ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ανάπτυξη Δομικών Υλικών με Χαμηλή Εκπομπή Σκόνης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Σωτηρία-Κυριακή Γεωργουλέα

Επιβλέπων:

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης,
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ
Φεβρουάριος 2016

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της φοίτησης στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη δομικών υλικών με χαμηλή εκπομπή σκόνης (Low Dust Technology).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Ε. Μπαδογιάννη, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να επιλέξω ελεύθερα από ένα πλήθος επιστημονικών θεμάτων εκείνο που μου κίνησε περισσότερο το ενδιαφέρον. Η πόρτα του γραφείου του ήταν μόνιμα ανοιχτή και παρείχε χρήσιμες συμβουλές και κατευθύνσεις για την υπέρβαση των δυσκολιών που προέκυπταν κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Α. Παπαγιάννη, Καθηγητή ΕΜΠ και Υπεύθυνο του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης της Ατμόσφαιρας του ΕΜΠ, για την επιστημονική του συμβολή στη διαδικασία μέτρησης της αιωρούμενης σκόνης, καθώς και για τη συμμετοχή του στη συμβουλευτική επιτροπή. Επιπλέον, θα ήθελε να ευχαριστήσω το τρίτο μέλος της επιτροπής, τον κ. Ε. Βουγιούκα, Λέκτορα ΕΜΠ, για το ενδιαφέρον του. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Δρ. Β. Πρωτονοτάριο για τη διάθεση της διάταξης DustTrak 8520 και για τον χρόνο που μου αφιέρωσε.

Το μεγαλύτερο μέρος των πειραματικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κονιαμάτων και Ανάπτυξης Νέων Προϊόντων της Διεύθυνσης Έρευνας και Ποιότητας της Ανώνυμης Εταιρίας Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ. Οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Σ. Αντίοχο, Προϊστάμενο του Εργαστηρίου, για την πρόταση του θέματος της παρούσας εργασίας, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή και την ενθάρρυνσή του να αναλαμβάνω πρωτοβουλίες και να κινούμαι ανεξάρτητα. Η συνεισφορά του στην εξοικείωσή μου με πτυχές της σύγχρονης βιομηχανίας υπήρξε καθοριστική. Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. Ν. Πιστοφίδη για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά του. Νιώθω ιδιαίτερα υπόχρεη σε καθέναν ξεχωριστά από το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου για την ειλικρινή του διάθεση να βοηθήσει σε οποιαδήποτε δυσκολία αντιμετώπισα. Πάνω απ' όλους, θέλω να ευχαριστήσω την «ψυχή» του εργαστηρίου, τον Θανάση Αγαθή, που χωρίς τη σβελτάδα και τα μπράτσα του δε θα είχαν πραγματοποιηθεί ούτε οι μισές πειραματικές δοκιμές της εργασίας αυτής. Εκτός των άλλων, ο Θανάσης είχε ουσιαστική αντίληψη των στόχων της εργασίας και οι επισημάνσεις του ήταν καίριες.

Περίληψη

Χαρακτηριστικό των υλικών με βάση το τσιμέντο είναι η υψηλή τους τάση να σχηματίζουν σκόνη κατά την παραγωγή, τη μεταφορά, την ανάμειξη και τη μεταχείρισή τους. Η αιωρούμενη σκόνη των υλικών αυτών προκαλεί σοβαρά προβλήματα υγείας στους εργαζόμενους και επιβαρύνει τις συνθήκες εργασίας. Επιπλέον, τα πιο λεπτά σωματίδια που απομακρύνονται υπό τη μορφή σκόνης πιθανώς να είναι τα πρόσθετα που με χαμηλό ποσοστό συμμετέχουν στη σύνθεση. Τα πρόσθετα των συνθέσεων με βάση το τσιμέντο συνήθως αποτελούν συστατικά υψηλού κόστους και καθορίζουν σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Ως εκ τούτου, η απώλεια των εν λόγω συστατικών μπορεί να τροποποιήσει τη σύσταση της σύνθεσης, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την απόδοση του τελικού προϊόντος.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης. Ως υλικά αναφοράς επιλέγονται μία εμπορικά διαθέσιμη κόλλα πλακιδίων υψηλών επιδόσεων με βάση το τσιμέντο και ένα τσιμέντο τύπου Portland. Για την παραγωγή της κόλλας πλακιδίων και του τσιμέντου με χαμηλή τάση σχηματισμού σκόνης, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι ινών κυτταρίνης και υγρών προσθέτων.

Πιο αναλυτικά, για την ανάπτυξη της κόλλας πλακιδίων με χαμηλή εκπομπή σκόνης, διερευνήθηκε η προσθήκη έξι τύπων ινών κυτταρίνης και δύο τύπων υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης σε διάφορες περιεκτικότητες. Διαπιστώθηκε ότι οι ίνες κυτταρίνης και τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνουν σημαντικά την τάση σχηματισμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων. Με την προσθήκη ινών κυτταρίνης σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων, επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση της σκόνης, η οποία κυμαίνεται από 68 έως 84%, ανάλογα με τον τύπο της ίνας. Ακόμη καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης, τα οποία σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων οδηγούν σε μία μείωση της σκόνης της τάξης του 95%. Εκτός από την αποτελεσματικότητα των προσθέτων ως προς τη μείωση της σκόνης, διερευνήθηκε και η επίδρασή τους στις φυσικές ιδιότητες της νωπής κόλλας πλακιδίων και τις μηχανικές ιδιότητες της σκληρυμένης κόλλας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, η παρουσία των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν υποβαθμίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της κόλλας πλακιδίων. Τέλος, εξετάστηκε η επιβάρυνση του κόστους παραγωγής της κόλλας πλακιδίων λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης. Από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της σκόνης, των δοκιμών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων και του κόστους παραγωγής, προέκυψε ως βέλτιστη λύση το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. κόλλας. Η κόλλα πλακιδίων με υγρό τύπου Β εμφανίζει μειωμένη τάση σχηματισμού σκόνης κατά 96% συγκριτικά με τη συμβατική κόλλα, παρόμοια μηχανική συμπεριφορά και επιβάρυνση του κόστους παραγωγής κατά 43.50 €/tn.

Για την παραγωγή του τσιμέντου με χαμηλή εκπομπή σκόνης, διερευνήθηκε η προσθήκη δύο τύπων ινών κυτταρίνης, τριών τύπων υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης και ενός λαδιού σιλικόνης σε διάφορες περιεκτικότητες. Διαπιστώθηκε ότι οι ίνες κυτταρίνης και τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνουν σημαντικά την τάση σχηματισμού σκόνης του τσιμέντου. Η μέτρηση της σκόνης του τσιμέντου με λάδι σιλικόνης απέτυχε λόγω έντονων, κατά περιοχές, συσσωματώσεων. Με την προσθήκη ινών κυτταρίνης σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. τσιμέντου, επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση της σκόνης, η οποία κυμαίνεται από 79 έως 93%, ανάλογα με τον τύπο της ίνας. Η αντίστοιχη μείωση της σκόνης λόγω της προσθήκης των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης κυμαίνεται από 88 έως 95%, ανάλογα με τον τύπο του υγρού. Εκτός από την αποτελεσματικότητα των προσθέτων ως προς τη μείωση της σκόνης, διερευνήθηκε και η επίδρασή τους στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου

τσιμεντοπολτού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, η παρουσία των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν υποβαθμίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου. Τέλος, εξετάστηκε η επιβάρυνση του κόστους παραγωγής του τσιμέντου λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης. Από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της σκόνης, των δοκιμών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων και του κόστους παραγωγής, προέκυψε ως βέλτιστη λύση το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β, σε ποσοστό 1.50% κ.β. κόλλας. Το τσιμέντο με υγρό τύπου Β εμφανίζει μειωμένη τάση σχηματισμού σκόνης κατά 95% συγκριτικά με το συμβατικό τσιμέντο, παρόμοια μηχανική συμπεριφορά και επιβάρυνση του κόστους παραγωγής κατά 43.50 €/tn.

Λέξεις κλειδιά: τεχνολογία χαμηλής εκπομπής σκόνης, τσιμεντοειδής κόλλα πλακιδίων, τσιμέντο, ίνες κυτταρίνης, μηχανικές ιδιότητες.

Abstract

Cement-based materials are generally in the form of powdered products and they are known to have a significant dust emission rate during their production, transportation, mixing and handling. That dust emission causes significant health problems to the workers. Furthermore, the finest particles, which blow away, could probably be the additives, that they were used at low-percentage. Such being the case, these constituents are costly and they have a determinant role in the composition and the properties of the final material. Therefore, the loss of such particles, may result in a consequent degradation of the performance at the final material.

The overall objective of the present Dissertation is the development of low-dust cement-based materials. A commercially available cementious tile adhesive and a typical Poltant cement were chosen as reference materials. To achieve the dustiness reduction of the reference materials, different types of cellulosic fibers and liquids were used as dust-reducing agents.

Concerning the development of the low-dust cementious tile adhesive, it has been investigated the addition effect, at different percentages, of six different types of cellulosic fibers and of two types of esters of neopentyl glycol. It was proven that both cellulosic fibers and esters of neopentyl glycol reduce significantly the dustiness of the cementious

tile adhesive. The addition of cellulosic fibers, at a concentration of 1.50% by weight of adhesive, led to a reduction of the dustiness in the range from 68 to 84%, depending on the type of the fiber used. Even better results were achieved by applying the neopentyl glycols, which at the amount of 1.50% by weight of dry adhesive, led to a dust reduction of 95%. Apart from the effect of the chosen agents on the adhesive's dustiness, their effect on the mechanical properties of the fresh and hardened adhesive was studied. The test results suggested that the addition of cellulosic fibers and liquid agents did not degrade the mechanical performance of the tile adhesive. Finally, the extra cost of tile adhesive's production due to the addition of cellulosic fibers and liquid agents was examined. By taking into account the results of dust measurements, the overall mechanical behavior and the extra cost of tile adhesive's production, the liquid type B, at the concentration of 1.50% by weight of dry adhesive, has emerged as the optimal solution. Compared to the conventional cementious tile adhesive, the tile adhesive with neopentyl glycol type B exhibits a dustiness reduction of 96%, similar mechanical performance and an increased production cost equal to 43.50 €/tn.

Concerning the development of the low-dust cement, the effect of two different types of cellulosic fibers, three types of esters of neopentyl glycol in liquid form and a silicone oil, at various concentrations, on the dustiness of the cement was investigated. It was proven that both cellulosic fibers and esters of neopentyl glycol reduce significantly the dustiness of the cement. The dustiness measurements of the cement with silicone oil failed because of the intense agglomeration at certain regions. The addition of cellulosic fibers at a concentration of 1.50% by weight of cement led to a reduction of the dustiness in the range from 79 to 93%, depending on the type of the fiber used. The respective dustiness reduction due to the addition of neopentyl glycols ranges from 88 to 95%, depending on the type of liquid. Apart from the effectiveness of the chosen agents on reducing the dustiness of cement, their effect on the mechanical properties of fresh and hardened cement paste was also investigated. The test results suggested that the addition of cellulosic fibers and liquid agents did not degrade the mechanical performance of cement. Finally, the extra cost of cement's production due to the addition of cellulosic fibers and liquid agents was examined. By taking into account the results of dust measurements, the overall mechanical behavior and the extra cost of cement's production, the liquid type B, at the concentration of 1.50% by weight of cement, has emerged as the optimal solution. Compared to the conventional cement, the cement with neopentyl glycol type B exhibits a dustiness

reduction of 95%, similar mechanical performance and an increased production cost equal to 43.50 €/tn.

Key words: low-dust technology, cementious tile adhesive, cement, cellulosic fibers, mechanical properties.

Περιεχόμενα

Πρόλογος i

Περίληψη iii

Abstract vii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή 1

1.1 Ανασκόπηση του προβλήματος 1

1.2 Στόχοι της εργασίας 4

1.3 Δομή της εργασίας 5

Βιβλιογραφία 7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Ίνες φυσικής κυτταρίνης 9

2.1 Εισαγωγή 9

2.2 Κατηγοριοποίηση ινών κυτταρίνης 11

2.3 Χημική σύνθεση ινών κυτταρίνης 14

2.3.1 Κυτταρίνη 15

2.3.2 Ημικυτταρρίνη 15
2.2.3 Λιγνίνη 16
2.3 Φυσική δομή ινών κυτταρίνης 16
2.4 Παραγωγή ινών κυτταρίνης 18
2.4.1 Διαχωρισμός δρόσου 19
2.4.2 Διαχωρισμός νερού 19
2.4.3 Διαχωρισμός ενζύμων 20
2.4.4 Χημικός διαχωρισμός 20
2.4.5 Μηχανικός διαχωρισμός 20
2.4.6 Έκρηξη ατμού 21
2.5 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ινών κυτταρίνης 22
2.6 Μηχανική συμπεριφορά σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με ίνες κυτταρίνης 25
2.6.1 Ενίσχυση υλικών με βάση το τσιμέντο με ίνες πολτού ή ίνες μικρού μήκους 25
2.6.2 Ενίσχυση υλικών με βάση το τσιμέντο με ίνες μεγάλου μήκους 32
Βιβλιογραφία 34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Δομικά υλικά χαμηλής εκπομπής σκόνης 43
3.1 Αφρώδες διάλυμα 43
3.2 Υδατική διασπορά πολυτετραφθοροαιθυλενίου 45
3.3 Έλαια γλυκόλης πολυαιθυλενίου 46
3.4 Τροποποιημένα φυτικά έλαια 47
3.5 Έλαια σιλικόνης 48
3.6 Υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης 49
3.7 Ορυκτέλαιο 50
Βιβλιογραφία 52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Υλικά και πειραματική διαδικασία 57

4.1 Υλικά 57
4.1.1 Κονίες 57
4.1.2 Ίνες κυτταρίνης 58
4.1.3 Υγρά πρόσθετα 60
4.2 Συνθέσεις και παρασκευή δοκιμίων 62
4.2.1 Κόλλα πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης 62
4.2.2 Κόλλα πλακιδίων με υγρά πρόσθετα 64
4.2.3 Τσιμέντο με ίνες κυτταρίνης 65
4.2.4 Τσιμέντο με υγρά πρόσθετα 67
4.3 Πειραματικές δοκιμές 68
4.3.1 Δοκιμές κόλλας πλακιδίων 68
4.3.2 Δοκιμές τσιμέντου 80
4.3.3 Δοκιμή προσδιορισμού της τάσης σχηματισμού σκόνης 85
4.3.4 Δοκιμή προσδιορισμού της συγκέντρωσης σκόνης 88
Βιβλιογραφία 91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Κόλλα πλακιδίων χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης 93
5.1 Λευκότητα κόλλας πλακιδίων 94
5.2 Εξάπλωση κόλλας πλακιδίων 94
5.2.1 Εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης 95
5.2.2 Εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα 96
5.3 Πυκνότητα νωπής κόλλας πλακιδίων 97
5.3.1 Πυκνότητα της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης 97
5.3.2 Πυκνότητα της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα 99
5.4 Περιεχόμενος αέρας νωπής κόλλας πλακιδίων 100
5.4.1 Περιεχόμενος αέρας της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης 100
5.4.2 Περιεχόμενος αέρας της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα 102
5.5 Συγκρατούμενο νερό νωπής κόλλας πλακιδίων 103

5.5.1 Συγκρατούμενο νερό της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης 104
5.5.2 Συγκρατούμενο νερό της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα 104
5.6 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων 104
5.6.1 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης..105
5.6.2 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα ..117
5.7 Ελεύθερη συρρίκνωση σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων.....120
5.7.1 Ελεύθερη συρρίκνωση της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.....120
5.7.2 Ελεύθερη συρρίκνωση της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα 126
5.7.3 Απώλεια βάρους της κόλλας πλακιδίων 126
5.8 Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων 127
5.8.2 Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.....130
5.9 Συγκέντρωση σκόνης της κόλλας πλακιδίων.....132
5.10 Κόστος παραγωγής της κόλλας πλακιδίων 134
5.11 Αποτελέσματα και συζήτηση.....135
Βιβλιογραφία.....141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Τσιμέντο χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης 143
6.1 Εξάπλωση νωπού τσιμεντοπολτού.....144
6.1.1 Εξάπλωση τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης.....144
6.1.2 Εξάπλωση νωπού τσιμεντοπολτού με υγρά πρόσθετα 145
6.2 Πρότυπη συνεκτικότητα τσιμεντοπολτού.....147
6.3 Χρόνος αρχής και τέλους πήξης του τσιμεντοπολτού 147
6.4 Σταθερότητα όγκου τσιμεντοπολτού 148
6.5 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμέντου.....149
6.6.1 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης 149
6.6.2 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα 153
6.7 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου.....160
6.7.1 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης.....160

6.7.2 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα 161

6.7.3 Σύγκριση της αποτελεσματικότητας των προσθέτων 163

6.8 Συγκέντρωση σκόνης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα 164

6.9 Κόστος παραγωγής τσιμέντου 168

6.10 Αποτελέσματα και συζήτηση 168

Βιβλιογραφία 173

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπεράσματα 177

Μέρος Α

Υφιστάμενο Θεωρητικό Υπόβαθρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
Εισαγωγή

1.1 Ανασκόπηση του προβλήματος

Η ταχεία αστικοποίηση και βιομηχανοποίηση κατά τα τελευταία έτη έχουν ως αποτέλεσμα την κλιμάκωση της ζήτησης του τσιμέντου σε παγκόσμιο επίπεδο. Το τσιμέντο αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό δομικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη υποδομών και έχει αποδειχθεί κλειδί για την οικονομική ανάπτυξη. Η τσιμεντοβιομηχανία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου σε όλο τον κόσμο με τη δημιουργία θέσεων απασχόλησης και την παροχή πολλαπλών οικονομικών οφελών τα οποία συνδέονται με τις βιομηχανίες [1.1]. Από την άλλη πλευρά, παράλληλα με την ανάπτυξη των βιομηχανιών τσιμέντου, οξύνεται το πρόβλημα της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Η δραστηριότητα των βιομηχανιών τσιμέντου θεωρείται σε μεγάλο βαθμό υπαίτια για την ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω της εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων (particulate emission) υπό τη μορφή λεπτόκοκκης σκόνης. Ως εκ τούτου, η ορθή εφαρμογή προγραμμάτων τοξικολογικής αξιολόγησης είναι αναγκαία για την προστασία της υγείας των ανθρώπων οι οποίοι εκτίθενται σε σκόνη τσιμέντου [1.2].

Το μεγάλο πρόβλημα της ρύπανσης σε μία βιομηχανία τσιμέντου οφείλεται στην σκόνη και τα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία εκπέμπονται από διάφορα σημεία της μονάδας όπως οι μύλοι άλεσης των πρώτων υλών, οι περιστροφικοί κλίβανοι (ξηροί ή υγροί), ο πύργος ψύξης κλίνκερ, τα σιλό αποθήκευσης και οι διατάξεις συσκευασίας. Οι εργαζόμενοι στη βιομηχανία τσιμέντου, οι οποίοι εμπλέκονται σε διάφορα στάδια της παραγωγής τσιμέντου, πλήττονται σε μεγαλύτερο βαθμό, ενώ η πλειοψηφία τους εκτίθενται σε σκόνη τσιμέντου για μεγάλα χρονικά διαστήματα λόγω της συνεχούς εργασίας στο εργοστάσιο τσιμέντου. Η έκθεση των εργαζομένων σε σκόνη τσιμέντου πραγματοποιείται κυρίως μέσω της δερματικής και της αναπνευστικής οδού και σε μικρότερο βαθμό μέσω της κατάποσης [1.2]. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα επίπεδα αιωρούμενης εισπνεόμενης σκόνης (airborne respirable dust), τα οποία καταγράφονται στον αέρα των χώρων εργασίας των βιομηχανιών τσιμέντου, κυμαίνονται από 5 έως 40 mg/m^3. Η εξαιρετικά μικρή αεροδυναμική διάμετρος των κόκκων της σκόνης τσιμέντου, η οποία κυμαίνεται από 0.05 έως 20 μm, καθιστά το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου ευάλωτο στην εναπόθεση τσιμέντου [1.3].

Τα βασικά συστατικά του τσιμέντου τύπου Portland είναι το πυριτικό τριασβέστιο και το πυριτικό διασβέστιο με κυμαινόμενη ποσότητα οξειδίου του αργιλίου, αργιλικού τριασβεστίου και οξειδίου του σιδήρου και με χαμηλή συγκέντρωση εξασθενούς χρωμίου. Η σύσταση του τσιμέντου Portland περιλαμβάνει μείγματα οξειδίου του ασβεστίου σε ποσοστά 62-66%, οξειδίου του πυριτίου σε ποσοστά 19-22%, τριοξειδίου του αργιλίου σε ποσοστά 4-8%, οξειδίου του σιδήρου σε ποσοστά 2-5%, οξειδίου του μαγνησίου σε ποσοστά 1-2%, καθώς και ποσότητες σεληνίου, θαλλίου, και άλλων συστατικών [1.4]. Επομένως, η χημική σύνθεση της σκόνης τσιμέντου αποκαλύπτει ότι το τσιμέντο περιέχει τοξικά συστατικά.

Υπάρχουν σαφείς ενδείξεις σχετικά με τις επιβλαβείς επιδράσεις της σκόνης του τσιμέντου στα συστήματα διαβίωσης. Οι Fleming et al. [1.5] αναφέρουν την περιστασιακή εκδήλωση εμφυσήματος και βρογχίτιδας λόγω της έκθεσης σε σκόνη τσιμέντου, καθώς και την υπερβολική συγκέντρωση τσιμέντου στον πνεύμονα («cementosis»). Από πειράματα σε ζώα, παρατηρείται ατροφία των ελαστικών ινών και πνευμονικό εμφύσημα στον πνευμονικό ιστό αρουραίων οι οποίοι εκτίθενται σε εισπνοή σκόνης τσιμέντου [1.5]. Σύμφωνα με τη μελέτη του Kalacic [1.7], ο επιπολασμός των λοιμώξεων του αναπνευστικού συστήματος και της χρόνιας

βρογχίτιδας είναι σημαντικά υψηλότερος στους εργαζόμενους σε βιομηχανίες τσιμέντου συγκριτικά με τον υπόλοιπο πληθυσμό, τόσο στους καπνιστές όσο και στους μη-καπνιστές. Το βρογχικό άσθμα συγκαταλέγεται στις ασθένειες τις οποίες εκδηλώνουν οι εργαζόμενοι σε τσιμεντοβιομηχανίες [1.8]. Όσο αφορά στις γυναίκες εργαζόμενες σε βιομηχανίες τσιμέντου, διαπιστώνεται υψηλή συχνότητα εμφάνισης φλεγμονής των ωοθηκών, διάβρωσης του κολπικού τμήματος της μήτρας, πρόπτωση του τοιχώματος του κόλπου και ακράτεια [1.9]. Εκτός των άλλων, καταγράφεται αυξημένος κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου του στομάχου στους εργαζόμενους σε βιομηχανίες τσιμέντου [1.10]. Ένα εξαιρετικά υψηλό ποσοστό των εργαζομένων, οι οποίοι απασχολούνται σε διαδικασίες άμεσου χειρισμού του τσιμέντου, παρουσιάζει καρκίνο του πνεύμονα [1.11]. Ο καρκίνος του λάρυγγα αναφέρεται επίσης ως ασθένεια στην οποία είναι επιρρεπή τα άτομα που εκτίθενται σε σκόνη τσιμέντου [1.12-1.13]. Σύμφωνα με μία μελέτη κοόρτης σε εργαζομένους εργοστασίων αμιαντοτσιμέντου, παρατηρείται υψηλότερος κίνδυνος εκδήλωσης όγκου του παχέος εντέρου συγκριτικά με τους εργαζόμενους σε άλλους κλάδους της βιομηχανίας αμιάντου [1.14]. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η εκδήλωση ορθοκολικού καρκίνου σχετίζεται με την παραγωγή τσιμέντου τύπου Portland [1.15]. Η μακροχρόνια έκθεση σε σκόνη τσιμέντου αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου της δεξιάς πλευράς του παχέος εντέρου [1.16].

Το αργίλιο και το πυρίτιο αποτελούν τα κύρια συστατικά της σκόνης του τσιμέντου. Υπάρχουν αρκετές αναφορές σχετικά με τις δυσμενείς επιπτώσεις του αργιλίου στα ζωντανά συστήματα [1.17-1.18]. Το διοξείδιο του πυριτίου, βασικό συστατικό της σκόνης τσιμέντου, χαρακτηρίζεται ως τοξικό [1.19-1.20]. Ο βαθμός εξάπλωσης των αναπνευστικών λοιμώξεων σε εργαζόμενους τσιμεντοβιομηχανιών διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα. Με στόχο την άμβλυνση των επιβλαβών επιδράσεων της σκόνης τσιμέντου, έχουν πραγματοποιηθεί ερευνητικές προσπάθειες παρασκευής τσιμέντου χωρίς πυρίτιο [2.21-1.23].

Εκτός από τις εξαιρετικά αρνητικές συνέπειες της σκόνης τσιμέντου στην υγεία των εργαζομένων, η απώλεια συστατικών μίας σύνθεσης με βάση το τσιμέντο, υπό τη μορφή σκόνης, ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλεια της απόδοσης του τελικού προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα, τα λεπτά σωματίδια, τα οποία απομακρύνονται κατά τον χειρισμό του υλικού, πιθανώς να αποτελούν τα πρόσθετα της σύνθεσης. Τα

πρόσθετα μίας σύνθεσης με βάση το τσιμέντο αποτελούν συστατικά υψηλού κόστους και καθορίζουν σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Ως εκ τούτου, η απώλειά των εν λόγω συστατικών μπορεί να τροποποιήσει τη σύσταση της σύνθεσης, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την απόδοση του τελικού δομικού προϊόντος. Επιπλέον, τα λεπτά σωματίδια ενδέχεται να είναι υδροστατικής ή/και ηλεκτροστατικής φύσης, προκαλώντας επιπλέον δυσκολία στην εφαρμογή ή τον χειρισμό των ξηρών συνθέσεων όπως προβλήματα ρευστότητας και πρόσφυσης καθώς και κινδύνους έκρηξης σκόνης («dust explosion risks»).

Από τα ανωτέρω, διαπιστώνεται ότι η σκόνη τσιμέντου όχι μόνο επιβαρύνει εξαιρετικά την υγεία των εργαζομένων των βιομηχανιών τσιμέντου, αλλά ενδέχεται να υποβαθμίζει την τελική απόδοση των δομικών προϊόντων.

1.2 Στόχοι της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο με χαμηλή εναέρια εκπομπή σκόνης (low airborne dust emission). Με άλλα λόγια, στόχος της εργασίας είναι η μείωση της σκόνης που «σηκώνεται» κατά την παραγωγή, τη μεταφορά, την ανάμιξη και τον χειρισμό των δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο. Τα δομικά υλικά αναφοράς είναι ένα τσιμέντο τύπου Portland και μία τσιμεντοειδής κόλλα πλακιδίων. Τα εν λόγω υλικά χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα λεπτή κοκκομετρία και επομένως, σχηματίζουν εξαιρετικά υψηλά επίπεδα σκόνης κατά τον χειρισμό τους.

Για την παρασκευή συνθέσεων δομικών υλικών τα οποία επιδεικνύουν μειωμένη τάση σχηματισμού σκόνης, επιλέγεται η χρήση κατάλληλων προσθέτων («anti-dust» additives). Παράλληλα με την υψηλή αποτελεσματικότητά τους ως προς την αναστολή του σχηματισμού σκόνης, τα πρόσθετα οφείλουν να είναι εύκολα στην εφαρμογή τους. Ως εύκολα στην εφαρμογή χαρακτηρίζονται τα πρόσθετα τα οποία δεν απαιτούν ιδιαίτερη επεξεργασία πριν την προσθήκη τους στη σύνθεση (αραίωση ή διαλυτοποίηση με νερό, θέρμανση κ.α.). Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητο η διαδικασία εφαρμογής των προσθέτων να μην προϋποθέτει εξειδικευμένο εργαστηριακό ή εργοστασιακό εξοπλισμό. Στο βαθμό που η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να αναπτύξει δομικά προϊόντα και τεχνολογίες εφαρμόσιμες και σε επίπεδο βιομηχανίας, επιδιώκεται η διαδικασία παρασκευής των προϊόντων χαμηλής σκόνης να είναι εύκολα

υλοποιήσιμη από κάθε τυπική μονάδα παραγωγής προϊόντων με βάση το τσιμέντο. Με άλλα λόγια, ο υφιστάμενος τυπικός εξοπλισμός μίας τσιμεντοβιομηχανίας να επαρκεί για την παρασκευή των προαναφερθέντων προϊόντων ή να απαιτούνται μικρές τροποποιήσεις του. Κρίσιμης σημασίας για την αξιολόγηση των προσθέτων είναι η επίδρασή τους στις απαιτούμενες ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Συγκεκριμένα, είναι εξαιρετικά σημαντικό τα πρόσθετα να μην προκαλούν μείωση της απόδοσης του προϊόντος αναφοράς ή ακόμη καλύτερα να τη βελτιώνουν. Τέλος, το κόστος των προσθέτων πρέπει να κινείται σε λογικά πλαίσια έτσι ώστε η χρήση τους να αποτελεί μία οικονομικά αποδεκτή λύση για τις βιομηχανίες δομικών προϊόντων.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία δομείται σε τρία μέρη και αποτελείται συνολικά από εφτά κεφάλαια. Κάθε κεφάλαιο της εργασίας πραγματεύεται ξεχωριστό αντικείμενο και για τη διευκόλυνση του αναγνώστη επιλέχθηκε να διαθέτουν ξεχωριστή μεταξύ τους βιβλιογραφία.

Το ***ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ*** της εργασίας απαρτίζεται από τα τρία πρώτα κεφάλαια και συνοψίζει το υφιστάμενο θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με το τεχνολογικό πρόβλημα και τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Αναλυτικότερα, στο **πρώτο κεφάλαιο** συνοψίστηκαν τόσο το πρόβλημα όσο και οι στόχοι της παρούσας εργασίας. Ουσιαστικά, πρόκειται για την εισαγωγή της εργασίας, όπου δηλώθηκαν τα καινοτόμα στοιχεία της, καθώς και η ανάπτυξη της δομής της. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναφέρεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατηγοριοποίηση, τη φυσική δομή, τη χημική σύνθεση και τις μεθόδους παραγωγής των κυτταρινούχων ινών. Στο ίδιο κεφάλαιο, αναφέρονται οι τυπικές μηχανικές ιδιότητές τους, καθώς και οι ερευνητικές προσπάθειες ενίσχυσης υλικών με βάση το τσιμέντο με ίνες κυτταρίνης. Το **τρίτο κεφάλαιο** αποτελεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των πρόσφατων ερευνητικών μελετών για την ανάπτυξη δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης. Περιλαμβάνει κυρίως ευρεσιτεχνίες, στις οποίες προτείνονται συγκεκριμένα πρόσθετα για τη μείωση της αιωρούμενης σκόνης των δομικών υλικών, περιγράφονται οι μέθοδοι εφαρμογής των προσθέτων στα δομικά υλικά, καθώς και ο τρόπος μέτρησης της αιωρούμενης σκόνης. Από τη βιβλιογραφική αυτή ανασκόπηση, δεν εντοπίστηκε κάποια δημοσιευμένη μελέτη στην οποία να χρησιμοποιούνται οι ίνες κυτταρίνης ως

πρόσθετα μείωσης της αιωρούμενης σκόνης των δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των ινών κυτταρίνης ως πρόσθετα μείωσης της αιωρούμενης σκόνης των δομικών υλικών αποτελεί στοιχείο καινοτομίας της παρούσας εργασίας.

Το ***ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ*** της εργασίας απαρτίζεται από τρία κεφάλαια και αποτελεί την πειραματική συμβολή της παρούσας εργασίας στη δημιουργία νέας γνώσης σχετικά με τα φιλικά προς το περιβάλλον δομικά υλικά με βάση το τσιμέντο. Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αρχικά παρατίθενται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία καθώς και οι ιδιότητές τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν και οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Κάθε πειραματική διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά για τη διευκόλυνση του αναγνώστη. Στο **πέμπτο κεφάλαιο,** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών της κόλλας πλακιδίων με τα επιλεχθέντα πρόσθετα. Εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των προσθέτων στις ιδιότητες της νωπής κόλλας πλακιδίων, καθώς και στη μηχανική συμπεριφορά της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκόνης της κόλλας πλακιδίων με τα επιλεχθέντα πρόσθετα. Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν το βέλτιστο πρόσθετο ως προς τη μείωση της σκόνης της κόλλας πλακιδίων. Εκτός από την αποτελεσματικότητά του ως προς τη μείωση της σκόνης, η επιλογή του βέλτιστου πρόσθετου πραγματοποιήθηκε και βάσει της επίδρασής του στις ιδιότητες της συμβατικής κόλλας πλακιδίων, καθώς και του οικονομικού κόστους του. Στο **έκτο κεφάλαιο,** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών του τσιμέντου με τα επιλεχθέντα πρόσθετα. Εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των προσθέτων στις ιδιότητες του νωπού τσιμεντοπολτού, καθώς και στη μηχανική συμπεριφορά του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκόνης του τσιμέντου με τα επιλεχθέντα πρόσθετα. Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν το βέλτιστο πρόσθετο ως προς τη μείωση της σκόνης του τσιμέντου. Εκτός από την αποτελεσματικότητά του ως προς τη μείωση της σκόνης, η επιλογή του βέλτιστου πρόσθετου πραγματοποιήθηκε και βάσει της επίδρασής του στις ιδιότητες του τσιμέντου.

Στο ***ΤΡΙΤΟ ΜΕΡΟΣ*** της εργασίας, το οποίο αποτελείται από το **έβδομο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας που διεξήχθη.

Βιβλιογραφία

1.1. Potgieter, J.H. (2012). An Overview of Cement production: How "green" and sustainable is the industry?. *Environmental Management and Sustainable Development, 1* (2), 14-37.

1.2. Fatima, S.K., Prabhavathi, P.A., Padmavathi, P., & Reddy, P.P. (2001). Analysis of chromosomal aberrations in men occupationally exposed to cement dust. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 490* (2), 179-186.

1.3. Mwaiselage, J., Moen, B., & Bråtveit, M. (2006). Acute respiratory health effects among cement factory workers in Tanzania: an evaluation of a simple health surveillance tool. *International archives of occupational and environmental health, 79* (1), 49-56.

1.4. Meo, S.A. (2004). Health hazards of cement dust. *Saudi Medical Journal, 25* (9), 1153-1159.

1.5. Fleming, A.J, D'Alonzo, A., & Zapp, J.A. (1960) *Modern Occupational Medicine*, 2nd Edition, Lea & Febiger.

1.6. Niepolomski, W., Sosnierz, M., & Wieozorek, M. (1967). Obraz patomorfologiezny narzadu odd echowego W doswiad-ozalnej pylicy cementowej U szezurow. *Medycynapracy, 18*, 369.

1.7. Kalačić, I. (1973). Chronic non specific lung disease in cement workers. *Archives of Environmental Health: An International Journal, 26* (2), 78-83.

1.8. Malceva, L.M., & Tatanov, J.U.A. (1974). Professional'nye zabolevanija organov dyhanija V uslovijah sovremennogo cementogo proizvodstva. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniya, 3*, 14.

1.9. Dudkiewicz, J., Kamiński, K., & Rybczyńska, A. (1983). Preventive gynecological examinations of women employed in the cement industry. *Medycyna Pracy, 34* (1), 89-94.

1.10. McDowall, M.E. (1984). A mortality study of cement workers. *British Journal of Industrial Medicine, 41* (2), 179-182.

1.11. Rafnsson, V., & Jóhannesdóttir, S.G. (1986). Mortality among masons in Iceland. *British Journal of Industrial Medicine, 43* (8), 522-525.

1.12. Olsen, J., & Sabroe, S. (1984). Occupational causes of laryngeal cancer. *Journal of Epidemiology and Community Health, 38* (2), 117-121.

1.13. Maier, H., Dietz, A., Zielinski, D., Junemann, K.H., & Helle, W.D. (1990). Risikofaktoren bei Plattenepithelkarzinomen der Mundhöhle, des Oropharynx, des Hypopharynx und des Larynx. *Deutsche Medizinische Wochenschrift, 115* (22), 843-850.

1.14. Albin, M., Jakobsson, K., Attewell, R., Johansson, L., & Wellinder, H. (1990). Mortality and cancer morbidity in cohorts of asbestos cement workers and referents. *British Journal of Industrial Medicine, 47* (9), 602-610.
1.15. Jakobsson, K., Attewell, R., Hultgren, B., & Sjoland, K. (1990). Gastrointestinal cancer among cement workers-a case referent study. *International Archives of Occupational and Environmental Health, 62* (4), 337-340.
1.16. Jakobsson, K., Horstmann, V., & Welinder, H. (1993). Mortality and cancer morbidity among cement workers. *British Journal of Industrial Medicine, 50* (3), 264-272.
1.17. Garruto, R.M., Fukatsu, R., Yanagihara, R., Gajdusek, D.C., Hook, G., & Fiori, C.E. (1984). Imaging of calcium and aluminum in neurofibrillary tangle-bearing neurons in parkinsonism-dementia of Guam. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 81* (6), 1875-1879.
1.18. Roy, A.K., Talukder, G., & Sharma, A. (1990). Effects of aluminium sulphate on human leukocyte chromosomes in vitro. *Mutation Research Letters, 244* (2), 179-183.
1.19. Oghiso, Y., Yamada, Y., & Shibata, Y. (1992). Effects of instilled fibrogenic particles on the clonal growth of murine pulmonary alveolar macrophages. *Environmental Health Perspectives, 97*, 159-161.
1.20. Koren, H.S., Joyce, M., Devlin, R.B., Becker, S., Driscoll, K., & Madden, M.C. (1992). Modulation of eicosanoid production by human alveolar macrophages exposed to silica in vitro. *Environmental Health Perspectives, 97*, 77-83.
1.21. Einbrodt, H.J., & Hentschel, D. (1966). Tierexperimentelle Untersuchungen mit Arbeitsplatzstauben aus cinem Huttenzementwerk. *International Archives of für Gewerbepathologic und Gewerbehygiene, 22*, 354-366.
1.22. Hublet, P. (1968). Enquete relative a resque de pneumoconiose dans la fabrication des liments de construction. *Archieves Belges de Medecine sociale, Hygiene, Medecine du Travail et Medecine Legale, 26*, 417-430.
1.23. Parkes, W.R. (1994). *Occupational Lung Disorders*, Butterworths-Heinemann., London.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
Ίνες φυσικής κυτταρίνης

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η ανησυχία για τα περιβαλλοντικά ζητήματα οδήγησε στη διεξαγωγή εκτεταμένης έρευνας σχετικά με την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει δοθεί στην χρήση ινών, οι οποίες προέρχονται από ανανεώσιμες φυτικές πηγές, στα σύνθετα υλικά [2.1-2.4]. Οι ιδιαίτερες μηχανικές και φυσικές ιδιότητές τους καθώς και τα περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης τους καθιστούν τις ίνες κυτταρίνης ιδανική εναλλακτική λύση για την ενίσχυση σύνθετων υλικών.

Οι φυτικές ίνες ή ίνες κυτταρίνης παρουσιάζουν μία σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η ευρεία διαθεσιμότητά τους σε σχετικά χαμηλό κόστος, η ανανεωσιμότητα της πρώτης ύλης τους, η ικανότητά τους να ανακυκλώνονται, η βιοδιασπασιμότητά τους, η ακίνδυνη φύση τους και το μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα. Όσο αφορά στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, οι ίνες κυτταρίνης χαρακτηρίζονται από χαμηλό ειδικό βάρος, ισορροπημένη ακαμψία, ανθεκτικότητα και αντοχή [2.5-2.6].

Σχήμα 2.1 Φυτικές ίνες σε μορφή: (α) νήματος, (β) συμπλέγματος και (γ) πολτού [2.7].

Οι φυτικές ίνες απαντώνται σε ποικίλες μορφολογίες και διαφέρουν ως προς τη διάμετρο, το λόγο διαστάσεων, το μήκος και την επιφανειακή τραχύτητα, ενώ βρίσκονται σε μορφή συνεχούς νήματος (strands), συμπλέγματος ασυνεχών ινών (staple) ή πολτού (pulp). Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές φυτικών ινών. Επιπλέον, η επιφάνεια των εν λόγω ινών μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να επιτευχθεί ένας ακόμη πιο υδρόφιλος ή υδρόφοβος χαρακτήρας [2.4].

Μολονότι τα ψαθυρά δομικά υλικά ενισχύονταν με φυτικές ίνες από την αρχαιότητα, η έννοια της ενίσχυσης των υλικών με βάση το τσιμέντο με φυτικές ίνες αναπτύχθηκε το 1940, όταν οι ίνες αυτές αξιολογήθηκαν ως δυνητικά υποκατάστατα των ινών αμιάντου [2.8]. Έκτοτε, σημαντική ερευνητική προσπάθεια έχει πραγματοποιηθεί για την εφαρμογή των φυτικών ινών ως ενισχυτικό υλικό στην παραγωγή δομικών στοιχείων χαμηλού κόστους. Στις μέρες μας, η ανάγκη για βιώσιμα και ενεργειακά αποδοτικά δομικά υλικά έχει προσανατολίσει την έρευνα στα εναλλακτικά υλικά για την παραγωγή φιλικών προς το περιβάλλον δομικών προϊόντων. Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με φυτικές ίνες κατά βάση σχετίζονται με την κατασκευή υλικών λεπτού τοιχώματος, όπως προϊόντα λεπτού φύλλου για χωρίσματα, κτιριακά κελύφη ή οροφές, κεραμίδια στεγών, και γενικώς προ-κατασκευασμένα στοιχεία [2.9].

Τα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με φυτικές ίνες παρουσιάζουν βελτιωμένη ανθεκτικότητα, ολκιμότητα, καμπτική ικανότητα και αντίσταση στις ρωγμές συγκριτικά με τα μη ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο. Ωστόσο, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της ενίσχυσης με φυτικές ίνες είναι η συμπεριφορά του

σύνθετου υλικού μετά τη ρηγμάτωσή του. Συγκεκριμένα, οι ίνες γεφυρώνουν τις ρωγμές της μήτρας και διευκολύνουν τη μεταφορά του μηχανικού φορτίου, καθυστερώντας τη συνένωση των ρωγμών. Η αντίσταση στην εξάπλωση των ρωγμών χάρις στον μηχανισμό αλληλεπίδρασης των ινών με τη μήτρα καθιστούν τα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με φυτικές ίνες ιδανικά υλικά για τον κατασκευαστικό τομέα. Οι ίνες κυτταρίνης παρέχουν επαρκή ακαμψία, αντοχή και συγκολλητική ικανότητα στην τσιμεντοειδή μήτρα με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αντοχής της σε κάμψη, της ανθεκτικότητάς της και της αντίστασής της σε κρούση [2.10-2.12]. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ινών κυτταρίνης είναι η δυνατότητά τους να μειώνουν την ελεύθερη πλαστική συρρίκνωση [2.13] και τη θερμική αγωγιμότητα του σύνθετου υλικού που ενισχύουν [2.14]. Οι εν λόγω ίνες βελτιώνουν την ακουστική απόδοση του σύνθετου υλικού μέσω της αύξησης της απορρόφησης του ήχου, την ειδική απόσβεσή του και την πυκνότητά του [2.15]. Παρόλα τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, επί του παρόντος, η βιομηχανική παραγωγή σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με φυτικές ίνες περιορίζεται από την ανθεκτικότητα των υλικών αυτών. Το πρόβλημα της ανθεκτικότητας του σύνθετου υλικού σχετίζεται με τη θραύση των ινών και την εκρίζωσή (pull-out) τους από τη μήτρα. Η επιρρέπεια των ινών σε θραύση και εκρίζωση οφείλεται στην εξασθένησή τους από την αλκαλική προσβολή, την ανοργανοποίησή τους λόγω της εναπόθεσης των προϊόντων της ενυδάτωσης στις κοιλότητες των ινών, καθώς και τη μεταβολή του όγκου τους λόγω της υψηλής απορρόφησης νερού από τις ίνες [2.16-2.19]. Ως εκ τούτου, το σύνθετο υλικό παρουσιάζει μειωμένη αντοχή και ανθεκτικότητα μετά τη ρηγμάτωση.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα είδη των φυτικών ινών, η χημική σύσταση και η φυσική δομή τους, οι μέθοδοι παραγωγής τους, καθώς και οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται μία ανασκόπηση των πρόσφατων μελετών της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με ίνες κυτταρίνης.

2.2 Κατηγοριοποίηση ινών κυτταρίνης

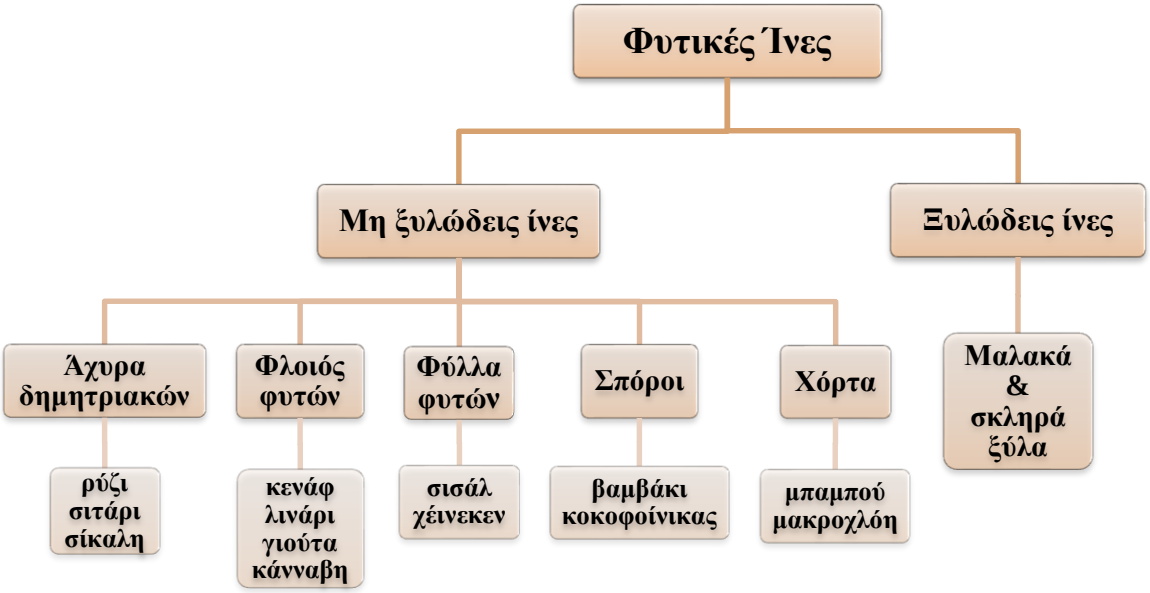
Στη φύση, υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία από φυτικές ίνες, οι οποίες ανάλογα με την προέλευσή τους, ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες: (α) μη ξυλώδεις ίνες (non-wood fibers) και (β) τις ίνες ξύλου (wood fibers). Οι ίνες ξύλου είναι γνωστές και ως

λιγνοκυτταρινικές ίνες, διότι η περιεκτικότητά τους σε λιγνίνη είναι υψηλότερη συγκριτικά με τις μη ξυλώδεις ίνες [2.2].

Οι μη ξυλώδεις ίνες, βάσει του μέρους του φυτού που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή τους, ταξινομούνται σε πέντε βασικές ομάδες: (α) ίνες από άχυρα δημητριακών, όπως το ρύζι, το σιτάρι, η σίκαλη, κ.ά., (β) ίνες από τον εσωτερικό φλοιό του βλαστού των φυτών, όπως η γιούτα, το λινάρι, η κάνναβη, το ραμί, το κενάφ, κ.ά., (γ) ίνες από φύλλα φυτών, όπως η αγαύη η σισαλανή (sisal), το χέινεκεν, κ.ά., (δ) ίνες από σπόρους βαμβακιού, κοκοφοίνικα, κ.ά., και (ε) ίνες από χορτάρια, όπως το χόρτο μακροχλόης (esparto), το μπαμπού, κ.ά. [2.2, 2.20].

Μολαταύτα, οι βασικές χημικές δομές των μη ξυλωδών ινών, ανεξάρτητα από την κατηγορία στην οποία ανήκουν, είναι παρόμοιες όσο αφορά στα συστατικά τους στοιχεία [2.21]. Η πλειονότητα των φυσικών ινών, οι οποίες εξάγονται από τα φύλλα, το στέλεχος και τους σπόρους των φυτών, πράγματι αξιοποιείται για την ενίσχυση σύνθετων υλικών από τη βιομηχανία. Συγκεκριμένα, οι ίνες του εσωτερικού φλοιού των φυτών, όπως το λινάρι, η γιούτα και η κάνναβη, χαρακτηρίζονται ως οι πλέον κατάλληλες φυτικές ίνες για τη βελτίωση της εφελκυστικής και καμπτικής αντοχής, καθώς και του μέτρου ελαστικότητας των σύνθετων υλικών. Αντίθετα, οι πιο χονδροειδής ίνες, όπως οι ίνες από σιζάλ και κοκοφοίνικα, ενδείκνυνται για την αύξηση της σκληρότητας των υλικών που ενισχύουν. Επιπλέον, άλλα είδη ινών και πληρωτικών υλικών, τα οποία αποτελούν προϊόντα επεξεργασίας του ξύλου, του κοκοφοίνικα, της αγαύης, της κάνναβης, της γιούτας, των σπόρων ρυζιού και καρυδιού, καθώς και των άχυρων δημητριακών, χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της σταθερότητας των διαστάσεων και της ακαμψίας των σύνθετων υλικών [2.2].

Οι ίνες ξύλου διακρίνονται σε: (α) ίνες μαλακού ξύλου (softwoods), οι οποίες λαμβάνονται από αειθαλή ή κωνοφόρα δένδρα ή από γυμνοσπέρματα όπως το έλατο, η ερυθρελάτη, το κέδρος, το κυπαρίσσι, το πεύκο, η σεκόια κ.ά., και (β) ίνες σκληρού ξύλου (hardwoods), οι οποίες λαμβάνονται από πλατύφυλλα ή φυλλοβόλα δένδρα ή αγγειοσπέρματα όπως η βελανιδιά, ο ευκάλυπτος, η καρυδιά, η λεύκα, η οξιά, η σημύδα, το σφενδάμι, η φλαμουριά, η φτελιά, κ.ά. Σημειώνεται ότι οι όροι σκληρό και μαλακό ξύλο δεν χαρακτηρίζουν απόλυτα την σκληρότητα του ξύλου, αλλά καθιερώθηκαν λόγω της υψηλότερης πυκνότητας των σκληρών ξύλων έναντι των μαλακών [2.22]. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των φυτικών ινών βάσει της πηγής προέλευσης τους.



Σχήμα 2.2 Ταξινόμηση των φυτικών ινών με βάση την προέλευσή τους [2.2].

Εκτός από την προέλευσή τους, οι ίνες κυτταρίνης ως υλικά ενίσχυσης ταξινομούνται και βάσει της μορφής τους (Σχήμα 2.1). Συγκεκριμένα, οι ίνες κυτταρίνης απαντώνται ως: (α) νήματα, δηλαδή ίνες μεγάλου μήκους το οποίο κυμαίνεται από 20 έως 100 cm, (β) ασυνεχείς ίνες, δηλαδή ίνες μικρού μήκους οι οποίες πιθανώς να κλωστοποιούνται σε νήματα, ή (γ) πολτού, δηλαδή ίνες εξαιρετικά μικρού μήκους το οποίο κυμαίνεται από 1 έως 10 mm, ενώ ο διαχωρισμός τους απαιτεί διασπορά των ινών σε νερό [2.7].

Τα νήματα ινών ή οι ασυνεχείς ίνες λαμβάνονται από καλλιεργούμενα ή άγρια φυτά είτε άμεσα είτε μέσω διαδικασιών διαχωρισμού. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι ίνες κυτταρίνης οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως από τη βιομηχανία υφασμάτων και χαρακτηρίζονται από υψηλό λόγο διαστάσεων (μορφής) και χαμηλή γραμμική μάζα.

Οι πολτοί λαμβάνονται κυρίως από πηγές ξύλου με μία διαδικασία πολτοποίησης. Ανάλογα με την εφαρμοζόμενη επεξεργασία για την καταστροφή ή εξασθένηση των δεσμών μεταξύ των ινών, η διαδικασία πολτοποίησης μπορεί να είναι μηχανική, θερμική, χημική ή συνδυασμός περισσότερων διαδικασιών. Πολτοί λαμβάνονται και από άλλες πηγές εκτός του ξύλου [2.22].

2.3 Χημική σύνθεση ινών κυτταρίνης

Οι φυτικές ίνες συντίθενται κυρίως από πολυμερή με βάση τη ζάχαρη και περιλαμβάνουν τρεις τύπους χημικών ουσιών: (α) την κυτταρίνη, (β) την ημικυταρρίνη και (γ) τη λιγνίνη [2.23-2.24]. Για το λόγο αυτό, οι φυτικές ίνες αναφέρονται και ως κυτταρινικές ή λιγνοκυτταρινικές ίνες. Η κυτταρίνη αποτελεί σχεδόν το ήμισυ των χημικών ουσιών των ινών κυτταρίνης, ενώ η ημικυταρρίνη και η λιγνίνη το ένα τέταρτο αυτών. Πρόσθετα συστατικά όπως η πηκτίνη και το κερί συχνά απαντώνται στη χημική δομή των ινών [2.25]. Η αναλογία των συστατικών των ινών κυτταρίνης εξαρτάται από την ηλικία και την πηγή προέλευσης των ινών, καθώς και από τις συνθήκες εκχύλισης των ινών από το φυτό προέλευσής τους. Η χημική σύνθεση των ινών ποικίλει από φυτό σε φυτό, ενώ διαφοροποιείται και μεταξύ των τμημάτων του ίδιου φυτού. Η χημική σύνθεση των πιο χαρακτηριστικών ινών κυτταρίνης παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Χημική σύνθεση χαρακτηριστικών φυτικών ινών [2.2].

Ίνα	**Λατινική ονομασία**	**Κυτταρίνη (%κ.β.)**	**Ημικυτταρίνη (%κ.β.)**	**Λιγνίνη (%κ.β.)**	**Πηκτίνη (%κ.β.)**	**Αναφορά**
Flax	*Linum usitatissimum*	60-81	14-18.6	2-3	1.8-2.3	2.26-2.29
Jute	*Corchorus capsularis*	51-72	12-20.4	5-13	0.2	2.26-2.28
Abaca	*Musa textilis*	60.8-64	21	12	0.8	2.30-2.31
Sisal	*Agave sisalana Perrine*	43-88	10-13	4-12	0.8-2	2.28-2.29, 2.31-2.32
Kenaf	*Hibiscus Cannabinus*	36	21	18	2	2.33
Ramie	*Boehmeria nivea Gaud*	68.6-76	13.1-15.0	0.6-1	1.9-2	2.28-2.29
Hemp	*Cannabis sativa L.*	70-78	17.9-22	3.7-5	0.9	2.28
Cotton	*Gossypium spp.(hirsutum)*	82.7-92	2-5.7	0.5-1	5.7	2.27, 2.29, 2.33
Coir	*Cocos nucifera L.*	43	0.3	45	4.0	2.26, 2.28
Banana	*Musa acuminata L.*	60-65	6-19	5-10	3-5	2.26-2.27
Henequén	*Agava fourcroydes Lemaire*	60-78	4-28	8-13	3-4	2.33
Bagasse	*Saccharum officinarum L.*	40	30	20	10	2.33
Pineapple	*Acanas Comosus*	80-81	16-19	12	2-2.5	2.26
Wood	-	45-50	23	27	-	2.26

2.3.1 Κυτταρίνη

Η παρουσία της κυτταρίνης ως ένα κοινό υλικό στα τοιχώματα των φυτικών κυττάρων ανακαλύφθηκε από τον Anselm Payen το 1838 [2.34]. Η κυτταρίνη είναι ένα γραμμικό πολυμερές, το οποίο αποτελείται από μονάδες D-γλυκοπυρανόζης συνδεόμενες μεταξύ τους με 1,4-β-γλυκοζιτικούς δεσμούς. Οι δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των διάφορων μακρομορίων προσδίδουν στην κυτταρίνη ποικίλες ενδιαφέρουσες φυσικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς της να απαντάται με κρυσταλλική δομή. Ως εκ τούτου, η μορφή της κυτταρίνης χαρακτηρίζεται ως ημικρυσταλλική στο βαθμό που περιέχει τόσο περιοχές υψηλής κρυσταλλικότητας όσο και άμορφες περιοχές. Η κρυσταλλική κυτταρίνη εμφανίζει έξι διαφορετικές πολυμορφές, ενώ παρουσιάζει δυνατότητα μετατροπής από τη μία μορφή στην άλλη. Η κυτταρίνη κρυσταλλικής μορφής Ι, ή αλλιώς η φυσική κυτταρίνη, περιλαμβάνει επίσης δύο αλλομορφές, την κυτταρίνη Ια και Ιβ [2.35]. Η αναλογία αυτών των αλλομορφών ποικίλει από φυτό σε φυτό. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι σε ίνες του στελέχους φυτών όπως το λινάρι, η γιούτα ή η κάνναβη, κυριαρχεί η κυτταρίνη Ιβ [2.36-2.37]. Οι κρυσταλλικές περιοχές της κυτταρίνης ονομάζονται κρυσταλλίτες. Ο νηματοειδής φορέας που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των συστατικών αυτών ονομάζεται μικροϊνίδιο (microfibril) και αποτελεί τη βασική δομική μονάδα του φυτικού κυτταρικού τοιχώματος. Τα μικροϊνίδια αυτά συντίθενται από αρκετές χιλιάδες αλυσίδες κυτταρίνης. Η διάμετρός τους μπορεί να μετρηθεί με τεχνικές που περιλαμβάνουν περίθλαση ακτίνων Χ και κυμαίνεται από 5 και έως 30 nm, ανάλογα με το είδος των ινών [2.38-2.41]. Στη διαμήκη κατεύθυνση, το μέτρο ελαστικότητας των μικροϊνιδίων είναι περίπου 137 GPa [2.42]. Στα χαρακτηριστικά αυτά των μικροϊνιδίων αποδίδονται οι καλές μηχανικές ιδιότητες των ινών κυτταρίνης. Στις περισσότερες ίνες κυτταρίνης, τα μικροϊνίδια προσανατολίζονται υπό μία γωνία ως προς τον κύριο άξονα των ινών, η οποία ονομάζεται γωνία μικροϊνιδίου (microfibril angle). Η γωνία μικροϊνιδίου έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της ίνας κυτταρίνης. Σημειώνεται ότι οι μικρές γωνίες προσδίδουν καλύτερες ιδιότητες στην ίνα [2.43].

2.3.2 Ημικυτταρρίνη

Μία άλλη μορφή πολυσακχαριτών που απαντάται στη φύση είναι η ημικυτταρίνη (hemicellulose). Οι δομικές μονάδες της ημικυτταρίνης είναι κυρίως σάκχαρα με πέντε

άτομα άνθρακα (πεντόζες) και με έξι άτομα άνθρακα (εξόζες). Η ημικυτταρίνη αποτελείται από μικρού μήκους, άκρως διακλαδισμένες αλυσίδες σακχάρων [2.44]. Η έντονα διακλαδισμένη δομή της καθιστά την ημικυτταρίνη άμορφη και σχετικά ευάλωτη στην υδρόλυσή της στα επιμέρους συστατικά της. Σε αντίθεση με την κυτταρίνη, η οποία είναι κρυσταλλική, ισχυρή και ανθεκτική στην υδρόλυση, η ημικυτταρίνη έχει μία τυχαία, άμορφη δομή χαμηλής αντοχής. Η ημικυτταρίνη παραμένει συνδεδεμένη με την κυτταρίνη και μετά την αφαίρεση της λιγνίνης. Η ημικυτταρίνη αξιοποιείται γενικά ως παράγοντας ζελατινοποίησης [2.23-2.24].

2.2.3 Λιγνίνη

Η λιγνίνη αποτελεί το συστατικό των κυτταρικών τοιχωμάτων με την πιο έντονα διακλαδισμένη και άμορφη δομή. Η δομή της λιγνίνης αποτελείται από μονάδες φαινυλοπροπανίου, οργανωμένων σε τρισδιάστατη δομή [2.23-2.24]. Η λιγνίνη παίζει σημαντικό ρόλο στην προστασία της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης από τις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία. Επιπλέον, η λιγνίνη μαζί με την κυτταρίνη λειτουργούν ως συνδετικό υλικό για την ενσωμάτωση των ινών κυτταρίνης. Για το λόγο αυτό, η λιγνίνη με την ημικυτταρίνη χαρακτηρίζονται ως το «τσιμέντο» της φύσης.

2.3 Φυσική δομή ινών κυτταρίνης

Η φυσική δομή των φυτικών ινών είναι εξαιρετικά πολύπλοκη λόγω της οργάνωσής της σε διαφορετικής κλίμακας μήκους στοιχεία και της παρουσίας διάφορων υλικών σε διάφορες αναλογίες. Οι φυτικές ίνες μορφώνονται από δεσμίδες μεμονωμένων φυτικών κυττάρων. Σε επίπεδο μικροσκοπικής κλίμακας, η ίνα κυτταρίνης δομείται από: (α) το πρωτεύον κυτταρικό τοίχωμα, (β) τα δευτερεύοντα κυτταρικά τοιχώματα και (γ) ένα μικρό κανάλι στο μέσον της (αυλός). Τα κυτταρικά τοιχώματα διατάσσονται ως ομόκεντροι κύλινδροι με τον αυλό να βρίσκεται στο κέντρο τους. Ο αυλός είναι υπεύθυνος για την πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών από την ίνα κυτταρίνης [2.45]. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μία σχηματική αναπαράσταση της φυσικής δομής των ινών κυτταρίνης.

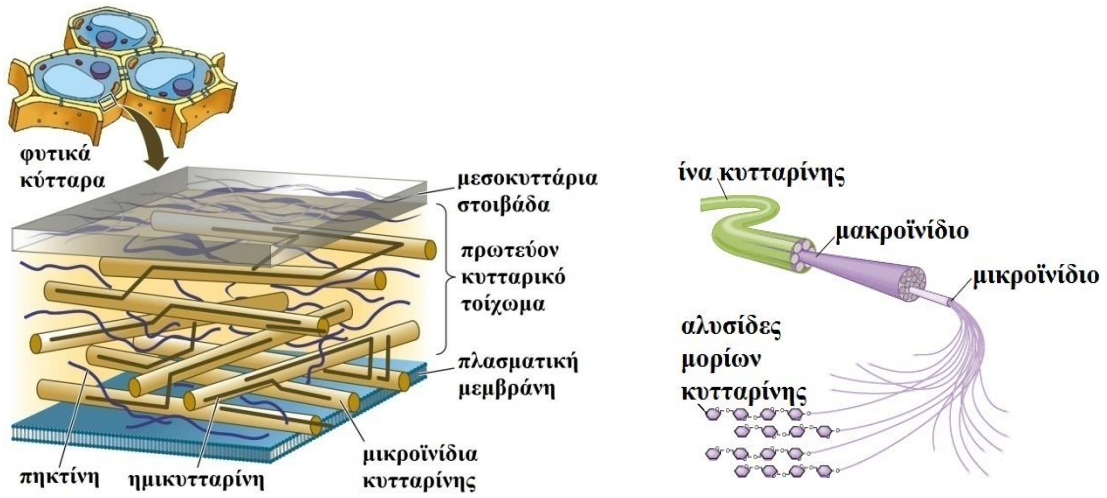
Το πρωτεύον κυτταρικό τοίχωμα δομείται από μία αποδιοργανωμένη διάταξη μικροϊνιδίων κυτταρίνης ενσωματωμένων σε μία μήτρα πηκτίνης, ημικυτταρίνης, λιγνίνης και πρωτεΐνών. Τα δευτερεύοντα κυτταρικά τοιχώματα (S_1, S_2, S_3) αποτελούνται από μικροϊνίδια κυτταρίνης υψηλής κρυσταλλικότητας με ποικίλο προσανατολισμό ως προς

τον διαμήκη άξονα της ίνας. Τα μικροϊνίδια συγκρατούνται στο εσωτερικό των δευτερευόντων τοιχωμάτων από μία άμορφη μάζα από λιγνίνη και ημικυτταρίνη, οι οποίες δρουν ως συγκολλητικές ουσίες. Σημειώνεται ότι το μεσαίο δευτερεύον στρώμα (S_2), το οποίο σχηματίζεται από μία ποσότητα μικροϊνιδίων κυτταρίνης σπειροειδώς περιελιγμένων εντός της μήτρας από άμορφη ημικυτταρίνη και λιγνίνη, καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες των ινών κυτταρίνης [2.45-2.48]. Η μεσοκυττάρια στοιβάδα, η οποία βρίσκεται στο εξωτερικό στρώμα του φυτικού κυττάρου, αποτελείται κυρίως από πηκτίνη, η οποία δρα ως συγκολλητική ουσία μεταξύ των μεμονωμένων ινών κυτταρίνης, με αποτέλεσμα την συγκρότηση δεσμίδων ινών [2.47]. Η ποσότητα της ημικυτταρίνης είναι περίπου η ίδια σε κάθε τοίχωμα, διότι οι στοιβάδες πρέπει να διαστέλλονται και να συστέλλονται ταυτόχρονα ώστε να μην αναπτύσσονται τάσεις μεταξύ τους λόγω των μεταβολών της περιεχόμενης υγρασίας. Η περιεκτικότητα του κάθε στρώματος σε κυτταρίνη αυξάνεται σταθερά από το εξωτερικό πρωτεύον στρώμα του κυτταρικού τοιχώματος προς τα εσώτατα δευτερεύοντα στρώματα. Αντίθετα, η περιεχόμενη λιγνίνη μειώνεται από την εξωτερική προς την εσωτερική στοιβάδα του κυτταρικού τοιχώματος [2.2].

Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση της δομής των φυτικών ινών [2.45, 2.47].

Ανάλογα με την κλίμακα παρατήρησης, μία ίνα κυτταρίνης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα σύνθετο υλικό ενισχυμένο με μακροϊνίδια, μικροϊνίδια και στοιχειώδη ινίδια (Σχήμα 2.4$^{\beta}$). Τα μακροϊνίδια, τα οποία είναι ορατά με οπτικό μικροσκόπιο, έχουν διάμετρο της κλίμακας των χιλιοστών και αποτελούν ένα συγκρότημα μακροϊνιδίων. Τα μικροϊνίδια, τα οποία έχουν διάμετρο στη νανοκλίμακα και είναι ορατά μόνο με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, αντιπροσωπεύουν την τυπική κυτταρική μονάδα του κυτταρικού τοιχώματος και αποτελούνται από επιμέρους

στοιχειώδη ινίδια, τα μικκύλια. Κάθε μικκύλιο αποτελείται από 50 έως 100 μόρια κυτταρίνης. Στη φύση, τα κυτταρικά τοιχώματα είναι σε κατάσταση διόγκωσης λόγω της συγκράτησης νερού στις περιοχές μεταξύ των μικκυλίων και των μικροϊνιδίων [2.45].



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση (α) της δομής του πρωτεύοντος κυτταρικού τοιχώματος [2.49] και (β) των δομικών στοιχείων μίας ίνας κυτταρίνης.

2.4 Παραγωγή ινών κυτταρίνης

Η παραγωγή των ινών κυτταρίνης περιλαμβάνει διάφορα στάδια, τα οποία διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την πηγή προέλευσης των ινών και τη χρήση για την οποία προορίζονται οι ίνες. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μόνο μία απλή περιγραφή των κυριότερων μεθόδων εκχύλισης των ινών κυτταρίνης.

Οι περισσότερες ίνες κυτταρίνης συγκρατούνται στα παρακείμενα κύτταρα εντός του βλαστού των φυτών μέσω της πηκτίνης. Η εκχύλιση των ινών πραγματοποιείται με διαδικασίες διαχωρισμού (retting processes). Η διαδικασία διαχωρισμού είναι μία χημική διαδικασία κατά την οποία διασπώνται οι χημικοί δεσμοί που συγκρατούν τον βλαστό ενιαίο και απελευθερώνονται οι ίνες από τον ξυλώδη πυρήνα του βλαστού.

Μετά τη συγκομιδή, οι βλαστοί συνήθως διατηρούνται είτε στον αγρό είτε σε νερό για δύο έως τρεις βδομάδες, κατά τη διάρκεια των οποίων τα συστατικά της πηκτίνης που δεσμεύουν την ίνα με άλλους φυτικούς ιστούς χαλαρώνουν και αποσυντίθενται από τους μικροοργανισμούς. Η ποιότητα της ίνας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες και τη διάρκεια της διαδικασίας διαχωρισμού. Οι μέθοδοι διαχωρισμού των ινών είναι πέντε: (α) διαχωρισμός δρόσου (dew retting), (β) διαχωρισμός νερού (water retting), (γ)

διαχωρισμός ενζύμων (enzyme retting), (δ) χημικός διαχωρισμός (chemical retting) και (ε) μηχανικός διαχωρισμός (mechanical retting).

2.4.1 Διαχωρισμός δρόσου

Κατά τη διαδικασία του διαχωρισμού δρόσου, τα στελέχη των φυτών κόβονται ή εκριζώνονται και παραμένουν απλωμένα στον αγρό ώστε να σαπίσουν. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον εποικισμό των αυτοχθόνων μυκήτων του εδάφους στον βλαστό και τη διάσπαση της πηκτίνης και της ημικυτταρίνης. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ευκολία απομάκρυνσης της πηκτίνης από τα βακτήρια. Μολαταύτα, η μέθοδος διαχωρισμού δρόσου παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα: (α) παραγωγή ινών μεγαλύτερου πάχους και κατώτερης ποιότητας συγκριτικά με τις ίνες από διαχωρισμό σε νερό, (β) παραγωγή ινών με χαρακτηριστικά χαμηλής αντοχής και συνοχής, (γ) εξάρτηση από συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από τις κατάλληλες εναλλαγές υγρασίας-ξηρασίας, (δ) κατάληψη γεωργικών πεδίων για αρκετές εβδομάδες και (ε) παραγωγή μολυσμένων με χώμα ινών [2.50-2.51].

2.4.2 Διαχωρισμός νερού

Ο διαχωρισμός των ινών στο νερό περιλαμβάνει την εμβάπτιση των στελεχών των φυτών σε νερό (ποτάμια, λίμνες, δεξαμενές) και την παρακολούθησή τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα αναερόβια και πηκτινολυτικά βακτήρια είναι υπεύθυνα για την αποσύνθεση των συστατικών της πηκτίνης και ως εκ τούτου, για την απελευθέρωση των ινών [2.52]. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην παραγωγή ινών υψηλής ποιότητας και ομοιομορφίας. Ωστόσο, η μέθοδος του διαχωρισμού των ινών στο νερό παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα: (α) μεγάλη απαιτούμενη ποσότητα καθαρού νερού, (β) εκτεταμένη δυσοσμία και περιβαλλοντική μόλυνση λόγω της αναερόβιας βακτηριακής ζύμωσης του φυτού, (γ) εντατική εργασία και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό και (δ) υψηλό κόστος [2.50, 2.53-2.54]. Ως εκ τούτου, ο διαχωρισμός στο νερό, ο οποίος στο παρελθόν αποτελούσε την κυρίαρχη μέθοδο εκχύλισης ινών από τα φυτά λόγω της υψηλής ποιότητας ινών που παρήγαγε, έχει ως επί το πλείστον καταργηθεί τις τελευταίες δεκαετίες στις δυτικές χώρες [2.55].

