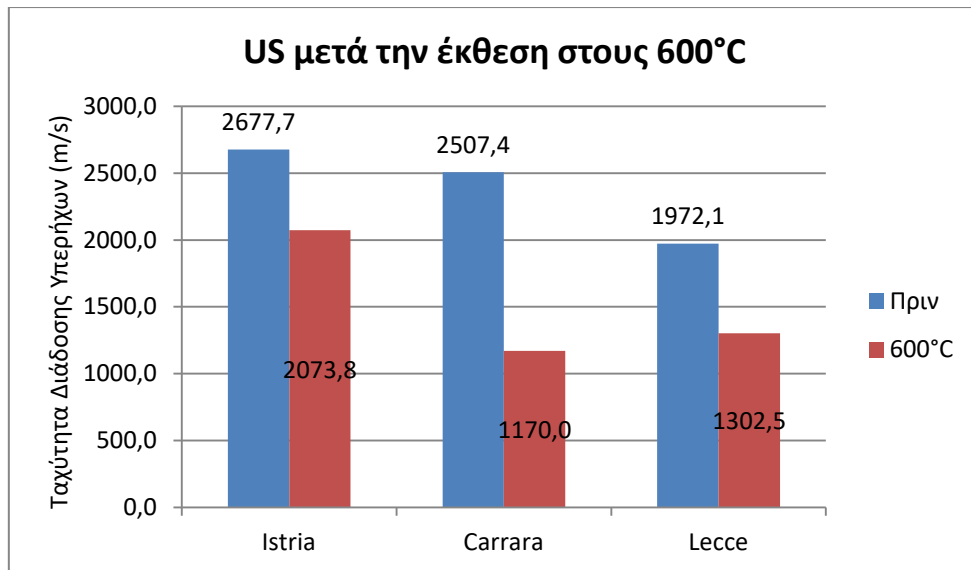
Διάγραμμα 13. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά λιθότυπο πριν και μετά την έκθεση στους 300°C

Παρατηρείται πως ύστερα από τη θέρμανση στο φούρνο στους 300°C, η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μειώνεται για την περίπτωση του μαρμάρου Carrara και του λιθότυπου Lecce. Μάλιστα, στην περίπτωση του μαρμάρου Carrara έχουμε μεγαλύτερη ελάττωση της τάξης του 15,69%, σε σύγκριση με του λιθότυπου Lecce, που η μέση τιμή μειώνεται κατά 1,95%. Αντίθετα, στο λίθο Istria φαίνεται να αυξάνεται η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων κατά 2,40%. Από αυτά τα αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 300°C, **το μάρμαρο Carrara παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ελάττωση στη συνοχή και σε μηχανικές αντοχές.**



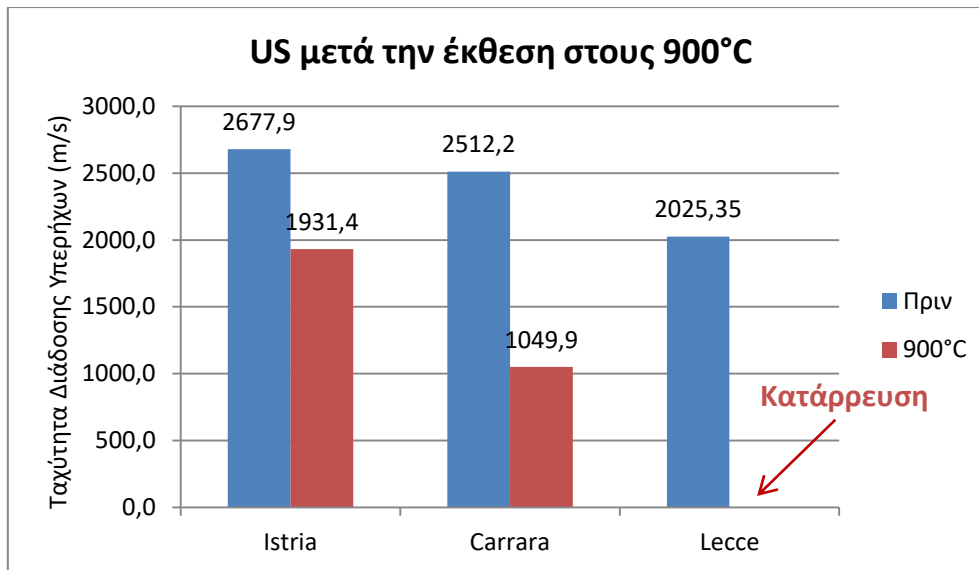
Διάγραμμα 14. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά λιθότυπο πριν και μετά την έκθεση στους 400°C

Παρατηρείται πως ύστερα από την έκθεση των δοκιμών στους 400°C, η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μειώνεται για όλα τα είδη λίθων. Στην περίπτωση του μαρμάρου Carrara έχουμε τη μεγαλύτερη ελάττωση κατά 28,91%, έπεται ο λιθότυπος Istria του οποίου η μέση τιμή μειώνεται κατά 17,28% και τέλος ο λιθότυπος Lecce, του οποίου η μέση τιμή ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ελαττώνεται κατά 9,88%. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν, ότι μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 400°C, **το μάρμαρο Carrara παρουσιάζει πάλι τη μεγαλύτερη ελάττωση σε συνοχή και μηχανικές αντοχές.**



Διάγραμμα 15. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά λιθότυπο πριν και μετά την έκθεση στους 600°C

Ύστερα από θέρμανση στο φούρνο στους 600°C, η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μειώνεται πάλι για όλα τα είδη λίθων. Στην περίπτωση του μαρμάρου Carrara έχουμε τη μεγαλύτερη ελάττωση κατά 53,34%, ακολουθεί ο λίθος Lecce που παρατηρείται μείωση κατά 33,96% και τέλος ο λίθος Istria του οποίου η μέση τιμή μειώνεται κατά 22,55%. Από αυτά τα αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 600°C, **το μάρμαρο Carrara εμφανίζει τη μεγαλύτερη ελάττωση σε συνοχή και μηχανικές αντοχές.**



Διάγραμμα 16. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά λιθότυπο πριν και μετά την έκθεση στους 900°C

Ύστερα από θέρμανση στο φούρνο στους 900°C ο λίθος Lecce κατέρρευσε πλήρως, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στην παρουσία χαλαζία και αργιλο-πυριτικών ορυκτών στο λιθότυπο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Συνεπώς, κατέστη αδύνατος ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στην περίπτωση αυτή, οπότε και θεωρείται ότι έχουμε μηδενική ταχύτητα διάδοσης υπερήχων και ελάττωση κατά 100,00%, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα. Στις άλλες δυο περιπτώσεις έχουμε πάλι μείωση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων. Στην περίπτωση του μαρμάρου Carrara έχουμε ελάττωση κατά 58,21%, ενώ του λιθότυπου Istria κατά 27,88%. Από αυτά τα αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 900°C, ο λιθότυπος Lecce και στη συνέχεια το μάρμαρο Carrara, εμφανίζουν τη μεγαλύτερη μείωση στη συνοχή και σε μηχανικές αντοχές.

4.4. Δοκιμές Εμβάπτισης – Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού & ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό

Οι μετρήσεις του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%), όπου υπολογίζεται το μέγιστο ποσοστό ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (WAC% - υδατική χωρητικότητα) και το ολικό ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό (% open porosity), πραγματοποιούνται βάσει της πρότυπης διαδικασίας RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais des Materiaux) tests (Test n.1.1: Porosity accessible to water, Test n.1.2: Bulk and real densities) (76).

Από την πειραματική διαδικασία και πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς, όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.2.4, προσδιορίστηκαν τα μεγέθη του μέγιστου ποσοστού υγρασίας μέσω εμβάπτισης WAC%, του %ανοιχτού πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας για ένα δοκίμιο από κάθε λιθότυπο σε κάθε θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, για το λιθότυπο Lecce δεν μελετήθηκε το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C και έχει καταρρεύσει, επειδή δεν εστάλη από το εργαστήριο της Βενετίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.



Εικόνα 30. Δοκιμές εμβάπτισης για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια

4.4.1. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Istria

Πίνακας 31. Μέγιστο ποσοστό ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P), φαινόμενης πυκνότητα (ρ_s) για το λιθότυπο Istria για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | ρ_s | Μεταβολή ρ_s ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|------|---|------|---|----------|---|
| A2r | Ref. | 0,17 | x | 0,06 | x | 2,85 | X |
| A3 | 300°C | 0,54 | +210,8% | 0,19 | +204,4% | 2,82 | -1,1% |
| A20 | 400°C | 0,21 | +23,2% | 0,07 | +20,2% | 2,84 | -0,4% |
| A18 | 600°C | 1,83 | +950,7% | 0,67 | +991,0% | 2,74 | -3,7% |
| A13 | 900°C | 4,88 | +2707,0% | 1,82 | +2878,0% | 2,69 | -5,7% |

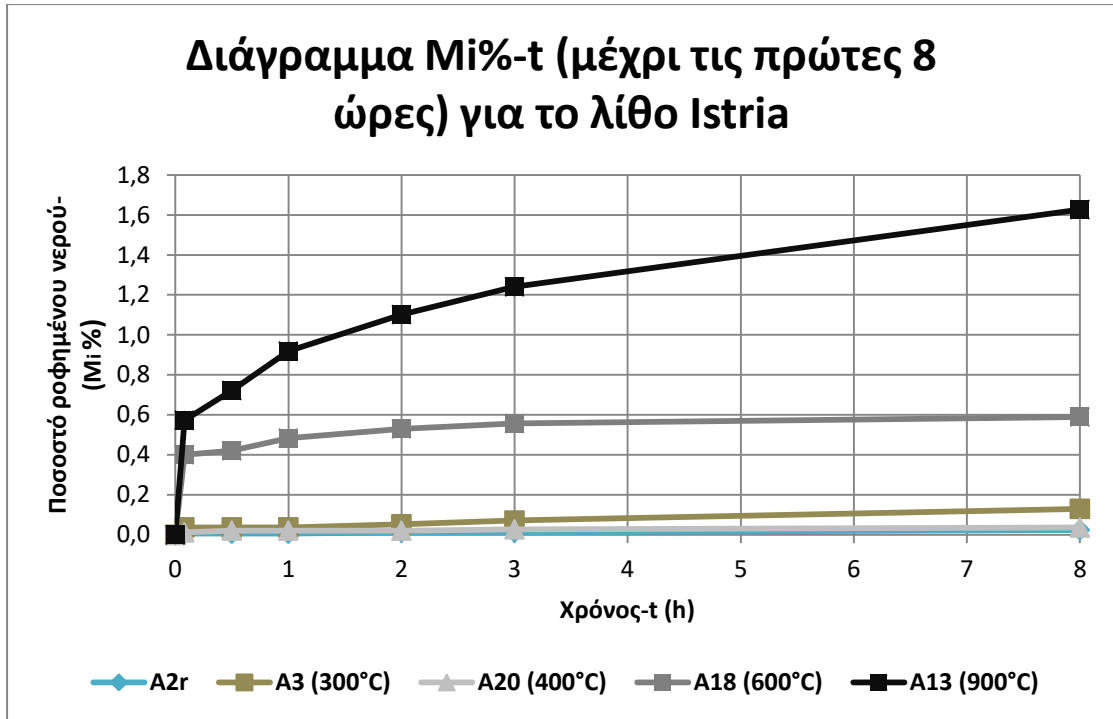
Από τον παραπάνω πίνακα και με βάση τα αποτελέσματα για το δοκίμιο αναφοράς, παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος Istria αποτελεί λίθο με αρκετά χαμηλό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη σχετική βιβλιογραφία (24). Στη συνέχεια, φαίνεται ότι το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C **εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά στα μεγέθη ολικού ανοιχτού πορώδους (%P) και μέγιστου ροφημένου νερού (%WAC)**. Μάλιστα το ποσοστό αύξησής τους ως προς το δοκίμιο αναφοράς είναι +2707,0% και +2878,0%, αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα, όπως ήταν αναμενόμενο, είναι η μικρότερη με τιμή 2,69 g/ml και μειώνεται κατά 5,7% από αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Αυτό μας δείχνει ότι μετά από την έκθεση του λιθότυπου Istria στους 900°C, **έχουμε τη μεγαλύτερη αλλοίωση της μικροδομής του**, γεγονός που συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης και της μακροσκοπικής και μικροσκοπικής ανάλυσης. Στη συνέχεια, την αμέσως μικρότερη τιμή αύξησης στα μεγέθη %P και %WAC, εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 600°C, με ποσοστά αύξησης +950,7% και +991,0% αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα μειώνεται επίσης κατά 3,7%, όπως περιμέναμε. Η μεγάλη αύξηση των μεγεθών %P και %WAC που παρουσιάζουν τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C και 900°C, οφείλεται και στις εμφανείς ρωγμές που υπέστησαν τα δοκίμια μετά την είσοδό τους στο φούρνο. Την αμέσως μικρότερη αύξηση στα μεγέθη %P και %WAC, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, την παρατηρούμε στο δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C με ποσοστά +210,8% και +204,4% αντίστοιχα και τέλος στο δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C, με ποσοστά 23,2% και 20,2% αντίστοιχα. Μετά την έκθεση του λιθότυπου Istria στους 300°C και 400°C παρατηρούμε ότι η φαινόμενη πυκνότητα παρουσιάζει μικρή μείωση της τάξης του -1,1% και -0,4% αντίστοιχα. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι γενικά **για το λιθότυπο Istria, με την αύξηση της**

θερμοκρασίας του φούρνου αυξάνονται το μέγιστο ποσοστό ροφήμένου νερού (%WAC) και το % ολικό ανοιχτό πορώδες (%P), ενώ η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_s) μειώνεται.

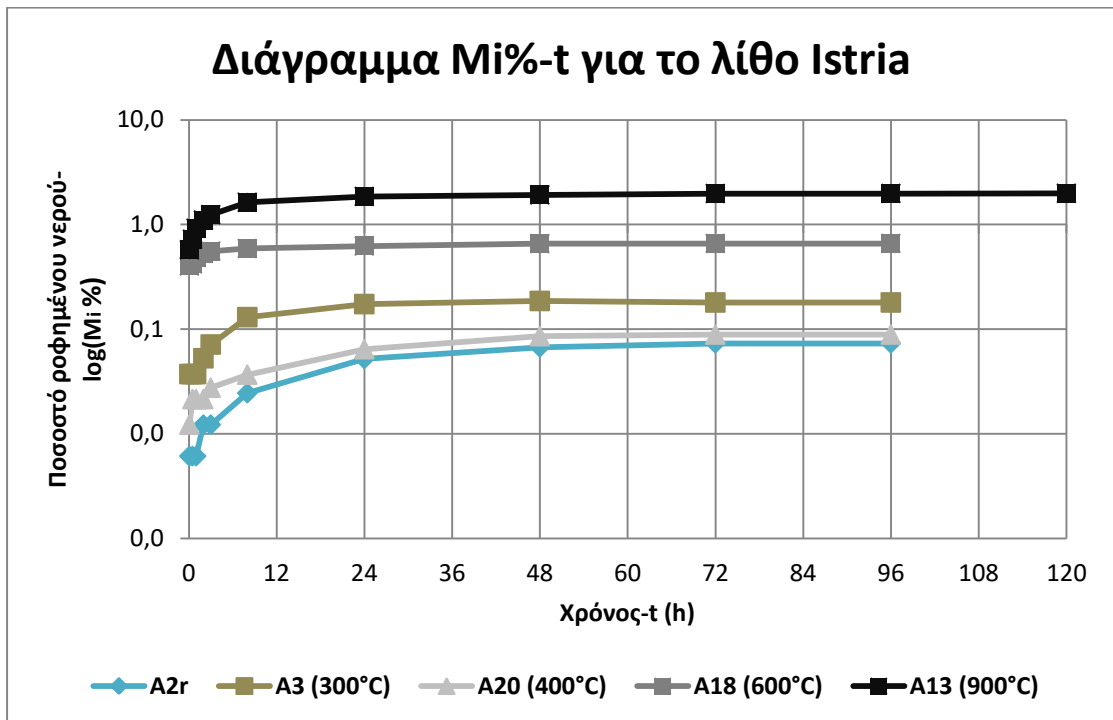
Πίνακας 32. Διαφορές ποσοστών μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφήμένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P), φαινόμενης πυκνότητα (ρ_s) ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το λιθότυπο Istria

| Κωδικός | Ποσοστό μεταβολής (%) | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | Διαφορά ποσοστού μεταβολής (%) | | |
|--------------------|-----------------------|----------|----------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------|
| | P% | WAC% | ρ_s | | P% | WAC% | ρ_s |
| A _{300°C} | +210,8% | +204,4% | -1,1% | 25°C-300°C | +210,8% | +204,4% | -1,1% |
| A _{400°C} | +23,2% | +20,2% | -0,4% | 300°C-400°C | -187,6% | -184,2% | +0,7% |
| A _{600°C} | +950,7% | +991,0% | -3,7% | 400°C-600°C | +927,5% | +970,7% | -6,2% |
| A _{900°C} | +2707,0% | +2878,0% | -5,7% | 600°C-900°C | +1756,4% | +1887,1% | -2,0% |

Από τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C, με τιμές +1756,4% και +1887,1% αντίστοιχα. Αυτό υποδεικνύει ότι σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, **επιτυγχάνεται και η μεγαλύτερη σε ποσοστό αλλοίωση της μικροδομής του λιθότυπου Istria**. Ύστερα, μικρότερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 400°C-600°C με τιμές +927,5% και +970,7% αντίστοιχα, δηλαδή περίπου στο μισό απ' ό,τι στο προαναφερθέν διάστημα. Στη συνέχεια, μικρότερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζεται στο διάστημα 25°C-300°C και είναι της τάξης του +210,8% και +204,4% αντίστοιχα. Τέλος, οι αρνητικές τιμές στην ποσοστιαία διαφορά για τα μεγέθη %P και %WAC, που εμφανίζονται στο διάστημα 300°C-400°C, εκφράζουν τη μείωση των εν λόγω μεγεθών σε σχέση με το προηγούμενο θερμοκρασιακό διάστημα. Συμπερασματικά, **παρατηρείται ότι γενικά τα μεγέθη %P και %WAC μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο (αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας) και στον ίδιο βαθμό στα εκάστοτε θερμοκρασιακά διαστήματα, γεγονός που υποδεικνύει την εξάρτηση των δύο μεγεθών**. Ως προς τις διαφορές του ποσοστού μεταβολής της φαινόμενης πυκνότητας, φαίνεται ότι αυτές διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα καθώς και ότι εμφανίζουν πτωτική τάση, που αν και μικρή, συμβαδίζει με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τον προηγούμενο πίνακα.



