ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

« ΓΕΩΤΕΓΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μεθοδολογία σύνθεσης σκυροδεμάτων τα οποία καταπονούνται σε κάμψη»

Ιωάννα Κλάδου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Κ. ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ

ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Μ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια τόσο διεθνώς όσο και στην χώρα μας παρατηρείται αφενός μεν αύξηση του αριθμού των κατασκευαζόμενων δαπέδων από σκυρόδεμα αφετέρου δε εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο εξελιγμένες διατάξεις αποθήκευσης και διακίνησης των εμπορευμάτων, γεγονός που προκαλεί σημαντική αύξηση των απαιτήσεων που τίθενται στις προδιαγραφές κατασκευής και στις μεθόδους υπολογισμού. Για την υλοποίηση των παραπάνω απαιτούνται ουσιαστικά αντίστοιχες μελέτες συνθέσεως σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις αυτού του τύπου σκυροδέματος.

Η διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζει όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονται ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης μελέτης συνθέσεως σκυροδέματος που καταπονείται σε κάμψη. Καταρχήν παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των σκυροδεμάτων, οι απαιτήσεις των επιμέρους συστατικών, οι δοκιμές ελέγχου κ.λ.π. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη και οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

Επιπλέον στα πλαίσια αυτής της εργασίας κατασκευάστηκε ένα αυτοματοποιημένο πρόγραμμα μέσω του οποίου μπορούν να γίνονται εύκολα και αξιόπιστα οι υπολογισμοί της μελέτης συνθέσεως σκυροδέματος που καταπονείται σε κάμψη.

Table of Contents

1 Εισαγωγή 4
2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος 6
2.1 Τσιμέντο 7
2.1.1 Είδη τσιμέντου 8
2.2 Αδρανή 9
2.2.1 Γενικά 9
2.2.2 Προέλευση των αδρανών υλικών 9
2.2.3 Φυσικά χαρακτηριστικά αδρανών 11
2.3 Νερό 17
2.3.1 Γενικά 17
2.3.2 Πιθανές πηγές νερού στο σκυρόδεμα 17
2.3.3 Ποιότητα νερού. 17
2.3.4 Προκαταρκτικοί έλεγχοι (EN 1008) 18
2.3.5 Χημικές ουσίες 18
2.4 Χημικά πρόσθετα 20
2.4.1 Γενικά 20
2.4.2 Κατηγορίες πρόσθετων 20
2.5 Πρόσθετα σκυροδέματος / Υποκατάστατα (ποζολάνες, βιομηχανικά παραπροϊόντα κλπ.) 22
2.5.1 Γενικά 22
3 Νωπό Σκυρόδεμα 24
3.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος 24
3.1.1 Εργασιμότητα 24
3.1.2 Επιβράδυνση / Σκυροδέτηση σε υψηλές θερμοκρασίες. 25
3.1.3 Επιτάχυνση πήξης / σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες. 27
3.1.4 Συνεκτικότητα 28
3.1.5 Εξίδρωση 29
3.1.6 Φινίρισμα 29
3.1.7 Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος 30

3.1.8 Περιεχόμενος αέρας 31
3.1.9 Αντλησιμότητα 31
3.1.10 Συνοχή / διαχωρισμός υλικών μίγματος 32
3.1.11 Θερμοκρασία νωπού σκυροδέματος 32
3.1.12 Λόγος νερού/τσιμέντου 32
3.1.13 Ωρίμανση 33
3.1.14 Μέθοδοι ωρίμανσης 35
3.1.15 Περίοδος ωρίμανσης 36
3.2 Έλεγχοι νωπού σκυροδέματος 37
3.2.1 Δειγματοληψία 37
3.2.2 Έλεγχος συνεκτικότητας με τη δοκιμή κάθισης 38
3.2.3 Έλεγχος συνεκτικότητας βάσει βαθμού συμπύκνωσης. 39
3.2.4 Έλεγχος της συνεκτικότητας βάσει διαμέτρου εξάπλωσης 39
3.2.5 Προσδιορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος 40
3.2.6 Προσδιορισμός του περιεχόμενου αέρα 41
4. Σκληρυνθεν σκυρόδεμα 42
4.1 Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος. 42
4.1.1 Θλιπτική αντοχή 42
4.1.2 Αντοχή σε κάμψη 42
4.1.3 Αντοχή σε Εφελκυσμό 44
4.1.4 Στεγανότητα 45
4.1.5 Συρρίκνωση 46
4.1.6 Αντοχή σε θειικά 47
4.1.7 Χημική αντοχή 47
4.1.8 Αντοχή σε τριβή 48
4.1.9 Ανάπτυξη θερμότητας ενυδάτωσης 48
4.1.10 Αντίδραση αλκαλίων-αδρανών 50
4.2 Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος 51
4.2.1 Έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος στο έργο 51
4.2.2 Έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος στο εργαστήριο 53
5 Μελέτη συνθέσεως σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη 62

5.1 Απαιτήσεις Αδρανών 64
5.2 Συνδυασμός αδρανών 65
5.3 Απαιτήσεις τσιμέντου 67
5.4 Απαιτήσεις νερού 69
5.5 Διαδικασία προσδιορισμού σύστασης μελέτης σκυροδέματος 69
5.5.1 Τρόποι μέτρησης συνοχής 69
5.5.2 Απαιτούμενη ποσότητα νερού 70
5.5.3 Προσδιορισμός αέρα στο ανάμιγμα. 71
5.5.4 Προσδιορισμός λόγου νερού τσιμέντου w/c 72
5.5.5 Υπολογισμός ποσότητας χονδρόκοκκων αδρανών. 75
5.6 Υπολογισμοί 76
5.7 Αριθμητικό παράδειγμα 77
5.7.1 Χαρακτηριστικά ζητούμενου σκυροδέματος. 77
5.7.2 Βήματα υπολογισμών 77
5.7.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων 84
5.8 Αυτοματοποίηση διαδικασίας υπολογισμών μελέτης συνθέσεως. 84
5.8.1 Παρουσίαση προγράμματος υπολογισμών 84
5.8.2. Διαγράμματα Ροής 90
5.8 Εφαρμογή προτεινόμενης μεθοδολογίας σε πραγματικές συνθήκες. 93
5.8.1 Καταλληλότητα αδρανών 93
5.8.2 Καταληλλότητα τσιμέντου. 97
5.8.3 Καταλληλότητα νερού 98
5.8.4 Υπολογισμοί σύνθεσης 99
5.8.5 Εφαρμογή στο πεδίο 102
6. Συμπεράσματα 106
7. Βιβλιογραφία. 108

1 Εισαγωγή

Στη διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού μελέτης συνθέσεων για σκυροδέματα που καταπονούνται σε κάμψη, καθώς και ένα πρόγραμμα αυτοματοποιημένου υπολογισμού σύμφωνα με το πρότυπο ACI 211.3R-02 και την προδιαγραφή UFGS-32 13 11. Τέτοιου είδους σκυροδέματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε δάπεδα.

Η δημιουργία αξιόπιστης μελέτης συνθέσεως που ικανοποιεί τις ανάγκες του έργου αποτελεί μεν ένα μόνο μικρό κομμάτι από ολόκληρη τη διαδικασία σκυροδέτησης, αλλά είναι εξίσου σημαντική και καθοριστική για όλη την πορεία του έργου. Μια λάθος σύνθεση σκυροδέματος μπορεί να έχει ως συνέπεια ένα σκυρόδεμα μη εργάσιμο, δύσκολο στο φινίρισμα, με χαμηλές τελικές αντοχές και μεγάλη περατότητα.

Στην ελληνική βιβλιογραφία υπάρχει ένα μεγάλο κενό όσον αφορά τα σκυροδέματα που καταπονούνται σε κάμψη, ενώ στη διεθνή, τα τελευταία χρόνια γίνεται μια προσπάθεια να καλυφθούν τα κενά που υπάρχουν, αφού πλέον έχει γίνει κατανοητή η σημασία της μελέτης συνθέσεως τέτοιου είδους σκυροδεμάτων αλλά και η διαφοροποιήσεις από τις κοινές μελέτες συνθέσεως.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να καλύψει αυτό το κενό, δημιουργώντας έναν πλήρη οδηγό, όπου ο αναγνώστης θα μπορεί να είναι σε θέση να δημιουργήσει μία σωστή μελέτης συνθέσεως για τέτοιου είδους σκυροδέματα. Για να γίνει όμως αυτό ο αναγνώστης θα πρέπει να είναι γνώστης των βασικών αρχών και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, οι οποίες παρουσιάζονται στα αρχικά κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας δίνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τα συστατικά του σκυροδέματος, τα αδρανή, το τσιμέντο, το νερό καθώς και τα χημικά πρόσμικτα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το νωπό σκυρόδεμα, οι ιδιότητες του και οι έλεγχοι που μπορούν να γίνουν σε αυτό. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος αλλά και οι έλεγχοι που μπορούν να γίνουν σε αυτό εργαστηριακοί και πεδίου.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι απαιτήσεις των σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη, η διαδικασία προσδιορισμού της μελέτης συνθέσεως, αριθμητικό παράδειγμα υπολογισμών, αλλά και αποτελέσματα μίας μελέτης συνθέσεως που δημιουργήθηκε σύμφωνα με αυτή τη διπλωματική εργασία σε πραγματικές συνθήκες έργου.

Σε καμία περίπτωση όμως δεν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5. Οι αρχικές δοκιμές στο εργαστήριο θα δώσουν μία πρώτη εικόνα για την εργασιμότητα, την περιεκτικότητα σε αέρα και τις αντοχές του συγκεκριμένου σκυροδέματος. Σε περιπτώσεις που δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις,

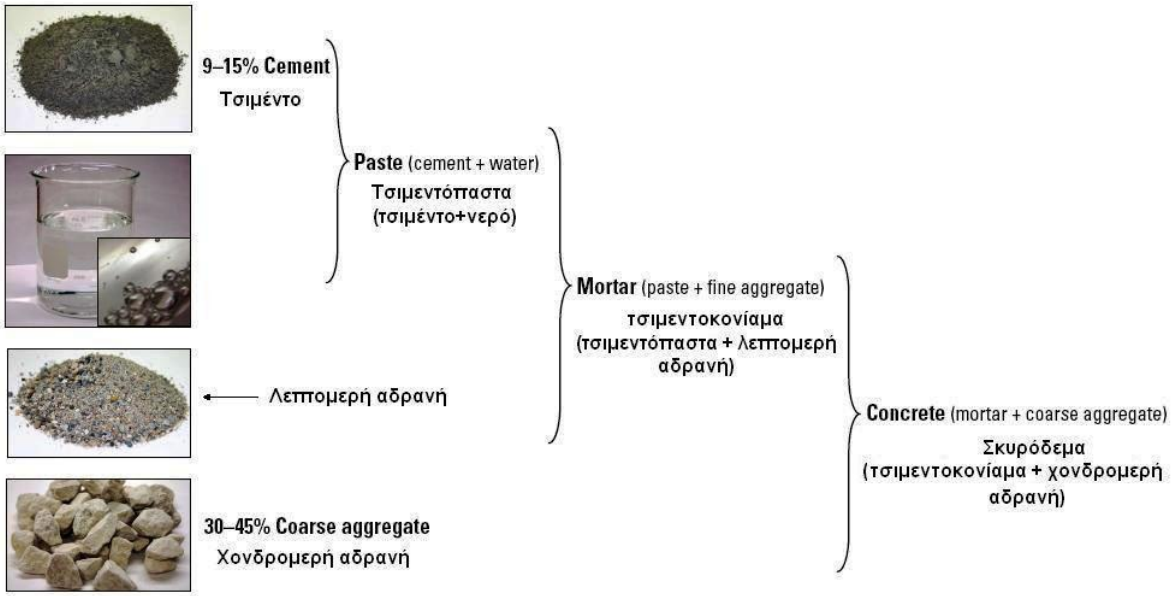
αλλαγές γίνονται συνήθως στον λόγο νερού τσιμέντου αλλά και τις ποσότητες των προσμίκτων. Είναι αναγκαίο μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω εργασιών στο εργαστήριο, να δημιουργούνται δοκιμαστικά αναμίγματα στο πεδίο ώστε να παρατηρείται η συμπεριφορά του σκυροδέματος στην πράξη.

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε επιτυχώς στη δημιουργία μελέτης συνθέσεως σκυροδέματος για δάπεδο αεροδρομίου στα Χανιά, Κρήτης, τα αποτελέσματα του οποίου όμως δεν μπορούν να δημοσιευτούν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς τα χημικά πρόσμικτα. Θεωρείται ότι η χρήση τους γίνεται σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή στις απαιτούμενες ποσότητες που ορίζει.

2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό δομικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη αδρανών, τσιμέντου, νερού ενώ σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να περιέχει άλλα τσιμεντοειδή υλικά ή/και χημικά πρόσθετα (Εικόνα 2.1).[1]



Εικόνα 2.1: Πρώτες ύλες σκυροδέματος (Τσακαλάκης, 2010)

Το τσιμέντο και τα αδρανή, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του σκυροδέματος, πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των αντίστοιχων κανονισμών.

Το κοινό σκυρόδεμα θεωρείται πρακτικά ως υλικό δύο φάσεων. Το τσιμέντο αποτελεί την πρώτη φάση, στην οποία είναι διασκορπισμένα τα αδρανή υλικά τα οποία αποτελούν τη δεύτερη φάση. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από τις ιδιότητες των δύο φάσεων, καθώς και από την αναλογία ανάμιξης των υλικών κατ' όγκο.

Η επιλογή των αναλογιών στη σύνθεση του σκυροδέματος πρέπει να εξασφαλίζει μία ισορροπία μεταξύ οικονομίας, αντοχής, εργασιμότητα, διάρκεια στο χρόνο, πυκνότητας και εμφάνισης. Ενώ η βαρύτητα στο κάθε στοιχείο καθορίζεται από τις ανάγκες της μελέτης αλλά και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα γίνεται η σκυροδέτηση.

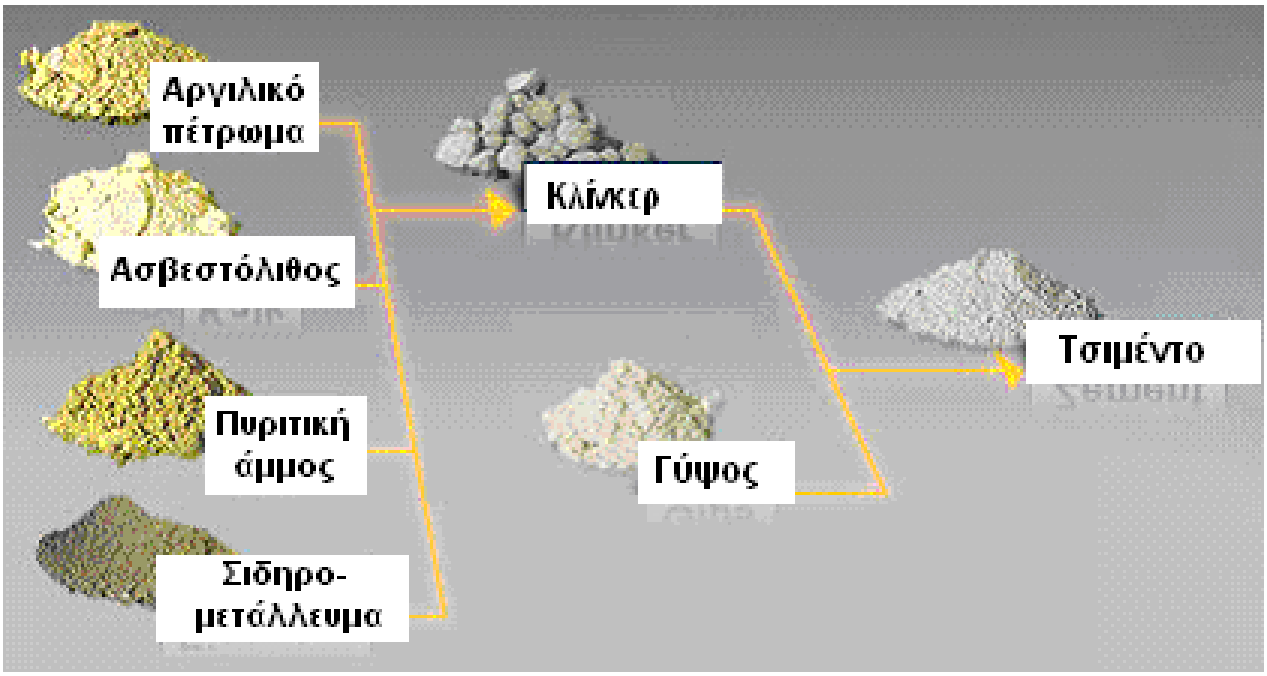
Η δυνατότητα προσαρμογής κάθε φορά στις απαιτήσεις του κάθε έργου προήλθε ύστερα από πολλές τεχνολογικές εφευρέσεις που πραγματοποιήθηκαν από το 1900 και

[1] Τα στοιχεία στο κεφάλαιο αυτό έχουν ληφθεί κυρίως από τις ακόλουθες πηγές: Taylor et al. 2006, Τσακαλάκης 2010, Κορωναίος και Πούλακος 2006.

μετά. Η χρήση του δείκτη νερού/τσιμέντου (w/c), σαν εργαλείο για τον προσδιορισμό της αντοχής χρησιμοποιήθηκε το 1918. Η θεαματική αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος στη διάρκεια του χρόνου μετά την προσθήκη αέρα έγινε στις αρχές του 1940. Τα παραπάνω όπως και πολλές άλλες ανακαλύψεις κυρίως στον τομέα των χημικών προσθέτων είναι ένα πολύτιμο εργαλείο στα χέρια του μηχανικού ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του κάθε έργου.

2.1 Τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι υδραυλική λεπτόκοκκη κονία που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό για την παραγωγή σκυροδέματος (υδραυλικές ονομάζονται οι κονίες που όταν αναμιχθούν με το νερό πήζουν και σκληραίνουν). Ο τσιμεντοπολτός (όπως ονομάζεται το αναμεμιγμένο με νερό τσιμέντο) πήζει και σκληραίνει μέσω της ενυδάτωσης, τόσο στον αέρα, όσο και εμβαπτισμένος σε νερό. Μετά την σκλήρυνση δεν διαλύεται στο νερό. Τα βασικά συστατικά για παραγωγή τσιμέντου τύπου Portland είναι ασβεστολιθικά και αργιλικά πετρώματα, τα οποία αφού αναμιχθούν σε προκαθορισμένες αναλογίες υποβάλλονται σε όπτηση στους 1450°C περίπου. Από τη διαδικασία αυτή παραλαμβάνεται το κλίνκερ, το οποίο ακολούθως αλέθεται ώστε να αποκτήσει την τελική γνωστή λεπτότητα του τσιμέντου. (Εικόνα 2.2) Συνδυάζει μεγάλη υδραυλική ικανότητα και υψηλές αντοχές, για αυτό έχει ευρεία χρήση στις δομικές κατασκευές όπως επίσης και στα υδραυλικά έργα.



Εικόνα 2.2: Βασικά συστατικά τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010)

2.1.1 Είδη τσιμέντου

Ο διαχωρισμός των ειδών του τσιμέντου μπορεί να χωριστεί ανάλογα με τις πρώτες ύλες που παράγεται ή με βάση την αντοχή τους.

2.1.1.1 Ανάλογα με τις πρώτες ύλες:

- Τύπου Ι – Πόρτλαντ: Καθαρά τσιμέντα πόρτλαντ χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα τα οποία προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου, και στα οποία επιτρέπεται η προσθήκη μέχρι 3% προϊόντων που προέρχονται από θραύση η κονιοποίηση φυσικών τεχνητών ή τεχνικών υλικών, όπως ασβεστόλιθων, βασάλτου, σκουριών, μπετονιτών, ιπτάμενης τέφρας κ.α.

- Τύπου ΙΙ – Πόρτλαντ με ποζολάνη: χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ πόρτλαντ, ποζολάνης φυσικής ή τεχνητής και του απαραίτητου γύψου. Το ποσοστό ποζολάνης καθορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου, το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20%. Δεν είναι απαραίτητο να ικανοποιούν τη δοκιμή ποζολανικότητας. Ειδικά το τσιμέντο με 10% αδιάλυτο υπόλειμμα ονομάζεται τσιμέντο πόρτλαντ ελληνικού τύπου.

- Τύπου ΙΙΙ- Ποζολανικό: Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ πόρτλαντ, ποζολάνης φυσικής ή τεχνητής και του απαραίτητου γύψου. Το ποσοστό ποζολάνης καθορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου, το οποίο πρέπει να είναι μεταξύ 20% και 40%. Πρέπει να ικανοποιούν τη δοκιμή ποζολανικότητας. Τα τσιμέντα αυτά χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για ογκώδη έργα, όπου απαιτείται χαμηλός αριθμός θερμότητας ενυδάτωσης ή βελτιωμένη αντοχή στα διαβρωτικά μέσα.

- Τύπου IV – Πόρτλαντ ανθεκτικό στα θειικά: είναι τσιμέντα ανθεκτικά στα θειικά άλατα και στο θαλάσσιο νερό και προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ πόρτλαντ και γύψου. Το αργιλικό τριασβέστιο C_3A πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5% και η περιεκτικότητα σε SO_3 να μην ξεπερνά το 2,5%.

2.1.1.2 Ανάλογα με την αντοχή τους:

Τα τσιμέντα, ανάλογα με την αντοχή τους κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1: κατηγορίες του τσιμέντου ανάλογα με την αντοχή του σε θλίψη

Κατηγορία αντοχών (ονομαστική)	Αντοχή σε θλίψη σε MPa			
	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών	
	Ελάχιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
35	-	15	25	45
45	10	-	35	55
55	15	-	45	Χωρίς όριο

2.2 Αδρανή

2.2.1 Γενικά

Τα αδρανή είναι υλικά, τα οποία προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση ή την τεχνητή θραύση των πετρωμάτων, καθώς και διάφορα υλικά, όπως σκουριές από υψικαμίνους, βιομηχανικά παραπροϊόντα κ.α. Αποτελούνται από συμπαγείς κόκκους του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους. Τα αδρανή του σκυροδέματος αποτελούν κατά προσέγγιση το 80% του συνολικού βάρους του σκυροδέματος και καταλαμβάνουν το 70-75% του όγκου του. Χρήση κατάλληλου μεγέθους και κατάλληλης ποιότητας αδρανών βελτιώνει την ποιότητα του σκυροδέματος.

Τα πετρώματα, από τα οποία προέρχονται τα θραυστά αδρανή για την παρασκευή του σκυροδέματος, πρέπει να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα και σταθερότητα στο χρόνο, να έχουν ισχυρή πρόσφυση με τον τσιμεντοπολτό και η συμβατική αντοχή τους πρέπει να είναι τουλάχιστον 45-65 MPa. Δηλαδή, τα πετρώματα αυτά πρέπει να είναι άριστης ποιότητας, γιατί από αυτά εξαρτάται η τελική αντοχή των δομικών έργων στις στατικές καταπονήσεις και στις επιδράσεις του περιβάλλοντος και των χημικών ουσιών.

2.2.2 Προέλευση των αδρανών υλικών

Τα αδρανή υλικά, τα οποία προέρχονται από πετρώματα, διακρίνονται σε συλλεκτά και σε θραυστά αδρανή.

2.2.2.1 Συλλεκτά Αδρανή

Συλλεκτά είναι τα αδρανή που δημιουργούνται από τη φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων, η οποία οφείλεται στις μεταβολές διάφορων καιρικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, ο αέρας, η δημιουργία παγετού κ.α. Τα αδρανή αυτά προέρχονται συνήθως από πετρώματα μειωμένης αντοχής και με τη μορφή χαλικιών και άμμου, συλλέγονται στις όχθες των λιμνών και των ποταμών, καθώς και στις παραθαλάσσιες περιοχές (Εικόνα 2.3).

Εικόνα 2.3: Συλλεκτά αδρανή

2.2.2.2 Θραυστά αδρανή

Τα θραυστά αδρανή λαμβάνονται από τη θραύση των πετρωμάτων με τεχνητό τρόπο. Μια ποσότητα λαμβάνεται από τα λιθοσυντρίμματα, όπως ονομάζονται τα μεγάλα κομμάτια που προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων με διάμετρο μεγαλύτερη από 63 mm. Τα λιθοσυντρίμματα ρίχνονται σε τριβεία άμμου και αφού κοσκινιστούν με τη σειρά των πρότυπων κόσκινων λαμβάνεται η άμμος δόμησης, η οποία είναι προφανώς μειωμένης αντοχής. Τα θραυστά υλικά, όμως, λαμβάνονται συνήθως από πετρώματα που κόβονται στα λατομεία με τη βοήθεια σπαστήρων. Τα κομμάτια ρίχνονται σε τριβεία άμμου και σε θραυστήρες πετρωμάτων και λαμβάνονται οι διάφορες κατηγορίες αδρανών από την πρωτοβάθμια θραύση. Τα κομμάτια με διαστάσεις μεγαλύτερες από 63mm ξαναρίχνονται σε τριβεία και σε θραυστήρες και λαμβάνονται τα αδρανή από τη δευτεροβάθμια θραύση, τα οποία είναι αυξημένης αντοχής (Εικόνα 2.4).

Εικόνα 2.4: Θραυστά αδρανή

2.2.2.3 Ανακυκλωμένα αδρανή

Τα ανακυκλωμένα αδρανή δημιουργούνται από ανακύκλωση υπάρχων σκυροδεμάτων (Εικόνα 2.5) Αφού αφαιρεθούν τυχόν οπλισμοί και άλλα ξένα αντικείμενα το υλικό μεταφέρεται σε σπαστήρες όπου ακολουθεί την ίδια διαδικασία με τα θραυστά αδρανή. Τα χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών είναι παρόμοια με αυτά των θραυστών. Παρόλα αυτά δεν ενδείκνυνται για παραγωγή λεπτών κλασμάτων για παραγωγή σκυροδέματος καθώς έχουν πολύ μεγάλες απαιτήσεις σε νερό. Ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με θραυστά αδρανή. Η ποιότητα του σκυροδέματος που παρασκευάζεται με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών εξαρτάται από την ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών. Συνήθως τα ανακυκλωμένα αδρανή είναι πιο μαλακά από τα φυσικά αδρανή και μπορεί να έχουν υψηλές περιεκτικότητες σε

αλκαλικά και χλωρίδια. Επιπλέον σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερο πορώδες οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερη απορρόφηση νερού.

Εικόνα 2.5: Ανακυκλωμένα αδρανή

2.2.3 Φυσικά χαρακτηριστικά αδρανών

Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες που μπορούν να ελέγχονται σε μία πηγή αδρανών είναι η κοκκομετρία τους, το σχήμα των κόκκων, η απορροφητικότητα τους και η αντοχή τους. Οι απαιτήσεις στα μεγέθη αυτά καθορίζονται κάθε φορά σε συνδυασμό με την ισχύουσες προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του έργου.

2.2.3.1 Κοκκομετρία αδρανών

Η κοκκομετρία αδρανών ουσιαστικά είναι μια διαβάθμιση του υλικού βάση το μέγεθος των κόκκων του που καθορίζεται ύστερα από κοσκίνιση του υλικού από κόσκινα διαφορετικής διαμέτρου. Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να γίνει με δύο σειρές κοσκίνων τα γερμανικά και τα αμερικάνικα. Το ποια από τις δύο σειρές πρέπει να ακολουθείται καθορίζεται από τις προδιαγραφές του έργου. Στην παρούσα εργασία ακολουθείται η αμερικάνικη σειρά.

Τα αδρανή χωρίζονται σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα.

- Χονδρόκοκκα χαρακτηρίζονται τα αδρανή που παραμένον στο κόσκινο Νο 4 (4,75 mm) ενώ ο μέγιστος κόκκος τους κυμαίνεται σε 9.5 με 37.5 mm.
- Λεπτόκοκκα χαρακτηρίζονται τα αδρανή που διέρχονται από το κόσκινο Νο 4.

2.2.3.2 Λεπτόκοκκα αδρανή

Γενικά η αύξηση της ποσότητας λεπτόκοκκων αδρανών στο μίγμα αυξάνει και τις απαιτήσεις σε νερό. Η ποσότητα των λεπτόκοκκων που περνάνε τα κόσκινα 300 μm και 150 μm επηρεάζουν την ποσότητα νερού στο μίγμα, την εργασιμότητα, την τελική επιφάνεια, και την περιεκτικότητα σε αέρα. Για το λόγο αυτό τα περισσότερα πρότυπα επιτρέπουν 5 με 10% διερχόμενο του κοσκίνου των 300 μm.

Άλλες απαιτήσεις για τα λεπτόκοκκα αδρανή σύμφωνα με τα αμερικάνικα πρότυπα ASTMC 33 / AASHTO M6 είναι:

- Τα λεπτόκοκκα δεν πρέπει να έχουν περισσότερο από 45% παραμένουν σε δύο οποιαδήποτε συνεχόμενα κόσκινα.
- Ο δείκτης λεπτότητας δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 2,3 και μεγαλύτερος από 3,1 και να μην διαφέρει περισσότερο από 0,2 από την τυπική του λατομείου από όπου προέρχεται. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση τα λεπτόκοκκα πρέπει να απορρίπτονται ή να γίνονται τροποποιήσεις στην ποσότητα τους.

Ο Δείκτης Λεπτότητας (Fineness Modulus FM) υπολογίζεται αθροίζοντας το επί τοις εκατό παραμένον βάρος σε μία σειρά κοσκίνων διαιρεμένο με 100. Η σειρά των κοσκίνων είναι 150μm (#100) , 300μm (#50), 600μm (#30), 1.18mm (#16), 2.36mm (#8), 4,75mm (#4). Ο δείκτης λεπτότητας δεν είναι μοναδικός και διαφορετικά μείγματα αδρανών μπορούν να έχουν το ίδιο δείκτη. Παρόλα αυτά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποσότητας του κάθε κλάσματος αδρανών στο μείγμα.

2.2.3.3 Χονδρόκοκκα αδρανή

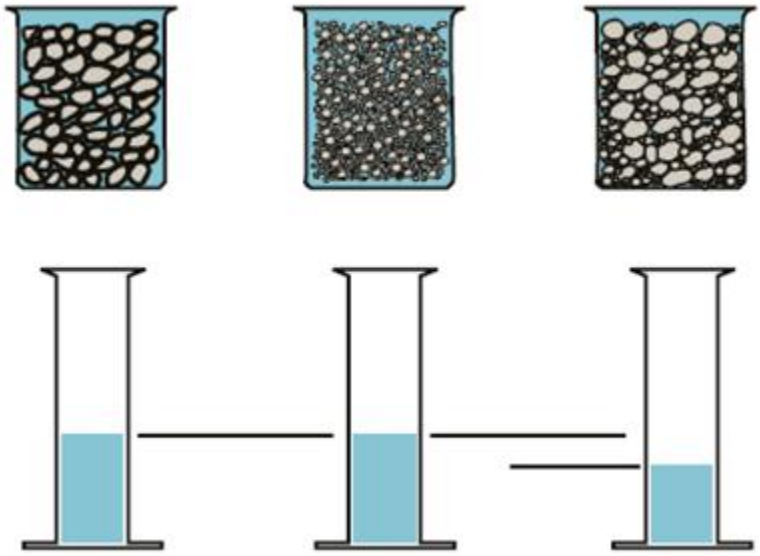
Οι απαιτήσεις ως προς τη διαβάθμιση των χονδρόκοκκων αδρανών καθορίζονται από το αμερικάνικο πρότυπο ASTMC 33 / AASHTO M80. Το συγκεκριμένο πρότυπο επιτρέπει μία ευρεία κλίμακα ως προς το μέγεθος και τη διαβάθμιση των χονδρόκοκκων. Όσο το ποσοστό του λεπτόκοκκου ως προς το συνολικό βάρος των αδρανών παράγει ένα σκυρόδεμα με καλή εργασιμότητα, το μέγεθος του μέγιστου κόκκου μπορεί να τροποποιείται χωρίς να αυτό να δημιουργεί κάποιοι αισθητή διαφοροποίηση στις απαιτήσεις νερού του μίγματος.

Ο μέγιστος κόκκος αδρανών συνήθως καθορίζεται από:

- διαθεσιμότητα στην τοπική αγορά
- πυκνότητα του οπλισμού και το πάχος του παρασκευασμένου δομικού στοιχείου
- δυνατότητα του εξοπλισμού να διαχειριστεί το παραγόμενο σκυρόδεμα.

2.2.3.4 Διαβάθμιση μίγματος αδρανών

Τα αδρανή καθώς είναι πιο σταθερά ως προς τη χημική τους σύσταση και τις διαστάσεις του από την τσιμεντόπαστα είναι σημαντικό να μεγιστοποιείται η ποσότητα αδρανών στο μίγμα (σε συνδυασμό της απαραίτητης ποσότητας πάστα που χρειάζεται ώστε να εξασφαλιστεί εργασιμότητα στο δείγμα). Το παραπάνω επιτυγχάνεται επιλέγοντας την βέλτιστη διαβάθμιση της κοκκκομετρίας των αδρανών. Η βέλτιστη διαβάθμιση εξασφαλίζει μία ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών κλασμάτων ώστε τα μικρά κλάσματα να καλύπτουν τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων και να εξασφαλίζει το μέγιστο δυνατό όγκο αδρανών (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Επίτευξη μέγιστου δυνατού όγκου αδρανών με χρήση κατάλληλης κοκκκομετρίας (Taylor et al. 2006)

Επιπλέον οι απαιτήσεις στην ποσότητα νερού επηρεάζονται από τις ιδιότητες των αδρανών. Για την επίτευξη ενός σκυροδέματος με εργασιμότητα απαιτείται πάστα που να καλύπτει την επιφάνεια των αδρανών. Πιθανή περίσσεια νερού οδηγεί σε προβλήματα όπως μείωση της αντοχής του σκυροδέματος και αύξηση της περατότητας του. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η καλή διαβάθμιση των αδρανών, καθώς για παράδειγμα τα λεπτόκοκκα απαιτούν περισσότερη πάστα καθώς έχουν μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας / όγκου. Μια μόνο καλή διαβάθμιση λεπτόκοκκου ή χονδρόκοκκου δεν είναι αρκετή όμως καθώς αυτό που δίνει τις τελικές ιδιότητες στο σκυρόδεμα είναι η τελική κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών (Abrams 1924). Ένα καλά διαβαθμισμένο ανάμιγμα αδρανών με μια ομοιόμορφη κοκκομετρική καμπύλη θα δώσει ένα σκυρόδεμα με καλύτερη συμπεριφορά από ένα με σπασίματα στην καμπύλη του. Ο Crouch (2000) έδειξε με τις μελέτες του ότι σε σκυροδέματα που περιείχαν αέρα ο δείκτης νερού τσιμέντου μπορεί να μειωθεί περισσότερο από 8% χρησιμοποιώντας αδρανή με ομοιόμορφη κοκκομετρία.

Ο συνδυασμός διαφορετικών αδρανών σε σωστή αναλογία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μίας καμπύλης κοντά στις απαιτήσεις. Η τέλεια κοκκομετρία δεν υπάρχει στην παραγωγή παρά μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις, παρόλα αυτά δοκιμαστικά αναμίγματα μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τέλος μίγματα με καλύτερη διαβάθμιση έχουν μικρότερη περατότητα, και συρρίκνωση, ενώ έχουν πιο εύκολη διάστρωση και φινιρίσματα και είναι πιο οικονομικά.

2.2.3.5 Σχήμα αδρανών

Το σχήμα των αδρανών μπορεί να χαρακτηριστεί κυβικό-γωνιώδες (cubic), επίπεδο (flat), ή επίμηκες (elongated). Αδρανή οποιοδήποτε σχήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή σκυροδέματος αν πληρούν τις υπόλοιπες απαιτήσεις ως προς αντοχή, διαπερατότητα κ.α. παρόλα αυτά μετά από μελέτες πεδίου έχουν προκύψει τα παρακάτω:

- Σε σκυροδέματα δαπέδων προτιμώνται γωνιώδη-κυβικά αδρανή καθώς δίνουν μεγαλύτερες καμπτικές αντοχές.
- Επίπεδα ή επιμήκη αδρανή είναι πιθανόν να μειώσουν την εργασιμότητα λόγω μεταξύ τους εμπλοκής στο πλαστικό στάδιο του σκυροδέματος. Ιδιαίτερα στα μεγέθη 9.5mm (3/8 in.) και 2.36mm (#8 κόσκινο).

2.2.3.6 Επιφανειακή δομή αδρανών

Αδρανή οποιασδήποτε επιφάνειας, από λεία μέχρι τραχεία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία σκυροδεμάτων αρκεί να είναι σε σωστές αναλογίες. Παρόλα αυτά μία τραχεία επιφάνεια είναι πλεονέκτημα στα σκυροδέματα που ελέγχονται σε κάμψη καθώς δημιουργούν καλύτερο δεσμό με την τσιμεντόπαστα.

