

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



Μεταπτυχιακή διατριβή

ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Δράκου Μαρούλλα

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή διατριβή

ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Δράκου Μαρούλλα

Σύμβουλος καθηγητής
[Δρ. Διόφαντος Χατζημιτσής]

Λεμεσός 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Δράκου Μαρούλλα, [2016]

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Κυριάκο Νεοκλέους, για την πολύτιμη καθοδήγησή και βοήθεια του...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η ανάγκη εξόρυξης αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος. Αυτό έχει τεράστιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και γέννησε το πρόβλημα ότι τα αποθέματα σύντομα θα τελειώσουν. Με γνώμονα την αειφορία και την βιώσιμη ανάπτυξη, παράλληλα με την ανάπτυξη της επιστημονικής και τεχνικής γνώσης κράτη, οργανισμοί, επιχειρήσεις και επιστήμονες τα τελευταία 20-25 χρόνια στέφονται στη χρήση ανακυκλωμένων υλικών ως Ανακυκλωμένα Αδρανή για την παραγωγή Σκυροδέματος ΑΑΣ.

Υλικά που αποκτούνται από κατεδαφίσεις κτηρίων και κατασκευών, βιομηχανικά απόβλητα, ελαστικά και οικιακά απορρίμματα δεν ενταφιάζονται σε χώρους υγειονομικής ταφής αλλά επαναχρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα που για να χρησιμοποιηθεί στις κατασκευές πρέπει να πληρούνται κάποια μεγέθη-όρια που αφορούν ιδιότητες του όταν είναι νωπό και σκληρυμένο.

Η παρούσα διατριβή μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση παραθέτει αρχικά ποια υλικά και με ποιο τρόπο μπορούν να ανακυκλωθούν και να χρησιμοποιηθούν ως ΑΑΣ και κατά δεύτερον με αποσπάσματα από πειραματικές έρευνες δίνει αποτελέσματα πως τα ανακυκλωμένα αδρανή επηρεάζουν ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος όπως κάθιση, υδατοπερατότητα, υδατοαπορροφητικότητα, μέτρο ελαστικότητας, θλιπτική αντοχή, καμπτική αντοχή, ενανθράκωση, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες κα.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για την χρήση των ΑΑΣ που δεν είναι πάντα η πιο οικολογική, εύχρηστη και οικονομική λύση και σίγουρα πρέπει να συνυπολογιστεί η έλλειψη κανονισμών και νομοθεσίας για την ορθή χρήση των ΑΑΣ.

Λέξεις κλειδιά: [αειφορία; Ανακυκλωμένα Αδρανή για την παραγωγή Σκυροδέματος ΑΑΣ; ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος; κατεδαφίσεις κατασκευών; βιομηχανικά απόβλητα; οικιακά απορρίμματα; ελαστικά]

ABSTRACT

Because of the extensive use of aggregates in concrete the need for mining aggregates has increased. This has enormous environmental impact and gave birth to the problem that stocks of aggregates will soon run out. In view of sustainable design and development, along with the development of scientific and technical knowledge countries, organizations, companies and scientists in the last 20-25 years crowned the use of recycled materials as recycled aggregates in concrete.

Materials obtained from demolished buildings and constructions, industrial waste, tires and household waste are not buried in landfills but are reused for the production of concrete. This dissertation after literature reviews is cites which materials and how they can be recycled and used in concrete and secondly gives results how these recycled aggregates affecting properties of fresh and hardened concrete such as slump, water permeability, modulus of elasticity, compressive strength, flexural strength, carburization, resistance at high temperatures.

Keywords: [sustainability, use of recycled aggregates in concrete; effect on fresh and hardened properties; demolished buildings; industrial waste; household waste; tires]

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1 Είδη ανακυκλωμένων υλικών που χρησιμοποιούνται ως ανακυκλωμένα αδρανή (ΑΑ) σκυροδέματος	14
1.1 Αδρανή υλικά από κατεδαφίσεις κτηρίων και κατασκευών	14
1.1.1 Βιωσιμότητα	14
1.1.2 Ανακυκλωμένα Αδρανή υλικά προερχόμενα από Κατασκευές και Κατεδαφίσεις.....	15
1.1.3 Ανακυκλωμένα υλικά για τα αδρανή υλικά.....	15
1.1.4 Ανακυκλωμένα αδρανή για την κατασκευή και οικοδομικά υλικά.....	16
1.1.5 Τα αδρανή υλικά που απαιτούνται για κατασκευαστικά έργα	17
1.1.6 Ανακύκλωση Ασφάλτου.....	17
1.2 Υλικά που ανακτήθηκαν από οικιακά σκουπίδια	17
1.3 Υλικά που ανακτήθηκαν από βιομηχανικές μεθόδους	19
1.4 Η διαδικασία ανακύκλωσης.....	19
1.4.1 Αυτοφερόμενα συγκροτήματα ανακύκλωσης	20
1.4.2 Μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης.....	21
2 Επιρροή των Ανακυκλωμένων Αδρανών στις ιδιότητες και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος	27
2.1 Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή.....	27
2.2 Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων	32
2.2.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.....	32
2.2.1.1 Κάθιση	32
2.2.1.2 Περιεκτικότητα σε αέρα	34
2.2.1.3 Ειδικό βάρος	36
2.2.2 Βασικές μηχανικές ιδιότητες	39
2.2.2.1 Θλιπτική αντοχή	41
2.2.2.2 Μέτρο ελαστικότητας	54
2.2.2.3 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων	55
2.2.2.4 Καμπτική αντοχή	57
2.3 Σκυροδέματα με αδρανή από υλικό κατεδαφίσεων	63
2.3.1 Πειραματική διαδικασία	64
2.3.1.1 Αδρανή.....	64
2.3.1.2 Συνθέσεις.....	65
2.3.1.3 Εργαστηριακά αποτελέσματα	67
2.3.1.4 Αντίσταση σε ολίσθηση.....	67
2.4 Σκυροδέματα με αδρανή από ανακυκλωμένο γυαλί.....	68
2.4.1 Αφρώδες Κυτταρικό Γυαλί – Geofil Foamed Glass Gravel (GFGG) – Διαδικασία Παραγωγής.....	68
2.4.2 Μηχανικές Ιδιότητες Σκυροδέματος με ΑΚΓ	69
2.4.3 Συστολή Σκυροδέματος-Drying Shrinkage	71
2.4.4 Ιδιότητες Ανθεκτικότητας Σκυροδέματος	71
2.4.5 Αντίδραση αλκαλίων πυριτίου – ASR ¹⁰	72
2.4.6 Ενανθράκωση	74
3 Συμπεράσματα	75
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Φυσικές ιδιότητες των αδρανών.....	28
Πίνακας 2.2: Λόγοι θλιπτικών αντοχών των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων προς τις αντοχές των συμβατικών	29
Πίνακας 2.3: Υπολογιστικός προσδιορισμός δεικτών Πυριτικός δείκτης S_m , Αργιλικός Δείκτης A_m , Βαθμός κορεσμού σε άσβεστο LSF, και Υδραυλικός δείκτης H_m των συνθέσεων της φαρίνας του τσιμέντου.....	30
Πίνακας 2.4: Αναλογίες μιγμάτων και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.....	34
Πίνακας 2.5: Ποσοστό αέρα για διάφορους λόγους νερού/τσιμέντου σε μίγματα τύπου ACRC	36
Πίνακας 2.6: Πειραματικά αποτελέσματα των φυσικών – μηχανικών ιδιοτήτων της σύνθεσης τσιμέντου – ελαστικού.....	50
Πίνακας 2.7. Θλιπτική αντοχή και ενεργειακή πυκνότητα.....	54
Πίνακας 2.8: Μείωση της σύνθετης δυναμικής κάμψης σε σχέση με το ποσοστό ελαστικού.....	60
Πίνακας 2.9: Κατηγορίες ελαφροσκυροδέματος (Neville, 1995).....	62
Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων αδρανών	64
Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά φυσικών αδρανών	64
Πίνακας 2.12: Συνθέσεις και ποσότητες συστατικών σε kg στο $1m^3$ σκυροδέματος.....	65
Πίνακας 2.13: Αποτελέσματα εργαστηριακών συνθέσεων σκυροδέματος σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση	66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα Ε1: Συνολική παραγωγή αποβλήτων στην ΕΕ κατά την οικονομική δραστηριότητα 2008.....	11
Διάγραμμα 2.1: Θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή προς την αντοχή των συμβατικών σκυροδεμάτων.....	29
Διάγραμμα 2.2: Επίδραση της περιεκτικότητας αέρα στη κάθιση ενός φρέσκου μίγματος με διάφορες αναλογίες όγκου ελαστικού (0-50%).....	33
Διάγραμμα 2.3: Επίδραση της αντικατάστασης TRA στην περιεκτικότητα σε αέρα του νωπού rubber concrete.....	35
Διάγραμμα 2.4: Μεταβολή του ποσοστού αέρα σε σχέση με την κατ' όγκο αναλογία ελαστικού.	36
Διάγραμμα 2.5: Μεταβολή ξηρού ειδικού βάρους με την περιεκτικότητα ελαστικού	37
Διάγραμμα 2.6: Ξηρό ειδικό βάρος ως προς την ποσοστιαία κ.ο. αναλογία ελαστικού, για διαφορετικά μεγέθη τεμαχιδίων ελαστικού.	38
Διάγραμμα 2.7: Επίδραση του ποσοστού ελαστικού στις ιδιότητες των μιγμάτων τύπου RPCC.	39
Διάγραμμα 2.8: Επίδραση της TRA στη χρονική εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής.....	42
Διάγραμμα 2.9: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της πυκνότητας για διάφορα μίγματα.....	42
Διάγραμμα 2.10: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ανάλογα με την πυκνότητα του σύνθετου σκυροδέματος... ..	43
Διάγραμμα 2.11: Επιρροή του είδους του ελαστικού και του ποσοστού του στη θλιπτική αντοχή του σύνθετου σκυροδέματος.	43
Διάγραμμα 2.12: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού ελαστικού.....	44
Διάγραμμα 2.13: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της πυκνότητας.....	45
Διάγραμμα 2.14: Χρονική μεταβολή στη θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου ανάλογα με το ποσοστό ελαστικού.....	46
Διάγραμμα 2.15: Χρονική μεταβολή στη θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου ανάλογα με το ποσοστό ελαστικού	47
Διάγραμμα 2.16: Επίδραση του ποσοστού του ελαστικού στη θλιπτική αντοχή.....	48
Διάγραμμα 2.17: Μεταβολή θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ποσοστό ελαστικού.	51
Διάγραμμα 2.18: Γραφική παράσταση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ξηρό ειδικό βάρος των μιγμάτων	52
Διάγραμμα 2.19: Θλιπτική αντοχή για 7 και 28 ημέρες	52
Διάγραμμα 2.20: Θλιπτική αντοχή - παραμόρφωση μιγμάτων με ελαστικά crumb	53
Διάγραμμα 2.21: Μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας για τα διαφορετικά ποσοστά ελαστικού	54

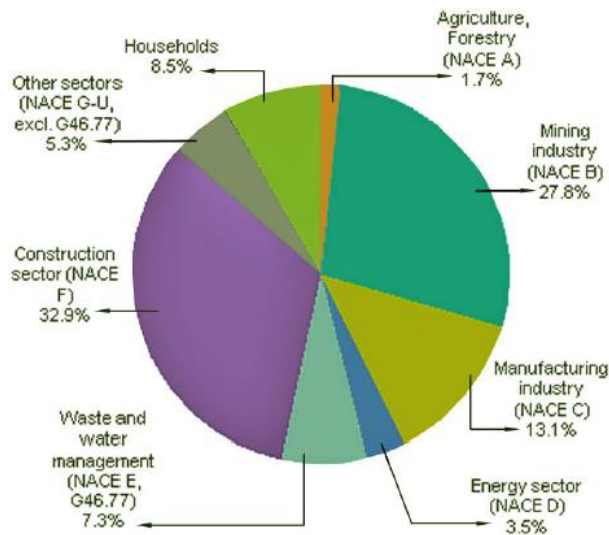
Διάγραμμα 2.22: Μεταβολή του δυναμικού συντελεστή ελαστικότητας με το ποσοστό του ελαστικού.....	55
Διάγραμμα 2.23: Σχέση μεταξύ stress και strain για διαφορετικές περιεκτικότητες ελαστικού.....	56
Διάγραμμα 2.24: Μεταβολή τάσης-παραμόρφωσης με διαφορετικό ποσοστό ελαστικού.....	56
Διάγραμμα 2.25: Καμπύλες σ-ε μιγμάτων κατά την 28η ημέρα.....	57
Διάγραμμα 2.26: Μεταβολή της καμπτικής αντοχής σε σχέση με την περιεκτικότητα ελαστικού.....	58
Διάγραμμα 2.27: Μεταβολή της καμπτικής αντοχής με την περιεκτικότητα του όγκου ελαστικού.....	59
Διάγραμμα 2.28: Επίδραση του επιπέδου αντικατάστασης TRA στην αντοχή κάμψης του κονιάματος σε 7 και 28 ημέρες.....	59
Διάγραμμα 2.29: Αντοχή κάμψης σε 7 και 28 ημέρες.....	60
Διάγραμμα 2.30. Σύγκριση μεταξύ της μείωσης της αντοχής και της περιεκτικότητας του ελαστικού.....	61
Διάγραμμα 2.31: Επίδραση του περιεχομένου ελαστικού στις θλιπτικές αντοχές.....	61
Διάγραμμα 2.32. Μεταβολή των αντοχών σε σχέση με την αντοχή ελέγχου.....	63
Διάγραμμα 2.33. Καμπύλες φορτίου-μετατοπίσεων για μίγματα rubber concrete.....	63
Διάγραμμα 2.34: Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με άμμο ανακυκλωμένη και γαρμπίλι λατομείου.....	65
Διάγραμμα 2.35: Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με γαρμπίλι ανακυκλωμένο και άμμο λατομείου.....	65
Διάγραμμα 2.36: Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με ανακυκλωμένο γαρμπίλι και άμμο μισή λατομείου και μισή ανακυκλωμένη.....	66
Διάγραμμα 2.37: Αντίσταση σε ολίσθηση μιγμάτων σκυροδέματος με και χωρίς ανακυκλωμένα αδρανή.....	67

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η βιομηχανική επανάσταση ήταν μια επανάσταση που επηρέασε την κοινωνία, τη παραγωγή, τη διεθνή οικονομία. Η ραγδαία εξέλιξη των μηχανών, καθώς και η αλλαγή του τρόπου παραγωγής ενέργειας, δημιούργησαν μια μεταβολή από τις παραδοσιακές διαχρονικές μεθόδους των τρόπων παραγωγής προϊόντων και υλικών αλλάζοντας αμετάβλητα τη φύση της βιομηχανικής παραγωγής. Η μεταφορά του χώρου παραγωγής από το αγροτικό σκηνικό και το εργαστήριο των επιδέξιων τεχνητών σε εργοστασιακές μονάδες παραγωγής αύξησαν δραματικά τη παραγωγικότητα πολλαπλασιάζοντας τα τεχνικά επιτεύγματα προς χάριν εξασφάλισης των αναγκών/απαιτήσεων ενός αδόκητα ανερχόμενου πληθυσμιακού δυναμικού.

Μέσω αυτής της μεταστροφής των κέντρων παραγωγής και την επέκταση του βιομηχανικού αποθέματος, η επιστήμη και η τεχνολογία άρχισε να στρέφεται προς την έρευνα και την αναζήτηση νέων οικοδομικών υλικών καθώς, η βιομηχανία όσον αφορά την κατασκευή υπήρξε πάντοτε μεγάλο κεφάλαιο της παγκόσμιας οικονομικής ανάπτυξης για να αγνοηθεί από τις πολυεθνικές εταιρείες.

Οι σημαντικότεροι τομείς από την άποψη των παραγόμενων αποβλήτων είναι ο κατασκευαστικός τομέας, που αντιστοιχεί σε 859 εκατομμύρια τόνους ή 32,9% του συνόλου, και αυτός της εξόρυξης, συμβάλλοντας κατά 727 εκατομμύρια τόνους ή 27,8% στο σύνολο των αποβλήτων. Συνολικά, το 97% των αποβλήτων που παράγονται σε αυτούς τους δύο τομείς, ή 1,53 εκατ. τόνοι, αντίστοιχα, είναι μεταλλεύματα ή χώματα (από εκσκαφή γης, κατασκευής δρόμων, κατεδαφίσεις, μπάζα εκσκαφών, υπολείμματα από εξόρυξη βράχων..). Αυτό εξηγεί το υψηλό ποσοστό των αποβλήτων σε μεταλλεύματα και εδάφη, που καλύπτουν το 65% σε σχέση με τη συνολική παραγωγή αποβλήτων από όλους τους τομείς και το 41% σε σχέση με το σύνολο των επικίνδυνων αποβλήτων που παράγονται συνολικά. Η μεταποιητική βιομηχανία έφτασε τα 343 εκατομμύρια τόνους ή 13,1% του συνολικού όγκου παραγόμενων αποβλήτων¹ (Διάγραμμα Ε1).



Διάγραμμα Ε1: Συνολική παραγωγή αποβλήτων στην EU-27 κατά οικονομική δραστηριότητα(NACE Rev.2) 2008. EUROSTAT

¹Eurostat (NASE Rev. 2008)

Ένα μεγάλο ποσοστό αποθέματος υλικών βρίσκεται καταμεμημένο στην κατασκευή των κτηρίων. Εκτιμάται ότι 40-50% του συνόλου υλικών εξόρυξης καταλήγουν σε κτίρια ή σε έργα υποδομών και ότι το 90% όλων των υλικών που επενδύονται στην κατασκευή βρίσκονται ακόμη στα κτίρια σήμερα. Οι αξιόλογες προσπάθειες των παλιότερων γενιών να μεταλλευτούν και να επεξεργαστούν τον ορυκτό πλούτο του κόσμου, μας άφησαν μια τεράστια συσσώρευση υλικού ενσωματωμένο στη δομή, στο φλοιό και στο εσωτερικό των κατασκευών μας.

Κάθε υλικό, τμήμα ενός κτηρίου, έχει διαφορετική διάρκεια ζωής. Έτσι ενώ ο φέρων οργανισμός ενός κτίσματος από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να έχει διάρκεια ζωής μέχρι και 60 -70 έτη, χωρίς να έχει υποστεί καθοριστικές βλάβες, ένα άλλο μέρος που αποτελεί την επικάλυψη του κτηρίου μπορεί να είναι κατάλληλο για το διάστημα 15-20 ετών. Η διάρκεια ζωής ή χρήσης των υλικών εξαρτάται πρωτίστως από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού, την σωστή χρησιμοποίησή του, της προσαρμογής του στο κτηριακό σύνολο και της συντήρησής του.

Εκτός αυτού, δηλαδή της φυσικής φθοράς ή διάβρωσης λόγω τοπικών γεωλογικών και κλιματολογικών παραγόντων, η πολιτιστική και κοινωνική αλλαγή επηρεάζει σημαντικά την διάρκεια χρήσης των υλικών λόγω της μη ανταπόκρισής τους στο αστικό περιβάλλον, όπως συμβαίνει με τη συνεχή αλλαγή χρήσης των κτηρίων .

Τα απόβλητα και η κατανάλωση ενέργειας είναι τα δύο βασικά ζητήματα που συνδέονται με τα υλικά. Μέσα από τη διάρκεια ζωής τους, κάθε υλικό έχει χρησιμοποιήσει ένα ορισμένο ποσό των φυσικών πόρων και έχει καταναλώσει μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Από τη διαδικασία της εξόρυξης των πρώτων υλών, τη μεταφορά τους, την επεξεργασία τους μέχρι και την χρησιμοποίησή τους στη κατασκευή ακόμα και ως απόβλητα, τα οικοδομικά υλικά προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους και είναι μια δαπανηρή επιχείρηση. Παρά της αξίας τους σε χρήμα καθώς και ανθρώπινης προσπάθειας, το μεγαλύτερο μέρος τους διατίθεται σε χωματερές συνήθως πριν το τέλος του κύκλου ζωής τους.

- Στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα κτίρια καταναλώνουν περίπου τη μισή ποσότητα πρωτογενούς ενέργειας για την κατασκευή, χρήση και κατεδάφισή τους, τα ποσοστά βέβαια διαφέρουν από χώρα σε χώρα.

- Ακόμη και η κατασκευή κτιρίων με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις και επομένως μικρή εξάρτηση από συμβατικά καύσιμα, καταναλώνουν κυρίως μέσω των οικοδομικών υλικών και της διαδικασίας οικοδόμησής τους, σημαντικά ποσά μη ανανεώσιμης ενέργειας και κατά συνέπεια παραγόμενες εκπομπές ρύπων.

- Οι χώροι υγειονομικής ταφής ή χωματερές, καταλαμβάνουν χώρο γης και μπορεί να προκαλέσουν ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους, ενώ η αποτέφρωση μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπές επικίνδυνων ατμοσφαιρικών ρύπων, εκτός αν ρυθμιστεί σωστά.

Έτσι λοιπόν το 'κόστος' κάθε υλικού δεν προσδιορίζεται μόνο από την αξία του σε χρήμα αλλά και από το περιβαλλοντικό, ενεργειακό, και ανθρώπινο κόστος.



Εικόνα 1: Λατομείο εξόρυξης λευκόλιθου στη Χαλκιδική

Σκοπός της εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση που θα αναδείξει διάφορα είδη ανακυκλωμένων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως ανακυκλωμένα αδρανή (ΑΑ) σκυροδέματος σε κανονικά έργα πολιτικού μηχανικού αλλά και σε ερευνητικά έργα σε διάφορες χώρες. Επίσης, παρουσιάζεται, μέσα από διαφορετικές έρευνες, η επιρροή των ΑΑ στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, όπως στο πορώδες, στην εργασιμότητα, στην πήξη, στην αντοχή σε θλίψη, στην εφελκυστική αντοχή και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Παρακάτω στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διάφορα είδη ανακυκλωμένων υλικών που χρησιμοποιούνται ως ανακυκλωμένα αδρανή, όπως τα αδρανή υλικά από κατεδαφίσεις κτηρίων και κατασκευών (οικοδομικών, οδοποιίας), υλικά που ανακτήθηκαν από οικιακά σκουπίδια, υλικά που ανακτήθηκαν από βιομηχανικές μεθόδους. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται μία σειρά πειραματικών ερευνών για τον σχεδιασμό των μειγμάτων και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους, την ανθεκτικότητα τους, την υδατοπερατότητα, την υδατοαπορροφητικότητα, την ενανθράκωση, την συστολή ξήρανσης, την αντοχή σε ψύξη απόψυξη, καθώς και την αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες. Ειδικότερα, οι κατηγορίες που εξετάζονται είναι αδρανή από ανακυκλωμένα εργαστηριακά δοκίμια, ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων, ανακυκλωμένο γυαλί και αδρανή από προϊόντα κατεδαφίσεων. Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσα από τη μελέτη ιδιοτήτων μειγμάτων σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή από τα παραπάνω άχρηστα υλικά.

1 Είδη ανακυκλωμένων υλικών που χρησιμοποιούνται ως ανακυκλωμένα αδρανή (ΑΑ) σκυροδέματος

1.1 Αδρανή υλικά από κατεδαφίσεις κτηρίων και κατασκευών

Τα υλικά κατασκευής όλο και περισσότερο κρίνονται από τα οικολογικά χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα η ανακύκλωση αποκτά μεγαλύτερη σημασία επειδή προστατεύει τους φυσικούς πόρους και εξαλείφει την ανάγκη για διάθεση, με τη χρήση των άμεσα διαθέσιμων πηγών. Τα ανακυκλωμένα υλικά μπορεί να προέρχονται από μια ποικιλία υλικών: προκύπτουν από κατασκευές και κατεδαφίσεις (σκυρόδεμα, τούβλα, πλακάκια), οδοποιίας (planings ασφαλτος), εκσκαφές και επιχειρήσεις κοινής ωφελείας. Μπορούν να αγοραστούν από θέσεις κατεδάφισης ή από κατάλληλα εξοπλισμένα κέντρα επεξεργασίας. Η ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών συνολικά εξαρτάται από την ποιότητα των υλικών που υποβάλλονται σε επεξεργασία, η επεξεργασία επιλογής και διαχωρισμού που χρησιμοποιείται, καθώς και ο βαθμός της τελικής επεξεργασίας που υφίστανται τα εν λόγω υλικά. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών υλικών: επί τόπου στο χώρο των εργασιών, ή ex situ σε μια κεντρική μονάδα. Σημαντική εξοικονόμηση κόστους και περιβαλλοντικά οφέλη μπορούν να επιτευχθούν με την επιτόπια παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών, μιας και μειώνεται η μετακίνηση των φορτηγών και τα δεδουλευμένα.

1.1.1 Βιωσιμότητα

Η Ανακύκλωση συγκεκριμένα προβλέπει βιωσιμότητα με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Η απλή πράξη της ανακύκλωσης του σκυροδέματος μειώνει την ποσότητα του υλικού που πρέπει να απορρίπτεται στις χωματερές. Τυχόν ενσωματωμένα μέταλλα μπορούν να αφαιρεθούν και να ανακυκλωθούν. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σκυροδέματος μειώνεται η ανάγκη για παρθένα αδρανή υλικά. Αυτό με τη σειρά του μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συνολικής διαδικασίας εξαγωγής.

Εκτός από το θέμα της διαχείρισης των πόρων, τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σκυροδέματος απορροφούν μεγάλη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από τον περιβάλλοντα χώρο. Η φυσική διαδικασία της ενανθράκωσης εμφανίζεται σε όλα τα σκυροδέματα από την επιφάνεια προς τα μέσα.

1.1.2 Ανακυκλωμένα Αδρανή υλικά προερχόμενα από Κατασκευές και Κατεδαφίσεις

Μεγάλο μέρος της υποδομής που έχει κατασκευαστεί από το 1950, ιδίως των οδοστρωμάτων, έχει γίνει, ή είναι απαρχαιωμένη και έχει ανάγκη αντικατάστασης ή επισκευής. Καθώς σε παγκόσμιο επίπεδο, και ιδιαίτερα στις αναπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, ξηλώνουν δρόμους και γκρεμίζουν κτίρια, παράγονται μεγάλες ποσότητες αποβλήτων κατεδαφίσεων, που οδηγούν στην ύπαρξη ανακυκλωμένων αδρανών υλικών.

Οι κατεδαφισμένες υποδομές μπορεί είτε να διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να ανακυκλώνονται. Η απόφαση λαμβάνεται συνήθως από τον ανάδοχο της κατεδάφισης, την συνεκτίμηση των περιφερειακών οικονομικών εξόδων, τους συμβατικούς όρους, καθώς και των επιταγών της νομοθεσίας.

1.1.3 Ανακυκλωμένα υλικά για τα αδρανή υλικά

Τα ίδια τα αδρανή μπορούν να ανακυκλωθούν ως αδρανή υλικά. Σε αντίθεση με τις χρήσεις της άμμου και χαλικιού η πέτρα είναι κατάλληλη για τη σύνθλιψη σε σύνολο. Οι "αποθέσεις" των ανακυκλώσιμων συνολικά υλικών τείνουν να συγκεντρώνονται κοντά σε αστικές περιοχές, και η παραγωγή από αυτές δεν μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την κάλυψη της ζήτησης για τα αδρανή υλικά. Η προμήθεια ανακυκλωμένου υλικού συνολικά εξαρτάται από την φυσική φθορά των δομών και την κατεδάφισή τους. Το μικρότερης χωρητικότητας κινητής μονάδας εργοστάσιο λειτουργεί καλύτερα για άσφαλτο-συνολική ανακύκλωση. Το υλικό που ανακυκλώνεται έχει συνήθως σημαντικές διαφορές ως προς την ποιότητα και τις ιδιότητες.

Σύμφωνα με το USGS, το 2006, 2,9 εκατομμύρια τόνοι μπετόν τσιμέντο Portland (συμπεριλαμβανομένων των συγκεντρωτικών), αξίας 21,9 εκατομμυρίων δολαρίων περίπου ανακυκλώθηκαν, και 1,6 εκατομμύρια τόνοι ασφαλτικού σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένων των συγκεντρωτικών), αξίας 11,8 εκατομμυρίων δολαρίων περίπου ανακυκλώθηκαν, από θρυμματισμένες πέτρες. Για την άμμο και χαλίκι, η έρευνα USGS για το 2006 έδειξε ότι 4,7 εκατομμύρια τόνοι σκυρόδεμα που αποτιμώνται σε 32,0 εκατ. δολάρια περίπου ανακυκλώθηκαν, καθώς και 6,17 εκατομμύρια τόνοι του ασφαλτομίγματος που αποτιμάται σε 45,1 εκατομμύρια \$ περίπου ανακυκλώθηκαν.