Διάγραμμα 17. Μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) και για τις πρώτες 8 ώρες εμβάπτισης για το λιθότυπο Istria για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες



Διάγραμμα 18. Μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) και για το συνολικό χρόνο εμβάπτισης για το λιθότυπο Istria για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

Από τα παραπάνω διαγράμματα αρχικά παρατηρείται ότι οι υγρομετρικές καμπύλες συμβαδίζουν με τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων για τα μεγέθη %P και %WAC. Πιο συγκεκριμένα, το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C **παρουσιάζει τη μέγιστη απορροφητική ικανότητα και μάλιστα χρειάστηκε ένα επιπλέον 24ωρο εμβάπτισης για να κορεστεί σε νερό.** Την αμέσως μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 600°C. Ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι τις πρώτες 8 ώρες εμβάπτισης, η διαφορά, ως προς το μέγεθος Mi%, με το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C, είναι μικρότερη από την τελική τους διαφορά, όταν δηλαδή έχουν κορεστεί σε νερό. Η διαφορά, ως προς την απορρόφηση νερού, **μεταξύ των δοκιμίων που έχουν εκτεθεί στους 900°C και 600°C αντίστοιχα, υποδεικνύει ότι η μικροδομή του λίθου Istria μετά την έκθεσή του στην υψηλότερη θερμοκρασία, αλλοιώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με τη χαμηλότερη θερμοκρασία, γι' αυτό και εισχωρεί μεγαλύτερη ποσότητα νερού,** η οποία και καταγράφεται στην αντίστοιχη καμπύλη αλλά και στα ποσοστά %WAC και %P. Στη συνέχεια, μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C, με σημαντική διαφορά από αυτήν των δοκιμίων που έχουν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες (600°C και 900°C). Τέλος, το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C και το δοκίμιο αναφοράς εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές του μεγέθους Mi%, με ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους. Συμπερασματικά **παρατηρούμε ότι για το λιθότυπο Istria, με την αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης των δοκιμίων αυξάνεται και το ποσοστό ροφημένου νερού, δηλαδή η απορροφητική τους ικανότητα.**

4.4.2. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο μάρμαρο Carrara

Πίνακας 33. Μέγιστο ποσοστό ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P), φαινόμενης πυκνότητα (ρ_s) για το μάρμαρο Carrara για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | ρ_s | Μεταβολή ρ_s ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|------|---|------|---|----------|---|
| B2r | Ref. | 0,39 | x | 0,14 | x | 2,83 | x |
| B9 | 300°C | 0,59 | +48,6% | 0,21 | +52,0% | 2,77 | -2,3% |
| B11 | 400°C | 0,88 | +123,9% | 0,32 | +127,5% | 2,79 | -1,6% |
| B1 | 600°C | 2,95 | +645,9% | 1,07 | +669,0% | 2,75 | -3,0% |
| B4 | 900°C | 6,64 | +1581,7% | 2,48 | +1680,8% | 2,67 | -5,6% |

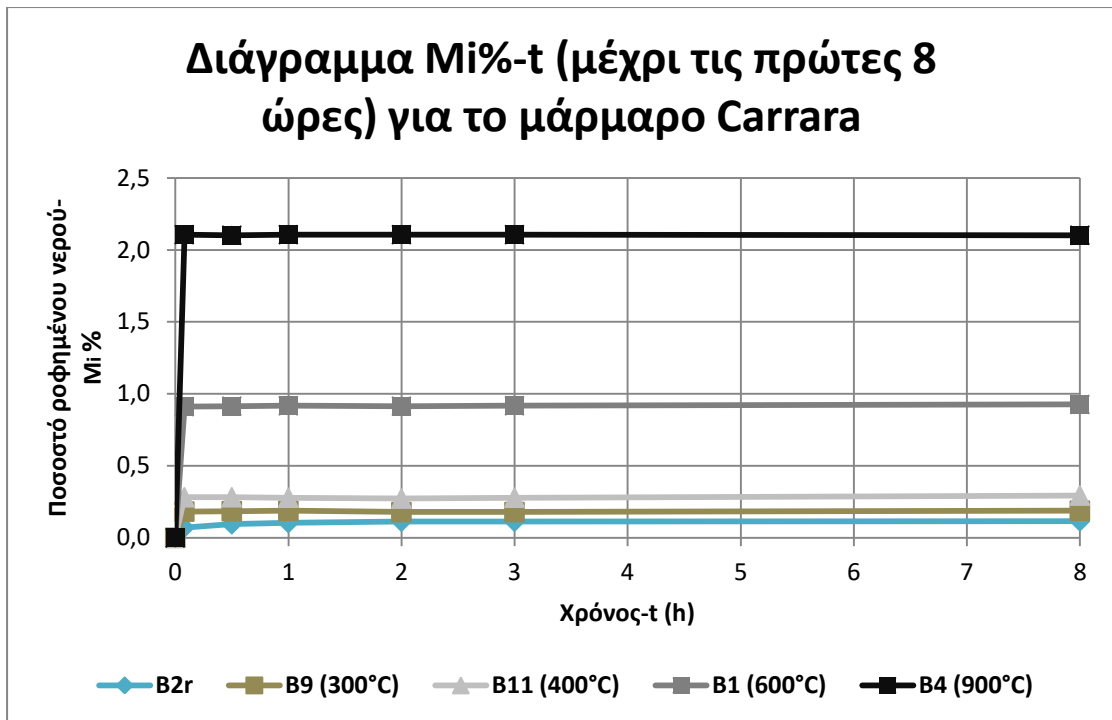
Από τον παραπάνω πίνακα και με βάση τα αποτελέσματα για το δοκίμιο αναφοράς, παρατηρούμε ότι το μάρμαρο Carrara έχει αρκετά χαμηλό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη σχετική βιβλιογραφία (30). Το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C **εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά στα μεγέθη ολικού ανοιχτού πορώδους (%P) και μέγιστου ροφημένου νερού (%WAC)**. Μάλιστα το ποσοστό αύξησής τους ως προς το δοκίμιο αναφοράς είναι +1581,7% και +1680,8%, αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα, όπως ήταν αναμενόμενο, είναι η μικρότερη με τιμή 2,67 g/ml και μειώνεται κατά 5,6% από αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Στη συνέχεια, μικρότερη αύξηση στα μεγέθη %P και %WAC, εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 600°C, με ποσοστά αύξησης +645,9% και +669,0% αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα μειώνεται επίσης κατά 3,0%. Η μεγάλη αύξηση των μεγεθών %P και %WAC που παρουσιάζουν τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C και ιδιαίτερα αυτό στους 900°C, πιθανόν να οφείλεται στην πλήρη παραμόρφωση που έχουν υποστεί, με αποτέλεσμα να έχει καταστραφεί η επιφανειακή τους μικροδομή και ενδεχομένως να έχουν αλλοιωθεί εσωτερικά, γεγονός που συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης και της μακροσκοπικής και μικροσκοπικής ανάλυσης. Την αμέσως μικρότερη αύξηση στα μεγέθη %P και %WAC, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, την παρατηρούμε στο δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C με ποσοστά +123,9% και +127,5% αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα πάλι μειώνεται, αλλά σε μικρότερο βαθμό και συγκεκριμένα κατά 1,6%. Τέλος, το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C εμφανίζει τη μικρότερη αύξηση των μεγεθών %P και %WAC, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς (+48,6% και +52,0% αντίστοιχα). Η φαινόμενη πυκνότητα μειώνεται κατά 2,3% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι για το μάρμαρο Carrara, με την αύξηση της θερμοκρασίας του

φούρνου αυξάνονται το μέγιστο ποσοστό ροφήμένου νερού (%WAC) και το % ολικό ανοιχτό πορώδες (%P), ενώ η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_s) μειώνεται.

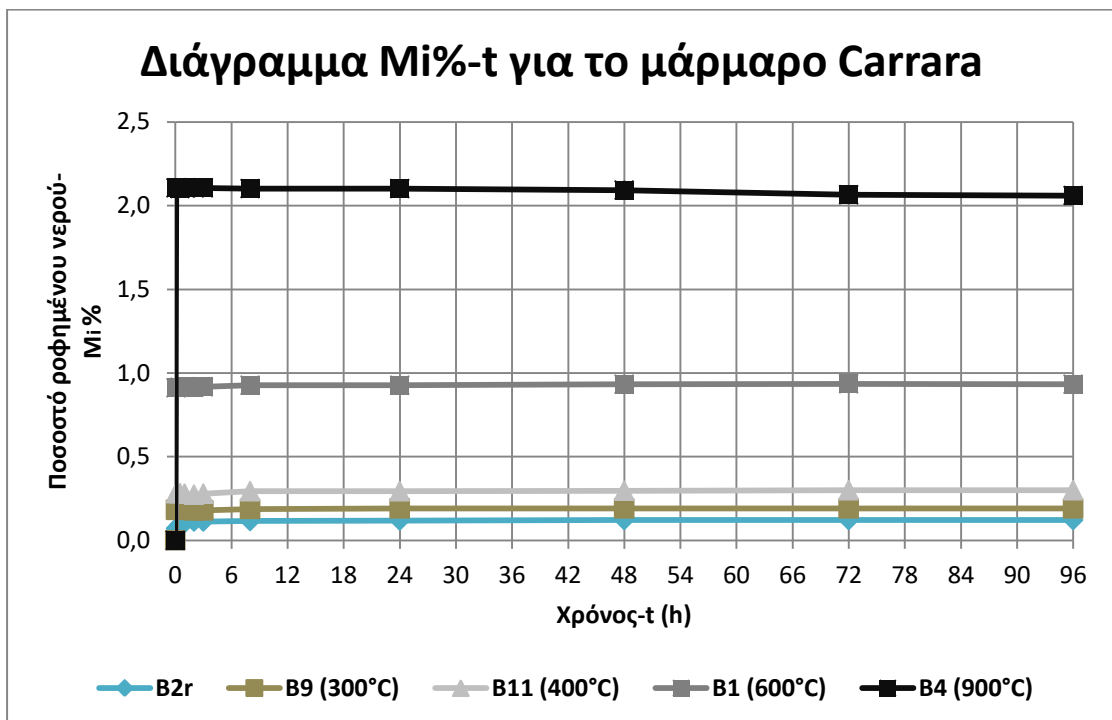
Πίνακας 34. Διαφορές ποσοστών μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφήμένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P), φαινόμενης πυκνότητας (ρ_s) ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το μάρμαρο Carrara

| Κωδικός | Ποσοστό μεταβολής (%) | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | Διαφορά ποσοστού μεταβολής (%) | | |
|--------------------|-----------------------|----------|----------|-----------------------------|--------------------------------|----------|----------|
| | P% | WAC% | ρ_s | | P% | WAC% | ρ_s |
| B _{300°C} | +48,6% | +52,0% | -2,3% | 25°C-300°C | +48,6% | +52,0% | -2,3% |
| B _{400°C} | +123,9% | +127,5% | -1,6% | 300°C-400°C | +75,3% | +75,5% | +0,7% |
| B _{600°C} | +645,9% | +669,0% | -3,0% | 400°C-600°C | +522,0% | +541,5% | -1,4% |
| B _{900°C} | +1581,7% | +1680,8% | -5,6% | 600°C-900°C | +935,8% | +1011,8% | -2,6% |

Από τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C, με τιμές +935,8% και +1011,8% αντίστοιχα. Μετά μικρότερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 400°C-600°C με τιμές +522,0% και +541,5% αντίστοιχα, δηλαδή πάλι περίπου στο μισό απ' ότι στο προαναφερθέν διάστημα. Στη συνέχεια, μικρότερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζεται στο διάστημα 300°C-400°C και είναι της τάξης του +75,3% και +75,5% αντίστοιχα. Τέλος, στο θερμοκρασιακό διάστημα 25°C-300°C παρατηρείται η μικρότερη διαφορά ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC, με τιμές +48,6% και 52,0% αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα θερμοκρασιακά διαστήματα 400°C-600°C και κυρίως στο 600°C-900°C παρατηρούνται αρκετά υψηλές διαφορές των ποσοστών μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC, σε σχέση με τα προηγούμενα διαστήματα. Αυτό υποδεικνύει τη μεγαλύτερη αλλοίωση στη μικροδομή, που υφίσταται το μάρμαρο Carrara, σε αυτά τα θερμοκρασιακά διαστήματα σε σχέση με τα προηγούμενα. Τα μεγέθη %P και %WAC μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο (αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας) και στον ίδιο βαθμό στα εκάστοτε θερμοκρασιακά διαστήματα, γεγονός που υποδεικνύει την εξάρτηση των δύο μεγεθών. Ως προς τις διαφορές του ποσοστού μεταβολής της φαινόμενης πυκνότητας, φαίνεται ότι αυτές διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα καθώς και ότι εμφανίζουν πτωτική τάση, που αν και μικρή, συμβαδίζει με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τον προηγούμενο πίνακα.



Διάγραμμα 19. Μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμφάνισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) και για τις πρώτες 8 ώρες εμφάνισης για το μάρμαρο Carrara για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες



Διάγραμμα 20. Μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμφάνισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) και για το συνολικό χρόνο εμφάνισης για το μάρμαρο Carrara για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

Από τα παραπάνω διαγράμματα αρχικά παρατηρείται ότι οι υγρομετρικές καμπύλες συμβαδίζουν με τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων για τα μεγέθη %P και %WAC. Πιο συγκεκριμένα, το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C **παρουσιάζει τη μέγιστη απορροφητική ικανότητα**. Την αμέσως μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 600°C. Παρατηρείται ότι οι τιμές του ποσοστού ροφημένου νερού (Mi%) για τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C και ιδιαίτερα για το δοκίμιο στους 900°C, είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπολοίπων δειγμάτων. Αυτό υποδεικνύει ότι τα δοκίμια που εξετέθησαν στους 600°C και 900°C εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερη απορροφητική ικανότητα από τα υπόλοιπα, γεγονός που αποδεικνύεται και από τις τιμές στους στα μεγέθη %P και %WAC. Στη συνέχεια, μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C με μικρή διαφορά από αυτό στους 300°C, που έπεται. Τέλος, τη μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το δοκίμιο αναφοράς, όπως ήταν αναμενόμενο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 300°C και 400°C, όπως και το αναφοράς, εμφανίζουν χαμηλές τιμές τους ποσοστού ροφημένου νερού, όταν σε υψηλότερες θερμοκρασίες οι τιμές του Mi% αυξάνονται σημαντικά, όπως προαναφέρθηκε. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να συνδυαστεί με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης, όπου στους 600°C και 900°C το μάρμαρο Carrara εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης της μέσης τιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων, δηλαδή τη μεγαλύτερη απομείωση της συνοχής του. Συμπερασματικά **παρατηρούμε ότι για το μάρμαρο Carrara, με την αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης των δοκιμίων αυξάνεται και το ποσοστό ροφημένου νερού, δηλαδή η απορροφητική τους ικανότητα.**

4.4.3. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Lecce

Πίνακας 35. Μέγιστο ποσοστό ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P), φαινόμενης πυκνότητα (ρ_s) για το λιθότυπο Lecce για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

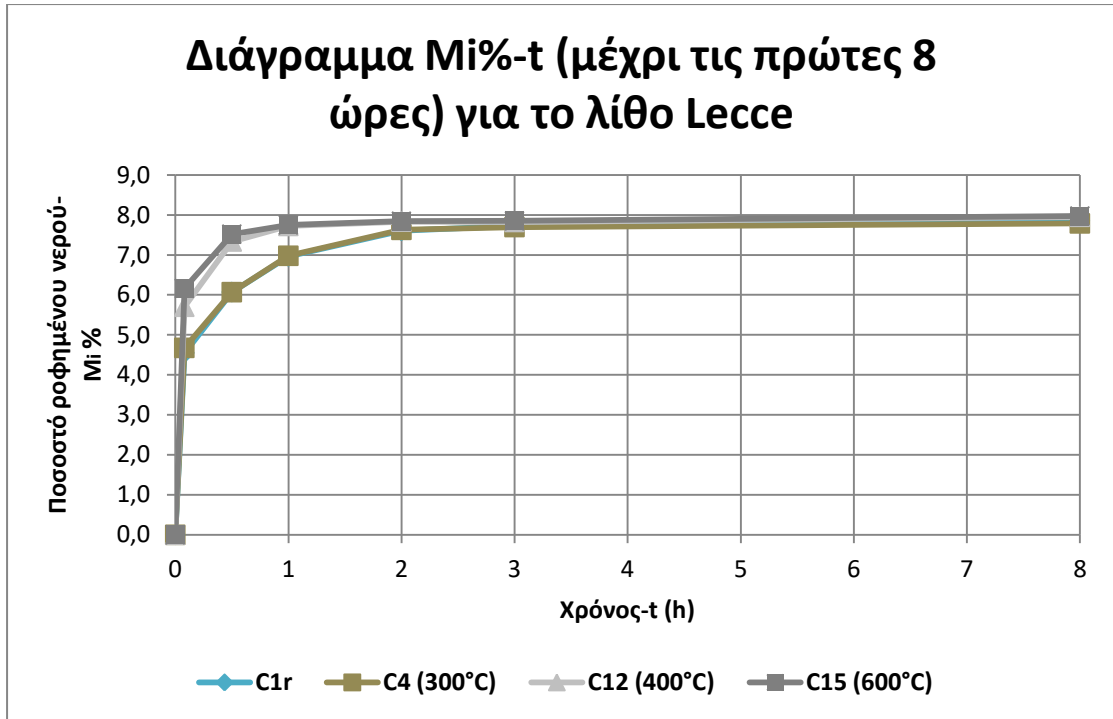
| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | ρ_s | Μεταβολή ρ_s ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|-------|---|-------|---|----------|---|
| C1r | Ref. | 20,28 | Χ | 9,96 | Χ | 2,04 | Χ |
| C4 | 300°C | 20,77 | +2,4% | 10,23 | +2,7% | 2,03 | -0,3% |
| C12 | 400°C | 19,17 | -5,5% | 9,69 | -2,6% | 1,98 | -2,9% |
| C15 | 600°C | 20,08 | -1,0% | 9,85 | -1,1% | 2,04 | +0,1% |

Από τον παραπάνω πίνακα και με βάση τα αποτελέσματα για το δοκίμιο αναφοράς, παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος Lecce αποτελεί λίθο με αρκετά υψηλό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη σχετική βιβλιογραφία (39). Το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C **εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά στα μεγέθη ολικού ανοιχτού πορώδους (%P) και μέγιστου ροφημένου νερού (%WAC)**, με ποσοστά αύξησης ως προς το δοκίμιο αναφοράς +2,4% και +2,7% αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα σε αυτή τη θερμοκρασία μειώνεται κατά 0,3% από αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Στη συνέχεια, το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 600°C εμφανίζει μικρή μείωση στα μεγέθη %P και %WAC, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, με αντίστοιχα ποσοστά μείωσης -1,0% και -1,1%, ενώ παράλληλα εμφανίζει πολύ μικρή αύξηση στη φαινόμενη πυκνότητα της τάξης του 0,1%. Το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C εμφανίζει επίσης μείωση στα μεγέθη %P και %WAC, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, με αντίστοιχα ποσοστά -5,5% και -2,6%. Η φαινόμενη πυκνότητα μετά την έκθεση στους 400°C επίσης μειώνεται κατά 2,9%. Γενικά **παρατηρούμε ότι για τα μεγέθη %P, %WAC και φαινόμενη πυκνότητα εμφανίζονται αντίστοιχες τιμές για όλα τα δοκίμια, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας έκθεσης στο φούρνο**, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα πολύ μικρά ποσοστά μεταβολής των αντίστοιχων μεγεθών. Αυτό σημαίνει ότι **τα προαναφερθέντα μεγέθη παραμένουν σχεδόν σταθερά μετά την έκθεση του λιθότυπου Lecce σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή το δίκτυο των πόρων που είναι προσβάσιμο στο νερό παραμένει παρόμοιο στο σύνολό του**. Παρ' όλα αυτά, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η κατανομή των πόρων σε σχέση με το μέγεθος της ακτίνας τους μπορεί να διαφοροποιείται στις διαφορετικές θερμοκρασίες έκθεσης, γεγονός όμως που δεν μπορεί να εξακριβωθεί με τη συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης.

