



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**



ΑΡΑΜΠΙΑΤΖΗ ΕΛΕΝΗ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μωρέττη Μαρίνα

Βόλος, 2015



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 13705/1
Ημερ. Εισ.: 04-05-2015
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2015
ΑΡΑ

Στην μαμά μου....

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου Μωρέττη Μαρίνα, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο που ανταποκρίνεται πλήρως στα επιστημονικά μου ενδιαφέροντα καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγησή της καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Φίλιππο Περδικάρη και τον Αλέκο Κουτσελίνη για την τεράστια και πολύτιμη βοήθειά τους αλλά και για τον χρόνο που αφιέρωσαν σε όλη την διάρκεια των πειραματικών μας δοκιμών. Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Χάρη Παπαθεοχάρη για την καθοδήγηση και για τις πολύτιμες συμβουλές του στην επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Φυσικά δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω το ΕΚΕΤ (Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου) της εταιρείας Lafarge στην Αθήνα για την μελέτη και αποστολή της χημικής σύστασης της ιπτάμενης τέφρας και ιδιαίτερα τον Χαράλαμπο Κουρή διότι μερίμνησε προσωπικά ώστε να μας χορηγηθεί η τέφρα και να γίνει η ανάλυση της χημικής της σύστασης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γιώργο και Λίτσα, τον αδερφό μου Δημήτρη και τον αρραβωνιαστικό μου Δημήτρη για την στήριξη και την αγάπη τους.

Περίληψη.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων αξιοποίησης βιομηχανικών παραπροϊόντων και ανακυκλωμένων υλικών στην παραγωγή σκυροδέματος. Η μελέτη αξιοποίησης των συγκεκριμένων υλικών θεωρήθηκε απαραίτητη καθώς στην Ελλάδα υπάρχουν τεράστιες ποσότητες που παραμένουν ανεκμετάλλευτες και επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διερεύνησης χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα που προέρχεται από τον ατμοηλεκτρικό σταθμό Αγίου Δημητρίου Κοζάνης. Τα σκυροδέματα που παράχθηκαν είχαν ποσοστό υποκατάστασης 15% και 30% κ.β. τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα και μετρήθηκαν οι αντοχές τους σε θλίψη και εφελκυσμό στις 28 ημέρες.

Στο θεωρητικό μέρος αρχικά αναφέρονται γενικά χαρακτηριστικά για το σκυρόδεμα και τα συστατικά του καθώς επίσης και στοιχεία για τους μηχανισμούς φθοράς του σκυροδέματος. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η ανάγκη παρασκευής "πράσινου" σκυροδέματος το οποίο είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Έπειτα, αναλύονται μερικοί από τους τρόπους παρασκευής ενός τέτοιου σκυροδέματος, όπως π.χ. χρησιμοποίηση τεφρών, σκωριών, φθαρμένων ελαστικών και ανακυκλωμένων τμημάτων σκυροδέματος. Κατόπιν, αναφέρονται μερικά έργα και εφαρμογές στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κάποια από τα παραπάνω υλικά και τέλος παραθέτονται πειραματικές δοκιμές άλλων ερευνητών.

Το πειραματικό μέρος το έλαβε χώρα στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Όλα τα στάδια παρασκευής του σκυροδέματος καθώς και των δοκιμών που ακολούθησαν πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο. Στο πειραματικό μέρος γίνεται λεπτομερής αναφορά σε κάθε διαδικασία ξεχωριστά. Στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα. Τέλος γίνεται η σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Συμπερασματικά οι ιπτάμενες τέφρες μπορούν να υποκαταστήσουν αξιόπιστα μέρος των τσιμέντων στην παρασκευή σκυροδέματος με συγκρίσιμες μηχανικές ιδιότητες με αυτές του κοινού σκυροδέματος και προσφέροντας ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΕΡΙΛΗΨΗ

1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Φυσική δομή του σκυροδέματος.....	1
1.3. Συστατικά του σκυροδέματος.....	2
1.3.1. Τσιμέντο.....	2
1.3.1.1. Κωδικοποίηση του τσιμέντου.....	4
1.3.1.2. Σύσταση του τσιμέντου.....	6
1.3.1.3. Ενυδάτωση του τσιμέντου.....	8
1.3.1.4. Σύνθετα τσιμέντα.....	9
1.3.1.5. Ιδιότητες του τσιμέντου.....	10
1.3.2. Αδρανή υλικά.....	12
1.3.2.1. Κατηγορίες αδρανών υλικών.....	14
1.3.2.2. Ιδιότητες και μέθοδοι ελέγχου.....	15
1.3.2.3. Αλκαλοπυριτική δράση.....	16
1.3.3. Νερό ανάμιξης.....	17
1.3.4. Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα (admixtures).....	18
1.3.5. Πρόσθετα συστατικά (additions).....	19
1.4. Σύνθεση σκυροδέματος.....	21
1.5. Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος.....	23
1.5.1. Εργασιμότητα.....	23
1.5.2. Αντοχή.....	24
1.5.3. Πορώδες.....	24
1.5.4. Διαπερατότητα.....	26
2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	28
2.1. Οπλισμένο σκυρόδεμα.....	28
2.2. Ανθεκτικότητα σκυροδέματος.....	31
2.3. Μηχανισμοί φθοράς του σκυροδέματος.....	33
2.3.1. Διάβρωση οπλισμού.....	34
2.3.1.1. Γενικά για την διάβρωση.....	34
2.3.1.2. Διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα.....	34
2.3.1.3. Μηχανισμός της διάβρωσης.....	36
2.3.1.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση οπλισμού.....	38
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ “ΠΡΑΣΙΝΟ” ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	43
3.1. Περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος.....	43

3.1.1.	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.....	43
3.1.2.	Άλλες επιβλαβείς εκπομπές στην ατμόσφαιρα.....	44
3.1.3.	Ρύπανση των νερών.....	45
3.2.	Κατανάλωση ενέργειας από την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος...	45
3.3.	“Πράσινο” σκυρόδεμα.....	46
4.	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ....	49
4.1.	Ιπτάμενη τέφρα.....	49
4.1.1.	Τι είναι η ιπτάμενη τέφρα.....	49
4.1.2.	Κατάταξη ιπτάμενων τεφρών.....	50
4.1.3.	Παραγωγή και αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας.....	53
4.1.4.	Αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε τσιμεντοβιομηχανίες του εξωτερικού.....	56
4.1.5.	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την χρήση της ιπτάμενης τέφρας.....	58
4.1.6.	Κανονισμοί και διατάξεις.....	61
4.1.6.1.	Απαιτήσεις χημικής σύστασης.....	61
4.1.6.2.	Φυσικομηχανικές απαιτήσεις.....	62
4.1.6.3.	Σχετικά πρότυπα.....	63
4.2.	Υγρή τέφρα.....	66
4.2.1.	Παραγωγή υγρής τέφρας (Τέφρα πυθμένα).....	66
4.2.2.	Αξιοποίηση υγρής τέφρας.....	66
5.	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΚΩΡΙΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ.....	69
5.1.	Σκωρίες χαλυβουργίας.....	69
5.1.1.	Ιστορική αναδρομή.....	69
5.1.2.	Χημική σύσταση της σκωρίας.....	69
5.1.3.	Τύποι σκωρίας.....	70
5.1.4.	Φυσικά χαρακτηριστικά και χρήσεις των διαφόρων τύπων σκωρίας....	72
5.1.5.	Σκωρία υψικαμίνων.....	73
5.1.6.	Σκωρία φούρνων χάλυβα (Steel Furnace Slag).....	73
5.1.7.	Αξιοποίηση της σκωρίας.....	76
5.1.7.1.	Ασφαλτούχο σκυρόδεμα.....	76
5.1.7.2.	Κατασκευή βάσεων.....	76
5.1.7.3.	Οικοδομικός τομέας.....	76
5.1.7.4.	Σιδηρόδρομοι.....	76
5.1.7.5.	Κατασκευή στεγάστρων.....	77
5.1.7.6.	Σκωρία από φούρνους με αέρα υπό πίεση ως συστατικό στο στερεοποιημένο υδραυλικό τσιμέντο.....	77
5.1.7.7.	Παραγωγή σκληρών αδρανών οδοποιίας.....	77
5.1.7.8.	Χρήση σκωρίας στο σκυρόδεμα.....	77

5.1.7.9. Παραγωγή σκωριοτισμένου.....	78
5.1.7.10. Ειδικές χρήσεις.....	79
5.1.8. Αξιοποίηση σκωρίας κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου.....	79
5.1.9. Πλεονεκτήματα από την χρήση των σκωριών χαλυβουργίας.....	81
5.2. Σκωρίες σιδηρονικελίου.....	83
5.2.1. Παραγωγή σκωριών σιδηρονικελίου.....	83
5.2.2. Αξιοποίηση σκωριών σιδηρονικελίου.....	84
6. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ...86	
6.1. Γενικά στοιχεία.....	86
6.2. Στοιχεία σχετικά με τα φθαρμένα ελαστικά στην Ε.Ε.....	88
6.3. Ελληνική νομοθεσία σχετικά με τα φθαρμένα ελαστικά οχημάτων.....	91
6.4. Στατιστικά στοιχεία ποσοτήτων και αξιοποίησης φθαρμένων ελαστικών στην Ελλάδα.....	92
6.5. Χρήσεις φθαρμένων ελαστικών	95
6.6. Χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε προϊόντα τσιμέντου.....	98
6.6.1. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος τσιμέντου/ τσιμεντοκονιάματος.....	98
6.6.1.1. Ειδικό βάρος.....	98
6.6.1.2. Εργασιμότητα – Κάθιση.....	99
6.6.1.3. Περιεχόμενος αέρας.....	99
6.6.2. Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος/τσιμεντοκονιάματος.....	100
6.6.2.1. Θλιπτική – Εφελκυστική αντοχή.....	100
6.6.2.2. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.....	102
6.6.2.3. Αντίσταση σε κρούση και δυσθραυστότητα.....	104
6.6.2.4. Ηχομόνωση και θερμομόνωση.....	105
6.6.2.5. Αντίσταση σε πυρκαγιά.....	106
6.6.2.6. Υδατοαπορρόφηση.....	106
6.6.2.7. Αντίσταση σε ρηγμάτωση – συστολή ξήρανσης.....	106
6.6.2.8. Αντίσταση σε κύκλους ψύξης – απόψυξης.....	107
6.6.2.9. Αντίσταση στη διείδυση χλωριοϊόντων.....	107
6.6.2.10. Μικροσκοπική παρατήρηση.....	108
6.7. Χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε προϊόντα ασφάλτου.....	108
6.7.1. Υγρή μέθοδος (Προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού στην ασφάλτο).....	109
6.7.1.1. Μεθοδολογία.....	109
6.7.1.2. Ιδιότητες ασφαλτομιγμάτων με χρήση της υγρής μεθόδου.....	109
6.7.2. Ξηρή μέθοδος (Προσθήκη ελαστικού στα αδρανή).....	113
6.7.2.1. Θερμά ασφαλτομίγματα.....	113
6.7.2.2. Ψυχρά ασφαλτομίγματα.....	113

7. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ – ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	115
7.1. Η ανάγκη της ανακύκλωσης.....	115
7.2. Μέθοδοι ανακύκλωσης παλαιών σκυροδεμάτων.....	117
7.2.1. Αυτοφερόμενα συγκροτήματα ανακύκλωσης.....	117
7.2.2. Μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης.....	118
7.3. Διαδικασία παραγωγής.....	120
7.4. Επανάκτηση υλικών από υπολείμματα σκυροδέματος.....	123
7.4.1. Επανάκτηση ανοικτού κυκλώματος.....	123
7.4.2. Επανάκτηση κλειστού κυκλώματος.....	124
7.5. Ανακύκλωση υπολειμμάτων σκυροδέματος στη βιομηχανία προκατασκευών.....	125
7.6. Οικονομική θεώρηση.....	126
7.7. Η ανακύκλωση στην Ελλάδα.....	127
8. “ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΕΣ” ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΕΛΛΑΔΑΣ....	129
8.1. Τεχνικά “οικολογικά” έργα σε Ελλάδα και εξωτερικό.....	129
8.1.1. Κατασκευή φράγματος από τειροσκυρόδεμα, Πλατανόβρυση Δράμας (Ελλάδα).....	129
8.1.2. Οι πύργοι “Κάστωρ και Πολυδεύκης”, (Γερμανία).....	131
8.1.3. Κτίριο The Solaire, (Νέα Υόρκη, ΗΠΑ).....	132
8.1.4. Φράγμα Beni Haroun, (Αλγερία).....	133
8.1.5. Ο αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, (Αυστραλία).....	134
8.1.6. Φράγμα Νέας Βικτώριας, (Αυστραλία).....	135
8.1.7. Φράγμα Salto Caxias, (Βραζιλία).....	135
8.1.8. Σιλό στο Βέλγιο.....	136
8.1.9. Φράγμα Puylaurent στη Lozère, (Γαλλία).....	136
8.1.10. Ανατολική Γέφυρα, (Δανία).....	137
8.1.11. Πύργος ψύξης σταθμού παραγωγής ενέργειας, (Γερμανία).....	138
8.1.12. Ο πύργος Πικάσο, (Ισπανία).....	138
8.1.13. Κυματοθραύστες στο Cobbolds Point, (Μεγάλη Βρετανία).....	139
8.1.14. Φράγμα Klong Tha Dan, (Ταϊλάνδη).....	139
8.1.15. Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, (ΗΠΑ).....	140
8.1.16. Φράγμα Olivenhain, Καλιφόρνια, (ΗΠΑ).....	141
8.1.17. Φράγμα Upper Stillwater, Γιούτα, (ΗΠΑ).....	141
8.1.18. Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, (Ελλάδα).....	142
8.2. Εφαρμογές για την παραγωγή “πράσινου” σκυροδέματος.....	143
8.2.1. Η αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας στη βιομηχανία TITAN, (Ελλάδα).....	143
8.2.2. Σκυρόδεμα με μεγάλο όγκο ιπτάμενης τέφρας, σκυρόδεμα Ecosmart, (Καναδάς).....	144
8.2.3. Πράσινο σκυρόδεμα με χρήση οξειδίου του μαγνησίου.....	145

8.2.4.	Παραγωγή σκυροδέματος με ελληνικό φλοιό ρυζιού (ΤΦΡ).....	146
8.2.5.	Προσπάθεια μείωσης του CO ₂ που εκπέμπουν οι τσιμεντοβιομηχανίες Lafarge και Calera.....	147
9.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΛΛΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΩΝ.....	149
9.1.	Δοκιμές σε άοπλα στοιχεία.....	149
9.1.1.	Περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές.....	149
9.1.2.	Αντοχή σε θλίψη.....	151
9.1.3.	Αντοχή σε εφελκυσμό.....	157
9.1.4.	Αντοχή σε κάμψη.....	159
9.1.5.	Μέτρο ελαστικότητας και μέτρο διάτμησης.....	160
9.1.6.	Αντοχή σε θραύση.....	165
9.2.	Δοκιμές σε οπλισμένα στοιχεία.....	166
9.2.1.	Περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές.....	166
9.2.2.	Αντοχή σε κάμψη.....	167
9.3.	Συγκριτική μελέτη άοπλων στοιχείων.....	174
9.4.	Συγκριτική μελέτη οπλισμένων στοιχείων.....	177
10.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	179
10.1.	Εισαγωγή.....	179
10.2.	Χρησιμοποιούμενα υλικά.....	180
10.3.	Διαδικασία παρασκευής δοκιμίων.....	182
10.3.1.	Υπολογισμός αναλογιών για την σύνθεση του σκυροδέματος.....	182
10.3.2.	Παρασκευή σκυροδέματος.....	186
10.3.3.	Δοκιμή κάθισης.....	188
10.3.4.	Παρασκευή δοκιμίων.....	191
10.3.4.1.	Συμπύκνωση δοκιμίων.....	191
10.3.4.2.	Συντήρηση δοκιμίων.....	193
10.4.	Διαδικασία θραύσης δοκιμίων.....	194
10.4.1.	Προετοιμασία κυβικών δοκιμίων.....	194
10.4.2.	Προετοιμασία κυλινδρικών δοκιμίων.....	199
10.4.3.	Θλιπτική δοκιμή κυβικών δοκιμίων.....	200
10.4.4.	Εφελκυστική δοκιμή κυλινδρικών δοκιμίων.....	203
10.5.	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	206
10.5.1.	Αποτελέσματα κυβικών δοκιμίων.....	206
10.5.2.	Αποτελέσματα κυλινδρικών δοκιμίων.....	212
10.5.3.	Μετατροπή των θλιπτικών αντοχών κύβων $f_{c,cube}$ σε θλιπτικές αντοχές κυλίνδρων $f_{c,cylinder}$	216
10.6.	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	218
10.7.	Συμπεράσματα.....	229

10.8. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά της βιβλιογραφίας.....	230
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	234
11.1. Συμπεράσματα.....	234
11.2. Μελλοντική έρευνα.....	235
12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	236

1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

1.1. Γενικά.

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό, το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού και το οποίο στερεοποιείται με την χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στη μάζα του τα αδρανή υλικά (Σωτηριάδης, 2011). Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα (χαλίκια). Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206, (2000), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων συστατικών (βελτιωτικά πρόσμικτα και πρόσθετα συστατικά) τα οποία τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος (Γκαβέλα, 2009).

Η σύσταση και οι ιδιότητες του σκυροδέματος ποικίλουν πολύ. Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί η διακύμανση της πυκνότητάς του η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 800 έως 4000 Kg/m³, της τελικής θλιπτικής αντοχής από 1 έως 140 MPa και της διαπερατότητας σε αέρια, η οποία μπορεί να είναι από μεγάλη έως ελάχιστη (Ρούτουλας, 1999).

Για την παρασκευή σκυροδέματος καλής ποιότητας απαιτείται η καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του, καθώς, επίσης, και η παρασκευή, διάστρωση και συντήρηση αυτού σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στην Ελλάδα, σχετικές λεπτομερείς οδηγίες υπάρχουν στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97), όπου επίσης δίνονται πολλές πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος (Σωτηριάδης, 2011).

1.2. Φυσική δομή του σκυροδέματος.

Το σκυρόδεμα είναι ένα εξαιρετικά ετερογενές και σύνθετο στη δομή υλικό, και συνεπώς είναι δύσκολο να δημιουργηθούν μοντέλα της δομής του, από τα οποία να είναι δυνατή μια αξιόπιστη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υλικού. Σε μακροσκοπικό επίπεδο (δηλαδή με γυμνό μάτι), μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα υλικό δύο φάσεων, αποτελούμενο από αδρανή τα οποία είναι διασκορπισμένα στη μάζα της τσιμεντόπαστας. Σε μικροσκοπικό επίπεδο (ορατό με μικροσκόπιο) αναγνωρίζεται και μία τρίτη φάση –η μεταβατική ζώνη, η οποία είναι η διεπιφάνεια μεταξύ των αδρανών και της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας, και αποτελεί ένα λεπτό κέλυφος πάχους περίπου 10-50 i m γύρω από τα αδρανή. Κάθε φάση, από τις τρεις

προηγούμενες, μπορεί να θεωρηθεί από μόνη της περαιτέρω σύνθετη. Επιπλέον, η τσιμεντόπαστα και η μεταβατική ζώνη υπόκεινται σε αλλαγές με τον χρόνο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να συμπεριφέρεται σαν ένα ζωντανό σύστημα.

Σε κάθε στάδιο της ενυδάτωσης του τσιμέντου η τσιμεντόπαστα αποτελείται από στερεά προϊόντα ενυδάτωσης, τα οποία ονομάζονται πήγμα, από κρυστάλλους υδροξειδίου του ασβεστίου, άνυδρο τσιμέντο και χώρο τον οποίο καταλαμβάνει το νερό που είχε προστεθεί για την ενυδάτωση του τσιμέντου. Το πήγμα του τσιμέντου αποτελείται από σωματίδια, ενώ τα κενά τα οποία υπάρχουν ονομάζονται πόροι του πήγματος.

Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικά αδρανή –αν και αυτό αμφισβητείται από πολλούς ερευνητές- σε αντίθεση με το νερό και το τσιμέντο στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του σκυροδέματος. Τα αδρανή καταλαμβάνουν το 60-80% του όγκου και επιδρούν στο ειδικό βάρος, στο μέτρο ελαστικότητας, στη σταθερότητα των διαστάσεων και στην αντοχή του υλικού σε διάρκεια. Τα μεγάλοι μεγέθους αδρανή είναι συνήθως μεγαλύτερα από 4.75 mm, ενώ τα λεπτότερα έχουν εύρος διακύμανσης από 75μm – 4.75mm.

Η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν το σκυρόδεμα είναι σημαντική για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του σκυροδέματος ως παραγόμενου προϊόντος. Η αντοχή σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητά του επειδή αυτή συνδέεται άμεσα με τη δομή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας δίνοντας έτσι και μια συνολική εικόνα της ποιότητας του σκυροδέματος (Τεταγιώτη, 2011).

1.3. Συστατικά του σκυροδέματος.

1.3.1. Τσιμέντο.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, (2000), το τσιμέντο είναι μία υδραυλική (κονία) συνδετική ύλη, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό το οποίο, όταν αναμειχθεί με νερό, σχηματίζει έναν πολτό (πάστα) που πήζει και σκληρύνεται διαμέσου αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης και το οποίο, μετά τη σκλήρυνση, διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό (Σωτηριάδης, 2011).

Στο πλαίσιο της έκδοσης κοινών Ευρωπαϊκών κανονισμών, η CEN (Comite Europeen de Normalisation) έχει διαμορφώσει το σχετικό για τα τσιμέντα πρότυπο EN 197-1, (2000), το οποίο υιοθέτησε και ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης

(ΕΛΟΤ), και αναφέρεται στην ενοποίηση των επιμέρους τύπων τσιμέντου που παράγονται στις διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

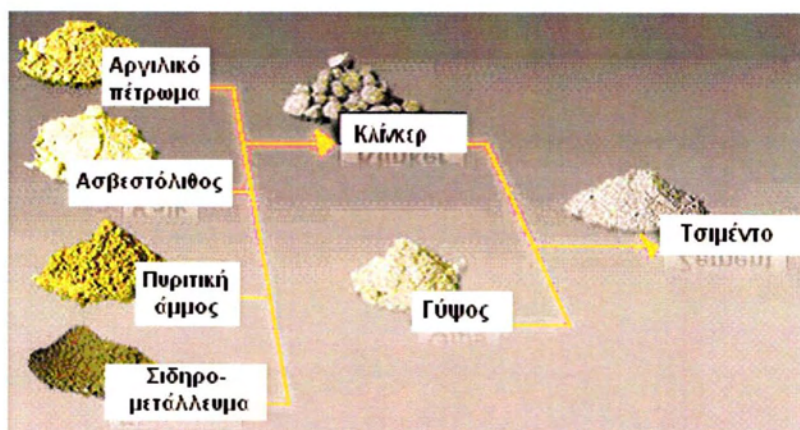
Το τσιμέντο, που καλύπτεται από το πρότυπο EN 197-1, (2000), και ονομάζεται CEM, μπορεί όταν αναμειχθεί με κατάλληλη αναλογία νερού και αδρανών, να δώσει κονίαμα ή σκυρόδεμα, που διατηρεί την εργασιμότητά του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με τον χρόνο, ενώ παράλληλα έχει σταθερότητα όγκου (Τεταγιώτη, 2011).

Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκερινοποίησης ($1380-1420^{\circ}\text{C}$) 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%.



Εικόνες 1-1 α,β: Αριστερά φαίνεται πως μοιάζει το κλίνκερ τσιμέντου Portland και δεξιά πως μοιάζει το τσιμέντο Portland.

Η υδραυλική σκλήρυνση (ο υδραυλικός χαρακτήρας) του τσιμέντου CEM οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων (C_2S και C_3S), οι οποίες είναι τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ και αποτελούν τα 2/3 της μάζας του. Μπορούν, όμως, και άλλες χημικές ενώσεις να συμμετέχουν στον μηχανισμό σκλήρυνσης, όπως π.χ. αργιλικές ενώσεις (C_3A και C_4AF). Το άθροισμα των συγκεντρώσεων του δραστικού οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και του δραστικού διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) στο CEM τσιμέντο πρέπει να είναι τουλάχιστον 50% κατά μάζα, όταν οι συγκεντρώσεις προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-2. Επιπροσθέτως, στο κλίνκερ του τσιμέντου Portland η αναλογία CaO/SiO_2 δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 2, ενώ δεν πρέπει να ξεπερνιέται το 5% κ.β. για το περιεχόμενο MgO . Σημειώνεται, επίσης, ότι υπάρχουν τσιμέντα, των οποίων η σκλήρυνση οφείλεται κυρίως σε άλλες ενώσεις, π.χ. το αργιλικό ασβέστιο στο ασβεσταργιλικό τσιμέντο (Σωτηριάδης, 2011).



Εικόνα 1-2: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου.

1.3.1.1. Κωδικοποίηση του τσιμέντου.

Στο σχετικό πρότυπο EN 197-1, (2000), προβλέπονται οι εξής πέντε τύποι κοινών τσιμέντων με πολλές υποδιαίρεσεις:

- CEM I – τσιμέντα Portland
- CEM II – σύνθετα τσιμέντα Portland
- CEM III – σκωριοτσιμέντα
- CEM IV – ποζολανικά τσιμέντα
- CEM V – σύνθετα τσιμέντα

Στο πρότυπο αυτό, που αποτελεί και ευρωπαϊκό πρότυπο, κάθε χώρα έχει συμπεριλάβει εκτός από το κλίγκερ, τα δικά της κύρια συστατικά (main constituents), τα οποία είναι παραπροϊόντα βασικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων της ή αποτελούν μέρος του ορυκτού της πλούτου και τα οποία συμβάλλουν, κατά περίπτωση, στη βελτίωση ορισμένων από τις ιδιότητες του τσιμέντου (Σωτηριάδης, 2011).

Στον Πίνακα 1-1 δίνονται τα 27 προϊόντα στην οικογένεια των κοινών τσιμέντων, όπως αυτά προδιαγράφονται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1,(2000), ενώ στον Πίνακα 1-2 παρουσιάζονται οι μηχανικές και οι φυσικές απαιτήσεις των τσιμέντων του ανωτέρω προτύπου.

Πίνακας 1-1: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 (Σωτηριάδης, 2011).

Τύπος	Ονομασία	Κύρια συστατικά*									Δευτ συστ
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	
ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND**											
CEM I	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND											
CEM II	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-P	80-90	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	
	II/A-Q	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	
	II/B-Q	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	
	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	
	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35		
II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20		
II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35		
II/A-M	80-94	6-20									0-5
II/B-M	65-79	21-35									
ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	
ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM IV	IV/A	65-89	-	11-35			-	-	-	-	0-5
	IV/B	45-64	-	36-55			-	-	-	-	
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	16-30		-	-	-	-	0-5
	V/B	20-39	20-39	-	31-50		-	-	-	-	

*Οι συμβολισμοί δίνονται παρακάτω στην παράγραφο για τα σύνθετα τσιμέντα

**Η σύνθεση είναι % κ.β. χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η γύψος

Πίνακας 1-2: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων στο EN 197-1 (Σωτηριάδης, 2011).

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή σε Θλίψη MPa				Χρόνος αρχής πήξης min	Σταθερότητα όγκου (Διαστολή) mm
	Πρώιμη αντοχή		Τυπική αντοχή			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες			
32,5 N	-	>16,0	>32,5	<52,5	>75	<10
32,5 R	>10,0	-				
42,5 N	>10,0	-	>42,5	<62,5	>60	
42,5 R	>20,0	-				
52,5 N	>20,0	-	>52,5	-	>45	
52,5 R	>30,0	-				

Επειδή οι ενώσεις που απαρτίζουν το κλίνκερ είναι και πολλές και πολύπλοκες, για την καλύτερη αναγραφή των αντιδράσεων κλινκερινοποίησης, αλλά και για την καλύτερη εξήγηση των φαινομένων ενυδάτωσης έχει διεθνώς επικρατήσει η χρήση των παρακάτω συντομογραφιών:

Πίνακας 1-3: Συντομογραφίες ενώσεων, που απαρτίζουν το κλίνκερ (Σωτηριάδης, 2011).

C = CaO	A = Al ₂ O ₃	S = SiO ₂	F = Fe ₂ O ₃
M = MgO	H = H ₂ O	N = Na ₂ O	K = K ₂ O
P = P ₂ O ₅	T = TiO ₂	\bar{S} = SO ₃	\bar{C} = CO ₂

1.3.1.2. Σύσταση τσιμέντου.

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του (main constituents), τα δευτερεύοντα συστατικά του (minor additional components- mac), το θειικό ασβέστιο και τα πρόσθετα (additives).

-Κύρια συστατικά.

Τα κύρια συστατικά (main constituents) είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής του διαδικασίας στο τσιμέντο (συνήθως κατά την τελική άλεση) σε αναλογία που ξεπερνά το 5% κ.β. της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Στα κύρια συστατικά εκτός από το κλίνκερ του τσιμέντου Portland (K), το οποίο έχει και τον δεσπόζοντα ρόλο, περιλαμβάνεται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά, φυσικά (P) ή τεχνητά (Q), διάφορες τέφρες, πυριτικές (V) ή ασβεστούχες (W), ψημένος σχιστόλιθος (burnt shale) (T), ασβεστόλιθος (L, LL) και πυριτική παιπάλη (silica fume) (D).

-Δευτερεύοντα συστατικά.

Τα δευτερεύοντα συστατικά είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα φυσικά ορυκτά υλικά, που προκύπτουν κατά τη διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ, ή συστατικά, όπως ορίζονται παραπάνω (κύρια συστατικά), εκτός εάν χρησιμοποιούνται σαν κύρια συστατικά του τσιμέντου. Τα συστατικά αυτά προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής του διαδικασίας στο τσιμέντο (συνήθως κατά την τελικά άλεση) σε αναλογία που δεν ξεπερνά το 5% κ.β. της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Στα δευτερεύοντα συστατικά (mac), τα οποία επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρά ποσοστά –έως 5% κ.β. –στο τσιμέντο, περιλαμβάνονται και τα υλικά που είναι γνωστά ως γεμιστικά (fillers). Αυτά είναι ειδικά επιλεγμένα λεπτόκοκκα ανόργανα υλικά, αδρανή ή μη, που στοχεύουν στη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων του τσιμέντου.

Τα δευτερεύοντα συστατικά, ύστερα από κατάλληλη προετοιμασία και εξαιτίας της κοκκομετρικής τους κατανομής, βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου (όπως το εργάσιμο ή τη συγκράτηση νερού). Μπορεί να είναι αδρανή ή να έχουν ελαφρώς υδραυλικές, λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες. Δεν τίθενται, όμως, για αυτά τέτοιες απαιτήσεις. Τα δευτερεύοντα υλικά πρέπει να προετοιμάζονται σωστά, δηλαδή να επιλέγονται, να ομοιογενοποιούνται, να ξηραίνονται και να αλέθονται ανάλογα με τη μορφή κατά την παραγωγή ή την παράδοσή τους. Δεν πρέπει να αυξάνουν αισθητά την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου ή να προκαλούν την καταστροφή του σκυροδέματος ή του κονιάματος με οποιοδήποτε τρόπο ή να μειώνουν την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

-Θεικό ασβέστιο.

Το θεικό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ, με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το θεικό ασβέστιο μπορεί να είναι φυσική γύψος (συνηθέστερη περίπτωση), διυδρίτης ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ημιυδρίτης ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) ή ανυδρίτης (άνυδρο θεικό ασβέστιο, CaSO_4) ή οποιοδήποτε μείγμα αυτών. Η γύψος και ο ανυδρίτης υπάρχουν στη φύση. Το θεικό ασβέστιο διατίθεται επίσης ως παραπροϊόν ορισμένων βιομηχανικών διεργασιών.

-Πρόσθετα.

Τα πρόσθετα είναι υλικά που δεν ανήκουν ούτε στα κύρια ούτε στα δευτερεύοντα συστατικά του τσιμέντου και προστίθενται για να βελτιώσουν είτε την παραγωγική διαδικασία είτε τις ιδιότητες του τσιμέντου. Η ολική τους ποσότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει, σε ξηρή βάση, το 1.0% της μάζας του τσιμέντου (εξαιρούνται οι χρωστικές). Η ποσότητα των οργανικών προσθέτων σε ξηρά βάση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.5% της μάζας του τσιμέντου. Αυτά τα πρόσθετα δεν πρέπει να συμβάλλουν στη διάβρωση του οπλισμού ή να βλάπτουν τις ιδιότητες του τσιμέντου

ή του σκυροδέματος ή του κονιάματος που παράγεται από το τσιμέντο (Σωτηριάδης, 2011).

1.3.1.3. Ενυδάτωση του τσιμέντου.

Η διαδικασία της ενυδάτωσης αρχίζει αμέσως μετά την επαφή τσιμέντου-νερού και συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας. Τα προϊόντα ενυδάτωσης του πυριτικού τριασβεστίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μία άμορφη φάση ενυδατωμένου πυριτικού ασβεστίου, με μοριακή αναλογία CaO/SiO_2 μικρότερη του 3 και υδροξείδιο του ασβεστίου. Η χημική αντίδραση της ενυδάτωσης μπορεί να αποδοθεί ως εξής:



Ανάλογη είναι και η αντίδραση ενυδάτωσης του πυριτικού διασβεστίου. Η ενυδάτωση του αργλικού τριασβεστίου γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο το κύριο προϊόν είναι ο ετρινγκίτης. Όταν όλη η γύψος καταναλωθεί, ο ετρινγκίτης αρχίζει να αντιδρά με το C_3A . Στο στάδιο αυτό παράγεται μονοθεϊκό ενυδατωμένο άλας. Κάτω από παρόμοιες συνθήκες, τα προϊόντα ενυδάτωσης της φερριτικής φάσης είναι σχεδόν ίδια με εκείνα της αργλικής φάσης.

Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι εξώθερμες με αποτέλεσμα να παρατηρείται έκλυση θερμότητας ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ακολουθεί προσεγγιστικά το ρυθμό ενυδάτωσης του τσιμέντου και επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες, δηλαδή τη σύσταση και τη λεπτότητα του τσιμέντου. Η συνολική θερμότητα που εκλύεται είναι περίπου ίδια με το άθροισμα της θερμότητας που αντιστοιχεί στην ενυδάτωση καθεμίας από τις παρακάτω φάσεις του τσιμέντου. Στον Πίνακα 1-4 δίνονται τα προϊόντα ενυδάτωσης και η εκλυόμενη θερμότητα των συστατικών του κλίνκερ.

Οι αντοχές του τσιμέντου οφείλονται στον σχηματισμό ενός συνεχούς, τρισδιάστατου πλέγματος ενυδατωμένων προϊόντων, το οποίο μπορεί να απορροφάει εξωτερικές τάσεις χωρίς να αποσθρώνεται. Γενικά, οι πάστες τσιμέντου θεωρείται ότι αποτελούνται από τρεις φάσεις, τις ένυδρες ενώσεις, το τσιμέντο που δεν πρόλαβε να ενυδατωθεί και τους πόρους. Οι ένυδρες ενώσεις είναι οι υπεύθυνες για την ανάπτυξη των αντοχών. Για δεδομένο πορώδες πάστας, οι αντοχές αυξάνονται καθώς αυξάνει ο βαθμός ενυδάτωσης. Ως βαθμός ενυδάτωσης ορίζεται ο όγκος του ενυδατωμένου τσιμέντου προς τον αρχικό όγκο τσιμέντου.

Το πορώδες της πάστας έχει αρνητική επίδραση στη ανάπτυξη των αντοχών, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων. Οι μεγάλοι πόροι είναι περισσότερο επιζήμιοι από τους μικρούς (Γκαβέλα, 2009).

Πίνακας 1-4: Ενθαλπία αντιδράσεων ενυδάτωσης καθαρών φάσεων του κλίνκερ (Γκαβέλα, 2009).

Αντιδράσεις	Ενθαλπία ενυδάτωσης (kJ/mole)
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	118
$\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	45
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 19\text{H}_2\text{O}$	314
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	245
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	309
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 32\text{H}_2\text{O}$	452
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $3\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3,\text{Fe}_2\text{O}_3)\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	203

1.3.1.4. Σύνθετα τσιμέντα.

Τα σύνθετα τσιμέντα Portland είναι τα τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση κλίνκερ-Portland, γύψου και ποζολάνης φυσικής ή τεχνητής. Αναλυτικά τα συστατικά των σύνθετων τσιμέντων Portland κατά EN 197-1 είναι (Κοκκίνη, 2011):

-Κλίνκερ τσιμέντου Portland, K

-Σκωρία υψικαμίνου, S

Υλικό με λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες που παρουσιάζει και ποζολανικές ιδιότητες όταν ενεργοποιείται κατάλληλα.

-Ποζολανικά υλικά, P, Q

Φυσικά ή βιομηχανικά υλικά πυριτικής ή αργιλοπυριτικής σύστασης. Μόνα τους όταν αναμιγνύονται με το νερό δε σκληρύνονται αλλά λεπτοαλεσμένα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με παρουσία νερού αντιδρούν με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που προκύπτει από την ενυδάτωση των συστατικών του κλίνκερ και σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργλικές ενώσεις που αναπτύσσουν αντοχές.

-Ιπτάμενες τέφρες, V, W

-Ψημένος σχιστόλιθος, T

-Ασβεστόλιθος, L, LL

-Πυριτική παιπάλη, D

1.3.1.5. Ιδιότητες του τσιμέντου.

Παρακάτω αναφέρονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου. Μπορούν να διακριθούν σε «φυσικές», όπως είναι η λεπτότητα, οι χρόνοι πήξης, η κανονική συνεκτικότητα και η σταθερότητα όγκου και «μηχανικές», με σημαντικότερες την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.

- **Λεπτότητα.**

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στο μέσο μέγεθος των σωματιδίων. Η αύξηση της λεπτότητας συντελεί σε:

- Ανάπτυξη μεγαλύτερων αντοχών στις πρώιμες ηλικίες
- Επίτευξη καλύτερης εργασιμότητας
- Έκλυση μεγαλύτερης θερμότητας κατά την ενυδάτωση
- Μείωση της πιθανότητας απόμειξης του τσιμέντου από τα υπόλοιπα συστατικά του
- Αύξηση της απαίτησης σε νερό
- Ανάπτυξη μεγαλύτερης τάσης συρρίκνωσης
- Μείωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ψύξης-απόψυξης καθώς και στην αύξηση των αναγκών αποθήκευσης

Η λεπτότητα εκτιμάται με τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής των σωματιδίων και με τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας δηλαδή της επιφάνειας των σωματιδίων ανά 1 gr ή 1 kgr τσιμέντου (κατά Blaine, Wagner).

- **Χρόνος πήξης, κανονική συνεκτικότητα.**

Αναφέρονται σε φυσικές ιδιότητες της πάστας του τσιμέντου και εξαρτώνται άμεσα από το περιεχόμενο νερό. Η δοκιμή γίνεται με τη συσκευή Vicat που προσδιορίζεται η ακριβής ποσότητα νερού σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3, (2005). Αρχή πήξης είναι η χρονική στιγμή στην οποία η πάστα είναι τόσο συνεκτική ώστε δε μπορεί πλέον να διαμορφωθεί σε καλούπι (2-4 ώρες). Τέλος πήξης είναι η χρονική στιγμή που το τσιμέντο έχει σκληρυνθεί σε σημείο ώστε να αντέχει ένα μικρό φορτίο (5-8 ώρες).

- **Σταθερότητα όγκου-soundness-Δοκιμή Le-Chatellier.**

Η δοκιμή αυτή έχει ως σκοπό τον έλεγχο της πάστας του τσιμέντου σε σχέση με την μεταβολή του όγκου που μπορεί να συμβεί μετά την πήξη. Για παράδειγμα η αύξηση αυτή μπορεί να οφείλεται σε καθυστερημένη ενυδάτωση των MgO και CaO καθώς και στις αντιδράσεις της γύψου με το C₃A που γίνονται αργά στο εσωτερικό της τσιμεντόπαστας και μπορεί να εκδηλωθεί μετά από αρκετούς μήνες ως και λίγα χρόνια.

- **Αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.**

Οι μηχανικές αντοχές του τσιμέντου αποτελούν την πιο χαρακτηριστική του ιδιότητα, με τις αντίστοιχες δοκιμές να αναφέρονται σε όλα τα διεθνή πρότυπα. Κυρίως μετρώνται η αντοχή σε θλίψη (compressive strength) και η αντοχή σε εφελκυσμό (flexural strength).

Η μέτρηση των αντοχών σύμφωνα και με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196-1, (1995), γίνεται σε ηλικίες 1, 2, 7 και 28 ημερών, σε κατάλληλα δοκίμια.

Δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών: η χημική-ορυκτολογική του σύσταση και η λεπτότητά του.

Όσον αφορά στην ορυκτολογική σύσταση του τσιμέντου, τέσσερα βασικά ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ (C_3S , C_3A , C_2S και C_4AF) καθορίζουν την ανάπτυξη των αντοχών του τσιμέντου. Έτσι τα C_3S , C_3A συντελούν στην ανάπτυξη των αντοχών μέχρι τις 28 ημέρες και τα C_2S και C_4AF προσδίδουν τις αντοχές σε μεγαλύτερες ηλικίες.

Παράλληλα η ανάπτυξη των αντοχών του τσιμέντου, επηρεάζεται από τη χημική του σύσταση, και συγκεκριμένα από την περιεκτικότητά του σε «ελεύθερα» - διαλυτά αλκάλια, σε θειικά (SO_3) και σε ελεύθερη άσβεστο ($fCaO$).

Τα διαλυτά αλκάλια υπάρχουν στο κλίνκερ υπό μορφή θεικών ενώσεων και η περιεκτικότητά τους εκφράζεται με το ισοδύναμο K_2O ($K_2O_{eq} = K_2O + 1.52Na_2O$) και κυμαίνεται από 0-1.5% κ.β.. Τα διαλυτά αλκάλια, έχουν θετική επίδραση στις πρώιμες αντοχές και αρνητική στις αντοχές μετά τις 7 ημέρες.

Τα θειικά προέρχονται κυρίως από την περιεχόμενη γύψο. Σύμφωνα με το EN 197-1, (2000), η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα είναι 3.5-4.0%, ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου. Αυξημένη περιεκτικότητα σε θειικά (>2.5%), οδηγεί σε μείωση των αντοχών.

Σχετικά με το $fCaO$, η αυξημένη περιεκτικότητά του, προοδευτικά συντελεί αρνητικά στη μηχανική αντοχή της τσιμεντόπαστας, λόγω της ρηγματώσης που προκαλεί η καθυστερημένη ενυδάτωσή του και ο σχηματισμός $Ca(OH)_2$.

Τέλος, η λεπτότητα του τσιμέντου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη των αντοχών του. Τα περισσότερα τσιμέντα έχουν λεπτότητα 2500-4500 cm^2/g . Αύξηση της λεπτότητας κατά 100 cm^2/g , οδηγεί σε αύξηση της f_{28} από 0.5-1 MPa. Η επίδραση της λεπτότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική στις πρώιμες ηλικίες αντοχών και λιγότερο σε μεγαλύτερες ηλικίες (Κοκκίνη, 2011).

1.3.2. Αδρανή υλικά.

Αδρανή υλικά (άμμος, χαλίκι, γαρμπίλι, σκύρα) καλούνται τα υλικά που αποτελούνται από λίθινους κόκκους, είτε φυσικούς –από άποψη μεγέθους- οπότε ονομάζονται φυσικά ή συλλεκτά αδρανή, είτε από κόκκους που προκύπτουν από τη θραύση όγκων πετρώματος ή τη θραύση φυσικών αδρανών οπότε ονομάζονται θραυστά αδρανή (Αντωνόπουλος, 2011).



Εικόνες 1-3 α,β,γ: Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνονται με την σειρά από αριστερά προς τα δεξιά πως είναι η άμμος, το γαρμπίλι και το χαλίκι.

Η ονομασία των αδρανών υλικών οφείλεται στο γεγονός ότι παραμένουν χημικά αδρανή, αντιθέτως με το τσιμέντο και το νερό, στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος (Σωτηριάδης, 2011). Ο όρος αδρανή δεν είναι τελείως ακριβής, μια και στο υψηλά αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος τα περισσότερα ορυκτά είναι τουλάχιστον μερικώς ασταθή (Τεταγιώτη, 2011). Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος (Σωτηριάδης, 2011).

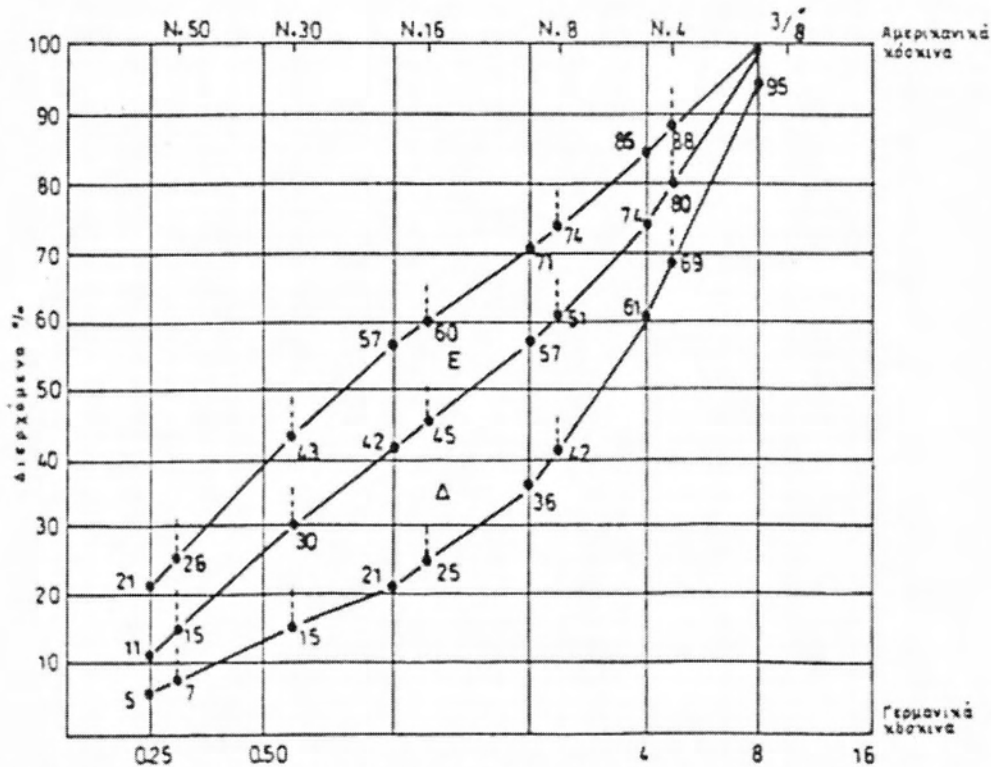
Για αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: (α) επαρκή αντοχή, (β) επαρκή πρόσφυση με την τσιμεντόπαστα και (γ) δεν αντιδρούν χημικά με την τσιμεντοκονία. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά (Γκαβέλα, 2009). Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών, που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος, είναι: η αντοχή τους (αντοχή του μητρικού πετρώματος), η καθαρότητα (η ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών οι κυριότερες εκ των οποίων είναι η παιπάλη, οι οργανικές προσμίξεις και οι θειούχες ενώσεις), η πρόσφυση με την κονία, η χημική συμπεριφορά τους με άλλα συστατικά του σκυροδέματος (ιδιαίτερα με τα Na_2O και K_2O), η κοκκομετρική διαβάθμισή τους (σχήμα και μέγεθος των κόκκων) κ.α. (Σωτηριάδης, 2011).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών είναι η διαδικασία διαχωρισμού και κατάταξης των κόκκων σε ομάδες με βάση το μέγεθός τους. Το μέγεθος των κόκκων προσδιορίζεται με πρότυπα κόσκινα που έχουν καθορισμένες διαμέτρους (ανοίγματα) οπών. Τα κόσκινα που κυρίως χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι τα κόσκινα των

Γερμανικών (περιγράφονται στα DIN 4187 και DIN 4188) και των Αμερικανικών Κανονισμών (περιγράφονται στο ASTM E11). Τα μεγέθη των οπών αποδίδονται σε mm ή inches αντίστοιχα. Με βάση τις συμβατικές διαμέτρους των κόκκων προσδιορίζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος κόκκων ως η ποσοστιαία κατ' όγκο αναλογία κάθε κατηγορίας μεγέθους κόκκων του υλικού (Γκαβέλα, 2009). Η κοκκομετρική διαβάθμιση αποτελεί το κυριότερο χαρακτηριστικό των αδρανών μιας και επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος. Οι κόκκοι στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλο, αλλά λόγω του ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματός τους, δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους, και αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά μεταξύ των αδρανών, γεμίζουν από το κονίαμα που συνδέει με αυτό τον τρόπο τους κόκκους σε ένα συμπαγές υλικό. Η ποσότητα του κονιάματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τα μεταξύ των κόκκων κενά (Τεταγιώτη, 2011).

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα και την εμπειρία από τα εγχώρια υλικά ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, καθόρισε περιοχές μέσα στις οποίες πρέπει να βρίσκονται οι καμπύλες της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών, ανάλογα με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες του σκυροδέματος. Στον Ελληνικό ΚΤΣ-97 δίνονται τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης για αδρανή μέγιστου κόκκου 63mm, 31.5mm, 16mm και 8mm.

Μέγιστος κόκκος αδρανούς είναι η διάσταση του μικρότερου κόσκινου μιας σειράς από το οποίο διέρχεται το 95% τουλάχιστον της ποσότητας του αδρανούς. Στο Διάγραμμα 1-1 φαίνονται τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 31.5mm. Παρατηρείται ότι δημιουργούνται δύο υποζώνες Ε και Δ. Η καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης του μίγματος των αδρανών που προορίζεται για οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να βρίσκεται στην υποζώνη Δ. Για σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 ή μικρότερης μπορεί να προδιαγραφεί ως περιοχή του μίγματος η υποζώνη Ε (Γκαβέλα, 2009).



Διάγραμμα 1-1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 3/8'' (Γκαβέλα, 2009).

1.3.2.1. Κατηγορίες αδρανών υλικών.

Τα αδρανή υλικά χωρίζονται με βάση:

- Την προέλευση.
 - Φυσικά αδρανή, ορυκτής προέλευσης, τα οποία μπορεί να έχουν υποστεί και μηχανική κατεργασία (ασβεστολιθικά, φυσικών αποθέσεων, όπως ποταμίσις, κ.α.)
 - Τεχνητά αδρανή, κυρίως ορυκτής αρχικής προέλευσης, τα οποία έχουν προκύψει από βιομηχανική κατεργασία (σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, κ.α.)
 - Ανακυκλωμένα αδρανή, υλικά από κατεδαφίσεις κατασκευών από σκυρόδεμα, τοιχοποιία, κ.α. (Τεταγιώτη, 2011).
- Την πηγή λήψης.
 - Φυσικά ή συλλεκτά αδρανή (υλικά κοίτης ποταμού, υλικά αναβαθμίδων, κορήματα κλιτύων).
 - Συλλεκτά ονομάζονται αυτά που μαζεύονται από τη φύση χωρίς να χρειαστεί η θραύση πετρωμάτων. Συνηθέστερος τύπος εναπόθεσης και συλλογής τέτοιων τριμμάτων είναι τα ποτάμια.
 - Αδρανή λατομείων (το πέτρωμα αποσπάται από τη βραχομάζα και υπόκειται σε επεξεργασία).

- Το μέγεθος των κόκκων.
Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους, τα διακρίνουμε στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

Παιπάλη	-0,25 mm
Άμμος	0,25-7 mm
Χαλίκι	7-70 mm

Ο διαχωρισμός τους γίνεται με κόσκινα.

-παιπάλη ή άλευρο. Μέγεθος κόκκων μικρότερο από 0.25mm.

-άμμος. Μέγεθος κόκκων μέχρι 7mm.

-σκύρα. Μέγεθος κόκκων από 7-70mm.

→Χονδρόκοκκα αδρανή, μέγιστη $D > 4\text{mm}$, ελάχιστη $d > 2\text{mm}$, ογκόλιθοι, κροκάλες, χαλίκια, γαρμπίλι, κ.α.

→Λεπτόκοκκα αδρανή, $D < 4\text{mm}$, άμμοι.

→Παιπάλη, $D < 2\text{mm}$, $70\% - 100\% < 0.063\text{mm}$.

- Το ειδικό βάρος.
→Κανονικού ειδικού βάρους ($2 - 3 \text{ gr/cm}^3$).
→Ελαφροβαρή ($< 2 \text{ gr/cm}^3$). Φυσικά ελαφρά αδρανή, επεξεργασμένα δομικά ελαφρά αδρανή, παραπροϊόντα ως ελαφρά αδρανή, επεξεργασμένα μονωτικά υπερελαφρά αδρανή.
→Βαρέα ($> 3 \text{ gr/cm}^3$). Προέρχονται από ορυκτά όπως ο βαρύτης, ο μαγνητίτης, ο αιματίτης και ο ιλμενίτης (Αντωνόπουλος, 2011).
- Τη χρήση.
→Αδρανή σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 12620)
→Αδρανή ασφαλτομιγμάτων (ΕΛΟΤ EN 13043)
→Αδρανή κονιαμάτων (ΕΛΟΤ EN 13139)
→Αδρανή για ογκόλιθους για λιμενικά και υδραυλικά έργα (ΕΛΟΤ EN 13383-1)
→Αδρανή για έρμα σιδηροδρομικής γραμμής (ΕΛΟΤ EN 13450)
→Αδρανή για βάσεις και υποβάσεις σταθεροποιημένες ή μη (ΕΛΟΤ EN 13242)
→Ελαφροβαρή αδρανή (ΕΛΟΤ EN 13055) (Κοκκίνη, 2011).

1.3.2.2. Ιδιότητες και μέθοδοι ελέγχου.

Οι μέθοδοι δοκιμών των αδρανών υλικών, σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 12620, (2002), μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες ανάλογα με την ελεγχόμενη χαρακτηριστική ιδιότητα:

- Μέθοδοι που ελέγχουν τα γενικά χαρακτηριστικά
- Μέθοδοι ελέγχου των γεωμετρικών χαρακτηριστικών
- Μέθοδοι που ελέγχουν τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά
- Μέθοδοι που ελέγχουν τις ιδιότητες των αδρανών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές
- Μέθοδοι ελέγχου χημικών χαρακτηριστικών (Τεταγιώτη, 2011).

1.3.2.3. Αλκαλοπυριτική δράση.

Όταν τα αδρανή περιέχουν άμορφο ή σε κρυπτοκρυσταλλική μορφή πυρίτιο, υπάρχει κίνδυνος αντίδρασής του με τα αλκάλια του σκυροδέματος (αλκαλοπυριτική αντίδραση). Προϊόν της αντίδρασης είναι ένα αρχικά διαυγές και στη συνέχεια λευκό, παχύρρευστο πήγμα (silica gel), το οποίο διογκώνεται με την απορρόφηση του νερού των πόρων και προκαλεί ρωγμές στο σκυρόδεμα.

Οι αλκαλοπυριτικές δράσεις που αναφέρουν διάφοροι ερευνητές είναι:

1. $2\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 \rightarrow 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}$
2. $2\text{SiO}_2 + 4\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}$
3. $3\text{SiO}_2 + 4\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{SiO}_2 + 2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

Η αντίδραση που θα συμβεί εξαρτάται από τη μορφή του πυριτίου και τη συγκέντρωση των αλκαλίων, προϋποθέτει δε την παρουσία υγρασίας. Το πήγμα που σχηματίζεται είναι συνήθως αρνητικά φορτισμένο και έλκει τα ιόντα ασβεστίου. Η περιεκτικότητα του πηγματος σε Ca^{++} αυξάνεται με τον χρόνο, όταν δε ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο, η τάση του πηγματος προς διόγκωση μηδενίζεται.

Η αντίδραση ευνοείται από την αύξηση της συγκέντρωσης των OH^- στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η χρήση ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας υψικαμίνου ως πρόσθετα στο τσιμέντο μειώνει τον κίνδυνο πραγματοποίησης αλκαλοπυριτικής δράσης. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ποσότητας των αλκαλίων στους πόρους του σκυροδέματος εξαιτίας των προσμίξεων αυτών.

Η ρηγμάτωση που προκαλείται από την αλκαλοπυριτική δράση, ευνοεί την διάβρωση του σιδηροπλισμού, ο οποίος εξαιτίας των ρωγμών, εκτίθεται πλέον στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Εκτός της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης, έχει παρατηρηθεί και αντίδραση μεταξύ αλκαλίων και ανθρακικών αλάτων. Η δράση αυτή πραγματοποιείται μεταξύ αλκαλίων και αδρανών που προέρχονται από δολομιτικό ασβεστόλιθο, και δεν έχει παρατηρηθεί μέχρι στιγμής στην Ευρώπη (Ρουτούλας, 1999).

1.3.3. Νερό ανάμιξης.

Το νερό είναι ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν, με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και στη σκλήρυνση του μείγματος. Η βασική απαίτηση για το νερό είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμειξης, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλασσινό νερό ή τα νερά αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε την καθυστέρηση της πήξης είναι:

- Η ζάχαρη
- Τα οξέα (π.χ. H_2CO_3 ή άλλα οργανικής προέλευσης)
- Τα λάδια και τα λίπη
- Οι οργανικές ουσίες

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008, (2002), (Κοκκίνη, 2011). Αν γίνεται χρήση νερού από ανακύκλωση, αυτή πρέπει να υπακούει στο παράρτημα Α της ίδιας προδιαγραφής (Σωτηριάδης, 2011). Το χρησιμοποιούμενο νερό συμμετέχει σε ποσοστό περίπου 6% κ.β. σε μια τυπική σύνθεση σκυροδέματος. Κατά βάση χρησιμοποιείται το πόσιμο νερό. Σε μερικές περιπτώσεις (άοπλο σκυροδέμα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί το θαλασσινό νερό ή νερό γεώτρησης (Κοκκίνη, 2011). Το ελληνικό πρότυπο που αναφέρεται στο νερό ανάμειξης και συντήρησης σκυροδέματος είναι το ΕΛΟΤ 345.

Η επίδραση του λόγου νερού προς τσιμέντο (N/T) στην ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος είναι πολύ σημαντική. Όπως αναφέρεται από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί έχει προκύψει ότι όταν ο λόγος N/T είναι μικρότερος του 0.40 δεν μπορεί να ενυδατωθεί όλο το περιεχόμενο τσιμέντο στο μείγμα. Θεωρητικά όλο το τσιμέντο μιας τσιμεντόπαστας θα μπορούσε να ενυδατωθεί όταν ο λόγος N/T είναι γύρω στο 0.40 κάτι όμως που δεν συμβαίνει στην πράξη. Κανονισμοί σε όλες τις χώρες προτείνουν τιμές για τον ελάχιστο ή μέγιστο λόγο N/T (Τεταγιώτη, 2011).

Τα όρια αναλογίας νερού προς τσιμέντο κυμαίνονται γενικά μεταξύ 0.7/1 και 0.4/1, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ρευστότητα του παραγόμενου υλικού

προκειμένου να είναι κατάλληλο για κατασκευές αλλά και η αντοχή του στη διάβρωση. Όταν η αναλογία N/T ξεπεράσει το 0.7/1, η διαπερατότητα του σκυροδέματος, άρα και η πιθανότητα χημικής προσβολής, αυξάνεται δυσανάλογα, εξαιτίας της μεγάλης αύξησης του μεγέθους και του αριθμού των τριχοειδών πόρων. Όταν η αναλογία N/T κυμαίνεται μεταξύ 0.4/1 και 0.45/1, εξασφαλίζεται τόσο η μείωση του πορώδους όσο και η αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος (Ρούτουλας, 1999).

Ανάλογα με την υγρασία του περιβάλλοντος και το πορώδες, το σκυρόδεμα το οποίο δεν έχει συντηρηθεί μπορεί να δεσμεύσει μεγάλη ποσότητα νερού. Το σύστημα των πόρων του σκυροδέματος, το οποίο είναι γεμάτο με υγρό (νερό) των πόρων και αέρα, παρέχει τη διαδρομή μεταφοράς διαβρωτικών ουσιών καθώς και τον ηλεκτρολύτη στο βασικό κελί διάβρωσης (Τεταγιώτη, 2011).

1.3.4. Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα (admixtures).

Τα υλικά αυτά προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου (συνήθως 0.3-1.5% κ.β. του τσιμέντου), κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος, με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων κυρίως του νερού, αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Βάσει της κυρίας δράσης τους, τα πρόσμικτα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Ρευστοποιητικά (αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού και τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος μικρότερου λόγου νερού προς τσιμέντο σε σχέση με αυτόν σκυροδέματος ίδιας εργασιμότητας που δεν περιέχει ρευστοποιητή)
- Αερακτικά (αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα του σκυροδέματος και τη ρευστότητά του, χρησιμοποιούνται για την προστασία του σκυροδέματος από τον παγετό σε όλη τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του)
- Επιβραδυντικά (απομονώνουν τις ταχύπηκτες αργλικές ενώσεις και κυρίως το C₃A)
- Επιταχυντικά (διευκολύνουν την ενυδάτωση του C₃A ή/και των πυριτικών ενώσεων)
- Στεγανωτικά (δρουν με χημικό τρόπο ενάντια στην υδατοπερατότητα του σκυροδέματος)

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν και άλλα πρόσμικτα, όπως αντιπαγετικά, διογκωτικά και αντιδιαβρωτικά (Σωτηριάδης, 2011, Γκαβέλα, 2009).

Οι κανονισμοί ορίζουν την απαιτούμενη ελάχιστη βελτιωτική δράση καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αλλοίωσης των άλλων ιδιοτήτων. Επίσης σύμφωνα και με

τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN 206-1, η ολική ποσότητα των προσμίκτων δεν πρέπει να ξεπερνά την μέγιστη συνιστώμενη από τον κατασκευαστή δόση και σε κάθε περίπτωση να μην ξεπερνά τα 50 g/Kg τσιμέντου (Κοκκίνη, 2011).

1.3.5. Πρόσθετα συστατικά (additions).

Τα πρόσθετα συστατικά είναι λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα στοχεύοντας είτε στη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του είτε στην επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων (Σωτηριάδης, 2011).

Σύμφωνα με το EN 206 διακρίνονται δύο κατηγορίες προσθέτων (Γκαβέλα, 2009):

- Τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου I), στα οποία περιλαμβάνονται filler αδρανών με προδιαγραφές σύμφωνες με το prEN 12620, όπως η ασβεστολιθική πούδρα και η χαλαζιακή σκόνη, και ανόργανα χρώματα, όπως χρωστικά μεταλλικά οξείδια κυρίως του σιδήρου, που χρησιμοποιούνται για να χρωματίσουν το σκυρόδεμα.
- Τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου II), στα οποία περιλαμβάνονται οι ιπτάμενες τέφρες, σύμφωνα με το EN 450 (2005), η πυριτική παιπάλη (silica fume), κατά ΕΛΟΤ EN 13263 (2005), και ταξινομούνται στις εξής πέντε κατηγορίες:

→ Υλικά με υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα υλικά με υαλώδη πυριτική φάση, η οποία έχει σημαντικά τροποποιηθεί από την παρουσία σε αξιοσημείωτες ποσότητες ιόντων ασβεστίου, μαγνησίου και αργιλίου. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής απαιτούν μικρές ποσότητες τσιμέντου Portland ή άλλων διεγερτών, για να επιταχύνουν την ενυδάτωσή τους. Η ταχέως ψυχθείσα σκωρία υψικαμίνων και μερικές υψηλού ασβεστίου ($\text{CaO} > 20\%$) ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

→ Υλικά με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται υλικά με μίγμα αργιλοπυριτικής και πυριτικής υαλώδους φάσης, που περιέχουν μεγάλες ποσότητες ασβεστίου και μαγνησίου. Στην κατηγορία αυτή, όπου τα υλικά εμφανίζουν τόσο υδραυλική όσο και ποζολανική δράση, ανήκουν οι υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες με περιεκτικότητα 10-20% σε CaO .

→ Οι κανονικές ποζολάνες. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υλικά, που συνίστανται από πυριτική υαλώδη φάση τροποποιημένη με αργίλιο ή σίδηρο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι χαμηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες.

→ Υλικά με ισχυρές ποζολανικές ιδιότητες. Σε αυτή περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα υλικά με πολύ μεγάλη λεπτότητα (και συνεπώς μεγάλη ειδική επιφάνεια), που συνίστανται από SiO_2 σε μη κρυσταλλική φάση. Τα υλικά αυτά, στα οποία ανήκει η πυριτική παιπάλη, έχουν μεγάλη ποζολανική δραστηριότητα.

→ Υλικά μικρής δραστηριότητας. Τέτοια υλικά είναι η σκωρία υψικαμίνων που ψύχθηκε με αργό ρυθμό ή οι τέφρες βάσης (bottom ashes). Τα υλικά αυτά

πρέπει να αλεσθούν σε πολύ μεγάλη λεπτότητα για να αποκτήσουν αποδεκτές ιδιότητες (κυρίως αντοχές), όταν συνεργάζονται με το τσιμέντο.

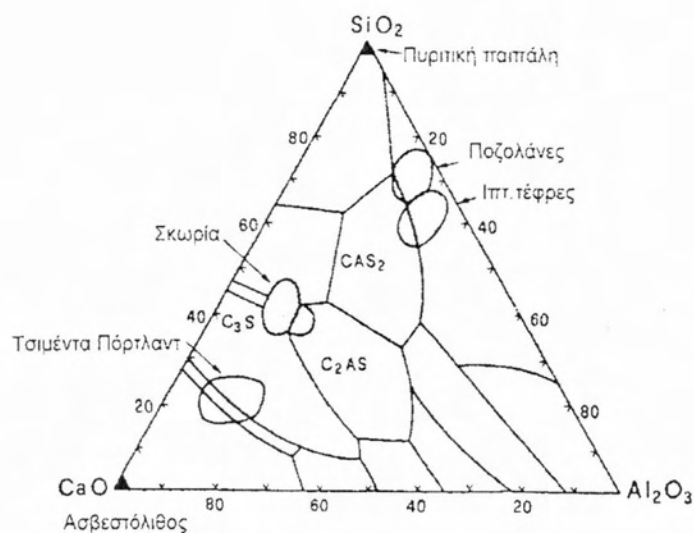
Γενικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες και των τριών πρώτων κατηγοριών ενισχύονται σημαντικά, εάν τα υλικά αυτά αλεσθούν σε μεγάλες λεπτότητες.

Τα περισσότερα από τα παραπροϊόντα, των οποίων προβλέπεται η προσθήκη στο EN 197-1, (2000), και τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως, προέρχονται από παραγωγική διαδικασία που περιλαμβάνει διεργασίες μετασχηματισμού σε υψηλές θερμοκρασίες από τις οποίες προκύπτουν τα υλικά αυτά ως παραπροϊόντα. Μόνο οι φυσικές ποζολάνες και ο ασβεστόλιθος δεν συγκαταλέγονται στα υλικά αυτά. Ειδικότερα, ο ασβεστόλιθος είναι το μόνο υλικό που δεν περιέχει πυρίτιο, η δράση του οποίου κατά την ενυδάτωση θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την εκδήλωση της συμπεριφοράς των επιμέρους τσιμέντων (Σωτηριάδης, 2011).

Στον Πίνακα 1-5 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τεσσάρων από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα υλικά στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων και τα οποία ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες. Επιπροσθέτως, στο Σχήμα 1-1 φαίνεται η σχετική θέση των υλικών και του τσιμέντου Portland στο τριμερές διάγραμμα CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Πίνακας 1-5: Χαρακτηριστικά βιομηχανικών παραπροϊόντων, που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα (Σωτηριάδης, 2011).

	Σκωρία υψικαμίνων	Κανονική ιπτάμενη τέφρα	Ιπτάμενη τέφρα υψηλού ασβεστίου	Πυριτική παιπάλη
SiO_2 (%)	27-40	34-60	25-40	>80
Al_2O_3 (%)	5-33	17-31	8-17	0.1-0.5
Fe_2O_3 (%)	1	2-25	5-10	0.1-5
CaO (%)	30-50	0.5-10	10-38	<1
C (%)	-	<10	<10	-
Βασικότητα	1.2-1.8	0.2-0.7	1.0-1.8	0.1
Κρυσταλλική φάση (%)	<30	10-50	10-50	<5
Άμορφη φάση	Si-Al-Ca-O	Si-Al-(Ca)-O	Si-Al-Ca-O	Si-O
Διαλυτό CaO (ppm)	150-300	30-70	30-70	ίχνη
Διαλυτό SO_3 (ppm)	20-150	0.5-1400	0.5-1400	10-15
Σχήμα σωματιδίων	με αιχμές	σφαιρικό	σφαιρικό	σφαιρικό
Λεπτότητα (Blaine) (cm^2/g)	3000-6000	2500-4000	2500-4000	
Λεπτότητα (BET) (m^2/g)	0.5-2	0.5-2	0.5-2	20
Πυκνότητα (g/cm^3)	2.9	2.0-2.7	2.0-2.7	2.3



Σχήμα 1-1: Σχετικές θέσεις τσιμέντου Portland και βιομηχανικών παραπροϊόντων σε τριμερές διάγραμμα CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (Σωτηριάδης, 2011).

1.4. Σύνθεση σκυροδέματος.

Η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Αρχικά, με την επιλογή των συστατικών (είδος τσιμέντου, αδρανών και προσθέτων) η οποία γίνεται σύμφωνα με τις κοινές τεχνικές προδιαγραφές για το σκυρόδεμα (Πίνακας 1-6). Σε δεύτερη φάση πραγματοποιείται ο καθορισμός της αναλογίας ανάμιξης των συστατικών του σκυροδέματος, δηλαδή του τσιμέντου, του νερού, των αδρανών και τυχόν χρησιμοποιούμενων προσθέτων, έτσι ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τον κατασκευαστή ή τον υπεύθυνο μηχανικό ενός έργου. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η παρακάτω:

- Επιλέγεται η κατηγορία του σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι προδιαγράφονται ο τύπος του τσιμέντου, ο μέγιστος λόγος N/T, τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών, η ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Λαμβάνονται υπόψη τυχόν περιορισμοί ή άλλοι κανόνες που ορίζονται από τα διεθνή ή εθνικά πρότυπα και προδιαγραφές (ΕΛΟΤ EN-206, ΚΤΣ-97).
- Ορίζεται η κατηγορία του σκυροδέματος με βάση τις αντοχές θλίψης ή/και την κατηγορία κάθισης, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή ή του υπεύθυνου μηχανικού.
- Προσδιορίζεται ο λόγος N/T και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο με βάση υπάρχοντα εργαστηριακά δεδομένα ή με την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών.
- Προσδιορίζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών όπως και η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε κοκκομετρικού κλάσματος στο σκυρόδεμα (Κοκκίνη, 2011).

Πίνακας 1-6: Συνήθεις τεχνικές απαιτήσεις σκυροδέματος (Κοκκίνη, 2011).

Επιθυμητή ιδιότητα	Εφαρμογή	Υλικά
<i>Υψηλή εργασιμότητα (χωρίς απόμιξη των συστατικών)</i>	1.Υποβρύχια σκυροδέτηση 2.Δύσκολες-βαθιές σκυροδετήσεις, με πυκνό οπλισμό 3.Αυτοεπιπεδούμενη σκυροδέτηση	Ρευστοποιητές- χαμηλό (N/T) Πρόσθετα τσιμέντου και σκυροδέματος Αδρανή χαμηλής κοκκομετρίας
<i>Ταχεία πήξη</i>	1.Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Επιταχυντές
<i>Αργή πήξη</i>	1.Αντιμετώπιση δημιουργίας θερμογεφυρών, στις ενώσεις 2.Αποφυγή ρηγμάτων (deflectioncracking) 3.Εξομάλυνση θερμοκρασιακών διαφορών	Επιβρανδυτές
<i>Υψηλή αντοχή πρώιμη</i>	1.Σκυρόδεμα ταχείας ξεκαλούπωσης 2.Σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες 3.Προεντεταμένο σκυρόδεμα	Τσιμέντο υψηλής πρώιμης αντοχής (Type III) Πλαστικοποιητές-Υπερρευστοποιητές Επιταχυντές
<i>Χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης</i>	1.Κατασκευές μεγάλου όγκου-μάζας: -Πλάκες αυξημένου πάχους -Έτοιμη τοιχοποιία -Φράγματα	Τσιμέντο μέτριας θερμότητας ενυδάτωσης (Type II) Σύνθετα τσιμέντα (Type IPM) ή σκυρόδεμα με πρόσθετα Τσιμέντο χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης Σύνθετα τσιμέντα (Type IPM) ή σκυρόδεμα με πρόσθετα
<i>Υψηλή ανθεκτικότητα</i>	1.Αντοχή στον παγετό 2.Ανθεκτικότητα στα θειικά (έδαφος, θάλασσα) 3.Ανθεκτικότητα στην αλκαλοπυριτική αντίδραση των αδρανών	Αερακτικά Τσιμέντο με ανθεκτικότητα στα θειικά (Type V).Σύνθετα τσιμέντα ή σκυρόδεμα με πρόσθετα Ρευστοποιητές- χαμηλό (N/T) Τσιμέντο χαμηλής περιεκτικότητας σε αλκάλια Αδρανή ανθεκτικά στα αλκάλια
<i>Χαμηλή διαπερατότητα</i>	1.Δεξαμενές νερού 2.Δεξαμενές αερίων 3.Γενικές απαιτήσεις ανθεκτικότητας	Ρευστοποιητές- χαμηλό (N/T) Πρόσθετα σκυροδέματος
<i>Σταθερότητα διαστάσεων</i>	1.Δεξαμενές νερού και αερίων 2.Πολύροφες κατασκευές 3.Κατασκευές με ειδική απαίτηση ως προς την ακρίβεια των διαστάσεων	Ρευστοποιητές- χαμηλό (N/T) Μειωτές νερού Αδρανή υψηλής αντοχής
<i>Χαμηλή θερμική διαστολή</i>	1.Πυρίμαχες κατασκευές 2.Θερμοκρασιακές διακυμάνσεις	Αδρανή χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής
<i>Χαμηλή πυκνότητα</i>	1.Πολύροφες κατασκευές	Ελαφριά αδρανή

	2.Θερμομόνωση	
<i>Υψηλή πυκνότητα</i>	1.Θωράκιση από ακτινοβολία 2.Κατασκευές αντιστάθμισης βάρους	Βαριά αδρανή
<i>Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα</i>	1.Θερμομόνωση	Ελαφριά αδρανή

1.5. Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος.

1.5.1. Εργασιμότητα.

Με τον όρο εργασιμότητα ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, να διαστρωθεί και να συμπτυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με ένα άλλο ορισμό, ως εργασιμότητα ορίζεται το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπίκνωση. Το εργάσιμο είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια στην πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της σκυροδέτησης. Είναι μια σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες όπως οι παρακάτω:

- Η ρευστότητα (flowability), που υποδηλώνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα εξαρτάται, κυρίως, από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.
- Η πλαστικότητα (plasticity), που υποδηλώνει την ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.
- Η συνοχή (consistency), που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μέρη μεταξύ τους και επομένως είναι μια από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.
- Η συμπτυκνωσιμότητα (compactability), που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπτυκνωθεί.
- Η τελειωσιμότητα (finishability), δηλαδή η ιδιότητα που διακρίνει το σκυρόδεμα να δίνει την επιθυμητή μορφή στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το καλούπι, χωρίς ελαττώματα (οπές ή εξογκώματα). Όσο αφορά την ελεύθερη επιφάνεια, και αυτή πρέπει να είναι ικανοποιητική, μετά τις συνήθεις τεχνικές διάστρωσης.
- Η αντλησιμότητα (pumpability), που είναι η ικανότητα του σκυροδέματος να αντλείται χωρίς προβλήματα.

Με βάση τον ορισμό που δόθηκε για την εργασιμότητα είναι φανερό ότι η μέτρησή της δεν μπορεί να γίνει άμεσα. Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μετρείται μία ή περισσότερες από τις υπόλοιπες ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Με τις μετρήσεις αυτές αποκτάται μια έμμεση και κατά προσέγγιση εικόνα του βαθμού εργασιμότητας του σκυροδέματος. Η κυριότερη από τις μεθόδους αυτές είναι η κάθιση (Γκαβέλα, 2009).

1.5.2. Αντοχή.

Η αντοχή (strength) του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η σημαντικότερη ιδιότητά του, παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις άλλα χαρακτηριστικά του, όπως η ανθεκτικότητα (durability) και η διαπερατότητα (permeability), μπορεί να είναι πιο σημαντικά. Σε κάθε περίπτωση, η αντοχή δίνει μια συνολική εικόνα της ποιότητας του σκυροδέματος, επειδή συνδέεται άμεσα με τη δομή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας. Η αντοχή του σκυροδέματος σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κατά βάση από τον λόγο N/T και τον βαθμό συμπίκνωσης (degree of compaction). Και οι δύο παράγοντες επιδρούν στο πορώδες του σκυροδέματος και σε καλά συμπτυκνωμένα σκυροδέματα το ποσοστό των κενών μειώνεται σημαντικά. Επομένως, η αντοχή του σκυροδέματος είναι συνάρτηση του όγκου των κενών (voids) (Σωτηριάδης, 2011).

1.5.3. Πορώδες.

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό και το σύνολό τους αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό. Το ολικό πορώδες, που χαρακτηρίζει την έκταση του πορώδους, εκφράζει το % ποσοστό ή το κλάσμα του όγκου ενός υλικού που καταλαμβάνουν οι πόροι του και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$p = \frac{V_k}{V} = \frac{\rho - \rho_\phi}{\rho}$$

όπου: p: το ολικό πορώδες του υλικού,

V_k : ο όγκος των πόρων (κενών),

V: ο φαινόμενος όγκος του υλικού,

ρ_ϕ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού,

ρ : το ειδικό βάρος του υλικού.

Στο σκυρόδεμα το ολικό πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25%. Όμως, ως ιδιότητα του σκυροδέματος, δεν δίνει πληροφορίες για τη μορφή, το σχήμα, το μέγεθος, καθώς και για την κατανομή των κοιλοτήτων, που αποτελούν ουσιώδη χαρακτηριστικά για τη συμπεριφορά του υλικού και τη διείσδυση του νερού. Το πορώδες επηρεάζει το σκυρόδεμα, κυρίως επιδρώντας στις αντοχές και στη διαπερατότητά του (Διάγραμμα 1-2).



Διάγραμμα 1-2: Συσχέτιση αντοχών θλίψης και διαπερατότητας με το πορώδες (Σωτηριάδης, 2011).

Επιπλέον, το πορώδες επηρεάζει τη χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, καθώς και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο όγκο, είναι μεγαλύτερο), είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό.

Στη μείωση του πορώδους συντείνουν:

- η ελάττωση του νερού και, επομένως, η ελάττωση των πόρων που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού που περισσεύει.
- η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, που πλησιάζει στην άριστη περιοχή, δηλαδή η πυκνότερη δομή των αδρανών.
- η καλή ποιότητα και καθαρότητα των αδρανών για την καλύτερη προσκόλληση της τσιμεντοκονίας. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα π.χ. έχουν καλύτερη πρόσφυση από τα πυριτικά.
- η αποτελεσματική συμπύκνωση του νερού σκυροδέματος.
- η καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά τη διάρκεια της πήξης (Σωτηριάδης, 2011).

Ο Πίνακας 1-7 εμφανίζει μια κατηγοριοποίηση των πόρων διαφόρων μεγεθών μέσα στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Όπως φαίνεται οι πόροι διακρίνονται σε τριχοειδείς και σε πόρους πήγματος.

Πίνακας 1-7: Οι πόροι μέσα στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και η επιρροή τους στις ιδιότητες του υλικού (Γκαβέλα, 2009).

Όνομασία	Διάμετρος	Περιγραφή	Συμπεριφορά νερού	Επηρεαζόμενες ιδιότητες
Τριχοειδείς πόροι	10-0.5μm	Μεγάλα τριχοειδή	Ως κοινό νερό	Αντοχή, διαπερατότητα
	50-10nm	Μέσα τριχοειδή	Αναπτύσσονται μέτριες επιφανειακές τάσεις	Αντοχή, διαπερατότητα, συστολή ξήρανσης σε υψηλές σχετικά υγρασίες
Πόροι πήγματος	10-2.5nm	Μικρά τριχοειδή πήγματος	Υψηλές επιφανειακές τάσεις	Συστολή ξήρανσης μέχρι 50% RH
	2.5-0.5nm	μικροπόροι	Ισχυρά προσροφημένο, δεν αναπτύσσονται μηνίσκοι	Συστολή ξήρανσης, ερπυσμός
	<0.5nm	πόροι διακένων	Ισχυρότατοι επιφανειακοί δεσμοί	Συστολή ξήρανσης, ερπυσμός

1.5.4. Διαπερατότητα.

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος και, μέσω αυτής, η ανθεκτικότητά του επηρεάζεται από τη σύσταση του τσιμέντου, από το λόγο N/T, από το πορώδες, από το βαθμό συμπύκνωσης, από τη συντήρηση και από την ύπαρξη ρωγμών. Αναλυτικότερα, για τον κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

Όταν η περιεκτικότητα του τσιμέντου στο σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερη από 300kg/m^3 , ο λόγος N/T είναι μικρός και έχει γίνει προσεκτική συντήρηση, τότε το σκυρόδεμα θα έχει μικρή διαπερατότητα.

Όταν ο λόγος N/T υπερβεί την τιμή 0.6, τότε υπάρχει δυσανάλογη αύξηση της διαπερατότητας, επειδή αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών πόρων.

Το πορώδες (μέγεθος και κατανομή των πόρων), καθώς και η ποσότητα του νερού που περιέχεται στους πόρους, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Συνήθως, η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε φυσικές και χημικές επιδράσεις μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τριχοειδείς πόρους.

Με τη συμπύκνωση γίνεται προσπάθεια μείωσης των κενών του αέρα στο σκυρόδεμα σε περιεκτικότητα μικρότερη από 1%. Για την επίτευξη της συμπύκνωσης εφαρμόζεται δόνηση κατά τη χύτευση, με αποτέλεσμα ο αέρας και το νερό να μεταφέρονται προς την επιφάνεια του σκυροδέματος, μειώνοντας έτσι το πορώδες. Με τον τρόπο αυτό υφίσταται προσωρινή αύξηση της διαπερατότητας κατά την

κατακόρυφη διεύθυνση, λόγω της δημιουργίας των τριχοειδών πόρων, οι οποίοι, όμως, σφραγίζονται με την πρόοδο της ενυδάτωσης.

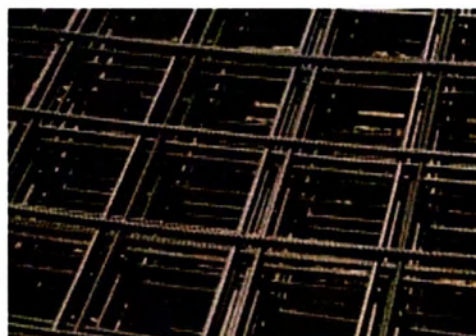
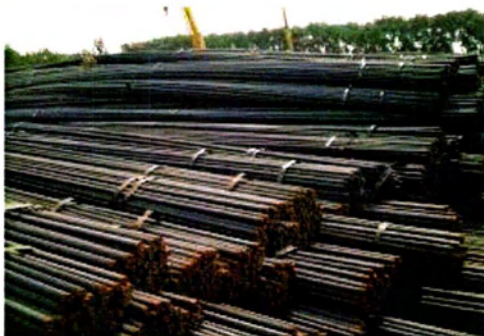
Η συντήρηση του σκυροδέματος συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας, ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης. Η συντήρηση γίνεται με σκοπό αφενός για να συγκρατήσει το σκυρόδεμα τη σωστή υγρασία, ώστε να γίνει η ενυδάτωση του τσιμέντου, και αφετέρου για να προστατευτεί το σκυρόδεμα από τις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας.

Η ύπαρξη ρωγμών διευκολύνει τη διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής και προς τον οπλισμό του σκυροδέματος. Οι ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες αιτίες, όπως φυσικές (συστελλόμενα αδρανή, καθίζηση σκυροδέματος), χημικές (διάβρωση οπλισμού, αντίδραση αλκαλίων-αδρανών), θερμικές (ψύξη-απόψυξη, εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας, πρόωρη θερμική μεταβολή) και κατασκευαστικές (υπερφόρτιση, ερπυσμός) (Σωτηριάδης, 2011).

2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ Ο ΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

2.1. Οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που έχει την ιδιότητα να συνεργάζεται πολύ καλά με τον χάλυβα βελτιώνοντας έτσι την αντοχή του σε εφελκυσμό που είναι χαμηλή (Γκαβέλα, 2009). Δηλαδή η ανάληψη των δυνάμεων εφελκυσμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται από τον χάλυβα οπλισμού, ο οποίος είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 2% και προσθήκες άλλων στοιχείων (Τεταγιώτη, 2011). Ο συνδυασμός του χάλυβα με το σκυρόδεμα ονομάζεται *οπλισμένο σκυρόδεμα*. Ο οπλισμός (χάλυβας) χρησιμοποιείται με τη μορφή ράβδων ή πλέγματος και αποτελεί τον σκελετό της κατασκευής.



Εικόνες 2-1 α,β: Στην αριστερή φωτογραφία φαίνονται ράβδοι οπλισμού ενώ στην δεξιά πλέγμα από ράβδους οπλισμού.

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος είναι προϊόντα χάλυβα με κυκλική ή σχεδόν κυκλική διατομή, με αντοχές που ορίζονται από τα διάφορα πρότυπα. Στην επιφάνειά τους, στην τυπική περίπτωση έχουν νευρώσεις. Υπάρχουν και χάλυβες οπλισμού χωρίς νευρώσεις ή με αυλακώσεις αντί για νευρώσεις.

Συνοπτικά, η ποιότητα των χαλύβων οπλισμού, σχετίζεται με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Ικανοποίηση των απαιτήσεων των εκάστοτε ισχυόντων Προτύπων σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές τους (όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή).
- Δυνατότητα ανάληψης σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων, που εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων απαιτήσεων για την ολκιμότητα και την δυσθραυστότητα.

- Ικανότητα του συστήματος σκυρόδεμα/οπλισμός μεταφοράς εφελκυστικών δυνάμεων από τον οπλισμό στο σκυρόδεμα. Η αντοχή συνάφειας είναι συνάρτηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και είναι σημαντικός παράγοντας επηρεασμού της ικανότητας ανάληψης παραμορφώσεων από τα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Σημαντική προϋπόθεση γι' αυτό είναι η ύπαρξη κατάλληλης τραχύτητας του οπλισμού, που εξασφαλίζεται με την τήρηση ειδικών απαιτήσεων για την γεωμετρία επιφάνειας.
- Δυνατότητα συνδέσεων τμημάτων του οπλισμού με συγκόλληση. Η συγκολλησιμότητα των χαλύβων καθορίζεται από τη χημική τους σύσταση και ελέγχεται μέσω της θέσπισης σχετικών απαιτήσεων.
- Δυνατότητα διατήρησης των βασικών προδιαγραφόμενων ιδιοτήτων, εντός των απαιτήσεων των Προτύπων και των κατασκευαστικών κανονισμών, σε τυπικές συνθήκες διαμόρφωσης των χαλύβων οπλισμού πριν την ενσωμάτωσή τους στο έργο. Εδώ θα μπορούσε να εντάξει κανείς, απαιτήσεις που σχετίζονται με την συμπεριφορά σε δοκιμασίες κάμψης και την πρόβλεψη για πιθανή υποβάθμιση των ιδιοτήτων λόγω προβλημάτων φυσικής γήρανσης.
- Διατήρηση των βασικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμού, σε περιπτώσεις ιδιαίτερα επιβλαβούς περιβάλλοντος. Εδώ υπάγονται θέματα και απαιτήσεις προστασίας από την διάβρωση.
- Συμπεριφορά των χαλύβων οπλισμού σε ειδικές συνθήκες, όπως σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες ή περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα κόπωσης.
- Χρήση των χαλύβων οπλισμού σε κατάσταση, ποσότητα, διάταξη, μορφή και ποιότητα διαμόρφωσης, αντίστοιχων των απαιτήσεων σχεδιασμού στην τελευταία και καθοριστική φάση της ενσωμάτωσής του στο σκυρόδεμα, ή αλλιώς κατά την τοποθέτησή τους.