2.4.3 Διαχωρισμός ενζύμων

Μία εναλλακτική λύση διαχωρισμού των ινών είναι η χρήση ενζύμων σε ελεγχόμενους αντιδραστήρες. Λόγω του χρονοβόρου χαρακτήρα των παραδοσιακών μεθόδων εκχύλισης των ινών από τον βλαστό του φυτού, η αποδόμηση της πηκτίνης, της λιγνίνης και της ημικυτταρίνης μέσω ενζύμων αποτέλεσε αντικείμενο μακροχρόνιας μελέτης [2.53, 2.56-2.59]. Οι ουσίες της πηκτίνης αποτελούν τα βασικά συστατικά της μεσοκυττάριας στοιβάδας, δηλαδή της λεπτής εξωκυτταρικής στρώσης των ινών που δρα ως συγκολλητική ουσία μεταξύ των παρακείμενων ινών, συγκρατώντας τις εντός του ξυλώδους φλοιού. Τα ένζυμα διασπούν τις ουσίες της πηκτίνης, επιτρέποντας τον διαχωρισμό των ινών από τον περιβάλλοντα ξυλώδη πυρήνα του βλαστού των φυτών. Τα ενζυμα αυτά είναι ευρέως γνωστά ως πηκτινάσες και μπορούν να παραχθούν από διάφορες μικροβιακές πηγές (βακτήρια, ζυμομύκητες, μύκητες, κ.ά.). Οι πηκτινάσες αναφέρονται σε πλήθος μελετών [2.60-2.61] ως τα πλέον κατάλληλα ένζυμα για την εκχύλιση διάφορων φυτικών ινών λόγω του ότι δεν προκαλούν ιδιαίτερο τραυματισμό των ινών. Η μέθοδος διαχωρισμού των ινών μέσω της δράσης ενζύμων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων στο βαθμό που αποτελεί μία πλήρως ελεγχόμενη και σύντομη διαδικασία, δεν προκαλεί περιβαλλοντική μόλυνση, ενώ οι παραγόμενες ίνες είναι ικανοποιητικής ποιότητας. Βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος των ενζύμων, αλλά και η χαμηλότερη αντοχή των ινών συγκριτικά με την αντοχή των ινών που εκχυλίζονται μέσω των παραδοσιακών μεθόδων [2.50, 2.56].

2.4.4 Χημικός διαχωρισμός

Ο χημικός διαχωρισμός περιλαμβάνει τον βρασμό των μίσχων και την εφαρμογή χημικών όπως το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH). Αποτελεί μία αποτελεσματική και εξαιρετικά σύντομη διαδικασία, η οποία παράγει καθαρές και συνεχείς ίνες με λεία επιφάνεια. Ωστόσο, για περιεκτικότητες υδροξειδίου του νατρίου μεγαλύτερες του 1%, η εφελκυστική αντοχή της ίνας μειώνεται. Ο χημικός διαχωρισμός απαιτεί υψηλά ποσά ενέργειας, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος παραγωγής των ινών [2.59, 2.62].

2.4.5 Μηχανικός διαχωρισμός

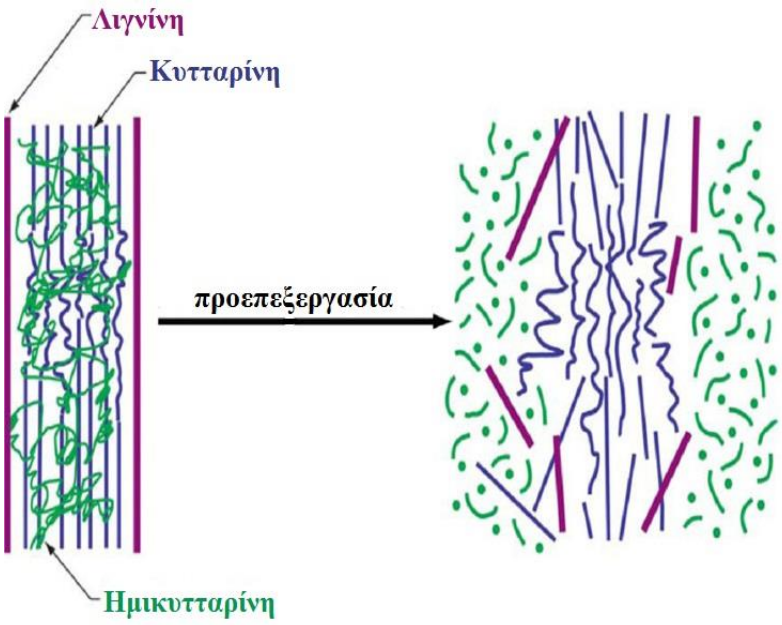
Κατά τον μηχανικό διαχωρισμό, τα στελέχη των φυτών τεμαχίζονται και ξυλοκοπούνται ώστε να σπάσει ο ξυλώδης πυρήνας τους σε μικρά κομμάτια μήκους μικρότερου από 1

cm. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλων μηχανημάτων όπως οι σφυρόμυλοι (hammermills). Ο μηχανικός διαχωρισμός οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ινών μικρού μήκους σε σύντομο χρονικό διάστημα. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το υψηλό κόστος και η χαμηλότερη ποιότητα των ινών [2.63].

2.4.6 Έκρηξη ατμού

Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί έντονη ερευνητική δραστηριότητα ως προς την ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων διαχωρισμού των ινών από τον εσωτερικό φλοιό των στελεχών των φυτών προς αντικατάσταση των παραδοσιακών μεθόδων διαχωρισμού. Μία από τις ευρέως εφαρμοσμένες μεθόδους προ-επεξεργασίας της πρώτης ύλης (ξύλο, στελέχη φυτών κ.ά.) για την παραγωγή ινών κυτταρίνης είναι η έκρηξη ατμού (steam explosion) λόγω της χαμηλής χρήσης χημικών και της περιορισμένης κατανάλωσης ενέργειας [2.64]. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προ-επεξεργασίας με έκρηξη ατμού, η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα θερμαίνεται με υψηλή πίεση κορεσμένου ατμού, συνήθως σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 180 έως 230 °C, για 2-10 λεπτά. Η υψηλή θερμοκρασία καθορίζει τη διάσπαση των χημικών δεσμών μεταξύ της λιγνίνης, της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης (Σχήμα 2.5). Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας με ατμό, η βιομάζα υποβάλλεται σε εκκένωση, με αποτέλεσμα τα μεσοκυττάρια υγρά να ατμοποιούνται ραγδαία, επιφέροντας μία εκτεταμένη αποδόμηση της βιομάζας [2.65-2.67]. Με τη διαδικασία αυτή, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του αρχικού μεγέθους των σωματιδίων της πρώτης ύλης. Η καρδιά της διαδικασίας της πολτοποίησης της πρώτης ύλης με έκρηξη ατμού είναι ο αντιδραστήρας, στον οποίο επιτρέπεται η χρήση υψηλής πίεσης κατά τη θέρμανση και το βρασμό της πρώτης ύλης.

Σημειώνεται ότι η έκταση των χημικών και δομικών τροποποιήσεων της πρώτης ύλης λόγω της προ-επεξεργασίας της με έκρηξη ατμού εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής της στον αντιδραστήρα, τη θερμοκρασία, το αρχικό μέγεθος των σωματιδίων της και την περιεχόμενη υγρασία [2.68].



Σχήμα 2.5 Διάσπαση των χημικών δεσμών της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας λόγω των διαδικασιών προ-επεξεργασίας [2.69].

2.5 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ινών κυτταρίνης

Οι ίνες κυτταρίνης, λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους, παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, ιδιαίτερα όσο αφορά στην ακαμψία τους. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των φυτικών ινών που χρησιμοποιούνται συνήθως.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2, οι μηχανικές ιδιότητες των ινών του ίδιου φυτού διαφέρουν σημαντικά. Στην πραγματικότητα, το κύριο πρόβλημα των φυτικών ινών είναι η υψηλή μεταβλητότητα των ιδιοτήτων τους. Πρώτον, η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των ινών μπορεί να ερμηνευτεί από τις διαφορές στη χημική σύνθεση και τη δομή των φυτικών ινών (γωνία μικροϊνιδίων, κρυσταλλικότητα, ατέλειες) λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους [2.74]. Δεύτερον, μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές μεθόδους δοκιμών που χρησιμοποιούνται ή τις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (σχετική υγρασία, θερμοκρασία, ταχύτητα φόρτισης, αριθμός δειγμάτων δοκιμής) [2.75]. Επιπλέον, η διερεύνηση των φυτικών ινών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές κλίμακες, είτε ως δεσμίδες ινών είτε ως μεμονωμένες ίνες. Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν στοιχεία για τις μηχανικές ιδιότητες τόσο των δεσμίδων ινών [2.76-2.77] όσο και των μεμονωμένων ινών [2.45, 2.78].

Πίνακας 2.2 Μηχανικές ιδιότητες φυτικών ινών [2.4-2.5, 2.70-2.74].

Ίνα	**Ειδικό βάρος**	**Μέτρο ελαστικότητας (GPa)**	**Εφελκυστική αντοχή (MPa)**	**Επιμήκυνση κατά τη θραύση (%)**
Λινάρι	1.54	27.5-85	345-2000	1-4
Ραμί	1.5-1.56	27-128	400-1000	1.2-3.8
Κάνναβη	1.47	17-70	368-800	1.6
Γιούτα	1.44	10-30	393-773	1.5-1.8
Σισάλ	1.45-1.5	9-22	350-700	2-7
Καρύδα	1.15	4-6	131-175	15-40
Βαμβάκι	1.5-1.6	5.5-12.6	287-597	7-8
Τσουκνίδα	1.51	24.5-87	560-1600	2.1-2.5
Κενάφ	1.2	14-53	240-930	1.6
Μπαμπού	0.6-1.1	11-17	140-230	-
Γυαλί	2.5	70	2000-3500	2.5
Άνθρακας	1.4	230-240	4000	1.4-1.8

Όταν η δοκιμή εκτελείται σε κλίμακα δέσμης ινών, υπάρχουν επιπτώσεις ολίσθησης της κάθε ίνας σε σχέση με τις παρακείμενές της στη μεσοκυττάρια στοιβάδα. Ως εκ τούτου, οι μηχανικές ιδιότητες των δεσμίδων ινών είναι κατώτερες των ιδιοτήτων των μεμονωμένων ινών. Οι Charlet et al. [2.77], οι οποίοι μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά της μεσοκυττάριας στοιβάδας δεσμίδων ινών λιναριού, απέδειξαν ότι η διατμητική αντοχή της στοιβάδας είναι χαμηλή. Στη χαμηλή αυτή αντοχή των περιοχών μεταξύ των ινών αποδόθηκαν οι ασθενέστερες μηχανικές ιδιότητες των δεσμίδων ινών.

Υπό το πρίσμα της δομικής οργάνωσης, μία φυτική ίνα είναι ένα σύνθετο υλικό τριών πολυμερών (κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη), στο οποίο τα μικροϊνίδια κυτταρίνης αποτελούν τα στοιχεία ενίσχυσης και το μίγμα της ημικυτταρίνης και της λιγνίνης συνθέτει τη μήτρα. Η δομή αυτή συγκροτείται ως μία διάταξη πολλαπλών στρώσεων, στην οποία οι στρώσεις P, S_1, S_2, S_3 των μικροϊνιδίων κυτταρίνης αναπτύσσονται υπό διαφορετικές γωνίες προς τον διαμήκη άξονα της φυτικής ίνας (βλ. Σχήμα 2.3). Επομένως,

ο προσδιορισμός των ελαστικών ιδιοτήτων των φυτικών ινών πραγματοποιείται με εφαρμογή κλασικής θεωρίας διαστρωμάτωσης (classical laminated theory) [2.26].

Η χρήση μοντέλων μεταβατικής κλίμακας (transition scales models) είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη των υδρο-ελαστικών ιδιοτήτων των ινών κυτταρίνης. Παράδειγμα κατάλληλων μοντέλων κλίμακας είναι τα μοντέλα μικρομηχανικής των Mori-Tanaka, όπως περιγράφονται από τους Fréour et al. [2.79]. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο αποπροσανατολισμός των μικροϊνιδίων, είναι απαραίτητη η εφαρμογή των μεθόδων των Lacoste et al. [2.80-2.81]. Οι μηχανικές ιδιότητες των τριών πολυμερών της ίνας κυτταρίνης έχουν μελετηθεί από πλήθος ερευνητών. Στοιχεία σχετικά με την κυτταρίνη παρουσιάζονται στις μελέτες των Tashiro και Kobayashi [2.82] και του Gillis [2.83]. Επιπλέον, ο Cousins [2.84-2.86], στη δεκαετία του '80, συνέβαλε στην οικοδόμηση μίας πολύτιμης βάσης δεδομένων για τις ιδιότητες της λιγνίνης και της ημικυτταρίνης. Λόγω της ιδιαίτερης δομής τους, οι φυτικές ίνες παρουσιάζουν μία ανισότροπη συμπεριφορά. Στη διαμήκη διεύθυνση, εμφανίζουν καλές μηχανικές ιδιότητες μέσω των μικροϊνίδιων, ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση οι μηχανικές ιδιότητες είναι πιο υποβαθμισμένες και πιο μεταβλητές λόγω των ιδιοτήτων του άμορφου μίγματος ημικυτταρίνης και λιγνίνης.

Οι φυτικές ίνες εμφανίζουν μία συγκεκριμένη συμπεριφορά υπό κυκλική μηχανική φόρτιση. Ο Baley [2.45] ήταν ο πρώτος που απέδειξε ότι το μέτρο ελαστικότητας των ινών λιναριού αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Επιπλέον, μία πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών βασίστηκε στην υπόθεση μίας νέας διάταξης των μικροϊνιδίων στην ίνα με την αύξηση του βαθμού κρυσταλλικότητάς τους. Όσο πιο ευθυγραμμισμένα είναι τα μικροϊνίδια με τον άξονα της ίνας, τόσο καλύτερες θα είναι οι μηχανικές ιδιότητες της ίνας σε αυτήν την κατεύθυνση. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται από τους Placet et al. [2.78], οι οποίοι μελέτησαν ενυδατωμένες ίνες κάνναβης. Η κρυσταλλοποίηση των φυτικών ινών υπό δοκιμή σε εφελκυσμό έχει επισημανθεί από τους Astley και Donald [2.41], οι οποίοι χρησιμοποίησαν περίθλαση ακτινών-Χ. Ο αναπροσανατολισμός των μικροϊνιδίων κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού έχει επιβεβαιωθεί από διάφορες μελέτες [2.87-2.88].

Η μηχανική απόδοση των φυτικών ινών επηρεάζεται από διαφορετικές παραμέτρους όπως: (α) η περιεκτικότητα των ινών σε κυτταρίνη, (β) η γωνία μικροϊνιδίων, (γ) η

διάμετρος των ινών, (δ) η θερμοκρασία, (ε) η παρουσία ατελειών στις ίνες και (στ) η περιεκτικότητα σε νερό στο εσωτερικό της ίνας.

Στο βαθμό που η κυτταρίνη είναι το άκαμπτο συστατικό των φυτικών ινών, η υψηλότερη περιεκτικότητα των ινών σε κυτταρίνη έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Η γωνία μικροϊνιδίου έχει σημαντική επίδραση στις ελαστικές ιδιότητες των φυτικών ινών. Στην πραγματικότητα, οι μικρές γωνίες μικροϊνιδίου οδηγούν σε καλύτερες ιδιότητες, επειδή οι φυτικές ίνες συμπεριφέρονται ως ένα σύνθετο υλικό το οποίο παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στην κατεύθυνση ενίσχυσης. Όσο αφορά στην επίδραση της διαμέτρου, οι περισσότερες μελέτες που διεξάγονται σε φυτικές ίνες υπό εφελκυσμό έδειξαν ότι τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η αντοχή σε εφελκυσμό της ίνας αυξάνονται με τη μείωση της διαμέτρου της [2.45, 2.89-2.91]. Πρόσφατα, οι Placet et al. [2.75] ανακάλυψαν τα αιτία της εξάρτησης αυτής κατά τη μελέτη ινών κάνναβης. Χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο και την ανακατασκευή μίας τρισδιάστατης εικόνας των ινών, έδειξαν ότι μέτρο ελαστικότητας της ίνας εξαρτάται πρωτίστως από το μέγεθος του αυλού της και, δευτερευόντως, από τη διάμετρο του εξωτερικού στρώματός της. Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των φυτικών ινών, καθώς ενδέχεται να προκαλέσει την εμφάνιση ατελειών με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των συνολικών μηχανικών ιδιοτήτων των ινών [2.26, 2.92]. Η εμφάνιση ατελειών σε τέτοια υλικά είναι μία επιπλέον αιτία της μεταβλητότητας της τιμής των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών. Αυτές οι ατέλειες ενδέχεται να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων εκχύλισης και επεξεργασίας των ινών και ιδιαίτερα κατά το στάδιο του διαχωρισμού των ινών από τον ξυλώδη πυρήνα του βλαστού. Η επίδραση των παραμέτρων αυτών έχει μελετηθεί λεπτομερώς από τους Mukherjee και Satyanarayanna [2.93].

2.6 Μηχανική συμπεριφορά σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με ίνες κυτταρίνης

2.6.1 Ενίσχυση υλικών με βάση το τσιμέντο με ίνες πολτού ή ίνες μικρού μήκους

Η συντριπτική πλειονότητα των εργασιών, οι οποίες μελετούν τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο, ενισχυμένων με ίνες πολτού ή ίνες κυτταρίνης

μικρού μήκους τυχαίας διασποράς, προσδιορίζει τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού με δοκιμές κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων.

Σχετικά με την επίδραση του τύπου των ινών κυτταρίνης, οι Savastano et al. [2.94-2.95] προσδιορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας τσιμέντου, το οποίο περιέχει σκωρία υψικαμίνου (blast furnace slag, BFS), ενισχυμένης με πολτό ρετσινιού πεύκου και σιζάλ. Με εφαρμογή της κάμψης τριών σημείων, συγκρίνονται οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού και της μήτρας ενός τυπικού τσιμέντου Portland ενισχυμένης με πολτό ρετσινιού πεύκου και σιζάλ. Τα συμπεράσματα της εν λόγω μελέτης υποδεικνύουν ότι τόσο η μήτρα τσιμέντου με σκωρία υψικαμίνου όσο και η μήτρα του τυπικού τσιμέντου Portland επιδεικνύουν σημαντική βελτίωση της αντοχής σε κάμψη για περιεκτικότητες σε πολτό κυτταρίνης 4 και 8% κ.β. τσιμέντου, αντίστοιχα. Η υψηλότερη αντοχή σε κάμψη (~24 MPa) του σύνθετου υλικού με βάση το σκωριοτσιμέντο επιτυγχάνεται για περιεκτικότητες σε πολτό ρετσινιού πεύκου από 8 έως 12% κ.β. τσιμέντου. Η αντοχή σε θραύση των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με 12% κ.β. τσιμέντου πολτό ρετσινιού πεύκου κυμαίνεται από 1.72 έως 2.36 kJ/m^2. Η αντοχή σε θραύση των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με πολτό σιζάλ είναι χαμηλότερη συγκριτικά με την αντοχή των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με πολτό ρετσινιού πεύκου. Η χειρότερη απόδοση των ινών σιζάλ αποδίδεται στη χαμηλότερη αντοχή τους, αλλά και στο γεγονός ότι δεν έχουν υποστεί ξυλοκόπημα για τη δημιουργία εξωτερικού ινιδισμού. Για τους ανωτέρω λόγους, οι ίνες σιζάλ αδυνατούν να περιορίσουν την επέκταση των μικρορωγμών στη μήτρα. Το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητάς τους σε ίνες κυτταρίνης. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού με βάση το σκωριοτσιμέντο ενισχυμένου με 12% κ.β. τσιμέντου ίνες πεύκου ή σιζάλ κυμαίνονται από 4.3 έως 6.2 GPa.

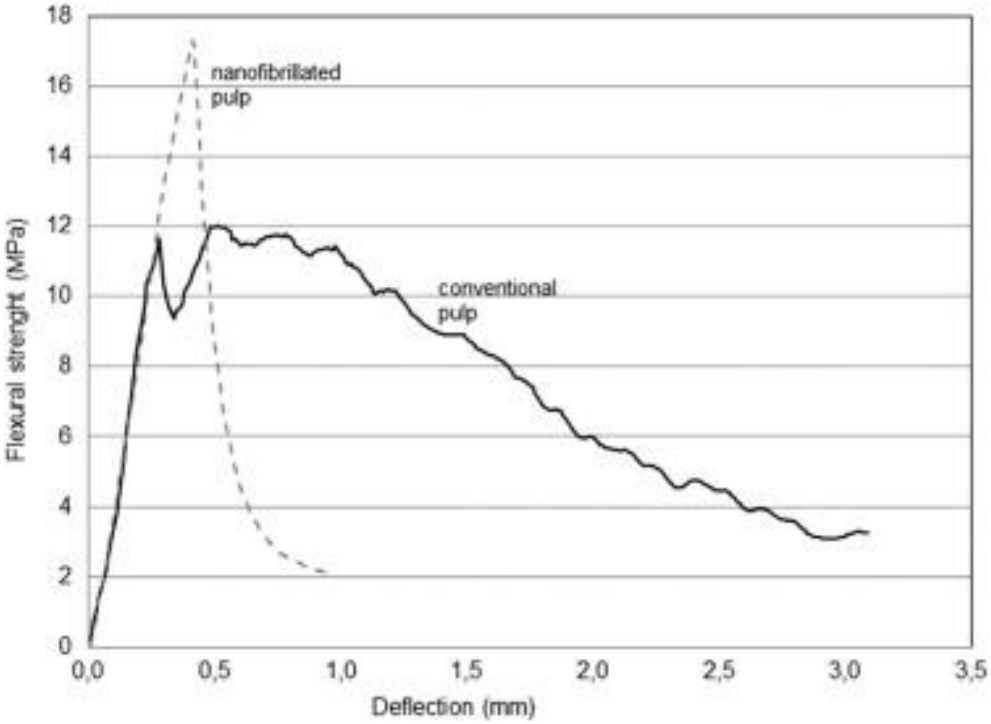
Με μία ανάλογη μέθοδο, οι Claramunt et al. [2.96] μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με βάση ένα τυπικό τσιμέντο Portland ενισχυμένων με ίνες ξυλοπολτού πεύκου συγκριτικά με τη συμπεριφορά των συνθέτων ενισχυμένων με πολτό βαμβακερών χνουδιών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού, τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με χνούδια βαμβακιού επιδεικνύουν βελτιωμένες ιδιότητες συγκριτικά με τα σύνθετα ενισχυμένα με ίνες ξυλοπολτού πεύκου, 16% υψηλότερη αντοχή και 37% υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες ξυλοπολτού πεύκου παρουσιάζουν καλύτερη μηχανική συμπεριφορά. Η

βελτιωμένη αυτή μηχανική συμπεριφορά αποδίδεται στην αναλογία μήκους προς διάμετρο των ινών ξυλοπολτού πεύκου, η οποία είναι 19% υψηλότερη από την αντίστοιχη αναλογία των χνουδιών βαμβακιού.

Ενδιαφέρουσα έρευνα διεξάγεται και από τους Savastano et al. [2.97], οι οποίοι αναλύουν την επίδραση του βαθμού διύλισης του πολτού σιζάλ στη μηχανική απόκριση των σύνθετων υλικών. Ειδικότερα, διερευνώνται τρεις βαθμοί διύλισης. Τα συμπεράσματα της έρευνας αναφέρουν έναν ενδιάμεσο βαθμό διύλισης ως τον βέλτιστο, ο οποίος οδηγεί σε σημαντική βελτίωση του συντελεστή θραύσης των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο. Από την άλλη πλευρά, η υπερβολική διύλιση των ινών του πολτού σιζάλ υποβαθμίζει τη μηχανική απόδοση των συνθέτων. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η ισχυρότερη πρόσφυση των ινών μειώνει τη συχνότητα εκρίζωσης των ινών από τη μήτρα κατά τη θραύση του σύνθετου υλικού, αμβλύνοντας τις επιπτώσεις της θραύσης στη δυσθραυστότητα του υλικού. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και στα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με πολτό ευκαλύπτου, δηλαδή η διύλιση του ξυλοπολτού αυξάνει σημαντικά τον συντελεστή θραύσης των συνθέτων, αλλά μειώνει την δυσθραυστότητά τους [2.98]. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και από τους Ardanuy et al. [2.99], οι οποίοι συγκρίνουν τη συμπεριφορά σύνθετων υλικών ενισχυμένων με συμβατικό πολτό κυτταρίνης και με πολτό νανοϊνιδίων (nanofibrillated pulp). Για ένα ποσοστό ινών κυτταρίνης ίσο με 4% κ.β. τσιμέντου, διαπιστώνεται ότι σε αντίθεση με τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με πολτό νανοϊνιδίων, τα σύνθετα με συμβατικό πολτό παρουσιάζουν περισσότερο ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται τόσο στο μεγάλο μήκος των ινών, το οποίο οδηγεί σε αποτελεσματικότερη γεφύρωση των επιφανειακών ρωγμών της μήτρας όσο και στη μικρή ειδική επιφάνειά τους, η οποία ευνοεί την ανθεκτικότητα του υλικού έναντι της εκρίζωσης (pull-out) των ινών από τη μήτρα. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη καμπτικής αντοχής-μετατόπισης σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με πολτό νανοϊνιδίων και με συμβατικό πολτό σιζάλ.

Η επίδραση της επιφανειακής τροποποίησης των ινών ευκαλύπτου στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο διερευνάται από τους Tonoli et al. [2.100]. Η τροποποίηση των ινών πραγματοποιείται με τη χρήση δύο τύπων σιλανίου, του μεθοξυσιλανίου και του αιθοξυσιλανίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας, τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες τροποποιημένες με αιθοξυσιλάνιο

παρουσιάζουν υψηλότερη καμπτική αντοχή σε σύγκριση με τα σύνθετα που περιέχουν μη τροποποιημένες ή τροποποιημένες με μεθοξυσιλάνιο ίνες κυτταρίνης. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η δυσθραυστότητα του σύνθετου υλικού δεν επηρεάζεται από την επιφανειακή τροποποίηση των ινών με σιλάνιο.



Σχήμα 2.6 Τυπική καμπύλη καμπτικής αντοχής (flexural strength) - μετατόπισης (deflection) σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με πολτό νανοϊνιδίων (nanofibrillated pulp) και με συμβατικό πολτό σιζάλ (conventional sisal pulp) [2.99].

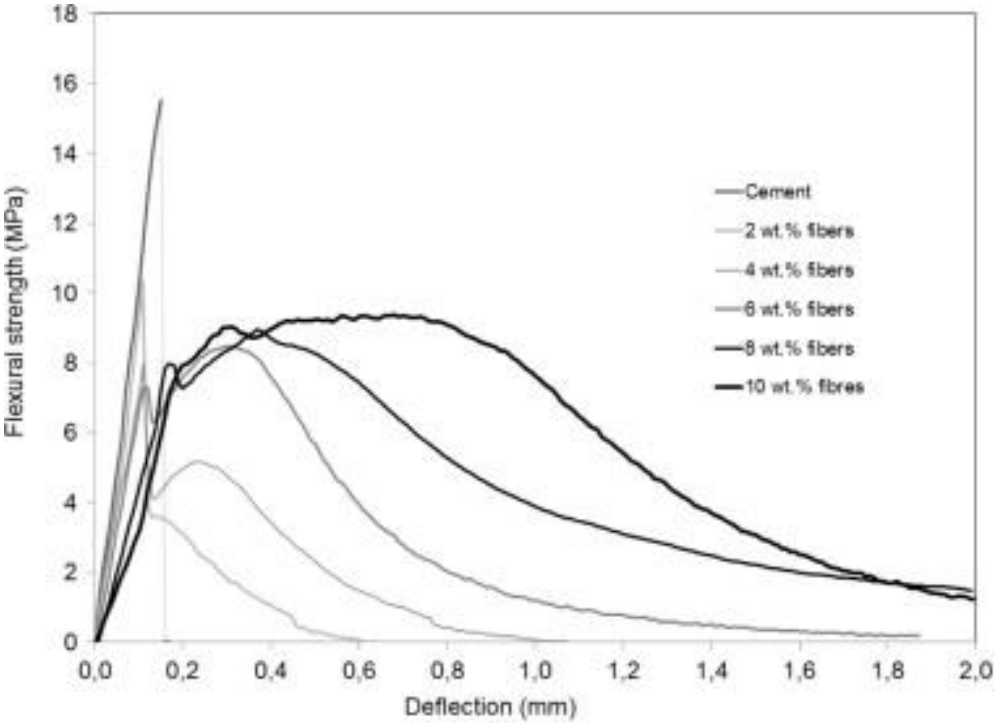
Η καμπτική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο Portland ενισχυμένων με ίνες γεωργικών αποβλήτων βαγάσσης, η οποία εξάγεται από τον μίσχο ζαχαροκάλαμου, σίτου και ευκαλύπτου, σε περιεκτικότητες 2 και 4% κ.β. τσιμέντου, μελετάται από τους Khorami και Ganjian [2.101]. Διαπιστώνεται ότι η προσθήκη ινών σε ποσοστό 2% κ.β. τσιμέντου προκαλεί μικρή μεταβολή της καμπτικής συμπεριφοράς σε σύγκριση με το υλικό αναφοράς. Αντίθετα, η αύξηση του ποσοστού των ινών σε 4% κ.β. τσιμέντου αλλάζει σημαντικά την καμπτική συμπεριφορά του υλικού. Η βέλτιστη καμπτική απόδοση επιτυγχάνεται στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες προερχόμενες από τα απόβλητα ζαχαροκάλαμου. Η απόδοση αυτή αποδίδεται στην υψηλή εφελκυστική αντοχή και την υψηλή αναλογία διαστάσεων της ίνας βαγάσσης συγκριτικά με τις ίνες σίτου και ευκαλύπτου. Οι ίδιοι συγγραφείς [2.102] διερευνούν την επίδραση της περιεκτικότητας ινών από απόβλητα ξυλοπολτού στις καμπτικές ιδιότητες των σύνθετων

υλικών με βάση το τσιμέντο. Διαπιστώνεται ότι η βέλτιστη περιεκτικότητα της μήτρας σε ίνες είναι περίπου 8% κ.β. τσιμέντου, για την οποία ο συντελεστής θραύσης του συνθέτου είναι 2.5 φορές υψηλότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή του υλικού αναφοράς. Επιπλέον, αναφέρεται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας του σύνθετου υλικού σε ίνες, αυξάνεται και η ολκιμότητά του.

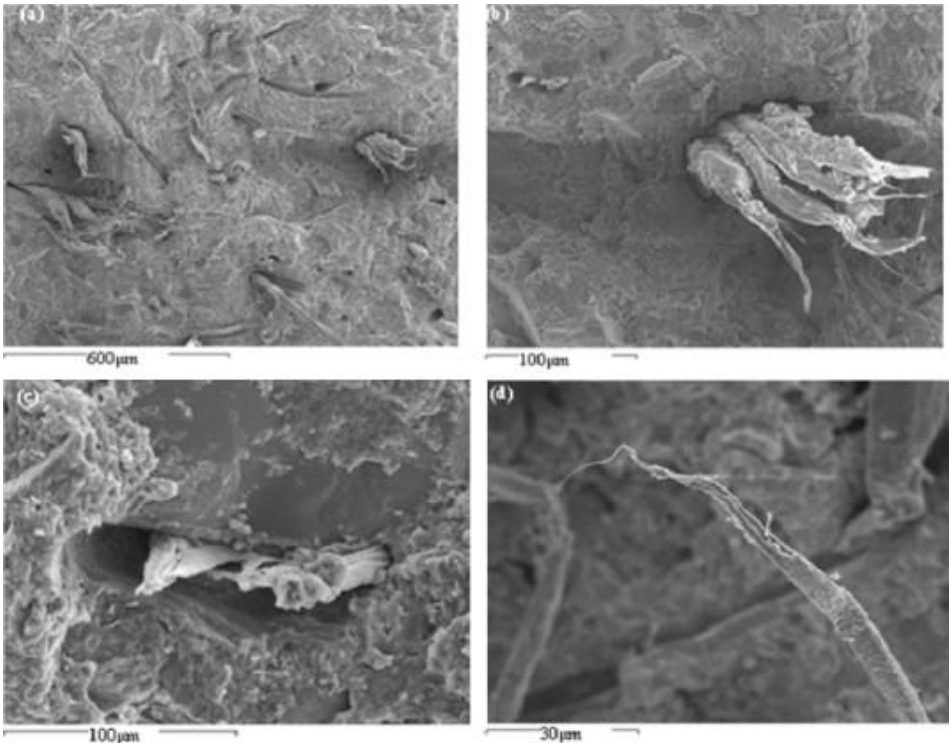
Με μία παρόμοια προσέγγιση, αναλύεται η επίδραση της περιεκτικότητας των ινών πολτού από απόβλητα χαρτιού και συσκευασιών στις ιδιότητες των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο από τους Bentchikou et al. [2.14]. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση των ινών, σε περιεκτικότητες από 0 έως 16% κ.β. τσιμέντου, στη θλιπτική και καμπτική αντοχή του σύνθετου υλικού. Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι η αύξηση του ποσοστού των ινών οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής του σύνθετου υλικού. Η μείωση της θλιπτικής αντοχής αποδίδεται στην αύξηση των κενών στη μάζα του υλικού λόγω της αύξησης του ποσοστού των ινών κυτταρίνης, οδηγώντας στη δημιουργία ενός ελαφρότερου και πιο αποδυναμωμένου υλικού. Από την άλλη πλευρά, η αντοχή σε κάμψη του σύνθετου υλικού αυξάνεται για περιεκτικότητες ινών από 0 έως 4% κ.β. τσιμέντου, λαμβάνοντας τιμές από 6 έως 7 MPa, ενώ για υψηλότερες περιεκτικότητες μειώνεται προοδευτικά. Η εν λόγω συμπεριφορά πιθανώς οφείλεται τόσο στη μη ομοιόμορφη διασπορά των ινών εντός της μήτρας όσο και στην αποδυνάμωση του υλικού λόγω της μείωσης του κλάσματος όγκου της τσιμεντοειδούς μήτρας.

Ομοίως, διερευνάται η επίδραση της περιεκτικότητας του μαλακού ξυλοπολτού στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο από τους Claramunt et al. [2.103]. Εξετάζονται σύνθετα υλικά με περιεκτικότητες σε ίνες από 0 έως 10% κ.β. τσιμέντου. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες καμπτικής αντοχής-μετατόπισης σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με ίνες μαλακού ξυλοπολτού σε διάφορες περιεκτικότητες και συγκρίνονται με την αντίστοιχη καμπύλη του τσιμέντου αναφοράς. Από τις καμπύλες παρατηρείται ότι η μέγιστη αντοχή της μήτρας μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητάς της σε ίνες έως και 4% κ.β. τσιμέντου. Για μεγαλύτερες περιεκτικότητες, η αντοχή της μήτρας διατηρείται περίπου στο 50% της μέγιστης επιτευχθείσας αντοχής. Ταυτόχρονα, υπάρχει μία αύξηση της αντοχής συναρτήσει της ενίσχυσης, η οποία επίσης τείνει να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή ίση ή ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη της αντοχής της μήτρας με 4% κ.β. τσιμέντου ίνες. Με την αύξηση της περιεκτικότητας του υλικού σε ίνες, η τιμή του συντελεστή θραύσης του

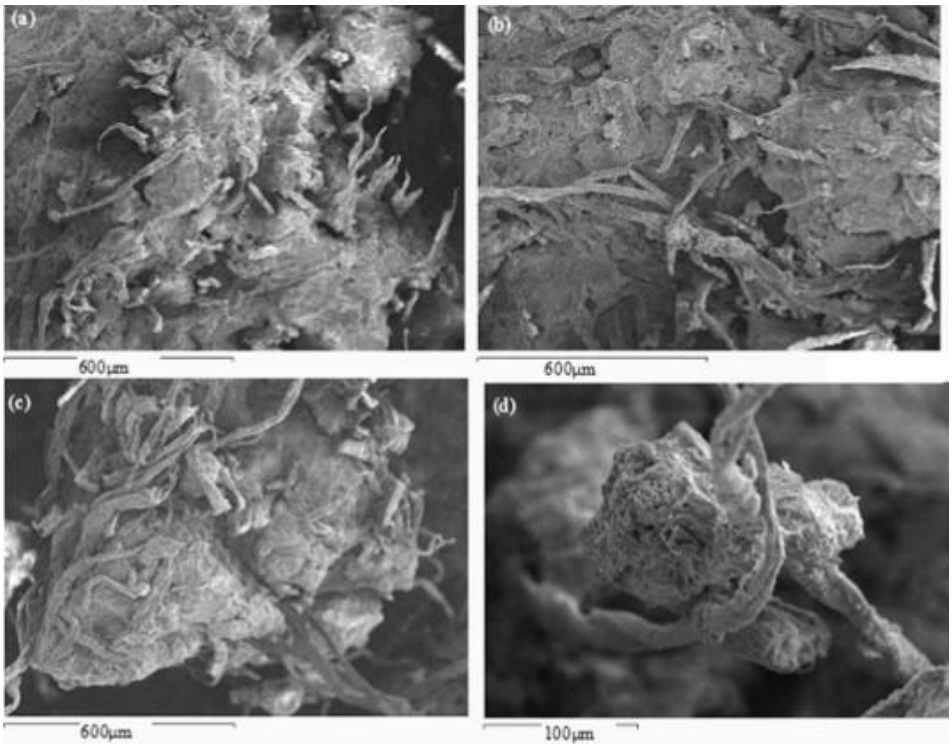
μειώνεται γραμμικά, ενώ η δυσθραυστότητά του αυξάνεται. Στα ΣχήματαΣχήμα 2.8 &Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται οι εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, οι οποίες φανερώνουν διάφορα μοντέλα αστοχίας του σύνθετου υλικού, ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε ίνες. Συγκεκριμένα, για χαμηλές περιεκτικότητες (< 2%), η καμπτική αστοχία του υλικού οφείλεται στην θραύση των ινών, δηλαδή οι δυνάμεις συγκόλλησης που αναπτύσσονται μεταξύ των ινών και της μήτρας είναι επαρκείς ώστε η αστοχία να μεταφερθεί στις ίνες και να τις σπάσει. Για μεσαίες περιεκτικότητες (4-6%), παρατηρείται ένας βαθμός απώλειας της συγκόλλησης των ινών με τη μήτρα λόγω της παρεμβολής γειτονικών ινών και η αστοχία του υλικού οφείλεται στην εκρίζωση των ινών (pull-out). Στην περίπτωση αστοχίας λόγω εκρίζωσης των ινών, η αναλογία μήκους προς πάχος (λόγος μορφής) των ινών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της καμπτικής αντοχής του υλικού. Για υψηλότερες περιεκτικότητες ινών (8-10%), ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης ινών-μήτρας απενεργοποιείται και οι ίνες πλέον δε λειτουργούν ως μέσο ενίσχυσης της μήτρας.



Σχήμα 2.7 Τυπικές καμπύλες καμπτικής αντοχής (flexural strength) - μετατόπισης (deflection) σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με ίνες μαλακού ξυλοπολτού σε διάφορες περιεκτικότητες [2.103].



Σχήμα 2.8 Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με 2% κ.β. τσιμέντου ίνες ξυλοπολτού [2.103].



Σχήμα 2.9 Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ενισχυμένων με ίνες ξυλοπολτού σε περιεκτικότητες από 4 έως 6% κ.β. τσιμέντου [2.103].

Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφονται και σε άλλη μελέτη των Savastano et al. [2.10], στην οποία εξετάζονται σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με πολτό ή ασυνεχείς ίνες σιζάλ. Αναφέρεται ότι η μεγίστη εφελκυστική αντοχή των συνθέτων επιτυγχάνεται για περιεκτικότητα ινών περίπου ίση με 8% κ.β. τσιμέντου, λαμβάνοντας τιμές από 18 έως 20 MPa. Η μεγίστη εφελκυστική αντοχή των συνθέτων είναι τουλάχιστον 58% υψηλότερη από την αντοχή του υλικού αναφοράς.

Τέλος, η επίδραση της φύσης των ινών (ανακυκλωμένες, μαλακός και σκληρός ξυλοπολτός) και της περιεκτικότητά τους (5, 10 και 15% κ.β. τσιμέντου) στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο διερευνάται από τους Soroushian et al. [2.104]. Οι τιμές της καμπτικής αντοχής των συνθέτων κυμαίνονται από 10 έως 20 MPa, ενώ της δυσθραυστότητας από 50 έως 300 Nm. Αναφέρεται ότι με την αύξηση του ποσοστού των ινών μαλακού ξύλου από 5 σε 15% αυξάνεται η δυσθραυστότητα του σύνθετου υλικού. Από την άλλη πλευρά, η καμπτική αντοχή παρουσιάζει μία σχετική βελτίωση με την αύξηση της περιεκτικότητας του συνθέτου σε ίνες από 5 σε 10% κ.β. τσιμέντου, ενώ για υψηλότερες περιεκτικότητες μειώνεται. Σχετικά με την επίδραση της φύσης των ινών, διαπιστώνεται ότι ίνες μαλακού ξύλου βελτιώνουν τόσο την καμπτική αντοχή όσο και τη δυσθραυστότητα του υλικού που ενισχύουν. Λιγότερο αποτελεσματικές, συγκριτικά με τις ίνες μαλακού ξύλου, αποδεικνύονται οι ίνες σκληρού ξυλοπολτού. Ακόμη πιο ανεπαρκείς χαρακτηρίζονται οι ανακυκλωμένες ίνες.

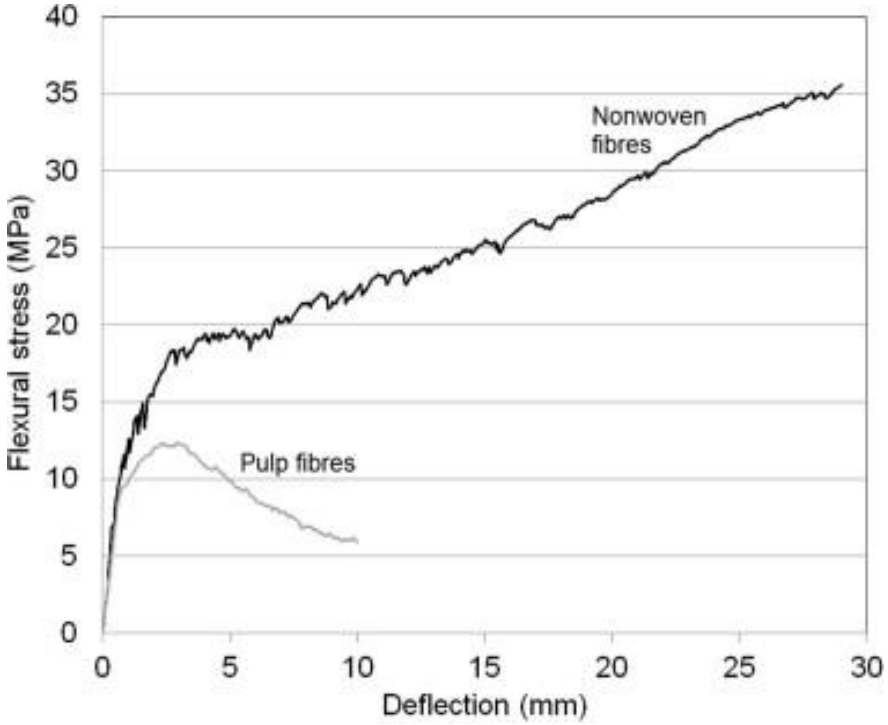
2.6.2 Ενίσχυση υλικών με βάση το τσιμέντο με ίνες μεγάλου μήκους

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πλειονότητα των ερευνών σχετικά με τα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με ίνες κυτταρίνης βασίζεται στη χρήση ινών μικρού μήκους ή ινών πολτού. Εξαίρεση αποτελεί η ερευνητική προσπάθεια των Toledo Filho et al. [2.105], στην οποία αναλύονται οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με φυτικές ίνες μεγάλου μήκους. Ο χαρακτηρισμός των υλικών πραγματοποιείται με δοκιμές εφελκυσμού και δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στη γραμμική ελαστική ζώνη, το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων προσδιορίζεται στα 30 GPa μέσω κάμψης και στα 34 GPa μέσω άμεσου εφελκυσμού. Μία συμπεριφορά σχηματισμού πολλαπλών ρωγμών παρατηρήθηκε υπό την επίδραση τόσο των φορτίων εφελκυσμού όσο και των φορτίων κάμψης. Η δυσθραυστότητα του υλικού, μέσω άμεσου εφελκυσμού και μέσω κάμψης, προσδιορίζεται στα 45 και 22 kJ/m^2,

αντίστοιχα. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ίνες σιζάλ είναι σε θέση να γεφυρώσουν τις ρωγμές και να περιορίσουν την επέκτασή τους εντός της περιοχής απόκρισης κατά την εφελκυστική καταπόνηση, προσδίδοντας στο σύνθετο υλικό υψηλή μηχανική επίδοση και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Επιπλέον, από την ίδια ερευνητική ομάδα [2.106], μελετάται η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε κόπωση. Διαπιστώνεται ότι τα σύνθετα δεν υφίστανται κόπωση έως και 106 κύκλους όταν υποβάλλονται στο μέγιστο επίπεδο έντασης κάτω από 6 MPa (50% της τελικής αντοχής σε εφελκυσμό).

Μία εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης της αντοχής και της δυσθραυστότητας των σύνθετων υλικών είναι η ενσωμάτωση ινών μεγάλου μήκους υπό τη μορφή κλωστοϋφαντουργικών δομών, όπως τα υφασμένα ή μη υφασμένα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Η εν λόγω μέθοδος είναι εφαρμόσιμη και σε επίπεδο βιομηχανικής παραγωγής. Νέα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο ενισχυμένα με μη υφασμένο λινάρι αναπτύσσονται από τους Claramunt et al. [2.107-2.109]. Διαπιστώνεται ότι τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με μη υφασμένο λινάρι αναπτύσσουν έναν πολύπλοκο μηχανισμό θραύσης, ο οποίος οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της μέγιστης αντοχής σε κάμψη και της δυσθραυστότητας του υλικού συγκριτικά με τα σύνθετα υλικά με ίνες πολτού. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη κάμψης του τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένου με μη υφασμένες φυτικές ίνες σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη του τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένου με ίνες πολτού. Αναφέρεται ότι, αν και οι τιμές του ορίου αναλογίας και του μέτρου ελαστικότητας, οι οποίες σχετίζονται με τη συμπεριφορά της μήτρας, είναι παραπλήσιες, οι τιμές του συντελεστή θραύσης και της ενέργειας θραύσης των σύνθετων υλικών με μη υφασμένες φυτικές ίνες είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες πολτού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στους διαφορετικούς μηχανισμούς θραύσης, οι οποίοι αναπτύσσονται ανάλογα με το μήκος των ινών. Το μεγάλο μήκος των ινών εξασφαλίζει μία μεγαλύτερη περιοχή επαφής των ινών με τη μήτρα, επιτρέποντας τον σχηματισμό πολλαπλών ρωγμών θραύσης καθώς αυξάνεται η ασκούμενη ένταση. Η απόσταση των ρωγμών μειώνεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης μέχρι να επιτευχθούν συνθήκες σταθερής κατάστασης, ενώ τελικά, υπάρχει μία προοδευτική βλάβη, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα στάδιο διεύρυνσης των ρωγμών, οδηγώντας σε αστοχία λόγω εκρίζωσης των ινών (fiber pull-out) [2.105].

Κατά παρόμοιο τρόπο, οι Toledo Filho et al., με τη χρήση ενός υφαντού υφάσματος από γιούτα ως μέσο ενίσχυσης του σκυροδέματος, παράγουν ένα νέο σύνθετο υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες για την ανάπτυξη στοιχείων λεπτού τοιχώματος [2.110].



Σχήμα 2.10 Τυπικές καμπύλες καμπτικής αντοχής (flexural strength) - μετατόπισης (deflection) σύνθετου υλικού με βάση το τσιμέντο ενισχυμένου με φυτικές μη υφασμένες ίνες (nonwoven fibres) και με ίνες πολτού (pulp fibres).

Βιβλιογραφία

2.1. Bledzki, A.K. & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, *24* (2), 221-274.

2.2. Biagiotti, J., Puglia, D., & Kenny, J.M. (2004). A review on natural fibre based composites-Part I: Structure, processing and properties of vegetable fibres. *Journal of Natural Fibers*, *1* (2), 37-68.

2.3. John, M.J. & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, *71* (3), 343-364.

2.4. Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers. *Progress in Polymer Science*, *37* (11), 1552-1596.

2.5. Satyanarayana, K.G., Arizaga, G.G.C., & Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-an overview. *Progress in Polymer Science*, *34* (9), 982-1021.

2.6. Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, *63* (9), 1259-1264.

2.7. Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo-Filho, R.D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, *79*, 115-128.
2.8. Tonoli, G.H.D., Santos, S.F., Savastano, H., Delvasto, S., Mejía de Gutiérrez, R., & Lopez de Murphy, M.D.M. (2011). Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. *Cement and Concrete Composites*, *33* (2), 225-232.
2.9. Roma, L.C., Martello, L.S., & Savastano, H. (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*, *22* (4), 668-674.
2.10. Savastano, H., Warden, P.G, & Coutts, R.S.P. (2003). Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, *25* (3), 311-319.
2.11. Morton, J.H., Cooke, T., & Akers, S.A.S. (2010). Performance of slash pine fibers in fiber cement products. *Construction and Building Materials*, *24* (2), 165-170.
2.12. Tolêdo-Filho, R.D., Ghavami, K., England, G.L., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, *25* (2), 185-196.
2.13. Toledo Filho, R.D., Ghavami, K., Sanjuán, M.A., & England, G.L. (2005). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, *27* (5), 537-546.
2.14. Bentchikou, M., Guidoum, A., Scrivener, K., Silhadi, K., & Hanini, S. (2012). Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. *Construction and Building Materials*, *34*, 451-456
2.15. Neithalath, N., Weiss, J. & Olek, J. (2004). Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement composites. *Cement and Concrete Composites*, *26* (4), 359-370.
2.16. Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J.A., & Barra, M. (2011). Fiber-matrix interactions in mortar composites reinforced with cellulosic fibers. *Cellulose*, *18* (2), 281-289.
2.17. Mohr, B.J., Nanko, H., & Kurtis, K.E. (2005). Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites*, *27* (4), 435-448.
2.18. Mohr, B.J., Biernacki, J.J., & Kurtis, K.E. (2006). Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, *36* (7), 1240-1251.
2.19. Toledo Filho, R.D., Scrivener, K., England, G.L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, *22* (2), 127-143.
2.20. Jawaid, M.H.P.S., & Khalil, H.A. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, *86* (1), 1-18.
2.21. Mohanty, A.K., Misra, M. & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromolecular materials and Engineering*, *276* (1), 1-24.

2.22. García Hortal, J.A. (2007). Fibras papeleras. *Editorial UPC, Barcelona, Spain*.
2.23. Bogoeva-Gaceva, G., Avella, M., Malinconico, M., Buzarovska, A., Grozdanov, A., Gentile, G., & Errico, M.E. (2007). Natural fiber eco-composites. *Polymer Composites*, *28* (1), 98-107.
2.24. Eichhorn, S.J., Dufresne, A., Aranguren, M., Marcovich, N.E., Capadona, J.R., Rowan, S.J., & Peijs, T. (2010). Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *Journal of Materials Science*, *45* (1), 1-33.
2.25. De Rosa, I.M., Kenny, J.M., Puglia, D., Santulli, C., & Sarasini, F. (2010). Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (Abelmoschus esculentus) fibres as potential reinforcement in polymer composites. *Composites Science and Technology*, *70* (1), 116-122.
2.26. Gassan, J., Chate, A., & Bledzki, A.K. (2001). Calculation of elastic properties of natural fibers. *Journal of Materials Science*, *36* (15), 3715-3720.
2.27. Smeder, B., & Liljedahl, S. (1996). Market oriented identification of important properties in developing flax fibres for technical uses. *Industrial Crops and Products*, *5* (2), 149-162.
2.28. Bledzki, A.K., Reihmane, S., & Gassan, J. (1996). Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *59* (8), 1329-1336.
2.29. Mwaikambo, L.Y., & Ansell, M.P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, *84* (12), 2222-2234.
2.30. Sun, R., Fang, J.M., Goodwin, A., Lawther, J.M., & Bolton, A.J. (1998). Fractionation and characterization of polysaccharides from abaca fibre. *Carbohydrate Polymers*, *37* (4), 351-359.
2.31. Rowell, R.M., Sanadi, A.R., Caulfield, D.F., & Jacobson, R.E. (1997). Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. *Lignocellulosic-plastic composites*, 23-51.
2.32. Joseph, P.V., Rabello, M.S., Mattoso, L.H.C., Joseph, K., & Thomas, S. (2002). Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, *62* (10), 1357-1372.
2.33. Klemm, D., Schmauder, H.P., & Heinze, T. (2005). Cellulose. *Biopolymers online*.
2.34. Payen, A. (1838). Mémoire sur la composition du tissu proper des plantes et du ligneux. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, *7*, 1052-1056.
2.35. Sugiyama, J., Vuong, R., & Chanzy, H. (1991). Electron diffraction study on the two crystalline phases occurring in native cellulose from an algal cell wall. *Macromolecules*, *24* (14), 4168-4175.
2.36. Sarko, A., & Muggli, R. (1974). Packing analysis of carbohydrates and polysaccharides. III. Valonia cellulose and cellulose II. *Macromolecules*, *7* (4), 486-494.

2.37. Nishiyama, Y., Langan, P., & Chanzy, H. (2002). Crystal structure and hydrogen-bonding system in cellulose Iβ from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction. *Journal of the American Chemical Society, 124* (31), 9074-9082.
2.38. Näslund, P., Vuong, R., Chanzy, H., & Jésior, J.C. (1988). Diffraction contrast transmission electron microscopy on flax fiber ultrathin cross sections. *Textile Research Journal, 58* (7), 414-417.
2.39. Fink H.P., Hofmann D., & Purz H.J. (1990). On the fibrillar structure of native cellulose. *Acta Polymerica, 41*, 131-137.
2.40. Eichhorn, S.J., Baillie, C.A., Zafeiropoulos, N., Mwaikambo, L.Y., Ansell, M.P., Dufresne, A., & Wild, P.M. (2001). Review: current international research into cellulosic fibres and composites. *Journal of Materials Science, 36* (9), 2107-2131.
2.41. Astley, O.M., & Donald, A.M. (2003). The tensile deformation of flax fibres as studied by X-ray scattering. *Journal of Materials Science, 38* (1), 165-171.
2.42. Sakurada, I., Nukushina, Y., & Ito, T. (1962). Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers. *Journal of Polymer Science, 57* (165), 651-660.
2.43. Bourmaud, A., Morvan, C., Bouali, A., Placet, V., Perré, P., & Baley, C. (2013). Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers. *Industrial Crops and Products, 44*, 343-351.
2.44. Meshitsuka, G., & Isogai, A. (1995). Chemical structures of cellulose, hemicelluloses, and lignin. *Chemical modification of lignocellulosic materials*, 11-34.
2.45. Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A*: *Applied Science and Manufacturing, 33* (7), 939-948.
2.46. Khalil, H.A., Bhat, A.H., & Yusra, A.I. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: a review. *Carbohydrate Polymers, 87* (2), 963-979.
2.47. Silva, R., Haraguchi, S.K., Muniz, E.C., & Rubira, A.F. (2009). Applications of lignocellulosic fibers in polymer chemistry and in composites. *Química Nova, 32* (3), 661-671.
2.48. Pietak, A., Korte, S., Tan, E., Downard, A., & Staiger, M.P. (2007). Atomic force microscopy characterization of the surface wettability of natural fibres. *Applied Surface Science, 253* (7), 3627-3635.
2.49. Ilnicka, A., & Lukaszewicz, J.P. (2015). Discussion remarks on the role of wood and chitin constituents during carbonization. *Frontiersin Materials, 2*, 20.
2.50. Van Sumere, C.F. (1992). Retting of flax with special reference to enzyme-retting. In: Sharma, H.S.S., & Van Sumere, C.F. (eds.), *The Biology and Processing of Flax. M. Publications*, Belfast, Northern Ireland, 157-198
2.51. Sharma, H.S.S., & Faughey, G.J. (1999). Comparison of subjective and objective methods to assess flax straw cultivars and fibre quality after dew-retting. *Annals of Applied Biology, 135* (2), 495-501.

2.52. Akin, D.E., Foulk, J.A., & Dodd, R.B. (2002). Influence on flax fibers of components in enzyme retting formulations. *Textile Research Journal*, *72* (6), 510-514.
2.53. Sharma, H.S.S. (1987). Studies on chemical and enzyme retting of flax on a semi-industrial scale and analysis of the effluents for their physico-chemical components. *International Biodeterioration*, *23* (6), 329-342.
2.54. Banik, S., Basak, M.K., Paul, D., Nayak, P., Sardar, D., Sil, S.C., & Ghosh, A. (2003). Ribbon retting of jute-a prospective and eco-friendly method for improvement of fibre quality. *Industrial Crops and Products*, *17* (3), 183-190.
2.55. Brown, A.E. (1984). Epicoccumnigrum, a primary saprophyte involved in the retting of flax. *Transactions of the British Mycological Society*, *83* (1), 29-35.
2.56. Akin, D.E., Condon, B., Sohn, M., Foulk, J.A., Dodd, R.B., & Rigsby, L.L. (2007). Optimization for enzyme-retting of flax with pectatelyase. *Industrial Crops and Products*, *25* (2), 136-146
2.57. Goodman, A.M., Ennos, A.R., & Booth, I. (2002). A mechanical study of retting in glyphosate treated flax stems (Linum usitatissimum). *Industrial Crops and Products*, *15* (2), 169-177.
2.58. Yu, H., & Yu, C. (2007). Study on microbe retting of kenaf fiber. *Enzyme and Microbial Technology*, *40* (7), 1806-1809.
2.59. Mooney, C., Stolle-Smits, T., Schols, H., & de Jong, E. (2001). Analysis of retted and not retted flax fibres by chemical and enzymatic means. *Journal of Biotechnology*, *89* (2), 205-216.
2.60. Hoondal, G., Tiwari, R., Tewari, R., Dahiya, N., & Beg, Q. (2002). Microbial alkaline pectinases and their industrial applications: a review. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *59* (4-5), 409-418.
2.61. Kapoor, M., Beg, Q.K., Bhushan, B., Dadhich, K.S., & Hoondal, G.S. (2000). Production and partial purification and characterization of a thermo-alkali stable polygalacturonase from Bacillus sp. MG-cp-2. *Process Biochemistry*, *36* (5), 467-473.
2.62. Kawahara, Y., Tadokoro, K., Endo, R., Shioya, M., Sugimura, Y., & Furusawa, T. (2005). Chemically retted kenaf fibers. *Sen'i Gakkaishi*, *61* (4), 115-117.
2.63. Paridah, M.T., & Khalina, A. (2009). Effects of soda retting on the tensile strength of kenaf (Hibiscus cannabnius L.) bast fibres. *Project Report Kenaf* EPU, 21.
2.64. Harmsen, P., Huijgen, W., Bermudez, L., & Bakker, R. (2010). Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic. *Biomass*, 1-49.
2.65. Grous, W.R., Converse, A.O., & Grethlein, H.E. (1986). Effect of steam explosion pretreatment on pore size and enzymatic hydrolysis of poplar. *Enzyme and Microbial Technology*, *8* (5), 274-280.
2.66. Young, R.A., & Akhtar, M. (1998). Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry. John Wiley & Sons.
2.67. Zimbardi, F., Viggiano, D., Nanna, F., Demichele, M., Cuna, D., & Cardinale, G. (1999). Steam explosion of straw in batch and continuous systems. In *Twentieth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*, 117-125. Humana Press.

2.68. Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, *83* (1), 1-11.
2.69. Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., & Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, *96* (6), 673-686.
2.70. Oksman, K., Skrifvars, M., & Selin, J.F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, *63* (9), 1317-1324.
2.71. Bodros, E., & Baley, C. (2008). Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (Urticadioica). *Materials Letters*, *62* (14), 2143-2145.
2.72. Ochi, S. (2008). Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials*, *40* (4), 446-452.
2.73. Summerscales, J., Dissanayake, N.P., Virk, A.S., & Hall, W. (2010). A review of bast fibres and their composites. Part 1-Fibres as reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *41* (10), 1329-1335.
2.74. Bourmaud, A., Morvan, C., Bouali, A., Placet, V., Perré, P., & Baley, C. (2013). Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers. *Industrial Crops and Products*, *44*, 343-351.
2.75. Placet, V., Trivaudey, F., Cisse, O., Gucheret-Retel, V., & Boubakar, M.L. (2012). Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect?.*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *43* (2), 275-287.
2.76. Madsen, B., Hoffmeyer, P., Thomsen, A.B., & Lilholt, H. (2007). Hemp yarn reinforced composites-I. Yarn characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *38* (10), 2194-2203.
2.77. Charlet, K., Gaillard-Martinie, B., & Béakou, A. (2011). Comportement mécanique et modélisation numérique de la lamelle mitoyenne de lin. In *17èmes Journées Nationales sur les Composites*, *17*, 110.
2.78. Placet, V., Cisse, O., & Boubakar, M.L. (2012). Influence of environmental relative humidity on the tensile and rotational behaviour of hemp fibres. *Journal of Materials Science*, *47* (7), 3435-3446.
2.79. Fréour, S., Jacquemin, F., & Guillen, R. (2006). Extension of Mori-Tanaka approach to hygroelastic loading of fiber-reinforced composites-comparison with Eshelby-Kroner self-consistent model. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *25* (10), 1039-1052.
2.80. Lacoste E., Fréour S., & Jacquemin F. (2010). On the validity of the Kröner-Eshelby scale transition model for inclusions with various morphologies. *Mechanics of Materials*, *42*, 218-226.
2.81. Lacoste E., Fréour S., & Jacquemin F. (2011). A multi-scale analysis of materials reinforced by inclusions randomly oriented in the layout. *Applied Mechanics and Materials*, *61*, 55-64.

2.82. Tashiro, K., & Kobayashi, M. (1991). Theoretical evaluation of three-dimensional elastic constants of native and regenerated celluloses: role of hydrogen bonds. *Polymer, 32* (8), 1516-1526.
2.83. Gillis, P.P. (1969). Effect of hydrogen bonds on the axial stiffnes of crystalline native cellulose. *Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics, 7* (5), 783-794.
2.84. Cousins, W.J., Armstrong, R.W., & Robinson, W.H. (1975). Young's modulus of lignin from a continuous indentation test. *Journal of Materials Science, 10* (10), 1655-1658.
2.85. Cousins, W.J. (1976). Elastic modulus of lignin as related to moisture content. *Wood science and technology, 10* (1), 9-17.
2.86. Cousins, W.J. (1978). Young's modulus of hemicellulose as related to moisture content. *Wood science and technology, 12* (3), 161-167.
2.87. Keckes, J., Burgert, I., Frühmann, K., Müller, M., Kölln, K., Hamilton, M., & Fratzl, P. (2003). Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. *Nature materials, 2* (12), 810-813.
2.88. Burgert, I. (2006). Exploring the micromechanical design of plant cell walls. *American Journal of Botany, 93* (10), 1391-1401.
2.89. Andersons, J., Spārniņš, E., Joffe, R., & Wallström, L. (2005). Strength distribution of elementary flax fibres. *Composites Science and Technology, 65* (3), 693-702.
2.90. Charlet, K., Jernot, J.P., Breard, J., & Gomina, M. (2010). Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres. *Industrial Crops and Products, 32* (3), 220-224.
2.91. Duval, A., Bourmaud, A., Augier, L., & Baley, C. (2011). Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Materials Letters, 65* (4), 797-800.
2.92. Stamboulis, A., Baillie, C.A., & Peijs, T. (2001). Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32* (8), 1105-1115.
2.93. Mukherjee, P.S., & Satyanarayana, K.G. (1986). An empirical evaluation of structure-property relationships in natural fibres and their fracture behaviour. *Journal of Materials Science, 21* (12), 4162-4168.
2.94. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2001). Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials. *Cement and Concrete composites, 23* (4), 389-397.
2.95. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites, 22* (5), 379-384.
2.96. Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J.A., & TolêdoFilho, R.D. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites, 33* (5), 586-595.
2.97. Tonoli, G.H.D., Joaquim, A.P., Arsène, M.A., Bilba, K., & SavastanoJr, H. (2007). Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. *Materials and Manufacturing Processes, 22* (2), 149-156.

2.98. Tonoli, G.H.D., Savastano, H., Fuente, E., Negro, C., Blanco, A., & Lahr, F.R. (2010). Eucalyptus pulp fibres as alternative reinforcement to engineered cement-based composites. *Industrial Crops and Products*, *31* (2), 225-232.
2.99. Ardanuy, M., Claramunt, J., Arévalo, R., Parés, F., Aracri, E., & Vidal, T. (2012). Nanofibrillated cellulose (NFC) as a potential reinforcement for high performance cement mortar composites. *BioResources*, *7* (3), 3883-3894.
2.100. Tonoli, G.H.D., Fuente, E., Monte, C., Savastano, H., Lahr, F.R., & Blanco, A. (2009). Effect of fibre morphology on flocculation of fibre-cement suspensions. *Cement and Concrete Research*, *39* (11), 1017-1022.
2.101. Khorami, M., & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, *25* (9), 3661-3667.
2.102. Khorami, M., & Ganjian, E. (2013). The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. *Construction and Building Materials*, *46*, 142-149.
2.103. Claramunt, J., Ardanuy, M., Parés, F., & Ventura, H. (2013). Mechanical performance of cement mortar composites reinforced with cellulose fibres. *Composite Science and Technology*.
2.104. Soroushian, P., Elzafraney, M., Nossoni, A., & Chowdhury, H. (2006). Evaluation of normal-weight and light-weight fillers in extruded cellulose fiber cement products. *Cement and Concrete Composites*, *28* (1), 69-76.
2.105. de Andrade Silva, F., Mobasher, B., & Toledo Filho, R.D. (2009). Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, *31* (10), 721-730.
2.106. de Andrade Silva, F., Mobasher, B., & Toledo Filho, R.D. (2010). Fatigue behavior of sisal fiber reinforced cement composites. *Materials Science and Engineering: A*, *527* (21), 5507-5513.
2.107. Claramunt, J., Ventura, H., Parés, F, & Ardanuy, M. (2013). Estructuras no tejidas de fibras naturals como refuerzo para compuestos de cemento de elevada ductilidad. Corz, A. & Güemes, A. (Eds.), *Actas del IX Congreso Nacional de Materiales Compuestos, AEMAC, Algeciras (Spain)*, 317-322.
2.108. Claramunt, J., Ventura, H., Parés, F., & Ardanuy, M. (2013). Natural fibre nonwovens as reinforcement for cement mortar composites. Fangueiro, R. (Ed.), B. Abstr. *1st International Conference on Natural Fibers - Sustainable Materials for Advanced Applications Universidadedo Minho*, 191-192.
2.109. Claramunt J., Ardanuy, M., Fernandez-Carrasco, L., & Ventura, H. (2014). Producto de material compuesto de aglomerante inorgánico y fibras vegetales, y método para su fabricación, Number: P201430772.
2.110. Fidelis, M.E.A., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R.D. (2014). The influence of fiber treatment on the mechanical behavior of jute textile reinforced concrete. *Key Engineering Materials*, *600*, 469-474.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Δομικά υλικά χαμηλής εκπομπής σκόνης

Τα έτοιμα προς χρήση ξηρά κονιάματα, τα οποία περιλαμβάνουν τουλάχιστον μία κονία ως συνδετικό υλικό και τουλάχιστον ένα αδρανές, καθώς και ένα ή περισσότερα πρόσθετα ή/και πρόσμικτα, σχηματίζονται από σωματίδια πολλά εκ των οποίων είναι εξαιρετικά υψηλής λεπτότητας. Ως εκ τούτου, οι εν λόγω ξηρές συνθέσεις κονιαμάτων παράγουν υψηλά επίπεδα σκόνης κατά τη διαδικασία μεταφοράς, χειρισμού και ανάμειξής τους.

Επί του παρόντος, σημαντικός αριθμός ερευνητικών προσπαθειών έχει διεξαχθεί με στόχο τη μείωση ή την εξάλειψη του σχηματισμού σκόνης των κονιών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι πιο πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο με χαμηλή εκπομπή σκόνης.

3.1 Αφρώδες διάλυμα

Μία μέθοδος ελέγχου της εκπεμπόμενης σκόνης των κονιών αναπτύχθηκε από τον Roe [3.1]. Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός σκόνης ελέγχεται με την εφαρμογή ενός υδατικού,

αφρώδους διαλύματος, το οποίο περιλαμβάνει ένα υδατοδιαλυτό κατιονικό πολυμερές, στις κονίες. Το κατιονικό πολυμερές ενσωματώνεται σε έναν υδατικό αφρό, ο οποίος περιέχει ανιονικούς, αμφοτερικούς ή κατιονικούς παράγοντες αφρισμού. Η εν λόγω μέθοδος ελέγχου της εκπεμπόμενης σκόνης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε κονίες όπως η ιπτάμενη τέφρα, ο φωσφορικός γαιάνθρακας και η ουρία.

Όσο αφορά στη σύνθεση του αφρώδους διαλύματος του υδατοδιαλυτού κατιονικού πολυμερούς, αναφέρεται ότι τα πολυμερή ενδέχεται να είναι πολυμερή προσθήκης ή πολυμερή συμπύκνωσης. Τέτοια πολυμερή είναι οι πολυαμίνες και οι τεταρτοταγείς αμίνες. Η παραγωγή του υδατικού αφρού επιτυγχάνεται μέσω αμφοτερικών ή ανιονικών παραγόντων αφρισμού. Για τη διερεύνηση της επίδρασης του αφρώδους διαλύματος στη μείωση του σχηματισμού σκόνης, παρασκευάστηκαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις διαλυμάτων επεξεργασίας των κονιών. Συγκεκριμένα, η πρώτη σύνθεση διαλύματος επεξεργασίας περιλαμβάνει ένα πολυμερές μελαμίνης/φορμαλδεΰδης, η δεύτερη ένα πολυμερές χλωριούχου αμμωνίου, ενώ η τρίτη και η τέταρτη ένα πολυμερές διαιθυλενοτριαμίνης/αδιπικού οξέος/επιχλωροϋδίνης. Στις τρεις πρώτες συνθέσεις επιλέγεται η κοκοϋλική αμιδο-σουλφοβεταΐνη ως αμφοτερικός παράγοντας αφρισμού, ενώ στην τέταρτη σύνθεση επιλέγεται ένας ανιονικός παράγοντας αφρισμού. Σημειώνεται ότι τα διαλύματα επεξεργασίας παρέχονται κατά προτίμηση σε συμπυκνωμένη μορφή και αραιώνονται πριν την εφαρμογή τους ως αφρός στις κονίες. Η συγκέντρωση του διαλύματος επεξεργασίας, βάσει της επί τοις εκατό κατά βάρος περιεκτικότητας κανιονικού πολυμερούς στον αφρό, κυμαίνεται από 0.1 έως 10%. Συνιστάται ο ρυθμός τροφοδοσίας του αφρού στις κονίες να λαμβάνει τιμές από 0.1 έως 15% κ.β. αφρού.

Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των προαναφερθέντων διαλυμάτων ως προς τη μείωση της τάσης των κονιών να παράγουν σκόνη εξετάστηκε μετρώντας τον σχετικό δείκτη σκόνης (Relative Dusting Index, RDI) και το ποσοστό καταστολής της σκόνης (Dust Suppression, %DS). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα αφρώδη κατιονικά πολυμερή επιτυγχάνουν μία σημαντική καταστολή του σχηματισμού σκόνης των κονιών, η οποία φτάνει έως και 94.6%, ενώ ικανοποιούν ένα ευρύ φάσμα φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις συνθέσεις που περιέχουν αμφοτερικό παράγοντα αφρισμού με τη σύνθεση με ανιονικό παράγοντα αφρισμού, φαίνεται ότι ο βαθμός καταστολής του σχηματισμού σκόνης είναι ανεξάρτητος από τον τύπο του παράγοντα αφρισμού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του υδατικού αφρού.

3.2 Υδατική διασπορά πολυτετραφθοροαιθυλενίου

Μία μέθοδος επεξεργασίας υλικών υψηλής τάσης σχηματισμού σκόνης αναπτύσσεται από τους Mizuno et al. [3.2], οι οποίοι παρασκευάζουν μία σύνθεση για την αναστολή του σχηματισμού σκόνης, η οποία περιλαμβάνει πολυτετραφθοροαιθυλένιο (polytetrafuoroethylene, PTFE) σε μορφή υδατικής διασποράς. Η επιλογή του πολυτετραφθοροαιθυλενίου βασίζεται στην υψηλή αποτελεσματικότητά του ως προς τον περιορισμό του σχηματισμού σκόνης. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος επεξεργασίας της κονίας περιλαμβάνει την ανάμειξή της με την υδατική διασπορά του πολυτετραφθοροαιθυλενίου, το οποίο περιέχει έως και 50 ppm γαλακτωματοποιητή με φθόριο, και την υποβολή του μίγματος σε θλίψη-διάτμηση σε θερμοκρασία από 20 έως 2000 ºC. Η υποβολή του μίγματος σε θλίψη-διάτμηση έχει ως αποτέλεσμα τον ινιδισμό του πολυτετραφθοροαιθυλενίου, δηλαδή τον σχηματισμό εξαιρετικά λεπτών ινών, οι οποίες προσομοιάζονται με τον ιστό της αράχνης. Στην παρουσία των λεπτών αυτών ινών αποδίδεται η αναστολή του σχηματισμού σκόνης, διότι η προερχόμενη από τις κονίες σκόνη αιχμαλωτίζεται και συσσωματώνεται στον ιστό των λεπτών ινιδίων.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, ως υλικά υψηλής παραγωγής σκόνης χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα, οι κονίες αργιλικών ορυκτών, σκωρίας, ιπτάμενης τέφρας, γύψου, άνθρακα, μετάλλων, καθώς και οι χρωστικές ουσίες. Στην εν λόγω μελέτη, εκτός των άλλων υλικών, διερευνάται και η επίδρασης της εφαρμογής της προαναφερθείσας επεξεργασίας σε ένα σύνηθες τσιμέντο τύπου Portland (Normal Portland Cement, NPC). Αρχικά, προθερμαίνονται 200 g τσιμέντου στους 90 °C. Στη συνεχεία, 20 g του προθερμασμένου τσιμέντου αναμιγνύονται με την υδατική διασπορά του πολυτετραφθοροαιθυλενίου ποσοστού 0.05% κ.β. τσιμέντου, και αναδεύονται για πέντε περίπου λεπτά σε κατάλληλο αναμικτήρα, ο οποίος έχει προθερμανθεί στους 90 °C. Στο μίγμα που προκύπτει προστίθενται τα υπόλοιπα 180 g του προθερμασμένου τσιμέντου. Κατόπιν ανάδευσης του νέου μίγματος για πέντε περίπου λεπτά, παράγεται η τροποποιημένη σύνθεση τσιμέντου με χαμηλή τάση σχηματισμού σκόνης.

Η διαδικασία μέτρησης της σκόνης του τσιμέντου περιλαμβάνει τη ρίψη 200 g τσιμέντου από το στόμιο της κορυφής ενός κυλινδρικού δοχείου με εσωτερική διάμετρο 39 cm και ύψος 59 cm. Η αιωρούμενη ποσότητα σκόνης στο δοχείο μετράται σε ύψος 45 cm από τον πυθμένα του με τη χρήση ενός ψηφιακού μετρητή σκόνης, ο οποίος λειτουργεί με την αρχή της σκέδασης του φωτός. Η μέτρηση της αιωρούμενης σκόνης διεξάγεται πέντε

φορές για ένα λεπτό συνεχόμενα μετά την ρίψη του δείγματος στο δοχείο, ενώ αφαιρείται η τιμή που καταγράφηκε πριν τη ρίψη του δείγματος. Ο γεωμετρικός μέσος όρος των καταγραφέντων τιμών υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Logx = 1/5 \sum log(x_i - d) \quad (3.1)$$

όπου x_i είναι η καταγραφόμενη τιμή της αιωρούμενης σκόνης και d είναι η καταγραφόμενη τιμή πριν τη ρίψη του δείγματος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η εφαρμογή της υδατικής διασποράς πολυτετραφθοροαιθυλενίου στο τσιμέντο επιτυγχάνει μία μείωση της αιωρούμενης σκόνης της τάξης του 95%. Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τους συγγραφείς, η μέθοδος που αναπτύσσουν αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο μείωσης της τάσης των κονιών να παράγουν σκόνη.

3.3 Έλαια γλυκόλης πολυαιθυλενίου

Οι Huber & Hoetzl [3.3] αναπτύσσουν μία μέθοδο μείωσης της τάσης των κονιών με βάση το τσιμέντο να σχηματίζουν σκόνη. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η εν λόγω μέθοδος ενδείκνυται για την παρασκευή κολλών πλακιδίων, αρμών πλήρωσης, πολτών στεγανοποίησης, επισκευαστικών κονιαμάτων, κολλών ενίσχυσης, κολλών για σύνθετα συστήματα θερμομόνωσης και συστημάτων διάστρωσης. Για τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης, προτείνεται η χρήση προσθέτων, τα οποία εμφανίζονται σε υγρή μορφή στη θερμοκρασία των 20 ºC, καθώς και η εφαρμογή των προσθέτων στις ξηρές κονίες υπό θερμοκρασία υψηλότερη των 40 ºC. Ιδιαιτέρως κατάλληλα πρόσθετα χαρακτηρίζονται οι αλκοόλες, οι γλυκόλες πολυαιθυλενίου, οι λιπαρές αλκοόλες, οι αλειφατικοί αιθέρες, οι αιθέρες κυτταρίνης, καθώς και οι εστέρες λιπαρών οξέων. Η περιεκτικότητα των υγρών προσθέτων κυμαίνεται από 0.01 έως 6% κ.β. ξηρής σύνθεσης.

Στην εν λόγω μελέτη, ως προσθετό επιλέγεται μία εμπορικά διαθέσιμη πολυαιθυλανογλυκόλη, η οποία εφαρμόζεται σε μία τσιμεντοειδή κόλλα πλακιδίων σε ποσοστό 2% κ.β. κόλλας. Η εφαρμογή του υγρού πρόσθετου στην ξηρή σύνθεση του κονιάματος πραγματοποιείται δια ψεκασμού. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά το μίγμα του ξηρού κονιάματος εισάγεται σε ένα δοχείο ανάμειξης. Στη συνέχεια, το υγρό πρόσθετο εφαρμόζεται στο μίγμα του ξηρού κονιάματος μέσω ενός ψεκαστήρα πίεσης και αναμιγνύεται με το κονίαμα. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας του

προσθέτου στη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης, εξετάζεται και η περίπτωση θέρμανσης της πολυαιθυλανογλυκόλης στους 50 ºC πριν την εφαρμογή της στην κόλλα πλακιδίων. Οι μετρήσεις της εκπεμπόμενης σκόνης πραγματοποιούνται με τη χρήση της συσκευής μέτρησης σκόνης SP3 βάσει του DIN 55999-2 (Καθορισμός κλίμακας για την ανάπτυξη σκόνης των χρωστικών ουσιών και των πληρωτικών υλικών-Μέρος 2: Μέθοδος μελέτης περίπτωσης). Οι μετρήσεις διεξάγονται αμέσως μετά την προσθήκη της πολυαιθυλανογλυκόλης στην κόλλα πλακιδίων καθώς και στις 28 ημέρες από την προσθήκη της γλυκόλης. Συμφώνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η προσθήκη της πολυαιθυλανογλυκόλης στην κόλλα πλακιδίων μειώνει σε μεγάλο βαθμό την ποσότητα της εκπεμπόμενης σκόνης. Διαπιστώνεται, επίσης, ότι η προσθήκη της προθερμασμένης πολυαιθυλανογλυκόλης στην κόλλα πλακιδίων οδηγεί σε ακόμη χαμηλότερα ποσοστά εκπεμπόμενης σκόνης.

3.4 Τροποποιημένα φυτικά έλαια

Οι Guyot et al. [3.4] παρασκευάζουν μία ξηρή σύνθεση η οποία επιδεικνύει μειωμένη τάση σχηματισμού σκόνης και είναι κατάλληλη για την ανάπτυξη υλικών με βάση το τσιμέντο όπως τσιμεντενέματα, κονιάματα, σκυροδέματα και επιχρίσματα. Η μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός τροποποιημένου φυτικού ελαίου ως πρόσθετου στην ξηρή σύνθεση. Ως τροποποιημένο φυτικό έλαιο χαρακτηρίζεται ένα φυτικό έλαιο το οποίο έχει υποστεί ειδική επεξεργασία μέσω τεχνικών, όπως η εκχύλιση ή η χημική τροποποίηση. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, ενδείκνυται η χρήση ελαίων όπως το κραμβέλαιο, το καρυδέλαιο, το λινέλαιο, το ηλιέλαιο, το σταφυλοκουκουτσέλαιο, το αραχιδέλαιο, το φοινικέλαιο, το έλαιο καρδάμου, το σησαμέλαιο, το σογιέλαιο, το βαμβακέλαιο και το έλαιο σιναπιού, τα οποία έχουν τροποποιηθεί χημικά μέσω της αντίδρασης εστεροποίησης με μία αλκοόλη.

Στην εν λόγω μελέτη, επιλέγονται ως πρόσθετα δύο εμπορικά διαθέσιμα τροποποιημένα φυτικά έλαια, τα οποία αποτελούν προϊόντα της εστεροποίησης ενός κραμβέλαιου με αλκοόλη. Συγκεκριμένα, για την παραγωγή του πρώτου φυτικού ελαίου η χρησιμοποιούμενη αλκοόλη είναι η βουτανόλη, ενώ για την παραγωγή του δεύτερου η 2-αιθυλ-εξανόλη. Για λόγους σύγκρισης, εκτός από τα προαναφερθέντα τροποποιημένα φυτικά έλαια, ως πρόσθετα χρησιμοποιούνται ένα μη τροποποιημένο κραμβέλαιο, ένα μη τροποποιημένο ηλιέλαιο καθώς και ένα λινολενικό οξύ. Τα έλαια εφαρμόζονται στην ξηρή

σύνθεση του κονιάματος με τη διαδικασία της απλής ανάμειξης σε ποσοστά 0.7% κ.β. ξηρής σύνθεσης. Η διαδικασία μέτρησης της εκπεμπόμενης σκόνης του κονιάματος περιλαμβάνει αρχικά την πλήρωση μίας φιάλης χωρητικότητας 100 ml με 65 gr ξηρού κονιάματος. Στη συνέχεια, η φιάλη σφραγίζεται με ένα πώμα και ανακινείται χειροκίνητα 10 φορές. Με το πέρας της ανακίνησης, το πώμα αφαιρείται γρήγορα. Η εκπομπή της σκόνης αξιολογείται βάσει της σκόνης που απελευθερώνεται από το στόμιο της φιάλης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας, η εκπεμπόμενη σκόνη των συνθέσεων κονιάματος με τροποποιημένα φυτικά έλαια είναι εξαιρετικά χαμηλή, ενώ οι συνθέσεις κονιαμάτων με μη τροποποιημένο κραμβέλαιο και ηλιέλαιο χαρακτηρίζονται από μία σχετικά υψηλή τάση σχηματισμού σκόνης. Αντίθετα, τόσο το κονίαμα με λινολενικό οξύ όσο και το κονίαμα αναφοράς παράγουν εξαιρετικά υψηλά ποσοστά σκόνης. Για τη διερεύνηση της επίδρασης των ελαίων στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου κονιάματος, παρασκευάζονται δοκίμια με περιεκτικότητα σε έλαια ίση με 0.7% κ.β. ξηρής σύνθεσης. Οι ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων εξετάζονται στην ηλικία των 28 ημερών. Διαπιστώνεται ότι τα κονιάματα με τροποποιημένα φυτικά έλαια παρουσιάζουν εξαιρετική μηχανική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, η θλιπτική και καμπτική αντοχή των δοκιμίων με τροποποιημένα κραμβέλαια αποδεικνύονται αισθητά βελτιωμένες συγκριτικά με τις αντοχές των δοκιμίων με μη τροποποιημένο κραμβέλαιο και ηλιέλαιο, ενώ οι τιμές τους είναι παρόμοιες με τις τιμές της θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής του κονιάματος αναφοράς. Επιπλέον, οι ιδιότητες της πρόσφυσης και της ελεύθερης συρρίκνωσης των δοκιμίων με τροποποιημένο κραμβέλαιο είναι συγκρίσιμες με εκείνες των δοκιμίων με μη τροποποιημένο κραμβέλαιο και ηλιέλαιο. Σε σύγκριση με το κονίαμα αναφοράς, οι ιδιότητες της ελεύθερης συρρίκνωσης των δοκιμίων με τροποποιημένο κραμβέλαιο αποδεικνύονται βελτιωμένες.

Ως εκ τούτου, η προσθήκη τροποποιημένων φυτικών ελαίων στα υλικά με βάση το τσιμέντο μειώνει τον σχηματισμό σκόνης και δεν επηρεάζει δυσμενώς τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

3.5 Έλαια σιλικόνης

Σε άλλη μελέτη τους, οι Guyot et al. [3.5] παρασκευάζουν ξηρές συνθέσεις υλικών με βάση το τσιμέντο μειωμένης τάσης σχηματισμού σκόνης με την προσθήκη ελαίων σιλικόνης. Συγκεκριμένα, ως πρόσθετα της ξηρής σύνθεσης για τη μείωση της

εκπεμπόμενης σκόνης επιλέγονται τρία εμπορικά διαθέσιμα έλαια σιλικόνης, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς το ιξώδες τους στους 20 ºC και την επιφανειακή τους τάση. Για λόγους σύγκρισης, παρασκευάζονται και ξηρές συνθέσεις με ένα εμπορικά διαθέσιμο ορυκτέλαιο. Τα έλαια σιλικόνης και το ορυκτέλαιο εφαρμόζονται στην ξηρή σύνθεση του κονιάματος με τη διαδικασία της απλής ανάμειξης σε ποσοστό 0.7% κ.β. ξηρής σύνθεσης.

Η διαδικασία μέτρησης της εκπεμπόμενης σκόνης του κονιάματος περιλαμβάνει αρχικά την πλήρωση μίας φιάλης χωρητικότητας 100 ml με 65 gr ξηρού κονιάματος. Στη συνέχεια, η φιάλη σφραγίζεται με ένα πώμα και ανακινείται χειροκίνητα 10 φορές. Με το πέρας της ανακίνησης, το πώμα αφαιρείται γρήγορα. Η εκπομπή της σκόνης αξιολογείται βάσει της σκόνης που απελευθερώνεται από το στόμιο της φιάλης.

Διαπιστώνεται ότι η προσθήκη τόσο των ελαίων σιλικόνης όσο και του ορυκτέλαιου στις ξηρές συνθέσεις με βάση το τσιμέντο οδηγεί στην παραγωγή υλικών χαμηλής τάσης σχηματισμού σκόνης. Εκτός από την επίδραση των προαναφερθέντων ελαίων στην τάση του υλικού να παράγει σκόνη, διερευνάται και η επίδρασή τους στη μηχανική συμπεριφορά του σκληρυμένου κονιάματος. Οι ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων εξετάζονται στην ηλικία των 28 ημερών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών, τα σκληρυμένα κονιάματα επιδεικνύουν καλή μηχανική συμπεριφορά. Ειδικότερα, η θλιπτική και η καμπτική αντοχή, η αντοχή σε πρόσφυση και η ελεύθερη συρρίκνωση των κονιαμάτων με έλαια σιλικόνης δε μεταβάλλονται ιδιαιτέρως συγκριτικά με το κονίαμα αναφοράς και το κονίαμα με ορυκτέλαιο. Όσο αφορά στην ελεύθερη συρρίκνωση, τα κονιάματα με έλαια σιλικόνης εμφανίζουν βελτιωμένη συμπεριφορά. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των κονιαμάτων με έλαια σιλικόνης είναι η αυξημένη αντίστασή τους σε πυρκαγιά συγκριτικά με τα κονιάματα με ορυκτέλαιο.

Συμπερασματικά, η προσθήκη ελαίων σιλικόνης σε υλικά με βάση το τσιμέντο επιτυγχάνει μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης χωρίς να επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά τους.

3.6 Υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης

Οι Stohr et al. [3.6] επιχειρούν να παρασκευάσουν συνθέσεις βιομηχανικού κονιάματος χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης και ιδιαιτέρως συνθέσεις κόλλας πλακιδίων, ενέματος πλήρωσης δομικών αρμών, στεγανωτικού κονιάματος, επισκευαστικού κονιάματος,

κονιάματος επιπέδωσης, κόλλας βασικής επένδυσης και κόλλας για σύνθετα συστήματα θερμομόνωσης. Ως πρόσθετο για τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης του ξηρού κονιάματος επιλέγεται ένας εμπορικά διαθέσιμος εστέρας νεοπεντυλο-γλυκόλης με καρβοξυλικό οξύ σε υγρή μορφή. Οι προτεινόμενες περιεκτικότητες σε εστέρα νεοπεντυλο-γλυκόλης κυμαίνονται από 0.5 έως 2% κ.β. ξηρού κονιάματος.

Στην εν λόγω έρευνα, παρασκευάζονται δύο διαφορετικές συνθέσεις κόλλας πλακιδίων, στις οποίες εφαρμόζεται το υγρό πρόσθετο μέσω ενός ψεκαστήρα πίεσης κατά τη διάρκεια της ανάμειξης της ξηρής σύνθεσης. Στην πρώτη κόλλα πλακιδίων η νεοπεντυλο-γλυκόλη εφαρμόζεται σε ποσοστά 0.75 και 1% κ.β. ξηρής σύνθεσης, ενώ στη δεύτερη σε ποσοστά 1 και 3%. Οι μετρήσεις της εκπεμπόμενης σκόνης διεξάγονται με την εφαρμογή μίας μεθόδου βασισμένης στο πρότυπο DIN 55999-2 (Καθορισμός κλίμακας για την ανάπτυξη σκόνης των χρωστικών ουσιών και των πληρωτικών υλικών-Μέρος 2: Μέθοδος μελέτης περίπτωσης). Η συσκευή μέτρησης σκόνης είναι το SP3 της εταιρείας LORENZ MESSGERATEBAU GmbH & Co. KG. Οι μετρήσεις διεξάγονται στις 1, 7 και 56 ημέρες από την παρασκευή των κολλών πλακιδίων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όσο αφορά στην πρώτη κόλλα πλακιδίων, η προσθήκη 0.75% κ.β. ξηρής σύνθεσης νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνει δραστικά την ποσότητα της εκπεμπόμενης σκόνης. Ωστόσο, παρατηρείται ότι στις πενήντα έξι ημέρες, η ποσότητα της εκπεμπόμενης σκόνης είναι ελαφρώς υψηλότερη συγκριτικά με την ποσότητα της σκόνης της πρώτης και έβδομης ημέρας. Ακόμη πιο βελτιωμένα αποτελέσματα εξάγονται για την κόλλα με 1% κ.β. ξηρής σύνθεσης νεοπεντυλο-γλυκόλη. Και στην περίπτωση αυτή, ο βαθμός μείωσης της εκπεμπόμενης σκόνης ελαφρώς φθίνει στις πενήντα έξι ημέρες. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για τη δεύτερη κόλλα πλακιδίων. Συγκεκριμένα, η κόλλα πλακιδίων με 1% κ.β. ξηρής σύνθεσης νεοπεντυλο-γλυκόλη παράγει εξαιρετικά χαμηλότερη ποσότητα σκόνης σε σύγκριση με τη συμβατική κόλλα πλακιδίων, ενώ η προσθήκη 3% κ.β. ξηρής σύνθεσης νεοπεντυλο-γλυκόλης σχεδόν εξαλείφει τον σχηματισμό σκόνης.

3.7 Ορυκτέλαιο

Συνθέσεις βιομηχανικού κονιάματος με χαμηλή εκπομπή σκόνης παρασκευάζονται από τους Laudet & Daviller [3.7]. Η χαμηλή εκπομπή σκόνης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός υγρού προσθέτου, το οποίο προκαλεί συσσωμάτωση των λεπτών σωματιδίων της ξηρής

σύνθεσης του κονιάματος. Οι προτεινόμενες ποσότητες του υγρού προσθέτου κυμαίνονται από 4 έως 10 gr ανά kg ξηρού κονιάματος. Σύμφωνα με τους μελετητές, το υγρό πρόσθετο πρέπει να είναι υδρόφοβο, ενώ ιδιαιτέρως κατάλληλα χαρακτηρίζονται τα ορυκτέλαια, τα παραφινέλαια και οι πολυολεφίνες.

Στην εν λόγω μελέτη, επιλέγεται ένα εμπορικά διαθέσιμο ορυκτέλαιο. Οι προς εξέταση συνθέσεις δομικών υλικών είναι ένα κονίαμα υψηλής αντοχής, ένα επίχρισμα υποστρώματος και ένα επίχρισμα τελικής στρώσης (φινίρισμα). Το ορυκτέλαιο προστίθεται στις προαναφερθείσες συνθέσεις σε ποσοστό 0.5% κ.β. ξηρής σύνθεσης κατά τη διάρκεια της ξηρής ανάμειξης των επιμέρους συστατικών των συνθέσεων. Η διερεύνηση της τάσης των συνθέσεων να παράγουν σκόνη βασίζεται πρότυπο NF P 94-103 του Δεκεμβρίου 2004 σχετικά με τον «καθορισμό του βαθμού εκπομπής σκόνης ενός κονιώδους προϊόντος (the Degree of Emission of Dust, DED)» υπό ελαφρώς διαφοροποιημένες συνθήκες λειτουργίας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ο βαθμός εκπομπής σκόνης του κονιάματος υψηλής αντοχής προσδιορίζεται στο 34%, ενώ του κονιάματος υψηλής αντοχής με ορυκτέλαιο στο 15%. Στο βαθμό που η σύνθεση του κονιάματος αναφοράς περιλαμβάνει μία ολεφίνη, την πολυβινυλική αλκοόλη, σε υψηλό ποσοστό (3.5% κ.β. ξηρού κονιάματος), η σημαντική μείωση του βαθμού εκπομπής σκόνης λόγω της προσθήκης του ορυκτέλαιου χαρακτηρίζεται απροσδόκητη. Συμπεραίνεται από τους μελετητές ότι η παρουσία της ολεφίνης φαίνεται να μην επηρεάζει την εκπομπή σκόνης από την σύνθεση του κονιάματος. Εκτός από την επίδραση του ορυκτέλαιου στον βαθμό της εκπεμπόμενης σκόνης, εξετάζεται και η επίδρασή του στην πρόσφυση και την εργασιμότητα του νωπού κονιάματος. Παρασκευάζονται δύο νωπά κονιάματα, εκ των οποίων το πρώτο αποτελεί το συμβατικό κονίαμα, ενώ το δεύτερο περιέχει ορυκτέλαιο σε ποσοστό 0.5% κ.β. ξηρού κονιάματος. Διαπιστώνεται ότι η τιμή της πρόσφυσης του συμβατικού κονιάματος είναι παρόμοια με την αντίστοιχη τιμή του κονιάματος με ορυκτέλαιο, ενώ η εργασιμότητα του νωπού κονιάματος ελαφρώς βελτιώνεται με την προσθήκη του ορυκτέλαιου.

Ανάλογα αποτελέσματα εξάγονται και στην περίπτωση του επιχρίσματος υποστρώματος. Ο βαθμός εκπομπής σκόνης του συμβατικού επιχρίσματος υποστρώματος είναι 22%, ενώ του επιχρίσματος με 0.5% κ.β. ξηρής σύνθεσης ορυκτέλαιο στο 9%. Για τη διερεύνηση της επίδρασης του ορυκτέλαιου στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του επιχρίσματος,

παρασκευάζονται δύο νωπά επιχρίσματα, εκ των οποίων το πρώτο αποτελεί το συμβατικό επίχρισμα, ενώ το δεύτερο περιέχει ορυκτέλαιο σε ποσοστό 0.5% κ.β. ξηρής σύνθεσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, το επίχρισμα με ορυκτέλαιο παρουσιάζει παρόμοια πρόσφυση, αντοχή σε κάμψη και θλίψη με το συμβατικό επίχρισμα, ενώ εμφανίζει βελτιωμένη εργασιμότητα.

Εξίσου αποτελεσματική αποδεικνύεται η προσθήκη του ορυκτέλαιου στο επίχρισμα τελικής στρώσης σε ποσοστό 0.7% κ.β. ξηρής σύνθεσης. Ο βαθμός εκπομπής σκόνης μειώνεται από το 17% στο μόλις 8% με την προσθήκη του ορυκτέλαιου. Συμπληρωματικά εξετάζεται η επίδραση του ορυκτέλαιου στην υδατοδιαπερατότητα του επιχρίσματος τελικής στρώσης. Διαπιστώνεται ότι το επίχρισμα με ορυκτέλαιο επιδεικνύει υψηλότερη στεγανότητα σε σύγκριση με το συμβατικό επίχρισμα. Επιπλέον, η προσθήκη του ορυκτέλαιου βελτιώνει σε ένα βαθμό την εργασιμότητα του νωπού επιχρίσματος.

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η προσθήκη του ορυκτέλαιου στις ξηρές συνθέσεις των κονιαμάτων επιτυγχάνει μία σημαντική μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης. Επιπλέον, η παρουσία του ορυκτέλαιου δεν υποβαθμίζει τις ιδιότητες των κονιαμάτων και των επιχρισμάτων, ενώ παράλληλα βελτιώνει την εργασιμότητά τους.

Από την ανωτέρω βιβλιογραφική ανασκόπηση, προκύπτει ότι όλες οι ερευνητικές προσπάθειες μείωσης της σκόνης των δομικών υλικών επιλέγουν είτε τη συσσωμάτωση των λεπτών σωματιδίων των ξηρών συνθέσεων είτε την προσθήκη υγρών στις ξηρές συνθέσεις. Ως εκ τούτου, η επιλογή της παρούσας εργασίας να διερευνήσει την επίδραση και των ινών κυτταρίνης στην τάση σχηματισμού σκόνης των δομικών υλικών αποτελεί μία ενδιαφέρουσα συμβολή στις μέχρι τώρα ερευνητικές προσπάθειες.

Βιβλιογραφία

3.1. Roe, D.C. (1993). Methods for suppressing dust emissions from bulk solids. *U.S. Patent No. 5,256,444*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
3.2. Mizuno, Y., Urano, T., Konabe, K., & Kawazoe, M. (2011). Method for dust-preventive treatment of material having dusting property. *U.S. Patent No. 7,871,534*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
3.3. Huber, M., & Hoetzl, K.D. (2011). Method of Dedusting a Pulverulent Building Material Composition. *U.S. Patent No. 20,110,179,976*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

3.4. Guyot, C., & Guillot, L. (2015). Dry composition comprising a binder and a modified vegetable oil. *U.S. Patent No. 8,974,595*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
3.5. Guyot, C., & Guillot, L. (2013). Dry composition comprising a binder and a silicone oil. *U.S. Patent No. 8,506,700*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
3.6. Stohr, W., Hötzl, K.D., Seidl, W., Zuern, S., & Wache, S. (2012). Dust free powdery building material composition. *U.S. Patent No. 8,262,793*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
3.7. Laudet, A., & Daviller, D. (2014). Mortar composition, method of preparation thereof and use thereof. *U.S. Patent No. 8,668,773*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Μέρος Β

Συμβολή Εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
Υλικά και πειραματική διαδικασία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο με χαμηλή τάση σχηματισμού σκόνης. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές δοκιμές που εφαρμόστηκαν για τον χαρακτηρισμό και τη μελέτη των ιδιοτήτων των δομικών αυτών υλικών.

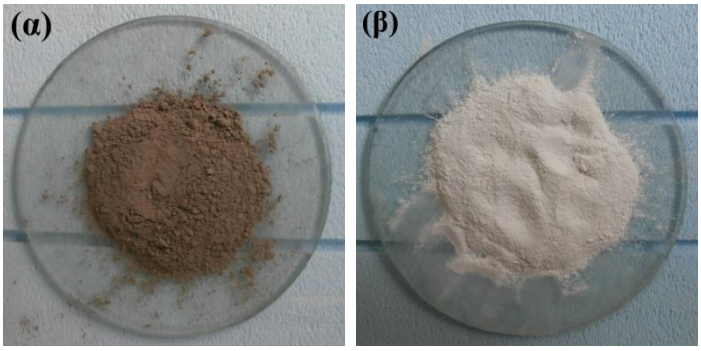
4.1 Υλικά

Ως δομικά υλικά αναφοράς επιλέχθηκαν το τσιμέντο και η κόλλα πλακιδίων, ενώ ως πρόσθετα για τη μείωση της αιωρούμενης σκόνης οι ίνες κυτταρίνης και τα υγρά πρόσθετα.

4.1.1 Κονίες

Για την παρασκευή των σύνθετων υλικών χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό τσιμέντο Portland (Ordinary Portland Cement, OPC) και μία εμπορικά διαθέσιμη κόλλα πλακιδίων με βάση το τσιμέντο (Cementitious Tile Adhesive, CTA). Η κόλλα πλακιδίων είναι μία ελαστική (S_1), υψηλών επιδόσεων (2), αντιολισθηρή (T) κόλλα με βάση το τσιμέντο (C) με

παρατεταμένο ανοιχτό χρόνο (E), δηλαδή πιστοποιείται ως κόλλα κατηγορίας C_2TES_1. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται το τσιμέντο και η κόλλα πλακιδίων που χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά αναφοράς.



Σχήμα 4.1 Δομικά υλικά αναφοράς: (α) τυπικό τσιμέντο Portland και (β) κόλλα πλακιδίων με βάση το τσιμέντο.

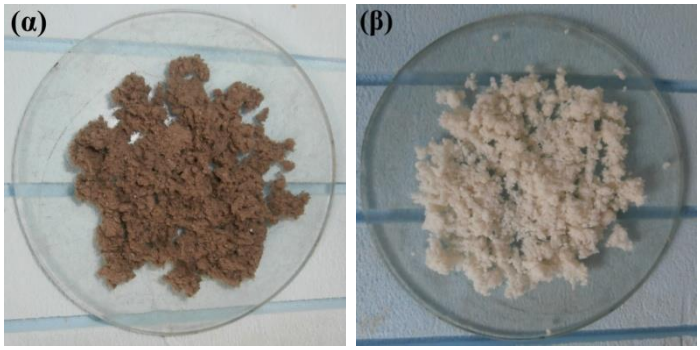
4.1.2 Ίνες κυτταρίνης

Χρησιμοποιήθηκαν εφτά διαφορετικοί τύποι εμπορικά διαθέσιμων ινών υψηλής περιεκτικότητας σε κυτταρίνη (cellulose fibres, CFs) από δύο εταιρίες. Στο εξής οι ίνες της μίας εταιρείας θα χαρακτηρίζονται ως CFs τύπου A, τύπου B, τύπου C, τύπου D, τύπου E και της δεύτερης ως τύπου F και τύπου G. Οι ίνες κυτταρίνης διαφοροποιούνται ως προς την περιεκτικότητα σε κυτταρίνη, την εμφάνιση, τη φαινόμενη πυκνότητα, την τιμή του pH, το ποσοστό τέφρας και το μήκος. Τα γενικά χαρακτηριστικά και το κόστος των ινών κυτταρίνης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Γενικά χαρακτηριστικά και κόστος των ινών κυτταρίνης.

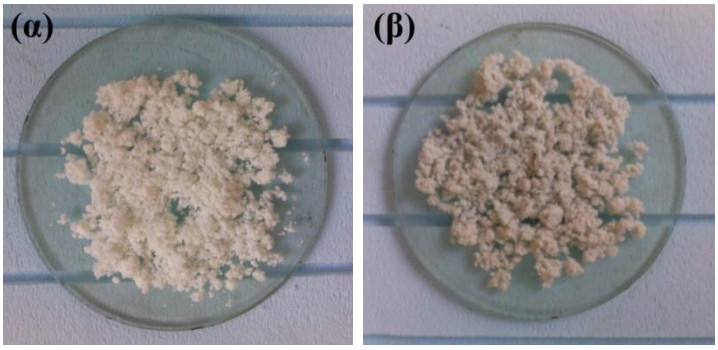
Τύπος CFs	**Χρώμα**	**Ποσοστό κυτταρίνης (%)**	**Φαινόμενη πυκνότητα (g/l)**	**Τιμή pH**	**Ποσοστό τέφρας (%)**	**Μέσο μήκος (μm)**	**Κόστος (€/kg)**
A	γκρι	~60	<90	6-9	<20	1100	1.65
B	υπόλευκο	~70	<120	4-9	<20	500	1.95
C	λευκό	~95	>120	5-9	<8	60	3.00
D	μπεζ	n.a.	<370	4-8	<5	250	1.70
E	κίτρινο	n.a.	<220	4-7	~0.5	100-400	2.00
F	λευκό	~70	150-190	5-8	<1	200	3.00
G	υπόλευκο	~60	80-140	7-9	<15	500	2.60

Σύμφωνα με την εταιρία παραγωγής τους, οι ίνες τύπου A και B χαρακτηρίζονται ως ίνες πρώτης γενιάς, ενώ οι τύπου C, D και E ως νέας γενιάς. Οι ίνες νέας γενιάς υποβλήθηκαν από τον κατασκευαστή σε ειδική επεξεργασία, η οποία αποσκοπούσε στον διαχωρισμό των σωματιδίων και τη μείωση της τάσης σχηματισμού συσσωματωμάτων. Ως εκ τούτου, οι ίνες νέας γενιάς αναμένεται να επιδείξουν βελτιωμένη συμπεριφορά κατά τη διαδικασία ανάμειξής της σύνθεσης σε σύγκριση με τις ίνες πρώτης γενιάς. Όσο αφορά στην προέλευσή τους, οι ίνες πρώτης γενιάς προέρχονται από τεχνιτή ακατέργαστη κυτταρίνη (technical raw cellulose), ενώ οι ίνες δεύτερης γενιάς από φυσική ακατέργαστη κυτταρίνη (natural raw cellulose) ενός ετήσιου φυτού. Ως προς τη μορφή τους, οι ίνες νέας γενιάς εμφανίζουν πιο κοκκώδη μορφή. Ωστόσο, βασική διαφορά των ινών πρώτης και νέας γενιάς είναι η επικάλυψη των δεύτερων με λάδι (oil coated). Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία τους, βασική πρώτη ύλη των ινών τύπου F και G είναι η καθαρή κυτταρίνη, η οποία περιέχει αλειφατικούς υδρογονάνθρακες. Στα ΣχήματαΣχήμα 4.2 & Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι ίνες πρώτης και νέας γενιάς αντίστοιχα, ενώ στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι ίνες τύπου F και G.



Σχήμα 4.2 Ίνες κυτταρίνης πρώτης γενιάς: (α) τύπου A και (β) τύπου B.

Σχήμα 4.3 Ίνες κυτταρίνης νέας γενιάς: (α) τύπου C, (β) τύπου D και (γ) τύπου E.



Σχήμα 4.4 Ίνες κυτταρίνης: (α) τύπου F και (β) τύπου G.

4.1.3 Υγρά πρόσθετα

Τα υγρά πρόσθετα που εξετάστηκαν διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (α) εστέρες νεοπεντυλο-γλυκόλης σε υγρή μορφή και (β) σιλικόνη σε υγρή μορφή. Το κριτήριο επιλογής των υγρών προσθέτων είναι η αποτελεσματικότητά τους ως προς τη μείωση του σχηματισμού σκόνης, καθώς και η ευκολία της εφαρμογής τους στις συνθέσεις των επιλεχθέντων δομικών υλικών. Επιπλέον, επιλέγονται υγρά τα οποία δε συσσωματώνονται κατά την εφαρμογή τους στις ξηρές συνθέσεις. Τέλος, η καταλληλότητα των υγρών αξιολογείται και βάσει της επίδρασής τους στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τελικού δομικού προϊόντος.

Όσο αφορά στους εστέρες νεοπεντυλο-γλυκόλης ή αλλιώς 2,2-διμέθυλο-1,3-προπανοδιόλη (neopentyl-glycol, 2,2-dimethyl-1,3-propanediol), η επιλογή τους βασίστηκε στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που επιδεικνύουν. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η δράση των εστέρων ως προς τη μείωση του σχηματισμού σκόνης οφείλει να είναι ενεργή για μεγάλο χρονικό διάστημα και μετά την συσκευασία των δομικών υλικών, είναι απαραίτητο οι εστέρες να επιδεικνύουν σταθερή συμπεριφορά ως προς την οξείδωση και κυρίως να μην αντιδρούν χημικά με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Ως εκ τούτου, επιλέγονται εστέρες οι οποίοι αποτελούν προϊόντα εστεροποίησης της νεοπεντυλο-γλυκόλης με οξέα ή καρβοξυλικά οξέα. Οι εν λόγω συνθετικοί εστέρες λίπανσης επιδεικνύουν μειωμένο δυναμικό οξείδωσης ή υδρόλυσης συγκριτικά με τους φυσικούς εστέρες. Επιπλέον, είναι σημαντικό οι επιλεχθέντες εστέρες ως πρόσθετα μείωσης της σκόνης να χαρακτηρίζονται από χαμηλό βαθμό εξάτμισης μετά από 24 ώρες. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η μακροχρόνια δράση τους ως προς τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης του υλικού. Τέλος, προτιμήθηκαν εστέρες νεοπεντυλο-γλυκόλης σε υγρή μορφή έναντι των εστέρων στερεής μορφής. Το πλεονέκτημα των εστέρων υγρής μορφής είναι η ευκολία και η ομοιογένεια

της εφαρμογής τους σε κονιοποιημένες συνθέσεις δομικών υλικών, συγκριτικά με τους εστέρες στερεής μορφής. Επιπλέον, απαιτούνται μικρότερες ποσότητες στην περίπτωση των υγρών εστέρων. Παράλληλα, οι εστέρες σε υγρή μορφή αναμένεται να βελτιώσουν σε μεγαλύτερο βαθμό την πρόσφυση της κόλλας πλακιδίων συγκριτικά με τους εστέρες στερεής μορφής.

Η πρώτη κατηγορία εστέρων που διερευνήθηκε είναι η νεοπεντυλο-γλυκόλη με καρβοξυλικό οξύ διαιθυλεξάνιου (neopentyl-glycol diethylhexano). Συγκριμένα, εξετάστηκαν δύο εμπορικά διαθέσιμοι εστέρες νεοπεντυλο-γλυκόλης διαιθυλεξανίου, οι οποίοι στο εξής θα χαρακτηρίζονται ως NPG τύπου A και NPG τύπου B. Η δεύτερη κατηγορία εστέρα που επιλέχθηκε ως πρόσθετο για τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης είναι ένας δι-εστέρας νεοπεντυλο-γλυκόλης με καπρυλικό οξύ (neopentyl-glycol dicaprylate). Στο εξής, η νεοπεντυλο-γλυκόλη αυτή θα αναφέρεται ως NPG τύπου C. Οι τυπικές ιδιότητες και το κόστος των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Η δεύτερη κατηγορία υγρών προσθέτων είναι ένα έλαιο πολυδιμεθυλοσιλοξάνης (polydimethylsiloxane, PDMS). Η σιλικόνη αυτή αποτελεί συνδυασμό ενός πολυμερούς διμεθυλοσιλικόνης (dimethylsilicone polymer) και μίας τριμεθυλοσιλοξυπυριτικής ρητίνης (trimethylsiloxysilicate resin) υψηλού μοριακού βάρους. Στο εξής, το έλαιο σιλικόνης θα αναφέρεται ως υγρό PDMS. Οι τυπικές ιδιότητες του υγρού σιλικόνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.2 Τυπικές ιδιότητες και κόστος των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Τύπος NPG	**Χρώμα (Hazen)**	**Οξύτητα (mg,KOH/gr)**	**Σαπωνοποίηση (mg, KOH/gr)**	**Ιωδίνη (gr I_2/100gr)**	**Κόστος (€/kg)**
A	30	0.02	312	<1.00	8.6
B	21	0.01	310.97	0.10	2.9
C	n.a.	≤0.50	592 - 312	<8	17.5

Πίνακας 4.3 Τυπικές ιδιότητες του υγρού σιλικόνης.

Τύπος	**Χρώμα**	**Σιλικόνη (%)**	**Ιξώδες στους 25° C (mm^2/sec)**	**Δείκτης διάθλασης στους 25° C**	**Κυκλοτετρασιλοξάνιο/ Κυκλοπετρασιλοξάνιο (%)**
PDMS	άχρωμο	100	40-1000	1408-1410	<0.1

4.2 Συνθέσεις και παρασκευή δοκιμίων

Αρχικά, παρασκευάζονται οι ξηρές συνθέσεις των υλικών αναφοράς (κόλλα πλακιδίων, τσιμέντο) με τα επιλεχθέντα πρόσθετα. Στη συνέχεια, παρασκευάζονται τα αντίστοιχα κονιάματα ή πάστες τους για τη χύτευση των δοκιμίων τους. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι συνθήκες συντήρησης των δοκιμίων έως την ηλικία διεξαγωγής των δοκιμών.

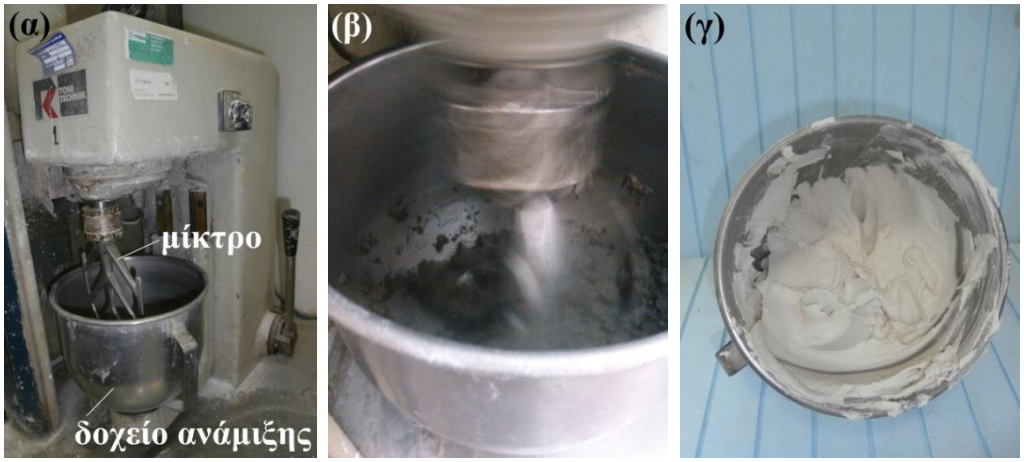
4.2.1 Κόλλα πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Οι ξηρές συνθέσεις της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης παρασκευάστηκαν με την προσθήκη των ινών κυτταρίνης σε ποσοστά 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. ξηρής σύνθεσης. Σημειώνεται ότι τα ποσοστά των ινών κυτταρίνης στις συνθέσεις της κόλλας πλακιδίων δεν υπολογίζονται σύμφωνα με το βάρος της κόλλας, αλλά σύμφωνα με το βάρος της τελικής σύνθεσης. Οι ίνες προστίθενται στις συνθέσεις όπως παραλαμβάνονται από τον κατασκευαστή χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Η ομογενοποίηση των συνθέσεων της κόλλας πλακιδίων με τις ίνες κυτταρίνης επετεύχθη με ισχυρή και παρατεταμένη ανακίνησή τους σε αεροστεγώς κλειστές σακούλες.

Για την παρασκευή της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης, η αναλογία νερού προς κόλλα πλακιδίων διατηρήθηκε ίση με 0.28 (W/CTA=0.28). Οι αναλογίες μίξης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Η παραγωγή της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-2 [4.1]. Συγκεκριμένα, οι ξηρές συνθέσεις της κόλλας πλακιδίων αναμειγνύονται με το νερό της μίξης μέχρι τον σχηματισμό ενός ομοιόμορφου μίγματος. Η συνολική διάρκεια ανάδευσης είναι 180 sec. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται ο αναμικτήρας κονιαμάτων, η διαδικασία ανάμειξης των συνθέσεων και η νωπή κόλλα πλακιδίων.

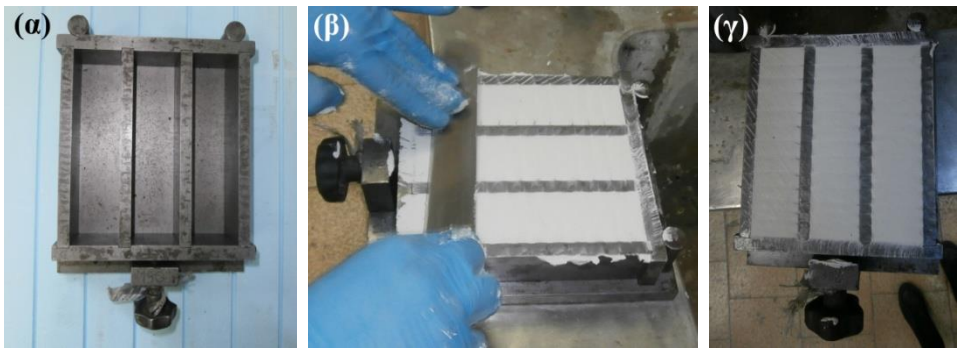
Πίνακας 4.4 Αναλογίες μίξης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Αριθμός σύνθεσης	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
CTA (gr)	2500	2492.5	2485	2475	2462.5
CFs (gr)	0	7.5	15	25	37.5
Νερό (ml)	700	700	700	700	700



Σχήμα 4.5 Διαδικασία παρασκευής νωπών κονιαμάτων: (α) αναμικτήρας κονιαμάτων, (β) ανάδευση τσιμεντοπολτού και (γ) νωπή κόλλα πλακιδίων.

Για την παρασκευή των δοκιμίων της κόλλας πλακιδίων επιλέγονται τριπλές μήτρες πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm (Σχήμα 4.6^{α}). Η μήτρα πληρούται με τη νωπή κόλλα πλακιδίων σε δύο στρώσεις, καθεμία εκ των οποίων συμπυκνώνεται με κρούσεις σε μία στερεή επιφάνεια. Συγκεκριμένα, η μία πλευρά της μήτρας κατά μήκος των διαμερισμάτων της διατηρείται σταθερή στη στερεή βάση, ενώ η απέναντι πλευρά αφήνεται να πέσει δέκα φορές από ύψος περίπου 30 mm από τη βάση. Η διαδικασία κρούσης επαναλαμβάνεται και για την πλευρά που διατηρήθηκε σταθερή στην στερεή βάση. Η περίσσεια κόλλας πλακιδίων αφαιρείται με τη χρήση μίας σπάτουλας με ελαστική λάμα, εκτελώντας μία εγκάρσια σχεδόν κατακόρυφη πριονωτή κίνηση σε κάθε διεύθυνση ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες των δοκιμίων. Τέλος, τοποθετείται πλάκα από γυαλί ή άλλο αδιάβροχο υλικό που δεν αντιδρά με το τσιμέντο διαστάσεων περίπου 210 x 185 x 6 mm επάνω στη μήτρα. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων της κόλλας πλακιδίων.



Σχήμα 4.6 Διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων της κόλλας πλακιδίων: (α) τριπλή μήτρα πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, (β) αφαίρεση της περίσσειας κονιάματος με σπάτουλα και (γ) μήτρα πληρωμένη με κόλλα πλακιδίων.

4.2.2 Κόλλα πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Οι περιεκτικότητες των συνθέσεων της κόλλας πλακιδίων σε υγρά πρόσθετα είναι 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων. Σημειώνεται ότι τα ποσοστά των υγρών προσθέτων στις ξηρές συνθέσεις της κόλλας πλακιδίων υπολογίζονται κατά βάρος (%, κ.β.) της κόλλας. Υπάρχουν τρεις εναλλακτικοί τρόποι εφαρμογής των υγρών πρόσθετων στις ξηρές συνθέσεις. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει την προσθήκη των υγρών στις ξηρές συνθέσεις της κόλλας πλακιδίων. Ο δεύτερος τρόπος προσθήκης των υγρών στις ξηρές συνθέσεις είναι ο ψεκασμός της κόλλας με τα υγρά πρόσθετα υπό συνθήκες ανάδευσης της κόλλας, ενώ ο τρίτος τρόπος είναι η απλή ανάμειξη ή ανάδευση της κόλλας με τα υγρά πρόσθετα. Είναι προφανές ότι ο δεύτερος και ο τρίτος τρόπος προσθήκης των υγρών προσθέτων στις ξηρές συνθέσεις οδηγούν σε πιο ομοιογενή κατανομή των υγρών στη σύνθεση. Ωστόσο, στο βαθμό που η εφαρμογή διαδικασιών ανάδευσης για την προσθήκη των υγρών στην κόλλα προκαλεί σημαντική απώλεια σκόνης, στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ο πρώτος τρόπος προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των μετρήσεων της αιωρούμενης σκόνης. Τον ψεκασμό της κόλλας πλακιδίων με τα υγρά πρόσθετα ακολούθησε ισχυρή και παρατεταμένη ανακίνηση των νέων συνθέσεων σε αεροστεγώς κλειστές σακούλες.

Για την παρασκευή της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα, η αναλογία νερού προς κόλλα πλακιδίων διατηρήθηκε ίση με 0.28 (W/CTA=0.28). Οι αναλογίες μίξης της κόλλας πλακιδίων με τα υγρά πρόσθετα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5. Η διαδικασία παρασκευής της νωπής κόλλας πλακιδίων με τα υγρά πρόσθετα και των αντίστοιχων δοκιμίων είναι ίδια με τη διαδικασία παρασκευής της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης (βλ. §4.2.1).

Πίνακας 4.5 Αναλογίες μίξης της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Αριθμός σύνθεσης	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
CTA (gr)	2500	2500	2500	2500	2500
NPG (gr)	0	7.5	12.5	25	37.5
Νερό (ml)	700	700	700	700	700

Όσο αφορά στις συνθήκες συντήρησης, οι πληρωμένες με τη νωπή κόλλα πλακιδίων μήτρες τοποθετούνται αμέσως στον υγρό θάλαμο θερμοκρασίας 20 ± 1 ºC και σχετικής

υγρασίας όχι χαμηλότερης του 90%. Τα δοκίμια της κόλλας πλακιδίων ξεκαλουπώνονται με ιδιαίτερη προσοχή μετά το πέρας 3 ημερών. Τα δοκίμια της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων συντηρούνται στον υγρό θάλαμο έως την ηλικία των 7 ημερών και στη συνέχεια, τοποθετούνται σε κλειστό χώρο του εργαστηρίου θερμοκρασίας 20 ± 2 ºC και σχετικής υγρασίας όχι χαμηλότερης του 50%.

4.2.3 Τσιμέντο με ίνες κυτταρίνης

Οι ξηρές συνθέσεις του τσιμέντου παρασκευάστηκαν με την προσθήκη των ινών κυτταρίνης σε ποσοστά 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου. Η ποσότητα των ινών κυτταρίνης στις συνθέσεις του τσιμέντου υπολογίζονται σύμφωνα με το βάρος του τσιμέντου. Η ομογενοποίηση των συνθέσεων του τσιμέντου με τις ίνες κυτταρίνης επετεύχθη με ισχυρή και παρατεταμένη ανακίνησή τους σε αεροστεγώς κλειστές σακούλες.

Την παρασκευή των ξηρών συνθέσεων ακολουθεί η προσθήκη του νερού μίξης. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο διατηρείται σε μία σταθερή τιμή ίση με 0.50 (W/C=0.50), ανεξάρτητα από την ποσότητα των ινών που προστίθενται στο τσιμέντο. Οι αναλογίες μίξης του τσιμέντου με τις ίνες κυτταρίνης για την παρασκευή του τσιμεντοπολτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 Αναλογίες μίξης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης.

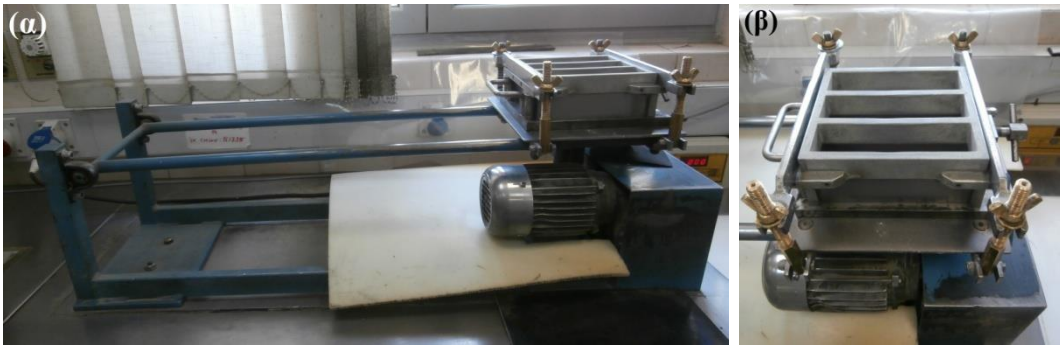
Αριθμός σύνθεσης	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
OPC (gr)	450	450	450	450	450
CFs (gr)	0	1.35	2.70	4.50	6.75
Πρότυπη άμμος CEN (gr)	1350	1350	1350	1350	1350
Νερό (ml)	225	225	225	225	225

Η παρασκευή του νωπού τσιμεντοπολτού πραγματοποιήθηκε με μηχανική ανάδευση των ξηρών συνθέσεων του τσιμέντου με το νερό μίξης στον αναμικτήρα κονιαμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 [4.2]. Αρχικά, τοποθετήθηκαν το νερό και το τσιμέντο στο δοχείο ανάμειξης αποφεύγοντας προσεχτικά την απώλεια νερού ή τσιμέντου. Η ποσότητα του τσιμέντου στην κάθε σύνθεση είναι 450 gr και του νερού μίξης 225 gr έτσι ώστε η αναλογία νερού προς τσιμέντο να διατηρείται ίση με 0.50. Αμέσως μόλις το νερό και το τσιμέντο έρθουν σε επαφή, τίθεται σε λειτουργία ο αναμικτήρας σε χαμηλή ταχύτητα.

Μετά το πέρας των 30 sec ανάμειξης του τσιμέντου με το νερό, προστίθεται η πρότυπη άμμος CEN σε ποσότητα 1350 gr με σταθερό ρυθμό και συνεχίζεται η ανάδευση για τα επόμενα 30 sec. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ταχεία ανάμειξη διάρκειας 30 sec. Ακολουθεί παύση της λειτουργίας του αναμικτήρα για 90 sec. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 30 sec, απομακρύνεται όλο το κονίαμα που επικολλάται πάνω στα τοιχώματα και στο κάτω μέρος του δοχείου ανάμειξης με τη βοήθεια ενός κατάλληλου ελαστικού ή πλαστικού ξέστρου και φέρεται στο μέσον του δοχείου ανάμειξης. Η διαδικασία παρασκευής του τσιμεντοπολτού ολοκληρώνεται με ανάμειξη διάρκειας 60 sec σε υψηλή ταχύτητα. Σημειώνεται ότι η ανάμειξη χαμηλής ταχύτητας επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του μίκτρου κατά την περιστροφική κίνηση σε ταχύτητα 140 ± 5 min^{-1} και κατά την πλανητική κίνηση σε ταχύτητα 62 ± 5 min^{-1}. Αντίστοιχα, η ανάμειξη υψηλής ταχύτητας επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του μίκτρου κατά την περιστροφική κίνηση σε ταχύτητα 285 ± 10 min^{-1} και κατά την πλανητική κίνηση σε ταχύτητα 125 ± 10 min^{-1}.

Για την παρασκευή των δοκιμίων επιλέγονται τριπλές μήτρες πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm. Η προετοιμασία των δοκιμίων του τσιμεντοπολτού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 [4.2]. Όσο αφορά στην παρασκευή των δοκιμίων τσιμεντοπολτού, η συμπύκνωση του μίγματος πραγματοποιείται με τη χρήση μίας συσκευής συμπύκνωσης με κρούση, η οποία ονομάζεται τράπεζα δόνησης (Σχήμα 4.7^{α}). Αρχικά, η μήτρα τοποθετείται επάνω στην πλάκα της τράπεζας δόνησης και στερεώνεται μέσω των σφιγκτήρων με κοχλία (Σχήμα 4.7^{β}). Κάθε διαμέρισμα της μήτρας πληρούται με τον νωπό τσιμεντοπολτό σε δύο στρώσεις με τη χρήση κατάλληλης σέσουλας. Η πρώτη στρώση τσιμεντοπολτού απλώνεται ομοιόμορφα χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο έλασμα διάστρωσης, το οποίο διατηρείται κατακόρυφο με τις ωτίδες του σε επαφή με το πλαίσιο και σύρεται μία φορά προς τη μία διεύθυνση και μία φορά προς την αντίθετη διεύθυνση, κατά μήκος κάθε διαμερίσματος. Ακολουθεί η συμπύκνωση της πρώτης στρώσης με 60 κρούσεις σε χρονικό διάστημα 60 ± 3 sec. Κατά την λειτουργία της συσκευής, η τράπεζα ανυψώνεται με την βοήθεια ενός έκκεντρου και αφήνεται να πέσει ελεύθερα από ύψος 15 ± 0.3 mm. Στη συνέχεια, η μήτρα πληρούται με τη δεύτερη στρώση τσιμεντοπολτού, η οποία διαστρώνεται με ένα μικρό έλασμα διάστρωσης και συμπυκνώνεται με 60 επιπλέον κρούσεις. Η μήτρα απομακρύνεται από την τράπεζα δόνησης. Η περίσσεια τσιμεντοπολτού αφαιρείται με τη χρήση μίας σπάτουλας με ελαστική λάμα, εκτελώντας μία εγκάρσια σχεδόν κατακόρυφη πριονωτή κίνηση σε κάθε διεύθυνση ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες των δοκιμίων. Τα υπολείμματα

τσιμεντοπολτού που υπάρχουν επάνω στη μήτρα σκουπίζονται μετά την εξομάλυνση της επιφάνειας των δοκιμίων. Τέλος, τοποθετείται πλάκα από γυαλί ή άλλο αδιάβροχο υλικό που δεν αντιδρά με το τσιμέντο διαστάσεων περίπου 210 x 185 x 6 mm επάνω στη μήτρα.



Σχήμα 4.7 Συμπύκνωση νωπού τσιμεντοπολτού: (α) τράπεζα δόνησης και (β) τοποθέτηση μήτρας τσιμεντοπολτού στο πλαίσιο της τράπεζας δόνησης.

4.2.4 Τσιμέντο με υγρά πρόσθετα

Όσο αφορά στα υγρά πρόσθετα, οι περιεκτικότητες των συνθέσεων του τσιμέντου σε υγρά πρόσθετα είναι 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου. Η ποσότητα των υγρών πρόσθετων στις συνθέσεις τσιμέντου υπολογίζονται σύμφωνα με το βάρος του τσιμέντου. Ομοίως με την κόλλα πλακιδίων, τα υγρά εφαρμόζονται στις ξηρές συνθέσεις του τσιμέντου δια του ψεκασμού. Τον ψεκασμό του τσιμέντου με τα υγρά πρόσθετα ακολούθησε ισχυρή και παρατεταμένη ανακίνηση των νέων συνθέσεων σε σακούλες αεροστεγώς κλειστές.

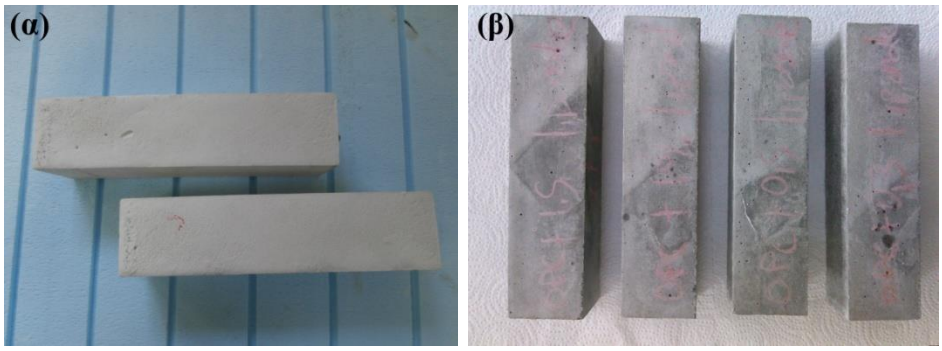
Την παρασκευή των ξηρών συνθέσεων ακολουθεί η προσθήκη του νερού μίξης. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο διατηρείται σε μία σταθερή τιμή ίση με 0.50 (W/C=0.50), ανεξάρτητα από την ποσότητα των υγρών που προστίθενται στο τσιμέντο. Οι αναλογίες μίξης του τσιμέντου με τα υγρά πρόσθετα για την παρασκευή του τσιμεντοπολτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7. Η διαδικασία παρασκευής του νωπού τσιμεντοπολτού με τα υγρά πρόσθετα, καθώς και των αντίστοιχων δοκιμίων, είναι η ίδια με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης (βλ. §4.2.3).

Όσο αφορά στις συνθήκες συντήρησης, οι πληρωμένες με τον νωπό τσιμεντοπολτό μήτρες τοποθετούνται αμέσως στον υγρό θάλαμο θερμοκρασίας 20 ± 1 ºC και σχετικής υγρασίας όχι χαμηλότερης του 90%. Τα δοκίμια του τσιμεντοπολτού ξεκαλουπώνονται με ιδιαίτερη

προσοχή μετά το πέρας 24 h. Τα δοκίμια του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού συντηρούνται σε νερό θερμοκρασίας 20 ± 1 ºC μέσα σε κατάλληλη δεξαμενή έως τη θραύση τους συμφώνα με το πρότυπο EN 196-1 [4.2]. Δοκίμια σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων και σκληρυμένου τσιμεντοπολτού παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8.

Πίνακας 4.7 Αναλογίες μίξης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα.

Αριθμός σύνθεσης	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
OPC (gr)	450	450	450	450	450
NPG / PDMS (gr)	0	1.35	2.70	4.50	6.75
Πρότυπη άμμος CEN (gr)	1350	1350	1350	1350	1350
Νερό (ml)	225	225	225	225	225



Σχήμα 4.8 Σκληρυμένα δοκίμια ηλικίας 28 ημερών: (α) κόλλας πλακιδίων και (β) τσιμεντοπολτού.

4.3 Πειραματικές δοκιμές

Σε πρώτο επίπεδο, παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της νωπής κόλλας πλακιδίων και του νωπού τσιμεντοπολτού. Σε δεύτερο επίπεδο, παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των σκληρυμένων δοκιμίων. Τέλος, παρουσιάζονται οι δοκιμές προσδιορισμού της τάσης των ξηρών συνθέσεων να σχηματίζουν σκόνη.

4.3.1 Δοκιμές κόλλας πλακιδίων

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κόλλα πλακιδίων βασίζεται στις πρότυπες δοκιμές κονιαμάτων και διαφέρει από τις πρότυπες δοκιμές πιστοποίησης των κολλών πλακιδίων. Μολαταύτα, η διεξαγωγή των εν λόγω δοκιμών κρίθηκε απαραίτητη

για τη διερεύνηση της επίδρασης των προσθέτων στις μηχανικές ιδιότητες της κόλλας πλακιδίων.

4.3.1.1 Δοκιμή προσδιορισμού λευκότητας της κόλλας πλακιδίων

Το χρώμα είναι ιδιότητα υψίστης σημασίας στην επιλογή για την πλειοψηφία των διαφόρων βιομηχανικών εφαρμογών. Η χρήση λευκών ορυκτών πρώτων υλών προσδίδουν μεγαλύτερη αξία στις κόλλες πλακιδίων. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητη η διερεύνηση της επίδρασης της προσθήκης των ινών κυτταρίνης στη λευκότητα της κόλλας πλακιδίων. Η επίδραση της προσθήκης των υγρών της νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν εξετάστηκε, διότι είναι άχρωμα και η προσθήκη τους στην κόλλα πλακιδίων δεν θα επηρέαζε το χρώμα της.

Ως λευκότητα ορίζεται ο βαθμός με τον οποίο προσπίπτον φως καθορισμένου μήκους ανακλάται από την επιφάνεια ενός υλικού. Συνήθως, η λευκότητα μετριέται σε σύγκριση με το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), το οποίο θεωρείται απόλυτα λευκό. Η μέθοδος μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μία εμπειρική μέθοδο που υιοθετείται ευρέως στη τσιμεντοβιομηχανία. Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται στο σύστημα του χρωματικού προσδιορισμού που εισηγήθηκε η Commission International de l' Eclairage (C.I.E.). Επειδή δεν υπάρχει ένα μόνο χρωματικό μοντέλο που να μπορεί να περιγράψει όλα τα διαθέσιμα χρώματα, η C.I.E. έχει υιοθετήσει τρία υποθετικά χρώματα ως πρότυπα με βάση τα οποία προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα.

Σε γενικές γραμμές, το σύστημα ταξινόμησης της C.I.E. ταξινομεί το χρώμα με βάση τον τρόπο που το βλέπει ο άνθρωπος. Η διαδικασία στηρίχθηκε στην επιστήμη της χρωματομετρίας, δηλαδή της ποσοτικής μέτρησης του χρώματος. Το σύστημα αυτό έχει ως στόχο να τυποποιήσει τις μετρήσεις του χρώματος. Για το λόγο αυτό εισήχθησαν τρεις συναρτήσεις οι οποίες ονομάστηκαν X, Y και Z και έχουν συγκεκριμένη κατανομή στο χρωματικό φάσμα. Με τις παραπάνω συναρτήσεις και με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία υπολογίζονται όλα τα χρωματικά χαρακτηριστικά ενός υλικού. Ωστόσο, όταν στο φωτόμετρο επιβληθεί ένα σύστημα φωτοκυψελικών φίλτρων, το οποίο έχει την ίδια φασματική αντίδραση όπως οι συναρτήσεις X, Y και Z, τότε λαμβάνονται κατευθείαν απόλυτες τιμές. Επομένως, για κάθε δείγμα λαμβάνονται ουσιαστικά τρεις μετρήσεις X, Y και Z, οι οποίες αντιστοιχούν στο ποσοστό επί τοις εκατό της λευκότητας, λαμπρότητας

και κιτρινάδας αντίστοιχα του δείγματος σε σύγκριση με το «απόλυτα λευκό» πρότυπο του MgO. Η παράμετρος Y καθορίζει την ιδιότητα της φωτεινότητας του χρώματος [4.3].

Για τον προσδιορισμό της λευκότητας, εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης ινών κυτταρίνης στη λαμπρότητα της κόλλας. Συγκεκριμένα, με τη χρήση ενός φωτοηλεκτρικού φωτόμετρου ανάκλασης, μετρήθηκε το ανακλώμενο από την επιφάνεια του υλικού φως. Αρχικά, μετρήθηκε ο συντελεστής Y του οξειδίου του μαγνησίου (Y_{MgO}), ο οποίος αντιστοιχεί σε 100% λαμπρότητα. Στη συνέχεια, μετρήθηκε ο συντελεστής Y του κάθε δείγματος κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης (Y_{CTA}). Το ποσοστό επί τοις εκατό της λαμπρότητας του κάθε δείγματος κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης υπολογίστηκε σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

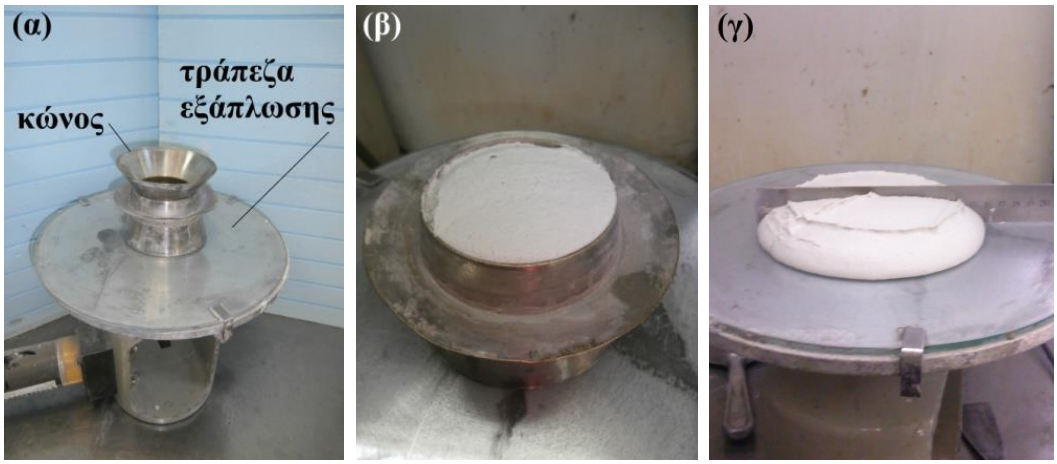
$$\%\ \lambda\alpha\mu\pi\rho\acute{o}\tau\eta\tau\alpha = \frac{Y_{MgO}}{Y_{CTA}} \cdot 100\% \qquad (4.1)$$

4.3.1.2 Δοκιμή προσδιορισμού συνεκτικότητας νωπής κόλλας

Η τιμή της εξάπλωσης (flow) του τσιμεντοκονιάματος αποτελεί ένα δείκτη της εργασιμότητας του υλικού και εκφράζεται με τη μέση διάμετρο σε cm που αποκτά μία κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος ή κονιάματος, η οποία μορφώθηκε επάνω στην τράπεζα εξάπλωσης, έπειτα από ορισμένο αριθμό αναπηδήσεων της τράπεζας. Η τιμή της εξάπλωσης προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3 [4.4].