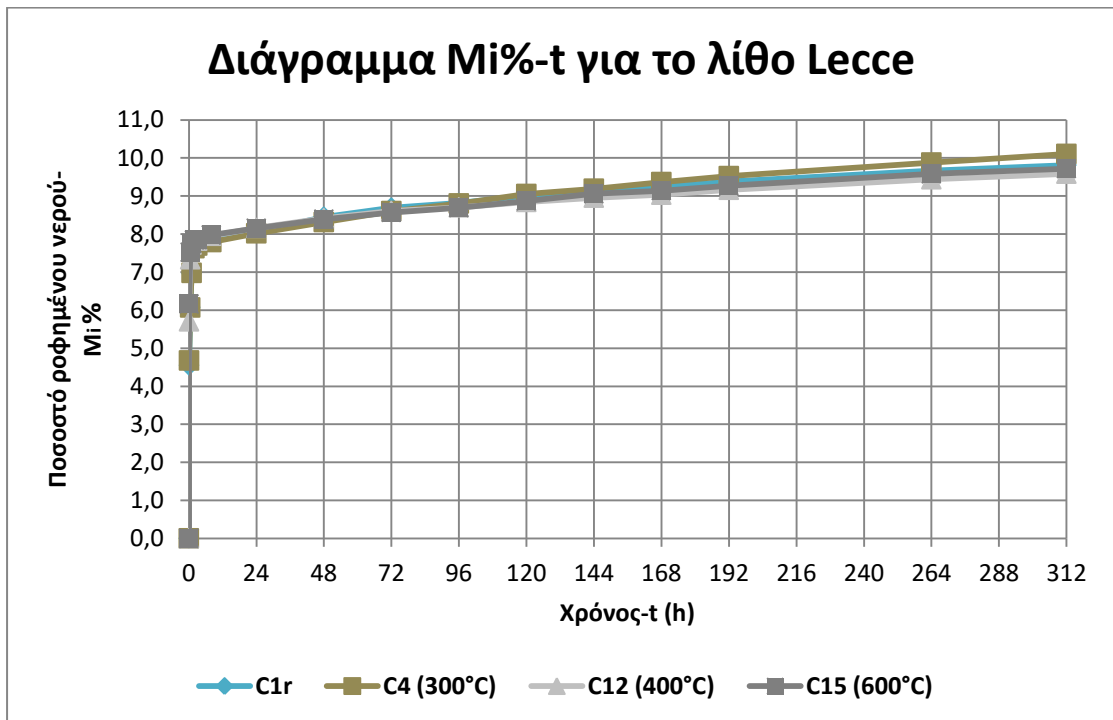
Πίνακας 36. Διαφορές ποσοστών μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P), φαινόμενης πυκνότητα (ρ_s) ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το λιθότυπο Lecce

| Κωδικός | Ποσοστό μεταβολής (%) | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | Διαφορά ποσοστού μεταβολής (%) | | |
|--------------------|-----------------------|-------|----------|-----------------------------|--------------------------------|-------|----------|
| | P% | WAC% | ρ_s | | P% | WAC% | ρ_s |
| C _{300°C} | +2,4% | +2,7% | -0,3% | 25°C-300°C | +2,4% | +2,7% | -0,3% |
| C _{400°C} | -5,5% | -2,6% | -2,9% | 300°C-400°C | -7,9% | -5,4% | -2,6% |
| C _{600°C} | -1,0% | -1,1% | +0,1% | 400°C-600°C | +4,5% | +1,6% | +3,0% |

Από τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη σε απόλυτο αριθμό διαφορά του ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 300°C-400°C, η οποία όμως είναι αρνητική με τιμές -7,9% και -5,4% αντίστοιχα. Οι αρνητικές τιμές στην ποσοστιαία διαφορά για τα μεγέθη %P και %WAC, που εμφανίζεται σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα, εκφράζουν τη μείωση των εν λόγω μεγεθών σε σχέση με το προηγούμενο θερμοκρασιακό διάστημα. Ύστερα, μικρότερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 400°C-600°C με τιμές +4,5% και +1,6% αντίστοιχα. Τέλος, η μικρότερη διαφορά του ποσοστού μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζεται στο διάστημα 25°C-300°C και είναι της τάξης του +2,4% και +2,7% αντίστοιχα. Συμπεραίνουμε ότι γενικά **τα μεγέθη %P και %WAC μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο, γεγονός που υποδεικνύει την εξάρτηση των δύο μεγεθών**. Ως προς τις διαφορές του ποσοστού μεταβολής της φαινόμενης πυκνότητας, η υψηλότερη εμφανίζεται στο διάστημα 400°C-600°C και ακολουθούν τα διαστήματα 300°C-400°C και 25°C-300°, με αρνητικές τιμές. Γενικά, παρατηρείται ότι οι διαφορές για τα τρία μεγέθη μεταξύ των θερμοκρασιακών διαστημάτων παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που υποδεικνύει ότι το δίκτυο των πόρων που είναι προσβάσιμο στο νερό δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης.



Διάγραμμα 21. Μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) και για τις πρώτες 8 ώρες εμβάπτισης για το λιθότυπο Lesce για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

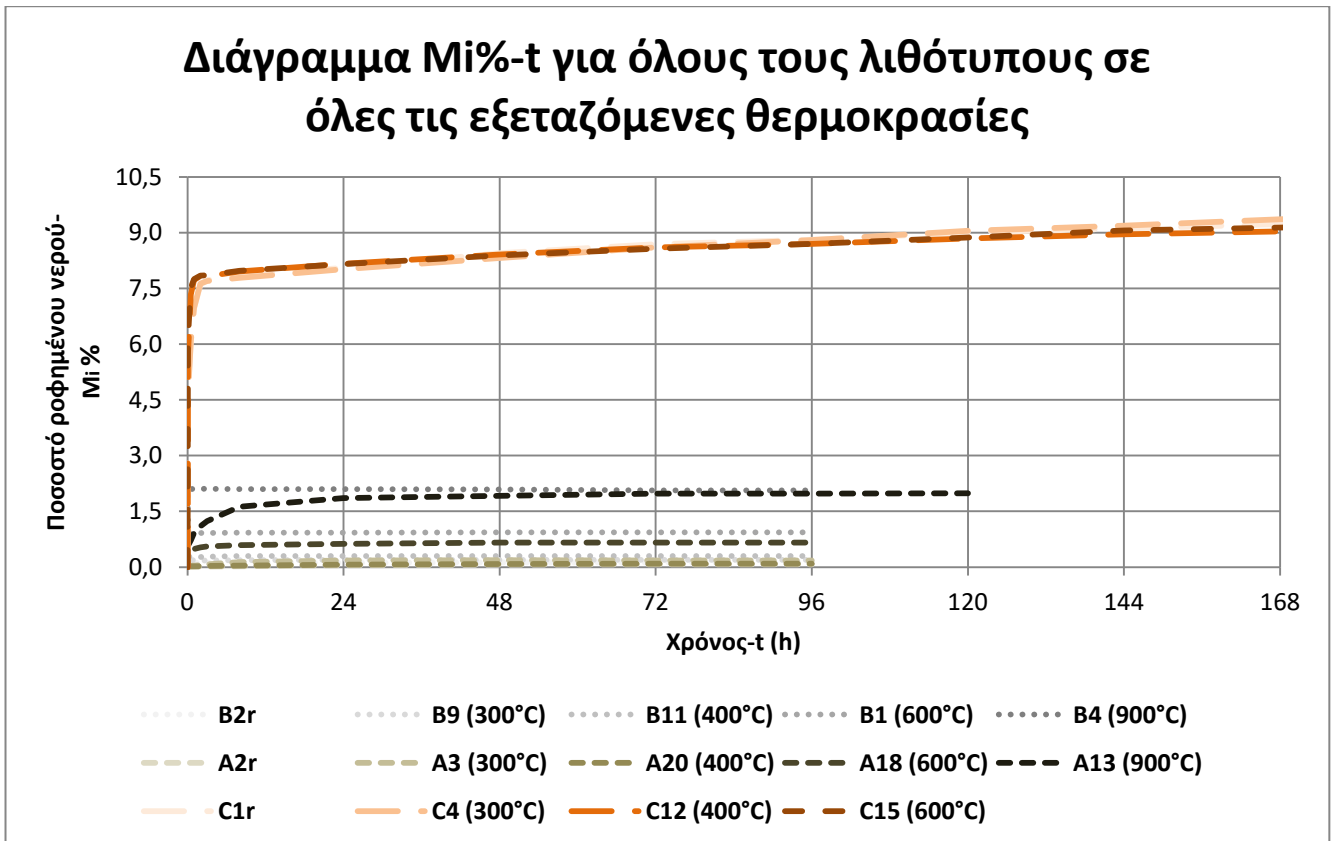


Διάγραμμα 22. Μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) και για το συνολικό χρόνο εμβάπτισης για το λιθότυπο Lesce για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

Από τα παραπάνω διαγράμματα αρχικά παρατηρείται ότι ανεξαρτήτως αν τα δοκίμια έχουν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες ή όχι, στο σύνολό τους εμφανίζουν παρόμοιο τρόπο απορρόφησης. Συγκεκριμένα, **οι τιμές του ποσοστού ροφημένου νερού είναι πολύ κοντά μεταξύ τους για όλα τα δοκίμια είτε εξετέθησαν σε υψηλές θερμοκρασίες είτε όχι**, γεγονός που συμβαδίζει απόλυτα με τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων για τα μεγέθη %P και %WAC. Πιο συγκεκριμένα, το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C παρουσιάζει τη μέγιστη απορροφητική ικανότητα. Την αμέσως μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το δοκίμιο αναφοράς, όμως με πολύ μικρή διαφορά από αυτό που έχει εκτεθεί στους 600°C και έπεται. Τέλος, τη μικρότερη απορροφητική ικανότητα παρουσιάζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C, βέβαια, όπως προαναφέρθηκε, με πολύ μικρή διαφορά από όλα τα υπόλοιπα δοκίμια. Ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο λιθότυπο παρουσιάζει το γεγονός ότι τις πρώτες 2 ώρες εμβάπτισης, οι τιμές του μεγέθους M_i%, για τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 400°C και 600°C σε σχέση με το αναφοράς και αυτό που έχει εκτεθεί στους 300°C είναι υψηλότερες. Μάλιστα, το δοκίμιο στους 600°C παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές του ποσοστού ροφημένου νερού μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Στη συνέχεια, οι τιμές του M_i% για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια φαίνεται να εξισώνονται και τελικά το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C εμφανίζει, με μικρή διαφορά, τη μεγαλύτερη απορροφητική ικανότητα. Οι παρόμοιες τιμές του ποσοστού ροφημένου νερού, όπως και των μεγεθών %P και %WAC, για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, **υποδεικνύει ότι τα δοκίμια του λιθότυπου Lesce παρουσιάζουν παρόμοια απορροφητική ικανότητα ανεξαρτήτως αν εξετέθησαν σε υψηλές θερμοκρασίες ή όχι. Αυτό σημαίνει για το λιθότυπο Lesce ότι μετά την έκθεση των δοκιμών σε υψηλές θερμοκρασίες, το δίκτυο των πόρων που είναι προσβάσιμο στο νερό παραμένει παρόμοιο στο σύνολό του.** Παρόλα αυτά, όπως προαναφέρθηκε, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η κατανομή των πόρων σε σχέση με το μέγεθος της ακτίνας τους μπορεί να διαφοροποιείται στις διαφορετικές θερμοκρασίες έκθεσης.

4.4.4. Μερικά συμπεράσματα

Στα παρακάτω διαγράμματα και πίνακες γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών λιθότυπων ως προς το ποσοστό ροφημένου νερού και ως προς το ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς για όλες αλλά και για κάθε θερμοκρασία έκθεσης ξεχωριστά.



Διάγραμμα 23. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) για όλους τους λιθότυπους για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

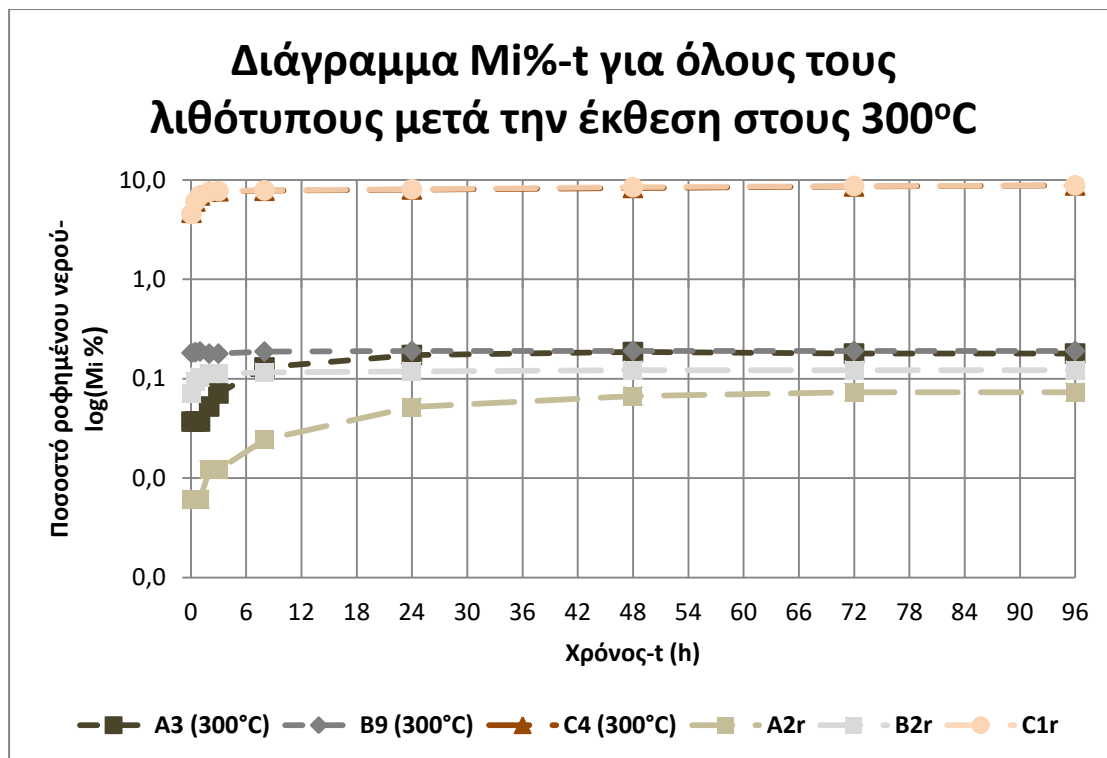
Στο παραπάνω διάγραμμα αναπαριστώνται οι υδρομετρικές καμπύλες όλων των λιθότυπων για όλες τις θερμοκρασίες έκθεσης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των δοκιμών δεν είναι δυνατή η λεπτομερής μελέτη κάθε δοκιμίου ξεχωριστά σε αυτό το διάγραμμα. Για το σκοπό αυτό γίνεται παρουσίαση αντίστοιχων διαγραμμάτων σε κάθε εξεταζόμενη θερμοκρασία παρακάτω. Στο παρόν διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο **λιθότυπος Lecce παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ποσοστού ροφημένου νερού σε σχέση με το μάρμαρο Carrara και το λιθότυπο Istria, γεγονός που φαίνεται και από τις τιμές των μεγεθών %P και %WAC, που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα, ως προς το μέγεθος %P, ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει μέγιστη τιμή της τάξης του 20,77% όταν στο λιθότυπο Istria και το μάρμαρο Carrara οι αντίστοιχες τιμές είναι 4,88% και 6,64% αντίστοιχα. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί και από το γεγονός ότι ο λιθότυπος**

Lecce χρειάστηκε 312 ώρες εμβάπτισης για να κορεστεί σε νερό, όταν ο λιθότυπος Istria και το μάρμαρο Carrara χρειάστηκαν μόνο 120 ώρες και 96 ώρες αντίστοιχα. Αυτό υποδεικνύει τη σημαντικά μεγαλύτερη απορροφητική ικανότητα του λιθότυπου Lecce σε σχέση με τους άλλους δύο λιθότυπους. Ακόμη, φαίνεται ότι ο λιθότυπος Istria και το μάρμαρο Carrara απορροφούν νερό στον ίδιο βαθμό, γεγονός που φαίνεται από τις τιμές των μεγεθών %P και %WAC και επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία (18), (24). Τέλος, παρατηρείται ότι για το μάρμαρο Carrara μετά την πρώτη ώρα εμβάπτισης ο ρυθμός απορρόφησης νερού είναι πολύ χαμηλός της τάξης του 0,009 gr/h. Αντίθετα, οι λιθότυποι Lecce και Istria εμφανίζουν μεγαλύτερους ρυθμούς απορρόφησης νερού, μετά την πρώτη ώρα εμβάπτισης, της τάξης του 0,46 gr/h και 0,39 gr/h αντίστοιχα.

Στα παρακάτω διαγράμματα και πίνακες γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών λιθότυπων ως προς το ποσοστό ροφημένου νερού και ως προς το ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς για κάθε εξεταζόμενη θερμοκρασία. Για τις θερμοκρασίες 300°C, 400°C και 600°C, οι υγρομετρικές καμπύλες απεικονίζονται για χρόνο εμβάπτισης μέχρι 96 ώρες, ενώ για τους 900°C για χρόνο εμβάπτισης μέχρι 120 ώρες. Αυτό γίνεται ώστε να απεικονίζονται καλύτερα και να είναι πιο κατανοητά τα διαγράμματα, παρ' ότι για το λιθότυπο Lecce ο συνολικός χρόνος εμβάπτισης είναι 312 ώρες.