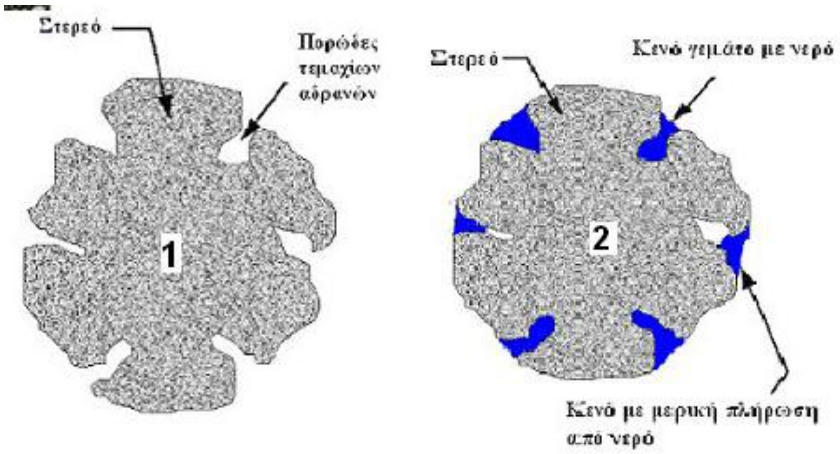
2.2.3.7 Απορροφητικότητα Αδρανών

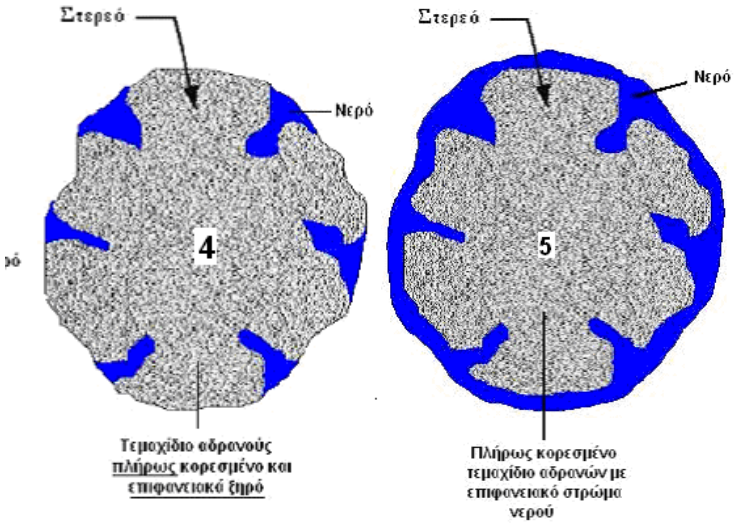
Τα τεμάχια των αδρανών μπορούν να περιέχουν νερό στο εσωτερικό τους και επίσης εξωτερική επιφανειακή υγρασία, που οφείλονται στο χώρο και τον τρόπο αποθήκευσής τους. Το πορώδες των αδρανών δίνει τη δυνατότητα απορρόφησης νερού από τα ξηρά αδρανή, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το διαθέσιμο νερό που είναι απαραίτητο για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου, δημιουργώντας ένα στεγνό σκυρόδεμα με χαμηλή εργασιμότητα. Αντιθέτως, εάν τα αδρανή έχουν περίσσεια νερού (στο εσωτερικό τους αλλά και στην επιφάνειά τους), συνεισφέρουν νερό για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης οδηγώντας στην παρασκευή σκυροδεμάτων με μη ομοιομορφία και με μεγάλες διακυμάνσεις στην ποιότητα. Για το λόγο αυτό είναι πολύ βασικό να υπολογίζεται στην παραγωγή η υγρασία των αδρανών πριν την παρασκευή σκυροδέματος και να γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις στην ποσότητα του νερού.

Με βάση τα παραπάνω, τα τεμαχίδια των αδρανών διακρίνονται στις παρακάτω τέσσερεις κατηγορίες, όσον αφορά στην κατάσταση τους από πλευράς υγρασίας (Εικόνα 2.7).

- Τελείως ξηρά (Oven-dry ή OD); χωρίς καθόλου υγρασία δηλαδή έχουν υποστεί ολοκληρωτική ξήρανση
- Μερικώς ξηρά (Air-dry ή AD); όπου οι εσωτερικοί τους πόροι είναι μερικώς γεμάτοι με νερό, ενώ η επιφάνειά τους είναι ξηρή.
- Τεμάχια με πόρους γεμάτους με νερό (Saturated-surface-dry ή SSD); ενώ η επιφάνειά τους δεν έχει υγρασία.
- Τεμάχια με πόρους γεμάτους με νερό (Damp ή Wet); ενώ η επιφάνειά τους είναι καλυμμένη με στρώμα (φιλμ) νερού.

Η τιμές απορροφητικότητας διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο των αδρανών από μηδέν μέχρι 7% της ξηρής μάζας των αδρανών για φυσικά αδρανή. Παρόλα αυτά οι τιμές συνήθως κυμαίνονται για τον ελληνικό χώρο από 1.5 μέχρι 3.





Εικόνα 2.7: Τέσσερις κατηγορίες αδρανών όσον αφορά την κατάσταση του από πλευράς εργασίας (Taylor, et al. 2006)

2.2.3.8 Συντελεστής θερμικής διαστολής Αδρανών

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής αδρανών (Coefficient of Thermal Expansion CTE) είναι η μέτρηση της αλλαγής του μήκους ή του όγκου του αδρανούς σε συγκεκριμένη μεταβολή της θερμοκρασίας. Τυπικά η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του μήκους και η μείωση της θερμοκρασίας σε μείωση του μήκους. Καθώς τα αδρανή καταλαμβάνουν τον μεγαλύτερο μέρος στο σκυρόδεμα η συμπεριφορά τους ανάλογα την θερμοκρασία επηρεάζει όλο τον όγκου του σκυροδέματος και της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό δαπέδων και άλλων κατασκευών. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα έχουν από τους χαμηλότερους συντελεστές θερμικής διαστολής και για αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως.

2.3 Νερό

2.3.1 Γενικά

Ο ρόλος του νερού είναι πολύ σημαντικός για τη δημιουργία σκυροδέματος. Το ανάμιγμα πρέπει να περιέχει τέτοια ποσότητα ώστε να εξασφαλίζετε εργασιμότητα αλλά όχι παραπάνω καθώς αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της περατότητας του τελικού σκυροδέματος. Για αυτό είναι κρίσιμο να υπολογίζεται η βέλτιστη ποσότητα νερού που θα εισαχθεί στο σκυρόδεμα.

2.3.2 Πιθανές πηγές νερού στο σκυρόδεμα

Το νερό που εισάγεται στο μίξερ κατά την παρασκευή του σκυροδέματος είναι η κύρια πηγή νερού αλλά όχι η μοναδική

- Σε περιόδους με πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να γίνει χρήση πάγου ώστε να πέσει η θερμοκρασία του σκυροδέματος. (Ο πάγος πρέπει να έχει λιώσει τελείως με το πέρας του χρόνου ανάμιξης.)

- Τα αδρανή τις περισσότερες φορές δεν είναι ξηρά με αποτέλεσμα να περιέχουν μία σημαντική ποσότητα νερού. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο ο υπολογισμός της υγρασίας των αδρανών πριν τη δημιουργία του μίγματος ώστε να αφαιρείται και η αντίστοιχη ποσότητα νερού. Επιπλέον πρέπει να ελέγχεται η ποιότητα του νερού που περιέχουν για πιθανή επιβλαβή στοιχεία.

- Νερό περιέχεται και σε κάποιους τύπους χημικών πρόσμικτων και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε περίπτωση που επηρεάζει το λόγο νερού τσιμέντου περισσότερο από 0,01.

2.3.3 Ποιότητα νερού.

Η ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται κατά τη δημιουργία του αναμίγματος παίζει σημαντικό ρόλο για την τελική ποιότητα του σκυροδέματος. Μεγάλη ποσότητα ακαθαρσιών στο νερό του μίγματος μπορεί να επηρεάσουν τους χρόνους πήξης και τις τελικές αντοχές του σκυροδέματος. Επιπλέον μπορεί να δημιουργηθούν αποθέσεις αλάτων στην επιφάνεια διάστρωσης και να διαβρώσει τον οπλισμό της κατασκευής, Κάθε χώρα διέπεται από αντίστοιχούς κανονισμού και πρότυπα που αφορούν την ποιότητα του νερού.

Η καταλληλότητα του νερού ανάμιξης για παραγωγή σκυροδέματος εξαρτάται από την προέλευσή του. Το Πρότυπο EN 1008 κατηγοριοποιεί τους ακόλουθους τύπους:

- <u>Πόσιμο νερό:</u> Κατάλληλο για σκυρόδεμα, δεν απαιτείται έλεγχός του.

- <u>Νερό που έχει ανακτηθεί μετά από επεξεργασία σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος</u> (π.χ. νερά εκπλύσεων). Γενικώς κατάλληλο για σκυρόδεμα, αλλά

πρέπει να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του παραρτήματος Α του Προτύπου (π.χ. το επιπλέον βάρος στερεών από νερά προερχόμενα από τέτοιου είδους επεξεργασίες, πρέπει να είναι μικρότερο από 1% του ολικού βάρους των αδρανών που περιέχονται στο μίγμα).

- Υπόγεια ύδατα: Μπορεί να είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα, αλλά πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.

- Νερό φυσικών πόρων και νερό βιομηχανικών διεργασιών : Μπορεί να είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα, αλλά πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.

- Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άοπλο σκυρόδεμα, αλλά δεν είναι κατάλληλο για οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Το μέγιστο επιτρεπόμενο περιεχόμενο σε χλώριο στο σκυρόδεμα πρέπει να τηρείται για σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό.

- Νερά αποβλήτων: Δεν είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα. Συνδυασμός υδάτων που προέρχεται από μίγμα υδάτων μετά από επεξεργασίες σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος και από νερό άλλης προελεύσεως θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις για την καταλληλότητα του νερού.

2.3.4 Προκαταρκτικοί έλεγχοι (ΕΝ 1008)

Το νερό πρέπει πρώτα να αναλυθεί για ίχνη λιπαρών ουσιών και ελαίων, αφρογόνες ουσίες (απορρυπαντικά!), αιωρούμενα συστατικά, οσμές (π.χ. χωρίς οσμή υδρόθειου μετά από προσθήκη υδροχλωρικού οξέος), οξύτητα (pH≥4) και χημικές ενώσεις. Νερό που δεν πληροί μία ή περισσότερες απαιτήσεις του Πίνακα 1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εάν ικανοποιεί τις ακόλουθες προδιαγραφές σε περιεκτικότητα χημικών ουσιών και εάν η χρήση του δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στο χρόνο πήξης και την ανάπτυξη αντοχών (ανατρέξτε στο Πρότυπο ΕΝ 1008 για τις μεθόδους ελέγχου)

2.3.5 Χημικές ουσίες

2.3.5.1 Χλώριο

Το περιεχόμενο του νερού σε χλώριο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα επίπεδα που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.2 :

Πίνακας 2.2: Επιτρεπτά όρια σε χλωριόντα. (ΕΝ 1008)

Τελική χρήση	Μέγιστο περιεχόμενο σε χλωριόντα mg/L
Προεντεταμένο σκυρόδεμα ή κονίαμα χυτών αγκυρώσεων	500
Σκυρόδεμα με οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά στοιχεία	1000
Σκυρόδεμα χωρίς οπλισμό	4500

2.3.5.2 Θειικά ιόντα

Το περιεχόμενο του νερού σε θειικά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2000 mg/L.

2.3.5.3 Αλκάλια

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα αδρανή ευαίσθητα σε αλκάλια, πρέπει να ελέγχεται το περιεχόμενο του νερού σε αλκάλια. Το περιεχόμενο σε αλκάλια (ισοδύναμο Na_2O) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1500 mg/L. Σε περίπτωση που το όριο αυτό ξεπεραστεί, το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περίπτωση που αποδειχθεί ότι έχουν ληφθεί κατάλληλα μέτρα για να αποτραπούν οι επιζήμιες αντιδράσεις αλκαλίων-αδρανών.

2.3.5.4 Επιβλαβείς ρύποι

Πρέπει πρωτίστως να διεξαχθούν ποιοτικοί έλεγχοι για σάκχαρα, φωσφορικά οξείδια, νιτρικά οξέα, μόλυβδο και ψευδάργυρο. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα είναι θετικά πρέπει είτε να καθοριστεί το περιεχόμενο ποσοστό της εντοπισμένης ουσίας, είτε να διεξαχθούν έλεγχοι για το χρόνο πήξης και τη θλιπτική αντοχή (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3: Μέγιστο επιτρεπτό όριο σε διάφορες ουσίες. (EN 1008)

Ουσία	**Μέγιστο περιεχόμενο σε mg/L**
Σάκχαρα	100
Φωσφορικά άλατα, εκφρασμένα σε P_2O_5	100
Νιτρικά άλατα, εκφρασμένα σε NO^-_3	500
Μόλυβδος, εκφρασμένος σε Pb^2+	100
Ψευδάργυρος, εκφρασμένος σε Zn^2+	100

2.3.4.5 Χρόνος πήξης και αντοχές

Η αρχή της πήξης κατά τον έλεγχο των δοκιμίων με το νερό πρέπει να γίνει το νωρίτερο σε 1 ώρα και δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 25% από τον αρχικό χρόνο πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό. Η ολοκλήρωση της πήξης δεν πρέπει να ξεπερνά τις 12 ώρες και δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 25% από το χρόνο ολοκλήρωσης της πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό. Η μέση θλιπτική αντοχή μετά από 7 ημέρες σε δοκίμια που έχουν παραχθεί με τη συγκεκριμένη ποιότητα νερού πρέπει να φτάνει τουλάχιστον το 90% της θλιπτικής αντοχής αντίστοιχων δοκιμίων που έχουν παραχθεί με απιονισμένο ή αποσταγμένο νερό.

2.4 Χημικά πρόσθετα

2.4.1 Γενικά

Τα χημικά πρόσθετα δρουν ευεργετικά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου (durability) και επηρεάζουν την εργασιμότητα (workability), το χρόνο πήξης-σκλήρυνσης του, τη θερμοκρασία συντήρησης του και την αναμενόμενη αντοχή δεδομένου μείγματος σκυροδέματος. Χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση:

- Δύσκολων κατασκευαστικών συνθηκών (σκυροδέματα σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος)
- Απαιτήσεις αυξημένης αντλησιμότητας του σκυροδέματος (υψηλά κτίρια)
- Απαιτήσεις υψηλών αρχικών αντοχών σκυροδέματος
- Απαιτήσεις πολύ χαμηλών λόγων νερού/τσιμέντου που επιδρούν στην αντοχή του έργου

2.4.2 Κατηγορίες πρόσθετων

- Επιταχυντικά πρόσθετά προστίθενται στο σκυρόδεμα με στόχο να αυξήσει την ταχύτητα ενυδάτωσης του τσιμέντου, να επιταχύνουν την πήξη και τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και να αυξήσουν την αρχική αντοχή του. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται να αναπτυχθούν αυξημένες αρχικές αντοχές στο δομικό έργο. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι προκαλούν μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος.

- Επιβραδυντικά πρόσθετα επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου και συνεπώς την πήξη και την σκλήρυνση του σκυροδέματος. Επίσης, βοηθούν στη διατήρηση του εργάσιμου και χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ο διαθέσιμος χρόνος για τη μεταφορά και τη διάστρωση του σκυροδέματος . Η αρχική αντοχή του σκυροδέματος εμφανίζεται μειωμένη, αλλά η τελική αντοχή του δεν επηρεάζεται από τα επιβραδυντικά πρόσθετα. Χρησιμοποιούνται όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, γιατί επιβραδύνουν το ρυθμό ανάπτυξης της θερμοκρασίας, καθώς και για την παρασκευή μεγάλων έργων χωρίς αρμούς εργασίας.

- Αερακτικά πρόσθετα δημιουργούν μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος μικρές φυσαλίδες με αποτέλεσμα να αυξηθεί το πορώδες του (Εικόνα 2.8). Συνεπώς αυξάνεται η αντοχή του στον παγετό και βελτιώνεται σημαντικά η εργασιμότητα του. Όταν όμως η περιεκτικότητα σε αέρα ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια είναι δυνατόν να μειωθεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος.

Εικόνα 2.8 Μεγέθυνση τομής σκυροδέματος στην οποία φαίνονται οι φυσαλίδες αέρα στο εσωτερικό του (Taylor, et al. 2006)

- Ρευστοποιητικά πρόσθετα αυξάνουν την ρευστότητα και την ομοιομορφία του σκυροδέματος και επιτρέπουν τη μείωση του νερού ανάμιξης με αποτέλεσμα την αύξηση της εργασιμότητας και της αντοχής του σκυροδέματος. Επίσης βελτιώνουν την υδατοπερατότητα και την αντοχή του στον παγετό. Είναι δυνατόν όμως, να εμφανιστεί αύξηση της συστολής ξήρανσης, καθώς και ανεπιθύμητη αύξηση των πόρων με συνέπεια καθυστέρηση της πήξης και μείωση της αντοχής.

- Στεγανοποιητικά πρόσθετα μειώνουν την ποσότητα του νερού, το οποίο απορροφάται ή εισχωρεί στο σκυρόδεμα, αυξάνοντας τη στεγανότητα του. Αποφεύγεται η δημιουργία μικροκοιλοτήτων στη μάζα του σκυροδέματος, καθώς και ο μικρορηγματώσεις και μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των πόρων και των τριχοειδών αγγείων. Είναι δυνατό όμως, να μεταβληθεί η χρονική εξέλιξη της πήξης και να μειωθεί η αντοχή του σκυροδέματος.

2.5 Πρόσθετα σκυροδέματος / Υποκατάστατα (ποζολάνες, βιομηχανικά παραπροϊόντα κλπ.)

2.5.1 Γενικά

Τα πρόσθετα σκυροδέματος είναι λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα εν γένει σε αρκετά μεγάλες αναλογίες (περίπου 5-20%).

Χρησιμοποιούνται γιατί:

- Αυξάνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος.
- Βελτιώνουν την εμφάνιση των κατασκευών από σκυρόδεμα (φινίρισμα).
- Μειώνουν την εκλυόμενη θερμότητα από την ενυδάτωση του τσιμέντου.
- Έχουν χαμηλότερο κόστος (κυμαινόμενο μεταξύ 25-50% από το τσιμέντο που αντικαθιστούν, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος του σκυροδέματος και κατά συνέπεια της κατασκευής

Το Πρότυπο EN 206-1 περιλαμβάνει 2 τύπους ανόργανων προσθέτων σκυροδέματος.

2.5.1.1 Τύπος I

Πρακτικά ανενεργά υλικά, όπως ασβεστολιθική πούδρα, χαλαζιακή σκόνη και χρωστικές ουσίες.

- <u>Χρωστικές:</u> Χρωστικά μεταλλικά οξείδια (κυρίως οξείδια του σιδήρου) που χρησιμοποιούνται για να χρωματίσουν το σκυρόδεμα. Προστίθενται σε ποσοστά της τάξης του 0,5-5% κατά βάρος του τσιμέντου. Πρέπει να παραμένουν χρωματικώς σταθερά στη μάζα του σκυροδέματος και ανενεργά στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Με χρήση ορισμένων τύπων χρωστικών ουσιών μπορεί να αυξηθεί η απαίτηση του μίγματος σε νερό.
- <u>Πούδρα αδρανών (χαλαζιακή, ασβεστολιθική</u>): Μίγματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτά αδρανή μπορούν να βελτιωθούν με προσθήκη πούδρας αδρανών. Τα ανενεργά αυτά υλικά χρησιμοποιούνται για βελτίωση της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών. Η απαίτηση σε νερό είναι αυξημένη, ιδιαιτέρως στην περίπτωση της ασβεστολιθικής πούδρας (Πίνακας 2.4).

Πίνακας 2.4: Τεχνικά δεδομένα για πούδρες αδρανών (σύμφωνα με DIN 4226-1)

Παράμετροι	Προϊόν		
	Πούδρες αδρανών		
	Χαλαζιακή πούδρα	Ασβεστολιθική πούδρα	Μονάδα
Πυκνότητα (ειδικό βάρος)	2650	2600-2700	kg/m^3
Ειδική επιφάνεια	≥1000	≥3500	cm^2/kg
Φαινόμενη πυκνότητα *1	1300-1500	1000-1300	kg/m^3
Απώλεια πύρωσης	0,2	≈40	%
*Ο παράγοντας αυτός πρέπει να ληφθεί υπόψη για την ικανότητα πλήρωσης των σιλό, κτλ.			

2.5.1.2 Τύπος II

Ποζολανικά ή λανθάνοντα υδραυλικά υλικά, όπως φυσικές ποζολάνες, ιπτάμενες τέφρες και πυριτική πούδρα. Η ιπτάμενη τέφρα είναι στάχτη που προέρχεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση γαιανθράκων και χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο τόσο στο τσιμέντο, όσο και στο σκυρόδεμα. Η σύνθεσή της εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του γαιάνθρακα, την προέλευση και τις συνθήκες καύσης του. Η πυριτική πούδρα (παιπάλη) αποτελείται κυρίως από σφαιρικά σωματίδια άμορφου διοξειδίου του πυριτίου προερχόμενα από την παραγωγή πυριτίου και κραμάτων πυριτίου. Έχει ειδική επιφάνεια περίπου 18-25 m^2 ανά γραμμάριο και αποτελεί μια πολύ ισχυρής δραστικότητας ποζολάνη. Τυπικές δοσολογίες πυριτικής παιπάλης κυμαίνονται μεταξύ 5% έως 10% μέγιστο κατά βάρος τσιμέντου.

3 Νωπό Σκυρόδεμα

Νωπό σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη των πρώτων υλών του και για όσο χρονικό διάστημα διατηρεί το εργάσιμο, δηλαδή όσο είναι δυνατόν να μεταφέρεται και να διαστρώνεται.[2]

Όταν το τσιμέντο ενωθεί με το νερό, αρχίζει η ενυδάτωσή του και δημιουργείται ο τσιμεντοπολτός, ο οποίος είναι η συνδετική ύλη του σκυροδέματος. Κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου γίνονται διάφορες χημικές αντιδράσεις και δημιουργούνται ένυδροι κρύσταλλοι. Ο τσιμεντοπολτός αρχίζει να πήζει, γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων των αδρανών και καλύπτει την επιφάνειά τους.

Με την πάροδο του χρόνου ο τσιμεντοπολτός γίνεται πιο συμπαγής και συνεκτικός, αποκτά αυξημένες αντοχές, δηλαδή αρχίζει η σκλήρυνση με τη στερεοποίηση του σκυροδέματος , η οποία διαρκεί πάρα πολύ χρόνο.

3.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

3.1.1 Εργασιμότητα

Η συνεκτικότητα του σκυροδέματος καθορίζει τη συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος κατά την ανάμιξη, μεταφορά, παράδοση και τοποθέτησή του επί τόπου στο έργο και επίσης κατά τη συμπύκνωση και εξομάλυνση της επιφάνειάς του. Η εργασιμότητα είναι συνεπώς μία σχετική παράμετρος και καθορίζεται βασικά από τη συνεκτικότητα.

Απαιτήσεις εργασιμότητας:

- Οικονομικά αποδοτικός χειρισμός, παράδοση/τοποθέτηση νωπού σκυροδέματος.
- Μέγιστη πλαστικότητα, με τη χρήση ρευστοποιητών
- Καλή συνοχή
- Χαμηλή πιθανότητα απόμιξης, καλή εξομάλυνση επιφάνειας
- Εκτεταμένη εργασιμότητα σε περιπτώσεις που επιθυμείται επιβράδυνση της πήξης λόγο σκυροδέτησης σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Επιταχυνόμενες διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης, σε περιπτώσεις σκυροδέτησης σε χαμηλές θερμοκρασίες.

---

[2] Τα στοιχεία στο κεφάλαιο αυτό έχουν ληφθεί κυρίως από τις ακόλουθες πηγές: Taylor et al. 2006, Τσακαλάκης 2010, Κορωναίος και Πούλακος 2006.

Η εργασιμότητα γενικά δεν μπορεί να υπολογιστεί με κάποια δοκιμή παρά μόνο με την εμπειρία που αποκτά ο κάθε μηχανικός (Scanlon 1994). Παρόλα αυτά όμως, η εργασιμότητα μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβάνοντας φυσικές αλλά και χημικές ιδιότητες των συστατικών του αναμίγματος.

- Περιεκτικότητα σε νερό: Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την εργασιμότητα είναι η περιεκτικότητα σε νερό του δείγματος. Αυξάνοντας την ποσότητα νερού στο μίγμα θα αυξηθεί ναι μεν η ρευστότητα του και η δυνατότητα συμπύκνωσης αλλά ταυτόχρονα μπορεί να μειωθεί .η αντοχή του, αυξάνεται η διαπερατότητα και εμφανίζεται το φαινόμενο του διαχωρισμού.

- Αδρανή: Πολύ παράγοντες που σχετίζονται με τα αδρανή επηρεάζουν την εργασιμότητα με πρώτο την ποσότητα των αδρανών και την κοκκομετρία τους. Μεγάλη ποσότητα λεπτόκοκκων για δεδομένο λόγο w/c δημιουργεί μίγματα με χαμηλή εργασιμότητα, ενώ μία ομοιόμορφη κοκκομετρία βελτιώνει την εργασιμότητα. Τέλος το σχήμα, η δομή τους, το πορώδες τους μπορούν να επηρεάσουν την εργασιμότητα του μίγματος.

- Αερακτικά πρόσμικτα: Η χρήση αερακτικού αυξάνει τον όγκο της τσιμεντόπαστας δουλεύοντας ταυτόχρονα σαν λιπαντικό βελτιώνοντας την εργασιμότητα του μίγματος. Παρόλα αυτά παραπάνω χρήση αερακτικού από το προβλεπόμενο όριο οδηγεί σε μείωση της εργασιμότητας, δυσκολία στο φινίρισμα και μείωση της τελικής αντοχής.

- Χρόνος και θερμοκρασία: Η εργασιμότητα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς το νερό εξατμίζεται από το μίγμα, απορροφάται από τα αδρανή και αντιδρά με το τσιμέντο. Ενώ σε θερμά περιβάλλοντα η παραπάνω διαδικασίες επιταχύνονται οπότε μειώνεται και άλλο η εργασιμότητα του μίγματος.

- Τσιμέντο: Το τσιμέντο μπορεί να επηρεάσει την εργασιμότητα του μίγματος σε πολύ μικρότερο βαθμό από τα προηγούμενα παρόλα αυτά ένα τσιμέντο με πολύ μεγάλη λεπτότητα έχει μικρότερη εργασιμότητα για δεδομένο λόγο w/c.

3.1.2 Επιβράδυνση / Σκυροδέτηση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από την ξήρανση κατά την τοποθέτηση. Η σκυροδέτηση είναι εφικτή σε υψηλές θερμοκρασίες, μόνο εάν παρέχονται ειδικά προστατευτικά μέτρα. Τα μέτρα αυτά πρέπει να είναι σε εφαρμογή από την αρχή της διαδικασίας παραγωγής έως το τέλος της ωρίμανσης. Εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία, την υγρασία αέρα, τις συνθήκες ανέμου, τη θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος, την ανάπτυξη θερμότητας και απώλεια αυτής και από τον όγκο του χυτευόμενου σκυροδέματος. Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να

υπερβαίνει τους +30°C κατά την τοποθέτησή του εάν δεν εφαρμόζονται αυτά τα προστατευτικά μέτρα.

Η εργασία με σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη επιβραδυντή μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε περιπτώσεις θερμοκρασίας αέρα πάνω από τους +25°C. Η ενυδάτωση είναι η χημική αντίδραση του τσιμέντου με το νερό. Ξεκινά μόλις έρθουν τα δύο συστατικά σε επαφή, συνεχίζεται ενώ το σκυρόδεμα χάνει την πλαστικότητά του και μπαίνει στη φάση πήξης (αρχική πήξη) και τελικώς ολοκληρώνεται μέσω της σκλήρυνσης του τσιμεντοπολτού. Κάθε χημική αντίδραση επιταχύνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η σωστή και ολοκληρωμένη συμπύκνωση δεν είναι πλέον εφικτή. Τα συνήθη μέτρα αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων περιλαμβάνουν τη χρήση υπερρευστοποιητή με επιβραδυντικές ιδιότητες ή υπερρευστοποιητή σε συνδυασμό με επιβραδυντή πήξης.

Ορολογία επιβράδυνσης

- *Σκοπός επιβράδυνσης*: Η επιμήκυνση του χρόνου εργασιμότητας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.
- *Χρόνος εργασιμότητας*: Ο χρόνος μετά την ανάμιξη, κατά τη διάρκεια του οποίου το σκυρόδεμα μπορεί να συμπυκνωθεί σωστά.
- *Ελεύθερη επιβράδυνση*: Η αρχική πήξη θα ξεκινήσει μόνο μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- *Στοχευόμενη επιβράδυνση*: Η αρχική πήξη ξεκινά σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Παράγοντες επιρροής

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την επιβράδυνση:

Επίδραση της θερμοκρασίας (βλέπε «Κρίσιμη θερμοκρασία»)

- Η αύξηση θερμοκρασίας μειώνει την επιβράδυνση, ενώ η μείωση θερμοκρασίας αυξάνει την επιβράδυνση.

Ενδεικτικός πρακτικός κανόνας:

Κάθε βαθμός Κελσίου κάτω από τους 20°C επιμηκύνει το χρόνο επιβράδυνσης κατά περίπου 1 ώρα. Κάθε βαθμός Κελσίου πάνω από τους 20°C συντομεύει το χρόνο επιβράδυνσης κατά περίπου 0,5 ώρες.

Χαρακτηριστικά του σκυροδέματος με επιβράδυνση

- Σκλήρυνση: Σε περίπτωση που η σκλήρυνση ξεκινά μετά τη διακοπή του επιβραδυντικού φαινομένου, αυτή είναι ταχύτερη από ότι στο σκυρόδεμα χωρίς επιβράδυνση.

- Συρρίκνωση / ερπυσμός: Η τελική συρρίκνωση ή ερπυσμός είναι μικρότερης έντασης από ότι στο σκυρόδεμα χωρίς επιβράδυνση.

- Πρώιμη συρρίκνωση: Οι ρωγμές συστολής που είναι αποτέλεσμα πρώιμης συρρίκνωσης, μπορούν να προκληθούν λόγω αφυδάτωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου επιβράδυνσης (επιφανειακή εξάτμιση).

- Προστασία από την αφυδάτωση είναι εξαιρετικά σημαντική για το σκυρόδεμα με επιβράδυνση. Η σωστή ωρίμανση είναι απαραίτητη.

3.1.3 Επιτάχυνση πήξης / σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Το σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από τη βροχή και τον παγετό κατά την εφαρμογή του. Η σκυροδέτηση είναι εφικτή σε θερμοκρασίες παγετού, μόνο εάν λαμβάνονται ειδικά προστατευτικά μέτρα. Αυτά πρέπει να εφαρμόζονται από την αρχή της διαδικασίας παραγωγής έως το τέλος της ωρίμανσης. Τα μέτρα αυτά εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία, την υγρασία αέρα, τις συνθήκες ανέμου, τη θερμοκρασία νωπού σκυροδέματος, την ανάπτυξη θερμότητας και απώλεια αυτής και από τον όγκο της σκυροδέτησης. Το νωπό σκυρόδεμα δεν πρέπει να έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από +5°C κατά την τοποθέτησή του εάν δε λαμβάνονται επιπλέον προστατευτικά μέτρα. Το νερό ανάμιξης και τα αδρανή θα πρέπει να προθερμαίνονται εάν αυτό είναι απαραίτητο.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες επιβραδύνουν την πήξη του τσιμέντου. Σε θερμοκρασίες κάτω από τους -10°C, οι χημικές διαδικασίες ενυδάτωσης του τσιμέντου διακόπτονται (αλλά συνεχίζουν μετά από θέρμανσή του). Κίνδυνος ενυπάρχει σε περίπτωση που το σκυρόδεμα παγώσει κατά την πήξη του, π.χ. χωρίς να έχει συγκεκριμένη ελάχιστη αντοχή. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται χαλάρωση της κατασκευής, με αντίστοιχη μείωση της αντοχής και της ποιότητα της. Η ελάχιστη αντοχή στην οποία το σκυρόδεμα μπορεί να αντέξει έναν κύκλο πήξης χωρίς βλάβη είναι η αποκαλούμενη αντοχή αντίστασης σε παγετό των 10N/mm^2. Ο κύριος στόχος είναι να φτάσει το σκυρόδεμα αυτή την αντοχή αντίστασης σε παγετό όσο το δυνατόν γρηγορότερα.

Η θερμοκρασία t του νωπού σκυροδέματος μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη εξίσωση συναρτήσει της θερμοκρασίας των αδρανών, του τσιμέντου και του νερού:

$t_{\text{σκυροδέματος}} = 0.7 \times t_{\text{αδρανών}} + 0.2 \times t_{\text{νερού}} + 0.1 \times t_{\text{τσιμέντου}}$

Ελάχιστη θερμοκρασία

Σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΝ 206-1, η θερμοκρασία νωπού σκυροδέματος κατά την παράδοση δεν πρέπει να είναι κάτω από +5°C. (Για λεπτά δομικά στοιχεία και εξωτερικές θερμοκρασίες κάτω από -3°C ή χαμηλότερες, το Πρότυπο ΕΝ απαιτεί θερμοκρασία νωπού σκυροδέματος +10°C, η οποία θα πρέπει να διατηρείται για 3 ημέρες!). Αυτές οι ελάχιστες θερμοκρασίες είναι σημαντικές, για να μπορεί να λάβει χώρα η πήξη. Το σκυρόδεμα θα πρέπει να προστατεύεται από την απώλεια θερμότητας κατά τη μετακίνησή του και μετά την τοποθέτησή του.

3.1.4 Συνεκτικότητα

Αντιθέτως με την "εργασιμότητα", η συνεκτικότητα– ή δυνατότητα παραμόρφωσης – του νωπού σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί. Το Πρότυπο ΕΝ 206-1:2000 κάνει διαχωρισμό μεταξύ 4 και 6 τάξεων συνεκτικότητας ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου και καθορίζει τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος από άκαμπτο έως ρευστό (Πίνακας 3.1)

Πίνακας 3.1 Ανοχές σχεδιαζόμενων τιμών συνεκτικότητας ΕΝ- 206-1:2000

Μέθοδος ελέγχου	Βαθμός συνεκτικότητας			Διάμετρος εξάπλωσης	Κάθιση		
Τιμές σχεδιασμού	≥1,26	1,25...1,11	≤1,10	όλες οι τιμές	≤40mm	50…90 mm	≥100mm
Ανοχές	±0,10	±0,08	±0,05	±30mm	±10mm	±20mm	±30mm

Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνεκτικότητα

- Μορφή / σύνθεση αδρανών
- Τύπος/ ποσότητα τσιμέντου
- Περιεχόμενο νερό
- Χρήση προσθέτων
- Χρήση προσμίκτων σκυροδέματος
- Θερμοκρασιακές συνθήκες
- Χρόνος/ ένταση ανάμιξης
- Χρόνος λήψης μέτρηση
- Χρόνος και χώρος δοκιμών

Η συνεκτικότητα του σκυροδέματος πρέπει να καθορίζεται τη στιγμή της παραλαβής του, δηλαδή επί τόπου στο έργο πριν την τοποθέτησή του (παρακολούθηση εργασιμότητας). Εάν η συνεκτικότητα καταγράφεται τόσο μετά τη διαδικασία ανάμιξης (έλεγχος συνεκτικότητας κατά την παραγωγή) και πριν την τοποθέτηση επί τόπου στο έργο, είναι δυνατή μία απευθείας σύγκριση των αλλαγών της συνεκτικότητας ως ένδειξη της ηλικίας του νωπού σκυροδέματος.

Εάν το σκυρόδεμα παραδίδεται από μπετονιέρα, η συνεκτικότητα μπορεί να μετρηθεί με λήψη τυχαίου δείγματος μετά την απόρριψη περίπου 0,3m^3 σκυροδέματος.

3.1.5 Εξίδρωση

Παρουσία νερού στην επιφάνεια, προκαλούμενη από διαχωρισμό του σκυροδέματος (Εικόνα 3.1). Μια μικρή ποσότητα νερού στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι φυσιολογική και επιθυμητή καθώς βοηθάει στον έλεγχο της ανάπτυξης πλαστικών ρωγμών. Αν ο ρυθμός της εξάτμισης στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό εξίδρωσης τότε η επιφάνεια θα στεγνώσει και θα σκάσει. Ταυτόχρονα όμως παραπάνω εξίδρωση από το φυσιολογικό δυσκολεύει το φινίρισμα, μειώνει την τελική αντοχή του σκυροδέματος και αυξάνει την διαπερατότητα της επιφάνειας του σκυροδέματος. Η εξίδρωση συχνά εμφανίζεται ως αποτέλεσμα ελαττωμάτων στα λεπτά υλικά των αδρανών και στο χαμηλό ποσοστό τσιμέντου ή στο υψηλό ποσοστό νερού των μιγμάτων.

Για μείωση της εξίδρωσης

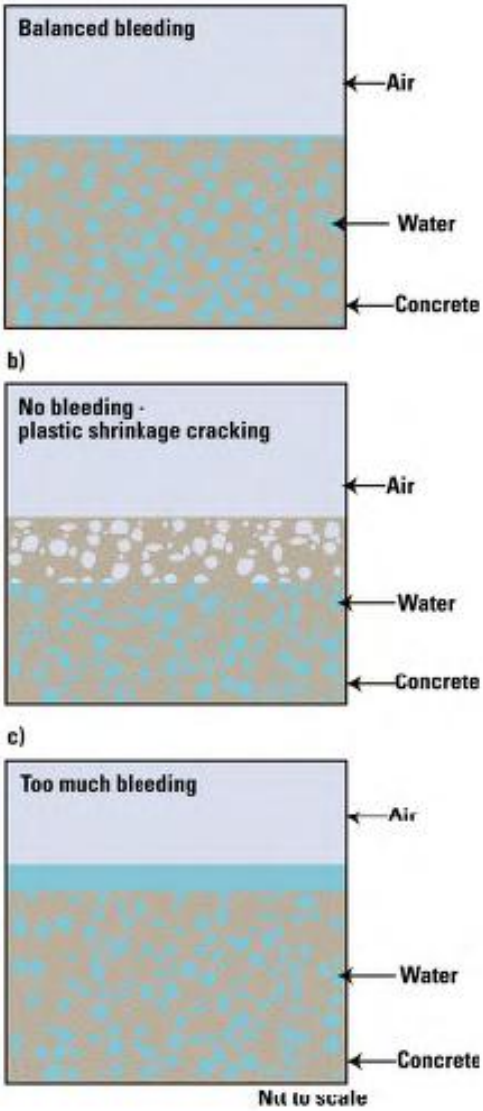
- Μείωση του περιεχόμενου νερού
- Έλεγχος του περιεχομένου των λεπτών υλικών
- Χρήση σταθεροποιητή μίγματος
- Βελτιστοποίηση της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών.

3.1.6 Φινίρισμα

Κατά την τοποθέτηση, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το σκυρόδεμα δεν έχει συμπυκνωθεί υπερβολικά, για να αποφευχθεί να ανέλθει πολύ νερό και τσιμεντοπολτός στην επιφάνεια.