Η συσκευή εξάπλωσης αποτελείται από μία κινούμενη διάταξη, η οποία στηρίζεται σε ένα πλαίσιο και μπορεί να προσκρουσθεί πάνω στο πλαίσιο με τη βοήθεια ενός περιστρεφόμενου έκκεντρου (Σχήμα 4.9$^{\alpha}$). Η διαδικασία δοκιμής περιλαμβάνει αρχικά την τοποθέτηση του καλουπιού-κώνου εξάπλωσης στο κέντρο της τράπεζας εξάπλωσης, η οποία έχει καθαριστεί προσεκτικά. Ο κώνος εξάπλωσης έχει ύψος 60 mm και εσωτερική διάμετρο στη βάση 100 mm και στην κορυφή 70 mm. Στη συνέχεια, το καλούπι πληρούται με τη νωπή κόλλα πλακιδίων σε δύο στρώσεις, καθεμία εκ των οποίων συμπυκνώνεται με δέκα χτύπους με τον κόπανο. Σημειώνεται ότι το καλούπι συγκρατείται σταθερά στη θέση του κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης. Η περίσσεια κονιάματος απομακρύνεται από την κορυφή του καλουπιού με τη χρήση μίας σπάτουλας με ελαστική λάμα εκτελώντας μία σχεδόν κάθετη και πριονωτή κίνηση (Σχήμα 4.9$^{\beta}$). Μετά την πάροδο περίπου 15 sec, το καλούπι απομακρύνεται κατακόρυφα. Η τράπεζα εξάπλωσης υποβάλλεται σε πτώση από το ύψος των 10 mm, 15 φορές με ρυθμό μίας πτώσης ανά δευτερόλεπτο.

Η διάμετρος εξάπλωσης της κόλλας πλακιδίων μετράται σε δύο κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις με τη χρήση βαθμονομημένου χάρακα (Σχήμα 4.9^{γ}). Η τελική τιμή της διαμέτρου εξάπλωσης υπολογίζεται ως η μέση τιμή των δύο αυτών τιμών.



Σχήμα 4.9 Δοκιμή εξάπλωσης: (α) συσκευή εξάπλωσης, (β) πλήρωση κώνου με κόλλα πλακιδίων και (γ) μέτρηση μίας διαμέτρου εξάπλωσης.

4.3.1.3 Δοκιμή προσδιορισμού πυκνότητας νωπής κόλλας

Η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) προσδιορίζεται με τον υπολογισμό της μάζας του κονιάματος που περιέχεται σε έναν γνωστό όγκο. Παρασκευάζεται ένα δείγμα νωπού κονιάματος με ελάχιστο όγκο 3 λίτρων ή τουλάχιστον 1.5 φορές τον απαιτούμενο για την εκτέλεση της δοκιμής όγκο. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-6 [4.5], συνίστανται τρεις διαφορετικές μέθοδοι πλήρωσης και συμπύκνωσης του κονιάματος μέσα στο βαθμονομημένο δοχείο, ο όγκος του οποίου πρέπει να είναι περίπου 1 λίτρο. Σημειώνεται ότι το δοχείο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας του νωπού κονιάματος σε αέρα είναι κατάλληλο (Σχήμα 4.10^{α}).

Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τη συνεκτικότητα του νωπού κονιάματος, όπως προσδιορίζεται με τη δοκιμή της εξάπλωσης. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι εξής τρεις μέθοδοι:

(α) Μέθοδος Δόνησης (Vibration Method) όταν η τιμή της εξάπλωσης είναι μικρότερη από 140 mm, δηλαδή το κονίαμα δεν είναι πλαστικό (stiff). Το βαθμονομημένο δοχείο πληρούται με το κονίαμα με τη χρήση μίας σέσουλας μέχρι την υπερχείλισή του. Εν συνεχεία, το δοχείο τοποθετείται σε μία τράπεζα δόνησης και η δόνηση συνεχίζεται μέχρις

ότου να μην παρατηρείται κατακάθιση του υλικού. Εάν είναι απαραίτητο προστίθεται επιπλέον ποσότητα υλικού. Τότε, το δοχείο ζυγίζεται με ακρίβεια 1 γραμμαρίου.

(β) Μέθοδος Σοκ (Shock Method) όταν η τιμή της εξάπλωσης είναι μεταξύ 140 mm και 200 mm, δηλαδή το κονίαμα είναι πλαστικό (plastic). Το βαθμονομημένο δοχείο πληρούται με το κονίαμα με τη χρήση μίας σέσουλας μέχρι το μέσο περίπου του ύψους του (Σχήμα 4.10$^{\beta}$). Στη συνέχεια, το δοχείο αφήνεται να πέσει δέκα φορές σε μία στερεή βάση, ενώ η μία ακμή του διατηρείται σταθερή πάνω στη βάση και η αντιδιαμετρική της αφήνεται να πέσει από ύψος περίπου 30 mm από τη βάση. Η διαδικασία κρούσης των πλευρών του δοχείου με την στερεή βάση επαναλαμβάνεται με κυκλικό τρόπο ώστε να εναλλάσσονται οι πλευρές του δοχείου. Ακολούθως, το δοχείο πληρούται με το υπόλοιπο κονίαμα έως την υπερχείλισή του και επαναλαμβάνεται η ανωτέρω διαδικασία κρούσης. Το περισσεύον κονίαμα αφαιρείται με τη χρήση μίας σπάτουλας με εύκαμπτη λάμα εκτελώντας μία σχεδόν κάθετη και πριονωτή κίνηση (Σχήμα 4.10$^{\gamma}$). Κατόπιν, το δοχείο ζυγίζεται με ακρίβεια 1 γραμμαρίου.

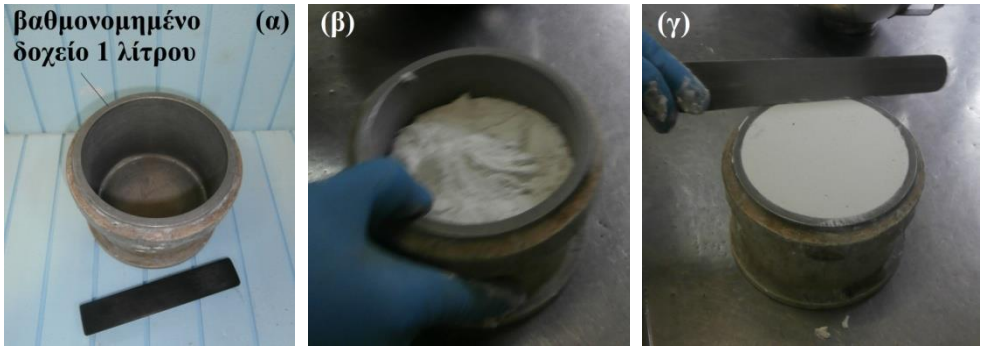
(γ) Μέθοδος όταν η τιμή της εξάπλωσης είναι μεγαλύτερη από 200 mm, δηλαδή το κονίαμα είναι μαλακό (soft). Το βαθμονομημένο δοχείο πληρούται με το κονίαμα με τη χρήση μίας σέσουλας μέχρι την υπερχείλισή του, ενώ τα χείλη του δοχείου καθαρίζονται με υγρό πανί. Το δοχείο ζυγίζεται με ακρίβεια 1 γραμμαρίου.

Η πυκνότητα p_m υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$p_m = (m_2 - m_1)/V_v \tag{4.2}$$

όπου m_2 είναι η μάζα του άδειου βαθμονομημένου δοχείου σε kg, m_1 είναι η μάζα του πληρωμένου με κονίαμα βαθμονομημένου δοχείου σε kg και V_v είναι ο όγκος του βαθμονομημένου δοχείου σε m^3.

Στην παρούσα εργασία, η εξεταζόμενη κόλλα πλακιδίων έχει πλαστική συμπεριφορά και ως εκ τούτου, εφαρμόζεται η Μέθοδος Σοκ.



Σχήμα 4.10 Δοκιμή προσδιορισμού πυκνότητας: (α) βαθμονομημένο δοχείο ενός λίτρου, (β) πλήρωση του δοχείου με κόλλα πλακιδίων έως το μέσο του και (γ) υπερχείλιση του δοχείου με κόλλα πλακιδίων και αφαίρεση της περίσσειας κόλλας πλακιδίων.

4.3.1.4 Δοκιμή προσδιορισμού περιεχόμενου αέρα νωπής κόλλας

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-7 [4.6], δύο μέθοδοι προβλέπονται για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του νωπού κονιάματος σε αέρα, η μέθοδος της πίεσης και η μέθοδος της αλκοόλης. Η μέθοδος της πίεσης εφαρμόζεται σε κονιάματα με ποσοστό αέρα μικρότερο του 20%, ενώ της αλκοόλης σε κονιάματα με ποσοστό αέρα μεγαλύτερο του 20%. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται η Μέθοδος Πίεσης, η οποία βασίζεται στην αρχή ότι ένας γνωστός όγκος αέρα υπό γνωστή πίεση, εξισορροπεί με έναν άγνωστο όγκο αέρα στο κονίαμα μέσα σε έναν σφραγισμένο θάλαμο.

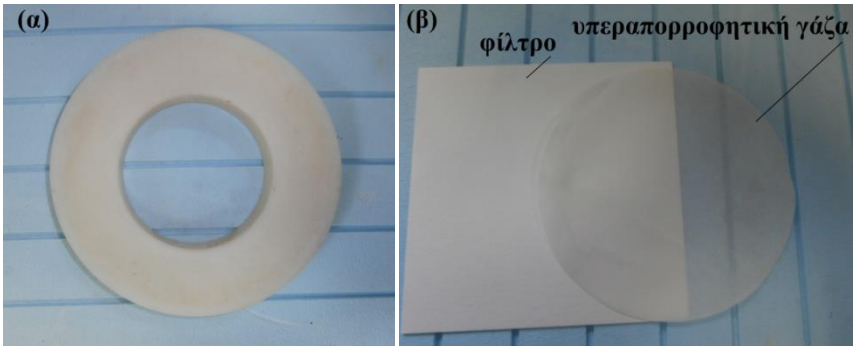
Η διάταξη αποτελείται από το δοχείο δείγματος όγκου περίπου ενός λίτρου και έναν θάλαμο πίεσης, επάνω στον οποίο είναι ενσωματωμένο ένα μανόμετρο. Στο Σχήμα 4.11^{α} παρουσιάζεται η διάταξη μέτρησης του περιεχόμενου αέρα νωπών κονιαμάτων. Αρχικά, το δοχείο δείγματος πληρούται με το νωπό κονίαμα, το οποίο συμπυκνώνεται σύμφωνα με την προαναφερθείσα Μέθοδο Σοκ. Το περισσεύον κονίαμα αφαιρείται με τη χρήση μίας σπάτουλας με ελαστική λάμα και το χείλος του δοχείου καθαρίζεται με υγρό πανί ώστε να επιτευχθεί υδατοστεγής σφράγιση μεταξύ του δοχείου δείγματος και του θαλάμου πίεσης. Ο θάλαμος πίεσης τοποθετείται επάνω στο δοχείο δείγματος και ασφαλίζεται στη θέση του μέσω δύο σφικτήρων ελατηρίου. Οι βαλβίδες Α και Β ανοίγουν, διοχετεύεται νερό στη βαλβίδα Α μέχρις ότου το νερό αρχίσει να εξέρχεται από τη βαλβίδα Β. Όταν παρατηρηθεί συνεχής ροή νερού χωρίς φυσαλίδες, οι βαλβίδες Α και Β κλείνουν (Σχήμα 4.11^{β}). Η συνεχής ροή νερού υποδηλώνει την πλήρη αντικατάσταση των κενών αέρα, τα οποία ενδεχομένως έχουν εγκλωβιστεί στην επιφάνεια του κονιάματος, με νερό. Στη συνέχεια, σφίγγει η βαλβίδα εκτόνωσης αέρα Γ και ασκείται πίεση στον περιεχόμενο αέρα μέσω της χειροκίνητης αντλίας πίεσης Δ μέχρις ότου ο δείκτης του μανόμετρου να

ξεπεράσει την κόκκινη ένδειξη (Σχήμα 4.11$^{\gamma}$). Απαιτούνται λίγα δευτερόλεπτα για την επαναφορά της θερμοκρασίας του πεπιεσμένου αέρα, η οποία έχει αυξηθεί λόγω της εφαρμογής πίεσης, σε φυσιολογικά επίπεδα. Στο σημείο αυτό, η βαλβίδα εκτόνωσης του αέρα Γ ξεσφίγγεται ώστε ο δείκτης του μανόμετρου να ταυτιστεί με την κόκκινη ένδειξη. Η κόκκινη ένδειξη σηματοδοτεί την απουσία αέρα στο δοχείο του δείγματος. Κατόπιν, η χειροκίνητη λαβή Ε πιέζεται προς κάτω με μία απότομη κίνηση έτσι ώστε ο εγκλωβισμένος στον χώρο πίεσης αέρας να διοχετευτεί στο δοχείο του δείγματος. Αμέσως μόλις σταθεροποιηθεί ο δείκτης, καταγράφεται η ένδειξη του μανόμετρου. Η τιμή αυτή αποτελεί το ποσοστό περιεχόμενου αέρα του νωπού κονιάματος.

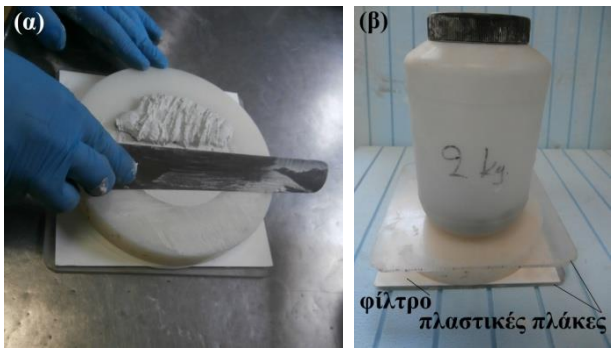
Σχήμα 4.11 Δοκιμή προσδιορισμού του περιεχόμενου αέρα: (α) διάταξη μέτρησης, όπου Α και Β είναι οι βαλβίδες εισόδου και εξόδου του νερού αντίστοιχα, Γ είναι η βαλβίδα εκτόνωσης του αέρα, Δ είναι η χειροκίνητη αντλία πίεσης του αέρα και Ε είναι η χειροκίνητη λαβή διοχέτευσης του εγκλωβισμένου αέρα στο δοχείο δείγματος, (β) πλήρης αντικατάσταση των κενών αέρα με νερό και (γ) το μανόμετρο της διάταξης και η κόκκινη ένδειξη που σηματοδοτεί την απουσία αέρα στο δοχείο του δείγματος.

4.3.1.5 Δοκιμή προσδιορισμού συγκρατούμενου νερού νωπής κόλλας

Το συγκρατούμενο νερό της νωπής κόλλας πλακιδίων προσδιορίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-8 [4.7]. Η ιδιότητα αυτή εκφράζει τη ικανότητα του μίγματος να διατηρείται ομοιογενές και να μην διαχωρίζονται οι φάσεις του. Η αρχή της δοκιμής συνίσταται στη μέτρηση της απορροφούμενης ποσότητας νερού από ένα φίλτρο σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει έναν πλαστικό δακτύλιο με εσωτερική διάμετρο 100 mm και ύψος περίπου 25 mm, δύο πλαστικές πλάκες, ένα διηθητικό χαρτόνι ως φίλτρο, μία υπεραπορροφητική βαμβακερή γάζα και ένα βαρίδιο των 2 kg. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται ο πλαστικός δακτύλιος, το φίλτρο και η υπεραπορροφητική γάζα.



Σχήμα 4.12 Δοκιμή προσδιορισμού του συγκρατούμενου νερού: (α) ο πλαστικός δακτύλιος κονιάματος και (β) το διηθητικό χαρτόνι ως φίλτρο και η υπεραπορροφητική γάζα.



Σχήμα 4.13 Δοκιμή προσδιορισμού του συγκρατούμενου νερού: (α) πλήρωση του πλαστικού δακτυλίου με νωπή κόλλα πλακιδίων και (β) τοποθέτηση του βαριδίου επάνω στην πληρωμένη με κόλλα πλακιδίων διάταξη για 5 λεπτά.

Αρχικά, ζυγίζεται το χάρτινο φίλτρο και τοποθετείται επάνω στη μία πλαστική πλάκα. Επάνω στο φίλτρο, το οποίο καλύπτεται με τη μη υφασμένη γάζα, τοποθετείται ο πλαστικός δακτύλιος και τέλος, η δεύτερη πλαστική πλάκα. Η διάταξη ζυγίζεται. Στη συνέχεια, αφαιρείται η δεύτερη πλαστική πλάκα και ο δακτύλιος πληρούται με το νωπό κονίαμα (Σχήμα 4.13^{α}). Αφού απομακρυνθεί το περισσεύον κονίαμα με τη χρήση μίας σπάτουλας, επανατοποθετείται η δεύτερη πλάκα επάνω στο δακτύλιο. Η πληρωμένη με κονίαμα διάταξη ζυγίζεται εκ νέου. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζεται το βάρος του νωπού κονιάματος ως η διαφορά του αρχικού βάρους της διάταξης και της πληρωμένης με κονίαμα διάταξης. Το βαρίδιο των 2 kg τοποθετείται επάνω στο δεύτερο δίσκο για πέντε λεπτά (Σχήμα 4.13^{β}). Τέλος, αφαιρείται το φίλτρο και ζυγίζεται. Η διαφορά βάρους του υγρού και του στεγνού φίλτρου ισοδυναμεί με την απορροφημένη ποσότητα νερού. Το ποσοστό συγκρατούμενου νερού WR υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$WR(\%) = w_2 \cdot w_3 / w_1 \cdot (1 + w_2) \tag{4.3}$$

όπου w_1 είναι το βάρος του νερού που απορροφήθηκε από το φίλτρο σε g, w_2 είναι ο λόγος του βάρους του νερού μίξης προς το βάρος του ξηρού κονιάματος και w_3 είναι το βάρος του νωπού κονιάματος.

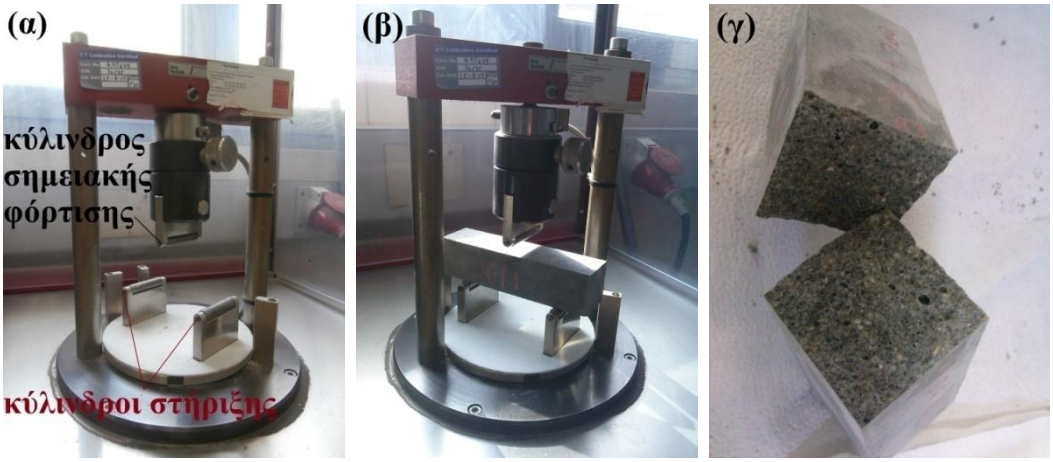
4.3.1.6 Δοκιμή προσδιορισμού αντοχής σε κάμψη και θλίψη

Η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων προσδιορίζεται με δοκιμή κάμψης τριών σημείων (three-point bending test) σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-11 [4.8]. Η συσκευή για τον προσδιορισμό των αντοχών σε κάμψη έχει δυνατότητα άσκησης φορτίων έως 10 kN, με ακρίβεια ± 1% του καταγραφόμενου φορτίου στην περιοχή των τελευταίων 4/5 της κλίμακας που ασκείται φορτίο, με ρυθμό φόρτισης 50 ± 10 N/s. Η συσκευή διαθέτει μία διάταξη κάμψης, η οποία αποτελείται από δύο χαλύβδινους κυλίνδρους διαμέτρου 10 ± 0.5 mm που λειτουργούν ως στηρίξεις για το δοκίμιο και απέχουν μεταξύ τους 100 ± 0.5 mm, και από έναν τρίτο χαλύβδινο κύλινδρο ίδιας διαμέτρου, ο οποίος λειτουργεί ως σημειακή φόρτιση για το δοκίμιο και είναι τοποθετημένος στο κέντρο ανάμεσα στους κυλίνδρους στήριξης. Το μήκος των κυλίνδρων κυμαίνεται από 45 έως 50 mm. Η διάταξη δοκιμής σε κάμψη τριών σημείων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14^{α}.

Η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων διεξάγεται σε δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm ηλικίας 3, 7 και 28 ημερών. Το δοκίμιο τοποθετείται έτσι ώστε ο επιμήκης άξονας του να είναι κάθετος προς τους κυλίνδρους στήριξης και η λεία επιφάνειά του σε επαφή με τους κυλίνδρους στήριξης. Η φόρτιση του δοκιμίου επιβάλλεται μέσω του κυλίνδρου σημειακής φόρτισης, ενώ η αύξηση του φορτίου πραγματοποιείται ομαλά με ρυθμό 50 ± 10 N/s έως ότου να επέλθει η θραύση. Η αντοχή σε κάμψη (R_f) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_f = 1.5 \cdot (F \cdot l/b \cdot d^2) \tag{4.4}$$

όπου F είναι το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο σε μονάδες N, b και d είναι οι εσωτερικές διαστάσεις του πρισματικού δοκιμίου σε mm και l είναι η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων στήριξης σε mm.



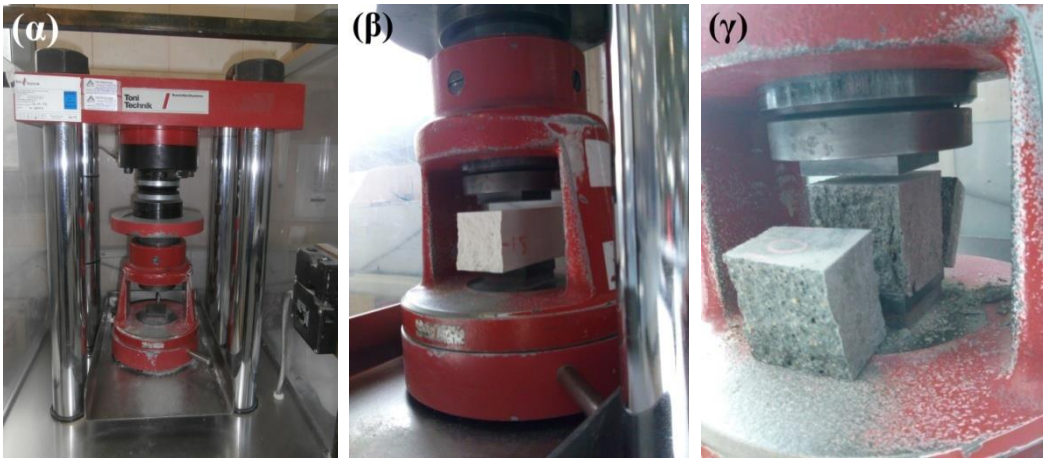
Σχήμα 4.14 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων: (α) διάταξη κάμψης τριών σημείων, (β) τοποθέτηση του προς εξέταση δοκιμίου τσιμεντοπολτού στη διάταξη και (γ) θραυσμένο δοκίμιο τσιμεντοπολτού.

Η μηχανή δοκιμής αντοχής σε θλίψη έχει δυνατότητα φόρτισης με ρυθμό 2400 ± 200 N/s και ακρίβεια ± 1% του καταγραφόμενου φορτίου στην περιοχή των τελευταίων 4/5 της κλίμακας που χρησιμοποιείται (κατά EN ISO 7500-1). Η διάταξη της δοκιμής αντοχής σε θλίψη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15[α].

Οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη διεξάγονται στα θραυσμένα από τη δοκιμή σε κάμψη δοκίμια, δηλαδή σε δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 80 mm. Η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων διεξάγεται σε δοκίμια ηλικίας 3, 7 και 28 ημερών. Τα προς εξέταση δοκίμια κεντράρονται επί των πλακών της μηχανής με ακρίβεια ± 0.5 mm έτσι ώστε το άκρο του δοκιμίου να προεξέχει περίπου 10 mm από τα άκρα των πλακών ή των βοηθητικών πλακών. Το φορτίο εφαρμόζεται στο δοκίμιο ομαλά με ρυθμό 2400 ± 200 N/s καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης έως ότου επέλθει η θραύση του δοκιμίου. Η αντοχή σε θλίψη (R_c) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_c = F_c / 1600 \tag{4.5}$$

όπου F_c είναι το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο σε μονάδες N και 1600 η επιφάνεια των πλακών ή των βοηθητικών πλακών σε mm^2.



Σχήμα 4.15 Δοκιμή θλίψης: (α) διάταξη συμπίεσης, (β) τοποθέτηση του προς εξέταση δοκιμίου κόλλας πλακιδίων στη διάταξη και (γ) θραυσμένο δοκίμιο τσιμεντοπολτού.

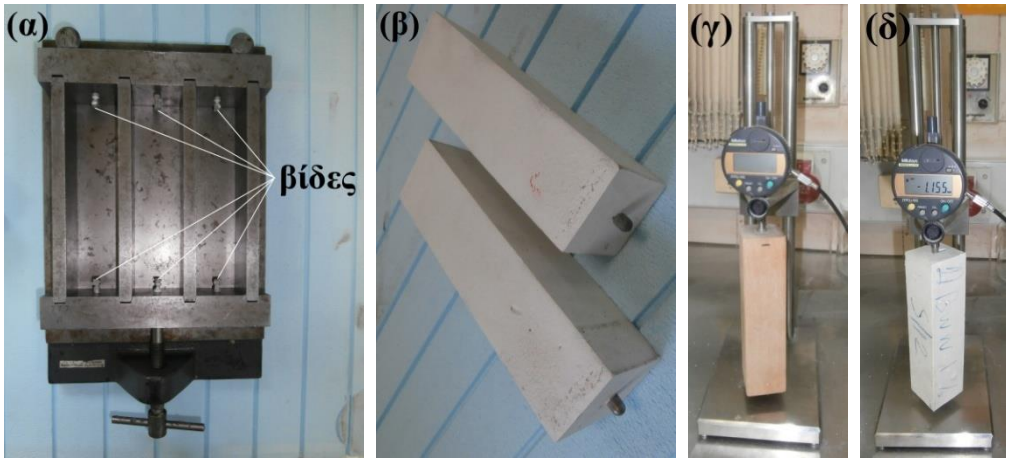
4.3.1.7 Δοκιμή προσδιορισμού ελεύθερης συρρίκνωσης

Η συρρίκνωση ενός ανεμπόδιστου δοκιμίου (unrestrained shrinkage), η οποία είναι γνωστή και ως ελεύθερη συρρίκνωση, αξιοποιείται για την εκτίμηση του βαθμού αντίστασης ενός υλικού έναντι της συρρίκνωσης. Η δοκιμή προσδιορισμού της ελεύθερης συρρίκνωσης διεξήχθει σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C490 [4.9]. Ο στόχος της δοκιμής αυτής είναι η μέτρηση της μεταβολής του μήκους του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης του κονιάματος. Η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου προσδιορίζεται ως η διαφορά μήκους του δοκιμίου μίας δεδομένης στιγμής και του μήκους του δοκιμίου αναφοράς. Οι μετρήσεις διεξάγονται με τη χρήση μίας διάταξης σύγκρισης μήκους, η οποία διαθέτει έναν ψηφιακό μετρητή ακρίβειας ± 0.001 mm.

Για την παρασκευή των δοκιμίων διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, επιλέγονται τριπλές μεταλλικές μήτρες πρισματικών δοκιμίων (Σχήμα 4.16^{α}). Το κάθε διαμέρισμα της μήτρας διαθέτει δύο μικρές οπές, μία στο κέντρο της κάθε μικρής πλευράς του, για την τοποθέτηση πίρων ανοξείδωτου χάλυβα έτσι ώστε κάθε δοκίμιο να έχει έναν πίρο σε κάθε άκρο του. Η νωπή κόλλα πλακιδίων χυτεύεται στις μήτρες σε δύο στρώσεις, καθεμία εκ των οποίων συμπυκνώνεται με κρούσεις σε μία στερεή επιφάνεια. Η περίσσεια κόλλας πλακιδίων αφαιρείται με τη χρήση μίας σπάτουλας με ελαστική λάμα, εκτελώντας μία εγκάρσια σχεδόν κατακόρυφη πριονωτή κίνηση σε κάθε διεύθυνση ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες των δοκιμίων. Τα υπολείμματα κόλλας πλακιδίων που υπάρχουν επάνω στη μήτρα σκουπίζονται μετά την εξομάλυνση της επιφάνειας των

δοκιμίων. Τέλος, τοποθετείται πλάκα από γυαλί ή άλλο αδιάβροχο υλικό που δεν αντιδρά με το τσιμέντο διαστάσεων περίπου 210 x 185 x 6 mm επάνω στη μήτρα.

Οι μήτρες τοποθετούνται αμέσως στον υγρό θάλαμο θερμοκρασίας 20 ± 1 ºC και σχετικής υγρασίας όχι χαμηλότερη του 90%. Μετά το πέρας 24 h, τα δοκίμια ξεκαλουπώνονται με ιδιαίτερη προσοχή και συντηρούνται στον υγρό θάλαμο έως την ηλικία των 7 ημερών. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε κλειστό χώρο του εργαστηρίου θερμοκρασίας 20 ± 2 ºC και σχετικής υγρασίας όχι χαμηλότερη του 50%.



Σχήμα 4.16 Δοκιμή ελεύθερης συρρίκνωσης: (α) τριπλή μεταλλική μήτρα πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, (β) δοκίμιο σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων, (γ) διάταξη σύγκρισης μήκους και (δ) μέτρηση μήκους του προς εξέταση δοκιμίου.

Η διαδικασία μέτρησης της μεταβολής του μήκους περιλαμβάνει αρχικά την τοποθέτηση του δοκιμίου αναφοράς (ξύλινο δοκίμιο) στη διάταξη σύγκρισης μήκους για τον μηδενισμό της ένδειξης του ψηφιακού μετρητή (Σχήμα 4.16^{γ}). Στη συνέχεια, το δοκιμίο αναφοράς αντικαθίσταται από το προς εξέταση δοκίμιο σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων (Σχήμα 4.16^{δ}). Το δοκίμιο περιστρέφεται με αργό ρυθμό στη διάταξη μέχρις ότου η ένδειξη του ψηφιακού μετρητή να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή. Η τιμή καταγράφεται και αποτελεί το μήκος του δοκιμίου τη δεδομένη στιγμή. Σημειώνεται ότι ως μήκος αναφοράς του δοκιμίου λαμβάνεται η τιμή της μέτρησης αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα, δηλαδή 24 ώρες μετά την παρασκευή των δοκιμίων. Η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου (L) σε οποιαδήποτε ηλικία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$L = 100 \cdot [(L_x - L_i)/G] \tag{4.6}$$

όπου L_x είναι η ένδειξη του μετρητή για το δοκίμιο x ημερών σε ίντσες, L_i είναι η ένδειξη του μετρητή για το δοκίμιο αναφοράς, δηλαδή του δοκιμίου των 24 ωρών, και G είναι το ονομαστικό σταθμισμένο μήκος του ξύλινου καλουπιού.

4.3.2 Δοκιμές τσιμέντου

Οι πειραματικές δοκιμές του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης ή υγρά πρόσθετα περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας του νωπού τσιμεντοπολτού, τον προσδιορισμό της πρότυπης συνεκτικότητάς του, τον προσδιορισμό χρόνου αρχής και τέλους πήξης του, καθώς και τον προσδιορισμό της σταθερότητας όγκου του. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές προσδιορισμού της πρότυπης συνεκτικότητας, του χρόνου αρχής και τέλους πήξης, καθώς και της σταθερότητας όγκου πραγματοποιήθηκαν μόνο για τον τσιμεντοπολτό με υγρά πρόσθετα λόγω έλλειψης χρόνου. Οι δοκιμές του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού είναι οι δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη και θλίψη.

4.3.2.1 Δοκιμή προσδιορισμού συνεκτικότητας νωπού τσιμεντοπολτού

Η τιμή της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3 [4.4]. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στην §4.3.1.2.

4.3.2.2 Δοκιμή προσδιορισμού πρότυπης συνεκτικότητας τσιμεντοπολτού

Η δοκιμή προσδιορισμού της συνεκτικότητας πραγματοποιείται με τη χρήση της χειροκίνητης συσκευής Vicat (Σχήμα 4.17^{α}) σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3 [4.10]. Η αρχή της δοκιμής είναι ότι ο τσιμεντοπολτός παρουσιάζει ένα βαθμό αντίστασης στη διείσδυση από το πρότυπο έμβολο. Το απαιτούμενο νερό για την παρασκευή ενός τσιμεντοπολτού πρότυπης συνεκτικότητας καθορίζεται από δοκιμαστικές διεισδύσεις σε πολτούς με διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό.

Η διαδικασία προσδιορισμού της πρότυπης συνεκτικότητας του τσιμεντοπολτού περιλαμβάνει αρχικά την ανάμειξη του τσιμεντοπολτού. Συγκεκριμένα, ζυγίζονται 500 g τσιμέντου και μία ποσότητα νερού, π.χ. 125 g. Κάθε χαρμάνι ανακατεύεται μηχανικά στον αναμικτήρα κονιαμάτων. Ενώ ο αναμικτήρας είναι σε ετοιμότητα λειτουργίας, προστίθενται το νερό και το τσιμέντο στο δοχείο ανάμειξης με προσοχή ώστε να αποφευχθεί απώλεια τσιμέντου ή νερού. Η διαδικασία προσθήκης πρέπει να ολοκληρωθεί εντός 10 s. Ο αναμικτήρας τίθεται αμέσως σε λειτουργία στη χαμηλή ταχύτητα

ανάδευσης, ενώ καταγράφεται ο χρόνος στο πλησιέστερο λεπτό ως «χρόνος μηδέν». Μετά το πέρας 90 s, η ανάδευση παύει για 30 s, κατά τη διάρκεια των οποίων αφαιρείται με τη βοήθεια λαστιχένιας ή πλαστικής σπάτουλας ο πολτός που έχει απομείνει στα τοιχώματα του δοχείου ανάμειξης και τοποθετείται στο κέντρο του πυθμένα του δοχείου ανάμειξης. Ακολούθως, πραγματοποιείται ανάδευση χαμηλής ταχύτητας για άλλα 90 s. Ο συνολικός χρόνος ανάμειξης είναι 180 s.

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της ανάμειξης, το καλούπι πληρούται με τον νωπό τσιμεντοπολτό. Τα κενά αέρα που ενδεχομένως υπάρχουν στον τσιμεντοπολτό απομακρύνονται με ελαφριά κρούση του υπερπλήρους καλουπιού σε μία στερεή βάση. Η περίσσεια τσιμεντοπολτού αφαιρείται με τη χρήση μίας σπάτουλας με ελαστική λάμα, εκτελώντας μία εγκάρσια σχεδόν κατακόρυφη μαλακή πριονωτή κίνηση.

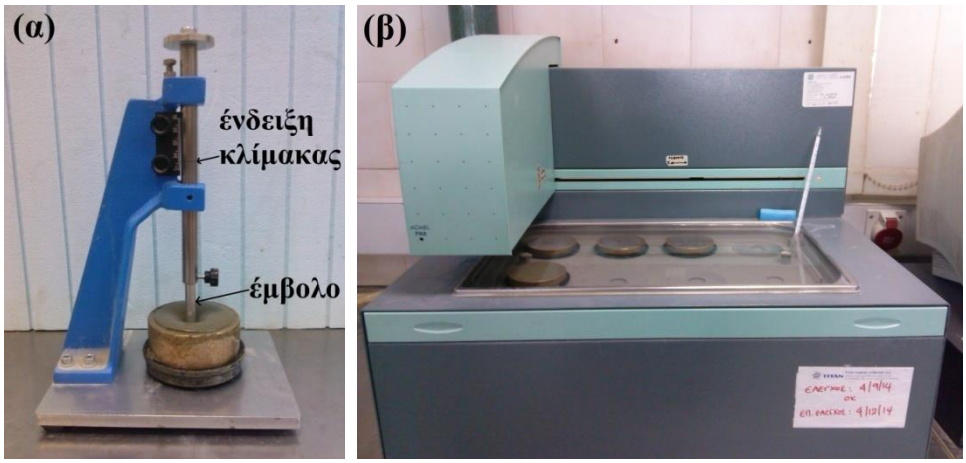
Η χειροκίνητη συσκευή Vicat ρυθμίζεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, το έμβολο κατεβαίνει ώστε να πατήσει στη βάση του καλουπιού, ενώ η ένδειξη κλίμακας της συσκευής μετακινείται ώστε να δείχνει μηδέν. Το έμβολο ανεβαίνει στη θέση αναμονής. Στη συνέχεια, το πληρωμένο με τσιμεντοπολτό καλούπι μεταφέρεται στη βάση της συσκευής Vicat έτσι ώστε το κέντρο του να είναι κάτω από το έμβολο. Το έμβολο χαμηλώνει ώστε να είναι σε επαφή με τον πολτό και παραμένει σε αυτή τη θέση για 1 έως 2 s για να αποφευχθεί αρχική ταχύτητα ή επιτάχυνση των κινητών τμημάτων της συσκευής. Κατόπιν, απελευθερώνονται γρήγορα τα κινητά τμήματα της συσκευής και το έμβολο αφήνεται να διεισδύσει κατακόρυφα στο κέντρο του πολτού. Η απελευθέρωση του εμβόλου πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός 4 min από τον «χρόνο μηδέν». Μετά το πέρας 30 s, καταγράφεται η ένδειξη της κλίμακας, η οποία δείχνει την απόσταση μεταξύ της κάτω επιφάνειας του εμβόλου και της βάσης του καλουπιού μαζί με την περιεκτικότητα του πολτού σε νερό εκφρασμένη ως επί τοις εκατό ποσοστό της μάζας του τσιμέντου. Η δοκιμή διείσδυσης επαναλαμβάνεται σε πολτούς διαφορετικής περιεκτικότητας σε νερό έως ότου να επιτευχθεί πολτός με ένδειξη της κλίμακας 6 ± 2 mm. Το περιεχόμενο αυτό του τσιμεντοπολτού σε νερό καταγράφεται με προσέγγιση 0.5% ως νερό πρότυπης συνεκτικότητας.

4.3.2.3 Δοκιμή προσδιορισμού χρόνου αρχής και τέλους πήξης τσιμεντοπολτού

Η δοκιμή προσδιορισμού του χρόνου αρχής και τέλους πήξης πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3 [4.10] με τη χρήση μίας αυτόματης συσκευής Vicat (Σχήμα

4.17$^{\beta}$). Η εν λόγω δοκιμή βασίζεται στην αρχή ότι ο χρόνος πήξης καθορίζεται από την παρατήρηση της διείσδυσης μίας βελόνας στον πολτό τσιμέντου πρότυπης συνεκτικότητας έως ότου η διείσδυση να είναι αδύνατη πέρα από ένα ορισμένο βάθος.

Το πληρωμένο με τσιμεντοπολτό καλούπι πρότυπης συνεκτικότητας τοποθετείται στο δοχείο εμβάπτισης της αυτόματης συσκευής Vicat υπό θερμοκρασία 20 ± 1 ºC. Μία βελόνα τυποποιημένων διαστάσεων διεισδύσει κατακόρυφα σε κατάλληλα σημεία του τσιμεντοπολτού, τα οποία απέχουν όχι λιγότερο από 8 mm από το χείλος του καλουπιού, 5 mm μεταξύ τους και τουλάχιστον 10 mm από την τελευταία θέση διείσδυσης. Η διείσδυση επαναλαμβάνεται σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα, π.χ. ανά 10 min. Ως χρόνος αρχής πήξης ορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του «χρόνου μηδέν» και του χρόνου στον οποίο η απόσταση μεταξύ της βελόνας και της βάσης του καλουπιού είναι 6 ± 3 mm. Ο χρόνος αρχής πήξης μετράται στο πλησιέστερο λεπτό. Ως χρόνος τέλους πήξης ορίζεται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του «χρόνου μηδέν» και του χρόνου στον οποίο η βελόνα διεισδύει μόνο 0.5 mm στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό χωρίς να αφήνει σημάδι στον τσιμεντοπολτό. Ο χρόνος τέλους πήξης καταγράφεται με ακρίβεια 15 min.

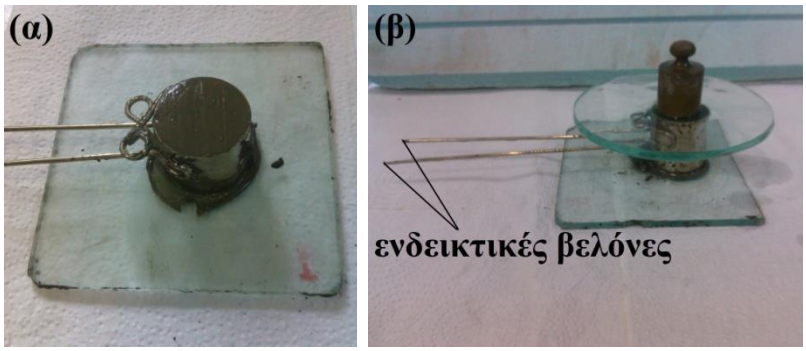


Σχήμα 4.17 Συσκευές Vicat (α) χειροκίνητη συσκευή Vicat για τον προσδιορισμό της πρότυπης συνεκτικότητας του τσιμεντοπολτού και (β) αυτόματη συσκευή Vicat για τον προσδιορισμό του χρόνου αρχής και τέλους πήξης.

4.3.2.4 Δοκιμή προσδιορισμού σταθερότητας όγκου τσιμεντοπολτού

Η δοκιμή προσδιορισμού της σταθερότητας όγκου πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3 [4.10]. Η εν λόγω δοκιμή βασίζεται στην αρχή ότι η σταθερότητα όγκου καθορίζεται από την παρατήρηση της διαστολής του όγκου του τσιμεντοπολτού πρότυπης συνεκτικότητας, όπως υποδεικνύεται από τη σχετική θέση δύο βελόνων.

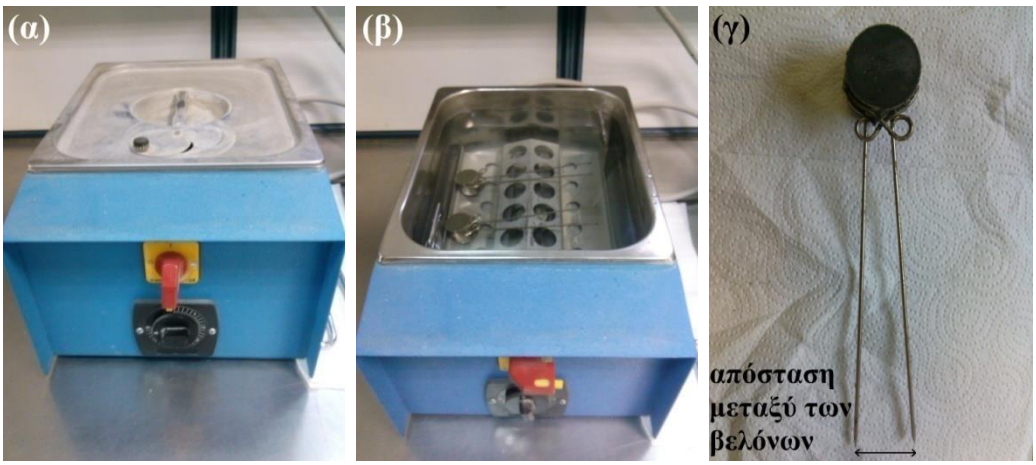
Ο εξοπλισμός για τον προσδιορισμό της σταθερότητας όγκου του τσιμεντοπολτού περιλαμβάνει το δακτύλιο Le Chatelier, ένα ζευγάρι επίπεδων πλακών και ένα υδατόλουτρο με σύστημα θέρμανσης. Ο δακτύλιος Le Chatelier πρέπει να είναι κατασκευασμένος από μέταλλο που δε διαβρώνεται και να έχει δύο ενδεικτικές βελόνες. Η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου είναι 30 mm, η εξωτερική διάμετρος 31 mm και το ύψος 30 mm, ενώ το μήκος των ενδεικτικών βελόνων είναι 150 ± 2 mm. Η ελαστικότητα του δακτυλίου πρέπει να είναι τέτοια ώστε η εφαρμογή μίας μάζας 300 ± 1 g να αυξάνει την απόσταση μεταξύ των ενδεικτικών βελόνων τουλάχιστον 15 mm χωρίς μόνιμη παραμόρφωση. Για κάθε δακτύλιο προβλέπεται ένα ζευγάρι επίπεδων πλακών στήριξης και επικάλυψης από στεγανό υλικό που δε διαβρώνεται από τον τσιμεντοπολτό, π.χ. γυαλί. Κάθε πλάκα πρέπει να έχει διαστάσεις μεγαλύτερες από τη διάμετρο του δακτυλίου. Η πλάκα επικάλυψης πρέπει να ζυγίζει τουλάχιστον 75 g. Για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση μπορεί να τοποθετηθεί και μία πρόσθετη μικρή μάζα επάνω στην πλάκα. Τέλος, το υδατόλουτρο με σύστημα θέρμανσης, στο οποίο βυθίζονται τα δοκίμια Le Chatelier, έχει τη δυνατότητα να ανεβάζει τη θερμοκρασία του νερού από 20 ± 2 ^{o}C στη θερμοκρασία βρασμού μέσα σε χρόνο 30 ± 5 min.



Σχήμα 4.18 (α) Δακτύλιος Le Chatelier πληρωμένος με νωπό τσιμεντοπολτό πρότυπης συνεκτικότητας και (β) συνολική διάταξη δακτυλίου, πλακών στήριξης-επικάλυψης και βαριδίου ως πρόσθετη μάζα.

Για τον προσδιορισμό της σταθερότητας όγκου του τσιμεντοπολτού, αρχικά παρασκευάζεται ο τσιμεντοπολτός κανονικής συνεκτικότητας. Στη συνέχεια, ο ελαφρά λαδωμένος δακτύλιος Le Chatelier τοποθετείται πάνω στην πλάκα στήριξης και πληρούται αμέσως με τον τσιμεντοπολτό χωρίς έντονη συμπύκνωση ή δόνηση με τη βοήθεια μόνο των χεριών και ενός εργαλείου με ευθεία ακμή για την ισοπέδωση της άνω επιφάνειας. Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης του δακτυλίου με τον τσιμεντοπολτό πρέπει να εμποδιστεί το τυχαίο άνοιγμα της σχισμής του δακτυλίου π.χ. με απαλή πίεση των

δακτύλων ή χρησιμοποιώντας μία κατάλληλη ελαστική ταινία. Στο Σχήμα 4.18^{α} παρουσιάζεται ο πληρωμένος με τσιμεντοπολτό δακτύλιος. Ο δακτύλιος καλύπτεται με την ελαφρά λαδωμένη πλάκα επικάλυψης και προστίθεται η συμπληρωματική μάζα (Σχήμα 4.18^{β}). Αμέσως μετά, ολόκληρη η διάταξη τοποθετείται για 24 h ± 30 min στον υγρό θάλαμο θερμοκρασίας 20 ± 1 °C και σχετικής υγρασίας τουλάχιστον 90%. Στο τέλος της περιόδου των 24 h ± 30 min, μετριέται η απόσταση (Α) μεταξύ των ακρών των ενδεικτικών βελόνων με προσέγγιση 0.5 mm. Ακολούθως, θερμαίνεται ο δακτύλιος βαθμιαία μέχρι τη θερμοκρασία βρασμού εντός 30 ± 5 min και διατηρείται στο υδατόλουτρο στη θερμοκρασία βρασμού για 3 h ± 5 min (Σχήμα 4.19^{β}). Στο τέλος της περιόδου βρασμού, μετριέται η απόσταση (Β) μεταξύ των άκρων των ενδεικτικών βελόνων με προσέγγιση 0.5 mm. Ο δακτύλιος αφήνεται να ψυχθεί στη θερμοκρασία του εργαστηρίου και μετριέται η απόσταση (Γ) μεταξύ των άκρων των ενδεικτικών βελόνων με προσέγγιση 0.5 mm (Σχήμα 4.19^{γ}). Τέλος, υπολογίζεται η διαφορά (Γ)-(Α) με προσέγγιση 1 mm, η οποία προσδιορίζει τη διαστολή του τσιμεντοπολτού. Αν η διαστολή ξεπεράσει την προδιαγραφή του υπό εξέταση τσιμέντου, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία, οι εξεταζόμενοι τσιμεντοπολτοί λαμβάνονται ως αποδεκτοί όταν εμφανίζουν διαστολή το πολύ 1 cm συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς.



Σχήμα 4.19 (α) Υδατόλουτρο με σύστημα θέρμανσης, (β) τοποθέτηση δοκιμίων Le Chatelier στο υδατόλουτρο για βρασμό και (γ) τελική απόσταση Γ μεταξύ των άκρων των ενδεικτικών βελόνων.

4.3.2.5 Δοκιμή προσδιορισμού αντοχής σε κάμψη και θλίψη

Η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων σκληρυμένου τσιμεντοπολτού προσδιορίζεται με δοκιμή κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 [4.2]. Η δοκιμή

διεξάγεται σε δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm ηλικίας 1, 7 και 28 ημερών, ενώ η δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού διεξάγεται σε δοκίμια ηλικίας 1, 2, 7 και 28 ημερών. Η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη και θλίψη περιγράφεται αναλυτικά στην §4.3.1.6.

4.3.3 Δοκιμή προσδιορισμού της τάσης σχηματισμού σκόνης

Ως «τάση σχηματισμού σκόνης» (dustiness) ορίζεται η τάση ενός κονιώδους υλικού να παράγει αιωρούμενη σκόνη κατά τη διαδικασία του χειρισμού του [4.11]. Η τάση σχηματισμού σκόνης προσδιορίζεται με διάφορες τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούν τη μηχανική ενέργεια ποικιλοτρόπως προκειμένου να προσομοιάσουν ακραίες καταστάσεις εκπομπής σκόνης από το εξεταζόμενο υλικό για καθορισμένο χρονικό διάστημα. Το προς εξέταση κονιώδες υλικό διασπείρεται και η ποσότητα της αιωρούμενης σκόνης αναλύεται είτε βαρομετρικά είτε οπτικά ανάλογα με την αρχή μέτρησης. Ακόμη και αν δεν είναι πάντοτε δυνατή η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών με την πραγματική έκθεση των εργαζομένων, η μέτρηση της τάσης σχηματισμού σκόνης εξακολουθεί να αποτελεί ένα κατάλληλο εργαλείο για τη διαχείριση του κινδύνου έκθεσης των εργαζομένων σε σκόνη. Η κατάταξη των υλικών εξαρτάται από τη μέθοδο δοκιμής και ενδεχομένως ποικίλει σημαντικά [4.12]. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης σκόνης αναπαριστούν διαφορετικούς εργασιακούς χώρους, δεν είναι ορθό να καθιερωθεί μία και μόνο δοκιμή μέτρησης σκόνης ως πρότυπη [4.13].

Τον Απρίλιο του 2006, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (European Committee for Standardization, CEN) κυκλοφόρησε το EN 15051 «Ατμόσφαιρα χώρων εργασίας - Μέτρηση της τάσης σχηματισμού σκόνης των χύδην υλικών» [4.14]. Σύμφωνα με το EN 15051, ορίζονται δύο μέθοδοι ως πρότυπες μέθοδοι μέτρησης της τάσης του υλικού να σχηματίζει σκόνη, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο μεταφοράς της μηχανικής ενέργειας στο υλικό. Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται μέθοδος του περιστρεφόμενου τυμπάνου (Rotating Drum, RD), ενώ η δεύτερη ονομάζεται μέθοδος συνεχούς ρίψης με ανάστροφη ροή (Continuous Drop Down, CDD). Και οι δύο μέθοδοι είναι ικανές να διαιρούν την αιωρούμενη σκόνη σε κλάσματα μεγέθους σύμφωνα με το πρότυπο EN 481 [4.15]. Η μέθοδος του περιστρεφόμενου τυμπάνου διαχωρίζει την σκόνη στο εισπνεύσιμο κλάσμα (inhalable fraction, I), το θωρακικό κλάσμα (thoracle fraction,

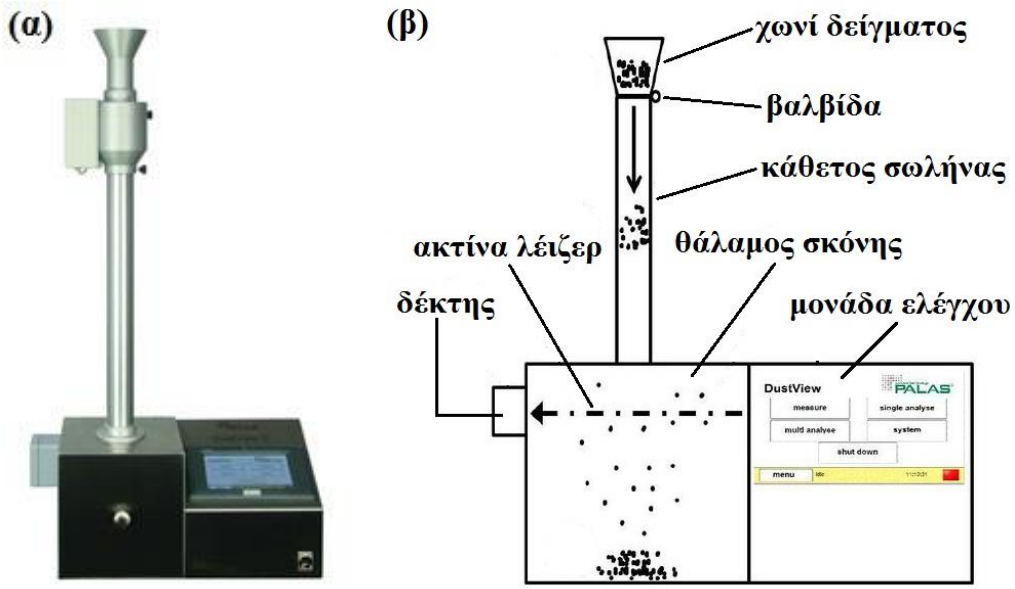
T) και το αναπνεύσιμο κλάσμα (respirable fraction, R), ενώ η μέθοδος συνεχούς ρίψης με ανάστροφη ροή την διαχωρίζει σε εισπνεύσιμο και αναπνεύσιμο κλάσμα. Μία τρίτη μέθοδο μέτρησης της αιωρούμενης σκόνης αποτελεί η μέθοδος μονής ρίψης (Single Drop, SD). Προφανώς, σε κάθε μέθοδο αντιστοιχεί και το κατάλληλο όργανο μέτρησης. Συγκεκριμένα, για την εφαρμογή της μεθόδου του περιστρεφόμενου τυμπάνου το πιστοποιημένο όργανο μέτρησης είναι το Heubach Dustmeter, ενώ για τη μέθοδο μονής ρίψης το Palas Dustview της BASF.

Οι ανωτέρω τρεις μέθοδοι μέτρησης της αιωρούμενης σκόνης διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο καταπόνησης του υλικού και επομένως, προσομοιώνουν διαφορετικές πραγματικές συνθήκες χειρισμού του υλικού. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος μονής ρίψης με τη χρήση του Dustview παρουσιάζει ορισμένες σημαντικές διαφορές συγκριτικά με τις άλλες δύο μεθόδους. Η αρχή λειτουργίας του Dustview είναι η εξασθένηση του φωτός και όχι η βαρυμετρική ανάλυση όπως στη μέθοδο του περιστρεφόμενου τυμπάνου και τη μέθοδο συνεχούς ρίψης με ανάστροφη ροή. Επιπλέον, το Dustview δε χωρίζει εκ των προτέρων την σκόνη σε κλάσματα πριν τη διεξαγωγή της μέτρησης.

Στο βαθμό που στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ποσοτική μέτρηση της σκόνης, η οποία παράγεται από τον χειρισμό του τσιμέντου και της κόλλας πλακιδίων, και όχι η διάκριση της σκόνης σε εισπνεύσιμη και αναπνεύσιμη, επιλέχτηκε η χρήση του Dustview. Παράλληλα, η μέθοδος της μονής ρίψης προσομοιάζει επιτυχώς τον χειρισμό που εκτελούν οι εργαζόμενοι όταν αδειάζουν ένα σακί τσιμέντου ή κόλλας πλακιδίων. Η διάταξη Dustview II παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20$^{\alpha}$, ενώ η σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του οργάνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20$^{\beta}$.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της μονής ρίψης, ένα δείγμα 30 g διοχετεύεται στο χωνί δείγματος. Στην αρχή της μέτρησης, η βαλβίδα του χωνιού δείγματος ανοίγει αυτόματα και το δείγμα πέφτει στον θάλαμο σκόνης. Η μέτρηση πραγματοποιείται βάσει της εξασθένησης της δέσμης ακτίνων λέιζερ, δηλαδή ο σχηματισμός σκόνης προκαλεί μία μείωση της έντασης της δέσμης λέιζερ. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η εξασθένηση της δέσμης λέιζερ παρατηρείται, ανιχνεύεται σε κλίμακα από 0 έως 100% και αποθηκεύεται ως μία σειρά τιμών σκόνης. Είναι προφανές ότι η τιμή 0 σημαίνει μηδενική εξασθένηση της δέσμης λέιζερ λόγω ανάπτυξης σκόνης, δηλαδή στο θάλαμο του Dustview υπάρχουν ελάχιστα μεμονωμένα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης. Αντίθετα, η τιμή 100 σημαίνει την πλήρη εξασθένηση της δέσμης λέιζερ λόγω ανάπτυξης σκόνης, δηλαδή ο θάλαμος του οργάνου

είναι γεμάτος αιωρούμενα σωματίδια σκόνης. Με βάση αυτή την αρχή μέτρησης, ο δείκτης διάθλασης των σωματιδίων του προς εξέταση υλικού επηρεάζει σε κάποιο βαθμό την εξασθένησης της δέσμης λέιζερ και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το κατά πόσο ο δείκτης διάθλασης των σωματιδίων επηρεάζει μόνο τις απόλυτες τιμές των μετρήσεων ή και την κατάταξη των διαφορετικών υλικών δεν έχει εξεταστεί ακόμα και θα έπρεπε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής ερευνάς [4.13].



Σχήμα 4.20 Μέθοδος της μονής ρίψης (α) διάταξη Dustview II της εταιρίας Palas και (β) σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του Dustview II.

Από την αρχική τιμή των πρώτων 0.5 s έως την τιμή της εξασθένησης της δέσμης λέιζερ στα 30 s, υπολογίζεται ο αριθμός της σκόνης που αιωρείται στο θάλαμο. Οι δύο αυτές τιμές χρησιμοποιούνται και ως τιμές αναφοράς για τη διάκριση της σκόνης σε εισπνεύσιμη και αναπνεύσιμη. Συγκεκριμένα, ο αριθμός της αιωρούμενης σκόνης που μετράται στα 0.5 s αντιστοιχεί στο εισπνεύσιμο κλάσμα σκόνης, ενώ ο αριθμός που μετράται στα 30 s αντιστοιχεί στο αναπνεύσιμο. Η καθιέρωση των μετρήσεων στα 0.5 και 30 s ως τιμές αναφοράς αποτελεί μία παραδοχή, η οποία βασίζεται στην ερευνητική εμπειρία και, επί του παρόντος, δεν μπορεί να αιτιολογηθεί επιστημονικά. Η αρχική τιμή είναι η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στο λογισμικό του Dustview II και ως εκ τούτου φαίνεται να αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ολικής αιωρούμενης και εισπνεύσιμης σκόνης στον θάλαμο. Μετά τα 30 s, το μεγαλύτερο μέρος του υλικού έχει κατακαθίσει στον πυθμένα του θαλάμου. Το χρονικό σημείο των 30 s επιλέγεται να εκφράσει το αναπνεύσιμο κλάσμα

της αιωρούμενης σκόνης. Για ένα σωματίδιο με αεροδυναμική διάμετρο 4 μm, η οποία αντιστοιχεί στο αναπνεύσιμο κλάσμα σύμφωνα με το EN 481 [4.15], η ταχύτητα καθίζησης σύμφωνα με τον νόμο του Stokes είναι 5×10^{-4} ms^{-1}, δηλαδή 16 mm σε 60 s. Υποθέτοντας μία σχετικά συνεχή πτώση των σωματιδίων όλων των μεγεθών μέσω του κάθετου σωλήνα, και λαμβάνοντας υπόψη ότι το οπτικό σύστημα της διάταξης (δέκτης) είναι εγκατεστημένο στο άνω τρίτο του θαλάμου σκόνης ύψους 22 cm, τα 30 s φαίνεται να είναι ένα κατάλληλο χρονικό σημείο για τον χαρακτηρισμό του κλάσματος των μικρότερων σωματιδίων, τα οποία εξακολουθούν να αιωρούνται λόγω στροβιλισμών και αναπηδήσεων [4.16].

Ο αριθμός της σκόνης που παράγεται από κάθε υλικό προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

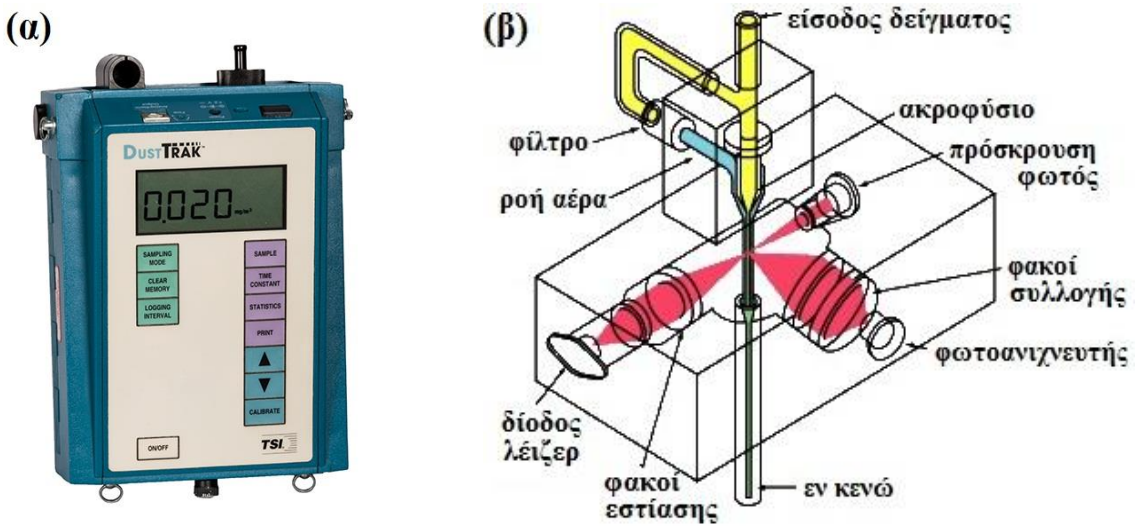
$$Dust\ value = \max value + 30 \sec value \tag{4.7}$$

όπου $\max value$ είναι η μέγιστη τιμή της σκόνης που καταγράφεται από το όργανο στα 0.5 sec και $30 \sec value$ είναι η τιμή της παραμένουσας αιωρούμενης σκόνης στα 30 sec.

4.3.4 Δοκιμή προσδιορισμού της συγκέντρωσης σκόνης

Εκτός από τη μέθοδος μονής ρίψης με τη χρήση του Dustview II, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης της σκόνης με τη χρήση του φωτόμετρου σκέδασης ενισχυμένου φωτός (laser) DustTrak 8520 της εταιρείας TSI. Το όργανο DustTrak 8520 αποτελεί ένα φορητό όργανο άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η μέτρηση της συγκέντρωσης της σκόνης βασίζεται στην αρχή της σκέδασης του φωτός από αιωρούμενα σωματίδια. Διαθέτει ενσωματωμένη αντλία, εσωτερική μνήμη και data-logger για την αυτόματη αποθήκευση των μετρούμενων τιμών (κινητών μέσων όρων) σε προγραμματιζόμενα διαστήματα, καθώς και τη δυνατότητα μετάδοσης των μετρούμενων τιμών σε Η/Υ. Μετρά το κλάσμα PM_{10}, καθώς και τα αναπνεύσιμα κλάσματα κατά ΕΛΟΤ EN 481, $PM_{2,5}$ και PM_1. Η συσκευή είναι βαθμονομημένη με πρότυπη σκόνη κατά ISO 12103-1 (A1 test dust). Το εύρος μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων αυτού του οργάνου κυμαίνεται από 0.001 έως 100 mg/m^3. Το όργανο DustTrak 8520 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21^{α}, ενώ η σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21^{β}.

Προκειμένου οι συνθήκες μέτρησης να προσομοιάζουν τις συνθήκες της μεθόδου της μονής ρίψης, κατασκευάστηκε μία διάταξη παρόμοια με τη διάταξη του Dustview II (Σχήμα 4.22). Στην αντίστοιχη θέση του δέκτη του Dustview II τοποθετήθηκε η κεφαλή δειγματοληψίας του DustTrak 8520. Σημειώνεται ότι για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε μόνο το φίλτρο των 10 μm και όχι των 1 και 2.5 μm. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μέτρηση της αιωρούμενης σκόνης και όχι η διάκριση των αιωρούμενων σωματιδίων σε κλάσματα μεγέθους. Επομένως, με τη χρήση του DustTrak 8520 μετρήθηκε η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των 10 μm.



Σχήμα 4.21 Προσδιορισμός συγκέντρωσης σκόνης (α) διάταξη DustTrak 8520 της εταιρίας TSI και (β) σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του DustTrak 8520 [4.17].

Δεδομένου ότι η διάταξη που κατασκευάστηκε για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της σκόνης δε διαθέτει τα αυτοματοποιημένα χαρακτηριστικά του Dustview II, η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε απαιτούσε μεγαλύτερη προσπάθεια. Πριν τη διεξαγωγή της κάθε μέτρησης, η διάταξη καθαριζόταν με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα. Στη συνέχεια, αφού το χωνί δείγματος καλυπτόταν με μία πλάκα, διεξαγόταν μέτρηση διάρκειας 1 min προκειμένου να καταγραφεί η ήδη υπάρχουσα σκόνη στον άδειο από σκόνη θάλαμο. Μετά το πέρας του 1 min, ανασηκωνόταν η πλάκα , και ένα δείγμα 30 gr ριχνόταν με μία κίνηση στο χωνί δειγματοληψίας, με τη χρήση σέσουλας και ξανά τοποθετούταν η πλάκα. Η μέτρηση της συγκέντρωσης της αιωρούμενης σκόνης διαρκούσε 5 min. Για κάθε δείγμα, διεξήχθηκαν πέντε μετρήσεις και ως τελικό

αποτέλεσμα λαμβάνεται ο μέσος όρος τους, αφού αφαιρέθηκε η αρχική μέτρηση που αφορά στην ήδη υπάρχουσα σκόνη.

Η συγκέντρωση της σκόνης που παράγεται από κάθε υλικό προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Συγκέντρωση\ σκόνης = 1/5 \sum(x_i - d) \quad (4.8)$$

όπου x_i είναι η τιμή της συγκέντρωσης της σκόνης που καταγράφεται από το όργανο κάθε 1 sec και d είναι η μέση τιμή της συγκέντρωσης της προϋπάρχουσας σκόνης πριν τη ρίψη του υλικού.

Κατά την πειραματική δοκιμή προσδιορισμού της συγκέντρωσης της σκόνης μέσω αυτής της διάταξης αυτής προέκυψαν σημαντικά προβλήματα, τα οποία καθιστούν τη μέθοδο αυτή ακατάλληλη για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Το βασικότερο πρόβλημα ήταν ότι το εύρος μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων του DustTrak 8520 είναι έως 100 mg/m^3 και οι εξεταζόμενες συνθέσεις αποδείχθηκε ότι παράγουν σκόνη υψηλότερης συγκέντρωσης με αποτέλεσμα η μέτρηση της συγκέντρωσης της σκόνης να είναι αδύνατη και η ακρίβειά της επισφαλής. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση της σκόνης που παρήγαγαν οι κονίες αναφοράς (κόλλα πλακιδίων, τσιμέντο) ήταν τόσο υψηλή που η μέτρηση ήταν δυνατή μετά το πέρας 10 min από την ρίψη των δειγμάτων. Προφανώς, μετά το πέρας των 10 min, έχει επέλθει καθίζηση μίας σημαντικής ποσότητας σκόνης με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην αντιστοιχούν στη μέγιστη συγκέντρωση σκόνης που παράγουν τα υλικά. Αδύνατη αποδείχθηκε και η μέτρηση της συγκέντρωσης σκόνης των συνθέσεων με ίνες κυτταρίνης, ακόμη και σε υψηλές περιεκτικότητες. Αντίθετα, οι μετρήσεις της σκόνης των συνθέσεων με υγρά πρόσθετα ήταν πραγματοποιήσιμες. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει και ποιοτικά ότι τα υγρά πρόσθετα λειτουργούν πιο αποτελεσματικά ως προς τον περιορισμό της σκόνης συγκριτικά με τις ίνες κυτταρίνης. Ωστόσο, ακόμη και οι συνθέσεις με τα υγρά πρόσθετα παρήγαγαν σκόνη υψηλότερης συγκέντρωσης από το εύρος μέτρησης του DustTrak 8520, καθιστώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων επισφαλή. Τα αποτελέσματα αυτά συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα εργασία μόνο ως συμπληρωματικά στοιχεία που επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα των υγρών προσθέτων. Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επιλεχθέντων προσθέτων ως προς τον περιορισμό της σκόνης

της κόλλας πλακιδίων και του τσιμέντου και τα συμπεράσματα της εργασίας θα βασιστούν αποκλειστικά στα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση του Dustview II.

Σχήμα 4.22 Διάταξη μέτρησης της συγκέντρωσης σκόνης με χρήση του φωτόμετρου σκέδασης DustTrak 8520.

Βιβλιογραφία

4.1. EN, B. (1999). 1015-2: Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of mortars, *European Committee for Standardization, Brussels*.

4.2. EN, T. (2005). 196-1: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, *European Committee for Standardization, 26*.

4.3. Ηλιάδου, Σ. (2007). *Διερεύνηση των συνθηκών γένεσης και δυνατότητες βιομηχανικής χρήσης του χουντίτη - υδρομαγνησίτη των νεογενών σχηματισμών Λευκάρων Κοζάνης*. Διδακτορική Διατριβή, 92-95 (2007).

4.4. EN, B. (1999). 1015-3: Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar by flow table, *European Committee for Standardization, Brussels*.

4.5. EN, B. (1999). 1015-6: Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar, *European Committee for Standardization, Brussels*.

4.6. EN, B. (1999). 1015-7: Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar, *European Committee for Standardization, Brussels*.