Πίνακας 37. Συγκριτικός πίνακας μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P) ως προς το δοκίμιο αναφοράς για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 300°C

| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|-------|---|-------|---|
| Istria | Ref. | 0,17 | +210,8% | 0,06 | +204,4% |
| | 300°C | 0,54 | | 0,19 | |
| Carrara | Ref. | 0,39 | +48,6% | 0,14 | +52,0% |
| | 300°C | 0,59 | | 0,21 | |
| Lecce | Ref. | 20,28 | +2,4% | 9,96 | +2,7% |
| | 300°C | 20,77 | | 10,23 | |



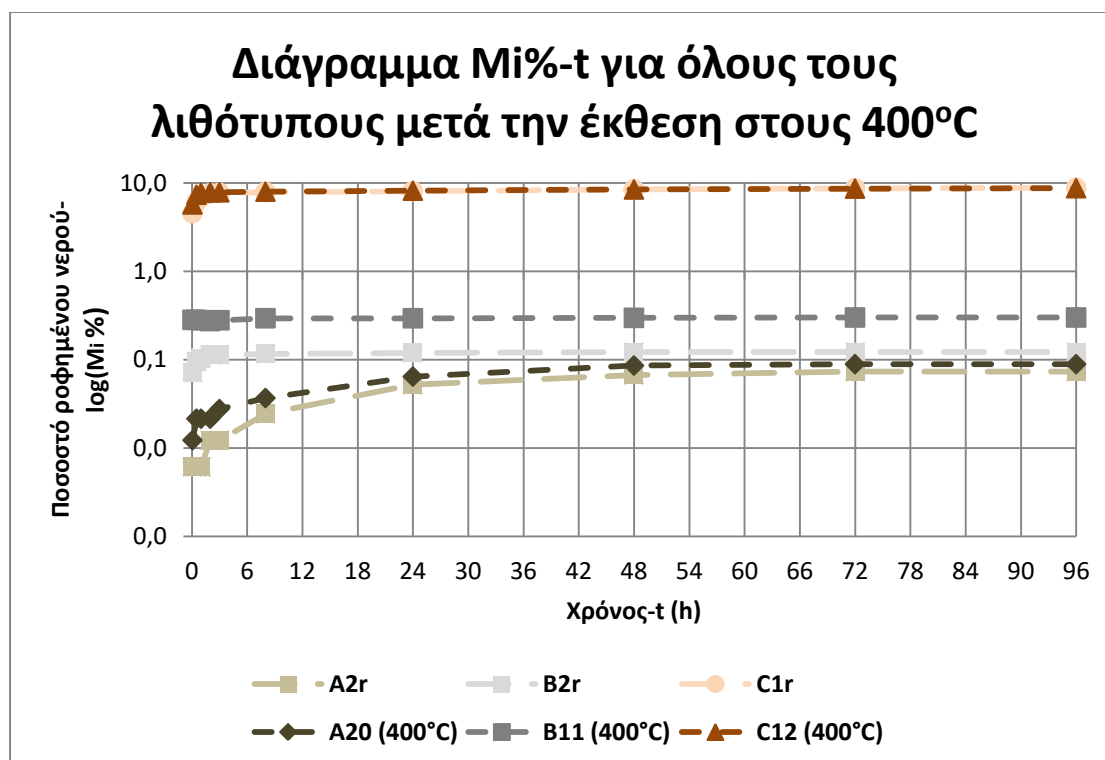
Διάγραμμα 24. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) για 96 ώρες εμβάπτισης για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 300°C

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και συγκρίνοντας δοκίμια που έχουν εκτεθεί στην ίδια θερμοκρασία, **ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ροφημένου νερού καθ' όλη τη διάρκεια της εμβάπτισης.** Στη συνέχεια, το μεγαλύτερο Mi% εμφανίζει το μάρμαρο Carrara και τέλος ο λιθότυπος Istria. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μεγεθών %P και %WAC για τους τρεις λιθότυπους, που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα, όπου ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τις υψηλότερες. Ως προς τη σχέση μεταξύ των δοκιμών αναφοράς και αυτών που έχουν εκτεθεί στους 300°C, **ο λιθότυπος Istria εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC,** με σημαντική διαφορά από τους άλλους λιθότυπους, γεγονός που γίνεται αντιληπτό και από τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των υδρομετρικών καμπυλών δοκιμίου αναφοράς και δοκιμίου στους 300°C. Στη συνέχεια μικρότερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζει το μάρμαρο Carrara με αύξηση κατά 48,6% και 52,0% αντίστοιχα, ενώ τέλος ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει πολύ μικρή μεταβολή της τάξης του +2,4% και +2,7% αντίστοιχα. Αυτό υποδεικνύει ότι **ο λιθότυπος που φαίνεται να επηρεάζεται πιο πολύ ως προς την απορροφητική του ικανότητα μετά την έκθεση στους 300°C, είναι ο λιθότυπος Istria, ενώ το μάρμαρο Carrara φαίνεται να επηρεάζεται σε πολύ μικρότερο βαθμό και ο λιθότυπος Lecce σχεδόν καθόλου.** Αυτό υποδεικνύει ότι μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 300°C, **στο λιθότυπο Istria έχουμε τη μεγαλύτερη αλλοίωση της μικροδομής,** γεγονός που δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης, όπου στο μάρμαρο Carrara εμφανίζεται η μεγαλύτερη ελάττωση της συνοχής και των μηχανικών αντοχών σε αυτή τη θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι όποιοι

πόροι έχουν προκύψει στο Carrara μετά την έκθεση του δοκιμίου στους 300°C, δεν είναι προσβάσιμοι στο νερό.

Πίνακας 38. Συγκριτικός πίνακας μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P) ως προς το δοκίμιο αναφοράς για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 400°C

| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|-------|---|------|---|
| Istria | Ref. | 0,17 | +23,2% | 0,06 | +20,2% |
| | 400°C | 0,21 | | 0,07 | |
| Carrara | Ref. | 0,39 | +123,9% | 0,14 | +127,5% |
| | 400°C | 0,88 | | 0,32 | |
| Lecce | Ref. | 20,28 | -5,5% | 9,96 | -2,6% |
| | 400°C | 19,17 | | 9,69 | |

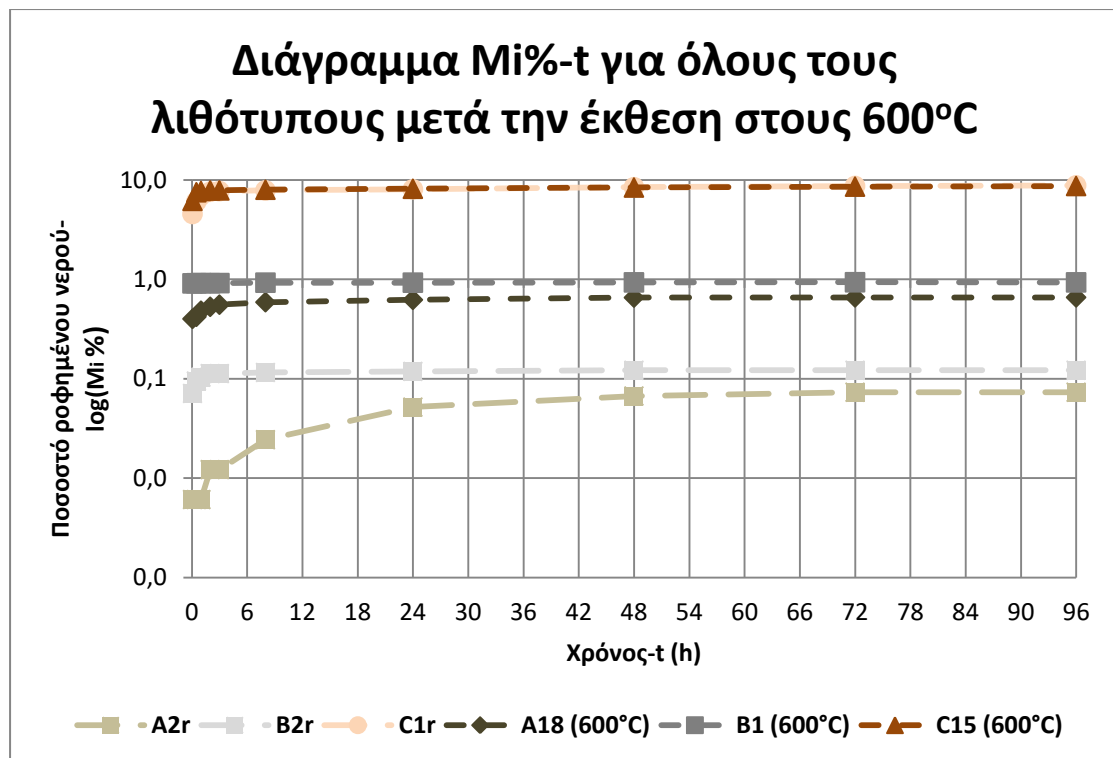


Διάγραμμα 25. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) για 96 ώρες εμβάπτισης για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 400°C

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και συγκρίνοντας δοκίμια που έχουν εκτεθεί στην ίδια θερμοκρασία, ο λιθότυπος Lecce **εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ροφημένου νερού καθ' όλη τη διάρκεια της εμβάπτισης**. Στη συνέχεια, μικρότερο Mi% εμφανίζει το μάρμαρο Carrara και τέλος ο λιθότυπος Istria. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μεγεθών %P και %WAC για τους τρεις λιθότυπους, που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα, όπου ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τις υψηλότερες. Ως προς τη σχέση μεταξύ των δοκιμών αναφοράς και αυτών που έχουν εκτεθεί στους 400°C, **το μάρμαρο Carrara εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC**, γεγονός που γίνεται αντιληπτό και από τις υδρομετρικές καμπύλες. Στη συνέχεια μικρότερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζει ο λιθότυπος Istria με μικρή αύξηση αυτών κατά 23,2% και 20,2% αντίστοιχα, ενώ τέλος ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει πολύ μικρή μεταβολή και μάλιστα μείωση. Αυτό υποδεικνύει ότι **ο λιθότυπος που φαίνεται να επηρεάζεται πιο πολύ ως προς την απορροφητική του ικανότητα μετά την έκθεση στους 400°C, είναι το μάρμαρο Carrara, ενώ ο λιθότυπος Istria φαίνεται να επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό και ο λιθότυπος Lecce σχεδόν καθόλου**. Αυτό υποδεικνύει ότι μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 400°C, **στο μάρμαρο Carrara έχουμε τη μεγαλύτερη αλλοίωση της μικροδομής**, γεγονός που συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκοπήσης, όπου στο μάρμαρο Carrara εμφανίζεται η μεγαλύτερη ελάττωση της συνοχής και των μηχανικών αντοχών σε αυτή τη θερμοκρασία.

Πίνακας 39. Συγκριτικός πίνακας μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P) ως προς το δοκίμιο αναφοράς για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 600°C

| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|-------|---|------|---|
| Istria | Ref. | 0,17 | +950,7% | 0,06 | +991,0% |
| | 600°C | 1,83 | | 0,67 | |
| Carrara | Ref. | 0,39 | +645,9% | 0,14 | +669,0% |
| | 600°C | 2,95 | | 1,07 | |
| Lecce | Ref. | 20,28 | -1,0% | 9,96 | -1,1% |
| | 600°C | 20,08 | | 9,85 | |



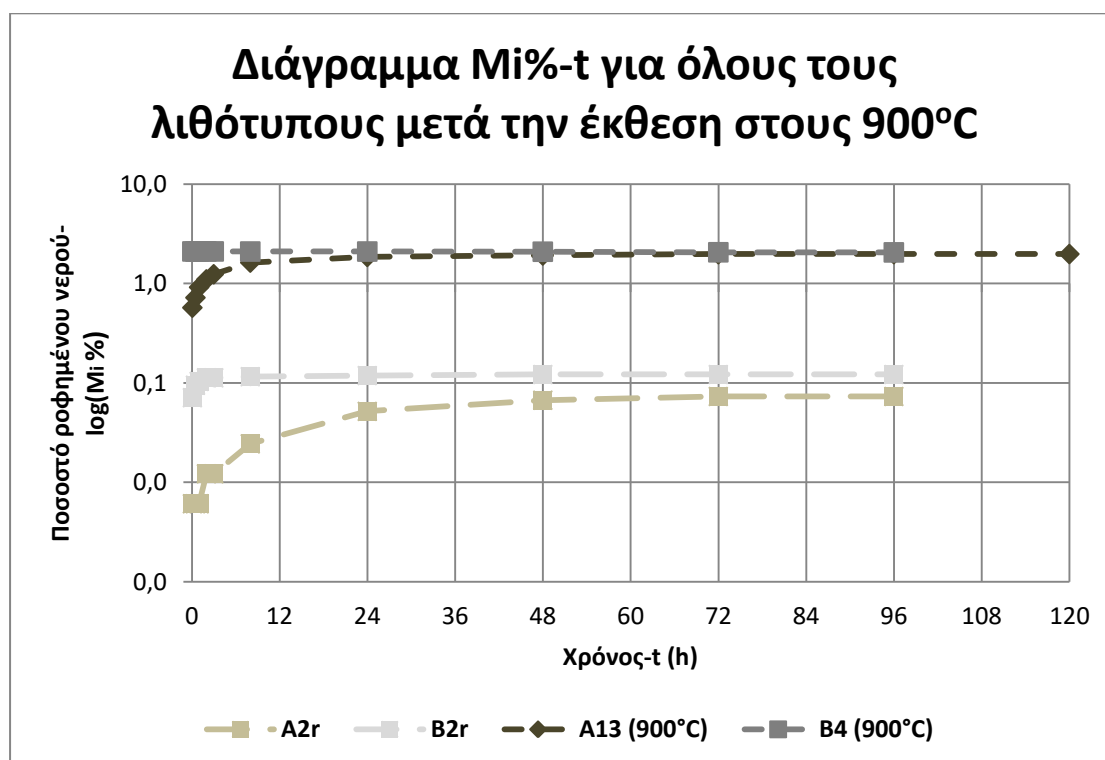
Διάγραμμα 26. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) για 96 ώρες εμβάπτισης για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 600°C

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και συγκρίνοντας δοκίμια που έχουν εκτεθεί στην ίδια θερμοκρασία, **ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ροφημένου νερού καθ' όλη τη διάρκεια της εμβάπτισης.** Στη συνέχεια, μικρότερο Mi% εμφανίζει το μάρμαρο Carrara και τέλος ο λιθότυπος Istria. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μεγεθών %P και %WAC για τους τρεις λιθότυπους, που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα, όπου ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τις υψηλότερες. Ως προς τη σχέση μεταξύ των δοκιμών αναφοράς και αυτών που έχουν εκτεθεί στους 600°C, **ο λιθότυπος Istria εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC,** γεγονός που γίνεται αντιληπτό και από τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των υγραμετρικών καμπυλών δοκιμίου αναφοράς και δοκιμίου στους 600°C. Στη συνέχεια μικρότερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC εμφανίζει το μάρμαρο Carrara, ενώ τέλος ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει πολύ μικρή μεταβολή και συγκεκριμένα μικρή μείωση. Αυτό υποδεικνύει ότι **ο λιθότυπος που φαίνεται να επηρεάζεται πιο πολύ ως προς την απορροφητική του ικανότητα μετά την έκθεση στους 600°C, είναι ο λιθότυπος Istria,** ενώ το μάρμαρο Carrara φαίνεται να επηρεάζεται λιγότερο και ο λιθότυπος Lecce σχεδόν καθόλου. Αυτό υποδεικνύει ότι **μετά την έκθεση και των τριών λιθότυπων στους 600°C, στο λιθότυπο Istria έχουμε τη μεγαλύτερη αλλοίωση στη μικροδομή,** γεγονός όμως που δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης, όπου στο μάρμαρο Carrara και ύστερα στο λιθότυπο Lecce εμφανίζεται η μεγαλύτερη ελάττωση της συνοχής και των μηχανικών αντοχών σε αυτή τη θερμοκρασία. Η μεγάλη απορροφητική ικανότητα που εμφανίζει ο λιθότυπος Istria μετά την έκθεσή του στους 600°C, χωρίς όμως να εμφανίζει και τη μεγαλύτερη ελάττωση της συνοχής σε σχέση με τους άλλους λιθότυπους, πιθανόν να

οφείλεται και στις ρωγμές που έγιναν αντιληπτές κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων, οι οποίες διευκόλυναν την εισχώρηση του νερού στο εσωτερικό του και οι οποίες δεν βρίσκονταν στις περιοχές που ελέγχθηκαν με την υπερηχοσκόπηση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί βέβαια και στο ότι οι μικροπόροι που αναπτύχθηκαν στο μάρμαρο Carrara δεν είναι προσβάσιμοι στο νερό, οπότε η ροφητική ικανότητα του λίθου παραμένει χαμηλή.

Πίνακας 40. Συγκριτικός πίνακας μεταβολής μέγιστου ποσοστού ροφημένου νερού (%WAC), % ανοιχτού πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης (%P) ως προς το δοκίμιο αναφοράς για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | Θερμοκρασία | P% | Μεταβολή P% ως προς το δοκίμιο αναφοράς | WAC% | Μεταβολή WAC% ως προς το δοκίμιο αναφοράς |
|---------|-------------|------|---|------|---|
| Istria | Ref. | 0,17 | +2707,0% | 0,06 | +2878,0% |
| | 900°C | 4,88 | | 1,82 | |
| Carrara | Ref. | 0,39 | +1581,7% | 0,14 | +1680,8% |
| | 900°C | 6,64 | | 2,48 | |



Διάγραμμα 27. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού ροφημένου νερού μέσω εμβάπτισης (Mi%) συναρτήσει του χρόνου (t) για 120 ώρες εμβάπτισης για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 900°C

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και συγκρίνοντας δοκίμια που έχουν εκτεθεί στην ίδια θερμοκρασία, **το μάρμαρο Carrara εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό ροφημένου νερού απ' ότι ο λιθότυπος Istria καθ' όλη τη διάρκεια της εμβάπτισης.** Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μεγεθών %P και %WAC για τους δύο λιθότυπους, που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα. Ως προς τη σχέση μεταξύ των δοκιμίων αναφοράς και αυτών που έχουν εκτεθεί στους 900°C, **ο λιθότυπος Istria εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής των μεγεθών %P και %WAC,** με σημαντική διαφορά από το μάρμαρο Carrara, γεγονός που γίνεται αντιληπτό και από τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των υγρομετρικών καμπυλών δοκιμίου αναφοράς και δοκιμίου στους 900°C. Αυτό υποδεικνύει ότι **ο λιθότυπος που φαίνεται να επηρεάζεται πιο πολύ ως προς την απορροφητική του ικανότητα μετά την έκθεση στους 900°C, είναι ο λιθότυπος Istria, ενώ το μάρμαρο Carrara φαίνεται να επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό.** Αυτό υποδεικνύει ότι **μετά την έκθεση και των δύο λιθότυπων στους 900°C, στο λιθότυπο Istria έχουμε τη μεγαλύτερη αλλοίωση στη μικροδομή,** γεγονός όμως που δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης, όπου στο μάρμαρο Carrara εμφανίζεται μεγαλύτερη ελάττωση της συνοχής και των μηχανικών αντοχών σε σχέση με το λίθο Istria σε αυτή τη θερμοκρασία. Η μεγάλη απορροφητική ικανότητα που εμφανίζει ο λιθότυπος Istria μετά την έκθεσή του στους 900°C, χωρίς όμως να εμφανίζει και τη μεγαλύτερη ελάττωση της συνοχής σε σχέση με τους άλλους λιθότυπους, πιθανόν να οφείλεται και στις ρωγμές που έγιναν αντιληπτές κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων, οι οποίες διευκόλυναν την εισχώρηση του νερού στο εσωτερικό του και οι οποίες δεν βρίσκονταν στις περιοχές που ελέγχθηκαν με την υπερηχοσκόπηση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί βέβαια και στο ότι οι μικροπόροι που αναπτύχθηκαν στο μάρμαρο Carrara δεν είναι προσβάσιμοι στο νερό, οπότε η ροφητική ικανότητα του λίθου παραμένει χαμηλή.

