



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ -
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ**

ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

A.M.: 00352

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΑΡΙΣΑ, 2025

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

.....
.....
.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από την κατασκευή φραγμάτων κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete- RCC), δίνοντας ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο. Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στο να αναδείξει τα περιβαλλοντικά οφέλη των φραγμάτων, μελετώντας την εξέλιξη τους, τα χαρακτηριστικά του υλικού και συγκρίνοντάς τα με τα φράγματα από συμβατικό σκυρόδεμα. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή στην κατασκευή φραγμάτων από την προ Χριστού περίοδο έως την σύγχρονη εποχή, αναδεικνύοντας την εξέλιξη των μεθόδων που χρησιμοποιούνταν ανά τους αιώνες. Επίσης, γίνεται εκτενής αναφορά στους βασικούς τύπους φραγμάτων που απαντώνται σήμερα, καθώς και στη σκοπιμότητα της κατασκευής τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο προσδιορίζονται συντόμως η έννοια του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, οι ιδιότητες και η σύστασή του, ενώ ταυτόχρονα περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά που το αποτελούν, η μέθοδος παρασκευής, καθώς και οι εργαστηριακές δοκιμές, στις οποίες υποβάλλεται. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται ενδεικτικά παραδείγματα μεγάλων φραγμάτων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και στην ελληνική επικράτεια μαζί με πίνακες που παρουσιάζουν τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε φράγματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται συγκριτική διερεύνηση των ιδιοτήτων, καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση σκυροδέματος συμβατικού τύπου και κυλινδρούμενου. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα και η βιβλιογραφία.

Λέξεις κλειδιά: φράγματα, περιβαλλοντικά οφέλη, κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, υλικά κατασκευής, εφαρμογές RCC

SUMMARY

This thesis deals with the study of the environmental benefits arising from the construction of rolled concrete dams, with particular emphasis on applications within Greece. The aim of the thesis is to highlight the environmental advantages of these dams by examining their development, the characteristics of the material used and by comparing them with conventional concrete dams. The first chapter, presents a historical overview of dam construction, from pre-Christian period to the modern age, highlighting the evolution of the methods used over the centuries. Additionally, it provides an extensive reference to the main types of dams found today, as well as to the purpose of their construction. In the second chapter, briefly defines the concept of roller- compacted concrete, its properties and composition, while also offering a detailed description of the materials used, the method of preparation and the laboratory tests to which it is subjected. The third chapter, presents indicative examples of large RCC dams, both at the international level and within the Greek territory, accompanied by tables that display the main characteristics of each dam. In the fourth chapter, a comparative investigation is conducted between the properties and environmental impacts of conventional concrete and roller compacted concrete. Finally, the conclusions and the bibliography are followed.

Keywords: dams, environmental benefits, roller compacted concrete, construction materials, RCC applications

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Χριστοδούλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας πτυχιακής εργασίας, για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλα τα μέλη του διδακτικού προσωπικού του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις γνώσεις και την καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου για την αγάπη και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ	10
1.1.1. Η Προ Χριστού περίοδος.....	11
1.1.2. Η Περίοδος μέχρι 1500 μ.Χ.....	12
1.1.3. Η Περίοδος μέχρι τον 18ο αιώνα	13
1.1.4. Η Περίοδος 19ος και 20ος αιώνας	14
1.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ (τύποι)	15
1.2.1. Βάσει της χρήσης τους.....	15
1.2.2. Ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους.....	16
1.2.3. Ανάλογα με τη λειτουργία τους	23
1.2.4. Ανάλογα με το ύψος τους	23
1.3. ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	24
2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ	26
2.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	26
2.2.1.Αντοχή	26
2.2.2. Ελαστικές Ιδιότητες.....	26
2.2.3. Πυκνότητα	27
2.2.4. Θερμικές Ιδιότητες	27
2.2.5. Διαπερατότητα	27
2.3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	28
2.3.1. Νερό	28
2.3.2. Αδρανή Υλικά	29
2.3.3. Τσιμέντο	29
2.3.4. Ιπτάμενη τέφρα	30
2.3.5. Ποζολάνες	31
2.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	32
2.5. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	34

2.5.1.Υγρασία νωπού μίγματος.....	34
2.5.2. Συνεκτικότητα RCC	34
2.5.3. Έλεγχοι συμπίκνωσης.....	34
2.5.4. Αντοχή RCC	35
3.1. Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος σε παγκόσμιο επίπεδο	36
3.2. Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος στον ελλαδικό χώρο	39
3.2.1. Φράγμα Πλατανόβρυσης	40
3.2.2. Φράγμα Μαραθίου.....	41
3.2.3. Φράγμα Άνω Μεράς.....	42
3.2.4. Φράγμα Στενό	43
3.2.5. Φράγμα Βαλσαμιώτη	44
4.1. Συγκριτική διερεύνηση ιδιοτήτων κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος	45
4.2. Συγκριτική διερεύνηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	46

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Όρια διαβάθμισης αδρανών υλικών	29
Πίνακας 2. Τα ψηλότερα φράγματα από RCC παγκοσμίως	36
Πίνακας 3. Τα μεγαλύτερα παγκοσμίως σε ωφέλιμο όγκο φράγματα από RCC	39
Πίνακας 4. Τα πέντε (5) φράγματα που έχουν κατασκευαστεί από RCC στην Ελλάδα	39
Πίνακας 5. Συγκριτική διερεύνηση ιδιοτήτων κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος	45
Πίνακας 6. Συγκριτική διερεύνηση περιβαλλοντικών επιδράσεων κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος.....	47
Πίνακας 7. Σύγκριση περιβαλλοντικής βιωσιμότητας κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:Φράγμα Sadd-el Kafara	11
Εικόνα 2: Φράγμα Marib.....	12
Εικόνα 3: Φράγμα Tibi.....	13
Εικόνα 4: Φράγμα Hoover	14
Εικόνα 5:Τομή φράγματος βαρύτητας	17
Εικόνα 6: Το φράγμα Μαραθώνα	17
Εικόνα 7: Τομή τοξωτού φράγματος.....	18
Εικόνα 8: Το φράγμα του Ταυρωπού	18
Εικόνα 9: Κατά τη κατασκευή του φράγματος	18
Εικόνα 10: Τομή αντηριδωτού φράγματος	19
Εικόνα 11: Το φράγμα Λάδωνα	19
Εικόνα 12:Τομή χωμάτινου φράγματος.....	21
Εικόνα 13:Φράγμα Μόρνου	22
Εικόνα 14: Το φράγμα Θησαυρού.....	22
Εικόνα 15:Willow Creek dam	28
Εικόνα 16: Φράγμα Gibe III (Αιθιοπία)	37
Εικόνα 17:Φράγμα Longtan (Κίνα)	37
Εικόνα 18:Φράγμα Miel I (Κολομβία).....	37
Εικόνα 19: Φράγμα Nam Theun 1 (Λάος)	38
Εικόνα 20: Φράγμα Ralco (Χιλή)	38
Εικόνα 21: Φράγμα Ayvali (Τουρκία).....	38
Εικόνα 22:Φράγμα Πλατανόβρυσης	40
Εικόνα 23:Φράγμα Μαραθίου.....	41
Εικόνα 24: Φράγμα Άνω Μεράς.....	42
Εικόνα 25:Φράγμα Στενό.....	43
Εικόνα 26: Φράγμα Βαλσαμιώτη	44

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

RCC:	Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα
CO ₂ :	Διοξείδιο του Άνθρακα
SiO ₂ :	Διοξείδιο του Πυριτίου
CaO:	Οξείδιο του Ασβεστίου
CEM II/B:	Τύπος σύνθετου τσιμέντου Portland
CEM IV/B:	Τύπος ποζολανικού τσιμέντου
ΕΛΟΤ:	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως *φράγμα* καθορίζεται ένα τεχνικό έργο που φράζει τη ροή ενός ποταμού με σκοπό τη συγκέντρωση του νερού και την αξιοποίησή του κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για αρδεύσεις. Επίσης, με την κατασκευή φραγμάτων ασχολείται η εφαρμοσμένη γεωλογία και η υδραυλική.

