

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**



**ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

---

**Η ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΩΣ ΚΡΙΣΙΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΤΗΣ  
ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Καραγιάννης Νικόλαος**

**Πτυχιούχος Φυσικής**

**ΑΘΗΝΑ 2017**

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

**Μέλη τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής:**

Μοροπούλου Αντωνία, Καθ. ΕΜΠ (επιβλέπουσα)

Κροκίδα Μαγδαληνή, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Μπακόλας Αστέριος, Επίκ. Καθ. ΕΜΠ

**Μέλη επταμελούς εξεταστικής επιτροπής:**

Λοϊζίδου - Μαλαμή Μαρία, Καθ. ΕΜΠ

Μαρούλης Ζαχαρίας, Καθ. ΕΜΠ

Μοροπούλου Αντωνία, Καθ. ΕΜΠ (επιβλέπουσα)

Χαριτίδης Κωνσταντίνος, Καθ. ΕΜΠ

Κροκίδα Μαγδαληνή, Αν. Καθ. ΕΜΠ

Καραντώνης Αντώνης, Επίκ. Καθ. ΕΜΠ

Μπακόλας Αστέριος, Επίκ. Καθ. ΕΜΠ

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

© Νικόλαος Καραγιάννης

*E-mail:* nikarag@mail.ntua.gr

©ΕΜΠ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών» ανατέθηκε τον Ιούνιο του 2012 από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, με επιβλέπουσα την Καθηγήτρια ΕΜΠ Αντωνία Μοροπούλου και εκπονήθηκε κατά το χρ. διάστημα 2012-2017.

Οι πειραματικές εργασίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Τομέα ΙΙΙ καθώς και στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών του Τομέα ΙΙ της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Με την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

1. Την επιβλέπουσα της διατριβής, Αντωνία Μοροπούλου, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση και επίβλεψη του συγκεκριμένου θέματος, καθώς και για την βοήθεια και διαρκή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής.
2. Το μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής επιτροπής, Αστέριο Μπακόλα, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, για την επιστημονική υποστήριξη και καθοδήγησή του, για τις πολύτιμες ιδέες του και για την κατανόηση και υπομονή που μου παρείχε σε όλες τις φάσεις αυτής της διατριβής.
3. Το μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής επιτροπής, Μαγδαληνή Κροκίδα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ, η οποία με την εμπειρία της στα θέματα της μοντελοποίησης, απλοποίησε και επιτάχυνε σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή και μοντελοποίηση των φαινομένων που μελετώνται στην εργασία αυτή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα πρέπει να αποδοθούν στην Δρ. Μαρία Καρόγλου η οποία με είχε σχεδόν αποκλειστικά υπό την επίβλεψή της σε όλη τη διάρκεια της διατριβής. Η εμπειρία της και η ικανότητα της να δίνει άμεσα λύσεις μας βοήθησαν ώστε μέσα από γόνιμους και δυναμικούς διαλόγους να πετυχαίνουμε πάντα τη βέλτιστη λύση σε κάθε θέμα που προέκυπτε, σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Δεν θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά όλους τους συνεργάτες-φίλους στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών και συγκεκριμένα τους Δρ. Κ. Δελέγκου, Δρ. Κ. Λαμπρόπουλο και Αντωνία Λαμπροπούλου για την συνεχή και πολύτιμη ηθική τους συμπαράσταση, την Υπ. Δρ. Μαίρη Αποστολοπούλου για την συμπαράστασή της σε καθημερινή βάση, για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε στη διόρθωση πολλών εργασιών και για τις εύστοχες παρατηρήσεις της σε όλη τη διάρκεια της διατριβής. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τις Ελισάβετ Τσιλιμαντού,

Νάσια Κιούση και Ευαγγελία Ξυνοπούλου, τον αείμνηστο Πέτρο Μούνδουλα, και τη Ρίτσα Κωνσταντή για την άψογη συνεργασία και την καθημερινή συμπαράσταση και υποστήριξή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, και ειδικότερα τη σύζυγό μου για τη συμπαράστασή και την κατανόηση τους καθώς και για τις ατέλειωτες ώρες που μου επέτρεψαν να λείπω ασχολούμενος με την παρούσα εργασία. Χωρίς τη υπομονή που επέδειξαν δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί ούτε στο ελάχιστο η παρούσα διατριβή.

Αθήνα, Απρίλιος 2017

Νικόλαος Καραγιάννης

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	11
ABSTRACT .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	15
1.1 Λίθοι .....	15
1.1.1 Ορυκτά – Πετρώματα .....	15
1.1.2 Κατηγορίες πετρωμάτων .....	16
1.2 Κεραμικά-Πλίνθοι .....	19
1.2.1 Ιστορική εξέλιξη στη χρήση κεραμικών .....	20
1.2.2 Διαδικασία παρασκευής ιστορικών κεραμικών .....	21
1.3 Κονίες – Κονιάματα .....	21
1.3.1 Κατηγορίες κονιαμάτων .....	22
1.3.2 Ιδιότητες των κονιαμάτων .....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	25
2.1 Γενικά .....	25
2.2 Παράγοντες φθοράς των υλικών .....	25
2.1.1 Φυσικο-Μηχανικοί παράγοντες φθοράς .....	26
2.1.2 Χημικοί παράγοντες φθοράς .....	30
2.1.3 Βιολογικοί παράγοντες φθοράς .....	32
2.1.4 Η δράση του νερού .....	33
2.1.5 Κύκλοι ύγρυνσης-ξήρανσης .....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ-ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ .....	39
3.1 Πορώδες .....	39
3.1.1 Γενικά .....	39
3.1.2 Είδη των πόρων .....	40
3.1.3 Ορισμός του πορώδους .....	42
3.2 Ειδική επιφάνεια .....	42
3.3 Πυκνότητα .....	43
3.4 Τεχνικές χαρακτηρισμού & μέθοδοι αποτίμησης των υλικών .....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ .....	51
4.1 Τριχοειδής αναρρίχηση .....	51

4.1.1 Συντελεστής απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδών πόρων .....	54
4.2 Ξήρανση.....	60
4.3 Μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας.....	63
4.3.1 Κατηγορίες μοντέλων .....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	67
5.1 Τριχοειδής αναρρίχηση .....	67
5.1.1 Συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών .....	68
5.1.2 Μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών ..	69
5.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας στα υλικά ...	71
5.2 Ξήρανση.....	73
5.3 Μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας.....	74
5.3.1 Υγρομετρικά μοντέλα .....	74
5.3.2 Ανασκόπηση στη μοντελοποίηση της τριχοειδούς αναρρίχησης.....	79
5.3.3 Ανασκόπηση στη μοντελοποίηση της ξήρανσης.....	83
5.4 Επίδραση της μικροδομής των υλικών στα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας .....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ.....	89
6.1 Εισαγωγή .....	89
6.2 Επιλογή των δομικών υλικών.....	89
6.3 Μελέτη των χαρακτηριστικών των υλικών .....	91
6.3.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών .....	91
6.3.2 Πορομετρία Υδραργύρου .....	91
6.4 Φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας στα δομικά υλικά.....	92
6.4.1 Δοκιμές υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών και εμβάπτισης .....	92
6.4.2 Τριχοειδής αναρρίχηση .....	94
6.4.3 Ξήρανση.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> : ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	97
7.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM) .....	97
7.2 Δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης – εμβάπτισης.....	101
7.3 Πορομετρία Υδραργύρου (MIP) .....	103
7.4 Μερικά Συμπεράσματα .....	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 <sup>ο</sup> : ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ .....	111
8.1 Εισαγωγή .....	111



8.2 Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας .....	111
8.3 Αποτελέσματα-Συζήτηση .....	111
8.4 Μερικά Συμπεράσματα .....	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 <sup>ο</sup> : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	119
9.1 Εισαγωγή .....	119
9.2 Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας .....	119
9.3 Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	119
9.4 Μερικά Συμπεράσματα.....	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 <sup>ο</sup> : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ .....	133
10.1 Εισαγωγή .....	133
10.2 Μαθηματικό μοντέλο της τριχοειδούς αναρρίχησης .....	133
10.3 Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	136
10.4 Μερικά Συμπεράσματα.....	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 <sup>ο</sup> : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ .....	147
11.1 Εισαγωγή .....	147
11.2 Μαθηματικό μοντέλο της ξήρανσης .....	147
11.3 Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	150
11.4 Μερικά Συμπεράσματα.....	157
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 <sup>ο</sup> : ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ-ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	159
12.1 Εισαγωγή .....	159
12.2 Συσχέτιση των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης-ξηήρανσης / Κύκλοι ύγρανσης- ξηήρανσης .....	159
12.3 Συσχέτιση των μοντέλων της τριχοειδούς αναρρίχησης-ξηήρανσης με στοιχεία της μικροδομής των υλικών .....	168
12.3.1 Συσχέτιση της τριχοειδούς αναρρίχησης με παραμέτρους της μικροδομής των υλικών.....	169
12.3.2 Συσχέτιση της ξήρανσης με στοιχεία της μικροδομής των υλικών .....	177
12.4 Συσχέτιση των φαινομένων μεταφοράς υγρασίας με μακροσκοπικές παραμέτρους των υλικών .....	188
12.5 Συσχέτιση των μακροσκοπικών παραμέτρων με στοιχεία της μικροδομής των υλικών .....	193
12.6 Πρόταση για ένα «νέο» συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης.....	197
12.6.1 Σύγκριση του «νέου» συντελεστή με τον υπάρχοντα $A_w$ από τη βιβλιογραφία	198
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....	201

13.1 Συμπεράσματα .....	201
13.2 Προοπτικές .....	205
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	207
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ .....	225
Κατάλογος σχημάτων .....	227
Κατάλογος Πινάκων .....	233
Κατάλογος συμβόλων .....	235

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν απασχολήσει τη διεθνή έρευνα οι μηχανισμοί και τα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας, τόσο στα παραδοσιακά όσο και στα σύγχρονα δομικά υλικά. Αυτό συμβαίνει γιατί η είσοδος της υγρασίας στα υλικά επιδρά στις οπτικές και στις μηχανικές ιδιότητές τους, στην πρόβλεψη του χρόνου ζωής τους καθώς και στο κόστος αποκατάστασης τους. Παρ' όλα αυτά, είναι ελάχιστα κατανοητοί οι μηχανισμοί που ελέγχουν τη μεταφορά της υγρασίας καθώς και τη συσχέτισή της με τη μικροδομή των δομικών υλικών. Η καλύτερη κατανόηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας είναι απαραίτητη γιατί μέσω αυτής γίνεται καλύτερη αξιολόγηση των βλαβών καθώς και ανάπτυξη κατάλληλων υλικών που πληρούν τις απαιτήσεις όσον αφορά την ανθεκτικότητα και την προστασία.

Η μαθηματική μοντελοποίηση της μεταφοράς υγρασίας στα πορώδη δομικά υλικά είναι ένα από τα πιο αποτελεσματικά εργαλεία τα οποία συμβάλουν στην αντιμετώπιση της ζημιάς που οφείλεται στην υγρασία. Επιπλέον, μέσω της μαθηματικής μοντελοποίησης μπορεί να προβλεφθεί η συσσώρευση υγρασίας στα υλικά περιορίζοντας έτσι το χρόνο επισκευής και αποκατάστασης. Εδώ και πολλά χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες από πολλούς ερευνητές για τη μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς υγρασίας στα πορώδη υλικά. Η περισσότερη όμως μέχρι τώρα έρευνα στηρίζεται σε φαινομενολογικές εξισώσεις που έχουμε δανειστεί από τη Φυσική του εδάφους για τον υπολογισμό της ταχύτητας και του ρυθμού ροής της υγρασίας στα δομικά υλικά. Εκτός αυτού, τα υπάρχοντα μοντέλα βασίζονται κυρίως σε θεωρητικούς υπολογισμούς και όχι σε πειραματικές μετρήσεις των μεταβλητών τους, προσβάλλοντας με αυτό τον τρόπο την αξιοπιστία τους στη πρόβλεψη των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας στα πορώδη δομικά υλικά.

Λαμβάνοντας όλα τα ανωτέρω υπόψη, η παρούσα διατριβή έχει ως αντικείμενο:

α) τη μελέτη των μηχανισμών μεταφοράς της υγρασίας μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης και της ξήρανσης σε πορώδη δομικά υλικά διαφόρων συστάσεων, εξετάζοντας το πώς αυτοί επηρεάζουν αλλά και επηρεάζονται από τη μικροδομή και τις ιδιότητες των υλικών.

β) τη μοντελοποίηση των μηχανισμών μεταφοράς της υγρασίας στα δομικά υλικά και την πρόβλεψη της υγρομετρικής συμπεριφοράς τους.

Στη παρούσα διατριβή επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν τρεις γενικοί τύποι φυσικών και τεχνητών δομικών υλικών (πλίνθοι, λίθοι και κονιάματα) διαφορετικών συστάσεων και με διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροδομής. Τα στοιχεία της μικροδομής των δομικών υλικών μελετήθηκαν με τη βοήθεια της πορομετρίας Υδραργύρου ενώ παράλληλα μελετήθηκαν στοιχεία που αφορούν τις υγρομετρικές ιδιότητες των υλικών. Τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας που ελήφθησαν υπόψη κατά τη διάρκεια της διατριβής ήταν η τριχοειδής αναρρίχηση, η οποία αποτελεί τον κυριότερο μηχανισμό εισόδου της υγρασίας σε ένα πορώδες μέσο, και η ξήρανση μέσω της οποίας εξέρχεται η υγρασία από το υλικό. Η

διαδικασία της ξήρανσης πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά από τον τριχοειδή κορεσμό κάθε υλικού με νερό.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων πάνω σε κρίσιμες υγρομετρικές παραμέτρους των δομικών υλικών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας αέρα με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση αυτών των παραγόντων στα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας στα υπό μελέτη δομικά υλικά.

Για τη μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας, χρησιμοποιήθηκαν ημι-εμπειρικά μοντέλα κινητικής πρώτης τάξης ενώ ακολούθησε προσαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στα πειραματικά δεδομένα, με στόχο να διερευνηθεί η καταλληλότητα και η προσαρμοστικότητα των μοντέλων. Επιπλέον έγινε ο προσδιορισμός των φυσικών παραμέτρων που σχετίζονται με την επίδραση των ιδιοτήτων των υλικών και την επίδραση του περιβάλλοντος. Βρέθηκε ότι τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν λαμβάνουν υπόψη τους τόσο τις περιβαλλοντικές παραμέτρους όσο και τις εγγενείς ιδιότητες των υλικών και προβλέπουν με ακρίβεια τις πειραματικές τιμές.

Στο τελικό στάδιο, συσχετίστηκαν οι φαινομενολογικές παράμετροι των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης, τόσο μεταξύ τους όσο και με στοιχεία της μικροδομής των υλικών ενώ η διατριβή ολοκληρώθηκε με την πρόταση μιας νέας υγρομετρικής παραμέτρου για κάθε υλικό η οποία λαμβάνοντας υπόψη της τόσο τις ιδιότητες των υλικών όσο και τις διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους περιγράφει με πολύ ικανοποιητικό τρόπο την υγρομετρική συμπεριφορά των υλικών.

## **ABSTRACT**

The mechanisms and moisture transport phenomena have occupied the international research extensively in the last decades, both in traditional and in modern building materials. This is because the presence of moisture in materials affects their aesthetic and mechanical properties, their life span as well as their restoration cost. Nevertheless, the mechanisms that control the moisture transfer phenomena are poorly understood and their association with the microstructure of building materials. A better understanding of the moisture transfer phenomena is crucial because, it can result in a better damage assessment and in the development of suitable materials, meeting the requirements for durability and protection of historical structures.

The mathematical modeling of the porous building materials moisture transport phenomena is one of the most effective tools which can contribute to the treatment of moisture damage. Moreover, through the mathematical modelling, the moisture accumulation in the materials can be realized, thus reducing the repair and recovery time. For many years efforts have been made by many researchers towards modeling of moisture transport phenomena in porous materials. Most research so far is based on phenomenological equations, borrowed from Soil Physics, which calculate the speed and flow rate of humidity in building materials. Furthermore, the existing models are mainly based on theoretical calculations and not on experimental measurements of the variables, thus affecting their reliability in predicting moisture transport phenomena in porous building materials.

Taking all this into account, the present research study has the following objectives:

- a) Study of the mechanisms of moisture transport phenomena through capillary rise and drying on porous building materials of various compositions, by examining their relation with their microstructure and materials properties.
- b) Modeling of the mechanisms of moisture transport phenomena in building materials and the prediction of their hygrometric behavior.

In the present study three general types of natural and artificial construction materials (bricks, stones and mortars) of different compositions and with different microstructural characteristics were selected and studied. The microstructural characteristics of the selected building materials were investigated with Mercury Intrusion Porosimetry, while the hygrometric properties of the materials were studied through gravimetric experiments. The moisture transport phenomena taken into account during the study were capillary rise water absorption, which is considered the main mechanism of moisture suction into a porous material, and drying, which governs the moisture move from the material to environment. The drying process was performed immediately after each material capillary water saturation was completed.

In the first stage, capillary water absorption experiments were performed, in order to investigate the influence of various environmental factors on critical hygrometric materials parameters.

Furthermore, capillary rise - drying experiments were conducted, under controlled conditions of temperature, relative humidity and air velocity, in order to study the effect of these environmental parameters on the materials moisture transport phenomena.

Regarding the modeling of the moisture transport phenomena, semi-empirical first order kinetics models were used, followed by the fitting of the mathematical models to the experimental data, in order to investigate the suitability and the adaptability of the models. Furthermore, physical parameters, associated with the materials characteristics and the influence of the environment were determined. The results show that the suggested mathematical models are successful, as they take into account both the environmental parameters and materials intrinsic characteristics and successfully predict the experimental data.

In the final stage, a correlation of the phenomenological parameters of the capillary rise - drying models, both among each other and with materials intrinsic characteristics was successfully performed, and this study was concluded with the proposal of a new hygrometric material parameter which takes into account, both the material properties and various environmental parameters, thus describing materials hygrometric behavior in a more effective manner.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 1.1 Λίθοι

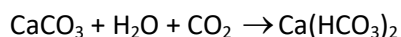
#### 1.1.1 Ορυκτά – Πετρώματα

Με τον όρο **ορυκτά** (*minerals*) εννοούμε τα φυσικά και ομογενή στερεά τα οποία σχηματίζονται συνήθως με ανόργανες διεργασίες είτε στο εσωτερικό της γης είτε στην επιφάνεια της. Τα ορυκτά εμφανίζουν μεγάλο βαθμό διάταξης των ατόμων τους, έχουν χημική σύσταση και φυσικές ιδιότητες που είτε είναι σταθερές είτε εμφανίζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις σε καθορισμένα όρια και εμφανίζουν τέλος, απόλυτα τακτοποιημένη εσωτερική οργάνωση (κρυσταλλική δομή).<sup>1, 2</sup>

Τα ορυκτά από τους συνδυασμούς των οποίων προκύπτουν τα κάθε είδους γήινα πετρώματα ονομάζονται πετρογενετικά.<sup>3, 4</sup> Τα κύρια πετρογενετικά ορυκτά, με την αντίστοιχη συμμετοχή τους στην σύσταση του εξωτερικού τμήματος του φλοιού της γης είναι: άστριοι (57,9%), πυρόξενοι, αμφίβολοι, ολιβίνης (16,3%), χαλαζίας (12,6%), μαρμαρυγίες (3,3%), ασβεστίτης (1,5%), αργιλικά ορυκτά (1%), λειμωνίτης (0,3%), δολομίτης (0,1%) και σερπεντίνης, χλωρίτης, ανυδρίτης, γύψος, και άλλα οξειδία του Fe (3,3%) κ.λ.π.

Ο χαλαζίας (SiO<sub>2</sub>), από τα πιο σπουδαία πετρογενετικά ορυκτά που συναντώνται και σε όλες τις κατηγορίες πετρωμάτων. Έχει μεγάλη σκληρότητα (σκληρότητα 7 της κλίμακας Mohs) και είναι πολύ ανθεκτικός στους αποσθρωτικούς παράγοντες, ενώ τα πετρώματα που περιέχουν χαλαζία σε σημαντικό ποσοστό, συνήθως έχουν υψηλές τιμές αντοχής.<sup>5</sup>

Από τα ανθρακικά ορυκτά το πιο σημαντικό είναι ο ασβεστίτης (CaCO<sub>3</sub>). Είναι σχεδόν αποκλειστικό συστατικό των ασβεστόλιθων, της κρητίδας (κιμωλίας) και του μαρμάρου. Περιέχεται επίσης σε μεγάλο ποσοστό σε άλλα ιζηματογενή πετρώματα όπως είναι οι μάργες, οι ψαμμίτες ή τα κροκαλοπαγή πετρώματα. Το κύριο ορυκτοδιαγνωστικό του χαρακτηριστικό είναι ότι αναβράζει ζωηρά ακόμη και σε ψυχρό αραιό διάλυμα HCl. Σχηματίζεται από καθιζήσεις του CaCO<sub>3</sub> σε ύδατα, όπου λαμβάνει χώρα η ιοντική διάλυση όξινου ανθρακικού ασβεστίου Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Επίσης, προσβάλλεται από το νερό που περιέχει CO<sub>2</sub> (π.χ. νερό της βροχής) και διαλύεται ως εξής:



<sup>1</sup> Μοροπούλου, Α., Μπατής, Γ. (2016): “Δομικά Υλικά”, 9<sup>ο</sup> εξάμηνο Τμ. Χημ. Μηχ., ΕΜΠ, Αθήνα.

<sup>2</sup> Adams, A. E., and MacKenzie, W. S. (1998): A Colour Atlas of Carbonate Sediments and Rocks Under the Microscope, London: Manson.

<sup>3</sup> Μοροπούλου, Α. (2009): “Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών. Μεθοδολογία Ενόργανων & Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών”, 7ο εξάμηνο Τμ. Χημ. Μηχ., Αθήνα.

<sup>4</sup> Price, C. A. (1996): Stone Conservation: an Overview of Current Research, Research in Conservation, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, USA.

<sup>5</sup> Μοροπούλου, Α. (2011): «Δομικά Υλικά Ιστορικών Μνημείων (Λίθοι - Μάρμαρα)». Διδακτικές Σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», ΕΜΠ.

**Πετρώματα** (*rocks*) ονομάζονται τα ορυκτά ή οι ομάδες ορυκτών που σχηματίζουν μέρος του στερεού φλοιού της Γης και είναι προϊόντα διάφορων γεωλογικών διεργασιών. Από έρευνα που έγινε στα πετρώματα που υπάρχουν στα πρώτα 16 χιλιόμετρα του στερεού φλοιού της Γης, προκύπτει η παρακάτω σύσταση:<sup>6</sup>

- 95% πυριγενή πετρώματα
- 4% άργιλοι
- 0,75% αμμόλιθοι
- 0,25% ασβεστόλιθοι

Τα πετρώματα της επιφάνειας της Γης είναι κατά μέσο όρο:

- 5% πυριγενή
- 4% μεταμορφωσιγενή
- 75% ιζηματογενή

ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια της Γης καλύπτεται από πάγους.

Τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που λαμβάνονται υπόψη για την βέλτιστη επιλογή τους και είναι σημαντικά στην Επιστήμη των Υλικών, είναι τα ακόλουθα:

- 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 μικροχαρακτηριστικά, η σχιστότητα, οι πτυχές, κ.α.

### 1.1.2 Κατηγορίες πετρωμάτων

Τα πετρώματα μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ως προς τη σύστασή τους μπορεί να είναι *ομογενή* όταν αποτελούνται από ένα είδος πέτρας ή *ετερογενή* όταν αποτελούνται από περισσότερα από ένα είδη. Όσον αφορά τις φυσικές τους ιδιότητες ταξινομούνται σε πορώδη, συμπαγή, μη συμπαγή κ.λ.π. Η βασικότερη όμως ταξινόμηση μπορεί να γίνει σε σχέση με τον τρόπο σχηματισμού τους, οπότε διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:<sup>7,8,9</sup>

- ✚ Στα πυριγενή ή εκρηξιγενή ή μαγματικά πετρώματα.
- ✚ Στα ιζηματογενή πετρώματα.

<sup>6</sup> Μπούρας Χ.Θ. (1999): “Μαθήματα Ιστορίας της αρχιτεκτονικής”, Α’ Τόμος – Εκδόσεις Συμμετρία & Β’ Τόμος – Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα.

<sup>7</sup> Winkler, E.M. (1997): Stone in architecture, 3<sup>rd</sup> Edition, Springer, New York.

<sup>8</sup> Amoroso, G. G. and Fassina, V. (1983): Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

<sup>9</sup> Siegesmund, S. and Snethlage, R. (2011): Stone in Architecture - Properties, Durability, 4<sup>th</sup> Edition, Springer, Berlin.



✚ Στα μεταμορφωμένα ή μεταμορφωσιγενή πετρώματα.

### 1.1.2.1 Πυριγενή πετρώματα

Τα πυριγενή πετρώματα σχηματίστηκαν από τη στερεοποίηση του μάγματος, η οποία προήλθε από το εσωτερικό της Γης και στερεοποιήθηκε στους επιφανειακούς σχηματισμούς του στερεού φλοιού της. Ανάλογα με το χρόνο και το βάθος στερεοποίησης του μάγματος, διακρίνονται σε επιμέρους κατηγορίες:<sup>10</sup>

Όταν η στερεοποίηση του μάγματος λαμβάνει χώρα αργά μέσα στο φλοιό σε μεγάλο βάθος, τα πετρώματα που δημιουργούνται ονομάζονται *βαθυγενή* ή *πλουτωνίτες* και καθώς η κρυστάλλωση είναι βραδεία, οδηγεί στη δημιουργία μέσο/χονδρόκοκκων κρυστάλλων, συχνά ορατών με γυμνό μάτι. Τέτοια πετρώματα είναι οι γρανίτες, οι διορίτες, οι συηνίτες και οι γάββροι.<sup>11</sup>

Αντίθετα, όταν η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα απότομα στην επιφάνεια του φλοιού της γης, τα πετρώματα που δημιουργούνται ονομάζονται *ηφαιστίτες* ή *εκρηξιγενή*. Οι ηφαιστίτες αντίθετα από τους πλουτωνίτες σχηματίζονται κάτω από συνθήκες ταχείας ψύξης, απότομης μεταβολής της ατμοσφαιρικής πίεσης και ταυτόχρονης αποβολής των αερίων του μάγματος και έτσι σχηματίζονται υαλώδεις ή μικροκρυσταλλικές μάζες. Τέτοια πετρώματα είναι ο βασάλτης και ο ρυόλιθος.

Όταν τέλος, η στερεοποίηση του μάγματος γίνεται σε μικρά βάθη, τα πετρώματα ονομάζονται *υποηφαιστικά*, ενώ όταν το μάγμα εισχωρήσει μέσα σε μεγάλα ρήγματα ή ανοίγματα δημιουργούνται τα *φλεβικά* πετρώματα.

Τα εκρηξιγενή πετρώματα προέρχονται από το ίδιο μάγμα με τα βαθυγενή και ως εκ τούτου έχουν την ίδια σύσταση. Η διαφορά όμως έγκειται στον ιστό τους, λόγω του διαφορετικού τρόπου σχηματισμού. Έτσι στα βαθυγενή πετρώματα ο ιστός επικράτησε να λέγεται κοκκώδης, διότι τα ορυκτά κρυσταλλώθηκαν κάτω από ομαλές συνθήκες και εμφανίζονται σε ισομεγέθεις περίπου κόκκους. Αντίθετα στα εκρηξιγενή πετρώματα η μάζα τους αποτελείται κατά ένα μέρος από κρυσταλλικά ορυκτολογικά συστατικά και κατά το υπόλοιπο, μεγαλύτερο συνήθως, ποσοστό από μια υαλώδη άμορφη μάζα.

Από χημική άποψη τα πυριγενή πετρώματα έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χαλαζία, ο οποίος κυμαίνεται από 35% μέχρι 80%. Με βάση την περιεκτικότητα σε SiO<sub>2</sub> διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες:<sup>12</sup>

- Υπερκορεσμένα και όξινα πετρώματα με ποσοστό SiO<sub>2</sub> 63-80%
- Ενδιάμεσα, κορεσμένα ή ουδέτερα με ποσοστό SiO<sub>2</sub> 52-63%
- Υποκορεσμένα, υποπυριτικά και βασικά με ποσοστό SiO<sub>2</sub> 45-52%
- Υπερβασικά πετρώματα με ποσοστό SiO<sub>2</sub> μικρότερο από 45%

<sup>10</sup> Λεγάκις, Α. (1997): «Τεχνολογία δομικών υλικών», Α΄ Έκδοση, Ευγενίδιο Ίδρυμα, Αθήνα.

<sup>11</sup> Bowen, N.L. (1928): The Evolution of Igneous Rocks, Princeton University Press, Princeton, NJ.

<sup>12</sup> Cross, W., Iddings, J.P., Pirsson, L.V., et al. (1902): A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks, J. Geol, 10, 555–690.

### 1.1.2.2 Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα είναι τα πιο διαδεδομένα πετρώματα στην επιφάνεια της Γης και σχηματίζονται από απόθεση ή καταβύθιση υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση μέσα σε ένα ρευστό μέσο (νερό ή αέρα) και τη μετέπειτα συγκόλληση των υλικών που αποτέθηκαν. Τα υλικά αποσάθρωσης ή απόσπασης από το υγιές πέτρωμα μεταφέρονται είτε με τη βαρύτητα είτε με τον αέρα, είτε, κυρίως, με τα ρέοντα νερά ή μέσα σε λίμνες και θάλασσες. Εκεί με την πάροδο του χρόνου και τη συνεχή επισώρευση, τα χαλαρά ή απλώς συνεκτικά υλικά, μετατρέπονται σε συμπαγή, δηλαδή σε πετρώματα (διαγένεση).

Για το σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων λαμβάνουν χώρα οι εξής διεργασίες:

- *Διάβρωση και αποσάθρωση*, που είναι οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που υφίστανται τα προϋπάρχοντα πετρώματα με αποτέλεσμα την καταστροφή τους.
- *Μεταφορά* των υλικών που προέκυψαν από την αποσάθρωση, με τον άνεμο και το νερό των ποταμών και των θαλασσών.
- *Απόθεση* των υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση. Η απόθεση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα.
- *Διαγένεση*, που είναι η διαδικασία με την οποία ένα χαλαρό ίζημα μετατρέπεται σε συμπαγές πέτρωμα, με τη βοήθεια της πίεσης των υπερκείμενων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης.

Τα ιζηματογενή πετρώματα ανάλογα με τον τρόπο που συντελείται η όλη διαδικασία σχηματισμού τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα *μηχανικά* ή *κλαστικά* ιζήματα που είναι ιζήματα που προκύπτουν από απόθεση υλικών αποσάθρωσης διαφόρων μεγεθών, σχημάτων και σύνθεσης, που αιωρούνται στο νερό ή στον αέρα. Τυπικά παραδείγματα κλαστικών ιζημάτων είναι ο ψαμμίτης, ο πηλόλιθος, η άργιλος, η μάργα, κ.ά.
- Τα *χημικά* ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν από συγκέντρωση και απόθεση ορυκτών που αποτέθηκαν κατευθείαν από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διεργασίες. Τέτοια είναι ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, ο όνυχας, ο γύψος, το ορυκτό αλάτι, κ.ά.
- Τα *οργανικά* ή *βιογενή* ιζήματα τα οποία σχηματίζονται όταν γίνεται συσσώρευση ή απόθεση ύλης προερχόμενης από ζωικούς ή φυτικούς οργανισμούς. Βιογενή ιζηματογενή πετρώματα είναι οι οργανογενείς ασβεστόλιθοι, η κιμωλία και οι κερατόλιθοι, η τύρφη, ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, κ.ά.

### 1.1.2.3 Μεταμορφωμένα πετρώματα

Μεταμορφωμένα ή μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι εκείνα τα πετρώματα που προκύπτουν από τη μεταμόρφωση πυριγενών ή ιζηματογενών πετρωμάτων στα βαθύτερα τμήματα του φλοιού, μετά από ιστολογικές, ορυκτολογικές και χημικές μεταβολές, χωρίς όμως να υποστούν τήξη. Τα πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα υπόκεινται σε αυξημένες πιέσεις και θερμοκρασίες, και στη δράση θερμών διαλυμάτων και αερίων. Έτσι, όταν

βρεθούν λόγω γεωλογικών διεργασιών σε μεγάλα βάθη, ανακρυσταλλώνονται και οδηγούνται 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 μαζών). Η θερμότητα που οφείλεται στην γεινίαση 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.

Σε σχέση με τις αλλαγές στον ιστό, την ορυκτολογική και την χημική τους σύσταση, τα μεταμορφωμένα πετρώματα υπόκεινται στις ακόλουθες μεταμορφώσεις:<sup>13</sup>

- Ισοφασική: αλλαγή μόνο του ιστού του προυπάρχοντος 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, άστριοι, μαρμαρυγίες)
- Ισοχημική: η χημική σύσταση του πετρώματος παραμένει 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 ασβεστοπυριτικά ορυκτά (skarn formation).

## 1.2 Κεραμικά-Πλίνθοι

Τα κεραμικά είναι μη μεταλλικά ανόργανα στερεά υλικά με κρυσταλλική ή άμορφη δομή. Είναι συνήθως σκληρά, ψαθυρά, με υψηλό σημείο τήξης, χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, καλή θερμική σταθερότητα και υψηλές θλιπτικές αντοχές.<sup>14, 15</sup>

Τα κεραμικά παρασκευάζονται από φυσικές πρώτες ύλες, συνήθως αργίλους, ασβέστη, άμμο κλπ ενώ η χρήση τους είναι συνήθως σε είδη αγγειοπλαστικής, πυρίμαχα τούβλα, κεραμίδια, γυαλί και τσιμέντο. Οι αναλογία του μίγματος καθαρής αργίλου με πυριτική άμμο, η διάμετρος των κόκκων και η θερμοκρασία όπτησης καθορίζουν το είδος του τελικού προϊόντος (πορσελάνη, κεραμικά, πλίνθοι, κ.ά.).<sup>16</sup>

Στα πλεονεκτήματα της χρήσης των κεραμικών θα πρέπει να αναφερθούν η χημική τους ευστάθεια (αντίσταση σε διάβρωση), η ενισχυμένη ακαμψία τους σε υψηλές θερμοκρασίες,

<sup>13</sup> Yardley, B.W.D. (1997): Einführung in die Petrologie metamorpher Gesteine, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

<sup>14</sup> Μοροπούλου, Α., Υφαντής, Δ., Σιμιτζής, Ι., Ζουμπουλάκης, Λ. (2008): "Επιστήμη και Τεχνική Υλικών", 7<sup>ο</sup> εξάμηνο Τμ. Χημ. Μηχ., ΕΜΠ, Αθήνα.

<sup>15</sup> Μοροπούλου, Α. (2011): Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος 1.2: "Εισαγωγή στην Παθολογία & Αποκατάσταση Μνημείων και Υλικών" Ε.Μ.Π., ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Β' κατεύθυνση: «Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης», Αθήνα.

<sup>16</sup> Lee, W.E. & Rainforth, W.M. (1994): Ceramic microstructures: Property control by processing., publ. London Chapman & Hall.

η σχετικά χαμηλή πυκνότητα τους, η υψηλή σκληρότητα και αντοχή σε φθορά καθώς και η καλή συμπεριφορά τους σε θερμικά shock. Ανάμεσα στα μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή αντίσταση σε μηχανικούς αιφνιδιασμούς, η υψηλή διασπορά μηχανικών ιδιοτήτων, η ευθραυστότητα τους, προβλήματα στην κατασκευή δοκιμών με πολύπλοκα σχήματα καθώς και προβλήματα συνένωσης τους με άλλα δομικά υλικά.

### 1.2.1 Ιστορική εξέλιξη στη χρήση κεραμικών

Τα κεραμικά, ως δομικά υλικά, πρωτοεμφανίστηκαν και εφαρμόστηκαν με τη μορφή ψημένων πλίνθων από τους Ασσύριους και τους Βαβυλώνιους.<sup>17, 18</sup> Τα υλικά αυτά αναπτύχθηκαν είτε για να καλύψουν την έλλειψη φυσικών υλικών (εκεί όπου οι λίθοι και το ξύλο ήταν υλικά δυσεύρετα. ή σε περιοχές που δεν υπήρχαν αυτοί σε αφθονία) είτε για χρήση τους ως διακοσμητικά στοιχεία (κατασκευή οικιακών σκευών, δοχείων αποθήκευσης τροφίμων, κ.ά.).

Ο πηλός ήταν η πρώτη κονία που χρησιμοποιήθηκε ο οποίος αναμεμιγμένος με νερό και άμμο παρέχει το πηλοκονίαμα. Μεγάλη εφαρμογή γνώρισε ο ψημένος πηλός κατά τη γεωμετρική και την αρχαϊκή περίοδο στην Ελλάδα, όπου χρησιμοποιήθηκε, όχι μόνο σε κεραμίδια αλλά και σε στοιχεία επενδύσεως των ξύλινων μερών.<sup>19</sup> Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ο πηλός αντικαταστάθηκε με νέες, ισχυρότερες κονίες (ασβέστης, γύψος) ενώ η ανακάλυψη του τσιμέντου έδωσε τεράστια ώθηση στη χρήση των κεραμικών υλικών.

Οι οπτόπλινθοι εφαρμόστηκαν σε μεγάλη κλίμακα κατά τη ρωμαϊκή εποχή, ενώ οι ίδιοι αρχίζουν να χρησιμοποιούν και το γυαλί.<sup>20</sup> Το γυαλί σε αγγεία απαντάται από πολύ παλαιότερα, αλλά στην Πομπηία και το Ηράκλειο ευρέθησαν υαλοπίνακες, όχι τελείως διαφανείς. Τα κεραμίδια και τα τούβλα χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον στην αρχιτεκτονική της παλαιοχριστιανικής περιόδου και την περίοδο του Ιουστινιανού, στην κατασκευή τοίχων και στην θολοδομία ενώ κατά τη Βυζαντινή περίοδο, σημειώνονται περιπτώσεις δομής εξ' ολοκλήρου από τούβλα. Μετά την Άλωση της Κωνσταντινούπολης, συνεχίζουν να διατηρούνται στον ελλαδικό χώρο οι τρόποι δομής του Βυζαντίου με την ευρεία χρήση τούβλων και την παρεμβολή πλίνθων σε τυχαίες θέσεις στις τοιχοποιίες. Τέλος, Μετά το 1900 έχουν κατασκευαστεί και τεχνητά κεραμικά με ποικίλες ιδιότητες και με υψηλές προδιαγραφές αντοχής (fine ceramics) που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρονικές εφαρμογές, για μοτέρ αυτοκινήτων, για βιολογικές εφαρμογές, μονωτικά, αντιστάσεις, ημιαγωγοί, υπεραγωγοί κ.λ.π.

Οι βασικότεροι σταθμοί στην κεραμική τεχνολογία δομικών υλικών είναι οι ακόλουθοι:

- 4000-2000π.Χ: Τα πρώτα ψημένα κεραμίδια

<sup>17</sup> Kenoyer, J. M. (2005): Uncovering the keys to the Lost Indus Cities, Scientific American, 15, 24–33.

<sup>18</sup> Wright, G.R.H. (2005): Ancient Building Technology, Parts 1: Text, Brill, Leiden, Boston.

<sup>19</sup> Muller-Wiener, W. (1995): Η αρχιτεκτονική στην αρχαία Ελλάδα, μτφ. Μ. Σμιτ-Δούνα, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

<sup>20</sup> Anderson J.J. (1997): Roman Architecture and Society, Baltimore: The Johns Hopkins University Press. pp. 151–166.

- 3000π.Χ: Κεραμικοί σωλήνες νερού
- 10μ.Χ: Γυάλινα τζάμια παραθύρων
- 600-1300μ.Χ: Βυζαντινά κεραμίδια και τούβλα
- 1500μ.Χ: Αραβικά πλακάκια με διακόσμηση υαλώματος
- 1950μ.Χ: Σύνθετα κεραμικά δομικά υλικά

### 1.2.2 Διαδικασία παρασκευής ιστορικών κεραμικών

Η διαδικασία παρασκευής ενός κλασικού, ιστορικού κεραμικού περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:<sup>15, 21</sup>

- Επιλογή του πηλού ανάλογα με τη χρήση του κεραμικού.
- Διαδικασία καθαρισμού και καθίζησης του πηλού, ανάλογα με την ποιότητα του αντικειμένου που πρόκειται να κατασκευαστεί.
- Ανάμιξη του πηλού με άμμο ή τριμμένο ασβεστόλιθο ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του αντικειμένου.
- Διαμόρφωση του αντικειμένου με τα χέρια, τον κεραμευτικό τροχό ή καλούπια.
- Τοποθέτηση σε φούρνο με την κατάλληλη ατμόσφαιρα και θερμοκρασία, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του αντικειμένου.

### 1.3 Κονίες – Κονιάματα

Τα κονιάματα είναι μίγματα μίας ή περισσότερων συνδετικών υλών (κονιών), νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (<4mm έως 5mm) και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά, αποκτούν δε μετά την πήξη και σκλήρυνση της συνδετικής ύλης, μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης.<sup>22, 23</sup>

Κονίες ονομάζονται τα κονιοποιημένα υλικά, τα οποία όταν αναμιχθούν και υποστούν κατεργασία υπό ορισμένες αναλογίες με ένα ρευστό μέσο (συνήθως νερό) μεταβάλλονται σε εύπλαστο πολτό αποκτώντας ταυτόχρονα συγκολλητικές ιδιότητες.<sup>24</sup> Ο πολτός αυτός βαθμιαία στερεοποιείται έως ότου σχηματίσει σκληρή και συμπαγή μάζα. Η κονία αποτελεί το συνδετικό υλικό των κονιαμάτων μετά την πήξη και σκλήρυνση.

<sup>21</sup> Oliver, G. & Bennett, H. (1992): XRF Analysis of Ceramics, Minerals & Allied Materials, publ. Wiley & Sons.

<sup>22</sup> Μπακόλας-Καραγιάννης Α. (2002): Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.

<sup>23</sup> Αναγνωστοπούλου, Σ. (2012): Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.

<sup>24</sup> Ορλάνδος, Α. Κ., (1958): Τα υλικά δομής των αρχαίων Ελλήνων, κατά τους συγγραφείς, τας επιγραφάς και τα μνημεία, Μέρος Α', Τεύχος 2: Τα μέταλλα, το ελεφαντοστόν, τα κονιάματα και οι λίθοι, Η Αρχαία Ελληνική Αρχιτεκτονική, Αθήνα.

- ❖ Οι κόνιες υποδιαιρούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις *αερικές* και τις *υδραυλικές*. *Αερικές* ονομάζονται οι κόνιες εκείνες που πήζουν και σκληραίνουν με την επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα. Μέσα σε υγρό περιβάλλον δεν αντέχουν ακόμα και οι αερικές κόνιες που έχουν σκληρυνθεί (π.χ. αερική άσβεστος, γύψος).
- ❖ *Υδραυλικές* ονομάζονται οι κόνιες εκείνες που πήζουν και σκληραίνουν και κάτω από την επίδραση του νερού (π.χ. τσιμέντο, υδραυλικός ασβέστης).

### 1.3.1 Κατηγορίες κονιαμάτων

Τα κονιάματα μπορούν να διαιρεθούν με πολλούς και διάφορους τρόπους, ανάλογα με την παράμετρο που εξετάζονται κάθε φορά. Έτσι έχουμε:<sup>25</sup>

#### 1.3.1.1 Ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσης

Με κριτήριο το είδος της κόνιας, τα κονιάματα διακρίνονται σε *υδραυλικά* και *αερικά*. Τα αερικά κονιάματα πήζουν και σκληραίνουν με την μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ανθρακικό ασβέστιο παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Στα υδραυλικά κονιάματα η διαδικασία της πήξης και της σκλήρυνσης επιταχύνεται με χημικές αντιδράσεις του  $\text{Ca(OH)}_2$  με ενεργά αργιλοπυριτικά άλατα παρουσία νερού. Η πήξη και η σκλήρυνση του κονιάματος αποτελούν δυο διαδοχικές φάσεις του ίδιου φαινομένου. Η πήξη είναι η φάση της στερεοποίησης όπου το υλικό, από εύπλαστο κονίαμα μετατρέπεται σε στερεή μάζα.

#### 1.3.1.2 Ανάλογα με το φαινόμενο βάρος τους

Τα κονιάματα με φαινόμενο βάρος μικρότερο από  $1500\text{Kg/m}^3$  χαρακτηρίζονται *ελαφριά* κονιάματα ενώ τα κονιάματα με φαινόμενο βάρος μεγαλύτερο από  $1500\text{Kg/m}^3$  χαρακτηρίζονται ως *βαριά* κονιάματα.

#### 1.3.1.3 Ανάλογα με την χρήση τους

Τα κονιάματα χωρίζονται σε κονιάματα δόμησης ή κονιάματα τοιχοποιίας, κονιάματα επιχρισμάτων, ισοπεδωτικά ή κονιάματα εξίσωσης δαπέδων, επισκευαστικά κονιάματα και συγκολλητικά όπου υπάγονται οι διάφορες κόλλες.

#### 1.3.1.4 Ανάλογα με το είδος της κόνιας ή των αδρανών

- ❖ Τσιμεντοκονιάματα με συνδετική ύλη το τσιμέντο.
- ❖ Ασβεστοκονιάματα με συνδετική ύλη τον πολτό άσβεστου ή την κονιοποιημένη υδράσβεστο.
- ❖ Τσιμεντοασβεστοκονιάματα ή μικτά κονιάματα με μίγμα τσιμέντου και άσβεστου ως συνδετική ύλη.
- ❖ Ποζολανικά κονιάματα με συνδετική ύλη άσβεστο (με μερική υποκατάσταση με τσιμέντο) και ποζολάνη (φυσική ή τεχνητή).

<sup>25</sup> "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4<sup>th</sup> Edition, edited by Peter C. Hewlet, 1998.



- ❖ Μαρμαροκονιάματα με κύριο αδρανές την μαρμαρόσκονη αντί της άμμου και συνδετική ύλη ασβέστη ή τσιμέντο (με ενδεχόμενη μικρή προσθήκη γύψου).
- ❖ Γυψοκονιάματα με κύριο συνδετικό υλικό την γύψο.

### 1.3.1.5 Ανάλογα με την αντοχή τους

Ανάλογα με τις τελικές αντοχές τους τα κονιάματα μπορούμε να τα κατατάξουμε σε τρεις κατηγορίες.

- Κονιάματα χαμηλής αντοχής (π.χ. πηλοκονιάματα)
- Κονιάματα μέτριας αντοχής (π.χ. τσιμεντοασβεστοκονιάματα)
- Κονιάματα υψηλής αντοχής (π.χ. τσιμεντοκονιάματα)

Διάφορες επιμέρους κατηγορίες όπως θερμομονωτικά, ηχομονωτικά, πυράντοχα κλπ, είναι υποπεριπτώσεις των παραπάνω γενικών διαιρέσεων.

### 1.3.2 Ιδιότητες των κονιαμάτων

Τα κονιάματα που προορίζονται για τα διάφορα δομικά έργα, έχουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών χρήσεων, ανάλογα με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες που εξαρτώνται από την σύνθεση και την ποσοστιαία αναλογία των πρώτων υλών αλλά και τον τρόπο παρασκευής τους.<sup>26, 27</sup> Τα σημεία ακριβώς αυτά είναι που διαφοροποιούν τα κονιάματα από τις υπόλοιπες κατηγορίες δομικών υλικών. Παράλληλα, τα κονιάματα είναι προορισμένα να συνδέουν μεταξύ τους διάφορα δομικά στοιχεία προς το σχηματισμό μιας ενιαίας σταθερής δομής η οποία θα αντέχει μεγάλες επιβαρύνσεις. Ως εκ τούτου τα κονιάματα θα πρέπει να αναπτύσσουν ικανοποιητικές **αντοχές** με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας. Εκτός από τις ικανοποιητικές αντοχές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι παρακάτω περιγραφόμενες ιδιότητες των κονιαμάτων:

**Πήξη και σκλήρυνση:** Αφορούν τα νωπά κονιάματα και αποτελούν δύο διαδοχικές φάσεις του ίδιου φαινομένου, που οφείλεται στην κρυστάλλωση των ενυδατωμένων φάσεων της κονιάς. Με τον όρο *πήξη* περιγράφεται το φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου ο πολτός μετατρέπεται από εύπλαστη μάζα σε υλικό με κάποια στερεότητα και μηχανική αντοχή.<sup>28</sup> Με τον όρο *σκλήρυνση* περιγράφεται το φαινόμενο που ακολουθεί χρονικά την πήξη και κατά τη διάρκεια του οποίου ο πολτός μεταβάλλεται σε στερεό σώμα.<sup>29</sup> Η σκλήρυνση μπορεί να διαρκέσει διαρκεί μήνες ή και χρόνια, ανάλογα με το είδος του κονιάματος και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκεται, εκδηλώνεται αύξηση της αντοχής, καθώς και μικρομεταβολές του όγκου του κονιάματος.

<sup>26</sup> Wendehorst, R. (1981): Δομικά υλικά, Έκδοση Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.

<sup>27</sup> ΕΛΟΤ EN 998-1 (2003): «Προδιαγραφή κονιαμάτων τοιχοποιίας- Μέρος 1: Εξωτερικά και εσωτερικά επιχρίσματα».

<sup>28</sup> Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S. (2005): Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries, *Cement & Concrete Composites*, 27, 289–294.

<sup>29</sup> Lanás, J., Bernal, J.L.P., Bello, M.A., Galindo, J.I.A. (2004): Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars, *Cement and Concrete Research*, 34, 12, pp. 2191–2201.

**Ανθεκτικότητα:** Όπως όλα τα δομικά υλικά έτσι και τα κονιάματα έχουν κάποιο πεπερασμένο χρόνο καλής λειτουργίας και αυτός είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την κονία. Επιθυμητό για μια κατασκευή είναι να διατηρεί την αρχική της εμφάνιση, την αντοχή της και την ακεραιότητα της για πολλά χρόνια. Μία συνολική θεώρηση του θέματος της ανθεκτικότητας θα πρέπει να περιλαμβάνει μεταξύ άλλων και την αντιμετώπιση των εξανθήσεων, της αποκατάστασης τυχόν μικρορωγμών, του παγετού και της στεγανότητας.

**Εργασιμότητα:** Η εργασιμότητα είναι μία σύνθετη ιδιότητα και συνίσταται από την *πλαστικότητα* που είναι η ικανότητα να μορφοποιείται ένα κονίαμα χωρίς να χάνει την συνοχή του, τη *ρευσιμότητα* και το *αναπόμικτο* που είναι η ικανότητα να διατηρεί το κονίαμα την ομοιογένεια του και να μην διαχωρίζεται σε στρώσεις διαφόρων συνθέσεων κατά την παραμονή του ή την μεταφορά του.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 2.1 Γενικά

Όλα τα δομικά υλικά παρουσιάζουν συνεχή συμπτώματα φθοράς ως αποτέλεσμα της έκθεσής τους στην ατμόσφαιρα. Η φθορά αυτή είναι αποτέλεσμα φυσικών, χημικών, μηχανικών και βιολογικών παραγόντων και εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και από τη φύση του ίδιου του υλικού.

Ο ορισμός της φθοράς των δομικών υλικών ακολουθεί τον γενικότερο ορισμό της διάβρωσης των τεχνητών και φυσικών υλικών ο οποίος δόθηκε στα πλαίσια του Διεθνούς Συμβουλίου για τη Διάβρωση (International Corrosion Council), της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Διάβρωσης (European Federation of Corrosion) και διαφόρων διεθνών κανονισμών και είναι ο ακόλουθος: «Διάβρωση είναι κάθε αυθόρμητη, ακόμη και εκβιασμένη, χημικής, ηλεκτροχημικής, φυσικής, μηχανικής, βιολογικής φύσης διεργασία αλλοίωσης της επιφάνειας [εξωτερικής και εσωτερικής (πόροι)] των υλικών, που οδηγεί σε απώλεια υλικού».

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι περίπλοκα και συνήθως αλληλοεξαρτώμενα μιας και είναι τόσοι πολλοί οι παράγοντες που υπεισέρχονται για τον καθορισμό τους. Όλα τα υλικά ακολουθούν τις επιταγές του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου και έχουν την τάση να οδηγούνται αυθόρμητα σε καταστάσεις χαμηλότερης ελεύθερης ενέργειας (G), ελεύθερης ενθαλπίας (H), χημικού δυναμικού ( $\mu$ ), και υψηλότερης εντροπίας (S). Η τάση αυτή των υλικών να υποβαθμίζονται ενεργειακά και να μετασχηματίζονται σε άλλα σταθερότερα, αποτελεί το κύριο αίτιο της φθοράς τους. Τα δομικά υλικά, που στην πλειοψηφία τους είναι ανισότροπα, κατά τη δυναμική διεργασία της φθοράς, εκτός από ενεργειακή υποβάθμιση υφίστανται αύξηση της εντροπίας τους, δηλαδή αύξηση της αταξίας των φάσεων του συστήματός τους. Οι νέες φάσεις που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον. Όσο πιο έντονη είναι η κατεργασία της πρώτης ύλης για την παρασκευή των δομικών υλικών (π.χ. μέταλλευμα σε μέταλλο - έντονη κατεργασία), τόσο πιο βίαιες είναι οι μεταβολές των δομικών υλικών στο ίδιο περιβάλλον, με αποτέλεσμα οι φθορές τους να είναι εντονότερες.<sup>30, 31</sup>

### 2.2 Παράγοντες φθοράς των υλικών

Η φθορά των δομικών υλικών είναι μια διεργασία που μπορεί να είναι τόσο βραδεία όσο και τα διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, ή τόσο ταχεία όσο για παράδειγμα, η προσβολή μιας επιφάνειας μαρμάρου από την όξινη βροχή, στο ρυπασμένο περιβάλλον μιας σύγχρονης αστικής- βιομηχανικής πόλης. Τα φαινόμενα της φθοράς είναι ποικιλόμορφα,

<sup>30</sup> Α. Μοροπούλου (1998): Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα "ΥΛΙΚΑ Ι: Φυσικοχημεία της Φθοράς και Τεχνική της Συντήρησης των Δομικών Υλικών", Ε.Μ.Π., Τμ. Χημ.-Μηχ., Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Αθήνα.

<sup>31</sup> Steiger, M.A., Charola, E. and Sterflinger, K. (2011): Weathering and deterioration, Stone in Architecture, Springer, Berlin, pp.227-316.

εκδηλώνονται στις διεπιφάνειες περιβάλλοντος-υλικών και είναι συνάρτηση τόσο ενδογενών όσο και εξωγενών παραγόντων. Στη συνέχεια γίνεται σύντομη αναφορά στους ενδογενείς και τους εξωγενείς παράγοντες φθοράς των υλικών.

Με τον όρο **ενδογενείς παράγοντες** νοούνται οι παράγοντες που αφορούν στο υλικό και αυτοί είναι:

- το είδος του δομικού υλικού (πέτρα, κονίαμα, κεραμικό, μέταλλο, σύνθετα υλικά, κ.ά.)
- οι ιδιότητες του υλικού (φυσικοχημικές, ορυκτολογικές και μηχανικές)
- η κατανομή μάζας στον όγκο και η υφή του (δηλαδή η μακρο- και η μικρο-δομή του υλικού)
- η προέλευση και η απόληψή του
- η τεχνολογία παραγωγής του
- η συμβατότητα του με άλλα υλικά
- η ιστορία του (τόσο στην αρχική του κατασκευή όσο και στις διάφορες επεμβάσεις συντήρησης)

Με τον όρο **εξωγενείς παράγοντες** περιγράφονται οι παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον και είναι:

- το είδος των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων που επιδρούν (θαλασσινή, αστική ή βιομηχανική ατμόσφαιρα)
- το νερό με την εκάστοτε μορφή του (βροχή, αερόλυμα, τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία, συμπύκνωση κ.ά.)
- οι μηχανικές φορτίσεις (θερμοκρασιακές μεταβολές, διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων, κρυστάλλωση αλάτων, σεισμικές δονήσεις, τριβή κ.ά.)
- το μικροκλίμα της περιοχής
- οι συνθήκες χρήσης της κατασκευής
- το περιβάλλον της κατασκευής σε σχέση με άλλα ασύμβατα υλικά
- διάφοροι βιολογικοί παράγοντες
- το γεωτεχνικό πλαίσιο θεμελίωσης
- η κατανομή, ο προσανατολισμός και η ένταση των περιβαλλοντικών παραγόντων, ανάλογα με τη θέση της επιφάνειας και του υλικού στην κατασκευή.<sup>26</sup>

### **2.1.1 Φυσικο-Μηχανικοί παράγοντες φθοράς**

Οι μηχανικοί παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών μπορούν με τη σειρά τους να διακριθούν σε εξωτερικής και σε εσωτερικής προέλευσης. Εξωτερικής προέλευσης μηχανικούς παράγοντες αποτελούν οι ημερήσιες ή εποχιακές θερμοκρασιακές μεταβολές που καταπονούν μέσω των διαστολών και συστολών τα δομικά υλικά, τα φορτία που καταπονούν τα υλικά σαν μέρος του δομικού συνόλου, οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ γειτονικών υλικών (ανάπτυξη τάσεων που καταπονούν τα υλικά), οι καταπονήσεις που οφείλονται στον κακό σχεδιασμό του οικοδομήματος και

τέλος, οι καταπονήσεις από φυσικές καταστροφές (σεισμοί, βομβαρδισμοί, πόλεμοι, κατακλυσμοί, πυρκαγιές, βανδαλισμοί, κ.τ.λ.).

Στους μηχανικούς παράγοντες φθοράς εσωτερικής προέλευσης συγκαταλέγονται η φθορά των πορωδών υλικών λόγω της κρυστάλλωσης των αλάτων, η φθορά λόγω σχηματισμού παγετού, καθώς και η φθορά με τη διόγκωση των μεταλλικών συνδέσμων, όπου σημειώνεται η ύπαρξη αυτών.

#### Θερμοκρασιακές μεταβολές<sup>32</sup>

Οι ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές (π.χ. σε περιοχές με ακραίες κλιματικές συνθήκες) ή οι άνισες κατανομές θερμοκρασίας στα δομικά υλικά μπορεί να αποτελέσουν την αφορμή για την ανάπτυξη τάσεων σε αυτά, με αποτέλεσμα την εκκίνηση φυσικο-μηχανικών διαδικασιών φθοράς. Εάν δε, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις λαμβάνουν χώρα σε πορώδη υλικά παρουσία υγρασίας, τα φαινόμενα περιπλέκονται και συσχετίζονται με τις μεταβολές της φυσικής κατάστασης του νερού (π.χ. σχηματισμός πάγου). Επίσης, οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής και θερμοχωρητικότητας των διαφόρων φάσεων και υλικών ενός συστήματος, ενισχύουν τα φαινόμενα μηχανικής φθοράς των δομικών υλικών, καθώς συνεπάγονται την ανάπτυξη τάσεων με περεταίρω επιπτώσεις στη συνοχή των υλικών.

Τα δομικά υλικά που είναι πιο επιρρεπή στις θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος, είναι τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι, δεδομένης της ανισοτροπίας τους. Τα εν λόγω δομικά υλικά, ενώ θεωρητικά δύναται να ανταποκριθούν ελαστικά σε θερμικές τάσεις, οι οποίες προκαλούνται από θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες των 30°C, στην πραγματικότητα, η ύπαρξη ζωνών αδυναμίας ή επιπέδων ασυνέχειας στα μάρμαρα και κυρίως στους ασβεστόλιθους, διευκολύνει την εκκίνηση διαβρωτικών διαδικασιών ακόμα και κατά τους συνήθεις θερμοκρασιακούς κύκλους του περιβάλλοντος.

Στην περίπτωση πολύ έντονης θέρμανσης και ακραίων θερμοκρασιακών μεταβολών όπως στην περίπτωση των πυρκαγιών, εκδηλώνονται ρηγματώσεις στο όριο μεταξύ θερμού και ψυχρού στρώματος. Η πολύ υψηλή θερμοκρασία (~900°C) για τα μάρμαρα, τους ασβεστόλιθους, τα ασβεστιτικά κονιάματα καθώς και για τους δολομίτες (~800°C), προκαλεί τη διάσπαση του ασβεστίτη (CaCO<sub>3</sub>) γεγονός που συνεπάγεται επιπτώσεις στη συνοχή του υλικού.

#### Κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων<sup>33, 34, 35, 36</sup>

<sup>32</sup> Winkler, W.E. (1975): "Stone: Properties, Durability in Man's Environment", Springer-Verlag.

<sup>33</sup> Moropoulou, A., Theoulakis, P. (1991): "Conditions causing destructive NaCl crystallization into the porous sandstone building material of the Medieval City of Rhodes", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Symposium for the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Geneva, p. 493.

<sup>34</sup> Theoulakis, P., Moropoulou, A. (1988): "Mechanism of deterioration of the sandstone of the Medieval City and the Castle of Rhodes", Proceedings of the Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Poland, p. 86.

<sup>35</sup> Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zedri E. (1996): "Salt impact on brickwork along the canals of Venice", *Journal of Materials and Structures*, 29, 1-9.

<sup>36</sup> Arnold, A. (1981): "Nature and reactions of saline minerals in walls", Proc. Intern. Symp. 'The Conservation of Stone', Bologna, p. 13.

Η κρυστάλλωση των διαλυτών αλάτων θεωρείται ο κυριότερος και πιο καταστροφικός παράγοντας φθοράς των δομικών υλικών, με επιπτώσεις σε όλα τα πορώδη υλικά, ανεξάρτητα από τη χημική τους σύσταση. Τα διαλυτά άλατα που κυκλοφορούν μέσα στα δομικά υλικά είναι κυρίως τα θειικά, τα νιτρικά, τα ανθρακικά και τα χλωριούχα. Αυτά μπορεί να προέρχονται από τα υπόγεια νερά, από όξινους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές ( $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $HCl$ ) οι οποίοι προσβάλλουν τα υλικά, από τη θάλασσα με τη βοήθεια του ανέμου και από άμεση επαφή των υλικών με το τσιμέντο που είναι σημαντική πηγή διαλυτών αλάτων. Η κίνηση των διαλυτών αλάτων γίνεται μέσω των μηχανισμών της ιοντικής διάχυσης, της τριχοειδούς μεταφοράς ή της ιοντικής όσμωσης.

Η πραγματική διεργασία του φαινομένου δεν έχει αποσαφηνιστεί, ενώ για την ερμηνεία του μηχανισμού του, έχουν προταθεί διαφορετικές θεωρίες. Η κρυστάλλωση αλάτων αναφέρεται στη μηχανική φθορά των δομικών υλικών, μέσω της ανάπτυξης μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό των υλικών (πόρους) από κρυστάλλους αλάτων και διάρρηξη της συνέχειας του υλικού, όταν οι τάσεις ξεπεράσουν την αντοχή του. Η διάλυση του συνδετικού υλικού μεταξύ των κόκκων του υλικού λόγω της κρυστάλλωσης αλάτων, συνεπάγεται τη λύση της συνοχής του, δημιουργώντας έτσι την αναγκαιότητα εφαρμογής κατάλληλων κατεργασιών συντήρησης (στερέωση, προστασία) για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων του. Οι κύριες πηγές αλάτων σε τοιχοποιίες είναι η τριχοειδής αναρρίχηση (από το έδαφος), τα γειτονικά υλικά (όπως το τσιμέντο) και συχνά το ίδιο το συνδετικό κονίαμα (εάν υπάρχει).

Τα φαινόμενα φθοράς που οφείλονται στην κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων εκδηλώνονται στα υλικά με τη μορφή *εξανθήσεων* ή *κρυπτοεξανθήσεων*. Στην περίπτωση των εξανθήσεων, η ανάπτυξη και η απόθεση των κρυστάλλων πραγματοποιείται στην επιφάνεια του υλικού. Η εξέλιξη αυτή του φαινομένου καθίσταται δυνατή όταν ο ρυθμός μεταφοράς του διαλύματος άλατος στην επιφάνεια υπερβαίνει το ρυθμό εξάτμισης. Στην περίπτωση της εκδήλωσης κρυπτοεξανθήσεων, η ανάπτυξη των κρυστάλλων πραγματοποιείται στο εσωτερικό των πόρων του υλικού, με ταυτόχρονη απόθεση του διαλύτη του διαλύματος άλατος εντός των πόρων. Η εξέλιξη αυτή του φαινομένου, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, καθίσταται δυνατή όταν ο ρυθμός μεταφοράς του διαλύματος άλατος στην επιφάνεια είναι μικρότερος από το ρυθμό εξάτμισης. Αυτή η εκδοχή θεωρείται η πιο επικίνδυνη εκ των δύο, καθώς οδηγεί σε ανάπτυξη πίεσης στα τοιχώματα των πόρων του λίθου, ανάλογα με το είδος του άλατος, το μέγεθος και την κατανομή των πόρων του υλικού. Η ανάπτυξη των κρυστάλλων στο εσωτερικό των πόρων, συνεπάγεται τη μεταφορά ιόντων στην επιφάνεια των κρυστάλλων. Εκεί λαμβάνουν χώρα διάφορες επιφανειακές αντιδράσεις (ρόφηση, επιφανειακή πυρήνωση, επιφανειακή διάχυση, αφυδάτωση, ιοντανταλλαγή) που οδηγούν στην ενσωμάτωση του ιόντος στο κρυσταλλικό πλέγμα.

#### Δράση του παγετού

Η φθορά που προκαλεί ο παγετός στα δομικά υλικά καθορίζεται από έναν αριθμό παραγόντων όπως η ορυκτολογική τους σύνθεση, το πορώδες τους και η τοποθεσία στην οποία βρίσκονται. Το είδος της φθοράς ποικίλλει και μπορεί να είναι ρηγμάτωση, αποφλοίωση και αποκόλληση. Η δημιουργία πάγου πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία πέσει αρκετά χαμηλότερα από τους  $0^{\circ}C$  εξαιτίας της παρουσίας αλάτων στο νερό τα οποία

έχουν σαν αποτέλεσμα να χαμηλώνει το σημείο πήξης. Η δημιουργία πάγου μέσα στους πόρους ή στις ρωγμές των δομικών υλικών είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη διότι η στερεοποίηση του νερού προκαλεί μια αύξηση του όγκου του κατά 9.3% με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ισχυρές μηχανικές τάσεις στο εσωτερικό του υλικού.<sup>37</sup>

Σύμφωνα με μια άλλη θεωρία, το νερό μέσα σε ένα πορώδες μέσο, δεν πήζει όλο στους 0°C, αλλά ένα μέρος του παραμένει στην υγρή φάση και μάλιστα διατηρείται για καταστάσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που φτάνουν μέχρι τους -40°C. Έτσι, οι μηχανικές πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματα του υλικού αποδίδονται στην ύπαρξη και διαστολή αυτού του υπόψυκτου νερού.<sup>38</sup> Τέλος, μια άλλη θεωρία αναφέρεται στη δημιουργία διφασικών τάσεων λόγω διαφοράς πίεσης στα όρια μεταξύ στερεάς, υγρής και αέριας φάσης.<sup>39</sup>

#### Σεισμικές Δονήσεις

Στα ιστορικά κτήρια, σε αντίθεση με τα νεότερα που είναι σχεδιασμένα σύμφωνα με τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς, κυριαρχεί ο παράγοντας των υφιστάμενων βλαβών και της φθοράς των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, κτήρια που έχουν υποστεί δομικές βλάβες είτε λόγω παρελθόντων σεισμικών δονήσεων είτε λόγω φθοράς των υλικών τους, θα υποστούν περαιτέρω ζημιές και ίσως πλήρη κατάρρευση σε μικρότερες τιμές δυναμικών επιταχύνσεων από αυτές που μπορούν να αντέξουν καινούργια, ισχυρά και κατάλληλα σχεδιασμένα κτήρια. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η ικανότητα απόκρισης ενός ιστορικού κτηρίου σε δυναμικές καταπονήσεις (σεισμούς) εξαρτάται κυρίως από τα συνδετικά του κονιάματα. Επιπλέον, έχειδειχθεί ότι η δυναμική καταπόνηση κτιρίων μπορεί να προκαλέσει βλάβες, όταν οι συχνότητες καταπόνησης κυμαίνονται από 8 έως 80Hz, ανάλογα με τις μέγιστες ταχύτητες που παρουσιάζονται. Η πρόβλεψη κατά DIN για τις βλάβες σε κτίρια είναι ότι μόνο ισχυρά κτίρια μπορούν να αντέξουν ταχύτητες μεταξύ 10 και 40mm/s, ενώ ιστορικά κτίρια, με ήδη υπάρχουσες βλάβες παρουσιάζουν οριακές αντοχές μεταξύ 2 και 5mm/s.<sup>40</sup>

#### Διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων<sup>41</sup>

Στα περισσότερα μνημεία του ελλαδικού χώρου, για τη σύνδεση των διαφόρων αρχιτεκτονικών στοιχείων, έχουν χρησιμοποιηθεί μεταλλικοί σύνδεσμοι από χάλυβα, χαλκό ή ορείχαλκο βυθισμένοι σε μόλυβδο (μολυβδοχόηση) ή άλλοτε δοκοί ξύλου βυθισμένοι σε θειάφι ή πίσσα. Κατά τις αναστηλώσεις που ακολούθησαν χρησιμοποιήθηκε εκτός από τα παραπάνω υλικά και ανοξείδωτος χάλυβας βυθισμένος σε σκυρόδεμα ή κονία.

<sup>37</sup> Powers, T. C. (1955): Basic considerations pertaining to freezing-and-thawing tests, In ASTM Proceedings, Vol. 55.

<sup>38</sup> Dunn, J.R., Hudec, P.P. (1966): Water, clay and rock soundness, *Ohio Journal of Science*, 66, 2.

<sup>39</sup> Winkler, M. F.(1968): 'Frost Damage to Stone and Concrete: Geological Considerations', *Engineering Geology*, 2, 5, 315-323.

<sup>40</sup> Cakmak, S.A., Moropoulou, A., Mullen, C. (1995): 'Interdisciplinary Study of Dynamic Behaviour and Earthquake Response of Hagia Sophia', *Journal of Soil dynamics and earthquake engineering*, 14, 9, 125-133.

<sup>41</sup> Σκουλικίδης, Θ., Βασιλείου, Π. (2007): "Διάβρωση και Προστασία Υλικών", Εκδόσεις Συμewών, Αθήνα.

Τα προϊόντα της οξείδωσης, κυρίως οξείδια του σιδήρου ή ανθρακικά άλατα χαλκού, τα οποία δημιουργούνται στην επιφάνεια των συνδέσμων αυξάνουν σημαντικά τον όγκο του συστήματος μέταλλο – προϊόντα διάβρωσης. Τα νέα οξείδια σχηματίζονται πάντα στην εξωτερική επιφάνεια μέσω της διάχυσης των κατιόντων μετάλλου προς το διαβρωτικό περιβάλλον μέσα από το ήδη σχηματισμένο στρώμα των προϊόντων διάβρωσης. Η διόγκωση του εγκλιβωτισμένου συνδέσμου προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρότατων τάσεων, που οδηγούν στη ρήξη του υλικού όταν υπερβούν την αντοχή του.

### 2.1.2 Χημικοί παράγοντες φθοράς

Η τεχνολογική πρόοδος και η ανάπτυξη των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων τις τελευταίες δεκαετίες, είχε σαν αποτέλεσμα την παρουσία διαφόρων ρύπων μέσα στον ατμοσφαιρικό αέρα. Οι ρύποι αυτοί εμφανίζονται άλλοτε σε υψηλές και άλλοτε σε χαμηλές συγκεντρώσεις ανάλογα με το είδος των πηγών ρύπανσης αλλά και με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τις μετεωρολογικές συνθήκες και χαρακτηρίζονται ως φθοροποιοί για τα συνήθη δομικά υλικά. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία του νερού στις διάφορες μορφές του στο εσωτερικό των υλικών προκαλεί φθορές από χημικές δράσεις σε αυτά.

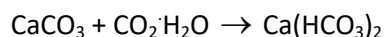
#### 2.1.2.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση-οξική επίδραση

Μέχρι τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, τα μνημεία και τα κτήρια αρχιτεκτονικής αξίας, που είναι εκτεθειμένα για αιώνες στη δράση της ατμόσφαιρας, παρουσίαζαν πολύ αργό ρυθμό φθοράς. Κατά τον εικοστό όμως αιώνα και ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, η αστικοποίηση και η συγκέντρωση των βιομηχανιών στις μεγαλουπόλεις είχε σαν αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των τοπικών επιπέδων ρύπανσης, προκαλώντας έτσι την επιτάχυνση της φθοράς των μνημείων και την δημιουργία νέων μορφών και μηχανισμών φθοράς. Ως ρυπαντές θεωρούνται οι ουσίες που προκαλούν αλλαγή της σύστασης του ατμοσφαιρικού αέρα ενώ οι κυριότεροι φθοροποιοί ρύποι για τα συνήθη δομικά υλικά είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τα οξείδια του θείου και το υδροχλώριο (HCl).

##### ❖ Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι ένα από τα συστατικά της ατμόσφαιρας που παράγεται κυρίως από φυσικές διεργασίες που αφορούν τους ζωντανούς οργανισμούς. Η αυξημένη όμως παρουσία του στην ατμόσφαιρα οφείλεται στο γεγονός ότι είναι το κυριότερο προϊόν της καύσης των διαφόρων καυσίμων υλών.

Το CO<sub>2</sub> αντιδρά με το νερό και δίνει ως προϊόν το ασθενές ανθρακικό οξύ που με τη σειρά του διαλύει τα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου σε πολλά δομικά υλικά (ασβεστόλιθους, μάρμαρα, κονιάματα, κ.ά.) σύμφωνα με την αντίδραση:

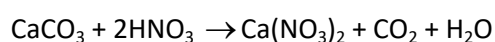




Το προϊόν της αντίδρασης είναι πολύ πιο διαλυτό στο νερό και προκαλεί τη σταδιακή αποικοδόμηση των υλικών.

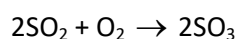
❖ Οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>)

Το άζωτο είναι το συστατικό της ατμόσφαιρας με τη μεγαλύτερη αναλογία (~78%). Κάποια από τα οξείδια του υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε πολύ μικρές ποσότητες και μπορούν να μετατραπούν σε διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Εκτός αυτού, NO<sub>2</sub> μπορεί να παραχθεί και μέσω διάφορων φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα. Έτσι το άζωτο μεταπηδά σε διάφορα στάδια οξειδωσης και κάποια ποσότητα του μετατρέπεται τελικά σε νιτρικό οξύ (HNO<sub>3</sub>). Το νιτρικό οξύ που είναι αρκετά ισχυρό, προσβάλλει το CaCO<sub>3</sub> και παράγει το αρκετά ευδιάλυτο προϊόν Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, οδηγώντας σε διάλυση του ασβεστιτικού υλικού, σύμφωνα με την αντίδραση:

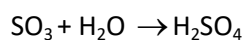


❖ Οξείδια του θείου

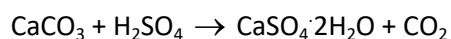
Το θείο υπάρχει στην ατμόσφαιρα με τη μορφή του διοξειδίου και του τριοξειδίου (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>). Η καύση προϊόντων που περιέχουν θείο, όπως το αργό πετρέλαιο και το κάρβουνο, οδηγεί στη δημιουργία του SO<sub>2</sub> το οποίο με τη σειρά του οξειδώνεται σε SO<sub>3</sub>.



Το SO<sub>3</sub> παρουσία νερού μετατρέπεται σε θειικό οξύ σύμφωνα με την αντίδραση:



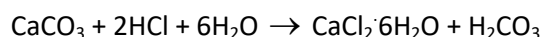
Η παρουσία του θειικού οξέος είναι καταστροφική για τα δομικά υλικά ασβεστιτικής προέλευσης διότι οδηγεί στη δημιουργία γύψου (γυψοποίηση) σύμφωνα με την αντίδραση:



Ο γύψος που σχηματίζεται αποπλένεται συνεχώς από την επιφάνεια του υλικού με αποτέλεσμα η επιφάνεια να διαλύεται και να χάνει τις τυχόν γλυπτές της λεπτομέρειες.

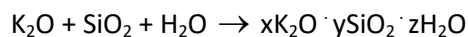
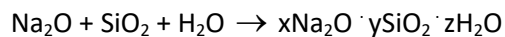
❖ Προσβολή του HCl

Το HCl μπορεί επίσης να προκαλέσει τη διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO<sub>3</sub>) σύμφωνα με την αντίδραση:



### 2.1.2.2 Πυριτο-αλκαλική προσβολή

Τα οξείδια του νατρίου και του καλίου τα οποία υπάρχουν στα υδραυλικά και στα τσιμεντινικά κονιάματα ή σαν πρόσμιξη στα αδρανή, αντιδρούν με το οξείδιο του πυριτίου που μπορεί να βρίσκεται στους πλίνθους της τοιχοποιίας ή στα αδρανή του κονιάματος σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Αποτέλεσμα της παραπάνω προσβολής είναι να παρουσιάζεται αύξηση του όγκου του υλικού, η οποία με τη σειρά της ασκεί πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων του υλικού οδηγώντας σε ρηγματώσεις και τελικά στη φθορά του υλικού.

### 2.1.2.3 Αιωρούμενα σωματίδια - αερολύματα

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι στερεά ή υγρά τεμάχια της ύλης που βρίσκονται διασκορπισμένα στην ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης και το μέγεθος τους κυμαίνεται από 0,2nm έως και 500nm. Προέρχονται κυρίως από τη καύση των ορυκτών καυσίμων και σχηματίζουν σκούρες κρούστες στις επιφάνειες που επικάθονται λόγω της πίσσας ή της αιθάλης που περιέχουν.

Τα αιωρούμενα σωματίδια επικάθονται στις εκτιθέμενες επιφάνειες δημιουργώντας σε αυτές κρούστες. τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν κάποια οξύτητα ή αλκαλικότητα και έτσι όταν επικάθονται στην επιφάνεια της επιτίθενται χημικά. Τα σωματίδια που παρουσιάζουν οξύτητα οδηγούν στο σχηματισμό οξέων ενώ τα σωματίδια που παρουσιάζουν αλκαλικότητα απελευθερώνονται ως σκόνη από το μπετόν σε καινούργια κτήρια.

Τα αερολύματα (aerosols) είναι μίγματα σωματιδίων και σταγονιδίων από θαλάσσιες και ηπειρωτικές σε αέριο μέσα στο οποίο αυτά αιωρούνται.

Η μεταφορά και διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί καθώς η ροή του αέρα είναι υπερβολικά πολύπλοκη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ο τρόπος και η έκταση της φθοράς που προκαλούν. Σημαντικό ρόλο παίζουν η τοποθέτηση και η κλίση της επιφάνειας, οι συνθήκες των ρευμάτων του αέρα και της υγρασίας που επικρατούν στο σημείο (μικροκλίμα του σημείου) ενώ η συγκράτηση τους σε μια επιφάνεια έχει διαφορετικούς βαθμούς έντασης που εξαρτώνται από την ανωμαλία της επιφάνειας.

### 2.1.3 Βιολογικοί παράγοντες φθοράς

Με τον όρο *βιοδιάβρωση* νοείται κάθε ανεπιθύμητη μεταβολή στις ιδιότητες ενός δομικού υλικού ως συνέπεια των δραστηριοτήτων κάποιων ζωντανών οργανισμών. Τα φυτά, τα ζώα και διάφοροι μικροοργανισμοί μπορούν να επιφέρουν πολλών ειδών φυσικοχημικές αλλαγές στα υλικά που προσβάλουν ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξής τους. Η αποίκηση των μικροοργανισμών στα δομικά υλικά και η βιοδιάβρωση σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι σημαντικότερες παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στη βιοδιάβρωση μπορεί να είναι είτε φυσικής είτε χημικής προέλευσης. Στους φυσικούς παράγοντες εντάσσονται η ξηρασία, υγρασία, η θερμοκρασιακή διακύμανση και το φως (δηλαδή το κλίμα και το μικροκλίμα μιας περιοχής) ενώ η διάβρωση λόγω χημικών διεργασιών θεωρείται σημαντικότερη και περιλαμβάνει την παραγωγή ανθρακικού οξέος,



την έκκριση οξαλικού οξέος και την παραγωγή υδατοδιαλυτών λειχηνικών ενώσεων που έχουν τη δυνατότητα να σχηματίζουν ευδιάλυτα μεταλλικά σύμπλοκα.

Τα φαινόμενα της φθοράς που σχετίζονται με τη δράση των μικροοργανισμών ή με τα προϊόντα οργανικών δράσεων συχνά υποτιμούνται σε σχέση με τα αποτελέσματα άλλων παραγόντων, όπως της άμεσης χημικής διάβρωσης. Ωστόσο, τα καταστροφικά αποτελέσματα των χημικών διεργασιών μπορούν να ενταθούν με την παρουσία οργανικά παραγόμενων διαβρωτικών παραγόντων, όπως οξυγόνου, οργανικών οξέων και διοξειδίου του άνθρακα. Η δράση των βακτηριδίων μπορεί να ευνοήσει τη διάβρωση της πέτρας μέσα από την ανάλωση χημικών συστατικών των ορυκτών της, απαραίτητων για τις οργανικές διεργασίες, όπως ακόμα, μπορεί και να παρέχει προϊόντα μεταβολισμού τα οποία δρουν σαν καταλύτες στην εξέλιξη της φθοράς.

Στις επιπτώσεις της βιολογικής διάβρωσης κατατάσσονται:

- η αισθητική εμφάνιση του υλικού: δημιουργία κρούστων, αλλαγές στο χρώμα των υλικών, λεκέδες από τις εκκρίσεις των οργανισμών.
- οι χημικές διεργασίες: τα υποπροϊόντα της δράσης του μεταβολισμού των οργανισμών αντιδρούν με το υπόστρωμα
- οι φυσικές διεργασίες: η μηχανική ρηγμάτωση που μπορεί να προκαλέσει από τις πιέσεις που ασκεί κατά την ανάπτυξή του ο οργανισμός στην επιφάνεια των υλικών.

#### 2.1.4 Η δράση του νερού

Το νερό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών και αυτό γιατί δρα σε πολλά επίπεδα και καθορίζει την επίδραση που θα έχουν άλλοι παράγοντες στα υλικά. Για το λόγο αυτό το πρόβλημα της υγρασίας στα δομικά υλικά έχει προκαλέσει από παλιά το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον. Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν έχουν μελετήσει και περιγράψει τις φυσικές διεργασίες της συμπύκνωσης και της εξάτμισης της υγρασίας σε δομικά υλικά<sup>42, 43, 44, 45, 46</sup>, με τη διαπερατότητα των πορωδών μέσων με νερό<sup>47</sup> και με τη κυκλοφορία του νερού μέσα σε τοιχοποιίες<sup>48</sup> ενώ στο επίκεντρο ήταν και οι

<sup>42</sup> Καρόγλου, Μ. (2005): Μελέτη των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς υλικών ελεγχόμενης μικροδομής σε επεμβάσεις συντήρησης, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.

<sup>43</sup> Camuffo, D., Del Monte, M., Ongaro, A. (1984): "The role of the atmospheric precipitation in Venice, related to both the dynamics of precipitation events and the weathering of monuments", *The science of total environment*, 40, 125-139.

<sup>44</sup> Camuffo D., Bernardi A. (1990): 'Atmospheric pollution and deterioration of monuments' Advanced Workshop 'Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones', Consiglio Nazionale delle Ricerche, ICTR, Italy.

<sup>45</sup> Camuffo D., Del Monte M, Sabbioni C, Vittori O. (1982): 'Wetting, Deterioration and Visual features of stone surfaces in an urban area', *Atmospheric Environment*, 16, 9, 2253-2259.

<sup>46</sup> Camuffo D., Del Monte M., Sabbioni C. (1983): 'Origin and Growth Mechanisms of the sulfated crusts on Urban limestone' *Water, Air, and Soil Pollution*, 19, 351-359.

<sup>47</sup> Vos H. B. (1975): 'Water absorption and drying of Materials', Πρακτικά διεθνούς συμποσίου 'The Conservation of stone', Bologna, p. 595.

αντοχές των υλικών κατά τη κίνηση της υγρασίας καθώς και τα τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν για τις τοιχοποιίες και τα υλικά.<sup>49</sup> Κύριοι μηχανισμοί φθοράς μιας τοιχοποιίας λόγω της υγρασίας είναι η υδρόλυση, η διάλυση, η ύγρανση, η διάβρωση (οξειδωση), η τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία, η μεταφορά των αλάτων και η κρυστάλλωσή τους, η υγροσκοπικότητα, η φθορά από τους κύκλους πήξης-τήξης κ. ά.<sup>50</sup>

Τα βασικά είδη φθοράς των υλικών που οφείλονται στη δράση της υγρασίας είναι η αποφλοίωση (Spalling), η απολέπιση (Peeling), ο διαχωρισμός σε στρώματα (Delamination), το φούσκωμα (Blistering), η συρρίκνωση (Shrinkage), η ρηγμάτωση (cracking), το ράγισμα (crazing), η αναντίστρεπτη διαστολή (Irreversible expansion), η ευθραυστότητα (Embrittlement), η απώλεια αντοχής (Strength loss), η δημιουργία λεκέδων (Staining), ο αποχρωματισμός (discoloration) και η φθορά από μικροοργανισμούς (Decay from micro-organisms).

Πιθανές πηγές υγρασίας αποτελούν το έδαφος, το περιβάλλον (η βροχή, η θάλασσα, οι υδρατμοί κλπ), πιθανές διαρροές λυμάτων, η χρήση του νερού για την παρασκευή των δομικών υλικών, οι διάφορες παρεμβάσεις με τη χρήση εκτεταμένων ποσοτήτων νερού, η υγροσκοπικότητα των αλάτων κ.ά.<sup>51</sup> Ο καλύτερος τρόπος για να "πολεμήσουν" τα προβλήματα που σχετίζονται με την υγρασία σε κτίρια είναι η πρόληψη της εισόδου της υγρασίας κατά τη φάση του σχεδιασμού. Ωστόσο, η εξάλειψη του προβλήματος σε υφιστάμενες, και κυρίως ιστορικές κατασκευές, είναι πιο περίπλοκη.

#### 2.1.4.1 Προέλευση της υγρασίας

Το νερό εισέρχεται και συγκρατείται στο εσωτερικό ενός δομικού υλικού είτε ως χημικά δεσμευμένο νερό, είτε ως φυσικά ροφημένο νερό είτε μέσω της τριχοειδούς κυκλοφορίας. **Χημικά δεσμευμένο** νερό είναι το νερό που αρχικά χρησιμοποιείται με τα δομικά υλικά για την κατασκευή μιας τοιχοποιίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού στη συνέχεια εξατμίζεται ενώ ένα μικρό ποσοστό που παραμένει στην τοιχοποιία δεν ευθύνεται για τυχόν προβλήματα υγρασίας σε αυτήν.

**Το φυσικά ροφημένο** νερό είναι το νερό που απορροφάται απευθείας από τον αέρα και εξαρτάται από τη σχετική υγρασία του χώρου. Στην περίπτωση που στο εσωτερικό του υλικού έχουν διεισδύσει άλατα με μεγάλη υγροσκοπικότητα, παρατηρείται απορρόφηση νερού από το υλικό ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας (ξηρή ατμόσφαιρα).

---

<sup>48</sup> Torraca G. (1982): 'Porous building materials - Materials science for architectural conservation', ICCROM second edition.

<sup>49</sup> M. Mamillan (1981): "Connaissance actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs", πρακτικά διεθνούς συμποσίου "The Conservation of Stone", Bologna, p. 59.

<sup>50</sup> Connolly, J.D. (1993): Humidity and building materials. In: Rose WB, Tenwolde a (eds) Bugs, mold and rot II, proceedings of a workshop by the building environment and thermal envelope council of the National Institute of Building Sciences, Washington DC, NIBS, 29–36.

<sup>51</sup> Oxley, T.A., Gobert, E.G. (1998): Dampness in buildings: diagnosis, treatment, instruments, 2<sup>nd</sup> ed., Biddles Ltd Guilford and King's Lynn, Great Britain.

Όλα τα πορώδη δομικά υλικά απορροφούν νερό μέσω των τριχοειδών τους πόρων. Το νερό αυτό χαρακτηρίζεται ως **τριχοειδώς αναρριχόμενο** νερό και αποτελεί την σημαντικότερη πηγή φθοράς για τα υλικά.

Με βάση τα παραπάνω, οι κυριότερες πηγές υγρασίας σε ένα δομικό υλικό μπορεί να είναι:<sup>52</sup>

- Υγρασία από την ατμόσφαιρα (νερό της βροχής, συμπύκνωση της υγρασίας της ατμόσφαιρας)
- Υγρασία από το έδαφος (τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία)
- Υγρασία από διαρροές εγκαταστάσεων (σωληνώσεις, αποχετεύσεις, παροχές, κ.ά.)
- Υγρασία κατά την εφαρμογή-κατασκευή-αποκατάσταση των δομικών υλικών
- Υγρασία με απευθείας μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα.

#### Το νερό της βροχής

Όλα τα δομικά έργα είναι εκτεθειμένα μετά την κατασκευή τους στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Η διαβρωτική δράση του νερού της βροχής συνίσταται στην αφομοίωση διαφόρων ιόντων καθώς οι σταγόνες απορροφούν τα σωματίδια των αερολυμάτων κατά την πτώση τους. Η σχετικά μικρή διάρκεια της βροχής δεν επιτρέπει στο νερό να διεισδύσει σημαντικά μέσα στα υλικά ενώ το μεγαλύτερο μέρος του απομακρύνεται στη συνέχεια κατά τη φάση της ξήρανσης. Η ποσότητα του νερού που θα διεισδύσει εξαρτάται από το είδος και την κατάσταση του υλικού, τη θέση του υλικού στο κτήριο καθώς και τους διάφορους περιβαλλοντικούς-κλιματολογικούς παράγοντες όπως για παράδειγμα οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή. Έτσι, ένα υλικό με μεγάλους πόρους ευνοεί τη διείσδυση του βρόχινου νερού σε αυτό ενώ οι τυχόν ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την είσοδο της υγρασίας σε αυτό.

#### Συμπύκνωση της ατμοσφαιρικής υγρασίας

Όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας φτάσει στο σημείο δρόσου, παρατηρείται συμπύκνωση της υγρασίας πάνω στις διάφορες επιφάνειες που είναι σε επαφή με αυτή. Με τη συμπύκνωση της υγρασίας μπορεί να αποθεθούν αξιόλογες ποσότητες νερού στην επιφάνεια και στο εσωτερικό των τοίχων ενώ είναι δυνατόν αν σημειωθεί συμπύκνωση όταν υδρατμοί εισέλθουν στο εσωτερικό μιας τοιχοποιίας και φτάσουν σε σημεία με θερμοκρασία μικρότερη του σημείου δρόσου.

#### Τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία

Η τριχοειδής αναρρίχηση είναι η σημαντικότερη αιτία εισόδου της υγρασίας σε ένα δομικό υλικό και είναι ένα πανταχού παρόν φαινόμενο, μιας και όλες οι τοιχοποιίες εδράζονται στο έδαφος. Σε όλα τα πορώδη δομικά υλικά υπάρχει μια κατηγορία πόρων που ονομάζονται τριχοειδείς πόροι ή απλά τριχοειδή του υλικού. Το νερό ανέρχεται μέσω των τριχοειδών πόρων λόγω της ηλεκτράρνητικής έλξης που ασκούν τα τοιχώματα των πόρων στα μόρια του νερού που είναι πολωμένα. Η τριχοειδής δύναμη αυξάνει όσο ελαττώνεται η διάμετρος των πόρων και είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από τη βαρύτητα. Αν η αναρρίχηση του

---

<sup>52</sup> Winkler, E.M. (1994): Stone in architecture, properties, durability, third edition, Berlin, Springer.