Η επιφάνεια δεν πρέπει να φινιριστεί (λειανθεί) πολύ νωρίς, αλλά μόνο όταν η επιφάνεια είναι μόλις ελαφρώς νωπή.

Η αντίσταση της επιφάνειας στη φθορά μπορεί γενικώς να βελτιωθεί εάν το φινίρισμα της επιφάνειας με ελικόπτερο επαναληφθεί για δεύτερη ή ακόμη και τρίτη φορά.



Εικόνα 3.1 Διαφορετικοί τρόποι εξιδρώσεις (Taylor et al. 2006)

3.1.7 Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος είναι η μάζα σε kg ανά m^3 νωπού, κανονικά συμπυκνωμένου σκυροδέματος, συμπεριλαμβάνοντας τα υπολειπόμενα κενά.

Με δεδομένο την ίδια ποσότητα τσιμέντου και αδρανών, χαμηλότερη πυκνότητα σκυροδέματος είναι ενδεικτική χαμηλότερης αντοχής σκυροδέματος, επειδή η πυκνότητα μειώνεται όσο το περιεχόμενο νερό και τα κενά αυξάνονται.

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος πέφτει

- Όσο αυξάνεται το περιεχόμενο νερό
- Όσο αυξάνονται τα περιεχόμενα κενά

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος αυξάνεται

- Όσο αυξάνεται το περιεχόμενο τσιμέντο
- Όσο μειώνεται ο λόγος νερού/ τσιμέντο
- Όσο μειώνονται τα περιεχόμενα κενά

3.1.8 Περιεχόμενος αέρας

Όλα τα σκυροδέματα περιέχουν πόρους. Ακόμα και μετά από προσεκτική συμπύκνωση, τα υπολειπόμενο περιεχόμενο αέρα, π.χ. με μέγιστο κόκκο αδρανών 32 mm, καταλαμβάνει ποσοστό 1-2% κατά όγκο και αυτό το σύνηθες περιεχόμενο μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό 4% κατά όγκο σε σκυροδέματα με λεπτά αδρανή.

Διαφορετικοί τύποι κενών αέρα

- Κενά συμπύκνωσης
- Ανοιχτά και κλειστά τριχοειδή κενά
- Κενά μικρό πορώδους
- Τεχνητά εγκλεισμένα κενά αέρα για βελτίωση της αντίστασης σε κύκλους πήξης/ τήξης

Το περιεχόμενο κενών αέρα στο σκυρόδεμα ή στο κονίαμα μπορεί να βελτιωθεί τεχνητά με αερακτικά πρόσμικτα.

3.1.9 Αντλησιμότητα

Η αντλησιμότητα του σκυροδέματος εξαρτάται βασικά από τη σύνθεση του μίγματος, τα χρησιμοποιούμενα αδρανή και τη μέθοδο παράδοσης.

Σε ότι αφορά στη μέθοδο παράδοσης και τοποθέτησης του αντλήσιμου σκυροδέματος, σημαντική μείωση της πίεσης στις αντλίες σκυροδέματος και αύξηση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με συστηματική προσθήκη βελτιωτικών άντλησης, ιδιαίτερα για χρήση με θραυστά αδρανή, δευτερογενείς πρώτες ύλες, ισχυρά απορροφητικά αδρανή κτλ.

Προσαρμογές στη μελέτη σύνθεσης και χρήση βελτιωτικού άντλησης μπορεί να μειώσει την τριβή στα τοιχώματα των σωληνώσεων, δίνοντας μικρότερες πιέσεις στην αντλία σε συνδυασμό με μεγαλύτερη απόδοση και μειωμένη φθορά.

3.1.10 Συνοχή / διαχωρισμός υλικών μίγματος

Η συνοχή ενός μίγματος περιγράφει την ομοιογένεια της σύστασης του νωπού μίγματος σκυροδέματος κατά την τοποθέτησή του. Απουσία συνοχής οδηγεί σε απόμιξη, διαχωρισμό και προβλήματα στην τοποθέτηση.

Τρόποι για βελτίωση της συνοχής

- Αύξηση των λεπτών υλικών (πούδρα + λεπτή άμμος)
- Μείωση του περιεχόμενου νερού, δηλαδή χρήση υπερρευστοποιητή
- Χρήση σταθεροποιητή
- Χρήση αερακτικού μέσου

Διαχωρισμός ονομάζεται η τάση των χονδρόκοκκων αδρανών να διαχωρίζονται από το υπόλοιπο μίγμα ιδιαίτερα κατά την μεταφορά του. Δημιουργείται είτε επειδή δεν υπάρχουν αρκετά χονδρόκοκκα στο ανάμιγμα ή επειδή υπάρχει περίσσια χονδροκόκκων.

Για την αποφυγή δημιουργίας φαινομένων διαχωρισμού πρέπει να γίνεται χρήση καλά διαβαθμισμένων υλικών. Αδρανή με κενά στην κοκκομετρία τους είναι πολύ πιθανόν να διαχωριστούν.

3.1.11 Θερμοκρασία νωπού σκυροδέματος

Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να είναι πολύ χαμηλή, έτσι ώστε το σκυρόδεμα να μπορέσει να αποκτήσει επαρκή αντοχή αρκετά γρήγορα και να μην υποστεί βλάβη από παγετό σε πρώιμο στάδιο.

- Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους +5°C κατά την τοποθέτησή του
- Το μόλις τοποθετημένο σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από τον παγετό. Για σκυρόδεμα με αντίσταση σε παγετό απαιτείται θλιπτική αντοχή περίπου $10N/mm^2$
- Από την άλλη μεριά, πολύ υψηλές θερμοκρασίες σκυροδέματος μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα κατά την τοποθέτηση και μείωση ορισμένων ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος. Για να αποφευχθεί αυτό, η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δε θα πρέπει να ανέβει πάνω από 30°C κατά την εφαρμογή του

3.1.12 Λόγος νερού/τσιμέντου

Ο λόγος νερού/ τσιμέντο (w/c) είναι ο λόγος του βάρους του νερού: βάρος του τσιμέντου στο νωπό σκυρόδεμα.

Υπολογίζεται διαιρώντας το βάρος του ολικού νερού N με το βάρος του ολικού προστιθέμενου τσιμέντου T.

Η εξίσωση για το λόγο νερού/ τσιμέντο είναι επομένως

$$\frac{N}{T} = \frac{N}{T} \quad \text{ή} \quad \frac{N}{T} = \frac{N}{T + (K\ x\tau\acute{\upsilon}\pi o\upsilon I\pi\rho\acute{o}\sigma\theta\varepsilon\tau\alpha)}$$

Το ενεργό περιεχόμενο νερό ενός μίγματος υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της ολικής ποσότητας νερού N_0 στο νωπό σκυρόδεμα και της ποσότητας νερού που απορροφάται από τα αδρανή (N_G, καθορισμένο σύμφωνα με EN 1097-6).

Ο απαιτούμενος λόγος w/c επηρεάζεται κυρίως από τα χρησιμοποιούμενα αδρανή, στρογγυλεμένα ή θραυστά και τη σύνθεσή τους. Η επιλογή του λόγου w/c καθορίζεται βασικά από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις.

3.1.13 Ωρίμανση

Για υψηλή ανθεκτικότητα, το σκυρόδεμα δεν πρέπει να είναι μόνο 'ισχυρό' αλλά και αδιαπέρατο, ειδικά κοντά στην επιφάνειά του. Όσο χαμηλότερο το πορώδες και όσο πυκνότερος ο σκληρυμένος τσιμεντοπολτός, τόσο υψηλότερη η αντίσταση του σκυροδέματος σε εξωτερικές επιδράσεις, καταπονήσεις και επιθέσεις. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, πρέπει να ληφθούν προληπτικά μέτρα για να προστατευθεί το νωπό σκυρόδεμα, ιδιαιτέρως από τα παρακάτω:

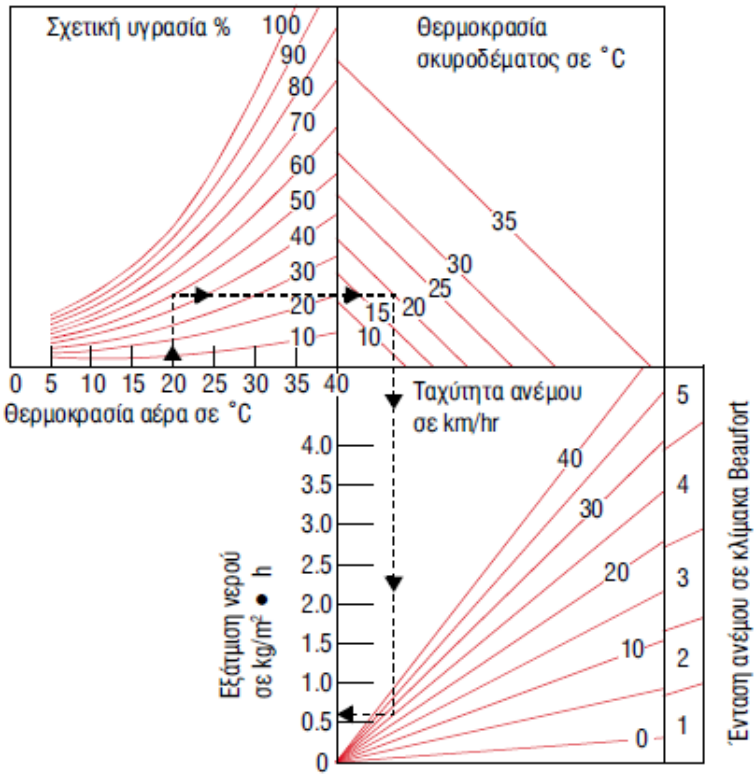
- Πρόωρη ξήρανση λόγω ανέμου, ήλιου, χαμηλής υγρασίας, κτλ.
- Ακραίες θερμοκρασίες (κρύο, ζέστη) και καταστροφή λόγω απότομων θερμοκρασιακών αλλαγών
- Βροχή
- Θερμικά και φυσικά σοκ
- Χημικές επιθέσεις
- Μηχανικές καταπονήσεις

Προστασία από πρόωρη ξήρανση είναι απαραίτητη, έτσι ώστε η ανάπτυξη των αντοχών του σκυροδέματος να μην επηρεαστεί από απομάκρυνση του νερού. Οι επιπτώσεις της πρόωρης απώλειας νερού είναι:

- Χαμηλές αντοχές κοντά στην επιφάνεια
- Τάση για δημιουργία σκόνης
- Υψηλότερη περατότητα σε νερό

- Χαμηλή ανθεκτικότητα σε καιρικές επιδράσεις
- Χαμηλή αντίσταση σε χημικές επιθέσεις
- Εμφάνιση ρωγμών συρρίκνωσης
- Αυξημένος κίνδυνος δημιουργίας όλων των τύπων των ρωγμών

Το ακόλουθο διάγραμμα αποδίδει παραστατικά το ποσό του νερού εξάτμισης ανά m^2 σκυροδέματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Όπως φαίνεται από την πορεία του βέλους, σε θερμοκρασίες αέρα και σκυροδέματος της τάξεως των 20°C, σχετική υγρασία 50% και μέση ταχύτητα ανέμου 20 km/hr, μπορούν να εξατμιστούν 0.6 λίτρα νερού ανά ώρα από επιφάνεια σκυροδέματος $1m^2$. Σε θερμοκρασίες σκυροδέματος υψηλότερες από τη θερμοκρασία του αέρα και σε μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, ο βαθμός της εξάτμισης νερού αυξάνεται σημαντικά. Στις ίδιες συνθήκες, θερμοκρασία σκυροδέματος 25°C θα είχε ως αποτέλεσμα 50% μεγαλύτερη εξάτμιση, δηλαδή 0,9 λίτρα ανά m^2 ανά ώρα (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Επίδραση της σχετικής υγρασίας αέρα, των θερμοκρασιών αέρα και σκυροδέματοςκαι της ταχύτητας του ανέμου στην εξάτμιση νερού σύμφωνα με VDZ (Γερμανικός Οργανισμός Παραγωγών Τσιμέντου).

Ακραίες θερμοκρασιακές επιδράσεις προκαλούν παραμόρφωση του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα διογκώνεται στη ζέστη και συστέλλεται στο κρύο. Η παραμόρφωση αυτή προκαλεί καταπόνηση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές. Είναι επομένως σημαντικό να αποφευχθούν μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές (> 15°K) μεταξύ του πυρήνα και της επιφάνειας στο νωπό και το νέο σκυρόδεμα και η έκθεση του μερικώς σκληρυμένου σκυροδέματος σε απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές.

Μηχανικές καταπονήσεις όπως βίαιες ταλαντώσεις και ισχυρά σοκ κατά την πήξη και τη φάση αρχικής σκλήρυνσης μπορούν να βλάψουν το σκυρόδεμα εάν χαλαρώσει η δομή του. Το νερό της βροχής και τα τρεχούμενα νερά συχνά προκαλούν μόνιμες βλάβες στο νωπό ή το νέο σκυρόδεμα. Η βλάβη σε περιπτώσεις διαδοχικών εργασιών πρέπει να αποφευχθεί με προστασία των άκρων του σκυροδέματος και χρήση προστατευτικών επικαλύψεων για ‘μη καλουπωμένες επιφάνειες σκυροδέματος και αναβάλλοντας το ξεκαλούπωμα για αρκετό χρόνο στην περίπτωση σκυροδέτησης σε καλούπια.

Χημικές καταπονήσεις από ουσίες σε υπόγεια ύδατα, έδαφος ή αέρα μπορούν να βλάψουν το σκυρόδεμα ή ακόμη και να το καταστρέψουν, ακόμη και σε περίπτωση χρήσης κατάλληλης σύνθεσης μίγματος και σωστής σκυροδέτησης, εάν η καταπόνηση γίνει πολύ νωρίς. Οι ουσίες αυτές πρέπει να κρατηθούν μακριά από το σκυρόδεμα για όσο το δυνατόν περισσότερο, π.χ. με κάλυψη ή συστήματα απορροής υδάτων.

3.1.14 Μέθοδοι ωρίμανσης

Τα προστατευτικά μέτρα ενάντια στην πρόωρη ξήρανση περιλαμβάνουν:

- Εφαρμογή υγρών βελτιωτικών ωρίμανσης
- Αναβολή ξεκαλουπώματος
- Κάλυψη με φύλλα
- Διάστρωση καλυμμάτων συγκράτησης νερού
- Διαρκή ψεκασμό με νερό, διατηρώντας το σκυρόδεμα επαρκώς εμβαπτισμένο και
- Συνδυασμό όλων αυτών των μεθόδων

Υγρά βελτιωτικά ωρίμανσης μπορούν να ψεκαστούν πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος με απλά εργαλεία (π.χ. χαμηλής πίεσης ψεκαστήρες οικιακής χρήσης). Αυτά πρέπει να εφαρμόζονται σε όλη την επιφάνεια του σκυροδέματος όσο το δυνατόν νωρίτερα: σε εκτεθειμένες όψεις σκυροδέματος αμέσως μόλις η “γυαλιστερή” επιφάνεια του σκυροδέματος γίνει “ματ” και σε καλουπωμένες όψεις αμέσως μετά την αποκαλούπωση. Είναι πάντα σημαντικό να διαμορφώνεται μία πυκνή μεμβράνη και να εφαρμόζεται η σωστή ποσότητα (σε g/m^2) όπως προδιαγράφεται στις οδηγίες χρήσης.

Σε κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος μπορεί να είναι κατάλληλη η εφαρμογή επάλληλων στρώσεων.

Αναβολή ξεκαλουπώματος σημαίνει ότι ο απορροφητικός ξυλότυπος πρέπει να παραμείνει υγρός και ο μεταλλότυπος πρέπει να είναι προστατευμένος από τη θερμότητα (π.χ. από απευθείας ηλιακή ακτινοβολία) και από χαμηλές θερμοκρασίες.

Η προσεκτική κάλυψη με αδιαπέρατες πλαστικές μεμβράνες είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για μη καλουπωμένες επιφάνειες και για στοιχεία σκυροδέματος μετά την αποκαλούπωσή τους. Τα φύλλα πρέπει να επικαλύπτονται πάνω στην επιφάνεια του νωπού σκυροδέματος και να είναι σταθεροποιημένα στα σημεία ενώσεων (π.χ. με τοποθέτηση σανίδων ή λίθων στα σημεία εκείνα) για να αποφευχθεί εξάτμιση του νερού από το σκυρόδεμα.

Η χρήση πλαστικών μεμβρανών συνίσταται ιδιαιτέρως για εμφανές σκυρόδεμα, καθώς έτσι θα αποφευχθεί σε μεγάλο βαθμό η δημιουργία εξανθημάτων. Οι μεμβράνες δεν πρέπει να είναι σε άμεση επαφή με το νωπό σκυρόδεμα. Φαινόμενο ‘καμινάδας’ (ταχεία απαγωγή υδρατμών), πρέπει επίσης να αποτρέπεται.

Κατά την κάλυψη των επιφανειών σκυροδέματος με υλικά συγκράτησης νερού όπως είναι η λινάτσα, ψάθα, η κάλυψη πρέπει να διατηρείται συνεχώς υγρή ή αν είναι απαραίτητο πρέπει να παρέχεται επιπλέον προστασία με πλαστικές μεμβράνες ενάντια στην ταχεία απώλεια υγρασίας.

Πρόωρη ξήρανση μπορεί να αποφευχθεί διατηρώντας την επιφάνεια του σκυροδέματος υγρή με συνεχή διαβροχή της. Η εναλλαγή διαβροχής και ξήρανσης μπορεί να οδηγήσει σε καταπονήσεις και επομένως σε ρωγμές στο νέο σκυρόδεμα. Αποφύγετε τον απευθείας ψεκασμό στην επιφάνεια του σκυροδέματος με ένα τζετ νερού, καθώς μπορεί παρουσιαστούν ρωγμές στο σκυρόδεμα εάν η επιφάνειά του κρυώσει λόγω χαμηλής θερμοκρασίας νερού και λανθάνουσας ανάπτυξης θερμότητας στο σκυρόδεμα, ιδιαιτέρως σε μεγάλου όγκου κατασκευές σκυροδέματος. Κατάλληλος εξοπλισμός περιλαμβάνει ακροφύσια ή διάτρητες σωλήνες τύπου ποτίσματος κήπων. Οι οριζόντιες επιφάνειες μπορούν να παραμείνουν εμβαπτισμένες στο νερό κατά την ωρίμανσή τους, όπου αυτό είναι δυνατό.

3.1.15 Περίοδος ωρίμανσης

Η περίοδος ωρίμανσης πρέπει να είναι καθορισμένη έτσι ώστε οι περιοχές κοντά στην επιφάνεια να επιτύχουν την απαιτούμενη αντοχή και στεγανότητα που απαιτείται για ανθεκτικότητα του σκυροδέματος καθώς και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

Η ανάπτυξη αντοχών είναι πολύ στενά συνδεδεμένη με τη σύνθεση του σκυροδέματος, τη θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος, τις συνθήκες περιβάλλοντος, τις διαστάσεις

του στοιχείου και η περίοδος ωρίμανσης που απαιτείται επηρεάζεται επίσης από τους ίδιους παράγοντες.

Ως τμήμα της Ευρωπαϊκής διαδικασίας τυποποίησης, προετοιμάζεται συγγραφή τυποποιημένων κανόνων για την ωρίμανση σκυροδέματος.

Η βασική αρχή αυτού του Ευρωπαϊκού προσχέδιου είναι ενσωματωμένη στο πρότυπο DIN 1045-3. Η βάση της θεωρίας αυτής είναι ότι η ωρίμανση του σκυροδέματος πρέπει να συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί το 50% της χαρακτηριστικής αντοχής fck του στοιχείου του σκυροδέματος. Για να καθοριστεί η απαραίτητη περίοδος ωρίμανσης, ο παραγωγός σκυροδέματος πρέπει να δώσει πληροφορίες για την ανάπτυξη των αντοχών του σκυροδέματος. Οι πληροφορίες αυτές βασίζονται στο μέσο όρο των αντοχών του σκυροδέματος της περιόδου μεταξύ 2 και 28 ημερών στους 20°C και έτσι κατηγοριοποιείται το σκυρόδεμα ως ταχείας, μεσαίας, χαμηλής ή πολύ χαμηλής ανάπτυξης αντοχής.

3.2 Έλεγχοι νωπού σκυροδέματος

3.2.1 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία για διαδοχικούς ελέγχους νωπού σκυροδέματος καλύπτεται από:

Το Πρότυπο EN 12350-1 για σύνθετα και τυχαία δείγματα.

- Σύνθετα δείγματα:

Ποσότητες σκυροδέματος οι οποίες αποτελούνται από έναν αριθμό μεμονωμένων δειγμάτων τα οποία λαμβάνονται ομοιόμορφα γύρω από έναν αναμικτήρα ή τη μάζα του σκυροδέματος και μετά αναμιγνύονται πλήρως.

- Τυχαία δείγματα:

Μεμονωμένα δείγματα που προέρχονται από ένα μόνο μέρος του αναμικτήρα ή της μάζας του σκυροδέματος και μετά αναμιγνύονται πλήρως.

- Μεμονωμένα δείγματα:

Δείγματα που λαμβάνονται από ένα κατάλληλο σημείο και μετά αναμιγνύονται πλήρως.

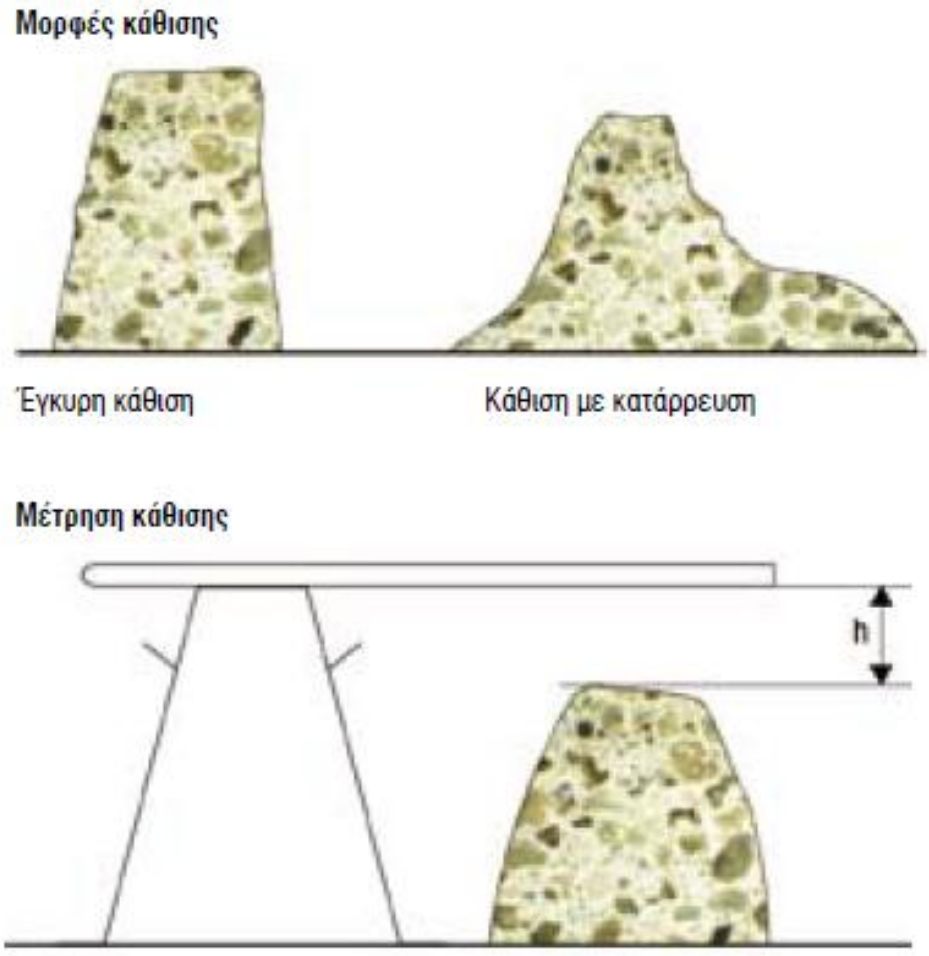
Η απόφαση για τη λήψη τυχαίων ή σύνθετων δειγμάτων εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο σκοπό. Η ολική ποσότητα δειγμάτων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορές μεγαλύτερη της απαιτούμενης ποσότητας σκυροδέματος που απαιτείται για έλεγχο (μία γεμάτη χειράμαξα χωρητικότητας 60 λίτρων είναι συνήθως αρκετή).

3.2.2 Έλεγχος συνεκτικότητας με τη δοκιμή κάθισης

Μεταλλικός κόλουρος κώνος ανοιχτός επάνω και κάτω γεμίζεται με νωπό σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται. Όταν ο κώνος σηκωθεί, η κάθιση δίνει ένα μέτρο της συνεκτικότητας του σκυροδέματος. Η κάθιση είναι η διαφορά σε mm μεταξύ του ύψους του μεταλλικού κώνου και του ύψους του νωπού σκυροδέματος μετά την πτώση του.

Ολόκληρη η διαδικασία από την αρχή του γεμίσματος μέχρι να σηκωθεί ο κώνος πρέπει να ολοκληρώνεται εντός 150 δευτερολέπτων. Η δοκιμή είναι έγκυρη μόνο όταν δίνει κάθιση κατά την οποία το σκυρόδεμα παραμένει σε μεγάλο βαθμό ακέραιο και συμμετρικό μετά την αφαίρεση του κώνου, δηλαδή το σκυρόδεμα να παραμένει όρθιο στη μορφή ενός κόλουρου κώνου (ή τμήματος κώνου).

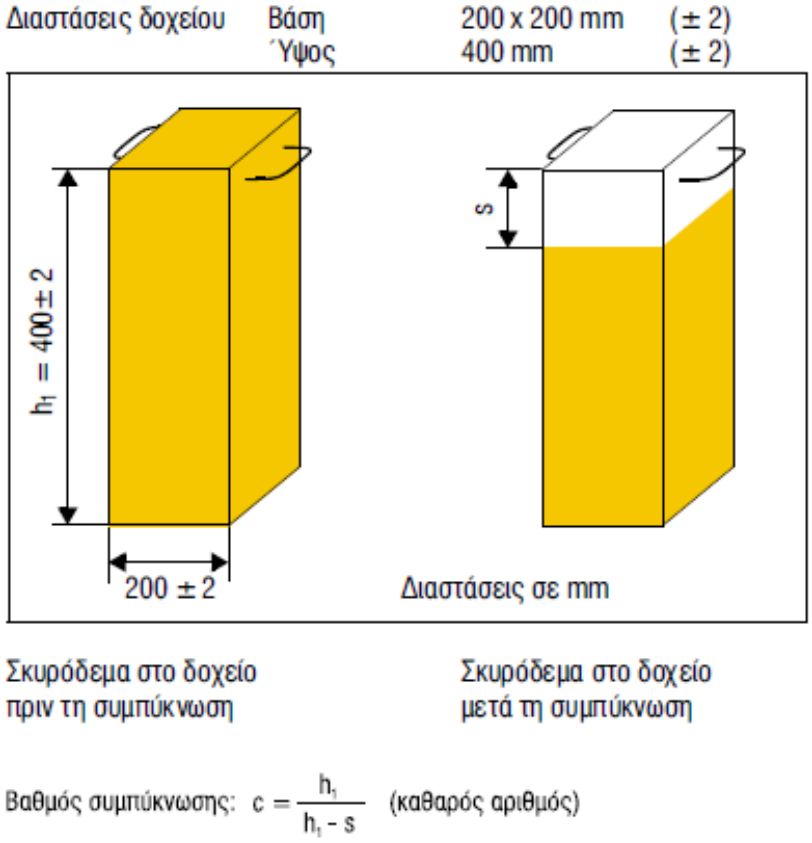
Εάν το σκυρόδεμα καταρρεύσει (Εικόνα 3.3), πρέπει να ληφθεί άλλο δείγμα. Εάν το δείγμα καταρρεύσει σε δύο διαδοχικούς ελέγχους ,το σκυρόδεμα δε διαθέτει την πλαστικότητα και τη συνοχή που απαιτούνται για τη δοκιμή κάθισης.



Εικόνα 3.3 Μορφές κάθισης (Sika 2007)

3.2.3 Έλεγχος συνεκτικότητας βάσει βαθμού συμπύκνωσης.

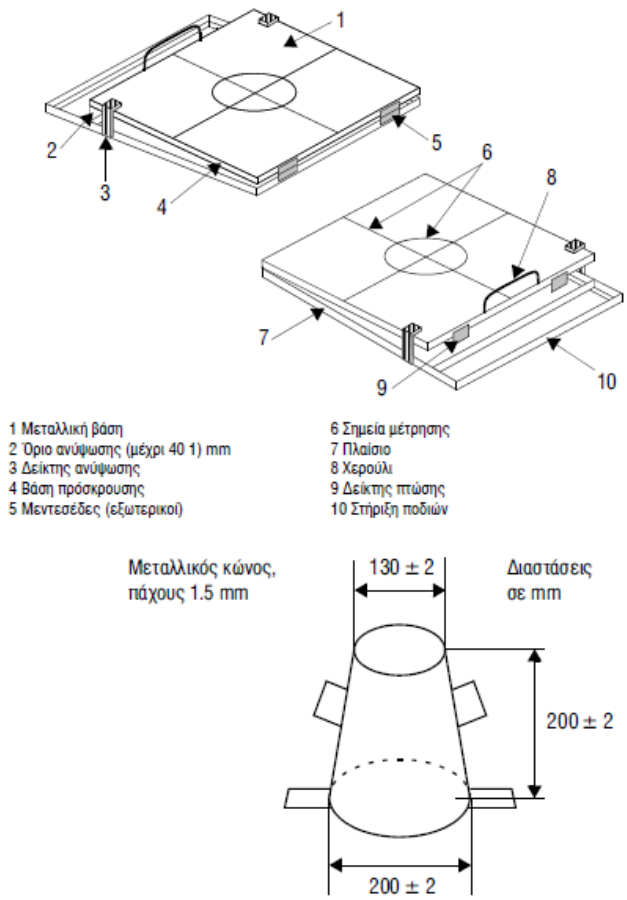
Το νωπό σκυρόδεμα τοποθετείται προσεκτικά σε μεταλλικό δοχείο. Η συμπύκνωση πρέπει να αποφεύγεται. Όταν το μεταλλικό δοχείο γεμίσει, η επιφάνεια του σκυροδέματος οριζοντιώνεται στο επίπεδο της ακμής του δοχείου, χωρίς όμως να δονηθεί. Το σκυρόδεμα ακολούθως δονείται, π.χ. με δονητή μεγίστης διαμέτρου 50mm. Μετά τη συμπύκνωση μετράται το ύψος από την κορυφή του δοχείου έως την επιφάνεια του σκυροδέματος και στις τέσσερις πλευρές του δοχείου. Η μέση τιμή χρησιμοποιείται για υπολογισμό του βαθμού συμπυκνώσεως (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 Υπολογισμός βαθμός συμπύκνωσης (Sika 2007).

3.2.4 Έλεγχος της συνεκτικότητας βάσει διαμέτρου εξάπλωσης

Η δοκιμή καθορίζει τη συνεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος μετρώντας την εξάπλωση του σκυροδέματος σε οριζόντια επίπεδη βάση. Μεταλλικός κόλουρος κώνος γεμίζεται με σκυρόδεμα (σε δύο στρώσεις) και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Ο κώνος ακολούθως αφαιρείται κατακόρυφα προς τα επάνω. Μετά από την οποιαδήποτε κατάρρευση σκυροδέματος, η βάση ανυψώνεται χειροκίνητα ή μηχανικά 15 φορές έως το δείκτη ανύψωσης και αφήνεται να πέσει έως τους δείκτες πτώσης. Η εξάπλωση του σκυροδέματος μετριέται παράλληλα προς τις πλευρές της βάσης διαμέσου του κέντρου της (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5 Δοκιμή εξάπλωσης (Sika 2007)

3.2.5 Προσδιορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος

Το νωπό σκυρόδεμα συμπυκνώνεται σε στερεό, στεγανό δοχείο και μετά ζυγίζεται.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 12360-6 οι ελάχιστες διαστάσεις του δοχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερες από τη μέγιστη ονομαστική διάμετρο των μεγαλύτερων αδρανών του σκυροδέματος, αλλά δεν πρέπει να είναι μικρότερες από 150 mm.

Η χωρητικότητα του δοχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 λίτρα. Το χείλος του δοχείου πρέπει να είναι παράλληλο με τη βάση του δοχείου. (Τα δοχεία μέτρησης αεροπεριεκτικότητας χωρητικότητας 8 λίτρων έχουν επίσης αποδειχθεί ιδιαίτερα κατάλληλα.)

Το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται μηχανικά με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης ή χειροκίνητα με ράβδο.

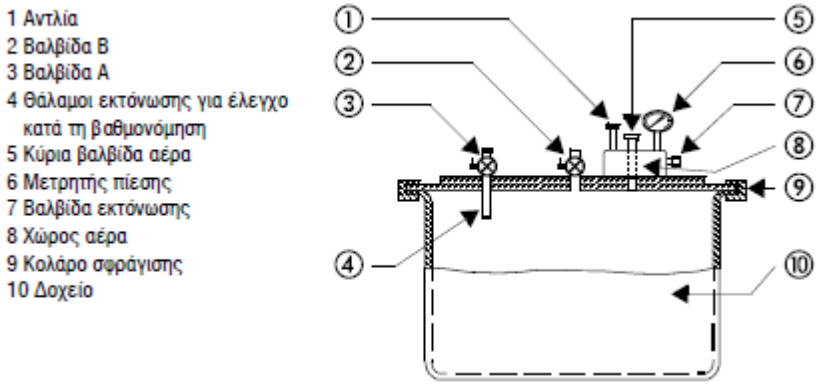
3.2.6 Προσδιορισμός του περιεχόμενου αέρα

Υπάρχουν δύο μέθοδοι που βασίζονται στην ίδια αρχή (Νόμος Boyle-Marriote): πρόκειται για τη μέθοδο της στήλης νερού και τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης. Η παρακάτω περιγραφή αφορά τη μέθοδο εξισορρόπησης της πίεσης, καθώς είναι και η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη.

Ένας γνωστός όγκος αέρα σε γνωστή πίεση εξισορροπείται με άγνωστο όγκο αέρα στο σκυρόδεμα σε ένα σφραγισμένο θάλαμο. Η διαβάθμιση στην κλίμακα του μετρητή πίεσης για την προκύπτουσα πίεση βαθμονομείται σε ποσοστό περιεχόμενου αέρα μέσα στο δείγμα.(Εικόνα3.6)

Τα δοχεία μέτρησης αεροπεριεκτικότητας για συμβατικό σκυρόδεμα συνήθως έχουν χωρητικότητα 8 λίτρων. Η συμπύκνωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης. Σε περίπτωση χρήσης δονητή χειρός, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι δε θα απελευθερωθεί ο εγκλεισμένος αέρας από υπερβολική δόνηση.

Καμία από τις προαναφερθείσες μεθόδους δεν είναι κατάλληλη για σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή, σκωρίες υψικαμίνων ή αδρανή με μεγάλο πορώδες.



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα συσκευής μέτρησης για τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης (Sika 2007)

4. Σκληρυνθέν σκυρόδεμα

Σκληρυνθώ σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο έχει σκληρυνθεί και έχει αποκτήσει την οριστική μορφή του, δηλαδή έχει μετατραπεί σε τεχνητό λίθο.[3]

4.1 Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος.

4.1.1 Θλιπτική αντοχή

Μία σημαντική ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος είναι η θλιπτική αντοχή. Καθορίζεται από τη δοκιμή συμπίεσης σε ειδικά παραγόμενα δοκίμια (κύβους ή κυλίνδρους) ή καρότα (πυρήνες) από την κατασκευή.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή είναι ο τύπος του τσιμέντου, ο λόγος νερού/ τσιμέντο και ο βαθμός ενυδάτωσης, ο οποίος επηρεάζεται κυρίως από το χρόνο και τη μέθοδο ωρίμανσης.

Η αντοχή του σκυροδέματος επομένως προκύπτει από την αντοχή του ενυδατωμένου τσιμέντου, την αντοχή των αδρανών, την πρόσφυση μεταξύ των δύο αυτών συστατικών και την ωρίμανση (Εικόνα 4.1).