4.5. Χρωματομετρία

Εξετάστηκε η μεταβολή των χρωματικών παραμέτρων με την τεχνική της χρωματομετρίας, πριν και μετά την προσομοίωση της φωτιάς, για κάθε είδος λίθου. Εφαρμόστηκε το μοντέλο CIE Lab, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 3.2.5. Επίσης, έγινε χρήση των συσκευών SpectraMagic NX στο εργαστήριο του πανεπιστημίου Ca' Foscari και Dr. Lange colorimeter LMG268 στο εργαστήριο του Ε.Μ.Π. Εκτελέστηκαν 2 μετρήσεις σε 1 επιφάνεια για κάθε δοκίμιο. Συγκεκριμένα, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ψηφιακής μικροσκοπίας (DM), επιλέχθηκαν οι επιφάνειες με τις λιγότερες αλλοιώσεις. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αυτοσχέδια «μάσκα» με διαστάσεις 5cm x 5cm, ώστε να διακρίνονται τα ακριβή σημεία που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η «μάσκα» που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια με αυτή στην ψηφιακή μικροσκοπία (DM). Τα αποτελέσματα της μεθόδου της χρωματομετρίας παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.

4.5.1. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Istria

Η μελέτη της μεταβολής του χρώματος μετά την επίδραση της φωτιάς στο λίθο Istria, για τους 300°C υπολογίστηκε για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, ενώ για τους 400°C-900°C υπολογίστηκε μόνο για ένα δοκίμιο σε κάθε θερμοκρασία λόγω απουσίας των δοκιμών και ως εκ τούτου αδυναμίας μελέτης τους. Τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 41. Χρωματικές παράμετροι δοκιμών αναφοράς του λιθότυπου Istria

| Κωδικός | L | Μέση τιμή L | a | Μέση τιμή a | b | Μέση τιμή b |
|---------|-------|-------------|-------|-------------|------|-------------|
| A1r | 81,34 | 80,08 | 0,92 | 0,31 | 7,36 | 5,38 |
| A2r | 78,34 | | -0,05 | | 4,56 | |
| A3r | 80,55 | | 0,07 | | 4,24 | |

Όπως παρατηρείται από τις τιμές των χρωματικών παραμέτρων L,a,b για το λιθότυπο Istria, αυτός εμφανίζει υψηλή τιμή της παραμέτρου L, δηλαδή είναι **λίθος με υψηλή λαμπρότητα και θετικές παραμέτρους a και b.**

Πίνακας 42. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 300°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|
| A1 | Πριν | 79,01 | -0,36 | 0,07 | 0,5 | 5,17 | 0,45 | 0,76 |
| | Μετά (300°C) | 78,65 | | 0,57 | | 5,62 | | |
| A2 | Πριν | 81,39 | -0,45 | 0,93 | 0,25 | 5,61 | -0,10 | 0,52 |
| | Μετά (300°C) | 80,94 | | 1,18 | | 5,51 | | |
| A3 | Πριν | 81,98 | -0,12 | 0,30 | 0,32 | 4,39 | -0,13 | 0,37 |
| | Μετά (300°C) | 81,86 | | 0,62 | | 4,26 | | |
| A4 | Πριν | 80,19 | 0,16 | 0,38 | 0,5 | 5,50 | -0,12 | 0,54 |
| | Μετά (300°C) | 80,35 | | 0,88 | | 5,38 | | |
| A5 | Πριν | 80,17 | -0,46 | -0,04 | 0,32 | 3,88 | 0,19 | 0,59 |
| | Μετά (300°C) | 79,71 | | 0,28 | | 4,07 | | |
| A6 | Πριν | 80,43 | -0,16 | -0,21 | 0,46 | 3,53 | 0,33 | 0,59 |
| | Μετά (300°C) | 80,27 | | 0,25 | | 3,86 | | |

Έπειτα από θέρμανση του λιθότυπου Istria στους 300°C, παρατηρείται σχεδόν καθολικά αρνητική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει τη **μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας**. Ταυτόχρονα, έχουμε θετική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι ύστερα από το πέρας της θέρμανσης, υπάρχει **μετατόπιση του χρώματος του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο**. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει και τις παρατηρήσεις που έγιναν στη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, για πιο ερυθρή χροιά των δοκιμών που εξετέθησαν στους 300°C. Τέλος, η αστάθεια που παρατηρείται ως προς την παράμετρο b, δεν μπορεί να μας δώσει αξιόπιστες πληροφορίες για τη μεταβολή του χρώματος του λίθου. Ως προς την παράμετρο ΔE, η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι αρκετά χαμηλή (ΔE<1), ώστε **να μην γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**.

Πίνακας 43. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 400°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|
| A20 | Πριν | 79,93 | -1,61 | 0,88 | -0,08 | 5,92 | -0,21 | 1,63 |
| | Μετά (400°C) | 77,70 | | 0,66 | | 5,72 | | |

Έπειτα από θέρμανση του λιθότυπου Istria στους 400°C, παρατηρείται αρνητική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει τη **μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λίθου**. Αυτό επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, για πιο έντονη γκρίζα χροιά των δοκιμών που εξετέθησαν στους 400°C. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αρνητική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς προς το πράσινο**.

Τέλος, η αρνητική μεταβολή της παραμέτρου b , υποδηλώνει **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το μπλε**. Ως προς την παράμετρο ΔE , η συνολική μεταβολή του χρώματος παραμένει χαμηλή ($\Delta E < 5$), ώστε **να μην γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**.

Πίνακας 44. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμίων του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 600°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|---------------|------|--------------|------|--------------|--------------|
| A18 | Πριν | 82,28 | -11,66 | 0,69 | -0,24 | 5,03 | -3,06 | 12,05 |
| | Μετά (600°C) | 71,25 | | 0,46 | | 1,92 | | |

Έπειτα από θέρμανση του λιθότυπου Istria στους 600°C, παρατηρείται υψηλή μείωση της λαμπρότητας, γεγονός που συνεπάγεται και **πολύ μεγάλη μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λίθου**. Αυτό επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, για πιο έντονη γκριζα χροιά των δοκιμίων που εξετέθησαν στους 600°C. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αρνητική μεταβολή για τη παράμετρο a , γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς προς το πράσινο**. Τέλος, η αρνητική μεταβολή της παραμέτρου b , υποδηλώνει **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το μπλε**. Ως προς την παράμετρο ΔE , η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι αρκετά υψηλή ($\Delta E > 5$) ώστε **να μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**, όπως και έγινε αντιληπτή κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική μελέτη των δοκιμίων.

Πίνακας 45. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμίων του λιθότυπου Istria μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|-------------|-------|--------------|------|--------------|-------------|
| A13 | Πριν | 80,92 | 4,23 | 0,72 | -0,91 | 4,88 | -3,40 | 5,50 |
| | Μετά (900°C) | 85,20 | | -0,32 | | 1,29 | | |

Έπειτα από θέρμανση του λίθου Istria στους 900°C, παρατηρείται αύξηση της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει **αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του λίθου**. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αρνητική μεταβολή για τη παράμετρο a , γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς προς το πράσινο**. Τέλος, η αρνητική μεταβολή της παραμέτρου b , υποδηλώνει **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το μπλε**. Ως προς την παράμετρο ΔE , η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι αρκετά υψηλή ($\Delta E > 5$), ώστε **να γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση των δοκιμίων.

Πίνακας 46. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών και μεταβολή ΔΕ για το λιθότυπο Istria για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔΕ | Μεταβολή ΔΕ | |
|--------------------------|--------|-------|-------|--------------|-----------------------------|---------------|
| | | | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | ΔΕ |
| A_{300°C} | -0,23 | 0,39 | 0,10 | 0,56 | 25°C-300°C | +0,56 |
| A_{400°C} | -2,23 | -0,22 | -0,20 | 1,63 | 300°C-400°C | +1,06 |
| A_{600°C} | -11,03 | -0,23 | -3,11 | 12,05 | 400°C-600°C | +10,43 |
| A_{900°C} | 4,28 | -1,04 | -3,59 | 5,50 | 600°C-900°C | -6,55 |

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου ΔΕ εμφανίζεται στα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C, όπου συμβαίνει και η μεγαλύτερη μεταβολή του ΔΕ κατά +10,43 μονάδες. Αυτό υποδεικνύει ότι **στους 600°C έχουμε τη μεγαλύτερη μεταβολή του χρώματος για το λιθότυπο Istria**. Στη συνέχεια, μικρότερη χρωματική μεταβολή παρατηρείται στους 900°C. Η μειωμένη χρωματική μεταβολή στους 900°C σε σχέση με τους 600°C, η οποία εκφράζεται και από την αρνητική τιμή της μεταβολής του ΔΕ στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C (-6,55 μονάδες), **οφείλεται στο γεγονός ότι στους 900°C έχει καταρρεύσει τμήμα της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμών με απώλεια αυθεντικού υλικού από τις ακμές και τις γωνίες τους**, όπως επισημάνθηκε κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση **και εμφανίστηκε στην επιφάνεια φρέσκο υλικό με μικρότερη χρωματική αλλοίωση**. Την αμέσως μικρότερη μεταβολή του χρώματος εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 400°C και τέλος αυτό στους 300°C. Γενικά, παρατηρούμε ότι **για το λιθότυπο Istria με την αύξηση της θερμοκρασίας και μέχρι τους 600°C, αυξάνεται η χρωματική παράμετρος ΔΕ καθώς και η μεταβολή της**. Μετά τους 600°C και συγκεκριμένα στους 900°C, όπου υπάρχει απώλεια αυθεντικού υλικού, η χρωματική μεταβολή αν και αυξημένη είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτή σε θερμοκρασία έκθεσης των 600°C.

4.5.2. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο μάρμαρο Carrara

Η μελέτη της μεταβολής του χρώματος μετά την επίδραση της φωτιάς στο μάρμαρο Carrara, για τους 300°C-400°C υπολογίστηκε για όλα τα δοκίμια, ενώ για τους 600°C-900°C υπολογίστηκε μόνο για ένα δοκίμιο σε κάθε θερμοκρασία λόγω απουσίας των δοκιμών και ως εκ τούτου αδυναμίας μελέτης τους. Τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 47. Χρωματικές παράμετροι δοκιμών αναφοράς του μαρμάρου Carrara

| Κωδικός | L | Μέση τιμή L | a | Μέση τιμή a | b | Μέση τιμή b |
|---------|-------|-------------|-------|-------------|------|-------------|
| B1r | 86,93 | 88,54 | -0,21 | -0,50 | 2,17 | 1,28 |
| B2r | 89,70 | | -0,59 | | 0,31 | |
| B3r | 89,00 | | -0,69 | | 1,37 | |

Όπως παρατηρείται από τις τιμές των χρωματικών παραμέτρων L,a,b για το μάρμαρο Carrara, αυτό εμφανίζει υψηλή τιμή της παραμέτρου L, δηλαδή είναι **λίθος με υψηλή λαμπρότητα, αρνητική τιμή της παραμέτρου a και θετική της παραμέτρου b.**

Πίνακας 48. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 300°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| B7 | Πριν | 86,03 | 2,8 | -0,64 | 0,28 | 3,10 | 0,75 | 2,91 |
| | Μετά (300°C) | 88,83 | | -0,36 | | 3,85 | | |
| B8 | Πριν | 86,65 | 2,25 | -0,69 | 0,31 | 1,51 | 1,12 | 2,53 |
| | Μετά (300°C) | 88,90 | | -0,38 | | 2,63 | | |
| B9 | Πριν | 89,18 | 2,1 | -0,57 | 0,28 | 1,35 | 1,03 | 2,36 |
| | Μετά (300°C) | 91,28 | | -0,29 | | 2,38 | | |

Έπειτα από θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 300°C, παρατηρείται θετική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει την **αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του μαρμάρου**. Αυτό μπορεί να συνδυαστεί με τα συμπεράσματα της μικροσκοπικής ανάλυσης, κατά τα οποία παρατηρήθηκε λείανση των προσανατολισμένων χαραγμάτων, γεγονός που συμβάλει στην αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του μαρμάρου. Παράλληλα, έχουμε θετική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι ύστερα από το πέρας της θέρμανσης, **υπάρχει μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο**. Τέλος, παρατηρείται θετική μεταβολή της παραμέτρου b, γεγονός που υποδηλώνει τη **μεταβολή του χρώματος του**

λίθου προς το κίτρινο. Ως προς την παράμετρο ΔΕ, η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι χαμηλή (ΔΕ<5), ώστε **να μην γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι.**

Πίνακας 49. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 400°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔΕ |
|---------|--------------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| B10 | Πριν | 87,74 | 5,6 | -0,55 | 0,41 | 0,63 | 0,60 | 5,65 |
| | Μετά (400°C) | 93,34 | | -0,14 | | 1,23 | | |
| B11 | Πριν | 89,24 | 4,28 | -0,55 | 0,36 | 0,61 | 1,15 | 4,45 |
| | Μετά (400°C) | 93,52 | | -0,19 | | 1,76 | | |
| B12 | Πριν | 89,04 | 1,57 | -0,37 | 0,58 | 0,87 | 2,37 | 2,90 |
| | Μετά (400°C) | 90,61 | | 0,21 | | 3,24 | | |

Έπειτα από θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 400°C, παρατηρείται θετική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει την **αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του μαρμάρου.** Αυτό μπορεί να συνδυαστεί με τα συμπεράσματα της μικροσκοπικής ανάλυσης, κατά τα οποία παρατηρήθηκε λείανση των προσανατολισμένων χαραγμάτων και κατά συνέπεια αύξηση των κόκκων υψηλής λαμπρότητας στην επιφάνεια του μαρμάρου. Παράλληλα, έχουμε θετική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι ύστερα από την έκθεση στους 400°C, υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο.** Τέλος, παρατηρείται θετική μεταβολή της παραμέτρου b, γεγονός που υποδηλώνει τη **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το κίτρινο.** Ως προς την παράμετρο ΔΕ, η συνολική μεταβολή του χρώματος γίνεται **οριακά αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔΕ≈5).**

Πίνακας 50. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 600°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔΕ |
|---------|--------------|-------|------|-------|------|------|-------|------|
| B1 | Πριν | 88,98 | 5,32 | -0,56 | 0,09 | 1,64 | -0,62 | 5,36 |
| | Μετά (600°C) | 94,43 | | -0,39 | | 0,95 | | |

Έπειτα από θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 600°C, παρατηρείται θετική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει την **αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του μαρμάρου.** Ταυτόχρονα, έχουμε μικρή θετική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι ύστερα από την έκθεση στους 600°C, υπάρχει οριακή **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο.** Τέλος, παρατηρείται αρνητική μεταβολή της παραμέτρου b, γεγονός που υποδεικνύει τη **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το μπλε.** Ως προς την παράμετρο

ΔΕ, η συνολική μεταβολή του χρώματος **μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι** (ΔΕ>5).

Πίνακας 51. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του μαρμάρου Carrara μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔΕ |
|---------|--------------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| B4 | Πριν | 89,25 | 2,03 | -0,55 | 1,00 | 0,78 | 1,39 | 2,66 |
| | Μετά (900°C) | 91,78 | | 0,53 | | 2,10 | | |

Έπειτα από θέρμανση του μαρμάρου Carrara στους 900°C, παρατηρείται θετική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει την **αύξηση της επιφανειακής φωτεινότητας του μαρμάρου**. Παράλληλα, έχουμε θετική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι ύστερα από το πέρας της θέρμανσης, υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο**. Τέλος, παρατηρείται θετική μεταβολή της παραμέτρου b, γεγονός που υποδηλώνει τη **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το κίτρινο**. Ως προς την παράμετρο ΔΕ, η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι χαμηλή (ΔΕ<5), γεγονός που υποδηλώνει ότι **δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**.

Πίνακας 52. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών και μεταβολή ΔΕ για το μάρμαρο Carrara για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔΕ | Μεταβολή ΔΕ | |
|--------------------|------|------|-------|------|-----------------------------|-------|
| | | | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | ΔΕ |
| B _{300°C} | 2,38 | 0,29 | 0,97 | 2,60 | 25°C-300°C | +2,60 |
| B _{400°C} | 3,82 | 0,45 | 1,37 | 4,33 | 300°C-400°C | +1,73 |
| B _{600°C} | 5,45 | 0,17 | -0,69 | 5,50 | 400°C-600°C | +1,16 |
| B _{900°C} | 2,53 | 1,08 | 1,32 | 3,05 | 600°C-900°C | -2,44 |

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου ΔΕ εμφανίζεται στο δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 600°C. Αυτό **υποδεικνύει ότι στους 600°C έχουμε τη μεγαλύτερη μεταβολή του χρώματος για το μάρμαρο Carrara**. Στη συνέχεια, μικρότερη χρωματική μεταβολή παρατηρείται στους 400°C. Την αμέσως μικρότερη μεταβολή του χρώματος εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 900°C και τέλος αυτό στους 300°C. Η μειωμένη χρωματική μεταβολή στους 900°C σε σχέση με αυτή στους 600°C, η οποία εκφράζεται και από την αρνητική τιμή της μεταβολής του ΔΕ στο θερμοκρασιακό διάστημα 600°C-900°C (-2,44 μονάδες), **οφείλεται στο γεγονός ότι στους 900°C έχει καταρρεύσει τμήμα της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμών με απώλεια αυθεντικού**

υλικού από τις ακμές και τις γωνίες τους, όπως επισημάνθηκε κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση και εμφανίστηκε στην επιφάνεια φρέσκο υλικό με μικρότερη χρωματική αλλοίωση. Ενδιαφέρον επίσης εμφανίζει το γεγονός ότι στο θερμοκρασιακό διάστημα 25°C-300°C παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή της παραμέτρου ΔΕ. Παρ' ότι δηλαδή η μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή για το μάρμαρο Carrara συμβαίνει μετά την έκθεσή του στους 600°C, η μεταβολή χρώματος μεταξύ του δοκιμίου αναφοράς και αυτού που έχει εκτεθεί στους 300°C, είναι μεγαλύτερη από τις μεταβολές του ΔΕ στα υπόλοιπα θερμοκρασιακά διαστήματα. Γενικά, παρατηρούμε ότι για το μάρμαρο Carrara με την αύξηση της θερμοκρασίας και μέχρι τους 600°C, αυξάνεται η χρωματική παράμετρος ΔΕ αλλά μειώνεται η μεταβολή της. Μετά τους 600°C και συγκεκριμένα στους 900°C, όπου υπάρχει απώλεια αυθεντικού υλικού, η χρωματική μεταβολή αν και αυξημένη είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτή σε θερμοκρασία έκθεσης των 600°C.