Σε ένα φράγμα διακρίνονται τρεις περιοχές: α) η λεκάνη απορροής, β) η λεκάνη κατάκλισης και γ) η ζώνη του φράγματος. Η λεκάνη απορροής είναι η κλειστή περιοχή που ορίζεται από μία υδροκριτική γραμμή και τροφοδοτεί με νερό τον ποταμό. Η λεκάνη κατάκλισης είναι η περιοχή της λεκάνης απορροής που θα χρησιμεύσει ως δεξαμενή για τα νερά που θα συγκεντρωθούν, καθώς η έκτασή της ορίζεται από το ύψος του φράγματος. Επιπλέον, η ζώνη του φράγματος περιλαμβάνει την περιοχή όπου θα κατασκευαστεί το φράγμα. Συνήθως, είναι ένα στένωμα που δεν παρουσιάζει ρήγματα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα φράγματα είναι πολύ δαπανηρά έργα και ο χρόνος λειτουργίας τους είναι πάντα περιορισμένος. Γι' αυτό, πριν αποφασιστεί η κατασκευή ενός φράγματος πρέπει να γίνεται ολοκληρωμένη τεχνική και οικονομική μελέτη, με στόχο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, το φράγμα θα αποσβέσει τη δαπάνη κατασκευής του και θα είναι κερδοφόρα.

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Η μηχανική των φραγμάτων συνίσταται ζωτικής σημασίας στην ιστορία του πολιτισμού, καθώς τα φράγματα αποτελούν τις πρώτες κατασκευές που έχει δημιουργήσει ο άνθρωπος. Η πρώιμη ιστορία τους παραμένει άγνωστη, ενώ προσεγγιστικά η χρονική τοποθέτηση των κατασκευών γίνεται πρωτύτερα του 1000 π.Χ., συγκεκριμένα στην αρχαία Αίγυπτο, όπου η ιδιόμορφη χρονολόγηση μειώνει το πλήθος των υπό διάθεση πληροφοριών αναφορικά με τις δυναστείες και τα τεχνολογικά επιτεύγματα.

Εναπομείναντα ερείπια στην Ινδία και την Σρι Λάνκα ρίχνουν φως στον τρόπο κατασκευής των αντλιών νερού από τους αρχαίους λαούς, αναδεικνύοντας ως πιο εκτεταμένη μέθοδο κατασκευής την εγκατάσταση χωμάτων εμποδίων σε υδατορεύματα. Οι αρχαίοι κτίστες χρησιμοποιούσαν τοπικά υλικά, όπως χώμα και χαλίκια.

Δεδομένης της ελλιπούς αντίληψης και γνώσης για τη μηχανική των υλικών και των πλημμυρικών ροών, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή ήταν συμπτωματικές. Επομένως, για πολλούς αιώνες, τα φράγματα που κατασκευάζονταν με αναχώματα θεωρούνταν αναξιόπιστα (Jansen, 1980).

1.1.1. Η Προ Χριστού (π.Χ.) περίοδος

Μία από τις πρώτες αναφορές κατασκευής μεγάλου τεχνικού έργου σχετίζεται με την ίδρυση της Μέμφιδος στο ποταμό Νείλο, όπου εκτιμάται μεταξύ 5700 π.Χ. και 2700 π.Χ. Ο ιστορικός Ηρόδοτος απέδωσε την κατασκευή στον Φαραώ Μήνη, το πρώτο βασιλιά της Αιγυπτιακής Δυναστείας. Σύμφωνα με πηγές, λέγεται ότι κατασκευάστηκε ένα φράγμα τοιχοποιίας στο Koshish στο Νείλο, περίπου 20 km πάνω από την περιοχή όπου ο Φαραώ είχε σκοπό την τοποθέτηση της πρωτεύουσας.

Η εκδοχή αυτή αναφέρει ότι πριν από την ίδρυση της πρωτεύουσας ο βασιλιάς Μήνης τροποποίησε την πορεία του ποταμού από την δυτική προς την ανατολική πλευρά της κοιλάδας, αλλάζοντας τη ροή του ποταμού σε νέο κανάλι. Σκοπός του φέρεται να ήταν η εξοικονόμηση χώρου για την πόλη, καθώς αποτελούσε σημαντικό μέρος της άμυνας στην ανατολική πλευρά, η οποία ήταν συνήθης δρόμος προσέγγισης των εχθρών (Jansen, 1980).

Σε διάφορα μέρη της *Αιγύπτου* διατηρούνται ακόμη και σήμερα απομεινάρια φραγμάτων βαρύτητας. Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνεται το φράγμα Sadd el-Kafara του Wadi el-Garawi κοντά στο Helwan, περίπου 32km νότια του Κάιρου. Το ύψος του 11m, μήκος στέψης 107m και πυρήνα από πέτρες, χαλίκι και χώμα. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η στέψη του συνέκλινε προς το κέντρο, συγκεντρώνοντας την υπερχειλίση σε αυτό το σημείο. Ωστόσο, ο πυρήνας στο σημείο αυτό δεν ήταν υδατοστεγής και η χωρητικότητα της δεξαμενής (περίπου 570.000 κυβικών μέτρων) δεν επαρκούσε για τη συγκράτηση των νερών των καταστροφικών πλημμυρών του Νείλου.

Η συγκεκριμένη παράλειψη επέφερε υπερχειλίση και στη συνέχεια κατάρρευση του κεντρικού τμήματος του φράγματος αφότου ολοκληρώθηκε η κατασκευή. Το λάθος αυτό εξακολουθούσε να σημειώνεται σε πολλά φράγματα, ενώ η αποτυχία του Sad el-Kafara λειτούργησε αποθαρρυντικά στο εξής για τους αρχαίους Αιγυπτίους από την κατασκευή άλλων φραγμάτων της ίδιας σύνθετης διατομής (Jansen, 1980).



Εικόνα 1:Φράγμα Sadd-el Kafara

Μεταξύ των αρχαίων φραγμάτων στη **Νότια Αραβία** θεωρείται εκτενέστερο το γεώφραγμα Marib Dam στην Υεμένη (περίπου 750 π. Χ.), το οποίο αποκαλούνταν Sudd al-Arim από τους Μουσουλμάνους. Πλαισιωμένο από πέντε υπερχειλιστές, τροφοδοτούσε με νερό ένα σύστημα αρδευτικών καναλιών για περισσότερα από 1000 χρόνια. Είχε μήκος στέψης 580m και ύψος 4m από την κοίτη του ποταμού (Jansen, 1980).



Εικόνα 2: Φράγμα Marib

Κοντά στον 5^ο αιώνα άρχισε η κατασκευή φραγμάτων στην **Ανατολική Ασία**, η οποία αναπτύχθηκε σχετικά αυτόνομα από τη Δύση, υπογραμμίζοντας σημαντική πρόοδο στα μέγιστα ύψη και μήκη των κατασκευών. Στο νησί της Κεϋλάνης (σημερινή Σρι Λάνκα) χτίστηκαν κατά τους αρχαίους χρόνους αναχώματα με σχετικά μικρό ύψος αλλά πολύ μεγάλο μήκος, που υπήρξαν πρόγονοι των σημερινών γεωφραγμάτων. Στην Κίνα το πέτρινο φράγμα ύψους 32m και μήκους 328m, το οποίο κατασκευάστηκε γύρω στο 240 π. Χ. στις όχθες του ποταμού Gykow στην επαρχία Shanxi, θεωρήθηκε σημαντική επιτυχία (Jansen, 1980).