4.1.2 Αντοχή σε κάμψη

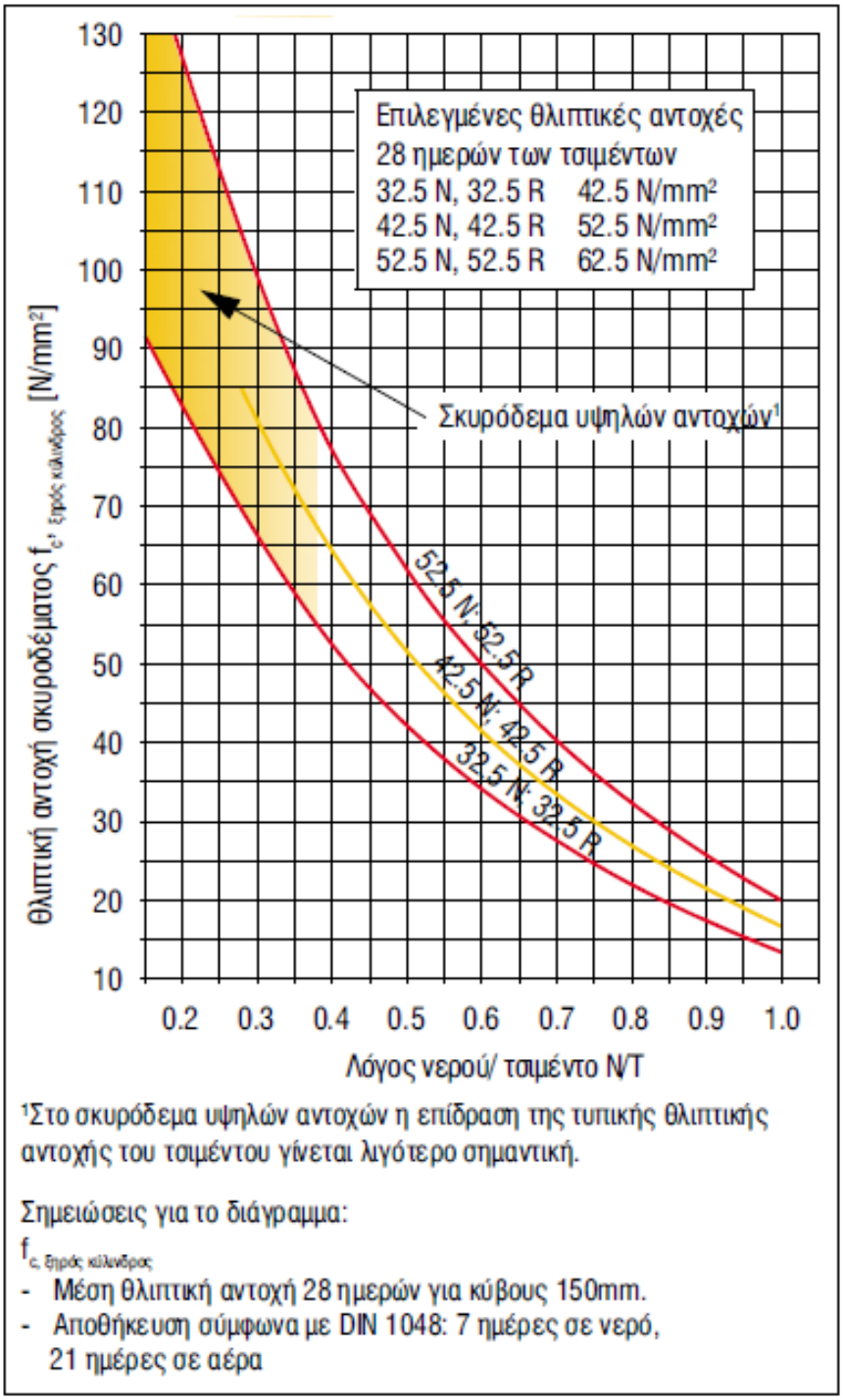
Η αντοχή του σκυροδέματος σε κάμψη είναι ιδιαίτερης σημασίας σε έργα όπως η οδοποιία ή οι αεροδιάδρομοι, ή σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ινοπλισμένες ίνες, ή σε σκυροδέματα επένδυσης καθώς αυτός είναι ο τρόπος που καταπονείται το δάπεδο σε αυτές τις κατασκευές. Παρόλο που η εφελκυστική αντοχή είναι πιο <<θεμελιώδης>> σε σχέση με την καμπτική η δεύτερη είναι ευκολότερο να μετρηθεί και αντιπροσωπεύει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης.

Η αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος αυξάνεται:

- Όσο αυξάνεται η τυπική θλιπτική αντοχή του τσιμέντου
- Όσο μειώνεται ο λόγος νερού/τσιμέντου
- Με τη χρήση γωνιωδών και θραυστών αδρανών.

---

[3] Τα στοιχεία στο κεφάλαιο αυτό έχουν ληφθεί κυρίως από τις ακόλουθες πηγές: Taylor et al. 2006, Τσακαλάκης 2010, Κορωναίος και Πούλακος 2006.



¹Στο σκυρόδεμα υψηλών αντοχών η επίδραση της τυπικής θλιπτικής αντοχής του τσιμέντου γίνεται λιγότερο σημαντική.

Σημειώσεις για το διάγραμμα:

$f_{c,\ \text{ξηράς κύλινδρος}}$

- Μέση θλιπτική αντοχή 28 ημερών για κύβους 150mm.
- Αποθήκευση σύμφωνα με DIN 1048: 7 ημέρες σε νερό, 21 ημέρες σε αέρα

Εικόνα 4.1: Συσχέτιση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, της τυπικής αντοχής του τσιμέντου και του λόγου νερού/τσιμέντου (Sika 2007)

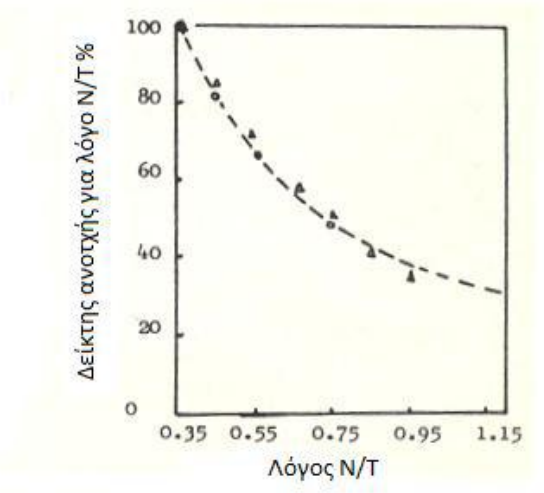
4.1.3 Αντοχή σε Εφελκυσμό

Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μείζονος σημασίας σε κατασκευές από άοπλο σκυρόδεμα καθώς και σε φράγματα που υποβάλλονται σε σεισμούς. Επίσης έχει καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων και δαπέδων αεροδρομίων ή λιμένων, όπου κύριο κριτήριο είναι η αντοχή σε κάμψη, και ακριβέστερα η αντοχή σε κόπωση από κάμψη, η οποία συνδέεται άμεσα με την αντοχή σε εφελκυσμό.

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την αντοχή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού
- Την αντοχή των αδρανών
- Την συνάφεια του τσιμεντοπολτού με τα αδρανή

Πιο συγκεκριμένα η εφελκυστική αντοχή επηρεάζεται από το λόγο N/T, όπως συμβαίνει και στη θλίψη αλλά σε μικρότερη κλίμακα (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Σχέση του λόγου N/T και της αντοχής σε εφελκυσμό.

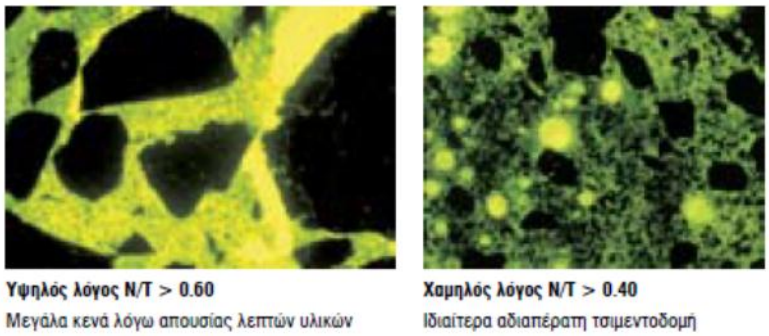
Ο τύπος των αδρανών αλλά και το μέγεθος τους παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην τελική εφελκυστική αντοχή. Γενικά όταν το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αυξάνει η εφελκυστική αντοχή μειώνεται.

Η μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής είναι ιδιαίτερα δυσχερής και γι' αυτόν τον λόγο έχουν επικρατήσει έμμεσοι τρόποι εκτίμησης της, όπως η δοκιμή διάρρηξης και η δοκιμή σε κάμψη.

4.1.4 Στεγανότητα

Η στεγανότητα ορίζει την αντίσταση της κατασκευής του σκυροδέματος στη διείσδυση του νερού.

Η στεγανότητα του σκυροδέματος καθορίζεται από την αδιαπερατότητα (τριχοειδές πορώδες) του ενυδατωμένου τσιμέντου (Εικόνα 4.2).

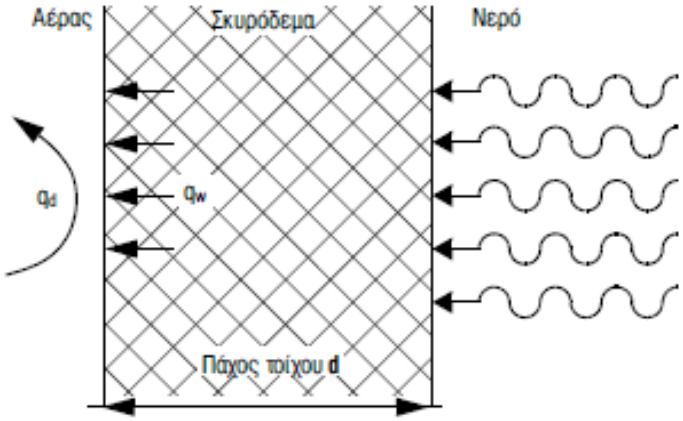


Εικόνα 4.4: Μείωση τριχοειδών κενών και κοιλοτήτων μέσω μείωσης νερού. (Sika 2007)

Σύμφωνα με το EN 12390-8 στεγανότητα υφίσταται όταν η μέγιστη διείσδυση νερού στο σκυρόδεμα είναι μικρότερη ή ίση με 50 mm, ενώ για να επιτευχθεί απαιτείται καλής ποιότητας σκυρόδεμα και σωστή κατασκευή αρμών.

Ουσιαστικά για να υφίσταται ένα στεγανό σκυρόδεμα πρέπει:

Ο όγκος νερού διείσδυσης qw να είναι μικρότερος από τον όγκο εξατμιζόμενου νερού qd (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Απεικόνιση στεγανότητας (Sika 2007)

4.1.5 Συρρίκνωση

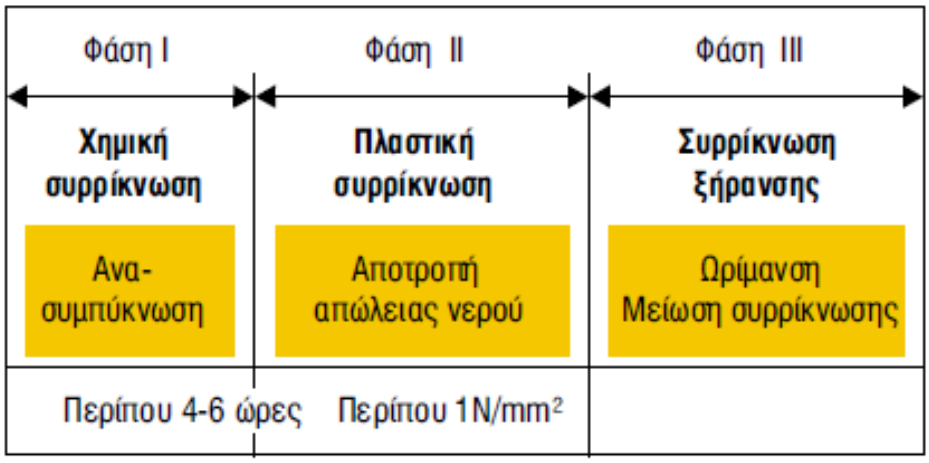
Η συρρίκνωση σημαίνει τη συστολή ή μείωση του όγκου του σκυροδέματος. Η χρονική ακολουθία και το τελικό μέγεθος της συρρίκνωσης επηρεάζονται κυρίως από την έναρξη της ξήρανσης, τις περιβάλλουσες συνθήκες και τη σύνθεση του σκυροδέματος.

Η χρονική αλληλουχία στις διαδικασίες της συρρίκνωσης έχει ως εξής (Εικόνα 4.4):

- Χημική συρρίκνωση του νέου σκυροδέματος μόνο λόγω της διαφοράς του όγκου μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων των χημικών αντιδράσεων εντός του σκυροδέματος. Η συρρίκνωση επηρεάζει μόνο τον τσιμεντοπολτό, όχι τα αδρανή.

- Πλαστική συρρίκνωση του νέου σκυροδέματος στο αρχικό στάδιο πήξης και σκλήρυνσης. Το νερό εκλύεται από το σκυρόδεμα μετά την αρχική πήξη, λόγω εξάτμισης, συνεπώς μειώνεται ο όγκος και το σκυρόδεμα συστέλλεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Η παραμόρφωση συνήθως διακόπτεται όταν το σκυρόδεμα φτάσει σε θλιπτική αντοχή 1N/mm^2.

- Συρρίκνωση ξήρανσης, η συρρίκνωση προκαλείται από την αργή ξήρανση του σκληρυμένου σκυροδέματος, δηλαδή όσο ταχύτερα μειώνεται η ποσότητα του ελεύθερου νερού στην κατασκευή, τόσο ταχύτερα συρρικνώνεται το σκυρόδεμα.



Εικόνα 4.4: Φάσεις συρρίκνωσης. (Sika 2007)

Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό συρρίκνωσης είναι:

- Σχεδιασμός και λεπτομερείς προδιαγραφές των κατασκευαστικών αρμών και των σταδίων σκυροδέτησης

- Βελτιστοποιημένη μελέτη σύνθεσης

- Λιγότερο δυνατό περιεχόμενο ολικό νερό

- Πρόσμικτο μείωσης συρρίκνωσης της συρρίκνωσης μετά την έναρξη της ενυδάτωσης
- Αποτροπή της απώλειας νερού με διαβροχή του καλουπιού και του υποστρώματος πριν τη σκυροδέτηση
- Ολοκληρωμένη ωρίμανση: κάλυψη με πλαστικά φύλλα ή μονωτικές κουβέρτες, επικαλύψεις επιφάνειας για συγκράτηση νερού (γεωυφάσματα, λινάτσες) ή ψεκασμός με υγρό βελτιωτικό ωρίμανσης

4.1.6 Αντοχή σε θειικά

Νερό που περιέχει ενώσεις θείου μερικές φορές απαντάται στο έδαφος ή βρίσκεται διαλυμένο σε υπόγεια ύδατα και μπορεί να προσβάλλει το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το νερό που περιέχει θειικά να αντιδρά με το αργιλικό τριασβέστιο (C3Al) του τσιμέντου και να παράγει ετρινγκίτη (και επίσης άλλες ενώσεις κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες), ο οποίος διογκώνεται και προκαλεί υψηλή εσωτερική πίεση στην κατασκευή και κατά συνέπεια σχηματισμό ρωγμών και αποφλοίωσης.

Προληπτικά μέτρα που μπορούν να ληφθούν είναι

- Όσο το δυνατόν περισσότερο στεγανές κατασκευές σκυροδέματος, δηλαδή χαμηλό πορώδες
- Χαμηλός λόγος νερού/ τσιμέντο με σκοπό ≤ 0.45
- Χρήση τσιμέντου με ελάχιστο περιεχόμενο σε αργιλικό τριασβέστιο (C3Al)
- Ωρίμανση κατάλληλη για την κατασκευή

4.1.7 Χημική αντοχή

Το σκυρόδεμα μπορεί να δεχθεί επίθεση από ρύπους που υπάρχουν στο νερό, στο χώμα ή σε αέρια κατάσταση (π.χ. ατμόσφαιρα). Προσβολή μπορεί επίσης να προκύψει και από τη φύση της χρήσης του σκυροδέματος (π.χ. δεξαμενές, βιομηχανικά δάπεδα, κτλ.).

Συγκεκριμένα:

- Επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, βλαβερά συστατικά στο έδαφος, ρύποι σε αέρια κατάσταση, φυτικής και ζωικής προέλευσης ουσίες μπορούν να επιτεθούν χημικά στο σκυρόδεμα.
- Η χημική επίθεση μπορεί να χωριστεί σε δύο τύπους

- Επίθεση διαλυτών: προκαλούμενη από τη δράση μαλακών νερών, οξέων, αλάτων, βάσεων, λαδιών και λιπαρών ουσιών, κτλ.
- Διόγκωση: προκαλούμενη κυρίως από τη δράση υδατοδιαλυτών θειικών (διόγκωση θειικών).

4.1.8 Αντοχή σε τριβή

Καταπόνηση λόγω τριβής.

Οι επιφάνειες σκυροδέματος είναι εκτεθειμένες σε φόρτιση λόγω κίνησης οχημάτων (τροχοί/ κίνηση), σε καταπονήσεις λόγω τριβής (ολίσθηση/ λάστιχα) και ή τάσεις λόγω κρούσης (βαριά υλικά/ πτώσεις). Η τσιμεντοδομή, τα αδρανή και η μεταξύ τους πρόσφυση υποβάλλονται όλα μαζί σε αυτή τη φυσική πίεση. Η επίθεση είναι επομένως βασικά μηχανική.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να ενισχυθεί η αντοχή σε τριβή. Αρχικά η αντοχή του ενυδατωμένου τσιμέντου σε τριβή είναι χαμηλότερη από ότι εκείνη των αδρανών, ιδιαιτέρως σε πορώδη τσιμεντοπολτό (υψηλό περιεχόμενο σε νερό). Όσο ο λόγος Ν/Τ μειώνεται, το πορώδες του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού επίσης μειώνεται και η πρόσφυση με τα αδρανή βελτιώνεται. Επιπλέον λόγος Ν/Τ μικρότερος από 0.45 αυξάνει την αντοχή σε τριβή, καθώς και βελτίωση της στεγανότητας του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού, βελτίωση της πρόσφυσης μεταξύ αδρανών και ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού, ή επιλογή καλής κοκκομετρικής καμπύλης, χρησιμοποιώντας ειδικά μεγέθη αδρανών αν είναι δυνατόν, ολοκληρωμένη ωρίμανση. Ενώ τέλος για αύξηση της αντοχής σε τριβή ακόμη περισσότερο, πρέπει να χρησιμοποιούνται επίσης ειδικά αδρανή.

4.1.9 Ανάπτυξη θερμότητας ενυδάτωσης

Κατά την ανάμιξή του με το νερό, το τσιμέντο ξεκινά να αντιδρά χημικά. Η διαδικασία αυτή καλείται ενυδάτωση του τσιμέντου.

Η χημική διαδικασία της σκλήρυνσης αποτελεί τη βάση της δημιουργίας του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και επομένως του σκυροδέματος. Η χημική αντίδραση με το νερό ανάμιξης παράγει νέα προϊόντα από τα προϊόντα του Clinker → ενυδάτωση.

Η παρατήρηση κάτω από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δείχνει τρεις διαφορετικές φάσεις της διαδικασίας ενυδάτωσης, η οποία είναι ισχυρά εξώθερμη δηλαδή εκλύεται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας (Εικόνα 4.5).

1η φάση ενυδάτωσης

Διάρκεια συνήθως από 4 έως 6 ώρες από την παραγωγή.

Ο γύψος στον πλαστικό τσιμεντοπολτό συνδέει το αργιλικό τριασβέστιο (C_3Al) για τη δημιουργία ετρινγκίτη, μίας μη υδατοδιαλυτής στρώσης η οποία αρχικά αναστέλλει τη διαδικασία μετατροπής των άλλων συστατικών. Η προσθήκη του γύψου σε ποσοστό 2-5% έχει επιβραδυντική επίδραση.

Οι μακρύτερες "βελόνες" οι οποίες δημιουργούνται σε αυτή τη φάση, συνδέουν τα διαχωρισμένα σωματίδια τσιμέντου, προκαλώντας έτσι την ακαμψία του σκυροδέματος.

2η φάση ενυδάτωσης

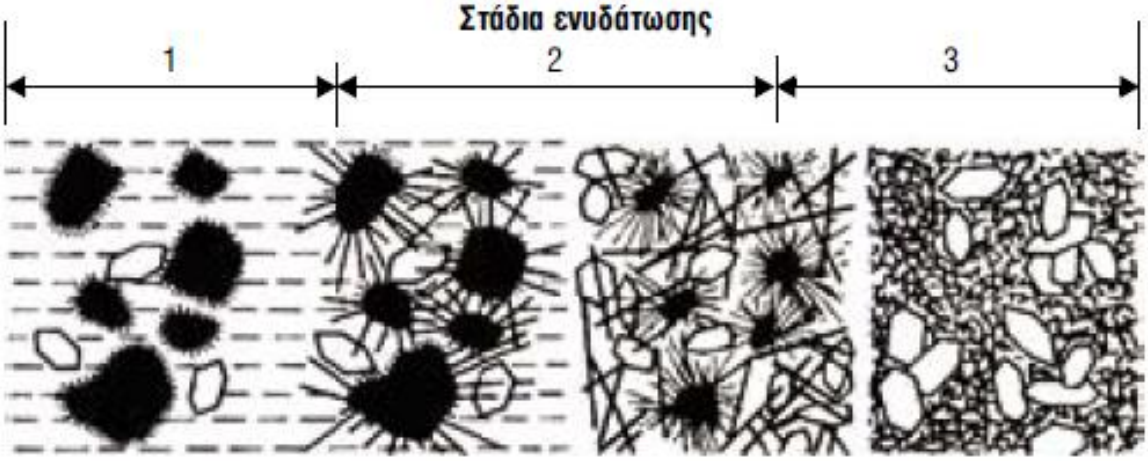
Έναρξη συνήθως 4-6 ώρες περίπου μετά την παραγωγή και διάρκεια έως και μία ημέρα.

Μετά από μερικές ώρες ξεκινά η έντονη ενυδάτωση των προϊόντων του clinker, ειδικά του πυριτικού τριασβεστίου (Ca3Si), με τη μορφή περιπλεγμένων μακριών βελονοειδών ενυδατωμένων κρυστάλλων, οι οποίοι ενισχύουν ακόμη περισσότερο τη δομή του μίγματος.

3η φάση ενυδάτωσης

Έναρξη μετά από περίπου μία ημέρα

Η δομή και μικροδομή του τσιμεντοπολτού είναι αρχικά ακόμη ανοιχτές. Όσο εξελίσσεται η ενυδάτωση, τα διάκενα γεμίζονται με άλλα προϊόντα ενυδάτωσης και η αντοχή αυξάνεται ακόμα περισσότερο.



Εικόνα 4.5: Απεικόνιση των φάσεων ενυδάτωσης και της εξέλιξης της δομής του σκυροδέματος κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου (Sika 2007).

4.1.10 Αντίδραση αλκαλίων-αδρανών

Η αντίδραση αλκαλίων-αδρανών (AAR) σχετίζεται με τις αντιδράσεις του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος με τα αδρανή. Αυτές παράγουν ένα πυριτικό gel το οποίο διαστέλλεται λόγω απορρόφησης του νερού και προκαλεί ρωγμές ή αποφλοίωση του σκυροδέματος.

Η μορφή και ο ρυθμός της αντίδρασης ποικίλει σύμφωνα με τον τύπο των αδρανών.

- Αντίδραση αλκαλίων-πυριτίου (ASR) σε ηφαιστειακά αδρανή
- Αντίδραση αλκαλίων-αλάτων ανθρακικού οξέος (ACR) σε ασβεστολιθικά αδρανή
- Αντίδραση αλκαλίων-πυριτικών αλάτων σε κρυσταλλικά αδρανή

Επιπλέον υπάρχει κίνδυνος για την αντίδραση αυτή όταν γίνεται χρήση αδρανών ευαίσθητων σε αλκάλια. Το πρόβλημα μπορεί προφανώς να ξεπεραστεί εάν δε γίνει χρήση τους, αλλά αυτό δεν είναι συχνά πρακτικό για οικονομικούς και οικολογικούς λόγους. Χρησιμοποιώντας κατάλληλα τσιμέντα και τεχνολογία παραγωγής σκυροδέματος υψηλής ποιότητας, η αντίδραση αυτή μπορεί να αποφευχθεί ή τουλάχιστον να μειωθεί.

Ο ακριβής μηχανισμός της αντίδρασης εξακολουθεί να ερευνάται εντατικώς. Σε γενικές γραμμές, τα ιόντα αλκαλίων διεισδύουν στα αδρανή μέσω της απορρόφησης του νερού και προκαλούν εσωτερική πίεση, η οποία προκαλεί ρωγμές και θραύση των αδρανών και ακολούθως στην τσιμεντοδομή, καταστρέφοντας έτσι το σκυρόδεμα. Η διάρκεια και η έντασή του εξαρτάται από την αντιδραστικότητα του τσιμέντου, τον τύπο και το πορώδες των αδρανών, το πορώδες του σκυροδέματος και τα προστατευτικά μέτρα που θα ληφθούν.

Τα προστατευτικά μέτρα είναι:

- Μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από σκωρίες ή άλλες προσθήκες (πυριτική παιπάλη / ιπτάμενη τέφρα) με χαμηλό ισοδύναμο σε Na_2O
- Ανάλυση της πιθανότητας αντιδράσεων AAR/ASR των αδρανών και κατηγοριοποίησή τους (πετρογραφική ανάλυση/ δοκιμές μικροπίεσης/ έλεγχος απόδοσης κτλ.)
- Αντικατάσταση ή μερική αντικατάσταση των αδρανών (ανάμιξή με άλλα διαθέσιμα αδρανή)
- Μείωση ή ολοκληρωτική αποφυγή της εισχώρηση υγρασίας στο σκυρόδεμα (στεγάνωση ή αποστράγγιση της κατασκευής

- Σχεδιασμός οπλισμού για καλή κατανομή των ρωγμών στο σκυρόδεμα (δηλαδή δημιουργία μόνο πολύ λεπτών ρωγμών)
- Σχεδιασμός στεγανού σκυροδέματος για ελαχιστοποίηση της διείσδυσης της υγρασίας

4.2 Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος

4.2.1 Έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος στο έργο

Ο έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος σε κατασκευασμένα δομικά στοιχεία γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους.

4.2.1.1 Έλεγχος με τη λήψη πυρήνων

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής λαμβάνονται από το κατασκευασμένο σκυρόδεμα κυλινδρικά δοκίμια, τα οποία ονομάζονται πυρήνες ή καρότα, με διάμετρο 10 ή 15 cm και λόγο ύψους/διαμέτρου, h/d = 1.Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την θραύση πυρήνων με διάμετρο 10,15 cm αντιστοιχούνται με τα αποτελέσματα κυβικών δοκιμίων με ακμή 15 cm.

4.2.1.2 Έλεγχος με μεθόδους μη καταστροφής

α) Έλεγχος με κρουσίμετρα (Εικόνα 4.6, Εικόνα 4.7)

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα, τα κρουσίμετρα. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής πρέπει το στέλεχος του κρουσίμετρου να είναι κάθετο στην εξεταζόμενη επιφάνεια του σκυροδέματος. Ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου κρουσίμετρου η αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίζεται με :

- <u>μέτρηση της διαμέτρου d</u>. Στη μέθοδο αυτή η αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίζεται από τη μέση διάμετρο, d, της κοιλότητας που δημιουργεί η κεφαλή του κρουσίμετρου στην εξεταζόμενη επιφάνεια .

- <u>μέτρηση της αναπήδησης R.</u> Στη μέθοδο αυτή η αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίζεται από τη μέση τιμή της αναπήδησης R, του κρουσίμετρου, καθώς αυτό προσκρούει στην εξεταζόμενη επιφάνεια

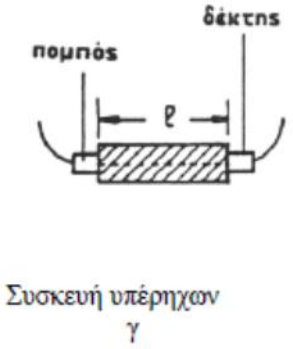
Κρουστικές μέθοδοι
Μέτρηση διαμέτρου d Μέτρηση αναπήδησης R
α β

Εικόνα 4.6: Κρουστικές μέθοδοι

Εικόνα 4.7: Κρουσίμετρο

β) Έλεγχος με τη συσκευή υπέρηχων

Στη μέθοδο αυτή στο ένα άκρο του εξεταζόμενου δοκιμίου, που έχει μήκος l, τοποθετείται ο πομπός της συσκευής υπέρηχων και στο άλλο άκρο του ο δέκτης της συσκευής (Εικόνα 4.8 –Εικόνα 4.9)).



Εικόνα 4.8: Διάταξη υπερήχων (Κορωναίος και Πουλάκος 2006)

Κατά τη δοκιμή ο πομπός εκπέμπει υπέρηχους που λαμβάνονται από το δέκτη μετά από χρόνο t. Η αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίζεται από την ταχύτητα διάδοσης των υπέρηχων, c, μέσα από το εξεταζόμενο δοκίμιο, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$c=l/t$$

Εικόνα 4.9: Συσκευή υπερήχων

4.2.2 Έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος στο εργαστήριο

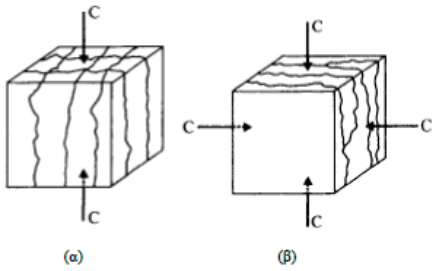
Καμία δοκιμή δεν ανταποκρίνεται στις συνθήκες που καταπονούν το σκυρόδεμα στην πραγματικότητα. Οι διάφορες εργαστηριακές δοκιμές μας δίνουν ένα μέτρο της αντοχής του υλικού. Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα τον μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, ο τρόπος επιβολής του φορτίου και οι αναπτυσσόμενες εντατικές και παραμορφωσιακές συνθήκες στην περιοχή επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή.

4.2.2.1 Δοκιμή σε θλίψη

Η δοκιμή σε θλίψη αποτελεί την πιο κοινή ίσως δοκιμή για το σκυρόδεμα, κυρίως λόγω του ότι είναι απλή στη διεξαγωγή της. Επίσης η αντοχή σε θλίψη είναι ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος απαραίτητο για κάθε υπολογισμό.

Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα τον μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή και οι επιβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και παραμόρφωσης στα σημεία επιβολής του φορτίου.

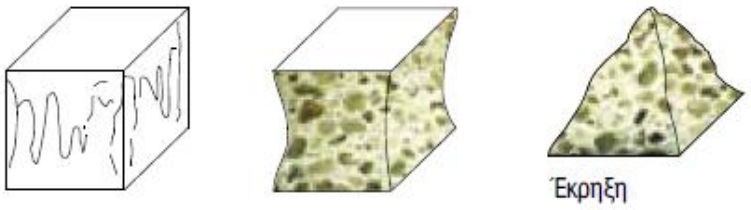
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι μορφές θραύσης κυβικού δοκιμίου υπό μονοαξονική και διαξονική θλίψη (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Μορφές θραύσης για (α) μονοαξονική θλίψη και (β) διαξονική (Κορωναίος και Πουλάκος 2006)

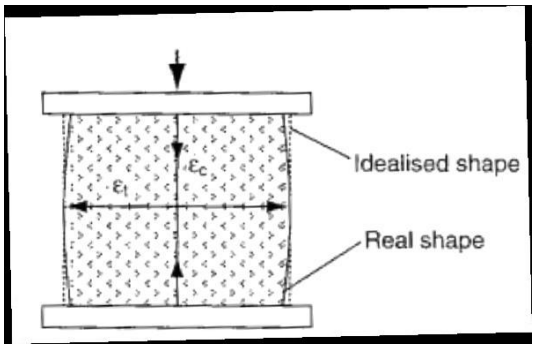
Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές κυρίως παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία. Οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και τελικά το δοκίμιο αστοχεί σχηματίζοντας κολονάκια. Αντίθετα στην περίπτωση της διαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές παράλληλες στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο φορτίσεις και το δοκίμιο αστοχεί με τον σχηματισμό πλακοειδών στοιχείων. Στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης υφίσταται αστοχία λόγω σύνθλιψης και το σκυρόδεμα δεν συμπεριφέρεται πλέον ψαθυρά.

Στις πραγματικές δοκιμές όμως οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες της μηχανής στην οποία γίνεται η δοκιμή. Το σκυρόδεμα κατά τη θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια περισσότερο από τις χαλύβδινες πλάκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται, λόγω τριβής, η οριζόντια παραμόρφωση και να αναπτύσσονται συνθήκες τριαξονικής θλίψης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αποτέλεσμα της τριαξονικής θλίψης είναι να αυξάνεται φαινομενικά η αντοχή του δοκιμίου.



Εικόνα 4.11: Τυπικές μορφές θραύσης (Sika 2007)

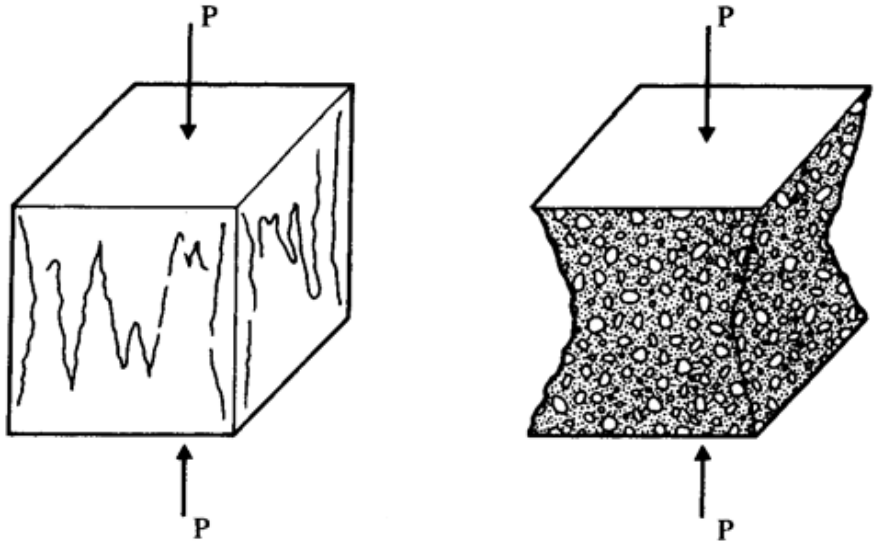
Οι εγκάρσιες αυτές δυνάμεις εξασθενούν καθώς απομακρυνόμαστε από τις πλάκες. Όταν το ύψος του δοκιμίου είναι μεγαλύτερο από δύο φορές το πλάτος του στο μέσο του δοκιμίου υφίστανται συνθήκες μονοαξονικής θλίψης. Έτσι εξηγείται το ότι στα κυλινδρικά δοκίμια όπου ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη (H/D≥2) η αντοχή είναι μικρότερη απ' ότι στα κυβικά δοκίμια (H/D=1). Η αντοχή του κυλίνδρου είναι ανάλογη της αντοχής του κύβου και είναι περίπου το 80% αυτής. Η σχέση των δύο αντοχών εξαρτάται και από το μέγεθος της μέγιστης επιβαλλόμενης δύναμης αλλά και από τις συνθήκες υγρασίας. Στη συνέχεια φαίνεται η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου και η σχέση της αντοχής με την αναλογία ύψους-διαμέτρου (ASTM C 42-04).



Εικόνα 4.12: Παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.

Η χρήση κυλινδρικών δοκιμίων υπερέχει λόγω του ότι επιτυγχάνεται πιο ομοιόμορφή κατανομή των τάσεων. Ωστόσο τα κυβικά δοκίμια είναι πιο εύχρηστα κυρίως διότι δεν απαιτείται απίσωση (καπέλωμα).

Στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται η ακόλουθη μορφή αστοχίας (Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.13: Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη (Sika 2007).

4.2.2.2 Δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Η δοκιμή αυτού του είδους έχει το πλεονέκτημα ότι μας δίνει αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος χωρίς να χρειαστεί να γίνουν υποθέσεις για την ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου.

Υπάρχει πλήθος διαφορετικών δοκιμών για τη μέτρηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν σε τέτοιου είδους δοκιμές είναι η εφαρμογή του φορτίου χωρίς να προκληθούν συγκεντρώσεις τάσεων αλλά και η αποφυγή της εκκεντρότητας.

Οι κυριότεροι τρόποι εφαρμογής του εφελκυστικού φορτίου είναι οι ακόλουθοι:

- Με αρπάγες
- Με συγκόλληση στα άκρα
- Με τριγωνικά πλαίσια

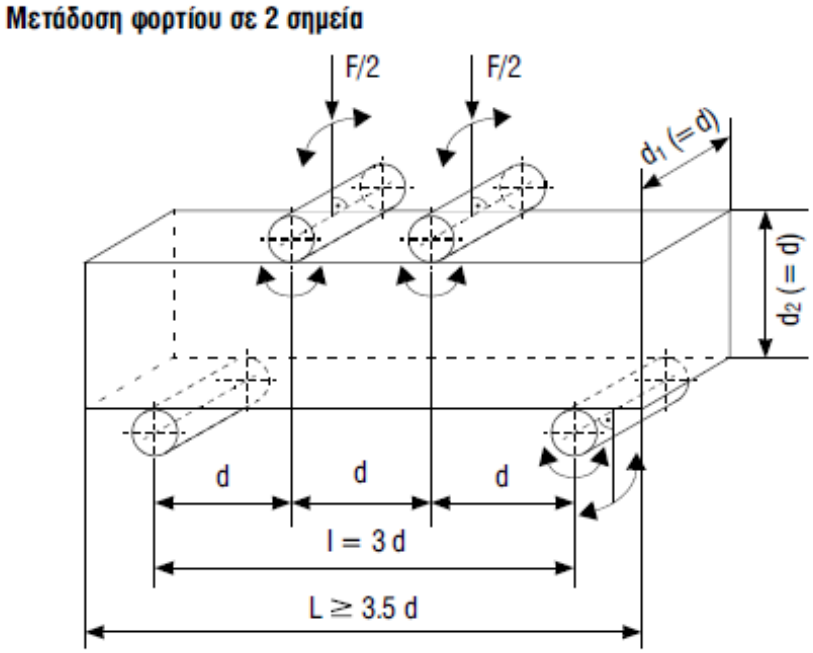
4.2.2.3 Δοκιμή διάρρηξης

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Τα δοκίμια συνήθως είναι κυλινδρικά, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούμε στην δοκιμή σε θλίψη, πράγμα που μας διευκολύνει στην σύγκριση της εφελκυστικής με την θλιπτική αντοχή. Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στη δοκιμή σε κάμψη πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση υπόθεση που δεν ισχύει και γι' αυτό η υπολογιζόμενη αντοχή είναι θεωρητική.

