

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Διερεύνηση αντοχών κονιάματος παρασκευασμένο με ανακυκλωμένα αδρανή

Σπουδαστής: Κωσταράς- Κωνσταντίνου Άγγελος

Επιβλέπων καθηγητής: Κολοβός Κωνσταντίνος

Ιούνιος 2017

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	5
2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	5
2.2. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	8
2.2.1. Τσιμέντο.....	8
2.2.1.1. Τσιμέντο Portland.....	9
2.2.1.2. Πρώτες ύλες στη βιομηχανία τσιμέντου.....	10
2.2.1.3. Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου Portland.....	11
2.2.1.4. Έψηση μίγματος πρώτων υλών – Τεχνολογίες έψησης.....	12
2.2.1.5. Ενυδάτωση του τσιμέντου Portland.....	14
2.2.1.6. Μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες του τσιμέντου.....	17
2.2.2. Αδρανή.....	19
2.2.2.1. Γενικά.....	19
2.2.2.2. Είδη αδρανών.....	20
2.2.2.3. Κοκκομετρία αδρανών.....	29
2.2.2.4. Ιδιότητες αδρανών.....	32
2.3. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	35
2.3.1. Χημικά πρόσμικτα επιφανειακής δράσης.....	36
2.3.1.1. Αερακτικά.....	36
2.3.1.2. Ρευστοποιητικά.....	37
2.3.1.3. Υπερρευστοποιητικά.....	37
2.3.2. Χημικά πρόσμικτα ελέγχου της πήξης.....	38
2.3.2.1. Επιταχυντικά της πήξης.....	38
2.3.2.2. Επιβραδυντικά της πήξης.....	38
2.3.3. Ορυκτά πρόσθετα.....	39
2.3.1.1. Φυσικά υλικά.....	39
2.3.1.2. Παραπροϊόντα.....	40
2.3.1.3. Στεγανοποιητικά πρόσθετα.....	41
2.4. ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΙΞΗΣ.....	42
2.5. ΝΩΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	46
2.5.1. Ανάμιξη και μεταφορά.....	46
2.5.2. Εργασιμότητα.....	47
2.5.3. Διάστρωση, συμπίκνωση, τελείωμα.....	48

2.5.4.	Συντήρηση, αφαίρεση ξυλοτύπων	50
2.5.5.	Εξίδρωση.....	51
2.5.6.	Απόμιξη	52
2.5.7.	Παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος	52
2.6.	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ	53
2.7.	ΕΙΔΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	54
2.7.1.	Έτοιμο σκυρόδεμα.....	54
2.7.2.	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	55
2.7.3.	Οπλισμένο σκυρόδεμα	56
2.7.4.	Προεντεταμένο σκυρόδεμα	56
2.7.5.	Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.....	57
2.7.6.	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα	58
2.7.7.	Διογκούμενο σκυρόδεμα.....	58
2.8.	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΑ.....	59
2.9.	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΑΔΡΑΝΗ	60
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	61
3.1.	Σκοπός.....	61
3.2.	Υλικά Σύνθεσης Κονιάματος	61
3.3.	Πειραματική Διαδικασία	61
3.3.1.	Φάση Α: Σκυροδέτηση δοκιμίων.....	61
3.3.2.	Φάση Β: Σκυροδέτηση δοκιμίων από ανακυκλούμενο σκυρόδεμα	62
3.4.	Αποτελέσματα	73
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

«...Όπως ο βασιλιάς Μίδας μετέτρεπε ότι άγγιζε σε χρυσό, έτσι κι εμείς πρέπει να μετατρέψουμε όλα αυτά τα σκουπίδια της σύγχρονης κοινωνίας σε όφελος μας, να μετατρέψουμε το άχρηστο σε χρήσιμο....»

Rem Koolhaas

Ενώ η φύση από μόνη της έχει μεριμνήσει για τη φυσική ανακύκλωση των απορριμμάτων των οργανισμών, ο άνθρωπος δείχνει να απέτυχε. Η συνεχής δημογραφική αύξηση και η τεχνολογική εξέλιξη οδήγησαν σε κατασπατάληση των φυσικών πόρων σε τέτοιο σημείο που τείνει να χαθεί η φυσική ισορροπία. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες επιβαρύνουν κατά πολύ το περιβάλλον, με την οικοδομική δραστηριότητα να θεωρείται μια από τις πιο εχθρικές επεμβάσεις αφού μεταβάλει αισθητά το φλοιό της Γης, δαπανά ενέργεια και πρώτες ύλες και παράγει απόβλητα. Σήμερα η ενεργειακή και περιβαλλοντική κρίση αποτελεί μέγιστο πρόβλημα της σύγχρονης κοινωνίας που αρνούμενη πλέον να εθελουφλεί, φέρει στο φως τον όρο ανακύκλωση. Η ανακύκλωση τόσο σαν φιλοσοφία όσο και σαν συμπεριφορά γίνεται όλο και πιο επίκαιρη στην προσπάθεια του ανθρώπου να ανατρέψει την επικείμενη καταστροφή του περιβάλλοντος.

Η προσπάθεια επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των απορριμμάτων αποτελεί παράδειγμα πολιτιστικής ανάπτυξης και θα πρέπει να αποτελεί παράδειγμα για το υπόλοιπο της κοινωνίας.

Σεβόμενη αυτή τη φιλοσοφία η παρούσα διπλωματική εργασία μέσω του πειραματικού μέρους διερευνά την αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος συγκριτικά με το συμβατικό με στόχο τη διερεύνηση της επαναχρησιμοποίησης του σκυροδέματος αφού αποτελεί κατασκευαστικό απόβλητο που παράγεται κατά την εκτέλεση διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων όπως ανέγερση, κατεδάφιση, ανακαίνιση κτιρίων, ανακατασκευή και συντήρηση δρόμων με σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον.

2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για παραπάνω από δύο χιλιετίες, το τσιμέντο μαζί με το σκυρόδεμα άντεξαν τη σκληρή δοκιμασία του χρόνου, κερδίζοντας ακλόνητη θέση στη σύγχρονη κοινωνία ως φτηνά, αξιόπιστα, αλλά και συνεχώς εξελισσόμενα δομικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται σχεδόν παντού στις κατασκευές. Στην πραγματικότητα η παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος σήμερα ξεπερνά αυτή του χάλυβα. Το τσιμέντο κατέχει την επιπρόσθετη διάκριση, σε αντίθεση με το χάλυβα, να παράγεται, κατ' ουσία, σχεδόν σε κάθε χώρα του σύγχρονου κόσμου [1].

Σύμφωνα με τις περισσότερες πηγές, το σκυρόδεμα εφευρέθη κατά τους ρωμαϊκούς χρόνους και αναπτύχθηκε ιδιαίτερα στο δυτικό κόσμο από το 1824 και μετά, όταν ο Άγγλος Joseph Aspdin παρασκεύασε πρώτος το λεγόμενο τσιμέντο Portland. Ήταν αποτέλεσμα άλεσης του προϊόντος έψησης μίγματος ασβεστόλιθου και αργίλου. Το ονόμασε Portland γιατί έμοιαζε με το πέτρωμα που εξορυσσόταν στο ομώνυμο νησί της Αγγλίας [2].

Το σκυρόδεμα ή μπετόν (αγγλ. concrete, γαλλ. beton) είναι για περισσότερο από έναν αιώνα τώρα το πλέον διαδεδομένο υλικό κατασκευής στατικών φορέων κτιρίων, γεφυρών, σηράγγων, δεξαμενών κλπ. Πριν την εμφάνιση του, εκτεταμένη χρήση είχαν οι ξύλινες καθώς και οι πετρόκτιστες κατασκευές ενώ, τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα στο εξωτερικό, μεγάλη ανάπτυξη παρουσιάζουν οι σύμμικτες κατασκευές, που συνδυάζουν σκυρόδεμα και δομικό χάλυβα προσφέροντας ταχύτητα στην κατασκευή και οικονομία κόστους και χώρου. Η κλασσική χρήση του σκυροδέματος είναι στο οπλισμένο σκυρόδεμα (reinforced concrete), όπου η μάζα του σκυροδέματος ενισχύεται με σιδηρό οπλισμό (χάλυβα), που του προσδίδει τη θλιπτική & διατμητική αντοχή που του λείπει ενώ συνεισφέρει και στην παραλαβή των θλιπτικών τάσεων. Τα δύο υλικά συνεργάζονται άριστα με καλή αμοιβαία πρόσφυση, ίδιο συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής, προστασία του οπλισμού από το σκυρόδεμα έναντι διάβρωσης κλπ.[3]. Το σκυρόδεμα, αρχικά, παρέχει ένα προστατευτικό αλκαλικό περιβάλλον γύρω από τον οπλισμό [4]. Οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά συστηματικά από το Γάλλο J.Monier το 1867, κηπουρό, όταν και παρουσίασε μελέτη για κάνιστρα και αργότερα για δοκούς και στρωτήρες από οπλισμένο σκυρόδεμα [2].

Το έτοιμο σκυρόδεμα είναι δομικό υλικό που παράγεται με την ανάμιξη αδρανών υλικών, τσιμέντου, νερού και πρόσθετων (για βελτίωση των ιδιοτήτων του κατά τη παραγωγή και χύτευση αλλά και όταν σκληρυνθεί). Με τη σημερινή του μορφή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενώ μετά το 1950 η χρήση του γενικεύτηκε, καθιστώντας το σήμερα το κυρίαρχο, παγκοσμίως, υλικό κατασκευών μαζί με το χάλυβα, ως οπλισμένο σκυρόδεμα. Για κάθε κάτοικο του πλανήτη μας αντιστοιχεί κάθε χρόνο λίγο παραπάνω από ένας τόνος σκυροδέματος και η ποσότητα αυτή συνεχώς αυξάνεται υπό την πίεση των αναπτυσσομένων χωρών, ιδιαίτερως της

Κίνας και της Ινδίας. Η παραγωγή σκυροδέματος έχει σχεδόν τετραπλασιαστεί παγκοσμίως από το 1970 έως σήμερα, υπολογίζεται δε ότι το 2030 θα φθάσει τα 5 δις τόνους, δηλ. θα διπλασιαστεί σε σχέση με σήμερα [5].

Οι διαφορετικές ιδιότητες των πρώτων υλών που αναμιγνύονται στη παραγωγή του σκυροδέματος (μάζα, όγκος, φυσικοχημικά χαρακτηριστικά), ανάγουν την παραγωγή σκυροδέματος σε μια εξαιρετικά πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία [6]. Οι αυστηρές διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος του 1997 [7] προβλέπουν τις απαιτούμενες συστάσεις των πρώτων υλών ανάλογα με τις απαιτούμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες στην εκάστοτε κατασκευή, π.χ. εργασιμότητα, αντοχή σε θλίψη, πλαστιμότητα, περιβάλλον έκθεσης, ανθεκτικότητα σε διάρκεια της κατασκευής.

Θεωρείται το οικονομικότερο και ασφαλέστερο οικοδομικό υλικό, με εξαιρετική σχέση κόστους - παρεχόμενων ιδιοτήτων και για το λόγο αυτό είναι αναντικατάστατο. Είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού μπορεί, όταν είναι νωπό, να λάβει οποιαδήποτε μορφή, χαρακτηρίζεται δε από ιδιαίτερες ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του, είναι το πιο εύχρηστο δομικό υλικό, αλλά ταυτόχρονα με τη μικρότερη διάρκεια ζωής, καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος από την παραγωγή του [6].

Οι εργασίες κατασκευών υπήρξε και συνεχίζει να είναι μια ιδιαίτερος σημαντική δραστηριότητα στην Ελλάδα. Σαν αποτέλεσμα, η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος έχει αναπτυχθεί ευρέως τόσο σε ποιότητα όσο και σε ποσότητα. Κατά μέσο όρο παράγονται στην Ελλάδα 15 εκατομμύρια τόνοι τσιμέντου με περίπου 50% εξ' αυτών να εξαγεται. Βάσει αυτών των δεδομένων, η Ελλάδα είναι η πέμπτη χώρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση στην παραγωγή τσιμέντου, η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα σε εξαγωγή τσιμέντου και μια από τις πρώτες χώρες εξαγωγής στον κόσμο. Το ποσό κατανάλωσης τσιμέντου ανά κάτοικο στην Ελλάδα αγγίζει τους 0,8 τόνους ετησίως και είναι ένα από τα υψηλότερα ποσοστά του κόσμου.

Ο τομέας δόμησης κατέχει πρωτεύουσα θέση στις γενικότερες βιομηχανικές και τεχνολογικές δραστηριότητες. Στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο παρουσιάζει κύκλο εργασιών 800 δις. ευρώ ετησίως που αντιστοιχεί στο 11% του συνολικού Ευρωπαϊκού ΑΕΠ. Απασχολεί περί τα 30 εκατ. ανθρώπους, περίπου το 20% του συνολικού εργατικού δυναμικού της ΕΕ. Τη σημαντικότερη θέση στον τομέα δόμησης κατέχει η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος (65% του εργατικού δυναμικού). Λόγω των αναγκών δημιουργίας υποδομών στις αναπτυσσόμενες χώρες, η ζήτηση σκυροδέματος και κατά συνέπεια τσιμέντου, αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο προσεχές μέλλον.

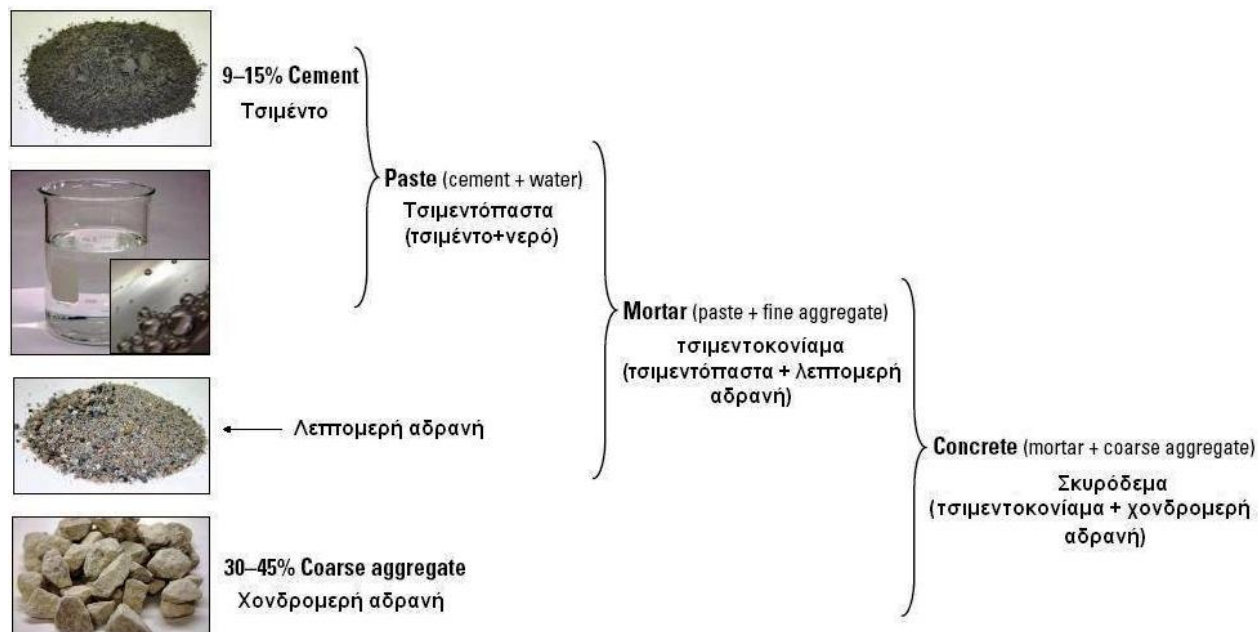
Λόγω της φύσης του σκυροδέματος, που δε μπορεί να αποθεματοποιηθεί σε έτοιμη μορφή (διατηρεί τις ιδιότητες του για λιγότερο από 2 ώρες από τη στιγμή της παραγωγής του), ο κλάδος είναι πολυδιασπασμένος και με χαμηλή συγκέντρωση, δίνοντας μεγάλη σημασία στη γεωγραφική κάλυψη, στις μονάδες που λειτουργούν στην περιοχή των έργων αλλά και στις μικρές τοπικές επιχειρήσεις. Στην Ελλάδα λειτουργούν 420 εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος, οι οποίες λειτουργούν 600 μονάδες παραγωγής. Η εγχώρια παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος το 2007 κινήθηκε πτωτικά και ανήλθε σε περίπου 24 εκ. τόνους, ενώ το 2008 εκτιμάται ότι περιορίστηκε περαιτέρω, έως και -25%. Η κάμψη της οικοδομικής δραστηριότητας κατά την περίοδο 2008-2010 αλλά και το γεγονός ότι οι παράγοντες που προκαλούν την απότομη πτώση την τελευταία διετία (ο κορεσμός της αγοράς, το υψηλό επίπεδο τιμών των ακινήτων, το πλεόνασμα των κατοικιών προς πώληση και -κυρίως- οι δυσκολίες στη χορήγηση πίστης, τόσο σε επίπεδο στεγαστικών δανείων όσο και επιχειρηματικών ώστε να χρηματοδοτείται η κατασκευαστική δραστηριότητα), οδηγούν στην εκτίμηση ότι και το 2011 θα είναι μία εξαιρετικά δύσκολη χρονιά για την οικοδομή και τις κατασκευές. Στην εκτίμηση αυτή συντείνει και το γεγονός ότι η δημόσια οικοδομική δραστηριότητα συμμετέχει με μικρό σχετικά ποσοστό στο προϊόν του κλάδου .

Σήμερα, στο πλαίσιο της βιωσιμότητας της βιομηχανίας σκυροδέματος, εξετάζονται τα ζητήματα των υλικών, όπως τα συστατικά που χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση του τσιμέντου Portland, τα υλικά που μπορούν ν' αντικαταστήσουν τα πρωτογενή αδρανή υλικά του σκυροδέματος καθώς και το ζήτημα της ανακύκλωσης του σκυροδέματος.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των επιμέρους συστατικών του σκυροδέματος, των ιδιοτήτων του, των κατηγοριών και των ειδών του.

2.2. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα είναι ένα πολυσυστατικό/πολυφασικό μίγμα τσιμέντου, νερού, αέρα, λεπτόκοκκων, μεσόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών και ορυκτών προσθέτων ή/και χημικών προσμίκτων. Σύμφωνα με την PCA (Portland Cement Association), η κατ' όγκον συμμετοχή των πρώτων υλών στο σκυρόδεμα δίνεται κατά προσέγγιση στο Σχήμα 1. [8].



ΣΧΗΜΑ 1: Κατά προσέγγιση συμμετοχή των πρώτων υλών στο σκυρόδεμα

2.2.1. Τσιμέντο

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1, τσιμέντο (CEM) καλείται μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό το οποίο, όταν αναμειχθεί με νερό, σχηματίζει μια πάστα που, λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης, πήζει και σκληρύνεται έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητά της κάτω από το νερό [9].

Στο σχετικό πρότυπο EN 197-1, που αναφέρεται στην ενοποίηση των επιμέρους τύπων τσιμέντου που παράγονται στις διάφορες χώρες της Ευρώπης, προβλέπονται οι εξής πέντε τύποι κοινών τσιμέντων με πολλές υποδιαιρέσεις:

- ❖ CEM I - τσιμέντα Portland, που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου, έως 5% κ.β.
- ❖ CEM II - σύνθετα τσιμέντα Portland, που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ τσιμέντου Portland, γύψου και ποζολάνης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης, σε ποσοστό 6-35% κατά μέγιστο.
- ❖ CEM III - σκωριοτσιμέντα, που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ, γύψου και σκωρίας μόνο σε ποσοστό 36-95% κατά μέγιστο.

- ❖ CEM IV - ποζολανικά τσιμέντα, που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ τσιμέντου Portland, γύψου και ποζολάνης που μπορεί να είναι φυσική ή ψημένη, ιπτάμενης τέφρας πυριτικής ή ασβεστούχα και πυριτικής παιπάλης. Δεν μπορούν να περιέχουν σκωρία.
- ❖ CEM V - σύνθετα τσιμέντα, που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και σε ίσο ποσοστό ποζολάνης, φυσικής ή ψημένης ή πυριτικής ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό 36-50% κατά μέγιστο. Δεν μπορούν να περιέχουν πυριτική παιπάλη.

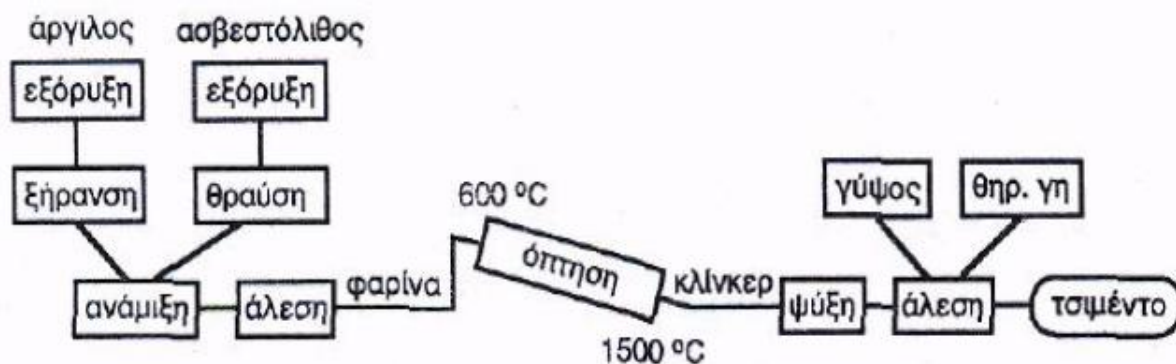
Στο πρότυπο αυτό, κάθε χώρα έχει συμπεριλάβει εκτός του κλίνκερ (το προϊόν έψησης των πρώτων υλών), τα δικά της κύρια συστατικά, τα οποία είναι παραπροϊόντα βασικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων της ή αποτελούν μέρος του ορυκτού της πλούτου και τα οποία συμβάλλουν κατά περίπτωση στη βελτίωση ορισμένων εκ των ιδιοτήτων του τσιμέντου [10].

Τα κοινά τσιμέντα πρέπει να καλύπτουν ένα σύνολο ιδιοτήτων προκειμένου να είναι αποδεκτά για περαιτέρω χρήση. Ειδικότερα, οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν είναι η λεπτότητα, η αντοχή σε θλίψη, ο χρόνος πήξης, η απαίτηση σε νερό, η σταθερότητα όγκου και η ενυδάτωση του τσιμέντου. Το σύνολο αυτών των ιδιοτήτων εμπίπτει στις φυσικομηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου. Εξίσου σημαντικές είναι και οι χημικές ιδιότητες του τσιμέντου (απώλεια πύρωσης, αδιάλυτο υπόλειμμα, προσδιορισμός θειικών και χλωριόντων, ποζολανικότητα κλπ [11].

2.2.1.1. Τσιμέντο Portland

Το τσιμέντο Portland και οι διάφοροι τύποι του αποτελούν υδραυλικές κονίες, δηλαδή κονίες που σχηματίζουν κάτω από την επίδραση νερού σταθερές ένυδρες ενώσεις, ελάχιστα υδατοδιαλυτές, με μεγάλη μεταξύ τους συνάφεια. Οι ενώσεις αυτές, με την πάροδο του χρόνου, αυξάνουν τη συνοχή των πολτών και των κονιαμάτων που προέρχονται από αυτές, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντοχών.

Ως τσιμέντο Portland κατά ASTM (American Society for Testing and Materials) ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420°C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος, που αποτελείται περίπου από 75% ασβεστολιθικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος, που καλείται κλίνκερ, με την κατάλληλη ποσότητα γύψου. Ας σημειωθεί ότι ως τσιμέντα Portland χαρακτηρίζονται αυτά των δύο πρώτων τύπων CEM I και II, όπου το κλίνκερ συμμετέχει σε ποσοστό μεγαλύτερο του 65% [10]. Το κλίνκερ, λόγω της χημικής του σύνθεσης αλλά και του τρόπου παρασκευής του, θεωρείται ότι ανήκει στην κατηγορία των κεραμικών υλικών.



Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland (Μιχάλης – Δημητρίου)

Ο υδραυλικός χαρακτήρας του τσιμέντου Portland αποδίδεται κυρίως στα προϊόντα ενυδάτωσης του πυριτικού διασβεστίου και του πυριτικού τριασβεστίου, που είναι τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ και αποτελούν τα $\frac{2}{3}$ της μάζας του και δευτερευόντως στα προϊόντα ενυδάτωσης των δύο άλλων συστατικών του (αργιλικό τριασβέστιο και σιδηραργιλικό τετρασβέστιο). Επιπρόσθετα, στο κλίνκερ του τσιμέντου Portland, η αναλογία CaO/SiO_2 δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 2 και το περιεχόμενο MgO δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% w/w [10].

2.2.1.2. Πρώτες ύλες στη βιομηχανία τσιμέντου

Όπως προκύπτει από τον ορισμό που προηγήθηκε για το τσιμέντο Portland, τα κύρια συστατικά του τσιμέντου Portland είναι κατά βάση ασβεστοπυριτικές ενώσεις. Έτσι, οι πρώτες ύλες για την παρασκευή του θα πρέπει να εξασφαλίζουν κυρίως ότι τα οξειδία CaO και SiO_2 βρίσκονται στις κατάλληλες μορφές και αναλογίες. Τα συστατικά αυτά σπάνια βρίσκονται με την απαιτούμενη αναλογία σε μία πρώτη ύλη. Πρώτες ύλες με μεγάλη περιεκτικότητα σε CaO οι οποίες χρησιμοποιούνται, είναι ο ασβεστόλιθος, η κιμωλία καθώς και διάφορες μάργες. Για δε τα οξειδία Al_2O_3 και SiO_2 χρησιμοποιούνται διάφοροι άργιλοι που προτιμώνται από τον χαλαζία, καθώς ο τελευταίος αντιδρά πολύ δύσκολα με το CaO [10].