4.7. EN, B. (1999). 1015-8: Methods of test for mortar for masonry - Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar, *European Committee for Standardization, Brussels*.
4.8. EN, B. (1999). 1015-11: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. *European Committee for Standardization, Brussels*.
4.9. ASTM C490/C490M, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, American Society for Testing and Materials (2011).
4.10. EN, B. (2005). 196-3: Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, *European Committee for Standardization, Brussels*.
4.11. Plinke, M.A.E., Maus, R., & Leith, D. (1992). Experimental examination of factors that affect dust generation by using Heubach and MRI testers. *American Industrial Hygiene Association, 53* (5), 325-330.
4.12. Lidén, G. (2006). Dustiness testing of materials handled at workplaces. *Annals of Occupational Hygiene, 50* (5), 437-439.
4.13. Bach, S., & Schmidt, E. (2008). Determining the dustiness of powders - a comparison of three measuring devices. *Annals of Occupational Hygiene, 52* (8), 717-725.
4.14. EN, C. (2006). 15051: Workplace atmospheres - measurement of the dustiness of bulk materials - requirements and reference test methods. *Brussels, Belgium: European Committee for Standardization*.
4.15. Norme, E.S. (1993). Workplace atmospheres - size fraction definitions for measurement of airborne particles. *European Committee for Standardization, 481*, 117-124.
4.16. Hamelmann, F., & Schmidt, E. (2003). Methods of dustiness estimation of industrial powders - a review. *KONA Powder and Particle, 21*, 7-18.
4.17. http://www.tsi.com/dusttrak-aerosol-monitor-8520/

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
Κόλλα πλακιδίων χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των ινών κυτταρίνης και των υγρών πρόσθετων στις ιδιότητες της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων. Στόχος του κεφαλαίου είναι ο προσδιορισμός του αποτελεσματικότερου πρόσθετου ως προς τη μείωση της τάσης σχηματισμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων. Ως βέλτιστο θα χαρακτηριστεί το πρόσθετο το οποίο μειώνει στο μεγαλύτερο βαθμό τον σχηματισμό σκόνης χωρίς να υποβαθμίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της κόλλας πλακιδίων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της λευκότητας της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της περιεκτικότητας των διαφόρων τύπων ινών κυτταρίνης και υγρών προσθέτων στις ιδιότητες της νωπής κόλλας πλακιδίων (εξάπλωση, πυκνότητα, περιεχόμενος αέρας, συγκρατούμενο νερό). Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα, δηλαδή η αντοχή σε κάμψη και θλίψη, η ελεύθερη συρρίκνωση και η απώλεια βάρους. Κατόπιν, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκόνης, καθώς και η επιβάρυνση του κόστους παραγωγής της κόλλας πλακιδίων. Τέλος,

εξάγονται συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα των προσθέτων για τη μείωση της σκόνης σε συνδυασμό με τη διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων της κόλλας πλακιδίων και λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση του κόστους παραγωγής της.

5.1 Λευκότητα κόλλας πλακιδίων

Τα αποτελέσματα της λευκότητας της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Την υψηλότερη μείωση του βαθμού λευκότητας εμφανίζει η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου A, οι οποίες είναι γκρι. Παρόμοια μείωση της λευκότητας παρουσιάζουν οι κόλλες πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου D και E, των οποίων το χρώμα είναι μπεζ και κίτρινο, αντίστοιχα. Τη μικρότερη μείωση λευκότητας εμφανίζει η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου B, οι οποίες είναι υπόλευκες. Αντίθετα, η προσθήκη των λευκών ινών τύπου F βελτιώνει τη λευκότητα της κόλλας πλακιδίων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η προσθήκη των ινών κυτταρίνης σε ποσοστά έως 1.50% κ.β. κόλλας διατηρεί τη λευκότητα της κόλλας πλακιδίων σε αποδεκτά επίπεδα (~80%).

Πίνακας 5.1 Βαθμός λευκότητας (%) της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1%**	**1.50%**
CTA - CFs/A	81.07	78.95	78.60	78.04	77.20
CTA - CFs/B	81.07	80.25	79.50	80.30	80.00
CTA - CFs/D	81.07	80.00	80.00	79.66	78.80
CTA - CFs/E	81.07	79.15	80.40	80.40	79.80
CTA - CFs/F	81.07	81.20	80.57	80.53	80.20

5.2 Εξάπλωση κόλλας πλακιδίων

Η δοκιμή προσδιορισμού της εξάπλωσης δεν περιλαμβάνεται στις πρότυπες δοκιμές της κόλλας πλακιδίων. Ωστόσο, αποτελεί δείκτη της εργασιμότητας του υλικού (βλ. Κεφάλαιο 4, §4.3.1.2). Στο βαθμό που ο χειρισμός και η εφαρμογή της κόλλας πλακιδίων πραγματοποιείται συνήθως χειροκίνητα, μία υψηλή πτώση της εργασιμότητάς της λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης ή των υγρών προσθέτων θα αποτελούσε ένα σημαντικό μειονέκτημα.

5.2.1 Εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

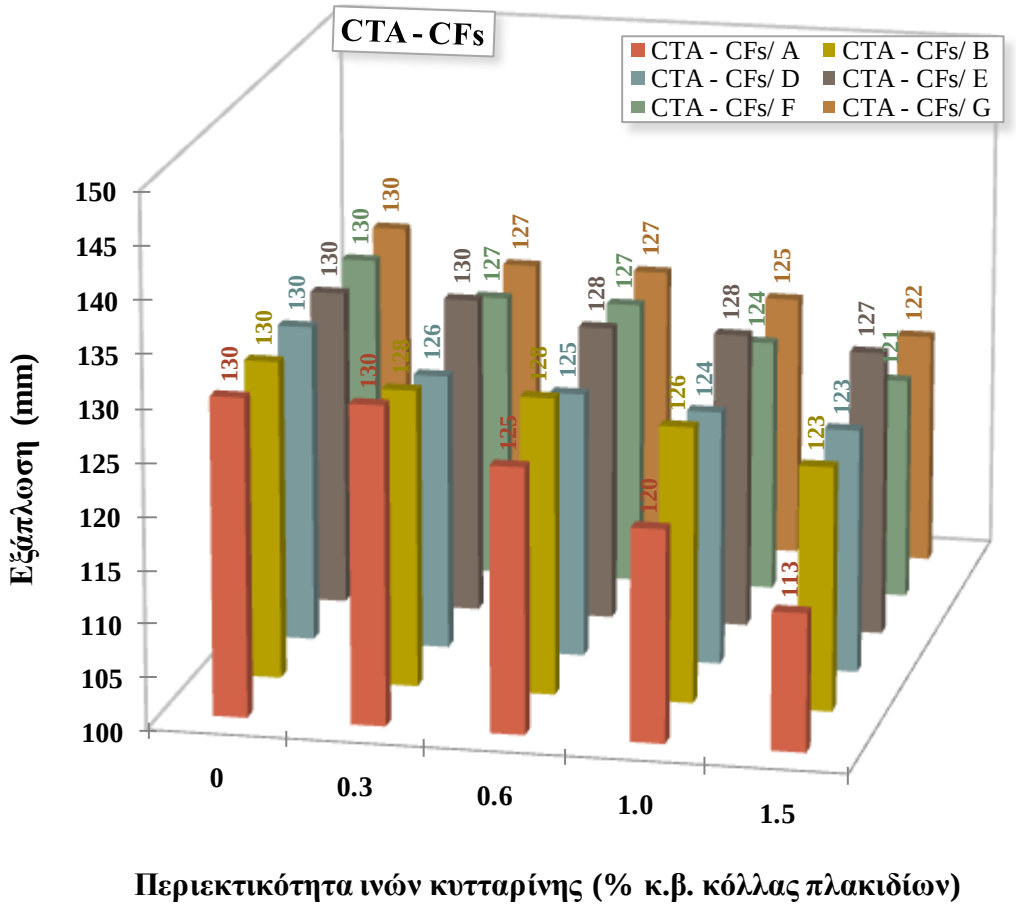
Τα αποτελέσματα της δοκιμής εξάπλωσης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 και παριστάνονται γραφικά στο Σχήμα 5.1. Παρατηρείται ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας πλακιδίων σε ίνες κυτταρίνης προκαλεί μείωση της εξάπλωσης της νωπής κόλλας. Αντίστοιχα αποτελέσματα μείωσης της εξάπλωσης λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης εξάγονται και σε άλλες μελέτες [5.1-5.5]. Η μείωση της εξάπλωσης της κόλλας πλακιδίων λόγω της προσθήκης των ινών αποδίδεται στον υδρόφιλο χαρακτήρα των ινών, οι οποίες απορροφούν ποσότητα του νερού του μίγματος, μειώνοντας την εργασιμότητα της νωπής κόλλας. Το νερό της μίξης συγκεντρώνεται στην επιφάνεια των ινών (κατακράτηση νερού) και παρεμποδίζεται η κίνησή του διαμέσου των κυτταρικών τοιχωμάτων των ινών, παράγοντας ένα λιγότερο πλαστικό υλικό.

Πίνακας 5.2 Εξάπλωση (mm) της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - CFs/A	130	130	125	120	113
CTA - CFs/B	130	128	128	126	123
CTA - CFs/D	130	126	125	124	123
CTA - CFs/E	130	130	128	128	127
CTA - CFs/F	130	127	127	124	121
CTA - CFs/G	130	127	127	125	122

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, διαπιστώνεται ότι η εξάπλωση της νωπής κόλλας πλακιδίων μειώνεται ελάχιστα για ποσοστά ινών κυτταρίνης έως και 0.60% κ.β. κόλλας. Τη μέγιστη μείωση εξάπλωσης παρουσιάζει η κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου A και είναι της τάξης του 14%. Η απόδοση αυτή αποδίδεται στο μεγάλο μήκος των ινών τύπου A (~1100 μm) συγκριτικά με το μήκος των υπόλοιπων ινών. Οι ίνες μεγαλύτερου μήκους διασπείρονται λιγότερο ομοιόμορφα στη μήτρα συγκριτικά με τις ίνες μικρότερου μήκους και ενδεχομένως να σχηματίσουν συσσωματώματα, εγκλωβίζοντας νερό στο εσωτερικό τους και μειώνοντας την εργασιμότητα της νωπής κόλλας. Τη βέλτιστη συμπεριφορά επιδεικνύουν οι κόλλες πλακιδίων με ίνες τύπου E. Η σχεδόν μηδενική επίδραση της προσθήκης των ινών τύπου E στην εξάπλωση της νωπής κόλλας οφείλεται στην επικάλυψη των ινών με λάδι από την κατασκευάστρια εταιρία

τους. Η παρουσία του λαδιού στην επιφάνεια των ινών εμποδίζει την προσρόφηση του νερού στην επιφάνειά τους. Επιπλέον, η κοκκώδης μορφή των ινών τύπου Ε διευκολύνει την επιτυχή διασπορά των ινών στη μήτρα με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται δίκτυα εγκλωβισμού του νερού. Μολαταύτα, οι ανωτέρω μεταβολές στην εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης είναι ασήμαντες και δεν αποτελούν αποτρεπτικό παράγοντα για τη χρήση των ινών ως πρόσθετα στην κόλλα πλακιδίων.



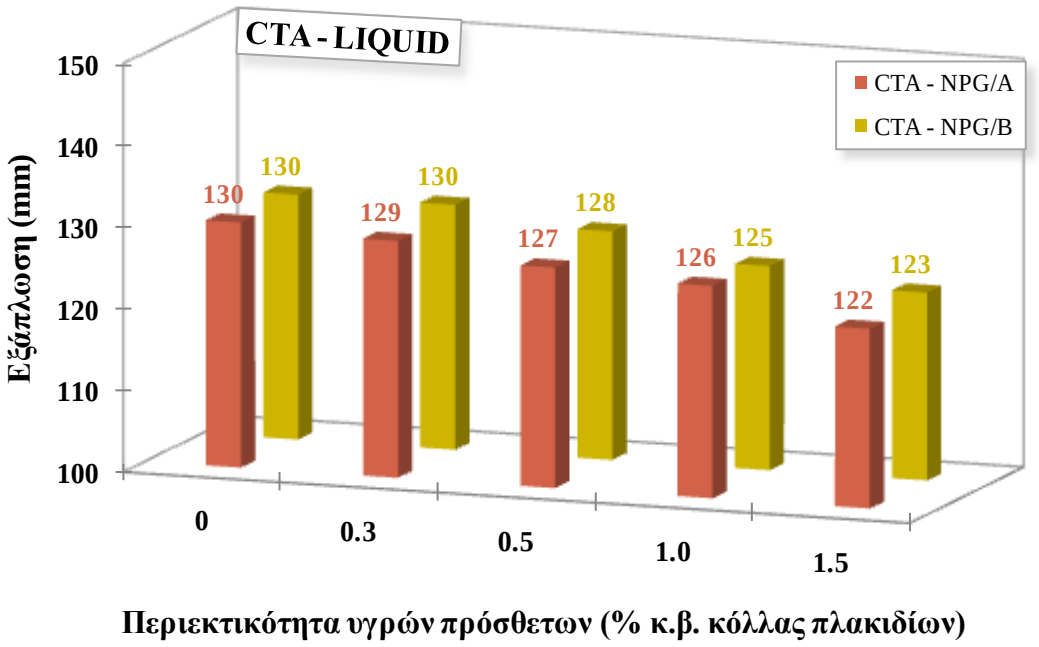
Σχήμα 5.1 Εξάπλωση της νωπής κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης.

5.2.2 Εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εξάπλωσης της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 5.2. Παρατηρείται ότι η προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν επηρεάζει αρνητικά την εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων.

Πίνακας 5.3 Εξάπλωση (mm) της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
CTA - NPG/A	130	129	127	126	122
CTA - NPG/B	130	130	128	125	123



Σχήμα 5.2 Εξάπλωση της νωπής κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε υγρά πρόσθετα.

5.3 Πυκνότητα νωπής κόλλας πλακιδίων

Η δοκιμή προσδιορισμού της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, §4.3.1.3. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση της πυκνότητας της κόλλας πλακιδίων είναι ανεπιθύμητη, διότι οδηγεί στη δημιουργία ενός βαρύτερου υλικού, δυσκολεύοντας τον εφαρμοστή του. Ωστόσο, εξίσου ανεπιθύμητη είναι και μία σημαντική πτώση της πυκνότητας της κόλλας διότι πιθανότατα θα προκαλούσε μείωση της θλιπτικής αντοχής της.

5.3.1 Πυκνότητα της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα της μεταβολής της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 5.3. Παρατηρείται ότι η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας πλακιδίων σε ίνες κυτταρίνης

προκαλεί μείωση της πυκνότητάς της. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών κυτταρίνης εις βάρος του κλάσματος όγκου της μήτρας. Πιο συγκεκριμένα, η αντικατάσταση ποσότητας της κόλλας πλακιδίων (πυκνό υλικό) με ίνες κυτταρίνης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα, προκαλεί μείωση της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων.

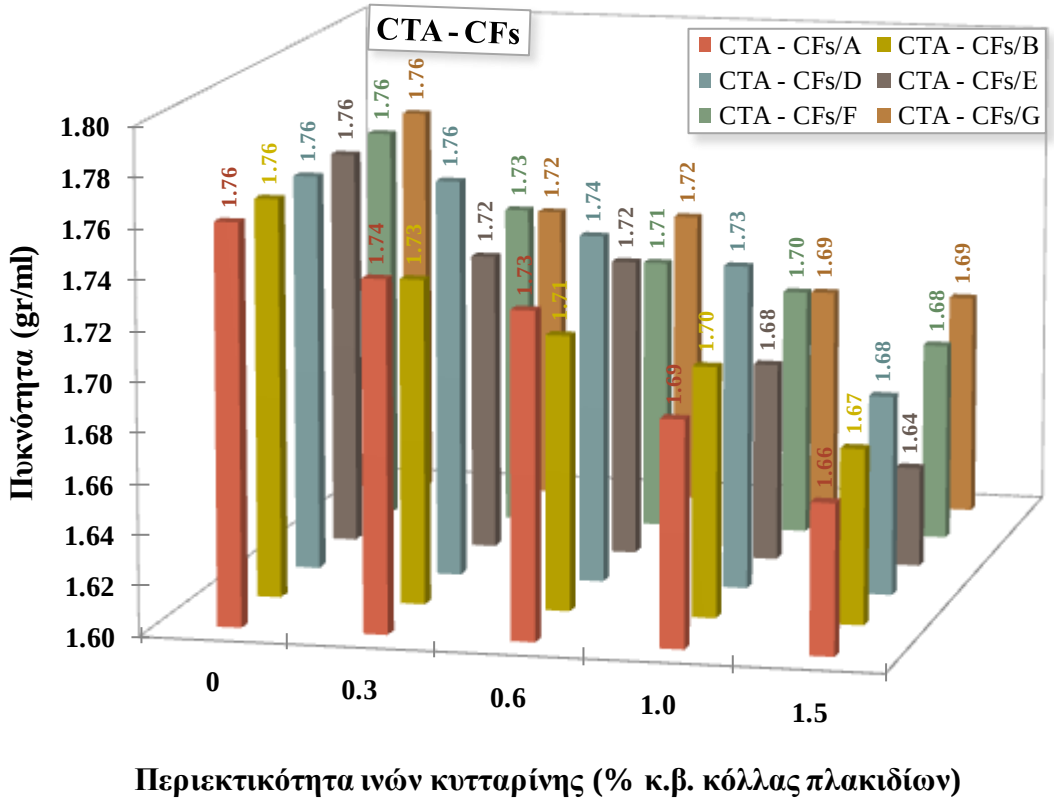
Πίνακας 5.4 Πυκνότητα (gr/ml) της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - CFs/A	1.76	1.74	1.73	1.69	1.66
CTA - CFs/B	1.76	1.73	1.71	1.70	1.67
CTA - CFs/D	1.76	1.76	1.74	1.73	1.68
CTA - CFs/E	1.76	1.72	1.72	1.68	1.64
CTA - CFs/F	1.76	1.73	1.71	1.70	1.68
CTA - CFs/G	1.76	1.72	1.72	1.69	1.69

Τη μικρότερη απώλεια πυκνότητας εμφανίζει η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου D, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την υψηλότερη φαινόμενη πυκνότητα (έως και 370 g/l) συγκριτικά με τις υπόλοιπες ίνες. Αντίθετα, η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου A, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τη χαμηλότερη φαινόμενη πυκνότητα (έως 90 g/l), παρουσιάζει αυξανόμενο ρυθμό μείωσης της πυκνότητάς της για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0.60% κ.β. κόλλας. Ωστόσο, τον υψηλότερο ρυθμό μείωσης της πυκνότητας παρουσιάζει η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου E, σημειώνοντας μέγιστη πτώση 6.25% για περιεκτικότητα σε ίνες ίση με 1.50% κ.β. κόλλας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ίνες τύπου E έχουν υψηλότερη πυκνότητα από τις ίνες τύπου B, F και G, φαίνεται ότι η φαινόμενη πυκνότητα των ινών δεν είναι η μόνη παράμετρος που επηρεάζει την πυκνότητα της νωπής κόλλας πλακιδίων. Είναι προφανές ότι η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας σε ίνες προκαλεί και αύξηση των φυσαλίδων αέρα που παράγονται κατά την ανάμειξη των ινών κυτταρίνης με τη νωπή κόλλα, οδηγώντας στη δημιουργία ενός ελαφρότερου υλικού. Ανάλογα αποτελέσματα μείωσης της πυκνότητας τσιμεντοειδών υλικών λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης αναφέρονται και σε άλλες μελέτες [5.6].

Οι προαναφερθείσες μεταβολές της πυκνότητας χαρακτηρίζονται περιορισμένες και δεν αναμένεται να επηρεάσουν την μηχανική συμπεριφορά της κόλλας πλακιδίων. Ως εκ

τούτου, όσο αφορά στην πυκνότητα της νωπής κόλλας πλακιδίων, η ενίσχυση της τσιμεντοειδούς κόλλας με ίνες κυτταρίνης αποτελεί μία αποδεκτή λύση.



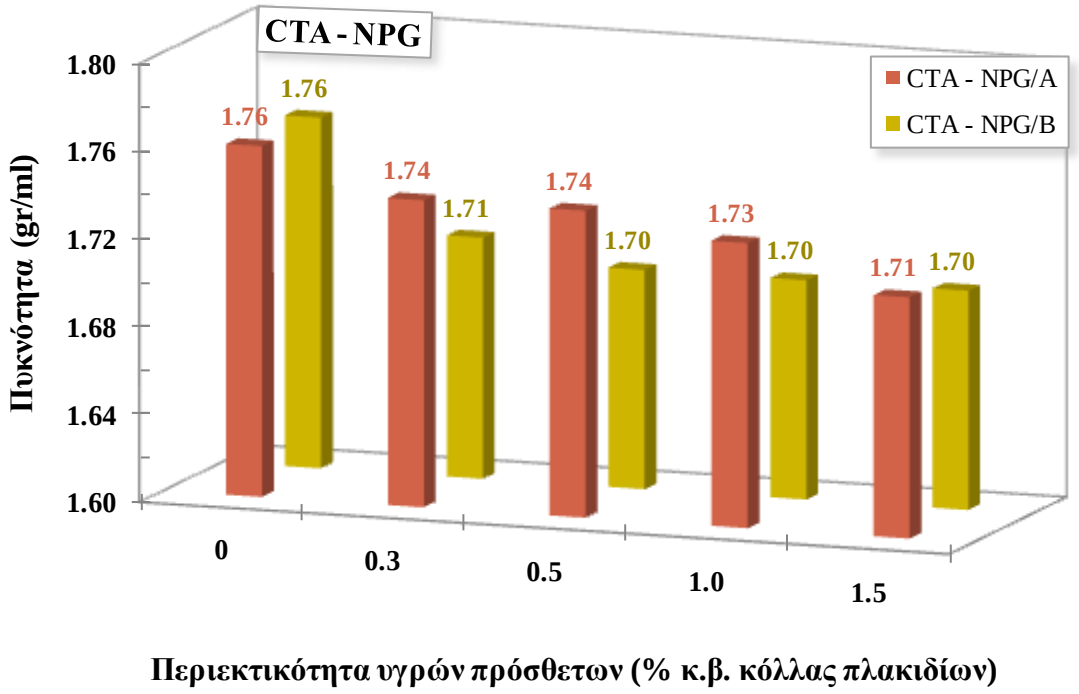
Σχήμα 5.3 Πυκνότητα της νωπής κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης.

5.3.2 Πυκνότητα της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα του ρυθμού μεταβολής της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 5.4. Αντίθετα με τις ίνες κυτταρίνης, η προσθήκη υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δε μεταβάλλει ιδιαιτέρως την πυκνότητα της κόλλας πλακιδίων. Η μέγιστη πτώση της πυκνότητας είναι της τάξης του μόλις 3.5% και αντιστοιχεί στην κόλλα πλακιδίων με υγρό τύπου Β σε περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0.50% κ.β. κόλλας. Επομένως, τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης είναι κατάλληλα ως πρόσθετα της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων.

Πίνακας 5.5 Πυκνότητα (gr/ml) της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.50%	1.00%	1.50%
CTA - NPG/A	1.76	1.74	1.74	1.73	1.71
CTA - NPG/B	1.76	1.71	1.70	1.70	1.70



Σχήμα 5.4 Πυκνότητα της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας.

5.4 Περιεχόμενος αέρας νωπής κόλλας πλακιδίων

Ο περιεχόμενος αέρας της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης ή υγρά πρόσθετα προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, §4.3.1.4.

5.4.1 Περιεχόμενος αέρας της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα του περιεχόμενου αέρα της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6 και παριστάνονται γραφικά στο Σχήμα 5.5. Παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση η προσθήκη των ινών κυτταρίνης προκαλεί αύξηση του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων. Ο ρυθμός αύξησης του περιεχόμενου αέρα είναι πιο έντονος στις κόλλες με ποσοστά ινών κυτταρίνης μεγαλύτερα του 0.60% κ.β. κόλλας. Η αύξηση του περιεχόμενου αέρα μπορεί να αποδοθεί στη δυσκολία επιτυχούς συμπύκνωσης της

νωπής κόλλας λόγω της ενσωμάτωσης ενός σχετικά υψηλού κλάσματος όγκου ινών. Η κακή συμπύκνωση οδηγεί στη δημιουργία κενών, στα οποία εγκλωβίζεται αέρας, κυρίως στη διεπιφάνεια της κόλλας και των ινών κυτταρίνης, καθώς και στις περιοχές μεταξύ των ινιδίων και των μικροϊνιδίων. Τα αποτελέσματα του ποσοστού του περιεχόμενου αέρα λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης συνάδουν με τα αποτελέσματα της πυκνότητας της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης (βλ. §5.3.1), επιβεβαιώνοντας ότι η μείωση της πυκνότητας οφείλεται σε ένα βαθμό και στον εγκλωβισμό αέρα εντός του υλικού. Εκτός από το κλάσμα όγκου των ινών κυτταρίνης, η αύξηση του περιεχόμενου αέρα σχετίζεται και με την ίδια τη φύση των ινών κυτταρίνης, η οποία είναι ιδιαιτέρως πορώδης.

Η μέγιστη αύξηση του περιεχόμενου αέρα είναι 33% και αντιστοιχεί στην κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης τύπου Ε, ενώ τον μικρότερο ρυθμό αύξησης του περιεχόμενου αέρα παρουσιάζει η κόλλα με ίνες τύπου D.

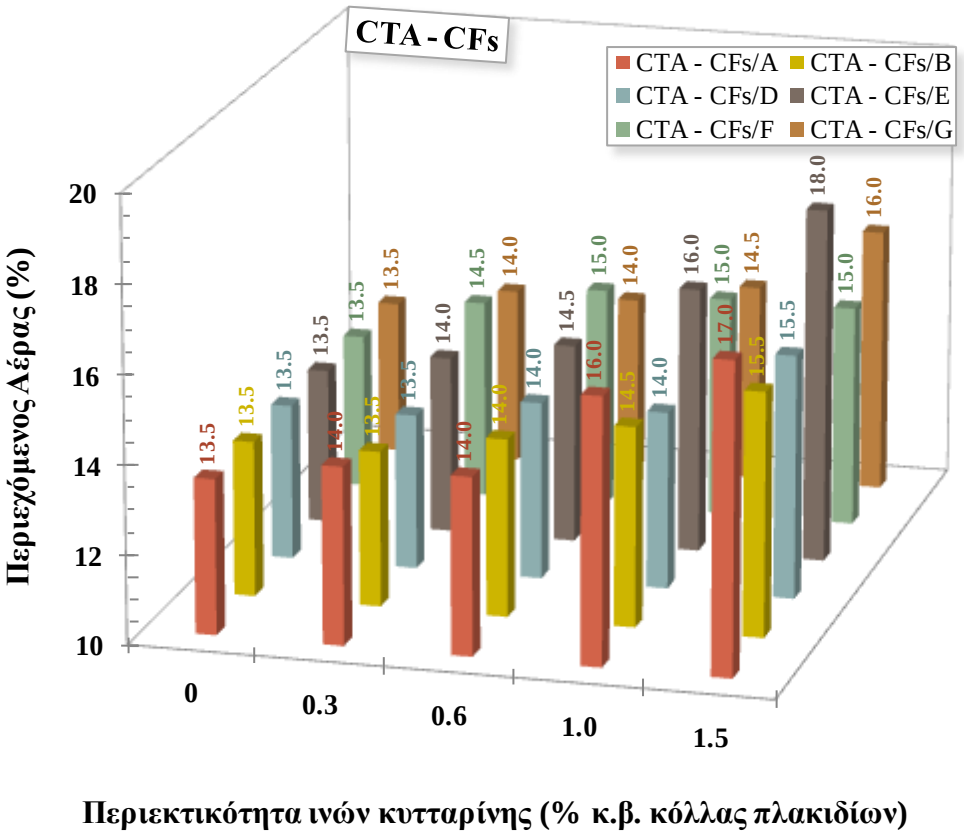
Πίνακας 5.6 Περιεχόμενος αέρας (%) της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - CFs/A	13.5	14.0	14.0	16.0	17.0
CTA - CFs/B	13.5	13.5	14.0	14.5	15.5
CTA - CFs/D	13.5	13.5	14.0	14.0	15.5
CTA - CFs/E	13.5	14.0	14.5	16.0	18.0
CTA - CFs/F	13.5	14.5	15.0	15.0	15.0
CTA - CFs/G	13.5	14.0	14.0	14.5	16.0

Είναι γνωστό ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος των ινών και κατ’ επέκταση ο λόγος διάστασής ή μορφής τους (μήκος προς διάμετρο), τόσο πιο εύκολα διασπείρονται στη μήτρα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η καλή διασπορά των ινών στο υλικό αναφοράς μειώνει τα κενά που σχηματίζονται στο σύνθετο υλικό, είναι αναμενόμενο οι κόλλες πλακιδίων με ίνες τύπου F και D, οι οποίες έχουν μέσο μήκος 200 και 250 μm αντίστοιχα, να παρουσιάζουν τη μικρότερη αύξηση σε περιεχόμενο αέρα. Αντίθετα, η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου A, οι οποίες έχουν μεγαλύτερο μήκος (~1100 μm), επιδεικνύει υψηλά ποσοστά περιεχόμενου αέρα για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0.60% κ.β. κόλλας. Ωστόσο, τον υψηλότερο ρυθμό αύξησης του περιεχόμενου αέρα παρουσιάζει η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου Ε, των οποίων το μήκος κυμαίνεται από 100 έως 400 μm. Υπό αυτή την έννοια, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα ως προς την επίδραση των διαστάσεων των ινών στον περιεχόμενο αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων. Άλλωστε,

οι ίνες προέρχονται από διαφορετικές πηγές και έχουν υποστεί διαφορετική επεξεργασία κατά την παραγωγή τους, με αποτέλεσμα η σύγκριση της επίδρασής τους στις ιδιότητες της κόλλας πλακιδίων να είναι σχεδόν αδύνατη.

Σε γενικές γραμμές, οι προαναφερθείσες μεταβολές του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων θεωρούνται αποδεκτές. Ωστόσο, οι κόλλες πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης τύπου A και E παρουσιάζουν σημαντική αύξηση του περιεχόμενου αέρα. Η επίδραση της αύξησης του περιεχόμενου αέρα στις μηχανικές ιδιότητες της κόλλας θα αξιολογηθεί συνδυαστικά με τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη.



Σχήμα 5.5 Περιεχόμενος αέρας (% κ.ο.) της νωπής κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης.

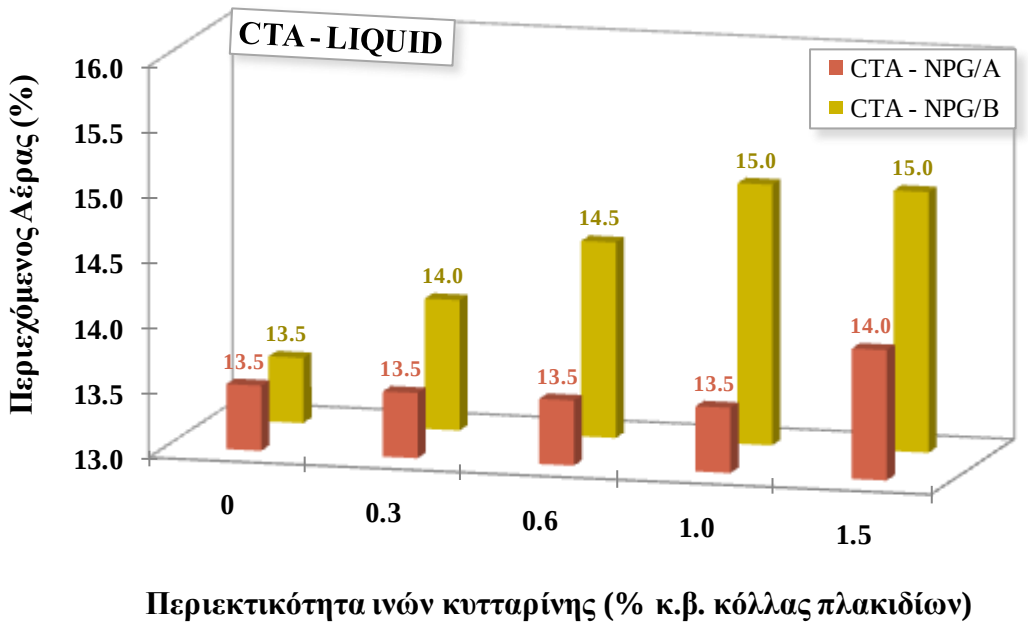
5.4.2 Περιεχόμενος αέρας της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα του περιεχόμενου αέρα της κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 5.6. Παρατηρείται ότι τη μέγιστη αύξηση περιεχόμενου αέρα (~11%) εμφανίζει η κόλλα πλακιδίων με το υγρό νεοπεντυλο-

γλυκόλης τύπου Β για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0.50% κ.β. κόλλας. Η εν λόγω αύξηση αποτελεί μία ασήμαντη μεταβολή στα όρια του σφάλματος της μέτρησης. Η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α δεν επηρεάζει τον περιεχόμενο αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων. Επομένως, η προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν επηρεάζει το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα της κόλλας πλακιδίων. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη δεδομένου ότι τα επιλεχθέντα υγρά δεν περιέχουν τασιενεργές ουσίες και λειτουργούν ως αερακτικά.

Πίνακας 5.7 Περιεχόμενος αέρας (%) της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - NPG/A	13.5	13.5	13.5	13.5	14.0
CTA - NPG/B	13.5	14.0	14.5	15.0	15.0



Σχήμα 5.6 Περιεχόμενος αέρας (%, κ.ο.) της νωπής κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

5.5 Συγκρατούμενο νερό νωπής κόλλας πλακιδίων

Το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης ή υγρά πρόσθετα προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, §4.3.1.5. Οι κόλλες πλακιδίων περιέχουν κατάλληλα χημικά πρόσθετα, τα οποία διασφαλίζουν την ικανότητά τους να συγκρατούν το νερό της μίξης. Το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού μίας κόλλας πλακιδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 99%.

5.5.1 Συγκρατούμενο νερό της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα του συγκρατούμενου νερού της νωπής κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8. Σε κάθε περίπτωση, το ποσοστό συγκρατούμενου νερού της νωπής κόλλας πλακιδίων διατηρείται μεγαλύτερο του 99%. Επομένως, η συνεργασία των ινών κυτταρίνης με τα χημικά πρόσθετα της κόλλας αξιολογείται ως καλή όσο αφορά στο ποσοστό του συγκρατούμενου νερού.

Πίνακας 5.8 Συγκρατούμενο νερό (%) της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - CFs/A	99.28	99.15	99.23	99.26	99.22
CTA - CFs/B	99.28	99.42	99.40	99.30	99.31
CTA - CFs/D	99.28	99.28	99.29	99.30	99.34
CTA - CFs/E	99.28	99.28	99.30	99.31	99.33
CTA - CFs/F	99.28	99.28	99.30	99.31	99.28
CTA - CFs/G	99.28	99.28	99.28	99.29	99.27

5.5.2 Συγκρατούμενο νερό της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα του συγκρατούμενου νερού της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Διαπιστώνεται ότι η προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης βελτιώνει ελαφρώς το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού της νωπής κόλλας πλακιδίων.

Πίνακας 5.9 Συγκρατούμενο νερό (%) της νωπής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - NPG/A	99.28	99.28	99.36	99.35	99.38
CTA - NPG/B	99.28	99.46	99.49	99.55	99.35

5.6 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων

Η αντοχή σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης ή υγρά πρόσθετα προσδιορίστηκε σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, §4.3.1.6.

5.6.1 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης στην ηλικία των 28 ημερών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 5.10 & 5.11, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.10 Αντοχή σε κάμψη (MPa) της κόλλας πλακιδίων ηλικίας 28 ημερών με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
CTA - CFs/A	4.51	4.96	4.74	4.60	4.63
CTA - CFs/B	4.51	4.45	4.40	4.57	4.49
CTA - CFs/D	4.51	5.27	4.97	4.68	4.52
CTA - CFs/E	4.51	4.75	4.56	4.57	4.58
CTA - CFs/F	4.51	5.29	5.10	4.74	4.58
CTA - CFs/G	4.51	5.21	4.98	4.83	4.69

Πίνακας 5.11 Αντοχή σε θλίψη (MPa) της κόλλας πλακιδίων ηλικίας 28 ημερών με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
CTA - CFs/A	19.70	17.50	16.55	15.15	15.30
CTA - CFs/B	19.70	18.75	17.45	15.90	15.85
CTA - CFs/D	19.70	19.90	19.63	19.35	17.90
CTA - CFs/E	19.70	18.35	18.60	17.50	16.80
CTA - CFs/F	19.7	17.85	17.56	18.44	17.44
CTA - CFs/G	19.70	18.86	18.54	17.26	16.89

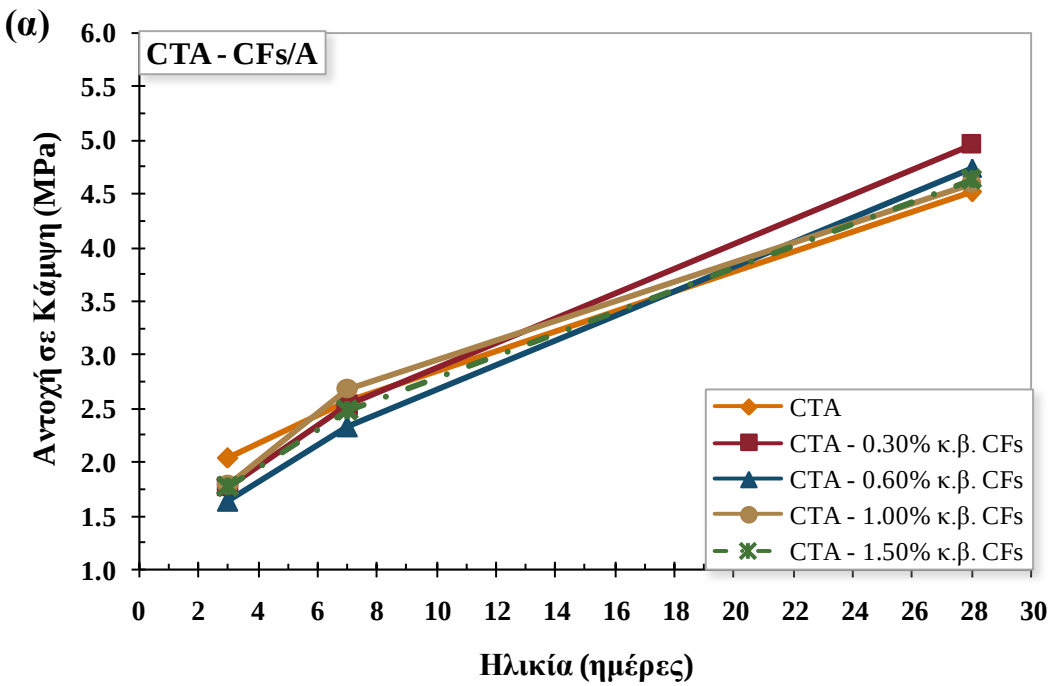
- ***Ίνες τύπου Α***

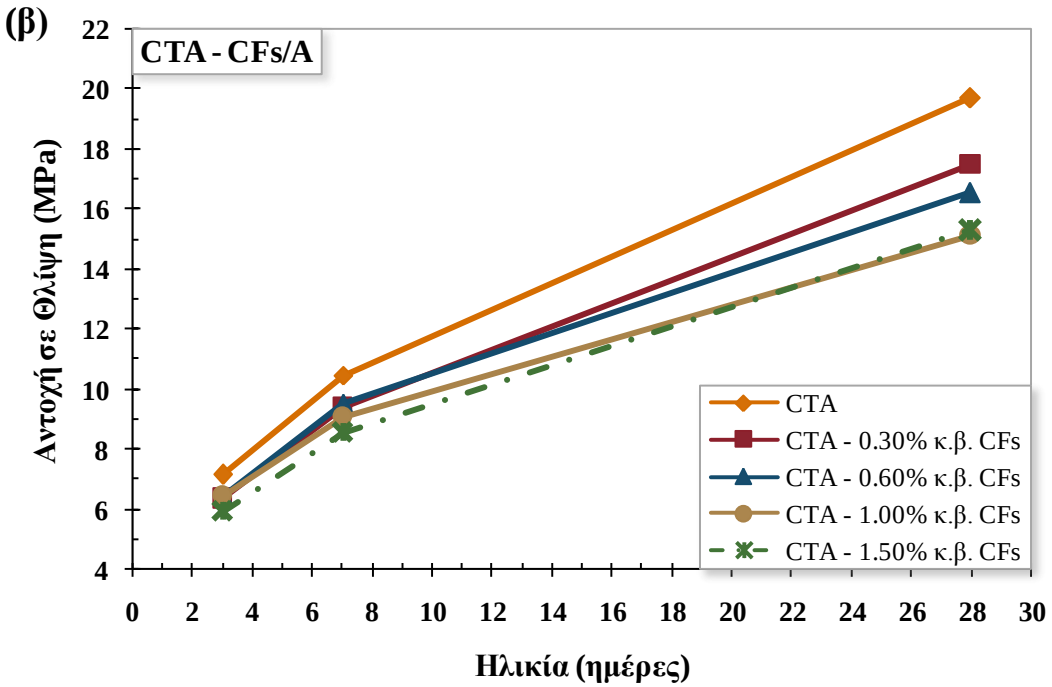
Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7. Παρατηρείται ότι στην ηλικία των 28 ημερών, οι κόλλες πλακιδίων ενισχυμένες με ίνες κυτταρίνης τύπου Α παρουσιάζουν ελαφρώς βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τη συμβατική κόλλα πλακιδίων (Σχήμα 5.7^{α}). Η μέγιστη αύξηση της αντοχής σε κάμψη επιτυγχάνεται στην κόλλα πλακιδίων με 0.30% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και είναι της τάξης του 10%, ενώ τη μικρότερη βελτίωση εμφανίζει η κόλλα με 1.00% κ.β. κόλλας ίνες. Η βελτίωση της αντοχής σε κάμψη της τσιμεντοειδούς κόλλας με ίνες κυτταρίνης τύπου Α συγκριτικά με τη συμβατική κόλλα αποδίδεται στην υψηλή αναλογία διαστάσεων της ίνας τύπου Α, η οποία οδηγεί σε αποτελεσματική γεφύρωση των επιφανειών των ρωγμών

της τσιμεντοειδούς μήτρας. Αρκετοί συγγραφείς αναφέρουν ότι, κατά τη διαδικασία θραύσης των τσιμεντοειδών υλικών ενισχυμένων με ίνες κυτταρίνης, η γεφύρωση των ρωγμών από τις ίνες περιορίζει τη διάδοσή τους στη μήτρα του υλικού και αυξάνει την αντίσταση της μήτρας στο άνοιγμα των ρωγμών [5.7-5.8].

Μολαταύτα, η αντοχή σε κάμψη της τσιμεντοειδούς κόλλας δεν παρουσιάζει μονοτονική συμπεριφορά με την περιεκτικότητά της σε ίνες κυτταρίνης. Στην ηλικία των 28 ημερών, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της κόλλας πλακιδίων σε ίνες κυτταρίνης τύπου Α, τόσο μειώνεται ο ρυθμός βελτίωσης της αντοχής της σε κάμψη. Η συμπεριφορά αυτή πιθανώς να οφείλεται στην επαλληλία δύο φαινομένων: (α) τη μη ομοιόμορφη διασπορά των ινών στη μήτρα για υψηλότερα ποσοστά ινών και (β) την πιο ασθενή απόκριση της σκληρυμένης κόλλας με ίνες κυτταρίνης λόγω της μείωσης του κλάσματος όγκου της τσιμεντοειδούς κόλλας καθώς αυξάνεται το κλάσμα όγκου των ινών. Επιπλέον, δεν πρέπει να παραγνωρίζεται η εγγενής διασπορά των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας. Η βελτίωση της αντοχής σε κάμψη των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης αναφέρεται σε πλήθος άλλων ερευνητικών μελετών [5.6, 5.9-5.15].

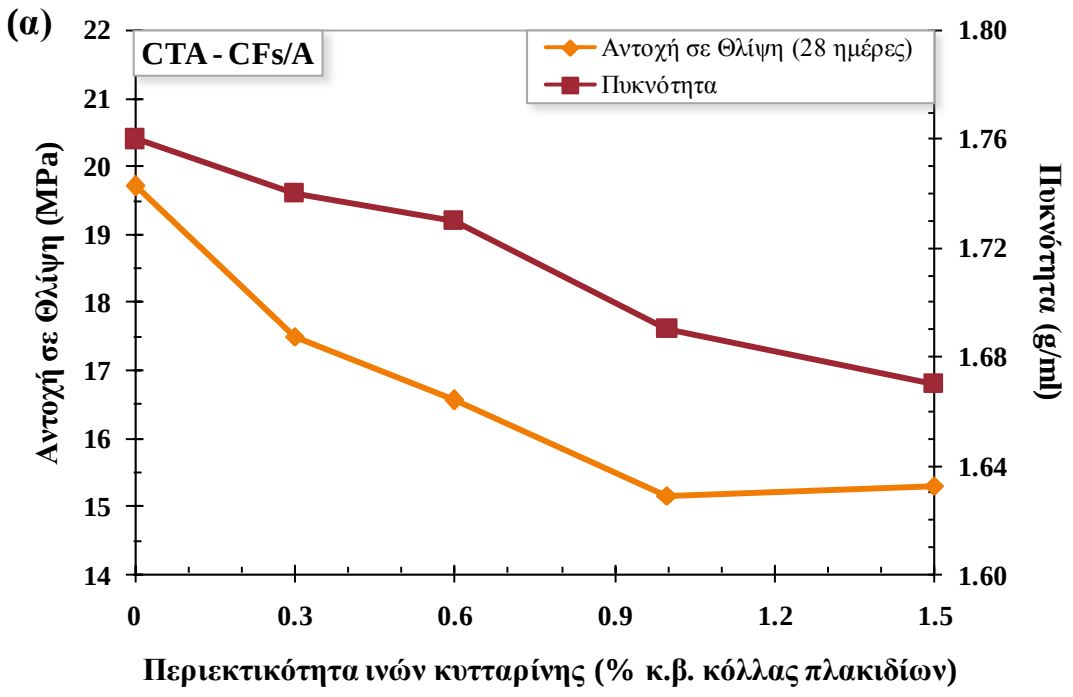
Αντίθετα με τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη, τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη υποδεικνύουν ότι η προσθήκη των ινών κυτταρίνης τύπου Α μειώνει τη θλιπτική αντοχή της κόλλας πλακιδίων (Σχήμα 5.7$^{\beta}$). Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι της τάξης του 23% και αντιστοιχεί στην κόλλα πλακιδίων με 1.00% κ.β. κόλλας ίνες τύπου Α. Παρόμοια μείωση της αντοχής σε θλίψη (~22%) παρουσιάζει η κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου Α. Παρατηρείται ότι η αύξηση του ποσοστού των ινών κυτταρίνης τύπου Α προκαλεί αύξηση του ρυθμού μείωσης της αντοχής σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων. Η μείωση της θλιπτικής αντοχής της κόλλας πλακιδίων με την αύξηση της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης αποδίδεται κυρίως στην αύξηση των κενών αέρα λόγω της προσθήκης περισσότερων ινών. Η αύξηση των κενών αέρα οδηγεί στην παραγωγή ενός ελαφρότερου και πιο αδύναμου υλικού. Η μείωση της αντοχής σε θλίψη των υλικών με βάση το τσιμέντο λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης αναφέρεται και σε άλλες μελέτες [5.5-5.6].

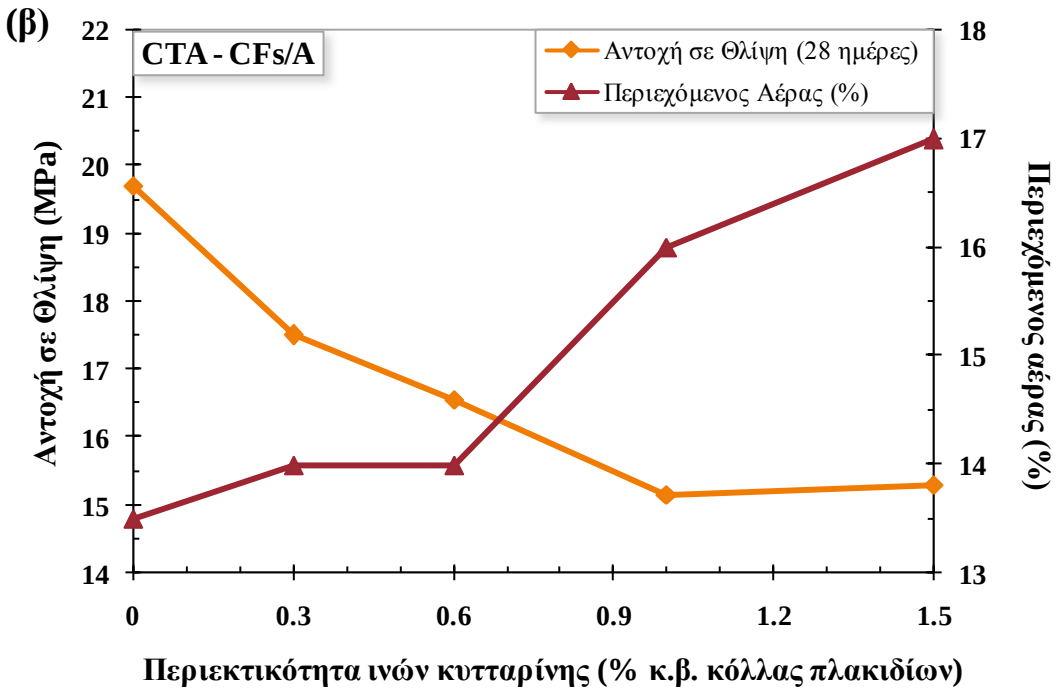




Σχήμα 5.7 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Από το Σχήμα 5.8$^{\alpha}$, διαπιστώνεται ότι η αντοχή σε θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Α και η πυκνότητά της μειώνονται με παρόμοιο τρόπο, καθώς αυξάνεται το ποσοστό των ινών. Ως εκ τούτου, η αντοχή σε θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης φαίνεται να αποτελεί μία συνάρτηση της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων. Ο ρόλος του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων όσο αφορά στην αντοχή σε θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Α φαίνεται στο Σχήμα 5.9$^{\beta}$. Παρατηρείται ότι η αύξηση του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων λόγω της αύξησης της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής της σκληρυμένης κόλλας. Εκτός από την αύξηση του περιεχόμενου αέρα, σημαντικό ρόλο στη μείωση της αντοχής σε θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων παίζει ο υδρόφιλος χαρακτήρας των ινών κυτταρίνης. Μία ποσότητα του νερού μίξης εγκλωβίζεται στο δίκτυο των ινών ή απορροφάται από τις ίνες, μειώνοντας την ποσότητα του διαθέσιμου νερού για την ενυδάτωση του τσιμέντου της κόλλας πλακιδίων. Ωστόσο, στο βαθμό που η θλιπτική αντοχή έχει μικρή σχέση με την αντοχή σε πρόσφυση, η οποία αποτελεί βασική ιδιότητα μίας κόλλας πλακιδίων και εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα του πολυμερούς που χρησιμοποιείται, η πτώση της θλιπτικής αντοχής της κόλλας πλακιδίων λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης δε συνιστά παράγοντα απόρριψης των ινών κυτταρίνης ως πρόσθετα.





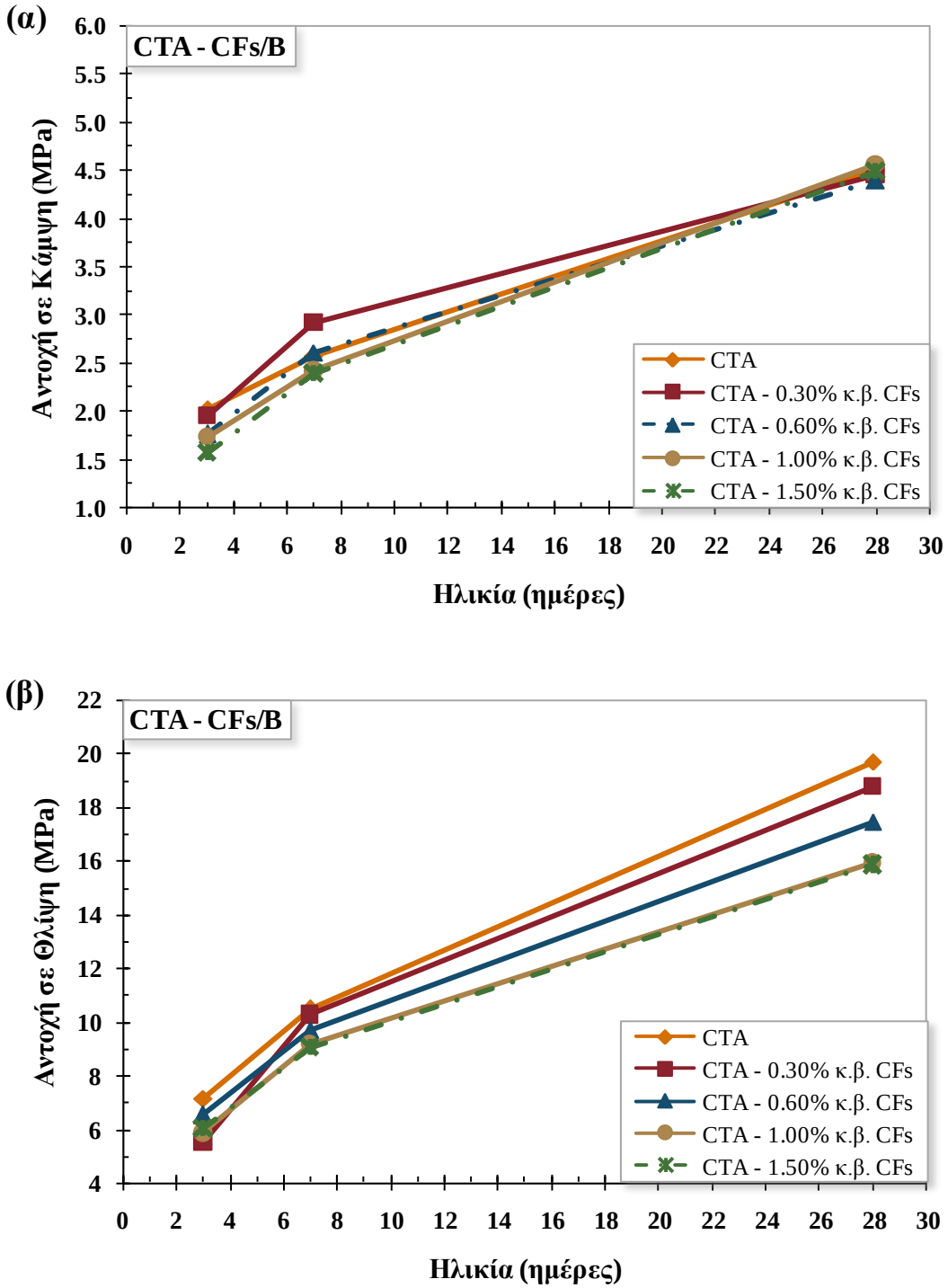
Σχήμα 5.10 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων και (α) ρυθμός ανάπτυξης της πυκνότητας της αντίστοιχης νωπής κόλλας συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης και (β) ρυθμός ανάπτυξης του περιεχόμενου αέρα της αντίστοιχης νωπής κόλλας συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης.

Ίνες τύπου Β

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Β σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11. Παρατηρείται ότι στην ηλικία των 28 ημερών, οι κόλλες πλακιδίων ενισχυμένες με ίνες κυτταρίνης τύπου Β παρουσιάζουν παρόμοια αντοχή σε κάμψη με τη συμβατική κόλλα πλακιδίων (Σχήμα 5.11$^{\alpha}$). Αντίθετα με τις ίνες τύπου Α, η προσθήκη των ινών τύπου Β δε βελτιώνει την καμπτική συμπεριφορά της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στο μικρότερο μήκος των ινών τύπου Β (~500 μm) συγκριτικά με το μήκος των ινών τύπου Α (~1100 μm). Η μικρότερη αναλογία διαστάσεων της ίνας τύπου Β φαίνεται να μην επιτρέπει στις ίνες να αναπτύξουν έναν επαρκή μηχανισμό γεφύρωσης των επιφανειακών ρωγμών της μήτρας.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Β παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11$^{\beta}$. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας πλακιδίων σε ίνες κυτταρίνης

τύπου Β προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής της σκληρυμένης κόλλας σε όλες τις ηλικίες. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της θλιπτικής αντοχής (~19.50%) αντιστοιχεί στην κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου Β.

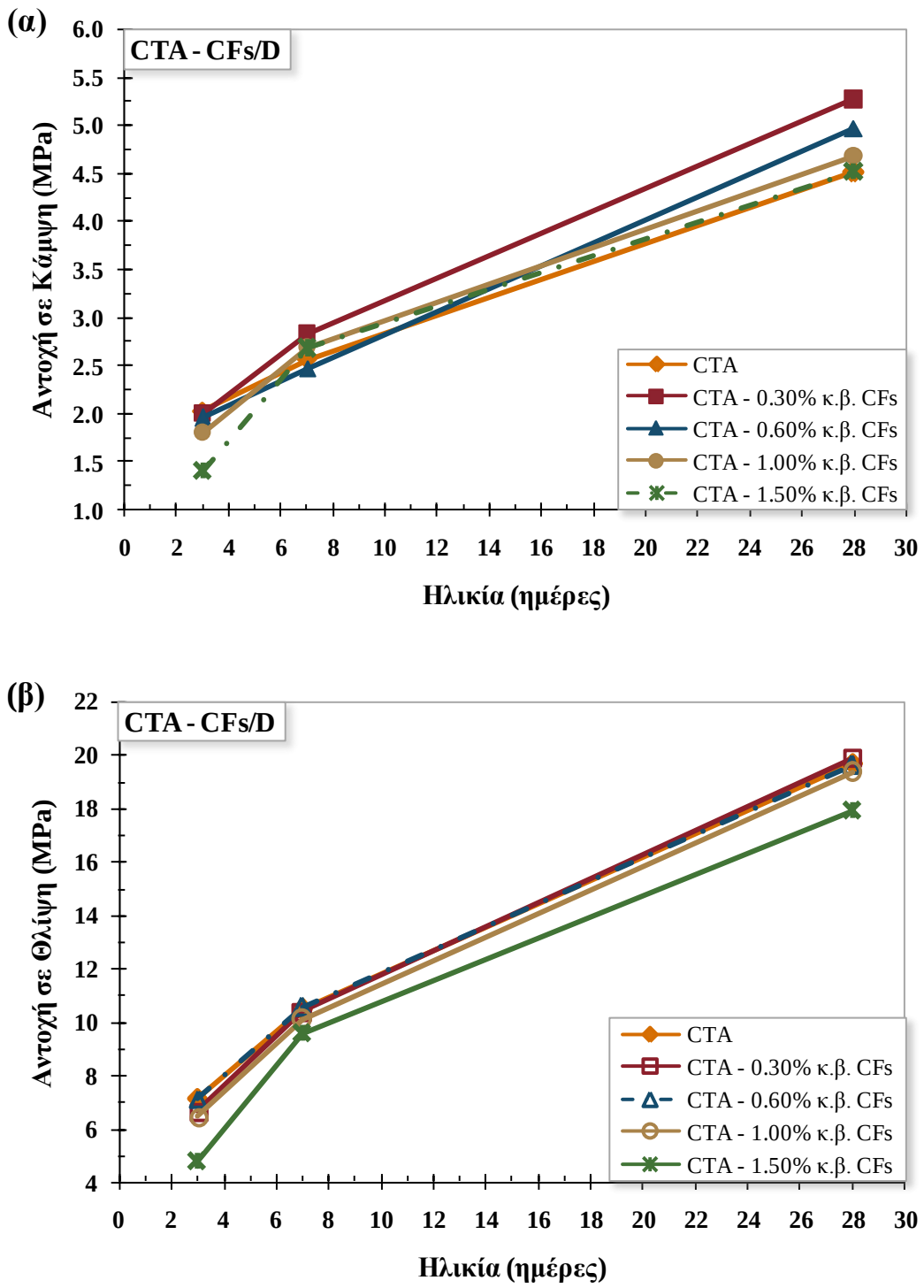


Σχήμα 5.11 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Β σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου D

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου D σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12. Στην ηλικία των 28 ημερών, η κόλλα πλακιδίων εμφανίζει βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς (Σχήμα 5.12$^{\alpha}$). Τη μέγιστη βελτίωση παρουσιάζει η κόλλα με 0.30% κ.β. κόλλας ίνες τύπου D και είναι περίπου ίση με 17%. Η βελτίωση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στην επιτυχή διασπορά των ινών στη μήτρα λόγω του μικρότερου μήκους τους (~250 μm) συγκριτικά με το μήκος των ινών τύπου A και B.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου D παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12$^{\beta}$. Σε όλες τις ηλικίες, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου D σε περιεκτικότητες έως και 1.00% κ.β. κόλλας προσεγγίζει την αντοχή της κόλλας αναφοράς. Ελαφριά μείωση της θλιπτικής αντοχής εμφανίζει μόνο η κόλλα με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου D, της οποίας η αντοχή σε θλίψη στην ηλικία των 28 ημερών σημειώνει πτώση της τάξης του μόλις 10%. Η βελτιωμένη αυτή συμπεριφορά της κόλλας με ίνες τύπου D ήταν αναμενόμενη στο βαθμό που η αντίστοιχη νωπή κόλλα χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη πυκνότητα και το χαμηλότερο ποσοστό περιεχόμενου αέρα (βλ. Σχήμα 5.3 &Σχήμα 5.5). Παράλληλα, η επικάλυψη των ινών τύπου D με λάδι μειώνει την απορρόφηση νερού από τις ίνες κυτταρίνης, επιτρέποντας την κυκλοφορία του νερού μίξης για την ενυδάτωση του τσιμέντου της κόλλας πλακιδίων.

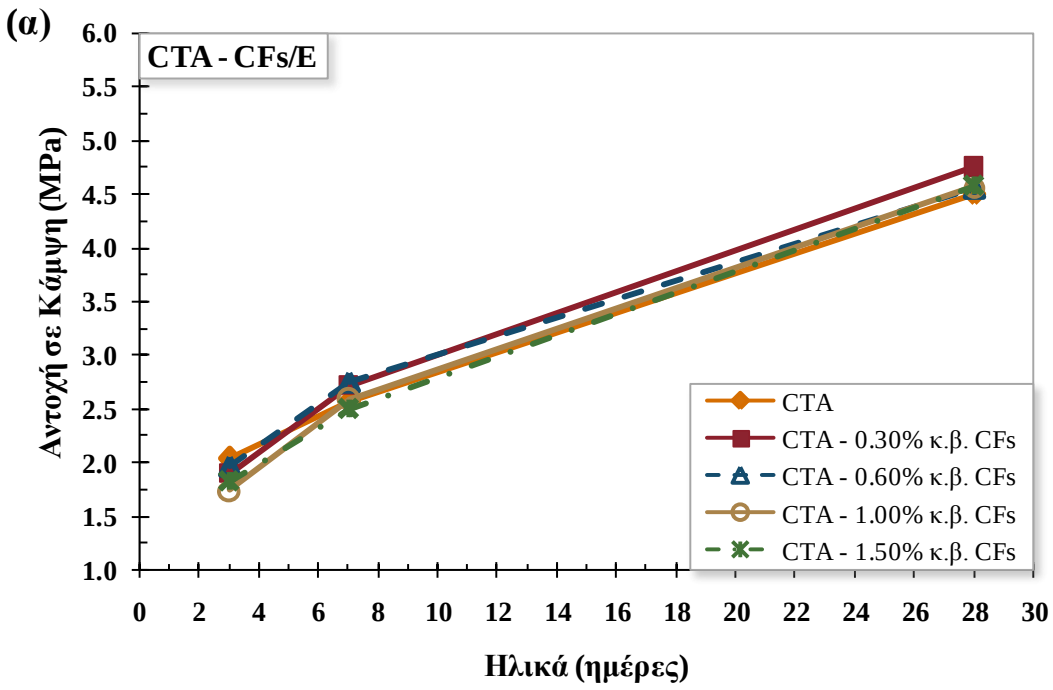


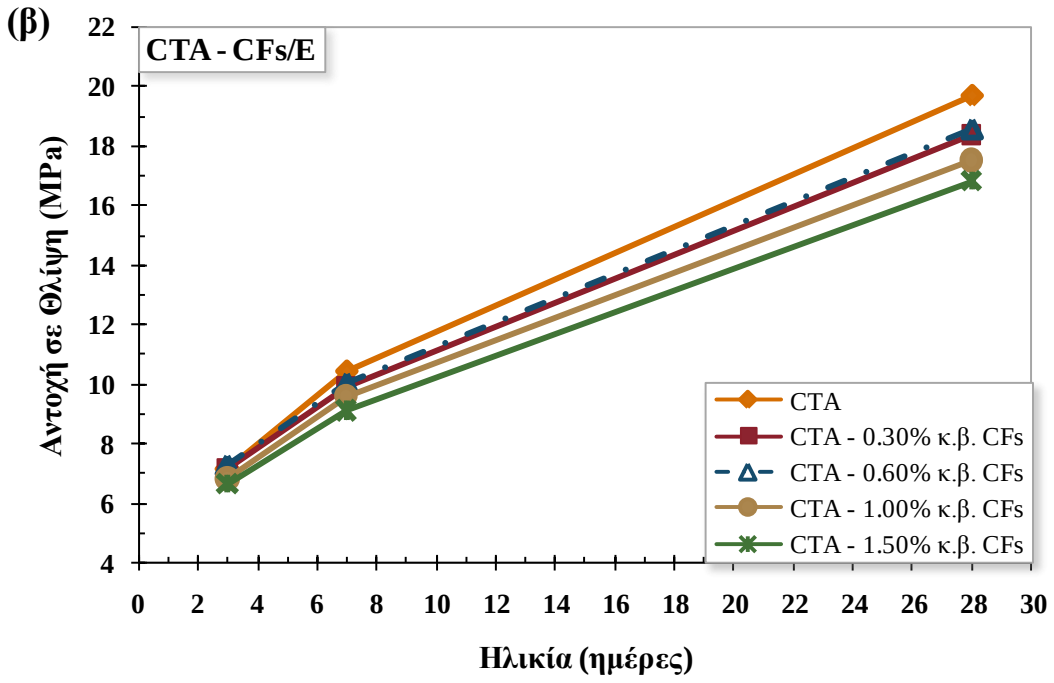
Σχήμα 5.12 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου D σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου Ε

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.13. Στην ηλικία των 28 ημερών, η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου Ε εμφανίζει ελαφρώς βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς (Σχήμα 5.13^{α}). Τη μέγιστη βελτίωση παρουσιάζει η κόλλα με 0.30% κ.β. κόλλας ίνες τύπου Ε και είναι μόλις 5%.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.13^{β}. Σε όλες τις ηλικίες, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε είναι χαμηλότερη της αντοχής της κόλλας αναφοράς. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι περίπου 15% και αντιστοιχεί στην κόλλα που περιέχει 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου Ε. Παρόλο που η νωπή κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου Ε χαρακτηρίζεται από χαμηλή πυκνότητα και υψηλό ποσοστό περιεχόμενου αέρα παρουσιάζει χαμηλότερη μείωση της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με τις κόλλες με ίνες τύπου Α και Β, των οποίων η μέγιστη μείωση της θλιπτικής αντοχής είναι 22 και 19.5%, αντίστοιχα. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην επικάλυψη των ινών τύπου Ε με λάδι, το οποίο μειώνει την απορρόφηση νερού μίξης από τις ίνες κυτταρίνης.



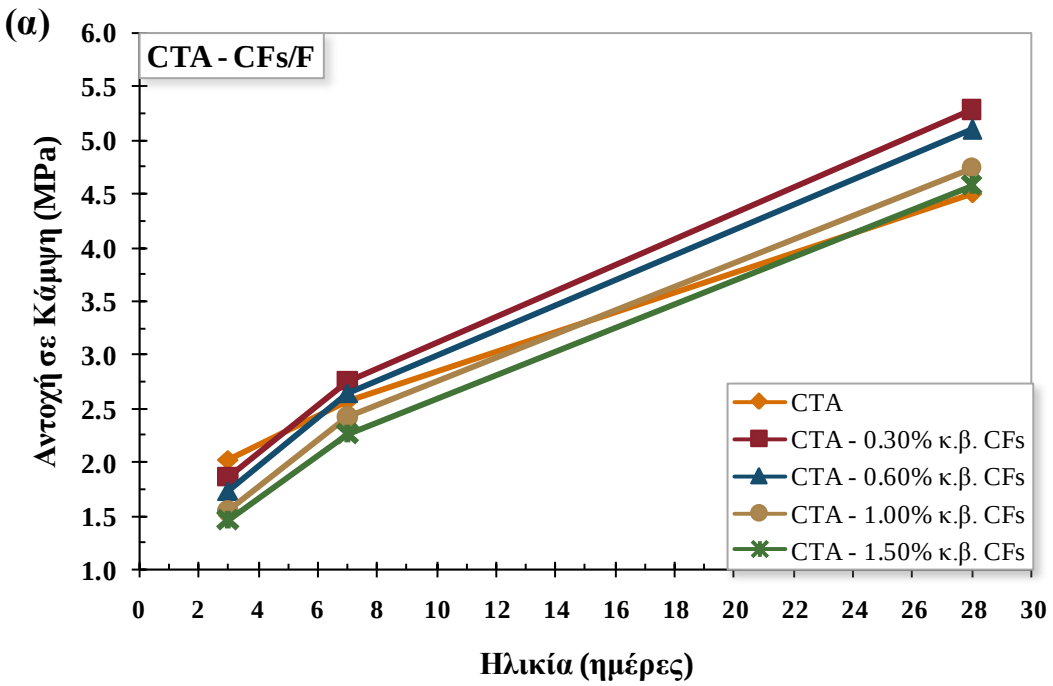


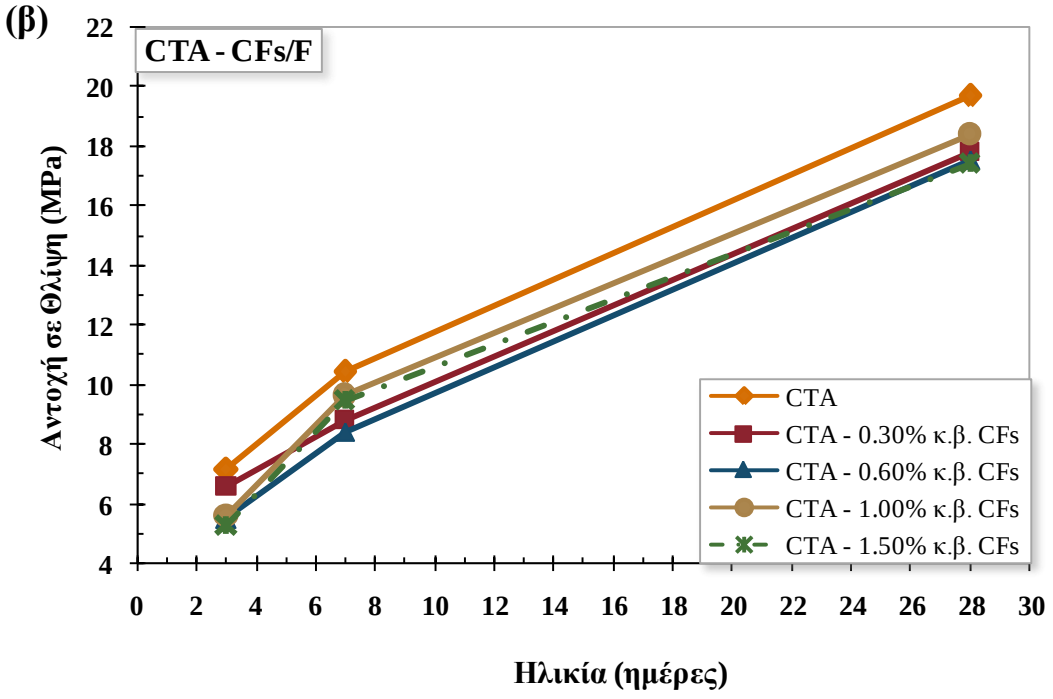
Σχήμα 5.13 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου F

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.14. Στην ηλικία των 28 ημερών, η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου F εμφανίζει βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς (Σχήμα 5.14^{α}). Τη μέγιστη βελτίωση παρουσιάζει η κόλλα με 0.30% κ.β. κόλλας ίνες τύπου F και είναι περίπου 17%, ενώ η κόλλα με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου F προσεγγίζει την καμπτική αντοχή της κόλλας αναφοράς.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου F παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.14^{β}. Σε όλες τις ηλικίες, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου F είναι μικρότερη της αντοχής της κόλλας αναφοράς. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι περίπου 12% και αντιστοιχεί στην κόλλα που περιέχει 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου F.