Πολλά γεωσυνθετικά μεγέθη παράγονται από ανακυκλωμένα υλικά. Ανακυκλώσιμα πλαστικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή των αδρανών υλικών. Π.χ το πολυστυρένιο, που διαφορετικά προοριζόταν για χώρους υγειονομικής ταφής, αντ' αυτού

συγκεντρώνεται, λιωμένο, μικτό και επεκτείνεται για να δημιουργηθούν χαμηλής πυκνότητας αδρανή υλικά. Τέτοια γεωσυνθετικά μεγέθη αντικατάστασης των συμβατικών αδρανών αυξάνοντας ταυτόχρονα το πορώδες, την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και την εξάλειψη της λεπτής σκόνης είναι συνυφασμένα με μακροοικονομικά μεγέθη που εξυπηρετούν στο φράξιμο και τη διακοπή της λειτουργίας πολλών εφαρμογών αποστράγγισης.

1.1.4 Ανακυκλωμένα αδρανή για την κατασκευή και οικοδομικά υλικά

Απόβλητα που προκύπτουν περιλαμβάνουν:

- θραύσματα από ασφαλτο
- τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων
- καθαρό σκυρόδεμα
- τέφρα πυθμένα αποτεφρωτήρα
- κονιοποιημένη ιπτάμενη τέφρα
- γυαλί

Δευτεροβάθμια μεγέθη περιλαμβάνουν :

- πηλό
- σχιστόλιθο
- σκωρία
- άμμο χυτηρίου

Τα τελικά προϊόντα που προέρχονται από δραστηριότητες ανακύκλωσης περιλαμβάνουν συνολικά μεγέθη για τη χρήση σε:

- ανακυκλωμένο ασφαλτοτάπητα
- έτοιμο σκυρόδεμα και αφρώδες
- προκατασκευασμένα
- δομικά υλικά
- γενικά αδρανή οικοδομικά υλικά

1.1.5 Τα αδρανή υλικά που απαιτούνται για κατασκευαστικά έργα

Τα αδρανή αποτελούνται από θραύσματα πετρωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη φυσική τους κατάσταση ή μετά από μηχανική επεξεργασία, όπως η σύνθλιψη, πλύση, και το μέγεθος. Φυσικά μεγέθη αποτελούνται από άμμο και χαλίκια, και θρυμματισμένους λίθους. Ανακυκλωμένα αδρανή αποτελούνται κυρίως από θρυμματισμένα υλικά σκυροδέματος και σύνθλιψη ασφαλτοτάπητα.

Η κατανάλωση αδρανών υλικών κατασκευής αποτελεί περισσότερο από το 80 τοις εκατό του συνόλου της αγοράς αδρανών υλικών και χρησιμοποιείται κυρίως για βάση στους δρόμους, girgar, σκυρόδεμα και άσφαλτο.

1.1.6 Ανακύκλωση Ασφάλτου

Στην πραγματικότητα, η ανακύκλωση ασφάλτου ήταν μια κοινή πρακτική που άρχισε στη δεκαετία του 1970. Τα υλικά επίστρωσης ασφάλτου ανακτώνται από κατεδαφισμένους δρόμους. Πρόκειται για χρήσιμες, τόσο για το συνδετικό άσφαλτο όσο και για τα μακροοικονομικά μεγέθη. Περισσότερα από 100 εκατ. τόνοι ασφαλτοτάπητα φθαρμένων ανακτώνται ετησίως. Περίπου το 80% των ανακτημένων υλικών ανακυκλώνονται σήμερα, και το υπόλοιπο 20% εκτίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Τα δύο τρίτα του ανακυκλωμένου υλικού χρησιμοποιείται ως αδρανές υλικό για τη βάση των δρόμων. Το υπόλοιπο ένα τρίτο από ανακυκλωμένο υλικό που επαναχρησιμοποιείται ως συνολικό μέγεθος για τη νέα άσφαλτο.

1.2 Υλικά που ανακτήθηκαν από οικιακά σκουπίδια

Το πανεπιστήμιο το Σέφιλντ σε συνεργασία με 26 βιομηχανικούς και κυβερνητικούς εταίρους, διεξάγουν δύο έρευνες (ConGlassCrete Projects I and II) – συνολικής αξίας περί των £1.2m – για τη δυνατότητα χρήσης ανακυκλωμένου γυαλιού ως συστατικό του σκυροδέματος. Στόχος των ερευνών, ConGlassCrete I and ConGlassCrete II είναι η χρησιμοποίηση του ανακυκλωμένου γυαλιού σε πληθώρα προϊόντων σκυροδέματος. Ειδικότερη στόχευση αποτελεί η εξέλιξη του υαλοθραύσματος σε αδρανές που θα οδηγήσει στη μείωση της κατανάλωσης του τσιμέντου Πόρτλαντ.

Ένα υλικό που χρησιμοποιεί ανακυκλώσιμο γυαλί και έχει ικανοποιητικές ιδιότητες ως αδρανές στο σκυρόδεμα είναι και το Αφρώδες Αδρανές Γυαλιού ΑΑΓ ή αλλιώς ονομαζόμενο Foamed Glass Gravel FGG. Με την προοπτική της ανακύκλωσης και

εξοικονόμησης ενέργειας και φυσικών πόρων, μια περιεκτική ερευνητική εργασία ολοκληρώθηκε (το 2003-2006), στο Concrete Lab του πανεπιστημίου του KINGSTON στο Λονδίνο για να αξιολογήσει τη δυνατότητα χρήσης ενός ανακυκλώσιμου υλικού από γυαλί, το Αφρώδες/Κυτταρικό Γυαλί ΑΚΓ - (FGG) με την μορφή αδρανούς-GFGG. Το υλικό παράγεται από την Εταιρεία Geofil CO Ltd (έτος παραγωγής υλικού 1998) ως αδρανές, και χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο σε μια σειρά εφαρμογών στο σκυρόδεμα αλλά και για διάφορες άλλες κατασκευαστικές λύσεις. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται προσπάθεια να αναπτυχθεί μια λύση προστιθεμένης αξίας (value-added) για μιας μεγάλης ποσότητας απόβλητων γυαλιού με τέτοιο τρόπο ώστε είναι καινοτόμα αλλά και βιώσιμη.

Η αναγνώριση του Κυτταρικού Γυαλιού Foamed Glass ως ένα καινοτόμο υλικό μόνωσης και κατασκευής ξεκίνησε από το 1930 και χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες της Ευρώπης, Αμερικής και Ασίας. Η κύρια αρχή παραγωγής του υλικού είναι ότι το γυαλί που προέρχεται από τα απόβλητα (Τηλεοράσεις, τζάμια κτιρίων, Υ/Η, λάμπες), θρυμματίζεται σε μορφή σκόνης, απαλλάσσεται από επικίνδυνα στοιχεία όπως μέταλλα και υδράργυρο. Περνάει από υψηλές θερμοκρασίες 900°C για περίπου 30 λεπτά και ξανά σε 950°C για επιπλέον 30 λεπτά και με μια σειρά χημικών αντιδράσεων με προσθετικά κυρίως SiC (2-5% σε μέγεθος 40 μm) ή (CaCO₃, Fly Ash, CaSO₄), αέρας απελευθερώνεται από την αποσύνθεση του προσθετικού και η σκόνη διογκώνεται, αφού ο αέρας εγκλωβίζεται δημιουργώντας το πορώδες υλικό. Η διαδικασία λεγόμενη sintering process (διαδικασία συμπίκνωσης) χρησιμοποιεί χαμηλές θερμοκρασίες και δεν είναι τόσο ενεργειακά απαιτητική όσο κατά τις πρώτες προσπάθειες παραγωγής Αφρώδους Αδρανούς. Με την γρήγορη ψύξη του υλικού σπάει εύκολα σε κομμάτια διαφόρων μεγεθών (granules) και με αργή ψύξη παράγονται τα πάνελ/boards με εξαιρετικές φυσικό-χημικό- μηχανικές ιδιότητες.

Τα αδρανή από ΑΚΓ λόγω της χαμηλής πυκνότητας, ειδικού βάρους (350-400 kg/m³) ελάχιστης/μηδενικής απορρόφησης νερού/(αδιάβροχο) λόγω κλειστής κυτταρικής δομής - closed cell structure- δεν επιτρέπουν την συγκράτηση νερού - no capillary action, έχουν μικρή θερμική αγωγιμότητα (ο αέρας που βρίσκεται στους πόρους/κύτταρα εμποδίζει την μετάδοση θερμότητας) λτ=0,050-0,060 W/mK, είναι μη καυστικό, ανθεκτικό σε χαμηλές θερμοκρασίες και στην χημική διάβρωση. Έχουν ικανοποιητική θλιπτική αντοχή ιδιαίτερα κατά την συμπίεση των κόκκων/υψηλή συνδετική ικανότητα/χαμηλή παραμόρφωση και είναι χημικά αβλαβές/οικολογικό, ανακυκλώσιμο, άοσμο, εύκολο στην εργασιμότητα μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος της κατασκευής χρησιμοποιείται για διάφορες χρήσεις

κατασκευαστικές και έργων υποδομής (Μονώσεις κτιρίων δαπέδων, τοίχων, οροφών, στην κατασκευή γεφυρών, δρόμων (frost protection layer) - ειδικά στην Νορβηγία το 2005 χρησιμοποιήθηκαν 12.000 μ³ Foamed Glass- FG σε 25 έργα οδοποιίας. Επίσης συντελούν στην βελτίωση σταθεροποίησης εδάφους αλλά και στην θεμελίωση κτιρίων, χρησιμοποιούνται ως υλικό αναχωμάτωσης, αλλά και στην, πετροχημεία, βιομηχανία κτλ.

1.3 Υλικά που ανακτήθηκαν από βιομηχανικές μεθόδους

Ο μεγαλύτερος όγκος των ανακυκλωμένων υλικών ως αδρανών υλικών κατασκευής είναι η υψικάμινος, χάλυβας και σκωρία. Σκωρία υψικαμίνου είτε αερόψυκτο (αργή ψύξη στην ανοικτή) ή σε κόκκους (που σχηματίζεται από σβήσιμο λιωμένης σκωρίας στο νερό για να διαμορφώσει άμμο μεγέθους σαν γυαλί). Το 2006, σύμφωνα με το USGS, η αερόψυκτος Σκωρία υψικαμίνων που πωλούνται ή χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ ήταν 7,3 εκατομμύρια τόνους και εκτιμάται σε 49 εκατ. Δολάρια. Σκωρία υψικαμίνων σε κόκκους που πωλούνται ή χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ ήταν 4,2 εκατομμύρια τόνους αξίας 318 εκατομμύρια δολάρια και χάλυβα κάμινος σκωρία που πωλούνται ή χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ ήταν 8,7 εκατομμύρια τόνους αξίας \$40 εκατομμυρίων. Αερόψυκτος υψικαμίνου σκωρία πωλήσεις για το 2006 ήταν για χρήση σε βάσεις οδικών και των επιφανειών (41%), ασφαλτικό σκυρόδεμα (13%), ετοιμού σκυροδέματος (16%), και το υπόλοιπο για άλλες χρήσεις. Κοκκώδης σκωρία υψικαμίνων, οι πωλήσεις το 2006 ήταν για χρήση σε τσιμεντοειδή υλικά (94%), και το υπόλοιπο για άλλες χρήσεις. Χάλυβας καμίνου σκωρίας : οι πωλήσεις το 2006 ήταν για χρήση σε βάσεις οδικών και των επιφανειών (51%), ασφαλτικό σκυρόδεμα (12%), για την πλήρωση (18%), και το υπόλοιπο για άλλες χρήσεις.

1.4 Η διαδικασία ανακύκλωσης

Τα συγκροτήματα ανακύκλωσης διακρίνονται σε συγκροτήματα παραγωγής αυτοφερόμενα για χρησιμοποίηση μέσα στο εργοστάσιο, 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 συντρίμμια 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 μπορεί να αφαιρεθούν με μαγνήτες ή άλλες διατάξεις διαχωρισμού και στη συνέχεια να ανακυκλωθούν με τήξη για άλλες χρήσεις

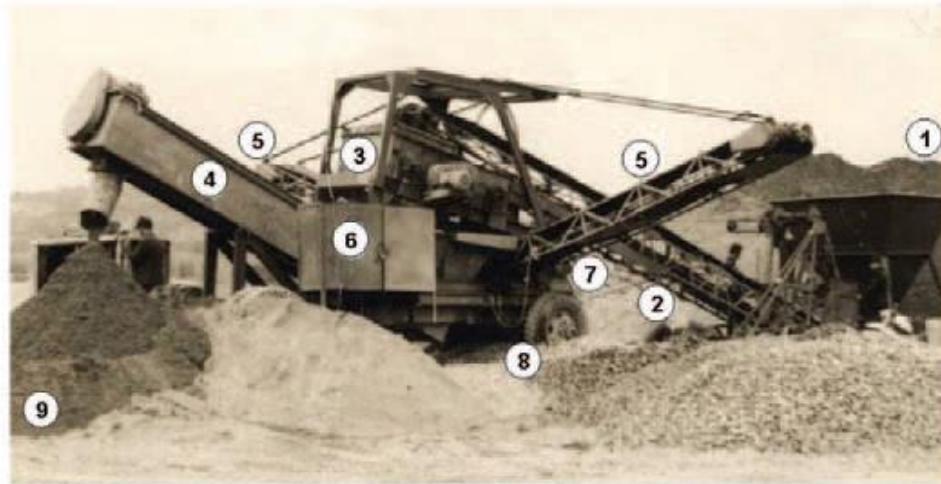
1.4.1 Αυτοφερόμενα συγκροτήματα ανακύκλωσης

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 μπάζων. Τα συγκροτήματα αυτά αποτελούνται από ένα θραυστήρα μπάζων σκυροδέματος, πλευρικό μεταφορέα απόθεσης ακατάλληλων υλικών, θραυστήρα δευτερογενούς θραύσης, συγκρότημα κοσκίνισματος, και ταινιόδρομο επαναφοράς του υπερδιάστατου υλικού από το κόσκινο στο 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 μπάζων σκυροδέματος είναι:

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

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 χρησιμοποίησής και απόρριψής 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 1.1).

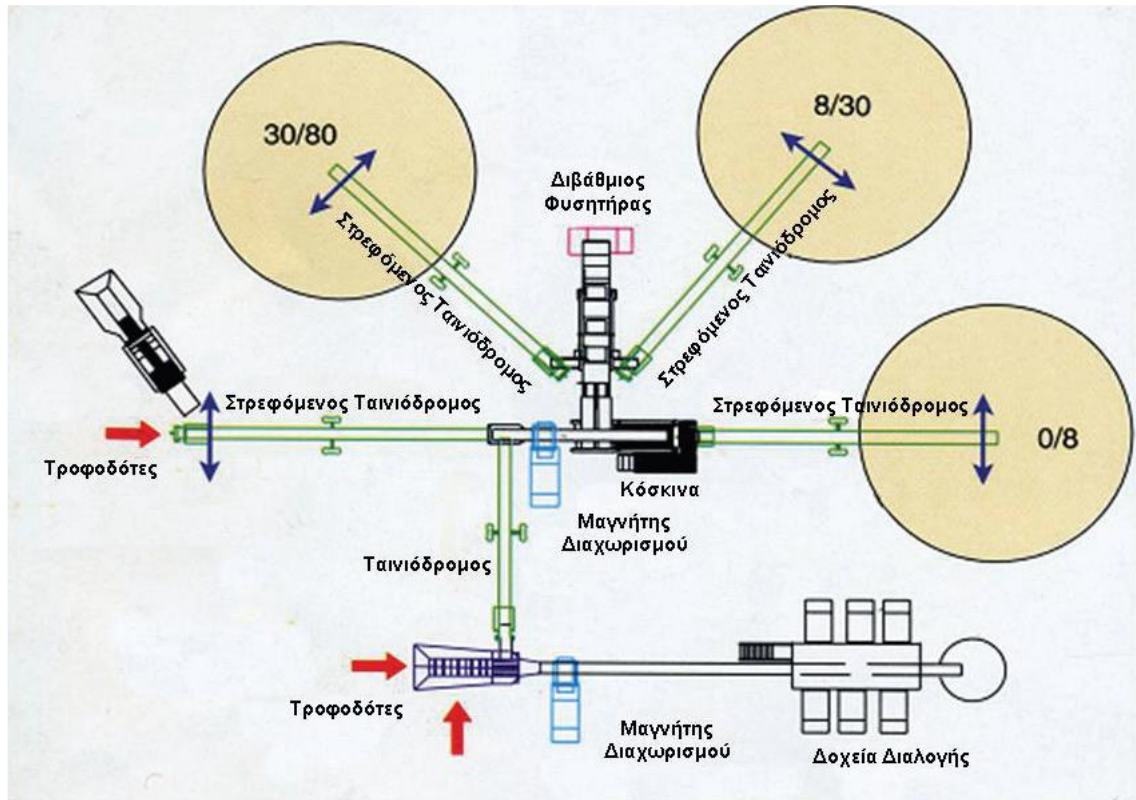


- | | |
|--|--|
| 1 Τροφοδοτική αποθήκη με
δοσιμετρικό δονητικό τροφοδότη | 5 Ιμάντες στίβασεως |
| 2 Μεταφορικός ιμάντας δονητικού
κοσκίνου | 6 Ηλεκτρικός πίνακας χειρισμών |
| 3 Δονητικό κόσκινο δύο πλεγμάτων | 7 Αντλία νερού (3 bar) |
| 4 Αποστραγγιστικό κοχλίας άμμου | 8 Πλαίσιο μεταφοράς |
| | 9 Άμμος. Μικρόκοκκοι <math><0,5\text{ mm}</math> |

Εικόνα 1.1: Αυτοφερόμενο συγκρότημα διαχωρισμού αδρανών και πλύσεως άμμου τριών βαθμίδων για την παραγωγή καναλέτων λεπτού τοιχώματος. Ελληνική κατασκευή, Χ.Ι. Εφραιμίδης, ΕΔΟΚ-ΕΤΕΡ

1.4.2 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, κοσκινίσματος, 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 1.2.



Εικόνα 1.2. Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος

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 ανακυκλώνόμενα υλικά σε ποσότητα της τάξεως των 75 m³/h, τότε χρησιμοποιείται για το πλύσιμο των αποθεμάτων του εργοταξίου και για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων λεπτόκοκκων προσμίξεων από την άμμο. Με τη μέθοδο αυτή ελέγχεται η ποιότητα της εργοταξιακής άμμου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του παραγομένου 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» (εικόνα 1.3) 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

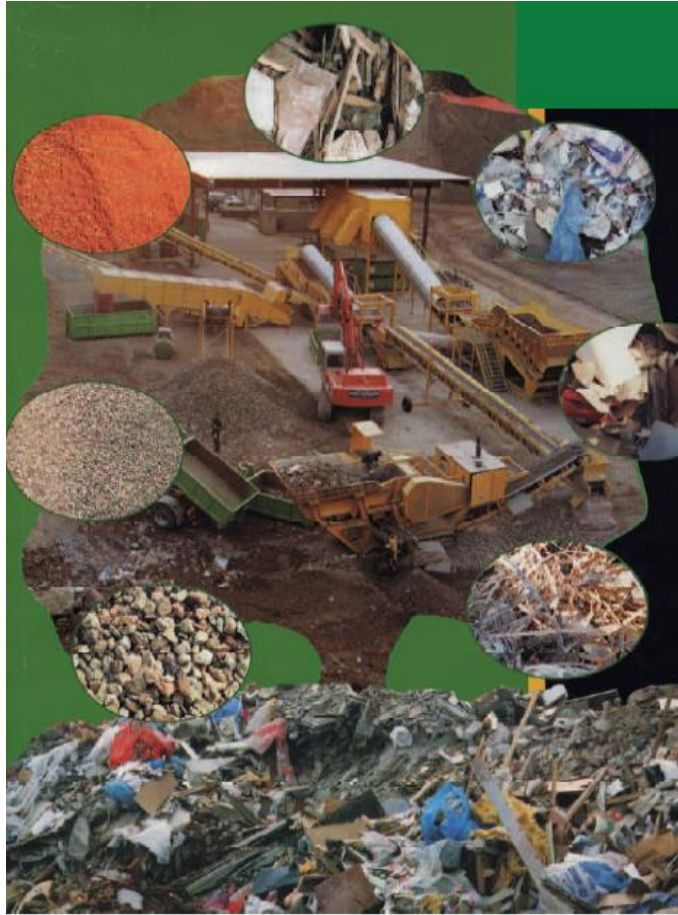
σιαγονοφόρο θραυστήρα. Το τροφοδοτούμενο υλικό περνάει πρώτα από ένα δονητικό διαχωριστή πρώτης βαθμίδας για την αφαίρεση των υπερδιάστατων υλικών > 100 mm.



Εικόνα 1.3 Θρυμματιστής σκυροδέματος – «Ψαλίδι» - Concrete Cruncher

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 ένα μαγνήτη που είναι τοποθετημένος πάνω από τον τροφοδοτικό ιμάντα. Ο ιμάντας μεταφέρει το υλικό σε ένα κόσκινο αποπλύσεως με καταιονισμό νερού. Πολτός υλικού <5 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 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 (εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος

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 διάφοροι μέθοδοι μεταξύ των οποίων επικρατέστερη είναι η μέθοδος του «*πυκνωτή λάσπης*» (εικόνα 1.5) 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 1.5: Μηχανικές μονάδες του συστήματος πλύσεως και διαβαθμίσεως αδρανών υλικών από ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων (πηγή CDE Ireland)

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 τη 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 χρομομολυβδένιο 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 οδηγούνται 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 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 παλιοσίδερα (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.

2 Επιρροή των Ανακυκλωμένων Αδρανών στις ιδιότητες και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μία σειρά πειραματικών ερευνών για τον σχεδιασμό των μειγμάτων, τη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους, την ανθεκτικότητα τους, την υδατοπερατότητα, την υδατοαπορροφητικότητα, την ενανθράκωση, την συστολή ξήρανσης, την αντοχή σε ψύξη απόψυξη, καθώς και την αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες.

2.1 Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή

Τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή, υψηλότερο πορώδες, μεγάλη διακύμανση ποιότητας, υψηλή συστολή ξήρανσης, μεγάλο ερπυσμό και χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (Nogchi 2001, Tomosawa 2000, Ravindrarajah 1988), που κάνουν δύσκολη την εφαρμογή τους.

Έχει γίνει πολύ έρευνα, διεθνώς, πάνω στα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή, που αφορά όμως τις μηχανικές τους ιδιότητες - κυρίως την αντοχή τους- και λιγότερο την ανθεκτικότητά τους - κυρίως την υδατοπερατότητά / υδατοαπορροφητικότητα, την ενανθράκωση, τη συστολή ξήρανσης καθώς και την αντοχή σε ψύξη απόψυξη (Levy 2004, Sagoe-Crentsil 2001, Οικονόμου 1999, Zaharieva 2004).

Υπάρχουν εργασίες που ερευνούν τη διείδυση των χλωριόντων και τη διάβρωση του σιδηρού οπλισμού. Στα ανακυκλωμένα υπάρχουν διεπιφάνειες αδρανών - τσιμέντου διαφορετικές από εκείνες των συμβατικών σκυροδεμάτων. Διεπιφάνεια υπάρχει τόσο μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της προσκολλημένης παλιάς τσιμεντοκονίας όσο και μεταξύ της προσκολλημένης και της νέας τσιμεντοκονίας (Ryu 2002α, Ryu 2002β). Η τσιμεντόπαστα που παραμένει στην διεπιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών δίνει αδύνατα σημεία στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, αφού αποτελείται από πολύ μικρούς πόρους και ρωγμές και επηρεάζει την αντοχή. Αυτοί οι πόροι και οι ρωγμές απορροφούν νερό και οδηγούν σε λιγότερο νερό για ενυδάτωση στην διεπιφάνεια των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων. Η τσιμεντόπαστα αυτή επιπλέον έχει υποστεί και ενανθράκωση, η οποία αυξάνει το πορώδες της (Tam 2005).¹

Στην εργασία που έκαναν οι Α.Ε. Σάββα, Επίκουρος Καθηγήτρια. Εργαστήριο Δομικών Υλικών ΔΠΘ και Ε. Β. Σκαρλάτος, Αρχιτέκτων Μηχανικός, Εταιρεία ΤΕΚΤΩΝ με τίτλο: «Σκυροδέματα με Ανακυκλωμένα Αδρανή Μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σε C1-» παρασκευάστηκαν σκυροδέματα με αδρανή παλιά σκυροδέματα κατηγορίας C12/15, C16/20 και C20/25, με τσιμέντο 142.5N. Τα ανακυκλωμένα αδρανή αντικαθιστούν τα συνήθη, εξ ολοκλήρου ή μόνο τα χονδρόκοκκο εξ αυτών. Προσδιορίστηκε η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή μέχρι την ηλικία του ενός έτους. Δοκίμια από τα σκυροδέματα αυτά οπλίστηκαν και προσδιορίστηκε η ανθεκτικότητα σε χλωριόντα ως απώλεια βάρους οπλισμού, ως δυναμικό διάβρωσης και ως προφίλ χλωριόντων. Έγινε σύγκριση όλων των παραπάνω ιδιοτήτων με τις αντίστοιχες σκυροδεμάτων με συνήθη πυριτικά αδρανή. Οι φυσικές ιδιότητες όλων των αδρανών δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1:Φυσικές ιδιότητες των αδρανών

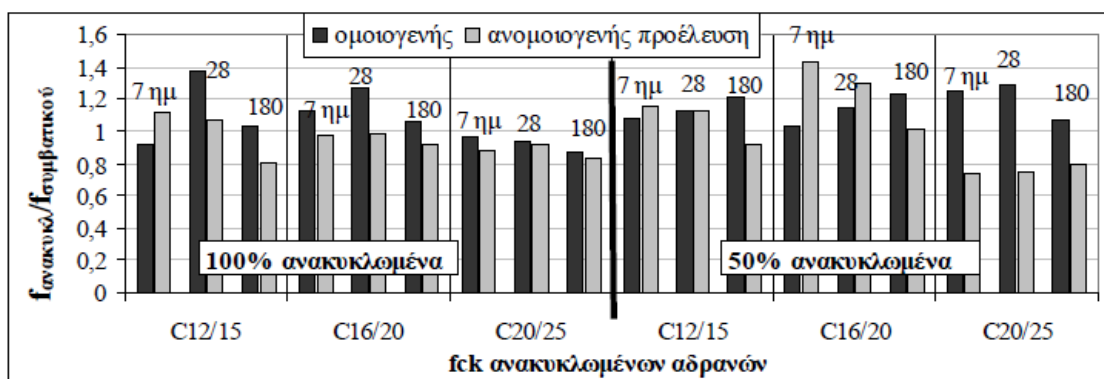
Είδος αδρανών	Ομοιογενής προέλευση						Ανομοιογενής προέλευση					
	Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)			Απορροφητικότητα (%)			Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)			Υγρασία (%)		
	Άμμος	Γαρυπάδι	Σκίρα	Άμμος	Γαρυπάδι	Σκίρα	Άμμος	Γαρυπάδι	Σκίρα	Άμμος	Γαρυπάδι	Σκίρα
C12/15	2,03	2,36	2,35	7,40	7,37	6,77	2,2	2,38	2,44	1,060	1,030	1,010
C16/20	2,33	2,35	2,36	4,17	3,08	3,21	2,2	2,44	2,42	1,063	1,024	1,015
C20/25	2,20	2,22	2,23	8,50	7,97	8,31	2,2	2,42	2,47	1,069	1,026	1,020
Συνήθη	2,64	2,65	2,64	2,55	1,90	1,70	2,63	2,6	2,65	1,036	1,01	1,00

Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή του σκυροδέματος προς ανακύκλωση επηρεάζει την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη. Η εφελκυστική αντοχή των μειγμάτων, με ομοιογενή ή όχι προέλευση των αδρανών, δεν παρουσίασε μεγάλες διαφοροποιήσεις. Σε σχέση με το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών (Διάγραμμα 2.2), η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των σκυροδεμάτων με ομοιογενή προέλευση, ενώ την μειώνει, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση. Η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων από ανακυκλωμένα, ανεξαρτήτως ομοιογένειας, αδρανή, παρουσιάστηκε μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντοχή των σκυροδεμάτων από τα οποία προήλθαν. Σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα (Πίνακας 2.2, Διάγραμμα 2.1), όταν η προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι ομοιογενής, όλα τα σκυροδέματα παρουσίασαν αντοχές μεγαλύτερες (από 1 έως 37%) του συμβατικού με

εξαίρεση το μείγμα με 100% ανακυκλωμένο C20/25, του οποίου οι αντοχές είναι μικρότερες (από 3 έως 21%) του συμβατικού.