Σημειώνεται επίσης, ότι οι παράμετροι αυτοί συνδέονται μεταξύ τους και επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τον τρόπο παραγωγής των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος (Γκαβέλα, 2009).

Η ποιότητα, οι διαστάσεις, οι ανοχές και οι λοιπές απαιτήσεις χαρακτηριστικών που πρέπει να έχουν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος που κυκλοφορούν, καθώς επίσης η ταξινόμηση, η αναγνώρισή τους, η τοποθέτηση και οι έλεγχοι συμμόρφωσης προδιαγράφονται από τον "Νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος" (ΚΤΧ, 2008). Ενδεικτικά αναφέρονται τα Πρότυπα ΕΛΟΤ-EN 10080 (2005) "Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι Χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις" και ΕΛΟΤ-1421, (2007), "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – συγκολλησιμοι χάλυβες – μέρος 1: γενικές απαιτήσεις, μέρος 2: τεχνική κατηγορία

B500A, μέρος 3: τεχνική κατηγορία B500C'', στα οποία παραπέμπει ο Κανονισμός. Στον ΚΤΧ 2008 παρατίθενται όλα τα Πρότυπα και κανονιστικά κείμενα όπου γίνονται παραπομπές κατά την σύνταξη των προδιαγραφών των ελάχιστων γενικών και ειδικών απαιτήσεων τις οποίες πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Σύμφωνα με αυτά καθορίζονται δύο κατηγορίες χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, B500A και B500C, όπου και για τις δύο αυτές κατηγορίες χαλύβων η ονομαστική (χαρακτηριστική) τιμή του ορίου διαρροής τους (εμφανούς ή συμβατικού για μήκυνση 0.2%) είναι 500MPa.

Σύμφωνα με τις νέες απαιτήσεις για αντισεισμικές κατασκευές που τίθενται από τον ευρωκώδικα ENV 10080 και τους ελληνικούς κατασκευαστικούς κανονισμούς ΕΚΩΣ 2000 και ΕΑΚ 2000 οι χάλυβες διακρίνονται όχι μόνο για την αντοχή τους αλλά και για την ολκιμότητά τους προκειμένου να επιτευχθεί αυξημένη πλαστιμότητα στις κατασκευές. Ως πλαστιμότητα ορίζεται η ικανότητα ενός φορέα ή ενός τμήματος μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα να αποκρίνεται σε μεγάλες μετελαστικές παραμορφώσεις χωρίς σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητάς του. Ο όρος ολκιμότητα εκφράζει τη σχέση της περιοχής των πλαστικών παραμορφώσεων ως προς την περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων μιας ράβδου οπλισμού που καταπονείται σε εφελκυσμό. Ορίζονται έτσι χάλυβες αυξημένης ολκιμότητας με υψηλή τιμή κράτυνσης $\geq 1,15$ (λόγος εφελκυστικής αντοχής / όριο διαρροής).

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά (αποδεκτές τιμές για πρακτικές εφαρμογές):

Πίνακας 2-1: Φυσικές ιδιότητες χάλυβα οπλισμού (Τεταγιώτη, 2011).

Μέτρο Ελαστικότητας	$E = 2.0 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
Μέτρο ολισθήσεως (διατμήσεως)	$G = 8.0 \cdot 10^4 \text{ MPa}$
Συντελεστή θερμικής διαστολής	$\alpha = 12,18 \cdot 10^{-6} / \text{grad}$
Λόγος Poisson	$\nu = 0,30$
Ειδική αντίσταση:	15,9-16,3 $\mu\Omega\text{cm}$
Πυκνότητα	$d = 7,85 \text{ t/m}^3$

Οι παραπάνω τιμές ισχύουν για θερμοκρασία περί τους 20 βαθμούς Κελσίου, μεταβαλλόμενες αισθητά από τη μεταβολή της (π.χ. τα E και G μειώνονται κατά 40% περίπου στους 650 βαθμούς Κελσίου, ενώ ο συντελεστής θερμικής διαστολής αυξάνει κατά 15% περίπου για την ίδια θερμοκρασία). Η μεταβολή είναι ανομοιόμορφη.

Στους χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας κατατάσσονται οι χάλυβες κατηγορίας B500A κατά ΕΛΟΤ 1421-2, (2007), οι οποίοι επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή τυποποιημένων δομικών πλεγμάτων και δικτυωμάτων μέχρι διάμετρο $\Phi 8$. Στους χάλυβες υψηλής ολκιμότητας κατατάσσονται οι χάλυβες

κατηγορίας B500C κατά ΕΛΟΤ 1421-3, (2007), οι οποίοι καλύπτουν τις αυξημένες απαιτήσεις για αντισεισμική συμπεριφορά των κατασκευών, όπως προβλέπονται από τον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ), (2000), και από τους Ευρωκώδικες.

Οι χάλυβες οφείλουν τις φυσικές ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (τάση διαρροής, τάση θραύσεως, μήκυνση θραύσεως κλπ) αφενός στη χημική σύσταση του κράματος δηλαδή στις αναλογίες των συστατικών του, αφετέρου σε διάφορες θερμομηχανικές κατεργασίες κατά την παραγωγή. Ο φθηνότερος τρόπος για την αύξηση της αντοχής είναι με αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, γεγονός που έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη μείωση της ολκιμότητας και της συγκολλησιμότητας στο λαμβανόμενο προϊόν. Στην πράξη η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 0,18% - 0,24% και αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ των παραπάνω αντικρουόμενων ιδιοτήτων και εξασφαλίζει υψηλή αντοχή, ικανοποιητική επιμήκυνση και καλή συγκολλησιμότητα. Άλλα κραματικά στοιχεία που προστίθενται είναι το μαγγάνιο (Mn), το πυρίτιο (Si), ο φωσφόρος (P), το θείο (S), το άζωτο (N), ο χαλκός (Cu), το βανάδιο (V), το ταντάλιο (Ta), το νιόβιο (Nb/Cb), το νικέλιο (Ni), το χρώμιο (Cr) και το μολυβδαίνιο (Mo).

Οι μεταλλοτεχνικές κατεργασίες των χάλυβων οπλισμού είναι (Τεταγιώτη, 2011):

- η έλαση, η οποία αποτελεί διαδικασία διαμόρφωσης εν θερμώ ή εν ψυχρώ ενός μεταλλικού υλικού με τη χρήση αντίρροπα περιστρεφόμενων κυλίνδρων.
- η ολκή, η οποία συνίσταται στην ψυχρή κατεργασία μιας ράβδου ή ενός σύρματος, τα οποία ελκόμενα διέρχονται μέσα από κατάλληλη μήτρα με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής τους (και επακόλουθο την αύξηση της αντοχής).

2.2. Ανθεκτικότητα σκυροδέματος.

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή του και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, στη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον όπου εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας.

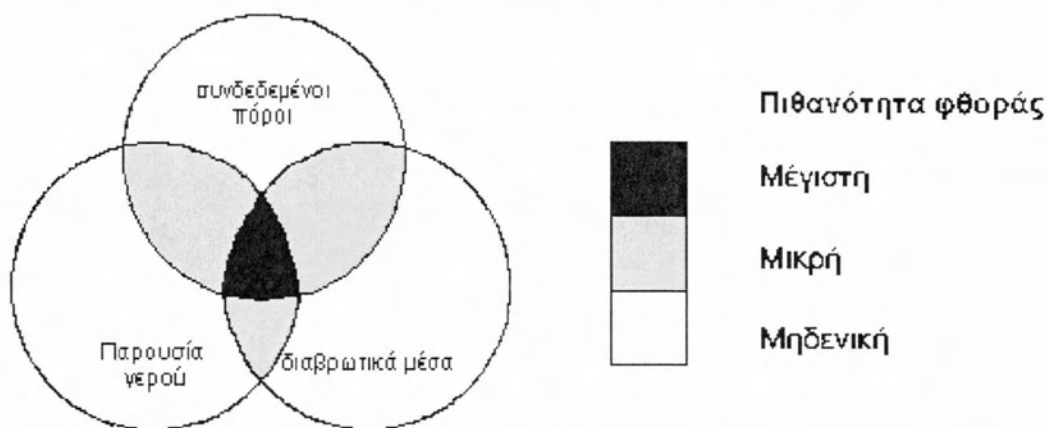
Οι βασικότερες αιτίες φθοράς που καταγράφονται στην πράξη είναι: η διάβρωση του σιδηροπλισμού, η ψύξη-απόψυξη στα ψυχρά κλίματα, οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαφόρων διαβρωτικών μέσων και οι

φυσικοχημικές δράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος μεταξύ των συστατικών του. Η μελέτη των διαφόρων φυσικοχημικών δράσεων της φθοράς είναι σύνθετη και απαιτεί τη συνολική και πολύπλευρη εξέτασή τους. Η κατανόηση των φαινομένων που προκαλούν τη φθορά του σκυροδέματος επιτρέπει την αναγωγή τους σε παράγοντες ανθεκτικότητας.

Συνοψίζοντας τις απόψεις πολλών ερευνητών για τους μηχανισμούς φθοράς του σκυροδέματος, μπορούν να προκύψουν τρεις βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (Κοκκίνη, 2011) :

- Η παρουσία συνδεδεμένων πόρων.
- Η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.
- Η παρουσία νερού.

Στο Σχήμα 2-1, που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια ποιοτική συσχέτιση των παραπάνω βασικών παραγόντων, που καθορίζουν τη φθορά του σκυροδέματος.



Σχήμα 2-1: Συνολική παρουσίαση της φθοράς του σκυροδέματος (Σωτηριάδης, 2011).

Κάθε κύκλος αντιστοιχεί σε έναν παράγοντα ανθεκτικότητας. Όταν ένας παράγοντας υπάρχει μόνος του, χωρίς την παρουσία των υπολοίπων, τότε δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς. Όταν δύο παράγοντες συνυπάρχουν, κάτι που αποδίδεται σχηματικά με την τομή δύο κύκλων, η πιθανότητα φθοράς αυξάνεται σημαντικά. Τέλος, όταν και οι τρεις παράγοντες συνυπάρχουν, ο κίνδυνος φθοράς γίνεται μέγιστος. Επίσης, φαίνεται η αλληλεξάρτηση των παραγόντων. Η απουσία ενός από τους τρεις παράγοντες απαλείφει τον κίνδυνο φθοράς του σκυροδέματος.

Βάσει των προαναφερθέντων παραγόντων μπορεί να θεωρηθεί ότι η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σχετίζεται με τα τρία παρακάτω ρευστά, που εισέρχονται σε αυτό και προκαλούν τη φθορά του:

- Το νερό (με τα διαβρωτικά μέσα που περιέχει).

- Ο ατμοσφαιρικός αέρας (CO_2 , O_2).
- Το ειδικό περιβάλλον (SO_4^{2-} , Cl^- και αλκάλια).

Η αντοχή στον χρόνο και στο περιβάλλον, καθώς και οι προκύπτουσες φθορές μιας κατασκευής εξαρτώνται άμεσα από το πορώδες και τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και από τις μηχανικές, τις φυσικές και τις χημικές επιδράσεις.

Το πορώδες, αλλά και η διαπερατότητα εξαρτώνται από τη σύσταση του τσιμέντου, από το λόγο N/T , από τον βαθμό συμύκνωσης του σκυροδέματος, τη συντήρησή του και την ύπαρξη ρωγμών.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζονται από τη διαθέσιμη υγρασία, την παρουσία διαβρωτικών ουσιών στο νερό και από τη θερμοκρασία.

Στις μηχανικές επιδράσεις μπορούν να αναφερθούν τα επιβαλλόμενα φορτία και οι παραμορφώσεις, όπως η διαφορική καθίζηση, η συστολή ξήρανσης, ο ερπυσμός, ο σεισμός και οι θερμοκρασιακές μικροαλλαγές.

Στις φυσικές επιδράσεις υπάγονται η μηχανική φθορά (απότριψη, υδροφθορά) και οι ακραίες θερμοκρασίες (παγετός, πυρκαγιά).

Τέλος, στις χημικές ή βιολογικές επιδράσεις αναφέρονται τα οξέα, οι βάσεις, τα άλατα και τα βακτηρίδια (Σωτηριάδης, 2011).

2.3. Μηχανισμοί φθοράς του σκυροδέματος.

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα από τις φυσικές και χημικές δράσεις στις οποίες εκτίθεται. Η φθορά του σκυροδέματος από χημικές αιτίες είναι: οι αντιδράσεις εναλλαγής μεταξύ του διαβρωτικού υγρού και των συστατικών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, οι αντιδράσεις που περιέχουν υδρόλυση και απόπλυση των συστατικών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και αντιδράσεις που οδηγούν σε σχηματισμό διογκούμενων προϊόντων.

Οι συνήθεις μηχανισμοί φθοράς του σκυροδέματος είναι οι εξής (Κοκκίνη, 2011):

- Αλκαλοπυριτική αντίδραση (λόγω της αντίδρασης των αλκαλικών ιόντων του τσιμέντου Portland με τα πυριτικά συστατικά των αδρανών).
- Προσβολή από θειικά (λόγω της αντίδρασης των θειικών με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και με το ενυδατωμένο αργιλικό ασβέστιο).
- Προσβολή από οξέα (λόγω του ότι σε υγρές συνθήκες το SO_4 , το CO_2 και άλλα όξινα καυσαέρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα προσβάλλουν το σκυρόδεμα).

- Διάβρωση οπλισμού (λόγω της επαφής του σκυροδέματος με όξινο διάλυμα ή της παρουσίας χλωριόντων).
- Ενανθράκωση σκυροδέματος (λόγω της αντίδρασης του CO₂ που υπάρχει στην ατμόσφαιρα με το Ca(OH)₂ του σκυροδέματος).
- Εξάνθιση (λόγω του σχηματισμού ενός άσπρου ιζήματος από CaCO₃ ή MgCO₃ στην επιφάνεια τσιμεντοειδών υλικών).
- Παγετός (λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών ένα τμήμα του νερού των πόρων της τσιμεντόπαστας έχει την τάση να παγώνει).
- Πυρκαγιά.

Παρακάτω θα αναπτύξουμε τους σημαντικότερους μηχανισμούς φθοράς που είναι η διάβρωση του οπλισμού και η ενανθράκωση του σκυροδέματος.

2.3.1. Διάβρωση οπλισμού.

2.3.1.1. Γενικά για την διάβρωση.

Η διάβρωση του οπλισμού είναι και σήμερα μια από τις κυριότερες αιτίες αστοχίας των κατασκευών σε ολόκληρο τον κόσμο. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού είναι ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς φθοράς του σκυροδέματος που επιδρά στη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Οι ζώνες διαβροχής, ψεκασμού και παλίρροιας (splash, spray and tidal zones) έχουν αναγνωρισθεί ως ζώνες υψηλού κινδύνου διάβρωσης. Τμήματα κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα τα οποία τοποθετούνται στη ζώνη διαβροχής και υπόκεινται περιοδικά σε διαβροχή και στέγνωμα, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στη διάβρωση που προέρχεται από χλωριόντα.

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται από το ISO 8044 του 1986, «Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος του οποίου αποτελεί τμήμα του» (Τεταγιώτη, 2011).

2.3.1.2. Διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

Στη συνήθη περίπτωση το σκυρόδεμα αποτελεί ένα προστατευτικό περιβάλλον του σιδηροπλισμού για δύο λόγους:

→ Το υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος είναι έντονα αλκαλικό, εξαιτίας του υδροξειδίου του ασβεστίου, προϊόν της αντίδρασης σκλήρυνσης του τσιμέντου, με pH μεταξύ 12.5 και 13.9. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο χάλυβας καλύπτεται επιφανειακά από ένα παθητικό στρώμα οξειδίων, που παρεμποδίζει τη διάβρωσή του. Η διάβρωσή του περιορίζεται στη συντήρηση του παθητικού αυτού στρώματος, δράση εξαιρετικά αργή, που πρακτικά μπορεί να παραμεληθεί.

→ Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά αέρια (O_2 , SO_2 κλπ) και άλλες ουσίες, που βοηθούν τη διάβρωση (άλατα χλωρίου κλπ).

Με την πάροδο του χρόνου, όμως, το σκυρόδεμα μπορεί να χάσει την προστατευτική του ικανότητα, π.χ. λόγω ενανθράκωσης το pH μπορεί να κατέβει κάτω από 9.0 ή η συγκέντρωση των χλωριόντων μπορεί να γίνει επαρκής, ώστε να καταστρέψει το παθητικό στρώμα χάλυβα, οπότε η διάβρωση του οπλισμού μπορεί να γίνει σημαντική (Σωτηριάδης, 2011).

Ενανθράκωση.

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην αντίδραση του $Ca(OH)_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή, που έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή του $Ca(OH)_2$ σε ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$), ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος.

Η ύπαρξη του $Ca(OH)_2$ μαζί με αυτή άλλων υδροξειδίων που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες εξασφαλίζουν στους οπλισμούς ένα προστατευτικό, έντονα αλκαλικό περιβάλλον ($pH \approx 12.5$). Σ' αυτό το περιβάλλον ένα λεπτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει τον χάλυβα από τη διάβρωση. Το στρώμα αυτό δε σταματά τη διάβρωση, αλλά περιορίζει σημαντικά τους ρυθμούς εξέλιξής της. Η μετατροπή όμως του $Ca(OH)_2$ σε ασβεστόλιθο με τη βοήθεια του ανθρακικού οξέος, που προκύπτει από την ένωση του CaO με H_2O , μειώνει σταδιακά την αλκαλικότητα στο περιβάλλον του οπλισμού, μέχρι να τη ρίξει σε επίπεδα που η παθητική προστασία που παρέχει το επικαλυπτικό στρώμα αναιρείται. Το pH που σηματοδοτεί αυτή τη μετάβαση είναι γύρω στο 9, ενώ ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα έχει $pH \approx 8$.

Η ενανθράκωση δεν αποτελεί πρόβλημα για το σκυρόδεμα καθαυτό. Απεναντίας, η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ασβεστόλιθο δίνει ένα πιο πυκνό υλικό (χαμηλό πορώδες) με μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Το πρόβλημα έχει να κάνει με την προστασία του οπλισμού, καθώς αποτελεί την κερκόπορτα για τη διάβρωσή του. Μπορούμε να την κατατάξουμε στις χημικές διεργασίες φθοράς και απαξίωσης του οπλισμού σκυροδέματος σε αντιδιαστολή με άλλες π.χ. μηχανικές, φυσικές, βιολογικές. Σε περιοχές μάλιστα όπου υπάρχουν και χλωριούχες ενώσεις όπως σε παραθαλάσσιες περιοχές, η συνεργιστική δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων μπορεί να είναι καταγιστική (Κουρνέτας, 2010).

Επίδραση χλωριόντων.

Το επιφανειακό στρώμα ένυδρου οξειδίου που προστατεύει τις ράβδους οπλισμού, μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από χλωριόντα, εάν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0.4-0.6% του βάρους του τσιμέντου. Είναι δυνατόν ακόμη και να διαλυθεί, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από τη ράβδο σε τιμές του pH κάτω του 9. Τα χλωριόντα αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσίνο νερό (συνηθισμένες πρακτικές στη νησιωτική Ελλάδα), ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Η δεύτερη περίπτωση είναι πολύ συνηθισμένη σε παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, όπου μέχρι σε μεγάλη απόσταση από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά (Κουρνέτας, 2010).

2.3.1.3. Μηχανισμός της διάβρωσης.

Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση, που λαμβάνει χώρα, όταν το σκυρόδεμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του. Η ηλεκτροχημική δράση συνεπάγεται την ύπαρξη ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η ανοδική δράση, την ύπαρξη καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η καθοδική δράση και η ύπαρξη ηλεκτρολύτη για τη μεταφορά των ιόντων. Η διεξαγωγή των δράσεων αυτών πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μετάλλου-ηλεκτρολύτη και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων στον ηλεκτρολύτη.

Η ανοδική δράση, στην περίπτωση της διάβρωσης του οπλισμού του σκυροδέματος, είναι η ανοδική διάλυση του σιδήρου, η οποία είναι μία οξειδωτική δράση συνυφασμένη με απόδοση ηλεκτρονίων κατά το σχήμα: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$.

Η ταχύτητα της δράσης αυτής εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Στην περίπτωση δημιουργίας παθητικού στρώματος είναι πολύ μικρή. Όταν όμως το pH αποκτήσει τιμές κάτω από 9.0 η ταχύτητα αυξάνει σημαντικά. Το ίδιο συμβαίνει, όταν το παθητικό στρώμα καταστραφεί από την παρουσία ικανού ποσού χλωριόντων.

Η καθοδική δράση είναι συνυφασμένη με την πρόσληψη ηλεκτρονίων. Για να πραγματοποιηθεί είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός οξειδωτικού μέσου. Στην περίπτωση που το οξειδωτικό μέσο είναι το οξυγόνο, αυτό μπορεί να προσλάβει ηλεκτρόνια προς σχηματισμό υδροξυλίωντων κατά το σχήμα: $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$.

Το οξυγόνο για να φτάσει στην επιφάνεια του σιδήρου, που είναι η κάθοδος, πρέπει να διαχυθεί μέσα από τους πόρους του σκυροδέματος.

Τα ιόντα σιδήρου από την ανοδική δράση και τα υδροξυλιόντα από την καθοδική δράση μετακινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη και τελικά αντιδρούν προς σχηματισμό στερεού προϊόντος κατά το σχήμα: $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$.

Το σχηματιζόμενο υδροξείδιο του σιδήρου με το υπάρχον οξυγόνο μετατρέπεται σε υδροξείδιο του τρισθενούς σιδήρου ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη, ο σχηματισμός του υδροξειδίου πραγματοποιείται στην επιφάνεια του σιδήρου ή μακρύτερα από αυτή. Ακόμη, από το είδος του ηλεκτρολύτη και τις αλλαγές της σύστασής του μπορεί να σχηματιστούν και άλλα είδη προϊόντων (π.χ. μικτά οξειδια-υδροξείδια κλπ). Στο Σχήμα 2-2 απεικονίζεται η διαδικασία διάβρωσης του σιδηροπλισμού και αναλύονται οι δράσεις, που λαμβάνουν χώρα. Ο ίδιος ο σιδηροπλισμός παίζει το ρόλο του αγωγού σύνδεσης ανοδικών-καθοδικών περιοχών. Τα σχηματιζόμενα προϊόντα διάβρωσης του οπλισμού μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές δευτερεύουσες επιδράσεις. Έτσι, αν σχηματισθούν μέσα στους πόρους και τους κλείσουν παρεμποδίζουν τη συνέχιση της διαβρωτικής δράσης, εάν όμως σχηματίζονται στην επιφάνεια του χάλυβα, επειδή έχουν μικρότερη πυκνότητα και συνεπώς μεγαλύτερο όγκο, εξασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα και τελικά μπορούν να το ρηγματώσουν.

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, για να πραγματοποιηθεί η διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα πρέπει να υπάρχουν τρεις προϋποθέσεις:

- Ανοδική διάλυση του σιδήρου.
- Παρουσία οξυγόνου.
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος μέσω του υγρού των πόρων.

Εάν και οι τρεις προϋποθέσεις εκπληρώνονται, τότε η διάβρωση του σιδηροπλισμού είναι δυνατή. Η ταχύτητα, η μορφή και η έκταση της διάβρωσης εξαρτώνται και από άλλους παράγοντες. Τη διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα επηρεάζουν, ακόμη, οι ακόλουθοι παράγοντες:

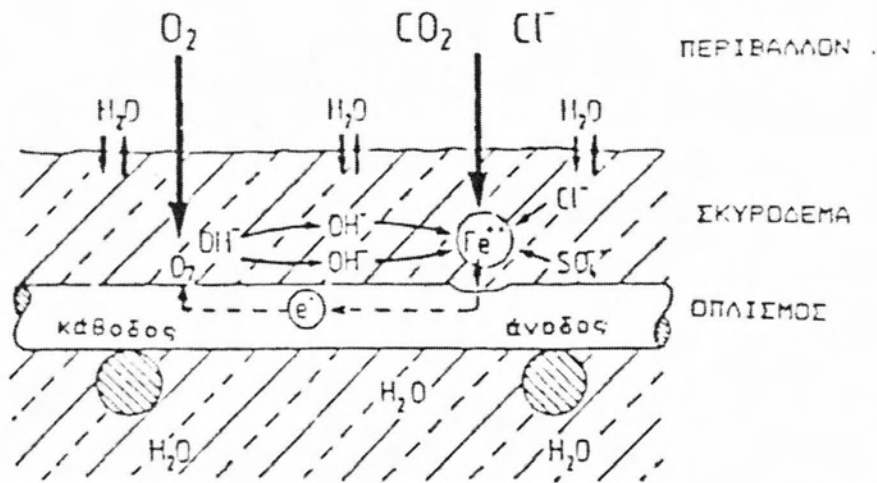
- Το είδος και η δομή του σκυροδέματος.
- Το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα.
- Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα.
- Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τη διάχυση του οξυγόνου (αλλά και άλλων διαβρωτικών αερίων) στη μάζα του σκυροδέματος και, κατά συνέπεια, στην επιφάνεια του χάλυβα. Στην παράγραφο 2.3.1.4. γίνεται λεπτομερέστερη εξέταση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων.

Εφόσον οι προϋποθέσεις για τη διάβρωση του σκυροδέματος εκπληρούνται, η διάβρωση λαμβάνει χώρα και μπορεί να οδηγήσει σε:

- Μείωση της διατομής του οπλισμού, με συνέπειες στη στατική ικανότητα της κατασκευής.
- Δημιουργία ρωγμών από τη δημιουργία των προϊόντων διάβρωσης (σχηματισμός οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού), με μεγαλύτερο μοριακό όγκο από το σίδηρο, όταν παρεμποδίζεται η ανάπτυξή τους (άσκηση εφελκυστικών τάσεων στο σκυρόδεμα).

Η απώλεια της επικάλυψης του οπλισμού προκαλεί δομικές φθορές στο οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας της απώλεια της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και της μείωσης της διατομής του οπλισμού (Σωτηριάδης, 2011).



Σχήμα 2-2: Διαδικασία διάβρωσης του σιδηροοπλισμού (Σωτηριάδης, 2011).

2.3.1.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση οπλισμού.

- **Το είδος και η δομή του σκυροδέματος.**

Το σκυρόδεμα είναι ένα πορώδες υγροσκοπικό υλικό. Το συνδετικό υλικό του σκυροδέματος, το τσιμέντο, κατά την ενυδάτωσή του σχηματίζει ένα ζελέ με πόρους διαφόρων διαμέτρων. Οι πόροι αυτοί, ανάλογα με την κατάσταση του περιβάλλοντος, μπορεί να είναι στεγνοί ή γεμάτοι νερό. Στην τελευταία περίπτωση, το νερό των πόρων είναι ένα υδατικό διάλυμα που περιέχει υδροξείδιο του ασβεστίου, το οποίο σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, καθώς και μικρότερα ποσά υδροξειδίου του καλίου και του νατρίου. Το διάλυμα αυτό έχει pH 12.5-13.9 και σχηματίζει στην επιφάνεια του χάλυβα το παθητικό προστατευτικό οξείδιο. Η διατήρηση της αλκαλικότητας και της προστατευτικής επίδρασης στο χάλυβα είναι προβληματική με την πάροδο του χρόνου και εξαρτάται από την ποσότητα και το είδος του τσιμέντου, το λόγο N/T, το είδος και την κοκκομετρία των αδρανών και τον χρόνο συντήρησης του σκυροδέματος.

Το τσιμέντο, που είναι ανθεκτικό στα θειικά ιόντα, και που βρίσκεται σε περιβάλλον με χλωριόντα, επιταχύνει την διάβρωση του σιδηροπλισμού. Τα τσιμέντα, που περιέχουν φυσικές ή τεχνητές ποζολάνες, εξαιτίας της ποζολανικής αντίδρασης, μειώνουν το πορώδες. Το μικρότερο πορώδες παρεμποδίζει την μεταφορά των διαβρωτικών συστατικών του περιβάλλοντος προς τον οπλισμό. Επίσης, πολλές ποζολάνες, λόγω του ότι περιέχουν Al_2O_3 , παρεμποδίζουν την διάβρωση, δεσμεύοντας τα χλωριόντα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συγκέντρωσή τους και άρα και η διαβρωτική τους ικανότητα.

Η επίδραση του λόγου N/T είναι, επίσης, σημαντική. Αύξησή του, οδηγεί σε αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος και αυτή με την σειρά της σε αύξηση της διάβρωσης του σιδηροπλισμού, εφόσον με αυτόν τον τρόπο γίνεται πιο εύκολη η πρόσβαση στον οπλισμό των περιβαλλοντικών διαβρωτικών παραγόντων.

Ακόμα, σημαντικό ρόλο παίζει και ο χρόνος συντήρησης του σκυροδέματος. Όσο ο χρόνος συντήρησης γίνεται μεγαλύτερος, τόσο το πορώδες και, συνεπώς, η διάβρωση του σιδηροπλισμού, ελαττώνονται.

Τέλος, το είδος και η κοκκομετρία των αδρανών είναι, επίσης, σημαντικοί παράγοντες για την διάβρωση του σιδηροπλισμού. Αν τα αδρανή είναι συμπαγή (χωρίς πόρους), τότε η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών γίνεται μόνο μέσα από τους πόρους του ζελέ του τσιμέντου. Αν, όμως, είναι πορώδη, η διέλευση των διαβρωτικών ουσιών γίνεται και μέσα από τους πόρους των αδρανών, με αποτέλεσμα η διάβρωση να είναι μεγαλύτερη.

- **Το πάχος επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα.**

Τα διαβρωτικά συστατικά, από το περιβάλλον, πρέπει να διαπεράσουν την επικάλυψη του σκυροδέματος και να φθάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του σκυροδέματος, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται (εφόσον τα άλλα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος παραμένουν ίδια), για να φθάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό. Η ωθούσα δύναμη για την μετακίνηση των συστατικών είναι η διάχυση. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες του σκυροδέματος, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού, ώστε να διατηρηθεί ο ίδιος βαθμός προστασίας του.

- **Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα.**

Το νερό στους πόρους του σκυροδέματος ρυθμίζει την μεταφορά των διαφόρων ιόντων ή αερίων στο εσωτερικό του, αλλά και την (ηλεκτρική) αντίστασή του. Η επίδραση του νερού στην ηλεκτρική αντίσταση και στην μεταφορά του οξυγόνου (και γενικότερα των αερίων) είναι αντίστροφη. Το κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα έχει την μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση (ή την μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα), ταυτόχρονα, όμως, παρεμποδίζει την απευθείας είσοδο του οξυγόνου. Στο κορεσμένο, με νερό, σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο διάχυση του διαλυμένου στο

νερό οξυγόνου, που είναι μικρή. Αντίθετα, στο ξηρό σκυρόδεμα η μεταφορά του οξυγόνου μέσα από τους άδειους πόρους είναι σημαντική. Όμως, η ηλεκτρική αντίσταση του ξηρού σκυροδέματος είναι μεγάλη (ή ηλεκτρική αγωγιμότητα μικρή), ώστε το ρεύμα μεταξύ των πόλων του γαλβανικού στοιχείου διάβρωσης είναι πολύ μικρό. Επομένως, ο κίνδυνος διάβρωσης σε ξηρό και κορεσμένο σε νερό σκυρόδεμα είναι μικρός, ενώ στις ενδιάμεσες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος.

Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα εξαρτάται από:

- Την υγρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος.
- Την δυνατότητα μεταφοράς του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος.
- Την προϋστορία του σκυροδέματος κατά την πήξη και την συντήρηση.

Η υγρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι μεταβαλλόμενη. Μετά από παρατεταμένη βροχή η σχετική υγρασία είναι 100%. Αντιθέτως, τις θερμές-ξηρές ημέρες είναι σχετικά μικρότερη. Ακόμη, η υγρασία εξαρτάται από την τοποθεσία, στην οποία βρίσκεται η κατασκευή. Στα παράλια η υγρασία είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τις μεσόγειες περιοχές. Η υγρασία εξαρτάται, επίσης, από το εάν το σκυρόδεμα είναι προστατευμένο ή όχι από την βροχή. Αν η σχετική υγρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος έχει κατέβει σε χαμηλά επίπεδα, η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος ακολουθεί την μείωση αυτή με μεγάλη χρονική καθυστέρηση. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στις τριχοειδείς δυνάμεις, που αναπτύσσονται μεταξύ του ζελέ του τσιμέντου και του νερού. Η διάρκεια της χρονικής καθυστέρησης εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων και το σχήμα τους, αλλά και από την σύσταση του σκυροδέματος.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, που πρέπει να αναφερθεί για την διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος, αλλά και του ίδιου του σκυροδέματος, είναι το θαλασσινό νερό. Οι φθορές του σκυροδέματος, που εκτίθεται σε θαλασσινό νερό, μπορεί να οφείλονται σε έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω λόγους:

- Στην αντίδραση των συστατικών του θαλασσινού νερού με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου.
- Στην αντίδραση διόγκωσης αλκαλίων-αδρανών.
- Στην πίεση κρυστάλλωσης αλάτων στο σκυρόδεμα, εξαιτίας της ύπαρξης θερμοκρασιακής διαφοράς στα διάφορα μέρη της κατασκευής.
- Στην δράση του χάλυβα σε οπλισμένα ή προεντεταμένα στοιχεία.
- Στην φυσική του φθορά εξαιτίας της επαφής του με το θαλασσινό νερό.

Σε ενυδατωμένα, μη οπλισμένα και χωρίς αδρανή, τσιμέντα Portland τα πιο επικίνδυνα συστατικά του θαλασσινού νερού, από άποψη χημικής προσβολής των συστατικών του σκυροδέματος, είναι τα θειικά άλατα και το μαγνήσιο εφόσον η συγκέντρωσή τους υπερβαίνει τα 1500 mg/mL και τα 500 mg/mL, αντίστοιχα. Αυτό που συμβαίνει στα υποθαλάσσια τμήματα μιας κατασκευής είναι η

αποαθητικοποίηση του οπλισμού και η απομάκρυνση του σιδήρου με την μορφή σκουριάς $\text{FeO} \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$.

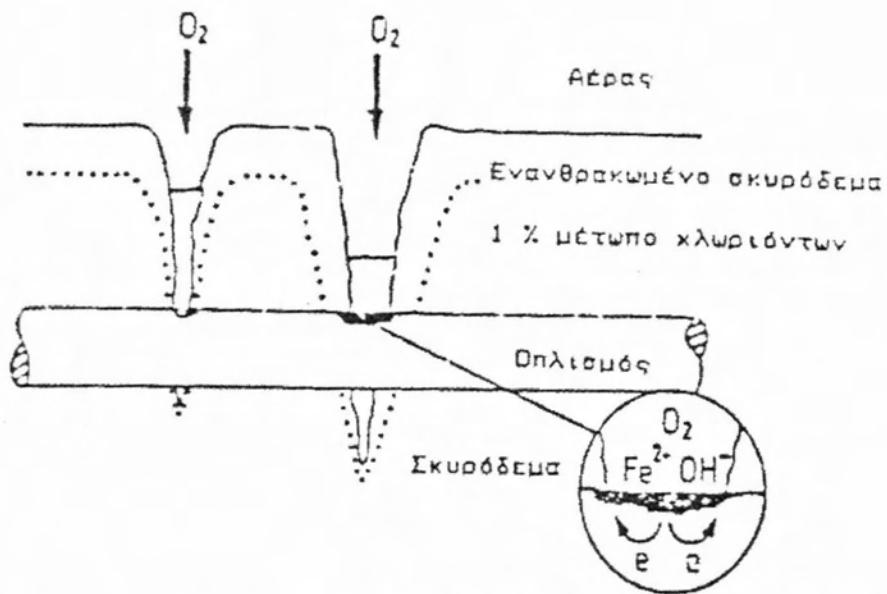
- **Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα.**

Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα έχει, πάντα, σαν αποτέλεσμα τη διευκόλυνση της μεταφοράς των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος (O_2 , CO_2 , Cl^-) στο εσωτερικό του σκυροδέματος και, κατά συνέπεια, στην επιφάνεια του οπλισμού. Η διείδυση των διαβρωτικών αυτών ουσιών από το περιβάλλον θα είναι τόσο ταχύτερη, όσο μεγαλύτερο θα είναι το πλάτος και το βάθος των ρωγμών. Αν οι ρωγμές φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, τότε υπάρχουν όλες οι προϋποθέσεις για την διάβρωσή του.

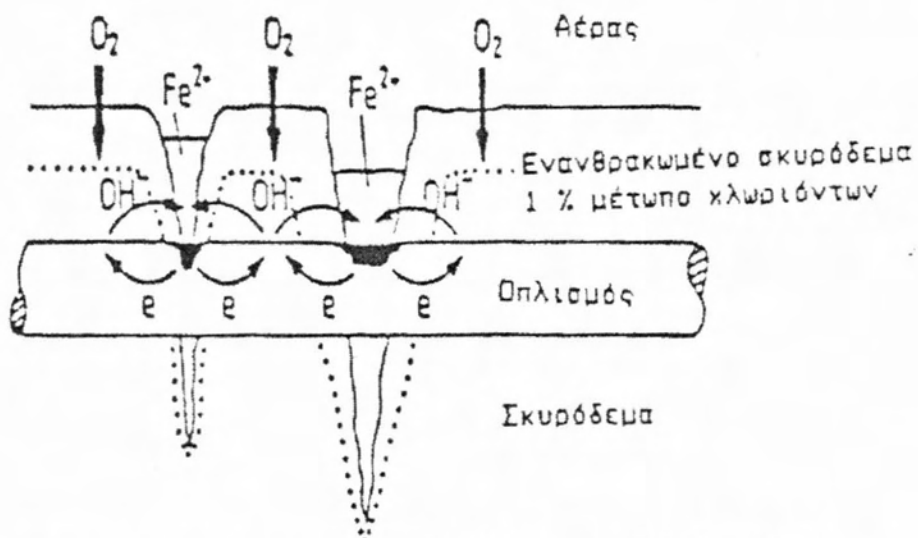
Η παρουσία των ρωγμών μπορεί να οφείλεται σε αστοχία στον υπολογισμό των τάσεων, σε μεταβολές της θερμοκρασίας, σε αστοχία κατά την συντήρηση του σκυροδέματος κ.λ.π.

Γενικά, στο σκυρόδεμα υπάρχουν ρωγμές πλάτους $< 2-3$ mm. Συνήθως, θεωρείται ότι οι ρωγμές αυτές δεν έχουν σημαντική επίδραση στη διάβρωση του σιδηροπλισμού, λόγω της μικρής μεταφοράς των διαβρωτικών ουσιών μέσα από αυτές, καθώς και λόγω της πλήρωσής τους με τα προϊόντα διάβρωσης του οπλισμού. Αυτό, όμως, είναι μόνο εν μέρει αληθές. Ο σχηματισμός συνεκτικού στρώματος από τα προϊόντα διάβρωσης εξαρτάται από τις συνθήκες σχηματισμού τους. Επιπλέον, τα λεπτά στρώματα των προϊόντων διάβρωσης αναδιαλύονται, όταν οι συνθήκες αλλάξουν. Γενικά, ρωγμές με πλάτος > 0.3 mm οδηγούν σε διάβρωση του οπλισμού. Η μεταφορά οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και χλωριόντων από τις ρωγμές είναι σημαντική, ακόμα και γι' αυτό το πλάτος (Σωτηριάδης, 2011).

Στα Σχήματα 2-3 και 2-4 παρουσιάζεται σχηματικά η διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με ρωγμές.



Σχήμα 2-3: Η διάβρωση του οπλισμού σε ρωγμές του σκυροδέματος (ιδιοδιάβρωση) (Σωτηριάδης, 2011).



Σχήμα 2-4: Η δημιουργία μακροστοιχείου διάβρωσης του οπλισμού σε μακροστοιχείο με ρωγμές (Σωτηριάδης, 2011).

3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ "ΠΡΑΣΙΝΟ" ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

3.1. Περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος.

3.1.1. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του τσιμέντου το οποίο ευθύνεται για περισσότερο από το 50% των εκπομπών CO₂ στο μίγμα του σκυροδέματος. Παρουσιάζονται δηλαδή οι πηγές παραγωγής και οι ποσότητες CO₂ που εκλύονται από την τσιμεντοβιομηχανία.

Το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» που προέρχεται από τις εκπομπές διαφόρων αερίων, των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (διοξείδιο του άνθρακα – CO₂, μεθάνιο – CH₄, κλπ) αναμένεται σύμφωνα με υπολογισμούς να προκαλέσει μια αύξηση στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά 1.9-5.3°C τα επόμενα χρόνια. Το πρόβλημα αυτό για να αντιμετωπιστεί επιβάλλει τον έλεγχο των αερίων εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει συστήσει στα μέλη της την εφαρμογή νέας φορολογικής πολιτικής των καυσίμων και της ενέργειας ώστε οι εκπομπές του CO₂ να περιοριστούν στα επίπεδα του 1990.

Παγκοσμίως υπολογίζεται ότι η βιομηχανία τσιμέντου παράγει 1.6 δισ. τόνους (t) CO₂, που αντιστοιχούν στο 5% περίπου των συνολικών εκπομπών CO₂ από όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι λοιπόν υπεύθυνη για μεγάλες ποσότητες εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές αυτές προέρχονται από:

- την μεταλλουργική διεργασία (πύρωση, θερμική διάσπαση) του ανθρακικού ασβεστίου CaCO₃, δηλ. της πρώτης ύλης (ασβεστόλιθοι), σε CaO και CO₂ μέσα στις περιστροφικές καμίνους των τσιμεντοβιομηχανιών, και
- την καύση των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) κατά την παραγωγή του τσιμέντου.

Από την καύση των ορυκτών καυσίμων προκύπτουν σύμφωνα με υπολογισμούς περίπου 0.63 t CO₂ ανά t τσιμέντου, ενώ από την πύρωση προκύπτουν 0.53 t CO₂ ανά t τσιμέντου. Συνολικά δηλαδή προκύπτουν 1.16 t CO₂ ανά t παραγόμενου τσιμέντου (Περυσινάκη, 2012).

Πίνακας 3-1: Παραγωγή CO₂ στις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένης και της ηλεκτρικής ενέργειας) (Περυσινάκη, 2012).

<i>Πηγές εκπομπών CO₂ στη βιομηχανία τσιμέντου</i>	<i>kg CO₂/t τσιμέντου</i>	<i>kg CO₂/m³ σκυροδέμα</i>	<i>Ποσοστό % συνολικού CO₂</i>
CO ₂ από την πύρωση του ασβεστολίθου	532	158.2	45.9
CO ₂ από την παραγωγή ενέργειας από καύσιμα	528	157.2	45.6
CO ₂ από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	99	29.3	8.5
<i>Συνολική παραγωγή CO₂</i>	<i>1159</i>	<i>344.7</i>	<i>100</i>

3.1.2. Άλλες επιβλαβείς εκπομπές στην ατμόσφαιρα.

Η τσιμεντοβιομηχανία και η βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος προκαλούν και άλλου είδους εκπομπές στην ατμόσφαιρα εκτός του CO₂, π.χ. σκόνη από την περιστροφική κάμινο, από την παραγωγή και ανάμιξη των πρώτων υλών, από την άλεση του κλίνκερ, από τις διαδικασίες ενσάκκισης και φόρτωσης του τσιμέντου κλπ. Ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της ρύπανσης είναι η δέσμευση, η συλλογή και ανακύκλωση της σκόνης στις διεργασίες παραγωγής του τσιμέντου. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται σήμερα αποδοτικά με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων, μηχανικών διατάξεων συλλογής, σακκόφιλτρων, κάλυψης των μεταφερόμενων υλικών κλπ.

Σημαντικό όμως πρόβλημα αποτελεί η εξουδετέρωση και αντιμετώπιση της έντονα αλκαλικής συμπεριφοράς της σκόνης της τσιμεντοβιομηχανίας. Συνήθως λοιπόν χρησιμοποιείται για επεξεργασία εδαφών γεωργικών καλλιεργειών και η απομένουσα ποσότητα αποτίθεται ως στείρο υλικό. Η χρησιμοποίηση αυτής της σκόνης για τη ρύθμιση του pH όξινων λιμνών στον Καναδά είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία επικίνδυνων αδιάλυτων αλάτων.

Μικρότερης αλλά όχι αμελητέας σπουδαιότητας είναι και οι εκπομπές άλλων ατμοσφαιρικών ρυπαντών (διοξείδιο του θείου – SO₂, οξειδία του αζώτου NO_x, τριοξείδιο του θείου – SO₃ κ.λπ.). Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται συνήθως αφενός με χρήση ως καυσίμων πρώτων υλών χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και αφετέρου με την δέσμευση των αερίων με τις πλέον σύγχρονες μεθόδους και με κατάλληλο εξοπλισμό περιβαλλοντικού ελέγχου (Περυσινάκη, 2012).

3.1.3. Ρύπανση των νερών.

Σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα που ανακύπτει στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος είναι η ρύπανση των υδάτων, με κυριότερο αυτό στη διαδικασία παραγωγής και χρήσης του σκυροδέματος. Η κατανάλωση νερού στις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος είναι το υπ' αριθμόν ένα πρόβλημα. Υπολογίζεται ότι χρειάζονται περίπου 2 m³ νερού ανά φορτηγό (μπετονιέρα) ανά ημέρα για έκπλυση και το pH του νερού που προκύπτει είναι περίπου 12. Η ισχυρή αλκαλικότητά του, το καθιστά ιδιαίτερα τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς. Στις σύγχρονες μονάδες έτοιμου σκυροδέματος υπάρχουν λίμνες απόρριψης των νερών έκπλυσης, όπου τα περιεχόμενα στερεά καθιζάνουν και το νερό υφίσταται επεξεργασία με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή του. Πολλές φορές επίσης υπάρχουν ειδικές εγκαταστάσεις απόρριψης του πλεονάζοντος σε μια κατασκευή σκυροδέματος για έκπλυση και ανάκτηση των αδρανών τα οποία επανατροφοδοτούνται στη μονάδα. Είναι φανερό ότι σοβαρό πρόβλημα προκύπτει από την ανεξέλεγκτη έκπλυση των φορτηγών μεταφοράς και των αντλιών τροφοδοσίας επί τόπου του έργου, γεγονός στο οποίο δεν έχει δοθεί η αναγκαία σημασία στη χώρα μας (Περυσινάκη, 2012).

3.2. Κατανάλωση ενέργειας από την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος.

Η σημερινή κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία τσιμέντου αντιπροσωπεύει το 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και σχεδόν το 5% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από την βιομηχανία. Το κόστος της ενέργειας αντιπροσωπεύει το 20-30% του κόστους παραγωγής του τσιμέντου. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από την καύση στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-2. Η μεγαλύτερη ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή τσιμέντου χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της περιστροφικής καμίνου.

Πίνακας 3-2: Ποσοστιαία (%) κατανάλωση καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου στην ΕΕ (Περυσινάκη, 2012).

Είδος καυσίμου	Ποσοστό % κ.β.
Άνθρακας	36
Petcoke	39
Λιγνίτης	6
Πετρέλαιο	7
Φυσικό αέριο	2
Εναλλακτικά καύσιμα	10
Σύνολο	100

Καταναλώνεται επίσης και ηλεκτρική ενέργεια περίπου 100 kWh/t τσιμέντου (ποσοστό 5-8% της συνολικής), που κατανέμεται ως εξής:

- 27.5% στην προετοιμασία των πρώτων υλών,
- 27.7% στις διεργασίες παραγωγής του κλίνκερ (κύκλωμα περιστροφικής καμίνου),
- 39.8% στις διεργασίες παραγωγής του τελικού προϊόντος (άλεση του κλίνκερ κλπ.), και
- 5% σε άλλες διεργασίες του συστήματος παραγωγής.

Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας είναι το σπουδαιότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος. Επειδή δε η παραγωγή τσιμέντου είναι μία ενεργοβόρος βιομηχανική δραστηριότητα, κατά συνέπεια και στο σκυρόδεμα ως δευτερογενές προϊόν ενσωματώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Η ενσωματωμένη ενέργεια ανά m³ σκυροδέματος, οφείλεται κατά 91.5% περίπου στην ενέργεια που χρειάστηκε στην παραγωγή του περιεχόμενου τσιμέντου (εξόρυξη πρώτων υλών, μεταφορά, θραύση, λειοτρίβηση, περιστροφική κάμινο, άλεση του κλίνκερ κλπ.) και μόνο το 8.5% στα αδρανή υλικά του σκυροδέματος (Περυσινάκη, 2012).

3.3. "Πράσινο" σκυρόδεμα.

Στη χώρα μας, με βάση την απογραφή της ΕΣΥΕ (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος) του 2000-2001, διαθέτουμε 3.44 εκ. οικοδομές με αποκλειστική χρήση κατοικίας. Εάν σε αυτά προσθέσουμε τα δημόσια κτίρια, τις βιομηχανίες, τα ξενοδοχεία, τους χώρους εξυπηρέτησης εργασίας (εργοτάξια, καταυλισμοί), καταυλισμούς προσφύγων, βρεφοκομεία-οικοτροφεία, ιδρύματα φροντίδας ηλικιωμένων, καταλύματα εκπαιδευομένων, στρατώνες, μοναστήρια, ορφανοτροφεία, αναρρωτήρια και καταλύματα και κτίρια που δεν έχουν καταγραφεί, ο συνολικός αριθμός θα πρέπει να προσεγγίζει τα 5 εκ. οικοδομήματα. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούν, σύμφωνα με την απογραφή της ΕΣΥΕ, είναι το μπετόν (1.909.312 τόνους), μέταλλο (21.718 τόνους), ξύλο (20.622 τόνους), τούβλα-τσιμεντόλιθοι (1.083.000 τόνους), πέτρα (891.649 τόνους), άλλα υλικά (56.852 τόνους). Ο τομέας αυτός, σύμφωνα με το Υπουργείο Ανάπτυξης για το ενεργειακό ισοζύγιο, απορροφά 5491 σύνολο όλων των προϊόντων (πετρέλαιο, άνθρακας κ.α.) σε σύνολο 31509 δηλαδή περίπου το 17.5%. Με δεδομένο επίσης ότι οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκαν σε ανησυχητικά επίπεδα κατά το διάστημα 2000-2004, με ρυθμό τρεις φορές μεγαλύτερο απ' ό τι στη δεκαετία του '90. Οι εκπομπές του CO₂ αυξήθηκαν κατά 3.1% σε ετήσια βάση στις αρχές της τρέχουσας δεκαετίας, έναντι ρυθμού 1.1% στη δεκαετία του '90, όπως τονίζεται στην έκθεση που δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα της περιοδικής έκδοσης της Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών (PNAS).

Σύμφωνα με τους συντάκτες της έκθεσης, αυτή η ταχεία αύξηση των εκπομπών του CO₂ οφείλεται κατά μέγα μέρος στην κατανάλωση ενέργειας και στην αύξηση της χρήσης άνθρακα στην παραγωγή ενέργειας (Κουρούς, 2009).

Επίσης, οι φυσικοί πόροι δεν είναι ανεξάντλητοι (Κουρούς, 2009). Άρα από τη συνεχή εξόρυξη υλικών τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως αδρανή σκυροδέματος υπάρχει ο κίνδυνος εξάντλησης των αποθεμάτων τους. Υπάρχει και μία τεράστια απαίτηση νερού από τη βιομηχανία σκυροδέματος η οποία χρησιμοποιεί πάνω από 1 τρισεκ. λίτρα νερού κάθε χρόνο σε όλο τον κόσμο. Τέλος, η κατεδάφιση και διάθεση παλαιών ή κατεστραμμένων δομών σκυροδέματος, πεζοδρομίων κ.λπ. αποτελεί μια άλλη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Τα μάζα συνεισφέρουν κατά ένα μεγάλο μέρος στα στερεά απόβλητά μας, και συγκεκριμένα αποτελούν το μεγαλύτερο συστατικό τους (Meyer, 2013).

Για όλους τους παραπάνω λόγους η βιομηχανία σκυροδέματος έχει εργαστεί εδώ και αρκετές δεκαετίες για την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθιστώντας το μετρίον πιο φιλικό προς το περιβάλλον, ή αλλιώς πιο "πράσινο". Τα τελευταία χρόνια ο χαρακτηρισμός "πράσινο" χρησιμοποιείται σαν συνώνυμο του "βιώσιμου". Δηλαδή, το "πράσινο" σκυρόδεμα είναι ένα υλικό πιο φιλικό προς το περιβάλλον.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες που οδηγούν στην παραγωγή αυτού του σκυροδέματος. Πρώτον, είναι η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Portland με άλλα τσιμεντοειδή υλικά, όπως ιπτάμενη τέφρα, κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, κλπ. Τα περισσότερα από αυτά τα υλικά είναι ποζολάνες και είναι παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση τους έχει διπλό πλεονέκτημα καθώς τα υλικά αυτά χρησιμεύουν ως μερική αντικατάσταση του τσιμέντου και ταυτόχρονα αποφεύγεται η ανάγκη να εναποτεθούν στη γη.

Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από διάφορα υλικά τα οποία ανήκουν στα στερεά απόβλητα, όπως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, γυαλί μετά την χρήση του, άχρηστα ελαστικά, πλαστικά, ίνες χαλιού, κλπ. Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά, πληρωτικά ή ίνες ενίσχυσης. Με τον προσδιορισμό και την αξιοποίηση ορισμένων ιδιοτήτων είναι δυνατό να αποκτήσουν αξία αυτά τα υλικά, τα οποία διαφορετικά θα έπρεπε να απορρίπτονται με σημαντικό κόστος. Περιλαμβάνονται, επίσης, σε αυτή την κατηγορία και ανανεώσιμα υλικά, όπως τα παραπροϊόντα από ξύλο, μπαμπού, και διάφορες φυσικές ίνες όπως σιζάλ και κάνναβη.

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει την μείωση της κατανάλωσης νερού (σημαντικό σε άνοδρες χώρες), τη βελτιωμένη ανθεκτικότητα (η οποία μειώνει το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης), τα μίγματα σκυροδέματος για ειδικά σκυροδέματα, όπως για εφαρμογές με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, βελτιωμένη αντοχή σε θραύση

και την ικανότητα διάχυσης της ενέργειας, το διαπερατό σκυρόδεμα (για την μείωση των ομβρίων υδάτων απορροής), για παγίδευση διοξειδίου του άνθρακα μέσω της διαδικασίας ενανθράκωσης, κλπ. (Meyer, 2013).

Σε επόμενα κεφάλαια θα γίνει λεπτομερής περιγραφή κάποιων από τους παραπάνω τρόπους παραγωγής "πράσινου" σκυροδέματος και θα σχολιαστούν οι επιδράσεις τους σε διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος (οπλισμένου ή άοπλου).

4. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ.

4.1. Ιπτάμενη τέφρα.

4.1.1. Τι είναι η ιπτάμενη τέφρα.

Η ιπτάμενη τέφρα είναι παραπροϊόν που συγκρατείται στα φίλτρα ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450, (2005), για τα κατασκευαστικά υλικά, η ιπτάμενη τέφρα ορίζεται ως το λεπτόκοκκο υλικό που αποτελείται κυρίως από σφαιρικά, υαλώδη σωματίδια τα οποία προέρχονται από την καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα. Λαμβάνεται από ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα, τα οποία δεσμεύουν την ιπτάμενη τέφρα από τους καπνοδόχους των λεβήτων καύσης κονιορτοποιημένου άνθρακα (Καραστεργίου, 2009). Η δραστηριότητα των τεφρών οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητά τους σε SiO_2 , Al_2O_3 και CaO . Οι δύο πρώτες ενώσεις προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ το οξείδιο του πυριτίου και κυρίως του ασβεστίου προσδίδουν στην τέφρα υδραυλικές ιδιότητες (Περυσινάκη, 2012). Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να είναι πυριτικής ή ασβεστολιθικής προέλευσης και διακρίνεται ανάλογα με την σύστασή της σε πυριτική (F) (η οποία περιέχει λιγότερο από 10% CaO) με ποζολανικές ιδιότητες και ασβεστοπυριτική ή ασβεστούχα (C) (η οποία περιέχει 10-35% CaO) με ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες αντίστοιχα (Καραστεργίου, 2009).

Όπως και στην χώρα μας έτσι και σε παγκόσμια κλίμακα ο διαρκώς αυξανόμενος ρυθμός της χρησιμοποίησης στερεών καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται παντού οι ποσότητες της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-1 (Στιβανάκης, 2003).

Πίνακας 4-1: Ποσότητες των παραγόμενων και αξιοποιούμενων τεφρών σε διάφορες χώρες.

<i>Χώρα</i>	<i>Έτος</i>	<i>Ποσότητα σε εκατ. τόνους</i>	<i>Αξιοποίηση (%)</i>
<i>Βουλγαρία</i>	<i>1998</i>	<i>6.5</i>	<i>8.0</i>
<i>Γερμανία</i>	<i>1999</i>	<i>34.0</i>	<i>35.0</i>
<i>Αυστραλία</i>	<i>2000</i>	<i>8.4</i>	<i>14.0</i>
<i>Μεγ. Βρετανία</i>	<i>2000</i>	<i>11.0</i>	<i>25.0</i>
<i>Γαλλία</i>	<i>1998</i>	<i>6.2</i>	<i>44.5</i>
<i>Πολωνία</i>	<i>1997</i>	<i>17.0</i>	<i>35.0</i>
<i>(Κ. Α. Κ.)</i>	<i>1998</i>	<i>85.0</i>	<i>8.0</i>
<i>Τσεχοσλοβακία</i>	<i>1997</i>	<i>19.0</i>	<i>17.0</i>
<i>Ελλάς</i>	<i>2001</i>	<i>13.0</i>	<i>15.0</i>
<i>Η. Π. Α.</i>	<i>1999</i>	<i>65.2</i>	<i>20.0</i>

Η έρευνα για τις ιδιότητες και τις χρήσεις της ιπτάμενης τέφρας σε διάφορους τομείς ξεκίνησαν στο Ηνωμένο Βασίλειο προς το τέλος του 1940. Από εκείνη τη στιγμή και μετά αρκετές βιομηχανίες, όπως βιομηχανίες ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν συνεχίσει να ερευνούν το θέμα. Η διάδοση των εξελίξεων και ερευνών που πραγματοποιούνται, γίνεται γενικά με δημοσιεύσεις από τις βιομηχανίες μέσω των τεχνικών δελτίων. Οι πολιτικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές τοποθετήσεις τώρα απαιτούν να εξεταστούν όλες οι πτυχές ώστε να γίνει δυνατή μεγαλύτερη χρήση του υλικού (Καραστεργίου, 2009).

4.1.2. Κατάταξη ιπτάμενων τεφρών.

Η διάκριση των ιπτάμενων τεφρών αφορά την χημική σύστασή τους η οποία εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και από την ορυκτολογική σύσταση των γαιωδών προσμίξεων που συνοδεύουν το καύσιμο στην εξόρυξη.

Γενικά οι συγκεντρώσεις των οξειδίων που αποτελούν τις τέφρες μετά την καύση του περιεχόμενου άνθρακα και την διάσπαση των ανθρακικών του στερεού καυσίμου παρουσιάζονται αισθητά αυξημένες στο υλικό (ιπτάμενη τέφρα) από τις αρχικές (στον εξορυσσόμενο λιγνίτη) λόγω συμπύκνωσης (εμπλουτισμού).

Μια εικόνα των διακυμάνσεων στη σύσταση των κύριων συστατικών των ιπτάμενων τεφρών διεθνώς δείχνει ο Πίνακας 4-2.

Πίνακας 4-2: Διακυμάνσεις της χημικής σύστασης (% κ.β.) ιπτάμενων τεφρών από διάφορες χώρες (Στιβανάκης, 2003).

Χώρα	Απόλλειες Πύρωσης	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Αυστραλία	0,1 - 1,2	53 - 63	25 - 28	2 - 6	1 - 7	1 - 2	0,1 - 0,8	1,8 - 3,2	0,8 - 2,4
Βουλγαρία	0,5 - 19,7	40 - 60	12 - 32	5 - 18	4 - 12	1 - 5	0,9 - 9,6		
Γερμανία	1,5 - 20,1	34 - 50	21 - 29	8 - 21	2 - 12	1 - 5	0,1 - 2,1		
Ελλάς	2,0 - 5,0	25 - 50	15 - 20	5 - 8	10-35	2 - 3	1,5 - 8	1,0-2,0	0,5 - 0,8
Γαλλία	0,3 - 15,2	29 - 54	10 - 33	5 - 15	1 - 39	1 - 5	0,1 - 7,0	0,7 - 6,0	0,1 - 0,9
Μεγ. Βρετανία	0,6 - 11,7	41 - 51	23 - 24	6 - 14	1 - 8	1,4 - 3	0,6 - 6,8	1,8 - 4,2	0,2 - 1,9
Ινδία	2,2 - 6,5	51 - 60	19 - 29	2 - 19	2 - 4	0 - 2	0,0 - 0,5		
Ιαπωνία	0,1 - 1,2	53 - 63	25 - 28	2 - 6	1 - 7	1 - 2	0,1 - 0,8	1,8 - 3,2	0,8 - 2,4
Πολωνία	1 - 10	35 - 60	6 - 36	5 - 12	2 - 35	1 - 4	0,1 - 8,0	0,1 - 2,7	0,1 - 2,0
Ρουμανία	0,2 - 4,5	39 - 53	18 - 29	7 - 16	3 - 13	1 - 4	0,5 - 5,9	0,3 - 2,2	0,1 - 1,8
Κ.Α.Κ.	0,5 - 22,5	36 - 63	11 - 40	4 - 17	1 - 32	0 - 5	0,1 - 2,5	1,1 - 3,6	0,5 - 1,2
Ουγγαρία	1 - 5,0	41 - 60	16 - 34	5 - 17	1 - 11	1 - 7	0,5 - 7,0	0, - 2,2	0,2 - 2,5
Η.Π.Α.	1 - 18,0	32 - 52	14 - 28	8 - 31	11-12	0 - 2	0,0 - 3,0		

Η βασικότερη διάκριση λόγω της χημικής σύστασης είναι αυτή που προκύπτει από την τιμή του λόγου CaO/SiO_2 που κατατάσσει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τέφρες βασικές ή υψηλής ασβέστου (HA) ή Calcareous fly ashes
- Τέφρες όξινης ή χαμηλής ασβέστου (LA) ή Siliceous fly ashes

Τέφρες που χαρακτηρίζονται βασικές, έχουν συντελεστή $CaO/SiO_2 \geq 1$ (Στιβανάκης, 2003). Οι τέφρες αυτές, οι λεγόμενες ασβεστοπυριτικές, προέρχονται από την καύση κατώτερης γεωλογικής περιόδου ανθράκων και λιγνιτών και έχουν επιπροσθέτως υδραυλικές ιδιότητες (π.χ. πήζουν μόνες τους) καθώς και ποζολανικές ιδιότητες που αποδίδονται στο ελεύθερο CaO που περιέχουν. Τέτοιου είδους τέφρες συνίστανται κυρίως από δραστικό CaO, SiO₂, Al₂O₃ και σε μικρότερα ποσοστά από Fe₂O₃ και άλλα οξείδια. Για την Ευρώπη γενικότερα για να χαρακτηριστεί μια ιπτάμενη τέφρα ως ασβεστόχος πρέπει να έχει ποσοστό δραστικού CaO > 10% κ.β. (Μπότσιος, 2011).

Τέφρες που χαρακτηρίζονται όξινης, έχουν συντελεστή $CaO/SiO_2 < 0,3$ (Στιβανάκης, 2003). Οι τέφρες αυτές, οι λεγόμενες αργιλοπυριτικές, προέρχονται από την καύση ανθρακιτών ή γαιανθράκων πλούσιων σε οργανικό μέρος και έχουν ποζολανικές ιδιότητες. Τέτοιου είδους τέφρες συνίστανται κυρίως από δραστικό SiO₂ και Al₂O₃ και σε μικρότερα ποσοστά από Fe₂O₃ και άλλα οξείδια. Για την Ευρώπη

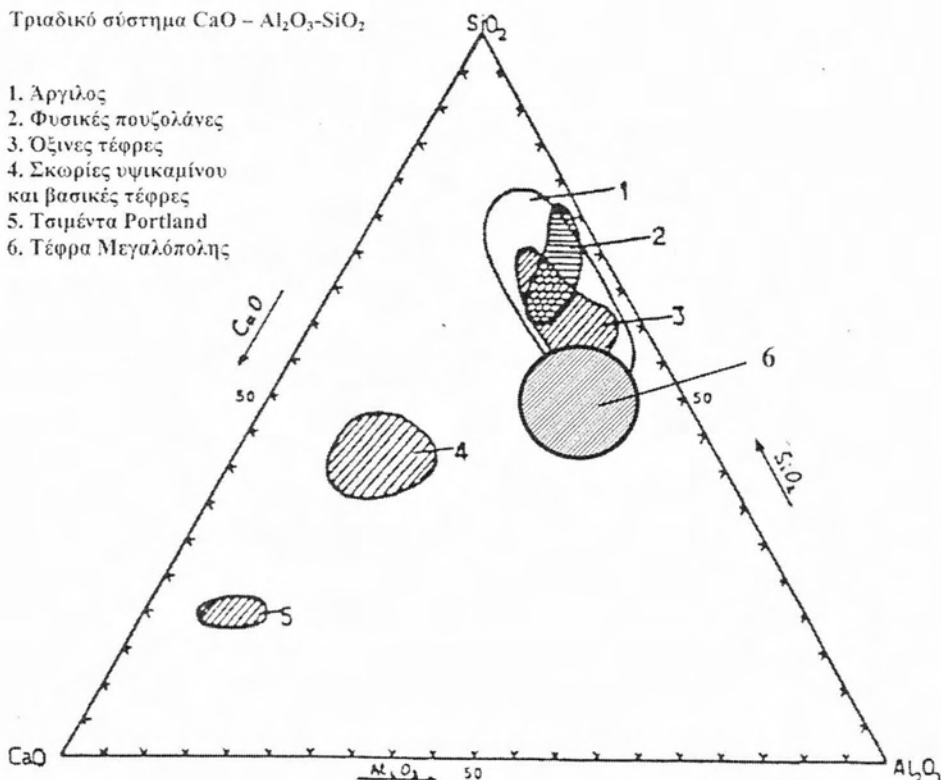
γενικότερα για να χαρακτηριστεί μια ιπτάμενη τέφρα ως πυριτική πρέπει να έχει ποσοστό δραστικού $\text{CaO} < 10\%$ κ.β. και θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι το ελεύθερο CaO δε θα υπερβαίνει το 2.5% (Μπότσιος, 2011).

Στην χώρα μας, στους ενεργειακούς σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας παράγονται κατά κανόνα βασικές τέφρες ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.86-1.40$), ενώ στους σταθμούς της Μεγαλόπολης όξινης ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.25-0.38$) (Πίνακας 4-3). Η ειδική επιφάνεια Blaine του τσιμέντου Portland κυμαίνεται από 2000-6000 cm^2/g .

Πίνακας 4-3: Χημική σύσταση του τσιμέντου Portland και των ιπτάμενων τεφρών της Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας (Στιβανάκης, 2003).

Οξειδία	Κλίνκερ Τσιμέντου Portland (%)	Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης (%)	Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας (%)
SiO_2	22,5	40 – 45	25 – 35
Al_2O_3	5,5	15 – 20	15 – 20
Fe_2O_3	2,5	7 – 8	5 – 7
CaO	66	12 – 15 (ελευθ. 0)	30 – 35 (ελ.10 –15)
MgO	1,35	$\cong 2$	$\cong 3$
SO_2	0,6	1,5 – 2,5	4 – 8
K_2O	0,75	1,5 – 2,0	1,0
Na_2O	0,40	$\cong 0,5$	0,6 – 0,8
TiO_2	$\cong 0,25$	$\cong 0,8$	$\cong 0,5$
Απώλεια πύρωσης	0,15	2	5
Αδιαλ. υπόλειμμα	0,10	45	20

Η περιοχή στην οποία εμφανίζονται οι όξινης τέφρες στο τριαδικό σύστημα Al_2O_3 - SiO_2 - CaO (Εικόνα 4-1) βρίσκεται πολύ κοντά και επικαλύπτεται εν μέρει με την περιοχή εμφάνισης των φυσικών πουζολανών (θηραϊκή γη, ηφαιστειακοί τόφφοι). Αντιθέτως η περιοχή των βασικών τεφρών πλησιάζει την περιοχή υδραυλικών κονιών (τσιμέντων) (Στιβανάκης, 2003).



Εικόνα 4-1: Τριμερές διάγραμμα $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$. Χαρακτηριστικές περιοχές υδραυλικών κονιών και ποζολανών (Στιβανάκης, 2003).

4.1.3. Παραγωγή και αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας.

Η παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας στην Ευρώπη ανέρχεται σε 45.000.000 τόνους ενώ στην Ελλάδα, σύμφωνα με τα στοιχεία της ΑΗΣ ΔΕΗ παράγονται 11.500.000 τόνοι (Μπότσιος, 2011). Πιο συγκεκριμένα, στην Ελλάδα το 2003 η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας ανέρχονταν περίπου στους 12.000.000 τόνους όπου 80% αυτής της ποσότητας προέρχεται από την περιοχή της Πτολεμαΐδας. Το υπόλοιπο προέρχεται από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που βρίσκονται στην Μεγαλόπολη (Καραστεργίου, 2009). Συγκρίνοντας το ποσοστό αξιοποίησης της χώρας μας με τον αντίστοιχο μέσο όρο της Ευρώπης υπάρχει σημαντική υστέρηση, εφόσον αξιοποιείται περίπου 1 με 1.1 εκατομμύρια τόνους τέφρας, δηλαδή το 10% της παραγόμενης ποσότητας, την ίδια στιγμή που στην Ευρώπη το ποσοστό εκμετάλλευσης φτάνει γύρω στο 18.2% (Μπάτης, Ρουτούλας και Πανταζοπούλου, 2009).

Θα μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε όλη την τέφρα διοχετεύοντας την στην κατασκευή και στην Οδοποιία πράγμα που θα οδηγούσε σε τριπλασιασμό του ποσοστού αξιοποίησης. Όσο αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος, οι ερευνητές πιστεύουν ότι η αντικατάσταση πρώτων υλών και κυρίως ασβεστόλιθου οδηγεί με την σειρά της σε μείωση των εκπομπών CO_2 . Από

την οικονομική σκοπιά η μεγιστοποίηση της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας μέσω μιας λελογισμένης αντικατάστασης του τσιμέντου, θα βοηθούσε σημαντικά στη βιώσιμη ανάπτυξη των δομικών υλικών, μειώνοντας το κόστος της κατασκευής (Εσκίολου).

Σε όλες τις χώρες που χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες) έχουν καταβληθεί έντονες προσπάθειες για την αξιοποίηση της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας. Αυτό οφείλεται αφενός μεν στην αύξηση του κόστους απόρριψης και στην έλλειψη κατάλληλων επιφανειών απόθεσης, αφετέρου δε στο οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την χρησιμοποίησή της.

Σχετικά με τις τεχνολογικές εφαρμογές της αξιοποιούμενης σήμερα ιπτάμενης τέφρας το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροφάται στον κατασκευαστικό τομέα και ιδιαίτερα όπως αναγράφεται και στον Πίνακα 4-4 στις εξής περιοχές (Στιβανάκης, 2003):

- Προσθήκη στο μπετόν ως αδρανές.
- Στις τσιμεντοβιομηχανίες, ως πρόσθετο υλικό του τσιμέντου.
- Στην οδοποιία ως υλικό επίστρωσης.

Πίνακας 4-4: Ποσά παραγόμενης τέφρας και περιοχές αξιοποίησής της σε διάφορες χώρες (οι ποσότητες σε 10^6 t) (Στιβανάκης, 2003).

<i>Χώρα</i>	<i>Ποσότητα τέφρας</i>	<i>Ποσότητα ιπτ. τέφρας</i>	<i>Αξιοποιούμενη ιπτ. τέφρα</i>	<i>Στα προϊόντα μπετόν</i>	<i>Στην τσιμεντοβιομηχανία</i>	<i>Στην οδοποιία</i>
<i>Η.Π.Α.</i>	65.2	50	10	3.9	0.8	2.8
<i>Μεγ. Βρετανία</i>	11	10	2.5	1.0	<<0.1	0.7
<i>Γαλλία</i>	6.2	4.2	2.0	<<0.1	1.2	0.4
<i>Καναδάς</i>	3.2	1.1	0.3	0.2	—	—
<i>Γερμανία</i>	34	16.6	5.8	2.8	0.8	0.5

Γενικά, οι εφαρμογές της τέφρας ανάλογα με τον τύπο της είναι οι ακόλουθες (Μπότσιος, 2011):

Ακατέργαστη.

- Σταθεροποίηση υπόβασης οδοποιίας
- Κατασκευή υποβάσεων και άκαμπτων οδοστρωμάτων
- Στεγάνωση εδαφών
- Σταθεροποίηση πρανών και εδαφών θεμελιώσεων

Κατεργασμένη.

- Μαζικές κατασκευές (τοιχοι αντιστήριξης, φράγματα, μπλόκια)
- Δύσκαμπτα οδοστρώματα
- Πίστες αεροδρομίων
- Διαχωριστικά δρόμων, New jersey, τριγωνικές τάφροι

- Προϊόντα σκυροδέματος: Τσιμεντοσωλήνες, στραγγιστήρια, κρασπεδόρειθρα, κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίου
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για επισκευές και σταθεροποίηση σηράγγων

Για τον παραπάνω διαχωρισμό αξίζει να σημειωθεί ότι οι ελληνικές τέφρες σύμφωνα με το Σχέδιο Εθνικών Προδιαγραφών και ανάλογα με την επεξεργασία που έχουν υποστεί πριν διατεθούν στην αγορά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην κατηγορία EIT1, ακατέργαστες τέφρες και στην κατηγορία EIT2, κατεργασμένες ιπτάμενες τέφρες. Τα όρια για την συγκέντρωση των θεικών και του ελεύθερου οξειδίου για τις δύο κατηγορίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-5: Κατηγορίες Ελληνικών ιπταμένων τεφρών (Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων, 2006).

	R45	SO₃	CaO_f
EIT1	≤45%	≤7%	—
EIT2	≤30%	≤5%	≤3%

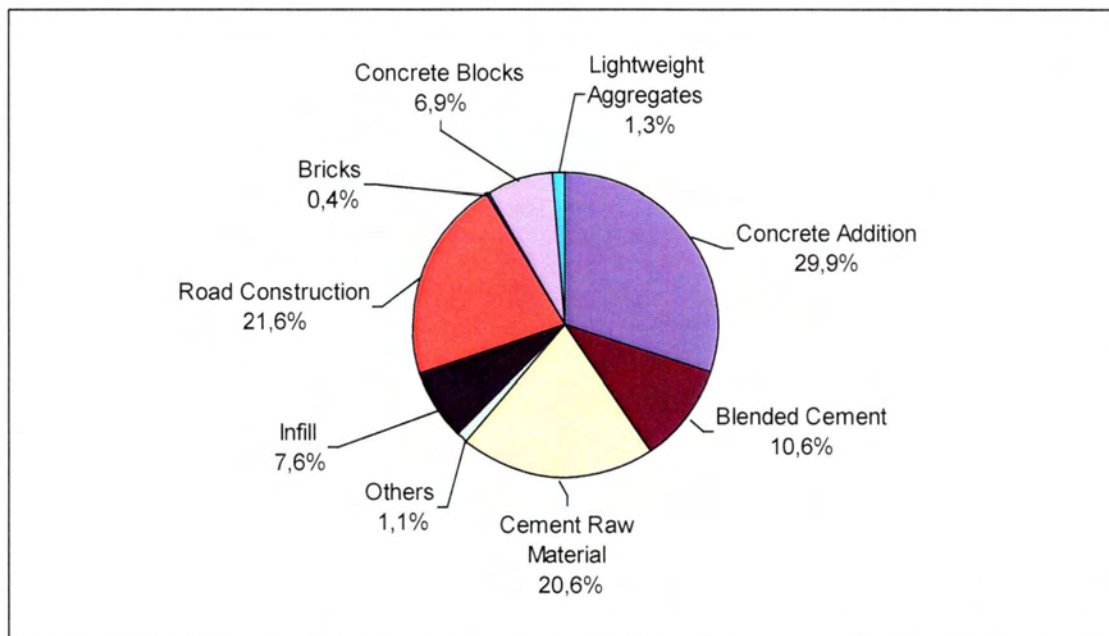
Η κατηγορία EIT1 περιλαμβάνει τις ιπτάμενες τέφρες που διατίθενται στην αγορά όπως ακριβώς συλλέγονται ή με στοιχειώδη ομογενοποίηση επιλεκτικά συλλεγόμενου υλικού. Η κατηγορία EIT2 περιλαμβάνει επεξεργασμένες ιπτάμενες τέφρες, οι οποίες μπορούν να αντικαταστήσουν ποσότητα τσιμέντου στην παραγωγή σκυροδέματος. Για την επεξεργασία των ιπταμένων τεφρών είναι απαραίτητη η ομογενοποίηση, η άλεση και η υδρόλυση των τεφρών και ο ποιοτικός έλεγχος αυτών έτσι ώστε να προκύψει υλικό που να εμπίπτει στις διατάξεις του κανονισμού (Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων, 2006).

Εκτός από τις προαναφερθείσες υπάρχει και ένα πλήθος άλλων εφαρμογών όπου η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται ή θα μπορούσε με επιτυχία να χρησιμοποιηθεί. Οι κυριότερες από αυτές είναι (Στιβανάκης, 2003):

- Ως υδραυλικό συνδετικό υλικό σε μίγμα με CaO
- Στην κατασκευή ελαφροβαρών τσιμεντολίθων και αδρανών
- Στο αεριομετόν και ασφαλτομετόν
- Στην κεραμική και πλινθοποιία
- Στην γεωργία και εξουδετέρωση όξινων εδαφών
- Στην εξυγίανση βιομηχανικών αποβλήτων
- Στην ανάκτηση ιχνοστοιχείων
- Στη χημεία για προσροφητικές και καταλυτικές δράσεις
- Στη βιομηχανία πλαστικών (υλικό πλήρωσης PVC, πολυστυρολίου και αφρωδών υλικών)
- Στη βιομηχανία χρωμάτων
- Στην κατασκευή κυλινδρούμενου σκυροδέματος

- Στην απορρύπανση
- Στον εμπλουτισμό εδαφών με ιχνοστοιχεία

Στο παρακάτω διάγραμμα πίτας βλέπουμε την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε οικοδομικά και τεχνικά έργα στην Ευρώπη μέχρι το 2000.



Διάγραμμα 4-1: Αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε οικοδομικά και τεχνικά έργα στην Ευρώπη μέχρι το 2000 (Καραστεργίου, 2009).

4.1.4. Αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε τσιμεντοβιομηχανίες του εξωτερικού.

Σε εργασία του Everett, (1995), αναφέρεται ότι σε μια από τις μεγαλύτερες τσιμεντοβιομηχανίες της Βορείου Αμερικής, διακόπηκε τελείως η χρήση του σχιστόλιθου και αντικαταστάθηκε με ιπτάμενη τέφρα και απόβλητα σιδηρούχων μεταλλευμάτων.

Ο Miller, (1980), αναφέρει την εισαγωγή 10% ιπτάμενης τέφρας απευθείας στη ζώνη καύσης, στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου Portland Ålborg, στην περιοχή Rórdal της Δανίας. Το παραχθέν κλίνκερ ήταν καλής ποιότητας και παρουσίασε κανονική κατανομή φάσεων. Σε μεταγενέστερη μελέτη που αναφέρεται στην ίδια τσιμεντοβιομηχανία, σημειώνεται ότι η βελτίωση του τρόπου εισαγωγής της τέφρας στο μίγμα των πρώτων υλών και η εγκατάσταση μιας καινούριας μονάδας προθερμαντήρα (precalciner), επέτρεψε την αύξηση του ποσοστού εισαγωγής της ιπτάμενης τέφρας στη ζώνη καύσης στο 24%, χωρίς επιβλαβείς συνέπειες στην ποιότητα του κλίνκερ ή στο περιβάλλον. Αναφέρεται ότι η επεξεργασία 2,3 εκατομμ. τόνων ιπτάμενης τέφρας είχε ως αποτέλεσμα την αξιοποίηση περισσότερου από το 50% του προϊόντος ως πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου.

Δύο μονάδες παραγωγής τσιμέντου στο Βέλγιο που εφαρμόζουν την υγρή μέθοδο, χρησιμοποίησαν επίσης ιπτάμενη τέφρα. Παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση στην υγρασία του πολτού, ελάττωση της εκπεμπόμενης σκόνης και μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Παρόλο που το κλίνκερ παρουσίασε αυξημένη ομοιογένεια των κυριότερων φάσεων, εμφανίστηκε υπερεψημένο και δυσάλεστο, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για την άλεση της τέφρας.

Μια γιαπωνέζικη τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποίησε επίσης ιπτάμενες τέφρες πλούσιες σε πυρίτιο ως μερικό υποκατάστατο της αργίλου στο μίγμα των πρώτων υλών.

Έχει επίσης αναφερθεί σε μια μελέτη του Harada, (1991), η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας και η μεγάλη χρησιμότητά της στην παρασκευή κλίνκερ. Η ιπτάμενη τέφρα αντικατέστησε την άργιλο στο μίγμα των πρώτων υλών και δεν παρουσιάστηκε κανένα πρόβλημα με την κοκκομετρία ή την παρουσία περιορισμένης ποσότητας άκαυστου άνθρακα στην τέφρα.

Η χρήση ιπτάμενης τέφρας έχει εφαρμοστεί και στην ινδική βιομηχανία τσιμέντου σύμφωνα με μελέτες των Mullick and Ahluwalia, (1992), και Ahluwalia και Page.

Σε άλλη μελέτη που έγινε στην Ινδία, ο Gore et al., (1992), αντικατέστησαν την άργιλο με ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 6% στο μίγμα τροφοδοσίας, όπου εφαρμόστηκε η υγρή μέθοδος παραγωγής τσιμέντου. Η τροποποίηση στο μίγμα τροφοδοσίας λόγω της υποκατάστασης υλικών με ιπτάμενη τέφρα απέφερε αρκετά υλικά, λειτουργικά και ενεργειακά οφέλη.

Σε εργασία του Kelly, (1994), διερευνήθηκε η παραγωγή κλίνκερ όπου χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα ως υποκατάστατο του σχιστόλιθου στο μίγμα των πρώτων υλών. Στη συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται ότι ο βαθμός κορεσμού σε άσβεστο, ο πυριτικός δείκτης και ο αργιλικός δείκτης παρουσίασαν υψηλότερες τιμές σε σχέση με το μίγμα που περιείχε την ίδια ποσότητα σε σχιστόλιθο.

Η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας ως συστατικό της φαρίνας έχει αναφερθεί και από τους Erel et al., (1988). Η έρευνά τους έδειξε ότι ήταν δυνατή η υποκατάσταση της αργίλου και του ασβεστόλιθου στο μίγμα των πρώτων υλών από ιπτάμενη τέφρα εφόσον το επιτρέπει η χημική τους συμβατότητα. Προκειμένου να ξεπεραστούν προβλήματα που σχετίζονται με τη συμβατότητα των τεφρών στη φαρίνα, οι συγγραφείς προτείνουν την προσθήκη περισσότερων του ενός τύπου τέφρας (διαφορετικής σύστασης) στη φαρίνα του τσιμέντου. Στην ίδια εργασία αναφέρεται η θετική επίδραση που είχε η προσθήκη των τεφρών στην εψησιμότητα εξεταζόμενων φαρινών (Μπότσιος, 2011).

4.1.5. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την χρήση της ιπτάμενης τέφρας.

Βελτιωμένες ιδιότητες.

Η ιπτάμενη τέφρα αντιδρά με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που προκύπτει από την ενυδάτωση του τσιμέντου και σχηματίζει ένυδρο πυριτικό ασβέστιο, που έχει παρεμφερείς ιδιότητες με το πυριτικό τριασβέστιο και διασβέστιο. Μέσω αυτής της διεργασίας, η ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει θετικά στην αντίσταση του σκυροδέματος σε θεικές ενώσεις, μειώνει την διαπερατότητά του, συνεισφέρει στην μείωση του λόγου N/T και βελτιώνει την ρευστότητα (ιξώδες) και το εργάσιμο του σκυροδέματος. Ο ρυθμός όμως απόκτησης της πρώιμης αντοχής του σκυροδέματος εξαρτάται από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης τέφρας. Περισσότερο ευνοϊκή συμπεριφορά παρουσιάζει η τέφρα τύπου C (ασβεστούχα) έναντι της F (πυριτικής), ενώ μακροπρόθεσμα η αντοχή που προσδίδει η ιπτάμενη τέφρα είναι μεγαλύτερη από του κοινού σκυροδέματος (Περυσινάκη, 2012).

Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας στο τσιμέντο ή στο σκυρόδεμα ενισχύει την ανθεκτικότητά τους στο χρόνο γιατί:

- Δεσμεύει το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που εκλύεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου.
- Ενισχύει την ενδοεπιφανειακή ζώνη λόγω ποζολανικής αντίδρασης.
- Μειώνει το πορώδες.
- Σκυρόδεμα με Ι.Τ. ενδείκνυται για υποθαλάσσιες κατασκευές.

Επίσης προσθήκη ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα:

- Περιορίζει την τάση για την ανάπτυξη ρωγμών που οφείλεται στην θερμότητα ενυδάτωσης που εκλύεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου Portland. Γι' αυτό η Ι.Τ. ενδείκνυται για μαζικές κατασκευές μεγάλου όγκου.
- Βελτιώνει ειδικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος σε νωπή ή σκληρυμένη κατάσταση.

Σκυρόδεμα με σημαντικό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας δεν αναπτύσσει πρώιμες αντοχές (1, 3, 7 ημερών) με τον ίδιο ρυθμό που αναπτύσσει το καθαρό τσιμέντο Portland λόγω αργού ρυθμού σκλήρυνσης (Καραστεργίου, 2009).

Οικονομικά οφέλη.

Από την μερική αντικατάσταση του κλίνκερ του τσιμέντου με Ι.Τ., συνήθως 20-60% είτε στην παραγωγή τσιμέντου είτε στην μπετονιέρα, έχουμε ενεργειακό και οικονομικό όφελος. Επίσης η μη παραγωγική χρήση της ιπτάμενης τέφρας έχει επιφέρει επιπρόσθετο οικονομικό βάρος που οφείλεται στην συντήρησή της (Καραστεργίου, 2009).

Όσον αφορά την χρήση ιπτάμενης τέφρας στην κατασκευή δασικών δρόμων να σημειωθεί ότι (Εσκίογλου):

- Μειώνεται το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος – αφού αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους – και ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής.
- Μειώνεται επίσης το κόστος κατασκευής από την ελαχιστοποίηση της ανάγκης προμήθειας δάνειων εδαφικών υλικών.

Περιβαλλοντικά οφέλη.

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη στερεά καύσιμα (λιθάνθρακας, λιγνίτης, κ.λπ.), συμβάλλει θετικά στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων (πρόβλημα απόθεσης τέφρας) και μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας (15% προσθήκη ιπτάμενης τέφρας αντί τσιμέντου στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση κατά περίπου 12.5% της απαιτούμενης ενέργειας ανά m^3 σκυροδέματος, δηλ. από 589.13 kWh/ m^3 σε 515.49 kWh/ m^3 περίπου) (Περυσινάκη, 2012). Η εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται σε διάφορα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς δεν απαιτείται εξόρυξη, τεμαχισμός και ξήρανση της πρώτης ύλης. Επίσης, ο άκαυστος άνθρακας που περιέχεται στην ιπτάμενη τέφρα μπορεί να προσδώσει ενέργεια κατά το ψήσιμο των προϊόντων (Τσιρίδης, 2011). Ακόμη, με την χρήση ιπτάμενης τέφρας έχουμε οικονομία στην χρήση πρώτων υλών (Στιβανάκης, 2003).

Από την χρήση της Ι.Τ. στο τσιμέντο ή στο σκυρόδεμα (σε αντικατάσταση του κλίνκερ) προκύπτει μείωση της εκλυόμενης ποσότητας CO₂ στο περιβάλλον, που παράγεται κατά την παραγωγή του κλίνκερ (παραγωγή τσιμέντου 1,5 δισεκ. τόνου/έτος) και εκτιμάται ότι ευθύνεται για το 7% του συνολικού εκλυόμενου στην ατμόσφαιρα CO₂.