νερού δεν αντισταθμίζεται από την τυχόν ξήρανση, η τριχοειδής αναρρίχηση μπορεί να φτάσει το ύψος αρκετών δεκάδων μέτρων. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, το φαινόμενο της ξήρανσης συνυπάρχει με τη διαδικασία της τριχοειδούς αναρρίχησης με αποτέλεσμα να αποκαθίσταται τελικά ισορροπία ανάμεσα στην άνοδο του νερού και την εξάτμιση του από την επιφάνεια. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι σοβαρό ρόλο στη τριχοειδή αναρρίχηση παίζουν και τα διαλυτά άλατα τα οποία εκτός από την κρυστάλλωση τους, δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την εκδήλωση του φαινομένου της ώσμωσης που ενισχύει την αναρρίχηση.

#### Μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα

Το θαλασσινό νερό έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και κυρίως σε NaCl, που φτάνει τα 35 kg αλάτων ανά 1 kg θαλασσινού νερού. Έτσι, καθίσταται ένα πολύ διαβρωτικό μέσο για κάθε υλικό και κατασκευή. Τα σταγονίδια θαλασσινού νερού μπορούν να διανύσουν αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων από τη θάλασσα, ανάλογα με τη διεύθυνση και ένταση των ανέμων, καθώς και την γεωμορφολογία της περιοχής.

Το θαλασσινό νερό περιέχει υδρόθειο H<sub>2</sub>S που προκύπτει από τον μεταβολισμό των θειοαναγωγικών βακτηριδίων. Επίσης υπάρχουν και άλλα βακτηρίδια στη θάλασσα, που μπορούν να παράγουν αμμωνία NH<sub>3</sub> καθώς και άλλες ενώσεις του αζώτου. Ακόμα, στο θαλασσινό νερό περιέχεται το 1% του συνολικού CO<sub>2</sub> με τη μορφή του H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Το pH του θαλασσινού νερού είναι κανονικά αλκαλικό και συγκεκριμένα σε επιφανειακά στρώματα, όπου το νερό ισορροπεί με το ατμοσφαιρικό O<sub>2</sub>, η τιμή του κυμαίνεται από 8,1 - 8,3. Η διαλυτότητα των πετρωμάτων στο θαλασσινό νερό είναι διαφορετική από αυτή στο γλυκό (μέχρι 10% περισσότερο).

#### **2.1.4.2 Επίδραση της υγρασίας στα δομικά υλικά**

Η υγρασία μπορεί να εισέλθει με διάφορους τρόπους σε ένα δομικό υλικό. Μπορεί να προέρχεται από τη βροχή, τη συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας, την απορροή από τις στέγες και τις προσόψεις των κτηρίων και από την τριχοειδή αναρρίχηση από το έδαφος.<sup>53, 54</sup> Τα δομικά υλικά συνήθως περιέχουν μια ποσότητα φυσικά δεσμευμένου νερού χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή τους. Για παράδειγμα τα πορώδη υλικά περιέχουν ένα ποσοστό υγρασίας που κυμαίνεται από 3-5% χωρίς αυτό να αποτελεί αιτία φθοράς τους.<sup>55</sup> Όταν όμως το ποσοστό υγρασίας ενός υλικού υπερβεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό, ενεργοποιούνται τα φαινόμενα φθοράς των υλικών προκαλώντας μια σειρά από φυσικές, χημικές και βιολογικής φύσης επιδράσεις.<sup>56, 57</sup> Έτσι η γνώση της κίνησης της υγρασίας μέσα

<sup>53</sup> Arnold, A. (1982): Rising damp and saline minerals, Fourth International Congress on the Deterioration and Preservation of Stone Objects, Louisville, 11–28.

<sup>54</sup> Karoglou, M., Moropoulou, A., Giakoumaki, A., Krokida, M. (2005): Capillary rise kinetics of some building materials, *Journal of Colloid and Interface Science*, 284, 260–264.

<sup>55</sup> Avoletti M. (1997): Contro l'umidità' ascendente. *Recupero & Conservazione* 17, 58–705.

<sup>56</sup> Oliver A. (1997): Dampness in buildings. In: Douglas J, Sterling JS (eds) 2<sup>nd</sup> edn., Blackwell science, Great Britain.

σε ένα δομικό υλικό είναι πολύ μεγάλης σημασίας γιατί καθορίζει το μηχανισμό φθοράς του υλικού.

- Φυσική επίδραση: Κύριος μηχανισμός φθοράς σε αυτή τη κατηγορία είναι η μετατροπή του νερού σε πάγο (βλ. ενότητα 2.1.1). Η ανθεκτικότητα των υλικών στον παγετό εξαρτάται από τη ποσότητα υγρασίας που περιέχει και από τη πορώδη δομή του.
- Χημική επίδραση: Κύριος μηχανισμός φθοράς σε αυτή την κατηγορία είναι η κρυστάλλωση των αλάτων (βλ. ενότητα 2.1.1 & 2.1.2). Τα άλατα αυτά μεταφέρονται με τη βοήθεια του νερού είτε από το έδαφος (τριχοειδής αναρρίχηση) είτε με τη δράση των ρύπων της ατμόσφαιρας και επιδρούν με τα συστατικά του δομικού υλικού. Επιπλέον το νερό μπορεί να δράσει διαλυτικά προς τα άλατα που περιέχονται σε πολλά δομικά υλικά. Κατά την ξήρανση του υλικού, τα άλατα αυτά επανακρυσταλλώνονται στο εσωτερικό των πόρων, προκαλώντας διόγκωση και ρήξη του υλικού.
- Βιολογική επίδραση: Η ανάπτυξη των προϊόντων της βιοδιάβρωσης στο εσωτερικό των δομικών υλικών είναι δείκτες της ύπαρξης της πλεονάζουσας υγρασίας και αποτελούν κίνδυνο για την υγεία των κατοίκων (βλ. ενότητα 2.1.3). Η ανάπτυξη βιολογικών οργανισμών σε μια τοιχοποιία είναι συνδυασμός της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στην τοιχοποιία. Έτσι, οι τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας θα καθορίσουν αν οι οργανισμοί αυτοί θα δημιουργηθούν και θα επιβιώσουν.

### 2.1.5 Κύκλοι ύγρυνσης-ξήρανσης

όλα τα πορώδη δομικά υλικά επηρεάζονται από τους διαδοχικούς κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης της υγρασίας. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, οι επιφάνειες των κτηρίων καλύπτονται αρχικά από ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού, πάνω στο οποίο επικάθονται διάφοροι ρύποι της ατμόσφαιρας και μεταφέρονται στο εσωτερικό της κατασκευής μέσω των πόρων ή τυχόν ρωγμών. Κατά την αντίστροφη διαδικασία της ξήρανσης, το νερό επιστρέφει στην εξωτερική επιφάνεια και εξατμίζεται δημιουργώντας εξανθήσεις (μαύρες κρούστες) πάνω στην επιφάνεια ενώ στο εσωτερικό του υλικού η διαδικασία της φθοράς συνεχίζεται.

Η επιδεκτικότητα των διαφόρων υλικών στους κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης εξαρτάται από τη πορώδη δομή τους και τις μηχανικές αντοχές τους και λιγότερο από τις χημικές τους ιδιότητες. Τα υλικά με μικρά πορώδη και υψηλές μηχανικές ιδιότητες είναι πιο ανθεκτικά στον τύπο αυτής της φθοράς.

---

<sup>57</sup> Moropoulou, A., Karoglou, M., Bakolas, A., Krokida M. and Maroulis, Z. B. (2014): Moisture Transfer Kinetics Building Materials and Components: Modeling, Experimental Data, Simulation. In: Drying and Wetting of Building Materials and Components. Springer International Publishing Switzerland.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ-ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η επιδεκτικότητα των δομικών υλικών στη φθορά είναι συνάρτηση των διαφόρων μηχανικών και δομικών τους παραμέτρων.<sup>58</sup> Η μικροδομή των δομικών υλικών σε συνδυασμό με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες καθορίζουν τη συμπεριφορά των υλικών στα διάφορα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και ενέργειας.

Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των υλικών με τη μεγαλύτερη βαρύτητα είναι το ανοικτό πορώδες, η μέση ακτίνα/διάμετρος των πόρων, η κατανομή μεγέθους και το σχήμα των πόρων, η ειδική επιφάνεια και η φαινόμενη πυκνότητα. Από πλευράς φυσικοχημικών ιδιοτήτων των υλικών, αυτές που παίζουν καθοριστικό ρόλο είναι η υδαταπορρόφηση, η διαπερατότητα στην υγρασία και η ρόφηση-εκρόφηση των αερίων και των υγρών.

### 3.1 Πορώδες

#### 3.1.1 Γενικά

Κάθε πορώδες μέσο που αποτελείται από στερεά σωματίδια θα περιέχει πόρους συνδεδεμένους μεταξύ τους έτσι ώστε να είναι επιτρεπτή η ροή των ρευστών μέσα από αυτούς και κατά συνέπεια η επικοινωνία τους με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Κατά τη διάρκεια όμως ορισμένων διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του υλικού και μειώνουν το χώρο των κενών, είναι δυνατόν ένα μέρος του κενού χώρου να καταστεί μη διαπερατό από ρευστά και ονομάζεται *κλειστό πορώδες*. Το κλειστό πορώδες δεν συμβάλλει καθόλου στη ροή ρευστών μέσα από το υλικό, είναι δύσκολο να ανιχνευτεί και πολλές φορές προσμετρείται στην στερεά μάζα του υλικού επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο την πυκνότητα του.

Το μέρος εκείνο των πόρων που είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους και μέσω των οποίων γίνεται η κυκλοφορία των ρευστών μέσα από το υλικό ονομάζονται *ανοικτό πορώδες*.

Η ανάλυση της διασύνδεσης των πόρων στα πορώδη μέσα είναι ύψιστης σημασίας για την κατανόηση των φυσικών τους ιδιοτήτων. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι ιδιότητες των πορωδών υλικών εξαρτώνται από τις συνδέσεις μεταξύ των κενών, των κοιλοτήτων και των σχισμών που υπάρχουν στο εσωτερικό των υλικών.<sup>59, 60, 61, 62</sup>

<sup>58</sup> Theoulakis, P., Moropoulou, A. (1997): "Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay", *Construction and Building Materials*, 11, 1, 65-71.

<sup>59</sup> Hall, C., Hoff, W. D. (2002): *Water transport in brick, stone and concrete*, Taylor and Francis, London, UK, Spon Press.

<sup>60</sup> Stauffer, D. and Aharony, A. (1992): *Introduction to percolation theory*, 2<sup>nd</sup> ed., Taylor and Francis, London.

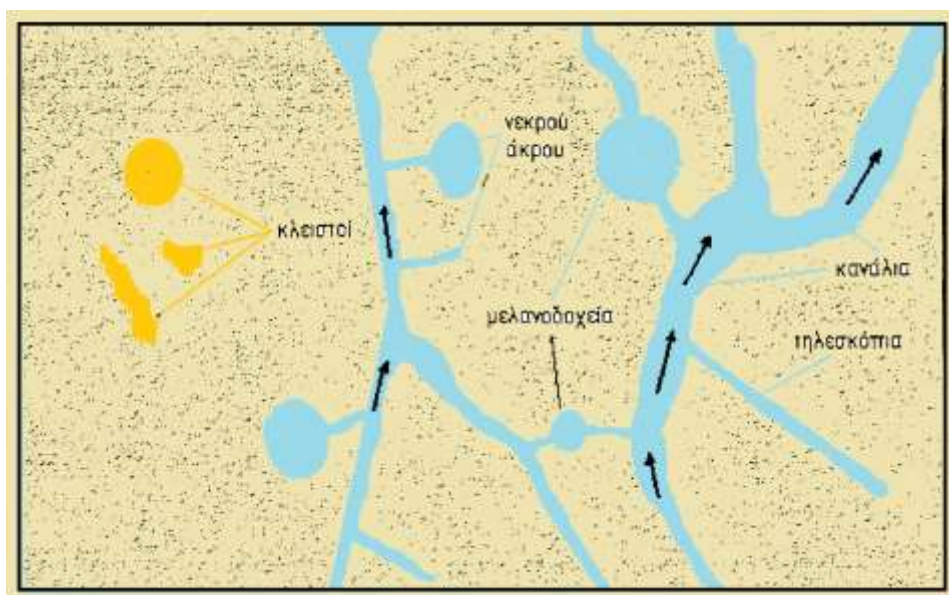
<sup>61</sup> Sahimi, M. (1994): *Applications of percolation theory*, Taylor and Francis, London.



Έτσι καθώς το πορώδες ενός υλικού μειώνεται, οι πόροι του γίνονται όλο και περισσότερο απομονωμένοι μεταξύ τους ενώ αυξάνει και η πιθανότητα να απομονωθούν τελείως. Υπάρχει μάλιστα ένα κάτω όριο πορώδους για κάθε υλικό (percolation threshold) κάτω από το οποίο υπάρχει μόνο κλειστό πορώδες ενώ πάνω από το κατώφλι αυτό εμφανίζονται και το ανοικτό και το κλειστό πορώδες με διαφορετικές αναλογίες.

### 3.1.2 Είδη των πόρων

Κάθε πορώδες μέσο εμφανίζει μια μεγάλη ποικιλία από πόρους οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το σχήμα, το μέγεθος και τον τρόπο σύνδεσης τους. Σύμφωνα με ένα κριτήριο ταξινόμησης, οι πόροι μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη προσβασιμότητα τους σε ρευστά. Οι πόροι που συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα δίκτυο πόρων και επικοινωνούν και με την εξωτερική επιφάνεια του υλικού ονομάζονται ανοικτοί πόροι. Αυτοί οι πόροι είναι προσβάσιμοι σε μόρια ή ιόντα του περιβάλλοντός τους. Αντίθετα, κλειστοί λέγονται οι πόροι εκείνοι οι οποίοι δεν συνδέονται με το υπόλοιπο δίκτυο και κατά συνέπεια σε αυτούς δεν έχει πρόσβαση κανένα ρευστό. Ορισμένοι πόροι είναι ανοικτοί μόνο στο ένα τους άκρο και ονομάζονται τυφλοί πόροι ή πόροι νεκρού άκρου (dead end pores). Στους τυφλούς πόρους τα ρευστά εισέρχονται με σχετική ευκολία σε αυτούς αλλά είναι δύσκολο να εξέλθουν. Ορισμένοι άλλοι είναι ανοικτοί και στα δύο άκρα τους και ονομάζονται διαμπερείς πόροι.<sup>63</sup>



**Σχήμα 3.1:** Τα είδη των πόρων ενός πορώδους υλικού

Ως μελανοδοχεία χαρακτηρίζονται οι πόροι με περισσότερα από ένα ανοίγματα που όμως είναι πολύ στενά και δεν είναι εύκολο σε ένα ρευστό να τα διαπεράσει.

<sup>62</sup> Gueguen Y., Chelidze T. and LeRavalec M. (1997): Microstructures, percolation thresholds and rock physical properties, *Tectonophysics*, 279, 23-35.

<sup>63</sup> Zdravkov, B. D., Cermak, J. J., Sefara, M., Janku, J. (2007): Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective, *Central European Journal of Chemistry*, 5,2, 385–395.



Τέλος μια άλλη κατηγορία πόρων είναι τα κανάλια που είναι εύκολα διαπερατοί λόγω του μεγέθους τους από τα ρευστά και τα τηλεσκόπια με διαπερατότητα ανάμεσα σε αυτή των μελανοδοχείων και των καναλιών.<sup>64</sup>

Γενικά, η δομή των πόρων, δηλαδή το σχήμα, το μέγεθος, η κατανομή και το δίκτυο των πόρων είναι πολύ δύσκολο να καθορίσει. Η τριχοειδής αναρρίχηση, η οποία είναι και ο κυριότερος μηχανισμός εισόδου υγρασίας σε ένα υλικό, λαμβάνει χώρα στους τριχοειδείς πόρους ενός υλικού. Η ακτίνα των τριχοειδών πόρων είναι ένα σημείο αντιπαράθεσης μεταξύ των ερευνητών αλλά γενικά, το εύρος της θεωρείται ότι είναι από 10nm έως 10μm (Πίνακας 3.1). Μια πολύ χρήσιμη ταξινόμηση των πόρων ενός υλικού με βάση τη διάμετρό τους σύμφωνα με διάφορους ερευνητές, περιγράφεται στο πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Ταξινόμηση των πόρων σύμφωνα με τη διάμετρό τους

Σύμφωνα με τη IUPAC <sup>65</sup>		Σύμφωνα με τον Mehta <sup>66</sup>		Σύμφωνα με τους Mindess <i>et al.</i> <sup>67</sup>	
Κατηγορία πόρων	Διάμετρος	Κατηγορία πόρων	Διάμετρος	Κατηγορία πόρων	Διάμετρος
Μικροπόροι (Micropores)	έως 2 nm	Διασωματιδιακός χώρος μεταξύ των C-S-H	1 nm έως 3 nm	Μικροπόροι «ενδιαμέσου στρώματος» (Micropores “inter layer”)	έως 0.5 nm
Μεσοπόροι (Mesopores)	2 έως 50 nm	Τριχοειδείς πόροι (με χαμηλό w/c) Τριχοειδείς πόροι (με υψηλό w/c)	10 nm έως 50 nm 3 μm έως 5 μm	Μικροπόροι (Micropores) Μικροί τριχοειδείς πόροι (gel) Μεσαίοι τριχοειδείς πόροι	0.5 nm έως 2.5 nm 2.5 nm έως 10 nm 10 nm έως 50 nm
Μακροπόροι (Macropores)	> 50nm	Εγκλωβισμένα κενά	50 μm έως 1 mm	Μεγάλοι τριχοειδείς πόροι Εγκλωβισμένος αέρας	50 nm έως 10 μm 0.1 mm έως 1 mm

<sup>64</sup> Μοροπούλου, Α., κ.ά. (2011): Σημειώσεις ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών για το Μάθημα "Φθορά και Προστασία Υλικών" 9<sup>ου</sup> εξαμήνου Σχολής Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. Αθήνα.

<sup>65</sup> International Union of Pure and Applied Chemistry Physical Chemistry Division Commission on Colloid and Surface Chemistry, Subcommittee on Characterization of Porous Solids: “Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)”, Pure Appl. Chem., Vol. 66(8), 1739–1758 (1994).

<sup>66</sup> Mehta, P. K. (1986): Concrete: Structure, Properties, and Materials. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

<sup>67</sup> Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003): Concrete, Prentice Hall, New Jersey.

### 3.1.3 Ορισμός του πορώδους

Κάθε πορώδες μέσο εξ' ορισμού αποτελείται από δυο ξεχωριστά μέρη: την στερεή μήτρα και το δίκτυο των πόρων που συνήθως καταλαμβάνονται από ένα ρευστό (αέρας, νερό, λάδι, μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, κ.λπ.).

Τα δομικά υλικά αποτελούνται από πόρους διαφορετικών σχημάτων και διαφορετικών διαμέτρων, πράγμα που σημαίνει ότι περιέχουν στο εσωτερικό τους κενά. Η κύρια παράμετρος της μικροδομής κάθε υλικού είναι το **ολικό πορώδες**  $\epsilon_0$  του υλικού το οποίο ορίζεται ως το πηλίκο των κενών  $V_p$  του υλικού προς τον συνολικό όγκο  $V_s$  του υλικού δηλαδή:<sup>68</sup>

$$\epsilon_0 = \frac{V_p}{V_s} = 1 - \frac{V_b}{V_s} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{real}} \quad (3.1)$$

όπου  $\rho_{app}$  και  $\rho_{real}$  είναι η φαινόμενη και η πραγματική πυκνότητα του υλικού αντίστοιχα και  $V_b$  ο όγκος της στερεάς μήτρας του υλικού.

Σε κάθε πορώδες μέσο οι κλειστοί πόροι δεν είναι διαπερατοί από κάποιο ρευστό. Εκτός αυτού, ορισμένοι πόροι του υλικού συμπεριφέρονται σαν κλειστοί και δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στην κίνηση του νερού στο υλικό. Για αυτό το λόγο είναι πιο αντιπροσωπευτικός ο ορισμός του **ενεργού ή ανοικτού πορώδους** του υλικού. Έτσι το σύνολο των πόρων που είναι διαπερατοί από ρευστά αναφέρεται στο ανοικτό πορώδες, ενώ το ενεργό πορώδες αναφέρεται σε εκείνους τους πόρους που επικοινωνούν μεταξύ τους και με αυτό τον τρόπο διευκολύνουν την κίνηση ενός ρευστού μέσα στο υλικό.

Κατά τη διάρκεια του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης, οι τριχοειδείς πόροι παίζουν καθοριστικό ρόλο γιατί μέσω αυτών κατά κύριο λόγο γίνεται η μεταφορά υγρασίας στο υλικό. Έτσι, εκτός από το ολικό πορώδες του υλικού, μπορεί να οριστεί και το **πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών πόρων του υλικού**  $\epsilon_{cap}$ , ως ο λόγος του όγκου των τριχοειδών πόρων του υλικού προς τον συνολικό όγκο του υλικού.

Τέλος, μια ακόμα χρήσιμη παράμετρος της μικροδομής των δομικών υλικών είναι το **πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης**  $\epsilon_{imm}$ , το οποίο είναι το ποσοστό του ολικού πορώδους που μετέχει στη είσοδο της υγρασίας μέσω εμβάπτισης του υλικού σε νερό.

## 3.2 Ειδική επιφάνεια

Η ειδική επιφάνεια αποτελεί μια σημαντική παράμετρο σε μια ποικιλία εφαρμογών των δομικών υλικών και ορίζεται ως το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας των στερεών τοιχωμάτων των πόρων ανά μονάδα μάζας ή ανά μονάδα όγκου του υλικού. Η ειδική επιφάνεια αποτελεί ένα μέτρο της προσροφητικής ικανότητας των διαφόρων βιομηχανικών προσροφητικών ενώ παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας

<sup>68</sup> Amoroso, G.G.; Camaiti, M. (1997): *Scienza dei materiali e restauro*. ALINEA, Bolgona.

των καταλυτών, στις στήλες εναλλαγής ιόντων, στα φίλτρα, κ.ά. Η ειδική επιφάνεια σχετίζεται επίσης και με την διαπερατότητα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα ρευστών σε πορώδη μέσα. Ο προσδιορισμός της τιμής της γίνεται με τη μέθοδο ρόφησης-εκρόφησης αζώτου όπου πραγματοποιείται προσαρμογή της εξίσωσης BET στο χαμηλότερο τμήμα της καμπύλης ρόφησης, ενώ μια εκτίμηση της μπορεί να γίνει και από μετρήσεις διαπερατότητας και πορώδους του υλικού.

### 3.3 Πυκνότητα

Ο όγκος κάθε πορώδους δομικού υλικού περιλαμβάνει τον όγκο της στερεάς ύλης και τον όγκο των κενών των πόρων που αυτό περιέχει. Με βάση τη διαφοροποίηση αυτή του όγκου, μπορούμε να διακρίνουμε τη πυκνότητα ενός δομικού υλικού σε φαινόμενη πυκνότητα ( $\rho_{app}$ ) και πραγματική πυκνότητα ( $\rho_{real}$ ).

Ως φαινόμενη πυκνότητα  $\rho_{app}$  του υλικού ορίζεται το πηλίκο της μάζας  $m_s$  του υλικού προς το συνολικό του όγκο  $V_s$ , δηλ.:

$$\rho_{app} = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.2)$$

Η πραγματική πυκνότητα  $\rho_{real}$  του υλικού λαμβάνει υπόψη της τον πραγματικό όγκο του υλικού δηλαδή τον όγκο του υλικού χωρίς τον όγκο των κενών των πόρων του και ορίζεται ως το πηλίκο της συνολικής μάζας του υλικού προς τον πραγματικό όγκο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_{real} = \frac{m_s}{V_b} = \frac{m_s}{V_s - V_p} \quad (3.3)$$

Η φαινόμενη πυκνότητα λαμβάνει υπόψη της το πορώδες των δομικών υλικών ενώ η πραγματική πυκνότητα εξαρτάται από τα συστατικά του υλικού και δεν λαμβάνει υπόψη της το πορώδες του.<sup>69</sup> Η πιο απλή από τις μεθόδους καθορισμού της φαινόμενης και της πραγματικής πυκνότητας πραγματοποιείται με την μέτρηση της άνωσης σε ένα βυθισμένο σε νερό δείγμα υλικού σύμφωνα με τη μέθοδο του Αρχιμήδη.<sup>70</sup>

Η ύπαρξη του πορώδους στα δομικά υλικά καθιστά τη φαινόμενη πυκνότητα πάντοτε μικρότερη από τη πραγματική ενώ οι αποκλίσεις ανάμεσα στις πυκνότητες των υλικών είναι πολύ μικρές σε περιπτώσεις που το πορώδες τους είναι πολύ μικρό (όπως συμβαίνει στην περίπτωση των πλουτωνικών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων).

<sup>69</sup> Siegesmund, S., Dürrast, H. (2011): Physical and mechanical properties of rocks, Stone in Architecture, Springer, Berlin.

<sup>70</sup> Monicard, R.P. (1980): Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis. Edition Technip, Paris.

### 3.4 Τεχνικές χαρακτηρισμού & μέθοδοι αποτίμησης των υλικών

**Υπέρυθρη φασματοσκοπία:**<sup>71, 72, 73, 74, 75</sup> Η υπέρυθρη φασματοσκοπία είναι σίγουρα μια από τις πιο σημαντικές αναλυτικές τεχνικές που είναι διαθέσιμες στους επιστήμονες. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα της υπέρυθρης φασματοσκοπίας είναι ότι σχεδόν κάθε δείγμα σε σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση μπορεί να μελετηθεί. Τα πρώτα φασματόμετρα υπέρυθρου εμφανίστηκαν στο εμπόριο το 1940 αλλά η σημαντικότερη πρόοδος στην υπέρυθρη φασματοσκοπία προκύπτει ως αποτέλεσμα της ανακάλυψης των φασματόμετρων υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier. Αυτό το είδος του φασματόμετρου χρησιμοποιεί ένα συμβολόμετρο και εκμεταλλεύεται τη μαθηματική διαδικασία του μετασχηματισμού Fourier. Η υπέρυθρη φασματοσκοπία με μετασχηματισμό Fourier (FTIR) έχει βελτιώσει δραματικά την ποιότητα της υπέρυθρης φασματοσκοπίας καθώς ελαχιστοποιείται ο χρόνος που απαιτείται για τη λήψη δεδομένων. Η υπέρυθρη φασματοσκοπία είναι μια τεχνική που βασίζεται στις δονήσεις των ατόμων ενός μορίου. Η υπέρυθρη φασματοσκοπία βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα μόρια μίας ένωσης, τα οποία διεγείρονται σε υψηλότερες στάθμες δόνησης ή περιστροφής. Ένα φάσμα υπέρυθρου λαμβάνεται συνήθως με το πέρασμα υπέρυθρης ακτινοβολίας μέσω ενός δείγματος υλικού και τον προσδιορισμό του κλάσματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται σε μια συγκεκριμένη ενέργεια. Η ενέργεια που αντιστοιχεί σε κάθε κορυφή του φάσματος απορρόφησης, αντιστοιχεί στην συχνότητα μιας δόνησης ενός μορίου. Η υπέρυθρη φασματοσκοπία διερευνά τις μοριακές δονήσεις (τάσης και κάμψης) και όχι τις ηλεκτρονιακές διεγέρσεις και μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη δομή της ουσίας. Ενεργές ενώσεις στο υπέρυθρο είναι μόνο εκείνες στις οποίες οι δονήσεις και οι περιστροφές των ατόμων τους έχουν μια διαρκή διπολική ροπή, όπως τα μόρια που αποτελούνται από δυο διαφορετικά άτομα ενώ απορρόφηση στο υπέρυθρο συμβαίνει μόνο όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα του κάθε δίπολου.

**Μέθοδοι περίθλασης ακτίνων Χ:**<sup>71,72,73</sup> Οι μέθοδοι περίθλασης ακτίνων-Χ είναι οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό της κρυσταλλικής δομής των υλικών. Με τη βοήθεια των μεθόδων περίθλασης μπορούν να εντοπίσουν χημικές ενώσεις από τη κρυσταλλική δομή τους και όχι από τις χημικές τους συνθέσεις. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να προσδιοριστούν διαφορετικές ουσίες (ή φάσεις) που έχουν όμως την ίδια σύνθεση.

<sup>71</sup> Μοροπούλου, Α., (2016): «Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών, Μεθοδολογία Ενόργανων & Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών» διδακτικές σημειώσεις μαθήματος Φθορά και Προστασία Υλικών, 9<sup>ο</sup> Εξαμήνου Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

<sup>72</sup> Leng, Y. (2008): MATERIALS CHARACTERIZATION: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.

<sup>73</sup> [https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0ahUKEwjcxPejKnSAhWMWBQKHS9ZBJkQFgg6MAU&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcontent%2Fdocument%2Fcontent%2Fdownloadaddocument%2F9781402061196-c7.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-541805-p173732029&usq=AFQjCNHCW6VpRivpMzATjgU\\_h4HJewQ9qQ&sig2=UdiBosae-vjZViyfb0pZ2g&cad=rja](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0ahUKEwjcxPejKnSAhWMWBQKHS9ZBJkQFgg6MAU&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcontent%2Fdocument%2Fcontent%2Fdownloadaddocument%2F9781402061196-c7.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-541805-p173732029&usq=AFQjCNHCW6VpRivpMzATjgU_h4HJewQ9qQ&sig2=UdiBosae-vjZViyfb0pZ2g&cad=rja)

<sup>74</sup> Herrera, L. K., Le Borgne, S., Videla, A. H. (2009): Modern Methods For Materials Characterization and Surface Analysis to Study the Effects of Biodeterioration and Weathering on Buildings of Cultural Heritage, *International Journal of Architectural Heritage*, 3, 74–91.

<sup>75</sup> Stuart, H. B. (2005): *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd.

Οι μέθοδοι περίθλασης περιλαμβάνουν την περίθλαση ακτίνων-Χ, την περίθλαση ηλεκτρονίων και την περίθλαση νετρονίων. Η περίθλαση ακτίνων-Χ από κρυστάλλους ανακαλύφθηκε το 1912, και από τότε είναι η πιο εκτεταμένα μελετημένη και χρησιμοποιούμενη τεχνική για το χαρακτηρισμό των υλικών. Η αρχή της μεθόδου αυτής βασίζεται στο γεγονός ότι όταν δέσμες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προσπίπτουν σε ένα κρυσταλλικό στερεό υφίστανται διάθλαση από τις κρυσταλλογραφικά επίπεδα του στερεού, όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Δύο σε φάση κυματικές ακτίνες (ακτίνα 1 και ακτίνα 2) προσπίπτουν στο στερεό και εκτρέπονται από δύο επίπεδα των κρυστάλλων (Α και Β). Οι εκτρεπόμενες ακτίνες δεν θα είναι σε πλέον σε φάση, εκτός εάν ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:

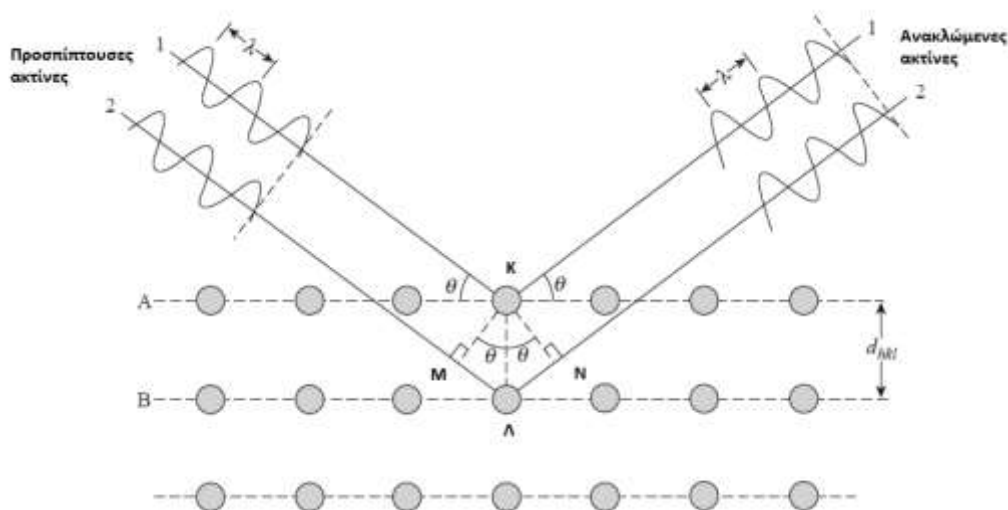
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \eta \mu \theta \quad (3.4)$$

όπου:  $n : 1, 2, 3, \dots$

$\lambda$  : μήκος κύματος ακτίνων Χ

$d$  : η απόσταση δύο κρυσταλλικών επιπέδων

$\theta$  : η γωνία προσπίπτουσας ή περιθλώμενης δέσμης ακτίνων Χ



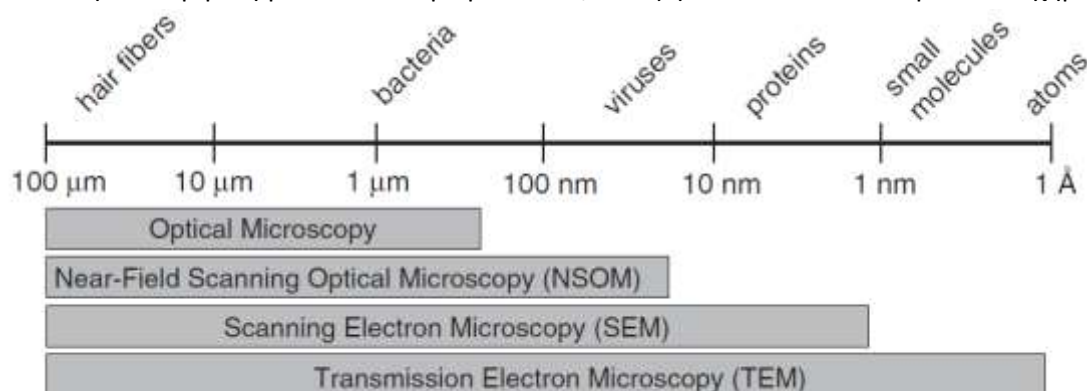
**Σχήμα 3.2:** Περίθλαση Bragg από κρυσταλλικό στερεό. Οι δέσμες 1 και 2 παραμένουν σε φάση όταν η διαφορά των δρόμων είναι  $(ΜΛ)+(ΛΝ) = 2 \cdot (ΚΛ) \cdot \eta \mu \theta$ .

Για τα κρυσταλλικά υλικά (κονίες και μονοκρύσταλλοι) οι μέθοδοι περίθλασης μπορούν να αποκαλύψουν εκτός από τη κρυσταλλική δομή, τη θέση, ένταση και σχήμα των κορυφών, το μέγεθος των κρυστάλλων (5-200nm), τις μικροσκοπικές καταπονήσεις και να κάνουν μια ποσοτική ανάλυση των φάσεων και υπολογισμό των σταθερών του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού.

**Οπτική μικροσκοπία:** Η οπτική μικροσκοπία αποτελεί το κύριο μέσο για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς για να εξετάσουν τη μικροδομή των υλικών. Η ιστορία της χρήσης ενός οπτικού μικροσκοπίου για την εξέταση της μικροδομής των υλικών ανάγεται στην δεκαετία του 1880. Από τότε, η οπτική μαζί με τη πολωτική μικροσκοπία αποτελούν τη βάση για τα

πεδία της πετρογραφίας (εξακρίβωση γεωγραφικής προέλευσης ενός δομικού υλικού και αναγνώριση των δομικών ορυκτών του) και της μεταλλογραφίας (ανάλυση της μικροδομής και αναγνώριση των φάσεων του υλικού). Επιπλέον, η οπτική μικροσκοπία χρησιμοποιείται ευρέως για την εξέταση όχι μόνο των μετάλλων αλλά και στα κεραμικά και στα πολυμερή.

**Ηλεκτρονική μικροσκοπία (TEM – SEM):** Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια παράγουν εικόνες της μικροδομής των υλικών με πολύ μεγαλύτερη μεγέθυνση και ανάλυση σε σχέση με τα οπτικά μικροσκόπια. Η υψηλή ανάλυση των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων οφείλεται στα μικρά μήκη κύματος των ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνται για το φωτισμό του μικροσκοπίου. Το μήκος κύματος των ηλεκτρονίων στα ηλεκτρονικά μικροσκόπια είναι περίπου 10.000 φορές μικρότερο από εκείνο του ορατού φως. Η ανάλυση των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων φτάνει τα 0.1nm, αν ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις των φακών τους. Η ικανότητα των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων να εστιάζουν στα εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, οδηγεί σε μια τεράστια χωρική ανάλυση σε σύγκριση με το οπτικό μικροσκόπιο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.3:** Σύγκριση του χαρακτηρισμού των τάξεων μεγέθους για την οπτική και την ηλεκτρονική μικροσκοπία.

Δεδομένου δε ότι η ανάλυση των ματιών μας είναι της τάξης των 0,1mm, για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα υλικά, θα πρέπει να χρησιμοποιούμε κατάλληλα επίπεδα μεγέθυνσης. Τέτοια υψηλή ανάλυση κάνει τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια εξαιρετικά χρήσιμα για την αποκάλυψη πολύ λεπτών λεπτομερειών της μικροδομής των υλικών.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ηλεκτρονικών μικροσκοπίων: τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια διερχόμενης δέσμης (Transmission Electron Microscopes-TEM) και τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης (Scanning Electron Microscopes-SEM).

Τα οπτικά ενός μικροσκοπίου TEM είναι παρόμοια με αυτά των συμβατικών οπτικών μικροσκοπίων, ενώ το μικροσκόπιο SEM μοιάζει περισσότερο με τα μικροσκόπια λέιζερ συνεστιακής σάρωσης. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Με αυτού του τύπου τα μικροσκόπια εξετάζεται η μικροσκοπική δομή της επιφάνειας των υλικών με πολύ υψηλότερη ανάλυση και πολύ μεγαλύτερο βάθος πεδίου σε σχέση με τα οπτικά μικροσκόπια. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της μικροσκοπίας SEM είναι η τρισδιάστατη εμφάνιση των εικόνων της, εξαιτίας του μεγάλου βάθους πεδίου. Για παράδειγμα, το βάθος

πεδίου μπορεί να φτάσει τη τάξη μεγέθους των 10μm σε μεγέθυνση  $\times 10^3$  και την τάξη μεγέθους των nm σε μεγέθυνση  $\times 10^4$ . Η βασική διαφορά μεταξύ ενός TEM και ενός SEM είναι το ότι οι αντικειμενικοί φακοί ενός TEM βρίσκονται μετά το δείγμα ενώ στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης οι αντικειμενικοί φακοί βρίσκονται πριν το δείγμα και εστιάζουν τη δέσμη προτού αυτή προσκρούσει στο δείγμα. Επίσης, ένα μικροσκόπιο SEM λειτουργεί και συντηρείται ευκολότερα σε σύγκριση με ένα TEM ενώ ένα σύστημα SEM παρέχει τη δυνατότητα να αποκτηθούν, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, και χημικές πληροφορίες από ένα δοκίμιο. Στο SEM λαμβάνουμε πληροφορίες είτε μέσω των ηλεκτρονίων BSE, είτε μέσω των ηλεκτρονίων SE, είτε μέσω της ακτινοβολίας X. Στο TEM οι πληροφορίες λαμβάνονται από το τμήμα της δέσμης που διαπερνά το λεπτό δείγμα. Η δέσμη εστιάζεται με την βοήθεια των αντικειμενικών φακών και των διαφραγμάτων πάνω στην οθόνη παρατήρησης ή σε φωτογραφικό φιλμ.

**Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM):**<sup>71,72</sup> Η μέθοδος της μικροσκοπίας οπτικών ινών (FOM) είναι μια μη καταστρεπτική, φορητή τεχνική του μικροσκοπικού ελέγχου των υλικών χωρίς να απαιτείται προηγουμένως επεξεργασία των υπό εξέταση επιφανειών. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω οπτικών ινών οι οποίες βρίσκονται κατάλληλα συζευγμένες. Στο ένα άκρο της ζεύξης το εισερχόμενο ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικούς παλμούς οι οποίοι μεταδίδονται μέσα στις οπτικές ίνες μέσω διαδοχικών ανακλάσεων. Στο άλλο άκρο της ζεύξης οι οπτικοί παλμοί μετατρέπονται εκ νέου σε ηλεκτρικό σήμα.

Η μικροσκοπία οπτικών ινών είναι κατάλληλη για:<sup>76</sup>

- την εξέταση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των επιφανειών (όπως η υφή και οι διάφορες μορφές φθοράς)
- την ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό των δομικών υλικών (π.χ. ταξινομήσεις των κονιαμάτων)
- για τη μελέτη των διαφόρων φαινομένων φθοράς (κυψελοποίηση, σκληρή ανθρακική κρούστα, κ.λ.π.)
- τη διερεύνηση της επιφανειακής μορφολογίας των υλικών
- να εντοπίσει ελαττώματα στα υλικά των ιστορικών κτηρίων
- για να αξιολογήσει τις διάφορες παρεμβάσεις καθαρισμού.

Τα κυριότερα τμήματα μιας συσκευής FOM είναι:

- Λάμπα αλογόνου που λειτουργεί στα 100W
- Έλεγχος έντασης φωτός: Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται απ' 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

---

<sup>76</sup> Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M. & Bakolas, A. (2013): Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1222-1239.

- Αντικειμενικοί φακοί: Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μπορεί να αλλάξει κανείς περισσότερους φακούς για να πάρει εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων. Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών.

Κατά τη διαδικασία της μικροσκοπικής εξέτασης το φως πρέπει να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος και ανακλάται πίσω διαμέσου των αντικειμενικών φακών. Χαρακτηριστικά της επιφάνειας σε θέσεις πλάγιες σχετικά με τη δέσμη φωτός εμφανίζουν μεγαλύτερο κοντράστ από την υπόλοιπη εικόνα με αποτέλεσμα να έχουμε απώλειες φωτός. Οι εικόνες της μικροσκοπίας οπτικών ινών έχουν υψηλή ανάλυση και μεγέθυνση έως και x600, ενώ μπορούν να αποθηκευτούν σε ψηφιακή μορφή για περαιτέρω επεξεργασία.

**Πορομετρία υδραργύρου (MIP):** Η πορομετρία υδραργύρου είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό της πορώδους δομής των φυσικών και τεχνητών πορώδων υλικών. Όπως αναφέρεται από τους Van Brakel κ.ά.<sup>77</sup>, ο Τσέχος Smetana<sup>78</sup> ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να βελτιώσει την εσωτερική δομή του ξύλου με την εισαγωγή υδραργύρου. Το 1921, ο Washburn<sup>79, 80</sup> πρότεινε τη χρήση της έγχυσης υδραργύρου σαν μέθοδο για να μπορέσουμε να εξασφαλίσουμε την κατανομή του μεγέθους των πόρων σε ένα πορώδες υλικό. Οι πρώτοι που περιέγραψαν την κατασκευή και λειτουργία μιας συσκευής πορομετρίας υδραργύρου παρουσιάζοντας ένα μεγάλο αριθμό πειραματικών δεδομένων ήταν οι Ritter και Drake το 1945<sup>81</sup>.

#### Αρχή της μεθόδου

Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους η πορομετρία υδραργύρου παρέχει, εκτός από το συνολικό πορώδες και την κατανομή των ακτινών των πόρων του υλικού. Η πορομετρία υδραργύρου βασίζεται στη βαθμιαία διείδυση του υδραργύρου που είναι μη διαβρέχον υγρό, σε ένα πορώδες υλικό εκκενωμένο από αέρα, με αύξηση της εξωτερικής πίεσης και απομάκρυνσης του υδραργύρου καθώς η πίεση ελαττώνεται<sup>82,83</sup>. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται, ο υδράργυρος εισβάλλει προοδευτικά και στους μικρότερους πόρους και σε πολύ υψηλή πίεση ο υδράργυρος καλύπτει τους ανοικτούς πόρους του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς η

---

<sup>77</sup> Van Brakel J., Modry S. et Svata M. (1981) : Mercury porosimetry : state of the art, *Powder Technology*, 29, 1-12.

<sup>78</sup> Smetana J. (1842) : *Sjlozpyt cili Fysika – Nàkladem Céského Museum*, Prague, 17, p 11.

<sup>79</sup> Washburn E. W., (1921a): The dynamic of capillary flow, *Phys. Rev.*, 17, 3, 273-283.

<sup>80</sup> Washburn E. W., (1921b): *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 7, 115-116.

<sup>81</sup> Drake L.C., Ritter H.L. (1945): Macropore-Size Distributions in Some Typical Porous Substances, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 17, 12, 787–791.

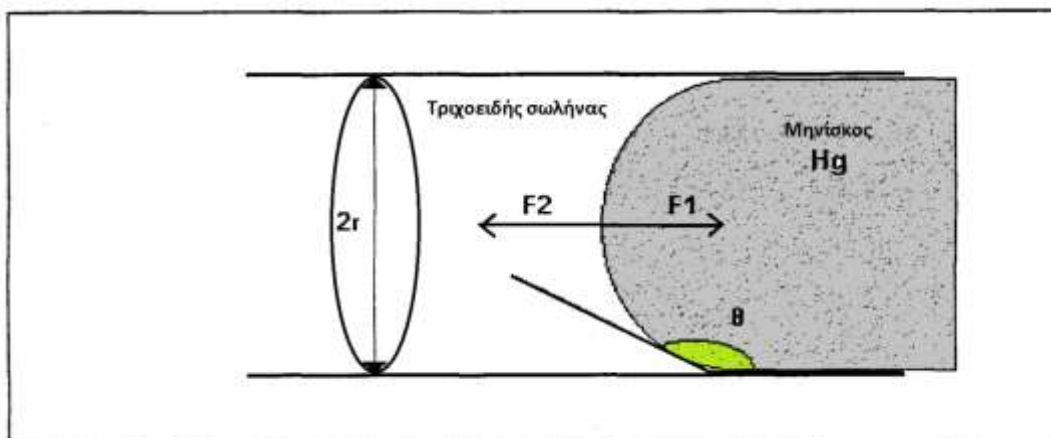
<sup>82</sup> Pittman E. D. (1984): The pore geometry of reservoir rocks – In *Physics and chemistry of porous media*, D.L. Johnson and P.N. Sen Eds, Schlumberger-Doll Res., Amer. Inst. Physics conf. Proceed., 107, 1-19.

<sup>83</sup> Pittman E. D. (1992): Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone – *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 76, 2, 191-198.



εξωτερική πίεση ελαττώνεται, ο υδράργυρος εξέρχεται από το δείγμα προοδευτικά, μέχρις ότου σε χαμηλή πίεση διακοπεί η συνέχεια στη ροή του υδραργύρου και ένα μέρος του παγιδεύεται στους πόρους του υλικού.

Από μια τυπική καμπύλη διείσδυσης-απομάκρυνσης του υδραργύρου παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την πορώδη δομή του υλικού. Για τον υπολογισμό της κατανομής των πόρων του υλικού έχει υιοθετηθεί το κυλινδρικό μοντέλο πόρων. Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι οι πόροι αποτελούν μια δέσμη κυλινδρικών τριχοειδών σωλήνων διαφορετικής διαμέτρου και ίσου μήκους που δεν τέμνονται μεταξύ τους.



Σχήμα 3.4: Μηνίσκος υδραργύρου μέσα σε τριχοειδή σωλήνα

Σε κάθε τριχοειδή σωλήνα η τριχοειδής δύναμη  $F_1$  που ασκείται στον υδράργυρο είναι:

$$F_1 = 2\pi r \gamma \cos\theta \quad (3.5)$$

όπου  $r$  είναι η ακτίνα του σωλήνα,  $\gamma$  είναι η επιφανειακή τάση του υδραργύρου (480dyn/cm) και  $\theta$  είναι η γωνία επαφής του υδραργύρου με τα τοιχώματα του σωλήνα.

Για να εισέλθει ο υδράργυρος στο σωλήνα θα πρέπει να εφαρμοστεί εξωτερική δύναμη  $F_2$ , ίση με:

$$F_2 = \pi r^2 P \quad (3.6)$$

όπου  $P$  είναι η εξωτερική πίεση.

Όταν η εξωτερική δύναμη  $F_2$  υπερβεί την τριχοειδή δύναμη  $F_1$  τότε ο τριχοειδής σωλήνας γεμίζει με υδράργυρο, ενώ στην ισορροπία ισχύει:

$$F_1 = -F_2$$

$$2\pi r \gamma \cos\theta = -\pi r^2 P$$

$$P = -\frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (3.7)$$

Όπως προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση, η εξωτερική πίεση που πρέπει να ασκηθεί προκειμένου ο υδράργυρος να εισέλθει στον τριχοειδή σωλήνα είναι αντίστροφα ανάλογη με την ακτίνα του τριχοειδή σωλήνα.

#### Σύντομη αξιολόγηση της μεθόδου

Η πορομετρία υδραργύρου είναι μια σχετικά γρήγορη μέθοδος με την οποία μπορεί να προσδιορίσει ένα μεγάλο εύρος διαμέτρων πόρων (3nm - 200μm) και μπορούν να προσδιοριστούν μια ποικιλία παραμέτρων της μικροδομής των πορωδών υλικών. Παρ' όλα αυτά, η συγκεκριμένη μέθοδος σπάνια χρησιμοποιείται για μετρήσεις ποιοτικού έλεγχου γιατί ο χρόνος που απαιτείται για μια απλή μέτρηση κυμαίνεται από 30-45 λεπτά<sup>84</sup>. Με τη μέθοδο αυτή, μπορούν να προσδιοριστούν μόνο πόροι που φτάνουν στην επιφάνεια του δείγματος. Επίσης το δείγμα πρέπει να είναι ξηρό γιατί ο υδράργυρος δεν μπορεί να εισέλθει σε δείγμα του οποίου οι πόροι είναι πληρωμένοι με άλλο υγρό<sup>85</sup>. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι υψηλές πιέσεις που απαιτούνται για να οδηγηθεί ο υδράργυρος μέσα στους μικρούς πόρους μπορεί να θλίψουν το δείγμα<sup>86, 87, 88, 89</sup>. Τέλος, η πορομετρία υδραργύρου υπερεκτιμάει τον όγκο των μικρότερων πόρων εξαιτίας των πόρων-μελανοδοχείων και των διασυνδεδεμένων πόρων οι οποίοι μετατοπίζουν την συνολική κατανομή πόρων σε μικρότερες τιμές.<sup>87</sup>

---

<sup>84</sup> Webb, P.A. and Orr, C. (1997): Analytical methods in fine particle technology. Micromeritics Instrument Corp., Norcross, GA, USA, p. 301.

<sup>85</sup> Ek, R., Lennholm, H., Davidson, R., Nyström, C. and Ragnarsson, G., (1995): Pore swelling in beads made of cellulose fibres and fibre fragments. *Int. J. Pharm.* 122, 49 - 56.

<sup>86</sup> Palmer, H.K. and Rowe, R.C., (1974): The application of mercury porosimetry to porous polymer powders, *Powder Technol.*, 9, 181 – 186.

<sup>87</sup> Johnston, G.P., Smith, D.M., Melendez, I. and Hurd, A.J., (1990): Compression effects in mercury porosimetry, *Powder Technology*, 61, 289 – 294.

<sup>88</sup> Allen, T. (1997): Particle size measurement, 5<sup>th</sup> Ed., Chapman & Hall, New York, USA, p. 251.

<sup>89</sup> Brown, S.M. and Lard, E.W. (1974): A comparison of nitrogen and mercury pore size distributions of silicas of varying pore volume, *Powder Technol.*, 9, 187 - 190.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Το νερό μπορεί να κυκλοφορήσει σε υγρή ή σε αέρια μορφή μέσα στο εσωτερικό ενός πορώδους υλικού με διάφορους τρόπους. Όταν το νερό είναι σε υγρή μορφή μπορεί να εισχωρήσει στο υλικό μέσω της ρόφησης, της διάχυσης, της ώσμωσης, της ηλεκτροκίνησης ή της θερμότητας. Η κίνηση της υγρασίας σε αέρια μορφή γίνεται είτε λόγω της συμπύκνωσης ή της προσρόφησης όταν το νερό εισέρχεται στο υλικό, είτε μέσω της εξάτμισης ή της εκρόφησης όπου το νερό απομακρύνεται από το υλικό.

Τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας σε πορώδη δομικά υλικά, ανάλογα με το αν παραμένει σταθερή ή όχι η θερμοκρασία, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ισόθερμα και μη ισόθερμα. Η μελέτη των ισόθερμων φαινομένων έχει ξεκινήσει εδώ και αρκετές δεκαετίες ενώ για τα μη ισόθερμα φαινόμενα δεν υπάρχουν κοινά αποδεκτά μοντέλα πρόβλεψης μέχρι σήμερα. Εκτός από τη θερμοκρασία, μια σειρά από παραδοχές στα φαινόμενα μεταφοράς περιλαμβάνουν σταθερή πυκνότητα του νερού, αμελητέα επίδραση της βαρύτητας, κ.ά. Ειδικά σε στερεά που στο εσωτερικό τους συνυπάρχει υγρασία σε υγρή και αέρια μορφή (μη κορεσμένα στερεά), θεωρείται ότι τα ρευστά στο εσωτερικό των υλικών δεν αναμειγνύονται μεταξύ τους, οι δύο φάσεις βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία, η επίδραση των διαλυμένων αλάτων είναι αμελητέα, κ.ά.<sup>90</sup>

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης και ως εκ τούτου τα φαινόμενα αυτά θα αναλυθούν διεξοδικά.

### 4.1 Τριχοειδής αναρρίχηση

Ο ρόλος του νερού στον μηχανισμό φθοράς των πορώδων δομικών υλικών έχει αναγνωριστεί από την Αρχαιότητα.<sup>91</sup> Το νερό εισέρχεται στα δομικά υλικά σε υγρή ή σε αέρια μορφή (υδρατμοί) αλλά οι κυριότεροι μηχανισμοί μεταφοράς υγρασίας σχετίζονται με την υγρή του φάση. Ο πιο κοινός τρόπος με τον οποίο το νερό εισέρχεται στο δίκτυο των πόρων ενός δομικού υλικού είναι η τριχοειδή αναρρίχηση. Το νερό εισέρχεται σε ένα δομικό υλικό μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης από το έδαφος, μέσω της βροχής και της συμπύκνωσης της υγρασίας του αέρα και προκαλεί διάφορα φυσικά, χημικά και βιολογικά προβλήματα στα υλικά.<sup>92</sup> Η τριχοειδής αναρρίχηση είναι ο κυριότερος παράγοντας φθοράς ενός υλικού διότι προκαλεί συμπύκνωση στο εσωτερικό του κτιρίου και δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη βακτηρίων με άμεση επιβάρυνση του

<sup>90</sup> Pel, L. (1995): Moisture transport in porous building materials, Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.

<sup>91</sup> Marcus Vitruvius Pollio: de Architectura, Book VI, chapter IV.

<sup>92</sup> Karagiannis, N.; Karoglou, M.; Bakolas, A. and Moropoulou, A. (2016): Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved, New Approaches to Building Pathology and Durability, Springer.

ατμοσφαιρικού αέρα στους εσωτερικούς χώρους για τους κατοίκους, γεγονός που επηρεάζει τόσο την υγεία τους όσο και την άνεσή στη διαβίωσή τους.<sup>93, 94, 95, 96, 97, 98</sup>

Με τον όρο τριχοειδή αναρρίχηση εννοούμε την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση του νερού που προέρχεται από το έδαφος μέσα σε μία τοιχοποιία και την εμφάνιση αναρριχόμενης υγρασίας σε αυτή.<sup>99</sup>

Κατά τη διάρκεια του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης, το νερό εισέρχεται από τη πλευρά του υλικού που είναι σε επαφή με το έδαφος και έτσι παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση στη μάζα του υλικού. Για ένα ισότροπο και πορώδες δομικό υλικό, η τριχοειδώς απορροφούμενη μάζα νερού ανά μονάδα επιφάνειας, είναι συνάρτηση του χρόνου σύμφωνα με την εξίσωση:

$$l = A_w \sqrt{t} \quad (4.1)$$

όπου  $l$  η μάζα του απορροφούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ),  $A_w$  ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης του υλικού ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}^{1/2}$ ) και  $t$  ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο (s).

Για να είναι σε ισχύ η εξίσωση (4.1) θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:<sup>100</sup>

- η διατομή του υλικού που είναι παράλληλη προς την απορροφητική επιφάνεια και κάθετος προς την κατεύθυνση του υγρού εισροή να είναι σταθερή
- το ύψος του δοκιμίου να είναι σχετικά μικρό έτσι ώστε να θεωρείται αμελητέα η βαρύτητα
- το βάθος βύθισης του δοκιμίου να είναι μικρό και η στάθμη του νερού να διατηρείται σε σταθερό επίπεδο, συνήθως μεταξύ 1 και 2 mm πάνω από την κατώτερη επιφάνεια του δείγματος
- η πιθανή εισροή νερού από πολλές κατευθύνσεις στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου να έχει αμελητέα επίδραση στην ροή του νερού μέσα στο δείγμα

<sup>93</sup> Shoemaker, R.C., House, D.E. (2006): Sick building syndrome (SBS) and exposure to water-damaged buildings: time series study, clinical trial and mechanisms, *Neurotoxicology Teratol*, 28, 573–588.

<sup>94</sup> Weinhold, B. (2007): A spreading concern inhalational health effects of mold, *Environ. Health Perspect.*, 115, 6, A300–A305.

<sup>95</sup> Lourenço, P. B.; Luso, E.; Almeida M. G. (2006): Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal, *Building and Environment*, 41, 2, 223-234.

<sup>96</sup> Pietrzyk K. (2015): A systemic approach to moisture problems in buildings for mould safety modelling, *Building and Environment*, 86, 50-60.

<sup>97</sup> Carrer, P.; Wargocki, P.; Fanetti, A.; Bischof, W.; Fernandes, E.; Hartmann, T.; Kephelopoulou, S.; Palkonen, S.; Seppänen O. (2015): What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings?, *Building and Environment*, 94, 1, 273-286.

<sup>98</sup> Huang, K.T.; Huang, W.P.; Lin, T.P.; Hwang R.L. (2015): Implementation of green building specification credits for better thermal conditions in naturally ventilated school buildings, *Building and Environment*, 86, 141-150.

<sup>99</sup> Alfano, G., Chiancarella, C., Cirillo, E., Fato, I., Martellotta, F. (2006): Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing, *Building and Environment*, 41, 1060-1069.

<sup>100</sup> Bomberg, M., Pazera, M. and Plagge, R. (2005). Analysis of Selected Water Absorption Coefficient Measurements, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 227–243.

- το σύστημα στήριξης στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου να έχει αμελητέα επίδραση στη ροή νερού μέσα στο δείγμα
- να διατηρείται μια ομοιόμορφη επαφή ανάμεσα στο δείγμα και στο υγρό καθ' όλη τη δοκιμή (π.χ., να μην επικάθονται φυσαλίδες αέρα κατατεθεί στην επιφάνεια του δείγματος που είναι σε επαφή με το νερό)
- να μειωθεί η εξάτμιση από τις πλευρές του δείγματος που δεν είναι σε επαφή με το νερό.

Στην εξίσωση (4.1) επίσης εισάγεται ως συντελεστής αναλογίας ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  του υλικού και εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο οι τριχοειδείς πόροι των δομικών υλικών απορροφούν νερό. Για να είναι συνεπής ο υπολογισμός του συντελεστή  $A_w$  με τις μετρήσεις των υπόλοιπων παραμέτρων των χαρακτηριστικών της υγρασίας σε ένα υλικό, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Το μέτωπο υγρασίας να μην έχει φτάσει στην απέναντί επιφάνεια των δοκιμίων (ακόρεστη ροή)
2. το ποσοστό υγρασίας στην επιφάνεια που είναι σε επαφή με το νερό να παραμένει σταθερό κα ίσο με το ποσοστό τριχοειδούς κορεσμού του υλικού (capillary moisture content)
3. το ύψος των δοκιμίων να είναι ένα μέρος μόνο του συνολικού ύψους της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας.

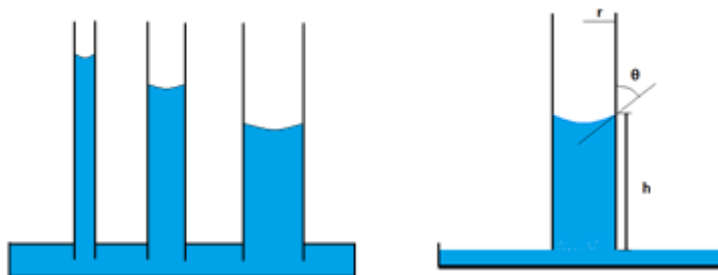
Το νερό του εδάφους μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο των πόρων ενός πορώδους υλικού οδηγούμενο από τη τριχοειδή δύναμη. Η τριχοειδής αναρρίχηση είναι μεγαλύτερη για μικρούς τριχοειδείς πόρους και είναι αντίστροφα ανάλογη της μέσης ακτίνας πόρων σύμφωνα με το νόμο του Jurin. Ο νόμος του Jurin αναφέρεται στο ύψος της κατακόρυφης ανόδου υγρού σε τριχοειδή πόρο και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:<sup>101</sup>

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r} \quad (4.2)$$

όπου  $r$  είναι η μέση ακτίνα του τριχοειδή πόρου,  $\sigma$  η επιφανειακή τάση του υγρού,  $\theta$  η γωνία επαφής υγρού-στερεού,  $\rho$  η πυκνότητα του υγρού και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

---

<sup>101</sup> Gennes P.G., Brochard-Wyart F., Quere D. (2004): Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves, Springer, New York.



**Σχήμα 4.1:** Η τριχοειδής δράση εξαρτάται από την ακτίνα του κάθε τριχοειδή πόρου. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα, τόσο υψηλότερο είναι το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης.

#### 4.1.1 Συντελεστής απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδών πόρων

Ο συντελεστής απορρόφησης νερού μέσω των τριχοειδών πόρων ενός υλικού είναι μία από τις σημαντικές παραμέτρους του δομικού υλικού γιατί διέπει την κίνηση της υγρασίας μέσα στο υλικό και εκφράζει τον ρυθμό απορρόφησης του υγρού νερού μέσω των τριχοειδών πόρων του υλικού. Έτσι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν καθορίζονται οι υγρομετρικές ιδιότητες του κάθε δομικού υλικού.

##### 4.1.1.1 Υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης νερού μέσω των τριχοειδών πόρων

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα και κανονισμοί βάσει των οποίων οι ερευνητές πραγματοποιούν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης και υπολογίζουν τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών. Η πλειονότητα αυτών των προτύπων αφορά δομικά υλικά και υλικά που χρησιμοποιούνται στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς. Πιο συγκεκριμένα, το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1925<sup>102</sup> αναφέρεται στον καθορισμό του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για φυσικούς λίθους ενώ το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1015-18<sup>103</sup> περιγράφει τον υπολογισμό του παραπάνω συντελεστή για κονιάματα και επιχρίσματα. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13057<sup>104</sup> αναφέρεται στον καθορισμό του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για σκυροδέματα ενώ το EN 480-5<sup>105</sup> περιγράφει τον καθορισμό του συντελεστή απορρόφησης νερού μέσω

<sup>102</sup> EN 1925 (2000): Natural stone test methods - Determination of water absorption coefficient by capillarity.

<sup>103</sup> EN 1015-18 (2002): Methods of test for mortar for masonry - Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.

<sup>104</sup> EN 13057 (2002): Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods. Determination of resistance of capillary absorption.

<sup>105</sup> EN 480-5 (2005): Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods. Determination of capillary absorption.

τριχοειδών για σκυροδέματα, κονιάματα και ενέματα. Επίσης, στο πρότυπο ISO 15148<sup>106</sup> περιγράφεται το πείραμα τριχοειδούς αναρρίχησης σε πορώδη υλικά κανονικής γεωμετρίας ενώ το EN 15801<sup>107</sup> αναφέρεται σε πορώδη ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στην πολιτιστική κληρονομιά. Τέλος, το EN 10859<sup>108</sup> αναφέρεται σε φυσικούς και τεχνητούς λίθους ενώ ο κανονισμός 11/85<sup>109</sup> αναφέρεται σε υλικά που χρησιμοποιούνται σε εργασίες συντήρησης στη πολιτιστική κληρονομιά.

Η πειραματική διαδικασία σε ένα πείραμα τριχοειδούς αναρρίχησης όπως περιγράφεται σε όλα τα προαναφερθέντα πρότυπα είναι πολύ κοινό.<sup>110</sup> Το κάθε δείγμα, αφού κρατηθεί μέσα σε φούρνο στους 60°C μέχρι να σταθεροποιηθεί η μάζα του, τοποθετείται σε ξηραντήρα έως ότου αποκτήσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος του. Στη συνέχεια, μετριέται η ξηρή μάζα του και τοποθετείται σε δοχείο με απιονισμένο νερό έτσι ώστε να βρίσκονται σε επαφή με το νερό μόλις μερικά χιλιοστά του. Τότε αρχίζει η απορρόφηση νερού μέσω των τριχοειδών πόρων του δοκιμίου και εξαιτίας αυτής της απορρόφησης στο δοκίμιο δημιουργείται ένα μέτωπο υγρασίας που αρχίζει να ανέρχεται προς την πάνω πλευρά του. Η ποσότητα του απορροφούμενου νερού μετριέται με ζυγίσεις του δείγματος σε τακτά χρονικά διαστήματα. Κάθε ζύγιση πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα (τυπικά μέσα σε 30 δευτερόλεπτα). Όταν το μέτωπο της υγρασίας φτάσει στην πάνω άκρη του δοκιμίου, αυτό έχει φτάσει στον τριχοειδή κορεσμό του (δεύτερο στάδιο) και από το σημείο αυτό και μετά καμία μεταβολή της μάζας του δεν παρατηρείται. Ο υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης μπορεί να γίνει σύμφωνα με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της μιας εφαπτομένης (one tangent method), ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης υπολογίζεται από την εφαπτομένη του γραμμικού πρώτου μέρους αν σχεδιάσουμε την απορροφούμενη μάζα νερού ανά μονάδα επιφάνειας δείγματος με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$A_w = \frac{\Delta B}{A\sqrt{t}} \quad (4.3)$$

όπου  $A_w$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2\text{s}^{1/2}$ ) είναι ο συντελεστής απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδών πόρων,  $A$  ( $\text{cm}^2$ ) είναι το εμβαδόν διατομής του δείγματος και  $\Delta B$  ( $\text{mg}$ ) είναι η μάζα του απορροφούμενου νερού.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των δύο εφαπτομένων (two tangents method), ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

<sup>106</sup> ISO 15148 (2002): Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion.

<sup>107</sup> EN 15801 (2009): Conservation of cultural property - Test methods. Determination of water absorption by capillarity.

<sup>108</sup> UNI 10859 (2000): Cultural Heritage – Natural and Artificial Stones - Determination of Water Absorption by Capillarity.

<sup>109</sup> Normal 11/85 (1985): Assorbimento d' acqua per capillarità – Coefficiente di assorbimento capillare, CNR-ICR.

<sup>110</sup> Hall, C. (1989): Water Sorptivity of Mortars and Concretes: A Review, *Magazine of Concrete Research*, 41, 51–61.

Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών

$$A_w = \frac{M^*}{\sqrt{t^*}} \quad (4.4)$$

όπου  $A_w$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2\text{s}^{-1/2}$ ) είναι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης,  $M^*$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) είναι η ασυμπτωτική τιμή του απορροφούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας δείγματος και  $t^*$  (s) είναι η τετμημένη του σημείου τομής που διέρχεται από την ασύμπτωτο και της εφαπτομένης στο ευθύγραμμο μέρος της καμπύλης.

Τέλος αναφέρεται η μέθοδος των 30 λεπτών (30 minutes method) σύμφωνα με την οποία ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$A_w = \frac{Q_{30}}{\sqrt{t_{30}}} \quad (4.5)$$

όπου  $Q_{30}$  είναι η απορροφούμενη μάζα νερού ανά μονάδα επιφάνειας δείγματος σε χρόνο 30 λεπτών και  $t_{30}$  είναι ο χρόνος των 30 λεπτών.

Στο Σχήμα 4.2 συνοψίζονται τα ευρωπαϊκά πρότυπα και οι κανονισμοί που περιγράφουν το πείραμα τριχοειδούς αναρρίχησης και τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και με βάση ποια από τις προαναφερθείσες μεθόδους γίνεται αυτός ο προσδιορισμός.



ΠΡΟΤΥΠΟ	ΕΤΟΣ ΕΚΔΟΣΗΣ	ΥΛΙΚΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΒΑΘΟΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ $A_w$
EN 1925	1999	Φυσικοί λίθοι	20±5 °C	-	κύβοι ακμής 70±5 mm ή κύβοι διαμέτρου 70±5 mm	Όχι	3±1 mm	1 εφαπτομένη
EN 1015-18	2002	Κονιάματα και επιχρίσματα	-	-	πρίσματα διαστάσεων 160*40*40 mm	Ναι (παραφίνη ή ρητίνη)	5-10 mm	1 εφαπτομένη
Normal 11/85	1985							2 εφαπτομένες
EN 10859	2000	Φυσικοί και τεχνητοί λίθοι	-	-				Μέθοδος των 30 λεπτών
ISO 15148	2002	Πορώδη υλικά	(18-28) ±2°C	(0.4-0.6) ±0.05%	Κανονικής γεωμετρίας	Ναι	5±2 mm	1 εφαπτομένη
EN 15801	2010	Πορώδη ανόργανα υλικά	-	-	Κύβοι ή κύλινδροι με διαστάσεις 10±0,5mm	Όχι		1 εφαπτομένη
EN 13057	2002	Τσιμέντο-σκυρόδεμα	-	-	Υλικά με διαστάσεις 100±5mm και μήκος 25±0,5 mm	Ναι	2±1 mm	1 εφαπτομένη

Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών

EN 480-5	2005	Σκυρόδεμα- κονιάματα- ενέματα	-	-				1 εφαπτομένη
----------	------	-------------------------------------	---	---	--	--	--	--------------

**Σχήμα 4.2:** Τα ευρωπαϊκά πρότυπα και οι κανονισμοί που αναφέρονται στο πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και στον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων.

#### 4.1.1.2 Συσχέτιση του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων με άλλες υγρομετρικές παραμέτρους των υλικών

Σημαντική είναι και η διασύνδεση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης με άλλες εξίσου σημαντικές παραμέτρους των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  συνδέεται με τον συντελεστή ροφητικής ικανότητας  $S$  του υλικού, μια άλλη εξίσου σπουδαία παράμετρος των υλικών καθώς εκφράζει την τάση του υλικού να απορροφά και να μεταφέρει το νερό μέσω των τριχοειδών του πόρων. Ο συντελεστής ροφητικής ικανότητας συνδέεται με το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_w = S \rho_w \quad (4.6)$$

όπου  $A_w$  ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης του υλικού ( $\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}$ ),  $S$  ο συντελεστής ροφητικής ικανότητας του υλικού ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{s}^{1/2} \rightarrow \text{m/s}^{1/2}$ ) και  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού. Στην πραγματικότητα, ενώ ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης αναφέρεται στη μάζα του τριχοειδώς απορροφούμενου νερού, ο συντελεστής ροφητικής ικανότητας αναφέρεται στον όγκο του τριχοειδώς απορροφούμενου νερού για το κάθε υλικό.

Ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια του συντελεστή ροφητικής ικανότητας ήταν ο Philip<sup>111</sup> το 1957 και από τότε πολλοί ερευνητές τον έχουν συμπεριλάβει στην έρευνά τους.<sup>112, 113</sup> Ο Hall τον χρησιμοποίησε στις εργασίες του στα δομικά υλικά και συγκέντρωσε μεγάλη ποσότητα δεδομένων για τη ροφητική ικανότητα.<sup>59, 110, 114</sup> Τα τελευταία 30 χρόνια, οι μετρήσεις του συντελεστή ροφητικής ικανότητας των υλικών μαζί με τις μετρήσεις του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης τους θεωρούνται σαφώς καθορισμένες και συμβάλουν στη μελέτη των παραμέτρων μεταφοράς του νερού σε μια ποικιλία δομικών υλικών.<sup>115, 116, 117, 118</sup>

Παρουσιάζοντας το συντελεστή ροφητικής ικανότητας σαν μια ποσότητα που εξάγεται από τη θεωρία ακόρεστης ροής, οι Hall και Hoff πρότειναν ότι ο συντελεστής ροφητικής ικανότητας ενός δομικού υλικού θα πρέπει να δίνεται από την εξίσωση:

$$S = (\sigma/\eta)^{1/2} S \quad (4.7)$$

<sup>111</sup> Philip, J.R. (1957): The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration.

<sup>112</sup> Martys, N.S. Ferraris, C.F. (1997): Capillary transport in mortars and concrete, *Cement and Concrete Research*, 27 (5), 747–760.

<sup>113</sup> Pia, G., Sassoni, E., Franzoni, E., Sanna, U. (2014): Predicting capillary absorption of porous stones by a procedure based on an intermingled fractal units model, *International Journal of Engineering Science*, 82, 196–204.

<sup>114</sup> Hall, C. (1977): Water Movement in Porous Building Materials—I. Unsaturated Flow Theory and its Application, *Building and Environment*, 12, 117–125.

<sup>115</sup> Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Adan, O., Brocken, H., Cerny, R., Pavlik, Z., Hall, C., Kumaran, K., Pel, L. and Plagge, R. (2004): Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27, 307–325.

<sup>116</sup> Reinhardt, H-W, Jooss, M. (1998): Permeability, Diffusion, and Capillary Absorption of Concrete at Elevated Temperature in the Service Range, *Otto-Graf-Journal*, 34-47.

<sup>117</sup> Kumaran, M.K. (1999): Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 22, 349–355.

<sup>118</sup> Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2007): Sorption Characteristics of Foam Concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 1341–1347.

όπου  $\sigma$  η επιφανειακή τάση του νερού,  $\eta$  το ιξώδες και  $S$  η εγγενής ροφητική ικανότητα που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία.

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (2.2) και (2.3) φαίνεται εύκολα ότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης ενός δομικού υλικού εξαρτάται αφ' ενός από τις φυσικές ιδιότητες του νερού και αφ' ετέρου από τα εγγενή χαρακτηριστικά του δομικού υλικού και μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$A_w \propto (\sigma/\eta)^{1/2} \quad (4.8)$$

Επιπλέον, ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  των δομικών υλικών σχετίζεται με άλλη μια σημαντική υδρομετρική παράμετρο των υλικών, το συντελεστή διαχυτότητας (diffusivity coefficient)  $D_w$  με τη προϋπόθεση ότι αυτός παραμένει σταθερός. Έτσι, η μέση τιμή του συντελεστή διαχυτότητας μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$D_w \approx \left( \frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \quad (4.9)$$

όπου  $D_w$  ο μέσος συντελεστής διαχυτότητας σε υγρή φάση του υλικού,  $A_w$  ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης και  $w_{cap}$  το ποσοστό υγρασίας στον τριχοειδή κορεσμό του υλικού.

Λαμβάνοντας υπόψη το εξελισσόμενο μέτωπο της υγρασίας στο υλικό, οι Krus και Künzle (1993) διαμόρφωσαν την εξίσωση (4.9) στην επόμενη σχέση για το προσδιορισμό του μέσου συντελεστή διαχυτότητας υγρού από την τιμή του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης του κάθε υλικού:

$$D_w = \frac{\pi}{4} \left( \frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \quad (4.10)$$

## 4.2 Ξήρανση

Τα πορώδη δομικά υλικά έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν και να αποβάλουν υγρασία ανάλογα με τις εναλλαγές των εξωτερικών συνθηκών. Η ανθεκτικότητα ενός δομικού υλικού τίθεται σε κίνδυνο όταν συσσωρεύεται μέσα σε αυτό σημαντική ποσότητα υγρασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα<sup>119</sup> και η σοβαρότητα του φαινομένου της αναρριχόμενης υγρασίας εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ του νερού που εισέρχεται μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης στο υλικό και του νερού που εξέρχεται μέσω του φαινομένου της εξάτμισης από τη τοιχοποιία. Έτσι, το ποσοστό υγρασίας σε ένα υλικό δεν καθορίζεται μόνο από το νερό που απορροφάται αλλά και από τη ποσότητα του νερού που εξατμίζεται κατά

<sup>119</sup> Rousseau, M.Z., Dalglish, W.A. (2004): Selected findings of an IRC study of the wetting and drying potentials of Wood-frame Walls exposed to different climates, CIB 2004, World building Congress, Toronto, Canada.

τη διαδικασία της ξήρανσης.<sup>57, 120</sup> Για αυτό το λόγο, η μελέτη της κινητικής της ξήρανσης των δομικών υλικών που γίνεται σε συνδυασμό με τη κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης τους είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη κατανόηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων στο ποσοστό υγρασία των δομικών υλικών.

Η ξήρανση ενός δομικού υλικού είναι μια κρίσιμη διαδικασία διότι, σε συνδυασμό με την ύγρανση, ρυθμίζει τη μονωτική ικανότητα ενός κτηριακού περιβλήματος, ελέγχει την ενεργειακή απόδοση της κατασκευής<sup>121, 122, 123</sup> και επηρεάζει τη διάρκεια ζωής της.<sup>124</sup> Σε γενικές γραμμές, η ξήρανση είναι ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας και εξαρτάται από:<sup>125</sup>

- Τις ιδιότητες του υλικού ( αποθήκευση και μεταφορά της υγρασίας)
- Τις κλιματικές συνθήκες ( ταχύτητα αέρα, θερμοκρασία και σχετική υγρασία)
- Τις συνθήκες μεταφοράς της θερμότητας και των υδρατμών (τραχύτητα επιφάνειας υλικού, κ.ά.)

Η ξήρανση στα πορώδη μέσα μπορεί να οριστεί ως η απομάκρυνση μιας πτητικής ουσίας (π.χ. το νερό) από το εσωτερικό του πορώδους στερεού μέσω του φαινομένου της εξάτμισης. Ο στόχος της ξήρανσης είναι η λήψη της καλύτερης δυνατής ποιότητας του προϊόντος και ο ευκολότερος χειρισμός του σε κάποια επόμενη διαδικασία. Γενικά κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, θερμός αέρας με χαμηλή σχετική υγρασία εμφυσείται πάνω από την επιφάνεια του πορώδους στερεού με σκοπό την απομάκρυνση του υγρού. Στη συνέχεια, υγρό μπορεί να μετακινηθεί από το εσωτερικό του πορώδους μέσου λόγω των διαφορετικών συγκεντρώσεων και της μερικής τάσης των ατμών μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του πορώδους μέσου. Η ξήρανση των πορωδών μέσων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, και η ταχύτητα του αέρα (εξωτερικούς παράγοντες) καθώς και από τα χαρακτηριστικά του δομικού υλικού (ενδογενείς παράγοντες).

Ο ρυθμός της ξήρανσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που χαρακτηρίζει τα φαινόμενα της ξήρανσης των υλικών σε μακροσκοπική κλίμακα και μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις: η πρώτη από αυτές ονομάζεται περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης ενώ η δεύτερη ονομάζεται περίοδος μειωμένου ρυθμού ξήρανσης. Σε κάθε ισόθερμη περίπτωση ξήρανσης, ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από το ισοζύγιο ανάμεσα στις τριχοειδείς δυνάμεις, τις δυνάμεις τριβής και τον ρυθμό εξάτμισης του υγρού. Ξεκινώντας η διεργασία της ξήρανσης, ο αέρας στο περιβάλλοντα χώρο του υλικού θα εισέλθει πρώτα στους

<sup>120</sup> Vos, B.H. (1975): Water absorption and drying of materials. In *The Conservation of Stone I: Proceedings of the International Symposium, Bologna, June 19–21*; Rossi Manaresi, R., Ed.; 679–694.

<sup>121</sup> D’Agostino, D. (2013): Moisture dynamics in an historical masonry structure- the Cathedral of Lecce (South Italy), *Building and Environment*, 63, 122–133.

<sup>122</sup> Silva, A.S., Ghisi, E., Lamberts, R. (2016): Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55, *Building and Environment*, 102, 95–115.

<sup>123</sup> Littia, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., Braet, J. (2015): Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings, *Energy and Buildings*, 105, 393–411.

<sup>124</sup> Ismail, M.; Yew, C. K.; Muhammad B. (2016): Life-span prediction of abandoned reinforced concrete residential buildings, *Construction and Building Materials*, 112, 1059–1065.

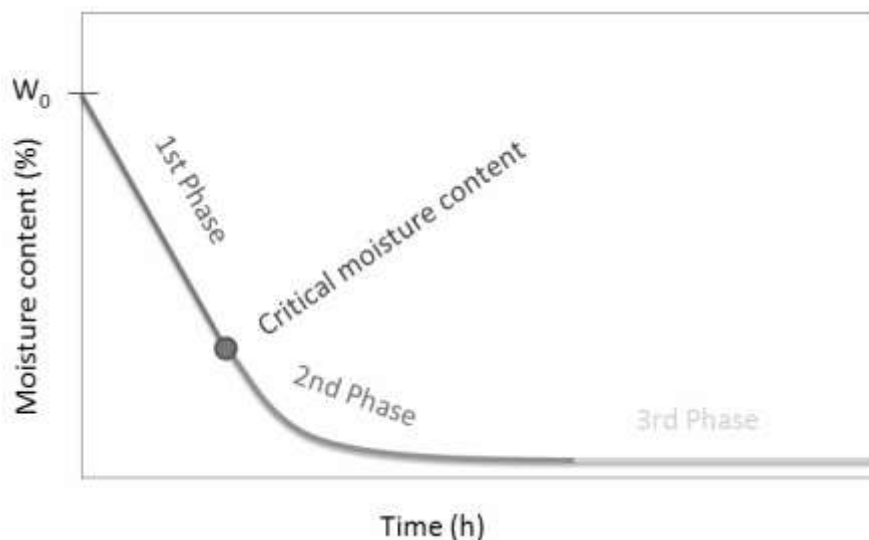
<sup>125</sup> Worch, A. (2004): The Behavior of Vapor Transfer in Building Material Surfaces: The vapor Transfer Resistance, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 2, 187–200.

μεγάλους πόρους που βρίσκονται στην επιφάνειά του γιατί αυτοί εμφανίζουν χαμηλότερη τριχοειδή πίεση. Έτσι, και αφού η πίεση του υγρού στο μηνίσκο του μεγαλύτερου πόρου είναι υψηλή, μπορεί να μετακινηθεί υγρό από το μεγαλύτερο πόρο σε άλλους πόρους με μικρότερη πίεση. Κατά τη διάρκεια της 1<sup>ης</sup> φάσης, η εξάτμιση προέρχεται από τη διάχυση που συμβαίνει στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού και οφείλεται στη διαφορά που έχει η τάση των ατμών ανάμεσα στην επιφάνεια του υλικού και στον εξωτερικό αέρα. Για να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός ξήρανσης θα πρέπει να διατηρηθεί η παροχή νερού από τους μεγαλύτερους πόρους στο εσωτερικό του υλικού, μέσω της τριχοειδούς ροής, προς την επιφάνειά του. Όσο αυτή η παροχή διατηρείται σταθερή, παραμένει σταθερός και ο ρυθμός ξήρανσης έως ότου το ποσοστό υγρασίας στο υλικό φτάσει μια κρίσιμη τιμή που ονομάζεται κρίσιμο ποσοστό υγρασίας ( $X_{cr}$ ). Το κρίσιμο ποσοστό υγρασίας εξαρτάται από το ρυθμό ξήρανσης της 1<sup>ης</sup> περιόδου, τις διαστάσεις του υλικού και τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, το κρίσιμο ποσοστό υγρασίας αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης της 1<sup>ης</sup> περιόδου γιατί τότε το υγρό στην επιφάνεια του υλικού στεγνώνει γρήγορα. Το κρίσιμο ποσοστό υγρασίας είναι επίσης υψηλό στα λεπτά υλικά διότι τότε η τριχοειδής ροή μεταφέρει το υγρό από μικρότερη απόσταση και έτσι το υγρό μπορεί να εξατμιστεί γρηγορότερα. Τέλος η υψηλότερη θερμοκρασία προκαλεί υψηλότερη τάση ατμών και έτσι ο ρυθμός ξήρανσης της 1<sup>ης</sup> περιόδου γίνεται μεγαλύτερος αυξάνοντας το κρίσιμο ποσοστό υγρασίας για το υλικό.

Η περίοδος μειωμένου ρυθμού ξήρανσης ξεκινά όταν ο ρυθμός εξάτμισης είναι μεγαλύτερος από την τριχοειδή ροή στο υλικό. Η τριχοειδής ροή από τους μεγαλύτερους πόρους του υλικού μειώνεται όταν μειθούν οι τριχοειδείς δυνάμεις. Με αυτό το τρόπο μειώνεται η τριχοειδής άντληση του υγρού από το εσωτερικό του υλικού προς την επιφάνεια και το υγρό δεν είναι αρκετό για να διατηρήσει σταθερό το ρυθμό εξάτμισης. Σε αυτή την περίπτωση, το υγρό από την επιφάνεια του πορώδους μέσου εξατμίζεται και το μέτωπο της εξάτμισης μετακινείται προς το εσωτερικό του πορώδους μέσου μειώνοντας έτσι και το ρυθμό ξήρανσης του υλικού.

Ορισμένοι ερευνητές διακρίνουν την ύπαρξη και μιας τρίτης φάσης κατά τη ξήρανση των πορώδων υλικών η οποία ξεκινάει όταν έχει εξαντληθεί το υγρό νερό και ο ρυθμός ξήρανσης ελέγχεται μόνο από τη διάχυση των υδρατμών προς την επιφάνεια του υλικού. Ως εκ τούτου, ο ρυθμός ξήρανσης θα είναι πολύ αργός, σχεδόν σταθερός ενώ το ποσοστό υγρασίας των υλικών τείνει προς την υγρασία ισορροπίας για συγκεκριμένες τιμές σχετικής υγρασίας.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια τυπική καμπύλη ξήρανσης ενός πορώδους υλικού. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται τόσο οι διαφορετικές φάσεις στη διαδικασία της ξήρανσης όσο και το κρίσιμο ποσοστό υγρασίας (critical moisture content) του υλικού.



Σχήμα 4.3: Τυπική καμπύλη ξήρασης ενός πορώδους υλικού.<sup>126</sup>

### 4.3 Μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας

Κάθε χρόνο οι φθορές σε κτήρια ως άμεση ή έμμεση συνέπεια της υγρασίας ανέρχονται σε πολλά δισεκατομμύρια. Οι φθορές αυτές δε είναι πιο έκδηλες σε ιστορικά και παραδοσιακά κτήρια μιας και αυτά είναι εκτεθειμένα στην επίδραση της υγρασίας για περισσότερο χρόνο. Επιπλέον η υγρασία δεν προκαλεί μόνο φαινόμενα φθοράς στις κατασκευές (διάβρωση, επίθεση/κρυστάλλωση αλάτων, ρηγμάτωση λόγω παγετού, κ.ά.) αλλά επηρεάζει και τη θερμική μόνωση των δομικών στοιχείων και επιδρά με μια σειρά φαινομένων και στην υγιεινή των κατοίκων (ανάπτυξη μυκήτων και μούχλας σε περιπτώσεις περίσσειας υγρασίας).<sup>127</sup> Με σκοπό τη πρόληψη της ανάπτυξης της υγρασίας μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολύτιμα υπολογιστικά εργαλεία, τα οποία σε συνδυασμό με εκτενείς πειραματικές μελέτες περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας σε δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, ορισμένα από τα υπολογιστικά αυτά εργαλεία είτε δεν έχουν ακόμα αξιολογηθεί πειραματικά είτε μπορούν να εφαρμοστούν σε περιορισμένο βαθμό. Επίσης κάποια από τα προαναφερθέντα μοντέλα βασίζονται σε πολύπλοκες παραμέτρους γεγονός που τα καθιστά μη πρακτικά στην εφαρμογή τους.

#### 4.3.1 Κατηγορίες μοντέλων

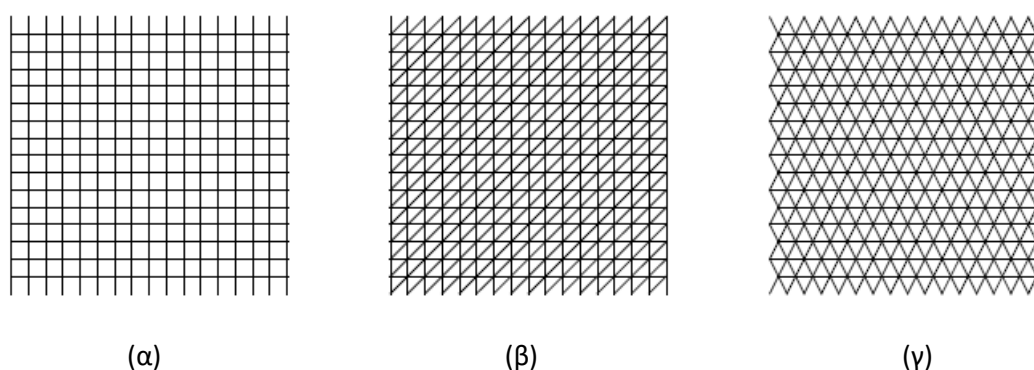
Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προσδιοριστεί τρεις διαφορετικοί τύποι μοντέλων που προσδιορίζουν τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας στα πορώδη υλικά και αυτά είναι:

<sup>126</sup> Couto, S., Diaz Gonçalves, T., Lopes, J.M.G. ( 2011): Drying of red ceramic brick - Effect of five silicone - based water repellent treatments , *Hydrophobe VI* , 6<sup>th</sup> International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Rome, Italy.

<sup>127</sup> Torres, M.I.M., de Freitas, V.P. (2001): Modelling of rising damp in historical buildings. In: Lourenço, P.B., Roca, P., editors. *Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seminar, Guimarães, Portugal, 381-390.