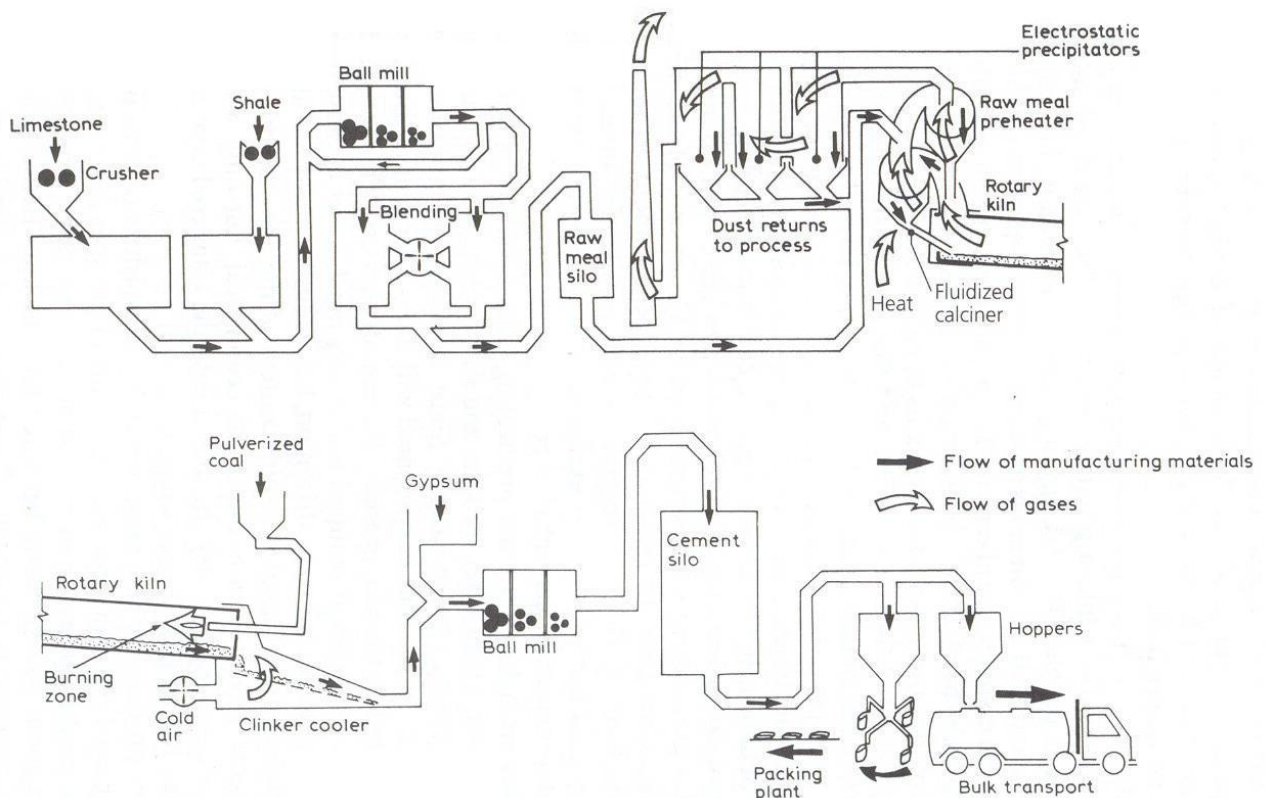
Πολλές φορές, όταν το Al_2O_3 και το Fe_2O_3 δε βρίσκονται σε ικανοποιητικά ποσοστά στις δύο πρώτες ύλες, τότε χρησιμοποιούνται επιπλέον πρώτες ύλες, τα λεγόμενα διορθωτικά υλικά, όπως βωξίτες, πυριτική άμμος ή αποφρύγματα σιδηροπυρίτη κ.ά., που σαν σκοπό έχουν τη διόρθωση των αναλογιών μεταξύ των κυρίων οξειδίων και οι οποίες ελέγχονται μέσω ειδικά καθορισμένων δεικτών. Στο σύνολο των πρώτων υλών που συμμετέχουν στις φάσεις του κλίνκερ, δε θα πρέπει να αγνοηθεί η επίδραση της τέφρας του καυσίμου, η οποία αναπόφευκτα προσμετράται στο κλίνκερ, απορροφούμενη από αυτό. Τέλος, στα συστατικά που απαρτίζουν το μίγμα των πρώτων υλών προσμετρούνται και ουσίες προστιθέμενες σε μικρό ποσοστό (fluxes και mineralizers) οι οποίες, όπως και θα αναλυθεί εκτενώς στην συνέχεια, ως σκοπό έχουν να μειώσουν τη θερμοκρασία εμφάνισης της υγρής φάσης ή την ενθαλπία των αντιδράσεων κλινκεροποίησης, επιταχύνοντας με τον τρόπο αυτό την διεργασία της κλινκεροποίησης [1].

2.2.1.3. Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου Portland

Τα κύρια στάδια παραγωγής του τσιμέντου είναι:

- α. προετοιμασία του μίγματος των πρώτων υλών (θραύση, ανάμιξη και άλεση),
- β. έψηση του μίγματος των πρώτων υλών και
- γ. συνάλεση του κλίνκερ με καθορισμένη ποσότητα γύψου.

Η κατηγοριοποίηση αυτή διακρίνει την παραγωγική διαδικασία στις διεργασίες που προηγούνται της κυρίως διεργασίας μετασχηματισμού των πρώτων υλών σε προϊόν, που είναι η έψηση και στις διεργασίες που έπονται και που προσδίδουν στο προϊόν επιμέρους ιδιότητες. Το διάγραμμα ροής μιας τυπικής τσιμεντοβιομηχανίας φαίνεται στο Σχήμα 3 [12]. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο στάδιο της έψησης, το οποίο και αναλύεται εκτενέστερα ακολούθως.



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής μιας τυπικής τσιμεντοβιομηχανίας

2.2.1.4. Έψηση μίγματος πρώτων υλών – Τεχνολογίες έψησης

Η έψηση είναι η βασική διεργασία της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου κατά την οποία πραγματοποιούνται οι βασικές αντιδράσεις που, σταδιακά, οδηγούν στο μετασχηματισμό των πρώτων υλών από ασβεστόλιθο και άργιλο στα μικτά οξείδια, τα οποία και αποτελούν τις διάφορες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αρκετά περίπλοκες και δεν είναι μελετημένες σε όλες τους τις λεπτομέρειες, καθόσον τα μίγματα των πρώτων υλών σχεδόν ποτέ δεν είναι ακριβώς τα ίδια, ενώ επιπλέον κάθε περιστροφική κάμινος (Π.Κ.), που είναι ο καθιερωμένος τύπος αντιδραστήρα για την έψηση, έχει τις ιδιαιτερότητές της που, σε μεγάλο βαθμό, επηρεάζουν την πορεία των αντιδράσεων [1].

Με βάση τα ανωτέρω, είναι απαραίτητη η θέσπιση άλλα και η ικανοποίηση συγκεκριμένων στόχων κατά τη διαδικασία της έψησης που σχετίζονται με [11]: α) την ελάττωση του κόστους παραγωγής, β) τη μεγιστοποίηση της παραγωγής της περιστροφικής καμίνου, γ) την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και δ) την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ποιότητας του προϊόντος.

Το σύστημα έψησης δεν περιλαμβάνει μόνο την περιστροφική κάμινο, αλλά και μια σειρά άλλων διατάξεων που την υποστηρίζουν, όπως για την καύση της χρησιμοποιούμενης καύσιμης ύλης, την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των απαερίων και του μίγματος των πρώτων υλών, την ψύξη του κλίνκερ και την αποκονίωση των απαερίων της περιστροφικής καμίνου.

Προφανής στόχος των τεχνολογικών εξελίξεων στο πεδίο της έψησης είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και η αύξηση της δυναμικότητας των διατάξεων. Ο στόχος αυτός δε μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του μήκους της περιστροφικής καμίνου, μιας και υπάρχουν σαφείς τεχνολογικοί περιορισμοί σχετικά με την έδραση, στήριξη και περιστροφή χωρίς παραμορφώσεις, καμίνων μεγάλου μήκους. Ο μόνος τρόπος βελτίωσης της δυναμικότητας και της αποτελεσματικότητας της διεργασίας είναι η αποδοτικότερη εναλλαγή θερμότητας [10]. Οι βασικές μεθοδολογίες έψησης που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής [1]:

1. Ξηρή μέθοδος που περιλαμβάνει τα συστήματα έψησης:
 - Με προασβεστοποίηση ή συστήματα έψησης με διπλή καύση
 - Με ανακομιστές θερμότητας ή προθερμαντήρες
2. Μέθοδος Lepol ή ημιυγρή μέθοδος
3. Υγρή μέθοδος

Στα δύο πρώτα συστήματα έψησης, η εξάτμιση και η προθέρμανση πραγματοποιούνται εκτός της περιστροφικής καμίνου και ειδικότερα σε μια σειρά κυκλώνων (ανακομιστές θερμότητας ή προθερμαντές), όπου το μίγμα των πρώτων υλών και τα απαέρια της καμίνου κυκλοφορούν κατ' αντιρροή.

Στα συστήματα έψησης με προασβεστοποίηση, η ασβεστοποίηση, δηλαδή η διάσπαση του CaCO_3 σε CaO , γίνεται σε ποσοστό 85 - 95% εκτός της καμίνου, με καύση του 60% περίπου της συνολικά απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου. Στα συστήματα έψησης με ανακομιστές θερμότητας, αλλά χωρίς διπλή καύση, το ποσοστό ασβεστοποίησης εκτός της καμίνου κυμαίνεται μεταξύ 50-70%.

Στη μέθοδο Lepol, η φαρίνα τροφοδοτείται υπό μορφή ένυδρων συσσωματωμάτων, διαστάσεων 10 - 20 mm, τα οποία καλούνται *κουφέτα*. Τα κουφέτα παρασκευάζονται με ψεκασμό νερού (~18%) σε περιστρεφόμενα τύμπανα, όπου και τροφοδοτείται η φαρίνα. Τα κουφέτα που παράγονται με αυτόν τον τρόπο, ξηραίνονται και ασβεστοποιούνται μερικώς, μέσω εσχάρων προθέρμανσης και στη συνέχεια μεταφέρονται στην περιστρεφόμενη κάμινο προς έψηση. Το ποσοστό ασβεστοποίησης εκτός της καμίνου είναι της τάξης του 30%. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ομοιογένεια του υλικού και η μικρή επιβάρυνση των απαερίων με σκόνη.

Η υγρή μέθοδος εφαρμόζεται σε περιοχές όπου, λόγω των κλιματολογικών συνθηκών, οι πρώτες ύλες έχουν μεγάλα ποσά φυσικής υγρασίας. Σ' αυτήν την περίπτωση, η ξήρανση των πρώτων υλών γίνεται στο αρχικό τμήμα της περιστρεφόμενης καμίνου ή στους ανακομιστές θερμότητας. Πλεονεκτεί έναντι της ξηράς μεθόδου στο ότι εμφανίζει πολύ καλή ομοιογένεια του υλικού και στο ότι δεν παρουσιάζει σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Το μειονέκτημά της όμως είναι η υψηλή κατανάλωση καυσίμου και η μικρή σχετικά δυναμικότητά της [13].

Εκτός των παραπάνω, σε πειραματικό - ερευνητικό στάδιο, έχουν προταθεί και εναλλακτικές τεχνολογίες έψησης, όπως αυτή των κάθετων καμίνων (vertical shaft kilns - VSK), η οποία και βασίζεται στη μέθοδο σύνθεσης "μαύρης φαρίνας" (black meal process), όπου καύσιμο χαμηλής πτητικότητας συναλέθεται με το μίγμα των πρώτων υλών. Λόγω του στατικού χαρακτήρα της καμίνου, η "μαύρη φαρίνα", πριν την τροφοδοσία της στην κάμινο, μορφοποιείται σε σφαιρίδια για την καλύτερη έψηση, ενώ ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο, το οποίο πρέπει να είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε πτητικά. Κυρίως χρησιμοποιείται το εναλλακτικό καύσιμο, το λεγόμενο coke breeze, παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα [1].

Αναφορές υπάρχουν και για την περίπτωση έψησης πρώτων υλών για την παραγωγή κλίνκερ με μικροκύματα, η οποία αναπτύχθηκε κυρίως για την έψηση κεραμικών υλικών στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Αν και ο χρόνος που απαιτείται για την έψηση είναι σχετικά μεγάλος (20-30 min), εντούτοις, η θερμοκρασία κλινκεροποίησης είναι έως και κατά 100°C χαμηλότερη της συμβατικής, με αύξηση των ρυθμών σχηματισμού κλίνκερ και καλύτερη ικανότητα κλινκεροποίησης. Για την επίτευξη καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων σε χαμηλότερες θερμοκρασίες έψησης, έχει αναφερθεί και η χρήση της έψησης σε υγρή φάση (liquid phase sintering - LPS), μιας τεχνολογίας όχι τόσο πρόσφατης αλλά ευρέως χρησιμοποιούμενης στην περιοχή των κεραμικών, όπως επίσης και ταχύτατη έψηση για πολύ μικρό χρόνο (rapid heating-up burning), κατά την οποία η αφυδάτωση των αργίλων, η διάσπαση του ασβεστολίθου, οι αντιδράσεις στη στερεή κατάσταση, η εμφάνιση της υγρής φάσης και ο σχηματισμός των ορυκτολογικών φάσεων σχεδόν επικαλύπτονται. Η όλη διαδικασία επικεντρώνεται κυρίως στις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ υγρής - στερεής φάσης, όπου και παρατηρείται αύξηση των ρυθμών διάχυσης και της κινητικότητας των σωματιδίων, μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης των δράσεων και επιτάχυνση του σχηματισμού των κρυστάλλων του αλίτη. Έτσι, το κλίνκερ μπορεί να συντεθεί στους 1300°C.

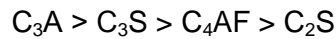
Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στις διατάξεις έψησης επικεντρώνονται στη μείωση του κόστους λειτουργίας, χωρίς να επηρεαστεί η ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος ενώ, παράλληλα, καθίσταται απαραίτητο να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον (μείωση NO_x, SO_x, αιωρούμενων στερεών κ.τ.λ.) από τη λειτουργία της εγκατάστασης. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες κατασκευής καυστήρων με μειωμένο ποσοστό πρωτογενούς αέρα και μειωμένη παραγωγή NO_x, ώστε να τηρηθούν τα αυστηρότατα όρια των κανονισμών. Οι τεχνικές ελέγχου στη βιομηχανία τσιμέντου συνεχώς εξελίσσονται και νέα προηγμένα συστήματα αναμένεται να χρησιμοποιηθούν τα επόμενα χρόνια.

2.2.1.5. Ενυδάτωση του τσιμέντου Portland

Αμέσως μετά την ανάμιξη του τσιμέντου Portland με το νερό, ένα πλήθος χημικών και φυσικών διεργασιών ξεκινά, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την πήξη και σκλήρυνση του παραπάνω μίγματος και την ανάπτυξη αξιοσημείωτων αντοχών σε κάμψη και θλίψη. Σύμφωνα με την παλαιότερη κρατούσα άποψη, κατά το στάδιο της ενυδάτωσης διακρίνονται 3 χρονικές περίοδοι [1]:

- 1^η περίοδος: διαρκεί περίπου 15 min και περιλαμβάνει τις αρχικές αντιδράσεις
- 2^η περίοδος: διαρκεί μερικές ώρες και χαρακτηρίζεται από απουσία ή μικρό αριθμό αντιδράσεων
- 3^η περίοδος: περιλαμβάνει το σχηματισμό των υδραυλικών ενώσεων

Λόγω της διαφορετικής τους σύνθεσης, τα συστατικά του τσιμέντου ενυδατώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς. Έτσι, τα ασβεσταργιλικά συστατικά (C_3A και C_4AF) είναι κυρίως υπεύθυνα για την απώλεια ρευστότητας και την πήξη του τσιμεντοπολτού, ενώ τα ασβεστοπυριτικά (C_3S , C_2S), που καταλαμβάνουν και το μεγαλύτερο ποσοστό w/w, παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη σκλήρυνση, δηλαδή στο ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών [14]. Οι ταχύτητες ενυδάτωσης των ενώσεων (φάσεων) του τσιμέντου κατατάσσονται ως εξής [8]:



Συνοπτικά, η διεργασία ενυδάτωσης αποτελείται από τα εξής απλοποιημένα στάδια [8]:

1. Υδρόλυση του C_3S και παραγωγή ιόντων Ca^+ και $(OH)^-$
2. Κρυστάλλωση των ελεύθερων ιόντων Ca^+ και $(OH)^-$ σε $Ca(OH)_2$
3. Μετατροπή του C_3S σε ένυδρο πυριτικό ασβέστιο ($Ca_3Si_2O_7 \cdot 4H_2O$)
4. Τα $Ca(OH)_2$ και ($Ca_3Si_2O_7 \cdot 4H_2O$) αποτελούν τους «πυρήνες» ανάπτυξης, που αρχίζουν να καλύπτονται από στρώματα $Ca_3Si_2O_7 \cdot 4H_2O$
5. Οι κρύσταλλοι (διαδοχικές στρώσεις) του $Ca_3Si_2O_7 \cdot 4H_2O$ διαρκώς διευρύνονται, καλύπτουν το χώρο μεταξύ τους και εμποδίζουν το νερό να προσεγγίσει το μη ενυδατωμένο C_3S
6. Ο ρυθμός της αντίδρασης ενυδάτωσης ρυθμίζεται πλέον από την ταχύτητα (δυνατότητα) διάχυσης του νερού μέσα από τους κρυστάλλους του $Ca_3Si_2O_7 \cdot 4H_2O$. Επειδή λοιπόν ο χώρος αυτός μικραίνει, μειώνεται και η ταχύτητα ενυδάτωσης των μη ενυδατωμένων τεμαχίων C_3S .

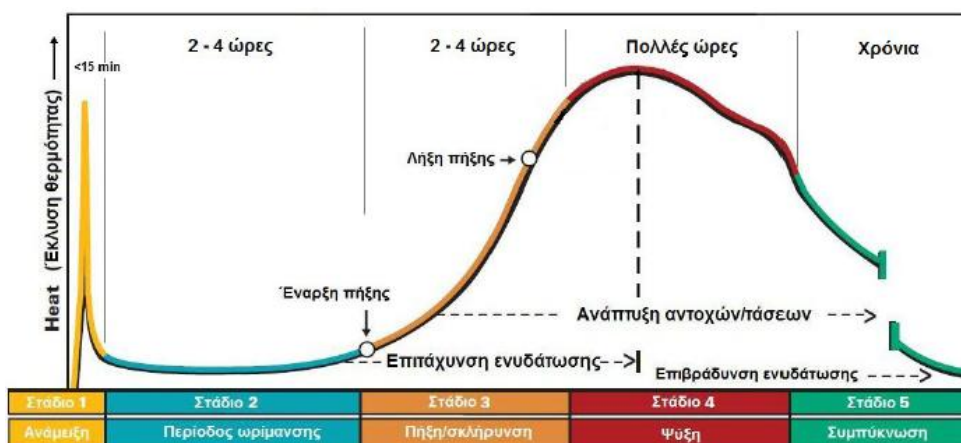
Στα πρώτα στάδια, η αντίδραση νερού - τσιμέντου είναι αντίδραση κάθε μιας από τις επιμέρους φάσεις με το νερό. Το αργιλικό τριασβέστιο και η φερριτική φάση αντιδρούν άμεσα, το ίδιο και το πυριτικό τριασβέστιο, ενώ το πυριτικό διασβέστιο καθυστερεί σημαντικά. Η γύψος διαλυτοποιείται γρήγορα και αρχίζει να σχηματίζεται ενυδατωμένο αργιλικό ή θειαργιλικό ασβέστιο [1].

Η πήξη αρχίζει κατά τη 2^η περίοδο, όταν οι κρύσταλλοι του ενυδατωμένου αργιλικού τριασβεστίου διαλύονται σε μεγαλύτερους κόκκους, γεφυρώνουν τα διαστήματα μεταξύ των άνυδρων κόκκων του κλίνκερ και σχηματίζουν μια σταθερή δομή. Προς το τέλος της 2^{ης} περιόδου, η γύψος που έχει απομείνει, επιταχύνει τις αντιδράσεις ενυδάτωσης των πυριτικών φάσεων. Οι ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές ενώσεις γεμίζουν τα κενά μεταξύ των γεφυρών του ενυδατωμένου αργιλικού τριασβεστίου και προκαλούν τη σταδιακή ανάπτυξη των αντοχών [1].

Στην αρχή της ενυδάτωσης, η διαδικασία ελέγχεται από το ρυθμό διαλυτοποίησης των άνυδρων συστατικών του κλίνκερ και της γύψου, στη συνέχεια από το ρυθμό σχηματισμού των ενυδατωμένων ενώσεων και στο τέλος από το ρυθμό διάχυσης του νερού και των ιόντων. Ο συνολικός ρυθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι ανάλογος της λεπτότητας του υλικού, ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης. Εκτός της ειδικής επιφάνειας και της κοκκομετρικής κατανομής, ο ρυθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι, επίσης, ανάλογος με τη θερμοκρασία, η αύξηση της οποίας αυξάνει την ταχύτητα των αντιδράσεων αλλά μεταβάλλει και τη δομή των προϊόντων. Τέλος, για δεδομένο τσιμέντο και σταθερή θερμοκρασία, ο ρυθμός ενυδάτωσης αυξάνει με το λόγο νερού / τσιμέντο [1]. Οι παράγοντες που καθορίζουν την κινητική της ενυδάτωσης είναι [10]:

- Η σύσταση των φάσεων του κλίνκερ και ο βαθμός ενσωμάτωσης ξένων ιόντων στο πλέγμα τους
- Οι συνθήκες παρασκευής του κλίνκερ (θερμοκρασία και χρόνος έψησης, ταχύτητα ψύξης)
- Το ποσοστό και η μορφή του θειικού ασβεστίου
- Η λεπτότητα του τσιμέντου
- Η διαδικασία ελάττωσης μεγέθους
- Ο λόγος νερό / τσιμέντο
- Οι συνθήκες διατήρησης των παστών
- Η προσθήκη χημικών.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα στάδια ενυδάτωσης του τσιμέντου, η κατά προσέγγιση χρονική διάρκειά τους και επίσης ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Στο στάδιο 1 φαίνεται η μικρή χρονική διάρκεια του σταδίου της υδρόλυσης της φάσης C_3A του τσιμέντου {απελευθέρωση ιόντων Ca^+ και $(OH)^-$ }, που συνοδεύεται από υψηλό ρυθμό έκλυσης θερμότητας και αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος κατά πολλούς βαθμούς. Το στάδιο 2 είναι γνωστό ως στάδιο ωρίμανσης (dormancy period), έχει χρονική διάρκεια 2-4 ώρες και είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σκυροδέμα διατηρεί πλαστικές ιδιότητες δηλ. μπορεί να μεταφερθεί στον τόπο του έργου και να διαστρωθεί, πριν αρχίσει να πήζει και να σκληρύνεται. Μετά το στάδιο 2 αρχίζει η κύρια αντίδραση της ενυδάτωσης των πυριτικών φάσεων, δηλαδή η σταδιακή πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος με παράλληλη έκλυση σημαντικής ποσότητας θερμότητας από την ενυδάτωση κατ' αρχήν του C_3S . Οι φάσεις αυτές αναφέρονται στα στάδια 3 και 4. Το στάδιο 5 αρχίζει πρακτικά μετά την πάροδο 36 ωρών και, κατά τη διάρκειά, του συνεχίζεται ο αργός σχηματισμός ένυδρων πυριτικών ενώσεων, εφόσον βέβαια συνεχίζουν να υπάρχουν μη ενυδατωμένες πυριτικές ενώσεις, παρουσία νερού και πρόσβαση του νερού σε αυτές.



Σχήμα 4: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου Portland [15].

2.2.1.6. Μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες του τσιμέντου

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου είναι οι θλιπτικές οι οποίες προσδιορίζονται σύμφωνα με το EN 196-1 στις 28 ημέρες και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες αντοχών:

- 32.5 N/mm²,
- 42.5 N/mm² και
- 52.5 N/mm²

Οι πρώιμες αντοχές μετρώνται στις 2 ημέρες εκτός από την κατηγορία των 32.5 N/mm² που μετρώνται στις 7 ημέρες.

Όσον αφορά στις φυσικές ιδιότητες, προβλέπεται ο έλεγχος των χρόνων πήξης (αρχή και τέλος) και της σταθερότητας του όγκου.

Όσον αφορά στις χημικές απαιτήσεις, ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα.

Οι προβλεπόμενες μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις τσιμέντων στο EN 197-1 παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 και 2 (το γράμμα R αναφέρεται σε τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών).

Πίνακας 1: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων στο πρότυπο EN 197-1 [9]

Κατηγορία αντοχών	Αντοχή σε θλίψη (N/mm ²)			Αρχή πήξης (min)	Διόγκωση (mm)
	2 ημ.	7 ημ.	28 ημ.		
32.5	-	≥ 16	32.5-52.5	≥ 75	≤ 10
32.5R	≥ 10	-	32.5-52.5		
42.5	≥ 10	-	42.5-62.5	≥ 60	
42.5R	≥ 20	-	42.5-62.5		
52.5	≥ 20	-	≥ 52.5	≥ 45	
52.5R	≥ 30	-	≥ 52.5		

Πίνακας 2: Προβλεπόμενες χημικές απαιτήσεις προτύπου EN 197-1 [9]

Ιδιότητα	Πρότυπο	Τύπος τσιμέντου	Κατηγορία αντοχών	Απαιτήση % w/w
Απώλεια πύρωσης	EN 196-2	CEM I CEM II	Όλες	≤ 5.0%
Αδιάλυτο υπόλειμμα	EN 196-2	CEM I CEM II	Όλες	≤ 5.0%
Θειικά (SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32.5	≤ 3.5%
		CEM II	32.5R	
		CEM IV	42.5	≤ 4.0%
		CEM V	42.5 52.5R 52.5	
		CEM III	Όλες	
Χλωριόντα	EN 196-21	Όλοι οι τύποι	Όλες	≤ 0.10%
Ποζολανικότητα	EN 196-5	Όλοι	Όλες	Πρέπει να ικανοποιεί τη δοκιμή ποζολανικότητας

2.2.2. Αδρανή

2.2.2.1. Γενικά

Αδρανή, γενικά, ονομάζονται τα κοκκομετρικώς διαβαθμισμένα, φυσικής ή βιομηχανικής προέλευσης υλικά, που χρησιμοποιούνται είτε με συγκολλητικό μέσο (σκυρόδεμα, ασφαλτόμιγμα) είτε αυτούσια (έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηρίων, φράγματα, αναβαθμίδες ποταμών, λιμενικά έργα) σε ποικίλα τεχνικά έργα. Τα αδρανή υλικά προσφέρουν όγκο και υψηλότερη αντοχή στις διάφορες τεχνικές κατασκευές. Δεν αντιδρούν χημικά με τις διάφορες συγκολλητικές ύλες, αλλά παρουσιάζουν φυσική συνοχή εξαιτίας της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους [16].