Η τσιμεντοβιομηχανία και η βιομηχανία σκυροδέματος και προϊόντων αποτελεί το ιδανικότερο όχημα για την απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων των παραπροϊόντων αυτών. Με τον τρόπο αυτό δεσμεύονται όλα τα επιβλαβή συστατικά (π.χ. βαρέα μέταλλα) μέσα στα προϊόντα ενυδάτωσης του σκυροδέματος (Καραστεργίου, 2009).

Από την χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως συστατικό της τροφοδοσίας της υψικαμίνου προκύπτουν τα παρακάτω (Μπότσιος, 2011):

- Βελτιωμένη εψησιμότητα που συνεπάγεται χαμηλότερες θερμοκρασίες έψησης και εξοικονόμηση καυσίμου.
- Ελαττωμένες εκπομπές SO₂, υδρογονανθράκων, και εκπομπές NO_x (στην υγρή μέθοδο) για ορισμένες μονάδες και ιπτάμενες τέφρες.
- Μειωμένη δημιουργία σκόνης καμίνου.

Η χρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε έργα οδοποιίας συνεπάγεται περιβαλλοντικά οφέλη. Το κόστος των έργων μειώνεται αισθητά και γίνεται σημαντική εξοικονόμηση πρώτων υλών και προφυλάσσονται τα διαθέσιμα αποθέματα αδρανών για άλλες εργασίες. Με τον τρόπο αυτόν χρησιμοποιούνται υλικά που στη φυσική τους κατάσταση θα ήταν ακατάλληλα για έργα οδοποιίας ενώ τώρα δημιουργούνται οικονομικές και ανθεκτικές στρώσεις για την κίνηση πολύ μεγαλύτερου κυκλοφοριακού φόρτου και έτσι η χρησιμοποίηση της τέφρας, ως τεχνικό αλλά και ως βιολογικό μέτρο, είναι ένα βήμα για μια οδοποιία που σέβεται το περιβάλλον (Εσκίολου).

Μειονεκτήματα.

Τα μειονεκτήματα της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή τσιμέντου και δομικών υλικών περιλαμβάνουν πιθανό υψηλό κόστος μεταφοράς της ιπτάμενης τέφρας στις παραγωγικές μονάδες και ενδεχόμενη μεταβολή της ποιότητας της ιπτάμενης τέφρας που μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στην παραγωγική διαδικασία. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις που μπορεί να προκύψουν και οι οποίες θα πρέπει να ελέγχονται, περιλαμβάνουν την μεταφορά συστατικών από την στερεή στην υγρή φάση καθώς επίσης και το ενδεχόμενο εκπομπής σχετικά υψηλών ποσών ραδιενέργειας (Τσιρίδης, 2011).

Ορισμένα άλλα μειονεκτήματα είναι η πρόκληση μειωμένης πλαστικότητας του μίγματος τροφοδοσίας στην υγρή μέθοδο και η πρόκληση αυξημένης εκπομπής αλκαλίων σε μια μονάδα παραγωγής με την ξηρή μέθοδο, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει εμπόδια στην λειτουργία των προθερμαντήρων (Μπότσιος, 2011).

Σχετικά με την χρήση της ιπτάμενης τέφρας στη κατασκευή δασικών δρόμων θα πρέπει να αναφερθούν τα εξής μειονεκτήματα (Εσκίολου):

- Ένα πρόβλημα που προκύπτει με την χρήση της είναι ότι υπάρχει εύρος τιμών των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της και έτσι χωρίς έλεγχο δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μαζικά.
- Επειδή πρέπει να κυριαρχεί η θεώρηση "Ανάπτυξη ναι αλλά μέσω κυρίως της προστασίας και όχι της υποβάθμισης του περιβάλλοντος" πρώτιστο σημείο μελέτης θα αποτελέσει η διασφάλιση της Δημόσιας Υγείας από την έκλυση των ραδιενεργών συστατικών και την μόλυνση των υδροφόρων οριζόντων. Η χρήση πρέπει να γίνεται με περίσκεψη σε κατασκευές χωρίς συμπύκνωση και ιδίως όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε μικρό βάθος, λόγω απόπλυσης των περιεχομένων μετάλλων τους.

Επίσης, να αναφερθεί ότι με προσθήκη ι.τ. στο σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα καθυστερεί να αναπτύξει τις αντοχές σε σχέση με το σκυρόδεμα χωρίς ι.τ.

4.1.6. Κανονισμοί και διατάξεις.

Η καταλληλότητα της πυριτικής ιπτάμενης τέφρας για τη χρήση της στο σκυρόδεμα προσδιορίζεται σήμερα από το πλαίσιο του EN 206-1 και 2, (2000), από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450-1 και 2 (2000).

Για τις ασβεστούχες τέφρες δεν υπάρχει Ευρωπαϊκό πρότυπο και η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους μπορεί να διασφαλισθεί μόνο βάσει εθνικού σχετικού κανονισμού που θα προσαρμόζεται/εντάσσεται στο EN 206 (Καραστεργίου, 2009).

Γενικά, οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες λόγω της σύστασής τους δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό, συστάθηκε από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος / Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας ομάδα εργασίας για την σύνταξη προδιαγραφών για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας υψηλή σε ασβέστιο σε άοπλο σκυρόδεμα (Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων, 2006).

4.1.6.1. Απαιτήσεις χημικής σύστασης.

- *Απώλεια πύρωσης.*

Προσδιορίζεται με την μέθοδο EN 196-2, (2013), για χρόνο πύρωσης 1 h. Ορίζεται Α.Π. \leq 5% κατά μάζα (κατηγορία Α κατά EN 450-1). Το ποσοστό του άκαυστου άνθρακα εάν απαιτείται μπορεί να προσδιορισθεί σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D6316 (2000).

- *Χλωριόντα (Cl).*

Το περιεχόμενο ποσοστό χλωριόντων Cl προσδιορισμένο σύμφωνα με το EN 196-21, (1992), δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.10% κατά μάζα.

- *Θειικά (SO₃).*

Το ποσοστό των θεικών εκπεφρασμένο ως SO₃ δεν πρέπει να ξεπερνά το 5,0% κατά βάρος.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Σε περίπτωση που το προσδιορισθέν ποσοστό SO₃ ευρίσκεται μεταξύ 5,0 και 7,0% κατά μάζα, η IT δεν απορρίπτεται εφόσον εμπίπτει στις άλλες απαιτήσεις, αλλά ακολουθείται η πρόταση των Καναδικών κανονισμών CAN/CSA-A23.5-M86 όπου, εάν υπάρχει θετική αξιόπιστη έκθεση βασισμένη σε πειραματική μελέτη, η IT γίνεται αποδεκτή.

- *Ελεύθερη άσβεστος (CaO_f).*

Το ποσοστό ελευθέρως ασβέστου στην κατηγορία τεφρών EIT2 δεν πρέπει να ξεπερνά το 3% κατά μάζα. Στις περιπτώσεις όπου αυτό είναι μεγαλύτερο, τότε το CaO_f της τέφρας προσδιορίζεται από την διαφορά:

$$\text{CaO}_f = \text{CaO}_f(\text{κατά EN 451-1}) - \text{CaO} (\text{ως Ca(OH)}_2)$$

Το CaO που ευρίσκεται ως Ca(OH)₂ προσδιορίζεται έμμεσα (προσδιορισμός του Ca(OH)₂ σε δείγματα ενυδατωμένης ιπτάμενης τέφρας με θερμοσταθμική ανάλυση ασβεστίου).

- *Διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), οξείδιο αλουμινίου (Al₂O₃) και οξείδιο σιδήρου (Fe₂O₃).*

Δεν προτείνεται όριο στο άθροισμα. Εφόσον συνισχύουν οι φυσικοχημικές απαιτήσεις προτείνεται στην περίπτωση των ελληνικών τεφρών να προσδιορίζεται το αδιάλυτο υπόλειμμα κατά EN 196-2 το οποίο θα πρέπει να είναι ≤ 20%. Κατά απαίτηση του πελάτη μπορεί να προσδιορίζεται το δραστικό πυρίτιο SiO₂ όπως ορίζεται στο EN 197-1, (2000), και το οποίο πρέπει να είναι τουλάχιστον 25% κ.β. Το αδιάλυτο υπόλειμμα προσδιοριζόμενο κατά EN 196-2 θα πρέπει να είναι ≤ 20%.

- *Αλκάλια.*

Εκφράζονται ως ισοδύναμο Na₂O. Δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 5% κατά μάζα.

4.1.6.2. Φυσικομηχανικές απαιτήσεις.

- *Λεπτότητα άλεσης.*

Ορίζεται ως ποσοστό επί τοις % συγκρατούμενου υλικού στο 45 μm κόσκινο και προσδιορίζεται κατά EN 196-6, (1992). Η υγρά κοσκίνηση κατά EN 451-2, (1995), δεν συνιστάται για τις ασβεστούχες τέφρες με υδραυλικές ιδιότητες. Για τις δύο προδιαγραφόμενες τέφρες (EIT1, EIT2) το μέγιστο συγκρατούμενο στο κόσκινο των 45 μm είναι 45% και 30% αντίστοιχα. Αποδεκτή απόκλιση ± 10% της δηλωμένης τιμής.

- *Δείκτης δραστικότητας.*

Η παρασκευή standard κονιαμάτων και ο προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής θα γίνεται σύμφωνα με το EN 196-1, (1995). Ο δείκτης δραστικότητας στις 28 ημ. και στις 90 ημ. δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 75% και 85% αντίστοιχα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για την κατηγορία EIT2 προτείνεται επιπλέον σε περίπτωση υψηλών ποσοστών προσθήκης στο σκυρόδεμα, ο έλεγχος θλιπτικής αντοχής με την αντίστοιχη διαδικασία του EN 196-1, (1995), αλλά με ανάμιγμα 50/50 IT/πρότυπο τσιμέντο CEMI, που είναι ενδεικτικό της υδραυλικής δραστικότητας των ασβεστούχων. Επίσης ενδείκνυται ο έλεγχος αντοχής των 7 ημερών σε σύγκριση με πρότυπο δείγμα με το πρότυπο τσιμέντο Portland.

- *Σταθερότητα όγκου – Μέθοδος Le Chatelier.*

Προτείνεται να γίνεται η δοκιμασία σε μίγματα 30% IT + 70% Portland τσιμέντο σύμφωνα με EN 196-3, (2005). Η διαστολή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 mm.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η δοκιμή επιπροσθέτως μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μίγμα 50% IT + 50% Portland σε περιπτώσεις υψηλών ποσοστών προσθήκης στο σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση αυτή η έκθεση των πλακούντων μπορεί να γίνει εναλλακτικά σε ατμό (κατά την τροποποιημένη μέθοδο του EN 196-3) και εάν το αποτέλεσμα δεν είναι αποδεκτό η διαστολή να ελέγχεται με τη μέθοδο του αυτόκλειστου (ASTM C151-93a).

- *Πυκνότητα σωματιδίων.*
Προσδιορίζεται σύμφωνα με EN 196-6, (1992), και δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο από 150 kg/m^3 από τη δηλωμένη τιμή.
- *Υγρασία.*
Η υγρασία των ασβεστούχων τεφρών πρέπει να είναι $< 1,0\%$ και να ελέγχεται βάσει του ASTM C311-98b.
- *Χρόνος πήξης.*
Η αρχή του χρόνου πήξης προσδιορίζεται σε πάστα μίγματος τσιμέντου / IT : 75% / 25% κατά μάζα σύμφωνα με το EN 196-3, (2005), και δεν πρέπει να παρουσιάζει χρόνο πήξης μεγαλύτερο από 2 ώρες από τον αντίστοιχο χρόνο προτύπου δείγματος με 100% τσιμέντο. Οι απαιτήσεις για το χρόνο πήξης πρέπει να συμφωνούν με ότι προδιαγράφεται στο EN 197-1, (2000).
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για την κατηγορία EIT2 προτείνεται επιπροσθέτως να γίνονται μετρήσεις και σε αναμίγματα τσιμέντου / τέφρας : 50% / 50% και να δίνονται οι τιμές του χρόνου συγκριτικά με το πρότυπο σε περιπτώσεις υψηλών ποσοστών προσθήκης στο σκυρόδεμα.
- *Συμβατότητα με πρόσμικτα (chemical admixtures).*
Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες EIT1 και EIT2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με όλα τα πρόσμικτα που εμπίπτουν στις αντίστοιχες προδιαγραφές για τη χρήση τους.
Η αποτελεσματικότητα του κάθε πρόσμικτου όσον αφορά τον τύπο, δοσολογία, συνθήκες περιβάλλοντος και χρόνο προσθήκης πρέπει να καθορίζεται με προηγούμενη πειραματική μελέτη σε δοκιμαστικά μείγματα (trial mixes) (ΦΕΚ551, 2007).

4.1.6.3. Σχετικά πρότυπα.

Αναφέρονται κατά σειρά τα σχετικά εναρμονισμένα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, το Ισπανικό Πρότυπο (UNE 83420, 1991), που είναι το πρώτο Εθνικό Πρότυπο ευρωπαϊκής χώρας με αντικείμενο τις ασβεστούχες τέφρες, τα Πρότυπα ASTM και τα Καναδικά (ΦΕΚ551, 2007).

Επισημαίνεται ότι το πρότυπο EN 451-2, (1995), που συνοδεύει το EN 450-1, (2005), δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση των ασβεστούχων τεφρών. Τα Καναδικά πρότυπα εμφανίζουν την μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στις ιδιαιτερότητες των IT ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατό μεγαλύτερη αξιοποίηση

των ιδιοτήτων των ΙΤ (Σχέδιο εθνικών προδιαγραφών για την αξιοποίηση τέφρας υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, 2004).

2.1 Ευρωπαϊκά Πρότυπα

ΕΛΟΤ EN 450-1	Fly ash for concrete - Part 1 : Definition, specifications and conformity criteria – Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα - Μέρος 1: Ορισμός, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης
ΕΛΟΤ EN 450-2	Fly ash for concrete - Part 2: Conformity evaluation – Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα - Μέρος 2: Αξιολόγηση της συμμόρφωσης
ΕΛΟΤ EN 196-1	Methods of testing cement- Determination of strength -- Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου – Μέρος 1: Προσδιορισμός αντοχών
ΕΛΟΤ EN 196-2	Methods of testing cement- Chemical analysis of cement – Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου – Μέρος 2: Χημική ανάλυση τσιμέντου
ΕΛΟΤ EN 196-3	Methods of testing cement- Determination of setting time and soundness – Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 3: Προσδιορισμός χρόνου πήξης και σταθερότητας όγκου
ΕΛΟΤ EN 196-6	Methods of testing cement- Determination of fineness – Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου – Μέρος 6 : Προσδιορισμός της λεπτότητας
ΕΛΟΤ EN 196-7	Methods of testing cement- Methods of taking and preparing samples of cement – Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 7 : Μέθοδοι λήψης και παρασκευής δειγμάτων τσιμέντου
ΕΛΟΤ EN 197-1	Cement-Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements – Τσιμέντο - Μέρος 1 : Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα
ΕΛΟΤ EN 206-1	Concrete - Part 1: Specification, production, performance and conformity – Σκυρόδεμα -Μέρος 1: Προδιαγραφή, επίδοση, παραγωγή και συμμόρφωση
ΕΛΟΤ EN 451-1	Methods of testing fly ash- Part 1: Determination of free calcium oxide content – Μέθοδος δοκιμής ιπτάμενης τέφρας - Μέρος 1: Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ελεύθερο οξείδιο του ασβεστίου
ΕΛΟΤ EN 451-2	Methods of testing fly ash- Part 2: Determination of fineness by wet sieving – Μέθοδος δοκιμής ιπτάμενης τέφρας - Μέρος 2: Προσδιορισμός λεπτότητας με υγρό κοσκίνισμα
UNE 83420 (5/3/91) (Spain)	Concrete additions, fly ashes. Specifications for fly ashes with a CaO content in excess of 10% – Πρόσθετα σκυροδέματος, ιπτάμενες τέφρες. Προδιαγραφή για ιπτάμενες τέφρες με περιεκτικότητα σε CaO μεγαλύτερη του 10%. (Ισπανικό Πρότυπο)

2.2 Άλλα σχετικά Πρότυπα

ASTM D6316-00	Standard test method for determination of total combustible and carbonate carbon in solid residues from coal and coke - Πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού συνολικού καυσίμου άνθρακα και άνθρακα υπό μορφή ανθρακικών στα στερεά κατάλοιπα γαιανθράκων και κωκ.
ASTM D 3682-01	Standard test method for major and minor elements in coal and coke ash by atomic absorption - Πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού κυρίων στοιχείων και ιχνοστοιχείων στην τέφρα γαιανθράκων και κωκ με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης.

ASTM D5016-98	Standard test method for sulfur in ash from coal, coke and residues from coal combustion using high temperature tube furnace combustion method with infrared absorption - Πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού θείου στην τέφρα γαιανθράκων και κωκ και στα κατάλοιπα καύσης γαιανθράκων, με καύση του δείγματος σε υψηλή θερμοκρασία εντός αυλωτού κλιβάνου και εφαρμογή τεχνικών μέτρησης της απορρόφησης στην περιοχή του υπερώθρου.
ASTM E1868-02	Standard test method for loss-on-drying by thermogravimetry - Πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού απωλειών βάρους κατά την ξήρανση με εφαρμογή θερμοσταθμικών τεχνικών.
ASTM E473-00	Standard terminology relating to thermal analysis - Τυποποίηση ορολογίας θερμικής ανάλυσης.
ASTM E1953-02	Standard practice for description of thermal analysis apparatus - Τυποποιημένες οδηγίες περιγραφής συσκευών θερμικής ανάλυσης.
ASTM E1131 -98	Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry - Πρότυπη μέθοδος στοιχειακής ανάλυσης με θερμοσταθμικές τεχνικές.
ASTM E1142-97	Standard terminology relating to thermophysical properties - Τυποποίηση ορολογίας θερμοφυσικών ιδιοτήτων.
ASTM E886-94	Standard practices for dissolution of refuse-derived fuel ash samples for analyses of metals - Πρότυπη μεθοδολογία διαλυτοποίησης δειγμάτων τέφρας λαμβανομένων από τα κατάλοιπα καυσίμων για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε μέταλλα.
ASTM 885-98 (reapproved 96)	Standard test method for Analyses of Metals in refuse-derived fuel by Atomic Absorption Spectroscopy - Πρότυπη μέθοδος ανάλυσης για τον προσδιορισμό μεταλλικών στοιχείων με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης
ASTM D 193	Specification for reagent water - Προδιαγραφή νερού αντιδραστηρίων
ASTM C 151-05	Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement – Πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού διόγκωσης υδραυλικών τσιμέντων εντός δοχείου υπό υψηλή πίεση.
ASTM C 311-02	Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete - Πρότυπες μέθοδοι δειγματοληψίας και δοκιμών ιπτάμενης τέφρας ή φυσικής ποζολάνης προς χρήση ως προσμίκτων σκυροδέματος με τσιμέντο Portland.
ASTM C 618-03	Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete - Πρότυπο ιπτάμενης τέφρας γαιανθράκων και ακατέργαστης ή κατεργασμένης εν θερμώ φυσικής ποζολάνης προς χρήση ως προσθέτων σκυροδέματος με τσιμέντο Portland
ACI 226 3R - 89	Use of fly ash in concrete - Χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα
CAN / CSA - A23.5-M86	Supplementary connecting materials - Συμπληρωματικά συνδετικά υλικά

Όσο για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα οι πρώτοι κανονισμοί θεσμοθετούνται στη Νορβηγία NS 3473-1989. Σήμερα η παραγωγή και ο έλεγχος καλύπτονται από οδηγίες και προδιαγραφές όπως είναι τα CSA Standard A23.3 1994 και οι οδηγίες της ACI Committee ACI 363 2R-98 (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

4.2. Υγρή τέφρα.

4.2.1. Παραγωγή υγρής τέφρας (Τέφρα πυθμένα).

Κατά την διάρκεια της καύσης λεπτόκοκκου λιγνίτη στον κλίβανο καύσης, κάποια ορυκτά, μερικώς τηγμένα συστατικά ενώνονται μέσα στον κλίβανο και δημιουργούν συσσωματώματα. Εξαιτίας του βάρους τους, τα συστατικά αυτά δεν περνάνε από τον θάλαμο καύσης μαζί με τα απαέρια, αλλά πέφτουν στον πυθμένα του κλίβανου, απ' όπου είτε απομακρύνονται κατευθείαν είτε ψύχονται σε λουτρό νερού, γεγονός που επηρεάζει την κρυσταλλική δομή τους.

Αυτή η υγρή τέφρα που παράγεται μπορεί να επεξεργαστεί, αν αυτό κριθεί απαραίτητο, μέσω αφυδάτωσης, κοσκίνισης και/ή άλεσης και στη συνέχεια να αποθηκευτεί (σε σιλό ή σε σκάμματα) ή να μεταφερθεί μέσω φορτηγών ή τρένων στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης του σταθμού παραγωγής ενέργειας για περαιτέρω χρησιμοποίησή της.

Για την καλύτερη παρακολούθηση της διαδικασίας, δείγματα υγρής τέφρας συλλέγονται απευθείας από τον εξοπλισμό φόρτωσης στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης. Η φύση και η ποιότητα παρακολούθησης εξαρτώνται από το είδος αξιοποίησης του παραπροϊόντος.

Η υγρή τέφρα περιέχει ακανόνιστα σχηματισμένα σωματίδια με τραχιά επιφάνεια. Τα κύρια χημικά συστατικά της είναι τα οξείδια του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου. Η χημική σύσταση της υγρής τέφρας μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με αυτή της ιπτάμενης τέφρας. Λόγω του μεγάλου πορώδους στη δομή των σωματιδίων της, η υγρή τέφρα εμφανίζει μικρό βάρος και καλές μηχανικές ιδιότητες. Παρόλα αυτά το μέγεθος των σωματιδίων της διαφοροποιείται έντονα ανά περίπτωση αφού εξαρτάται από την λεπτότητα του άνθρακα και τις συνθήκες καύσης (Μπότσιος, 2011).

4.2.2. Αξιοποίηση υγρής τέφρας.

Παγκοσμίως οι υγρές τέφρες βρίσκουν πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία των δομικών υλικών είτε αυτές προέρχονται από τον λιγνίτη, είτε από άλλους άνθρακες. Στους Πίνακες 4-6 ως 4-8 που ακολουθούν φαίνονται οι εφαρμογές υγρής τέφρας στους διάφορους τομείς στην βιομηχανία.

Πίνακας 4-6: Εφαρμογές της υγρής τέφρας στο σκυρόδεμα (Μπότσιος, 2011).

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Τρόπος εφαρμογής</i>	<i>Κατεργασία/ Προδιαγραφές</i>	<i>Αποτελέσματα</i>
<i>Αδρανές σε πλάκες σκυροδέματος</i>	Έως 50% αντικατάσταση των αδρανών (άμμος) με υγρή τέφρα.	Θερμική κατεργασία για μείωση της απώλειας πύρωσης. Δεν χρειάζονται διαδικασίες ελάττωσης μεγέθους.	Σκυρόδεμα με μικρότερο ειδικό βάρος και καλύτερες αντοχές λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της υγρής τέφρας.
<i>Αντικαταστάτης τσιμέντου</i>	Έως 20% αντικατάσταση του τσιμέντου του σκυροδέματος με υγρή τέφρα (ποζολανική χρήση).	Άλεση για μείωση του μεγέθους και του πορώδους της τέφρας στο P ₉₅ =325 μm.	Το σκυρόδεμα εμφανίζει υψηλότερες αντοχές μετά από 14- 60 μέρες.
<i>Αδρανές σε αερακτικό σκυρόδεμα</i>	Έως 50% αντικατάσταση των αδρανών (άμμος) με υγρή τέφρα.	Θερμική κατεργασία για μείωση απώλειας πύρωσης σε ποσοστό <6%.	Σκυρόδεμα με μικρότερο ειδικό βάρος, μεγαλύτερο πορώδες και καλύτερες αντοχές.

Πίνακας 4-7: Άλλες εφαρμογές της υγρής τέφρας (Μπότσιος, 2011).

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Τρόπος εφαρμογής</i>	<i>Κατεργασία/ Προδιαγραφές</i>	<i>Αποτελέσματα</i>
<i>Τσιμέντο</i>	Αντικαθιστά ποσοστό του κλίνκερ (4%-20%) ως ποζολάνη.	Στερεοποίηση/ Σταθεροποίηση.	Το τσιμέντο εμφανίζει καλύτερες μηχανικές αντοχές από το Portland μετά από 28 μέρες.
<i>Κεραμικά τούβλα</i>	Περιέχεται σε τούβλα σε μείγμα με ιπτάμενη τέφρα.		Έχουν κατασκευαστεί τούβλα με 25% υγρή τέφρα.

Πίνακας 4-8: Εφαρμογές της υγρής τέφρας στην οδοποιία (Μπότσιος, 2011).

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Τρόπος εφαρμογής</i>	<i>Κατεργασία/ Προδιαγραφές</i>	<i>Αποτελέσματα</i>
<i>Σκυρόδεμα ασφάλτου</i>	Ως αδρανές σε συνδυασμό με άλλα αδρανή σε κρύο μείγμα ασφάλτου.	Απομάκρυνση σουλφιδίων του σιδήρου κυρίως ηλεκτρομαγνητικά.	Βελτίωση της ανθεκτικότητας του μείγματος, ελάχιστη μείωση της σταθερότητας.
<i>Συστατικό βάσης</i>	Ως λεπτόκοκκο αδρανές στο υλικό του υποστρώματος.	Κοσκίνισμα και άλεση για την απομάκρυνση των χοντρόκοκκων (μεγαλύτερα από 19mm).	Βελτίωση της ανθεκτικότητας του μείγματος, ελάχιστη μείωση της σταθερότητας.
<i>Σταθεροποιητής βάσης</i>	Σε μείγμα με τσιμεντοειδή υλικά (Portland, υπόλειμμα καμίνου, ποζολάνες με ενεργοποιητές).	Έλεγχος υγρασίας (βέλτιστη υγρασία: 12-24%), κατάλληλη άλεση, απομάκρυνση δηλητηριωδών υλικών.	Υψηλότερες μηχανικές αντοχές.
<i>Αναχώματα</i>	Γεμίσματα, υποστηρίγματα τοίχων, δρόμων, κλπ.	Βέλτιστη υγρασία, απομάκρυνση σουλφιδίων, να μην είναι διαβρωτικό. Κοσκίνιση και άλεση.	
<i>Ρευστά γεμίσματα</i>	Αδρανές στα μείγματα.	Χωρίς προδιαγραφές για υγρασία.	Καλή ρευστότητα λόγω υγρασίας.
<i>Έλεγχος χιονιού & πάγου</i>	Απλώνεται απευθείας στην επιφάνεια.	Χρησιμοποιείται χονδρόκοκκο υλικό.	

Δεν υπάρχουν εκτενείς βιβλιογραφικές ερευνητικές αναφορές για την αξιοποίηση των Υ.Τ. με βάση την χημική τους σύσταση. Παρόλα αυτά το εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του ΕΜΠ ερευνητικά ασχολείται και με αυτού του είδους την αξιοποίηση (Μπότσιος, 2011).

5. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΚΩΡΙΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ.

5.1. Σκωρίες χαλυβουργίας.

5.1.1. Ιστορική αναδρομή.

Η σκωρία είναι ένα προϊόν της χαλυβουργικής βιομηχανίας. Κάποτε αποτελούσε ένα άχρηστο υποπροϊόν ενώ τώρα είναι αποδεκτό και συχνά προτιμάται για διάφορες χρήσεις. Αν και ολοένα μεγαλύτερη ποσότητα της παραγόμενης σκωρίας απορροφάται, στις μέρες μας, από διάφορους τομείς ώστε να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετη ουσία σε διάφορα υλικά, το ίδιο το υλικό υπάρχει εδώ και μερικούς αιώνες. Από το 1859 οι Γερμανοί χρησιμοποιούσαν τη σκωρία για την κατασκευή πυρομαχικών. Επίσης κατά τον 18^ο αιώνα χρησιμοποιήθηκαν πέτρες σκωρίας χυτοσιδήρου στην κατασκευή σπιτιών. Οι πρώτοι δρόμοι που κατασκευάστηκαν με την χρήση σκωρίας ήταν στην Αγγλία το 1813. Μέχρι το 1880 το υλικό αποτελούσε αναπόσπαστο συστατικό πολλών Ευρωπαϊκών δρόμων. Κατά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο το υλικό χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην κατασκευή δρόμων και ως πρόσθετο υλικό στην παραγωγή χαλκικών για τις σιδηροδρομικές γραμμές (Καραστεργίου, 2009).

5.1.2. Χημική σύσταση της σκωρίας.

Η χημική σύσταση της σκωρίας μπορεί να προσδιοριστεί με την τεχνική περίθλασης ακτινών X. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται ενώσεις που εμφανίζονται στη σκωρία χάλυβα. Ουσιαστικά οι τιμές αυτές δεν διαφέρουν πολύ στους διάφορους τύπους σκωρίας. Ο βαθμός ψύξης της σκωρίας χάλυβα είναι αρκετά μικρός και έτσι σχηματίζονται κρυσταλλικές ενώσεις.

Πίνακας 5-1: Χημική σύσταση της σκωρίας χάλυβα (Καραστεργίου, 2009).

Συστατικό	Σύνθεση (%)
CaO	40 - 52
SiO ₂	10 - 19
FeO	10 - 40 (70 - 80% FeO, 20 - 30% Fe ₂ O ₃)
MnO	5 - 8
MgO	5 - 10
Al ₂ O ₃	1 - 3
P ₂ O ₅	0.5 - 1
S	< 0.1
Metallic Fe	0.5 - 10

Οι κυρίαρχες ενώσεις είναι οξειδία σιδήρου, ασβεστίου, μαγνησίου. Τα σχετικά ποσοστά αυτών των ενώσεων εξαρτώνται από την πρακτική σιδηρουργίας και τον ρυθμό ψύξης της σκωρίας χάλυβα.

Η σκωρία χάλυβα είναι αλκαλική, με pH που κυμαίνεται από 8 έως 10. Εντούτοις, το pH της σκωρίας μπορεί να υπερβεί την τιμή 11, ένα επίπεδο που μπορεί να είναι διαβρωτικό στους γαλβανισμένους σωλήνες χάλυβα που έρχονται σε άμεση επαφή με την σκωρία (Καραστεργίου, 2009).

5.1.3. Τύποι σκωρίας.

Στη συνέχεια παραθέτονται οι σημαντικότεροι τύποι σκωρίας.

Σκωρία υψικαμίνων (Blast Furnace Slag).

Η σκωρία υψικαμίνων (Blast Furnace Slag, BF) σχηματίζεται όταν το μέταλλευμα σιδήρου λιώνει μαζί με κοκ (είτε ασβεστόλιθος, είτε δολομίτης) σε έναν φούρνο με αέρα υπό πίεση. Όταν η μεταλλουργική διαδικασία τήξης ολοκληρώνεται, το ασβέστιο στο τήγμα έχει συνδυαστεί χημικά με τα αργιλικά και τα πυριτικά άλατα του μεταλλεύματος και της τέφρας κοκ ώστε να διαμορφωθεί το μη-μεταλλικό προϊόν που ονομάζεται σκωρία υψικαμίνων. Κατά τη διάρκεια της ψύξης και σκλήρυνσης, από τη λειωμένη κατάσταση, η σκωρία BF μπορεί να ψυχθεί με διάφορους τρόπους για να διαμορφωθούν ποικίλα προϊόντα σκωρίας BF.

Αερόψυκτη σκωρία (Air-cooled Slag).

Η σκωρία από φούρνους με αέρα υπό πίεση ψύχεται σε ατμοσφαιρικό αέρα, επεξεργάζεται μέσω εγκαταστάσεων κοσκινίσματος και σύνθλιψης και στη συνέχεια διαμορφώνεται σε πολλά μεγέθη για χρήση κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα.

Σφαιροποιημένη ή διεσταλμένη σκωρία (Pelletized or Expanded Slag).

Η σφαιροποιημένη ή διεσταλμένη σκωρία ψύχεται γρήγορα χρησιμοποιώντας νερό ή ατμό για να παραχθεί ένα ελαφρύ υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές όπως: πυρίμαχα οικοδομικά υλικά, υλικά μικρού βάρους, παραγωγή τσιμέντου.

Κοκκοποιημένη σκωρία (Granulated Slag).

Η κοκκοποιημένη σκωρία ψύχεται γρήγορα από μεγάλες ποσότητες ύδατος και παράγεται ένα υλικό που αποτελείται από αμμοειδείς κόκκους. Στη συνέχεια αλέθεται/κονιορτοποιείται σε έναν αλεστή GGBS (Ground Granulated Blast Slag).

Σκωρία φούρνων χάλυβα (Steel Furnace Slag).

Η σκωρία φούρνων χάλυβα (Steel Furnace Slag) παράγεται σε έναν (BOF) βασικό φούρνο οξυγόνου ή έναν (EAF) φούρνο ηλεκτρικών τόξων. Ο καυτός σίδηρος (BOF) ή/και άχρηστο μέταλλο (EAF) είναι τα αρχικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του χάλυβα σε όλες τις διαδικασίες. Το ασβέστιο εγχέεται για να δράσει ως ρευστό μέσο και συνδυάζεται με τα πυριτικά άλατα, τα οξειδία αργιλίου, τα οξειδία μαγνησίου, τα οξειδία μαγγανίου και με τον φερρίτη ώστε να σχηματίσει την σκωρία φούρνων χάλυβα ή συνηθέστερα αποκαλούμενη σκωρία χάλυβα. Η σκωρία χύνεται από τον φούρνο σε μία λειωμένη κατάσταση. Μετά την ψύξη, η σκωρία χάλυβα υποβάλλεται σε επεξεργασία ώστε να αφαιρεθούν όλα τα ελεύθερα μέταλλα.

Σκωρία κάδου (Ladle Furnace Slag).

Η σκωρία κάδου είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα που προκύπτει κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας του ακατέργαστου υλικού και παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO. Έχει βρεθεί ότι αντικατάσταση του τσιμέντου από σκωρία κάδου σε ποσοστό 20% κ.β. έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή σκυροδέματος με ελκυστικές μηχανικές ιδιότητες.

Σκωρία του Θωμά.

Η σκωρία του Θωμά είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας σιδήρου και χάλυβα και χρησιμοποιήθηκε παλαιότερα ως φωσφορούχο λίπασμα. Περιέχει 14-17% P₂O₅, 45-50% CaO, 2% MgO και διάφορα ιχνοστοιχεία, όπως μαγγάνιο, χαλκό, μολυβδαίνιο και κοβάλτιο. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε CaO είναι κατάλληλο λίπασμα για όξινα εδάφη.

Σιδηρούχα Σκωρία Ελάστρων.

Η Σιδηρούχα Σκωρία Ελάστρων (Καλαμίνα) προέρχεται από την διαδικασία έλασης σιδήρου, ο οποίος βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και οξειδώνεται απότομα

κατά την επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η περιεκτικότητα της σιδηρούχας σκωρίας σε οξείδιο του σιδήρου ανέρχεται σε 95%. Παράγεται σε κοκκομετρία 0-10MM. Χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς ως προσθετικό υλικό στην κατασκευή διακοσμητικών κεραμιδιών και τούβλων για παραγωγή υλικών με μαύρο χρώμα, ως προσθετικό υλικό στην παραγωγή τσιμέντου, ως καταλύτης στην διαδικασία ανακύκλωσης μολυβιού από μπαταρίες, ως σιδηρούχο λίπασμα και τέλος στην κατασκευή βαριδίων και αντίβαρων (Καραστεργίου, 2009).

5.1.4. Φυσικά χαρακτηριστικά και χρήσεις των διαφόρων τύπων σκωρίας.

Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά και μερικές χρήσεις διαφόρων τύπων σκωρίας:

Πίνακας 5-2: Φυσικά χαρακτηριστικά και χρήσεις διαφόρων τύπων σκωρίας (Καραστεργίου, 2009).

Τύπος σκωρίας	Φυσικά Χαρακτηριστικά	Χρήσεις
Αερόψυκτη (air cooled)	Η λειωμένη σκωρία, στερεοποιείται και ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου ή με προσθήκη ύδατος μετά από στερεοποίηση. Στη συνέχεια κονιορτοποιείται και φιλτράρεται.	Θεμέλια, υλικό κατασκευής στεγών, υλικό για μόνωση, άσφαλτος, γόμωση, γεωργία, σκυρόδεμα, σιδηρόδρομους, υαλοτεχνία, περιβαλλοντικές εφαρμογές.
Διαστελλόμενη ή ελαφριά (Expanded or Lightweight)	Παράγεται με γρήγορη ροή λειωμένης σκωρίας σε κεκλιμένα κοιλώματα, υγρά στον πυθμένα ώστε να επιτραπεί η διείδυση ατμού προκαλώντας πολλά μικρά κενά.	Φράγματα (concrete blocks), μονωτικό υλικό, τοιχοποιία, μπετόν μικρού βάρους, υλικό γόμωσης μικρού βάρους.
Κοκκοποιημένη (Ganulated)	Γρήγορη ψύξη σε μια υψηλής ταχύτητας ανάδευση της σκωρίας με πίδακες νερού.	Παραγωγή συνδυασμένου τσιμέντου. Μπορεί επίσης να αντικαταστήσει την άμμο στο σκυρόδεμα.
Σφαιροποιημένη (Pellitized)	Μια παραλλαγή της προηγούμενης διαδικασίας όπου η ψύξη γίνεται κυρίως με αέρα και λιγότερο με νερό.	Ίδιες με αυτές της κοκκοποιημένης σκωρίας.

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε τα χαρακτηριστικά των κυριότερων τύπων σκωρίας που παράγονται από τις χαλυβουργίες: Σκωρίας υψικαμίνων και σκωρίας φούρνων χάλυβα (Καραστεργίου, 2009).

5.1.5. Σκωρία υψικαμίνων.

Η σκωρία υψικαμίνων είναι δευτερεύον προϊόν της παραγωγής τηκόμενου σιδήρου σε έναν φούρνο υψικαμίνων.

Η σκωρία υψικαμίνων έχει συνήθως μικρή αναλογία βασικών (basic) προς όξινα συστατικά. Η περιεκτικότητα σε ασβέστιο και μαγνήσιο, που αναφέρονται ως ισοδύναμα οξειδία, κυμαίνεται από 1.25 έως 1.55 του λόγου βασικότητας (basicity ratio). Τα βασικά στοιχεία, CaO, MgO και SiO₂, έχουν μια αναλογία:

CaO 38%

MgO 10%

SiO₂ 36%

με δευτερεύοντα στοιχεία (Καραστεργίου, 2009):

Iron Oxide (FeO & Fe₂O₃) < 1%

Sulfur (S) 1% ±

Alumina (Al₂O₃) 6-12%

5.1.6. Σκωρία φούρνων χάλυβα (Steel Furnace Slag).

Η σκωρία από χάλυβα υφίσταται επεξεργασία ως αερόψυκτο υλικό, τα ελεύθερα μέταλλα διαχωρίζονται με την βοήθεια μαγνητών και το υλικό διαχωρίζεται και μορφοποιείται για την χρησιμοποίησή του σε διάφορες κατασκευές. Μερικές από αυτές είναι η χρήση του στη σταθεροποίηση γεωργικών εδαφών, ως ακατέργαστο συστατικό στην παραγωγή τσιμέντου τύπου Portland και σαν υλικό για περιβαλλοντικές αποκαταστάσεις.

Η σκωρία φούρνων χάλυβα περιλαμβάνει την ακόλουθη σειρά πηγών:

1. Σκωρία ανοιχτού καμινιού από τους φούρνους με θέρμανση οροφής (reverberatory furnaces), όπου λειωμένος σίδηρος, μέταλλευμα και άχρηστα ρινίσματα καθαρίζονται με ροή ασβεστόλιθου για μεγάλη περίοδο, με την βοήθεια καυσίμων και με την έγχυση αερίων για την θέρμανση και καύση του άνθρακα.
2. Βασικός φούρνος οξυγόνου (BOF, BOP ή LD) όπου τα άχρηστα ρινίσματα και ο λειωμένος σίδηρος αναμιγνύονται με χημικό ασβέστιο ώστε να αφαιρεθεί το πυρίτιο. Ο καθαρισμός του άνθρακα γίνεται από το εγχέομενο οξυγόνο.

3. Φούρνος ηλεκτρικών τόξων (EAF) όπου το άχρηστο υλικό ή το μέταλλευμα ή και τα δύο λειώνουν από το εναλλασσόμενο ή συνεχές ηλεκτρικό τόξο, μαζί με το χημικό ασβέστιο (ασβεστίτης ή ασβεστίτης μαζί με δολομίτη) που περιέχει μαγνήσιο και ασβέστιο.

Οι διαφορές στις σκωρίες από αυτές τις τρεις διαδικασίες οφείλονται κυρίως στις πρώτες ύλες και την επιθυμητή τελική χημεία του χάλυβα και λιγότερο στην ίδια την διαδικασία.

Όταν υπάρχει λίγος χρόνος έκθεσης στους φούρνους και υπερβολική προσθήκη ασβεστίου, μπορεί να προκύψει ενεργό ασβέστιο (Καραστεργίου, 2009).

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να αναλύσουμε περισσότερο την σκωρία κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (EAF).

Σκωρία κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (EAF Slag).

Η σκωρία κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace Slag- EAFS) είναι ένα παραπροϊόν της μεταλλουργικής βιομηχανίας. Προκύπτει από την τήξη σε κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace- EAF) παλαιοσιδήρου (ferrous scrap). Σύμφωνα με την American Society for Testing Materials (ASTM), η σκωρία ορίζεται ως ένα μη μεταλλικό προϊόν που αποτελείται κυρίως από πυριτικές ενώσεις του ασβεστίου ενωμένες με οξείδια σιδήρου, αλουμινίου, ασβεστίου και μαγνησίου και παράγεται ταυτόχρονα με τον χάλυβα μέσα σε κλίβανο. Η ποσότητα που παράγεται στα χαλυβουργεία, ως παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας, αποτελεί ποσοστό περίπου 13%-18% επί της συνολικής ποσότητας τροφοδοσίας του κλιβάνου με αποτέλεσμα οι μεταλλουργικές σκωρίες να είναι ένα από τα μεγαλύτερα σε ποσότητα βιομηχανικά παραπροϊόντα.

Ιδιότητες σκωρίας κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (Κουμπούρη, 2011):

- Φυσικές ιδιότητες.

Τα αδρανή σκωρίας είναι αρκετά γωνιώδη και έχουν τραχεία επιφανειακή υφή. Επίσης διαθέτουν υψηλή πυκνότητα μονάδας όγκου και παρουσιάζουν περιορισμένη απορροφητικότητα. Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για το ειδικό βάρος, τη μονάδα βάρους και την απορροφητικότητα.

Πίνακας 5-3: Φυσικές ιδιότητες σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (Κουμπούρη, 2011).

Ιδιότητα	Τιμή
Ειδικό βάρος	3.2 - 3.6
Μονάδα βάρους	1600 - 1920 kg/m ³
Υδαταπορροφητικότητα	3%

- *Χημικές ιδιότητες.*

Από χημικής άποψης η σκωρία είναι ένα μίγμα με κύρια συστατικά οξείδια Ca, Si και Al, δηλαδή τα ίδια οξείδια που αποτελούν το τσιμέντο Portland, αλλά με διαφορετικές αναλογίες. Οι σκωρίες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με την διαδικασία παραγωγής και την μέθοδο ψύξης τους. Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται το εύρος της περιεκτικότητας των βασικών οξειδίων της σκωρίας. Στη χημική σύσταση της σκωρίας ενδέχεται να υπάρχουν σε μικρή περιεκτικότητα και άλλα οξείδια όπως Na₂O, BaO, P₂O₅, Ti₂O και οξείδια βαρέων μετάλλων όπως Cr₂O₃ και V₂O₅.

Πίνακας 5-4: Τυπική χημική σύσταση σκωρίας κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (% κ.β.) (Κουμπούρη, 2011).

Ένωσι	Σύσταση (% κ.β.)
CaO	40 – 52
SiO ₂	10 – 19
FeO	10 – 40
MgO	5 – 10
Al ₂ O ₃	1 – 3
S	0.5 – 1

- *Μηχανικές ιδιότητες.*

Στατικά, δυναμικά φορτία και περιβαλλοντικές επιδράσεις όπως βροχή, ζέστη και συστολοδιαστολές απαιτούν μακρόχρονη ανθεκτικότητα από τις σύγχρονες κατασκευές. Γι' αυτό το λόγο τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που χρησιμοποιούνται για τις κατασκευές αυτές είναι εξαιρετικής σημασίας. Η επεξεργασμένη σκωρία έχει ευνοϊκές μηχανικές ιδιότητες για χρήση ως αδρανές, όπως καλή αντοχή σε τριβή και κρούση, σταθερότητα, καλά ακουστικά χαρακτηριστικά, υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα.

- *Θερμικές ιδιότητες.*

Τα αδρανή σκωρίας είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και έχουν υψηλότερη θερμοχωρητικότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά φυσικά αδρανή. Η ιδιότητά τους αυτή τα καθιστά καταλληλότερα για επισκευή ασφαλικών μιγμάτων θερμής ανάμιξης σε χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

5.1.7. Αξιοποίηση της σκωρίας.

Στην συνέχεια αναφέρουμε διάφορους τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται η σκωρία (Καραστεργίου, 2009):

5.1.7.1. Ασφαλτούχο σκυρόδεμα.

Η σκωρία (όλοι οι τύποι) συχνά χρησιμοποιείται σε ασφαλτοστρώσεις λόγω της υψηλής σταθερότητάς της και της μεγάλης τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των ελαστικών και της ασφάλτου. Η αντοχή, η σκληρότητα και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά δεσμών της σκωρίας που παράγεται από υψικαμίλους και φούρνους χάλυβα, την καθιστούν κατάλληλη για παραγωγή ασφάλτου υψηλής ποιότητας.

5.1.7.2. Κατασκευή βάσεων.

Η σκωρία έχει μελετηθεί ως υλικό που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή βάσεων/θεμελίων. Έχει αποδειχτεί ότι κανένα άλλο υλικό δεν παρουσίασε τόσα πλεονεκτήματα όσα η σκωρία. Σημαντικός παράγοντας για να βρει άμεση εφαρμογή η σκωρία στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι το κόστος παραγωγής. Η παραγωγή σκωρίας στην Αμερική από υψικαμίλους είναι περίπου 2.0 t/m^3 (1.7 τόνου/cu yd.). Η παραγωγή των μέχρι τώρα συμβατικών υλικών κυμαίνονταν μεταξύ 2.1 και 2.3 t/m^3 (1.8 έως 1.9 τόνου/cu yd.).

Η σκωρία φούρνων χάλυβα χρησιμοποιείται ευρέως ως βάση, υλικό για κατασκευή δρόμων και στην κατασκευή και σταθεροποίηση στενών μονοπατιών. Απαιτείται προσεκτική επιλογή και επεξεργασία λόγω της ακραίας μεταβλητότητας στην χημική σύστασή της από πηγή σε πηγή.

5.1.7.3. Οικοδομικός τομέας.

Η σκωρία που παράγεται από υψικαμίλους μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον οικοδομικό τομέα για κατασκευή πυρίμαχων τούβλων και τσιμεντόλιθων. Το βάρος αυτών των δομικών μονάδων (διαστάσεων $8 \times 8 \times 16$, Αμερικανικά πρότυπα) εξαρτάται από τον τύπο σκωρίας που χρησιμοποιείται και κυμαίνεται από 11-16 kg για την διαστελλόμενη και 12-16 kg για την κοκκοποιημένη σκωρία μέχρι 16-20 kg για την αερόψυκτη σκωρία. Οι συγκεκριμένες τεκτονικές μονάδες σκωρίας έχουν χαμηλή απώλεια βάρους κατά την ξήρανση. Τα δομικά υλικά που κατασκευάζονται με χρήση σκωρίας από υψικαμίλους παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

5.1.7.4. Σιδηρόδρομοι.

Το χοντροειδές τμήμα της σκωρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χαλίκι ραγών για όλους τους τύπους σιδηροδρόμων, από τις μεγαλύτερες κύριες γραμμές έως τα βιομηχανικά παρακλάδια. Το λεπτό τμήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω από τα χαλίκια για να αποτρέψει την προσρόφηση χώματος σε αυτά. Η σκωρία αποτελεί το

καταλληλότερο υλικό για την συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω του υψηλού κενού διαστήματος (void space), της καθαρότητάς της και της υψηλής αντίστασής της στην αποσάθρωση από διάβρωση.

Λόγω της τραχιάς και αιχμηρής μορφής της σκωρίας υπάρχει σταθερή σύνδεση των σιδηρόβεργων. Έτσι αποτρέπεται η μετατόπιση με την χρήση των σιδηρογραμμών ακόμα και όταν έχουν κλίση στις στροφές. Επίσης οι σιδηρόδρομοι που κατασκευάζονται με την χρήση αυτού του υλικού παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στην φθορά και στο γδάρισμα, ελαχιστοποιώντας έτσι την υποβάθμισή τους με την πάροδο του χρόνου. Ακόμα είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στις κλιματικές μεταβολές, στις ακραίες θερμοκρασίες και σε έκθεση σε χημικά.

5.1.7.5. Κατασκευή στεγάστρων.

Η σκωρία από υψικαμίλους είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως συστατικό στην κατασκευή στεγών για να προστατεύσει και να συντηρήσει την απαραίτητη πίεση της σκεπής στα διάφορα καιρικά φαινόμενα. Επίσης παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε ακραίες καιρικές μεταβολές και παρέχει μεγαλύτερη συναρμογή με τα υλικά πίσσας από τα συμβατικά υλικά. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η καλή μόνωση και υψηλή αντίσταση στη φωτιά.

5.1.7.6. Σκωρία από φούρνους με αέρα υπό πίεση ως συστατικό στο στερεοποιημένο υδραυλικό τσιμέντο.

Σε όλα τα κατασκευαστικά προγράμματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά η ποιότητα και οι προδιαγραφές των χρησιμοποιούμενων υλικών. Η σκωρία από υψικαμίλους είναι μη-αντιδραστική σε ένα υψηλό αλκαλικό περιβάλλον, όπως το σκυρόδεμα και το χώμα. Επίσης δοκιμές που έχουν γίνει για την αντοχή στην φωτιά δείχνουν ότι η συγκεκριμένη σκωρία παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα έναντι των συμβατικών υλικών.

5.1.7.7. Παραγωγή σκληρών αδρανών οδοποιίας.

Οι σκωρίες αποτελούν το μεγαλύτερο σε ποσότητα παραπροϊόν. Για την διαχείριση των σκωριών η «ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.» έχει προχωρήσει στη δημιουργία δύο εγκαταστάσεων παραγωγής σκληρών αδρανών οδοποιίας με συνολική παραγωγική δυναμικότητα 200.000 τόνων ανά έτος. Η εταιρεία κατά την τελευταία πενταετία έχει επιτύχει υψηλό βαθμό αρτιότητας στην οργάνωση, τις παραγωγικές διαδικασίες και τον έλεγχο των τελικών προϊόντων (Κουρούς, 2009).

5.1.7.8. Χρήση σκωρίας στο σκυρόδεμα.

Η πιο διαδεδομένη παγκοσμίως χρήση της σκωρίας είναι στο σκυρόδεμα κυρίως σαν συνδετικό υλικό, αντικαθιστώντας μερικώς το τσιμέντο Portland. Σε ορισμένες

εφαρμογές υπάρχει υποκατάσταση σε ποσοστό έως και 50% για την παρασκευή σκυροδέματος υψηλών αντοχών. Είναι προφανές ότι με την αντικατάσταση των αδρανών από αποκαμινεύματα σκωρίας παράγεται «βαρύ» σκυρόδεμα το οποίο ενδεικτικά αναφέρεται ότι το φαινόμενο ειδικό βάρος του μπορεί να είναι της τάξης του 2.70-2.90 και μπορεί να τύχει εφαρμογής σε ανάλογα έργα (φράγματα, τοίχοι προστασίας, δάπεδα, κτλ). Με βάση τα παραπάνω δεδομένα την παρούσα περίοδο πραγματοποιούνται από εταιρείες δοκιμαστικές παραγωγές προϊόντων όπως οι πλάκες πεζοδρομίου, ιδιαίτερα ανθεκτικές σε αλκαλικό περιβάλλον (Κουρούς, 2009).

5.1.7.9. Παραγωγή σκωριοτσιμέντου.

Το σκωριοτσιμέντο είναι ένας τύπος τσιμέντου από μείγμα εξαϋλωμένου άνθρακα (κλίνκερ) και κοκκοποιημένου υλικού σκωρίας υψικαμίνων με μικρή ποσότητα ασβεστόλιθου απαραίτητη για την ρύθμιση της τελικής συνταγής. Το σκωριοτσιμέντο παράγεται με την κονιορτοποίηση κοκκοποιημένου υλικού σκωρίας υψικαμίνων με μείγμα εξαϋλωμένου άνθρακα (κλίνκερ) τσιμέντου Portland. Το σκωριοτσιμέντο είναι ένα από τα πιο βιώσιμα δομικά υλικά στον κόσμο. Αυξάνει την διάρκεια ζωής της κατασκευής με ταυτόχρονη μείωση της έκλυσης των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Το κοκκοποιημένο υλικό σκωρίας υψικαμίνων αντικαθιστά συνήθως το 35% με 65% του τσιμέντου Portland. Με αντικατάσταση 50% κάθε τόνου του παραγόμενου τσιμέντου Portland παγκοσμίως θα είχαμε μείωση περίπου 500.000 τόνων CO₂.

Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του, το σκωριοτσιμέντο εκτός από τις συνήθειες εφαρμογές είναι επίσης κατάλληλο για μαζικές σκυροδετήσεις σε θαλάσσιες κατασκευές, κατασκευές λιμένων, φραγμάτων και γεφυρών, όπου το σκυρόδεμα αντιμετωπίζει υψηλές θερμοκρασίες κατά την ενυδάτωση στην διάρκεια πήξης, και δέχεται επιθέσεις θεικών αλάτων, χλωριδίων και θαλασσινού νερού. Χαρακτηριστική είναι η ιδιότητά του για υψηλής διάρκειας και αυξανόμενες αντοχές που θα συνεχιστούν και μετά τις 28 ημέρες.

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιεί σκωριοτσιμέντο μπορεί να αξιοποιηθεί άριστα στις παρακάτω χρήσεις (Ecocement):

- Κατασκευές σε θαλάσσιο περιβάλλον όπως λιμάνια και άλλες παράκτιες κατασκευές (έκθεση σε θειικά άλατα και χλωρίδια).
- Κτίσματα κοντά σε παραλίες.
- Μαζικές σκυροδετήσεις όπως φράγματα, γέφυρες κλπ.
- Εγκαταστάσεις λυμάτων και κατεργασίας αυτών.
- Δεξαμενές συλλογής και επεξεργασίας ύδατος.
- Υποθαλάσσιες κατασκευές.
- Γεωθερμικές εφαρμογές (παρουσία όξινων και θεικών αλάτων).

- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας τροφίμων (όξινες επιθέσεις).

5.1.7.10. Ειδικές χρήσεις.

- Γυαλί.

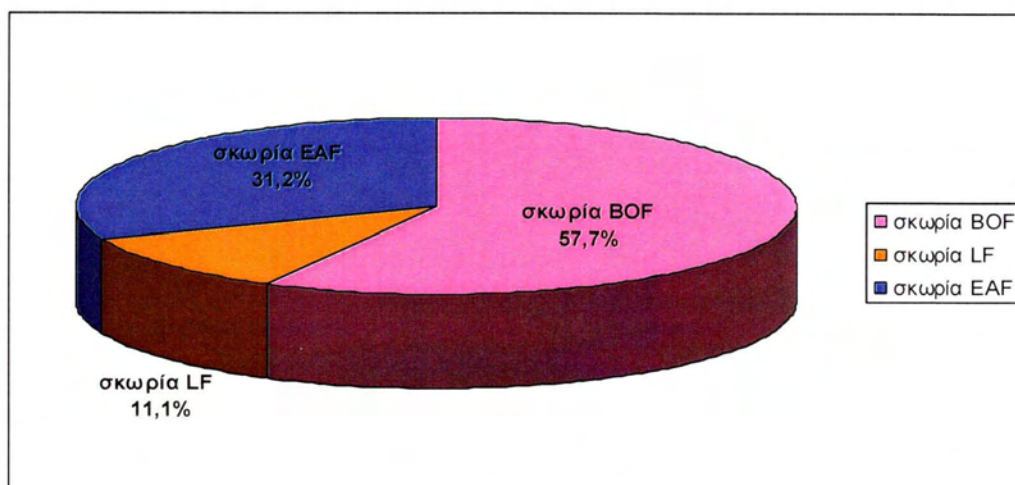
Για την παραγωγή γυαλιού χρησιμοποιείται ασβέστιο, πυρίτιο και πηγές αλουμίνιας ώστε να επιτευχθεί η σωστή χημεία. Οι κατασκευαστές μπουκαλιών μπορούν να χρησιμοποιήσουν σκωρία υψικαμίνων ως μερική πηγή και των τριών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το σημείο τήξης όλων των συστατικών είναι σχετικά χαμηλό (Καραστεργίου, 2009).

- Μονωτικό υλικό.

Η σκωρία υψικαμίνων έχει πολλά από τα ορυκτά συστατικά που χρειάζονται στην κατασκευή μονωτικών υλικών και αποτελεί την κύρια πρώτη ύλη για την κατασκευή τέτοιων υλικών (Καραστεργίου, 2009).

5.1.8. Αξιοποίηση σκωρίας κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου.

Κατά την διάρκεια παραγωγής χάλυβα, δημιουργούνται σκωρίες μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου (BOF), σκωρίες κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (EAF) και σκωρίες κάδου (LF). Η παγκόσμια παραγωγή σε σκωρία χάλυβα ανέρχεται στους 50 Mt ετησίως ενώ στην Ευρώπη η ετήσια παραγωγή είναι 12 Mt. Σήμερα περισσότερο από το 40% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα πραγματοποιείται σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου η ετήσια παραγωγή των οποίων είναι 20 Mt. Στην Ευρώπη η παραγωγή χαλυβουργικής σκωρίας κατανέμεται σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 5-1, με την παραγωγή σκωρίας EAF να ανέρχεται στο 31.2%. Στην Ελλάδα η δυναμικότητα παραγωγής χάλυβα είναι 3.5 Mt/y ενώ ετήσια παραγωγή σκωρίας EAF κυμαίνεται από 0.3 Mt σε 0.4 Mt. Τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα, που σχετίζονται με την απόθεση και τη διάθεση των σκωριών, είναι η κονιοποίηση (dusting) τους καθώς και η απελευθέρωση εκλουσμάτων.



Εικόνα 5-1: Κατανομή παραγωγής χαλυβουργικής σκωρίας στην Ευρώπη (Κουμπούρη, 2011).

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα έχει εκδώσει την Ευρωπαϊκή Οδηγία για Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (BAT της IPPC) από το 1996. Από τον Μάιο του 2004 όλα τα κράτη μέλη συμπεριλαμβανομένων και των νέων μελών υποχρεούνται να εφαρμόσουν πλήρως την ντιρεκτίβα τόσο σε υπάρχουσες όσο και σε νέες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η οποία, μεταξύ άλλων, υποχρεώνει τα χαλυβουργεία να ελαχιστοποιήσουν τα απόβλητα που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία και απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Περίπου το 65% της παγκόσμιας παραγωγής σε σκωρία EAF χρησιμοποιείται στον τομέα της οδοποιίας και της δόμησης, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται ή χρησιμοποιείται σε άλλες εφαρμογές. Στην Ευρώπη το 2010 περίπου το 37% της σκωρίας χάλυβα που παρήχθει χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή τσιμέντου. Στην Ελλάδα από το συνολικό ποσό των EAFS υφίστανται επεξεργασία κάθε χρόνο, περίπου το 55%, το οποίο χρησιμοποιείται στην παραγωγή χονδρόκοκκων αδρανών για την κατασκευή δρόμων και λιγότερο από 1% στην παραγωγή τσιμέντου.

Έχει διαπιστωθεί ότι η σκωρία EAF μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς του κατασκευαστικού κλάδου. Για παράδειγμα, στην παραγωγή τσιμέντου, είτε ως πρώτη ύλη ή σε μεταγενέστερο στάδιο, ως (λανθάνον) υδραυλικό ή ποξολανικό υλικό. Στις χαλυβουργικές σκωρίες περιέχονται ενώσεις (C_3S , C_2S , C_4AF και C_2F), που προσδίδουν υδραυλικές ιδιότητες στα τελικά προϊόντα, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας. Τα πιο γνωστά τσιμέντα αυτού του τύπου είναι τα λεγόμενα σκωριο-τσιμέντα. Από την απευθείας χρήση των σκωριών χάλυβα μπορεί να παραχθεί τσιμέντο Portland.

Επιπλέον, μπορεί να αξιοποιηθεί στην οδοποιία, ως χονδρόκοκκο αδρανές λόγω της σκληρότητάς, της σημαντικής αντοχής της σε φθορά έναντι της τριβής και της κρούσης. Ως χονδρόκοκκο αδρανές χρησιμεύει στην κατασκευή βάσεων ή

υποβάσεων δρόμων καθώς και σαν συστατικό ασφαλτομιγμάτων ή στις επιφάνειες πεζοδρομίων. Μία ακόμη μέθοδος αξιοποίησης των σκωριών είναι στην παραγωγή άμμου αμμοβολής για την προετοιμασία μεταλλικών επιφανειών και εφαρμογές σε τοιχοποιίες για αναπαλαιώσεις κτιρίων (Κουμπούρη, 2011). Εκτιμάται ότι σε ετήσια βάση θα διατίθενται περίπου 15.000-25.000 τόνοι άμμου αμμοβολής. Το κύριο πλεονέκτημα της άμμου αμμοβολής από σκωρία κλιβάνου, όπως παρατηρήθηκε κατά τις δοκιμές, είναι η υψηλή ταχύτητα καθαρισμού των επιφανειών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην σκληρότητα αλλά και στην γωνιώδη φύση του υλικού σε κοκκομετρίες κάτω των 1.5 mm (Κουρούς, 2009).

Σε χώρες με γενικευμένη έλλειψη αδρανών, όπως το Βέλγιο, η Ολλανδία αλλά και σε περιοχές της Γερμανίας, της Γαλλίας, της Δανίας η χρήση αδρανών σκωρίας αποτελεί μία ικανοποιητική λύση για πολλές εφαρμογές. Ακόμη σε χώρες όπου τα φυσικά σκληρά αδρανή είναι σπάνια (Η.Π.Α.), οι σκωρίες χρησιμοποιούνται σε αντιολισθηρούς τάπητες. Εντυπωσιακό είναι το παράδειγμα της Μεγάλης Βρετανίας, μιας χώρας με αφθονία σκληρών αδρανών, όπου η χρήση των αδρανών σκωρίας σε αντιολισθηρούς τάπητες αποτελεί κοινή πρακτική.

Στην Ελλάδα τεχνικοί, οικονομικοί και οικολογικοί λόγοι έχουν προκαλέσει ένα αυξημένο ενδιαφέρον για εφαρμογή των σκωριών σε διάφορα έργα. Το ζήτημα της χρήσης των αδρανών σκωρίας σε αντιολισθηρούς τάπητες, που είναι μια από τις συνηθέστερες εφαρμογές, συνιστά ένα θέμα ξεχωριστής σημασίας για την Ελλάδα, όπου βρίσκεται σε εξέλιξη το πρόγραμμα υλοποίησης οδικών αξόνων (Κουμπούρη, 2011).

Επίσης, οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες των σκωριών κάνουν το υλικό ιδανικό και για εφαρμογές οι οποίες είναι λιγότερο διαδεδομένες στην χώρα μας όπως αυτή των λεπτοταπήτων (μίγμα Slurry) για επιφανειακές και διορθωτικές οδοστρώσεις (Κουρούς, 2009).

5.1.9. Πλεονεκτήματα από την χρήση των σκωριών χαλβουργίας.

Η άσφαλτος σκωρίας έχει μεγαλύτερη σταθερότητα από την συμβατική άσφαλο, επιτρέποντας την κατασκευή λεπτών τμημάτων σε ορισμένες περιπτώσεις. Τα πεζοδρόμια σκωρίας αντιστέκονται στην δημιουργία αυλακώσεων. Επίσης είναι ασφαλέστερα έναντι των συμβατικών λόγω της μικρότερης ολίσθησής τους (Καραστεργίου, 2009) και είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε αλκαλικό περιβάλλον (Κουρούς, 2009). Ακόμη, μίγμα σκωρίας με τσιμέντο ασφάλτου καθιστά ένα υλικό το οποίο είναι ανθεκτικό στις πιέσεις που δέχεται όπως επίσης και στις αποκολλήσεις. Τέλος, όσο αφορά το ασφαλτούχο σκυρόδεμα, η άσφαλτος που κατασκευάζεται με την χρήση σκωρίας είναι όπως αναφέρθηκε πολύ σταθερή και έχει καλή μοριακή δομή, επιτρέποντας έτσι την αντίσταση σε δυναμικά και σε στατικά φορτία χωρίς να παρατηρείται παραμόρφωση, ακόμα και στις ακραίες θερμοκρασίες. Τα μίγματα

ασφάλτου σκωρίας διατηρούν την θερμότητα για μεγαλύτερο διάστημα από αυτό των συμβατικών ασφάλτων, επομένως υπάρχει περισσότερος χρόνος για την τοποθέτηση και τη συμπίεση.

Στο κομμάτι της κατασκευής βάσεων αξίζει να σημειωθεί ότι οι βάσεις σκωρίας έχουν μεγάλη αντοχή σε καταπονήσεις και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση. Επίσης αναπτύσσουν μεγάλη πυκνότητα και απαιτούν ελάχιστη τοποθέτηση δοκών. Τέλος είναι πολύ σταθερές σε μεταβολές της υγρασίας και αποστραγγίζονται καλύτερα από τις αντίστοιχες συμβατικές βάσεις. Οι βάσεις σκωρίας εκτείνονται σε μικρότερο βάθος λόγω της υψηλής αναλογίας CBR (California Bearing Ratio) βάσει του σχεδίου AASHTO. Οι βάσεις σκωρίας είναι συχνά το υλικό επιλογής για πολλούς εργολάβους.

Στον οικοδομικό τομέα, κατασκευάζονται πυρίμαχα τούβλα και τσιμεντόλιθοι με την χρήση σκωρίας που έχουν εξαιρετική μόνωση στη θερμότητα και τον ήχο εξαιτίας της πορώδους δομής τους, πολύ καλύτερη από τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Η σκωρία από φούρνους με αέρα υπό πίεση χρησιμοποιείται ως συστατικό στο στερεοποιημένο υδραυλικό τσιμέντο, όπως είπαμε παραπάνω, και προσδίδει σημαντικές ιδιότητες όπως είναι η μεγάλη αντοχή, η υψηλή σταθερότητα, σκληρότητα, αντοχή στην φωτιά, η καλή μόνωση και το μικρό βάρος. Τα επιβλαβή σωματίδια σ' αυτόν τον τύπο σκωρίας είναι λιγότερα από 1% (Καραστεργίου, 2009).

Κάποια από τα πλεονεκτήματα που προσδίδει η χρήση σκωρίας στο σκυρόδεμα είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες και η αδιαπερατότητά του από το νερό (Κουρούς, 2009). Επίσης, τα σκωριο-τσιμέντα που προέρχονται από σκωρίες υψικαμίνου παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου (Κουμπούρη, 2011).

Για το σκωριοτσιμέντο αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του δίνει την δυνατότητα κατασκευών με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά αλλά και ιδιαίτερες ευκολίες όπως (Ecocement):

- Δυνατότητα παρασκευής κονιαμάτων και σκυροδετήσεων με λιγότερο νερό.
- Αποφυγή ανάπτυξης ρωγμών στις σκυροδετήσεις (χαμηλό θερμικό στρες).
- Ιδανικό για σκυροδετήσεις σε συνθήκες καύσωνα.
- Υψηλές αντιστάσεις των κατασκευών σε πυρκαγιά λόγω χαμηλού συντελεστή θερμοκρασιακής μετάδοσης.
- Υψηλή προστασία σιδηροπλισμού από την διάβρωση.
- Προστασία της κατασκευής από την υγρασία και την αρμύρα της θάλασσας.

- Ανοιχτόχρωμες σκυροδετημένες επιφάνειες που σημαίνει μικρότερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την τοιχοποιία άρα καλύτερη θερμική συμπεριφορά.
- Αποδεδειγμένα πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Σχετικά με την χρήση σκωριών EAF να αναφέρουμε ότι τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν στην παραγωγή άμμου αμμοβολής για την προετοιμασία μεταλλικών επιφανειών και στις εφαρμογές σε τοιχοποιίες για αναπαλαιώσεις κτιρίων οφείλονται στην σκληρότητα αλλά και στη γωνιώδη φύση του υλικού σε κοκκομετρίες κάτω των 1.5 mm. Στο πεδίο των υδραυλικών κατασκευών τα αδρανή σκωρίας χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω της αδιαπερατότητάς τους από το νερό σε φράγματα και αναχώματα, στη σταθεροποίηση κοιτών και όχθων ποταμών και στην πλήρωση διαβρωμένων τμημάτων σε κοίτες ποταμών (Κουμπούρη, 2011).

Οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου είναι (Κουρούς, 2009):

- Η εξοικονόμηση ενέργειας.
- Η μη μορφολογική επιβάρυνση του φυσικού τοπίου από την εξόρυξη φυσικών αδρανών.
- Η θετική επίπτωση λόγω εξουδετέρωσης της όξινης αντίδρασης σε αντιδιαστολή με τα φυσικά αδρανή.
- Η εξοικονόμηση φυσικών πόρων μέσω της ανακύκλωσης των παραπροϊόντων των χαλυβουργείων.
- Η κατασκευή ασφαλέστερου οδικού δικτύου.

5.2. Σκωρίες σιδηρονικελίου.

5.2.1. Παραγωγή σκωριών σιδηρονικελίου.

Κατά την παραγωγή σιδηρονικελίου καταναλώνονται οι εξής πρώτες ύλες:

- Μετάλλευμα Λατερίτη.
- Λιγνίτης.
- Γαϊάνθρακες.

Οι βοηθητικές ύλες που καταναλώνονται κατά την παραγωγική διαδικασία είναι οι εξής:

- Μαζούτ.
- O₂.
- Δολομιτικό ασβέστιο.
- Πάστα ηλεκτροδίων (H/Δ).
- Πυρίμαχα.

- Προπάνιο.

Κατά την παραγωγή σιδηρονικελίου παράγονται διάφοροι τύποι σκωρίας όπως:

- Σκωρία ηλεκτρικής καμίνου (H/K) σε κοκκοποιημένη μορφή, η οποία αποθηκεύεται σε εξωτερικούς χώρους και διατίθεται σε ΧΥΤΑ, ή πωλείται σε τσιμεντοβιομηχανία.
- Σκωρία M/T (μετά τον μαγνητικό διαχωρισμό), η οποία αποθηκεύεται σε εξωτερικούς χώρους.
- Μαγνητικό συμπύκνωμα σκωρίας M/T, το οποίο αποθηκεύεται σε εξωτερικούς χώρους και επανατροφοδοτείται στους M/T (μεταλλάκτες).

Στην Ελλάδα λειτουργεί μια βιομηχανία σιδηρονικελίου (Λάρκο) που παράγει δύο είδη σκωρίας.

Το πρώτο είδος είναι σκωρία από αναγωγική τήξη. Για την διεργασία της αναγωγικής τήξης του μεταλλεύματος χρησιμοποιείται μεγάλη ισχύς (103.5 MW), ενώ παράγονται σκωρία H/K (η οποία οδηγείται για στερεοποίηση-κοκκοποίηση), και απόβλητα νερού ψύξης μετασχηματιστών, το οποίο περιέχει φαινόλες και οδηγείται στον παχυντή. Κατά την στερεοποίηση-κοκκοποίηση ρευστού καταναλώνεται νερό από την υπερχειλίση του παχυντή για την διάσπαση των φαινολών λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, που επικρατούν κατά τη διεργασία (150 m³/h), καθώς και θαλασσινό νερό σε μεγάλες ποσότητες (7150 m³/h). Η στερεοποιημένη-κοκκώδης σκωρία πωλείται ως υλικό αμμοβολής ή πρόσθετο στην τσιμεντοβιομηχανία, ενώ το νερό από υπερχειλίση της δεξαμενής καθίζησης (εκροή) απορρίπτεται στον αποδέκτη (θάλασσα). Είναι ένα μη επικίνδυνο απόβλητο και η ετήσια παραγωγή στην Ελλάδα είναι 1.500.000 τόνου/χρόνο. Τα 2/3 της ποσότητας αυτής απορρίπτονται στον Ευβοϊκό και μόλις το 1/3 χρησιμοποιείται ως υλικό αμμοβολής και στην τσιμεντοβιομηχανία. Η χημική σύσταση είναι: 32% SiO₂, 32% Fe, 9% Al₂O₃, 3.5% CaO, 3% MnO, 3% Cr₂O₃.

Το δεύτερο είδος σκωρίας είναι η σκωρία από καθαρισμό FeNi (25% Ni), και η παραγωγή ανέρχεται στους 85.000 τόνου/χρόνο. Και αυτός ο τύπος σκωρίας χρησιμοποιείται ως υλικό αμμοβολής και στην τσιμεντοβιομηχανία (Καραστεργίου, 2009).

5.2.2. Αξιοποίηση σκωριών σιδηρονικελίου.

Από την δεκαετία του 70' οι ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες χρησιμοποίησαν την σκωρία μετά από λειοτρίβιση σαν πρόσθετο υλικό στο τσιμέντο λόγω των υδραυλικών της ιδιοτήτων. Αυτή η χρήση ουσιαστικά σταμάτησε το 2002 όταν εκδόθηκαν τα καινούρια πρότυπα για το τσιμέντο.

Ωστόσο η χρήση σκωρίας στην παραγωγή τσιμέντου υψηλών προδιαγραφών διερευνήθηκε με εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές. Οι εργαστηριακές δοκιμές βοήθησαν στον προσδιορισμό των κυρίων παραμέτρων της διεργασίας, σχετικά με τις αναλογίες πρώτων υλών, την κινητική της αναγωγής και τον ρυθμό απόψυξης του προϊόντος. Τα προϊόντα των εργαστηριακών δοκιμών ανέπτυξαν αντοχή σε θλίψη κοντά σε εκείνη των υψηλών προδιαγραφών. Επίσης η απουσία αρχικής αντοχής στο πιλοτικό προϊόν αποδίδεται στον υψηλότερο ρυθμό απόψυξης σε σύγκριση με τις εργαστηριακές δοκιμές. Το αλουμινούχο τσιμέντο υψηλών προδιαγραφών έχει το πλεονέκτημα ότι αποκτά πολύ γρήγορα την μέγιστη αντοχή του, συνεπώς θεωρείται εξαιρετικά κατάλληλο για χρήση σε μεγάλα κατασκευαστικά έργα που χρησιμοποιούν τεχνικές συνεχόμενης χύτευσης.

Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν έδωσαν επιτυχή αποτελέσματα που αφορούν: α) την χρήση της σκωρίας ως αδρανές πρόσθετο υλικό στο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής σε αντικατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών και β) την χρήση της σκωρίας ως πρόσθετο στο τσιμέντο, λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων (Κουρούς, 2009).

6. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ.

6.1. Γενικά στοιχεία.

Ένα βασικό πρόβλημα, το οποίο απαιτεί άμεση επίλυση είναι η εγκατάλειψη στο περιβάλλον τόσο των οχημάτων όσο και των επιμέρους τμημάτων τους που ολοκληρώνουν τον κύκλο ζωής τους και τίθενται σε αχρηστία προτού αποσυρθεί το όχημα στο σύνολό του. Δυστυχώς τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα όχημα είναι πολλά και το πρόβλημα ανάκτησης, διάθεσης, αξιοποίησης, κατάλληλης επεξεργασίας και ανακύκλωσης δεν είναι απλή υπόθεση. Ένα τμήμα που προκαλεί αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον κυρίως όταν αποτίθεται ανεξέλεγκτα είτε σε χωματερές είτε σε χαράδρες είναι τα ελαστικά μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους (Μαυρίδου, 2010).



Εικόνα 6-1: Σωροί ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.

Τα ελαστικά χαρακτηρίζονται από ιδιότητες που διασφαλίζουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του οχήματος όπως είναι η απορρόφηση κραδασμών στις ανωμαλίες του οδοστρώματος, η αντοχή και η ανθεκτικότητα σε μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λόγω της τριβής του ελαστικού με το οδόστρωμα καθώς και η καλή χιλιομετρική απόδοση. Συνεπώς, όταν τα ελαστικά πάψουν να εμφανίζουν τις παραπάνω ιδιότητες πρέπει να αντικαθίστανται είτε ολοκληρωτικά είτε μερικώς μέσω της διαδικασίας της αναγόμωσης. Πρακτικά, όπως και με τα περισσότερα βιομηχανικά παραπροϊόντα, η μη οργάνωση της «τύχης» τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους σε συνδυασμό με την έλλειψη μέριμνας και πολιτικής

για την μετέπειτα τύχη των ελαστικών έχει ως αποτέλεσμα τη διόγκωση του προβλήματος της διάθεσής τους.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους, όταν αποτίθενται στο περιβάλλον, είναι ο πολύ μεγάλος χρόνος πλήρους αφομοίωσής τους από τη φύση, ο οποίος υπολογίζεται σε μερικές εκατοντάδες χρόνια. Αποτελούν υλικά που δεν αποικοδομούνται γρήγορα υποβαθμίζοντας αισθητά το χώρο στον οποίο αποτίθενται, αποτελώντας μόνιμη εστία μόλυνσεων από τα στάσιμα νερά που είναι δυνατόν να εγκλωβιστούν στα κοίλα τους. Παράλληλα, είναι πιθανοί δημιουργοί πυρκαγιών –συχνά μη ελεγχόμενων –με τεράστιες περιβαλλοντικές συνέπειες.

Όσον αφορά στη σύσταση των ελαστικών οχημάτων, τα επιμέρους συστατικά τους τόσο για επιβατικά οχήματα όσο και για φορτηγά δίνονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Ποσοστά επιμέρους συστατικών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ελαστικών οχημάτων (Μαυρίδου, 2010).

<i>Υλικό</i>	<i>Επιβατικά</i>	<i>Φορτηγά</i>
Φυσικό ή συνθετικό καουτσούκ	47%	45%
Άνθρακας	21.5%	22%
Μέταλλα	16.5%	25%
Υφάσματα	5.5%	-
Οξείδιο ξευδαργύρου	1%	2%
Θείο	1%	1%
Πρόσθετα	7.5%	5%

Με τον όρο καουτσούκ εννοούνται διάφορα πολυμερή, μεταξύ των οποίων και το φυσικό καουτσούκ. Το λάδι και τα ειδικά μαλακτικά κάνουν την γόμα πιο μαλακή, ενώ όλα τα υπόλοιπα συστατικά τη σκληραίνουν. Πολύ σημαντικός είναι εδώ ο ρόλος που παίζουν δύο υλικά, ο άνθρακας και το πυρίτιο, τα οποία βελτιώνουν δραστικά την αντοχή στη φθορά. Ο πρώτος, εκτός από το να σκληραίνει την γόμα, φροντίζει να αυξάνει την αντοχή της σε όλων των ειδών τις καταπονήσεις και κυρίως στην αντίσταση σε ολίσθηση ενώ το πυρίτιο μειώνει την τριβή ολίσθησης, η οποία επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση ενός αυτοκινήτου, και ταυτόχρονα αυξάνει το φάσμα της ωφέλιμης θερμοκρασίας λειτουργίας ενός ελαστικού. Το θείο φροντίζει να δημιουργηθούν οι δεσμοί των μακρομορίων της γόμας.

Τα ελαστικά ταξινομούνται με βάση τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (E.K.A.), (2001), στην ίδια κύρια κατηγορία με τα οχήματα μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους (Κωδικός 16 01) και πιο συγκεκριμένα με τον κωδικό 16 01 03.

Τα ελαστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές ανάλογα με την μορφή τους. Παραδείγματος χάρη, ανακυκλωμένο ελαστικό με μορφή πούδρας μπορεί να ενσωματωθεί σε μίγματα με βάση την άσφαλτο, ενώ μεγαλύτερα τεμάχια ελαστικού, πχ κοκκομετρίας 50 mm και μεγαλύτερα μπορούν να ενσωματωθούν σε γεωτεχνικά έργα, όπως είναι επιχώματα κτλ. Για πρακτικούς λόγους σύγκρισης μεταξύ των επιστημόνων ή όσων ασχολούνται με την εναλλακτική επεξεργασία του ανακυκλωμένου ελαστικού, πραγματοποιήθηκε η παρακάτω διάκριση ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων του (Πίνακας 6-2) (Μαυρίδου, 2010).

Πίνακας 6-2: Διαβάθμιση ελαστικών μερών [ETRA] (Μαυρίδου, 2010).

<i>Ονομασία ελαστικού μέρους</i>	<i>Μέγεθος ελαστικού</i>
Cut	>300 mm
Τεμάχιο (shred)	300-50 mm
Chip	50-10 mm
Κόκκος (granulate)	10-1 mm
Πούδρα (powder)	<1 mm
Λεπτή πούδρα (fine powder)	<500 μm

6.2. Στοιχεία σχετικά με τα φθαρμένα ελαστικά στην Ε.Ε.

Με βάση αξιόπιστες εκτιμήσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση συσσωρεύονται ετησίως περισσότερα από 250 εκ. ελαστικά μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους με ανάλογες ποσότητες στην Ανατολική Ευρώπη, τη Βόρεια Αμερική, τη λατινική Αμερική, την Ιαπωνία και τη Μέση Ανατολή επιβαρύνοντας το περιβάλλον με περισσότερα από 1 δις ελαστικά [ETRA].

Οι υφιστάμενοι σωροί ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους εκτιμώνται σε ± 3 δις εντός της Ε.Ε. ενώ η αντίστοιχη ποσότητα για τη Βόρεια Αμερική ανέρχεται στα 1 δις. Κάθε χρόνο οι σωροί αυτοί αυξάνονται με ανησυχητικό ρυθμό, με ένα μέρος να αποτίθεται σε χωματερές ενώ ένα άλλο μεγαλύτερο αποτίθεται ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον προκαλώντας τις γνωστές ανεπιθύμητες συνέπειες.

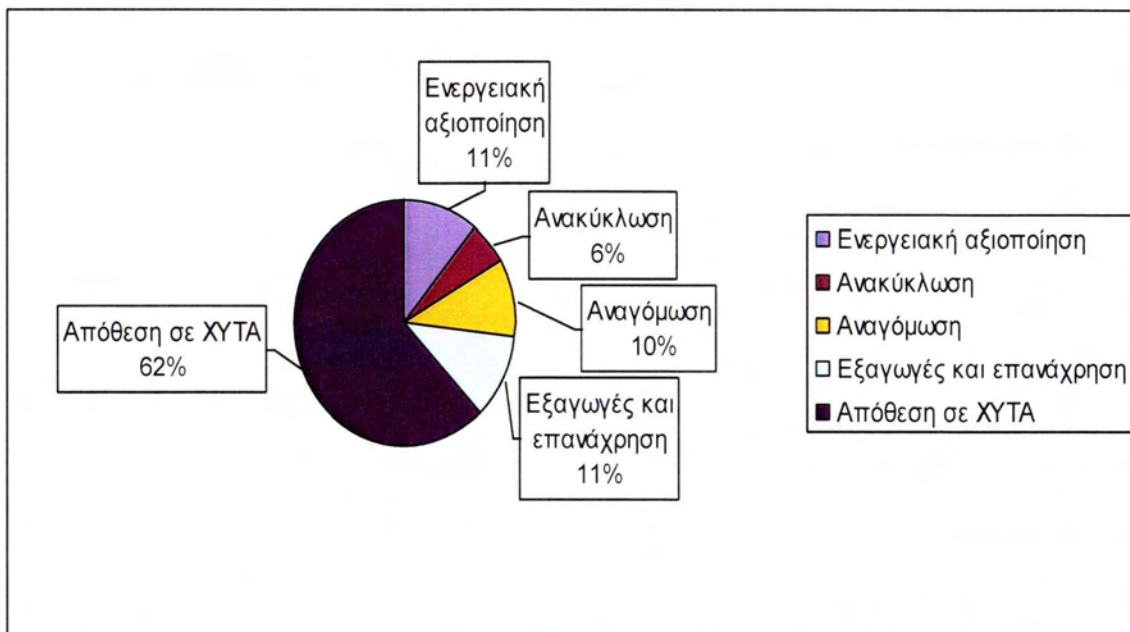
Η έννοια της διαχείρισης των ελαστικών σε κάθε κράτος- μέλος διαφέρει κατά περίπτωση ανάλογα με την εθνική πολιτική και νομοθεσία. Για ορισμένα κράτη μέλη ως διαχείριση των ελαστικών νοείται αποκλειστικά η συγκέντρωσή τους σε χωματερές, ενώ σε άλλα η πρακτική αυτή έχει εγκαταλειφθεί εδώ και χρόνια. Όμως η ψήφιση σχετικής με τα απόβλητα νομοθεσίας (Οδηγία 31/1999/Ε.Ε.) απαγορεύει ρητά την απόθεση σε Χ.Υ.Τ.Α. και επομένως τα κράτη μέλη καλούνται να εφαρμόσουν εναλλακτικές πρακτικές.

Η θέσπιση της Ευρωπαϊκής αυτής οδηγίας αποτέλεσε την κυρίαρχη νομοθεσία για όλη την Ευρώπη. Κάθε χώρα- μέλος της ΕΕ οφείλει να συμμορφώνεται έναντι αυτής. Όσον αφορά στην εναλλακτική διαχείριση των φθαρμένων ελαστικών οχημάτων, υπάρχει ήδη σχετική θεσπισμένη νομοθεσία και κρατικά συστήματα, που φροντίζουν ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της νομοθεσίας αυτής. Τέτοια συστήματα-φορείς εναλλακτικής διαχείρισης ελαστικών σε διάφορα κράτη μέλη της ΕΕ έχουν ήδη αναλυθεί ενώ παρακάτω δίνονται ενδεικτικά μερικά από αυτά.

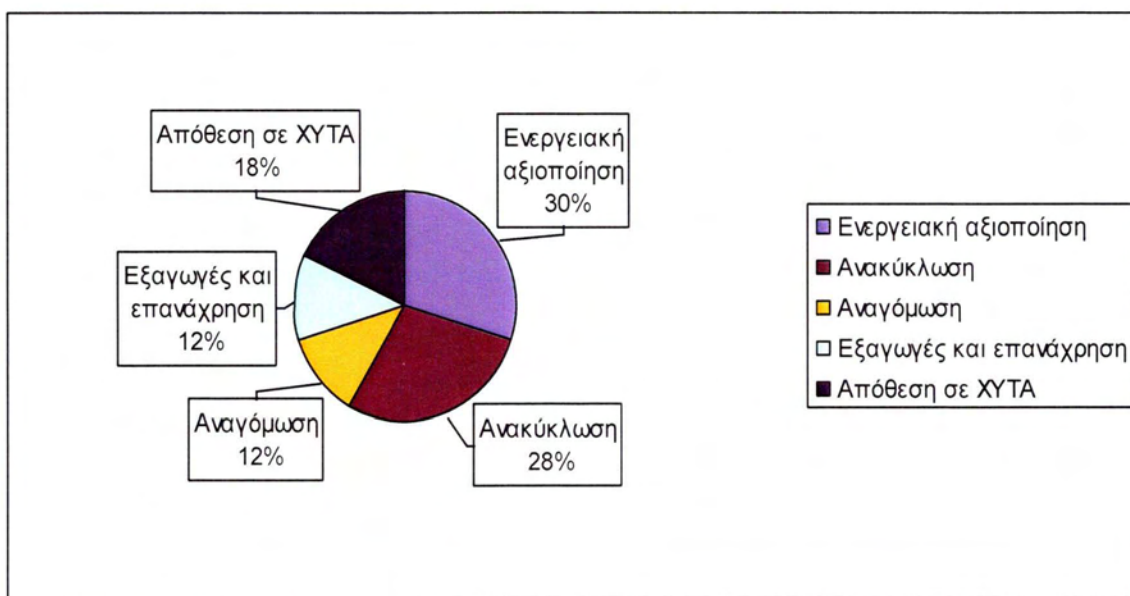
Πίνακας 6-3: Φορείς εναλλακτικής διαχείρισης ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους σε χώρες της Ευρώπης (Μαυρίδου, 2010).