1.1.2. Η Περίοδος μέχρι 1500 μ.Χ.

Κατά τη **Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία** υλοποιήθηκε μικρός αριθμός φραγμάτων. Κατασκευασμένα, κυρίως, από κονίαμα τοιχοποιίας μεγάλης αντοχής και στεγανότητας. Επίσης, οι Ρωμαίοι αναγνώρισαν την ανάγκη για διατήρηση του εδάφους. Κοντά στις ακτές της Τριπολιτανίας (Λιβύη), αρκετά ρεύματα τα οποία αποστραγγίζουν τη βόρεια πλαγιά των βουνών Jebel Nefusa απορρίπτουν μεγάλους όγκους λάσπης στη Μεσόγειο. Τρεις σημαντικές πόλεις της ρωμαϊκής εποχής, Leptis Magna, Oea και Sabratha χτίστηκαν κοντά στο κατώτερο ρεύμα αυτών των υδάτινων ρευμάτων. Σκοπός της κατασκευής των φραγμάτων ήταν η παροχή νερού στις πόλεις και η προστασία του εδάφους απ' την διάβρωση. Αξίζει να σημειωθεί πως το Ρωμαϊκό φράγμα χτίστηκε περίπου τον δεύτερο αιώνα μ.Χ. κοντά στο Kasserine, 217 km νοτιοδυτικά της Τύνιδας. Είναι μια κατασκευή τοιχοποιίας αποτελούμενο από χώμα και χαλίκια (Jansen, 1980).

Κατά την περίοδο της **Βυζαντινής Αυτοκρατορίας** σημαντική ήταν η συμβολή του Ιουστινιανού στην ανάπτυξη του δικτύου ύδρευσης της Κωνσταντινούπολης με το χτίσιμο

συνολικά οκτώ φραγμάτων στην περιοχή, τέσσερα από τα οποία λειτουργούν ακόμη. Το μεγαλύτερο από αυτά περιλαμβάνει το 617.000 κυβικών μέτρων (500 στρεμμάτων) Btiyuk Bent σε ένα παραπόταμο του ποταμού Kiathene Deresi περίπου 14 χιλιόμετρα βόρεια της πόλης. Στα σύνορα μεταξύ Τουρκίας και Συρίας κοντά στην πόλη Daras, ο μηχανικός Χρύσης από την Αλεξάνδρεια, με εντολή του Ιουστινιανού, οικοδόμησε ένα αξιοσημείωτο φράγμα καμπύλης κάτοψης, το οποίο θεωρείται από ορισμένους ιστορικούς ως το πρώτο γνωστό τοξωτό φράγμα (Jansen, 1980).

Στην **Ανατολή** οι Ασιάτες συνέχισαν να διακρίνονται στην κατασκευή φραγμάτων με χώμα. Οι Ιάπωνες είχαν κατασκευάσει μέχρι το 1500 μ.Χ. γύρω στα τριάντα γεωφράγματα με ύψος που ξεπερνούσε τα 15m, ενώ στην Κεϋλάνη καταγράφονταν νέα ρεκόρ μήκους στις αναχωματικές κατασκευές και στο Madras της Ινδίας οικοδομήθηκε το 1500 μ.Χ. το φράγμα Mudduk Masur ύψους 24m, το οποίο δεν ξεπεράστηκε για περίπου τρεις αιώνες. Απεναντίας, οι **Ευρωπαίοι** εξακολουθούσαν να κατασκευάζουν φράγματα τοιχοποιίας. Το Almonacid de la Cuba στο Rio Aguasvivas (Ισπανία) χρονολογείται από τον 13ο μ.Χ. αιώνα και αρχικά ήταν κατασκευασμένο από αργολιθοδομή με ακατέργαστο ασβεστοκονίαμα και εξωτερική επένδυση λαξευμένης πέτρας. Γίνεται λόγος ότι το ύψος του ήταν τα 29m και το μήκος του σχεδόν 85m. Ορισμένοι ιστορικοί εκτιμούν πως είναι το τελευταίο φράγμα χριστιανικής καταγωγής, το οποίο σώζεται στην Ισπανία (Jansen, 1980).

1.1.3. Η Περίοδος μέχρι τον 18ο αιώνα

Μέχρι το τέλος του 16ου αιώνα τα περισσότερα φράγματα κατασκευάστηκαν στην **Ισπανία**. Το φράγμα Alicante ,ένα τοξωτό φράγμα βαρύτητας στο Rio Monegre, 18 km βορειοδυτικά της ισπανικής πόλης Alicante, αποτελεί το σημαντικότερο επίτευγμα της εποχής εκείνης. Η κατασκευή του φράγματος, γνωστού και με το όνομα του κοντινού χωριού Tibi ,άρχισε το 1580 και περατώθηκε το 1594. Εκτιμάται, ότι για τρεις αιώνες το φράγμα αυτό ήταν το ψηλότερο στον κόσμο με ύψος τα 41m (Jansen, 1980).



Εικόνα 3: Φράγμα Tibi

Τον 18ο αιώνα οι **Ισπανοί** γνωστοποίησαν τις αρχές σχεδιασμού τους στις αποικίες τους στις Ηνωμένες Πολιτείες, χτίζοντας αρκετά φράγματα βαρύτητας στο Μεξικό. Επιπλέον, στις βόρειες αποικίες, η κατασκευή φραγμάτων είχε ξεκινήσει πριν από έναν αιώνα. Ωστόσο, κορυφώθηκε μετά το 1850, καθώς ο χρυσός αύξησε απότομα την ανάγκη για παροχή νερού (Jansen, 1980).

1.1.4. Η Περίοδος 19ος και 20ος αιώνας

Μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα ο σχεδιασμός φραγμάτων στηριζόταν στην εμπειρία. Ωστόσο, η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών και η ανάπτυξη δομικών θεωριών συσσωρεύονταν για περισσότερο από 250 χρόνια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα φράγματα βαρύτητας στην Ευρώπη να αναπτύσσουν σταδιακά αρχιτεκτονική μορφή, ενώ παράλληλα η κατασκευή τους άρχισε να ενσωματώνει ορθολογικές προσεγγίσεις (Jansen, 1980). Καθοριστικό ήταν το έργο των M. de Sazilly και Rankine (μέσα 19ου αιώνα), τα οποία συνέβαλαν στην κατανόηση των σχεδιαστικών αρχών και της κατασκευαστικής απόδοσης, ανοίγοντας τον δρόμο προς την επιστημονική ανάλυση των μεγάλων αυτών τεχνικών έργων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εξέλιξη των δομικών υλικών, στα τέλη του 19ου αιώνα, συνετέλεσαν τις επόμενες δεκαετίες στον περιορισμό της κατασκευής λιθόκτιστων φραγμάτων τοιχοποιίας και στην καθιέρωση φραγμάτων βαρύτητας από συμβατικό σκυρόδεμα. Ωστόσο, σύντομα εντοπίστηκαν ζητήματα δυσλειτουργίας, όπως η άκαμπτη συμπεριφορά της κατασκευής και το πρόσθετο θερμοκρασιακό φορτίο από την αντίδραση ενυδάτωσης. Ο παράγοντας αυτός σε συνδυασμό με την υψηλή για την εποχή τιμή οδήγησαν στην κατασκευή των πρώτων τοξωτών και αντιρηδωτών φραγμάτων σκυροδέματος και στην ιδέα της μείωσης της ποσότητας του τσιμέντου στο συνολικό μίγμα.