- τα μοντέλα δικτύου (network models),
- τα μοντέλα δέσμης σωλήνων (bundle of tubes models) και
- τα εμπειρικά-ημιεμπειρικά μοντέλα (empirical models).<sup>128</sup>

Τα μοντέλα δικτύου είναι τα πιο εκτεταμένα από τις τρεις κατηγορίες. Η βασική τους ιδέα είναι το ότι προσεγγίζουν τη δομή των πόρων του υλικού με ένα πλέγμα (lattice) σωλήνων και δεσμών σε μικροσκοπική κλίμακα. Οι ακτίνες των σωλήνων αυτών είναι τυχαία κατανεμημένες και ακολουθούν τα δεδομένα των μετρήσεων της πορώδους δομής του υλικού. Με τον τρόπο αυτό και προσομοιώνοντας τη διείσδυση ενός ρευστού στους πόρους του δικτύου μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες συναρτήσεις που αφορούν παραμέτρους του συστήματος. Ξεκινώντας από την εργασία του Fatt,<sup>129</sup> τα μοντέλα δικτύου έχουν αναπτυχθεί και βελτιωθεί μέχρι σήμερα, από πολλούς ερευνητές.<sup>130, 131, 132, 133, 134, 135, 136</sup>



**Σχήμα 4.4:** Παραδείγματα δικτύων δύο διαστάσεων: (α) τετράγωνο πλέγμα, (β) τριγωνικό πλέγμα και (γ) εξα-τριγωνικό πλέγμα.<sup>128</sup>

Το κύριο πλεονέκτημα των μοντέλων δικτύου είναι η ικανότητα τους να προσεγγίζουν τη δομή των πόρων του υλικού και να λαμβάνουν υπόψη τους τις δομικές επιπτώσεις που έχει η διείσδυση του υγρού σε αυτό. Ωστόσο, η χρήση αυτών των μοντέλων για τη μελέτη των φαινομένων μεταφοράς στα πορώδη μέσα είναι πολύ επίπονη. Αρχικά θα πρέπει να επιλεγεί και να διαμορφωθεί ένα κατάλληλο δίκτυο. Κατόπιν, θα πρέπει να αποδοθούν τα

<sup>128</sup> Scheffler, G.A. (2008): Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage, Ph.D. Thesis, Dresden University of Technology, Dresden.

<sup>129</sup> Fatt, I. (1956): The network model of porous media: I–III, Trans. AIME Petrol. Div. 207, 144–177.

<sup>130</sup> Quenard, D.A., Xu, K., Künzel, H.M., Bentz, D.P., Martys, N.S. (1998): Microstructure and transport properties of porous building materials, *Mater. Struct.*, 31, 317–324.

<sup>131</sup> Carmeliet, J., Descamps, F., Houvenaghel, G. (1999): A multiscale network model for simulating moisture transfer properties in porous media, *Transport Porous Med.*, 35, 67–88.

<sup>132</sup> Carmeliet, J., Roels, S. (2001): Determination of isothermal moisture transport properties of porous building material, *J. Therm. Environ. Build. Sci.*, 24, 83–210.

<sup>133</sup> Vandersteen, K., Carmeliet, J., Feyen, J. (2003): A network modeling approach to derive unsaturated hydraulic properties of a rough-walled fracture, *Transport Porous Med.*, 50, 197–221.

<sup>134</sup> Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H. (2003): Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone. Part 1: a mesoscopic approach, *Transport Porous Med.*, 52, 333–350.

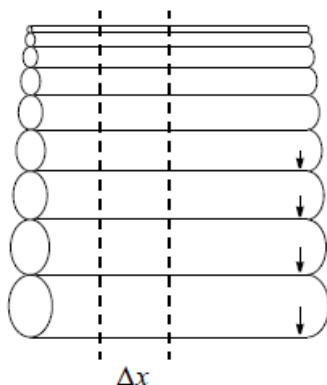
<sup>135</sup> Yiotis, A.G., Salin, D., Yortsos, Y.C. (2015): Pore network modeling of drying processes in macroporous materials: effects of gravity, mass boundary layer and pore microstructure, *Transport in Porous Media*, 110, 175.

<sup>136</sup> Vorhauer, N., Wang, Y.J., Kharaghani, A., Tsotsas, E., Prat, M. (2015): Drying with formation of capillary rings in a model porous medium, *Transport in Porous Media*, 110(2), 197–223.



μεγέθη των πόρων με τη βοήθεια κατάλληλων προσομοιώσεων (π.χ. προσομοίωση Monte Carlo) σε σχέση με την κατανομή των πόρων του υλικού. Στη συνέχεια, θα πρέπει να εκτελεστεί ένας ικανός αριθμός προσομοιώσεων δικτύου σύμφωνα με τα επιλεγμένα κριτήρια και τέλος να εξαχθούν οι ιδιότητες μεταφοράς από τις συνθήκες ροής που έχουν επιτευχθεί.

Η δεύτερη κατηγορία μοντέλων είναι τα μοντέλα δέσμης σωλήνων. Και αυτά βασίζονται στη δομή των πόρων και εξάγουν τις υδρομετρικές παραμέτρους με πολύ πιο απλοποιημένο τρόπο. Στα μοντέλα αυτά οι συναρτήσεις μεταφοράς εξάγονται αναλυτικά



**Σχήμα 4.5:** Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου δέσμης σωλήνων. Όλοι οι σωλήνες είναι παράλληλοι κύλινδροι, έχουν το ίδιο μήκος και είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους.<sup>128</sup>

από τη συνάρτηση κατανομής των πόρων και αντί να χρησιμοποιήσουν ένα εκτεταμένο δίκτυο πόρων, ακολουθούν μια απλοποιημένη δομή πόρων που είναι παράλληλοι και συνδεδεμένοι μεταξύ τους σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων.<sup>137, 138, 139, 140, 141, 142</sup>

Το μοντέλο της δέσμης σωλήνων είναι απλούστερο από το μοντέλο δικτύου και είναι κατάλληλο για ευρύτερες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη αυτού του μοντέλου έγινε για υλικά τα οποία επιδεικνύουν υψηλό βαθμό κορεσμού, δεν είναι κατάλληλο και παρέχει μικρότερη ακρίβεια για υλικά που υπόκεινται σε χαμηλά επίπεδα κορεσμού. Επιπλέον, λόγω της απλοποιημένης προσέγγισής του, το μοντέλο αυτό χρειάζεται περαιτέρω βαθμονόμηση για να μπορέσει να είναι συνεπές με τα πειραματικά δεδομένα.

<sup>137</sup> Häupl, P. & Fechner, H. (2003): "Hygric material properties of porous building materials" 2<sup>nd</sup> International Building Physics/Science Conference, Leuven.

<sup>138</sup> Grunewald, J. & Bomberg, M. (2003): An Engineering Approximation of Material Characteristics for Input to Heat, Air and Moisture Transport Simulations, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 26, 4.

<sup>139</sup> Carmeliet, J. & Roels, S. (2002): Determination of the Moisture Capacity of Porous Building Materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25, 209-237.

<sup>140</sup> Plagge, R., Häupl, P., Grunewald, J., Fechner, H. (2002): Functional description of water storage and transfer in capillary porous building materials, Proceedings to the 11<sup>th</sup> Symposium for Building Physics, Dresden University at Technology, Institute of Building Climatology, Vol.1, 338-350.

<sup>141</sup> Tuller, M. & Or, D. (2002): Unsaturated Hydraulic Conductivity of Structured Porous Media: A Review of Liquid Configuration-Base Models, *Vadose Zone Journal*, Vol. 1, 14-37.

<sup>142</sup> Tsunazawa, Y., Yokoyama, T., Nishiyama, N. (2016): An experimental study on the rate and mechanism of capillary rise in sandstone, *Progress in Earth and Planetary Science*, 3, 1, 1.

Τέλος τα εμπειρικά-ημιεμπειρικά μοντέλα είναι τα πιο απλοποιημένα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.<sup>43, 46, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149</sup> Τα μοντέλα αυτά παρέχουν ένα σύνολο αναλυτικών συναρτήσεων οι οποίες προσαρμόζονται στα πειραματικά δεδομένα. Τα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούν συνήθως κινητικές διαφόρων τάξεων οι οποίες ύστερα από τη προσαρμογή τους με τα πειραματικά δεδομένα, παρέχουν τις τιμές ορισμένων παραμέτρων, σημαντικών για τις διαδικασίες της ύγρυνσης και ξήρανσης του υλικού. Η άμεση συσχέτισή τους με τα πειραματικά δεδομένα καθώς και ο σχετικά μικρός αριθμός παραμέτρων που χρησιμοποιούν, είναι το βασικότερο πλεονέκτημα των εμπειρικών μοντέλων σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες μοντέλων που χρησιμοποιούνται διεθνώς. Επιπλέον, τα εμπειρικά μοντέλα δεν απαιτούν μεγάλη υπολογιστική υποδομή, έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και δεν απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για τη λειτουργία τους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα των εμπειρικών-ημιεμπειρικών μοντέλων, όπως αυτά περιγράφονται ανωτέρω, στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε ένα ημιεμπειρικό μοντέλο για τη περιγραφή και τη μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας σε δομικά υλικά.

---

<sup>143</sup> Karoglou, M.; Moropoulou, A.; Maroulis, Z.B. & Krokida, M.K. (2005): Drying Kinetics of Some Building Materials, *Drying Technology*, 23:1-2, 305-315.

<sup>144</sup> Liu, Q., Bakker-Arkema, F.W. (1997): Stochastic modelling of grain drying: model development, *J. Agric Eng Res.*, 66, 275–280.

<sup>145</sup> White, G.M., Ross, I.J., Ponekert, R. (1981): Fully exposed drying of popcorn. *Trans ASAE*, 24, 466–468.

<sup>146</sup> Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F. (1999): Drying characteristic of laurel leaves under different conditions, In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International congress on agricultural mechanization and energy*, Adana, Turkey.

<sup>147</sup> Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002): A new model for single-layer drying, *Drying Technology*, 20, 1503–1513.

<sup>148</sup> Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. (2003): *Food process design*. Marcel Dekker, New York.

<sup>149</sup> D'Agostino, D. (2014): Modelling of Wetting and Drying Cycles in Building Structures, in 'Drying and Wetting of Building Materials and Components', Editor: J. M. P. Q. Delgado, Chapter 6, Springer International Publishing, Switzerland.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

### 5.1 Τριχοειδής αναρρίχηση

Η τριχοειδής αναρρίχηση έχει αναγνωριστεί από το παρελθόν έως σήμερα ως ένα μόνιμο και πανταχού παρόν πρόβλημα για τις τοιχοποιίες. Ειδικά στις μέρες μας έχουν αναφερθεί διάφορες πτυχές που σχετίζονται με την αύξηση της υγρασίας, συμπεριλαμβανομένων των κινδύνων για την υγεία και την ασφάλεια, τις οικονομικές επιπτώσεις, τη βασική έρευνα για τη φύση της τριχοειδούς αναρρίχησης, την πειραματική έρευνα, την ανάπτυξη τεχνικών και προϊόντων για την καταπολέμηση της και τη μελέτη περιπτώσεων τόσο σε παραδοσιακές όσο και σε σύγχρονες τοιχοποιίες.

Επιπλέον, εκτενείς μελέτες καταδεικνύουν τις συνέπειες για την υγεία και την ασφάλεια του πληθυσμού λόγω της αναρριχόμενης υγρασίας που είναι το αποτέλεσμα της τριχοειδούς αναρρίχησης στις τοιχοποιίες. Σύμφωνα με δημοσίευμα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, στην Ευρώπη ένα ποσοστό μεταξύ του 10 και του 50% των εσωτερικών χώρων όπου ζουν, εργάζονται και παίζουν άνθρωποι, είναι υπό αυξημένη υγρασία. Η υγρασία αυτή δημιουργήσει ψυχρότητα στις τοιχοποιίες και κάνει έτσι αναγκαία τη θέρμανση τους με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος ενέργειας λόγω της υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας της υγρασίας.<sup>150</sup>

Υπάρχουν διάφορες ιστορικές αναφορές για τη τριχοειδή αναρρίχηση οι οποίες είναι δημοσιευμένες από το 19<sup>ο</sup> αιώνα. Στα πλαίσια όμως της παρούσας διατριβής θα γίνει αναφορά μόνο στις πιο πρόσφατες από αυτές. Ορισμένες από αυτές τις εργασίες αναφέρονται στην συσχέτιση μεταξύ του ύψους ισορροπίας στη τριχοειδή αναρρίχηση και στο χρόνο αναρρίχησης<sup>151, 152, 153</sup> ενώ κάποιες άλλες αναφέρονται στην επίδραση που έχουν διάφορα δομικά υλικά στο ύψος ισορροπίας και στο ρυθμό της τριχοειδούς αναρρίχησης.<sup>154, 155</sup> Η Maravelaki-Kalaitzaki<sup>156</sup> μαζί με άλλους ερευνητές παρουσίασαν μια

<sup>150</sup> Organisation, World Health. Damp and Mould. Copenhagen : Information Brochure, 2009.

<sup>151</sup> I'Anson, S. J., Hoff, W. D. (1986): Water movement in porous building materials - VIII. Effects of evaporative drying on height of capillary rise equilibrium in walls, *Building and Environment.*, 21, 195-200.

<sup>152</sup> Hansen, H and Frambol, C. (2006): Rising Damp: Test of Chemical Injection. Danish Technological Institute.

<sup>153</sup> Burkinshaw, R. (2010): The rising damp test of Camberwell pier: Potential height of moisture rise in brickwork and the effectiveness of a modern chemical injection cream, *Journal of Building Appraisal.*, 6, 5-19.

<sup>154</sup> Lubelli, B., Van Hees, R.P.J. and Groot, C.W.P. (2006): Investigation on the behaviour of a restoration plaster applied on heavy salt loaded masonry, *Construction and Building Materials*, 20, 691-699.

<sup>155</sup> Lubelli, B., Van Hees, R.P.J. and Groot, C.J.W.P. (2004): The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry, *Construction and Building Materials.*, 18, 119-124.

<sup>156</sup> Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., Kilikoglou, V. (2005): Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete, *Cement and Concrete Research*, 35, 1577-1586.

εργασία τους για το χαρακτηρισμό και την αποκατάσταση των ιστορικών κονιαμάτων μιας βενετσιάνικης Βίλλας στα Χανιά της Κρήτης. Οι κύριες αιτίες φθοράς των δομικών υλικών ήταν η κρυστάλλωση αλάτων που οφειλόταν στη μεταφορά υγρασίας μέσα στη τοιχοποιία λόγω του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης. Παρόμοιες μελέτες στην Αυστραλία<sup>157</sup> και στη Μαλαισία<sup>158</sup> καταδεικνύουν την εναπόθεση και τη κρυστάλλωση αλάτων που μεταφέρονται με τη τριχοειδή αναρρίχηση ως τις κύριες αιτίες και μηχανισμούς φθοράς σε ιστορικές τοιχοποιίες και σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς αντίστοιχα. Οι Rirsch και Zhang<sup>159</sup> μελέτησαν την επίδραση που έχουν κονιάματα διαφορετικής σύστασης στην κατανομή της υγρασίας σε τοιχοποιίες. Επίσης έκαναν μετρήσεις της ροφητικής ικανότητας των κονιαμάτων και τις συνέκριναν με προσαρμογές με υπάρχον μοντέλο με πολύ καλά αποτελέσματα.

### 5.1.1 Συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών

Επιπλέον, πολλοί ερευνητές τα τελευταία χρόνια ασχολήθηκαν με τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ως μία από τις βασικότερες παραμέτρους της υγραμετρικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών και με τον υπολογισμό του<sup>160</sup> χωρίς όμως να δώσουν ιδιαίτερη έμφαση στις περιβαλλοντικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται τα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης. Ο Bomberg<sup>100</sup> μαζί με άλλους ερευνητές πραγματοποίησαν μια έρευνα στη τριχοειδή αναρρίχηση διαφόρων δομικών υλικών και πρότειναν μια πειραματική διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό πρακτικών και αναπαραγωγίσιμων τιμών του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων. Η Aggelakorouli<sup>161</sup> μαζί με άλλους ερευνητές υπολόγισαν τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης διαφόρων τύπων ασβεστοκονιαμάτων και συνέδεσαν τα αποτελέσματά τους με στοιχεία της μικροδομής και με τις υγραμετρικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε επεμβάσεις αποκατάστασης. Ο Raimondo<sup>162</sup> μαζί με άλλους ερευνητές υπολόγισαν τις τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης διαφόρων τύπων οπτόπλινθων με σκοπό να μελετήσουν την επίδραση των χαρακτηριστικών και της μεθόδου επεξεργασίας των υλικών στον αρχικό ρυθμό υδαταπορρόφησης τους. Ο Tsunazawa<sup>142</sup> μαζί με άλλους ερευνητές πραγματοποίησαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης με ένα είδος λίθου με σκοπό να μελετήσουν τις συνθήκες με τις οποίες οι πόροι του υλικού είναι διαθέσιμοι στην τριχοειδή αναρρίχηση προτείνοντας ένα μοντέλο ποιοτικής περιγραφής του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης.

<sup>157</sup> Lopez-Arce, P, et al. (2009): Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia, *Materials and Structures*, 42, 827- 848.

<sup>158</sup> Ahmad, A.G., Rahman, H.F.A. (2010): Treatment of Salt Attack and Rising Damp in Heritage Buildings in Penang, Malaysia. *Journal of Construction in Developing Countries*, 15, 1, 93-111.

<sup>159</sup> Rirsch, E. and Zhang, Z. (2010): Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties, *Construction and Building Materials*, 24, 1815-1820.

<sup>160</sup> Vejmelkova, E., Pavlikova, M., Jerman, M. and Cerny, R. (2009): Free Water Intake as Means of Material Characterization, *Journal of Building Physics*, 33, 1.

<sup>161</sup> Aggelakopoulou, E., Bakolas, A. and Moropoulou, A. (2011): Hygric Properties of Lime Based Mortars used for Restoration Interventions on Historic Structures, XII DBMC, Porto, Portugal.

<sup>162</sup> Raimondo, M., Dondi, M., Gardini, D., Guarini, G., Mazzanti, F. (2009): Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks, *Construction and Building Materials*, 23, 2623–2630.

### 5.1.2 Μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών

Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τον συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων των δομικών υλικών σαν ουσιαστικό μέρος της ερευνητικής τους εργασίας, υπολογίζοντάς τον παρόλα αυτά κάθε φορά με μια από τις προαναφερθείσες διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού.

Ο Plagge<sup>163</sup> μαζί με άλλους ερευνητές περιέγραψαν μια πειραματική διαδικασία με την οποία αυτοματοποιούταν το πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης. Στη συνέχεια, χρησιμοποίησαν αυτή τη διαδικασία για να υπολογίσουν το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε επιλεγμένα δομικά υλικά σύμφωνα με το πρότυπο EN 15148. Οι Candanedo και Derome<sup>164</sup> πραγματοποίησαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης σε ένα είδος ξύλου και προσδιόρισαν το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και για τις τρεις διαστάσεις των δειγμάτων τους σύμφωνα με τη μέθοδο της μιας εφαπτομένης. Ο Fronteau<sup>165</sup> μαζί με άλλους ερευνητές μελέτησαν τις ορυκτολογικές και φυσικοχημικές ιδιότητες ενός τύπου λίθου με προέλευση το λεκανοπέδιο του Παρισιού και μέσα στα πλαίσια αυτής της μελέτης υπολόγισαν το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των λίθων σύμφωνα με το πρότυπο EN 1925. Ο Juhász<sup>166</sup> μαζί με άλλους ερευνητές ανέλυσαν τα χαρακτηριστικά της μετανάστευσης ενός είδους βακτηρίου σε πορώδη ασβεστόλιθο και μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της τριχοειδούς αναρρίχησης του νερού στο λίθο χρησιμοποιώντας το πρότυπο EN 1925 για τον υπολογισμό του συντελεστή υδαταπορρόφησης. Ο Sengun<sup>167</sup> μαζί με άλλους ερευνητές χρησιμοποίησαν το πρότυπο EN 1925 και καθόρισαν τους συντελεστές υδαταπορρόφησης σε 118 διαφορετικής σύστασης φυσικούς λίθους. Στη συνέχεια συσχέτισαν τους συντελεστές αυτούς με άλλες παραμέτρους των λίθων όπως η ολική πυκνότητα, το ολικό πορώδες κ.ά.

Οι Calcaterra κ.ά.<sup>168</sup> μελέτησαν ένα είδος μαγματικού λίθου με προέλευση το αρχαίο κέντρο της Νάπολης στην Ιταλία, από διαφορετικές οπτικές πλευρές και μεταξύ άλλων, μέτρησαν το συντελεστή υδαταπορρόφησης του σύμφωνα με τον κανονισμό 11/85. Οι Stefanidou και

---

<sup>163</sup> Plagge, R., Scheffler, G., Grunewald, J. (2005): Automatic measurement of water uptake coefficient of building materials. Proceedings of 7<sup>th</sup> conference of building physics in Northern Countries, 15-22.

<sup>164</sup> Candanedo, L., Derome, D. (2005): Numerical simulation of water absorption in softwood, 9<sup>th</sup> International IBPSA Conference, Montréal, Canada.

<sup>165</sup> Fronteau, G., Moreau, C., Thomachot-Schneider, C., Barbin, V. (2010): Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation, *Engineering Geology*, 115, 158-166.

<sup>166</sup> Juhász, P., Kopecskó, K., Suhajda, A. (2014) : Analysis of capillary absorption properties of porous limestone material and its relation to the migration depth of bacteria in the absorbed biomineralizing compound, *Civil Engineering*, 58, 2, 113–120.

<sup>167</sup> Sengun, N., Demirdag, S., Akbay, D., Ugur, I., Altindag, R., Akbulut, A. (2014): Investigation of the relationships between capillary water absorption coefficients and other rock properties of some natural stones, V. Dünya Doğaltaş Kongresi (Globalstone 2014), 22 -25.

<sup>168</sup> Calcaterra, D., Cappelletti, P., Langella, A., Morra, V., Colella, A., de Gennaro, R. (2000): The building stones of the ancient centre of Naples (Italy): Piperno from Campi Flegrei. A contribution to the knowledge of a long-time-used stone, *Journal of Cultural Heritage*, 1, 415–427.

Παργιαννί<sup>169</sup> εξέτασαν το ρόλο των αδρανών στη δομή και στη συμπεριφορά κονιαμάτων με βάση την άβεστο ερευνώντας την επίδραση του μεγέθους και του ποσοστού των αδρανών στην αντοχή, στο πορώδες και στη σταθερότητα των κονιαμάτων. Επίσης υπολόγισαν το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των κονιαμάτων σύμφωνα με τον κανονισμό 11/85. Οι Karoglou κ.ά.<sup>54</sup> το 2005 ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τη πρόβλεψη της τριχοειδούς αναρρίχησης διαφόρων δομικών υλικών. Στην εργασία αυτή, η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας των υλικών ακολούθησε τις οδηγίες του κανονισμού 11/85. Οι Karoglou κ.ά.<sup>170</sup> επίσης μελέτησαν τον ρυθμό μεταφοράς υγρασίας σε επιχρίσματα που χρησιμοποιούνταν σε τοιχοποιίες που υπέφεραν από το φαινόμενο της αναρριχόμενης υγρασίας. Στην εργασία τους αυτή πραγματοποίησαν μεταξύ άλλων και πειράματα γήρανσης με επαναλαμβανόμενους κύκλους τριχοειδούς αναρρίχησης αλάτων σύμφωνα με το κανονισμό 11/85. Οι Dei και Salvadori<sup>171</sup> σε μελέτη τους, προσπάθησαν να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα θεραπειών που βασίζονται σε νανοσωματίδια ασβέστου σαν στερεωτικά πάνω σε ασβεστόλιθους και σε βαμμένες επιφάνειες. Έτσι πραγματοποίησαν μια σειρά από πειράματα στα οποία ο υπολογισμός του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών των υλικών έγινε σύμφωνα με τον κανονισμό 11/85.

Οι Maravelaki-Kalaitzaki κ.ά.<sup>156</sup> πραγματοποίησαν μια έρευνα με υδραυλικά κονιάματα αποκατάστασης σε μια ιστορική τοιχοποιία στη Κρήτη. Επίσης παρουσίασαν τα αποτελέσματα του φυσικοχημικού χαρακτηρισμού των αρχικών κονιαμάτων και επιχρισμάτων καθώς και την εξέλιξη των κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου που χρησιμοποιήθηκαν για την αποκατάσταση. Τα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης που πραγματοποιήθηκαν καθώς και ο υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο UNI 10859. Οι Vandevoorde κ.ά.<sup>172</sup> πρότειναν μια εναλλακτική μέθοδο ελέγχου μη κατεργασμένων υλικών από λίθους σε πειράματα που πραγματοποιούνται στο χώρο του εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα από πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης που είχαν ληφθεί σύμφωνα με το πρότυπο UNI 10859 με σκοπό να αξιολογηθεί η ακρίβεια των πρώτων. Οι Vandevoorde κ.ά.<sup>173</sup> επίσης σε μία άλλη εργασία τους, παρουσίασαν τη σύγκριση μη καταστρεπτικών τεχνικών για την ανάλυση της υγραμετρικής συμπεριφοράς επτά διαφορετικών τύπων λίθων με σκοπό να αναπτύξουν μια μεθοδολογία για την εφαρμογή μιας μεθόδου με κατάλληλα συγκρίσιμα αποτελέσματα. Και σε αυτή την εργασία τα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο UNI

<sup>169</sup> Stefanidou, M., Papayianni, I. (2005): The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars, *Cement & Concrete Composites*, 27, 914–919.

<sup>170</sup> Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A., Papapostolou, A. (2013): Effect of coatings on moisture and salt transfer phenomena of plasters, *Construction and Building Materials*, 48, 35–44.

<sup>171</sup> Dei, L., Salvadori, B. (2006): Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay, *Journal of Cultural Heritage*, 7, 110–115.

<sup>172</sup> Vandevoorde, D., Pamplona, M., Schalm, O., Vanhellemont, Y., Cnudde, V., Verhaeven, E. (2009): Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption, *Journal of Cultural Heritage*, 10, 41–47.

<sup>173</sup> Vandevoorde, D., Cnudde, V., Dewanckele, J., Brabant, L., de Bouw, M., Meynen, V., Verhaeven, E. (2013): Validation of in situ applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone, *Procedia Chemistry*, 8, 317–327.

10859. Οι Ksinopoulou κ.ά.<sup>174</sup> ερεύνησαν την εκτέλεση σωματιδιακά διαμορφωμένων στερεωτικών εφαρμοσμένων σε δύο διαφορετικούς τύπους λίθων που χρησιμοποιούνταν σε ιστορικές κατασκευές στην Ελλάδα. Με σκοπό να αξιολογηθεί ο βαθμός στερέωσης έγιναν αλλαγές στις ιδιότητες των κατεργασμένων δειγμάτων και αυτές μετρήθηκαν με διάφορες μεθόδους. Ανάμεσα σε αυτές ήταν και ο προσδιορισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ο οποίος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο UNI 10859.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι ενώ η πειραματική διαδικασία του πειράματος της τριχοειδούς αναρρίχησης είναι αδιαμφισβήτητη, ο προσδιορισμός και η σύγκριση των τιμών του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης είναι δύσκολος εξαιτίας των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού του καθώς και εξαιτίας της ανομοιογένειας των δομικών υλικών. Έτσι, όπως πολύ συχνά παρατηρείται, ένα δομικό υλικό εμφανίζει διαφορετικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ανάλογα με τη μέθοδο προσδιορισμού.

### 5.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας στα υλικά

Η τριχοειδής αναρρίχηση είναι το σημαντικότερο τρόπο μεταφοράς της υγρασίας στο εσωτερικό ενός δομικού υλικού και ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την πρόβλεψη της κατανομής υγρασίας σε δομικά υλικά που υφίστανται καθημερινά τα φαινόμενα της ύγρυνσης και ξήρανσης. Καθώς μάλιστα σε ακραία περιβάλλοντα, η θερμοκρασία του αέρα στη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου μπορεί να μεταβάλλεται μέσα σε ένα ευρύ φάσμα τιμών (από -10 έως 40°C), είναι προφανές ότι ο ακριβής υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε τέτοια περιβάλλοντα είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό της αντοχής αυτών των υλικών.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες που ερευνούν την επίδραση της θερμοκρασίας στα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας και στις υγρομετρικές ιδιότητες σε πολλά δομικά υλικά. Οι Bazant και Najjar<sup>175</sup> ερεύνησαν το φαινόμενο της διάχυσης της υγρασίας σε δοκίμια σκυροδέματος και σε κονιάματα σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 25 έως 75°C. Έτσι πρότειναν έναν παράγοντα διόρθωσης στον συντελεστή διάχυσης αυτών των υλικών που αυξάνει καθώς αυξάνει και η θερμοκρασία. Ο παραπάνω παράγοντας διόρθωσης χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό ενός μοντέλου μεταφοράς υγρασίας τόσο κατά την ύγρυνση όσο και κατά τη ξήρανση των υλικών αυτών. Οι Chari κ.ά.<sup>176</sup> μελέτησαν τους συντελεστές μεταφοράς υγρασίας σε δώδεκα διαφορετικούς τύπους κονιαμάτων, διαφορετικών συστάσεων και σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 60 °C και βρήκαν ότι

<sup>174</sup> Ksinopoulou, E., Bakolas, A., Kartsonakis, I., Charitidis, C., Moropoulou, A. (2012): Particle Consolidants in the Consolidation of Porous Stones, 12<sup>th</sup> International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Columbia University, New York.

<sup>175</sup> Bazant, Z.P., Najjar, L.J. (1972): Nonlinear water diffusion in non-saturated concrete, *Materials and Structures*, 5, 25, 3–20.

<sup>176</sup> Chari, M. N., Shekarchi, M., Sobhani, J., Chari, M. N. (2016): The effect of temperature on the moisture transfer coefficient of cement-based mortars: An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 102, 306–317.



η επίδραση της θερμοκρασίας είναι κατά πολύ σημαντικότερη στη διάρκεια της ξήρανσης σε σχέση με την ύγρανση των συγκεκριμένων υλικών. Πιο συγκεκριμένα, καθώς η θερμοκρασία αυξάνει από τους 20 στους 60°C, παρατήρησαν ότι ο συντελεστής διάχυσης κατά την ύγρανση μειώνεται γραμμικά έως το 44% ενώ ο συντελεστής διάχυσης κατά τη ξήρανση έχει μια αυξάνει εκθετικά 40 φορές. Οι Ishida κ.ά.<sup>177</sup> πραγματοποίησαν ένα αριθμητικό μοντέλο για τη μεταφορά υγρασίας σε τσιμεντιτικά υλικά για διάφορες θερμοκρασίες. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές προσομοίωσαν την επίδραση της θερμοκρασίας στη επιφανειακή τάση και στην ισορροπία μεταξύ υγρής και αέριας φάσης του νερού βρίσκοντας μεταξύ άλλων ότι μια αύξηση στη θερμοκρασία προκαλεί μείωση στη καμπύλη υστέρησης των υπό εξέταση υλικών. Οι Conciatori κ.ά.<sup>178</sup> πραγματοποίησαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης με αλμυρό νερό σε τρεις διαφορετικούς τύπους σκυροδέματος και σε χαμηλές θερμοκρασίες (-20 έως 10°C). Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν την ποσότητα του τριχοειδώς απορροφούμενου νερού στα συγκεκριμένα υλικά. Οι Reinhardt και Jooss<sup>116,179</sup> εξέτασαν την επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και στους συντελεστές διαπερατότητας και διάχυσης, δειγμάτων σκυροδέματος με διαφορετικούς τύπους τσιμέντου και αδρανών, σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Μέτρησαν το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης 9 διαφορετικών τύπων δοκιμίων σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 80°C και βρήκαν ότι οι τιμές όλων των συντελεστών αυξάνουν σχεδόν γραμμικά με τη θερμοκρασία. Οι Gummerson κ.ά.<sup>180</sup> πραγματοποίησαν μετρήσεις του συντελεστή ροφητικής ικανότητας ενός είδους πλίνθου για τέσσερα διαφορετικά οργανικά υγρά και σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 5 έως 36°C και βρήκαν μία γραμμική σχέση του συντελεστή ροφητικής ικανότητας με τη θερμοκρασία. Οι Mukhopadhyaya κ.ά.<sup>181</sup> μελέτησαν την επίδραση της επιφανειακής θερμοκρασίας από τρία συνηθισμένα δομικά υλικά στον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για ένα εύρος θερμοκρασιών από 3 έως 35°C. Αυτό που παρατήρησαν ήταν ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας των δειγμάτων έχει επίδραση στα υλικά με μικρό συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ενώ για υλικά με υψηλούς συντελεστές η επίδραση της θερμοκρασίας είναι αμελητέα. Οι Feng και Janssen<sup>182</sup> επίσης διεξήγαγαν μετρήσεις των υγρομετρικών ιδιοτήτων τριών δομικών υλικών σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 10 έως 40°C. Ανάμεσα στις άλλες μετρήσεις τους υπολόγισαν και το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών και βρήκαν ότι αυτός είναι στενά συνδεδεμένος με τη θερμοκρασία προτείνοντας έτσι μια γραμμική εξίσωση για τον υπολογισμό του.

<sup>177</sup> Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T. (2007): Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, 37, 4, 565–578.

<sup>178</sup> Conciatori, D., Brühwiler, E., Gysler, R. (2011): Brine absorption in concrete at low temperature: experimental investigation and modeling, *J. Mater. Civil. Eng. ASCE*, 23, 6, 846–851.

<sup>179</sup> Jooss, M., Reinhardt, H.W. (2002): Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, *Cement and Concrete Research*, 32, 9, 1497-1504.

<sup>180</sup> Gummerson, R.J., Hall, C. and Hoff, W. D. (1980): Water movement in porous building materials II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials, *Building and Environment*, 15, 101-108.

<sup>181</sup> Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., Goudreau, P. (2002): Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials, *J. Build. Phys.*, 26, 2, 179–195.

<sup>182</sup> Feng, C., Janssen, H. (2016): Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence, *Building and Environment*, 99, 107-118.



Περιγράφοντας τις πειραματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται ένα πείραμα τριχοειδούς αναρρίχησης, τα ευρωπαϊκά πρότυπα και κανονισμοί είτε δεν λαμβάνουν σοβαρά υπόψη τους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα, είτε, σε κάποιες περιπτώσεις, καταδεικνύουν ότι η πειραματική διαδικασία θα πρέπει να γίνεται στη θερμοκρασία των 20°C ή σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από 18 έως 28°C (Βλ. Πίνακα 4.1). Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα των ερευνών για την επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών είναι σε αρκετές περιπτώσεις αντιφατικά μεταξύ τους. Για τους λόγους αυτούς η επίδραση της θερμοκρασίας στις υγρομετρικές ιδιότητες των δομικών υλικών και πιο συγκεκριμένα στον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης χρήζει περισσότερης διερεύνησης.

## 5.2 Ξήρανση

Προκειμένου να προσδιοριστεί η διαδικασία ξήρανσης των δομικών υλικών, υπάρχουν λίγα διεθνή πρότυπα και κανονισμοί. Ο κανονισμός II.5 της RILEM αξιολογεί την ικανότητα ξήρανσης μη επεξεργασμένων και επεξεργασμένων δειγμάτων<sup>183</sup>, ενώ ο κανονισμός Normal 29/88 χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μιας χαρακτηριστικής σταθεράς στη διαδικασία της ξήρανσης που ονομάζεται δείκτης ξήρανσης.<sup>184</sup> Τέλος, το διεθνές πρότυπο EN 16322 καθορίζει τη συμπεριφορά πορωδών ανόργανων υλικών κατά τη ξήρανση τους και αναφέρεται στη ξήρανση δειγμάτων μετά από την πλήρη εμβάπτιση τους σε νερό.<sup>185</sup> Ενώ η πειραματική διαδικασία της διεργασίας ξήρανσης παραμένει αναμφισβήτητη, τα ανωτέρω πρότυπα και οι συστάσεις καταδεικνύουν ότι η πειραματική διαδικασία της ξήρανσης περιορίζεται σε ειδικές συνθήκες θερμοκρασίας του αέρα και σχετικής υγρασίας καθώς και σε υλικά τα οποία ξηραίνονται έπειτα από εμβάπτιση τους σε νερό.

Εκτός από τα προαναφερθέντα πρότυπα, πολλοί ερευνητές, στη προσπάθεια τους να εισαγάγουν μια παράμετρο που θα είναι χαρακτηριστική για τη διαδικασία της ξήρανσης, έχουν προτείνει έναν νέο συντελεστή που ονομάζεται συντελεστής ξήρανσης και δίνει ένα μέτρο για τη διάρκεια της διαδικασίας της ξήρανσης ενός δομικού υλικού.<sup>186, 187, 188</sup> Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη παράμετρος δεν είναι ευρέως αποδεκτή μέχρι σήμερα.

<sup>183</sup> RILEM TC 25-PEM (1980): Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, Test No. II.5 "Evaporation curve", *Materials and Structures*, 13, 204-207.

<sup>184</sup> Commissione Normal 1991, Misura dell'indice di asciugamento (drying index), Roma, CNR/ICR, Doc. 29/88.

<sup>185</sup> EN 16322 (2013): Conservation of Cultural Heritage – Test Methods – Determination of Drying Properties.

<sup>186</sup> Krus, M.; Holm, A. (1999): Simple Methods to Approximate the Liquid Transport Coefficients Describing the Absorption and Drying Process, 5<sup>th</sup> Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Goteborg, Norway, 241–248.

<sup>187</sup> Krus, M., Lenz, K., Plagge, R., Scheffler, G. (2007): Ein Trocknungskoeffizient als neuer hygrothermischer Standardmaterialkennwert. 12. Symposium on Building Physics, Dresden University of Technology, Proceedings Vol. 1: 283-293.

<sup>188</sup> Scheffler, G. A. and R. Plagge. (2010): Introduction of a Drying Coefficient for Building Materials, Proceedings of Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, ASHRAE Transactions, Volume 116, Part 2.

Επιπρόσθετα, πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη ξήρανση σε συνδυασμό με την απορρόφηση του νερού από τα υλικά, είτε αξιοποιώντας ορισμένες παραμέτρους της ξήρανσης είτε συνδέοντας τη διαδικασία της ξήρανσης με άλλες ιδιότητες των δομικών υλικών.<sup>189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198</sup> Παρόλα αυτά, στη πλειονότητα των προαναφερθέντων μελετών, η διαδικασία της ξήρανσης πραγματοποιούταν σε δομικά υλικά τα οποία προηγούμενα ήταν εμβαπτισμένα σε νερό και όχι έπειτα από πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης. Έτσι, με αυτό τον τρόπο, υπήρχε μία απόκλιση από τις πραγματικές συνθήκες και αυτές οι μελέτες δεν ανταποκρίνονταν στο πραγματικό πρόβλημα της αναρριχόμενης υγρασίας.

## 5.3 Μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας

### 5.3.1 Υγρομετρικά μοντέλα

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας έχει γίνει ευρέως αποδεκτή και αποτελεί μια κοινώς εφαρμοζόμενη μέθοδος έρευνας. Έτσι έχουν αναπτυχθεί, επεκταθεί αλλά και βελτιωθεί πολλά υπολογιστικά εργαλεία.<sup>199, 200, 201</sup> Δεδομένου μάλιστα ότι οι πειραματικές έρευνες είναι στις περισσότερες

<sup>189</sup> Flores-Colen, I., Silva, L., de Brito, J., de Freitas, V.P. (2016): Drying index for in-service physical performance assessment of renders, *Construction and Building Materials*, 112, 1101–1109.

<sup>190</sup> Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Silva, A., Silva, V., Velosa, A. (2014): New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions, *Construction and Building Materials*, 54, 378–384.

<sup>191</sup> Alturkistani, P., Fazio, P., Rao, J., Mao, Q. (2008): A new test method to determine the relative drying capacity of building envelope panels of various configurations, *Building and Environment*, 43, 12, 2203–2215.

<sup>192</sup> Mao, Q., Fazio, P., Rao, J. (2009): In-cavity evaporation allowance — a drying capacity indicator for wood-frame wall system, *Building and Environment*, 44, 12, 2418–2429.

<sup>193</sup> Bednar, T. (2002): Approximation of Liquid Moisture Transport Coefficient of Porous Building Materials by Suction and Drying Experiments. Demands on Determination of Drying Curve, 6<sup>th</sup> Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway, 493–500.

<sup>194</sup> Komatsu, Y., Sciazko, A., Zakrzewski, M., Kimijima, S., Hashimoto, A., Kaneko, S., Szymd, J. S. (2015): An experimental investigation on the drying kinetics of a single coarse particle of Belchatow lignite in an atmospheric superheated steam condition, *Fuel Processing Technology*, 131, 356–369.

<sup>195</sup> Brito, V., Gonçalves, T. D. (2013): Artisanal lime coatings and their influence on moisture transport during drying. 3<sup>rd</sup> Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland.

<sup>196</sup> Zhao, J. and Plagge, R. (2015): Characterization of hygrothermal properties of sandstones—Impact of anisotropy on their thermal and moisture behaviors, *Energy and Buildings*, 107, 479–494.

<sup>197</sup> Makhloufi, Z., Bouziani, T., Hadjoudja, M., Bederina, M. (2014): Durability of limestone mortars based on quaternary binders subjected to sulfuric acid using drying–immersion cycles, *Construction and Building Materials*, 71, 579–588.

<sup>198</sup> Delgado, J. M. P. Q., Guimarães, A. S. and de Freitas, V. P., (2014): Air Drying Technologies Applied to Buildings Treatment, Drying and Wetting of Building Materials and Components, Springer.

<sup>199</sup> Häupl, P., Grunewald, J., Fechner, H., Stopp, H. (1997): Coupled heat air and moisture transfer in building structures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 1633–1642.

<sup>200</sup> Kunzel, H.M., Kiessl, K. (1997): Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 159–167.

<sup>201</sup> Janssen, H., Blocken, B., Carmeliet, J. (2007): Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 1128–1140.

περιπτώσεις δαπανηρές και χρονοβόρες, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στα υπολογιστικά μοντέλα τα οποία εκτιμούν τη συμπεριφορά της υγρασίας στα δομικά στοιχεία. Τα μοντέλα αυτά ποικίλουν ως προς τη μαθηματική τους πολυπλοκότητα η οποία ως ένα βαθμό εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:<sup>202</sup>

- Διάσταση της μεταφοράς της υγρασίας (δυνατότητα προσομοίωσης σε μια, δύο και τρεις διαστάσεις)<sup>203, 204, 205, 206, 207, 208, 209</sup>
- Τύπος ροής (μόνιμη, ενδιάμεση ή δυναμική)
- Ποιότητα και διαθεσιμότητα της πληροφορίας και
- Στοχαστική φύση των δεδομένων (ιδιότητες των υλικών, καιρικές συνθήκες, ποιότητα κατασκευής, κ.λπ.).

Μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί 57 υδρομετρικά μοντέλα στη διεθνή βιβλιογραφία, εκ των οποίων μόνο τα 14 είναι διαθέσιμα στο κοινό: τα 9 από αυτά είναι εμπορικά πακέτα ενώ τα υπόλοιπα 5 είναι δωρεάν προγράμματα. Στον πίνακα 5.1 παρατίθενται τα 14 υδρομετρικά υπολογιστικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα στο κοινό.<sup>210</sup>

Τα τελευταία χρόνια επικρατεί μια πιο ολιστική προσέγγιση στη μοντελοποίηση (whole building approach) σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται μεταξύ άλλων υπόψη της την επίδραση όλων των αντικειμένων, έμψυχων και άψυχων, στην συγκέντρωση της υγρασίας και στη θερμοκρασία ενώ προϋποτίθεται η σύζευξη υγρασίας και θερμότητας.<sup>211, 212</sup> Το 2003 μάλιστα η Διεθνής Επιτροπή Ενέργειας ξεκίνησε ένα ερευνητικό πρόγραμμα με σκοπό την υποστήριξη αυτού του είδους της μοντελοποίησης με την εκτέλεση κατάλληλων πειραμάτων επαλήθευσης και επικύρωσης των μοντέλων.<sup>213, 214, 215, 216, 217, 218</sup>

<sup>202</sup> Straube J., and Burnett, E.F.P. (2001): Overview of hygrothermal (HAM) analysis methods. In: Trechsel HR, editor. ASTM manual 40-moisture analysis and condensation control in building envelopes, 81–89.

<sup>203</sup> Kohonen R. (1984): A method to analyse the transient hygrothermal behaviour of building materials and components, Technical Research Center of Finland (VTT), Publication 21.

<sup>204</sup> Karagiozis, A. (1993): Overview of the 2D hygrothermal heat-moisture transport model LATENITE, NRC-INR, Ottawa.

<sup>205</sup> Burch, D., Chi, J. (1997): Moist, a PC program for Predicting Heat and Moisture Transfer in Building Envelopes, release 3.0, NIST Special Publication 917.

<sup>206</sup> Künzle, H.M. (1995): Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart.

<sup>207</sup> Arfvidsson, J. (1998): Moisture Transport in Porous Media, Modelling Based on Kirchoff Potentials, report TVBH-1010, Lund University.

<sup>208</sup> MATCH-Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials, at <http://www.match-box.dk>

<sup>209</sup> Pedersen, C.R. (1990): Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, Technical University of Denmark.

<sup>210</sup> Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M., de Freitas, V.P. (2013): Numerical simulation of exterior condensations on façades: The undercooling phenomenon, *Journal of Building Performance Simulation*, 6, 5, 337-345.

<sup>211</sup> Hens, H.L.S.C. (2015): Combined heat, air, moisture modelling: a lookback, how, of help?, *Building and Environment*, 91, 138–151.

<sup>212</sup> Steeman, M., De Paepe, M., Janssens, A. (2010): Impact of whole-building hygrothermal modelling on the assessment of indoor climate in a library building, *Building and Environment*, 45, 7, 1641–1652

<sup>213</sup> Vera Araya S., (2009): Interzonal Air and Moisture Transport through Large Horizontal Openings: An Integrated Experimental and Numerical Study', PhD-thesis, Concordia University.

---

<sup>214</sup> Li, Y., Fazio P., Rao, J. (2011): An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room, *Building and Environment*, 47, 205-216

<sup>215</sup> Tariku, F., Kumaran, K., Fazio, P. (2011): Determination of indoor humidity profile using a whole-building hygrothermal model, *Building simulation* 4, 61-78.

<sup>216</sup> Steeman, M., Janssens, A., Steeman, H., Van Belleghem, M., De Paepe, M. (2010): On coupling 1 D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multi-zone building energy simulation program, *Building and Environment* 45, 865-877.

<sup>217</sup> Steeman, M., Van Belleghem, M., De Paepe, M., Janssens, A. (2010): Experimental validation and sensitivity analysis of a coupled BES-HAM model, *Building and Environment*, 45, 2202-2217.

<sup>218</sup> Hua, Ge, Yang, X., Fazio, P., Rao, J. (2014): Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials, *Building and Environment*, 81, 162-171.

**Πίνακας 5.1:** Υγροθερμικά υπολογιστικά εργαλεία διαθέσιμα στο κοινό

ΟΝΟΜΑ	ΤΥΠΟΣ ΡΟΗΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ														ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ										ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	I	II	III	IV
1D-HAM	1D-HAM	x		x	x	x	x						x		x	x	x	x				x			x	x			
BSim2000	1D-HM	x	x	x	x	x	x					x			x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x		
Delphin 5	1/2D-HAMPS	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x			
EMPTIED	1D-HAM	x		x	x		x		x				x		x	x	x								x	x	x		
GLASTA	1D-HM	x		x	x		x	x							x	x		x				x			x				
HygIRC-1D	1D-HAM	x		x	x	x	x		x	x			x		x	x		x	x	x	x		x	x	x	x		x	
HAMLab	1D-HAM	x		x	x			x			x		x		x	x			x	x		x	x		x	x			



### Λίστα συμβόλων

1–Πυκνότητα	A–Θερμοκρασία
2–Πορώδες	B–Σχετική υγρασία/ Πίεση/ Συγκέντρωση
3–Ειδική θερμοχωρητικότητα	C – Συγκέντρωση πίεσης αέρα
4–Θερμική αγωγιμότητα	D – Ηλιακή ακτινοβολία
5–Ισόθερμες ρόφησης	E – Ταχύτητα αέρα
6–Διαπερατότητα υδρατμών	F– Κατεύθυνση ανέμου
7–Διαχυτότητα υδρατμών	G–Κατακρήμνιση
8–Πίεση απορρόφησης	H– ανταλλαγή μεγάλων κυμάτων
9–Διαχυτότητα υγρών	I–Δείκτης νέφωσης
10–Παράγοντας αντίστασης στη διάχυση	J–Διαρροή νερού
11–αγωγιμότητα νερού	
12–Ειδική χωρητικότητα υγρασίας	I–Θερμοκρασία
13–Διαπερατότητα αέρα	II–Σχετική υγρασία/Πίεση/Συγκέντρωση
14–Υστέρηση στις ισόθερμες ρόφησης	III–Πίεση
	IV–Φαιν/νο εσωτ. συσσώρευσης (T και RH)

### 5.3.2 Ανασκόπηση στη μοντελοποίηση της τριχοειδούς αναρρίχησης

Εκτός από τα ανωτέρω υπολογιστικά εργαλεία, πολλοί ερευνητές μέχρι σήμερα έχουν προσπαθήσει να μοντελοποιήσουν το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης στα δομικά υλικά. Ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα μοντέλων μεταφοράς της υγρασίας σε δομικά υλικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Ορισμένοι από αυτούς χρησιμοποίησαν ως βασική παράμετρο μοντελοποίησης το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης και μελέτησαν την εξάρτηση του με βασικές ιδιότητες των υλικών.<sup>79, 219, 220, 221</sup> Ο Mason<sup>222</sup> ήταν από τους πρώτους ερευνητές που ανέπτυξε ένα μοντέλο στο οποίο η τριχοειδής αναρρίχηση

<sup>219</sup> Hamraoui, A., Nylander, T. (2002): Analytical Approach for the Lucas–Washburn Equation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 250, 415–421.

<sup>220</sup> Marmur, A., Cohen, R.D. (1997): Characterization of Porous Media by the Kinetics of Liquid Penetration: The Vertical Capillaries Model, *Journal of Colloid and Interface Science*, 189, 299–304.

<sup>221</sup> Fries, N. and Dreyer, M. (2008): An analytic solution of capillary rise restrained by gravity, *Journal of Colloid and Interface Science*, 320, 259–263,

<sup>222</sup> Mason, G. (1974): Rising damp, *Building Science*, 9, 227–231.

συνυπάρχει με τη ξήρανση των υλικών και στο οποίο βασική παράμετρος μελέτης είναι το ύψος της αναρριχόμενης υγρασίας. Αξίζει να σημειωθεί επίσης η προσπάθεια των Massari και Massari<sup>223</sup> οι οποίοι μελέτησαν το ύψος της αναρριχόμενης υγρασίας σε έναν αριθμό ιστορικών κτηρίων στη Ρώμη και εξήγαγαν μια σχέση που συνδέει το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης με το πάχος της τοιχοποιίας. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί η προσπάθεια των Hall και Hoff<sup>224</sup> οι οποίοι χρησιμοποιώντας τις έννοιες και τις μεθόδους της θεωρίας της ακόρεστης ροής, ανέπτυξαν ένα μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης για τη τριχοειδή αναρρίχηση (Sharp Front Model) το οποίο συμπεριλαμβάνει και την εξάτμιση και τη βαρύτητα. Το μοντέλο αυτό περιγράφει την εξάρτηση του ύψους τριχοειδούς αναρρίχησης με το χρόνο και έχει χρησιμοποιηθεί από ένα μεγάλο πλήθος ερευνητών ως μέρος της εργασίας τους.<sup>225,226,227</sup>

**Πίνακας 5.2:** Χαρακτηριστικά παραδείγματα μοντέλων μεταφοράς υγρασίας.

<b>Μοντελοποίηση ως προς το ύψος της υγρασίας</b>	
Mason G. (1974) <sup>222</sup>	$\frac{dh}{dt} = \frac{K_3 p_c - \frac{1}{2} K_1 h^2}{K_2 h}$
Marmur, A. & Cohen, R.D. (1997) <sup>220</sup>	$At = -Bh - \ln(1 - Bh)$
Zhmud et al. (2000) <sup>228</sup>	$h(t) = \frac{a}{b} (1 - e^{-\frac{b^2 t}{a}})$
Hamraoui, A. & Nylander, T. (2002) <sup>219</sup>	$At = -h(t) - h_c \ln\left(1 - \frac{h(t)}{h_c}\right)$
Lee et al. (2004) <sup>229</sup>	$\frac{dh}{dt} = -\frac{k}{n} \frac{d\phi}{dx} = -\frac{k}{n} \left[1 - \frac{(h_0 - h_w)}{h}\right]$

<sup>223</sup> Massari, G., Massari, I., Damp buildings, old and new. In ICCROM 1993 Rome, Italy: ICCROM (English translation of Risanamento Igienico dei Locali Umidi. Milan, Italy: Ulrico Hoepli, 1985)

<sup>224</sup> Hall, C., Hoff, W.D. (2007): Rising damp: capillary rise dynamics in walls, *Proc R Soc A*, 463, 1871–1884.

<sup>225</sup> Ioannou, I. and Hoff, W.D. (2008): Water repellent influence on salt crystallization in masonry, *Proceedings of the ICE: Construction Materials*, 161, 17–23.

<sup>226</sup> Ioannou, I., Andreou, A., Tsikouras, B., Hatzipanagiotou, K. (2009): Application of the Sharp Front Model to capillary absorption in a vuggy limestone, *Eng. Geol.*, 105, 20–23.

<sup>227</sup> Hall, C., Hamilton, A., Hoff, W.D., Viles, H.A., Eklund, J.A. (2011): Moisture dynamics in walls: response to micro-environment and climate change, *Proc. R. Soc. A*, 467, 194–211.

<sup>228</sup> Zhmud, B.V., Tiberg, F., Hallstenson, K. (2000): Dynamics of capillary rise, *J. of Colloid Interface Sci.*, 228, 2, 263–269.

<sup>229</sup> Lee, Y. K., Kodikara, J. and Bouazza, A. (2004): Modeling and Laboratory Assessment of Capillary Rise in Stabilized Pavement Materials, *Journal of the Transportation Research Board*, 1868, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 3–13.



Karoglou et al. (2005) <sup>79</sup>	$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{t_c} (H_e - H)$
Hall, C. & Hoff, W.D. (2007) <sup>224</sup>	$\frac{dh}{dt} = \frac{S^2}{2\theta_w} \frac{1}{h} - \frac{eh}{b\theta_w}$
Fries, N. & Dreyer, M. (2008) <sup>221</sup>	$h(t) = \frac{a}{b} [1 + W(-e^{-1-\frac{b^2 t}{a}})]$
Tsunazawa et al. (2016) <sup>142</sup>	$q = \frac{\pi r^4}{8\mu t l} \left( \frac{2\gamma \cos \theta}{r} - x\rho g \right)$
<b>Μοντελοποίηση ως προς το ποσοστό απορροφημένης υγρασίας</b>	
Philip, J.R. & de Vries, D.A. (1957) <sup>230</sup>	$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D_T \cdot \nabla T) + \nabla(D_u \cdot \nabla u) + \frac{\partial K}{\partial x}$
Rode, C. (1990) <sup>231</sup>	$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial s}{\partial x} \right)$
Kunzel, H. (1995) <sup>232</sup>	$\frac{du}{d\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_\phi \cdot \nabla \phi + \delta_p \cdot \nabla(\phi \cdot p_{v,sat}))$
Burch, D.M. & Chi, J. (1997) <sup>205</sup>	$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_v \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)$
Hagentoft, C.E. & Blomberg, T.(2000) <sup>233</sup>	$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_v \frac{\partial v}{\partial x} + q_a v \right)$
Diersch, H.J.G. (2005) <sup>234</sup>	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K(\theta) \cdot \nabla \Psi) - S(\theta)$
Janssen et al. (2007) <sup>201</sup>	$\frac{du}{dp_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} = -\nabla(-K_i(p_c) \cdot \nabla p_c + \delta \cdot \nabla p_v)$

<sup>230</sup> Philip, J.R. and de Vries, D.A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38, 2, 222–232.

<sup>231</sup> Rode, C. (1990): Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Thermal Insulation Laboratory, Denmark.

<sup>232</sup> Kunzel, H. (1995): Simultaneous heat and moisture transport in building components. PhD Thesis, Fraunhofer-IBP, Stuttgart.

<sup>233</sup> Hagentoft, C.E., Blomberg, T. (2000): 1D-HAM, coupled heat, air and moisture transport in multi-layered wall structures. Manual with brief theory and an example, version 2.0.

<http://www.buildingphysics.com/manuals/1dham.pdf>

<sup>234</sup> Diersch, H.J.G. (2005): FEFLOW 5.2 Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System. Reference Manual. WASY Ltd., Berlin.

Hoffman and Niesel <sup>235</sup>	$m = a [1 - \exp(-bt^{1/2})]$
Ishida et al. (2007) <sup>177</sup>	$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} + \text{div}(J(\theta_w, T, \nabla \theta_w, \nabla T)) + Q = 0$
Scheffler, G. A. & Plagge, R. (2010) <sup>238</sup>	$j_k^{m_{l+v}} = D_v^0 \cdot \left[ \frac{1 - \Theta}{p + (1 - \Theta)^2 \cdot (1 - p)} \right] \cdot \frac{dp_v}{dx}$ $+ K_l^0 \cdot \left[ \frac{p}{p + (1 - \Theta)^2 \cdot (1 - p)} \right] \cdot \frac{dp_c}{dx}$
Chari et al. (2016) <sup>176</sup>	$D^{wet} = D_0^{wet} e^{-\beta w}$

Η πλειονότητα όμως των ερευνητών ανέπτυξε μοντέλα για τη τριχοειδή αναρρίχηση τα οποία είχαν ως βασική παράμετρο μελέτης, το ποσοστό της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας. Οι ερευνητές αυτοί έλαβαν υπόψη τους χαρακτηριστικές παραμέτρους και μεταβλητές που σχετίζονται με το περιβάλλον και με τα υλικά και μελέτησαν την επίδρασή τους στην κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης είτε μόνη της είτε σε συνδυασμό με το φαινόμενο της ξήρανσης των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, οι Chari κ.ά.<sup>176</sup> μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή διάχυσης τσιμεντιτικών συστημάτων, τόσο κατά τη ύγρανση με εμβάπτιση, όσο και κατά τη ξήρανσή τους, σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 60 °C. Βρέθηκε ότι η θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στο συντελεστή μεταφοράς της υγρασίας αφού αυτός αυξάνει εκθετικά κατά τη ξήρανση ενώ μειώνεται γραμμικά κατά την ύγρανση των υλικών. Οι Guizzardi κ.ά.<sup>236</sup> πραγματοποίησαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης σε πλίνθους και σε θερμοκρασίες από 5 έως 55°C. Στη συνέχεια πραγματοποίησαν σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με υπάρχοντα αριθμητικά μοντέλα και βρέθηκε ότι τα μοντέλα αυτά περιγράφουν επαρκώς τη εξάρτηση της θερμοκρασίας λαμβάνοντας υπόψη βασικές παραμέτρους των υλικών. Την επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας προσπάθησαν να ενσωματώσουν οι Ishida κ.ά.<sup>177</sup> σε μια μελέτη τους σε τσιμεντιτικά υλικά. Έτσι αφού πραγματοποιήθηκαν πειράματα ύγρανσης-ξήρανσης σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 60°C και για διάφορες τιμές της σχετικής υγρασίας, προτάθηκε ένα μοντέλο που προβλέπει τη μεταφορά και το ποσοστό υγρασίας των υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες. Οι Stuck κ.ά.<sup>237</sup> μοντελοποίησαν την επίπτωση της λιθογραφίας και της κατανομής της ακτίνας των πόρων, για τρεις τύπους λίθων των υλικών πάνω στα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας. Τα αποτελέσματα

<sup>235</sup> Hoffmann, D., Niesel, K. (1988): Quantifying capillary rise in columns of porous material, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 67, 8, 1418.

<sup>236</sup> Guizzardi, M., Derome, D., Carmeliet, J. (2016): Water uptake in clay brick at different temperatures: experiments and numerical simulations, *J. Build. Phys.*, 39, 4, 373–389.

<sup>237</sup> Stuck, H., Plagge, R., Siegesmund, S. (2013): Numerical modeling of moisture transport in sandstone: the influence of fabric and clay content, *Environmental Earth Science*, 69, 4, 1161–1187.

έδειξαν μεταξύ άλλων, ότι ορισμένες κατανομές πόρων διευκολύνουν τα φαινόμενα μεταφοράς ενώ κάποιες άλλες εμφανίζουν επιλεκτικότητα και ως προς το είδος της απορρόφησης της υγρασίας από το υλικό. Οι Tsunazawa κ.ά.<sup>142</sup> πραγματοποίησαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης σε ένα είδος λίθου με σκοπό να αξιολογήσουν τη σημασία της ακτίνας των πόρων στο φαινόμενο. Αφού διαπίστωσαν τη σημασία των στενών πόρων στο ρυθμό απορρόφησης του νερού, πρότειναν ένα κατάλληλο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του τις διαφορετικές ακτίνες των πόρων του και παρέχει μια ποσοτική περιγραφή της τριχοειδούς αναρρίχησης. Οι Scheffler και Plagge<sup>238</sup> πρότειναν ένα μοντέλο για τα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας το οποίο δεχόμενο ως ελάχιστα δεδομένα εισόδου στοιχεία από δομή των πόρων των υλικών, είναι σε θέση να εξάγει τους συντελεστές μεταφοράς υγρασίας των υλικών και με υψηλή ευελιξία και προσαρμοστικότητα επιτυγχάνεται η προσαρμογή με τα φυσικά δεδομένα του προβλήματος. Οι Suchorab κ.ά.<sup>239</sup> εφάρμοσαν ένα υπάρχον λογισμικό μοντελοποίησης, για να μελετήσουν το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης σε κελύφη κτηρίων από σκυρόδεμα. Το εφαρμοζόμενο μοντέλο στις προσομοιώσεις βασίζεται στην εξίσωση Richards για ροή νερού σε ακόρεστες συνθήκες ενώ έγινε και επαλήθευση του μοντέλου με πειράματα στο εργαστήριο. Βρέθηκε ότι το υπάρχον μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία και περιγράφει επαρκώς την τριχοειδή αναρρίχηση αρκεί να γίνει κατάλληλη παραμετροποίηση και διακριτοποίηση.

### 5.3.3 Ανασκόπηση στη μοντελοποίηση της ξήρανσης

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία πολλά μοντέλα μεταφοράς της υγρασίας τα οποία περιγράφουν τη διαδικασία της ξήρανσης των πορωδών υλικών.<sup>57, 143, 148, 240, 241, 242, 243, 244</sup> Κάθε ερευνητής εστιάζει σε διαφορετικές ιδιότητες των υλικών και σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, προκειμένου να περιγράψει τη διαδικασία της ξήρανσης με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Οι Zaknounge κ.ά.<sup>245</sup> αξιολόγησαν τους συντελεστές μεταφοράς της υγρασίας, συμπεριλαμβανομένης της πειραματικής κινητικής της ξήρανσης, σε υγροσκοπικά πορώδη υλικά και ανέπτυξαν ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της μεταφοράς της θερμότητας και της μάζας σε

<sup>238</sup> Scheffler, G. A., Plagge, R. (2010): A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 286–296.

<sup>239</sup> Suchorab, Z., Widomski, M., Sobczuk, H., Lagód, G., (2010): Capillary rise phenomenon in aerated concrete. Monitoring and simulations, *Proc. ECOpole*, 2, 4, 285–290.

<sup>240</sup> Dantas, L.B., Orlande, H.R.B., Cotta, R.M. (2003): An inverse problem of parameter estimation for heat and mass transfer in capillary porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 1587–1598.

<sup>241</sup> Dietl, C., Winter, E., Viskanta, R. (1998): An efficient simulation of heat and mass transfer processes during drying of capillary porous hygroscopic materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41, 3611–3625.

<sup>242</sup> Jacobsen, S., Aarseth, L.I. (1999): Effect of wind on drying from wet porous building materials surfaces- A simple model in steady state, *Materials and Structures*, 32, 38-44.

<sup>243</sup> Nguyen, T.Q., Petkovic, J., Dangla, P. and Baroghel-Bouny, V. (2008): Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials. *Construction and Building Materials*, 22, 11, 2185-2195.

<sup>244</sup> Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q. (2016): Drying Kinetics of Building Materials: Brief Theory and Experimental Evaluation, *Diffusion Foundations*, 7, 114-127.

<sup>245</sup> Zaknounge, A., Glouannec, P., Salagnac, P. (2012): Estimation of moisture transport coefficients in porous materials using experimental drying kinetics, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 205–215.

πορώδη υλικά. Οι Barreira κ.ά.<sup>246</sup> προσάρμοσαν έξι μοντέλα ξήρανσης με διαφορετικές κινητικές πρώτης τάξης, που υπήρχαν στη βιβλιογραφία, για να περιγράψουν τη διαδικασία της ξήρανσης και για να εκτιμήσουν το ποσοστό της υγρασίας ισορροπίας σε δύο κατηγορίες δομικών υλικών (συνθετικά συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης (ETICS) και πλίνθους). Βρήκαν ότι η σταθερά χρόνου ξήρανσης επηρεάζεται έντονα από το φαινόμενο μεταφοράς της υγρασίας καθώς και από τις συνθήκες της ξήρανσης. Οι Matiasovsky και Mihalka πραγματοποίησαν πειράματα ξήρανσης σε 25 δομικά υλικά (πλίνθους, επιχρίσματα ανακαίνισης, κονιάματα, κλπ) και επιβεβαίωσαν ότι ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται από συγκεκριμένες παραμέτρους της δομής για κάθε υλικό.<sup>247</sup> Οι Stück κ.ά.<sup>237</sup> πραγματοποίησαν μια αριθμητική προσομοίωση της κατανομής της υγρασίας κάτω από πραγματικές κλιματικές συνθήκες σε τρεις διαφορετικούς τύπους λίθων. Για το σκοπό αυτό διεξήγαγαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης και ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο της μεταφοράς υγρασίας και της αποθήκευσης της κάτω από διάφορες κλιματολογικές συνθήκες. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη του την επίπτωση ορισμένων χαρακτηριστικών της δομής των λίθων και συνδέει, μεταξύ άλλων, τις κλιματικές συνθήκες με την διαδικασία της ξήρανσης.

Με τη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αναπτύχθηκαν διάφορα υπολογιστικά εργαλεία που περιγράφουν μεταξύ άλλων, τη διαδικασία της ξήρανσης όπως το WUFI,<sup>206</sup> το MOIST,<sup>205</sup> το GLASTA,<sup>248</sup> το UMIDUS,<sup>249</sup> το MATCH,<sup>208</sup> το EMPTIED<sup>250</sup> κ.λπ. Παρά την ευρεία εφαρμογή τους, τα προαναφερθέντα μοντέλα διαφέρουν ως προς τη διάσταση της μεταφοράς της υγρασίας τους (μία, δύο ή τρεις διαστάσεις), ως προς τον τύπο της ροής (σταθερή, ενδιάμεση ή δυναμική ροή), ως προς την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των παρεχομένων πληροφοριών ή την στοχαστική φύση των δεδομένων.<sup>251</sup> Επιπλέον, ορισμένα από τα προαναφερθέντα προγράμματα έχουν αρκετούς περιορισμούς ως προς τα περιλαμβανόμενα κλιματικά δεδομένα τους (π.χ. UMIDUS) ή ως προς την περαιτέρω ενημέρωση και υποστήριξή τους (π.χ. MOIST). Επιπλέον, ορισμένα δεν λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. EMPTIED). Το βασικότερο όμως μειονέκτημα των προαναφερθέντων υπολογιστικών εργαλείων είναι το ότι βασίζονται σε θεωρητικές και όχι πειραματικές τιμές των μεταβλητών τους ή, με άλλα λόγια, απουσιάζουν αξιόπιστες πειραματικές τιμές στα δεδομένα τους γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες τους στο να περιγράψουν αξιόπιστα τη διαδικασία της ξήρανσης των δομικών υλικών.

<sup>246</sup> Barreira, E., Delgado, J. M. P. Q. and de Freitas, V. P. (2014): *Wetting and Drying Kinetics of Building Materials, Drying and Wetting of Building Materials and Components*, Springerl.

<sup>247</sup> Matiasovsky, P. and Mihalka, P. (2014): *Pore Structure Parameters and Drying Rates of Building Materials, Drying and Wetting of Building Materials and Components*, Springerl.

<sup>248</sup> Physibel (2007): *GLASTA diffusion-condensation-drying extended Glaser method*, at <http://www.physibel.be/v0n2gl.htm>

<sup>249</sup> Mendes, N., Ridley, I., Lamberts, R., Philip, P.C., Budag, K. (1999): *UMIDUS - a PC program for the prediction of heat and moisture transfer in porous building elements*, vol. 20(4), pp. 2-8, *Building Energy Simulation*, Berkeley, USA.

<sup>250</sup> Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC). *Envelope moisture performance through infiltration, exfiltration and diffusion— EMPTIED*. Research Highlights, Technical series, 99–123 at <http://www.cmhc-schl.gc.ca/publications/en/rh-pr/tech/1999-123e.html>

<sup>251</sup> Karoglou, M., Moropoulou, A., Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. (2007): *A powerful simulator for moisture transfer in buildings*, *Building and Environment*, 42, 902–912.

Από τα προαναφερθέντα γίνεται φανερό ότι στις περισσότερες μελέτες η ξήρανση ακολουθεί μετά από εμβάπτιση των δομικών υλικών στο νερό. Με αυτό τον τρόπο παρατηρείται απόκλιση από τη πραγματικότητα μιας και πολύ σπάνια τα υλικά είναι κορεσμένα σε νερό πριν τη ξήρανση τους. Με αυτό τον τρόπο εμφανίζεται μια αδυναμία στη λήψη αξιόπιστων πειραματικών τιμών για τη μέτρηση της υγρασίας κατά τη ξήρανση των δομικών υλικών. Στην παρούσα διατριβή, έγινε μια προσπάθεια σύγκλισης σε πραγματικές συνθήκες για τα υπό εξέταση δομικά υλικά. Η διαδικασία της ξήρανσης πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά από τον τριχοειδή κορεσμό κάθε υλικού. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μια εκτίμηση της επίπτωσης του τριχοειδώς αναρριχόμενου νερού στην κινητική της ξήρανσης των δομικών υλικών, κάτω από ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

## 5.4 Επίδραση της μικροδομής των υλικών στα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας

Μέχρι σήμερα, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί σε εργασίες τους με την επίδραση που μπορεί να έχουν στοιχεία της μικροδομής των δομικών υλικών τόσο στις μηχανικές αντοχές των υλικών όσο και στα διάφορα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας σε αυτά. Ο Leary ήταν από τους πρώτους ερευνητές που χρησιμοποίησαν στοιχεία της μικροδομής των υλικών ως παράγοντες πρόβλεψης της ανθεκτικότητας τους. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησε 221 δομικούς ασβεστόλιθους και σημείωσε τον συντελεστή κορεσμού (τον οποίο ο Hirschawald<sup>252</sup> είχε ορίσει ως το πηλίκο του πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης προς το ολικό πορώδες του υλικού), το ολικό πορώδες και το ποσοστό των πόρων με διαμέτρους μικρότερες από 5μm ως τους βασικούς παράγοντες της ανθεκτικότητας τους.<sup>253</sup> Τα ίδια στοιχεία της μικροδομής των λίθων χρησιμοποίησαν ως παράγοντες ανθεκτικότητας και άλλοι ερευνητές σε αντίστοιχες εργασίες τους.<sup>254, 255</sup>

Οι Wendler και Charola<sup>270</sup> μελέτησαν την επίδραση που έχει η υγρασία στη τριχοειδή αναρρίχηση και στη ξήρανση διαφόρων δομικών υλικών. Οι ερευνητές αυτοί σε εργασίες τους συμφωνούν με το συμπέρασμα που είχε καταλήξει και ο Klopfer<sup>256</sup> και υποστηρίζουν ότι η τριχοειδή αναρρίχηση και ο ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης έχουν ισχύ μόνο για πόρους με διαμέτρους από 1mm έως 10μm. Οι πόροι με διάμετρο μεγαλύτερη από 1mm

<sup>252</sup> Hirschawald, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit, Emst&Sohn, Berlin.

<sup>253</sup> Leary, E. (1983): The Building Limestones of the British Isles, Building Research Establishment Report. Her Majesty's Stationary Office, London.

<sup>254</sup> Bell, F. G. (1993): Durability of carbonate rock as a building stone with comments on its preservation, *Environmental Geology*, 21, pp. 187-200.

<sup>255</sup> Mod'd, B. K., Flowarth, R. J., Bland, C. H. (1996): Rabid prediction of building research establishment limestone durability class from porosity and saturation, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, pp. 285-297.

<sup>256</sup> Klopfer, H. (1980): Das Kapillarverhalten poröser Baustoffe. Lehrgang Nr. 4406/79.88, Technische Akademie Esslingen.

δεν μετέχουν στη τριχοειδή αναρρίχηση ενώ στους πόρους με διάμετρο μικρότερη από 1μm ο ρυθμός είναι τόσο μικρός που μπορεί να αγνοηθεί.

Οι Keppert κ.ά.<sup>257</sup> μελέτησαν φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας σε πορώδεις λίθους και βρήκαν ότι οι πειραματικά μετρούμενοι συντελεστές υδαταπορρόφησης των λίθων εμφανίζουν μια εκθετική σχέση με τον ειδικό όγκο των λίθων. Η σχέση αυτή εμφανίζει την καλύτερη συσχέτιση για εύρος πόρων με διαμέτρους μεταξύ 0,1 και 100μm. Έτσι κατάληξαν στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο εύρος πόρων συμμετέχει πιο ενεργά στη μεταφορά υγρασίας μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης στους συγκεκριμένους λίθους. Στο άρθρο τους αυτό αναφέρουν και μια άλλη εργασία<sup>258</sup> στην οποία έχει παρατηρηθεί μια γραμμική συσχέτιση του συντελεστή ροφητικής ικανότητας με το πορώδες των υλικών.

Οι Raimondo κ.ά.<sup>259</sup> μελέτησαν την επίδραση της μικροδομής των πλίνθων στη διαδικασία της υδαταπορρόφησης τους. Χώρισαν τους πόρους των υλικών σε 3 κατηγορίες (μέση ακτίνα, διάμετρος μικρότερη από 50nm και διάμετρος μεγαλύτερη από 3μm) και βρήκαν ότι:

- Η κινητική της ρόφησης της υγρασίας είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος των πόρων αφού πόροι με διαφορετικές διαμέτρους εμφανίζουν παρόμοιους συντελεστές υδαταπορρόφησης.
- Η ύπαρξη μικροπόρων (διάμετρος μικρότερη από 50nm) εμφανίζει μια απόκλιση από την ρόφηση της υγρασίας.
- Η υπόθεση ότι οι μεγαλύτεροι πόροι (διάμετρος μεγαλύτερη από 3μm) είναι οι περισσότερο εμπλεκόμενοι στο φαινόμενο της ρόφησης (όπως ισχυρίζονται οι Beltrán et al.<sup>260</sup> σε μια εργασία τους) αποδείχθηκε ότι δεν είναι εντελώς αξιόπιστη.

Ο Benavente<sup>261</sup> σε μια εργασία του αναφέρει ότι το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης έχει ισχύ για πόρους με μεγέθη έως 0,1μm. Παρόλα αυτά, πόροι με μέγεθος από 1μm έως 1mm ευνοούν υψηλούς ρυθμούς απορρόφησης. Οι Benavente et al.<sup>262</sup> επίσης σε μια εργασία τους συνέδεσαν την διαπερατότητα λίθων σε υγρασία με τη τριχοειδή αναρρίχηση και τη μικροδομή των λίθων. Στην εργασία τους αυτή, αφού επαναλαμβάνουν τα προηγούμενα, βρήκαν ότι μόνο για πορώδη >10%, η διαπερατότητα σχετίζεται με το μέγεθος των πόρων του υλικού και περιγράφουν τρεις περιοχές διαπερατότητας-πορώδους ως προς τη μέση ακτίνα πόρου-λαϊμού  $1\text{mm} < r_M$ ,  $0.5\mu\text{m} < r_M < 1\text{mm}$  και  $r_M < 0.5\mu\text{m}$ . Η καλύτερη συσχέτιση της διαπερατότητας έγινε με τη χρήση της μέσης ακτίνας πόρων και του ενεργού πορώδους.

<sup>257</sup> Keppert, M., Čáchová, M., Koňáková, D. (2015): Transport of Liquids in Porous Rocks, 7<sup>th</sup> International Conference on Building Materials, Zahrady, Czech Republic.

<sup>258</sup> Zhang, L. (2013): Aspects of rock permeability, *Front. Struc. Civ. Eng.*, 7, 102-116.

<sup>259</sup> Raimondo, M., et al. (2009): Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks, *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2623–2630.

<sup>260</sup> Beltrán, V., Escardino, A., Feliu, C., Rodrigo, M.D. (1988): Liquid suction by porous ceramic materials, *British Ceramic Transactions Journal*, 87:64–9.

<sup>261</sup> Benavente, D. (2011): Why pore size is important in the deterioration of porous stones used in the built heritage?, *Macla*, 15, pp. 41–42.

<sup>262</sup> Benavente, D., Pla, C., Cueto, N., Galvañ, S., Martínez-Martínez, J., García-del-Cura, M.A., Ordóñez S. (2015): Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure, *Engineering Geology*, 195, pp. 301–311.

Ο Steindlberger<sup>263</sup> μελέτησε την επίδραση της κατανομής του μεγέθους των πόρων στην αντοχή λίθων από ηφαιστειακή τέφρα. Βρήκε ότι η αφθονία τριχοειδών πόρων με ακτίνες από 30nm έως 10μm είναι υπεύθυνοι για τη γρήγορη μεταφορά υγρασίας στα υλικά και κατ' επέκταση για τη καταστροφή των υλικών από παγετό. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν σε μελέτη τους και οι Torok et al.<sup>264</sup> σε αντίστοιχη εργασία τους.

Όπως προκύπτει από τα ανωτέρω παραδείγματα δεν υπάρχει με σαφήνεια κάποιο στοιχείο της μικροδομής των υλικών στο οποίο η πλειονότητα των ερευνητών να αποδίδει την αιτία για τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας στα υλικά. Για να καλυφθεί το κενό αυτό, ως βασικός στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, είναι να γίνουν όλες οι δυνατές συσχετίσεις, τόσο των παραμέτρων των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας, όσο και μακροσκοπικών υδρομετρικών παραμέτρων με στοιχεία της μικροδομής των υλικών για να μπορέσει να αποτιμηθεί ποιοτικά αλλά και ποσοτικά, η όποια προκύπτουσα εξάρτηση.

---

<sup>263</sup> Steidlberger, E. (2004): Volcanic tufts from Hesse (Germany) and their weathering behavior, *Environmental Geology*, 46, 378-390.

<sup>264</sup> Török, Á., Forgó, L. Z., Vogt, T., Löbens, S., Siegesmund, S. and Weiss, T. (2007): The influence of lithology and pore-size distribution on the durability of acid volcanic tuffs, Hungary, Geological Society, London, Special Publications, 271, p251-260.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της υλοποίησης της παρούσας διατριβής, προηγήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό να προσδιοριστούν οι τελευταίες εξελίξεις που αφορούσαν τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας (τριχοειδής αναρρίχηση-ξήρανση) σε πορώδη δομικά υλικά καθώς και τα υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας. Στη συνέχεια, ακολούθησε το πειραματικό μέρος τα στάδια του οποίου ήταν τα ακόλουθα:

1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ: αρχικά έγινε η επιλογή των δομικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό μέρος της παρούσας διατριβής. Τα υλικά αυτά είναι 6 κονιάματα διαφορετικών συστάσεων, 2 πωρόλιθοι και 2 οπτόπλιθοι.
2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ: Κατόπιν, μελετήθηκαν στοιχεία της μικροδομής των δομικών υλικών. Επίσης προσδιορίστηκαν και στοιχεία που αφορούν τις υδρομετρικές ιδιότητες των υπό μελέτη δομικών υλικών (πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών πόρων του υλικού, πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης, κ.ά.).
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ-ΞΗΡΑΝΣΗΣ: Με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων σε κρίσιμες παραμέτρους των δομικών υλικών, πραγματοποιήθηκαν και ολοκληρώθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας στα δομικά υλικά σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας του αέρα με σκοπό να γίνει η συσχέτιση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας του αέρα με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των δομικών υλικών.
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ: Ακολούθως, έγινε εφαρμογή υπαρχόντων ημι-εμπειρικών μοντέλων για την τριχοειδή υδαταπορρόφηση και τη ξήρανση, με σκοπό των προσδιορισμό κατάλληλων φαινομενολογικών παραμέτρων για τα υπό εξέταση υλικά.
5. ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ-ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ: Τέλος συσχετίστηκαν οι φαινομενολογικές παράμετροι των μοντέλων, τόσο μεταξύ τους όσο και με στοιχεία της μικροδομής δομικών υλικών.

### 6.2 Επιλογή των δομικών υλικών

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν τρεις γενικοί τύποι φυσικών και τεχνητών δομικών υλικών, με διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροδομής. Η πρώτη κατηγορία ήταν οι πλίνθοι οι οποίοι θα συμβολίζονται στο εξής με το αρχικό γράμμα «B» (από το

αρχικό της αγγλικής λέξης «Brick=πλίνθος»). Η δεύτερη κατηγορία υλικών ήταν οι λίθοι οι οποίοι θα συμβολίζονται με το αρχικό γράμμα *S* (από το αρχικό της αγγλικής λέξης «Stone=λίθος») ενώ η τρίτη κατηγορία υλικών ήταν τα κονιάματα τα οποία θα συμβολίζονται με το αρχικό γράμμα *m* (από το αρχικό της αγγλικής λέξης «mortar=κονίαμα»). Οι πλίνθοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν παραδοσιακού τύπου, ο πλίνθος *BRI* ήταν ιταλικής προέλευσης ενώ ο πλίνθος *BRM* προερχόταν από ένα ελληνικό εργοστάσιο. Όσον αφορά τους λίθους, ο λίθος *SRH* προερχόταν από ένα λατομείο στην Ρόδο ενώ ο λίθος *SRY* προερχόταν από ένα λατομείο στο Ρέθυμνο της Κρήτης. Τα υπό εξέταση κονιάματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ως κονία, δύο διαφορετικούς τύπους φυσικής υδραυλικής ασβέστου (*NHL2* & *NHL3.5*) σύμφωνα με το πρότυπο EN 459-1<sup>265</sup>.

Η κονία *NHL2* που επιλέχθηκε είναι της εταιρείας BASF με εμπορική ονομασία ALBARIA™ CALCE ALBAZZANA. Πρόκειται για μια φυσική υδραυλική ασβεστο με φουντουκί-ροζ απόχρωση που παρασκευάζεται από την έμψηση επιλεγμένων μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Η κονία *NHL3.5* είναι της εταιρείας LAFARGE με εμπορική ονομασία CHAUX BLANCHE-3.5. Είναι και αυτή μια φυσική υδραυλική ασβεστος μεγαλύτερης όμως ονομαστικής θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την *NHL2*. Όσον αφορά τα αδρανή των κονιαμάτων, επιλέχθηκε άμμος ποταμού με εύρος κόκκων από 0 έως 4mm. Η συγκεκριμένη άμμος έχει επιδείξει πολύ καλή κοκκομετρία ενώ η απουσία παιπάλης την κάνει ιδανική άμμο για κονιάματα αποκατάστασης. Τα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνταν από συνθέσεις με τρεις (3) διαφορετικούς λόγους κονίας-αδρανών (binder/aggregate ratio) για κάθε κονία. Η επιλογή έγινε με μεγέθη μάζας (ποσοστό μάζας της κονίας της σύνθεσης προς την τελική μάζα του κονιάματος). Το ποσοστό κονίας φυσικής υδραυλικής ασβεστού (*NHL*) που επιλέχθηκαν ήταν 20%, 25% και 30% επί του ολικού βάρους ξηρού κονιάματος.

Η επιλογή των συγκεκριμένων κονιαμάτων έγινε διότι τα κονιάματα υδραυλικής ασβέστου είναι τεχνητά δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά αποκατάστασης σε κτήρια που έχουν να κάνουν με την πολιτιστική κληρονομιά καθώς και στην βιωσιμότητα των κτηρίων. Όλα τα δοκίμια ήταν κυβικά με διαστάσεις  $5 \times 5 \times 5 \pm 0,1 \text{ cm}^3$ . Τουλάχιστον τρία δείγματα από κάθε δομικό υλικό ελέγχθηκαν ενώ κάθε πείραμα επαναλήφθηκε τρεις φορές. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διατριβή μαζί με μια σύντομη περιγραφή τους.

**Πίνακας 6.1:** Τα δομικά υλικά και η περιγραφή τους

<b><i>a/a</i></b>	<b><i>Materials</i></b>	<b><i>Description</i></b>
<b>1</b>	<i>BRI</i>	Typical solid clay brick
<b>2</b>	<i>BRM</i>	Traditional handmade clay brick
<b>3</b>	<i>SRH</i>	Rhodes quarry stone

<sup>265</sup> EN 459-1 (2010): Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria.

4	SRY	Rethymno quarry stone
5	<i>mca20/80</i>	20% NHL 2 & 80% river sand
6	<i>mca25/75</i>	25% NHL 2 & 75% river sand
7	<i>mca30/70</i>	30% NHL 2 & 70% river sand
8	<i>mcb20/80</i>	20% NHL 3.5 & 80% river sand
9	<i>mcb25/75</i>	25% NHL 3.5 & 75% river sand
10	<i>mcb30/70</i>	30% NHL 3.5 & 70% river sand

### 6.3 Μελέτη των χαρακτηριστικών των υλικών

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων με σκοπό να γίνει χαρακτηρισμός των υπό εξέταση δομικών υλικών. Η μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με μικροσκόπιο οπτικών ινών και με μακροσκοπικές φωτογραφίες ενώ η μελέτη της μικροδομής τους έγινε με τη μέθοδο της πορομετρίας υδραργύρου (MIP). Τέλος, τα υπό εξέταση υλικά υπέστησαν πειράματα υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων καθώς και δοκιμές εμβάπτισης σε απιονισμένο νερό με σκοπό να προσδιοριστούν χρήσιμες υγρομετρικές παράμετροί τους.

#### 6.3.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών

Η λήψη εικόνων των υπό εξέταση υλικών πραγματοποιήθηκε με το μικροσκόπιο οπτικών ινών i-Scope USB της εταιρίας MORITEX Corporation ενώ οι φακοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι View 25XPL lens και View 50XPL lens της εταιρίας MORITEX Corporation.

Το συγκεκριμένο μικροσκόπιο οπτικών ινών διαθέτει έξοδο USB και με αυτό τον τρόπο γίνεται η σύνδεσή του με φορητό υπολογιστή στον οποίο καταγράφονται τα δεδομένα-εικόνες. Στον υπολογιστή τέλος μπορεί να γίνει ψηφιακή επεξεργασία κάθε εικόνας παρέχοντας έτσι περαιτέρω δυνατότητες επεξεργασίας. Το χρησιμοποιούμενο λογισμικό ήταν το Moritex Viewer 2.2 της εταιρίας MORITEX Corporations.

#### 6.3.2 Πορομετρία Υδραργύρου

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα πορομετρίας Υδραργύρου με σκοπό να εξαχθούν στοιχεία για τη μικροδομή των υπό εξέταση υλικών. Τα πειράματα της πορομετρίας υδραργύρου πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα III Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, όπου χρησιμοποιείται το πορόμετρο υδραργύρου της εταιρείας Fisons Instruments και το οποίο αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα:

- Το Macropores Unit 120 και
- Το Porosimeter Pascal 440, Thermo Electron.

Το πρώτο τμήμα (Macropores Unit 120) περιλαμβάνει μια αντλία κενού μέσω της οποίας αφαιρείται ο αέρας από το δείγμα και μια δεξαμενή αποθήκευσης του υδραργύρου. Στο τμήμα αυτό ο υδράργυρος εισδύει στο δείγμα με επιβολή εξωτερικής πίεσης μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα. Η μέγιστη τιμή της είναι ίσο με 1atm. Με τον τρόπο αυτό μετρώνται πόροι με ακτίνες  $r > 2\mu\text{m}$  (μακροπόροι). Στο δεύτερο τμήμα (Pascal 440), η εισδυσή του υδραργύρου πραγματοποιείται με επιβολή εξωτερικής πίεσης μέσω υδραυλικού συστήματος. Το όριο συμπίεσης είναι ίσο προς 2000bar. Έτσι επιτυγχάνεται η μέτρηση των μικρότερων πόρων του υλικού οι οποίοι έχουν ακτίνα  $r > 0,003\mu\text{m}$  (μεσοπόροι).

Και τα δύο τμήματα είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου γίνονται απ' ευθείας, η καταγραφή της καμπύλης εισδυσής – απομάκρυνσης του υδραργύρου, ο υπολογισμός του ολικού ειδικού όγκου  $V_{cum}$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ), της ειδικής επιφάνειας  $S$  των πόρων ( $\text{m}^2/\text{g}$ ), της μέσης ακτίνας  $r$  των πόρων ( $\mu\text{m}$ ), της φαινόμενης και διορθωμένης φαινόμενης πυκνότητας  $d_{bulk}$  και  $d_{bulkcor}$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) και του ολικού ανοιχτού πορώδους  $\varepsilon_o$  (%) μέσω του λογισμικού milestone 2000.<sup>266</sup>

## 6.4 Φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας στα δομικά υλικά

### 6.4.1 Δοκιμές υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών και εμβάπτισης

#### 6.4.1.1 Δοκιμές υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων

Τα υπό εξέταση υλικά αρχικά υπέστησαν πειράματα υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εμβάπτισης τους σε απιονισμένο νερό. Πριν από τη πραγματοποίηση των δοκιμών, τα υπό εξέταση υλικά παρέμειναν σε κλίβανο και σε θερμοκρασία των  $60^\circ\text{C}$  για όσο χρόνο χρειαζόταν μέχρι να σταθεροποιηθεί η μάζα τους και στη συνέχεια παρέμειναν φυλαγμένα σε ξηραντήρα. Τόσο οι δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης όσο και οι δοκιμές εμβάπτισης πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία αέρα των  $25^\circ\text{C}$  ενώ η θερμοκρασία του νερού ήταν  $23,5^\circ\text{C}$  και η σχετική υγρασία είχε τιμή  $45 \pm 5\%$ .

Αρχικά κάθε δείγμα ζυγιζόταν για να προσδιοριστεί η ξηρή μάζα του και στη συνέχεια τοποθετούταν σε κλίνη άμμου εμποτισμένη με απιονισμένο νερό. Μεταξύ της επιφάνειας του δοκιμίου και της άμμου είχε τοποθετηθεί διηθητικό χαρτί. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, τα υπό εξέταση δοκίμια βρισκόνταν μερικώς βυθισμένα σε βάθος  $2 \pm 1$  mm από την ελεύθερη επιφάνεια του απιονισμένου νερού. Το δοκίμιο ζυγιζόταν σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ενώ το πείραμα ολοκληρωνόταν όταν σταθεροποιούταν η μάζα του δοκιμίου για τρεις συνεχόμενες ζυγίσεις.

Κατά τα πειράματα της υδαταπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση προσδιορίστηκαν το ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω τριχοειδών πόρων του υλικού ( $X_{cap.}$ ), ο ειδικός όγκος νερού μέσω τριχοειδών ( $T.C.V_{cap.}$ ) και το πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών πόρων του υλικού  $\varepsilon_{cap.}$  κάθε υλικού μαζί με τη τυπική τους απόκλιση.

<sup>266</sup> Μοροπούλου, Α. «Ποροσιμετρία Υδραργύρου». Διδακτικές Σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», ΕΜΠ, ακαδ. Έτος 2006 -2007.

Το ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω των τριχοειδών πόρων  $X_{cap.}$  του υλικού προσδιορίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$X_{cap.} = \frac{m_{sat}^{cap.} - m_{dry}}{m_{dry}} \times 100 \% \quad (6.1)$$

όπου  $m_{sat}^{cap.}$  η μάζα του νερού στον τριχοειδή κορεσμό του δείγματος, και  $m_{dry}$  η μάζα του ξηρού δείγματος.