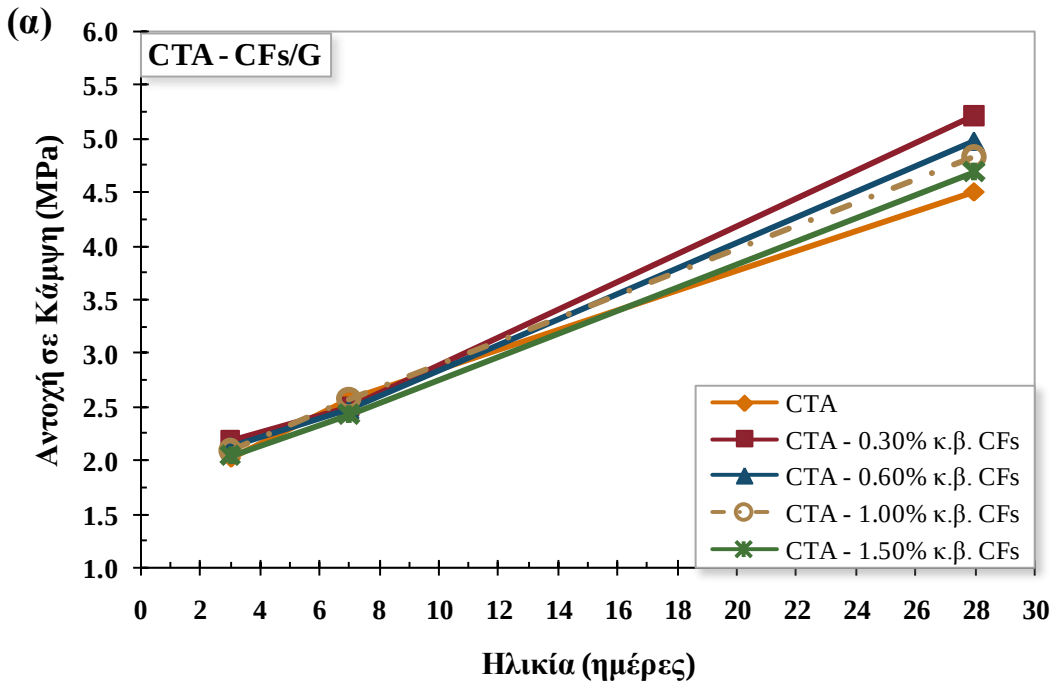


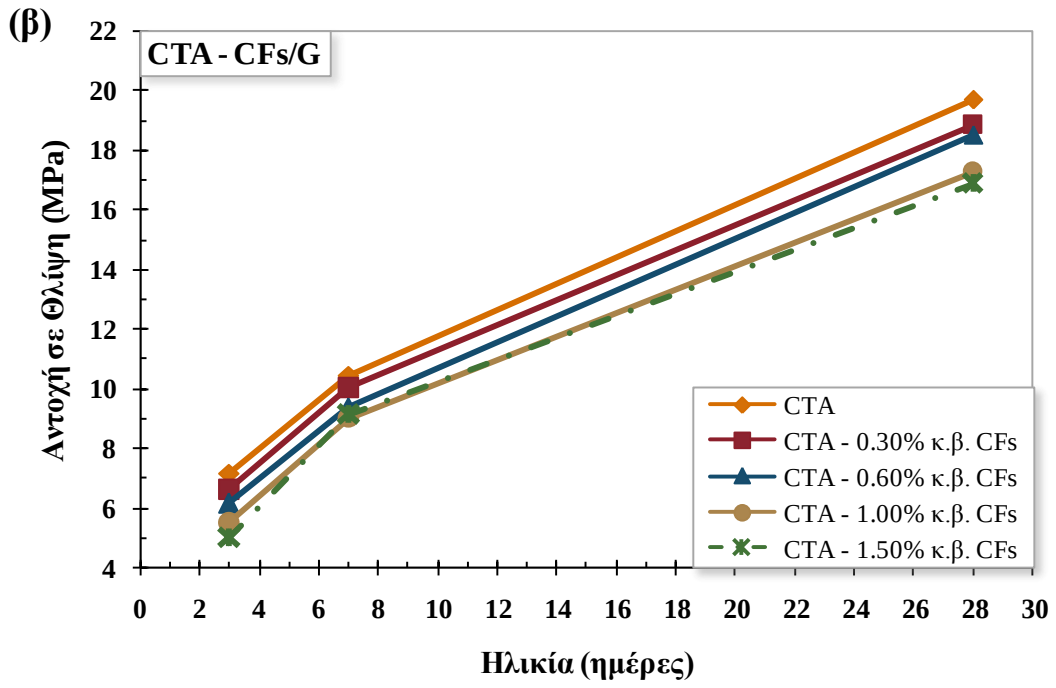
Σχήμα 5.14 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου G

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου G σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.15. Στην ηλικία των 28 ημερών, η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου G εμφανίζει βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς (Σχήμα 5.15^{α}). Τη μέγιστη βελτίωση παρουσιάζει η κόλλα με 0.30% κ.β. κόλλας ίνες τύπου G και είναι περίπου 15.5%.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου G παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.15^{β}. Σε όλες τις ηλικίες, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου G είναι μικρότερη της αντοχής της κόλλας αναφοράς. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι 14.5% και αντιστοιχεί στην κόλλα που περιέχει 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου G.





Σχήμα 5.15 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με ίνες κυτταρίνης τύπου G σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

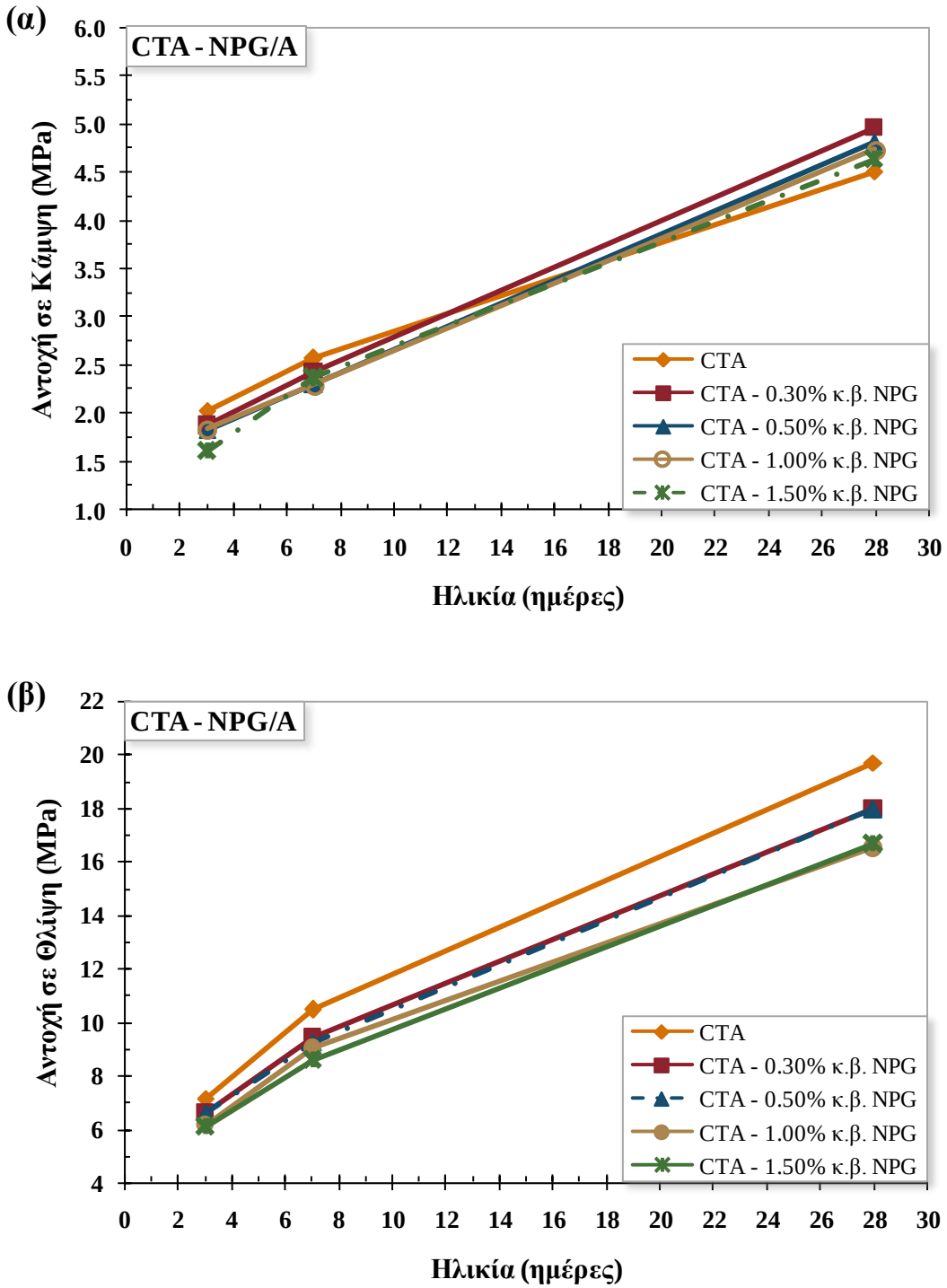
5.6.2 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16. Παρατηρείται ότι στην ηλικία των 28 ημερών, οι κόλλες πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τη συμβατική κόλλα πλακιδίων. Η μέγιστη βελτίωση είναι περίπου 10% και αντιστοιχεί στην κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16^{β}. Σε όλες τις ηλικίες, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α είναι μικρότερη της αντοχής της κόλλας αναφοράς. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι περίπου 16.5% και αντιστοιχεί στην κόλλα που περιέχει 1.00% κ.β. κόλλας υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α. Η συμπεριφορά αυτή δεν ήταν

αναμενόμενη στο βαθμό που η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α δεν επηρέασε ιδιαίτερα την πυκνότητα και το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων (βλ. Σχήμα 5.4 &Σχήμα 5.6).

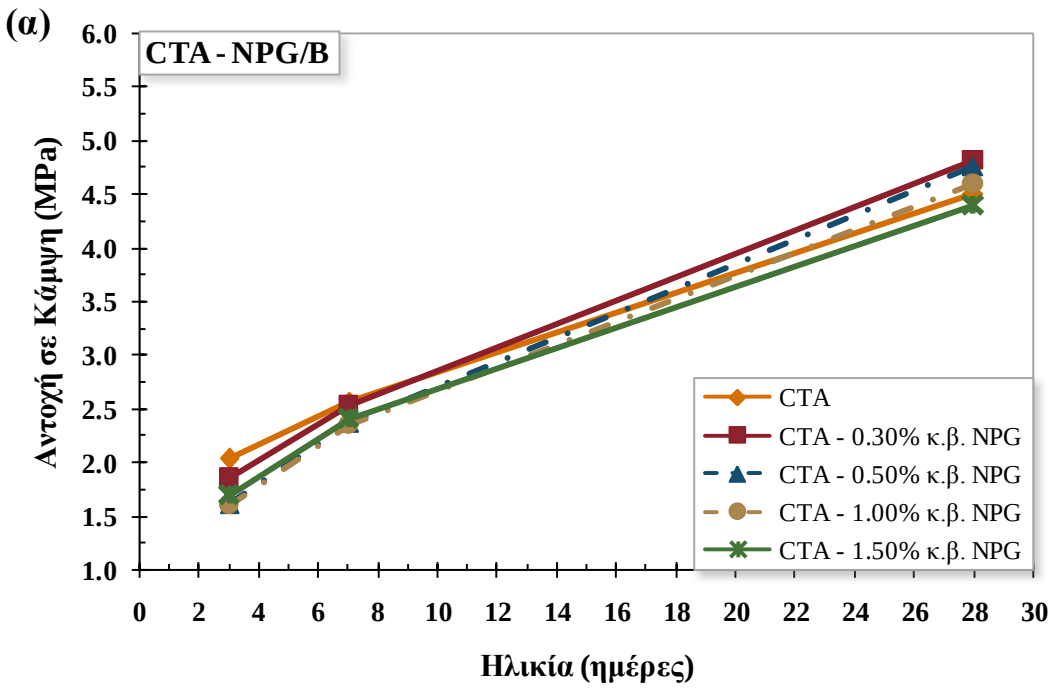


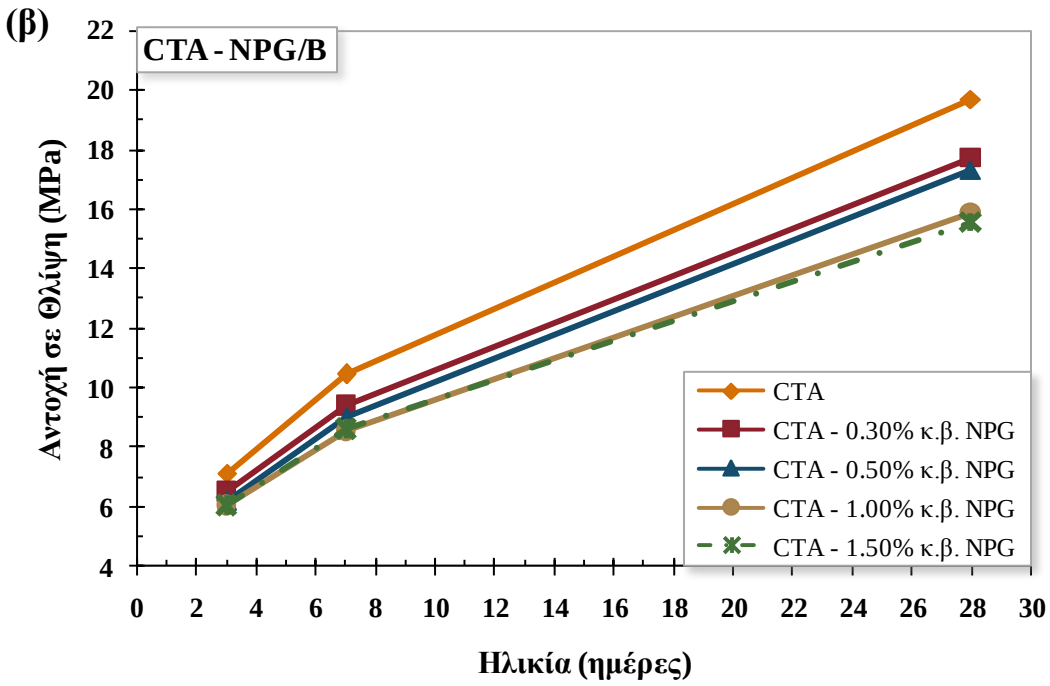
Σχήμα 5.16 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.13. Παρατηρείται ότι στην ηλικία των 28 ημερών, οι κόλλες πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες έως και 1.00% κ.β. κόλλας παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τη συμβατική κόλλα πλακιδίων, ενώ η κόλλα με 1.50% κ.β. κόλλας υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β έχει παρόμοια καμπτική αντοχή με την κόλλα αναφοράς.

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.17^{β}. Σε όλες τις ηλικίες, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων ενισχυμένης με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β είναι χαμηλότερη της αντοχής της κόλλας αναφοράς. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι περίπου 20% και αντιστοιχεί στην κόλλα που περιέχει 1.50% κ.β. κόλλας υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β. Η μείωση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων για περιεκτικότητες υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β μεγαλύτερες του 0.60% κ.β. κόλλας (βλ. Σχήμα 5.6).





Σχήμα 5.17 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

5.7 Ελεύθερη συρρίκνωση σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων

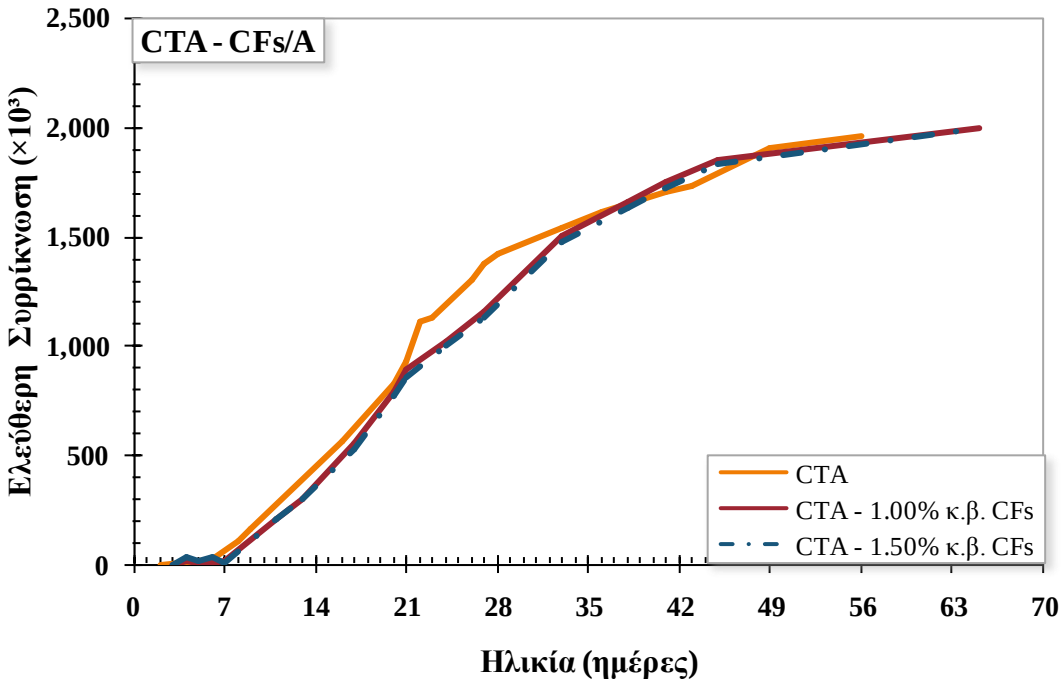
Η συρρίκνωση των δοκιμίων της κόλλας πλακιδίων είναι η παραμόρφωσή τους υπό συνθήκες ξήρανσης και εκφράζεται ως η μεταβολή του μήκους τους σε σχέση με το αρχικό τους μήκος. Η διαδικασία προσδιορισμού της ελεύθερης συρρίκνωσης της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, §4.3.1.7. Σημειώνεται ότι κάθε φορά που μετράται η συρρίκνωση των δοκιμίων, μετράται και η μεταβολή του βάρους τους, διότι σχετίζεται με τις αλλαγές του ειδικού βάρους των δοκιμίων.

5.7.1 Ελεύθερη συρρίκνωση της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Οι ίνες κυτταρίνης είναι πορώδεις και χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα απορρόφησης και αποδέσμευσης του νερού με αποτέλεσμα τον σχηματισμό διόδων υγρασίας στο εσωτερικό της τσιμεντοειδούς μήτρας. Η συμπεριφορά αυτή των ινών κυτταρίνης αυξάνει τη συρρίκνωση των υλικών με βάση το τσιμέντο [5.16]. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η διερεύνηση των δυσμενέστερων περιπτώσεων της κόλλας πλακιδίων, δηλαδή η κόλλα με 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης.

Ίνες τύπου Α

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου Α σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.18. Παρατηρείται ότι η κόλλα με ίνες κυτταρίνης τύπου Α παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την κόλλα αναφοράς ως προς τη συρρίκνωση. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας πλακιδίων σε ίνες τύπου Α φαίνεται να μην επηρεάζει τη συρρίκνωση λόγω ξήρανσης. Ανάλογα αποτελέσματα καταγράφονται και στη μελέτη των Kawashima & Shah [5.4], οι οποίοι αναφέρουν ότι οι ίνες κυτταρίνης δεν επηρεάζουν τη συρρίκνωση λόγω ξήρανσης των τσιμεντοειδών υλικών και αποδεικνύονται αποτελεσματικές ως προς τον περιορισμό της εξάπλωσης των ρωγμών λόγω συστολής ξήρανσης όταν επιτευχθεί επαρκής διασπορά των ινών στη μήτρα.

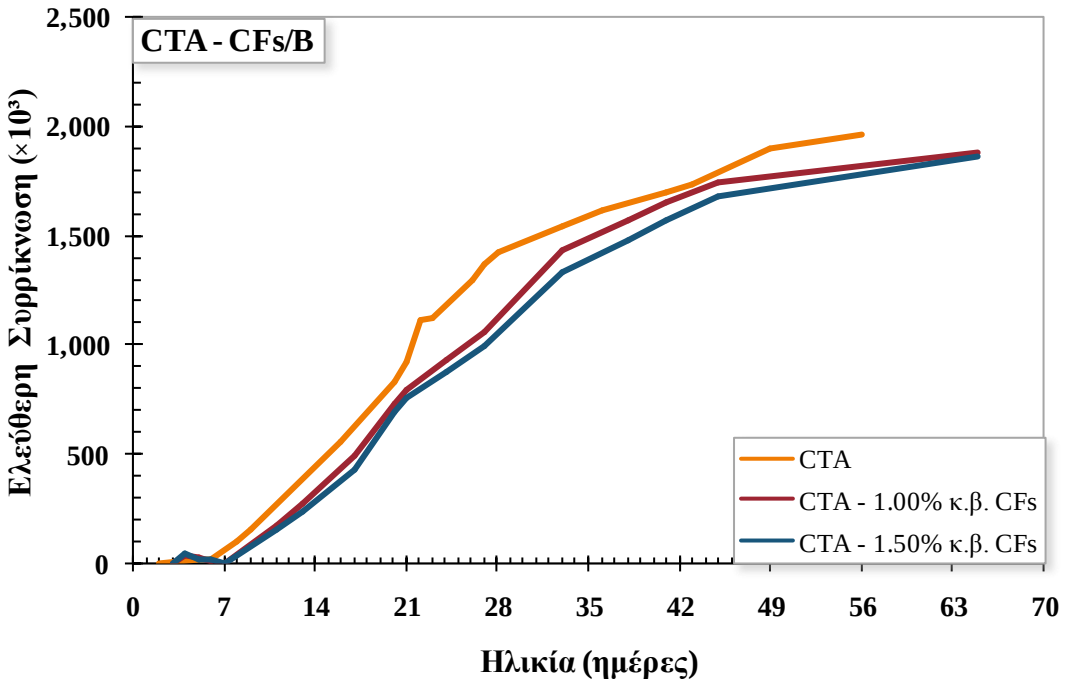


Σχήμα 5.18 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου Α σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου Β

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου Β σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.19. Παρατηρείται ότι η κόλλα

με ίνες κυτταρίνης τύπου B παρουσιάζει ελαφρώς μειωμένη συρρίκνωση συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας πλακιδίων σε ίνες τύπου B φαίνεται να βελτιώνει σε ένα βαθμό τη συμπεριφορά της κόλλας ως προς τη συρρίκνωση.

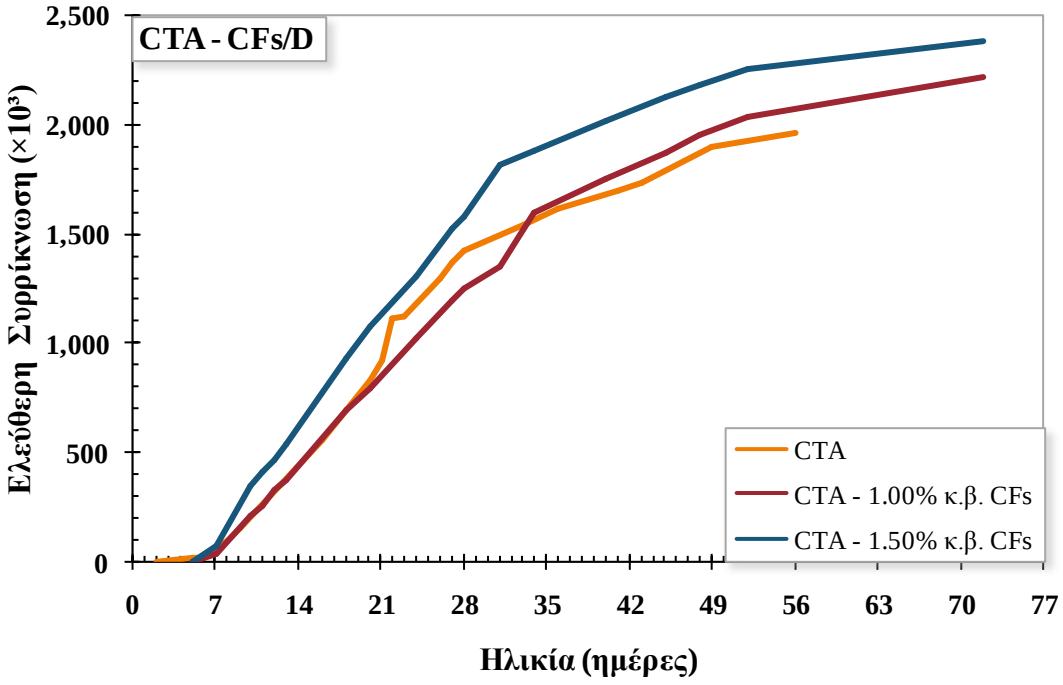


Σχήμα 5.19 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου B σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου D

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου B σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.20. Παρατηρείται ότι η κόλλα με 1.00% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης τύπου D παρουσιάζει ελαφρώς αύξηση της συρρίκνωσης συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς. Ωστόσο, η συρρίκνωση της κόλλας με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης τύπου D αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τη συρρίκνωση της κόλλας αναφοράς. Η μέγιστη αύξηση της συρρίκνωσης της κόλλας με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης τύπου D είναι περίπου 15%. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τη μελέτη των Toledo Filho el al. [5.17], σύμφωνα με τους οποίους η προσθήκη φυτικών ινών σε περιεκτικότητα 0.30% κατ' όγκο τσιμεντοκονιάματος προκαλεί έως και 27% αύξηση της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης.

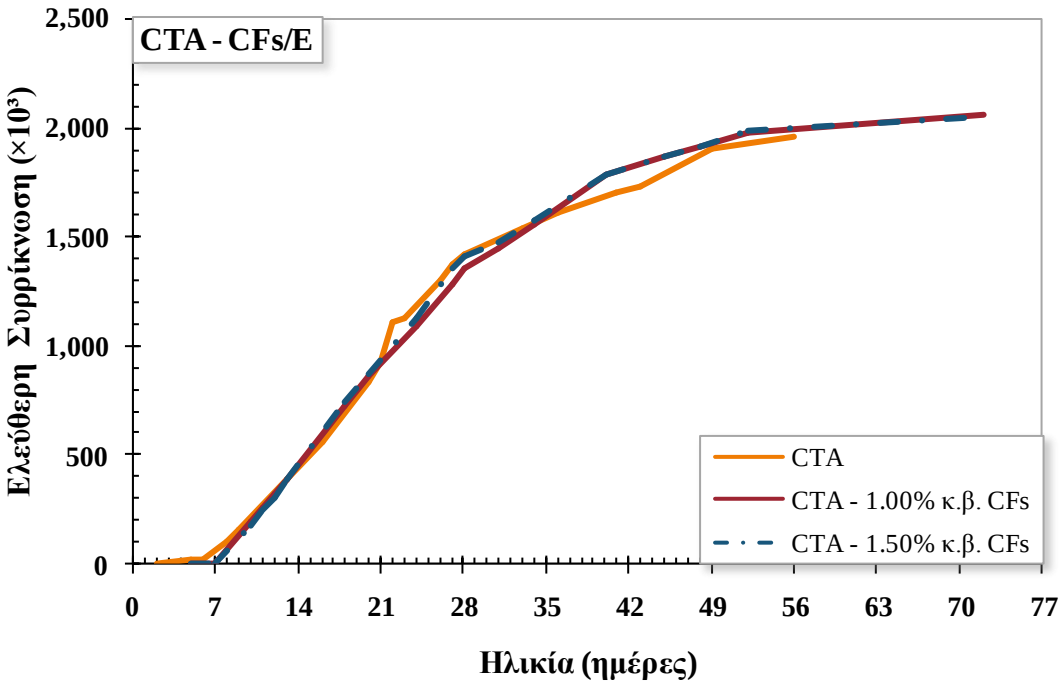
Όπως είναι γνωστό, η συρρίκνωση της τσιμεντοειδούς μήτρας κυρίως σχετίζεται με το μέγεθος του πορώδους της, καθώς και την έκταση, το σχήμα και τη συνέχεια του συστήματος των τριχοειδών στην ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου [5.18]. Η προσθήκη των ινών κυτταρίνης αυξάνει το πορώδες της μήτρας της κόλλας πλακιδίων και ως εκ τούτου, συμβάλλει στην υψηλότερη συρρίκνωσή της λόγω ξήρανσης.



Σχήμα 5.20 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου D σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου Ε

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.21. Παρατηρείται ότι η κόλλα με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε παρουσιάζει παρόμοια συρρίκνωση με την κόλλα αναφοράς. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας σε ίνες τύπου Ε φαίνεται να μην επηρεάζει τη συρρίκνωσή της λόγω ξήρανσης. Η σταθερή αυτή συμπεριφορά της μήτρας με ίνες τύπου Ε ως προς τη συρρίκνωση ενδεχομένως να οφείλεται στην επικάλυψη των ινών με λάδι, το οποίο μειώνει την απορρόφηση του νερού μίξης από τις ίνες.



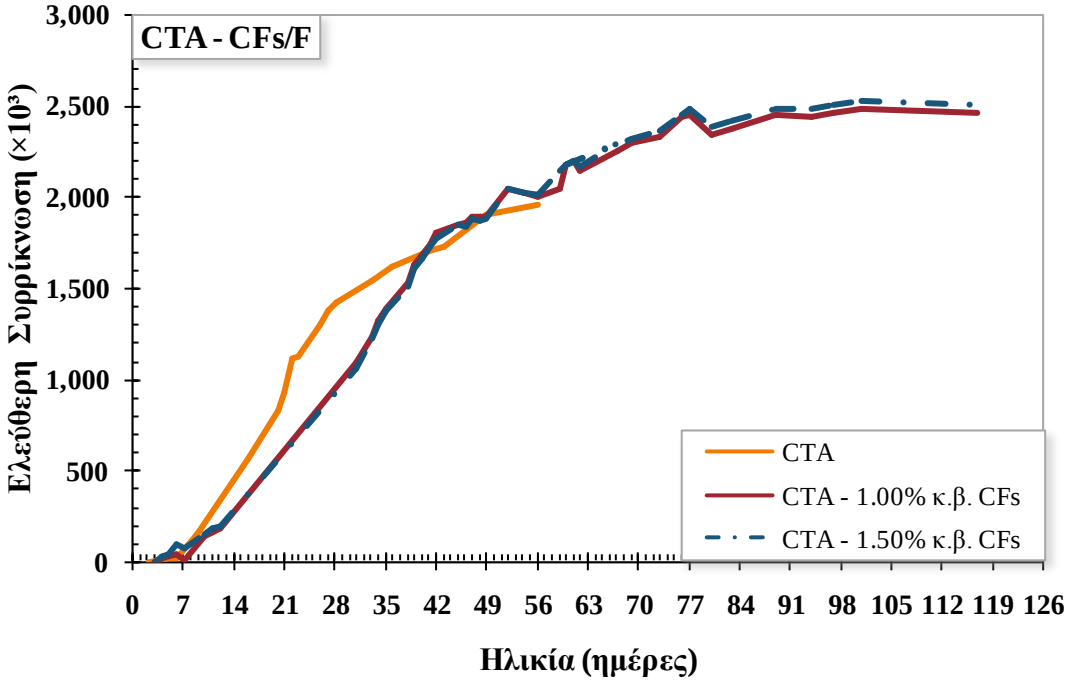
Σχήμα 5.21 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου Ε σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

Ίνες τύπου F

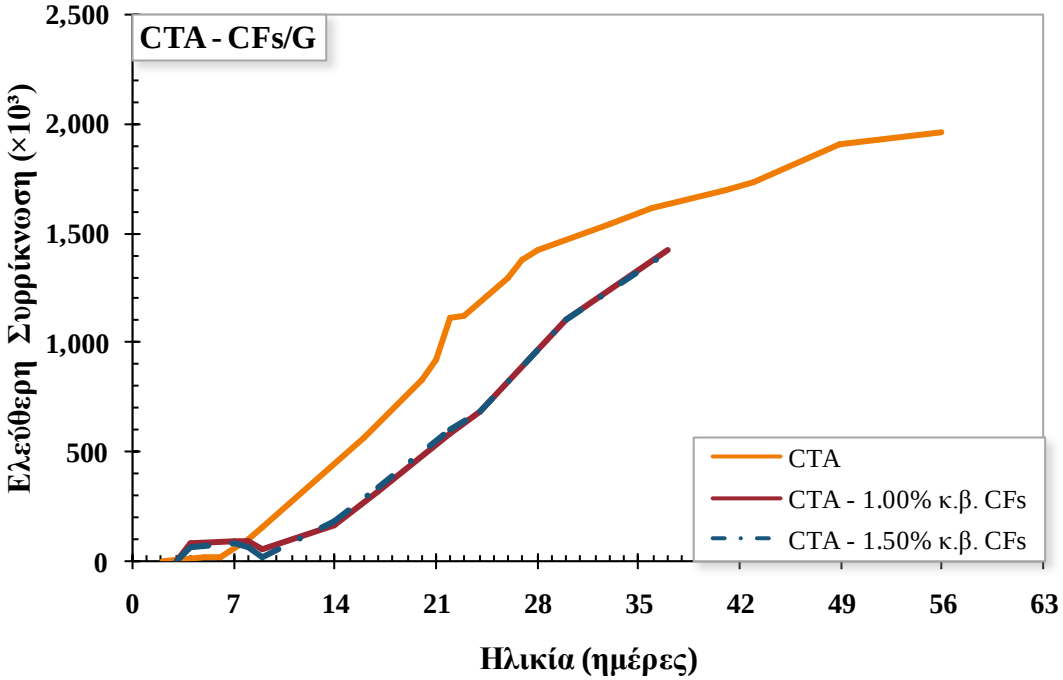
Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.22. Παρατηρείται ότι η κόλλα με ίνες κυτταρίνης τύπου F παρουσιάζει παρόμοια συρρίκνωση με την κόλλα αναφοράς. Στις πρώιμες ηλικίες, η συρρίκνωση της κόλλας με ίνες τύπου F είναι αρκετά χαμηλότερη συγκριτικά με τη συρρίκνωση της κόλλας αναφοράς.

Ίνες τύπου G

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου G σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.23. Παρατηρείται ότι η κόλλα με ίνες κυτταρίνης τύπου G παρουσιάζει χαμηλότερη συρρίκνωση συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς.



Σχήμα 5.22 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

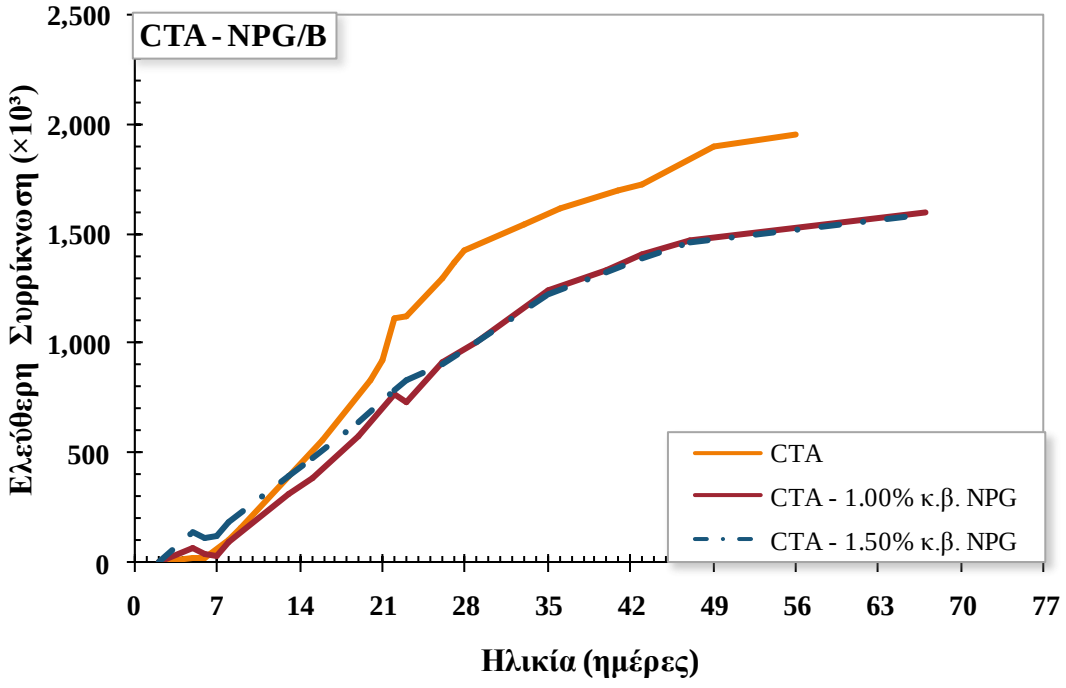


Σχήμα 5.23 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης τύπου G σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

5.7.2 *Ελεύθερη συρρίκνωση της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα*

Όσο αφορά στη διερεύνηση της επίδρασης των υγρών προσθέτων στη συρρίκνωση λόγω ξήρανσης της κόλλας πλακιδίων, εξετάστηκε μόνο το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β. Στο βαθμό που τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α και Β έχουν την ίδια χημική σύσταση, δεν αναμένεται διαφορετική συμπεριφορά του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α.

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της συρρίκνωσης λόγω ξήρανσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.24. Παρατηρείται ότι η κόλλα με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη συρρίκνωση συγκριτικά με την κόλλα αναφοράς.



Σχήμα 5.24 Ρυθμός ανάπτυξης της συρρίκνωσης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας πλακιδίων.

5.7.3 *Απώλεια βάρους της κόλλας πλακιδίων*

Η μέση απώλεια βάρους της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα λόγω ξήρανσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.12. Η προσθήκη ινών κυτταρίνης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απώλειας βάρους της κόλλας πλακιδίων. Η αύξηση αυτή

αποδίδεται στην πορώδη φύση των ινών κυτταρίνης, η οποία σε επίπεδο μικρο-δομής δημιουργεί περισσότερες διόδους υγρασίας εντός της μήτρας της κόλλας πλακιδίων. Όσο αφορά στην επίδραση της περιεκτικότητας της κόλλας σε ίνες κυτταρίνης, η αύξηση του ποσοστού των ινών από 1.00 σε 1.50% κ.β. κόλλας φαίνεται να μην επηρεάζει την απώλεια βάρους της μήτρας. Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι σε αρκετές περιπτώσεις, οι κόλλες πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης χαρακτηρίζονται από μικρότερη απώλεια βάρους συγκριτικά με τις αντίστοιχες κόλλες με 1.00% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης. Αν και η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης αναμενόταν να προκαλέσει μικρότερη απώλεια βάρους των δοκιμίων της κόλλας πλακιδίων, διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της απώλειας βάρους της κόλλας πλακιδίων με το υγρό τύπου Β προσεγγίζουν ή ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης. Η συμπεριφορά αυτή της κόλλας πλακιδίων με το υγρό τύπου Β δε συνάδει με τη βελτιωμένη απόκρισή της ως προς τη συρρίκνωση λόγω ξήρανσης (βλ. §5.7.2).

Πίνακας 5.12 Μέση απώλεια βάρους της κόλλας πλακιδίων λόγω ξήρανσης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**1%**	**1.50%**
CTA - CFs / A	36.99	49.46	49.63
CTA - CFs / B	36.99	51.97	49.60
CTA - CFs/D	36.99	46.19	45.09
CTA - CFs/E	36.99	50.45	49.38
CTA - CFs/F	36.99	43.42	42.87
CTA - CFs/G	36.99	43.08	43.49
CTA - NPG/B	36.99	48.92	48.58

5.8 Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων

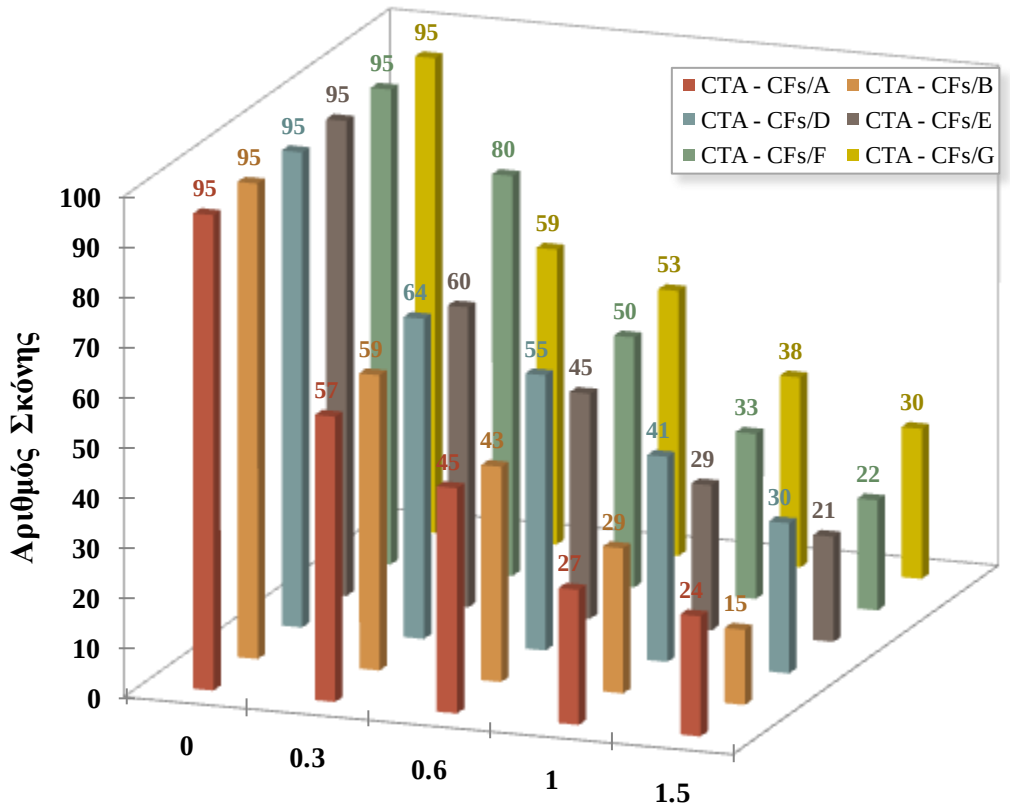
Η διαδικασία μέτρησης του αριθμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, §4.3.3.

5.8.1 Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13 και παριστάνονται γραφικά στο Σχήμα 5.25.

Πίνακας 5.13 Αριθμός σκόνης της ξηρής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

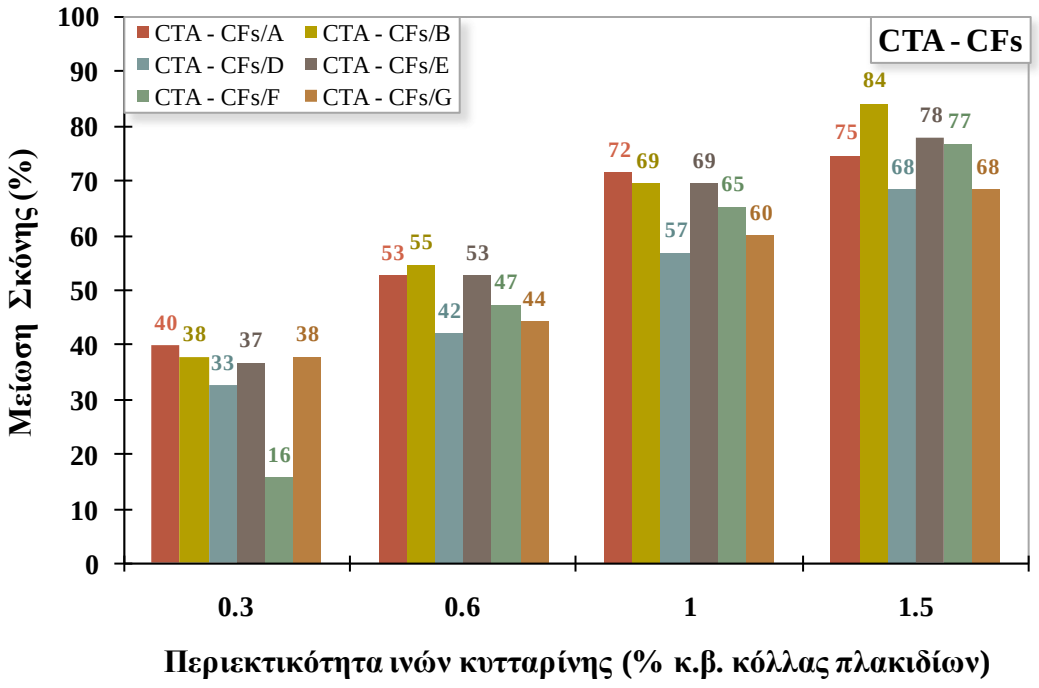
Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
CTA - CFs / A	95	57	45	27	24
CTA - CFs / B	95	59	43	29	15
CTA - CFs / D	95	64	55	41	30
CTA - CFs / E	95	60	45	29	21
CTA - CFs / F	95	80	50	33	22
CTA - CFs / G	95	59	53	38	30



Σχήμα 5.25 Αριθμός σκόνης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη των ινών κυτταρίνης περιορίζει σημαντικά την εκπομπή σκόνης από την τσιμεντοειδή κόλλα πλακιδίων, ιδιαίτερα για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0.60% κ.β. κόλλας πλακιδίων. Ωστόσο, ακόμη και για χαμηλές περιεκτικότητες ινών κυτταρίνης (0.30% κ.β. κόλλας), επιτυγχάνεται μείωση της σκόνης της κόλλας πλακιδίων έως και 40%. Τα ποσοστά μείωσης του αριθμού σκόνης της κόλλας

πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.26. Παρατηρείται ότι, για περιεκτικότητες έως και 1.00% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης, τη βέλτιστη συμπεριφορά ως προς τη μείωση της σκόνης παρουσιάζουν οι ίνες τύπου A, B και E. Για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 1.00% κ.β. κόλλας, τα χαμηλότερα ποσοστά σκόνης αντιστοιχούν στις κόλλες με ίνες τύπου B, E και F, με τη μέγιστη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης να επιτυγχάνεται στην κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες τύπου B και να είναι ίση με 84%. Οι πιο αναποτελεσματικές ίνες ως προς τη μείωση της σκόνης αποδεικνύονται οι ίνες τύπου D. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν μη αναμενόμενο στο βαθμό που οι ίνες τύπου D ανήκουν στη «βελτιωμένη γενιά ινών», και σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία τους, επιδεικνύουν βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς τη μείωση της σκόνης συγκριτικά με τις ίνες τύπου A και B. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιφάνεια των ινών τύπου D είναι επικαλυμμένη με λάδι, φαίνεται ότι η επικάλυψη των ινών με λάδι δεν επιδρά στην αποτελεσματικότητά τους ως προς τη μείωση της σκόνης.



Σχήμα 5.26 Ποσοστό μείωσης της σκόνης της κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε ίνες κυτταρίνης.

Επί του παρόντος, δεν υπάρχει κάποια δημοσιευμένη μελέτη που να αναφέρει τη χρήση των ινών κυτταρίνης ως πρόσθετο μείωσης της αιωρούμενης σκόνης. Ως εκ τούτου, στην παρούσα εργασία, επιχειρείται μία ερμηνεία του μηχανισμού που αναπτύσσουν οι ίνες

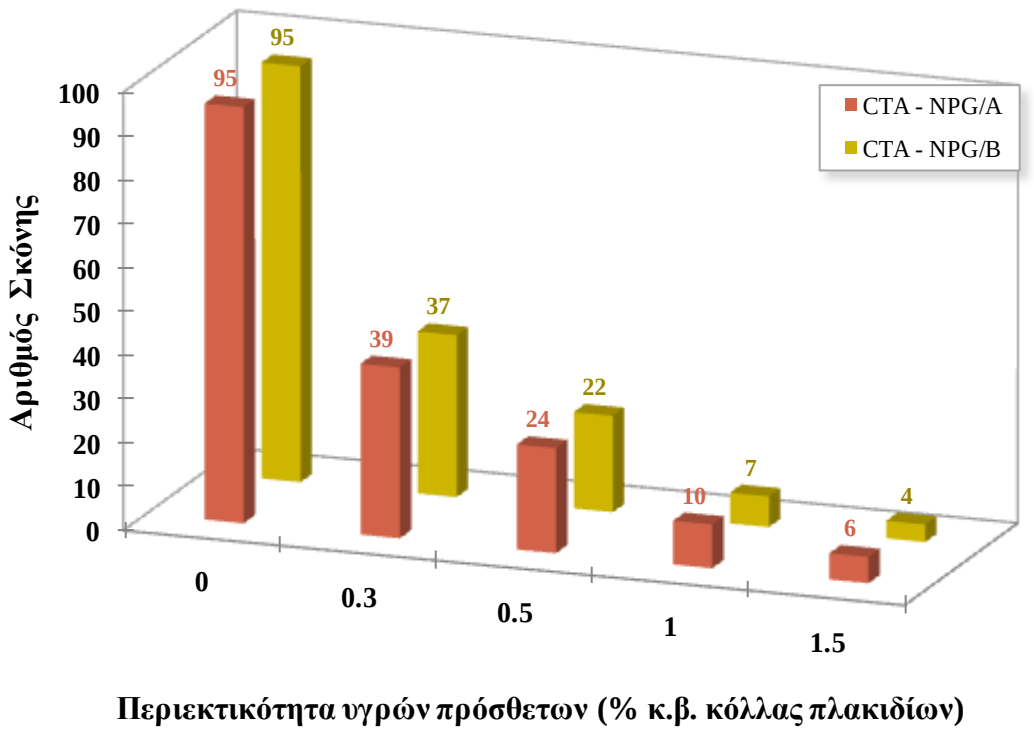
κυτταρίνης, χωρίς ωστόσο να είναι δυνατή η επιβεβαίωσή της από προηγούμενες μελέτες. Όσο αφορά στις ίνες κυτταρίνης με επικάλυψη λαδιού, είναι προφανές ότι κατά την ανάμειξη της ξηρής κόλλας πλακιδίων με τις ίνες κυτταρίνης, τα λεπτά σωματίδια της κόλλας πλακιδίων προσκολλώνται στην επιφάνεια των ινών λόγω της παρουσίας του λαδιού. Οι υπόλοιπες ίνες ενδεχομένως να έχουν υποστεί ειδική επεξεργασία κατά την παραγωγή τους με στόχο τον έντονο ινιδισμό τους. Ο ινιδισμός της επιφάνειας των ινών κυτταρίνης οδηγεί στον σχηματισμό ενός δικτύου όμοιου με τον ιστό της αράχνης. Τα λεπτά σωματίδια της κόλλας πλακιδίων, τα οποία είναι και τα υποψήφια προς αιώρηση σωματίδια, αιχμαλωτίζονται και συσσωματώνονται στον ιστό που σχηματίζουν οι ινιδοποϊημένες ίνες κυτταρίνης. Ως εκ τούτου, όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα της κόλλας πλακιδίων σε ίνες κυτταρίνης, τόσο εντονότερη είναι η παρουσία των ινιδίων, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός πιο πυκνού ιστού και τη δέσμευση υψηλότερου αριθμού λεπτών σωματιδίων.

5.8.2 Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 5.27. Παρατηρείται ότι η προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης, ακόμη και σε χαμηλές περιεκτικότητες, περιορίζει σημαντικά την τάση της κόλλας να σχηματίζει σκόνη. Διαπιστώνεται ότι ο αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων με μόλις 0.30% κ.β. κόλλας υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης προσεγγίζει τον αριθμό σκόνης της κόλλας με 1.00% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης. Επομένως, η μείωση της σκόνης της κόλλας πλακιδίων επιτυγχάνεται με αρκετά χαμηλότερες ποσότητες υγρών πρόσθετων συγκριτικά με τις ίνες κυτταρίνης. Για περιεκτικότητες ίσες με 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, η σκόνη σχεδόν εξαλείφεται. Η μέγιστη μείωση σκόνης επιτυγχάνεται στην κόλλα πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας υγρό τύπου Β και είναι ίση με 96%.

Πίνακας 5.14 Αριθμός σκόνης της ξηρής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - NPG/A	95	39	24	10	6
CTA - NPG/B	95	37	22	7	4



Σχήμα 5.27 Αριθμός σκόνης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων συναρτήσει της περιεκτικότητάς της σε υγρά πρόσθετα.

Η αποτελεσματικότητα των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν οφείλεται στη συσσωμάτωση των λεπτών σωματιδίων της κόλλας πλακιδίων, αλλά στην προσρόφηση του υγρού εστέρα στους κόκκους της κόλλας πλακιδίων. Η προσρόφηση του υγρού εστέρα αυξάνει το βάρος των κόκκων της κόλλας με αποτέλεσμα οι κόκκοι να καθιζάνουν. Η υψηλή αποτελεσματικότητα των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ως προς τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης σχετίζεται και με την ιδιότητά τους να μην σχηματίζουν συσσωματώματα. Κατά την εφαρμογή του υγρού στους κόκκους της κόλλας, δεν παρατηρήθηκε συσσώρευση του υγρού σε συγκεκριμένες περιοχές της ξηρής σύνθεσης με αποτέλεσμα την ομοιογενή διαβροχή των κόκκων της κόλλας. Εκτός από την ιδιότητα των υγρών πρόσθετων να μη συσσωματώνονται, σημαντικό παράγοντα ως προς τη μείωση του σχηματισμού σκόνης αποτελεί η διαβρεκτικότητα (wettability) των χρησιμοποιούμενων υγρών. Ως «διαβρεκτικότητα» ορίζεται η ικανότητα ενός υγρού να διατηρεί επαφή με μία στερεή επιφάνεια λόγω των μοριακών αλληλεπιδράσεων που αναπτύσσονται όταν οι δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή. Σύμφωνα με την εξίσωση Young-Dupré [5.19], όταν η επιφανειακή τάση του υγρού είναι μικρότερη της επιφανειακής τάσης των στερεών, βελτιώνεται ο βαθμός διαβροχής των στερεών. Επομένως, στο βαθμό του τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης έχουν μικρότερη επιφανειακή

τάση από τους κόκκους της κόλλας πλακιδίων, επιτυγχάνεται ικανοποιητική διαβροχή της ξηρής σύνθεσης.

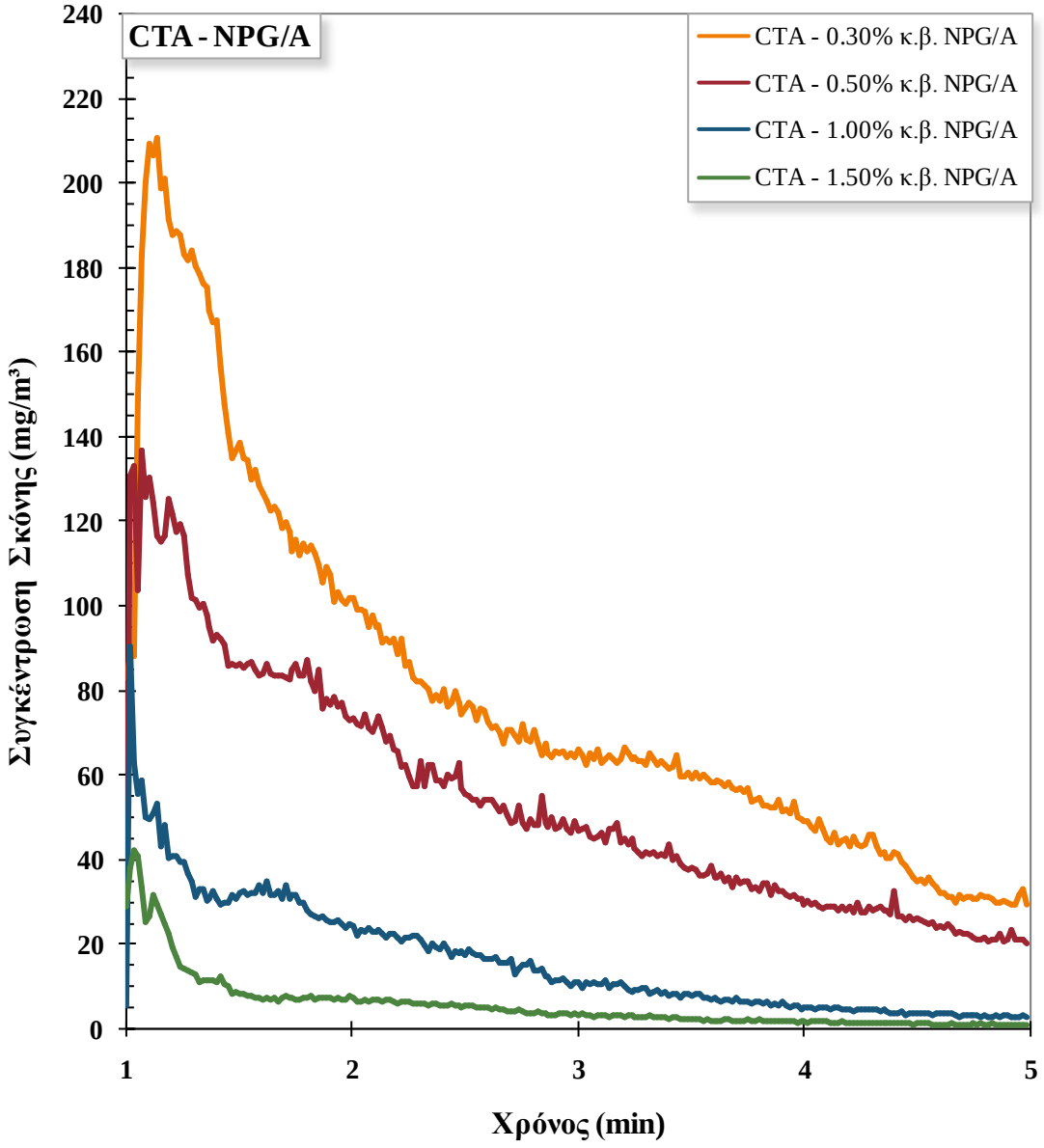
5.9 Συγκέντρωση σκόνης της κόλλας πλακιδίων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σκόνης της κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α και Β με τη χρήση του DustTrak 8520 παρουσιάζονται στα Σχήμα 5.28 & 5.27, αντίστοιχα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. Κεφάλαιο 4, §4.3.4), το πρώτο λεπτό μετά την έναρξη της μέτρησης είναι το χρονικό σημείο ρίψης του δείγματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, ελάχιστα δευτερόλεπτα μετά το πρώτο λεπτό καταγράφεται η υψηλότερη συγκέντρωση σκόνης για την εκάστοτε σύνθεση. Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης συγκέντρωσης σκόνης της κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα σε διάφορες περιεκτικότητες. Σημειώνεται ότι η συγκέντρωση της σκόνης της κόλλας πλακιδίων δεν περιλαμβάνεται στα σχήματα, διότι η μέτρησή της ήταν δυνατή μετά το πέρας των δέκα λεπτών από τη ρίψη του δείγματος. Επιπλέον, για περιεκτικότητες 1.00 και 1.50% κ.β. κόλλας υγρά τύπου Α και Β, οι τιμές της συγκέντρωσης της σκόνης είναι χαμηλότερες των 100 mg/m³ και ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα των μετρήσεων θεωρούνται αξιόπιστα.

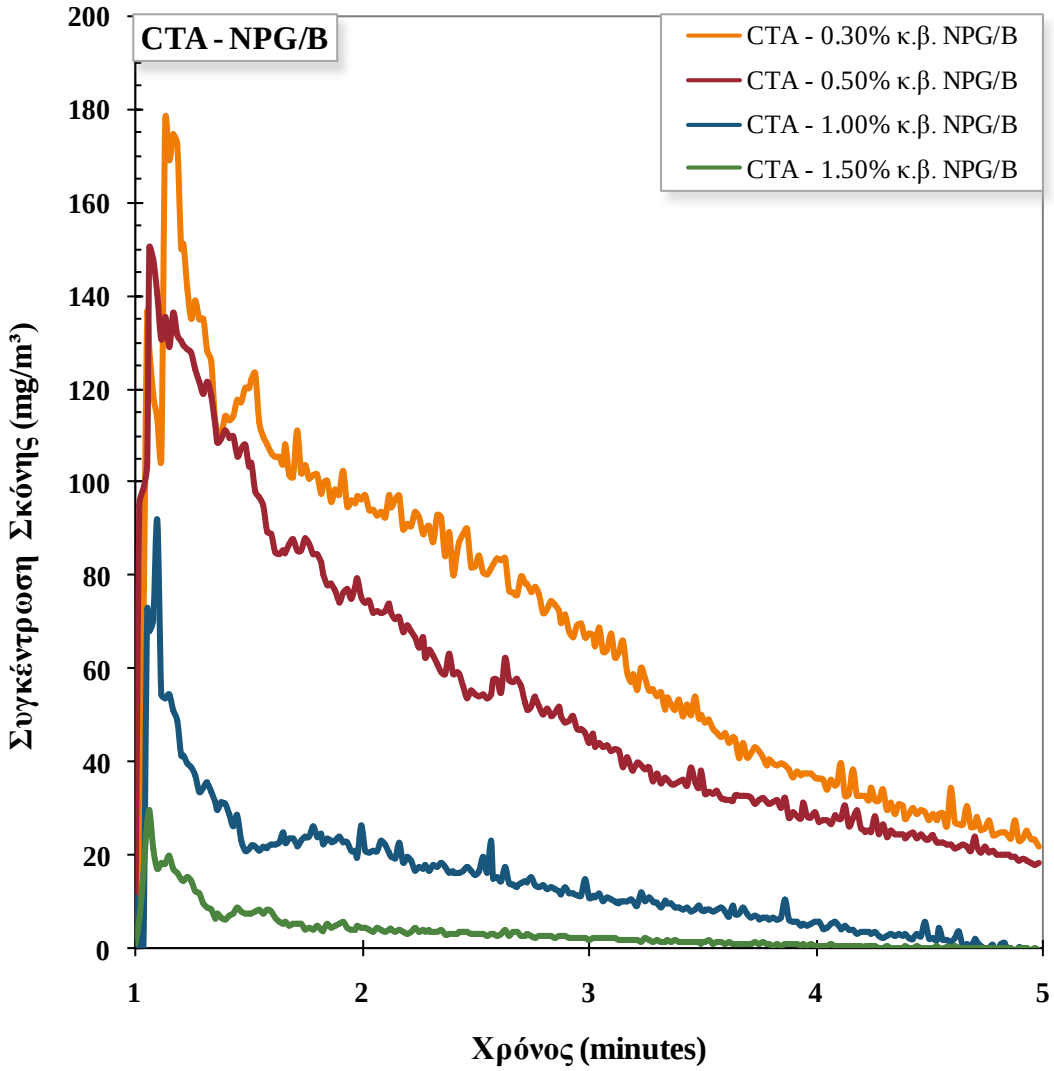
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σκόνης της κόλλας πλακιδίων με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα ποιοτικά συμπεράσματα. Το γεγονός ότι η μέτρηση της σκόνης της κόλλας αναφοράς ήταν δυνατή μετά το πέρα δέκα λεπτών, ενώ της κόλλας με 0.30% κ.β. κόλλας υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης ήταν δυνατή από το πρώτο λεπτό, φανερώνει, έστω και ποιοτικά, ότι η προσθήκη των επιλεχθέντων υγρών ακόμη και σε μικρή ποσότητα μειώνει την τάση της κόλλας να παράγει σκόνη. Παράλληλα, η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας σε υγρά τύπου Α και Β οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης σκόνης με σχεδόν αναλογικό τρόπο. Παρατηρείται ότι η αύξηση της περιεκτικότητας της κόλλας πλακιδίων σε υγρά τύπου Α και Β από 0.30 σε 1.50% κ.β. κόλλας οδηγεί σε μείωση της μέγιστης συγκέντρωσης σκόνης κατά 80 και 83%, αντίστοιχα (Πίνακας 5.15).

Πίνακας 5.15 Μέγιστη συγκέντρωση σκόνης (mg/m³) της ξηρής κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA -NPG/ A	210.70	136.91	90.46	42.02
CTA -NPG/ B	177.72	150.38	92.08	29.84



Σχήμα 5.28 Συγκέντρωση σκόνης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.29 Συγκέντρωση σκόνης της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β συναρτήσει του χρόνου.

5.10 Κόστος παραγωγής της κόλλας πλακιδίων

Το επιπρόσθετο κόστος για την παραγωγή 1 tn κόλλας πλακιδίων λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης και υγρών προσθέτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 5.16 & 5.17, αντίστοιχα. Είναι σαφές ότι οι ίνες κυτταρίνης καθώς και το υγρό τύπου Β αποτελούν τις πιο οικονομικές λύσεις. Αντίθετα, η προσθήκη των υγρών τύπου Α και C αυξάνει σημαντικά το κόστος παραγωγής της κόλλας χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης.

Πίνακας 5.16 Επιπρόσθετο κόστος (€/tn) για την παραγωγή κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
CTA - CFs/A	4.95	9.90	16.50	24.75
CTA - CFs/B	5.85	11.70	19.50	29.25

CTA - CFs/D	5.85	11.70	19.50	29.25
CTA - CFs/E	6.00	12.00	20.00	30.00
CTA - CFs/F	9.06	18.12	30.20	45.30
CTA - CFs/G	7.80	15.60	26.00	39.00

Πίνακας 5.17 Επιπρόσθετο κόστος (€/tn) για την παραγωγή κόλλας πλακιδίων με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - NPG/A	25.80	43.00	86.00	129.00
OPC - NPG/B	8.70	14.50	29.00	43.50

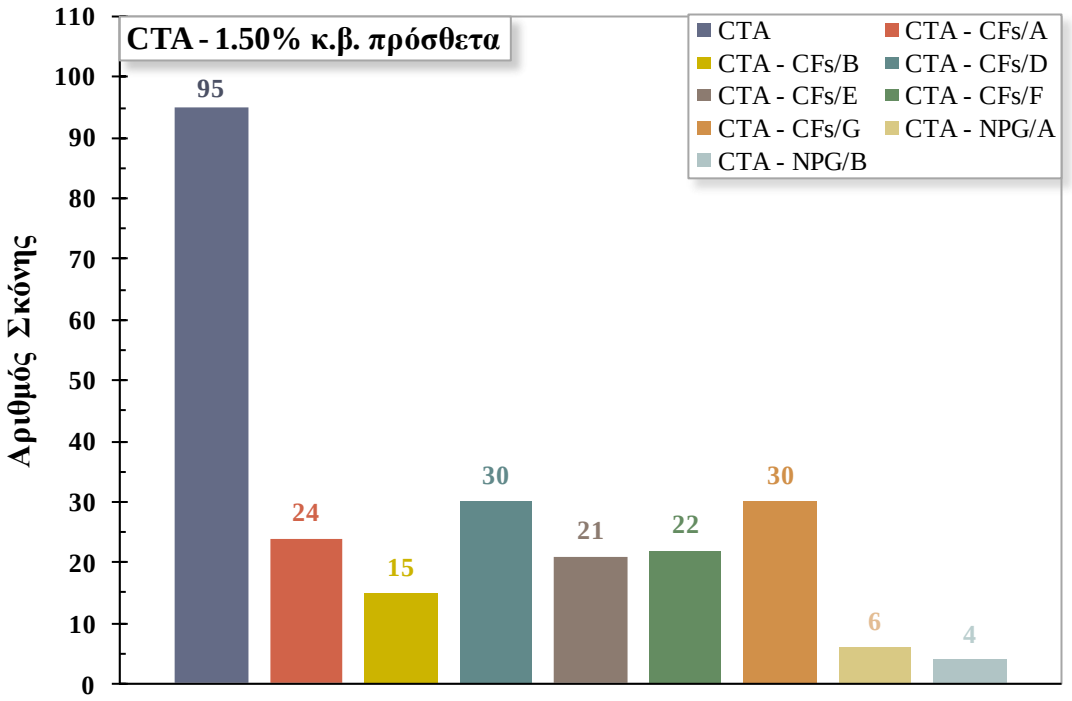
5.11 Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα συμπεράσματα εξάγονται βάσει της αποτελεσματικότητας των επιλεχθέντων προσθέτων ως προς τη μείωση της σκόνης της κόλλας πλακιδίων. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των προσθέτων στις φυσικές ιδιότητες της νωπής κόλλας πλακιδίων (εξάπλωση, πυκνότητα, περιεχόμενος αέρας, συγκρατούμενο νερό), καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων (αντοχή σε κάμψη και θλίψη, ελεύθερη συρρίκνωση). Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος των προσθέτων, επιλέγεται το βέλτιστο πρόσθετο για την παραγωγή της κόλλας πλακιδίων χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης.