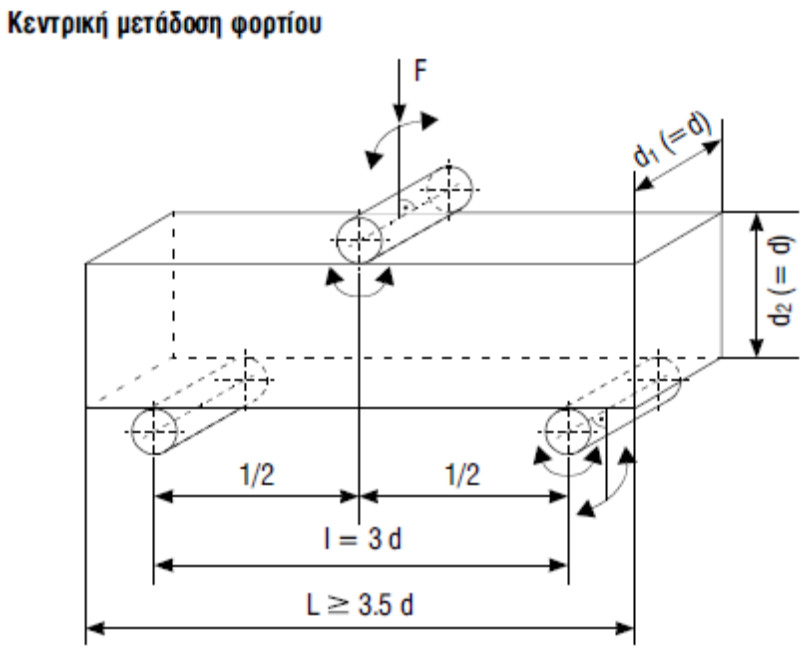
Δοκιμή διάρρηξης είναι δυνατό να γίνει και σε κυβικά ή πρισματικά δοκίμια με την επιβολή του φορτίου στα μέσα δύο απέναντι πλευρών.

4.2.2.4 Δοκιμή σε κάμψη

Η δοκιμή σε κάμψη μπορεί να γίνει είτε με την επιβολή του φορτίου σε ένα σημείο στο μέσον του δοκιμίου είτε σε δύο σημεία που ισαπέχουν «στα τρίτα του ανοίγματος» όπως φαίνεται παρακάτω. (Εικόνα 4.14)



Εικόνα 4.14α : Δοκιμή κάμψης με φόρτιση στα τρίτα του ανοίγματος (Sika 2007)

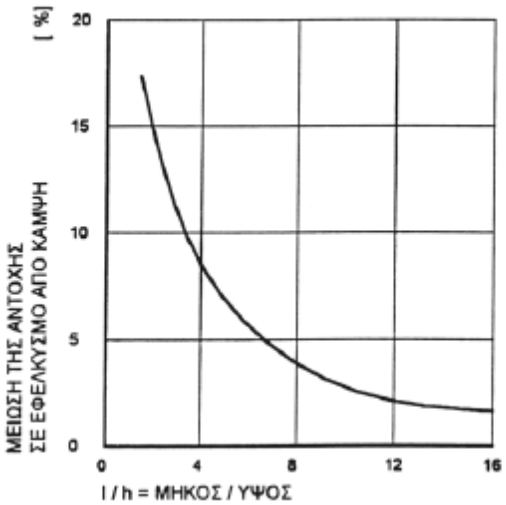


Εικόνα 4.14β : Δοκιμή κάμψης με φόρτιση στο μέσον (Sika 2007)

Ο όγκος του δοκιμίου που βρίσκεται υπό τη μέγιστη τιμή της ροπής κάμψεως είναι διαφορετικός στις δύο περιπτώσεις, όπως και η κατανομή των τεμνουσών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ότι η δοκιμή με τα δύο σημεία επιβολής του φορτίου να δίνει χαμηλότερες τιμές αντοχής και καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

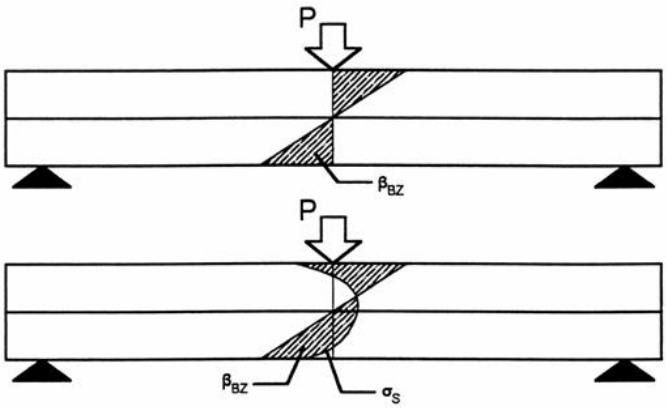
Η δοκιμή κάμψης δίνει γενικά μεγαλύτερες φαινόμενες αντοχές σε σχέση με τις άλλες δοκιμές. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι ο συνολικός όγκος του δοκιμίου που υπόκειται στη μέγιστη ένταση είναι μικρότερος και άρα η πιθανότητα να βρίσκεται μια ατέλεια στην κρίσιμη περιοχή είναι μικρότερη. Επίσης η ένταση που υπολογίζεται μέσω της ελαστικής θεώρησης είναι ανεπαρκής αφού υπάρχει πλαστική παραμόρφωση καθώς προσεγγίζεται η θραύση με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η αντοχή.

Το μήκος των δοκιμίων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ύψος τους, ώστε το αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από τη διατμητική καταπόνηση (Εικόνα 4.15).



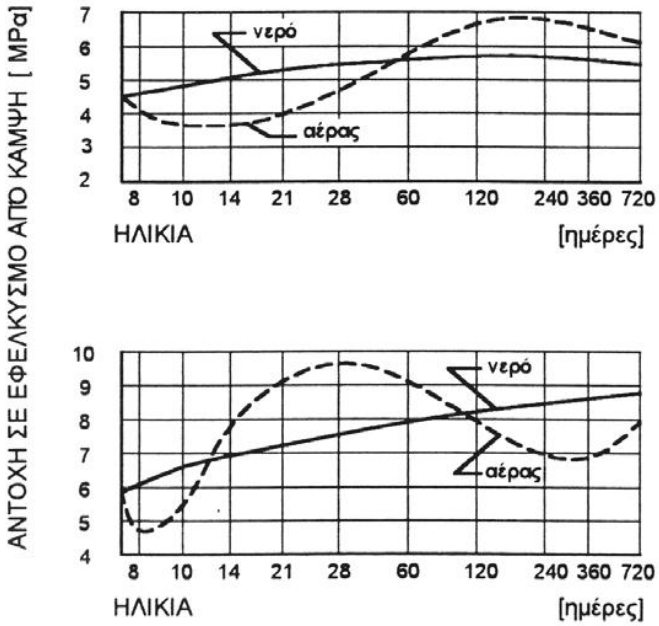
Εικόνα 4.15: Επίδραση του λόγου μήκους: ύψους, l/h, του δοκιμίου στην αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη του σκυροδέματος (Κορωναίος και Πουλάκος 2006)

Τα δοκίμια διατηρούνται μέσα στο νερό μέχρι τη δοκιμή, ώστε το αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από τις εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται λόγω της συστολής ξήρανσης, σ_s (Εικόνα 4.16).



Εικόνα 4.16: Έλεγχος της αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη και επίδραση της συστολής ξήρανσης, σ_s (Κορωναίος και Πουλάκος 2006)

Στην Εικόνα 4.17 δίνεται η διαφορά της αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη, για διατήρηση στον αέρα και για διατήρηση μέσα στο νερό, η οποία είναι συνέπεια των τάσεων που αναπτύσσονται κάθε φόρα λόγω της συστολής ξήρανσης ή της διαστολής ύγρανσης.



Εικόνα 4.17: Η αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη για δοκίμια σκυροδέματος και κονιάματος ανάλογα με τον τρόπο συντήρησης τους (Κορωναίος και Πουλάκος 2006)

4.2.2.5 Πυκνότητα σκληρυμένου σκυροδέματος

Η πυκνότητα υπολογίζεται από τη μάζα και τον όγκο οι οποίοι λαμβάνονται από ένα σκληρυμένο δοκίμιο σκυροδέματος.

Απαιτούνται δοκίμια με ελάχιστο όγκο 1 λίτρου. Εάν η ονομαστική διάμετρος των μέγιστων αδρανών είναι πάνω από 25mm, ο ελάχιστος όγκος του δοκιμίου πρέπει να είναι πάνω από 50 D3, όταν το D είναι η μέγιστη διάμετρος κόκκου αδρανών.

Το πρότυπο καθορίζει 3 συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να προκαθοριστεί η μάζα του δοκιμίου. Ως έτοιμο δείγμα, ως δείγμα κορεσμένο σε νερό ή ως δείγμα που ξηράθηκε σε θερμαινόμενο χώρο. Ενώ για να καθοριστεί ο όγκος μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο αναφοράς, είτε με υπολογισμό από τις πραγματικές μετρούμενες μάζες, είτε με υπολογισμό από τα δοκίμια ελέγχου. Ο καθορισμός του όγκου του νερού εκτόπισης είναι η πιο ακριβής μέθοδος και η μόνη που είναι κατάλληλη για δοκίμια ακανόνιστου σχεδιασμού.

4.2.2.6 Βάθος διείσδυσης νερού υπό πίεση

Για να υπολογιστεί ο βαθμός διείσδυσης νερού υπό πίεση, εφαρμόζεται νερό υπό πίεση στην επιφάνεια σκληρυμένου σκυροδέματος και στο τέλος της διάρκειας της δοκιμής το δοκίμιο διασπάται και μετράται το μέγιστο βάθος διείσδυσης του νερού.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι κύβοι, κύλινδροι ή πρίσματα με ελάχιστο μήκος ή διάμετρο 150mm.Η περιοχή ελέγχου στο δοκίμιο είναι ένα κύκλος διαμέτρου 75mm (η πίεση νερού μπορεί να εξασκηθεί από πάνω ή κάτω).

Συνθήκες κατά τη δοκιμή

- Η πίεση του νερού δεν πρέπει να εξασκείται σε λεία/ φινιρισμένη επιφάνεια του δοκιμίου (κατά προτίμηση χρησιμοποιείστε μία πλευρική επιφάνεια που έχει διαμορφωθεί ειδικά για τη δοκιμή). Η αναφορά πρέπει να καθορίσει την κατεύθυνση της πίεσης του νερού σε σχέση με την κατεύθυνση έγχυσης όταν παρασκευάζονταν τα δοκίμια (σε ορθές γωνίες ή παράλληλα).

- Η επιφάνεια του σκυροδέματος που είναι εκτεθειμένη στην πίεση του νερού πρέπει να εκτραχύνεται με μία συρματόβουρτσα (κατά προτίμηση αμέσως μετά την αποκαλούπωση του δοκιμίου).

- Τα δοκίμια πρέπει να είναι ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών κατά τη φάση της δοκιμής.

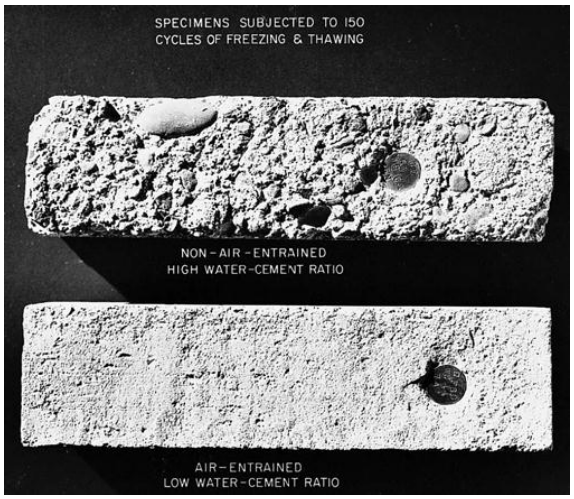
Για 72 ώρες εξασκείται συνεχής πίεση νερού 500 (± 50) kPa (5bar). Τα δοκίμια πρέπει να επιθεωρούνται συστηματικά για νωπές περιοχές και μετρήσιμη απώλεια νερού. Μετά τη δοκιμή τα δοκίμια πρέπει να απομακρύνονται άμεσα και να θραύονται κατά τη διεύθυνση της εξασκούμενης πίεσης. Κατά το διαχωρισμό, η επιφάνεια που ήταν εκτεθειμένη στην πίεση του νερού πρέπει να βρίσκεται από κάτω.

Εάν τα διασπώμενα τμήματα είναι ελαφρώς ξηρά, το μονοπάτι κατεύθυνσης του νερού πρέπει να σημειώνεται πάνω στο δοκίμιο. Η μέγιστη διείσδυση κάτω από την περιοχή ελέγχου πρέπει να μετριέται και να δηλώνεται στο πλησιέστερο 1 mm.

4.2.2.7 Αντοχή σε δοκιμή παγοπληξίας

Για τον έλεγχο της αντοχής του σκυροδέματος σε παγετό με νερό και σε κύκλους ψύξης (παγώματος)/ απόψυξης (ξεπαγώματος) με διάλυμα NaCl (“αλατόνερο”). Μετράται η ποσότητα του σκυροδέματος που έχει αποχωριστεί από την επιφάνεια μετά από έναν καθορισμένο αριθμό και συχνότητα κύκλων ψύξης/απόψυξης.

Πιο αναλυτικά τα δοκίμια ψύχονται επαναλαμβανόμενα σε θερμοκρασίες κάτω από τους -20°C και επαναθερμαίνονται στους +20°C ή περισσότερο (σε νερό ή κοινό διάλυμα αλατιού). Η προκύπτουσα ποσότητα του υλικού που έχει διαχωριστεί είναι ενδεικτική της αντίστασης του σκυροδέματος σε παγετό ή κύκλους ψύξης/απόψυξης (Εικόνα 4.18)



Εικόνα 4.18: Εικόνα δοκιμίων που έχουν ελεγχθεί σε αντοχή σε παγετό το πρώτο δεν περιέχει αερακτικό σε σχέση με το δεύτερο (Taylor et al. 2006)

5 Μελέτη συνθέσεως σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη

Σύνθεση σκυροδέματος ονομάζεται η διαδικασία, η οποία ακολουθείται για τον ακριβή προσδιορισμό της ποσότητας του τσιμέντου, του νερού και των αδρανών υλικών, οι οποίες πρέπει να αναμιχθούν, ώστε να παρασκευαστεί σκυρόδεμα, το οποίο να έχει προκαθορισμένες ιδιότητες, αφού ληφθούν υπόψη η ποιότητα και οι ιδιότητες των διαθέσιμων υλικών.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού μελέτης συνθέσεων για σκυροδέματα που καταπονούνται σε κάμψη, με κάθιση από 0 μέχρι 25mm, καθώς και ένα πρόγραμμα αυτοματοποιημένου υπολογισμού σύμφωνα με το πρότυπο ACI 211.3R-02 και την προδιαγραφή UFGS-32 13 11 Concrete Pavements for Airfields and other Heavy Duty Pavements. Τέτοιου είδους σκυροδέματα χρησιμοποιούνται ευρέος σε δάπεδα.

Τα δάπεδα επί εδάφους διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες.

Ανάλογα με τη θέση τους σε:

- Δάπεδα εξωτερικών χώρων: Τα δάπεδα αυτά υπόκεινται στις δράσεις του περιβάλλοντος (θερμοκρασιακές μεταβολές ημερήσιου ή ετήσιου κύκλου, βροχή και παγετός). Φορτίζονται είτε από τα συνήθη φορτηγά οχήματα (max επιτρεπόμενο φορτίο άξονα 13t), τυχόν χρησιμοποιούμενα εμπορευματοκιβώτια και κυρίως από τους γερανούς φορτοεκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων είτε από αεροπλάνα, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως σε δάπεδα αεροδρομίων. Οι απαιτήσεις ως προς την αντίσταση σε ολίσθηση πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους ότι το δάπεδο μπορεί να είναι βρεγμένο έστω και αν η ταχύτητα μετακίνησης είναι συνήθως μικρή. Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις καθορίζουν επίσης και τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας.

- Δάπεδα εσωτερικών χώρων: Τα δάπεδα αυτά υφίστανται σημαντικά μειωμένες θερμοκρασιακές δράσεις και διαφορετικό τρόπο φόρτισης που εξαρτάται από την διάταξη των ραφιών και το μηχάνημα φορτοεκφόρτωσης. Λόγω όμως των συστημάτων ραφιών και φορτοεκφόρτωσης πρέπει να τηρούν αυστηρές απαιτήσεις επιπεδότητας και ομαλότητας κύλισης. Τα δάπεδα αυτά συχνά κατασκευάζονται με ινοπλισμένο με χαλύβδινες ίνες σκυρόδεμα και απαιτούν ιδιαίτερης ακρίβειας διάστρωση, συμπύκνωση και τελική επιπέδωση που εξασφαλίζεται μόνο με χρήση ειδικών διαστρωτικών και συμπυκνωτικών μηχανημάτων καθώς και με τελική μόρφωση με ελικόπτερα. Επισημαίνεται ότι η τοποθέτηση ραφιών μεγάλου ύψους πακτωμένων στο δάπεδο, δημιουργεί ιδιαίτερα επιβαρυντική επιπόνηση των δαπέδων σε περίπτωση σεισμικής δράσης, η οποία μπορεί να μετριασθεί σημαντικά με κατάλληλη σύνδεση των

ραφιών μεταξύ τους έτσι ώστε σε περίπτωση σεισμού να δημιουργηθεί δράση πλαισίου και όχι προβόλου.

Ανάλογα με τον τύπο οπλίσεώς τους, διακρίνονται σε:

- Άοπλα δάπεδα. Τα δάπεδα αυτά διαστασιολογούνται με μεθόδους ελαστικής ανάλυσης έτσι ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις εφελκυσμού από κάμψη να επιτρέψουν τον προβλεπόμενο αριθμό φορτίσεων από τα φορτία λειτουργίας και τις λοιπές δράσεις (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές) χωρίς να παρουσιαστεί ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται σε νόμους αστοχίας άοπλου σκυροδέματος σε κόπωση από κάμψη και έχει μακρά ιστορία εφαρμογής -και επομένως εμπειρίας- σε οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων (Κόλιας, 2008α).

- Οπλισμένα με συνήθεις ράβδους οπλισμού, πλέγματα οπλισμού κ.α. Σε αυτή την περίπτωση δαπέδων η ύπαρξη οπλισμών – εφόσον γίνει ο ορθός υπολογισμός αυτών- εξασφαλίζει τοπικά την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του δαπέδου αλλά το σκυρόδεμα είναι ρηγματωμένο και ο οπλισμός αναλαμβάνει σημαντικό ποσοστό φορτίου ενώ το εύρος των ρωγμών πρέπει να διατηρείται μέσα σε επιτρεπτά όρια με κατάλληλους ελέγχους. Σημαντική στο τομέα αυτόν είναι η συμβολή των Abbas, et al (2007).

- Ινοπλισμένα δάπεδα με ίνες μεταλλικές, συνθετικές κ.α. Η παρουσία των ινών μεγάλου μέτρου ελαστικότητας στα δάπεδα συμβάλλει στον έλεγχο της μικρορηγματώσεως και την ανακατανομή των εντάσεων μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, χωρίς ωστόσο οι ίνες να αυξάνουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η πλαστιμότητα ενός ινοπλισμένου δαπέδου εξαρτάται από τον τύπο των ινών, τη δοσολογία και την αντοχή τους και εκφράζεται μέσω του συντελεστή Re, ως ο λόγος του μέσου φορτίου ως προς το φορτίο κατά τη δημιουργία της πρώτης ρωγμής. Το μέσο φορτίο ορίζεται ως η μέση τιμή του φορτίου κατά την πρώτη ρωγμή και του φορτίου που αντιστοιχεί σε βύθιση 3mm μετά την πρώτη ρωγμή (Concrete Society Technical Report no 34, 1994).

Ανάλογα με την κατασκευαστική μέθοδο που ακολουθείται, διακρίνονται σε:

- Δάπεδα με αρμούς συστολής (jointed floors). Πρόκειται για τη συνήθη διαδικασία κατασκευής δαπέδων επί εδάφους. Κατά τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση του δαπέδου, κόβονται με αρμοκόπτη οι αρμοί συστολής σε κάνναβο περί τα 5.0 - 6.0m, οπότε το δάπεδο πλέον συμπεριφέρεται ως σύνολο επιμέρους πλακών με μικρότερες διαστάσεις. Οι επιβαλλόμενες τάσεις «καταναγκασμού» λόγω συστολής ξηράνσεως και θερμοκρασιακών μεταβολών είναι μικρότερες σε σύγκριση με δάπεδα με αρμούς σε μεγαλύτερες αποστάσεις και ο κίνδυνος

ανάπτυξης ρωγμών είναι μικρότερος. Ωστόσο όμως η μέθοδος αυτή μειονεκτεί ως προς το κόστος κατασκευής και συντήρησης των αρμών κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

- Δάπεδα χωρίς αρμούς συστολής (jointless floors). Σε αυτή την περίπτωση αναφερόμαστε σε δάπεδα τα οποία σκυροδετούνται κατά μεγάλες επιφάνειες ανά φάση σκυροδέτησης χωρίς να προβλέπονται αρμοί συστολής. Μία τέτοια επιφάνεια δαπέδου μπορεί να έχει διαστάσεις έως και 50m ανά κατεύθυνση. Τέτοιου τύπου δάπεδα προβλέπονται ινοπλισμένα με μεταλλικές ίνες σε κατάλληλο ποσοστό. Κατά τον σχεδιασμό αυτών των δαπέδων είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς, με ακρίβεια, οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω συστολής ξηράνσεως και θερμοκρασιακών μεταβολών και οι πιθανές ρηγματώσεις να περιορισθούν σε εύρη που δεν θα επηρεάσουν τη χρήση του δαπέδου.

Για τον σωστό σχεδιασμό μελέτης συνθέσεως τέτοιου τύπου σκυροδεμάτων σε καμία περίπτωση όμως δεν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ακόλουθοι υπολογισμοί. Οι αρχικές δοκιμές στο εργαστήριο θα δώσουν μία πρώτη εικόνα για την εργασιμότητα την περιεκτικότητα σε αέρα και τις αντοχές του συγκεκριμένου σκυροδέματος. Σε περιπτώσεις που δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις, αλλαγές γίνονται συνήθως στον λόγο νερού τσιμέντου αλλά και τις ποσότητες των προσμίκτων. Είναι αναγκαίο μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω εργασιών στο εργαστήριο, να δημιουργούνται δοκιμαστικά αναμίγματα στο πεδίο ώστε να παρατηρείτε η συμπεριφορά του σκυροδέματος στην πράξη.

Στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς τα χημικά πρόσμικτα. Θεωρείται ότι η χρήση τους γίνεται σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή στις απαιτούμενες ποσότητες που ορίζει.

5.1 Απαιτήσεις Αδρανών

Πέρα από τα γενικά χαρακτηριστικά των αδρανών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, για τη δημιουργία σκυροδέματος δαπέδων πρέπει να καλύπτονται οι παρακάτω απαιτήσεις.

1. Αντοχή σε αποσάθρωση-Δοκιμή υγείας / ASTM C88 Standars Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate). Τα αδρανή, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα δεν πρέπει να έχουν περισσότερο από 18% απώλεια σε 5 κύκλους με χρήση θειικού μαγνησίου $MgSO_4$ ή 12% με χρήση θειικού νατρίου Na_2SO_4.

2. Πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού του βαθμού αλκαλικής αντίδρασης των αδρανών (μέθοδος κονιάματος-ράβδου) / ASTM C 1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar_Bar Method). Τα

αδρανή χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα πρέπει να εξετάζονται ξεχωριστά και να έχουν λιγότερο από 0,08% μετά από 28 ημέρες βύθιση σε 1N NaOH διαλύματος.

3. Φθορά σε τριβή και κρούση / ASTM C 131 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact to the Los Angeles Machine. Τα χονδρόκοκκα αδρανή δεν πρέπει να έχουν απώλεια μεγαλύτερη από 40%.

4. Κοκκομετρική διαβάθμιση / ASTM C 33 Standard Test Method for Concrete Aggregates. Στην προδιαγραφή αυτή παρουσιάζονται τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης τόσο για τα χονδρόκοκκα αλλά και τα λεπτόκοκκα. Ενώ ο μέγιστος κόκκος αδρανών είναι 17,5mm (1,5 inc). Εκτός αν το έργο έχει άλλη απαίτηση.

5. Δοκιμή για τον προσδιορισμό ελαφροβαρών προσμίξεων / ASTM C 123 Standard Test Method for Lightweight particles for Aggregates. Για τα χονδρόκοκκα αδρανή από 0,2 έως 1 ανάλογα τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν. Για τα λεπτόκοκκα 0,5%.

6. Υλικά λεπτότερα από 0,075mm /ASTM C 117 Standard Test Method for Material finer than 0,075mm. Για τα χονδρόκοκκα αδρανή από 0 έως 1%. Για λεπτόκοκκα αδρανή 3%

7. Προσδιορισμός σβώλων αργίλου και εύθρυπτων αδρανών υλικών / ASTM C 142 Standard Test Method for Clay lumps and friable particles. Για τα χονδρόκοκκα αδρανή 2%, για λεπτόκοκκα μέχρι 1%.

5.2 Συνδυασμός αδρανών

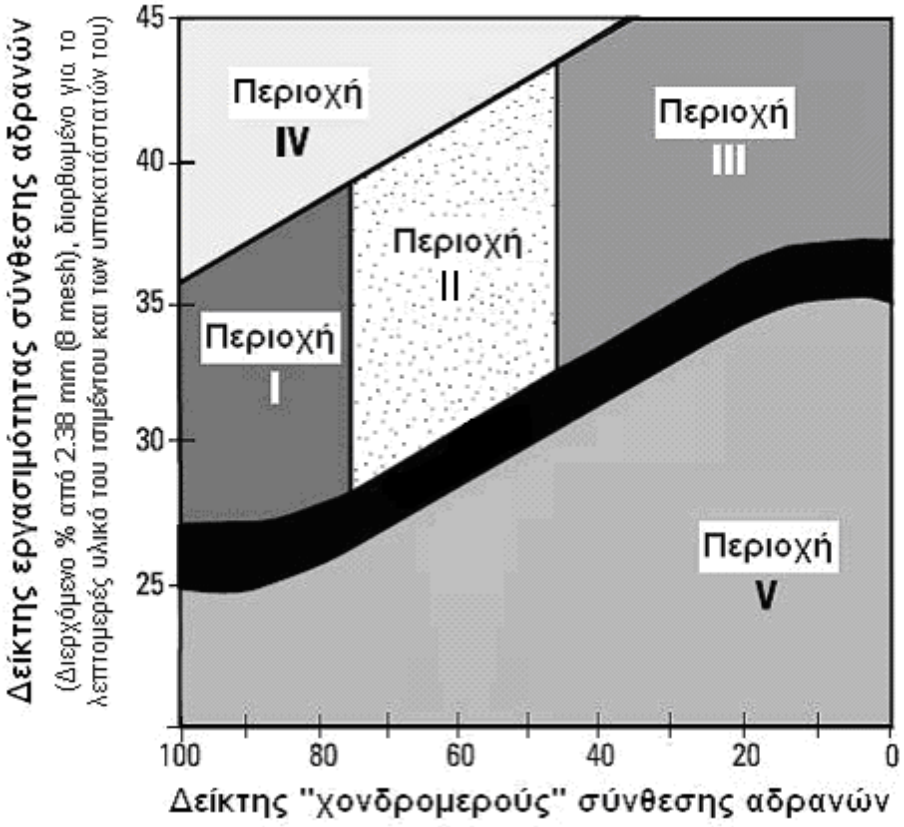
Επιπλέον, ανεξάρτητα από της απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν τα χονδρόκοκκα και τα λεπτόκοκκα ως προς την διαβάθμισή τους, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ο συνδυασμός τους πρέπει να είναι τέτοιος έτσι ώστε να ικανοποιούν την ακόλουθη απαίτηση:

- Ο δείκτης χονδρομερούς σε συνδυασμό με τον δείκτη εργασιμότητας πρέπει στο αντίστοιχο διάγραμμα (Διάγραμμα 5.1), να βρίσκονται μέσα στην περιοχή του ορθογωνίου που χαρακτηρίζεται ως ιδανική.

- Ο δείκτης χονδρομερούς ορίζεται ως το % αθροιστικό παραμένον του μίγματος στο κόσκινο 9.5mm διά του κοσκίνου 2.36mm.

- Ο δείκτη εργασιμότητας ορίζεται ως το % διερχόμενο το κόσκινο 2.36mm. Σε περιπτώσεις που το βάρος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται είναι περισσότερο

από 335kg/m^3, πρέπει να γίνεται μία διόρθωση στον συντελεστή εργασιμότητας κατά 2,5% προς τα πάνω ανά 42kg τσιμέντο.



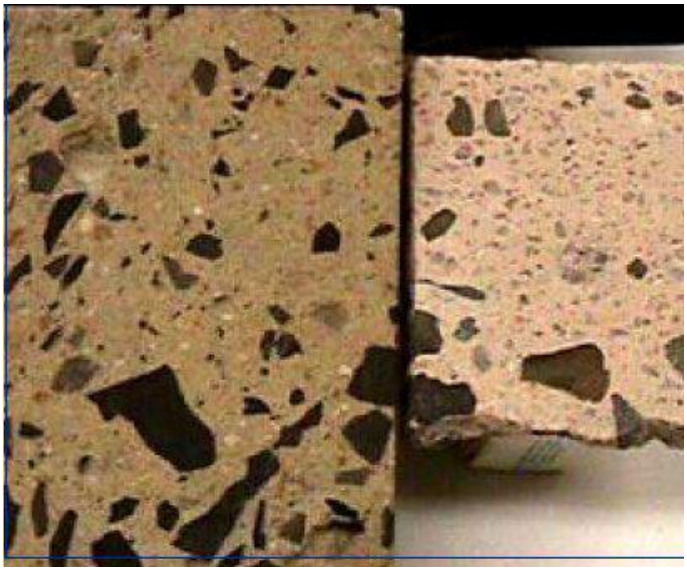
Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα σχέσης μεταξύ «Δείκτη χονδρομερούς» αδρανών και «Δείκτη εργασιμότητας» του σκυροδέματος

Ο Shilstone [13] συνιστά να επιδιώκεται «στόχος» 60 για το «*Δείκτη χονδρομερούς*» και 35 για το *Δείκτη εργασιμότητας* **(Περιοχή ΙΙ)**. Όμως, όταν το μέγιστο μέγεθος τεμαχίων αδρανών κυμαίνεται από 25 mm – 37.5 mm, τότε ο *Δείκτης χονδρομερούς* πρέπει να είναι περίπου 52 και ο *Δείκτης εργασιμότητας* να κυμαίνεται από 34 έως 38, ενώ όταν ο Δείκτης *χονδρομερούς* είναι 68 τότε ο *Δείκτης εργασιμότητας* πρέπει να παίρνει τιμές από 32 έως 36. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι αποδεκτή περιοχή για σύνθεση αδρανών σκυροδέματος είναι η **ΙΙ** (Σχήμα 7.11).

Συνθέσεις αδρανών που προσεγγίζουν το κάτω όριο της **περιοχής ΙΙ** φαίνονται να έχουν περίσσεια χονδρομερούς υλικού, ενώ οι συνθέσεις αδρανών, που «υπερπηδούν» το *κάτω* όριο της **ΙΙ** και ανήκουν στην **περιοχή V,** φαίνεται να έχουν υπερβολική ποσότητα χονδρομερούς υλικού και έλλειψη λεπτομερών αδρανών (άρα έλλειψη τσιμενοκονιάματος). Αυτές οι συνθέσεις είναι προφανές ότι δεν είναι αποδεκτές για την παραγωγή σκυροδέματος. Οι συνθέσεις, που προσεγγίζουν το *άνω* όριο της **ΙΙ,**

εμφανίζουν υπερβολική ποσότητα λεπτομερών αδρανών, ενώ όταν εισέλθουν στην **περιοχή IV** απαιτούν, λόγω της λεπτότητάς τους, μεγάλη ποσότητα νερού που οδηγεί πιθανώς σε «απόμιξη»* (segregation) των αδρανών και παραγωγή τελικώς ασθενούς σκυροδέματος. Συνθέσεις αδρανών, που ανήκουν στην **περιοχή I** (Δείκτης χονδρομερούς μεγαλύτερος του 75)**,** παράγουν μείγματα με έλλειψη κοκκομετρικών κλασμάτων, με μειωμένη εργασιμότητα και πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της απόμιξης, δηλαδή «ασθενή» σκυροδέματα. Οι συνθέσεις αδρανών που ανήκουν στην περιοχή **III** αντιπροσωπεύουν μίγματα αδρανών κατάλληλα για σκυρόδεμα όταν τα μεγέθη αδρανών είναι μικρότερα από 3/4" (19 mm).

*(*Ως «απόμιξη, των αδρανών στο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το φαινόμενο της διαφορικής καθ΄ ύψος κατανομής, λόγω μεγέθους, των αδρανών στη μάζα του σκυροδέματος,* **Εικόνα 5.1**).



Εικόνα 5.1. Φαινόμενο «απόμιξης» αδρανών υλικών στο σκυρόδεμα (εντονότερο στη δεξιά φωτογραφία)

5.3 Απαιτήσεις τσιμέντου

Για τη δημιουργία σκυροδεμάτων δαπέδων μπορεί να γίνει χρήση μόνο τσιμέντου Portland ή τσιμέντου Portland με σκωρία, ή πυριτική παιπάλη, ή ποζολάνη. Οι άλλες κατηγορίες τσιμέντου δεν ενδείκνυνται για αυτά τα σκυροδέματα καθώς έχουν υψηλή αλκαλικότητα. Στον Πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι κατηγορίες τσιμέντου συνοπτικά και οι αποδεκτές.

Πίνακας 5.1: Κυριότεροι τύποι τσιμέντου βάση EN 197-1.

Κυριότεροι Τύποι Τσιμέντου	-Ονομασία	Τύπος Τσιμέντου	Σύνθεση (% μέρη κατά βάρος)[1]										
			Κύρια συστατικά										Δευτερεύοντα συστατικά
			Κλίνκερ τσιμέντου Portland	Σκωρία	Πυριτική Παιπάλη	Ποζολάνη		Ιπτάμενη Τέφρα		Ψημένος σχιστόλιθος	Ασβεστόλιθος		
						Φυσική	Τεχνητή	Πυριτική	Ασβεστούχος				
			K	S	D[2]	P	Q	V	W	T	L[4]	LL[5]	
CEM I	Τσιμέντο Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Τσιμέντο Portland με σκωρία υψικαμίνων	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με πυριτική παιπάλη	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με ποζολάνη	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με ιπτάμενη τέφρα	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με ψημένο σχιστόλιθο	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με ασβεστόλιθο	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Τσιμέντο Portland - σύνθετο[3]	CEM II/A-M	80-94	6-20									0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5
CEM III	Σκωριοτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο[3]	CEM IV/A	65-89	—	11-35					—	—	—	0-5
		CEM IV/B	45-64	—	36-55					—	—	—	0-5
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-30			—	—	—	—	0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	—	31-50			—	—	—	—	0-5

Σημειώσεις

1 Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο % σύνολο των κυριοτέρων και δευτερευόντων συστατικών.

2 Το ποσοστό της πυριτικής παιπάλης περιορίζεται στο 10%

3 Στα σύνθετα τσιμέντα Portland CEM II/A-M και CEM II/B-M, στα ποζολανικά τσιμέντα CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμέντα CEM V/A και CEM V/B, ο τύπος του κύριου συστατικού πρέπει να δηλώνεται στην ονομασία του τσιμέντου

4 Ο ολικός οργανικός άνθρακας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,2% κ.β.

5 Ο ολικός οργανικός άνθρακας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,5% κ.β.

Τέλος για να εξασφαλίζεται η ποιότητα του τσιμέντου σε όλη τη διάρκεια του έργου, πρέπει να ζητούνται οι εργαστηριακοί έλεγχοι που γίνονται κατά την παραγωγή του τσιμέντου από το εργοστάσιο και να συνοδεύουν το κάθε φορτίο που παραλαμβάνεται.

5.4 Απαιτήσεις νερού

Αν το νερό που θα χρησιμοποιηθεί από τη μονάδα παρασκευής σκυροδέματος δεν είναι από το δίκτυο του πόσιμου νερού, διεξάγονται οι απαραίτητοι έλεγχοι σύμφωνα με την παράγραφο 2.3.4 και 2.3.5.