Ο ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω τριχοειδών  $T.C.V_{cap.}$  του υλικού προσδιορίζεται βάσει της σχέσης:

$$T.C.V_{cap.} = \frac{X_{cap.}}{d_{H_2O}} \quad (6.2)$$

όπου  $d_{H_2O}$  η πυκνότητα του νερού υπολογισμένη στη θερμοκρασία του πειράματος.

Το πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών πόρων  $\epsilon_{cap.}$  (%) κάθε υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_{cap.} = \frac{T.C.V_{cap.} \times m_{dry}}{V_{total}} \times 100 \% \quad (6.3)$$

όπου  $V_{total}$  ο συνολικός όγκος του δοκιμίου.

#### 6.4.1.2 Δοκιμές εμβάπτισης

Με την εμβάπτιση του υλικού σε νερό υπολογίζεται το μέγιστο ποσοστό υγρασίας που μπορεί να κατακρατήσει το υλικό χωρίς την άσκηση εξωτερικής πίεσης. Στο πρότυπο που ακολουθήθηκε το ποσοστό αυτό του νερού εκφράζεται ως το συνολικό ποσοστό του νερού που συγκρατείται επί ξηρής μάζας.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν βάσει του Ιταλικού κανονισμού NORMAL-7/81.<sup>267</sup> Στο πείραμα της εμβάπτισης χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 3, 4 ή 5 cm (ανάλογα με το υλικό) όπως συνέβη και στην τριχοειδή υδατοαπορρόφηση. Τα δοκίμια μετά από τη ξήρανσή τους στους 60°C, εμβαπτίστηκαν σε απιονισμένο νερό. Μετά τη σταθεροποίηση της μάζας τους, υπολογίζεται το ποσό του περιεχομένου νερού από τη μεταβολή της μάζας των δοκιμίων. Έτσι, προσδιορίστηκαν το ποσοστό ροφούμενης υγρασίας μέσω εμβάπτισης του υλικού ( $X_{imm.}$ ), ο ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω εμβάπτισης ( $T.C.V_{imm.}$ ) και το πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης  $\epsilon_{imm.}$  κάθε υλικού καθώς και η τυπική τους απόκλιση.

<sup>267</sup> NORMAL-7/81: Assorbimento d' acqua per immersione totale - Capacità di imbibizione: Water absorption with total immersion - immersion capacity, ICR.

Το ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω εμβάπτισης  $X_{imm}$  του υλικού προσδιορίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$X_{imm} = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{dry}} \times 100 \% \quad (6.4)$$

όπου  $m_{sat}$  η μάζα του νερού στον κορεσμό μετά από εμβάπτιση του δείγματος, και  $m_{dry}$  η μάζα του ξηρού δείγματος.

Ο ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω εμβάπτισης  $T.C.V_{imm}$  του υλικού προσδιορίζεται βάσει της σχέσης:

$$T.C.V_{imm} = \frac{X_{imm}}{d_{H_2O}} \quad (6.5)$$

όπου  $d_{H_2O}$  η πυκνότητα του νερού υπολογισμένη στη θερμοκρασία του πειράματος.

Το πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης  $\varepsilon_{imm}$  (%) κάθε υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{imm} = \frac{T.C.V_{imm} \times m_{dry}}{V_{total}} \times 100 \% \quad (6.6)$$

όπου  $V_{total}$  ο συνολικός όγκος του δοκιμίου.

#### 6.4.2 Τριχοειδής αναρρίχηση

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας είναι ο ίδιος με αυτόν της προηγούμενης παραγράφου. Τα υπό εξέταση υλικά είναι αυτά που περιγράφονται στον πίνακα 6.1.

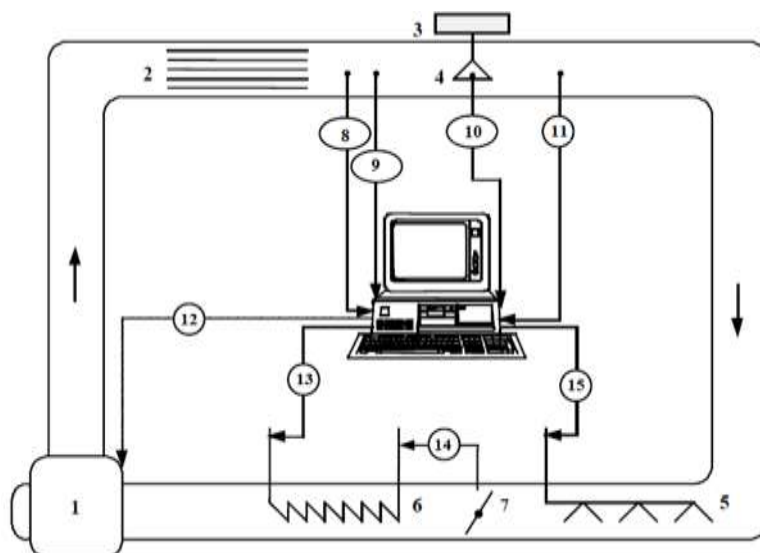
Η πειραματική διαδικασία σε ένα πείραμα τριχοειδούς αναρρίχησης είναι πολύ κοινή και το ίδιο το πείραμα μπορεί να χωριστεί σε δυο στάδια. Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, η θέση του μετώπου υγρασίας στο υλικό πλησιάζει σταδιακά την επάνω πλευρά του δοκιμίου και η υδαταπορρόφηση ελέγχεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις. Η ποσότητα του απορροφούμενου νερού υπολογίζεται με ζυγίσεις των δειγμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου, το μέτωπο υγρασίας έχει φτάσει το πάνω μέρος του δείγματος και δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στη μάζα του δοκιμίου διότι το ποσοστό υγρασίας έχει πλέον φτάσει το ποσοστό της υγρασίας τριχοειδούς κορεσμού ( $w_{cap}$ ).

#### 6.4.3 Ξήρανση

Η πειραματική διαδικασία σε ένα πείραμα ξήρανσης είναι πολύ κοινή. Το κάθε δοκίμιο αρχικά ζυγίζεται και αφού προσδιοριστεί η αρχική του υγρασία, τοποθετείται προς

ξήρανση. Η ποσότητα της υγρασίας υπολογίζεται με ζυγίσεις των δειγμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το πείραμα ολοκληρώνεται όταν σταθεροποιηθεί η μάζα του ζυγισμένου δοκιμίου. Στο σημείο αυτό προσδιορίζεται και η υγρασία ισορροπίας του κάθε δοκιμίου αφαιρώντας τη ξηρή μάζα του από την σταθερή μάζα στο τέλος του πειράματος.

Τα πειράματα ξήρανσης σε ρεύμα αέρα πραγματοποιήθηκαν στον προ-ημιβιομηχανικό ξηραντήρα ρεύματος αέρα, του εργαστηρίου "Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών" του ΕΜΠ. Ο ξηραντήρας αυτός αποτελείται από ένα τούνελ αέρα τετραγωνικής διατομής με διαστάσεις  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  έχει μήκος 4m, ύψος 2,5m ενώ οι καταγραφείς ανοχές στη θερμοκρασία και στη σχετική υγρασία ήταν  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  και  $\pm 0,5\%$  αντίστοιχα. Ο συγκεκριμένος ξηραντήρας αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα: το τμήμα ελέγχου του ρυθμού ροής του αέρα, το τμήμα ελέγχου θέρμανσης, το τμήμα ελέγχου του υγραντήρα και το τμήμα ελέγχου του ανεμιστήρα. Στο παρακάτω Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του εν λόγω ξηραντήρα.



- |                             |                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1. Ανεμιστήρας              | 9. Θερμοκρασία υγρού βολβού           |
| 2. Ευθυγράμμιση ροής        | 10. Βάρος και θερμοκρασία υλικού      |
| 3. Ζυγός                    | 11. Ταχύτητα αέρα                     |
| 4. Υλικό                    | 12. Έλεγχος ανεμιστήρα                |
| 5. Υγραντήρας               | 13. Θερμοστατικός έλεγχος αντιστάσεων |
| 6. Ηλεκτρικές αντιστάσεις   | 14. Έλεγχος ροής αέρα                 |
| 7. Διακόπτης ροής           | 15. Έλεγχος υγραντήρα                 |
| 8. Θερμοκρασία ξηρού βολβού |                                       |

**Σχήμα 6.1:** Σχηματικό διάγραμμα του ξηραντήρα ρεύματος αέρα και συνοπτική ερμηνεία των μερών του.

Η κυκλοφορία του αέρα στο ξηραντήρα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα ισχύος 0,5 hp ενώ ο έλεγχος της ροής του αέρα πραγματοποιείται μέσω ενός αναλογικού ποτενσιόμετρου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται ταχύτητες του αέρα σε ένα εύρος από 0,1 έως 10m/s. Η ταχύτητα του αέρα μετριέται με τη βοήθεια ενός ανεμομέτρου.

Η θέρμανση του αέρα πραγματοποιείται με τη βοήθεια θερμαντικών στοιχείων διαφορετικών μηκών ενώ η συνολική ηλεκτρική ισχύς τους είναι 30 KW. Οι αντιστάσεις των στοιχείων αυτών μπορούν να τεθούν σε λειτουργία με εξωτερικούς διακόπτες και η επιθυμητή θερμοκρασία μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλους συνδυασμούς στοιχείων.

Η ύγρανση του αέρα στον ξηραντήρα επιτυγχάνεται μέσω μιας συσκευής ύγρανσης ενώ όλες οι θερμοκρασίες μετρώνται με τη βοήθεια θερμοζευγών. Η υγρασία του αέρα υπολογίζεται από τη θερμοκρασία ξηρού και υγρού βολβού, που μετράται από τα θερμοζεύγη ξηρού και υγρού βολβού, αλλά και από υγρόμετρο.

Ο έλεγχος της κατάστασης του αέρα στο ξηραντήρα καθώς και η καταγραφή των πειραματικών δεδομένων, γίνονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ο οποίος είναι εφοδιασμένος με κατάλληλη εργαστηριακή κάρτα για την ανάγνωση και τη μετάδοση αναλογικών και ψηφιακών σημάτων.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης σε όλα τα υπό εξέταση υλικά έως ότου επιτευχθεί το ποσοστό τριχοειδούς κορεσμού υγρασίας για κάθε υλικό. Αμέσως μετά τα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης, συνεχιζόταν για κάθε δείγμα η διαδικασία της ξήρανσης για να καθοριστεί η επίδραση των μεταβλητών της διαδικασίας στη κινητική της ξήρανσης. Οι μεταβλητές οι οποίες ελήφθησαν υπόψη ήταν η θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητα του αέρα ενώ η ενεργότητα του αέρα ήταν ελεγχόμενη και ίση με  $0,35 \pm 0,1$  κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρία δείγματα από κάθε υλικό με διαστάσεις  $3 \times 3 \times 3 \pm 0,1 \text{ cm}^3$  ενώ τα πειράματα ξήρανσης πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (25, 30 και 40°C) και σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες του αέρα (1, 3 και 5m/s) για κάθε δείγμα. Ο σχεδιασμός που ακολουθήθηκε για τα πειράματα της ξήρανσης ήταν ο σταυροειδής σχεδιασμός. Σύμφωνα με αυτόν, στην αρχή επιλέχθηκε μια θερμοκρασία αναφοράς (30°C) και μια ταχύτητα αναφοράς του αέρα (3m/s) και πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης σε όλα τα δείγματα. Στη συνέχεια ακολούθησαν πειράματα σε θερμοκρασίες 25 και 40°C με σταθερή ταχύτητα αέρα στα 3m/s και τέλος πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε ταχύτητες αέρα 1 και 5m/s σε σταθερή θερμοκρασία των 30°C.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις διάφορες μεθόδους χαρακτηρισμού των υπό εξέταση υλικών. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM), τις δοκιμές υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων και εμβάπτισης καθώς και τα αποτελέσματα από τη Πορομετρία Υδραργύρου (MIP) για τα δομικά υλικά.

### 7.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM)

Παρακάτω ακολουθούν φυσικές μακροσκοπικές φωτογραφίες καθώς και φωτογραφίες από το μικροσκόπιο οπτικών ινών σε χαρακτηριστικές μεγεθύνσεις (25× & 50×) σε χαρακτηριστικά δείγματα των υπό εξέταση υλικών.

#### Πλίνθος *BRI*

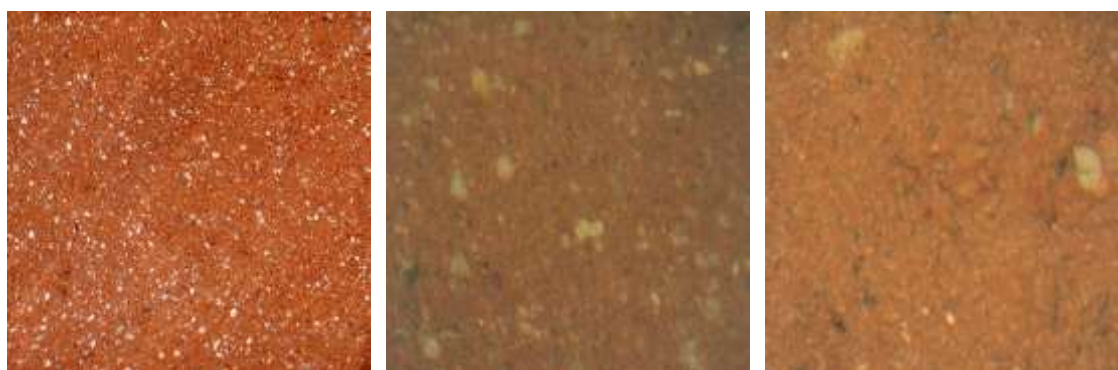


Μακρο-φωτογραφία

25×

50×

#### Πλίνθος *BRM*



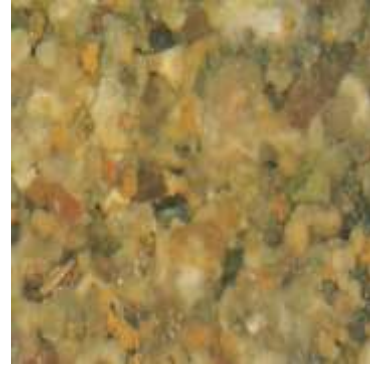
Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών

Μακρο-φωτογραφία

25×

50×

**Λίθος *SRH***



Μακρο-φωτογραφία

25×

50×

**Λίθος *SRY***

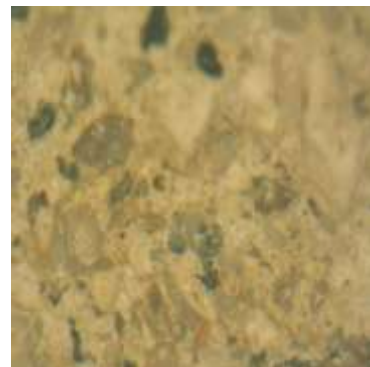
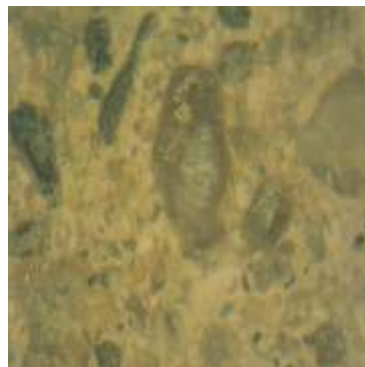


Μακρο-φωτογραφία

25×

50×

**Κονίαμα *mca20/80***



Μακρο-φωτογραφία

25×

50×

**Κονίαμα *mca25/75***

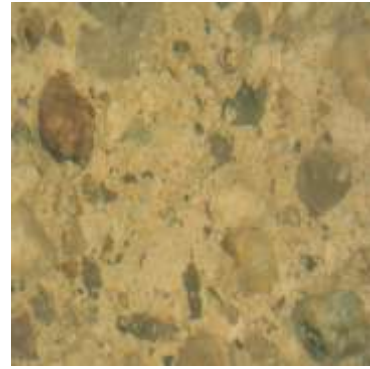




Μακρο-φωτογραφία



25x



50x

**Κονίαμα *mca30/70***



Μακρο-φωτογραφία

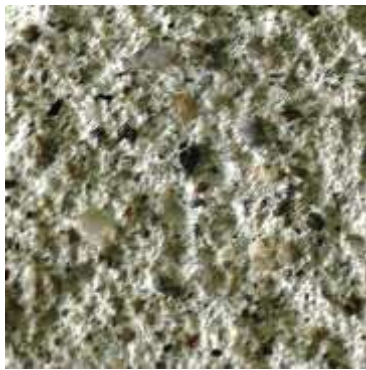


25x

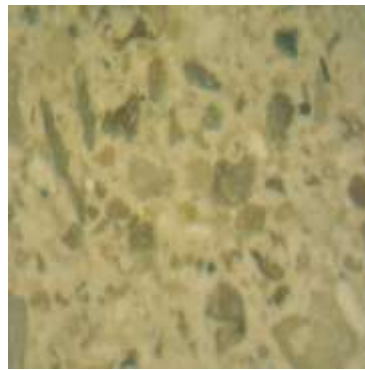


50x

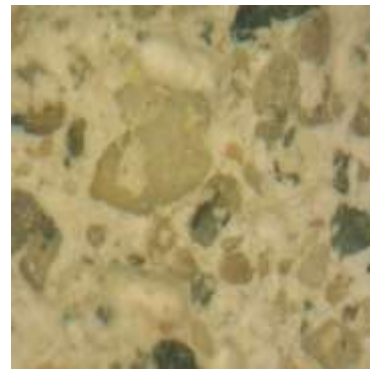
**Κονίαμα *mcb20/80***



Μακρο-φωτογραφία

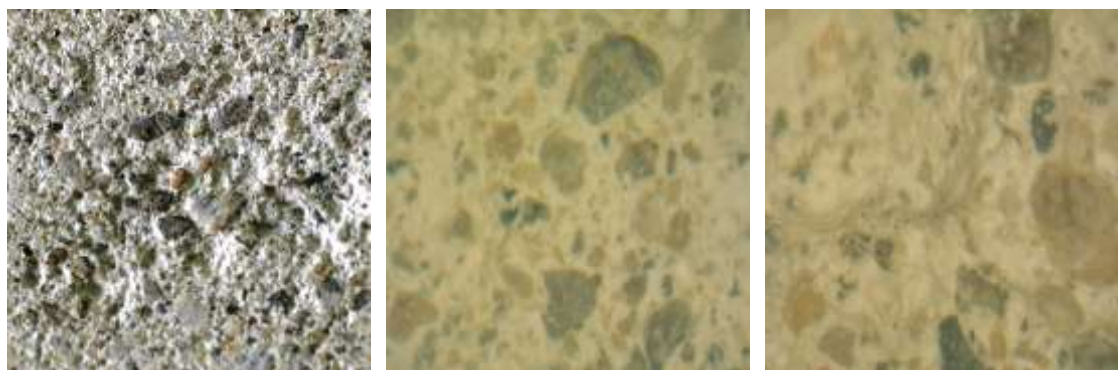


25x



50x

**Κονίαμα *mcb25/75***

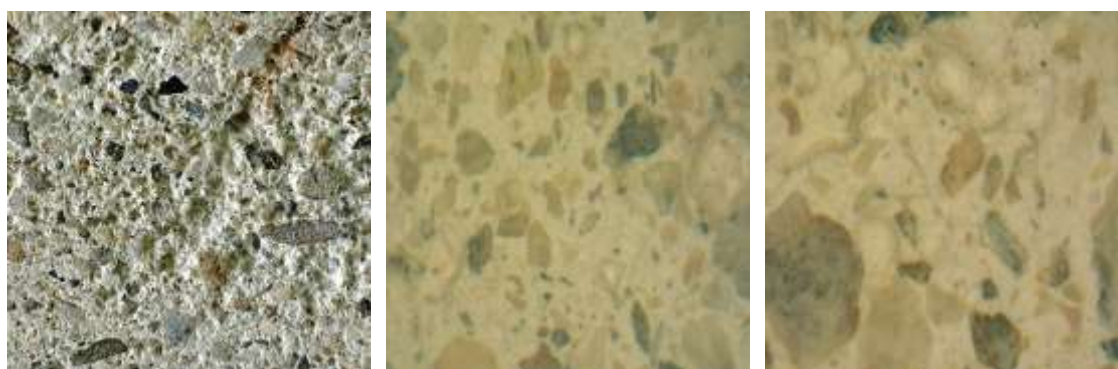


Μακρο-φωτογραφία

25x

50x

**Κονίαμα *mcb30/70***



Μακρο-φωτογραφία

25x

50x

**Σχήμα 7.1:** Μακροσκοπικές εικόνες και αποτελέσματα FOM σε διαφορετικές μεγεθύνσεις των υπό εξέταση δομικών υλικών.

Πλίνθοι:

Ο πλίνθος *BRI* έχει ένα ανοικτό κεραμιδί χρώμα, περιέχει μικρά αδρανή διαφορετικών σχημάτων ενώ εμφανίζει πολλούς και μικρούς πόρους διάσπαρτους σε όλη την έκταση του υλικού. Ο πλίνθος *BRM* έχει πιο έντονο κεραμιδί χρώμα σε σχέση με τον *BRI*, περιέχει πολλά, μικρά αδρανή, ομοιόμορφα κατανεμημένα στη μάζα του ενώ οι πόροι του είναι κυρίως μικρού μεγέθους.

Λίθοι:

Ο πωρόλιθος Ρόδου (*SRH*) παρουσιάζει ανομοιομορφία σε όλη τη μάζα του. Επίσης η επιφάνεια του εμφανίζει έντονη ποικιλία στα χρώματα ενώ εμφανής είναι και η ύπαρξη μεγάλων πόρων διαφορετικών σχημάτων σε αυτόν. Αντίθετα, ο πωρόλιθος Ρεθύμνου (*SRY*) παρουσιάζει ένα κιτρινωπό χρώμα, είναι πιο συμπαγής από τον πωρόλιθο Ρόδου με περισσότερους και μικρότερους σε μέγεθος πόρους.

Κονιάματα:

Τα κονιάματα με βάση τη φυσική υδραυλική άσβεστο *NHL2* εμφανίζουν ένα υποκίτρινο, φουντουκί-ροζ χρώμα, έχουν αρκετή ανομοιομορφία και τραχύτητα στην επιφάνεια τους ενώ είναι εμφανής η αναλογία της κονιάς όσο αυξάνει το ποσοστό της στο κονίαμα. Τα κονιάματα με βάση τη φυσική υδραυλική άσβεστο *NHL3.5* εμφανίζουν ένα πιο υπόλευκο χρώμα σε σχέση με τα κονιάματα *mca*, έχουν μεγαλύτερη συνοχή και μικρότερη ανομοιογένεια στην επιφάνειά τους σε σχέση με τα κονιάματα *mca* ενώ και εδώ είναι εμφανής η αύξηση της ποσότητας της κονιάς όσο αυξάνει το ποσοστό της στο κονίαμα. Όσον αφορά τους πόρους, παρουσιάζεται μια ομοιογένεια στην κατανομή και το μέγεθός τους σε όλα τα κονιάματα ενώ τα μεγέθη τους εμφανίζονται παραπλήσια.

## 7.2 Δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης – εμβάπτισης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης και εμβάπτισης για όλα τα υπό εξέταση υλικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Επίσης στο Πίνακα 7.1 αναγράφεται και ο λόγος  $X_{cap.} / X_{imm.}$  (%) για κάθε υλικό ο οποίος είναι ενδεικτικός για το ποσοστό των πόρων οι οποίοι συμμετέχουν στο φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης για κάθε υλικό.

Όπως φαίνεται και στο Πίνακα 7.1, οι τιμές του πορώδους προσβάσιμου στο νερό μέσω των τριχοειδών πόρων είναι χαμηλότερες από τις τιμές του πορώδους προσβάσιμου στο νερό μέσω εμβάπτισης για όλα τα υλικά γεγονός που ήταν αναμενόμενο μιας και οι πόροι που συμμετέχουν στη τριχοειδή αναρρίχησης είναι μέρος του συνόλου των πόρων κάθε υλικού. Αυτό φαίνεται επίσης και από το λόγο  $X_{cap.} / X_{imm.}$  (%) ο οποίος είναι μικρότερος από το 100% για κάθε υλικό. Τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα εμφανίζονται και για τις τιμές του ειδικού ειδικού όγκου κάθε υλικού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης και εμβάπτισης.

Όσον αφορά τις τιμές του πορώδους προσβάσιμου στο νερό, το κεραμικό *BRI* έχει τις υψηλότερες τιμές τόσο κατά την τριχοειδή αναρρίχηση όσο και κατά την εμβάπτιση. Αντίθετα ο λίθος *SRH* εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές πορώδους ενώ τα κονιάματα παρουσιάζουν τιμές πορώδους προσβάσιμου στο νερό μεταξύ του 21% και 23% περίπου.

**Πίνακας 7.1:** Αποτελέσματα δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης και εμφάνισης για τα υπό εξέταση υλικά.

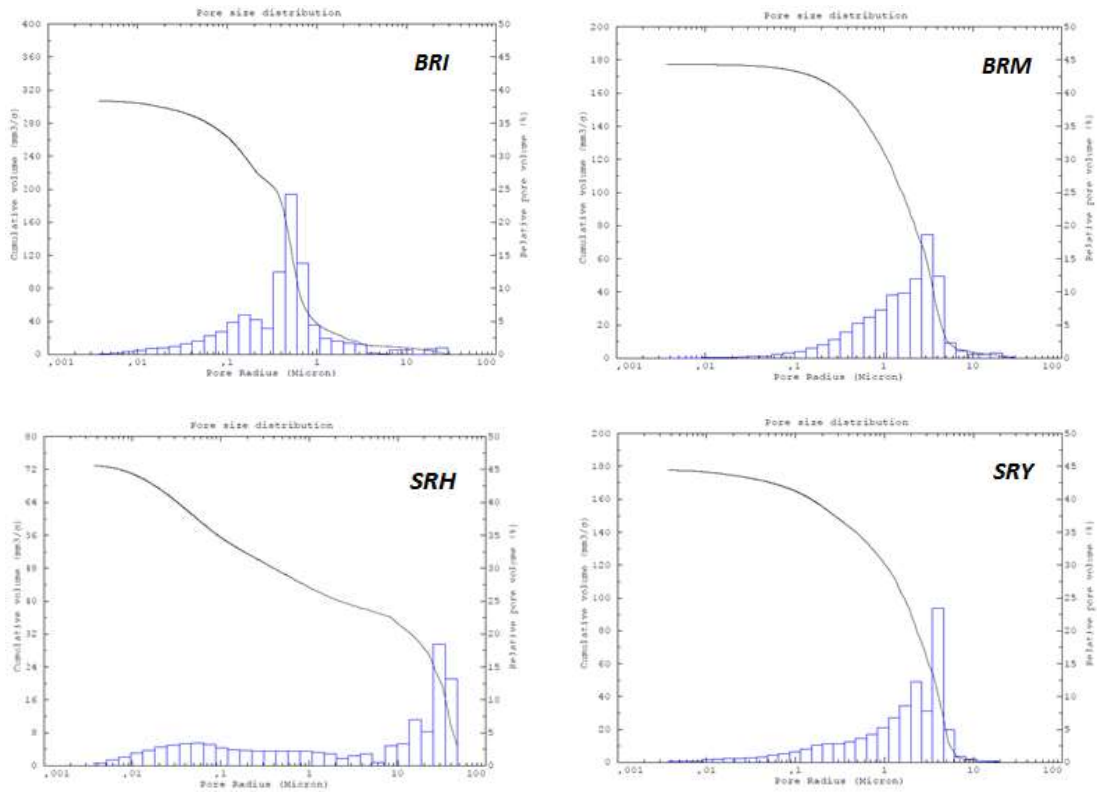
Υλικά	$X_{cap.}$ (%)	SD	T.C.V. <sub>cap.</sub> (mm <sup>3</sup> /g)	SD	$\epsilon_{cap.}$ (%)	SD	$X_{imm.}$ (%)	SD	T.C.V. <sub>imm.</sub> (mm <sup>3</sup> /g)	SD	$\epsilon_{imm.}$ (%)	SD	$X_{cap.}/X_{imm.}$ (%)	$\epsilon_{cap.}/\epsilon_{imm.}$ (%)
<b>BRI</b>	25.67	1.02	257.41	10.25	36.98	1.52	27.73	0.80	278.02	8.00	39.94	1.18	92.6	92.6
<b>BRM</b>	11.67	0.18	117.01	1.76	20.47	0.48	13.33	0.23	133.64	2.27	23.38	0.61	87.6	87.6
<b>SRH</b>	6.11	0.27	62.24	1.91	12.57	0.28	7.02	0.38	71.54	3.38	14.45	0.52	86.9	87.0
<b>SRY</b>	12.52	0.79	129.75	3.18	23.06	0.33	14.52	0.75	149.71	2.67	26.61	0.22	86.2	86.7
<b>mca20/80</b>	12.01	0.03	120.42	0.27	22.56	0.20	12.42	0.07	124.51	0.70	23.07	0.25	96.7	97.8
<b>mca25/75</b>	11.59	0.14	116.22	1.39	21.60	0.06	11.89	0.10	119.19	0.97	22.15	0.16	97.5	97.5
<b>mca30/70</b>	11.98	0.13	120.08	1.32	22.22	0.18	12.45	0.20	124.84	2.04	23.10	0.07	96.2	96.2
<b>mcb20/80</b>	11.99	0.13	120.24	1.33	22.14	0.23	12.08	0.18	121.14	1.76	22.31	0.44	99.3	99.2
<b>mcb25/75</b>	11.75	0.10	117.82	1.05	22.22	0.12	11.89	0.17	119.21	1.70	22.29	0.26	98.8	98.6
<b>mcb30/70</b>	11.47	1.15	123.19	0.02	21.43	2.11	12.46	0.15	124.91	1.55	22.77	0.28	98.6	94.1

$X_{cap.}$  (%): ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω τριχοειδών πόρων του υλικού,  $X_{imm.}$  (%): ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω εμφάνισης του υλικού,  $T.C.V._{cap.}$ : ο ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω τριχοειδών,  $T.C.V._{imm.}$ : ο ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω εμφάνισης,  $\epsilon_{cap.}$ : το πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών πόρων του κάθε υλικού,  $\epsilon_{imm.}$ : το πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω εμφάνισης του κάθε υλικού μαζί με τη τυπική τους απόκλιση SD.

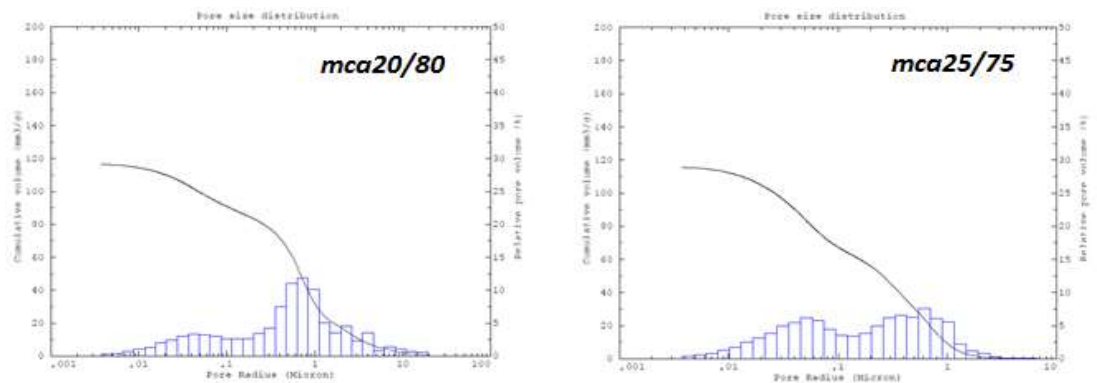


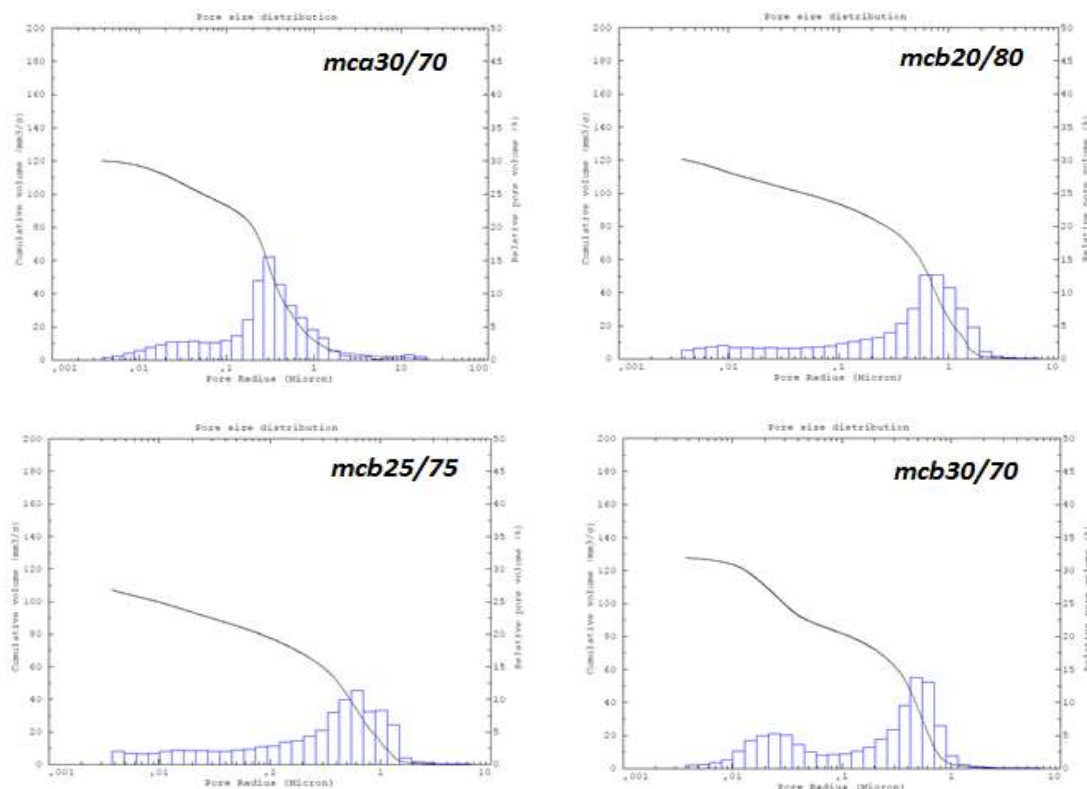
### 7.3 Πορομετρία Υδραργύρου (MIP)

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πορομετρίας υδραργύρου ενώ στα Σχήματα 7.2 & 7.3 φαίνεται ενδεικτικά η ογκομετρική κατανομή των πόρων ως προς τις ακτίνες τους για τα υπό εξέταση υλικά.



Σχήμα 7.2: Λογαριθμικό διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής των πόρων ως προς τις ακτίνες τους για τους πλίνθους και τους λίθους.





**Σχήμα 7.3:** Λογαριθμικό διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής των πόρων ως προς τις ακτίνες τους για τα κονιάματα *mca* και *mcb*.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.2 και του Σχήματος 7.2, ο πλίνθος *BRI* εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές του ολικού πορώδους και του ολικού ειδικού όγκου από όλα τα υπό εξέταση υλικά ενώ η κατανομή του μεγέθους των πόρων του εμφανίζει μέγιστη τιμή στη μέση ακτίνα των πόρων του (κοντά στα 0,5nm) γεγονός που μαρτυράει τη μεγάλη υδροφιλία του ενώ ταυτόχρονα εμφανίζει σχετικά μικρή μέση ακτίνα πόρων. Το κεραμικό *BRM* εμφανίζει μικρότερο ολικό πορώδες και πιο ευρεία κατανομή του μεγέθους των πόρων του σε σχέση με το *BRI* αλλά η μέση ακτίνα πόρων του είναι περίπου 6 φορές μεγαλύτερη.

Ο λίθος *SRH* εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές ολικού πορώδους και ολικού ειδικού όγκου σε σχέση με όλα τα εξεταζόμενα υλικά ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη μέση ακτίνα πόρων σε σχέση με αυτά. Η κατανομή του μεγέθους των πόρων του είναι ευρεία με μέγιστο στη μέση ακτίνα τους (κοντά στα 30nm). Ο λίθος *SRY* έχει σχεδόν διπλάσιο ολικό πορώδες από τον λίθο *SRH*, εμφανίζει πολύ μικρότερη μέση ακτίνα πόρων σε σχέση με αυτόν ενώ η κατανομή των πόρων του είναι σε μικρότερες ακτίνες με μέγιστο κοντά στη μέση ακτίνα του.

Όσον αφορά τα κονιάματα (βλέπε Πίνακα 7.2 & Σχήμα 7.3), εμφανίζουν μέσες τιμές ολικού πορώδους που κυμαίνονται από 22 έως 24% και μέσες ακτίνες πόρων με τιμές από 0,45 έως 0,75μm ενώ και οι τιμές του ολικού ειδικού τους όγκου βρίσκονται σε μέσα επίπεδα με τιμές από 115 έως 125 mm<sup>3</sup>/g. Τα κονιάματα *mca20/80* και *mca30/70* εμφανίζουν μια



ευρεία κατανομή πόρων με μέγιστο κοντά στη μέση ακτίνα τους ενώ το κονιάμα *mca25/75* εμφανίζει ένα πολύ πιο μικρό εύρος ακτινών πόρων μετατοπισμένο σε μικρότερες ακτίνες. Οι κατανομές πόρων των κονιαμάτων *mcb* είναι ευρείες, μετατοπισμένες σε μικρότερες γενικά ακτίνες πόρων ενώ τα κονιάματα *mcb30/70* εμφανίζουν δικόρυφη κατανομή με τις κορυφές αρκετά μακριά από τη μέση ακτίνα πόρων τους. Με μια πιο προσεκτική μελέτη παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το ποσοστό κονιάς στο κονιάμα μιας κατηγορίας, μειώνεται η μέση ακτίνα πόρων του κονιάματος. Από τα κονιάματα κάθε κατηγορίας (*mca* και *mcb*), τα κονιάματα 25/75 παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές ολικού ειδικού όγκου και ολικού πορώδους. Ακολουθούν τα κονιάματα 20/80 ενώ τα κονιάματα 30/70 εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές ολικού ειδικού όγκου και ολικού πορώδους της κατηγορίας τους.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

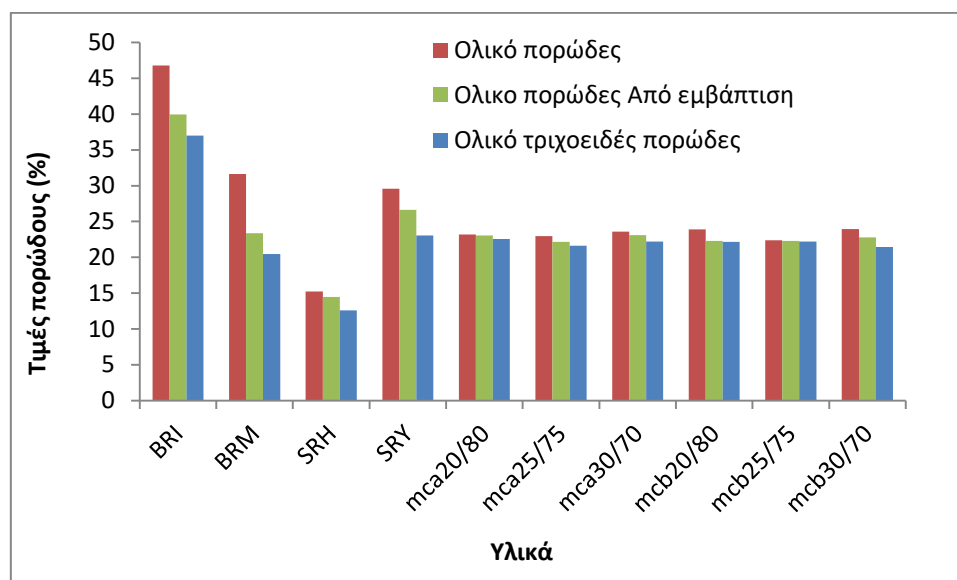
**Πίνακας 7.2:** Αποτελέσματα της πορομετρίας υδραργύρου για τα υπό εξέταση υλικά.

Υλικά	Ολικός ειδικός όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	SD	Διορθωμένη Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	SD	Ολικό πορώδες (%)	SD	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	SD	Ειδική επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)	SD	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	SD
<u>Πλίνθοι</u>												
<i>BRI</i>	314.00	4.90	2.801	0.030	46.79	0.65	0.52	0.02	4.14	0.07	1.490	0.003
<i>BRM</i>	171.74	3.92	2.697	0.007	31.65	0.44	3.08	0.01	0.53	0.01	1.843	0.016
<u>Λίθοι</u>												
<i>SRH</i>	67.33	5.98	2.669	0.015	15.22	1.21	29,58	0,06	1.68	0.06	2.263	0.023
<i>SRY</i>	183.69	4.46	2.671	0.018	32.91	0.65	2.57	0.87	1.74	0.19	1.792	0.010
<u>Κονιάματα</u>												
<i>mca20/80</i>	117.15	4.91	2.578	0.016	24.48	0.82	0.73	0.01	2.70	0.23	1.980	0.014
<i>mca25/75</i>	115.74	1.58	2.574	0.004	23.23	0.22	0.62	0.01	3.91	0.37	1.983	0.009
<i>mca30/70</i>	120.55	1.84	2.560	0.009	23.62	0.30	0.45	0.14	3.25	0.12	1.956	0.007
<i>mcb20/80</i>	123.29	3.45	2.545	0.007	23.57	0.48	0.75	0.08	4.00	0.29	1.937	0.016
<i>mcb25/75</i>	113.82	8.88	2.533	0.007	23.06	1.38	0.62	0.01	4.66	0.05	1.967	0.032
<i>mcb30/70</i>	125.01	6.00	2.522	0.008	22.89	0.92	0.55	0.07	4.55	0.52	1.918	0.018

Με σκοπό να πραγματοποιηθεί ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων της πορομετρίας υδραργύρου με τις δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης και εμφάνισης των υλικών, υπολογίστηκε το ποσοστό του ολικού πορώδους που μετέχει στη τριχοειδή αναρρίχηση και στην εμφάνιση και τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

**Πίνακας 7.3:** Αποτελέσματα του ποσοστού ολικού πορώδους που μετέχει στη τριχοειδή αναρρίχηση για όλα τα υλικά.

Υλικά	Ολικό πορώδες από MIP (%)	Ολικό πορώδες από εμφάνιση (%)	Ολικό τριχοειδές πορώδες (%)
<u>Πλίνθοι</u>			
BRI	46.79	39.94	36.98
BRM	31.65	23.38	20.47
<u>Λίθοι</u>			
SRH	15.22	14.45	12.57
SRY	32.91	26.61	23.06
<u>Κονιάματα</u>			
mca20/80	24.48	23.07	22.56
mca25/75	23.23	22.15	21.60
mca30/70	23.62	23.10	22.22
mcb20/80	23.57	22.31	22.14
mcb25/75	23.06	22.29	22.22
mcb30/70	22.89	22.77	21.43



**Σχήμα 7.4:** Ολικό πορώδες, ολικό πορώδες από εμφάνιση και ολικό τριχοειδές πορώδες των δομικών υλικών.

Στο σχήμα 7.4 φαίνεται σε κοινό διάγραμμα το ολικό πορώδες, το ολικό πορώδες προσβάσιμο στο νερό από εμβάπτιση και το ολικό τριχοειδές πορώδες για όλα τα υπό εξέταση δομικά υλικά. Όπως φαίνεται και από το γράφημα αυτό, το μεγαλύτερο ποσοστό τριχοειδών πόρων το έχει το κονίαμα *mc20/80*. Από την άλλη πλευρά, το χαμηλότερο ποσοστό τριχοειδών πόρων παρατηρείται στον λίθο *SRV*. Γενικότερα σε όλα τα κονιάματα έχουμε αυξημένα ποσοστά τριχοειδών πόρων ενώ επιβεβαιώνεται ότι ο πλίνθος *BRI* εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές ολικού και ολικού τριχοειδούς πορώδους ενώ ο λίθος *SRH* παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές και των δύο ολικών πορωδών.

## 7.4 Μερικά Συμπεράσματα

Η πορομετρία υδραργύρου είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ανάλυσης της πορώδους δομής των υλικών. Επιπλέον, με την πορομετρία μπορούν να προσδιοριστούν χρήσιμες παράμετροι της μικροδομής των υλικών όπως ο ολικός ειδικός όγκος, η ειδική επιφάνεια, το ολικό πορώδες η μέση ακτίνα πόρων κ.ά. Από την άλλη πλευρά, οι δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης και εμβάπτισης σε απιονισμένο νερό, σε συνδιασμό με τη FOM μικροσκοπία, παρέχουν επιπρόσθετα βασικά στοιχεία της μικροδομής των υλικών όπως το πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω των τριχοειδών πόρων και μέσω εμβάπτισης των υλικών, τα ποσοστά τριχοειδούς απορροφούμενης υγρασίας και απορροφούμενης υγρασίας μέσω εμβάπτισης, κ.ά.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν εικόνες από μακροφωτογραφήσεις και από FOM μικροσκοπία των υπό εξέταση υλικών, μετρήσεις με την μέθοδο της πορομετρίας Υδραργύρου καθώς και δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης και εμβάπτισης για όλα τα εξεταζόμενα υλικά με σκοπό τον προσδιορισμό των ανωτέρω παραμέτρων και στοιχείων της μικροδομής τους. Στη συνέχεια, επιτελέστηκε συσχέτιση των αποτελεσμάτων των παραπάνω τεχνικών μεταξύ τους και προσδιορίστηκε το ολικό τριχοειδές πορώδες των υλικών. Όσον αφορά τους λίθους και τους πλίνθους, βρέθηκε ότι ο πλίνθος *BRI* εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές πορώδους, ο λίθος *SRH* εμφανίζει τις χαμηλότερες ενώ ο πλίνθος *BRM* και ο λίθος *SRV* έχουν ενδιάμεσες τιμές πορώδους και περίπου ίσες μεταξύ τους. Όσον αφορά τα κονιάματα, αυτά εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές πορώδους, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

### 8.1 Εισαγωγή

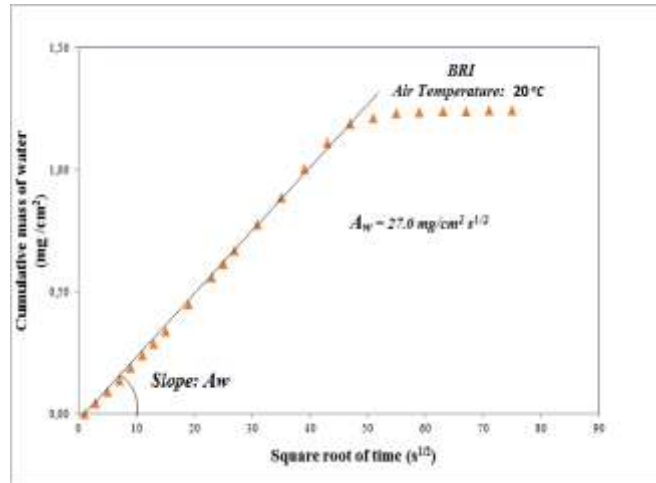
Η παρουσία του νερού είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς τόσο στα παραδοσιακά όσο και στα σύγχρονα κτήρια. Το νερό εισέρχεται με διάφορους τρόπους μέσα στα δομικά υλικά αλλά ο σημαντικότερος από αυτούς είναι η τριχοειδής αναρρίχηση. Με τα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης του νερού μέσω των τριχοειδών πόρων (συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης) ο οποίος χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους τους. Στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης διαφόρων κατηγοριών δομικών υλικών, σε θερμοκρασία 20°C, με τρεις διαφορετικούς τρόπους σύμφωνα με διαφορετικά διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Στη συνέχεια συγκρίνονται μεταξύ τους τα αποτελέσματα των τριών αυτών τρόπων με σκοπό να διερευνηθεί ποιός είναι ο καταλληλότερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών.

### 8.2 Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας

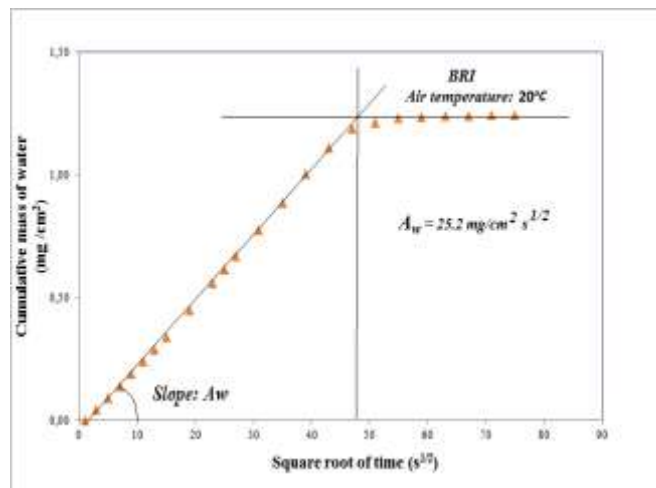
Αρχικά επιλέχθηκε για εξέταση ένα δομικό υλικό και πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης στους 20°C. Το υλικό επιλογής ήταν ο πλίνθος *BRI* εξαιτίας της υψηλής ομοιογένειας που εμφανίζει και της μεγάλης του υδροφιλίας. Εκτός αυτού ο συγκεκριμένος πλίνθος εμφανίζει υψηλή γραμμικότητα στο πρώτο και δεύτερο μέρος του συγκεκριμένου πειράματος υδαταπορρόφησης. Ακολουθώντας τη πειραματική διαδικασία, υπολογίστηκε ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης του πλίνθου *BRI* σύμφωνα με τις τρεις διαφορετικές προαναφερθείσες μεθόδους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης και με τα υπόλοιπα δομικά υλικά στους 20°C όπως αυτό συνίσταται και από τα περισσότερα πρότυπα και κανονισμούς και υπολογίστηκαν οι τιμές των συντελεστών τριχοειδούς αναρρίχησης σύμφωνα με τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους.

### 8.3 Αποτελέσματα-Συζήτηση

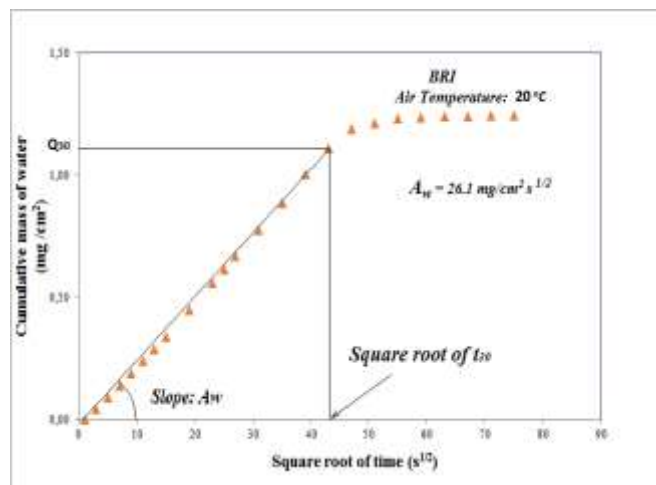
Στα σχήματα 8.1, 8.2 και 8.3 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων τριχοειδούς αναρρίχησης για τον πλίνθο *BRI* στους 20°C. Στα σχήματα αυτά φαίνεται και γραφικά πώς υπολογίζεται ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού.



**Σχήμα 8.1:** Υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  σύμφωνα με τη μέθοδο της μιας εφαπτομένης (One tangent method).



**Σχήμα 8.2:** Υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  σύμφωνα με τη μέθοδο των δύο εφαπτομένων (Two tangents method).



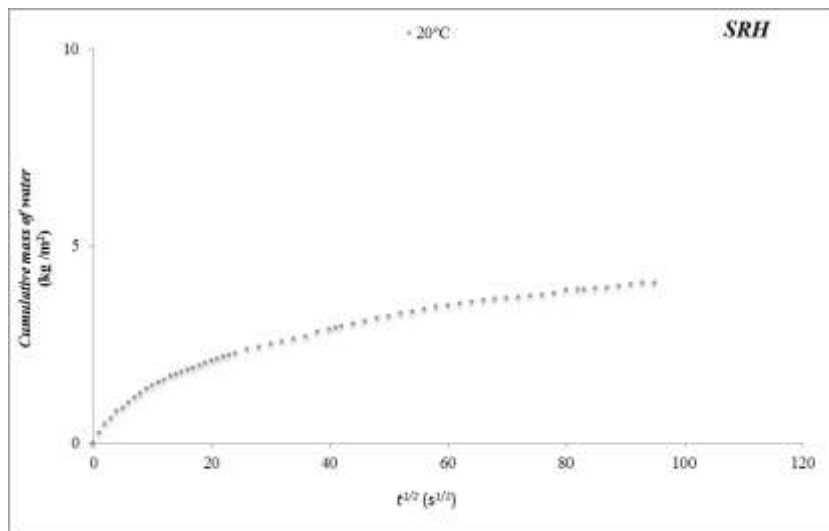
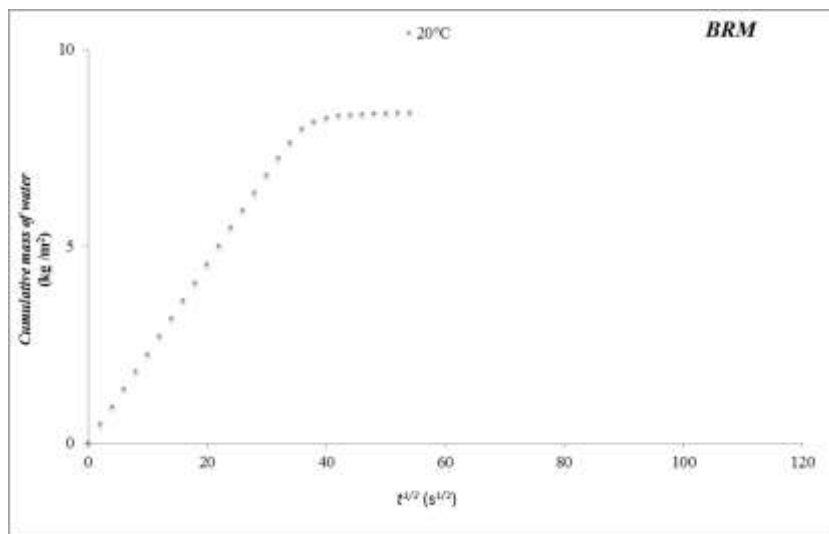
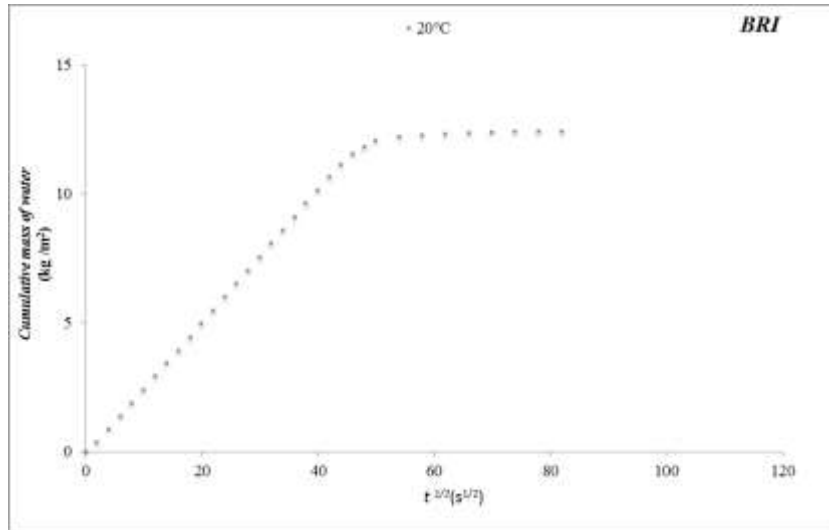
**Σχήμα 8.3:** Υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  σύμφωνα με τη μέθοδο των 30 λεπτών (30 minutes method).

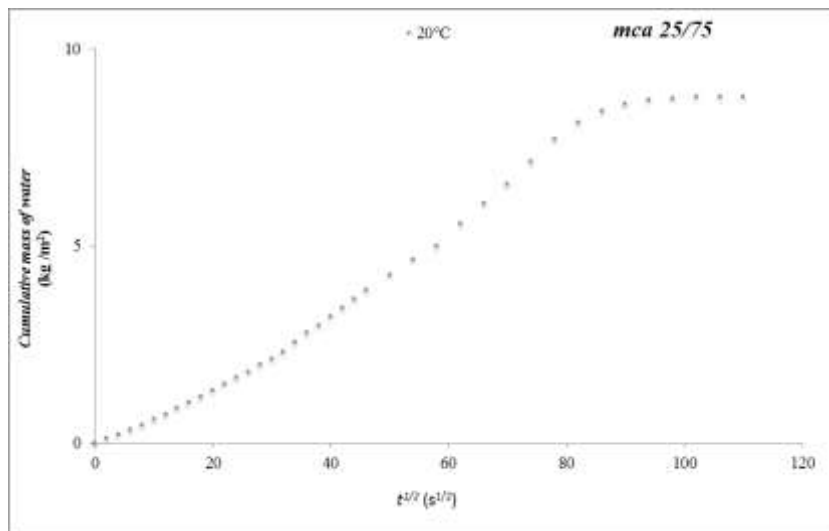
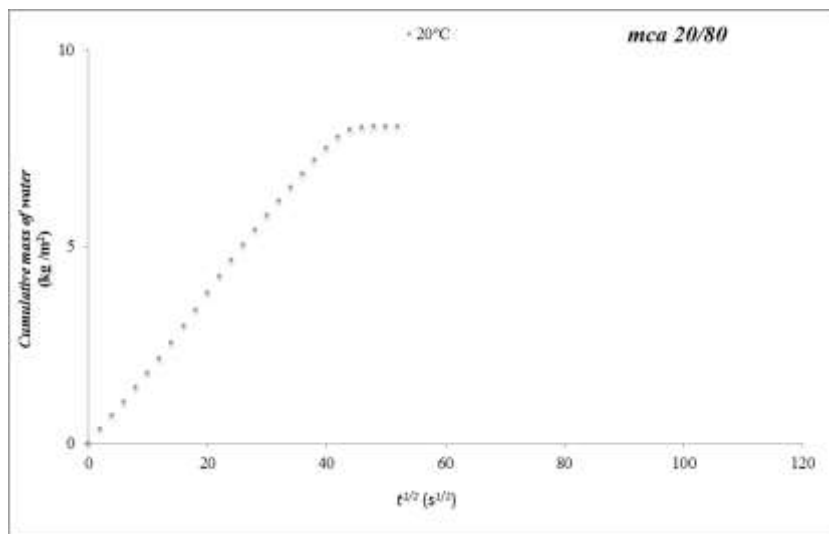
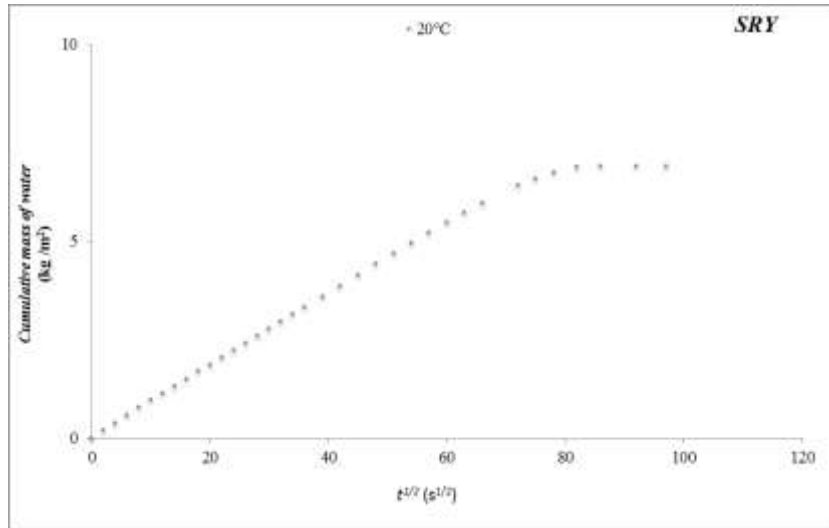


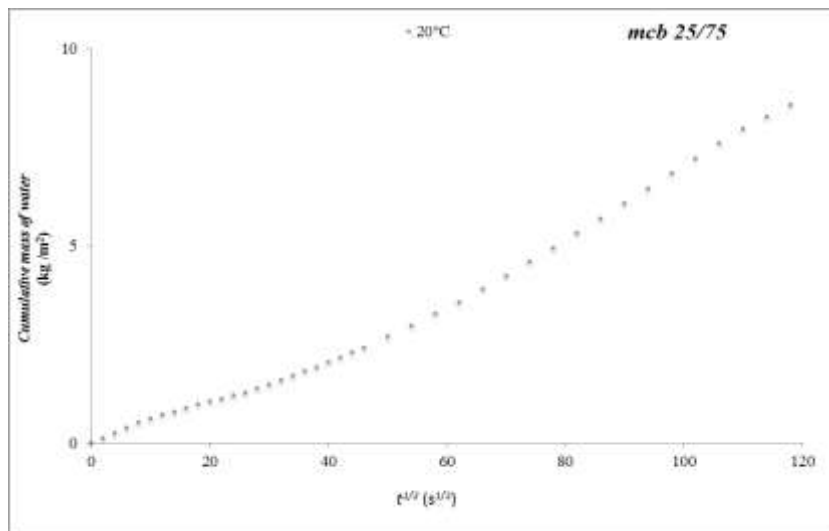
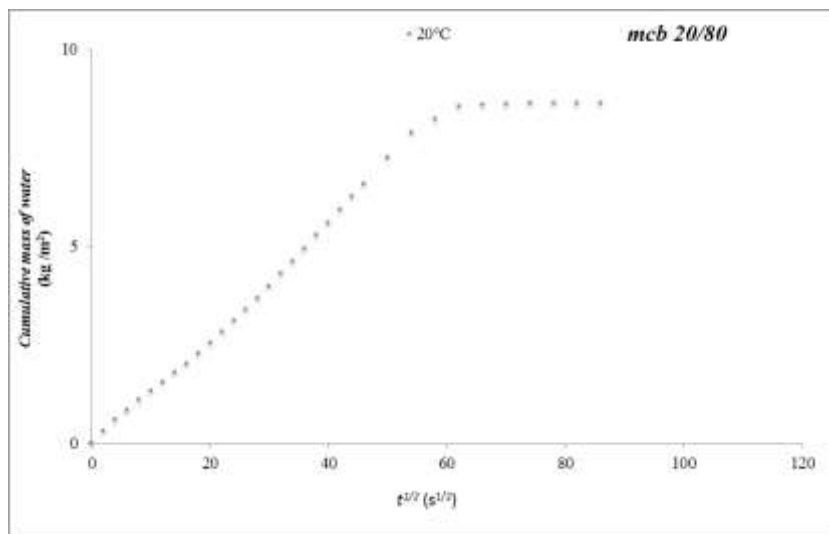
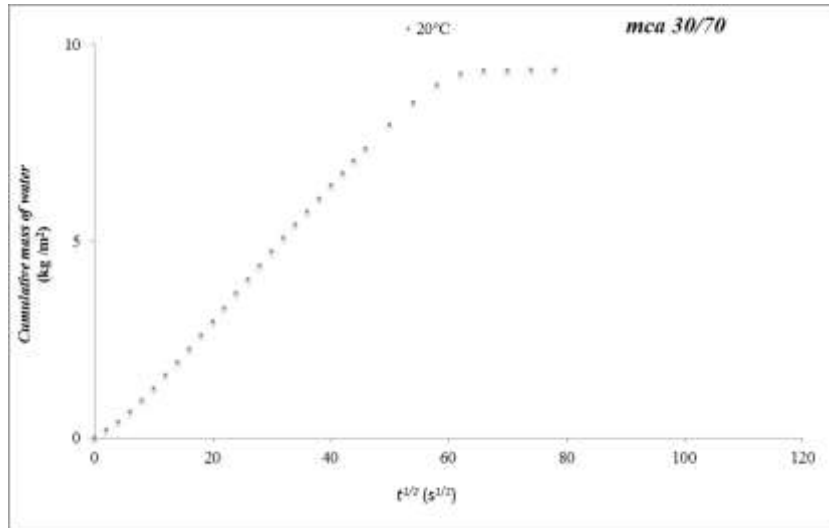
Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης όλων των δομικών υλικών στους 20°C όπως αυτά είναι υπολογισμένα και με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους ενώ στο Σχήμα 8.4 παρουσιάζονται οι κινητικές τριχοειδούς αναρρίχησης για όλα τα υπό εξέταση δομικά υλικά.

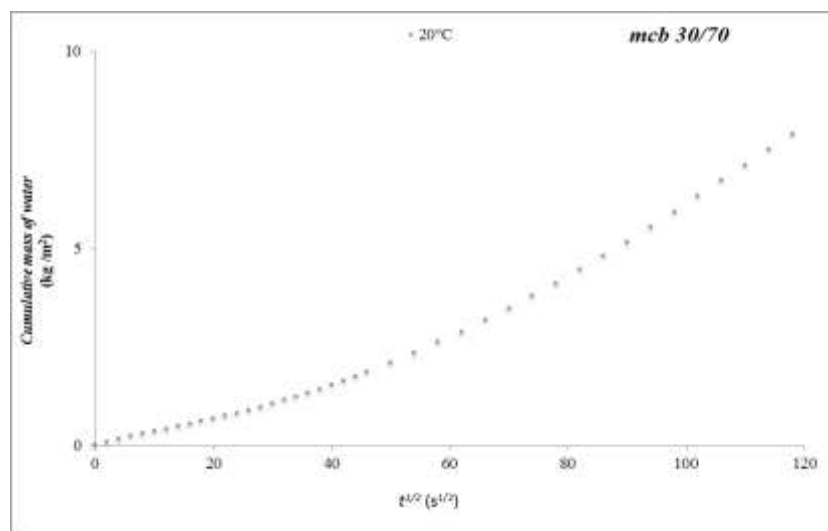
**Πίνακας 8.1:** Τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  για τα δομικά υλικά στους 20°C σύμφωνα με τις διάφορες μεθόδους υπολογισμού του.

$A_w$ (kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> ) (20 °C)						
Υλικά	Μέθοδος μιας εφαπτομένης		Μέθοδος δύο εφαπτομένων		Μέθοδος 30 λεπτών	
		SD		SD		SD
<b>BRI</b>	0,265	0,004	0,254	0,002	0,263	0,003
<b>BRM</b>	0,203	0,002	0,203	0,002	0,205	0,003
<b>SRH</b>	0,101	0,001	0,115	0,005	0,069	0,001
<b>SRY</b>	0,086	0,004	0,083	0,002	0,090	0,006
<b>mca20/80</b>	0,188	0,006	0.175	0,004	0,175	0,005
<b>mca25/75</b>	0,085	0,006	0.106	0,001	0,077	0,007
<b>mca30/70</b>	0,165	0,008	0.147	0,003	0,152	0,010
<b>mcb20/80</b>	0,121	0,006	0.107	0,002	0,091	0,001
<b>mcb25/75</b>	0,090	0,005	0.071	0,001	0,051	0,001
<b>mcb30/70</b>	0,095	0,006	0.066	0,001	0,035	0,005









**Σχήμα 8.4:** Μάζα του τριχοειδώς απορροφημένου νερού ανά μονάδα επιφάνειας σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου για τα διάφορα δομικά υλικά.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 8.1, είναι εμφανές ότι υπάρχει μια διαφοροποίηση στις τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων, τόσο ανάμεσα στα διαφορετικά δομικά υλικά όσο και ανάμεσα στους τρεις διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού του. Όπως επίσης φαίνεται στον πίνακα 8.1, οι πλίνθοι εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ( $A_w > 20$ ), όποια και αν είναι η μέθοδος υπολογισμού. Όσον αφορά τους λίθους, οι λίθοι *SRV* εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε σχέση με τους λίθους *SRH*. Ένας πιθανός λόγος για την εμφάνιση χαμηλών τιμών του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για τον λίθο *SRV* είναι η διαφορετική του φύση και τα διαφορετικά στοιχεία της μικροδομής του. Επιπλέον, οι πλίνθοι *BRI* και *BRM*, οι λίθοι *SRV*, και τα κονιάματα *mca20/80* και *mca30/70* εμφανίζουν τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης οι οποίες είναι σχεδόν ίδιες ανεξάρτητα από τη μέθοδο υπολογισμού του. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι το ότι τα συγκεκριμένα υλικά εμφανίζουν γραμμικό πρώτο μέρος κατά το πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης σε αντίθεση με τους λίθους *SRH* και τα κονιάματα *mca25/75*, *mcb20/80*, *mcb25/75* και *mcb30/70* στα οποία εμφανίζονται κάποιες ανωμαλίες στον αρχικό ρυθμό απορρόφησης νερού ο οποίος είναι πιο αργός (βλέπε Σχήμα 8.4). Αυτός ο αργός αρχικός ρυθμός απορρόφησης ευθύνεται και για το γεγονός ότι εμφανίζονται μικρότερες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε ορισμένα υλικά (*mca25/75*, *mcb20/80*, *mcb25/75* και *mcb30/70*) όταν αυτός υπολογίζεται με τη μέθοδο των 30 λεπτών σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Γενικά τα κονιάματα με κονία *NHL2* (*mca* κονιάματα) εμφανίζουν υψηλότερες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε σχέση με τα κονιάματα κονιάς *NHL3.5* (*mcb* κονιάματα) πιθανόν λόγω του διαφορετικού τύπου κονιάς που χρησιμοποιούν.

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, είναι εμφανές ότι, ενώ δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές για δομικά υλικά με μεγάλη ομοιογένεια, εντούτοις σημειώνουν σημαντικές διαφορές

μεταξύ τους όταν πρόκειται για υλικά που εμφανίζουν αποκλίσεις από τη γραμμικότητα στον αρχικό ρυθμό υδαταπορρόφησης στα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ορισμένα δομικά υλικά χρειάζονται περισσότερο από 30 λεπτά της ώρας έως ότου αρχίσουν να απορροφούν νερό μέσω των τριχοειδών τους πόρων με σταθερό ρυθμό (βλέπε Σχήμα 8.4), είναι προφανές ότι θα πρέπει να αποκλειστεί η μέθοδος των 30 λεπτών ως μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης. Για τον ίδιο λόγο και η μέθοδος της μιας εφαπτομένης δεν υπολογίζει με ακρίβεια την τιμή του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και αυτό γιατί στα δομικά υλικά με μη γραμμικό αρχικό ρυθμό υδαταπορρόφησης, η κλίση (άρα και ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης) αλλάζει κάθε χρονική στιγμή κατά την εξέλιξη του πειράματος τριχοειδούς αναρρίχησης. Τέλος, με τη μέθοδο των δύο εφαπτομένων αίρεται η μη γραμμικότητα στον αρχικό ρυθμό υδαταπορρόφησης ορισμένων δομικών υλικών και συνεπώς η μέθοδος αυτή είναι και η πιο ενδεδειγμένη για τον υπολογισμό του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης όλων των δομικών υλικών.

## **8.4 Μερικά Συμπεράσματα**

Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορα πρότυπα και κανονισμοί τόσο για την πειραματική διαδικασία του πειράματος της τριχοειδούς αναρρίχησης όσο και για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης νερού μέσω των τριχοειδών πόρων των δομικών υλικών. Ενώ το πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης είναι κοινό σε όλα τα πρότυπα, ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης στηρίζεται σε διαφορετική βάση, δίνοντας διαφορετικά τελικά αποτελέσματα. Έτσι δημιουργείται σύγχυση ανάμεσα στην ερευνητική κοινότητα καθώς οι τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης δεν είναι εύκολα συγκρίσιμες μεταξύ των διαφόρων ερευνητών. Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση δομικών υλικών στη θερμοκρασία περιβάλλοντος των 20°C και υπολογίστηκε ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης τους, ακολουθώντας τα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς, σύμφωνα με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού που έχουν προτυποποιηθεί διεθνώς. Η μέθοδος των δύο εφαπτομένων φαίνεται ότι είναι η πιο κατάλληλη για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης διότι μπορεί να εφαρμοστεί και σε δομικά υλικά τα οποία εμφανίζουν αποκλίσεις από τη γραμμικότητα στον αρχικό ρυθμό υδαταπορρόφησης στα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 9.1 Εισαγωγή

Οι υγρομετρικές ιδιότητες των δομικών υλικών είναι απαραίτητες και ζωτικής σημασίας παράμετροι για την μελέτη των φαινομένων μεταφοράς της θερμότητας, του αέρα και της υγρασίας, τόσο στα παραδοσιακά όσο και στα σύγχρονα κτήρια και αυτό γιατί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυτής της ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια αυτών των ιδιοτήτων. Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν τις υγρομετρικές ιδιότητες των δομικών υλικών βρίσκεται και η θερμοκρασία η οποία, παρά τη μεγάλη της σπουδαιότητα, είτε αγνοείται είτε, σε κάποιες περιπτώσεις, δεν της δίνεται η πρέπουσα σημασία. Στο παρόν κεφάλαιο, σαν συνέχεια του προηγούμενου, υπολογίζεται ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης διαφόρων κατηγοριών δομικών υλικών στις θερμοκρασίες 25 και 30°C, με τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους υπολογισμού, σύμφωνα με τα διαφορετικά διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Στη συνέχεια, συσχετίζονται μεταξύ τους τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και επιχειρείται να βρεθεί μια σχέση εξάρτησης του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση δομικών υλικών με τη θερμοκρασία. Τέλος και με σκοπό την αξιολόγηση της, εφαρμόζεται η παραπάνω σχέση και για τη θερμοκρασία των 15°C καθώς επίσης γίνεται και σύγκριση της με σχέσεις που έχουν προκύψει από μοντέλα άλλων ερευνητών.

### 9.2 Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας

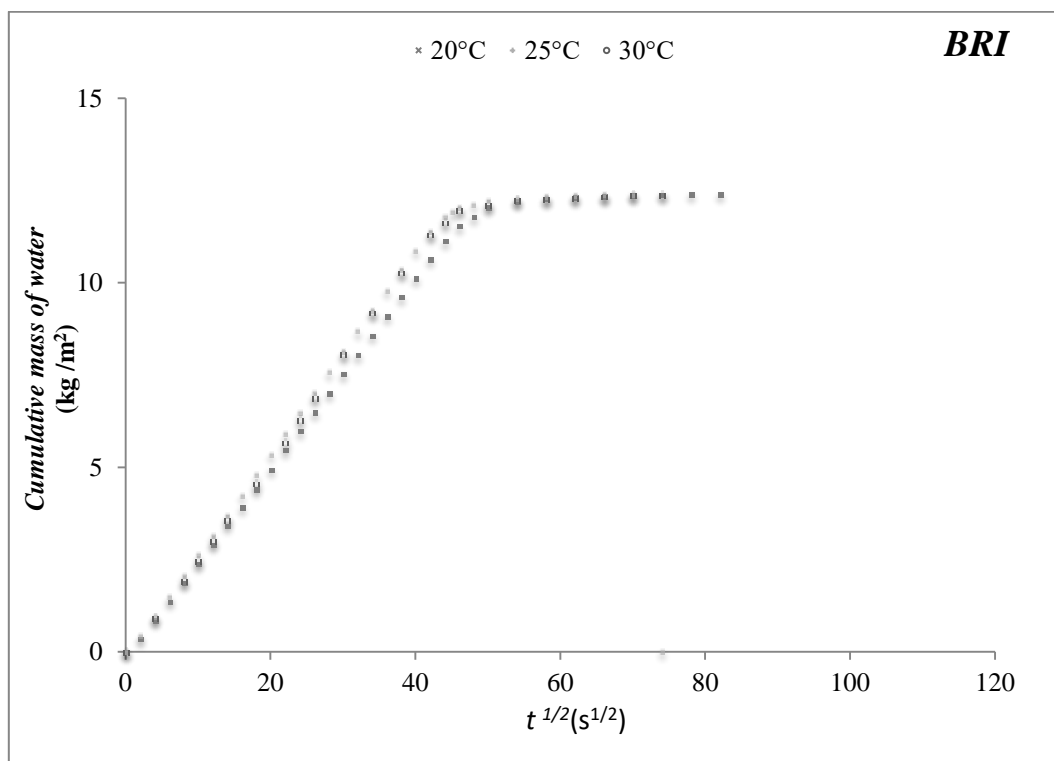
Σε συνέχεια των πειραμάτων τριχοειδούς αναρρίχησης που προηγήθηκαν και αφού πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης για όλα τα δείγματα στους 20°C, ακολούθησε σειρά πειραμάτων τριχοειδούς αναρρίχησης στους 25 και στους 30°C για όλα τα δοκίμια. Κατόπιν υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων για όλα τα υλικά στις παραπάνω θερμοκρασίες, σύμφωνα με τη μέθοδο των δύο εφαπτομένων όπως αυτή περιγράφεται στον κανονισμό Normal 11/85.

### 9.3 Αποτελέσματα - Συζήτηση

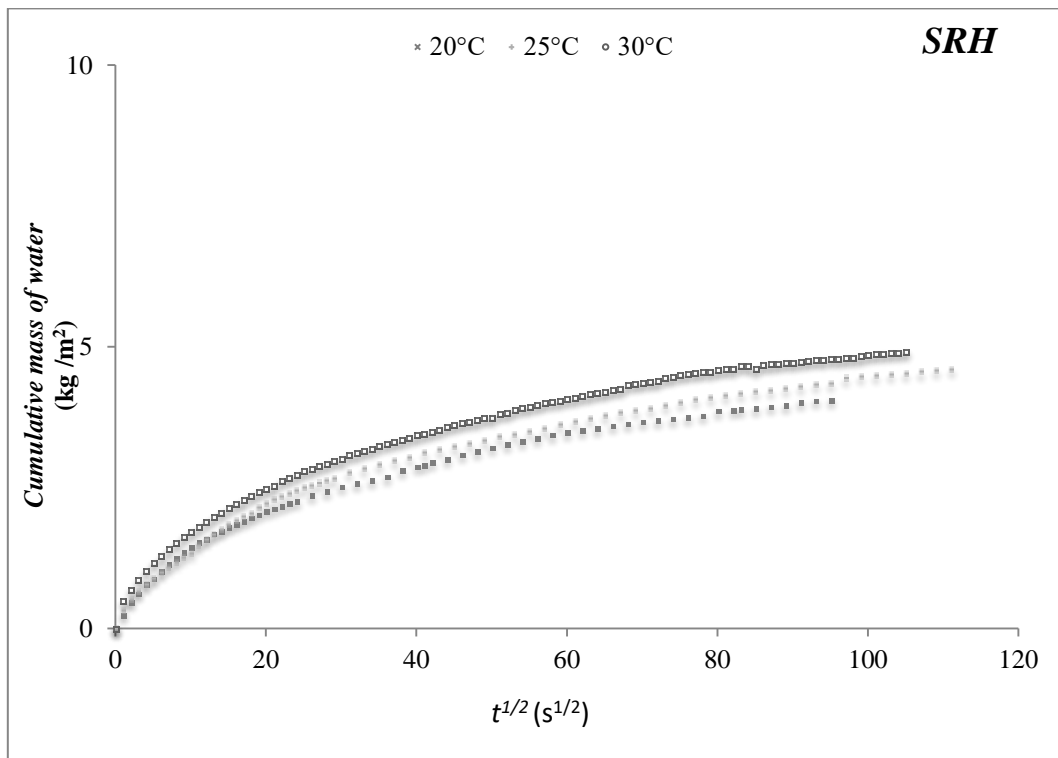
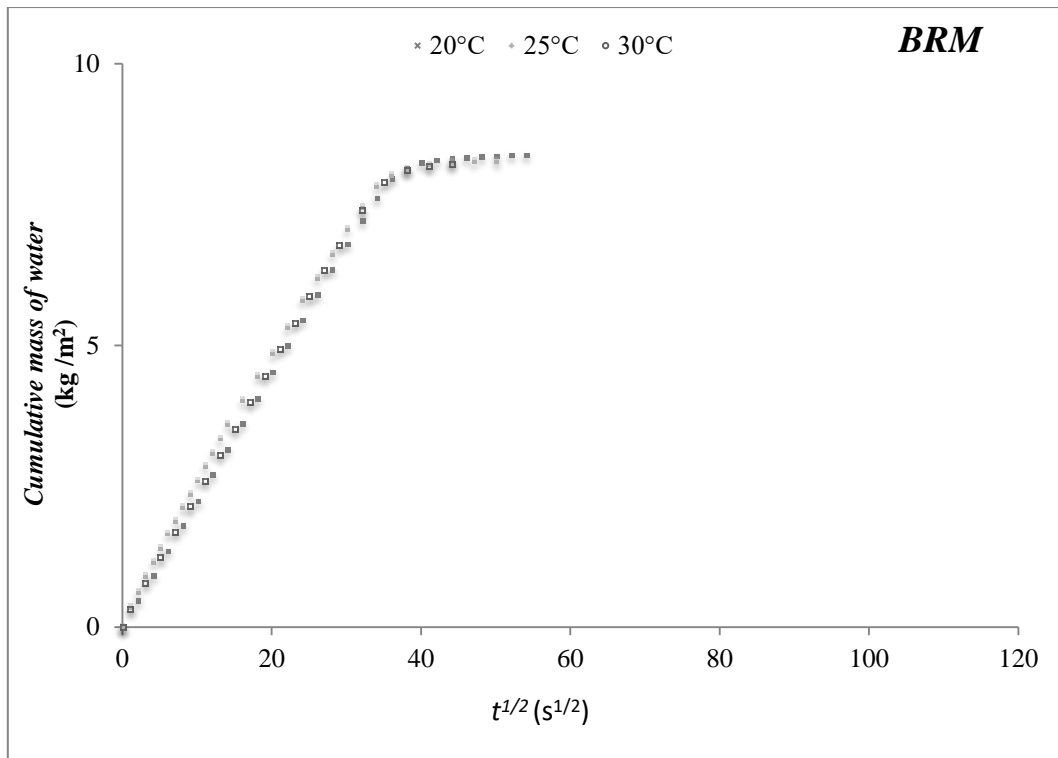
Οι πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και τα αποτελέσματα της κινητικής της τριχοειδούς αναρρίχησης για όλα τα υπό εξέταση δομικά υλικά και για τις θερμοκρασίες των 20, 25 και 30°C συνοψίζονται στον Πίνακα 9.1 και στο Σχήμα 9.1 αντίστοιχα. Οι σχεδιασμένες τιμές αντιπροσωπεύουν ένα δείγμα από κάθε υλικό και κάθε επιμέρους διάγραμμα αναφέρεται στο ίδιο δείγμα.

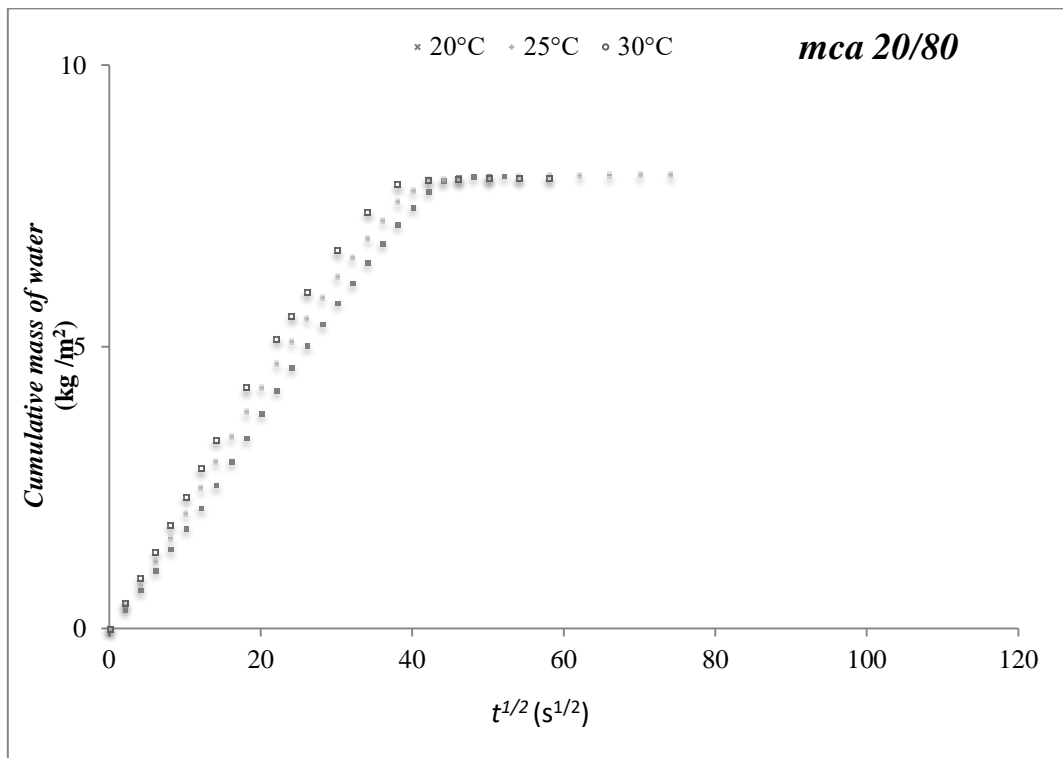
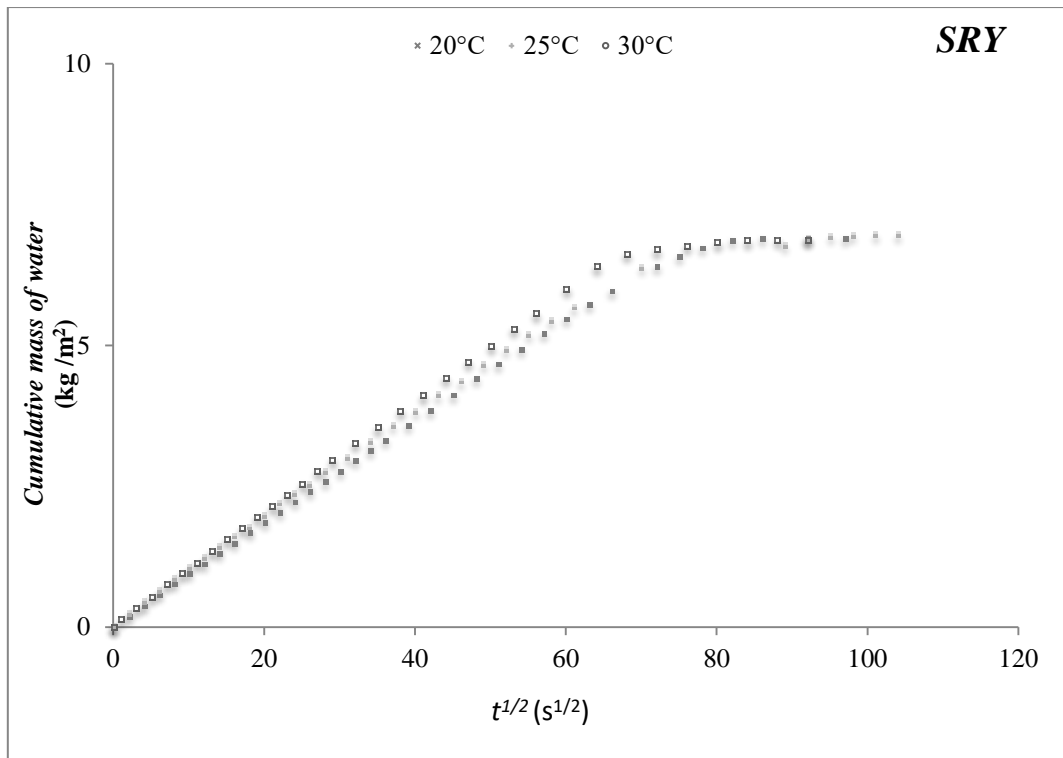
**Πίνακας 9.1:** Τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ( $A_w$ ) με τη τυπική απόκλιση (SD) για τις θερμοκρασίες των 20, 25 και 30°C.