Οι προηγμένες αρχές σχεδιασμού του τοξωτού φράγματος Hoover στις ΗΠΑ σημάδεψαν τη δεκαετία του '30, καθώς η εφαρμογή των επιστημονικών προσεγγίσεων στα τεχνικά θέματα που προέκυψαν κατά τη φάση κατασκευής συνέβαλαν στη βελτίωση της υπάρχουσας τεχνογνωσίας (Jansen, 1980).



Εικόνα 4: Φράγμα Hoover

Δύο δεκαετίες αργότερα η κατασκευή και η αστοχία του φράγματος Malpasset (1959) ανέδειξε την ανάγκη για εξειδικευμένες γεωλογικές έρευνες στο πλαίσιο εγκατάστασης των φραγμάτων. Μέχρι το 1960, η προσοχή επικεντρωνόταν ολοένα και περισσότερο στην ανάλυση και έρευνα των φορτίων, οδηγώντας στην τεχνολογία των φραγμάτων διπλής καμπυλότητας. Επομένως, τα επόμενα χρόνια σημειώθηκε εγκατάλειψη της κατασκευής των φραγμάτων βαρύτητας και κυριαρχία των γεωφραγμάτων -κατασκευές με μικρότερες απαιτήσεις θεμελίωσης, οικονομικότερα υλικά και ταχύτερους ρυθμούς παραγωγής- λόγω της εξέλιξης των χωματουργικών μηχανημάτων και της γενικευμένης ευαισθητοποίησης σε περιβαλλοντικά ζητήματα. Παρ' όλα αυτά, τα φράγματα σκυροδέματος παρέμειναν στο επίκεντρο των κατασκευών, αποτελώντας πηγή εξέλιξης των υλικών και των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους (Δουλη, 2014).

Το 1970 και ακολούθως το 1980 αναπτύχθηκε η ιδέα για την παραγωγή ενός νέου τύπου σκυροδέματος, που συνδύαζε τα χωματουργικά μηχανήματα με τροποποιήσεις στην αναλογία τσιμέντου και προσαρμογές στην κοκκομετρία των αδρανών. Έτσι, δημιουργήθηκε το Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete), το οποίο αποτέλεσε συνδυασμό όλων των πλεονεκτημάτων του συμβατικού υλικού, ενώ ταυτόχρονα επέτρεπε την επεξεργασία του με τις ταχύτερες, πιο εύκολες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους των γεωφραγμάτων. Μεταξύ των ομοιοτήτων του με το συμβατικό σκυρόδεμα συγκαταλέγονται η διαδικασία ανάπτυξης και ελέγχου των χαρακτηριστικών του μίγματος, η διερεύνηση της θεμελίωσης και η ανάλυση της σταθερότητας της κατασκευής.

Ένα βασικό στοιχείο διαφοροποίησης είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και η αναλογία των συστατικών, που επιτρέπει τη διάστρωση του σε παράλληλες στρώσεις, συνήθως 30 εκατοστών, όπως συμβαίνει με τα εδαφικά υλικά. Το RCC, σε διάφορες παραλλαγές του, είναι το κύριο δομικό υλικό που χρησιμοποιείται στα φράγματα βαρύτητας σήμερα και συνεχίζει να εξελίσσεται (Δουλη, 2014).

1.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ (τύποι)

Η ταξινόμηση των φραγμάτων μπορεί να γίνει ανάλογα με τη χρήση τους, τα υλικά κατασκευής και τη γεωμετρία τους. Επιπλέον, μπορεί να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη λειτουργία τους και το ύψος.

1.2.1. Βάσει της χρήσης τους

Με βάση τη χρήση τους, οι κατηγορίες των φραγμάτων είναι:

- Φράγματα αποθήκευσης νερού.
- Φράγματα εκτροπής. Μετατοπίζουν προσωρινά ή μόνιμα τη ροή του νερού σε κανάλια, αγωγούς ή άλλα σημεία μεταφοράς.
- Φράγματα ρύθμισης για την διαχείριση και αποτροπή πλημμυρών.

Τα **φράγματα αποθήκευσης** είναι αυτά που συγκεντρώνουν το νερό κατά τις βροχοπτώσεις όταν υπάρχει πλεονάζον ποσό με σκοπό την παροχή νερού για χρήση σε περιόδους ανάγκης. Αυτές οι περίοδοι μπορεί να είναι εποχιακές, ετήσιες ή και μεγαλύτερης χρονικής έκτασης. Η διάθεση του αποθηκευμένου νερού πραγματοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, άρδευσης και άλλες εφαρμογές (U.S.B.R., 1987).

Τα **φράγματα εκτροπής** κατασκευάζονται για να εκτρέπουν τη ροή του νερού σε τάφρους, κανάλια και άλλα συστήματα μεταφοράς. Εφαρμόζονται σε εγγειοβελτιωτικά έργα, στην άρδευση, στην τροφοδότηση οικιακών και βιομηχανικών megakaTaCTάσεων (U.S.B.R., 1987).

Τα **ρυθμιστικά φράγματα** εφαρμόζονται για την ανάσχεση των πλημμυρικών φαινομένων και διαχωρίζονται σε δυο τύπους. Στον πρώτο τύπο, η πλημμυρική απορροή συγκρατείται προσωρινά και μέσω ειδικού δίαυλου εξόδου απελευθερώνεται σταδιακά προς τα κατάντη, προκειμένου η απορροή να μην υπερβαίνει την παροχευτικότητα των κατάντη διωρύγων ή καναλιών. Στον δεύτερο τύπο, η πλημμυρική απορροή αποθηκεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο και κατόπιν εκκενώνεται μέσω διαπερατών αντερεισμάτων ή θεμελίωσης. Ορισμένα ρυθμιστικά φράγματα μπορεί επίσης να αποθηκεύουν ιζήματα ή φερτά (U.S.B.R., 1987).

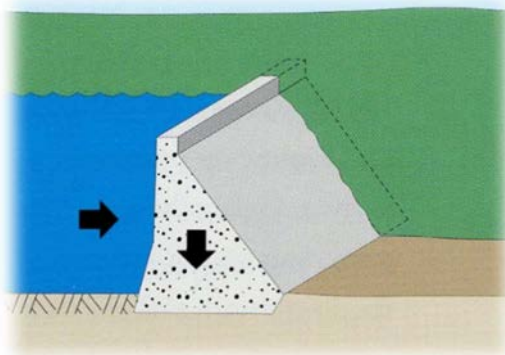
1.2.2. Ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους

Με βάση την κατασκευή και τη γεωμετρία τους τα φράγματα διακρίνονται σε:

- **Άκαμπτα:**
 - Βαρύτητας (σκυρόδεμα)
 - Συμβατικού σκυροδέματος
 - Κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC)
 - Κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (συνήθως αξονοσυμμετρικά)
 - Τοξωτά
 - Αντηριδωτά

Τα **φράγματα βαρύτητας** από σκυρόδεμα αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή φράγματος από σκυρόδεμα. Κτίζονται από κατακόρυφους όγκους σκυροδέματος, ενώ οι αρμοί μεταξύ τους σφραγίζονται με εύκαμπτα υλικά. Στα φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα το ίδιο το βάρος του φράγματος αναλαμβάνει την παραλαβή των δυνάμεων ολίσθησης και ανατροπής που ασκεί το νερό. Οι κυριότερες δυνάμεις που ενεργούν είναι οι υδροστατικές, στην ανάντη και πιθανώς στην κατάντη πλευρά, η άνωση, το ίδιο βάρος του φράγματος και η τριβή με το έδαφος. Η χάραξη του φράγματος σε οριζοντιογραφία μπορεί να είναι είτε ευθεία, είτε καμπύλη, ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής και τις

λειτουργικές ανάγκες που εξυπηρετεί το φράγμα. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται μια τυπική τομή φράγματος βαρύτητας.