5.5 Διαδικασία προσδιορισμού σύστασης μελέτης σκυροδέματος

5.5.1 Τρόποι μέτρησης συνοχής

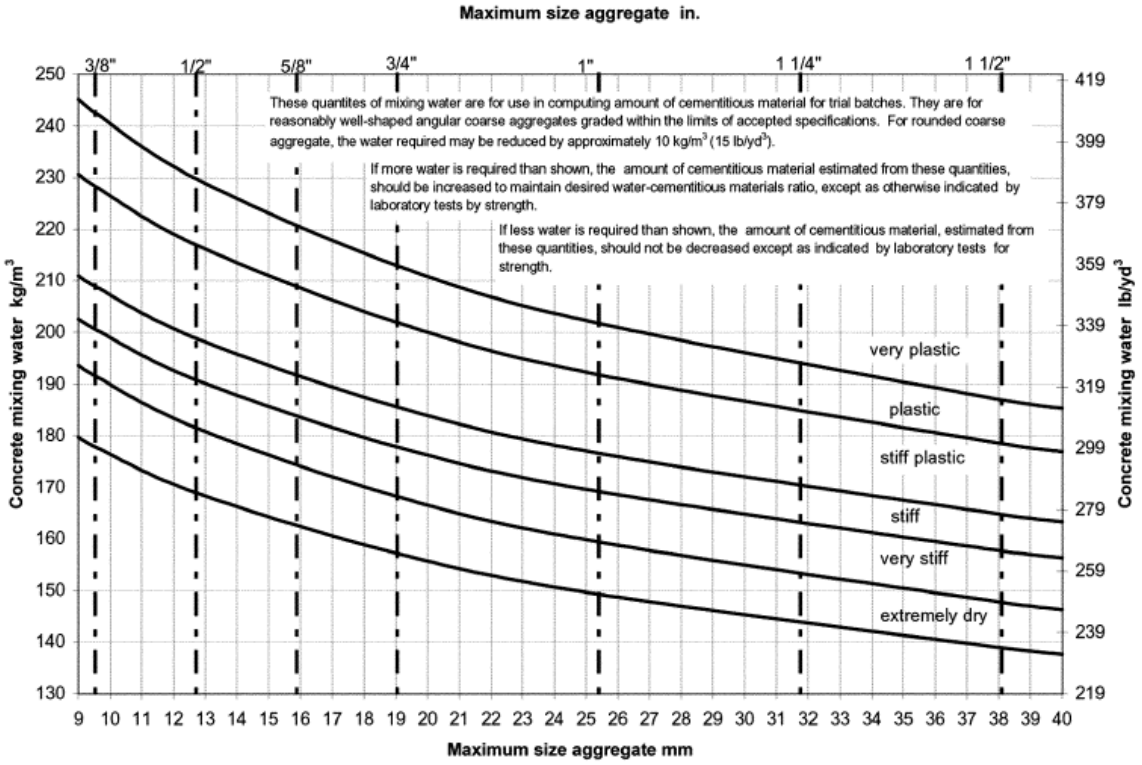
Η εργασιμότητα είναι από τις πιο βασικές ιδιότητες του σκυροδέματος που καθορίζει το πόσο εύκολα θα αναμιχθεί, θα διαστρωθεί, θα συμπυκνωθεί και θα φινιριστεί. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 δεν υπάρχει κάποια δοκιμή που να μπορεί να μετρήσει την ιδιότητα αυτή του σκυροδέματος. Επειδή όμως είναι τόσο απαραίτητο να είναι γνωστό αν το σκυρόδεμα έχει καλή εργασιμότητα ή όχι η ανάγκη αυτή καλύπτεται έμμεσα από τον προσδιορισμό της συνοχής του μίγματος σχετίζοντας το με τη ροή του νωπού σκυροδέματος. Η δοκιμή κάθισης είναι η πιο διαδεδομένη δοκιμή μέτρησης συνοχής και είναι η βασική δοκιμή για την συγκεκριμένη διαδικασία υπολογισμού μελέτης συνθέσεως. Εκτός από τη δοκιμή κάθισης σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και η δοκιμή Vebe, κυρίως για σκυροδέματα με κάθιση μικρότερη από 25mm (1 in). ACI.211.3R-02Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζεται η συσχέτιση κάθισης και δοκιμής Vebe, με την περιγραφή της συνοχής όπως θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 5.2: Συσχέτιση κάθισης με δοκιμή Vebe και περιγραφή συνοχής (ACI 211.3R-02 table 2.1)

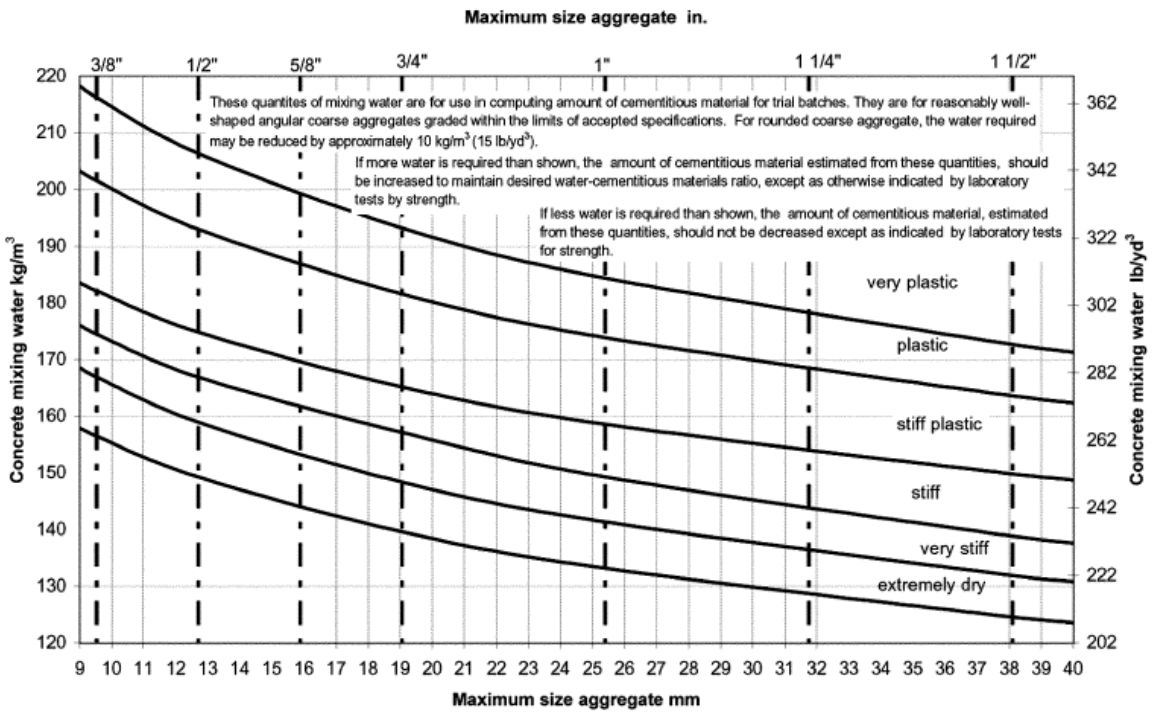
Περιγραφή συνοχής	**Κάθιση, mm**	**Κάθιση, in**	**Vebe, s**
Εξαιρετικά στεγνό / Extremely dry	-	-	Από 32 μέχρι 18
Πολύ δύσκαμπτο / Very Stiff	-	-	Από 18 μέχρι 10
Δύσκαμπτο / Stiff	Από 0 μέχρι 25	Από 0 μέχρι 1	Από 10 μέχρι 5
Δύσκαμπτο με πλαστικότητα / stiff plastic	Από 25 μέχρι 75	Από 1 μέχρι 3	Από 5 μέχρι 3
Πλαστικό / plastic	Από 75 μέχρι 125	Από 3 μέχρι 5	Από 3 μέχρι 0
Πολύ πλαστικό / plastic	Από 125 μέχρι 190	Από 5 μέχρι 7,5	-

5.5.2 Απαιτούμενη ποσότητα νερού

Σύμφωνα με το πρότυπο ACI 211.3R-02 οι απαιτήσεις σε νερό για το μίγμα προκύπτουν από τα Διαγράμματα 5.2 και 5.3 που ακολουθούν. Τα διαγράμματα αυτά έχουν προκύψει από μία σειρά εργαστηριακών δοκιμών, όπου σύμφωνα με τον μέγιστο κόκκο αλλά και τον επιθυμητό τύπο συνοχής προσδιορίζεται η ποσότητα νερού. Το Διάγραμμα 5.2 αφορά σκυροδέματα στα οποία δεν έχει εισαχθεί αέρας, μέσω κάποιου πρόσμικτου, ενώ στο Διάγραμμα 5.3 έχει εισαχθεί επιπλέον αέρας. Βέβαια η τιμή αυτή αποτελεί την αρχική εκτίμηση και μπορεί να διορθωθεί αν απαιτηθεί κατά την διάρκεια των δοκιμαστικών μιγμάτων κάνοντας και τις απαιτούμενες διορθώσεις ώστε να παραμένει σταθερός ο λόγος νερού/τσιμέντου, όπως θα υπολογιστεί στη συνέχεια.



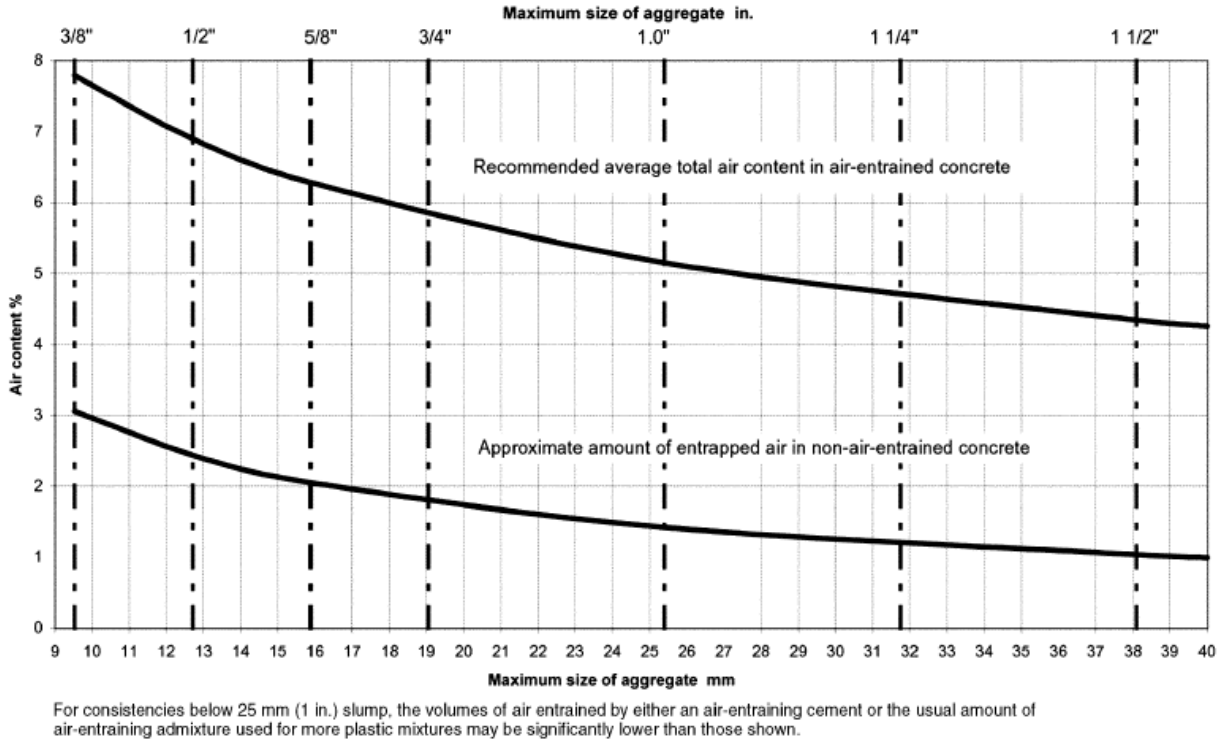
Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα προσδιορισμού ποσότητας νερού σύμφωνα με τον ονομαστικό μέγιστο κόκκο του μίγματος και τον τύπο συνοχής του. Για σκυροδέματα που δεν θα εισαχθεί αερακτικό (Fig 2.1, ACI 211.3R-02)



Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα προσδιορισμού ποσότητας νερού σύμφωνα με τον ονομαστικό μέγιστο κόκκο του μίγματος και τον τύπο συνοχής του. Για σκυροδέματα που θα εισαχθεί αερακτικό (Fig 2.2, ACI 211.3R-02)

5.5.3 Προσδιορισμός αέρα στο ανάμιγμα.

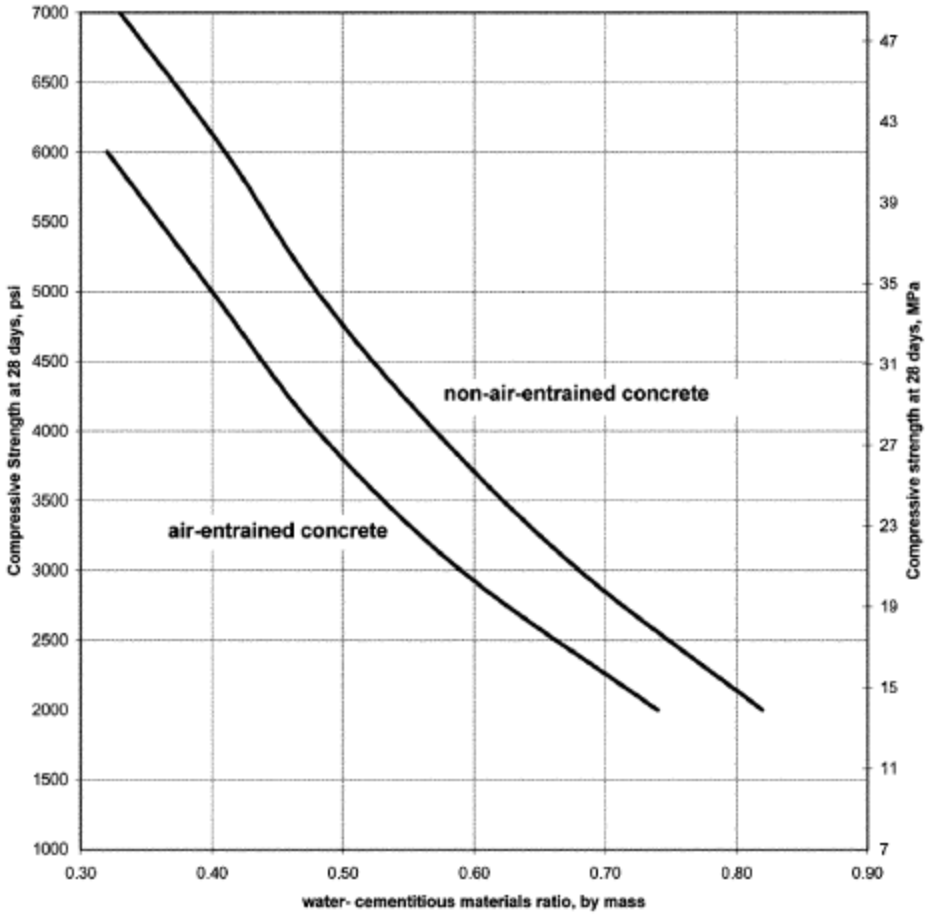
Ανεξαρτήτως αν θα εισαχθεί αέρας στο ανάμιγμα με κάποιο αερακτικό ή όχι, το ανάμιγμα θα περιέχει ποσότητα αέρα η οποία πρέπει να είναι γνωστή ώστε να συμπεριληφθεί στους μετέπειτα υπολογισμούς για τις ποσότητες των υλικών καθώς ο αέρας αυτός καταλαμβάνει όγκο στο ανάμιγμα που είναι σημαντικός και πρέπει να αφαιρείτε. Η ποσότητα αυτή υπολογίζεται από το Διάγραμμα 5.4 το οποίο έχει προκύψει από πειραματικά δεδομένα.



Διάγραμμα 5.4: Υπολογισμός περικλειόμενου αέρα στο ανάμιγμα ανάλογα με τον μέγιστο κόκκο αδρανών (ACI 211.3R-02 Fig 2.3)

5.5.4 Προσδιορισμός λόγου νερού τσιμέντου w/c

Η επιλογή του λόγου νερού τσιμέντου στο ανάμιγμα καθορίζεται από την απαιτούμενη αντοχή του έργου. Το ACI 211.3R-02 συσχετίζει την θλιπτική αντοχή με τον λόγο νερού τσιμέντου μέσω του Διαγράμματος 5.5:



Values are estimated average strengths for concrete containing not more than the percentage of air shown in Fig. 2.3. For a constant water-cementitious materials ratio, the strength of concrete is reduced as the air content is increased.
Strength is based on 150 x 300 mm (6 x 12 in.) cylinders prepared in accordance with ASTM C 31/31M and moist-cured 28 days at 23 +/- 1.7 C (73.4 +/- 3 F).
Relationship assume maximum size of aggregate about 19 to 25 mm (3/4 to 1 in.) for a given source, strength produced for a given water-cementitious materials ratio will increase as maximum size of aggregate decreases.

Διάγραμμα 5.5: Σχέση θλιπτικής αντοχής με λόγο νερού προς τσιμέντο (ACI 211.3R-02 Fig 3.1)

Όμως στις περιπτώσεις των δαπέδων το παραπάνω διάγραμμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δυνάμεις στις οποίες καταπονούνται είναι καμπτικές και όχι θλιπτικές. Ακριβής συσχέτιση θλίψης με κάμψη δεν είναι εφικτή ώστε να μπορεί να γίνει προσαρμογή στο παραπάνω διάγραμμα. Για το λόγο αυτό για την επιλογή του μέγιστου επιτρεπόμενου λόγου νερού τσιμέντου ακολουθείται ο Πίνακας 5.3:

Πίνακας 5.3: Συσχέτιση καμπτικής αντοχής με λόγο νερού τσιμέντου (ARMY TM 5-822-7 AIR FORCE AFM 88-6, Chap. 8)

		Λόγος νερού/τσιμέντου (w/c)	
Θλιπτική αντοχή (psi)	Καμπτική αντοχή [1] (psi)	Σκυρόδεμα χωρίς αέρα	Σκυρόδεμα που θα γίνει χρήση αερακτικού
6.000	700-800	0,41	-
5.000	625-700	0,48	0,40
4.000	525-625	0,57	0,48
3.000	450-525	0,68	0,59
2.000	350-450	0,82	0,74

[1] Δεν υπάρχει ακριβή σχέση μετατροπής θλιπτικής αντοχής σε καμπτική, καθώς η σχέση τους εξαρτάται από τα αδρανή και το τσιμέντο που χρησιμοποιείτε σε κάθε σύνθεση και για το λόγο αυτό ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται για τους αρχικούς υπολογισμούς

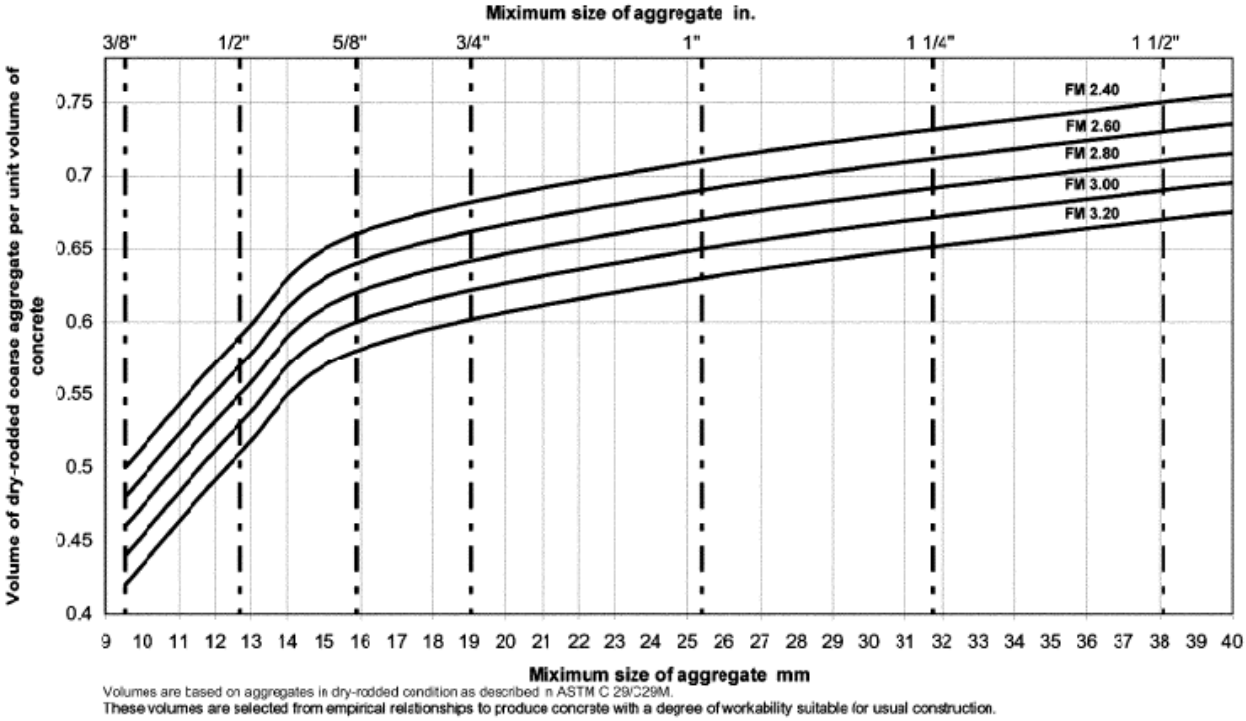
Στη συνέχεια σε περίπτωση δαπέδου αεροδρομίου σύμφωνα με την προδιαγραφή UFGS-32 13 11, ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος νερού τσιμέντου είναι 0.45.

Αφού επιλεγεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος νερού τσιμέντου και αφού έχει επιλεγεί και η ποσότητα νερού (kg) στο ανάμιγμα μπορεί να υπολογιστεί και η απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου διαιρώντας το βάρος του νερού με τον λόγο νερού τσιμέντου.

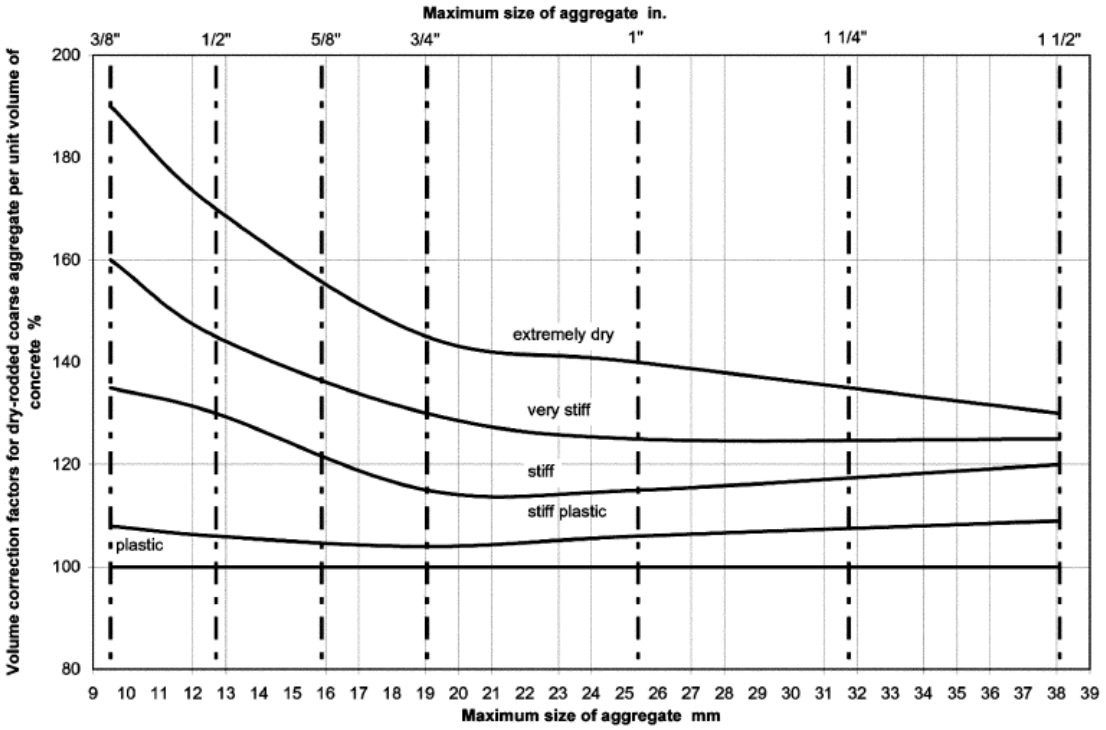
Σε περίπτωση που οι προδιαγραφές του έργου αναφέρουν ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ο λόγος νερού τσιμέντου που αντιστοιχεί μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας την μάζα του νερού με την μάζα του τσιμέντου. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι δύο λόγοι νερού και χρησιμοποιείται ο μικρότερος.

5.5.5 Υπολογισμός ποσότητας χονδρόκοκκων αδρανών.

Αν ο υπολογισμός του όγκου των ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών δεν μπορεί να υπολογιστεί μέσω εργαστηριακής έρευνας βασισμένη στα διαθέσιμα αδρανή, μπορεί εναλλακτικά να υπολογιστεί αρχικά από τα ακόλουθα διαγράμματα και στη συνέχεια να τροποποιηθεί από τις δοκιμές πεδίου αν χρειάζεται. Από το Διάγραμμα 5.6 υπολογίζεται ο όγκος των χονδρόκοκκων αδρανών βάσει του μέγιστου κόκκου και του δείκτη λεπτότητας του μίγματος των αδρανών, για σκυροδέματα με κάθιση από 75mm μέχρι 125mm. Στη συνέχεια από το Διάγραμμα 5.6, υπολογίζεται ο συντελεστής διόρθωσης του όγκου που υπολογίστηκε πριν, βάσει της συνοχής που ζητείται να έχει το σκυρόδεμα.



Διάγραμμα 5.6: Υπολογισμός όγκου ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών (ACI 211.R-02 Fig 3.2)



Διάγραμμα 5.6: Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών βάσει της συνοχής του ζητούμενου σκυροδέματος (ACI 211.R-02 Fig 3.3)

5.6 Υπολογισμοί

Για τον τελικό υπολογισμό της μελέτης συνθέσεως μπορούν να ακολουθηθούν δύο διαδικασίες.

Στον πρώτο τρόπο υπολογισμών επιλέγετε ένας λόγος νερού τσιμέντου και εκτελούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Στη συνέχεια παρασκευάζεται το δοκιμαστικό ανάμιγμα στο εργαστήριο και γίνονται οι απαραίτητες δοκιμές. Ανάλογα από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν γίνονται τροποποιήσεις στους υπολογισμούς και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία μέχρι να προκύψει το επιθυμητό ανάμιγμα με την αντίστοιχη εργασιμότητα και τις απαιτούμενες αντοχές. Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία το ανάμιγμα δοκιμάζεται στο πεδίο για τυχόν βελτιώσεις.

Στον δεύτερο τρόπο υπολογισμών σύμφωνα με το UFGS-32 13 11 επιλέγονται τρεις διαφορετικοί λόγοι νερού τσιμέντου και γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί και για τις τρεις περιπτώσεις. Στη συνέχεια παρασκευάζονται τα δοκιμαστικά αναμίγματα και λαμβάνονται έξι πρισματικά δοκίμια από το κάθε ανάμιγμα και εξετάζεται η αντοχή τους σε κάμψη σε 28 ή 90 ημέρες ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Τα αποτελέσματα αυτά εισάγονται σε ένα διάγραμμα όπου στον άξονα x’x είναι οι λόγοι νερού τσιμέντου

και στο y'y οι αντίστοιχες αντοχές σε κάμψη. Από το διάγραμμα αυτό υπολογίζεται ο ακριβής λόγος νερού τσιμέντου που αντιστοιχεί στην ακριβής απαιτούμενη αντοχή του έργου. Στη συνέχεια ξαναγίνονται οι υπολογισμοί για τον καινούργιο λόγο νερού τσιμέντου και πλέον το ανάμιγμα δοκιμάζεται στο πεδίο.

5.7 Αριθμητικό παράδειγμα

Για την εμπέδωση όλων τον παραπάνω στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί ένα αριθμητικό παράδειγμα.

5.7.1 Χαρακτηριστικά ζητούμενου σκυροδέματος.

Η ζητούμενη μελέτη συνθέσεως αφορά σκυρόδεμα δαπέδου αεροδρομίου σε περιοχή όπου δεν έχει ακραία καιρικά φαινόμενα. Με ζητούμενη καμπτική αντοχή 4.5 MPa, και μέγιστο ονομαστικό κόκκο αδρανών: 25 mm (1 in), θα γίνει χρήση αερακτικού πρόσμικτου και η επιθυμητή κάθιση είναι 2,5 με 5mm δηλαδή ανήκει στην κατηγορία δύσκαμπτο με πλαστικότητα.

5.7.2 Βήματα υπολογισμών

Βήμα 1°: Ιδιότητες αδρανών

Αρχικά γίνονται οι απαραίτητες δοκιμές στα διαθέσιμα αδρανή της περιοχής και ελέγχεται αν πληρούν τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.1. Στη συνέχεια υπολογίζεται το ειδικό βάρος, η υδαταπορροφητικότηκα και η πυκνότητα των αδρανών (ASTM C127 & ASTM C128).

Πίνακας 5.4 Ειδικά βάρη, υδαταπορροφητικότητα και πυκνότητα αδρανών αναμίγματος

Δεδομένα υλικών / Material Data			
	ΜΕΙΚΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ BULK SPECIFIC GRAVITY	ΥΓΡΑΣΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ WATER ABSORTION	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ BULK DENSITY (kg/m3))
Τσιμέντο Cement	3.00		
Χονδρ/κο1 Coarse 1	2.58	1.40%	1392
Χονδρ/κο2 Coarse 2	2.61	1.00%	1415
Χονδρ/κο3 Coarse 3	2.59	1.60%	1419
Λεπτ/κο 1 Fine 1	2.59	1.60%	
Λεπτ/κο 2 Fine 2	0	0.00%	

Βήμα 2ο: Βέλτιστος συνδυασμός αδρανών:

Έχοντας τα αποτελέσματα από τις κοκκομετρικές αναλύσεις, γίνονται διάφοροι συνδυασμοί μέχρις ότου δημιουργηθεί ένα μίγμα αδρανών το οποίο να ικανοποιεί και τις απαιτήσεις τη διαβάθμισης των χονδρόκοκκων σύμφωνα με το ASTM C33 αλλά και τις απαιτήσεις του μίγματος υπολογίζοντας τον συντελεστή εργασιμότητας και συντελεστή χονδροκόκκων για κάθε συνδυασμό.

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης αδρανών του μίγματος, διερχόμενο ποσοστό%

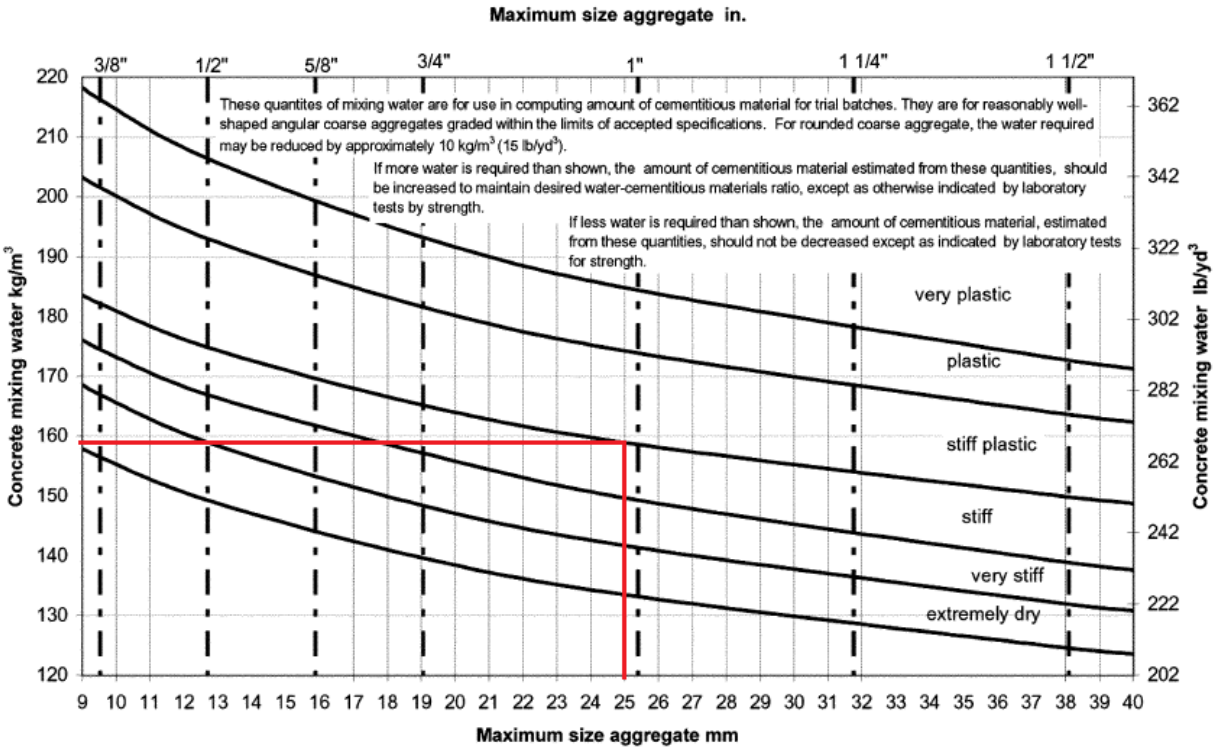
Μέγεθος κοσκίνων Sieve Size		% Διερχόμενο % Passing					
		Χονδρ/κο1 coarse 1	Χονδρ/κο 2 coarse 2	Χονδρ/κο 3 coarse 3	Λεπτ/κο1 fine 1	Λεπτ/κο2 fine 2	Λεπτ/κο3 fine 3
#	mm						
2 1/2"	63.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	50.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.400	83.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.100	2.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.700	2.00	27.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.510	2.00	5.00	99.00	100.00	100.00	100.00
4	4.760	2.00	1.00	28.00	97.00	100.00	100.00
8	2.380	2.00	1.00	3.00	73.00	100.00	100.00
16	1.190	1.00	1.00	2.00	48.00	100.00	100.00
30	0.595	1.00	1.00	2.00	27.00	100.00	100.00
50	0.297	1.00	1.00	2.00	12.00	100.00	100.00
100	0.149	1.00	1.00	2.00	3.00	100.00	100.00
200	0.074	1.00	1.00	2.00	2.00	100.00	100.00
pan	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας 5.6 Τελικά ποσοστά για κάθε αδρανές στο ανάμιγμα.

Τύπος Αδρανών / Type of Aggregate	**% στο ανάμιγμα % on the mixture**
Χονδρόκοκκο 1/ COARSE 1	13%
Χονδρόκοκκο 2/ COARSE 2	30%
Χονδρόκοκκο 3/ COARSE 3	12%
Λεπτόκοκκο 1/ FINE 1	45%
Δείκτης Λεπτότητας/ Finess Moduluss	3.1

Βήμα 3ο: Υπολογισμός νερού στο ανάμιγμα:

Ακολουθώντας το Διάγραμμα 5.7 (Fig 2.2, ACI 211.3R-02), υπολογίζεται το νερό του αναμίγματος. Για μέγιστο ονομαστικό κόκκο 25mm η ποσότητα είναι 158 kg/m^3.



Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα προσδιορισμού ποσότητας νερού σύμφωνα με τον ονομαστικό μέγιστο κόκκο του μίγματος και τον τύπο συνοχής του. Για σκυροδέματα που θα εισαχθεί αερακτικό (Fig 2.2, ACI 211.3R-02)

Βήμα 4ο: Υπολογισμός λόγου νερού τσιμέντου:

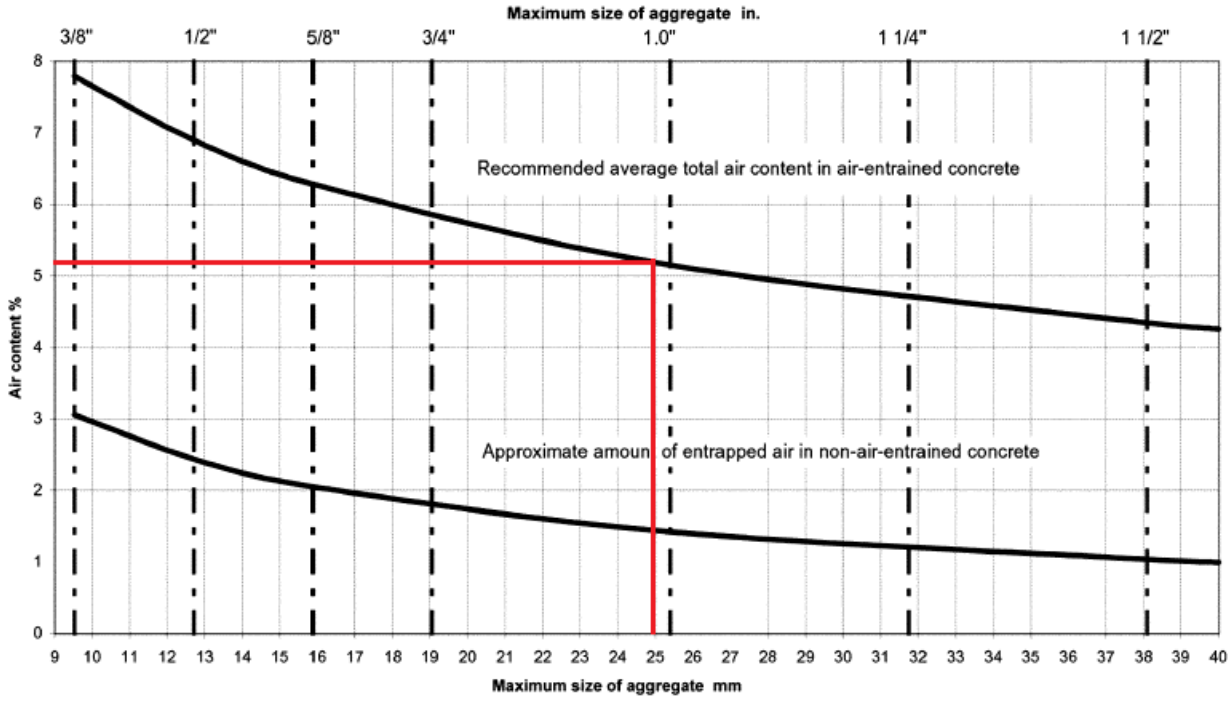
Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 και για την ζητούμενη αντοχή ο λόγος νερού τσιμέντου πρέπει να είναι 0.40 αλλά λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο όριο σύμφωνα με το UFGS που είναι 0.45 οι υπολογισμοί θα γίνουν με λόγο νερού τσιμέντου 0.43. (Υπολογισμοί θα μπορούσαν να γίνουν και με τους τρεις διαφορετικούς λόγους w/c αρχικά όμως επιλέγεται μία τιμή στη μέση, γίνεται το ανάμιγμα και ανάλογα με τα αποτελέσματα της εργασιμότητας και τις αντοχές που θα δώσει επιλέγεται και ο τελικός λόγος w/c).

Άρα μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα τσιμέντου:

$$\frac{W}{C} = \frac{water}{cement} \rightarrow 0.43 = \frac{158}{cement} \rightarrow cement = 367kg$$

Βήμα 5°: Υπολογισμός ποσοστού αέρα στο ανάμιγμα:

Σύμφωνα με το διάγραμμα 5.8 (Fig 2.3, ACI 211.3R-02) για μέγιστο ονομαστικό κόκκο αδρανών 25mm και για σκυρόδεμα που γίνεται χρήση αερακτικού το ποσοστό αέρα είναι 5.2%.