- *Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα*

Η προσθήκη των επιλεχθέντων ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης στην κόλλα πλακιδίων μειώνει την τάση σχηματισμού σκόνης. Σε κάθε περίπτωση, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της κόλλας σε ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, τόσο μειώνεται η τάση σχηματισμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων. Για το λόγο αυτό, οι συνθέσεις της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τάση σχηματισμού σκόνης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.30. Όσο αφορά στις ίνες κυτταρίνης, πιο αποτελεσματικές αποδείχτηκαν οι ίνες τύπου B, οι οποίες επιτυγχάνουν μείωση του αριθμού σκόνης κατά 84%. Αντίθετα, οι ίνες τύπου D και G επιτυγχάνουν τη μικρότερη μείωση του αριθμού σκόνης (68%). Η αποτελεσματικότητα των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ως προς τη μείωση της σκόνης

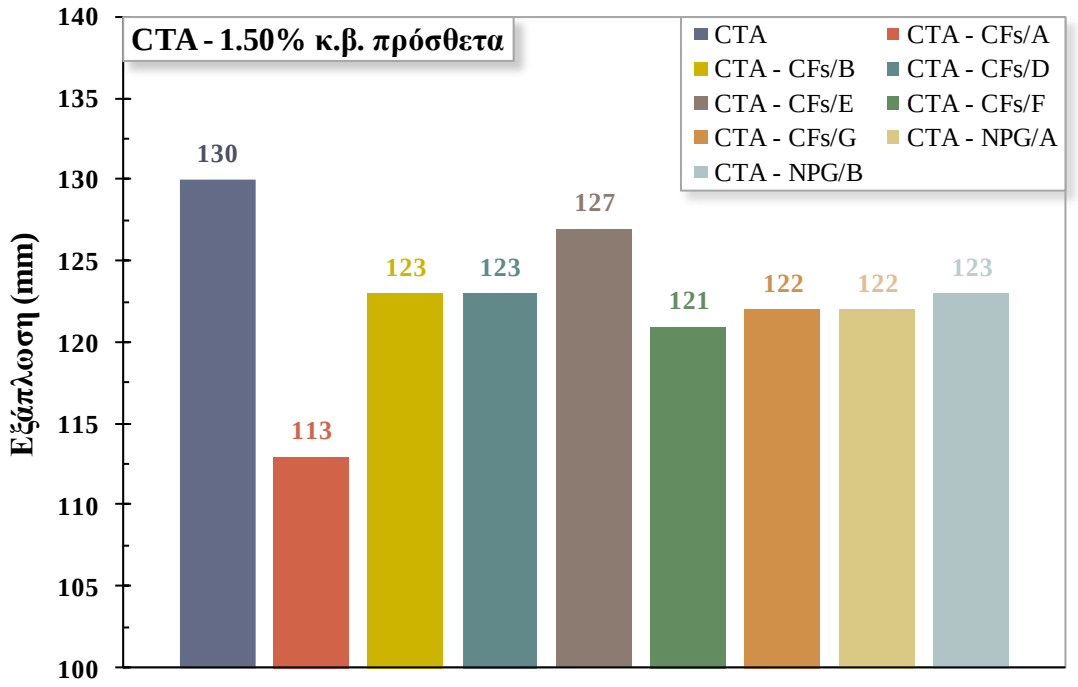
είναι σημαντικά υψηλότερη. Τα υγρά τύπου Α και Β σχεδόν εξαλείφουν την σκόνη της κόλλας πλακιδίων, επιτυγχάνοντας μείωση της σκόνης της τάξης του 96%.



Σχήμα 5.30 Αριθμός σκόνης της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

- *Εξάπλωση της νωπής κόλλας πλακιδίων*

Η προσθήκη των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνουν την εξάπλωση της νωπής κόλλας πλακιδίων. Τα αποτελέσματα της εξάπλωσης της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.31. Όσο αφορά στις ίνες κυτταρίνης, η μείωση της εξάπλωσης κυμαίνεται από 2 έως 13%. Οι ίνες τύπου Ε επιδεικνύουν τη βέλτιστη συμπεριφορά ως προς την εξάπλωση της νωπής κόλλας, ενώ οι ίνες τύπου Α τη χείριστη. Οι ίνες τύπου Β, οι οποίες επιτυγχάνουν τη μέγιστη μείωση της σκόνης, προκαλούν μία μείωση της εξάπλωσης της τάξης του μόλις 5.4%. Σε γενικές γραμμές, η παρουσία των επιλεχθέντων ινών κυτταρίνης, εκτός των ινών τύπου Α, δε μειώνει σημαντικά την εξάπλωση της νωπής κόλλας πλακιδίων. Παρόμοια μείωση της εξάπλωσης (~5.4%) με τις ίνες τύπου Β προκαλούν τα υγρά τύπου Α και Β.



Σχήμα 5.31 Εξάπλωση της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

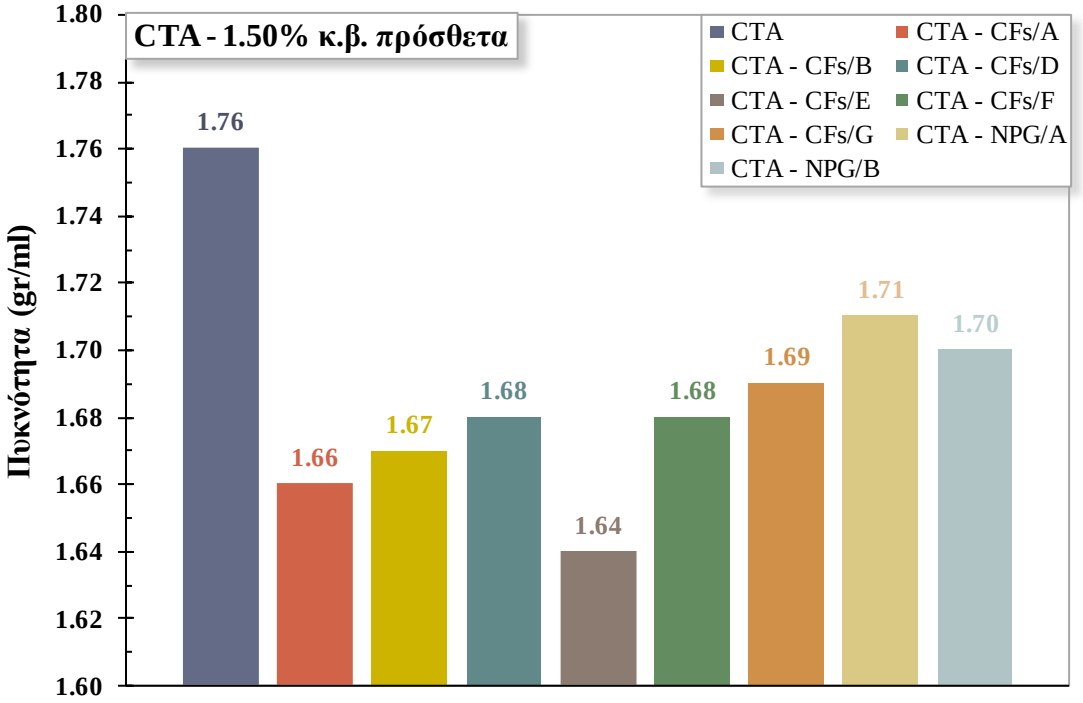
Πυκνότητα της νωπής κόλλας πλακιδίων

Η προσθήκη των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνει την πυκνότητα της νωπής κόλλας πλακιδίων. Τα αποτελέσματα της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.32. Όσο αφορά στις ίνες κυτταρίνης, η μείωση της πυκνότητας κυμαίνεται από 4 έως 6.3%. Τα ποσοστά αυτά μείωσης της πυκνότητας δεν αξιολογούνται ως σημαντικά. Από την άλλη, η παρουσία των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου A και B οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας της νωπής κόλλας πλακιδίων κατά μόλις 3.4%.

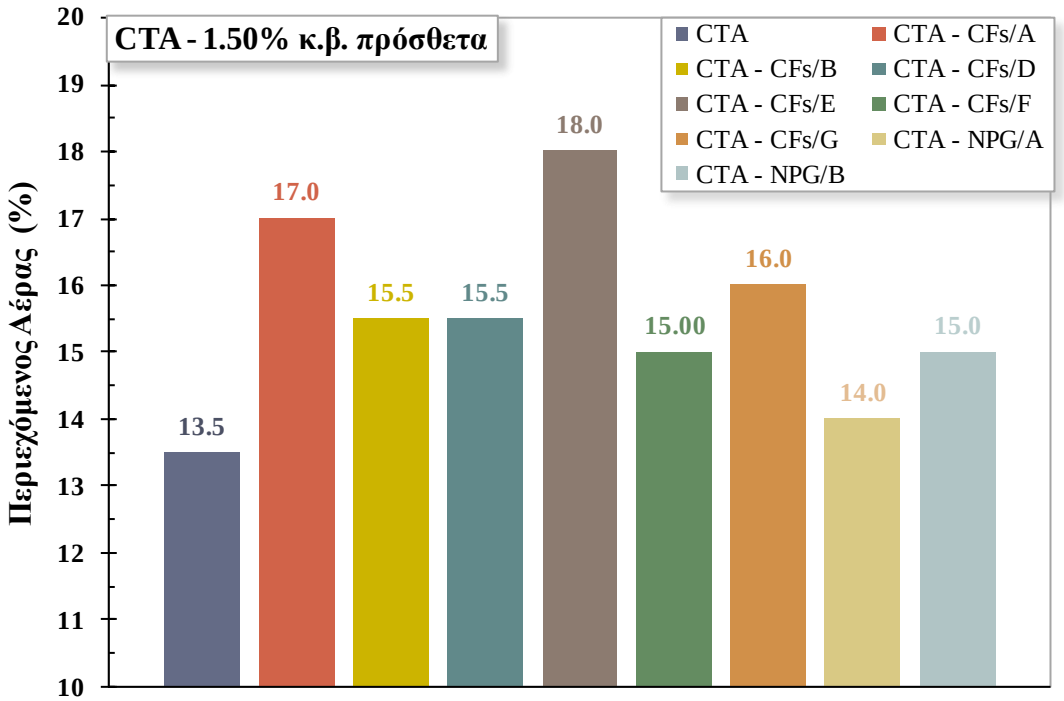
Περιεχόμενος αέρας της νωπής κόλλας πλακιδίων

Η προσθήκη των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης αυξάνει τον περιεχόμενο αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων. Τα αποτελέσματα του περιεχόμενου αέρα της νωπής κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.32. Όσο αφορά στις ίνες κυτταρίνης, η αύξηση του περιεχόμενου αέρα κυμαίνεται από 11 έως 33%. Η κόλλα πλακιδίων με ίνες τύπου B παρουσιάζει αύξηση του περιεχόμενου αέρα κατά 15%.

Αντίθετα, η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α δεν επηρεάζει τον περιεχόμενο αέρα της νωπής κόλλας, ενώ του υγρού τύπου Β προκαλεί μία αύξηση της τάξης του 11%.



Σχήμα 5.32 Πυκνότητα της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.



Σχήμα 5.33 Περιεχόμενος αέρας (%) της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

- *Συγκρατούμενο νερό της νωπής κόλλας πλακιδίων*

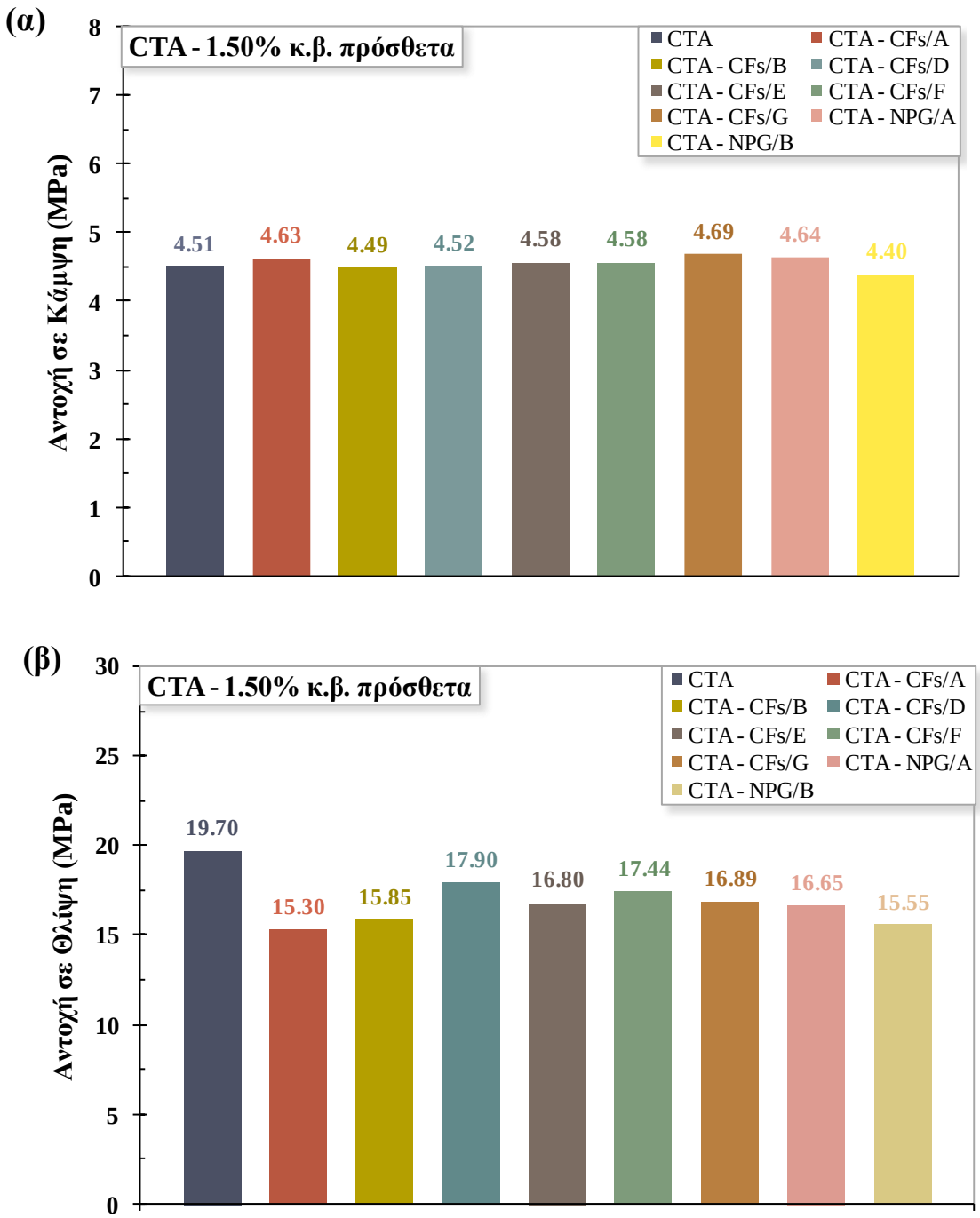
Η προσθήκη των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης διατηρεί το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού της νωπής κόλλας πλακιδίων υψηλότερο του 99%. Επομένως, τα επιλεχθέντα πρόσθετα δεν επιδρούν αρνητικά στο ποσοστό του συγκρατούμενου νερού της κόλλας πλακιδίων.

- *Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων*

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. κόλλας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.34. Η προσθήκη των επιλεχθέντων ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δεν επηρεάζει την αντοχή σε κάμψη της τσιμεντοειδούς κόλλας πλακιδίων. Αντίθετα, η αντοχή σε θλίψη της κόλλας πλακιδίων μειώνεται σημαντικά με την προσθήκη των ινών κυτταρίνης και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης. Η μείωση της θλιπτικής αντοχής της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης κυμαίνεται από 9.13 έως 22.33%, ενώ της κόλλας με 1.50% κ.β. κόλλας υγρά πρόσθετα από 15.48 έως 20%.

- *Ελεύθερη συρρίκνωση της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων*

Σε γενικές γραμμές, οι ίνες κυτταρίνης είτε μειώνουν είτε δεν επηρεάζουν τη συρρίκνωση της σκληρυμένης κόλλας πλακιδίων. Εξαίρεση αποτελούν οι ίνες τύπου D, οι οποίες αυξάνουν τη συρρίκνωση της κόλλας πλακιδίων. Τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνουν τη συρρίκνωση της κόλλας πλακιδίων.

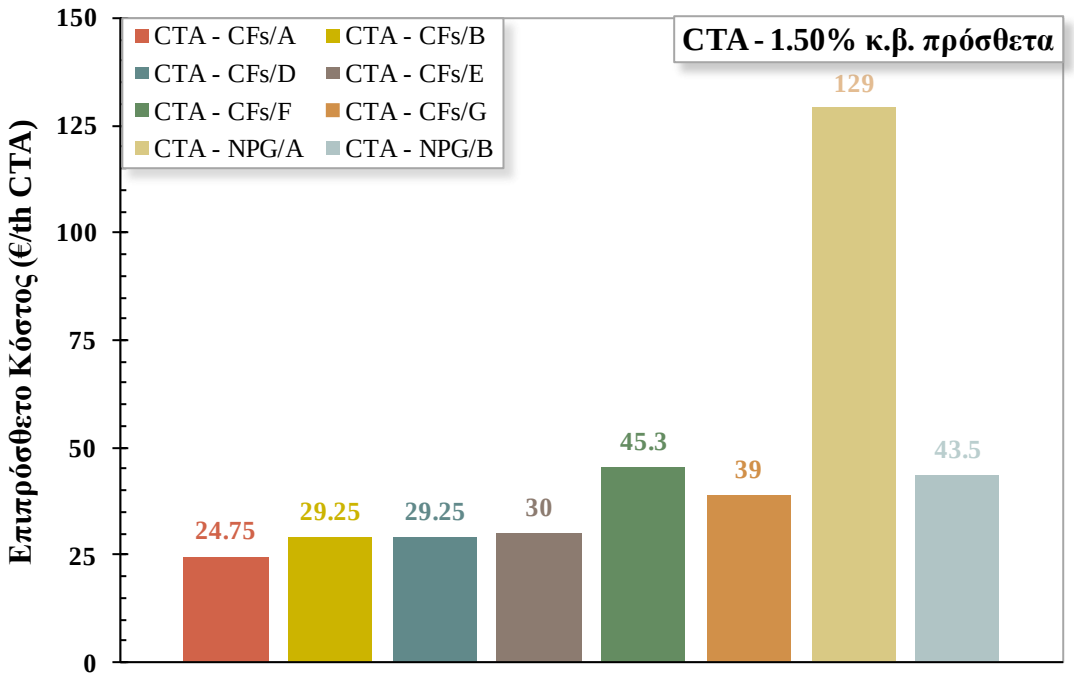


Σχήμα 5.34 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης στην ηλικία των 28 ημερών.

- *Κόστος παραγωγής της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα*

Το επιπλέον κόστος για την παραγωγή 1 tn κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.35. Είναι προφανές ότι οι ίνες κυτταρίνης αποτελούν πιο οικονομική λύση συγκριτικά με τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης. Το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α, παρά την υψηλή

αποτελεσματικότητά του ως προς τον περιορισμό της σκόνης της κόλλας πλακιδίων, δε συνιστάται, διότι επιβαρύνει σημαντικά το κόστος παραγωγής της κόλλας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η προσθήκη των ινών τύπου Β σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. κόλλας επιτυγχάνει μείωση του αριθμού σκόνης κατά 84% και αυξάνει το κόστος παραγωγής της κόλλας κατά 29.25 €/tn, ενώ η προσθήκη 1.00% κ.β. κόλλας υγρού τύπου Β μειώνει τη σκόνη κατά 93% και αυξάνει το κόστος παραγωγής της κόλλας κατά 29 €/tn, συμπεραίνεται ότι το υγρό τύπου Β αποτελεί τη βέλτιστη οικονομικά λύση. **Ως εκ τούτου, προτείνεται η παραγωγή της κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β, η οποία χαρακτηρίζεται από αριθμό σκόνης ίσο με 4 και επιπλέον κόστος παραγωγής 43.50 €/tn.**



Σχήμα 5.35 Επιπρόσθετο κόστος (€/tn) για την παραγωγή κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Βιβλιογραφία

5.1. Soroushian, P., & Marikunte, S. (1990). Reinforcement of cement-based materials with cellulose fibers. *ACI Special Publication*, *124*.

5.2. Soroushian, P., & Marikunte, S. (1991). Moisture sensitivity of cellulose fiber reinforced cement. *ACI Special Publication*, *126*.

5.3. Naik, T.R., Friberg, T.S., & Chun, Y.M. (2004). Use of pulp and paper mill residual solids in production of cellucrete. *Cement and Concrete Research*, *34* (7), 1229-1234.

5.4. Kawashima, S., & Shah, S.P. (2011). Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, *33* (2), 201-208.
5.5. Mello, E., Ribellato, C., & Mohamedelhassan, E. (2014). Improving Concrete Properties with Fibers Addition. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, *8* (3), 249-254.
5.6. Bentchikou, M., Guidoum, A., Scrivener, K., Silhadi, K., & Hanini, S. (2012). Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. *Construction and Building Materials*, *34*, 451-456.
5.7. Youjiang, W., Wu, H.C., & Victor, C. (2000). Concrete reinforcement with recycled fibres. *Journal of Materials in Civil Engineering November*, *314*.
5.8. Grzybowski, M., & Shah, S.P. (1990). Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, *87* (2), 138-148.
5.9. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, *22* (5), 379-384.
5.10. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S. (2003). Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, *25* (6), 585-592.
5.11. Khorami, M. & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, *25* (9), 3661-3667.
5.12. Khorami, M. & Ganjian, E. (2013). The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. *Construction and Building Materials*, *46*, 142-149.
5.13. Claramunt, J., Ardanuy, M., Parés, F., & Ventura, H. (2013). Mechanical performance of cement mortar composites reinforced with cellulose fibres. *Composite Science and Technology*.
5.14. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2003). Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, *25* (3), 311-319.
5.15. Soroushian, P., Elzafraney, M., Nossoni, A., & Chowdhury, H. (2006). Evaluation of normal-weight and light-weight fillers in extruded cellulose fiber cement products. *Cement and Concrete Composites*, *28* (1), 69-76.
5.16. Toledo Filho, R.D., & Sanjuan, M.A (1999). Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. *Cement and Concrete Research*, *29* (10), 1597-1604.
5.17. Toledo Filho R.D., Ghavami, K., Sanjuán, M.A., & England, G.L. (2005). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, *27* (5), 537-546.
5.18. Aitcin, P.C., Neville, A.M., & Acker, P. (1997). Integrated view of shrinkage deformation. *Concrete International*, *19* (9), 35-41.
5.19. Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 65-87.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Τσιμέντο χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού αποτελεί η πειραματική μελέτη της επίδρασης των ινών κυτταρίνης και των υγρών προσθέτων στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Στόχος του κεφαλαίου είναι ο προσδιορισμός του αποτελεσματικότερου πρόσθετου ως προς τη μείωση της τάσης σχηματισμού σκόνης του τσιμέντου. Ως βέλτιστο θα χαρακτηριστεί το πρόσθετο το οποίο μειώνει στο μεγαλύτερο βαθμό τον σχηματισμό σκόνης, χωρίς να υποβαθμίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τσιμεντοπολτού.

Αρχικά, παρουσιάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας των διαφόρων τύπων ινών κυτταρίνης και υγρών προσθέτων στις ιδιότητες του νωπού τσιμεντοπολτού όπως η εξάπλωση, ο χρόνος αρχής και τέλους πήξης και η σταθερότητα όγκου. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα. Τέλος, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκόνη και εξάγονται συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα των προσθέτων για τη μείωση της σκόνης σε συνδυασμό με τη διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του τσιμεντοπολτού.

6.1 Εξάπλωση νωπού τσιμεντοπολτού

6.1.1 Εξάπλωση τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης

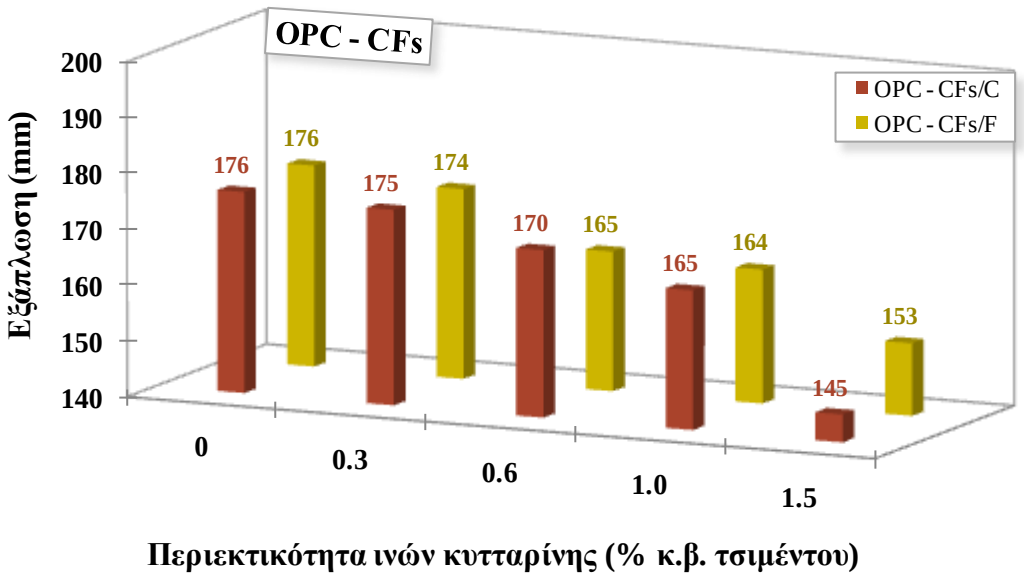
Τα αποτελέσματα της μεταβολής της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου C και F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 6.1. Παρατηρείται ότι, όπως και στην κόλλα πλακιδίων (βλ. Κεφάλαιο 5, §5.2.1), η προσθήκη ινών κυτταρίνης στον τσιμεντοπολτό προκαλεί μείωση της εξάπλωσής του. Η μείωση της εξάπλωσης αποδίδεται στον υδρόφιλο χαρακτήρα των ινών κυτταρίνης. Ποσότητα του νερού μίξης απορροφάται από τις ίνες, μειώνοντας την εργασιμότητα του νωπού τσιμεντοπολτού. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμεντοπολτού σε ίνες κυτταρίνης προκαλεί περαιτέρω μείωση της εξάπλωσής του. Η συμπεριφορά αυτή του τσιμεντοπολτού ήταν αναμενόμενη, δεδομένου ότι η αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών στη μήτρα του τσιμεντοπολτού σημαίνει υψηλότερο εμβαδό επιφάνειας των ινών κυτταρίνης και επομένως, απορρόφηση μεγαλύτερης ποσότητας του αρχικού νερού μίξης. Αντίστοιχα αποτελέσματα μείωσης της εργασιμότητας των υλικών με βάση το τσιμέντο λόγω της προσθήκης κυτταρινούχων ινών αναφέρονται και σε άλλες μελέτες [6.1-6.4].

Πίνακας 6.1 Εξάπλωση (mm) του νωπού τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - CFs/C	176	173	165	160	145
OPC - CFs/F	176	174	165	164	153

Ο τσιμεντοπολτός με ίνες κυτταρίνης τύπου F παρουσιάζει ελαφρώς βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς την εξάπλωση συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό με ίνες τύπου C. Η συμπεριφορά αυτή δεν ήταν αναμενόμενη στο βαθμό που το μήκος των ινών τύπου F (~200 μm) είναι σχεδόν τριπλάσιο του μήκους των ινών τύπου C (~60 μm) και επομένως, οι ίνες τύπου F έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια για την απορρόφηση του νερού. Ωστόσο, η απόκλιση των τιμών της εξάπλωσης των τσιμεντοπολτών με ίνες τύπου F και C είναι τόσο μικρή που δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επίδραση του μήκους των ινών κυτταρίνης στην εξάπλωση του τσιμεντοπολτού. Η μεγίστη μείωση της εξάπλωσης είναι περίπου 17.5% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C. Στο βαθμό που η εργασιμότητα αποτελεί σημαντική ιδιότητα του

τσιμέντου, η επιλογή των ινών κυτταρίνης ως πρόσθετα φαίνεται να μη συνιστά καλή λύση. Ωστόσο, αν οι ίνες κυτταρίνης αποδειχθούν αποτελεσματικές ως προς τη μείωση της τάσης του τσιμέντου να σχηματίζει σκόνη, το πρόβλημα της εργασιμότητας μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση κατάλληλων ρευστοποιητών.



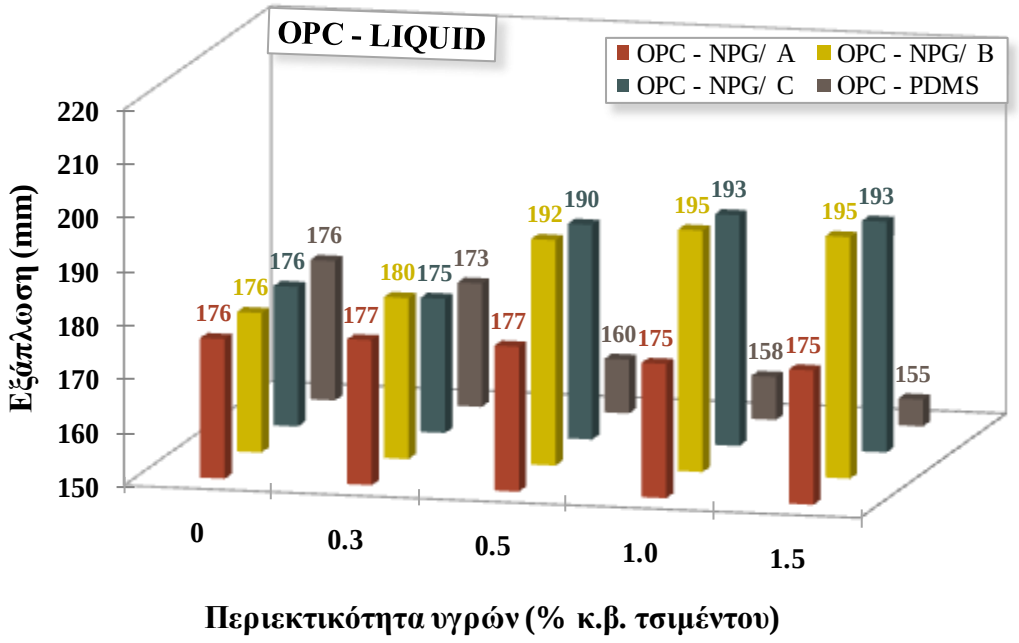
Σχήμα 6.1 Εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού συναρτήσει της περιεκτικότητάς του σε ίνες κυτταρίνης.

6.1.2 Εξάπλωση νωπού τσιμεντοπολτού με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα της μεταβολής της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού με υγρά πρόσθετα σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 6.2.

Πίνακας 6.2 Εξάπλωση (mm) του νωπού τσιμεντοπολτού με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - NPG/A	176	177	177	175	175
OPC - NPG/B	176	180	192	195	195
OPC - NPG/C	176	175	190	193	193
OPC - PDMS	176	173	160	158	155



Σχήμα 6.2 Εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού συναρτήσει της περιεκτικότητάς του σε υγρά πρόσθετα.

Παρατηρείται ότι οι υγροί εστέρες νεοπεντυλο-γλυκόλης είτε βελτιώνουν την εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού είτε τη διατηρούν σταθερή. Συγκεκριμένα, η παρουσία του υγρού τύπου A δεν επηρεάζει την τιμή της εξάπλωσης, ενώ τα υγρά τύπου B και C τη βελτιώνουν για περιεκτικότητες μεγαλύτερες από 0.50% κ.β. τσιμέντου. Αντίθετα, η προσθήκη της σιλικόνης προκαλεί σημαντική μείωση της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού. Η μέγιστη μείωση είναι περίπου 12% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό σιλικόνης. Η μείωση της εξάπλωσης με την προσθήκη του λαδιού σιλικόνης ήταν αναμενόμενη λόγω της εξαιρετικά παχύρευστης μορφής του. Κατά την εφαρμογή του λαδιού σιλικόνης στο τσιμέντο μέσω ψεκασμού, παρατηρήθηκε αδυναμία διασποράς του στους κόκκους του τσιμέντου λόγω της έντονης συσσωμάτωσης που προκάλεσε στους κόκκους του τσιμέντου σε συγκεκριμένες περιοχές. Τα συσσωματώματα του τσιμέντου δε διαλύθηκαν ούτε κατά την έντονη και παρατεταμένη ανακίνηση της σύνθεσης στη σακούλα πριν από την παρασκευή του νωπού τσιμεντοπολτού. Αν ληφθεί υπόψη ότι ποσότητα του λαδιού σιλικόνης προσκολλήθηκε στα τοιχώματα της σακούλας, είναι σαφές ότι η προσθήκη λαδιού σιλικόνης δεν μπορεί να εφαρμοστεί ομοιογενώς στην ξηρή σύνθεση του τσιμέντου ώστε να επιτευχθεί επαρκής διαβροχή των κόκκων του τσιμέντου. Ενδεχομένως, το πρόβλημα αυτό να ξεπερνιόταν με την αραίωση της σιλικόνης με τη χρήση κατάλληλων διαλυτών πριν την εφαρμογή της

στο τσιμέντο. Ωστόσο, η διερεύνηση μίας τέτοιας βελτιστοποίησης κατά την εφαρμογή δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

6.2 Πρότυπη συνεκτικότητα τσιμεντοπολτού

Η δοκιμή προσδιορισμού της πρότυπης συνεκτικότητας του τσιμεντοπολτού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, §4.3.2.2. Δεδομένου ότι το υγρό σιλικόνης μείωσε σημαντικά την εργασιμότητα του τσιμεντοπολτού (βλ. §6.1.2) και δεν αποτελεί πλέον υποψήφιο πρόσθετο, διερευνήθηκε μόνο η επίδραση της προσθήκης των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης στην πρότυπη συνεκτικότητα του τσιμεντοπολτού.

Για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ποσότητας του νερού μίξης ώστε η κάθιση του τσιμεντοπολτού να είναι αποδεκτή, πραγματοποιήθηκε πλήθος δοκιμών. Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της απαίτησης σε νερό του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές κάθισης του τσιμεντοπολτού. Διαπιστώνεται ότι η παρουσία των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ουσιαστικά δεν επηρεάζει την απαίτηση του τσιμέντου σε νερό.

Πίνακας 6.3 Απαίτηση σε νερό του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Τύπος σύνθεσης	Μετρούμενα μεγέθη	0%	0.30%	0.50%	1.00%	1.50%
OPC - NPG/A	απαίτηση σε νερό (gr)	27.16	27	27	27	26.9
	κάθιση (mm)	6	7	7	8	8
OPC - NPG/B	απαίτηση σε νερό (gr)	27.16	27	27	27	27.4
	κάθιση (mm)	6	7	8	8.5	6
OPC - NPG/C	απαίτηση σε νερό (gr)	27.16	27	27	27.4	27.56
	κάθιση (mm)	6	4	4	8	7.5

6.3 Χρόνος αρχής και τέλους πήξης του τσιμεντοπολτού

Η δοκιμή προσδιορισμού του χρόνου αρχής και τέλους πήξης του τσιμεντοπολτού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, §4.3.2.3. Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου αρχής και τέλους πήξης του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50,

1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου. Την υψηλότερη απόκλιση σε σχέση με το τσιμέντο αναφοράς ως προς τους χρόνους αρχής και τέλους πήξης παρουσιάζει το τσιμέντο με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου Α. Η αρχή πήξης του τσιμέντου με υγρό τύπου Α καθυστερεί κατά 11% συγκριτικά με το τσιμέντο αναφοράς και το τέλος πήξης κατά 12.8%. Ωστόσο, οι αποκλίσεις αυτές θεωρούνται αμελητέες. Επομένως, η προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης δε μεταβάλλει σημαντικά τον χρόνο αρχής και τέλους πήξης των τσιμεντοπολτών πρότυπης συνεκτικότητας.

Πίνακας 6.4 Χρόνος αρχής και τέλους πήξης του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Τύπος σύνθεσης	**Μετρούμενα μεγέθη**	**0%**	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - NPG/A	αρχή πήξης (min)	144	145	145	145	160
	τέλος πήξης (min)	195	200	205	217	220
OPC - NPG/B	αρχή πήξης (min)	144	143	135	160	155
	τέλος πήξης (min)	195	210	208	220	220
OPC - NPG/C	αρχή πήξης (min)	145	140	142	147	153
	τέλος πήξης (min)	198	197	197	220	204

6.4 Σταθερότητα όγκου τσιμεντοπολτού

Η σταθερότητα όγκου του τσιμεντοπολτού εκτιμάται βάσει της διόγκωσής του (βλ. Κεφάλαιο 4, §4.3.2.4.). Η διόγκωση προσδιορίστηκε για τη μέγιστη περιεκτικότητα του τσιμεντοπολτού σε υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης. Τα αποτελέσματα της διόγκωσης του τσιμεντοπολτού με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρά τύπου Α, Β και C παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5. Παρατηρείται ότι η προσθήκη των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ακόμη και σε μεγάλη περιεκτικότητα δεν προκαλεί διόγκωση του τσιμεντοπολτού.

Πίνακας 6.5 Διόγκωση του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Τύπος σύνθεσης	Αρχική απόσταση βελόνων (cm)	Τελική απόσταση βελόνων (cm)	Διόγκωση (cm)
OPC - 1.50% κ.β. NPG/A	3	3	0
OPC - 1.50% κ.β. NPG/B	2.2	2.4	0.2
OPC - 1.50% κ.β. NPG/C	1.2	1.3	0.1

6.5 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμέντου

6.6.1 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου C και F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.6 & 6.7, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.6 Αντοχή σε κάμψη (MPa) του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού ηλικίας 28 ημερών με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - CFs/C	6.23	8.07	7.91	7.28	7.23
OPC - CFs/F	6.23	6.65	7.20	6.85	7.02

Πίνακας 6.7 Αντοχή σε θλίψη (MPa) του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού ηλικίας 28 ημερών με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - CFs/C	65.45	61.80	60.45	61.65	59.85
OPC - CFs/F	65.45	63.71	67.70	63.71	64.22

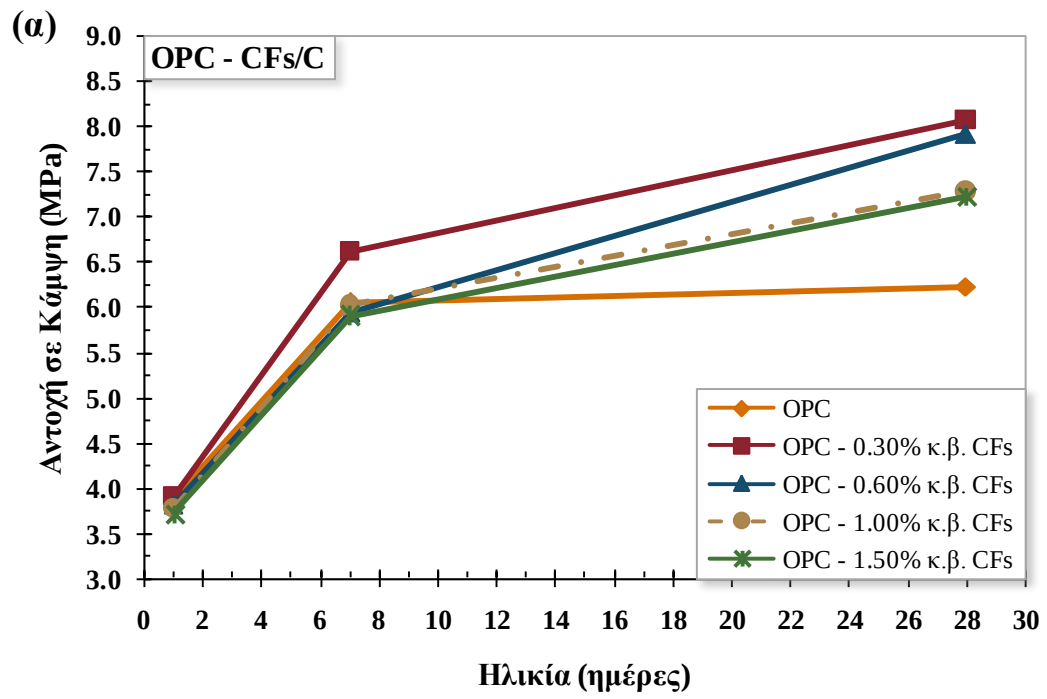
- ***Ίνες τύπου C***

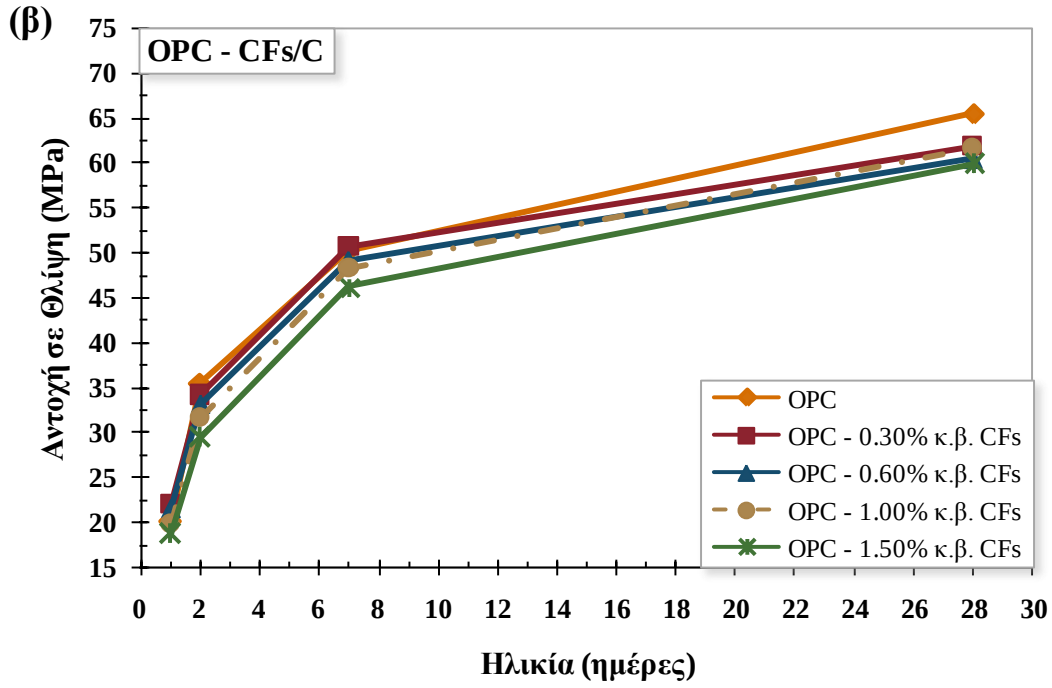
Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου C σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με ίνες κυτταρίνης τύπου C εμφανίζει σημαντικά βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς (Σχήμα 6.3^{α}). Τη μέγιστη βελτίωση παρουσιάζει ο τσιμεντοπολτός με 0.30% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C και είναι ίση με 29.5%, ενώ τη μικρότερη βελτίωση (~16%) ο τσιμεντοπολτός με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C. Η θετική επίδραση των ινών κυτταρίνης στην καμπτική αντοχή των υλικών με βάση το τσιμέντο αναφέρεται και σε πλήθος άλλων μελετών [6.5-6.12].

Η βελτίωση της αντοχής σε κάμψη του τσιμεντοπολτού λόγω της παρουσίας των ινών κυτταρίνης αποδίδεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ινών, όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή τους, το μήκος και η αναλογία διαστάσεών τους, τα οποία καθιστούν τις ίνες ικανές να γεφυρώνουν τις ρωγμές της μήτρας της τσιμεντοκονίας. Με την

προϋπόθεση ότι έχουν αναπτυχθεί δυνάμεις συνάφειας μεταξύ της μήτρας τσιμέντου και των ινών, η αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες αναμένεται να βελτιώσει την αντοχή σε κάμψη του τσιμεντοπολτού. Ωστόσο, παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμεντοπολτού σε ίνες κυτταρίνης τύπου C μειώνεται η καμπτική αντοχή του. Συγκεκριμένα, ο τσιμεντοπολτός με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C παρουσιάζει 10% χαμηλότερη καμπτική αντοχή συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό με 1.00% κ.β. τσιμέντου ίνες. Το φαινόμενο αυτό ενδεχομένως να είναι αποτέλεσμα της συσσωμάτωσης των ινών λόγω της ανεπιτυχούς διασποράς τους στη μήτρα του τσιμέντου. Η συσσωμάτωση των ινών οδηγεί στον σχηματισμό αδύναμων περιοχών στο εσωτερικό της μήτρας. Ο δεύτερος παράγοντας που δεν επιτρέπει την αναλογική αύξηση της αντοχής σε κάμψη των τσιμεντοειδών υλικών όσο αυξάνεται η περιεκτικότητά τους σε ίνες κυτταρίνης σχετίζεται με τη βέλτιστη αναλογία ινών κυτταρίνης και σωματιδίων τσιμέντου, για την οποία κάθε ίνα περιβάλλεται από επαρκώς ενυδατωμένα σωματίδια τσιμέντου. Ως εκ τούτου, με την αύξηση του αριθμού των ινών, η ποσότητα των ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου δεν είναι αρκετή για να καλύψει όλες τις πλευρικές επιφάνειες των ινών, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση του υλικού. Δεδομένου ότι τα ποσοστά των ινών τύπου C που εξετάστηκαν είναι αρκετά χαμηλά (έως 1.50% κ.β. τσιμέντου), η μείωση του ρυθμού βελτίωσης της καμπτικής αντοχής με την αύξηση της ποσότητας των ινών φαίνεται να οφείλεται στην ανεπιτυχή διασπορά τους στη μήτρα.

Αντίθετα με τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη, τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη υποδεικνύουν ότι η προσθήκη των ινών κυτταρίνης τύπου C μειώνει τη θλιπτική αντοχή του τσιμεντοπολτού σε κάθε ηλικία (Σχήμα 6.3$^{\beta}$). Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της αντοχής σε θλίψη είναι περίπου 8.5% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C, ενώ η μικρότερη μείωση (~6.0%) αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 0.30% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C. Η μείωση της αντοχής σε θλίψη του τσιμεντοπολτού λόγω της αύξησης της περιεκτικότητάς του σε ίνες κυτταρίνης αποδίδεται κυρίως στην αύξηση των κενών. Η παρουσία των κενών εντός του υλικού οδηγεί στην παραγωγή ενός ελαφρότερου και πιο αδύναμου υλικού. Συνεπώς, καθώς η ποσότητα του τσιμέντου διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις συνθέσεις, ανεξάρτητα από την ποσότητα των ινών κυτταρίνης, συμπεραίνεται ότι η πτώση της θλιπτικής αντοχής του τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης δε σχετίζεται με τη μείωση του κλάσματος όγκου του τσιμέντου, αλλά με την παρουσία των κενών. Η μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης αναφέρεται και σε άλλες μελέτες [6.4, 6.9].





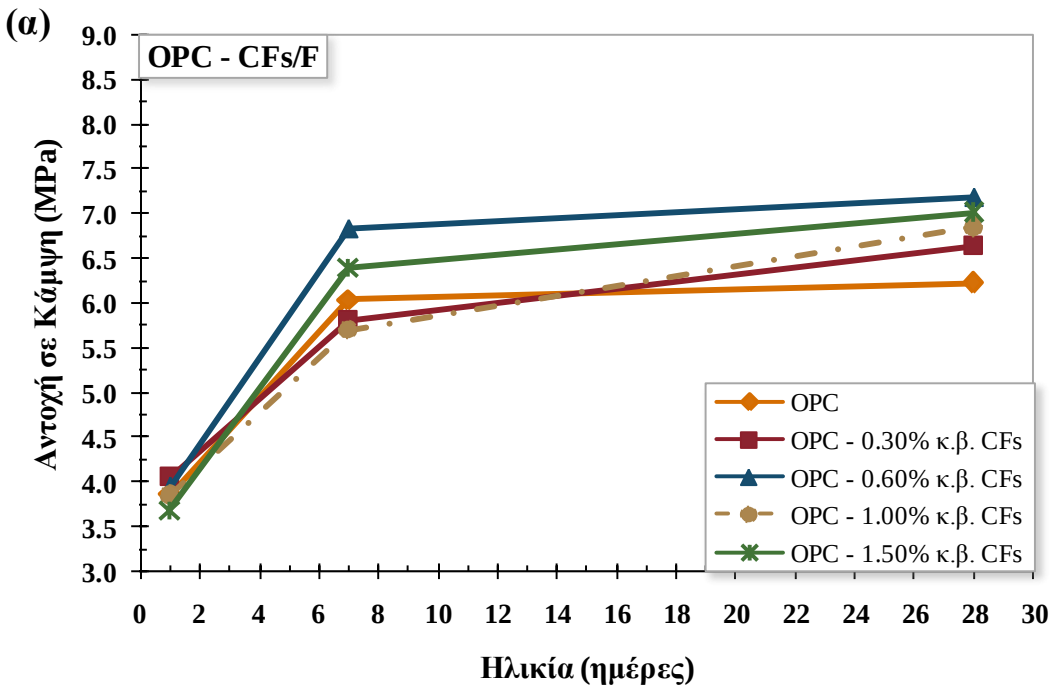
Σχήμα 6.3 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου C σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου.

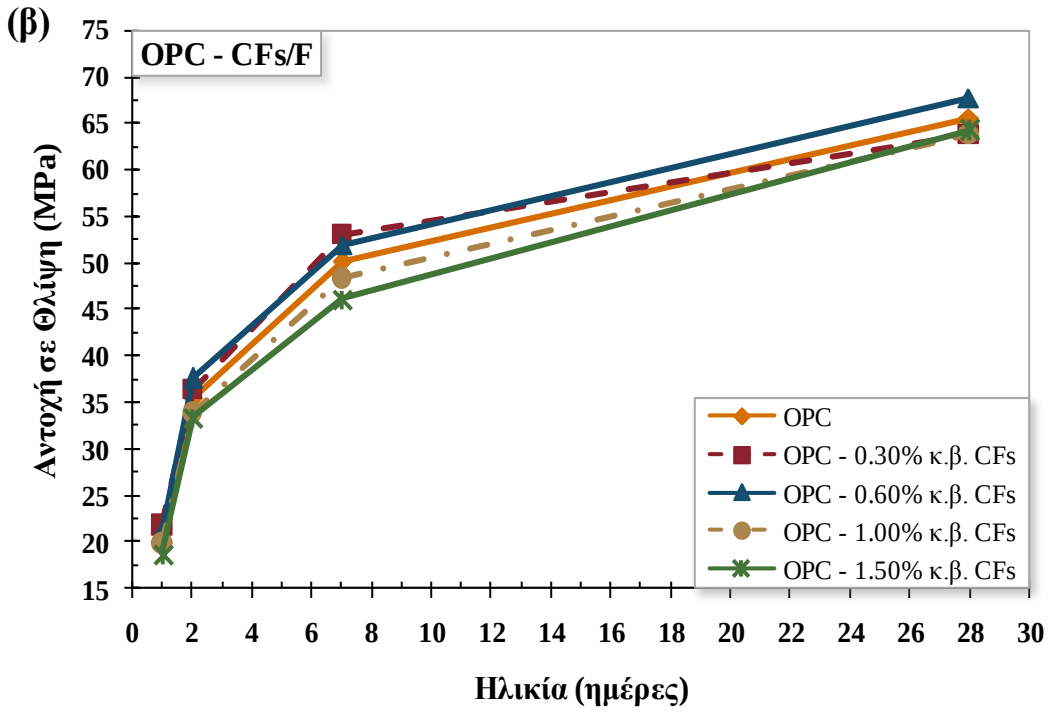
Ίνες τύπου F

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60,

1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με ίνες κυτταρίνης τύπου F εμφανίζει σημαντικά βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς (Σχήμα 6.4^{α}). Τη μέγιστη βελτίωση παρουσιάζει ο τσιμεντοπολτός με 0.60% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου F και είναι ίση με 15.5%. Παρατηρείται ότι η αντοχή σε κάμψη του τσιμεντοπολτού με ίνες τύπου F είναι χαμηλότερη από την αντοχή του τσιμεντοπολτού με ίνες τύπου C (βλ. Σχήμα 6.3^{α}). Η βελτιωμένη καμπτική συμπεριφορά του τσιμεντοπολτού με ίνες τύπου C συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό με ίνες τύπου F δεν ήταν αναμενόμενη στο βαθμό που το μήκος των ινών τύπου F (~200μm) είναι περίπου τριπλάσιο του μήκους των ινών τύπου C (60 μm). Ο υψηλότερος λόγος διάστασης των ινών τύπου F αναμενόταν να εξασφαλίσει αποτελεσματικότερη γεφύρωση των ρωγμών της τσιμεντοειδούς μήτρας. Ενδεχομένως, το μεγαλύτερο μήκος των ινών τύπου F να οδήγησε σε συσσωμάτωση των ινών, δυσκολεύοντας τη διασπορά τους στην τσιμεντοειδή μήτρα.

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε θλίψη του τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4^{β}. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με ίνες κυτταρίνης τύπου F εμφανίζει παρόμοια θλιπτική αντοχή με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς.





Σχήμα 6.4 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού ενισχυμένου με ίνες κυτταρίνης τύπου F σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου.

6.6.2 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρά πρόσθετα στην ηλικία των 28 ημερών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 6.8 & 6.9, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.8 Αντοχή σε κάμψη (MPa) του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού ηλικίας 28 ημερών με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
OPC - NPG/A	6.23	6.58	6.31	6.16	6.47
OPC - NPG/B	6.23	7.84	7.94	8.36	8.37
OPC - NPG/C	6.23	7.12	7.48	6.66	6.96
OPC - PDMS	6.23	6.78	7.36	6.98	7.15

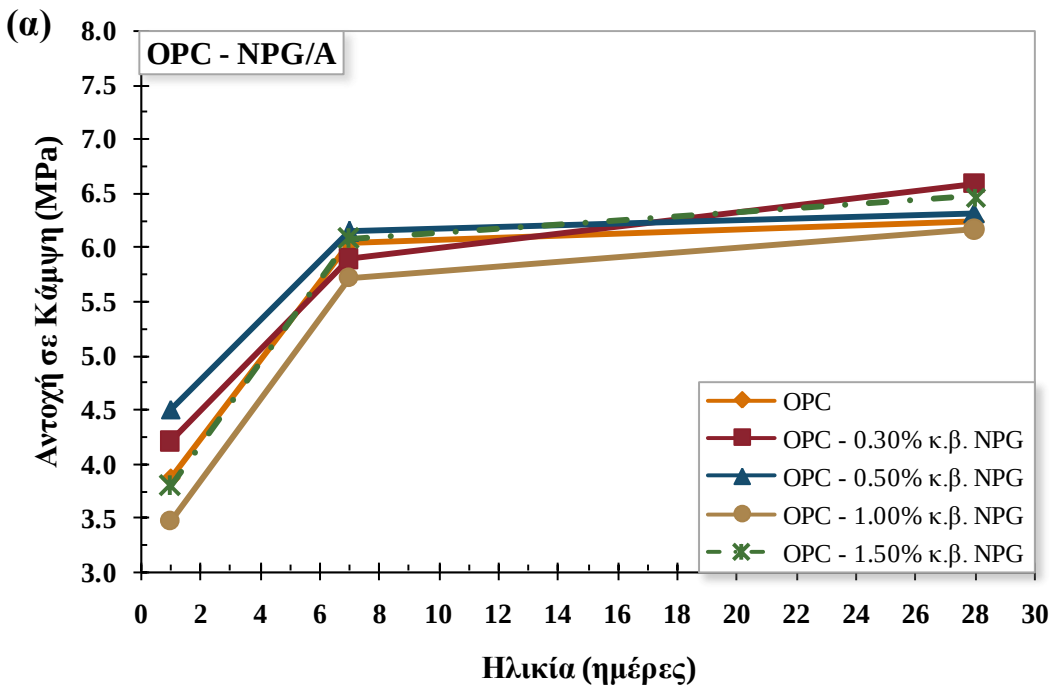
Πίνακας 6.9 Αντοχή σε θλίψη (MPa) του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού ηλικίας 28 ημερών με υγρά πρόσθετα.

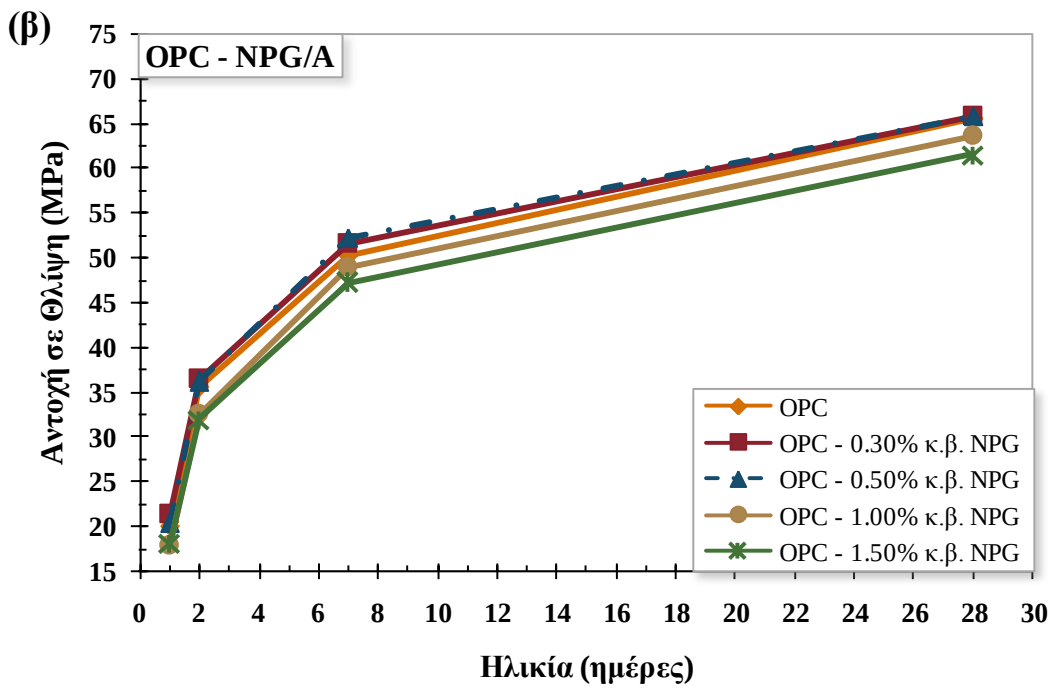
Τύπος σύνθεσης	0%	0.30%	0.60%	1.00%	1.50%
OPC - NPG/A	65.45	65.80	65.75	63.55	61.55

OPC - NPG/B	65.45	64.95	66.60	63.50	64.50
OPC - NPG/C	65.45	62.05	61.1	55.55	55.5
OPC - PDMS	65.45	58.85	62.30	59.90	56.20

Υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α εμφανίζει ελαφρώς βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς (Σχήμα 6.5^{α}). Όσο αφορά στην αντοχή σε θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α, για περιεκτικότητες έως 0.50% κ.β. τσιμέντου, η θλιπτική αντοχή ελαφρώς βελτιώνεται, ενώ για μεγαλύτερες περιεκτικότητες μειώνεται. Η μέγιστη μείωση είναι μόλις 6% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου Α. Επομένως, η προσθήκη του υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α δεν επηρεάζει αρνητικά τη μηχανική συμπεριφορά του τσιμέντου.

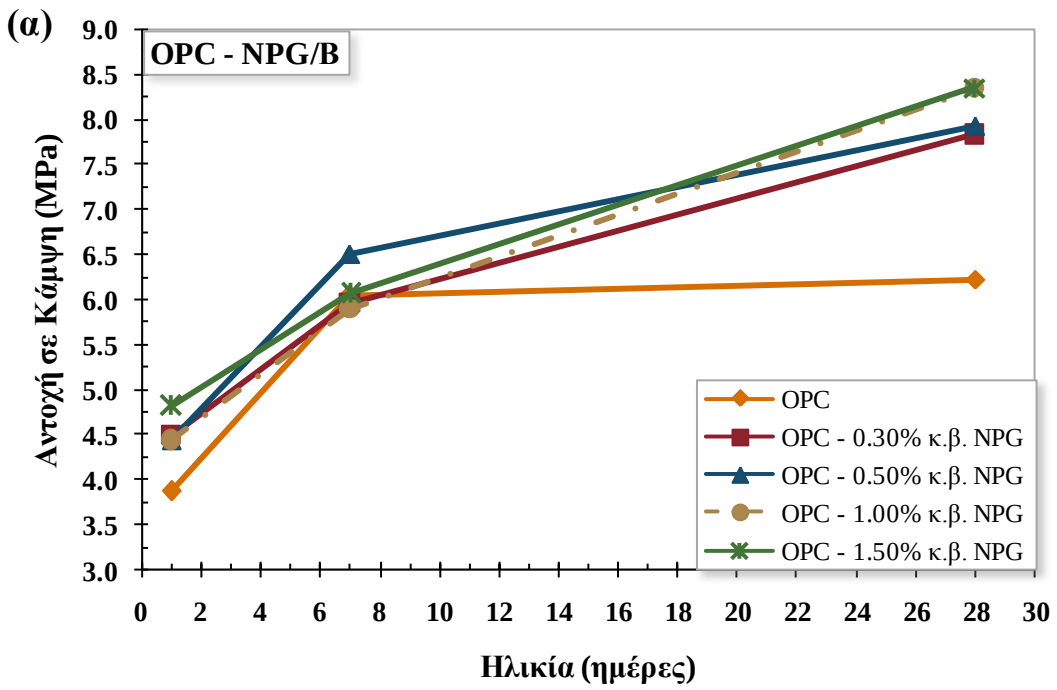


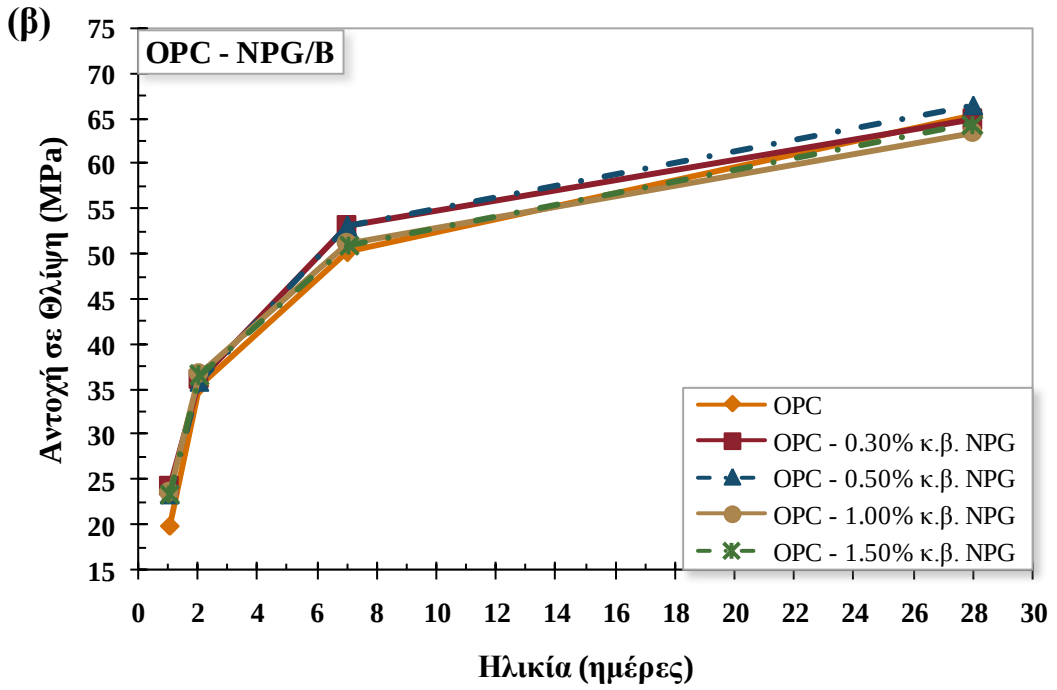


Σχήμα 6.5 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου.

Υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β εμφανίζει σημαντικά βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς (Σχήμα 6.6^{α}). Για περιεκτικότητες έως και 0.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου Β, η βελτίωση της καμπτικής αντοχής του τσιμέντου είναι της τάξης του 27.5%, ενώ για μεγαλύτερες περιεκτικότητες η αντοχή βελτιώνεται έως και 35%. Η αντοχή σε θλίψη του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού είναι παρόμοια με τη θλιπτική αντοχή του τσιμεντοπολτού αναφοράς (Σχήμα 6.6^{β}). Επομένως, η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β βελτιώνει την καμπτική αντοχή του τσιμέντου και δεν επηρεάζει τη θλιπτική αντοχή.





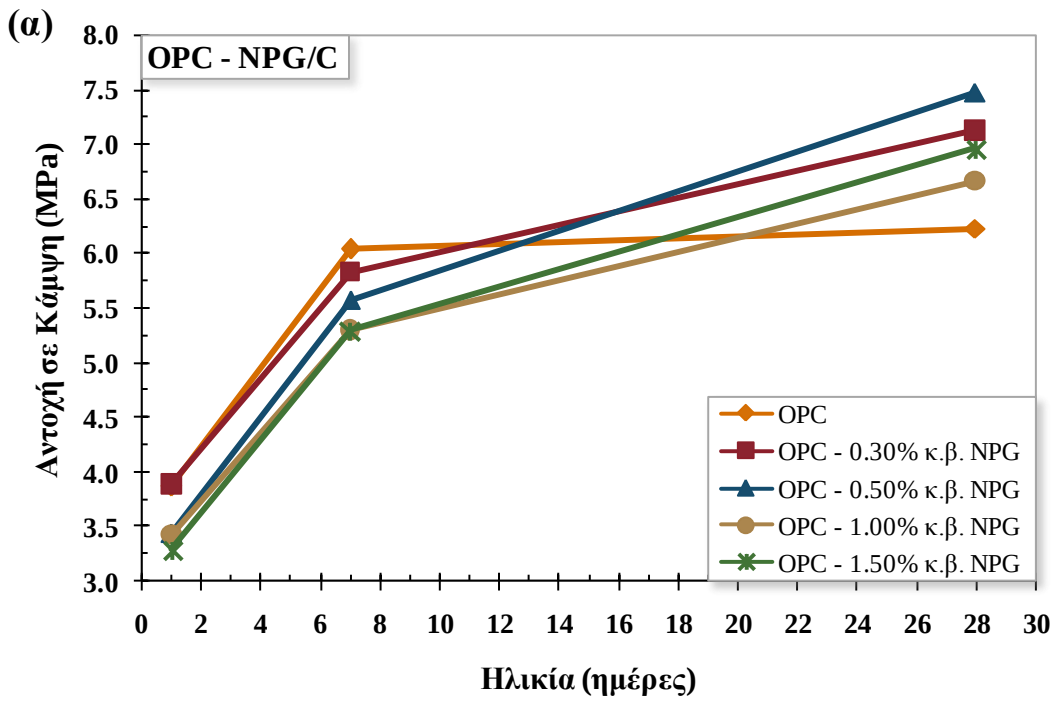
Σχήμα 6.6 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου B σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου.

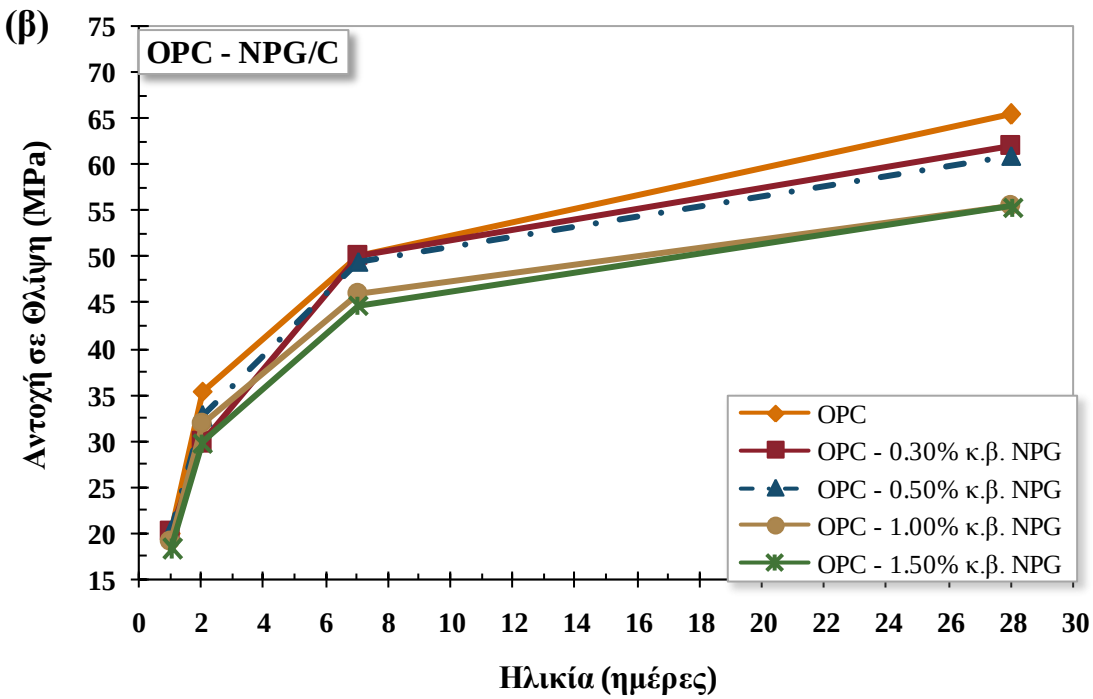
Υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50,

1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C εμφανίζει σημαντικά βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς (Σχήμα 6.7$^{\alpha}$). Η μέγιστη αύξηση της αντοχής σε κάμψη είναι 20% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 0.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου C, ενώ η χαμηλότερη βελτίωση είναι περίπου 12% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 1.00% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου C.

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7$^{\beta}$. Παρατηρείται ότι η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C προκαλεί μείωση της αντοχής σε θλίψη του τσιμεντοπολτού. Στην ηλικία των 28 ημερών, για περιεκτικότητες έως και 0.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου C, η θλιπτική αντοχή του τσιμεντοπολτού μειώνεται έως και 6.7%, ενώ για υψηλότερες περιεκτικότητες η μείωση της θλιπτικής αντοχής είναι της τάξης του 15%. Επομένως, η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C βελτιώνει σημαντικά την καμπτική συμπεριφορά του τσιμέντου, ενώ μειώνει τη θλιπτική αντοχή του.





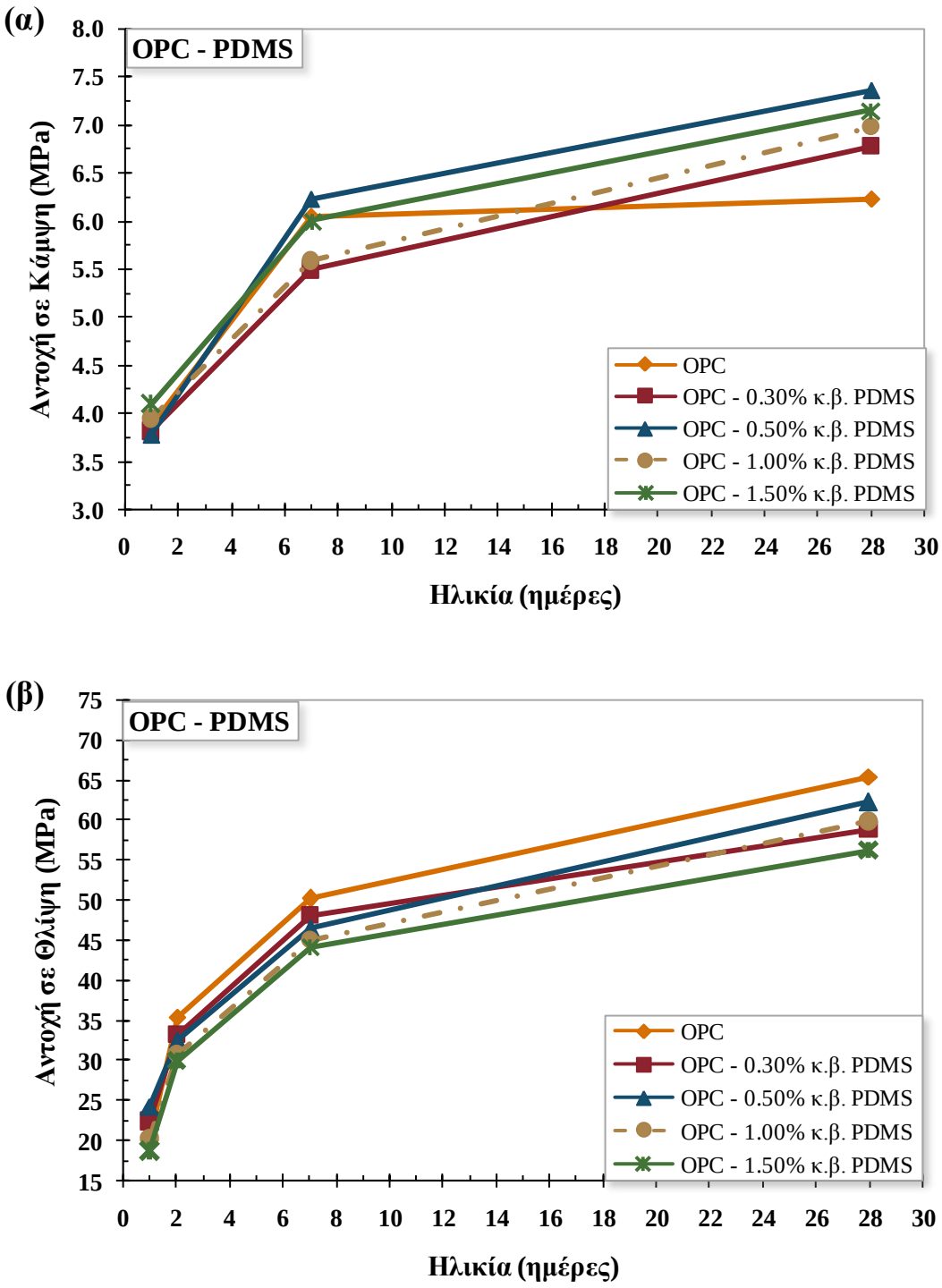
Σχήμα 6.7 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου.