Εικόνα 5: Τομή φράγματος βαρύτητας

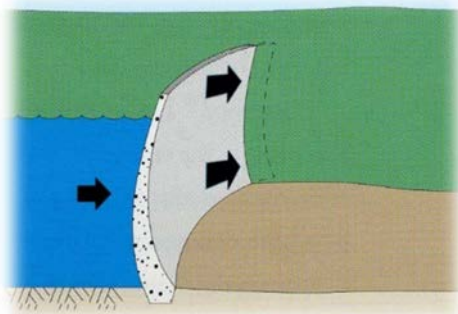
Το φράγμα του Μαραθώνα συνιστά χαρακτηριστικό παράδειγμα φράγματος βαρύτητας στην Ελλάδα (Εικόνα 6), του οποίου η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1929 και εντοπίζεται στη Ν. Αττική. Ο κύριος του έργου είναι η ΕΥΔΑΠ (ΕΕΜΦ, 2013).



Εικόνα 6: Το φράγμα Μαραθώνα

Τα **τοξωτά φράγματα** έχουν σε κάτοψη τοξοειδή μορφή και λειτουργούν ως αμφίπακτα τόξα. Η πίεση του νερού ασκείται στην κυρτή επιφάνεια του φράγματος και μεταφέρεται προς τα πλευρικά τοιχώματα της κοιλάδας, υπό τη μορφή οριζόντιων δυνάμεων. Λόγω του περιορισμένου πάχους, τα τοξωτά φράγματα επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, διότι η ανάντη πλευρά βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού, ενώ η κατόντη είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί

μια διαφοροποίηση στη συστοδιαστολή των δύο επιφανειών που αναπτύσσει σημαντικές εσωτερικές τάσεις στη δομή του σκυροδέματος. Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται μια τομή τοξωτού φράγματος.



Εικόνα 7: Τομή τοξωτού φράγματος

Ένα από τα τοξωτά φράγματα στην Ελλάδα αποτελεί το φράγμα του Ταυρωπού (Εικόνα 8), (Εικόνα 9), το οποίο ολοκληρώθηκε το 1959 και εντοπίζεται στην Περιφερειακή Ενότητα Καρδίτσας . Ο κύριος του έργου είναι η ΔΕΗ Α.Ε. (ΕΕΜΦ, 2013).

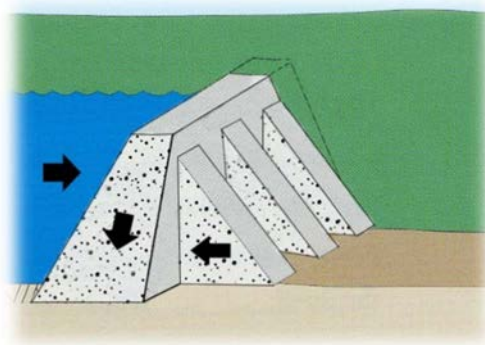


Εικόνα 8: Το φράγμα του Ταυρωπού



Εικόνα 9: Κατά τη κατασκευή του φράγματος

Τα **αντηριδωτά φράγματα** ανήκουν στην κατηγορία των διάκενων φραγμάτων βαρύτητας με αυξημένα κενά και στην πραγματικότητα αποτελούν κούφια φράγματα βαρύτητας. Συγκριτικά με τα φράγματα βαρύτητας, παρουσιάζουν οικονομία όγκου που μπορεί να φτάσει και 1/6 του όγκου ενός αντίστοιχου φράγματος. Αποτελούνται από δύο βασικά μέρη: Το πρώτο μέρος είναι ένα λεπτό τοίχωμα (καλύπτρα), επίπεδο ή καμπύλο με σχετικά μικρό βάρος, τοποθετημένο κάθετα στη ροή και κεκλιμένο ως προς την κατακόρυφο, το οποίο φέρει την υδροστατική πίεση και τη μεταφέρει στις αντηρίδες. Από την άλλη, το δεύτερο στοιχείο είναι οι αντηρίδες, τοποθετημένες παράλληλα προς την κατεύθυνση του ρεύματος, που παραλαμβάνουν τις δυνάμεις από το τοίχωμα και τις μεταφέρουν στο έδαφος. Επιπρόσθετα, στα αντηριδωτά φράγματα δεν προβλέπεται κατασκευή συστήματος αποστράγγισης, όπως εφαρμόζεται στα φράγματα βαρύτητας. Η πιθανή διήθηση δε δημιουργεί κινδύνους υποπίεσεων, εφόσον το νερό εκρέει ελεύθερα στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να προκαλεί δυνάμεις άνωσης κάτω από τη θεμελίωση του φράγματος. Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται η τομή αντηριδωτού φράγματος.



Εικόνα 10: Τομή αντηριδωτού φράγματος

Ένα από τα αντηριδωτά φράγματα στην Ελλάδα είναι το φράγμα του Λάδωνα (Εικόνα 11), η ολοκλήρωση του οποίου έγινε το 1955 και τοποθετείται στην Περιφεριακή Ενότητα Αρκαδίας. Ο κύριος του έργου είναι η ΔΕΗ Α.Ε. (ΕΕΜΦ, 2013).



Εικόνα 11: Το φράγμα Λάδωνα

Αξίζει να αναφερθούν επίσης, μερικά από τα πλεονεκτήματα των αντιριδωτών φραγμάτων. Ένα από αυτά είναι ότι είναι οικονομικότερα έναντι των υπολοίπων διότι αποτελούν ελαφριού τύπου κατασκευές, καθώς και γιατί ο ξυλότυπος που απαιτείται τις περισσότερες φορές μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε όλα τα ανοίγματα. Επιπλέον, το βάρος της κατασκευής είναι αμελητέο και η θεμελίωση κάθε τοίχου και αντηρίδας είναι ανεξάρτητη.

- **Εύκαμπτα:**

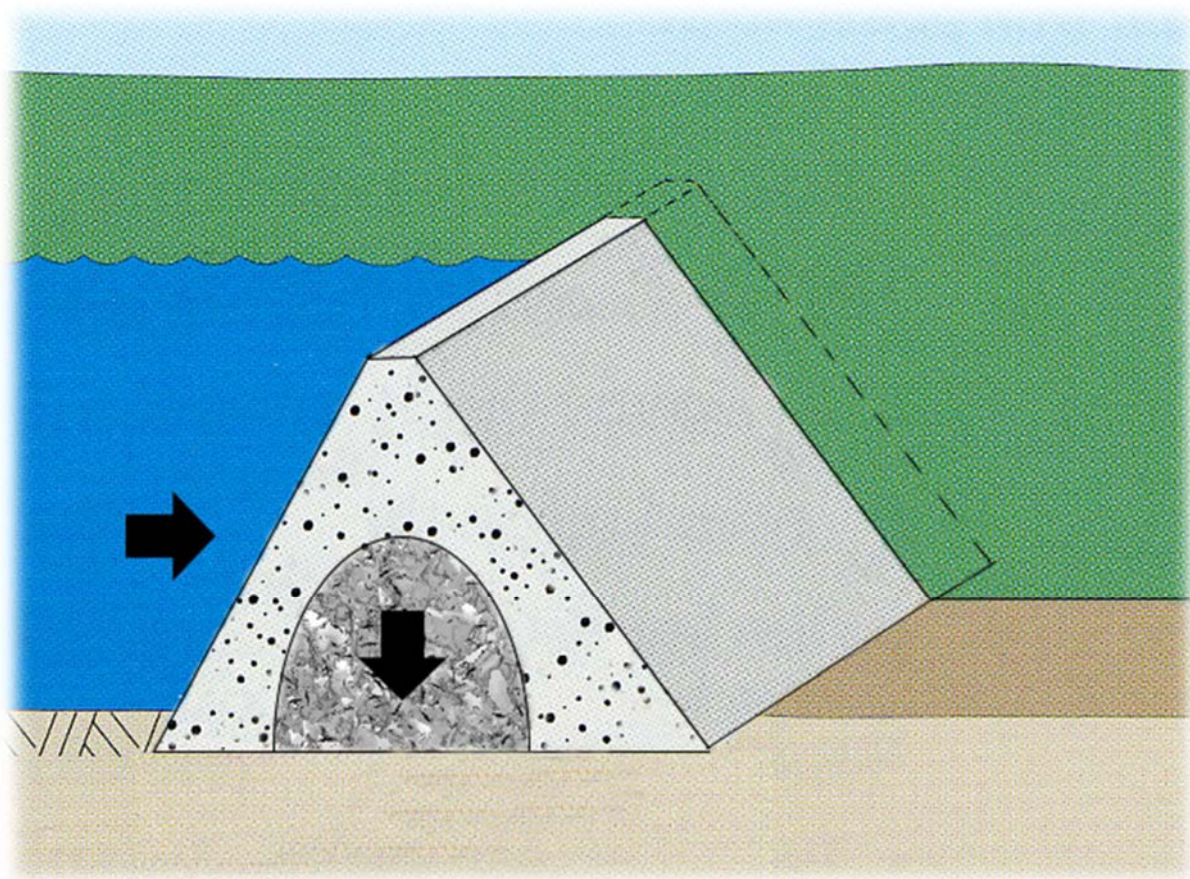
- Χωμάτινα
 - Με διάφραγμα
 - Ομογενή
 - Ετερογενή ή κατά ζώνες
- Λιθόρριπτα
 - Με αργιλικό ή ασφαλικό πυρήνα
 - Με ανάντη πλάκα σκυροδέματος
 - Με ανάντη ασφαλική μεμβράνη ή γεωμεμβράνη