Σύμφωνα με την κλασική αντίληψη, τα αδρανή υλικά αποτελούν τον σκελετό του σκυροδέματος. Καλύπτοντας στο σύνολο τους (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα) το 60-75 % του όγκου του σκυροδέματος (70-85% του βάρους του), επηρεάζουν καθοριστικά τις ιδιότητες του, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρυμένη μορφή. Εφόσον είναι, γενικά, λιγότερο παραμορφώσιμα σε σχέση με τον τσιμεντοπολτό, αντιστέκονται στη διάδοση και ανάπτυξη των μικρορωγματώσεων που προκαλούνται από τη συστολή ξήρανσης. Με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν και βελτιώνουν την αντοχή του τσιμεντοπολτού [17].

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα. Θα πρέπει ν' αποτελούνται από κόκκους υγιείς, σκληρούς, ανθεκτικούς, απαλλαγμένους από βλαπτικές αργιλικές προσμίξεις οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τόσο την ενυδάτωση του τσιμέντου όσο και την πρόσφυση των κόκκων των αδρανών με την τσιμεντόπαστα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η φύση των δεσμών που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια αδρανών και τσιμεντόπαστας, οδηγούν στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος. Συνεπώς η εκλογή του αδρανούς είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη σύνθεση και την ποιότητα του σκυροδέματος, ο οποίος πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με τις επιδιωκόμενες απαιτήσεις, και ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα [17].

Τα αδρανή σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των παρακάτω κανονισμών και προτύπων:

ΚΤΣ 1997(ΦΕΚ 315/Β/17-4-97) άρθρο 4 § 3	Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος
Σχέδιο Ελληνικού Προτύπου ΕΛΟΤ 408	Θραυστά Αδρανή για συνήθη σκυροδέματα

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι, ο νέος Ευρωπαϊκός Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΕΛΟΤ EN - 206 αναφέρει ότι τα αδρανή σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του παρακάτω Ευρωπαϊκού προτύπου:

ΕΛΟΤ EN 12620:2002	Αδρανή για σκυρόδεμα (Aggregates for concrete)
--------------------	--

Η ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με την αντίσταση του σκυροδέματος στις φθορές από φυσικά ή χημικά αίτια και από την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση. Οι κύριες αιτίες της αποσάθρωσης του σκυροδέματος (και άρα της μείωσης της ανθεκτικότητας) είναι [18]:

α) Φθορές που οφείλονται στη δράση του περιβάλλοντος (αέρας, νερό, διάβρωση εξαιτίας της επίδρασης της θάλασσας κλπ.) και στη δράση του ανθρώπινου παράγοντα (π.χ. κίνηση οχημάτων). Πετρώματα τα οποία αποσαθρώνονται εύκολα, όπως οι αργιλικόι σχιστόλιθοι, είναι ακατάλληλα για αδρανή.

β) Αποσάθρωση λόγω παγετού: οφείλεται στην εναλλαγή ψύξης - απόψυξης του σκυροδέματος παρουσία νερού.

γ) Αποσάθρωση από χημικές προσβολές: οφείλεται στη χημική δράση διαφόρων ουσιών στο σκυρόδεμα, όπως ενώσεις θείου, σιδήρου, μολύβδου, ψευδαργύρου, χλωριούχες, φωσφορικές, νιτρικά άλατα και αλογόνα κλπ.

δ) Αποσάθρωση λόγω αλκαλοπυριτικής αντίδρασης: οφείλεται σε αντίδραση των αλκαλίων του τσιμέντου με πυριτικά αδρανή που περιέχουν άμορφο SiO_2 . Η αντίδραση αυτή προκαλεί διόγκωση στην οποία οφείλεται η αποσάθρωση του σκυροδέματος. Τέτοια πετρώματα μπορεί να είναι δολομίτες, ζεόλιθοι, υαλώδεις έως κρυπτοκρυσταλλικοί ρυόλιθοι, δακίτες, λατίτες και ανδεσίτες. Επικίνδυνα ορυκτά είναι ο οπάλιος, ο χαλκηδόνιος, ο τριδυμίτης και χριστοβαλίτης (ΕΛΟΤ 408). Ο κίνδυνος στον Ελλαδικό χώρο είναι πολύ μειωμένος, γιατί κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται ασβεστολιθικά αδρανή και, επιπλέον, όπου χρησιμοποιούνται πυριτικά αδρανή, αυτά δεν είναι ενεργά.

2.2.2.2. Είδη αδρανών

Τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε οικογένειες ως εξής [17]:

A. Με βάση την προέλευσή τους

Φυσικής προέλευσης: Είναι τα αδρανή τα οποία έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον και έχουν υποστεί μόνο μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής.

Τεχνητά ή βιομηχανικά: Είναι τα αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (π.χ. τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης, αργιλικό σχιστόλιθοι, σχιστοπηλοί κλπ.).

Ανακυκλωμένα: Είναι τα αδρανή που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδάφισης σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφατικών έργων κλπ.).

B. Με βάση την πηγή απόληψης

Φυσικά ή συλλεκτά αδρανή: Ονομάζονται τα αδρανή που η λήψη τους γίνεται από φυσικές αποθέσεις (ποτάμια, ορυχεία κλπ.). Είναι τα γνωστά χαλίκια, τα αμμοχάλικα ή η φυσική άμμος. Τα μειονεκτήματά τους είναι οι προσμίξεις χώματος, η λεία επιφάνεια και το στρογγυλεμένο σχήμα των κόκκων τους.

Αδρανή λατομείων: Ονομάζονται τα αδρανή που προκύπτουν από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος. Είναι η κύρια κατηγορία αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται στον Ελλαδικό χώρο. Περιέχουν ποσοστό παιπάλης πολύ μεγαλύτερο από αντίστοιχα φυσικά αδρανή.

Γ. Με βάση το ειδικό τους βάρος

Κανονικού ειδικού βάρους: Είναι τα αδρανή με ειδικό βάρος $2-3 \text{ t/m}^3$ (g/cm^3). Είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα αδρανή για τεχνικά έργα (ασφαλτικά, οδοστρωσίας, παραγωγή σκυροδέματος, κονιαμάτων κλπ.).

Ελαφροβαρή: Είναι τα αδρανή με ειδικό βάρος $<2 \text{ t/m}^3$.

Βαρέα: Είναι τα αδρανή με ειδικό βάρος $>3 \text{ t/m}^3$. Έχουν ειδικές χρήσεις (πχ. κατασκευές από σκυρόδεμα για προστασία από την ακτινοβολία κλπ.).

Δ. Με βάση το μέγεθος των κόκκων

Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών ταξινομούνται σε:

Χονδροκόκκα: Είναι τα αδρανή με μέγεθος κόκκων $D > 2 \text{ mm}$.

Λεπτόκοκκα: Είναι τα αδρανή με μέγεθος κόκκων $D = 2-0,063 \text{ mm}$.

Παιπάλη: Είναι το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγεθος κόκκων $D < 0,063 \text{ mm}$.

Ε. Με βάση τη χρήση τους

Αδρανή βάσεων και υποβάσεων

Στην οδοποιία χρησιμοποιούνται αδρανή υλικά για την κατασκευή στρώσεων βάσεων ή υποβάσεων. Σκοπός του οδοστρώματος είναι να παραλάβει τα φορτία της κυκλοφορίας και να τα καταλείψει στο υπέδαφος. Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται σε βάσεις ή υποβάσεις μπορεί να είναι φυσικά αδρανή ή θραυστά (αδρανή λατομείων). Σύμφωνα με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13242, τα αδρανή της βάσης και της υποβάσης μπορεί, εκτός από φυσικά

και θραυστά, να είναι τεχνητά και ανακυκλωμένα. Μια ουσιαστική αλλαγή είναι ότι εισάγει την ορυκτολογική και πετρογραφική εξέταση του προοριζόμενου πετρώματος για χρήση αδρανών, η οποία μπορεί να δώσει σαφείς πληροφορίες για τη συμπεριφορά του πετρώματος σε διάφορες καιρικές συνθήκες. Μη επιθυμητά πετρώματα είναι ο σχιστόλιθος, ο φυλλίτης, η κιμωλία, η μάργα, ο αργιλικός σχιστόλιθος και πετρώματα συνδεδεμένα χαλαρά με αργιλικά ορυκτά.

Αδρανή σκυροδέματος

Καλούνται τα κοκκώδη υλικά, φυσικά ή τεχνητά, τα οποία με την προσθήκη τσιμέντου και νερού σχηματίζουν σκυρόδεμα. Αποτελούνται από λίθινους κόκκους, είτε φυσικούς οπότε ονομάζονται «φυσικά ή συλλεκτά» αδρανή, είτε από κόκκους που προκύπτουν από τη θραύση πετρώματος ή θραύση φυσικών αδρανών, οπότε ονομάζονται «θραυστά» αδρανή.

Ανάλογα με το μέγεθος και την πηγή λήψης μπορούν να καταταχθούν στις εξής κατηγορίες:

▪ **Άμμος θραυστή**

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ - 97: ονομάζεται το κλάσμα του θραυστού αδρανούς υλικού το διερχόμενο από το κόσκινο 8 ή το 3/8'' σε ποσοστό 100% και από το κόσκινο Νο 4 σε ποσοστό τουλάχιστον 95%. Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN - 12620: ονομάζεται το κλάσμα με μέγιστο κόκκο (D)≤4 mm.

Η εξόρυξη των πετρωμάτων που προορίζονται για παραγωγή άμμου σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται σε υγιείς όγκους στο λατομείο, με απόρριψη:

- όλων των μη καθαρών και μη υγιών τμημάτων,
- των περιοχών επαφής με γειτονικά πετρώματα,
- μη υγιή των επιφανειακών τμημάτων του μετώπου
- της σκόνης και των γαιωδών προσμίξεων
- ξένων λοιπών υλικών
- των αποσαθρωμένων όγκων πετρώματος
- των όγκων που περιέχουν βλαπτικά ορυκτολογικά συστατικά τα οποία θα προκαλέσουν προβλήματα στην ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος

Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκλογή και στην ρύθμιση των μηχανημάτων θραύσης – κοσκίνισης, ώστε το τελικό προϊόν να παρουσιάζει σταθερότητα ποιοτικών χαρακτηριστικών και να είναι απαλλαγμένο από:

- Υψηλό ποσοστό ασβεστολιθικής παιπάλης
- Αργιλικές προσμίξεις
- Γωνιώδεις κόκκους
- Υπερμεγέθεις κόκκους

Παρόλο που η πλειοψηφία των πετρωμάτων που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο είναι κατάλληλα για την παραγωγή θραυστής άμμου σκυροδέματος, ωστόσο ορισμένα από αυτά απαιτούν προκαταρκτικές εργαστηριακές δοκιμές ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα χρήσης, κυρίως όσον αφορά τις ιδιότητες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και συνεπώς της κατασκευής στο χρόνο. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται σε πετρώματα τα οποία περιέχουν υψηλό ποσοστό δολομιτικών προσμίξεων ή άμορφων προσμίξεων οξειδίου του πυριτίου. Στις περιπτώσεις αυτές, θα πρέπει να γίνεται εξέταση της άμμου σκυροδέματος για διερεύνηση της δυνητικής βλαπτικότητας, σύμφωνα με τις μεθόδους της αλκαλοπυριτικής ή της αλκαλοασβεστιτικής αντίδρασης.

▪ Άμμος φυσική – συλλεκτή

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ 97: ονομάζεται το κλάσμα φυσικής απόθεσης το οποίο διέρχεται από το κόσκινο 8 ή το 3/8'' σε ποσοστό 100% και από το κόσκινο Νο 4 σε ποσοστό τουλάχιστον 95%.

Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN - 12620: ονομάζεται το κλάσμα με μέγιστο κόκκο (D)≤4 mm

Η φυσική - συλλεκτή άμμος βρίσκεται σε φυσικές θαλάσσιες, λιμναίες ή ποτάμιες αποθέσεις. Η φόρτωσή της από τη θάλασσα γίνεται με αρπάγη, προσαρμοσμένη σε πλοίο - φορτηγό, ενώ σε άλλες περιπτώσεις με εκσκαφέα ανεστραμμένου κάδου.

Η παραγωγή της φυσικής – συλλεκτής άμμου γίνεται με τροφοδότηση του συγκροτήματος κοσκίνισης με καθαρό κυρίως υλικό, απαλλαγμένο από αργιλικές ή άλλες προσμίξεις. Σε κάθε περίπτωση, το υλικό υποβάλλεται σε πλύσιμο ώστε να απομακρυνθεί η συγκολλημένη άργιλος και άλλες τυχόν επιβλαβείς προσμίξεις που περιβάλλουν τους κόκκους, ανάλογα με την πηγή λήψης του υλικού. Τα καταστρώματα των κοσκίνων κατασκευάζονται από πλέγματα χαλύβδινα ή ελαστικά, τετράγωνης, κυκλικής ή ορθογώνιας βροχίδας. Για την υγρή κοσκίνιση της άμμου προτιμώνται τα ελαστικά πλέγματα. Αυτά τα πλέγματα αποφεύγουν το φράξιμο των οπών, δε σκουριάζουν, παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από τα χαλύβδινα και περιορίζουν το θόρυβο. Το μειονέκτημά τους είναι ότι κοστίζουν περισσότερο. Για τα κεκλιμένα (μεγάλη κλίση ως προς την οριζόντια θέση) δονούμενα κόσκινα, προτιμώνται πλέγματα που έχουν ορθογώνιες οπές με παράλληλη διάταξη της μέγιστης διάστασης στην φορά τροφοδοσίας του υλικού. Για άμμους που περιέχουν μεγάλη περιεκτικότητα κολλώδους αργίλου συνιστάται η χρήση περιστροφικού κοσκίνου (tumbling scrubber). Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκλογή και στην ρύθμιση των μηχανημάτων κοσκίνισης, ώστε το τελικό προϊόν να παρουσιάζει σταθερότητα ποιοτικών χαρακτηριστικών και να είναι απαλλαγμένο από αργιλικές προσμίξεις, υπερμεγέθεις κόκκους και υψηλό ποσοστό παιπάλης.

Δοκιμές προκαταρκτικού τύπου πρέπει να πραγματοποιούνται, ώστε να διαπιστωθεί η συμμόρφωση των υλικών με τις προδιαγραφές, στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Όταν πρόκειται για νέες πηγές λήψης αδρανών για τις οποίες ο παραγωγός δε διαθέτει επαρκή στοιχεία ή δεν υφίσταται πολυετής πείρα.
2. Όταν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στη φύση του μητρικού πετρώματος ή στις συνθήκες της επεξεργασίας των αδρανών, που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών πρέπει να αποτελούν σημείο εκκίνησης του ελέγχου της παραγωγής αυτού του υλικού

Στην Ελλάδα, οι κυριότερες πηγές λήψης της φυσικής - συλλεκτής άμμου είναι οι κοίτες ή παλαιοκοίτες ποταμών ή χειμάρρων. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ορυκτολογική σύσταση των αποθέσεων αυτών και απαιτούνται προκαταρκτικές εργαστηριακές δοκιμές ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα χρήσης κυρίως όσον αφορά τις ιδιότητες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και συνεπώς της κατασκευής στο χρόνο. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται σε αποθέσεις που περιέχουν υψηλό ποσοστό άμορφων προσμίξεων οξειδίου του πυριτίου. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να γίνεται εξέταση της φυσικής - συλλεκτής άμμου σκυροδέματος, για διερεύνηση της δυνητικής βλαπτικότητας, σύμφωνα με τις μεθόδους της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης. Η επιμελημένη έκπλυση – κοσκίνιση της φυσικής - συλλεκτής άμμου σκυροδέματος αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες (όχι όμως και το μοναδικό) για την ποιότητα του παραγόμενου τελικού προϊόντος. Η δημιουργούμενη υψηλή υγρασία της φυσικής – συλλεκτής άμμου, λόγω υγρής κοσκίνισης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην παραγωγή σκυροδέματος, ώστε να γίνεται η ανάλογη διόρθωση στο νερό ανάμιξης.

▪ Χαλίκι

Στον ΚΤΣ - 97 δε δίνεται ορισμός των επόμενων κλασμάτων από την άμμο. Ωστόσο, στην ελληνική αγορά, χαλίκι θεωρείται το κλάσμα που διέρχεται από το κόσκινο 31,5 ή το 1''. Όμως και με το ΕΛΟΤ EN – 12620 δε δίνεται ορισμός για το συγκεκριμένο κλάσμα. Ανήκει στα χονδρόκοκκα αδρανή (coarse aggregates), όπως αυτά ορίζονται στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό. Ειδικότερα, είναι δυνατό να ανήκει στις κατηγορίες:

- $D > 11,2$ και $D/d > 2$
- $D > 11,2$ και $D/d \leq 2$

Η εξόρυξη των πετρωμάτων που προορίζονται για παραγωγή χονδρόκοκκων αδρανών (χαλίκι, γαρμπίλι, ψηφίδα) σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται σε υγιείς όγκους στο λατομείο, με απόρριψη:

- όλων των μη καθαρών και μη υγιών τμημάτων
- των περιοχών επαφής με γειτονικά πετρώματα, μη υγιή
- των επιφανειακών τμημάτων του μετώπου
- της σκόνης και των γαιωδών προσμίξεων
- ξένων λοιπών υλικών
- των αποσαθρωμένων όγκων πετρώματος
- των όγκων που περιέχουν βλαπτικά ορυκτολογικά συστατικά τα οποία θα προκαλέσουν προβλήματα στην ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος (κατά την έναρξη των εργασιών σε νέο λατομείο συνιστάται η προκαταρκτική πετρογραφική εξέταση του πετρώματος).

Η παραγωγή θραυστών χονδρόκοκκων αδρανών σκυροδέματος γίνεται με τροφοδότηση του θραυστικού συγκροτήματος με καθαρό υλικό, απαλλαγμένο από σβώλους και συσσωματώματα αργίλου όπως και κάθε ξένης προσμίξεως. Το θραυστό υλικό παράγεται κατόπιν πολλαπλής θραύσεως, κατά τις ισχύουσες προδιαγραφές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πολλαπλά θραυστικά μέσα, ανάλογα της προελεύσεως του αδρανούς υλικού, της ορυκτολογικής και πετρογραφικής συστάσεως αυτού, της σκληρότητας, της αντοχής σε τριβή και κρούση, της αρχικής κοκκομετρικής διαβάθμισης αυτού όσο και αυτής που επιδιώκεται. Στην περίπτωση όπου τεμάχια του υλικού, το οποίο προορίζεται για θραύση, περιβάλλονται από ισχυρή συγκολλημένη άργιλο που δε μπορεί να αποχωρισθεί με μηχανικά μέσα, ή δεν θα χρησιμοποιείται αυτό το υλικό ή θα υποβάλλεται σε πλύσιμο.

Ένα σύνθηρες συγκρότημα θραύσης – κοσκίνισης αδρανών υλικών για παραγωγή χονδρόκοκκων αδρανών σκυροδέματος αποτελείται από:

- Προδιαλογέα για απομάκρυνση των βλαπτικών αργιλικών συστατικών
- Θραυστήρες πρωτογενούς θραύσης (συνήθως με ρότορα)
- Θραυστήρες δευτερογενούς θραύσης
- Κόσκινα τετραγωνικής βροχίδας

Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκλογή και στη ρύθμιση των μηχανημάτων θραύσης – κοσκίνισης, ώστε το τελικό προϊόν να παρουσιάζει σταθερότητα ποιοτικών χαρακτηριστικών και να είναι απαλλαγμένο από:

- Υψηλό ποσοστό ασβεστολιθικής παιπάλης
- Αργιλικές προσμίξεις
- Γωνιώδεις και πεπλατυσμένους κόκκους
- Υπερμεγέθεις κόκκους

Δοκιμές προκαταρκτικού τύπου πρέπει να πραγματοποιούνται, ώστε να διαπιστωθεί η συμμόρφωση των υλικών με τις προδιαγραφές, στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Όταν πρόκειται για νέες πηγές λήψης αδρανών για τις οποίες ο παραγωγός δεν διαθέτει επαρκή στοιχεία ή δεν υφίσταται πολυετής πείρα.
2. Όταν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στην φύση του μητρικού πετρώματος ή στις συνθήκες της επεξεργασίας των αδρανών που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών πρέπει να αποτελούν σημείο εκκίνησης του ελέγχου της παραγωγής αυτού του υλικού.

Παρόλο που η πλειοψηφία των πετρωμάτων που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο είναι κατάλληλα για την παραγωγή χονδρόκοκκων αδρανών σκυροδέματος, ορισμένα από αυτά απαιτούν προκαταρκτικές εργαστηριακές δοκιμές ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα χρήσης, κυρίως όσον αφορά τις ιδιότητες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και συνεπώς της κατασκευής στο χρόνο. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται σε πετρώματα τα οποία περιέχουν υψηλό ποσοστό δολομιτικών προσμίξεων ή άμορφων προσμίξεων οξειδίου του πυριτίου. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να γίνεται εξέταση των αδρανών σκυροδέματος για διερεύνηση της δυνητικής βλαπτικότητας σύμφωνα με τις μεθόδους της αλκαλοπυριτικής ή της αλκαλοασβεστιτικής αντίδρασης.

▪ **Γαρμπίλι**

Στον ΚΤΣ - 97 δε δίνεται ορισμός των επόμενων κλασμάτων από την άμμο. Ωστόσο, στην ελληνική αγορά, γαρμπίλι θεωρείται το κλάσμα που διέρχεται από το κόσκινο Νο 16 ή το 1/2' και ρυζάκι το κλάσμα που διέρχεται από το Νο 8 ή το 3/8'. Ούτε όμως και με το ΕΛΟΤ EN - 12620 δίνεται ορισμός για το συγκεκριμένο κλάσμα. Ανήκει στα χονδρόκοκκα αδρανή (coarse aggregates) όπως αυτά ορίζονται στο Ευρωπαϊκό Κανονισμό. Ειδικότερα, είναι δυνατό ν' ανήκει στις κατηγορίες:

$D/d \leq 2$ ή $D \leq 11.2$ mm

ή

$D \leq 11.2$ mm και $D/d > 4$

Αντιολισθηρά αδρανή

Αντιολισθηρά είναι τα αδρανή που χρησιμοποιούνται σε στρώσεις κυκλοφορίας και έχουν ικανοποιητική τραχύτητα και, γενικώς, εξαιρετικά επιφανειακά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών αντοχών και της ανθεκτικότητας στις καιρικές συνθήκες. Σύμφωνα με ελληνικές προδιαγραφές, η προέλευση των αδρανών αυτών μπορεί να είναι η ακόλουθη:

- Λεπτόκοκκα: αποτελούνται από θραυστά αδρανή ή πλυμένα ποταμίσια υλικά
- Χονδροκόκκα: αποτελούνται από χαλίκια, θραυστά χαλίκια ή θραυστά πετρώματα

Η εξόρυξη των πετρωμάτων που προορίζονται για παραγωγή αντιολισθηρών πρέπει να γίνεται σε υγιείς όγκους στο λατομείο, με απόρριψη:

- όλων των μη καθαρών και μη υγιών τμημάτων
- των περιοχών επαφής με γειτονικά πετρώματα, μη υγιή
- των επιφανειακών τμημάτων του μετώπου
- της άμμου, της σκόνης και των γαιωδών προσμίξεων
- ξένων λοιπών υλικών.

Η παραγωγή του θραυστού υλικού για αντιολισθηρά θα πρέπει να γίνεται με τροφοδότηση του συγκροτήματος θραύσης – κοσκίνισης με καθαρό υλικό, απαλλαγμένο από σβώλους και συσσωματώματα αργίλου όπως και κάθε ξένης προσμίξεως. Το θραυστό υλικό παράγεται κατόπιν μιας ή περισσότερων θραύσεων, γεγονός που εξαρτάται από την αρχική του προέλευση και τις ισχύουσες προδιαγραφές. Γι' αυτόν το σκοπό θα χρησιμοποιούνται πολλαπλά θραυστικά μέσα, ανάλογα της προελεύσεως του αδρανούς υλικού, της ορυκτολογικής και πετρογραφικής συστάσεως αυτού, της σκληρότητας, της αντοχής σε τριβή και κρούση, της αρχικής κοκκομετρικής διαβάθμισης αυτού όσο και αυτής που επιδιώκεται. Στην περίπτωση που τεμάχια του υλικού, το οποίο προορίζεται για θραύση, περιβάλλονται από ισχυρή συγκολλημένη άργιλο που δε μπορεί να αποχωρισθεί με μηχανικά μέσα, ή δε θα χρησιμοποιείται αυτό το υλικό ή θα υποβάλλεται σε πλύσιμο. Η λύση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε αδρανή φυσικών αποθέσεων.

Ένα σύνθηρες συγκρότημα θραύσης – κοσκίνισης αδρανών αντιολισθηρών αποτελείται από:

1. Προδιαλογέα για απομάκρυνση των βλαπτικών αργιλικών συστατικών
2. Θραυστήρες πρωτογενούς θραύσης:
3. Θραυστήρες δευτερογενούς θραύσης:
4. Κόσκινα τετράγωνης ή ορθογώνιας βροχίδας (δηλ. με κάθετη διάταξη της μέγιστης διάστασης στην φορά τροφοδοσίας του υλικού)

Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκλογή και στη ρύθμιση των μηχανημάτων θραύσης ώστε να μη δημιουργούνται κατά την παραγωγή:

- i. πεπλατυσμένοι και επιμήκεις κόκκοι τελικού προϊόντος (λόγω υψηλής σκληρότητας του μητρικού πετρώματος)
- ii. λεπτόκοκκα κλάσματα.

Σε περίπτωση που το υλικό, ύστερα από τη θραύση – κοσκίνιση, δεν ικανοποιεί την απαιτούμενη κοκκομετρική διαβάθμιση, θα πρέπει να παράγεται με ανάμιξη και σύνθεση διαφορετικών κοκκομετρικών κλασμάτων, με συγκεκριμένες αναλογίες, έτσι ώστε το τελικό προϊόν να συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές.

Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εκλογή και στην ρύθμιση των μηχανημάτων θραύσης – κοσκίνισης, ώστε το τελικό προϊόν να παρουσιάζει σταθερότητα ποιοτικών χαρακτηριστικών και να είναι απαλλαγμένο από:

- αργιλικές προσμίξεις
- υπερμεγέθεις κόκκους
- υψηλό ποσοστό παιπάλης.

Δοκιμές προκαταρκτικού τύπου πρέπει να πραγματοποιούνται ώστε να διαπιστωθεί η συμμόρφωση των υλικών με τις προδιαγραφές, στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Όταν πρόκειται για νέες πηγές λήψης αδρανών για τις οποίες ο παραγωγός δε διαθέτει επαρκή στοιχεία ή δεν υφίσταται πολυετής πείρα
2. Όταν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στη φύση του μητρικού πετρώματος ή στις συνθήκες της επεξεργασίας των αδρανών που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών πρέπει να αποτελούν σημείο εκκίνησης του ελέγχου της παραγωγής αυτού του υλικού.

Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για αντιολισθηρά αδρανή έχουν υψηλές προδιαγραφές γιατί δέχονται πολύ μεγάλη καταπόνηση συνεπώς είναι δεδομένο ότι πρέπει να προέρχονται από πετρώματα υψηλής σκληρότητας (ηφαιστιογενή ή πλουτώνια πετρώματα).

Τέτοια θεωρούνται εκείνα που, εκτός από ιδιαίτερα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και κυρίως ανθεκτικότητα. Ο ρόλος των αδρανών στην αντιολισθηρή στρώση είναι να δώσουν σε αυτήν μεγάλη διάρκεια ζωής και να έχουν μεγάλη αντίσταση στην ολίσθηση. Τα πυριγενή πετρώματα αποτελούν τα καλύτερα μητρικά πετρώματα για τη λήψη σκληρών αδρανών. Τα περισσότερα συμπαγή και λεπτοκρυσταλλικά από αυτά περιγράφονται διεθνώς ως trap (rock) και σ' αυτά περιλαμβάνονται δακίτες, ανδεσίτες, βασάλτες, διαβάσες κ.ά. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση, τον ιστό, το μέγεθος των κρυστάλλων, τις επιφάνειες ασυνέχειας ή αδυναμίας, το μέγεθος και την αναλογία των ανομοιογενών ως προς τη σκληρότητα συστατικών [19].

2.2.2.3. Κοκκομετρία αδρανών

Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού των αδρανών είναι η διάμετρος του κόκκου. Έτσι, χρησιμοποιείται η κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση, δηλαδή ο διαχωρισμός και η κατάταξη των κόκκων σε ομάδες από άποψη μεγέθους. Δηλαδή, η κοκκομετρική σύνθεση προσδιορίζει την ποσοστιαία κατ' όγκο αναλογία κάθε κατηγορίας μεγέθους κόκκων του υλικού [3].

Τα αδρανή είναι μείγμα κόκκων διαφορετικού μεγέθους. Η κοκκομετρική τους σύνθεση παίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος. Καλά διαβαθμισμένα αδρανή με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα, έχουν λιγότερα κενά από αυτά που είναι λιγότερο διαβαθμισμένα, δηλαδή έχουν κόκκους ομοιόμορφων διαστάσεων. Η μείωση του όγκου των κενών μειώνει τον απαιτούμενο τσιμεντοπολτό, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους και αύξηση της ογκοσταθερότητας του σκυροδέματος. Επιπλέον, δοσμένη ποσότητα νερού ανά μονάδα όγκου, η εργασιμότητα και η συνοχή του μείγματος βελτιώνονται με τη χρήση καλά διαβαθμισμένων αδρανών και με την παρουσία κάποιας ελάχιστης ποσότητας λεπτόκοκκου υλικού [20].

Η μορφή των κόκκων των αδρανών πρέπει να είναι κατά το δυνατόν στρογγυλή. Ένας κόκκος κρίνεται ως ακατάλληλος από άποψη μορφής, όταν ο λόγος του μήκους προς το πάχος του είναι μεγαλύτερος από 3:1. Το ποσοστό των ακατάλληλων κόκκων δεν πρέπει να ξεπερνά το 50% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας αδρανών μεγέθους μεγαλύτερου των 8 mm. Ο έλεγχος του ποσοστού ακατάλληλων κόκκων πραγματοποιείται με ειδικό παχύμετρο. Η μορφή των κόκκων των αδρανών έχει καθοριστική σημασία για την ποσότητα του τσιμεντοκονιάματος που απαιτείται κατά την παρασκευή σκυροδέματος. Ένας επιμήκης ή πολύ επίπεδος κόκκος έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από έναν σφαιρικό κόκκο. Χρειάζεται συνεπώς μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντοκονίας. Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας, καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια.

Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς [20].

Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή σκυροδεμάτων κατατάσσονται σε τρεις κύριες ομάδες μεγεθών τεμαχίων [8].:

1. Χονδρόκοκκα αδρανή με τεμάχια μεγαλύτερα από 9.5 mm (3/8 in.)
2. Ενδιάμεσου μεγέθους αδρανή με τεμάχια από 2.36 – 9.5 mm (8 mesh-3/8 in.) και τα
3. Λεπτόκοκκα αδρανή με τεμάχια μικρότερα από 2.36 mm (8 mesh)

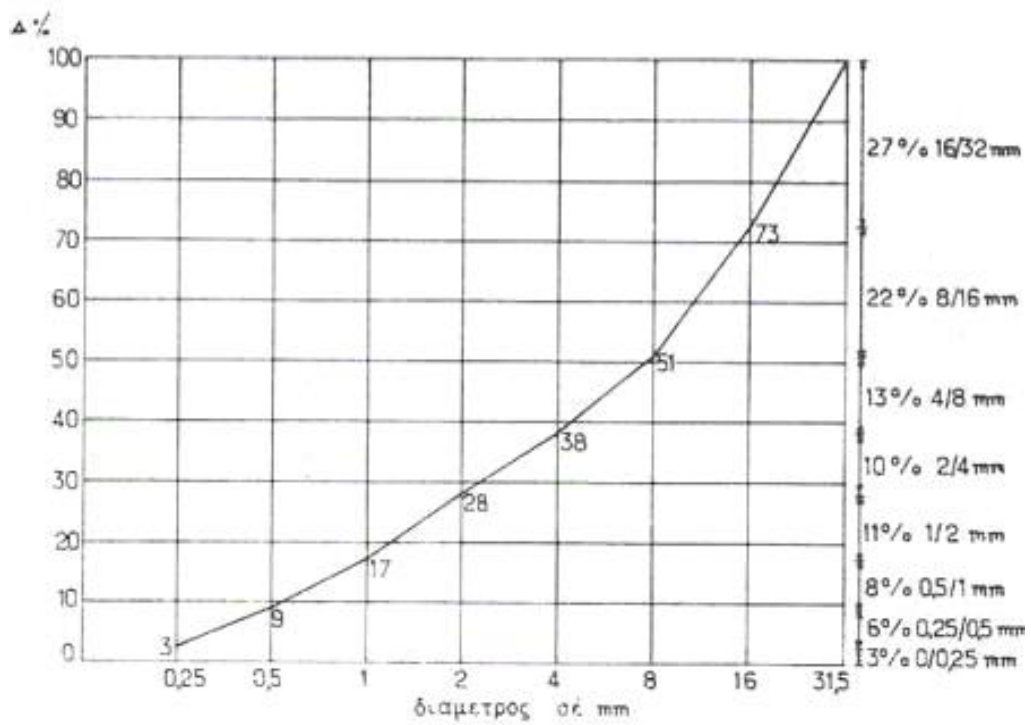
Το κοκκομετρικό κλάσμα με μεγέθη τεμαχίων 0.075 έως 5 mm χαρακτηρίζεται και ως «άμμος» (sand), ενώ τα τεμάχια μεγέθους ≤ 0.075 mm (200 mesh) ονομάζονται «παιπάλη».

Η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται με σειρά πρότυπων κοσκίνων. Οι σειρές κοσκίνων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και υιοθετούνται από το πρότυπο ΕΛΟΤ-408 και από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος - 97 είναι η γερμανική σειρά των DIN 4187 και 4188(βλ. Εικόνα 1) και η αμερικανική σειρά κόσκινων της προδιαγραφής ASTM E 11. Τα γερμανικά κόσκινα θα συμβολίζονται με το n, ενώ τα αμερικάνικα με το No.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται ως εξής: από τα ποσοστά κατά βάρος που συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο, υπολογίζεται το ποσοστό που περνάει, δηλαδή το λεπτότερο από κάθε κόσκινο. Κατόπιν, σχεδιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη, με τις διαμέτρους των κόσκινων στον οριζόντιο λογαριθμικό άξονα και το ποσοστό που περνάει από κάθε κόσκινο, στον κατακόρυφο αριθμητικό άξονα (βλ. Σχήμα 5). Ενώ ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής συνθέσεως του υλικού και η χάραξη της αντίστοιχης καμπύλης δεν παρουσιάζουν καμιά δυσκολία, πολύ δυσκολότερη είναι η αξιολόγηση και η εκτίμηση της καμπύλης αυτής και η εκλογή της καταλληλότερης, για κάθε περίπτωση, από άποψη ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Για να ελαχιστοποιηθούν τα κενά στο μείγμα των αδρανών και να αποφευχθεί η απόμιξη του μείγματος (δηλ. διαχωρισμός των κόκκων μιας διάστασης από το υπόλοιπο μείγμα), πρέπει η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών να είναι συνεχής [20].



Εικόνα 1: Πρότυπη Γερμανική σειρά κοσκίων



Σχήμα 5: Παράδειγμα κοκκομετρικής καμπύλης

2.2.2.4. Ιδιότητες αδρανών

Το είδος των αδρανών που χρησιμοποιούνται στα κοινά σκυροδέματα δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την αντοχή του σκυροδέματος, επειδή τα (συνηθισμένα) αδρανή χαρακτηρίζονται από αντοχή σαφώς μεγαλύτερη αυτής του τσιμεντοπολτού και της μεταβατικής ζώνης. Μερικά όμως χαρακτηριστικά των αδρανών, όπως είναι το μέγεθος, το σχήμα, η επιφανειακή υφή, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η ορυκτολογική τους σύσταση ενδέχεται να επηρεάσουν την αντοχή του σκυροδέματος είτε έμμεσα, μεταβάλλοντας τον απαιτούμενο λόγο νερού ως προς τσιμέντο, είτε άμεσα, επιδρώντας στα χαρακτηριστικά της μεταβατικής ζώνης [14].

Η καταλληλότητα ενός πετρώματος για την παρασκευή σκυροδέματος έχει να κάνει με την αντοχή του, την καθαρότητα (ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών), την πρόσφυση με την κονία και τη χημική συμπεριφορά [3]. Γενικά, τα μητρικά πετρώματα πρέπει να είναι υγιή και συμπαγή (όχι αποσαθρωμένα) και απαλλαγμένα από γαιώδεις προσμίξεις. Οι ασβεστόλιθοι πρέπει να μην περιέχουν άργιλο, το δε πορώδες των πετρωμάτων να είναι μικρό, εφ' όσον τα δομικά έργα είναι εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες και στον παγετό.

Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά (προδιαγραφές αντοχής και χρήσης) του σκυροδέματος καθορίζουν τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Είναι γνωστό ότι, χαμηλής πυκνότητας αδρανή με μεγάλο πορώδες παράγουν ασθενές (χαμηλής αντοχής) σκυρόδεμα με μικρή αντίσταση σε φθορά, ενώ μεγάλης πυκνότητας και σκληρά αδρανή συμβάλλουν στην παραγωγή σκυροδέματος μεγάλης αντοχής (σε θλίψη και τριβή) [8].

Στη συνέχεια αναλύονται οι κυριότερες ιδιότητες των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για αδρανή υλικά.

Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή του αδρανούς είναι αποφασιστική για την αντοχή του σκυροδέματος. Το μητρικό πέτρωμα βάσει του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος πρέπει να έχει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 65Μpa (ΕΛΟΤ 408), αλλά ο ΚΤΣ προβλέπει δυνατότητα χρήσης και χαμηλότερης αντοχής εφόσον από τη μελέτη σύνθεσης αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος για το έργο που προορίζονται. Έλεγχος της αντοχής των λίθινων προϊόντων σε θλίψη δε γίνεται όταν πρόκειται για συνηθισμένα δομικά στοιχεία (κοινά κονιάματα, σκυροκονιάματα κλπ.). Και αυτό γιατί η αντοχή των αδρανών είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή των διαφόρων συγκολλητικών ουσιών και επομένως δεν έχει καμία πρακτική σημασία ο προσδιορισμός της.

Ακατάλληλα από άποψη αντοχής για την παραγωγή αδρανών, θεωρούνται τα αποσαθρωμένα, αποσχιζόμενα, αργιλικά και μαλακά μητρικά πετρώματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως (σκύρα οδοστρωσίας δρόμων βαριάς κυκλοφορίας, σκυροδέματα υψηλής αντοχής κ.ά.) γίνεται έλεγχος της αντοχής των αδρανών σε θραύση. Για τα χονδρά αδρανή (σκύρα, χαλίκια), προσδιορίζεται η εκατοστιαία αναλογία των λεπτών υλικών που προκύπτουν από τη σύνθλιψη μιας ορισμένης ποσότητας χονδρών αδρανών από ένα συγκεκριμένο φορτίο. Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της αντοχής σε θραύση είναι να προσδιορισθεί το φορτίο θλίψεως που χρειάζεται για να προκύψουν λεπτά αδρανή βάρους 10% του βάρους του αρχικού δείγματος των χονδρόκοκκων αδρανών.

Τα φυσικά αδρανή, τα οποία αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος από χαλαζιακό υλικό, ανταποκρίνονται γενικά στις απαιτήσεις των συνήθων σκυροδεμάτων. Τεχνητά αδρανή, (θραυστά υλικά) για συνήθη σκυροδέματα, πρέπει να προέρχονται από πετρώματα με υψηλή θλιπτική αντοχή σε υγρή κατάσταση ($>1000 \text{ kp/cm}^2$).

Αντοχή σε τριβή

Η υψηλή αντοχή των αδρανών σε τριβή είναι απαραίτητη για την κατασκευή σκυροδεμάτων τα οποία καταπονούνται σε τριβή, όπως π.χ. τα οδοστρώματα, τα πεζοδρόμια, τα δάπεδα βιομηχανικών κτιρίων, τα δάπεδα ορισμένων δημοσίων κτιρίων κλπ. (Θεοδωρίδης). Η σκληρότητα των κόκκων των αδρανών ενός σκυροδέματος, είναι καθοριστική για την αντοχή του σκυροδέματος σε τριβή. Ο έλεγχος της αντοχής σε τριβή γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς BS 812:1960, ASTM C 535-69, C 131-69, D 289-63. Η μέθοδος που εφαρμόζεται κατά ASTM, είναι και η περισσότερο διαδεδομένη (δοκιμή Los Angeles) [3].

Συστολή και Διαστολή

Τα φυσικά αμμοχάλικα και τα πυριγενή πετρώματα δεν παρουσιάζουν γενικά συστολή και διαστολή λόγω υγρασίας, ενώ άλλα πετρώματα, όπως π.χ. οι ηφαιστειοί τόφφοι, παρουσιάζουν συστολή - διαστολή μέχρι και 3 mm/m. Επίσης, η κίσηση παρουσιάζει μεγάλη αυξομείωση του όγκου της [3].

Απορροφητικότητα

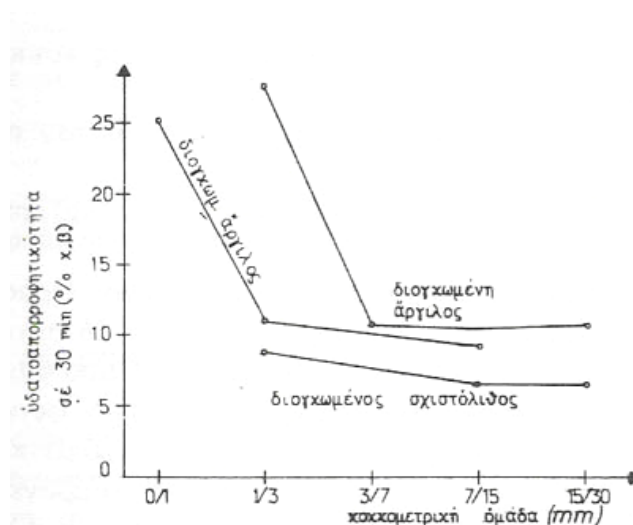
Τα τεμάχια των αδρανών μπορούν να περιέχουν νερό στο εσωτερικό τους και επίσης εξωτερική επιφανειακή υγρασία, που οφείλονται στο χώρο και τον τρόπο αποθήκευσής τους. Το πορώδες των αδρανών δίνει τη δυνατότητα απορρόφησης νερού από τα ξηρά αδρανή, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το διαθέσιμο νερό που είναι απαραίτητο για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου. Αντιθέτως, εάν τα αδρανή έχουν περίσσεια νερού (στο εσωτερικό τους αλλά και στην επιφάνειά τους), συνεισφέρουν νερό για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Με βάση τα παραπάνω, τα τεμάχια των αδρανών διακρίνονται στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες, όσον αφορά στην κατάσταση τους από πλευράς υγρασίας [14]:

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

Από τις παραπάνω τέσσερις καταστάσεις, η πλέον χαρακτηριστική είναι η κατάσταση 3, η οποία είναι μια κατάσταση ισορροπίας, όπου τα αδρανή ούτε απορροφούν αλλά ούτε και αποδίδουν νερό στην τσιμεντόπαστα [8]. Η κατάσταση αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους των αδρανών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα.

Αντοχή στον παγετό

Η καταλληλότητα ενός αδρανούς για σκυρόδεμα εξωτερικών δομικών στοιχείων, καθορίζεται μεταξύ των άλλων και από την αντοχή στον παγετό. Αδρανή που παρουσιάζουν υδατοαπορροφητικότητα υπό ατμοσφαιρική πίεση, από 0 - 0,5 κ.β., θεωρούνται ως ανθεκτικά στον παγετό και δεν απαιτείται η δοκιμή ελέγχου της αντοχής στον παγετό [3]. Η άμμος και τα χαλίκια φυσικής προελεύσεως, συλλεκτά ή θραυστά αδρανή, σπάνια προσβάλλονται από το ψύχος. Επικίνδυνα είναι τα αδρανή τα οποία απορροφούν σημαντική ποσότητα νερού (ο έλεγχος γίνεται στάζοντας μία σταγόνα νερό πάνω στον ξηρό κόκκο του αδρανούς).



Σχήμα 6: Υδατοαπορροφητικότητα ελαφρών αδρανών [3]

Επιβλαβείς προσμίξεις

Οι προσμίξεις των αδρανών, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την πήξη και τη σκλήρυνση των σκυροδεμάτων, ονομάζονται επιβλαβείς. Η παρουσία των προσμίξεων αυτών, μπορεί και να οδηγήσει στη διάβρωση του σιδηροπλισμού [3]. Οι παρακάτω ενώσεις θεωρούνται επιβλαβείς [21]:

- α) **Ενώσεις Θείου (ανυδρίτης, γύψος):** προκαλούν διόγκωση. Η περιεκτικότητα σε SO_3 πρέπει να είναι $< 1\%$
- β) **Ενώσεις Σιδήρου:** προκαλούν διόγκωση και κηλίδες.
- γ) **Νιτρικά άλατα και αλογόνα:** προκαλούν διάβρωση. Η περιεκτικότητα σε Cl πρέπει να είναι $< 0,2\%$
- δ) **Ενώσεις του μολύβδου ή του ψευδαργύρου:** Προκαλούν επιτάχυνση ή επιβράδυνση με ταυτόχρονη μείωση της αντοχής
- ε) **Χλωριούχες ή φωσφορικές ενώσεις:** Επιδρούν στο χρόνο πήξης
- στ) **Πυριτικοί άργιλοι** (ασβεστίου, νατρίου, καλίου)
- ζ) **Αποσαθρώσιμα συστατικά (αργιλικό σχιστόλιθο):** Προκαλούν μείωση αντοχής
- η) **Οργανικά συστατικά:** Προκαλούν μείωση αντοχής και καθυστέρηση της πήξης
- θ) **Γαϊάνθρακες ή λιγνίτες:** Προκαλούν μείωση αντοχής. Η περιεκτικότητα τους πρέπει να είναι $< 1\%$
- ι) **Κερατόλιθοι (ε.β. <2,35):** να μην υπερβαίνουν το 5%.

Στα φυσικά αδρανή από θάλασσα η περιεκτικότητα σε άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο πρέπει να είναι $< 1\%$ του βάρους του τσιμέντου. Επίσης, η δυνατότητα βλαπτικότητας των αδρανών κατά την αλκαλοπυριτική αντίδραση (με χημική μέθοδο ή με πρίσματα) πρέπει να εξετάζεται πριν τη χρήση τους στο σκυρόδεμα. Τέλος, οι προδιαγραφές συνιστούν να αποφεύγονται πετρώματα με συστατικά που περιέχουν οπάλιο, ανδεσίτη, ρυόλιθο και δολομίτες, γιατί προκαλούν διόγκωση, και ζεόλιθους λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου.

2.3. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Πολλές φορές, κατά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος, προστίθενται υλικά σε μικρές ποσότητες σχετικά με την ποσότητα του τσιμέντου, με σκοπό την τροποποίηση ορισμένων χαρακτηριστικών του όσο είναι ακόμα νωπό (π.χ. εργασιμότητα, χρόνος πήξης) ή ακόμα και μετά τη σκλήρυνση (π.χ. ανάπτυξη αντοχής, ανθεκτικότητα σε διάρκεια). Τα υλικά αυτά ονομάζονται πρόσμικτα. Συχνά, επίσης, προστίθενται λεπτόκοκκα, ανόργανα υλικά, με στόχο τη βελτίωση ή την επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Τα τελευταία ονομάζονται πρόσθετα. Η ταξινόμηση των πρόσμικτων ή πρόσθετων υλικών, ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν, είναι αρκετά δύσκολη διότι πολλά απ' αυτά επιτελούν πάνω από μία λειτουργίες.

Έτσι, τα υλικά αυτά διακρίνονται, ανάλογα με τη δράση τους, σε χημικά πρόσμικτα που δρουν αμέσως στην επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου, σε χημικά πρόσμικτα που επηρεάζουν τις αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού, από λίγα λεπτά έως αρκετές ώρες μετά την προσθήκη τους, και σε ορυκτά πρόσθετα που, συνήθως, επιδρούν αμέσως στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του νωπού σκυροδέματος αλλά εμφανίζουν χημική δραστηριότητα αρκετές ημέρες ή και μήνες μετά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος [14]. Σε σύγκριση με τα λοιπά συστατικά του σκυροδέματος, τα πρόσθετα έχουν σημαντικό, ανά μονάδα βάρους ή όγκου, κόστος [20].

2.3.1. Χημικά πρόσμικτα επιφανειακής δράσης

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται στην ανάμιξη του σκυροδέματος για τον εγκλωβισμό αέρα, οπότε καλούνται αερακτικά, ή για τη μείωση του νερού, οπότε λέγονται ρευστοποιητικά. Γενικά, αποτελούνται από μόρια που περιλαμβάνουν οργανικές αλυσίδες των οποίων το ένα άκρο είναι υδρόφιλο και περιέχει μία ή περισσότερες πολικές ομάδες (π.χ. $-\text{COO}^-$, $-\text{SO}_3^-$, $-\text{NH}_3^+$) [14].

2.3.1.1 Αερακτικά

Η δράση των αερακτικών συνίσταται στη δημιουργία και, κατόπιν, στον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα, μεγέθους 0,02 - 0,2 mm, στη μάζα του τσιμεντοπολτού, με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ζέστης – παγετού [20]. Τα αερακτικά πρόσθετα δηλαδή, δημιουργούν μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος μικρές φυσαλίδες που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να αυξάνει το πορώδες του. Συνεπώς, αυξάνεται η αντοχή του στον παγετό και βελτιώνεται σημαντικά το εργάσιμό του, λόγω μείωσης της εσωτερικής τριβής μεταξύ των στερεών κόκκων. Όταν όμως η περιεκτικότητα σε αέρα ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια, είναι δυνατό να μειωθεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος [22].

Τα πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται ως αερακτικά προέρχονται, συνήθως, από άλατα ρητινών του ξύλου, από πετρελαϊκά οξέα και από ορισμένα συνθετικά απορρυπαντικά [14].

2.3.1.2. Ρευστοποιητικά

Σε αντίθεση με τ' αερακτικά, οι πολικές ομάδες στα ρευστοποιητικά είναι ενωμένες με πολικές ή υδρόφιλες αλυσίδες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της ρευστότητας χωρίς μεταβολή της αντοχής, για την αύξηση της αντοχής για δεδομένη ρευστότητα (μειώνοντας το νερό ανάμιξης κατά 5 – 15%) και για την μείωση του ποσοστού τσιμέντου για δεδομένη ρευστότητα και αντοχή. Τα πλεονεκτήματα αυτά δε μπορούν να εμφανίζονται ταυτόχρονα [14]. Επίσης, είναι δυνατό να εμφανιστεί αύξηση της συστολής ξήρανσης, καθώς και ανεπιθύμητη αύξηση των πόρων, με συνέπεια καθυστέρηση της πήξης και μείωση της αντοχής.

Υλικά που χρησιμοποιούνται ως ρευστοποιητικά είναι ορισμένα άλατα, παράγωγα ενώσεων όπως η λιγνίνη, ορισμένα ανθρακοξυλικά οξέα και οι πολυσακχαρίτες.

2.3.1.3. Υπερρευστοποιητικά

Τα υπερρευστοποιητικά αποτελούν ειδική κατηγορία χημικών πρόσμικτων επιφανειακής δράσης, που αυξάνουν τη ρευστότητα μιγμάτων 3 – 4 φορές περισσότερο απ' ό τι τα συνηθισμένα ρευστοποιητικά, επιτρέποντας μείωση του νερού ανάμιξης κατά 20 – 25%, χωρίς απώλεια ρευστότητας. Χαρακτηριστικό της δομής τους είναι η ύπαρξη μακριών αλυσίδων μεγάλου μοριακού βάρους, με πολυάριθμες πολικές ομάδες. Το ισχυρό αρνητικό φορτίο που επιφέρουν στους κόκκους του τσιμέντου έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού και τη μεγάλη αύξηση της ρευστότητας. Αποτελούνται, συνήθως, από άλατα μελαμίνης ή ενώσεις φορμαλδεΐδης και προστίθενται σε ποσοστά 0,4 – 0,8% έως 1,2% κ.β. τσιμέντου [14].

Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας που, αναγκαστικά, περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδραση τους στη ρευστότητα του μίγματος, κατά κανόνα, εξαφανίζεται μετά από 20 - 30 min από την προσθήκη τους στο μίγμα. Για το λόγο αυτό, αν η ανάμιξη των υλικών του σκυροδέματος γίνεται σε εργοστάσιο ετοιμού σκυροδέματος και ακολουθεί μεταφορά στο έργο σε αυτοκίνητο - αναμικτήρα, ένα μέρος ή και το σύνολο του υπερρευστοποιητικού στο μίγμα χρειάζεται να προστεθεί όχι στο εργοστάσιο παραγωγής αλλά επιτόπου στο έργο, λίγο πριν τη σκυροδέτηση [20].