Πίνακας 2.2: Λόγοι θλιπτικών αντοχών των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων προς τις αντοχές των συμβατικών σκυροδεμάτων

		$f_{\text{ανακυκλωμένων}} / f_{\text{συμβατικού}}$											
		Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών											
		100%			50%			100%			50%		
		f_{ck} σκυροδέματος προέλευσης											
Ηλικία (ημέρες)		C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25
		Ομοιογενής προέλευση						Ανομοιογενής προέλευση					
7		0,92	1,13	0,97	1,08	1,03	1,25	1,12	0,98	0,88	1,15	1,43	0,73
28		1,37	1,27	0,94	1,14	1,14	1,28	1,07	0,99	0,91	1,13	1,29	0,74
90		1,01	0,98	0,79	1,12	1,12	0,99	0,87	0,98	0,87	1,00	1,08	0,82
180		1,03	1,05	0,86	1,21	1,23	1,07	0,80	0,92	0,84	0,91	1,01	0,80



Διάγραμμα 2.1: Θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή προς την αντοχή των συμβατικών σκυροδεμάτων

Οι εναπομένουσες αντοχές των σκυροδεμάτων μετά από πύρωση 2 ωρών στους 100, 300 και 550 °C (μέγιστη τιμή) έδειξαν ότι σκυροδέματα με ομοιογενή προέλευση ανακυκλωμένων αδρανών είναι ανθεκτικότερα του συμβατικού, ενώ, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση, τα συμβατικά σκυροδέματα είναι ανθεκτικότερα.²

Σε εργασία που διεξήχθει από τους Χ.-Τ. Γκαλμπένης, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Κ. Τσακαλάκης, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σ. Τσίμας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, διερευνήθηκε η δυνατότητα υποκατάστασης της φαρίνας του τσιμέντου από ανακυκλωμένα υλικά που προέρχονται από κατεδαφίσεις κτιρίων για την

²http://portal.tee.gr/portal/page/portal/PUBLICATIONS/SCIENTIFIC_PUBLICATIONS/2010/2o_teuchos2010/04_3803.pdf

παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου. Τα οικοδομικά απορρίμματα που ειδικότερα αντιμετωπίζονται είναι τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (ΑΑΣ) και τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Τοιχοποιίας (ΑΑΤ). Από τον προσδιορισμό της χημικής και ορυκτολογικής σύστασης των ΑΑΣ και ΑΑΤ, διαπιστώθηκε καταρχήν η ομοιότητα τους με τη σύσταση της φαρίνας του τσιμέντου. Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε το ποσοστό υποκατάστασης της φαρίνας του τσιμέντου από τα υπό εξέταση υλικά (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3: Υπολογιστικός προσδιορισμός δεικτών Πυριτικός δείκτης Sm, Αργλικός Δείκτης Am, Βαθμός κορεσμού σε άσβεστο LSF, και Υδραυλικός δείκτης Hm των συνθέσεων της φαρίνας του τσιμέντου.

Δείκτες	Διακύμανση Συνήθη Όρια (Επιθυμητά όρια)	Συνθέσεις Φαρίνας				
		Βιομηχανική Φαρίνα (BΦ)	75% BΦ 19% ΑΑΣ 7% ΑΑΤ	50% BΦ 38% ΑΑΣ 12% ΑΑΤ	25% BΦ 58% ΑΑΣ 17% ΑΑΤ	0% BΦ 77% ΑΑΣ 23% ΑΑΤ
Sm	1.9-3.2 (2.3-2.7)	2.31	2.44	2.58	2.72	2.89
Am	1.3-2.5 (1.3-1.7)	1.3	1.43	1.60	1.79	2.07
Hm	1.7-2.3 (~2)	2.16	2.16	2.16	2.23	2.23
LSF	0.66-1.2 (0.92-0.96)	0.96	0.95	0.94	0.96	0.95

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τα εξεταζόμενα υλικά παρουσίασαν χαρακτηριστικές ομοιότητες στη σύστασή τους σε σχέση με την σύσταση της φαρίνας του τσιμέντου. Η ασβεστολιθική και πυριτική προέλευση των ΑΑΣ και ΑΑΤ είναι συμβατή με την προέλευση της ΒΦ. Επιπλέον, από τις συνθέσεις της φαρίνας που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα εξεταζόμενα υλικά θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν τις φυσικές πρώτες ύλες ακόμη και σε ποσοστό 100%.³

Στο Πανεπιστήμιο του Σαλέρνο, στο Νότο της Ιταλίας, επιστήμονες συμμετέχουν σε ένα πρωτοποριακό ερευνητικό πρόγραμμα. Η κλασική συνταγή που περιλαμβάνει νερό, τσιμέντο και αδρανή υλικά, εμπλουτίζεται με ανακυκλωμένες δομικές μεταλλικές ίνες, ώστε το σκυρόδεμα που παράγεται, να είναι οικολογικό και με υψηλότερη αντοχή. Στο εργαστήριο, το πειραματικό σκυρόδεμα εμπλουτίζεται με ανακυκλωμένα υλικά και μετά υποβάλλεται σε αυστηρούς μηχανικούς ελέγχους. Οι επιστήμονες λυγίζουν, συμπιέζουν και

³Τσίμας Σ. και Σ. Τσιβιλής (2004) «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

σπάνε το σκυρόδεμα, προκειμένου να μελετήσουν την συμπεριφορά του κάτω από ακραίες συνθήκες.

Οι επιστήμονες φιλοδοξούν ότι η έρευνά τους θα αποδείξει πως το οικολογικό σκυρόδεμα μπορεί να δοθεί για μαζική παραγωγή. Ο υπεύθυνος ποιοτικού ελέγχου του εργοστασίου Καλτσεστρουότσι, Μάουρο Μέλε, θέτει ως όρο, το νέο υλικό να καλύπτει τα στάνταρ ποιότητας που απαιτούνται, βάσει της εθνικής και διεθνούς νομοθεσίας. Εκτός από ανακυκλωμένες και φυσικές ίνες, οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι στο μέλλον, συμπαγές και ποιοτικό οικολογικό σκυρόδεμα, θα παράγεται από υπολείμματα ελαστικών και από ανακυκλωμένα πλαστικά υλικά.^{4,5,6,7,8}

Οι κ.κ. Σ. Κόλιας, τ. Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος και Μ. Κατσάκου, Δρ. Πολιτικός μηχανικός ΕΜΠ, ΙΝΤΕΡΜΠΕΤΟΝ Δομικά Υλικά ΑΕ, υλοποίησαν σειρά εργαστηριακών δοκιμών με σκοπό τη μελέτη των μεταβολών της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το ποσοστό αντικατάστασης των συμβατικών αδρανών Διερευνήθηκαν στο εργαστήριο οι ιδιότητες σκυροδεμάτων που παράγονται με αντικατάσταση των χονδρών αδρανών με φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα ίδιας διαβάθμισης. Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα είχε προέλευση από εργασίες συντήρησης φθαρμένων ασφατικών οδοστρωμάτων. Οι ιδιότητες που εξετάστηκαν είναι η αντοχή σε θλίψη και σε κάμψη καθώς και το στατικό και το δυναμικό (από συντονισμό) μέτρο ελαστικότητας. Εξετάστηκαν διάφορα μίγματα με ποσοστά αναμίξεως κμ θραυστών αδρανών και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 αντίστοιχα.⁹

⁴ www.encore-fp7.unisa.it

⁵ <http://gr.euronews.com/2013/06/24/green-concrete-under-construction/>

⁶ <http://polyteknikanea.gr/WP3/?p=24866>

⁷ <http://www.news.gr/perivallon/oikologika-proionta/article/76114/anoigei-o-dromos-gia-to-oikologiko-mpeton.html>

⁸ <http://www.news.gr/perivallon/oikologika-proionta/article/76114/anoigei-o-dromos-gia-to-oikologiko-mpeton.html>

⁹ http://www.skyrodemanet.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=198%3A--a----21&catid=67&Itemid=66

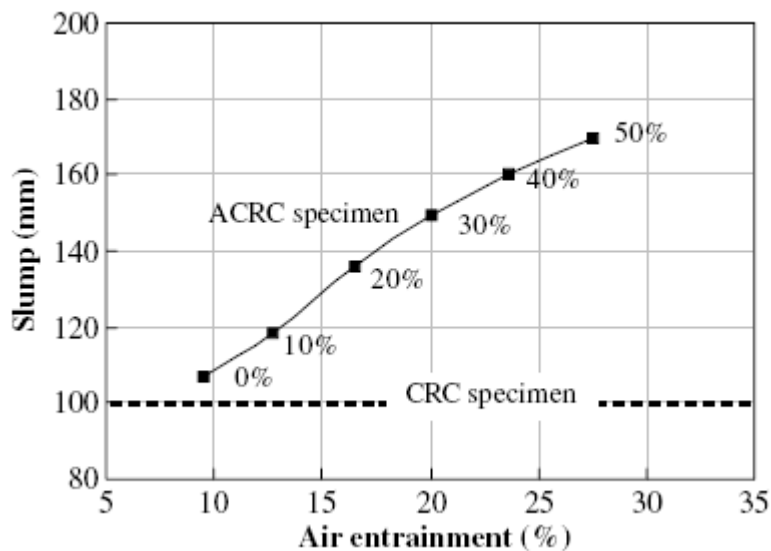
2.2 Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί από διάφορους ερευνητές στον τομέα της χρησιμοποίησης των ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων στο σκυροδέμα για την πλήρη ή μερική αντικατάσταση των αδρανών του.

2.2.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

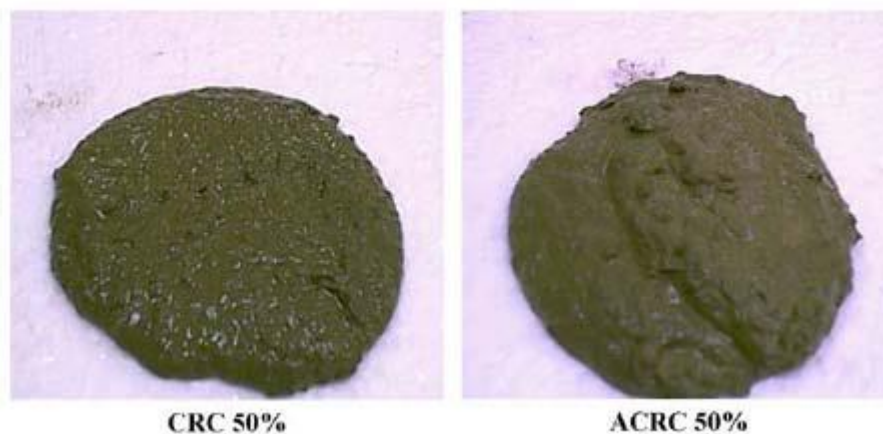
2.2.1.1 Κάθιση

Η κάθιση είναι ένα μέτρο εργασιμότητας του σκυροδέματος το οποίο εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, την οποία παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κόνος καθίσεως). Πολλοί ερευνητές έχουν αναφερθεί στην κάθιση του μίγματος από ανακυκλωμένα ελαστικά. Αρχικά ο Raghvan (1998) έχει αναφέρει ότι τα μείγματα με ενσωματωμένα τεμάχια ελαστικού παρουσίασαν ευκολία στη χρήση (ανάμιξη, μεταφορά και τοποθέτηση), συγκρίσιμη ή και καλύτερη από το μίγμα χωρίς ελαστικά. επίσης, οι Khatib και Bayomy (1999) ερεύνησαν την ικανότητα επεξεργασίας του rubbercrete και ανέφεραν ότι υπάρχει μια μείωση στη κάθιση ανάλογη με την αύξηση του περιεχομένου ελαστικού, ως ποσοστό του συνολικού όγκου. Ανέφεραν δε ότι σε ποσοστό ελαστικού 40%, η κάθιση ήταν σχεδόν μηδενική με αποτέλεσμα το σκυροδέμα να μην μπορεί να υποστεί επεξεργασία με το χέρι. επίσης, παρατηρήθηκε ότι τα μείγματα που δημιουργήθηκαν με πιο λεπτό κομμάτι ελαστικού ήταν πιο εύκολο να τοποθετηθούν, συγκριτικά με εκείνα που δημιουργήθηκαν από χονδροειδή κομμάτια ελαστικών. Επιπροσθέτως, στη μελέτη του Bennazouk et al. (2006) παρατηρείται η επιρροή της περιεκτικότητας του μίγματος σε αέρα στην κάθιση του σκυροδέματος. Η ικανότητα επεξεργασίας του νωπού μίγματος ACRC (aerated cement rubber composite) βελτιώνεται σημαντικά λόγω της εισαγωγής διογκωτικού (δηλαδή αυξημένου ποσοστού αέρα) στο μείγμα.



Διάγραμμα 2.2: Επίδραση της περιεκτικότητας αέρα στη κάθιση ενός φρέσκου μίγματος με διάφορες αναλογίες όγκου ελαστικού (0-50%)

Η κάθιση, ως μέτρο ρευστότητας του υλικού, αυξάνεται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αέρα. πριν την εισαγωγή αέρα στο μίγμα, η κάθιση όλων των μειγμάτων ήταν 90-100 mm. Για το ACRC (aerated cement rubber composite), που περιέχει 50% μόρια ελαστικού, σε σύγκριση και με το αντίστοιχο CRC (cement rubber composite), παρατηρήθηκε βελτίωση αφού οι τιμές της κάθισης κυμάνθηκαν από 100 έως 169,5 mm. Στη φωτογραφία 2.1 εμφανίζονται δείγματα των CRC και ACRC, και συγκεκριμένα δείγματα νοπών μειγμάτων με περιεκτικότητα ελαστικού ίση με 50%.



Εικόνα 2.1: Δείγματα νοπών μινμάτων CRC και ACRC με περιεκτικότητα σε ελαστικό ίση με 50%.

Σε μια ακόμα μελέτη, που πραγματοποιήθηκε από τους Khatib και Bayomy (1999), ερευνήθηκε η επιρροή της περιεκτικότητας ελαστικού στην κάθιση και στο ειδικό βάρος. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4, η αύξηση της περιεκτικότητας του μείγματος σε κομμάτια ελαστικού οδήγησε σε μείωση τόσο στην κάθιση όσο και στο ειδικό βάρος των μιγμάτων.

Πίνακας 2.4: Αναλογίες μιγμάτων και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

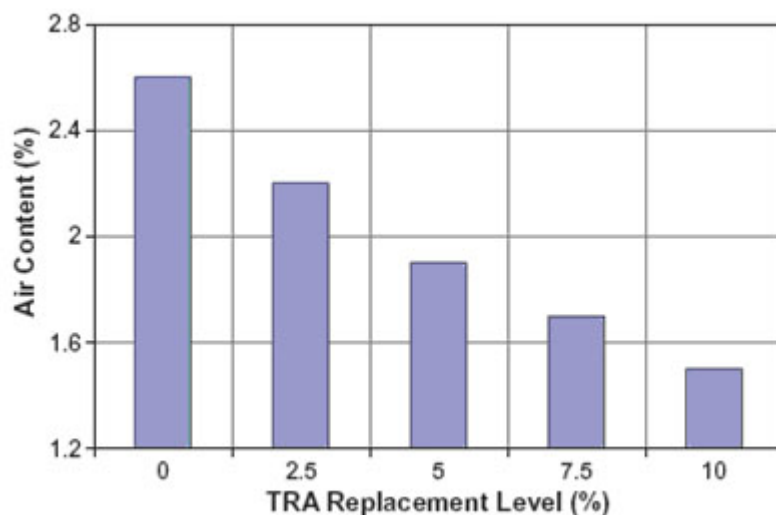
Περιεκτικότητα ελαστικού (%) ^a	Αναλογίες μιγμάτων (kg/m ³ του σκυροδέματος)					Αναλογία νερού τσιμέντου w/c	Κάθιση (mm)	Ειδικό βάρος (kg/m ³)
	Νερό	Τσιμέντο	Χονδροειδή μείγματα αδρανών	Λεπτά μείγματα αδρανών	Ελαστικό			
0	252	446	961	585	0	0,56	75,33	2399
20	252	446	961	468	67,51	0,56	60,7	2217
40	252	446	961	351	135	0,56	35,7	2068,3
60	252	446	961	234	202,5	0,56	17,7	1987
80	252	446	961	117,2	270	0,56	10,3	1830,6
100	252	446	961	0	337,6	0,56	4,7	1740,6

2.2.1.2 Περιεκτικότητα σε αέρα

Ο Fedroff (1996) κατέγραψε υψηλότερη περιεκτικότητα σε αέρα στα μείγματα rubber concrete σε σχέση με τα μείγματα κανονικού σκυροδέματος. Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν επίσης από τους Khatib και Bayomy (1999). Αυτό πιθανόν οφείλεται στη μη πολική φύση των ελαστικών μορίων και στην τάση τους να παγιδεύουν τον αέρα στις τραχιές επιφάνειές τους. Επιπλέον, όταν προστίθεται ελαστικό σε ένα συγκεκριμένο μείγμα, μπορεί να προσελκύσει αέρα δεδομένου ότι έχει την τάση να απομακρύνει το νερό, και επομένως ο αέρας να προσκολληθεί στα ελαστικά μόρια. Συμπερασματικά, η αύξηση του ελαστικού περιεχομένου οδηγεί σε υψηλότερη περιεκτικότητα αέρα στα μείγματα rubber concrete, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το ειδικό βάρος των μιγμάτων.

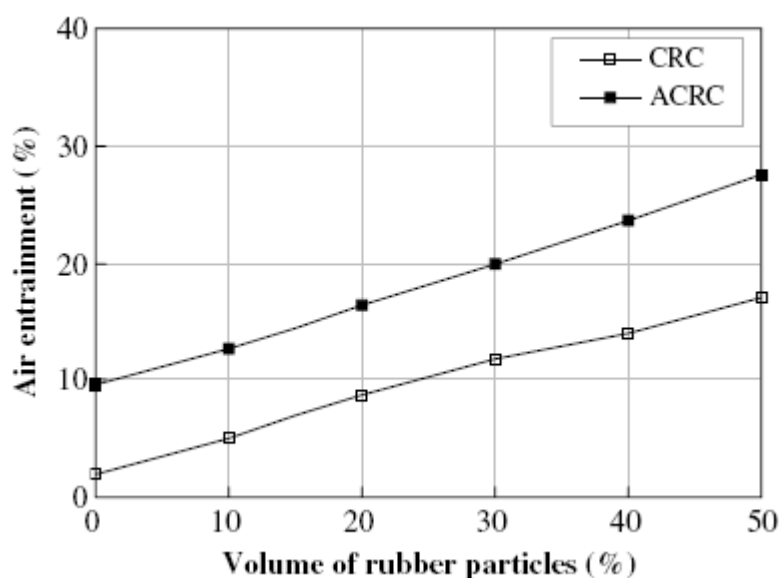
Επίσης ο Al-akhlas παρουσίασε την επίδραση της προσθήκης πούδρας από καύση ελαστικών TRA (Tire Rubber Ash) στην περιεκτικότητα αέρα του νωπού μείγματος. Η περιεκτικότητα σε αέρα εμφάνισε μείωση ανάλογη με την αύξηση του επιπέδου TRA. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα του αέρα από 2,6% για το κανονικό σκυροδέμα μειώθηκε σε 1,5% για μίγμα που περιείχε 10% TRA. Κατ' επέκταση το ποσοστό μείωσης στην περιεκτικότητα του αέρα ήταν 15%, 27%, 35%, και 42% για τα μείγματα με περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα (Διάγραμμα 2.3). Η μείωση στην περιεκτικότητα αέρα

με την αύξηση του επιπέδου προσθήκης TRA μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση της TRA όπου τα μόρια TRA γεμίζουν μερικά από τα κενά αέρα του μείγματος.



Διάγραμμα 2.3: Επίδραση της αντικατάστασης TRA στην περιεκτικότητα σε αέρα του νωπού rubber concrete

Ο Benazzouk (2002) παρατήρησε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του ελαστικού στο μείγμα του νέου σκυροδέματος τόσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε αέρα. Στο Διάγραμμα 2.4 εμφανίζονται τα ποσοστά εισαγωγής αέρα για τα δείγματα CRC (cement rubber composite) και ACRC (aerated cement rubber composite). Παρατηρείται ότι για την αναλογία όγκου ελαστικού 50%, οι περιεκτικότητες σε αέρα είναι 17,0% και 28,2%, αντίστοιχα. Η υψηλότερη περιεκτικότητα αέρα στα μείγματα μπορεί να οφείλεται στην ικανότητα των μορίων του ελαστικού να παγιδεύουν αέρα στην τραχιά επιφάνειά τους. Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν κι από διάφορους άλλους ερευνητές. Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας για την περιεκτικότητα σε αέρα του rubber concrete έδειξε ότι είναι σαφώς μια εξαιρετικά σύνθετη παράμετρος, η οποία επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας μείξης, την αναλογία των υλικών του μίγματος, το ποσοστό των λεπτών και χονδροειδών ελαστικών, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του τσιμέντου, την ποσότητα του ύδατος, το ποσοστό και τις ιδιότητες του αέρα και μιας σειράς άλλων παραμέτρων. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό κατά τη διάρκεια της μείξης υποβοηθάει επίσης την παγίδευση περισσότερου αέρα. Προκειμένου να ελεγχθούν αυτές οι υποθέσεις, έγιναν μετρήσεις των δειγμάτων ACRC που περιέχουν ελαστικό 0%, 20% και 50% κατ' όγκο μειώνοντας την περιεκτικότητα σε νερό κατά τη διάρκεια της μείξης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν συνοψίζονται στον Πίνακα 2.5.



Διάγραμμα 2.4: Μεταβολή του ποσοστού αέρα σε σχέση με την κατ' όγκο αναλογία ελαστικού

Πίνακας 2.5: Ποσοστό αέρα για διάφορους λόγους νερού/τσιμέντου σε μίγματα τύπου ACRC

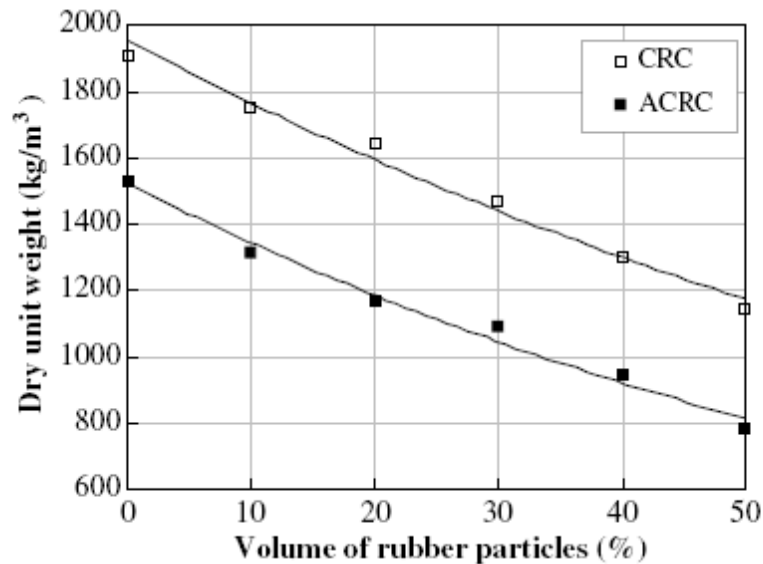
w/c	Air-entrainment (%)		
	0% Rubber	20% Rubber	50% Rubber
0.26	6.3	–	–
0.30	9.5	15.8	–
0.35	–	16.5	–
0.47	–	–	28.7
0.52	–	–	28.2

2.2.1.3 Ειδικό βάρος

Λόγω της χαμηλής πυκνότητας των ελαστικών μορίων, το ειδικό βάρος των μειγμάτων που περιέχουν ελαστικό μειώνεται ανάλογα με την αύξηση του ποσοστού του ελαστικού. Επιπλέον, η αύξηση στο περιεχόμενο του ελαστικού αυξάνει την περιεκτικότητα σε αέρα, η οποία μειώνει στη συνέχεια το ειδικό βάρος των μιγμάτων. Η μείωση του ειδικού βάρους του rubber concrete είναι ωστόσο αμελητέα όταν το περιεχόμενο ελαστικού είναι χαμηλότερο από 10-20% του συνολικού όγκου (Khatib και Bayomy, 1999).

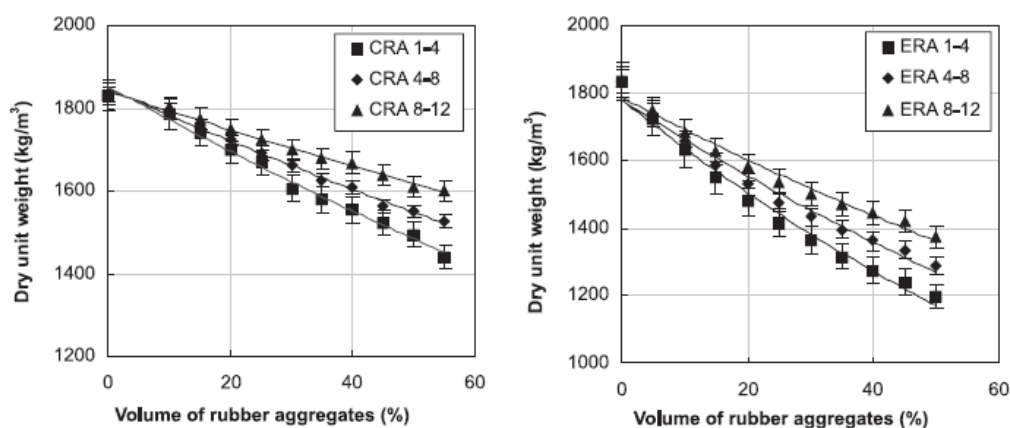
Ο Bennazouk (2006) μελέτησε το ξηρό ειδικό βάρος των μειγμάτων CRC (cement rubber composite) και ACRC (aerated cement rubber composite) σε σχέση με την περιεκτικότητα σε ελαστικό. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη των ελαστικών μορίων μειώνει

γραμμικά το ξηρό ειδικό βάρος. Οι τιμές μειώνονται από τα 1910 kg/m³ για το σκυρόδεμα χωρίς ελαστικό σε 1150 kg/m³ και 785 kg/m³ για CRC και ACRC που περιέχουν 50% ελαστικού, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε μείωση 40% και 50% του ειδικού βάρους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση στο ξηρό ειδικό βάρος του ACRC, εξαιτίας του μεγαλύτερου ποσοστού αέρα έναντι του CRC, είναι ανεξάρτητη από την αναλογία όγκου-ελαστικού και προέρχεται από τη σταθερή τιμή του ποσοστού των αεροφουσαλίδων.



Διάγραμμα 2.5: Μεταβολή ξηρού ειδικού βάρους με την περιεκτικότητα ελαστικού

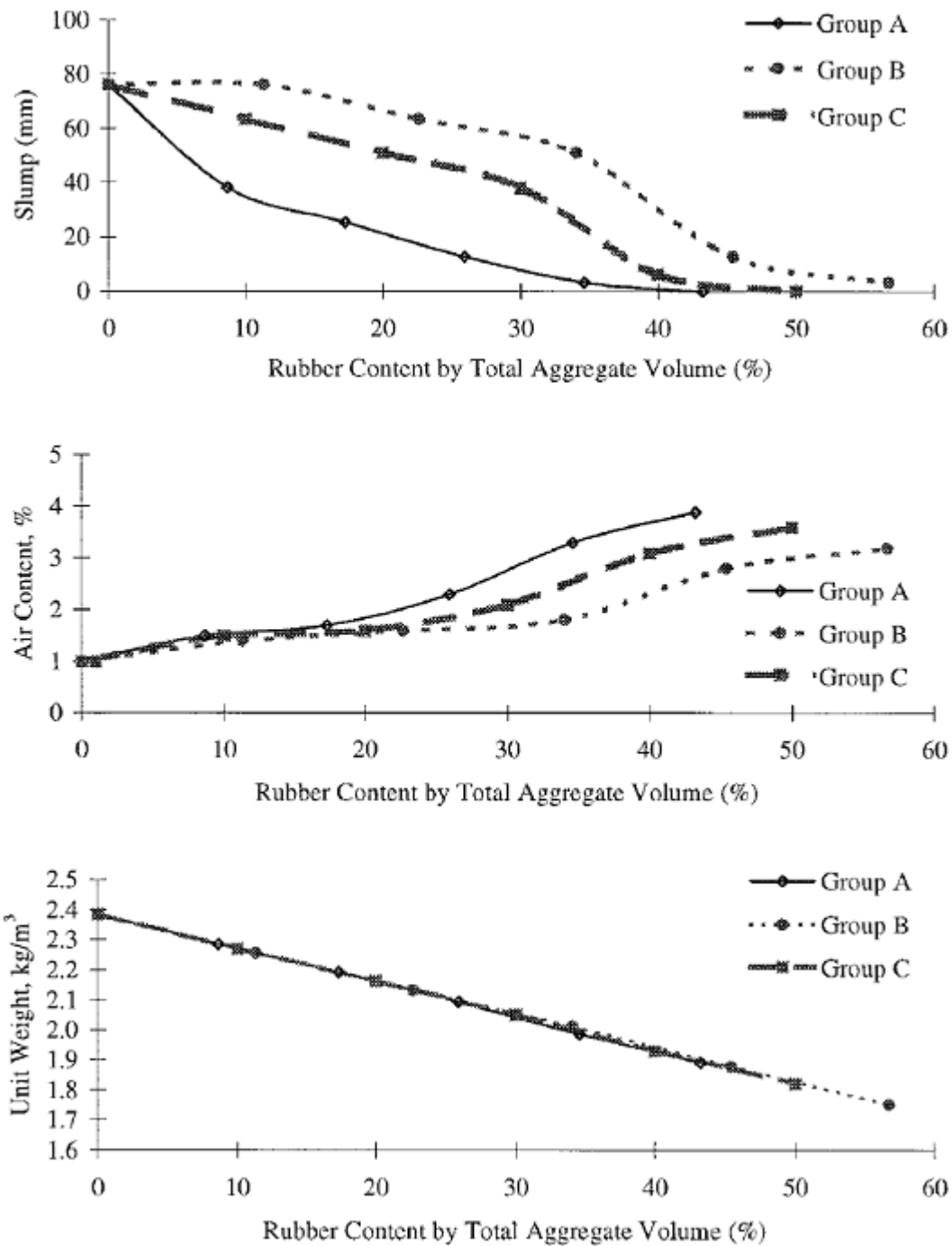
Σε άλλη μελέτη ο Bennazouk (2002) παρατήρησε ότι καθώς το ποσοστό του ελαστικού αυξάνεται στο μείγμα, το ξηρό ειδικό βάρος της σύνθεσης μειώνεται, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του. Το Διάγραμμα 2.6 παρουσιάζει αυτές τις μεταβλητές για δύο τύπους ελαστικών με διαφορετικά μεγέθη μορίων. Μείωση μέχρι 22% και 35% του ξηρού ειδικού βάρους, ανάλογα με την αναλογία ελαστικού, καταγράφηκε για τα CRAC (compact rubber aggregates composites) και ERAC (expanded rubber aggregates composites), αντίστοιχα. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι η μείωση στο ειδικό βάρος είναι σημαντικότερη όταν το μέγεθος των μορίων ελαστικού είναι μικρότερο.