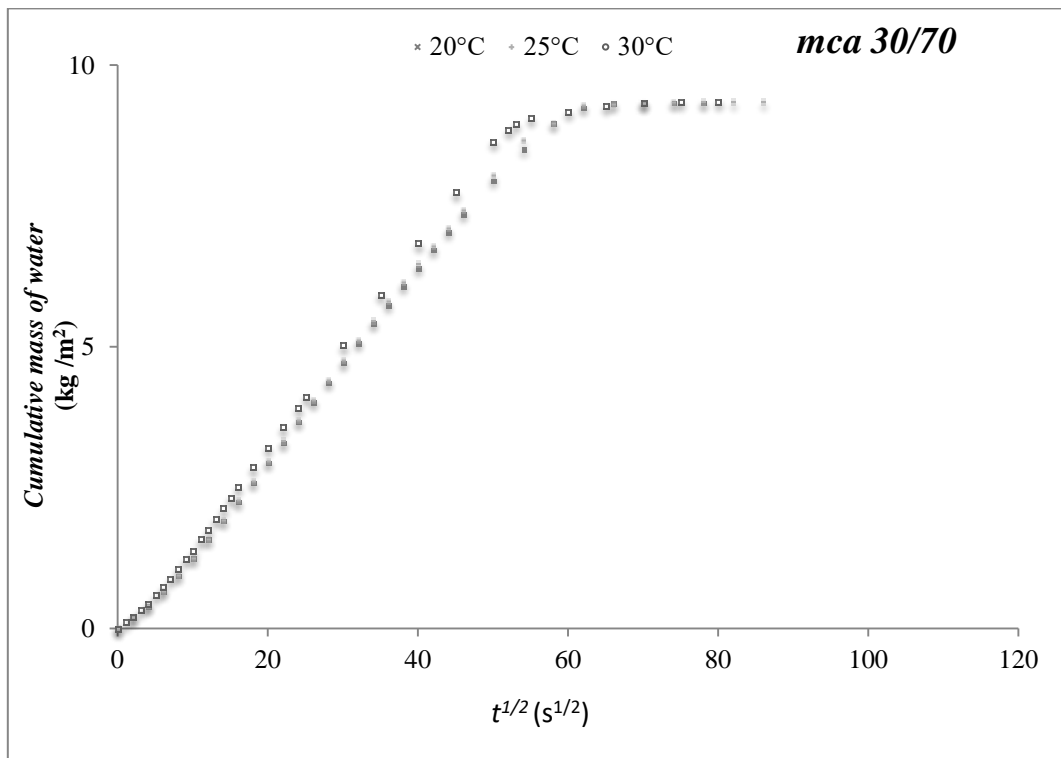
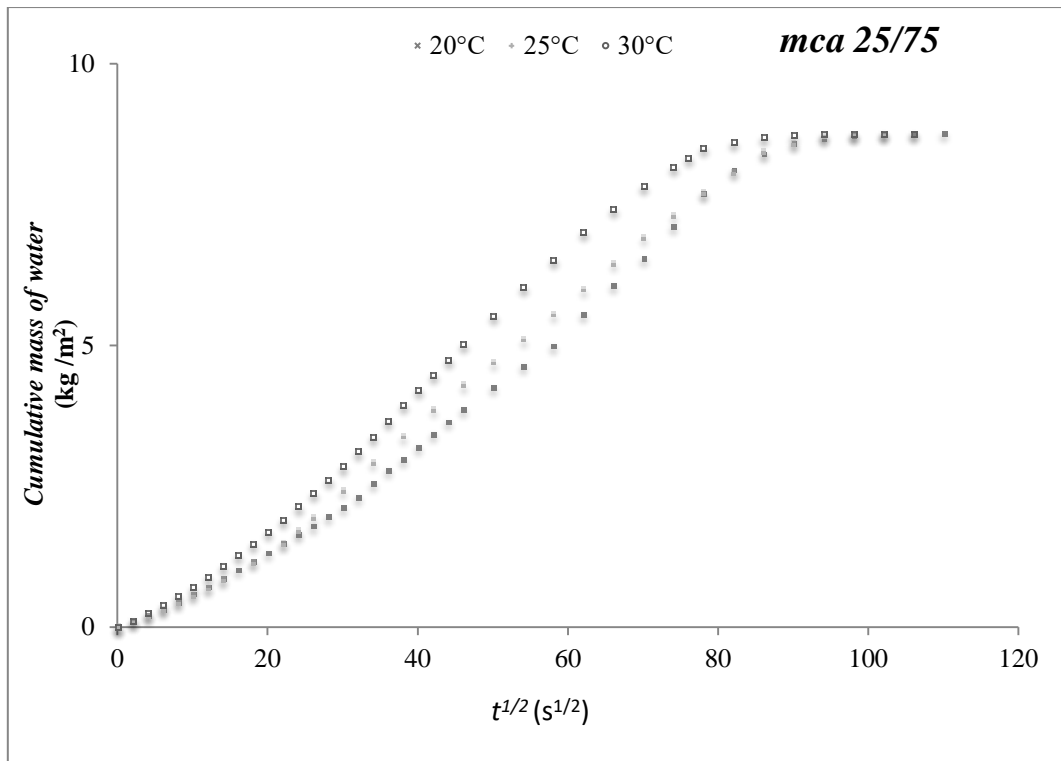
<u>Υλικά</u>	20 °C		25 °C		30 °C	
	$A_w(\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2})$	SD	$A_w(\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2})$	SD	$A_w(\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2})$	SD
<b>BRI</b>	0.254	0.002	0.259	0.002	0.263	0.002
<b>BRM</b>	0.203	0.002	0.212	0.001	0.228	0.001
<b>SRH</b>	0.115	0.005	0.142	0.006	0.172	0.006
<b>SRY</b>	0.083	0.002	0.091	0.002	0.101	0.002
<b>mca20/80</b>	0.175	0.004	0.184	0.004	0.191	0.004
<b>mca25/75</b>	0.106	0.001	0.110	0.001	0.116	0.002
<b>mca30/70</b>	0.147	0.003	0.160	0.002	0.170	0.003
<b>mcb20/80</b>	0.107	0.002	0.113	0.003	0.117	0.002
<b>mcb25/75</b>	0.071	0.001	0.076	0.003	0.081	0.002
<b>mcb30/70</b>	0.066	0.001	0.069	0.002	0.073	0.001

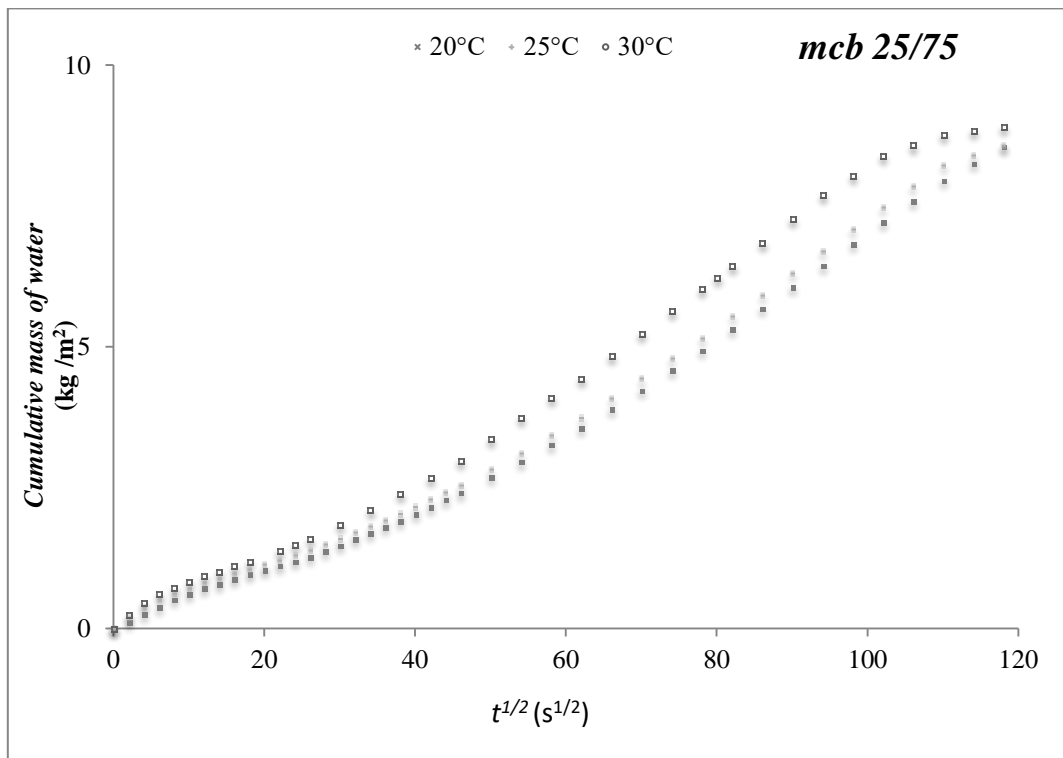
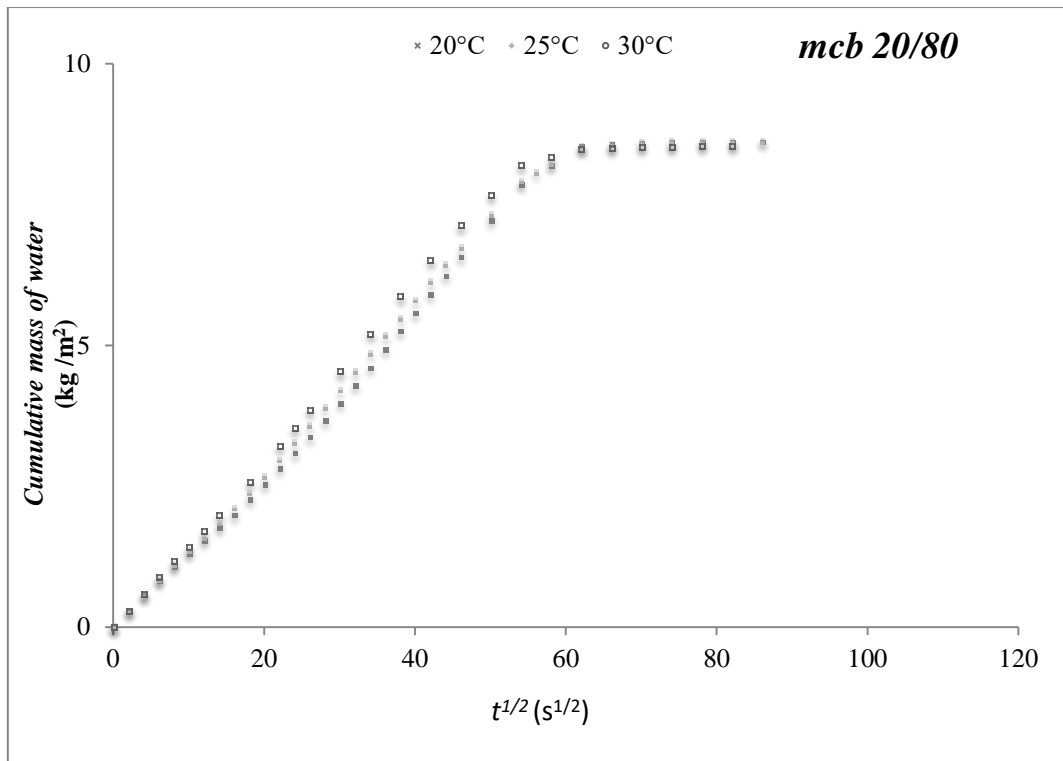


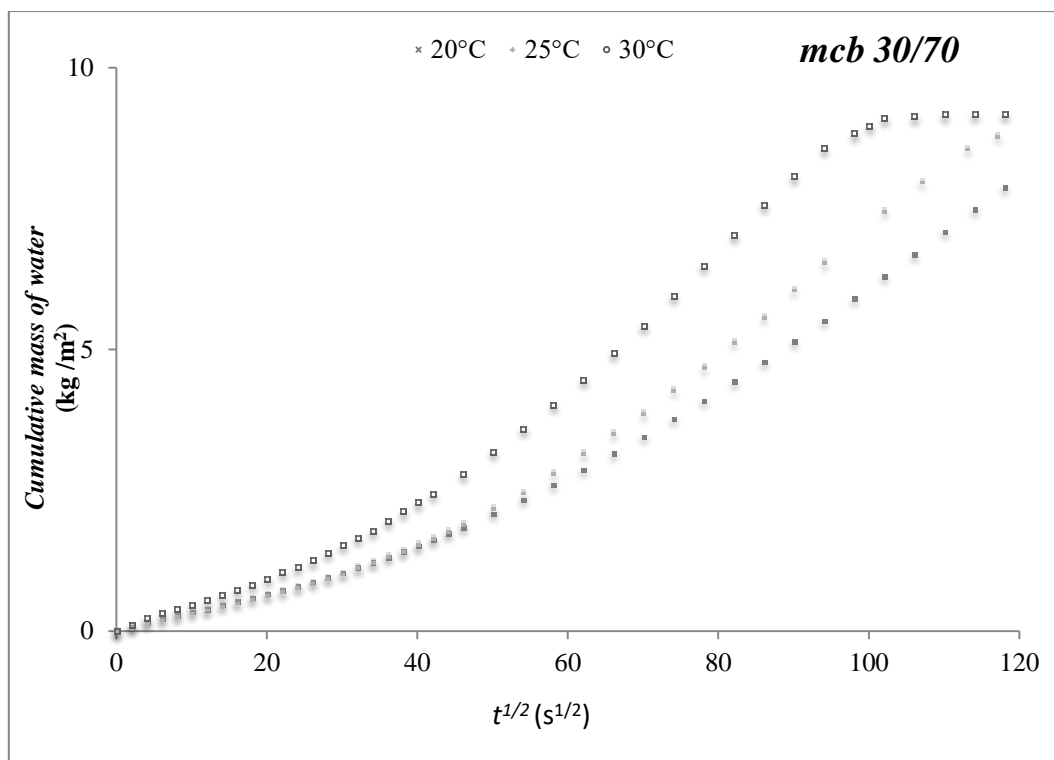








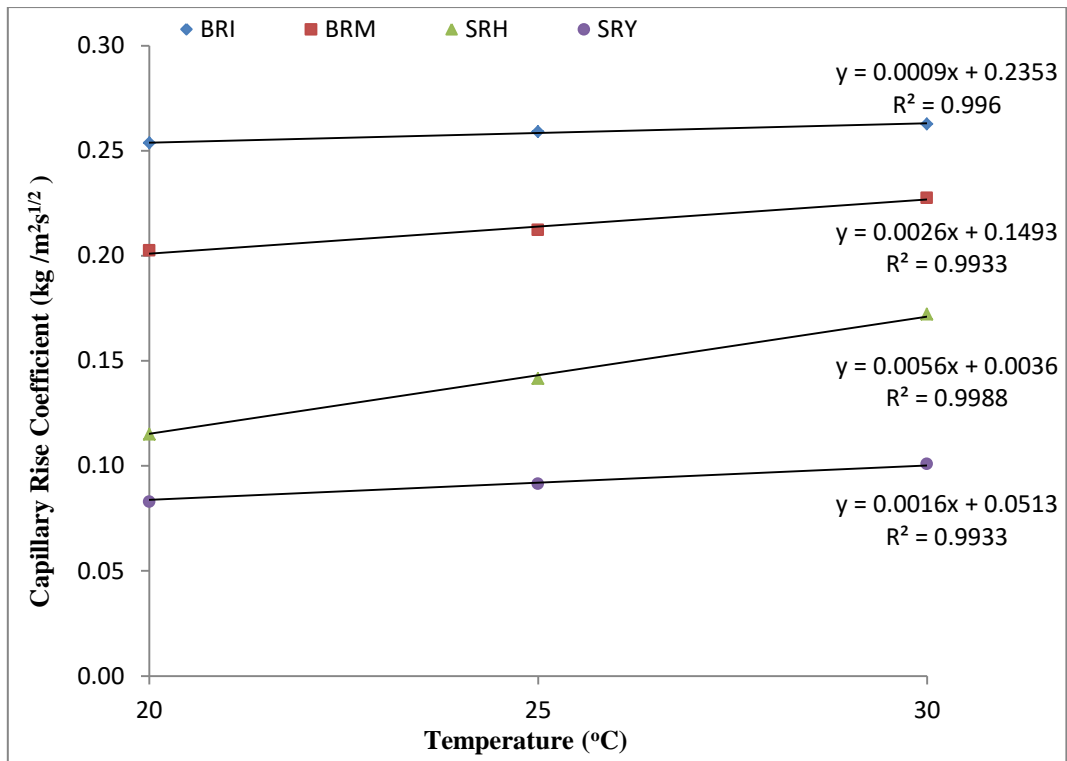




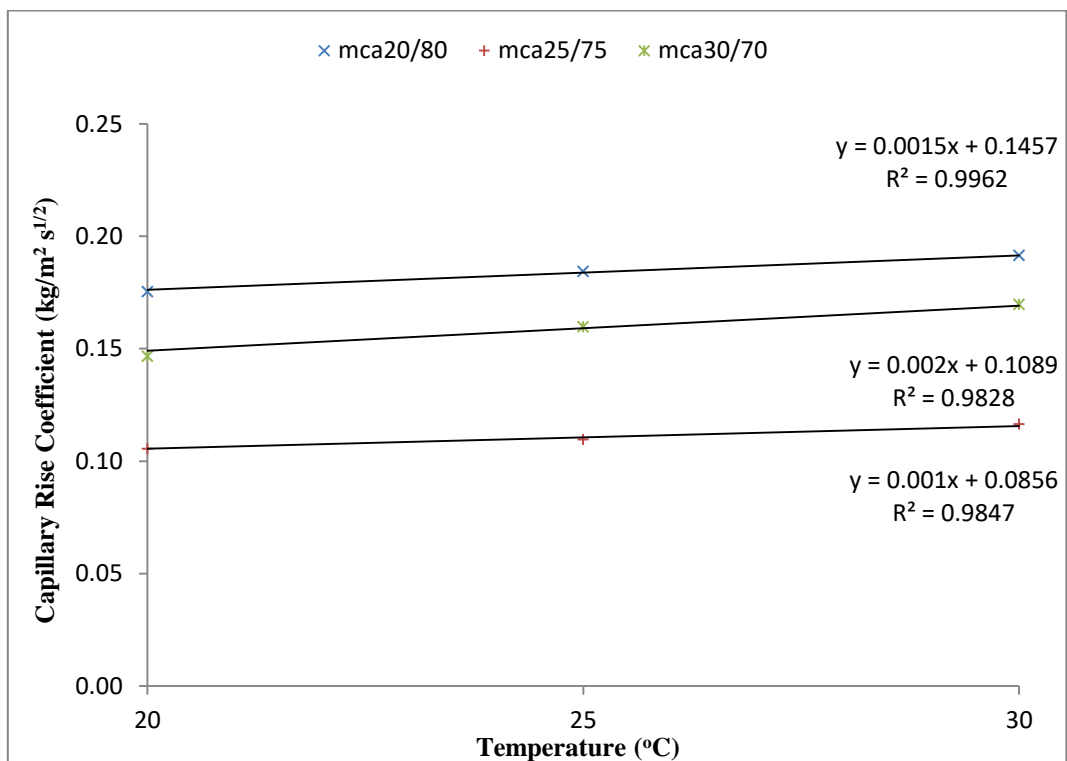
**Σχήμα 9.1:** Κινητικές της τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση δομικών υλικών στις θερμοκρασίες 20, 25 και 30°C.

Από τις κινητικές της τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών στο σχήμα 9.1 παρατηρείται μια καθαρή εξάρτηση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης με τη θερμοκρασία για όλα τα υπό εξέταση υλικά. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής υδαταπορρόφησης μέσω των τριχοειδών πόρων αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το αρχικό μέρος της κινητικής για τα κεραμικά *BRI* και *BRM*, είναι πολύ καλά καθορισμένο από μια ευθεία γραμμή για όλες τις θερμοκρασίες και το σχήμα της καμπύλης παραμένει το ίδιο για όλες τις θερμοκρασίες. Επιπλέον, το κεραμικό *BRI* επιδεικνύει υψηλότερο τριχοειδή υδατοκορεσμό σε σχέση με το κεραμικό *BRM*. Οι λίθοι *SRH* παρουσιάζουν ένα μη γραμμικό πρώτο μέρος στην κινητική τους, για όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες ενώ οι λίθοι *SRY* εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης σε σχέση με τους λίθους *SRH*. Επιπλέον, ο λίθος *SRH* εμφανίζει και τη μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά, σε όλες τις θερμοκρασίες. Κάποιες αποκλίσεις από τη γραμμικότητα επίσης παρατηρούνται στο σχήμα των καμπυλών για ορισμένα κονιάματα (*mca25/75*, *mcb25/75* και *mcb30/70*) πιθανόν λόγω της διαφορετικής μικροδομής τους.

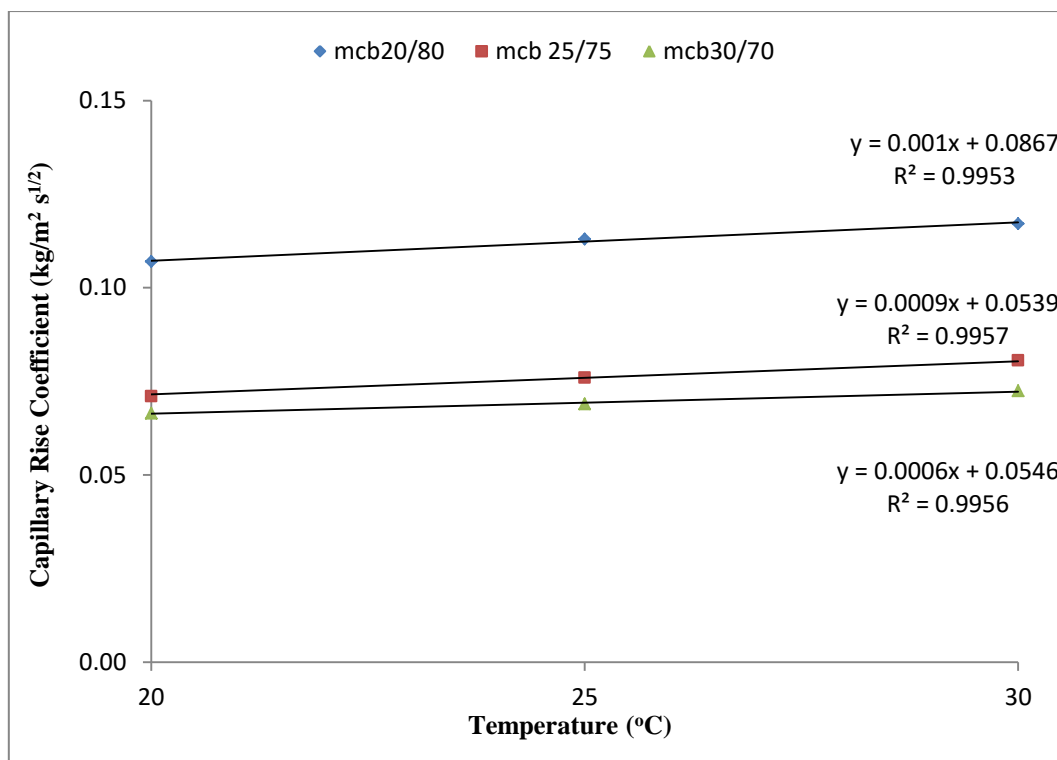
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των τιμών του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης με τη θερμοκρασία και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στα Σχήματα 9.2, 9.3 και 9.4.



**Σχήμα 9.2:** Συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης σε διάφορες θερμοκρασίες για τους λίθους και τα κεραμικά.



**Σχήμα 9.3:** Συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης σε διάφορες θερμοκρασίες για τα κονιάματα *mca*.



**Σχήμα 9.4:** Συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης σε διάφορες θερμοκρασίες για τα κονιάματα *mcb*.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 9.2, 9.3 και 9.4 είναι φανερό ότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης εμφανίζει μία ισχυρή γραμμική εξάρτηση με τη θερμοκρασία, σε όλα τα εξεταζόμενα υλικά και στο συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος τιμών των πειραμάτων. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την εξάρτηση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης από τις φυσικές ιδιότητες του νερού. Είναι επίσης προφανές ότι υπάρχει μια διαφοροποίηση της κλίσης της ευθείας για κάθε δομικό υλικό, γεγονός που σημαίνει ότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης εξαρτάται επίσης και από τις εγγενείς ιδιότητες κάθε υλικού όπως το πορώδες, η κατανομή των πόρων, η μέση ακτίνα πόρων κ.ά.

Στη συνέχεια, και για να γίνει επαλήθευση των εξισώσεων που προέκυψαν από την ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης, πραγματοποιήθηκαν πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης για όλα τα εξεταζόμενα υλικά στους 15°C. Επίσης πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του συντελεστή υδαταπορρόφησης με τη βοήθεια των εξισώσεων που εμφανίζονται στα Σχήματα 9.2, 9.3 και 9.4. Τα αποτελέσματα των πειραματικών τιμών και των προβλεπόμενων από τη γραμμική παλινδρόμηση τιμών του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης στους 15°C φαίνονται στον Πίνακα 9.2.

**Πίνακας 9.2:** Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για τα εξεταζόμενα υλικά στους 15°C.

---



---

Θερμοκρασία 15°C

---



---

Υλικά	Υπολογιζόμενος A-coefficient (kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1/2</sup> )	Πειραματικός A-coefficient (kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1/2</sup> )
<i>BRI</i>	0,249	0,249
<i>BRM</i>	0,188	0,188
<i>SRH</i>	0,087	0,088
<i>SRY</i>	0,076	0,077
<i>mca20/80</i>	0,169	0,169
<i>mca25/75</i>	0,100	0,101
<i>mca30/70</i>	0,139	0,141
<i>mcb20/80</i>	0,102	0,102
<i>mcb25/75</i>	0,067	0,068
<i>mcb30/70</i>	0,063	0,064

Είναι προφανές από τον Πίνακα 9.2 ότι οι πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις προβλεπόμενες τιμές από τις εξισώσεις στα Σχήματα 9.2-9.4. Συνεπώς, οι συγκεκριμένες εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της τιμής του συντελεστή υδαταπορρόφησης σε οποιαδήποτε θερμοκρασία μέσα στο πειραματικό θερμοκρασιακό εύρος και το συγκεκριμένο εμπειρικό μοντέλο αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο υπολογιστικό εργαλείο στη προσομοίωση της υγρομετρικής συμπεριφοράς των υπό εξέταση δομικών υλικών.

Επιπρόσθετα στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια προσπάθεια να συγκριθεί το εμπειρικό αυτό μοντέλο με μοντέλα άλλων ερευνητών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Το 2016 οι Feng και Janssen<sup>182</sup> λαμβάνοντας υπόψη τους την εξίσωση (4.8), πρότειναν την παρακάτω εξίσωση με την οποία μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης:

$$A_w = C \cdot [0.095 \cdot (T-273.15) + 6.566] \quad (9.1)$$

όπου *C* ένας συντελεστής που εξαρτάται μόνο από τη μικροδομή των υλικών και ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστή η τιμή του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Ακολουθώντας την προτεινόμενη από τους Feng και Janssen μεθοδολογία, υπολογίστηκε ο συντελεστής *C*, τοποθετώντας στην εξίσωση (9.1) τις τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση υλικών στη θερμοκρασία των 20°C και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.3.

**Πίνακας 9.3:** Οι τιμές του συντελεστή *C* και η τυπική του απόκλιση, σύμφωνα με την εργασία των Feng και Janssen, στους 20°C.

Υλικά	Συντελεστής <i>C</i> (kg/m <sup>5/2</sup> )
<i>BRI</i>	0.030±0.001
<i>BRM</i>	0.024±0.002



<i>SRH</i>	0.015±0.001
<i>SRY</i>	0.010±0.001
<i>mca20/80</i>	0.021±0.001
<i>mca25/75</i>	0.009±0.001
<i>mca30/70</i>	0.019±0.002
<i>mcb20/80</i>	0.013±0.001
<i>mcb25/75</i>	0.008±0.001
<i>mcb30/70</i>	0.008±0.001

Κατόπιν οι τιμές του συντελεστή  $C$  εφαρμόστηκαν στην εξίσωση (9.1) για κάθε υλικό και πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για τη θερμοκρασία των 30°C. Τέλος, συγκρίθηκαν οι τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης όπως αυτές υπολογίστηκαν σύμφωνα με την εργασία των Feng και Janssen με τις πειραματικές τιμές του για τη θερμοκρασία των 30°C και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.4.

**Πίνακας 9.4:** Σύγκριση των πειραματικών τιμών του συντελεστή  $A_w$  με τις τιμές που υπολογίστηκαν από την εξίσωση (9.1) στους 30°C.

<b>Υλικά</b>	<b>Τιμές <math>A_w \pm SD</math> σύμφωνα με την εξίσωση (9.1) (<math>\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}</math>)</b>	<b>Πειραματικές τιμές του <math>A_w \pm SD</math> (<math>\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}</math>)</b>
<i>BRI</i>	0.280±0.002	0.263±0.002
<i>BRM</i>	0.229±0.002	0.228±0.001
<i>SRH</i>	0.137±0.004	0.172±0.006
<i>SRY</i>	0.092±0.002	0.101±0.002
<i>mca20/80</i>	0.195±0.004	0.191±0.004
<i>mca25/75</i>	0.089±0.001	0.116±0.002
<i>mca30/70</i>	0.178±0.003	0.170±0.003
<i>mcb20/80</i>	0.118±0.002	0.117±0.002
<i>mcb25/75</i>	0.079±0.001	0.081±0.002
<i>mcb30/70</i>	0.072±0.001	0.073±0.001

Είναι προφανές από τον Πίνακα 9.4 ότι σε ορισμένες περιπτώσεις (*BRM*, *mca20/80*, *mcb20/80*, *mcb25/75* και *mcb30/70*), οι πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης είναι πολύ κοντά στις προβλεπόμενες από την εξίσωση (9.1) καθώς η διαφορά τους είναι κάτω από το 4%. Αντίθετα, σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις (*BRI*, *SRH*, *SRY*, *mca25/75* και *mca30/70*), οι προβλεπόμενες από την εξίσωση (9.1) τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης επιδεικνύουν σημαντική απόκλιση σε σχέση με τις πειραματικές τιμές καθώς η διαφορά τους ξεπερνά το 4%. Συνεπώς, παρά το γεγονός ότι η εξίσωση (9.1) παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ορισμένα δομικά υλικά, δεν μπορεί να εφαρμοστεί για όλα τα πορώδη δομικά υλικά.

Επιπρόσθετα, οι Hall και Hoff<sup>59</sup> έχουν προτείνει ένα κατάλληλο μοντέλο το οποίο προβλέπει την επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή ροφητικής ικανότητας όλων των δομικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, έλαβαν υπόψη τους το γεγονός ότι, καθώς αυξάνει η θερμοκρασία του νερού, το ιξώδες του μειώνεται πιο γρήγορα σε σχέση με τη μείωση της επιφανειακής του τάσης. Έτσι πρότειναν ότι μια αύξηση στη θερμοκρασία από τους 20 στους 30°C, θα είχε σαν αποτέλεσμα μια αύξηση για τη ποσότητα  $(\sigma/\eta)^{1/2}$  για το νερό, άρα και για το συντελεστή ροφητικής ικανότητας του υλικού, κατά έναν παράγοντα περίπου 10,6% (βλέπε εξίσωση (4.8)).

Για να εξακριβωθούν οι προηγούμενες προβλέψεις, πραγματοποιήθηκε ένας υπολογισμός του συντελεστή ροφητικής ικανότητας των υπό εξέταση υλικών στους 20 και στους 30°C και κατόπιν υπολογίστηκε το ποσοστό (%) της μεταβολής του. Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρουσιάζονται στον πίνακα 9.5.

**Πίνακας 9.5:** Οι πειραματικές τιμές του συντελεστή ροφητικής ικανότητας των υλικών στους 20 και 30°C και το ποσοστό μεταβολής του με την τυπική του απόκλιση.

<i>Υλικά</i>	$S_{20} \text{ (m/s}^{1/2}\text{)}$ ( $\times 10^{-4}$ )	$S_{30} \text{ (m/s}^{1/2}\text{)}$ ( $\times 10^{-4}$ )	$\frac{S_{30} - S_{20}}{S_{20}}$ (%)
<i>BRI</i>	2.54	2.60	2.4±1.0
<i>BRM</i>	2.00	2.30	15.0±0.8
<i>SRH</i>	1.10	1.70	54.5±7.1
<i>SRY</i>	0.82	1.00	21.9±3.0
<i>mca20/80</i>	1.80	1.90	5.6±3.0
<i>mca25/75</i>	0.89	1.20	34.8±2.4
<i>mca30/70</i>	1.50	1.70	13.3±3.0
<i>mcb20/80</i>	1.10	1.20	9.1±2.6

<i>mcb25/75</i>	0.71	0.81	14.1±2.5
<i>mcb30/70</i>	0.65	0.73	12.3±2.0

---

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 9.5 και όπως ήταν αναμενόμενο, ο συντελεστής ροφητικής ικανότητας των υλικών αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά η αύξηση αυτή είναι διαφορετική για κάθε υλικό και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του. Με δεδομένο τη σχέση με την οποία συνδέονται μεταξύ τους ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης με το συντελεστή ροφητικής ικανότητας των δομικών υλικών, συμπεραίνεται ότι κάθε γενίκευση που αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στους συντελεστές μεταφοράς της υγρασίας στα υλικά εμπεριέχει υψηλό κίνδυνο αν δε λαμβάνεται υπόψη τα χαρακτηριστικά και η μικροδομή του κάθε υλικού. Χωρίς αμφιβολία, η μικροδομή των δομικών υλικών είναι μία πολύ κρίσιμη παράμετρος που συνδέεται στενά με τις υγρομετρικές ιδιότητες των υλικών αλλά παρ' όλα αυτά δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς έως σήμερα.

#### 9.4 Μερικά Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στο φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση δομικών υλικών και παρατηρήθηκε μια γραμμική σχέση εξάρτησης ανάμεσα στις τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και τη θερμοκρασία. Έτσι προτάθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για κάθε θερμοκρασία. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια αξιολόγηση του μοντέλου αυτού εφαρμόζοντας το για τη πρόβλεψη των τιμών του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών για τη θερμοκρασία των 15°C. Οι πειραματικές τιμές του συντελεστή στους 15°C βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία με τις προβλεπόμενες για όλα τα εξεταζόμενα υλικά. Συνεπώς, η υπόθεση ενός σταθερού συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, ανεξάρτητου από τη θερμοκρασία, που υιοθετούταν μέχρι σήμερα από τους ερευνητές, είναι καθαρά ανακριβής.

Στη συνέχεια, οι πειραματικά εξαγόμενες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης συγκρίθηκαν με τις τιμές που προβλέπουν μοντέλα άλλων ερευνητών. Βρέθηκε ότι τα επιλεγμένα μοντέλα δεν μπορούν να προβλέψουν τις τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για όλες τις περιπτώσεις δομικών υλικών. Αυτό συμβαίνει διότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης δεν εξαρτάται μόνο από τις φυσικές ιδιότητες του νερού αλλά και από τις εγγενείς ιδιότητες των δομικών υλικών. Συνεπώς αυτή η εξάρτηση θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας και χρήσης πραγματικών πειραματικών δεδομένων, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και τη λήψη αποφάσεων και όπου γενικότερα ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης χρησιμεύει ως μέσο χαρακτηρισμού ενός δομικού υλικού και πρόβλεψης της υγρομετρικής συμπεριφοράς του.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ

### 10.1 Εισαγωγή

Η τριχοειδής απορρόφηση του νερού είναι ένας από τους κύριους μηχανισμούς πρόσληψης της υγρασίας στα δομικά υλικά, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική αντοχή τους. Συνεπώς, η μελέτη της κινητικής της τριχοειδούς αναρρίχησης είναι πολύ χρήσιμη για την κατανόηση της συμπεριφοράς των δομικών υλικών, συμβάλλοντας στην αύξηση της αντοχής τους και τη διάρκεια ζωής τους. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιούνται πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης στα υπό εξέταση δομικά υλικά, σε ένα πειραματικό ξηραντήριο, κάτω από ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (διαφορετική ταχύτητα αέρα, θερμοκρασία του αέρα και σχετική υγρασία του αέρα). Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο πρώτης τάξης για τη κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη του τις περιβαλλοντικές συνθήκες σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των υλικών και προβλέπει με επιτυχία το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών καταδεικνύοντας της επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων όσο και των εγγενών χαρακτηριστικών των υλικών στη κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης.

Επιπλέον, οι τρέχουσες κλιματικές τάσεις δείχνουν ότι όλο και περισσότερα ακραία καιρικά φαινόμενα θα πρέπει να αναμένονται, τα οποία επηρεάζουν τόσο τα σύγχρονα όσο και τα παραδοσιακά κτήρια. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να γίνεται ο προσδιορισμός αυτών των επιπτώσεων του κλίματος με την εφαρμογή και την ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων. Έτσι, η δυνατότητα εφαρμογής αυτής του ημι-εμπειρικού μοντέλου σε κατάλληλους προσομοιωτές θα μπορούσε να μετατρέψει το προτεινόμενο μοντέλο σε εργαλείο αξιολόγησης των κινδύνων, αντιμετωπίζοντας διάφορες προκλήσεις που σχετίζονται με την αλλαγή του κλίματος, και γενικότερα με διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα.

### 10.2 Μαθηματικό μοντέλο της τριχοειδούς αναρρίχησης

Από τα διάφορα εμπειρικά εργαλεία μοντελοποίησης τα οποία έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως καταλληλότερο, ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης για τη περιγραφή του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης. Η βασική παράμετρος ήταν η τριχοειδώς αναρριχόμενη υγρασία  $X_{cr}$  κάθε υλικού. Η κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{dX_{cr}}{dt} = \frac{1}{t_{cr}} (X_{ce} - X_{cr}) \quad (10.1)$$

όπου  $dX_{cr}/dt$  είναι ο ρυθμός τριχοειδούς απορρόφησης της υγρασίας στο υλικό,  $X_{cr}$  (kg/kg db) το ποσοστό τριχοειδώς απορροφημένης υγρασίας σε χρόνο  $t$ ,  $t_{cr}$  (h) η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης και  $X_{ce}$  (kg/kg db) η υγρασία ισορροπίας του υλικού.

Η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης στο συγκεκριμένο μοντέλο, ενσωματώνει τη ταχύτητα του αέρα  $u$  (m/s), τη θερμοκρασία του αέρα  $T$  (°C) και την ενεργότητα του αέρα  $\alpha_w$  (-) σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_{cr} = c_0 \left( \frac{u}{u_r} \right)^{c_1} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{c_2} \left( \frac{\alpha_w}{\alpha_{wr}} \right)^{c_3} \quad (10.2)$$

όπου  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$  είναι κατάλληλες εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες,  $u_r$  είναι η ταχύτητα αναφοράς,  $T_r$  η θερμοκρασία αναφοράς και  $\alpha_{wr}$  η ενεργότητα αναφοράς του αέρα. Η παράμετρος  $c_0$  περιγράφει την επίδραση του υλικού στη σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης και εξαρτάται από τις διαστάσεις του κάθε δοκιμίου και από τις εγγενείς ιδιότητες του υλικού, ενώ οι παράμετροι  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$  καταδεικνύουν την επίδραση του περιβάλλοντος στη σταθερά του χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης.

Η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης  $t_{cr}$  εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται ώστε το ποσοστό υγρασίας να φτάσει τα 2/3 του ποσοστού της υγρασίας ισορροπίας για κάθε υλικό και όπως και ο ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (μέσω των παραμέτρων  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$ ) και από τα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού (μέσω της παραμέτρου  $c_0$ ).

Επιπλέον, η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης είναι αντίστροφα ανάλογη με μια νεοεισαγώμενη παράμετρο του μοντέλου, τη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης  $K_{cr}$ . Συνεπώς, η εξίσωση (10.1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dX_{cr}}{dt} = K_{cr} (X_{ce} - X_{cr}) \quad (10.3)$$

Η λύση της εξίσωσης (10.3) παρέχει το ποσοστό της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας σε χρόνο  $t$  και έχει τη μορφή:

$$X_{cr} = X_{ce} - (X_{ce} - X_{c0}) e^{-t/t_{cr}} \quad (10.4)$$

όπου  $X_{c0}$  (kg/kg db) ένας διορθωτικός παράγοντας που εκφράζει τη παραμένουσα υγρασία μετά τη ξήρανση του υλικού.

Οι τιμές των παραμέτρων  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$  υπολογίζονται έπειτα από τη προσαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα, ελαχιστοποιώντας τη μέση τετραγωνική απόκλιση  $S_5$  του τοπικού αθροίσματος των τετραγώνων μεταξύ των πειραματικών και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της υγρασίας, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$S_s = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(X_{cr} - X_{cr}^*)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (10.5)$$

όπου  $X_{cr}$  και  $X_{cr}^*$  είναι οι πειραματικές και οι προβλεπόμενες τιμές του ποσοστού της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας ισορροπίας και  $N$  είναι το πλήθος των πειραματικών τιμών.

Στον επόμενο πίνακα 10.1 παρουσιάζεται συνοπτικά το μαθηματικό μοντέλο της κινητικής της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας για τα υπό εξέταση δομικά υλικά.

**Πίνακας 10.1:** Μαθηματικό μοντέλο της κινητικής της τριχοειδώς αναρριχόμενης υγρασίας

<u>Ιδιότητες</u>	
$X_{cr}$	ποσοστό υγρασίας
$t_{cr}$	σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης
<u>Παράγοντες</u>	
$X_{ce}$	ποσοστό υγρασίας ισορροπίας (kg/kg db)
$X_{c0}$	αρχικό ποσοστό υγρασίας ισορροπίας (kg/kg db)
$T$	θερμοκρασία αέρα (°C)
$\alpha_w$	ενεργότητα αέρα (-)
$u$	ταχύτητα αέρα (m/s)
<u>Εξισώσεις ιδιοτήτων</u>	
$\frac{dX_{cr}}{dt} = \frac{1}{t_{cr}} (X_{ce} - X_{cr})$	
$X_{cr} = X_{ce} - (X_{ce} - X_{c0}) e^{-t/t_{cr}}$	
$t_{cr} = c_0 \left( \frac{u}{u_r} \right)^{c_1} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{c_2} \left( \frac{\alpha_w}{\alpha_{wr}} \right)^{c_3}$	
$t_{cr} = \frac{1}{K_{cr}}$	
<u>Παράμετροι</u>	

Σταθερές:  $c_0(h)$ ,  $c_1(-)$ ,  $c_2(-)$ ,  $c_3(-)$

$X_{c0}(kg/kg db)$ ,  $X_{ce}(kg/kg db)$

Παράγοντες που επηρεάζουν τις παραμέτρους

Υλικό  $\rightarrow c_0, X_0, X_{ce}$

Περιβάλλον  $\rightarrow c_1, c_2, c_3$

### 10.3 Αποτελέσματα - Συζήτηση

Το προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο πρώτης τάξης προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα της τριχοειδούς αναρρίχησης για τα υπό εξέταση υλικά και υπολογίστηκαν οι εμπειρικές παράμετροι του καθώς και η τυπική απόκλιση. Η καλύτερη προσαρμογή πραγματοποιήθηκε με ελαχιστοποίηση της μέσης τετραγωνικής απόκλισης, της υγρασίας ισορροπίας  $X_{ce}$  και της διορθωτικής παραμέτρου  $X_{c0}$ . Η σταθερά χρόνου  $t_{cr}$  προσδιορίστηκε από την εξίσωση (10.2) θέτοντας ως θερμοκρασία αναφοράς  $T_r = 30^\circ C$ , ως ταχύτητα αναφοράς του αέρα  $u_r = 3m/s$  και ως ενεργότητα αναφοράς του αέρα  $a_{wr} = 0,35$ . Τα αποτελέσματα για τις τιμές των εμπειρικών παραμέτρων στη μοντελοποίηση της τριχοειδούς αναρριχόμενης υγρασίας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 10.2.

**Πίνακας 10.2:** Εμπειρικές παράμετροι για τη μοντελοποίηση της τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών

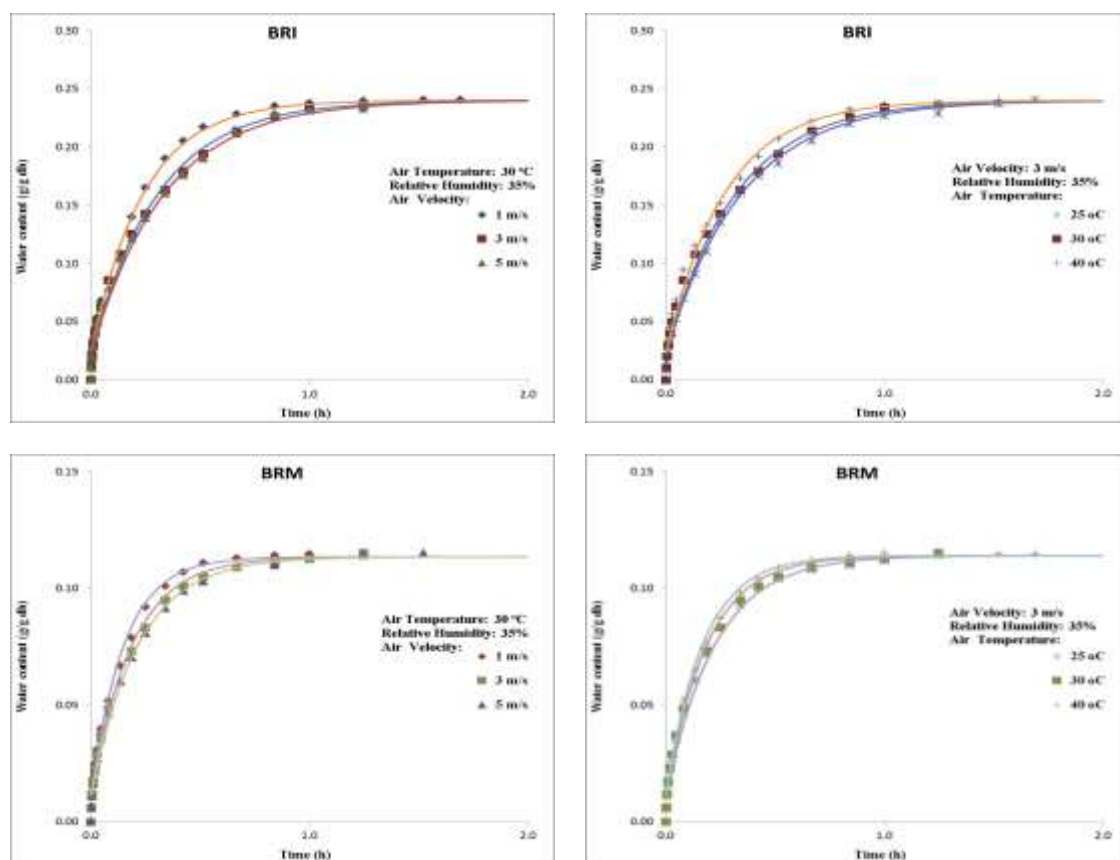
<i>Υλικά</i>	$X_{c0}(kg/kg db)$	$X_{ce}(kg/kg db)$	$c_0(h)$	$c_1(-)$	$c_2(-)$	$c_3(-)$	$S_s (kg/kg db)$
<u>Πλίνθοι</u>							
<i>BRI</i>	0.02	0.24	0.31	0.17	-0.30	0.20	3.57E-03
<i>BRM</i>	0.01	0.11	0.20	0.20	-0.50	0.22	3.26E-04
<u>Λίθοι</u>							
<i>SRH</i>	0.01	0.06	0.22	1.10	-0.90	-0.05	8.37E-04
<i>SRY</i>	0.02	0.12	0.48	0.32	-0.65	0.05	1.74E-03
<u>Κονιάματα</u>							
<i>mca20/80</i>	0.01	0.12	0.24	0.16	-0.50	0.02	3.99E-04
<i>mca25/75</i>	0.01	0.12	0.80	0.24	-0.80	0.01	3.87E-04



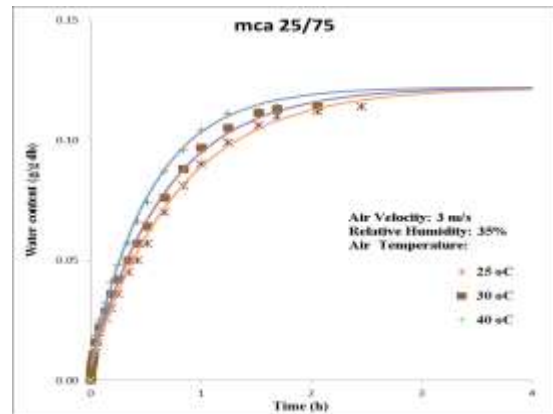
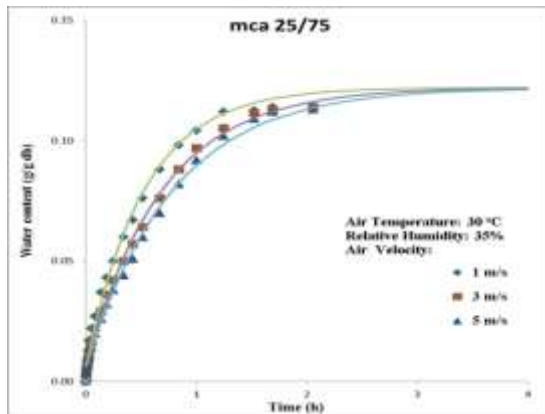
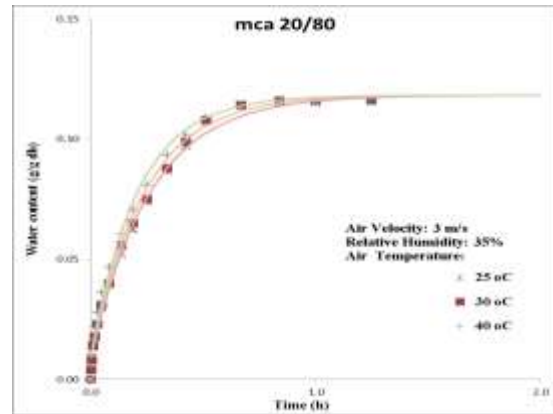
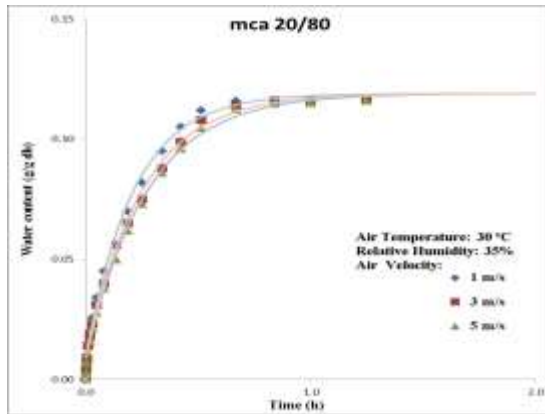
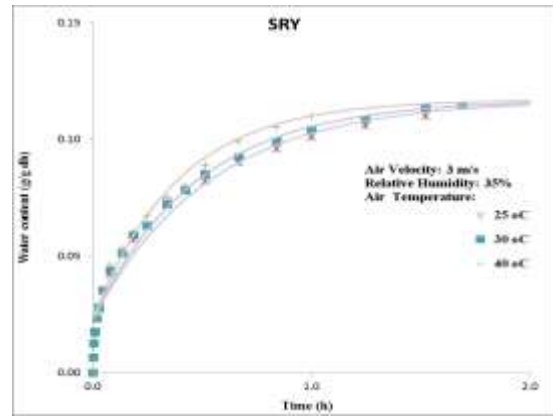
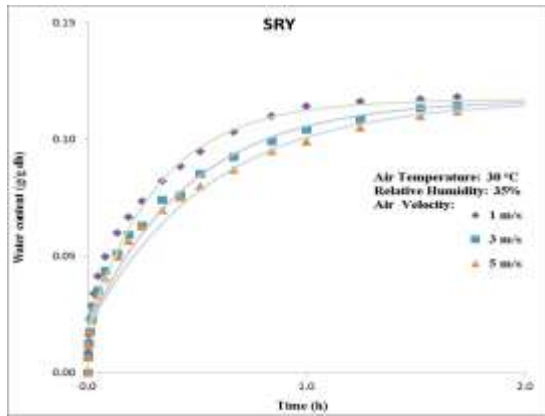
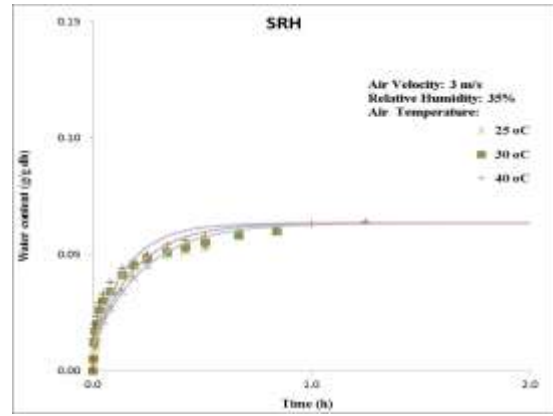
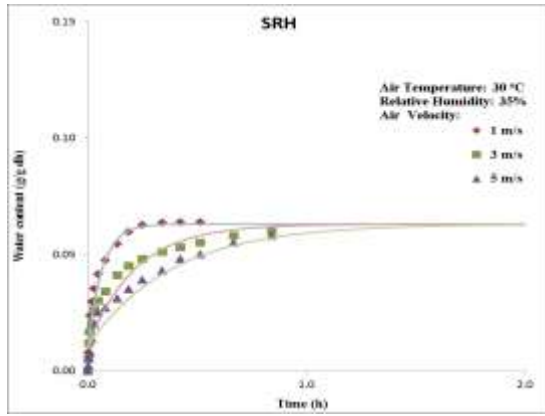
<i>mca30/70</i>	0.01	0.12	0.40	0.45	-1.20	0.20	2.39E-04
<i>mcb20/80</i>	0.01	0.12	0.79	0.61	-0.80	0.55	3.81E-04
<i>mcb25/75</i>	0.01	0.12	2.36	0.23	-0.65	0.30	3.46E-04
<i>mcb30/70</i>	0.01	0.14	3.67	0.13	-0.90	-0.15	0.86E-04

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.2, η παράμετρος  $c_0$  η οποία χαρακτηρίζει την επίδραση του υλικού στη τριχοειδή αναρρίχηση, παίρνει διαφορετικές τιμές για κάθε υλικό γεγονός που καταδεικνύει ότι η μικροδομή κάθε υλικού επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης. Διαφορετικές για κάθε υλικό είναι και οι παράμετροι  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$  που αντιπροσωπεύουν την εξάρτηση της ταχύτητας του αέρα, της θερμοκρασίας και της ενεργότητας του αέρα αντίστοιχα. Επιπλέον, οι πολύ χαμηλές τιμές της μέσης τετραγωνικής απόκλισης  $S_5$  μεταξύ των πειραματικών και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της υγρασίας, καταδεικνύουν ότι η προσαρμογή είναι πολύ καλή αποδεικνύοντας ότι το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει με επιτυχία το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης.

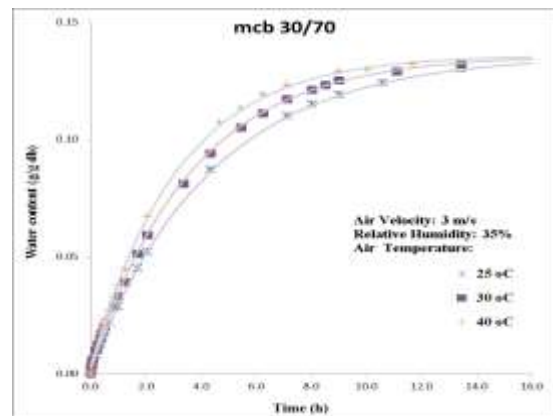
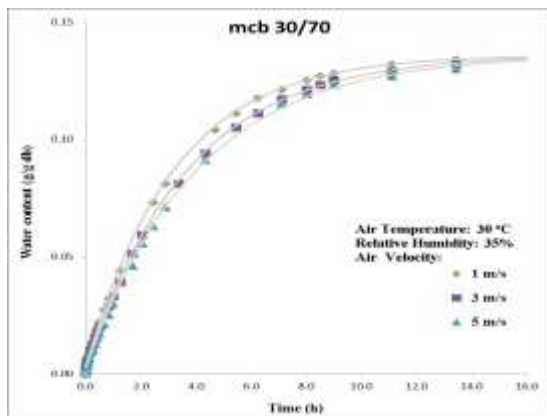
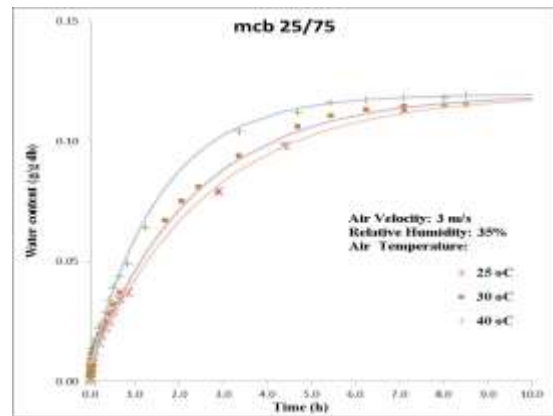
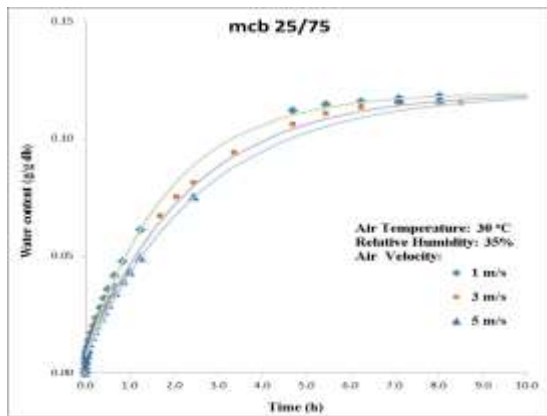
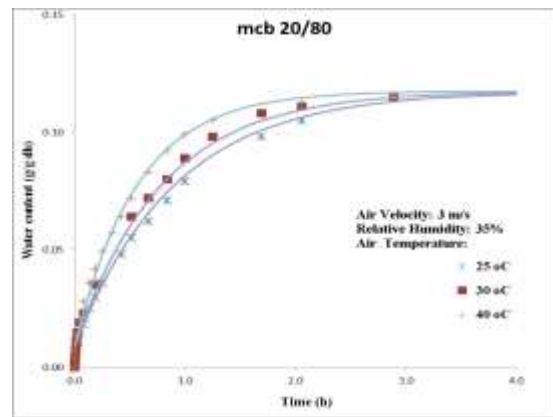
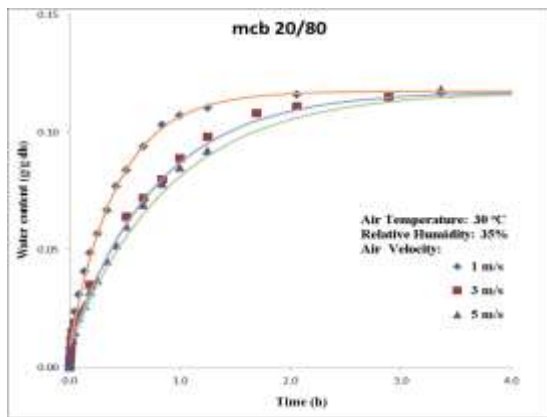
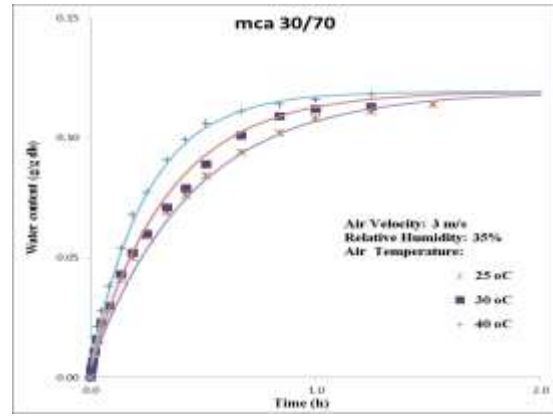
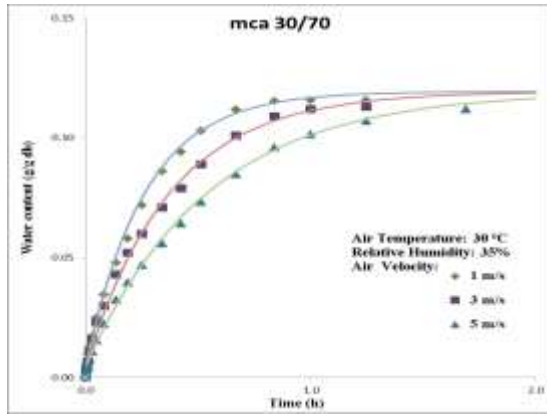
Τα πειραματικά αποτελέσματα της κινητικής της τριχοειδούς αναρρίχησης μαζί με τη προσαρμογή του μαθηματικού μοντέλου για όλα τα εξεταζόμενα υλικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.1.



Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών



Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών



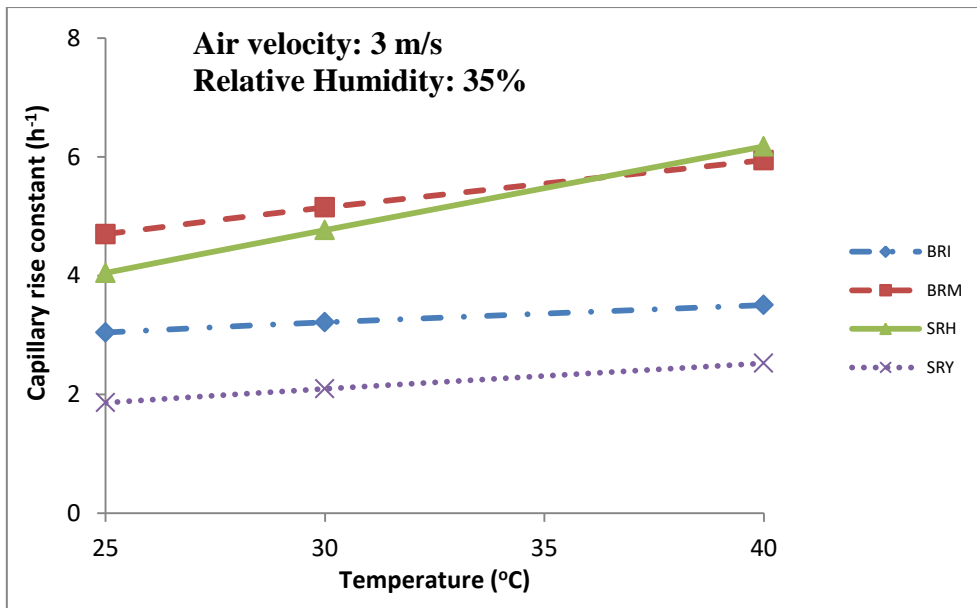
**Σχήμα 10.1:** Οι κινητικές τριχοειδούς αναρρίχησης για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και ταχύτητας αέρα για τα υπό εξέταση δομικά υλικά.

Από το Σχήμα 10.1 είναι φανερό ότι κάθε δομικό υλικό επιδεικνύει διαφορετική συμπεριφορά στη τριχοειδή αναρρίχηση καθώς και ότι η τριχοειδής υδαταπορρόφηση επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (βλ. π.χ. κονίαμα *mca30/70*). Η επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων μεταβάλλεται σε σχέση με τις ιδιότητες των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης αυξάνει όταν αυξάνει η θερμοκρασία (π.χ. κονιάματα *mca25/75*, *mca30/70* και *mcb20/80*). Η επίδραση της θερμοκρασίας πάνω στο ρυθμό τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών έχει καταδειχθεί από προηγούμενες μελέτες. Στη παρούσα μελέτη έγινε μια επιβεβαίωση αυτής της εξάρτησης κάτω από διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας του αέρα, και σχετικής υγρασίας (δυναμικές συνθήκες).

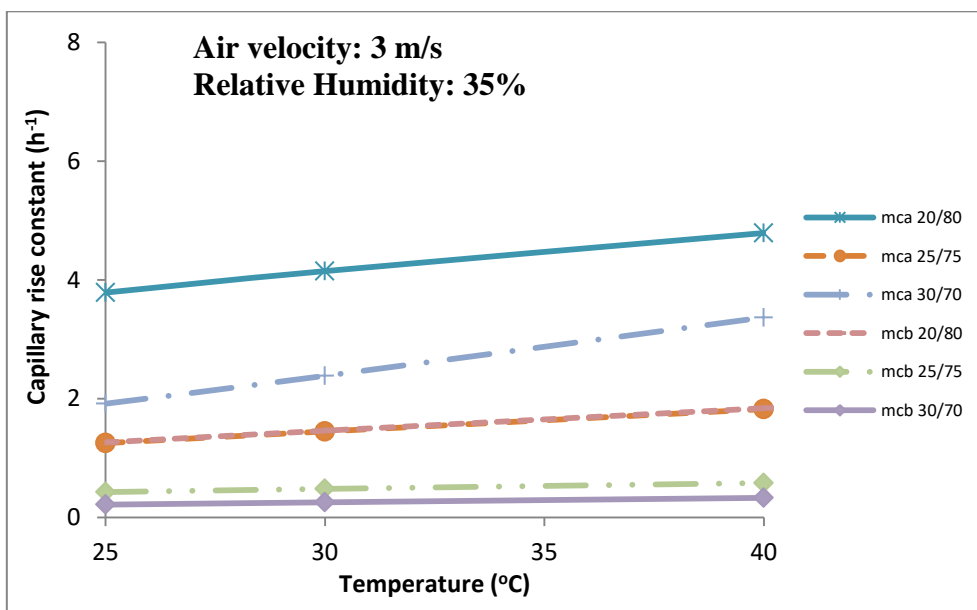
Η ταχύτητα του αέρα θεωρείται ένας πρωταρχικής σημασίας περιβαλλοντικός παράγοντας που επηρεάζει τα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας στα δομικά υλικά. Παρ' όλα αυτά η παράμετρος αυτή συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη όταν μελετάται η τριχοειδής αναρρίχηση. Όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη τριχοειδή υδαταπορρόφηση, είναι φανερό ότι όσο αυξάνει η ταχύτητα του αέρα, μειώνεται ο ρυθμός της τριχοειδούς υδαταπορρόφησης (βλ. λίθοι *SRH*, *SRY* και κονίαμα *mca30/70*). Τέλος, όσον αφορά την επίδραση της σχετικής υγρασίας στη τριχοειδή αναρρίχηση, παρατηρείται ότι αυξανόμενης της σχετικής υγρασίας ο ρυθμός τριχοειδούς υδαταπορρόφησης μειώνεται για όλα τα υπό εξέταση υλικά.

Εκτός από την επίδραση των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης, τα εγγενή χαρακτηριστικά των υλικών επηρεάζουν επίσης το ρυθμό της τριχοειδούς υδαταπορρόφησης των δομικών υλικών. Έτσι, διαφορετικά δομικά υλικά επιδεικνύουν διαφορετικούς ρυθμούς υδαταπορρόφησης, κάτω από τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες που αποδίδεται στις διαφορετικές ιδιότητες τους και χαρακτηριστικά τους (διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $c_0$ ).

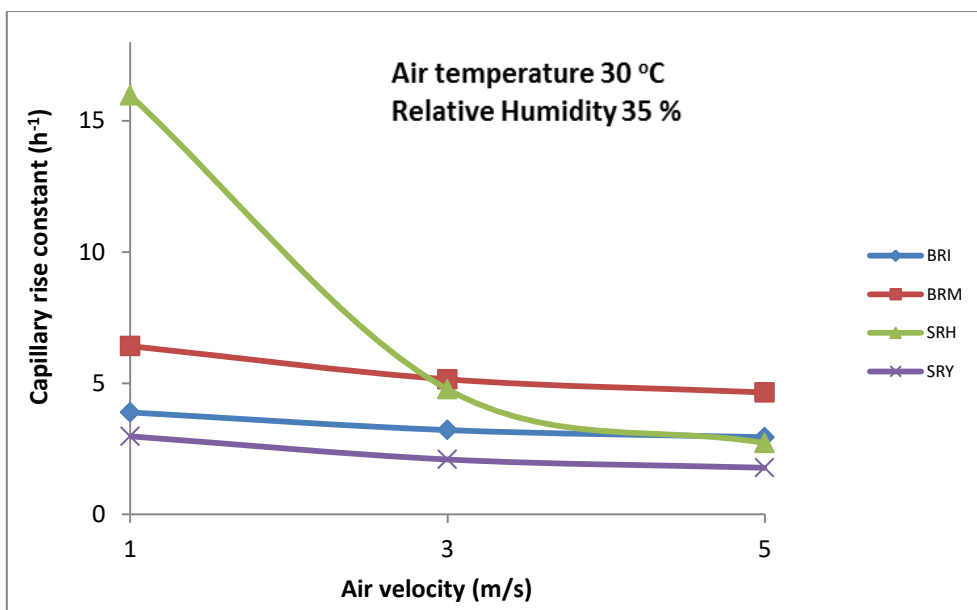
Επιπλέον, στη παρούσα μελέτη εισάγεται για πρώτη φορά μια παράμετρος της τριχοειδούς υδαταπορρόφησης που ονομάζεται σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης  $K_{cr}$  και η οποία δίνει ένα μέτρο του ρυθμού υδαταπορρόφησης για κάθε υλικό και ενσωματώνει την επίδραση τόσο των εγγενών χαρακτηριστικών των υλικών, όσο και την επίδραση του περιβάλλοντος στη τριχοειδή απορρόφηση. Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης παρουσιάζεται στα σχήματα 10.2, 10.3, 10.4 και 10.5.



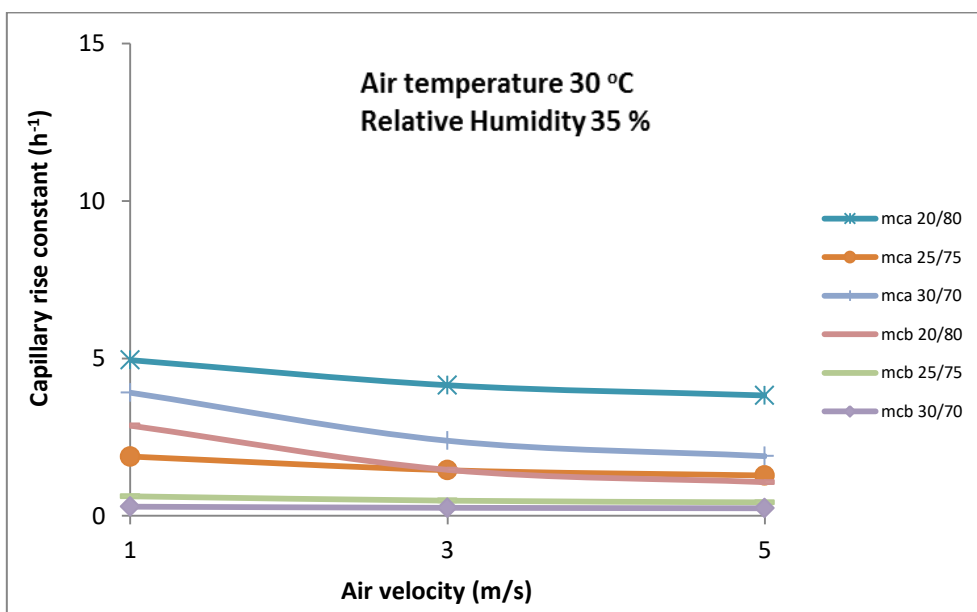
**Σχήμα 10.2:** Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των λίθων και των πλίνθων.



**Σχήμα 10.3:** Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των κονιαμάτων *mca* και *mcb*.



**Σχήμα 10.4:** Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των λίθων και των πλίνθων.



**Σχήμα 10.5:** Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των κονιαμάτων *mca* και *mcb*.

Όπως παρατηρείται από τα ανωτέρω σχήματα, η επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά  $K_{cr}$  είναι αξιοσημείωτη. Παρ' όλα αυτά η επίδραση αυτή δεν είναι η ίδια για όλα τα υλικά, γεγονός που αποδίδεται στα διαφορετικά εγγενή χαρακτηριστικά τους. Πιο συγκεκριμένα, οι πλίνθοι *BRI* και *BRM* παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά που βασίζονται στις διαφορετικές πρώτες ύλες τους και στη διαφορετική

διαδικασία παραγωγής τους.<sup>268</sup> Στους εξεταζόμενους λίθους, αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στις διαφορετικές ορυκτολογικές συνθέσεις τους, στα διαφορετικά πορώδη τους, στις κατανομές μεγέθους των πόρων τους, κ.ά.<sup>269</sup> Επιπλέον, οι λίθοι *SRH* παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μείωση της σταθεράς τριχοειδούς αναρρίχησης με την ταχύτητα αέρα (βλ. Σχήμα 10.4). Αυτό το υλικό επιδεικνύει τη συγκεκριμένη συμπεριφορά πιθανότατα λόγω της μεγαλύτερης μέσης ακτίνας των πόρων του. Σε γενικές γραμμές, οι μεγάλοι πόροι ενός υλικού ευνοούν την καλύτερη κυκλοφορία του αέρα και την μεγαλύτερη εξάτμιση των υγρών.<sup>270</sup> Όσον αφορά τα κονιάματα, τα *mca* κονιάματα (κονιάματα με κονία *NHL2* ως συνδετικό υλικό) επιδεικνύουν υψηλότερες τιμές της σταθεράς τριχοειδούς αναρρίχησης σε σχέση με τα *mcB* κονιάματα (κονιάματα με κονία *NHL3.5* ως συνδετικό υλικό). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό τύπο κονιάς η οποία καθορίζει και τα διαφορετικά εγγενή χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, μια σύγκριση των τιμών της σταθεράς τριχοειδούς αναρρίχησης κονιαμάτων με την ίδια συνδετική κονία αλλά με διαφορετική αναλογία κονιάς/αδρανών (20/80, 25/75 και 30/70), δείχνει μια διαφορετική επίδραση που και αυτή αποδίδεται στο διαφορετικό σχεδιασμό τους (mix design).

Για να αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητα (applicability) του προαναφερθέντος μοντέλου, έγινε μια σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με ένα εναλλακτικό μοντέλο από τη βιβλιογραφία και το οποίο περιγράφει το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο από τα παραδείγματα που αναφέρονται στον Πίνακα 5.2 και μετά την προσαρμογή του στο πειραματικά δεδομένα, συγκρίθηκε με το παρουσιαζόμενο μοντέλο της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, οι Hoffman και Niesel,<sup>235</sup> θέλοντας να περιγράψουν τη τριχοειδή υδαταπορρόφηση διαφόρων κατηγοριών πορωδών υλικών, πρότειναν ένα εμπειρικό εκθετικό μοντέλο με μορφή:

$$m = a [1 - \exp(-bt^{1/2})] \quad (10.6)$$

όπου:  $m$  είναι η μάζα του απορροφούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας επαφής του υλικού με το νερό,  $a$  είναι η υγρασία κορεσμού μέσω τριχοειδών ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού,  $b$  είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τη κινητική ρόφησης και  $t$  ο χρόνος του πειράματος.

Οι συγκεκριμένοι ερευνητές επίσης πρότειναν ότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  των υλικών συνδέεται με τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  του παραπάνω μοντέλου σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_w = a \cdot b \quad (10.7)$$

<sup>268</sup> Johari, I., Said, S., Hisham, B., Bakar, A., Ahmad, Z. A. (2010): Effect of the Change of Firing Temperature on Microstructure and Physical Properties of Clay Bricks from Beruas (Malaysia), *Science of Sintering*, 42, 245-254.

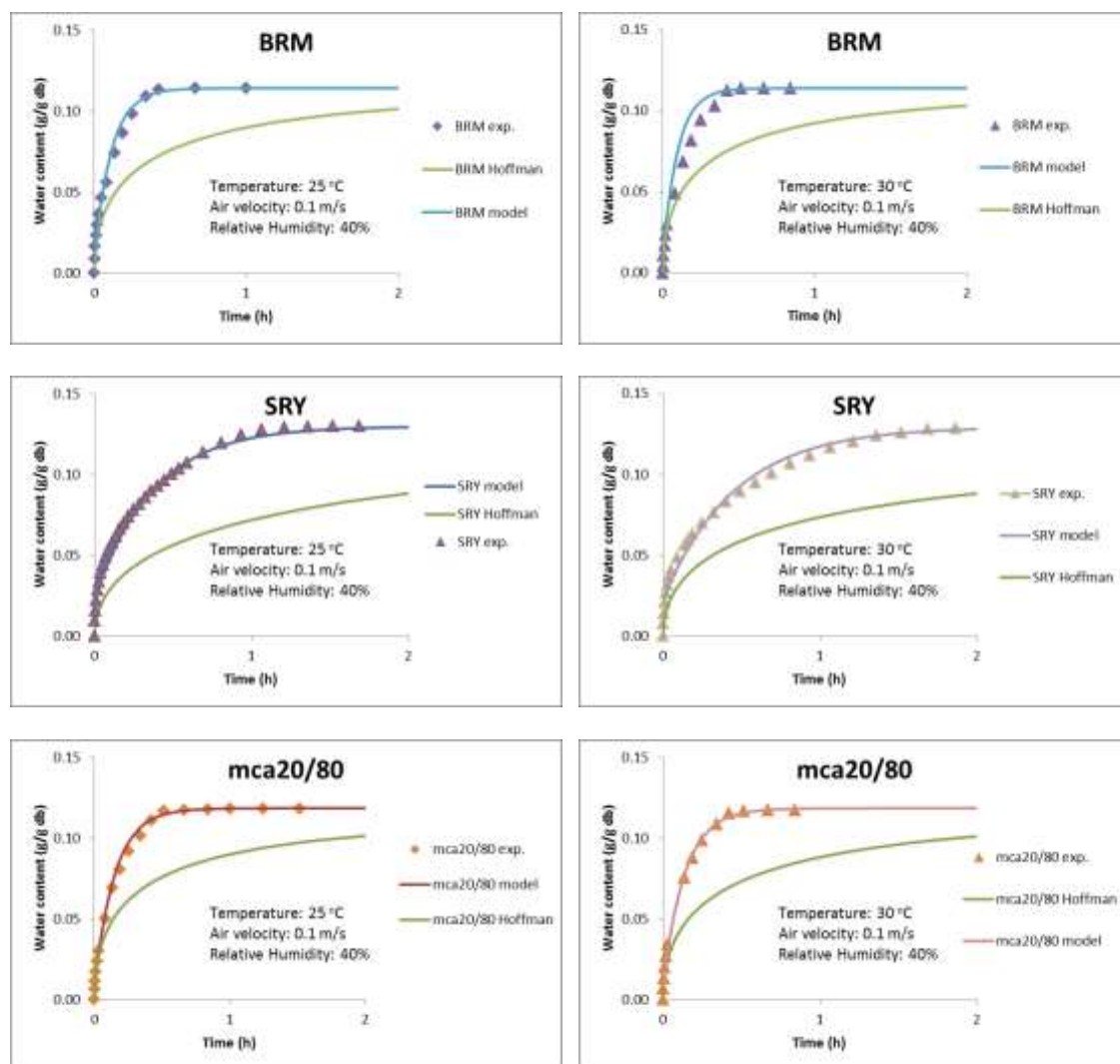
<sup>269</sup> Ksinopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou A. (2014): Modification of Si-based Consolidants by the Addition of Colloidal Nanoparticles: Application in Porous Stones, *Journal of Nano Research*, 27, 143-152.

<sup>270</sup> Wendler, E., Charola, A.E. (2008): Water and its interaction with porous inorganic building materials, Proc. Hydrophobe V: 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Water Repellent Treatment of Building Materials, Aedification Publishers, 57-74.

Δεδομένου ότι οι ποσότητες  $m$  και  $a$  είναι ανάλογες με το ποσοστό υγρασίας  $X_{cr}$  και το ποσοστό υγρασίας ισορροπίας  $X_{ce}$  αντίστοιχα, η σχέση (10.6) γράφεται:

$$X_{cr} = X_{ce} [1 - \exp(-bt^{1/2})] \quad (10.8)$$

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που προτείνεται στην εργασία των Hoffman και Niesel, έγινε υπολογισμός της παραμέτρου  $b$  για ορισμένα δομικά υλικά (*BRM*, *SRY* και *mca20/80*), λαμβάνοντας τις τιμές του συντελεστή υδαταπορρόφησης τους  $A_w$  στους 25 και 30°C από προηγούμενες μετρήσεις και την τιμή της υγρασίας ισορροπίας  $X_{ce}$  από τον Πίνακα 10.2. Επιπλέον, καθώς το μοντέλο των Hoffman και Niesel αναφέρεται σε στατικές συνθήκες αέρα, η ταχύτητα του αέρα θεωρήθηκε ίση με μηδέν. Μετά από αυτό, μια σύγκριση έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εξίσωση (10.8) με το προτεινόμενο μοντέλο της παρούσας διατριβής (βλέπε εξίσωση (10.4)), και με τα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο Σχήμα 10.6.



Σχήμα 10.6: Σύγκριση των μοντέλων με τα πειραματικά δεδομένα στους 25 και 30°C για ορισμένα δομικά υλικά.



Όπως φαίνεται καθαρά από το Σχήμα 10.6, το προτεινόμενο ημι-εμπειρικό μοντέλο έχει πολύ καλύτερη προσαρμογή με τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το μοντέλο των Hoffman και Niesel δεν ενσωματώνει την επίδραση του περιβάλλοντος και κατά συνέπεια δεν μπορεί να έχει μεγάλη ακρίβεια. Η παράμετρος  $a$  του μοντέλου των Hoffman και Niesel είναι ανεξάρτητη της πειραματικής μεθόδου και παραμένει σταθερή για κάθε υλικό (είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό του υλικού). Η παράμετρος  $b$  είναι η μόνη που συνδέεται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες (μέσω του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  – σχέση (10.7)) αγνοώντας την επίδραση της ταχύτητας του αέρα και της σχετικής υγρασίας στη τριχοειδή ρόφηση των δομικών υλικών.

#### **10.4 Μερικά Συμπεράσματα**

Στη διεθνή βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται πολλά μοντέλα προκειμένου να προβλεφτεί η συμπεριφορά των δομικών υλικών κατά τη διάρκεια της υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τους διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους και προσομοιώνουν την συμπεριφορά των υλικών κάτω από την επίδραση των παραμέτρων αυτών. Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του αέρα και της σχετικής υγρασίας στην κινητική της υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων σε διάφορα δομικά υλικά. Βρέθηκε ότι η κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης μπορεί να περιγραφεί με επιτυχία με τη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου πρώτης τάξης. Το ημι-εμπειρικό αυτό μοντέλο ταιριάζει με επιτυχία με τα πειραματικά δεδομένα και περιγράφει επαρκώς την πρόσληψη νερού μέσω των τριχοειδών πόρων των εξεταζόμενων υλικών υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Διαπιστώθηκε ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν την τριχοειδή υδαταπορρόφηση διαφόρων δομικών υλικών. Μία αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα προκαλεί αύξηση του ρυθμού υδαταπορρόφησης ενώ μια αύξηση είτε της ταχύτητας του αέρα ή της σχετικής υγρασίας επιφέρει μια μείωση στο ρυθμό υδαταπορρόφησης των εξεταζόμενων υλικών. Επιπλέον, βρέθηκε ότι τα εγγενή χαρακτηριστικά κάθε υλικού διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην τριχοειδή υδαταπορρόφηση. Όλες οι παραπάνω παράμετροι ενσωματώνονται με την εισαγωγή μιας νέας παραμέτρου στο μοντέλο που ονομάζεται σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης  $K_{cr}$ .

Επιπλέον, το προτεινόμενο μοντέλο συγκρίθηκε με μοντέλα άλλων ερευνητών με σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας του. Διαπιστώθηκε ότι η προσαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα ήταν πιο ακριβής λόγω της ενσωμάτωσης των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών και των εγγενών χαρακτηριστικών των υλικών σε αυτό.

Το κύριο πλεονέκτημα του ανωτέρω μοντέλου είναι η άμεση συσχέτιση του με τα πειραματικά δεδομένα και η μεγάλη δυνατότητα εφαρμογής του. Έτσι, αυτό το προαναφερθέν ημι-εμπειρικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη διαδικασία της τριχοειδούς αναρρίχησης σε δομικά υλικά, κάτω από δυναμικές περιβαλλοντικές συνθήκες, καταστρώνοντας το ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την αξιολόγηση των κινδύνων σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα δομικά υλικά.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11<sup>ο</sup>: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

### 11.1 Εισαγωγή

Η υγρασία που προέρχεται από το έδαφος μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης σε συνδυασμό με τη ξήρανση, είναι οι βασικές αιτίες φθοράς τόσο σε ιστορικά όσο και σε σύγχρονα κτήρια. Το ποσοστό υγρασίας σε μια τοιχοποιία εξαρτάται από τους ρυθμούς ύγρυνσης και ξήρανσης. Η μελέτη της κινητικής της ξήρανσης των υλικών σε συνδυασμό με τη κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης τους είναι πολύ χρήσιμες για τη κατανόηση των μηχανισμών της φθοράς στα δομικά υλικά. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του αέρα και η σχετική υγρασία παίζουν με τη σειρά τους καθοριστικό ρόλο στη κινητική της ξήρανσης των υλικών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα μαθηματικά μοντέλα πρώτης τάξης είναι κατάλληλα για τη περιγραφή της κινητικής ξήρανσης ενός δομικού υλικού. Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιούνται πειράματα ξήρανσης στα υπό εξέταση δομικά υλικά, σε ένα πειραματικό ξηραντήριο, κάτω από ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα μαθηματικό μοντέλο πρώτης τάξης για τη κινητική της ξήρανσης των υλικών. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη του τις περιβαλλοντικές συνθήκες σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών και προβλέπει με επιτυχία την εφαρμογή της ξήρανσης διαφόρων δομικών υλικών καταδεικνύοντας της επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων στη σταθερά ξήρανσης των υλικών.

### 11.2 Μαθηματικό μοντέλο της ξήρανσης

Από όλα τα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα ξήρανσης τα οποία έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία μέχρι σήμερα, ένα απλό μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης φαίνεται να είναι κατάλληλο για να περιγράψει τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας κατά τη ξήρανση.<sup>271, 272, 273</sup> Το μοντέλο αυτό είναι ικανό να περιγράψει τη περίοδο μειωμένου ρυθμού ξήρανσης και δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{t_d}(X-X_e) \quad (11.1)$$

<sup>271</sup> Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B. (1995): Transport properties in the drying of solids. In Handbook of Industrial Drying, Vol. 2; Mujumdar, A.S., Ed.; Marcel Dekker: New York.

<sup>272</sup> Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B., Kiranoudis, C.T. (1996): Computer simulation of industrial dryers. *Drying Technology*, 14, 5, 971–1010.

<sup>273</sup> Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. (2002): Modeling, Simulation and Design of Drying Processes. Keynote lecture at the 13<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS, Beijing, China.

όπου  $dX/dt$  είναι ο ρυθμός ξήρανσης του υλικού,  $X$  (kg/kg db) είναι το ποσοστό υγρασίας στο υλικό σε χρόνο  $t$ ,  $t_d$  η σταθερά χρόνου ξήρανσης (h) και  $X_e$  (kg/kg db) είναι το ποσοστό υγρασίας ισορροπίας του υλικού.

Η σταθερά χρόνου ξήρανσης  $t_d$  εκφράζει τον απαιτούμενο χρόνο μέσα στον οποίο απομακρύνονται τα 2/3 της υγρασίας από το υλικό και, όπως και ο ρυθμός ξήρανσης, εξαρτάται από τις συνθήκες ξήρανσης και από τα χαρακτηριστικά του υλικού.<sup>129 274</sup>

Το προτεινόμενο μοντέλο επίσης ενσωματώνει στη σταθερά χρόνου ξήρανσης, την ταχύτητα του αέρα  $u$ (m/s), τη θερμοκρασία  $T$ (°C) και την ενεργότητα του αέρα  $\alpha_w$ (-) σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_d = d_0 \left( \frac{u}{u_r} \right)^{d_1} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{d_2} \left( \frac{\alpha_w}{\alpha_{wr}} \right)^{d_3} \quad (11.2)$$

όπου  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  είναι κατάλληλες εμπειρικές σταθερές,  $T_r$  είναι η θερμοκρασία αναφοράς,  $\alpha_{wr}$  η ενεργότητα αναφοράς του αέρα και  $u_r$  η ταχύτητα αναφοράς του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, η παράμετρος  $d_0$  περιγράφει την επίδραση του υλικού στη σταθερά χρόνου ξήρανσης και εξαρτάται από τις διαστάσεις κάθε δοκιμίου και από τα εγγενή χαρακτηριστικά του υλικού ενώ οι παράμετροι  $d_1$ ,  $d_2$  και  $d_3$  καταδεικνύουν την επίδραση του περιβάλλοντος στη σταθερά χρόνου ξήρανσης.

Η σταθερά χρόνου ξήρανσης  $t_d$  είναι αντίστροφα ανάλογη με τη σταθερά ξήρανσης  $K$  του υλικού και έτσι η εξίσωση (11.1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad (11.3)$$

Το ποσοστό υγρασίας ισορροπίας  $X_e$  του υλικού εξαρτάται από τη θερμοκρασία  $T$  και την ενεργότητα του αέρα  $\alpha_w$  και μπορεί να υπολογιστεί από το τροποποιημένο μοντέλο του Oswin σύμφωνα με την εξίσωση:

$$X_e = b_0 \exp \left( \frac{b_1}{T} \right) \left( \frac{\alpha_w}{1 - \alpha_w} \right)^{b_2} \quad (11.4)$$

όπου  $X_e$  είναι το ποσοστό υγρασίας ισορροπίας (kg/kg db%),  $T$  η θερμοκρασία του αέρα (°C),  $\alpha_w$  η ενεργότητα του αέρα και  $b_0$ ,  $b_1$ , και  $b_2$  κατάλληλες εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού.

Οι τιμές των σταθερών  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  μπορούν να καθοριστούν με κατάλληλη προσαρμογή της προτεινόμενης εξίσωσης (11.4) στα πειραματικά δεδομένα, ελαχιστοποιώντας την

<sup>274</sup> Saravacos, G.D., Maroulis, Z.B. (2001): Transport Properties of Foods, Marcel Dekker: New York.

ακόλουθη μέση τετραγωνική απόκλιση  $S_5$  του τοπικού αθροίσματος των τετραγώνων μεταξύ των πειραματικών και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της υγρασίας:

$$S_5 = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(X_e - X_e^*)^2}{(N-p)} \right]^{1/2} \quad (11.5)$$

όπου  $X_e$  και  $X_e^*$  είναι οι πειραματικές και οι προβλεπόμενες τιμές του ποσοστού υγρασίας ισορροπίας,  $N$  είναι το πλήθος των πειραματικών σημείων και  $p$  είναι ο αριθμός των υπολογιζόμενων τιμών.

Οι παράμετροι του μοντέλου  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  και  $d_3$  υπολογίζονται με προσαρμογή των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης εξίσωσης (11.1) στα πειραματικά δεδομένα, ελαχιστοποιώντας τη μέση τετραγωνική απόκλιση ανάμεσα στις προβλεπόμενες και στις πειραματικές τιμές.

Στον Πίνακα 11.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά το μαθηματικό μοντέλο της ξήρανσης των δομικών υλικών.

**Πίνακας 11.1:** Μαθηματικό μοντέλο ξήρανσης των δομικών υλικών

---

<u>Ιδιότητες</u>	
$X$	ποσοστό υγρασίας
$t_d$	σταθερά χρόνου ξήρανσης

<u>Παράγοντες</u>	
$X_e$	Ποσοστό υγρασίας ισορροπίας
$T$	θερμοκρασία αέρα (°C)
$a_w$	ενεργότητα αέρα (-)
$u$	ταχύτητα αέρα (m/s)

<u>Εξισώσεις ιδιοτήτων</u>	
$\frac{dX}{dt}$	$= -\frac{1}{t_d} (X - X_e)$
$t_d$	$= d_0 \left( \frac{u}{u_r} \right)^{d_1} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{d_2} \left( \frac{\alpha_w}{\alpha_{w_r}} \right)^{d_3}$

$$t_d = \frac{1}{K}$$

$$t = t_d \ln \left( \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right)$$

$$X_e = b_0 \exp \left( \frac{b_1}{T} \right) \left( \frac{\alpha_w}{1 - \alpha_w} \right)^{b_2}$$

#### Παράμετροι

Σταθερές:  $d_0(\text{h}), d_1(-), d_2(-), d_3(-)$

Σταθερές:  $b_0(\text{kg/kg db}\%), b_1(^{\circ}\text{C}), b_2(-)$

#### Παράγοντες που επιδρούν στις παραμέτρους

Υλικό  $\rightarrow d_0, b_0$

Περιβάλλον  $\rightarrow d_1, d_2, d_3, b_1, b_2$

### 11.3 Αποτελέσματα - Συζήτηση

Το μοντέλο ξήρανσης πρώτης τάξης προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα για όλα τα εξεταζόμενα υλικά και τα αποτελέσματα του υπολογισμού των παραμέτρων μαζί με τη τυπική απόκλιση συνοψίζονται στο Πίνακα 11.2. Η καλύτερη προσαρμογή πραγματοποιήθηκε ελαχιστοποιώντας την μέση τετραγωνική απόκλιση η οποία δίνεται στην εξίσωση (11.5). Οι τιμές των παραμέτρων  $b_0, b_1$  και  $b_2$  έχουν υπολογιστεί μετά από τη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων με το τροποποιημένο μοντέλο του Oswin και χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της υγρασίας ισορροπίας  $X_e$  κάθε υλικού μέσω της εξίσωσης (11.4). Η σταθερά χρόνου  $t_d$  υπολογίστηκε από την εξίσωση (11.2) θέτοντας ως θερμοκρασία αναφοράς  $T_r=30^{\circ}\text{C}$ , ως ενεργότητα αναφοράς του αέρα  $\alpha_{wr}=0,35$  και ως ταχύτητα αναφοράς του αέρα  $u_r=3\text{m/s}$ .