4.5.3. Μελέτη των επιπτώσεων του πειράματος προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Lecce

Η μελέτη της μεταβολής του χρώματος μετά την επίδραση της προσομοίωσης της φωτιάς στο λίθο Lecce, για τους 300°C-400°C υπολογίστηκε για όλα τα δοκίμια, ενώ για τους 600°C υπολογίστηκε μόνο για ένα δοκίμιο λόγω απουσίας των υπολοίπων δοκιμίων και ως εκ τούτου αδυναμίας μελέτης τους. Τα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 900°C και έχουν καταρρεύσει, δεν εστάλησαν από το εργαστήριο της Βενετίας οπότε δεν ήταν δυνατή η μελέτη τους. Τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 53. Χρωματικές παράμετροι δοκιμίων αναφοράς του λιθότυπου Lecce

| Κωδικός | L | Μέση τιμή L | a | Μέση τιμή a | b | Μέση τιμή b |
|---------|-------|--------------|------|-------------|-------|--------------|
| C1r | 81,08 | 80,92 | 2,36 | 2,33 | 12,96 | 12,63 |
| C2r | 81,51 | | 2,18 | | 12,54 | |
| C3r | 80,19 | | 2,46 | | 12,39 | |

Όπως παρατηρείται από τις τιμές των χρωματικών παραμέτρων L,a,b για το λιθότυπο Lecce, αυτός εμφανίζει υψηλή τιμή της παραμέτρου L, δηλαδή είναι **λίθος με υψηλή λαμπρότητα και θετικές παραμέτρους a και b.**

Πίνακας 54. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμίων του λιθότυπου Lecce μετά την έκθεση στους 300°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|--------------|------|-------------|-------|--------------|-------------|
| C1 | Πριν | 80,08 | -5,57 | 2,75 | 2,80 | 14,39 | 0,59 | 6,26 |
| | Μετά (300°C) | 74,51 | | 5,55 | | 14,98 | | |
| C2 | Πριν | 80,59 | -4,93 | 2,68 | 2,67 | 14,52 | -0,18 | 5,61 |
| | Μετά (300°C) | 75,66 | | 5,35 | | 14,34 | | |
| C3 | Πριν | 80,34 | -5,72 | 2,68 | 2,53 | 13,88 | -0,07 | 6,25 |
| | Μετά (300°C) | 74,62 | | 5,21 | | 13,81 | | |
| C4 | Πριν | 80,18 | -6,21 | 2,58 | 3,03 | 13,13 | 0,95 | 6,97 |
| | Μετά (300°C) | 73,97 | | 5,61 | | 14,08 | | |
| C5 | Πριν | 81,44 | -7,12 | 2,23 | 2,72 | 13,61 | 0,59 | 7,64 |
| | Μετά (300°C) | 74,32 | | 4,95 | | 14,20 | | |
| C6 | Πριν | 81,77 | -6,64 | 2,26 | 2,72 | 12,74 | 0,34 | 7,18 |
| | Μετά (300°C) | 75,13 | | 4,98 | | 13,08 | | |

Έπειτα από θέρμανση του λίθου Lecce στους 300°C, παρατηρείται αρνητική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει τη **μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λιθότυπου**. Ακόμη, έχουμε θετική μεταβολή για τη παράμετρο *a*, γεγονός που μαρτυρά ότι ύστερα από το πέρας της θέρμανσης, υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο**. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν στη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, για πιο ερυθρή χροιά των δοκιμών που εξετέθησαν στους 300°C. Τέλος, παρατηρείται σχεδόν καθολικά θετική μεταβολή της παραμέτρου *b*, γεγονός που υποδηλώνει τη **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το κίτρινο**. Ως προς την παράμετρο Δ*E*, η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι υψηλή (Δ*E*>5), ώστε **να γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**.

Πίνακας 55. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμών του λιθότυπου Lecce μετά την έκθεση στους 400°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|
| C7 | Πριν | 80,76 | -7,68 | 2,47 | 1,68 | 13,68 | -1,84 | 8,07 |
| | Μετά (400°C) | 73,08 | | 4,15 | | 11,84 | | |
| C8 | Πριν | 80,47 | -7,92 | 2,47 | 1,23 | 13,28 | -2,93 | 8,53 |
| | Μετά (400°C) | 72,55 | | 3,70 | | 10,35 | | |
| C9 | Πριν | 81,02 | -7,03 | 2,40 | 1,48 | 13,56 | -2,00 | 7,46 |
| | Μετά (400°C) | 73,99 | | 3,88 | | 11,56 | | |
| C10 | Πριν | 80,86 | -8,26 | 2,36 | 1,59 | 13,81 | -2,44 | 8,76 |
| | Μετά (400°C) | 72,60 | | 3,95 | | 11,37 | | |
| C11 | Πριν | 81,07 | -8,44 | 2,26 | 1,17 | 13,04 | -2,35 | 8,84 |
| | Μετά (400°C) | 72,63 | | 3,43 | | 10,69 | | |
| C12 | Πριν | 80,14 | -6,60 | 2,58 | 0,98 | 13,45 | -2,18 | 7,02 |
| | Μετά (400°C) | 73,54 | | 3,56 | | 11,27 | | |

Έπειτα από θέρμανση του λιθότυπου Lecce στους 400°C, παρατηρείται πάλι αρνητική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει τη **μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λιθότυπου**. Επίσης, έχουμε θετική μεταβολή για τη παράμετρο *a*, γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το κόκκινο**. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη μικροσκοπική ανάλυση, για πιο ερυθρή χροιά των δοκιμών που εξετέθησαν στους 400°C. Τέλος, παρατηρείται αρνητική μεταβολή της παραμέτρου *b*, γεγονός που υποδηλώνει τη **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το μπλε**. Ως προς την παράμετρο Δ*E*, η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι υψηλή (Δ*E*>5), ώστε **να γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι**.

Πίνακας 56. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμίων του λιθότυπου Lecce μετά την έκθεση στους 600°C

| Κωδικός | Κατάσταση | L | ΔL | a | Δa | b | Δb | ΔE |
|---------|--------------|-------|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| C15 | Πριν | 81,52 | -14,22 | 2,29 | -0,16 | 12,77 | -6,40 | 15,59 |
| | Μετά (600°C) | 67,33 | | 2,11 | | 6,31 | | |

Ύστερα από θέρμανση του λίθου Lecce στους 600°C, παρατηρείται αρνητική μεταβολή της λαμπρότητας, γεγονός που υποδηλώνει τη **μείωση της επιφανειακής φωτεινότητας του λιθότυπου**. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, για πιο γκριζα χροιά των δοκιμίων που εξετάθησαν στους 900°C. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αρνητική μεταβολή για τη παράμετρο a, γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχει **μετατόπιση της χρωματικής χροιάς του συγκεκριμένου λιθότυπου προς το πράσινο**. Τέλος, έχουμε αρνητική μεταβολή της παραμέτρου b, γεγονός που υποδηλώνει τη **μεταβολή του χρώματος του λίθου προς το μπλε**. Ως προς την παράμετρο ΔE, η συνολική μεταβολή του χρώματος είναι αρκετά υψηλή (ΔE>5), ώστε **να γίνεται ξεκάθαρα αντιληπτή και από το ανθρώπινο μάτι**.

Στους 900°C τα δοκίμια του λιθότυπου Lecce κατέρρευσαν πλήρως, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Τα δοκίμια που εξετάθησαν στους 900°C δεν εστάλησαν από το εργαστήριο της Βενετία και ως εκ τούτου κατέστη αδύνατος ο υπολογισμός της μεταβολής των χρωματικών τους παραμέτρων.



Εικόνα 31. Λιθότυπος Lecce ύστερα από θέρμανση στους 900°C

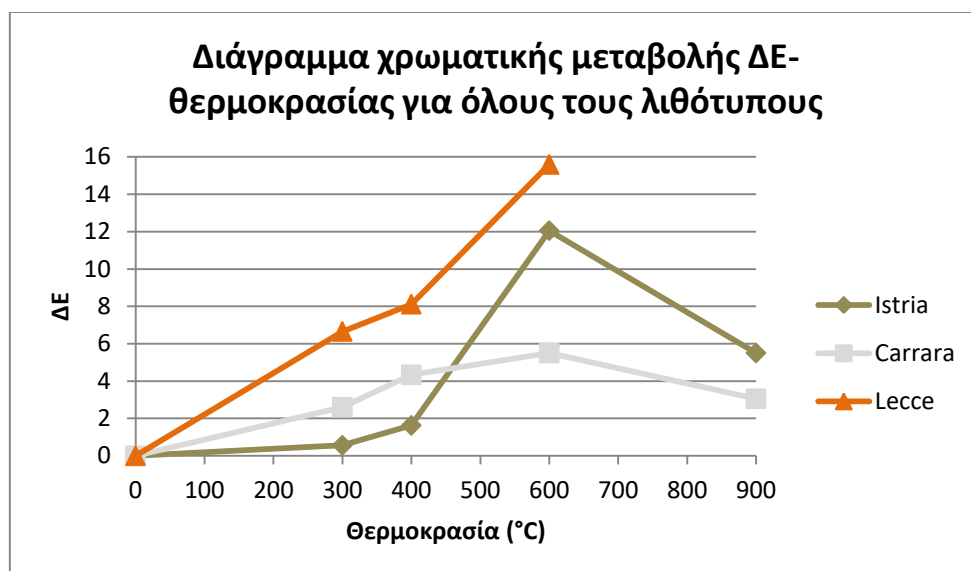
Πίνακας 57. Χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια των δοκιμίων και μεταβολή ΔΕ για το λιθότυπο Lesce για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔE | Μεταβολή ΔE | |
|--------------------|--------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|
| | | | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | ΔE |
| C _{300°C} | -6,03 | 2,75 | 0,37 | 6,65 | 25°C-300°C | +6,65 |
| C _{400°C} | -7,66 | 1,36 | -2,29 | 8,11 | 300°C-400°C | +1,46 |
| C _{600°C} | -14,19 | -0,18 | -6,46 | 15,59 | 400°C-600°C | +7,48 |

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου ΔE εμφανίζεται στα δοκίμια που έχουν εκτεθεί στους 600°C, όπου συμβαίνει και η μεγαλύτερη μεταβολή του ΔE κατά +7,48 μονάδες. Αυτό υποδεικνύει ότι **στους 600°C έχουμε τη μεγαλύτερη μεταβολή του χρώματος για το λιθότυπο Lesce**. Στη συνέχεια, μικρότερη χρωματική μεταβολή παρατηρείται στους 400°C. Τέλος, η μικρότερη μεταβολή του χρώματος εμφανίζει το δοκίμιο που έχει εκτεθεί στους 300°C. Γενικά, παρατηρούμε ότι **για το λιθότυπο Lesce, με την αύξηση της θερμοκρασίας και μέχρι τους 600°C, αυξάνεται η χρωματική παράμετρος ΔE**. Αντίθετα, η μεταβολή της παραμέτρου ΔE δεν αυξάνεται αναλογικά με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, η μεγαλύτερη μεταβολή της παραμέτρου ΔE εμφανίζεται στο θερμοκρασιακό διάστημα 400°C-600°C και η αμέσως επόμενη στο 25°C-300°C, ενώ η μικρότερη μεταβολή στο 300°C-400°C.

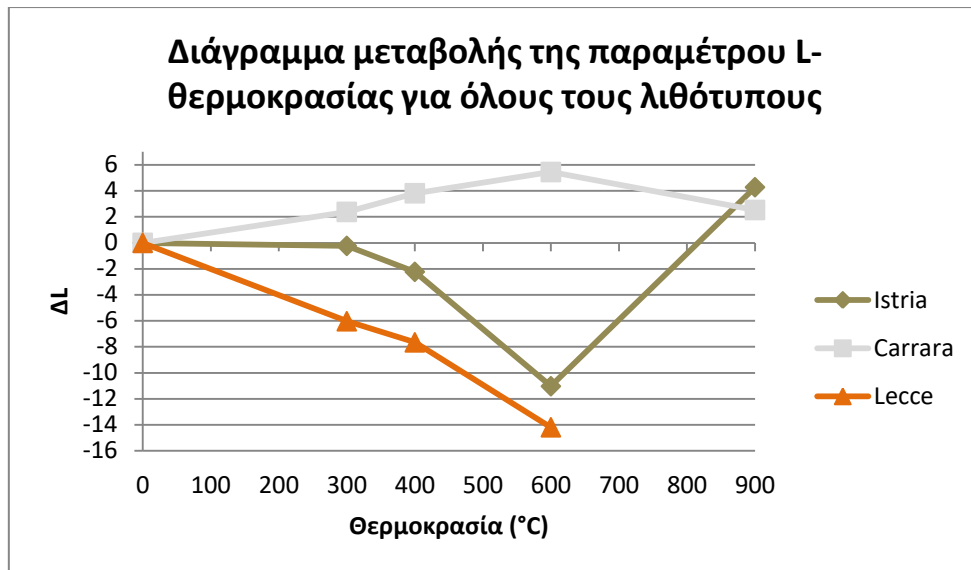
4.5.4. Μερικά συμπεράσματα

Στα παρακάτω διαγράμματα και πίνακες παρουσιάζονται οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων L, a και b, η παράμετρος ΔE και η μεταβολή της για κάθε είδος λιθότυπου σε όλες αλλά και σε κάθε εξεταζόμενη θερμοκρασία ξεχωριστά.



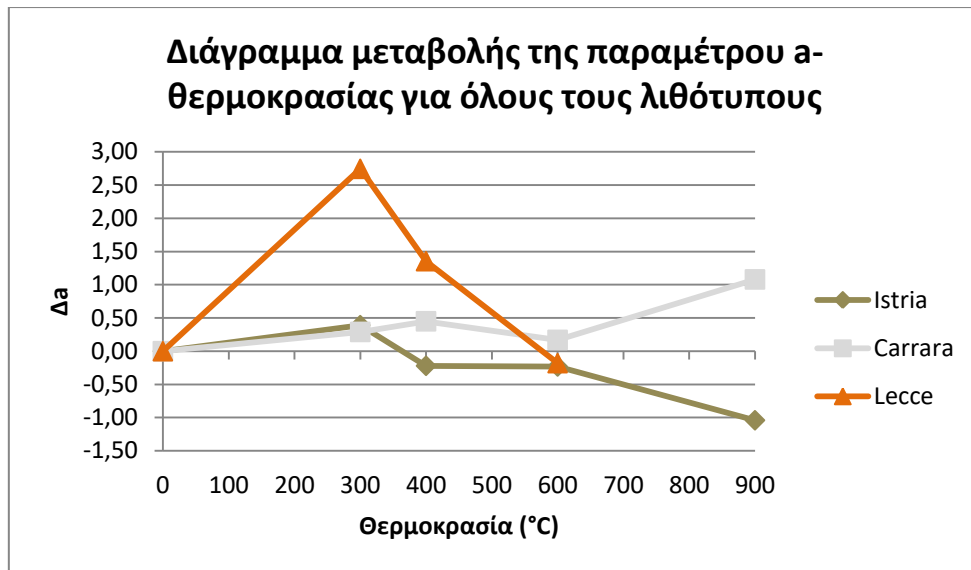
Διάγραμμα 28. Συγκριτικό διάγραμμα χρωματικής μεταβολής ΔE ανά θερμοκρασία για όλους τους λιθότυπους

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος **Lecce** εμφανίζει τη **μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έκθεσης**. Στη συνέχεια μέχρι τους 400°C, το μάρμαρο Carrara εμφανίζει μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή από το λιθότυπο Istria. Από τους 600°C και μέχρι την τελική θερμοκρασία των 900°C, ο λιθότυπος Istria εμφανίζει μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή από το μάρμαρο Carrara. Ακόμη, **όλοι οι λιθότυποι, παρουσιάζουν μέγιστη χρωματική μεταβολή στους 600°C**. Γενικά, φαίνεται ότι για όλους τους λιθότυπους μέχρι και τους 600°C, η χρωματική μεταβολή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ στους 900°C, εκτός του λιθότυπου Lecce που δεν μελετήθηκε, έχουμε μείωση της χρωματικής μεταβολής. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι στους 900°C έχει καταρρεύσει τμήμα της επιφάνειας των δοκιμίων με απώλεια αυθεντικού υλικού από τις ακμές και τις γωνίες τους και εμφανίστηκε στην επιφάνεια φρέσκο υλικό με μικρότερη χρωματική αλλοίωση.