Η δυνατότητα των υπερρευστοποιητών να αυξάνουν τη ροή του σκυροδέματος εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος, η δόση, και ο χρόνος της προσθήκης του υπερρευστοποιητή, ο λόγος νερού / τσιμέντο και η φύση ή η ποσότητα του τσιμέντου. Έχει διαπιστωθεί ότι για τους περισσότερους τύπους τσιμέντου, ο υπερρευστοποιητής βελτιώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος [23].

2.3.2. Χημικά πρόσμικτα ελέγχου της πήξης

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι ουσίες που χρησιμοποιούνται ως επιταχυντικά της πήξης, ως επιβραδυντικά της πήξης και αυτές οι οποίες, σε μικρές ποσότητες, δρουν ως επιταχυντικά και σε μεγαλύτερες ποσότητες δρουν ως επιβραδυντικά. Η γύψος δρα πάντα ως επιβραδυντικό της πήξης, ακόμα και σε μεγάλες ποσότητες, αποτελώντας εξαίρεση, λόγω της μικρής διαλυτότητάς της στο νερό. Η δράση των χημικών προσμίκτων ελέγχου της πήξης του σκυροδέματος είναι αρκετά πολύπλοκη και σχετίζεται, κυρίως, με τη διάλυση των άνυδρων συστατικών του τσιμέντου και, σε πολύ μικρότερο βαθμό, με την κρυστάλλωση των ενύδρων. Το αποτέλεσμα της δράσης ενός χημικού πρόσμικτου καθορίζεται από μια σειρά συμπληρωματικών ή αντίθετων φαινομένων, που εξαρτώνται από τον τύπο και τη συγκέντρωση των ιόντων που παρέχονται από το πρόσμικτο στο σύστημα [14].

2.3.2.1 Επιταχυντικά της πήξης

Χρησιμοποιούνται, συνήθως, όταν η σκυροδέτηση γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, οπότε η πήξη και σκλήρυνση του τσιμεντοπολτού γίνεται με αργούς ρυθμούς. Επίσης, χρησιμοποιούνται όταν επιδιώκεται γρήγορη απομάκρυνση των ξυλοτύπων (π.χ. στην προκατασκευή), όταν είναι αναγκαία η ταχεία περάτωση του έργου ή όταν το στοιχείο πρόκειται να παραλάβει εξωτερικά φορτία σε μικρό χρόνο μετά τη σκυροδέτηση [14]. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι προκαλούν μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος [22]. Το χλωριούχο ασβέστιο ήταν αρκετά συνηθισμένο, μέχρι πρότινος, ως επιταχυντικό, αλλά οι προδιαγραφές σκυροδέματος συνήθως επιβάλλουν την αποφυγή χρήσης χλωριούχων ενώσεων, λόγω της πιθανής διάβρωσης του σιδηροπλισμού, σε περίπτωση οπλισμένων σκυροδεμάτων, γεγονός που έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου (durability) και καλύπτονται από την προδιαγραφή ASTM C 494 (Types B και D) [8].

2.3.2.2. Επιβραδυντικά της πήξης

Τα επιβραδυντικά πρόσθετα επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου και συνεπώς την πήξη και τη 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.

Πολλά επιβραδυντικά της πήξης δρουν, επίσης, θετικά στην κατεύθυνση της μείωσης του απαιτούμενου νερού για την ενυδάτωση του τσιμέντου με αποτέλεσμα, λόγω της μείωσης του χρησιμοποιούμενου νερού, να παράγεται σκυρόδεμα αυξημένης τελικής αντοχής [8]. Επιβραδυντικές ιδιότητες εμφανίζουν, εκτός από τη γύψο, η ζάχαρη και τα ευδιάλυτα άλατα ψευδαργύρου [14].

2.3.3. Ορυκτά πρόσθετα

Υλικά σε μορφή σκόνης, πυριτικής συνήθως σύστασης, χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά και σε μεγάλες αναλογίες (μεταξύ 10 – 100% κ.β. τσιμέντου) είτε ως προσμίξεις για την παρασκευή τσιμέντου είτε ως πρόσθετα κατά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος, με κύριο σκοπό τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση ορισμένων χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Τέτοια υλικά μπορεί να είναι φυσικά (ποζολάνες από ηφαιστειακά πετρώματα) ή βιομηχανικά παραπροϊόντα που, ενδεχομένως, υπόκεινται και σε κάποια επεξεργασία (ξήρανση, κονιορτοποίηση κλπ.). Γενικά, η συμβολή τους στην παραγωγή του σκυροδέματος είναι η παρακάτω [8]:

1. Αυξάνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος
2. Βελτιώνουν την εμφάνιση των κατασκευών από σκυρόδεμα (φινίρισμα)
3. Μειώνουν την εκλυόμενη θερμότητα από την ενυδάτωση του τσιμέντου.

2.3.1.1. Φυσικά υλικά

Οι φυσικές ποζολάνες προέρχονται, κυρίως, από κονιορτοποίηση ηφαιστειακών πετρωμάτων και ορυκτών, που σχηματίστηκαν από την ταχεία ψύξη του μάγματος. Η ονομασία ποζολάνη προήλθε από την περιοχή Pozzuoli της Ιταλίας, όπου οι Ρωμαίοι είχαν ανακαλύψει ότι το έδαφος της περιοχής παρουσίαζε υδραυλικές ιδιότητες. Γαίες της περιοχής χρησιμοποιούσαν οι Ρωμαίοι στα κονιάματα τους. Σήμερα, ποζολάνες ονομάζονται πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά που έχουν τη δυνατότητα να ενώνονται με την υδράσβεστο Ca(OH)_2 και να σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις που, με το χρόνο, σκληρύνονται και αποκτούν μικρές ή μεγαλύτερες αντοχές. Η δράση αυτή οφείλεται, κυρίως, στο άμορφο πυριτικό υλικό των πολοζανών. Για να χρησιμοποιηθεί μια ποζολάνη για την παρασκευή τσιμέντων πρέπει να ικανοποιεί τη δοκιμή δραστηριότητας που προβλέπει ο Κανονισμός, δηλαδή να παρουσιάζει συμβατική αντοχή τουλάχιστον 5 MPa.

Η χρήση ποζολανών είναι ιδιαίτερα ευεργετική για το σκυρόδεμα για τους εξής λόγους [14]:

- i. Λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων τους βελτιώνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος μειώνοντας τις απαιτήσεις σε νερό
- ii. Μειώνεται το ενδεχόμενο διαχωρισμού των συστατικών του σκυροδέματος και της εξίδρωσης
- iii. Μειώνεται η θερμοκρασία ενυδάτωσης
- iv. Βελτιώνεται η ανθεκτικότητα σε διάρκεια αφού μειώνεται η διάμετρος των πόρων του σκυροδέματος και άρα η διαπερατότητά του.

Ηφαιστειακές γαίες

Στην Ελλάδα υπάρχουν ηφαιστιογενείς γαίες με ποζολανικές ιδιότητες σε πολλές περιοχές, όπως η Σαντορίνη (θηραϊκή γη), η Μήλος (Μηλαϊκή γη), τα νησιά Γυαλί και Νίσυρος των Δωδεκανήσων, στο νομό Πέλλας και αλλού. Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι, η θηραϊκή γη χρησιμοποιείται από τις ελληνικές βιομηχανίες τσιμέντου ως πρόσμικτο ποζολανικό υλικό τσιμέντου από το 1930 περίπου. Ιδιαίτερο τύπο ηφαιστειακής ποζολάνης αποτελεί ο ορυκτός ζεόλιθος, ενώ ποζολανικές ιδιότητες και δομή σχεδόν ίδια με αυτή των ηφαιστειακών γαιών μπορούν ν' αποδοθούν και σε αργιλικά ή σχιστολιθικά ορυκτά, μετά από θέρμανση σε 600 – 900°C [14].

Διατομική γη

Απαντάται σε εναποθέσεις στις ΗΠΑ, στη Γερμανία, στη Δανία, στην Αλγερία και στον Καναδά. Σχηματίζεται από τη συσσώρευση ενός τεράστιου αριθμού απολιθωμένων διατόμων. Κύριο χαρακτηριστικό της ενυδάτωσής της είναι οι μεγάλες απαιτήσεις σε νερό, που μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα αντοχής και ανθεκτικότητας σε διάρκεια [14].

2.3.1.2. Παραπροϊόντα

Ιπτάμενη τέφρα

Ιπτάμενη τέφρα ονομάζονται τα σε λεπτότατο διαμερισμό κατάλοιπα που προκύπτουν από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών και που συλλέγονται κατά την έξοδο των αερίων καύσεως από τις καπνοδόχους των ατμοηλεκτρικών σταθμών με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Η δραστηριότητα των τεφρών οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα σε SiO_2 , Al_2O_3 και CaO . Οι δύο πρώτες ενώσεις προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ το οξείδιο του Ca υδραυλικές. Στην Ελλάδα ιπτάμενη τέφρα παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Δ.Ε.Η. της Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων, η μορφολογία τους και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειάς τους παίζουν καθοριστικό ρόλο για τις απαιτήσεις σε νερό ανάμιξης, την εργασιμότητα και το ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής του σκυροδέματος [14].

Σκωρία καμίνου

Η κονιορτοποίηση των παραπροϊόντων καμίνου σιδηρομεταλλευμάτων σε μορφή σκωρίας δίνει λεπτότατους κόκκους, με δομή που μοιάζει αρκετά με αυτήν της ιπτάμενης τέφρας. Σήμερα, είναι γενικά αποδεκτό ότι, κόκκοι σκωρίας με διάμετρο $< 10 \mu\text{m}$, συνεισφέρουν σημαντικά στην ανάπτυξη αντοχής σε σκυρόδεμα ηλικίας μέχρι 28 ημερών, κόκκοι διαμέτρου μεταξύ 10 και 45 μm συνεισφέρουν στην αντοχή σε μεγαλύτερες ηλικίες, ενώ μεγαλύτεροι κόκκοι ενυδατώνονται πολύ δύσκολα [14].

Πυριτική παιπάλη

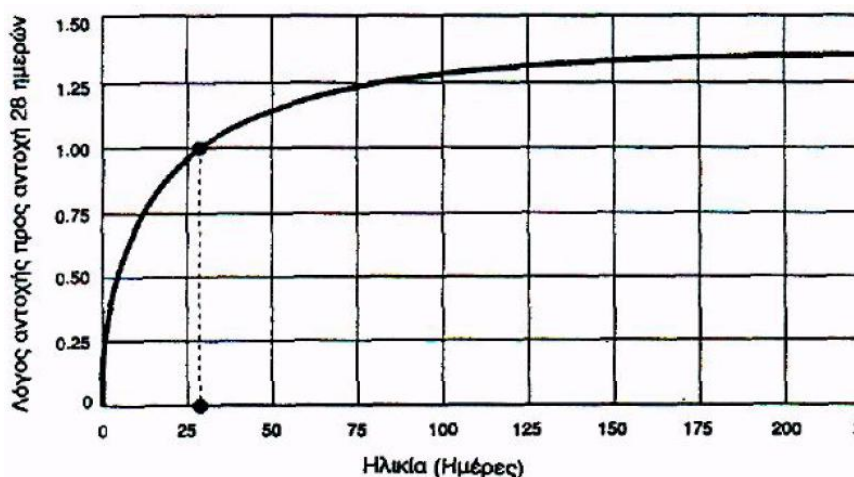
Αποτελεί παραπροϊόν της βιομηχανίας πυριτικών και σιδηροπυριτικών κραμάτων και σχηματίζεται από την οξειδωση και συμπύκνωση ατμών SiO_2 , σε μορφή μικρότατων σφαιριδίων με μέση διάμετρο της τάξης του 0,1 μm , δηλαδή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη διάμετρο των κόκκων ιπτάμενης τέφρας ή σκωρίας καμίνου. Σε αυτό οφείλεται τόσο η μεγάλη ποζολανικότητα της πυριτικής παιπάλης όσο και οι σχετικά μεγάλες απαιτήσεις σε νερό [14].

2.3.1.3. Στεγανοποιητικά πρόσθετα

Τα στεγανοποιητικά πρόσθετα μειώνουν την ποσότητα του νερού, το οποίο απορροφάται ή εισχωρεί στο σκυρόδεμα, αυξάνοντας τη στεγανότητά του (μειώνουν το πορώδες). Αποφεύγεται η δημιουργία μικροκοιλοτήτων και μικρορηγματώσεων στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των πόρων και των τριχοειδών αγγείων. Είναι δυνατόν, όμως, να μεταβληθεί η χρονική εξέλιξη της πήξης και να μειωθεί η αντοχή του σκυροδέματος. Ως στεγανοποιητικά πρόσμικτα μπορεί να χρησιμοποιηθούν : α) λεπτόκοκκα αδρανή (χαλαζίας, μπεντονίτης κ.ά.), β) ανόργανα υλικά (θηραϊκή γη, άργιλος κ.ά.), αδιάλυτοι σάπωνες σε μορφή σκόνης ή γαλακτώματος (στεατικός ψευδάργυρος, στεατικό ασβέστιο κ.ά.) ή άλλες υδρόφοβες ενώσεις, δ) ρητινικά ή στεατικά άλατα του αμμωνίου σε μορφή πολτού ή γαλακτώματος με υδραπωθητικές ιδιότητες και ε) υγροί υδρογονάνθρακες ή ελαιώδη προϊόντα του πετρελαίου σε μορφή γαλακτώματος, που αποσυντίθενται στη μάζα του σκυροδέματος και φράζουν τους πόρους. Πρέπει να γίνεται λελογισμένη χρήση τους διότι, μερικά απ' αυτά μπορεί να μειώσουν την αντοχή του σκυροδέματος.

2.4. ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΙΞΗΣ

Η πήξη και η σκλήρυνση του σκυροδέματος οφείλονται αποκλειστικά στη χημική δράση μεταξύ τσιμέντου και νερού. Τα συστατικά του τσιμέντου αντιδρούν με το νερό ύστερα από μία σειρά περίπλοκων χημικών αντιδράσεων που διαρκούν χρόνια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ενυδάτωση [24]. Με την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό δημιουργείται μια γκριζοπράσινη πολτώδης μάζα, ο ενυδατωμένος τσιμεντοπολτός. Για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, το μίγμα δε φαίνεται να παρουσιάζει καμιά μεταβολή. Αργότερα όμως, φαίνεται ότι αρχίζει να πήζει προοδευτικά έως ότου στερεοποιηθεί τελείως. Το φαινόμενο αυτό καλείται πήξη του τσιμεντοπολτού και οι χαρακτηριστικές στιγμές αλλαγής της φυσικής καταστάσεως ονομάζονται αρχή και τέλος της πήξεως. Κατά το χρονικό διάστημα ως την αρχή της πήξεως, ο τσιμεντοπολτός επιδέχεται κατεργασίας και μεταφοράς [20]. Γι' αυτό και ο ΚΤΣ-97 [26] ορίζει ότι η αρχή της πήξεως για τα κοινά τσιμέντα δεν πρέπει να εμφανίζεται νωρίτερα από μία ώρα από τη στιγμή της ανάμιξης των δύο υλικών και το τέλος της πήξεως αργότερα από 8 ώρες. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, δηλαδή του μίγματος τσιμέντου, νερού και αδρανών υλικών, ο χρόνος ως την αρχή της πήξεως γίνεται δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος.



Σχήμα 7: Εξέλιξη της αντοχής του τσιμεντοπολτού [14]

Η καταλληλότητα του νερού ανάμιξης για παραγωγή σκυροδέματος εξαρτάται από την προέλευσή του. Το ΕΛΟΤ EN 1008:2002 κατηγοριοποιεί τους ακόλουθους τύπους:

- Πόσιμο νερό: Κατάλληλο για σκυρόδεμα, δεν απαιτείται ο έλεγχός του
- Νερό που έχει ανακτηθεί μετά από επεξεργασία σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος (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: Κατάλληλα για σκυρόδεμα μετά από έλεγχο
- Νερό φυσικών πόρων και νερό βιομηχανικών διεργασιών: Κατάλληλα για σκυρόδεμα μετά από έλεγχο
- Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άσπλο σκυρόδεμα αλλά δεν είναι κατάλληλο για οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Το μέγιστο επιτρεπόμενο περιεχόμενο σε χλώριο στο σκυρόδεμα πρέπει να τηρείται για τα σκυροδέματα με χαλύβδινο οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά τμήματα
- Νερά αποβλήτων: Ακατάλληλα για σκυρόδεμα.

Συνδυασμός υδάτων που προέρχεται από μίγμα υδάτων μετά από επεξεργασία σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος και από νερό άλλης προελεύσεως, θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις για την καταλληλότητα του νερού.

Όσον αφορά τους προκαταρκτικούς ελέγχους που πρέπει να διενεργηθούν σύμφωνα με το ως άνω Πρότυπο, το νερό πρέπει πρώτα να αναλυθεί για ίχνη λιπαρών ουσιών και ελαίων, αφρογόνες ουσίες (απορρυπαντικά κλπ.), αιωρούμενα συστατικά, οσμές (π.χ. χωρίς οσμή υδρόθειου μετά από προσθήκη υδροχλωρικού οξέος), οξύτητα ($\text{pH} \geq 4$) και χουμικές ενώσεις. Νερό που δεν πληροί μία ή περισσότερες απαιτήσεις του Πίνακα 1 του Προτύπου, 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 [28].

Χημικές ενώσεις

- *Χλώριο*

Το περιεχόμενο του νερού σε χλώριο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα επίπεδα που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3

Πίνακας 3: επιτρεπόμενη περιεκτικότητα χλωριόντων

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 ή εμβαπτισμένα μεταλλικά στοιχεία	4500

- *Θειικά ιόντα*

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

- *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 Na₂O) 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.

- *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 4: Όρια ουσιών κατά τη χημική ανάλυση

Ουσία	Μέγιστο περιεχόμενο (mg/l)
Σάκχαρα	100
Φωσφορικά άλατα, εκφρασμένα σε P ₂ O ₅	100
Νιτρικά άλατα, εκφρασμένα σε NO ₃ ⁻	500
Μόλυβδος, εκφρασμένος σε Pb ²⁺	100
Ψευδάργυρος, εκφρασμένος σε Zn ²⁺	100

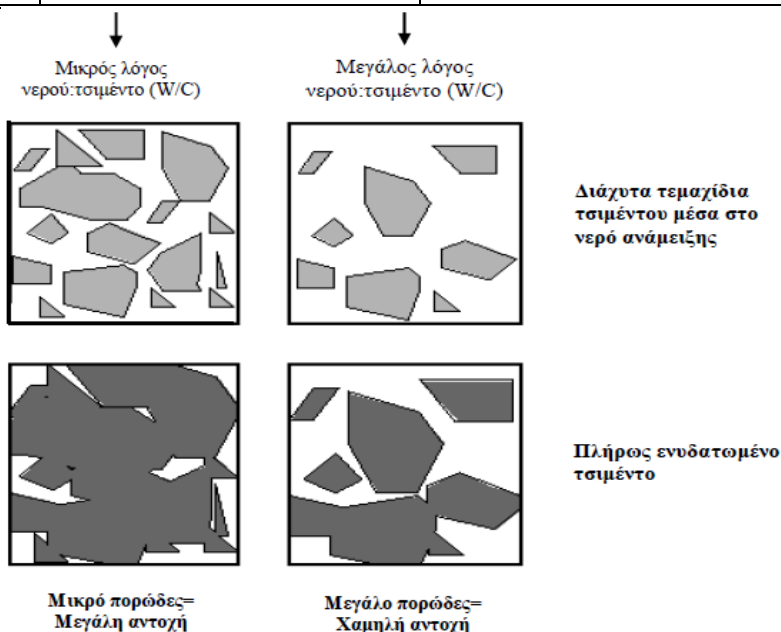
Η αρχή της πήξης κατά τον έλεγχο των δοκιμίων με το νερό πρέπει να γίνει το νωρίτερο σε 1 ώρα και δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 25% από τον αρχικό χρόνο πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό. Η ολοκλήρωση της πήξης δεν πρέπει να ξεπερνά τις 12 ώρες και δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 25% από το χρόνο ολοκλήρωσης της πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή απεσταγμένο 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 απεσταγμένο νερό.

Λόγος τσιμέντου - νερού (υδατοτσιμεντοσυντελεστής)

Είναι γνωστό ότι στην αντοχή του σκυροδέματος παίζει σπουδαίο ρόλο ο κατά βάρος λόγος του νερού προς το τσιμέντο W/C. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος [20]. Έχει παρατηρηθεί ότι η άριστη αναλογία W/C κυμαίνεται μεταξύ 0,4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0,5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Επίσης παρατηρείται ότι, ενώ μια απόκλιση προς τα επάνω από το άριστο ποσοστό κατά 10% συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15% περίπου, μια ίση απόκλιση προς τα κάτω, συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30% περίπου. Είναι επομένως φρόνιμο, κατά την επιδίωξη της βέλτιστης αναλογίας νερού να παραμένει κανείς πάντοτε για λόγους ασφαλείας προς τα επάνω, παρά να κινδυνεύει η ποσότητα νερού να είναι μικρότερη της βέλτιστης με συνέπεια να υποστεί αλματώδη πτώση η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Τέλος η ποσότητα του νερού δεν πρέπει να είναι τόσο λίγη ώστε να βλάπτεται η καλή εργασιμότητα του μίγματος. Στον Πίνακα 5 δίνεται ο μέγιστος λόγος W/C κατά μέσο όρο για κάθε ποιότητα σκυροδέματος [20]:

Πίνακας 5: Μέγιστος λόγος W/C για κάθε ποιότητα σκυροδέματος

α/α	Ποιότητα σκυροδέματος	Μέγιστος λόγος βάρους W/C για m ³ σκυροδέματος
1	C8	0,700
2	C12	0,575
3	C16	0,485
4	C20	0,420



Σχήμα 8: Επίδραση της ποσότητας του νερού (λόγος W/C) στην ενυδάτωση του τσιμέντου και στις ιδιότητες της τσιμεντόπαστας και κατ' επέκταση και του σκυροδέματος [8]

2.5. ΝΩΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

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 δυνατό να μεταφέρεται και να διαστρώνεται. Όταν το τσιμέντο ενωθεί με το νερό, αρχίζει η ενυδάτωσή του και δημιουργείται ο τσιμεντοπολτός, ο οποίος είναι η συνδετική ύλη του σκυροδέματος [22].

Όλες οι ενέργειες που αφορούν στο σκυρόδεμα σε νεαρή ηλικία, είναι απόλυτα καθοριστικές για την ποιότητά του [14]. Ως νεαρή ηλικία θεωρείται, για τα κοινά σκυροδέματα, το διάστημα των πρώτων 1 - 2 ημερών, στο οποίο το σκυρόδεμα πήζει (σε 6 – 10 ώρες) και αναπτύσσει ικανοποιητική αντοχή, που να επιτρέπει την απομάκρυνση των ξυλοτύπων.

Γενικά, οι ενέργειες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι η ανάμιξη των συστατικών, η μεταφορά στο εργοτάξιο και η διάστρωσή του, η συμπύκνωση, το τελείωμα, η συντήρηση και η αφαίρεση των ξυλοτύπων. Σχετικά με τις ενέργειες αυτές, είναι ορισμένα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και φαινόμενα, που επηρεάζουν την ποιότητά του. Αυτά είναι η εργασιμότητα, η απώλεια κάθισης, η απόμιξη, η εξίδρωση, η πλαστική συστολή, ο χρόνος πήξης, οι ακραίες θερμοκρασίες κατά τη διάστρωση και συντήρηση, και η ρηγμάτωση σε νεαρή ηλικία.

2.5.1. Ανάμιξη και μεταφορά

Η ανάμιξη του σκυροδέματος γίνεται μηχανικά με αναμικτήρες (μπετονιέρες) στο εργοτάξιο είτε σε εγκαταστάσεις μακριά απ' αυτό (έτοιμο σκυρόδεμα). Το εργοστασιακό σκυρόδεμα έχει καλύτερο έλεγχο ποιότητας και μικρότερο κόστος από το εργοταξιακό. Η χρήση του διευκολύνει σημαντικά τη σκυροδέτηση, γι' αυτό και σήμερα, ουσιαστικά, έχει εκτοπίσει το εργοταξιακό. Η μέτρηση του τσιμέντου, των αδρανών και των τυχόν προσμίκτων ή προσθέτων σε στερεή μορφή, γίνεται κατά βάρος (σε μικρά έργα τα αδρανή μπορούν να μετρώνται και κατ' όγκο, αρκεί να επιβεβαιώνεται συχνά η πυκνότητά τους), ενώ το νερό και τα τυχόν υγρά πρόσμικτα μετρώνται ή κατ' όγκο ή κατά βάρος [14]. Για την ανάμιξη του σκυροδέματος προστίθενται στον αναμικτήρα τα χονδρόκοκκα αδρανή, κατόπιν τα λεπτόκοκκα και μετά το τσιμέντο, τα οποία αναμιγνύονται για 1 λεπτό περίπου. Ακολουθεί η προσθήκη νερού σε μικρές δόσεις και των τυχόν προσμίκτων, εκτός των ρευστοποιητικών ή υπερρευστοποιητικών, και η ανάμιξη συνεχίζεται για 1 λεπτό ακόμα.

Η μεταφορά του έτοιμου σκυροδέματος στο έργο γίνεται με οχήματα και πρέπει να διαρκεί το πολύ 45 λεπτά αν γίνεται με κοινό φορτηγό (σπανιότατα πλέον) ή το πολύ 90 λεπτά αν γίνεται με μπετονιέρα σε περιστρεφόμενο κάδο.

Ο παραπάνω χρόνος μειώνεται στο μισό στην περίπτωση ζεστού ή ξηρού καιρού ή δυνατού ανέμου. Η συχνότητα περιστροφής του κάδου της μπετονιέρας πρέπει να είναι 2 – 6 στροφές / λεπτό, για ν' αποφευχθεί απόμιξη των συστατικών ή πρόωρη πήξη [14].

2.5.2. Εργασιμότητα

Με τον όρο “εργάσιμο” ή “εργασιμότητα” χαρακτηρίζεται, γενικά, η ευκολία με την οποία μπορεί να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυροδέμα, χωρίς απόμιξη των υλικών. Ο ορισμός όμως αυτός δεν είναι απόλυτα ακριβής, γιατί η ευκολία αυτή κατεργασίας του νωπού σκυροδέματος συνδέεται και με τα μέσα που διατίθενται. Το εργάσιμο θα πρέπει να εξεταστεί ανεξάρτητα από τις εξωτερικές αυτές συνθήκες. Γι' αυτό, σωστότερο είναι να το οριστεί ως το έργο που απαιτείται για την υπερνίκηση των εσωτερικών τριβών, ωστόσο επιτευχθεί πλήρης συμπίκνωση. Η εργασιμότητα είναι μια ιδιότητα σύνθετη που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες και που δύσκολα μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά. Τέτοιες ιδιότητες, με τις οποίες συνδέεται και εξαρτάται το εργάσιμο, είναι οι ακόλουθες :

- α) Η ρευστότητα, που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού αναμείξεως
- β) Η πλαστικότητα, με την οποία νοείται η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του
- γ) Η συνοχή, η οποία είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια του υλικού μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα
- δ) Η συμπυκνωσιμότητα, δηλαδή η δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και που εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπυκνώσεως
- ε) Τέλος, ο όρος συνεκτικότητα χρησιμοποιείται πολλές φορές για να εκφραστεί άλλοτε το εργάσιμο και άλλοτε η ρευστότητα.