**Πίνακας 11.2:** Υπολογιζόμενες παράμετροι κατά τη ξήρανση των δομικών υλικών.

Υλικά	$d_0(\text{h})$	$d_1(-)$	$d_2(-)$	$d_3(-)$	$S_s (\text{kg/kg db}\%)$
-------	-----------------	----------	----------	----------	---------------------------

Πλίνθοι

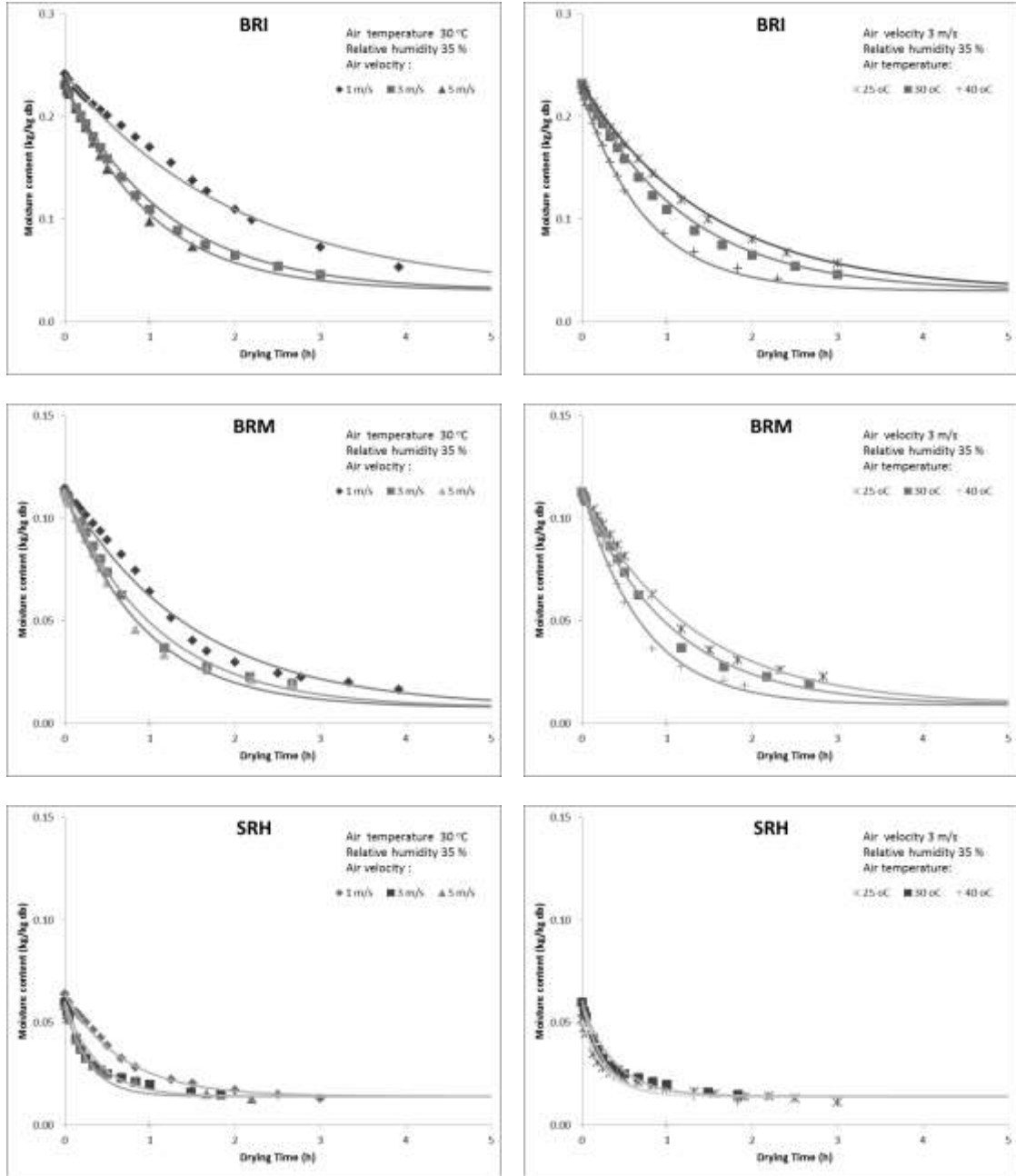
<i>BRI</i>	1.38	-0.35	-0.38	-1.08	4.81E-03
<i>BRM</i>	1.01	-0.38	-0.77	0.27	2.44E-03
<u>Λίθοι</u>					
<i>SRH</i>	0.42	-0.36	-0.42	0.72	6.20E-04
<i>SRY</i>	0.74	-0.42	-0.53	0.43	2.73E-03
<u>Κονιάματα</u>					
<i>mca20/80</i>	0.83	-0.33	-0.89	0.43	5.08E-03
<i>mca25/75</i>	0.99	-0.34	-0.96	0.55	3.16E-03
<i>mca30/70</i>	0.87	-0.43	-1.01	0.49	3.74E-03
<i>mcb20/80</i>	1.10	-0.40	-0.48	0.59	1.76E-03
<i>mcb25/75</i>	1.37	-0.33	-0.07	0.72	4.10E-04
<i>mcb30/70</i>	1.84	-0.30	-0.43	0.62	1.16E-03

Όπως φαίνεται και στο Πίνακα 11.2, οι πολύ μικρές τιμές της μέσης τετραγωνικής απόκλισης  $S_5$  καταδεικνύουν το ότι η προσαρμογή του μοντέλου ξήρανσης με τα πειραματικά δεδομένα είναι πολύ καλή και άρα το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια το φαινόμενο της ξήρανσης στα εξεταζόμενα υλικά. Επιπλέον, η παράμετρος  $d_0$  η οποία χαρακτηρίζει το υλικό, παίρνει διαφορετικές τιμές για κάθε υλικό πράγμα που σημαίνει ότι η διαδικασία της ξήρανσης επηρεάζει κάθε δομικό υλικό με διαφορετικό τρόπο. Επίσης, οι παράμετροι  $d_1$ ,  $d_2$  και  $d_3$  που αντιπροσωπεύουν την επίδραση της θερμοκρασίας, της ενεργότητας του αέρα και της ταχύτητας του αέρα αντίστοιχα στη διαδικασία της ξήρανσης αλλάζουν για κάθε υλικό.

Μια πιο λεπτομερής ανάλυση δείχνει ότι η παράμετρος  $d_3$  που αντιπροσωπεύει την επίδραση της ενεργότητας του αέρα στη σταθερά του χρόνου ξήρανσης, λαμβάνει τιμές από 0,4 έως 0,7 για τη πλειονότητα των εξεταζόμενων υλικών. Εξαιρέση αποτελούν οι πλίνθοι *BRI* και *BRM* στους οποίους η  $d_3$  είναι ίση με -1,08 και 0,27 αντίστοιχα. Η παράμετρος  $d_2$  που αντιπροσωπεύει την επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά του χρόνου ξήρανσης βρέθηκε να έχει ένα πιο ευρύ πεδίο τιμών ενώ η παράμετρος  $d_1$  αντιπροσωπεύει την επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά του χρόνου ξήρανσης και λαμβάνει τιμές από -0,3 έως -0,5 για όλα τα εξεταζόμενα υλικά.

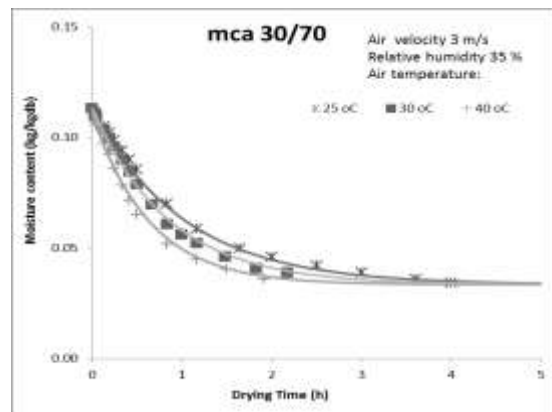
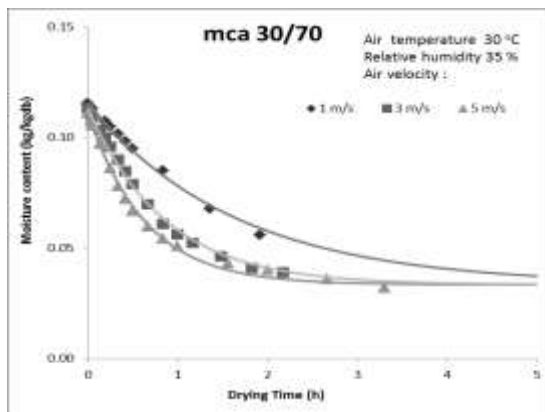
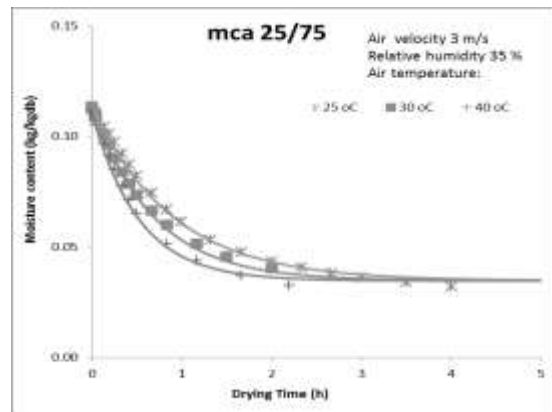
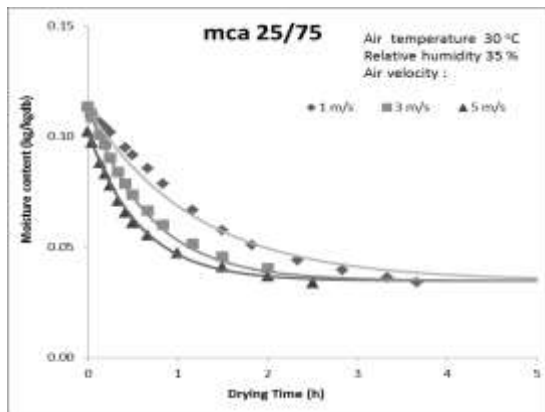
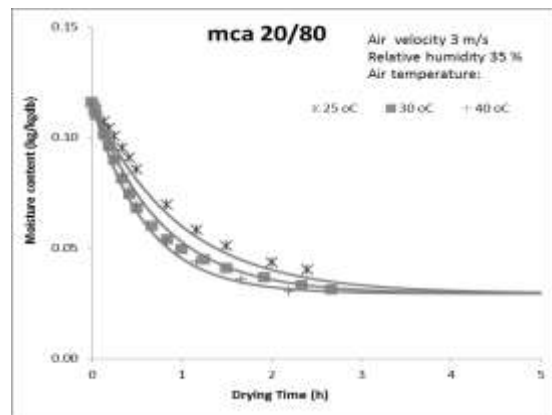
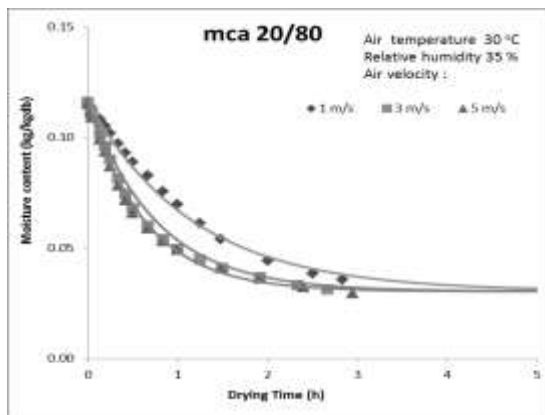
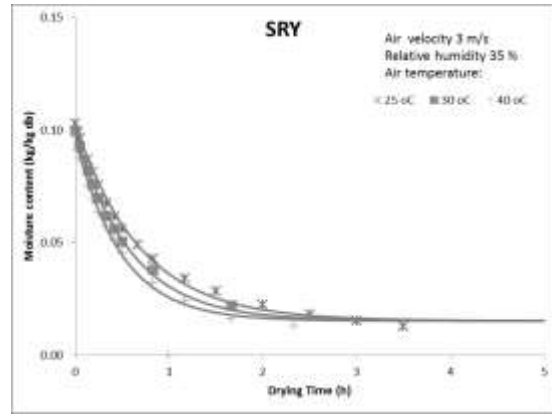
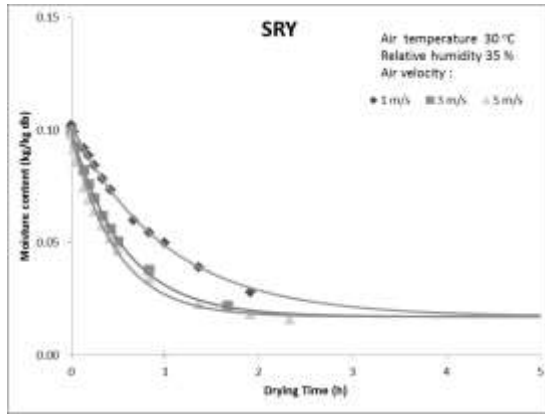
Τα πειραματικά αποτελέσματα της κινητικής της ξήρανσης μαζί με τη προσαρμογή του μοντέλου ξήρανσης για όλα τα εξεταζόμενα υλικά εμφανίζονται στο Σχήμα 11.1. Στο Σχήμα 11.1 επίσης παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές φάσεις της ξήρανσης: το στάδιο σταθερού ρυθμού ξήρανσης (φάση I) και το στάδιο μειωμένου ρυθμού ξήρανσης (φάση II) για κάθε υλικό. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11.1, η επίδραση της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντικές σε όλα τα εξεταζόμενα υλικά. Έτσι, διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν τη κινητική ξήρανσης των υλικών με διαφορετικό

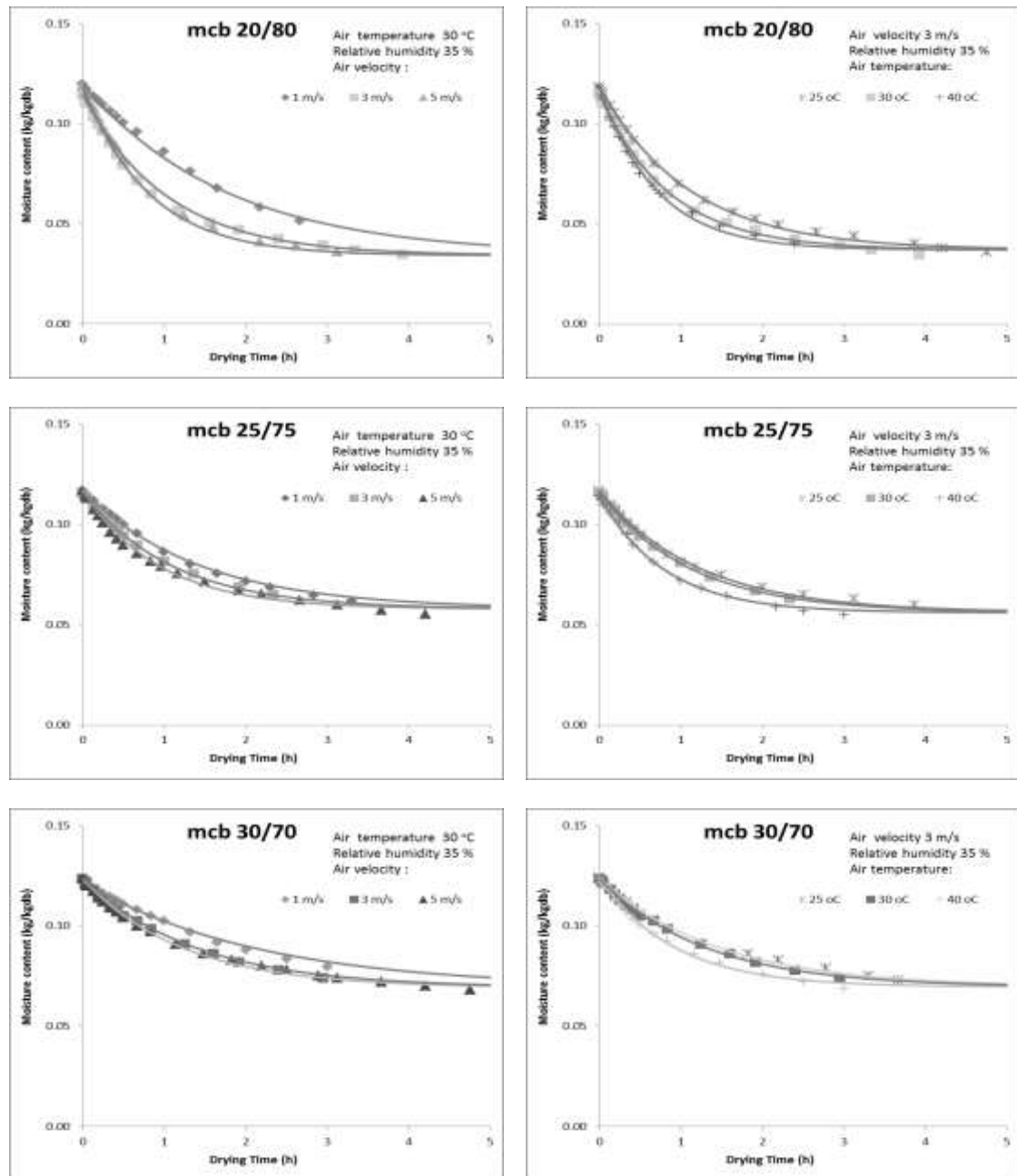
τρόπο. Επίσης, η μορφή και η κλίση των διαγραμμάτων είναι διαφορετική για διαφορετικά υλικά. Επίσης, είναι φανερό από το Σχήμα 11.1 ότι η ξήρανση για το κάθε υλικό ξεκινάει από διαφορετικό αρχικό ποσοστό υγρασίας. Ενδεικτικά, ο πλίνθος *BRI* επιδεικνύει το υψηλότερο αρχικό ποσοστό υγρασίας, σε αντίθεση με το λίθο *SRH* ο οποίος έχει το χαμηλότερο αρχικό ποσοστό υγρασίας από όλα τα υπό εξέταση υλικά.





Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών





**Σχήμα 11.1:** Οι κινητικές της ξήρανσης των δομικών υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες αέρα.

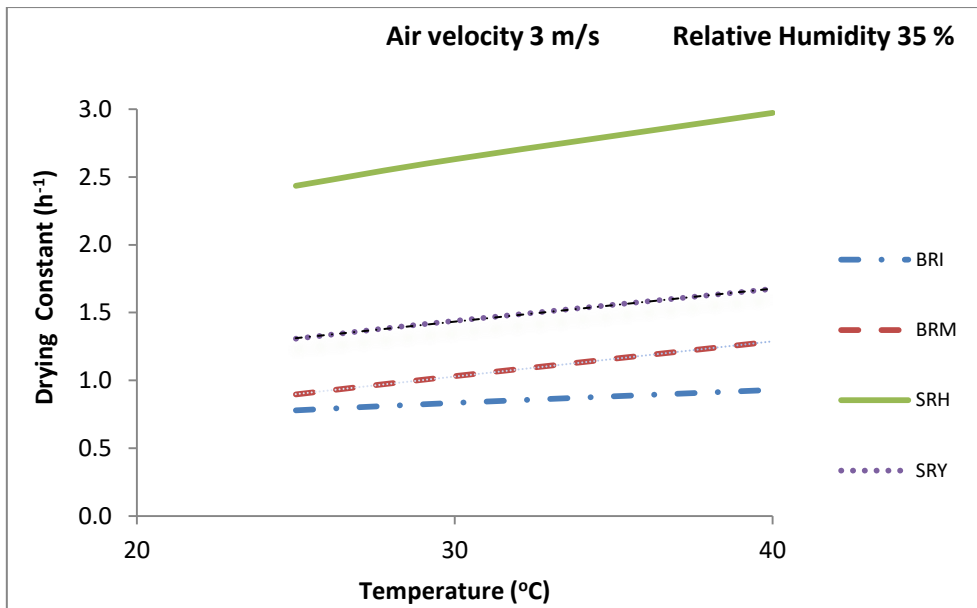
Η επίδραση των παραμέτρων της επεξεργασίας στη σταθερά ξήρανσης  $K$  παρουσιάζεται στα σχήματα 11.2, 11.3, 11.4 και 11.5. Όπως δείχνει και η εξίσωση (11.2), η σταθερά χρόνου ξήρανσης  $t_d$ , και κατά συνέπεια και η σταθερά ξήρανσης  $K$ , εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και από τα εγγενή χαρακτηριστικά των υλικών. Όσον αφορά του περιβαλλοντικούς παράγοντες, μια αύξηση της θερμοκρασίας υπό σταθερή σχετική υγρασία, οδηγεί σε μια σημαντική αύξηση της σταθεράς ξήρανσης για όλα τα υλικά. Επιπλέον, μια αύξηση της ταχύτητας του αέρα οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές της σταθεράς ξήρανσης και κατά συνέπεια, σε υψηλότερους ρυθμούς ξήρανσης.

Από όλα τα εξεταζόμενα υλικά, ο λίθος SRH παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές σταθεράς ξήρανσης και τους μεγαλύτερους ρυθμούς ξήρανσης με τη θερμοκρασία (βλ. Σχήμα 11.3). Συγκρίνοντας τις τιμές της σταθεράς ξήρανσης των λίθων και των πλίνθων, οι λίθοι εμφανίζουν υψηλότερες σταθερές ξήρανσης σε σχέση με τα κεραμικά (βλέπε Σχήμα 11.2 & 11.4).

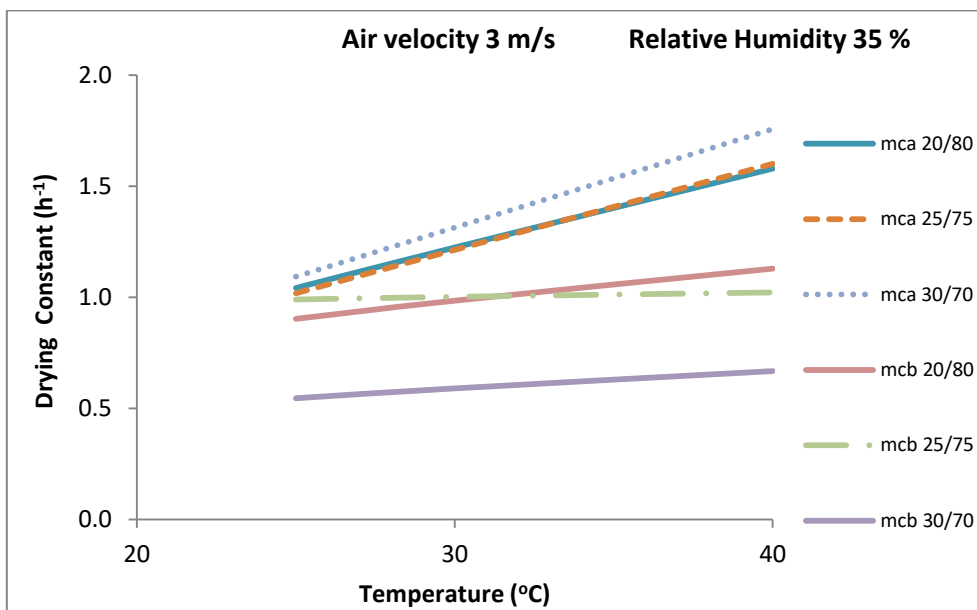
Τα κεραμικά εμφανίζουν διαφορετικές τιμές της σταθεράς ξήρανσης. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πλίνθων στη ξήρανση όπως η διαφορετική φύση των πρώτων υλών τους, η διαφορετική μέθοδος κατασκευής τους, η διαφορετική διαδικασία ξήρανσης κατά την παρασκευή τους καθώς και η διαφορετική θερμοκρασία έμψυξής τους.<sup>241</sup> Έτσι, η διαφοροποίηση κατά τη ξήρανση τους αποδίδεται κυρίως στα διαφορετικά εγγενή χαρακτηριστικά τους.

Οι λίθοι εμφανίζουν επίσης διαφορετική εξάρτηση της σταθεράς ξήρανσης τους με τη θερμοκρασία του αέρα και την ταχύτητα του αέρα. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στα διαφορετικά εγγενή χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η διαφορετική τους σύνθεση και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της μικροδομής τους. Μεταξύ των διαφορών τους είναι τα διαφορετικά πορώδη τους και οι διαφορετικές κατανομές μεγέθους πόρων τους και, κατά συνέπεια, αυτές οι διαφορές επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους στη ξήρανση.<sup>242</sup>

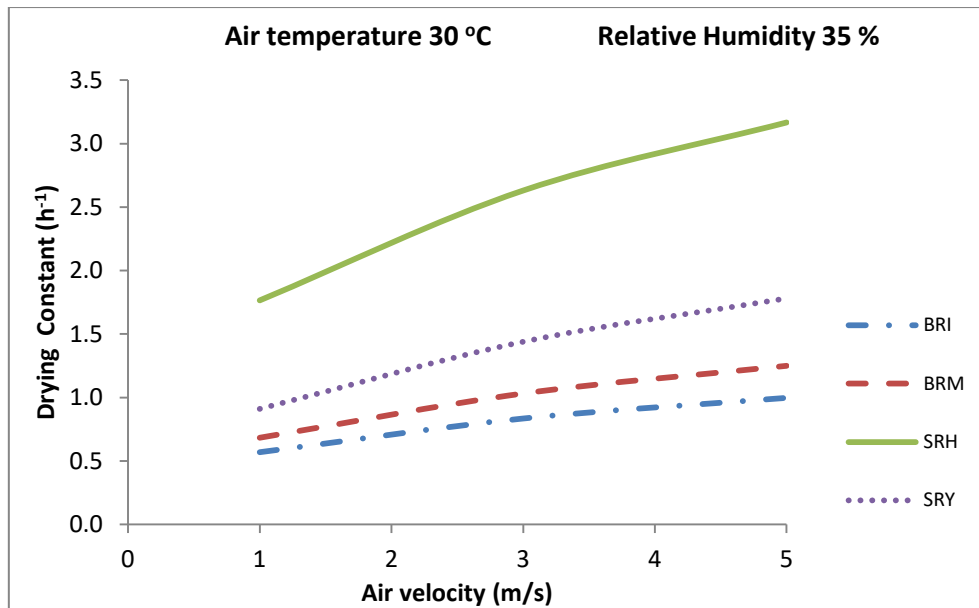
Όσον αφορά τα κονιάματα, τα κονιάματα *mca* (με κονία *NHL2*) εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές στη σταθερά ξήρανσης σε σχέση με τα κονιάματα *mcb* (με κονία *NHL3.5*) για όλες τις εξεταζόμενες τιμές θερμοκρασίας και ταχύτητας αέρα (βλέπε Σχήμα 11.3 & 11.5). Αυτή η διαφοροποίηση μεταξύ τους οφείλεται στο διαφορετικό τύπο του συνδετικού τους υλικού (διαφορετικοί τύποι κονιάς) και στα διαφορετικά εγγενή τους χαρακτηριστικά. Συγκρίνοντας τις τιμές της σταθεράς ξήρανσης ξεχωριστά για κάθε τύπο κονιαμάτων (20/80, 25/75 και 30/70), είναι προφανές ότι υπάρχει μία διαφοροποίηση λόγω των διαφορετικών σχεδιασμών τους. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού της συνδετικής κονιάς σε ένα κονίαμα (υψηλότερη αναλογία κονιάς/αδρανών) οδηγεί σε μια μείωση του ρυθμού ξήρανσης της και κατά συνέπεια την αύξηση της σταθεράς ξήρανσης της.



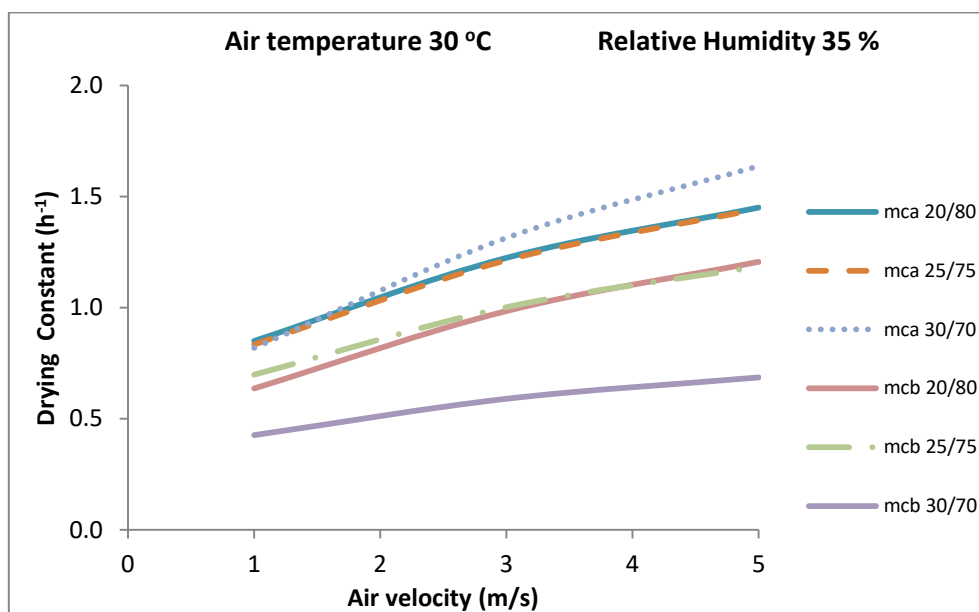
Σχήμα 11.2: Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά ξήρανσης των λίθων και των πλίνθων.



Σχήμα 11.3: Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά ξήρανσης των κονιαμάτων *mca* και *mcb*.



Σχήμα 11.4: Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά ξήρανσης των λίθων και των πλίνθων.



Σχήμα 11.5: Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά ξήρανσης των κονιαμάτων *mca* και *mcb*.

## 11.4 Μερικά Συμπεράσματα

Μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται διεθνώς διάφορα μοντέλα ξήρανσης τα οποία προβλέπουν τη συμπεριφορά στη ξήρανση των πορωδών δομικών υλικών. Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες τα πειράματα ξήρανσης εφαρμόζονται σε υλικά τα οποία είναι κορεσμένα με νερό. Έτσι τα συμπεράσματά τους εμφανίζουν απόκλιση από τις πραγματικές συνθήκες αφού στη πραγματικότητα δεν υπάρχουν δομικά υλικά κορεσμένα

με νερό εκτός από ελάχιστες ιδιαίτερες περιπτώσεις. Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων στη κινητική ξήρανσης του τριχοειδώς αναρριχόμενου νερού σε διάφορα δομικά υλικά. Βρέθηκε ότι η διαδικασία της ξήρανσης στα δομικά υλικά μπορεί να περιγραφεί με ένα μαθηματικό μοντέλο πρώτης τάξης το οποίο εφαρμόζεται και περιγράφει τη κινητική της ξήρανσης του τριχοειδώς αναρριχόμενου νερού. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει την επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα αέρα στη σταθερά ξήρανσης των εξεταζόμενων υλικών και προβλέπει με επιτυχία την επίδραση αυτών των παραγόντων στη ξήρανση των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η σταθερά ξήρανσης των υλικών αυξάνει με αύξηση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της ταχύτητας του αέρα. Επίσης βρέθηκε ότι η σταθερά ξήρανσης των υπό μελέτη δομικών υλικών εξαρτάται εκτός από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και από τα εγγενή χαρακτηριστικά των υλικών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12<sup>ο</sup>: ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ-ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### **12.1 Εισαγωγή**

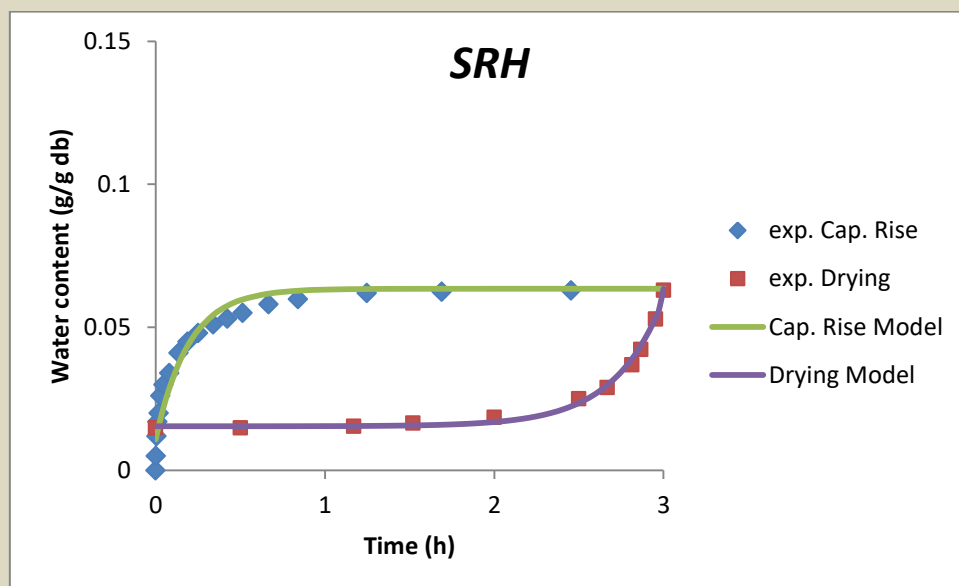
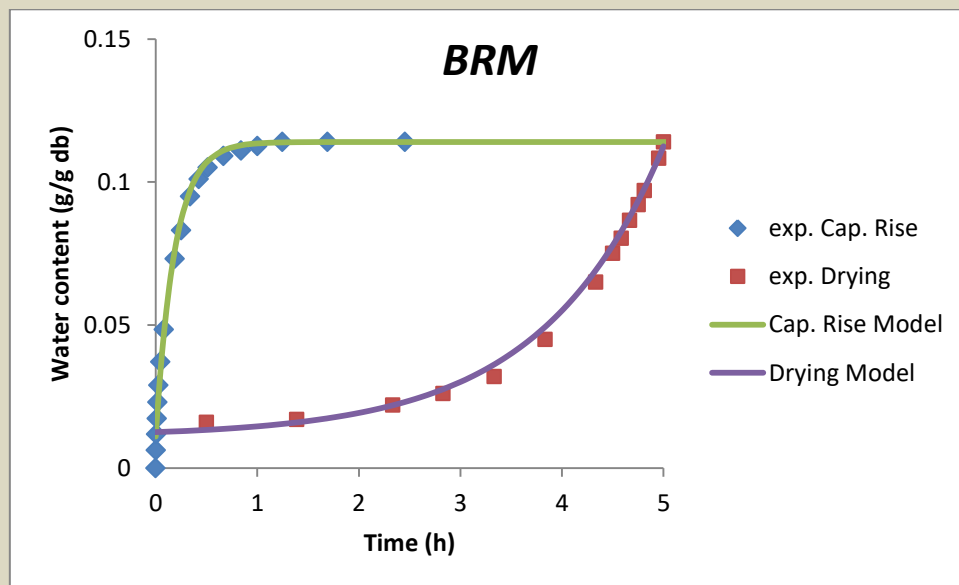
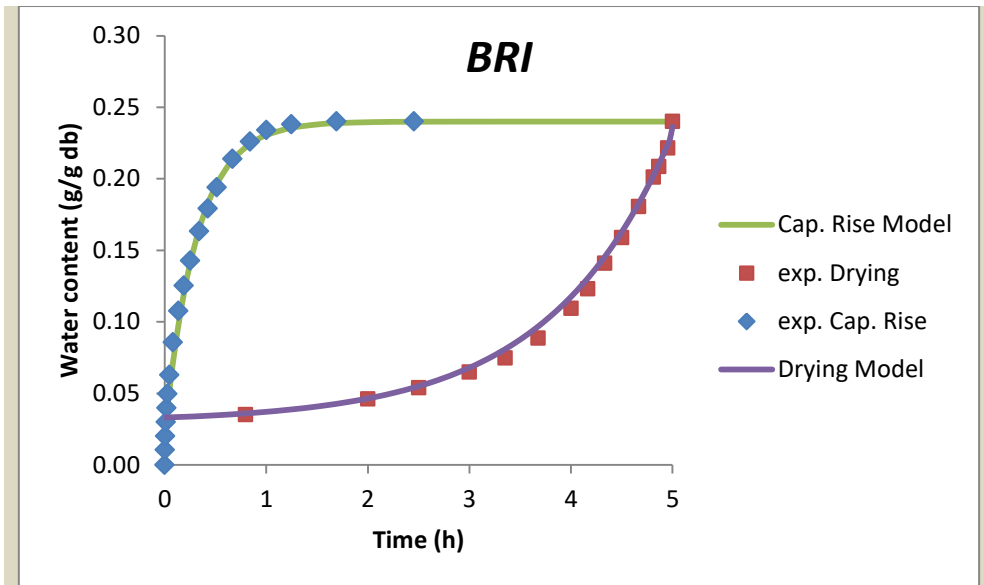
Στα προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης σε όλα τα εξεταζόμενα υλικά και προσδιορίστηκαν βασικές παράμετροι που διέπουν τα φαινόμενα μεταφοράς της υγρασίας από και προς αυτά. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στοιχείων της μικροδομής των υλικών με τη βοήθεια της πορομετρίας υδραργύρου η οποία, παρά το γεγονός ότι δεν απευθύνεται στο σύνολο των πόρων του κάθε υλικού, είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος μελέτης της μικροδομής των υλικών και είναι η μέθοδος εκείνη που χρησιμοποιείται από το σύνολο των ερευνητών παγκοσμίως.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται συσχέτιση των βασικών παραμέτρων όπως αυτές προέκυψαν από τη μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας στα δομικά υλικά, τόσο μεταξύ τους, όσο και με βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής των υπό εξέταση υλικών με σκοπό την εξαγωγή σχέσεων που θα επιτρέπουν τη μεταξύ τους σύνδεση. Έτσι, θα μπορεί να γίνει εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την υδρομετρική συμπεριφορά των δομικών υλικών απλά με μελέτη στοιχείων της μικροδομής τους.

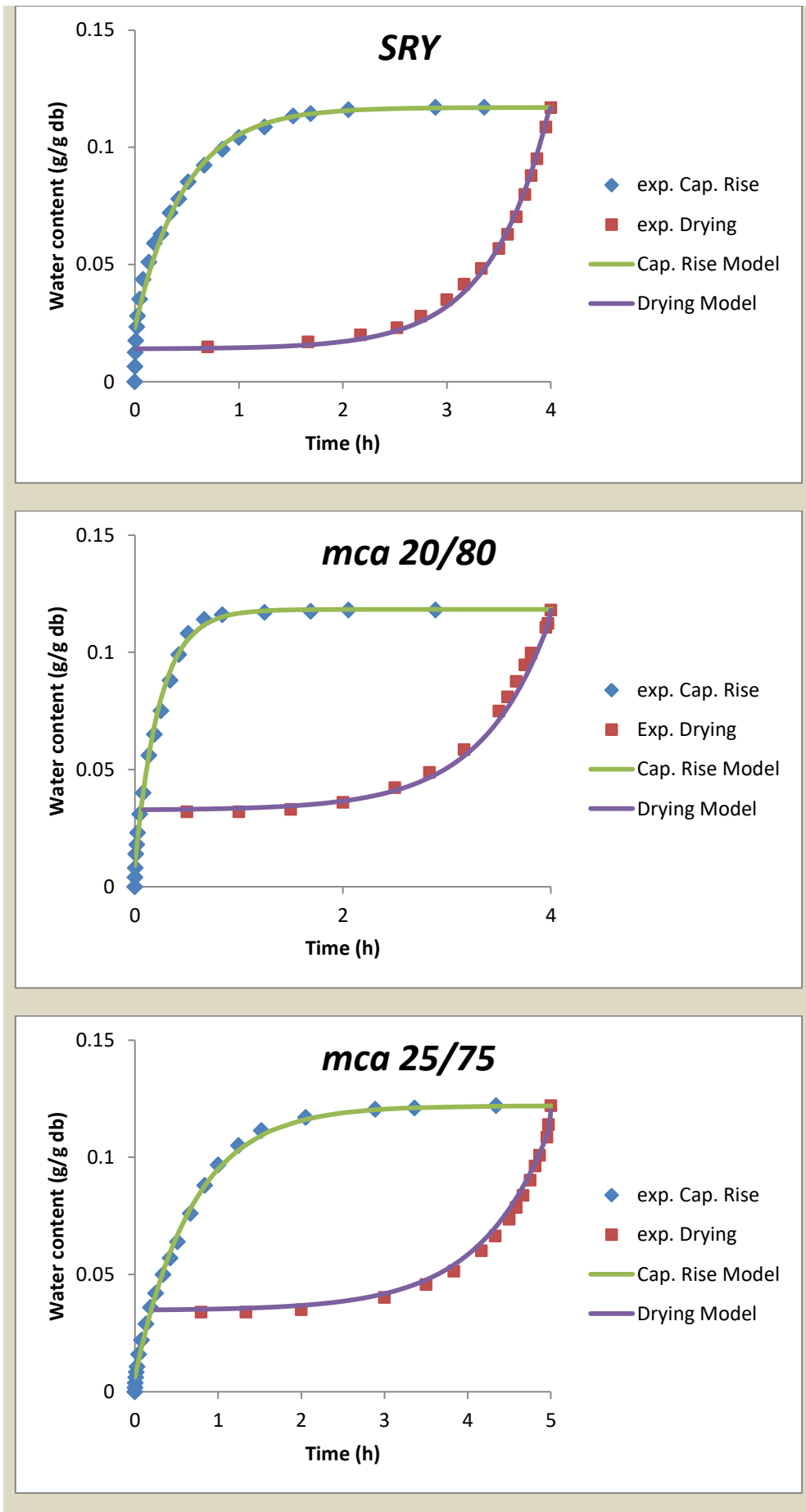
### **12.2 Συσχέτιση των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης / Κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης**

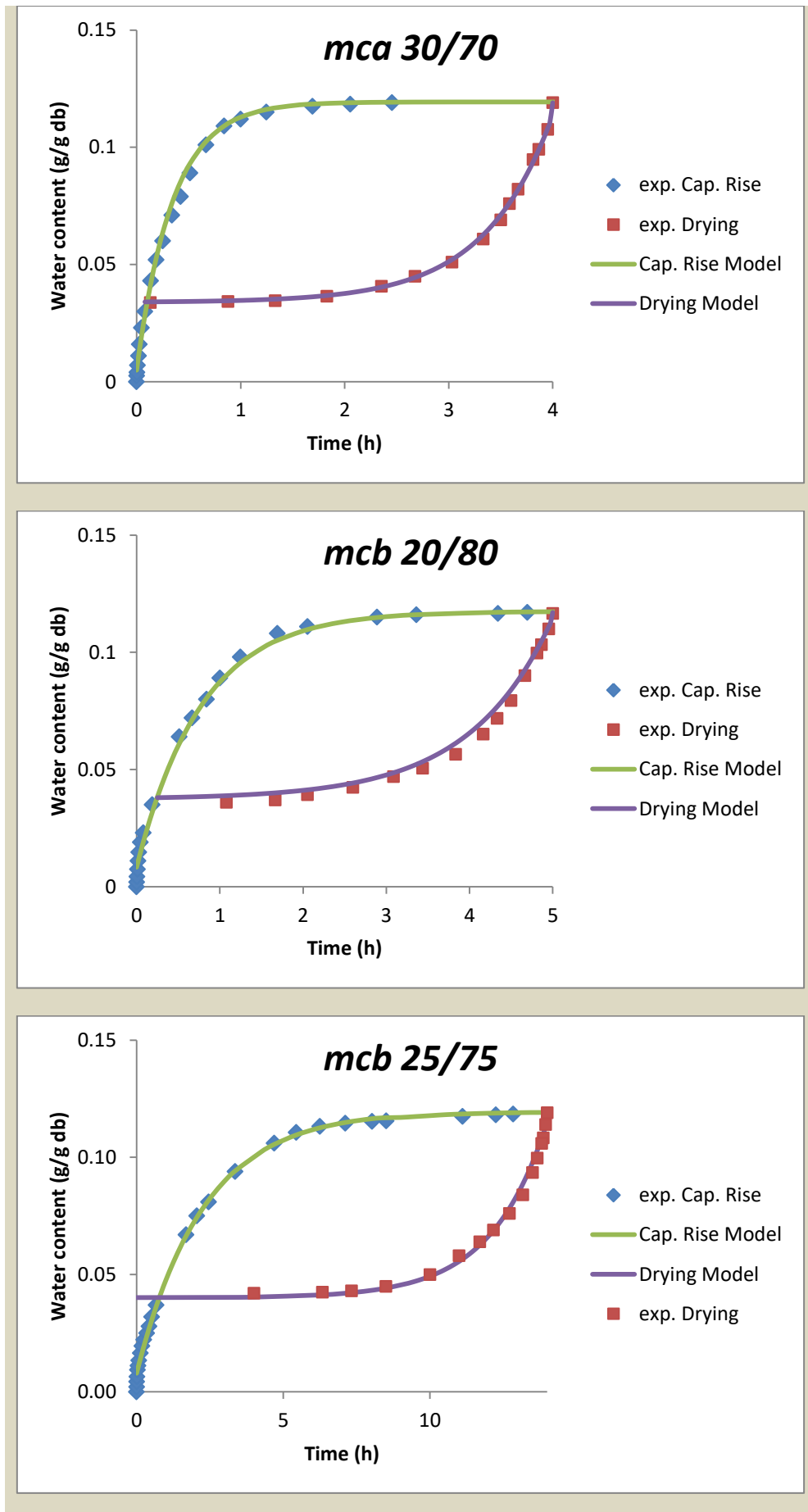
Στα κεφάλαια 10 και 11 μελετήθηκαν τα φαινόμενα της ξήρανσης και της τριχοειδούς αναρρίχησης αντίστοιχα των υπό εξέταση υλικών και πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση των φαινομένων αυτών η οποία, στηριζόμενη σε εμπειρικά μαθηματικά μοντέλα πρώτης τάξης, προέβλεπε με επιτυχία τις κινητικές των φαινομένων αυτών καταδεικνύοντας την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων καθώς και των εγγενών χαρακτηριστικών των υλικών στις σταθερές ξήρανσης και τριχοειδούς αναρρίχησης.

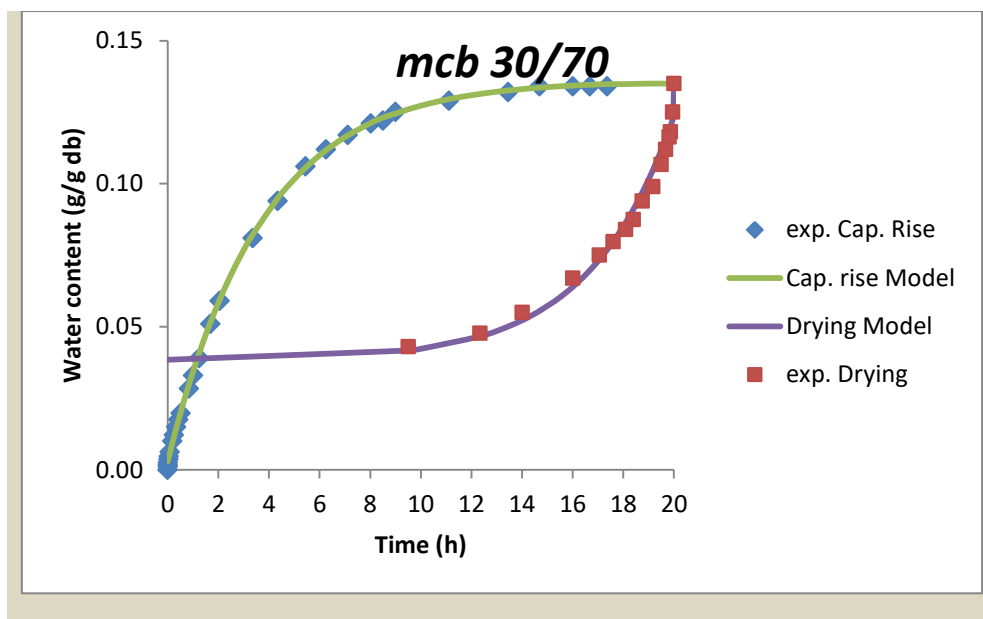
Στην παρούσα ενότητα σχεδιάστηκαν ενδεικτικά οι βρόχοι τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης για όλα τα εξεταζόμενα υλικά, σύμφωνα με τις κινητικές τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης που προέκυψαν στα κεφάλαια 10 και 11, για τη θερμοκρασία των 30°C και για την ταχύτητα αέρα των 3m/s. Οι βρόχοι αυτοί παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 12.1.







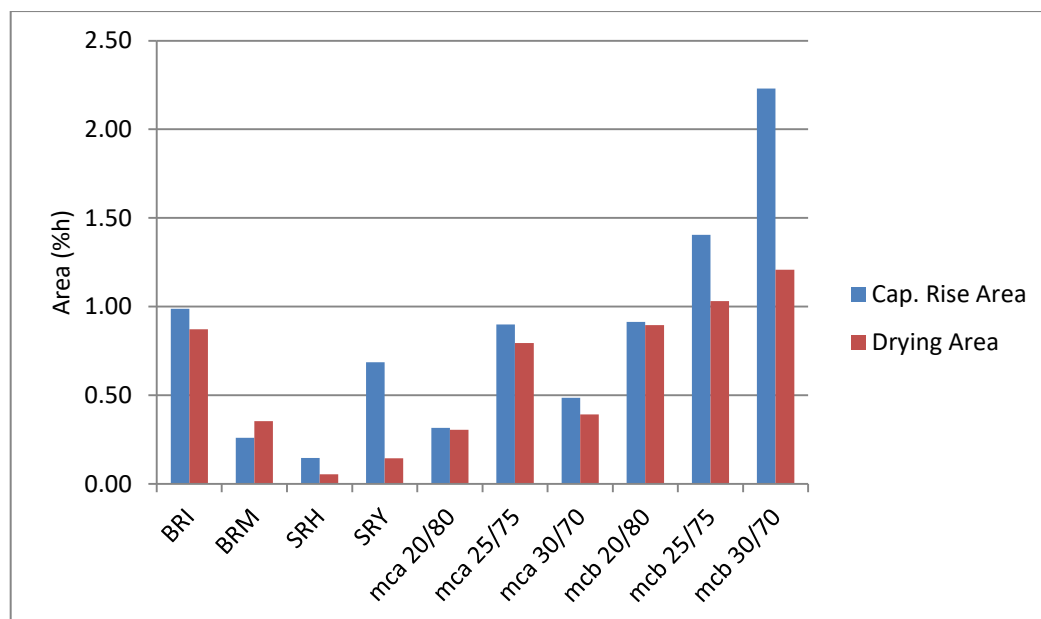




**Σχήμα 12.1:** Βρόχοι τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης των εξεταζόμενων υλικών σε θερμοκρασία 30°C και ταχύτητα αέρα 3m/s.

Παρατηρώντας το Σχήμα 12.1 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μορφολογία των βρόχων τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης είναι διαφορετική για διαφορετικά υλικά. Στους βρόχους των πλίνθων *BRI* και *BRM*, το μέρος της τριχοειδούς αναρρίχησης είναι πολύ πιο γρήγορο σε σχέση με το μέρος της ξήρανσης, γεγονός που συνάδει με τη μεγάλη υδροφιλία που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά. Στους λίθους *SRH* και *SRY*, εμφανίζεται μια συμμετρία ως προς τα μέρη της τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης, γεγονός που σημαίνει ότι στα υλικά αυτά η τριχοειδής αναρρίχηση διαρκεί περίπου όσο και η ξήρανση τους. Όσον αφορά τα κονιάματα, υπάρχει διαφοροποίηση των βρόχων η οποία σχετίζεται και με το ποσοστό κονιάς/αδρανών για κάθε κονίαμα. Πιο συγκεκριμένα, τα κονιάματα *mca20/80* και *mcb20/80* εμφανίζουν πολύ γρηγορότερους χρόνους τριχοειδούς αναρρίχησης σε σχέση με τη ξήρανση. Τα κονιάματα *mca25/75* και *mca30/70* εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τα δύο φαινόμενα ενώ στα κονιάματα *mcb25/75* και *mcb30/70* η ξήρανση πραγματοποιείται γρηγορότερα από την τριχοειδή αναρρίχηση. Είναι επίσης εμφανές ότι τα κονιάματα *mcb* παρουσιάζουν μεγαλύτερους χρόνους τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης σε σχέση με τα κονιάματα *mca*.

Κατόπιν, υπολογίστηκαν με ολοκλήρωση τα εμβαδά των περιοχών κάτω από τις καμπύλες των κινητικών τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης για κάθε υλικό. Το φυσικό περιεχόμενο των εμβαδών αυτών αντιστοιχεί στη ποσότητα της υγρασίας που ροφήθηκε κατά τη διάρκεια της τριχοειδούς αναρρίχησης και εξήλθε κατά τη διάρκεια της ξήρανσης των υλικών. Οι διαφορές στα εμβαδά αυτά αντιστοιχούν στην παραμένουσα υγρασία μετά το πέρας των δύο φαινομένων. Στο Σχήμα 12.2 παριστάνονται τα εμβαδά των περιοχών αυτών για όλα τα εξεταζόμενα υλικά.



**Σχήμα 12.2:** Εμβαδά των καμπύλων κινητικών τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης στους 30°C και 3m/s.

Στα κονιάματα 20/80 με τους δύο τύπους κονιάς (NHL2 & NHL3.5), τα εμβαδά των καμπυλών των κινητικών τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης είναι περίπου τα ίδια πράγμα που σημαίνει ότι όσο νερό εισέρχεται με τη τριχοειδή αναρρίχηση, τόσο περίπου και εξέρχεται με τη ξήρανση. Αντίθετα, στους λίθους SRY και στα κονιάματα mcb25/75 και mcb30/70 εμφανίζονται οι μεγαλύτερες διαφορές των εμβαδών στη τριχοειδή αναρρίχηση και στη ξήρανση.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι σταθερές χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης και οι σταθερές χρόνου ξήρανσης καθώς και οι λόγοι των σταθερών χρόνων τριχοειδούς αναρρίχησης προς σταθερά χρόνου ξήρανσης ( $t_{cr}/t_d$ ) για όλες τις πειραματικές συνθήκες και για όλα τα υπό εξέταση υλικά και σχεδιάστηκε η εξάρτηση των συγκεκριμένων λόγων με τη θερμοκρασία και με τη ταχύτητα του αέρα. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών και η συσχέτιση των λόγων με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους εικονίζονται στον Πίνακα 12.1 και στα Σχήματα 12.3 έως 12.6 αντίστοιχα.

**Πίνακας 12.1:** Σταθερές χρόνων τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης και οι λόγοι  $t_{cr}/t_d$  των εξεταζόμενων υλικών.

Drying time constant (h)	25	30	40	Cap. rise time constant (h)	25	30	40
BRI	1.71	1.60	1.43	BRI	0.33	0.31	0.29
BRM	1.12	0.97	0.78	BRM	0.21	0.19	0.17
SRH	0.41	0.38	0.34	SRH	0.25	0.21	0.16
SRY	0.76	0.69	0.60	SRY	0.54	0.48	0.40

<i>mca20/80</i>	0.96	0.82	0.63
<i>mca25/75</i>	0.98	0.82	0.62
<i>mca30/70</i>	0.91	0.76	0.57
<i>mcb20/80</i>	1.11	1.02	0.89
<i>mcb25/75</i>	1.01	1.00	0.98
<i>mcb30/70</i>	1.83	1.69	1.50

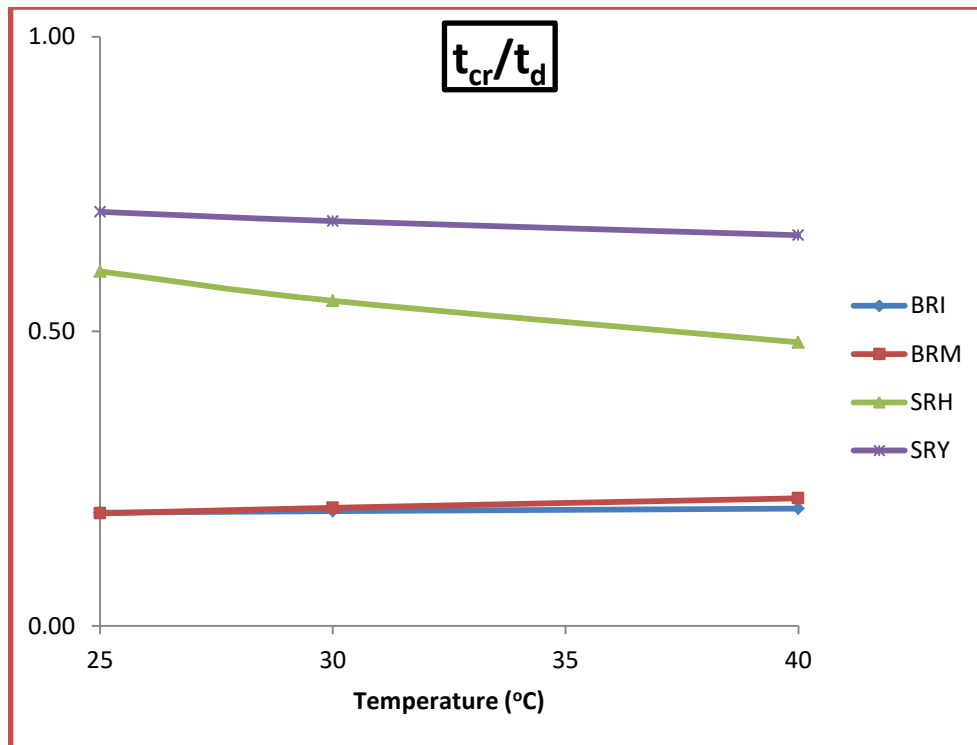
<i>mca20/80</i>	0.26	0.24	0.21
<i>mca25/75</i>	0.80	0.69	0.55
<i>mca30/70</i>	0.52	0.42	0.30
<i>mcb20/80</i>	0.79	0.68	0.54
<i>mcb25/75</i>	2.34	2.07	1.72
<i>mcb30/70</i>	4.61	3.91	3.02

Drying time constant (h)	1	3	5
<i>BRI</i>	2.34	1.60	1.34
<i>BRM</i>	1.46	0.97	0.80
<i>SRH</i>	0.57	0.38	0.32
<i>SRY</i>	1.10	0.69	0.56
<i>mca20/80</i>	1.18	0.82	0.69
<i>mca25/75</i>	1.20	0.82	0.69
<i>mca30/70</i>	1.22	0.76	0.61
<i>mcb20/80</i>	1.57	1.02	0.83
<i>mcb25/75</i>	1.43	1.00	0.84
<i>mcb30/70</i>	2.34	1.69	1.46

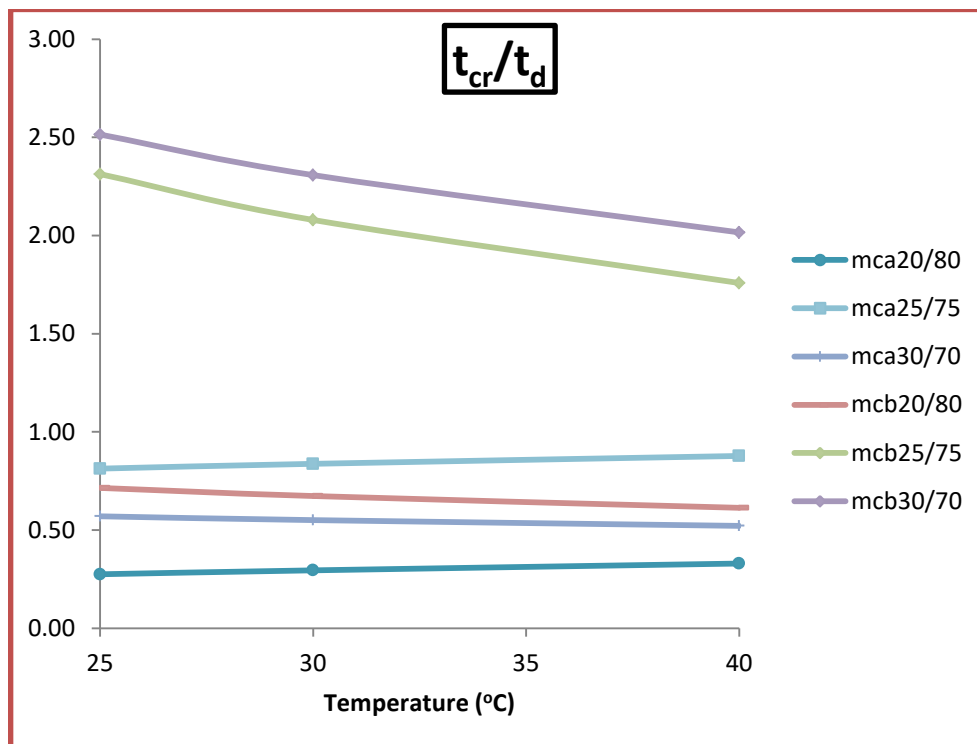
Cap. rise time constant (h)	1	3	5
<i>BRI</i>	0.26	0.31	0.34
<i>BRM</i>	0.16	0.19	0.22
<i>SRH</i>	0.06	0.21	0.37
<i>SRY</i>	0.34	0.48	0.56
<i>mca20/80</i>	0.20	0.24	0.26
<i>mca25/75</i>	0.53	0.69	0.78
<i>mca30/70</i>	0.26	0.42	0.53
<i>mcb20/80</i>	0.35	0.68	0.94
<i>mcb25/75</i>	1.61	2.07	2.33
<i>mcb30/70</i>	3.43	3.91	4.16

$t_{cr}/t_d$	25	30	40
<i>BRI</i>	0.19	0.19	0.20
<i>BRM</i>	0.19	0.20	0.22
<i>SRH</i>	0.60	0.55	0.48
<i>SRY</i>	0.70	0.69	0.66
<i>mca20/80</i>	0.28	0.30	0.33
<i>mca25/75</i>	0.81	0.84	0.88
<i>mca30/70</i>	0.57	0.55	0.52
<i>mcb20/80</i>	0.71	0.67	0.61
<i>mcb25/75</i>	2.31	2.08	1.76
<i>mcb30/70</i>	2.51	2.31	2.02

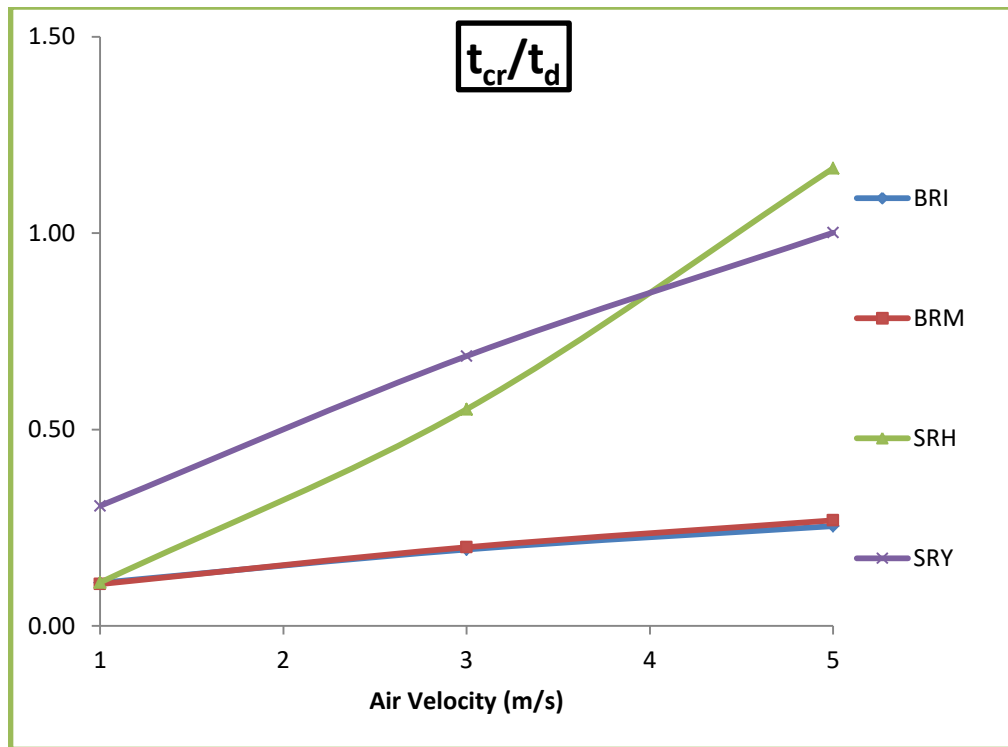
$t_{cr}/t_d$	1	3	5
<i>BRI</i>	0.11	0.19	0.25
<i>BRM</i>	0.11	0.20	0.27
<i>SRH</i>	0.11	0.55	1.16
<i>SRY</i>	0.31	0.69	1.00
<i>mca20/80</i>	0.17	0.30	0.38
<i>mca25/75</i>	0.44	0.84	1.13
<i>mca30/70</i>	0.21	0.55	0.86
<i>mcb20/80</i>	0.22	0.67	1.13
<i>mcb25/75</i>	1.13	2.08	2.77
<i>mcb30/70</i>	1.46	2.31	2.85



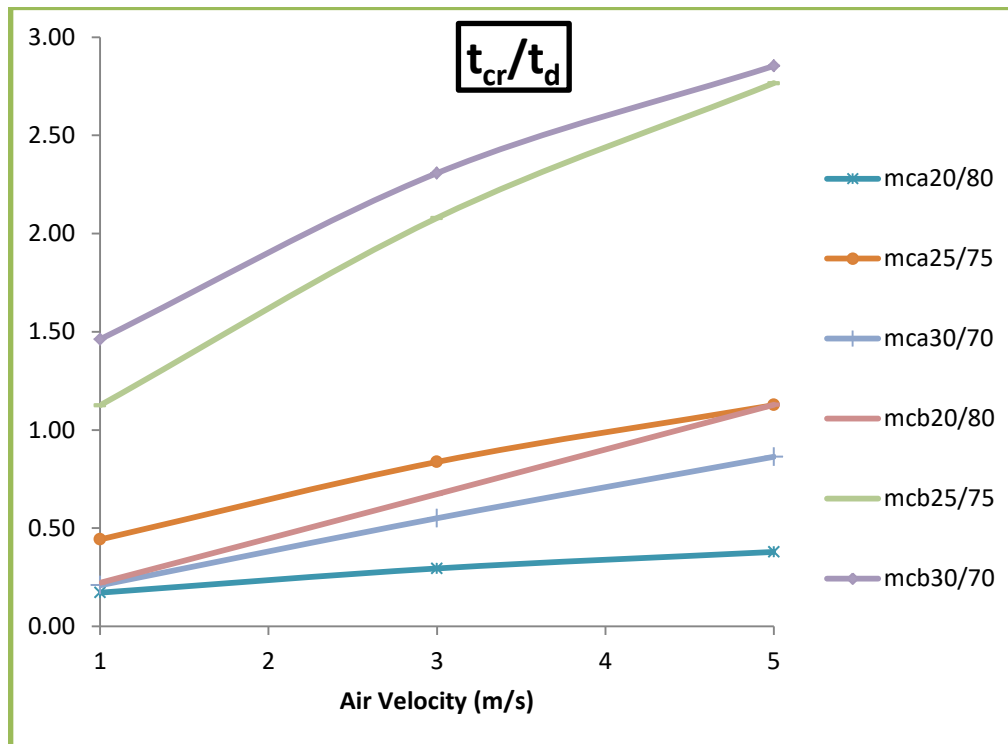
Σχήμα 12.3: Συσχέτιση του λόγου  $t_{cr}/t_d$  με τη θερμοκρασία για τους λίθους και τους πλίνθους.



Σχήμα 12.4: Συσχέτιση του λόγου  $t_{cr}/t_d$  με τη θερμοκρασία για τα κονιάματα *mca* και *mcb*.



**Σχήμα 12.5:** Συσχέτιση του λόγου  $t_{cr}/t_d$  με την ταχύτητα του αέρα για τους λίθους και τους πλίνθους.



**Σχήμα 12.6:** Συσχέτιση του λόγου  $t_{cr}/t_d$  με την ταχύτητα του αέρα για τα κονιάματα *mca* και *mcb*.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 12.1, οι βρόχοι τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης έχουν διαφορετική μορφή για κάθε δομικό υλικό. Σε όλα τα υπό εξέταση υλικά, η ξήρανση σαν φαινόμενο, είναι πιο αργή από τη τριχοειδή αναρρίχηση. Εξαιρέση αποτελούν τα κονιάματα *mcb25/75* και *mcb30/70* στα οποία η τριχοειδής αναρρίχηση είναι πιο αργό φαινόμενο σε σχέση με τη ξήρανση. Παρατηρώντας τα Σχήματα 12.3 & 12.4 βλέπουμε ότι οι κλίσεις των καμπύλων δεν είναι ίδιες για όλα τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, στα κεραμικά *BRI* & *BRM*, οι λόγοι των σταθερών χρόνου παραμένουν σταθεροί για όλες τις πειραματικές τιμές θερμοκρασίας. Στους λίθους *SRH* και *SRY* και σε ορισμένα κονιάματα (*mca30/70* & σε όλα τα *mcb* κονιάματα) οι κλίσεις είναι αρνητικές ενώ οι αντίστοιχες κλίσεις για τα κονιάματα *mca20/80* & *mca25/75* είναι θετικές. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνει η θερμοκρασία, η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης ορισμένων υλικών μειώνεται γρηγορότερα σε σχέση με τη σταθερά ξήρανσής τους με αποτέλεσμα να μειώνεται το πηλίκιο των δύο σταθερών με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στα Σχήματα 12.5 και 12.6 οι λόγοι των σταθερών χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης προς ξήρανση έχουν θετικές κλίσεις για όλα τα υλικά. Ενδιαφέρον εμφανίζει η συμπεριφορά του λίθου *SRH* για τον οποίο η κλίση είναι πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα υλικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγάλοι πόροι του *SRH* ευνοούν την εξάτμιση. Έτσι, μειώνεται πολύ ο χρόνος ξήρανσης του υλικού με αποτέλεσμα να αυξάνει ο παραπάνω λόγος. Παρόμοια και στα *mcb* κονιάματα (και κυρίως στα *mcb25/75* και *mcb30/70*) οι λόγοι των σταθερών χρόνου εμφανίζουν μεγαλύτερους ρυθμούς σε σχέση με τα *mca* κονιάματα. Επιπλέον, τόσο στο *mcb25/75*, όσο και στο *mcb30/70* η ξήρανση είναι γρηγορότερη από την τριχοειδή αναρρίχηση. Κατά συνέπεια, οι λόγοι των σταθερών χρόνου τους θα είναι μεγαλύτεροι της μονάδας.

### 12.3 Συσχέτιση των μοντέλων της τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης με στοιχεία της μικροδομής των υλικών

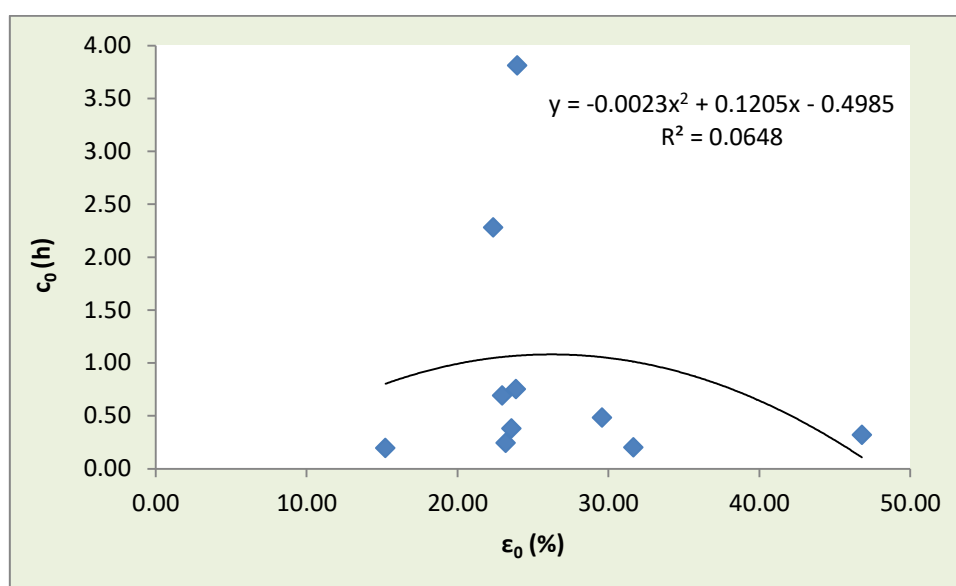
Στη συνέχεια, έγινε μια επιλογή ορισμένων από τους παράγοντες που καθορίζουν την επίδραση των χαρακτηριστικών των δομικών υλικών στις κινητικές της τριχοειδούς αναρρίχησης και της ξήρανσης οι οποίοι συσχετίστηκαν με επιλεγμένα στοιχεία της μικροδομής των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν την επίδραση των εγγενών χαρακτηριστικών των υλικών στις κινητικές των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας στα υλικά ήταν οι παράμετροι  $c_0$  και  $d_0$  που υπεισέρχονται στις σταθερές χρόνων τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης αντίστοιχα και οι οποίες εξαρτώνται από τα ίδια τα υλικά καθώς και οι ίδιες οι σταθερές χρόνου ξήρανσης και τριχοειδούς αναρρίχησης. Όλοι οι ανωτέρω παράγοντες συσχετίστηκαν με στοιχεία της μικροδομής των υλικών όπως η μέση ακτίνα πόρων των υλικών, το ολικό πορώδες, το ολικό τριχοειδές πορώδες και η ειδική επιφάνεια των υλικών. Σκοπός των συσχετίσεων αυτών είναι γνωρίζοντας την μια από τις δύο μεταβλητές να μπορούμε να υπολογίσουμε την άλλη με τη βοήθεια της συνάρτησης συσχέτισης τους. Για παράδειγμα, πραγματοποιώντας μετρήσεις των στοιχείων της μικροδομής των υλικών να είναι σε θέση οι ερευνητές να υπολογίσουν τις παραμέτρους  $c_0$  και  $d_0$  των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης και



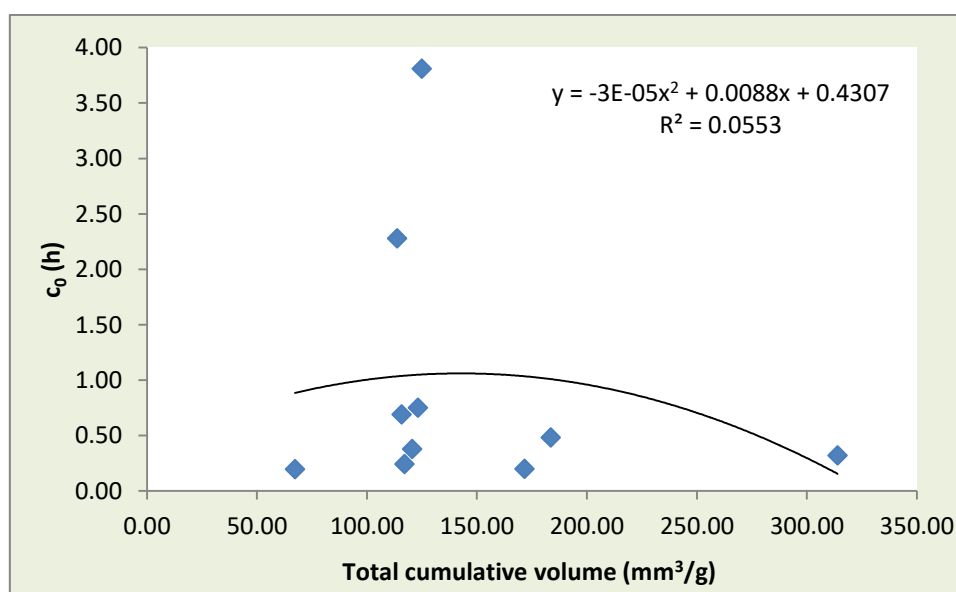
ξήρασης αντίστοιχα και μέσω των σταθερών αυτών να μπορεί να γίνει πρόβλεψη όλων των ιδιοτήτων των υλικών.

### 12.3.1 Συσχέτιση της τριχοειδούς αναρρίχησης με παραμέτρους της μικροδομής των υλικών

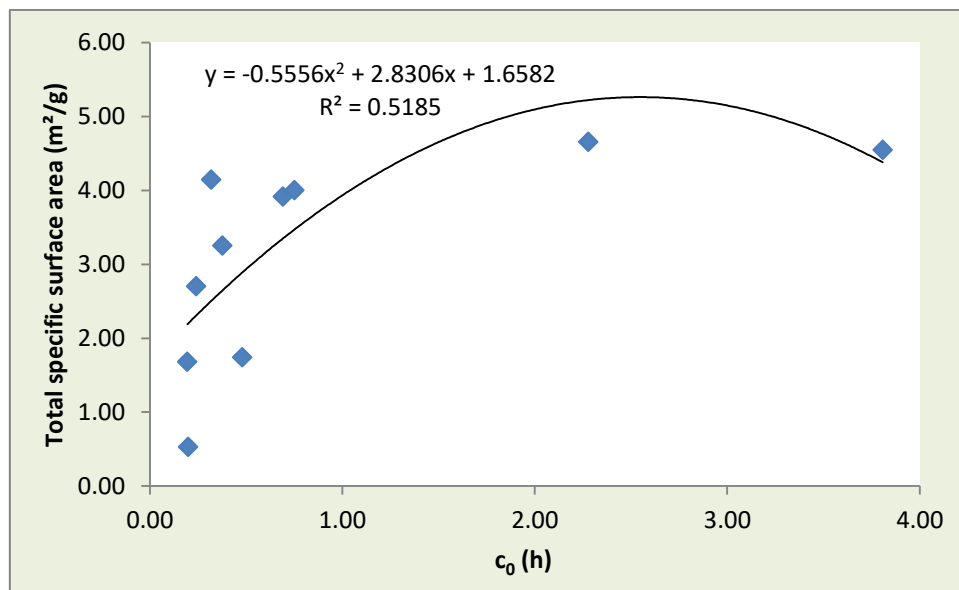
Η παράμετρος  $c_0$  που χαρακτηρίζει την επίδραση των χαρακτηριστικών του υλικού στο φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης (και της οποίας οι τιμές φαίνονται στον Πίνακα 10.2) συσχετίστηκε με παραμέτρους της μικροδομής των υλικών όπως το ολικό πορώδες, ο ειδικός όγκος, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα πόρων κ.ά. (βλέπε Πίνακας 7.2) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα.



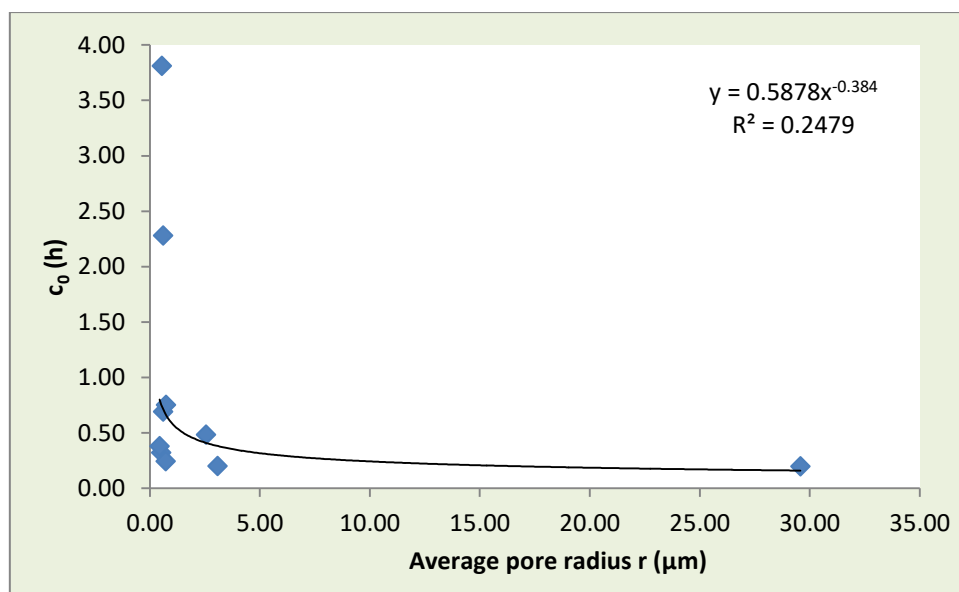
Σχήμα 12.7: Παράμετρος  $c_0$  σε σχέση με το ολικό πορώδες  $\epsilon_0$  των υλικών



Σχήμα 12.8: Παράμετρος  $c_0$  σε σχέση με τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών



Σχήμα 12.9: Παράμετρος  $c_0$  σε σχέση με την ειδική επιφάνεια  $S$  των υλικών



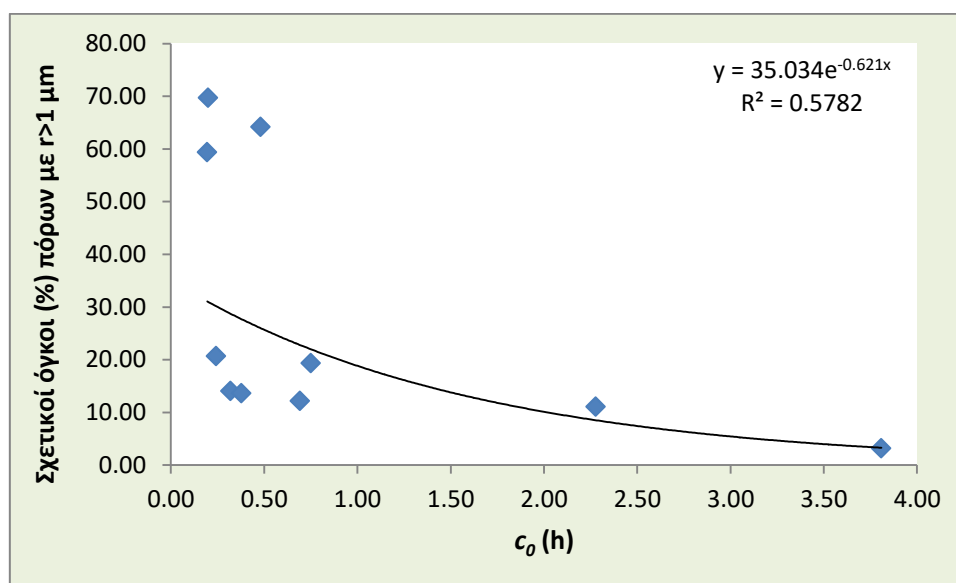
Σχήμα 12.10: Παράμετρος  $c_0$  σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων  $r$  των υλικών

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω Σχήματα (12.7-12.10), η πολύ χαμηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει ισχυρή σχέση εξάρτησης της παραμέτρου  $c_0$  με τα ανωτέρω στοιχεία της μικροδομής των υλικών. Όπως επίσης φαίνεται από το Διάγραμμα 12.10 η συσχέτιση της παραμέτρου  $c_0$  του μοντέλου τριχοειδούς αναρρίχησης με τη μέση ακτίνα πόρων των υλικών είναι πολύ ασθενής. Για το σκοπό αυτό χωρίστηκαν οι ακτίνες των πόρων των υλικών σε κλάσεις και υπολογίστηκαν οι σχετικοί όγκοι των πόρων για κάθε κλάση. Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 12.2.

**Πίνακας 12.2:** Σχετικοί όγκοι (%) για κάθε κλάση πόρων των υλικών.

Υλικά	Σχετικοί όγκοι πόρων (%)					Total (%)
	$r < 0.1 \mu\text{m}$	$0.1 < r < 0.5 \mu\text{m}$	$0.5 < r < 1 \mu\text{m}$	$1 < r < 10 \mu\text{m}$	$r > 10 \mu\text{m}$	
<i>BRI</i>	13.33	43.37	29.27	11.60	2.43	100
<i>BRM</i>	2.16	12.59	15.56	68.29	1.40	100
<i>SRH</i>	23.97	11.85	4.86	12.22	47.10	100
<i>SRY</i>	7.55	16.38	11.95	63.77	0.35	100
<i>mca20/80</i>	29.16	26.26	23.95	19.12	1.51	100
<i>mca25/75</i>	34.17	31.04	22.65	12.14	0	100
<i>mca30/70</i>	23.80	39.34	23.28	13.58	0	100
<i>mcb20/80</i>	22.47	24.90	33.31	19.32	0	100
<i>mcb25/75</i>	27.27	31.55	30.15	11.03	0	100
<i>mcb30/70</i>	24.22	38.12	34.52	3.14	0	100

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις της παραμέτρου  $c_0$  με τους σχετικούς όγκους τόσο των παραπάνω κλάσεων όσο και με συνδυασμούς των κλάσεων αυτών. Ενδεικτικά η συσχέτιση της παραμέτρου  $c_0$  με τους σχετικούς όγκους (%) των πόρων με ακτίνα μεγαλύτερη από 1  $\mu\text{m}$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.11.

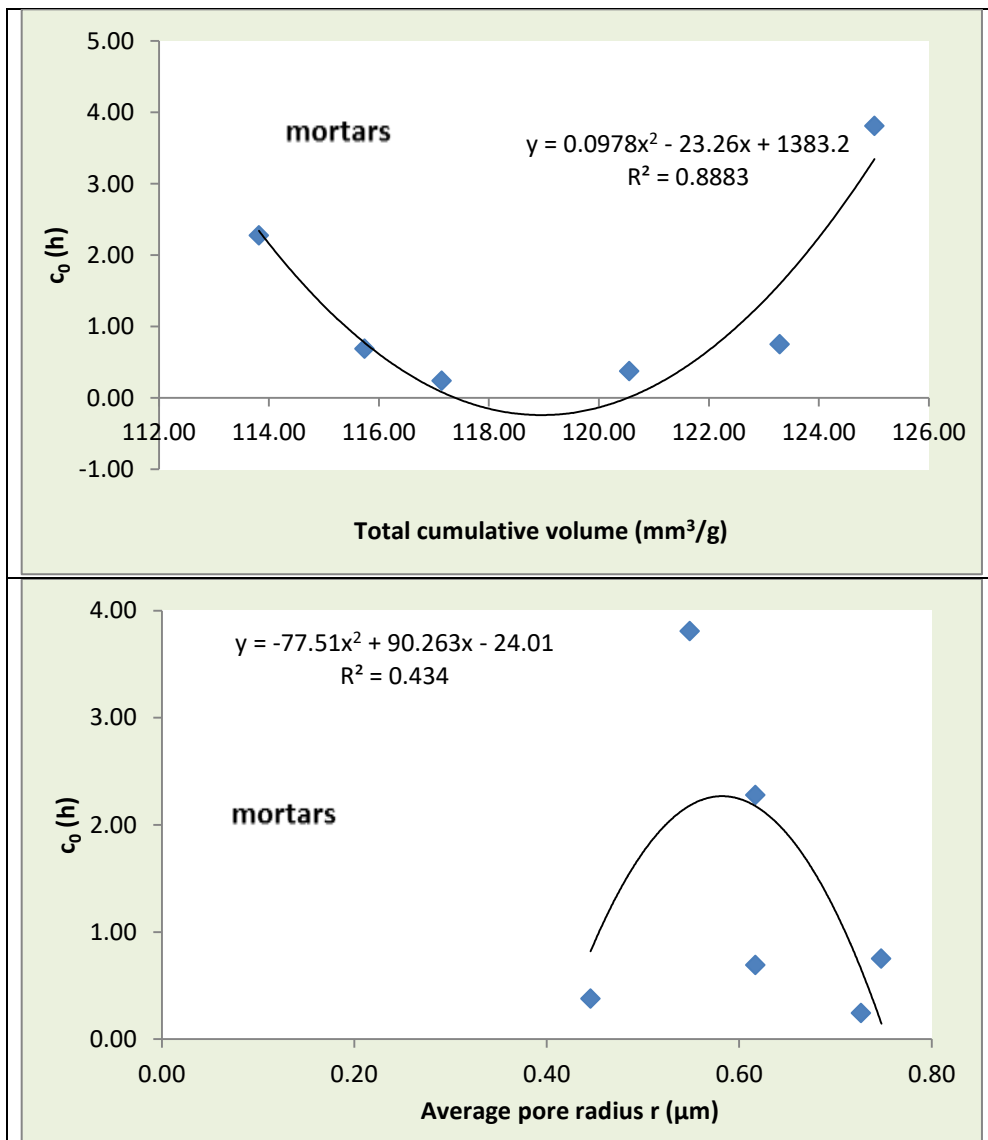


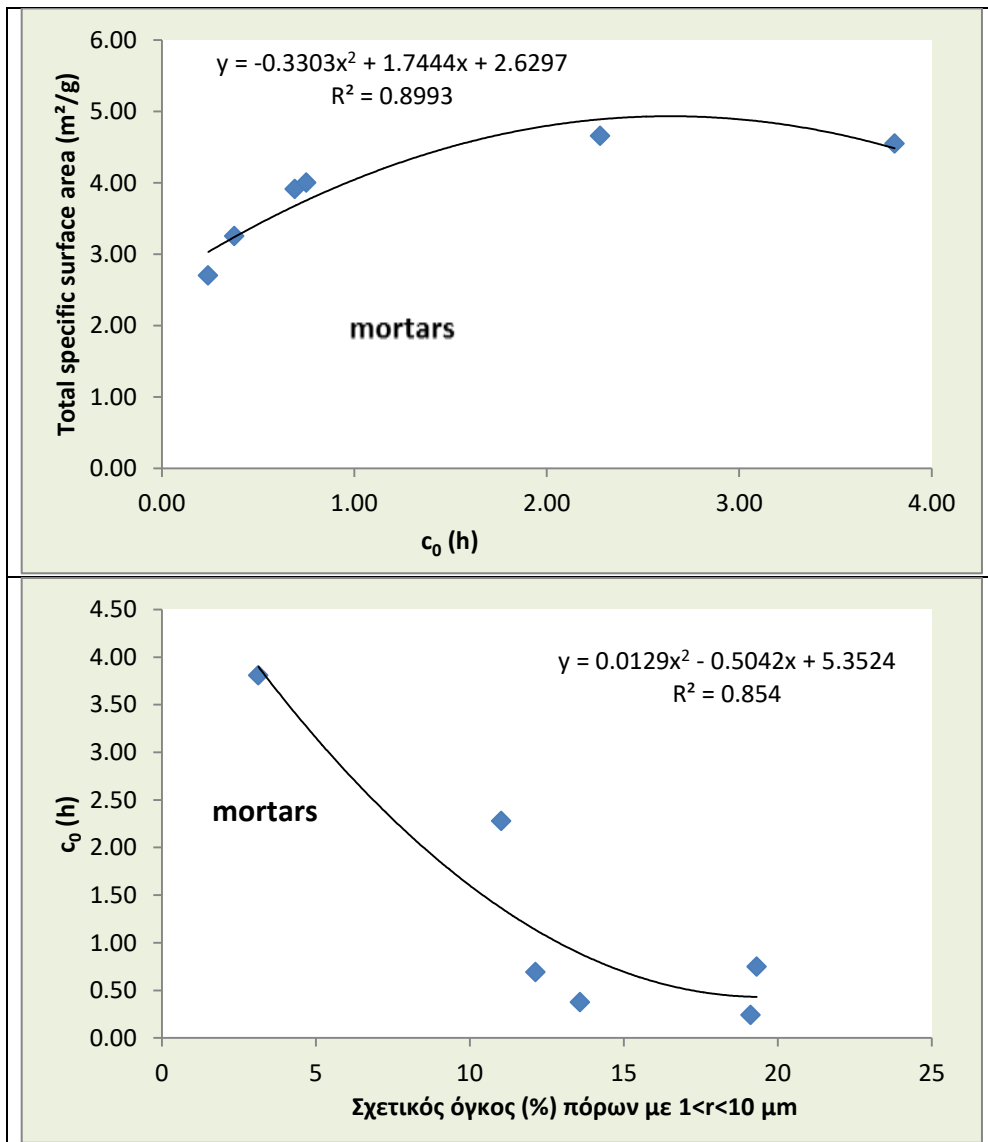
**Σχήμα 12.11:** Συσχέτιση της σταθεράς  $c_0$  με τους σχετικούς όγκους (%) πόρων των υλικών με  $r > 1 \mu\text{m}$ .