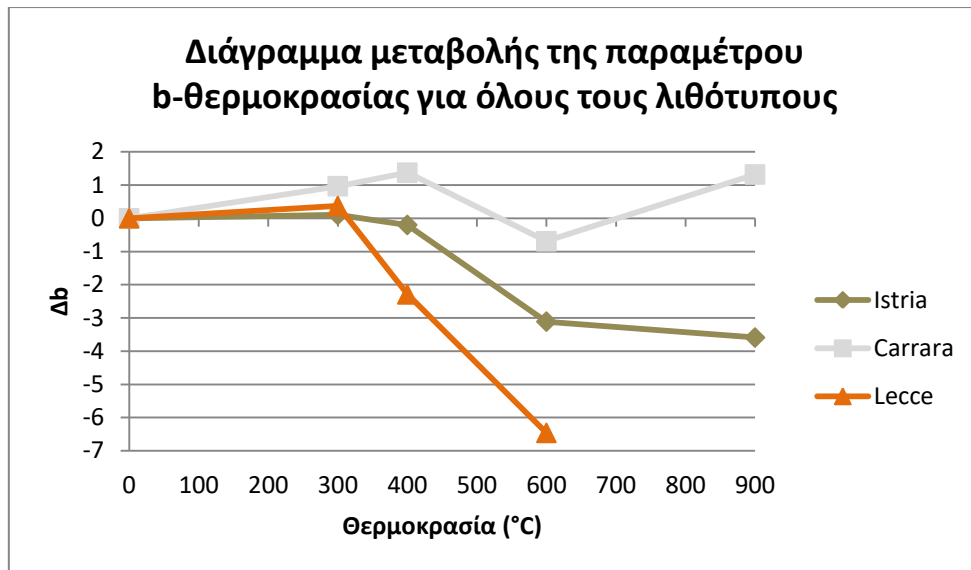
Διάγραμμα 29. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της χρωματικής παραμέτρου L ανά θερμοκρασία για όλους τους λιθότυπους

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τις πιο αρνητικές τιμές της μεταβολής της χρωματικής παραμέτρου L. Αυτό σημαίνει ότι **στον λιθότυπο Lecce παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση της φωτεινότητας κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, σε σχέση με τους άλλους λιθότυπους**. Στη συνέχεια και μέχρι τους 600°C, ο λιθότυπος Istria εμφανίζει επίσης αρνητικές τιμές της μεταβολής της παραμέτρου L, ενώ το μάρμαρο Carrara θετικές, γεγονός που, όπως προαναφέρθηκε, πιθανόν να οφείλεται στη λείανση των προσανατολισμένων χαραγμάτων. Στους 900°C, όπου για το λιθότυπο Istria παρατηρείται σημαντική αύξηση του ΔL ενώ για το μάρμαρο Carrara μικρή μείωση αλλά παραμένει θετικό, το δεύτερο εμφανίζει μικρότερο ΔL από το λιθότυπο Istria. Συμπεραίνεται ότι **μέχρι τους 600°C στους λιθότυπους Istria και Lecce παρατηρείται μείωση της φωτεινότητας της επιφάνειας, ενώ στο μάρμαρο Carrara αύξηση**. Στους 900°C ο λιθότυπος Istria και το μάρμαρο Carrara εμφανίζουν αύξηση της φωτεινότητας, με το λιθότυπο Istria να παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση.



Διάγραμμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της χρωματικής παραμέτρου α ανά θερμοκρασία για όλους τους λιθότυπους

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι μέχρι τους 400°C ο λιθότυπος **Lecce** εμφανίζει τις πιο θετικές τιμές της μεταβολής της παραμέτρου α . Στους 600°C ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει αρνητικές τιμές. Αυτό υποδεικνύει ότι μέχρι τους 400°C τείνει περισσότερο από τους άλλους λιθότυπους προς κόκκινη χροιά ενώ στους 600°C προς πράσινη χροιά. Ο λιθότυπος Istria στους 300°C εμφανίζει θετικό $\Delta\alpha$ και ελάχιστα μεγαλύτερο από αυτό του μαρμάρου Carrara, ενώ μετά και για όλες τις υπόλοιπες θερμοκρασίες αρνητικό. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι μέχρις τους 300°C η επιφάνειά τείνει να αποκτήσει κόκκινη χροιά, ενώ στο διάστημα 400°C-900°C τείνει προς πράσινη χροιά. Τέλος, το μάρμαρο Carrara για όλες τις θερμοκρασίες έκθεσης εμφανίζει θετική μεταβολή της παραμέτρου α , γεγονός που υποδεικνύει ότι με την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες αποκτάει κόκκινη χροιά.



Διάγραμμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της χρωματικής παραμέτρου b ανά θερμοκρασία για όλους τους λιθότυπους

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι μέχρι τους 400°C και για τους 900°C το μάρμαρο Carrara εμφανίζει τις πιο θετικές τιμές της μεταβολής της παραμέτρου b. Στους 600°C το μάρμαρο Carrara εμφανίζει αρνητική τιμή του Δb. Αυτό υποδεικνύει ότι **μέχρι τους 400°C και για τους 900°C, η επιφάνεια του μαρμάρου Carrara τείνει προς κίτρινη χροιά, ενώ στους 600°C τείνει οριακά προς τη μπλε χροιά.** Αντίθετα, ο λιθότυπος Istria στους 300°C εμφανίζει οριακά θετική μεταβολή της παραμέτρου b και σε όλες τις υπόλοιπες θερμοκρασίες αρνητική μεταβολή, η οποία γίνεται περισσότερο αρνητική με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ομοίως, ο λιθότυπος Lecce στους 300°C εμφανίζει θετική μεταβολή της παραμέτρου b, ενώ στους 400°C και 600°C εμφανίζει τη μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή, σε σχέση με τους άλλους λιθότυπους, η οποία πάλι γίνεται περισσότερο αρνητική με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι **οι λιθότυποι Istria και Lecce στους 300°C τείνουν οριακά προς κίτρινη χροιά ενώ σε όλες τις επόμενες θερμοκρασίες τείνουν όλο και περισσότερο προς την μπλε χροιά.**

Πίνακας 58. Συγκριτικός πίνακας χρωματικής μεταβολής στην επιφάνεια των δοκιμών και μεταβολής ΔΕ για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 300°C

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔE |
|--------------------------|-------|------|------|-------------|
| Istria _{300°C} | -0,23 | 0,39 | 0,10 | 0,56 |
| Carrara _{300°C} | 2,38 | 0,29 | 0,97 | 2,60 |
| Lecce _{300°C} | -6,03 | 2,75 | 0,37 | 6,65 |

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τη μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή μετά την έκθεση στους 300°C. Επίσης, αυτή η μεταβολή είναι η μόνη που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔE>5). Την αμέσως μικρότερη χρωματική μεταβολή εμφανίζει το μάρμαρο Carrara και τέλος ο λιθότυπος Istria. Οι χρωματικές μεταβολές αυτών των λιθότυπων δεν είναι αντιληπτές από το ανθρώπινο μάτι (ΔE<0).

Πίνακας 59. Συγκριτικός πίνακας χρωματικής μεταβολής στην επιφάνεια των δοκιμών και μεταβολής ΔE για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 400°C

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔE | Μεταβολή ΔE | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------------------|--------------|
| | | | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | ΔE |
| Istria _{400°C} | -2,23 | -0,22 | -0,20 | 1,63 | 300°C-400°C | +1,06 |
| Carrara _{400°C} | 3,82 | 0,45 | 1,37 | 4,33 | 300°C-400°C | +1,73 |
| Lecce _{400°C} | -7,66 | 1,36 | -2,29 | 8,11 | 300°C-400°C | +1,46 |

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τη μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή, η οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔE>5). Στη συνέχεια, την αμέσως μικρότερη χρωματική μεταβολή εμφανίζει το μάρμαρο Carrara, που οριακά δεν γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔE≈5) και τέλος ο λιθότυπος Istria, που δεν γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔE<5). Ως προς τη μεταβολή του ΔE στο θερμοκρασιακό διάστημα 300°C-400°C, όλοι οι λιθότυποι εμφανίζουν παρόμοιες τιμές, οι οποίες κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό υποδεικνύει ότι μετά την έκθεση στους 400°C, οι χρωματικές μεταβολές σε σχέση με την προηγούμενη θερμοκρασία του φούρνου δεν αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό και για τους τρεις λιθότυπους.

Πίνακας 60. Συγκριτικός πίνακας χρωματικής μεταβολής στην επιφάνεια των δοκιμών και μεταβολής ΔΕ για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 600°C

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔΕ | Μεταβολή ΔΕ | |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|-----------------------------|--------|
| | | | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | ΔΕ |
| Istria _{600°C} | -11,66 | -0,24 | -3,06 | 12,05 | 400°C-600°C | +10,43 |
| Carrara _{600°C} | 5,32 | 0,09 | -0,62 | 5,36 | 400°C-600°C | +1,16 |
| Lecce _{600°C} | -14,22 | -0,16 | -6,40 | 15,59 | 400°C-600°C | +7,48 |

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι **τη μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή μετά την έκθεση των δοκιμών στους 600°C, την εμφανίζει ο λιθότυπος Lecce**, η οποία είναι αρκετά υψηλή ώστε να γίνεται εύκολα αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔΕ=15,59 μονάδες). Την αμέσως μικρότερη χρωματική μεταβολή εμφανίζει ο λιθότυπος Istria, η οποία είναι πολύ υψηλότερη από αυτή στους 300°C, γεγονός που εκφράζεται από τη μεταβολή του ΔΕ στο διάστημα 400°C-600°C και είναι η υψηλότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους λιθότυπους. Τέλος, τη μικρότερη χρωματική μεταβολή εμφανίζει το μάρμαρο Carrara, η οποία όμως γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔΕ>5). Γενικά, **όλοι οι λιθότυποι μετά την έκθεση στους 600°C, εμφανίζουν μεγάλη χρωματική μεταβολή, η οποία γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι.**

Πίνακας 61. Συγκριτικός πίνακας χρωματικής μεταβολής στην επιφάνεια των δοκιμών και μεταβολής ΔΕ για όλους τους λιθότυπους μετά την έκθεση στους 900°C

| Κωδικός | ΔL | Δa | Δb | ΔΕ | Μεταβολή ΔΕ | |
|--------------------------|------|-------|-------|------|-----------------------------|-------|
| | | | | | Θερμοκρασιακό διάστημα (°C) | ΔΕ |
| Istria _{900°C} | 4,23 | -0,91 | -3,40 | 5,50 | 600°C-900°C | -6,55 |
| Carrara _{900°C} | 2,03 | 1,00 | 1,39 | 2,66 | 600°C-900°C | -2,44 |

Με βάση τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι **μετά την έκθεση των δοκιμών στους 900°C, ο λιθότυπος Istria εμφανίζει μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή από το μάρμαρο Carrara**, η οποία στην πρώτη περίπτωση γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (ΔΕ=5,50 μονάδες), ενώ στη δεύτερη όχι (ΔΕ<5). Επίσης και οι δύο λιθότυποι εμφανίζουν μείωση του ΔΕ σε σχέση με την προηγούμενη θερμοκρασία έκθεσης, γεγονός που εκφράζεται από τις αρνητικές τιμές της μεταβολής του ΔΕ. Συγκεκριμένα, ο λιθότυπος Istria εμφανίζει πιο αρνητική τιμή της μεταβολής του ΔΕ, γεγονός που υποδεικνύει ότι στο διάστημα 600°C-900°C το χρώμα του μεταβάλλεται περισσότερο απ' ό,τι του μαρμάρου Carrara.

5. Συμπεράσματα

Συμπεραίνουμε ότι τα φυσικοχημικά και φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων λίθων υποβαθμίζονται μετά την έκθεσή τους για 6 ώρες στις διαφορετικές υψηλές θερμοκρασίες (300°C, 400°C, 600°C και 900°C), που επιλέχθηκαν για να προσομοιάσουν το φαινόμενο της φωτιάς. **Τη χαμηλότερη ανθεκτικότητα παρουσίασε ο λίθος Lecce, ο οποίος μετά την έκθεσή του στους 900°C κατέρρευσε θρυμματιζόμενος σε μικρά και μεγαλύτερα κομμάτια, ενώ και οι άλλοι δύο εξεταζόμενοι λιθότυποι στη συγκεκριμένη θερμοκρασία εμφάνισαν τα πιο απομειωμένα τους χαρακτηριστικά.** Πιο συγκεκριμένα, παρουσίασαν απώλεια αυθεντικού υλικού και απώλεια της αρχικής κυβικής τους γεωμετρίας, αισθητικές αλλοιώσεις, τις χαμηλότερες ταχύτητες διάδοσης υπερήχων, καθώς και τις μεγαλύτερες τιμές πορώδους προσβάσιμου στο νερό, αλλά και υδατικής χωρητικότητας. Πιο συγκεκριμένα:

Με βάση τις παρατηρήσεις κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, ύστερα από την έκθεση των εξεταζόμενων λιθότυπων στις υψηλές θερμοκρασίες, **τις μεγαλύτερες αλλοιώσεις ως προς τη γεωμετρία και τη μορφολογία τις παρουσιάζει ο λιθότυπος Lecce, ο οποίος στους 900°C κατέρρευσε.** Σε όλες τις προηγούμενες θερμοκρασίες ο λίθος Lecce παρουσιάζει μικρές μεταβολές στη μορφολογία και δεν καταγράφεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, ενώ **παρατηρούνται έντονες χρωματικές μεταβολές (καστανέρυθρη και γκριζα χροιά).** Ο λίθος Istria μετά την έκθεση στους 300°C, 400°C και 600°C **εμφανίζει χρωματικές μεταβολές (ερυθρή χροιά) και συγκεκριμένα στους 600°C μικρές ρωγμές.** Στους 900°C ο λίθος Istria **εμφανίζει μεγάλες αλλοιώσεις ως προς τη μορφολογία και τη γεωμετρία, ενώ παρατηρούνται έντονες χρωματικές μεταβολές (γκρίζα χροιά) και σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού.** Τέλος, το μάρμαρο Carrara μετά την έκθεση στους 300°C και 400°C **παρουσιάζει μικρές μορφολογικές μεταβολές, οι οποίες οφείλονται στη λείανση των προσανατολισμένων χαραγμάτων,** που δημιουργεί το εργαλείο κοπής. Στους 600°C και 900°C **παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές ως προς τη μορφολογία και τη γεωμετρία των δοκιμίων, καθώς επίσης και σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, ιδιαίτερα μετά την έκθεση στους 900°C.**

Με βάση τα αποτελέσματα της θερμοβαρυμετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης (TG/DTA), παρατηρούμε ότι όλοι οι λιθότυποι παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά CaCO₃ πριν την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει το χαμηλότερο ποσοστό CaCO₃ (≈89%). Τα υψηλά ποσοστά του CaCO₃ διατηρούνται για όλους τους λιθότυπους και μετά την έκθεση των δοκιμίων στις υψηλές θερμοκρασίες (600°C και 900°C). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι **κατά την έκθεση των δοκιμίων σε αυτές τις θερμοκρασίες, το μέρος του CaCO₃ που μετατράπηκε σε CaO κατέρρευσε και το εναπομείναν CaCO₃ που αρχικά βρισκόταν εσωτερικά, βγήκε στην επιφάνεια.** Πιο συγκεκριμένα, ως προς τα διαγράμματα θερμικής ανάλυσης, για το λιθότυπο Istria και μετά την έκθεσή του στους 900°C, παρατηρείται ασθενής ενδόθερμη κορυφή στους 392°C, που συνοδεύεται από μικρή απώλεια μάζας (=0,18%). Αυτή η κορυφή υποδεικνύει την **ύπαρξη μικρής ποσότητας λεμονίτη στο λιθότυπο, του οποίου ένα συστατικό είναι ο γκαϊτίτης, που με τη σειρά του σε αυτή τη θερμοκρασία σχηματίζει αιματίτη.** Για το μάρμαρο Carrara

και μετά την έκθεση του στους 900°C, παρατηρείται ασθενής ενδόθερμη κορυφή στους 415°C, που συνοδεύεται από μικρή απώλεια μάζας (=0,1%). Αυτή η κορυφή **υποδεικνύει την παρουσία βρουσίτη (Mg(OH)₂)**, γεγονός που δεν μας εκπλήσσει, μιας και στο δοκίμιο αναφοράς του μαρμάρου Carrara ανιχνεύεται ανθρακικό ασβέστιο και μαγνήσιο (δολομίτης). Αυτό συμπεραίνεται από την καμπύλη της πρώτης παραγώγου της διαφορικής θερμικής ανάλυσης του δοκιμίου αναφοράς, που εμφανίζει διπλή κορυφή. Τέλος, στην περίπτωση του δοκιμίου του λιθότυπου Lecce που έχει εκτεθεί στους 600°C, παρατηρείται μικρή μετατόπιση της κορυφής διάσπασης του CaCO₃ σε σχέση με αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Αυτό **υποδεικνύει τη διαφοροποίηση της κρυσταλλικότητας των κόκκων CaCO₃, που επέρχεται ύστερα από την έκθεση του λιθότυπου στους 600°C.**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου της υπερηχοσκόπησης, **η αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης των δοκιμίων όλων των λιθότυπων οδηγεί στην μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη μείωση της συνοχής και των μηχανικών αντοχών τους.** Το μάρμαρο Carrara εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μέχρι τη θερμοκρασία έκθεσης των 600°C, σε σχέση με τους άλλους λιθότυπους. Αντίθετα, στους 900°C ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό μείωσης της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων, λόγω της κατάρρευσής του. **Η κατάρρευση του λιθότυπου Lecce στους 900°C οφείλεται στην παρουσία χαλαζία καθώς και ορισμένων αργιλο-πυριτικών ορυκτών στο λιθότυπο.** Ο χαλαζίας σε θερμοκρασίες >573°C παρουσιάζει θερμική διόγκωση, ενώ στους 900°C αυξάνονται οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, με αποτέλεσμα να δέχεται μέγιστη και μόνιμη καταπόνηση. Επιπλέον, οι αργιλο-πυριτικές ενώσεις σε θερμοκρασίες >600°C αποσυντίθενται. Ως προς τις μεταβολές της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία έκθεσης, ο λιθότυπος Lecce και το μάρμαρο Carrara εμφανίζουν μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης, παρουσιάζοντας τις μικρότερες τιμές ταχύτητας διάδοσης υπερήχων μετά την έκθεση στους 900°C. **Ο λιθότυπος Istria μετά την έκθεση στους 300°C, παρουσιάζει αύξηση στην ταχύτητα διάδοσης υπερήχων, γεγονός που αποδίδεται στη διόγκωση των κρυστάλλων ασβεσίτη και στην παράλληλη συρρίκνωση των, μικρής περιεκτικότητας, αργιλικών ορυκτών του λιθότυπου.** Μετά την έκθεση του λιθότυπου Istria στις επόμενες εξεταζόμενες θερμοκρασίες, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων, με τη μικρότερη να εμφανίζεται μετά την έκθεση στους 900°C. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε λιθότυπος παρουσιάζει διαφορετικά ποσοστά μεταβολής στην ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων ανά θερμοκρασιακό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, ο λίθος Istria παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στο θερμοκρασιακό διάστημα 300°C-400°C, το μάρμαρο Carrara στο διάστημα 400°C-600°C, ενώ ο λιθότυπος Lecce στο διάστημα 600°C-900°C, όπου καταρρέει.