<i>Χώρα</i>	<i>Φορέας</i>	<i>Υπεύθυνος</i>	<i>Ιστοσελίδα</i>
Βέλγιο	Recytyre	C. Lorquet	http://www.recytyre.be
Φινλανδία	Suomen Rengaskierrätys	H. Sjö berg	http://www.rengaskierratys.com
Γαλλία	Aliapur	E. Fabiew	http://www.aliapur.com
Γερμανία	Gavs	H. Hirsch	h.hirsch@wdk.de
Ελλάδα	Ecoelastika	G. Mavrias	http://www.ecoelastika.gr
Ουγγαρία	Magusz	G. Samay	http://www.magusz.hu
Ιταλία	Eco Pne Us	M. Saltalamacchia	http://www.ecopneus.it
Ολλανδία	Recybem	C. van Oostenrijk	http://www.recybem.nl
Νορβηγία	Dekkretur	H. Braathen	http://www.dekkretur.no
Ισπανία	Nedes	J.M. Bermejo	consorcio@arrakis.es
Πολωνία	Cuo	J. Ziolkowski	http://www.utyliczajaoapon.pl
Πορτογαλία	Valorpneu	C. Silva	http://www.valorpneu.pt/
Ρουμανία	Eco Anvelope	F. Brabete	http://www.ecoanvelope.ro
Σουηδία	Sdab	L. Aman	http://www.sdab.se
Ηνωμένο Βασίλειο	Used tyre wg	A.J. Dorken	http://www.tyredisposal.co.uk

Παράλληλα διάφορες εναλλακτικές χρήσεις των ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους δίνονται στα Διαγράμματα 6-1 α, β για τις χρονιές 1994 και 2003, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται μια αισθητή μείωση των ποσοτήτων που αποτίθενται σε χωματερές, εξαιτίας της νομοθεσίας- ενώ χρήσεις όπως η θερμική αξιοποίηση και η αναγόμευση κυριαρχούν (Μαυρίδου, 2010).



Διάγραμμα 6-1α: Εναλλακτική διαχείριση φαρμαμένων ελαστικών στην Ευρώπη το 1994 (Μαυρίδου, 2010).



Διάγραμμα 6-1β: Εναλλακτική διαχείριση φαρμαμένων ελαστικών στην Ευρώπη το 2003 (Μαυρίδου, 2010).

6.3. Ελληνική νομοθεσία σχετικά με τα φθαρμένα ελαστικά οχημάτων.

Το νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα, σχετικά με τα φθαρμένα ελαστικά οχημάτων, αποτελείται από τα παρακάτω (Μαυρίδου, 2010 και Οικονόμου και Μαυρίδου, 2008):

- Πλήρης απαγόρευση εισόδου παλαιών ελαστικών σε Χ.Υ.Τ.Α. από το 2006 (Οδηγία 31/99 Ε.Ε.)
- Οδηγία 53/2000/ΕΕ για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους
- Οδηγία 76/2000/ΕΕ για την αποτέφρωση αποβλήτων
- Νόμος 2939/01 για την εναλλακτική διαχείριση των υλικών συσκευασίας και άλλων προϊόντων
- Προεδρικό Διάταγμα (ΠΔ 109, ΦΕΚ Α75-5/3/2004) που θέτει προδιαγραφές και στόχους για την διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών στην Ελλάδα
- ΚΥΑ 1145/28/7/2004 σχετικά με την έγκριση του συλλογικού συστήματος εναλλακτικής διαχείρισης παλαιών ελαστικών Ecoelastika
- ΚΥΑ 1916/24-12-2004 για την ξεχωριστή αναγραφή των χρηματικών εισφορών του συστήματος της Ecoelastika επί των τιμολογίων πώλησης νέων ελαστικών

Συγκεκριμένα στη χώρα μας, στις 5 Μαρτίου 2004 θεσπίστηκε το Προεδρικό Διάταγμα 109/2004 (ΦΕΚ 75, 2004) με αντικείμενο: «Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείρισή τους». Το Προεδρικό αυτό Διάταγμα αποσκοπεί στην πρόληψη δημιουργίας αποβλήτων από τα ελαστικά πίσωτρα καθώς και στην επαναχρησιμοποίηση, στην ανακύκλωση και στην ενεργειακή αξιοποίηση των μεταχειρισμένων ελαστικών, στη μείωση της ποσότητας των προς διάθεση αποβλήτων σύμφωνα με τους στόχους και τις γενικές αρχές του Νόμου 2939/2001 καθώς και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης όλων όσων συμμετέχουν στον κύκλο ζωής των ελαστικών.

Σύμφωνα με το παρόν Π.Δ., από την 16^η Ιουλίου του 2003 και έπειτα, δεν γίνονται αποδεκτά σε Χ.Υ.Τ.Α. ολόκληρα μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων, εκτός αν αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευαστικά έργα εντός του Χ.Υ.Τ.Α., ενώ από την 16^η Ιουλίου 2006 απαγορεύεται η απόθεση μεταχειρισμένων ελαστικών οχημάτων σε οποιαδήποτε μορφή και κοκκομετρία. Από την συλλεγόμενη ποσότητα των ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους ένα μικρό μόνο μέρος αξιοποιείται σήμερα, ποσοστό το οποίο από το τέλος Ιουλίου 2006 θα έπρεπε να ανέρχεται στο 65% των αποσυρόμενων ελαστικών, ενώ εντός του ίδιου χρονικού διαστήματος η ανακύκλωση αυτών θα έπρεπε να φθάνει το 10% (Μαυρίδου, 2010).

6.4. Στατιστικά στοιχεία ποσοτήτων και αξιοποίησης φθαρμένων ελαστικών στην Ελλάδα.

Όσον αφορά στη συλλογή, στην εναλλακτική αξιοποίηση ή αποθήκευση των ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους για τα έτη 2002-2008 παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα στατιστικά στοιχεία.

Συγκεκριμένα, οι ποσότητες και οι τομείς στους οποίους αξιοποιήθηκαν φθαρμένα ελαστικά το 2002 φαίνονται στον Πίνακα 6-4.

Πίνακας 6-4: Αξιοποίηση ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους στην Ελλάδα κατά το έτος 2002 (Μαυρίδου, 2010).

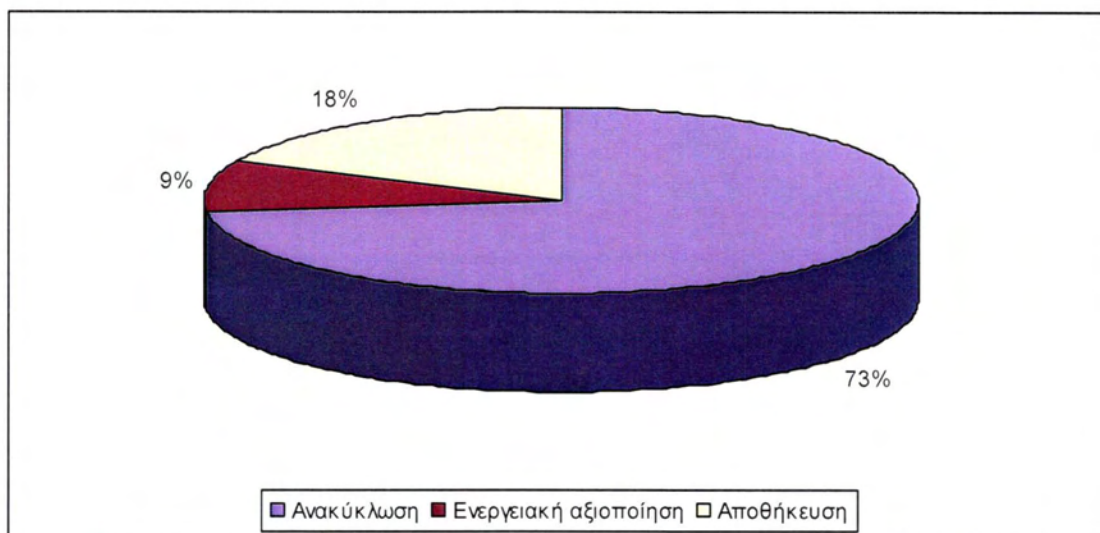
<i>Μέθοδος διαχείρισης</i>	<i>Ποσότητες (tns / year)</i>	<i>Ποσοστά (%)</i>
Συναποτέφρωση στην τσιμεντοβιομηχανία	1.500	3,0%
Διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ)	2.300	4,6%
Ανακύκλωση για παραγωγή τρίμματος	7.000	14,0%
Ανεξέλεγκτη διάθεση (ανενεργά λατομεία, αλάνες)	39.200	58,4%
Αποθήκες ΟΔΔΥ	10.000	20,0%
Σύνολο	50.000	100,0%

Κατά το χρονικό διάστημα Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου 2004, η Ecoelastika διαχειρίστηκε 21.547 τόνους μεταχειρισμένων ελαστικών εκ των οποίων το 12,5% ανακυκλώθηκε ενώ το υπόλοιπο 87,5% αξιοποιήθηκε ενεργειακά στην τσιμεντοβιομηχανία.

Το 2005 συλλέχθηκαν συνολικά 24.869 τόνοι. Από αυτή την ποσότητα, το 20,63% αξιοποιήθηκε θερμικά σε εγκαταστάσεις της τσιμεντοβιομηχανίας ΤΙΤΑΝ, το 19,15% υπέστη επεξεργασία και παρήχθη τρίμμα ελαστικού διαφόρων κοκκομετριών το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο για την κατασκευή τεχνητού χλοοτάπητα σε γήπεδα 5Χ5, στα μαλακά πλακάκια στις παιδικές χαρές και στο τερέν του στίβου. Το 6,89% ήταν μέταλλα, το 7,79% ήταν λινά και λοιπά κατάλοιπα της παραγωγικής διαδικασίας τα οποία μπορούσαν να οδηγηθούν σε ΧΥΤΑ, το 19,27% ήταν ενδιάμεσα προϊόντα τεμαχισμού (π.χ. τεμάχια ελαστικού, chips κλπ.) τα οποία είτε διατίθενται ως έχουν σε κατασκευαστικά (π.χ. αποστραγγιστικά κλπ.) είτε λειτουργούν ως απόθεμα για παραγωγή τρίμματος. Τέλος, ποσοστό 26,28% αποθηκεύτηκε σε κατάλληλους χώρους.

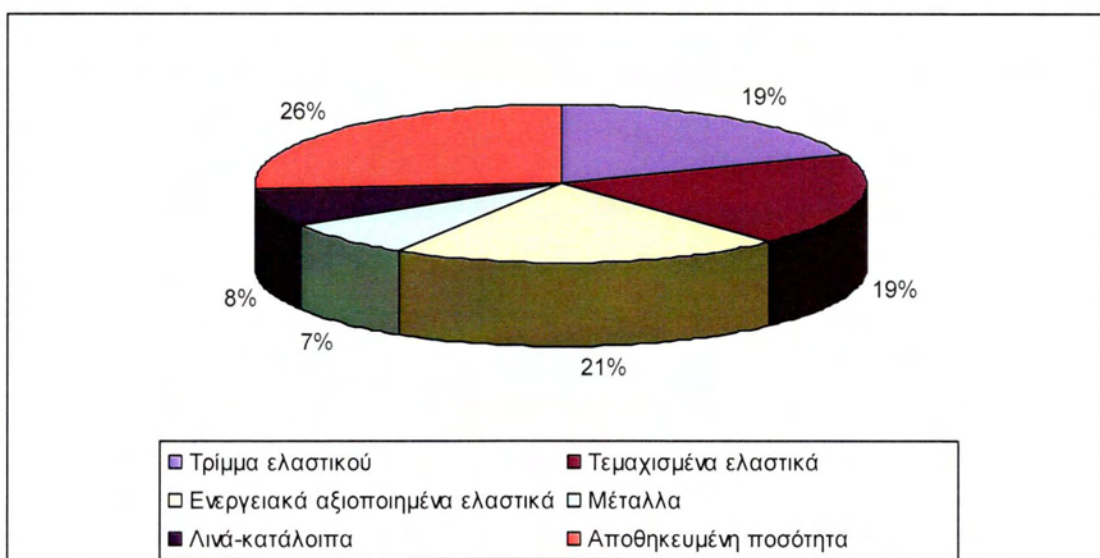
Οι ποσότητες μεταχειρισμένων ελαστικών που συλλέχθηκαν το 2006 ανήλθαν σε 41.380 τόνους από τις οποίες, το 73% οδηγήθηκε για τεμαχισμό και το 9% αξιοποιήθηκε ενεργειακά στην τσιμεντοβιομηχανία όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6-

2. Η υπόλοιπη ποσότητα παρέμεινε αποθηκευμένη σε χώρους προσωρινής αποθήκευσης του συστήματος.



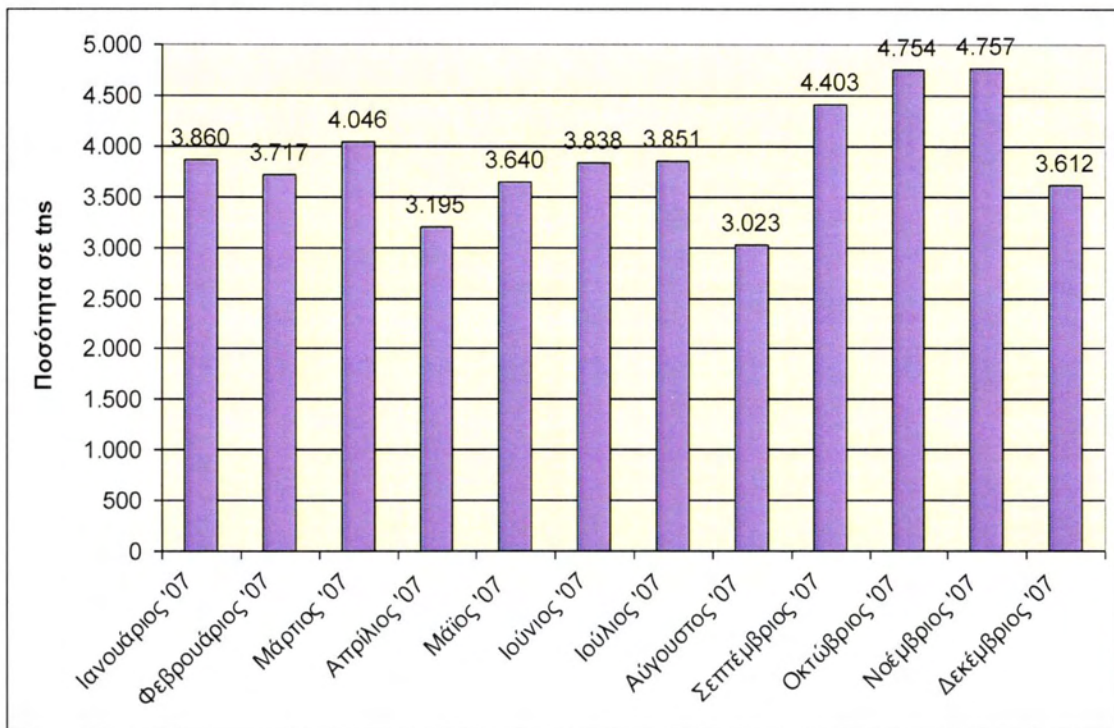
Διάγραμμα 6-2: Ποσοστιαία ανάλυση διαχειριζόμενων ποσοτήτων κατά το 2006 (Μαυρίδου, 2010).

Όσον αφορά στα προϊόντα διαχείρισης των ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους στη χώρα μας στο Διάγραμμα 6-3 δίνονται τα σχετικά στοιχεία.

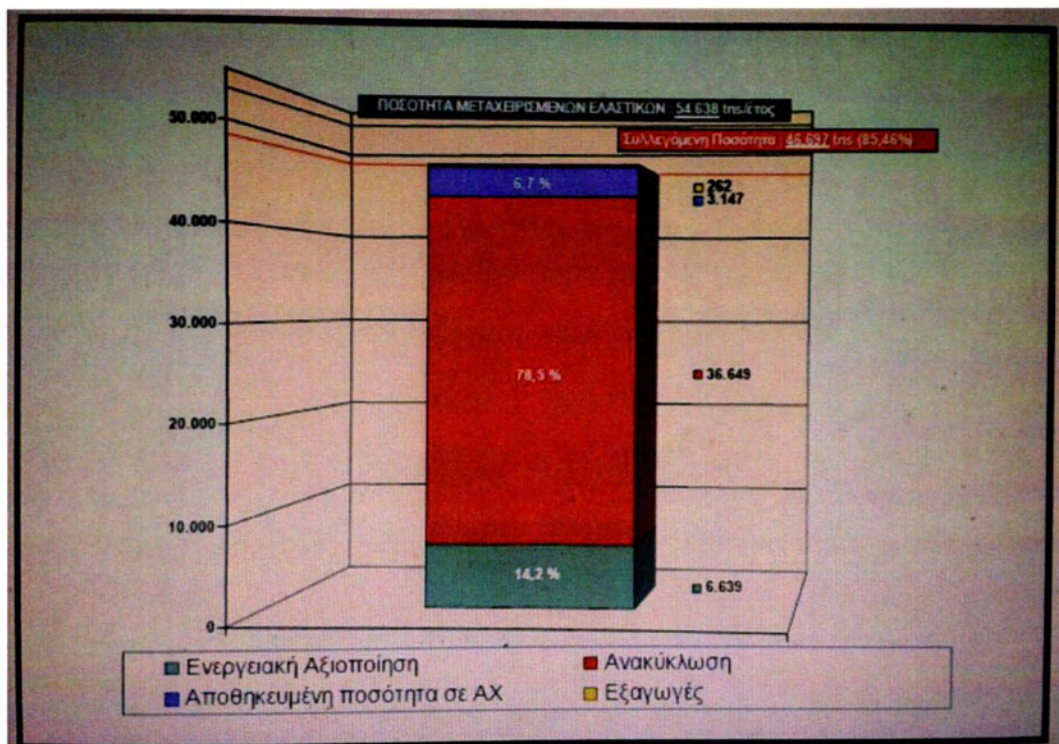


Διάγραμμα 6-3: Προϊόντα διαχείρισης ελαστικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους στην Ελλάδα (Μαυρίδου, 2010).

Τα στοιχεία συλλογής, αξιοποίησης για το έτος 2007 δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 6-4: Μηνιαίες ποσότητες απορριπτόμενων ελαστικών 2007 (Μαυρίδου, 2010).



Διάγραμμα 6-5: Αξιοποιούμενες-ανακυκλούμενες ποσότητες 2007 (Μαυρίδου, 2010).

Κατά το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου 2007 – Δεκεμβρίου 2007 η Ecoelastika διαχειρίστηκε συνολικά 46.697 τόνους μεταχειρισμένων ελαστικών εκ των οποίων το 78,5% οδηγήθηκε προς τεμαχισμό και το 14,2% αξιοποιήθηκε ενεργειακά στην τσιμεντοβιομηχανία (Μαυρίδου, 2010).

6.5. Χρήσεις φθαρμένων ελαστικών.

Χρήσεις σε εφαρμογές μη πολιτικού μηχανικού.

Τα φθαρμένα ελαστικά των οχημάτων είναι δυνατόν να επαναχρησιμοποιηθούν σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος εφαρμογών. Υπάρχουν δύο τρόποι χρήσης των ελαστικών, ο πρώτος αφορά ολόκληρα ελαστικά και ο δεύτερος κοκκοποιημένα.

Ολόκληρα ελαστικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή νέων αναγομωμένων ελαστικών, σε αποβάθρες και μαρίνες – ως υλικά αποφυγής της διάβρωσης λόγω κυματισμών -, ως φυσικά φράγματα, σε ορεινές περιοχές, σε γήπεδα γκολφ, ως υλικά προσωρινών οδών, καθώς και για την ουδετεροποίηση – σταθεροποίηση εδαφών.

Κοκκοποιημένα ελαστικά, και κυρίως το ελαστικό μέρος αυτών, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για χρήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία, για δημιουργία ελαστικού εξοπλισμού δρόμων και σήμανσης, ως πορώδεις σωλήνες αποστράγγισης, σε δάπεδα παιδότοπων ή υπαίθριων αθλημάτων – ποδοσφαιρικά γήπεδα – για δάπεδα συνεδριακών και εκθεσιακών κέντρων, στις γραμμές των τρένων και τραμ καθώς και ως υλικά δωματίων-στεγών.

Χρήσεις σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού.

Η πρώτη χρήση των ανακυκλωμένων ελαστικών ανιχνεύεται στην Αμερική στα μέσα της δεκαετίας του 70, όταν χρησιμοποιήθηκαν ως κυματοθραύστες και τεχνητοί ύφαλοι. Το χρονικό εκείνο διάστημα και μέχρι το 1991 ελάχιστα ελαστικά χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού. Από το 1992, τεμάχια ελαστικού χρησιμοποιούνταν σε επιχώματα και ελέγχονταν ως ελαφροβαρές υλικό για πλήρωση τοίχων αντιστήριξης. Η εφαρμογή αυτή αποτελούσε εναλλακτική εφαρμογή στη χρήση τους σε έργα οδοποιίας – στην παραγωγή τροποποιημένης με ελαστικό ασφάλτου-. Ωστόσο και οι δύο αυτές εφαρμογές δεν ήταν πραγματικά αποδεκτές από την κατασκευαστική κοινότητα αυτοκινητοδρόμων. Η ποσότητα των ελαστικών που χρησιμοποιείτο σε έργα Πολιτικού Μηχανικού στην Αμερική αυξήθηκε σε περίπου 10 εκατομμύρια ετησίως στο τέλος του 1995. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της περιόδου εκείνης, σε έργα Πολιτικού Μηχανικού ήταν δυνατό να καταναλωθούν 15 με 20 εκατομμύρια ανακυκλωμένων ελαστικών μέχρι το 1997. Το Δεκέμβριο 1995 και Ιανουάριο 1996, μελέτες σε δρόμους όπου χρησιμοποιήθηκε

ανακυκλωμένο ελαστικό εμφάνισαν προβλήματα στην λειτουργία τους, η γνώση της αρνητικής αυτής συμπεριφοράς οδήγησε στον περιορισμό της χρήσης ελαστικών σε παρόμοια έργα. Κατά το 1996, η μοναδική ευρεία χρήση των ανακυκλωμένων ελαστικών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού αφορούσε στην κατασκευή χωματερών και στην λειτουργία αυτών. Η αγορά περιορίστηκε στα 5 εκατομμύρια ελαστικά. Ωστόσο τα επόμενα χρόνια, πραγματοποιήθηκαν παγκοσμίως μελέτες σχετικές με την συμπεριφορά των ελαστικών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού – δηλαδή σε προϊόντα με βάση το τσιμέντο, την άσφαλο καθώς και εδαφικά υλικά – με αποτέλεσμα την ανάπτυξη κατάλληλης τεχνογνωσίας.

Η εναλλακτική διαχείριση μέσω της χρησιμοποίησης φθαρμένων ελαστικών και κυρίως του ανακυκλωμένου ελαστικού μέρους τους στις διάφορες εφαρμογές επιλέγεται με βάση τις ιδιότητές τους. Όσον αφορά σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού οι ιδιότητες που κάνουν το ελαστικό ενδιαφέρον στην χρήση είναι:

- Η απλή μορφοποίησή του – τεμαχίζεται εύκολα σε διάφορα μεγέθη –
- Το χαμηλό ειδικό του βάρος εξαιτίας του οποίου μπορεί να χαρακτηριστεί ως χαμηλού ειδικού βάρους αδρανές υλικό
- Η θερμική μόνωση που μπορεί να προσφέρει – αποτελεί έναν φτωχό αγωγό θερμότητας, και προσφέρει καλύτερη μόνωση συγκριτικά με το έδαφος ή διάφορα αδρανή υλικά
- Η μόνωση έναντι κραδασμών – η δυνατότητα παραμόρφωσής του επιτρέπει σε αυτό να απορροφά κραδασμούς
- Η ακουστική μόνωση – αποτελεί φτωχό αγωγό ήχου, παρέχει δε καλύτερα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με ανομοιόμορφη επιφάνεια ώστε να προκαλείται περαιτέρω διάχυση του ήχου.

Ταυτόχρονα το ελαστικό μπορεί να δεσμεύει επιφανειακά νερό, το οποίο όμως δεν απορροφάει στο εσωτερικό του ενώ αποτελεί ένα οργανικό υλικό ανθεκτικό σε έλαια, σε πολλούς διαλύτες – οξέα αλλά και σε χημικές ενώσεις.

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά γνωρίσματα-ιδιότητές τους, οι τάσεις που επικρατούν τα τελευταία χρόνια τόσο στην Ευρώπη όσο και παγκοσμίως αντιμετωπίζουν τα ελαστικά ως στεγανωτικά υλικά, σε επιχρίσματα, ως μέτρο πρόληψης απέναντι στην ολισθηρότητα εδαφών-γηπέδων, ως υλικό για την απόσβεση κραδασμών, για την κατασκευή ηχομονωτικών πάνελ σε μεγάλους οδικούς ή σιδηροδρομικούς άξονες, για ασφαλτόστρωση δρόμων με τροποποιημένη με ελαστικό άσφαλο, για κατασκευές αποστραγγιστικών στρώσεων σε ΧΥΤΑ, για κατασκευές αποστραγγιστικών στρώσεων και ζωνών εκτόνωσης βιοαερίου σε αποκαταστάσεις ΧΑΔΑ, για κατασκευές υπόβασης σε μεγάλους οδικούς άξονες με τεμαχισμένο ελαστικό, για την ενίσχυση πρανών κατά μήκος μεγάλων οδικών

αξόνων με ολόκληρα ή τεμαχισμένα ελαστικά καθώς και για την προστασία απότομων ανωφερειών.

Παράλληλα και σύμφωνα και με την διεθνή εμπειρία τα ανακυκλωμένα ελαστικά χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα των κατασκευών λόγω των θερμομονωτικών και αντισεισμικών ιδιοτήτων τους, στην κατασκευή οδοστρωμάτων λόγω των αντιολισθητικών ιδιοτήτων που έχουν, σε υδραυλικά έργα – έναντι διάβρωσης ακτών, ως κυματοθραύστες, σε τοιχία αντιστήριξης-.

Επίσης αυτά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή σκυροδεμάτων ειδικών εφαρμογών, όπου δεν απαιτείται ανάπτυξη υψηλών μηχανικών αντοχών, ως υποκατάστατο αδρανών υλικών λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού ειδικού τους βάρους καθώς και ως υλικά για την κατασκευή ηχομονωτικών φραγμάτων-τοιχών σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας.

Γεωτεχνικές εφαρμογές φθαρμένων ελαστικών.

Σημαντικός αριθμός μελετών έχει πραγματοποιηθεί με αντικείμενο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τροποποιημένων με ελαστικά εδαφών τόσο σε εργαστηριακό όσο και σε εργοταξιακό επίπεδο. Τα χαρακτηριστικά αυτά κρίνουν την καταλληλότητα του ελαστικού ως υλικά για γεωτεχνικά έργα, από άποψη οικονομική, τεχνολογική και περιβαλλοντική, σε συνδυασμό με τις Αμερικανικές Προδιαγραφές ASTM D 6270, (1998).

Φθαρμένα ελαστικά, διαφόρων μεγεθών κόκκου, δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε γεωτεχνικά έργα. Αυτά λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους, της ευκολίας διασποράς τους καθώς και των επιθυμητών ιδιοτήτων αποστράγγισης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως επιχώματα, ως δευτερογενές υλικό πλήρωσης σε τοίχους αντιστήριξης, ως ενισχυτικό εδαφών, για τον περιορισμό του φαινομένου της διάβρωσης και της διαφορικής καθίζησης εδαφών, για σταθεροποίηση πρανών και ως μέσο αποστράγγισης .

Ειδικότερα, όσον αφορά στους τοίχους αντιστήριξης, το ελαστικό μπορεί να δράσει ως μειωτής των εδαφικών ωθήσεων που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού πλήρωσης πίσω από αυτόν με συνέπεια τη μείωση του πάχους του τοίχους με οικονομικά οφέλη.

Παράλληλα υλικά όπως είναι τα φθαρμένα ελαστικά οχημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή χαμηλού βάρους και οικονομικών επιχωμάτων (οι τεράστιες ποσότητες απαιτούμενων υλικών θέτουν οικονομικά κριτήρια και επομένως τα ελαστικά αποτελούν ιδανικό υλικό, λόγω του χαμηλού τους κόστους σε σχέση με άλλα πρωτογενή υλικά).

Η προσθήκη φθαρμένων ελαστικών σε εδάφη και η επιρροή τους στο υπέδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο συνεχών ελέγχων.

Ωστόσο σύμφωνα με αρκετά αποτελέσματα στο πεδίο αυτό προέκυψε μηδαμινή, εντός των επιτρεπτών ορίων, μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπρόσθετα, τα τεμάχια ελαστικού έχουν σχετικά υψηλή ικανότητα απορρόφησης οργανικών χημικών ενώσεων με βάση ανάλογες μετρήσεις.

Στη Μινεσότα, στο Όρεγκον, στο Κολοράντο, στην Ιντιάνα και σε πολλές ακόμα πολιτείες των ΗΠΑ, φθαρμένα ελαστικά έχουν χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικά σε επιχώματα ενώ στο Maine, γίνονται προσπάθειες χρήσης τεμαχισμένων ελαστικών ως υλικά πλήρωσης σε τοίχους αντιστήριξης, ως υλικό υπόβασης ή ως μονωτικό στρώμα στο οδόστρωμα (Μαυρίδου, 2010).

6.6. Χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε προϊόντα τσιμέντου.

Μια πιθανή χρήση των φθαρμένων ελαστικών αποτελεί η προσθήκη τους σε προϊόντα με βάση το τσιμέντο όπως κονιάματα καθώς και μίγματα σκυροδέματος για ειδικές εφαρμογές όπως κυβόλιθοι οδοστρωσίας, πλάκες πεζοδρομίου, ηχοπετάσματα και ως αντικατάστατο μέρους των φυσικών αδρανών.

Μελέτες σχετικά με το ΣΑΕ (Σκυρόδεμα με Ανακυκλωμένο Ελαστικό) πιστοποιούν την δυνατότητα παρασκευής τέτοιου είδους σκυροδέματος, όταν το ανακυκλωμένο ελαστικό προστίθεται με κατάλληλο τρόπο και σε κατάλληλη κοκκομετρία και ποσοστό. Οι Eldin και Senouci εξέτασαν τη συμπεριφορά του ελαστικού σκυροδέματος το 1993, δημοσιεύοντας ένα από τα αρχικά άρθρα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα ενώ πληθώρα άλλων επιστημόνων ακολούθησαν παρέχοντας περισσότερες πληροφορίες και δεδομένα πάνω σε αυτό. Μερικές από τις ιδιότητες, τόσο σε νωπή όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση, που έχουν μελετηθεί περιγράφονται παρακάτω (Μαυρίδου, 2010).

6.6.1. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος τσιμέντου/τσιμεντοκονιάματος.

6.6.1.1. Ειδικό βάρος.

Το ειδικό βάρος του τροποποιημένου με ανακυκλωμένο ελαστικό σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του ελαστικού που αντικαθιστά μέρος των φυσικών αδρανών υλικών. Η μείωση αυτή οφείλεται στο χαμηλότερο ειδικό βάρος του ελαστικού συγκριτικά με τα υλικά τα οποία αντικαθιστά καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο όγκο. Αν η αντικατάσταση αφορά λεπτόκοκκο ή χονδρόκοκκο κλάσμα αδρανών, η μείωση του ειδικού βάρους κυμαίνεται είτε στα ίδια επίπεδα είτε σε μεγαλύτερα επίπεδα για χρήση λεπτόκοκκου ελαστικού και για ποσοστά αντικατάστασης έως 75% κ.ο. Σύμφωνα με τους Eldin και Senouci, (1993), η μείωση του ειδικού βάρους ΣΑΕ ανέρχεται στο 25% με πλήρη αντικατάσταση χονδρόκοκκων

φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένο ελαστικό ενώ στην περίπτωση αντικατάστασης 33% κ.ο. του λεπτόκοκκου κλάσματος αδρανών με ελαστικό η μείωση αυτή κυμαίνεται στο 10%. Σε τσιμεντοκονιάματα, χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού ως προς αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου προκαλεί σημαντική μείωση του ειδικού βάρους των μιγμάτων έως και 42% για προσθήκη ελαστικού 50% κ.ο. του τσιμέντου (Μαυρίδου, 2010).

6.6.1.2. Εργασιμότητα – Κάθιση.

Με τον όρο εργασιμότητα ή κάθιση χαρακτηρίζεται η ικανότητα του μίγματος-τσιμεντοκονιάματος ή σκυροδέματος αντίστοιχα να δουλεύεται άνετα. Η εργασιμότητα των μιγμάτων σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό μειώνεται με αύξηση του ποσοστού του ανακυκλωμένου ελαστικού. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο αυξημένο ιξώδες των μιγμάτων δεδομένης της αύξησης της τριβής μεταξύ των κόκκων του ελαστικού και του υπόλοιπου μίγματος αδρανών-τσιμέντου καθώς και στη μειωμένη πυκνότητα των μιγμάτων. Ωστόσο, δεν είναι σαφές, κατά τους Nehdi and Khan, (2001) αν η επίδραση των κόκκων του ανακυκλωμένου ελαστικού στην εργασιμότητα/κάθιση του σκυροδέματος οφείλεται στη μείωση της πυκνότητας του μίγματος ή σε πραγματικές αλλαγές στην τιμή διαρροής και στο πλαστικό ιξώδες του μίγματος.

Παράλληλα, αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος αδρανών με αντίστοιχης κοκκομετρίας ανακυκλωμένο ελαστικό προκαλεί μίγματα με μεγαλύτερη εργασιμότητα σε σύγκριση με αντίστοιχα όπου αντικαθίσταται το λεπτόκοκκο κλάσμα, σύμφωνα με τους Khatib και Bayomy, (1999). Επίσης, σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό σε ποσοστά μεγαλύτερα του 40% κ.ο. εμφανίζουν μηδενική κάθιση, γεγονός που καθιστά τα μίγματα αυτά μη εργάσιμα με το χέρι. Από την άλλη, οι Raghavan, Huynth and Ferraris, (1998), αναφέρουν ότι η συμπεριφορά τσιμεντοκονιαμάτων με ανακυκλωμένο ελαστικό είναι καλύτερη ή παρόμοια με την αντίστοιχη του μίγματος αναφοράς ενώ σε μελέτη των Albano et al., (2005), σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό δύο κοκκομετριών (0.29 και 0.59 mm) εμφάνισε μειωμένη κάθιση συγκριτικά με το μίγμα αναφοράς κατά 88% (Μαυρίδου, 2010).

6.6.1.3. Περιεχόμενος αέρας.

Η προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού στο σκυρόδεμα οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου αέρα σε σχέση με το αντίστοιχο του πρότυπου μίγματος ακόμα και αν δεν χρησιμοποιηθεί αερακτικό. Όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων του ελαστικού, λεπτόκοκκο ελαστικό προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση του περιεχόμενου αέρα συγκριτικά με χονδρόκοκκο για ποσοστά >20%. Η αύξηση αυτή αποδίδεται στην τάση των κόκκων του ελαστικού να απωθούν το νερό και να εγκλωβίζουν αέρα στην τραχεία τους επιφάνεια. Παράλληλα αύξηση του ποσοστού

του ανακυκλωμένου ελαστικού αυξάνει το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα ενώ μειώνει τη μονάδα των μιγμάτων. Σε μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό, εμφανίζεται αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα, η οποία αποδίδεται στους υδρόφοβους κόκκους ελαστικού (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2. Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος/τσιμεντοκονιάματος.

6.6.2.1. Θλιπτική-Εφελκυστική αντοχή.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η προσθήκη μεγάλων ποσοστών ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος οδηγεί σε μείωση των μηχανικών αντοχών των μιγμάτων. Προϊόντα τσιμέντου με ανακυκλωμένο ελαστικό εμφανίζουν μειωμένες αντοχές σε θλίψη και σε κάμψη σε σύγκριση με τα συμβατικά μίγματα. Είναι γνωστό πως η ύπαρξη κενών, τα οποία αυξάνονται με την προσθήκη ελαστικού, προκαλεί μείωση της αντοχής τους ως εξής: 5% κενά συνεπάγεται ακόμα και μεγαλύτερη από 10% μείωση της αντοχής.

Παράλληλα, μίγματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό (ΑΕ) τείνουν να εμφανίσουν παρόμοιες αντοχές σε 7 και 28 ημέρες. Σε αντίθεση με τα πρότυπα μίγματα, στα οποία η αντοχή αυξάνεται με το χρόνο, στα τροποποιημένα με ελαστικό, πολύ μεγάλο μέρος της αντοχής τους αναπτύσσεται ήδη από τις πρώιμες ηλικίες (7 ημέρες) όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή ενώ στη θλιπτική η εικόνα αυτή εμφανίζεται για ποσοστά αντικατάστασης φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένο ελαστικό >20% κ.ο. είτε πρόκειται για λεπτόκοκκο είτε για χονδρόκοκκο ελαστικό.

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει πως πληθώρα παραγόντων επηρεάζουν τις μηχανικές αντοχές των μιγμάτων σκυροδέματος με ΑΕ. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν το ποσοστό, το μέγεθος κόκκου, την καθαρότητα του ελαστικού, τον τρόπο ανάμιξης του ελαστικού στα μίγματα καθώς και τη μορφή της επιφάνειας των κόκκων του ανακυκλωμένου ελαστικού που χρησιμοποιείται. Σημαντική είναι η επίδραση του μεγέθους των κόκκων του ελαστικού στα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων σκυροδέματος. Μεγαλύτερες αντοχές επιτυγχάνονται όταν χρησιμοποιείται μικρότερος κόκκος ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος. Συνεπώς μεγαλύτερη μείωση προκαλείται όταν πραγματοποιείται αντικατάσταση χονδρόκοκκου μέρους αδρανών με ελαστικό σε σύγκριση με αντικατάσταση του λεπτόκοκκου κλάσματος αδρανών. Σύμφωνα με τη μελέτη του Τορξυ, (1995), η διαφορά της μείωσης αυτής κυμαίνεται στο 10%. Τα βέλτιστα ποσοστά αντικατάστασης λεπτόκοκκων ή χονδρόκοκκων αδρανών για την παραγωγή μιγμάτων σκυροδέματος ικανοποιητικών θλιπτικών αντοχών για δόμηση, κυμαίνονται σε 50% και 25% κ.ο., αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, σύμφωνα με τους Eldin and Senouci, (1993), η μείωση στην αντοχή σε θλίψη τροποποιημένου με ανακυκλωμένο ελαστικό σκυροδέματος ανέρχεται στο 85% όταν πραγματοποιείται πλήρης αντικατάσταση

χονδρόκοκκου φυσικού αδρανούς με ελαστικό, ενώ αντικατάσταση λεπτόκοκκου συνεπάγεται μείωση της τάξης του 65%. Σε τσιμεντοκονιάματα, αντικατάσταση της άμμου με ανακυκλωμένο ελαστικό σε ποσοστό 30% κ.ο. οδηγεί σε πτώση της θλιπτικής αντοχής κατά 80% και της εφελκυστικής κατά 70%.

Όσον αφορά τη μορφή της επιφάνειας των χρησιμοποιούμενων κόκκων ανακυκλωμένου ελαστικού, τραχεία επιφάνεια εμφανίζει καλύτερη συνάφεια με το περιβάλλον τσιμεντόμικτωμα και κατ' επέκταση οδηγεί στην ανάπτυξη μιγμάτων με υψηλότερες μηχανικές αντοχές.

Παράλληλα, μίγματα σκυροδέματος με ελαστικό με μορφή ινών συμπεριφέρονται καλύτερα σε σχέση με αντίστοιχα που περιέχουν στρογγυλεμένα τεμάχια ελαστικού.

Η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών μπορεί να αποδοθεί σε τρεις αιτίες: πρώτα απ' όλα το ελαστικό αποτελεί ένα υλικό με μεγαλύτερη ελαστικότητα από το περιβάλλον υπό φόρτιση μίγμα και συνεπώς οι αναπτυσσόμενες ρωγμές εμφανίζονται περιμετρικά των κόκκων του ελαστικού οδηγώντας σε αστοχία υπό μικρότερο φορτίο. Μια δεύτερη αιτία αποτελούν οι κόκκοι του ελαστικού, οι οποίοι είναι δυνατόν να θεωρηθούν ως κενά, που έχουν ως αποτέλεσμα την ασθενέστερη δομή μιγμάτων. Τέλος, η αντοχή του σκυροδέματος οφείλεται κυρίως στη μορφή, την πυκνότητα και τη σκληρότητα των χονδρόκοκκων αδρανών και επομένως αντικατάσταση μέρους αυτών από ελαστικά, μικρότερης σκληρότητας, οδηγεί σε μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Η μείωση των μηχανικών αντοχών τόσο σε τσιμεντοκονιάματα όσο και σε μίγματα σκυροδέματος έχει αποδοθεί στην ασθενή συνάφεια κόκκων ελαστικού, τσιμεντοπολτού και αδρανών.

Για τον σκοπό αυτό, περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη βελτίωση της συνάφειας – μέσω επεξεργασίας του ανακυκλωμένου ελαστικού - , η οποία οδηγεί σε αύξηση των μηχανικών αντοχών έχει πραγματοποιηθεί. Πολλοί επιστήμονες χρησιμοποίησαν διάφορα μέσα με σκοπό την αλλαγή της επιφάνειας των κόκκων του ελαστικού και τη δημιουργία περισσότερο τραχείας επιφάνειας. Οι κόκκοι ελαστικού προεπεξεργάστηκαν με διάφορα φυσικά και χημικά μέσα:

- νερό-Eldin and Senouci, (1993)
- κορεσμένο διάλυμα NaOH-Segre and Joeke, (2000)
- διάλυμα HNO₃ και H₂SO₄-Colom, Carrillo and Cañavate, (2007)
- διαλύτης CCl₄-Rostami, Lepore, Silverstraim and Zundi, (1993)
- επιχρίστηκαν με τσιμεντοπολτό-Li, Li and Li, (1998), Kew, Cairns and Kenny, (2004), ενώ
- πραγματοποιήθηκε χρήση coupling agents-Naik and Singh (1991).

Ο στεατικός ψευδάργυρος αποτελεί ένα πρόσθετο που υπάρχει στο ελαστικό και το οποίο διαχέεται στην επιφάνειά του οδηγώντας σε ασθενή χαρακτηριστικά

συνάφειας. Η επεξεργασία με NaOH απομακρύνει το υλικό αυτό από την επιφάνεια και ενισχύει την ομοιογένεια σε αυτήν.

Σύμφωνα με τους Rostami et al., (1993), μίγματα σκυροδέματος με εκπλυμένο με νερό ανακυκλωμένο ελαστικό εμφανίζει βελτιωμένη θλιπτική αντοχή κατά 16% ενώ η βελτίωση για κόκκους ανακυκλωμένου ελαστικού πλυμένου με CCl₄ ανήλθε στο 57%. Επιπρόσθετα, προσθήκη latex σε σκυροδέματα με ανακυκλωμένο ελαστικό προκαλούν αύξηση στην αντοχή σε κάμψη, η οποία αποδίδεται στην ύπαρξη του latex, το οποίο ενισχύει τη συνάφεια ελαστικού-υπόλοιπου μίγματος.

Οι Ghaly and Cahill, (2005), μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης ανακυκλωμένου ελαστικού σε αντικατάσταση μέρους του λεπτόκοκκου κλάσματος των φυσικών αδρανών, σε μίγματα σκυροδέματος, στην αντοχή ενώ ανέπτυξαν ένα τασικό συντελεστή μείωσης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ώστε να προβλέπεται η αντοχή σε θλίψη των μιγμάτων με ανακυκλωμένο ελαστικό σε διαστήματα μέχρι και 28 ημέρες, αν η τάση θλίψης του συμβατικού σκυροδέματος, με όμοιο λόγο N/T είναι γνωστή στη μελετώμενη χρονική στιγμή.

Επίσης, ο τύπος του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου επηρεάζει την αντοχή σε θλίψη των σκυροδεμάτων με και χωρίς ανακυκλωμένο ελαστικό. Οι Biel and Lee, (1996), συμπέραναν ότι ειδικός τύπος τσιμέντου (magnesium oxychloride) δίνει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με το κοινό τσιμέντο Portland. Βρήκαν ότι η χρήση αυτού του τύπου τσιμέντου ενισχύει τη συνάφεια ελαστικού-υπόλοιπου μίγματος, ώστε τέτοιου είδους μίγματα σκυροδέματος να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές, με αντικατάσταση φυσικών αδρανών με ελαστικό σε ποσοστά έως και 17% του συνολικού όγκου των αδρανών.

Οι Eldin and Senouci, (1993), ανέπτυξαν μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει ικανοποιητικά την επίδραση του ανακυκλωμένου ελαστικού στη μείωση των αντοχών του ΣΑΕ, θεωρώντας τους κόκκους του ελαστικού ως μεγάλους πόρους. Σύμφωνα με το μοντέλο, εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις συγκεντρώνονται περιμετρικά των κόκκων του ελαστικού. Είναι λογικό, ότι στην περίπτωση που το ανακυκλωμένο ελαστικό αντικαθιστά μέρος των φυσικών αδρανών, δεδομένης της φύσης αυτού, η μείωση των μηχανικών αντοχών οφείλονται εν μέρει και στον περιορισμό των αδρανών που μπορούν να φέρουν φορτία.

Όσον αφορά στην αντοχή σε κάμψη και διάρρηξη, παρατηρήθηκε μείωση μικρότερου ρυθμού σε σχέση με την αντίστοιχη της θλιπτικής αντοχής (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.2. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.

Η ύπαρξη κόκκων ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος μειώνει το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας των μιγμάτων, με αύξηση του ποσοστού του

περιεχόμενου ελαστικού, η οποία οδηγεί σε υψηλότερο επίπεδο ηχητικής μόνωσης του προϊόντος. Παράλληλα το μίγμα εμφανίζεται λιγότερο ψαθυρό στην αστοχία. Οι Eldin et al., (1993) εξήγησαν την μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας μέσω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας των κόκκων του ανακυκλωμένου ελαστικού, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως μεγάλης διαμέτρου πόροι. Η μείωση αυτή υποδεικνύει μεγαλύτερη ελαστικότητα-ευκαμψία, που αποτελεί θετική ιδιότητα για χρήση του ΣΑΕ σε στρώματα σταθεροποίησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Ταυτόχρονα, σε μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος βρέθηκε ότι η σχέση μεταξύ δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και αντοχής σε θλίψη δεν επαληθεύει την εμπειρική σχέση που ισχύει για τα συμβατικά μίγματα σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 1992-1, (1992).

Οι Labbani et al., (2004) εξέτασαν την επίδραση της θερμοκρασίας στο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ΣΑΕ, με χρήση ελαστικού σε μορφή σκόνης ως βασικό συστατικό. Βρήκαν ότι, η προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος προκαλεί μείωση του E_d για όλα τα επίπεδα θερμοκρασιών. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C) η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μειώθηκε από 28 GPa (τσιμεντοπολτός) σε 10 GPa για μίγμα σκυροδέματος με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε ποσοστό 60%. Η μείωση αυτή αποδόθηκε στη φύση του ελαστικού να απορροφάει υπερηχητικά κύματα. Η ικανότητα της απορρόφησης ηχητικών σημάτων συνεπάγεται ένα υλικό που μπορεί να παρέχει ηχητική μόνωση. Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε για εύρος θερμοκρασιών μεταξύ -20°C και 100°C , πτώση του μέτρου ελαστικότητας, η οποία εξαρτάται από τον όγκο του περιεχόμενου ανακυκλωμένου ελαστικού.

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και στην περίπτωση που ανακυκλωμένο ελαστικό προστίθεται σε τσιμεντοκονιάματα ως αντικατάστατο μέρους του τσιμέντου. Η μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανέρχεται στο 76% για ποσοστό ελαστικού 50% κ.ο.

Σύμφωνα με τους Shimizze et al., (1994), το ελαστικό μέτρο σε σκυρόδεμα με χονδρόκοκκο ανακυκλωμένο ελαστικό ως αντικατάστατο 100% του χονδρόκοκκου κλάσματος αδρανών του προκαλεί μείωση του κατά 72% ενώ αντικατάσταση του λεπτόκοκκου κλάσματος οδηγεί σε μείωση της τάξης του 47% σε σύγκριση με το μίγμα αναφοράς.

Τέλος, οι Torcu and Avcular, (1997), πρότειναν μια μαθηματική εξίσωση, με ικανοποιητική ακρίβεια, για το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, θεωρώντας το ΣΑΕ ως υλικό τριών φάσεων (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.3. Αντίσταση σε κρούση και δυσθραυστότητα.

Αν και το ΣΑΕ εμφανίζει μειωμένες μηχανικές αντοχές, ιδιότητες όπως αντίσταση σε κρούση και δυσθραυστότητα αντισταθμίζουν την παραπάνω μείωση. Για ένα υλικό υψηλής ενέργειας θραύσης, το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας θραύσης ανήκει στην πλαστική περιοχή, ενώ για ένα ψαθυρό υλικό, η αντίστοιχη ενέργεια ανήκει στην ελαστική περιοχή. Η ενέργεια που απορροφάται από ένα υλικό μέχρι το σημείο θραύσης του αποτελεί πλαστική ενέργεια. Είναι επομένως επιθυμητή η παραγωγή λιγότερο ψαθυρού σκυροδέματος. Η αστοχία του ΣΑΕ έχει μελετηθεί από πλήθος επιστημόνων και βρέθηκε ότι είναι περισσότερο όλκιμη συγκριτικά με την ψαθυρή αστοχία του συμβατικού σκυροδέματος. Σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό δεν εμφανίζει ψαθυρή θραύση, ενώ υπομένει σημαντική παραμόρφωση και έχει την ικανότητα να απορροφάει μεγάλη ποσότητα πλαστικής ενέργειας υπό θλιπτικά και καμπτικά φορτία. Παράλληλα, η μετά ρωγμών αντοχή ενισχύεται με προσθήκη μεγάλων τεμαχίων ανακυκλωμένου ελαστικού παρά με προσθήκη λεπτότερων κόκκων ελαστικού. Σύμφωνα με τους Khatib and Bayomy, (1999), όσο το ποσοστό του ελαστικού αυξάνεται, το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό εμφανίζει είτε κωνικό είτε κυλινδρικό σχήμα αστοχίας. Μίγματα με ελαστικό σε ποσοστό 60% του συνολικού όγκου, εμφανίζουν ελαστικές παραμορφώσεις, τις οποίες διατηρούν μετά την αποφόρτιση.

Παράλληλα, εισαγωγή ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος ενισχύει δραστικά τη δυσθραυστότητα των μιγμάτων, ανεξάρτητα από το μέγεθος του περιεχόμενου ανακυκλωμένου ελαστικού. Ο Torz u, (1995), συμπέρανε ότι ΣΑΕ εμφανίζει υψηλές παραμορφώσεις ειδικά υπό δράσεις κρούσης εξαιτίας της υψηλής ικανότητάς του απορρόφησης πλαστικής ενέργειας. Ταυτόχρονα αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου ελαστικού σε οδοφράγματα από σκυρόδεμα τύπου Jersey επηρεάζει δραστικά τη μείωση των κορυφών των δυνάμεων επιβράδυνσης και κατ' επέκταση το βαθμό σοβαρότητας της κρούσης. Σε μία άλλη μελέτη, των Torz u and Avcular, (1997), σχετική με τη συμπεριφορά ΣΑΕ σε κιγκλιδώματα οδών βρέθηκε ότι η αντίσταση σε κρούση του ΣΑΕ είναι υψηλότερη, κυρίως με χρήση χονδρόκοκκου ελαστικού και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπου απαιτείται απόσβεση δονήσεων. Επιπρόσθετα, οι Biel and Lee, (1996), αναφέρουν ότι η αστοχία κυλινδρικών δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος οδηγούν σε έντονα ψαθυρό κωνικό διαχωρισμό τους. Αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου ελαστικού ελαττώνει τον εκρηκτικό χαρακτήρα της αστοχίας. Οι El-Dieb et al., (2001), πιστεύουν ότι η αντίσταση σε κρούση του σκυροδέματος βελτιώνεται με χρήση τεμαχίων ανακυκλωμένου ελαστικού με προσθήκη τους σε ποσοστό μέχρι 50% κ.ο. Μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης οδηγούν σε μικρότερη βελτίωση, ενώ 100% αντικατάσταση φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένο ελαστικό οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κρούση, συγκριτικά με το μίγμα αναφοράς. Σύμφωνα με μελέτη των Liu

et al., (2009), προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος αυξάνει τη δυσθραυστότητα των μιγμάτων για προσθήκη ελαστικού σε ποσοστό 6-10% κ.ο. των αδρανών (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.4. Ηχομόνωση και θερμομόνωση.

Μπορεί να υποθεθεί ότι δοκιμασία ήχου θα στηρίξει την δυνατότητα εφαρμογής ΣΑΕ για την παραγωγή ηχοφραγμάτων με σκοπό τη μείωση των ηχητικών εκπομπών. Τα τμήματα μεταφορών των Wisconsin και Pennsylvania (DOTS) μελέτησαν την απορρόφηση ήχου ολόκληρων τεμαχίων ελαστικών ως οδικά ηχοφράγματα με μέτρια επιτυχία. Παράλληλα, το μέγεθος του ανακυκλωμένου ελαστικού παίζει ρόλο στη μείωση του ήχου. Χονδρόκοκκο ανακυκλωμένο ελαστικό προκαλεί μεγαλύτερη μείωση του ήχου που απορροφάται σε σύγκριση με λεπτόκοκκο.

Όσον αφορά στη θερμομόνωση, εισαγωγή ανακυκλωμένου ελαστικού στο σκυρόδεμα παρέχει ένα υλικό με πολύ καλή θερμική μονωτική ικανότητα. Οι Laidoudi et al., (2004), εξέτασαν την υδροθερμική συμπεριφορά σύνθετων τσιμεντοειδών υλικών. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση στην ηχητική μόνωση με αύξηση του μεγέθους κόκκων του ανακυκλωμένου ελαστικού και του ποσοστού συμμετοχής του ενώ μειώθηκε η ευαισθησία σε υγρασία, με αποτέλεσμα να διατηρείται ικανοποιητική θερμομονωτική απόδοση σε υγρό μέσο. Οι Paine et al., (2004), μελέτησαν τη θερμική ικανότητα ΣΑΕ και συμπέραναν ότι η χρήση κοκκοποιημένου ανακυκλωμένου ελαστικού οδηγεί σε μικρότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μιγμάτων αναφοράς για δεδομένη αντοχή ενώ οι τιμές είναι παρόμοιες με συμβατικά θερμομονωτικά μπλόκια δόμησης. Η μείωση αυτή αποδόθηκε στον χαμηλότερο συντελεστή θερμικής ελαστικότητας του ανακυκλωμένου ελαστικού (0,50 W/mK) συγκριτικά με τον αντίστοιχο των φυσικών αδρανών (2,45-5,20 W/mK).

Κονιάματα με χρήση ελαστικού ως πρόσθετο υλικό 10% κ.β. του τσιμέντου προκαλεί μικρότερη θερμική συστολή-διαστολή σε σχέση με το πρότυπο μίγμα αναφοράς της τάξης του 9%. Σχετικά με την ικανότητα θερμικής μόνωσης, τσιμεντοκονιάματα με αναλογία κονία:ελαστικό=1:0,4 οδηγεί σε αύξηση της θερμικής μόνωσης κατά 5%.

Τσιμεντοπολτοί με χρήση λεπτόκοκκου ανακυκλωμένου ελαστικού ως αντικατάστατο μέρους του τσιμέντου προκαλεί μείωση της θερμικής αγωγιμότητας της τάξης του 60%. Η μείωση αυτή οφείλεται στη μονωτική ικανότητα των κόκκων του ελαστικού, το οποίο έχει χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας συγκριτικά με τον τσιμεντοπολτό (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.5. Αντίσταση σε πυρκαγιά.

Αντίσταση σε πυρκαγιά ΣΑΕ πρέπει να μελετηθεί καθώς προσθήκη ενός οργανικού υλικού σε μίγματα σκυροδέματος είναι δυνατό να μεταβάλλει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος. Σύμφωνα με αρχικούς ελέγχους σε ΣΑΕ παρατηρήθηκε μείωση της ανάφλεξης. Η συμπεριφορά υψηλής αντοχής σκυροδέματος έναντι πυρκαγιάς αλλάζει όταν προστεθεί σε αυτό ανακυκλωμένο ελαστικό, εξαλείφοντας την ψαθυρού τύπου αστοχία υπό θλιπτικά φορτία. Παράλληλα, ίνες ανακυκλωμένου ελαστικού διατηρούν τις πλευρές των ρωγμών μαζί οδηγώντας σε μια περισσότερο διαδοχική αστοχία. Το βάθος της ζημιάς (σε θερμοκρασία > 500° C για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος) μειώνεται. Αν και περαιτέρω μελέτες πάνω στην ιδιότητα αυτή είναι απαραίτητες, αρχικά πειραματικά αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.6. Υδατοαπορρόφηση.

Η βιβλιογραφία σχετικά με την υδατοαπορρόφηση τσιμεντοπολτών, τσιμεντοκονιαμάτων καθώς και μιγμάτων σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό (ΣΑΕ) είναι ελάχιστη. Σύμφωνα με τους Segre and Joekes, (2000), και Benazzouk et al., (2004), ΣΑΕ εμφανίζει μειωμένη υδατοαπορροφητικότητα όταν ανακυκλωμένο ελαστικό αντικαθιστά μέρος των φυσικών αδρανών ενώ μίγματα τσιμεντοπολτών με ανακυκλωμένο ελαστικό ως αντικατάστατο μέρους του τσιμέντου καθώς και τσιμεντοκονιάματα (ΤΣΑΕ) με ανακυκλωμένο ελαστικό, σε μορφή ινών, ως αντικατάστατο μέρους της άμμου είτε κοκκοποιημένο ως πρόσθετο υλικό εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Η βελτίωση αυτή εξηγείται διότι ΤΣΑΕ και ΣΑΕ έχουν λιγότερους πόρους ή λιγότεροι πόροι είναι προσπελάσιμοι από το νερό. Ωστόσο μελέτη των Bignozzi and Sandrollini, (2004), έδειξε πως δεν ισχύει το ίδιο και σε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό καθώς αυτό εμφανίζει ίδια υδατοαπορροφητικότητα με το μίγμα αναφοράς (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.7. Αντίσταση σε ρηγμάτωση-συστολή ξήρανσης.

Η συστολή αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες ρηγμάτωσης σε προϊόντα τσιμέντου. Προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα σκυροδέματος ως αντικατάστατο μέρους των φυσικών αδρανών βρέθηκε να ευνοεί την αντίσταση σε συστολή ξήρανσης και να μειώνει τόσο το εύρος των αναπτυσσόμενων ρωγμών όσο και την ταχύτητα εξάπλωσής τους.

Σύμφωνα με τους Raghavan et al., (1998), κονιάματα με ανακυκλωμένο ελαστικό ανέπτυξαν ρωγμές μικρότερου μήκους και εύρους συγκριτικά με μίγματα αναφοράς. Παρά την εμφάνιση πολλαπλών ρωγμών, η συνολική ρηγματωμένη περιοχή μειώνεται με αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου ανακυκλωμένου ελαστικού. Παράλληλα, ο χρόνος έναρξης της ρηγμάτωσης καθυστέρησε κατά μισή περίπου ώρα

με προσθήκη τεμαχίων ανακυκλωμένου ελαστικού σε ποσοστό 15%. Οι Kang et al., (2006) αναφέρουν ότι η καθυστέρηση αυτή αυξάνεται με αύξηση του λόγου νερό/τσιμέντο καθώς και με αύξηση του όγκου του περιεχόμενου ανακυκλωμένου ελαστικού. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν μίγματα τσιμέντου κατάλληλων για επιχρίσματα με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε αναλογία τσιμεντοειδούς υλικού:ελαστικό=1:0,075 (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.8. Αντίσταση σε κύκλους ψύξης-απόψυξης.

Είναι γνωστό πως ο σχεδιασμός σκυροδέματος γίνεται συχνά με γνώμονα την ικανοποιητική του αντίσταση σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης με στόχο τη μη καταστροφή του. Οι Segre et al., (2004) εξέτασαν την επίδραση του ανακυκλωμένου ελαστικού σε τσιμεντοκονιάματα. Τα πολύ καλά αποτελέσματα των πειραματικών ελέγχων, έδειξαν ότι περαιτέρω μελέτες έπρεπε και πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να πιστοποιηθεί η δυνατότητα χρήσης τέτοιων σύνθετων ελαστικών προϊόντων στη δόμηση. Ταυτόχρονα, σύμφωνα με άλλες μελέτες, προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε κατάλληλα ποσοστά ($\leq 15\%$ κ.β. του τσιμέντου, 30 και 40% κ.ο. αδρανών) οδηγεί σε βελτίωση της ιδιότητας αυτής ενώ αποτελέσματα των Paine et al., (2002) δείχνουν ότι υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ανακυκλωμένο ελαστικό ως αντιπαγωτικός παράγοντας στο σκυρόδεμα καθώς η συμπεριφορά του ΣΑΕ όσον αφορά την απολέπιση (scaling) είναι όμοια με την αντίστοιχη του σκυροδέματος με αερακτικό. Αντίθετα αποτελέσματα σημείωσαν οι Eldin and Senouci, (1993), σε μίγματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό- τόσο λεπτόκοκκο όσο και χονδρόκοκκο σε μελέτη τους το 1994.

Το 2007, οι Torcu and Demir εξέτασαν την ανθεκτικότητα ΣΑΕ καθώς και τσιμεντοκονιαμάτων με ανακυκλωμένο ελαστικό (ΤΣΑΕ) υπό συνθήκες ψύξης-απόψυξης, σε θαλασσινό νερό και υψηλές θερμοκρασίες και συμπέραναν ότι σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες δεν είναι ιδιαίτερα σκληρές, ΣΑΕ με 10% ανακυκλωμένο ελαστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί (Μαυρίδου, 2010).

6.6.2.9. Αντίσταση στη διείσδυση χλωριοϊόντων.

Σύμφωνα με μελέτη των Xu et al., (1995), Al-Akhras et al., (2004), προσθήκη υπολείμματος της πυρόλυσης ελαστικών σε τσιμεντοκονιάματα προκαλεί βελτίωση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριοϊόντων. Μια άλλη πειραματική μελέτη αφορούσε στην εξέταση της συμπεριφοράς τσιμεντοκονιαμάτων με ανακυκλωμένο ελαστικό, τα οποία τοποθετήθηκαν σε μίγμα Na_2SO_4 και NaCl για 56h και στη συνέχεια θερμαίνονταν στους 55°C για 16h. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η προσθήκη του ελαστικού επέδρασε αρνητικά στο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και στις μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων ενώ η περιεκτικότητα σε χλωριοϊόντα αυξήθηκε.

6.6.2.10. Μικροσκοπική παρατήρηση.

Μελέτη της μικροδομής σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό και ιδιαιτέρως της διεπιφάνειας κόκκων ανακυκλωμένου ελαστικού-υπόλοιπου μίγματος, έχει πραγματοποιηθεί σε μικρή έκταση κυρίως με χρήση Σαρωτικού Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου. Σύμφωνα με αποτελέσματα ελέγχων, μερικοί μελετητές παρατήρησαν ισχυρή συνάφεια μεταξύ του ελαστικού και του τσιμεντοπήγματος ενώ άλλοι αναφέρουν ότι η σύνδεση δεν είναι τόσο ισχυρή όσο στο συμβατικό μίγμα αναφοράς δεδομένης της ύπαρξης κενών. Ως μέτρα ενίσχυσης της συνάφειας αυτής έχουν προταθεί και ληφθεί διάφορα σχετικά με τρόπους επιφανειακής επεξεργασίας του ελαστικού- με χημικά ή φυσικά μέσα- είτε με χρήση ειδικής κατηγορίας τσιμέντου είτε με προσθήκη ειδικών βελτιωτικών πρόσμικτων σκυροδέματος (Μαυρίδου, 2010).

6.7. Χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε προϊόντα ασφάλτου.

Την κυριότερη εφαρμογή των ανακυκλωμένων ελαστικών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού, παγκοσμίως, αποτελεί η προσθήκη τους σε ασφαλτομίγματα, ως τροποποιητές ασφάλτου. Ως τροποποιημένη ασφαλτος νοείται ένα μίγμα ασφάλτου, ανακυκλωμένου ελαστικού και διαφόρων πρόσθετων, στο οποίο το τρίμμα ελαστικού αποτελεί τουλάχιστον το 15% κατά βάρος του συνολικού μίγματος και το οποίο έχει αντιδράσει ικανοποιητικά με την θερμή ασφαλτο έτσι ώστε να απορροφήσει τα τρίμματα του ελαστικού.

Η χρήση των ανακυκλωμένων ελαστικών σε εφαρμογές ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιείται στην βιομηχανία ασφάλτου για περισσότερα από 30 χρόνια. Η ιστορία της προσθήκης ελαστικών σε ασφαλτομίγματα εντοπίζεται στη δεκαετία του 1940 με τη δημιουργία του Ramflex. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960, ο Charles McDonald ανέπτυξε ένα τροποποιημένο ασφαλτικό συνδετικό υλικό με προσθήκη ελαστικού, το οποίο ονομάστηκε Overflex. Τα παραπάνω προέκυψαν από την ανάγκη εύρεσης ενός υλικού που θα απέτρεπε την πρόωμη ρηγμάτωση των επιφανειακών στρώσεων του οδοστρώματος.

Η προσθήκη του ελαστικού στα ασφαλτομίγματα μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Τεμάχια ελαστικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως διαμορφωτές ιδιοτήτων της ασφάλτου (υγρή μέθοδος) είτε ως αδρανή υλικά (ξηρή μέθοδος). Βασικές διαφορές ανάμεσα στις δύο μεθόδους αποτελούν το μέγεθος των κόκκων του ελαστικού, το προστιθέμενο ποσοστό, η λειτουργία του ελαστικού και η ευκολία προσθήκης του στο μίγμα.

Στην περίπτωση της «υγρής μεθόδου», τα τεμάχια του ανακυκλωμένου ελαστικού αναμιγνύονται με την ασφαλτο σε υψηλές θερμοκρασίες, προτού γίνει η ανάμιξή τους

με τα θερμά αδρανή, ενώ στην περίπτωση της «ξηρής μεθόδου», ανακυκλωμένο ελαστικό αντικαθιστά ένα μικρό μέρος των φυσικών αδρανών στο ασφαλτόμιγμα προτού προστεθεί η άσφαλτος. Αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί εξετάζοντας ασφαλτομίγματα, που παρασκευάστηκαν με χρήση της υγρής μεθόδου ενώ για την ξηρή η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη.

Παρακάτω, παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τις δύο μεθόδους καθώς και με την επίδραση του ανακυκλωμένου ελαστικού σε μίγματα που παρασκευάζονται με τις μεθόδους αυτές (Μαυρίδου, 2010).

6.7.1. Υγρή μέθοδος (Προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού στην άσφαλτο).

6.7.1.1. Μεθοδολογία.

Σύμφωνα με την “υγρή μέθοδο-wet process”, ανακυκλωμένο ελαστικό (<0.6 mm) σε ποσοστό 18-22% κ.β. της ασφάλτου αναμιγνύεται με το ασφαλτικό συνδετικό υλικό για διάστημα 45 min σε υψηλή θερμοκρασία προτού έρθει σε επαφή με τα αδρανή. Τα τελευταία 20 χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί και δημοσιευθεί αποτελέσματα μελετών παγκοσμίως με αντικείμενο την επίδραση της τροποποιημένης ασφάλτου στις ιδιότητες και στη συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων.

Η υγρή μέθοδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρασκευή ασφαλτομιγμάτων με ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των συμβατικών. Η τροποποίηση που επιφέρει το ανακυκλωμένο ελαστικό στην άσφαλτο αποδίδεται σε φυσικές αλλαγές και αλλαγές σύστασης μέσω μιας διεργασίας αλληλεπίδρασης όπου οι κόκκοι του ελαστικού διογκώνονται απορροφώντας ένα ποσοστό του λεπτόκοκκου κλάσματος αυτής, με σκοπό τη δημιουργία ενός ιξώδους τζελ, που οφείλεται στην αύξηση του ιξώδους του τροποποιημένου με ελαστικό συνδετικού υλικού. Σημειώνεται ότι μπορεί να θεωρηθεί απαραίτητος πρόσθετος εξοπλισμός ανάμιξης ασφάλτου-κόκκων ελαστικού.

6.7.1.2. Ιδιότητες ασφαλτομιγμάτων με χρήση της υγρής μεθόδου.

Στην περίπτωση της υγρής μεθόδου – wet process – οι ιδιότητες της τροποποιημένης ασφάλτου εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι η σύσταση του ασφαλτικού συνδετικού, το ποσοστό, η προέλευση, η κοκκομετρική διαβάθμιση και ο τρόπος επεξεργασίας-τεμαχισμού του ανακυκλωμένου ελαστικού, η θερμοκρασία καθώς και ο χρόνος ανάμιξης ελαστικού-ασφάλτου. Προσθήκη ελαστικού σε ποσοστά >10% κ.β. οδηγεί σε πολύ μεγάλη αύξηση του ιξώδους της ασφάλτου για συνήθεις εργασίες οδοστρωσίας ενώ για ποσοστά ελαστικού 10-15% το ιξώδες μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Ταυτόχρονα, ο τρόπος επεξεργασίας-τεμαχισμού του ελαστικού επηρεάζει τις ιδιότητες της τροποποιημένης ασφάλτου καθώς κόκκοι κρυογενούς επεξεργασίας παρουσιάζουν μισή επιφάνεια σε σχέση με αντίστοιχους μηχανικού τεμαχισμού.

Παράλληλα, χρήση διαφόρων κοκκομετριών ελαστικού (600 μm ή 300 μm) δεν επηρεάζει αισθητά το ιξώδες ασφαλτομιγμάτων ενώ χρήση ελαστικού προέλευσης από φορτηγά οχήματα οδηγεί σε μίγματα με πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση και την πρόωμη ρηγμάτωση, σε σύγκριση με αντίστοιχα όπου χρησιμοποιείται ελαστικό επιβατικών αυτοκινήτων.

Σύμφωνα με τους Li κ.α., το μέγεθος των κόκκων του ελαστικού επηρεάζει τη διασπορά τους στην άσφαλτο. Συγκεκριμένα, μικρότεροι κόκκοι οδηγούν σε καλύτερη διασπορά και κατ' επέκταση σε περισσότερο ομοιόμορφο μίγμα. Παράλληλα, η ίδια μελέτη εξετάζει την επίδραση του ρυθμού, του χρόνου καθώς και της θερμοκρασίας ανάμιξης. Τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά στο σημείο μάλθωσης και τη διεισδυτικότητα της τροποποιημένης ασφάλτου έδειξαν μείωση αυτών με αύξηση της θερμοκρασίας ανάμιξης, η οποία για τη διεισδυτικότητα ήταν αρκετά έντονη για θερμοκρασίες $>210^\circ\text{C}$. Η μείωση αυτή αποδόθηκε στη φύση του ασφαλτικού συνδετικού, το οποίο αποτελεί ένα εξαρτώμενο από την θερμοκρασία υλικό. Βέλτιστη τιμή θερμοκρασίας αποδείχθηκαν οι 180°C , καθώς σε μεγαλύτερες τιμές η άσφαλτος γήρασκε. Ωστόσο, η θερμοκρασία ανάμιξης διαφοροποιείται σύμφωνα με μελέτη των Navarro et al., (2007), η οποία πρότεινε ως βέλτιστη θερμοκρασία αυτή των 210°C παρέχοντας άσφαλτο με μεγαλύτερη ευκαμψία από τη συμβατική.

Παράλληλα, γρήγορη ανάμιξη ($\sim 7000\text{ rpm}$) οδήγησε σε καλύτερη διασπορά του ελαστικού στο μίγμα ενώ ο χρόνος ανάμιξης καθορίστηκε στα 40 min, διάρκεια κατά την οποία το σύστημα ισορρόπησε.

Σύμφωνα με πειραματικούς ελέγχους, κόκκοι ανακυκλωμένου ελαστικού συγκρατούν μεγαλύτερη ποσότητα ασφάλτου απ' ό,τι τα φυσικά αδρανή, γεγονός που δηλώνει πιθανή αλληλεπίδραση ασφάλτου.

Τροποποιημένα ασφαλτομίγματα, υγρής μεθόδου, εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να εφαρμοσθούν σε διάφορες κλιματικές συνθήκες, είναι περισσότερο ελαστικά σε θερμοκρασίες χαμηλές ακόμα και υπό του μηδενός, με ταυτόχρονη μείωση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης από 50 mm σε 38 mm. Παράλληλα εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά στην αντίσταση σε ολίσθηση, ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, αντίσταση στην τροχαυλάκωση, βελτιωμένη εφελκυστική αντοχή, δυσθραυστότητα, ανθεκτικότητα, μεγαλύτερο χρόνο ζωής και μειωμένο κόστος συντήρησης των οδοστρωμάτων συγκριτικά με αντίστοιχα με χρήση κοινής – μη τροποποιημένης ασφάλτου - . Εξέταση της συμπεριφοράς μιγμάτων με ΑΕ σε χαμηλές θερμοκρασίες στο Πανεπιστήμιο του Κάνσας των ΗΠΑ, υπέδειξε ως βέλτιστο ποσοστό εισαγωγής του ελαστικού το εύρος 18-22% και επεσήμανε ότι η ποσότητα αυτή δεν επιφέρει

μεταβολές στην εφελκυστική αντοχή και στην ενέργεια θραύσης της ασφάλτου κάτω που συμβαίνει για μεταβολή της ποσότητας ασφάλτου μεταξύ 6 και 9%.

Όσον αφορά στη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και στη μόνιμη παραμόρφωση, μελέτη στο Πανεπιστήμιο της Αριζόνα έδειξε ότι ασφαλτόμιγμα με χρήση τροποποιημένης με ΑΕ ασφάλτου ως συνδετικού υλικού εμφάνισε περιορισμένη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης καθώς και παραμένουσα παραμόρφωση. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στην άσφαλτο, που περιείχε 20% κ.β. ελαστικό, το οποίο προκάλεσε αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής των μιγμάτων. Η αυξημένη γωνία τριβής αποτελεί ένδειξη της αυξημένης ικανότητας του μίγματος να αναπτύσσει αντοχές υπό φορτία και κατ' επέκταση της εμφάνισης μικρότερης παραμένουσας παραμόρφωσης.

Το ανακυκλωμένο ελαστικό προσδίδει στα ασφαλτομίγματα ελαστικότητα και μπορεί να ενδυναμώσει τη συνάφεια μεταξύ του συνδετικού υλικού και των αδρανών οδηγώντας σε αύξηση στην αντίσταση σε κόπωση και μείωση της θερμικής ρηγμάτωσης. Στη μέθοδο αυτή, η αλληλεπίδραση ανάμεσα στους κόκκους του ελαστικού και την άσφαλτο δεν μπορεί να ελεγχθεί εύκολα καθώς ξεκινάει μόλις αναμιχθούν τα αδρανή με την άσφαλτο. Όταν τα μίγματα αυτά παρασκευαστούν σωστά, τέτοιου είδους οδόστρωμα συμπεριφέρεται ικανοποιητικά ακόμα και σε συνθήκες παγετού.

Πρόσφατες μελέτες συμπέραναν ότι κατά τη διάρκεια της ανάμιξης και της μεταφοράς, το ελαστικό αντιδρά με την άσφαλτο, τροποποιώντας τις ιδιότητές του, το σχήμα του και κατ' επέκταση τη συμπεριφορά του τελικού ασφαλτομίγματος.

Μελέτες σχετικά με την επίδραση της υγρασίας στις μηχανικές ιδιότητες των τροποποιημένων με ανακυκλωμένο ελαστικό μεγέθους κόκκων 2-8 mm ασφαλτομιγμάτων έδειξε μείωση της δυσκαμψίας, η οποία μειώνεται συναρτήσει του ποσοστού του προστιθέμενου ελαστικού. Η μείωση αυτή αποδόθηκε στα κενά που δημιουργήσαν οι κόκκοι του ελαστικού και κατά συνέπεια περισσότερο νερό διείσδυσε στο μίγμα κατά τη διαδικασία κορεσμού δίνοντας ασθενέστερη δομή. Για τροποποιημένα με ανακυκλωμένο ελαστικό ασφαλτομίγματα, αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση βρέθηκε να μειώνεται συγκριτικά με τα συμβατικά μίγματα εξαιτίας της κατάστασης κορεσμού καθώς η παρουσία του ελαστικού οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης σε κόπωση πριν την κατάσταση αυτή. Γι' αυτό, ασφαλτομίγματα με ανακυκλωμένο ελαστικό συμπεριφέρονται καλύτερα όσον αφορά στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά στην μη γηρασμένη κατάστασή τους, ενώ η συμπεριφορά αυτή χειροτερεύει υπό συνθήκες υγρασίας.

Σύμφωνα με τους Fernandes et al., (2002), εργαστηριακή μελέτη ασφαλτομιγμάτων με ανακυκλωμένο ελαστικό έδειξε μειωμένη ευστάθεια Marshall συγκριτικά με την αντίστοιχη των συμβατικών, μειωμένες τιμές resilient μέτρου ελαστικότητας καθώς και εφελκυστικής αντοχής, η οποία φάνηκε να μην επηρεάζεται

από την κοκκομετρική διαβάθμιση του ελαστικού. Παράλληλα, η μείωση στο μέτρο ελαστικότητας μεγάλωνε με αύξηση του μεγέθους και του ποσοστού του ανακυκλωμένου ελαστικού. Τα μίγματα αυτά δεν συμμορφώθηκαν με τις απαιτήσεις των Βραζιλιάνικων Προδιαγραφών. Στην ίδια μελέτη, μίγματα με λεπτόκοκκο ελαστικό (0.15-1.18 mm) σε ποσοστό μέχρι 2% κ.β. του συνολικού μίγματος έδειξε πολύ καλή συμπεριφορά όσον αφορά στην αντίσταση σε τροχαυλάκωση.

Εγκλείσματα ανακυκλωμένου ελαστικού είναι δυνατό να τροποποιήσουν τη συμβατική θερμή άσφαλο όσον αφορά την κόπωση σε εφελκυσμό, καθώς μίγματα με ανακυκλωμένα ελαστικά διαφορετικής επεξεργασίας – κρυογενούς ή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος – εμφανίζουν ενισχυμένη αντοχή σε κόπωση σε σύγκριση με τα συμβατικά μίγματα. Η συμπεριφορά αυτή δεν επηρεάζεται από το ποσοστό κενών, το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται από τη μια κατηγορία ασφάλτου στην άλλη.

Η χρήση της τροποποιημένης με ελαστικό ασφάλτου γίνεται ευρέως γνωστή δεδομένου του ότι δίνει οδοστρώματα με μειωμένη όχληση θορύβου. Η παρατήρηση αυτή έγινε για πρώτη φορά στις Βρυξέλλες του Βελγίου το 1981, σε ένα θερμό ασφαλτόμιγμα με την ονομασία "Drainasphalt". Η μελέτη έδειξε μείωση στα επίπεδα κυκλοφοριακού θορύβου της τάξης των 10 dB. Σε άλλες χώρες, χρήση τέτοιου είδους μιγμάτων οδήγησε σε παρόμοια ή μικρότερη μείωση του θορύβου, χώρες όπως ο Καναδάς (1991), η Αγγλία (1998), η Γαλλία (1984), η Γερμανία (1980), η Αυστρία (1988) και η Ολλανδία (1988). Ως αποτέλεσμα, πολλές πολιτείες των ΗΠΑ (Αριζόνα, Φλόριντα, Καλιφόρνια, Λος Άντζελες και Τέξας) αλλά και παγκοσμίως χρησιμοποιούν τέτοια μίγματα. Παράλληλα, συνδυασμός κοκκομετρικών διαβαθμίσεων ανακυκλωμένου ελαστικού είναι δυνατό να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του θορύβου, σύμφωνα με μελέτη των Zhu and Carlson, ενώ όσον αφορά στον τρόπο παρασκευής των μιγμάτων – υγρή ή ξερή μέθοδος – μίγματα της ξηρής μεθόδου απορροφούν περισσότερο θόρυβο.

Συνοπτικά, εργαστηριακά αποτελέσματα μελετών σχετικά με την προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε ασφαλτομίγματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς προσδίδουν στο οδόστρωμα μεγαλύτερη αντοχή σε ολίσθηση, μειωμένη ρηγμάτωση σε χαμηλές θερμοκρασίες ή λόγω κοπώσεως, αυξημένο σημείο μάλθωσης, μειωμένη ευστάθεια Marshall με ταυτόχρονη όμως αύξηση των ιξοδοελαστικών χαρακτηριστικών του, ιδιαίτερα αυξημένη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση ή τροχαυλάκωση και μεγαλύτερο χρόνο ζωής σε σχέση με τις συμβατικές ασφαλτικές στρώσεις.

Τέλος, από οικονομική πλευρά, ασφαλτοσκυρόδεμα με τροποποιημένη με ελαστικό άσφαλο, είναι οικονομικό, κάνοντας οικονομία της τάξης των \$22000 ανά μίλι συγκριτικά με κοινές εφαρμογές ασφάλτου (Μαυρίδου, 2010).

6.7.2. Ξηρή μέθοδος (Προσθήκη ελαστικού στα αδρανή).

6.7.2.1. Θερμά ασφαλτομίγματα.

Όσον αφορά στην 'Ξηρή μέθοδο-dry process', η υπάρχουσα βιβλιογραφία είναι περιορισμένη και καλύπτει την κατηγορία των θερμών ασφαλτομιγμάτων.

Όταν ανακυκλωμένο ελαστικό, σε μορφή πούδρας, προστίθεται στα ασφαλτομίγματα, βελτιώνει την συμπακνωσιμότητα και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, λόγω της δράσης του ελαστικού ως φίλλερ, που συμπληρώνει τα υπάρχοντα κενά του σκελετού των αδρανών.

Μελέτες σε πυκνά διαβαθμισμένα ασφαλτομίγματα τροποποιημένα με ανακυκλωμένο ελαστικό, που περιέχουν 3%-5% ανακυκλωμένο ελαστικό κ.β. των αδρανών, έδειξαν ότι η δυσκαμψία των μιγμάτων αυτών μειώθηκε κατά 30-75% ανάλογα με το ποσοστό του προστιθέμενου ελαστικού. Ωστόσο, όταν λεπτόκοκκο ελαστικό (μέγιστου κόκκου <1 mm) προστίθεται σε ασφαλτομίγματα, όπως συμβαίνει σε διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ- Φλόριντα, Κολοράντο και Κάνσας -, παράγονται μίγματα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά στην δυσκαμψία και στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση ενώ κόκκοι αυτού του μεγέθους είναι περισσότερο ενεργοί σε σύγκριση με χονδρόκοκκους όσον αφορά στην αντίσταση σε τροχαυλάκωση. Παρόλα αυτά, η ιδιότητα της αντίστασης σε τροχαυλάκωση πρέπει να μελετηθεί για διάφορα μεγέθη κόκκου και ποσότητες ανακυκλωμένου ελαστικού.

Η Ξηρή μέθοδος συγκρινόμενη με την υγρή μέθοδο, δεν απαιτεί τη χρήση ειδικού εξοπλισμού ενώ αποτελεί λιγότερο διαδεδομένη μέθοδο δεδομένου του υψηλού κόστους ενσωμάτωσης του ανακυκλωμένου ελαστικού σε ειδικά διαβαθμισμένα φυσικά αδρανή. Ωστόσο η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα να ενσωματώσει μεγαλύτερες ποσότητες ελαστικών, ιδιαίτερα σε ειδικές εφαρμογές, με περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα.

Στην Ισπανία υπάρχουν ήδη από το 2007 προδιαγραφές και νομοθετική ρύθμιση σχετικά με την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων σε ασφαλτομίγματα. Στην Ελλάδα δυστυχώς, μέχρι στιγμής δεν υπάρχει σχετικό θεσμικό πλαίσιο ούτε ερευνητική προσπάθεια στον τομέα αυτό.

6.7.2.2. Ψυχρά ασφαλτομίγματα.

- *Τύπου Slurry.*

Το πρόβλημα των αντιολισθηρών ταπήτων έχει οξυνθεί στις μέρες μας. Για το σκοπό αυτό αλλά και λόγω των ιδιαίτερα αυξημένων παρατηρούμενων ατυχημάτων στα οδικά δίκτυα της χώρας αλλά και διεθνώς γίνονται προσπάθειες εύρεσης τρόπων αύξησης της αντίστασης σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων.

Μίγματα slurry με ανακυκλωμένο ελαστικό, αποτελούν μίγματα ασφαλικού γαλακτώματος στα οποία τοποθετείται ελαστικό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και έχουν ως στόχο την επισκευή οδοστρωμάτων. Αν και το κόστος των μιγμάτων αυτών είναι σχετικά αυξημένο, τα μίγματα με ΑΕ εμφανίζουν πλεονεκτήματα όπως αυξημένη διάρκεια ζωής και αντίσταση σε ολίσθηση. Παράλληλα, τέτοιου είδους μίγματα είναι δυνατόν να ενσωματώσουν μεγάλες ποσότητες ελαστικών και κατ' επέκταση να εξομαλύνουν το πρόβλημα της απόθεσης αυτών.

- *Επισκευαστικά.*

Η βιβλιογραφία σχετικά με επισκευαστικά τσιμεντοκονιάματα με ασφαλικό συνδετικό υλικό και προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού είναι ανύπαρκτη.

7. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ - ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

7.1. Η ανάγκη της ανακύκλωσης.

Η ανακύκλωση του σκυροδέματος είναι μία εξελισσόμενη μέθοδος, η οποία αξιοποιεί τα παλαιά σκυροδέματα, που προέρχονται από κατεδαφίσεις, σεισμούς ή άλλες καταστρεπτικές ενέργειες (καταρρεύσεις κ.α.). Είναι απαραίτητη από οικονομική αλλά και περιβαλλοντική άποψη. Συνήθως στο παρελθόν τα μπάζα των οικοδομών μεταφερόντουσαν σε χωματερές ως υλικό πληρώσεως, με τα γνωστά προβλήματα λόγω ελλείψεως χώρων αποθέσεως (π.χ. περίπτωση του ΧΥΤΑ Λιοσίων). Σε πολλές χώρες της Ευρώπης και Αμερικής η ανακύκλωση εφαρμόζεται με νόμο. Αν το ποσοστό των χρησιμοποιούμενων αδρανών υλικών από ανακύκλωση είναι μικρότερο από το νομοθετημένο ποσοστό σε σχέση με το συνολικό ποσοστό αδρανών που περιέχονται στο σκυρόδεμα, η οικοδομική άδεια αφαιρείται. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται σήμερα μεταξύ 20 και 30%, θα αυξηθεί όμως σύντομα.

Η ανακύκλωση έχει πολλά πλεονεκτήματα, έτσι ώστε με την αυξημένη ευαισθησία για την προστασία του περιβάλλοντος, τους αυστηρότερους περιβαλλοντικούς νόμους και την προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το κόστος των κατασκευών, να αποτελεί αναγκαιότητα και καθήκον. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της ανακύκλωσης είναι η παραγωγή άμμου ελεγχόμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης και ποσοστού παιπάλης, το οποίο οφείλεται στις σύγχρονες μεθόδους πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού.

Τελευταία οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης προδιαγράφει ποσοστό ανακύκλωσης από διάφορες κατασκευές και κατεδαφίσεις μέχρι το 2020 της τάξεως του 70%.