Τα **χωμάτινα φράγματα** κατασκευάζονται με γαιώδη υλικά που διατηρούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, τοποθετούνται κατά επάλληλες στρώσεις και συμπυκνώνονται με μηχανικά μέσα. Αντλούν την αντοχή τους από την τοποθέτηση, το συντελεστή εσωτερικής τριβής και τη συνάφειά τους.

Ακόμη και μετά τη συμπύκνωση, παραμένουν κενά ανάμεσα στους κόκκους, γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία μιας εύπλαστης και ευέλικτης μάζας. Αυτή η μάζα μπορεί να προσαρμοστεί σε ελαφρές υποχωρήσεις του εδάφους, στο οποίο στηρίζεται, χωρίς να προκαλεί κίνδυνο καταστροφής.

Στο εσωτερικό της διατομής του φράγματος και κατά μήκος του άξονά του, δημιουργείται ένα αδιαπέραστο στρώμα, το οποίο αποτελείται από συμπυκνωμένο άργιλο υψηλής πλαστιμότητας. Αυτό το στρώμα καθορίζει τον πυρήνα της διατομής. Από τον πυρήνα και μέχρι ορισμένο βάθος κατασκευάζεται ένα διάφραγμα για να σταματήσει την υπόγεια ροή του νερού.

Γύρω από τον πυρήνα εγκαθίστανται υλικά που δεν είναι απαραίτητα αδιαπέραστα, τα οποία σχηματίζουν το σώμα του φράγματος. Τα χωμάτινα φράγματα είναι προτιμότερα από τα φράγματα από σκυρόδεμα, διότι δεν προϋποθέτουν υψηλής ποιότητας έδαφος. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 12) αντικατοπτρίζεται η τομή ενός χωμάτινου φράγματος.



Εικόνα 12: Τομή χωμάτινου φράγματος

Ένα από τα φράγματα τύπου χωμάτινο στην Ελλάδα είναι το φράγμα του Μόρνου (Εικόνα 13), το οποίο αποπερατώθηκε το 1979 και βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Φωκίδας. Ο κύριος του έργου είναι η ΕΥΔΑΠ. (ΕΕΜΦ, 2013).



Εικόνα 13: Φράγμα Μόρνου

Ως **λιθόρριπτο** χαρακτηρίζεται ένα **φράγμα** του οποίου τα σώματα στήριξης αποτελούνται από κομμάτια βράχων ή κροκάλες. Οι λίθοι που απαρτίζουν το σώμα στήριξης του φράγματος πρέπει να έχουν γωνίες, δηλαδή να εξάγονται από λατομείο. Είναι απαραίτητο να είναι ομοιόμορφου μεγέθους και να μην περιέχουν χαλίκια ή λεπτόκοκκα υλικά, καθώς αυτά θα υποχωρήσουν ανάμεσα στους μεγαλύτερους λίθους, οδηγώντας στην καταστροφή του φράγματος.

Ένα από τα φράγματα με λιθόρριπτη κατασκευή στην Ελλάδα είναι το φράγμα του Θησαυρού (Εικόνα 14) το οποίο αποπερατώθηκε το 1996 και βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Δράμας. Ο κύριος του έργου είναι η ΔΕΗ Α.Ε. (ΕΕΜΦ, 2013).



Εικόνα 14: Το φράγμα Θησαυρού

- **Μικτά ή σύνθετα**

Κατασκευάζονται σε περιοχές με ιδιαίτερα γεωλογικά, μορφολογικά ή οικονομικά χαρακτηριστικά (ή συνδυασμοί των παραπάνω).

1.2.3. Ανάλογα με τη λειτουργία τους

Με βάση τη λειτουργία τους τα φράγματα χωρίζονται σε:

- Φράγματα απλής σκοπιμότητας:
 - Υδροηλεκτρικά
 - Αρδευτικά
 - Υδρευτικά
 - Αντιπλημμυρικά
 - Ανασχετικά
- Φράγματα διπλής σκοπιμότητας: (Συνδυασμός ανά δύο των προηγούμενων).
- Πολλαπλής σκοπιμότητας: (Συνδυασμός ανά τρία ή περισσότερα των προηγούμενων).

Επίσης, τα φράγματα μπορούν να χωριστούν ανάλογα της υδραυλικής τους λειτουργία σε **υπερπηδητά** και **μη υπερπηδητά** φράγματα.

- Τα **υπερπηδητά φράγματα**, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, είναι σχεδιασμένα, ώστε να επιτρέπουν την υπέρβαση της ροής πάνω από τη στέψη τους χωρίς να υφίστανται ζημιές. Σε αυτό τον τύπο φραγμάτων η στέψη τους εκπροσωπεί και τον υπερχειλιστή τους. Συνήθως, τα υπερπηδητά φράγματα είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα.
- Τα **μη υπερπηδητά** φράγματα είναι εκείνα όπου η υπερχείλιση δε συμβαίνει από τη στέψη τους, αλλά από τον υπερχειλιστή ασφαλείας, ο οποίος είναι μια ξεχωριστή κατασκευή. Στην κατηγορία των μη υπερπηδητών φραγμάτων περιλαμβάνονται τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα φράγματα. (U.S.B.R., 1987).

1.2.4. Ανάλογα με το ύψος τους

Με βάση το ύψος, τα φράγματα διαχωρίζονται σε:

- Μικρά φράγματα ύψους <15m.
- Μεγάλα φράγματα ύψους >15m ή 5m < Ύψος < 15m και χωρητικότητα νερού >3.000.000 m³.
- Πολύ μεγάλα φράγματα ύψους >150m.

1.3. ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Τα φράγματα αποτελούν κατασκευές υψίστης σημασίας που κατασκευάζονται κυρίως για την αποθήκευση νερού. Επιπλέον, τα φράγματα και οι ταμιευτήρες παγκοσμίως έχουν διπλή λειτουργία, καθώς αξιοποιούν τα νερά των ποταμών για να προάγουν την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και μετριάζοντας τα δεινά μεγάλου αριθμού του παγκόσμιου πληθυσμού που πλήττεται από πλημμύρες και ξηρασίες.