Διάγραμμα 2.6: Ξηρό ειδικό βάρος ως προς την ποσοστιαία κ.ο. αναλογία ελαστικού, για διαφορετικά μεγέθη τεμαχιδίων ελαστικού.

Στην έρευνα των Khatib και Bayomy μελετήθηκαν οι εξής παράμετροι: η κάθιση, η περιεκτικότητα αέρα και το ειδικό βάρος. Οι παραπάνω ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος rubber concrete παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.7. Σε περιεκτικότητα ελαστικού 80% (40% από το συνολικό όγκο), η κάθιση ήταν περίπου μηδενική και το μείγμα δεν ήταν κατάλληλο για χειρωνακτική μείξη. Τα δείγματα με αυτό το υψηλό περιεχόμενο ελαστικού έπρεπε να συμπυκνωθούν χρησιμοποιώντας δονητή. Η μείωση στην εργασιμότητα, όπως υποδεικνύεται από τη μείωση των τιμών κάθισης σε υψηλότερα ποσοστά κ.ο. ελαστικού, αύξησε τον περιεχόμενο αέρα και μείωσε τα ειδικά βάρη. Οι υψηλές τιμές της περιεκτικότητας αέρα, στα υψηλά περιεχόμενα ελαστικού, διατηρήθηκαν παρά την περεταίρω προσπάθεια συμπύκνωσης.

Το ποσοστό αύξησης στην περιεκτικότητα αέρα ήταν σχεδόν το ίδιο για τις τρεις ομάδες δοκιμών όταν το περιεχόμενο ελαστικού ήταν <30% του συνολικού όγκου του μείγματος. Η ομάδα B είχε χαμηλότερη περιεκτικότητα αέρα από την ομάδα A για περιεχόμενο ελαστικού >30%. Θεωρείται ότι αυτό είναι αποτέλεσμα της πρόσθετης προσπάθειας συμπύκνωσης που απαιτείται για το δείγμα της ομάδας B σε υψηλό περιεχόμενο ελαστικού. Γενικά, η περιεκτικότητα αέρα αυξήθηκε και το ειδικό βάρος μειώθηκε ομοιόμορφα. Το Διάγραμμα 2.7 δείχνει ότι οι καμπύλες ειδικού βάρους ταιριάζουν σε μια ευθεία γραμμή και για τις τρεις ομάδες δοκιμών. Με βάση τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα μείγματα τύπου RPCC οδηγούν σε μείγματα σκυροδέματος ελαφρύτερου βάρους. Το ειδικό βάρος μπορεί να μειωθεί έως και κατά 75% του ειδικού βάρους του κανονικού σκυροδέματος.



Διάγραμμα 2.7: Επίδραση του ποσοστού ελαστικού στις ιδιότητες των μιγμάτων τύπου RPCC

2.2.2 Βασικές μηχανικές ιδιότητες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από σχετικές μελέτες για τις βασικές μηχανικές ιδιότητες (θλιπτική και καμπτική αντοχή, κλπ) του rubber concrete. Αρχικά οι Ali (1993), Rostami (1993), Eldin και Senouci (1993), Torcu (1995) παρουσίασαν τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής του ενισχυμένου με ελαστικό σκυροδέματος. Τα

αποτελέσματα των διάφορων μελετών δείχνουν ότι το μέγεθος, τα ποσοστά και η σύσταση επιφάνειας των ελαστικών μορίων έχουν αισθητές επιπτώσεις στη θλιπτική αντοχή των μειγμάτων rubber concrete, λόγω της αύξησης περιεκτικότητας σε αέρα. Οι Eldin και Senouci (1993) ανέφεραν ότι τα μείγματα με κομμάτια από ελαστικά εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερες θλιπτικές και καμπτικές αντοχές από το κανονικό σκυρόδεμα. Υπήρξε περίπου 85% μείωση της θλιπτικής αντοχής και 50% μείωση της καμπτικής αντοχής όταν αντικαταστάθηκαν πλήρως τα χονδρόκοκκα αδρανή από τα ελαστικά τεμαχίδια. Εντούτοις, μια μείωση περίπου 65% της θλιπτικής αντοχής και μέχρι 50% της καμπτικής αντοχής παρατηρήθηκε όταν αντικαταστάθηκε πλήρως τα λεπτόκοκκα αδρανή από λεπτότερα μόρια τύπου crumb.

Οι Khatib και Bayomy (1999) καθώς και ο Topcu (1995) έδειξαν επίσης ότι η προσθήκη των χονδρόκοκκων κομματιών ελαστικού στο σκυρόδεμα μείωσε τη θλιπτική αντοχή περισσότερο συγκριτικά με την προσθήκη των λεπτών κομματιών ελαστικού. Επίσης, οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι εάν τα ελαστικά μόρια έχουν τραχύτερη επιφάνεια ή μέσω κάποιας προεργασίας, μπορεί να οδηγηθούμε σε υψηλότερη θλιπτική αντοχή.

Οι Naik και Singh, 1991 μελέτησαν την επίδραση της όξινης προεργασίας στα ελαστικά μόρια, τα οποία ενυδατώθηκαν με NaOH για 5 λεπτά και έπειτα ξεπλύθηκαν με νερό. Αυτή η επεξεργασία ενίσχυσε την αντοχή του σκυροδέματος μέσω μιας μικροσκοπικής αύξησης στη σύσταση της επιφάνειας των ελαστικών μορίων. Οι Eldin και Senouci (1993) επίσης ενυδάτωσαν και έπλυναν τα ελαστικά μέρη με νερό για να αφαιρέσουν τους μολυσματικούς παράγοντες, ενώ ο Rostami (1993) χρησιμοποίησε νερό και διαλυτικό τετραχλωρίδιο άνθρακα, και νερό σε συνδυασμό με ένα καθαριστή μείξεων λάτεξ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σκυρόδεμα rubber concrete που περιέχει ελαστικά μόρια που ξεπλύθηκαν με νερό εμφάνισε υψηλότερη θλιπτική αντοχή περίπου 16% από το αντίστοιχο σκυρόδεμα που περιέχει τα μη επεξεργασμένα ελαστικά μέρη, ενώ αυτή η βελτίωση στη θλιπτική αντοχή ήταν 57% όταν χρησιμοποιήθηκαν ελαστικά σύνολα που είχαν υποστεί επεξεργασία με τετραχλωρίδιο άνθρακα.

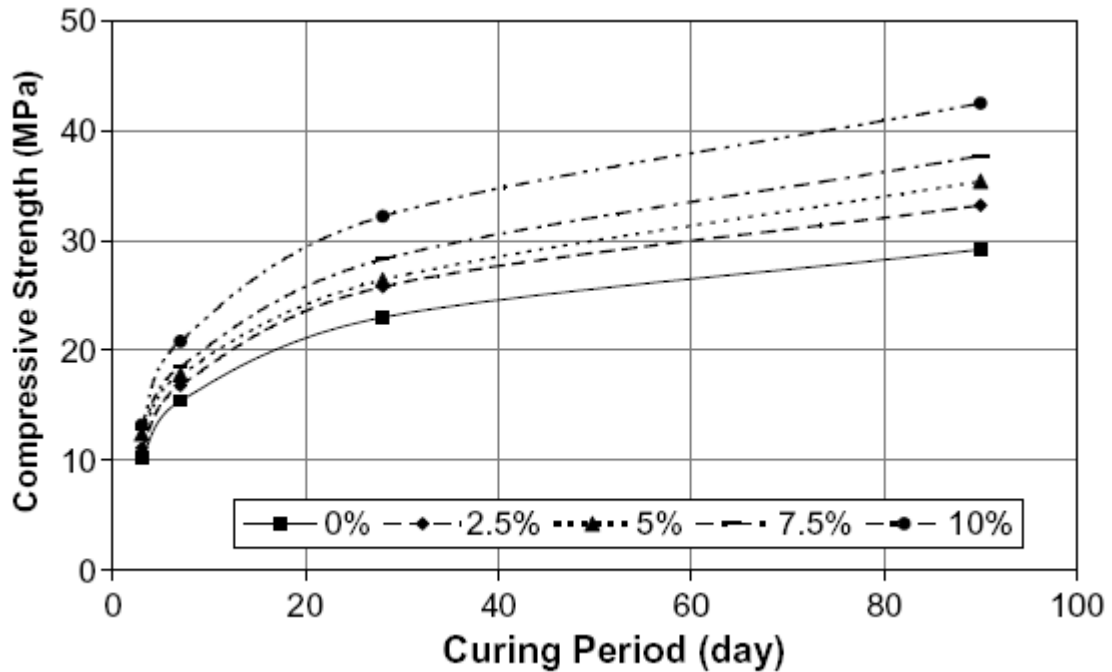
Οι Biel και Lee (1996) ανέφεραν ότι ο τύπος τσιμέντου έχει σημαντικές επιπτώσεις στη θλιπτική αντοχή του rubber concrete. Χρησιμοποίησαν δύο τύπους τσιμέντου, τσιμέντο οξυχλωριδίων μαγνησίου και τσιμέντο του Πόρτλαντ, στην παραγωγή rubber concrete. Το ποσοστό της αντικατάστασης του μέρους λεπτών αδρανών με ελαστικό ποικίλει από 0% έως

90% σε βάρος. Παρατηρήθηκε απώλεια 90% σε θλιπτική αντοχή τόσο για το σύνθετο σκυρόδεμα με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ (PCRC) όσο και για το σύνθετο σκυρόδεμα με τσιμέντο οξυχλωριδίων μαγνησίου (MOCRC). Το σκυρόδεμα τσιμέντου οξυχλωριδίων μαγνησίου παρουσίασε περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή έναντι του σκυροδέματος με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ τόσο με όσο και χωρίς την προσθήκη του ελαστικού. Όσον αφορά στην καμπτική αντοχή, τα δείγματα με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ, που δημιουργήθηκαν με 25% ποσοστό ελαστικού ως προς το συνολικό όγκο, διατήρησαν 20% της καμπτικής αντοχής τους, ενώ τα δείγματα τσιμέντου οξυχλωριδίων μαγνησίου με το ίδιο περιεχόμενο ελαστικού διατήρησαν 34% της καμπτικής αντοχής τους.

2.2.2.1 Θλιπτική αντοχή

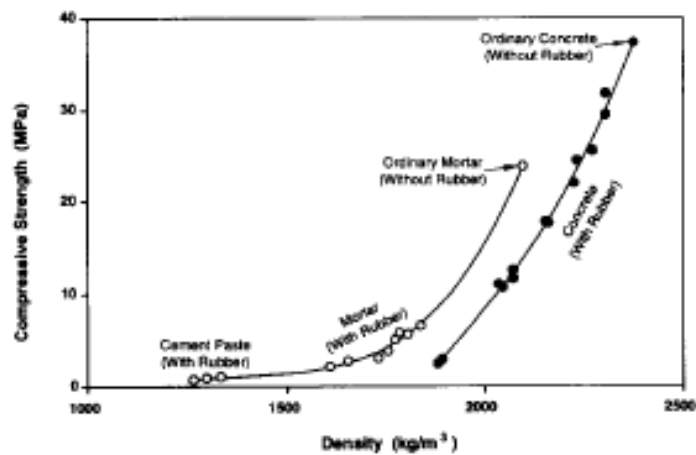
Ο Al-Akhras παρουσίασε (βλ. Διάγραμμα 2.8) την ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής για το χρονικό διάστημα 3, 7, 28, και 90 ημερών για το μίγμα που περιέχει ποσοστό 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, και 10% TRA. Το ποσοστό ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής είναι σχετικά υψηλό μεταξύ των 3 και 7 ημερών. Μεταξύ 28 και 90 ημερών, το ποσοστό ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής είναι σχετικά μικρό. Η γρήγορη ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος που περιέχει τα διαφορετικά επίπεδα TRA (Tire rubber ash) κατά τη διάρκεια των 3 και 7 ημερών δείχνει τη γρήγορη ενυδάτωση. Η ποσοστιαία αύξηση σε θλιπτική αντοχή για κάθε επίπεδο TRA ήταν υψηλότερη αρχικά. Η θλιπτική αντοχή των δειγμάτων κονιάματος αυξήθηκε με την αύξηση του TRA για όλα τα χρονικά διαστήματα (3, 7, 28 και 90 ημέρες).

Η αύξηση στη θλιπτική αντοχή των δειγμάτων κονιάματος σε 7 ημέρες ήταν 9%, 16%, 20%, και 35% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα. Η ποσοστιαία αύξηση στη θλιπτική αντοχή των δειγμάτων σε 28 ημέρες ήταν 12%, 14%, 23%, και 40% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα. Η ποσοστιαία αύξηση της θλιπτικής αντοχής των δειγμάτων κονιάματος των 90 ημερών ήταν 14%, 21%, 29%, και 45% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα. Η αύξηση στην αντοχή του μίγματος (θλιπτική και καμπτική) με την περιεκτικότητα TRA μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το TRA συμπεριφέρεται ως υλικό πληρώσεως στα μείγματα rubber concrete.



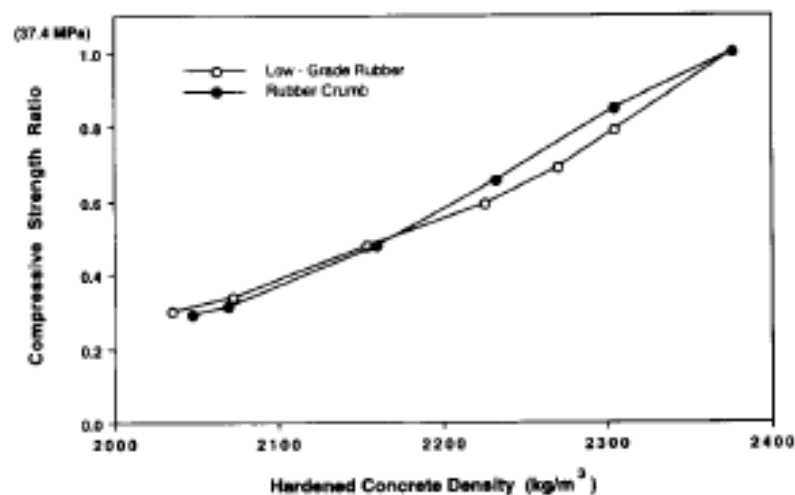
Διάγραμμα 2.8: Επίδραση της TRA στη χρονική εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής

Το Διάγραμμα 2.9 παρουσιάζει τη μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σύνθετου σκυροδέματος για διάφορα ποσοστά ελαστικού. Επίσης δείχνει ότι, για παρόμοια πυκνότητα, οι μειώσεις της θλιπτικής αντοχής των μειγμάτων σκυροδέματος ήταν πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των άλλων μειγμάτων. Πολλές μεταβλητές (αναλογία N/T, συνολικό περιεχόμενο ελαστικού, κ.λπ.) περιλήφθηκαν στις δοκιμές αυτές, και επομένως δεν θα ήταν δυνατό να εξηγηθούν πλήρως οι λόγοι για τη συμπεριφορά που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.9 (π.χ. σχηματισμός μικρορωγμών, κλπ).



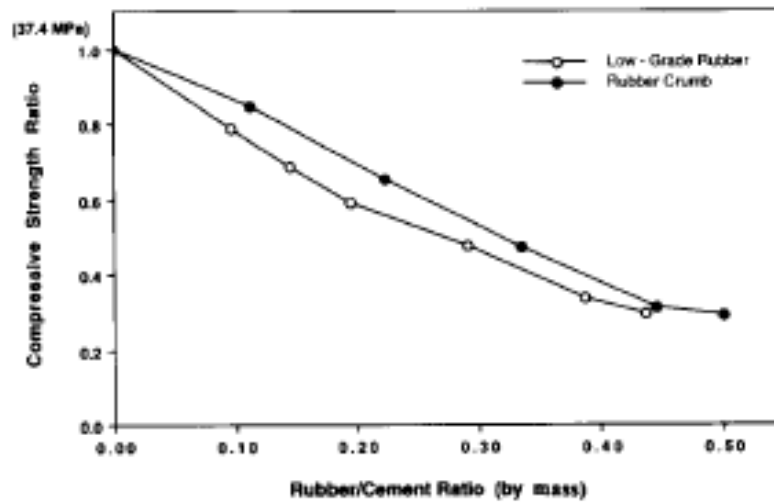
Διάγραμμα 2.9: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της πυκνότητας για διάφορα μίγματα

Δοκίμια σκυροδέματος που έγιναν με την προσθήκη ελαστικών τεμαχίων και έχοντας παρόμοια πυκνότητα, εμφανίστηκαν να παρουσιάζουν παρόμοιες θλιπτικές αντοχές. Το Διάγραμμα 2.10 παρουσιάζει τη μεταβολή στη θλιπτική αντοχή (η αντοχή του σκυροδέματος με το ελαστικό σε σχέση με αυτό χωρίς το ελαστικό) σε σχέση με την πυκνότητα του σκυροδέματος. Το σχήμα δείχνει ότι τα σκυροδέματα που περιέχουν οποιοδήποτε τύπο ελαστικού είχαν παρόμοια θλιπτική αντοχή όταν η πυκνότητα του σκυροδέματος ήταν κάτω από 2150kg/m³. Για μεγαλύτερη πυκνότητα, οι θλιπτικές αντοχές των σκυροδεμάτων που περιέχουν κομμάτια ελαστικού ήταν ελαφρώς υψηλότερες, με μια μέγιστη αύξηση περίπου 10%.



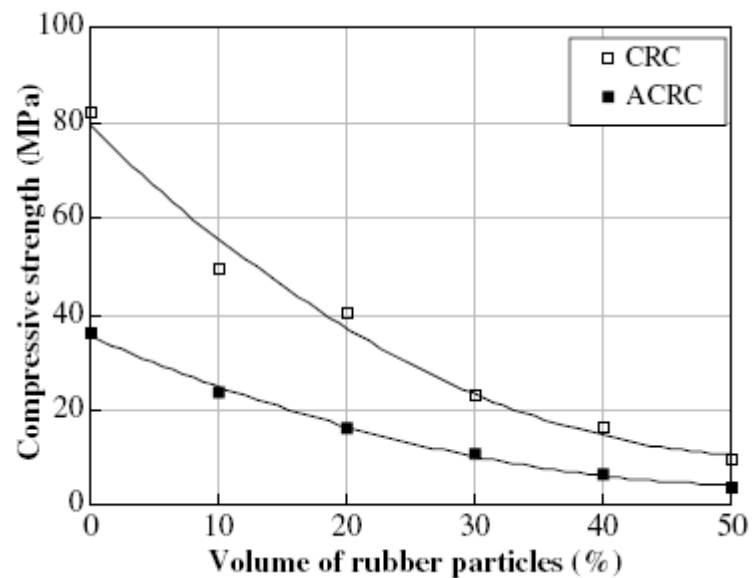
Διάγραμμα 2.10: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ανάλογα με την πυκνότητα του σύνθετου σκυροδέματος

Η επίδραση του ποσοστού και του τύπου ελαστικού στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος φαίνεται στο Διάγραμμα 2.11. Γενικά το σκυρόδεμα που περιέχει ελαστικό είχε μια υψηλότερη θλιπτική αντοχή από το σκυρόδεμα που περιέχει πιο λεπτόκοκκα ελαστικά, για παρόμοια αναλογία τσιμέντου/ελαστικού με μέγιστη διαφορά στην αντοχή περίπου 15%. Εντούτοις, η διαφορά στη θλιπτική αντοχή εμφανίστηκε να είναι αμελητέα για τα σκυροδέματα με αναλογίες ελαστικού/τσιμέντου 0,45 και άνω.



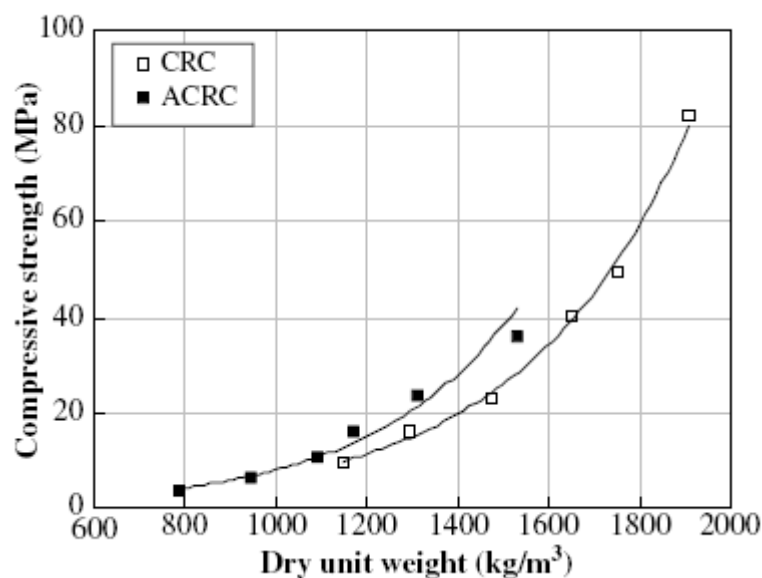
Διάγραμμα 2.11: Επιρροή του είδους του ελαστικού και του ποσοστού του στη θλιπτική αντοχή του σύνθετου σκυροδέματος

Ο Bennazouk (2006) παρουσίασε τα παρακάτω διαγράμματα που έδειξαν ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του ελαστικού μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στη μελέτη του χρησιμοποίησε τα υλικά τύπου ACRC (aerated cement rubber composite) και CRC (cement rubber composite). Οι τιμές αντοχής είναι περίπου 10,5 MPa για δείγματα CRC και 3,8 MPa για ACRC, όταν περιέχουν 50% ποσοστό ελαστικού.



Διάγραμμα 2.12: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού ελαστικού

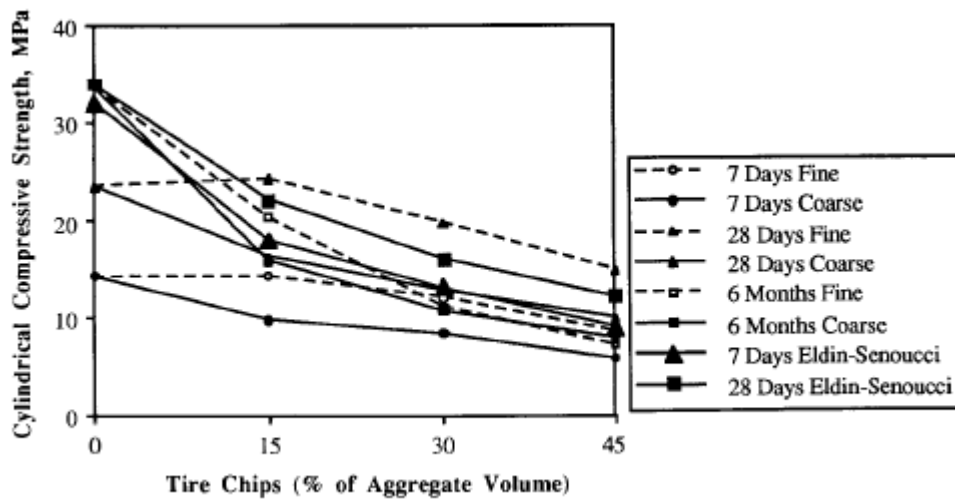
Το Διάγραμμα 2.13 παρουσιάζει μια σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και της πυκνότητας του μείγματος. Είναι εμφανές ότι μείωση της πυκνότητας (ρ) προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής R_c (MPa). Οι ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις: $R_c=0.0423*\exp(0.0027\rho)$ και $R_c=0.0365*\exp(0.0031\rho)$ (με συντελεστές συσχέτισης $R^2=0,99$ και $R^2=0.98$, αντίστοιχα), προτάθηκαν για τα δείγματα ACRC και CRC. Επιπλέον, το Διάγραμμα 2.13 δείχνει ότι για το ίδιο ξηρό ειδικό βάρος, το δείγμα ACRC έχει υψηλότερη θλιπτική αντοχή από το δείγμα CRC. Για το ίδιο ξηρό ειδικό βάρος, το δείγμα ACRC έχει επίσης χαμηλότερες αναλογίες N/T.



Διάγραμμα 2.13: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της πυκνότητας

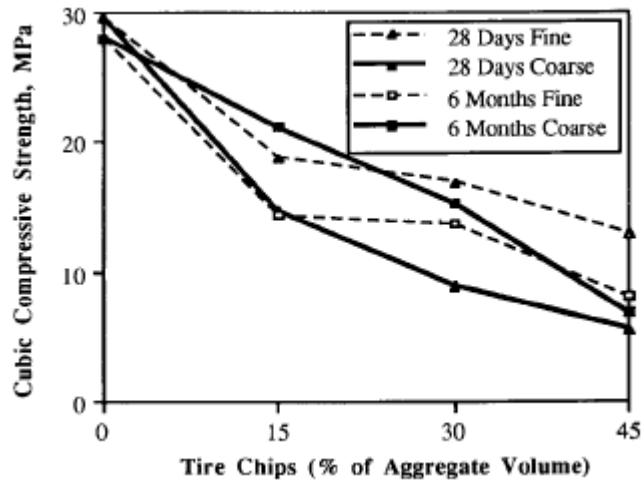
Ο Torcu στα Διαγράμματα 2.14 και 2.15 αναφέρει τις τιμές της θλιπτικής αντοχής για το σύνθετο σκυρόδεμα. Όπως φαίνεται σε αυτά τα σχήματα, οι τιμές αντοχής του σκυροδέματος μειώνονται αρκετά με αυξανόμενο το ποσοστό των μικροτεμαχίων ελαστικών στο τέλος των 7, 28 ημερών και 6 μηνών. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.14, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε 7 ημέρες είναι 14,27 MPa. Εντούτοις, μειώνεται σε 14.16, 12.00, και 8.54 MPa με την προσθήκη 15, 30, και 45% των λεπτών μικροτεμαχίων ελαστικών, αντίστοιχα. Επιπλέον, μειώνεται σε 9.68, 8.38 και 5.80 MPa με την προσθήκη των ανωτέρω ποσοστών των χοντροειδών ελαστικών κομματιών. Ενώ η θλιπτική αντοχή του κανονικού σκυροδέματος των 28 ημερών ήταν 23.48 MPa, με την προσθήκη των λεπτόκκοκων ελαστικών μειώθηκε ως 24.22, 19.70 και 14.77 MPa. Επιπλέον, μειώθηκε σε

16.18, 12.62, και 9.90 Mpa με την προσθήκη των χονδρόκοκκων μικροτεμαχίων ελαστικών. Για τα δείγματα των έξι μηνών η τιμή της αντοχής του κανονικού σκυροδέματος ήταν 33.67 Mpa. Εντούτοις, βρέθηκε ως 20.23, 11.06, και 7.16 Mpa με το μείγμα λεπτών λωρίδων ελαστικών, και 15.75, 10.82, και 7.72 Mpa με το μείγμα παχύτερων λωρίδων ελαστικών.