Η παράμετρος  $c_0$  εμφανίζει εκθετική συσχέτιση με τους σχετικούς όγκους (%) των πόρων με ακτίνες μεγαλύτερες του 1  $\mu\text{m}$ , παρ' όλα αυτά η συσχέτιση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί ισχυρή. Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε αναζητώντας εξάρτηση της παραμέτρου  $c_0$  και με τις υπόλοιπες κλάσεις πόρων των υλικών. Από τα προηγούμενα συνάγεται το συμπέρασμα ότι δεν μπορεί να υπάρξει άμεση συσχέτιση της παραμέτρου  $c_0$  με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των υλικών μιας και τα υλικά αυτά εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, διαφορετικές ιδιότητες και μη κοινά εύρη πόρων. Για

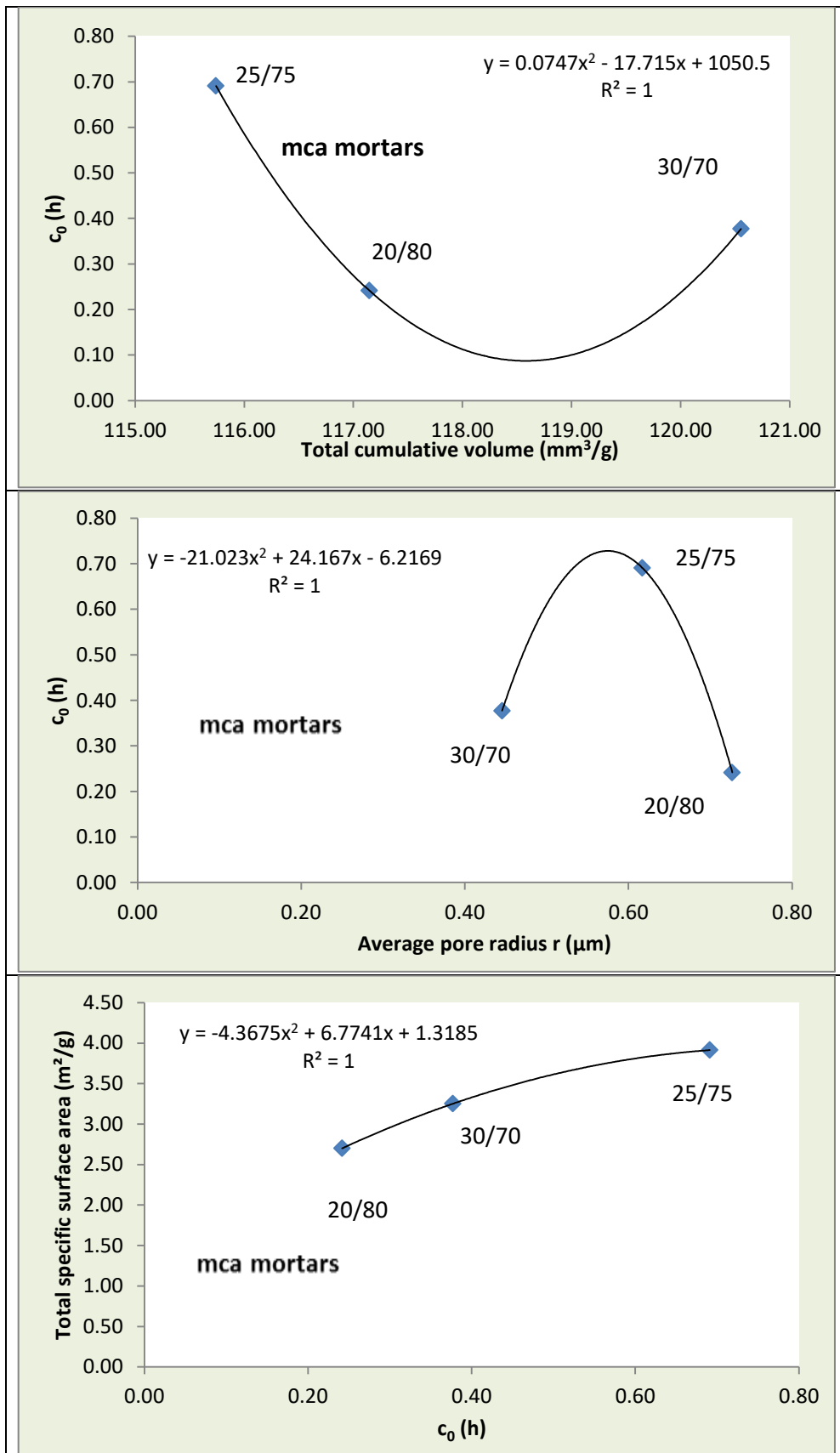
παράδειγμα, τα υλικά *SRH* και *SRY* ανήκουν στην κατηγορία των λίθων αλλά εμφανίζουν τελείως διαφορετικά στοιχεία μικροδομής. Ο λίθος *SRH* εκτός από τη μεγαλύτερη μέση ακτίνα πόρων, εμφανίζει και ένα πολύ μεγάλο εύρος κατανομής πόρων σε σχέση με το λίθο *SRY* του οποίου το εύρος πόρων είναι πολύ πιο περιορισμένο. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τους πλίνθους *BRI* και *BRM*. Ο πλίνθος *BRI* έχει μικρότερη μέση ακτίνα πόρων σε σχέση με τον *BRM* αλλά μεγαλύτερο ολικό πορώδες, μεγαλύτερο ειδικό όγκο και πολύ μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια από τον *BRM*. Από την άλλη πλευρά, τα κονιάματα είναι δομικά υλικά με παρόμοια χημική σύσταση, παρόμοιες ιδιότητες και ο αριθμός τους είναι ικανός ώστε να επιτρέπει να γίνουν μεταξύ τους συγκρίσεις και συσχετίσεις.

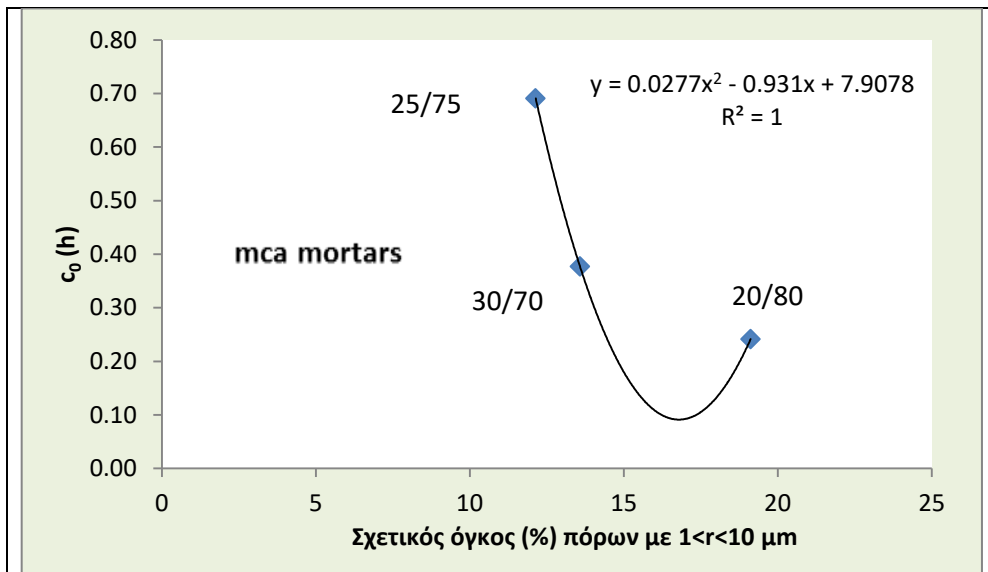
Στη συνέχεια και με σκοπό να εξεταστεί αν βελτιώνονται οι συσχετίσεις της παραμέτρου  $c_0$  με τα στοιχεία της μικροδομής των υλικών, επιλέχθηκαν τα κονιάματα και πραγματοποιήθηκαν οι ανωτέρω συσχετίσεις τόσο με όλα τα κονιάματα όσο και με κάθε κατηγορία κονιαμάτων ξεχωριστά (*mca* και *mcb*). Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών παρουσιάζονται στα Σχήματα 12.12-12.14.



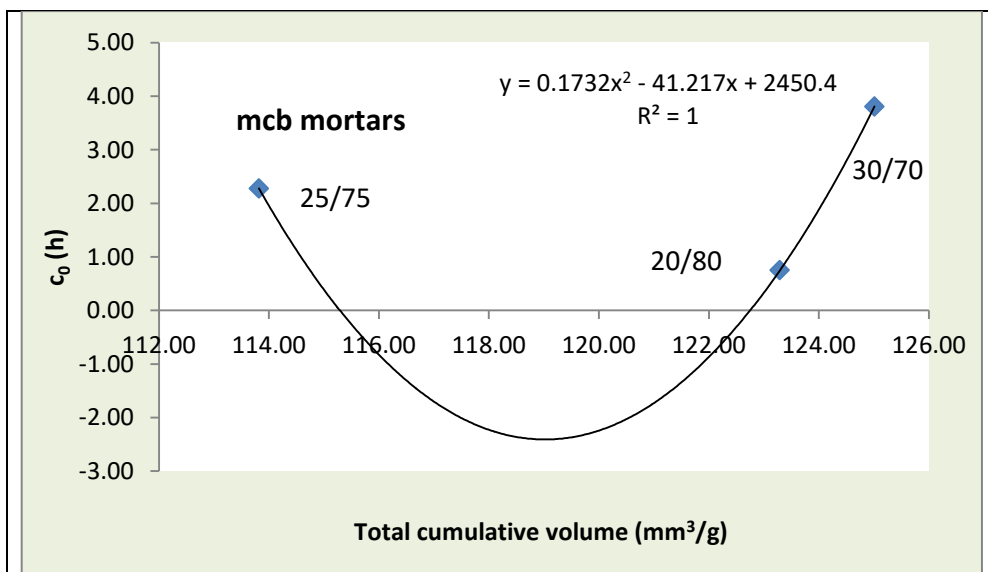


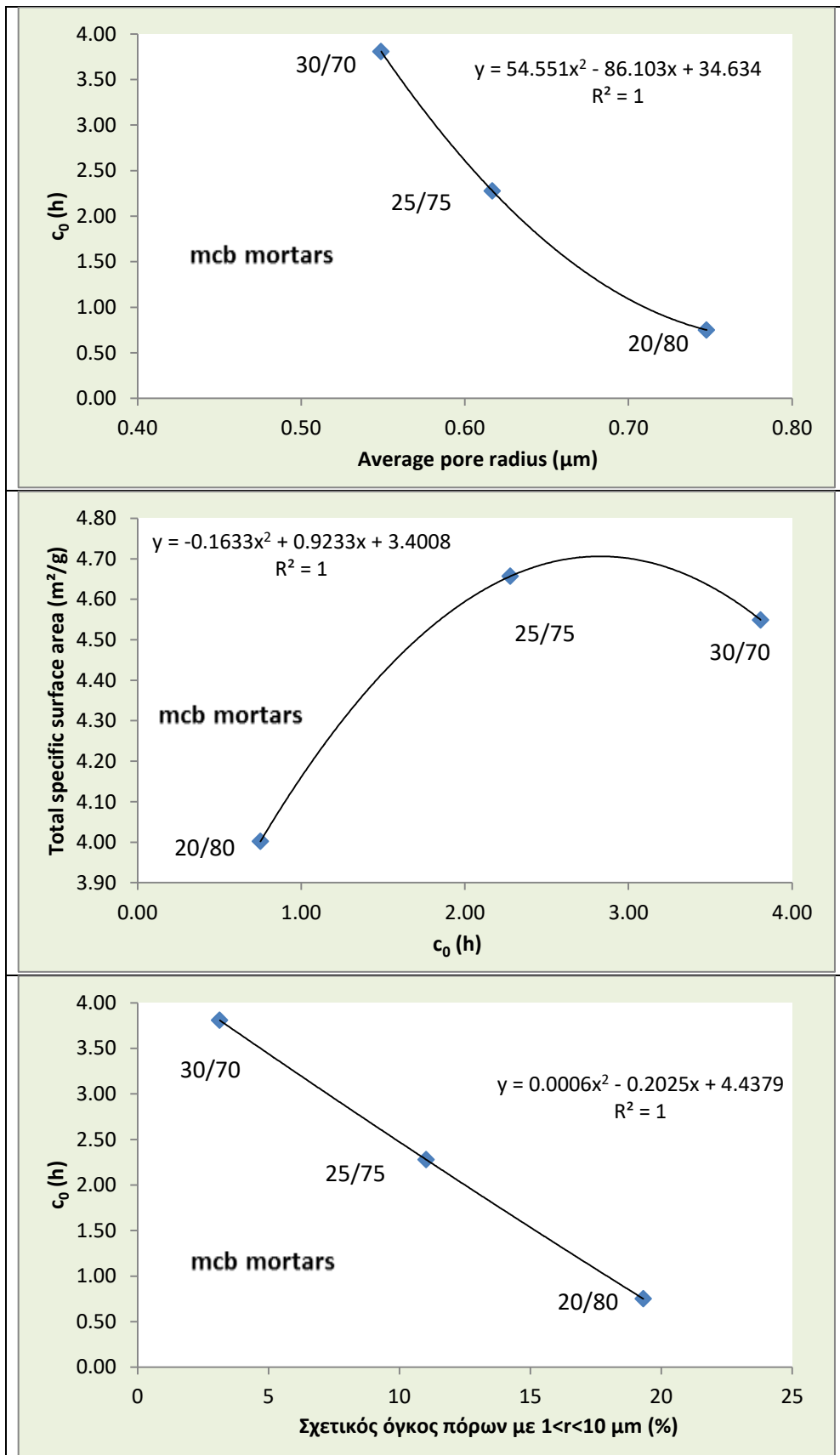
**Σχήμα 12.12:** Βελτιωμένη συσχέτιση της σταθεράς  $c_0$  με στοιχεία της μικροδομής των κονιαμάτων.





**Σχήμα 12.13:** Βελτιωμένη συσχέτιση της σταθεράς  $c_0$  με στοιχεία της μικροδομής των *mca* κονιαμάτων.





**Σχήμα 12.14:** Βελτιωμένη συσχέτιση της σταθεράς  $c_0$  με στοιχεία της μικροδομής των *mcb* κονιαμάτων.



Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι η επιλογή ομάδας υλικών και συγκεκριμένα των κονιαμάτων, οδήγησε σε βελτίωση της συσχέτισης της σταθεράς  $c_0$  με παραμέτρους της μικροδομής τους. Έτσι, η παράμετρος  $c_0$  εμφανίζει πολύ καλή εξάρτηση με τον ειδικό όγκο, την ειδική επιφάνεια και το σχετικό όγκο (%) πόρων των κονιαμάτων με  $1 < r < 10 \mu\text{m}$ . Αντίθετα, δεν φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση της σταθεράς  $c_0$  με τη μέση ακτίνα πόρων των κονιαμάτων, κατά συνέπεια, η μέση ακτίνα των πόρων των υλικών δεν μπορεί να αποτελέσει στοιχείο της μικροδομής τους που συσχετίζεται με τη σταθερά  $c_0$  στη τριχοειδή αναρρίχηση. Αντί για τη μέση ακτίνα πόρων, υπάρχουν άλλα στοιχεία όπως η ειδική επιφάνεια, ο ειδικός όγκος ή ο σχετικός όγκος (%) των πόρων με ακτίνες μεγαλύτερες από  $1 \mu\text{m}$  που μπορούν να αποτελέσουν χαρακτηριστικά στοιχεία εξάρτησης με τη σταθερά  $c_0$  του προτεινόμενου μοντέλου τριχοειδούς αναρρίχησης.

Επιπλέον, προηγούμενες εργασίες έχουν συνδέσει τον ειδικό όγκο των κονιαμάτων με τις μηχανικές τους αντοχές. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλες τιμές ειδικού όγκου συνοδεύονται με χαμηλές μηχανικές αντοχές οι οποίες αποδίδονται κυρίως σε μηχανικές καταπονήσεις και σε φαινόμενα κρυστάλλωσης αλάτων στα κονιάματα.<sup>22, 275, 276, 277</sup> Από τον Πίνακα 7.2 και από τα παραπάνω σχήματα είναι εμφανές ότι τα κονιάματα με αναλογία κονιάς/αδρανών 1:3 (κονιάματα 25/75) εμφανίζουν τους μικρότερους ειδικούς όγκους σε κάθε κατηγορία, γεγονός που υποδηλώνει και επιβεβαιώνει και τις παρατηρούμενες αυξημένες μηχανικές τους αντοχές σε σχέση με τα υπόλοιπα κονιάματα.

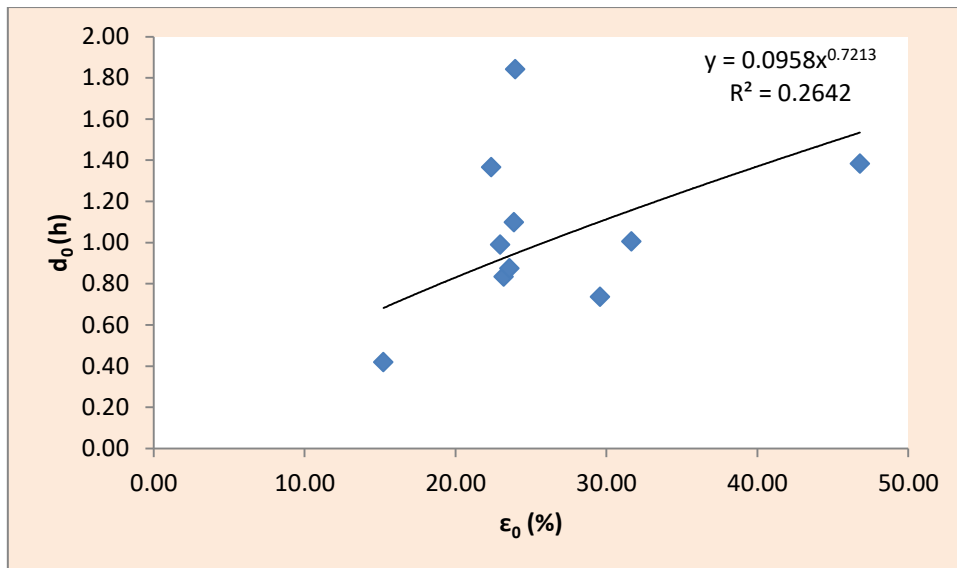
### 12.3.2 Συσχέτιση της ξήρανσης με στοιχεία της μικροδομής των υλικών

Η παράμετρος του μοντέλου ξήρανσης η οποία εκφράζει την επίδραση των χαρακτηριστικών των υλικών στη σταθερά χρόνου ξήρανσης είναι η παράμετρος  $d_0$  (βλέπε Πίνακας 11.2). Η παράμετρος αυτή συσχετίστηκε με στοιχεία της μικροδομής των υλικών όπως το ολικό πορώδες, ο ειδικός όγκος, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα πόρων κ.ά. (βλέπε Πίνακας 7.2) και τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.

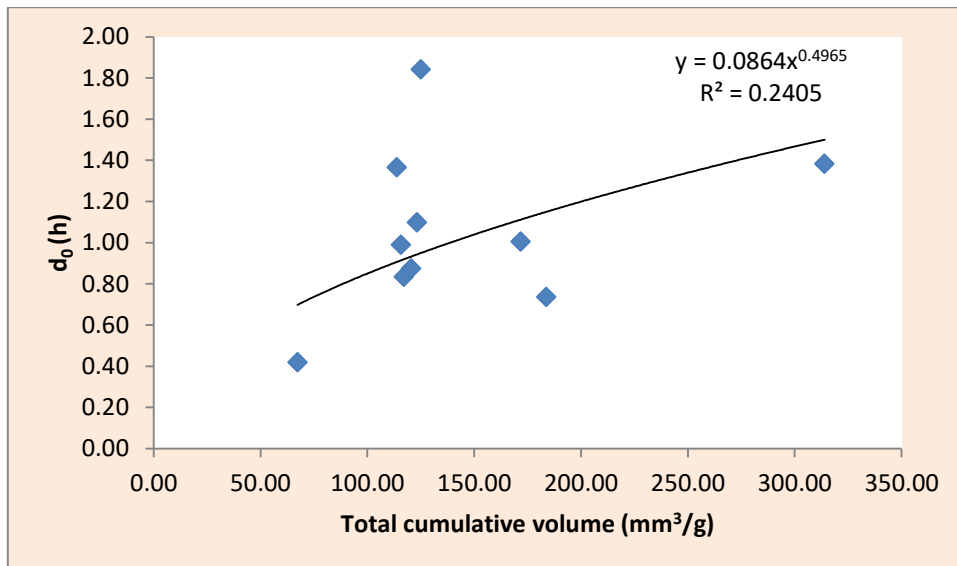
<sup>275</sup> Biscontin, G., Bakolas, A., Moropoulou, A., Zendri, E., (1994): "Microstructural characterization of the historical mortars of Venice", in 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Venice.

<sup>276</sup> Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zendri, E. (1995): "Physico-chemical characteristics of traditional mortars in Venice", in Structural Studies of Historical Buildings IV, Computational Mechanics Publications, Southampton.

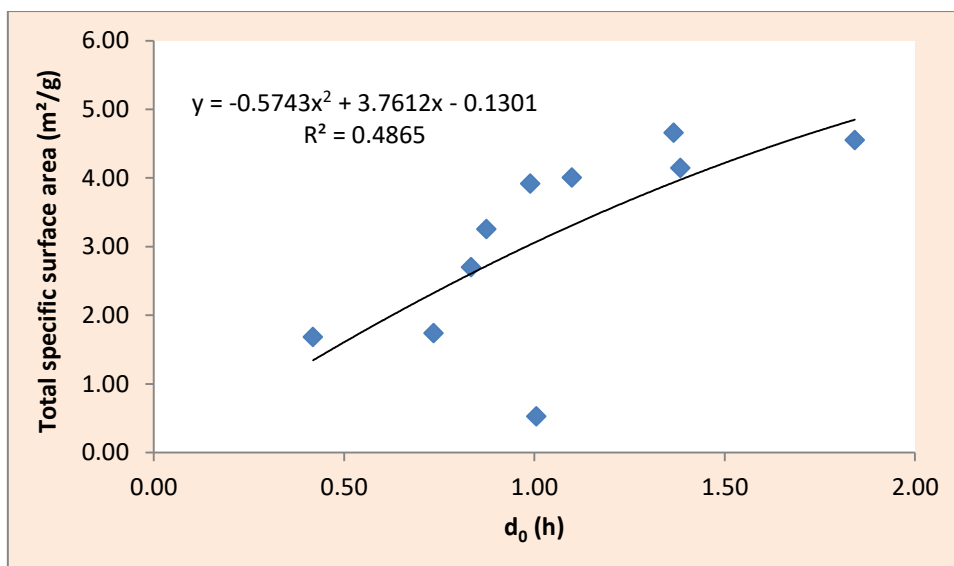
<sup>277</sup> Biscontin, G., Pellizon Birelli, M., Zendri, E. (2002): Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 1, 31-37.



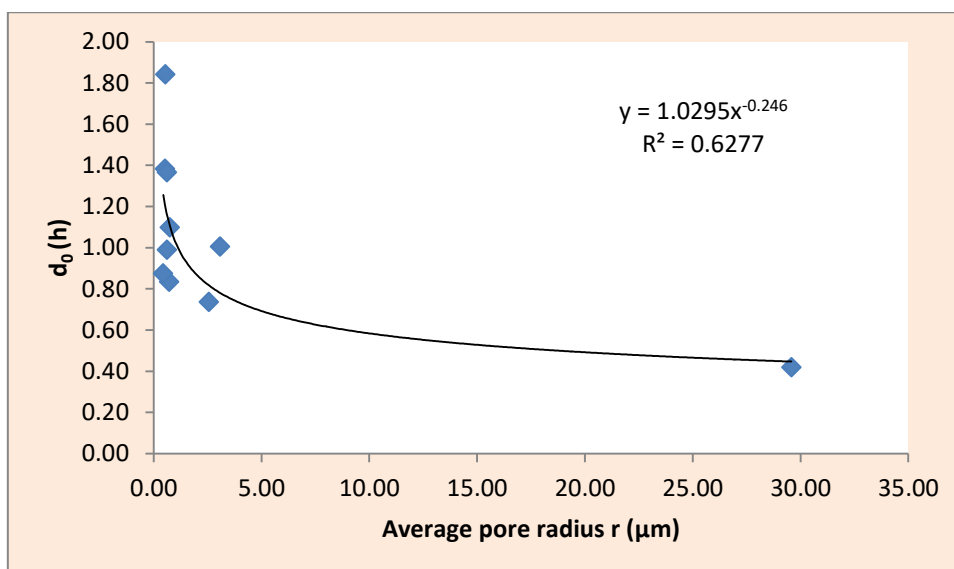
Σχήμα 12.15: Παράμετρος  $d_0$  σε σχέση με το ολικό πορώδες  $\epsilon_0$  των υλικών



Σχήμα 12.16: Παράμετρος  $d_0$  σε σχέση με τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών

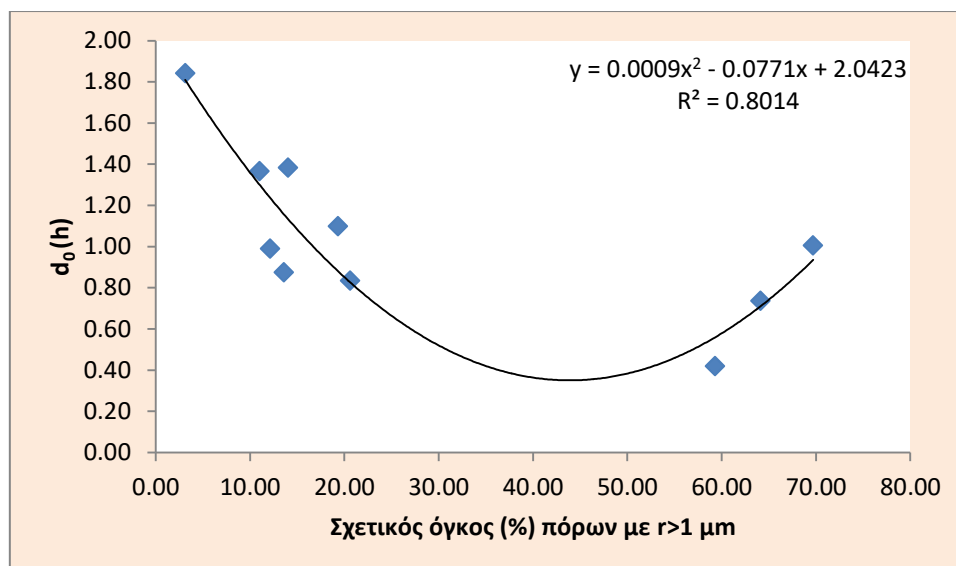


Σχήμα 12.17: Παράμετρος  $d_0$  σε σχέση με την ειδική επιφάνεια  $S$  των υλικών



Σχήμα 12.18: Παράμετρος  $d_0$  σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων  $r$  των υλικών

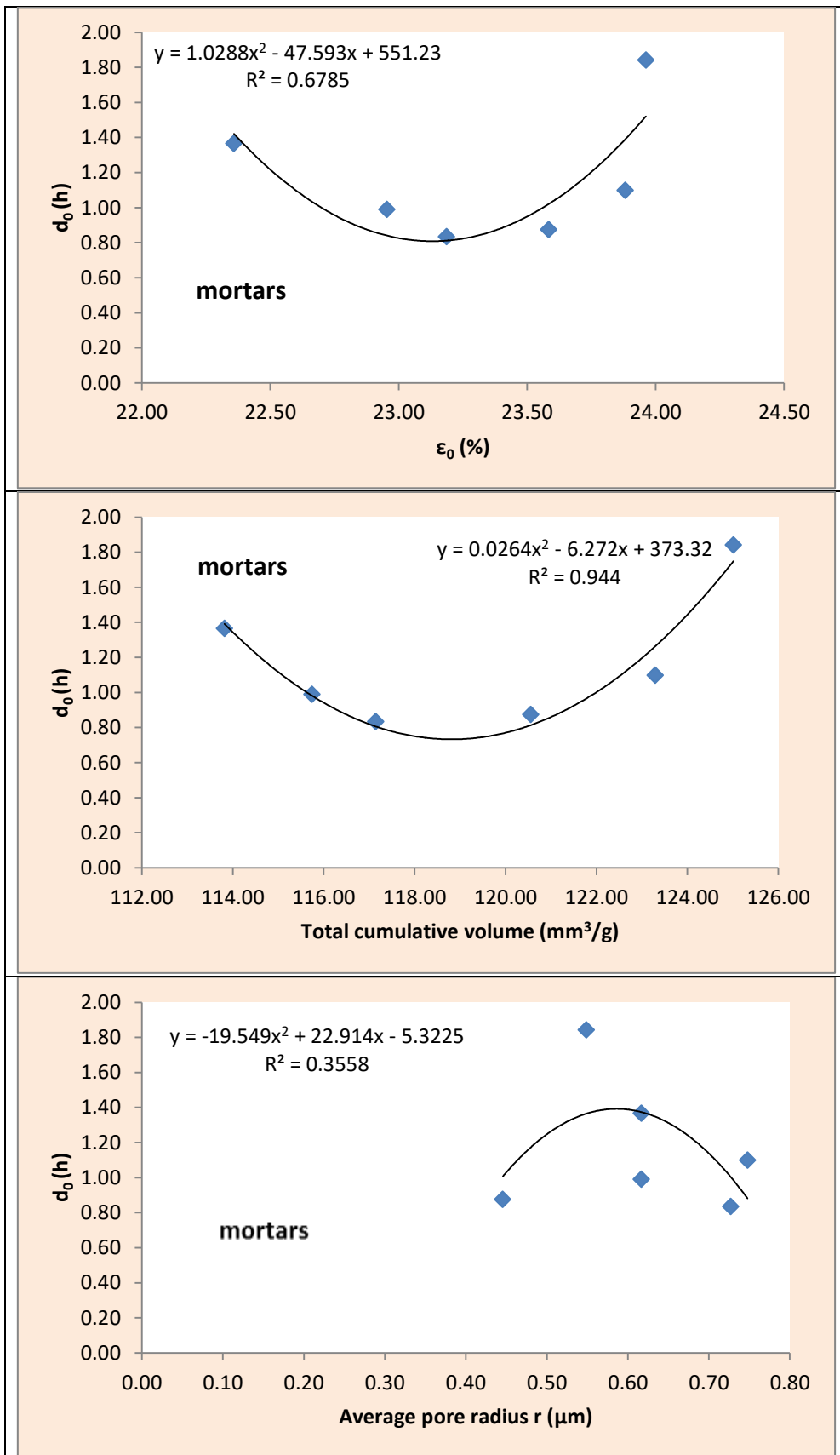
Η συσχέτιση της παραμέτρου  $d_0$  με στοιχεία της μικροδομής των υπό εξέταση δομικών υλικών, όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, είναι σαφώς πιο ικανοποιητική από τη συσχέτιση της παραμέτρου  $c_0$  με τα αντίστοιχα στοιχεία. Παρ' όλα αυτά, ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$ , σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει την τιμή των 0,62, υποδηλώνοντας ότι και εδώ δεν υπάρχει ισχυρή σχέση εξάρτησης της παραμέτρου  $d_0$  με τα ανωτέρω στοιχεία της μικροδομής των υλικών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις της παραμέτρου  $d_0$  με τους σχετικούς όγκους, τόσο των κλάσεων του Πίνακα 12.2, όσο και με συνδυασμούς των κλάσεων αυτών. Ενδεικτικά η συσχέτιση της παραμέτρου  $d_0$  με τους σχετικούς όγκους (%) των πόρων με ακτίνα μεγαλύτερη από 1 μm παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.19.

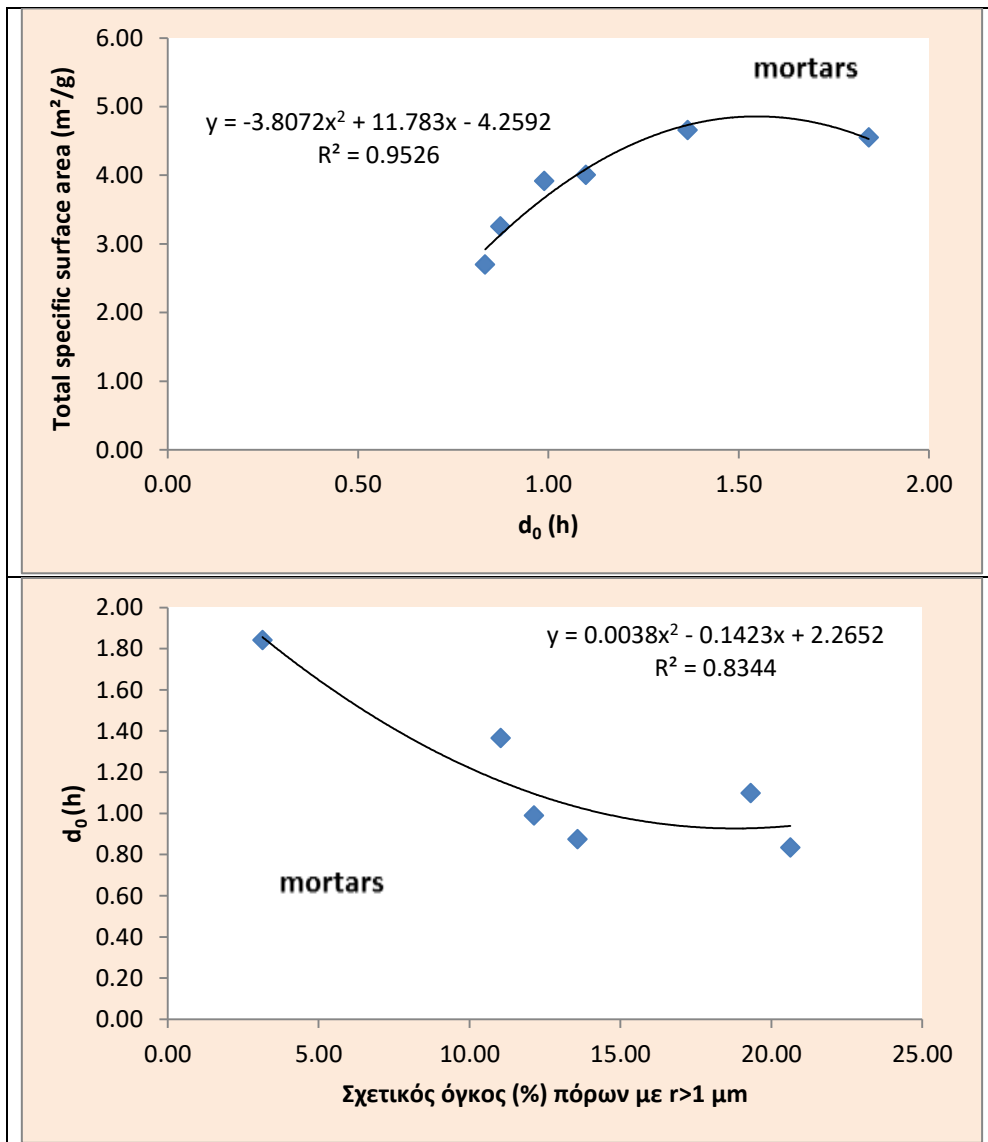


**Σχήμα 12.19:** Συσχέτιση της σταθεράς  $d_0$  με τους σχετικούς όγκους (%) των υλικών με  $r > 1 \mu\text{m}$

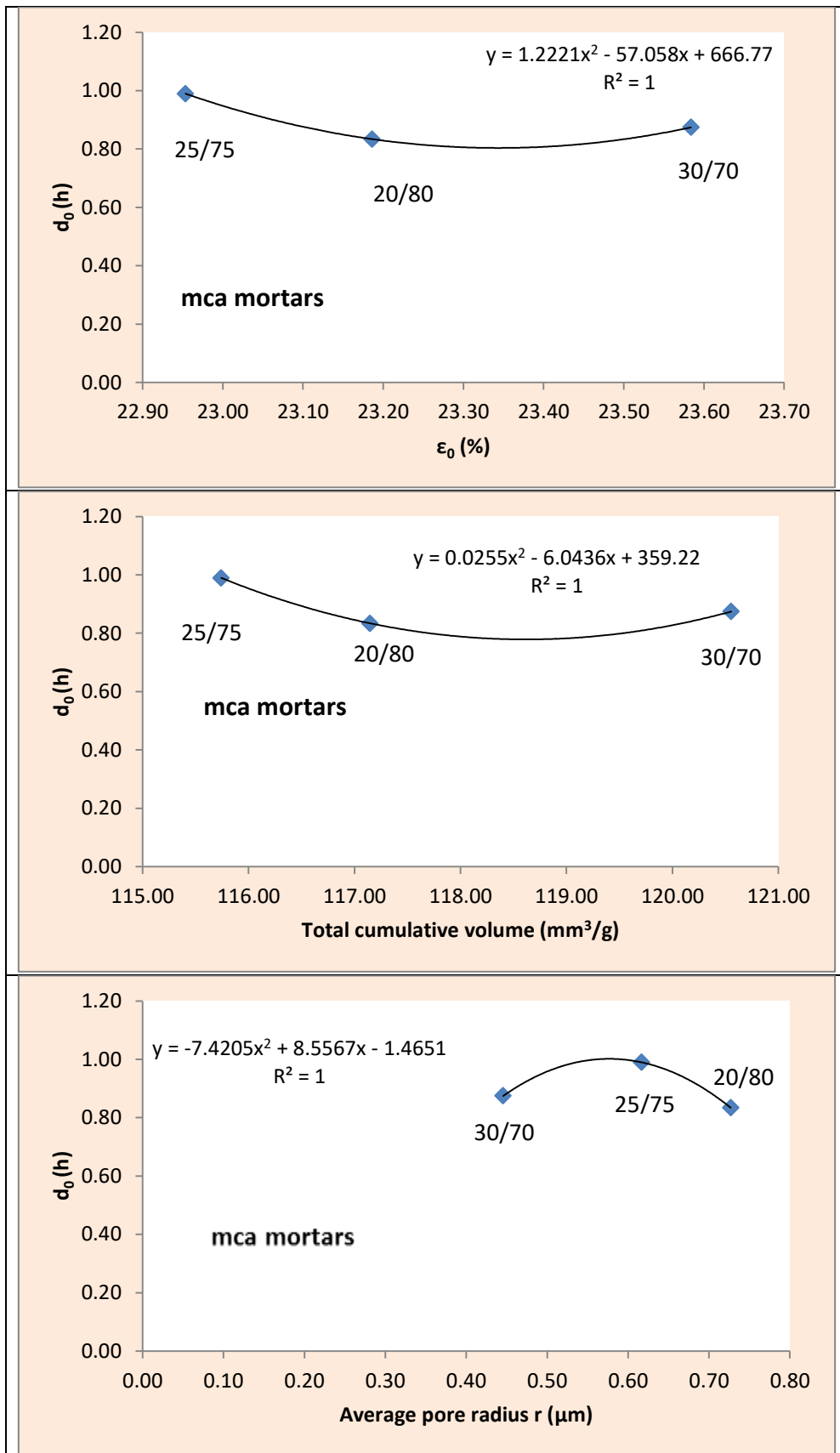
Η παράμετρος  $d_0$  εμφανίζει τετραγωνική εξάρτηση με τους σχετικούς όγκους (%) πόρων των υλικών με ακτίνες  $r > 1 \mu\text{m}$  ενώ η συσχέτιση είναι σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα ( $R^2 = 0.8014$ ). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι το φαινόμενο της ξήρανσης είναι εντονότερο για τους τριχοειδείς πόροι των υλικών με σχετικά μεγάλες μέσες ακτίνες (μεσοπόροι-μακροπόροι) ενώ οι πόροι μικρότερης ακτίνας συμμετέχουν στο φαινόμενο αυτό σε μικρότερο βαθμό.

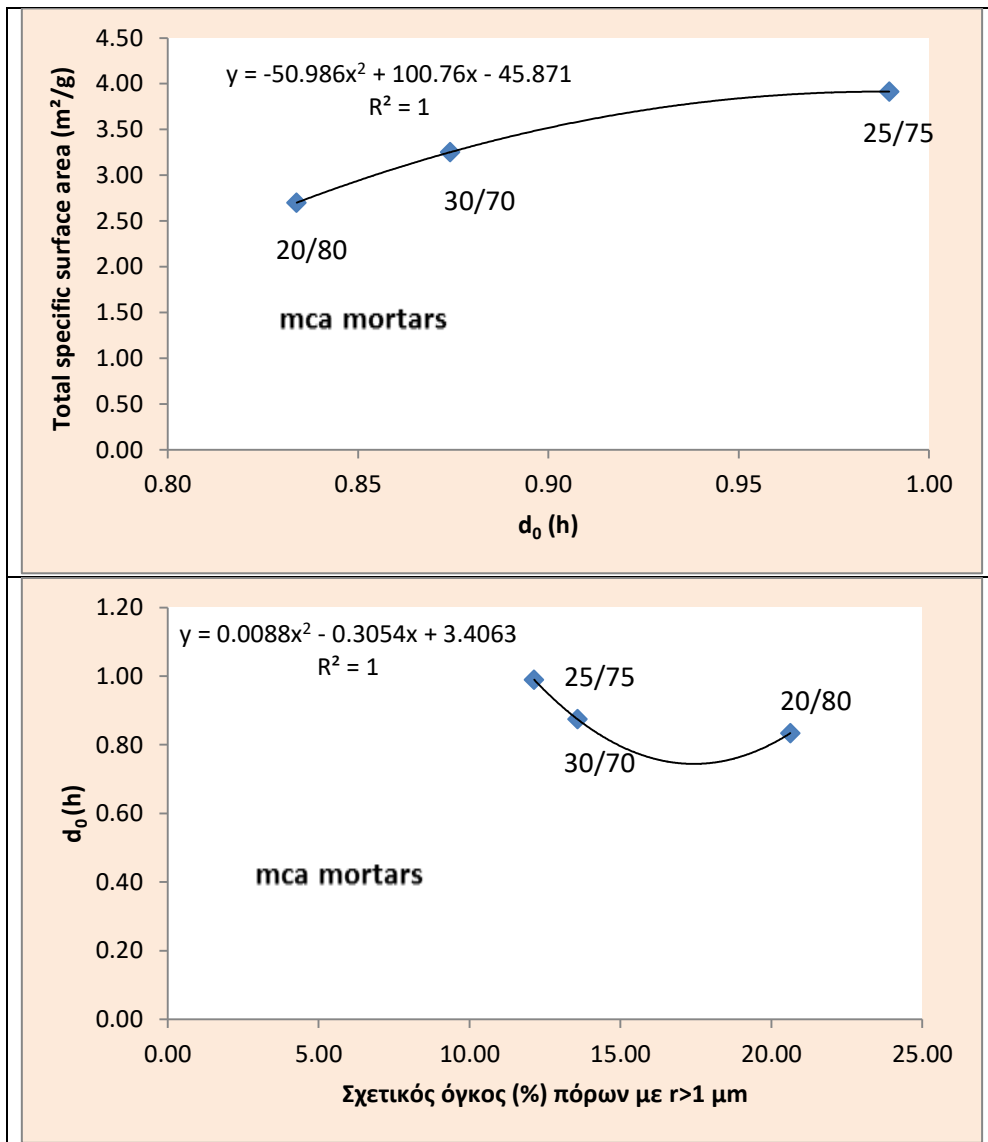
Στη συνέχεια και σε μια προσπάθεια να εξεταστεί αν βελτιώνονται οι συσχετίσεις της παραμέτρου  $d_0$  με τα στοιχεία της μικροδομής των υλικών, επιλέχθηκαν τα κονιάματα (όπως ακριβώς συνέβη και στην περίπτωση της τριχοειδούς αναρρίχησης) και πραγματοποιήθηκαν οι ανωτέρω συσχετίσεις τόσο με όλα τα κονιάματα όσο και με κάθε κατηγορία κονιαμάτων ξεχωριστά ( $mca$  και  $mcb$ ). Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών παρουσιάζονται στα Σχήματα 12.20-12.22.





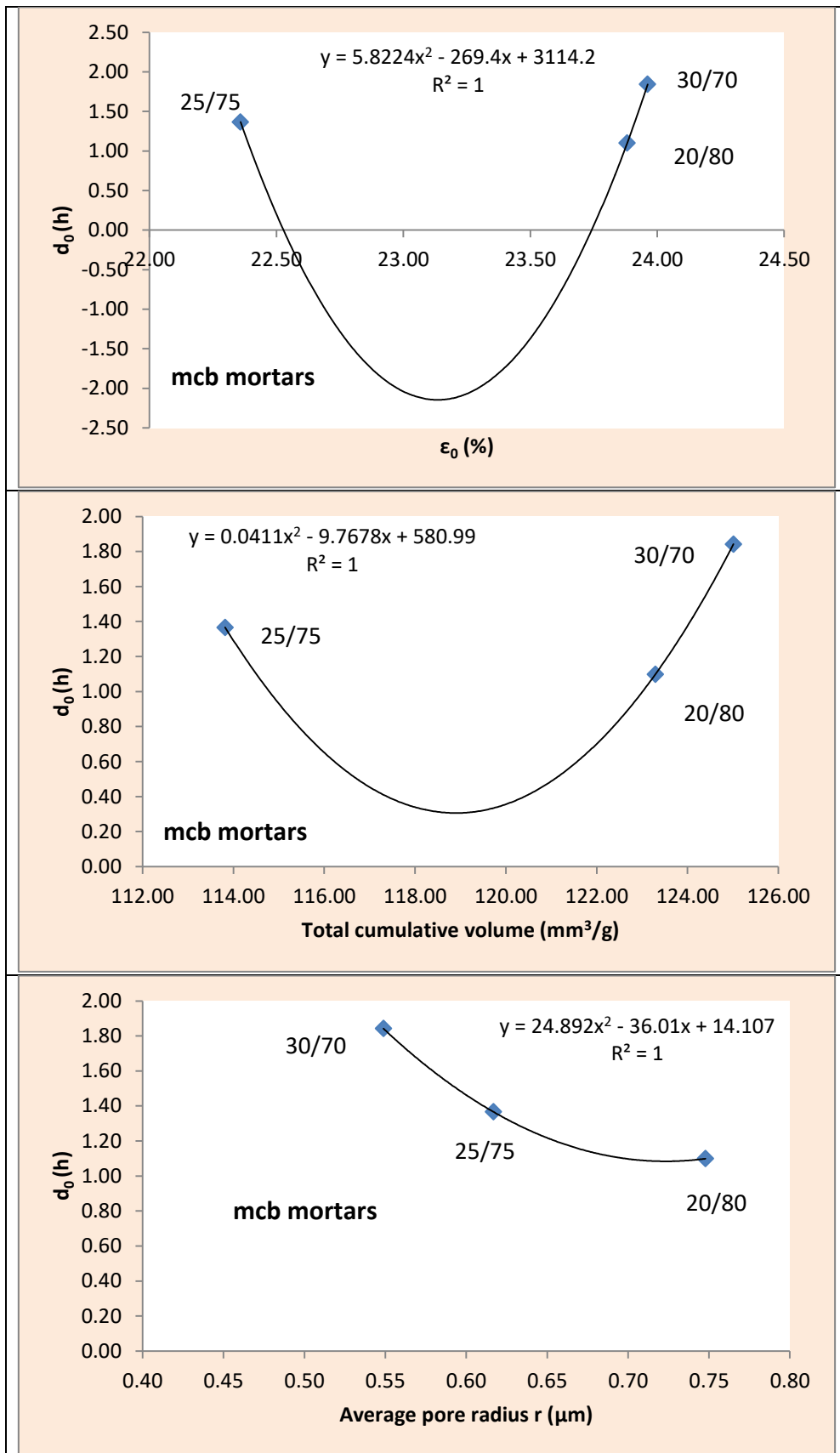
**Σχήμα 12.20:** Βελτιωμένη συσχέτιση της παραμέτρου  $d_0$  με στοιχεία της μικροδομής των κονιαμάτων.

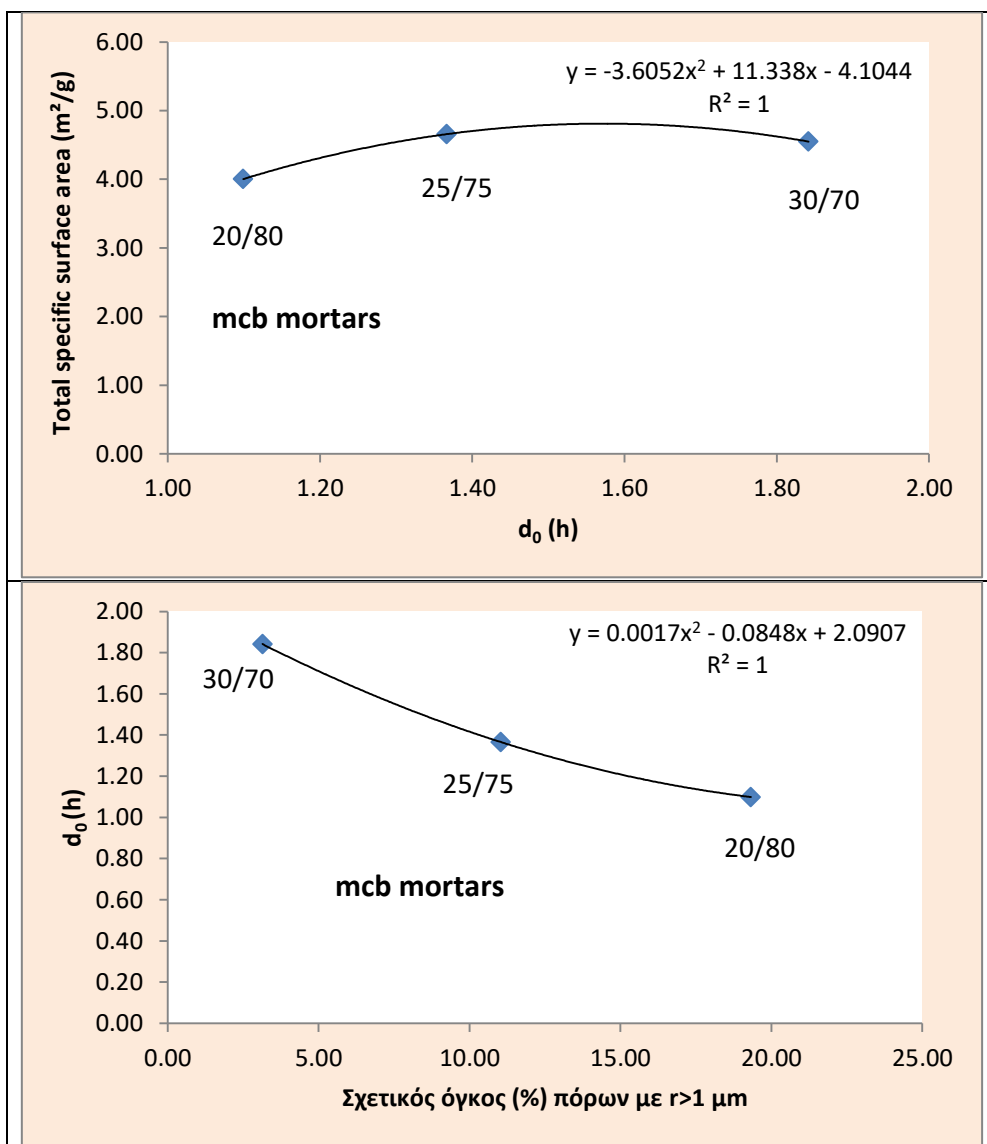




**Σχήμα 12.21:** Βελτιωμένη συσχέτιση της παραμέτρου  $d_0$  με στοιχεία της μικροδομής των *mca* κονιαμάτων.





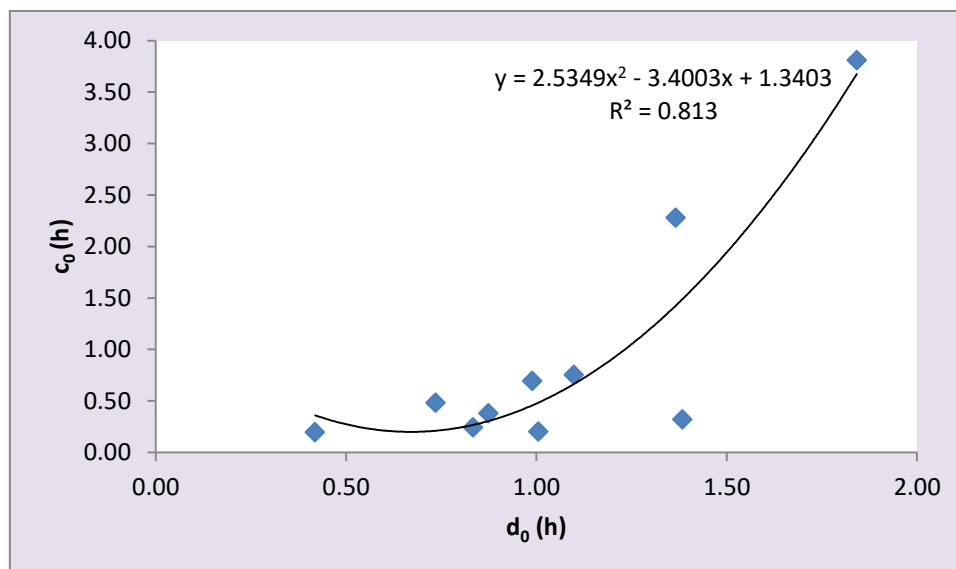


**Σχήμα 12.22:** Βελτιωμένη συσχέτιση της παραμέτρου  $d_0$  με στοιχεία της μικροδομής των *mcb* κονιαμάτων.

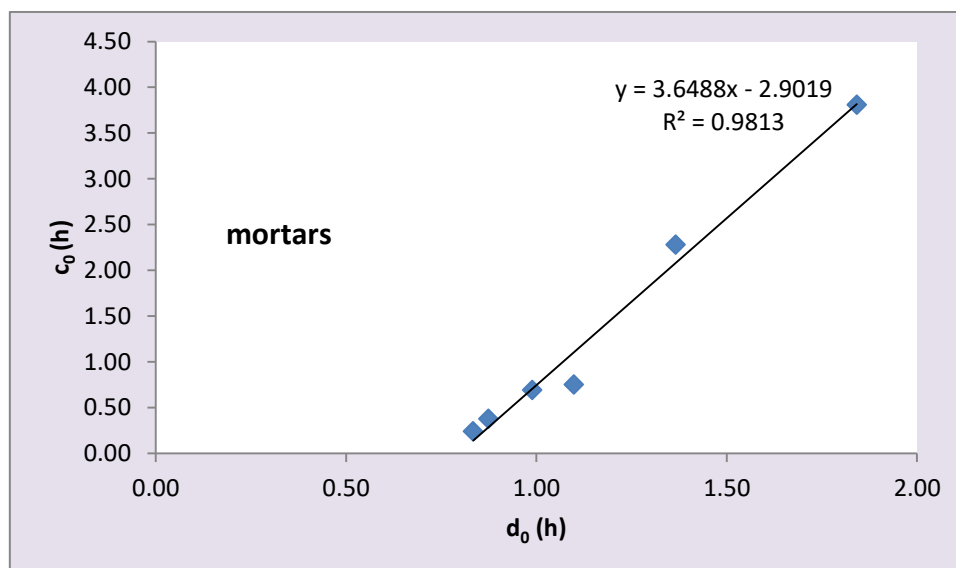
Είναι φανερό ότι η επιλογή των κονιαμάτων οδήγησε σε βελτίωση των συσχετίσεων της παραμέτρου  $d_0$  με τα περισσότερα στοιχεία της μικροδομής των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η παράμετρος  $d_0$  εμφάνισε παρά πολύ καλή συσχέτιση ( $R^2 > 0.9$ ) με τον ειδικό όγκο και την ειδική επιφάνεια των υλικών ενώ βελτίωσε ακόμα περισσότερο την εξάρτηση της με το σχετικό όγκο (%) των πόρων των κονιαμάτων με  $r > 1 \mu\text{m}$ . Αντίθετα οι χαμηλές τιμές του συντελεστή συσχέτισης της παραμέτρου  $d_0$  με το ολικό πορώδες και τη μέση ακτίνα πόρων των κονιαμάτων επαληθεύει το γεγονός της μη εξάρτησης της με τα συγκεκριμένα στοιχεία.

Ολοκληρώνοντας τις παραπάνω συσχετίσεις των παραμέτρων των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρασης με τα στοιχεία της μικροδομής των υλικών, πραγματοποιήθηκαν και συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων των δύο μοντέλων, τόσο περιλαμβάνοντας όλα τα υπό

εξέταση υλικά, όσο και μεταξύ των επιλεγμένων κονιαμάτων και τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



**Σχήμα 12.23:** Συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $d_0$  για όλα τα υλικά.



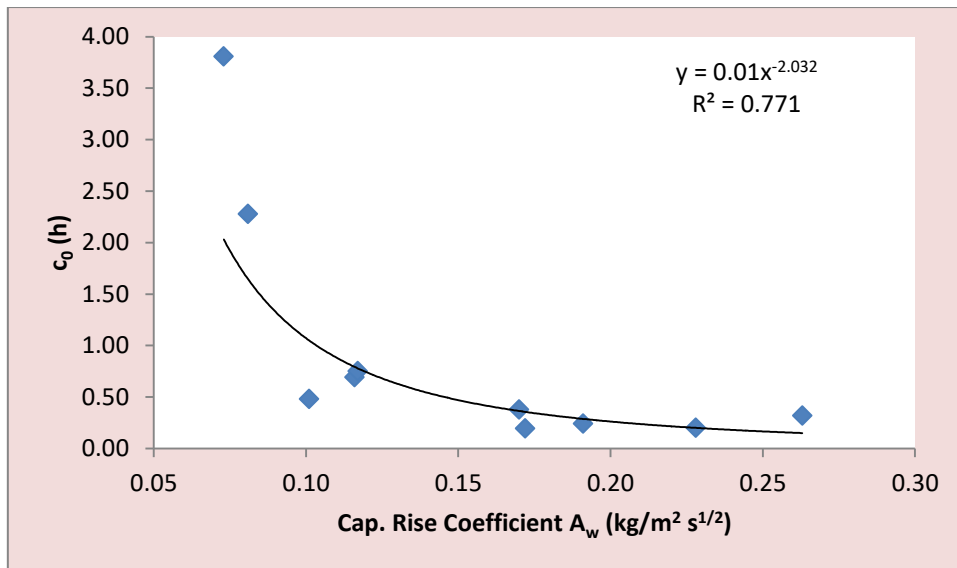
**Σχήμα 12.24:** Βελτιωμένη συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $d_0$  για τα κονιάματα.

Όπως είναι φανερό από τα Σχήματα 12.23 & 12.24 η ήδη πολύ καλή συσχέτιση ανάμεσα στις παραμέτρους  $c_0$  και  $d_0$  των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης, βελτιστοποιήθηκε (σχεδόν γραμμική) με την χρήση των κονιαμάτων *mca* και *mcb*.

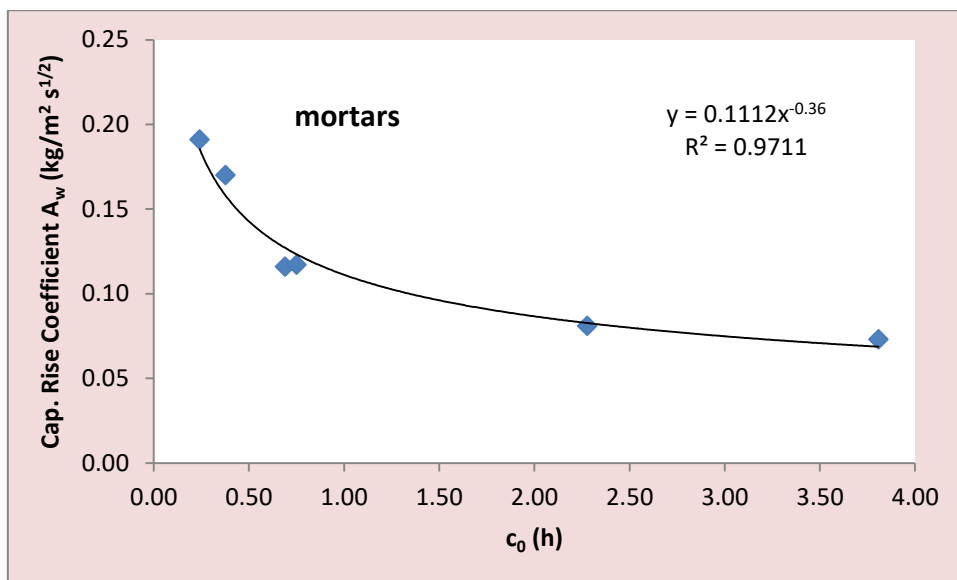
## 12.4 Συσχέτιση των φαινομένων μεταφοράς υγρασίας με μακροσκοπικές παραμέτρους των υλικών

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια να συνδεθούν οι παράμετροι των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης με μακροσκοπικά μετρούμενες παραμέτρους της υγρασιακής συμπεριφοράς των υλικών. Για το σκοπό αυτό, επιχειρήθηκε να συσχετιστούν οι παράμετροι  $c_0$  και  $d_0$  με το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση υλικών. Ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών είναι μια εύκολα προσδιορίσιμη μακροσκοπική παράμετρος τους η τιμή της οποίας μπορεί να βρεθεί με ένα απλό βαρομετρικό πείραμα. Η τιμή του συντελεστή επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και από τα χαρακτηριστικά των υλικών (όπως έχει δειχθεί στα προηγούμενα κεφάλαια). Εκτός αυτών, η τιμή του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης εξαρτάται και από τη μέθοδο του προσδιορισμού του. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να γίνει χρήση των τιμών του ανωτέρω συντελεστή σε στατικές συνθήκες περιβάλλοντος (μηδενική ταχύτητα αέρα) σε συνδυασμό με τις τιμές που ελήφθησαν κατά τα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης σε δυναμικές συνθήκες. Η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή είναι η μέθοδος των 2 εφαιπτομένων όπως αυτή έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

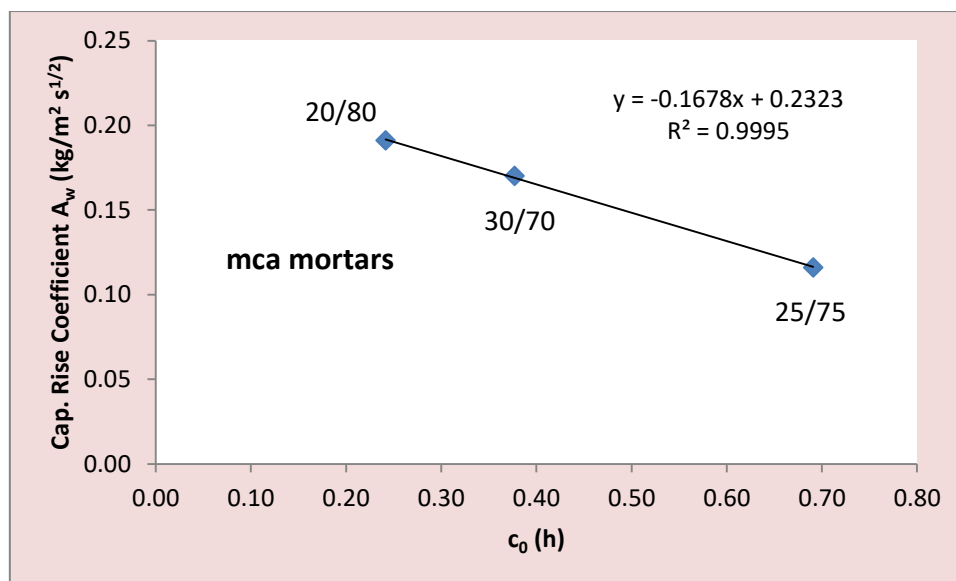
Αρχικά επιλέχθηκε ο συντελεστής τριχοειδούς υδαταπορρόφησης των υλικών στη θερμοκρασία των 30°C (βλέπε Πίνακας 9.1), ως η πιο αντιπροσωπευτική μακροσκοπική παράμετρος των υλικών, και συσχετίστηκε με τις παραμέτρους  $c_0$  και  $d_0$  οι οποίες σχετίζονται με τη φύση των υλικών. Η συσχέτιση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  με τις παραμέτρους  $c_0$  και  $d_0$  πραγματοποιήθηκε, τόσο για όλα τα υπό εξέταση υλικά, όσο και για τα κονιάματα και για τις επιμέρους κατηγορίες κονιαμάτων ξεχωριστά. Στόχος της προσπάθειας αυτής ήταν να γίνει δυνατός ο υπολογισμός παραμέτρων των μοντέλων κινητικής της τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης, μέσω απλών μαθηματικών σχέσεων, από τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών ο οποίος εύκολα μπορεί να υπολογιστεί από ένα πείραμα υδαταπορρόφησης. Τα αποτελέσματα των ανωτέρω συσχετίσεων παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



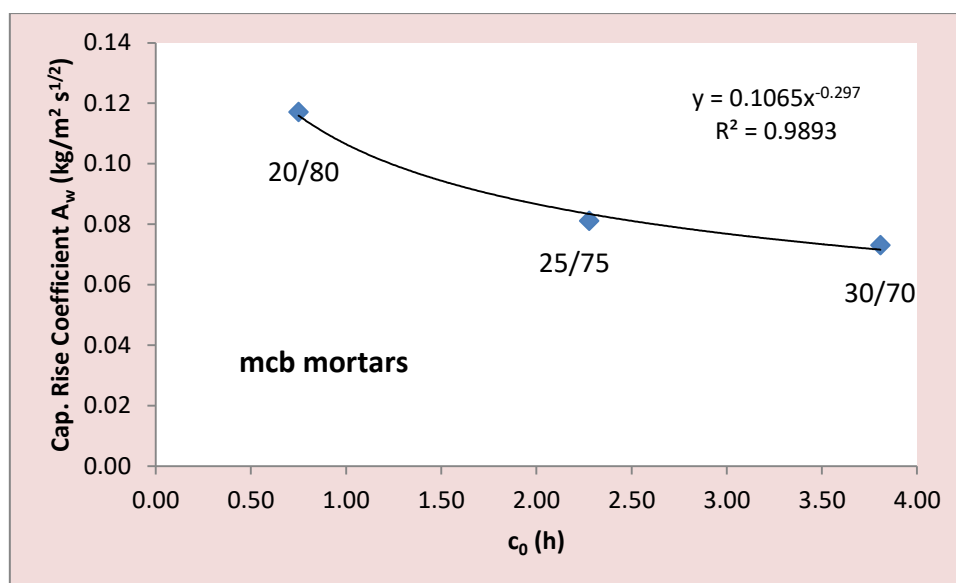
Σχήμα 12.25: Συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $A_w$  για όλα τα υλικά.



Σχήμα 12.26: Συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $A_w$  για όλα τα κονιάματα.



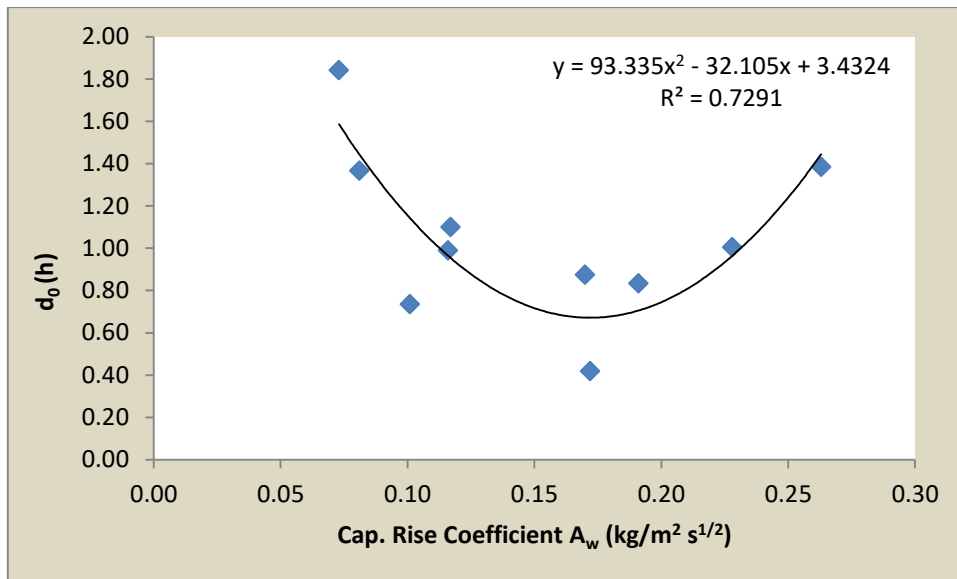
Σχήμα 12.27: Συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $A_w$  για τα *mca* κονιάματα.



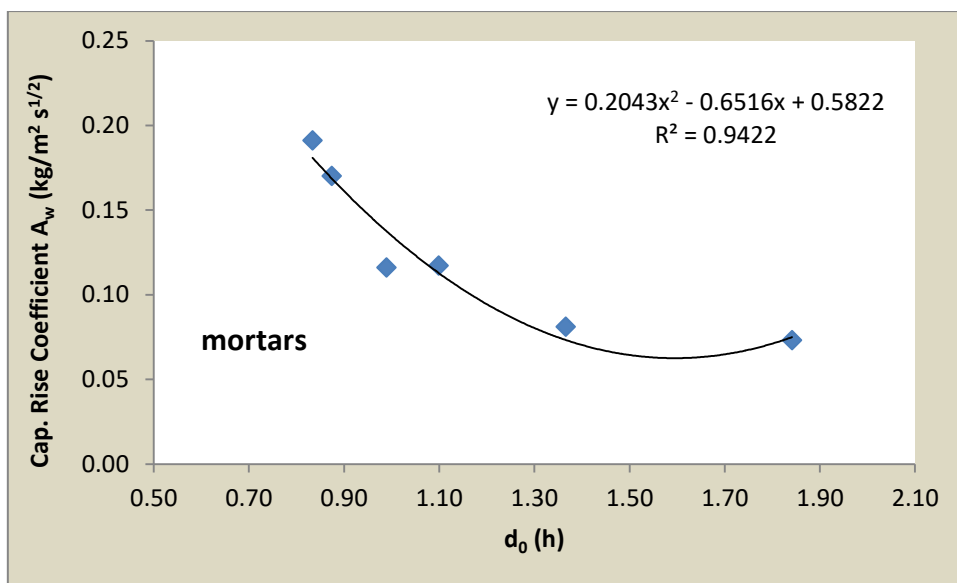
Σχήμα 12.28: Συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $A_w$  για τα *mcb* κονιάματα.

Η εξάρτηση της παραμέτρου  $c_0$  με τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  είναι εκθετική. Με την επιλογή των κονιαμάτων η συσχέτιση βελτιώθηκε κατά πολύ. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι η εξάρτηση των κονιαμάτων *mca* με το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης είναι γραμμική με άριστη συσχέτιση ενώ και η συσχέτιση του συντελεστή  $A_w$  με τη παράμετρο  $c_0$  στα *mcb* κονιάματα είναι πάρα πολύ καλή.

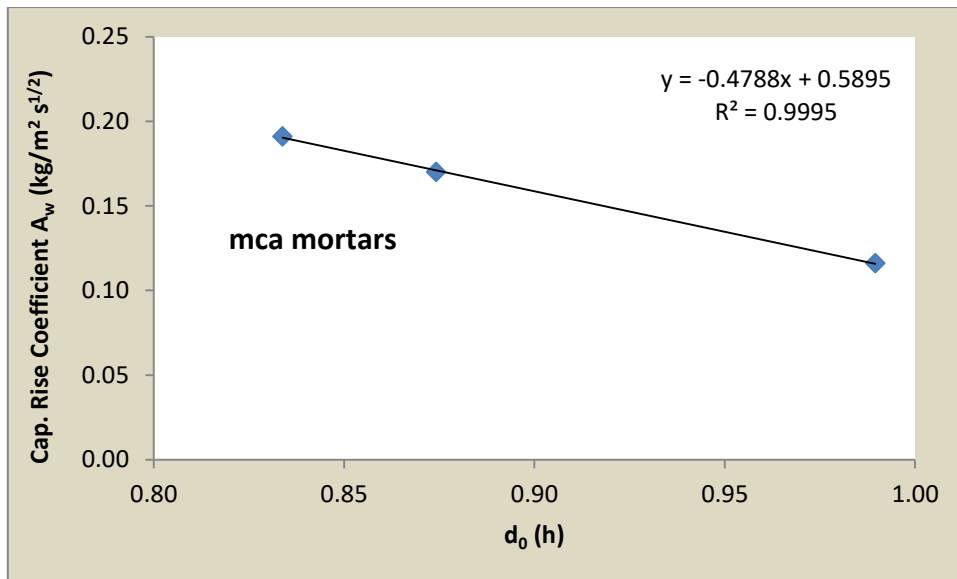
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της παραμέτρου  $d_0$  του μοντέλου της ξήρανσης με το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$ , τόσο για όλα τα υλικά όσο και για τα κονιάματα και τις υποκατηγορίες τους.



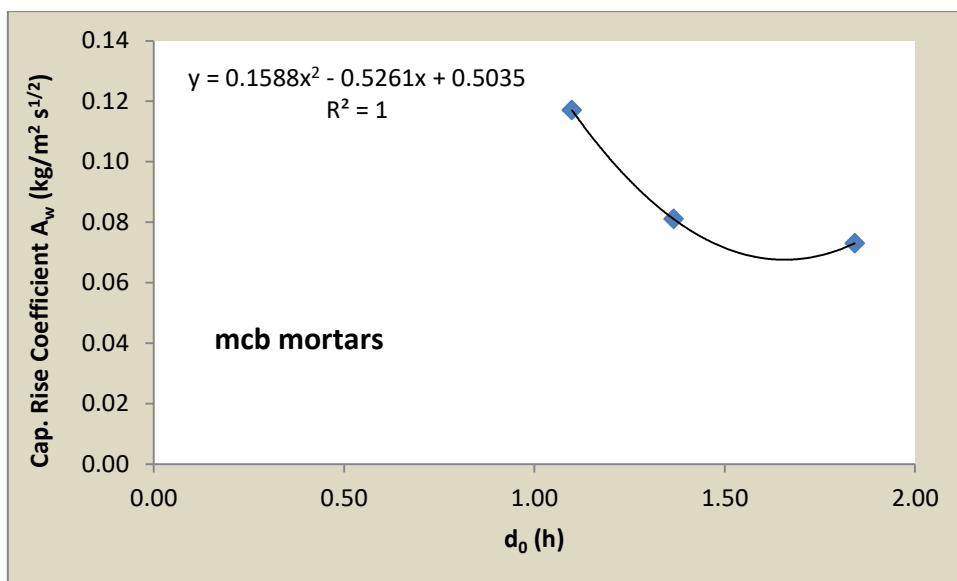
Σχήμα 12.29: Συσχέτιση των παραμέτρων  $d_0$  και  $A_w$  για όλα τα υλικά.



Σχήμα 12.30: Συσχέτιση των παραμέτρων  $d_0$  και  $A_w$  για τα κονιάματα.



Σχήμα 12.31: Συσχέτιση των παραμέτρων  $d_0$  και  $A_w$  για τα *mca* κονιάματα.



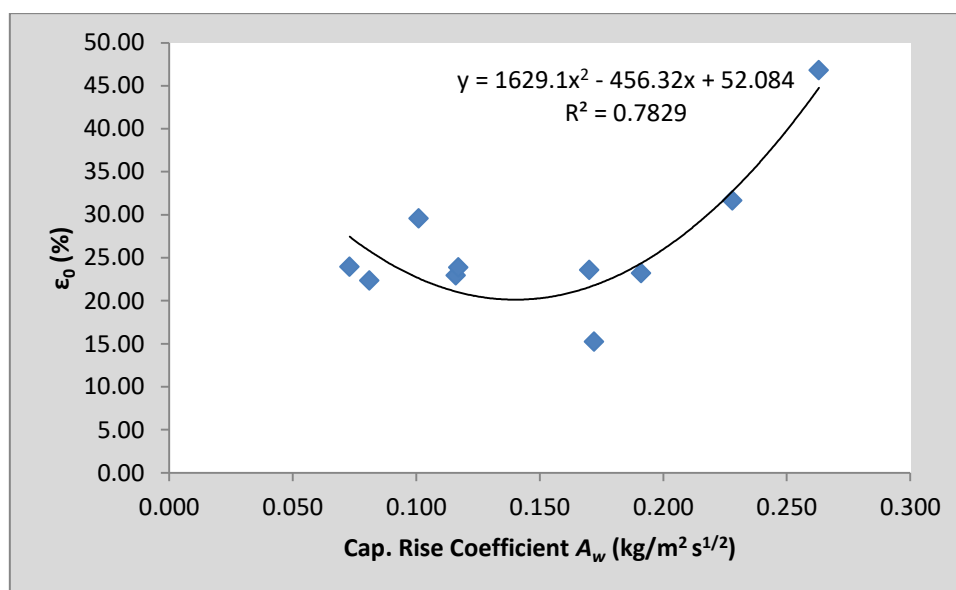
Σχήμα 12.32: Συσχέτιση των παραμέτρων  $d_0$  και  $A_w$  για τα *mcb* κονιάματα.

Η εξάρτηση της παραμέτρου  $d_0$  με τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  είναι πολυωνυμική. Και σε αυτή τη περίπτωση η επιλογή των κονιαμάτων βελτίωσε τη συσχέτιση των μεταβλητών. Επίσης εύκολα παρατηρείται η γραμμικότητα του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  με τη παράμετρο  $d_0$  για τα *mca* κονιάματα ενώ και η συσχέτιση τους στα *mcb* κονιάματα είναι πάρα πολύ καλή.

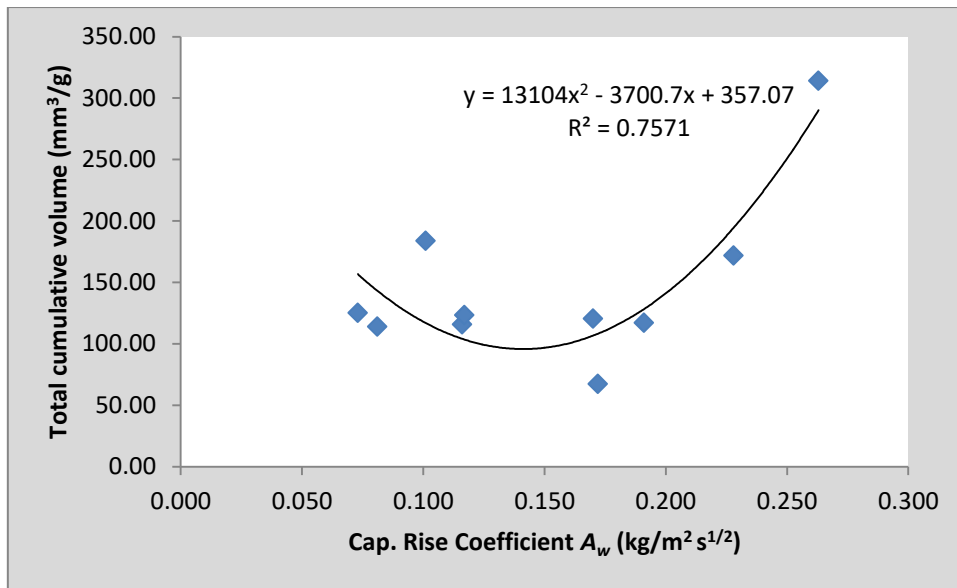


## 12.5 Συσχέτιση των μακροσκοπικών παραμέτρων με στοιχεία της μικροδομής των υλικών

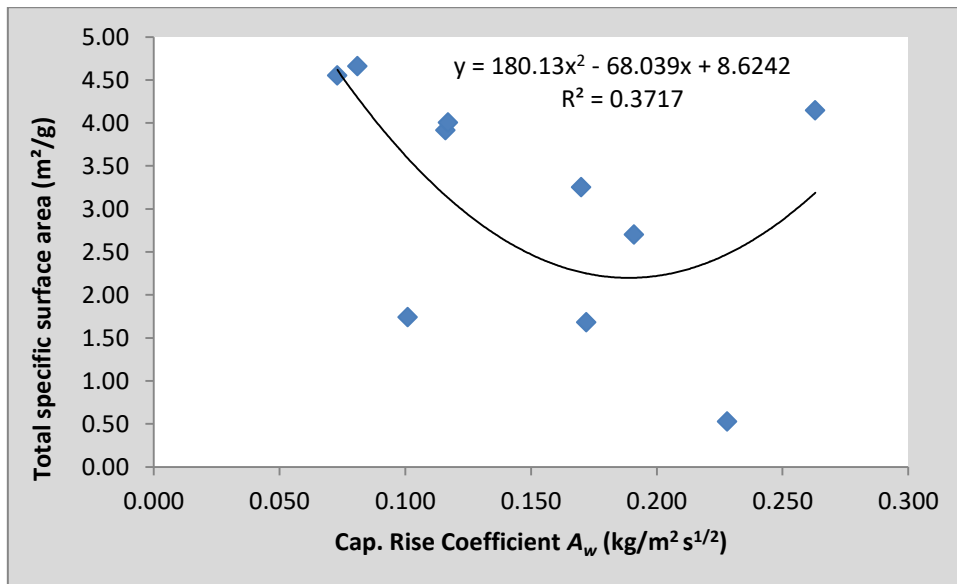
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε συσχέτιση μακροσκοπικών παραμέτρων των υλικών με στοιχεία της μικροδομής τους. Η προσπάθεια αυτή είχε σαν στόχο τη σύνδεση εύκολα μετρήσιμων μακροσκοπικών παραμέτρων των υλικών με μικροσκοπικές παραμέτρους της μικροδομής τους, με σκοπό την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους μέσω ποσοτικών σχέσεων. Ως βασική μακροσκοπική παράμετρος των υλικών και στη περίπτωση αυτή επιλέχτηκε ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  των υλικών σε θερμοκρασία στους 30°C (βλέπε Πίνακας 9.1), όπως αυτός υπολογίζεται με τη μέθοδο των 2 εφαπτομένων. Η συσχέτιση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  με τα στοιχεία της μικροδομής των υλικών πραγματοποιήθηκε, τόσο για όλα τα υπό εξέταση υλικά, όσο και για τα κονιάματα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα των ανωτέρω συσχετίσεων παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



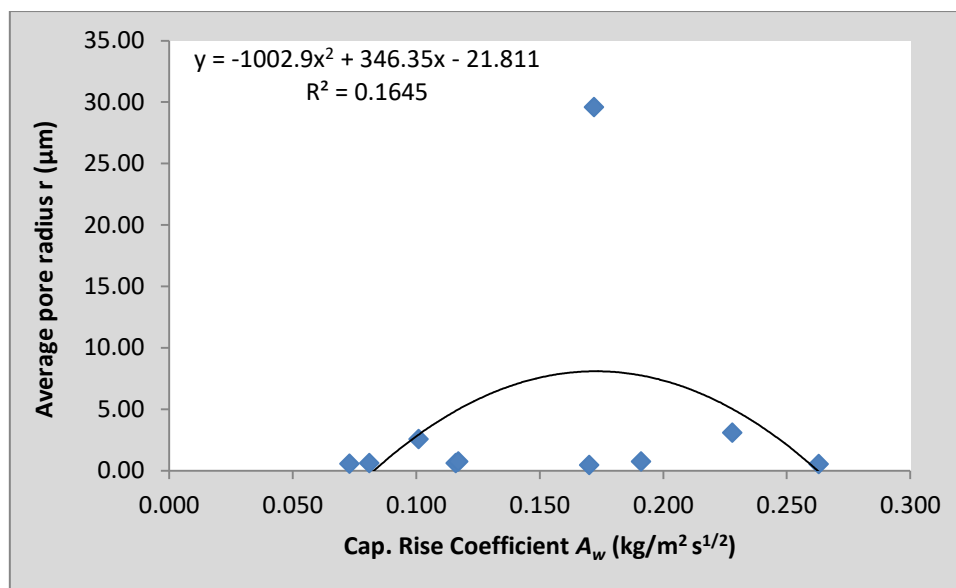
Σχήμα 12.33: Συντελεστής  $A_w$  σε σχέση με το ολικό πορώδες  $\epsilon_0$  των υλικών



Σχήμα 12.34: Συντελεστής  $A_w$  σε σχέση με τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών



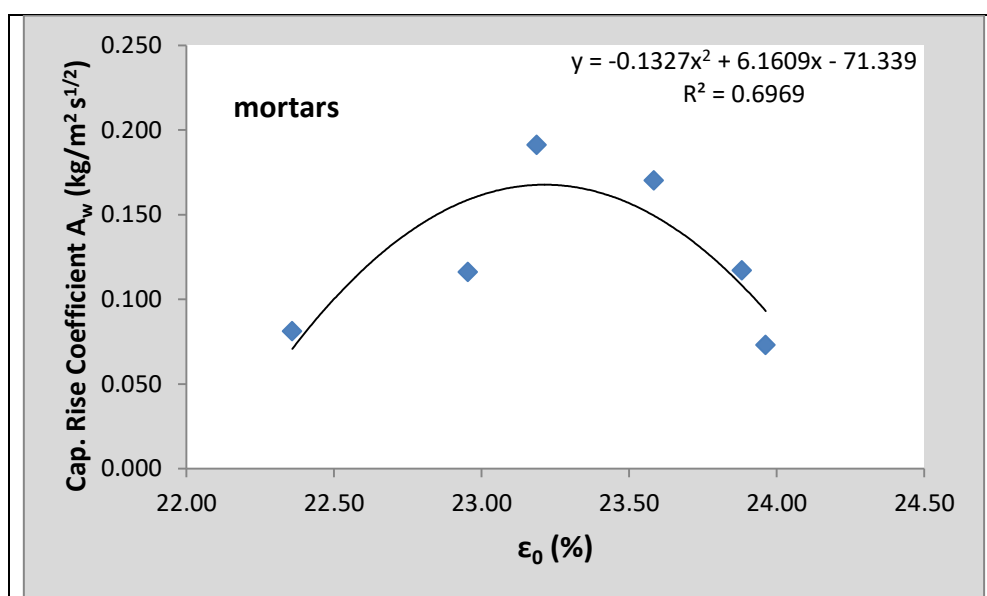
Σχήμα 12.35: Συντελεστής  $A_w$  σε σχέση με την ειδική επιφάνεια  $S$  των υλικών

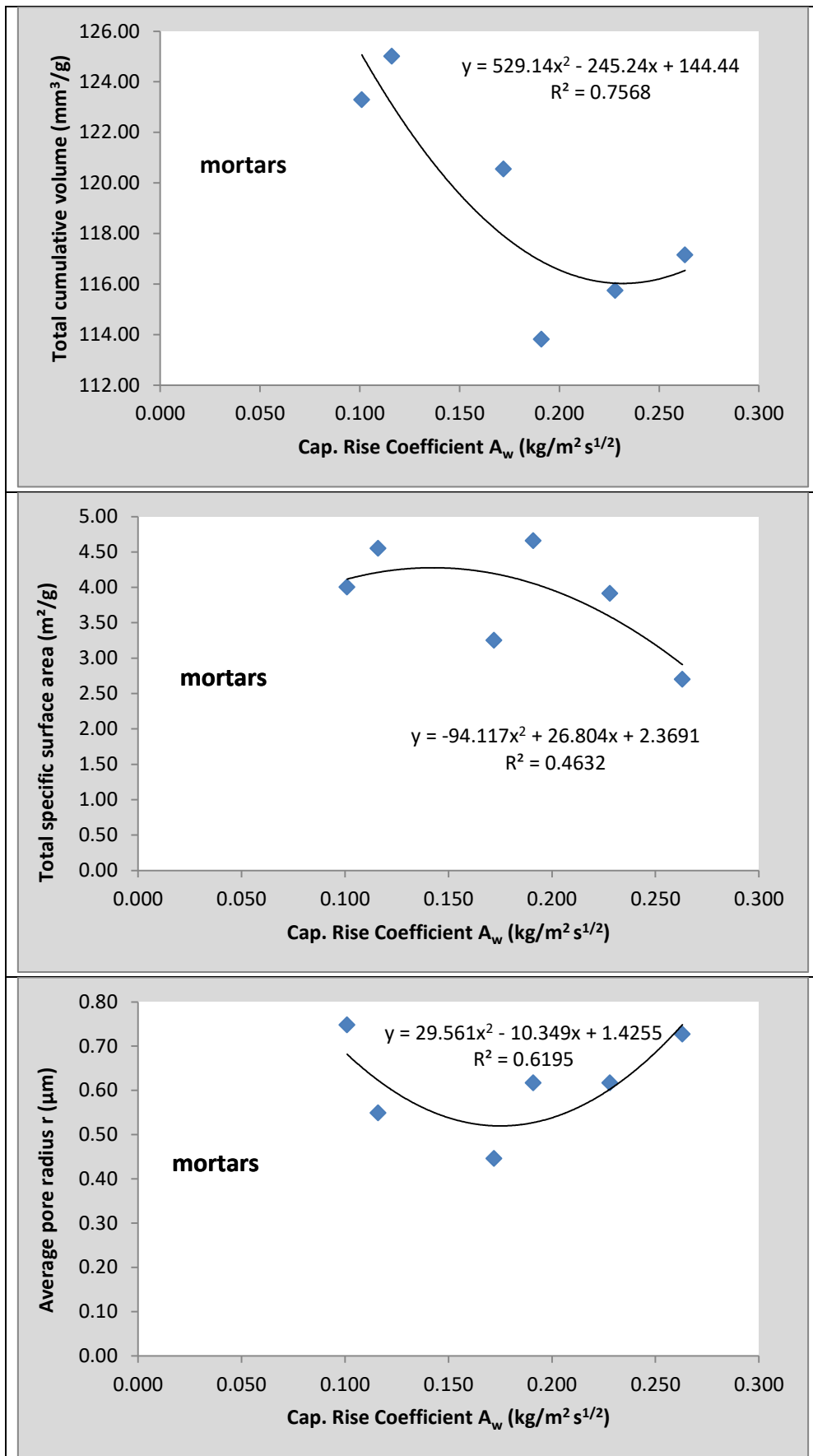


**Σχήμα 12.36:** Συντελεστής  $A_w$  σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων  $r$  των υλικών

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  των υλικών στους  $30^\circ\text{C}$  εμφανίζει ισχυρότερες συσχετίσεις με το ολικό πορώδες και τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών ( $R^2 = 0.7829$  και  $R^2 = 0.7571$  αντίστοιχα) ενώ δεν φαίνεται να συσχετίζεται με τη μέση ακτίνα πόρων και την ειδική επιφάνεια των υλικών ( $R^2 = 0.1645$  και  $R^2 = 0.3717$  αντίστοιχα).

Σε μια προσπάθεια να διερευνηθεί το κατά πόσο η κατηγοριοποίηση των υλικών θα βελτιώσει τις παραπάνω συσχετίσεις, επιλέχθηκαν όπως προηγούμενα τα κονιάματα και πραγματοποιήθηκαν οι ανωτέρω συσχετίσεις. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών παρουσιάζονται στα επόμενα Σχήματα.





Σχήμα 12.37: Βελτιωμένη συσχέτιση του συντελεστή  $A_w$  με στοιχεία της μικροδομής των κονιαμάτων.

Συμπερασματικά, ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών δεν φαίνεται να εμφανίζει πολύ ισχυρή συσχέτιση με τα στοιχεία της μικροδομής των υλικών. Πιθανώς, μια μεγαλύτερη βάση δεδομένων η οποία θα περιελάμβανε περισσότερα δομικά υλικά θα ήταν ικανή να δώσει καλύτερες και αξιοποιήσιμες συσχετίσεις του  $A_w$  με τη μικροδομή των υλικών.