Σύμφωνα με την Ε.Ε.Μ.Φ., η κατασκευή φραγμάτων παρέχει τους παρακάτω εξής σκοπούς:

- Ύδρευση
- Άρδευση
- Αντιπλημμυρική προστασία
- Υδροηλεκτρική παραγωγή
- Αναψυχή
- Βιομηχανική χρήση
- Φιλικό προς το περιβάλλον

1. Ύδρευση και Βιομηχανική χρήση

Ένα τμήμα αποθήκευσης νερού προορίζεται για την κάλυψη ανθρώπινων αναγκών, αλλά και για δημοτικούς και βιομηχανικούς σκοπούς, λόγω χάρη νερό ψύξης μονάδων θερμικών. Το επεξεργασμένο νερό μπορεί να αξιοποιηθεί για πόση, καθώς συμβάλλει στην εξασφάλιση καθαρού νερού για ανθρώπους και την αποφυγή ασθενειών.

2. Άρδευση

Τα φράγματα συμβάλλουν στην υποστήριξη των καλλιεργειών και των φυτών μέσω της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των φραγμάτων είναι η δυνατότητα ρύθμισης των ροών του νερού σύμφωνα με τις γεωργικές ανάγκες των διαφόρων περιοχών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Έτσι, με την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων νερού διευκολύνουν την άρδευση, επιτρέποντας τις κοινότητες να προγραμματίσουν τη γεωργία τους και τη καλλιέργεια τους ενισχύοντας έτσι την προσφορά τροφίμων.

3. Αντιπλημμυρική προστασία

Κατά τις περιόδους πλημμύρας, τα φράγματα μπορούν να συντελέσουν στον έλεγχο της ροής του νερού μειώνοντας τις πλημμύρες για να βοηθήσουν στη διαχείριση των εκπλύσεων και χωρίς να προκαλέσουν ζημιές σε ζωές και περιουσίες ανθρώπων. Παράλληλα, το νερό που διατηρείται μέσω φραγμάτων και δεξαμενών κατά τη στιγμή των πλημμυρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των απαιτήσεων άρδευσης και πόσιμου νερού και για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

4. Υδροηλεκτρική παραγωγή

Ένα από τα βασικά στοιχεία των φραγμάτων και τα μεγάλα πλεονεκτήματα της βιομηχανίας είναι η χρήση φραγμάτων στην παραγωγή υδροηλεκτρικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Μόλις κατασκευαστεί ένα φράγμα μπορεί να παράξει σταθερή ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να απαιτείται καύσιμο για την παραγωγή της. Ακόμη, τα φράγματα που χρησιμοποιούνται στην υδροηλεκτρική ενέργεια διαρκούν περισσότερο από τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια καθώς, έχουν λιγότερους τεχνικούς περιορισμούς και τα υδροηλεκτρικά μηχανήματα είναι ικανά για γρήγορη εκκίνηση και λήψη στιγμιαίων μεταβολών φορτίου.

5. Αναψυχή

Η δημιουργία φραγμάτων μπορεί να αποτελέσει εξαιρετική πηγή αναψυχής. Μπορούν επίσης, να χρησιμεύσουν ως ψυχαγωγική δραστηριότητα κάνοντας για παράδειγμα, βαρκάδα, κολύμβηση, ψάρεμα κ.λπ. δραστηριότητες που συνδέονται με τις λίμνες.

6. Φιλικό προς το περιβάλλον

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη των φραγμάτων είναι τα φιλικά προς το περιβάλλον χαρακτηριστικά τους. Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πόρων, συνεισφέρει στην ελάττωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως το CO₂.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΤΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΩΣ ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Είναι γνωστό, ότι το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται ως υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως, τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως, αφού η ετήσια κατανάλωση ξεπερνά τα 10 δισεκατομμύρια τόνους. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως: α) στην απόκριση του υλικού στο νερό, στην ανθεκτικότητα σε διάρκεια και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, β) στην δυνατότητα του σκυροδέματος να μορφώνεται σε μια τεράστια ποικιλία σχημάτων και μεγέθων και γ) στο οικονομικό κόστος, στην διαθεσιμότητα των συστατικών του και στη ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του.

2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

«Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα ή αλλιώς το σκυρόδεμα έλασης (rollcrete) αποτελεί σύνθεση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών υλικών και υδραυλικών κονιών, όπως είναι το τσιμέντο. Αναμιγνύονται με νερό και πιθανώς και με πρόσθετα, όπως μειωτικό ύδατος ή μειωτικό ύδατος – επιβραδυντικό πήξεως, για την παραγωγή σκυροδέματος με ελάχιστη συνεκτικότητα και καθιστά δυνατή τη διακίνηση και διάστρωσή του με συνήθη χωματουργικά μηχανήματα (ισοπεδωτές κλπ.), καθώς και τη συμύκνωση με δονητικούς συμπυκνωτήρες» (ΕΛΟΤ, 2009)

2.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

2.2.1. Αντοχή

Τα φράγματα από σκυρόδεμα και RCC υπόκεινται συχνά σε τριβή, ψύξη-απόψυξη και χημική προσβολή, με αποτέλεσμα τη φθορά του σκυροδέματος. Το εσωτερικό του RCC μπορεί να υποστεί ζημιά από παγετό, λόγω κρυστάλλωσης στο σύστημα πόρων. Ενώ, μπορεί να λυθεί με τη χρήση μιγμάτων που συμπαρασύρουν τον αέρα, δημιουργώντας μέγιστο όγκο αέρα για τη διάχυση του νερού. Ένας άλλος τρόπος είναι η επιλογή σκυροδέματος ύψιστης ποιότητας στο εξωτερικό, για να αποτραπεί η ρηγμάτωση επιφανειακά και να γίνει εφικτή η υψηλή αντοχή. Τέλος, είναι γνωστό πως το RCC έχει χαμηλή αντίσταση στην ψύξη-απόψυξη, κι έτσι ο κίνδυνος που ελλοχεύει από παγετό μπορεί να ελαττωθεί με τη βοήθεια συμβατικού σκυροδέματος ή από παράγοντες που συμπαρασύρουν τον αέρα.

2.2.2. Ελαστικές Ιδιότητες

Οι ελαστικές ιδιότητες του σκυροδέματος απαρτίζονται απ' τον συντελεστή ελαστικότητας και τον λόγο Poisson και επηρεάζονται από συνθήκες ,για παράδειγμα : η αντοχή, ο τύπος αδρανών, η ηλικία. Στη σχεδίαση των φραγμάτων επιδιώκεται η ύπαρξη χαμηλού

συντελεστή ελαστικότητας, επομένως η πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών σε συγκεκριμένα σημεία πίεσης μειώνεται. Βέβαια, ως αποτέλεσμα μπορεί να παραμορφωθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα. Συμπληρωματικά, ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας διεξάγεται με δοκιμές μέσω των εργαστηρίων. Ο λόγος Poisson αναφέρεται στην αναλογία μεταξύ της αξονικής και της εγκάρσιας τάσης, αφού προέρχεται από την κατανομή της αξονικής τάσης. Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0,17-0,22.

2.2.3. Πυκνότητα

Η πυκνότητα του κυλινδρούμενου σκυροδέματος εξαρτάται απ' την πυκνότητα του αδρανούς υλικού, την κοκκομετρική κατανομή, το ποσοστό υγρασίας και τον βαθμό συμπίκνωσης. Πολλά μίγματα περιέχουν λιγότερο νερό, καθώς έχουν ανεπαρκή αέρα γεγονός που άγει σε μεγαλύτερη πυκνότητα συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η πυκνότητά του κυμαίνεται από 2.400 kg/m³, σε αντίθεση η πυκνότητα του κυλινδρούμενου σκυροδέματος μπορεί να είναι 1-3% μεγαλύτερη, αγγίζοντας σε τιμές 2.424-2.472 kg/m³.