Τονίζεται ότι η σημασία της εργασιμότητας στην τεχνολογία του σκυροδέματος είναι τεράστια, αφού είναι γνωστό, πλέον, ότι σκυροδέματα που διαστρώνονται ή συμπυκνώνονται δύσκολα, συνήθως εμφανίζουν προβληματική αντοχή και ανθεκτικότητα σε διάρκεια [14].

2.5.3. Διάστρωση, συμπύκνωση, τελείωμα

2.5.3.1. Διάστρωση

Η εκφόρτωση του νωπού σκυροδέματος πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση τελικής διάστρωσης. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, η μεταφορά του σκυροδέματος στη θέση διάστρωσης μπορεί γίνεται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με την ποιότητα και την ποσότητά του, όπως με καροτσάκια, αναβατόρια, ειδικά οχήματα, αντλίες ή άλλα μέσα που δεν προκαλούν ανάμιξη. Απαγορεύεται η ελεύθερη πτώση σκυροδέματος από ύψος μεγαλύτερο από 2,5 m για τα κατακόρυφα στοιχεία και 1,0 m για τις πλάκες και τις στέγες. Η διάστρωση του σκυροδέματος στα καλούπια πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία κενών ή οπών.

Οι αντλίες αποτελούν στην Ελλάδα, όπως και διεθνώς, το κυριότερο μέσο μεταφοράς του σκυροδέματος στη θέση διάστρωσης, που μπορεί ν' απέχει μέχρι 300 m στην οριζόντια διάσταση και μέχρι 50 m στην κατακόρυφη, με απόδοση μέχρι 100 m³/h. Οι συνηθισμένες αντλίες σε αυτοκίνητο μεταφέρουν το σκυροδέμα μέχρι 20 m οριζόντια ή προς τα πάνω και 8 m περίπου προς τα κάτω. Οι σωλήνες μεταφοράς, που συνήθως είναι μεταλλικοί, πρέπει να έχουν όσο το δυνατό μικρότερη διάμετρο, ώστε να ελαχιστοποιείται το βάρος του σωλήνα αλλά και του σκυροδέματος που περιέχει [14].

Για να αποφευχθεί απόμιξη συστατικών κατά τη διάστρωση, το σκυροδέμα πρέπει να αδειάζεται σε οριζόντιες στρώσεις του ίδιου περιήπου πάχους (κάθε μία από τις οποίες συμπυκνώνεται επαρκώς πριν διαστρωθεί η επόμενη) ή σε κοντινούς σωρούς. Τονίζεται ότι η διάστρωση σε μεγάλους σωρούς και το άπλωμα κατόπιν με δονητή, προκαλεί απόμιξη. Τέλος, ο ρυθμός διάστρωσης πρέπει να είναι αρκετά γρήγορος, ώστε η τελευταία στρώση να είναι ακόμα σε πλαστική κατάσταση όταν διαστρώνεται η επόμενη, για να εμποδίζεται ο σχηματισμός επιφανειών αδυναμίας, όπως αυτές που σχηματίζονται όταν γίνεται διάστρωση νωπού σκυροδέματος σε ήδη σκληρυμένο (αρμοί εργασίας) [14].

2.5.3.2. Συμπύκνωση

Συμπύκνωση σκυροδέματος είναι η διαδικασία απομάκρυνσης του εγκλωβισμένου αέρα από το νωπό σκυροδέμα, αμέσως μετά την χύτευσή του στον ξυλότυπο και η επίτευξη της μέγιστης πυκνότητάς του, μέσω της ταξινόμησης των αδρανών σε πυκνή διάταξη [27]. Η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε αέρα αμέσως μετά την τοποθέτησή του στον ξυλότυπο μπορεί να φθάσει το 5%. Η επίδραση της συμπύκνωσης στην αντοχή και την διαπερατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Εκτιμάται ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε αέρα κατά μία ποσοστιαία μονάδα οδηγεί σε μείωση της αντοχής της τάξης των 500 kPa.

Κάποιοι βαθμός συμπίκνωσης σκυροδέματος με μεγάλη ρευστότητα μπορεί να επιτευχθεί με συμπίεση, κοπάνισμα ή άλλες πρόχειρες μεθόδους. Πλήρης συμπίκνωση επιτυγχάνεται συνήθως με εφαρμογή δόνησης, η οποία προκαλεί την προσωρινή μείωση της τριβής και πρόσφυσης μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος, αυξάνει τη ρευστότητα και οδηγεί στην απομάκρυνση του αέρα και την πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων [27].

Κατά την εφαρμογή της δόνησης, η περίσσεια του νερού και του τσιμεντοπολτού, της πάστας καθώς και ο εγκλωβισμένος αέρας οδηγούνται προς την επιφάνεια. Το νερό μειώνει το ιξώδες του τσιμεντοπολτού με αποτέλεσμα να μειώνονται οι εσωτερικές τριβές μεταξύ των κόκκων και να αυξάνεται προσωρινά η ρευστότητα του σκυροδέματος. Τα αδρανή περιστρέφονται και κατακάθονται υπό την επίδραση του βάρους τους, αποκτώντας τη μέγιστη πυκνότητα. Ο τσιμεντοπολτός αναδύεται στην επιφάνεια γεμίζοντας τα κενά, σφηνώνοντας τα αδρανή και δημιουργώντας δεσμούς με αυτά [27].

Η συμπίκνωση εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των κόκκων των αδρανών, το περιεχόμενο νερό, τη διάταξη του οπλισμού και τις διαστάσεις του δομικού στοιχείου. Ο βαθμός συμπίκνωσης του σκυροδέματος εξαρτάται από τη συνεκτικότητά του. Η συνεκτικότητα είναι ένα μέτρο για το εργάσιμο και το βαθμό συμπίκνωσης του νωπού σκυροδέματος και εξαρτάται από την ποσότητα του τσιμεντοπολτού. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες συνεκτικότητας [22]:

- K1: ύφυγρο ή δύσκαμπτο σκυρόδεμα
- K2: πλαστικό σκυρόδεμα και
- K3: ρευστό σκυρόδεμα.

Το νωπό σκυρόδεμα πρέπει να έχει τέτοια συνεκτικότητα και εργάσιμο ώστε να μπορεί, κατά τη διάστρωσή του, να λαμβάνει την απαιτούμενη μορφή εύκολα και χωρίς σφάλματα.

2.5.3.3. Τελείωμα

Το τελείωμα γίνεται, συνήθως, σε επίπεδες επιφάνειες και στοχεύει στην εξομάλυνση και βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας του σκυροδέματος. Επιτυγχάνεται με τη χρήση ευθύγραμμης δοκού ορθογωνικής διατομής (π.χ. καδρόνι), που σύρεται στην επιφάνεια και, ταυτόχρονα, μετακινείται πάνω – κάτω, παρασύροντας έτσι το πλεονάζον σκυρόδεμα προς τυχόν κοιλότητες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επιπεδότητα βελτιώνεται περαιτέρω με “σαρώστρες”, που έχουν επίπεδη επιφάνεια σε επαφή με το σκυρόδεμα. Σε εμφανή δάπεδα με ιδιαίτερες απαιτήσεις εξομάλυνσης και επιπεδότητας, το τελείωμα περιλαμβάνει κι ένα τελικό στάδιο, κατά το οποίο η επιφάνεια του σκυροδέματος εξομαλύνεται περαιτέρω και συμπυκνώνεται με ειδικό μηχάνημα, που φέρει ξύλινες ή μεταλλικές λεπίδες που περιστρέφονται σε επαφή με το σκυρόδεμα, εξομαλύνοντας κάθε ατέλεια. Η διαδικασία αυτή προκαλεί άνοδο τσιμεντοπολτού στην επιφάνεια, γι’ αυτό και η πρόωρη εφαρμογή της ή για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην αντοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος [14].

2.5.4. Συντήρηση, αφαίρεση ξυλοτύπων

Η συντήρηση αποβλέπει στην προστασία του σκυροδέματος κατά τα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης, κυρίως από πρόωρη ξήρανση, από την επίδραση της θερμοκρασίας, του ανέμου, του νερού και των κραδασμών, καθώς και από τις χημικές επιδράσεις. Η συντήρηση είναι υποχρεωτική για κάθε έργο. Αρχίζει αμέσως μετά τη διάστρωση του σκυροδέματος και η χρονική διάρκειά της εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και τις ειδικές απαιτήσεις του έργου. Η συντήρηση αποσκοπεί βασικά στο να εξασφαλίσει στο σκυρόδεμα το νερό που απαιτείται για την ενυδάτωση, είτε με την αναπλήρωση του νερού που εξατμίζεται είτε με παρεμπόδιση της εξάτμισης. Σύμφωνα με τον ΚΤΣ-97 [26], αυτό επιτυγχάνεται με: α) λινάτσες επικάλυψης που διατηρούνται υγρές για 7 τουλάχιστον ημέρες, β) πλημμύρισμα οριζόντιων ελεύθερων επιφανειών, γ) βύθισμα προκατασκευασμένων στοιχείων σε δεξαμενές νερού, δ) ψεκασμό της επιφάνειας του σκυροδέματος με περιστροφικούς ψεκαστήρες συνεχούς λειτουργίας, ε) πλαστικές μεμβράνες επικάλυψης για παρεμπόδιση της εξάτμισης και στ) επάλειψη ή ψεκασμό των ελεύθερων επιφανειών με υγρό που σχηματίζει λεπτή και αδιαπέρατη από το νερό μεμβράνη.

Η αφαίρεση ξυλοτύπων (με τη γενικότερη έννοια του καλουπιού) πρέπει να γίνεται μόνο εφόσον το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει αρκετή αντοχή ώστε να φέρει όλα τα φορτία που δρουν κατά την αφαίρεση, καθώς και αυτά που πρόκειται να δράσουν μέχρι την ηλικία των 28 ημερών.

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται σε περιπτώσεις όπου, σε στοιχεία των οποίων οι ξυλότυποι θα αφαιρεθούν, στηρίζονται αυτοί των υπερκείμενων κατασκευών ή όταν στις οριζόντιες επιφάνειες των στοιχείων αυτών προβλέπεται ν' αποθηκευτούν υλικά [26].

2.5.5. Εξίδρωση

Εξίδρωση ονομάζεται η αποβολή νερού πριν από την πήξη του σκυροδέματος ή του κονιάματος, η οποία οφείλεται στην καθίζηση των στερεών υλικών με ταυτόχρονη άνοδο του νερού που εξατμίζεται. Η ταχύτητα καθίζησης είναι διαφορετική στις διάφορες θέσεις του τσιμεντοπολτού, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ρωγμές, κατά τη διάρκεια του φαινομένου, από τις τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται από το κέντρο προς την περιφέρεια. Η εξίδρωση εξαρτάται από το είδος του τσιμέντου, τη λεπτότητα άλεσής του, το συντελεστή νερού / τσιμέντο W/C, το ποσοστό των λεπτών υλικών και το χρόνο έναρξης της πήξης [22]. Η εξίδρωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του τελικού όγκου του μίγματος και την απομάκρυνση μέρους νερού [14]. Η ελάττωση του νερού είναι, βέβαια, επιθυμητή, γιατί έχει ευνοϊκό αποτέλεσμα στην αντοχή, αλλά το φαινόμενο του διαχωρισμού είναι επιβλαβές και ανεπιθύμητο γενικά, λόγω της ανομοιογένειας που δημιουργεί μέσα στη μάζα του σκυροδέματος και, ειδικότερα, τα ακόλουθα δυσμενή φαινόμενα [20] :

- α) Όπως το νερό κινείται προς τα επάνω, συμπαρασύρει το λεπτόκοκκο τμήμα του τσιμέντου. Με τον τρόπο αυτόν το μίγμα γίνεται φτωχότερο σε τσιμέντο και στην επιφάνεια δημιουργείται λεπτό στρώμα κονιάς, που ρηγματώνεται και αποφλοιώνεται
- β) Κατά τη διέλευση του νερού ανάμεσα από τα στερεά συστατικά, δημιουργούνται μέσα στον τσιμεντοπολτό λεπτοί σωληνίσκοι
- γ) Η συγκέντρωση του νερού δε γίνεται μόνο στην επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται τοπικά και στις κοιλότητες μεταξύ των σκύρων, όπου γίνεται τοπική συγκέντρωση νερού με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοιλοτήτων
- δ) Το ίδιο φαινόμενο δημιουργείται και σε όλο το μήκος κάτω από τις ράβδους του οπλισμού, όπου, το κενό που σχηματίζεται, μειώνει την επιφάνεια συνεργασίας ανάμεσα στο σκυρόδεμα και το σίδηρο και, συγχρόνως, αυξάνει τον κίνδυνο διαβρώσεως των οπλισμών. Το φαινόμενο της εξιδρώσεως επιτείνεται με την αύξηση του νερού αναμίξεως, καθώς και με την έλλειψη λεπτόκοκκων υλικών της άμμου και του τσιμέντου, γιατί μ' αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η κίνηση του νερού προς τα πάνω. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι, κάθε είδος τσιμέντου έχει διαφορετική ικανότητα συγκρατήσεως νερού. Ρόλο παίζει, κυρίως, η λεπτότητα του τσιμέντου και οι προσμίξεις.

2.5.6. Απόμιξη

Απόμιξη καλείται ο διαχωρισμός των συστατικών του σκυροδέματος, λόγω διαφοράς ειδικού βάρους, που μπορεί να συμβεί και σε ξηρά και σε υγρά αναμίγματα [14]. Τα στερεά δηλαδή συστατικά διαχωρίζονται από το νερό αλλά και μεταξύ τους, κατά την κατακόρυφη κίνησή τους. Τα βαρύτερα κινούνται προς τα χαμηλότερα στρώματα και έτσι, τελικά, τακτοποιούνται σε στρώσεις, ανάλογα με το βάρος τους. Αν οι κόκκοι είναι από το ίδιο πέτρωμα και, επομένως, έχουν το ίδιο ειδικό βάρος, ο διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων. Το φαινόμενο της απομείξεως είναι από τα πιο καταστρεπτικά για την αντοχή και γενικά για την ποιότητα του σκυροδέματος, γιατί όπως είναι φανερό, μεταβάλλει τις αναλογίες μίξεως κατά τρόπο ανομοιόμορφο και απρόβλεπτο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται περιοχές με μειωμένη αντοχή, καθώς επίσης και μειωμένη πρόσφυση μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος από την έλλειψη κονιάματος [20].

2.5.7. Παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος

Σκληρυνθέν σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο έχει σκληρυνθεί και έχει αποκτήσει την οριστική μορφή του, δηλαδή έχει μετατραπεί σε τεχνητό λίθο. Οι ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος επηρεάζονται από τους εξής παράγοντες [22]:

☞ Ο βαθμός ενυδάτωσης

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενυδάτωσης, δηλαδή όσο πιο ολοκληρωμένη είναι η ενυδάτωση των κόκκων του τσιμέντου, τόσο πιο συμπαγές, στερεό και ανθεκτικό είναι το σκληρυνθέν σκυρόδεμα.

☞ Ο λόγος νερού / τσιμέντο W/C

Η τιμή του λόγου W/C επηρεάζει σημαντικά την πλαστικότητα και την αντοχή του σκυροδέματος. Ο συντελεστής αυτός έχει καθορισμένη τιμή, ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή του παρασκευαζόμενου σκυροδέματος και την ποιότητα του τσιμέντου. Μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές από την απαιτούμενη τιμή του W/C, επιδρούν αρνητικά στην αντοχή του σκυροδέματος.

☞ Η θερμοκρασία

Η υψηλή θερμοκρασία επιταχύνει την πήξη, μειώνει τη δυνατότητα επεξεργασίας και αυξάνει τη συστολή ξήρανσης. Επίσης, αυξάνει την αρχική αντοχή αλλά μειώνει την τελική αντοχή του σκυροδέματος. Η χαμηλή θερμοκρασία επιβραδύνει την πήξη και τη σκλήρυνση και αυξάνει τη δυνατότητα επεξεργασίας. Με την προϋπόθεση ότι δεν προσβάλλεται από παγετό, η τελική αντοχή του σκυροδέματος, συνήθως, αυξάνεται.

Η θερμοκρασία επηρεάζει την ταχύτητα σκλήρυνσης του σκυροδέματος για θερμοκρασίες αέρα μέχρι και τους 18°C περίπου. Για τις θερμοκρασίες αυτές, η ταχύτητα σκλήρυνσης μειώνεται, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία και μάλιστα η μείωση είναι μεγαλύτερη για λεπτά δοκίμια. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 18°C, η ταχύτητα σκλήρυνσης παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το πάχος του δοκιμίου

☞ Η υγρασία

Η γρήγορη ξήρανση του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα να αναπτυχθούν τάσεις λόγω της συστολής ξήρανσης, οι οποίες προκαλούν ρηγμάτωση ή μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό του σκυροδέματος.

2.6. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ - 1997, οι κατηγορίες σκυροδέματος χαρακτηρίζονται από το γράμμα C (Concrete = σκυρόδεμα) και ακολουθούν δύο αριθμοί. Ο πρώτος αναφέρεται στη χαρακτηριστική αντοχή (fck) κυλίνδρου και ο δεύτερος στη χαρακτηριστική αντοχή κύβου, σε MPa, στις 28 ημέρες. Το δοκίμιο κυλίνδρου έχει ύψος 30 cm και διάμετρο 15 cm ενώ το δοκίμιο κύβου είναι ακμής 15 cm. Οι παλιές κατηγορίες, τύπου B225, έχουν καταργηθεί. Οι κατηγορίες σκυροδέματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 6

Πίνακας 6: Κατηγορίες σκυροδεμάτων

Κατηγορία σκυροδέματος	fck, κυλίνδρου (MPa)	fck, κύβου (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Καθοριστικά για την ασφάλεια μιας κατασκευής είναι τα αδύνατα σημεία της. Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_{cm} , αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Ως χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος (δηλ. αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το ποσοστό υποαντοχής $p=5\%$ των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από την χαρακτηριστική αντοχή και το υπόλοιπο 95 % θα ήταν πάνω απ' αυτήν) [14]. Έτσι, αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή f_{cm} και τυπική απόκλιση s , είναι : $f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot s$ όπου ο συντελεστής $-1,645$ αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%. Έτσι, δύο σκυροδέματα με διαφορετική διασπορά ή διαφορετικό έλεγχο ποιότητας και, επομένως, διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης, s , θεωρούνται ισοδύναμα από απόψεως ασφάλειας, αν έχουν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Αυτό σημαίνει πως αυτό που έχει τη μεγαλύτερη διασπορά ή το χειρότερο έλεγχο ποιότητας (δηλ. τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση), θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη μέση τιμή f_{cm} και επομένως μεγαλύτερο κόστος [20].

Επειδή η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ως βάση για τον έλεγχο ποιότητας του σκυροδέματος ορίζεται η συμβατική αντοχή, f_{28} δηλαδή αυτή που μετράται με δοκίμια τυποποιημένης μορφής και διαστάσεων, που παρασκευάζονται από το νωπό σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της διάστρωσης, συντηρούνται με καθορισμένο τρόπο και δοκιμάζονται σε θλίψη με τυποποιημένο τρόπο [14].

2.7. ΕΙΔΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.7.1. Έτοιμο σκυρόδεμα

Είναι το σκυρόδεμα εκείνο που παρασκευάζεται σε σταθερό ή κινητό αναμικτήρα και μεταφέρεται στον τόπο εφαρμογής του, υπό την μορφή του φρέσκου σκυροδέματος [24]. Η ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος κατά τη μεταφορά έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρεται το σκυρόδεμα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η διατήρηση του εργάσιμου του σκυροδέματος επιτυγχάνεται με πρόσθετη διαβροχή του σκυροδέματος.

2.7.2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εκτοξευόμενο (ή gunite) ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο τοποθετείται στη θέση σκυροδέτησης με εκτόξευση από το ακροφύσιο ειδικής συσκευής, με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να διαστρωθεί ταχύτατα χωρίς τη χρήση ξυλοτύπων ενώ ως μειονέκτημα μπορεί ν' αναφερθεί το μεγαλύτερο κόστος, λόγω της χρήσης αυξημένης ποσότητας τσιμέντου αλλά και η εξάρτηση της ποιότητάς του από τη δεξιότητα και την εμπειρία του χειριστή του εξοπλισμού εκτόξευσης [14].

Η παρασκευή του σκυροδέματος γίνεται με δύο μεθόδους: την υγρή και την ξηρή. Στην υγρή μέθοδο τα αδρανή υλικά, το τσιμέντο και το νερό αναμιγνύονται από την αρχή και το σκυρόδεμα μεταφέρεται με ρεύμα πεπιεσμένου αέρα μέσω σωληνώσεων στο ακροφύσιο, ενώ στην ξηρή μέθοδο το μίγμα τσιμέντου και αδρανών μεταφέρεται στο ακροφύσιο, όπου προστίθεται το νερό με ψεκασμό [20]. Η μέθοδος υγρής ανάμιξης πλεονεκτεί της ξηρής γιατί δίνει καλύτερο έλεγχο της ποσότητας του νερού ανάμιξης (και τυχόν προσμίκτων, αν χρησιμοποιούνται) αλλά και επειδή εξασφαλίζει καλύτερες συνθήκες εργασίας λόγω της λιγότερης σκόνης που παράγεται [14].

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει να έχει ομοιογένεια, κατάλληλο εργάσιμο που θα του επιτρέψει να διαστρωθεί ικανοποιητικά και, ταυτόχρονα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η πρόσφυση στην επιφάνεια στην οποία γίνεται η εκτόξευση, καθώς και η ελάχιστη αναπήδηση. Επίσης, πρέπει να έχει την αντοχή, την ανθεκτικότητα και όλες τις άλλες πρόσθετες ιδιότητες που απαιτούνται για το έργο.

Η ποιότητα του εκτοξευόμενου, προσθέτου σκυροδέματος εξαρτάται, σε σημαντικό βαθμό, από τον έλεγχο του νερού και του επιταχυντικού προσθέτου του μίγματος, την πίεση του αέρα, την ταχύτητα εξόδου των υλικών από το ακροφύσιο, τις τεχνικές χρήσεις του ακροφυσίου και τον χειριστή του ακροφυσίου. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε κατασκευές οι οποίες έχουν υποστεί εκτεταμένες καταστροφές, όπως και σε κατασκευές λεπτότοιχες ή ασθενώς οπλισμένες.

2.7.3. Οπλισμένο σκυρόδεμα

Οπλισμένο ονομάζεται το σκυρόδεμα μέσα στο οποίο τοποθετούνται κατάλληλοι ράβδοι από χάλυβα. Το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες και, κυρίως, σημαντική αύξηση στην αντοχή σε εφελκυσμό, οι οποίες οφείλονται στην πολύ καλή συνεργασία του σκυροδέματος με το χάλυβα.

2.7.4. Προεντεταμένο σκυρόδεμα

Προεντεταμένο ονομάζεται το σκυρόδεμα στο εσωτερικό του οποίου έχουν αναπτυχθεί τεχνητά μόνιμες εντατικές καταπονήσεις με τη χρήση τενόντων (σύρματα, ράβδοι ή συρματόσχοινα, καλώδια). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος.

Με τη λύση του προεντεταμένου σκυροδέματος αναζητείται τρόπος μείωσης των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών δυνάμεων ώστε να επεκταθεί η περιοχή ισχύος του οπλισμένου σκυροδέματος και για μεγαλύτερα ανοίγματα των οριζοντίων μελών των κτισμάτων. Για τη μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων ασκείται στο οριζόντιο μέλος θλιπτική δύναμη κατά τη διεύθυνση του μήκους του φορέα ώστε να ωθήσει τη ροή των φορτίων προς την κατακόρυφη φυσική τροχιά τους και να μειώσει την ανάπτυξη των εφελκυστικών δυνάμεων αντιστάθμισης. Η τεχνική της προέντασης συνίσταται στην εισαγωγή αυτής της πρόσθετης αξονικής θλιπτικής επιπόνησης, η οποία ονομάζεται δύναμη προέντασης, γιατί επιβάλλεται πριν ενταθεί ο φορέας από τα φορτία του. Η εισαγωγή της δύναμης προέντασης επιτυγχάνεται με τάνυση (εφελκυσμό) καλωδίων ενσωματωμένων στο φορέα.

Η λύση του προεντεταμένου σκυροδέματος χαιρετίστηκε ως ιδιαίτερα υποσχόμενη, ικανή ν' αναιρέσει βασικά μειονεκτήματα του οπλισμένου σκυροδέματος. Η δοκιμασία του όμως στην πράξη, ανέδειξε μια σειρά σημαντικών μειονεκτημάτων, όπως ευαλωσία σε διάβρωση με ιδιαίτερα εκρηκτικές συνέπειες σε περίπτωση αστοχίας του, αυξημένη κόπωση των φορέων, ιδιαίτερη επικινδυνότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς, μειονεκτική αντισεισμική συμπεριφορά κλπ. Σήμερα, η λύση του προεντεταμένου σκυροδέματος εγκαταλείπεται.

2.7.5. Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα

Ως αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (self compacting ή self consolidating concrete) καλείται το σκυρόδεμα που έχει τη δυνατότητα να πληρώσει οποιονδήποτε τύπο (ξυλότυπο, μεταλλότυπο, πλαστικότυπο κτλ.) ρέοντας ανάμεσα στον οπλισμό και να αποκτήσει ικανή συμπίκνωση, αποκλειστικά λόγω του ιδίου βάρους του και της ρεολογικής του συμπεριφοράς. Βασικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ είναι η αυξημένη του ρευστότητα σε συνδυασμό με τη διατήρηση της απαιτούμενης συνεκτικότητας, η οποία αποτελεί μέτρο της αντίστασης διαχωρισμού του μίγματος. Πρόκειται για σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (με επιλεκτικά αναβαθμισμένες ιδιότητες) και μάλιστα, σύμφωνα με την προτεινόμενη άποψη αρκετών ερευνητών, αποτελεί τη μεγαλύτερη εξέλιξη στον τομέα της τεχνολογίας σκυροδέματος τα τελευταία 50 χρόνια.