Με βάση τα αποτελέσματα από τις δοκιμές εμβάπτισης για τον προσδιορισμό του ποσοστού ροφημένου νερού και του ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό, παρατηρούμε ότι **ο λιθότυπος Lecce εμφανίζει τη μεγαλύτερη απορροφητική ικανότητα σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες.** Στη συνέχεια, μικρότερη απορροφητική ικανότητα εμφανίζει το μάρμαρο Carrara και τέλος ο λίθος Istria. **Ως προς τα μεγέθη (%)P (πορώδες) και (%)WAC (ποσοστό ροφημένου νερού), για το λίθο Istria και το μάρμαρο Carrara παρατηρείται ότι αυτά αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας.** Το ποσοστό

μεταβολής των μεγεθών (%)P και (%)WAC επίσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης για αυτούς τους λιθότυπους. Για το λιθότυπο **Lecce** παρατηρείται ότι, τα μεγέθη (%)P και (%)WAC καθώς και τα ποσοστά μεταβολής τους, εμφανίζουν αντίστοιχες τιμές σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έκθεσης. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο των πόρων που είναι προσβάσιμο στο νερό παραμένει παρόμοιο στο σύνολό του μετά την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών, παρ' όλο που πιθανώς η κατανομή των πόρων σε σχέση με το μέγεθος της ακτίνας τους μπορεί να διαφοροποιείται στις διαφορετικές θερμοκρασίες έκθεσης. Τέλος, ο λιθότυπος **Istria** εμφανίζει τα υψηλότερα ποσοστά μεταβολής των μεγεθών (%)P και (%)WAC, σε σχέση με τους άλλους λιθότυπους, σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έκθεσης εκτός από τους 400°C, όπου τους εμφανίζει το μάρμαρο **Carrara**. Αυτό σημαίνει ότι **μετά την έκθεση των λιθότυπων σε υψηλές θερμοκρασίες, ο λιθότυπος Istria παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μεταβολή στη μικροδομή του**, γεγονός που δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της υπερηχοσκόπησης, όπου το μάρμαρο **Carrara** εμφάνιζε τις μεγαλύτερες μεταβολές ως προς τη συνοχή και τις μηχανικές αντοχές για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έκθεσης μέχρι και τους 600°C.

Με βάση τα αποτελέσματα από τη μέθοδο της χρωματομετρίας, **παρατηρούμε ότι η συνολική χρωματική μεταβολή ΔΕ αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας έκθεσης και για τους τρεις λιθότυπους**. Αξίζει να σημειωθεί ότι **στους 600°C όλοι οι εξεταζόμενοι λιθότυποι παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αισθητική αλλοίωση, όπως αυτή καταγράφεται από τη συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ**, ενώ στους 900°C η χρωματική μεταβολή ΔΕ μειώνεται, παραμένοντας όμως σε υψηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι **στους 900°C έχει καταρρεύσει τμήμα της επιφάνειας με απώλεια αυθεντικού υλικού από τις ακμές και τις γωνίες των δοκιμών και εμφανίστηκε στην επιφάνεια φρέσκο υλικό με μικρότερη χρωματική αλλοίωση**. Ως προς τη μεταβολή του ΔΕ, παρατηρούμε ότι μέχρι τους 600°C, για το λιθότυπο **Istria** αυτή αυξάνεται, ενώ για το μάρμαρο **Carrara** μειώνεται. Ο λιθότυπος **Lecce** εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές χρωματικής μεταβολής ΔΕ για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες και ακολουθεί το μάρμαρο **Carrara** μέχρι τη θερμοκρασία έκθεσης των 400°C. Μετά την έκθεση των λιθότυπων στους 600°C και 900°C, ο λιθότυπος **Istria** εμφανίζει μεγαλύτερη χρωματική μεταβολή από το μάρμαρο **Carrara**. Τέλος, οι μεταβολές στις χρωματικές παραμέτρους L, a και b συμβαδίζουν με τις παρατηρήσεις κατά τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση. Συγκεκριμένα, **μετά την έκθεση των λιθότυπων σε υψηλές θερμοκρασίες, οι λιθότυποι Istria και Lecce αποκτούν καστανέρυθρη και γκρίζα χροιά**.

6. Βιβλιογραφία

1. **A. Μοροπούλου, Γ. Μπατής.** Δομικά Υλικά. Αθήνα : s.n., 2012, σσ. p.1-50.
2. **Winkler, E. M.** «Stone in Architecture. Properties, durability.». 3rd edition. Berlin : Springer-Verlag, 1997.
3. **Γ. Χριστοφίδης, Τ. Σολδάτος.** «Ορυκτολογία». Διδακτικές σημειώσεις. s.l. : Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. , 2004.
4. **Λεγάκης, Α.** «Δομικά Υλικά.». s.l. : Εκδ. Ευγενίδιο Ίδρυμα, 1997.
5. www.olympusmicro.com. [Ηλεκτρονικό] Olympus Microscopy Resource Center.
6. **Π. Βασιλείου, Μ. Κουή, Α. Μοροπούλου, Γ. Μπατής, Ι. Σαγιάς, Α. Καραντώνης, Α. Μπακόλας.** «Σημειώσεις Ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης & Τεχνικής των Υλικών» . s.l. : Εκδόσεις Πολυτεχνείου Αθήνα, 2012. pp 1-10 .
7. **Α.Μοροπούλου.** «Χαρακτηρισμός, Έλεγχος ποιότητας, Διάγνωση φθοράς και Συντήρηση δομικών υλικών - Μεθοδολογία Ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών». Αθήνα : s.n., 2016.
8. **Reed, J.S.** «*Principles of Ceramics Processing*». 2nd Edition . New York : John Wiley & Sons, 1995.
9. **Webb, P.A.** «Volume and density determinations for particle technologists». *Micromeritics Instrument Corp.* 2001.
10. **Μοροπούλου, Α.** Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Φθορά και Προστασία Υλικών» 9ο εξαμ. Χ.Μ. «Φυσικοχημεία της φθοράς και τεχνική της συντήρησης των δομικών υλικών». ΕΜΠ Αθήνα : s.n., 2006.
11. **Α.Μοροπούλου.** «Υλικά». Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Υλικών», Χ.Μ. ΕΜΠ Αθήνα : s.n., 2015.
12. **P. Theoulakis, Α.Μοροπούλου.** «Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay». *Construction & Building Materials.* 1997, σσ. 65-71.
13. **Μοροπούλου, Μ. Κουί, Ρ.Τheoulakis, Α. Βακόλας, Κ. Ρουμπούλος, Ρ. Michailidis, R. Van Grieken, Cardell-Fernandez.** «Microstructural criteria to evaluate stone susceptibility to sea-salt decay on Mediterranean and Atlantic coast monuments.». *Conservation of monuments in the Mediterranean basin.* 2000, σ. 316.
14. **Α. Μοροπούλου, «Μεθοδολογία Διαγνωστικής Μελέτης», Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων» Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης. «Μεθοδολογία Διαγνωστικής Μελέτης». Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων» Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.**

15. **Μοροπούλου, Α.** Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Υλικών» Χ.Μ. «Υλικά» Μέρος Β. ΕΜΠ Αθήνα : s.n., 2015.
16. **Ποζιόπουλος, Α.** «Χαρακτηριστικές φθορές στις μεσαιωνικές οχυρώσεις της Παλιάς Πόλης της Ρόδου, Πρακτικά Ιστορία και Προβλήματα Συντήρησης της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου». *Γραφείο Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου*. 1992.
17. **P. Maravelaki-Kalaitzaki, G. Biscontin.** Origin, characteristics and morphology of weathering crusts on Istria stone in Venice. *PERGAMON*. 2 December 1997.
18. **Pagona Maravelaki-Kalaitzaki, Renzo Bertoncello, Guido Biscontin.** Evaluation of the initial weathering rate of Istria stone exposed to rain. *ELSEVIER*. 2002.
19. **Lazzarini, Lorenzo.** *PIETRA D'ISTRIA: QUARRIES, CHARACTERISATION, DETERIORATION OF THE STONE OF VENICE*. New York : s.n., 2012.
20. **R.L., Folk.** Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1959, σσ. 1-38.
21. **R.J., Dunham.** Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *American Association of Petroleum Geologists Memoirs*. 1962, σσ. 108-121.
22. **Giulia Ghenoa, Elena Badettib, Andrea Brunellib, Renzo Ganzerlaa, Antonio Marcominib.** Consolidation of Vicenza, Arenaria and Istria stones: A comparison between nano-based products and acrylate derivatives. *ELSEVIER*. 7 November 2017.
23. **Παπατρέχας, Δρ Χρήστος.** Δ/νση Πετρογραφίας και Ορυκτολογίας, ΙΓΜΕ : s.n.
24. **M. Simunic Bursic, D. Aljinovic , D. Orsulic.** Kirmenjask – the stone on which Venice was built. *European Geosciences Union*. 2005.
25. *Lezioni di Litologia applicata.* **F., Calvino.** Padua : s.n., 1967.
26. **Kleiner, Diana E. E.** *The Ascent of Augustus and Access to Italian Marble*. Yale University : s.n.
27. **Goldthwaite, Richard A.** *The Economy of Renaissance Florence*. 2011.
28. <https://setouchitrip.com>. <https://setouchitrip.com/travel-directory/2911>. [Ηλεκτρονικό]
29. Magical marble, that gleaming rock for the ages. *Smithsonian*. 1992.
30. **Dagmara Wielgosz-Rondolino, Fabrizio Antonelli, Maciej J. Bojanowski, Marcin Gładki, Mehmet Cemal Goncüoglu, Lorenzo Lazzarini.** Improved methodology for identification of Goktepe white marble and the understanding of its use: A comparison with Carrara marble. *ELSEVIER*. 2018.
31. <https://www.marmirossi.com>. <https://www.marmirossi.com/en/news/focus-materials/the-carrara-marble-a-white-marble-with-history>. [Ηλεκτρονικό] MarmiRossi.

32. **Livia Nardini, Erik Rybacki, Maximilian J.E.A. Döhmann, Luiz F.G. Morales, Sascha Brune, Georg Dresen.** High-temperature shear zone formation in Carrara marble: The effect of loading conditions. *Tectophysics*. 2018.
33. **Olga V. FRANK-KAMENETSKAYA, Dmitrii Yu. VLASOV, Marina S. ZELENSKAYA, Irina V. KNAUF, Mariya A. TIMASHEVA.** Decaying of the marble and limestone monuments in the urban environment. Case studies from Saint Petersburg, Russia. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai*. 2009.
34. **ANGELA CALIA, MARISA LAURENZI TABASSO, ANNA MARIA MECCHI, GIOVANNI QUARTA.** The study of stone for conservation purposes: Lecce stone (southern Italy). *University of Otago*. 2014.
35. **C., De Giorgi.** Note e ricerche sui materiali edilizi adoperati nella provincia di Lecce. 1981.
36. **Dell'Anna L., Laviano R.** Penisola salentina: stato delle conoscenze mineralogiche e geochimiche. In: Margiotta B. & Palmentola G. (eds) Atti del Convegno sulle conoscenze geologiche del territorio salentino, Lecce. Quaderni Ricerche Centro Studi Geotecnici D'Ingegneria. 1987, 11, σσ. 303-321.
37. **Carola Esposito Corcione, Elisabetta Palumbo, Angela Masciullo, Francesco Montagna, Maria Chiara Torricelli.** Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications. *ELSEVIER*. 2017.
38. **D'Agostino, Delia.** Moisture dynamics in an historical masonry structure: The Cathedral of Lecce (South Italy). *ELVESIER*. 2012.
39. **Luciana Randazzo, Valentina Venuti, Giuseppe Paladini, Vincenza Crupi, Domenico Majolino, Frédéric Ott, Michela Ricca, Natalia Rovella, Mauro Francesco La Russa.** Evaluating the protecting effects of two consolidants applied on Pietra di Lecce limestone: A neutronographic study. *ELSEVIER*. 2020.
40. **Emilia Vasanelli, Donato Colangiuli, Angela Calia, Maria Sileo, Antonietta Aiello.** Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *ELSEVIER*. 2014.
41. **P., Pauly J.** Maladie alvéolaire, conditions de formation et d'évolution. In: Rossi Maresi, R. (ed.) Proceedings of the International Symposium The Conservation of Stone II. Ente Bolognese Manifestazioni Artistiche. 1976, σσ. 55-88.
42. **Lewin S. Z., Charola A. E.** The physical chemistry of deteriorated brick and its impregnation techniques. In: CNR-Universita` di Venezia (eds) Atti del Convegno Il Mattone di Venezia. Comune di Venezia-Fondazione Giorgio Cini. 1979, σσ. 189-214.
43. **Ingham, J.P.** Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. *Mater. Character.* 2009, σσ. 60, 700-709.
44. **(2018), Changing the Guard | Royal Palaces / Windsor Castle.** <http://changing-guard.com/windsor-castle.html>. [Ηλεκτρονικό]

45. https://www.athensvoice.gr/greece/655711_varnakova-den-glitose-apo-ti-fotia-i-eikona-tis-panagias. [Ηλεκτρονικό]
46. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CF%81%CE%BA%CE%B1%CE%B3%CE%B9%CE%AC_%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD_%CE%A0%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%B3%CE%AF%CE%B1_%CF%84%CF%89%CE%BD_%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%AF%CF%89%CE%BD#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE. [Ηλεκτρονικό]
47. <https://www.efsyn.gr/node/258284>. [Ηλεκτρονικό]
48. **McCabe S., Smith B.J., P. Warke.** Exploitation of inherited weakness in fire-damaged building sandstone: The ‘fatiguing’ of ‘shocked’ stone. *Eng. Geol.* 2010.
49. **Murru A., Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J., Meloni,P.** Evaluation of post-thermal shock effects in Carrara marble and Santa Caterina di Pittinuri limestone. *Constr. Build. Mater.* 2018.
50. **R., Felicetti.** The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2006.
51. **G.A., Khoury.** Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2002.
52. **Kompaníková Z., Gomez-Heras M., Michňová J., Durmeková T., Vlčko J.** Sand stone alterations triggered by fire-related temperatures. *Environ. Earth Science.* 2014.
53. **Vázquez P., Shushakova V., Gómez-Heras M.** Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: Experimental observations and stress simulation. *Eng. Geol.* 2015.
54. **Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J.** Thermal stress-induced micro cracking in building granite. *Eng. Geo.* 2016.
55. **Brotóns V., Tomás R., Ivorra S., Alarcón J.C.** Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian’ scalcarenite. *Eng. Geo.* 2013.
56. **Martinho E., Mendes M., Dionísio A.** 3D imaging of P-waves velocity as a tool for evaluation of heat-induced limestone decay. *Constr. Build. Mater.* 2017.
57. **Calia A., Colangiuli D., Lettieri M., Quarta G., Masieri M.** Microscopic techniques and a multi-analytical approach to study the fire damage of the painted stuccoes from the Petruzzelli Theatre (Bari, Southern Italy). *Microchem. J.* 2016.
58. **Haaland M.M., Friesem D.E., Miller C.E., Henshilwood C.S.** Heat-induced alteration of glauconitic minerals in the Middle Stone Age levels of Blombos Cave, South Africa: Implications for evaluating site structure and burning events. *J. Arch. Sci.* 2017.
59. **G.A., Khoury.** Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2000.

60. **Ozguven A., Ozcelik.** Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. *Eng. Geo.* 2014.
61. **Vazquez P., Acuña M., Benavente D, Gibeaux S., Navarro I., Gomez-Heras M.** Evolution of surface properties of ornamental granitoids exposed to high temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2016.
62. **Peng J., Rong G., Cai M., Yao M., Zhou C.** Comparison of mechanical properties of undamaged and thermal-damaged coarse marbles under triaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2016.
63. **Sanjurjo-Sánchez J., Gomez-Heras M., Fort R., Alvarez deBuergo M., Izquierdo Benito R., Angel Brud M.** Dating fires and estimating the temperature attained on stone surfaces. The case of Ciudad de Vascos (Spain). *Microchem. J.* 2016.
64. **McCabe S., B. J. Smith, P. A. Warke.** Sandstone response to salt weathering following simulated fire damage: A comparison of the effects of furnace heating and fire. *Earth Surface Processes and Landforms.* 2007.
65. **Chakrabarti B., T. Yates, A. Lewry.** Effect of fire damage on natural stonework in buildings. *Construction and Building Materials.* 1996.
66. **A., Dionísio.** Stone decay induced by fire on historic buildings: The case of the cloister of Lisbon Cathedral (Portugal). *Geological Society. Special Publications,* 2007.
67. **Gillhuber S., G. Lehrberger, J. Göske.** Fire damage of trachyte: Investigations of the Teplá monastery building stones. *Geological Society.* 2010.
68. **M., Hajpál.** Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature. *Fire Technology.* 2002.
69. **E. Martinho, Amelia Dionísio.** Assessment Techniques for Studying the Effects of Fire on Stone Materials: A Literature Review. *International Journal of Architectural Heritage.* 2018.
70. **Antonia Moropoulou, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas.** «Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage». *Construction and Building Materials.* 2013.
71. **Μοροπούλου, Α.** "Μη καταστρεπτικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών-εφαρμογή στο εργαστήριο και επι τόπου". *Σημειώσεις για τις εργαστηριακές ασκήσεις του μαθήματος "Υλικά" Χ.Μ.* ΕΜΠ Αθήνα : s.n., 1996.
72. **Α. Μοροπούλου, Μ. Κουή, Μ. Κροκίδα, Α. Μπακόλας.** «Σημειώσεις Ασκήσεων του Μαθήματος Δομικά Υλικά.» . Αθήνα : Πολυτεχνείο, 2016, σσ. 9-19, 69–74.
73. **Μοροπούλου, Α.** «Μη καταστρεπτικές & ενόργανες μέθοδοι διάγνωσης της φθοράς και ελέγχου υλικών και επεμβάσεων συντήρησης». *Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων» Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.*

74. —. «Τυποποίηση και πρότυπα για έλεγχο ποιότητας στις κατασκευές με μη καταστρεπτικές μεθόδους». Αθήνα Ε.Μ.Π. : s.n., 2012.
75. **15801, UNI EN.** «Conservation of cultural property - Test methods - Determination of water absorption by capillarity». 2010.
76. Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials. *ICCROM*. 1999.
77. “What is color and How is Measured?”. *Applications Note*. s.l. : HunterLab The Color Management Company, 2000, Τόμ. 12.
78. CIE L* a* b* Color Scale. *Applications Note*. s.l. : HunterLab, 1996, Τόμ. 8.
79. ASTM D2244: Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates. 1993.
80. EN15886:2010: «Conservation of cultural property-Test methods-Colour measurement of surfaces».
81. <https://gqsystems.eu>. <https://gqsystems.eu/blog/how-choose-the-right-color-tolerancing-method-for-your-process>. [Ηλεκτρονικό]
82. **F. O’Connor, W.H. Cheung, M. Valix.** Reduction roasting of limonite ores: effect of dehydroxylation. *ELSEVIER*. 2004.
83. **E. Martinho, A. Dionisio.** Assessment Techniques for Studying the Effects of Fire on Stone Materials: A Literature Review. *International Journal of Architectural Heritage* . 2008.
84. **H. Yavuz, S.Demirdag, S.Caran.** Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. *ELSEVIER*. 2009.
85. **Henry Lutz Ehrlich, Dianne K Newman.** *Geomicrobiology*. 2009. 180.
86. **A. Murru, D.M. Freire-Lista, R. Fort, M.J. Varas-Muriel, P. Meloni.** Evaluation of post-thermal shock effects in Carrara marble and Santa Caterina di Pittinuri limestone. 2018.