## 12.6 Πρόταση για ένα «νέο» συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών είναι μια βασική και εύκολα προσδιορίσιμη μακροσκοπική παράμετρος της υγρομετρικής τους συμπεριφοράς. Παρ' όλα αυτά, ο υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών εμπεριέχει τα εξής βασικά προβλήματα:

- δεν ενσωματώνει με άμεσο τρόπο τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται το πείραμα προσδιορισμού του και από τις οποίες εξαρτάται και ο ίδιος
- δεν ενσωματώνει άμεσα τις εγγενείς ιδιότητες των υλικών και
- η τιμή του επηρεάζεται από τις μεθόδους υπολογισμού του.

Για να ξεπεραστούν τα ανωτέρω προβλήματα προτείνεται η εισαγωγή ενός «νέου» συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, ο οποίος, σε αντίθεση με τον υπάρχων, θα λαμβάνει υπόψη του, τόσο τις περιβαλλοντικές παραμέτρους όσο και τα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών και θα είναι και ανεξάρτητος από τις μεθόδους υπολογισμού του. Ο συντελεστής αυτός θα ονομάζεται *απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης*  $A_{w/abs}$  και υπολογίζεται μετά από ένα βαρυμετρικό πείραμα, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$A_{w/abs} = \frac{\Delta B_{2/3}}{A\sqrt{t_{cr}}} \quad (12.1)$$

όπου  $A_{w/abs}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$ ) είναι ο απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) είναι το εμβαδόν διατομής του δείγματος και  $\Delta B_{2/3}$  ( $\text{kg}$ ) είναι η μάζα του τριχοειδώς απορροφούμενου νερού σε χρόνο ίσο με τη σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης  $t_{cr}$  του κάθε υλικού. Δεδομένου ότι η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης εκφράζει τον απαιτούμενο χρόνο στον οποίο η υγρασία κατά την τριχοειδή αναρρίχηση φτάνει στα 2/3 της υγρασίας κατά τον τριχοειδή κορεσμό του κάθε δείγματος, η ποσότητα  $\Delta B_{2/3}$  θα αντιστοιχεί στα 2/3 του απορροφούμενου νερού στο τριχοειδή κορεσμό για κάθε υλικό. Η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης  $t_{cr}$  ενσωματώνει τις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του πειράματος και τα εγγενή χαρακτηριστικά του υλικού και, όπως προκύπτει από το μοντέλο τριχοειδούς αναρρίχησης, δίνεται από τη σχέση 10.2. Έτσι, ο απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης κάθε υλικού παίρνει τη μορφή:

$$A_{w/abs} = \frac{\Delta B_{2/3}}{A \sqrt{c_0 \left(\frac{u}{u_r}\right)^{c_1} \left(\frac{T}{T_r}\right)^{c_2} \left(\frac{a_w}{a_{wr}}\right)^{c_3}}} \quad (12.2)$$

Ο απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης ενσωματώνει την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών καθώς και τα εγγενή χαρακτηριστικά των υλικών μέσω της εισαγωγής της σταθεράς χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης. Επίσης, δεν επηρεάζεται η τιμή του από τη μέθοδο υπολογισμού μιας και δεν επηρεάζεται κανένας από τους παράγοντές του από αυτή. Έτσι μπορεί να αποτελέσει ένα απόλυτο μέτρο περιγραφής της συμπεριφοράς κάθε δομικού υλικού κατά τη τριχοειδή υδαταπορρόφηση.

### 12.6.1 Σύγκριση του «νέου» συντελεστή με τον υπάρχοντα $A_w$ από τη βιβλιογραφία

Σε μια προσπάθεια να γίνει αξιολόγηση του απόλυτου συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, επιχειρήθηκε μια σύγκρισή του με τον συντελεστή τριχοειδούς υδαταπορρόφησης, όπως αυτός υπολογίζεται πειραματικά στα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο συντελεστής υδαταπορρόφησης των υπό εξέταση δομικών υλικών σύμφωνα με τη μέθοδο των 2 εφαπτομένων για όλες τις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης με τη βοήθεια της εξίσωσης (12.2) κάνοντας χρήση των παραμέτρων της μοντελοποίησης της τριχοειδούς αναρρίχησης, όπως υπολογίζονται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα των ανωτέρω υπολογισμών καθώς και η τυπική τους απόκλιση παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 12.3 και 12.4.

**Πίνακας 12.3:** Πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και θεωρητικές τιμές του απόλυτου συντελεστή υδαταπορρόφησης για τη θερμοκρασία των 30°C, RH: 35% και για διαφορετικές ταχύτητες του αέρα.

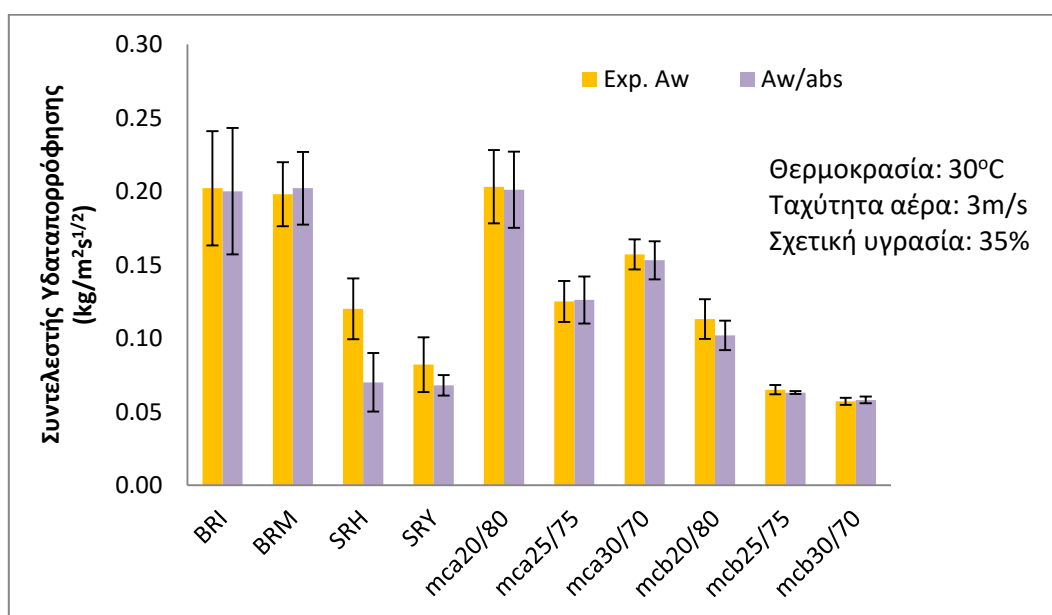
	Exp. $A_w$	SD	$A_{w/abs}$	SD	Exp. $A_w$	SD	$A_{w/abs}$	SD	Exp. $A_w$	SD	$A_{w/abs}$	SD
Υλικά	1 m/s				3 m/s				5 m/s			
<b>BRI</b>	0.208	0.033	0.204	0.039	0.202	0.039	0.200	0.043	0.202	0.035	0.197	0.036
<b>BRM</b>	0.211	0.017	0.215	0.017	0.198	0.022	0.202	0.025	0.194	0.023	0.197	0.023
<b>SRH</b>	0.131	0.051	0.086	0.037	0.120	0.021	0.070	0.020	0.118	0.036	0.071	0.004
<b>SRY</b>	0.097	0.018	0.085	0.010	0.082	0.019	0.068	0.007	0.079	0.017	0.072	0.009
<b>mca20/80</b>	0.197	0.015	0.197	0.014	0.203	0.025	0.201	0.026	0.195	0.022	0.195	0.025
<b>mca25/75</b>	0.121	0.010	0.122	0.010	0.125	0.014	0.126	0.016	0.129	0.015	0.132	0.013
<b>mca30/70</b>	0.160	0.010	0.169	0.012	0.157	0.010	0.153	0.013	0.134	0.005	0.124	0.011
<b>mcb20/80</b>	0.119	0.010	0.089	0.006	0.113	0.014	0.102	0.010	0.095	0.009	0.088	0.009

<i>mcb25/75</i>	0.069	0.005	0.070	0.006	0.065	0.003	0.063	0.001	0.064	0.006	0.063	0.004
<i>mcb30/70</i>	0.057	0.003	0.055	0.005	0.057	0.002	0.058	0.002	0.057	0.002	0.056	0.002

**Πίνακας 12.4:** Πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και θεωρητικές τιμές του απόλυτου συντελεστή υδαταπορρόφησης για ταχύτητα αέρα 3m/s, RH: 35% και για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Υλικά	Exp. $A_w$	SD	$A_{w/abs}$	SD	Exp. $A_w$	SD	$A_{w/abs}$	SD	Exp. $A_w$	SD	$A_{w/abs}$	SD
	25°C				30°C				40°C			
<i>BRI</i>	0.167	0.012	0.166	0.020	0.202	0.039	0.200	0.043	0.176	0.019	0.173	0.022
<i>BRM</i>	0.181	0.037	0.184	0.035	0.198	0.022	0.202	0.025	0.170	0.025	0.175	0.024
<i>SRH</i>	0.118	0.019	0.082	0.012	0.120	0.021	0.070	0.020	0.123	0.063	0.073	0.006
<i>SRY</i>	0.083	0.018	0.076	0.018	0.082	0.019	0.068	0.007	0.080	0.016	0.069	0.011
<i>mca20/80</i>	0.192	0.017	0.194	0.018	0.203	0.025	0.201	0.026	0.212	0.028	0.214	0.026
<i>mca25/75</i>	0.119	0.015	0.119	0.013	0.125	0.014	0.126	0.016	0.125	0.010	0.128	0.010
<i>mca30/70</i>	0.150	0.013	0.153	0.012	0.157	0.010	0.153	0.013	0.169	0.017	0.169	0.019
<i>mcb20/80</i>	0.072	0.016	0.061	0.008	0.113	0.014	0.102	0.010	0.107	0.015	0.094	0.008
<i>mcb25/75</i>	0.060	0.006	0.061	0.004	0.065	0.003	0.063	0.001	0.059	0.007	0.058	0.006
<i>mcb30/70</i>	0.062	0.003	0.063	0.003	0.057	0.002	0.058	0.002	0.060	0.002	0.059	0.003

Ενδεικτικά παρατίθενται στο επόμενο διάγραμμα οι τιμές των δύο συντελεστών για τη θερμοκρασία των 30°C, σχετική υγρασία 35% και ταχύτητα αέρα 3m/s.



**Σχήμα 12.38:** Τιμές των δύο συντελεστών και τυπικές αποκλίσεις στους 30°C, σχετική υγρασία 35% και για ταχύτητα αέρα 3m/s.

Όπως είναι φανερό από τους προηγούμενους πίνακες και από το Σχήμα 12.38, οι τιμές των δύο συντελεστών είναι σε πολύ καλή συμφωνία για όλα σχεδόν τα υπό εξέταση υλικά και σε όλες τις θερμοκρασίες και ταχύτητες του αέρα. Εξάιρεση αποτελεί ο λίθος *SRH* για τον οποίο οι τιμές των συντελεστών εμφανίζουν αποκλίσεις πέρα από τα όρια της τυπικής απόκλισης. Παρατηρώντας τα Σχήματα 8.4 & 9.1 είναι φανερό ότι οι πωρόλιθοι *SRH* παρουσιάζουν ένα μη γραμμικό πρώτο μέρος στην κινητική της τριχοειδούς αναρρίχησης τους που, σε συνδυασμό με τα στοιχεία της μικροδομής τους (μεγάλη μέση ακτίνα πόρων, μεγάλο εύρος κατανομής πόρων κ.ά.) και την ανομοιογένεια σε όλη τη μάζα τους, ερμηνεύει αυτή τη συμπεριφορά τους.

Είναι επίσης φανερό ότι οι συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης δομικών υλικών που δεν εμφανίζουν γραμμικό πρώτο μέρος κατά το πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης (*mca25/75*, *mcb20/80*, *mcb25/75* και *mcb30/70*), εμφανίζουν τιμές με πολύ μικρές αποκλίσεις και πάντα μέσα στα όρια του στατιστικού σφάλματος. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι ο απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης μπορεί να υποκαταστήσει τους υπάρχοντες συντελεστές στη περιγραφή του φαινομένου της υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών των δομικών υλικών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 13.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι (α) η μελέτη των μηχανισμών μεταφοράς της υγρασίας (τριχοειδής αναρρίχηση και ξήρανση) σε πορώδη δομικά υλικά διαφόρων συστάσεων και η εξέταση του κατά πόσο οι μηχανισμοί αυτοί επηρεάζουν αλλά και επηρεάζονται από τη μικροδομή και τις ιδιότητες των δομικών υλικών και (β) η μοντελοποίηση των μηχανισμών μεταφοράς της υγρασίας στα δομικά υλικά με σκοπό την πρόβλεψη της υγρασιακής συμπεριφοράς τους.

Στο πλαίσιο αυτό προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

#### **Μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας**

Όσον αφορά τις διάφορες μεθόδους προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς υδαταπορρόφησης των δομικών υλικών, κατηγοριοποιήθηκαν τα υπάρχοντα πρότυπα και κανονισμοί που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία και αναφέρονται τόσο στην πειραματική διαδικασία του πειράματος της τριχοειδούς αναρρίχησης όσο και στον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης νερού μέσω των τριχοειδών πόρων των δομικών υλικών. Εν συνεχεία, αξιολογήθηκαν οι παραπάνω μέθοδοι και βρέθηκε ότι η μέθοδος των δύο εφαπτομένων φαίνεται ότι είναι η πιο κατάλληλη για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης διότι μπορεί να εφαρμοστεί και σε δομικά υλικά τα οποία εμφανίζουν αποκλίσεις από τη γραμμικότητα στον αρχικό ρυθμό υδαταπορρόφησης στα πειράματα τριχοειδούς αναρρίχησης.

#### **Επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών**

Κατόπιν μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στο φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση δομικών υλικών και προτάθηκε ένα σύνολο εμπειρικών σχέσεων για την πρόβλεψη των τιμών του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για κάθε θερμοκρασία μέσα στο προβλεπόμενο όριο. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια αξιολόγηση των εξισώσεων αυτών εφαρμόζοντας τις για τη πρόβλεψη των τιμών του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών για τη θερμοκρασία των 15°C. Οι πειραματικές τιμές του συντελεστή στους 15°C βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία με τις προβλεπόμενες για όλα τα εξεταζόμενα υλικά.

Στη συνέχεια, οι πειραματικά εξαγόμενες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης συγκρίθηκαν με τις τιμές που προβλέπουν μοντέλα άλλων ερευνητών. Βρέθηκε ότι τα επιλεγμένα μοντέλα δεν μπορούν να προβλέψουν τις τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για όλες τις περιπτώσεις δομικών υλικών. Αυτό συμβαίνει διότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης δεν εξαρτάται μόνο από τις φυσικές ιδιότητες του νερού αλλά και από τις εγγενείς ιδιότητες των δομικών υλικών.

### **Μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας**

Βρέθηκε ότι, τόσο η τριχοειδής αναρρίχηση όσο και η ξήρανση των υπό μελέτη δομικών υλικών μπορούν να περιγραφούν με απλά μαθηματικά μοντέλα κινητικής πρώτης τάξης. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τους διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους με φυσικό περιεχόμενο καθώς και τα εγγενή χαρακτηριστικά του κάθε υλικού και προσομοιώνουν την συμπεριφορά των υλικών κάτω από την επίδραση των παραμέτρων αυτών.

Όσον αφορά την τριχοειδή αναρρίχηση, βρέθηκε ότι μία αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα προκαλεί αύξηση του ρυθμού υδαταπορρόφησης ενώ μια αύξηση είτε της ταχύτητας του αέρα ή της σχετικής υγρασίας επιφέρει μια μείωση στο ρυθμό υδαταπορρόφησης των εξεταζόμενων υλικών. Επιπλέον, το προτεινόμενο μοντέλο της τριχοειδούς αναρρίχησης συγκρίθηκε με μοντέλα άλλων ερευνητών με σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας του. Διαπιστώθηκε ότι η προσαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα ήταν πιο ακριβής λόγω της ενσωμάτωσης των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών και των εγγενών χαρακτηριστικών των υλικών σε αυτό.

Όσον αφορά τη ξήρανση, μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων στη κινητική ξήρανσης του τριχοειδώς αναρριχόμενου νερού σε διάφορα δομικά υλικά. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η σταθερά ξήρανσης των υλικών αυξάνει με αύξηση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της ταχύτητας του αέρα.

### **Συσχέτιση των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας με στοιχεία της μικροδομής των υλικών**

Τέλος πραγματοποιείται συσχέτιση των βασικών παραμέτρων της μοντελοποίησης των φαινομένων μεταφοράς της υγρασίας στα δομικά υλικά, τόσο μεταξύ τους, όσο και με βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής των υπό εξέταση υλικών με σκοπό την εξαγωγή σχέσεων που θα επιτρέπουν τη μεταξύ τους σύνδεση. Σκοπός των συσχετίσεων αυτών ήταν το να μπορεί να γίνει εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την υγρασιμική συμπεριφορά των δομικών υλικών απλά με μελέτη στοιχείων της μικροδομής τους.

Στο πλαίσιο των συσχετίσεων αυτών προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Συσχέτιση σταθερών χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης με περιβαλλοντικές παραμέτρους

Οι λόγοι των σταθερών χρόνου των φαινομένων μεταφοράς υγρασίας εμφανίζουν διαφορετική τάση για κάθε κατηγορία υλικών. Στα κεραμικά *BRI* & *BRM*, οι λόγοι των σταθερών χρόνου παραμένουν σταθεροί για όλες τις πειραματικές τιμές θερμοκρασίας. Στους λίθους *SRH* και *SRY* και σε ορισμένα κονιάματα (*mca30/70* & σε όλα τα *mcb* κονιάματα) οι κλίσεις είναι αρνητικές ενώ οι αντίστοιχες κλίσεις για τα κονιάματα *mca20/80* & *mca25/75* είναι θετικές. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνει η θερμοκρασία, η σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης ορισμένων υλικών μειώνεται γρηγορότερα σε σχέση με τη σταθερά ξήρανσής τους με αποτέλεσμα να μειώνεται το πηλίκιο των δύο σταθερών με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Αντίθετα, στη συσχέτισή τους με τη ταχύτητα του αέρα, οι λόγοι των σταθερών χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης έχουν θετικές κλίσεις για όλα τα υλικά.

- Συσχέτιση των μοντέλων της τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης με στοιχεία της μικροδομής των υλικών

Οι συσχετίσεις των παραμέτρων  $c_0$  και  $d_0$  των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης με τα στοιχεία της μικροδομής των υλικών ήταν ασθενείς. Ο πιθανός λόγος για τον οποίο δεν μπορεί να υπάρξει άμεση συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $d_0$  με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των υλικών είναι ότι πρόκειται για διαφορετικά δομικά υλικά, τα οποία εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, διαφορετικές ιδιότητες και μη κοινά εύρη πόρων.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν ως εξεταζόμενα υλικά τα κονιάματα και πραγματοποιήθηκαν οι ανωτέρω συσχετίσεις τόσο με όλα τα κονιάματα όσο και με κάθε κατηγορία κονιαμάτων ξεχωριστά ( $mca$  και  $mcb$ ). Βρέθηκε ότι οι παράμετροι  $c_0$  και  $d_0$  εμφανίζουν πάρα πολύ καλή εξάρτηση με τον ολικό ειδικό όγκο, την ειδική επιφάνεια και το σχετικό όγκο (%) πόρων των κονιαμάτων με  $1 < r < 10 \mu m$ . Συνεπώς, στοιχεία της μικροδομής των υλικών όπως η ειδική επιφάνεια, ο ολικός ειδικός όγκος ή ο σχετικός όγκος (%) πόρων με ακτίνες μεγαλύτερες από  $1 \mu m$  μπορούν να αποτελέσουν χαρακτηριστικά στοιχεία εξάρτησης με τις παραμέτρους των μοντέλων μεταφοράς της υγρασίας στα κονιάματα. Το μέρος αυτό των συσχετίσεων ολοκληρώθηκε με τη συσχέτιση ανάμεσα στις παραμέτρους  $c_0$  και  $d_0$  των μοντέλων τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης, η οποία ήταν άριστη και γραμμική για τα κονιάματα  $mca$  και  $mcb$ .

- Συσχέτιση των φαινομένων μεταφοράς υγρασίας με μακροσκοπικές παραμέτρους των υλικών

Κατόπιν, συσχετίστηκαν οι παράμετροι  $c_0$  και  $d_0$  με το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση υλικών, που είναι η πιο εύκολα προσδιορίσιμη μακροσκοπική παράμετρός τους. Στόχος της προσπάθειας αυτής ήταν να γίνει δυνατός ο υπολογισμός παραμέτρων των μοντέλων κινητικής της τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης, μέσω απλών μαθηματικών σχέσεων, από τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών. Η πολύ καλή συσχέτιση των παραμέτρων  $c_0$  και  $d_0$  με το συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης αριστοποιήθηκε με την επιλογή των κονιαμάτων ως εξεταζόμενα υλικά.

- Συσχέτιση των μακροσκοπικών παραμέτρων με στοιχεία της μικροδομής των υλικών

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε συσχέτιση μακροσκοπικών παραμέτρων των υλικών με στοιχεία της μικροδομής τους. Ως βασική μακροσκοπική παράμετρος των υλικών και στη περίπτωση αυτή επιλέχθηκε ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  των υλικών σε θερμοκρασία στους  $30^\circ C$ . Βρέθηκε ότι ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  των υλικών εμφανίζει ισχυρότερες συσχετίσεις με το ολικό πορώδες και τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών ( $R^2 = 0.7829$  και  $R^2 = 0.7571$  αντίστοιχα) ενώ δεν φαίνεται να συσχετίζεται με τη μέση ακτίνα πόρων και την ειδική επιφάνεια των υλικών ( $R^2 = 0.1645$  και  $R^2 = 0.3717$  αντίστοιχα). Η επιλογή των κονιαμάτων ως μόνων εξεταζόμενων υλικών βελτίωσε τη

συσχέτιση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης  $A_w$  με τη μέση ακτίνα πόρων και την ειδική επιφάνεια των υλικών.

### **Πρόταση για ένα «νέο» συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης**

Ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης των υλικών είναι μια βασική και εύκολα προσδιορίσιμη μακροσκοπική παράμετρος της υδρομετρικής τους συμπεριφοράς. Παρ' όλα αυτά, ο υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών εμπεριέχει βασικά προβλήματα. Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά, προτείνεται η εισαγωγή ενός «νέου» συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του, τόσο τις περιβαλλοντικές παραμέτρους όσο και τα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών και είναι ανεξάρτητος από τις μεθόδους υπολογισμού του. Σε μια προσπάθεια να γίνει αξιολόγηση του, ο προτεινόμενος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης, συγκρίθηκε με τον συντελεστή τριχοειδούς υδαταπορρόφησης, όπως αυτός υπολογίζεται πειραματικά σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς, για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα. Οι τιμές των δύο συντελεστών βρέθηκαν να είναι σε πολύ καλή συμφωνία για όλα σχεδόν τα υπό εξέταση υλικά και σε όλες τις θερμοκρασίες και ταχύτητες του αέρα.

## 13.2 Προοπτικές

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διδακτορικής διατριβής, προτείνονται οι ακόλουθες ερευνητικές προοπτικές:

- Περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή των μοντέλων μεταφοράς υγρασίας ώστε να περιλαμβάνουν περισσότερα δομικά υλικά. Για παράδειγμα θα μπορούσε να γίνει παρασκευή περισσότερων κατηγοριών κονιαμάτων, με σκοπό να ελεγχθεί περαιτέρω η εφαρμοσιμότητα των μοντέλων και να διευρυνθεί η υπάρχουσα βάση δεδομένων.
- Χρήση και εφαρμογή των εξαγόμενων υπολογιστικών σχέσεων σε κατάλληλους προσομοιωτές με σκοπό τον υπολογισμό χρήσιμων παραμέτρων της υδρομετρικής συμπεριφοράς των υλικών.
- Αξιοποίηση των συμπερασμάτων για την ανάπτυξη προδιαγραφών, στις περιπτώσεις που είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης.
- Επέκταση της μελέτης για τον έλεγχο της συμβατότητας δύο ή περισσότερων δομικών υλικών (π.χ. λίθων-κονιαμάτων, κεραμικών-κονιαμάτων) που είναι η αιτία πρόκλησης και επιτάχυνσης της φθοράς σε τοιχοποιίες.
- Επέκταση της μελέτης σε δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων έτσι ώστε να υπεισέρθει και η διάσταση των υλικών ως μια εκ των παραμέτρων μοντελοποίησης (2D/3D μοντελοποίηση).
- Επέκταση της μελέτης της επίδρασης της μικροδομής στην υδρομετρική συμπεριφορά των υλικών η οποία θα συμπεριλαμβάνει και τη μεταφορά διαλυτών αλάτων συγκεκριμένων περιεκτικοτήτων στα υλικά καθώς και στην εφαρμογή διαφορετικών διαλυτών (εκτός από το νερό), τόσο στα υπάρχοντα, όσο και σε νέα δομικά υλικά.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μοροπούλου, Α., Μπατής, Γ. (2016): “Δομικά Υλικά”, 9ο εξάμηνο Τμ. Χημ. Μηχ., Αθήνα.
2. Adams, A. E., and MacKenzie, W. S. (1998): A Colour Atlas of Carbonate Sediments and Rocks Under the Microscope, London: Manson.
3. Μοροπούλου, Α. (2009): “Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών. Μεθοδολογία Ενόργανων & Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών”, 7ο εξάμηνο Τμ. Χημ. Μηχ., Αθήνα.
4. Price, C. A. (1996): Stone Conservation: an Overview of Current Research, Research in Conservation, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, USA.
5. Μοροπούλου, Α. (2011): «Δομικά Υλικά Ιστορικών Μνημείων (Λίθοι - Μάρμαρα)». Διδακτικές Σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», ΕΜΠ.
6. Μπούρας Χ.Θ. (1999): “Μαθήματα Ιστορίας της αρχιτεκτονικής”, Α' Τόμος – Εκδόσεις Συμμετρία & Β' Τόμος – Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα.
7. Winkler, E.M. (1997): Stone in architecture, 3rd Edition, Springer, New York.
8. Amoroso, G. G. and Fassina, V. (1983): Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
9. Siegesmund, S. and Snethlage, R. (2011): Stone in Architecture - Properties, Durability, 4th Edition, Springer, Berlin.
10. Λεγάκις, Α. (1997): «Τεχνολογία δομικών υλικών», Α' Έκδοση, Ευγενίδιο Ίδρυμα, Αθήνα.
11. Bowen, N.L. (1928): The Evolution of Igneous Rocks, Princeton University Press, Princeton, NJ.
12. Cross, W., Iddings, J.P., Pirsson, L.V., et al. (1902): A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks, J. Geol, 10, 555–690.
13. Yardley, B.W.D. (1997): Einführung in die Petrologie metamorpher Gesteine, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
14. Μοροπούλου, Α., Υφαντής, Δ., Σμιτζής, Ι., Ζουμπουλάκης, Λ. (2008): “Επιστήμη και Τεχνική Υλικών”, 7ο εξάμηνο Τμ. Χημ. Μηχ., ΕΜΠ, Αθήνα.
15. Μοροπούλου, Α. (2011): Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος 1.2: “Εισαγωγή στην Παθολογία & Αποκατάσταση Μνημείων και Υλικών” Ε.Μ.Π., ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Β' κατεύθυνση: «Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης», Αθήνα.
16. Lee, W.E. & Rainforth, W.M. (1994): Ceramic microstructures: Property control by processing., publ. London Chapman & Hall.
17. Kenoyer, J. M. (2005): Uncovering the keys to the Lost Indus Cities, Scientific American, 15, 24–33.
18. Wright, G.R.H. (2005): Ancient Building Technology, Parts 1: Text, Brill, Leiden, Boston.
19. Muller-Wiener, W. (1995): Η αρχιτεκτονική στην αρχαία Ελλάδα, μτφ. Μ. Σμιτ-Δούνα, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

20. Anderson J.J. (1997): *Roman Architecture and Society*, Baltimore: The Johns Hopkins University Press. pp. 151–166.
21. Oliver, G. & Bennett, H. (1992): *XRF Analysis of Ceramics, Minerals & Allied Materials*, publ. Wiley & Sons.
22. Μπακόλας-Καραγιάννης Α. (2002): Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
23. Αναγνωστοπούλου, Σ. (2012): Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
24. Ορλάνδος, Α. Κ., (1958): Τα υλικά δομής των αρχαίων Ελλήνων, κατά τους συγγραφείς, τας επιγραφάς και τα μνημεία, Μέρος Α', Τεύχος 2: Τα μέταλλα, το ελεφαντοστόν, τα κονιάματα και οι λίθοι, Η Αρχαία Ελληνική Αρχιτεκτονική, Αθήνα.
25. "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4th Edition, edited by Peter C. Hewlet, 1998.
26. Wendehorst, R. (1981): Δομικά υλικά, Έκδοση Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
27. ΕΛΟΤ EN 998-1 (2003): «Προδιαγραφή κονιαμάτων τοιχοποιίας- Μέρος 1: Εξωτερικά και εσωτερικά επιχρίσματα».
28. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., Anagnostopoulou, S. (2005): Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries, *Cement & Concrete Composites*, 27, 289–294.
29. Lanas, J., Bernal, J.L.P., Bello, M.A., Galindo, J.I.A. (2004): Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars, *Cement and Concrete Research*, 34, 12, pp. 2191–2201.
30. Α. Μοροπούλου (1998): Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα "ΥΛΙΚΑ Ι: Φυσικοχημεία της Φθοράς και Τεχνική της Συντήρησης των Δομικών Υλικών", Ε.Μ.Π., Τμ. Χημ.-Μηχ., Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Αθήνα.
31. Steiger, M.A., Charola, E. and Sterflinger, K. (2011): *Weathering and deterioration, Stone in Architecture*, Springer, Berlin, pp.227-316.
32. Winkler, W.E. (1975): "Stone: Properties, Durability in Man's Environment", Springer-Verlag.
33. Moropoulou, A., Theoulakis, P. (1991): "Conditions causing destructive NaCl crystallization into the porous sandstone building material of the Medieval City of Rhodes", *Proceedings of the Second Int. Symposium for the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Geneva, p. 493.
34. Theoulakis, P., Moropoulou, A. (1988): "Mechanism of deterioration of the sandstone of the Medieval City and the Castle of Rhodes", *Proceedings of the Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Torun, Poland, p. 86.
35. Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou A., Zedri E. (1996): "Salt impact on brickwork along the canals of Venice", *Journal of Materials and Structures*, 29, 1-9.
36. Arnold, A. (1981): "Nature and reactions of saline minerals in walls", *Proc. Intern. Symp. 'The Conservation of Stone'*, Bologna, p. 13.
37. Powers, T. C. (1955): Basic considerations pertaining to freezing-and-thawing tests, In *ASTM Proceedings*, Vol. 55.



38. Dunn, J.R., Hudec, P.P. (1966): Water, clay and rock soundness, *Ohio Journal of Science*, 66, 2.
39. Winkler, M. F.(1968): 'Frost Damage to Stone and Concrete: Geological Considerations', *Engineering Geology*, 2, 5, 315-323.
40. Cakmak, S.A., Moropoulou, A., Mullen, C. (1995): 'Interdisciplinary Study of Dynamic Behaviour and Earthquake Response of Hagia Sophia', *Journal of Soil dynamics and earthquake engineering*, 14, 9, 125-133.
41. Σκουλικίδης, Θ., Βασιλείου, Π. (2007): "Διάβρωση και Προστασία Υλικών", Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα.
42. Καρόγλου, Μ. (2005): Μελέτη των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς υλικών ελεγχόμενης μικροδομής σε επεμβάσεις συντήρησης, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
43. Camuffo, D., Del Monte, M., Ongaro, A. (1984): "The role of the atmospheric precipitation in Venice, related to both the dynamics of precipitation events and the weathering of monuments", *The science of total environment*, 40, 125-139.
44. Camuffo D., Bernardi A. (1990): 'Atmospheric pollution and deterioration of monuments' Advanced Workshop 'Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones', Consiglio Nazionale delle Ricerche, ICTR, Italy.
45. Camuffo D., Del Monte M, Sabbioni C, Vittori O. (1982): 'Wetting, Deterioration and Visual features of stone surfaces in an urban area', *Atmospheric Environment*, 16, 9, 2253-2259.
46. Camuffo D., Del Monte M., Sabbioni C. (1983): 'Origin and Growth Mechanisms of the sulfated crusts on Urban limestone' *Water, Air, and Soil Pollution*, 19, 351-359.
47. Vos H. B. (1975): 'Water absorption and drying of Materials', Πρακτικά διεθνούς συμποσίου 'The Conservation of stone', Bologna, p. 595.
48. Torraca G. (1982): 'Porous building materials - Materials science for architectural conservation', ICCROM second edition.
49. Mamillan, M. (1981): "Connaissance actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs", πρακτικά διεθνούς συμποσίου "The Conservation of Stone", Bologna, p. 59.
50. Connolly, J.D. (1993): Humidity and building materials. In: Rose WB, Tenwolde a (eds) Bugs, mold and rot II, proceedings of a workshop by the building environment and thermal envelope council of the National Institute of Building Sciences, Washington DC, NIBS, 29–36.
51. Oxley, T.A., Gobert, E.G. (1998): Dampness in buildings: diagnosis, treatment, instruments, 2<sup>nd</sup> ed., Biddles Ltd Guilford and King's Lynn, Great Britain.
52. Winkler, E.M. (1994): Stone in architecture, properties, durability, third edition, Berlin, Springer.
53. Arnold, A. (1982): Rising damp and saline minerals, Fourth International Congress on the Deterioration and Preservation of Stone Objects, Louisville, 11–28.
54. Karoglou, M., Moropoulou, A., Giakoumaki, A., Krokida, M. (2005): Capillary rise kinetics of some building materials, *Journal of Colloid and Interface Science*, 284, 260–264.
55. Avoletti M. (1997): Contro l'umidità ascendente. *Recupero & Conservazione* 17, 58–705.

56. Oliver A. (1997): Dampness in buildings. In: Douglas J, Sterling JS (eds) 2nd edn., Blackwell science, Great Britain.
57. Moropoulou, A., Karoglou, M., Bakolas, A., Krokida M. and Maroulis, Z. B. (2014): Moisture Transfer Kinetics Building Materials and Components: Modeling, Experimental Data, Simulation. In: Drying and Wetting of Building Materials and Components. Springer International Publishing Switzerland.
58. Theoulakis, P., Moropoulou, A. (1997): "Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay", Construction and Building Materials, 11, 1, 65-71.
59. Hall C., Hoff W. D. (2002): Water transport in brick, stone and concrete, Taylor and Francis, London, UK, Spon Press.
60. Stauffer D. and Aharony A. (1992): Introduction to percolation theory, 2nd ed., Taylor and Francis, London.
61. Sahimi M. (1994): Applications of percolation theory, Taylor and Francis, London.
62. Gueguen Y., Chelidze T. and LeRavalec M. (1997): Microstructures, percolation thresholds and rock physical properties, Tectonophysics, 279, 23-35.
63. Zdravkov, B. D., Cermak, J. J., Sefara, M., Janku, J. (2007): Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective, Central European Journal of Chemistry, 5(2) 385–395.
64. Μοροπούλου, Α., κ.ά. (2011): Σημειώσεις ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών για το Μάθημα "Φθορά και Προστασία Υλικών" 9ου εξαμήνου Σχολής Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. Αθήνα.
65. International Union of Pure and Applied Chemistry Physical Chemistry Division Commission on Colloid and Surface Chemistry, Subcommittee on Characterization of Porous Solids: "Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)", Pure Appl. Chem., Vol. 66(8), 1739–1758 (1994).
66. Mehta, P. K. (1986): Concrete: Structure, Properties, and Materials. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
67. Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003): Concrete, Prentice Hall, New Jersey.
68. Amoroso, G.G.; Camaiti, M. (1997): Scienza dei materiali e restauro. ALINEA, Bolgona.
69. Siegesmund, S., Dürrast, H. (2011): Physical and mechanical properties of rocks, Stone in Architecture, Springer, Berlin.
70. Monicard, R.P. (1980): Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis. Edition Technip, Paris.
71. Μοροπούλου, Α., (2016): «Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών, Μεθοδολογία Ενόργανων & Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών» διδακτικές σημειώσεις μαθήματος Φθορά και Προστασία Υλικών, 9ου Εξαμήνου Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
72. Leng, Y. (2008): MATERIALS CHARACTERIZATION: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.
73. <https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0ahUKUwjcxSPejKnSAhWMWBQKHS9ZBjkQFgg6MAU&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcontent%2Fdocument%2Fdocument%2Fdownloadaddocument%2F9781402061196-c7.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-541805>

[p173732029&usg=AFQjCNHCW6VpRivpMzATjgU\\_h4HJewQ9qQ&sig2=UdiBosae-vjZViyfb0pZ2g&cad=rja](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.001)

74. Herrera, L. K., Le Borgne, S., Videla, A. H. (2009): Modern Methods For Materials Characterization and Surface Analysis to Study the Effects of Biodeterioration and Weathering on Buildings of Cultural Heritage, *International Journal of Architectural Heritage*, 3, 74–91.
75. Stuart, H. B. (2005): *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd.
76. Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M., & Bakolas, A. (2013): Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1222-1239.
77. Van Brakel J., Modry S. et Svata M. (1981) : Mercury porosimetry : state of the art, *Powder Technology*, 29, 1-12.
78. Smetana J. (1842) : *Sjlozpyt cili Fysika – Nàkladem Céského Museum*, Prague, 17, p 11.
79. Washburn E. W., (1921a): The dynamic of capillary flow, *Phys. Rev.*, 17, (3), p 273-283.
80. Washburn E. W., (1921b): *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 7, p 115-116.
81. Drake L.C., Ritter H.L. (1945): Macropore-Size Distributions in Some Typical Porous Substances, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 17 (12), 787–791.
82. Pittman E. D., (1984): The pore geometry of reservoir rocks – In *Physics and chemistry of porous media*, D.L. Johnson and P.N. Sen Eds, Schlumberger-Doll Res., Amer. Inst. Physics conf. Proceed., 107, 1-19.
83. Pittman E. D., (1992): Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone – *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 76, (2), 191-198.
84. Webb, P.A. and Orr, C. (1997): *Analytical methods in fine particle technology*. Micromeritics Instrument Corp., Norcross, GA, USA, p. 301.
85. Ek, R., Lennholm, H., Davidson, R., Nyström, C. and Ragnarsson, G., (1995): Pore swelling in beads made of cellulose fibres and fibre fragments. *Int. J. Pharm.* 122, 49 - 56.
86. Palmer, H.K. and Rowe, R.C., (1974): The application of mercury porosimetry to porous polymer powders, *Powder Technol.*, 9, 181 – 186.
87. Johnston, G.P., Smith, D.M., Melendez, I. and Hurd, A.J., (1990): Compression effects in mercury porosimetry, *Powder Technol.*, 61, 289 – 294.
88. Allen, T. (1997): *Particle size measurement*, 5th Ed., Chapman & Hall, New York, USA, p. 251.
89. Brown, S.M. and Lard, E.W. (1974): A comparison of nitrogen and mercury pore size distributions of silicas of varying pore volume, *Powder Technol.*, 9, 187 - 190.
90. Pel, L. (1995): *Moisture transport in porous building materials*, Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
91. Marcus Vitruvius Pollio: *de Architectura*, Book VI, chapter IV.
92. Karagiannis, N.; Karoglou, M.; Bakolas, A. and Moropoulou, A. (2016): Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved, *New Approaches to Building Pathology and Durability*, Springer.

93. Shoemaker, R.C., House, D.E. (2006): Sick building syndrome (SBS) and exposure to water-damaged buildings: time series study, clinical trial and mechanisms, *Neurotoxicology Teratol*, 28, 573–588.
94. Weinhold, B. (2007): A spreading concern inhalational health effects of mold, *Environ. Health Perspect.*, 115 (6), A300–A305.
95. Lourenço, P. B.; Luso, E.; Almeida M. G. (2006): Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal, *Building and Environment*, 41, 2, 223-234.
96. Pietrzyk K. (2015): A systemic approach to moisture problems in buildings for mould safety modelling, *Building and Environment*, 86, 50-60.
97. Carrer, P.; Wargocki, P.; Fanetti, A.; Bischof, W.; Fernandes, E.; Hartmann, T.; Kephelopoulos, S.; Palkonen, S.; Seppänen O. (2015): What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings?, *Building and Environment*, 94, 1, 273-286.
98. Huang, K.T.; Huang, W.P.; Lin, T.P.; Hwang R.L. (2015): Implementation of green building specification credits for better thermal conditions in naturally ventilated school buildings, *Building and Environment*, 86, 141-150.
99. Alfano, G., Chiancarella, C., Cirillo, E., Fato, I., Martellotta, F. (2006): Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing, *Building and Environment*, 41, 1060-1069.
100. Bomberg, M., Pazera, M. and Plagge, R. (2005). Analysis of Selected Water Absorption Coefficient Measurements, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 227–243.
101. Gennes P.G., Brochard-Wyart F., Quere D. (2004): Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves, Springer, New York.
102. EN 1925 (2000): Natural stone test methods - Determination of water absorption coefficient by capillarity.
103. EN 1015-18 (2002): Methods of test for mortar for masonry - Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.
104. EN 13057 (2002): Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods. Determination of resistance of capillary absorption.
105. EN 480-5 (2005): Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods. Determination of capillary absorption.
106. ISO 15148 (2002): Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion.
107. EN 15801 (2009): Conservation of cultural property - Test methods. Determination of water absorption by capillarity.
108. UNI 10859 (2000): Cultural Heritage – Natural and Artificial Stones - Determination of Water Absorption by Capillarity.
109. Normal 11/85 (1985): Assorbimento d' acqua per capillarità – Coefficiente di assorbimento capillare, CNR-ICR.
110. Hall, C. (1989): Water Sorptivity of Mortars and Concretes: A Review, *Magazine of Concrete Research*, 41, 51–61.
111. Philip, J.R. (1957): *The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration.*

112. Martys, N.S. Ferraris, C.F. (1997): Capillary transport in mortars and concrete, *Cement and Concrete Research*, 27 (5), 747–760.
113. Pia, G., Sassoni, E., Franzoni, E., Sanna, U. (2014): Predicting capillary absorption of porous stones by a procedure based on an intermingled fractal units model, *International Journal of Engineering Science*, 82, 196–204.
114. Hall, C. (1977): Water Movement in Porous Building Materials—I. Unsaturated Flow Theory and its Application, *Building and Environment*, 12, 117–125.
115. Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Adan, O., Brocken, H., Cerny, R., Pavlik, Z., Hall, C., Kumaran, K., Pel, L. and Plagge, R. (2004): Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27, 307–325.
116. Reinhardt, H-W, Jooss, M. (1998): Permeability, Diffusion, and Capillary Absorption of Concrete at Elevated Temperature in the Service Range, *Otto-Graf-Journal*, 34-47.
117. Kumaran, M.K. (1999): Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 22, 349–355.
118. Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2007): Sorption Characteristics of Foam Concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 1341–1347.
119. Rousseau, M.Z., Dalglish, W.A. (2004): Selected findings of an IRC study of the wetting and drying potentials of Wood-frame Walls exposed to different climates, CIB 2004, World building Congress, Toronto, Canada.
120. Vos, B.H. (1975): Water absorption and drying of materials. In *The Conservation of Stone I: Proceedings of the International Symposium, Bologna, June 19–21*; Rossi Manaresi, R., Ed.; 679–694.
121. D’Agostino, D. (2013): Moisture dynamics in an historical masonry structure- the Cathedral of Lecce (South Italy), *Building and Environment*, 63, 122–133.
122. Silva, A.S., Ghisi, E., Lamberts, R. (2016): Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55, *Building and Environment*, 102, 95–115.
123. Littia, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., Braet, J. (2015): Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings, *Energy and Buildings*, 105, 393–411.
124. Ismail, M.; Yew, C. K.; Muhammad B. (2016): Life-span prediction of abandoned reinforced concrete residential buildings, *Construction and Building Materials*, 112, 1059-1065.
125. Worch, A. (2004): The Behavior of Vapor Transfer in Building Material Surfaces: The vapor Transfer Resistance, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, 2, 187–200.
126. Couto, S., Diaz Gonçalves, T., Lopes, J.M.G. ( 2011): Drying of red ceramic brick - Effect of five silicone - based water repellent treatments , *Hydrophobe VI* , 6th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Rome, Italy.
127. Torres, M.I.M., de Freitas, V.P. (2001): Modelling of rising damp in historical buildings. In: Lourenço, P.B., Roca, P., editors. *Historical Constructions. Possibilities*

- of numerical and experimental techniques. Proceedings of the 3rd International Seminar, Guimarães, Portugal, 381-390.
128. Scheffler, G.A. (2008): Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage, Ph.D. Thesis, Dresden University of Technology, Dresden.
  129. Fatt, I. (1956): The network model of porous media: I–III, Trans. AIME Petrol. Div. 207, 144–177.
  130. Quenard, D.A., Xu, K., Künzel, H.M., Bentz, D.P., Martys, N.S. (1998): Microstructure and transport properties of porous building materials, Mater. Struct., 31, 317–324.
  131. Carmeliet, J., Descamps, F., Houvenaghel, G. (1999): A multiscale network model for simulating moisture transfer properties in porous media, Transport Porous Med., 35, 67–88.
  132. Carmeliet, J., Roels, S. (2001): Determination of isothermal moisture transport properties of porous building material, J. Therm. Environ. Build. Sci., 24, 83–210.
  133. Vandersteen, K., Carmeliet, J., Feyen, J. (2003): A network modeling approach to derive unsaturated hydraulic properties of a rough-walled fracture, Transport Porous Med., 50, 197–221.
  134. Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H. (2003): Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone. Part 1: a mesoscopic approach, Transport Porous Med., 52, 333–350.
  135. Yiotis, A.G., Salin, D., Yortsos, Y.C. (2015): Pore network modeling of drying processes in macroporous materials: effects of gravity, mass boundary layer and pore microstructure, Transport in Porous Media, 110, 175.
  136. Vorhauer, N., Wang, Y.J., Kharaghani, A., Tsotsas, E., Prat, M. (2015): Drying with formation of capillary rings in a model porous medium, Transport in Porous Media, 110(2), 197-223.
  137. Häupl, P. & Fechner, H.; “Hygric material properties of porous building materials“ 2nd International Building Physics/Science Conference, Leuven 2003.
  138. Grunewald, J. & Bomberg, M. (2003): An Engineering Approximation of Material Characteristics for Input to Heat, Air and Moisture Transport Simulations, Journal of Thermal Envelope and Building Science, 26, 4.
  139. Carmeliet, J. & Roels, S. (2002): Determination of the Moisture Capacity of Porous Building Materials, Journal of Thermal Envelope and Building Science, 25, 209-237.
  140. Plagge, R., Häupl, P., Grunewald, J., Fechner, H. (2002): Functional description of water storage and transfer in capillary porous building materials, Proceedings to the 11th Symposium for Building Physics, Dresden University at Technology, Institute of Building Climatology, Vol.1, 338-350.
  141. Tuller, M. & Or, D. (2002): Unsaturated Hydraulic Conductivity of Structured Porous Media: A Review of Liquid Configuration-Base Models, Vadose Zone Journal, Vol. 1, 14-37.
  142. Tsunazawa, Y., Yokoyama, T., Nishiyama, N. (2016): An experimental study on the rate and mechanism of capillary rise in sandstone, Progress in Earth and Planetary Science, 3, 1, 1.
  143. Karoglou, M.; Moropoulou, A.; Maroulis, Z.B. & Krokida, M.K. (2005): Drying Kinetics of Some Building Materials, Drying Technology, 23:1-2, 305-315.

144. Liu, Q., Bakker-Arkema, F.W. (1997): Stochastic modelling of grain drying: model development, *J. Agric Eng Res.*, 66, 275–280.
145. White, G.M., Ross, I.J., Ponekert, R. (1981): Fully exposed drying of popcorn. *Trans ASAE*, 24, 466–468.
146. Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F. (1999): Drying characteristic of laurel leaves under different conditions, In: *Proceedings of the 7th International congress on agricultural mechanization and energy*, Adana, Turkey.
147. Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002): A new model for single-layer drying, *Drying Technology*, 20, 1503–1513.
148. Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. (2003): *Food process design*. Marcel Dekker, New York.
149. D’Agostino, D. (2014): Modelling of Wetting and Drying Cycles in Building Structures, in ‘*Drying and Wetting of Building Materials and Components*’, Editor: J. M. P. Q. Delgado, Chapter 6, Springer International Publishing, Switzerland.
150. Organisation, World Health. *Damp and Mould*. Copenhagen : Information Brochure, 2009.
151. l’Anson, S. J., Hoff, W. D. (1986): Water movement in porous building materials - VIII. Effects of evaporative drying on height of capillary rise equilibrium in walls, *Building and Environment.*, 21, 195-200.
152. Hansen, H. and Frambol, C. (2006): *Rising Damp: Test of Chemical Injection*. Danish Technological Institute.
153. Burkinshaw, R. (2010): The rising damp test of Camberwell pier: Potential height of moisture rise in brickwork and the effectiveness of a modern chemical injection cream, *Journal of Building Appraisal.*, 6, 5-19.
154. Lubelli, B., Van Hees, R.P.J. and Groot, C.W.P. (2006): Investigation on the behaviour of a restoration plaster applied on heavy salt loaded masonry, *Construction and Building Materials*, 20, 691-699.
155. Lubelli, B., Van Hees, R.P.J. and Groot, C.J.W.P. (2004): The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry, *Construction and Building Materials.*, 18, 119-124.
156. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., Kilikoglou, V. (2005): Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete, *Cement and Concrete Research*, 35, 1577–1586.
157. Lopez-Arce, P, et al. (2009): Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia, *Materials and Structures*, 42, 827-848.
158. Ahmad, A.G., Rahman, H.F.A. (2010): Treatment of Salt Attack and Rising Damp in Heritage Buildings in Penang, Malaysia. *Journal of Construction in Developing Countries*, 15, 1, 93-111.
159. Rirsch, E. and Zhang, Z. (2010): Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties, *Construction and Building Materials*, 24, 1815-1820.
160. Vejmelkova, E., Pavlikova, M., Jerman, M. and Cerny, R. (2009): Free Water Intake as Means of Material Characterization, *Journal of Building Physics*, 33, 1.

161. Aggelakopoulou, E., Bakolas, A. and Moropoulou, A. (2011): Hygric Properties of Lime Based Mortars used for Restoration Interventions on Historic Structures, XII DBMC, Porto, Portugal.
162. Raimondo, M., Dondi, M., Gardini, D., Guarini, G., Mazzanti, F. (2009): Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks, *Construction and Building Materials*, 23, 2623–2630.
163. Plagge, R., Scheffler, G., Grunewald, J. (2005): Automatic measurement of water uptake coefficient of building materials. Proceedings of 7th conference of building physics in Northern Countries, 15-22.
164. Candanedo, L., Derome, D. (2005): Numerical simulation of water absorption in softwood, 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada.
165. Fronteau, G., Moreau, C., Thomachot-Schneider, C., Barbin, V. (2010): Variability of some Lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation, *Engineering Geology*, 115, 158-166.
166. Juhász, P., Kopecskó, K., Suhajda, A. (2014) : Analysis of capillary absorption properties of porous limestone material and its relation to the migration depth of bacteria in the absorbed biomineralizing compound, *Civil Engineering*, 58, 2, 113–120.
167. Sengun, N., Demirdag, S., Akbay, D., Ugur, I., Altindag, R., Akbulut, A. (2014): Investigation of the relationships between capillary water absorption coefficients and other rock properties of some natural stones, V. Dünya Doğaltaş Kongresi (Globalstone 2014), 22 -25.
168. Calcaterra, D., Cappelletti, P., Langella, A., Morra, V., Colella, A., de Gennaro, R. (2000): The building stones of the ancient centre of Naples (Italy): Piperno from Campi Flegrei. A contribution to the knowledge of a long-time-used stone, *Journal of Cultural Heritage*, 1, 415–427.
169. Stefanidou, M., Papayianni, I. (2005): The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars, *Cement & Concrete Composites*, 27, 914–919.
170. Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A., Papapostolou, A. (2013): Effect of coatings on moisture and salt transfer phenomena of plasters, *Construction and Building Materials*, 48, 35–44.
171. Dei, L., Salvadori, B. (2006): Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay, *Journal of Cultural Heritage*, 7, 110–115.
172. Vandevoorde, D., Pamplona, M., Schalm, O., Vanhellefont, Y., Cnudde, V., Verhaeven, E. (2009): Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption, *Journal of Cultural Heritage*, 10, 41-47.
173. Vandevoorde, D., Cnudde, V., Dewanckele, J., Brabant, L., de Bouw, M., Meynen, V., Verhaeven, E. (2013): Validation of in situ applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone, *Procedia Chemistry*, 8, 317–327.
174. Ksinopoulou, E., Bakolas, A., Kartsonakis, I., Charitidis, C., Moropoulou, A. (2012): Particle Consolidants in the Consolidation of Porous Stones, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Columbia University, New York.



175. Bazant, Z.P., Najjar, L.J. (1972): Nonlinear water diffusion in non-saturated concrete, *Materials and Structures*, 5, 25, 3–20.
176. Chari, M. N., Shekarchi, M., Sobhani, J., Chari, M. N. (2016): The effect of temperature on the moisture transfer coefficient of cement-based mortars: An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 102, 306–317.
177. Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T. (2007): Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, 37, 4, 565–578.
178. Conciatori, D., Brühwiler, E., Gysler, R. (2011): Brine absorption in concrete at low temperature: experimental investigation and modeling, *J. Mater. Civil. Eng. ASCE*, 23, 6, 846–851.
179. Jooss, M., Reinhardt, H.W. (2002): Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, *Cement and Concrete Research*, 32, 9, 1497-1504.
180. Gummerson, R.J., Hall, C. and Hoff, W. D. (1980): Water movement in porous building materials II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials, *Building and Environment*, 15, 101-108.
181. Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., Goudreau, P. (2002): Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials, *J. Build. Phys.*, 26, 2, 179–195.
182. Feng, C., Janssen, H. (2016): Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence, *Building and Environment*, 99, 107-118.
183. RILEM TC 25-PEM (1980): Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, Test No. II.5 “Evaporation curve”, *Materials and Structures*, 13, 204-207.
184. Commissione Normal 1991, Misura dell’indice di asciugamento (drying index), Roma, CNR/ICR, Doc. 29/88.
185. EN 16322 (2013): Conservation of Cultural Heritage – Test Methods – Determination of Drying Properties.
186. Krus, M.; Holm, A. (1999): Simple Methods to Approximate the Liquid Transport Coefficients Describing the Absorption and Drying Process, 5th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Goteborg, Norway, 241–248.
187. Krus, M., Lenz, K., Plagge, R., Scheffler, G. (2007): Ein Trocknungskoeffizient als neuer hygrothermischer Standardmaterialkennwert. 12. Symposium on Building Physics, Dresden University of Technology, Proceedings Vol. 1: 283-293.
188. Scheffler, G. A. and R. Plagge. (2010): Introduction of a Drying Coefficient for Building Materials, Proceedings of Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, ASHRAE Transactions, Volume 116, Part 2.
189. Flores-Colen, I., Silva, L., de Brito, J., de Freitas, V.P. (2016): Drying index for in-service physical performance assessment of renders, *Construction and Building Materials*, 112, 1101–1109.
190. Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Silva, A., Silva, V., Velosa, A. (2014): New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions, *Construction and Building Materials*, 54, 378–384.

191. Alturkistani, P., Fazio, P., Rao, J., Mao, Q. (2008): A new test method to determine the relative drying capacity of building envelope panels of various configurations, *Building and Environment*, 43, 12, 2203–2215.
192. Mao, Q., Fazio, P., Rao, J. (2009): In-cavity evaporation allowance — a drying capacity indicator for wood-frame wall system, *Building and Environment*, 44, 12, 2418–2429.
193. Bednar, T. (2002): Approximation of Liquid Moisture Transport Coefficient of Porous Building Materials by Suction and Drying Experiments. Demands on Determination of Drying Curve, 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway, 493–500.
194. Komatsu, Y., Sciazko, A., Zakrzewski, M., Kimijima, S., Hashimoto, A., Kaneko, S., Szymd, J. S. (2015): An experimental investigation on the drying kinetics of a single coarse particle of Belchatow lignite in an atmospheric superheated steam condition, *Fuel Processing Technology*, 131, 356–369.
195. Brito, V., Gonçalves, T. D. (2013): Artisanal lime coatings and their influence on moisture transport during drying. 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland.
196. Zhao, J. and Plagge, R. (2015): Characterization of hygrothermal properties of sandstones—Impact of anisotropy on their thermal and moisture behaviors, *Energy and Buildings*, 107, 479–494.
197. Makhloufi, Z., Bouziani, T., Hadjoudja, M., Bederina, M. (2014): Durability of limestone mortars based on quaternary binders subjected to sulfuric acid using drying–immersion cycles, *Construction and Building Materials*, 71, 579–588.
198. Delgado, J. M. P. Q., Guimarães, A. S. and de Freitas, V. P., (2014): Air Drying Technologies Applied to Buildings Treatment, *Drying and Wetting of Building Materials and Components*, Springel.
199. Häupl, P., Grunewald, J., Fechner, H., Stopp, H. (1997): Coupled heat air and moisture transfer in building structures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 1633–1642.
200. Künzl, H.M., Kiessl, K. (1997): Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 159–167.
201. Janssen, H., Blocken, B., Carmeliet, J. (2007): Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 1128–1140.
202. Straube J., and Burnett, E.F.P. (2001): Overview of hygrothermal (HAM) analysis methods. In: Trechsel HR, editor. *ASTM manual 40-moisture analysis and condensation control in building envelopes*, 81–89.
203. Kohonen R. (1984): A method to analyse the transient hygrothermal behaviour of building materials and components, Technical Research Center of Finland (VTT), Publication 21.
204. Karagiozis, A. (1993): Overview of the 2D hygrothermal heat-moisture transport model LATENITE, NRC-INR, Ottawa.
205. Burch, D., Chi, J. (1997): Moist, a PC program for Predicting Heat and Moisture Transfer in Building Envelopes, release 3.0, NIST Special Publication 917.

206. Künzel, H.M. (1995): Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart.
207. Arfvidsson, J. (1998): Moisture Transport in Porous Media, Modelling Based on Kirchoff Potentials, report TVBH-1010, Lund University.
208. MATCH-Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials, at <http://www.match-box.dk>
209. Pedersen, C.R. (1990): Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, Technical University of Denmark.
210. Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M., de Freitas, V.P. (2013): Numerical simulation of exterior condensations on façades: The undercooling phenomenon, *Journal of Building Performance Simulation*, 6, 5, 337-345.
211. Hens, H.L.S.C. (2015): Combined heat, air, moisture modelling: a lookback, how, of help?, *Building and Environment*, 91, 138–151.
212. Steeman, M., De Paepe, M., Janssens, A. (2010): Impact of whole-building hygrothermal modelling on the assessment of indoor climate in a library building, *Building and Environment*, 45, 7, 1641–1652
213. Vera Araya S., (2009): Interzonal Air and Moisture Transport through Large Horizontal Openings: An Integrated Experimental and Numerical Study', PhD-thesis, Concordia University.
214. Li, Y., Fazio P., Rao, J. (2011): An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room, *Building and Environment*, 47, 205-216
215. Tariku, F., Kumaran, K., Fazio, P. (2011): Determination of indoor humidity profile using a whole-building hygrothermal model, *Building simulation* 4, 61-78.
216. Steeman, M., Janssens, A., Steeman, H., Van Belleghem, M., De Paepe, M. (2010): On coupling 1 D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multi-zone building energy simulation program, *Building and Environment* 45, 865-877.
217. Steeman, M., Van Belleghem, M., De Paepe, M., Janssens, A. (2010): Experimental validation and sensitivity analysis of a coupled BES-HAM model, *Building and Environment*, 45, 2202-2217.
218. Hua, Ge, Yang, X., Fazio, P., Rao, J. (2014): Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials, *Building and Environment*, 81, 162-171.
219. Hamraoui, A., Nylander, T. (2002): Analytical Approach for the Lucas–Washburn Equation, *J. Colloid Interface Sci.*, 250, 415–421.
220. Marmur, A., Cohen, R.D. (1997): Characterization of Porous Media by the Kinetics of Liquid Penetration: The Vertical Capillaries Model, *J. Colloid Interface Sci.*, 189, 299–304.
221. Fries, N. and Dreyer, M. (2008): An analytic solution of capillary rise restrained by gravity, *J. Colloid Interf. Sci.*, 320, 259–263,
222. Mason, G. (1974): Rising damp, *Building Science*, 9, 227–231.

223. Massari, G., Massari, I., Damp buildings, old and new. In ICCROM 1993 Rome, Italy:ICCROM (English translation of Risanamento Igienico dei Locali Humidi. Milan, Italy: Ulrico Hoepli, 1985)
224. Hall, C., Hoff, W.D. (2007): Rising damp: capillary rise dynamics in walls, Proc R Soc A, 463, 1871–1884.
225. Ioannou, I. and Hoff, W.D. (2008): Water repellent influence on salt crystallization in masonry, Proceedings of the ICE: Construction Materials, 161, 17–23.
226. Ioannou, I., Andreou, A., Tsikouras, B., Hatzipanagiotou, K. (2009): Application of the Sharp Front Model to capillary absorption in a vuggy limestone, Eng. Geol., 105, 20–23.
227. Hall, C., Hamilton, A., Hoff, W.D., Viles, H.A., Eklund, J.A. (2011): Moisture dynamics in walls: response to micro-environment and climate change, Proc. R. Soc. A, 467, 194–211.
228. Zhmud, B.V., Tiberg, F., Hallstenson, K. (2000): Dynamics of capillary rise, J. of Colloid Interface Sci., 228, 2, 263–269.
229. Lee, Y. K., Kodikara, J. and Bouazza, A. (2004): Modeling and Laboratory Assessment of Capillary Rise in Stabilized Pavement Materials, Journal of the Transportation Research Board, 1868, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 3–13.
230. Philip, J.R. and de Vries, D.A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Eos, Transactions American Geophysical Union, 38, 2, 222–232.
231. Rode, C. (1990): Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Thermal Insulation Laboratory, Denmark.
232. Kunzel, H. (1995): Simultaneous heat and moisture transport in building components. PhD Thesis, Fraunhofer-IBP, Stuttgart.
233. Hagentoft, C.E., Blomberg, T. (2000): 1D-HAM, coupled heat, air and moisture transport in multi-layered wall structures. Manual with brief theory and an example, version 2.0. <http://www.buildingphysics.com/manuals/1dham.pdf>
234. Diersch, H.J.G. (2005): FEFLOW 5.2 Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System. Reference Manual. WASY Ltd., Berlin.
235. Hoffmann, D., Niesel, K. (1988): Quantifying capillary rise in columns of porous material, Am. Ceram. Soc. Bull., 67, 8, 1418.
236. Guizzardi, M., Derome, D., Carmeliet, J. (2016): Water uptake in clay brick at different temperatures: experiments and numerical simulations, J. Build. Phys., 39, 4, 373–389.
237. Stuck, H., Plagge, R., Siegesmund, S. (2013): Numerical modeling of moisture transport in sandstone: the influence of fabric and clay content, Environmental Earth Science, 69, 4, 1161–1187.
238. Scheffler, G. A., Plagge, R. (2010): A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 286–296.
239. Suchorab, Z., Widomski, M., Sobczuk, H., Lagód, G., (2010): Capillary rise phenomenon in aerated concrete. Monitoring and simulations, Proc. ECOpole, 2, 4, 285–290.

240. Dantas, L.B., Orlande, H.R.B., Cotta, R.M. (2003): An inverse problem of parameter estimation for heat and mass transfer in capillary porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 1587–1598.
241. Dietl, C., Winter, E., Viskanta, R. (1998): An efficient simulation of heat and mass transfer processes during drying of capillary porous hygroscopic materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41, 3611–3625.
242. Jacobsen, S., Aarseth, L.I. (1999): Effect of wind on drying from wet porous building materials surfaces- A simple model in steady state, *Materials and Structures*, 32, 38-44.
243. Nguyen, T.Q., Petkovic, J., Dangla, P. and Baroghel-Bouny, V. (2008): Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials. *Construction and Building Materials*, 22, 11, 2185-2195.
244. Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q. (2016): Drying Kinetics of Building Materials: Brief Theory and Experimental Evaluation, *Diffusion Foundations*, 7, 114-127.
245. Zaknounge, A., Glouannec, P., Salagnac, P. (2012): Estimation of moisture transport coefficients in porous materials using experimental drying kinetics, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 205–215.
246. Barreira, E., Delgado, J. M. P. Q. and de Freitas, V. P. (2014): Wetting and Drying Kinetics of Building Materials, *Drying and Wetting of Building Materials and Components*, Springer.
247. Matiasovsky, P. and Mihalka, P. (2014): Pore Structure Parameters and Drying Rates of Building Materials, *Drying and Wetting of Building Materials and Components*, Springer.
248. Physibel (2007): GLASTA diffusion-condensation-drying extended Glaser method, at <http://www.physibel.be/v0n2gl.htm>
249. Mendes, N., Ridley, I., Lamberts, R., Philip, P.C., Budag, K. (1999): UMIDUS - a PC program for the prediction of heat and moisture transfer in porous building elements, vol. 20(4), pp. 2-8, *Building Energy Simulation*, Berkeley, USA.
250. Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC). Envelope moisture performance through infiltration, exfiltration and diffusion— EMPTIED. Research Highlights, Technical series, 99–123 at <http://www.cmhc-schl.gc.ca/publications/en/rh-pr/tech/1999-123e.html>
251. Karoglou, M., Moropoulou, A., Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. (2007): A powerful simulator for moisture transfer in buildings, *Building and Environment*, 42, 902–912.
252. Hirschwald, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit, Emst&Sohn, Berlin.
253. Leary, E. (1983): The Building Limestones of the British Isles, Building Research Establishment Report. Her Majesty's Stationary Office, London.
254. Bell, F. G.(1993): Durability of carbonate rock as a building stone with comments on its preservation, *Environmental Geology*, 21, pp. 187-200.
255. Mod'd, B. K., Flowarth, R. J., Bland, C. H.(1996): Rabid prediction of building research establishment limestone durability class from porosity and saturation, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, pp. 285-297.
256. Klopfer, H. (1980): Das Kapillarverhalten poröser Baustoffe. Lehrgang Nr. 4406/79.88, Technische Akademie Esslingen.

257. Keppert, M., Čáchová, M., Koňáková, D. (2015): Transport of Liquids in Porous Rocks, 7<sup>th</sup> International Conference on Building Materials, Zahradky, Czech Republic.
258. Zhang, L. (2013): Aspects of rock permeability, *Front. Struc. Civ. Eng.*, 7, 102-116.
259. Raimondo, M., et al. (2009): Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks, *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2623–2630.
260. Beltrán, V., Escardino, A., Feliu, C., Rodrigo, M.D. (1988): Liquid suction by porous ceramic materials, *British Ceramic Transactions Journal*, 87:64–9.
261. Benavente, D. (2011): Why pore size is important in the deterioration of porous stones used in the built heritage?, *Macla*, 15, pp. 41–42.
262. Benavente, D., Pla, C., Cuetoa, N., Galvañ, S., Martínez-Martínez, J., García-del-Cura, M.A., Ordóñez S. (2015): Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure, *Engineering Geology*, 195, pp. 301–311.
263. Steidlberger, E. (2004): Volcanic tufts from Hesse (Germany) and their weathering behavior, *Environmental Geology*, 46, 378-390.
264. Török, Á., Forgó, L. Z., Vogt, T., Löbens, S., Siegesmund, S. and Weiss, T. (2007): The influence of lithology and pore-size distribution on the durability of acid volcanic tuffs, Hungary, Geological Society, London, Special Publications, 271, p251-260.
265. EN 459-1 (2010): Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria.
266. Μοροπούλου, Α. «Ποροσιμετρία Υδραργύρου». Διδακτικές Σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», ΕΜΠ, ακαδ. Έτος 2006 -2007.
267. NORMAL-7/81: Assorbimento d' acqua per immersione totale - Capacità di imbibizione: Water absorption with total immersion - immersion capacity, ICR.
268. Johari, I., Said, S., Hisham, B., Bakar, A., Ahmad, Z. A. (2010): Effect of the Change of Firing Temperature on Microstructure and Physical Properties of Clay Bricks from Beruas (Malaysia), *Science of Sintering*, 42, 245-254.
269. Ksinopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou A. (2014): Modification of Si-based Consolidants by the Addition of Colloidal Nanoparticles: Application in Porous Stones, *Journal of Nano Research*, 27, 143–152.
270. Wendler, E., Charola, A.E. (2008): Water and its interaction with porous inorganic building materials, *Proc. Hydrophobe V: 5th Int. Conf. on Water Repellent Treatment of Building Materials*, Aedification Publishers, 57–74.
271. Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B. (1995): Transport properties in the drying of solids. In *Handbook of Industrial Drying*, Vol. 2; Mujumdar, A.S., Ed.; Marcel Dekker: New York.
272. Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B., Kiranoudis, C.T. (1996): Computer simulation of industrial dryers. *Drying Technology*, 14, 5, 971–1010.
273. Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. (2002): Modeling, Simulation and Design of Drying Processes. Keynote lecture at the 13th International Drying Symposium IDS, Beijing, China.
274. Saravacos, G.D., Maroulis, Z.B. (2001): *Transport Properties of Foods*, Marcel Dekker: New York.
275. Biscontin, G., Bakolas, A., Moropoulou, A., Zendri, E., (1994): “Microstructural characterization of the historical mortars of Venice”, in 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Venice.

276. Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zendri, E. (1995): “Physico-chemical characteristics of traditional mortars in Venice”, in *Structural Studies of Historical Buildings IV*, Computational Mechanics Publications, Southampton.
277. Biscontin, G., Pellizon Birelli, M., Zendri, E. (2002): Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 1, 31-37.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*



## **ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

### **Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά περιοδικά**

1. Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2016): Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials, *Building and Environment*, 106, 402–408.
2. Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., Krokida, M., Moropoulou, A. (2017): Drying kinetics of building materials capillary moisture, *Construction and Building Materials*, 137, 441–449.
3. Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., Krokida, M., Moropoulou, A. (2017): The Influence of Dynamic Environmental Conditions on Capillary Water Uptake of Building Materials, *Construction and Building Materials*, under review.

### **Κεφάλαια σε Βιβλία**

- Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2016): Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved, *New Approaches to Building Pathology and Durability*, Springerl.

### **Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Συνέδρια**

1. Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2015): «Effect of Temperature on Water Capillary Rise Coefficient of Building Materials», 1<sup>st</sup> International Symposium on Building Pathology (ISBP 2015 – Porto, Portugal)
2. N. Καραγιάννης, Μ. Καρόγλου, Α. Μπακόλας, Α. Μοροπούλου (2015): «Επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ιστορικών και παραδοσιακών δομικών υλικών», 10<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα, Ελλάδα.
3. N. Καραγιάννης, Μ. Καρόγλου, Α. Μπακόλας, Α. Μοροπούλου (2015): «Η συσχέτιση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ιστορικών και παραδοσιακών δομικών υλικών με τη θερμοκρασία», Επιστημονικό συνέδριο ΘΑΛΗΣ ΑΕΙΣ, Επιστημονική υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων για αειφόρα και συμβατά υλικά και επεμβάσεις συντήρησης και προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα.

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

## Κατάλογος σχημάτων

<b>Σχήμα 3.1:</b> Τα είδη των πόρων ενός πορώδους υλικού.....	40
<b>Σχήμα 3.2:</b> Περίθλαση Bragg από κρυσταλλικό στερεό. Οι δέσμες 1 και 2 παραμένουν σε φάση όταν η διαφορά των δρόμων είναι $(M\lambda) + (N\lambda) = 2 \cdot (KL) \cdot \eta\mu\theta$ .....	45
<b>Σχήμα 3.3:</b> Σύγκριση του χαρακτηρισμού των τάξεων μεγέθους για την οπτική και την ηλεκτρονική μικροσκοπία.....	46
<b>Σχήμα 3.4:</b> Μηνίσκος υδραργύρου μέσα σε τριχοειδή σωλήνα.....	49
<b>Σχήμα 4.1:</b> Η τριχοειδής δράση εξαρτάται από την ακτίνα του κάθε τριχοειδή πόρου. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα, τόσο υψηλότερο είναι το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης.....	54
<b>Σχήμα 4.2:</b> Τα ευρωπαϊκά πρότυπα και οι κανονισμοί που αναφέρονται στο πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και στον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων .....	57
<b>Σχήμα 4.3:</b> Τυπική καμπύλη ξήρανσης ενός πορώδους υλικού.....	63
<b>Σχήμα 4.4:</b> Παραδείγματα δικτύων δύο διαστάσεων: (α) τετράγωνο πλέγμα, (β) τριγωνικό πλέγμα και (γ) εξα-τριγωνικό πλέγμα.....	64
<b>Σχήμα 4.5:</b> Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου δέσμης σωλήνων. Όλοι οι σωλήνες είναι παράλληλοι κύλινδροι, έχουν το ίδιο μήκος και είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους.....	65
<b>Σχήμα 6.1:</b> Σχηματικό διάγραμμα του ξηραντήρα ρεύματος αέρα και συνοπτική ερμηνεία των μερών του.....	96
<b>Σχήμα 7.1:</b> Μακροσκοπικές εικόνες και αποτελέσματα FOM σε διαφορετικές μεγεθύνσεις των υπό εξέταση δομικών υλικών.....	100
<b>Σχήμα 7.2:</b> Λογαριθμικό διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής των πόρων ως προς τις ακτίνες τους για τους πλίνθους και τους λίθους.....	103
<b>Σχήμα 7.3:</b> Λογαριθμικό διάγραμμα ογκομετρικής κατανομής των πόρων ως προς τις ακτίνες τους για τα κονιάματα $mca$ και $mcb$ .....	104
<b>Σχήμα 7.4:</b> Ολικό πορώδες, ολικό πορώδες από εμβάπτιση και ολικό τριχοειδές πορώδες των δομικών υλικών.....	108

<b>Σχήμα 8.1:</b> Υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης $A_w$ σύμφωνα με τη μέθοδο της μιας εφαπτομένης (One tangent method).....	112
<b>Σχήμα 8.2:</b> Υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης $A_w$ σύμφωνα με τη μέθοδο των δύο εφαπτομένων (Two tangents method). .....	112
<b>Σχήμα 8.3:</b> Υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης $A_w$ σύμφωνα με τη μέθοδο των 30 λεπτών (30 minutes method). .....	112
<b>Σχήμα 8.4:</b> Μάζα του τριχοειδώς απορροφημένου νερού ανά μονάδα επιφάνειας σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου για τα διάφορα δομικά υλικά.....	117
<b>Σχήμα 9.1:</b> Κινητικές της τριχοειδούς αναρρίχησης των υπό εξέταση δομικών υλικών στις θερμοκρασίες 20, 25 και 30°C.....	125
<b>Σχήμα 9.2:</b> Συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης σε διάφορες θερμοκρασίες για τους λίθους και τα κεραμικά.....	126
<b>Σχήμα 9.3:</b> Συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης σε διάφορες θερμοκρασίες για τα κονιάματα $mca$ . .....	126
<b>Σχήμα 9.4:</b> Συντελεστές τριχοειδούς αναρρίχησης σε διάφορες θερμοκρασίες για τα κονιάματα $mcb$ . .....	127
<b>Σχήμα 10.1:</b> Οι κινητικές τριχοειδούς αναρρίχησης για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και ταχύτητας αέρα για τα υπό εξέταση δομικά υλικά.....	140
<b>Σχήμα 10.2:</b> Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των λίθων και των πλίνθων.....	141
<b>Σχήμα 10.3:</b> Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των κονιαμάτων $mca$ και $mcb$ .....	141
<b>Σχήμα 10.4:</b> Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των λίθων και των πλίνθων.....	142
<b>Σχήμα 10.5:</b> Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης των κονιαμάτων $mca$ και $mcb$ . .....	142
<b>Σχήμα 10.6:</b> Σύγκριση των μοντέλων με τα πειραματικά δεδομένα στους 25 και 30°C για ορισμένα δομικά υλικά.....	144

<b>Σχήμα 11.1:</b> Οι κινητικές της ξήρανσης των δομικών υλικών σε διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες αέρα.....	154
<b>Σχήμα 11.2:</b> Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά ξήρανσης των λίθων και των πλίνθων.....	156
<b>Σχήμα 11.3:</b> Επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά ξήρανσης των κονιαμάτων $mca$ και $mcb$ .....	156
<b>Σχήμα 11.4:</b> Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά ξήρανσης των λίθων και των πλίνθων.....	157
<b>Σχήμα 11.5:</b> Επίδραση της ταχύτητας του αέρα στη σταθερά ξήρανσης των κονιαμάτων $mca$ και $mcb$ .....	157
<b>Σχήμα 12.1:</b> Βρόχοι τριχοειδούς αναρρίχησης – ξήρανσης των εξεταζόμενων υλικών σε θερμοκρασία 30°C και ταχύτητα αέρα 3m/s.....	163
<b>Σχήμα 12.2:</b> Εμβαδά των καμπύλων κινητικών τριχοειδούς αναρρίχησης-ξήρανσης στους 30°C και 3m/s.....	164
<b>Σχήμα 12.3:</b> Συσχέτιση του λόγου $t_{cr}/t_d$ με τη θερμοκρασία για τους λίθους και τους πλίνθους.....	166
<b>Σχήμα 12.4:</b> Συσχέτιση του λόγου $t_{cr}/t_d$ με τη θερμοκρασία για τα κονιάματα $mca$ και $mcb$ .....	166
<b>Σχήμα 12.5:</b> Συσχέτιση του λόγου $t_{cr}/t_d$ με την ταχύτητα του αέρα για τους λίθους και τους πλίνθους.....	167
<b>Σχήμα 12.6:</b> Συσχέτιση του λόγου $t_{cr}/t_d$ με την ταχύτητα του αέρα για τα κονιάματα $mca$ και $mcb$ .....	167
<b>Σχήμα 12.7:</b> Παράμετρος $c_0$ σε σχέση με το ολικό πορώδες $\epsilon_0$ των υλικών.....	169
<b>Σχήμα 12.8:</b> Παράμετρος $c_0$ σε σχέση με τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών.....	169
<b>Σχήμα 12.9:</b> Παράμετρος $c_0$ σε σχέση με την ειδική επιφάνεια $S$ των υλικών.....	170
<b>Σχήμα 12.10:</b> Παράμετρος $c_0$ σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων $r$ των υλικών.....	170
<b>Σχήμα 12.11:</b> Συσχέτιση της σταθεράς $c_0$ με τους σχετικούς όγκους (%) πόρων των υλικών με $r > 1\mu m$ .....	171
<b>Σχήμα 12.12:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση της σταθεράς $c_0$ με στοιχεία της μικροδομής των κονιαμάτων.....	173
<b>Σχήμα 12.13:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση της σταθεράς $c_0$ με στοιχεία της μικροδομής των $mca$ κονιαμάτων.....	175

<b>Σχήμα 12.14:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση της σταθεράς $c_0$ με στοιχεία της μικροδομής των $mcb$ κονιαμάτων.....	176
<b>Σχήμα 12.15:</b> Παράμετρος $d_0$ σε σχέση με το ολικό πορώδες $\varepsilon_0$ των υλικών.....	178
<b>Σχήμα 12.16:</b> Παράμετρος $d_0$ σε σχέση με τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών.....	178
<b>Σχήμα 12.17:</b> Παράμετρος $d_0$ σε σχέση με την ειδική επιφάνεια $S$ των υλικών.....	179
<b>Σχήμα 12.18:</b> Παράμετρος $d_0$ σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων $r$ των υλικών.....	179
<b>Σχήμα 12.19:</b> Συσχέτιση της σταθεράς $d_0$ με τους σχετικούς όγκους (%) των υλικών με $r > 1\mu m$ .....	180
<b>Σχήμα 12.20:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση της παραμέτρου $d_0$ με στοιχεία της μικροδομής των κονιαμάτων.....	182
<b>Σχήμα 12.21:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση της παραμέτρου $d_0$ με στοιχεία της μικροδομής των $mca$ κονιαμάτων.....	184
<b>Σχήμα 12.22:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση της παραμέτρου $d_0$ με στοιχεία της μικροδομής των $mcb$ κονιαμάτων.....	186
<b>Σχήμα 12.23:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $c_0$ και $d_0$ για όλα τα υλικά.....	187
<b>Σχήμα 12.24:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση των παραμέτρων $c_0$ και $d_0$ για τα κονιάματα.....	187
<b>Σχήμα 12.25:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $c_0$ και $A_w$ για όλα τα υλικά.....	189
<b>Σχήμα 12.26:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $c_0$ και $A_w$ για όλα τα κονιάματα.....	189
<b>Σχήμα 12.27:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $c_0$ και $A_w$ για τα $mca$ κονιάματα. ....	190
<b>Σχήμα 12.28:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $c_0$ και $A_w$ για τα $mcb$ κονιάματα. ....	190
<b>Σχήμα 12.29:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $d_0$ και $A_w$ για όλα τα υλικά.....	191
<b>Σχήμα 12.30:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $d_0$ και $A_w$ για τα κονιάματα.....	191
<b>Σχήμα 12.31:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $d_0$ και $A_w$ για τα $mca$ κονιάματα.....	192
<b>Σχήμα 12.32:</b> Συσχέτιση των παραμέτρων $d_0$ και $A_w$ για τα $mcb$ κονιάματα.....	192
<b>Σχήμα 12.33:</b> Συντελεστής $A_w$ σε σχέση με το ολικό πορώδες $\varepsilon_0$ των υλικών.....	193
<b>Σχήμα 12.34:</b> Συντελεστής $A_w$ σε σχέση με τον ολικό ειδικό όγκο των υλικών.....	194
<b>Σχήμα 12.35:</b> Συντελεστής $A_w$ σε σχέση με την ειδική επιφάνεια $S$ των υλικών.....	194
<b>Σχήμα 12.36:</b> Συντελεστής $A_w$ σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων $r$ των υλικών.....	195
<b>Σχήμα 12.37:</b> Βελτιωμένη συσχέτιση του συντελεστή $A_w$ με στοιχεία της μικροδομής των κονιαμάτων.....	196

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

**Σχήμα 12.38:** Τιμές των δύο συντελεστών και τυπικές αποκλίσεις στους 30°C, σχετική υγρασία 35% και για ταχύτητα αέρα 3m/s.....199

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*



## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3.1:</b> Ταξινόμηση των πόρων σύμφωνα με τη διάμετρό τους.....	41
<b>Πίνακας 5.1:</b> Υγροθερμικά υπολογιστικά εργαλεία διαθέσιμα στο κοινό.....	77
<b>Πίνακας 5.2:</b> Χαρακτηριστικά παραδείγματα μοντέλων μεταφοράς υγρασίας.....	80
<b>Πίνακας 6.1:</b> Τα δομικά υλικά και η περιγραφή τους.....	90
<b>Πίνακας 7.1:</b> Αποτελέσματα δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης και εμφάνισης για τα υπό εξέταση υλικά.....	102
<b>Πίνακας 7.2:</b> Αποτελέσματα της πορομετρίας υδραργύρου για τα υπό εξέταση υλικά.....	107
<b>Πίνακας 7.3:</b> Αποτελέσματα του ποσοστού ολικού πορώδους που μετέχει στη τριχοειδή αναρρίχηση για όλα τα υλικά. ....	108
<b>Πίνακας 8.1:</b> Τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης $A_w$ για τα δομικά υλικά στους 20°C σύμφωνα με τις διάφορες μεθόδους υπολογισμού του.....	113
<b>Πίνακας 9.1:</b> Τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ( $A_w$ ) με τη τυπική απόκλιση (SD) για τις θερμοκρασίες των 20, 25 και 30°C.....	120
<b>Πίνακας 9.2:</b> Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για τα εξεταζόμενα υλικά στους 15°C.....	127
<b>Πίνακας 9.3:</b> Οι τιμές του συντελεστή $C$ και η τυπική του απόκλιση, σύμφωνα με την εργασία των Feng και Janssen, στους 20°C.....	129
<b>Πίνακας 9.4:</b> Σύγκριση των πειραματικών τιμών του συντελεστή $A_w$ με τις τιμές που υπολογίστηκαν από την εξίσωση (9.1) στους 30°C.....	129
<b>Πίνακας 9.5:</b> Οι πειραματικές τιμές του συντελεστή ροφητικής ικανότητας των υλικών στους 20 και 30°C και το ποσοστό μεταβολής του με την τυπική του απόκλιση.....	130
<b>Πίνακας 10.1:</b> Μαθηματικό μοντέλο της κινητικής της τριχοειδούς αναρριχόμενης υγρασίας.....	135

**Πίνακας 10.2:** Εμπειρικές παράμετροι για τη μοντελοποίηση της τριχοειδούς αναρρίχησης των δομικών υλικών.....136

**Πίνακας 11.1:** Μαθηματικό μοντέλο ξήρανσης των δομικών υλικών.....149

**Πίνακας 11.2:** Υπολογιζόμενες παράμετροι κατά τη ξήρανση των δομικών υλικών.....150

**Πίνακας 12.1:** Σταθερές χρόνων τριχοειδούς αναρρίχησης και ξήρανσης και οι λόγοι  $t_{cr}/t_d$  των εξεταζόμενων υλικών.....164

**Πίνακας 12.2:** Σχετικοί όγκοι (%) για κάθε κλάση πόρων των υλικών.....171

**Πίνακας 12.3:** Πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και θεωρητικές τιμές του απόλυτου συντελεστή υδαταπορρόφησης για τη θερμοκρασία των 30°C, RH: 35% και για διαφορετικές ταχύτητες του αέρα.....198

**Πίνακας 12.4:** Πειραματικές τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και θεωρητικές τιμές του απόλυτου συντελεστή υδαταπορρόφησης για ταχύτητα αέρα 3m/s, RH: 35% και για διαφορετικές θερμοκρασίες.....199

## Κατάλογος συμβόλων

$\epsilon_0$ :	ολικό πορώδες του υλικού
$V_p$ :	όγκος των κενών του υλικού
$V_s$ ή $V_{total}$	συνολικός όγκος του υλικού
$V_b$ :	όγκος της στερεάς μήτρας του υλικού
$\rho_{app}$ :	φαινόμενη πυκνότητα του υλικού
$\rho_{real}$ :	πραγματική πυκνότητα του υλικού
$m_s$ :	συνολική μάζα του υλικού
$I$ :	τριχοειδώς απορροφούμενη μάζα νερού ανά μονάδα επιφάνειας επαφής του υλικού με το νερό
$A_w$ :	συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης του υλικού
$t$ :	χρόνος
$h$ :	ύψος της κατακόρυφης ανόδου υγρού σε τριχοειδή πόρο σύμφωνα με το νόμο του Jurin
$r$ :	μέση ακτίνα ενός τριχοειδή πόρου του υλικού
$\sigma$ :	επιφανειακή τάση του υγρού
$\theta$ :	γωνία επαφής υγρού-στερεού.
$\rho$ :	πυκνότητα του υγρού
$g$ :	επιτάχυνση της βαρύτητας
$A$ :	εμβαδόν διατομής του δείγματος του υλικού
$\Delta B$ :	μάζα του απορροφούμενου νερού
$M^*$ :	ασυμπτωτική τιμή του απορροφούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας δείγματος του υλικού
$t^*$ :	τετμημένη του σημείου τομής που διέρχεται από την ασύμπτωτο και της εφαπτομένης στο ευθύγραμμο μέρος της καμπύλης σε ένα πείραμα τριχοειδούς αναρρίχησης

$Q_{30}$ :	απορροφούμενη μάζα νερού ανά μονάδα επιφάνειας δείγματος σε χρόνο 30 λεπτών
$t_{30}$ :	χρόνος των 30 λεπτών
$S$ :	συντελεστής ροφητικής ικανότητας του υλικού
$\rho_w$ ή $d_{H_2O}$	πυκνότητα του νερού
$\eta$ :	ιξώδες του νερού
$S$ :	εγγενής ροφητική ικανότητα του υλικού
$D_w$ :	μέσος συντελεστής διαχυτότητας του υλικού σε υγρό
$W_{cap}$ :	ποσοστό υγρασίας στον τριχοειδή κορεσμό του υλικού
$X_{cap}$ :	ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω των τριχοειδών πόρων του υλικού
$m^{cap}_{sat}$ :	μάζα του απορροφούμενου νερού στον τριχοειδή κορεσμό του δείγματος
$m_{dry}$ :	μάζα του ξηρού δείγματος του υλικού
$T.C.V_{cap}$ :	ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω τριχοειδών πόρων του υλικού
$\epsilon_{cap}$ :	πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών πόρων (τριχοειδές πορώδες) κάθε υλικού
$X_{imm}$ :	ποσοστό της υγρασίας κορεσμού μέσω εμβάπτισης του υλικού
$m_{sat}$ :	μάζα του νερού στον κορεσμό μετά από εμβάπτιση του δείγματος
$T.C.V_{imm}$ :	ολικός ειδικός όγκος νερού μέσω εμβάπτισης του υλικού
$\epsilon_{imm}$ :	πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω εμβάπτισης κάθε υλικού
$X_{cr}$ :	ποσοστό τριχοειδώς απορροφημένης υγρασίας σε χρόνο $t$
$X_{ce}$ :	υγρασία ισορροπίας του υλικού
$X_{co}$ :	διορθωτικός παράγοντας στο μοντέλο τριχοειδούς αναρρίχησης που εκφράζει τη παραμένουσα υγρασία μετά τη ξήρανση του υλικού
$dX_{cr}/dt$ :	ρυθμός τριχοειδούς απορρόφησης της υγρασίας στο υλικό
$t_{cr}$ :	σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης
$K_{cr}$ :	σταθερά τριχοειδούς αναρρίχησης

*Η μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών*

$u$ :	ταχύτητα του αέρα
$u_r$ :	ταχύτητα αναφοράς του αέρα
$T$ :	θερμοκρασία του αέρα
$T_r$ :	θερμοκρασία αναφοράς του αέρα
$\alpha_w$ :	ενεργότητα του αέρα
$\alpha_{wr}$ :	ενεργότητα αναφοράς του αέρα
$c_0, c_1, c_2, c_3$ :	κατάλληλες εμπειρικές σταθερές του μοντέλου τριχοειδούς αναρρίχησης
$S_S$ :	μέση τετραγωνική απόκλιση του τοπικού αθροίσματος των τετραγώνων μεταξύ των πειραματικών και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της υγρασίας
SD:	Τυπική απόκλιση
$X$ :	ποσοστό υγρασίας στο υλικό κατά τη ξήρανση σε χρόνο $t$
$X_e$ :	ποσοστό υγρασίας ισορροπίας κατά τη ξήρανση του υλικού
$dX/dt$ :	ρυθμός ξήρανσης του υλικού
$t_d$ :	σταθερά χρόνου ξήρανσης
$K$ :	σταθερά ξήρανσης
$d_0, d_1, d_2, d_3$ :	κατάλληλες εμπειρικές σταθερές του μοντέλου ξήρανσης
$b_0, b_1, b_2$ :	κατάλληλες εμπειρικές σταθερές από το τροποποιημένο μοντέλο του Oswin
$A_{w/abs}$ :	απόλυτος συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης
$\Delta B_{2/3}$ :	μάζα του τριχοειδώς απορροφούμενου νερού σε χρόνο ίσο με τη σταθερά χρόνου τριχοειδούς αναρρίχησης $t_{cr}$ του κάθε υλικού
$r$ :	μέση ακτίνα πόρων του υλικού