Υγρό σιλικόνης τύπου PDMS

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό σιλικόνης τύπου PDMS σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8. Στην ηλικία των 28 ημερών, ο τσιμεντοπολτός με υγρό σιλικόνης τύπου PDMS εμφανίζει σημαντικά βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό αναφοράς (Σχήμα 6.8^{α}). Η μέγιστη αύξηση της αντοχής σε κάμψη είναι 18% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 0.50% κ.β. τσιμέντου υγρό σιλικόνης τύπου PDMS, ενώ ο τσιμεντοπολτός με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου PDMS παρουσιάζει βελτίωση της καμπτικής αντοχής κατά περίπου 15%.

Τα αποτελέσματα του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής σε θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό σιλικόνης τύπου PDMS σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8^{β}. Παρατηρείται ότι η προσθήκη του υγρού σιλικόνης προκαλεί μείωση της αντοχής σε θλίψη του τσιμεντοπολτού. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μέγιστη μείωση της θλιπτικής αντοχής είναι περίπου 14% και αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό σιλικόνης. Επομένως, η προσθήκη του

υγρού σιλικόνης τύπου PDMS βελτιώνει την καμπτική συμπεριφορά του τσιμέντου, ενώ μειώνει τη θλιπτική αντοχή του.



Σχήμα 6.8 Ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με υγρό σιλικόνης τύπου PDMS σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου.

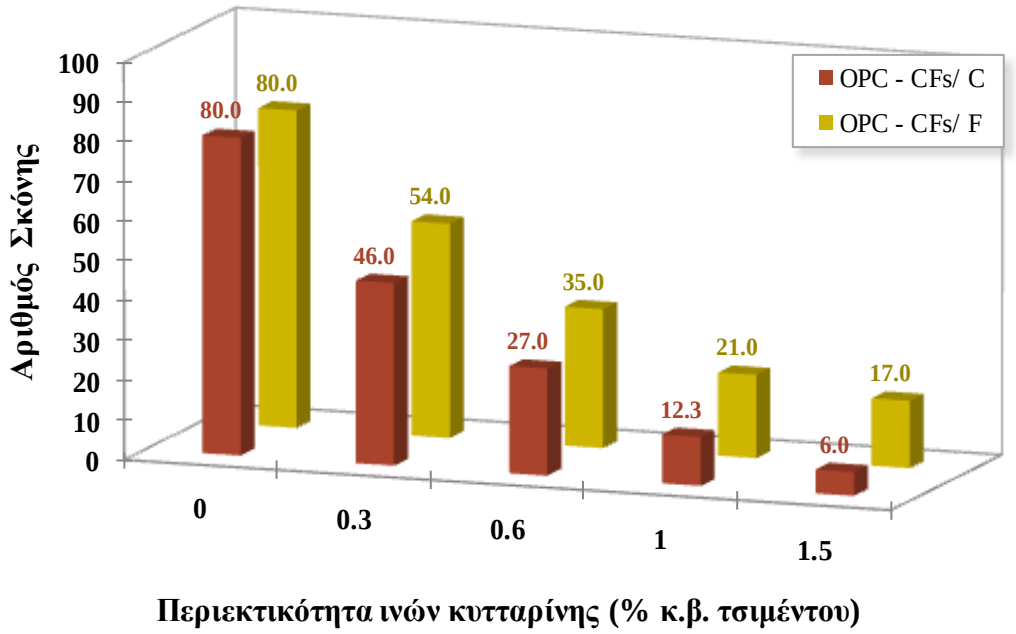
6.7 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου

6.7.1 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.60, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.10 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 6.9. Παρατηρείται ότι η προσθήκη των ινών κυτταρίνης περιορίζει σημαντικά την εκπομπή σκόνης από το τσιμέντο. Υψηλότερη αποτελεσματικότητα ως προς τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης του τσιμέντου επιδεικνύουν οι ίνες τύπου C. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο μικρότερο μήκος των ινών τύπου C (~60 μm) συγκριτικά με το μήκος των ινών τύπου F (~200 μm). Οι ίνες μικρότερου μήκους διασπείρονται πιο ομοιογενώς στο τσιμέντο, σχηματίζοντας ένα πιο αποτελεσματικό δίκτυο για τη δέσμευση των λεπτών σωματιδίων του τσιμέντου. Ο μικρότερος αριθμός σκόνης επιτυγχάνεται στο τσιμέντο με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες τύπου C.

Πίνακας 6.10 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - CFs/C	80	46	27	12.3	6
OPC - CFs/F	80	54	35	21	17



Σχήμα 6.9 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου συναρτήσει της περιεκτικότητάς του σε ίνες κυτταρίνης.

6.7.2 *Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα*

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητες 0.30, 0.50, 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11 και παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 6.10. Σημειώνεται ότι η μέτρηση της σκόνης του τσιμέντου με υγρό σιλικόνης δεν απέδωσε λόγω της ανομοιόμορφης εφαρμογής του υγρού στο τσιμέντο. Εξαιτίας της αναποτελεσματικής εφαρμογής του προσθέτου, δεν περιορίστηκε η εκπομπή σκόνης, οπότε δεν καταγράφηκε με τη μέτρηση διαφοροποίηση μεταξύ του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με υγρό σιλικόνης και του αριθμού σκόνης του τσιμέντου αναφοράς.

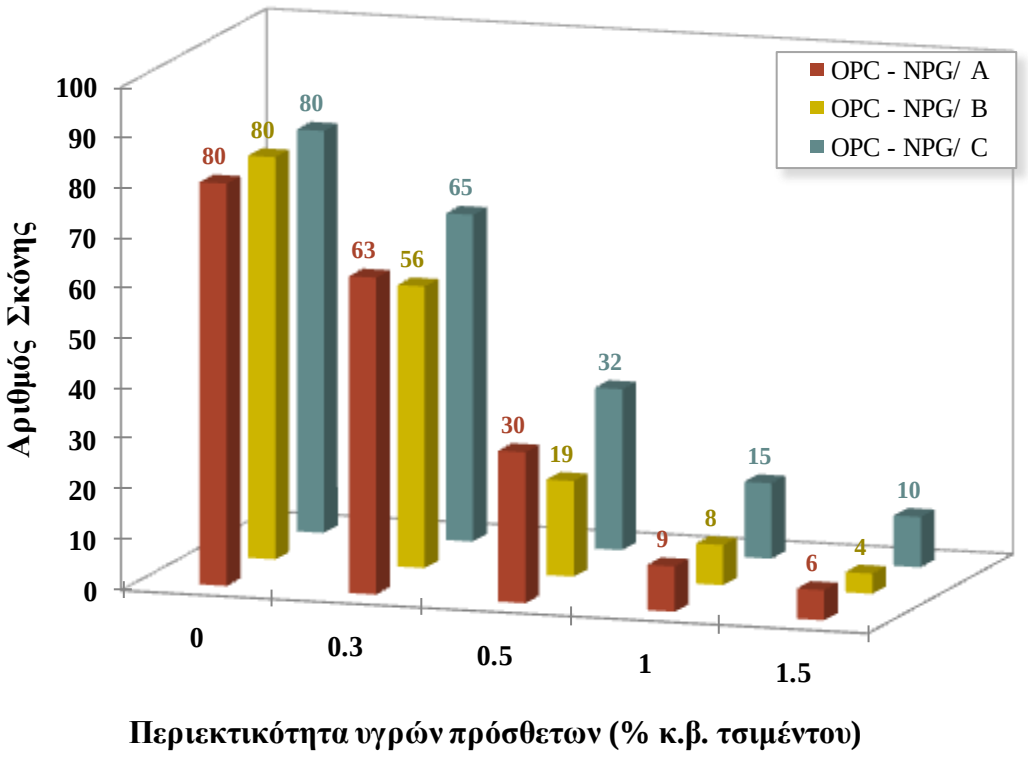
Παρατηρείται ότι ο αριθμός σκόνης του τσιμέντου μειώνεται σημαντικά για περιεκτικότητες υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης μεγαλύτερες του 0.50% κ.β. τσιμέντου. Ομοίως με την κόλλα πλακιδίων, πιο αποτελεσματικό ως προς τον περιορισμό της εκπεμπόμενης σκόνης του τσιμέντου αποδεικνύεται το υγρό τύπου Β. Ωστόσο, και η προσθήκη του υγρού τύπου Α εξασφαλίζει παρόμοιο βαθμό μείωσης της εκπεμπόμενης σκόνης του τσιμέντου. Με την προσθήκη υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α και Β σε περιεκτικότητες ίσες με 1.00 και 1.50% κ.β. τσιμέντου, η σκόνη σχεδόν εξαλείφεται. Το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C αποδεικνύεται λιγότερο αποτελεσματικό ως προς την καταστολή της σκόνης του τσιμέντου συγκριτικά με τα υγρά τύπου Α και Β. Η διαφορετική απόδοση των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ως προς τη μείωση της σκόνης οφείλεται στα διαφορετικά καρβοξυλικά οξέα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρασκευή τους για την εστεροποίηση της νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Πίνακας 6.11 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0%**	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - NPG/A	80	63	30	9	6
OPC - NPG/B	80	56	19	8	4
OPC - NPG/C	80	65	32	15	10

Η αποτελεσματικότητα των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ως προς τη μείωση του σχηματισμού σκόνης δεν οφείλεται στη συσσωμάτωση των λεπτών σωματιδίων του τσιμέντου, αλλά στην προσρόφηση του υγρού εστέρα στους κόκκους του. Η προσρόφηση του υγρού εστέρα στους κόκκους του τσιμέντου αυξάνει το βάρος των κόκκων με

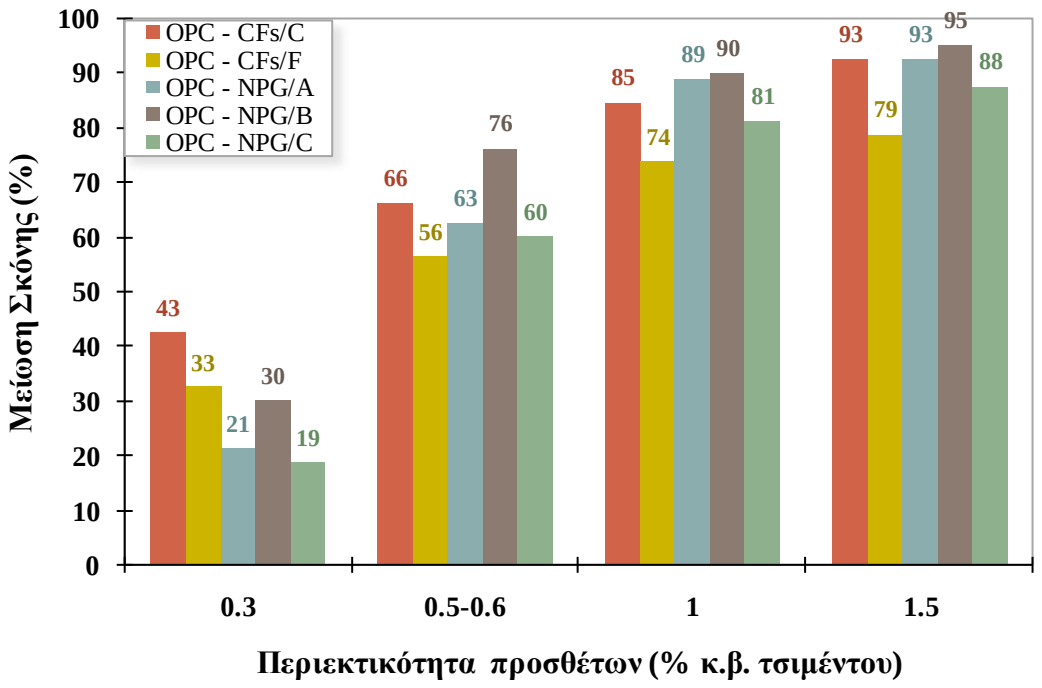
αποτέλεσμα αυτοί να καθιζάνουν και συνεπώς, να εμποδίζεται η αιώρηση λεπτών σωματιδίων. Η υψηλή αποτελεσματικότητα των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ως προς τη μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης σχετίζεται και με την ιδιότητά τους να μην σχηματίζουν συσσωματώματα. Κατά την εφαρμογή του υγρού στους κόκκους του τσιμέντου, δεν παρατηρήθηκε συσσώρευση του υγρού σε συγκεκριμένες περιοχές της ξηρής σύνθεσης με αποτέλεσμα την ομοιογενή διαβροχή των κόκκων του τσιμέντου. Εκτός από την ιδιότητα των υγρών πρόσθετων να μη σχηματίζουν συσσωματώματα, σημαντικός παράγοντας, για τη μείωση του σχηματισμού σκόνης, είναι η διαβρεκτικότητα (wettability) των χρησιμοποιούμενων υγρών. Σύμφωνα με την εξίσωση Young-Dupré [6.13], όταν η επιφανειακή τάση του υγρού είναι μικρότερη της επιφανειακής τάσης των στερεών βελτιώνεται ο βαθμός διαβροχής των στερεών. Επομένως, στο βαθμό που τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης έχουν μικρότερη επιφανειακή τάση από την τάση της επιφάνειας των κόκκων του τσιμέντου, επιτυγχάνεται ικανοποιητική διαβροχή του τσιμέντου.



Σχήμα 6.10 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου συναρτήσει της περιεκτικότητάς του σε υγρά πρόσθετα.

6.7.3 Σύγκριση της αποτελεσματικότητας των προσθέτων

Τα ποσοστά μείωσης του αριθμού σκόνης του τσιμέντου συναρτήσει της περιεκτικότητάς του σε ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11. Παρατηρείται ότι το πιο αποτελεσματικό πρόσθετο ως προς τη μείωση της σκόνης του τσιμέντου αποδεικνύεται το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β, το οποίο σε ποσοστό 1.50% κ.β. τσιμέντου επιτυγχάνει μείωση της σκόνης κατά 95%. Παρόμοια ποσοστά μείωσης της εκπεμπόμενης σκόνης του τσιμέντου επιτυγχάνονται και με την προσθήκη υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α. Αντίθετα με την κόλλα πλακιδίων (βλ. Κεφάλαιο 5, §5.8.1), τα αποτελέσματα του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης τύπου C είναι εξίσου χαμηλά με τα αποτελέσματα του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α. Από την άλλη, η μείωση της εκπεμπόμενης σκόνης λόγω της προσθήκης των ινών κυτταρίνης τύπου F είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τα υπόλοιπα πρόσθετα. Ως εκ τούτου, τα πιο αποτελεσματικά πρόσθετα για την καταστολή της σκόνης του τσιμέντου είναι τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α και Β, καθώς και οι ίνες κυτταρίνης τύπου C.



Σχήμα 6.11 Ποσοστό μείωσης της σκόνης του τσιμέντου συναρτήσει της περιεκτικότητάς του σε ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

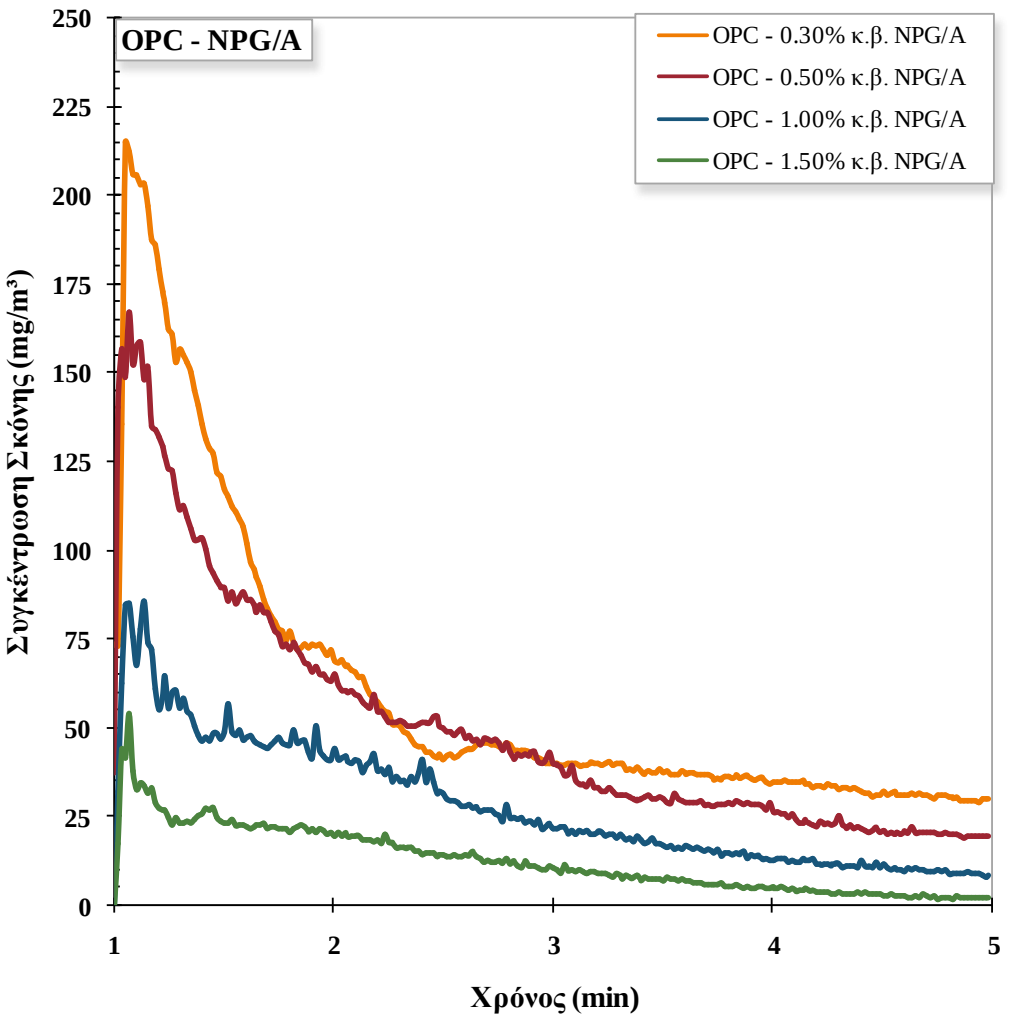
6.8 Συγκέντρωση σκόνης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σκόνης του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου A, B και C με τη χρήση του DustTrak 8520 παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.12, 6.13 & 6.14, αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, ελάχιστα δευτερόλεπτα μετά το πρώτο λεπτό καταγράφεται η υψηλότερη συγκέντρωση σκόνης για την εκάστοτε σύνθεση. Στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης συγκέντρωσης σκόνης του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα σε διάφορες περιεκτικότητες. Σημειώνεται ότι η συγκέντρωση της σκόνης του τσιμέντου αναφοράς δεν περιλαμβάνεται στα σχήματα, διότι η μέτρησή της ήταν δυνατή μετά το πέρας των δέκα λεπτών από τη ρίψη του δείγματος.

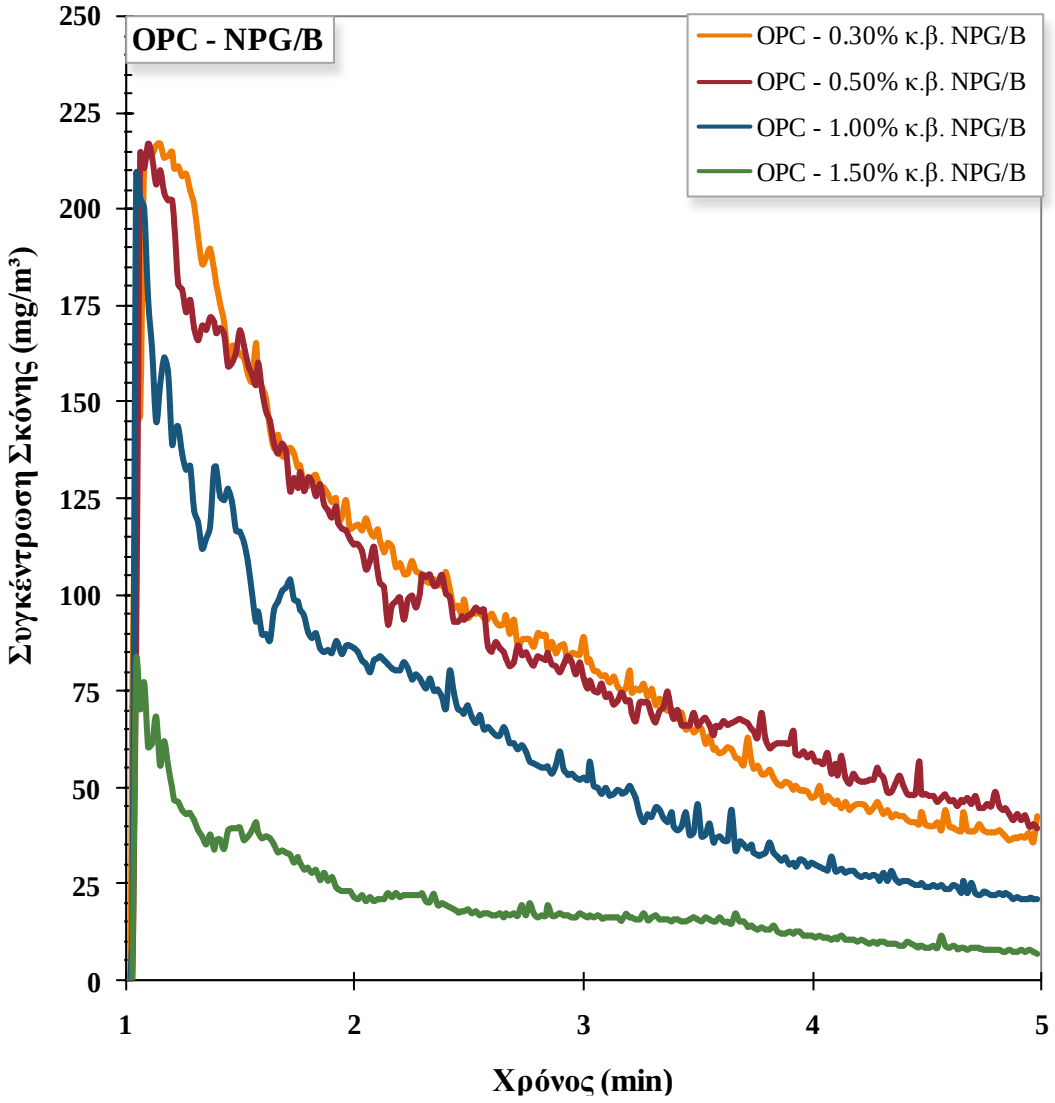
Πίνακας 6.12 Μέγιστη συγκέντρωση σκόνης (mg/m³) του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα.

Τύπος σύνθεσης	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
OPC - NPG/A	214.92	167.38	85.65	53.88
OPC - NPG/C	216.69	216.77	208.97	82.58
OPC - NPG/C	220.35	208.65	212.96	140.08

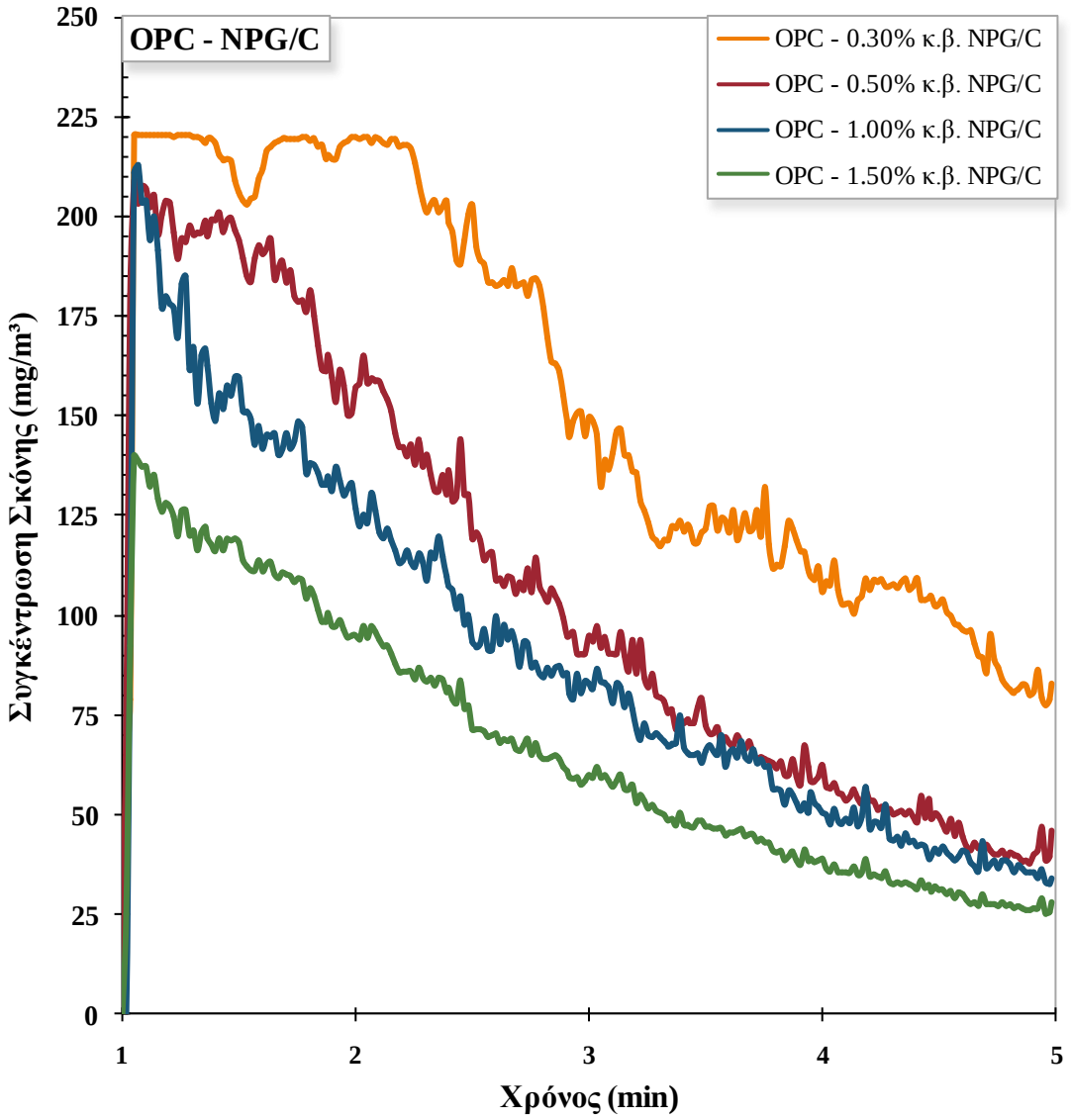
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σκόνης του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα ποιοτικά συμπεράσματα. Το γεγονός ότι η μέτρηση της σκόνης του τσιμέντου ήταν δυνατή μετά το πέρας δέκα λεπτών, ενώ του τσιμέντου με 0.30% κ.β. τσιμέντου υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου A και B ήταν δυνατή από το πρώτο λεπτό φανερώνει, έστω και ποιοτικά, ότι η προσθήκη των επιλεχθέντων υγρών ακόμη και σε μικρή ποσότητα μειώνει την τάση του τσιμέντου να παράγει σκόνη. Αντίθετα, η προσθήκη του υγρού νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C σε ποσοστό 0.30% κ.β. τσιμέντου δεν οδηγεί σε ανάλογη μείωση της συγκέντρωσης της σκόνης δεδομένου ότι παρατηρείται «πλατό» στο διάγραμμα της συγκέντρωσης, έως περίπου τα 2.5 min (Σχήμα 6.14). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης σκόνης του τσιμέντου, το υγρό τύπου C φαίνεται να είναι το λιγότερο αποτελεσματικό.



Σχήμα 6.12 Συγκέντρωση σκόνης του τσιμέντου με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 6.13 Συγκέντρωση σκόνης του τσιμέντου με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 6.14 Συγκέντρωση σκόνης του τσιμέντου με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου C συναρτήσει του χρόνου.

6.9 Κόστος παραγωγής τσιμέντου

Το επιπρόσθετο κόστος για την παραγωγή 1 tn τσιμέντου λόγω της προσθήκης ινών κυτταρίνης και υγρών προσθέτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 6.13 & 6.14, αντίστοιχα. Είναι σαφές ότι οι ίνες κυτταρίνης καθώς και το υγρό τύπου Β αποτελούν την πιο οικονομική λύση. Αντίθετα, η προσθήκη των υγρών τύπου Α και C αυξάνουν σημαντικά το κόστος παραγωγής του τσιμέντου.

Πίνακας 6.13 Επιπρόσθετο κόστος (€/tn) για την παραγωγή τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης.

Τύπος σύνθεσης	**0.30%**	**0.60%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - CFs/C	9.00	18.00	30.00	45.00
CTA - CFs/F	9.06	18.12	30.20	45.30

Πίνακας 6.14 Επιπρόσθετο κόστος (€/tn) για την παραγωγή τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Τύπος σύνθεσης	**0.30%**	**0.50%**	**1.00%**	**1.50%**
CTA - NPG/A	25.80	43.00	86.00	129.00
CTA - NPG/B	8.70	14.50	29.00	43.50
CTA - NPG/C	52.50	87.50	175.00	262.50

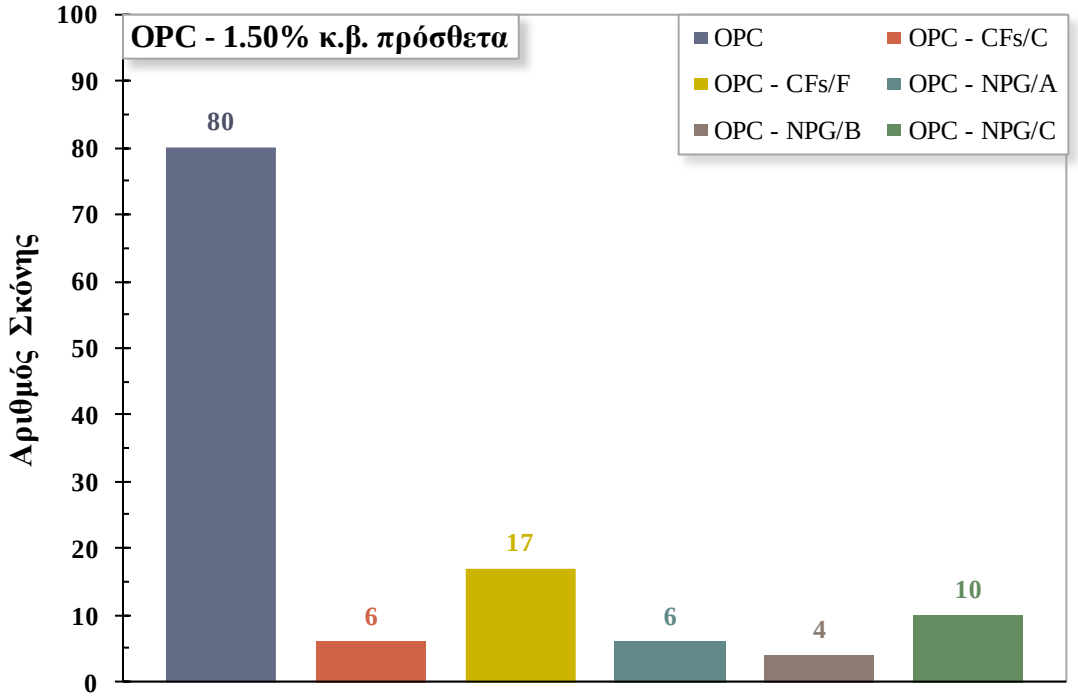
6.10 Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα συμπεράσματα εξάγονται βάσει της αποτελεσματικότητας των επιλεχθέντων προσθέτων ως προς τη μείωση της σκόνης του τσιμέντου. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των προσθέτων στις ιδιότητες του νωπού τσιμεντοπολτού (εξάπλωση, απαίτηση σε νερό, χρόνος αρχής και τέλους πήξης), καθώς και στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού (αντοχή σε κάμψη και θλίψη). Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος των προσθέτων, επιλέγεται το βέλτιστο πρόσθετο για την παραγωγή του τσιμέντου χαμηλής εκπεμπόμενης σκόνης.

- *Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα*

Η προσθήκη των επιλεχθέντων ινών κυτταρίνης και υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης στο τσιμέντο μειώνει την τάση σχηματισμού σκόνης. Σε κάθε περίπτωση, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, τόσο μειώνεται η τάση σχηματισμού σκόνης. Για το λόγο αυτό, οι συνθέσεις του τσιμέντου με

1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τάση σχηματισμού σκόνης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.15. Όσο αφορά στις ίνες κυτταρίνης, πιο αποτελεσματικές αποδείχτηκαν οι ίνες τύπου C, οι οποίες επιτυγχάνουν μία μείωση του αριθμού σκόνης ίση με 92.5%. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, διαπιστώνεται ότι τα πιο αποτελεσματικά υγρά είναι τα υγρά τύπου A και B, τα οποία επιτυγχάνουν μείωση της σκόνης κατά 92.5 και 95%, αντίστοιχα.

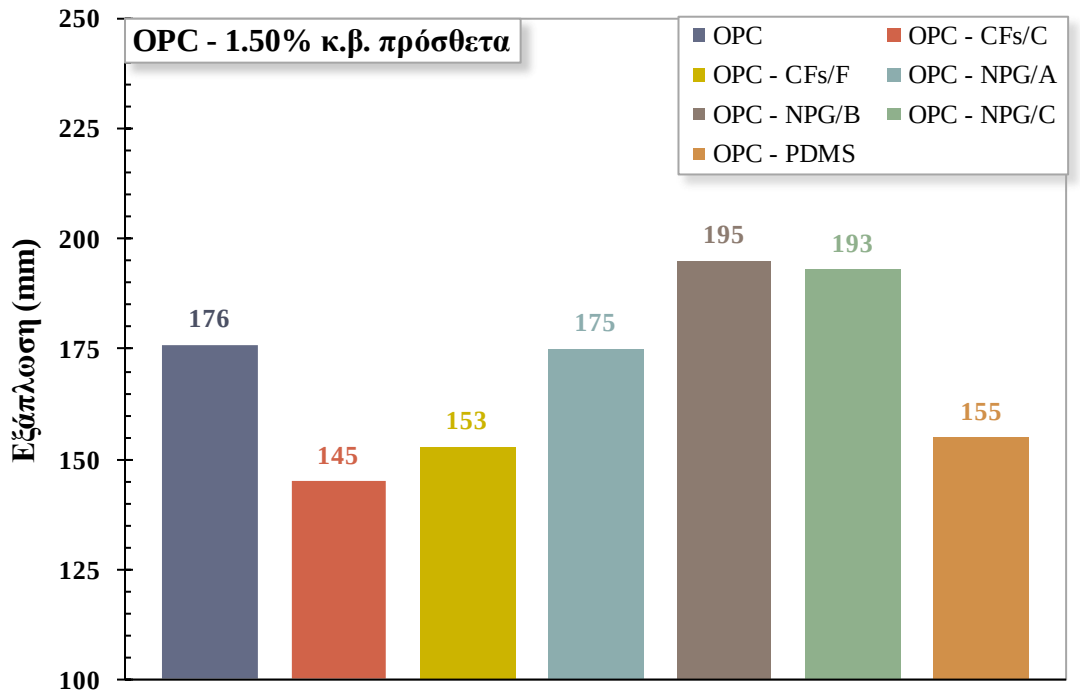


Σχήμα 6.15 Αριθμός σκόνης του τσιμέντου με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

- *Εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα*

Τα αποτελέσματα της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.16. Οι ίνες κυτταρίνης μειώνουν την εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού, τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης είτε τη διατηρούν σταθερή είτε τη βελτιώνουν, ενώ το υγρό σιλικόνης τη μειώνει. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού λόγω της προσθήκης των ινών τύπου C και F κυμαίνεται από 13 έως

17.6%. Το υγρό τύπου A δεν επηρεάζει την εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού, ενώ τα υγρά τύπου B και C τη βελτιώνουν κατά 9.7 και 8.8%, αντίστοιχα. Η προσθήκη του υγρού σιλικόνης σε περιεκτικότητα 1.50% κ.β. τσιμέντου προκαλεί μείωση της εξάπλωσης του νωπού τσιμεντοπολτού κατά 12%. Υπενθυμίζεται ότι κατά την εφαρμογή του υγρού σιλικόνης, προέκυψαν σοβαρά προβλήματα συσσωματώσεων κατά περιοχές του τσιμέντου. Επομένως, όσο αφορά στην εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού, το πιο κατάλληλο πρόσθετο είναι το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου B.



Σχήμα 6.16 Εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα.

- *Απαίτηση σε νερό, χρόνος αρχής και τέλους πήξης και διόγκωση του τσιμέντου με υγρά πρόσθετα*

Η παρουσία των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης ουσιαστικά δεν επηρεάζει την απαίτηση του τσιμέντου σε νερό, καθώς και τον χρόνο αρχής και τέλους πήξης του τσιμεντοπολτού. Επιπλέον, τα υγρά αυτά δεν προκαλούν διόγκωση του τσιμέντου.

- *Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού*

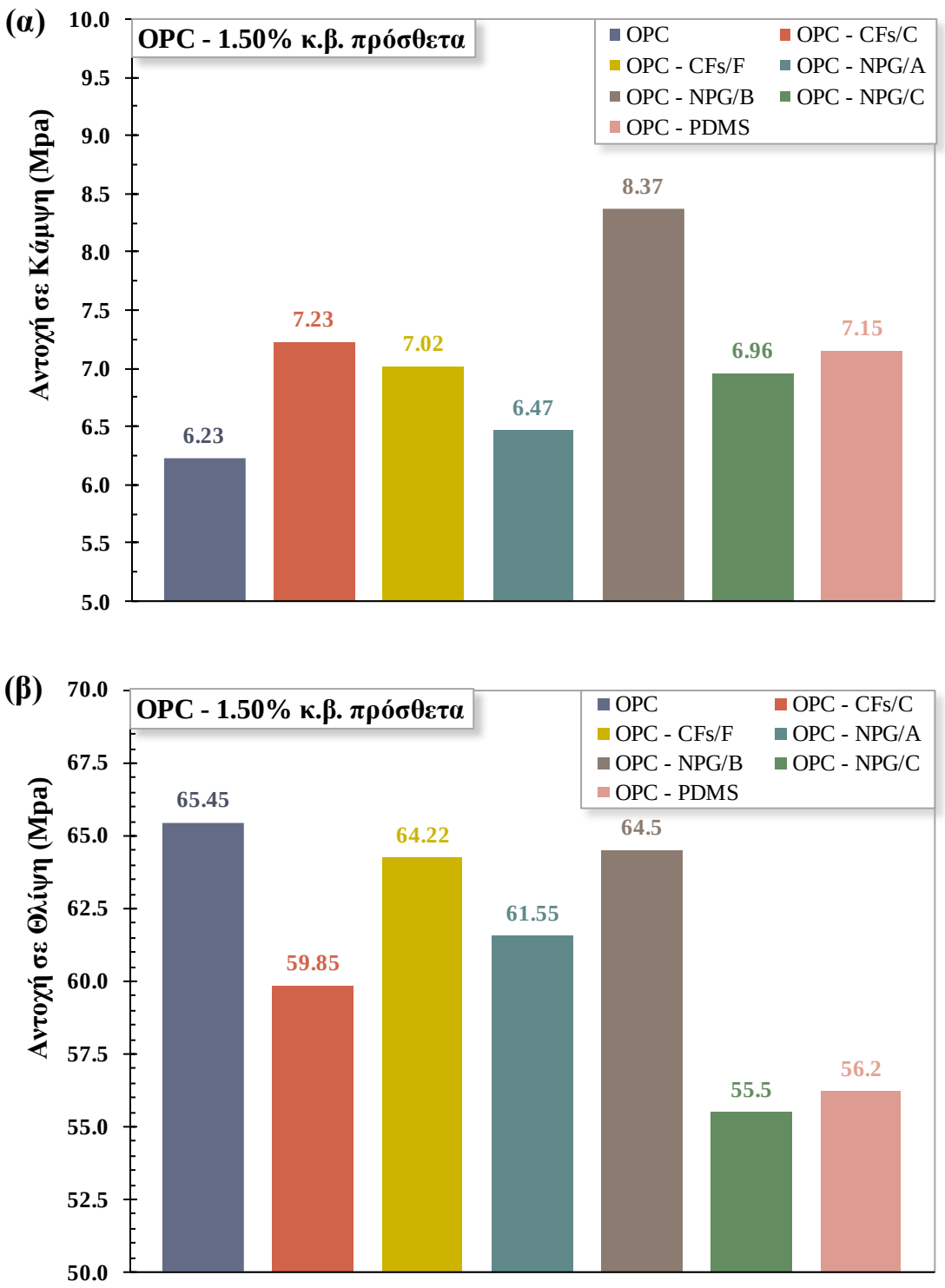
Τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη και θλίψη του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού με ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα σε περιεκτικότητα ίση με 1.50% κ.β. τσιμέντου

παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.17. Τα επιλεχθέντα πρόσθετα βελτιώνουν την αντοχή σε κάμψη του τσιμετοπολτού στην ηλικία των 28 ημερών (Σχήμα 6.17^{α}). Η βελτίωση της καμπτικής αντοχής του τσιμεντοπολτού λόγω της προσθήκης των ινών τύπου C και F είναι 16.1 και 11.3%, αντίστοιχα, ενώ λόγω της προσθήκης των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης κυμαίνεται από 3.9 έως 34.4%. Η μέγιστη βελτίωση της καμπτικής αντοχής αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου B. Αντίθετα, η αντοχή σε θλίψη του τσιμεντοπολτού μειώνεται με την προσθήκη των ινών κυτταρίνης και των υγρών προσθέτων (Σχήμα 6.17^{β}). Η μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της προσθήκης των ινών τύπου C και F είναι 8.6 και 1.9%, αντίστοιχα, ενώ λόγω της προσθήκης των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης κυμαίνεται από 1.5 έως 15.2%. Η ελάχιστη πτώση της θλιπτικής αντοχής (1.5%) αντιστοιχεί στον τσιμεντοπολτό με υγρό τύπου B.

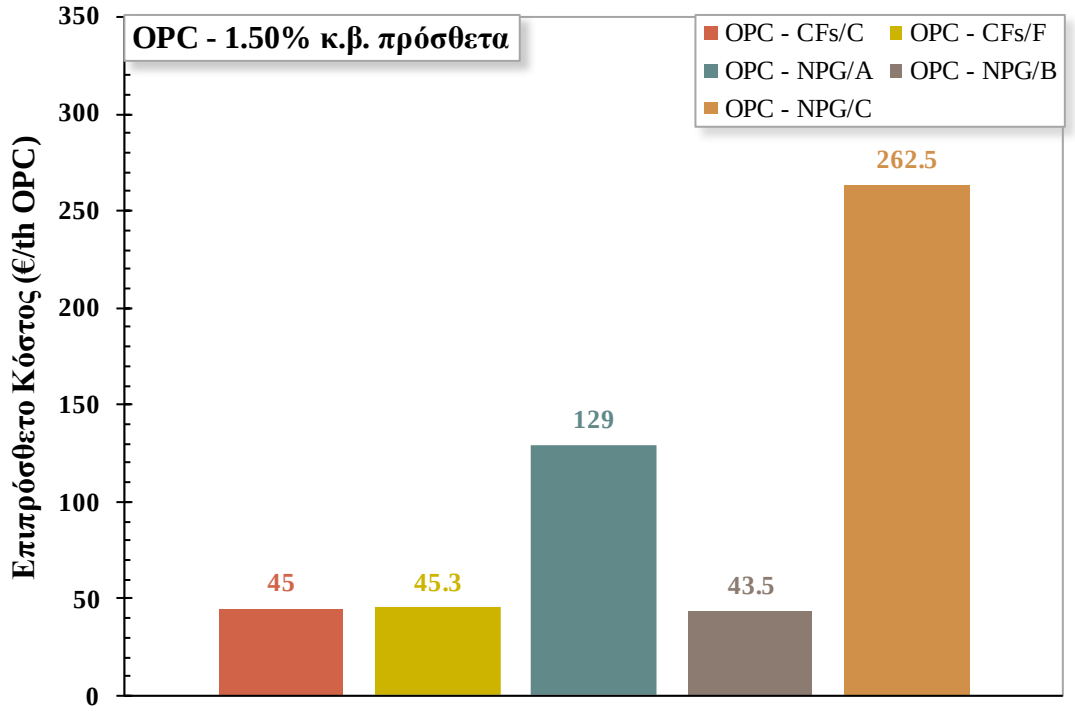
Επομένως, όσο αφορά στις μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου, τα πιο κατάλληλα πρόσθετα είναι οι ίνες τύπου F και το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου B.

- *Κόστος παραγωγής του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης*

Το επιπλέον κόστος για την παραγωγή 1 tn τσιμέντου με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.18. Είναι προφανές ότι οι ίνες κυτταρίνης και το υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου B αποτελούν τις πιο οικονομικές λύσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ίνες τύπου C και το υγρό τύπου B επιτυγχάνουν παρόμοια μείωση της τάσης σχηματισμού σκόνης και έχουν παρόμοιο κόστος, η βέλτιστη επιλογή θα βασιστεί στην επίδρασή τους στις ιδιότητες του τσιμέντου. Οι ίνες τύπου C μειώνουν την εξάπλωση του νωπού τσιμεντοπολτού, καθώς και τη θλιπτική αντοχή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού ηλικίας 28 ημερών, ενώ το υγρό τύπου B βελτιώνει σημαντικά την εργασιμότητα του νωπού τσιμεντοπολτού και διατηρεί σταθερή τη θλιπτική αντοχή του. **Συνεπώς, προτείνεται η παραγωγή του τσιμέντου με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου B, η οποία χαρακτηρίζεται από αριθμό σκόνης ίσο με 4 και επιπλέον κόστος παραγωγής 43.50 €/tn.**



Σχήμα 6.17 Αντοχή σε κάμψη και θλίψη του τσιμεντοπολτού με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες κυτταρίνης και υγρά πρόσθετα στην ηλικία των 28 ημερών.



Σχήμα 6.18 Επιπρόσθετο κόστος (€/tn) για την παραγωγή τσιμέντου με 1.50% κ.β. τσιμέντου ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης.

Βιβλιογραφία

6.1. Soroushian, P., & Marikunte, S. (1990). Reinforcement of cement-based materials with cellulose fibers. *ACI Special Publication*, 124.

6.2. Naik, T.R., Friberg, T.S., & Chun, Y.M. (2004). Use of pulp and paper mill residual solids in production of cellucrete. *Cement and Concrete Research*, *34* (7), 1229-1234.

6.3. Kawashima, S., & Shah, S.P. (2011). Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, *33* (2), 201-208.

6.4. Mello, E., Ribellato, C., & Mohamedelhassan, E. (2014). Improving Concrete Properties with Fibers Addition. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, *8* (3), 249-254.

6.5. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, *22* (5), 379-384.

6.6. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2003). Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, *25* (6), 585-592.

6.7. Khorami, M. & Ganjian, E. (2011). Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials*, *25* (9), 3661-3667.

6.8. Khorami, M. & Ganjian, E. (2013). The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. *Construction and Building Materials*, *46*, 142-149.
6.9. Bentchikou, M., Guidoum, A., Scrivener, K., Silhadi, K., & Hanini, S. (2012). Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. *Construction and Building Materials*, *34*, 451-456.
6.10. Claramunt, J., Ardanuy, M., Parés, F., & Ventura, H. (2013). Mechanical performance of cement mortar composites reinforced with cellulose fibres. *Composite Science and Technology*.
6.11. Savastano, H., Warden, P.G., & Coutts, R.S.P. (2003). Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, *25* (3), 311-319.
6.12. Soroushian, P., Elzafraney, M., Nossoni, A., & Chowdhury, H. (2006). Evaluation of normal-weight and light-weight fillers in extruded cellulose fiber cement products. *Cement and Concrete Composites*, *28* (1), 69-76.
6.13. Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 65-87.

Μέρος Γ

Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η ανάπτυξη δομικών υλικών με βάση το τσιμέντο που να χαρακτηρίζονται από χαμηλή τάση σχηματισμού σκόνης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι ινών κυτταρίνης, καθώς και υγρά πρόσθετα. Ως υλικά αναφοράς επιλέχτηκαν μία εμπορικά διαθέσιμη κόλλα πλακιδίων με βάση το τσιμέντο και ένα τυπικό τσιμέντο Portland. Η έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάδειξη του βέλτιστου πρόσθετου ως προς τη μείωση της τάσης των δομικών υλικών να σχηματίζουν σκόνη σε συνδυασμό με τη διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Παράλληλα, η επιλογή του βέλτιστου πρόσθετου πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη και την επιβάρυνση του κόστους παραγωγής των δομικών υλικών λόγω της χρήσης των προσθέτων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σκόνης της κόλλας πλακιδίων με τα επιλεχθέντα πρόσθετα υπέδειξαν ότι οι ίνες κυτταρίνης και τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνουν σημαντικά την τάση σχηματισμού σκόνης. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της κόλλας πλακιδίων σε ίνες κυτταρίνης και υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης, τόσο μειώνεται ο σχηματισμός σκόνης από την κόλλα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης της κόλλας πλακιδίων με ίνες κυτταρίνης, τη βέλτιστη απόδοση ως προς

τον περιορισμό της σκόνης παρουσίασαν οι ίνες τύπου Β, οι οποίες σε ποσοστό 1.50% κ.β. κόλλας, επιτυγχάνουν μείωση της σκόνης κατά 84%. Ακόμη πιο υψηλή αποτελεσματικότητα επιδεικνύουν τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α και Β, τα οποία, σε ποσοστό 1.50% κ.β. κόλλας, επιτυγχάνουν μείωση του αριθμού σκόνης κατά 94 και 96%, αντίστοιχα. Η απόδοση αυτή των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης αποδίδεται στην ιδιότητά τους να μη συσσωματώνονται, καθώς και στην υψηλή διαβρεκτικότητά τους. Η προσρόφηση των υγρών εστέρων στην επιφάνεια των κόκκων της ξηρής κόλλας πλακιδίων αυξάνει το βάρος τους με αποτέλεσμα οι κόκκοι να καθιζάνουν και μη σχηματίζεται αιωρούμενη σκόνη. Σε γενικές γραμμές, η παρουσία των ινών κυτταρίνης τύπου Β και των υγρών νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Α και Β δεν υποβαθμίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της κόλλας πλακιδίων. Επομένως, βάσει της αποτελεσματικότητας των υποψήφιων προσθέτων ως προς τη μείωση της σκόνης της κόλλας πλακιδίων και της επιβάρυνσης του κόστους παραγωγής της, ως βέλτιστο πρόσθετο αναδεικνύεται το υγρό τύπου Β. **Ως εκ τούτου, προτείνεται η παραγωγή κόλλας πλακιδίων με 1.50% κ.β. κόλλας υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β, η οποία χαρακτηρίζεται από αριθμό σκόνης ίσο με 4 και επιβάρυνση του κόστους παραγωγής κατά 43.50 €/tn.**

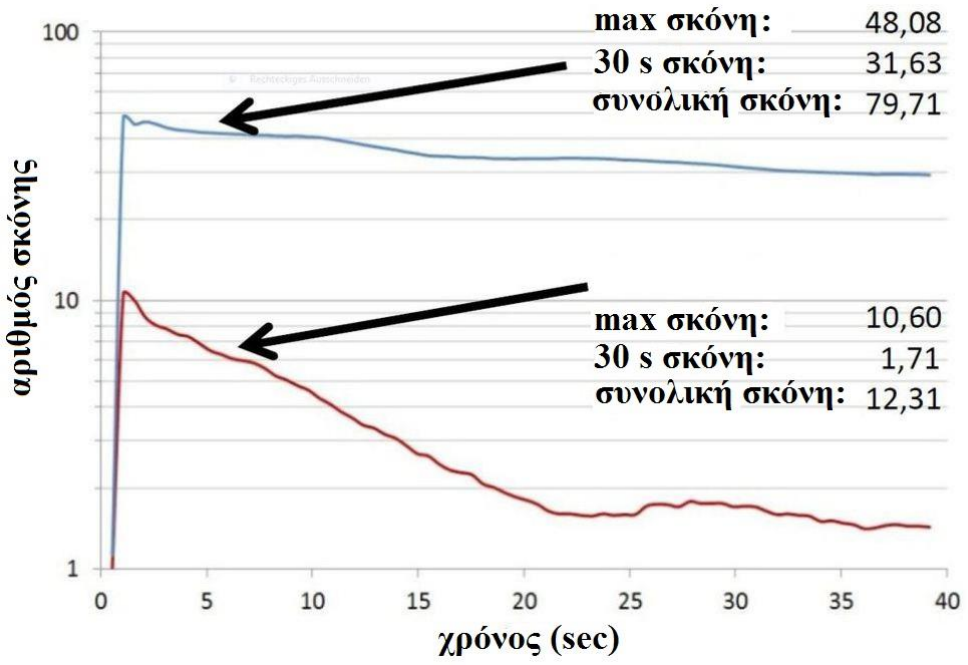
Ομοίως, οι ίνες κυτταρίνης και τα υγρά νεοπεντυλο-γλυκόλης μειώνουν την τάση του τσιμέντου να σχηματίζει σκόνης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού σκόνης του τσιμέντου με ίνες κυτταρίνης, τη βέλτιστη απόδοση ως προς τον περιορισμό της σκόνης παρουσίασαν οι ίνες τύπου C, οι οποίες σε ποσοστό 1.50% κ.β. τσιμέντου, επιτυγχάνουν μείωση της σκόνης κατά 93%. Η υψηλή απόδοση των ινών τύπου C αποδίδεται στο μικρό τους μήκος (~60 μm) και την κοκκώδη μορφή τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά των ινών τύπου C διευκολύνουν την ανάμειξη των ινών με το τσιμέντο, παρέχοντας τη μέγιστη δυνατή διαθέσιμη επιφάνεια ινών για τη δέσμευση των λεπτών σωματιδίων του τσιμέντου. Όσο αφορά στα υγρά πρόσθετα, τα υγρά τύπου Α και Β αποδείχθηκαν τα πιο αποτελεσματικά ως προς τη μείωση της σκόνης του τσιμέντου. Συγκριτικά με το τσιμέντο αναφοράς, το τσιμέντο με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό τύπου Α και Β παρουσίασε χαμηλότερη τάση σχηματισμού σκόνης κατά 93 και 95%, αντίστοιχα. Παρόλο που οι μηχανικές ιδιότητες των τσιμέντων με υγρό τύπου Α και υγρό τύπου Β είναι παρόμοιες, η χρήση του υγρού τύπου Α δε συνιστάται λόγω υψηλού κόστους του. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παρουσία των ινών τύπου C μειώνει την εργασιμότητα και τη θλιπτική αντοχή του τσιμέντου, ενώ το υγρό τύπου Β βελτιώνει την εργασιμότητα και δεν

επηρεάζει τη θλιπτική αντοχή του, ως βέλτιστο πρόσθετο αναδεικνύεται το υγρό τύπου Β. **Ως εκ τούτου, προτείνεται η παραγωγή τσιμέντου με 1.50% κ.β. τσιμέντου υγρό νεοπεντυλο-γλυκόλης τύπου Β, το οποίο χαρακτηρίζεται από αριθμό σκόνης ίσο με 4 και επιβάρυνση του κόστους παραγωγής κατά 43.50 €/tn.**

Παράρτημα

Πίνακας 1 Αποτελέσματα μέτρησης του αριθμού σκόνης με τη χρήση του DustView II της εταιρείας Palas.

OPC	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Μ.Ο.
Σκόνη στα 0.5 sec	48	50	51	49.7
Σκόνη στα 30 sec	20	24	26	23.3
Συνολικός αριθμός σκόνης	68	74	77	**73**



Σχήμα 1 Αποτελέσματα μέτρησης του αριθμού σκόνης δύο διαφορετικών συνθέσεων τσιμέντου με τη χρήση του DustView II της εταιρείας Palas.

Πίνακας 2 Αποτελέσματα μέτρησης της συγκέντρωσης σκόνης με τη χρήση του DustTrack 8520 της εταιρείας TSI.

α/α	**Ημερομηνία** (dd-MM-yyyy)	**Χρόνος** (hh:mm:ss)	**Συγκέντρωση σκόνης** (mg/m³)
1	01/07/2015	14:38:43	2.837
2	01/07/2015	14:38:44	2.689
3	01/07/2015	14:38:45	2.463
4	01/07/2015	14:38:46	2.726
5	01/07/2015	14:38:47	2.999
6	01/07/2015	14:38:48	2.82
7	01/07/2015	14:38:49	2.721
8	01/07/2015	14:38:50	2.238
9	01/07/2015	14:38:51	2.538
10	01/07/2015	14:38:52	2.522
11	01/07/2015	14:38:53	2.409
12	01/07/2015	14:38:54	3.803
13	01/07/2015	14:38:55	2.762
14	01/07/2015	14:38:56	2.964
15	01/07/2015	14:38:57	2.833
16	01/07/2015	14:38:58	2.728
17	01/07/2015	14:38:59	2.479
18	01/07/2015	14:39:00	3.874
19	01/07/2015	14:39:01	2.995
20	01/07/2015	14:39:02	2.773
21	01/07/2015	14:39:03	2.388
22	01/07/2015	14:39:04	2.494
23	01/07/2015	14:39:05	2.42
24	01/07/2015	14:39:06	2.652
25	01/07/2015	14:39:07	2.18
26	01/07/2015	14:39:08	2.273
27	01/07/2015	14:39:09	2.316
28	01/07/2015	14:39:10	3.392
29	01/07/2015	14:39:11	2.396
30	01/07/2015	14:39:12	2.592
31	01/07/2015	14:39:13	2.541
32	01/07/2015	14:39:14	2.596
33	01/07/2015	14:39:15	2.75
34	01/07/2015	14:39:16	2.622
35	01/07/2015	14:39:17	3.186
36	01/07/2015	14:39:18	2.629
37	01/07/2015	14:39:19	2.498
38	01/07/2015	14:39:20	2.259
39	01/07/2015	14:39:21	2.306
40	01/07/2015	14:39:22	2.776
41	01/07/2015	14:39:23	2.55
42	01/07/2015	14:39:24	2.327
43	01/07/2015	14:39:25	2.789
44	01/07/2015	14:39:26	2.412

45	01/07/2015	14:39:27	2.546
46	01/07/2015	14:39:28	2.459
47	01/07/2015	14:39:29	2.371
48	01/07/2015	14:39:30	2.234
49	01/07/2015	14:39:31	2.226
50	01/07/2015	14:39:32	2.374
51	01/07/2015	14:39:33	2.415
52	01/07/2015	14:39:34	2.754
53	01/07/2015	14:39:35	2.233
54	01/07/2015	14:39:36	2.335
55	01/07/2015	14:39:37	2.107
56	01/07/2015	14:39:38	2.257
57	01/07/2015	14:39:39	2.619
58	01/07/2015	14:39:40	2.074
59	01/07/2015	14:39:41	2.273
60	01/07/2015	14:39:42	2.097
61	01/07/2015	14:39:43	2.094
62	01/07/2015	14:39:44	3.033
63	01/07/2015	14:39:45	18.412
64	01/07/2015	14:39:46	37.675
65	01/07/2015	14:39:47	43.079
66	01/07/2015	14:39:48	26.487
67	01/07/2015	14:39:49	23.494
68	01/07/2015	14:39:50	29.257
69	01/07/2015	14:39:51	28.751
70	01/07/2015	14:39:52	31.116
71	01/07/2015	14:39:53	23.762
72	01/07/2015	14:39:54	23.108
73	01/07/2015	14:39:55	19.699
74	01/07/2015	14:39:56	18.536
75	01/07/2015	14:39:57	17.528
76	01/07/2015	14:39:58	17.553
77	01/07/2015	14:39:59	15.43
78	01/07/2015	14:40:00	15.508
79	01/07/2015	14:40:01	12.433
80	01/07/2015	14:40:02	10.549
81	01/07/2015	14:40:03	8.924
82	01/07/2015	14:40:04	7.562
83	01/07/2015	14:40:05	8.078
84	01/07/2015	14:40:06	6.178
85	01/07/2015	14:40:07	7.559
86	01/07/2015	14:40:08	8.197
87	01/07/2015	14:40:09	9.488
88	01/07/2015	14:40:10	9.892
89	01/07/2015	14:40:11	9.631
90	01/07/2015	14:40:12	8.222
91	01/07/2015	14:40:13	7.646
92	01/07/2015	14:40:14	8.611
93	01/07/2015	14:40:15	7.556

94	01/07/2015	14:40:16	8.567
95	01/07/2015	14:40:17	8.767
96	01/07/2015	14:40:18	8.203
97	01/07/2015	14:40:19	8.291
98	01/07/2015	14:40:20	7.809
99	01/07/2015	14:40:21	6.713
100	01/07/2015	14:40:22	6.416
101	01/07/2015	14:40:23	7.048
102	01/07/2015	14:40:24	5.962
103	01/07/2015	14:40:25	5.787
104	01/07/2015	14:40:26	7.343
105	01/07/2015	14:40:27	7.844
106	01/07/2015	14:40:28	5.749
107	01/07/2015	14:40:29	6.003
108	01/07/2015	14:40:30	6.24
109	01/07/2015	14:40:31	5.871
110	01/07/2015	14:40:32	5.502
111	01/07/2015	14:40:33	5.283
112	01/07/2015	14:40:34	6.663
113	01/07/2015	14:40:35	5.758
114	01/07/2015	14:40:36	6.275
115	01/07/2015	14:40:37	7.155
116	01/07/2015	14:40:38	9.222
117	01/07/2015	14:40:39	6.491
118	01/07/2015	14:40:40	5.28
119	01/07/2015	14:40:41	6.021
120	01/07/2015	14:40:42	5.161
121	01/07/2015	14:40:43	6.081
122	01/07/2015	14:40:44	6.134
123	01/07/2015	14:40:45	5.483
124	01/07/2015	14:40:46	5.386
125	01/07/2015	14:40:47	5.355
126	01/07/2015	14:40:48	5.348
127	01/07/2015	14:40:49	4.838
128	01/07/2015	14:40:50	5.871
129	01/07/2015	14:40:51	5.539
130	01/07/2015	14:40:52	5.119
131	01/07/2015	14:40:53	5.27
132	01/07/2015	14:40:54	4.854
133	01/07/2015	14:40:55	4.782
134	01/07/2015	14:40:56	4.753
135	01/07/2015	14:40:57	6.372
136	01/07/2015	14:40:58	4.641
137	01/07/2015	14:40:59	6.836
138	01/07/2015	14:41:00	5.589
139	01/07/2015	14:41:01	6.006
140	01/07/2015	14:41:02	4.948
141	01/07/2015	14:41:03	5.227
142	01/07/2015	14:41:04	4.838

143	01/07/2015	14:41:05	4.462
144	01/07/2015	14:41:06	5.214
145	01/07/2015	14:41:07	5.003
146	01/07/2015	14:41:08	4.183
147	01/07/2015	14:41:09	5.111
148	01/07/2015	14:41:10	4.747
149	01/07/2015	14:41:11	4.058
150	01/07/2015	14:41:12	4.735
151	01/07/2015	14:41:13	5.158
152	01/07/2015	14:41:14	4.723
153	01/07/2015	14:41:15	5.029
154	01/07/2015	14:41:16	4.547
155	01/07/2015	14:41:17	4.469
156	01/07/2015	14:41:18	4.569
157	01/07/2015	14:41:19	4.675
158	01/07/2015	14:41:20	4.462
159	01/07/2015	14:41:21	4.239
160	01/07/2015	14:41:22	3.783
161	01/07/2015	14:41:23	4.384
162	01/07/2015	14:41:24	5.655
163	01/07/2015	14:41:25	4.33
164	01/07/2015	14:41:26	4.224
165	01/07/2015	14:41:27	4.309
166	01/07/2015	14:41:28	4.4
167	01/07/2015	14:41:29	4.054
168	01/07/2015	14:41:30	5.215
169	01/07/2015	14:41:31	4.49
170	01/07/2015	14:41:32	4.453
171	01/07/2015	14:41:33	4.797
172	01/07/2015	14:41:34	3.789
173	01/07/2015	14:41:35	3.668
174	01/07/2015	14:41:36	4.121
175	01/07/2015	14:41:37	4.252
176	01/07/2015	14:41:38	3.666
177	01/07/2015	14:41:39	3.563
178	01/07/2015	14:41:40	3.634
179	01/07/2015	14:41:41	3.521
180	01/07/2015	14:41:42	3.871
181	01/07/2015	14:41:43	3.798
182	01/07/2015	14:41:44	3.684
183	01/07/2015	14:41:45	3.857
184	01/07/2015	14:41:46	3.878
185	01/07/2015	14:41:47	3.729
186	01/07/2015	14:41:48	3.745
187	01/07/2015	14:41:49	3.372
188	01/07/2015	14:41:50	3.825
189	01/07/2015	14:41:51	3.499
190	01/07/2015	14:41:52	3.068
191	01/07/2015	14:41:53	2.953

192	01/07/2015	14:41:54	3.367
193	01/07/2015	14:41:55	3.099
194	01/07/2015	14:41:56	3.661
195	01/07/2015	14:41:57	3.219
196	01/07/2015	14:41:58	3.192
197	01/07/2015	14:41:59	3.352
198	01/07/2015	14:42:00	3.024
199	01/07/2015	14:42:01	3.2
200	01/07/2015	14:42:02	2.992
201	01/07/2015	14:42:03	2.915
202	01/07/2015	14:42:04	3
203	01/07/2015	14:42:05	2.796
204	01/07/2015	14:42:06	3.075
205	01/07/2015	14:42:07	2.247
206	01/07/2015	14:42:08	2.638
207	01/07/2015	14:42:09	2.795
208	01/07/2015	14:42:10	2.253
209	01/07/2015	14:42:11	2.691
210	01/07/2015	14:42:12	2.844
211	01/07/2015	14:42:13	2.324
212	01/07/2015	14:42:14	2.569
213	01/07/2015	14:42:15	2.628
214	01/07/2015	14:42:16	2.165
215	01/07/2015	14:42:17	2.513
216	01/07/2015	14:42:18	2.311
217	01/07/2015	14:42:19	2.013
218	01/07/2015	14:42:20	1.944
219	01/07/2015	14:42:21	2.083
220	01/07/2015	14:42:22	2.261
221	01/07/2015	14:42:23	2.477
222	01/07/2015	14:42:24	1.933
223	01/07/2015	14:42:25	2.097
224	01/07/2015	14:42:26	2.272
225	01/07/2015	14:42:27	2.047
226	01/07/2015	14:42:28	1.947
227	01/07/2015	14:42:29	1.879
228	01/07/2015	14:42:30	1.934
229	01/07/2015	14:42:31	1.938
230	01/07/2015	14:42:32	1.776
231	01/07/2015	14:42:33	1.795
232	01/07/2015	14:42:34	2.015
233	01/07/2015	14:42:35	1.848
234	01/07/2015	14:42:36	1.976
235	01/07/2015	14:42:37	1.72
236	01/07/2015	14:42:38	1.88
237	01/07/2015	14:42:39	1.888
238	01/07/2015	14:42:40	1.782
239	01/07/2015	14:42:41	1.56
240	01/07/2015	14:42:42	2.217

241	01/07/2015	14:42:43	1.717
242	01/07/2015	14:42:44	1.714
243	01/07/2015	14:42:45	1.666
244	01/07/2015	14:42:46	1.573
245	01/07/2015	14:42:47	1.99
246	01/07/2015	14:42:48	1.734
247	01/07/2015	14:42:49	1.413
248	01/07/2015	14:42:50	1.812
249	01/07/2015	14:42:51	1.661
250	01/07/2015	14:42:52	1.654
251	01/07/2015	14:42:53	1.429
252	01/07/2015	14:42:54	1.451
253	01/07/2015	14:42:55	1.433
254	01/07/2015	14:42:56	1.349
255	01/07/2015	14:42:57	1.344
256	01/07/2015	14:42:58	1.391
257	01/07/2015	14:42:59	2.124
258	01/07/2015	14:43:00	1.376
259	01/07/2015	14:43:01	1.298
260	01/07/2015	14:43:02	1.259
261	01/07/2015	14:43:03	1.178
262	01/07/2015	14:43:04	1.024
263	01/07/2015	14:43:05	1.306
264	01/07/2015	14:43:06	1.097
265	01/07/2015	14:43:07	1.295
266	01/07/2015	14:43:08	1.271
267	01/07/2015	14:43:09	1.107
268	01/07/2015	14:43:10	1.346
269	01/07/2015	14:43:11	1.321
270	01/07/2015	14:43:12	1.2
271	01/07/2015	14:43:13	1.137
272	01/07/2015	14:43:14	1.157
273	01/07/2015	14:43:15	1.254
274	01/07/2015	14:43:16	1.048
275	01/07/2015	14:43:17	0.974
276	01/07/2015	14:43:18	1.528
277	01/07/2015	14:43:19	1.241
278	01/07/2015	14:43:20	1.093
279	01/07/2015	14:43:21	1.096
280	01/07/2015	14:43:22	0.971
281	01/07/2015	14:43:23	1.062
282	01/07/2015	14:43:24	1.17
283	01/07/2015	14:43:25	1.093
284	01/07/2015	14:43:26	0.867
285	01/07/2015	14:43:27	0.964
286	01/07/2015	14:43:28	1.044
287	01/07/2015	14:43:29	1.005
288	01/07/2015	14:43:30	1.093
289	01/07/2015	14:43:31	1.101

290	01/07/2015	14:43:32	0.953
291	01/07/2015	14:43:33	1.062
292	01/07/2015	14:43:34	0.999
293	01/07/2015	14:43:35	0.971
294	01/07/2015	14:43:36	0.902
295	01/07/2015	14:43:37	1.22
296	01/07/2015	14:43:38	1.084
297	01/07/2015	14:43:39	0.957
298	01/07/2015	14:43:40	0.859
299	01/07/2015	14:43:41	1.123
300	01/07/2015	14:43:42	0.874