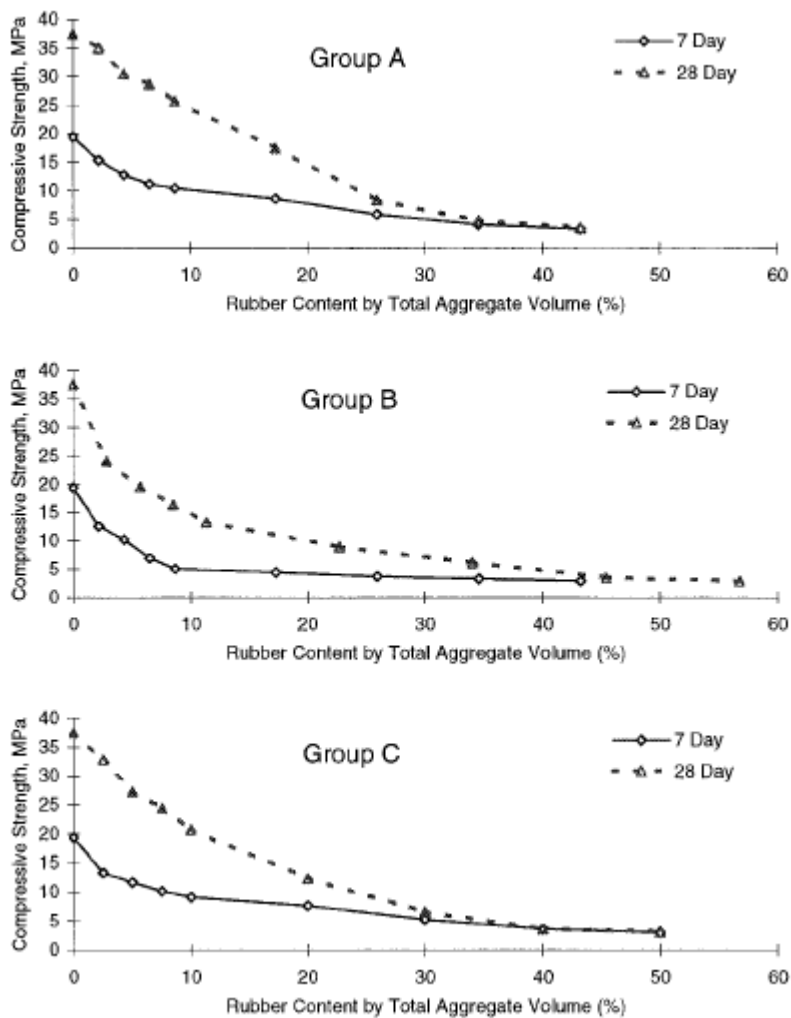
Διάγραμμα 2.14: Χρονική μεταβολή στη θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου ανάλογα με το ποσοστό ελαστικού

Το Διάγραμμα 2.15 παρουσιάζει τη θλιπτική αντοχή όσον αφορά στα ποσοστά των κομματιών ελαστικών που προστίθενται. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η θλιπτική αντοχή του C20 κανονικού σκυροδέματος των 28 ημερών ήταν 29.50 Mpa. Στη συνέχεια υπολογίστηκε 18.80, 16.90, και 12.90 Mpa για την προσθήκη 15, 30 και 45% των λεπτών ελαστικών chip, και 14.60, 8.91, και 5.51 Mpa για την προσθήκη του ίδιου ποσού χονδροειδών ελαστικών chip, αντίστοιχα. Για τους 6 μήνες, η θλιπτική αντοχή ήταν 28.00 Mpa για το κανονικό σκυρόδεμα ενώ μειώθηκε σε 14.40, 13.60 και 8.00 Mpa, και 21.00, 15.27, και 6.87 Mpa για την προσθήκη των λεπτών και χονδροειδών ελαστικών κομματιών, αντίστοιχα. Αυτό υποδηλώνει ότι τα χονδροειδή κομμάτια ελαστικού μειώνουν τις θλιπτικές αντοχές περισσότερο από ότι τα λεπτά chip ελαστικού.



Διάγραμμα 2.15: Χρονική μεταβολή στη θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου ανάλογα με το ποσοστό ελαστικού

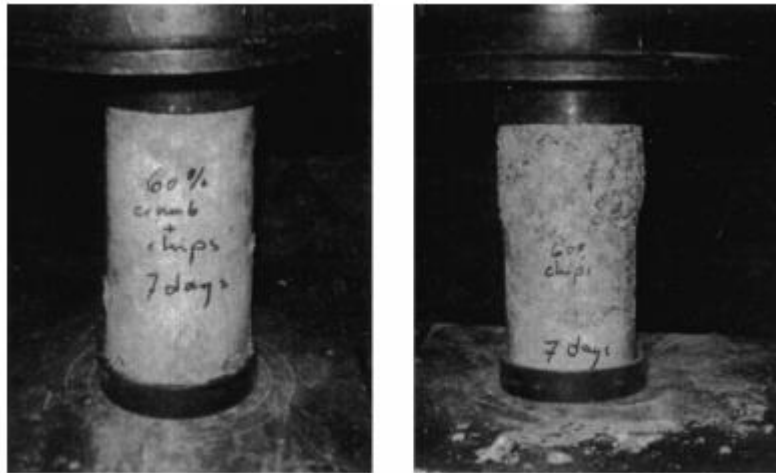
Οι Eldin και Senoucci ανέφεραν απώλειες μέχρι 85% στη θλιπτική αντοχή και μέχρι 50% στην εφελκυστική αντοχή. Όπως αναφέρεται όμως στην ίδια εργασία, το rubber concrete έχει τη δυνατότητα να υποβληθεί σε μεγαλύτερη ελαστική παραμόρφωση πριν από την αστοχία. Τα δείγματα που περιέχουν το ελαστικό δεν επέδειξαν τόσο ψαθυρή αστοχία υπό θλίψη λόγω της πλαστιμής συμπεριφοράς του ελαστικού. Ο διαχωρισμός ήταν βαθμιαίος ανάλογα με τον τύπο και το ποσοστό ελαστικού. Οι Khatib- Bayomy παρουσίασαν επίσης την επίδραση του ποσοστού του ελαστικού στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στο Διάγραμμα 2.16 παρατηρούμε μια συστηματική μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ελαστικό.



Διάγραμμα 2.16: Επίδραση του ποσοστού του ελαστικού στη θλιπτική αντοχή

Η αρχική θλιπτική αντοχή των 28 ημερών ήταν περίπου 38 MPa για το κανονικό σκυρόδεμα και μειώθηκε σε σχεδόν 3 MPa όταν έγινε πλήρης αντικατάσταση των χονδροειδών αδρανών από τα κομμάτια ελαστικών. Για το μίγμα με την αντικατάσταση κομματιών με ελαστικό, η αντοχή μειώθηκε περίπου σε 3,6 και 3,2 Mpa για τα μίγματα με αντικατάσταση ελαστικών κομματιών (crumb) και τσιπ (chip), αντίστοιχα. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου ένα 90% στη μείωση της αντοχής των 28 ημερών όταν αντικαθίσταται το 100% του συνολικού όγκου από το ελαστικό. Εντούτοις, για την αντοχή των 7 ημερών, το ποσοστό της μείωσης αντοχής ήταν πολύ λιγότερο από αυτή των 28 ημερών. Αν και η μείωση της αντοχής είναι βεβαίως μια αρνητική ιδιότητα που μπορεί να εμποδίσει τη χρήση του ελαστικού, κάποιος μπορεί να δει και τη θετική επίδραση που έχει στη μορφή αστοχίας. Παρατηρήθηκε σε όλες τις δοκιμές ότι για αύξηση του περιεχόμενου

ελαστικού τα δείγματα τείνουν να αστοχήσουν βαθμιαία με κωνική μορφή αστοχίας (βλ. φωτογραφίες 2.2 και 2.3). Τα δείγματα άντεξαν μια πολύ υψηλότερη παραμόρφωση από το μίγμα ελέγχου κανονικού σκυροδέματος. Με το περιεχόμενο ελαστικού κοντά σε 60%, τα δείγματα είχαν μια σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, η δυνατότητα να παραμορφωθούν πλαστικά αυξάνεται σημαντικά.



(a) Typical Mode of Failure in Compression for Rubberized PCC Mixtures

Εικόνα 2.2. Φάσεις αστοχίας κυλινδρικών δοκιμών



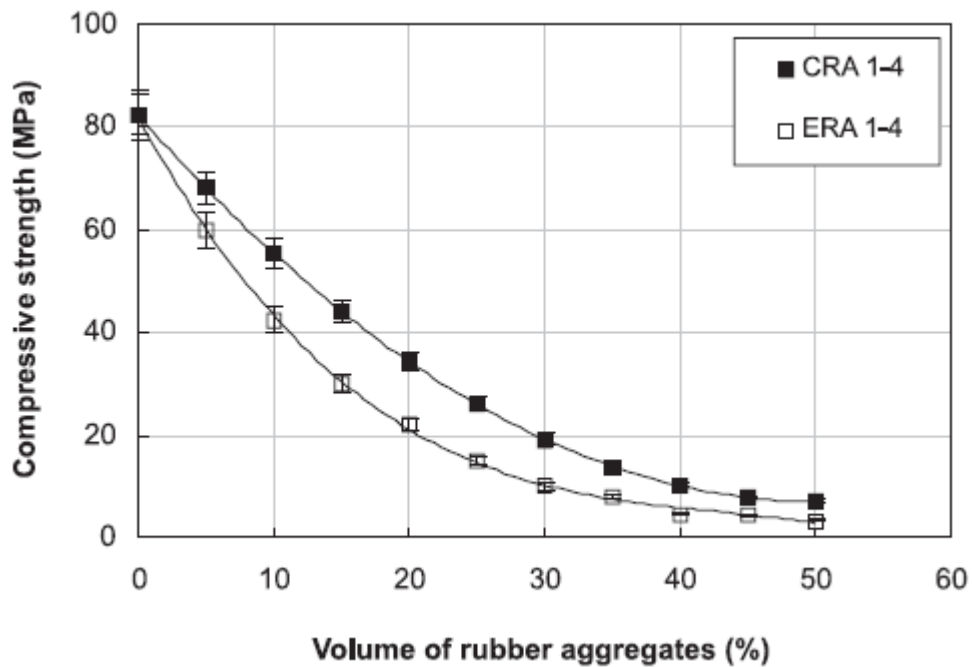
(b) Distribution of Crumb and Chip Particles in the Rubberized PCC Mixtures

Εικόνα 2.3. Εικόνες κυβικών δοκιμών

Πίνακας 2.6: Πειραματικά αποτελέσματα των φυσικών – μηχανικών ιδιοτήτων της σύνθεσης τσιμέντου – ελαστικού.

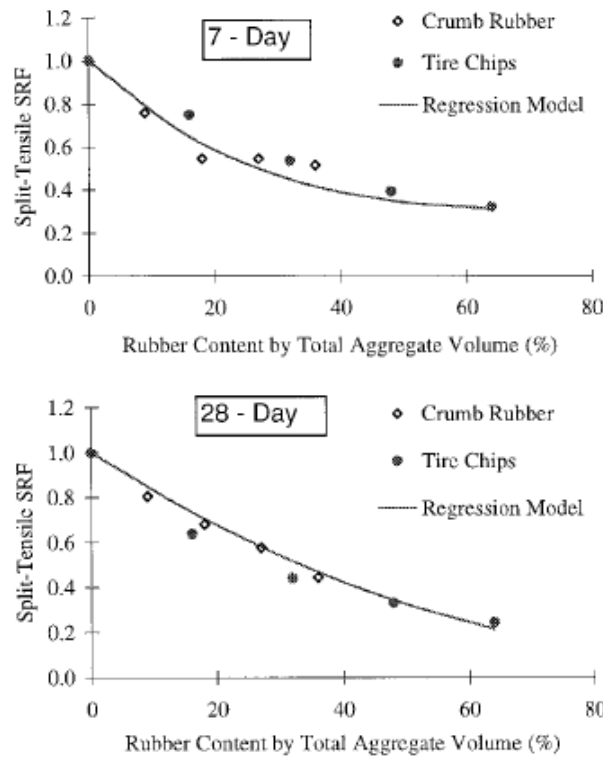
Volume of rubber (%)	Sieve size (mm)	ρ (kg/m ³)		E_d^* (MPa)		R_c (MPa)		R_F (MPa)		E (MPa)	
		CRAC	ERAC	CRAC	ERAC	CRAC	ERAC	CRAC	ERAC	CRAC	ERAC
0		1832.5	1832.5	25,397	25,397	82.5	82.5	3.38	3.38	20,000	20,000
5	1-4	1785.8	1724.0	23,000	18,400	68.0	59.0	3.4	3.6	–	–
	4-8	1793.6	1735.5	23,800	19,400	63.0	54.0	3.2	3.3	–	–
	8-12	1800.0	1748.0	24,600	19,700	60.5	51.0	3.00	3.0	–	–
10	1-4	1740.5	1630.0	20,015	17,409	55.0	42.0	3.52	3.6	15,000	12.5
	4-8	1757.0	1655.0	21,850	18,455	48.0	36.0	3.35	3.5	14,000	12,000
	8-12	1773.5	1683.0	23,809	18,952	43.0	32.0	3.23	3.2	12,000	12,000
15	1-4	1698.0	1548.0	20,337	14,222	44.0	30.0	3.56	3.8	–	–
	4-8	1723.0	1587.0	21,040	15,238	36.0	27.0	3.37	3.5	–	–
	8-12	1747.5	1627.0	21,424	16,031	31.0	24.0	3.25	3.0	–	–
20	1-4	1672.0	1477.0	18,053	11,174	34.0	22.0	3.67	3.9	12,000	9000
	4-8	1690.0	1528.0	19,079	12,169	27.0	16.0	3.56	3.7	10,000	8000
	8-12	1722.0	1578.0	19,963	13,170	21.0	14.0	3.42	3.5	9000	7000
25	1-4	1606.0	1415.0	16,145	9159	26.0	15.0	3.57	3.8	–	–
	4-8	1661.0	1477.0	16,961	10,428	20.0	13.0	3.24	3.4	–	–
	8-12	1700.0	1537.0	18,183	11,682	15.0	11.0	3.00	3.2	–	–
30	1-4	1578.0	1362.0	13,699	7285	19.0	10.0	3.42	3.6	10,000	8000
	4-8	1626.0	1433.0	15,313	8444	15.0	7.0	3.00	3.3	9000	7500
	8-12	1677.0	1502.0	16,565	10,603	10.0	6.0	2.68	2.8	8000	6000
35	1-4	1553.0	1314.0	12,303	6206	14.0	8.0	3.25	3.6	–	–
	4-8	1608.0	1395.0	13,187	7460	11.0	6.5	3.00	3.0	–	–
	8-12	1668.0	1470.0	14,780	8984	7.0	5.0	2.35	2.5	–	–
40	1-4	1522.0	1274.0	10,621	5079	10.0	6.0	2.85	3.3	7000	6500
	4-8	1562.0	1362.0	12,081	6507	8.0	5.0	2.30	2.7	6000	5000
	8-12	1636.0	1443.0	13,542	8412	5.0	3.5	2.00	2.0	5000	3500
45	1-4	1494.0	1238.0	10,029	4445	8.0	4.0	2.40	3.5	–	–
	4-8	1563.0	1334.0	11,105	6031	6.0	3.5	1.80	3.0	–	–
	8-12	1607.0	1420.0	12,930	7785	4.0	2.5	1.50	2.5	–	–
50	1-4	1438.0	1195.0	9730	4126	6.5	3.4	2.40	2.8	–	–
	4-8	1526.0	1288.0	10,566	5558	5.0	2.6	1.80	2.4	–	–
	8-12	1599.5	1373.0	12,120	6667	3.5	2.0	1.50	2.0	–	–

Ο Bennazouk (2002) χρησιμοποίησε CRA και ERA μείγματα προκειμένου να εξάγει συμπεράσματα όσον αφορά στη θλιπτική αντοχή σε σχέση με την περιεκτικότητα του ελαστικού. Η θλιπτική αντοχή της 28^{ης} ημέρας, για μέγεθος τεμαχιδίων του ελαστικού 1-4 mm, παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.17 και όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6. Οι τιμές της αντοχής ήταν υψηλότερες με CRA. Η θλιπτική αντοχή μειώνεται αρκετά όταν αυξάνεται το ποσοστό των ελαστικών. Αυτή η τάση επηρεάζεται ελαφρώς από το μέγεθος του ελαστικού, εντούτοις, για ένα δεδομένο ποσοστό ελαστικών λεπτότερα μεγέθη οδήγησαν σε χαμηλότερες απώλειες σε θλιπτική αντοχή από ότι τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια, λόγω της αυξημένης ομοιομορφίας στη διαβάθμιση.



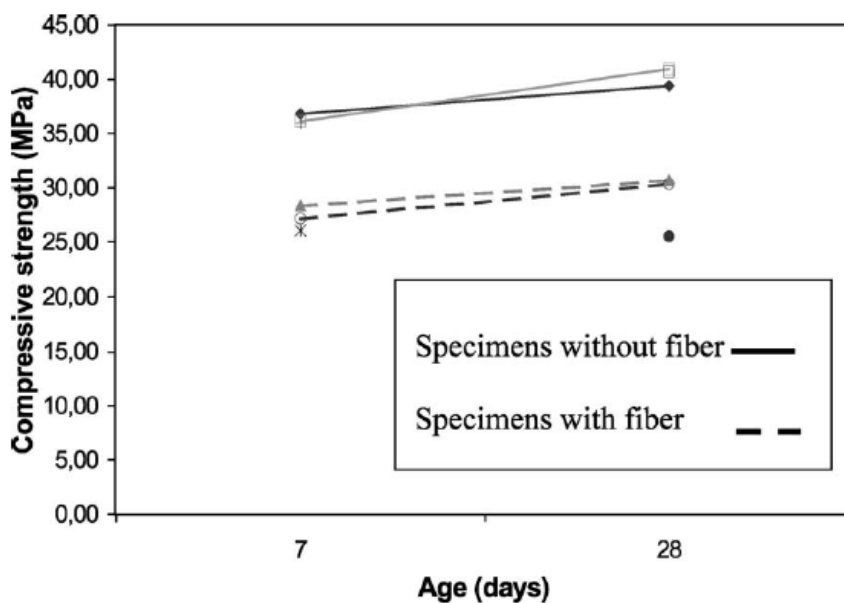
Διάγραμμα 2.17: Μεταβολή θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ποσοστό ελαστικού

Το Διάγραμμα 2.18 δείχνει ότι για το ίδιο ειδικό βάρος, η θλιπτική αντοχή είναι υψηλότερη με την ERA απ' ό τι με CRA. Αυτή η διαφορά μειώνεται καθώς το μέγεθος των ελαστικών μορίων αυξάνεται. Με μια πρώτη ματιά, αυτό το φαινόμενο είναι σε αντίφαση με τα παρατηρημένα αποτελέσματα, με τα οποία το ειδικό βάρος αυξάνεται καθώς τα μεγέθη των τεμαχίων ελαστικού αυξάνονται.



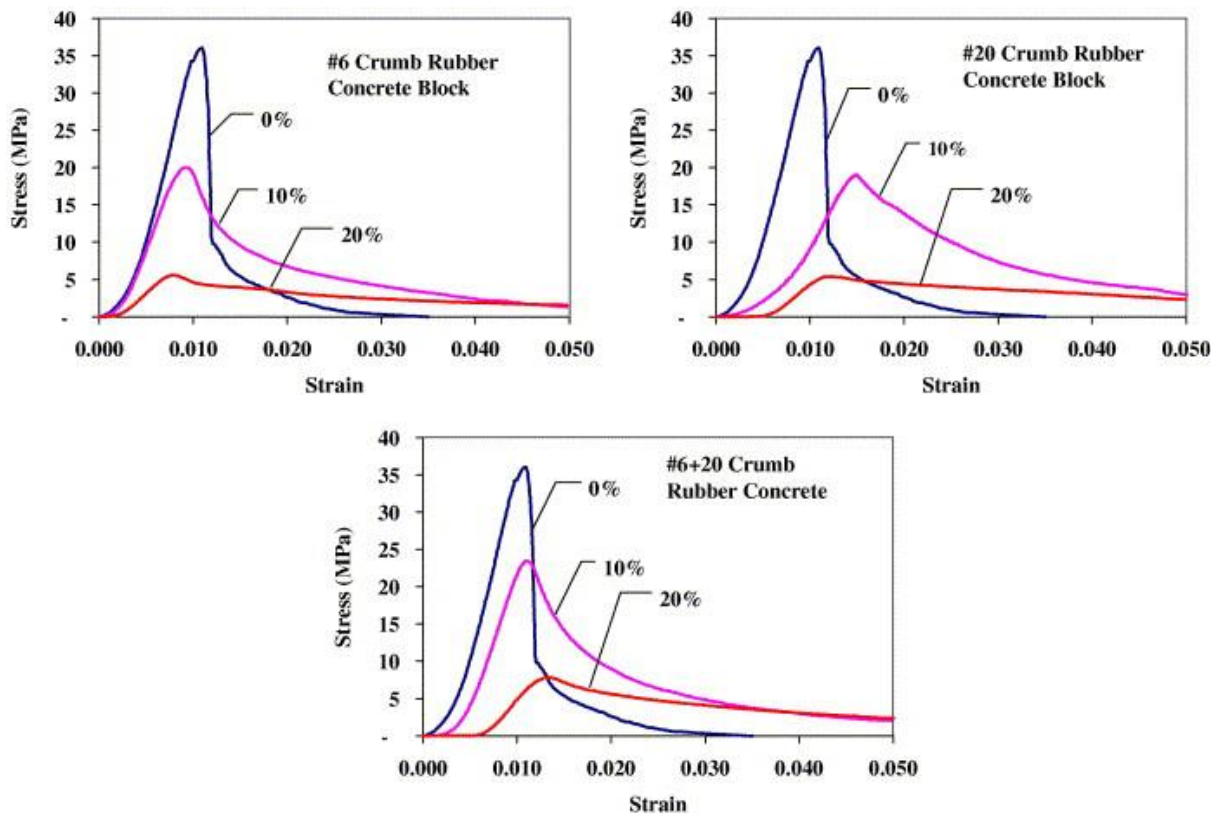
Διάγραμμα 2.18: Γραφική παράσταση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ξηρό ειδικό βάρος των μιγμάτων

Τα αποτελέσματα των Hernandez και Olivares (2002) (βλ. Διάγραμμα 2.19) έδειξαν ότι η θλιπτική αντοχή των δειγμάτων που εξετάζονται δείχνουν ότι το σκυρόδεμα από ελαστικό είχε μια χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή 23 Μpa, ενώ για το απλό σκυρόδεμα ήταν 36 Μpa. Οι μέσες τιμές αντοχών ήταν 29 και 40 Μpa, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2.19: Θλιπτική αντοχή για 7 και 28 ημέρες

Οι Sukontasukkul και Chaikaew έδειξαν επίσης ότι οι θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος επηρεάστηκαν όχι μόνο από τη περιεκτικότητα του ελαστικού αλλά και από το μέγεθος των ελαστικών (crumb). Όσον αφορά στη μη-γραμμικότητα του σύνθετου υλικού, αυτή μεγαλώνει με την αύξηση της περιεκτικότητας ελαστικού (Πίνακας 2.7 και Διάγραμμα 2.20). Εντούτοις, από την άποψη της ανθεκτικότητας, το μείγμα σκυρόδεμα-ελαστικό βρέθηκε να είναι καλύτερο από το κανονικό σκυρόδεμα όπως φαίνεται από τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα (πίνακας 2.11).



Διάγραμμα 2.20: Θλιπτική αντοχή - παραμόρφωση μιγμάτων με ελαστικά crumb

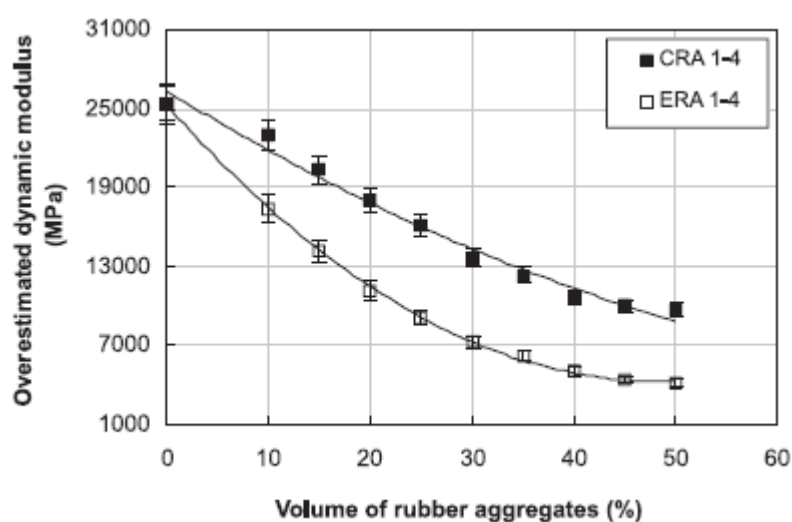
Πίνακας 2.7. Θλιπτική αντοχή και ενεργειακή πυκνότητα

Μίγμα Ελέγχου	Αντοχή (Μpa)	Ενεργειακή πυκνότητα (Μpa)
610	19,96	0,32
620	5,58	0,19
2010	19,08	0,35
2020	5,4	0,21
62010	23,44	0,39
62020	7,85	0,24

Παρατηρήθηκε ότι με την αλλαγή των αδρανών υλικών του κανονικού σκυροδέματος με ελαστικά, η αντοχή του σκυροδέματος μειώθηκε σημαντικά, ενώ η ανθεκτικότητα αυξήθηκε. Συγκρίνοντας τα μείγματα τριών ελαστικών crumb, το μείγμα που γίνεται από το ελαστικό του μικτού μεγέθους crumb (No. 6 + 20) φάνηκε να συμπεριφέρεται καλύτερα από εκείνα που έγιναν από έναν ενιαίο τύπο crumb. Αυτό οφειλόταν ίσως στην καλύτερη συμπίεση και την υψηλότερη πυκνότητα που πρόσφερε ο συνδυασμός των ελαστικών crumb.

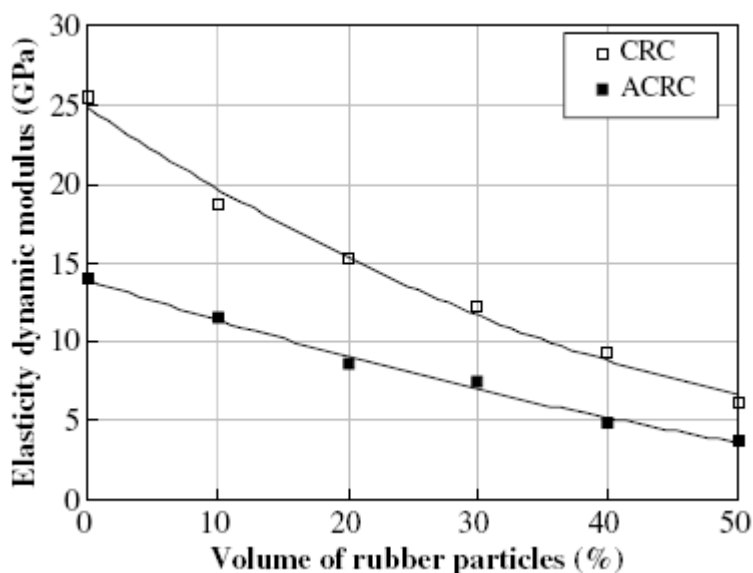
2.2.2.2 Μέτρο ελαστικότητας

Οι αλλαγές στο μέτρο ελαστικότητας για τα διαφορετικά μεγέθη των κόκκων ελαστικών παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.21. Οι τιμές μειώνονται από περίπου 20.000 έως 10.000 MPa και σε 4000 MPa για τον τύπο CRA και ERA, αντίστοιχα, για δείγμα που περιέχει ελαστικό 50% έναντι του κανονικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ελαστικότητας του CRA είναι πέντε φορές μεγαλύτερος από αυτός του ERA.



Διάγραμμα 2.21: Μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας για τα διαφορετικά ποσοστά ελαστικού

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του Bennazouk (2006) του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας των δειγμάτων ACRC και CRC συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ελαστικά μόρια δίνονται στο Διάγραμμα 2.22. Οι καμπύλες δείχνουν ότι για ένα ποσοστό 50% ελαστικού το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται περίπου 6,2 και 3,7 GPa. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μείωση περίπου 40%.

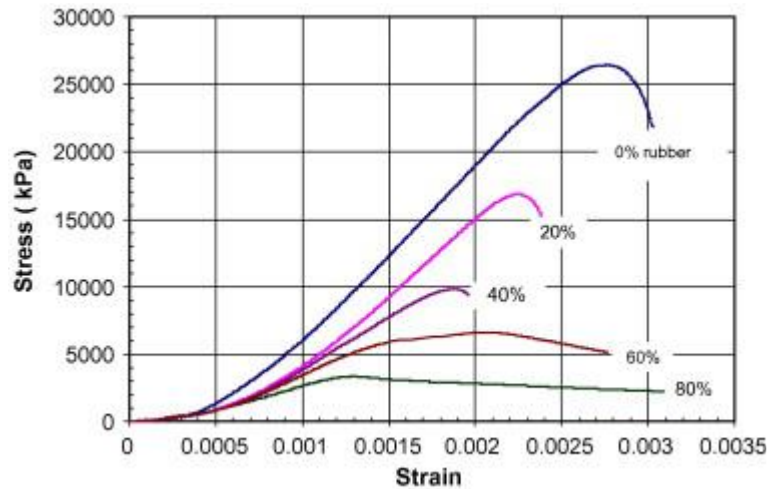


Διάγραμμα 2.22: Μεταβολή του δυναμικού συντελεστή ελαστικότητας με το ποσοστό του ελαστικού

2.2.2.3 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων

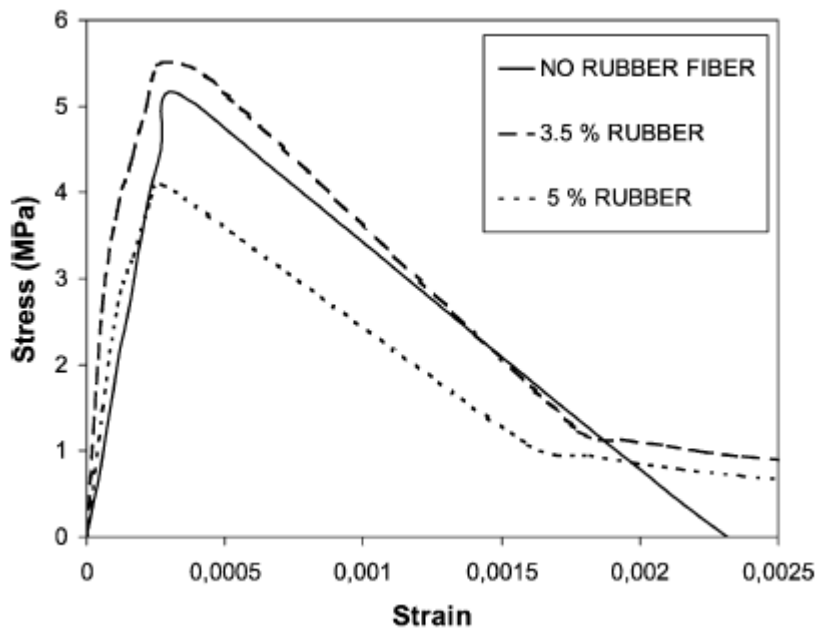
Στην έρευνα του Batayneh παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης (stress-strain) για διαφορετικό ποσοστό ελαστικού. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) των δειγμάτων που περιέχουν ελαστικό μέχρι 40% συμπεριφέρονται με παρόμοια τάση στο αρχικό δείγμα, αλλά έχοντας μια μικρότερη κορύφωση. Από τα αποτελέσματα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει γραμμική αύξηση των πιέσεων έως ότου φθάσει στην αιχμή προτού απελευθερωθεί η ενέργεια από το σπάσιμο του μείγματος. Για αυτήν την περίπτωση, τα δείγματα συμπεριφέρθηκαν όπως ένα ψαθυρό υλικό του οποίου η συνολική ενέργεια που παράγεται κατά την αστοχία είναι ελαστική ενέργεια. Εντούτοις, η μη-γραμμική συμπεριφορά φαίνεται για τα άλλα δύο δείγματα που περιέχουν ελαστικό 60% και 80%. Εδώ, μόλις επιτευχθεί η μέγιστη τάση, το δείγμα συνεχίζει να παράγει. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά των σκληρών υλικών που έχουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους να παράγεται κατά την αστοχία ως πλαστική ενέργεια. Η πλαστική ενέργεια ορίζεται ως το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να παραγάγει μια συγκεκριμένη

παραμόρφωση μετά από το ελαστικό, η οποία αύξησε τη δυνατότητα του υλικού ακόμα και μετά από το σχηματισμό των ρωγμών. Επομένως, μπορεί να δηλωθεί ότι το σκυρόδεμα με ένα υψηλότερο ποσοστό του κομματιών ελαστικού κατέχει υψηλή ανθεκτικότητα, δεδομένου ότι η ενέργεια είναι κυρίως πλαστική.



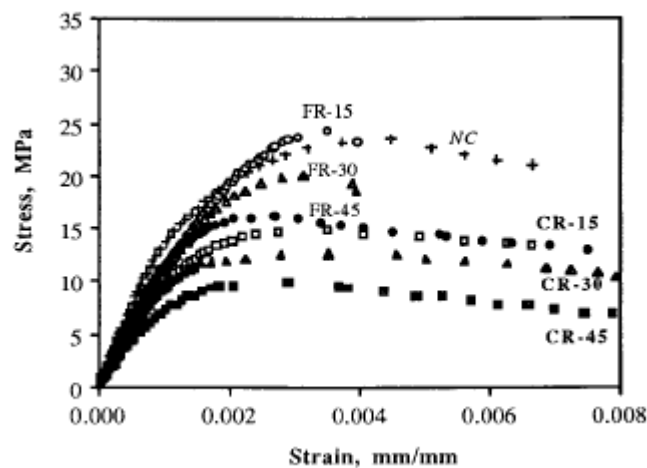
Διάγραμμα 2.23: Σχέση μεταξύ stress και strain για διαφορετικές περιεκτικότητες ελαστικού.

Οι Hernandez και Olivares (2002) παρουσίασαν μια γραφική παράσταση τάσης-παραμόρφωσης με διαφορετική περιεκτικότητα ελαστικού στα μείγματα, (χωρίς ελαστικό, και με 3% ή 5% ελαστικό).



Διάγραμμα 2.24: Μεταβολή τάσης-παραμόρφωσης με διαφορετικό ποσοστό ελαστικού

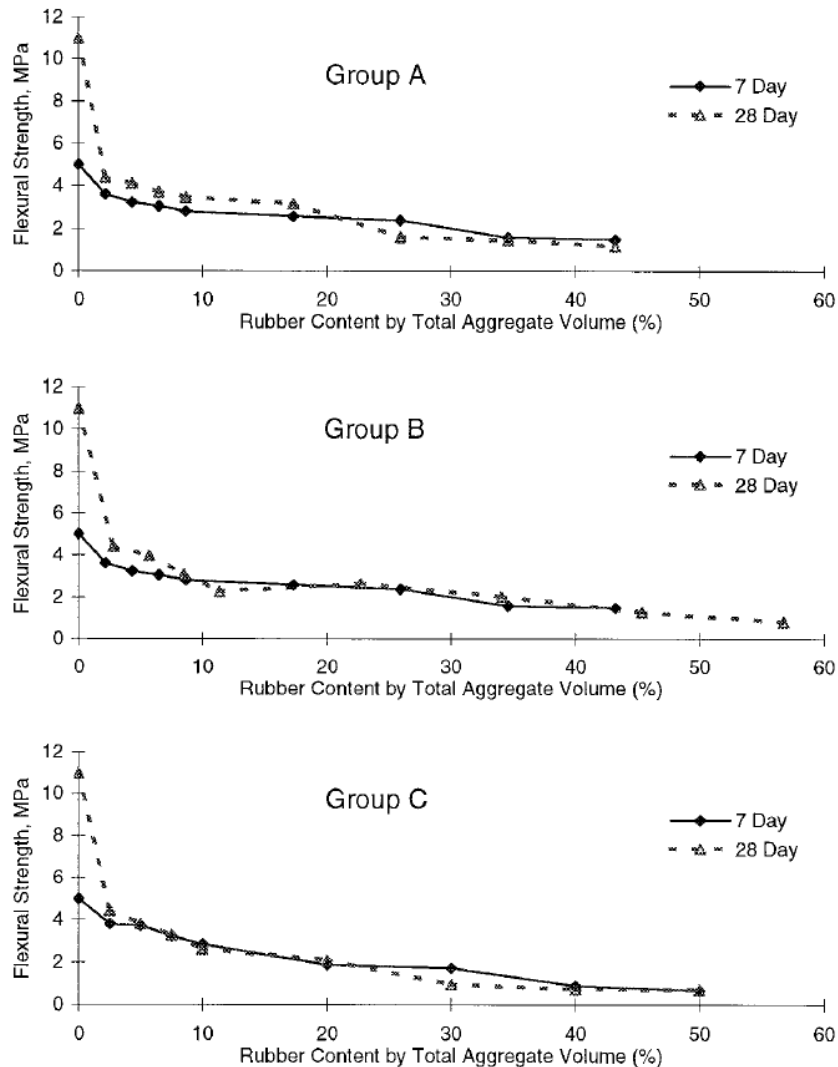
Ο Torcu (1995) πραγματοποίησε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) των επενδυμένων σκυροδεμάτων με ελαστικό. Αν και τα διαγράμματα σ - ϵ των 7, η 28 ημερών και τα έξι μηνών κανονικών και επενδυμένων με καουτσούκ σκυροδεμάτων εξετάστηκαν σε αυτήν την μελέτη, λόγω της ομοιότητάς τους μόνο εκείνα των σκυροδεμάτων 28 ημερών δίνονται στο Διάγραμμα 2.25 για παράδειγμα. Όταν τα διαγράμματα σ - ϵ αυτών των σκυροδεμάτων αναλύονται, μπορεί να φανεί ότι το σκυρόδεμα ελέγχου φθάνει στην τελευταία πίεση περίπου 0.002. Το σκυρόδεμα που έχει το ελαστικό χονδροειδές μείγμα 15% παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά ως κανονικό σκυρόδεμα. Με το μείγμα ελαστικών χονδροειδών μορίων τα μέγιστα σημεία πίεσης πέφτουν ενώ η πίεση αυξάνεται στο σημείο αποτυχίας στην επενδυμένη με καουτσούκ τιμών σκυροδέματος επίσης αλλάζουν μεταξύ 0.003 και 0.005 ενάντια στις μέγιστες πιέσεις.



Διάγραμμα 2.25: Καμπύλες σ - ϵ μιγμάτων κατά την 28η ημέρα

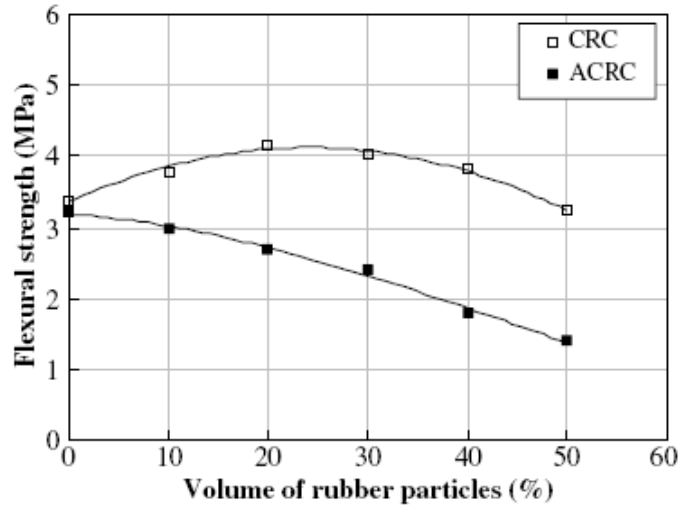
2.2.2.4 Καμπτική αντοχή

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Khatib και Bayomy για την καμπτική αντοχή των μειγμάτων σκυροδέματος παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.26, το οποίο μας δείχνει ότι η καμπτική αντοχή μειώθηκε με την αύξηση του περιεχομένου σε ελαστικό με έναν τρόπο παρόμοιο με αυτόν που παρατηρήθηκε στη θλιπτική αντοχή. Παρατηρήθηκε ότι το αρχικό ποσοστό μείωσης της αντοχής ήταν πιο μεγάλο από αυτό της θλιπτικής αντοχής.



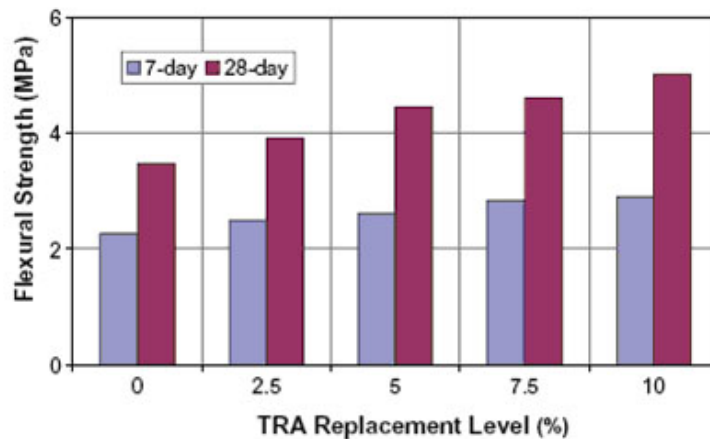
Διάγραμμα 2.26: Μεταβολή της καμπτικής αντοχής σε σχέση με την περιεκτικότητα ελαστικού

Η έρευνα του Bennazouk (2006) για την καμπτική αντοχή σε σχέση με την περιεκτικότητα του ελαστικού παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.27. Παρατηρείται μια μείωση της καμπτικής αντοχής του δείγματος ACRC. Η τιμή μειώνεται από 3,3 έως 1,4 Mpa. Αυτό μας δείχνει ότι η πορώδης δομή του δείγματος υπερισχύει της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας, λόγω της επίδρασης του αέρα. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι για μια δεδομένη αναλογία όγκου ελαστικού, η μείωση στην καμπτική αντοχή του δείγματος ACRC είναι χαμηλότερη από αυτή στη θλιπτική αντοχή, πιθανώς εξαιτίας των ιών πολυπροπυλενίου. Για το δείγμα CRC, οι καμπύλες αποκαλύπτουν μέγιστα σε μια αναλογία όγκου μεταξύ 20% και 30% του ελαστικού περιεχομένου, ως αποτέλεσμα τόσο του μέτρου ελαστικότητας όσο και του μη-εύθραυστου χαρακτηριστικού κάτω από τη φόρτωση του ελαστικού.



Διάγραμμα 2.27: Μεταβολή της καμπτικής αντοχής με την περιεκτικότητα του όγκου ελαστικού

Ο Al-akhras με TRA (Tire rubber ash) παρουσίασε το Διάγραμμα 2.28 που δείχνει την επίδραση της αντικατάστασης του TRA στην καμπτική αντοχή των μειγμάτων σε 7 και 28 ημέρες. Για το μείγμα που περιέχει 10% TRA η καμπτική αντοχή αυξήθηκε από 3,48 Μpa (7 ημέρες) σε 5 Μpa για το κονίαμα που περιέχει 10% TRA σε 28 ημέρες. Η ποσοστιαία αύξηση στην καμπτική αντοχή σε 7 ημέρες ήταν 10%, 15%, 25%, και 28% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα, συγκρινόμενο με το κονίαμα ελέγχου. Οι αντίστοιχες αυξήσεις σε 28 ημέρες ήταν 12%, 27%, 32%, και 43% σε περιεχόμενο TRA 2,5%, 5%, 7,5%, και 10%, αντίστοιχα, έναντι του μείγματος ελέγχου. Η αύξηση σε αντοχή κονιάματος (θλιπτική και καμπτική) με το περιεχόμενο TRA μπορεί να αποδοθεί στη φυσική επίδραση όπου το TRA συμπεριφέρεται ως υλικό πλήρωσης στα μείγματα κονιάματος.



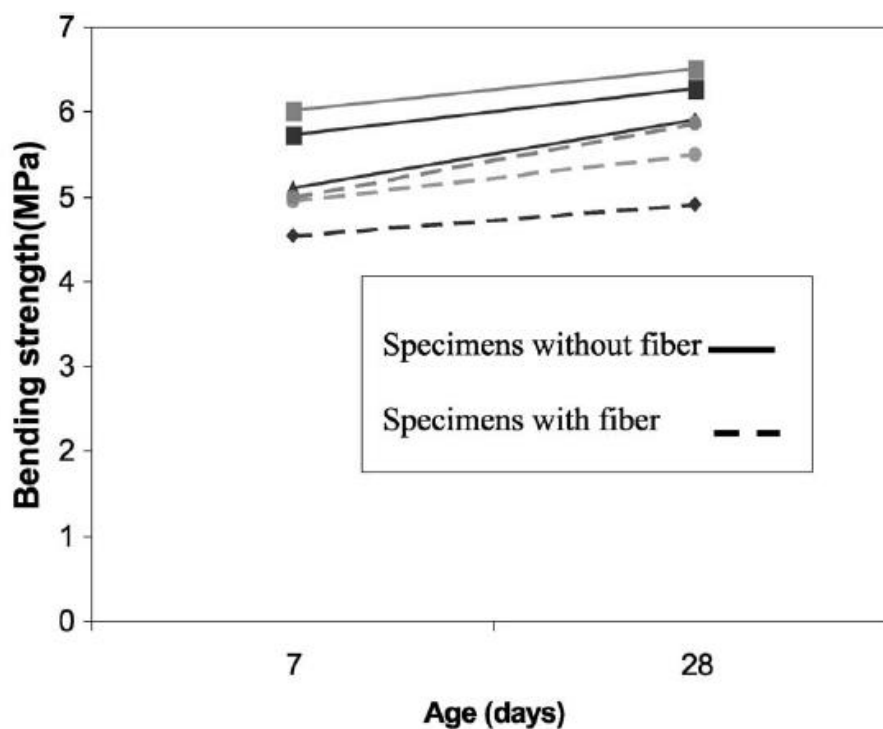
Διάγραμμα 2.28: Επίδραση του επιπέδου αντικατάστασης TRA στην αντοχή κάμψης του κονιάματος σε 7 και 28 ημέρες

Ο Bennazouk (2002) παρουσίασε τις τιμές της καμπτικής αντοχής που αναφέρονται παραπάνω στον Πίνακα 2.12. Για CRAC και ERAC με διαφορετικά ποσοστά ελαστικού, τα αποτελέσματα δείχνουν μέγιστες τιμές στις αναλογίες όγκου για 20%. Από τη περιεκτικότητα ελαστικού σε 35% και πάνω, η αντοχή κάμψης μειώνεται σημαντικά εξαιτίας της ρήξης της σύνδεσης μητρών ελαστικού–τσιμέντου. Αυτή η μείωση είναι μεγαλύτερη καθώς το μέγεθος των ελαστικών αυξάνεται.

Πίνακας 2.8: Μείωση της σύνθετης δυναμικής κάμψης σε σχέση με το ποσοστό ελαστικού

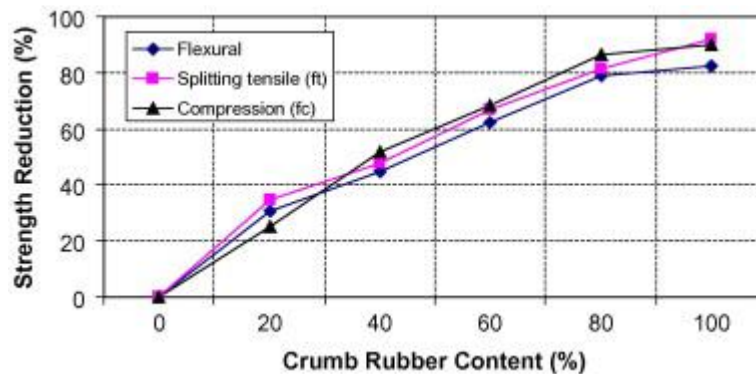
Size of rubber aggregates (mm)	Losses of the flexural strength (%)	
	CRAC ^a	ERAC ^b
1–4	8.5	15.4
4–8	5.3	9.5
8–12	1.2	3.4

Τα αποτελέσματα των Hernandez και Olivares (2002) έδειξαν ότι το σκυρόδεμα γεμισμένο με ίνα ελαστικού είχε μια χαρακτηριστική αντοχή 4 Μpa σε 28 ημέρες, ενώ στο απλό σκυρόδεμα ήταν 5,4 Μpa. Οι μέσες τιμές ήταν 5,2 και 6,1 Μpa, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.29.

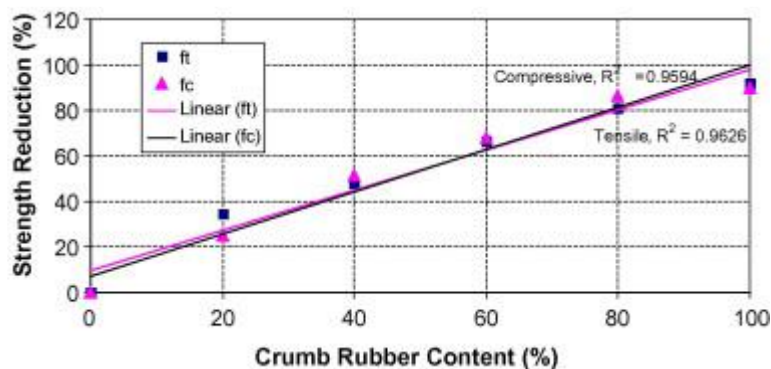


Διάγραμμα 2.29: Αντοχή κάμψης σε 7 και 28 ημέρες

Στη μελέτη του Batayneh γίνεται μία συνδυαστική αναφορά της επίδρασης του ελαστικού στην αντοχή. Η επίδραση του ελαστικού κομματιού στη αντοχή του σκυροδέματος δίνεται στον Πίνακα 2.13, και καταδεικνύεται στο Διάγραμμα 2.30 και το Διάγραμμα 2.31. Οι σχέσεις μεταξύ της περιεκτικότητας του ελαστικού και της μείωσης των θλιπτικών, και καμπτικών δυνάμεων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.30. Μπορεί να φανεί ότι η χρήση του ελαστικού μείωσε όλες τις μηχανικές δυνάμεις. Όπως αναμένεται, όσο υψηλότερο το περιεχόμενο ελαστικού στο μείγμα, τόσο υψηλότερη η μείωση θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής (f_c) και (f_t). Η κλίση είναι μικρότερη όταν το ελαστικό περιεχόμενο είναι επάνω από 40%. Όταν το ποσοστό κυμαίνεται μεταξύ 40% και 100% συνεχίζει να μειώνει την αντοχή σε μια μέγιστη απώλεια αντοχής μέχρι 90%. Επομένως, αυτό το αποτέλεσμα περιορίζει τη χρήση του τροποποιημένου σκυροδέματος όταν η αντοχή είναι η πρωταρχική απαίτηση. Η σχέση μεταξύ των θλιπτικών και των ελαστικών δυνάμεων φαίνονται στο Διάγραμμα 2.31. Μπορεί να φανεί από τον αριθμό ότι υπάρχει ένας γραμμικός συσχετισμός των δύο δυνάμεων και με τις δύο αντοχές να παρουσιάζουν το ίδιο γραμμικό ποσοστό απώλειας αντοχής με αύξηση της περιεκτικότητας του ελαστικού.



Διάγραμμα 2.30. Σύγκριση μεταξύ της μείωσης της αντοχής και της περιεκτικότητας του ελαστικού



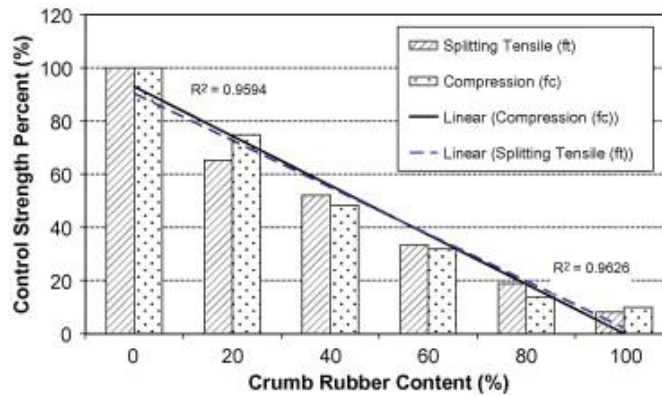
Διάγραμμα 2.31: Επίδραση του περιεχομένου ελαστικού στις θλιπτικές αντοχές

Ο Πίνακας 2.9 δείχνει την απαραίτητη θλιπτική αντοχή για τις διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογής του ελαφριού δομικού σκυροδέματος (LWC) όπως διευκρινίζεται από τον Neville (1995), το οποίο έχει υιοθετηθεί στους κώδικες κτισίματος στην Ιορδανία. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του ελαστικού, το σκυρόδεμα με κομμάτια από ελαστικό μπορεί να ταξινομηθεί ως ελαφρύ σκυρόδεμα. Αυτό μπορεί επίσης να υποστηριχθεί από τα συμπεράσματα που αναφέρονται από τον Pierce και Blackwell (2003). Η ελάχιστη αντοχή που απαιτείται για το δομικό ελαφροσκυρόδεμα είναι 17 Μpa, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.9. Όταν το ποσοστό ελαστικού που χρησιμοποιείται στο μείγμα είναι 20%, επιτυγχάνεται μια μέση αντοχή 18,97 Μpa. Επομένως, το τροποποιημένο σκυρόδεμα που περιέχει κομμάτι ελαστικού μέχρι 20% μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα ελαφριά δομικά στοιχεία. Η δεύτερη κατηγορία που δίνεται στον Πίνακα 2.13, που απαιτεί θλιπτική αντοχή 7-17 Μpa για το μέτριο σκυρόδεμα, μπορεί να επιτευχθεί επίσης με μια αντικατάσταση 40-60% των λεπτών ελαστικών αδρανών του μείγματος.

Πίνακας 2.9. Κατηγορίες ελαφροσκυροδέματος (Neville, 1995)

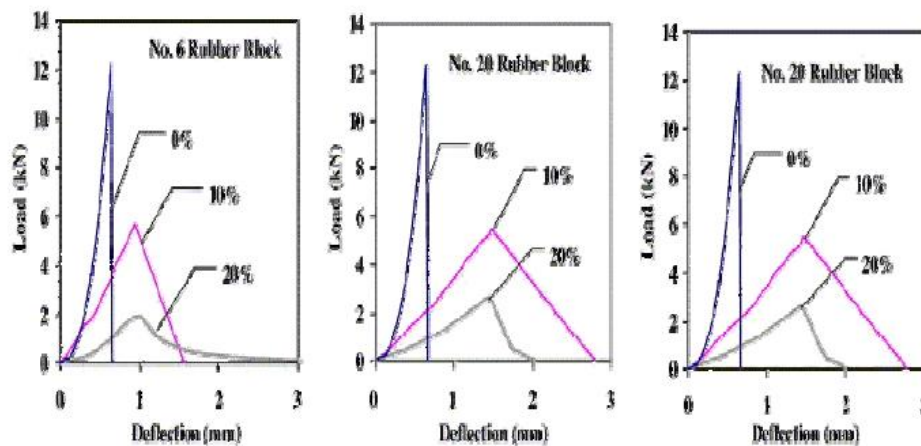
Κατηγορίες	πυκνότητα (kg/m ³)	θλιπτική αντοχή (Μpa)
Δομικό ελαφρόσκυρόδεμα	1350-1900	17
Μέτριο σκυρόδεμα δύναμης	1900-800	7.0 -17
Σκυρόδεμα χαμηλής πυκνότητας	300-800	χρησιμοποιείται για μη δομικούς λόγους (επιτροπή μόνωσης, πεζοδρόμια, φραγμοί, κ.λπ.)

Το Διάγραμμα 2.32 παρουσιάζει την επίδραση των διαφορετικών ποσοστών της περιεκτικότητας του ελαστικού στις θλιπτικές και στις ελαστικές αντοχές όταν συγκρίνονται με το αρχικό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θλιπτική αντοχή για τη διαφορετική περιεκτικότητα ελαστικού ποικίλει από 10% μέχρι 75% του δείγματος ελέγχου, ενώ η ελαστική αντοχή ποικίλει από 65% μέχρι 8% του δείγματος ελέγχου. Είναι αξιοσημείωτο ότι το ποσοστό μείωσης της αντοχής με το αυξανόμενο ποσοστό ελαστικού ήταν σχεδόν το ίδιο στη θλιπτική αντοχή όπως είναι στην ελαστική αντοχή. Αυτό είναι εμφανές στο ιστόγραμμα του διαγράμματος 2.32 (Papakonstantinou και Tobolski, 2006).



Διάγραμμα 2.32. Μεταβολή των αντοχών σε σχέση με την αντοχή ελέγχου

Οι Sukontasukkul and Chaikaew παρουσιάζουν στο Διάγραμμα 2.33 τη μεταβολή της καμπτικής αντοχής με το ποσοστό του ελαστικού στο σκυρόδεμα. Όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής αντοχής η καμπτική αντοχή μικραίνει όσο το ποσοστό των ελαστικών crumb αυξάνεται. Εντούτοις, τα αποτελέσματα δείχνουν μεγαλύτερη ευελιξία και ανθεκτικότητα με τις μεγαλύτερες εκτροπές στο μέγιστο φορτίο, τις πιο μακροχρόνιες μέγιστες απαντήσεις και την υψηλότερη ενέργεια σπασίματος.



Διάγραμμα 2.33. Καμπύλες φορτίου-μετατοπίσεων για μίγματα rubber concrete

2.3 Σκυροδέματα με αδρανή από υλικό κατεδαφίσεων

Στην έρευνα των Μαυρίδου Σ. και Οικονόμου Ν. (2009), με θέμα την αξιοποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών σε μίγματα σκυροδέματος (Μαυρίδου Σ. κα, 2009), μελετώνται ιδιότητες σκυροδέματος με αυτού του είδους τα αδρανή τόσο σε νωπή όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση. Παράλληλα τα παραγόμενα μείγματα εξετάζονται στερεοσκοπικά

ενώ ελέγχονται και ως προς αντίσταση σε ολίσθηση καθώς και στην έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες (200 και 400°C).

2.3.1 Πειραματική διαδικασία

2.3.1.1 Αδρανή

Για την παραγωγή των Ανακυκλωμένων Αδρανών Σκυροδέματος (Α.Α.Σ.), τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα, κομμάτια παλαιού σκυροδέματος, άγνωστης πρωτογενούς προέλευσης και ηλικίας που προήλθαν από υλικό κατεδαφίσεων του ευρύτερου Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης. Η προμήθεια των ανακυκλωμένων αδρανών έγινε από τη μονάδα επεξεργασίας Α.Ε.Κ.Κ. σταθερού τύπου 'Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας ΑΕ.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή προτού ενσωματωθούν στα νέα μείγματα σκυροδέματος ελέγχθηκαν ως προς την καταλληλότητά τους ως αδρανή υλικά. Οι ιδιότητες που μελετήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 2.10 για τα ανακυκλωμένα και στον Πίνακα 2.11 για τα φυσικά, αντίστοιχα.

Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων αδρανών

Ιδιότητα\Κλάσμα αδρανών	Άμμος	Ψηφίδα	Γαρμπίλι
ΜΙΚΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ Ε.Β.	2,63	2,42	2,45
ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ %	8,13	6,44	5,13
ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΜΜΟΥ	71	-	-
ΦΘΟΡΑ ΚΑΤΑ LOS ANGELES	-	-	29,4
ΔΟΚΙΜΗ ΥΓΕΙΑΣ	-	-	1,80%

Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά φυσικών αδρανών

Ιδιότητα\Κλάσμα αδρανών	Άμμος	Ψηφίδα -Γαρμπίλι
ΜΙΚΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ Ε.Β.	2,89	2,71
ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ %	2	0,3
ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΜΜΟΥ	70	-
ΦΘΟΡΑ ΚΑΤΑ LOS ANGELES	-	24,8
ΔΟΚΙΜΗ ΥΓΕΙΑΣ	-	0,30%

Ανώτατο όριο μη βάση τον ΚΤΣ-'97 για δοκιμή υγείας: 12%

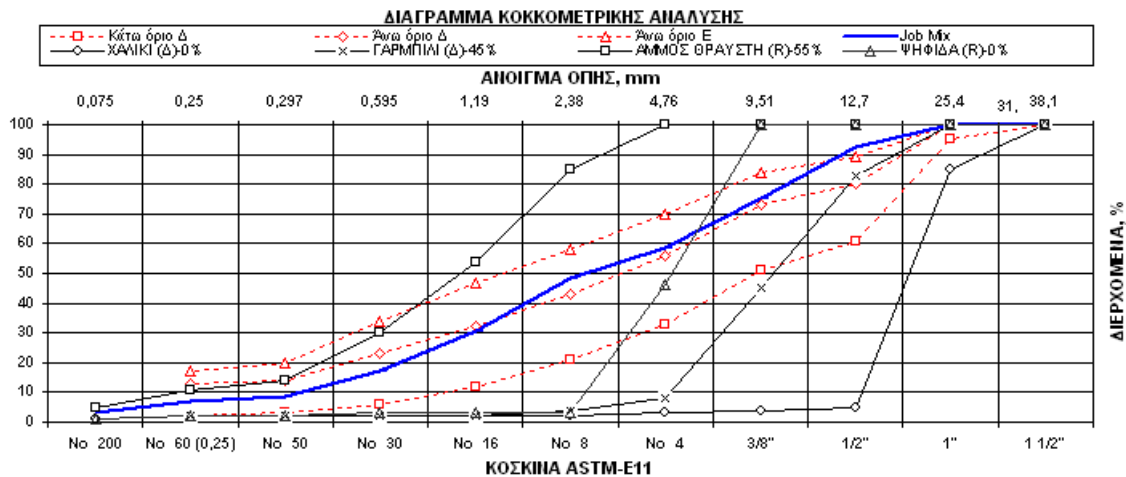
Ανώτατο όριο με βάση τον ΚΤΣ-'97 για φθορά κατά Los Angeles: 40%

2.3.1.2 Συνθέσεις

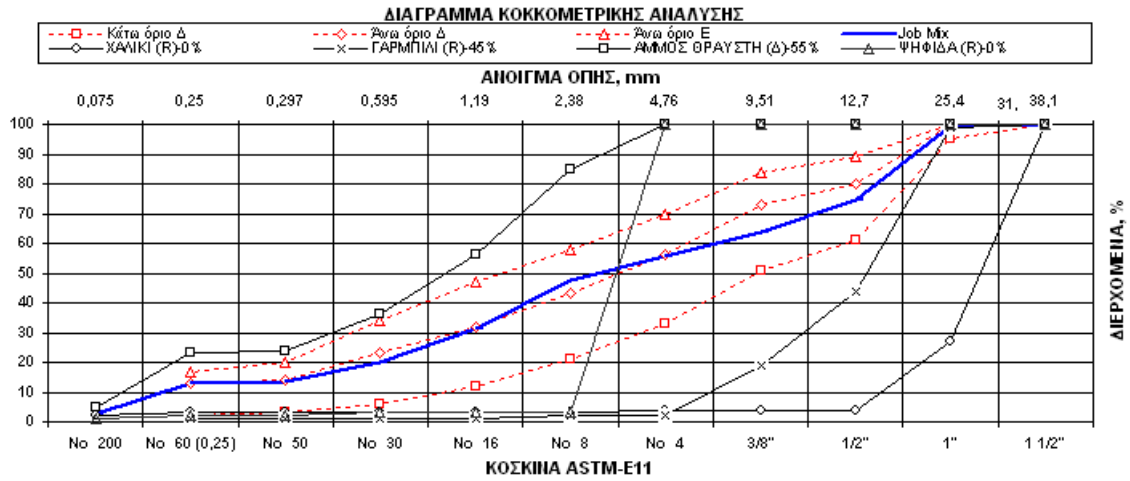
Για το σκοπό της εργασίας παρασκευάστηκαν μίγματα σκυροδέματος με χρήση τσιμέντου TITAN CEM II 32.5N και TITAN CEM I 42.5R, αδρανών λατομείου Δρυμού, ανακυκλωμένων αδρανών, ειδικού πρόσθετου επιβραδυντή Pozzolith 134 CF, πρόσθετου υπερρευστοποιητή Glenium C329 και νερού, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.12.

Πίνακας 2.12: Συνθέσεις και ποσότητες συστατικών σε kg στο 1m³ σκυροδέματος

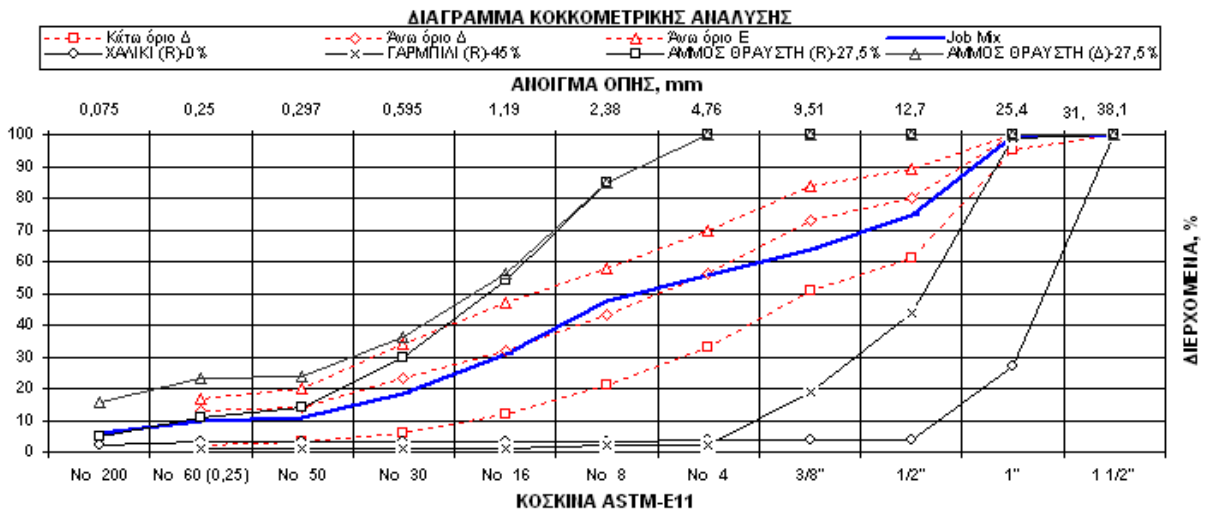
Συστατικά\Σύνθεση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Γαρμπίλι Δρυμού	835			823			817	776		
Άμμος Δρυμού	976			962					937	469
Γαρμπίλι ανακυκλωμένο		734	734		747	682			726	726
Άμμος ανακυκλωμένη		860	860		875	300	866	822		425
Νερό	225	310	345	190	276	325	240	260	225	250
TITAN CEM I 42,5R	200	200	200	100	100	100	100	100	100	100
TITAN CEM II 32,5N	100	100	100	300	300	300	300	300	300	300
Pozzolith 134 CF	0,9	0,9	0,9	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Glenium C329	2,4	2,4	5,1	4,4	4,4	4,4	6	6	6	6
Glenium C329 (προσθήκη σε 60')	0	0	0	0	0	2,4	2	1,6	1,6	1,6



Διάγραμμα 2.34: Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με άμμο ανακυκλωμένη και γαρμπίλι λατομείου (συνθέσεις 7 και 8)



Διάγραμμα 2.35: Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με γαρμπίλι ανακυκλωμένο και άμμο λατομείου (σύνθεση 9)



Διάγραμμα 2.36: Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με ανακυκλωμένο γαρμπίλι και άμμο μισή λατομείου και μισή ανακυκλωμένη (σύνθεση 10)

2.3.1.3 Εργαστηριακά αποτελέσματα

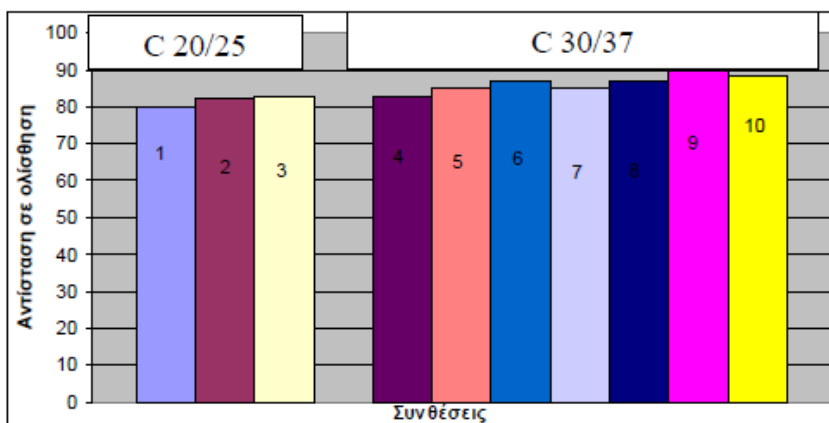
Πίνακας 2.13: Αποτελέσματα εργαστηριακών συνθέσεων σκυροδέματος σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση

Σύνθεση		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Κατηγορία σκυροδέματος		C20/25	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Πυκνότητα (Kg/m ³)		2403	2168	2123	2410	2201	2148	2260	2287	2330	2256
Κάθιση (cm)		21	3	9	26	2	11	3	16	25	12
Κενά αέρος νωπού σκυρ/τος %		1,7	4,2	3,9	1,7	3,8	3,5	3,6	2,8	2,4	3

Σύνθεση		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Αντοχή σε διάρρηξη		2,61	1,86	1,56	3,57	2,63	2,12	2,70	2,76	3,44	3,07
Αντοχή σε κάμψη		3,96	2,59	2,43	4,95	3,94	3,60	4,07	4,16	4,86	4,25
Αντοχή σε θλίψη		35,80	22,30	20,17	47,05	33,83	26,67	34,88	35,65	49,35	40,45
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)		44,37	26,55	24,48	53,50	35,67	30,05	40,38	38,45	45,60	42,13

2.3.1.4 Αντίσταση σε ολίσθηση

Η αντίσταση σε ολίσθηση μετρήθηκε σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο δοκιμής (ASTM E303-83) στο εργαστήριο Δημοσίων Έργων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 2.37.



Διάγραμμα 2.37: Αντίσταση σε ολίσθηση μιγμάτων σκυροδέματος με και χωρίς ανακυκλωμένα αδρανή

2.4 Σκυροδέματα με αδρανή από ανακυκλωμένο γυαλί

2.4.1 Αφρώδες Κυτταρικό Γυαλί – Geofil Foamed Glass Gravel (GFGG) – Διαδικασία Παραγωγής

Με διαδικασίες όπως απαιτούνται από ISO 9001, το ανακυκλωμένο γυαλί (διαφόρων ειδών και χρώματος) με οργανικά και ανόργανα στοιχεία (μετά από ειδική επεξεργασία απαλλαγής από χαρτί, μέταλλο, υδράργυρο, (Fe, Al, Mer) μετατρέπεται σε σκόνη σε μέγεθος (25-100μ). Ομογενοποιείται με αέρια και με προσμίξεις όπως το calcium sulphate rich gypsum, limestone, (calcium carbonate-CaCO₃), MnO₂ or Silicon Carbide (SiC) τα οποία μειώνουν το σημείο τήξεως και αυξάνουν την ρευστότητα. Το μείγμα θερμαίνεται μεταξύ σε 700°C και 900°C, και το αέριο που παράγεται από την αποσύνθεση του προσθετικού, δημιουργεί μια δομή κυττάρων/κυψελών για να διαμορφώσει ένα πορώδες σώμα. Γενικά, η διόγκωση των κόκκων ξεκινάει περίπου σε 700°C με περαιτέρω αύξηση με την άνοδο στη θερμοκρασία σε 960 °C, και έκτοτε οι κόκκοι βαθμιαία λειώνουν. Ένα ειδικό προσθετικό με μεγάλη ειδική επιφάνεια που μειώνει την υδατοπερατότητα του στερεοποιημένου υλικού εφαρμόζεται σαν τελευταία επικάλυψη. Μετά την ξήρανση το υλικό υπόκειται σε φούρνο (heat treatment) και έπειτα αφήνεται γρήγορα να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου. Το αδρανές έχει πυκνότητα 450-650 kg/m³ (σχεδόν 40-50% μειωμένο βάρος σε σχέση με το κοινό χαλίκι), έχει καλή θερμομονωτική ιδιότητα και χαμηλό ποσοστό απορρόφησης νερού (2.8-6.0% ποσοστό της μάζας του).

Τα προϊόντα αφρώδους/Κυτταρικού γυαλιού είναι διαθέσιμα στο εμπόριο από το 1980. Οι επιχειρήσεις που παράγουν το αφρώδες γυαλί περιλαμβάνουν το Πίτσμπουργκ Corning που βασίζεται στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη, Misapor AG και Millcell AG στην Ελβετία, Hasapor στη Νορβηγία και τη Γερμανία, Geofil στην Ουγγαρία, GOMELSTEKLO στη Λευκορωσία, Ηνωμένο Βασίλειο, (Foamed Glass Gravel, ConGlascrete, Washed Glass Sand), αλλά και στην Τουρκία (Hasapor Glassfoam-HASGLASS, Γερμανία και Αυστρία (Glapor) με πολλή επιτυχία. Άλλες χώρες που χρησιμοποιούν ήδη το υλικό είναι Αυστρία, Βέλγιο, Γαλλία, Ιταλία, Ολλανδία και Ισπανία.



Φωτογραφία 2.4: Αφρώδες Κυτταρικό Γυαλί ΑΚΓ ως αδρανές στο Σκυρόδεμα

Σε μελέτη, που πραγματοποίησε η Φωτιάδου Σ. το 2007 στο Kingston University , το ΑΚΓ- GFGG παρήχθη χρησιμοποιώντας το μικτό γυαλί μπουκαλιών MB (γκρίζο χρώμα FGG) και γυαλιού από την τηλεόραση και τους λαμπτήρες φωτισμού CRT/TV/PC (καφετί χρώμα FGG). Χρησιμοποιήθηκε σε δύο είδη μεγεθών, 5-20 χιλ. (ως χονδρόκοκκο) και από 0-5 χιλ. (ως λεπτόκοκκο). Το FGG αναπτύχθηκε από μια Ουγγρική επιχείρηση την Geofil Ltd, που είχε ως σκοπό συγκεκριμένα και που κατασκευάστηκε να καλύψει τις απαιτήσεις των σύγχρονων προϊόντων κατασκευής. Στην ουσία, η τεχνολογία Geofil-FGG (GFGG) χρησιμοποιεί το γυαλί αποβλήτων (από ποικίλες πηγές) ως κύριο υλικό και με την πρόσμιξη αέριου πετροχημικής προελεύσεως για να βελτιώσει την πρόσφυση και με τις προσθήκες ενός μεταλλεύματος αργίλου για να βοηθήσει και για να ελέγξει την υδατοαπορροφητικότητα παράγει το συγκεκριμένο υλικό. Το προϊόν έχει προαχθεί στην Ουγγαρία για διάφορες εφαρμογές. Ένα άλλο υλικό FGG που εξετάστηκε στην έρευνα για λόγους σύγκρισης ήταν Hasopor και ένα άλλο ελαφρύ κατασκευασμένο υλικό από την ιπτάμενη τέφρα ονομαζόμενο Lytag.

2.4.2 Μηχανικές Ιδιότητες Σκυροδέματος με ΑΚΓ

Το σκυρόδεμα με αδρανή από ΑΚΓ παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά και αυτό οφείλεται, i) στην ελάχιστη απορρόφηση νερού, οπότε γίνεται καλύτερη ενυδάτωση της τσιμεντόπαστας που αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου, ii) και στην επιφάνεια του αδρανούς, τραχιάς/πορώδης, που βελτιώνει τη πρόσφυση τσιμεντόπαστας και δυναμώνει την Ενδιάμεση Ζώνη Μετάβασης Interfacial Transition Zone

ITZ μεταξύ αδρανούς και τσιμεντόπαστας. Επίσης η Ποζολανική αντίδραση μεταξύ τσιμέντου και γυαλιού επίσης βοηθάει στην ενίσχυση του δεσμού.

Η δύναμη του σκυροδέματος επηρεάζεται επίσης από τη κατανομή, τη σύσταση επιφάνειας, τη μορφή, τη δύναμη, και την ακαμψία των αδρανών. Η μορφή των αδρανών και ο συντελεστής ελαστικότητάς τους επηρεάζουν επίσης τη συγκέντρωση πίεσης, μέσα στο σκυρόδεμα, δεδομένου ότι τα αδρανή ενεργούν ως επιβραδυντές ρωγμών. Η ικανοποιητική μορφή, σύσταση και δύναμη του GF GG συνετέλεσε στην συγκρίσιμη με το κοινό σκυρόδεμα αντοχή σε χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης. Το μέγιστο μέγεθος του αδρανούς επηρεάζει επίσης τη δύναμη, που δείχνει ότι ως αυξάνεται το μέγεθος αδρανούς μειώνεται η δύναμη σκυροδέματος. Αποδείχθηκε κατά τη διάρκεια του χαρακτηρισμού GF GG ότι οι ιδιότητες της δύναμης/ακαμψίας είναι χαμηλότερες από αυτό του αμμοχάλικου. Δεδομένου ότι το ποσοστό του αμμοχάλικου αντικαθίσταται από την πιο αδύνατη/εύθραυστη μορφή του GF GG αναμένεται να μειωθεί επίσης η αντοχή σκυροδέματος ειδικά αν τα ποσοστά χρήσης GF GG είναι >30% κ.ο.

Επιπλέον, το σύστημα πόρων στο σκυρόδεμα διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη δύναμη. Το σύστημα πόρων αποτελείται από τέσσερις τύπους πόρων: macropores λόγω του αέρα, macropores λόγω της ανεπαρκούς συμπίεσης, των τριχοειδών πόρων και των πόρων πηκτωμάτων. Εκτός από τον όγκο τους, η μορφή και το μέγεθος των πόρων είναι επίσης κρίσιμες. Αυτό το σύστημα πόρων κυβερνά τις σημαντικότερες ιδιότητες του σκυροδέματος, ειδικότερα τη δύναμή του. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του συστήματος πόρων είναι το πορώδες και διανομή μεγέθους πόρων και γενικά γίνονται αποδεκτά πως όσο το πορώδες και το μέγεθος πόρων αυξάνονται, μειώνεται η θλιπτική δύναμη. Οι πόροι-gel pores δεν επηρεάζουν τη δύναμη του σκυροδέματος αλλά τον ερπυσμό, συστολή και την διαστολή. Οι τριχοειδείς πόροι και άλλοι μεγαλύτεροι πόροι είναι αρμόδιοι για τη μείωση του συγκεκριμένου συντελεστή δύναμης και ελαστικότητας. Όσο το ποσοστό GF GG (5-20 μμ) αυξάνονταν > 30%, δεν γινόταν σωστή κατανομή αδρανών, πολλά επέπλεαν στην επιφάνεια λόγω χαμηλού ειδικού βάρους και έκαναν δύσκολη την συμπίεση του σκυροδέματος. Έτσι πόροι άρχισαν να εμφανίζονται οι οποίοι συνετέλεσαν στην μείωση αντοχής σκυροδέματος. Ο διαχωρισμός των μειγμάτων δεν παρατηρήθηκε σε τέτοιο βαθμό για το λεπτόκοκκο GF GG, κατά συνέπεια κανένα σημάδι της μείωσης της δύναμης.

2.4.3 Συστολή Σκυροδέματος-Drying Shrinkage

Τα αποτελέσματα από τα πρίσματα από το μείγμα με 30% GFGG τα μείγματα με GFGG παρουσίασαν αύξηση τη συστολής στην τιμή των 120 με και η τελική αξία σταθεροποιήθηκε μετά από 3 εβδομάδες. Τα πρίσματα με 40% και 50% GFGG παρουσίασαν περαιτέρω αύξηση στη συστολή που έγινε σταθερή μετά από 3 εβδομάδες με τις τιμές των 420 με και 600 με αντίστοιχα σε 56 ημέρες. Η συστολή των μειγμάτων με 30- 50% GFGG δεν υπερέβη το επιτρεπόμενο όριο υποδεικνύοντας ότι το αδρανές δεν συμπιέζεται. Εντούτοις, υπήρξε μια αύξηση στην τιμή της συστολής κατά σχεδόν 16% όταν αυξήθηκε GFGG από 30%-50% λόγω του νερού που απορροφήθηκε από τα αδρανή GFGG και το τσιμέντο. Στις υψηλότερες αντικαταστάσεις GFGG, η συστολή αναμένεται να αυξηθεί περισσότερο λόγω της ύπαρξης πολλών πόρων, αποτέλεσμα της ανεπαρκούς συμπίεσης αλλά και του αναλογικού μεγαλύτερου ποσού νερού που υπάρχει στο μείγμα. Ο λόγος για την αυξανόμενη τιμή της συστολής λόγω των υψηλών επιπέδων αντικατάστασης από GFGG είναι η μετακίνηση και εξάτμιση μεγαλύτερου ποσού υγρασίας. Όσο αυξάνεται ο λόγος W/C τόσο αυξάνεται η συστολή.

2.4.4 Ιδιότητες Ανθεκτικότητας Σκυροδέματος

Γενικά ο ρυθμός απορρόφησης νερού από την επιφάνεια του σκυροδέματος με 30% κ.ο GFGG ήταν συγκρίσιμος με το κοινό σκυρόδεμα. Η επίδραση του GFGG >30% ήταν εμφανής και όσο το ποσοστό GFGG αυξανόταν από 30- 100% κ.ο τα αποτελέσματα ήταν αρνητικά. Επίσης όσο αυξάνεται το W/C από 0.4 σε 0.77, αυξάνεται επίσης και ο ρυθμός απορρόφησης νερού, σε συμφωνία με την μείωση θλιπτικής αντοχής. Επίσης βρέθηκε ότι η απορρόφηση νερού στις 60 μέρες ήταν μικρότερη από τις 28 μέρες, λόγω της αυξημένης θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου είναι μικρότερες στις 60 μέρες από ότι στις 28.

Επαληθεύτηκε ότι ο ρυθμος απορρόφησης νερού μειώθηκε όσο ο λόγος W/C μειωνόταν λόγω καλύτερης ενυδάτωσης τσιμεντόπαστας. Η καθυστέρηση στην υδατοπερατότητα (n-value) με συνεπακόλουθο την μείωση τιμής (n-value), αυξανόταν όσο η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος αυξανόταν από 15 σε 50 MPa. Επίσης όσο το ποσοστό GFGG αυξανόταν η καθυστέρηση την απορροφητικότητα μειωνόταν υποδηλώνοντας ότι γινόταν γρηγορότερη απορρόφηση από τα αδρανή και από την τσιμεντόπαστα αλλά και ότι υπήρχαν πόροι στο εσωτερικό του σκυροδέματος άρα μειωμένη ανθεκτικότητα.

Η επίδραση λεπτόκοκκων GFGG δεν είχε την ίδια πατέντα με τα χοντρόκοκκα αδρανή. Η αύξηση GFGG δεν επηρέασε την απορροφητικότητα νερού και η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος ήταν συγκρίσιμη με του κοινού σκυροδέματος CONTROL, αποτελέσματα ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες. Φυσικά οι τιμές n-value ήταν μικρότερες στις 60 μέρες από ότι στις 28 όπως αναμενόταν, λόγω της αυξημένης αντοχής με την πάροδο του χρόνου.

Στο σκυρόδεμα η συνδεσιμότητα μεταξύ των πόρων είναι καταλυτικός παράγοντας για την διεισδυτικότητα υγρών και αερίων. Όσο το σύστημα πόρων είναι κλειστό όπως στο GFGG (closed pore system) η υδατοπερατότητα δεν θα αυξηθεί ακόμα και αν το αδρανές είναι πορώδες. Έτσι τα λεπτόκοκκα αδρανή GFGG σε ποσοστό 0-15% δεν επηρεάζουν την υδατοπερατότητα και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος αλλά και τα χοντρόκοκκα αδρανή σε ποσοστό μικρότερο από 30% κ.ο δεν επηρεάζουν αρνητικά όπως όταν το ποσοστό αυξηθεί σε 40,50, 60 και 100% κ.ο.

2.4.5 Αντίδραση αλκαλίων πυριτίου – ASR¹⁰

Η χρήση ανακυκλωμένου γυαλιού ως αδρανές σκυροδέματος παρουσιάζει προβλήματα, λόγω της επιβλαβούς αντίδρασης αλκαλίων πυριτίου (alkali-silica reaction). Υπάρχει πληθώρα ερευνών που εξετάζουν το φαινόμενο της ASR^{11, 12, 13}. Παρόλα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα λήψης κάποιων μέτρων ώστε να μετριαστεί η ASR:

- Ο θρυματισμός του γυαλιού σε κόκκους μικρότερους των 300 μm
- Ορυκτές προσμίξεις (μετακολίνη ή υπτάμενη τέφρα) βοηθούν αποτελεσματικά στη μείωση της εξάπλωσης της ASR στο σκυρόδεμα
- Χρήση γυαλιού ανθεκτικού στα αλκάλια
- Μετατροπή της χημικής σύνθεσης του γυαλιού
- Χρήση στεγανοποιητικών στο σκυρόδεμα, ώστε να παραμείνει στεγνό
- Χρήση τσιμέντου με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια

Εργαστηριακές δοκιμές της ASR

Σειρά εργαστηριακών ερευνών εξετάζουν την απόκριση της ASR απέναντι στη χρήση γυαλιού διαφορετικού χρώματος και διαβάθμισης των κόκκων ως αδρανών σκυροδέματος.

Τα αρχικά αποτελέσματα έδειξαν την ύπαρξη βέλτιστου μεγέθους γυαλιού για τη μείωση της ASR, Διάγραμμα 2.38. Το Διάγραμμα 2.39 δείχνει ότι υπάρχει διαφοροποίηση της αντίδραση ανάλογα με το χρώμα του γυαλιού. Ειδικότερα, για 6-12 mm αδρανή γυαλιού, στα κεχριμπαρένια και διάφανα γυαλιά η έκταση είναι μεγαλύτερη από τα πράσινα και μπλε γυαλιά.

Επίσης, έχουν ερευνηθεί πρόσθετα ως κατασταλτικά της ASR. Αυτά περιλαμβάνουν το λευκό τσιμέντο, Παραφορμαλδεΐδη, GGBS¹⁴, MK (Μετακαολίνη) και ποζολανικό γυαλί διαφορετικού χρώματος και διαβάθμισης. Η επιρροή των παραπάνω αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 2.40.

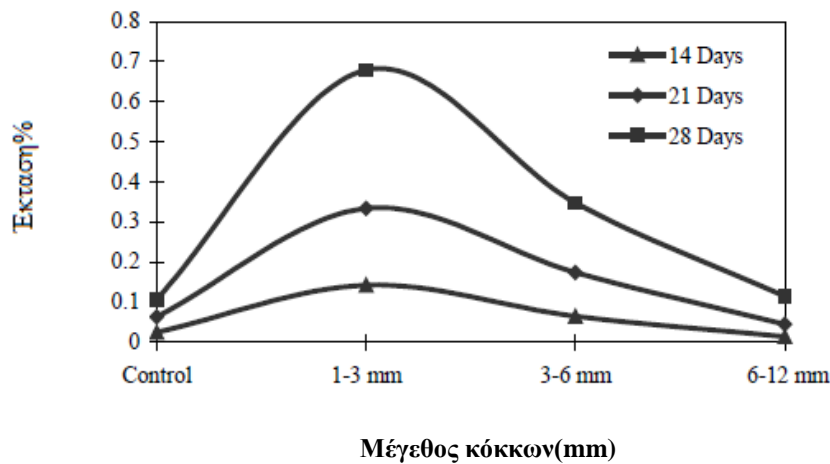
¹⁰http://www.columbia.edu/cu/civileng/meyer/publications/publications/74_ByarsMeyerZhuDundee20032.pdf

¹¹Meyer C. and Baxter, S. "Use of Recycled Glass for Concrete Masonry and Blocks", Final Report to New York State Energy Research and Development Authority, Rep. No. 97-15, Albany, NY, Nov.1997.

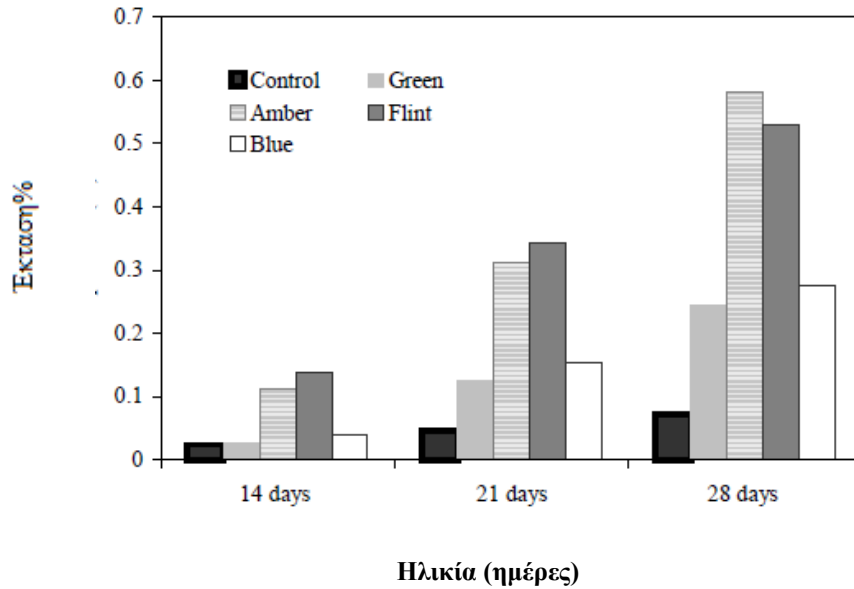
¹²Jin, W, "Alkali-Silica Reaction in Concrete with Glass Aggregate – A Chemo-Physico- Mechanical Approach", PhD Dissertation, Columbia University, New York, NY, 1998.

¹³ Jin, W, C. Meyer and S. Baxter, "Glasscrete – Concrete with Glass Aggregate", ACI Materials Journal, Mar - April, 2000.

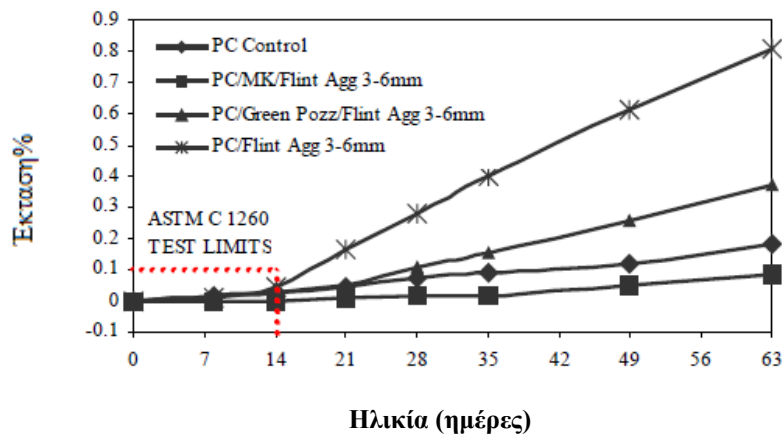
¹⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_granulated_blast-furnace_slag



Διάγραμμα 2.38: Βέλτιστο μέγεθος μπλε γυαλιού



Διάγραμμα 2.39: Σχετική αντίδραση αδρανών γυαλιού μεγέθους 6-12mm διαφορετικών χρωμάτων



Διάγραμμα 2.40: Επίδραση πρόσμικτων στη μείωση της ASR

2.4.6 Ενανθράκωση

Τα αποτελέσματα του εργαστηριακού τεστ έδειξαν ότι μέχρι 60% χοντρόκοκκο GFGG είχε την αμελητέα επιρροή, αλλά με περαιτέρω αύξηση ποσοστού αδρανούς παρατηρήθηκε μια αύξηση βάθους ενανθράκωσης. Μετά από 20 εβδομάδες της έκθεσης στο εργαστήριο, που δείχνουν την απόδοση διάρκειας του σκυροδέματος σε 20-έτη στην πραγματικότητα, οι μέγιστες διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ 50% χοντρόκοκκου GFGG και του κοινού σκυροδέματος NA ήταν 4 και 5 χιλ. για 0.62 και 0.77 w/c ανάλογα, ενώ για τα συγκεκριμένα μείγματα με 60% GFGG η διαφορά αυξήθηκε ελαφρώς σε 9 χιλ. για w/c 0.77. Οι περαιτέρω αντικαταστάσεις με 100% GFGG αύξησαν τη διαφορά σημαντικά σε 18 χιλ. όταν το w/c 0.77. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η ενανθράκωση αυξήθηκε

σε υψηλά w/c κατά δύο φορές (από 20 χιλ. σε 40 χιλ.). Επίσης επιβεβαιώθηκε ότι το μεγαλύτερης αντοχής σκυρόδεμα είχε μικρότερο βάθος ενανθράκωσης, δείχνοντας καλή συμπεριφορά τσιμεντόπαστας και αδρανών GF/GG.

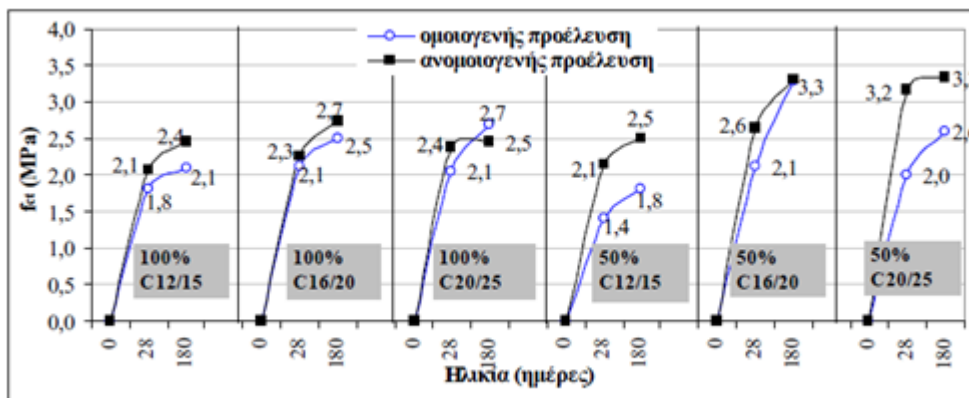
3 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η μελέτη ιδιοτήτων μειγμάτων σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή από άχρηστα υλικά που ανακτήθηκαν από κατεδαφίσεις κτηρίων και κατασκευών, άχρηστα υλικά που ανακτήθηκαν από οικιακά σκουπίδια και άχρηστα υλικά που ανακτήθηκαν από βιομηχανικές μεθόδους μέσα από διαφορετικές έρευνες.

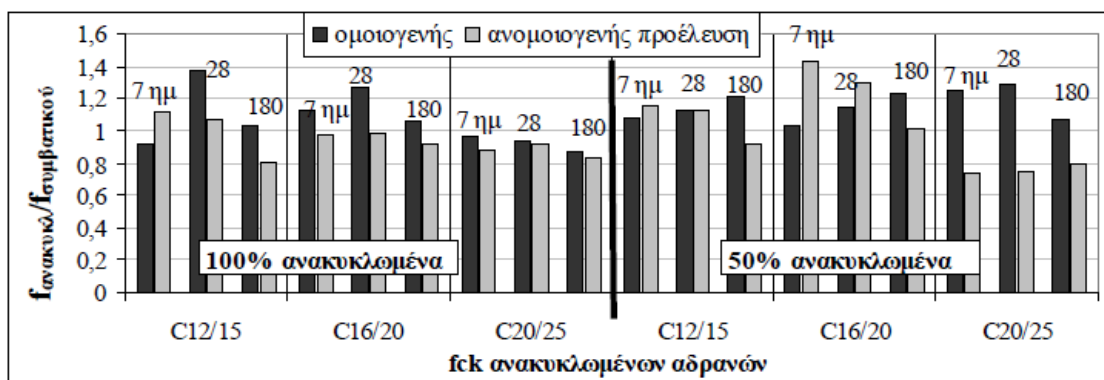
Το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από επεξεργασία (τεμαχισμό και διαλογή) παλαιών στοιχείων σκυροδέματος από κατεδαφίσεις, δηλαδή παλαιού σκυροδέματος άγνωστης προέλευσης, ηλικίας και κατηγορίας αντοχής, παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά και αντοχή. Όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μειγμάτων, η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών έχει ως συνέπεια τη μείωση των χαρακτηριστικών αλλά την επίτευξη της κατηγορίας αντοχής σχεδιασμού. Οι τιμές της αντίστασης σε ολίσθηση κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα, χωρίς ιδιαίτερες αυξομειώσεις. Όσον αφορά στην έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείγματα ανθεκτικότερα σε σύγκριση με τα συμβατικά. Τα μείγματα αυτά διατηρούν έως και το 91 % της αρχικής τους θλιπτικής αντοχής έναντι του 80% των συμβατικών, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας η εναπομένουσα τιμή τους κυμαίνεται μεταξύ 74-87% του αντίστοιχου συμβατικού. Ωστόσο στους 400°C, η μείωση τόσο της θλιπτικής αντοχής όσο και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας δεν είναι τόσο μεγάλη. Αξίζει να σημειωθεί πως κανένα από τα δείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή δεν εμφάνισε επιφανειακά ρηγματώσεις εξαιτίας της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το κόστος παραγωγής των συνθέσεων, οι οποίες έδωσαν και τις υψηλότερες τιμές μηχανικών αντοχών, υπολογίστηκε ελαφρά μικρότερο από το αντίστοιχο της συμβατικής. Η σχετικά μικρή αυτή διάφορα αναμένεται να διευρυνθεί με την πτώση του κόστους επεξεργασίας ανά τόνο στις μονάδες ανακύκλωσης λόγω της μαζικής εισροής υλικών. Ακόμη αξίζει να συνυπολογιστεί στο παραπάνω κέρδος και η μείωση των εξόδων από τις μεταφορές καθώς είναι δυνατόν με ένα δρομολόγιο να μεταφερθούν άχρηστα από το

εργοτάξιο στη μονάδα και στην επιστροφή να μεταφερθούν ανακυκλωμένα προϊόντα. Αυτό που συμβαίνει σήμερα στην πράξη είναι η εκτέλεση ξεχωριστών δρομολογίων για απόρριψη ‘μπάζων’ και μεταφορά υλικών με τα οχήματα να είναι άδεια κατά τη μισή διαδρομή με αποτέλεσμα τις αυξημένες οικονομικές και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.



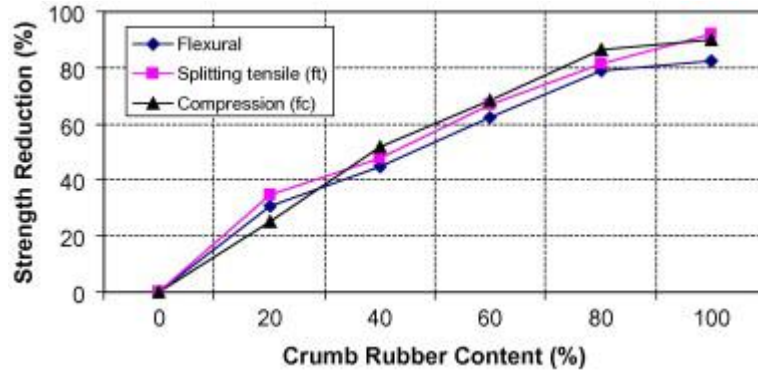
Διάγραμμα 3.1: Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη των μιγμάτων¹⁵



Διάγραμμα 3.2: Θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή προς την αντοχή των συμβατικών σκυροδεμάτων¹⁵

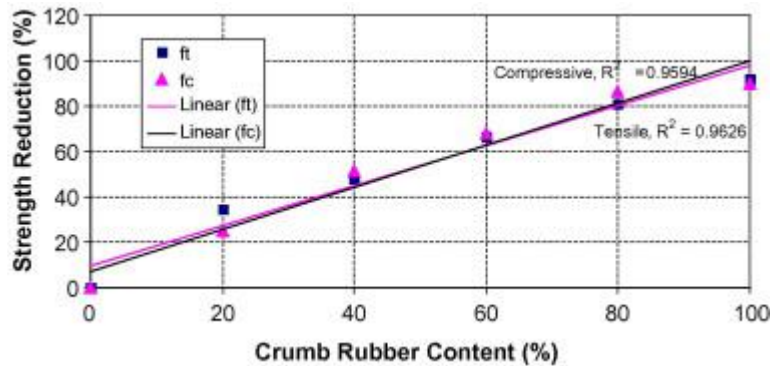
Με την αντικατάσταση των αδρανών υλικών του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα ελαστικά υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε άλλες εφαρμογές όπως κάλυψη αθλητικών επιφανειών, αντιολισθητικά, υλικά οδοποιίας, μονώσεις, κ.α. Η χρήση του rubber concrete σε δάπεδα αθλοπαιδιών όπως αυλές σχολείων λειτουργεί ικανοποιητικά λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του μείγματος. Για την καλύτερη αξιοποίηση του παραπάνω μείγματος είναι απαραίτητο η γνώση των ιδιοτήτων του υλικού rubber concrete. Επομένως, σύμφωνα με την βιβλιογραφική επισκόπηση της παρούσας εργασίας παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται

το ποσοστό της περιεκτικότητας του ελαστικού στο μείγμα η κάθιση και το ειδικό βάρος μειώνεται. Επίσης, παρατηρείται μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων (θλιπτική, καμπτική αντοχή).

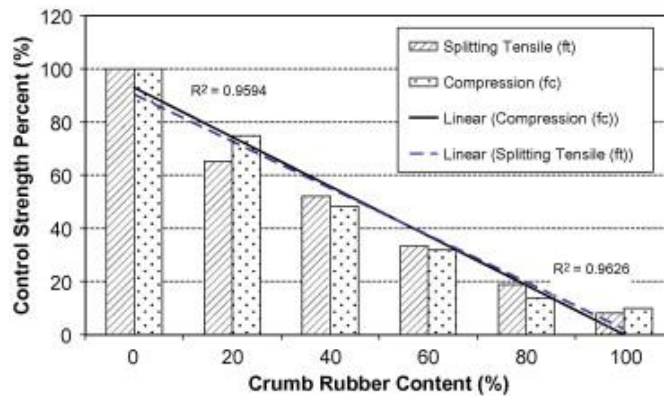


Διάγραμμα 3.3. Σύγκριση μεταξύ της μείωσης της αντοχής και της περιεκτικότητας του ελαστικού

¹⁵http://portal.tee.gr/portal/page/portal/PUBLICATIONS/SCIENTIFIC_PUBLICATIONS/2010/2o_teuchos2010/04_3803.pdf



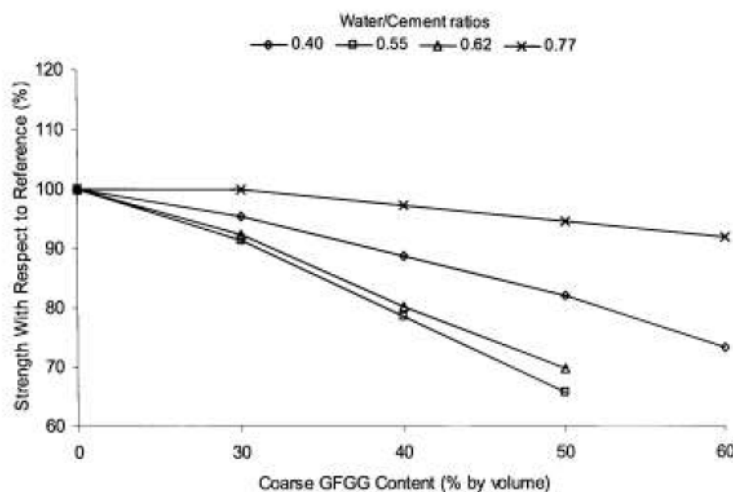
Διάγραμμα 3.4: Επίδραση του περιεχομένου ελαστικού στις θλιπτικές αντοχές



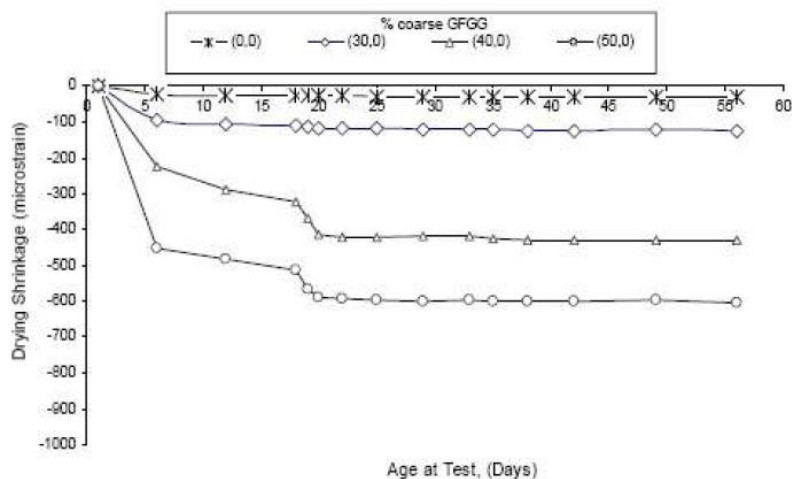
Διάγραμμα 3.5. Μεταβολή των αντοχών σε σχέση με την αντοχή ελέγχου

Έρευνες με τη χρήση αριθμητικής προσομοίωσης, αναδεικνύουν τη δυνατότητα της χρήσης των ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών. Πρόκειται ασφαλώς για μια προκαταρκτική έρευνα που χρειάζεται περαιτέρω διεύρυνση με ακριβέστερη προσομοίωση κανονικών κτηρίων έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη βέλτιστη δυνατή τεχνο-οικονομικά χρήση των νέων σύνθετων υλικών σε διάφορα τεχνικά έργα πολιτικού μηχανικού.

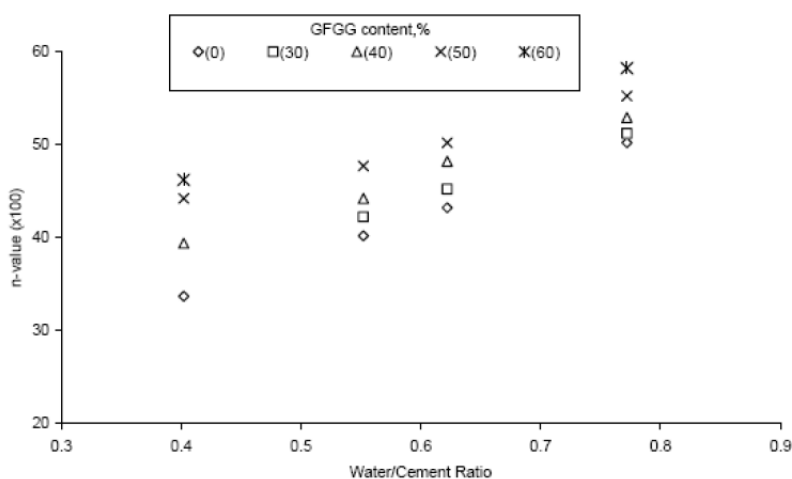
Η έρευνα με χρήση ανακυκλωμένου γυαλιού στο σκυρόδεμα έχει καταδείξει ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές στην παραγωγή σκυροδέματος έως 45 MPa και με μηχανικές ιδιότητες αλλά και ανθεκτικότητα συγκρίσιμες με το Σνηθισμένο Σκυρόδεμα (Reference) ανά περίπτωση αλλά και με ικανοποιητική θερμοχομονωτική ικανότητα. Πρέπει όμως να δοθεί μεγάλο βάρος στην έρευνα γύρω από τη μείωση της επιβλαβούς αντίδρασης αλκαλίων πυριτίου ASR. Η συγκεκριμένη βιομηχανία, που χρησιμοποιεί τα απέραντα ποσά ενέργειας και φυσικών πόρων και συμβάλλει στην παραγωγή του CO₂, μπορεί να βελτιώσει το αρχείο της με μια αυξανόμενη εμπιστοσύνη στα ανακυκλωμένα υλικά είτε σε αδρανή ή στο τσιμέντο. Ειδικά στις μέρες μας η περιβαλλοντική προστασία του αέρα, γης και υδάτων είναι αναγκαία και επιβάλλεται για να αποτραπούν μελλοντικές οικονομικό-περιβαλλοντικές καταστροφές. Το υλικό GF GG έχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε Πράσινη Τεχνολογία. είναι περιβαλλοντικά φιλικό και συντελεί στην βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη.



Διάγραμμα 3.6: Επίδραση ποσοστού χοντρόκοκκου GF GG στην αντοχή σκυροδέματος¹⁶



Διάγραμμα 3.7: Συστολή ξήρανσης σε 56 μέρες¹⁶



Διάγραμμα 3.8: Επίδραση ποσοστού GFVG στις τιμές Rate of Decay – n value σε σχέση με W/C=0.40-0.77 για τις 28 μέρες¹⁶

Τα αδρανή που προκύπτουν από επεξεργασία αποβλήτων, λόγω της προέλευσής τους και της συχνής ανομοιογένειά τους, προκαλούν, στον τελικό καταναλωτή/ μηχανικό /εργολάβο, αμφιβολίες για την αξιοπιστία των ιδιοτήτων τους. Θα πρέπει να βρεθούν τρόποι πιστοποίησης κάθε διαφορετικού υλικού που προωθείται στην αγορά ώστε τα υλικά αυτά, μεμονωμένα αλλά και στο σύνολό τους, να αποκτήσουν ακόμα και πλεονεκτήματα έναντι των πρωτογενών αντιστοιχών τους. Όπως συμβαίνει ήδη τα πιστοποιημένα οικοδομικά υλικά που είτε μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν είτε προέρχονται από διαδικασίες ανακύκλωσης είναι σκόπιμο να προτιμώνται και να είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο ή καταλόγους υλικών που θα ενημερώνονται συνεχώς.

¹⁷Αειφόρος Ανάπτυξη - Χρήση Αφρώδους/Κυτταρικού Γυαλιού ως Αδρανές Φωτιάδου Σουμέλα, 2010

Οι επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου πρέπει να θεωρήσουν την ανακύκλωση των αδρανών σαν επαγγελματική και ηθική τους υποχρέωση. Η επαγγελματική τους κατάρτιση τους δίνει τη δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά σε μια βιώσιμη κοινωνία και πόλη επιλέγοντας τη ανακύκλωση αλλά και τον σχεδιασμό κτηρίων για μελλοντική ανακύκλωση. Οφείλουν να ενημερώνονται τόσο για την ύπαρξη και εφαρμογή της σχετικής νομοθεσίας, όσο και για τις εφαρμοζόμενες πρακτικές και δράσεις στην περιοχή που δραστηριοποιούνται.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα όντως αποτελεί μια καινοτομία στην σημερινή εποχή που λέγεται ότι θα είναι η εποχή της οικολογίας, της ανακύκλωσης και της αειφόρου ανάπτυξης.

Όμως έχοντας μελετήσει τις διαδικασίες της ανακύκλωσης και τις αειφόρου ανάπτυξης, εξάγεται το συμπέρασμα πως δεν πρόκειται για δύο ταυτόσημους όρους, τουλάχιστον στον τομέα του σκυροδέματος.

Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα δεν αποτελεί πάντα την πιο οικολογική, την πιο εύχρηστη και ούτε καν πολλές φορές την πιο οικονομική λύση. Ο μηχανικός έχει να αντιμετωπίσει και την έλλειψη κανονισμών και νομοθεσίας. Δυστυχώς η πραγματικότητα στις κατασκευές είναι πως όταν τυπωθούν ολοκληρωμένοι κανονισμοί και οδηγίες για ένα υλικό, τότε αυτό παύει να είναι οικολογικό, οικονομικό και εύχρηστο καθώς κάποιο άλλο έχει πάρει τη θέση του.

Όσον αφορά τώρα για την αειφόρο ανάπτυξη στις κατασκευές, οι λύσεις που θα ήταν ωφέλιμο να παρατεθούν, να μελετηθούν και να γίνουν πραγματικότητα είναι ο καλύτερος σχεδιασμός και έλεγχος των εργασιών των έργων, ώστε να μην παραβιάζονται τα χρονοδιαγράμματα και να μην χάνονται υλικά, να κατασκευάζονται τα έργα με μεγαλύτερο προσδόκιμο ζωής και να δοθεί μεγάλη βάση στην συντήρηση και επισκευή των έργων.

Το μέλλον για τα ανακυκλωμένα αδρανή θα καθοδηγείται από μειωμένη διαθεσιμότητα χώρων υγειονομικής ταφής, μεγαλύτερη αποδοχή των προϊόντων, τη συνεχή ανακύκλωση των εντολών της κυβέρνησης, και τη συνεχιζόμενη φθορά του σε ένα μεγάλο απόθεμα των υφιστάμενων υποδομών, καθώς και από τις απαιτήσεις μιας υγιούς οικονομίας.

Το τελικό συμπέρασμα είναι, ότι με τη νέα τεχνολογία ανακύκλωσης εξασφαλίζονται οικονομικά οφέλη και προστασία του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μην αποτελεί πλέον υποχρέωση προς τη φύση αλλά και μία κερδοφόρο επιχείρηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανακύκλωση (επιμέλεια: Καθηγητής Ν. Μουσιόπουλος), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
2. Περιοδικό «Ανακύκλωση» (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2002) Τεύχος 44, «Απόβλητα από κατασκευές, κατεδαφίσεις και εκσκαφές».
3. Καλδέλλης Ι.Κ. και Π. Κωνσταντινίδης (2003) «Σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα ανακύκλωσης οικοδομικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση», Πρακτικά συνεδρίου HELECO '03, σελ. 255-263, Αθήνα
4. Σχέδιο Προεδρικού Διατάγματος με θέμα «Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση τους» (2003) Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.
5. Τσίμας Σ. και Σ. Τσιβιλής (2004) «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
6. <http://concretestructures.blogspot.gr/>
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete_recycling
8. <http://news.pathfinder.gr/misc/502560.html>
9. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/PUBLICATIONS/SCIENTIFIC_PUBLICATIONS/2010/2o_teuxos2010/04_3803.pdf
10. Galbenis C.-T. and S.Tsimas (2004) “Applicability study of recycled aggregates as raw materials in cement clinker manufacturing”, AMIREG 2004, Proceedings of International Conference, Chania, Greece.
11. Oikonomou N. (2004) “Recycled concrete aggregates”, Cement and Concrete Composites, Article in Press, Corrected Proof.
12. Symonds Group Ltd (1999) “Construction and Demolition management practices and their economic impacts”, Brussels.

13. School of Civil Engineering, Sustainable Technology Research Centre- STRC, Concrete and Masonry Research Group - CaMRG, Kingston University, Penhryn Road, Kingston Upon Thames, KT1 2EE, UK (2003-2006)
14. Meyer C. and Baxter, S. "Use of Recycled Glass for Concrete Masonry and Blocks", Final Report to New York State Energy Research and Development Authority, Rep. No. 97-15, Albany, NY, Nov. 1997.
15. Jin, W, "Alkali-Silica Reaction in Concrete with Glass Aggregate – A Chemo-Physico-Mechanical Approach", PhD Dissertation, Columbia University, New York, NY, 1998.
16. Jin, W, C. Meyer and S. Baxter, "Glasscrete – Concrete with Glass Aggregate", ACI Materials Journal, Mar - April, 2000.
17. <http://www.ecorec.gr>
18. <http://www.e-zine.gr/>
19. <http://www.fhwa.dot.gov/>
20. <http://www.goodquarry.com/>
21. <http://www.skyrodemanet.gr>