Η ικανότητα που έχει να εγχέεται και να ρέει μέσα στους ξυλότυπους, διατηρώντας πάντα μια ομοιόμορφη κατανομή των συστατικών του (πάστα, αδρανή κλπ), είναι μια από τις πλέον σημαντικές απαιτήσεις σε ένα αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Είναι το βαθύτερο αίτιο της υψηλής ρευστότητας, αφού επιτρέπει στο σκυρόδεμα να ρέει μεταξύ πυκνού οπλισμού ή διατομών περίπλοκης γεωμετρίας δίχως δυσκολία. Αν δεν ικανοποιούσε την αντίσταση στο διαχωρισμό, τα χονδρόκοκκα αδρανή θα συγκεντρώνονταν κοντά στον οπλισμό, δυσχεραίνοντας έτσι τη ροή του μίγματος [24].

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έχει υψηλότερο περιεχόμενο σε λεπτά υλικά από ότι το συμβατικό σκυρόδεμα εξαιτίας του υψηλού περιεχομένου του σε συνδετικό υλικό και διαφορετική κοκκομετρική καμπύλη κατανομής. Αυτές οι τροποποιήσεις, σε συνδυασμό με ειδικά προσαρμοσμένους υπερρευστοποιητές, παράγουν μοναδική ρευστότητα και συμφυή ικανότητα συμπίκνωσης [28].

Συγκεντρωτικά, τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι τα επόμενα [24]:

- ☞ Ταχύτερη κατασκευή
- ☞ Μείωση του απαιτούμενου εργατικού δυναμικού στο έργο
- ☞ Καλύτερες τελικές επιφάνειες
- ☞ Ευκολότερη τοποθέτηση
- ☞ Αυξημένες αντοχές
- ☞ Μεγαλύτερη ευελιξία στη σχεδίαση
- ☞ Μειωμένα επίπεδα θορύβου, απουσία δόνησης
- ☞ Ασφαλέστερο περιβάλλον εργασίας.

2.7.6. Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα που, εκτός από τα συνήθη συστατικά του (τσιμέντο, νερό, αδρανή, πρόσθετα ή πρόσμικτα), περιέχει και ίνες, ονομάζεται ινοπλισμένο. Πολλές ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με την προσθήκη των ινών. Η σωστή επιλογή για διαφορετικές χρήσεις είναι σημαντική καθότι, όχι μόνο το υλικό αλλά και το σχήμα των ινών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα [28]. Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών, και διαμέτρου που είναι, συνήθως, κλάσμα του χιλιοστού, και διασκορπίζονται στη μάζα του μίγματος κατά την ανάμιξη των συστατικών του, σε ποσοστό της τάξης του 1 – 3% κ.ό. Παρασκευάζονται, κατά κύριο λόγο, από χάλυβα, πολυπροπυλένιο ή γυαλί και δευτερευόντως από άνθρακα, αραμίδιο, πολυεστέρα, νάυλον και φυσικά υλικά όπως το ξύλο [14].

Ο βασικός ρόλος των ινών είναι η αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας του υλικού (που σχετίζεται με εφελκυστικές τάσεις) και ο περιορισμός της ρηγμάτωσης (π.χ. λόγω συστολής ξήρανσης) ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται και, μικρή συνήθως, αύξηση της αντοχής. Αποτέλεσμα είναι, συνήθως, η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητάς του ν' απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση [14].

2.7.7. Διογκούμενο σκυρόδεμα

Διογκούμενο ονομάζεται το σκυρόδεμα που περιέχει είτε διογκούμενο τσιμέντο είτε διογκούμενο πρόσθετο, ώστε να προκαλείται σταδιακή αύξηση του όγκου του, τουλάχιστον ίση με τη συστολή ξήρανσης. Αποτέλεσμα της διόγκωσης είναι η ανάπτυξης θλιπτικών τάσεων, που μειώνονται βαθμιαία με την ανάπτυξη της συστολής ξήρανσης. Το μεγάλο πλεονέκτημα του σκυροδέματος αυτού είναι η εξάλειψη της ρηγμάτωσης, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη στεγανότητα (δεξαμενές νερού, σωλήνες αποχέτευσης, οροφές κλπ. [14].

2.8. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΑ

Το σκυρόδεμα ως δομικό υλικό θεωρείται από ορισμένους ερευνητές ως υλικό αειφόρο και πράσινο για τους παρακάτω λόγους μεταξύ άλλων [5]:

- Το σκυρόδεμα παράγεται κατά βάση από αδρανή, νερό και τσιμέντο. Τα δυο πρώτα βρίσκονται εν αφθονία στη φύση κοντά στον τόπο κατανάλωσης και το τσιμέντο, συνήθως, παράγεται σε κοντινή περιοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να είναι αφενός οικονομικό και αφετέρου να απαιτεί μειωμένη κατανάλωση ενέργειας για τη μεταφορά του. Σημειωτέον ότι, σημαντικό ποσοστό του κόστους όλων των δομικών υλικών αποτελεί το κόστος μεταφοράς τους
- Το σκυρόδεμα μπορεί να παραχθεί και από υλικά ανακυκλώσιμα τόσο για την αντικατάσταση των αδρανών όσο για αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου. Για μεν το πρώτο απαλλάσσει τη φύση από αυτά τα στερεά απόβλητα, για δε το δεύτερο μειώνει έμμεσα την εκπομπή αερίων CO₂ που είναι η κύρια αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου στον πλανήτη
- Το σκυρόδεμα στο τέλος της ζωής ενός έργου μπορεί να ανακυκλωθεί
- Το διαπερατό σκυρόδεμα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επίστρωση δαπέδων στην ύπαιθρο, επιτρέπει στο νερό της βροχής να περνά στο υπέδαφος, εμπλουτίζοντας έτσι τον υπόγειο ορίζοντα και προλαβαίνοντας τη ρύπανση ποταμών και λιμνών
- Η θερμική μάζα του σκυροδέματος βοηθάει στη σταθερότητα της εσωτερικής θερμοκρασίας των κτιρίων εξοικονομώντας ενέργεια για ψύξη – θέρμανση
- Το ανοικτό χρώμα του σκυροδέματος αντανακλά τη ζέστη κατά τη διάρκεια της ημέρας και το φως κατά τη διάρκεια της νύχτας συμβάλλοντας και με αυτόν τον τρόπο στην εξοικονόμηση ενέργειας
- Δώματα από αδιαπέρατο σκυρόδεμα μπορούν να φυτευτούν, συμβάλλοντας έτσι στην εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη – θέρμανση
- Τελευταίο και πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι αντισεισμικά και ανθεκτικά (αειφόρος κατασκευή). Το παλαιότερο κτίριο από σκυρόδεμα που στέκει μέχρι σήμερα, έχει ηλικία άνω των 2000 ετών και είναι το Πάνθεον στη Ρώμη, το οποίο είναι, ακόμα στις μέρες μας, ο μεγαλύτερος θόλος από άοπλο σκυρόδεμα στον κόσμο.

2.9. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΑΔΡΑΝΗ

Αν και η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών γίνεται στις αναπτυσσόμενες χώρες εδώ και αρκετά χρόνια, η προώθηση αυτού του ανακυκλωμένου υλικού σαν εναλλακτικό αδρανές δεν είναι εύκολη υπόθεση. Έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, λόγω της υψηλής απορροφητικότητας και του γωνιώδους σχήματός του, σε οδοστρώματα και υποστρώματα, σε υπόγειες κατασκευές και σκυροδέματα μάζας, αλλά η εφαρμογή σε σκυροδέματα υψηλότερης αντοχής δεν είναι συνηθισμένη καθώς υπάρχουν ακόμα πολλά άλυτα προβλήματα. Τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή, υψηλότερο πορώδες, μεγάλη διακύμανση ποιότητας, υψηλή συστολή ξήρανσης, μεγάλο ερπυσμό και χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, που κάνουν δύσκολη την εφαρμογή τους [25].

Έχει γίνει πολύ έρευνα, διεθνώς, πάνω στα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή, που αφορά όμως τις μηχανικές τους ιδιότητες - κυρίως την αντοχή τους - και λιγότερο την ανθεκτικότητά τους - κυρίως την υδατοπερατότητα / υδατοαπορροφητικότητα, την ενανθράκωση, τη συστολή ξήρανσης καθώς και την αντοχή σε ψύξη απόψυξη [25].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. Σκοπός

Το εργαστηριακό μέρος της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στη διερεύνηση της αντοχής σε θλίψη και κάμψη μετά από συντήρηση 7 και 28 ημερών δοκιμίων από ανακυκλωμένο κονίαμα σε σύγκριση με δοκίμια αναφοράς συμβατικής σύνθεσης στις ίδιες ηλικίες συντήρησης.

3.2. Υλικά Σύνθεσης Κονιάματος

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν υπόκεινται σε συμμόρφωση με τους πρότυπους κανονισμούς [29] και είναι οι εξής:

- Τσιμέντο τύπου Portland [CEMII]
- Πρότυπη χαλαζιακή άμμο Durostick με μέγεθος κόκκου 0.01-0.5 mm
- Πρότυπη χαλαζιακή άμμο Thrakon με μέγεθος κόκκου 0.7- 1.45 mm
- Χαλαζιακή άμμος της εταιρείας Stroumpoulis με μέγεθος κόκκου 0.4-0.8 mm



ΕΙΚΟΝΑ 2: Χαλαζιακή άμμος

3.3. Πειραματική Διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αποτελείται από τις εξής δύο φάσεις:

3.3.1. Φάση Α: Σκυροδέτηση δοκιμίων

1. Κοσκίνισμα της άμμου για την κατανομή μεγέθους των κόκκων και την δημιουργία κοκκομετρικής καμπύλης
2. Σύνθεση κονιάματος αποτελούμενο κ.β. από ένα μέρος τσιμέντου, τρία μέρη ξηρής χαλαζιακής άμμου και μισό μέρος πόσιμου νερού.
3. Παρασκευή και σκυροδέτηση 39 δοκιμίων διαστάσεων 40mm × 40mm × 160mm.
4. Δοκιμή αντοχών σε θλίψη και κάμψη 7 ημερών σε 13 δοκίμια και 28 ημερών σε 26 δοκίμια.

3.3.2. Φάση Β: Σκυροδέτηση δοκιμίων από ανακυκλούμενο σκυρόδεμα

1. Θραύση δοκιμίων για επαναχρησιμοποίηση στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Κοσκίνιση της άμμου για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους κόκκων
2. Σύνθεση κονιάματος αποτελούμενο κ.β. από ένα μέρος ανακυκλούμενου τσιμέντου, τρία μέρη ξηρής χαλαζιακής άμμου, μισό μέρος πόσιμου νερού και 0,15% κ.β. (επί της μάζας του τσιμέντου) υπερρρευστοποιητή
3. Παρασκευή και σκυροδέτηση 12 δοκιμίων με διαστάσεις 40mm × 40mm × 160mm
4. Δοκιμή αντοχών σε θλίψη και κάμψη μετά από συντήρηση 7 ημερών σε 4 δοκίμια και μετά από συντήρηση 28 ημερών σε 8 δοκίμια



(α) Μηχανή κοσκινισματος



(β) Διαδικασία ζύγισης υλικών



(γ) Παρασκευή κονιάματος



(δ) Μήτρα



(ε) Καθαρισμός & Λύπανση μήτρας



(στ) Μηχανή θλίψης

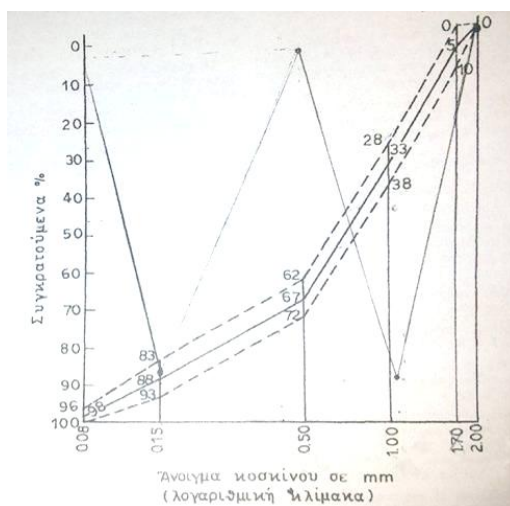
ΕΙΚΟΝΑ 3: Στάδια διαδικασίας του πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο πειραματικές φάσεις.

ΦΑΣΗ Α

A1. Κοσκίνιση άμμου και εξαγωγή κοκκομετρικής καμπύλης

Για την σύνθεση του κονιάματος χρησιμοποιήθηκε πρότυπη χαλαζιακή άμμος. Η άμμος πρέπει να αποτελείται από τρία κλάσματα λεπτό (0|0,5), μέσο (0,5|1) και χοντρό (1|2). Για τον διαχωρισμό χρησιμοποιήθηκαν τα ASTM κόσκινα No 16, No 30, No 100, No 200, με σκοπό την εύρεση της κατανομής μεγέθους κόκκων και την εξαγωγή της κοκκομετρικής καμπύλης σύμφωνα με το πρότυπο διάγραμμα προεδρικού διατάγματος 244 όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Αφού τοποθετήθηκαν σε σειρά τα κόσκινα, κοσκινίστηκαν 75 kg χαλαζιακής άμμου. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 7 στο κόσκινο No16 με άνοιγμα βροχίδας 1,18mm προέκυψε συγκρατούμενο 23732 g, στο νούμερο 30 με άνοιγμα βροχίδας 0,6 mm προέκυψε συγκρατούμενο 19983 g, στο No100 με άνοιγμα βροχίδας 0,15 mm προέκυψε συγκρατούμενο 22817 g και στο No 200 με άνοιγμα βροχίδας 0,075 mm συγκρατούμενο 3168 g.



ΕΙΚΟΝΑ 4: Κοκκομετρική διαβάθμιση πρότυπης άμμου [29]

Από το συνολικό κοσκινισμένο υλικό χρησιμοποιήθηκαν 39 kg για τον υπολογισμό της κοκκομετρικής καμπύλης. Για να μην ξεπεραστούν τα όρια της κοκκομετρικής καμπύλης στα 39 kg απαιτείται συγκρατούμενο υλικό από το κόσκινο No16 14430 g, από το κόσκινο No30 13260 g, από το κόσκινο No100 8190 g και από το No 200 3120 g αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Συγκρατούμενο υλικό

Κόσκινου ASTM	Ανοιγμα Βροχιδας [mm]	Συγκρατουμενο Ποσοστό [%]	Υπολογισμός	Συγκρατουμενο υλικό [g]
No 16	1.18	37	370*39kg	14430
No 30	0.6	71	(710-370)*39kg	13260
No 100	0.15	92	(920-710)*39kg	8190
No 200	0.075	100	(1000-920)*39kg	3120

A2) Σύνθεση κονιάματος

Για την παρασκευή του αρχικού κονιάματος η σύνθεση που αποτελείται κ.β. από ένα μέρος τσιμέντου, τρία μέρη ξηρής χαλαζιακής άμμου και μισό μέρος πόσιμου νερού. Πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή μιας μήτρας η οποία συγκροτείται από τρία δοκίμια, κάθε φορά πρέπει να αναμιγνύονται 450 g τσιμέντο, 1350 g άμμου και 225 g νερό (βλ. Πίνακα 8).

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Σύνθεση συμβατικού κονιάματος

NEPO [g]	ΤΣΙΜΕΝΤΟ [g]	ΑΜΜΟΣ [g]
225	450	1350

Από τα 39000 g άμμου που διανεμήθηκαν στα τέσσερα κόσκινα υπολογίσθηκαν οι απαιτούμενες ποσότητες των συστατικών στα 1350 g, ήτοι:

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: Συγκρατούμενο υλικό για μια μήτρα

Κόσκινο ASTM	Ποσότητα Άμμου [g]
No 16	499,5
No 30	459
No 100	283,5
No 200	108

A3) Παρασκευή και σκυροδέτηση κονιάματος

Για την παρασκευή χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτροκίνητος εργαστηριακός αναμικτήρας ο οποίος αποτελείται από υποδοχή από ανοξείδωτο χάλυβα χωρητικότητας 4,7 lt και ένα μίκτρο (Εικόνα 3γ).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

- Αφού τοποθετήθηκε νερό στον αναμικτήρα τέθηκε σε λειτουργία σε χαμηλή ταχύτητα
- Προσθήκη τσιμέντου και αναμονή 30 s
- Προσθήκη άμμου με σταθερό ρυθμό και αναμονή 30 s
- Αύξηση της ταχύτητας στο νούμερο 2 του αναμικτήρα και αναμονή για ακόμη 30 s

- Κλείσιμο του αναμικτήρα για 1,5 min και καθαρισμός των τριχωμάτων του αναμικτήρα με ελαστικό ξύστρο.
- Τέθηκε ο αναμικτήρας σε λειτουργία για το επόμενο 1 min σε υψηλή ταχύτητα.
- Αφού η κάθε μήτρα λιπανθεί ελαφρά στο εσωτερικό με τη χρήση ορυκτελαίου, τοποθετείται πάνω στην πλάκα της συσκευής συμπυκνώσεως με κρούση και μέσα σε αυτή κατευθείαν από τον αναμικτήρα το πρώτο στρώμα κονιάματος περίπου 320 g (μέχρι τη μέση) σε κάθε ένα από τα τρία διαμερίσματα της μήτρας με τη βοήθεια κουταλιού γνωστής χωρητικότητας. Απλώθηκε το στρώμα αυτό με χαλύβδινη σπάτουλα που σύρεται δυο φορές μπρός πίσω κατά μήκος κάθε διαμερίσματος της μήτρας. Το στρώμα αυτό του κονιάματος υποβάλλεται σε 60 κρούσεις σε χρόνο 60 s. Κατόπιν διαστρώνεται δεύτερο καθόλα όμοιο στρώμα κονιάματος, ισοπεδώνεται και συμπυκνώνεται όπως προηγούμενα.
- Η άνω επιφάνεια της μήτρας επιπεδώθηκε και καθαρίστηκε με μυστρί.
- Στην συνέχεια για την αποφυγή εξατμίσεως του νερού οι μήτρες καλύπτονται με υγρά πανιά σε όλη τους την επιφάνεια.
- Ξεκαλούπωμα δοκιμίων: Την επόμενη ημέρα της σκυροδέτησης ξεκαλουπώνονται τα δοκίμια από τις μήτρες και αφού μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους και το βάρος τους με χρήση ηλεκτρονικού μικρομέτρου και αναλυτικού ζυγού ακριβείας εμβαπτίστηκαν μέσα σε νερό όπου αφέθηκαν για συντήρηση για 7 ή 28 ημέρες.
- Στην συνέχεια οι μήτρες καθαρίστηκαν και λιπάνθηκαν με ορυκτέλαιο ώστε να είναι έτοιμες για την επόμενη σκυροδέτηση.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δοκίμια.

A4) Δοκιμή αντοχών σε κάμψη (R_f) και θλίψη (R_c)

Κατά την φάση αυτή η αντοχή 13 δοκιμίων μετά από συντήρηση 7 ημερών και 26 δοκιμίων μετά από συντήρηση 28 ημερών δοκιμάσθηκε σε θλίψη με χρήση μηχανής κάμψεως.

- Η αντοχή σε κάμψη R_f δίνεται από τη Σχέση (1):

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot L}{b^3} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Όπου:

F_f : το φορτίο που εφαρμόσθηκε στην μέση του πρίσματος σε N

L : η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων σε mm

b : η πλευρά της τετραγωνικής διατομής σε mm

Παράδειγμα υπολογισμού για το δοκίμιο 1:

$$F_f = 254 \text{ dan} \cdot 10\text{N} = 2540 \text{ N}$$

$$R_f = (1.5 \cdot F_f \cdot L) / b^3 = (1.5 \cdot 2540 \cdot 110) / 40^3 = 6,5484 \text{ N/mm}^2$$

- Η αντοχή σε θλίψη R_c δίνεται από τη δίνεται από τη Σχέση (2):

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

Όπου:

F_c : μέγιστο φορτίο στο σημείο θραύσης (και F_{c1} , F_{c2} τα δύο θραύσματα μετά την κάμψη) που δίνεται από τη Σχέση (3)

$$F_c = \frac{(F_{c1} + F_{c2}) \cdot 1000}{2} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

A : η επιφάνεια των πλακών σε mm^2

Παράδειγμα υπολογισμού για το δοκίμιο 1:

$$F_c = [(71.7 + 75.4) \cdot 1000] / 2 = 73550 \text{ N}$$

$$R_c = 73550 / (40.00 \cdot 40.44) = 45.4686 \text{ N/mm}^2$$

i. Μετά από συντήρηση 7 ημερών σε 13 δοκίμια

Η παρασκευή των 13 δοκιμίων μετά από συντήρηση 7 ημερών έγινε σε πέντε (5) διαφορετικές ημερομηνίες όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: Συμβατικό κονίαμα μετά από συντήρηση 7 ημερών

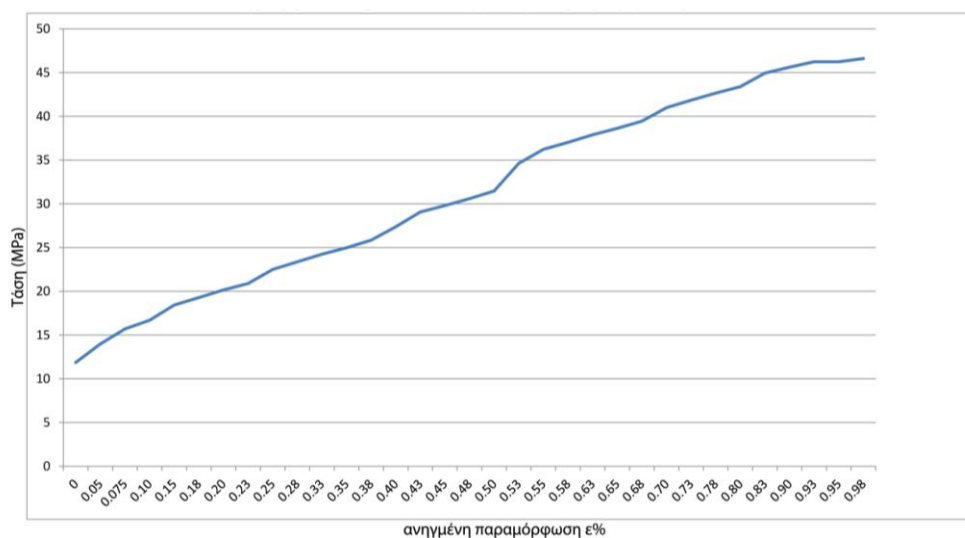
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΗΚΟΣ Χ ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΒΑΡΟΣ [g]	Η/Μ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	Η/Μ ΞΕΚΑΛΟΥ/ΤΟΣ	F_f [N]	R_f [N/mm ²]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ R_f	F_c [N]	R_c [N/mm ²]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ R_c
1	40.00*40.44	587	31/05/'16	07/06/'16	2540	6,5484	6,9498	73550	45,4686	44,5296
2	40.18*39.11	569	31/05/'16	07/06/'16	2890	7,3511		68500	43,5906	
3	40.07*39.91	573,5	01/06/'16	08/06/'16	2485	6,3731	6,3748	72750	45,4917	44,1504
4	40.09*40.70	591	01/06/'16	08/06/'16	2490	6,3764		69850	42,8091	
5	39.98*40.47	577	02/06/'16	09/06/'16	2720	7,0230	7,0268	69450	42,9236	42,7574
6	40.09*39.71	577,5	02/06/'16	09/06/'16	2690	6,8885		66050	41,4894	
7	40.14*40.67	585,5	02/06/'16	09/06/'16	2810	7,1690	6,4866	71600	43,8593	42,7978
8	40.09*39.78	572	06/06/'16	13/06/'16	2520	6,4532		69800	43,7678	
9	40.07*39.77	574,5	06/06/'16	13/06/'16	2650	6,7963		69850	43,8320	
10	40.04*40.23	582	06/06/'16	13/06/'16	2570	6,6059		67950	42,1838	
11	40.21*39.94	583	06/06/'16	13/06/'16	2400	6,0910	6,4502	66500	41,4075	44,1631
12	40.44*39.34	577	07/06/'16	14/06/'16	2570	6,4119		70150	44,0943	
13	40.07*39.89	574,5	07/06/'16	14/06/'16	2530	6,4885		70700	44,2319	
							ΓΕΝΙΚΟ Μ.Ο.	6,66		43,68

Παρακάτω θα κατασκευασθεί διάγραμμα τάσης (σ) – ανηγμένης παραμόρφωσης ($\epsilon\%$) για το θραύσμα 2 του δοκιμίου 1 με **εμβαδόν 1616 mm², φορτίο θραύσης 75.4 KN= 75400 N και τάση θραύσης 46,66 MPa** (βλ. Πίνακα 11, Εικόνα 5).

ΠΙΝΑΚΑΣ 11: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής Δοκιμίου 1

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [KN]	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ [mm ²]	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [Μpa]	Lo [mm]
1	75.4	1616	46.66	40

ΔΥΝΑΜΗ [KN]	ΔL [mm]	ΤΑΣΗ Μpa [N/mm ²]	Ανοιγμένη παραμόρφωση ε% [(ε=ΔL/Lo)*100]
19.2	0	12	0
22.6	0.02	14	0.05
25.4	0.03	16	0.075
27	0.04	17	0.10
29.8	0.06	18	0.15
31.2	0.07	19	0.18
32.6	0.08	20	0.20
33.8	0.09	21	0.23
36.4	0.1	23	0.25
37.8	0.11	23	0.28
39.2	0.13	24	0.33
40.4	0.14	25	0.35
41.8	0.15	26	0.38
44.3	0.16	27	0.40
47	0.17	29	0.43
48.2	0.18	30	0.45
49.5	0.19	31	0.48
50.9	0.2	31	0.50
56	0.21	35	0.53
58.6	0.22	36	0.55
59.9	0.23	37	0.58
61.3	0.25	38	0.63
62.5	0.26	39	0.65
63.8	0.27	39	0.68
66.3	0.28	41	0.70
67.7	0.29	42	0.73
69	0.31	43	0.78
70.2	0.32	43	0.80
72.7	0.33	45	0.83
73.8	0.36	46	0.90
74.8	0.37	46	0.93
74.8	0.38	46	0.95
75.4	0.39	47	0.98



Εικόνα 5: Διάγραμμα τάσης(σ) - ανηγμένης παραμόρφωσης (ε%) Δοκιμίου 1 FC2 (07/06)

ii. Μετά από συντήρηση 28 ημερών σε 26 δοκίμια.

Η παρασκευή των 26 δοκιμίων μετά από συντήρηση 28 ημερών έγινε σε πέντε (5) διαφορετικές ημερομηνίες όπως φαίνεται στον Πίνακα 12.

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: Συμβατικό κονίαμα μετά από συντήρηση 28 ημερών

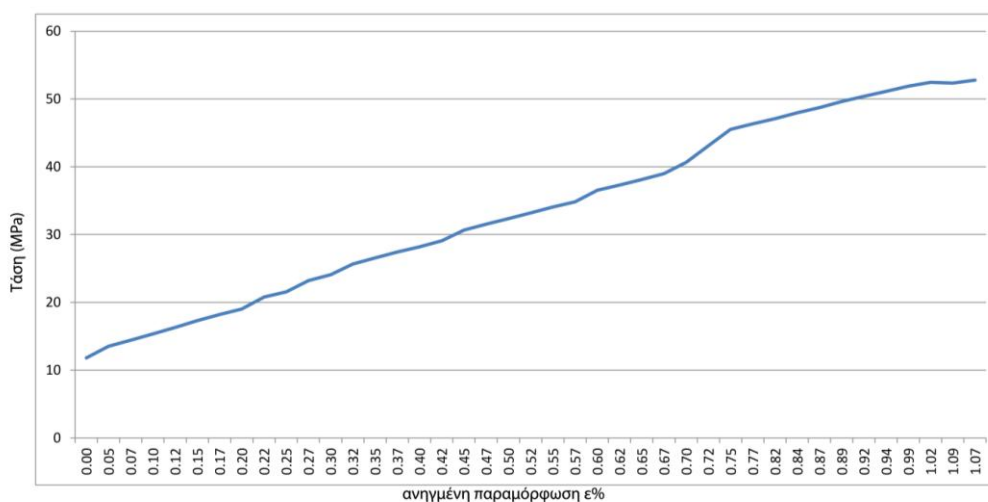
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΗΚΟΣ Χ ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΒΑΡΟΣ [g]	Η/Μ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	Η/Μ ΞΕΚΑΛΟΥ/ΤΟΣ	Ff [N]	Rf [N/mm ²]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Rf	Fc [N]	Rc [N/mm]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Rc
14	40,24*39,32	563,5	31/05/'16	28/06/'16	2770	7,0144	7,1692	84600	53,4686	54,9228
15	40.01*40.04	581	31/05/'16	28/06/'16	2710	6,9815		91100	56,8664	
16	40.05*39.91	580,5	31/05/'16	28/06/'16	2780	7,1404		87400	54,6798	
17	40.25*41.35	604	31/05/'16	28/06/'16	2980	7,5405		91000	54,6764	
18	40.29*40.00	573	01/06/'16	29/06/'16	3060	7,7199	7,2810	89950	55,8141	55,0396
19	40.16*39.84	583,5	01/06/'16	29/06/'16	2770	7,0564		90600	56,6259	
20	39.98*40.56	584,5	01/06/'16	29/06/'16	2740	7,0747		87100	53,7128	
21	40.37*39.40	571,5	01/06/'16	29/06/'16	2900	7,2792		85900	54,0055	
22	40.04*39.92	573,5	02/06/'16	30/06/'16	2900	7,4542	7,4642	86050	53,8352	53,7441
23	40.04*39.78	579,5	02/06/'16	30/06/'16	2830	7,2742		86050	54,0247	
24	39.83*39.16	572	02/06/'16	30/06/'16	2970	7,7555		80700	51,7393	
25	40.07*40.01	591	02/06/'16	30/06/'16	2870	7,3605		84000	52,3952	
26	39.90*39.91	582	02/06/'16	30/06/'16	3170	8,2343	7,6211	88150	55,3564	51,6527
27	40.05*39.94	589,5	02/06/'16	30/06/'16	2700	6,7063		89150	55,1135	
28	39.92*39.39	576,5	06/06/'16	04/07/'16	2950	7,6513		81100	51,5756	
29	39.91*39.19	574	06/06/'16	04/07/'16	3040	78.906		77400	49,4862	
30	39.83*40.06	579,5	06/06/'16	04/07/'16	2920	76.249	7,8566	81700	51,2039	54,2787
31	39.83*39.41	573,5	06/06/'16	04/07/'16	2810	73.377		86050	54,8194	
32	40.02*40.12	578,5	06/06/'16	04/07/'16	3110	80.059		82300	51,2580	
33	40.29*39.92	584	06/06/'16	04/07/'16	3000	75.686		84550	52,5685	
34	40.47*39.24	581,5	06/06/'16	04/07/'16	2930	71.550	7,8566	81250	51,1636	54,2787
35	40.00*40.13	576,5	06/06/'16	04/07/'16	3000	77.344		82100	51,1463	
36	40.16*39.25	568	07/06/'16	05/07/'16	3100	78.970		86400	54,8126	
37	40.16*39.63	576,5	07/06/'16	05/07/'16	3100	78.970		86300	54,2242	
38	40.28*40.00	582	07/06/'16	05/07/'16	3270	82.559	7,8566	86500	53,6867	54,2787
39	40.18*39.58	578,5	07/06/'16	05/07/'16	2900	73.765		86500	54,3914	
						ΓΕΝΙΚΟ Μ.Ο.	7,48			53,93

Παρακάτω θα κατασκευασθεί διάγραμμα τάσης (σ) – ανηγμένης παραμόρφωσης ($\epsilon\%$) για το κομμάτι 1 του δοκιμίου 14 με **εμβαδόν=1582 μm^2 , δύναμη θραύσης =83,5 KN= 83500 N και τάση θραύσης=52,77 MPa** (βλ. Πίνακα 13, Εικόνα 6).

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής Δοκιμίου 14

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [KN]	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ [mm ²]	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [Μpa]	Lo [mm]
14	83.5	1582	52.77	40.24

ΔΥΝΑΜΗ [KN]	ΔL [mm]	ΤΑΣΗ Μpa [N/mm ²]	Ανοιγμένη παραμόρφωση ε% [(ε=Δl/Lo)*100]
18.7	0	12	0.00
21.4	0.02	14	0.05
22.8	0.03	14	0.07
24.3	0.04	15	0.10
25.8	0.05	16	0.12
27.4	0.06	17	0.15
28.8	0.07	18	0.17
30.1	0.08	19	0.20
32.9	0.09	21	0.22
34.1	0.1	22	0.25
36.7	0.11	23	0.27
38.1	0.12	24	0.30
40.6	0.13	26	0.32
42	0.14	27	0.35
43.4	0.15	27	0.37
44.6	0.16	28	0.40
46	0.17	29	0.42
48.5	0.18	31	0.45
49.9	0.19	32	0.47
51.2	0.2	32	0.50
52.5	0.21	33	0.52
53.9	0.22	34	0.55
55.1	0.23	35	0.57
57.8	0.24	37	0.60
59	0.25	37	0.62
60.3	0.26	38	0.65
61.7	0.27	39	0.67
64.3	0.28	41	0.70
68.2	0.29	43	0.72
72	0.3	46	0.75
73.3	0.31	46	0.77
74.5	0.33	47	0.82
75.9	0.34	48	0.84
77.1	0.35	49	0.87
78.5	0.36	50	0.89
79.7	0.37	50	0.92
80.9	0.38	51	0.94
82.1	0.4	52	0.99
83	0.41	52	1.02
82.8	0.44	52	1.09
83.5	0.43	53	1.07



Εικόνα 6: Διάγραμμα τάσης(σ) - ανηγμένης παραμόρφωσης (ε%) Δοκιμίου 14 (28/06)

ΦΑΣΗ Β

B1) Θραύση δοκιμίων για επαναχρησιμοποίηση στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Κοσκίνιση της άμμου για την εύρεση της κατανομής μεγέθους κόκκων και την σχεδίαση της κοκκομετρικής καμπύλης

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις αντοχές κάμψης και θλίψης αρχικά, αποθηκεύθηκαν και στην συνέχεια θραύστηκαν με τη χρήση χαλύβδινης βαριοπούλας. Δεν χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Los Angeles διότι αυτή αυξάνει την ποσότητα παιπάλης και δεν μπορεί να ικανοποιήσει το απαιτούμενο μέγεθος κόκκων για την παρασκευή του κονιάματος. Η διαδικασία κοσκίνισης της άμμου και δημιουργίας κοκκομετρικής καμπύλης είναι η ίδια που ακολουθήθηκε στην πρώτη φάση.

B2) Σύνθεση κονιάματος αποτελούμενο κ.β από ένα μέρος ανακυκλωμένου τσιμέντου, τρία μέρη ξηρής χαλαζιακής άμμου, μισό μέρος πόσιμου νερού και 0.15 % ρευστοποιητή.

Η σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του αρχικού κονιάματος είναι η ίδια που ακολουθήθηκε στην πρώτη φάση με μόνη διαφορά την προσθήκη ρευστοποιητή για να επιτευχθεί συνοχή του μίγματος. Συγκεκριμένα η σύνθεση αποτελείται από ένα μέρος τσιμέντου, τρία μέρη ξηρής χαλαζιακής άμμου, μισό μέρος πόσιμου νερού και 0,15% κ.β. επί της μάζας του τσιμέντου υπερρευστοποιητή. Πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή μιας μήτρας η οποία αποτελείται από τρία δοκίμια κάθε φορά πρέπει να αναμιγνύονται 450 g τσιμέντο, 1350 g άμμου και 225 g νερό και 3 g υπερρευστοποιητή. (βλ. Πίνακα 14).

ΠΙΝΑΚΑΣ 14: Σύνθεση ανακυκλωμένου κονιάματος

ΝΕΡΟ [g]	ΤΣΙΜΕΝΤΟ [g]	ΑΜΜΟΣ [g]	ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ [g]
225	450	1350	3

B3) Παρασκευή και σκυροδέτηση 12 δοκιμών με διαστάσεις 40mm × 40mm × 160mm

Η διαδικασία για την παρασκευή των 12 δοκιμών της παρούσας φάσης είναι η ίδια με αυτή της 1ης φάσης. Αρχικά κατά την παρασκευή του κονιάματος για την σκυροδέτηση της 1ης μήτρας δεν είχε χρησιμοποιηθεί υπερρρευστοποιητής με αποτέλεσμα στην δόνηση της μήτρας να μην επιτυγχάνεται συνοχή του αναμίγματος. Για αυτόν τον λόγο στα κονιάματα των υπολοίπων δοκιμών προστέθηκε υπερρρευστοποιητής.

B4) Δοκιμή αντοχών σε θλίψη και κάμψη 7 ημερών σε 4 δοκίμια και 28 ημερών σε 8 δοκίμια

Κατά την διάρκεια της φάσης αυτής προσδιορίστηκε η αντοχή θλίψης 4 δοκιμών μετά από συντήρηση 7 ημερών και 8 δοκιμών μετά από συντήρηση 28 ημερών με τη χρήση συσκευής κάμψεως. Τα δοκίμια Νο 1, 5 και 6 που στον Πίνακα 15,16 φέρουν το σύμβολο * είναι χωρίς ρευστοποιητή και δεν λήφθηκαν υπόψη στους τελικούς υπολογισμούς.

i. Μετά από συντήρηση 7 ημερών σε 4 δοκίμια

Παρασκευή των 4 δοκιμών μετά από συντήρηση 7 ημερών

Πίνακας 15: Ανακυκλωμένο κονίαμα μετά από συντήρηση 7 ημερών

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΗΚΟΣ Χ ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΒΑΡΟΣ [g]	Η/Μ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	Η/Μ ΞΕΚΑΛΟΥ/ΤΟΣ	Ff [N]	Rf [N/mm ²]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Rf	Fc [N]	Rc [N/mm]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Rc
1*	40.67*39.52	516.5	08/11/'16	15/11/'16	0	0	-	0	0	-
2	40.29*42.59	550	08/11/'16	15/11/'16	3160	7.97	7.92	78250	45.6	46.59
3	40.25*40.04	546.8	08/11/'16	15/11/'16	3160	8		77250	47.93	
4	40.00*39.69	544.5	08/11/'16	15/11/'16	3020	7.79		73400	46.23	

ii. Μετά από συντήρηση 28 ημερών σε 8 δοκίμια.

Παρασκευή των 26 δοκιμών μετά από συντήρηση 28 ημερών

Πίνακας 16: Ανακυκλωμένο κονίαμα μετά από συντήρηση 28 ημερών

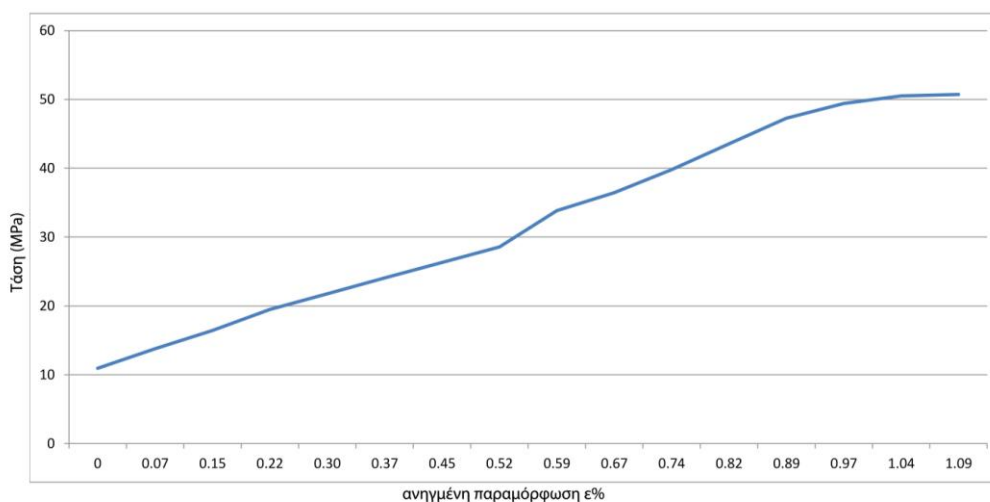
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΗΚΟΣ Χ ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΒΑΡΟΣ [g]	Η/Μ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	Η/Μ ΞΕΚΑΛΟΥ/ΤΟΣ	Ff [N]	Rf [N/mm ²]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Rf	Fc [N]	Rc [N/mm]	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Rc
5*	40.14*40.88	501.5	08/11/'16	06/12/'16	1680	4.29	-	0	0	-
6*	40.71*40.40	521.5	08/11/'16	06/12/'16	1770	4.33	-	25100	15.26	-
7	40.35*42.85	561	08/11/'16	06/12/'16	3340	8.4	7,51	88150	50.98	51,84
8	40.25*41.33	543	08/11/'16	06/12/'16	3080	7.79		83550	50.22	
9	40.70*40.64	555.5	08/11/'16	06/12/'16	2800	6.85		90050	54.44	
10	40.46*40.57	553	08/11/'16	06/12/'16	2850	7.1		89300	54.4	
11	40.84*41.35	560.5	08/11/'16	06/12/'16	3150	7.63		83650	49.53	
12	40.11*40.18	544	08/11/'16	06/12/'16	2850	7.29		82950	51.47	

Παρακάτω θα κατασκευασθεί διάγραμμα τάσης (σ) – ανοιγμένης παραμόρφωσης ($\epsilon\%$) για το κομμάτι 1 του δοκιμίου 7 με **εμβαδόν 1729 mm², φορτίο θραύσης 87,7 KN= 87700 N και τάση θραύσης 50,72 MPa.** (βλ. Πίνακα 17, Εικόνα 7).

ΠΙΝΑΚΑΣ 17: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής Δοκιμίου 7

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [kN]	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ [mm ²]	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ [MPa]	Lo [mm]
7	87.7	1729	50.72	40.35

ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΔL [mm]	ΤΑΣΗ MPa [N/mm ²]	Ανοιγμένη παραμόρφωση ε% [(ε=Δl/Lo)*100]
18.9	0	11	0
23.8	0.03	14	0.07
28.4	0.06	16	0.15
33.7	0.09	19	0.22
37.6	0.12	22	0.30
41.6	0.15	24	0.37
45.5	0.18	26	0.45
49.4	0.21	29	0.52
58.5	0.24	34	0.59
63	0.27	36	0.67
68.8	0.3	40	0.74
75.3	0.33	44	0.82
81.7	0.36	47	0.89
85.4	0.39	49	0.97
87.3	0.42	50	1.04
87.7	0.44	51	1.09



Εικόνα 7: Διάγραμμα τάσης(σ) - ανηγμένης παραμόρφωσης (ε%) Δοκιμίου 7 (06/12)

3.4. Αποτελέσματα

Συνολικά τριανταεννέα (39) δοκίμια που διέφεραν σε μέρες ωρίμανσης (7 και 28 ημέρες) και υλικό (συμβατικό κονίαμα και ανακυκλωμένο) κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν και τα αποτελέσματα αυτού του πειραματικού μέρους παρατίθενται συνοπτικά στον πίνακα 18. Οι γραμμές αναφέρονται στους μέσους όρους αντοχών σε θλίψη κάμψη σε δυο διαφορετικές καταστάσεις ωρίμανσης, επτά (7) και είκοσι οχτώ (28) ημερών ενώ οι στήλες αφορούν το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα δοκίμια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 18: Σύνοψη χαρακτηριστικών αντοχών συμβατικού και ανακυκλωμένου κονιάματος

	Συμβατικό Κονίαμα	Ανακυκλούμενο κονίαμα
Μέσος όρος αντοχής σε θλίψη δοκιμίων στις 7 ημέρες (MPa)	43.68 MPa	46.59 MPa
Μέσος όρος αντοχής σε θλίψη δοκιμίων στις 28 ημέρες (MPa)	53.93 MPa	51.84 MPa
Μέσος όρος αντοχής σε κάμψη δοκιμίων στις 7 ημέρες (MPa)	6.66 MPa	7.92 MPa
Μέσος όρος αντοχής σε κάμψη δοκιμίων στις 28 ημέρες (MPa)	7.48 MPa	7.51 MPa

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι συγκρίνοντας τις τιμές που αντοχών μεταξύ συμβατικού και του ανακυκλωμένου σκυροδέματος παρατηρούνται τα εξής:

- η χαρακτηριστική **θλιπτική αντοχή** συνολικά 26 δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα και 8 δοκιμίων από ανακυκλωμένο, **28 ημερών ωρίμανσης** παρουσιάζει διαφορά 2 MPa. Πιο συγκεκριμένα ο μέσος όρος αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα είναι 53.93 MPa ενώ του ανακυκλωμένου 51.84 MPa.
- η χαρακτηριστική **θλιπτική αντοχή** συνολικά 13 δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα και 4 δοκιμίων από ανακυκλωμένο, **7 ημερών ωρίμανσης** παρουσιάζει διαφορά σχεδόν 3 MPa με αυτή του ανακυκλωμένου να υπερβαίνει αυτή του συμβατικού. Πιο συγκεκριμένα ο μέσος όρος αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα είναι 43.68 MPa ενώ του ανακυκλωμένου 46.59 MPa.
- η **αντοχή σε κάμψη** συνολικά 26 δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα και 8 δοκιμίων από ανακυκλωμένο, **28 ημερών ωρίμανσης** παρουσιάζει ελάχιστη διαφορά 0,03 MPa. Πιο συγκεκριμένα ο μέσος όρος αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων από συμβατικό είναι 7.48 MPa ενώ του ανακυκλωμένου 7.51 MPa.
- η **αντοχή σε κάμψη** συνολικά 13 δοκιμίων από συμβατικό σκυρόδεμα και 4 δοκιμίων από ανακυκλωμένο, **7 ημερών ωρίμανσης** παρουσιάζει διαφορά 1.26 MPa. Πιο συγκεκριμένα ο μέσος όρος αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων από συμβατικό είναι 6.66 MPa ενώ του ανακυκλωμένου 7.92 MPa.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της αντοχής του ανακυκλωμένου σκυροδέματος συγκριτικά με το συμβατικό με σκοπό την επανάχρηση του αφού αποτελεί κατασκευαστικό απόβλητο που επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον.

Μέσα από εκτενή πειραματικό έλεγχο μελετήθηκε η συμπεριφορά των δύο κονιαμάτων.

Κατά τη σύγκριση αντοχών μεταξύ του συμβατικού και του ανακυκλωμένου σκυροδέματος παρατηρείται ό,τι η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή του αντίστοιχου συμβατικού.

Πιο συγκεκριμένα η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος 28 ημερών ωρίμανσης είναι 53.93 MPa ενώ του ανακυκλωμένου 51.84 MPa. Παρόμοια η διαφορά αλλά με μικρότερες αντοχές είναι οι τιμές που παρουσίασαν τα δοκίμια με ωρίμανση 7 ημερών.

Μικρές διαφορές παρουσιάζονται και στην αντοχή σε κάμψη όπου όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον πίνακα 18, το συμβατικό σκυρόδεμα έχει αντοχή σε κάμψη 7.48 MPa ενώ το ανακυκλωμένο έχει 7.51 MPa.

Η διαπραγμάτευση του θέματος ανέδειξε την σημαντικά μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών αντοχής σε κάμψη και θλίψη του ανακυκλωμένου συγκριτικά με το συμβατικό.

Παρόλο που οι τιμές του πειράματος ήταν ικανοποιητικές πρέπει να αναλογιστούμε ότι το πείραμα έγινε στο ιδανικό περιβάλλον του εργαστηρίου και η προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι ομοιογενής αφού προέρχεται από δοκίμια του συμβατικού σκυροδέματος. Στην πραγματικότητα τα ανακυκλωμένα αδρανή προέρχονται είτε από κατεδαφίσεις, που συνήθως δεν είναι καθαρά και χρησιμοποιούνται σε έργα οδοποιίας, είτε από αδρανή που προέρχονται από απορρίμματα βιομηχανιών, τα οποία είναι σχετικά καθαρά και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια και παρουσιάζουν μεγαλύτερο φάσμα χρήσης.

Χρήζει περαιτέρω μελέτης και έρευνας σε μεγαλύτερη κλίμακα αν το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα μπορεί να αντικαταστήσει το συμβατικό όσον αφορά το στατικό φορέα ενός κτιρίου. Μπορεί όμως να αντικαταστήσει μεγάλο μέρος των κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται στην οικοδομή όπως κονιάματα τοιχοποιίας, επιχρισμάτων, γεμίσματα δαπέδων, κτλ.

Η έννοια της ανακύκλωσης γίνεται όλο και πιο επίκαιρη αφού ωφελεί τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και την οικονομία. Όμως, όπως και μετά τους βομβαρδισμούς των παγκοσμίων πολέμων η επαναχρησιμοποίηση-ανακύκλωση υλικών δόμησης υπαγορεύονταν από περιβαλλοντικούς λόγους και το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει και σήμερα ώστε να αποφευχθεί η μετατροπή της μοντέρνας τσιμεντούπολης σε μια απέραντη χωματερή.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Κ. Κολοβός, *Βελτίωση εψησιμότητας μίγματος πρώτων υλών παραγωγής κλίνκερ*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ (2003)
- [2]. <http://mycourses.ntua.gr>
- [3]. Ηλεκτρονικό Μουσείο Πολιτικού Μηχανικού
- [4]. Αθ. Ρούτουλας, *Επίδραση ορυκτών προσθέτων και αναστολέων διάβρωσης στην αντιδιαβρωτική προστασία οπλισμών σκυροδέματος*, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου (2006)
- [5]. Ε. Κανιτάκη, *Οι κατασκευές από σκυρόδεμα είναι και αειφόρες και πράσινες Concrete structures are both sustainable and green*, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος (2009)
- [6]. INTERMPETON, ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε., (2010)
- [7]. Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΕ-97), 3^η έκδοση, Ιανουάριος 2000, Αθήνα, Νοέμβριος (1997)
- [8]. Κ. Τσακαλάκης, *Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010
- [9]. European Committee for Standardization EN 197-1, 2000
- [10]. Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής, *Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου*, 1^η εκδ., Ε.Μ.Π., Αθήνα, (1999)
- [11]. Χ. Τ. Γκαλμπένης, *Διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης οικοδομικών απορριμμάτων στην παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ (2008)
- [12]. Bye G.C., *Portland Cement*, 2nd Edition, (1999)
- [13]. Γ. Παρισάκης, Β. Κασελούρη, Σ. Τσίμας, Χ. Φτίκος, *“Χημεία και Τεχνολογία Τσιμέντου”*, Εκδ. Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1992
- [14]. Α. Τριανταφύλλου, *Διαστασιολόγηση στοιχείων ενισχυμένων σε διάτμηση με φύλλα από FRPs*, vol1(2), (1998)
- [15]. IMPC MANUAL
- [16]. Π.Τσούτσικα, Τ. Σολδάτος, Α.Τσιραμπίδης, Α. Κορωναίος, *Συσχέτιση Πετρογραφικών και Φυσικομηχανικών ιδιοτήτων αδρανών πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία*, 2ο Συνέδριο της επιτροπής οικονομικής γεωλογίας, ορυκτολογίας & γεωχημείας, Θεσσαλονίκη (2005)
- [17]. ΤΕΕ, *Οδηγοί Δομικών Υλικών*
- [18]. Κ. Γεωργίου, *Ανθεκτικότητα σκυροδέματος και ελληνικές πρακτικές κατασκευής* (2004)
- [19]. Σ. Νταμπίζιας, Π. Χρυσοστομίδης, Φ. Μάλτζαρης, Ε. Καρατάσου. *Σκληρά αδρανή στον Ελληνικό χώρο. Πετρολογικοί τύποι και ορυκτολογικά-ιστολογικά χαρακτηριστικά. Ημερίδα «Αδρανή πετρώματα και δομικοί λίθοι»*, Θεσσαλονίκη, (2003)

- [20]. Π.Α. Μιχάλης Σωτήρης, Χ. Δημητρίου, Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος, Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος (2007)
- [21]. www.skyrodemanet.gr
- [22]. Α. Κορωναίος, Γ. Πουλάκος, Τεχνικά Υλικά, Εκδόσεις Συμμετρία, ISBN: 978-960-266-346-2, Ενημέρωση 05/2015
- [23]. Ε. Δημητρακοπούλου, Μ. Μπασδεκη, Υπερρευστο Σκυρόδεμα: Ιδιότητες και Εφαρμογή αυτού ως μέσο ενίσχυσης “ 13ο Φοιτητικό Συνέδριο : Επισκευές Κατασκευών ” Πάτρα, Φεβρουάριος 2007
- [24]. Ν. Διαμαντώνης, «Ιδιότητες Πάστας Τσιμέντου σε Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα», Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Χημικών Επιστημών, ΕΜΠ, Αθήνα, (2008)
- [25]. Α.Ε. Σάββα, Ε. Β. Σκαρλάτος, Σκυροδέματα με Ανακυκλωμένα Αδρανή, Μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σε Cl-
- [26]. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (1997)
- [27]. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων ΠΕΤΕΠ, www.ggde.gr
- [28]. SIKA, <http://grc.sika.com/>
- [29]. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Προεδρικών Διάταγμα 244, 1980