Οι περιοριστικές διατάξεις προστασίας του περιβάλλοντος για την εγκατάσταση νέων λατομείων δυσχεραίνουν το πρόβλημα της παραγωγής αδρανών υλικών για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών. Το αποτέλεσμα είναι η παραβίαση των νομοθετημένων διατάξεων και η ανεπανόρθωτη καταστροφή του περιβάλλοντος ακόμη και σε «προστατευόμενες» περιοχές. Είναι έντονες οι πληγές που δημιουργούν τα υπαίθρια λατομεία σε όλα τα βουνά της χώρας, ακόμη και κοντά σε πόλεις, τουριστικά θέρετρα και αρχαιολογικά κέντρα. Είναι γνωστό ότι τα λατομεία αυτά δημιουργούν τεράστια προβλήματα, τα οποία δεν αντιμετωπίζονται με νομοθετικά διατάγματα ή ευχολόγια από οργανώσεις περιβαλλοντικής προστασίας. Ιδιαίτερα για

το Ελληνικό περιβάλλον οι καταστροφές που γίνονται είναι πέραν πάσης λογικής γι' αυτό και απαιτούνται ριζικές λύσεις.

Η σύγχρονη τεχνολογία προσφέρει αξιόλογες λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Μία από αυτές είναι η παραγωγή εμπορεύσιμων αδρανών υλικών από παλαιά σκυροδέματα, που προέρχονται από κατασκευές και κατεδαφίσεις, και από την απόπλυση υπολειμμάτων σκυροδέματος των εγκαταστάσεων παραγωγής. Τα υλικά από την ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων, μπορούν μετά από κατάλληλη επεξεργασία να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά, εφάμιλλα προς τα πρωτογενή παραγόμενα υλικά και σε πολλές περιπτώσεις ακόμη καλύτερα (Εφραιμίδης, 2008). Έτσι με την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του σκυροδέματος επιτυγχάνονται τα εξής: μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από στερεά απόβλητα (μπάζα) (Κανιτάκη, 2009) και εξοικονόμηση πρώτων υλών (Περυσινάκη, 2012).

Το Ηνωμένο Βασίλειο, το οποίο θεωρείται πρωτοπόρο στην Ευρώπη στον τομέα της ανακύκλωσης, εδώ και αρκετά χρόνια εφαρμόζει με νόμο την ανακύκλωση αδρανών υλικών από πρωτογενείς και δευτερογενείς πηγές. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του 2005, περίπου 275 εκατομ. τόνοι αδρανών υλικών χρησιμοποιούνται κάθε χρόνο ως πρώτη ύλη στις δομικές κατασκευές. Από αυτά μόνο 75 εκατομ. τόνοι (περίπου 23%) προς το παρόν προέρχονται από ανακύκλωση ή δευτερεύουσες πηγές. Η Αγγλική κυβέρνηση είχε μελετήσει προγράμματα αυξήσεως της παραγωγής ανακυκλωμένων υλικών από παλαιά σκυροδέματα κατά 20 εκατομ. τόνους ετησίως μέχρι το 2012.

Σύμφωνα με στατιστική μελέτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης το έτος 2000 πετάχτηκαν 60 εκατομ. τόνοι αδρανών υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές. Τέτοια υλικά είναι δευτερογενή προϊόντα από λατομεία, υψικαμίλους ή τέφρα εργοστασίων επεξεργασίας λιγνίτη, σκυροδέματα από κατεδαφίσεις και άλλα. Με βάση εργαστηριακές μετρήσεις η αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι περίπου 10% κατώτερη της αντίστοιχης του κανονικού. Το ποσοστό 10% μπορεί να ελαττωθεί με την εφαρμογή των συγχρόνων βελτιωμένων μεθόδων παραγωγής των αδρανών υλικών από ανακύκλωση σε οργανωμένα κέντρα παραγωγής.

Η έρευνα για την εκπόνηση σοβαρού σχεδιασμού πρέπει να αναφέρεται στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης των υλικών που απορρίπτονται ως ακατάλληλα (Εφραιμίδης, 2008).

7.2. Μέθοδοι ανακύκλωσης παλαιών σκυροδεμάτων.

Τα συγκροτήματα ανακύκλωσης διακρίνονται σε συγκροτήματα παραγωγής αυτοφερόμενα για χρησιμοποίηση μέσα στο εργοτάξιο, και μόνιμα συγκροτήματα εγκατεστημένα σε οργανωμένες κεντρικές μονάδες δημόσιες, κοινοτικές ή ιδιωτικές, οι οποίες ανταποκρίνονται στις νέες τεχνολογικές εξελίξεις.

Τα υλικά τα οποία συλλέγονται από την καθαίρεση σκυροδέματος μεταφέρονται στο κέντρο ανακύκλωσης και αρχικά τροφοδοτούνται στο θραυστήρα πρόθραυσης. Μπορεί οι πέτρες και τα συντρίμια σκυροδέματος να περιέχουν διάφορα άλλα υλικά όπως άσφαλτο, ξύλα, τούβλα, χαρτιά, πλαστικά και ακαθαρσίες. Τα μηχανήματα θραύσεως επεξεργάζονται μόνο σκυροδέματα που είναι απαλλαγμένα από τα ακατάλληλα αυτά υλικά, τα οποία απομακρύνονται με ειδικές διατάξεις. Μέταλλα όπως κομμάτια από ράβδους οπλισμού γίνονται δεκτά, αφού μπορούν να αφαιρεθούν με μαγνήτες ή άλλες διατάξεις διαχωρισμού και στη συνέχεια να ανακυκλωθούν με τήξη για άλλες χρήσεις (Εφραιμίδης, 2008).

7.2.1. Αυτοφερόμενα συγκροτήματα ανακύκλωσης.

Η θραύση στο εργοτάξιο κατεδάφισης μπορεί να γίνει με αυτοφερόμενα θραυστικά συγκροτήματα, τα οποία μειώνουν το κόστος κατασκευής και την ατμοσφαιρική ρύπανση που δημιουργείται από τη μεταφορά υλικών προς και από το λατομείο. Τα κινητά συγκροτήματα ανακύκλωσης τοποθετούνται μέσα στο εργοτάξιο του έργου. Έχουν συγκριτικά χαμηλό κόστος και μπορεί ένα συγκρότημα να αποσβεστεί σε ένα μεγάλο έργο. Τα μεγάλα αυτοφερόμενα συγκροτήματα μπορούν να επεξεργαστούν μέχρι 400 m³/h μάζων. Τα συγκροτήματα αυτά αποτελούνται από έναν θραυστήρα μάζων σκυροδέματος, πλευρικό μεταφορέα απόθεσης ακατάλληλων υλικών, θραυστήρα δευτερογενούς θραύσης, συγκρότημα κοσκινίσματος, και ταινιόδρομο επαναφοράς του υπερδιάστατου υλικού από το κόσκινο στον θραυστήρα για συμπληρωματική θραύση. Σε περίπτωση μικρών ποσοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρά αυτοφερόμενα συγκροτήματα μέχρι 100 m³/h, τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε στενούς χώρους μέσα σε πόλεις.

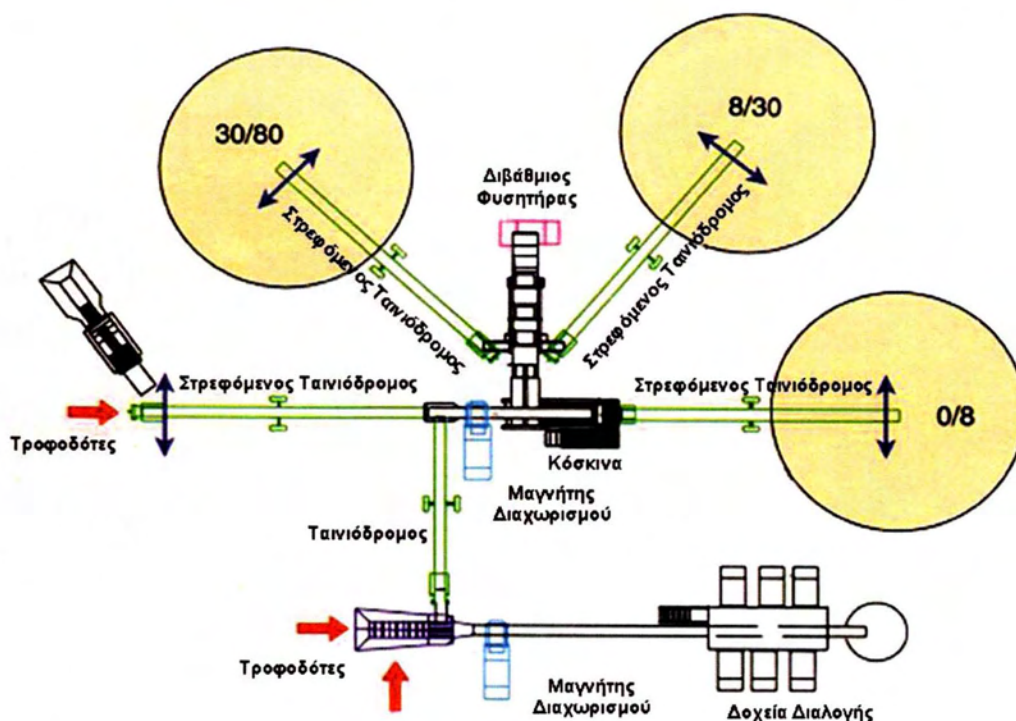
Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης κατάλληλων αυτοφερόμενων συγκροτημάτων ανακύκλωσης μάζων σκυροδέματος είναι (Εφραιμίδης, 2008):

- Δεν υπάρχουν έξοδα απομακρύνσεως των μάζων στη χωματερή και μεταφοράς αδρανών στο εργοτάξιο.
- Μειωμένοι άεργοι χρόνοι (αναμονή οχημάτων, προετοιμασία προσβάσεως κ.α.), αύξηση της παραγωγής, μειωμένο εργατικό κόστος.
- Με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις δεν υπάρχουν παράπονα από τους περιοίκους, ή αυτές μειώνονται στο ελάχιστο.

- Δεν ενοχλούν την κυκλοφορία οχημάτων και πεζών, δεν ρυπαίνουν τους δρόμους κυκλοφορίας, δεν προκαλούν ρύπανση από καυσαέρια ή θορύβους.

7.2.2. Μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης.

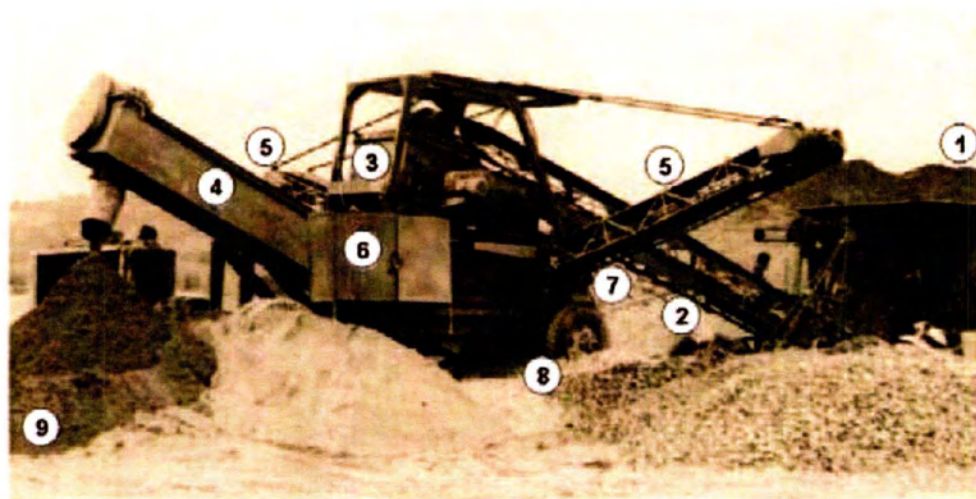
Τα μόνιμα συγκροτήματα των κέντρων ανακύκλωσης, όπως χρησιμοποιούνται σε πολλές Ευρωπαϊκές πόλεις, είναι ολοκληρωμένα εργοστάσια παραγωγής με εξελιγμένα μηχανήματα καθαρισμού, θραύσεως, μηχανικής διαλογής ή με μαγνήτες, διαχωρισμού, κοσκίνισματος, πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού και ελέγχου της παραγωγής. Η ποιότητα των παραγομένων από την ανακύκλωση υλικών στα συγκροτήματα αυτά είναι εφάμιλλη ή και ανώτερη από τα συμβατικά υλικά, αφού η τελευταία βαθμίδα παραγωγής περιλαμβάνει και πλύσιμο της άμμου, δηλαδή τον έλεγχο του ανεπιθύμητου λεπτόκοκκου υλικού σε επιθυμητές τιμές (Εικόνα 7-1).



Εικόνα 7-1: Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος (Εφραιμίδης, 2008).

Για τη διαλογή ανάμικτων υλικών και την απομάκρυνση των ακατάλληλων χρησιμοποιείται οπτικό σύστημα, όπως είναι των εργοστασίων O.E.M. Recycling Equipment, γνωστό με το εμπορικό σήμα «Aquila» (=αετός). Το σύστημα έχει δοκιμαστεί με επιτυχία στη διαλογή μικτών υλικών, όπως ξύλα, χαρτιά, πλαστικά υλικά, PVC, γύψος, χώμα και άλλα. Το οπτικό σύστημα εντοπίζει τα ακατάλληλα υλικά και τα διαχωρίζει, έτσι ώστε στο συγκρότημα να τροφοδοτούνται καθαρά υλικά.

Πολλοί παραγωγείς αδρανών υλικών, οι οποίοι εφαρμόζουν την ανακύκλωση, ακολουθούν και τις δύο μεθόδους: Την ανακύκλωση στο λατομείο με μόνιμο συγκρότημα, και την ανακύκλωση στο εργοτάξιο του έργου με κινητό συγκρότημα. Οι παραγωγείς ζητούν από τους εργολάβους να φέρουν τα μπάζα τους στο λατομείο. Το υλικό αυτό είναι μία έτοιμη πρώτη ύλη, η οποία μετά την επεξεργασία μετατρέπεται σε χρησιμοποιήσιμα αδρανή υλικά. Οι εργολάβοι έχουν το πλεονέκτημα, ότι μπορούν να επιλέγουν το πλησιέστερο προς το εργοτάξιο τους λατομείο με κέντρο ανακύκλωσης και να επιστρέφουν τα φορτηγά τους με πρωτογενή ή ανακυκλωμένα αδρανή, αντί να επιστρέφουν άδεια από τη χωματερή, η οποία πολλές φορές είναι δυσεύρετη. Το κινητό συγκρότημα έχει το πλεονέκτημα της συγκριτικά χαμηλής επένδυσης, αλλά δεν έχει την ικανότητα με μόνο μηχανικά μέσα (κατάλληλα μηχανήματα πρωτογενούς και δευτερογενούς θραύσης) να ελέγχει το ποσοστό του ανεπιθύμητου λεπτού υλικού, όπως παιπάλη και διάφορες άλλες ρυπαντικές προσμίξεις. Εκτός αν το εργοτάξιο βρίσκεται κοντά σε ποτάμι και υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησεως και απόρριψης του νερού πλύσεως στα κατάντι του πλυντηρίου, αν βέβαια αυτό επιτρέπεται. Τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κινητό συγκρότημα κοσκίνου με καταιονισμό νερού και αποστραγγιστικό κοχλία (Εικόνα 7-2).



- 1 Τροφοδοτική αποθήκη με δοσιμετρικό δονητικό τροφοδότη
- 2 Μεταφορικός ιμάντας δονητικού κοσκίνου
- 3 Δονητικό κόσκινο δύο πλεγμάτων
- 4 Αποστραγγιστικό κοχλίας άμμου

- 5 Ιμάντες στήθσεως
- 6 Ηλεκτρικός πίνακας χειρισμών
- 7 Αντλία νερού (3 bar)
- 8 Πλαίσιο μεταφοράς
- 9 Άμμος. Μικρόκοκοι <math>< 0,5 \text{ mm}</math>

Εικόνα 7-2: Αυτοφερόμενο συγκρότημα διαχωρισμού αδρανών και πλύσεως άμμου τριών βαθμίδων για την παραγωγή καναλέτων λεπτού τοιχώματος (Εφραιμίδης, 2008).

7.3. Διαδικασία παραγωγής.

Το συγκρότημα ανακύκλωσης πρέπει να είναι κατάλληλο για την επεξεργασία μεγάλου εύρους μικτών υλικών που μπορεί να περιέχουν χαρτιά, πλαστικά, πολυστερίνες και σκουπίδια, όπως χώμα, άργιλο και ξύλα. Όταν το συγκρότημα δεν πλένει ανακυκλώσιμα υλικά σε ποσότητα της τάξεως των $75 \text{ m}^3/\text{h}$, τότε χρησιμοποιείται για το πλύσιμο των αποθεμάτων του εργοταξίου και για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων λεπτόκοκκων προσμίξεων από την άμμο. Με την μέθοδο αυτή ελέγχεται η ποιότητα της εργοταξιακής άμμου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του παραγόμενου σκυροδέματος.

Τα μικτά υλικά διαφόρων συστατικών φτάνουν στο εργοτάξιο ανακύκλωσης με φορτηγά οχήματα. Με την άφιξή τους στη γεφυροπλάστιγγα το φορτίο εξετάζεται με μία ευρυγώνιο κάμερα για τον έλεγχο της καταλληλότητας επεξεργασίας από το συγκρότημα πλύσεως. Τα ακατάλληλα φορτία οδηγούνται σε χωματερή για απόρριψη, ενώ τα κατάλληλα οδηγούνται στο συγκρότημα πλύσεως. Μεγάλα κομμάτια από κατεδαφίσεις τεμαχίζονται με κρουστικό σφυρί ή «ψαλίδι» (concrete cruncher) που είναι προσαρμοσμένο στην άκρη του προβόλου υδραυλικού εκσκαφέα κατάλληλου μεγέθους. Τα ψαλίδια μπορούν να αναπτύξουν δυνάμεις μέχρι 600 t . Το μεγαλύτερο μέρος των υλικών μεταφέρεται με φορτωτή σε ένα σιαγονοφόρο θραυστήρα. Το τροφοδοτούμενο υλικό περνάει πρώτα από ένα δονητικό διαχωριστή πρώτης βαθμίδας για την αφαίρεση των υπερδιάστατων υλικών $> 100 \text{ mm}$.

Ο θρυμματιστής σκυροδέματος, concrete cruncher, είναι κατάλληλος για την κατάτμηση σκυροδέματος σε μικρά κομμάτια στο δάπεδο του εργοταξίου. Με κατάλληλη διαμόρφωση των εσωτερικών οδόντων κόβει και διαχωρίζει το χαλύβδινο οπλισμό. Η εργασία αυτή αυξάνει την παραγωγικότητα του συγκροτήματος ανακύκλωσης.

Τα μεταλλικά αντικείμενα απομακρύνονται με μαγνήτη που είναι τοποθετημένος πάνω από τον τροφοδοτικό ιμάντα. Ο ιμάντας μεταφέρει το υλικό σε ένα κόσκινο αποπλύσεως με καταιονισμό νερού. Πολτός υλικού $< 5 \text{ mm}$ οδηγείται σε ένα συγκρότημα πλύσεως και επεξεργασίας άμμου με ενσωματωμένο υδροκυκλώνα, ο οποίος αφαιρεί τα αιωρούμενα υλικά, όπως παιπάλη και άργιλο. Η άμμος αφυδατώνεται σε ποσοστό υγρασίας μικρότερο του 12% και είναι απαλλαγμένη από μικροϋλικά κάτω των 40 micron ($=10^{-3} \text{ mm}$). Η διαδικασία αυτή δίνει εμπορεύσιμη λεπτή άμμο χωρίς την ανάγκη προκοσκινίσματος ή αφαιρέσεως φυτικής γης από το τροφοδοτούμενο υλικό, έτσι ώστε να βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα των παραγομένων προϊόντων, ιδιαίτερα της λεπτόκοκκης άμμου.

Όπως σε όλα τα συγκροτήματα πλύσεως, η ορθή διαχείριση του νερού αποπλύσεως είναι κρίσιμη για τη λειτουργία και την οικονομία της παραγωγής. Στα συγκροτήματα ανακύκλωσης αυτό είναι ένα τεχνικό πρόβλημα που οφείλεται στη

μεταβαλλόμενη σύνθεση/ρύπανση του τροφοδοτούμενου υλικού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι μεταξύ των οποίων επικρατέστερη είναι η μέθοδος του «πυκνωτή λάσπης» (Εικόνα 7-3) με ενσωματωμένη πολυηλεκτρολυτική διάταξη οργανικής βάσης, η οποία υποστηρίζει τη διαχωριστική ικανότητα. Η διάταξη αυτή προκαλεί ταχύτατη καθίζηση των πλεοναζόντων στερεών υλικών (φαινόμενο θρόμβωσης), τα οποία ως πυκνή λάσπη μεταφέρονται με αντλίες λάσπης σε μία εξωτερική απόθεση σε απόσταση 300-400 μέτρων από το συγκρότημα. Το καθαρό νερό υπερχειλίζει τη δεξαμενή του πυκνωτή και φιλτράρεται για την αφαίρεση των υπόλοιπων αιωρούμενων ανεπιθύμητων προσμίξεων, όπως ελαιώδεις αφροί, και στη συνέχεια μεταφέρεται στη δεξαμενή νερού του συγκροτήματος. Από τη θέση αυτή το νερό επανακυκλοφορεί στην απαιτούμενη καθαρότητα και ποσότητα στο συγκρότημα πλύσεως. Με τον πυκνωτή λάσπης δεν χρειάζονται πλέον οι υπαίθριες δεξαμενές καθίζησης.



Εικόνα 7-3: Μηχανικές μονάδες του συγκροτήματος πλύσεως και διαβαθμίσεως αδρανών υλικών από ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων (Εφραιμίδης, 2008).

Τελευταία εξέλιξη στη διαχείριση του νερού και των αποβαλλομένων στερεών είναι η *Φιλτρόπρεσα* με ενσωματωμένα φίλτρα (μήκους περίπου 16 m), η οποία τοποθετείται μετά τον πυκνωτή λάσπης. Λειτουργεί με πίεση 15 bar και έχει ικανότητα διαχείρισης, ανάλογα με το συγκρότημα, μέχρι 30 t/h απόβλητων στερεών, τα οποία με την βοήθεια της φιλτρόπρεσας διαμορφώνονται σε «πίτες» μικρού όγκου

για εύκολη μεταφορά ως χρησιμοποιήσιμο υποπροϊόν. Το περιεχόμενο της πίτας σε στερεά είναι της τάξεως του 90%. Η λειτουργία του συγκροτήματος είναι αυτόματη και ελεγχόμενη από ηλεκτρονική διάταξη.

Τα αδρανή υλικά και οι ανεπιθύμητοι κόκκοι περνάνε κατ' ευθείαν από το πρωτογενές κόσκινο καταιονισμού σε ένα πλυντήριο με δίδυμους άξονες μήκους 8 μέτρων, οι οποίοι φέρουν πτερύγια από χρομομολυβδαίνιο μεγάλης διαμέτρου περίπου 1,5 μέτρων. Η ταχύτητα περιστροφής των αξόνων ρυθμίζεται εύκολα, έτσι ώστε να προσαρμόζεται στα μεταβλητά χαρακτηριστικά του υλικού. Διάφορα ελαφρά μολυσματικά υλικά, όπως σκουριά, πλαστικά και οργανικά υλικά, ξύλα και χόρτα αιωρούνται και μετακινούνται προς ένα κόσκινο αφαίρεσης απορριμμάτων, το οποίο επανακτά το νερό και τα λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία οδηγούνται στη μονάδα πλύσεως άμμου. Διάφορα συντρίμματα που είναι προϊόντα τριβής μεταφέρονται σε ένα αποστραγγιστικό κόσκινο. Τα λεπτόκοκκα υλικά που απελευθερώνονται και το νερό οδηγείται σε ένα φρεάτιο με υποβρύχια αντλία. Το φρεάτιο συλλέγει επίσης νερά αποπλύσεως και υπόγεια νερά, τα οποία τελικά αντλούνται στο κόσκινο καταιονισμού.

Τα πλυμένα και αποστραγγισμένα αδρανή υλικά μεγαλύτερα των 5 mm μεταφέρονται από το κόσκινο αποστραγγίσεως σε ένα κόσκινο δύο πλεγμάτων χωρίς νερό για την τελική κοκκομετρική διαβάθμιση. Η διεργασία παράγει πέντε εμπορεύσιμα προϊόντα: άμμος < 5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm, 20-40 mm και 40-100 mm, τα οποία ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές παραγωγής σκυροδέματος.

Ακόμη και τα προϊόντα της πρέσας σε μορφή πίτας, τα οποία είναι συμπιεσμένη λάσπη και άργιλος, θεωρούνται εμπορεύσιμα προϊόντα ως αργιλικό επίχρισμα για την επάλειψη καναλιών και οχετών νερού. Τα μεταλλικά υλικά, τα οποία συλλέγονται από το μαγνήτη πωλούνται ως παλιοσίδηρα (scrap).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στους μαγνήτες αφαίρεσης των μετάλλων από το ρεύμα του υλικού. Οι μαγνήτες δεν χρησιμεύουν μόνο για την ανάκτηση μετάλλων αλλά και για να συμβάλλουν στην παραγωγή καθαρών υλικών, όπως αδρανών υλικών και ξύλων. Το κόσκινο της πρώτης βαθμίδας διαχωρίζει υλικά μεγέθους < 30 cm. Το κόσκινο της δεύτερης βαθμίδας αφαιρεί από το υλικό αυτό τα ανεπιθύμητα λεπτά υλικά. Το υπόλοιπο υλικό οδηγείται με ταινιόδρομο στο μαγνήτη, ο οποίος εκτρέπει τα μεταλλικά αντικείμενα από το ρεύμα του υλικού. Με μαγνήτες δινορευμάτων είναι δυνατή και η εκτροπή μη μεταλλικών υλικών, όπως αλουμίνιο, χαλκός και μπρούντζος.

Χρησιμοποιούνται μόνιμοι και ηλεκτρικοί μαγνήτες. Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, γι' αυτό προτιμώνται στα αυτοφερόμενα κινητά συγκροτήματα. Στα Μόνιμα Κέντρα Ανακύκλωσης χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί μαγνήτες, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη μαγνητική ισχύ, επομένως έχουν τη

δυνατότητα να ανυψώνουν βαρύτερα και μεγαλύτερα αντικείμενα. Διακρίνονται επίσης επίπεδοι μαγνήτες πάνω από την κεφαλή του ταινιοδρόμου και μαγνήτες τυμπάνου.

Το πλύσιμο των αδρανών υλικών προσθέτει υψηλή αξία στο τελικό προϊόν από ότι ο «ξηρός» διαχωρισμός. Η ικανότητα της παραγωγής άμμου υψηλής ποιότητας, η οποία αλλιώς θα πεταγόταν σε χωματερή, είναι ακόμη ένα σοβαρό πλεονέκτημα. Οι νέες εγκαταστάσεις με την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας πλύσεως, δείχνει ότι η διαθεσιμότητα νερού και η διαχείριση των λεπτόκοκκων υλικών δεν αποτελούν πλέον σοβαρά εμπόδια για την αποδοτική πραγματοποίηση εμπορεύσιμων υλικών από υλικά που στο παρελθόν θεωρούντο σκουπίδια. Εναπόκειται τώρα στους διαχειριστές της ανακύκλωσης και των κατεδαφίσεων να αποφασίσουν πως θα επενδύσουν στις νέες αυτές τεχνολογίες για τις οποίες η πράξη δείχνει ότι είναι κερδοφόρες (Εφραιμίδης, 2008).

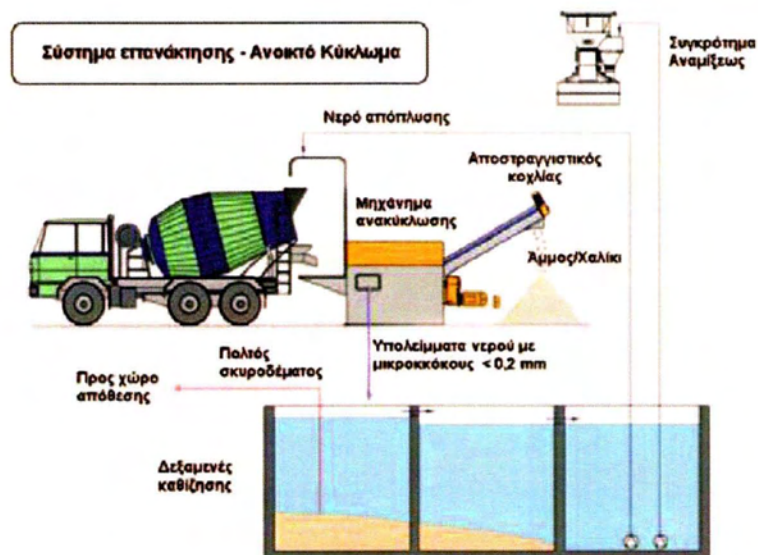
7.4. Επανάκτηση υλικών από υπολείμματα σκυροδέματος.

Η επεξεργασία υπολειμμάτων σκυροδέματος στα εργοστάσια παραγωγής και του νερού που χρησιμοποιείται για το πλύσιμό τους εφαρμόζεται εδώ και 25 χρόνια περίπου με συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία για την παραγωγή εμπορεύσιμης άμμου με ελεγχόμενο ποσοστό παιπάλης. Με την αξιοποίηση των υπολειμμάτων σκυροδέματος έχουν προκύψει σημαντικά οικονομικά οφέλη, τα οποία δικαιολογούν τις σχετικές επενδύσεις. Αυτά οφείλονται μεταξύ άλλων στη μείωση του κόστους απόθεσης των υπολειμμάτων σκυροδέματος, στην οικονομία του νερού πλύσεως, και στην επανάκτηση ακριβών υλικών, όπως είναι λεπτόκοκκος καθαρή άμμος απαλλαγμένη από παιπάλη και ζημιογόνες ρυπαρές προσμίξεις. Παράλληλα με την αύξηση της παραγωγικότητας, η ανακύκλωση των υπολειμμάτων βελτιώνει τις συνθήκες παραγωγής από την πλευρά του χρήστη για την ποιότητα του σκυροδέματος. Σημειώνεται επίσης ότι η διαδικασία ανακύκλωσης ανταποκρίνεται στις νομοθετικές διατάξεις, οι οποίες ισχύουν σε πολλές χώρες για την επανάκτηση χρησιμοποιήσιμων υλικών και την προστασία του περιβάλλοντος. Όπως αναφέρεται παρακάτω διακρίνονται δύο συστήματα επανάκτησης (Εφραιμίδης, 2008).

7.4.1. Επανάκτηση ανοικτού κυκλώματος.

Με το σύστημα ανακύκλωσης υπολειμμάτων σκυροδέματος ανοικτού κυκλώματος τα υλικά (άμμος και χαλίκι) επανακτώνται και τροφοδοτούνται στο συγκρότημα παραγωγής. Το νερό συλλέγεται σε μία δεξαμενή καθίζησης και στη συνέχεια χρησιμοποιείται πάλι για το πλύσιμο. Τα προϊόντα του πλυσίματος, μικρόκοκκα

υλικά, τα οποία κατακάθονται στον πυθμένα της δεξαμενής μαζεύονται με φορτωτή και χρησιμοποιούνται σε άλλες χρήσεις (Εικόνα 7-4).



Εικόνα 7-4: Επανάκτηση υλικών από υπολείμματα σκυροδέματος (Εφραιμίδης, 2008).

7.4.2. Επανάκτηση κλειστού κυκλώματος.

Στο κλειστό κύκλωμα, μαζί με την επανάκτηση των υπολειμμάτων σκυροδέματος οδηγείται στο συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος ολόκληρη η ποσότητα του υπολειπόμενου νερού, στο οποίο συνυπάρχουν λεπτόκοκκα υλικά και τσιμέντο. Με το σύστημα αυτό η απώλεια υλικού είναι μηδενική (Εικόνα 7-5).

Το συγκρότημα ανακύκλωσης μπορεί να είναι κινητό ή σταθερό. Τα βασικά μηχανήματα της εγκατάστασης είναι το κόσκινο καταιονισμού, το μηχάνημα πλύσεως, το οποίο διαμορφώνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις και το μέγεθος της παραγωγής, οι δεξαμενές καθιζήσεως, ο αποστραγγιστικός κοχλίας και οι μεταφορικές και τροφοδοτικές διατάξεις (Εφραιμίδης, 2008).

7.5. Ανακύκλωση υπολειμμάτων σκυροδέματος στη βιομηχανία προκατασκευών.

Η ανακύκλωση υπολειμμάτων βρίσκει εφαρμογή επίσης στη βιομηχανία προκατασκευασμένων στοιχείων. Οι απαιτήσεις στην παραγωγή είναι διαφορετικές από αυτές των εργοστασίων έτοιμου σκυροδέματος. Το κέντρο βάρους στα εργοστάσια προκατασκευής βρίσκεται στην επεξεργασία του νερού και της καθαρότητάς του (Εικόνα 7-5).



Εικόνα 7-5: Επανάκτηση υλικών από υπολείματα σκυροδέματος, κλειστό κύκλωμα (Εφραιμίδης, 2008).

Το πλεόνασμα νερού, το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατ' ευθείαν στην ανάμιξη, διυλίζεται και μετατρέπεται σε καθαρό νερό, το οποίο χρησιμοποιείται μέσα στο εργοστάσιο, ή μετά από μια τελική επεξεργασία οδηγείται στο δίκτυο αποχέτευσης. Η λάσπη, αν είναι κατάλληλη, χρησιμοποιείται στο συγκρότημα αναμίξεως, έτσι ώστε να δημιουργείται ένα κλειστό κύκλωμα. Αν η ποσότητα της παραγόμενης λάσπης είναι περισσότερη από την απαιτούμενη, τότε η εγκατάσταση εξοπλίζεται με μία φιλτρόπρεσα (Εικόνα 7-6) (Εφραιμίδης, 2008).



Μεταφερόμενο συγκρότημα ανακύκλωσης επί μεταλλικού ελκίθρου (κατασκ. Bibko)



Συγκρότημα ανακύκλωσης με δύο αποστραγγιστικούς κοχλίες παραγωγής δύο προϊόντων για κονιάματα και άνοδρο ασβέστιο (κατασκ. Bibko)



Συγκρότημα πλύσεως αδρανών Αιγίνης τριών διαβαθμίσεων για το σκυρόδεμα των λεκανών ηλεκτρολύσεως εργοστασίου Πεσιντέ (κατασκ. Bibko)

Εικόνα 7-6: Ανακύκλωση υπολειμμάτων σκυροδέματος σε εργοστάσιο παραγωγής προκατασκευασμένων στοιχείων (Εφραιμίδης, 2008).

7.6. Οικονομική θεώρηση.

Η ανακύκλωση σκυροδεμάτων έχει αποδειχθεί, ότι είναι κερδοφόρα επιχείρηση, αλλά έχει ορισμένα όρια, τα οποία απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Αυτά είναι: το κόστος μεταφοράς, το οποίο υποχρεώνει την αγορά να προσανατολίζεται προς τις αστικές περιοχές, πρέπει να διατηρείται σε χαμηλές τιμές. Η αγορά για ανακυκλωμένα υλικά επηρεάζεται από τις προδιαγραφές των χρηστών και από διάφορες προκαταλήψεις και επιφυλάξεις. Τελικά, η διαθεσιμότητα των τροφοδοτούμενων στο συγκρότημα υλικών προσδιορίζεται από το μέγεθος των κατεδαφίσεων, η οποία κατά κανόνα γίνεται μέσα σε παλαιότερες και μεγαλύτερες πόλεις.

Οι τιμές κόστους διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τις συνθήκες, που επικρατούν στην περιοχή. Η τεχνολογική βελτίωση της παραγωγής και τα κίνητρα που πρέπει να παρέχει η διοίκηση για την τόνωση της ανακύκλωσης θα συντελέσουν στη μείωση του κόστους εκμετάλλευσης. Στο σημείο αυτό απαιτείται η εκπόνηση σχετικής οικονομοτεχνικής μελέτης.

Δίνονται ορισμένα ενδεικτικά μεγέθη από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η επένδυση για την εγκατάσταση συγκροτήματος ανακύκλωσης εξαρτάται από το μέγεθος και τη σύνθεση της εγκατάστασης. Σύμφωνα με αμερικανικές πηγές εκτιμάται σε \$4,40 έως \$8,80 ανά τόνο ετήσιας παραγωγής. Το κόστος επεξεργασίας του συγκροτήματος

ανακύκλωσης κυμαίνεται μεταξύ \$2,76 και \$6,61 ανά τόνο ανάλογα με το μέγεθος της παραγωγής και τις φάσεις επεξεργασίας. Η μέση ικανότητα ενός μόνιμου συγκροτήματος ανακύκλωσης είναι περίπου 150.000 τόνοι το χρόνο. Για το συγκρότημα αυτό η επένδυση εκτιμάται σε \$660.000 έως \$1.320.000 (Εφραιμίδης, 2008).

7.7. Η ανακύκλωση στην Ελλάδα.

Στην Ελλάδα η ανακύκλωση σκυροδέματος είναι σε ερευνητικό στάδιο. Στη συνέχεια αναλύονται και σχετικά ερευνητικά αποτελέσματα από το Α.Π.Θ.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από κατεδαφίσεις συνήθως δεν είναι καθαρά, αφού περιέχουν άλατα, κεραμικά, άμμο, σκόνη, ξυλεία, πλαστικά, κλπ. Αν επιπλέον, λαμβάνονται από ένα κέντρο ανακύκλωσης, συλλέγονται από διάφορα κτίρια με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ανομοιογένεια και ασταθείς και με μεγάλες διαφοροποιήσεις ιδιότητες. Αυτό δυσκολεύει τη χρήση τους στην παραγωγή ενός νέου σκυροδέματος. Αντίθετα, τα ανακυκλωμένα που προέρχονται από βιομηχανίες, είναι σχετικά καθαρά με προσκολλημένο σε αυτά μόνο το παλιό τσιμέντο και αφού προέρχονται από τον ίδιο τύπο σκυροδέματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια, δηλ. λιγότερο διαφοροποιημένες και περισσότερο σταθερές ιδιότητες.

Έχει δε γίνει αρκετή πειραματική έρευνα στο παρελθόν για τον σχεδιασμό των μιγμάτων και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους, αλλά η ανθεκτικότητά τους και, κυρίως, η υδατοπερατότητα, η υδατοαπορροφητικότητα, η ενανθράκωση, η συστολή ξήρανσης, καθώς και η αντοχή σε ψύξη-απόψυξη έχουν μελετηθεί πολύ λίγο. Αναφορικά με την αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες υπάρχουν ελάχιστες εργασίες.

Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα δεν ανακυκλώνονται εύκολα, είναι δυνατή όμως η επεξεργασία και η επαναχρησιμοποίησή τους ως ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σε έργα υποδομής όπως π.χ. στη διαμόρφωση οριζόντιων επιφανειών και υλικών οδοποιίας και σπανιότερα σε άλλα έργα, όπως σε χώρους στάθμευσης θρυμματισμένο τσιμέντο μπορεί να αντικαταστήσει σε ποσοστό 20% το αμμοχάλικο (Περυσινάκη, 2012) καθώς επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην προστασία ακτογραμμών (Κανιτάκη, 2009).

Επίσης, για τις προκατασκευασμένες πλάκες σκυροδέματος (Platenbau) προωθείται το σύστημα της ανακύκλωσης στοιχείων (elemental recycling) ως αποτέλεσμα ερευνητικού προγράμματος που χρησιμοποιεί αυτές τις πλάκες σε νέο τύπο κατοικιών. Αξιοποιούνται μόνο εσωτερικά πάνελα καθώς τα εξωτερικά έχουν υποστεί επεξεργασία με ένα ειδικό μονωτικό που σήμερα θεωρείται καρκινογόνο. Οι πλάκες σταθεροποιούνται μεταξύ τους με ατσάλινες λωρίδες και τα κενά σύνδεσης

συμπληρώνονται με τσιμέντο. Σύμφωνα με το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα η κατασκευή ενός σπιτιού από επαναχρησιμοποιημένες πλάκες είναι κατά 30 έως 40% φθηνότερη από την κατασκευή με εξ ολοκλήρου καινούργια υλικά ενώ ταυτόχρονα εξοικονομούνται τα καύσιμα που χρειάζονται για τη θραύση του σκυροδέματος σε χαλίκι. Δύο αρνητικά στοιχεία αυτής της επανάχρησης είναι ότι οι τοίχοι από σκυρόδεμα δεν επιτρέπουν επεμβάσεις πάνω τους εύκολα όπως π.χ. τρύπημα με καρφί ενώ το μεγάλο βάρος των πανέλων (5 τόνοι το καθένα) απαιτεί γερανό για την επανατοποθέτησή τους.

Τέλος, από το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι δυνατή η εξαγωγή του οπλισμού ο οποίος μπορεί να λιώσει και να αναδιαμορφωθεί για νέες χρήσεις (Περυσινάκη, 2012).

8. "ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΕΣ" ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.

8.1. Τεχνικά "οικολογικά" έργα σε Ελλάδα και εξωτερικό.

8.1.1. Κατασκευή φράγματος από τεφροσκυρόδεμα, Πλατανόβρυση Δράμας (Ελλάδα).

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης (Εικόνα 8-1) στον Νομό Δράμας βρίσκεται σε απόσταση 400 km περίπου από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Αποτελεί το ενδιάμεσο από τα τρία τμήματα του συστήματος των έργων της ΔΕΗ στον ποταμό Νέστο (ΥΗΕ Θησαυρού-Πλατανόβρυσης-Τεμένους). Η κατασκευή του διήρκεσε 18 μήνες, χρονικό διάστημα που θεωρείται εξαιρετικά σύντομο για την κατασκευή έργων τέτοιας φύσης και τάξης μεγέθους. Είναι από τα υψηλότερα φράγματα της Ευρώπης (95 m), που είναι κατασκευασμένα με κυλινδρούμενο τεφροσκυρόδεμα και με τόσο υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα (Περυσινάκη, 2012), περίπου 80%. Δηλαδή η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε για το σκυρόδεμα του φράγματος είχε αναλογία περίπου 225 kg προς 50 kg τσιμέντου ανά m³ σκυροδέματος (Εσκίογλου). Ο συνολικός κύριος όγκος του φράγματος, μαζί με τον τοίχο αντιστήριξης, είναι 450.000 m³, ο δε όγκος των στοιχείων όψεως – στην κατασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν 175 kg/m³ ιπτάμενης τέφρας – είναι 11.330 m³. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν περίπου 110.000 τόνοι κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας, η οποία μεταφέρθηκε από τη μονάδα επεξεργασίας της τέφρας στην Πτολεμαΐδα με ειδικά συλοφόρα αυτοκίνητα (Περυσινάκη, 2012). Η ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος έγινε τον Μάρτιο του 1997 (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-1: Το οικολογικό φράγμα της Πλατανόβρυσης στο Νέστο (Περυσινάκη, 2012).

Το υδροηλεκτρικό φράγμα της Πλατανόβρυσης είναι το πρώτο τέτοιου τύπου στην Ελλάδα (RCC, Roller Compacted Concrete). Παρότι υπήρχε κόστος λόγω της μεταφοράς της ιπτάμενης τέφρας σε απόσταση 400 km, η συνολική κατασκευή του φράγματος ήταν οικονομικά συμφέρουσα, συγκρινόμενη με συμβατική κατασκευή – από κονίες. Μετά από τόσα χρόνια από τότε που ολοκληρώθηκε το έργο, δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα. Έτσι λοιπόν αντί αυτές οι ποσότητες τέφρας να απορριφθούν στο περιβάλλον με τα γνωστά άσχημα αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης και κατά συνέπεια την παραγωγή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας (Εσκίογλου). Για την ακρίβεια, το φράγμα κατασκευάστηκε με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, και διαθέτει δύο υδροηλεκτρικά εργοστάσια συνολικής ισχύος 100 MW (2x50 MW) (Καραστεργίου, 2009). Το φράγμα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο βαρύτητας RCC που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα από την ΑΕΓΕΚ, σύμφωνα με την μελέτη που εκπόνησε η ΔΕΗ, ως ιδιοκτήτης του ΥΗΕ Πλατανόβρυσης.

Όσον αφορά το RCC, είναι ένα ύφυγρο μίγμα το οποίο προκύπτει από την βίαιη ανάμιξη διαβαθμισμένων αδρανών υλικών με υδραυλικές κονίες και μικρή ποσότητα νερού ώστε να παρουσιάζει μηδενική κάθιση. Γι' αυτόν τον λόγο τόσο η διάστρωσή του όσο και η συμπύκνωσή του γίνεται με χωματοουργικό εξοπλισμό, ενώ τα αποτελέσματα αντοχών που αναπτύσσει είναι εφάμιλλα των συμβατικών

σκυροδεμάτων και συνεχίζουν να βελτιώνονται έως την ηλικία των 360 ημερών αγγίζοντας τα 450 kg/cm^2 σε θλίψη.

Η υψηλή περιεκτικότητα του RCC Πλατανόβρυσης σε υδραυλικές κονίες (275 kg/m^3) το κατατάσσει στην κατηγορία των πλουσίων σκυροδεμάτων σε πάστα. Οι υδραυλικές κονίες αποτελούνται από 18% τσιμέντο τύπου I-45 και 82% ιπτάμενη τέφρα. Αυτή η σχέση 4.5:1 ιπτάμενης τέφρας : τσιμέντου θεωρείται από τις μεγαλύτερες που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα στον κόσμο και καθιστά την τέφρα το βασικότερο συνδετικό υλικό του RCC. Συνεπώς στο φράγμα της Πλατανόβρυσης οι φυσικές και χημικές ιδιότητες της τέφρας είναι οι καθοριστικοί παράγοντες της συμπεριφοράς του RCC.

Μετά από εργαστηριακές έρευνες προέκυψε το συμπέρασμα ότι η τέφρα ενεργοποιούμενη με υψηλή άλεση σε μία λεπτότητα κατά Blaine μεγαλύτερη των $4.500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ εμφανίζει υδραυλικές ιδιότητες και μπορεί να αξιοποιηθεί προστιθέμενη στα μίγματα σκυροδεμάτων ως υποκατάστατο του τσιμέντου. Για τον λόγο αυτόν η εταιρεία ΑΕΓΕΚ μέσα στον ευρύτερο χώρο του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, κατασκεύασε για λογαριασμό της ΔΕΗ ειδικό συγκρότημα άλεσης και επεξεργασίας, όπου η τέφρα εκτός από την λειοτριβήσή της υφίσταται και έναν υδροψεκασμό ώστε το ελεύθερο CaO να περιορίζεται κάτω του 3%. Το εν λόγω εργοστάσιο έχει δυνατότητα παραγωγής 500 τόνων ημερησίως επεξεργασμένης τέφρας, μετά την ολοκλήρωση όμως του φράγματος της Πλατανόβρυσης σταμάτησε η λειτουργία του και έκτοτε παραμένει αναξιοποίητο.

Χαρακτηριστικό είναι ότι ο συνολικός όγκος τεφροσκυροδεμάτων του φράγματος, που ανέρχεται στις 460.000 m^3 , διαστρώθηκε εντός 293 ημερών.

Η μέση ημερήσια παραγωγή και τοποθέτηση τεφροσκυροδέματος στο φράγμα ήταν 1.570 m^3 ανά ημέρα με μέγιστη τοποθέτηση την 1/5/1996 (4.600 m^3).

Η χρήση για πρώτη φορά στην Ελλάδα ιπτάμενης τέφρας για την κατασκευή ενός μεγάλου τεχνικού έργου και η εμπειρία που αποκτήθηκε είναι πράγματα πολύ σημαντικά για την προώθηση της μελλοντικής αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας από την οποία θα μπορούσαν να προκύψουν οφέλη οικονομικά (μείωση κόστους κατασκευών και εξοικονόμηση ενέργειας), αλλά και περιβαλλοντικά. Δυστυχώς η εμπειρία αυτή έχει μείνει ως σήμερα ανεκμετάλλευτη.

8.1.2. Οι πύργοι "Κάστωρ και Πολυδεύκης", (Γερμανία).

Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής χρήσης ιπτάμενης τέφρας στην Γερμανία αποτελούν οι δίδυμοι πύργοι Castor & Pollux (Κάστωρ και Πολυδεύκης) (Εικόνα 8-2). Ο ψηλότερος πύργος (Pollux) έχει ύψος 130 m. Και οι δύο πύργοι χτίστηκαν πάνω σε κοινή βάση θεμελίωσης από σκυρόδεμα περιεκτικότητας 180 kg τσιμέντου και 120 kg ιπτάμενης τέφρας/ m^3 . Το επάνω μέρος της βάσης θεμελίωσης σχεδιάστηκε για

να έχει μεγάλη αντίσταση σε τριβή και περιέχει 280 kg τσιμέντου Portland και 70 kg ι.τ./m³. Οι εσωτερικοί τοίχοι των κτιρίων περιέχουν 400 kg τσιμέντου υψηλής αντοχής (B65) και 100 kg ι.τ./m³, ενώ οι κολώνες κατασκευάστηκαν με την χρήση υψηλής αντοχής τσιμέντου B115 και ποσότητας 470 kg, 120 kg ι.τ. και 35 kg μικροσίλικα ανά m³. Η αντοχή των κατακόρυφων στοιχείων ξεπερνά τα 130 N/mm² στις 90 μέρες (Καραστεργίου, 2009).



Εικόνα 8-2: Οι πύργοι 'Κάστωρ και Πολυδεύκης', (Γερμανία).

8.1.3. Κτίριο The Solaire, (Νέα Υόρκη, ΗΠΑ).

Για την κατασκευή του κτιρίου Solaire στο Μανχάταν της Νέας Υόρκης χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα (Εικόνα 8-3). Το Solaire αποτελείται από 27 ορόφους, έχει 293 διαμερίσματα και για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν φιλικές τεχνικές άλλους το περιβάλλον. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν περίπου 7645,5 m³ σκυροδέματος με ποσοστό 18% ιπτάμενης τέφρας για την κατασκευή του μεγαλύτερου μέρους του κτιρίου. Άλλους χρησιμοποιήθηκε 40% ιπτάμενη τέφρα για την κατασκευή των θεμελίων, όπου η τέφρα λειτούργησε ως ρυθμιστικός παράγοντας στη θερμοκρασία ενυδάτωσης των θεμελίων και του σκυροδέματος. Η αποπεράτωση του κτιρίου έγινε το 2003 (Καραστεργίου, 2009).



Εικόνα 8-3: Κτίριο The Solaire, (Νέα Υόρκη, ΗΠΑ).

8.1.4. Φράγμα Beni Haroun, (Αλγερία).

Για την κατασκευή του φράγματος Beni Haroun στον ποταμό El Kabir, του πρώτου φράγματος που κατασκευάστηκε στην Αλγερία με τη μέθοδο κυλινδρούμενου σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 63%. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν 82 kg/m^3 τσιμέντο τύπου II και 143 kg/m^3 ιπτάμενη τέφρα τύπου F (πυριτική τέφρα). Κατασκευάστηκε κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς, και η αποπεράτωσή του έγινε το 2000. Έχει ύψος 118 m, ενώ το μήκος του και η χωρητικότητά του ανέρχονται σε 714 m και 963 εκατ. m^3 αντίστοιχα (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-4: Φράγμα Beni Haroun, (Αλγερία).

8.1.5. Ο αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, (Αυστραλία).

Στα βόρεια άλλους Άλλους Νότιας Ουαλίας στην Αυστραλία κατασκευάστηκε ο άλλους αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, ο οποίος αποτελείται από οδόστρωμα 4 λωρίδων και 54 γέφυρες, και κατασκευάστηκε κυρίως για την εξοικονόμηση χρόνου μετακίνησης και την βελτίωση άλλους ασφάλειας των μεταφορών. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό περίπου 30%, και συγκεκριμένα, για τη κατασκευή των 28.5 km, απαιτήθηκαν 230.000 m³ σκυροδέματος, στο οποίο ενσωματώθηκαν 54.000 τόνοι τσιμέντου και 22.000 τόνοι ιπτάμενης τέφρας. Η συνεχής και γρήγορη μεταφορά τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας επιτεύχθηκε με οδικά και σιδηροδρομικά μέσα (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-5: Αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, (Αυστραλία).

8.1.6. Φράγμα Νέας Βικτωρίας, (Αυστραλία).

Στην Δυτική Αυστραλία ολοκληρώθηκε το 1991 το φράγμα New Victoria, το οποίο κατασκευάστηκε με την μέθοδο κυλινδρούμενου σκυροδέματος ενσωματώνοντας 66% ιπτάμενη τέφρα. Ειδικότερα, για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν 79 kg/m^3 τσιμέντο τύπου I, και 160 kg/m^3 ιπτάμενη τέφρα τύπου F (πυριτική τέφρα). Το φράγμα έχει ύψος 52 m, 285 m μήκος και χωρητικότητα 10 εκατ. m^3 . Η κατασκευή του έγινε με στόχο την υδρονομή άλλους περιοχής (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-6: Φράγμα Άλλους Βικτωρίας, (Αυστραλία).

8.1.7. Φράγμα Salto Caxias, (Βραζιλία).

Για την κατασκευή φράγματος του Salto Caxias στον Iguacu ποταμό άλλους Βραζιλίας χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με περιεκτικότητα 20% σε ιπτάμενη τέφρα. Οι αναλογίες του μίγματος ήταν 80 kg/m^3 τσιμέντο τύπου II και 20 kg/m^3 ιπτάμενη τέφρα τύπου F, μειώνοντας έτσι το κόστος άλλους κατασκευής κατά 25% σε σύγκριση με ένα γαιόφραγμα. Συμβατικό σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη άλλους μιας όψης του φράγματος ώστε να παρέχει ένα αδιαπέραστο στεγανωτικό παρέμβυσμα. Άλλους χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα σε στρώσεις μεταξύ στρώσεων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα υπό τη μορφή σκαλοπατιών για την κατασκευή άλλους άλλους όψης του φράγματος. Το φράγμα είναι το όγδοο μεγαλύτερο στον κόσμο, με μήκος 1083 m, ύψος 67 m και χωρητικότητα $3600 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε το 1998 (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-7: Φράγμα Salto Caxias, (Βραζιλία).

8.1.8. Σιλό στο Βέλγιο.

Στον σταθμό παραγωγής ενέργειας Genk-Langerlo στο Βέλγιο, κατασκευάστηκαν 5 σιλό αποθήκευσης ιπτάμενης τέφρας χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα που περιείχε ιπτάμενη τέφρα. Κάθε σιλό έχει ύψος 43.6 m, διάμετρο 13 m και 0.45 m πάχος τοιχίου. Για την κατασκευή του σκυροδέματος εφαρμόστηκε η μέθοδος 'gliding mold', όπου ενσωματώθηκαν 80 kg/m^3 ιπτάμενης τέφρας. Η συνολική ποσότητα ιπτάμενης τέφρας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των τοιχίων, συμπεριλαμβανομένων των άνω και κάτω ορόφων ήταν περίπου 1500 m^3 ανά σιλό. Η προσθήκη 120 τόνων ιπτάμενης τέφρας συντέλεσε στη δημιουργία μιας ομαλής και λείας επιφάνειας στο σκυρόδεμα και η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε και σε αρκετούς άλλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-8: Σιλό στο Βέλγιο.

8.1.9. Φράγμα Puylaurent στη Lozère, (Γαλλία).

Το φράγμα Puylaurent στη Lozère της Γαλλίας κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα ειδικό μίγμα σκυροδέματος αποτελούμενο από 60% τσιμέντο και 40% ιπτάμενη τέφρα, προερχόμενη από έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό της Γαλλίας (συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 10000 τόνοι ιπτάμενης τέφρας). Το περιεχόμενο τσιμέντο καθορίστηκε στα 250 kg/m^3 . Είναι ένα από τα μεγαλύτερα κοίλα φράγματα που

χτίστηκαν στη δεκαετία του '90 στην Γαλλία (ολοκλήρωση κατασκευής το 1995). Το μέγιστο ύψος του φράγματος ανέρχεται στα 73 m και το μήκος του στα 220 m (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-9: Φράγμα Puylaurent στη Lozère, (Γαλλία).

8.1.10. Ανατολική Γέφυρα, (Δανία).

Για την σύνδεση της Κοπεγχάγης με την κυρίως χώρα της Δανίας και την Κεντρική Ευρώπη, έγινε το οδικό έργο "Great Belt" που συνδέει το νησί Zealand με το νησί Funen. Μέρος του έργου, αποτελεί και η ανατολική γέφυρα (East Bridge), συνολικού μήκους 6790 m. Πρόκειται για κρεμαστή γέφυρα, και είναι μια από τις γέφυρες με το μεγαλύτερο άνοιγμα από πυλώνα σε πυλώνα, μήκους 1624 m. Οι πυλώνες στους οποίους αναρτήθηκε το άνοιγμα έχουν ύψος 254 m και κατασκευάστηκαν με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, το οποίο περιείχε τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα (47 kg/m^3) και *microsilica* ως υλικά του σκυροδέματος. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του έργου είναι ο χαμηλός λόγος νερού-τσιμέντου. Το έργο σχεδιάστηκε για να έχει διάρκεια ζωής 100 χρόνια. Το 1997 έγιναν τα εγκαίνια, ενώ το 1998 δόθηκε στην κυκλοφορία (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-10: Ανατολική Γέφυρα, (Δανία).

8.1.11. Πύργος ψύξης σταθμού παραγωγής ενέργειας, (Γερμανία).

Στο Niedraubem της Γερμανίας κατασκευάστηκε πύργος ψύξης για τις ανάγκες του νέου ενεργειακού σταθμού χρησιμοποιώντας υψηλής αντοχής σκυρόδεμα με μεγάλη αντίσταση σε οξεία που περιείχε και ποσότητα ιπτάμενης τέφρας. Για το σύνολο της κατασκευής του χρειάστηκαν 32.000 m³ σκυροδέματος, εκ των οποίων 17.650 m³ ήταν υψηλής αντοχής σκυρόδεμα. Πιο αναλυτικά, για την παραγωγή 1 m³ σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν περίπου 230 kg τσιμέντου Portland, 65 kg ιπτάμενης τέφρας, 33 kg silica fume, 3.200 kg αδρανών έως 16 mm διαμέτρου και 120 λίτρα νερού. Ο πύργος έχει συνολικό ύψος 200 m, άνω διάμετρο 86 m και κάτω διάμετρο 136 m και είναι ένας από τους μεγαλύτερους πύργους ψύξης παγκοσμίως (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-11: Πύργος ψύξης σταθμού παραγωγής ενέργειας, (Γερμανία).

8.1.12. Ο πύργος Πικάσο, (Ισπανία).

Ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιήθηκε και για την κατασκευή του πύργου του Πικάσο στην Μαδρίτη. Ο πύργος αυτός έχει ύψος 171 m, είναι ο υψηλότερος πύργος στην Μαδρίτη και ένας από τους υψηλότερους σε όλη την Ισπανία. Κατασκευάστηκε με σκυρόδεμα το οποίο περιέχει διάφορα είδη προσμίκτων, τσιμέντου, και ιπτάμενης τέφρας. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 11.000 m³ σκυροδέματος. Η συγκέντρωση των προσμίκτων στο σκυρόδεμα διαφέρει ανάλογα με το ύψος στο οποίο χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν πριν την κατασκευή του πύργου, έδειξαν ότι οι κυριότεροι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να εξασφαλίσουν ικανοποιητική άντληση του σκυροδέματος και να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή, είναι η ποσότητα της περιεχόμενης ιπτάμενης τέφρας, τα ειδικά πρόσθετα και ο ρυθμός ενυδάτωσης των ελαφρών αδρανών (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-12: Ο πύργος Πικάσο, (Ισπανία).

8.1.13. Κυματοθραύστες στο Cobbolds Point, (Μεγάλη Βρετανία).

Το 1999 κατασκευάστηκαν 4 κυματοθραύστες που εκτείνονταν σε απόσταση 100 m μέσα στη θάλασσα στο Cobbolds Point της Μεγάλης Βρετανίας. Αποτελούνται από 560 προκατασκευασμένες μονάδες σκυροδέματος με συνολικό βάρος 4.000 τόνων. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό μίγμα από αδρανή και ιπτάμενη τέφρα. Ειδικότερα η χρήση της ιπτάμενης τέφρας αποσκοπούσε στη βελτίωση της αντοχής της κατασκευής. Οι κυματοθραύστες κατασκευάστηκαν για να αντιστρέψουν τις επιδράσεις της παραλιακής διάβρωσης από τη Βόρεια Θάλασσα καθώς και την παράνομη αφαίρεση των διακοσμητικών πετρών και βράχων από ερασιτέχνες κηπουρούς (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-13: Κυματοθραύστες στο Cobbolds Point, (Μεγάλη Βρετανία).

8.1.14. Φράγμα Klong Tha Dan, (Ταϊλάνδη).

Το φράγμα Klong Tha Dan στον Nakon Nayok ποταμό της Ταϊλάνδης είναι το μεγαλύτερο παγκοσμίως φράγμα σε όγκο. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν 5 εκατ. m^3 κυλινδρούμενου σκυροδέματος που περιείχε 52% ιπτάμενη τέφρα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν $90 \text{ kg}/m^3$ τσιμέντο και $100 \text{ kg}/m^3$ ιπτάμενη τέφρα τύπου F. Το έργο αποτελείται από 2 RCC φράγματα, ύψους 93 m και μήκους 2.720 m, και η συνολική του χωρητικότητα ανέρχεται στα 224 εκατ. m^3 . Η κατασκευή του

ολοκληρώθηκε το 2004, έχοντας σαν συνολικό κόστος 143 εκατ. δολάρια (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-14: Φράγμα Klong Tha Dan, (Ταϊλάνδη).

8.1.15. Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, (ΗΠΑ).

Το νοσοκομείο Boulder Community Foothills στο Κολοράντο, είναι το πρώτο νοσοκομείο στις Η.Π.Α. στο οποίο απονεμήθηκε πιστοποίηση LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) για τις περιβαλλοντικές καινοτομίες που διαθέτει. Κατά την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα στο σκυρόδεμα με σκοπό την αντοχή μεγάλης διάρκειας και την βελτίωση της αποδοτικότητας του κτιρίου. Συγκεκριμένα, στο σκυρόδεμα προστέθηκε ιπτάμενη τέφρα, το ποσοστό της οποίας κυμαινόταν μεταξύ 0%-25%, που εκτός των άλλων, βοήθησε και στην έγκαιρη αποπεράτωση των εργασιών που προέβλεπε ο χρονικός προγραμματισμός του έργου. Το 60 κλινών νοσοκομείο με εμβαδόν ~18.580 m² και 14,02 m ύψους ολοκληρώθηκε το 2003 με κόστος 53 εκατ. δολαρίων (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-15: Νοσοκομείο της κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, (ΗΠΑ).

8.1.16. Φράγμα Olivenhain, Καλιφόρνια, (ΗΠΑ).

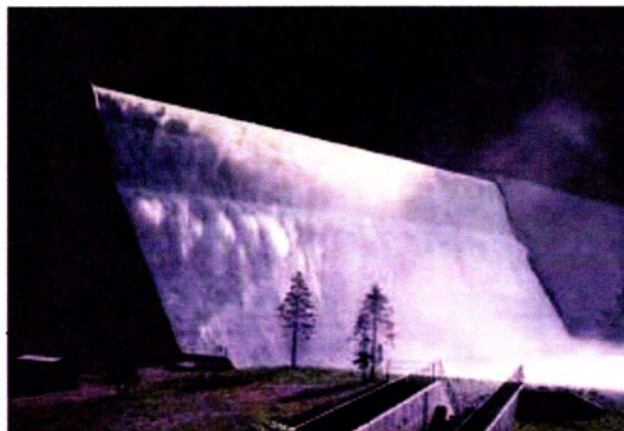
Η αποπεράτωση του φράγματος Olivenhain στην Καλιφόρνια έγινε το 2003. Είναι το πρώτο φράγμα στην Καλιφόρνια όπου χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία κυλινδρούμενου σκυροδέματος με 62% περιεχόμενη ιπτάμενη τέφρα, καθώς και το υψηλότερο φράγμα στην Βόρεια Αμερική. Για την κατασκευή του φράγματος χρησιμοποιήθηκαν 993.921,3 m³ κυλινδρούμενου σκυροδέματος με αναλογίες 74 kg/m³ τσιμέντο τύπου II και 121 kg/m³ ιπτάμενη τέφρα τύπου F. Έχει ύψος 94 m, μήκος 778 m και χωρητικότητα 30 εκατ. m³. Το φράγμα δεν βρίσκεται εντός της ροής ενός ποταμού, αλλά εκτρέπεται νερό από άλλες περιοχές προκειμένου να αποταμιευτεί στο φράγμα (www.flyash.gr).



Εικόνες 8-16 α,β: Φράγμα Olivenhain, Καλιφόρνια, (ΗΠΑ).

8.1.17. Φράγμα Upper Stillwater, Γιούτα, (ΗΠΑ).

Το φράγμα Upper Stillwater στο Rock Creek της Γιούτα ολοκληρώθηκε το 1987 και κατασκευάστηκε με την τεχνική του κυλινδρούμενου σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε περιείχε 32% τσιμέντο Portland και 68% ιπτάμενη τέφρα (με αναλογίες 79 kg/m³ τσιμέντο και 173 kg/m³ ιπτάμενη τέφρα τύπου F). Κατασκευάστηκε κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς, και οι διαστάσεις του είναι: ύψος 91 m, μήκος 815 m και χωρητικότητα 37 εκατ. m³ (www.flyash.gr).



Εικόνα 8-17: Φράγμα Upper Stillwater, Γιούτα, (ΗΠΑ).

8.1.18. Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, (Ελλάδα).

Υποκατηγορία σκωριοτσιμέντου χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των υποθαλάσσιων τμημάτων της γέφυρας του Ρίου-Αντιρρίου. Η κατασκευή της ζεύξης Ρίου-Αντιρρίου εκτιμάται ως ένα από τα δυσκολότερα και πλέον πρωτοποριακά τεχνικά έργα στον κόσμο. Το σκυρόδεμα των υποθαλάσσιων τμημάτων απαιτούσε τσιμέντο με αυξημένο ποσοστό σκωρίας υψικαμίνων ώστε να είναι ανθεκτικό στην διάβρωση που προκαλούν τα άλατα του θαλασσινού νερού (Ecocement). Με λίγα λόγια, η σκωρία «παγιδεύει» ένα μεγάλο ποσοστό των ελεύθερων χλωρίων που ενδέχεται να βρεθούν στο σκυρόδεμα, και εμποδίζει την αντίδρασή τους με το οξυγόνο, με τελικό αποτέλεσμα την αδυναμία περαιτέρω οξείδωσης του οπλισμού. Επίσης, τα τσιμέντα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πρέπει να έχουν χαμηλή και ελεγχόμενη θερμότητα ενυδάτωσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δυνατότητα ρηγμάτωσης λόγω ξήρανσης των ιδιαίτερα ογκωδών τμημάτων. Τελικά, τα τσιμέντα που επιλέχθηκαν για την κατασκευή της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου είναι τα παρακάτω (Χαρικιοπούλου-Cordona, Λυκούδης και Παπανικόλας):

- BFS CEM III/A 42.5 με 60% σκωρία (slag) που χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα σκυροδέματα της Κύριας Γέφυρας, και κυρίως στα θεμέλιά της, καθώς και στις γέφυρες πρόσβασης, και παρασκευάζεται ειδικά για την Κοινοπραξία Γέφυρα,
- Portland CEM I 52.5 με χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης που χρησιμοποιείται κυρίως στο κατάστρωμα της γέφυρας και εν μέρει σε όλα τα άλλα σκυροδέματα της τάξης C60/75,
- CEM II BM 32.5 για όλες τις υπόλοιπες κατασκευές.



Εικόνα 8-18: Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, (Ελλάδα) (Ecocement).

8.2. Εφαρμογές για την παραγωγή “πράσινου” σκυροδέματος.

8.2.1. Η αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας στη βιομηχανία TITAN, (Ελλάδα).

Έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στα δομικά υλικά όχι μόνο ως ποζολανικό πρόσθετο (μέχρι 10%) αλλά και ως συστατική πρώτη ύλη σε μεγαλύτερα ποσοστά καθώς αυτή η προοπτική παρουσιάζει και εξαιρετικά οικονομικά πλεονεκτήματα λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής αυτών των δομικών υλικών, αφενός μεν λόγω της φθηνότερης πρώτης ύλης, αφετέρου δε λόγω εξοικονόμησης ενέργειας (άλωση, έψηση) από την προσθήκη αυτής της πρώτης ύλης στο τελευταίο στάδιο της παραγωγής.

Ο Στιβανάκης (2003) έχει καταλήξει στο συμπέρασμα ότι «η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης αποδεικνύεται ότι έχει όλα τα χαρακτηριστικά ώστε να θεωρηθεί κατεργασμένη πρώτη ύλη, η οποία μπορεί να συνεργαστεί τουλάχιστον μέχρι 30% με προϊόντα της τσιμεντοβιομηχανίας για την παραγωγή νέων προϊόντων, τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες τεχνολογικές ιδιότητες»-πλεονεκτήματα, όπως:

- Διατήρηση υψηλών αντοχών και βελτίωση των τεχνολογικών ιδιοτήτων μέχρι προσθήκης έως 30% ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης.
- Παραπλήσια ρεολογική συμπεριφορά με τα τσιμέντα, με το πλεονέκτημα ότι προσφέρει δυνατότητα παρέμβασης στο ιξώδες χωρίς επιπτώσεις στις αντοχές.
- Αυξημένη μακροχρόνια αντίσταση στην προσβολή του σκυροδέματος από διαβρωτικά ιόντα Mg^{+2} , SO^{-2} .
- Μεγάλο οικονομικό όφελος από την υποκατάσταση μέρους των πρώτων υλών και την εξοικονόμηση ενέργειας και παράλληλα περιβαλλοντικά οφέλη.

Μέχρι σήμερα η έρευνα έχει οδηγήσει στην αξιοποίηση του 10-15% της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης, για την παραγωγή δομικών υλικών με προσθήκη ποσοστού της, κατά 10-20% σε τσιμέντα Π II/35 (Portland Ελληνικού τύπου). Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε και συνεχίζεται, εκτός από το επιστημονικό ενδιαφέρον και τους δρόμους που άνοιξε στην μελέτη των δομικών υλικών είχε άμεση εφαρμογή στις βιομηχανίες τσιμέντου, και οδήγησε στην παραγωγή νέων τύπων υλικών. Τα νέα προϊόντα μπορούν να εφαρμοστούν και σε ευρύτερους τομείς των κατασκευών όπως κατασκευή μεγάλων έργων, όπου η ανάδευση δεν είναι δυνατή και η συμπύκνωση του υλικού είναι τυχαία, χρήση ως υλικό οδόστρωσης σε πολύ υψηλά ποσοστά προσθήκης κ.α.

Είχε επίσης θετικές επιπτώσεις στην μείωση των εξόδων λειτουργίας του ενεργειακού σταθμού Μεγαλόπολης, καθώς και στη μείωση του κόστους παραγωγής του τσιμέντου και συνέβαλε στην εύρυθμη και απρόσκοπτη λειτουργία βιομηχανιών όπως ο TITAN, σε μια περιοχή με τους υψηλότερους ρυθμούς αποβιομηχάνισης (Περυσινάκη, 2012).

8.2.2. Σκυρόδεμα με μεγάλο όγκο ιπτάμενης τέφρας, σκυρόδεμα Ecosmart, (Καναδάς).

Η οργανωτική επιτροπή της Ecosmart υποστηρίζει την έρευνα με τη χρήση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών και υλικών αντικατάστασης του τσιμέντου. Στη βάση projects επίδειξης, με τη χρήση μεγάλων όγκων υλικών αντικατάστασης του τσιμέντου, οι εκπομπές CO₂ ελαττώθηκαν. Παρόλο που το project στοχεύει στην αξιοποίηση διαφορετικών τύπων υλικών αντικατάστασης, όπως τέφρα ως παραπροϊόν καύσης, φυσικές ποζολάνες, τέφρα φλοιού ρυζιού, σιδηροπυρίτιο ή σκωρία υψικαμίνου, κυρίως εστιάζει στην ιπτάμενη τέφρα. Αυτή είναι το πιο συνηθισμένο και το πιο εύκολα διαθέσιμο υλικό πλήρωσης στον Καναδά. Με σκυρόδεμα που περιέχει μεγάλο όγκο σε ιπτάμενη τέφρα (45%) είναι δυνατόν να παραχθεί σκυρόδεμα αντοχής τάξης C20/25 με ένα περιεχόμενο σε τσιμέντο Portland μόνο 165 kg/m³.

Το project συνεισέφερε σε αύξηση στη χρήση μέσου ποσοστού ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα στον Καναδά από 15% το 1999, σε 25% το 2002 και τα κύρια συμπεράσματά του συνοψίζονται στα εξής (Περυσινάκη, 2012):

- Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα γενικά μειώνει την διαπερατότητα και έτσι η διείσδυση ιόντων χλωρίου και η επιφανειακή αντίσταση μειώνονται.
- Επιπροσθέτως, οι απαιτήσεις σε νερό μειώνονται εξαιτίας της βελτίωσης στην πλαστικότητα και την εργασιμότητα του φρέσκου σκυροδέματος.
- Απαιτείται μικρή αναλογία νερού/συνδετικής ουσίας ώστε να επιτυγχάνεται ανθεκτικότητα-διάρκεια ζωής και επιπλέον απαιτούνται ενδεχομένως μεγαλύτερες περίοδοι ωρίμανσης.
- Η κατά 50% αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα είναι κερδοφόρα, σε ό,τι αφορά το κόστος, την εκτέλεση και την απόδοση. Ωστόσο, εξήχθη και το συμπέρασμα ότι ακόμα υπάρχουν πολιτικά, τεχνολογικά και οικονομικά εμπόδια.
- Για το σκυρόδεμα τα κύρια εμπόδια είναι ο μεγαλύτερος χρόνος πήξης, η πιο αργή ανάπτυξη αντοχής, ο χρόνος ωρίμανσης και οι αβεβαιότητες έναντι ενανθράκωσης και της αντοχής σε ψύξη-απόψυξη.
- Τέλος, οι διαφοροποιήσεις στην ποιότητα της ιπτάμενης τέφρας, το επιπλέον κόστος για την μεταφορά και την αποθήκευσή της, το χρώμα των επιφανειών του σκυροδέματος και η έλλειψη οδηγιών και προτύπων ενδεχομένως να αποτελέσουν εμπόδια στην εμπορική αξιοποίηση σκυροδέματος με υψηλό περιεχόμενο σε ιπτάμενη τέφρα.

8.2.3. Πράσινο σκυρόδεμα με χρήση οξειδίου του μαγνησίου.

Ο Νικόλαος Βλασόπουλος, διδάκτορας και συνεργάτης του Imperial College του Λονδίνου, έχει ανακαλύψει ένα νέο είδος σκυροδέματος, το οποίο παρασκευάζεται μέσω διαδικασιών που περιορίζουν ως και 85% τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Υπό προϋποθέσεις, μάλιστα, το υλικό αυτό δύναται να έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ως προς το διοξείδιο του άνθρακα, δηλαδή να μην απελευθερώνει CO₂ κατά την παραγωγή του.

Μάλιστα, το περιοδικό Technology Review του MIT συμπεριέλαβε το τσιμέντο της Novacem στις δέκα αναδυόμενες τεχνολογίες για το 2010, ενώ επίσης ανακηρύχθηκε καλύτερη καινοτομία στο συνέδριο ενεργειακών τεχνολογιών που διοργάνωσε το πρακτορείο Bloomberg. Το περιβαλλοντικό όφελος μεταφράζεται και σε οικονομικό, καθώς τα επόμενα χρόνια η τσιμεντοβιομηχανία θα ενταχθεί στο εμπόριο ρύπων, πληρώνοντας για τους τόνους διοξειδίου του άνθρακα που εκλύει στην ατμόσφαιρα. Η εταιρεία Novacem, που έχει εδώ και λίγα χρόνια ιδρύσει ο Βλασόπουλος μαζί με άλλους ερευνητές, υπόσχεται πως το συγκεκριμένο προϊόν θα κυκλοφορήσει στην αγορά σε λιγότερο από μία πενταετία. Η εταιρεία ήδη σχεδιάζει το πρώτο πιλοτικό εργοστάσιο, το οποίο θα μπορεί να παράγει ετησίως 25.000 τόνους οικοδομικού υλικού.

Σύμφωνα με το δημοσίευμα της Καθημερινής, οι παράγοντες που κάνουν το νέο τσιμέντο «σύμμαχο» της προστασίας του περιβάλλοντος, είναι οι εξής (Περυσινάκη, 2012):

- Το τσιμέντο της Novacem παρασκευάζεται κυρίως από οξείδιο του μαγνησίου, χωρίς να χρησιμοποιείται δηλαδή καθόλου ασβεστόλιθος, κάτι που σημαίνει πως εξαρχής έχει κατά 50% μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα.
- Εξίσου σημαντικό όμως είναι πως το μίγμα που αναπτύχθηκε χρειάζεται να θερμανθεί σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν τους 700° C, με συνέπεια να μπορούν να χρησιμοποιηθούν καύσιμα πολύ πιο φιλικά στο περιβάλλον. Όπως για παράδειγμα βιοκαύσιμα, καύσιμες ύλες δηλαδή φυτικής προέλευσης, οι οποίες όταν καταναλωθούν, απελευθερώνουν τόσο διοξείδιο του άνθρακα όσο δέσμευσαν και τα φυτά από τα οποία αυτές προήλθαν. Σε μία τέτοια περίπτωση μηδενίζονται οι ρύποι που οφείλονται στη θέρμανση του μίγματος, με συνέπεια η παραγωγή του τσιμέντου να έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ως προς τις εκπομπές CO₂.
- Στην πορεία των ερευνών, φάνηκε πως το προϊόν της Novacem έχει και άλλα σημαντικά οικολογικά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα ότι είναι δυνατόν να ανακυκλωθεί πλήρως μετά την κατεδάφιση ενός κτιρίου, ενώ αντίθετα το συμβατικό τσιμέντο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί μόνο σαν χαμηλής ποιότητας δομικό υλικό.

- Οι πρώτες μελέτες για τα κοιτάσματα πυριτικού μαγνησίου, από το οποίο προέρχεται το οξειδίο του μαγνησίου, δηλαδή η πρώτη ύλη, μιλούν για 10.000 δις. τόνους, αρκετούς δηλαδή για να καλύψουν τη ζήτηση για μερικούς αιώνες. Το «πράσινο» σκυρόδεμα αναμένεται να είναι επίσης εφάμιλλο με το τσιμέντο Portland σε μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.
- Τέλος, το σκυρόδεμα που παράγεται με τη χρήση αυτού του τσιμέντου δεσμεύει πολύ περισσότερο CO₂ από την ατμόσφαιρα κατά την διαδικασία της σκλήρυνσής του (Κανιτάκη, 2009).

8.2.4. Παραγωγή σκυροδέματος με ελληνικό φλοιό ρυζιού (ΤΦΡ).

Πέρα από τα ευρέως γνωστά υλικά (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία κ.α.) που η έρευνα έχει καταδείξει ως αποτελεσματικούς μερικούς υποκαταστάτες του τσιμέντου, στα πλαίσια του προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα» της Γενικής Γραμματείας Έρευνας Τεχνολογίας, αξιολογήθηκε η τέφρα φλοιού ρυζιού (ΤΦΡ) που παράγεται στις εγκαταστάσεις της ελληνικής βιομηχανίας Agrino. Ο ερευνητής Σ. Κ. Αντίοχος και οι συνεργάτες του χρησιμοποιώντας δοκιμές που σχετίζονται με την επίδραση του παραπροϊόντος στη μηχανική συμπεριφορά, την ανθεκτικότητα στη διείσδυση χλωριόντων κ.λπ., κατέληξαν σε πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Μετά από μια ελεγχόμενη συμπληρωματική άλεση, η οποία δεν είναι ενεργοβόρος (δεδομένου ότι η ΤΦΡ αλέθεται πολύ εύκολα), η προσθήκη της ελληνικής τέφρας ρυζιού στο σκυρόδεμα, έδωσε τιμές των παραπάνω ιδιοτήτων τέτοιες που δικαιολογούν την πολύ καλή ποζολανική συμπεριφορά της που εκτιμάται καλύτερη από αυτήν των ιπτάμενων τεφρών. Οι ερευνητές Givi et. al , (2010), σε Review άρθρο τους, συνοψίζουν συναφή ερευνητικά συμπεράσματα και από την ανασκόπησή τους ουσιαστικά επαληθεύουν τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε και η προαναφερθείσα ελληνική ερευνητική ομάδα.

Η ΤΦΡ μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλώς κονιορτοποιημένη και ομογενοποιημένη σε δομικές εφαρμογές. Υπάρχει δυνατότητα προσθήκης σε τσιμέντα ως δευτερεύον συστατικό (filler) διαθέτοντας και συνδετικές ιδιότητες ως ποζολανικό υλικό, με δυνατότητα αντικατάστασης μέρους του κλίνκερ τσιμέντου. Επιπλέον, μπορεί να προστεθεί απευθείας σε σκυροδέματα βελτιώνοντας σημαντικά τις αντοχές και ιδιαίτερα την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων και την επερχόμενη διάβρωση των χαλύβδινων οπλισμών. Τα εντυπωσιακά αποτελέσματα που προκύπτουν από την υποκατάσταση αδρανών με ΤΦΡ σε σκυρόδεμα, δικαιολογούν την ανάπτυξη σκυροδέματος υψηλών αντοχών για εξειδικευμένες χρήσεις, ως νέο δομικό υλικό. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς η θεαματική συμπεριφορά του ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά, θα προδιέθετε θετικά τους εν δυνάμει χρήστες του υλικού (τις τσιμεντοβιομηχανίες) οι οποίες θα παρέβλεπαν το βασικό μειονέκτημα του υλικού που σίγουρα δεν είναι η ποιότητά του αλλά το

περιορισμένο της παραγωγής του. Ποσότητες της τάξης των 500 τόνων, που εκτιμάται ότι είναι η συνολική ετήσια παραγωγή της Agrino, θεωρούνται αμελητέες για ενσωμάτωση του υλικού στη συνηθισμένη παραγωγή της τσιμεντοβιομηχανίας (Περυσινάκη, 2012).

8.2.5. Προσπάθεια μείωσης του CO₂ που εκπέμπουν οι τσιμεντοβιομηχανίες Lafarge και Calera.

Ήδη, εδώ και πολλά χρόνια η τσιμεντοβιομηχανία και τα ερευνητικά κέντρα εργάζονται με στόχο το πράσινο σκυρόδεμα που εκπέμπει όσο γίνεται λιγότερο CO₂ κατά την παρασκευή του τσιμέντου, ικανοποιώντας έτσι και το πρωτόκολλο του Κιότο, και έχει παράλληλα βελτιωμένες ιδιότητες.

Μεταξύ άλλων, γίνεται ερευνητική προσπάθεια να ελαττωθεί η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ανά m³ σκυροδέματος που είναι σήμερα γύρω στα 300 kg/m³ χωρίς να επηρεαστούν οι ιδιότητες του παραγόμενου υλικού.

Η γαλλική εταιρεία Lafarge, πρώτη παγκοσμίως σε παραγωγή τσιμέντου, ανέλαβε την υποχρέωση να μειώσει το εκπεμπόμενο CO₂ ανά τόνο τσιμέντου κατά 20% μεταξύ των ετών 1990 και 2010. Τέλος του 2007, είχε επιτύχει την μείωση κατά 16%. Για να κατανοήσουμε το εύρος των μεγεθών, ενδεικτικά αναφέρουμε πως αυτή η προσπάθεια έχει αποτέλεσμα την εξοικονόμηση 100 kg CO₂ / τόνο τσιμέντου, και συνολικά την εξοικονόμηση 14 εκατομ. τόνων CO₂, δηλ. όσο CO₂ εκπέμπει όλη η πόλη του Παρισιού σε έναν χρόνο.

Η ίδια εταιρεία έχει εφεύρει το υλικό Ductal, που περιέχει τσιμέντο, θρυμματισμένο χαλαζία και ίνες χάλυβα διαμέτρου 120 μικρών. Μια γέφυρα κατασκευασμένη με Ductal, επιτυγχάνει οικονομία 35% σε πρώτες ύλες, 46% σε ενέργεια και 53% σε εκπομπή CO₂ σε σχέση με μια αντίστοιχη γέφυρα κατασκευασμένη με κλασικό σκυρόδεμα.

Η εταιρεία Calera με έδρα την Καλιφόρνια, διατείνεται ότι πέτυχε να αντιστρέψει την διαδικασία εκπομπής CO₂ κατά την παραγωγή τσιμέντου. Δηλαδή, κατά την διάρκειά της, αντί να παράγεται CO₂, αντίθετα παγιδεύεται από την ατμόσφαιρα το CO₂ που προέρχεται από ρυπογόνες βιομηχανίες και έτσι το παραγόμενο τσιμέντο αποτελεί κατά κάποιο τρόπο, αποθήκη του CO₂ της ατμόσφαιρας.

Η διαδικασία αυτή της παραγωγής τσιμέντου μιμείται την διαδικασία παραγωγής "θαλάσσιου τσιμέντου" από το κοράλλι όταν αυτό παράγει τα όστρακα και τους υφάλους, παίρνοντας το ασβέστιο και το μαγνήσιο από το θαλασσινό νερό και χρησιμοποιώντας τα για την δημιουργία ανθρακικών αλάτων σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος.

"Μετατρέπουμε το CO₂ σε ανθρακικό οξύ και στη συνέχεια σε ανθρακικά άλατα. Χρειαζόμαστε μόνο θαλασσινό νερό και ρύπανση" λέει ο εκπρόσωπος της εταιρείας.

Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή αυτού του τσιμέντου είναι ανεξάντλητες: Αφενός το θαλάσσιο νερό που περιέχει δισεκατομ. τόνους ασβέστιο και μαγνήσιο και καλύπτει το 70% της επιφάνειας του πλανήτη και αφετέρου 2775 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μόνο στις ΗΠΑ που παρήγαγαν το 2006, 2,5 δισεκατομ. τόνους CO₂ (Κανιτάκη, 2009).

9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΛΛΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΩΝ.

9.1. Δοκιμές σε άοπλα στοιχεία.

9.1.1. Περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές.

Ο Στιβανάκης Β. στις εργαστηριακές και βιομηχανικές δοκιμές που πραγματοποίησε χρησιμοποίησε ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης που προερχόταν από ποσότητες που έχουν υποστεί βιομηχανική ομογενοποίηση (αποθήκευση κατά στρώσεις) ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική ομαλοποιώντας τις διακυμάνσεις στην σύσταση. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην «ηλικία» της ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αλλοίωσης της από την υγρασία και άλλους παράγοντες. Το κλίνκερ προερχόταν από την παραγωγή της τσιμεντοβιομηχανίας TITAN (Δρέπανο Αχαΐας) και περιείχε 6% γύψο για τον έλεγχο της ταχύτηξής. Η ποζολάνη που χρησιμοποιήθηκε είναι τυπικό δείγμα θηραϊκής γης που χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο σε ποσοστό 8-12% στο κλίνκερ. Η γύψος που χρησιμοποιήθηκε για κατασκευή μιγμάτων είχε υποστεί ξήρανση σε φούρνο 60°C για 24 ώρες (Στιβανάκης, 2003).

Στην μελέτη του Καραστεργίου Α. χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα που προήλθε από τους σταθμούς ηλεκτρικού ρεύματος από την περιοχή της Πτολεμαΐδας. Η τέφρα χαρακτηρίζεται από μορφολογική ανομοιογένεια και δεν παρουσιάζει καθορισμένη χημική σύσταση. Χρησιμοποιήθηκαν δύο παρτίδες ιπτάμενης τέφρας που προήλθαν από διαφορετικές περιοχές εναπόθεσης. Η πρώτη παρτίδα που χρησιμοποιήθηκε θα αναφέρεται ως ιπτάμενη τέφρα Α και αντίστοιχα η δεύτερη ως ιπτάμενη τέφρα Β. Πρόκειται για ασβεστούχες ιπτάμενες τέφρες και σύμφωνα με το πρότυπο ASTM ταξινομούνται ως τύπος C. Παρουσιάζουν ποζολανική αλλά και υδραυλική συμπεριφορά. Η σκωρία κάδου προήλθε από την βιομηχανία κατεργασίας σιδήρου "ΣΙΔΕΝΟΡ". Παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO. Τέλος η σκόνη πορτλανδίτη που χρησιμοποιήθηκε, ήταν εργαστηριακή κονία Ca(OH)₂ Carlo Etba με καθαρότητα πάνω από 95%. Η ιπτάμενη τέφρα (και οι δύο παρτίδες) και η σκωρία κάδου έχουν υποστεί άλεση σε σφαιρόμυλο για 60 min (250 στροφές/λεπτό) (Καραστεργίου, 2009).