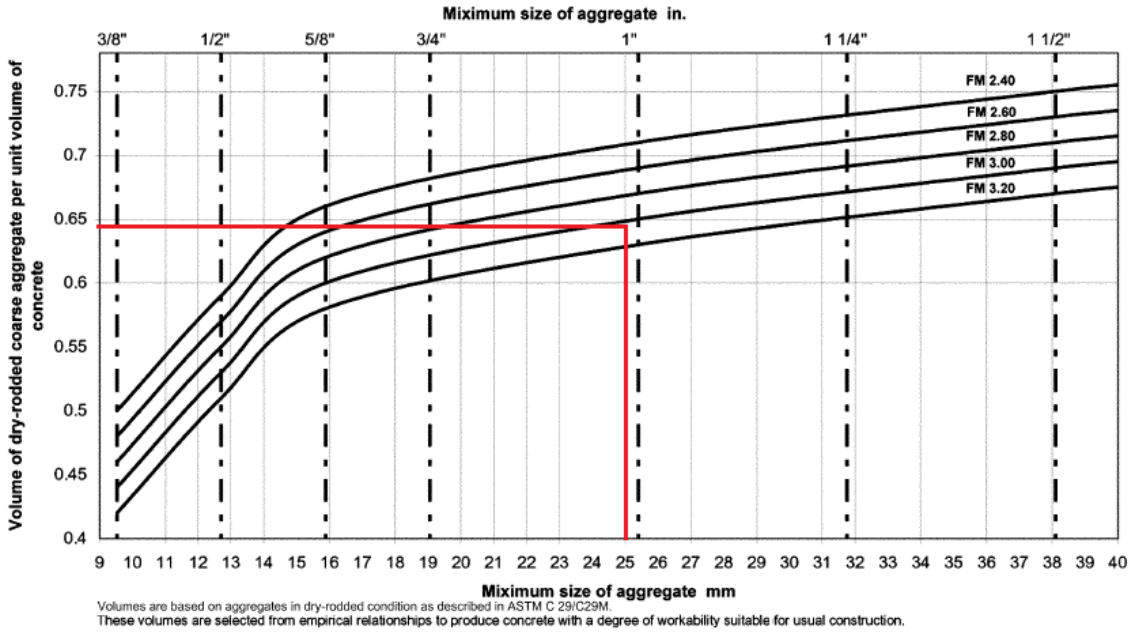


Διάγραμμα 5.8: Υπολογισμός περικλειόμενου αέρα στο ανάμιγμα ανάλογα με τον μέγιστο κόκκο αδρανών (ACI 211.3R-02 Fig 2.3)

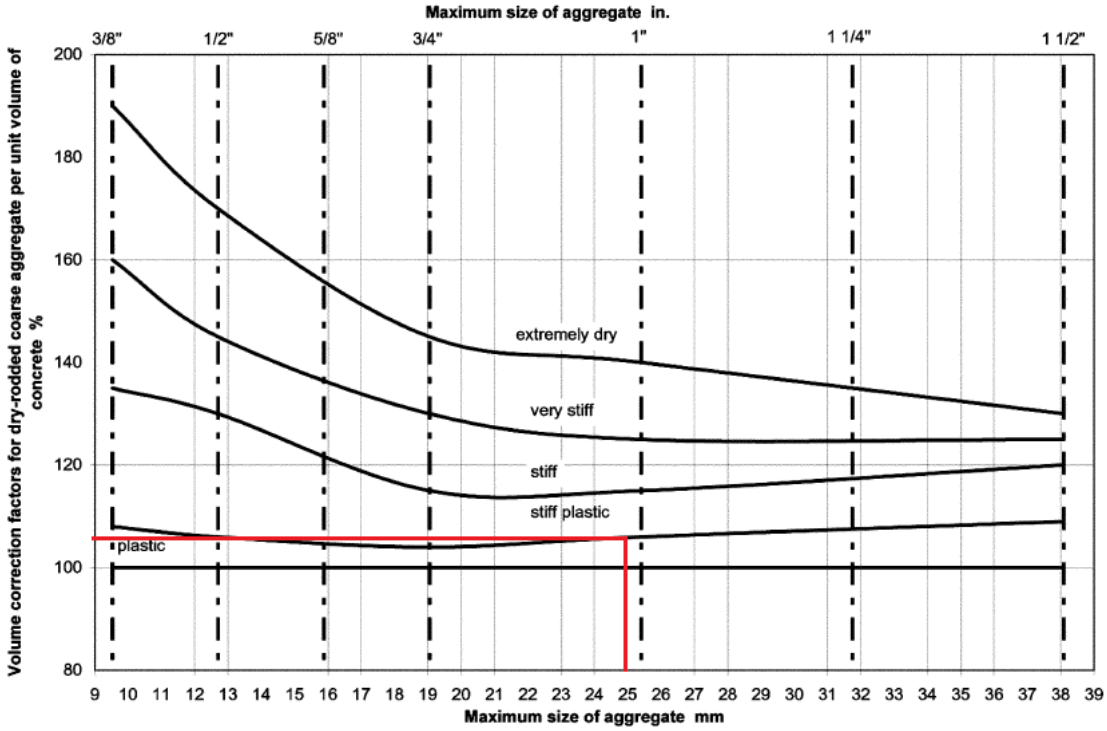
Βήμα 6°: Υπολογισμός όγκου χονδρόκοκκων αδρανών στο ανάμιγμα

Σύμφωνα με το διάγραμμα 5.5 και 5.6 . (ACI 211.R-02 Fig 3.2 & Fig 3.3) για μέγιστο ονομαστικό κόκκο 25mm και με δείκτη λεπτότητας 3.1, (ο δείκτης λεπτότητας υπολογίζεται ως το άθροισμα των διερχόμενων από το κόσκινο νούμερο #4 έως το νούμερο #100, διαιρεμένο με το 100) ο όγκος χονδρόκοκκων είναι 0.65 ενώ ο συντελεστής διόρθωσης είναι για δύσκαμπτο με πλαστικότητα σκυρόδεμα 108% άρα ο όγκος χονδρόκοκκων είναι:

$$\tau\varepsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}\varsigma\ \acute{o}\gamma\kappa o\varsigma\ \chi o\nu\delta\rho o\kappa\acute{o}\kappa\kappa\omega\nu = 0.64 \times 1.08 = 0.69$$



Διάγραμμα 5.9: Υπολογισμός όγκου ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών (ACI 211.R-02 Fig 3.2)



Διάγραμμα 5.10: Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών βάσει της συνοχής του ζητούμενου σκυροδέματος (ACI 211.R-02 Fig 3.3)

Βήμα 7ο: Υπολογισμός μάζας χονδρόκοκκων αδρανών:

$$\begin{aligned}&\textit{συνολική μάζα χονδρόκοκκων αδρανών}\\&\quad = \textit{τελικός όγκος αδρανών}\\&\quad \times (\textit{πυκνότητα χονδρόκοκκου}1 \times \textit{ποσοστό στο ανάμιγμα}\\&\quad + \textit{πυκνότητα χονδρόκοκκου}2 \times \textit{ποσοστό στο ανάμιγμα}\\&\quad + \textit{πυκνότητα χονδρόκοκκου}3 \times \textit{ποσοστό στο ανάμιγμα})\\&\quad /(1 - \textit{ποσοστού άμμου στο ανάμιγμα})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\textit{συνολική μάζα χονδρόκοκκων αδρανών}\\&\quad = 0.69 \times (1392 \times 13\% + 1415 \times 30\% + 1419 \times 12\%) \times (1 - 45\%)\end{aligned}$$

$$\textit{συνολική μάζα χονδρόκοκκων αδρανών} = 975kg$$

$$\begin{aligned}&\textit{μάζα χονδρόκοκκου } 1 =\\&\quad = \textit{τελικός όγκος αδρανών}\\&\quad \times \frac{(\textit{πυκνότητα χονδρόκοκκου}1 \times \textit{ποσοστό στο ανάμιγμα})}{(1 - \textit{ποσοστού άμμου στο ανάμιγμα})}\\&\quad = 0.69 \times \frac{(1392 \times 13\%)}{(1 - 45\%)} = 227kg\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\textit{μάζα χονδρόκοκκου } 2 =\\&\quad = \textit{τελικός όγκος αδρανών}\\&\quad \times \frac{(\textit{πυκνότητα χονδρόκοκκου}2 \times \textit{ποσοστό στο ανάμιγμα})}{(1 - \textit{ποσοστού άμμου στο ανάμιγμα})}\\&\quad = 0.69 \times \frac{(1415 \times 30\%)}{(1 - 45\%)} = 533kg\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\textit{μάζα χονδρόκοκκου } 3 =\\&\quad = \textit{τελικός όγκος αδρανών}\\&\quad \times \frac{(\textit{πυκνότητα χονδρόκοκκου}2 \times \textit{ποσοστό στο ανάμιγμα})}{(1 - \textit{ποσοστού άμμου στο ανάμιγμα})}\\&\quad = 0.69 \times \frac{(1419 \times 12\%)}{(1 - 45\%)} = 214kg\end{aligned}$$

Βήμα 8ο: Υπολογισμός μάζας άμμου:

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί ο όγκος της άμμου.

$$\text{όγκος τσιμέντου} = \frac{\text{μάζα τσιμέντου στο ανάμιγμα}}{(\text{ειδικό βάρος τσιμέντου } \times 1000)} = \frac{367}{3.00 \times 1000} = 0.122$$

$$\text{όγκος νερού} = 0.158$$

$$\text{όγκος χονδρόκοκκων αδρανών } = \frac{\text{συνολική μάζα χονδρόκοκκων}}{(\text{συνολικό ειδικό βάρος χονδρόκοκκων } \times 1000)}$$
$$= \frac{975}{2.60 \times 1000} = 0.375$$

$$\text{όγκος αέρα} = 0.052$$

$$\text{συνολικός όγκος συστατικών αναμίγματος εκτός άμμου}$$
$$= \text{όγκος αέρα} + \text{όγκος χονδρόκοκκων} + \text{όγκος νερού} + \text{ όγκος τσιμέντου}$$
$$= 0.052 + 0.375 + 0.158 + 0.122 = 0.708$$

$$\text{όγκος άμμου} = 1 - \text{συνολικός όγκων συστατικών αναμίγματος εκτός άμμου} = 0.292$$

$$\text{μάζα άμμου} = \text{όγκος άμμου} \times \text{ειδικό βάρος άμμου} \times 1000 = 757kg$$

Βήμα 9ο: Υπολογισμός μάζα νερού που απορροφάτε από τα αδρανή :

$$\text{μάζα νερού που απορροφάται από τα αδρανή}$$
$$= \text{μάζα χονδρόκ 1 στο ανάμιγμα} \times \text{υδατοαπορροφητικότητα χονδροκ1}$$
$$+ \text{μάζα χονδρόκ2 στο ανάμιγμα} \times \text{υδατοαπορροφητικότητα χονδροκ2}$$
$$+ \text{μάζα χονδρόκ3 στο ανάμιγμα} \times \text{υδατοαπορροφητικότητα χονδροκ3}$$
$$+ \text{μάζα άμμου στο ανάμιγμα } \times \text{υδατοαπορροφητικότητα άμμου}$$
$$= 2.58 \times 231 + 2.61 \times 542 + 2.59 \times 217 + 2.58 \times 742 = 24kg$$

5.7.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ο Πίνακας 5.6.με τις ποσότητες για τη παρασκευή 1m^3 νωπού και συμπυκνωμένου σκυροδέματος.

Πίνακας 5.7. Ποσότητες υλικών για την παρασκευή 1m^3 σκυροδέματος

	Μάζα υλικών σε 1m^3 σκυροδέματος (kg)
Τσιμέντο	367
Χονδρόκοκκο 1	227
Χονδρόκοκκο 2	533
Χονδρόκοκκο 3	214
Λεπτόκοκκο 1 (άμμο)	757
Νερό	158 + 24

Η ακριβής κάθε φορά ποσότητα νερού στο τελικό ανάμιγμα καθορίζεται από την υγρασία των αδρανών στην κάθε περίπτωση και θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη πριν την έναρξη της σκυροδέτησης. Μη διόρθωση της υγρασίας έχει επιπτώσεις στην τελική ποιότητα του σκυροδέματος, στην αντοχή του και στην περατότητα του.

5.8 Αυτοματοποίηση διαδικασίας υπολογισμών μελέτης συνθέσεως.

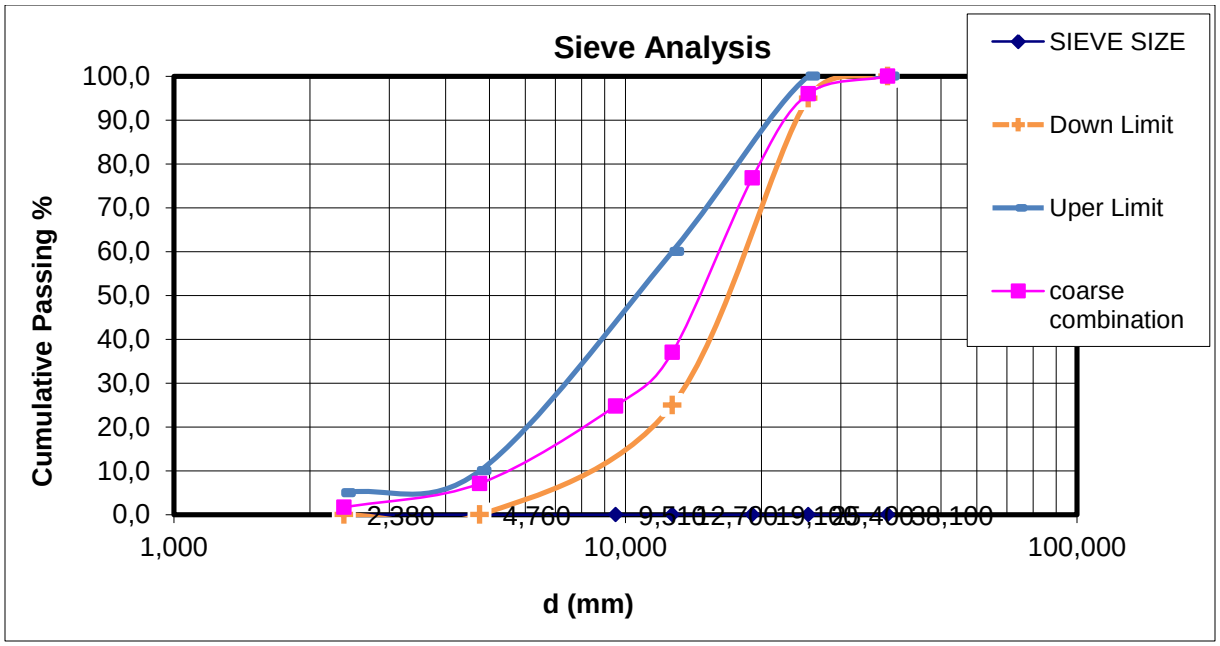
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5, αυτοματοποιήθηκαν και κατασκευάστηκε ένα απλό και φιλικό προς τον χρήστη πρόγραμμα σε περιβάλλον Excel Microsoft Office υπολογισμών μελέτης συνθέσεως σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη.

5.8.1 Παρουσίαση προγράμματος υπολογισμών

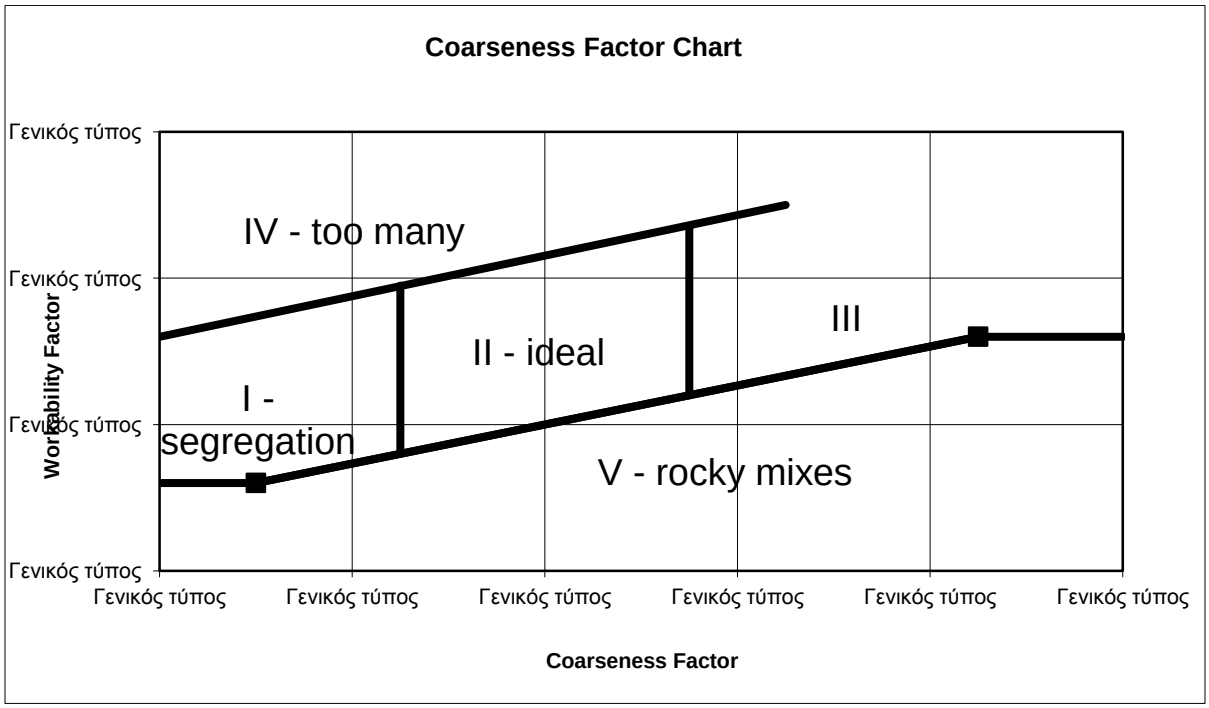
Αρχικά στο πρώτο φύλλο του Excel εισάγονται τα ποσοστά % διερχόμενων των αδρανών. Αυτόματα υπολογίζονται τα % διερχόμενα του μίγματος χονδροκόκκων καθώς και όλου του μίγματος αδρανών ανάλογα με τα ποσοστά του κάθε μίγματος στο ανάμιγμα. Ταυτόχρονα υπολογίζονται αυτόματα ο συντελεστής εργασιμότητας και ο συντελεστής χονδροκόκκων (Εικόνα 5.1). Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων που υπάρχουν στο φύλλο αυτό ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει το ιδανικό ανάμιγμα αδρανών όπου ικανοποιεί της απαραίτητες απαιτήσεις (Εικόνα 5.2 & Εικόνα 5.3).

Sieve Size			% Passing				Combined % Passing	Combined Cumulative % Retained	Combined % Retained	Combined coarse % Passing
#	in	mm	coarse 1	coarse 2	coarse 3	fine 1				
2 1/2"	2.500	63.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	
2"	2.000	50.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	
1 1/2"	1.500	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	100
1"	1.000	25.400	83.00	100.00	100.00	100.00	97.79	2.21	2.21	96
3/4"	0.750	19.100	2.00	100.00	100.00	100.00	87.26	12.74	10.53	77
1/2"	0.500	12.700	2.00	27.00	100.00	100.00	65.36	34.64	21.90	37
3/8"	0.375	9.510	2.00	5.00	99.00	100.00	58.64	41.36	6.72	25
4	0.187	4.760	2.00	1.00	28.00	97.00	47.57	52.43	11.07	7
8	0.093	2.380	2.00	1.00	3.00	73.00	33.77	66.23	13.80	2
16	0.047	1.190	1.00	1.00	2.00	48.00	22.27	77.73	11.50	1
30	0.024	0.595	1.00	1.00	2.00	27.00	12.82	87.18	9.45	1
50	0.012	0.297	1.00	1.00	2.00	12.00	6.07	93.93	6.75	1
100	0.006	0.149	1.00	1.00	2.00	3.00	2.02	97.98	4.05	1
200	0.003	0.074	1.00	1.00	2.00	2.00	1.57	98.43	0.45	1
pan	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	1.57	
		% Total Coarse Aggregate	**24%**	**55%**	**22%**					
		% Total Aggregate	**13%**	**30%**	**12%**	**45%**				
Workability Factor		34								
Coarseness Factor		62								

Εικόνα 5.1 Υπολογισμοί για την βέλτιστη σύνθεση των αδρανών με τη χρήση του αυτοματοποιημένου λογισμικού.



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα σύνθεσης χονδρόκοκκων στο ανάμιγμα βάση των ορίων του ASTM C33 όπως παρουσιάζεται στο πρόγραμμα.



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα σχέσης μεταξύ «Δείκτη χονδρομερούς» αδρανών και «Δείκτη εργασιμότητας» του σκυροδέματος

Αφού επιλεγεί η βέλτιστη σύνθεση των αδρανών, ώστε να ικανοποιούνται όλα τα διαγράμματα, εισάγονται τα ποσοστά του κάθε κλάσματος και τα αποτελέσματα των δοκιμών ειδικού βάρους, υδαταπορροφητικότητας και πυκνότητας των αδρανών στα κατάλληλα κελιά του δεύτερου υπολογιστικού φύλλου (Εικόνα 5.4)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΩΝ / MATERIAL DATA				
	ΜΕΙΚΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ BULK SPECIFIC GRAVITY	ΥΓΡΑΣΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ WATER ABSORTION	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΣΤΟ ΑΝΑΜΙΓΜΑ MIXTURE PERCENTAGE	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ BULK DENSITY (kg/m3)
ΤΣΙΜΕΝΤΟ / CEMENT	3.00			
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 1 / COARSE 1	2.58	1.40%	**13.00%**	1392
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 2 / COARSE 2	2.61	1.00%	**30.00%**	1415
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 3 / COARSE 3	2.59	1.60%	**12.00%**	1419
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ 1 / FINE 1	2.59	1.60%	**45.00%**	
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ 2 / FINE 2	0	0.00%	**0.00%**	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΩΝ COARSE AGGREGATE TOTAL SPECIFIC GRAVITY	2.60			

Εικόνα 5.4: Κελιά εισαγωγής δεδομένων αδρανών όπως παρουσιάζεται στο πρόγραμμα

Στην συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα βάση των διαγραμμάτων του ACI 211.3R-02 όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο. (Εικόνα 5.4)

Δεδομένα σύμφωνα με τα διαγράμματα του ACI 211.3R **Inputs From ACI 211.3R Diagrams**	
ΔΕΙΚΤΗΣ ΛΕΠΤΟΤΗΤΑΣ FINE AGGREGATE FINENESS MODULUS	3.00
ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟΣ ΚΟΚΚΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ COARSE AGGREGATE MAXIMUM SIZE (mm)	25.4
ΛΟΓΟΣ ΝΕΡΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ / w/cm	0.43
ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ APPROXIMATE QUANTITY OF MIXING WATER (kg/m3)	158.00
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ REQUIRED AIR CONTENT	5.2%
ΟΓΚΟΣ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΩΝ / VOLUME OF COARSE AGGREGATE REQUIRED IN EACH CONCRETE BATCH (m3)	0.64
ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΟΓΚΟΥ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΩΝ / VOLUME CORRECTION FACTOR FOR DRY-RODDED COARSE AGGREGATE	1.08

Εικόνα 5.5: Κελιά εισαγωγής δεδομένων που προήλθαν από τα διαγράμματα του ACI 211.3R

Αφού εισαχθούν τα παραπάνω δεδομένα, το πρόγραμμα κάνει αυτόματα όλους του απαραίτητους υπολογισμού και εμφανίζει τις απαραίτητες ποσότητες υλικών για τη δημιουργία 1m^3 νωπού σκυροδέματος, καθώς και την ποσότητα νερού που απορροφούν τα αδρανή (Εικόνα 5.6) και οποίες εμφανίζονται συνοπτικά (Εικόνα 5.7).

Υπολογισμοί Ποσοτήτων (Computation of proportions)			
-	**Ποσότητα Quantity**		**Ποσότητα Quantity**
Τσιμέντο / cement (kg/m3)	367	Όγκος Νερού Volume of Water (m^3)	0.158
Διορθωμένος όγκος χονδρόκοκκων αδρανών Corrected volume of coarse aggregate (m^3)	0.69	Όγκος χονδρόκοκκων αδρανών Solid volume of coarse aggregate (m^3)	0.375
Συνολική μάζα χονδρόκοκκων αδρανών Coarse aggregate total mass (kg)	975	Όγκος αέρα Volume of air (m^3)	0.052
Μάζα χονδρόκοκκου 1 Coarse 1 aggregate mass (kg)	227	Συνολικός Όγκος συστατικών εκτός άμμου Total volume of ingredients except sand (m^3)	0.708
Μάζα χονδρόκοκκου 2 Coarse 2 aggregate mass (kg)	533	Όγκος απαιτούμενης άμμου Solid volume of sand required (m^3)	0.292
Μάζα χονδρόκοκκου 3 Coarse 3 aggregate mass (kg)	214	Μάζα άμμου Required mass of dry sand (kg)	757
Όγκος τσιμέντου Solid volume of cement (m^3)	0.122	Μάζα νερού που απορροφάτε από τα αδρανή Water absorbed by dry aggregates (kg)	24

Εικόνα 5.6: Στάδιο υπολογισμών του προγράμματος.

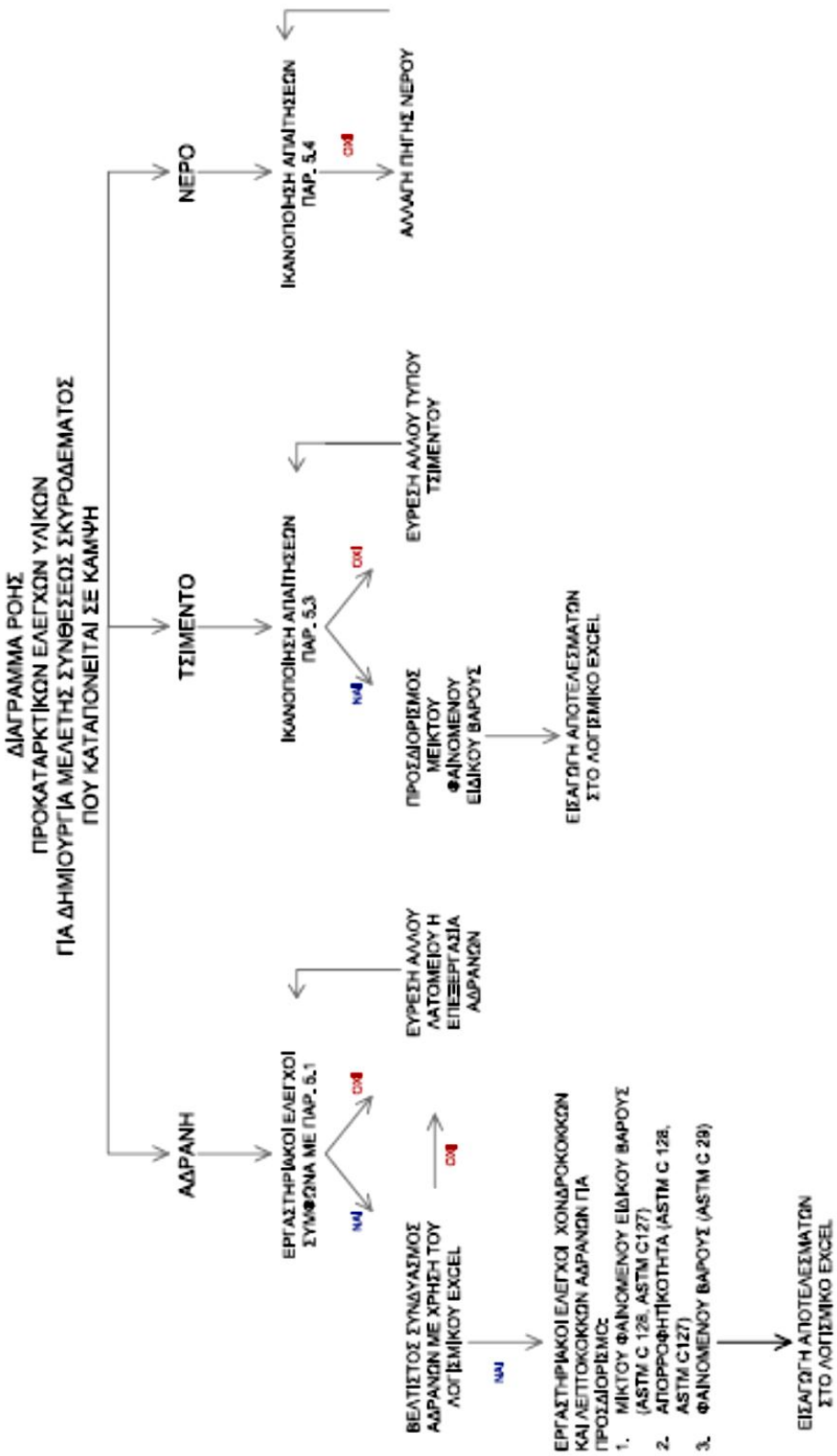
	ΜΑΖΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ 1 m^3 ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ QUANTITIES PER 1 m^3 (kg)
Τσιμέντο / Cement	367
Συνολική ποσότητα νερού / Total water	182
Ξηρή άμμο / Sand dry	757
Χονδρόκοκκο 1 ξηρό / Coarse aggregate 1 dry	227
Χονδρόκοκκο 2 ξηρό / Coarse aggregate 2 dry	533
Χονδρόκοκκο 3 ξηρό / Coarse aggregate 3 dry	214
Αερακτικό πρόσμικτο /Air entraining admixture	*
Ρευστοποιητής / Superplasticiser	*
Ίνες /Fiber	*

Εικόνα 5.7: Τελικά αποτελέσματα του προγράμματος

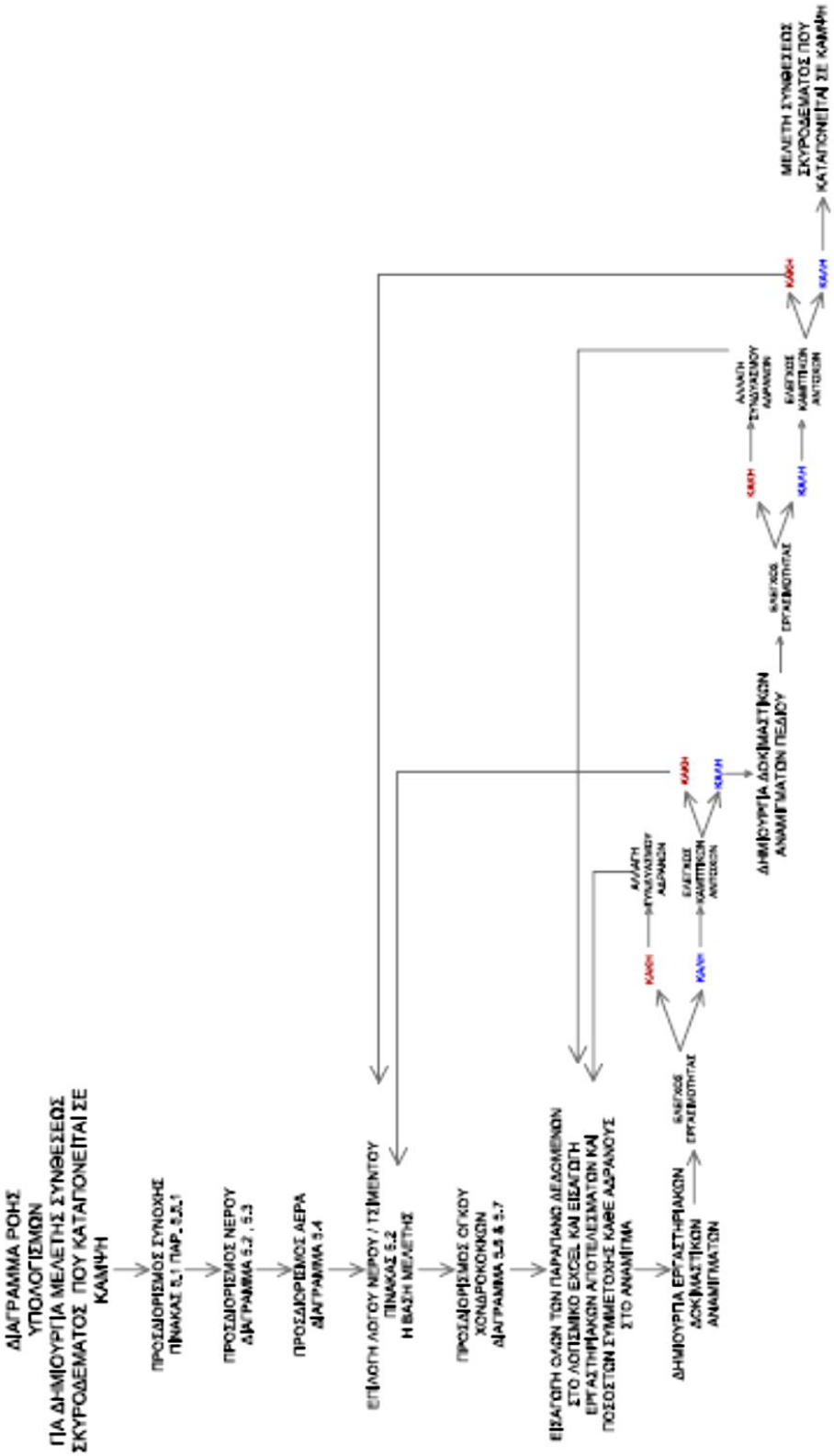
*Οι ποσότητες των προσμίκτων αναγράφονται από τον χρήστη κάθε φορά, ανάλογα με την ποσότητα που θα χρησιμοποιήσει σε κάθε δοκιμαστικό ανάμιγμα. Οι ποσότητες των προσμίκτων δεν αποτελεί κομμάτι αυτής της εργασίας.

5.8.2. Διαγράμματα ροής των απαιτούμενων ελέγχων και υπολογισμών

Για την πλήρη κατανόηση της όλης διαδικασίας και για τον τρόπο αντιμετώπισης πιθανών προβλημάτων ανάλογα με το στάδιο της διαδικασίας δημιουργήθηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα ροής.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα Ροής Προκαταρκτικών Ελέγχων για τη δημιουργία μελέτης συνθέσεως σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη.



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα Ροής Υπολογισμών για τη δημιουργία μελέτης συνθέσεως σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη.

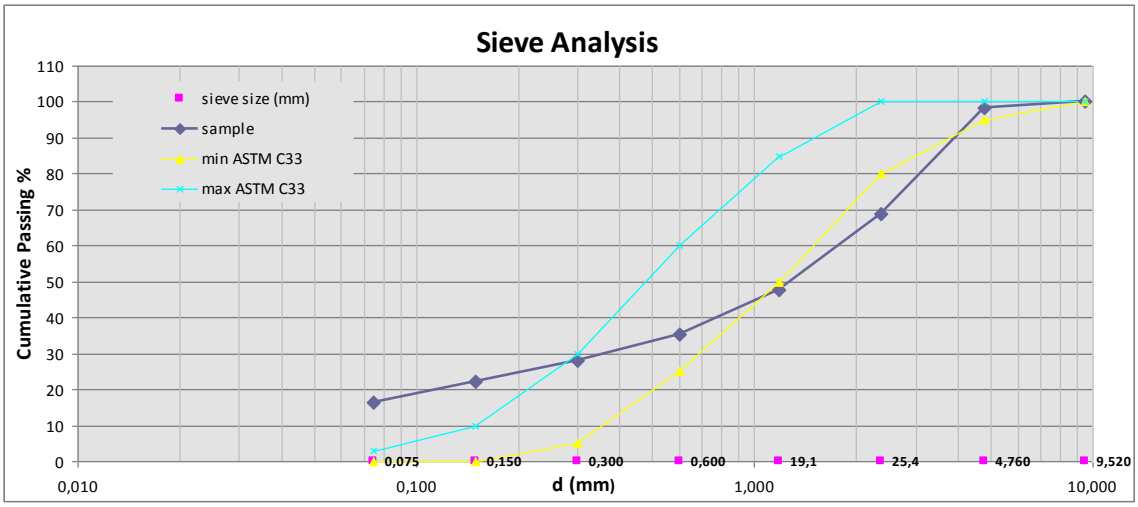
5.8 Εφαρμογή προτεινόμενης μεθοδολογίας σε πραγματικές συνθήκες.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες παραγράφους εφαρμόστηκε σε δημιουργία μελέτης συνθέσεως σκυροδέματος δαπέδου αεροδρομίου σε νησιωτική περιοχή της Ελλάδα.

Αναλυτικότερα ζητούμενο της συγκεκριμένης σύνθεσης ήταν σκυρόδεμα με καμπτικές αντοχές μεγαλύτερες από 3MPa στις 7ημέρες και 4,48MPa σε 28 ημέρες με χρήση διαστρωτήρα σκυροδεμάτων.

5.8.1 Καταλληλότητα αδρανών

Αρχικά εξετάστηκαν τα διαθέσιμα αδρανή της περιοχής ως προς την καταλληλότητα τους. Τα χονδρόκοκκα αδρανή ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις του προτύπου τα λεπτόκοκκα όμως όχι. Η κοκκομετρία της άμμου και η περιεκτικότητα της σε υλικό λεπτότερου των 0,075mm, την καθιστούσε ακατάλληλη προς χρήση.

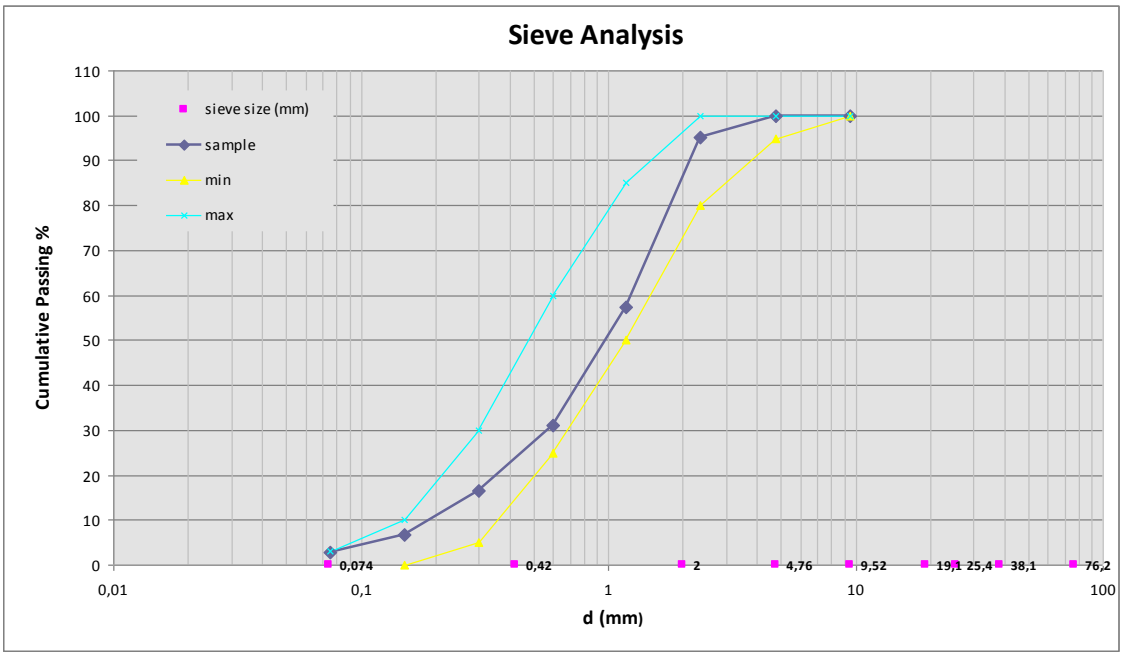


Διάγραμμα 5.11: Κοκκομετρική ανάλυση λεπτόκοκκου υλικού.

Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός Πίνακας με αποτελέσματα και όρια δοκιμών

	Αποτέλεσμα δοκιμής	Όρια προδιαγραφής UFGS 32 13 11
Δείκτης λεπτότητας/ Fineness Modulus	**3**	**2.5<x<3**
Υλικό λεπτότερο του 0,075mm Material finer than 0,075mm	**16.2%**	**<3%**

Η αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούσε να γίνει με δύο τρόπους ή εύρεση άλλου λατομείου ή επεξεργασία της άμμου. Η πρώτη εναλλακτική απορρίφθηκε καθώς το έργο είναι σε νησιωτική περιοχή και το κόστος μεταφοράς της άμμου θα υπερέβαινε εκείνο της επεξεργασίας. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας, ξήρανσης και πέρασμα από αεροταξινομητή, μέχρι να δημιουργηθεί το επιθυμητό υλικό με κατάλληλη κοκκομετρία, περιεκτικότητα σε υλικό λεπτότερου των 0,075mm και δείκτη λεπτότητας.



Διάγραμμα 5.12: Κοκκομετρική ανάλυση του λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού μετά την επεξεργασία του.

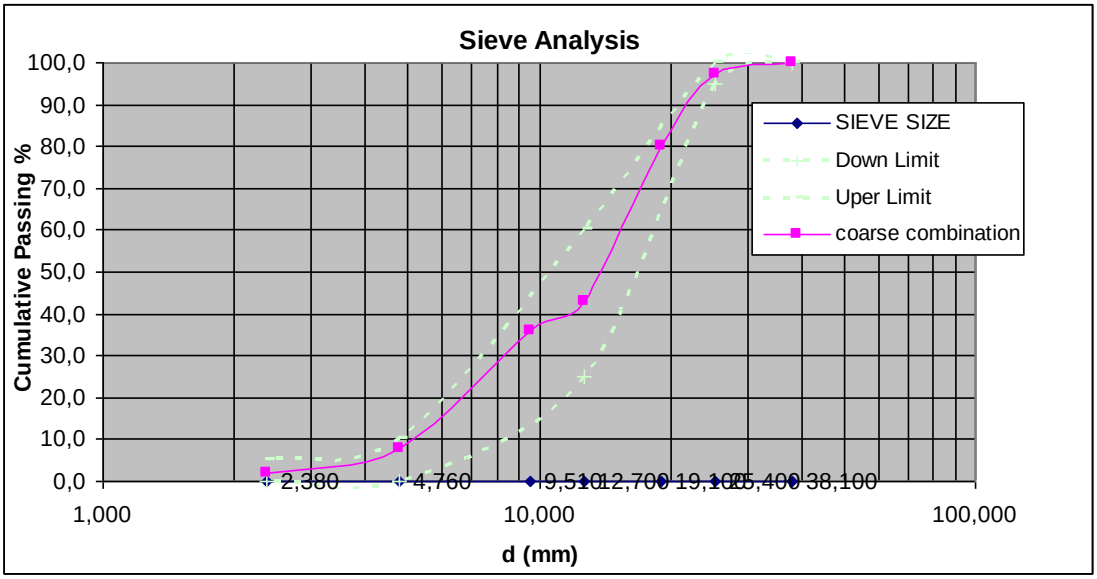
Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικός Πίνακας με αποτελέσματα και όρια δοκιμών.

	Αποτέλεσμα δοκιμής	Όρια προδιαγραφής UFGS 32 13 11
Δείκτης λεπτότητας/ Fineness Modulus	**2,93**	**2.5<x<3**
Υλικό λεπτότερο του 0,075mm Material finer than 0,075mm	**2,7%**	**<3%**

Αφού καλύφθησαν οι απαιτήσεις των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών συνέχεια έχουν οι απαιτήσεις του συνδυασμού τους. Για πιο γρήγορο και ακριβή

υπολογισμό, έγινε χρήση του προγράμματος σε περιβάλλον Excel, που έχει παρουσιαστεί νωρίτερα, και με διαδοχικές δοκιμές επιλέχθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός των αδρανών.

Από εκεί προέκυψαν τα αποτελέσματα που δίνονται στις Εικόνες 5.13 και 5.14.



Διάγραμμα 5.13: Κοκκομετρική ανάλυση συνδυασμού χονδρόκοκκου υλικού σύμφωνα με το ASTM C33.

Sieve Size			% Passing					Combined % Passing	Combined Cumulative % Retained	Combined % Retained	Down limit for coarse aggr	Upper limit for coarse aggr	Combined coarse % Passing
#	in	mm	coarse 1	coarse 2	coarse 3	fine 1	fine 2						
2 1/2"	2,500	63,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00			
2"	2,000	50,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00			
1 1/2"	1,500	38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	100	100	100
1"	1,000	25,400	88,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,20	1,80	1,80	95	100	97
3/4"	0,750	19,100	18,00	97,00	100,00	100,00	100,00	86,86	13,14	11,34	-	-	80
1/2"	0,500	12,700	1,00	19,00	100,00	100,00	100,00	62,47	37,53	24,39	25	60	43
3/8"	0,375	9,510	1,00	3,00	99,00	100,00	100,00	57,76	42,24	4,71			36
4	0,187	4,760	1,00	1,00	20,00	100,00	100,00	39,03	60,97	18,73	0	10	8
8	0,093	2,380	1,00	1,00	4,00	95,06	100,00	33,67	66,33	5,36	0	5	2
16	0,047	1,190	1,00	1,00	3,00	57,30	100,00	20,60	79,40	13,07			2
30	0,024	0,595	1,00	1,00	3,00	31,01	100,00	11,66	88,34	8,94			2
50	0,012	0,297	1,00	1,00	3,00	16,40	100,00	6,70	93,30	4,97			2
100	0,006	0,149	1,00	1,00	2,00	6,74	100,00	3,18	96,82	3,52			1
200	0,003	0,074	0,00	0,00	0,00	2,70	100,00	0,92	99,08	2,27			0
pan	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,92			
	% Total Coarse Aggregate		23%	42%	35%	100%							
	% Total Aggregate		15%	28%	23%	34%	0%	100%					
Workability Factor		34											
Coarseness Factor		64											

Εικόνα 5.10: Υπολογισμοί για την βέλτιστη σύνθεση των αδρανών με τη χρήση του αυτοματοποιημένου λογισμικού.

Στη συνέχεια υπολογίζεται εργαστηριακά το μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος, η απορροφητικότητα (ASTM C128 για λεπτόκοκκα, ASTM C 127 για χονδρόκοκκα) και το φαινόμενο βάρος (ASTM C 29) για το κάθε κλάσμα αδρανών που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη και εισάγονται τα αποτελέσματα στα αντίστοιχα κελιά του προγράμματος.

MATERIAL DATA				
	ΜΕΙΚΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ BULK SPECIFIC GRAVITY:	ΥΓΡΑΣΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ABSORTION	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΣΤΟ ΑΝΑΜΙΓΜΑ MIXTURE PERCENTAGE	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ BULK DENSITY (kg/m3)
ΤΣΙΜΕΝΤΟ / CEMENT	3,06			
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 1 / COARSE 1	2,64	0,70%	**15,00%**	1503
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 2 / COARSE 2	2,65	0,70%	**28,00%**	1520
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 3 / COARSE 3	2,63	1,00%	**23,00%**	1545
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ 1 / FINE 1	2,62	1,20%	**34,00%**	
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ 2 / FINE 2	0	0,00%	**0,00%**	
COARSE AGGREGATE TOTAL SPECIFIC GRAVITY	2,64			

Εικόνα 5.11: Κελιά εισαγωγής δεδομένων αδρανών όπως παρουσιάζεται στο πρόγραμμα

5.8.2 Καταλληλότητα τσιμέντου.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5,3 το τσιμέντο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δάπεδα αεροδρομίων είναι συγκεκριμένων τύπων. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το δεδομένο καθώς και τη διαθεσιμότητα επιλέχθηκε η χρήση τσιμέντου Portlad τύπου CEM I.

Στον Πίνακα 5.10 που ακολουθεί παρουσιάζεται η χημική ανάλυση και η ξηρή του σύνθεση. Τέλος το μεικτό φαινόμενο ειδικό του βάρος είναι 3,06 σύμφωνα με τα

εργαστηριακά αποτελέσματα του εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου της μονάδας παραγωγής τσιμέντου από όπου γίνεται η προμήθεια του.

Πίνακας 5.12: Προδιαγραφές ποιότητας παραγωγής τελικού προϊόντος τσιμέντου CEM I 42.5N.

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ
ΒΟΛΟΣ
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ 16/11/2012

ΠΡΟΤΥΠΟ
ΤΣΙΜΕΝΤΟ
CEM I 42,5 R

ΕΛΟΤ ΕΝ 197-1

	ΕΛΑΧΙΣΤΟ			ΜΕΓΙΣΤΟ	
	ΟΡΙΟ ΠΡΟΤΥ-ΠΟΥ	ΟΡΙΟ ΠΡΟΔΙΑ-ΓΡΑΦΗΣ	ΕΝΔΕΙ-ΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΟΡΙΟ ΠΡΟΔΙΑ-ΓΡΑΦΗΣ	ΟΡΙΟ ΠΡΟΤΥ-ΠΟΥ
Α. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ					
SiO2			18,62		
Al2O3			5,43		
Fe2O3			3,25		
CaO			63,82		
MgO			1,89		
SO3			3,15	3,50	4,50
Na2O			0,38		
K20			0,56		
L.O.I			2,60	3,10	5,00
SUM			99,70		
I.R			0,40	0,75	5,00
Cr(6+) ppm			0,00	0,30	2,00
Cl			0,01	0,02	0,10
Β. ΣΥΝΘΕΣΗ ΞΗΡΗ					
	%				
ΚΛΙΝΚΕΡ	95,0		95,7		100,0
ΠΡΟΣΘΕΤΟ	0		4,3		5,0
			100,00		
ΓΥΨΟΣ			4,2		
ΘΕΙΙΚΟΣ ΣΙΔΗΡΟΣ			0,3		
ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟ	gr/tn				
TEA			150		
ΤΙΠΑ					

5.8.3 Καταλληλότητα νερού.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε είναι από το δίκτυο του πόσιμου νερού οπότε δεν χρειάστηκε να γίνει κάποιος έλεγχος.

5.8.4 Υπολογισμοί σύνθεσης

Για τη συγκεκριμένη σύνθεση απαιτείτε ένα σκυρόδεμα με κάθιση από 25mm μέχρι 75mm δηλαδή στην κατηγορία δύσκαμπτο με πλαστικότητα, ενώ ο μέγιστος κόκκος είναι 25mm. Με βάση αυτά τα δεδομένα, προκύπτουν από τα αντίστοιχα διαγράμματα τα δεδομένα του δεύτερου πίνακα εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος.

Δεδομένα σύμφωνα με τα διαγράμματα του ACI 211.3R **Inputs From ACI 211.3R Diagrams**	
ΔΕΙΚΤΗΣ ΛΕΠΤΟΤΗΤΑΣ FINE AGGREGATE FINENESS MODULUS	3,14
ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟΣ ΚΟΚΚΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ COARSE AGGREGATE MAXIMUM SIZE (mm)	25,4
ΛΟΓΟΣ ΝΕΡΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ / w/cm	0,45
ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ APPROXIMATE QUANTITY OF MIXING WATER (kg/m3)	158,00
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΑΕΡΑΣ REQUIRED AIR CONTENT	5,2%
ΟΓΚΟΣ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΩΝ / VOLUME OF COARSE AGGREGATE REQUIRED IN EACH CONCRETE BATCH (m3)	0,65
ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΟΓΚΟΥ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΩΝ / VOLUME CORRECTION FACTOR FOR DRY-RODDED COARSE AGGREGATE	1,08

Εικόνα 5.13: Κελιά εισαγωγής δεδομένων που προήλθαν από τα διαγράμματα του ACI 211.3R

Εισάγοντας όλα τα απαιτούμενα δεδομένα, προκύπτει η ακόλουθη σύνθεση:

	ΜΑΖΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ 1 m^3 ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ QUANTITIES PER 1 m^3 (kg)
ΤΣΙΜΕΝΤΟ / CEMENT	351
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ TOTAL WATER	158+17
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ 1 / FINE 1	707
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 1 / COARSE 1	240
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 2 / COARSE 2	453
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ 3 / COARSE 3	378

Εικόνα 5.14: Τελικά αποτελέσματα του προγράμματος

Στην συγκεκριμένη σύνθεση έγινε χρήση αερακτικού πρόσμικτου όπως απαιτείται από τη μελέτη, ενώ πρόσθετα έγινε χρήση ρευστοποιητή ώστε να διατηρηθεί η εργασιμότητα του σκυροδέματος κατά τη μεταφορά του από το παρασκευαστήριο στο πεδίο. Επιπρόσθετα για αποφυγή δημιουργίας κατασκευαστικών επιφανειακών ρωγματώσεων στο σκυρόδεμα εξαιτίας πιθανής γρήγορης εξάτμισης του νερού έγινε χρήση ινών. Λόγω των καλών κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του έργου έγινε χρήση όλων των πρόσμικτων στο ελάχιστο προτεινόμενο των κατασκευαστών τους. (Η ποσότητα υπολογίζεται συναρτήσει της ποσότητας του τσιμέντου.)

	ΜΑΖΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ 1 m^3 ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ QUANTITIES PER 1 m^3 (kg)
ΑΕΡΑΚΤΙΚΟ/ AIR ENTRAINING ADMIXTURE	0,178
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ/ SUPERPLASTICISER	1,138
ΙΝΕΣ/ FIBER	0,600

Εικόνα 5.15: Ποσότητες πρόσμικτων στο 1m^3 νωπού σκυροδέματος.

Αρχικά η παραπάνω σύνθεση δημιουργήθηκε και ελέγχθηκε σε συνθήκες εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.

ΚΑΘΙΣΗ / SLUMP, 0 min	90mm
ΚΑΘΙΣΗ / SLUMP, 20 min (Απαιτούμενος χρόνος για μεταφορά σκυροδέματος από το παρασκευαστήριο στο πεδίο)	55mm
ΑΕΡΑΣ/ AIR CONTENT, 20min	5%
ΣΥΝΟΧΗ / WORKABILITY	Πολύ καλή
ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 7 ΗΜΕΡΩΝ / FLEXURAL STRENGTH 7 DAYS	5,24 MPa
ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ / FLEXURAL STRENGTH 28 DAYS	6,11 MPa

Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν απόλυτα ικανοποιητικά, καθώς επιτυγχάνεται και πολύ καλή εργασιμότητα και υψηλές αντοχές.

Η καμπτικές αντοχές που προέκυψαν είναι αρκετά παραπάνω από αυτές που απαιτεί το έργο (4,48MPa 28ημερών). Σε περίπτωση που αυτά τα αποτελέσματα δεν είχαν προκύψει με τον μικρότερο λόγο νερού τσιμέντου που είναι αποδεκτός για σκυροδέματα δαπέδων το 0.45, θα μπορούσε να επαναληφθεί η παραπάνω σύνθεση με μικρότερο λόγο νερού τσιμέντου που ουσιαστικά είναι λιγότερο τσιμέντο στη σύνθεση κυρίως για λόγους κόστους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό δεν μπορεί να γίνει αφού ήδη είμαστε στο κάτω όριο οπότε την αποδεχόμαστε.

Στη συνέχεια η παραπάνω μελέτη σύνθεσης εφαρμόστηκε στο πεδίο, ώστε να ελεγχθεί και σε συνθήκες περιβάλλοντος. Οι σκυροδετήσεις θα πραγματοποιούνταν χειμερινούς

μήνες με θερμοκρασία περιβάλλοντος από 5°C μέχρι 18°C Τα αποτελέσματα που έδωσε παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών πεδίου σε πραγματικές συνθήκες.

ΚΑΘΙΣΗ / SLUMP, 0 min	80mm
ΚΑΘΙΣΗ / SLUMP, 20 min (Απαιτούμενος χρόνος για μεταφορά σκυροδέματος από το παρασκευαστήριο στο πεδίο)	50mm
ΑΕΡΑΣ/ AIR CONTENT, 20min	4,5%
ΣΥΝΟΧΗ / WORKABILITY	Πολύ καλή
ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 7 ΗΜΕΡΩΝ / FLEXURAL STRENGTH 7 DAYS	5,36 MPa
ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ / FLEXURAL STRENGTH 28 DAYS	6,43 MPa

Λαμβάνοντας και τα παραπάνω αποτελέσματα εξακριβώθηκε ότι η συγκεκριμένη μελέτη συνθέσεως λειτουργεί σύμφωνα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του έργου.

5.8.5 Εφαρμογή στο πεδίο

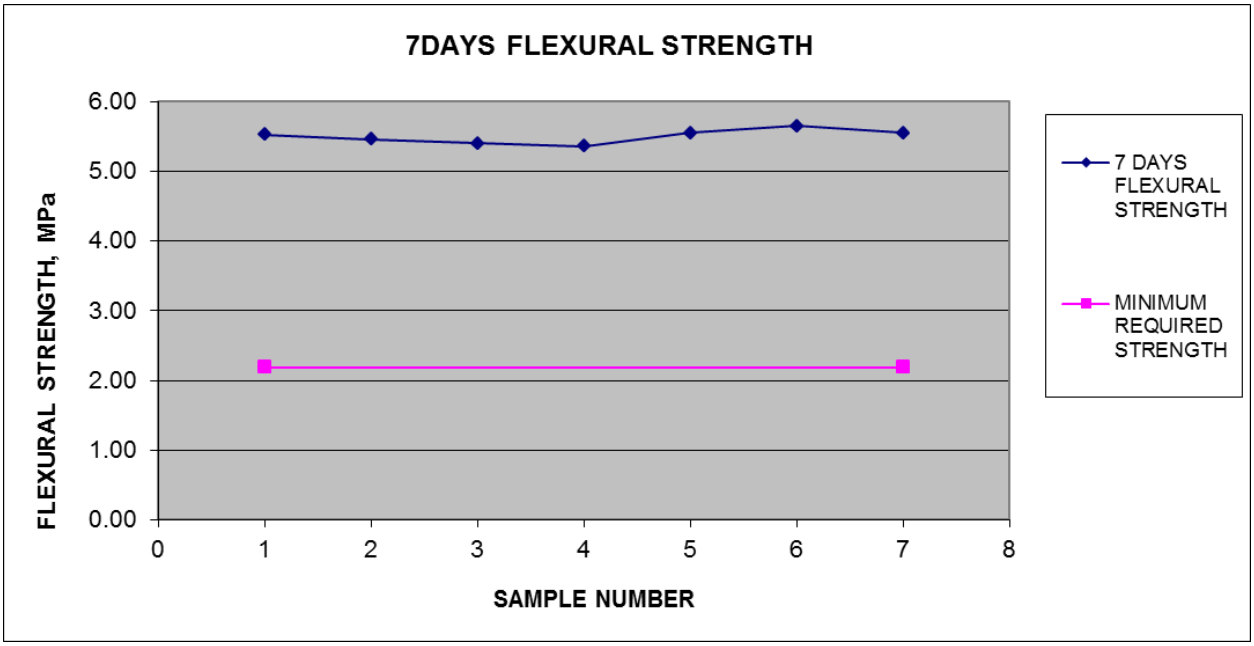
Η μελέτη συνθέσεως πριν εφαρμοστεί στο πεδίο πρέπει να προσαρμόζεται καθημερινά στις συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και στις συνθήκες τον αδρανών. Πριν οποιαδήποτε σκυροδέτηση πρέπει να υπολογίζεται η υγρασία των αδρανών και ιδιαίτερα της άμμου και να γίνεται η απαιτούμενη διόρθωση στην ποσότητα του νερού της σύνθεσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στους χειμερινούς μήνες καθώς κατά κανόνα τα αδρανή είναι βρεγμένα. Τα περισσότερα παρασκευαστήρια διαθέτουν υγρασιόμετρα μέσα στα σιλό των αδρανών ώστε να γίνεται αυτόματη διόρθωση στην τελική ποσότητα του νερού αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται και ένας εργαστηριακός έλεγχος της υγρασίας. Περίσσεια νερού από την καθορισμένη ποσότητα της μελέτης θα

δημιουργήσει προβλήματα στις τελικές αντοχές, στην περατότητα, στο φινίρισμα αλλά και την εργασιμότητα.

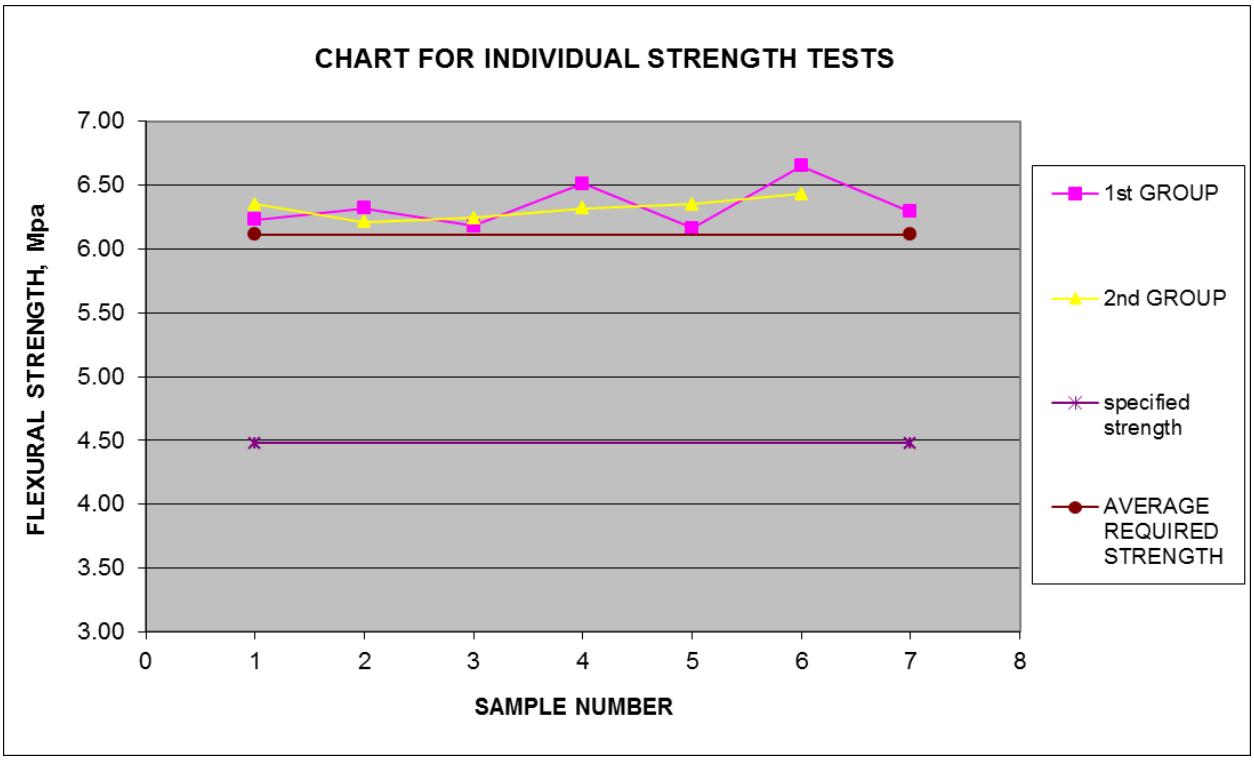
Ο έλεγχος των καμπτικών αντοχών του σκυροδέματος στο συγκεκριμένο έργο καθορίζεται από τη μελέτη ως εξής:

- Λήψη 4 πρισματικών δοκιμίων στα αρχικά στάδια της ημερήσιας σκυροδέτησης.
- Λήψη 4 πρισματικών δοκιμίων στα τελικά στάδια της σκυροδέτησης.
- Το ένα δοκίμιο από κάθε ομάδα θα εξετάζεται η αντοχή του στις 7 ημέρες και η αντοχή του πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 65% της απαιτούμενης αντοχής, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 2,9MPa.
- Τα υπόλοιπα 3 δοκίμια κάθε ομάδας εξετάζεται η αντοχή τους στις 28 ημέρες. Η αντοχή του κάθε δοκιμίου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 4,14MPa ενώ ο μέσο όρος κάθε ομάδας πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 4,48MPa.

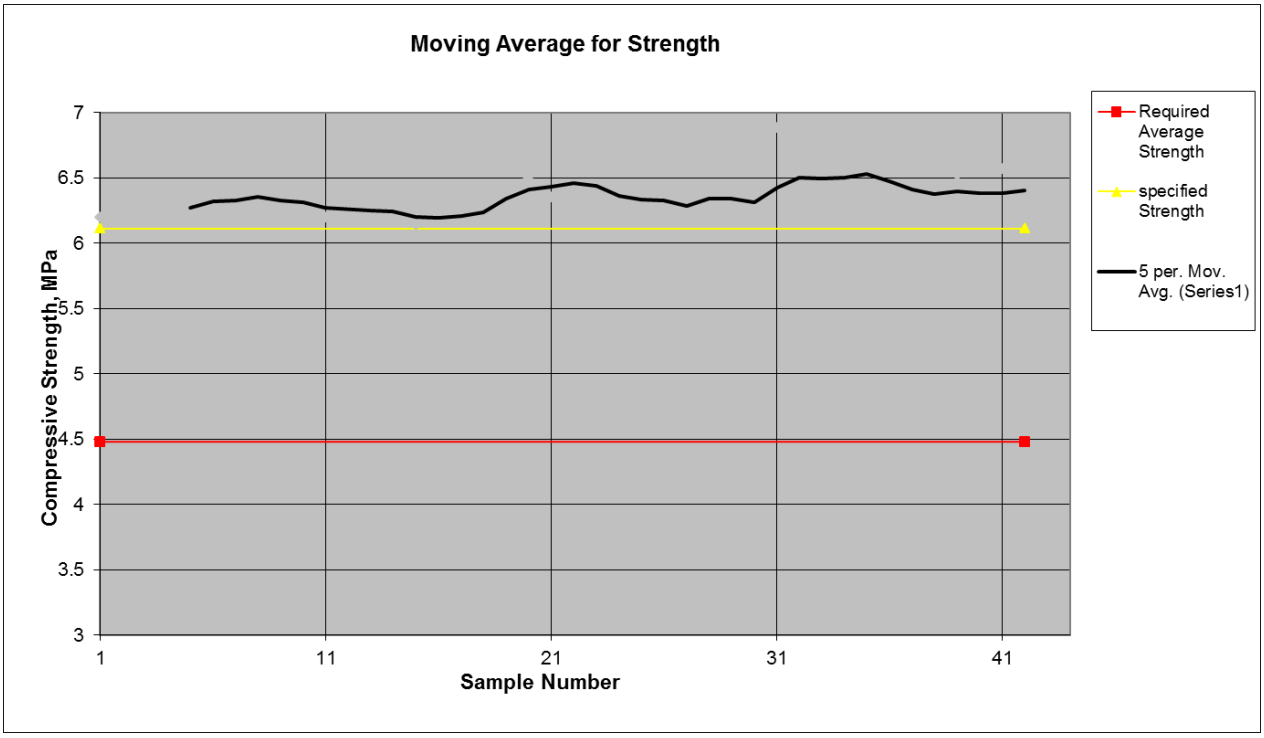
Τα αποτελέσματα ελέγχου μιας φάσης του παραπάνω έργου που περιλάμβανε 7 ημέρες σκυροδέτησης 300m^3/ημέρα, έδωσαν τα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.14 : Συνολικά αποτελέσματα καμπτικής αντοχής 7 ημερών



Διάγραμμα 5.15: Συνολικά αποτελέσματα καμπτικής αντοχής 28 ημερών 1^{ης} και 2^{ης} ομάδας.



Διάγραμμα 5.16: Κυλιόμενος μέσος όρος συνολικών αποτελεσμάτων.

6. Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια τόσο διεθνώς όσο και στην χώρα μας παρατηρείται αύξηση του αριθμού των κατασκευαζόμενων δαπέδων και ταυτόχρονα χρήση όλο και περισσότερο εξελιγμένων διατάξεων αποθήκευσης και διακίνησης των εμπορευμάτων, γεγονός που προκαλεί σημαντική αύξηση των απαιτήσεων που τίθενται στις προδιαγραφές κατασκευής και στις μεθόδους υπολογισμού. Δυστυχώς η ελληνική βιβλιογραφία έχει μείνει πολύ πίσω σε ότι αφορά των σχεδιασμό δαπέδων, με μόνη επίσημη προδιαγραφή την ΔΕ-7 της πολεμικής αεροπορίας του 1978 με μία πρόσφατη αναθεώρηση, χωρίς ουσιαστικές διαφοροποιήσεις, το 2006. Πέρα από αυτή την προδιαγραφή τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει και γίνονται κάποιες δημοσιεύσεις οι οποίες όμως αφορούν το σχεδιασμό δαπέδων και δεν αναφέρονται στη μελέτη συνθέσεως και stις απαιτήσεις αυτού του τύπου σκυροδέματος.

Η μελέτη συνθέσεων σκυροδεμάτων που καταπονούνται σε κάμψη δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν συνέχεια της μελέτης συνθέσεως κοινών σκυροδεμάτων, που καταπονούνται σε θλίψη, αλλά σαν μία τελείως ξεχωριστή κατηγορία σκυροδεμάτων με διαφορετικές απαιτήσεις και ανάγκες.

Για το σωστό σχεδιασμό τέτοιου είδους σκυροδεμάτων πρέπει να εξετάζονται πολύ προσεκτικά οι απαιτήσεις του έργου και στη συνέχεια να χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες πρώτες ύλες. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι τα αδρανή και το τσιμέντο που διατίθενται σε κάθε περιοχή μπορεί να μην πληρούν τις απαιτήσεις των προδιαγραφών, κάτι που επηρεάζει πολύ το κόστος αλλά και το χρόνο κατασκευής. να Για να διασφαλίστεί το καταλληλης ποιότητας σκυρόδεμα πρέπει να εκπονείται εξειδικευμένη μελέτη συνθέσεως και να ελέγχεται με παραγωγή δοκιμαστικών αναμιγμάτων. Ο χρόνος που χρειάζονται για μία ολοκληρωμένη μελέτη συνθέσεως τέτοιου τύπου, σε συνδυασμό με όλες τις απαραίτητες δοκιμές στα αδρανή για την πιστοποίηση της καταλληλότητας τους, μπορεί να διαρκέσει μέχρι και 6 μήνες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να καλύψει το κενό που υπάρχει, στην ελληνική κυρίως βιβλιογραφία, ως προς τον σχεδιασμό σύνθεσης τέτοιου είδους σκυροδεμάτων, δίνοντας όλες τι απαραίτητες πληροφορίες για τον σχεδιασμό τους αλλά και τις απαιτήσεις των συστατικών τους.

Παρουσιάζει αναλυτικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για τους υπολογισμούς της μελέτης συνθέσεως, ενώ το αριθμητικό παράδειγμα βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της όλης διαδικασίας. Δίνεται έτσι η δυνατότητα στον αναγνώστη να έχει συγκεντρωμένες όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζεται για την εκπόνηση μια τέτοιας μελέτης σύνθεσης.

Με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Excel, σε μορφή λογιστικού φύλλου, οι υπολογισμοί γίνονται πολύ γρήγορα χωρίς να πρέπει να επαναλαμβάνονται

κάθε φορά και χωρίς υπολογιστικά σφάλματα, ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα (τόσο τα ενδιαμάμεσα όσο και τα τελικά) και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται αναλυτικά. Δίνεται έτσι η δυνατότητα στο χρήστη να παρακολουθεί τους πλήρεις υπολογισμούς μια μελέτης συνθέσεως που δημιουργεί, ή να παραγματοποιεί ελέγχους ή τροποποιήσεις σε μια ήδη υπαρχουσα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσε μελλοντικά να βελτιωθεί εισάγοντας τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται σε κάποιο νέο πρόγραμμα που θα δημιουργηθεί (π.χ. σε περιβάλλον Matlab), ώστε η διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης σύνθεσης των αδρανών να αυτοματοποιηθεί.

Τέλος επιπλέον πειραματική διερεύνηση της σχέσης των καμπτικών αντοχών με το λόγο νερού τσιμέντου θα μπορούσε να περιορίσει τον απαιτούμενο αριθμό δοκιμαστικών αναμιγμάτων και να μειώσει τον απαιτούμενο χρόνο για την μελέτη της σύνθεσης.

7. Βιβλιογραφία.

Abrams, D. A. 1924. Design of Concrete Mixtures. Bulletin 1. 6th printing. Chicago, IL: StructuralMaterials Research Laboratory, Lewis Institute

Abbas, A.A., Pavlovic,M.N., Kotsovos,M.D., “Post-elastic behaviour of ground-floor slabs Part2: Fabric reinforced concrete slabs”, Magazine of Concrete Research Vol9, No6, August 2007

ACI Committee 211, 2002, Evaluation of Strength Test Results of Concrete. ACI 214. Farmington Hills, American Concrete Institute (ACI).

ACI Committee 211, 2002, Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. ACI 211.3R-02. Farmington Hills, American Concrete Institute (ACI).

ACI Committee 211, 2008, *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*. ACI 211.4R-08 Farmington Hills, American Concrete Institute (ACI).

ACI Committee 211, 2009, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.* ACI 211.1-91. Farmington Hills, American Concrete Institute (ACI).

ACI Committee 316, 1997, Guide for Construction of Concrete Pavements *and* Concrete Bases. ACI 211.1-91. Farmington Hills, American Concrete Institute (ACI)

ARMY TM 5-822-7, Standard Practice for Concrete Pavements, Departments of the Army and the Air Force.

ASTM C 1260 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).

ASTM C 131, Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.

ASTM C 138, Standard Test Method for Density, Yield, and Air Content of Concrete.

ASTM C 143, Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

ASTM C 150/AASHTO M 85, Specification for Portland Cement.

ASTM C 33, Specification for Concrete Aggregates.

ASTM C136-04 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

ASTM C29, Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate.

ASTM C31, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.

DOT/FAA/AR-04/46.

CEN EN 206-1, 2000, *Specification, performance, production and conformity*. European Standard.

Concrete Industrial Ground Floors, A guide to design and construction, Concrete Society Technical Report No 34, Third Edition (1994)

Crouch, L. K.; Sauter, Heather J.; and Williams, Jakob A, 2000, 92-MPa Air-entrained HPC, TRB-Record 1698, Concrete 2000

CSN EN 1008 - Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete

EN 12350-1, 2009, *Testing Fresh Concrete*, European Standard

EN 12390-8, 2008, *Testing Hardened concrete*, European Standard

DIN 4226-1, 2001-07, *Aggregates for cmortar and concrete - Part 1: Normal-weight and heavy aggregates*

DIN 1045-3, 2001-07, *Plain, reinforced and prestressed concrete structures - Part 3: Workmanship*

Garg, N and E. Guo, 2004, Operational Life of Airport Pavements, Technicla Report.

Guo, E.H., 2010, Concrete Pavement Strength and Beam Flexural Strength, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.

Hirschi, T., H. Knauber, M. Lanz, J. Schlumpf, J. Schrabbach, C. Spirig, U. Waeber, Απόδοση στα Ελληνικά και προσαρμογή Εύη Σάλτα, 2007, Εγχειρίδιο τεχνολογίας Σκυροδέματος Sika, Sika Hellas ABEE.

Knapton J., 2003*, Ground Bearing Concrete Slabs*, Thomas Telford

National Ready-Mixed Concrete Association, 1992, What, Why and How? Flexural Strength of Concrete, Concrete in Practice 16. NRMCA, Silver Spring, Md.

Packard, R.G., 1995 , Design of Concrete Air Pavement, Portland Cement Association, Transportation Department.

Scanlon, J.M. 1994*. Factors Influencing Concrete Workability. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. STP 169C. Philadelphia, PA: American Society of Testing and Materials: 49–64.

Smith, K.D, J.R. Roesler, J.E. Naughton, 2002, Review of Fatigue Models for Concrete Airfield Pavement Design, Technical Report Prepared for American Concrete Pavement Association.

Tayabji, S. Anderson, J., 2007, Proposed Specification for Construction of Concrete Airfield Pavement, Innovative Pavement Research Foundation, Airport Concrete Pavement Technology Program, 5420 Old Orchard Road Skokie, IL 6007.

Taylor, P.C., Kosmatka, S.H., Voigt, G.F., et al. 2006, Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice-Manual, National Concrete Pavement Technology Centre/ Center for Transportation Research and Education Iowa State University.

Thuma, R.G. 2002: A comparison of Rigid Airfield Pavement Design Methods, Technical Report Prepared for American Concrete Pavement Association

UFGS-32 13 11, 2012, Concrete Pavement for Airfields and other Heavy-Duty Pavements, USACE / NAVFAK / AFCESA / NASA

Κόλιας, Σ., 2008, *Υπολογισμός δυσκάμπτων οδοστρωμάτων". Σεμινάριο «Οδοστρώματα από Σκυρόδεμα*, Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, Αθήνα

Κορωναίος, Αιμ. Γ. και Γ. Ι. Πουλάκος, 2006, Τεχνικά Υλικά Τόμος 1, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τέγος, Ι.Α., Γιάννακας, Ν.Χ., 2006, *Πλάκες επί εδάφους: οι γνωστοί-άγνωστοι φορείς Σκυροδέματος*, 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος (Αλεξανδρούπολη Οκτώβριος 18-20, 2006), Αλεξανδρούπολη, 495-509

Τσακαλάκης, Κ. 2010, *Τεχνολογία Παραγωγής τσιμέντου και Σκυροδέματος*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων.