



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ -  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Τίτλος διπλωματικής εργασίας: Διερεύνηση και σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένων σκυροδεμάτων μεταξύ συμβατικών και μη συμβατικών αδρανών**

**Λάκκα Θεοδώρα, ΑΜ:6878**

**Επιβλέπων: Αυτουσμής Αθανάσιος, Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός,  
Λέκτορας Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής**

***Αθήνα, Ιανουάριος 2023***

## Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Λάκκα Θεοδώρα του Νικολάου με αριθμό μητρώου cw6878 φοιτήτρια του Προγράμματος Διπλωματικών Σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



**Η Διπλωματική Εργασία Εξετάστηκε Επιτυχώς από την κάτωθι  
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή**

**Σταυρούλα Δενεζάκη**  
Λέκτορας – Εφαρμογών

**Τριαντάφυλλος – Φίλης Κόκκινος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής



**Μαρία Αλογομιά**  
Λέκτορας - Εφαρμογών

## Πρόλογος

Η παρακάτω διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023, στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Το θέμα της συγκεκριμένης εργασίας πραγματεύεται τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος, αλλά και τη σύγκριση αυτού με αντίστοιχα συμβατικά και μη συμβατικά σκυροδέματα.

Στη συγκεκριμένη εργασία αναλύεται η προέλευση και των τριών τύπων σκυροδεμάτων, τα συστατικά, η μηχανική τους συμπεριφορά αλλά και οι εφαρμογές τους στην καθημερινότητα.

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής προέκυψε ύστερα από συζήτηση με τον επιβλέποντα καθηγητή καθώς και την εκδήλωση του ενδιαφέροντος μου για τον τομέα του σκυροδέματος και του εναλλακτικούς τρόπους ενίσχυσης του.

## **Ευχαριστίες**

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αυτουσμή Αθανάσιο Διπλ. Πολιτικό Μηχανικό, Λέκτορα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την πολύτιμη καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης για την επιστημονική συμβολή του σε αυτήν και κυρίως για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε όλο το προηγούμενο διάστημα.

## Περιεχόμενα

Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής εργασίας .....	1
Πρόλογος.....	3
Ευχαριστίες.....	4
Κατάλογος εικόνων.....	8
Κατάλογος πινάκων .....	13
Λεξιλόγιο.....	14
Περίληψη.....	16
Abstract.....	17
<b>1. Συμβατό σκυρόδεμα.....</b>	<b>18</b>
1.1. Ορισμός.....	18
1.2. Ιστορική αναδρομή .....	18
1.3. Κατηγορίες σκυροδέματος.....	21
1.4. Συστατικά σκυροδέματος.....	25
1.4.1. Αδρανή .....	25
1.4.2. Τσιμέντο .....	27
1.4.3. Νερό αναμίξεως.....	31
1.4.4. Πρόσθετα σκυροδέματος.....	31
1.5. Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.....	32
1.6. Κανονισμοί Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ).....	33
1.7. Ανθεκτικότητα σκυροδέματος .....	34
1.8. Συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα.....	34
1.8.1. Δομικός χάλυβας .....	36
<b>2. Μη συμβατό σκυρόδεμα.....</b>	<b>39</b>
2.1. Ορισμός.....	39
2.2. Σκυροδέματα από ανακυκλωμένα αδρανή .....	41
2.3. Ιδιότητες σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή .....	42
2.3.1. Εργασιμότητα ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....	42
2.3.2. Πυκνότητα ανακυκλωμένου νωπού σκυροδέματος .....	42
2.3.3. Θλιπτική αντοχή ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....	42
2.3.4. Συρρίκνωση ανακυκλωμένου σκυροδέματος .....	43
2.3.5. Μέτρο ελαστικότητας ανακυκλωμένου σκυροδέματος .....	43
2.3.6. Αντοχή ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε ψύξη-απόψυξη.....	44
2.3.7. Αντοχή ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε εφελκυσμό και κάμψη.....	44
2.3.8. Σύσπληξη ξήρανσης σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή .....	44
2.3.9. Ερπυσμός και διαπερατότητα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή.....	45
2.3.10. Βάθος ενανθράκωσης.....	45

2.3.11. Διείσδυση του χλωρίου .....	45
2.3.12. Μηχανισμός θραύσης.....	46
2.4. Ενίσχυση σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή.....	46
2.4.1. Προσθήκη ιπτάμενης τέφρας.....	46
2.4.2. Χρήση σκωρίας υψικαμίνου.....	47
2.4.3. Ανάμιξη δύο σταδίων (T SMA) .....	47
2.4.4. Ανάμιξη κονιάματος και ανάμιξη με άμμο .....	47
2.4.5. Προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή .....	48
2.5. Οικονομική προσέγγιση μη συμβατού σκυροδέματος.....	48
<b>3. Ινοπλισμένο σκυρόδεμα .....</b>	<b>50</b>
3.1. Ορισμός.....	50
3.2. Ιστορική αναδρομή .....	51
3.3. Μηχανισμός δυσθραυστότητας.....	52
3.4. Ίνες και αναλογίες ανάμιξης .....	55
3.5. Ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος .....	61
3.5.1. Εργασιμότητα.....	61
3.5.2. Αντοχή αζονικού εφελκυσμού .....	63
3.5.3. Αντοχή εφελκυσμού κάμψης .....	64
3.5.4. Αντοχή σε διάρρηξη .....	65
3.5.5. Αντοχή σε διάτμηση .....	65
3.5.6. Αντοχή σε κρούση .....	65
3.5.7. Μέτρο ελαστικότητας, ερπυσμός και συστολή ξήρανσης .....	66
3.5.8. Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	67
3.5.9. Ανάπτυξη ινοπλισμένων μιγμάτων εξαιρετικά υψηλής απόδοσης .....	68
3.6. Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	72
3.7. Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .....	74
3.7.1. Συστατικά παρασκευής ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος .....	74
3.7.2. Εφαρμογές ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	76
3.7.3. Σύγκριση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τον συμβατικό οπλισμό.....	77
3.7.4. Σύγκριση έγχυτου και εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	77
<b>4. Αριθμητικό παράδειγμα .....</b>	<b>79</b>
4.1. Σκοπός της άσκησης .....	79
4.2. Σύνθεση-Παρασκευή δοκιμίων.....	79
4.3. Διαστάσεις-Αναλογία χαλύβδινων ινών .....	79
4.4. Μηχανικές ιδιότητες χαλύβδινων ινών .....	80
4.5. Δεδομένα της άσκησης .....	80
4.6. Υπολογισμός αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη θραυόμενης δοκού από ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	82
4.7. Ανακεφαλαίωση.....	84
<b>5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>85</b>

**6. Βιβλιογραφικές αναφορές..... 87**



## Κατάλογος εικόνων

- Εικόνα 1** Παράδειγμα εφαρμογής υδραυλικού σκυροδέματος - Πηγή: Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος – Ιστορία – Εξέλιξη ([http://www.hcia.gr/userfiles/76f33141-2c60-4977-b1dd-0ee3da3ab524/history\\_1.jpg](http://www.hcia.gr/userfiles/76f33141-2c60-4977-b1dd-0ee3da3ab524/history_1.jpg))
- Εικόνα 2** Παράδειγμα εφαρμογής υδραυλικού σκυροδέματος - Πηγή: Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος – Ιστορία – Εξέλιξη ([http://www.hcia.gr/userfiles/76f33141-2c60-4977-b1dd-0ee3da3ab524/history\\_2.jpg](http://www.hcia.gr/userfiles/76f33141-2c60-4977-b1dd-0ee3da3ab524/history_2.jpg))
- Εικόνα 3** Αρχαίο θέατρο Πομπηίας - Πηγή: Odeon - Teatro Piccolo- Trip advisor ([https://www.tripadvisor.com.gr/Attraction\\_Review-g187786-d2204881-Reviews-Odeon\\_Teatro\\_Piccolo-Pompeii\\_Province\\_of\\_Naples\\_Campania.html#/media-atf/2204881/401996328:p/?albumid=-160&type=0&category=-160](https://www.tripadvisor.com.gr/Attraction_Review-g187786-d2204881-Reviews-Odeon_Teatro_Piccolo-Pompeii_Province_of_Naples_Campania.html#/media-atf/2204881/401996328:p/?albumid=-160&type=0&category=-160))
- Εικόνα 4** Εικόνα 4 Παρασκευή σκυροδέματος - Πηγή: GETIAN GENNERAL SERVICES - Σχεδιασμός σκυροδέματος (<http://ggs.com.cy/yphresies/schediasmos-skyrodematos>)
- Εικόνα 5** Παράδειγμα χαρακτηριστικών δοκιμών - Πηγή: Στοιχεία σκυροδέματος Ευάγγελος Π. Φινδανής Τοπογράφος Μηχανικός MSc - (<https://vfindanis.files.wordpress.com/2018/07/cf83cf84cebfc9cf87ceb5ceafceb1cf83cebafcf85cf81cebfc4ceadcebcb1cf84cebfcf82.pdf>)
- Εικόνα 6** Μηχάνημα παραγωγής σκυροδέματος στο χώρο του εργοστασίου - Πηγή: ELCON POLSKA - ELKONMIXMASTER – 30 (<https://elkon.eu/wp-content/uploads/2020/04/polonyas-768x472.jpg>)
- Εικόνα 7** Μικρή αντλία σκυροδέματος - Πηγή: BOSSGOO (<https://gr.bossgoo.com/product-detail/crawler-dumper-truck-mini-for-sale-56617811.html>)
- Εικόνα 8** Ταξινόμηση των αδρανών υλικών βάσει του σχήματος τους – Πηγή: Μεταπτυχιακή εργασία « ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ », Παπαδάκη Χ. Ζ. (<http://artemis.library.tuc.gr/MT2000-0007/MT2000-0007.pdf>)
- Εικόνα 9** Διαδικασία κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα - Πηγή: Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών υλικών - Διαδικασία ([http://oikaluteroteri.weebly.com/uploads/1/2/1/5/12150848/3390300\\_orig.jpg](http://oikaluteroteri.weebly.com/uploads/1/2/1/5/12150848/3390300_orig.jpg))
- Εικόνα 10** Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης - Πηγή: TEI Πειραιά - Εργαστήριο εδαφομηχανικής (<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/CIV117/1.%20%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20%CE%9C%CE%B1%CE%B8%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82/1.%20%CE%9A%CE%BF%CE%BA%CE%BA%CE%BF%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7%20%CE%95%CE%B4%CE%B1%CF%86%CF%8E%CE%BD.pdf>)

- Εικόνα 11** Τελική κωδικοποίηση τσιμέντου - Πηγή: Σχήμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας
- Εικόνα 12** Επιβλέπων μηχανικός κατά τη διαδικασία μελέτης της σύνθεσης του σκυροδέματος - Πηγή: ΓΕΩΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΤΕ (<https://www.geomeletitiki.gr/wp-content/uploads/2020/08/I-Tansey-008-%C2%A9-Jevtic-.jpg>)
- Εικόνα 13** Ενίσχυση δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό (κόκκινη γραμμή) στην περιοχή της εφελκυστικής καταπόνησης – Πηγή: Βικιπαίδεια ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0e/Beam\\_stress\\_01.PNG/300px-Beam\\_stress\\_01.PNG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0e/Beam_stress_01.PNG/300px-Beam_stress_01.PNG))
- Εικόνα 14** Τυπικό παράδειγμα οπλισμένου σκυροδέματος – Πηγή: SkyCiv (<https://skyciv.com/wp-content/uploads/2019/02/image2.jpg>)
- Εικόνα 15** Χαλύβδινες ράβδοι οπλισμού – Πηγή: Bountimas (<https://www.bountimas.com/wp-content/uploads/2016/11/xalyvas.jpg>)
- Εικόνα 16** Διάφορες μορφές χάλυβα ως δομικό υλικό – Πηγή: Skoutaris Steel (<https://skoutarissteel.com/wp-content/uploads/2011/12/Basic-Structural-Steel-Shapes.jpg>)
- Εικόνα 17** Προσθήκη χαλύβδινων ινών για προέκταση κατοικίας – Πηγή: Design & Construction – Τεχνικό γραφείο μελετών και κατασκευών (<https://www.design-construction.gr/wp-content/uploads/2014/01/perissos-2.png>)
- Εικόνα 18** Σωρός οικοδομικών αποβλήτων - Πηγή: B2GREEN ([https://www.b2green.gr/images\\_articles/78091.jpg](https://www.b2green.gr/images_articles/78091.jpg))
- Εικόνα 19** Μπάζα κατεδαφίσεων - Πηγή: Alithia.gr ([https://www.alithia.gr/sites/default/files/styles/arhra825/public/diafora/apovlita\\_kat\\_edafigis.jpg](https://www.alithia.gr/sites/default/files/styles/arhra825/public/diafora/apovlita_kat_edafigis.jpg))
- Εικόνα 20** Απόβλητα εργοταξίου - Πηγή: KRONOS EKO (<https://kronoseco.gr/wp-content/uploads/2020/11/adrani.jpg>)
- Εικόνα 21** Απόβλητα από εκσκαφές – Πηγή: B2GREEN ([https://news.b2green.gr/wp-content/uploads/2021/01/B2Green\\_Aporrimmata\\_Debris.jpg](https://news.b2green.gr/wp-content/uploads/2021/01/B2Green_Aporrimmata_Debris.jpg))
- Εικόνα 22** Απόβλητα οδοποιίας - Πηγή: Apollonaekk (<https://apollonaekk.gr/geodiCarousel/contact.jpg>)
- Εικόνα 23** Διάβρωση οπλισμού του σκυροδέματος - Πηγή: Διάβρωση και προστασία οπλισμένου σκυροδέματος - Λήδα Γκίβαλου, Μαρία Ελένη Μιτζήθρα (<https://www.chemeng.ntua.gr/courses/dpm/pdf-files/07-oplismeno-skyrodemagivalou.pdf>)
- Εικόνα 24** Ίνες βασάλτη - Πηγή: EL-N.DECOREXPRO - (<https://decorexpro.com/images/article/orig/2017/12/fibrovolochno-dlya-styazhki-polanaznachenie-i-rashod-10.jpg>)
- Εικόνα 25** Μόνιμη μονάδα ανακύκλωσης αδρανών - Πηγή: Cyclades24 (<https://cyclades24.gr/wp-content/uploads/2022/02/anakyklosi-mpazon.jpg>)
- Εικόνα 26** Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για ινοπλισμένο και άοπλο σκυρόδεμα - Πηγή: Διπλωματική εργασία « ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ », των Τζανετή Νικόλαου και Kacapani Andrea  
(<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/42751/test%20diplomatikh%206.pdf?sequence=1>)

**Εικόνα 27** Είδη τεχνιτών ινών σύμφωνα με την BISFA - Πηγή: Διπλωματική εργασία « Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος », της Παπαδάτου Μαρίας  
(<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/40164/%ce%94%ce%b9%cf%80%ce%bb%cf%89%ce%bc%ce%b1%cf%84%ce%b9%ce%ba%ce%ae.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

**Εικόνα 28** Καμπύλη φορτίου-βύθισης (δοκού σε κάμψη) κανονικού και ινοπλισμένου σκυροδέματος - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 29** Διατομή μιας οπλισμένης με ίνες χάλυβα δοκού μετά από αστοχία που δείχνει ότι η αιτία της αστοχίας ήταν η εξόλκευση των ινών - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 30** Μηχανισμός αύξησης της πλαστιμότητας κάμψης του σκυροδέματος με ίνες - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 31** Επιρροή των ινών στα διαφορετικά στάδια εφελκυστικής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 32** Μεταλλικές ίνες με άγκιστρα στα άκρα - Πηγή: ΣΙΔΕΝΟΡ  
([https://sidenor.gr/wp-content/uploads/2016/09/INOMIX\\_2017\\_1400x600.jpg](https://sidenor.gr/wp-content/uploads/2016/09/INOMIX_2017_1400x600.jpg))

**Εικόνα 33** Μεταλλικές ίνες με άλλη παραλλαγή - Πηγή: 3 bp blogspot  
(<https://3.bp.blogspot.com/-6GU6jtDMFmo/WSpgnJDaQKI/AAAAAAAAhsc/zdtlEb8Rm5oxgl8xe1-d36frhToNAVizQCLcB/s1600/B1133630957%255B1%255D.jpg>)

**Εικόνα 34** Ίνες γυαλιού αλκαλικής αντίστασης, υψηλής ποιότητας - Πηγή: bsg i.nbxc  
(<https://bsg-i.nbxc.com/product/b9/af/94/8911f2e8b87a7631f20bc7c5e6.jpg>)

**Εικόνα 35** Επίδραση των ινών στη δημιουργία ρωγμών κατά περίπτωση - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 36** Παραμορφωμένες ίνες χάλυβα ψυχρής έλασης - Πηγή: Bozios  
(<https://www.bozios.gr/wp-content/uploads/NOVOCON.jpg>)

**Εικόνα 37** Πολύ λεπτές ίνες πολυπροπυλενίου - Πηγή: ClickandBuild  
(<https://www.clickandbuild.gr/datafiles/1070l.jpg>)

**Εικόνα 38** Ινίδια χάλυβα - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 39** Ινίδια πολυπροπυλενίου - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

- Εικόνα 40** Μίγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος - Πηγή: encrypted (<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQqW-COagy7STsfX4NoYcQa6hoQJdijEqrw&usqp=CAU>)
- Εικόνα 41** Επίδραση του λόγου διαστάσεων των ινών στην εργασιμότητα του κονιάματος - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)
- Εικόνα 42** Επίδραση του μεγέθους των αδρανών και της περιεκτικότητας σε ίνες στην εργασιμότητα - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)
- Εικόνα 43** Εξοπλισμός για τη δοκιμή Vebe, που αναπτύχθηκε από τον Σουηδό μηχανικό V. Böhner - Πηγή: Civillearners (<https://civillearners.com/wp-content/uploads/2021/09/g2.png>)
- Εικόνα 44** Δοκιμή αξονικού εφελκυσμού και επιρροή αποτελεσμάτων από περιεκτικότητα σε ίνες - Πηγή: ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, του ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΧΑΡΗ (<http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/Files/Content/42/%CE%98%CE%95%CE%9F%CE%94%CE%A9%CE%A1%CE%9F%CE%A5KL.pdf>)
- Εικόνα 45** Μέτρηση καμπτικής αντοχής με τη μέθοδο τριών και τεσσάρων σημείων - Πηγή: ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, του ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΧΑΡΗ (<http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/Files/Content/42/%CE%98%CE%95%CE%9F%CE%94%CE%A9%CE%A1%CE%9F%CE%A5KL.pdf>)
- Εικόνα 46** Επιρροή των ινών στην αντοχή σε κρούση - Πηγή: ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, του ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΧΑΡΗ (<http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/Files/Content/42/%CE%98%CE%95%CE%9F%CE%94%CE%A9%CE%A1%CE%9F%CE%A5KL.pdf>)
- Εικόνα 47** Επίδραση του οπλισμού των ινών στην αντοχή πρώτης ρωγμής - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)
- Εικόνα 48** Επίδραση των με συστροφή ινών και των ινών με οδόντωση στην αντοχή κρούσης - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)
- Εικόνα 49** Σχετική βελτίωση στις διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος από την όπλιση με ίνες - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)
- Εικόνα 50** Εφαρμογή εξαιρετικά υψηλής αποτελεσματικότητας ινοπλισμένου μίγματος σε μια γέφυρα μικρού πλάτους. Με άνοιγμα 120 m και βάθος αψίδας 130 cm η γέφυρα για πεζούς Cheong στην Κορέα, αποτελεί παγκόσμιο ρεκόρ λυγηρότητας (δηλ. του λόγου πλάτους-ανοίγματος) - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)
- Εικόνα 51** Στην πάνω εικόνα φαίνεται ο τρόπος αστοχίας του σκυροδέματος SIFCON, που είναι διαφορετικός απ'ό,τι του συμβατικού σκυροδέματος. Στις κάτω εικόνες

παρουσιάζεται η εντυπωσιακή ικανότητα παραμόρφωσης του SIFCON έναντι του οπλισμένου στοιχείου σκυροδέματος που υποβάλλεται σε διάτμηση παρόλο που και τα 2 δοκίμια είχαν τσιμεντόπαστα παρόμοιων χαρακτηριστικών - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 52** Καμπύλη εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης και εύρους ρωγμής-παραμόρφωσης για ένα σκληρυμένο ECC - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 53** Ελεγχόμενη βλάβη του υδραυλικού μίγματος ECC - Πηγή: P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - μικροδομή, ιδιότητες και υλικά (βιβλίο)

**Εικόνα 54** Σύγχρονη μηχανή παρασκευής ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος - Πηγή: bsg i.nbx (https://bsg-i.nbx.com/product/1e/af/ab/0adc759ec528daafa897548a51.jpg@4e\_500w\_500h.src%7Cwatermark=2&text=Z3IuaHdtYWMuY29t&t=75&color=I0ZGRkZGRg%3D%3D&size=41&p=9%7C95Q.webp)

**Εικόνα 55** Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (EFNARC) - Πηγή: ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, του ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΧΑΡΗ (http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/Files/Content/42/%CE%98%CE%95%CE%9F%CE%94%CE%A9%CE%A1%CE%9F%CE%A5KL.pdf)

**Εικόνα 56** Εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος - Πηγή: Monoiso (https://www.monoiso.gr/wp-content/uploads/2018/03/gunite-1200x675.jpg)

**Εικόνα 57** Μηχανή κάμψης του εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος - Πηγή: Φωτογραφία από το εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

**Εικόνα 58** Διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης άοπλης δοκού - Πηγή: Excel

**Εικόνα 59** Διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης ινοπλισμένης δοκού - Πηγή: Excel

## **Κατάλογος πινάκων**

- Πίνακας 1** Κατηγορίες σκυροδέματος βάσει του όγκου
- Πίνακας 2** Τυπικές αναλογίες των υλικών σε ανάμιξη σκυροδέματος διαφόρου αντοχής
- Πίνακας 3** Κατηγορίες σκυροδέματος βάση του Ευρωκώδικα 2
- Πίνακας 4** Βασικοί τύποι τσιμέντου
- Πίνακας 5** Κατηγορίες αντοχής τσιμέντου
- Πίνακας 6** Ενδεικτική διάρκεια ζωής σχεδιασμού ΕΛΟΤ EN 206-1
- Πίνακας 7** Τυπικές ιδιότητες ινών
- Πίνακας 8** Ενδεικτικές αναλογίες ανάμιξης ινοπλισμένου σκυροδέματος κανονικού βάρους
- Πίνακας 9** Μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σκυροδεμάτων
- Πίνακας 10** Έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα
- Πίνακας 11** Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα

## Λεξιλόγιο

### Ακρωνύμια:

<b>ΔΕΗ</b>	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
<b>ΕΤΕ</b>	Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος
<b>ΕΛΟΤ</b>	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης
<b>ΚΤΣ</b>	Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος
<b>ΦΕΚ</b>	Φύλλο Εφημερίδας Κυβερνήσεως
<b>ΩΣ</b>	Ωπλισμένο Σκυρόδεμα
<b>ACI</b>	(American Concrete Institute) Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος
<b>CEN</b>	(Committee European de Normalisation) Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης

### Ξένες λέξεις/εκφράσεις:

<b>béton armé</b>	-	μπετόν αρμέ
<b>curling up</b>	-	κυματοειδής συστροφή
<b>compacting factor test</b>	-	συντελεστής συμπακνωσιμότητας
<b>expansive cement concrete</b>	-	διογκωτικό τσιμέντο
<b>latex modified concrete</b>	-	σκυρόδεμα τροποποιημένο με latex
<b>fiber reinforced concrete</b>	-	ινοπλισμένο σκυρόδεμα
<b>fiber reinforced shotcrete</b>	-	ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
<b>prestressed concrete</b>	-	προεντεταμένο σκυρόδεμα
<b>clinker</b>	<b>K</b>	κλίνκερ
<b>granulated blastfurnace slag</b>	<b>S</b>	κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου
<b>natural pozzolana</b>	<b>P</b>	φυσική ποζολάνη
<b>natural calcined pozzolana</b>	<b>Q</b>	φυσική ψημένη ποζολάνη
<b>siliceous fly ash</b>	<b>V</b>	πυριτική ιπτάμενη τέφρα
<b>calcareous fly ash</b>	<b>W</b>	ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα
<b>burnt shale</b>	<b>T</b>	ψημένος σχιστόλιθος
<b>limestone</b>	<b>L</b>	ασβεστόλιθος
<b>silica flour</b>	<b>D</b>	πυριτική παιπάλη

### Χημικά στοιχεία/ενώσεις:

<b>Al</b>	Αργίλος
<b>Ca</b>	Ασβέστιο
<b>Fe</b>	Σίδηρος
<b>Si</b>	Πυρίτιο
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Τριοξείδιο του αργίλου
<b>CaO</b>	Οξείδιο του ασβεστίου
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Πυριτικό τριασβέστιο

<b>CO<sub>2</sub></b>	Διοξείδιο του άνθρακα
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Ανθρακικό ασβέστιο
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Υδροξείδιο του ασβεστίου
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Τριοξείδιο του σιδήρου
<b>MgO</b>	Οξείδιο του μαγνησίου
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Διοξείδιο του πυριτίου



## Περίληψη

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πιο ευρέως διαδεδομένο δομικό υλικό από την αρχαιότητα έως και σήμερα. Στο πέρασμα των χρόνων έχει υποστεί αρκετές διαφοροποιήσεις στην παρασκευή του, οι οποίες στοχεύουν τόσο στην εύκολη διαχείρισή του ως υλικό, όσο και στη μέγιστη λειτουργικότητα του στις διάφορες κατασκευές που χρησιμοποιείται. Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να αναλυθεί βάσει των αδρανών υλικών που συμμετέχουν στην δημιουργία του, καθώς και στα λοιπά συστατικά που συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής του συμπεριφοράς. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται το συμβατό σκυρόδεμα, το οποίο και βρίσκει εφαρμογή στο μεγαλύτερο μέρος των κατασκευών. Γίνεται αναφορά στην ιστορική του εξέλιξη, στις κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζεται και φυσικά αναπτύσσονται λεπτομερώς τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή του. Στη συνέχεια, και με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη σύγχρονη εποχή, γίνεται λόγος για το μη συμβατικό σκυρόδεμα. Η αυξημένη ζήτηση του σκυροδέματος αλλά και η ανησυχία για την προστασία του περιβάλλοντος, οδήγησαν τους νεότερους μελετητές στο να αναζητήσουν εναλλακτικούς τρόπους με τους οποίους θα μπορούσε να παρασκευαστεί αυτό το περιζήτητο μίγμα. Στο δεύτερο σκέλος λοιπόν αυτής την εργασίας, παρουσιάζεται το σκυρόδεμα το οποίο προκύπτει από την αξιοποίηση ανακυκλωμένων αδρανών υλικών. Περιγράφονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αναφέρονται οι μηχανικές ιδιότητες τις οποίες παρουσιάζει, οι τρόποι που θα μπορούσαν να ενισχύσουν τα αδύναμα στοιχεία του και γίνεται μια μικρή οικονομική προσέγγιση της παραγωγής του. Έπειτα, το τρίτο και εκτενέστερο μέρος της παρούσας διπλωματικής ασχολείται με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Ένα σκυρόδεμα που τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται ολοένα και πιο γνωστό ιδιαίτερα στον κατασκευαστικό κλάδο. Παρασκευάζεται με την προσθήκη διάφορων τύπων ινών στο απλό σκυρόδεμα, οι οποίες αναγράφονται παρακάτω, και γίνεται γνωστή η σημαντική βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του μέσα από την συγκεκριμένη διαδικασία. Στο κεφάλαιο που αφορά στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα περιγράφεται επίσης η ιστορική του αναδρομή, οι διάφορες ιδιότητες του, καθώς και οι εφαρμογές στις οποίες συναντάται στη σημερινή εποχή. Είναι βέβαιο πως δεν θα μπορούσε να αντικαταστήσει πλήρως τον συμβατικό οπλισμό, όμως σε αρκετές περιπτώσεις θα πρέπει να προτιμάται η χρήση του τόσο για τα οικονομικά οφέλη, όσο και για την ουσιαστική συνεισφορά του σε κάποιες καταπονήσεις. Ένα μικρό αριθμητικό παράδειγμα θα βοηθήσει να κατανοηθεί καλύτερα η βελτίωση της μηχανικής του συμπεριφοράς σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα και θα παραθέσει κάποια συμπεράσματα από τη χρησιμοποίησή του στις κατασκευές. Στο πέρασμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας εξάγονται κάποια τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από τη σύγκριση των διαφορετικών τύπων σκυροδεμάτων.

## Abstract

Concrete is the most widespread construction material from ancient times to the present day. Over the years, it has undergone several variations in its preparation, which aim both at its easy handling as a material, and at its maximum functionality in the various constructions it is used in. The purpose of this thesis is to analyze based on the inert materials that participate in its creation, as well as the other components that contribute to the improvement of its mechanical behavior. In the first part, compatible concrete is presented, which is used in most constructions. Reference is made to its historical development, the categories into which it is divided and, of course, the elements used in its preparation are developed in detail. Next, and with particular interest for the modern era, there is talk of unconventional concrete. The increased demand for concrete as well as the concern for the protection of the environment, led the younger scholars to look for alternative ways in which this sought-after mixture could be prepared. In the second part of this work, the concrete that results from the utilization of recycled aggregates is presented. The advantages and disadvantages compared to conventional concrete are described. The mechanical properties are mentioned, the ways that could strengthen its weak elements and a small economic approach to its production is made. Then, the third and most extensive part of this dissertation deals with fiber reinforced concrete. A concrete that in recent decades has become increasingly well-known, especially in the construction industry. It is prepared by adding various types of fibers to plain concrete, which are also known below, and the significant improvement of its mechanical behavior through this specific process is known. In the chapter of fiber-reinforced concrete, its historical background is also described, its various properties, as well as the applications in which it is found today. It is certain that it could not completely replace conventional armament, but in several cases its use should be preferred both for the economic benefits and for its substantial contribution to some stresses. A small numerical example will help to better understand the improvement of its mechanical behavior compared to unreinforced concrete and will quote some conclusions from its use in constructions. At the end of this specific thesis, some final conclusions are drawn through the comparison of the different types of concrete.

## 1. Συμβατό σκυρόδεμα

### 1.1. Ορισμός

Το σκυρόδεμα είναι το κονίαμα, του οποίου το συνδετικό υλικό είναι το τσιμέντο. Κονίαμα ονομάζεται το μίγμα που χρησιμοποιείται στις οικοδομικές κατασκευές με σκοπό τη σύνδεση των υλικών (π.χ. τούβλα, πέτρες κτλ.). Αποτελείται από τσιμέντο σε μορφή σκόνης, θραύσματα αδρανών, νερό και άλλα πρόσθετα. Στο σκυρόδεμα συγκεκριμένα, ως αδρανή χρησιμοποιούνται το χαλίκι, το γαρμπήλι αλλά και η άμμος. Η ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό σχηματίζει τον τσιμεντοπολτό, ο οποίος λειτουργεί ως κόλλα μεταξύ των αδρανών υλικών και τελικά παράγεται ο τεχνητός λίθος σκυρόδεμα. Στο παρελθόν χρησιμοποιείτο και ο όρος "μπετόν αρμέ" προερχόμενος από την γαλλική ονομασία (béton armé). Η αρχική του σύσταση είναι ρευστή και με το πέρασμα του χρόνου αλλά και μιας σειράς εξωθερμικών χημικών διεργασιών, στερεοποιείται και αποκτά τη ζητούμενη φέρουσα ικανότητά του. Σε ορισμένες περιπτώσεις προστίθενται στο σκυρόδεμα ειδικά πρόσμικτα υλικά για τη βελτίωση μιας ή περισσότερων ιδιοτήτων του. Ανάλογα με την εφαρμογή του, ελέγχονται και τα χαρακτηριστικά του στην πάροδο του χρόνου (αρχική ανάμιξη, διάστρωση, εργασιμότητα, ανθεκτικότητα, κόστος κτλ.).

Το σκυρόδεμα αποτελεί παγκοσμίως το πιο γνωστό δομικό υλικό, καθώς παρουσιάζει υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα, αποδοχή στις περισσότερες κλιματολογικές συνθήκες, έχει σχετικά χαμηλό κόστος αλλά και άμεση παραγωγή.

### 1.2. Ιστορική αναδρομή

Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα αποτελούν δυο έννοιες σχεδόν ίδιες για τον μέσο καταναλωτή. Αυτό που αναγνωρίζεται είναι το τελικό προϊόν, δηλαδή το σκυρόδεμα. Η εξέλιξή τους στο πέρασμα του χρόνου, συνδέεται άμεσα. Η δημιουργία ενός τεχνητού λίθου που προκύπτει από την ανάμιξη φυσικών αδρανών με συνδετικές κονίες και νερό, έχει μετεξελιχθεί στο σημερινό σκυρόδεμα και η διάδοσή του μετράει πάνω από 9.000 έτη.

Το αρχαιότερο γνωστό σκυρόδεμα χρονολογείται κατά το 7000 π.Χ. σε μια περιοχή στα νότια της Γαλιλαίας. Η ανακάλυψή του έγινε κατά τη διάνοιξη ενός δρόμου το 1985. Στη σύνθεσή του βρέθηκε ασβέστης και πέτρες. Η λάσπη που προκύπτει από την ανάμιξη του ασβέστη, του νερού και της άμμου, έρχεται σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα του ατμοσφαιρικού αέρα και σκληραίνει, οπότε γίνεται στερεό σώμα. Η ένωση και η συγκόλληση του κονιάματος αυτού με τις πέτρες, δημιούργησε την πρώτη μορφή σκυροδέματος.

Επίσης ένα εύρημα σκυροδέματος αποτελεί δάπεδο σε μια προϊστορική καλύβα στις όχθες του Δούναβη στη Γιουγκοσλαβία και χρονολογείται κατά το 5600 π.Χ. Κατά το 2500 π.Χ. στη μεγάλη πυραμίδα της Αιγύπτου, οι λίθοι που έχουν χρησιμοποιηθεί φαίνεται να συνδέονται μεταξύ τους με μια κονία είτε από ασβέστη είτε από γύψο. Υπάρχουν τοιχογραφίες στις οποίες γίνεται αναπαράσταση της διαδικασίας παρασκευής του ασβεστοκονιάματος και αξιοποίηση του υλικού στο χτίσιμο. Στην κατασκευή του Σινικού Τείχους επίσης φαίνεται να χρησιμοποιήθηκε κάποιο τσιμεντοειδές υλικό την περίοδο εκείνη. Η τεχνική αυτή του χτισίματος δεν άργησε να ταξιδέψει στην Αρχαία Ελλάδα όπου καθιερώθηκε η επικάλυψη πλίνθων από πηλό με μίγματα από ασβέστη.

Σύμφωνα με τον Ρωμαίο αρχιτέκτονα-συγγραφέα Vitruvius μια πρόδρομη έννοια του σημερινού σκυροδέματος είναι το "έμπλεκτον" υλικό, που περιγράφει την ανάμιξη μικρών κομματιών λίθων με ένα συνδετικό κονίαμα. Σε μοναστήρι της Ελβετίας, κατά το 1414 μ.Χ. βρέθηκαν χειρόγραφα του με σαφείς οδηγίες για την παρασκευή κονιάματος από ασβέστη και νερό το οποίο έπρεπε να έρθει σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ώστε να πήξει και να πάρει την τελική του μορφή. Στην Αρχαία Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά τα υδραυλικά σκυροδέματα τα οποία έπηζαν και σκλήραιναν τόσο σε επαφή με τον αέρα όσο και σε επαφή με το νερό. Είναι γνωστό πως τέτοιου είδους σκυροδέματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο πέρασμα του χρόνου και στις επιδράσεις του εξωγενούς περιβάλλοντος. Οι Έλληνες χρησιμοποιούν υδραυλικά κονιάματα από τότε μέχρι και σήμερα με χαρακτηριστικά παραδείγματα:

- i) Μίγμα από ασβέστη και άμμου από το ηφαίστειο της Θήρας ή της Νισύρου. Το μίγμα αυτό έχει τη δυνατότητα να πήξει και να σκληραίνει μέσα στο νερό χωρίς να διαλύεται όπως τα ασβεστοκονιάματα.



Εικόνα 1 Παράδειγμα εφαρμογής υδραυλικού σκυροδέματος

- ii) Θαλάσσια έργα με χρήση θραυσμάτων από κεραμίδια και πλίνθων από ασβέστη (Ρόδος, Δήλος).
- iii) Διάφορα άλλα υλικά, όπως τέφρες (Κόρτυς Αρκαδία), σιδερόσκονη (Αγορά Αθηνών), πρωτοξείδιο του μόλυβδου (Λαύριον).



Εικόνα 2 Παράδειγμα εφαρμογής υδραυλικού σκυροδέματος

Λόγω των Ελληνικών αποικιών στην Ιταλία κατά το 300 π.Χ., οι Ρωμαίοι πήραν τις γνώσεις αυτές και τις εξέλιξαν τόσο στον τομέα των αερικών κονιαμάτων, όσο και στην ανάμιξη ασβέστη με ηφαιστειακή γη που προμηθεύονταν από τον Βεζούβιο (υδραυλικά κονιάματα). Την περίοδο εκείνη καθιερώθηκε το όνομα "Ποζολάνες" στα ηφαιστειακά αυτά υλικά από το

χωριό Pozzuoli, αλλά και σε άλλα με παρόμοιες ιδιότητες (ορισμένες Ιπτάμενες Τέφρες-πυριτική παιπάλη). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για τα ποζολανικά τσιμέντα και η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη. Ένα από τα σημαντικότερα έργα των Ρωμαίων κατά το 75 π.Χ. είναι το αρχαίο θέατρο που βρίσκεται στην περιοχή της Πομπηίας και η χωρητικότητά του είναι 20.000 θέσεις.



Εικόνα 3 Αρχαίο θέατρο Πομπηίας

Λίγο αργότερα οι Ρωμαίοι άρχισαν να προσθέτουν στο σκυρόδεμα επιπλέον υλικά για να βελτιώσουν τις ιδιότητες του, τα αντίστοιχα σημερινά χημικά πρόσθετα. Αξιοσημείωτη ήταν και η χρήση αίματος, υλικό που εισήγαγε αέρα μέσα στο σκυρόδεμα ώστε να επιτευχθεί η αύξηση της εργασιμότητας και η ανθεκτικότητά του έναντι παγετού. Χαρακτηριστική επίσης ήταν και η προσθήκη τριχών από ζώα, αλόγων συνήθως, υλικό που θυμίζει τη χρήση πλαστικών και χαλύβδινων ινών στις μέρες μας και αυτό δεν είναι άλλο από το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Παρόμοια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και για την κατασκευή των κατώτερων επιπέδων στην Αγία Σοφία της Κωνσταντινούπολης κατά το 540 μ.Χ.

Κάποια χρόνια μετά, κατά το 1414 μ.Χ. η ανακάλυψη χειρόγραφων και πάλι του Vitruvius ήρθε για να αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον σχετικά με το σκυρόδεμα. Πιστοποίησε για πρώτη φορά τη χρήση ποζολανικού κονιάματος στη νεότερη εποχή και συγκεκριμένα στην κατασκευή της Παναγίας των Παρισίων. Ωστόσο καθοριστικό ρόλο στην αξιοποίηση του τσιμέντου όπως είναι σήμερα συντέλεσε ο Άγγλος μηχανικός John Smeaton κατά το 1700 μ.Χ. Ανέλαβε να ανακατασκευάσει έναν ξύλινο φάρο που είχε ισοπεδωθεί την πρώτη φορά εξαιτίας μιας πυρκαγιάς και την δεύτερη λόγω θύελλας. Ήταν προκαθορισμένη η κατασκευή του από πέτρα εκείνη τη φορά όμως η θάλασσα δεν επέτρεπε στα γνωστά ασβεστοκονιάματα να πήξουν και να σκληρύνουν. Όπως ήταν λογικό στράφηκε στην αναζήτηση άλλων υλικών που θα του προσέφεραν ασφαλές αποτέλεσμα. Έτσι διαπίστωσε πως τα ασβεστοκονιάματα με ασβέστη που περιείχε άργιλο, μπορούσαν να πήξουν σε επαφή με τον αέρα αλλά κυρίως μπορούσαν να πήξουν και σε επαφή με το νερό. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη χρήση του τσιμέντου με τη σημερινή του μορφή. Ακολούθησαν διάφορες άλλες ευρεσιτεχνίες στον τομέα αυτό όπως του James Parker με το "Ρωμαϊκό τσιμέντο". Σημαντική στιγμή στην ιστορία του τσιμέντου αποτελεί η προσφορά ενός υλικού από τον Άγγλο μηχανικό Joseph Aspdin για το οποίο πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Το όνομα του υλικού παραμένει έως και σήμερα και δεν είναι άλλο από το "τσιμέντο Portland". Πήρε την ονομασία αυτή διότι το χρώμα του τσιμέντου όταν πια είχε σκληρύνει θύμιζε ιδιαίτερα το χρώμα των πετρωμάτων του Portland. Πλέον στις

εγκαταστάσεις της Βρετανικής Τσιμεντοβιομηχανίας διατηρείται ένας από τους πέτρινους κλιβάνους που χρησιμοποίησε ο γιος του Aspdin, William για την παραγωγή του τσιμέντου.

Έκτοτε το τσιμέντο πέρασε από αρκετά στάδια ώστε να επιτευχθεί το σημερινό επίπεδο παραγωγής του. Κατά το 1816 μ.Χ. κατασκευάστηκε η πρώτη γέφυρα στη Γαλλία από άοπλο σκυρόδεμα, ενώ το 1818 μ.Χ. πρωτοεμφανίστηκε η προσθήκη σφυρήλατου σιδήρου σε αυτό από τον Βρετανό μηχανικό Ralph Dodd. Έτσι άρχισε να γίνεται λόγος για την έννοια του οπλισμού στο σκυρόδεμα με εφαρμογή σε δάπεδα αλλά και προσθήκη συρμάτων για την ενίσχυση γλαστρών σκυροδέματος από τον Joseph Monier κατά το 1850-1861 μ.Χ. Τελικά στο Παρίσι έγινε η κατασκευή του πρώτου οικοδομήματος από σύστημα οπλισμένου σκυροδέματος όπως αναφέρεται σε χρονολογία 1902 μ.Χ. από τον August Rerrert. Ήταν η πρώτη χρήση φέροντος οργανισμού με υποστυλώματα, δοκούς αλλά και πλάκες χωρίς φέρουσες τοιχοποιίες σε πολυκατοικία. Ύστερα η τεχνολογία γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη και στον τομέα των δομικών υλικών με την ένταξη του χάλυβα, χημικών πρόσθετων, της διαδικασίας προέντασης αλλά και την χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος, γεγονός που οδήγησε και στην βελτίωση του ποιοτικού ελέγχου αλλά και της παραγωγής.

Σήμερα παράγονται παγκοσμίως πάνω από 1,5 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου ανά έτος, ενώ το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από αυτό ξεπερνά τα 10 δισεκατομμύρια τόνους. Είναι αναμφίβολο πως τα δυο αυτά υλικά αποτελούν τα πλέον σπουδαιότερα υλικά στην εποχή μας.



Εικόνα 4 Παρασκευή σκυροδέματος

### 1.3. Κατηγορίες σκυροδέματος

Με βάση το βάρος ανά μονάδα όγκου το σκυρόδεμα μπορεί να διακριθεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

Κατηγορίες σκυροδέματος	Βάρος σκυροδέματος (kg/m <sup>3</sup> )
Ελαφρο-σκυρόδεμα	1800
Σκυρόδεμα κανονικού βάρους	2400

Βαρύ σκυρόδεμα	3200
----------------	------

**Πίνακας 1** Κατηγορίες σκυροδέματος βάσει του όγκου

Το πιο χρησιμοποιούμενο σκυρόδεμα σε δομικές κατασκευές είναι του κανονικού βάρους, το οποίο περιέχει φυσική άμμο (λεπτόκοκκη και χονδρόκοκκη) αλλά και θραυστά αδρανή. Όσον αφορά το βαρύ σκυρόδεμα, παράγεται με υψηλής πυκνότητας αδρανή και χρησιμοποιείται για την προστασία από την ραδιενέργεια.

Ανάλογα με την θλιπτική αντοχή του, το σκυρόδεμα χωρίζεται σε αντίστοιχες κατηγορίες:

- i) Χαμηλής αντοχής σκυρόδεμα - μικρότερη από 20MPa (3000psi)
- ii) Μέσης αντοχής σκυρόδεμα - από 20 έως 40MPa (3000-6000psi)
- iii) Υψηλής αντοχής σκυρόδεμα - μεγαλύτερη από 40MPa (6000psi)

Το μέσης αντοχής σκυρόδεμα αναφέρεται ως κανονικό και χρησιμοποιείται στα περισσότερα έργα. Σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμόζεται το υψηλής αντοχής.

	Μικρή αντοχή (kg/m <sup>3</sup> )	Μέτρια αντοχή (kg/m <sup>3</sup> )	Υψηλή αντοχή (kg/m <sup>3</sup> )
Σκυρόδεμα	255	356	510
Νερό	178	178	178
Λεπτόκοκκα αδρανή	801	848	890
Χονδρόκοκκα αδρανή	1169	1032	872
<b>Αναλογία τσιμεντόπαστας</b>			
Ποσοστό κατά βάρος	18	22,1	28,1
Ποσοστό κατά όγκο	26	29.3	34,3
Νερό/Σκυρόδεμα κατά μάζα	0.70	0.50	0,35
Αντοχή (MPa)	18	30	60

**Πίνακας 2** Τυπικές αναλογίες των υλικών σε ανάμιξη σκυροδέματος διαφόρου αντοχής

Με τους νεότερους κανονισμούς και σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 – Σχεδιασμός των κατασκευών από σκυρόδεμα, οι κατηγορίες του είναι:

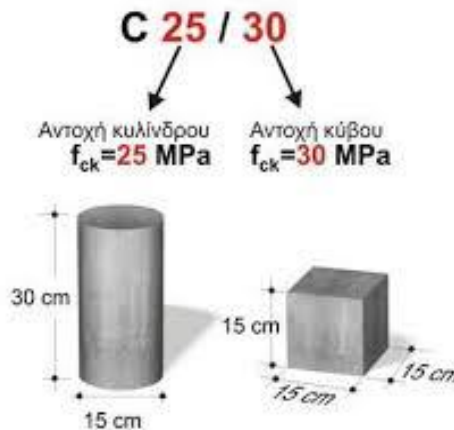
Κατηγορίες σκυροδέματος	$f_{ck}$ (κυλινδρικού δοκιμίου) (MPa)	$f_{ck}$ (κυβικού δοκιμίου) (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55

C50/60	50	60
--------	----	----

Πίνακας 3 Κατηγορίες σκυροδέματος βάση του Ευρωκώδικα 2

Οι παραπάνω κατηγορίες αφορούν τα σκυροδέματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στις κατασκευές.

Επεξηγηματικά με τον πρώτο αριθμό εκφράζεται η χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm μέσα σε 28 ημέρες. Με τον δεύτερο αριθμό εκφράζεται η χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη κυβικού δοκιμίου ακμής 150mm επίσης μέσα σε 28 ημέρες.



Εικόνα 5 Παράδειγμα χαρακτηριστικών δοκιμών

Υπάρχουν ακόμα πολλές τροποποιημένες κατηγορίες σκυροδέματος βάσει της σύστασής του όπως για παράδειγμα σκυρόδεμα με διογκωτικό τσιμέντο (expansive cement concrete), σκυρόδεμα τροποποιημένο με latex (latex modified concrete) και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (fiber reinforced concrete) το οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω.

Ανάλογα με τη σύσταση του σκυροδέματος επηρεάζονται και άλλες ιδιότητες του όπως η αντοχή, η ανθεκτικότητα, η συστολή ξήρανσης, ο ερπυσμός κλπ. Για το λόγο αυτό παρακάτω αναλύονται και τα συστατικά του.

Βάσει της προέλευσής του το σκυρόδεμα μπορεί να διακριθεί στις παρακάτω κατηγορίες:

- i) **Εργοταξιακό σκυρόδεμα:** Το σκυρόδεμα το οποίο κατασκευάζεται στο εργοτάξιο κατά τη διάρκεια του έργου. Κατά τη σύνθεσή του, η υπηρεσία ή ο επιβλέπων μηχανικός του έργου, αναλαμβάνει να παρακολουθεί και να ελέγχει όλα τα στάδια δηλαδή την διαλογή των υλικών, τις αναλογίες ανάμιξης, τα μηχανήματα παραγωγής, κτλ. Το εργοταξιακό σκυρόδεμα μπορεί να είναι είτε μικρών έργων, όταν παρασκευάζεται από την Μελέτη Συνθέσεως σκυροδέματος, χωρίς να έχουν γίνει δοκιμαστικά αναμίγματα, είτε μεγάλων έργων όπου απαιτούνται 15-60 δοκιμαστικά αναμίγματα καθώς και άλλες απαιτήσεις του ΚΤΣ-97.





Εικόνα 6 Μηχάνημα παραγωγής σκυροδέματος στο χώρο του εργοταξίου

- ii) **Εργοστασιακό σκυρόδεμα:** Το σκυρόδεμα το οποίο δημιουργείται στο εργοστάσιο παραγωγής. Η υπηρεσία ή ο επιβλέπων μηχανικός του έργου εξετάζει κατευθείαν το έτοιμο προϊόν κατά την παράδοση και δεν επεμβαίνει στη διαλογή των υλικών, τις αναλογίες ανάμιξης και στα στάδια παραγωγής του. Το εργοστασιακό σκυρόδεμα συναντάται σε μονάδες προκατασκευής, όπου μετά την ανάμιξη μεταφέρεται στο σημείο της διάστρωσης με αντλίες, ή μέσω αυτοκινήτων μεταφοράς σκυροδέματος στο συμβατικής κατασκευής έργο. Αυτό είναι γνωστό και ως "έτοιμο σκυρόδεμα".

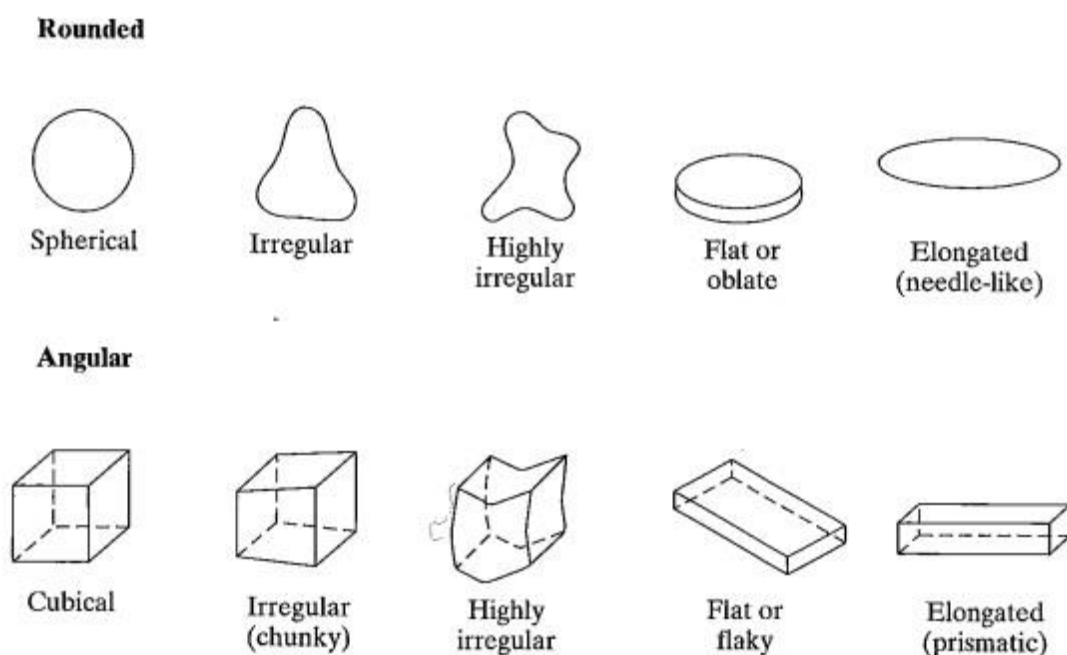


Εικόνα 7 Μικρή αντλία σκυροδέματος

## 1.4. Συστατικά σκυροδέματος

### 1.4.1. Αδρανή

Στην παρασκευή σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κοκκώδη υλικά τα οποία καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του. Τα υλικά αυτά ονομάζονται αδρανή. Τα πλέον διαδεδομένα είναι τα χαλίκια, η άμμος, το ρυζάκι και το γαρμπήλι. Τα αδρανή υλικά αποτελούνται από λίθινους κόκκους, από κόκκους που προκύπτουν από την θραύση όγκων πετρωμάτων ή από τη θραύση φυσικών αδρανών. Οι κόκκοι αυτοί μπορεί να έχουν ίδιο αλλά και διαφορετικό μέγεθος. Τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά είναι τα καταλληλότερα πετρώματα για αδρανή. Απαραίτητο είναι τα αδρανή υλικά να έχουν επαρκή αντοχή και βεβαίως να μην θρυμματίζονται.



Εικόνα 8 Ταξινόμηση των αδρανών υλικών βάσει του σχήματος τους

Βάσει της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης τα αδρανή χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

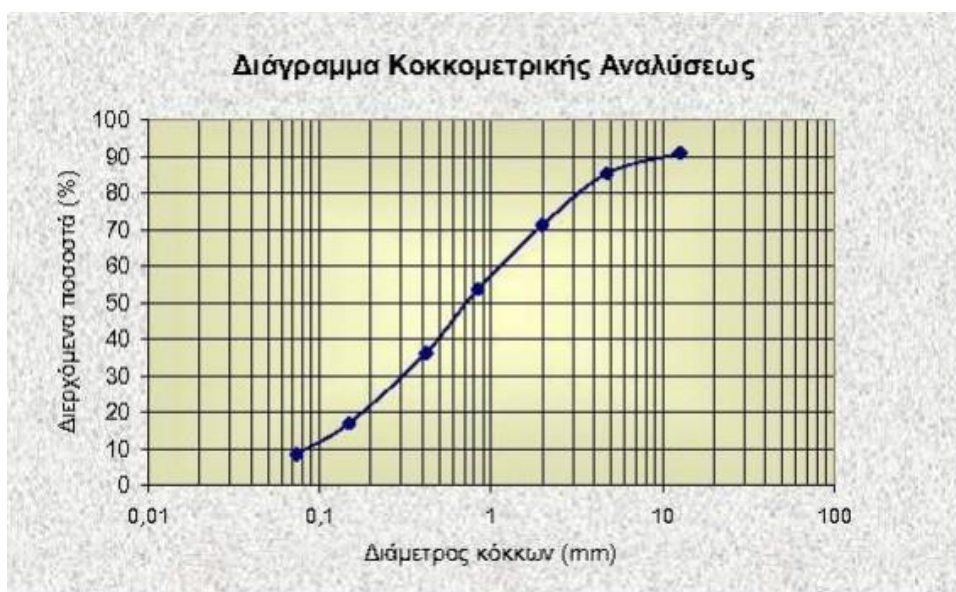
- i) **Χονδρόκοκκα:** Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών (EN-12620) έχουν μέγιστη διάμετρο  $D > 4\text{mm}$  και ελάχιστη  $d > 2\text{mm}$ . Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κροκάλες, τα χαλίκια, το γαρμπήλι, οι ογκόλιθοι, και το ρυζάκι.
- ii) **Λεπτόκοκκα:** Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών (EN-12620) έχουν μέγιστη διάμετρο  $D < 4\text{mm}$ . Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα διάφορα είδη άμμου.
- iii) **Filler:** Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών (EN-12620) είναι το αδρανές υλικό με τον λεπτότατο καταμερισμό και μέγιστη διάμετρο  $D < 2\text{mm}$ , το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο 0,063mm.

Το σχήμα των κόκκων επηρεάζει την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Εργασιμότητα ονομάζεται η ιδιότητά του να μεταφέρεται, να συμπυκνώνεται και να διαστρώνεται όσο ακόμα

είναι σε νωπή κατάσταση. Η πολυγωνικότητα των κόκκων βοηθάει στην βέλτιστη στήριξη μεταξύ τους, αλλά και την καλύτερη πρόσφυσή τους με το σκυρόδεμα. Λειτουργούν παρόμοια με τον οπλισμό, με νευρώσεις στη συνολική μάζα του σκυροδέματος. Στη μηχανική αντοχή του συντελούν επίσης οι κυβοειδείς και οι πλακοειδείς κόκκοι λόγω της καλύτερης έδρασής τους. Ιδανικά η εξωτερική επιφάνεια των κόκκων πρέπει να είναι άγρια και όχι λεία διότι σε αυτήν την περίπτωση χρειάζεται περισσότερη τσιμεντόπαστα, δηλαδή μεγαλύτερο κόστος. Σκοπός του μηχανικού είναι να επιτευχθεί το βέλτιστο χτίσιμο με τα μικρότερα κατά το δυνατόν κενά μεταξύ των αδρανών, ώστε να συμπληρωθούν με τη συνδετική κονία. Τα μεγαλύτερα κενά οδηγούν σε μικρότερη αντοχή από την ζητούμενη. Η διαδικασία αυτή απαιτεί σωστό διαχωρισμό και κατανομή των κόκκων σε αναλογία κατ' όγκο με το μίγμα. Η γνώση της κοκκομετρίας και της υφιστάμενης υγρασίας στα αδρανή είναι απαραίτητη για την ορθή μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.



Εικόνα 9 Διαδικασία κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα



Εικόνα 10 Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης

Βάσει της προέλευσής τους τα αδρανή χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- i) **Φυσικά ή συλλεκτά:** Τα αδρανή τα οποία συλλέγονται από φυσικές αποθέσεις (π.χ. ποτάμια, ορυχεία κτλ.). Φυσικά αδρανή από τη θάλασσα που δεν έχουν πλυθεί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή σκυροδέματος μόνο εφόσον η περιεκτικότητα τους σε χλωριούχα άλατα, δεν ξεπερνά το 1% του βάρους του τσιμέντου. Στο προεντεταμένο σκυρόδεμα ωστόσο απαγορεύεται η χρήση φυσικών αδρανών προερχόμενα από θαλασσινό νερό.
- ii) **Αδρανή λατόμευσης:** Τα αδρανή τα οποία προέρχονται από την εξόρυξη και τη θραύση όγκων πετρώματος.
- iii) **Τεχνητά ή βιομηχανικά:** Τα αδρανή τα οποία έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών.
- iv) **Αδρανή σκωρίας υψικαμίνων:** Η αργή ψύξη της σκωρίας υψικαμίνου σε κάδους ταφροκαμίνους ή μεταλλικά καλούπια δίνει ένα προϊόν από το οποίο μετά από θραύση και κοσκίνισμα δύναται να παραχθούν ισχυροί κόκκοι με μεγάλη πυκνότητα για τη χρήση στην παραγωγή σκυροδεμάτων.
- v) **Αδρανή από ιπτάμενη τέφρα:** Η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται από μικρά σφαιρικά σωματίδια αργιλοπυριτικής υάλου και παράγεται από την καύση κονιορτοποιημένου κάρβουνου σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Από την ιπτάμενη τέφρα δύναται να παραχθούν ελαφρά αδρανή με κατάλληλη διαδικασία η οποία περιλαμβάνει πελλετοποίηση και συμπύκνωσή της σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 1000°C έως 1200°C. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητά τους σε SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και CaO οι τέφρες έχουν μεγάλη δραστηριότητα. Η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας στη χώρα μας γίνεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα και στη Μεγαλόπολη.

Εκτός από τα δύο κριτήρια κατηγοριοποίησης των αδρανών που αναφέρθηκαν ανωτέρω, υπάρχει ακόμα ένα που αφορά στα αδρανή για την κατασκευή εξειδικευμένων σκυροδεμάτων όπως:

- i) **Ελαφρά αδρανή:** Τα αδρανή με πυκνότητα κάτω των 1120 kg/m<sup>3</sup> τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ελαφροσκυροδεμάτων.
- ii) **Βαρέα αδρανή:** Τα αδρανή με πυκνότητα από 2320-4500 kg/m<sup>3</sup> τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή βαρέων σκυροδεμάτων με ειδικό βάρος από 2900-6100 kg/m<sup>3</sup> και εφαρμόζονται κυρίως για την προστασία από πυρηνική ακτινοβολία.

Για την εύρεση της αναλογίας ανάμιξης των αδρανών, απαιτείται η μελέτη της σύνθεσης προκειμένου να καλύπτονται οι απαιτήσεις του κάθε έργου.

## 1.4.2. Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί μια υδραυλική συνδετική κονία, δηλαδή ένα πολύ λεπτοκομμένο υλικό σε μορφή σκόνης, το οποίο όταν έρθει σε επαφή με το νερό, σχηματίζει τον τσιμεντοπολτό. Ενώ λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις και μηχανισμοί ενυδάτωσης αυτός πήζει και σκληραίνει. Μετά τη διαδικασία της σκλήρυνσης η αντοχή και η σταθερότητά του διατηρούνται ακόμα και μέσα στο νερό. Για την παραγωγή του τσιμέντου απαιτούνται κάποια βασικά συστατικά, τα οποία είναι ο ασβεστόλιθος και η άργιλος. Η κύρια χρήση του τσιμέντου

είναι η αντίδρασή του με το νερό. Πειραματικά έχει αποδειχθεί πως όσο αυξάνεται το ποσοστό του τσιμέντου στο σκυρόδεμα (εντός ορίων πάντα) κι εφόσον τα άλλα συστατικά παραμένουν αμετάβλητα, τόσο αυξάνεται και η αντοχή του. Ένα τσιμέντο συμμορφούμενο με το EN 197-1, ονομαζόμενο CEM τσιμέντο, πρέπει όταν αναμειχθεί με τα αδρανή υλικά και το νερό να μπορεί να δημιουργήσει σκυρόδεμα το οποίο να διατηρεί το εργασιμότητα του για αρκετό χρονικό διάστημα. Μετά από καθορισμένο χρόνο πρέπει να επιτυγχάνει την απαιτούμενη αντοχή αλλά και να κρατά σταθερό τον όγκο του μακροπρόθεσμα. Η υδραυλική σκλήρυνση του τσιμέντου CEM οφείλεται βασικά στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών, μπορούν όμως κι άλλες χημικές ενώσεις να συμμετέχουν στον μηχανισμό σκλήρυνσης, όπως π.χ. αργιλικές ενώσεις. Τα τσιμέντα CEM χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια παρά τα διάφορα υλικά στη σύνθεσή τους και αυτό είναι αποτέλεσμα ποιοτικά διασφαλισμένης παραγωγής και διεργασιών χειρισμού της συγκεκριμένης ύλης. Η σύνδεση μεταξύ των διεργασιών αυτών αλλά και η συμμόρφωση του τσιμέντου με το EN 197-1 καθορίζεται στο EN 197-2. Επιπρόσθετα υπάρχουν τσιμέντα των οποίων η σκλήρυνση οφείλεται κυρίως σε άλλες ενώσεις όπως π.χ. το αργιλικό ασβέστιο στο ασβεσταργιλικό τσιμέντο.

Από χημικής πλευράς τα βασικά συστατικά του τσιμέντου είναι το Ca, το Si, το Al και ο Fe. Ωστόσο η παρασκευή του διαφέρει από χώρα σε χώρα ανάλογα με τα υλικά που διατίθενται. Τα συνηθέστερα κύρια συστατικά είναι τα παρακάτω:

- i) **Κλίνκερ(K):** Είναι μια ουσία σε μορφή πετρώματος που προκύπτει όταν η ασβεστόλιθος και η άργιλος, τα βασικά συστατικά στη σύνθεση του τσιμέντου, τεθούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το πέτρωμα αυτό μετά τη διαδικασία της επιθυμητής κοκκομετρίας, και αφού προστεθεί γύψος ώστε να ρυθμίσει την πήξη, σχηματίζεται το τελικό προϊόν που δεν είναι άλλο από το γνωστό παγκοσμίως τσιμέντο Portland.
- ii) **Ποζολανικά υλικά(P,Q):** Είναι πυριτικές ή αργιλοπυριτικές ουσίες, οι οποίες αφού λεπτοαλεστούν και έρθουν σε επαφή με το νερό, αντιδρούν με την υδράσβεστο  $\text{Ca(OH)}_2$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος δημιουργώντας ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργιλικές ενώσεις με μεγάλη αντοχή. Τα κύρια συστατικά των ποζολάνων είναι το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) και το τριοξείδιο του αργίλου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Επίσης τριοξείδιο του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και λοιπά οξείδια. Το ποσοστό του δραστικού οξειδίου του πυριτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 25% κατά μάζα.
  - a) *Φυσικές ποζολάνες(P):* Είναι ιζηματογενή πετρώματα ή ηφαιστειογενή υλικά με τέτοια χημική και ορυκτολογική σύνθεση ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν ανωτέρω.
  - b) *Φυσικές ψημένες ποζολάνες(Q):* Είναι επίσης ιζηματογενή πετρώματα, ηφαιστειογενή υλικά, άργιλοι ή σχιστόλιθοι που ενεργοποιούνται ύστερα από συγκεκριμένη θερμική επεξεργασία.
- iii) **Ιπτάμενες τέφρες:** Είναι τα λεπτότατα σε καταμερισμό υλικά που προέρχονται από την καύση λιγνιτών ή γαιανθράκων. Συλλέγονται από την ηλεκτροστατική ή την μηχανική κατακρήμνιση σωματιδίων στα καυσαέρια κλιβάνων που καίνε κονιοποιημένο άνθρακα. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN 197-1 δεν χρησιμοποιούνται στο τσιμέντο τέφρες που λαμβάνονται από άλλες μεθόδους.
  - a) *Πυριτική ιπτάμενη τέφρα(V):* Λεπτή κονία από σωματίδια με ποζολανικές ιδιότητες. Αποτελείται από δραστικό οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) και οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ακόμα περιέχει οξείδιο του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και λοιπές ενώσεις.

- b) *Ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα(W)*: Λεπτή σκόνη με ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες. Αποτελείται από δραστικό οξείδιο του ασβεστίου (CaO), δραστικό οξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) και οξείδιο του αργιλίου (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ακόμα περιέχει οξείδιο του σιδήρου (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και λοιπές ενώσεις.
- iv) **Ψημένος σχιστόλιθος(T)**: Ιδιαίτερα ο ψημένος σχιστόλιθος παράγεται σε ειδικό κλίβανο σε θερμοκρασία 800°C περίπου. Λόγω της σύνθεσής του περιέχει στοιχεία κλίνκερ, όπως πυριτικό διασβέστιο και αργιλικό ασβέστιο. Όταν είναι λεπτοαλεσμένος σε μορφή σκόνης, ο ψημένος σχιστόλιθος εμφανίζει σημαντικές υδραυλικές ιδιότητες όπως το τσιμέντο Portland και άλλα ποζολανικά χαρακτηριστικά.
- v) **Ασβεστόλιθος(L)**: Είναι ένα υλικό το οποίο πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις. Αρχικά η περιεκτικότητά του σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>) υπολογιζόμενη από την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 75% κατά μάζα. Η περιεκτικότητά του σε άργιλο προσδιοριζόμενη με τη μέθοδο κυανού του μεθυλενίου, σύμφωνα με το EN 933-9 δεν πρέπει να ξεπερνά τα 1,20g/100g. Για την δοκιμή αυτή πρέπει ο ασβεστόλιθος να κονιοποιηθεί σε μια λεπτότητα περίπου 5000 cm<sup>2</sup>/g προσδιοριζόμενη ως ειδική επιφάνεια σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 196-6.
- vi) **Κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου(S)**: Η σκωρία υψικαμίνου προέρχεται από τον χάλυβα. Η τηγμένη σκωρία που λαμβάνεται από την υψικάμινο από την απότομη πήξη της σε νερό ή σε αέρα μετατρέπεται σε υαλώδη ή άμορφη δομή. Για να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή τσιμέντου θα πρέπει να αλεστεί ενώ όταν ενεργοποιηθεί με τον σωστό τρόπο αποκτά υδραυλικές ιδιότητες. Το μεγαλύτερο μέρος της κοκκοποιημένης σκωρίας πρέπει να αποτελείται από συνδυασμό οξειδίου του ασβεστίου (CaO), οξείδιο του μαγνησίου (MgO) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>).
- vii) **Πυριτική παιπάλη(D)**: Προέρχεται από την αναγωγή χαλαζία υψηλής καθαρότητας με άνθρακα σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου κατά την παραγωγή πυριτίου και σιδηροπυριτικών κραμάτων. Έχει την μορφή πούδρας ενώ υπολογίζεται 100 φορές μικρότερη του μεγέθους κόκκων του τσιμέντου. Η απώλεια πύρωσής της δεν πρέπει να ξεπερνά το 4% κατά μάζα όταν προσδιορίζεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 196-2 σε χρόνο πύρωσης 1 ώρα. Βασικό χαρακτηριστικό της παιπάλης είναι ότι βελτιώνει τον εγκιβωτισμό του τσιμεντοπολτού πάνω στα αδρανή και ενισχύει την πληρωτική τους ικανότητα.

Παράλληλα υπάρχουν και τα δευτερεύοντα συστατικά του τσιμέντου, τα οποία είναι φυσικά ορυκτά υλικά που προέρχονται από τη διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ. Έπειτα από συγκεκριμένη επεξεργασία και κοκκομετρική κατανομή προστίθενται στο τσιμέντο βελτιώνοντας την εργασιμότητά του αλλά και την συγκράτηση του νερού. Πιθανόν έχουν και ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες, στοιχείο που δεν είναι απαραίτητο στη συγκεκριμένη περίπτωση. Τα δευτερεύοντα υλικά χρήζουν σωστής προετοιμασίας, δηλαδή σωστή επιλογή, ομογενοποίηση, ξήρανση και άλεση ανάλογα με τη χρήση τους. Είναι σημαντικό με την προσθήκη τους στο τσιμέντο να μην αυξάνεται η ανάγκη για νερό, να μην καταστρέφουν το σκυρόδεμα καθώς και να μην προκαλούν διάβρωση του οπλισμού.

Για τους σκοπούς ικανοποίησης του EN 197-1 προστίθενται στο τσιμέντο κάποια πρόσθετα υλικά με σκοπό να βελτιώσουν την παραγωγή και τις ιδιότητές του. Το ποσοστό των υλικών αυτών δεν πρέπει να ξεπερνά το 1% της μάζας του. Ομοίως και για τα πρόσθετα υλικά είναι σημαντικό να μην καταστρέφουν το σκυρόδεμα και να μην προκαλούν διάβρωση του οπλισμού. Σύμφωνα με τα πρότυπα EN 934 η προσθήκη πρόσμικτων στο σκυρόδεμα πρέπει να δηλώνεται τυπικά στην ονομασία του και στα παραστατικά παράδοσης.

Στην Ελλάδα, βάσει του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1 «Σύνθεση, Προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα», τα τσιμέντα χαρακτηρίζονται από τον τύπο τους κι έναν αριθμό που δηλώνει την αντοχή τους.

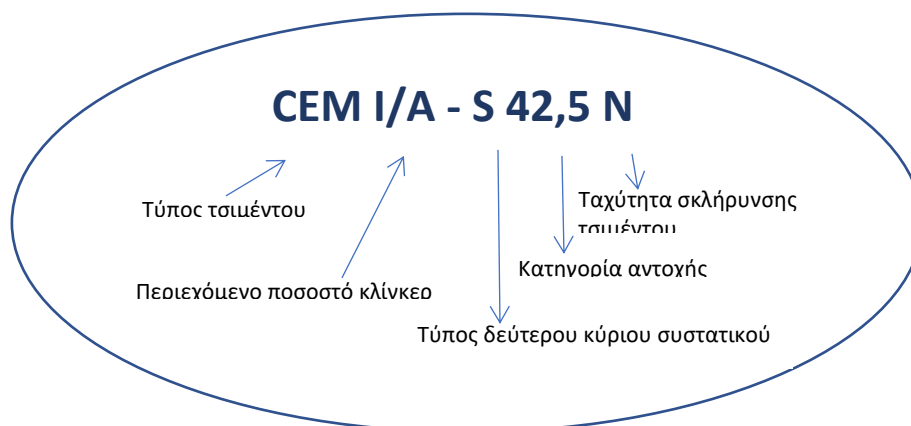
Τύπος τσιμέντου	Ονομασία τσιμέντου	Ποσοστό κλίνκερ (%)		
		A	B	C
CEM I	Τσιμέντο Portland	K < 95		
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland	80 < K < 94	65 < K < 79	-
CEM III	Σκωριοτσιμέντο	35 < K < 65	20 < K < 40	5 < K < 19
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο	65 < K < 89	45 < K < 64	-
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο	40 < K < 64	20 < K < 39	-

Πίνακας 4 Βασικοί τύποι τσιμέντου

Βάσει της αντοχής του το τσιμέντο διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: 32,5MPa, 42,5MPa, 52,5MPa. Οι παραπάνω είναι οι χαρακτηριστικές αντοχές του τσιμέντου σε θλίψη. Οι αντοχές μετρούνται σε κυβικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος πλευράς 40mm, με λόγους (κ.β.) τσιμέντο: άμμο: νερό: 1:3:0,5 αντίστοιχα. Ανάλογα με τον χρόνο ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών προκύπτουν δυο βασικές υποκατηγορίες: N για κανονικό ρυθμό και R για ταχύ ρυθμό.

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη (MPa)			Χρόνος αρχής πήξης	Σταθερότητα όγκου (Διαστολή)
	Πρώιμη αντοχή		Τυπική αντοχή		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	min	min
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-			

Πίνακας 5 Κατηγορίες αντοχής τσιμέντου



Εικόνα 11 Τελική κωδικοποίηση τσιμέντου

### 1.4.3. Νερό αναμίξεως

Το νερό αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό για την παρασκευή του σκυροδέματος. Συμβάλλει τόσο στην ρευστότητα του, όσο και στην ενυδάτωση αλλά και την συντήρησή του. Το νερό που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα πρέπει να είναι ελεγμένο, καθαρό και απαλλαγμένο από χημικές ουσίες που θα μπορούσαν να βλάψουν τη σύστασή του αλλά και τον οπλισμό μεταγενέστερα. Το καταλληλότερο για την παραγωγή του σκυροδέματος νερό είναι το πόσιμο και δεν απαιτείται ο έλεγχός του. Όσον αφορά το νερό του δικτύου ύδρευσης πρέπει να εξετάζεται για χημικές ενώσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία πήξης και σκλήρυνσης του. Τέτοιες ενώσεις αποτελούν η ζάχαρη, το λίπος και το λάδι, ανθρακικά οξέα που δεσμεύουν το ασβέστιο (Ca), η άργιλος και οργανικές ουσίες που αναστέλλουν την πήξη του σκυροδέματος. Το νερό που προέρχεται από τα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος, επεξεργάζεται (π.χ. νερά εκπλύσεως) και γενικώς χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα αλλά πρέπει πρώτα να ικανοποιούνται ορισμένες απαιτήσεις. Τα υπόγεια ύδατα, τα νερά που προέρχονται από φυσικούς πόρους κι εκείνα από βιομηχανικές εργασίες μπορούν να συμβάλλουν στην παρασκευή σκυροδέματος αφού πρώτα ελεγχθεί η καταλληλότητά τους. Το νερό της θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύνθεση μόνο άοπλου σκυροδέματος και εφόσον επιτευχθεί αύξηση της αντοχής του κατά 15%. Σε σκυρόδεμα με οπλισμό ή σε προεντεταμένο σκυρόδεμα απαγορεύεται η προσθήκη του καθώς οδηγεί στην οξείδωση του χάλυβα. Ακατάλληλα επίσης για την παραγωγή του σκυροδέματος είναι και τα νερά που προέρχονται από απόβλητα αλλά και τα μίγματα υδάτων ύστερα από βιομηχανικές επεξεργασίες.

#### Λόγος τσιμέντου-νερού (υδατοτσιμεντοσυντελεστής):

Είναι γνωστό πως ο λόγος κατά βάρους νερού προς τσιμέντο  $w / z$  παίζει καθοριστικό ρόλο στην τελική ποιότητα του σκυροδέματος αλλά και στην αντοχή του. Όσο πιο μικρός είναι ο λόγος αυτός τόσο μεγαλύτερη προκύπτει και η αντοχή του. Μεγάλη τιμή του λόγου αυτού μπορεί να οδηγήσει σε κενά εντός της μάζας του σκυροδέματος, λόγω εγκλωβισμένου αέρα ή περίσσειας νερού. Ύστερα από υπολογισμούς και εμπειρικές τεχνικές η ιδανική αναλογία για σκυροδέματα υψηλής αντοχής φτάνει έως 0,40 και για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής 0,50. Σε κάθε περίπτωση η τιμή του λόγου  $w / z$  επηρεάζεται κι από άλλους παράγοντες όπως η φυσική υγρασία των αδρανών και οι συνθήκες περιβάλλοντος της κατασκευής.

### 1.4.4. Πρόσθετα σκυροδέματος

Τα πρόσμικτα σκυροδέματος είναι ανόργανα υλικά λεπτομερώς διαμερισμένα, σε σκόνη ή σε υγρή μορφή, τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα σε μικρές ποσότητες με σκοπό να βελτιώσουν τις ιδιότητές του είτε όταν είναι φρέσκο είτε όταν είναι σκληρυμένο. Παρακάτω αναφέρονται τα εν γένει πρόσμικτα υλικά:

- i) **Μειωτής νερού:** Έχει την ιδιότητα να μειώνει την περιεκτικότητα του νερού σε ένα μείγμα χωρίς να μεταβάλλει τη συνεκτικότητά του, να αυξάνει την εργασιμότητα του ή να πραγματοποιεί και τις δυο λειτουργίες παράλληλα.



- ii) **Ρευστοποιητικά:** Είναι τα υλικά που προκαλούν αύξηση της ρευστότητας του μίγματος. Με τη χρήση αυτών των υλικών ελαττώνεται το νερό αναμίξεως για τον ίδιο βαθμό εργασιμότητας, αυξάνοντας την αντοχή του σκυροδέματος και το εργάσιμο χωρίς απώλεια της θλιπτικής αντοχής.
- iii) **Αερακτικά:** Είναι τα υλικά που εισάγουν αέρα στο μίγμα μέσω πολλών μικρών φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες αυτές στοχεύουν στην αύξηση της εργασιμότητας και της αντοχής στον παγετό χωρίς όμως απώλεια της θλιπτικής αντοχής.
- iv) **Επιβραδυντικά:** Είναι τα υλικά που επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου σε περιπτώσεις όπου η διαδικασία διάστρωσης απαιτεί περισσότερο από τον προκαθορισμένο χρόνο.
- v) **Επιταχυντικά:** Είναι τα υλικά που επιταχύνουν την διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου.
- vi) **Στεγανωποιητικά μάζας:** Είναι τα υλικά που συμβάλουν στην αποφυγή πόρων λόγω κακής συμπίκνωσης και ρηγματώσεων που οφείλονται στην συστολή/διαστολή του σκυροδέματος. Ακόμα μειώνουν τις υδραπωθητικές δυνάμεις μεταξύ της τσιμεντοκονίας και του νερού. Για να επιτευχθεί πλήρης στεγανοποίηση χρειάζεται να εξεταστούν κι άλλοι παράγοντες. Επεξηγηματικά θα ήταν ανώφελη η μείωση του πορώδους και των υδραπωθητικών δυνάμεων χωρίς παράλληλα να πραγματοποιούνται σωστή συμπίκνωση του σκυροδέματος και μέτρα για την αποφυγή ρηγματώσεων.

## 1.5. Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρήζει ειδικής μελέτης στην παραγωγή του ώστε να είναι ομοιογενές και τη στιγμή της διάστρωσης να έχει την απαιτούμενη εργασιμότητα. Επίσης θα πρέπει να συμπεκνωθεί σωστά, να αναπτύξει την επιθυμητή αντοχή, ανθεκτικότητα και άλλες ιδιότητες οι οποίες προδιαγράφονται στο έργο. Για κάθε ποιότητα σκυροδέματος είναι υποχρεωτική η μελέτη σύνθεσής του όπως και για σκυροδέματα ειδικών απαιτήσεων (ανθεκτικά σκυροδέματα, στεγανά σκυροδέματα). Η διαδικασία μπορεί να παραληφθεί σε περιπτώσεις σκυροδεμάτων υπόστρωσης, ισοπεδωτικών στρώσεων και άλλων βοηθητικών κατασκευών που δεν αφορούν άμεσα το έργο. Στα εργοτάξια που πραγματοποιείται επιτόπου παρασκευή σκυροδέματος ο παρασκευαστής οφείλει να ολοκληρώσει έγκαιρα την μελέτη σύνθεσης. Η ευθύνη για την αντιπροσωπευτικότητα των υλικών και την πραγματοποίηση της μελέτης είναι του επιβλέποντος μηχανικού. Στην αρχή κάθε έργου πρέπει να γίνεται η μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος και να επαναλαμβάνεται κάθε φορά που αλλάζει η προέλευση των αδρανών, όταν τα αδρανή παρουσιάζουν διαφορετική διαβάθμιση από την προκαθορισμένη, όταν μεταβάλλονται τα πρόσθετα, ο τύπος τσιμέντου, η κατηγορία αντοχής του και όταν το μίγμα δεν ικανοποιεί τις αρχικές απαιτήσεις παρά την τήρηση όλων μέτρων της μελέτης.



Εικόνα 12 Επιβλέπων μηχανικός κατά τη διαδικασία μελέτης της σύνθεσης του σκυροδέματος

## 1.6. Κανονισμοί Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ)

Στην Ελλάδα, ο πρώτος κανονισμός που αφορούσε το σκυρόδεμα ξεκίνησε να ισχύει το 1954. Είναι ο «Κανονισμός για τη Μελέτη και Εκτέλεση Οικοδομικών Έργων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα» και αναφερόταν κυρίως σε έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΩΣ) αλλά και δευτερευόντως στα υλικά από τα οποία αποτελείτο. Το 1959 τον ακολουθεί η Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή ΠΤΠ-504 η οποία αναφερόταν σε κυλινδρικά δοκίμια και αμερικάνικα κόσκινα. Στην συνέχεια, το 1981, το Σχέδιο Προτύπου ΕΛΟΤ 346 για έτοιμα σκυροδέματα εκδίδεται και το 1985 έρχεται ο ΚΤΣ-85 (ΦΕΚ/266/Β/9.5.85) (Κανιτάκη 2009).

Το 1997 έρχεται η αναθεώρηση του ΚΤΣ-85 και προκύπτει ο ΚΤΣ-97 (ΦΕΚ/315/Β/17.4.1997). Το 2000, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) εκδίδει το πρότυπο EN 206-1 «Σκυρόδεμα – μέρος 1: Προδιαγραφή, επιδόσεις, παραγωγή και συμμόρφωση» και το 2001 ο ΕΛΟΤ το εφαρμόζει μιας και ήταν υποχρεωτικής εφαρμογής με βάση το ευρωπαϊκό δίκαιο για τα δημόσια έργα (όλοι οι οργανισμοί τυποποίησης έπρεπε έως και τον Ιούνιο του 2004 να αποσύρουν κάθε κείμενο ή διάταξη το οποίο ήταν αντίθετο με το EN 206-1). Τα νέα Ευρωπαϊκά πρότυπα τσιμέντου EN 196 και EN 197-1 οδηγούν το 2002 στην προσαρμογή του ΚΤΣ-97 με τη δημοσίευση του ΦΕΚ/537/Β/1.5.02. Στο νέο ΚΤΣ-97/2002 προστίθεται νέα κατηγορία κάθισης (S5) και γίνεται αναθεώρηση στους χρόνους αφαίρεσης ξυλότυπων (Κανιτάκη 2009, Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος 2014).

Φτάνοντας στο 2008, ο ΕΛΟΤ ανέλαβε και κατέληξε στη σύνταξη του Ελληνικού Εθνικού Προσαρτήματος (National Annex) καθώς και τη διαμόρφωση των Εθνικών αποκλίσεων (Κανιτάκη 2009, Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος 2014). Μετά τα προαναφερθέντα, ο ΕΛΟΤ εξέδωσε ενιαίο κείμενο EN 206-1+NA το οποίο αποτελείται από το EN 206-1:2001 σε συνδυασμό με τις τροποποιήσεις A1 (2004), A2 (2005) και το προσάρτημα της εκδοτικής ομάδας του ΕΛΟΤ του 2011. Το Ιούνιο του 2014 το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206:2013 αντικαθιστά το ΕΛΟΤ EN 206-1:2001 και τέλος, το 2016 εγκρίνεται ο ΚΤΣ-2016 με υποχρεωτική εφαρμογή σε δημόσια αλλά και ιδιωτικά έργα (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως Τεύχος Β' 1561/02.06.2016).

Τα προϊόντα δομικών κατασκευών τα οποία διατίθενται στην αγορά και έχουν δήλωση απόδοσης παίρνουν σήμανση CE. Αυτή η σήμανση δηλώνει πως το συγκεκριμένο προϊόν υπάγεται σε κάποιο πρότυπο ή ανταποκρίνεται στην ευρωπαϊκή τεχνική αξιολόγηση που έχει εκδοθεί για αυτό. (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος 2014)

## 1.7. Ανθεκτικότητα σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, όπως και όλα τα τεχνητά υλικά, χαρακτηρίζονται από πεπερασμένη διάρκεια ζωής. Από εκεί και έπειτα το έργο θεωρείται ανεπαρκές και δεν είναι κατάλληλο για χρήση. Εκτός από τις απαιτήσεις αντοχής, λειτουργικότητας, στις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι αναγκαία η εξασφάλιση της μέγιστης ανθεκτικότητας του φορέα, δηλαδή η διατήρηση των ιδιοτήτων του στο πέρασμα του χρόνου.

Η διάρκεια ζωής που προβλέπεται για την οποιαδήποτε κατασκευή συσχετίζεται με τη χρήση για την οποία προορίζεται και προκύπτει με βάση τον ΕΛΟΤ EN 206-1 και φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Κατηγορία διάρκειας ζωής σχεδιασμού	Ενδεικτική διάρκεια ζωής σχεδιασμού (έτη)	Παραδείγματα
1	10	Προσωρινές κατασκευές <sup>(1)</sup>
2	25	Δομικά στοιχεία τα οποία μπορούν να αντικατασταθούν
3	25	Αγροτικές και παρεμφερείς κατασκευές
4	50	Κτίρια και παρεμφερή
5	100	Μνημειακά κτίρια, γέφυρες και άλλα τεχνικά έργα

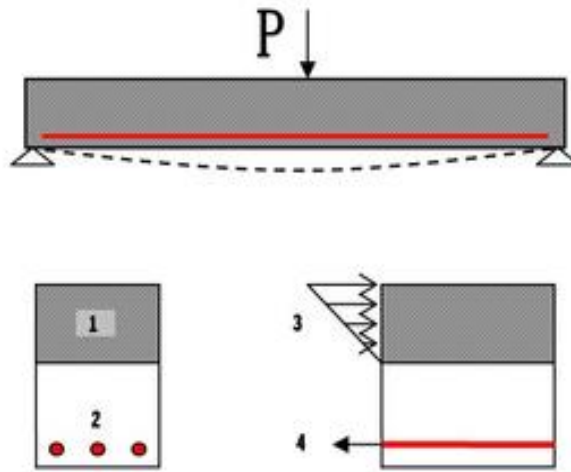
<sup>(1)</sup> Οι φορείς και τα δομικά στοιχεία τα οποία μπορούν να αποσυναρμολογηθούν εν όψει επαναχρησιμοποίησής τους δε θα πρέπει να θεωρούνται προσωρινά.

Πίνακας 6 Ενδεικτική διάρκεια ζωής σχεδιασμού ΕΛΟΤ EN 206-1

## 1.8. Συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα

Η πιο διαδεδομένη χρήση του σκυροδέματος στη σύγχρονη εποχή είναι το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα. Το βασικό αρνητικό του απλού σκυροδέματος έγκειται στη χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό που παρουσιάζει. Για το λόγο αυτό, ενισχύεται, οπλίζεται δηλαδή με χαλύβδινο σκελετό. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται ονομάζεται οπλισμός και σκοπός της τοποθέτησής του είναι να παραλάβει τα εφελκυστικά φορτία, τη στιγμή που το σκυρόδεμα παραλαμβάνει τα θλιπτικά. Σημαντική λεπτομέρεια είναι επίσης, πως το υλικό που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του σκυροδέματος, χρειάζεται να παρουσιάζει παρόμοιο συντελεστή θερμικής διαστολής με αυτό, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σωστή συνεργασία μεταξύ τους κατά τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Ο χάλυβας πληροί τις παραπάνω ιδιότητες και αξιοποιείται. Κατά την έγχυση του νωπού σκυροδέματος, εισάγονται στη μάζα χαλύβδινες ράβδοι, οι οποίες αφού το μίγμα σκληρύνει και πάρει την τελική του μορφή γίνονται ένα σώμα με αυτό. Οι θέσεις των ράβδων προκύπτουν ύστερα από στατική μελέτη και ανάλυση της κατασκευής και τοποθετούνται ειδικότερα σε σημεία όπου η αντοχή του σκυροδέματος κινδυνεύει να παρουσιάσει αστοχία. Για οικονομικούς λόγους γίνεται προσπάθεια ο οπλισμός να χρησιμοποιείται μόνο εκεί που είναι αναγκαίος. Παρά τα θετικά του χαρακτηριστικά, ο χάλυβας παρουσιάζει αδυναμία στη διάβρωση και στην έκθεσή του σε φωτιά. Στο σημείο αυτό επεμβαίνει το σκυρόδεμα το οποίο δημιουργεί έναν μανδύα αλκαλικού περιβάλλοντος γύρω από το υλικό και εμποδίζει τόσο την οξειδωση του, όσο και την επαφή του με πολύ υψηλές

θερμοκρασίες. Φαίνεται δηλαδή ότι τα δυο υλικά συμπληρώνουν το ένα το άλλο. Μελέτες αποδεικνύουν ότι οι κατασκευές από συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζουν ασφαλώς μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη κλπ. σε σχέση με κατασκευές από άλλα δομικά υλικά.



**Εικόνα 13** Ενίσχυση δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό (κόκκινη γραμμή) στην περιοχή της εφελκυστικής καταπόνησης

Ακόμα μία ευρέως γνωστή μορφή οπλισμένου σκυροδέματος είναι το προεντεταμένο σκυρόδεμα (prestressed concrete), στο οποίο οι τένοντες προέντασης που χρησιμοποιούνται ως οπλισμός, εφαρμόζονται πριν καν ασκηθεί στο υλικό κάποια εξωτερική καταπόνηση.



**Εικόνα 14** Τυπικό παράδειγμα οπλισμένου σκυροδέματος

Το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα έχει πολλά προτερήματα που το κάνουν να ξεχωρίζει μεταξύ άλλων δομικών υλικών. Πέρα από την μεγάλη θλιπτική αντοχή που παρουσιάζει το ίδιο το σκυρόδεμα, την εφελκυστική αντοχή που αποκτά λόγω του χαλύβδινου οπλισμού, έχει

και αντισεισμικό χαρακτήρα. Επίσης τα υλικά από τα οποία αποτελείται είναι σχετικά εύκολο να βρεθούν στη χώρα μας, γεγονός που καθιστά οικονομικότερη την παραγωγή του. Η ρευστή μορφή του βοηθά στο να πάρει ποικίλες μορφές και σχήματα, ενώ παράλληλα δεν απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση χάρη στα ανθεκτικά συστατικά του. Όσον αφορά τη χρησιμοποίησή του στις κατασκευές είναι ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη, έχει εύκολη διαχείριση και παρουσιάζει μια ακαμψία που είναι ζητούμενη στις περισσότερες από αυτές ώστε να διατηρούνται ως έχουν.

Όπως και όλα τα οικοδομικά υλικά, έτσι και το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα φέρει και κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά:

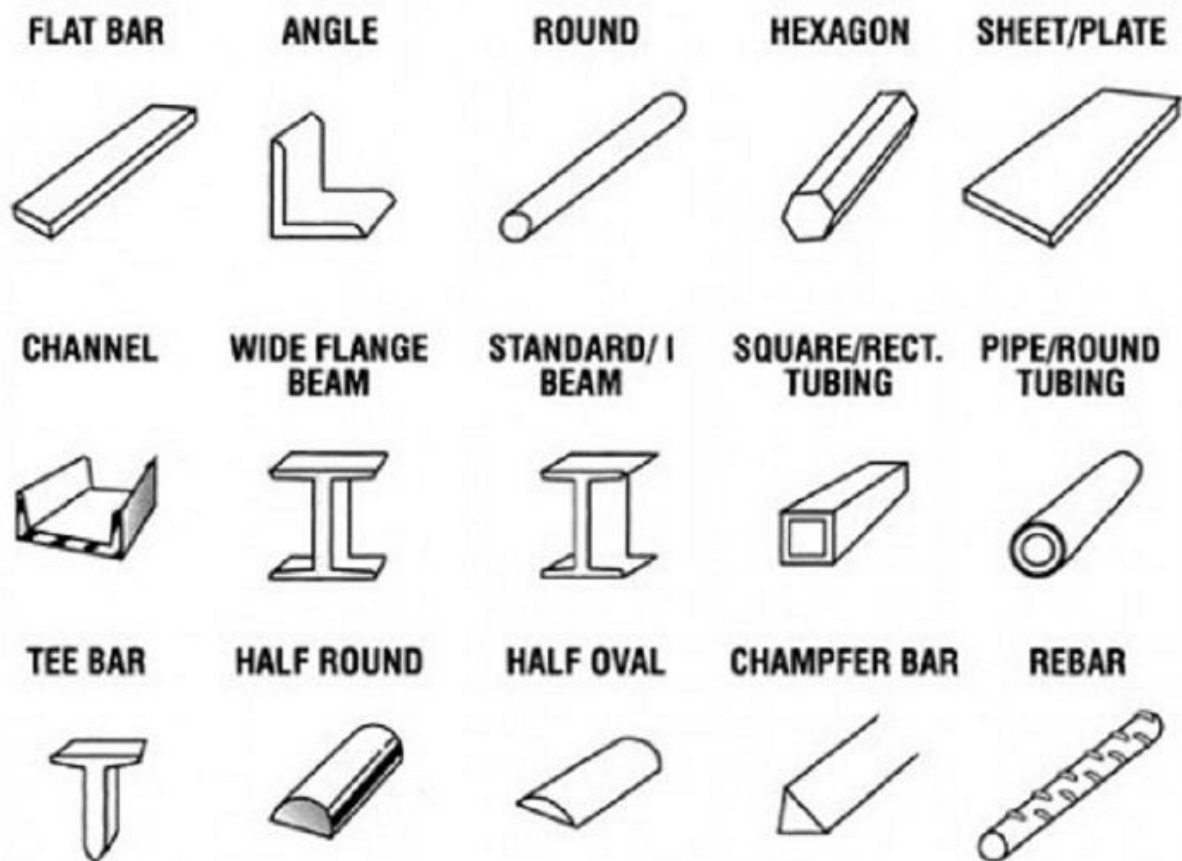
- i) Όταν τσιμέντο έρχεται σε επαφή με το νερό προκαλείται σκλήρυνση στο μίγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η αποθήκευση του έτοιμου υλικού για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνεπώς το κάθε στοιχείο πρέπει να φυλάσσεται ξεχωριστά.
- ii) Το σκυρόδεμα χρειάζεται ένα χρονικό περιθώριο για να ωριμάσει και να αναπτύξει τις μηχανικές του ιδιότητες, γεγονός που καθυστερεί τη διαδικασία επιτέλεσης ενός έργου.
- iii) Χαρακτηριστικό επίσης του σκυροδέματος είναι η συρρίκνωση, που σε αρκετές περιπτώσεις προκαλεί εμφανείς ρωγμές και μειωμένη αντοχή σε σχέση με τη ζητούμενη.

### 1.8.1. Δομικός χάλυβας

Στη σύγχρονη μηχανική χρησιμοποιούνται τρία βασικά οικοδομικά υλικά, το σκυρόδεμα, ο δομικός χάλυβας και το ξύλο. Ανά περίπτωση έργου είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά του καθενός ώστε να γίνεται η καταλληλότερη επιλογή. Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα ασχοληθούμε με τον δομικό χάλυβα. Τα βασικά στοιχεία που τον αποτελούν είναι ο σίδηρος και ο άνθρακας, ενώ όσος περισσότερος είναι ο άνθρακας τόσο μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή εμφανίζει το υλικό. Αξίζει να σημειωθεί όμως πως η αυξημένη ποσότητα αυτού επιφέρει και ευαισθησία στο ατσάλι που δεν είναι επιθυμητό για τη χρήση του στις οικοδομικές κατασκευές.



Εικόνα 15 Χαλύβδινες βέργες οπλισμού



Εικόνα 16 Διάφορες μορφές χάλυβα ως δομικό υλικό

Κάποια από τα βασικά προτερήματα του χάλυβα είναι τα εξής:

- i) Ο δομικός χάλυβας είναι ιδιαίτερα αγαπητό υλικό προς τους κατασκευαστές, καθώς εμφανίζει μεγάλες αντοχές σε σχέση με το μικρό του βάρος. Προτιμάται ιδίως σε πολύωρες κατασκευές, γέφυρες μεγάλης έκτασης και φυσικά σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμική δραστηριότητα.
- ii) Ακόμα και μετά την αστοχία του μπορεί να δεχθεί μεγάλες παραμορφώσεις.
- iii) Είναι σχετικά προβλέψιμο υλικό, δηλαδή οι μηχανικές του ιδιότητες είναι δυνατό να προβλεφθούν με αρκετή βεβαιότητα και η ελαστική του συμπεριφορά είναι εμφανής από νωρίς. Σε αντίθεση με το σκυρόδεμα τα χαρακτηριστικά του δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα στο πέρασμα του χρόνου.
- iv) Έχει γρήγορη και εύκολη τοποθέτηση, γεγονός που μειώνει το χρόνο επιτέλεσης τους έργου, άρα και το κόστος.
- v) Οι χάλυβδινες κατασκευές έχουν άμεση και γρήγορη διαδικασία επισκευής, ενώ τα μέλη από χάλυβα αξιοποιούνται σε προκατασκευές.
- vi) Τα μέλη από χάλυβα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και εύκολα να συμπληρωθούν ως στοιχεία επέκτασης σε υφιστάμενες κατασκευές.
- vii) Χαρακτηριστικό επίσης του χάλυβα είναι η μειωμένη αντοχή σε λυγισμό και απαιτείται σχετική μελέτη για τη βελτίωση του.



Εικόνα 17 Προσθήκη χαλύβδινων μελών για προέκταση κατοικίας

Εκτός από τα θετικά γνωρίσματα του δομικού χάλυβα, χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψιν και κάποια αρνητικά ώστε να παίρνονται και τα απαραίτητα μέτρα για την αντιμετώπισή τους. Τα κυριότερα είναι τα παρακάτω:

- i) Το κόστος για την παραγωγή του χάλυβα είναι αρκετά υψηλό, άρα αυξάνεται και το συνολικό κόστος της κατασκευής σε σχέση με το αν γινόταν χρήση κάποιου άλλου δομικού υλικού.
- ii) Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η αντοχή του χάλυβα έναντι φωτιάς είναι μικρή, ενώ ως καλός αγωγός της θερμότητας τη μεταδίδει πολύ γρήγορα. Απαραίτητα σε κάθε κατασκευή είναι τα μέτρα πυρόσβεσης.
- iii) Η έκθεση του χάλυβα στο φυσικό περιβάλλον μπορεί να επιφέρει προβλήματα στο έργο λόγω διάβρωσης και γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η επικάλυψη των μελών με ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά.
- iv) Χαρακτηριστικό του είναι επίσης και η ευαισθησία του σε λυγισμό και γι' αυτό είναι απαραίτητες αντίστοιχες μελέτες σχεδιασμού.

## 2. Μη συμβατό σκυρόδεμα

### 2.1. Ορισμός

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος και την εναπόθεση των δομικών απορριμμάτων οδήγησε στην δημιουργία του μη συμβατού σκυροδέματος. Το μη συμβατό σκυρόδεμα προέρχεται από επαναχρησιμοποιούμενο "απόβλητο" σκυρόδεμα και άλλα ανακυκλώσιμα υλικά ως αδρανή, ενώ είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον. Οι απαιτήσεις για παρασκευή σκυροδέματος είναι μεγάλες ημερησίως σε παγκόσμια εμβέλεια καθώς και η ταχύτητα εξάντλησης των φυσικών πόρων. Καθημερινά παράγονται τεράστιες ποσότητες αποβλήτων από διάφορες οικοδομικές εργασίες, κατασκευές ή κατεδαφίσεις. Η διαχείρισή τους γίνεται ανεξέλεγκτη δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στο φυσικό περιβάλλον.



Εικόνα 18 Σωρός οικοδομικών αποβλήτων

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων προέρχονται από διάφορες δραστηριότητες. Πρωτίστως από οικοδομικές εργασίες, ανεγέρσεις, κατεδαφίσεις, περιφράξεις, ανακαινίσεις, κλπ. Ομοίως προκύπτουν και από έργα υποδομών, κατεδαφίσεις δρόμων, σηράγγων, γεφυρών, αποχετευτικών έργων και άλλα. Τέλος οι δημιουργία τους μπορεί να οφείλεται σε φυσικές καταστροφές όπως πλημμύρες, σεισμούς, κατολισθήσεις, δυσμενή καιρικά φαινόμενα και λοιπές καταστροφικές συνθήκες. Ανάλογα λοιπόν με την προέλευσή τους χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- i) **Απόβλητα κατεδαφίσεων – Μπάζα.** Τέτοιου είδους απόβλητα είναι χώματα, διάφοροι τύποι σκύρων, στοιχεία σκυροδέματος, τούβλα, επιχρίσματα, γύψος, πλάκες επιστρώσεων, μεταλλικά στοιχεία, κομμάτια ξύλων, τρίμματα ειδών υγιεινής, λαξευμένες πέτρες, κτλ. Τα υλικά αυτά μεταξύ τους παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια και η σύστασή τους ποικίλλει.





Εικόνα 19 Μπάζα κατεδαφίσεων

- ii) **Απόβλητα από εργοτάξια.** Ανάμεσα τους βρίσκονται κομμάτια ξύλων, πλαστικά, χαρτιά, μεταλλικά αντικείμενα, καλώδια, οικοδομικές κόλλες, ίχνη χρωμάτων και βερνικιών, σοβάδες, καθώς και υλικά που χρησιμοποιούνται στις επικαλύψεις. Σημαντικό μέρος των αποβλήτων στα εργοτάξια καταλαμβάνουν και τα είδη συσκευασίας των εμπορευμάτων δηλαδή χαρτόνια, πλαστικά τούβλα, κτλ.



Εικόνα 20 Απόβλητα εργοταξίου

- iii) **Απόβλητα εκσκαφών.** Στα απόβλητα αυτά περιλαμβάνονται τα μητρικά χώματα των εκσκαφών του κάθε έργου, χαλίκια, πέτρες, και οποιαδήποτε υλικά που μπορεί να προέρχονται από φυσικά φαινόμενα, από χωματουργικά και εκβραχισμούς. Τέτοιου είδους υλικά χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε κατασκευή, αλλά πιο συγκεκριμένα σε γεωτεχνικά έργα, και σε υπόγεια.



Εικόνα 21 Απόβλητα από εκσκαφές

- iv) **Απόβλητα οδοποιίας.** Ο συγκεκριμένος τύπος αποβλήτων, προέρχεται από υλικά οδοστρώματος, ασφάλτου, καθώς και υλικά υποβάσεων. Ανάμεσά τους κυριαρχούν τα χαλίκια, τα σκύρα, η άμμος και γενικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οδών. Προκύπτουν είτε από την ανακαίνιση, είτε από την αποξήλωσή τους, από την συντήρηση υπόγειων υδραυλικών και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων στις πόλεις.



Εικόνα 22 Απόβλητα οδοποιίας

## 2.2. Σκυροδέματα από ανακυκλωμένα αδρανή

Από όλα τα υλικά αποβλήτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα καταλληλότερα για την παρασκευή δομικού ανακυκλωμένου σκυροδέματος, είναι τα αδρανή από απόβλητα προηγούμενου σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στα ευνοϊκά χαρακτηριστικά τους και στο γεγονός ότι η ποσότητα των ακαθαρσιών είναι μικρότερη. Η ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η ποιότητα του αρχικού σκυροδέματος, η επεξεργασία που έχουν υποστεί ως τη στιγμή εκείνη αλλά και η ύπαρξη βλαβερών για το σκυροδέμα υλικών μέσα στο μίγμα. Τα προσκολλημένα κονίαματα που βρίσκονται γύρω από τα αδρανή παίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς συμβάλλουν στην τραχιά υφή τους αλλά και στην

υδαταπορροφητικότητά τους έναντι των πολύ λεπτών σωματιδίων. Επιπρόσθετα, χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών είναι η χαμηλή αντοχή που παρουσιάζουν, το υψηλό πορώδες, η μεγάλη συστολή ξήρανσης, το μικρό μέτρο ελαστικότητας και ο μεγάλος ερπυσμός. Αποτέλεσμα αυτών είναι η δύσκολη εφαρμογή τους.

## **2.3. Ιδιότητες σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή**

### **2.3.1. Εργασιμότητα ανακυκλωμένου σκυροδέματος**

Όπως διαπιστώνεται στις περισσότερες μελέτες της βιβλιογραφίας, η αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα του σκυροδέματος, οδηγεί στη σημαντική μείωση της εργασιμότητάς του. Μέσω της μεγάλης υδαταπορροφητικότητάς τους, το μίγμα γίνεται ιδιαίτερα ξηρό και αυτό δυσκολεύει τη λειτουργικότητά του. Ένας ακόμα παράγοντας που οδηγεί στο αποτέλεσμα αυτό είναι η τραχιά επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών. Τα υλικά αυτά παρουσιάζονται πιο γωνιακά και η αναλογία επιφάνειας / όγκου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα φυσικά αδρανή, τα οποία έχουν σαφώς πιο ομαλή και λεία επιφάνεια. Έτσι οι εσωτερικές τριβές μεταξύ των αδρανών είναι μεγάλες και άρα απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα πάστας ώστε να επιτευχθεί αντίστοιχη εργασιμότητα με αυτή των φυσικών υλικών. Συνεπώς, αν προσπαθήσουμε να παρασκευάσουμε σκυρόδεμα με τον ίδιο λόγο N / T και ανακυκλωμένα αδρανή, θα παρουσιάσει σημαντικά χαμηλότερη εργασιμότητα. Για να επιτύχουμε σχετικά ίδια εργασιμότητα με αυτή που θα είχε το σκυρόδεμα με φυσικά αδρανή, απαιτείται να προσθέσουμε στο μίγμα 5-15% περισσότερο νερό, στην περίπτωση που τα ανακυκλωμένα αδρανή βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση. Εναλλακτικά με το νερό, στο σχεδιασμό ανάμιξης θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν υλικά όπως ιπτάμενη τέφρα, πρόσμικτα, ή και ο συνδυασμός τους ώστε να βελτιωθεί η εργασιμότητα.

### **2.3.2. Πυκνότητα ανακυκλωμένου νωπού σκυροδέματος**

Μειωμένη πυκνότητα παρουσιάζεται στο νέο σκυρόδεμα όταν προστίθεται στο μίγμα μεγάλη ποσότητα αδρανών ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει διότι η πυκνότητα τους είναι αρκετά χαμηλότερη από εκείνη των φυσικών αδρανών γεγονός που επηρεάζει το τελικό ειδικό βάρος, το οποίο είναι μικρότερο τόσο σε νωπή όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση. Οι διαφορές μεταξύ των πυκνοτήτων εξαρτάται από το ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση του εκ νέου σκυροδέματος και από τις διαφορές που έχει το ειδικό τους βάρος σε σχέση με τα φυσικά αδρανή που χρησιμοποιούνται. Όπως αναφέρεται σε μελέτες, όταν στο μίγμα του σκυροδέματος χρησιμοποιείται καθολικό ποσοστό χονδρόκοκκων αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, τότε το σκυρόδεμα που προκύπτει εμφανίζει 5% μειωμένη πυκνότητα σε σχέση με το αν το καθολικό ποσοστό ήταν από φυσικά αδρανή.

### **2.3.3. Θλιπτική αντοχή ανακυκλωμένου σκυροδέματος**

Έπειτα από χρόνιες μελέτες στον κλάδο αυτό, προκύπτει πως το σκυρόδεμα που παράγεται από ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζει μικρότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με την χρήση φυσικών αδρανών και με την ίδια ποσότητα τσιμέντου. Αναφορές γίνονται για μείωση έως και

45% του αναφερόμενου σκυροδέματος. Το αποτέλεσμα αυτό, επηρεάζει η χαμηλή αντοχή του κονιάματος που συναντάται ως κατάλοιπο γύρω από τα ανακυκλωμένα αδρανή, το μικρό ειδικό τους βάρος αλλά και η μεγάλη υδαταπορροφητικότητά τους. Ωστόσο, πηγές αναφέρουν πως το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή εμφανίζει υψηλό ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής, ειδικότερα ύστερα από 28 ημέρες. Το αφυδατωμένο, παλαιό τσιμέντο που έχει παραμείνει προσκολλημένο στα ανακυκλωμένα αδρανή, όταν αντιδράσει με το νερό επιταχύνει την ανάπτυξη της αντοχής. Η καταλληλότητα των επαναχρησιμοποιούμενων αδρανών ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιες ιδιότητες με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα διατηρώντας σταθερό το λόγο  $N / T$ , όσο χειρότερη είναι η ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απώλεια σε αντοχή. Πειραματικά προκύπτει ότι όταν τα χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών είναι εφάμιλλα με αυτά των φυσικών αδρανών, τότε και οι επιδόσεις των μιγμάτων σκυροδέματος τείνουν να μοιάζουν. Αξίζει να αναφερθεί πως όταν χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή έναντι λεπτόκοκκων το μίγμα παρουσιάζει αισθητά καλύτερη μηχανική συμπεριφορά.

#### **2.3.4. Συρρίκνωση ανακυκλωμένου σκυροδέματος**

Κατά τη διαδικασία ωρίμανσης του σκυροδέματος, παρατηρούνται διακυμάνσεις στον όγκο του που οφείλονται στη μείωση του νερού το οποίο εξατμίζεται, και στις χημικές διεργασίες που αφορούν την ενυδάτωση και την ενανθράκωσή του. Το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή συνήθως παρουσιάζει μεγαλύτερη συρρίκνωση έναντι αυτού με τα φυσικά αδρανή υλικά. Η αναλογία  $N / T$ , ο τύπος του τσιμέντου, η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος και το μέγεθος του δείγματος είναι κάποιοι από τους λόγους που επηρεάζουν τη συρρίκνωση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Οι δυο κατηγορίες συρρίκνωσης είναι: α) η αυτογενής και β) η συρρίκνωση ξήρανσης. Η πρώτη κατηγορία συναντάται στις πρώιμες ηλικίες (10-12 ώρες) και εξελίσσεται υπό μη κορεσμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, πολύ υψηλές θερμοκρασίες ή δυνατούς ανέμους. Η αυτογενής συρρίκνωση ή διαφορετικά χημική συρρίκνωση αφορά την ενυδάτωση του τσιμέντου κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης του σκυροδέματος στην οποία δεν σημειώνεται απώλεια νερού. Η δεύτερη κατηγορία, η συρρίκνωση ξήρανσης, αφορά στην ενυδάτωση του τσιμέντου κατά τη σκλήρυνση υπό μη κορεσμένες συνθήκες αλλά με τη διαφορά ότι σημειώνεται απώλεια υγρασίας στο σκυρόδεμα. Το τελευταίο είδος συρρίκνωσης επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ποσότητα του τσιμέντου αλλά και τις ιδιότητες που φέρουν τα ανακυκλωμένα αδρανή. Όπως αναφέρεται στη μελέτη της Building Contractors Society of Japan, το μίγμα σκυροδέματος που περιέχει χονδρόκοκκα αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος και φυσική άμμο παρουσιάζει 20-50% μεγαλύτερη συρρίκνωση, ενώ αυτό που περιέχει χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζει 70-100% μεγαλύτερη συρρίκνωση σε σχέση με το σκυρόδεμα από φυσικά αδρανή.

#### **2.3.5. Μέτρο ελαστικότητας ανακυκλωμένου σκυροδέματος**

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος συσχετίζεται με τα αδρανή που χρησιμοποιούνται και την ακαμψία που παρουσιάζει το τσιμέντο. Η πάστα του τσιμέντου έχει σαφώς χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από εκείνο των αδρανών. Όπως επισημαίνεται σε μελέτες, το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από ανακυκλωμένα αδρανή υλικά έχει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από το αντίστοιχο με φυσικά αδρανή και η μείωση αυτή είναι ανάλογη με την ποσότητα των ανακυκλωμένων αδρανών μέσα στο μίγμα όταν τα υπόλοιπα στοιχεία διατηρούνται σταθερά. Το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών επηρεάζει πιο πολύ το μέτρο ελαστικότητας του

εκ νέου σκυροδέματος παρά τη θλιπτική αντοχή του. Αναφορικά με μελέτες, το σκυρόδεμα που προκύπτει από χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζει τιμή μέτρου ελαστικότητας E, 10-33% μικρότερη σε σχέση με το σκυρόδεμα από φυσικά αδρανή. Παράλληλα όμως αν κάποιος κοιτάξει τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων και για τα δυο είδη σκυροδέματος, θα διαπιστώσει πως είναι σχεδόν όμοια. Αυτό σημαίνει πως οι κατασκευές από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα μπορούν να σχεδιαστούν βάσει της θεωρίας της πλαστιμότητας των κατασκευών με συμβατικό σκυρόδεμα.

### **2.3.6. Αντοχή ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε ψύξη-απόψυξη**

Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από ανακυκλωμένα αδρανή υλικά, εμφανίζει χαμηλότερη αντίσταση όταν εκτίθεται σε ψύξη και απόψυξη σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτό παρατηρείται διότι το μη συμβατικό σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγαλύτερο πορώδες, μεγαλύτερη υδαταπορροφητικότητα άρα και συνεπώς μικρότερη μηχανική απόδοση από αυτό με τα φυσικά αδρανή. Εξαιτίας του μεγάλου πορώδους των ανακυκλωμένων αδρανών, το σκυρόδεμα φαίνεται πιο εκτεθειμένο σε ζημιές από παγετούς.

### **2.3.7. Αντοχή ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε εφελκυσμό και κάμψη**

Όταν στην παρασκευή του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, η αντοχή σε κάμψη που προκύπτει είναι έως και 10% μικρότερη σε σχέση με το συμβατικό. Ωστόσο διαφορετικές μελέτες υποστηρίζουν, πως η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα δεν επηρεάζει αισθητά την αντοχή σε κάμψη του παραγόμενου σκυροδέματος.

Σχετικά με την αντοχή εφελκυσμού του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, παρουσιάζει μια μείωση της τάξης του 6% σε σχέση με το σκυρόδεμα από φυσικά αδρανή. Σε περιπτώσεις που τα ανακυκλωμένα αδρανή αντικαθιστούν καθολικά τα χονδρόκοκκα και τα λεπτόκοκκα φυσικά αδρανή τότε η δύναμη του εφελκυσμού μπορεί να μειωθεί σε τιμές τάξης του 10-20%. Για να αντισταθμιστεί η διαφορά αυτή και διατηρώντας σταθερό το ποσοστό του νερού, χρειάζεται να προσθέσουμε ποσότητα τσιμέντου.

### **2.3.8. Συστολή ξήρανσης σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή**

Η ποσότητα της τσιμεντόπαστας και ο λόγος w / cm του τσιμέντου στο μίγμα είναι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό ξήρανσης του σκυροδέματος. Το γεγονός πως στο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή περιέχεται μεγαλύτερη ποσότητα πάστας σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα, το κάνει να παρουσιάζει μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης. Στο σκυρόδεμα με χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή και φυσική άμμο επισημαίνεται 20-50% μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης όπως αναφέρει η Japan Contractors Association. Παράλληλα, το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από χονδρόκοκκα αλλά και λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή εμφανίζει 70-100% υψηλότερη συστολή ξήρανσης έναντι του κανονικού σκυροδέματος.

### **2.3.9. Ερπυσμός και διαπερατότητα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή**

Η ποσότητα των ανακυκλωμένων αδρανών μέσα στο μίγμα του σκυροδέματος επηρεάζει και τον ερπυσμό του. Επεξηγηματικά, όσο μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνουν μέσα στο μίγμα, τόσο μεγαλύτερος προκύπτει και ο ερπυσμός. Η διαφορά του έναντι του φυσικού σκυροδέματος μπορεί να αγγίζει και τιμές 30-60% παραπάνω. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο όγκο τσιμεντόπαστας που έχει το μη συμβατικό σκυρόδεμα.

Σχετικά με τη διαπερατότητα, επηρεάζεται από το μέγεθος και τη συνέχεια που εμφανίζουν οι πόροι της πάστας κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή μπορεί να γίνει από 2 έως 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος, σε περιπτώσεις που η αναλογία  $w / cm$  είναι 0,50-0,70.

### **2.3.10. Βάθος ενανθράκωσης**

Δύο από τα πιο ευαίσθητα σημεία στην προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα είναι το βάθος της ενανθράκωσης και η διείσδυση του χλωρίου. Σχετίζονται με το μεγάλο πορώδες που παρουσιάζουν σε σύγκριση με τα φυσικά αδρανή και με άλλες ιδιότητες όπως την ανθεκτικότητά τους ή την υδαταπορροφητικότητα. Μέσα από πειραματικές μελέτες σε σκυροδέματα από ανακυκλωμένα αδρανή, συμπεραίνεται πως το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος αυτού είναι 1,1-2,5 φορές μεγαλύτερο συγκρινόμενο με το συμβατικό. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, όταν στο μίγμα του σκυροδέματος γίνεται προσθήκη χονδρόκοκκων αδρανών υλικών, προκαλείται μεγαλύτερη ενανθράκωση στην τσιμεντοειδή μικροδομή, γεγονός που επηρεάζεται από το μεγάλο πορώδες του κονιάματος που μένει προσκολλημένο. Όταν στο δείγμα εμφανίζεται μεγάλο πορώδες, η διάδοση του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα γίνεται ευκολότερη και με την παρουσία υγρασίας στο περιβάλλον αντιδρά χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $CaOH_2$ ) που υπάρχει στο υλικό και δημιουργείται τελικά ανθρακικό ασβέστιο ( $CaCO_3$ ). Μέσα από αυτή τη σειρά αντιδράσεων προκαλείται μείωση στο pH του σκυροδέματος και αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη διάβρωση του χάλυβα του οπλισμού. Σε μίγματα σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται καθολικά χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή είναι πιθανή η αύξηση του βάθους ενανθράκωσης κατά 20-80% έναντι του συμβατικού σκυροδέματος αναφοράς. Ωστόσο η διαφορά μεταξύ των τιμών αυτών μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες όπως το κονίαμα που παραμένει προσκολλημένο στα ανακυκλωμένα αδρανή, την αναλογία  $N / T$  του μίγματος αλλά και την υγρασία που υπάρχει στο γύρω περιβάλλον.

### **2.3.11. Διείσδυση του χλωρίου**

Η διαδικασία διείσδυσης των ιόντων χλωρίου στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είναι αντίστοιχη με τη διαδικασία ενανθράκωσης. Οφείλεται κυρίως στο μεγάλο πορώδες του μη συμβατού σκυροδέματος και όπως αναφέρεται σε μελέτες της βιβλιογραφίας όσο αυξάνεται η προσθήκη χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα, τόσο μεγαλύτερο είναι και το βάθος της διείσδυσης του χλωρίου. Τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν ιδιότητες όπως μεγάλο πορώδες και υδαταπορροφητικότητα. Παράλληλα μέσα από τη διαδικασία ανακύκλωσης δημιουργούνται ρωγμές σε αυτά και όλα αυτά μαζί συμβάλουν στην γρήγορη εξάπλωση των υγρών και των βλαβερών για το σκυρόδεμα ουσιών. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το

σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από ανακυκλωμένα αδρανή έναντι φυσικών έχει τελικά μειωμένη αντοχή και απόδοση. Ο μηχανικός για να προβλέψει το παραπάνω πρόβλημα, φροντίζει να εξοπλίσει το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα με νέο ανθεκτικό κονίαμα το οποίο εμποδίζει τη διόδο των βλαβερών ουσιών προς τα αδρανή.



Εικόνα 23 Διάβρωση οπλισμού του σκυροδέματος

### 2.3.12. Μηχανισμός θραύσης

Ο μηχανισμός θραύσης του σκυροδέματος επηρεάζεται από την ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών και τη σχέση τους με την τσιμεντόπαστα. Μέσα από το πείραμα του έκαναν οι Brand et al. (2014) χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή και ανακυκλωμένη άσφαλτο οδοστρώματος, παρατηρήθηκε πως η συνολική ενέργεια θραύσης ήταν αρκετά παρόμοια ή και σε κάποιες περιπτώσεις υψηλότερη έναντι του φυσικού σκυροδέματος, ενώ η αντοχή και η ελαστικότητα ήταν χαμηλότερη. Μέσα στη βιβλιογραφία υπάρχουν και αντίθετες απόψεις που υποστηρίζουν πως όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα, τόσο μειώνεται και η ενέργεια θραύσης.

## 2.4. Ενίσχυση σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή

Με σκοπό να αντιμετωπιστούν όλες οι παραπάνω αστοχίες που προκύπτουν από τη χρήση σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή υλικά, προτείνονται οι ακόλουθοι τρόποι για την ενίσχυσή του.

### 2.4.1. Προσθήκη ιπτάμενης τέφρας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε εκτενώς η ιπτάμενη τέφρα. Η δημιουργία της οφείλεται στην ποζολανική αντίδραση των λεπτόκοκκων αδρανών, συμπυκνώνοντας την τσιμεντόπαστα και εν τέλει προκύπτει και το υψηλό πορώδες που παρουσιάζει το σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή. Κάποιες από τις ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας όταν προστεθεί στο μίγμα του σκυροδέματος είναι οι ακόλουθες:

- i) Βελτιώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος.
- ii) Περιορίζει την εύκολη διόδο του νερού και άλλων βλαβερών για το σκυρόδεμα ουσιών, δηλαδή μειώνει την διαπερατότητά του.

- iii) Περιορίζει τη συστολή του.
- iv) Οδηγεί στη μείωση της θλιπτικής αντοχής του σε ηλικία 28 ημερών.
- v) Κατά τη διαδικασία της ενανθράκωσης αυξάνει το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο δεσμεύεται στο σκυρόδεμα.

#### **2.4.2. Χρήση σκωρίας υψικαμίνου**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε εκτενώς και η σκωρία υψικαμίνου. Λέγεται αλλιώς και τσιμέντο σκωρίας και βελτιώνει τις μακροπρόθεσμες ιδιότητες που παρουσιάζει το σκυρόδεμα. Σε μια πειραματική δοκιμή, οι Parthiban και Saravana Raja Mohan (2017), επιχείρησαν να αντικαταστήσουν καθολικά με σκωρία υψικαμίνου το τσιμέντο Portland, χρησιμοποιώντας ως ενεργοποιητές αντί για νερό, μια μίξη πυριτικού νατρίου μαζί με διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου. Διαπίστωσαν έτσι πως με την προσθήκη χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών σε διαφορετικά ποσοστά κάθε φορά, προέκυψε σκυρόδεμα το οποίο είχε μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή, καμπτική αντοχή και αντοχή σε θραύση έναντι του σκυροδέματος από τσιμέντο Portland και φυσικά αδρανή.

#### **2.4.3. Ανάμιξη δύο σταδίων (TSMA)**

Σκοπός της προσπάθειας αυτής ήταν η ενίσχυση της ποιότητας του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή. Έπειτα από πειραματικές διαδικασίες, οι Tam V. W. και Tam C. M. (2007) επιχείρησαν να χωρίσουν το νερό ανάμιξης σε δυο μέρη. Αφού τα αδρανή αναμίχθηκαν μεταξύ τους για 60 δευτερόλεπτα, πρόσθεσαν το πρώτο μέρος του νερού και επανέλαβαν τη διαδικασία για άλλα 60 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια έβαλαν το τσιμέντο και ανάμιξαν για 30 δευτερόλεπτα. Έριξαν το δεύτερο μέρος του νερού στο μίγμα και η διαδικασία συνέβη για 120 δευτερόλεπτα. Αποτέλεσμα αυτής της διαφορετικής ανάμειξης ήταν η βελτιωμένη μεταβατική ζώνη διεπαφής του σκυροδέματος με τα ανακυκλωμένα αδρανή, σε σχέση με τη συμβατική ανάμιξη, παρότι διήρκησε για περισσότερο χρόνο.

#### **2.4.4. Ανάμιξη κονιάματος και ανάμιξη με άμμο**

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, στόχος ήταν η ενίσχυση της απόδοσης του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Στην πρώτη περίπτωση και όπως αναφέρεται από την βιβλιογραφία, τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή αντικατέστησαν καθολικά τα χονδρόκοκκα φυσικά, αφού υποβλήθηκαν σε επεξεργασία τις προηγούμενες 7 ημέρες. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η αύξηση της αντοχής σε θλίψη. Ομοίως και στη δεύτερη περίπτωση, τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή προεπεξεργάστηκαν 7 ημέρες πριν την ανάμιξη. Στην σύγκριση μεταξύ των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων που υπέστησαν προεπεξεργασία και όχι, τα πρώτα σημείωσαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή σε μεταγενέστερη ηλικία (28 ημερών).



#### 2.4.5. Προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή

Η προσθήκη ινών παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή. Όπως αναφέρει η βιβλιογραφία, οι Katkhuda και Shatarat (2017) επιχείρησαν να ενσωματώσουν ίνες βασάλτη, σε διάφορα ποσοστά, μέσα στο μίγμα μη επεξεργασμένου αλλά και επεξεργασμένου ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος. Κατέληξαν στο συμπέρασμα, πως όταν οι αναλογίες του μίγματος ανακυκλωμένων και φυσικών αδρανών, είναι 20% και 80% αντίστοιχα, τότε το σκυρόδεμα που προκύπτει παρουσιάζει αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη έναντι του σκυροδέματος αναφοράς. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι Afroughsabet et al. (2017), που πρόσθεσαν 1% ίνες χάλυβα διπλού αγκίστρου σε σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή και κατέγραψαν πως σε μεταγενέστερη ηλικία (28 ημερών) η προσθήκη χαλύβδινων ινών αύξησε την εφελκυστική αντοχή κατά 60% και την αντοχή σε κάμψη κατά 88%. Αργότερα, οι Gao et al. αύξησαν το ποσοστό των ινών χάλυβα σε 2% για ποσοστά 30%, 50% και 100% του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή και επισήμαναν την βελτίωση της διατμητικής αντοχής κατά 135% του σκυροδέματος που είχε παραχθεί από 50% χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή.



Εικόνα 24 Ίνες βασάλτη

#### 2.5. Οικονομική προσέγγιση μη συμβατού σκυροδέματος

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, πολλά από τα υλικά των αποβλήτων μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε κατασκευές. Για το σκοπό αυτό επιβάλλεται να απομακρυνθούν προτού ξεκινήσει η διαδικασία της κατεδάφισης. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι αρκετά δύσκολη και απαιτεί σίγουρα υψηλότερο κόστος αναφορικά με μια συμβατή αποξήλωση. Τα υλικά χρειάζεται να διαχωριστούν με σωστό τρόπο, να προσδιοριστούν και κυρίως να γίνει ο απαιτούμενος έλεγχος της καταλληλότητάς τους. Βάσει των παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως υλικά χαμηλής αξίας όπως τούβλα, καλώδια ή πλακάκια έχουν μεγαλύτερο κόστος ανάκτησης από αυτό της εκ νέου αγοράς. Αντιθέτως υλικά όπως ξύλα, και διάφορα είδη μετάλλων χρήζουν ανάκτησης καθώς το κόστος αγοράς τους είναι ιδιαίτερα υψηλό. Ακόμα όμως και στην περίπτωση αυτών των υλικών, οι διαδικασίες εξέτασης της καταλληλότητάς τους, η εξακρίβωση της διάρκειας χρήσης και ζωής τους καθώς και οι έλεγχοι της απόδοσής τους σε υποτιθέμενη επαναχρησιμοποίηση, αυξάνουν σημαντικά το κόστος, και δεν είναι συμφέρουσες ιδιαίτερα όταν πρόκειται για πολύ μικρές ποσότητες από αυτά.

Ωστόσο η διαδικασία ανακύκλωσης σκυροδεμάτων θα μπορούσε να μετατραπεί σε μια πολύ κερδοφόρα επιχείρηση, παρά τις επιφυλάξεις που υπάρχουν σχετικά με τη χρήση τους. Δοκιμές αποδεικνύουν ότι με σύγχρονα μέσα θα μπορούσαν να εξασφαλιστούν αδρανή ακόμα και καλύτερης ποιότητας από της πρωτογενούς παραγωγής. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας προσφέρει καινοτόμα μηχανήματα διαχωρισμού, πλύσης, ταξινόμησης και επανάκτησης των ανακυκλωμένων αδρανών σε λιγότερο χρόνο και ασφαλώς με πιο οικονομικές προσεγγίσεις. Με τον καιρό υπάρχει δυνατότητα για επιπλέον μείωση του νερού πλύσεως, ενώ η λάσπη που δημιουργείται από τη διαδικασία θα έχει απευθείας εφαρμογή σε κάποια άλλη κατασκευή. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι η εδραίωση μόνιμων κέντρων ανακύκλωσης σκυροδέματος, τα οποία θα βοηθήσουν στο πρόβλημα διαχείρισης των μπαζών. Μέσω των παραπάνω, η ανακύκλωση του παλαιού σκυροδέματος πέρα από την προσπάθεια προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος, θα μπορούσε να επιφέρει και οικονομικά οφέλη στον επιχειρηματικό κλάδο. Περισσότερες λεπτομέρειες για το ζήτημα χρήζουν οικονομοτεχνικής μελέτης.

Στο σύντομο μέλλον με τη μείωση των χώρων εναπόθεσης μπαζών και την ανεπάρκεια στην αυξανόμενη ζήτηση του σκυροδέματος, η ανακύκλωσή του θα αποτελεί μονόδρομο.



**Εικόνα 25** Μόνιμη μονάδα ανακύκλωσης αδρανών

### 3. Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

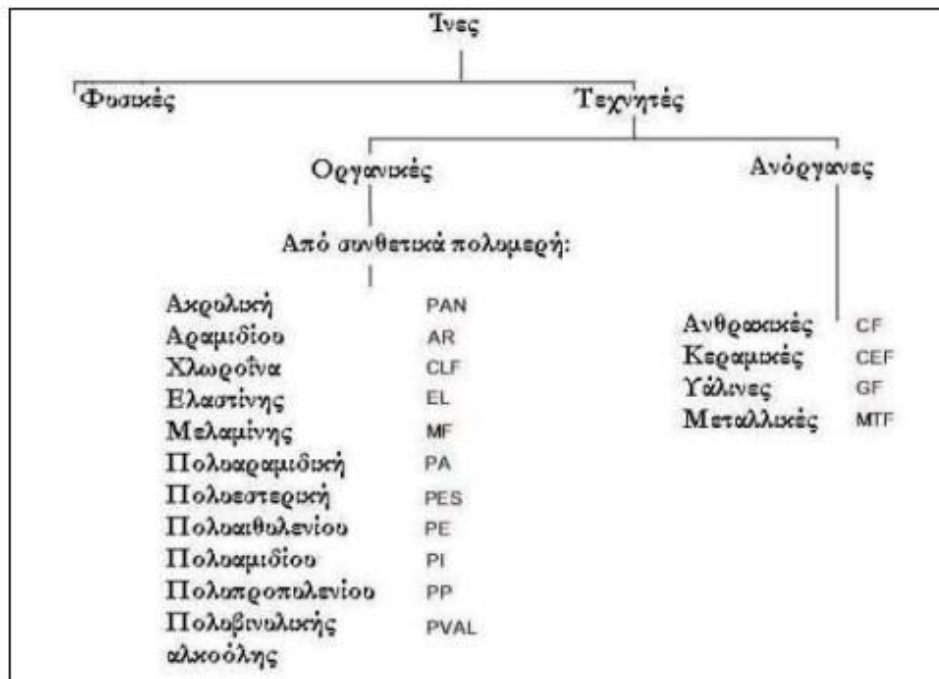
#### 3.1. Ορισμός

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (fiber reinforced concrete) είναι αυτό το οποίο αποτελείται από τσιμέντο με υδραυλικές ιδιότητες, νερό, αδρανή (λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα) και ασυνεχείς διακριτές ίνες σε τυχαία κατεύθυνση. Στην σύνθεσή του μπορεί να περιέχονται ποζολάνες ή άλλα πρόσμικτα που συναντώνται και στο συμβατικό σκυρόδεμα. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται είναι διάφορων μορφών, μεγεθών (συνήθως λίγων εκατοστών και διαμέτρου που δεν ξεπερνά το κλάσμα χιλιοστού) και διασκορπίζονται στο μίγμα σε ποσοστό 1-3% του συνολικού όγκου του. Ευρύτερα γνωστή στις δομικές και μη δομικές εφαρμογές είναι η χρήση χαλύβδινων ινών, ωστόσο στο εμπόριο υπάρχουν πλαστικές, γυάλινες και από άλλα φυσικά υλικά. Με την εισαγωγή ινών στο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται η αύξηση της παραμόρφωσης κατά την αστοχία, η καθυστέρηση της εξάπλωσης των μικρορωγμών και συνεπώς η βελτίωση της αντοχής του. Η γρήγορη διάδοση των μικρορωγμών του σκυροδέματος κάτω από μια εφαρμοσμένη ένταση είναι υπεύθυνη για την χαμηλή εφελκυστική αντοχή του. Τα τελευταία χρόνια είναι δυνατό να παρασκευαστεί ινοπλισμένο σκυρόδεμα με βελτιωμένη δυσθραυστότητα, ικανότητα δηλαδή να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση. Παρόλου που η αγορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν έχει γνωρίσει ακόμα ιδιαίτερη ανάπτυξη, στη Βόρεια Αμερική αναπτύσσεται κατά 20% ετησίως και αναφέρεται πως η ετήσια παραγωγή ινών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα φτάνει του 300.000 τόνους σε παγκόσμιο επίπεδο. Μέσα από το εμβαδό της καμπύλης του παρακάτω σχήματος φαίνεται η δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος που είναι σχεδόν 40 φορές μεγαλύτερη έναντι του άοπλου.



Εικόνα 26 Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για ινοπλισμένο και άοπλο σκυρόδεμα

Ανάλογα με την εφαρμογή που θα έχει το σκυρόδεμα, τις ζητούμενες μηχανικές ιδιότητες, το κόστος που διατίθεται, τη διάθεση στην αγορά και την αποτελεσματικότητα, επιλέγεται το είδος της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί. Τα βασικότερα είδη ινών σύμφωνα με την BISFA (The international bureau for the standardization of man-made fibers) παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27 Είδη τεχνητών ινών σύμφωνα με την BISFA

Ο τύπος των ινών και το ποσοστό του όγκου της επηρεάζει τις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Σε συνάρτηση του όγκου τους στο μίγμα, ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

- i) **Χαμηλό ποσοστό όγκου (< 1%)**: Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε τις ίνες για να μειωθεί η ρηγμάτωση εξαιτίας της συστολής. Βρίσκει εφαρμογή στις πλάκες και στα δάπεδα που έχουν μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια που συστέλλεται και οδηγεί σε υψηλή ρηγμάτωση. Οι διασκορπισμένες ίνες σε σχέση με τις ράβδους χάλυβα και το πλέγμα έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα. Προσφέρουν καλύτερη κατανομή των φορτίων, είναι λιγότερο ευαίσθητες στη διάβρωση και έχουν λιγότερο κόστος συγκριτικά με την τοποθέτηση ράβδων χάλυβα και πλεγμάτων.
- ii) **Μέτριο ποσοστό όγκου (1-2%)**: Η προσθήκη ινών στο ποσοστό αυτό συντελεί στην αύξηση της καμπτικής αντοχής, της πλαστιμότητας κατά την θραύση και της αντίστασης στην κρούση. Τα συγκεκριμένα αυτά μίγματα χρησιμοποιούνται στην παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σε δομές που απαιτούν απορρόφηση ενέργειας, βελτιωμένη ικανότητα έναντι διαστρωμάτωσης της μάζας, απολέπισης και κόπωσης.
- iii) **Μεγάλο ποσοστό όγκου (> 2%)**: Στο επίπεδο αυτό οι ίνες εφαρμόζονται στα πιο δύσκαμπτα μίγματα. Τα ινοπλισμένα αυτά μίγματα (HPFRC) περιγράφονται συχνά ως υψηλής επιτελεστικότητας λόγω της βελτιωμένης συμπεριφοράς τους. Στο πέρασμα του χρόνου αναπτύχθηκαν και τα εξαιρετικά υψηλής επιτελεστικότητας ινοπλισμένα σκυροδέματα.

### 3.2. Ιστορική αναδρομή

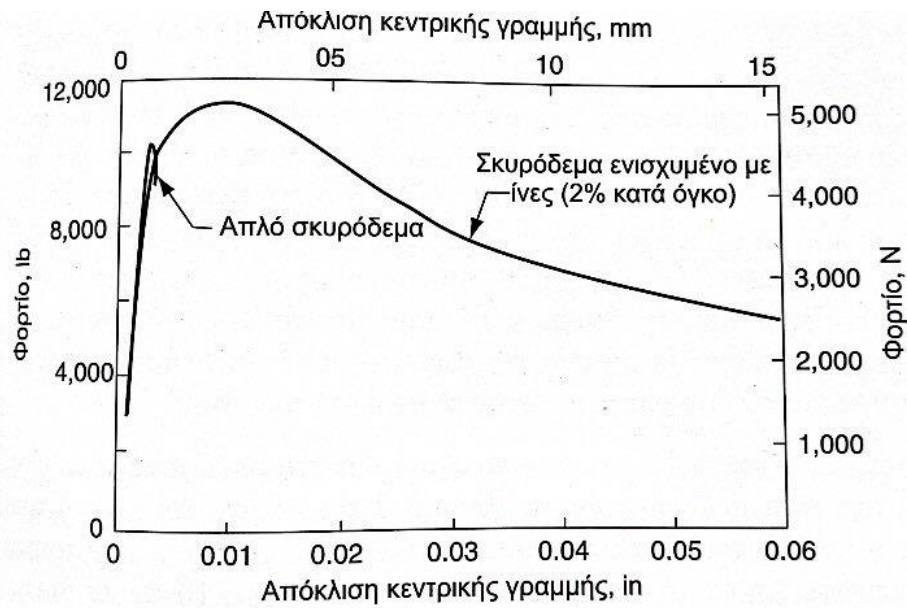
Στο πέρασμα των χρόνων αρκετοί προσπάθησαν να βελτιώσουν την ψαθυρότητα των δομικών υλικών προσθέτοντας ίνες σε αυτά. Στους σοβάδες των οροφών και στα τούβλα, συχνά

χρησιμοποιούσαν ίνες από άχυρα, είτε από μαλλιά ζώων με σκοπό την ενίσχυσή τους. Σκοπός των ινών, από τους ιστορικούς χρόνους μέχρι και σήμερα, ήταν η αποφυγή των ρωγμών στο σκυρόδεμα αλλά και η διατήρηση της πλαστιμότητας του σε περίπτωση δημιουργίας τους. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, γνώρισε την πρώτη του χρήση κοντά στα 100 χρόνια πίσω. Αναφέρεται πως ο Becard την κατοχύρωσε κατά το 1874 μ.Χ. στην Καλιφόρνια, όπου επιχείρησε να ενισχύσει το σκυρόδεμα με την προσθήκη ακανόνιστου παλαιοσιδήρου σε αυτό. Έπειτα ακολούθησαν κι άλλες παρόμοιες δοκιμές στις ΗΠΑ, στην Αγγλία, στην Γαλλία αλλά και στην Γερμανία. Εξαιτίας του μεγάλου κόστους, της ανεπαρκούς εξέτασής τους από εργαστήρια, αλλά και από την ραγδαία διάδοση και χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος παγκοσμίως, η εφαρμογή των ινών περιορίστηκε για αρκετά χρόνια. Κατά το 1970 μ.Χ. και μετά η έρευνα συνεχίστηκε με αποτέλεσμα την πρώτη χρήση εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος για την σταθεροποίηση πρανούς στομίου σήραγγας κατά το 1972 μ.Χ. στο Idaho. Η πρώτη χρήση αντλήσιμου σκυροδέματος συναντάται στην κατασκευή του μετρό της Φρανκφούρτης (σε τρία σημεία) όπου επιχείρησαν να ενισχύσουν με χαλύβδινες ίνες τη μόνιμη επένδυση των σηράγγων. Σε τομείς που αφορούν την κατασκευή σηράγγων, η εφαρμογή του ινοπλισμένου σκυροδέματος πραγματοποιείται με εκτόξευση, έγχυση, προκατασκευή ή εκβολή με σκοπό την επένδυσή τους.

Η χρήση χαλύβδινων ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, φέρει περισσότερα πλεονεκτήματα έναντι της χρήσης δομικού πλέγματος. Αρχικά αποφεύγονται οι διαδικασίες που αφορούν την τοποθέτηση του τελευταίου, που σημαίνει σημαντική μείωση του χρόνου και του κόστους επιτέλεσης του έργου. Επίσης η προσθήκη ινών πλεονεκτεί, καθώς διευκολύνει την σύνδεση επάλληλων στρώσεων σκυροδέματος, βοηθά στην αποφυγή δημιουργίας κενών που προκύπτουν πίσω από τις ράβδους του δομικού πλαισίου αλλά και ρωγμών εξαιτίας της ταλάντωσης αυτού. Μια ακόμη χρήση του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η επισκευή παλαιών επενδύσεων, και η αποκατάσταση σηράγγων των οποίων η ανθεκτικότητα διακυβεύεται λόγω ανεπαρκούς κάλυψης και διάβρωσης του οπλισμού. Σημαντικό θεωρείται πως με τη χρήση του σκυροδέματος αυτού μειώνεται και το απαιτούμενο πάχος της επένδυσης που απαιτείται για την επικάλυψη του οπλισμού και την ροή του. Στην κατασκευή των προκατασκευασμένων τομέων (segments) του δακτυλίου της επένδυσης, αξιοποιείται επίσης το σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες, χάρη στην απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής και της επίτευξης της ομοιογένειας. Επίσης καταφέρνει να μειώσει την δημιουργία ρωγμών που προκύπτουν κατά την μεταφορά και την προώθησή τους.

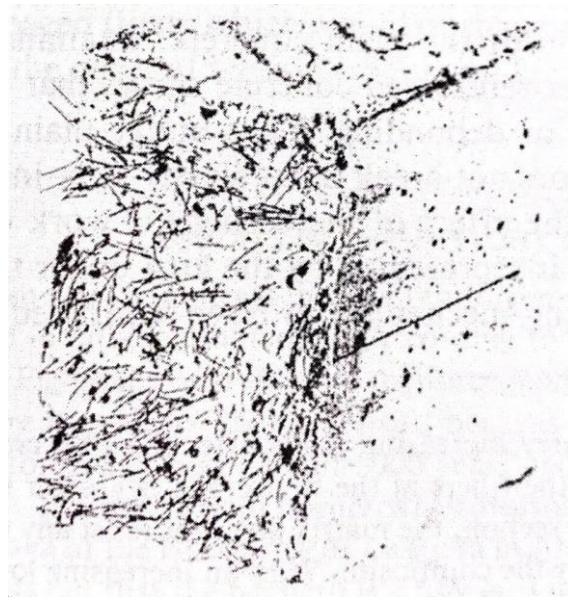
### 3.3. Μηχανισμός δυσθραυστότητας

Είναι γνωστό πως το κανονικό σκυρόδεμα αστοχεί ξαφνικά μόλις ξεπεραστεί η βύθιση που αντιστοιχεί στην τελική καμπτική αντοχή του. Αντίθετα το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εξακολουθεί να αντέχει σημαντικά φορτία ακόμα και για βυθίσεις αρκετά μεγαλύτερες από τη βύθιση αστοχίας του κανονικού σκυροδέματος. Όπως απεικονίζεται παρακάτω η αστοχία πραγματοποιείται αρχικά εξαιτίας της εξόλκευσης των ινών ή της αποκόλλησης. Ένα δοκίμιο δηλαδή ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν σπάζεται κατευθείαν μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, σε σχέση με ένα δοκίμιο κανονικού σκυροδέματος. Αυτό έχει ως επακόλουθο την αύξηση του έργου θραύσης, η οποία περιγράφεται ως πλαστιμότητα ή δυσθραυστότητα και απεικονίζεται από την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-βύθισης.



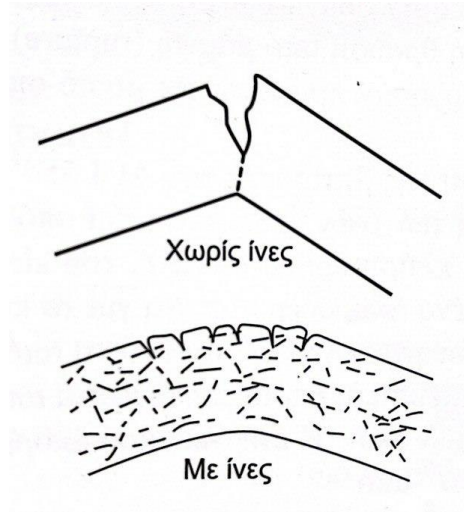
Εικόνα 28 Καμπύλη φορτίου-βύθισης (δοκού σε κάμψη) κανονικού και ινοπλισμένου σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον Shah, κατά το μηχανισμό πλαστιμότητας στα ινοπλισμένα μίγματα, το ανάμιγμα φέρει τα αυξανόμενα φορτία μετά από την πρώτη ρωγή στην τσιμεντόπαστα εφόσον η αντίσταση σε εξόλκευση των ινών στην πρώτη ρωγή είναι μεγαλύτερη από το φορτίο εμφάνισης της πρώτης ρηγματώσης. Στη ρηγματωμένη διατομή, η τσιμεντόπαστα δεν ανθίσταται σε οποιαδήποτε ένταση και οι ίνες φέρουν ολόκληρο το φορτίο που αναλαμβάνεται από το σύμπλεγμα. Με την επιβολή κάποιου μεγαλύτερου φορτίου σε αυτό, οι ίνες θα τείνουν να μεταφέρουν την επιπλέον ένταση στην τσιμεντόπαστα μέσω των τάσεων συνάφειας. Ωστόσο εάν οι τάσεις αυτές συνάφειας δεν ξεπερνούν την αντοχή σε συνάφεια των ινών, τότε δύναται να προκληθεί μεγαλύτερη ρηγματώση. Η διαδικασία αυτή πολλαπλασιασμού της ρηγματώσης συνεχίζεται μέχρι να αστοχήσουν οι ίνες, είτε η συσσωρευμένη τοπική συγκόλληση να οδηγήσει στην εξόλκευση των ινών.



Εικόνα 29 Διατομή μιας οπλισμένης με ίνες χάλυβα δοκού μετά από αστοχία που δείχνει ότι η αιτία της αστοχίας ήταν η εξόλκευση των ινών

Στοιχεία δοκιμών του Krenchel αποδεικνύουν πως και στα κανονικά αλλά και στα ινοπλισμένα με ίνες χάλυβα κονιάματα, η ενσωμάτωση ινών σε 0,90-2% του όγκου του σκυροδέματος, επέφερε αύξηση της αντοχής σε κάμψη κατά περίπου 15-30% αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις η επιμήκυνση από κάμψη ήταν από 9 έως 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του άοπλου κονιάματος. Καμία ορατή ρωγμή δεν εξακριβώθηκε στην εφελκυστική ζώνη αμέσως πριν από την τελική θραύση από κάμψη (rupture). Η λεπτή κατανομή των μικρορωγμών δείχνει πως οι ίνες ενέργησαν πρωτίστως ως μικρο-οπλισμός για την κατανομή των ρωγμών.



Εικόνα 30 Μηχανισμός αύξησης της πλαστιμότητας κάμψης του σκυροδέματος με ίνες

Σύμφωνα με την έκθεση της Επιτροπής του ACI 554, η συνολική ενέργεια που απορροφάται για την αποκόλληση των ινών όπως μετρείται από την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-βύθισης πριν την πλήρη θραύση μιας δοκού είναι τουλάχιστον 10-40 φορές υψηλότερη για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε σχέση με το κανονικό. Το μέγεθος της βελτίωσης της δυσθραυστότητας εξαρτάται έντονα από την συγκέντρωση των ινών και την αντίστασή τους στην εξόλκευση, η οποία επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η μορφή και η υφή της επιφάνειας των ινών. Η ενέργεια που απορροφάται κατά την εξόλκευση των ινών υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$G_c = \frac{1}{2} V f g \tau \frac{L^2 f}{d f}$$

Όπου

$Vf$ : το ποσοστό όγκου των ινών

$Lf$ : το μήκος των ινών

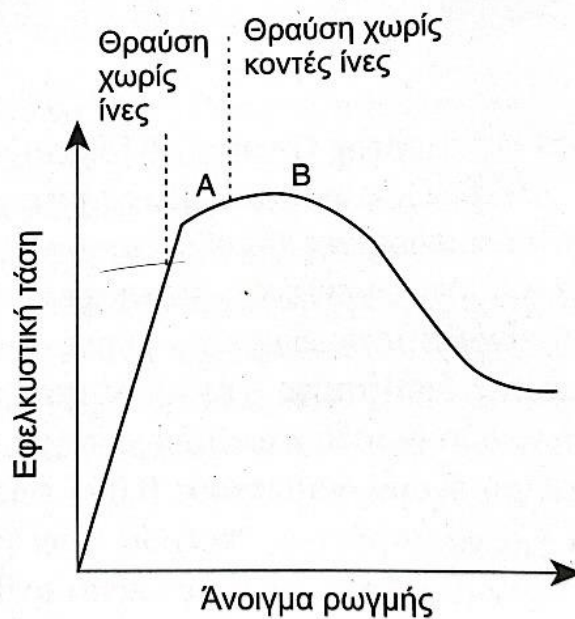
$df$ : η διάμετρος των ινών

$g, \tau$ : παράμετροι των διεπιφανειών

Η αύξηση στην ενέργεια θα αυξήσει το χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch} = EG/\sigma^2$  (ιδιότητα που περιγράφει την ψαθυρότητα ενός υλικού) οδηγώντας σε συστήματα μεγαλύτερης πλαστιμότητας.

Από άποψη υλικού και δομής υπάρχει μια λεπτή ισορροπία στη βελτιστοποίηση της συνάφειας μεταξύ της ίνας και της τσιμεντόπαστας. Σε περίπτωση που οι ίνες και η τσιμεντόπαστα συνδέονται ασθενώς, υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης υπό την επίδραση μικρών σχετικά φορτίων

με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται ουσιαστικά η γεφύρωση των ρωγμών. Σε αυτήν την κατάσταση, οι ίνες δεν καταφέρνουν να αυξήσουν την πλαστιμότητα του συστήματος. Αντιθέτως, εάν ο δεσμός με την τσιμεντόπαστα είναι πολύ ισχυρός, πολλές από τις ίνες μπορούν να σπάσουν προτού απελευθερώσουν ενέργεια μέσω της εξόλκευσης. Έτσι συμπεριφέρονται ως μη ενεργά εγκλείσματα που οδηγούν μόνο σε περιθωριακή βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Σημαντικό φυσικά είναι και το μέγεθος των ινών στη μηχανική συμπεριφορά του μίγματος. Με σκοπό να γεφυρωθεί ο μεγάλος αριθμός των μικρορωγμών στο σύμπλεγμα κάτω από την επιβολή του φορτίου και να αποφευχθεί η τοπική συγκέντρωση τάσεων, είναι απαραίτητη η προσθήκη πολλών κοντών ινών. Δεν είναι δύσκολο να βελτιστοποιηθούν οι αναλογίες ανάμιξης με σκοπό να ενσωματωθούν αυτές οι κοντές ίνες και να επιτευχθεί υψηλή εργασιμότητα. Η ομοιόμορφη κατανομή των κοντών ινών μπορεί να αυξήσει την αντοχή και την πλαστιμότητα του μίγματος. Οι μακριές ίνες απαιτούνται για να γεφυρώσουν τις μακρορωγμές σε υψηλότερες φορτίσεις. Συγκεκριμένα το ποσοστό όγκου των μακρών ινών μπορεί να είναι πολύ μικρότερο από το ποσοστό όγκου των κοντών. Η παρουσία μακρών ινών μειώνει αισθητά την εργασιμότητα του μίγματος και το ποσοστό όγκου του χρειάζεται να καθοριστεί με προσοχή. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στο σκυρόδεμα SIFCON όπου οι ίνες ενσωματώνονται σε πολύ, η εργασιμότητα δεν αποτελεί πρόβλημα και επομένως ένα μεγάλο ποσοστό των μακρών ινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η συνδυασμένη επίδραση των κοντών και των μακρών ινών στη συμπεριφορά του μίγματος κάτω από την ένταση παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 31 Επιρροή των ινών στα διαφορετικά στάδια εφελκυστικής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος

### 3.4. Ίνες και αναλογίες ανάμιξης

Η προσθήκη ινών με τυχαίο προσανατολισμό στη μάζα του σκυροδέματος, αποσκοπεί στον περιορισμό των ρωγμών που προκαλούνται σε αυτό αλλά και στον έλεγχο της επέκτασής τους. Οι βασικότερες ίνες που συναντώνται στα σκυροδέματα, καθώς και κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

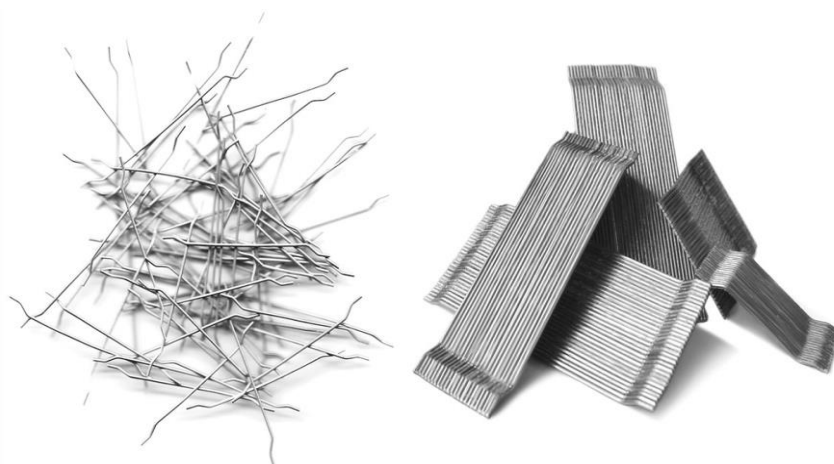


Τύπος ίνας	Αντοχή σε εφελκυσμό (ksi)	Μέτρο του Young ( $10^3$ ksi)	Τελική επιμήκυνση (%)	Ειδικό βάρος
Ακρυλικό	30-60	0,3	25-45	1,1
Αμίαντος	80-140	12-20	-0,6	3,2
Βαμβάκι	60-100	0,7	3-10	1,5
Ύαλος	150-550	10	1,5-3,5	2,5
Νάilon (μεγάλης αντοχής)	110-120	0,6	16-20	1,1
Πολυεστέρας (μεγάλης αντοχής)	105-125	1,2	11-13	1,4
Πολυαιθυλένιο	-100	0,02-0,06	-10	0,95
Πολυπροπυλένιο	80-100	0,5	-25	0,90
Ραιγιόν (μεγάλης ανθεκτικότητας)	60-90	1,0	10-25	1,5
Ορυκτοβάμβακας	70-110	10-17	-0,6	2,7
Χάλυβας	40-400	29	0,5-35	7,8

Πίνακας 7 Τυπικές ιδιότητες ινών

Για τα κατασκευαστικά σκυροδέματα ευρύτερα χρησιμοποιούμενες είναι οι χαλύβδινες ίνες. Στο εμπόριο μπορεί να κανείς να βρει τις ίνες αυτές σε διάφορες μορφές. Οι στρογγυλοποιημένες ίνες χάλυβα έχουν διάμετρο μεταξύ 0,25-0,75mm. Οι επίπεδες ίνες χάλυβα έχουν πάχος διατομής 0,15-0,40mm και πλάτος 0,25-0,90mm. Οι πτυχωμένες και παραμορφωμένες ίνες χάλυβα είναι διαθέσιμες και για πλήρες μήκος ή να είναι πτυχωμένες στις άκρες μόνο. Για να διευκολυνθεί ο χειρισμός και η ανάμιξη, είναι επίσης διαθέσιμες ίνες σε δέσμες των 10-30 ινών με υδροδιαλυτή κόλλα. Τυπικοί λόγοι των δυο διαστάσεων μήκος / πάχος κυμαίνονται από περίπου 30-150. Οι τυπικές ίνες γυαλιού έχουν διαμέτρους 0,005-0,015mm, αλλά οι ίνες αυτές μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους για να παράγουν στοιχεία ινών γυαλιού με διαμέτρους 0,013-1,3mm. Δεδομένου ότι το συνηθισμένο γυαλί δεν είναι ανθεκτικό στη χημική επίθεση από την τσιμεντόπαστα Portland, έχουν αναπτυχθεί ίνες γυαλιού ανθεκτικές στα αλκάλια με μεγαλύτερη γενικά ανθεκτικότητα. Χρησιμοποιούνται επίσης ίνες πολυπροπυλενίου που έχουν υποστεί ινιδισμό (συσπάσεις) και ύφανση.

Άλλα είδη μεταλλικών ινών που βρίσκουμε στο εμπόριο, είναι αυτές με άγκιστρα στα άκρα και άλλες παραλλαγές, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση αγκύρωσης στη μάζα του σκυροδέματος και στην αύξηση της αποδοτικότητας τους.



Εικόνα 32 Μεταλλικές ίνες με άγκιστρα στα άκρα

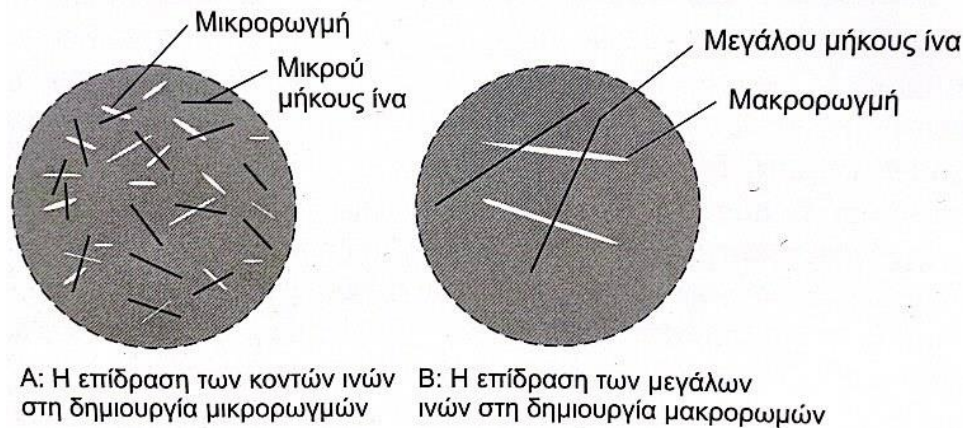


**Εικόνα 33** Μεταλλικές ίνες με άλλη παραλλαγή



**Εικόνα 34** Ίνες γυαλιού αλκαλικής αντίστασης, υψηλής ποιότητας

Στην τελική συμπεριφορά του μίγματος, συντελούν καθοριστικό ρόλο ο τύπος των ινών που χρησιμοποιούνται, το μήκος τους, το ποσοστό που καταλαμβάνουν στον συνολικό όγκο και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται με την τσιμεντόπαστα. Αποδεκτές τιμές για την ποσόστωση των ινών είναι μέχρι και 3% κατ' όγκο, έτσι ώστε να μη χρειαστούν άλλες τεχνικές διαχείρισης. Με την προσθήκη κοντών ινών επιτυγχάνεται ο έλεγχος του ανοίγματος και της επέκτασης των μικρών ρωγμών, καθώς είναι πυκνά διασκορπισμένες μέσα στο μίγμα. Με την προσθήκη μακρύτερων ινών εξασφαλίζεται η τελική αύξηση της αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπως παρουσιάζονται παρακάτω ανά περίπτωση:



Εικόνα 35 Επίδραση των ινών στη δημιουργία ρωγμών κατά περίπτωση

Η γεφύρωση των εφελκυστικών ρωγμών από ίνες για τυχαία προσανατολισμένες κοντές ευθείες ίνες εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{1}{2} V_f g \tau \frac{L_f}{d_f} \left( 1 - \frac{\delta}{\frac{L_f}{2}} \right)^2$$

Όπου

$V_f$ : το ποσοστό όγκου των ινών

$L_f$ : το μήκος των ινών

$d_f$ : η διάμετρος των ινών

$g, \tau$ : παράμετροι των διεπιφανειών

Η εξίσωση αυτή αναπτύχθηκε για κοντές ίνες όπου το φορτίο εξόλκευσης είναι χαμηλότερο από την αντοχή των ινών. Εάν αυτή η υπόθεση δεν ισχύει, γίνεται απαραίτητη η ενσωμάτωση της επιρροής της αντοχής των ινών στην διατύπωση. Το μέγιστο φορτίο  $\sigma_0$  που μπορεί να παραλάβει από την προηγούμενη εξίσωση είναι:

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} V_f g \tau \frac{L_f}{d_f}$$

Αυτή η σχέση είναι μια καλή ένδειξη της αποτελεσματικότητας των ινών στο μίγμα. Είναι σαφές πως ο λόγος των διαστάσεων των ινών ελέγχει το μέγεθος της μέγιστης έντασης.

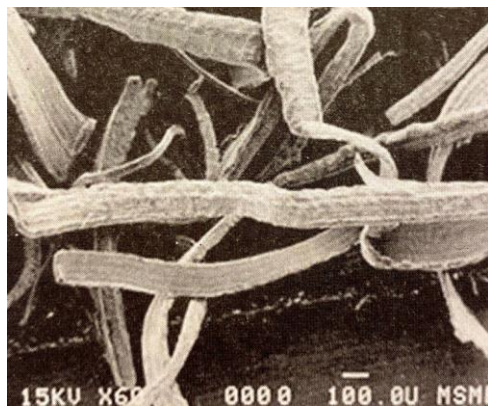
Είναι ευρέως γνωστό ότι η προσθήκη οποιουδήποτε τύπου ινών στο κανονικό σκυρόδεμα μειώνει την εργασιμότητα. Ανεξάρτητα από τον τύπο ινών η απώλεια της εργασιμότητας είναι ανάλογη προς το ποσοστό συγκέντρωσης των ινών στο σκυρόδεμα. Μερικοί τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο κονίαμα και στο σκυρόδεμα είναι:



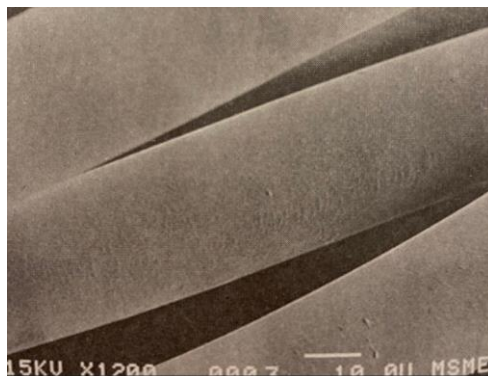
**Εικόνα 36** Παραμορφωμένες ίνες χάλυβα ψυχρής έλασης



**Εικόνα 37** Πολύ λεπτές ίνες πολυπροπυλενίου



**Εικόνα 38** Ινίδια χάλυβα



**Εικόνα 39** Ινίδια πολυπροπυλενίου

Ο λόγος που καθιστά τη χρήση χαλύβδινων ινών ευρέως διαδεδομένη και πιο εφαρμόσιμη, είναι τα πλεονεκτήματά τους συγκριτικά με άλλα είδη. Αρχικά έχουν λογικό κόστος κατασκευής και είναι άμεσα διαθέσιμες στον καταναλωτή. Επίσης μετατρέπουν το σκυρόδεμα από ψαθυρό σε πλαστικό υλικό χάρη στη δυσθραυστότητα που του προσφέρουν. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνονται από 400-1500MPa, με τους ανθρακούχους χάλυβες, ειδικά τους σκληρυμένους που αγγίζουν ακόμα και τα 4GPa. Ακόμα εμφανίζουν αντίσταση στα αλκαλικά πρόσμικτα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Σύμφωνα με το πρότυπο A 820 της ASTM (American Society for Testing and Materials), ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους, οι χαλύβδινες ίνες χωρίζονται στους εξής τύπους:

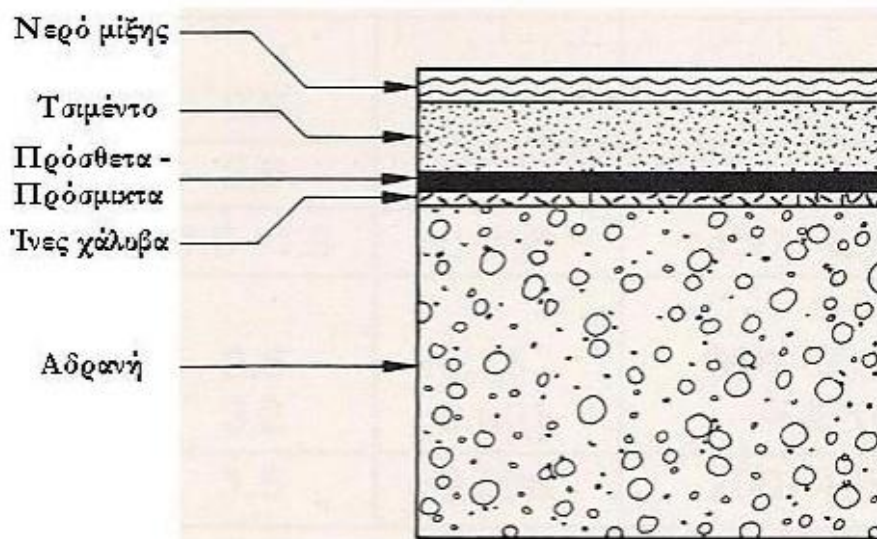
- i) **Τύπος I:** ίνες ψυχρής ολκής. Παρασκευάζονται από την εν ψυχρώ επεξεργασία σύρματος χάλυβα. Εμπορικά είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος.
- ii) **Τύπος II:** ίνες από κοπή χαλυβδόφυλλων
- iii) **Τύπος III:** ίνες από τηγμένο μέταλλο
- iv) **Τύπος IV:** ίνες από φριζάρισμα ή λιμάρισμα (mill cut)
- v) **Τύπος V:** ίνες ψυχρής ολκής τροποποιημένες

Όπως στο άοπλο εκτοξευμένο σκυρόδεμα, έτσι και στο ινοπλισμένο, πέραν των ινών, για τη σύνθεσή του απαιτείται τσιμέντο, νερό, αδρανή και πρόσμικτα. Οι αναλογίες της ανάμιξης εξαρτώνται από τις απαιτήσεις της κάθε κατασκευής σε αντοχή, εργασιμότητα κλπ. Σε σύγκριση με τα συμβατά σκυροδέματα, τα ινοπλισμένα περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου και μεγαλύτερη αναλογία λεπτομερών προς αδρομερή υλικά. Συχνά ιπτάμενη τέφρα προστίθεται στο μέρος του τσιμέντου ώστε να επιτευχθεί ποσοστό αυτού 35%. Ακόμα προστίθενται ρευστοποιητές και αερατικά με σκοπό να βελτιωθεί η εργασιμότητα των μιγμάτων που περιέχουν υψηλό ποσοστό ινών. Η επιτροπή ACI 544 επισημαίνει πως το ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα προδιαγράφεται συνήθως από την αντοχή και την περιεκτικότητα του σε ίνες. Η αντοχή σε κάμψη προσδιορίζεται για εφαρμογές δαπέδων και η θλιπτική αντοχή για κατασκευαστικές εφαρμογές. Για το σκυρόδεμα κανονικού βάρους έχουν προσδιοριστεί περιεκτικότητες ινών από πολύ χαμηλές όπως 30kg/m<sup>3</sup> έως και πολύ υψηλές όπως 220kg/m<sup>3</sup>, αν και το συνηθισμένο ανώτερο όριο είναι 160-200kg/m<sup>3</sup>.

Συστατικά	Κονία	Μέγιστο μέγεθος αδρανών 10mm	Μέγιστο μέγεθος αδρανών 19mm
Τσιμέντο (lb/yd <sup>3</sup> )	415-712	356-593	297-534
Λόγος νερού-τσιμέντου	0,30-0,45	0,35-0,45	0,40-0,50
Ποσοστό λεπτόκκοκων/χονδρόκοκων αδρανών	100	45-60	45-55
Περιεκτικότητα αέρα (%)	7-10	4-7	4-6
Περιεκτικότητα ινών (% κ.ο)			
Παραμορφωμένη ίνα χάλυβα	0,50-1,0	0,4-0,9	0,3-0,8
Ομαλή ίνα χάλυβα	1,0-2,0	0,9-1,8	0,8-1,6

Υαλόνημα	2-5	0,3-1,2	-
----------	-----	---------	---

Πίνακας 8 Ενδεικτικές αναλογίες ανάμιξης ινοπλισμένου σκυροδέματος κανονικού βάρους



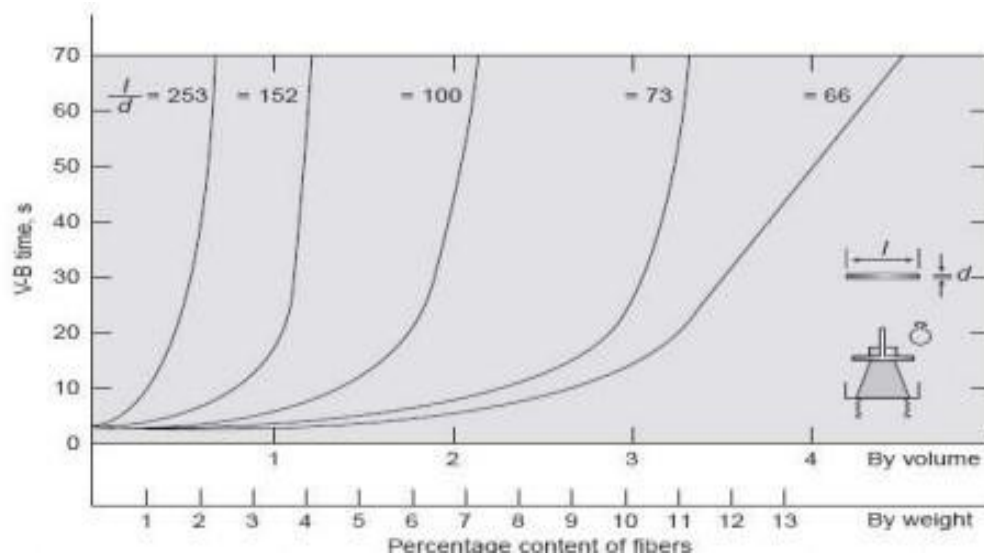
Εικόνα 40 Μίγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος

### 3.5. Ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος

#### 3.5.1. Εργασιμότητα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα τυπικά κονιάματα ή μίγματα σκυροδέματος που περιέχουν ίνες, εμφανίζουν πολύ χαμηλότερη εργασιμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η αντλησιμότητα του σκυροδέματος, να συσσωματώνονται οι ίνες και τελικά να γίνεται δύσκολη η διάστρωση. Για την αποφυγή τέτοιου προβλήματος κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη αερατικών, προσμίξεων πλαστικοποίησης, μεγαλύτερο ποσοστό τσιμεντόπαστας (με ή χωρίς ποζολάνες) και ίνες οι οποίες έχουν συγκολληθεί ανά μικρές ομάδες.

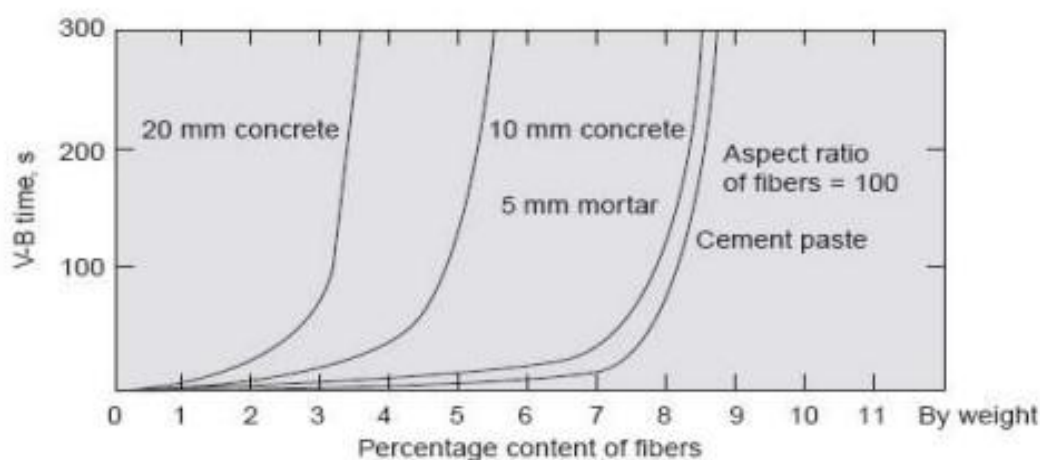
Ανεξάρτητα από τον τύπο των ινών, η απώλεια της εργασιμότητας είναι ανάλογη προς το ποσοστό συγκέντρωσης των ινών στο σκυρόδεμα. Γνωρίζοντας πως με την προσθήκη των ινών αυξάνεται η σταθερότητα της νωπής μάζας του σκυροδέματος, η κάθιση από την δοκιμή του κώνου δεν είναι αντιπροσωπευτικό δείγμα της εργασιμότητας. Για την αξιολόγηση της εργασιμότητας των ινοπλισμένων μιγμάτων σκυροδέματος, πιο κατάλληλη θεωρείται η δοκιμή Vebe. Οι επιδράσεις της περιεκτικότητας σε ίνες και του λόγου των δυο διαστάσεων στο χρόνο της δοκιμής Vebe, όπως διαπιστώθηκε από ερευνητές του Βρετανικού Ιδρύματος Έρευνας Κτιρίων, φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 41 Επίδραση του λόγου διαστάσεων των ινών στην εργασιμότητα του κονιάματος

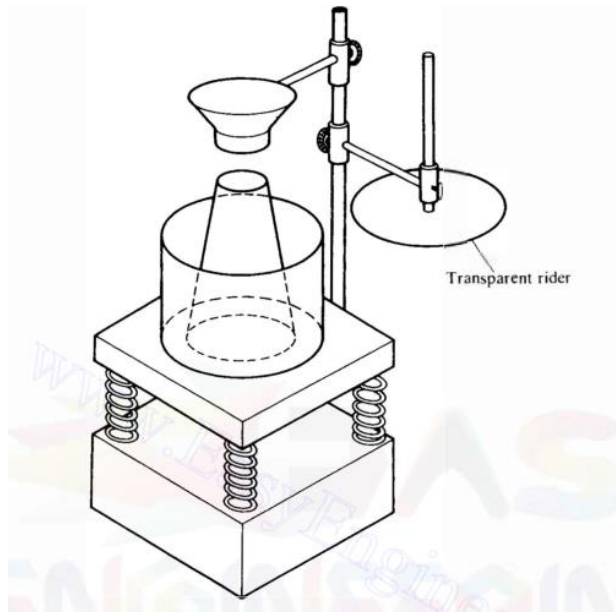
Εξετάζοντας την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας του σκυροδέματος, είναι φανερά επιθυμητός ο μεγάλος λόγος των δυο διαστάσεων για τις ίνες καθώς επίσης και μια υψηλή συγκέντρωσή τους στο σκυρόδεμα. Αντιθέτως όπως φαίνεται στο σχήμα, οι αυξήσεις σε αυτές τις δυο μεταβλητές επιδρούν αρνητικά στην εργασιμότητα. Όπως αποδεικνύουν στοιχεία από την έρευνα των Swamy και Mangat, οι χαλύβδινες ίνες με λόγους των δυο διαστάσεων μεγαλύτερους από 100, τείνουν να παράγουν το φαινόμενο γνωστό ως curling up (κυματοειδούς συστροφής) σε συγκεντρώσεις ινών τόσο χαμηλές όσο 1,13% κ.ο. Για την επιλογή του κατάλληλου ποσού και λόγου των δυο διαστάσεων των ινών, προφανώς και γίνεται κάποιος συμβιβασμός. Η επιλογή αυτή είναι που παίζει και καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των ινοπλισμένων μιγμάτων σκυροδέματος. Συνήθως το ποσοστό των ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα κυμαίνεται στο 2% κ.ο., με έναν μέγιστο λόγο των δυο διαστάσεων 100.

Και στην περίπτωση που η συγκέντρωση είναι 2%, η εργασιμότητα του κονιάματος ή του σκυροδέματος φαίνεται να μειώνεται αισθητά, καθώς το μέγεθος των αδρανών αυξάνεται όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Σύμφωνα με τον οδηγό ACI για τον καθορισμό, την ανάμιξη, την τοποθέτηση και το τελείωμα του ινοπλισμένου σκυροδέματος, αδρανή μεγαλύτερα από 19mm δεν συστήνονται για τη χρήση σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες.



Εικόνα 42 Επίδραση του μεγέθους των αδρανών και της περιεκτικότητας σε ίνες στην εργασιμότητα

Η δοκιμή Vebe που αναφέρθηκε πιο πάνω, είναι μια δοκιμασία συντελεστού συμπακνωσιμότητας (compacting factor test) που αναπτύχθηκε στην Μ.Βρετανία. Υπολογίζει το βαθμό συμπακνωσιμότητας που επιτυγχάνεται όταν ένα μίγμα σκυροδέματος υφίσταται μια καθορισμένη εργασία. Ο εξοπλισμός αποτελείται από μια δονητική τράπεζα, ένα κυλινδρικό δοχείο, έναν κώνο κάθισης και ένα γυάλινο ή πλαστικό δίσκο προσαρμοσμένο σε μια ελευθέρως κινούμενη ράβδο που χρησιμεύει ως τελικό σημείο αναφοράς. Ο κώνος τοποθετείται μέσα στον κύλινδρο, γεμίζεται με σκυρόδεμα και αφαιρείται. Ο δίσκος φέρεται στο πάνω άκρο του κώνου του σκυροδέματος και η τράπεζα δόνησης τίθεται σε κίνηση. Ο απαιτούμενος χρόνος για τον ανασχηματισμό του σκυροδέματος από το κωνικό σχήμα στο κυλινδρικό είναι ένα μέτρο της ρευστότητας και αναφέρεται ως χρόνος Vebe (Vebe seconds).



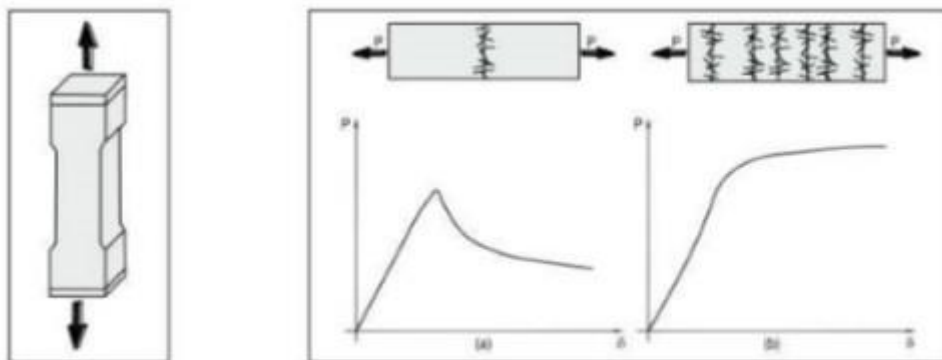
Εικόνα 43 Εξοπλισμός για τη δοκιμή Vebe, που αναπτύχθηκε από τον Σουηδό μηχανικό V. Böhner

### 3.5.2. Αντοχή αξονικού εφελκυσμού

Η παρουσία ινών επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε αξονικό εφελκυσμό, ιδιαίτερα ύστερα από την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Μέσα από πειραματικές δοκιμές, προκύπτει πως σε περιπτώσεις που το ποσοστό των ινών είναι 1,5-2%, το μέγεθος του φορτίου αυξάνεται αρκετά.

Όταν ο προσανατολισμός των ινών είναι παράλληλος με την διεύθυνση της εφελκυστικής τάσης, η αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό μπορεί να βελτιωθεί έως και 133%. Σε κάθε άλλη περίπτωση τυχαίου προσανατολισμού, η αύξηση της αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος φτάνει έως και 60%.

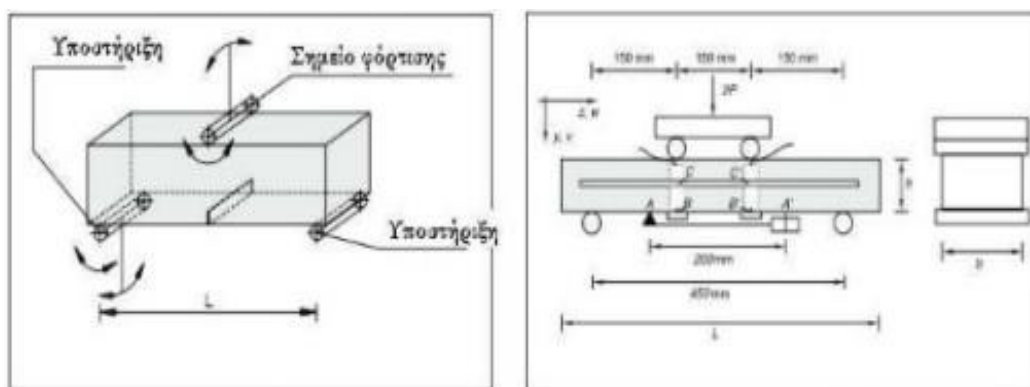




Εικόνα 44 Δοκιμή αξονικού εφελκυσμού και επιρροή αποτελεσμάτων από περιεκτικότητα σε ίνες

### 3.5.3. Αντοχή εφελκυσμού κάμψης

Οι πειραματικές δοκιμές για έλεγχο εφελκυσμού κάμψης γίνονται σε δοκούς και σε πλάκες.



Εικόνα 45 Μέτρηση καμπτικής αντοχής με τη μέθοδο τριών και τεσσάρων σημείων

Η αντοχή στην εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, σύμφωνα με τον κανονισμό UNI 11039, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = \frac{P \times l}{b \times (h - a_0)^2}$$

Όπου

$f$ : αντοχή πρώτης ρωγμής

$l$ : απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων στην κάτω πλευρά

$h$ : το ύψος της δοκού

$a_0$ : το βάθος χάραξης, στο κάτω μέρος του δοκιμίου

Όλα τα παραπάνω μεγέθη είναι σε χιλιοστά και μεταβάλλονται ανάλογα με τους κανονισμούς κάτω από τους οποίους πραγματοποιείται η κάθε δοκιμή.

### 3.5.4. Αντοχή σε διάρρηξη

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα δεν ενδείκνυται για τη βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής του. Όσον αφορά την αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε διάρρηξη, φαίνεται να έχει αρκετές ομοιότητες με την αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό.

Με την προσθήκη χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης, σε αναλογία με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές αξονικού εφελκυσμού. Για ποσοστό ινών 8% στο συνολικό βάρος του μίγματος, η βελτίωση της αντοχής σε διάρρηξη μπορεί να αυξηθεί ακόμη και μέχρι 30%, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Μέσα από άλλες δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού, παρατηρήθηκε άμεση μείωση του φορτίου ύστερα από την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, την ίδια στιγμή που δοκίμια με πανομοιότυπες ιδιότητες σε δοκιμές κάμψης, παρουσίασαν εντελώς όγκιμη συμπεριφορά.

### 3.5.5. Αντοχή σε διάτμηση

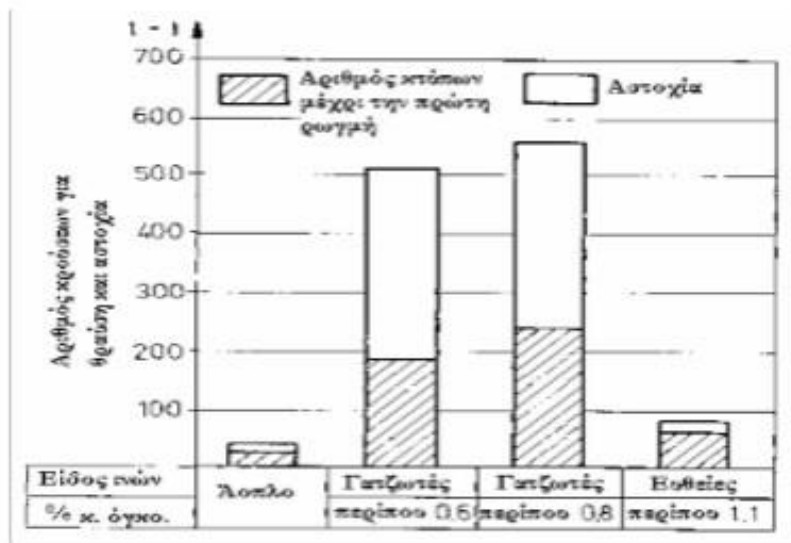
Η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση, είτε αυτό είναι άοπλο, είτε είναι ινοπλισμένο, εξαρτάται από την εφελκυστική του εκάστοτε υλικού. Οι διατμητικές τάσεις επηρεάζουν τα ινοπλισμένα στοιχεία τη στιγμή που δεν υπάρχει συμβατικός χαλύβδινος οπλισμός, ενώ αρκετές φορές επιφέρουν και αστοχία. Το γεγονός αυτό συναντάται σε περιπτώσεις όπου το ύψος της δοκού είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το μήκος της, η μετάδοση της διατμητικής τάσης γίνεται μέσω των χαλύβδινων ινών και ο συμβατικός οπλισμός αναλαμβάνει τις εφελκυστικές τάσεις.

Μέσα από ποικίλα πειράματα που περιγράφονται στη βιβλιογραφία, η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο μίγμα του σκυροδέματος μπορεί να επιφέρει αισθητή βελτίωση στην αντοχή του σε διάτμηση. Πρωτίστως, είναι δυνατή η ομοιόμορφη κατανομή των ινών μέσα στο υλικό και επίσης οι αποστάσεις που αποκτούν μεταξύ τους είναι σίγουρα πολύ μικρότερες σε σχέση με τους συμβατικούς οπλισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται η διάδοση των ρωγμών όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ενώ από την εμφάνιση της πρώτης κιάλας ρωγμής παρατηρείται σημαντική αύξηση στην αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Τέλος, η μείωση που επιτυγχάνεται στο πλάτος των ρωγμών συμβάλλει στην καλύτερη διάδοση της διάτμησης γύρω από την οποιαδήποτε ρωγμή.

### 3.5.6. Αντοχή σε κρούση

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από την πολύ μεγαλύτερη αντοχή που παρουσιάζει σε κρούση, σε σχέση με το άοπλο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ενέργεια που χρειάζεται για την εξόλκευση των ινών και κατ' επέκταση εμφανίζεται μεγαλύτερη αντίσταση στη διάρρηξη και στην τάση που έχει το υλικό να θρυμματίζεται. Τα σκυροδέματα με προσθήκη χαλύβδινων ινών φέρουν αυξημένη ενέργεια θραύσης, από 2,5 έως και 3,5 φορές μεγαλύτερη έναντι των άοπλων. Μέσα από πειραματικές δοκιμές σε κρούση, παρατηρείται πως το σύνολο των απαιτούμενων κτύπων για να σπάσει το δοκίμιο επηρεάζεται από το ποσοστό των ινών μέσα στο μίγμα του σκυροδέματος. Καθοριστικό ρόλο επίσης παίζει και η χρήση ινών με σύστημα αγκύρωσης, που φαίνεται να επηρεάζει το αποτέλεσμα περισσότερο από την προσθήκη μεγαλύτερου ποσοστού ινών. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής κρούσης συμβατικού σκυροδέματος απαιτούνται 30-50 κτύποι μέχρι την αστοχία του υλικού, τη στιγμή που το ινοπλισμένο αστοχεί σε περισσότερους από 100 κτύπους. Η διαφορά αυτή είναι πολύ

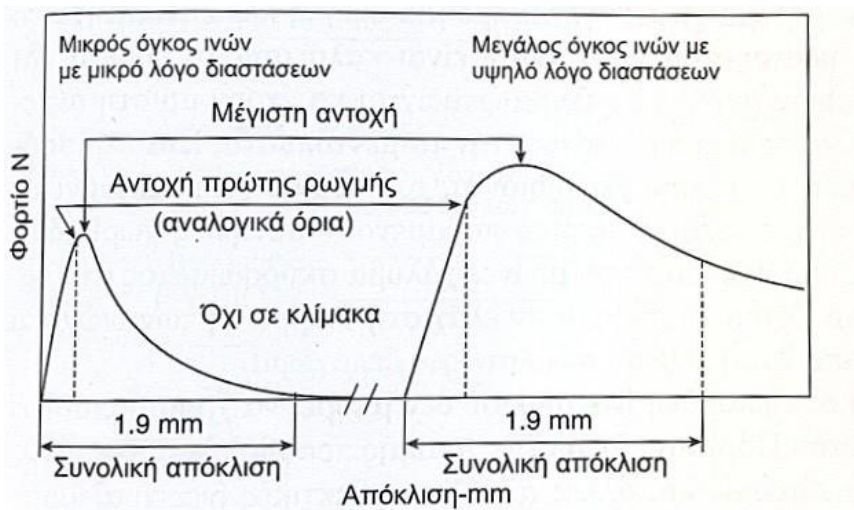
μεγαλύτερη φυσικά και σε περιπτώσεις άοπλου σκυροδέματος. Η αντοχή και ενέργεια θραύσης είναι αυτές που καθορίζουν το προφίλ του υλικού κάτω από κρουστικές καταπονήσεις (π.χ. εκρήξεις, πτώσεις υλικών).



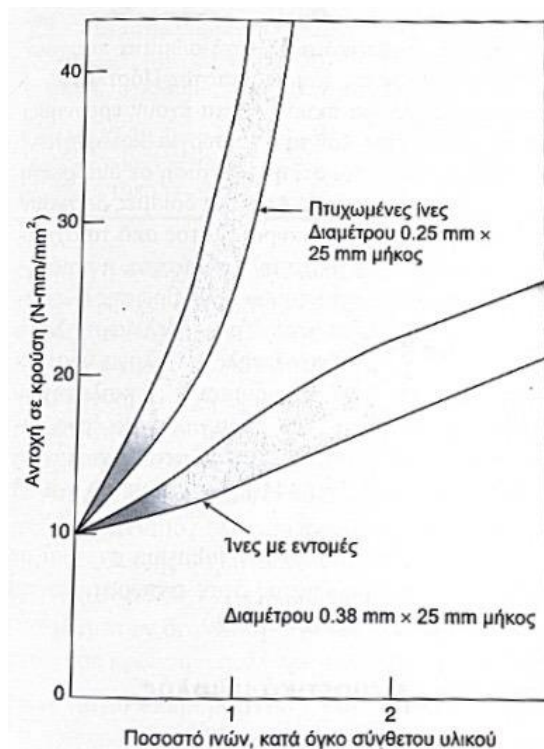
Εικόνα 46 Επιρροή των ινών στην αντοχή σε κρούση

### 3.5.7. Μέτρο ελαστικότητας, ερπυσμός και συστολή ξήρανσης

Ο συνυπολογισμός των ινών χάλυβα στο σκυροδέμα έχει μικρή επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας, στο θλιπτικό ερπυσμό και τη συστολή ξήρανσης. Ο καμπτικός ερπυσμός μπορεί να μειωθεί ουσιαστικά όταν χρησιμοποιούνται πολύ δύσκαμπτες ίνες άνθρακα, αλλά και ο εφελκυστικός ερπυσμός μειώνεται ελαφρώς. Πειραματικές μελέτες επισημαίνουν πως λόγω του μικρού τους όγκου οι ίνες ενεργούν απλά ως άκαμπτες προσθήκες στην τσιμεντόπαστα, χωρίς να συμβάλλουν ιδιαίτερα στη σταθερότητα του όγκου του μίγματος.



Εικόνα 47 Επίδραση του σπλισμού των ινών στην αντοχή πρώτης ρωγμής



Εικόνα 48 Επίδραση των με συστροφή ινών και των ινών με οδόντωση στην αντοχή κρούσης

### 3.5.8. Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου σκυροδέματος

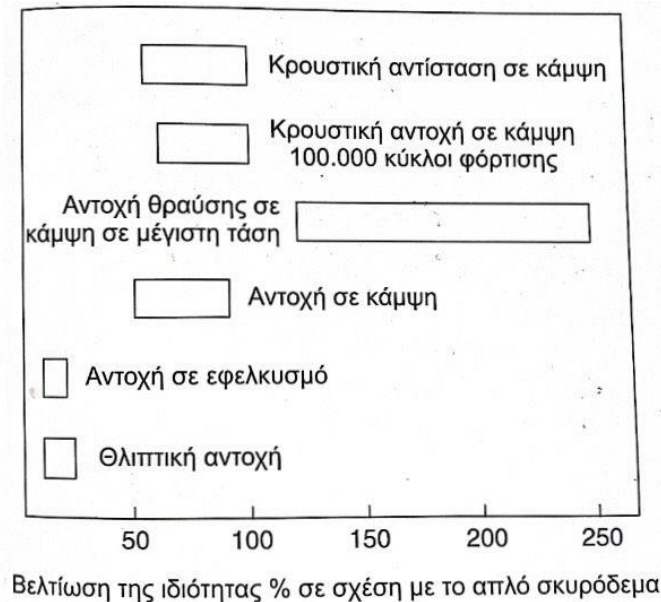
Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρασκευάζεται κυρίως με μια υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και μια χαμηλή αναλογία τσιμέντου-νερού. Τα σκυροδέματα που περιέχουν ίνες χάλυβα, φαίνεται πως παρουσιάζουν εξαιρετική ανθεκτικότητα όταν εξασφαλιστεί η σωστή συμπίκνωση, η συντήρηση αλλά και προστασία των ινών από την τσιμεντόπαστα. Η σκωρίαση της επιφάνειας των ινών είναι αναπόφευκτη όταν στα περιβάλλοντα περιέχονται χλωριοίοντα, στο εσωτερικό τους όμως παραμένουν χωρίς διάβρωση. Σε μακροπρόθεσμες εργαστηριακές δοκιμές ινοπλισμένου με χαλύβδινες ίνες σκυροδέματος, παρατηρήθηκε ελάχιστη διάβρωση των ινών και καμία αστοχία ύστερα από 7 έτη έκθεσής τους σε άλατα για ξεπάγωμα.

Όσον αφορά την συνηθισμένη ίνα γυαλιού, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κονιάματα ή σκυροδέματα του τσιμέντου Πόρτλαντ, καθώς παρουσιάζουν χημική προσβολή από την τσιμεντόπαστα. Κάποιες αλκαλιο-ανθεκτικές ίνες γυαλιού ( π.χ. Zirconia), έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε αλκαλικές συνθήκες, ωστόσο ακόμα κι αυτές παρουσιάζουν βαθμιαία επιδείνωση με το χρόνο. Παρόμοια συμπεριφορά έχουν και οι φυσικές ίνες από βαμβάκι, από μαλλί και άλλα συνθετικά πολυμερή σώματα στην επαφή τους με το αλκαλικό περιβάλλον της τσιμεντόπαστας Πόρτλαντ.

Σύμφωνα με το ACI 544, τα ινοπλισμένα με χαλύβδινες ίνες σκυροδέματα έχουν ευρέως εξεταστεί για την ανθεκτικότητά τους στη διάβρωση της επιφάνειας και τη δημιουργία κοιλιοτήτων. Ύστερα από δοκιμές των σωματείων των μηχανικών επισημαίνεται πως η αντίσταση σε διάβρωση από τριβή από φερτά υλικά του ρέοντος νερού δεν βελτιώνεται. Το συμπέρασμα είναι ότι η διάβρωση συμβαίνει λόγω της σταδιακής φθοράς του σκυροδέματος από τα φερτά υλικά που κυλούν στην επιφάνεια με χαμηλή ταχύτητα, η ποιότητα του συνόλου

και η σκληρότητα της επιφάνειας καθορίζουν το ποσοστό διάβρωσης. Συνεπώς η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα δεν επέφερε καμία βελτίωση. Ουσιαστικά εάν το αποτέλεσμα της χρήσης των ινών είναι ένας μεγαλύτερος λόγος τσιμεντού-νερού και μια μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τσιμεντόπαστα, είναι πιθανή η δημιουργία κοιλοτήτων από μεγάλα τεμάχια φερτών υλικών.

Με σκοπό την εύκολη αναφορά, φτιάχτηκε ένα διάγραμμα από τον Johnston σχετικά με τις βελτιώσεις στις διάφορες ιδιότητες του κανονικού σκυροδέματος όταν προστίθενται ευθείες χαλύβδινες ίνες 25-38 mm σε αυτό. Το διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:



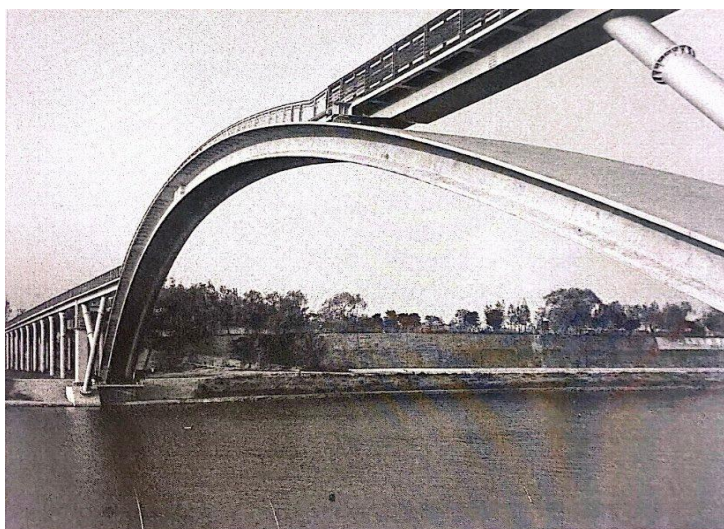
Εικόνα 49 Σχετική βελτίωση στις διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος από την όπλιση με ίνες

### 3.5.9. Ανάπτυξη ινοπλισμένων μιγμάτων εξαιρετικά υψηλής απόδοσης

Τα τελευταία χρόνια, σημειώνεται μια νέα γενιά ινοπλισμένων μιγμάτων των οποίων η αντοχή, η πλαστιμότητα και η ανθεκτικότητα είναι αισθητά βελτιωμένες. Παρά τις ανταγωνιστικές προτάσεις που αφορούν τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς, η δυνατότητα νέων εφαρμογών είναι προφανής στις ακόλουθες κατηγορίες μιγμάτων:

- i) **Συμπαγή ενισχυμένα σύνθετα υλικά (CRC).** Στη Δανία πρώτη φορά, δημιουργήθηκαν συμπαγή ενισχυμένα σύνθετα υλικά στα οποία χρησιμοποιούνταν μεταλλικές ίνες 6 mm μήκους, 0,15 mm διαμέτρου και ποσοστό όγκου της τάξης 5-10 %. Για την επαρκή συμπίκνωσή τους ήταν απαραίτητη η δόνηση υψηλής συχνότητας. Οι κοντές αυτές ίνες συντέλούσαν στην αύξηση της εφελκυστικής αντοχής και την πλαστιμότητα του υλικού. Η αύξηση της αντοχής ήταν μεγαλύτερη από αυτή της πλαστιμότητας, επομένως στο σχεδιασμό μεγάλων δοκών και πλακών χρειαζόταν υψηλό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης με μορφή ράβδων ώστε να αξιοποιηθεί η δυνατότητα του σύνθετου υλικού (CRC). Η χρήση κοντών ινών ενδείκνυται για τον έλεγχο των ρωγμών γύρω από τις ράβδους οπλισμού. Συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους, το τελικό κόστος της κατασκευής σημειώνεται πολύ υψηλότερο, γεγονός που σημαίνει πως η χρήση συμπυκνωμένων οπλισμένων μιγμάτων δικαιολογείται σε περιπτώσεις που χρειαζόμαστε ειδική συμπεριφορά, για παράδειγμα υψηλή αντίσταση σε κρούση ή πολύ υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

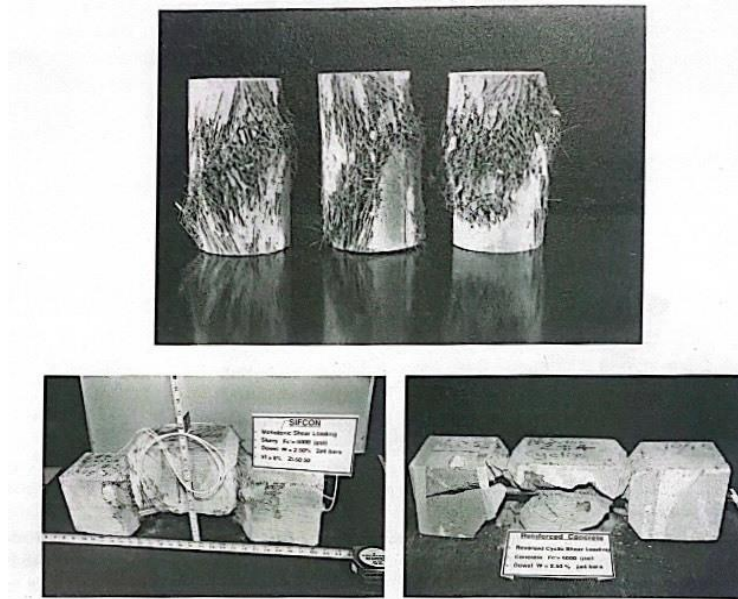
- ii) **Σκυρόδεμα υπερδραστηκής κονιάς (RCP).** Στη Γαλλία πρώτη φορά, δημιουργήθηκε το σκυρόδεμα υπερδραστηκής κονιάς που παρουσίαζε βελτίωση των ακόλουθων παραμέτρων στις αναλογίες ανάμιξης και τις συνθήκες συντήρησης: α) περιορισμό των χονδρόκοκκων αδρανών, β) μεγιστοποίηση της πυκνότητας μονάδας όγκου των κοκκωδών υλικών, γ) εφαρμογή πίεσης στο νωπό σκυρόδεμα, δ) έκθεση του υλικού σε θερμική επεξεργασία και ε) χρήση ινών χάλυβα, μήκους 13 mm και διαμέτρου συνήθως 0,15 mm, με μέγιστο ποσοστό όγκου 2,5%. Στο συγκεκριμένο μίγμα χρησιμοποιήθηκαν ίνες που έχουν διπλάσιο μήκος σε σύγκριση με τον προηγούμενο τύπο ινοπλισμένων σύνθετων υλικών. Συμπερασματικά, εξαιτίας του περιορισμού της εργασιμότητας, δεν μπορεί το ίδιο ποσοστό όγκου να ενσωματωθεί στον όγκο του μίγματος. Το υλικό δύναται να αποκτήσει μια θλιπτική αντοχή 200 Mpa εφόσον συντηρηθεί σε ζεστό νερό στους 90° για 3 ημέρες, ενώ μπορεί να αγγίξει και τα 800 Mpa όταν συντηρηθεί στους 400°. Στην αγορά σήμερα, το προϊόν παρουσιάζει και μεγαλύτερη βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής της τσιμεντόπαστας, επεξεργασμένη χημικά ίνα, προσθήκη μικροϊνών καθώς και δεν απαιτείται ανάγκη θερμικής διεργασίας. Παρακάτω φαίνεται μια εμπορική εφαρμογή του υλικού αυτού:



**Εικόνα 50** Εφαρμογή εξαιρετικά υψηλής αποτελεσματικότητας ινοπλισμένου μίγματος σε μια γέφυρα μικρού πλάτους.

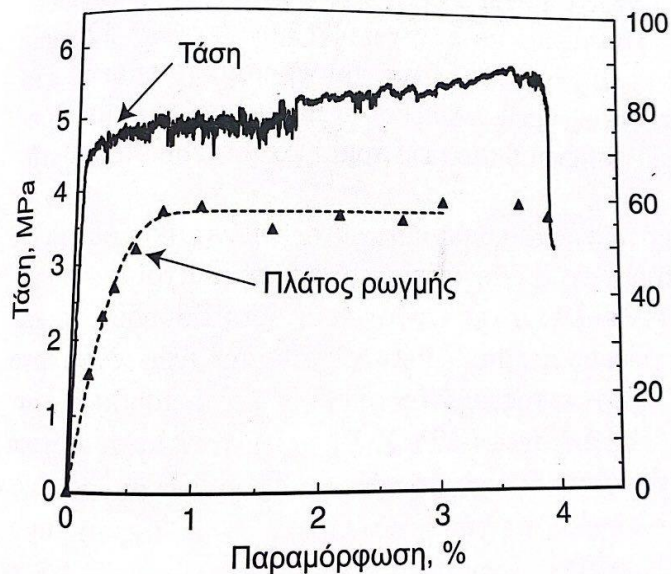
Με άνοιγμα 120 m και βάθος αψίδας 130 cm η γέφυρα για πεζούς Cheong στην Κορέα, αποτελεί παγκόσμιο ρεκόρ λυγρότητας (δηλ. του λόγου πλάτους-ανοίγματος)

- iii) **Σκυρόδεμα ινοπλισμένου τσιμεντοπολτού (SIFCON).** Η διαδικασία παρασκευής του συγκεκριμένου μίγματος χαρακτηρίζεται από την τοποθέτηση ινών σε έναν ξυλότυπο και την διήθηση ενός τσιμεντοπολτού υψηλού λόγου  $w / c$  για την επικάλυψή τους. Στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούνται ίνες μεγάλης ειδικής επιφάνειας. Έχουν επιτευχθεί θλιπτικές και εφελκυστικές αντοχές μέχρι 120 Mpa και 40 Mpa αντίστοιχα. Όσον αφορά την καμπτική αντοχή έχει αναφερθεί έως και 90 Mpa ενώ η διατμητική αντοχή μέχρι 28 Mpa. Η διαδικασία αυτή κατασκευής κάνει το τελικό προϊόν ανισότροπο, ενώ στον άμεσο εφελκυσμό κατά μήκος της κατεύθυνσης των ινών παρουσιάζει ιδιαίτερα πλάστικη συμπεριφορά. Το μίγμα αυτό ενδείκνυται για την επισκευή δαπέδων και πλακών.

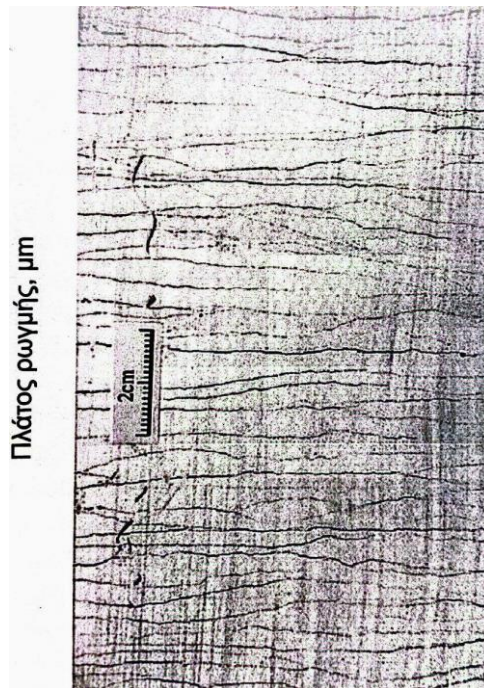


**Εικόνα 51** Στην πάνω εικόνα φαίνεται ο τρόπος αστοχίας του σκυροδέματος SIFCON, που είναι διαφορετικός από,τι του συμβατικού σκυροδέματος. Στις κάτω εικόνες παρουσιάζεται η εντυπωσιακή ικανότητα παραμόρφωσης του SIFCON έναντι του σπλισμένου στοιχείου σκυροδέματος που υποβάλλεται σε διάτμηση παρόλο που και τα 2 δοκίμια είχαν τσιμεντόπαστα παρόμοιων χαρακτηριστικών.

- iv) **Σύνθετο τσιμεντοειδές ανάμιγμα (ECC).** Η υπερβολικά υψηλή πλαστιμότητα του συγκεκριμένου μίγματος, που χαρακτηρίζεται από μια ικανότητα εφελκυστικής παραμόρφωσης 3-7%, επιτυγχάνεται με τη βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ίνας, τσιμεντόπαστας και διεπιφάνειας. Μαθηματικά μοντέλα αναπτύχθηκαν με σκοπό ένα μικρό ποσοστό όγκου 2% να μπορεί να προσδίδει μεγάλη πλαστιμότητα. Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη μονοαξονικής εφελκυστικής έντασης-παραμόρφωσης για ένα δείγμα ECC. Το υλικό παρουσιάζει μια πολύ υψηλή ικανότητα έντασης και πλαστιμότητας καθώς και ελεγχόμενη διάδοση ρωγμών. Η κατασκευή του ECC μπορεί να γίνει είτε με κανονική σκυροδέτηση είτε με εξώθηση. Με την προσθήκη ενός βέλτιστου ποσού υπερρευστοποιητή και ενός μη ιοντικού πολυμερούς σώματος είναι εφικτή η αυτοσυμπύκνωση του υλικού. Πειραματικά αποτελέσματα με σωλήνες που κατασκευάζονται με τεχνική εξώθησης του υλικού δείχνουν ότι το υλικό ECC έχει μια πλαστική συμπεριφορά στο όριο διαρροής αντί της συνήθους ψαθυρής θραύσης που εμφανίζεται όταν χρησιμοποιείται κανονικό σκυρόδεμα. Αυτό το μίγμα έχει μελετηθεί επίσης για την επισκευή δαπέδων και καταστροφών γεφυρών, για την ενίσχυση των κατασκευών σε σεισμικά φορτία και ως ένα σημαντικό υλικό για το σχεδιασμό νέων υψηλών απαιτήσεων κατασκευών.



Εικόνα 52 Καμπύλη εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης και εύρους ρωγμής-παραμόρφωσης για ένα σκληρυμένο ECC



Εικόνα 53 Ελεγχόμενη βλάβη του υδραυλικού μίγματος ECC

- v) **Πολλαπλώς ενισχυμένο με ίνες σκυρόδεμα (MSFRC).** Οι ερευνητές του Laboratoire Central des Ponts Chaussees (Γαλλία) πρότειναν έναν συνδυασμό κοντών και μακριών ινών με σκοπό την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής, της φέρουσας ικανότητας αλλά και της πλαστιμότητας. Με την ανάμιξη αυτή, πέτυχαν σχετικά καλή εργασιμότητα με ποσοστό όγκου ινών μέχρι 7%. Ένας τυπικός συνδυασμός είναι 5% ευθείες ίνες χάλυβα, μήκους 5mm και διαμέτρου 0,25mm και 2% ευθείες ίνες χάλυβα με αγκυροειδή άκρα, μήκους 25mm και διαμέτρου 0,3mm.



Ινοπλισμένο σύνθετο	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)	E (GPa)	$G_c$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$L_{ch}$ (m)
Απλό σκυρόδεμα	-	2-5	0,01	15-30	0,1-0,2	0,25-0,4
Χάλυβας FRC ( $V_f = 1\%$ δεσμευμένο άκρο)	4	4.5	0,05- 0,5	32,5	5	8
Άνθρακας FRC ( $V_f = 2\%$ )	5,5	5	0,1- 0,2	5,6	1-3	0,2-0,7
Πολυμερές FRC ( $V_f = 1\%$ οφελίνη)	0,75- 1,5	4,5	0,1	30	1-4	1,5-6
SIFCON ( $V_f =$ χάλυβας 2-4%)	20-35	6-32	0,5	30-70	20-30	2-17
CRC ( $V_f =$ χάλυβας 6%, σε συνδυασμό με χαλύβδινες ράβδους)	40	120	1-2	100	1200	8,3
RPC ( $V_f =$ χάλυβας 2,4%)	9,6	10-24	0,5- 0,7	54-60	15-40	4,2-8,1
ECC ( $V_f = 2\%$ PE)	4,5-8	2,5	3-6	22-35	27	95-150

Πίνακας 9 Μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σκυροδεμάτων

### 3.6. Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η επιτροπή ACI 544 έχει συντάξει μια έκθεση εφαρμογών σε παγκόσμιο επίπεδο που αφορούν στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Ο Hanager συνοψισε μερικά από τα μεγάλα και πιο ενδιαφέροντα έργα. Τα κυριότερα σημεία από τις συνήθεις εφαρμογές που συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν την περίληψη και στην έκθεση του ACI 544, δίνονται παρακάτω:

Η πρώτη δομική χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα ήταν το 1971 για την παραγωγή αποσυνδέσιμων πάνελ, εμβαδού 3250 mm<sup>2</sup> και πάχους 65mm για ένα γκαράζ χώρων στάθμευσης στον αερολιμένα Heathrow στο Λονδίνο. Το σκυρόδεμα περιείχε 3% κατά βάρος ψυχρής έλασης ίνες χάλυβα διαμέτρου 0,25mm και μήκους 25mm. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας αναφερόμενης επιθεώρησης μετά από 5 έτη χρήσης, οι πλάκες δεν παρουσίασαν καμία ένδειξη ρηγμάτωσης.

Επίσης το 1971, το ερευνητικό εργαστήριο εφαρμοσμένης μηχανικής του αμερικανικού στρατού εκτέλεσε την ελεγχόμενη δοκιμή ινοπλισμένου σκυροδέματος (ίνες 2% κατ' όγκο) σε πλάκες διαδρόμων αεροσκαφών στο Vicksburg του Μισισσιππή. Ο διάδρομος υποβλήθηκε σε φορτίο τροχών αεροσκάφους C5A (13.600Kg ανά τροχό, πάνω από 12 ρόδες). Το πείραμα συνέκρινε την συμπεριφορά μιας οπλισμένης πλάκας σκυροδέματος πάχους 150mm με μια πλάκα κανονικού σκυροδέματος πάχους 250mm. Στην ινοπλισμένη πλάκα η πρώτη ρωγμή εμφανίστηκε ύστερα από 350 φορτίσεις έναντι των 40 για την πλάκα συμβατικού σκυροδέματος. Το συμβατικό σκυρόδεμα εκτιμήθηκε ότι θα αστοχήσει εντελώς μετά από 950 φορτίσεις. Το πείραμα έδειξε πως το δάπεδο ινοπλισμένου σκυροδέματος με λεπτές ρωγμές στην επιφάνεια μπορούσε να λειτουργεί ακόμα και ύστερα από 8.735 φορτίσεις.

Στον διεθνή αερολιμένα McCarran του Las Vegas στη Νεβάδα, το 1976, μια υπάρχουσα ασφαλτοστρωμένη περιοχή χώρων στάθμευσης αεροσκαφών (63,00 yd<sup>2</sup>) επιστρώθηκε με ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα πάχους 150mm, έναντι του πάχους 380mm που θα είχε απαιτηθεί εάν το σκυρόδεμα ήταν συμβατικά οπλισμένο. Με βάση την ικανοποιητική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος, το 1979 μια άλλη επικάλυψη δαπέδου (πάχους

175mm) τοποθετήθηκε με κινητό εξοπλισμό διάστρωσης σκυροδέματος πάνω από μια πρόσφατα κατασκευασμένη βάση ασφάλτου με υπόβαση στρώση αδρανών. Για αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 85 lb/yd<sup>3</sup> (50 kg/m<sup>3</sup>) ινών με διαμορφωμένα για καλή αγκύρωση άκρα μήκους 50mm με διάμετρο 0,50mm. Η καμπτική αντοχή 28-ημέρας του σκυροδέματος ήταν 1045 psi (7 Mpa). Η χρήση των ινών αυτών στο δεύτερο έργο ήταν περίπου στο μισό ποσοστό κατ' όγκο από αυτό που απαιτήθηκε στο πρώτο έργο. Και οι δυο αυτές περιοχές χώρων στάθμευσης μεταφέρουν φορτία DC-10 και Boeing 747 (μέχρι 775.000 lb).

Το 1980, σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός νέου αερολιμένα (850m X 23m X 170mm) στον Cannon διεθνή αερολιμένα, Reno, Νεβάδα. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 5600m<sup>3</sup> σκυροδέματος με ίνες χάλυβα που περιείχε 12mm μέγιστο κόκκο αδρανών και 87 lb/yd<sup>3</sup> (52 kg/m<sup>3</sup>) ίνες τύπου που χρησιμοποιήθηκαν στο Las Vegas. Ο αεροδιάδρομος κατασκευάστηκε σε τρεις λωρίδες 7,5m εύρους με πριονισμένους εγκάρσιους αρμούς ανά 12m. Οι σφραγισμένοι διαμήκεις αρμοί κατασκευής τοποθετήθηκαν ανά 7,5m.

Δυο μεγάλες περιοχές πρανών βράχων σταθεροποιήθηκαν με εκτοξευμένο σκυρόδεμα οπλισμένο με ίνες χάλυβα, η μια σε διωλιστήριο στη Σουηδία και η άλλη σε μια τομή σιδηροδρόμου κατά μήκος του ποταμού Snake στην πολιτεία της Ουάσιγκτον. Στη Σουηδία, χρησιμοποιήθηκαν 4100 m<sup>3</sup> εκτοξευμένου σκυροδέματος που περιείχαν 55 kg/m<sup>3</sup> ινών. Στο έργο στον ποταμό Snake χρησιμοποιήθηκαν 5.300m<sup>3</sup> εκτοξευμένου σκυροδέματος που περιείχαν 120-150 kg/m<sup>3</sup> ίνες (0,25 X 12 mm), το πρανές αρχικά στερεώθηκε στο βράχο και κατόπιν καλύφθηκε με 60-75 mm εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Κατ' εκτίμηση εξοικονομήθηκαν \$50.000 σε σχέση με την εναλλακτική λύση της χρήσης εκτοξευμένου συμβατικού σκυροδέματος ενισχυμένου με πλέγμα οπλισμού. Έχουν επίσης αναφερθεί διάφορες επενδύσεις σηράγγων και άλλα έργα επισκευής επενδύσεων στην Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες με χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες. Τέλος, όσον αφορά τις συνήθειες χρήσεις του ινοπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος, η ακόλουθη δήλωση στην έκθεση του ACI 544.1 R-96 συνοψίζει επαρκώς την κατάσταση:

*Γενικά, για καμπτικά δομικά στοιχεία, οι ίνες χάλυβα πρέπει να χρησιμοποιούνται από κοινού με κατάλληλα υπολογισμένη συνεχή όπλιση. Οι ίνες χάλυβα μπορούν με αξιοπιστία να περιορίσουν τη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, κρούσης, συστολών ή θερμικών φορτίων και να βελτιώσουν έτσι την αντίσταση σε αποσάθρωσή του. Στις εφαρμογές όπου η παρουσία συνεχούς οπλισμού εφελκυσμού δεν είναι ουσιαστική για την ασφάλεια και τη στατική επάρκεια της κατασκευής, όπως πατώματα στο έδαφος, δάπεδα, επικαλύψεις και επενδύσεις με εκτοξευμένο σκυρόδεμα, βελτιώσεις στην αντοχή κάμψης, την αντίσταση σε κρούση, την πλαστιμότητα και την αντοχή σε κόπωση μπορούν να γίνουν με τη χρήση των ινών για να μειώσουν το πάχος των διατομών, να ενισχύσουν την επιτελεστικότητα ή και τα δυο μαζί.*

Εάν υποθεθεί πως το κόστος ανάμιξης, μεταφοράς και τοποθέτησης του σκυροδέματος δεν αλλάζει με την προσθήκη ινών, η διαφορά στο κόστος μεταξύ του χυτού επιτόπου ινοπλισμένου σκυροδέματος και του συμβατικού δεν είναι μεγάλη. Επίσης έναντι του συμβατικού σκυροδέματος, δεδομένου πως το πάχος των ινοπλισμένων πλακών σκυροδέματος που σχεδιάζονται για ένα δεδομένο φορτίο μπορεί να μειωθεί ουσιαστικά, η γενική διαφορά στο αρχικό κόστος μπορεί να αποδειχτεί αμελητέα. Θεωρώντας τον ωφέλιμο χρόνο ζωής επομένως, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα φαίνεται να είναι μια οικονομικώς συμφέρουσα λύση.

Χάρη στα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, σήμερα το ινοπλισμένο σκυρόδεμα βρίσκει πολλές εφαρμογές σε μεγάλο φάσμα κατασκευών με χαρακτηριστικά παραδείγματα τα ακόλουθα:

- i) Στην υποστήριξη των θεμελιώσεων και τους πασσάλους που χρησιμοποιούνται.

- ii) Στην υποστήριξη και την τελική επικάλυψη σηράγγων.
- iii) Στην υποδομή οδικών δικτύων, σιδηροδρομικών σταθμών, αερολιμένες και οδοστρώματα.
- iv) Στην κατασκευή έργων ανθεκτικών σε ανατινάξεις.
- v) Σε προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος.
- vi) Στην επένδυση υδραυλικών έργων, αποστράγγισης, αποχέτευσης και πισίνες.
- vii) Στην κατασκευή πατωμάτων και λιμενικών δαπέδων.
- viii) Στην αντισεισμική θωράκιση κτιρίων και άλλων κατασκευών.
- ix) Στην ενίσχυση και σταθεροποίηση πρανών.
- x) Σε αναπλάσεις και ανακαινίσεις κοινόχρηστων χώρων.
- xi) Στην κατασκευή προσωρινών έργων και σε αποθήκες άχρηστων υλικών.
- xii) Σε τοιχία αντιστήριξης και δεξαμενές νερού.
- xiii) Σε μεταλλικές κατασκευές όπως κτίρια, προβλήτες, γέφυρες.

### 3.7. Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Shotcrete) ονομάζεται το σκυρόδεμα στο οποίο έχουν προστεθεί ίνες και παράλληλα διαστρώνεται με πίεση στις επιφάνειες με τη χρήση ενός ακροφυσίου εκτόξευσης.

Ανάλογα με τον τρόπο που αναμιγνύονται τα συστατικά για την παρασκευή του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, διακρίνεται σε δυο κατηγορίες, ξηράς και υγρής ανάμιξης:

- i) **Ξηράς ανάμιξης.** Το τσιμέντο αναμιγνύεται καλά με τα αδρανή υλικά και στη συνέχεια τροφοδοτούνται στον διανομέα. Το μίγμα διέρχεται από έναν σωλήνα διανομής και με τη συμβολή πεπιεσμένου αέρα καταλήγει στο ακροφύσιο. Στο ίδιο σημείο παρέχεται και νερό με σκοπό την στιγμιαία ανάμιξη των υλικών και την εκτόξευσή του στην επιφάνεια με μεγάλη ταχύτητα.
- ii) **Υγρής ανάμιξης.** Το τσιμέντο αναμιγνύεται καλά με τα αδρανή υλικά και το νερό και καταλήγουν στο ακροφύσιο όπως αναφέρεται από πάνω. Έπειτα γίνεται προσθήκη επιταχυντικού πήξης εφόσον είναι αναγκαίο, και πάλι με τη συμβολή του πεπιεσμένου αέρα επιτυγχάνεται η ταχύτητα εκτόξευσης.

#### 3.7.1. Συστατικά παρασκευής ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

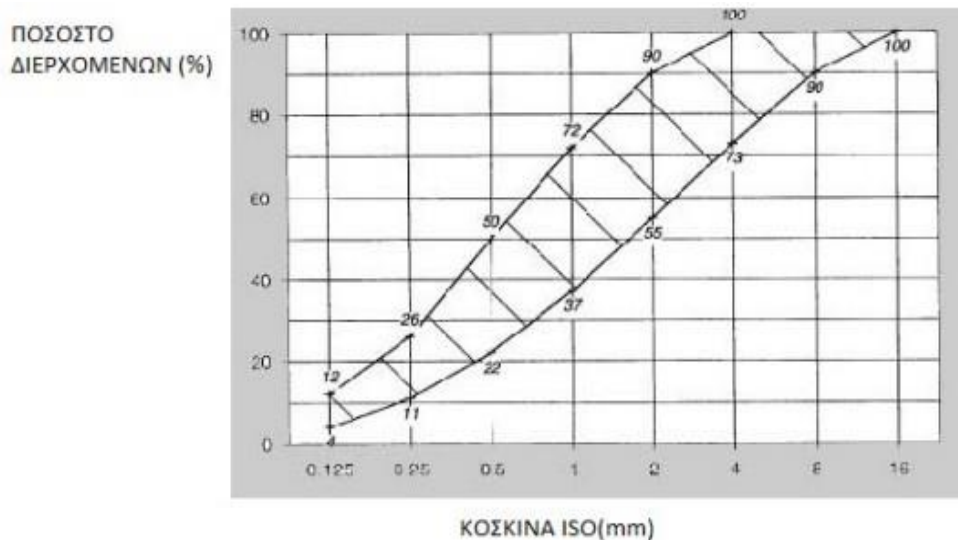
Όπως αναφέρεται στους ελληνικούς κανονισμούς, όλα τα συστατικά που αποτελούν το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι καθαρά, απαλλαγμένα από επιβλαβείς ουσίες, σε προκαθορισμένη ποσότητα ώστε να μην επηρεαστεί η ανθεκτικότητα του μίγματος, ή να οδηγήσουν σε διάβρωση του οπλισμού.



Εικόνα 54 Σύγχρονη μηχανή παρασκευής ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Τα συστατικά αυτά είναι:

- i) **Τσιμέντο.** Για την παρασκευή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται τσιμέντα τύπου Portland τα οποία απαιτείται να εμφανίζουν άμεση σκλήρυνση και παράλληλα να είναι σύμφωνα με το πρότυπο του ΕΛΟΤ EN-197-1. Τα συγκεκριμένα αυτά τσιμέντα χαρακτηρίζονται από μεγάλη περιεκτικότητα  $C_3S$  και το πάχος του κυμαίνεται από 4.000 έως 4.500  $cm^2/g$ . Ο ζητούμενος λόγος νερού προς τσιμέντο ( $w / c$ ) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,45 και η ποσότητα του τσιμέντου να είναι 350  $kg/m^3$  και άνω. Επίσης σε διάρκεια 1 ώρας πρέπει να επιτυγχάνεται θλιπτική αντοχή 1 Mpa, ενώ σε 24 ώρες πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10 Mpa.
- ii) **Νερό.** Το νερό που χρησιμοποιείται για την ανάμιξη και τη συντήρηση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ 345.
- iii) **Αδρανή.** Για την παρασκευή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται αδρανή υλικά τα οποία πρέπει να είναι σύμφωνα με το πρότυπο EN 12620, ενώ παράλληλα υπάρχει και το πρότυπο ΕΛΟΤ-408 που τα ορίζει. Όπως αναφέρει ο EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), η καμπύλη της κοκκομετρικής ανάλυσης των αδρανών πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ ορισμένων ορίων και αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 55 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (EFNARC)

- iv) **Ίνες.** Οι διαδικασίες ανάμιξης και εκτόξευσης δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τις ίνες από χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Πιθανές επικαλύψεις ωστόσο από αλουμίνιο για παράδειγμα, μπορεί να φανούν επιβλαβείς για το σκυρόδεμα. Στο μίγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ίνες από χάλυβα, γυαλί ή πολυμερές. Όπως αναφέρει ο EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures) το μήκος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50mm και το 0,70 της διαμέτρου των ακροφυσίων και των σωλήνων που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία. Σε ορισμένες περιπτώσεις αξιοποιούνται και μεγαλύτερες ίνες χωρίς να εμποδίζουν την εξέλιξη της εκτόξευσης. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από τη μελέτη σύνθεσης. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ACI (American Concrete Institute), το ιδανικό μήκος των ινών πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 19-32mm ενώ η διάμετρος τους στα 0,4mm. Η ζητούμενη εφελκυστική αντοχή τους ορίζεται τουλάχιστον 345Μpa. Όσον αφορά την αποθήκευση των ινών, είναι απαραίτητο να προστατεύονται από την υγρασία, άλλους επιβλαβείς παράγοντες και υλικά που θα μπορούσαν να τις επιμολύνουν. Σε διαφορετική περίπτωση δεν θα ήταν κατάλληλες για χρήση.
- v) **Πρόσθετα υλικά.** Τα πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, συνήθως είναι ιπτάμενη τέφρα, σκωρίες, πυριτικές παιπάλες και διάφορα βελτιωτικά συστατικά. Τα υλικά αυτά σε συνδυασμό με τα ορυκτά φίλλερς (fillers) και τις χρωστικές ουσίες θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου EN 206-1.

### 3.7.2. Εφαρμογές ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται με μεγάλο φάσμα κατασκευών με βασικές χρήσεις τις παρακάτω:

- i) Σε προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος.
- ii) Στην αντισεισμική θωράκιση κτιρίων και άλλων κατασκευών.
- iii) Στην υποστήριξη φυσικών σπηλαίων.

- iv) Στην ενίσχυση και σταθεροποίηση πρανών.
- v) Σε τοιχία αντιστήριξης.
- vi) Σε μεταλλευτικές κατασκευές.
- vii) Στην υποστήριξη σηράγγων και υπόγειων θαλάμων.



Εικόνα 56 Εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος

### 3.7.3. Σύγκριση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τον συμβατικό οπλισμό

Κατά την παρασκευή του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι ίνες προστίθενται στο νωπό μίγμα. Ύστερα από κατάλληλες διεργασίες προκύπτει ένα ομοιογενές υλικό, το οποίο ικανοποιεί τις προϋποθέσεις των κανονισμών. Μέσω της προσθήκης ινών στο σκυρόδεμα, στόχος είναι να βελτιωθούν οι ιδιότητές του και πιο συγκεκριμένα η αύξηση της εφελκυστικής του αντοχής, της διατμητικής αντοχής και της αντοχής σε κρούση. Όταν στο σκυρόδεμα προστεθούν ίνες, το υλικό από ψαθρό μετατρέπεται σε πλάστιμο και κύριος ρόλος τους είναι να η αποφυγή της γρήγορης και σε βάθος διάδοσης των ρωγμών.

Οι ίνες διασκορπίζονται στο σημείο που διαστρώνεται το σκυρόδεμα, ενώ ο συμβατικός χαλύβδινος οπλισμός και το πλέγμα τοποθετούνται μόνο στα σημεία που κρίνεται απαραίτητο. Επίσης οι ίνες είναι μικρού μήκους και η αποστάσεις μεταξύ τους είναι μικρές μέσα στο μίγμα, σε αντίθεση με τη κλασική όπλιση. Τέλος η έκταση που καταλαμβάνει το πλέγμα είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή που καταλαμβάνουν οι ίνες.

### 3.7.4. Σύγκριση έγχυτου και εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται το εύρος των λόγων των συστατικών του έγχυτου και του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος αντίστοιχα.<sup>[1]</sup>

Υλικό	Κονίαμα	9,5 mm μέγιστος κόκκος αδρανούς (kg/m <sup>3</sup> )	19 mm μέγιστος κόκκος αδρανούς (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	415-710	355-590	300-535
Λόγος N/ T	0,3-0,45	0,35-0,45	0,4-0,5
Λεπτομερές / Χονδρομερές υλικό (%)	100	45-60	45-55
Συγκρατούμενος αέρας (%)	7-10	4-7	4-6
<b>Ίνες (%) κατ' όγκο</b>			
Λείος χάλυβας	1-2	0,9-1,8	0,8-1,6
Παραμορφωμένος χάλυβας	0,5-1	0,4-0,9	0,3-0,8

Πίνακας 10 Έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Υλικό	Μίγμα λεπτών αδρανών (kg/m <sup>3</sup> )	Μίγμα με αδρανή 9,5 mm (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	446-559	445
Αμμοχάλικο (< 6,35 mm) <sup>α</sup>	1438-1679	697-880
Αδρανή με κόκκο 9,5 mm		700-875
Χαλύβδινες ίνες <sup>β,γ</sup>	35-157	39-150
Επιταχυντής	Ποικίλει	Ποικίλει
Λόγος N/ T	0,4-0,45	0,4-0,45

α: η άμμος περιείχε 5% υγρασία

β: 1% χαλύβδινες ίνες = 78,6 kg/m<sup>3</sup>

γ: Εφόσον η αναπήδηση των ινών γενικά είναι μεγαλύτερη από αυτή των αδρανών, υπάρχει συνήθως μικρότερο ποσοστό ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τελική του θέση

Πίνακας 11 Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα<sup>1</sup>

Το εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα φέρει διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το έγχυτο, εξαιτίας της δομής του. Εξαιτίας της μεθόδου που διαστρώνονται οι ίνες στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κατανέμονται τυχαία και με μικρές αποκλίσεις σε δισδιάστατη μορφή, σε αντίθεση με το έγχυτο όπου κατανέμονται τυχαία αλλά σε τρισδιάστατη μορφή. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ανισοτροπία του υλικού και κατ' επέκταση στην εμπόδιση της ενίσχυσής του με τις ίνες. Συνεπώς προτιμότερη είναι η δισδιάστατη κατανομή, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται με ίνες που φέρουν μεγαλύτερο λόγο μορφής.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το συμβατικό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει μια ελαστική συμπεριφορά, έναντι του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος που κινείται στην πλαστική περιοχή. Το δεύτερο χαρακτηρίζεται από μεγάλες παραμορφώσεις και εμφανίζει μικρές ρηγματώσεις. Τα συστατικά του μίγματος και το ποσοστό των ινών διαφοροποιούνται μεταξύ του έγχυτου και του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στην παρασκευή του, συμβάλλει σημαντικά στη αύξηση της αντοχής του σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης, εν συγκρίσει με τις πειραματικές δοκιμές αξονικού εφελκυσμού. Εμφανής επίσης είναι και η βελτίωση της διατμητικής αντοχής που παρουσιάζει το ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα.

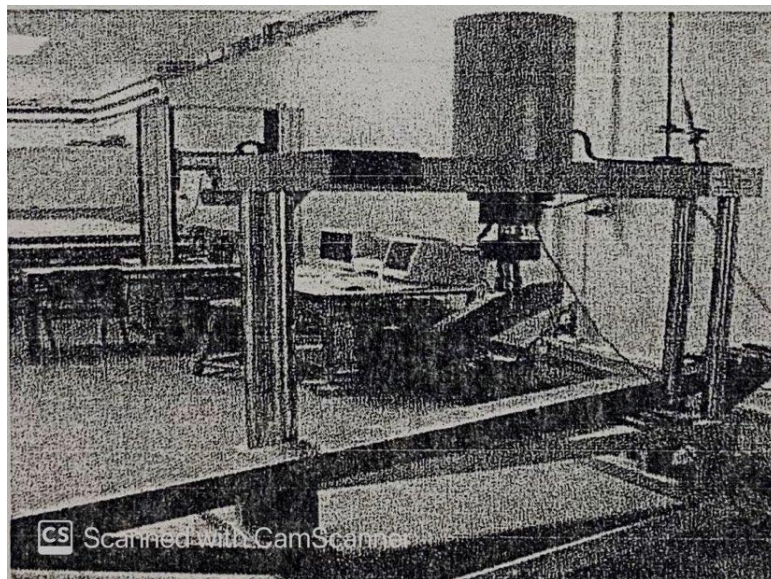
<sup>1</sup> Πίνακες: Ρουσάκης Γρηγόρης, (2010) Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με θέμα: "Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα"

## 4. Αριθμητικό παράδειγμα

### 4.1. Σκοπός της άσκησης

Σκοπός του παρακάτω αριθμητικού παραδείγματος είναι να διευκρινισθεί η μεταβολή της αντοχής μια ινοπλισμένης δοκού σε σχέση με μια άοπλη. Για το σκοπό αυτό παρασκευάζουμε μια άοπλη και μια ινοπλισμένη δοκό και αφού φτάσουν σε μεταγενέστερη ηλικία (28 ημέρες), υποβάλλονται στη μηχανή κάμψης.

Η δοκιμή εξελίχθηκε στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και στα δοκίμια έγινε χρήση χαλύβδινων ινών.




Εικόνα 57 Μηχανή κάμψης του εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος

### 4.2. Σύνθεση-Παρασκευή δοκιμίων

Τα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν με τις ίδιες αναλογίες σε ποσότητα  $1\text{m}^3$ . Όσον αφορά το ινοπλισμένο σκυροδέμα, προστέθηκαν σε αυτό 40 kg χαλύβδινες ίνες. Αφού γίνει η παρασκευή και ανάμειξη  $1\text{m}^3$  άοπλου σκυροδέματος, 5 min πριν το τέλος, αδειάζονται οι σάκοι με τις ίνες χάλυβα και κατανέμονται ομοιόμορφα στο νωπό μίγμα.

### 4.3. Διαστάσεις-Αναλογία χαλύβδινων ινών

Σχήμα: 

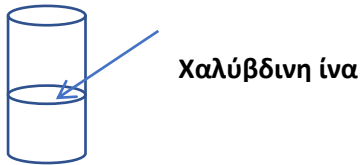
Μήκος: 3-6 cm

Κυκλική διατομή με διάμετρο: 0,37 mm



**Αναλογία βάρους:** 40 kg/m<sup>3</sup> σκυροδέματος για σκυρόδεμα συνηθισμένων οικοδομικών έργων  
(50 kg/m<sup>3</sup> σκυροδέματος για σκυρόδεμα απαιτητικών έργων)

#### 4.4. Μηχανικές ιδιότητες χαλύβδινων ινών

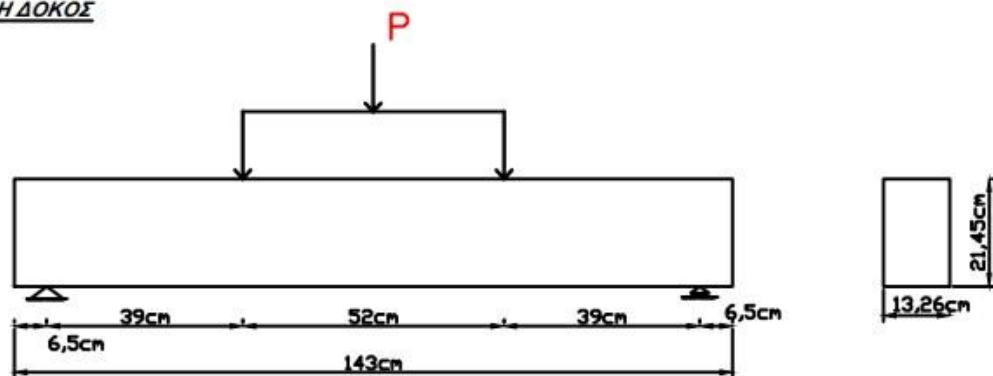


$$\sigma = P/F \implies \sigma_{\theta\rho} = 1\text{GPa}$$

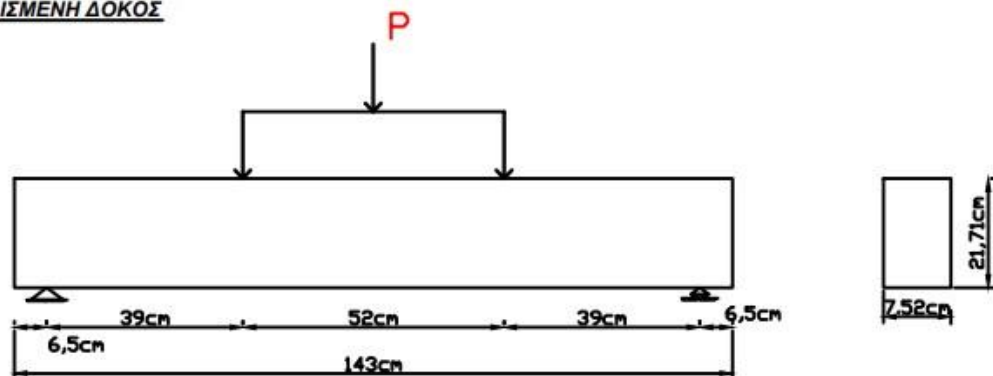
#### 4.5. Δεδομένα της άσκησης

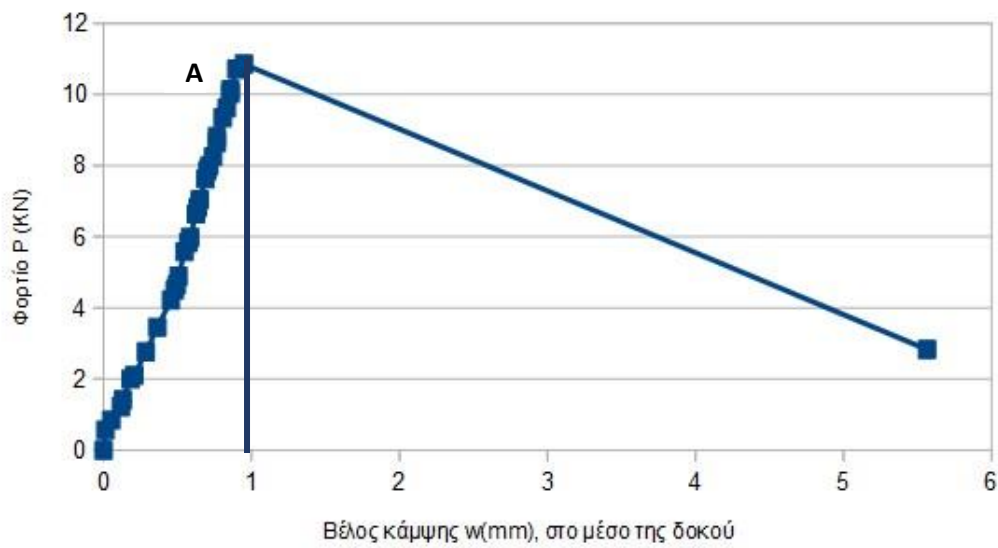
Δίνονται τα παρακάτω μοντέλα άοπλης και ινοπλισμένης δοκού αντίστοιχα:

ΑΟΠΛΗ ΔΟΚΟΣ

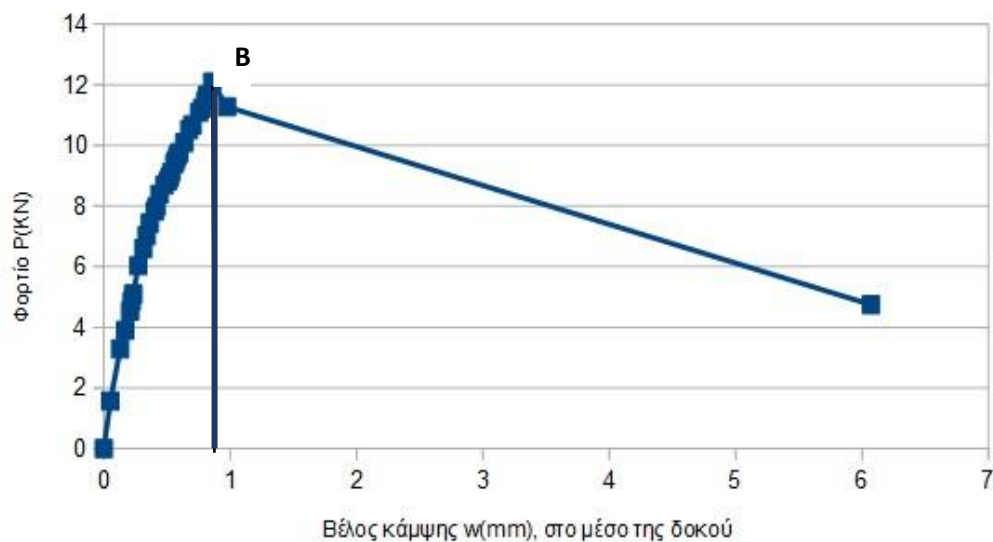


ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΔΟΚΟΣ





Εικόνα 58 Διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης άοπλης δοκού

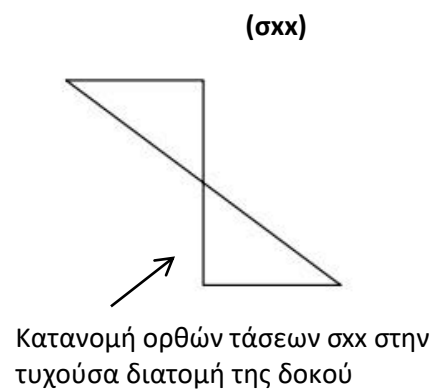
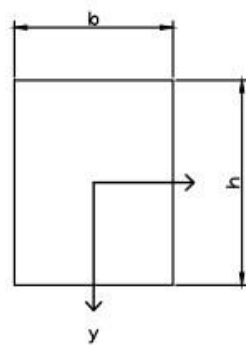
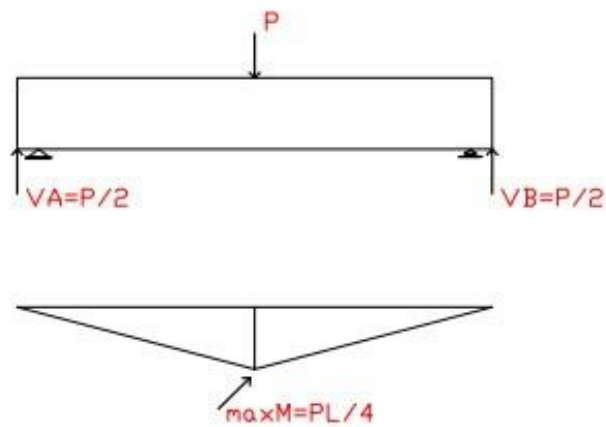


Εικόνα 59 Διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης ινοπλισμένης δοκού

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται:

- i) Στο σημείο A βρίσκεται το  $P_{max} = 10,855 \text{ KN}$  , που μπορεί να αναλάβει άοπλη δοκός.
- ii) Στο σημείο B βρίσκεται το  $P_{max} = 11,661 \text{ KN}$  , που μπορεί να αναλάβει ινοπλισμένη δοκός με χαλύβδινες ίνες σε αναλογία  $50 \text{ kg} / \text{m}^3$  σκυροδέματος.
- iii) Αύξηση την ενέργειας πλαστιμότητας του σκυροδέματος.

#### 4.6. Υπολογισμός αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη θραυτόμενης δοκού από ινοπλισμένο σκυρόδεμα



#### Υπολογισμοί:

##### Δοκός Δ0 (Άοπλη δοκός)

$$P_{\max} = 10,855 \text{ KN}$$

$$M_{\Delta 0} = (P \times L) / 4 = (10,855 \times 143) / 4 = 1552,265 \text{ KNcm}$$

$$I_{\Delta 0} = (b \times h^3) / 12 = (13,26 \times 21,45^3) / 12 = 10905,464 \text{ cm}^4$$

$$y = h / 2 = 21,45 / 2 = 10,725 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\Delta 0} = (M_{\Delta 0} \times y) / I_{\Delta 0} = (1552,265 \times 10,725) / 10905,464 = 1,527 \text{ MPa}$$

##### Δοκός Δ1 (Ινοπλισμένη δοκός)

$$P_{\max} = 11,661 \text{ KN}$$

$$M_{\Delta 1} = (P \times L) / 4 = (11,661 \text{ KN} \times 143) / 4 = 1667,523 \text{ KNcm}$$

$$I_{\Delta 1} = (b \times h^3) / 12 = (7,52 \times 21,71^3) / 12 = 6412,332 \text{ cm}^4$$

$$y = h / 2 = 21,71 / 2 = 10,855 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\Delta 1} = (M_{\Delta 0} \times y) / I_{\Delta 1} = (1667,523 \times 10,855) / 6412,332 = 2,823 \text{ KPa}$$

**Αύξηση:**

### **Δοκός Δ0 (Άοπλη δοκός)**

Μέγιστη εφελκυστική τάση στο πέλμα της δοκού, στη θέση της μέγιστης ροπής

$$\Longrightarrow \text{Max}\sigma_{\Delta 0} = 3 P_{\text{max}} \times L / 2 b \times h^2 = 3 \times 10,855 \times 143 / 2 \times 13,26 \times 21,45^2 = 0,382 \text{ KPa}$$



$$\text{Av } P_{\text{max}} = P_{\theta\rho}$$

Αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη δοκού, η οποία θραύεται στο μέσον με φορτίο  $P_{\theta\rho}$   $\Longrightarrow$   
 $\sigma_{\Delta 0\theta\rho} = 3 P_{\theta\rho} \times I_{\Delta 0} / 2 b \times h^2 = 3 \times 10,855 \times 10905,464 / 2 \times 13,26 \times 21,45^2 =$

$$= 29,105 \text{ KPa}$$

### **Δοκός Δ1 (Ινοπλισμένη δοκός)**

Μέγιστη εφελκυστική τάση στο πέλμα της δοκού, στη θέση της μέγιστης ροπής

$$\Longrightarrow \text{Max}\sigma_{\Delta 1} = 3 P_{\text{max}} \times L / 2 b \times h^2 = 3 \times 11,661 \times 143 / 2 \times 7,52 \times 21,71^2 = 0,706 \text{ KPa}$$



$$\text{Av } P_{\text{max}} = P_{\theta\rho}$$

Αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη δοκού, η οποία θραύεται στο μέσον με φορτίο  $P_{\theta\rho}$

$$\Longrightarrow \sigma_{\Delta 1\theta\rho} = 3 P_{\theta\rho} \times I_{\Delta 1} / 2 b \times h^2 = 3 \times 11,661 \times 6412,332 / 2 \times 7,52 \times 21,71^2 =$$

$$= 31,645 \text{ KPa}$$

**Επομένως:** Αύξηση αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη ινοπλισμένης δοκού ως προς άοπλη

$$\Longrightarrow (31,645 - 29,105) / 29,105 \times 100\% = 0,0873 \times 100\% = \underline{\underline{8,73\%}}$$

## 4.7. Ανακεφαλαίωση

Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία και αποδεικνύεται με το παραπάνω αριθμητικό παράδειγμα, η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο άοπλο σκυρόδεμα επιφέρει:

- i) Αύξηση της αντοχής έναντι της φωτιάς.
- ii) Βελτίωση στη συνοχή του σκυροδέματος όσο αυτό ακόμα είναι νωπό.
- iii) Βελτίωση της πλαστιμότητας.
- iv) Μείωση χρόνου τοποθέτησης έναντι χαλύβδινου πλέγματος, άρα και μείωση του συνολικού κόστους του έργου.
- v) Καταλληλότερη ανάληψη των φορτίων στα διάφορα μέλη.
- vi) Αύξηση φορτίου αστοχίας σε πλάκα σκυροδέματος C50 κατά 8,4%.
- vii) Αύξηση αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη στην ανωτέρω πλάκα κατά 3,9%.
- viii) Αύξηση αντοχής σε θλίψη από κάμψη κατά 8,2%.
- ix) Ασφαλή αντικατάσταση υπάρχοντος σιδήρου πλέγματος σε πλάκα με ίνες προπυλενίου ή χαλύβδινες.
- x) Μείωση επικάλυψης κύριου οπλισμού σε δοκό ή σε πλάκα, λόγω αύξησης της αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη.
- xi) Μείωση μικρορωγμών κατά την πήξη της πλάκας στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Στις περισσότερες εργαστηριακές δοκιμές, το ινοπλισμένο με χαλύβδινες ίνες σκυρόδεμα εξετάζεται ως προς τη συμπεριφορά του σε κάμψη. Καταγράφεται το βέλος της κάμψης και το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται, χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το ποσοστό των ινών μέσα στο μίγμα αλλά και το υλικό τους.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή ανάμιξη του υλικού και φυσικά να μη γίνεται προσθήκη κάποιας πρόσθετης ουσίας όπως ρευστοποιητές, επιταχυντές για να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά τα αποτελέσματα.

## 5. Συμπεράσματα

Το σκυρόδεμα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι στη ζωή του μηχανικού. Είναι ένα υλικό που ήρθε στις ζωές μας για να μείνει και να συμβάλλει στην κατασκευή διάφορων έργων από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Μέσα από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναφέρθηκαν και αναπτύχθηκαν λεπτομερώς τρεις μεγάλες κατηγορίες αυτού, καθώς και συγκρίσεις μεταξύ τους. Στο πρώτο σκέλος της εργασίας γίνεται λόγος για το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα. Είναι εκείνο που βρίσκει τη μεγαλύτερη εφαρμογή παγκοσμίως και επί χρόνια γίνονται μελέτες με σκοπό την βελτίωση των ιδιοτήτων του. Η παρασκευή του γίνεται με χονδρόκοκκα υλικά και το μίγμα μεταφέρεται στο σημείο εφαρμογής με τη χρήση αντλιών. Προκειμένου να διατηρηθεί στη σωστή κατάσταση για χρήση ύστερα από 1,5-2 ώρες μετά τη φόρτωση του στο εργοστάσιο, προστίθενται στο μίγμα επιβραδυντές. Ο έλεγχος γίνεται κυρίως κατά την παραγωγή στο εργοστάσιο αλλά σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται επανέλεγχος κάθισης όταν φτάσει στο εργοτάξιο. Ενδεικτικά ο λόγος  $N / T$  κυμαίνεται από 0,50-0,70 ανάλογα και με το σκοπό χρήσης. Κατά τον οπλισμό είναι εμφανής η ανομοιογένεια μεταξύ του τσιμεντοπολτού και του χαλύβδινου οπλισμού. Σχεδιάζεται για να παραλαμβάνει στατικά και αργά φορτία, ενώ η συμπεριφορά του είναι ελαστική. Δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη αντοχή έναντι κρούσης, μεγάλη ανθεκτικότητα και ικανότητα αντίστασης σε φθορές από τριβή. Ακόμα και λίγη ώρα μετά τη διάστρωσή του εμφανίζει τις πρώτες ρωγμές, αλλά διατηρεί μικρές παραμορφώσεις. Η συρρίκνωση και ο ερπυσμός του είναι αυξημένα και όταν απαιτείται αύξηση της πυκνότητας του γίνεται χρήση δονητών. Στη συνέχεια και το δεύτερο μέρος εργασίας αναφέρεται στο σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από ανακυκλωμένα αδρανή. Σκοπός της δημιουργίας του ήταν η συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα αυτό προέρχονται από απόβλητα κατασκευών, κατεδαφίσεων ή από άλλες οικοδομικές εργασίες. Τα καταλληλότερα ανακυκλωμένα αδρανή για τη χρήση αυτή είναι εκείνα από προηγούμενο σκυρόδεμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα του σκυροδέματος, τόσο μειώνεται και η εργασιμότητα του. Μειωμένη επίσης παρουσιάζεται και η πυκνότητα του νέου σκυροδέματος όταν προστίθενται τέτοιου είδους αδρανή, αφού από μόνα τους έχουν χαμηλότερη πυκνότητα σε σχέση με τα φυσικά αδρανή. Παρά τον μεγάλο ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής που εμφανίζει ύστερα από 28 ημέρες το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, η θλιπτική αντοχή του είναι μικρότερη έως και 45% σε σχέση με το συμβατό. Κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης του ο όγκος του μεταβάλλεται, αφού μεγάλο μέρος του νερού εξατμίζεται, άρα συνεπώς παρουσιάζεται μεγάλη συρρίκνωση. Βασικές ιδιότητες επίσης του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, η χαμηλή αντίσταση σε ψύξη και απόψυξη, η μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη έναντι του συμβατού και η μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό. Με την αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών, προκύπτει μεγαλύτερος ερπυσμός, ενώ η ενέργεια θραύσης δεν επιδέχεται ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται επίσης πολλοί τρόποι ενίσχυσης αυτού του τύπου σκυροδέματος με σκοπό η χρησιμοποίησή του να γίνεται ολοένα και πιο συχνή. Από οικονομικής πλευράς, η διαδικασία ανακύκλωσης του σκυροδέματος είναι αρκετά δύσκολη, χρονοβόρα, άρα και απαιτεί αρκετό εξοπλισμό και υψηλό κόστος υλοποίησης. Ωστόσο σε μελλοντικό χρόνο και με τα κατάλληλα επενδυτικά μέτρα, θα μπορούσε να μετατραπεί σε μία αρκετά κερδοφόρα βιομηχανία. Προχωρώντας, η τρίτη ενότητα της συγκεκριμένης μελέτης αφορά στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, έγχυτο και εκτοξευόμενο. Η σύνθεσή του είναι ίδια με το απλό σκυρόδεμα ενώ ξεχωρίζει στην προσθήκη ινών στο μίγμα, οι οποίες μπορεί να αποτελούνται από διάφορα υλικά. Οι ίνες αυτές προστίθενται στη μάζα με τυχαίο προσανατολισμό και σκοπός τους είναι ο περιορισμός των ρωγμών και της επέκτασής τους κατά την καταπόνηση του υλικού. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από λεπτόκοκκα αδρανή, ενώ αρκετές είναι οι περιπτώσεις που μεταφέρεται στη θέση εφαρμογής με εκτόξευση. Η διάρκεια ζωής του μπορεί να φτάσει έως

και 12 ώρες από τη στιγμή της παρασκευής. Κατά τη στιγμή που είναι έτοιμο να τοποθετηθεί στο σημείο, γίνεται και προσθήκη επιταχυντή. Ο έλεγχος του γίνεται μέσα στο εργοτάξιο και συγκεκριμένα την ώρα που μπαίνει ο επιταχυντής. Δεν θα μπορούσε να ελεγχθεί σε προηγούμενο στάδιο, αφού στα συστατικά του είναι και ο σταθεροποιητής που σημαίνει πως το μίγμα είναι ανενεργό. Όσον αφορά τη σύσταση του υλικού είναι ομοιογενές, καθώς οι ίνες γίνονται ένα σώμα με τον τσιμεντοπολτό. Η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι κατάλληλη ώστε να παραλαμβάνει μεταβαλλόμενα φορτία και με πολύ γρήγορη καταπόνηση. Παρουσιάζει ιδιαίτερη ανθεκτικότητα και η αντοχή του έναντι κρούσης είναι μεγάλη. Όσο διαρκεί η διαδικασία της διάστρωσης, τα στοιχεία από ινοπλισμένο σκυροδέμα δεν εμφανίζουν καθόλου ρηγματώσεις, ούτε μετά τη φόρτιση ενώ οι παραμορφώσεις τους είναι μεγάλες. Ιδιαίτερα το ενισχυμένο με ίνες χάλυβα σκυροδέμα κινείται στην πλαστική περιοχή και παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα έναντι της φθοράς από τριβές. Ο λόγος  $N / T$  στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος φτάνει από 0,35-0,50 ανάλογα πάντα και με τη χρήση. Στην κατηγορία αυτή δεν γίνεται χρήση δονητών για αύξηση της πυκνότητας, απλώς εκτοξεύεται με μεγαλύτερη δύναμη στην επιφάνεια εφαρμογής. Ακολούθως, στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα. Σκοπός του είναι να γίνει σύγκριση μεταξύ μιας άοπλης δοκού και μιας από ινοπλισμένο με χαλύβδινες ίνες σκυροδέμα. Αναγράφονται τα υλικά και η διαδικασία του πειράματος, ενώ παρουσιάζονται και τα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για την καθεμιά. Έπειτα πιστοποιείται αριθμητικά η αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη της ινοπλισμένης δοκού ως προς την άοπλη και απαριθμούνται κάποια ακόμα οφέλη που προσφέρει η προσθήκη ινών στις ιδιότητες του σκυροδέματος.

## 6. Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Κομνηνού Ε. & Οικονόμου Π. , (2015). Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος, ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες. Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα
- [2] Παπαντωνίου Ι. , (2007). ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΠΙ/ΕΝΤΟΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΤΥΠΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ. Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών, Πάτρα
- [3] Τζανετής Ν. & Κασαράι Α. , (2016). ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ. Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ, Αθήνα
- [4] Παπαδάτου Μ. , (2014). Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος. Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα
- [5] Α.Ε. ΣΑΒΒΑ , Επίκουρος Καθηγήτρια, (2010). Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή: Επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχ. 2 2010 Tech. Chron. Sci. J. TCG, No 2, Civil Engineering Department, Democritus University of Thrace
- [6] Καϊσίδου Μ. & Παπαθανασίου Α., Σκυρόδεμα από ανακυκλώσιμα αδρανή. Πτυχιακή εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Πολιτικών Έργων Υποδομής
- [7] Δαγρές Ε. , Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ. , (2017). ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΧΩΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα
- [8] Κορόζης Ηλ. , Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. , (2015). Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Μεταπτυχιακή



εργασία, Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οπλισμένου  
Σκυροδέματος, Αθήνα

- [9] P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro , (2009). ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – Μικροδομή, ιδιότητες και υλικά. Εκδόσεις: Κλειδάριθμος
- [10] Τσώνος Αλ. Δ. , (2017). Σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (πρώτος τόμος). Εκδόσεις: ΣΟΦΙΑ – [www.esofia.net](http://www.esofia.net)
- [11] Δρίτσος Σ. , (2002). Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Εκδόσεις Παν. Πατρών, Πάτρα
- [12] Δημάκος Κ. , (2018). Εργαστηριακές ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα
- [13] Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης - Περίληψη απόφασης της Επιτροπής της 5ης Ιουνίου 2014
- [14] Ρουσάκης Γρηγόρης Π. , (2010). Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) "Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπόγειων Έργων"
- [15] Ρήγα Μ. & Σκαντζό Ηλ. , (2009). Χημεία τσιμέντου. Πτυχιακή εργασία, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Χημείας, Αθήνα
- [16] Θεοδώρου Χ. , (2013). ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ. “19ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών-Αφιέρωμα στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.” , Πάτρα
- [17] Τζιουβέλη Ελ. & Χανιώτου Ζ. , (2022). ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΩΣ ΑΔΡΑΝΗ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ. Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών , Αθήνα
- [18] Καθ. Α. Μοροπούλου & ΕΔΙΠ Κ. Λαμπρόπουλος , «Δομικά Υλικά» , Τσιμέντο & Σκυρόδεμα , 9 ο εξάμ. Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
- [19] Μιχάλης Α. Π. & Δημητρίου Χ. Σ. , (2007). ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ. Πτυχιακή εργασία. Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής , Θεσσαλονίκη

- [20] Παπαδάκη Χ. Ζ , (2010) . Διερεύνηση εφελκυστικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος. Μεταπτυχιακή εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
- [21] Κακούρα Δ. , (2021). Διερεύνηση φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων σκυροδέματος με ανάμεικτα αδρανή. Διπλωματική εργασία. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών , Αθήνα
- [22] [https://apothesis.eap.gr/bitstream/repo/53668/1/Eco-friendly%20concrete\\_Sachlikidis.pdf](https://apothesis.eap.gr/bitstream/repo/53668/1/Eco-friendly%20concrete_Sachlikidis.pdf)
- [23] Δομοχημική – Τεχνολογία Ινοπλισμένου σκυροδέματος:  
<https://www.domochemica.com.cy/gr/blog>
- [24] Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος – Ιστορία – Εξέλιξη:  
<http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/history/>
- [25] Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος – Τσιμέντο:  
<http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/cement/>
- [26] Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος – Σκυρόδεμα:  
<http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/concrete/>
- [27] Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος – Εφαρμογές:  
<http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/uses-concrete/>
- [28] Technikos.gr – Πρόσμικτα Σκυροδέματος: <https://www.texnikos.gr/domisi/61-prosmikta-skyrodeματος>
- [29] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ – Σκυρόδεμα:  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%8C%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B1>
- [30] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ – Οπλισμένο Σκυρόδεμα:  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%80%CE%BB%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF\\_%CF%83%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%8C%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%80%CE%BB%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF_%CF%83%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%8C%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B1)
- [31] Egialeas Civ – Τεχνικό γραφείο – Οπλισμένο Σκυρόδεμα:  
<https://egialeasciv.gr/2021/03/05/%CE%BF%CF%80%CE%BB%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%BF-%CF%83%CE%BA%CF%85%CF%81%CE%BF%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B1/>

- [32] Ανέλιξη – Σκυρόδεμα: <https://anelixi2020.org/kathara-ylika-kai-technologies/kathara-ulika-kai-technologies-oikodomika-proionta-proionta-ylikon-tis-gis-skurodema/>
- [33] SkyCiv – Συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά στη δομική μηχανική: <https://skyciv.com/el/technical/steel-vs-timber-vs-concrete/>