Οι Συγγούνας Γ. και Ματίκας Θ.Ε. στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν τσιμέντο Portland χρώματος γκρι και με φαινόμενο ειδικό βάρος 3,15. Ο τύπος του τσιμέντου αυτού κατά EN 197-1, (2000), ήταν CEM I/42,5 N. Η τέφρα από ανακυκλωμένο χαρτί (WSA) προμηθεύτηκε από την εταιρεία παραγωγής ανακυκλωμένου χαρτιού

Aylesford Newsprint Ltd του Ηνωμένου Βασιλείου, η οποία έχει μέγεθος παιπάλης και φαινόμενο ειδικό βάρος 2,6. Η σκωρία υψικαμίνου (GGBS) προμηθεύτηκε από την εταιρεία Civil and Marine Slag Cement Ltd.UK. του Ηνωμένου Βασιλείου. Το GGBS έχει μέγεθος παιπάλης και φαινόμενο ειδικό βάρος 2,9. Χρησιμοποιήθηκε φυσική άμμος θαλάσσης από το κανάλι του Μπρίστολ. Η άμμος ξεπλύθηκε προκειμένου να απομακρυνθούν οι ποσότητες του αλατιού σύμφωνα με τον Βρετανικό κανονισμό BS 8110: Part 1:1985 (Structural use of concrete), (1985). Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από δύο διαφορετικά μεγέθη 10 mm και 20 mm. Η προέλευσή τους ήταν από ασβεστολιθικά πετρώματα. Τέλος, για ένα μόνο δείγμα χρησιμοποιήθηκε ποσότητα υπερρυστοποιητή η ονομασία του οποίου είναι Daracem[®] SP1 (Συγγούνας και Ματίκας, 2008).

Στην πειραματική τους εργασία οι Παπαγιάννη Ι. και Αναστασίου Ε. χρησιμοποίησαν επεξεργασμένη ασβεστούχα τέφρα της ευρύτερης περιοχής της Πτολεμαΐδας. Η τέφρα χαρακτηρίστηκε ως τύπου EIT2 με χαρακτηριστικά: CaO=2,8 < 3,0%, SO₃=3,5 < 5,0%, φαινόμενο ειδικό βάρος 2,42, λεπτότητα άλεσης 328 m²/kg, R_{45μm}~20% < 30%. Χρησιμοποιήθηκαν αδρανή εγχώρια με κοκκομετρική διαβάθμιση που προέκυψε από την επιμέρους κοκκομετρική ανάλυση των κλασμάτων των αδρανών 0-4 mm, 4-8 mm και γαρμπίλι 4-12,5 mm. Ως άμμος χρησιμοποιήθηκε πλυμένη άμμος από το Στρυμόνα ποταμό. Ως χονδρόκοκκα χρησιμοποιήθηκαν θραυστά ασβεστολιθικά πετρώματα λατομείου Δρυμού. Το ποσοστό της υγρασίας των αδρανών ελέγχονταν αμέσως πριν τη σκυροδέτηση για να γίνεται η σχετική διόρθωση εφόσον ο σχεδιασμός βασιζόταν σε κεκορεσμένης στεγνής επιφάνειας αδρανή. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I/42,5 και ρυστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης σε ποσοστό 1-2% κ.β. κονιών (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

Στα πλαίσια της έρευνας που πραγματοποίησε το Εθνικό κέντρο έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης – Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων χρησιμοποιήθηκε από τον Γκίνου Μ. ιπτάμενη τέφρα από την μονάδα IV του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας για την πιλοτική παραγωγή κυβόλιθων διπλής και μονής στρώσης. Ύστερα από αναλύσεις αποδείχθηκε ότι η μονάδα IV είναι εκείνη που δίνει ιπτάμενη τέφρα με την μικρότερη περιεκτικότητα όσον αφορά τα θειικά. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν προμηθεύτηκαν από το ιδιόκτητο λατομείο της TEXNOMΠETON Α.Ε. ενώ το τσιμέντο ήταν κατηγορίας CEM 42,5 N (Εθνικό κέντρο έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης, Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων, 2006).

9.1.2. Αντοχή σε θλίψη.

Στιβανάκης (2003).

Για την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής κατασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 4x4x16 cm (Δοκίμια FERET, DIN 116/1958) τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης στις 2, στις 7 και στις 28 ημέρες.

Στην σειρά δοκιμών Γ1 γίνεται υποκατάσταση του κλίνκερ από μη αλεσμένη ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 0, 10, 20 και 30%. Οι μετρήσεις των αντοχών στα δοκίμια αυτά δείχνουν σημαντική πτώση των αντοχών των 28 ημερών με αυξανόμενο ποσοστό ι.τ. Αυτό αποδόθηκε στην κοκκομετρική σύσταση της ι.τ. (χονδρόκοκκη) και στη μη πλήρη ενεργοποίηση των ποζολανικών της ιδιοτήτων.

Πίνακας 9-1: Αντοχή σε θλίψη δοκιμών μιγμάτων τσιμέντου Portland με μη αλεσμένη τέφρα Μεγαλόπολης (Στιβανάκης, 2003).

Ποσοστό ιπτάμενης τέφρας (%)	Αντοχές (N/mm ²)			
	2 ημ.	7 ημ.	28 ημ.	w/c
0	23,7	36,9	48,1	0,5
10	18,4	30,6	42,2	0,54
20	13,4	23,1	34,3	0,58
30	9,4	18,7	33,1	0,62

Με την αύξηση του ποσοστού της ι.τ. αυξάνεται και το ποσοστό του προστιθέμενου νερού ανάμιξης για να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός εξάπλωσης των δοκιμών. Με την σημαντική πτώση των αντοχών επιβεβαιώνεται και πειραματικά ότι μόνο αλεσμένη ι.τ. επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο (ή υποκατάστατο) στο τσιμέντο.

Στην σειρά δοκιμών Γ2 γίνεται υποκατάσταση του κλίνκερ από αλεσμένη ι.τ. Παρασκευάστηκαν με ανάμιξη και ομογενοποίηση δοκίμια (κατά τα πρότυπα) που περιείχαν 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 και 94% ι.τ. (N/T=0,5). Το ποσοστό του γύψου παρέμεινε σταθερό 6%. Το κλίνκερ είχε λεπτότητα 1,6% σε κόσκινο 4900 βρχ./m² και Blaine περίπου 3100 cm²/gr. Η ι.τ. αλέσθηκε στα 4800 cm²/gr. Οι αντοχές των δοκιμών μετρήθηκαν σε 2, 7 και 28 ημέρες.

Πίνακας 9-2: Αντοχές σε θλίψη δοκιμίων μιγμάτων τσιμέντου – αλεσμένης ιπ. τέφρας (Στιβανάκης, 2003).

Ποσοστό ιπτάμενης τέφρας (%)	Αντοχές (N/mm ²)		
	2 ημ.	7 ημ.	28 ημ.
0	22	32,8	44,4
10	23,3	37,7	48,4
20	19,9	35,8	51,4
30	17,1	31,3	47,2
40	13,8	30,3	46
50	13,2	28,8	41,6
60	11	23,9	34
70	8,6	21,1	27,9
80	7,6	13,5	14,1
90	2,45	3,67	4,3
94	0	0	0

Φαίνεται ότι για ποσοστό ι.τ. μέχρι 40% οι αντοχές των 28 ημερών είναι ικανοποιητικές και συγκρίσιμες με αυτές του καθαρού τσιμέντου. Η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού της ι.τ. οδηγεί σε μείωση των αντοχών του μίγματος. Για την πλήρη υποκατάσταση του κλίνκερ από ι.τ. οι αντοχές μηδενίζονται. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η ι.τ. Μεγαλόπολης δεν διαθέτει αυτοτελείς υδραυλικές ιδιότητες όπως η ι.τ. Πτολεμαΐδας-Καρδιάς.

Στην σειρά δοκιμίων Δ μελετήθηκαν μίγματα μέχρι 30% προσθήκης ι.τ. Μεγαλόπολης (ι.τ.Μ.), για τον έλεγχο των μακροχρόνιων αντοχών (1 έτος) και της επίδρασης της προώθησης της άλεσης σ' αυτές. Για τον σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν: α) δοκίμια με τσιμέντο αναφοράς Portland σε βαθμίδες άλεσης 3200 και 3700 Blaine, β) δοκίμια με μίγματα τσιμέντου αναφοράς και 15% ι.τ.Μ. σε βαθμίδες άλεσης 3160 και 3600 Blaine και, γ) δοκίμια με μίγματα τσιμέντου αναφοράς και 30% ι.τ.Μ. σε βαθμίδες άλεσης 3700 και 4110 Blaine.

Πίνακας 9-3: Μακροχρόνιες αντοχές μιγμάτων με ι.τ. Μεγαλόπολης (Στιβανάκης, 2003).

	0% Τέφρα	0% Τέφρα	15% Τέφρα	15% Τέφρα	30% Τέφρα	30% Τέφρα
	3200	3700	3160	3600	3700	4110
ΗΜΕΡΕΣ						
2	21,5	26,2	17,6	22,3	18,4	20,1
7	33,8	39,6	27,8	35,2	30,1	32,4
28	46,8	52,5	38,6	47,1	46,5	48,6
56	51	53,4	43,6	52,8	48	56,1
90	53,8	55,2	45	55	50,2	57,2
182	56,2	56,8	47,5	55,8	54,6	62
364	57,4	58,8	52,5	58,2	58	64,5

Η σύγκριση μεταξύ μιγμάτων 15% και 30% δείχνει ότι καθοριστική παράμετρος για την βελτίωση των μακροχρόνιων αντοχών είναι η ειδική επιφάνεια (Blaine) του μίγματος και όχι το ποσοστό της προστιθέμενης ι.τ.Μ. Αυτό είναι φανερό από το ότι το λεπτοαλεσμένο μίγμα 30% παρουσιάζει υψηλότερες αντοχές από το μίγμα με 15% ι.τ.Μ. και από το τσιμέντο αναφοράς μετά τις 56 ημέρες (Στιβανάκης, 2003).

Συγγόνιας και Ματίκας (2008)

Σε τρία κυβικά δοκίμια (150x150x150 mm) και σε τρία κυλινδρικά δοκίμια (ύψος 300 mm και διάμετρος 150 mm) για κάθε τύπο σκυροδέματος που δημιουργήθηκε εξετάστηκε η αντοχή τους σε θλίψη σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 3 (Compressive strength of test specimens), (2009). Ο χρόνος σκλήρυνσης και εφαρμογής της δοκιμής θλίψης ήταν 7 ημέρες και 28 ημέρες για τα κυβικά και τα κυλινδρικά δοκίμια αντίστοιχα.

Γενικά, για όλες τις δοκιμές χρησιμοποίησε 13 διαφορετικά μίγματα σκυροδέματος. Δηλαδή, χρησιμοποίησε 5 διαφορετικές αναλογίες τσιμέντου (PC), τέφρας ανακυκλωμένου χαρτιού (WSA) και σκωρίας υψικαμίνου (GGBS) για διάφορους λόγους αναλογίας νερού/συνδετικό υλικό. Παρακάτω φαίνονται οι 5 αυτές αναλογίες:

Πίνακας 9-4: Ποσοστά τσιμέντου Portland και ανακυκλωμένων υλικών στο σκυρόδεμα (λόγος νερού/συνδετικό υλικό: 0.5, 0.4 και 0.35) (Συγγούνας και Ματίκας, 2008).

PC %	WSA %	GGBS %
100	0	0
80	10	10
70	15	15
60	20	20
40*	30*	30*

*Το PC-WSA-GGBS (40-30-30) σκυρόδεμα παρασκευάστηκε μόνο για λόγο νερού/συνδετικό υλικό ίσο με 0.5.

Από τα παραπάνω ποσοστά τα 4 πρώτα χρησιμοποιούνται για όλους τους λόγους νερού/συνδετικό υλικό: 0.5, 0.4 και 0.35 ενώ τα τελευταία ποσοστά χρησιμοποιούνται μόνο για λόγο 0.5.

Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 3, (2009). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \text{ όπου}$$

f_c = Αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων (N/mm^2) και f_{CA} = Μέσος όρος της αντοχής σε θλίψη για τρία δοκίμια, F = Μέγιστο φορτίο αντοχής (N), A_c = Εμβαδόν της περιοχής όπου εφαρμόζονται οι θλιπτικές δυνάμεις (mm), για κυβικά δοκίμια ($A_c = 10000 \text{ mm}^2$) και για κυλινδρικά δοκίμια ($A_c = 17671.46 \text{ mm}^2$).

Πίνακας 9-5: Αντοχή σε θλίψη f_{CA} κυβικών δοκιμίων 7 ημερών (Συγγούνας και Ματίκας, 2008).

Μίγματα PC-WSA- GGBS	Αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμίων 7 ημερών (N/mm^2)		
	N/Σ=0,5	N/Σ=0,4	N/Σ=0,35
100-0-0	26,3	29	34,4
80-10-10	27,5	29	34,9
70-15-15	21	30,2	31,8
60-20-20	24,5	29,4	34,2
40-30-30	21,8	-	-

Πίνακας 9-6: Αντοχή σε θλίψη f_{CA} κυλινδρικών δοκιμίων 28 ημερών (Συγγούνας και Ματίκας, 2008).

Μίγματα PC-WSA- GGBS	Αντοχή σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων 28 ημερών (N/mm ²)		
	N/Σ=0,5	N/Σ=0,4	N/Σ=0,35
100-0-0	23,9	32,7	38,2
80-10-10	28,3	37,3	42,9
70-15-15	29,2	37,1	39
60-20-20	31,5	41,2	35,5
40-30-30	29	-	-

Παρατηρήθηκε ότι (Συγγούνας και Ματίκας, 2008):

- Σε ηλικία σκλήρυνσης 7 ημερών οι τιμές αντοχής σε θλίψη των PC-WSA-GGBS (τσιμέντο-τέφρα ανακυκλωμένου χαρτιού-σκωρία υψικαμίνων) σκυροδεμάτων είναι σχετικά ίσες με την τιμή αντοχής σε θλίψη του PC-100% σκυροδέματος.
- Σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών οι τιμές αντοχής σε θλίψη των PC-WSA-GGBS σκυροδεμάτων είναι μεγαλύτερες από την τιμή αντοχής σε θλίψη του PC-100% σκυροδέματος εκτός από μια περίπτωση (PC-WSA-GGBS (60%-20%-20%), N/Σ 0,35). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις καθυστερημένες ποζολανικές αντιδράσεις που προέρχονται από το WSA-GGBS.
- Η αύξηση του περιεχομένου του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έως 40% έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών. Το σκυρόδεμα με τη μέγιστη αντοχή σε θλίψη είναι το PC-WSA-GGBS (80%-10%-10%) σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών, λόγος N/Σ ίσο με 0,35 και τιμή ίση με $f_{CA}=42,9$ N/mm².

Παπαγιάννη και Αναστασίου (2009).

Σκυροδετήθηκαν 6 διαφορετικές συνθέσεις με συνολικό ποσό συνδετικών κονιών 600-700 kg/m³. Για κάθε σύνθεση κατασκευάστηκαν 10 κύλινδροι 15x30 cm, 5 κύβοι 15x15x15 cm και 5 πρισματικά δοκίμια 10x10x40 cm προκειμένου να γίνει προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σε διάφορες ηλικίες, εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη και κάμψη καθώς και προσδιορισμός του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

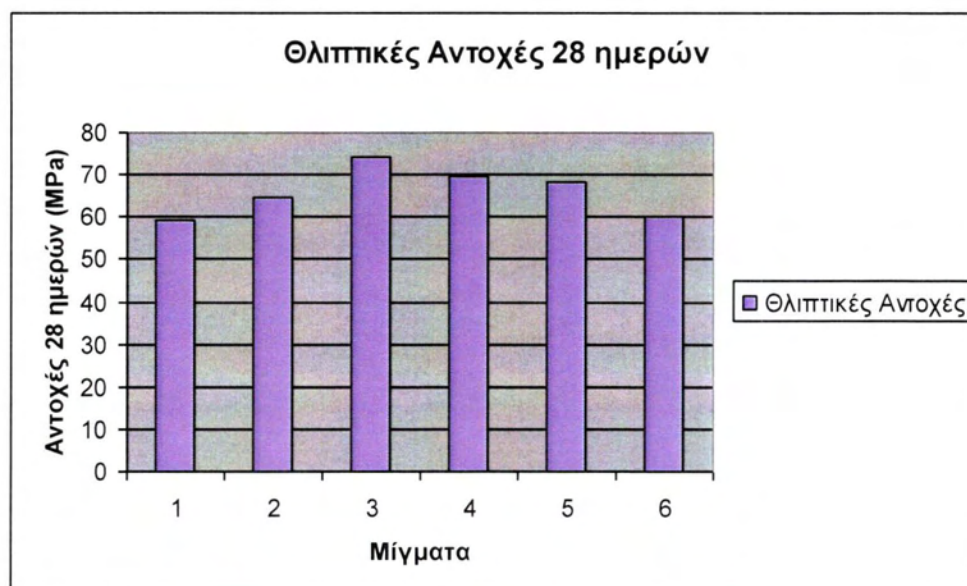
Οι συνθέσεις των σκυροδεμάτων που χυτεύθηκαν στα δοκίμια και οι ιδιότητες των νωπών σκυροδεμάτων φαίνονται στον Πίνακα 9-7. Οι θλιπτικές αντοχές στις διάφορες ηλικίες φαίνονται στον Πίνακα 9-8.

Πίνακας 9-7: Συνθέσεις σκυροδεμάτων με ιπτάμενη τέφρα (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

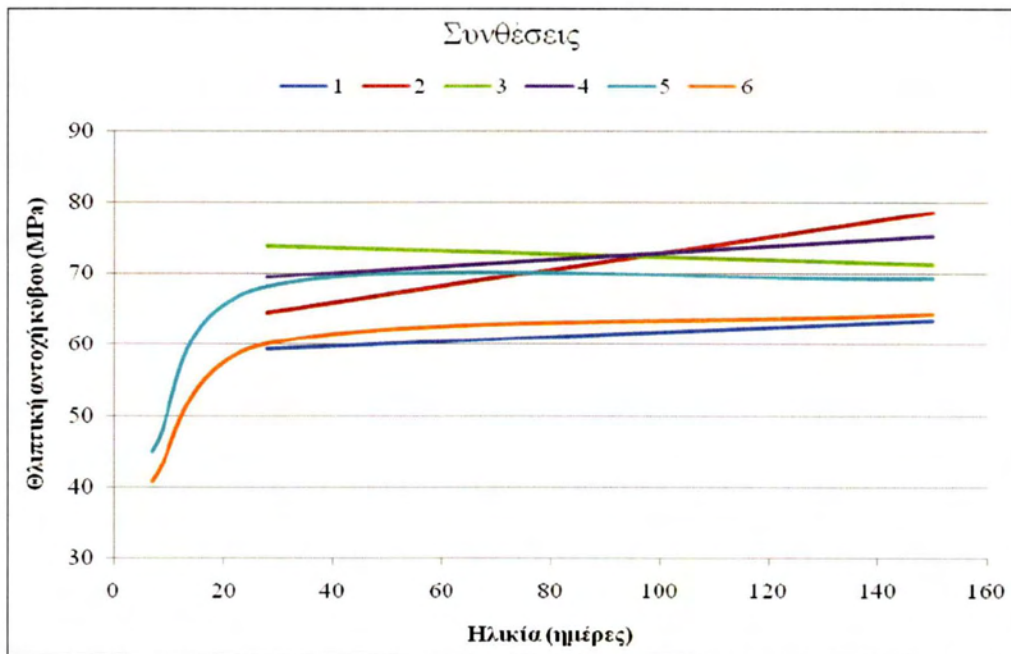
Υλικά (kg)	1	2	3	4	5	6
Γαρμπίλι	635,85	637,10	632,08	561,3	549,60	549,63
Ρύζι	324,38	323,10	319,67	283,92	274,44	274,21
Άμμος	683,90	676,50	689,83	598,14	565,20	565,24
CEM Ι42,5	450	450	300	350	350	350
Ιπτάμενη τέφρα	150 (33%)	150 (33%)	300 (50%)	350 (50%)	350 (50%)	350 (50%)
Νερό	182,2	145,8	132,78	167,02	213,40	214,00
Ρευστοποιητής	4,0	6,0	12,0	14,0	14,5	7,00
Λόγος Ν/Τ	0,30	0,25	0,22	0,238	0,30	0,30
Κάθιση (cm)	6,9	6,8	8,0	8,5	7,0	7,2
% ρευστοποιητή	0,5	0,65	1,2	1,4	1,0	1,0

Πίνακας 9-8: Θλιπτικές αντοχές σκυροδεμάτων με τέφρα (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Θλιπτική αντοχή (MPa)						
7 ημερών κυβ.	-	-	-	-	45,1	40,8
28 ημερών κυλ.	49,5	56,8	65,9	59,9	55,3	50,9
28 ημερών κυβ.	59,4	64,5	73,9	69,5	68,2	60,1
5 μηνών κυβ.	63,5	78,6	71,3	75,2	69,3	64,4



Διάγραμμα 9-1: Θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων 28 ημερών για κάθε μίγμα σκυροδέματος.



Διάγραμμα 9-2: Ρυθμός ανάπτυξης αντοχής κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με τέφρα (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα επιτεύχθηκαν επίπεδα 28 ημερών θλιπτικής αντοχής πάνω από 60 MPa για κύβους με ένα συνολικό ποσό κονιών από 600 έως 700 kg/m³. Η παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει τις θλιπτικές αντοχές είναι ο λόγος νερού/τσιμέντου. Σε λόγους N/T κάτω από 0,30 (μίγματα 2, 3 και 4) οι τιμές που επιτεύχθηκαν είναι υψηλότερες. Υπάρχει ένας καλός ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής και φαίνεται πως στις 7 ημέρες ένα επίπεδο αντοχής 40-50 MPa είναι εφικτό.

9.1.3. Αντοχή σε εφελκυσμό.

Συγγούνας και Ματίκας (2008).

Η δοκιμή εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων εφαρμόστηκε σε τρία κυλινδρικά δοκίμια (ύψος 300 mm και διάμετρος 150 mm), ηλικίας σκλήρυνσης 28 ημερών, για κάθε τύπο σκυροδέματος που παρασκευάστηκε (οι τύποι σκυροδέματος αναφέρθηκαν παραπάνω, στην παράγραφο 9.1.2.). Η δοκιμή έγινε σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 6 (Tensile splitting strength of test specimens), (2009).

Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 6, (2009). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi \cdot L \cdot d}, \text{ όπου}$$

f_{ct} = Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη δοκιμίων, (N/mm²), f_{ctA} = Μέσος όρος εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων για τρία δοκίμια, (N/mm²), F = Μέγιστο φορτίο, (N), L = Το μήκος της γραμμής επαφής του δοκιμίου (mm), (Για το δοκίμιο

το $L = 300 \text{ mm}$), $d =$ Σχεδιασμένη διατομή διάστασης (mm), (Για το δοκίμιο το $d = 150 \text{ mm}$).

Πίνακας 9-9: Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη f_{CTA} κυλινδρικών δοκιμίων 28 ημερών.

Μίγματα PC-WSA- GGBS	Αντοχή σε εφελκυσμό 28 ημερών (N/mm^2)		
	$N/\Sigma=0,5$	$N/\Sigma=0,4$	$N/\Sigma=0,35$
100-0-0	2,9	3,34	3,57
80-10-10	3,41	3,36	3,84
70-15-15	2,87	2,76	3,62
60-20-20	3,52	3,86	3,61
40-30-30	3,55	-	-

Παρατηρήθηκε ότι (Συγγούνας και Ματίκας, 2008):

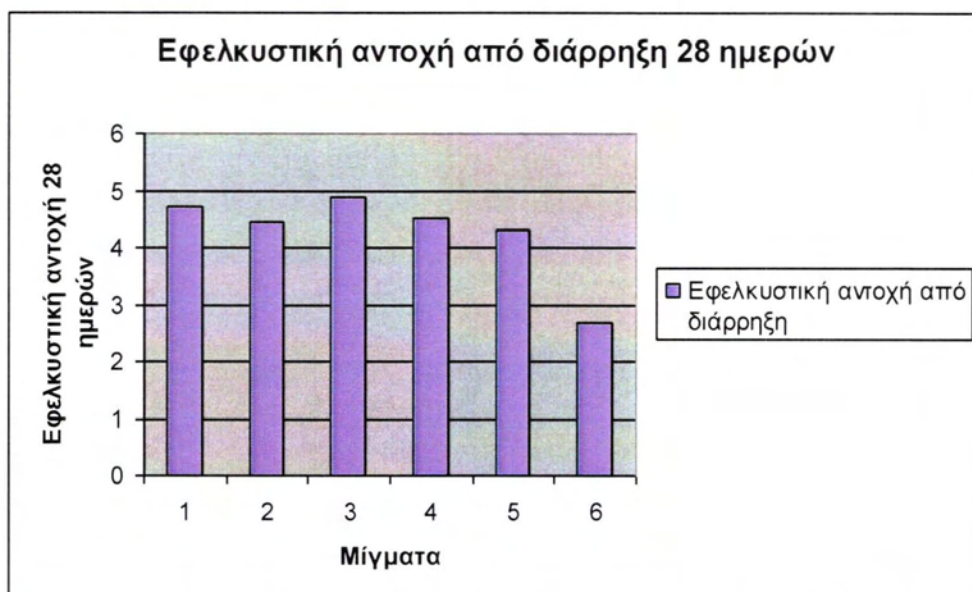
- Σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών οι τιμές εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων των PC-WSA-GGBS σκυροδεμάτων είναι μεγαλύτερες από την τιμή εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη του PC-100% σκυροδέματος εκτός από μια περίπτωση (PC-WSA-GGBS (70%-15%-15%), N/Σ 0,5 και 0,4).
- Η αύξηση του περιεχομένου του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έως 40% έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων του σκυροδέματος σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.
- Το σκυρόδεμα με τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη δοκιμίων είναι το PC-WSA-GGBS (60%-20%-20%) σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών, λόγος N/Σ ίσο με 0,4 και τιμή ίση με $f_{CTA}=3,86 \text{ N/mm}^2$.

Παπαγιάννη και Αναστασίου (2009).

Ο αριθμός και το σχήμα των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι συνθέσεις του σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν αναλύονται στην παράγραφο 9.1.2. Παρακάτω φαίνεται η εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.

Πίνακας 9-10: Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη δοκιμίων για τις διάφορες συνθέσεις σκυροδέματος (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (MPa)	4,71	4,45	4,88	4,52	4,30	2,67



Διάγραμμα 9-3: Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημερών για όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι υπάρχει μια τάση χαμηλότερων αντοχών εφελκυσμού για τα μίγματα με 700 kg/m^3 συνολικής κονιάς οδηγώντας μας στο συμπέρασμα ότι καλύτερα συμπεριφέρονται ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα μίγματα με 600 kg/m^3 συνολικής κονιάς. Η εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη να σημειώσουμε ότι κυμαίνεται από 2,6 έως 4,8% της θλιπτικής αντοχής.

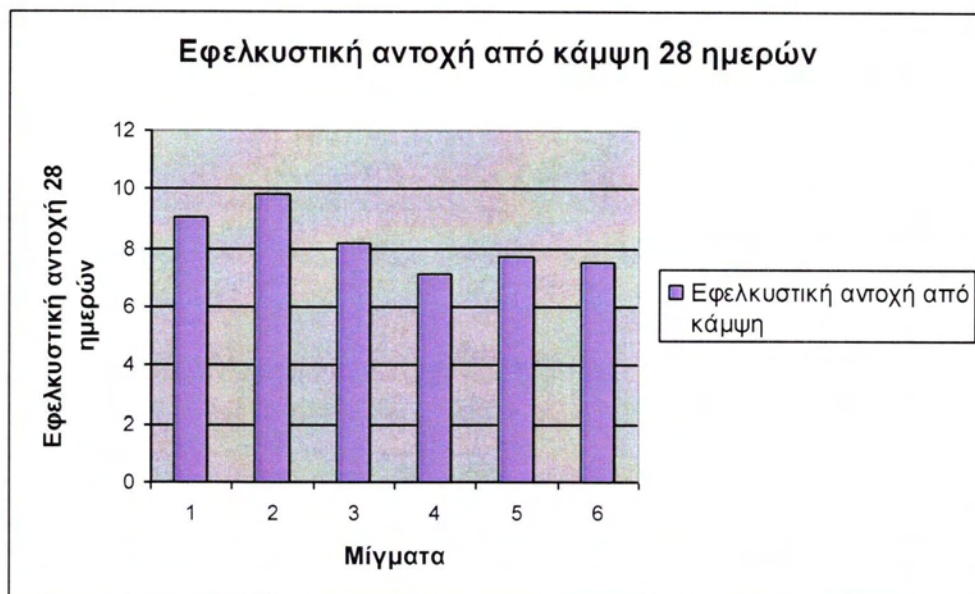
9.1.4. Αντοχή σε κάμψη.

Παπαγιάννη και Αναστασίου (2009).

Ο αριθμός και το σχήμα των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι συνθέσεις του σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν αναλύονται στην παράγραφο 9.1.2. Παρακάτω φαίνεται η εφελκυστική αντοχή από κάμψη σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.

Πίνακας 9-11: Εφελκυστική αντοχή από κάμψη δοκιμίων για τις διάφορες συνθέσεις σκυροδέματος (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Εφελκυστική αντοχή από κάμψη 28 ημ. (MPa)	9,05	9,84	8,16	7,10	7,69	7,54



Διάγραμμα 9-4: Εφελκυστική αντοχή από κάμψη 28 ημερών για όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι υπάρχει μια τάση χαμηλότερων αντοχών εφελκυσμού για τα μίγματα με 700 kg/m^3 συνολικής κονιάς οδηγώντας μας στο συμπέρασμα ότι καλύτερα συμπεριφέρονται ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα μίγματα με 600 kg/m^3 συνολικής κονιάς. Η εφελκυστική αντοχή από κάμψη να σημειώσουμε ότι κυμαίνεται από 7 έως 9% της θλιπτικής αντοχής (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

9.1.5. Μέτρο ελαστικότητας και μέτρο διάτμησης.

Καραστεργίου (2009).

Στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των τεφρών Α, Β καθώς και για την σκωρία κάδου έχουν αναφερθεί στο 9.1.1. Κατασκευάστηκαν οι παρακάτω σειρές δειγμάτων:

i) Τέσσερις σειρές δειγμάτων με

- α) Ιπτάμενη τέφρα Α (4g), 10% Ca(OH)_2 (0,4g) και 20% νερό (~0,9g).
- β) Ιπτάμενη τέφρα Α (4g), 20% Ca(OH)_2 (0,8g) και 20% νερό (~0,9g).
- γ) Ιπτάμενη τέφρα Α (4g), 30% Ca(OH)_2 (1,2g) και 20% νερό (~1g).
- δ) Ιπτάμενη τέφρα Β (4g), 30% Ca(OH)_2 (1,2g) και 20% νερό (~1g).

Η θερμοκρασία υδροθερμικής κατεργασίας ρυθμίστηκε στους 60°C ενώ τα δείγματα παρέμειναν σε αυτήν την θερμοκρασία έως και 72 ώρες.

ii) Τέσσερις σειρές δειγμάτων με

- α) Ιπτάμενη τέφρα Β (4g), 10% Ca(OH)_2 (0,4g) και 20% νερό (~0,9g).
- β) Ιπτάμενη τέφρα Β (4g), 20% Ca(OH)_2 (0,8g) και 20% νερό (~0,9g).
- γ) Ιπτάμενη τέφρα Β (4g), 30% Ca(OH)_2 (1,2g) και 20% νερό (~1g).

δ) Ιπτάμενη τέφρα Β (4g), 40% Ca(OH)_2 (1,6g) και 20% νερό (~1,1g).

Τα παραπάνω δείγματα υπέστησαν υδροθερμική κατεργασία επίσης μέχρι 72 ώρες στους 95°C.

iii) Δείγματα ιπτάμενης τέφρας Β / σκωρίας κάδου με προσθήκη νερού σε ποσοστό περίπου 20% του συνολικού βάρους (ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας). Τα δείγματα αυτά είχαν συνολικό βάρος 5 γραμμαρίων χωρίς την προσθήκη νερού. Μελετήθηκαν δείγματα με αναλογίες:

α) 50% ι.τ.Β. (2,5g), 50% σκωρίας κάδου (2,5g) και 20% νερό (1g).

β) 70% ι.τ.Β. (3,5g), 30% σκωρίας κάδου (1,5g) και 20% νερό (1g).

γ) 90% ι.τ.Β. (4,5g), 10% σκωρίας κάδου (0,5g) και 20% νερό (1g).

δ) Μόνο ι.τ.Β. (5g) και 20% νερό (1g).

ε) 70% ι.τ.Β. (3,5g), 30% Ca(OH)_2 (1,5g) και 20% νερό (1g).

Τα δισκία μορφοποιήθηκαν με την χρήση της πρέσας και τοποθετήθηκαν σε θερμοκρασία 95°C. Τα δείγματα α), β) και γ) παρέμειναν στην θερμοκρασία αυτή για 2 έως 168 ώρες ενώ τα δείγματα δ) και ε) για 24 ώρες.

iv) Μια σειρά δειγμάτων με χρήση 50% ιπτάμενης τέφρας Β (2,5g), και 50% σκωρίας κάδου (2,5g) που έχουν υποστεί συνάλεση σε σφαιρόμυλο για 60 min και στη συνέχεια προσθήκη νερού περίπου 0,8g. Η σκωρία κάδου που χρησιμοποιήθηκε σ' αυτήν την σειρά ήταν ήδη αλεσμένη πριν τη συνάλεση ενώ η ιπτάμενη τέφρα Β δεν είχε αλεστεί. Η θερμοκρασία υδροθερμικής κατεργασίας ρυθμίστηκε στους 95°C και τα δείγματα παρέμειναν σε αυτήν την θερμοκρασία μέχρι 72 ώρες.

v) Δείγματα με τις συστάσεις που είχαν τα δισκία iii (εκτός από την σύσταση 90% ιπτάμενης τέφρας Β (4,5g) – 10% σκωρία κάδου (0,5g)) μόνο που η θερμοκρασία αυτή την φορά ρυθμίστηκε στους 60°C.

Η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των δειγμάτων έγινε με την βοήθεια μιας συσκευής της εταιρίας GrindoSonic. Πιο συγκεκριμένα η συσκευή αυτή σχεδιάστηκε ειδικά για την μέτρηση των ελαστικών ιδιοτήτων υλικών. Είναι βασισμένη στην τεχνική "impulse excitation", κατά την οποία το υπό δοκιμή δείγμα με τη βοήθεια ενός μικρού μηχανικού χτυπήματος υποβάλλεται σε μια αρχική παραμόρφωση. Αυτή η τεχνική μέτρησης είναι μη καταστρεπτική, ιδιαίτερα ακριβής και πολύ απλή.

Παρατηρήθηκαν τα εξής (Καραστεργίου, 2009):

- Δείγματα ιπτάμενης τέφρας (Α,Β) – Ca(OH)_2 (υδροθερμική κατεργασία στους 60°C). Στα δείγματα που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα Α βρέθηκε ότι όταν η περιεκτικότητα σε Ca(OH)_2 ήταν 20 και 30% (της ποσότητας της τέφρας), παρουσίασαν μικρές τιμές Ε και G (μέτρο ελαστικότητας και διάτμησης). Αντίθετα τα δισκία που περιείχαν 10% Ca(OH)_2 εμφάνισαν αρκετά υψηλές τιμές Ε και G μετά από 7 ημέρες κατεργασίας. Ακόμα μεγαλύτερες τιμές παρουσίασαν τα δείγματα που αποτελούνταν από ιπτάμενη τέφρα Β και 30% Ca(OH)_2 . Η ποσότητα εντριγγίτη που

εμφανίζεται στα δείγματα (και σε αυτά που περιείχαν ι.τ.Α. αλλά και σε αυτά με ι.τ.Β.) ήταν αρκετά μεγάλη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ρωγμών στα δισκία και έτσι τα δείγματα αυτά δεν κρίνονται αξιόπιστα για την αξιοποίησή τους στον κατασκευαστικό τομέα και κρίνουν απαγορευτικούς τους 60°C, καθώς η θερμοκρασία αυτή ευνοεί την ανάπτυξη κρυστάλλων εντριγγίτη.

- *Δείγματα ιπτάμενης τέφρας Β – Ca(OH)₂ (υδροθερμική κατεργασία στους 95°C).* Κατασκευάστηκαν δείγματα τα οποία περιείχαν ιπτάμενη τέφρα Β και Ca(OH)₂ σε ποσοστά 10%, 20%, 30% και 40% (τα ποσοστά αυτά αναφέρονται στη μάζα της τέφρας που ήταν 4g). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δείγματα που η περιεκτικότητά τους σε Ca(OH)₂ ήταν 30% και 40% παρουσίασαν παρόμοιες τιμές Ε και G και ανέπτυξαν "φτωχότερες" μηχανικές ιδιότητες από εκείνα στα οποία η περιεκτικότητα σε Ca(OH)₂ ήταν 10% και 20% όπου επίσης παρατηρήθηκαν παρόμοιες τιμές στα μεγέθη Ε και G. Δηλαδή φαίνεται ότι αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε Ca(OH)₂ πάνω από 20% της μάζας της τέφρας, παρατηρείται μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των δειγμάτων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με αντίστοιχα παλιότερης μελέτης όπου όμως χρησιμοποιήθηκε ι.τ.Α. βρέθηκε ότι τα δείγματα που περιέχουν ι.τ.Β. ακόμα και από τις δύο πρώτες ώρες παραμονής τους στο υδροθερμικής κατεργασίας αναπτύσσουν μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και μέτρου διάτμησης (G) σε σχέση με αυτά που περιέχουν ι.τ.Α. Επίσης μετά από 72 ώρες υδροθερμικής κατεργασίας φαίνεται ότι αυτά που περιέχουν ι.τ.Β. παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες (μεγαλύτερες τιμές Ε και G) από τα αντίστοιχα δείγματα που περιείχαν ι.τ.Α.
- *Δείγματα ιπτάμενης τέφρας Β – σκωρίας κάδου (υδροθερμική κατεργασία στους 95°C).* Φαίνεται ότι τα δείγματα που κατασκευάστηκαν με 50% ι.τ.Β. / 50% σκωρία κάδου και 70% ι.τ.Β. / 30% σκωρία κάδου παρόμοιες τιμές Ε και G μετά από 7 ημέρες υδροθερμικής κατεργασίας που ρυθμίστηκε στους 95°C. Αντίθετα τα δείγματα που κατασκευάστηκαν με προσθήκη 90% ι.τ.Β. και 10% σκωρία κάδου βρέθηκε να αναπτύσσουν μεγαλύτερες τιμές Ε και G.
- *Δείγματα ιπτάμενης τέφρας Β (50%) – σκωρίας κάδου (50%) (Συνάλεση) (υδροθερμική κατεργασία στους 95°C).* Σε αυτή τη σειρά δειγμάτων οι πρώτες ύλες (ι.τ.Β. και σκωρία κάδου) έχουν υποστεί συνάλεση στον σφαιρόμυλο για 60 λεπτά. Συγκρίνοντας τις τιμές των Ε και G που προκύπτουν για αυτά τα δείγματα και τις αντίστοιχες για τα δείγματα που δεν έχει γίνει συνάλεση φαίνεται ότι οι τελικές τιμές (μετά από 7 ημέρες) είναι περίπου οι ίδιες. Αυτό όμως που είναι αξιοσημείωτο είναι οι μεγάλες τιμές Ε και G που εμφανίζονται ακόμα και από τις πρώτες δύο ώρες υδροθερμικής κατεργασίας. Αυτό οφείλεται στην συνάλεση, αφού μ' αυτή γίνεται καλύτερη ομογενοποίηση των κόνεων και μείωση του πορώδους απ' ότι επιτυγχάνεται με την χειρονακτική μέθοδο.

- Δείγματα ιπτάμενης τέφρας Β – σκωρίας κάδου (υδροθερμική κατεργασία στους 60°C). Στους 60°C τα δείγματα με αναλογία σε ι.τ.Β./σκωρία κάδου 70-30 εμφάνισαν μεγαλύτερες τιμές Ε, G από αυτά με αναλογία 50-50. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα των 95°C προκύπτει ότι στους 95°C τα δείγματα εμφανίζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα δείγματα που επεξεργάστηκαν στους 60°C εμφάνισαν μεγάλη ποσότητα κρυστάλλων εντριγγίτη. Η εμφάνιση εντριγγίτη έχει αρνητικές συνέπειες στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων και τελικά πολλές φορές οδηγούν στην αστοχία τους. Έτσι γίνεται σαφές ότι τα δείγματα που επεξεργάστηκαν στους 60°C κρίνονται ακατάλληλα για την χρήση τους στον κατασκευαστικό τομέα.

Συγγόνος και Ματίκας (2008).

Για την εύρεση του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη χρησιμοποιήθηκαν τρία κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος (ύψος 300 mm και διάμετρος 150 mm), ηλικίας σκλήρυνσης 28 ημερών, για κάθε τύπο σκυροδέματος που παρασκευάστηκε (οι τύποι σκυροδέματος αναφέρθηκαν παραπάνω, στην παράγραφο 9.1.2.). Η δοκιμή εφαρμόστηκε σύμφωνα με τον Βρετανικό κανονισμό BS 1881-121: 1983 (Method for determination of static modulus of elasticity in compression), (1983). Ο εξοπλισμός του πειράματος περιλάμβανε ένα πλαίσιο επιμηκυσιόμετρου και ένα κάλυμμα στην οροφή του κυλίνδρου έτσι ώστε η επιφάνεια θλίψης μεταξύ δοκιμίου και μηχανής να είναι επίπεδη.

Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής εύρεσης του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με τον Βρετανικό κανονισμό BS 1881-121: 1983, (1983). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{(\varepsilon_a - \varepsilon_b) \cdot 300 \cdot 0.002}, \text{ όπου}$$

E = Στατικό μέτρο ελαστικότητας, (N/mm²), E_A = Μέσος όρος του στατικού μέτρου ελαστικότητας για τρία δοκίμια, (N/mm²), σ_a = Ανώτερο φορτίο ίσο με f_c/3, (N/mm²), σ_b = Βασικό φορτίο ίσο με 0.50 N/mm², ε_a = Μέση επιμήκυνση υπό το ανώτερο φορτίο, ε_b = Μέση επιμήκυνση, 300 = Το μήκος της περιοχής που βρίσκονταν υπό παραμόρφωση επί δύο και 0.002 = Η απόσταση μεταξύ των διαιρέσεων του επιμηκυσιόμετρου.

Πίνακας 9-12: Στατικό μέτρο ελαστικότητας E_A σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων 28 ημερών (Συγγούνας και Ματίκας, 2008).

Μίγματα PC-WSA- GGBS	Στατικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη 28 ημερών (N/mm^2)		
	$N/\Sigma=0,5$	$N/\Sigma=0,4$	$N/\Sigma=0,35$
100-0-0	31905	33352	40120
80-10-10	37559	43628	45943
70-15-15	29951	34631	32530
60-20-20	31550	32569	41163
40-30-30	30928	-	-

Παρατηρήθηκε ότι (Συγγούνας και Ματίκας, 2008):

- Η αύξηση του περιεχομένου του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έως 20% έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη του σκυροδέματος σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.
- Για μεγαλύτερη ποσότητα WSA-GGBS από 20% στο σκυρόδεμα είναι αναγκαία περισσότερη έρευνα. Φαίνεται ότι η χρήση μεγάλης ποσότητας WSA έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του στατικού μέτρου ελαστικότητας. Το σκυρόδεμα με το μέγιστο στατικό μέτρο ελαστικότητας είναι το PC-WSA-GGBS (80%-20%-20%) σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών, λόγος νερού/συνδετικού ίσο με 0,35 και τιμή ίση με $45943 N/mm^2$.

Παπαγιάννη και Αναστασίου (2009).

Ο αριθμός και το σχήμα των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι συνθέσεις του σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν αναλύονται στην παράγραφο 9.1.2. Παρακάτω φαίνονται το στατικό και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.

Πίνακας 9-13: Στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Στατικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	27,2	32,5	33,6	29,2	27,8	29,2
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	42,9	47,5	47,85	40,9	45,3	44,34

Μια τάση χαμηλότερων μέτρων ελαστικότητας που παρατηρείται σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καλύτερα συμπεριφέρονται ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα μίγματα με $600 kg/m^3$ συνολικής κονιάς. Όπως φαίνεται, το στατικό μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 27 έως 33,5 GPa. Εάν συγκριθούν οι τιμές αυτές με τις υπολογιζόμενες (βάσει του τύπου $E_{cm} = 9,5 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3}$) τιμές $E_{στατικού}$ συμβατικών σκυροδεμάτων φαίνεται ότι οι τιμές στα σκυροδέματα με τέφρα είναι λίγο χαμηλότερες (33,5 GPa αντί 37 GPa). Δηλαδή, τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής με μεγάλο ποσοστό τέφρας έχουν σχετικά χαμηλότερο

μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά σκυροδέματα (Παπαγιάννη και Αναστασίου, 2009).

9.1.6. Αντοχή σε θραύση.

Εθνικό κέντρο έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης, Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων (2006).

Ο Γκίνου Μ. παρασκεύασε κυβόλιθους διπλής και μονής στρώσης διαστάσεων 100 x 200 x 60 mm με αντικατάσταση τσιμέντου από ι.τ. Οι κυβόλιθοι διπλής στρώσης αποτελούνται από δύο στρώσεις μίγματος με διαφορετική σύσταση η κάθε μία, όπως φαίνεται στο Πίνακα 9-14. Ενώ οι κυβόλιθοι μονής στρώσης αποτελούνται από μία στρώση μίγματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 9-16. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συνθέσεις που δημιουργήθηκαν για κυβόλιθο τύπου παραλληλογράμμου διπλής στρώσης.

Πίνακας 9-14: Σύνθεση κυβόλιθων διπλής στρώσης με ιπτάμενη τέφρα.

	1 ^η στρώση				2 ^η στρώση			Συνολικά
	Αδρανές 0-1,5 (kg)	Αδρανές 1,5-2,5 (kg)	Τσιμέντο 42,5N (kg)	Ι.Τ. (kg)	Αδρανές 0-4 (kg)	Τσιμέντο 42,5N (kg)	Ι.Τ. (kg)	Ποσοστό Ι.Τ. (%)
ΔΟΚΙΜΙΟ 1	200	160	50	0	1440	144	0	0
ΔΟΚΙΜΙΟ 2	200	160	47	3	1440	137	7	5
ΔΟΚΙΜΙΟ 3	200	160	45	5	1440	130	14	10
ΔΟΚΙΜΙΟ 4	200	160	42	8	1440	122	22	15
ΔΟΚΙΜΙΟ 5	200	160	40	10	1440	115	29	20
ΔΟΚΙΜΙΟ 6	200	160	37	13	1440	108	36	25

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής σε θραύση.

Πίνακας 9-15: Αντοχή σε θραύση των παραγόμενων κυβόλιθων διπλής στρώσης 28 ημερών.

	Ποσοστό Ι.Τ. (%)	Μ.Ο. Αντοχής σε θραύση (MPa)
ΔΟΚΙΜΙΟ 1	0	17,99
ΔΟΚΙΜΙΟ 2	5	15,41
ΔΟΚΙΜΙΟ 3	10	19,31
ΔΟΚΙΜΙΟ 4	15	22,11
ΔΟΚΙΜΙΟ 5	20	19,13
ΔΟΚΙΜΙΟ 6	25	15,06

Η σύνθεση 1 είναι η κλασική σύνθεση της εταιρείας και από την αντοχή σε θραύση έδωσε αποτέλεσμα 17,99 MPa. Εκτός από την σύνθεση 1 και οι υπόλοιπες συνθέσεις έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η σύνθεση 4 με προσθήκη 15% ι.τ. έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα (22,11 MPa), αλλά ιδιαίτερα ικανοποιητικά

θεωρούνται και τα αποτελέσματα από τις συνθέσεις 3 και 5 με προσθήκη ι.τ. σε ποσοστό 10% και 20% αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συνθέσεις της δεύτερης παραγωγής:

Πίνακας 9-16: Σύνθεση κυβόλιθων μονής στρώσης με ιπτάμενη τέφρα.

	Αδρανές 0-1,5 (kg)	Αδρανές 1,5-2,5 (kg)	Τσιμέντο 42,5N (kg)	Ι.Τ. (kg)	Ποσοστό Ι.Τ. (%)	Νερό (lt)	N/(T+Ι.Τ.)
ΣΥΝΘΕΣΗ 1	200	160	40	15	35	16	0,29
ΣΥΝΘΕΣΗ 2	200	160	40	20	47	17	0,28
ΣΥΝΘΕΣΗ 3	200	160	35	15	40	16	0,32
ΣΥΝΘΕΣΗ 4	200	160	35	20	53	17	0,31
ΣΥΝΘΕΣΗ 5	200	160	50	0	0	20	0,40

Τα αποτελέσματα αντοχής σε θραύση παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 9-17: Αντοχή σε θραύση κυβόλιθων μονής στρώσης με ιπτάμενη τέφρα.

	Ι.Τ. (kg)	Ποσοστό Ι.Τ. (%)	Μ.Ο. Αντοχής σε θραύση (MPa)
ΣΥΝΘΕΣΗ 1	15	35	18,32
ΣΥΝΘΕΣΗ 2	20	47	24,04
ΣΥΝΘΕΣΗ 3	15	40	19,65
ΣΥΝΘΕΣΗ 4	20	53	17,12
ΣΥΝΘΕΣΗ 5	0	0	22,13

Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι η σύνθεση 2 με προσθήκη 20 kg τέφρας και με λόγο $N/(T+Ι.Τ.)=0,28$ έδωσε τις υψηλότερες τιμές αντοχής σε θραύση (24,04 MPa), ενώ ιδιαίτερα ικανοποιητικά θεωρούνται και τα αποτελέσματα της σύνθεσης 5 (22,13 MPa). Τέλος οι τιμές των αντοχών σε θραύση των υπόλοιπων συνθέσεων είναι χαμηλότερες, αλλά πολύ κοντά στις άλλες τιμές (Εθνικό κέντρο έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης, Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων, 2006).

9.2. Δοκιμές σε οπλισμένα στοιχεία.

9.2.1. Περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές.

Στην μελέτη των Sunilaa G. και Dr. Thenmozhi R. (2011) χρησιμοποιήθηκε κοινό τσιμέντο Portland (OPC-43 grade) σύμφωνα με τον IS 8112:1989, τοπική άμμος ποταμού σύμφωνα με την Zone III σαν λεπτόκοκκο αδρανές και πέτρες γρανίτη που σπάνε δύσκολα από εγκεκριμένο λατομείο κοντά στο Coimbatore Tamilnadu στην Ινδία σαν χονδρόκοκκο αδρανές. Τα αδρανή αυτά είναι σύμφωνα με τον IS: 383 (1970). Επίσης χρησιμοποιήθηκε πόσιμο νερό σε όλα τα μείγματα. Τα ειδικά βάρη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 9-18.

Πίνακας 9-18: Ειδικά βάρη υλικών (Sunilaa and Dr. Thenmozhi, 2011).

Υλικό	Ειδικό Βάρος
Τσιμέντο	3.15
Ιπτάμενη τέφρα	2.2
Ενεργή ιπτάμενη τέφρα	2.3
Χονδρόκοκκα αδρανή	2.86
Λεπτόκοκκα αδρανή	2.6

Η ιπτάμενη τέφρα σε μορφή ξηρής σκόνης ελήφθη από το εργοστάσιο ηλεκτρισμού Mettur Thermal στην Ινδία και συμφωνεί με τον IS: 3812 Part 1-2003 (Sunilaa and Dr. Thenmozhi, 2011).

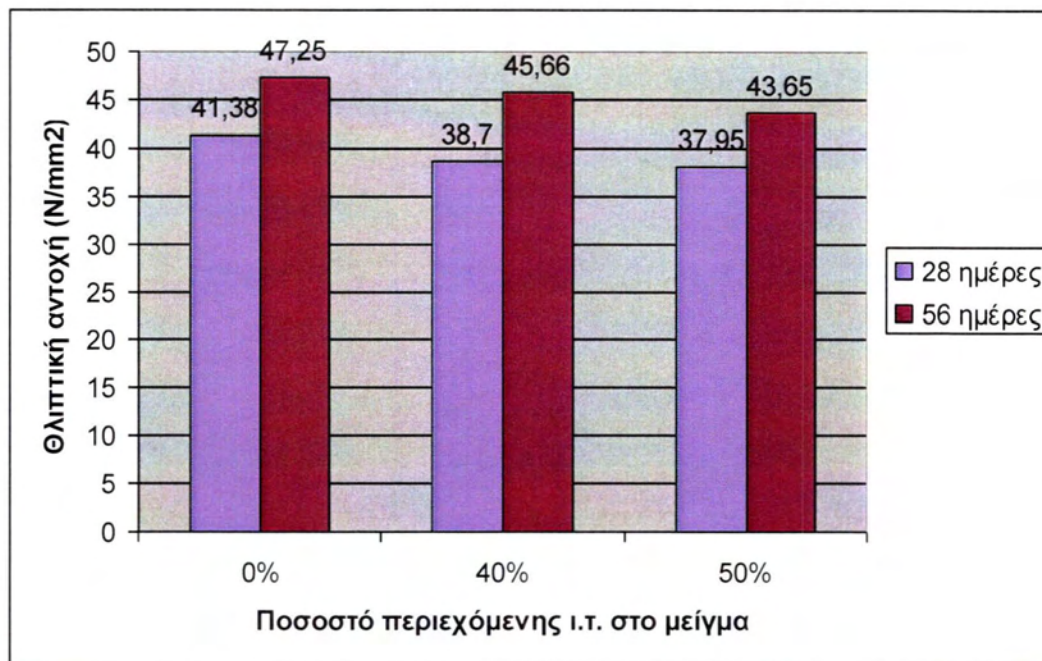
Στην πειραματική τους εργασία οι Preetha R., Joanna P.S., Rooby J. και Pillai C.S. χρησιμοποίησαν κοινό τσιμέντο Portland (OPC), άμμο ποταμού, ιπτάμενη τέφρα (τύπου F) και πόσιμο νερό. Οι δοκοί φτιάχτηκαν από σκυρόδεμα τύπου M30. Επίσης χρησιμοποιήθηκε 0,75% υπερρευστοποιητής conplast για τα δοκάρια με οπλισμένο σκυρόδεμα από τσιμέντο OPC και 1,3% για τα δοκάρια με οπλισμένο σκυρόδεμα που περιείχε ιπτάμενη τέφρα. Η αναλογία νερού-συνδετικό υλικό και για τους δύο τύπους δοκών, με και χωρίς ι.τ., ήταν 0,45. Για τον διαμήκη οπλισμό και τους συνδετήρες χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι τύπου Fe 500 (Preetha, Joanna, Rooby and Pillai, 2013).

9.2.2. Αντοχή σε κάμψη.

Preetha R., Joanna P.S., Rooby J. και Pillai C.S (2013).

Από τις 12 δοκούς που εξετάστηκαν, οι 4 κατασκευάστηκαν χωρίς ιπτάμενη τέφρα και οι υπόλοιπες 8 κατασκευάστηκαν με 40% και 50% ι.τ. Από αυτές ,οι 6 (2 χωρίς ι.τ., 2 με 40% ι.τ. και 2 με 50% ι.τ.) εξετάστηκαν την 28^η μέρα και οι άλλες 6 (2 χωρίς ι.τ., 2 με 40% ι.τ. και 2 με 50% ι.τ.) την 56^η μέρα από την μέρα σκυροδέτησης. Το μήκος των δοκών ήταν 2500 mm και η διατομή ήταν 150 mm x 250 mm.

Πίνακας 9-19: Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων στις 28 και στις 56 μέρες από την σκυροδέτηση.



Πίνακας 9-20: Λεπτομέρειες δοκών (Preetha R., Joanna P.S., Rooby J. και Pillai C.S., 2013).

	Αριθμός Δοκού	Δοκιμή Δοκών (μέρες)	Οπλισμός των δοκών			
			Διαμήκης		Συνδετήρες	
			Άνω	Κάτω	Διάμετρος (mm)	Διάστημα (mm)
1	CB0%	28	2#10	2#12 + 1#16	8	120
2	CB40%		2#10	2#12 + 1#16	8	120
3	CB50%		2#10	2#12 + 1#16	8	120
4	CB0%	56	2#10	2#12 + 1#16	8	120
5	CB40%		2#10	2#12 + 1#16	8	120
6	CB50%		2#10	2#12 + 1#16	8	120

Η δοκιμή διεξήχθη σε ένα πλαίσιο φόρτισης με ικανότητα 400 kN το οποίο υπέβαλε τις δοκούς σε δύο σημειακά φορτία. Χρησιμοποιήθηκαν: μηκυσιόμετρο TML στο ενδιάμεσο διάστημα της ράβδου οπλισμού, μηκυσιόμετρα στην επιφάνεια του σκυροδέματος στην κεντρική περιοχή της δοκού και στην πάνω επιφάνειά της στην περιοχή της καθαρής κάμψης και LVDTs για την μέτρηση των παραμορφώσεων σε διάφορες θέσεις, ένα στο ενδιάμεσο διάστημα, 2 κάτω από τα σημεία φόρτισης και 2 κοντά στις ακραίες στηρίξεις. Τα μηκυσιόμετρα και τα LVDTs ενώθηκαν με έναν

καταγραφέα δεδομένων από τον οποίο πάρθηκαν οι αναγνώσεις με την βοήθεια ενός υπολογιστή σε κάθε διάστημα φόρτισης μέχρι να συμβεί η αστοχία της δοκού.

Κατά τις δοκιμές παρατηρήθηκαν κατακόρυφες ρωγμές κάμψης και η τελική αστοχία συνέβη εξαιτίας της συντριβής από σύνθλιψη του σκυροδέματος με σημαντική τελική παραμόρφωση. Όταν το φορτίο έφτασε στο μέγιστο η επικάλυψη του σκυροδέματος στη θλιπτική ζώνη άρχισε να αστοχεί και στους δύο τύπους δοκών με και χωρίς ι.τ. Η 1^η ρωγμή εμφανιζόταν πάντα κοντά στη μέση της δοκού. Οι ρωγμές στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι σχεδόν κατακόρυφες και υποδηλώνουν αστοχία δοκών σε κάμψη.



Εικόνα 9-1: Σχηματισμοί ρωγμών (Preetha R., Joanna P.S., Rooby J. και Pillai C.S., 2013).

Πίνακας 9-21: Σύγκριση των τιμών πλαστιμότητας κάθε σύνθετου μείγματος (με ι.τ.) με το μείγμα αναφοράς (χωρίς ι.τ.).

Δοκοί με ποσοστό ι.τ./Μέρα δοκιμής	Απόκλιση κατά την διαρροή (mm)	Μέγιστη απόκλιση (mm)	Πλαστιμότητα μετατόπισης	Μ.Ο. των δύο ίδιων δοκιμών	Ποσοστό μείωσης πλαστιμότητας καθώς αυξάνεται η ι.τ.
CB 0% - 28	4,8	20	4,17	4,63	-
CB 0% - 28	5,4	27,5	5,09		
CB 40% - 28	5	20,6	4,12	4,24	-8,42%
CB 40% - 28	5,8	25,2	4,35		
CB 50% - 28	5	19,3	3,86	4,15	-10,37%
CB 50% - 28	5	22,2	4,44		
CB 0% - 56	4,6	24,6	5,34	5,81	-
CB 0% - 56	3,5	22	6,28		
CB 40% - 56	6,2	28,6	4,61	4,52	-22,20%
CB 40% - 56	4,9	21,7	4,43		
CB 50% - 56	5	21,6	4,32	4,73	-18,59%
CB 50% - 56	4	20,5	5,13		

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι πλαστιμότητες μετατόπισης των διαφόρων μειγμάτων. Στον Μ.Ο. αναφέρονται οι μέσοι όροι των δύο δοκών με ίδιο ποσοστό ι.τ. και ίδιας μέρας δοκιμής, ενώ στην επόμενη στήλη φαίνονται οι μειώσεις των τιμών των Μ.Ο. των δοκών με ι.τ. συγκριτικά με τις δοκούς αναφοράς (χωρίς ι.τ.). Η μέγιστη πλαστιμότητα εμφανίζεται στην δοκό CB 50% - 56 με τιμή 5,13 ενώ η ελάχιστη στην δοκό CB 50% - 28 με τιμή 3,86. Αυτό όμως που έχει νόημα να συγκρίνουμε είναι η διαφορά των δοκών με ι.τ. με τις δοκούς χωρίς ι.τ. Οι δοκοί CB 40% - 28 παρουσιάζουν την μικρότερη μείωση πλαστιμότητας από τις δοκούς αναφοράς -8,42% σε σχέση με την μείωση κατά -10,37% που παρουσιάζουν οι δοκοί CB 50% - 28. Στις 56 ημέρες όμως αυτό ανατρέπεται καθώς οι δοκοί με 40% ι.τ. παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση της πλαστιμότητας (-22,20%) από ότι οι δοκοί με 50% ι.τ. (-18,59%). Από την έρευνα αυτή προέκυψε ότι οι δοκοί χωρίς ι.τ. παρουσιάζουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα μετακινήσεων από τις αντίστοιχες δοκούς με 40% ή 50% ι.τ. Και μάλιστα η διαφορά αυτή αυξάνει με την πάροδο του χρόνου.

Γενικά, οι δοκοί που κατασκευάστηκαν με υψηλό ποσοστό ι.τ. είναι ικανές να υποβάλλονται σε μεγάλες παραμορφώσεις πριν την αστοχία χωρίς σημαντική μείωση της απόκρισης. Αυτό δείχνει ότι οι δοκοί που περιέχουν ι.τ. μπορούν να προταθούν για δομικά μέλη που θα υποστούν μεγάλη παραμόρφωση όπως π.χ. συμβαίνει με ξαφνικές δυνάμεις λόγω σεισμού (Preetha R., Joanna P.S., Rooby J. και Pillai C.S., 2013).

Sunilaa και Dr. Thenmozhi (2011).

Στην παρούσα μελέτη έγινε ενεργοποίηση της ιπτάμενης τέφρας χρησιμοποιώντας οξειδίο του ασβεστίου και πυριτικό νάτριο σε αναλογία 1:8. Η απαιτούμενη ποσότητα του πυριτικού νατρίου σε μορφή τζελ και του οξειδίου του ασβεστίου σε μορφή πάστας αναμίχθηκαν σε ένα δοχείο και θερμάνθηκαν στους 103°C για να διασφαλισθεί η σωστή ανάμιξη. Μετά προστέθηκε η ι.τ. και αναμίχθηκε καλά.

Μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος με ενεργή ι.τ. και ι.τ. χρησιμοποιώντας μεταβολή του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου κατά μάζα (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% και 60%). Τα μίγματα του σκυροδέματος σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τον IS: 10262: 2009 και είχαν στόχο αντοχής τα 27 MPa. Οι δοκιμές των μειγμάτων έγιναν σύμφωνα με τον IS 516: 1959.

Οι δοκοί που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη σχεδιάστηκαν ως κάτω οπλισμένες δοκοί. Χρησιμοποιήθηκαν 2Φ10 HYSB κάτω και 2Φ8 HYSB πάνω σαν κύριος οπλισμός. Συνδετήρες δύο σκελών ΣΦ6 παρέχονται ανά διαστήματα των 125 mm.

Πίνακας 9-22: Λεπτομέρειες του προγράμματος δοκιμών (Sunilaa G. και Dr. Thenmozhi R, 2011).

Σειρά δοκών	Διατομή δοκών: 100mm x 200mm, Μήκος: 2.0m, Εύρος επιρροής: 1.5m			
	Ονομασία δοκών	Ποσοστό τέφρας	Αναλογία Ν/Σ	Αριθμός δειγμάτων
B1	C1	0	0,45	1 x 3
	F1,F2,F3,F4,F5,F6	10,20,30,40,50,60	0,45	6 x 3
	AF1,AF2,AF3,AF4,AF5,AF6	10,20,30,40,50,60	0,45	6 x 3

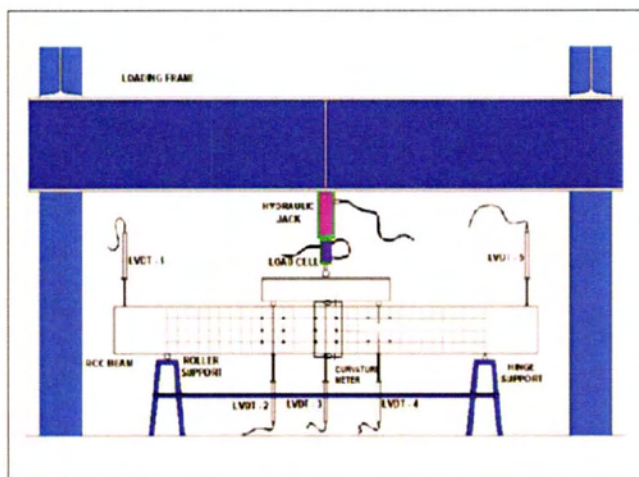
C1: δοκοί αναφοράς (χωρίς ι.τ.), F_i: δοκοί με ι.τ., AF_i: δοκοί με ενεργή ι.τ.

Πίνακας 9-23: Θλιπτικές και εφελκυστικές αντοχές σε MPa των διαφόρων μειγμάτων σκυροδέματος.

Μείγματα	7 ημέρες		14 ημέρες		28 ημέρες		56 ημέρες		90 ημέρες	
	fck	fct	fck	fct	fck	fct	fck	fct	fck	fct
CM	18,1	2,25	21,6	2,35	27,3	4,22	28,3	4,88	28,9	4,95
FA 10	15	0,91	16,1	1,65	19	4,08	28	4,68	29	4,74
FA 20	16,25	1,15	15,8	1,75	19,6	4,26	28,2	4,73	29,3	4,79
FA 30	16,5	1,25	15,4	1,85	19,8	4,38	29	4,75	29,8	4,8
FA 40	15,23	1,23	14	1,68	18,5	4,02	26,2	4,4	27	4,5
FA 50	14	1,21	13,6	1,56	18	3,76	25	4,2	25,5	4,3
FA 60	12	1,12	12,5	1,25	17,7	3,51	23,6	3,96	24	4,22
AFA 10	18	2,1	20,2	2,4	28	4,75	29,3	5,3	30,5	5,92
AFA 20	18,2	2,25	21,6	3,1	28,5	4,96	30,1	5,57	31	6,1
AFA 30	19	2,45	22,5	3,85	29,4	5,16	31	5,66	32	6,18
AFA 40	19,4	2,85	22,7	4,25	29,6	5,23	31,3	5,78	32,4	6,29
AFA 50	19,8	3,15	23	4,32	29,8	5,35	31,5	5,86	32,6	6,52
AFA 60	16,9	2,95	22,1	4,12	28,25	5	30,75	4,81	28,7	5,08

f_{ck} : Μέση θλιπτική αντοχή (MPa), f_{ct} : Μέση εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη (MPa).

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι στις 28 ημέρες όλα τα μείγματα με ενεργή ι.τ. έχουν μεγαλύτερη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη από αυτές του μείγματος χωρίς ι.τ. Τα μείγματα με ι.τ. παρουσιάζουν μειωμένες τιμές αντοχών εκτός από τις περιπτώσεις Fa 20 και FA 30 που παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Σε βάθος χρόνου (90 ημέρες) όλα τα μείγματα με ενεργή ι.τ. παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές από αυτές του μείγματος αναφοράς, εκτός από την περίπτωση AFA 60 που έχει σχεδόν ίδια τιμή θλιπτικής αντοχής με του μείγματος αναφοράς. Οι τιμές των θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών των μειγμάτων με ι.τ. είναι είτε μεγαλύτερες από του μείγματος αναφοράς, είτε αρκετά συγκρίσιμες με αυτές.



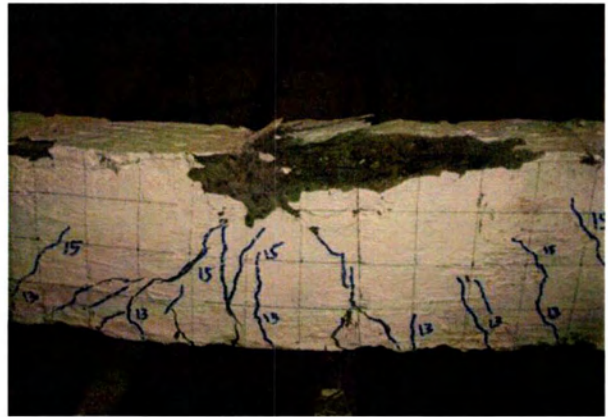
Εικόνες 9-2 α,β: Αριστερά φαίνεται η διαδικασία δοκιμής και δεξιά η δοκός μετά την δοκιμή με τις ρωγμές κάμψης (Sunilaa G. και Dr. Thenmozhi R, 2011).

Όλες οι δοκοί ελέγχθηκαν σε κάμψη σε πλαίσιο φόρτισης ικανότητας 1000 kN. Το εύρος επιρροής τους ήταν 1500mm, στηρίζονταν απλά και υποβλήθηκαν σε δύο σημειακά φορτία. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας LVDT (Linear Variable Differential Transducers). Επίσης καταγράφηκαν οι ρωγμές σε κάθε αύξηση του φορτίου. Όλες οι δοκοί ελέγχθηκαν μέχρι αστοχίας. Η αντοχή μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μετρητή καμπυλότητας.

Με την εφαρμογή των φορτίων τα δείγματα ελέγχου έδειξαν ρωγμές στα 25 kN και το τελικό φορτίο παρατηρήθηκε στα 30 kN με μέγιστη παραμόρφωση 15,67mm. Στην περίπτωση της ι.τ. η αντικατάσταση 30% είχε μέγιστο φορτίο πρώτης ρωγμής 22 kN και τελικό φορτίο 24 kN με μέγιστη παραμόρφωση 13,7mm.



Εικόνες 9-3 α,β: Οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν στις δοκούς με ι.τ. (Sunilaa G. και Dr. Thenmozhi R, 2011).



Εικόνα 9-4 α,β: Οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν στις δοκούς με ε.ι.τ. (Sunilaa G. και Dr. Thenmozhi R, 2011).

Πίνακας 9-24: Σύγκριση πλαστιμότητας των διαφόρων δοκών.

Μείγματα	Πλάτος ρωγμής (mm)	Πλαστιμότητα μετατόπισης	Ποσοστό μείωσης/ αύξησης
C1	0,2	2,15	-
FA 1	0,1	2,34	+8,84%
FA 2	0,06	2,37	+10,24%
FA 3	0,12	2,36	+9,77%
FA 4	0,15	2,31	+7,44%
FA 5	0,07	2,2	+2,33%
FA 6	0,2	2,18	+1,40%
AFA 1	0,19	2,28	+6,05%
AFA 2	0,18	2,32	+7,91%
AFA 3	0,2	2,46	+14,42%
AFA 4	0,05	2,52	+17,21%
AFA 5	0,11	2,77	+28,84%
AFA 6	0,12	2,06	-4,19%

Όπως βλέπουμε όλες οι δοκοί παρουσιάζουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα από την πλαστιμότητα της δοκού χωρίς ι.τ. εκτός από την περίπτωση AFA 6 η οποία παρουσιάζει μια μικρή μείωση της πλαστιμότητας, αλλά είναι συγκρίσιμη και πολύ κοντά σε αυτήν της δοκού C1. Την καλύτερη πλαστιμότητα την εμφανίζει η δοκός AFA 5 που παρουσιάζει αύξηση πλαστιμότητας κατά 28,84%. Όσο αυξάνεται η πλαστιμότητα ενός μέλους μιας κατασκευής τόσο πιο μεγάλες παραμορφώσεις μπορεί να απορροφήσει χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής του.

Τέλος, να αναφερθεί ότι η καμπτική συμπεριφορά των δοκών με ε.ι.τ. είναι παρόμοια με αυτή των δοκών αναφοράς.

9.3. Συγκριτική μελέτη όπλων στοιχείων.

Αρχικά θα συγκρίνουμε πόση αύξηση ή μείωση των θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών 28 ημερών παρατηρήθηκε σε κάθε μία από τις παραπάνω υποκαταστάσεις που πραγματοποιήθηκαν σε όπλα στοιχεία.

Πίνακας 9-25: Θλιπτικές αντοχές δοκιμών 28 ημερών.

Ερευνητής	Σειρά δοκιμών	Ποσοστό (%)	Θλιπτικές αντοχές 28 ημ. (MPa)	Αύξηση ή μείωση θλιπτικής αντοχής (%)	Λόγος Ν/Σ
Στιβανάκης	Γ1 - Προσθήκη μη αλεσμένης Ι.Τ. (κυβικά δοκίμια)	0	48,1	-	0,5
		10	42,2	-12,27%	0,54
		20	34,3	-28,69%	0,58
		30	33,1	-31,19%	0,62
	Γ2 - Δοκίμια με αλεσμένη Ι.Τ. (κυβικά δοκίμια)	0	44,4	-	0,5
		10	48,4	+9,01%	0,5
		20	51,4	+15,77%	0,5
		30	47,2	+6,31%	0,5
		40	46	+3,6%	0,5
		50	41,6	-6,31%	0,5
		60	34	-23,42%	0,5
		70	27,9	-37,16%	0,5
		80	14,1	-68,24%	0,5
		90	4,3	-90,32%	0,5
94	0	-100,00%	0,5		
Συγγούνας και Ματίκας	Προσθήκη τέφρας ανακυκλωμένου χαρτιού (WSA) και σκωρίας υψικαμίνου (GGBS) (κυλινδρικά δοκίμια)	0-0	23,9	-	0,5
		10-10	28,3	+18,41%	0,5
		15-15	29,2	+22,18%	0,5
		20-20	31,5	+31,80%	0,5
		30-30	29	+21,34	0,5
		0-0	32,7	-	0,4
		10-10	37,3	+14,07%	0,4
		15-15	37,1	+13,46%	0,4
		20-20	41,2	+25,99%	0,4
		0-0	38,2	-	0,35
		10-10	42,9	+12,30%	0,35
		15-15	39	+2,09%	0,35
		20-20	35,5	-7,07%	0,35

Πίνακας 9-26: Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών 28 ημερών.

Ερευνητής	Σειρά δοκιμών	Ποσοστό (%)	Εφελκυστικές αντοχές 28 ημ. (MPa)	Αύξηση ή μείωση εφελκυστικής αντοχής (%)	Λόγος Ν/Σ
Συγγούνας και Ματίκας	Προσθήκη τέφρας ανακυκλωμένου χαρτιού (WSA) και σκωρίας υψικαμίνου (GGBS) (κυλινδρικά δοκίμια)	0-0	2,9	-	0,5
		10-10	3,41	+17,59%	0,5
		15-15	2,87	-1,03%	0,5
		20-20	3,52	+21,38%	0,5
		30-30	3,55	+22,41%	0,5
		0-0	3,34	-	0,4
		10-10	3,36	+0,60%	0,4
		15-15	2,76	-17,37%	0,4
		20-20	3,86	+15,57%	0,4
		0-0	3,57	-	0,35
		10-10	3,84	+7,56%	0,35
		15-15	3,62	+1,40%	0,35
		20-20	3,61	+1,12%	0,35

Στη συνέχεια παραθέτουμε τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης σχετικά με το στατικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη δοκιμών.

Πίνακας 9-27: Στατικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμών 28 ημερών.

Ερευνητής	Σειρά δοκιμών	Ποσοστό (%)	Στατικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη 28 ημ. (MPa)	Αύξηση ή μείωση στατικού μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη (%)	Λόγος Ν/Σ
Συγγούνας και Ματίκας	Προσθήκη τέφρας ανακυκλωμένου χαρτιού (WSA) και σκωρίας υψικαμίνου (GGBS) (κυλινδρικά δοκίμια)	0-0	31905	-	0,5
		10-10	37559	+17,72%	0,5
		15-15	29951	-6,12%	0,5
		20-20	31550	-1,11%	0,5
		30-30	30928	-3,06%	0,5
		0-0	33352	-	0,4
		10-10	43628	+30,81%	0,4
		15-15	34631	+3,83%	0,4
		20-20	32569	-2,35%	0,4
		0-0	40120	-	0,35
		10-10	45943	+14,51%	0,35
		15-15	32530	-18,92%	0,35
		20-20	41163	+2,60%	0,35

Τέλος, παραθέτουμε τον πίνακα με την συγκριτική μελέτη των αντοχών σε θραύση κυβόλιθων μονής και διπλής στρώση 28 ημερών

Πίνακας 9-28: Αντοχή σε θραύση κυβόλιθων 28 ημερών.

Ερευνητής	Σειρά δοκιμίων	Ποσοστό (%)	Αντοχή σε θραύση 28 ημ. (MPa)	Αύξηση ή μείωση αντοχής σε θραύση (%)	Λόγος N/Σ
Εθνικό κέντρο έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης, Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων, Γκίνου	Δοκίμια διπλής στρώσης με Ι.Τ. (κυβόλιθοι)	0	17,99	-	
		5	15,41	-14,34%	
		10	19,31	+7,34%	
		15	22,11	+22,90%	
		20	19,13	+6,34%	
		25	15,06	-16,29%	
	Δοκίμια μονής στρώσης με Ι.Τ. (κυβόλιθοι)	0	22,13	-	0,4
		35	18,32	-17,22%	0,29
		40	19,65	-11,21%	0,32
		47	24,04	+8,63%	0,28
		53	17,12	-22,64%	0,31

Παρατηρώντας τις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες βλέπουμε ότι κατά τον Στιβανάκη προσθήκη 10%-50% αλεσμένης ι.τ. δίνει πολύ καλά αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής. Επίσης, κατά τους Συγγούνα και Ματίκα η προσθήκη τέφρας ανακυκλωμένου χαρτιού και σκωρίας υψικαμίνου δίνει άριστες θλιπτικές αντοχές σε όλα τα ποσοστά προσθήκης των παραπάνω παραπροϊόντων καθώς και άριστες εφελκυστικές αντοχές για όλες τις συνθέσεις εκτός αυτής με 70-15-15 τσιμέντο-τέφρα ανακυκλωμένου χαρτιού-σκωρία υψικαμίνου για λόγο N/T=0,4. Ο Γκίνου μελετώντας την αντοχή σε θραύση κυβόλιθων απέδειξε ότι η προσθήκη ι.τ. σε κυβόλιθους διπλής στρώσης έχει θετικά αποτελέσματα σε ποσοστά 10%-20%, ενώ σε κυβόλιθους μονής στρώσης σε ποσοστό 47%. Τέλος, όσον αφορά το στατικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη οι Συγγούνας και Ματίκας διαπίστωσαν ότι αρνητικά αποτελέσματα έχει μόνο η σύνθεση 70-15-15 τσιμέντου-τέφρας ανακυκλωμένου χαρτιού-σκωρίας υψικαμίνου για λόγο N/T=0,35.

9.4. Συγκριτική μελέτη οπλισμένων στοιχείων.

Θα συγκρίνουμε πόση αύξηση ή μείωση παρατηρήθηκε στην πλαστιμότητα μετατόπισης 28 ημερών στις παραπάνω οπλισμένες δοκούς.

Πίνακας 9-29: Σύγκριση πλαστιμότητας οπλισμένων δοκών 28 ημερών.

Ερευνητές	Μείγματα	Πλαστιμότητα μετατόπισης	Ποσοστό μείωσης/ αύξησης
Preetha R., Joanna P.S., Rooby J και Pillai C.S.	CB 0%	4,63	-
	CB 40%	4,24	-8,42%
	CB 50%	4,15	-10,37%
Sunilla G. και Dr. Thenmozhi R.	C1	2,15	-
	FA 1	2,34	+8,84%
	FA 2	2,37	+10,24%
	FA 3	2,36	+9,77%
	FA 4	2,31	+7,44%
	FA 5	2,20	+2,33%
	FA 6	2,18	+1,40%
	AFA 1	2,28	+6,05%
	AFA 2	2,32	+7,91%
	AFA 3	2,46	+14,42%
	AFA 4	2,52	+17,21%
	AFA 5	2,77	+28,84%
	AFA 6	2,06	-4,19%

Μπορεί η έρευνα των Preetha R. et al. να δίνει δοκούς με μεγαλύτερη πλαστιμότητα όμως σκοπός μας είναι η σύγκριση των σύνθετων δοκών (με σκυρόδεμα με ι.τ.) με τις δοκούς αναφοράς (χωρίς ι.τ.). Επομένως καλύτερα αποτελέσματα έχουν οι δοκοί των Sunilla and Thenmozhi των οποίων οι πλαστιμότητες των δοκών με ι.τ. παρουσιάζουν αύξηση έως και 28,84% σε σχέση με τις δοκούς χωρίς ι.τ. Και οι δοκοί όμως των Preetha et al. δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα πλαστιμότητας.

10. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.

10.1. Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα περιγραφούν βήμα προς βήμα τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Αναλύονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ο τρόπος με τον οποίο παρασκευάστηκαν τα κυβικά και τα κυλινδρικά δοκίμια και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές θραύσης των δοκιμίων αυτών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών και θα αναφερθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε 18 κυβικά και 9 κυλινδρικά δοκίμια συνολικά οι οποίες συμπεριλαμβάνανε την θλιπτική δοκιμή των πρώτων (κυβικών) δοκιμίων και την εφελκυστική δοκιμή των δεύτερων (κυλινδρικών) δοκιμίων. Συνεπώς, από τις δοκιμές αυτές μετρήθηκαν οι αντοχές σε θλίψη των κυβικών δοκιμίων και οι αντοχές σε εφελκυσμό των κυλινδρικών δοκιμίων. Όπως θα δούμε παρακάτω, έγιναν 3 διαφορετικές σκυροδετήσεις, η μία με 100% τσιμέντο, η μία με αντικατάσταση 15% του βάρους του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα και η τελευταία με αντικατάσταση 30% του βάρους του τσιμέντου από ι.τ. Σκοπός μας ήταν να διαπιστώσουμε την επιρροή της προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Για να καταλήξουμε στις παραμέτρους που διαλέξαμε, δηλαδή στη μέγιστη ποσότητα υποκατάστασης του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα, βασιστήκαμε στην έρευνα του Β. Στιβανάκη (2003) 'Έρευνα και ανάπτυξη νέων δομικών υλικών από στερεά παραπροϊόντα λιγνιτικής καύσης ενεργειακού κέντρου Μεγαλόπολης'. Έπειτα από πειράματα που πραγματοποίησε αναφέρει ότι μέχρι και υποκατάσταση 40% του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης, οι θλιπτικές αντοχές 28 ημερών είναι συγκρίσιμες με αυτές του καθαρού τσιμέντου, με τις μέγιστες τελικές αντοχές να αναπτύσσονται σε ποσοστό υποκατάστασης 25-35%. Γενικά, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας μέχρι και 30% αλεσμένης στα ~3.500 Blaine είναι επιτρεπτή και δεν οδηγεί σε μείωση των αντοχών 28 ημερών. Έτσι λοιπόν, αποφασίσαμε να παρασκευάσουμε τρεις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος, μία με καθαρό τσιμέντο Portland, μία με 15% υποκατάσταση και μία με 30% υποκατάσταση του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα. Για κάθε μείγμα κατασκευάσαμε από 6 κυβικά (C1, C2, C3, C4, C5, C6) και από 3 κυλινδρικά (C'1, C'2, C'3) δοκίμια.

Πίνακας 10-1: Ονομασία δοκιμίων.

	100% τσιμέντο	85% Τσιμέντο + 15% ι.τ.	70% Τσιμέντο + 30% ι.τ.
Κυβικά δοκίμια	C1-0 C2-0 C3-0 C4-0 C5-0 C6-0	C1-15% C2-15% C3-15% C4-15% C5-15% C6-15%	C1-30% C2-30% C3-30% C4-30% C5-30% C6-30%
Κυλινδρικά δοκίμια	C'1-0 C'2-0 C'3-0	C'1-15% C'2-15% C'3-15%	C'1-30% C'2-30% C'3-30%

Να σημειωθεί ότι οι δύο πρώτες σκυροδετήσεις (με σκέτο τσιμέντο και με 85% τσιμέντο+15% ιπτάμενη τέφρα) πραγματοποιήθηκαν στις 1/10/14 ενώ η τρίτη σκυροδέτηση (70% τσιμέντο+30% ιπτάμενη τέφρα) πραγματοποιήθηκε στις 7/10/14.

10.2. Χρησιμοποιούμενα υλικά.

Για τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου ΙΙ (CEM ΙΙ 42,5) το οποίο ήταν συσκευασμένο σε σάκους των 40 kg. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε πόσιμο νερό όπως ορίζει ο Ν.Κ.Τ.Σ., το οποίο ήταν καθαρό και απαλλαγμένο από βλαπτικές ουσίες. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλίκι και άμμος σπαστήρα. Τόσο το τσιμέντο όσο και τα αδρανή προμηθεύτηκαν από μια μάντρα υλικών του Βόλου.

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι ασβεστούχα. Την προμηθευτήκαμε από την εταιρεία Lafarge και συγκεκριμένα από το εργαστήριο ΕΚΕΤ (Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου) της εταιρείας στην Αθήνα και προέρχεται από τον ατμοηλεκτρικό σταθμό Αγίου Δημητρίου Κοζάνης. Η χημική της σύσταση, η οποία μας στάλθηκε ύστερα από επεξεργασία της τέφρας στο εργαστήριο της Lafarge, φαίνεται στον Πίνακα 10-2. Λόγω της λεπτότητάς της δεν χρειάστηκε να υποστεί άλεση σε σφαιρόμυλο.

Τέλος, να σημειωθεί ότι στην εργασία μας χρησιμοποιήσαμε ρευστοποιητή Sikament[®] 150 S. Το Sikament[®] 150 S είναι υπερρευστοποιητής μεγάλου φάσματος εφαρμογών. Ενεργεί ως ρευστοποιητής σε μικρή δοσολογία (0,2-0,6% κατά βάρος τσιμέντου) και ως υπερρευστοποιητής σε μεγάλη δοσολογία (0,6-1,2% κατά βάρος τσιμέντου), διευκολύνοντας τη σκυροδέτηση και την παραγωγή ποιοτικού σκυροδέματος. Είναι εγκεκριμένο υλικό σύμφωνα με ΕΛΟΤ EN 934-2 Π 11.1 & 11.2 (Επιβραδυντής του χρόνου πήξης/ Μειωτής νερού υψηλής δραστηριότητας/ Υπερρευστοποιητής), (2001). Όσον αφορά την εμφάνισή του, είναι υγρό διάλυμα, χρώματος σκούρου καφέ, πυκνότητας ~1,16 kg/l (στους 20°C), με τιμή pH 8-11

(στους 20°C) και ελεύθερο χλωριόντων. Τα πλεονεκτήματά του είναι τα εξής: α)βελτιώνει τις ιδιότητες φρέσκου και σκληρυμένου σκυροδέματος, β)βελτιώνει τις επιφάνειες σε εμφανή σκυροδέματα, γ)αυξάνει τις αντοχές του μείγματος και δ)δεν περιέχει χλώριο, έτσι είναι κατάλληλο για οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα (Sikament). Κατά την σκυροδέτηση χρησιμοποιήθηκε για βελτίωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος.

Πίνακας 10-2: Χημική σύσταση ιπτάμενης τέφρας.

Κωδικός δείγματος		39476
Περιγραφή		Τέφρα Αγ. Δημητρίου
Ημερομηνία παραλαβής		18-07-2014
	Μέθοδος	
SiO ₂ (%)	ISO 29581-2	30,12
Al ₂ O ₃ (%)	ISO 29581-2	9,98
Fe ₂ O ₃ (%)	ISO 29581-2	3,98
CaO (%)	ISO 29581-2	34,10
MgO (%)	ISO 29581-2	2,90
K ₂ O (%)	ISO 29581-2	1,09
Na ₂ O (%)	ISO 29581-2	0,70
SO ₃ (%)	ISO 29581-2	5,43
TiO ₂ (%)	ISO 29581-2	0,39
P ₂ O ₅ (%)	ISO 29581-2	0,29
Cr ₂ O ₃ (%)	ISO 29581-2	0,04
Mn ₂ O ₃ (%)	ISO 29581-2	0,06
ZnO (%)	ISO 29581-2	0,01
SrO (%)	ISO 29581-2	0,03
Sum (%)	ISO 29581-2	99,53
LOI (%)	EN 196-2	10,41
CaOf (%)	Lafarge In House	9,39
Insoluble residue (%)	EN 196-2	26,93
SO ₃ (%)	EN 196-2	5,57
Absolute density (g / cm ³)	ASTM C188	2,65
Blaine (cm ² / g)	EN 196-6	7643
R45μm (%)	EN 196-6	5,22

10.3. Διαδικασία παρασκευής δοκιμίων.

10.3.1. Υπολογισμός αναλογιών για την σύνθεση του σκυροδέματος.

Οι αναλογίες των υλικών (τσιμέντο, νερό, αδρανή) που χρησιμοποιήθηκαν για τις συνθέσεις των μειγμάτων υπολογίστηκαν σύμφωνα με την εργασία των Μιχάλης και Δημητρίου (2007).

Υπολογίζονται στην συνέχεια οι ποσότητες των υλικών που χρειάζονται για την παρασκευή σκυροδέματος 6 κυβικών δοκιμίων, 15x15x15 cm, και 3 κυλινδρικών δοκιμίων, 15x30 cm, κατηγορίας C20/25 με $S_{εργ.} = 5$ MPa ($S_{εργ.}$: τυπική απόκλιση, αν δεν υπάρχουν στοιχεία τυπικής αποκλίσεως τότε παίρνουμε $S=5$ MPa, ΚΤΣ, 1997). Για το τσιμέντο ελληνικού τύπου και τα συνηθισμένα ασβεστολιθικά αδρανή της χώρας μας οι μέσες τιμές των ειδικών βαρών είναι:

$\gamma_Z = 3,1$ gr/cm³ (ειδικό βάρος του τσιμέντου)

$\gamma_A = 2,7$ gr/cm³ (φαινόμενο ειδικό βάρος των κόκκων των αδρανών) και

$\gamma_W = 1,0$ gr/cm³ (ειδικό βάρος του νερού).

Το άθροισμα των απόλυτων (πραγματικών) όγκων των υλικών πρέπει να δίνει 1 m³:

$$\frac{Z}{\gamma_Z} + \frac{W}{\gamma_W} + \frac{A}{\gamma_A} = 1m^3$$

Επομένως η απαιτούμενη ποσότητα αδρανών για 1m³ είναι:

$$A = \gamma_A \times \left(1,0 - \frac{W}{\gamma_W} - \frac{Z}{\gamma_Z} \right) \quad (\text{σχ.1})$$

Υπολογισμός της απαιτούμενης αντοχής:

$$f_a = f_{ck} + 2,14 \times S_{εργ.} = 25 + 2,14 \times 5 = 35,7 \text{ MPa.}$$

Από το διάγραμμα αναλογιών νερού-τσιμέντου, για απαιτούμενη αντοχή $f_a=35,7$ MPa, βρίσκεται ο λόγος νερού-τσιμέντου (N/T) καθώς και οι απαιτούμενες ποσότητες τσιμέντου (z) και νερού (w).

$$\text{Επομένως: } \frac{W}{Z} = 0,556 \rightarrow Z = 358,7 \text{ kg και } W = 0,556 \times 358,7 = 199,4 \text{ kg.}$$

Από την (σχ.1) βρίσκω την ποσότητα των αδρανών:

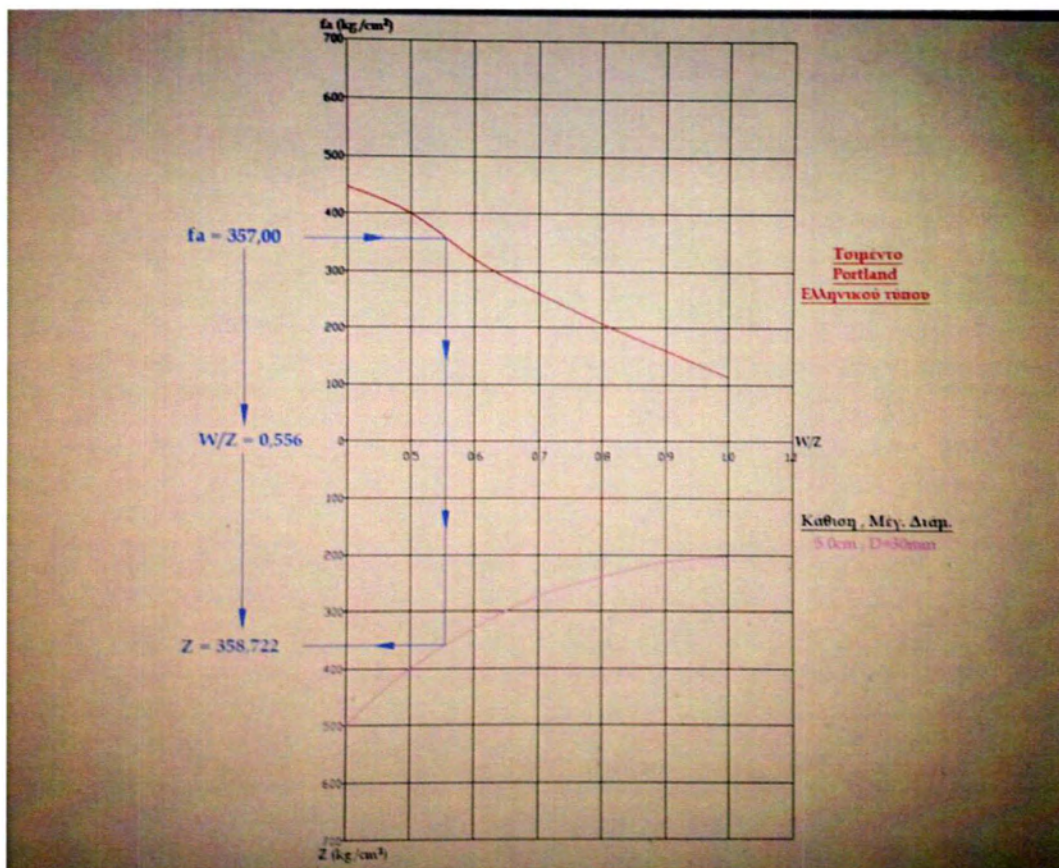
$$A = 1,850 \text{ tn} = 1850 \text{ kg.}$$

Επομένως για 1m³ έτοιμου σκυροδέματος κατηγορίας C20/25 με $S_{εργ.} = 5$ MPa χρειάζονται οι παρακάτω ποσότητες:

Αδρανή: 1850 kg

Τσιμέντο: 358,7 kg

Νερό: 199,4 lt.



Διάγραμμα 10-1: Διάγραμμα αναλογιών νερού τσιμέντου (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007).

Επειδή κατά την σκυροδέτηση παρατηρήσαμε ότι το σκυρόδεμα ήταν πολύ πηχτό και δεν ήταν αρκετά εργάσιμο προσθέσαμε 55 gr ρευστοποιητή Sikament 150S (που αναφέραμε παραπάνω) και επιπλέον +365 gr νερού σε κάθε σκυροδέτηση. Επομένως, ο λόγος N/T έγινε 0,58 αντί του αρχικού 0,56.

Υπολογισμός αναλογιών για 1 σκυροδέτηση (6 κύβοι και 3 κυλίνδροι).

Αρχικά θα βρούμε τον όγκο ενός κυβικού δοκιμίου που είναι $V_{\text{κυβ}} = 15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ cm}^3 \rightarrow 0,003375 \text{ m}^3$. Επομένως, για τα 6 κυβικά δοκίμια της μίας σκυροδέτησης ο όγκος είναι $0,02025 \text{ m}^3$. Αντίστοιχα ο όγκος ενός κυλινδρικού δοκιμίου είναι $V_{\text{κυλ}} = \pi \times 7,52 \times 30 \approx 5299 \text{ cm}^3 \rightarrow 0,005299 \text{ m}^3$. Τα τρία κυλινδρικά δοκίμια χρειάζονται σκυρόδεμα όγκου $0,0159 \text{ m}^3$. Συνεπώς, ο συνολικός όγκος που χρειαζόμαστε για μία σκυροδέτηση είναι $0,02025 + 0,0159 = 0,03615 \text{ m}^3$ και βάζοντας ακόμη 15% ποσότητα σκυροδέματος, καθώς θα την χρειαστούμε για την δοκιμή κάθισης αλλά και για τυχόν απώλειες, ο τελικός όγκος του σκυροδέματος της μίας σκυροδέτησης ανέρχεται στο $0,04157 \text{ m}^3$.

Όπως είπαμε παραπάνω, οι ποσότητες αδρανών, τσιμέντου και νερού για 1 m^3 σκυροδέματος είναι:

Αδρανή $\rightarrow 1850 \text{ kg}$

Τσιμέντο → 358,7 kg

Νερό → 199,4 lt

Επομένως, οι ποσότητες των υλικών που χρειάζονται για την μία σκυροδέτηση (δηλαδή για 0,04157 m³) είναι:

Αδρανή → 76,905 kg

Τσιμέντο → 14,912 kg

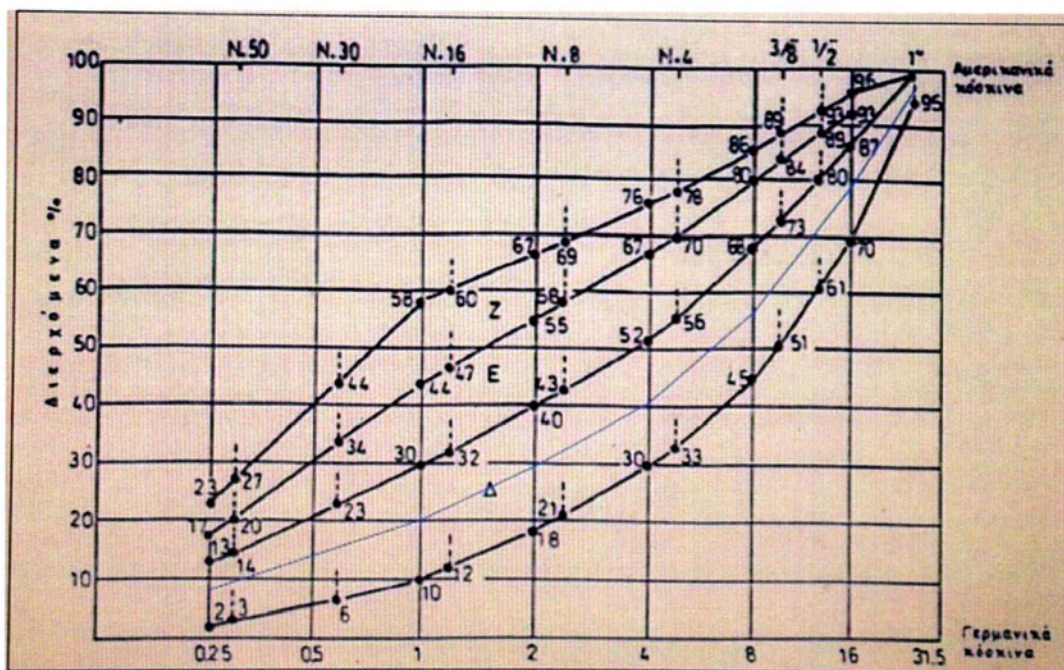
Νερό → 8,284 lt

Οι αναλυτικές ποσότητες των αδρανών για κάθε διάσταση κοσκίνου δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10-3: Αναλυτικές ποσότητες αδρανών μιας σκυροδέτησης – Δελτίο κοκκομετρικής ανάλυσης.

Όνομασία κοσκίνου	Όρια προδιαγραφής	Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Συγκρατούμενο βάρος (kg)	Διερχόμενο βάρος	
				kg	%
31.5	100		0	76.905	100
16	77-87		16.534	60.370	78.5
8	45-68		16.919	43.451	56.5
4	30-52		11.920	31.531	41
2	18-40		9.229	22.302	29
1	10_30		6.921	15.381	20
0.25	2_13		9.613	5.768	7.5
		Παιπάλη:	5.768		
		Συν. Βάρος	76.905		

Στη συνέχεια παραθέτουμε την κοκκομετρική καμπύλη του Κ.Τ.Σ., (1997), και την μέση καμπύλη που υποθέσαμε για τις συνθέσεις των μειγμάτων μας λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά % του διερχόμενου βάρους κάθε κοσκίνου.



Διάγραμμα 10-2: Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 31,5 mm (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007).

Στις παραπάνω ποσότητες υλικών κατά την ζύγισή τους στρογγυλοποιήσαμε το τελευταίο ψηφίο επειδή η ηλεκτρονική ζυγαριά που χρησιμοποιήσαμε κάνει στρογγυλοποίηση στα 5 gr.

Πίνακας 10-4: Τελικές ποσότητες αδρανών μιας σκυροδέτησης (μετά την στρογγυλοποίηση).

Όνομασία κοσκίνου	Όρια προδιαγραφής	Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Συγκρατούμενο βάρος (kg)	Διερχόμενο βάρος	
				kg	%
31.5	100		0	76.910	100
16	77-87		16.535	60.375	78.5
8	45-68		16.920	43.455	56.5
4	30-52		11.920	31.535	41
2	18-40		9.230	22.305	29
1	10_30		6.920	15.385	20
0.25	2_13		9.615	5.770	7.5
		Παιπάλη:	5.770		
		Συν. Βάρος	76.910		

Υπολογισμός αναλογιών για τις 3 σκυροδετήσεις (18 κύβοι και 9 κύλινδροι).

Ο συνολικός όγκος σκυροδέματος που χρειαζόμαστε για τις τρεις σκυροδετήσεις είναι $0,12470 \text{ m}^3$. Επομένως, οι ποσότητες των υλικών που χρειάζονται για τις τρεις σκυροδετήσεις (δηλαδή για $0,12470 \text{ m}^3$) είναι:

Αδρανή → 230,730 kg

Τσιμέντο + Ιπτάμενη τέφρα → 44,745 kg (38,030 kg + 6,715 kg)

Νερό → 24,850 lt

Οι αναλυτικές ποσότητες των αδρανών για κάθε διάσταση κοσκίνου για τις τρεις σκυροδετήσεις δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10-5: Αναλυτικές ποσότητες αδρανών τριών σκυροδετήσεων – Δελτίο κοκκομετρικής ανάλυσης.

Όνομασία κοσκίνου	Όρια προδιαγραφής	Άνοιγμα κοσκίνου	Συγκρατούμενο βάρος	Διερχόμενο βάρος	
				kg	%
	%	(mm)	(kg)		
31.5	100		0	230.730	100
16	77-87		49.605	181.125	78.5
8	45-68		50.760	130.365	56.5
4	30-52		35.760	94.605	41
2	18-40		27.690	66.915	29
1	10_30		20.760	46.155	20
0.25	2_13		28.845	17.310	7.5
		Παιπάλη:	17.310		
		Συν. Βάρος	230.730		

Πίνακας 10-6: Ποσότητες τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας σε κάθε σκυροδέτηση.

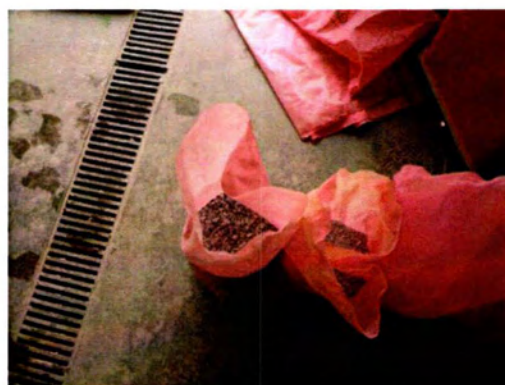
	Ποσοστό υποκατάστασης τσιμέντου από ι.τ.		
	0%	15%	30%
Τσιμέντο (kg)	14,915	12,675	10,440
Ιπτάμενη τέφρα (kg)	0	2,240	4,475

10.3.2. Παρασκευή σκυροδέματος.

Αυτή η φάση ξεκινάει με το κοσκίνισμα των αδρανών, ώστε να συγκεντρωθούν οι απαιτούμενες ποσότητες σε κάθε κόσκινο. Αφού ετοιμάσαμε 7 κουβάδες στους οποίους θα έμπαιναν τα αδρανή από κάθε κόσκινο κολλήσαμε πάνω τους χαρτάκια με το μέγεθος του κάθε κόσκινου, δηλαδή 0-0.425, 0.425-1, 1-2, 2-4, 4-8, 8-16 και 16-31.5. Ύστερα από το κοσκίνισμα μικρής ποσότητας αδρανών αδειάζαμε το περιεχόμενο του κάθε κόσκινου στον αντίστοιχο κουβά και συνεχίζαμε με τον ίδιο τρόπο μέχρι να συγκεντρωθούν οι απαιτούμενες ποσότητες.

Στη συνέχεια σε ηλεκτρονική ζυγαριά, ζυγίσαμε τα υλικά που χρειάζονται για την παρασκευή μιας παρτίδας και τα τοποθετήσαμε μέσα σε σακουλάκια γράφοντας από έξω το μέγεθος του κόσκινου (για τα αδρανή) και το βάρος του. Το ίδιο κάναμε και για τις άλλες δύο παρτίδες.

Έπειτα, βάλαμε τις ποσότητες των αδρανών της μιας παρτίδας στην μπετονιέρα και κάναμε ξηρή ανάδευση των αδρανών υλικών, ενώ στη συνέχεια προσθέσαμε σταδιακά το τσιμέντο και το νερό. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, παρατηρήσαμε ότι το μείγμα μας ήταν πολύ πηχτό και γι' αυτό αποφασίσαμε να αυξήσουμε την ποσότητα του νερού κατά 365 gr σε κάθε σκυροδέτηση και να προσθέσουμε 55 gr ρευστοποιητή. Έτσι αυξήσαμε τον λόγο N/T από 0,56 που ήταν αρχικά σε 0,58 αυξάνοντας το εργάσιμο του σκυροδέματος.



Εικόνες 10-1 α,β: Τοποθέτηση αδρανών σε σακουλάκια.



Εικόνα 10-2: Ανάδευση υλικών στην μπετονιέρα.

10.3.3. Δοκιμή κάθισης.

Για την εκτέλεση της δοκιμής κάθισης χρησιμοποιούνται (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007):

α) Ο κώνος κάθισης, που είναι μεταλλική μήτρα σχήματος ορθού κόλουρου κώνου, με διάμετρο κάτω βάσεως 200 ± 2 mm, διάμετρο άνω βάσεως 100 ± 2 mm, ύψος 300 ± 2 mm (χωρητικότητας $0,0055 \text{ m}^3$ ή 5,5 κυβ. παλάμες). Οι δύο βάσεις είναι ανοιχτές, παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στον άξονα του κώνου. Η μήτρα έχει στην εξωτερική της επιφάνεια δύο χειρολαβές, προσαρμοσμένες στα δύο τρίτα του ύψους της από την κάτω βάση και δύο αντιδιαμετρικά εξωτερικά πτερύγια στηρίξεως, στο επίπεδο της κάτω βάσεως, για την ακινητοποίησή της. Το μέταλλο κατασκευής της πρέπει να είναι απρόσβλητο από σκυρόδεμα, η εσωτερική της επιφάνεια να είναι λεία, χωρίς ανωμαλίες, και το πάχος του τοιχώματος να είναι τουλάχιστον 1,5 mm.

β) Η χαλύβδινη ράβδος συμπυκνώσεως, ευθύγραμμη, μήκους 60 cm, κυκλικής διατομής $\Phi 16$ mm, με στρογγυλεμένα άκρα.

γ) Ο κώνος κάθισης τοποθετείται πάνω σε επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια και διαβρέχεται εσωτερικά, αυτός και η επιφάνεια έδρασης.

Διαδικασία δοκιμής:

Η μέθοδος εφαρμόζεται για σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανούς 40 mm. Ο κώνος γεμίζεται με τη σέσουλα (όχι μυστρί) σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους και διατηρείται ακίνητος καθ' όλη τη διάρκεια του γεμίματος, με την βοήθεια των δύο πτερυγίων στηρίξεως, πάνω στα οποία πατάει με τα πόδια του ο παρασκευαστής. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως, που κατανέμουν κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα κτυπήματα ξεκινούν από την περίμετρο της μήτρας και με σπειροειδή κίνηση φθάνουν στο κέντρο. Κατά τη συμπύκνωση της κατώτερης (πρώτης) στρώσης, η ράβδος βυθίζεται σε όλο το βάθος του σκυροδέματος και, κατά την εμπηξή της, έχει στην αρχή μια μικρή κλίση που βαθμιαία ελαττώνεται, τείνοντας προς την κατακόρυφο. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση η ράβδος βυθίζεται σε όλη τη στρώση, εισερχόμενη λίγο (περίπου 1-2 cm) και στην αμέσως από κάτω της. Στην ανώτερη (τρίτη) στρώση ο κώνος γεμίζεται με περίσσεια σκυροδέματος, που συμπληρώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης. Ύστερα από τη συμπύκνωση και της ανώτερης στρώσης, αφαιρείται το σκυρόδεμα που πλεονάζει και επιπεδώνεται η άνω επιφάνειά του, με παλινδρομική κίνηση της ράβδου συμπυκνώσεως στα χείλη του κώνου.

Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθαρίζεται η περιοχή γύρω από τη βάση του και ο κώνος ανασύρεται αργά, από τις πλευρικές χειρολαβές. Η ανύσωση πρέπει να γίνεται ομαλά, με σταθερή ταχύτητα και κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, χωρίς στροφή και τραντάγματα, και να ολοκληρώνεται μέσα σε 5-10 sec (ο παρασκευαστής μετράει αργά από το 1001 έως

το 1005). Ολόκληρη η διαδικασία της δοκιμής από την έναρξη του γεμίματος μέχρι την αφαίρεση του κώνου πρέπει να ολοκληρώνεται σε χρόνο μικρότερο των 150 sec. Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, που ελευθερούμενο από το μεταλλικό περίβλημα "κάθισε", μετριέται με προσέγγιση 5 mm, εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007).



Εικόνες 10-3 α,β: Αριστερά φαίνεται το γέμισμα του κώνου με την σέσουλα και δεξιά η συμπύκνωση της πρώτης στρώσης με την ράβδο.



Εικόνα 10-4: Μέτρηση της κάθισης.

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι καθίσεις των τριών σκυροδετήσεων:

Πίνακας 10-7: Καθίσεις των σκυροδετήσεων.

Σκυροδετήσεις	Καθίσεις (cm)
100% τσιμέντο	6
85% τσιμέντο με 15% ιπτάμενη τέφρα	13,5 ≈ 14
70% τσιμέντο με 30% ιπτάμενη τέφρα	9,5 ≈ 10

Παρατηρούμε ότι η προσθήκη ι.τ. αύξησε την κάθιση.



Εικόνες 10-5 α,β: Κάθιση σκυροδέματος με σκέτο τσιμέντο.



Εικόνες 10-6 α,β: Κάθιση σκυροδέματος με 15% ιπτάμενη τέφρα.



Εικόνες 10-7 α,β: Κάθιση σκυροδέματος με 30% ιπτάμενη τέφρα.

10.3.4. Παρασκευή δοκιμίων.

10.3.4.1. Συμπύκνωση δοκιμίων.

Ο Ν.Κ.Τ.Σ. αναφέρει ότι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της λήψεως του σκυροδέματος και της παρασκευής του δοκιμίου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 15 λεπτά της ώρας. Τα συμβατικά δοκίμια που προορίζονται για τους ελέγχους συμμορφώσεως, είναι κυβικά, διαστάσεων 15 x 15 x 15 cm (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007). Στην έρευνά μας κατασκευάσαμε από έξι κυβικά δοκίμια για κάθε σκυροδέτηση. Οι μήτρες (καλούπια) πριν από την χρήση τους πρέπει να έχουν λαδωθεί ελαφρά με ορυκτέλαιο.

Για την σκυροδέτηση των κυβικών δοκιμίων και κάθιση σκυροδέματος μεγαλύτερη των 50 mm (που είναι η περίπτωση μας, καθώς όλες οι καθίσεις μας είναι μεγαλύτερες από 50 mm) η συμπύκνωση γίνεται με ράβδο Φ16, μήκους 60 cm και με στρογγυλεμένα άκρα (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007). Στην περίπτωση αυτή, κάθε μήτρα γεμίζεται με τη σέσουλα (όχι μυστρί, γιατί διαφεύγει το λεπτό υλικό) σε δύο στρώσεις (μισή και μισή κάθε φορά) και κάθε στρώση συμπακνώνεται ιδιαίτερα. Η συμπύκνωση κάθε στρώσης απαιτεί 25 χτυπήματα με τη σχετική ράβδο. Κατά τη συμπύκνωση της κατώτερης στρώσης η ράβδος πρέπει να εισχωρεί μέχρι τον πυθμένα της μήτρας. Μετά τη συμπύκνωση επιπεδώνεται η τελική επιφάνεια, καθαρίζονται οι επιφάνειες της μήτρας και αριθμείται το δοκίμιο (να σημειωθεί ότι το ταμπελάκι του κάθε δοκιμίου αναγράφει και την ημερομηνία της σκυροδέτησης εκτός από τον αριθμό και την σύνθεση του δοκιμίου).

Για τα κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν μήτρες διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm, λαδωμένες ελαφρά με ορυκτέλαιο. Η συμπύκνωση και στα κυλινδρικά δοκίμια γίνεται με την ίδια ράβδο όπως και στα κυβικά δοκίμια. Η διαφορά είναι ότι οι μήτρες των κυλινδρικών δοκιμίων γεμίζονται με τη σέσουλα σε τρεις στρώσεις (ένα τρίτο του ύψους κάθε στρώση) και κάθε στρώση συμπακνώνεται ιδιαίτερα με 25 χτυπήματα με τη σχετική ράβδο. Κατά τη συμπύκνωση της κατώτερης στρώσης η ράβδος πρέπει να εισχωρεί μέχρι τον πυθμένα της μήτρας. Και εδώ, μετά τη συμπύκνωση επιπεδώνεται η τελική επιφάνεια, καθαρίζονται οι επιφάνειες της μήτρας και αριθμείται το δοκίμιο.



Εικόνες 10-8 α,β: Αριστερά φαίνεται το γέμισμα της πρώτης στρώσης και δεξιά το γέμισμα της δεύτερης στρώσης σκυροδέματος.



Εικόνα 10-9: Συμπύκνωση της δεύτερης στρώσης σκυροδέματος με την κατάλληλη ράβδο.



Εικόνες 10-10 α,β: Επιπέδωση της τελικής επιφάνειας αρχικά με την ράβδο και μετά με την σπάτουλα.



Εικόνες 10-11 α,β: Αρίθμηση των κυβικών δοκιμίων.



Εικόνα 10-12: Αρίθμηση των κυλινδρικών δοκιμίων.

10.3.4.2. Συντήρηση δοκιμίων.

Τα δοκίμια παρέμειναν σε σκιά, μέσα στις μήτρες (καλούπια) για έξι ημέρες. Την έκτη ημέρα, δηλαδή στις 7/10/14 για τις δύο πρώτες σκυροδετήσεις και στις 4/11/14 για την τρίτη σκυροδέτηση, έγινε το ξεκαλούπωμα. Βγάλαμε δηλαδή τα δοκίμια από τις μήτρες και τα σκεπάσαμε με βρεγμένες λινάτσες. Τα κρατήσαμε σκεπασμένα με τις λινάτσες, οι οποίες διαβρέχονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μέχρι να συμπληρωθεί η 28^η μέρα από την σκυροδέτησή τους. Αυτό το κάνουμε για να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για την ενυδάτωση του τσιμέντου.

10.4. Διαδικασία θραύσης δοκιμίων.

10.4.1. Προετοιμασία κυβικών δοκιμίων.

Μετά από 28 ημέρες από την ημέρα σκυροδέτησης αφαιρέθηκαν οι υγρές λινάτσες, τα δοκίμια αφέθηκαν να στεγνώσουν και ζυγίστηκαν σε ηλεκτρονική ζυγαριά για τον προσδιορισμό του πραγματικού ειδικού βάρους του σκυροδέματος. Στον Πίνακα 10-8 φαίνονται τα βάρη των κυβικών δοκιμίων. Το μέσο ειδικό βάρος που προέκυψε είναι $B/V=2407,252 \text{ kg/m}^3$ για τα δοκίμια με σκέτο τσιμέντο, $B/V=2404,515 \text{ kg/m}^3$ για τα δοκίμια με 15% ι.τ. και $B/V=2399,599 \text{ kg/m}^3$ για τα δοκίμια με 30% ι.τ.

Πίνακας 10-8: Βάρη των κυβικών δοκιμίων.

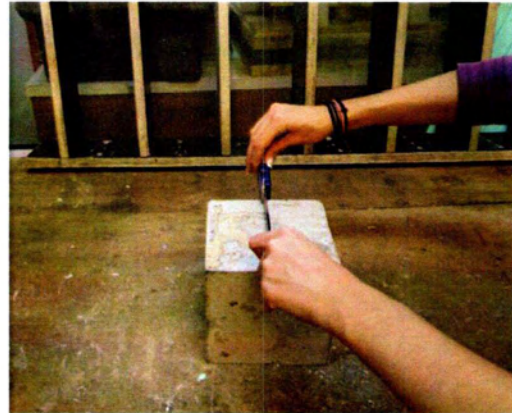
Δοκίμιο	Βάρος (kg)	Δοκίμιο	Βάρος (kg)	Δοκίμιο	Βάρος (kg)
C1-0	8,195	C1-15%	8,185	C1-30%	8,155
C2-0	8,255	C2-15%	8,260	C2-30%	8,305
C3-0	8,285	C3-15%	8,245	C3-30%	8,195
C4-0	8,180	C4-15%	8,210	C4-30%	8,220
C5-0	8,265	C5-15%	8,275	C5-30%	8,160
C6-0	8,190	C6-15%	8,220	C6-30%	8,205
M.O.	8,228	M.O.	8,233	M.O.	8,207

Έπειτα, παρατηρούμε ότι η μία πλευρά του κάθε κύβου είναι πιο αδρή (η ελεύθερη επιφάνεια του καλουπιού) ενώ οι υπόλοιπες πέντε πλευρές είναι λείες. Τοποθετώντας λοιπόν την αδρή αυτή πλευρά σαν δεξιά πλευρά του κύβου και έχοντάς την πάντα εκεί, καθ' όλες τις περιστροφές του κύβου, δηλαδή χωρίς να την τοποθετούμε ποτέ σαν άνω ή κάτω βάση, μετρούμε με ένα ορθογωνιόμετρο ποιες πλευρές παρουσιάζουν καλύτερη ορθή γωνία μεταξύ τους. Αυτές που παρουσιάζουν καλύτερη καθετότητα μεταξύ τους τις σημειώνουμε με έναν μαρκαδόρο ώστε να ξέρουμε ποια επιφάνεια είναι καλύτερα να τοποθετήσουμε σαν άνω βάση, όταν βάλουμε το δοκίμιο μας στο μηχάνημα θλίψης.



Εικόνες 10-13 α,β: Έλεγχος καθετότητας των πλευρών του κύβου.

Στη συνέχεια, αφού επιλέξουμε ποιες θα είναι η άνω και κάτω βάση του κύβου μετράμε με ένα ηλεκτρονικό παχύμετρο το μήκος αυτών των δύο πλευρών και προς τις δύο διευθύνσεις, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Μας ενδιαφέρουν αυτές οι δύο πλευρές μόνο γιατί είναι αυτές στις οποίες θα ασκείται το θλιπτικό φορτίο, οπότε θέλουμε να ξέρουμε το εμβαδόν τους για την εύρεση της τάσης που ασκείται σε αυτές.



Εικόνες 10-14 α,β: Μέτρηση της άνω και κάτω βάσης του κύβου με το ηλεκτρονικό παχύμετρο.

Αφού πήραμε τρεις μετρήσεις προς κάθε κατεύθυνση και για την άνω και για την κάτω βάση του κάθε κύβου, μετά βγάλαμε τους μέσους όρους των μετρήσεων αυτών και κατ' επέκταση υπολογίσαμε το εμβαδόν της κάθε πλευράς.

Πίνακας 10-9α: Μέτρηση των άνω και κάτω βάσεων, που επιβλήθηκε το θλιπτικό αξονικό φορτίο, των κυβικών δοκιμών σκυροδέματος με 100% τσιμέντο.

	Πλευρά 1		Πλευρά 2	
	1x (mm)	1y (mm)	2x (mm)	2y (mm)
C1-0	152	150	153	150
	152	150	152	150
	151	150	153	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	153	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22950	
C2-0	152	150	152	150
	151	150	152	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	
C3-0	153	150	153	150
	152	150	152	150
	152	150	153	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	153	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22950	
C4-0	152	150	151	150
	151	150	150	150
	151	150	151	150
Μέση τιμή (mm)	151	150	151	150
Εμβαδό (mm²)	22650		22650	
C5-0	152	150	152	150
	152	150	151	150
	151	150	153	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	
C6-0	151	150	152	150
	152	150	152	150
	151	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	151	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22650		22800	

Πίνακας 10-9β: Μέτρηση των άνω και κάτω βάσεων, που επιβλήθηκε το θλιπτικό αξονικό φορτίο, των κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με 85% τσιμέντο + 15% ιπτάμενη τέφρα.

	Πλευρά 1		Πλευρά 2	
	1x (mm)	1y (mm)	2x (mm)	2y (mm)
C1-15%	152	150	151	150
	152	150	151	150
	151	150	151	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	151	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22650	
C2-15%	153	150	153	150
	152	150	152	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	
C3-15%	152	150	153	150
	152	150	153	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	153	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22950	
C4-15%	152	150	153	150
	151	150	153	150
	152	150	151	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	
C5-15%	152	150	153	150
	153	150	152	150
	153	150	153	150
Μέση τιμή (mm)	153	150	153	150
Εμβαδό (mm²)	22950		22950	
C6-15%	152	150	153	150
	153	150	152	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	

Πίνακας 10-9γ: Μέτρηση των άνω και κάτω βάσεων, που επιβλήθηκε το θλιπτικό αξονικό φορτίο, των κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με 70% τσιμέντο + 30% ιπτάμενη τέφρα.

	Πλευρά 1		Πλευρά 2	
	1x (mm)	1y (mm)	2x (mm)	2y (mm)
C1-30%	152	150	153	150
	152	150	152	150
	152	150	153	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	153	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22950	
C2-30%	152	150	153	150
	152	150	153	150
	152	150	153	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	153	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22950	
C3-30%	152	150	153	150
	152	150	151	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	
C4-30%	151	150	152	150
	151	150	152	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	151	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22650		22800	
C5-30%	153	150	152	150
	151	150	152	150
	152	150	151	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	152	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22800	
C6-30%	152	150	151	150
	152	150	151	150
	152	150	152	150
Μέση τιμή (mm)	152	150	151	150
Εμβαδό (mm²)	22800		22650	

Πρέπει να σημειωθεί ότι στον παραπάνω πίνακα έγινε στρογγυλοποίηση στο χιλιοστό (mm) γι' αυτό και δεν έχουμε δεκαδικά ψηφία. Αυτό έγινε γιατί κατά τον υπολογισμό του εμβαδού θέλαμε να πολλαπλασιάζουμε ακέραιους αριθμούς χιλιοστών. Κάτι άλλο που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι με τους κύβους C5-0, C5-15% και C6-30% δημιουργήθηκε κάποιο πρόβλημα με την διόγκωσή τους όσο

βρίσκονταν στις μήτρες. Μετρώντας, δηλαδή, το μήκος των άνω και κάτω βάσεων τους παρατηρήσαμε ότι το μήκος του σε κάποια σημεία έβγαινε πάνω από 153 mm το οποίο αποτελεί πρόβλημα. Γι' αυτό το λόγο έγινε απόξεση με τον τροχό στην αδρή επιφάνεια αυτών των κύβων έτσι ώστε το μήκος τελικά να μην ξεπερνάει τα 153 mm.

10.4.2. Προετοιμασία κυλινδρικών δοκιμίων.

Μετά από 28 ημέρες από την ημέρας σκυροδέτησης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με των κυβικών δοκιμίων. Στον Πίνακα 10-10 φαίνονται τα βάρη των κυβικών δοκιμίων. Ο μέσος όρος τους αντιστοιχεί σε ειδικό βάρος σκυροδέματος $B/V=2416,909 \text{ kg/m}^3$ για τα δοκίμια με σκέτο τσιμέντο, $B/V=2416,343 \text{ kg/m}^3$ για τα δοκίμια με 15% ι.τ. και $B/V=2422,379 \text{ kg/m}^3$ για τα δοκίμια με 30% ι.τ.

Πίνακας 10-10: Βάρη των κυλινδρικών δοκιμίων.

Δοκίμιο	Βάρος (kg)
C'1-0	12,835
C'2-0	12,805
C'3-0	12,800
M.O.	12,813

Δοκίμιο	Βάρος (kg)
C'1-15%	12,835
C'2-15%	12,805
C'3-15%	12,790
M.O.	12,810

Δοκίμιο	Βάρος (kg)
C'1-30%	12,850
C'2-30%	12,815
C'3-30%	12,860
M.O.	12,842

Στη συνέχεια, βρήκαμε τις γενέτειρες των κυλίνδρων ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία: φτιάξαμε στο autocad έναν κύκλο διαμέτρου 15 cm (ίδιας διαμέτρου δηλαδή με τον κύλινδρο), βρήκαμε το κέντρο του και χαράξαμε τις δύο κάθετες διαμέτρους έτσι ώστε να σχηματίζουν έναν σταυρό. Τοποθετήσαμε τον κύκλο στην μία πλευρά του κυλίνδρου και σημαδέψαμε τα δύο αντιδιαμετρικά σημεία. Έπειτα, χαράξαμε την διάμετρο και με το ορθογωνιόμετρο φέραμε τις δύο κάθετες στην διάμετρο. Βάλαμε τον κύκλο στην άλλη πλευρά του κυλίνδρου και ελέγξαμε αν τα δύο αντιδιαμετρικά σημεία της χάραξης συμπίπτουν με αυτά του κύκλου. Αν ναι τότε βρήκαμε την γενέτειρα, αν όχι κάναμε την ίδια διαδικασία ξανά μέχρι να συμπέσουν. Για καλύτερο έλεγχο τοποθετήσαμε τους κυλίνδρους στο μηχάνημα της δοκιμής για να δούμε αν όντως έχουμε κάνει σωστά την χάραξη.

Αφού βρήκαμε τις γενέτειρες των κυλίνδρων, επόμενο βήμα είναι να κολλήσουμε ξυλάκια στις δύο επιφάνειες που θα ασκηθεί η δύναμη από το μηχάνημα της δοκιμής για να είναι ομοιόμορφη η κατανομή της δύναμης στον κύλινδρο. Κολλάμε δηλαδή από δύο ξυλάκια με κάθε κύλινδρο στις δύο κάθετες που χαράξαμε σε σχέση με την διάμετρο. Να σημειώσουμε ότι το μήκος από τα ξυλάκια είναι $\approx 320 \text{ mm}$.

10.4.3. Θλιπτική δοκιμή κυβικών δοκιμίων.

Σ' αυτή τη φάση του πειράματος τοποθετούμε κάθε κυβικό δοκίμιο στην μηχανή θλίψης όπου θα μετρήσουμε τις αντοχές των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη (compression test).



Εικόνα 10-15: Μηχανή DMG με διάταξη για δοκιμή κύβου σκυροδέματος σε θλίψη.

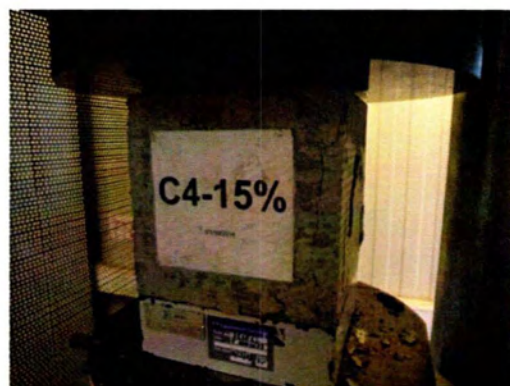
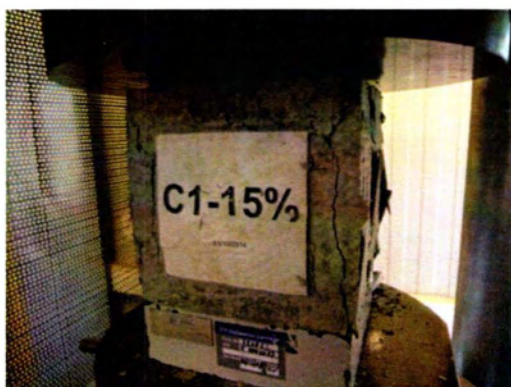
Το δοκίμιο τοποθετείται στην μηχανή DMG Denison Mayes Group μεταξύ δύο απαραμόρφωτων πλακών μέσω των οποίων εφαρμόζεται το αξονικό φορτίο, στην άνω και κάτω επιφάνειά του. Κατά την φόρτισή του το δοκίμιο διογκώνεται και τελικά συνθλίβεται, εμφανίζοντας πολλές ρωγμές στην παράπλευρη επιφάνεια του. Η τάση που αναπτύσσεται στο δοκίμιο, βασισμένη στο εμβαδόν της αρχικής διατομής του κατά την στιγμή της θραύσης του είναι το όριο θραύσης. Η διάρκεια δοκιμής κάθε κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος ήταν περίπου 1 λεπτό.



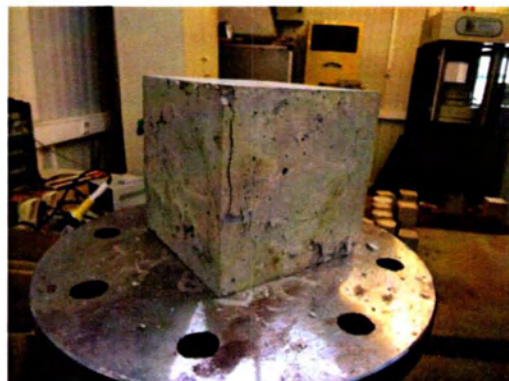
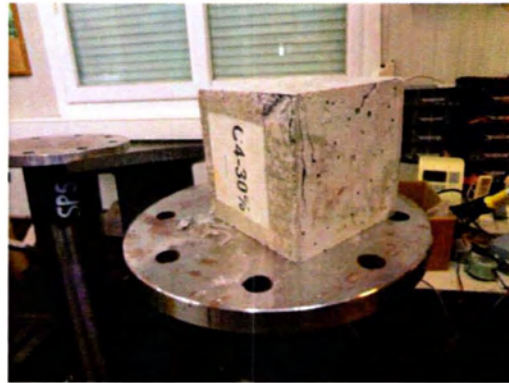
Εικόνα 10-16: Τοποθέτηση του κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος στην μηχανή θλίψης.



Εικόνες 10-17 α-στ: Θραύση δοκιμίων σκυροδέματος με 100% τσιμέντο.



Εικόνες 10-18 α-στ: Θραύση δοκιμίων σκυροδέματος με 15% ιπτάμενη τέφρα.



Εικόνες 10-19 α-στ: Θραύση δοκιμών σκυροδέματος με 30% ιπτάμενη τέφρα.

10.4.4. Εφελκυστική δοκιμή κυλινδρικών δοκιμών.

Τοποθετούμε κάθε κυλινδρικό δοκίμιο στην μηχανή στην οποία θα μετρήσουμε τις αντοχές των δοκιμών σε έμμεσο εφελκυσμό (brazilian test).



Εικόνα 10-20: Μηχανή DMG με διάταξη για δοκιμή κυλίνδρου σκυροδέματος σε έμμεσο εφελκυσμό.

Το δοκίμιο τοποθετείται στην μηχανή DMG Denison Mayes Group μεταξύ δύο απαραμόρφωτων πλακών μέσω των οποίων εφαρμόζεται το αξονικό φορτίο, στις επιφάνειες στις οποίες κολλήσαμε τα ξυλάκια στον κύλινδρο. Κατά την φόρτισή του το δοκίμιο αρχίζει μετά από κάποια τιμή του φορτίου να ρηγματώνεται, εμφανίζοντας αρχικά μια κατακόρυφη ρωγμή κατά μήκος της διαμέτρου του.



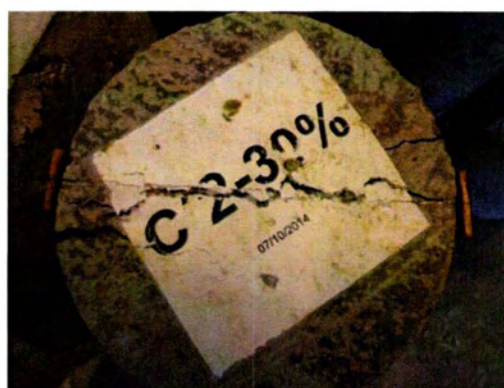
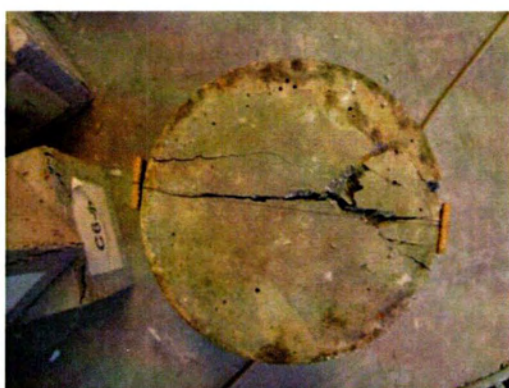
Εικόνα 10-21: Τοποθέτηση κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος στην μηχανή DMG για δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Εικόνες 10-22 α,β,γ: Ρηγμάτωση κατά την αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος με 100% τσιμέντο.



Εικόνες 10-23 α,β,γ: Ρηγμάτωση κατά την αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος με 15% ι.τ..



Εικόνες 10-24 α,β: Ρηγμάτωση κατά την αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος με 30% ι.τ.

Ο σχολιασμός του τρόπου ρηγμάτωσης τόσο των κυβικών όσο και των κυλινδρικών δοκιμίων γίνεται παρακάτω στο 10.6. όπου γίνεται παράθεση των σχολίων για όλες τις σκυροδετήσεις.

10.5. Επεξεργασία αποτελεσμάτων.

10.5.1. Αποτελέσματα κυβικών δοκιμίων.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι θλιπτικές αντοχές κάθε παρτίδας σκυροδέματος με βάση την τάση που αναπτύσσεται στο δοκίμιο κατά την θραύση και το εμβαδόν της διατομής του.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου.}$$

Πίνακας 10-11: Θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με 100% τσιμέντο.

Ονομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου (Kg)	Ρυθμός επιβολής φορτίου (um/sec)	Μέγιστη ένδειξη πρέσας (KN)	Διατομή δοκιμίου (cm ²)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημ. (Μρα)
C1-0	8,195	22000	749,0	228,75	32,743
C2-0	8,255	22000	751,6	228,00	32,965
C3-0	8,285	18000	768,3	228,75	33,587
C4-0	8,180	18000	701,5	226,50	30,971
C5-0	8,265	18000	739,0	228,00	32,412
C6-0	8,190	18000	748,1	227,25	32,920
Μέσος όρος αντοχής					32,600

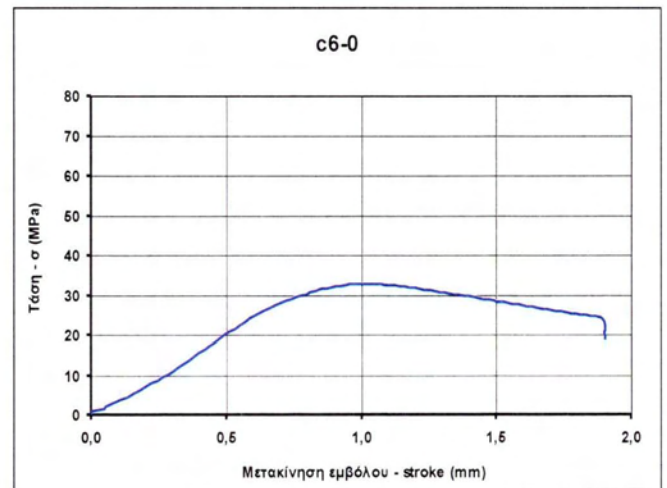
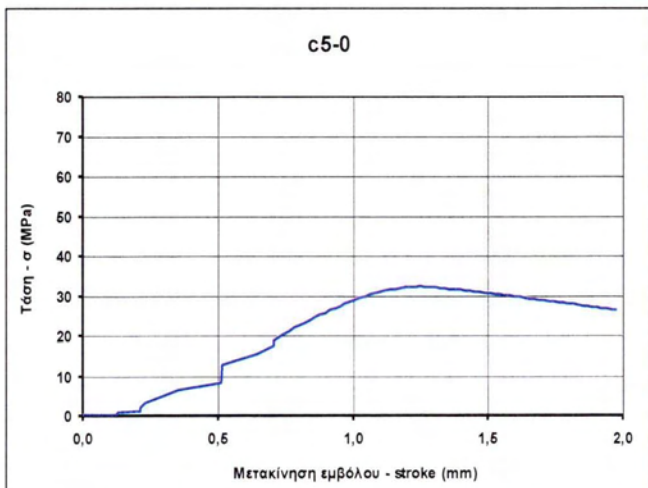
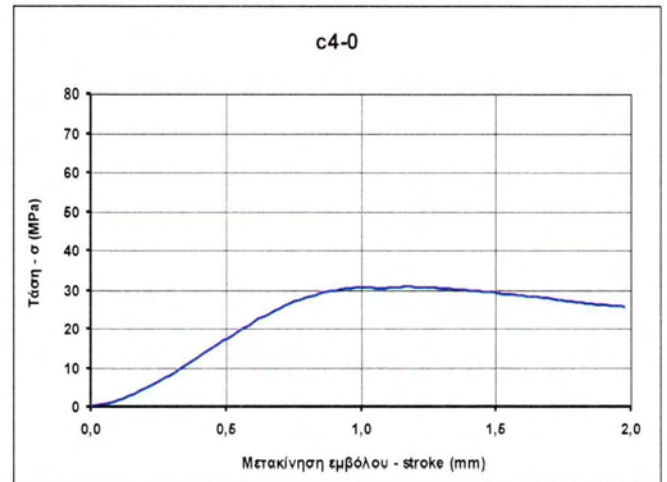
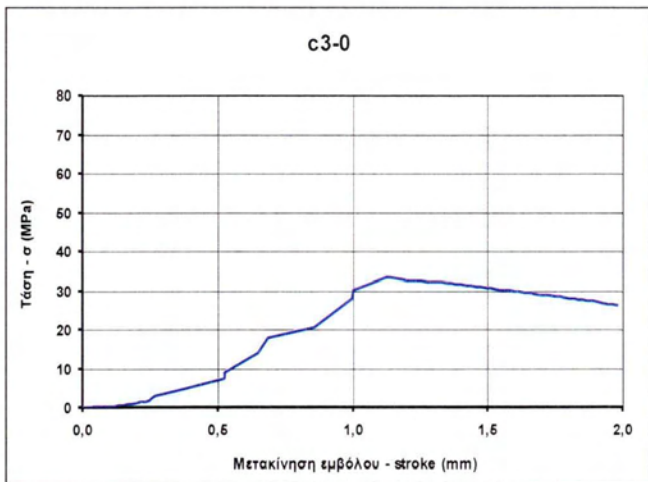
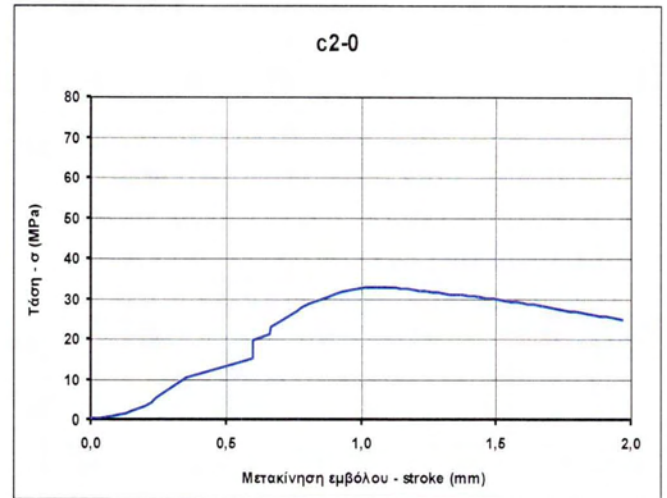
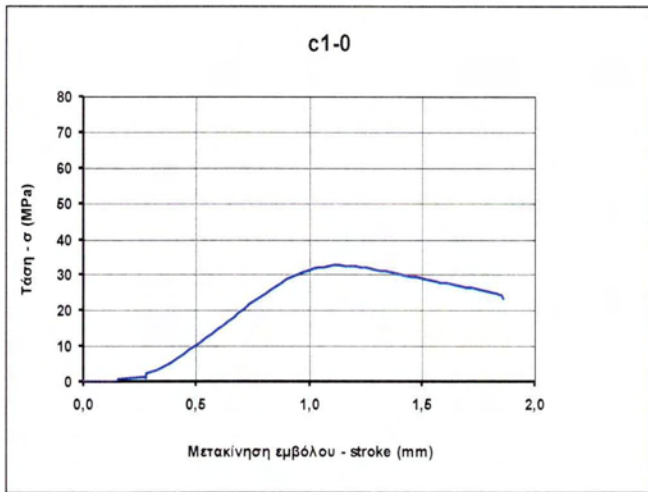
Πίνακας 10-12: Θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα.

Ονομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου (Kg)	Ρυθμός επιβολής φορτίου (um/sec)	Μέγιστη ένδειξη πρέσας (KN)	Διατομή δοκιμίου (cm ²)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημ. (Mpa)
C1-15%	8,185	18000	705,7	227,25	31,054
C2-15%	8,260	18000	764,0	228,00	33,509
C3-15%	8,245	18000	742,2	228,75	32,446
C4-15%	8,210	18000	720,4	228,00	31,596
C5-15%	8,275	18000	748,2	229,50	32,601
C6-15%	8,220	18000	761,9	228,00	33,417
Μέσος όρος αντοχής					32,437

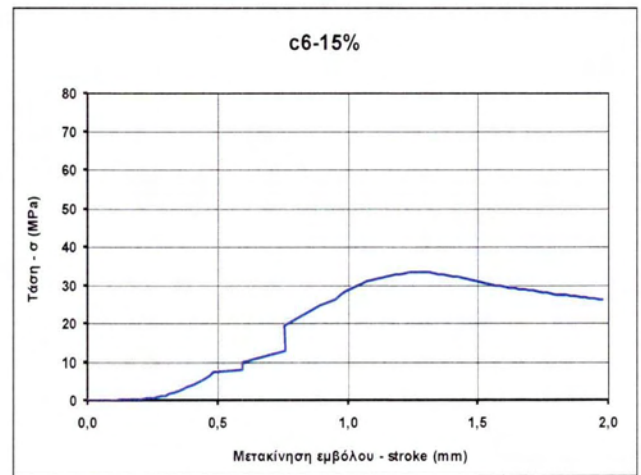
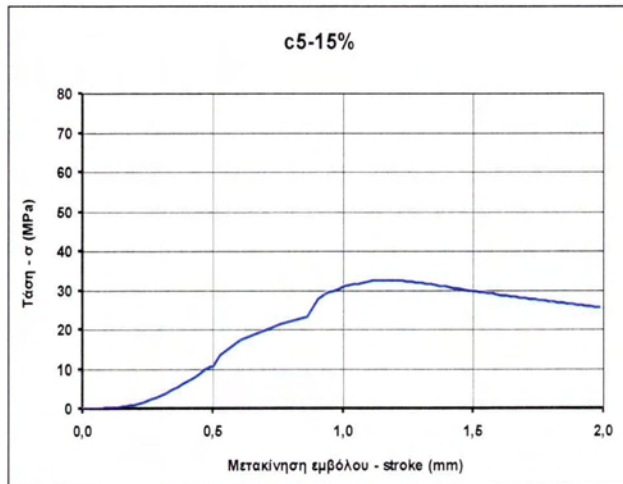
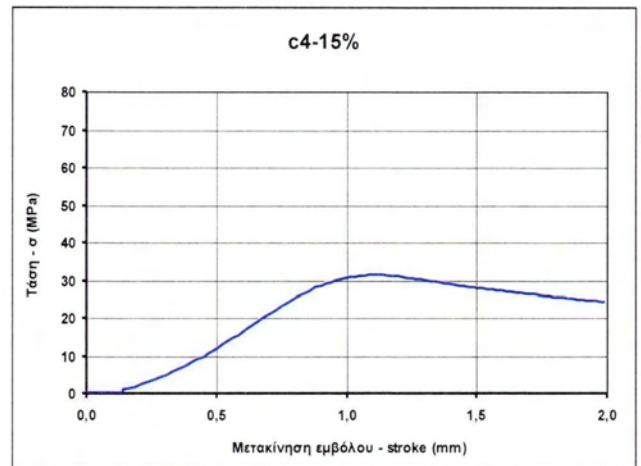
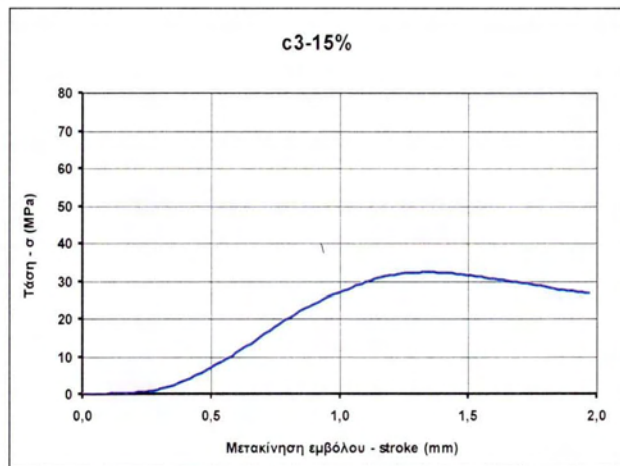
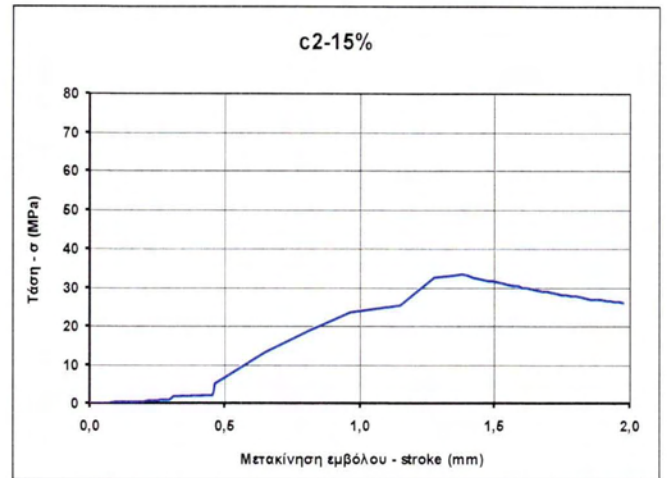
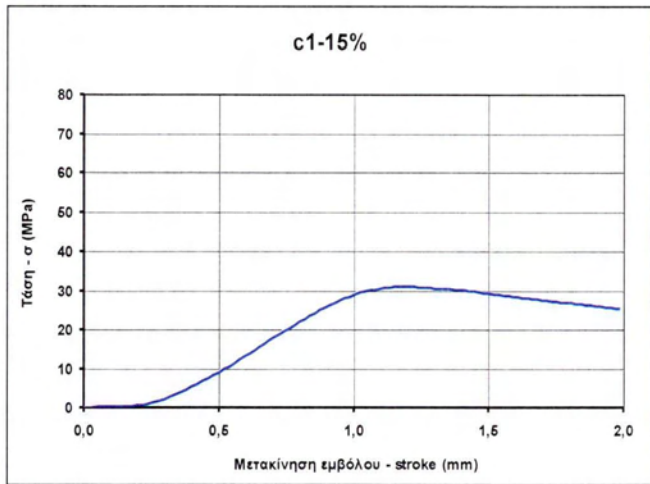
Πίνακας 10-13: Θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.

Ονομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου (Kg)	Ρυθμός επιβολής φορτίου (um/sec)	Μέγιστη ένδειξη πρέσας (KN)	Διατομή δοκιμίου (cm ²)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημ. (Mpa)
C1-30%	8,155	18000	698,1	228,75	30,518
C2-30%	8,305	16000	680,9	228,75	29,766
C3-30%	8,195	16000	697,3	228,00	30,583
C4-30%	8,220	16000	700,8	227,25	30,838
C5-30%	8,160	16000	696,5	228,00	30,548
C6-30%	8,205	16000	688,7	227,25	30,306
Μέσος όρος αντοχής					30,427

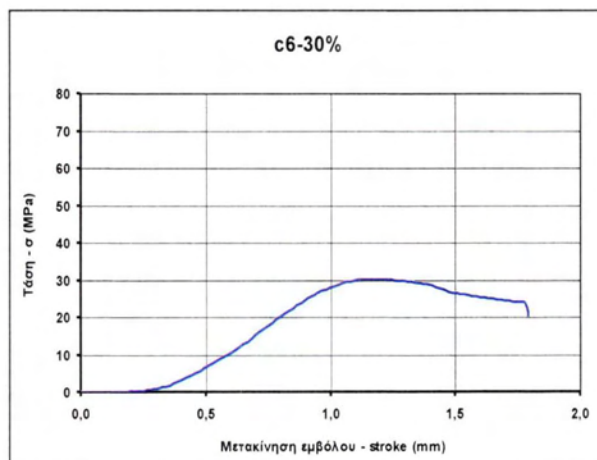
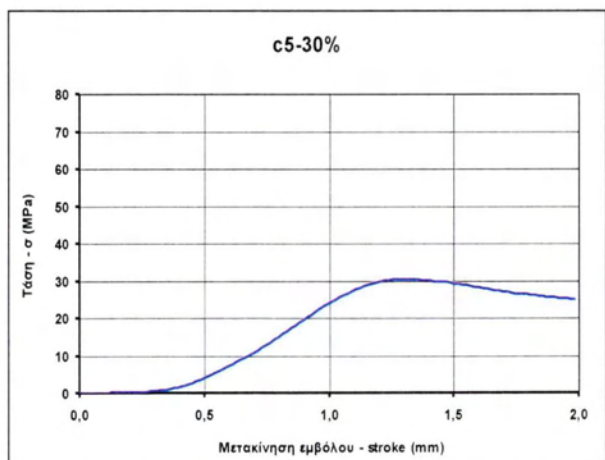
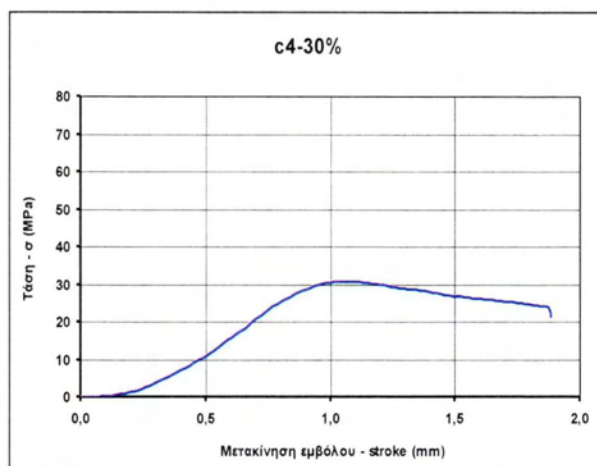
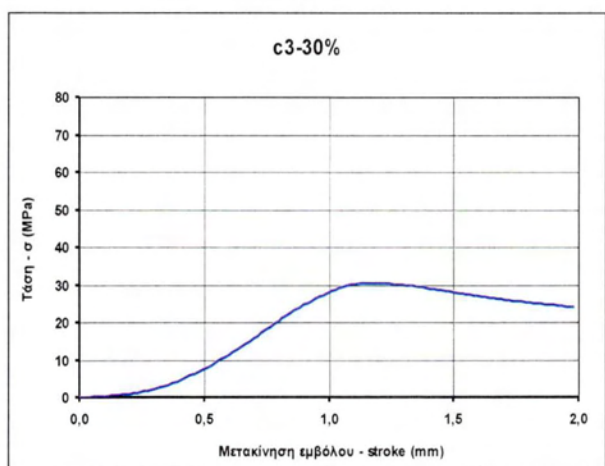
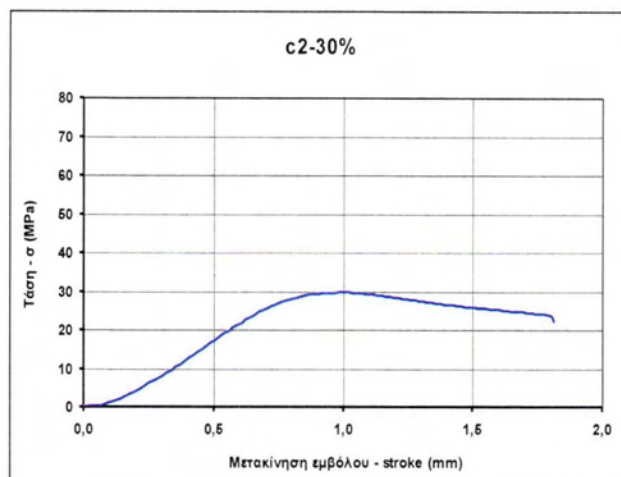
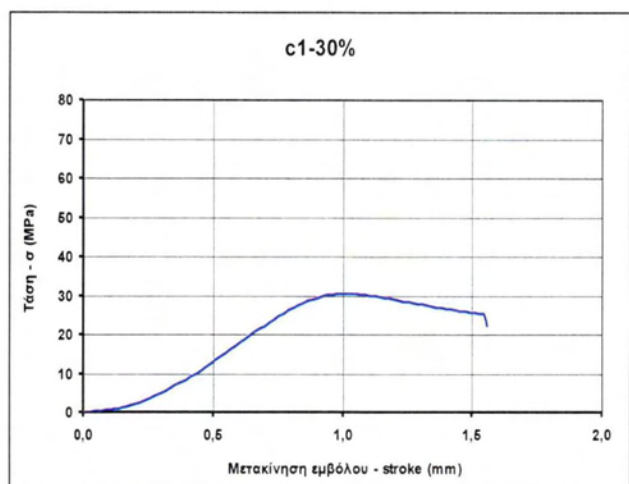
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται από την μηχανή θλίψης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής για τις διάφορες σκυροδετήσεις, δηλαδή με σκέτο τσιμέντο, με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα και με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.



Διαγράμματα 10-3 α-στ: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής (stroke) για τα κυβικά δοκίμια με σκέτο τσιμέντο.



Διαγράμματα 10-4 α-στ: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής (stroke) για τα κυβικά δοκίμια με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα.



Διαγράμματα 10-5 α-στ: Διαγράμματα θλιπτικής τάσης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής (stroke) για τα κυβικά δοκίμια με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.

Όπως αναφέρει ο Κ.Τ.Σ. οι αντοχές 28 ημερών κάθε δειγματοληψίας έξι δοκιμίων πρέπει να ικανοποιούν το Κριτήριο συμμορφώσεως A (άρθρο 13.6.1.) (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007).

Κριτήριο A (Εργοστασιακό σκυροδέμα, Εργοταξιακό σκυροδέμα μικρών έργων).

\bar{X}_6 = Μέσος όρος αντοχής των 6 συμβατικών δοκιμίων.

X_i = Η αντοχή κάθε συμβατικού δοκιμίου.

s = Η τυπική απόκλιση της δειγματοληψίας που προκύπτει από τη σχέση:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=6} (X_i - \bar{X}_6)^2}{5}} \quad \text{και } s \geq 1,5 \text{ MPa.}$$

Αν η τιμή της τυπικής αποκλίσεως της δειγματοληψίας είναι μικρότερη από 1,5 MPa, τότε στο κριτήριο συμμορφώσεως A πρέπει να εισάγεται τιμή $s = 1,5$ MPa.

Για την παρτίδα σκυροδέματος με σκέτο τσιμέντο ισχύουν:

1^{ος} κανόνας αποδοχής:

$\bar{X}_6 = 32,600 \text{ MPa}$ και $s = 0,885 \text{ MPa} \rightarrow s = 1,5 \text{ MPa}$ (βάση κανονισμού)

$\bar{X}_6 \geq f_{ck} + 1,60*s = 25 + 1,60*1,5 = 27,400 \text{ MPa}$

Επομένως ο 1^{ος} κανόνας αποδοχής ισχύει.

2^{ος} κανόνας αποδοχής:

$X_i^{\min} = 30,971 \text{ MPa}$

$X_i^{\min} \geq f_{ck} - 2 \text{ MPa} = 25 - 2 = 23,000 \text{ MPa}$

Επομένως ο 2^{ος} κανόνας αποδοχής ισχύει.

Για την παρτίδα σκυροδέματος με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα ισχύουν:

1^{ος} κανόνας αποδοχής:

$\bar{X}_6 = 32,437 \text{ MPa}$ και $s = 0,975 \text{ MPa} \rightarrow s = 1,5 \text{ MPa}$ (βάση κανονισμού)

$\bar{X}_6 \geq f_{ck} + 1,60*s = 25 + 1,60*1,5 = 27,400 \text{ MPa}$

Επομένως ο 1^{ος} κανόνας αποδοχής ισχύει.

2^{ος} κανόνας αποδοχής:

$X_i^{\min} = 30,054 \text{ MPa}$

$X_i^{\min} \geq f_{ck} - 2 \text{ MPa} = 25 - 2 = 23,000 \text{ MPa}$

Επομένως ο 2^{ος} κανόνας αποδοχής ισχύει.

Για την παρτίδα σκυροδέματος με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα ισχύουν:

1^{ος} κανόνας αποδοχής:

$\bar{X}_6 = 30,427 \text{ MPa}$ και $s = 0,365 \text{ MPa} \rightarrow s = 1,5 \text{ MPa}$ (βάση κανονισμού)

$\bar{X}_6 \geq f_{ck} + 1,60*s = 25 + 1,60*1,5 = 27,400 \text{ MPa}$

Επομένως ο 1^{ος} κανόνας αποδοχής ισχύει.

2^{ος} κανόνας αποδοχής:

$X_i^{\min} = 29,766 \text{ MPa}$

$X_i^{\min} \geq f_{ck} - 2 \text{ MPa} = 25 - 2 = 23,000 \text{ MPa}$

Επομένως ο 2^{ος} κανόνας αποδοχής ισχύει.

10.5.2. Αποτελέσματα κυλινδρικών δοκιμών.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι εφελκυστικές αντοχές κάθε παρτίδας σκυροδέματος με βάση το μέγιστο θλιπτικό φορτίο (PSP) που αναπτύσσεται στο δοκίμιο κατά την θραύση, την διάμετρο της διατομής του (d) και το μήκος του δοκιμίου (l).

$$f_{ct,SP} = \frac{2P_{SP}}{\pi \cdot d \cdot l}, \text{ εφελκυστική αντοχή κυλίνδρου σε διάρρηξη.}$$

Πίνακας 10-14: Εφελκυστικές αντοχές κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος με 100% τσιμέντο.

Όνομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου (Kg)	Ρυθμός επιβολής φορτίου (um/sec)	Μέγιστη ένδειξη πρέσας (KN)	Διάμετρος διατομής (mm)	Μήκος δοκιμίου (mm)	Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (Mpa)
C'1-0	12,835	12000,000	229,8	150	300	3,25
C'2-0	12,805	15000,000	220,0	150	300	3,11
C'3-0	12,800	15000,000	240,5	150	300	3,40
Μέσος όρος						3,26

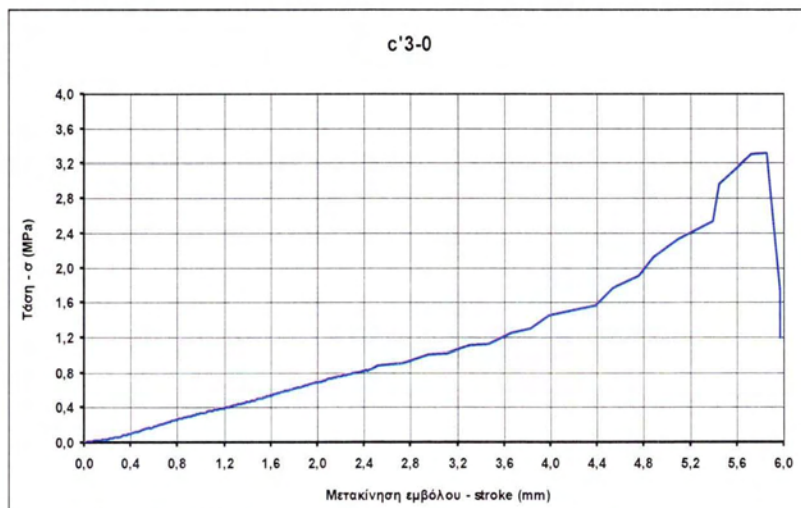
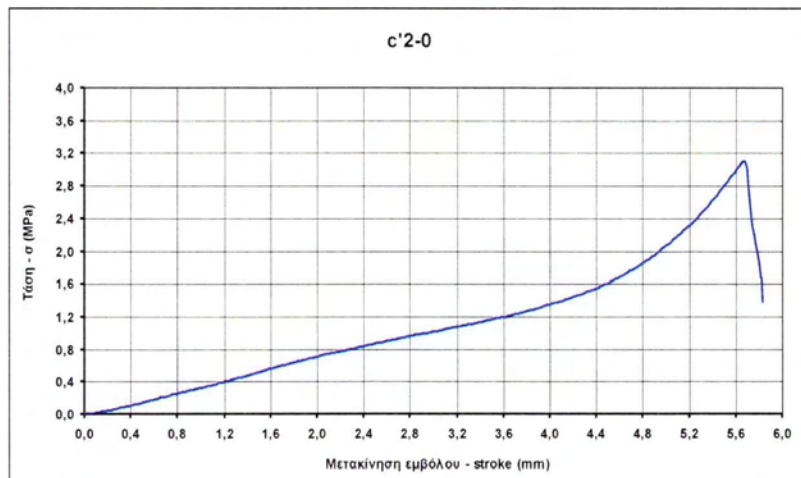
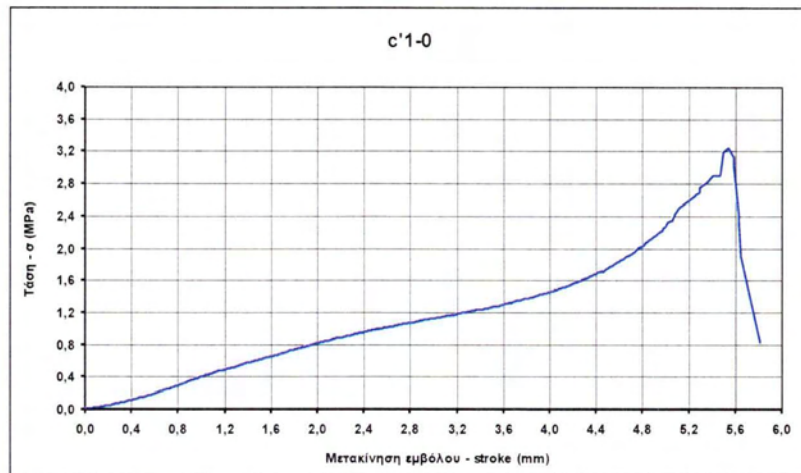
Πίνακας 10-15: Εφελκυστικές αντοχές κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα.

Όνομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου (Kg)	Ρυθμός επιβολής φορτίου (um/sec)	Μέγιστη ένδειξη πρέσας (KN)	Διάμετρος διατομής (mm)	Μήκος δοκιμίου (mm)	Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (Mpa)
C'1-15%	12,835	15000,000	237,2	150	300	3,36
C'2-15%	12,805	15000,000	221,2	150	300	3,13
C'3-15%	12,790	15000,000	219,8	150	300	3,11
Μέσος όρος						3,20

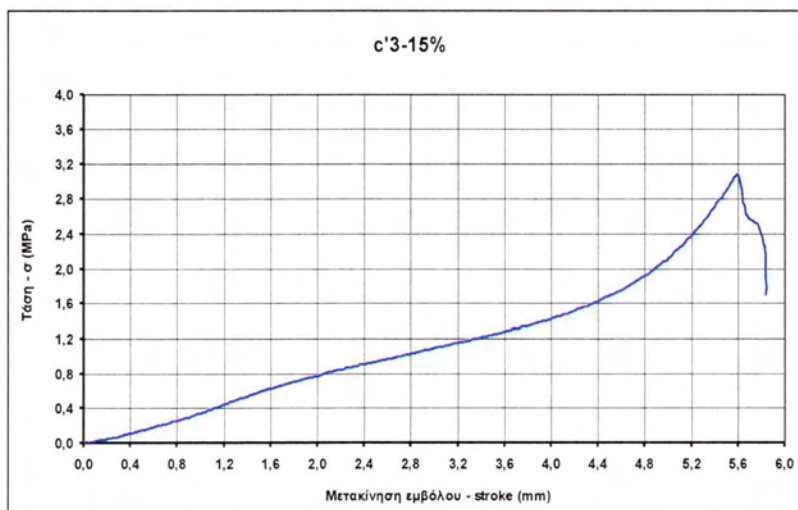
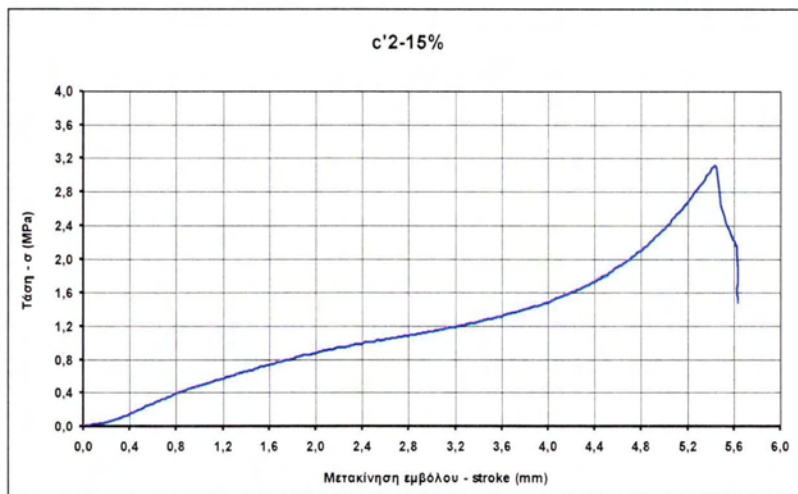
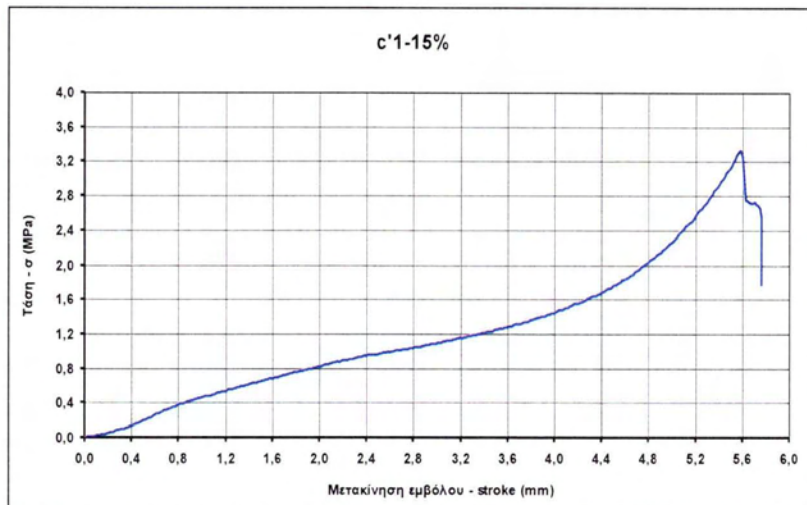
Πίνακας 10-16: Εφελκυστικές αντοχές κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.

Όνομασία δοκιμίου	Βάρος δοκιμίου (Kg)	Ρυθμός επιβολής φορτίου (um/sec)	Μέγιστη ένδειξη πρέσας (KN)	Διάμετρος διατομής (mm)	Μήκος δοκιμίου (mm)	Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (Mpa)
C'1-30%	12,850	15000,000	199,4	150	300	2,82
C'2-30%	12,815	15000,000	218,6	150	300	3,09
C'3-30%	12,860	15000,000	231,6	150	300	3,28
Μέσος όρος						3,06

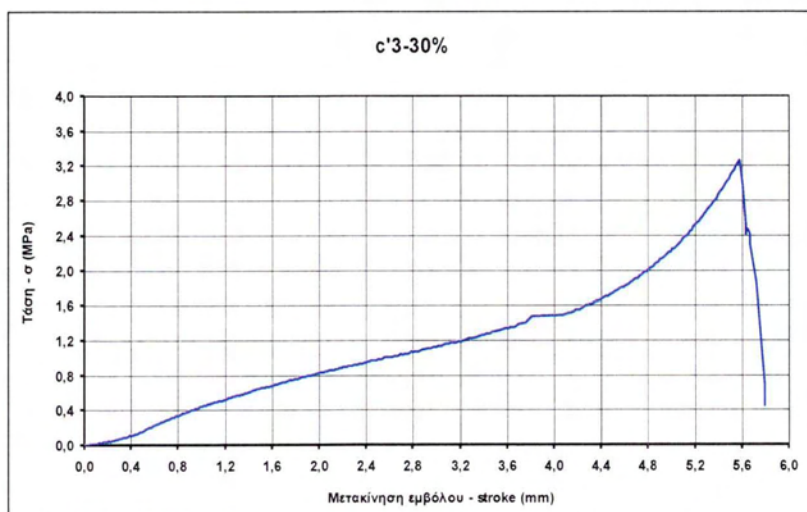
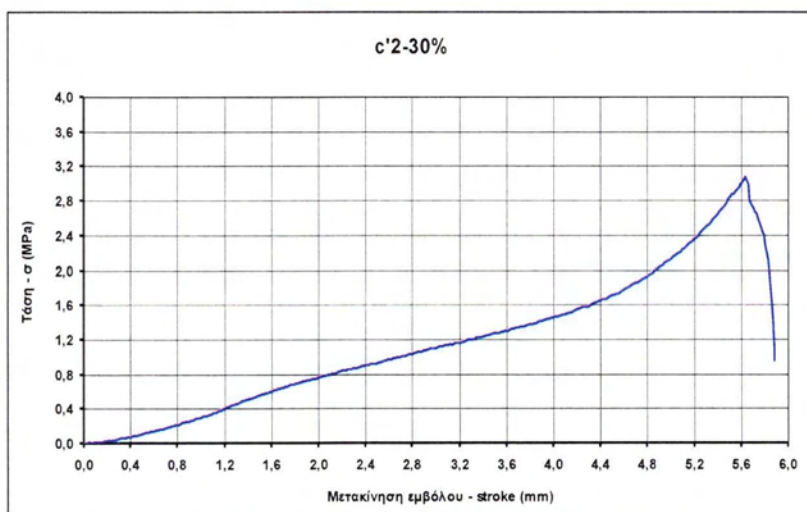
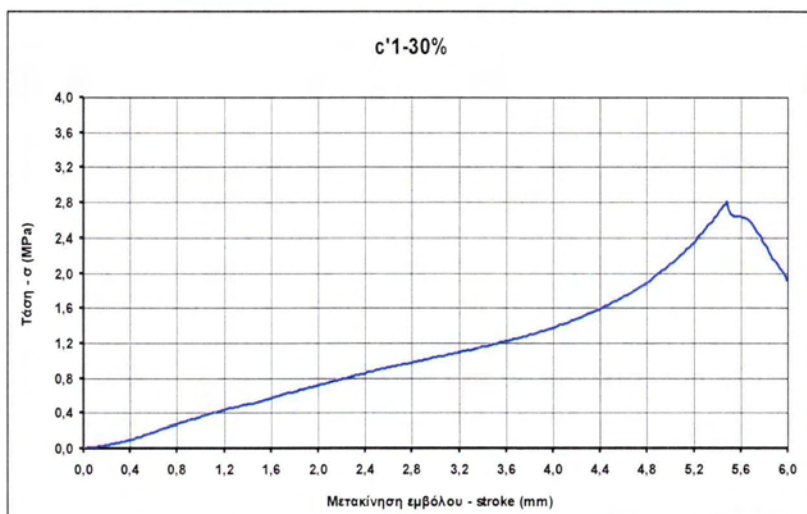
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται από την μηχανή εφελκυσμού σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής για τις διάφορες σκυροδετήσεις, δηλαδή με σκέτο τσιμέντο, με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα και με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.



Διαγράμματα 10-6 α,β,γ: Διαγράμματα εφελκυστικής τάσης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής για τα κυλινδρικά δοκίμια με σκέτο τσιμέντο.



Διαγράμματα 10-7 α,β,γ: Διαγράμματα εφελκυστικής τάσης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής για τα κυλινδρικά δοκίμια με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα.



Διαγράμματα 10-8 α,β,γ: Διαγράμματα εφελκυστικής τάσης σε σχέση με την μετακίνηση του εμβόλου της μηχανής για τα κυλινδρικά δοκίμια με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.

Εφόσον γνωρίζουμε τις τιμές της εφελκυστικής αντοχής κυλίνδρου σε διάρρηξη $f_{ct,SP}$ για κάθε κύλινδρο μπορούμε να βρούμε την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ct} , η οποία από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι είναι (ΕΚΩΣ 2000):

$$f_{ct} \approx 0,9 * f_{ct,SP}$$

Πίνακας 10-17: Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος βάσει της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη.

Ονομασία δοκιμίου	Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. $f_{ct,SP}$ (MPa)	Εφελκυστική αντοχή 28 ημ. f_{ct} (MPa)
C'1-0	3,25	2,926
C'2-0	3,11	2,801
C'3-0	3,40	3,062
Μέσος όρος αντοχής		2,930
C'1-15%	3,36	3,020
C'2-15%	3,13	2,816
C'3-15%	3,11	2,799
Μέσος όρος αντοχής		2,878
C'1-30%	2,82	2,539
C'2-30%	3,09	2,783
C'3-30%	3,28	2,949
Μέσος όρος αντοχής		2,757

10.5.3. Μετατροπή των θλιπτικών αντοχών κύβων $f_{c,cube}$ σε θλιπτικές αντοχές κυλίνδρων $f_{c,cylinder}$.

- 1^{ος} τρόπος μετατροπής.

Σε εργασία του Β. Κυριακόπουλου (2012) αναφέρονται οι τρεις παρακάτω σχέσεις για την μετατροπή του $f_{c,cube}$ σε $f_{c,cylinder}$:

$$f_{c,cylinder} = 0,848 \times f_{c,cube} \text{ (κατά τους Sen and Desayi)}$$

$$f_{c,cylinder} = 0,81 \times f_{c,cube} \text{ (κατά το ACI Building code 318-89)}$$

$$f_{c,cylinder} = 0,80 \times f_{c,cube} \text{ (κατά τον Oluokun)}$$

- 2^{ος} τρόπος μετατροπής.

Οι Tibor Kausay και Tamás K. Simon σε έρευνα τους αναφέρουν την αναλογία:

$$f_{c,cube}/f_{c,cylinder} = 0,97/0,76 \text{ για σκυροδέματα } C < C50/60$$

- 3^{ος} τρόπος μετατροπής.

Σκεπτόμενοι ότι υπάρχουν οι κατηγορίες σκυροδέματος C16/20, C20/25, C25/30, C30/37 κ.ο.κ. μπορούμε να πούμε ότι για κάθε κατηγορία σκυροδέματος υπάρχει και ο κατάλληλος συντελεστής με τον οποίο αν πολλαπλασιάσουμε την $f_{c,cube}$ μπορούμε να βρούμε την $f_{c,cylinder}$. Αυτός ο συντελεστής υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$16/20 \approx 0,80 \text{ για C16/20}$$

$$20/25 \approx 0,80 \text{ για C20/25}$$

$$25/30 \approx 0,833 \text{ για C25/30}$$

$$30/37 \approx 0,811 \text{ για C30/37 κ.ο.κ.}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και δεδομένου ότι όλες οι τιμές των $f_{c,cube}$ είναι ανάμεσα σε 30 MPa και 37 MPa (εκτός από την τιμή για C2-30% που είναι ανάμεσα σε 25 MPa και 30 MPa) με γραμμική παρεμβολή βρίσκουμε τον συντελεστή με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την αντίστοιχη τιμή $f_{c,cube}$.

Πίνακας 10-18: Μετατροπή $f_{c,cube}$ σε $f_{c,cylinder}$ σύμφωνα με τον 3^ο τρόπο μετατροπής.

Ονομασία δοκιμίων	$f_{c,cube}$ (MPa)	Συντελεστής πολλαπλασιασμού b	$f_{c,cylinder} = b * f_{c,cube}$ (MPa)
C1-0	32,743	0,8244	26,993
C2-0	32,965	0,8237	27,153
C3-0	33,587	0,8217	27,598
C4-0	30,971	0,8299	25,703
C5-0	32,412	0,8254	26,753
C6-0	32,920	0,8238	27,119
Μέσος όρος	32,600		26,887
C1-15%	31,054	0,8297	25,766
C2-15%	33,509	0,8220	27,544
C3-15%	32,446	0,8253	26,778
C4-15%	31,596	0,8280	26,161
C5-15%	32,601	0,8248	26,889
C6-15%	33,417	0,8223	27,479
Μέσος όρος	32,437		26,770
C1-30%	30,518	0,8314	25,373
C2-30%	29,766	0,8315	24,750
C3-30%	30,583	0,8312	25,421
C4-30%	30,838	0,8304	25,608
C5-30%	30,548	0,8313	25,395
C6-30%	30,306	0,8320	25,215
Μέσος όρος	30,427		25,293

10.6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Στο σημείο αυτό θα συγκρίνουμε διάφορα χαρακτηριστικά των τριών σκυροδετήσεων που παρασκευάσαμε, δηλαδή την σκυροδέτηση με σκέτο τσιμέντο, με τσιμέντο και 15% ιπτάμενη τέφρα και με τσιμέντο και 30% ιπτάμενη τέφρα.

Η πρώτη διαφορά που παρατηρήσαμε αντικαθιστώντας τσιμέντο με ιπτάμενη τέφρα είναι η υφή του μείγματος του σκυροδέματος. Προσθέτοντας 15% ιπτάμενη τέφρα στο μείγμα μας παρατηρήσαμε ότι η υφή του ήταν πιο υδαρή σε σχέση με το μείγμα με 100% τσιμέντο. Υιοθετήσαμε λοιπόν την άποψη ότι αντικαθιστώντας τσιμέντο με ιπτάμενη τέφρα το μείγμα μας θα γίνεται πιο υδαρές. Πιστέψαμε πως όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αντικατάστασης τόσο πιο υδαρές θα είναι το μείγμα μας. Επομένως, με την αντικατάσταση 30% τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα περιμέναμε ένα μείγμα ακόμα πιο υδαρές από το μείγμα με 15% ιπτάμενη τέφρα. Αντί αυτού όμως, είδαμε ότι το μείγμα μας ήταν πιο πηχτό από πριν. Δηλαδή, συγκρίνοντας τις τρεις περιπτώσεις είδαμε ότι το πιο υδαρές μείγμα είναι αυτό με 15% ιπτάμενη τέφρα, το πιο πηχτό είναι αυτό με 100% τσιμέντο και κάτι ενδιάμεσο είναι αυτό με 30% ιπτάμενη τέφρα.

Συγκρίνοντας τις τιμές των καθίσεων των τριών περιπτώσεων βλέπουμε ότι την μεγαλύτερη κάθιση την έχει το σκυρόδεμα με 15% ιπτάμενη τέφρα ($13,5 \approx 14$ cm) και την μικρότερη το σκυρόδεμα με 100% τσιμέντο (6 cm). Το σκυρόδεμα με 30% ιπτάμενη τέφρα έχει ενδιάμεση κάθιση σε σχέση με τις άλλες δύο ($9,5 \approx 10$ cm). Φυσικά αυτό είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο ύστερα από όσα είπαμε για την υφή του κάθε σκυροδέματος. Όσο πιο υδαρές είναι το μείγμα τόσο μεγαλύτερη κάθιση θα παρουσιάσει και όσο πιο πηχτό είναι τόσο πιο μικρή κάθιση θα έχει.

Κυβικά δοκίμια.

Στους παρακάτω πίνακες παραθέτουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα του βάρους και της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμίων από κάθε σκυροδέτηση.

Πίνακας 10-19: Συγκριτικά αποτελέσματα του βάρους των κυβικών δοκιμίων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ					
ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ I.T. (kg)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 15% I.T. (kg)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 30% I.T. (kg)	
C1-0	8,195	C1-15%	8,185	C1-30%	8,155
C2-0	8,255	C2-15%	8,260	C2-30%	8,305
C3-0	8,285	C3-15%	8,245	C3-30%	8,195
C4-0	8,180	C4-15%	8,210	C4-30%	8,220
C5-0	8,265	C5-15%	8,275	C5-30%	8,160
C6-0	8,190	C6-15%	8,220	C6-30%	8,205
M.O.	8,228	M.O.	8,233	M.O.	8,207

Βλέποντας τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η διαφορά βάρους των κύβων των τριών σκυροδετήσεων είναι αμελητέα. Η διαφορά του μέσου όρου του μείγματος με 15% ι.τ. από τον μέσο όρο του μείγματος με καθαρό τσιμέντο είναι +5 gr και αυτή του μείγματος με 30% ι.τ. από αυτό με σκέτο τσιμέντο είναι -21 gr. Κοιτάζοντας αυτές τις τιμές καταλαβαίνουμε ότι η διαφορά τους είναι πάρα πολύ μικρή και θεωρείται σχεδόν μηδενική. Να θυμίσουμε σε αυτό το σημείο τις τιμές μέσου ειδικού βάρους των κυβικών δοκιμίων: 2407,252 kg/m³ για τα δοκίμια με σκέτο τσιμέντο, 2404,515 kg/m³ για τα δοκίμια με 15% ι.τ. και 2399,599 kg/m³ για τα δοκίμια με 30% ι.τ. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές παρατηρούμε μια μείωση κατά 0,11% προσθέτοντας 15% ι.τ. ενώ προσθέτοντας 30% η μείωση είναι 0,32%. Και αυτές οι διαφορές μπορούμε να πούμε ότι είναι σχεδόν μηδενικές.

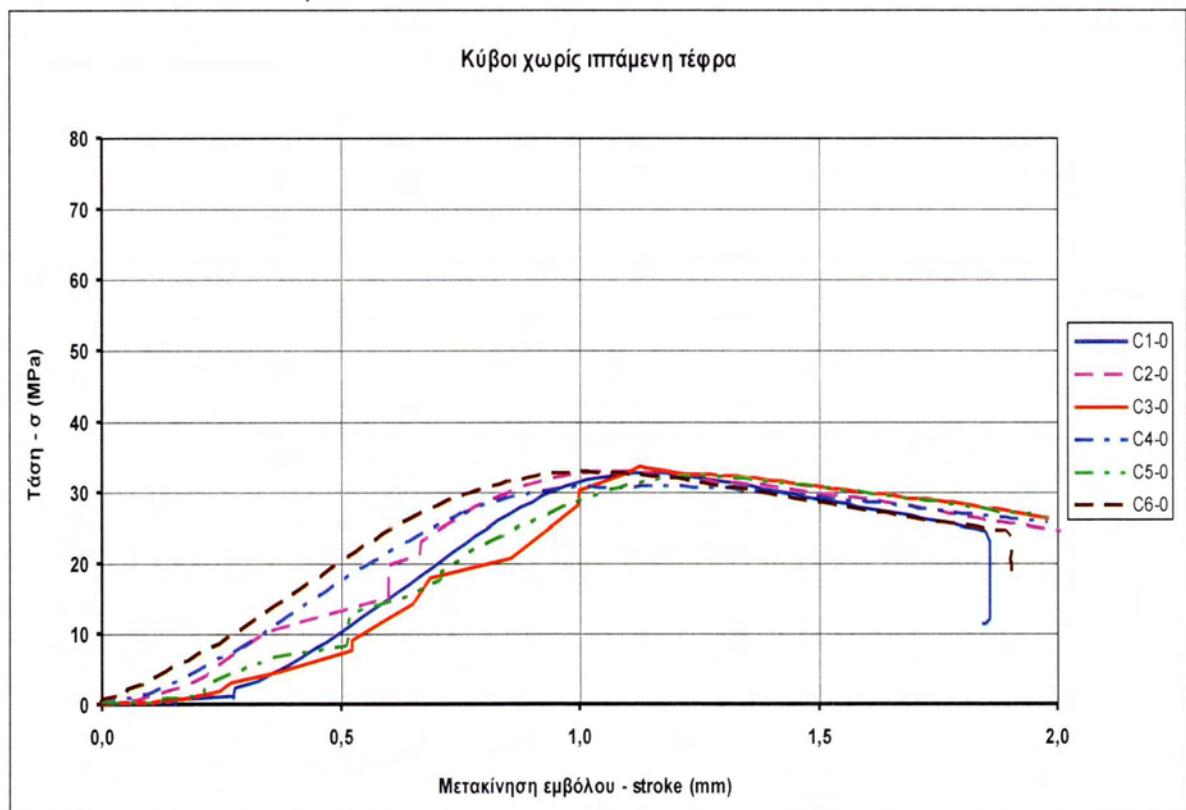
Πίνακας 10-20: Συγκριτικά αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής 28 ημερών των κυβικών δοκιμίων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (28 ΗΜΕΡΩΝ) ΤΩΝ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ					
ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ Ι.Τ. (Mpa)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 15% Ι.Τ. (Mpa)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 30% Ι.Τ. (Mpa)	
C1-0	32,743	C1-15%	31,054	C1-30%	30,518
C2-0	32,965	C2-15%	33,509	C2-30%	29,766
C3-0	33,587	C3-15%	32,446	C3-30%	30,583
C4-0	30,971	C4-15%	31,596	C4-30%	30,838
C5-0	32,412	C5-15%	32,601	C5-30%	30,548
C6-0	32,920	C6-15%	33,417	C6-30%	30,306
M.O.	32,600	M.O.	32,437	M.O.	30,427

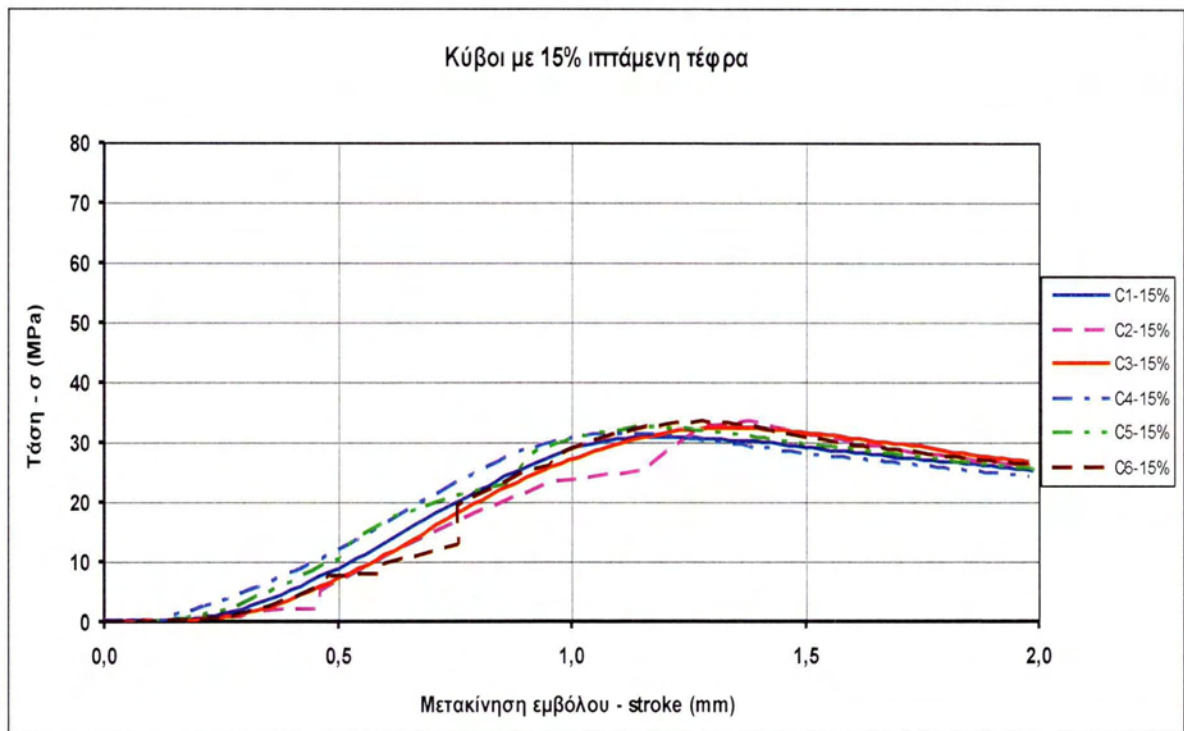
Παρατηρούμε μείωση της αντοχής σε θλίψη καθώς αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης. Και κυρίως μια πιο απότομη μείωση της τάσης παρατηρείται στην μετάβαση από 15% ι.τ. σε 30% ι.τ. (μείωση τάσης κατά 6,2%) παρά στην μετάβαση από 0% σε 15% (μείωση τάσης κατά 0,5%). Σε γενικές γραμμές όμως, αυτές οι μειώσεις είναι μικρές. Εμείς χρησιμοποιήσαμε CEM II 42,5 MPa, όπως αναφέραμε και παραπάνω, και παρατηρήσαμε ότι παρασκευάσαμε σκυρόδεμα με θλιπτικές αντοχές μεγαλύτερες από 30 MPa ενώ σαν κατώτερο στόχο είχαμε βάσει αρχικού σχεδιασμού τα 25 MPa. Επομένως, σε μελλοντική έρευνα ίσως είναι ενδιαφέρον να χρησιμοποιηθεί CEM II 32,5 MPa, το οποίο να καλύπτει μεν αλλά να είναι πιο κοντά στις επιδιωκόμενες απαιτήσεις για C20/25. Παρόλα αυτά όμως, για εμάς δεν ήταν σημαντική αυτή η διαφοροποίηση καθώς σκοπός μας ήταν η συγκριτική μελέτη των αντοχών του σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση τσιμέντου από ι.τ. Στην μελέτη μας, μας ενδιαφέρει που οι μειώσεις των θλιπτικών αντοχών κατά -0,5% προσθέτοντας 15% ι.τ. και κατά -6,67% προσθέτοντας 30% ι.τ. είναι πολύ μικρές. Δηλαδή, τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με αυτά των δοκιμίων χωρίς ι.τ.

Ο τρόπος ρηγματώσης είναι ίδιος και στις τρεις περιπτώσεις, δηλαδή βλέπουμε ότι δημιουργήθηκαν ρωγμές στις τέσσερις παράπλευρες επιφάνειες των κύβων με συνέπεια την αποφλοίωση του σκυροδέματος στις επιφάνειες αυτές. Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημάνουμε ότι μπορεί ο τρόπος ρηγματώσης να είναι ίδιος, όμως η ένταση της ρηγματώσης δεν είναι ίδια. Παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια με 30% ιπτάμενη τέφρα εμφάνισαν πιο μικρές ρωγμές και λιγότερη αποφλοίωση της εξωτερικής στρώσης του σκυροδέματος.

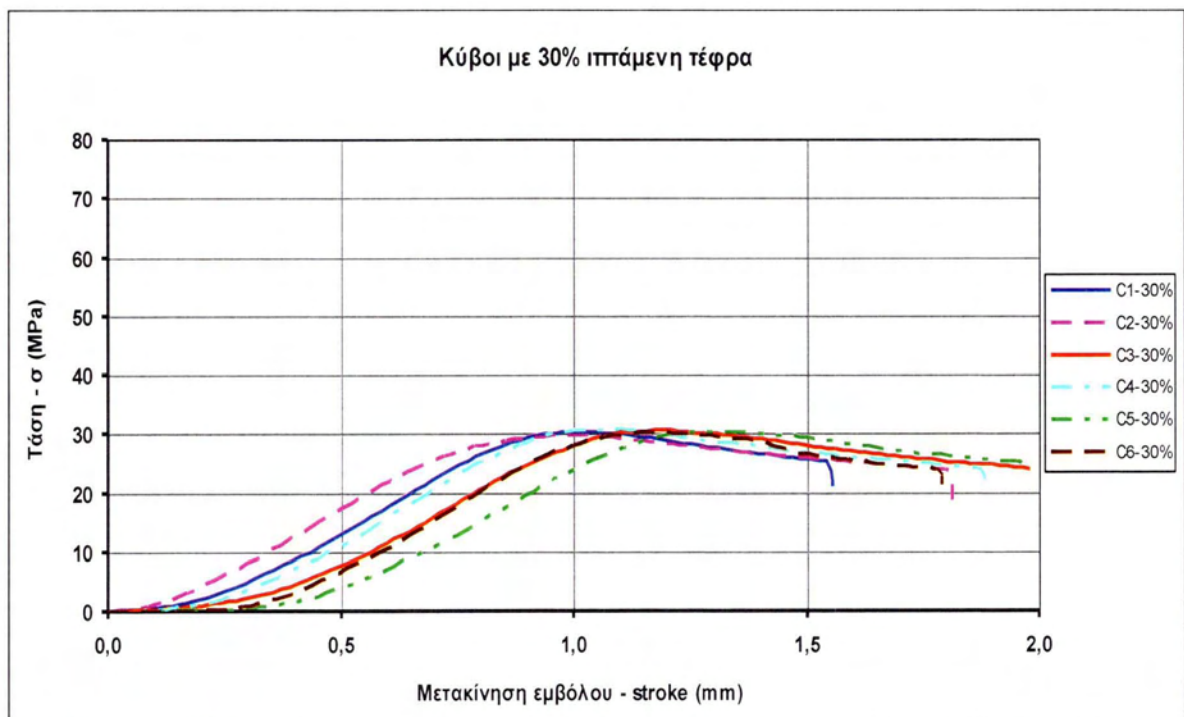
Στα σχήματα 10-9α έως 10-9γ ακολουθούν τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η συσχέτιση μετακίνησης του εμβόλου (stroke) συναρτήσει της τάσης που ασκείται στο δοκίμιο.



Διάγραμμα 10-9α: Σύγκριση κυβικών δοκιμίων χωρίς Ι.Τ.

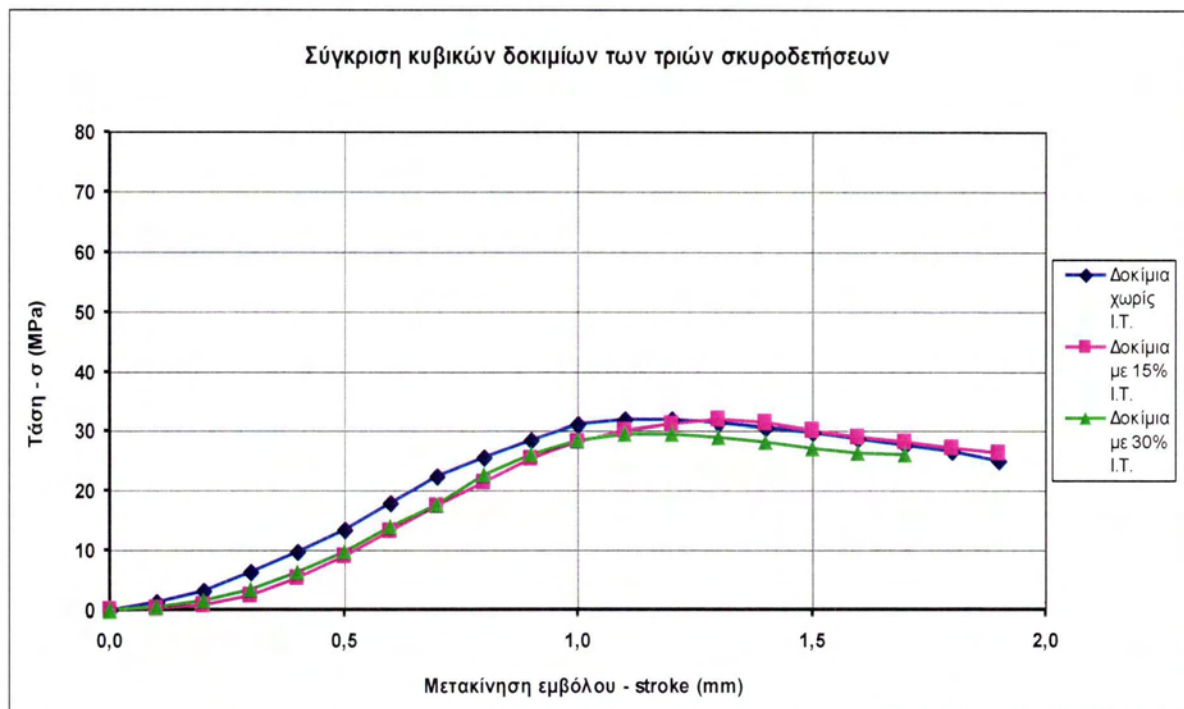


Διάγραμμα 10-9β: Σύγκριση κυβικών δοκιμών με 15% I.T.



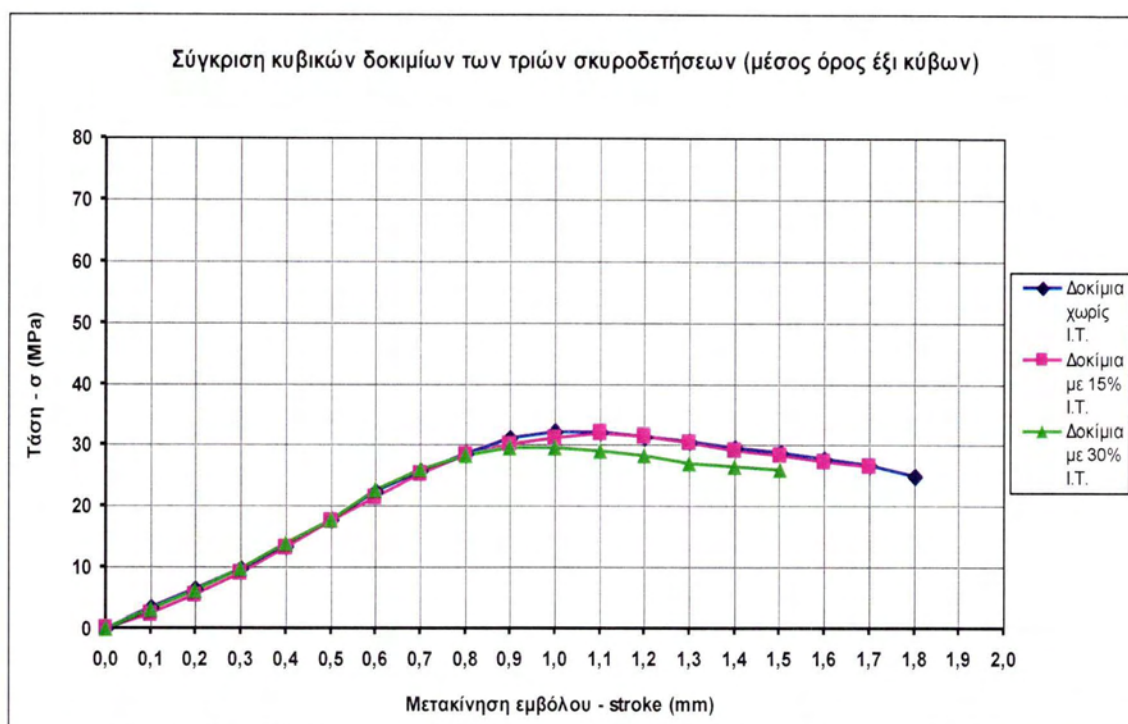
Διάγραμμα 10-9γ: Σύγκριση κυβικών δοκιμών με 30% I.T.

Τέλος, στο Διάγραμμα 10-10 παριστάνονται οι μέσες καμπύλες σ -stroke των κυβικών δοκιμών κάθε σκυροδέτησης (χωρίς I.T., με 15% I.T. και με 30% I.T.) για μετακίνηση εμβόλου από 0,00 μέχρι 1,90 mm με βήμα 0,10 mm έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 10-10: Σύγκριση των κυβικών δοκιμίων των τριών σκυροδετήσεων.

Όπως βλέπουμε παραπάνω, αρχικά τα διαγράμματα εμφανίζουν μια μικρή κλίση και στη συνέχεια η κλίση αυτή αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί αρχικά δεν είχε πατήσει ακόμα καλά η μηχανή στα δοκίμια. Επισημαίνεται ότι η μετακίνηση του εμβόλου αποτυπώνει την διαφορά μήκους του δοκιμίου λόγω σύνθλιψης η οποία επηρεάζεται σημαντικά από τις αυξημένες τοπικές παραμορφώσεις των άκρων των δοκιμίων στις θέσεις εφαρμογής του φορτίου από την μηχανή. Συνεπώς η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος αναμένεται να είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη που μετράται μέσω της μετακίνησης του εμβόλου. Κρίθηκε σκόπιμο να διορθωθούν τα διαγράμματα των μέσων καμπυλών των έξι κυβικών δοκιμίων κάθε σκυροδέτησης ως εξής: έγινε προέκταση των γραμμικών τμημάτων των διαγραμμάτων, σβήστηκαν οι αρχικές τιμές μετακίνησης του εμβόλου και μετατοπίστηκαν τα διαγράμματα προς τα αριστερά για να είναι πιο συμβατά με την μετακίνηση του εμβόλου από την στιγμή που το έμβολο πάτησε καλά στα δοκίμια και μετά. Παρακάτω φαίνεται το διορθωμένο διάγραμμα.



Διάγραμμα 10-11: Σύγκριση των κυβικών δοκιμίων των τριών σκυροδετήσεων – Διορθωμένο διάγραμμα.

Οι μέσες τιμές των μέγιστων τάσεων θλίψης που αναπτύσσονται στα δοκίμια χωρίς ι.τ., με 15% ι.τ. και με 30% ι.τ. είναι αντίστοιχα 32,076 MPa, 31,819 MPa και 29,645 MPa. Παρατηρούμε μια μείωση της τάσης κατά 0,8% με 15% αντικατάσταση τσιμέντου και επιπλέον μείωση 6,83% καθώς φτάνουμε σε ποσοστό αντικατάστασης 30%. Δηλαδή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μείωση της τάσης είναι πολύ μικρή και η μετακίνηση του εμβόλου κατά την στιγμή ανάπτυξης της μέγιστης τάσης είναι σχεδόν ίδια. Επίσης, ο τρόπος συμπεριφοράς των δοκιμίων είναι σχεδόν ίδιος όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα.

Ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας των κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος γίνεται από το τμήμα των καμπυλών του σχήματος 10-11 μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων με την μεγαλύτερη κλίση.

Πίνακας 10-21: Υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας των κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος βάσει διαγράμματος.

	δ (mm)	$\epsilon = \delta/l$	σ (MPa)	$E = \sigma/\epsilon$ (GPa)
C-0	0,1	0,001	4,51	7
C-15%	0,1	0,001	4,34	7
C-30%	0,1	0,001	4,78	7

δ : η διαφορά μετακίνησης του εμβόλου μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων, ϵ : η ανηγμένη παραμόρφωση, l : το αρχικό μήκος = 150 mm, σ : η μέγιστη διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων, E : το μέτρο ελαστικότητας.

Και στις τρεις σκυροδετήσεις παρατηρούμε ότι τα μέτρα ελαστικότητας των κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος είναι σχεδόν ίδια. Στην συνέχεια θα γίνει ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας βάσει του Ευρωκώδικα 2.

Πίνακας 10-22: Υπολογισμός μέτρων ελαστικότητας κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος βάσει Ευρωκώδικα 2.

	σ (MPa)	f_{ck} (MPa)	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)	$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3}$ (GPa)
C-0	31,10	25,786	33,786	32
C-15%	28,37	23,37	31,37	31
C-30%	26,05	21,05	29,05	30

σ : η τάση που αναπτύσσεται κατά την γραμμική περιοχή του διαγράμματος, f_{ck} : χαρακτηριστική θλιπτική κυλινδρική αντοχή, f_{cm} : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, E_{cm} : μέσο μέτρο ελαστικότητας.

Συγκρίνοντας τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τα διαγράμματα με αυτά που προέκυψαν βάσει του Ευρωκώδικα παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι το stroke (μετακίνηση εμβόλου) που μετρήθηκε στα διαγράμματα δεν αποτυπώνει την πραγματική ανηγμένη παραμόρφωση του δοκιμίου, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Επειδή δεν τοποθετήθηκαν ειδικά μετρικά όργανα για την μέτρηση των παραμορφώσεων (ηλεκτρομηκινσιόμετρα ή βελόμετρα) τα διαγράμματα τάσεων-μετακινήσεων έγιναν βάσει της μέτρησης της μετακίνησης από το stroke. Σε όλα όμως τα δοκίμια εφαρμόστηκε η μέθοδος του stroke οπότε μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των μέτρων ελαστικότητας των δοκιμίων μεταξύ τους. Και όπως παρατηρείται τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια, δείχνοντας ότι με υποκατάσταση του τσιμέντου από ι.τ. η ελαστικότητα των δοκιμίων σκυροδέματος είναι ίδια. Άλλωστε αυτό ήταν το αντικείμενο μελέτης, η συγκριτική συμπεριφορά των δοκιμίων σκυροδέματος με ι.τ. με τα δοκίμια σκυροδέματος χωρίς ι.τ.

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας βάσει του διαγράμματος δεν είναι καθόλου αξιόπιστος, σε αντίθεση με τον υπολογισμό βάσει του Ευρωκώδικα 2, ο οποίος δίνει πολύ αντικειμενικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά οι αντοχές (θλιπτικές και εφελκυστικές) που προέκυψαν από τα διαγράμματα είναι πάρα πολύ αξιόπιστες.

Κυλινδρικά δοκίμια.

Στους παρακάτω πίνακες παραθέτουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα του βάρους και της εφελκυστικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων από κάθε σκυροδέτηση.

Πίνακας 10-23: Συγκριτικά αποτελέσματα του βάρους των κυλινδρικών δοκιμίων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ					
ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ I.T. (kg)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 15% I.T. (kg)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 30% I.T. (kg)	
C'1-0	12,835	C'1-15%	12,835	C'1-30%	12,850
C'2-0	12,805	C'2-15%	12,805	C'2-30%	12,815
C'3-0	12,800	C'3-15%	12,790	C'3-30%	12,860
M.O.	12,813	M.O.	12,810	M.O.	12,842

Η διαφορά βάρους των κυλίνδρων των τριών σκυροδετήσεων είναι επίσης αμελητέα. Η διαφορά βάρους του μείγματος με 15% ι.τ. από το μείγμα με καθαρό τσιμέντο είναι +3 gr και αυτή του μείγματος με 30% ι.τ. από αυτό με σκέτο τσιμέντο είναι +29 gr. Κοιτάζοντας αυτές τις τιμές καταλαβαίνουμε ότι η διαφορά τους είναι πάρα πολύ μικρή. Οι τιμές των μέσων ειδικών βαρών των κυλινδρικών δοκιμίων να θυμίσουμε ότι είναι οι εξής: 2416,909 kg/m³ για τα δοκίμια με σκέτο τσιμέντο, 2416,343 kg/m³ για τα δοκίμια με 15% ι.τ. και 2422,379 kg/m³ για τα δοκίμια με 30% ι.τ. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές βλέπουμε μια μείωση κατά 0,02% προσθέτοντας 15% ι.τ. ενώ κατά την προσθήκη 30% ι.τ. στο μείγμα μας παρατηρούμε μια αύξηση του μέσου ειδικού βάρους κατά 0,23%. Οι διαφορές αυτές είναι σχεδόν μηδενικές όπως μπορούμε να αντιληφθούμε.

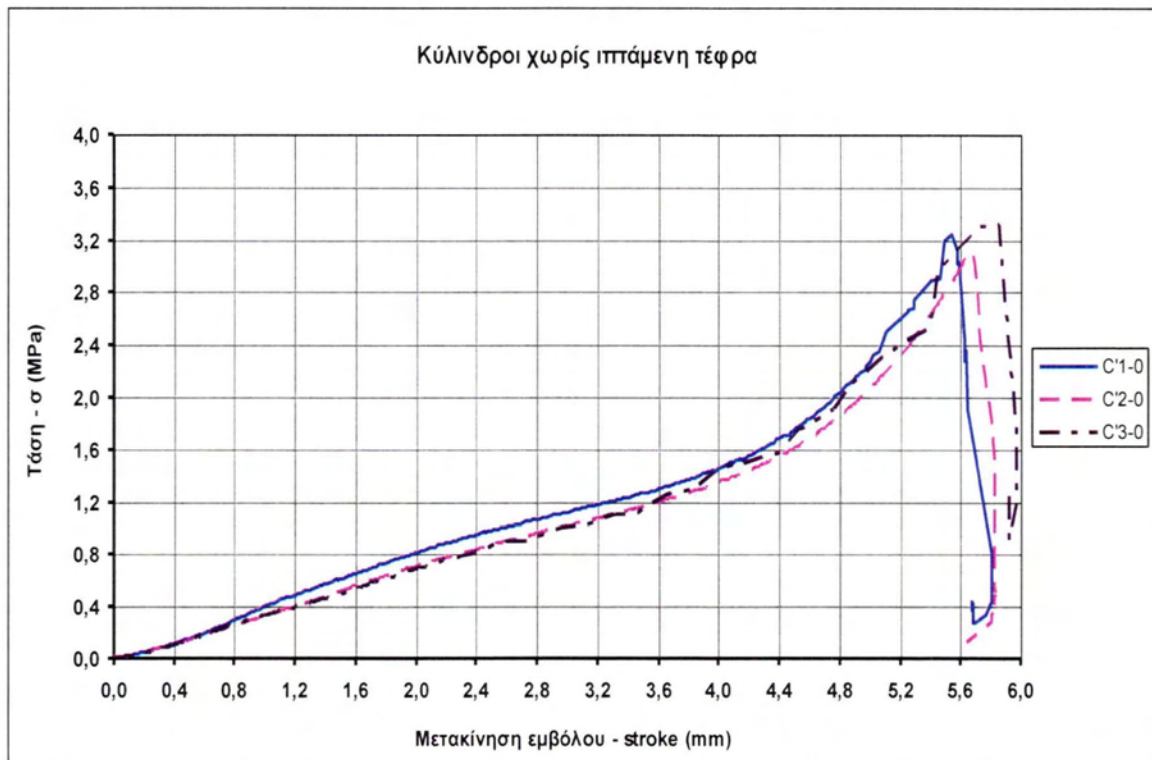
Πίνακας 10-24: Συγκριτικά αποτελέσματα της εφελκυστικής αντοχής 28 ημερών των κυλινδρικών δοκιμίων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (28 ΗΜΕΡΩΝ) ΤΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ					
ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ I.T. (Mpa)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 15% I.T. (Mpa)		ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ 30% I.T. (Mpa)	
C'1-0	3,25	C'1-15%	3,36	C'1-30%	2,82
C'2-0	3,11	C'2-15%	3,13	C'2-30%	3,09
C'3-0	3,40	C'3-15%	3,11	C'3-30%	3,28
M.O.	3,26	M.O.	3,20	M.O.	3,06

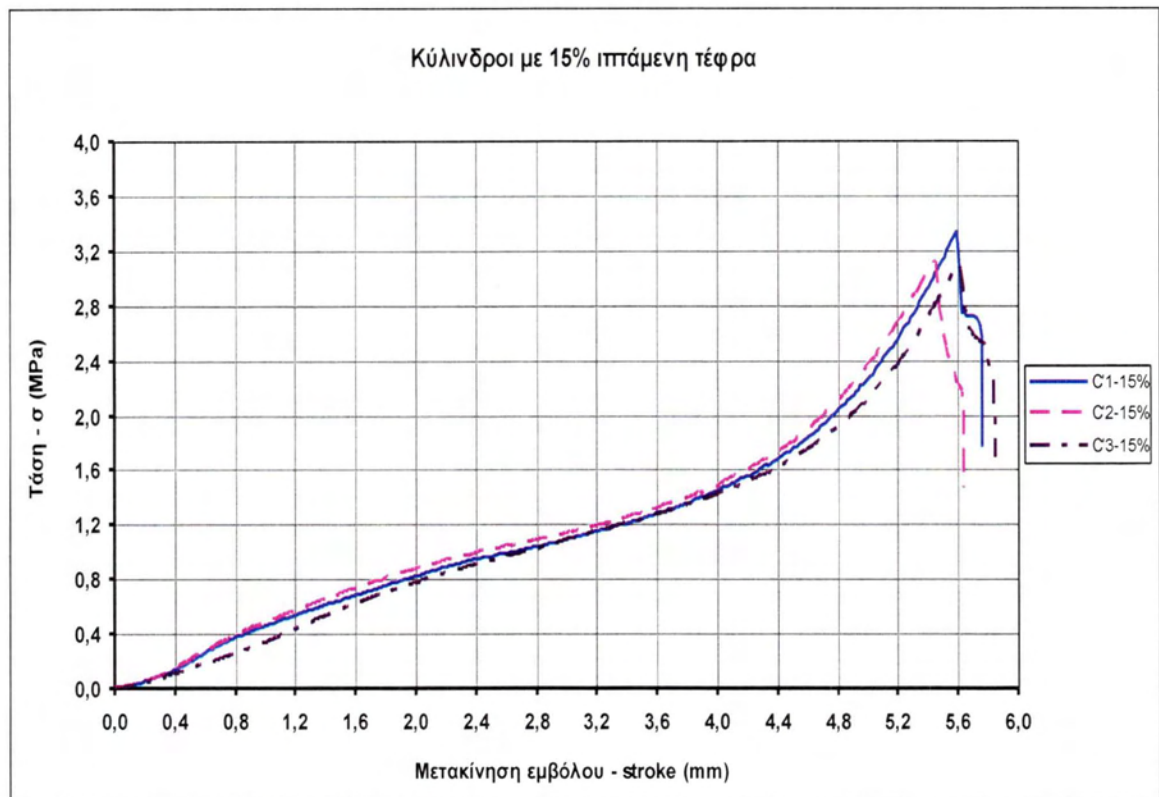
Και στα κυλινδρικά δοκίμια παρατηρούμε μία μείωση της τάσης εφελκυσμού καθώς αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης. Και κυρίως μια πιο απότομη μείωση της τάσης από την μετάβαση από 15% ι.τ. σε 30% ι.τ. (μείωση τάσης κατά 4,38%) παρά από την μετάβαση από 0% σε 15% (μείωση τάσης κατά 1,84%). Σε γενικές γραμμές όμως, αυτές οι μειώσεις είναι μικρές. Όπως στα κυβικά δοκίμια έτσι και στα κυλινδρικά, δεν ήταν σημαντική αυτή η διαφοροποίηση καθώς σκοπός μας ήταν η συγκριτική μελέτη των αντοχών του σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση τσιμέντου από ι.τ. με τις αντοχές του μείγματος αναφοράς (100% τσιμέντο). Το θετικό είναι ότι οι εφελκυστικές αντοχές από διάρρηξη που προκύπτουν με προσθήκη ι.τ. στα μείγματα είναι συγκρίσιμες με αυτές του μείγματος χωρίς ι.τ.

Ο τρόπος ρηγμάτωσης είναι ίδιος και στις τρεις περιπτώσεις, δηλαδή αρχικά άνοιξε μια σχεδόν κατακόρυφη ρωγμή κατά μήκος της διαμέτρου του κυλίνδρου και στη συνέχεια εμφανίστηκαν άλλες ρωγμές παραπλεύρως της κατακόρυφης. Οι σχεδόν κατακόρυφες αυτές ρωγμές επεκτάθηκαν σε όλο το μήκος του κυλίνδρου.

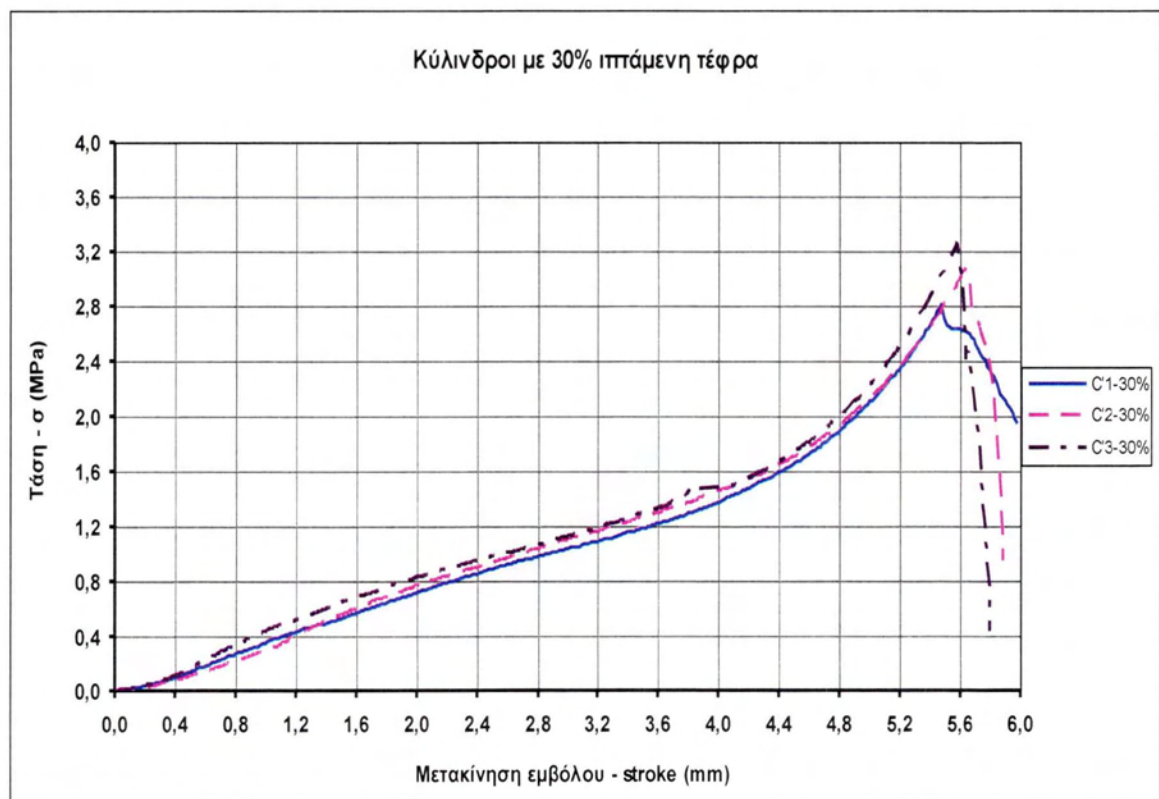
Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των κυλινδρικών δοκιμών.



Διάγραμμα 10-12α: Σύγκριση κυλινδρικών δοκιμών χωρίς Ι.Τ.

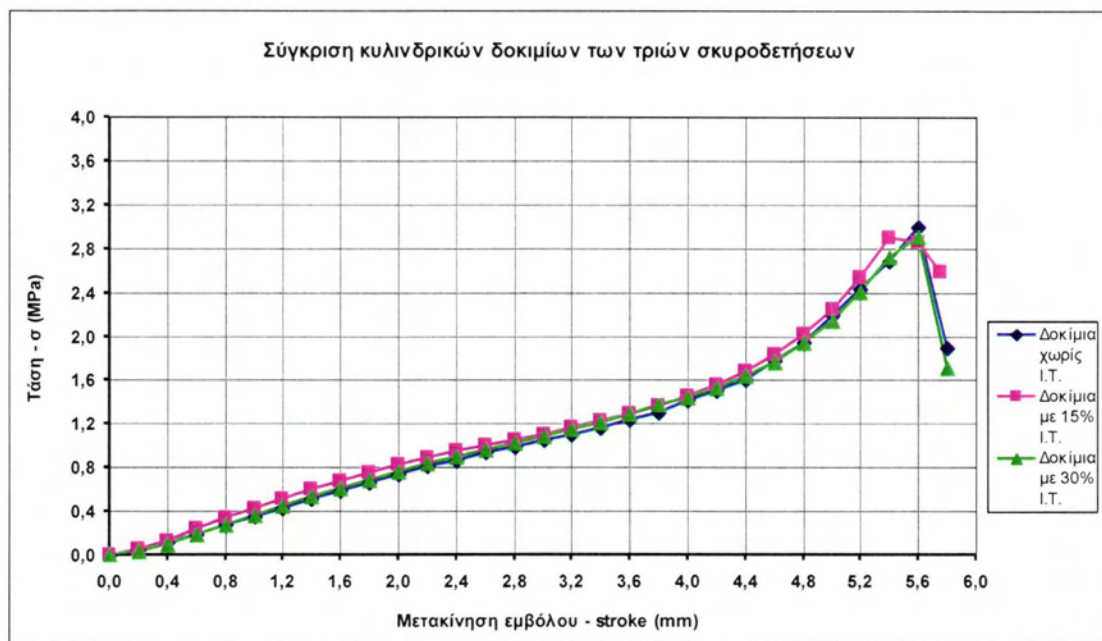


Διάγραμμα 10-12β: Σύγκριση κυλινδρικών δοκιμών με 15% Ι.Τ.



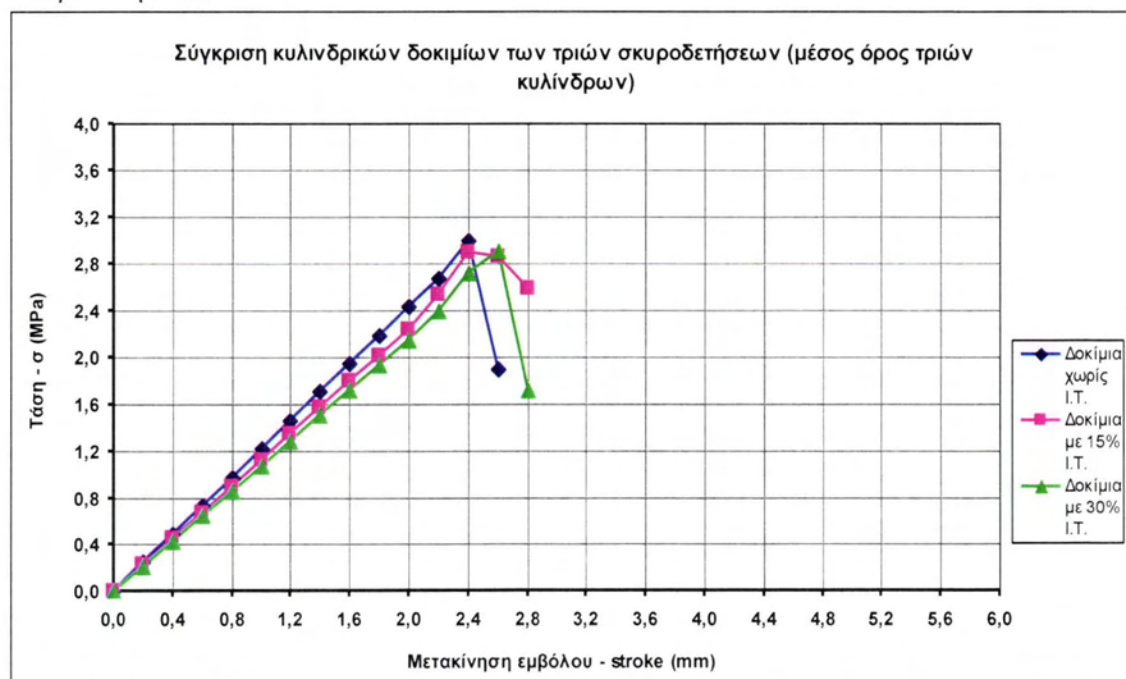
Διάγραμμα 10-12γ: Σύγκριση κυλινδρικών δοκιμών με 30% Ι.Τ.

Τέλος, στο Διάγραμμα 10-13 παριστάνονται οι μέσες καμπύλες σ -stroke των κυλινδρικών δοκιμών κάθε σκυροδετήσεως (χωρίς I.T., με 15% I.T. και με 30% I.T.) για μετακίνηση εμβόλου από 0,00 μέχρι 5,80 mm με βήμα 0,20 mm έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 10-13: Σύγκριση των κυλινδρικών δοκιμών των τριών σκυροδετήσεων.

Με το ίδιο τρόπο που έγινε η διόρθωση των διαγραμμάτων των κυβικών δοκιμών, έγινε και η διόρθωση των κυλινδρικών δοκιμών των τριών σκυροδετήσεων.



Διάγραμμα 10-14: Σύγκριση των κυλινδρικών δοκιμών των τριών σκυροδετήσεων – Διορθωμένο διάγραμμα.

Οι μέσες τιμές των μέγιστων τάσεων που αναπτύσσονται στα δοκίμια χωρίς ι.τ., με 15% ι.τ. και με 30% ι.τ. είναι αντίστοιχα 2,997 MPa, 2,895 MPa και 2,913 MPa. Παρατηρούμε μια μείωση της τάσης κατά 0,102 MPa με 15% αντικατάσταση τσιμέντου και στη συνέχεια μια αύξηση της τάσης κατά 0,018 MPa καθώς φτάνουμε σε ποσοστό αντικατάστασης 30%. Η μετακίνηση του εμβόλου όταν παρατηρείται η μέγιστη τάση είναι αντίστοιχα 5,60 mm, 5,40 mm και 5,60 mm. Δηλαδή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μείωση της τάσης είναι πολύ μικρή και η μετακίνηση του εμβόλου κατά την στιγμή ανάπτυξης της μέγιστης τάσης είναι σχεδόν ίδια. Επίσης, η συμπεριφορά των δοκιμίων είναι σχεδόν ταυτόσημη όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα.

Οι μέσες τιμές των μέγιστων τάσεων εφελκυσμού που αναπτύσσονται στα δοκίμια χωρίς ι.τ., με 15% ι.τ. και με 30% ι.τ. είναι αντίστοιχα 3 MPa, 2,9 MPa και 2,91 MPa. Παρατηρούμε μια μείωση της τάσης κατά 3,33% με 15% αντικατάσταση τσιμέντου και μείωση 3% με ποσοστό αντικατάστασης 30%. Δηλαδή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μείωση της τάσης είναι πολύ μικρή και η μετακίνηση του εμβόλου κατά την στιγμή ανάπτυξης της μέγιστης τάσης είναι σχεδόν ίδια. Επίσης, ο τρόπος συμπεριφοράς των δοκιμίων χωρίς ι.τ. και με 30% ι.τ. είναι σχεδόν ίδιος όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα. Ενώ τα δοκίμια με 15% ι.τ. μετά την αστοχία παρουσίασαν πιο ομαλή μείωση των αντοχών τους σε σχέση με ταυπόλοιπα δοκίμια που παρουσίασαν πιο απότομη μείωση αντοχών.

Το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει από τις δοκιμές εφελκυσμού των κυλίνδρων υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε για τις δοκιμές θλίψης των κύβων και προκύπτει ίσο με $E_0=188$ MPa, $E_{15\%}=181$ MPa και $E_{30\%}=170$ MPa. Και εδώ δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές των δοκιμίων χωρίς ι.τ. και των δοκιμίων με ι.τ.

10.7. Συμπεράσματα.

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως υποκατάστατο του τσιμέντου σε κατασκευές από άοπλο σκυρόδεμα είναι αποδεκτή και άκρως ικανοποιητική. Και αυτό προκύπτει από το ότι οι τάσεις που δίνουν τα μείγματα με αντικατάσταση 15% και 30% τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα είναι συγκρίσιμες με τις τάσεις του μίγματος με 100% τσιμέντο. Να σημειώσουμε ότι οι θλιπτικές αντοχές που πετύχαμε είναι όλες μεγαλύτερες από 30 MPa, δηλαδή εμπίπτουν σε σκυρόδεμα C25/30, το οποίο είναι ικανοποιητικών αντοχών για τα ελληνικά δεδομένα καθώς συνήθως χρησιμοποιούνται τα C20/25 ή C25/30. Επίσης, ο τρόπος ρηγμάτωσης των δοκιμίων και των τριών μειγμάτων είναι παρόμοιος, γεγονός που σημαίνει ότι ο τρόπος συμπεριφοράς καθώς και ο τρόπος αστοχίας τους κάτω από την ίδια φόρτιση είναι σχεδόν ίδιος.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι τιμές αντοχής, τόσο της θλιπτικής όσο και της εφελκυστικής, κάθε ομάδας παρουσιάζουν μικρή διασπορά και σύμφωνα με τους υπολογισμούς υπάρχει συμμόρφωση με τα κριτήρια του Ν.Κ.Τ.Σ. για το σκυρόδεμα κάθε σκυροδέτησης.

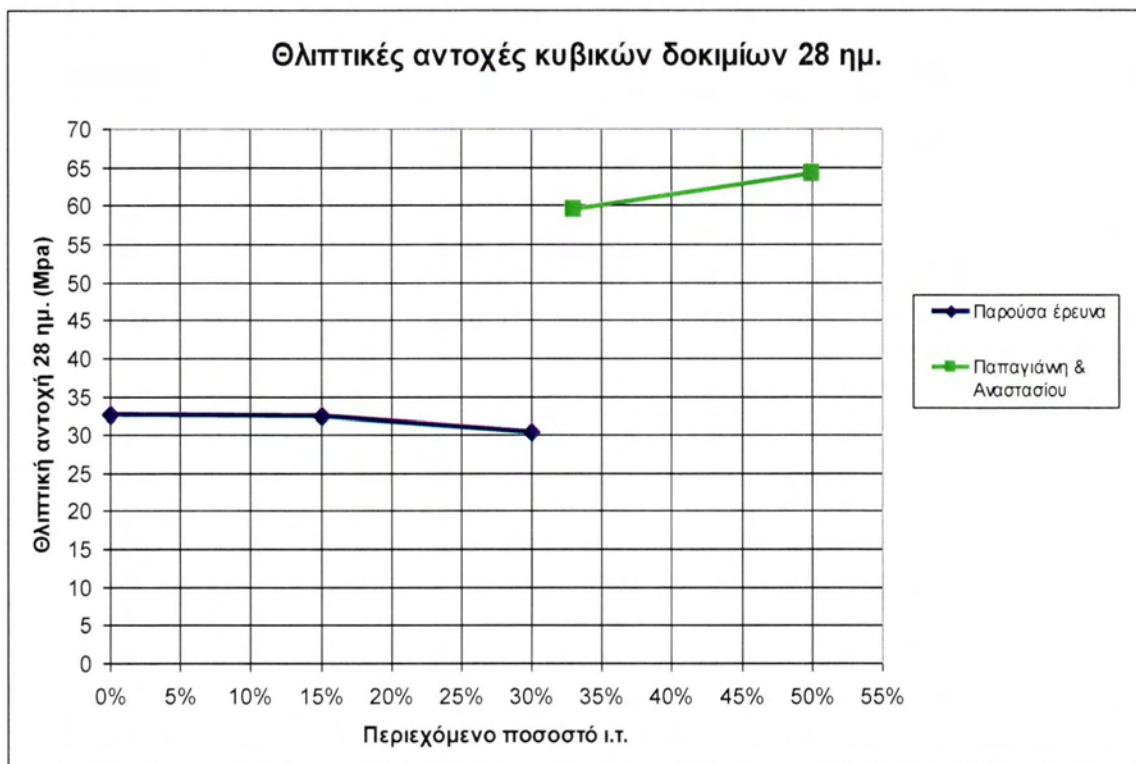
Επομένως, γνωρίζοντας ότι από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων η ιπτάμενη τέφρα ως υποκατάστατο του τσιμέντου έως και 30% δίνει πολύ καλά αποτελέσματα σε κατασκευές από άοπλο σκυρόδεμα και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι αποτελεί ένα βιομηχανικό παραπροϊόν, η χρήση της στον κατασκευαστικό τομέα είναι μια πολύ καλή πρόταση και ίσως μια εναλλακτική λύση του προβλήματος της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Καθώς, με αυτή της την χρήση οι τσιμεντοβιομηχανίες θα χρειάζεται να παράγουν λιγότερες ποσότητες τσιμέντου και επομένως θα περιοριστεί η εκπομπή CO₂, το οποίο επιβαρύνει αρκετά την ατμόσφαιρα. Τέλος, ένα ακόμη όφελος από την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας είναι το ότι δεν θα απαιτείται να εναποθέτονται τόσο μεγάλες ποσότητες του παραπροϊόντος αυτού στο περιβάλλον.

10.8. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά της βιβλιογραφίας.

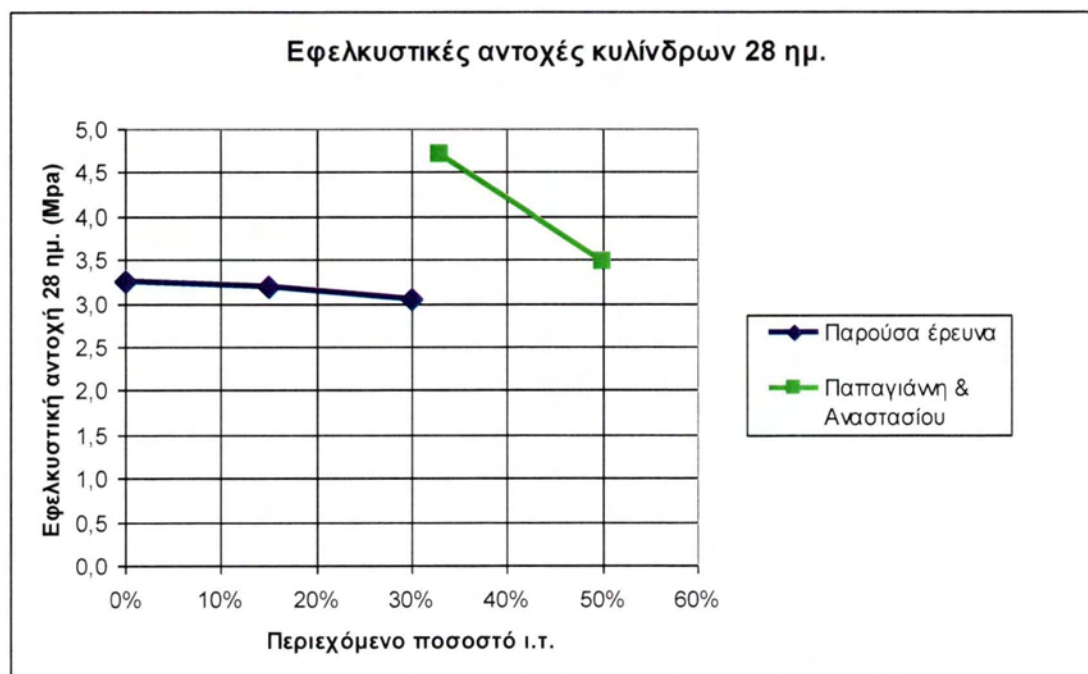
Στην βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε βρέθηκε ότι προσθήκη ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή σκυροδέματος πραγματοποιήσαν οι Παπαγιάννη Ι. και Αναστασίου Ε., (2009). Επομένως, θα μπορούσαμε να κάνουμε σύγκριση των αποτελεσμάτων μας με τα δικά τους, όμως οι παραπάνω, δημιούργησαν μείγματα με 33% και 50% υποκατάσταση τσιμέντου από ι.τ. Δεν έχουν κάποιο μείγμα αναφοράς, δηλαδή με 100% τσιμέντο. Και επειδή στόχος μας ήταν η συγκριτική μελέτη των σύνθετων μειγμάτων (αυτών με ι.τ.) με το μείγμα αναφοράς αντιλαμβανόμαστε ότι δεν μπορεί να γίνει τελικά σύγκριση των αποτελεσμάτων μας με αυτά των Παπαγιάννη και Αναστασίου.

Το μόνο που μπορούμε να κάνουμε είναι να δούμε τι διαφορές παρουσιάζουν τα δικά μας σύνθετα μείγματα (με ι.τ.) με αυτά των παραπάνω ερευνητών.

Παρακάτω φαίνονται σε διαγράμματα οι συγκρίσεις των θλιπτικών αντοχών κυβικών δοκιμίων καθώς επίσης και των εφελκυστικών αντοχών κυλινδρικών δοκιμίων.



Διάγραμμα 10-15: Σύγκριση θλιπτικών αντοχών κυβικών δοκιμών 28 ημερών.



Διάγραμμα 10-16: Σύγκριση εφελκυστικών αντοχών κυλινδρικών δοκιμών 28 ημερών.

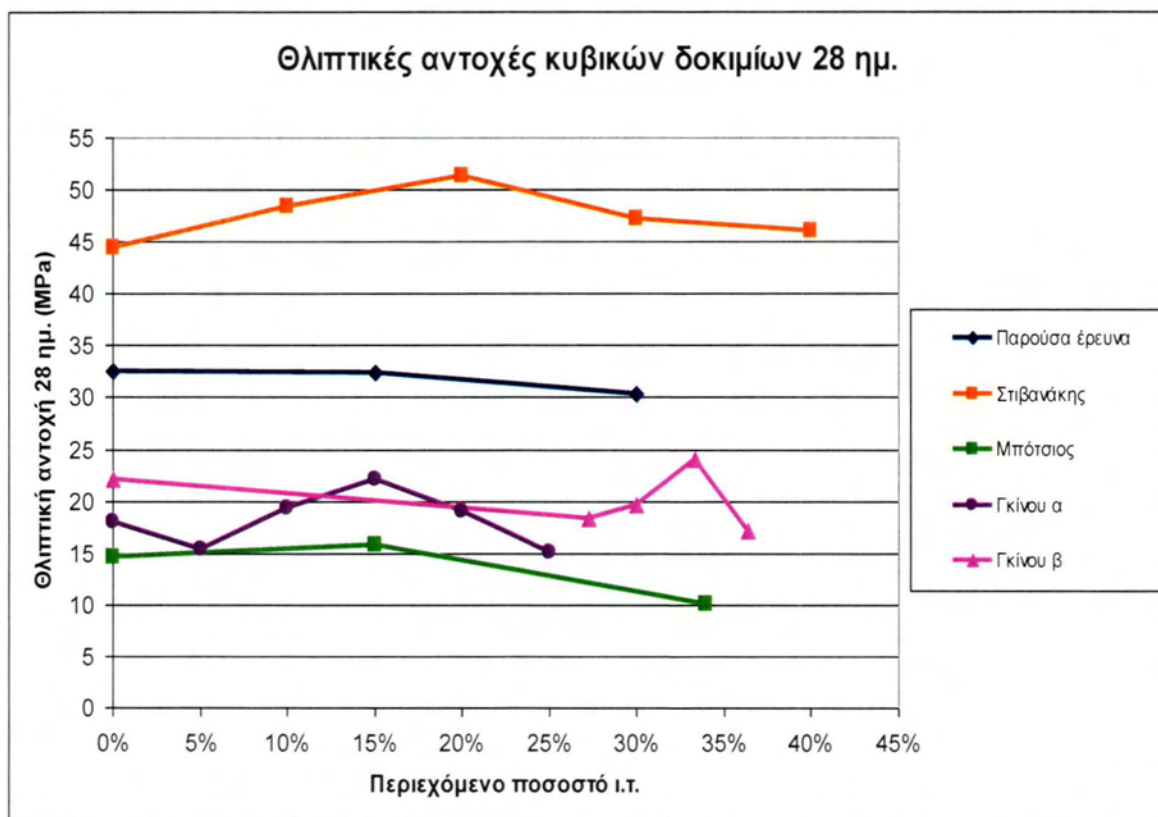
Συγκρίνοντας τα δικά μας αποτελέσματα με αυτά άλλων ερευνητών παρατηρούμε ότι οι δοκιμές των Παπαγιάννη και Αναστασίου δίνουν υψηλότερες θλιπτικές αντοχές από τις δικές μας. Να σημειώσουμε ότι αξίζει να συγκρίνουμε μόνο την υποκατάσταση τσιμέντου κατά 33% των Παπαγιάννη και Αναστασίου (που είναι κοντά με την δική μας υποκατάσταση 30%) καθώς είναι άσκοπο να συγκρίνουμε την υποκατάσταση κατά 50% από την στιγμή που εμείς δεν κάναμε τόσο μεγάλη υποκατάσταση. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η αντοχή του μίγματος των τελευταίων είναι σχεδόν διπλάσια από την δική μας.

Όσον αφορά στις εφελκυστικές αντοχές κυλινδρικών δοκιμίων παρατηρούμε ότι και πάλι οι Παπαγιάννη και Αναστασίου πέτυχαν πολύ υψηλότερη αντοχή, σχεδόν 1,5 φορά μεγαλύτερη από την δική μας αντοχή. Βέβαια, και σε αυτήν την περίπτωση καλό είναι να συγκρίνουμε μόνο την υποκατάσταση κατά 33% που είναι κοντά στο δικό μας ποσοστό υποκατάστασης (30%) για τον ίδιο λόγο που είπαμε παραπάνω.

Να αναφέρουμε όμως ότι οι διαφορές στα αποτελέσματα μας από αυτά των Παπαγιάννη και Αναστασίου ίσως έχουν να κάνουν και με διάφορους παράγοντες όπως:

- Ύπαρξη διαφορετικού λόγου N/T.
- Διαφορετική άλεση και ειδική επιφάνεια Blaine της ιπτάμενης τέφρας.
- Πιθανή προμήθεια ι.τ. από διαφορετικούς ΑΗΣ, επομένως με διαφορετική χημική σύσταση.
- Διαφορετική κατηγορία τσιμέντου.
- Διαφορετική κοκκομετρία αδρανών.
- Διαφορετική ποσότητα ρευστοποιητή.

Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος λόγω της υποκατάστασης από ιπτάμενη τέφρα τσιμέντου ή κλίνκερ στην παραγωγή σκυροδέματος ή τσιμέντου, αντίστοιχα, διαφόρων ερευνητών.



Διάγραμμα 10-17: Θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων 28 ημερών διαφόρων ερευνητών λόγω προσθήκης ι.τ.

Χαρακτηριστικά δοκιμίων που παριστάνονται στο Διάγραμμα 10-17:

- Παρούσα έρευνα: υποκατάσταση τσιμέντου από ι.τ. σε ποσοστά 15% και 30% κ.β. για την παραγωγή σκυροδέματος.
- Στιβανάκης: υποκατάσταση κλίνκερ τσιμέντου από ι.τ. σε ποσοστά 10%, 20%, 30% και 40% για την παραγωγή τσιμέντου.
- Μπότσιος: αντικατάσταση μέρους των πρώτων υλών στη σύσταση της φαρίνας με ι.τ. σε ποσοστά 15% και 34% για την παραγωγή τσιμέντου.
- Γκίνου: αντικατάσταση τσιμέντου από ι.τ. σε ποσοστά
 α) 5%, 10%, 15%, 20%, 25% για την παραγωγή κυβόλιθων διπλής στρώσης και
 β) 27,27%, 30%, 33%, 36,36% για την παραγωγή κυβόλιθων μονής στρώσης.

11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.

11.1. Συμπεράσματα.

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση αλλά και από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι η υποκατάσταση τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα έως και 30% είναι δυνατή στην παραγωγή σκυροδέματος και μάλιστα με πολύ καλά αποτελέσματα.

Αξιοσημείωτο είναι πως υπάρχει η δυνατότητα να παραχθεί σκυρόδεμα υψηλών αντοχών από υποκατάσταση τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα ακόμα και με ποσοστό υποκατάστασης 50% όπως έδειξαν οι Παπαγιάννη και Αναστασίου (2009). Σ' αυτή την περίπτωση όμως πρέπει να μελετηθεί πολύ η κοκκομετρία των αδρανών καθώς και ο λόγος N/T καθώς οι παραπάνω για να πετύχουν τόσο υψηλές αντοχές σκυροδέματος με 50% υποκατάσταση του τσιμέντου έκαναν διάφορες δοκιμές αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά αυτά.

Όσον αφορά στις δοκιμές που πραγματοποιήσαμε, παρατηρήσαμε μια μικρή μείωση των αντοχών των μιγμάτων για ποσοστό υποκατάστασης τσιμέντου από ι.τ. 30% συγκριτικά με τα μίγματα αναφοράς (μείωση θλιπτική αντοχής 28 ημερών κατά 6,67% και εφελκυστικής αντοχής 28 ημερών κατά 5,90%) ενώ για ποσοστό ι.τ. 15% οι μηχανικές ιδιότητες ήταν παρόμοιες με τα μίγματα αναφοράς (μείωση θλιπτικής αντοχής κατά 0,5% 28 ημερών και εφελκυστικής αντοχής 28 ημερών κατά 1,77%). Το σημαντικό είναι ότι με την χρήση ιπτάμενης τέφρας στις δοκιμές που έγιναν μπόρεσε να επιτευχθεί παρασκευή σκυροδέματος με αρκετά υψηλές αντοχές για τα ελληνικά δεδομένα τυπικών κατασκευών. Δεδομένου δηλαδή ότι στην Ελλάδα χρησιμοποιείται συνήθως C20/25 ή C25/30 και ήταν δυνατό να παρασκευαστεί σκυρόδεμα με αντοχές μεγαλύτερες από 30 MPa οι οποίες εμπίπτουν σε C30/37, είναι κατανοητό ότι η προσθήκη της ι.τ. στο σκυρόδεμα δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα.

Επίσης, ο τρόπος ρηγμάτωσης των μιγμάτων που προκύπτουν είναι παρόμοιος με αυτόν των μιγμάτων αναφοράς δίνοντας το πλεονέκτημα στο συγκεκριμένο βιομηχανικό παραπροϊόν να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον κατασκευαστικό τομέα χωρίς να μας είναι άγνωστος ο τρόπος αστοχίας των δομών που είναι κατασκευασμένα από αυτό.

Συνεπώς, η ιπτάμενη τέφρα από ένα άχρηστο βιομηχανικό παραπροϊόν μπορεί άνετα να μετατραπεί σε υλικό χρήσιμο στον κατασκευαστικό τομέα, με αντοχές

σχεδόν ίσες με τις αντοχές του παραδοσιακού κοινού τσιμέντου. Έτσι, οι τσιμεντοβιομηχανίες θα μπορούν να παράγουν λιγότερες ποσότητες τσιμέντου, το οποίο συνεπάγεται λιγότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς και μειωμένες εκπομπές CO₂. Επίσης, θα μειώνονται αντίστοιχα οι ποσότητες ι.τ. που θα εναποθέτονται στο περιβάλλον, το οποίο επιβαρύνεται σημαντικά από τέτοιου είδους βιομηχανικά παραπροϊόντα.

11.2. Μελλοντική έρευνα.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας μας κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια από σκέτο τσιμέντο και με υποκατάσταση τσιμέντου με ι.τ. Μία πρόταση λοιπόν για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η υποκατάσταση τσιμέντου με ι.τ. σε οπλισμένα στοιχεία σκυροδέματος (π.χ. οπλισμένων δοκών) υπό κλίμακα στα οποία θα γίνει υποκατάσταση τσιμέντου με ι.τ. και στα οποία θα μελετηθούν οι μηχανικές αντοχές (αντοχή σε κάμψη, σε τέμνουσα, σε στρέψη, κ.α.).

Μία άλλη πρόταση είναι η μελέτη οπλισμένων στοιχείων όπως τα παραπάνω σε διείδυση χλωριόντων και μελέτη του βαθμού διάβρωσης του οπλισμού από αυτά.

Όσον αφορά την μελλοντική έρευνα σε άοπλα στοιχεία, θα μπορούσε να γίνει μελέτη στην οποία θα κατασκευάσουμε κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια με υποκατάσταση τσιμέντου από ι.τ. στα οποία όμως θα αλλάζουμε τον λόγο N/T και την κοκκομετρία των αδρανών.

Τέλος, θα μπορούσε να γίνει υποκατάσταση αδρανών από κομμάτια φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων τόσο σε άοπλα όσο και σε οπλισμένα στοιχεία σκυροδέματος και να μελετηθούν οι μηχανικές του αντοχές. Επίσης, μία ακόμα πιο τολμηρή ιδέα για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η κατασκευή άοπλων (ίσως και οπλισμένων) στοιχείων σκυροδέματος στα οποία θα πραγματοποιηθεί υποκατάσταση τσιμέντου από ι.τ. και ταυτόχρονη υποκατάσταση αδρανών από κομμένα ελαστικά αυτοκινήτων και να μελετηθούν οι αντοχές τους (στην περίπτωση των οπλισμένων στοιχείων καλό θα είναι να μελετηθεί και η διάβρωση του οπλισμού από χλωριόντα). Κάτι ακόμα που είναι καλό να ερευνηθεί στο μέλλον είναι το τι γίνεται με την πλαστιμότητα των στοιχείων με ι.τ., καθώς όπως είδαμε στο 9^ο κεφάλαιο από την έρευνα των Preetha et. Al, (2013), η πλαστιμότητα είναι μικρότερη από τα στοιχεία αναφοράς (χωρίς ι.τ.), ενώ σύμφωνα με τους Sunilla and Dr. Thenmozhi, (2011), η πλαστιμότητα των σύνθετων στοιχείων (με ι.τ.) είναι μεγαλύτερη από αυτήν των στοιχείων αναφοράς.

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

Ελληνική βιβλιογραφία.

1. Αντίοχος, Σ.Κ., Φίλη, Δ., Παπαδάκης, Ε., Κυρίτση Α., Τσίμας, Μ., Γκαλμπένης, Χ.Τ. και Τσίμας, Σ., "Παραγωγή σκυροδέματος με ελληνική τέφρα φλοιού ρυζιού (ΓΦΡ)", Προσεγγίσεις και Προοπτικές, (www.scribd.com).
2. Αντωνόπουλος, Α. (2011), "Αδρανή Υλικά", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
3. Γκαβέλα, Σ. (2009), "Μελέτη της ενσωμάτωσης θερμοπλαστικών απορριμμάτων στη σύνθεση διαφόρων τύπων σκυροδέματος", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ.
4. Εθνικό κέντρο έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης, Ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων (2006), "Ανάπτυξη νέων προϊόντων με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας στη Δυτική Μακεδονία", Πρακτικά Ημερίδας, Κοζάνη.
5. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ), (2000).
6. Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ), (2000).
7. ΕΛΟΤ EN 197-1, (2000). "Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα".
8. ΕΛΟΤ 345, "Το ύδωρ αναμίξεως και συντηρήσεως σκυροδέματος".
9. ΕΛΟΤ EN 934-2, (2001), "Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 2: Πρόσθετα σκυροδέματος – Ορισμοί, απαιτήσεις, συμμόρφωση, σήμανση και επισήμανση".
10. ΕΛΟΤ EN 10080, (2005), "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοί χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις".
11. ΕΛΟΤ EN 12620, (2002), "Αδρανή για σκυρόδεμα".
12. ΕΛΟΤ 1421-1, (2007), "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοί χάλυβες – Μέρος 1: Γενικές απαιτήσεις".
13. ΕΛΟΤ 1421-2, (2007), "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοί χάλυβες – Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A".
14. ΕΛΟΤ 1421-3, (2007), "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοί χάλυβες – Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C".
15. Εσκιόγλου, Π., "Η χρήση και η οικονομικότητα της ιπτάμενης τέφρας".
16. Ευρωπαϊκή Προδιαγραφή EN 1992-1, (1992), "Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, Μέρος 1-2: Γενικοί κανόνες: Δομοστατικός σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς".

17. Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (Ε.Κ.Α.) 16 01 03, (2001), "Έλαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους".
18. Εφραιμίδης, Ι.Χ. (2008), "Παραγωγή αδρανών υλικών από ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων", 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα.
19. Κανιτάκη, Ε. (2009), "Οι κατασκευές από σκυρόδεμα είναι και αειφόρες και πράσινες", 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος.
20. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ), (1997).
21. Καραστεργίου, Α. (2009), "Μελέτη της συνεργατικής υδροθερμικής κατεργασίας ιπτάμενης τέφρας και μεταλλουργικής σκωρίας για την παρασκευή δομικών υλικών", Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ.
22. Κοκκίνη, Μ. (2011), "Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων- σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
23. Κουμπούρη, Δ. (2011), "Αξιοποίηση σκωριών ΕΑΦ ως Α' ύλη σε φιλικά προς το περιβάλλον τσιμέντα μελετικού τύπου", Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
24. Κουρνέτας, Δ. (2010), "Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος – Μέτρα επέμβασης", 16^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα.
25. Κουρούς, Ι. (2009), "Φιλικά προς το περιβάλλον υλικά για βιώσιμες κατασκευές", Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας.
26. Κυριακόπουλος, Β. (2012), "Σχέση αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη και κάμψη για ασβεστολιθικά αδρανή Αττικής", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
27. Μαυρίδου, Δ.Σ. (2010), "Αξιοποίηση ανακυκλωμένων ελαστικών αυτοκινήτων σε ειδικών εφαρμογών κονιάματα και σκυροδέματα τσιμέντου ή ασφάλτου", Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ.
28. Μιχάλης, Α.Π. και Δημητρίου, Χ.Σ. (2007), "Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος", Διπλωματική Εργασία, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης.
29. Μπάτης, Γ., Ρούτουλας, Α. και Πανταζοπούλου, Π. (2009), "Βελτιστοποίηση συνδυασμού ιπτάμενης τέφρας και παραπροϊόντος κοιτάσματος πορφυρίτη στην ανθεκτικότητα σκυροδέματος", 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος.
30. Μπότσιος, Δ. (2011), "Παρασκευή τσιμέντου με χρήση ελληνικών τεφρών και μελέτη των ιδιοτήτων του", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.

31. Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ), (2008).
32. Οικονόμου, Ν. και Μαυρίδου, Σ. (2008), "Χρήση φθαρμένων ελαστικών σε έργα πολιτικού μηχανικού", 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα.
33. Παπαγιάννη, Ι. και Αναστασίου, Ε. (2009), "Σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με μεγάλη περιεκτικότητα τέφρας ΕΙΤ2 των ελληνικών προδιαγραφών", Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου για την αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Κοζάνη.
34. Περυσινάκη, Δ.Π. (2012), "Διερεύνηση των οικολογικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
35. Ρούτουλας, Τ.Α. (1999), "Ανθεκτικότητα σκυροδεμάτων με σύνθετα τσιμέντα", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ.
36. Στιβανάκης, Ε.Β. (2003), "Έρευνα και ανάπτυξη νέων δομικών υλικών από στερεά παραπροϊόντα λιγνιτικής καύσης ενεργειακού κέντρου Μεγαλόπολης", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
37. Συγγούνας, Γ. και Ματίκας, Θ.Ε. (2008), "Δημιουργία σκυροδέματος με τέφρα ανακυκλούμενου χαρτιού", 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα.
38. Σωτηριάδης, Χ.Κ. (2011), "Διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς ασβεστολιθικών τσιμέντων σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θεικών ιόντων", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ.
39. Τεταγιώτη, Δ. (2011), "Μελέτη του χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενες διαβρωτικές συνθήκες", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ.
40. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας (2004), "Σχέδιο εθνικών προδιαγραφών για την αξιοποίηση τέφρας υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο", Κοζάνη.
41. Τσιρίδης, Θ.Β. (2011), "Μελέτη τοξικότητας ιπτάμενης τέφρας", Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ.
42. ΦΕΚ 551 τεύχος δεύτερο, (2007), "Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες".
43. ΦΕΚ 75 τεύχος πρώτο, (2004), "Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείρισή τους".
44. Χαρικιοπούλου-Cordova, Λ., Λυκούδης, Σ. και Παπανικόλας, Π., "Μελέτη συνθέσεως σκυροδέματος στη γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου".

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

1. ACI Committee ACI 363 2R-98, (1998), "Guide to quality control and testing of high-strength concrete".
2. Al-Akhras, N.M. and Smadi, M.M. (2004), "Properties of tire rubber ash mortar", Cement & Concrete Composites.
3. Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J.L. and Hernández, M. (2005), "Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructives and non-destructive testing", Composite Structures.
4. ASTM D 6270, (1998), "Standard Practice for use of scrap tires in civil engineering applications".
5. ASTM D 6316, (2000), "Standard test method for determination of total, combustible and carbonate carbon in solid residues from coal and coke".
6. Benazzouk, A., Douzane, O. and Quéneudec, M. (2004), "Transport of fluids in cement-rubber composites", Cement and Concrete Composites.
7. Biel, T.D. and Lee, H. (1996), "Magnesium oxychloride cement concrete with recycled tire rubber", Transportation Research Record, No 1561, Transportation Research Board, Washington.
8. Bignozzi, M.C. and Sandrolini, F. (2004), "Recycling tyre rubber in building materials", In: Limbachiya M.C. and Roberts John J., Sustainable Waste Management and Recycling: Used-Post-Consumer Tyres, Proceedings of the International Conference organized by the Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, London, UK.
9. BS EN 12390-3: 2009, (2009), "Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens".
10. BS EN 12390-6: 2009, (2009), "Testing hardened concrete. Tensile splitting strength of test specimens".
11. BS 1881-121: 1983, (1983), "Testing concrete. Method for determination of static modulus of elasticity in compression".
12. BS 8110-1: 1985, (1985), "Structural use of concrete. Code of practice for design and construction".
13. Colom, X., Carrillo, F. and Cañavate, J. (2007), "Composites reinforced with reused tyres: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility", Composites: Part A.
14. Ecocement, "Σκωριοσιμμένο υψηλών αντοχών".

15. Eldin, N.N. and Senouci, A.B. (1993), "Rubber-tire particles as concrete aggregates", ASCE Journal of Materials in Civil Engineering.
16. El-Dieb, A.S, Abdel-Wahab, M.M. and Abdel-Hameed, M.E. (2001), "Concrete using rubber tyre particles as aggregate", In: Dhir, R.K. (Ed.), Proceedings of the International Symposium organized by the Concrete Technology Unit, University of Dundee, UK.
17. EN 196-1, (1995), "Methods of testing cement. Determination of strength".
18. EN 196-2, (2013), "Methods of testing cement. Chemical analysis of cement".
19. EN 196-21, (1992), "Methods of testing cement. Determination of the chloride, carbon dioxide and alkali content of cement".
20. EN 196-3, (2005), "Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness".
21. EN 196-6, (1992), "Methods of testing cement. Determination of fineness".
22. EN 197-1, (2000), "Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements".
23. EN 206-1, (2000), "Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity".
24. EN 450, (2005) "Fly ash for concrete".
25. EN 451-2, (1995), "Method of testing fly ash. Determination of fineness by wet sieving".
26. EN 1008, (2002), "Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete".
27. EN 13263, (2005), "Silica fume for concrete. Definitions, requirements and conformity criteria".
28. Erel, Y., Mattheews, A. and Nathan, Y. (1988), "Potential use of coal ash in the Israel cement industry", Cement and Concrete Research.
29. European Tire Recycling Association, ETRA, www.etra-eu.com.
30. Everett, D. (1995), "Raw materials are the key to CKD reduction", Rock Products, Cement Edition.
31. Fernandes, Jr J.L., Bertollo, S.A.M., Bernucci, L.L.B. and E. de Moura, (2002), "Laboratory evaluation of dense asphalt mixtures modified with addition of rubber", 3rd International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, J&A Publishers, Thessaloniki, Greece.

32. Ghaly, A.M. and Cahill, J.D. (2005), "Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*.
33. Givi, A.N., Rashid, S.A., Aziz, F.N.A. and Salleh, M.A.M. (2010), "Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete", *A Review Journal of American Science*.
34. Gore, V.K., Khadilkar, S.A., Lele, P.G., Page, C.H. and Chatterjee, A.K. (1992), "Conversation of raw material through use of industrial wastes in cement manufacture", 9th International Congress on Chemistry of Cement, New Delhi.
35. Harada, M. (1991), "Recovery and utilization of coal ash", Shigen To Sozai, Japan.
36. ISO 8044, (1986), "Corrosion of metals and alloys – Terms and definitions".
37. Kang, J., Ren, H. and Zhang, P. (2006), "Cracking-resistance and flexural property of rubberized concrete", *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*.
38. Kelly, R.J. (1994), "Coal ash – A useful raw material for Portland cement manufacture", *Ash – A Valuable Resource*, Second International Symposium, South Africa Coal Ash Association Publication, Cresta, South Africa.
39. Kew, H.Y., Cairns, R. and Kenny, M.J. (2004), "The use of recycled rubber tyres in concrete", In: Limbachiya M.C. and Roberts John J., *Sustainable Waste Management and Recycling: Used-Post-Consumer Tyres*, Proceedings of the International Conference organized by the Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, London, UK.
40. Khatib, Z.K. and Bayomy, F.M. (1999), "Rubberized Portland cement concrete", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*.
41. Labbani, F., Benazzouk, A., Douzane, O. and Quéneudec, M. (2004), "Effect of temperature on the physico-mechanical properties of cement-rubber composites", In: Limbachiya M.C. and Roberts John J., *Sustainable Waste Management and Recycling: Used-Post-Consumer Tyres*, Proceedings of the International Conference organized by the Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, London, UK.
42. Laidoudi, B., Marmoret, L. and Quéneudec, M. (2004), "Reuse of rubber waste in cementitious composites: Hygrothermal behavior", In: Limbachiya M.C. and Roberts John J., *Sustainable Waste Management and Recycling: Used-Post-Consumer Tyres*, Proceedings of the International Conference organized by the Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, London, UK.

43. Li, Z., Li, F. and Li, J.S.L (1998), "Properties of concrete incorporating rubber tyre particles", Magazine of Concrete Research.
44. Liu, R.X., Hou, W.S., Xu, Y.H. and Xu, K.S. (2009), "Effect of crumb rubber on the mechanical properties of concrete", Journal of Building Materials.
45. Meyer, C. (2013), "The greening of the concrete industry", The 2013 world congress on advances in structural engineering and mechanics (ASEM13), Jeju, Korea.
46. Miller, F.M. (1980), "Effect on clinker quality of the fly ash insufflation, Kiln No. 86", Report No. 3: Evaluation of New Fly Ash Feeder, Low Slurry Moisture Level, and Reduced Kiln Feed Rate. Evaluation of Two Belgian Clinker's Produced with High-Ash Fuel, FI. Smidth, Róderal, Denmark.
47. Mullick, A.K. and Ahluwalia, S.C. (1992), "Utilization of wastes in Indian cement industry", Cement Industry Solutions to Waste Management, First International Symposium, Calgary, Alberta, Canada.
48. Naik, T.R. and Singh, S.S. (1991), "Utilization of discarded tires as construction materials for transportation facilities", Report No CBU-1991-02, UWM Center for By-products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee.
49. Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza and Gallegos, C. (2007), "Influence of processing conditions on the rheological behavior of crumb tire rubber-modified bitumen", Journal of Applied Polymer Science.
50. Nehdi, M. and Khan, A. (2001), "Cementitious composites containing recycled tire rubber: An overview of engineering properties and potential applications", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP.
51. Paine, K.A., Dhir, R.K., Moroney, R. and Kopasakis, K. (2002), "Use of crumb rubber to achieve freeze thaw resisting concrete", In: Dhir, R.K. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, UK.
52. Paine, K.A., Moroney, R.C. and Dhir, R.K. (2004), "Application of granulated rubber to improve thermal efficiency of concrete", In: Limbachiya M.C. and Roberts John J., Sustainable Waste Management and Recycling: Used-Post-Consumer Tyres, Proceedings of the International Conference organized by the Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, London, UK.
53. Preetha, R., Joanna, P.S., Rooby, J. and Pillai, C.S. (2013), "Ductility behavior of reinforced high volume flyash concrete beams", International Journal of Scientific & Engineering Research.

54. Raghavan, D., Huynh, H. and Ferraris, C.F. (1998), "Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tire rubber-filled cementitious composite", *Journal of Materials Science*.
55. Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T. and Zundi, I. (1993), "Use of recycled rubber tires in concrete", In: Dhir, R.K. (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000*, University of Dundee, Scotland, UK.
56. Schimizza, R., Nelson, J., Amirkhanian, S. and Murden, J. (1994), "Use of waste rubber in light-duty concrete pavements", in *Proceedings, ASCE 3rd Materials, Engineering Conference, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*.
57. Serge, N. and Joekes, I. (2000), "Use of tire rubber particles as addition to cement pastes", *Cement and Concrete Research*.
58. Serge, N., Joekes, I., Galves, A.D. and Rodrigues, J.A. (2004), "Rubber-mortar composites: Effect of composition on properties", *Journal of Materials Science*.
59. Sunilaa, G. and Dr. Thenmozhi, R. (2011), "Flexural behaviour of activated fly ash concrete", *International Journal of Engineering Science and Technology*.
60. Tibor, K. and Tamás, K.S., "Acceptance of concrete compressive strength".
61. Topç u, I.B. (1995), "The properties of rubberized concrete", *Cement and Concrete Research*.
62. Topç u, I.B. and Avcular, N. (1997), "Analysis of rubberized concrete as a composite material", *Cement and Concrete Research*.
63. Topç u, I.B. and Avcular, N. (1997), "Collision behaviours of rubberized concrete", *Cement and Concrete Research*.
64. Topç u, I.B. and Demir, A. (2007), "Durability of rubberized mortar and concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*.
65. UNE 83420, (1991), "Additions for concrete. Fly ash. Specifications for fly ashes with a content more than 10% in CaO".
66. Xu, G.J., Watt, D.F. and Hudec, P.P. (1995), "Recycling automotive related wastes in concrete", *Journal of Materials Processing Technology*.

Ιστοσελίδες

1. www.flyash.gr



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000124485