2.2.4. Θερμικές Ιδιότητες

Οι θερμικές ιδιότητες του κυλινδρούμενου σκυροδέματος περιέχουν την ειδική θερμότητα, την αγωγιμότητα και τον συντελεστή θερμικής διαστολής και είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το σκυρόδεμα, τόσο για το RCC όσο και για το συμβατικό. Οι θερμικές ιδιότητες διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και την περιεκτικότητα των αδρανών και του τσιμεντοειδούς υλικού και για αυτό το λόγο χρίζεται ο έλεγχος του μίγματος. Επιπροσθέτως, το RCC με ελάχιστη περιεκτικότητα σε υλικά, φαίνεται να έχει μειωμένη αύξηση θερμοκρασίας σχετικά με το συμβατικό σκυρόδεμα.

2.2.5. Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα εξαρτάται από το ποσοστό των κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σε ένα μίγμα. Κονιάματα αναγνωρίζονται το τσιμέντο, οι τεχνητές ή φυσικές ποζολάνες, καθώς είναι και τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά. Σημαντικό ρόλο παίζουν τα λεπτόκοκκα υλικά που βρίσκονται στο μίγμα, αντίθετα το τσιμέντο έχει δευτερεύον σημασία, για τα μίγματα που βασίζονται σε γεωτεχνικές προσεγγίσεις. Σύμφωνα με τη θεωρία του παραδοσιακού σκυροδέματος με ξεπλυμένα αδρανή, είναι σημαντικό να διατηρείται ο λόγος νερού προς το τσιμέντο σε χαμηλά επίπεδα, προκειμένου να μειωθεί η διαπερατότητα του μίγματος. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι το φράγμα Willow Creek, το οποίο κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου από σκυρόδεμα RCC με χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο (66 kg/m³). Ως αποτέλεσμα, η διαπερατότητα που επιτεύχθηκε με την προσθήκη ιλύος ήταν της τάξης των 10⁻⁹ m/sec.



Εικόνα 15: Willow Creek dam

2.3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η σύνθεση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος περιλαμβάνει λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή υλικά, καθώς και υδραυλικά κονιάματα όπως το τσιμέντο, το οποίο αναμειγνύεται με νερό και ενδεχομένως με πρόσθετα, όπως επιβραδυντικά πήξης. Το παραγόμενο σκυρόδεμα έχει χαμηλή συνεκτικότητα, επιτρέποντας τη συμπύκνωσή του με δονητικούς συμπυκνωτές και τη διάστρωσή του με κοινά χωματουργικά μηχανήματα. Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μειγμάτων RCC είναι τύπου Portland και μπορεί να συνδυαστεί με άλλες υδραυλικές κονίες, όπως ποζολάνες ή ιπτάμενη τέφρα. Η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασιακής αύξησης κατά τη διάρκεια της πήξης του σκυροδέματος, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την αντοχή του (Κολλάτου, 2017).

Τα μείγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους: αυτά με υψηλό ποσοστό κονιαμάτων (High-paste RCC) και αυτά με χαμηλό ποσοστό (Low-paste RCC). Κάθε τύπος έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Τα μείγματα με υψηλότερο ποσοστό κονιαμάτων συνήθως έχουν αυξημένο κόστος και απαιτούν αυστηρές διαδικασίες διαβάθμισης και πλύσης των αδρανών. Αντίθετα, τα μείγματα με χαμηλότερο ποσοστό κονιαμάτων ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προβλήματα διαχωρισμού, να παρουσιάσουν αυξημένη διαπερατότητα και να απαιτούν την προσθήκη λεπτόκοκκου κλάσματος αδρανών για να διασφαλιστεί η ομοιογενής δομή του σκυροδέματος (Κολλάτου, 2017). Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά τα υλικά κατασκευής κυλινδρούμενου σκυροδέματος:

2.3.1. Νερό

Το νερό που προορίζεται για την παραγωγή του RCC θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές του πρότυπου ΕΛΟΤ EN 1008. Γενικά, κάθε νερό που συναντάτε στη φύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή σκυροδέματος, εφόσον αυτό δεν περιέχει επιβλαβείς προσμίξεις, ή υπάρχουν σε μικρές ποσότητες που δεν βλάπτουν αρνητικά το σκυρόδεμα.

2.3.2. Αδρανή Υλικά

Τα αδρανή υλικά είναι κοκκώδη υλικά που προκύπτουν από τη φυσική διάσπαση πετρωμάτων, είτε συμπαγών είτε πορωδών ή και από τεχνητό θρυμματισμό. Αναλόγως με το μέγεθος των κόκκων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) Τα λεπτόκοκκα αδρανή(άμμος), β) τα χονδρόκοκκα αδρανή(σκύρα). Είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι τα αδρανή υλικά δεν αλληλεπιδρούν με τα αλκαλικά στοιχεία του τσιμέντου. Η διαβάθμιση των αδρανών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή του κυλινδρούμενου σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 933.01, 933.02) θα πρέπει να είναι ομαλή και να εμπίπτει στη ζώνη που καθορίζεται απ' τον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 1. Όρια διαβάθμισης αδρανών υλικών

Κόσκινα ανοίγματος mm	63 mm	22.4 mm	2 mm	0.063 mm
Ποσοστό διερχόμενο [%]	100	70-82	25-35	2-6

Αν δεν υπάρχει διαφορετική πρόβλεψη από τη μελέτη του φράγματος, τα αδρανή θα ανήκουν στις παρακάτω κατηγορίες (Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13242):

- *FL35: Δείκτης πλακοειδούς να ισούται με 35 (ΕΛΟΤ EN 933.03)*
- *LA40: Αντοχή σε απότριψη κατά Los Angeles κλάσματος 10/14 έως 40% (ΕΛΟΤ EN 1097.02)*
- *WA242: Απορρόφηση νερού μετά από εμβάπτισης 24h ίση προς 2% (ΕΛΟΤ EN 1097.06)*
- *MS18: Δοκιμή υγείας πετρώματος με τη μέθοδο θειικού μαγνησίου δείκτης 18 (ΕΛΟΤ EN 1367.02).*

2.3.3. Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται στο μίγμα κυλινδρούμενου σκυροδέματος είναι τύπου Portland CEM IV/B ή CEM II/B με κατηγορία αντοχής 32.5 N σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 197.01. Το τσιμέντο τύπου Portland που εφαρμόζεται στην Ελλάδα είναι ένα βιομηχανικό προϊόν σε μορφή γκριζοπράσινης σκόνης, το οποίο απαρτίζεται από κόκκους με διαστάσεις 1-50 μm. Η παρασκευή του γίνεται με άλεσμα σβώλων, γνωστών ως κλίνκερ, όπου έχουν διάμετρο μερικών εκατοστών, σε συνδυασμό με μικρές ποσότητες προσμίξεων, όπως γύψος μηλαϊκή γη και ιπτάμενη τέφρα (Τριανταφύλλου, 2017).

2.3.4. Ιπτάμενη τέφρα

Η Ιπτάμενη τέφρα (ΕΛΟΤ EN 450.01) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μείγμα είτε ως πρόσμικτο σκυροδέματος, είτε ως υποκατάστατο μέρος του τσιμέντου. Παράγεται μέσω ηλεκτροστατικής ή μηχανικής κατακρήμνισης των αιωρούμενων σωματιδίων που προέρχονται απ'τα καυσαέρια κλιβάνων που καίνε κονιοποιημένο άνθρακα. Είναι κρίσιμο να αποφεύγεται η χρήση τέφρας που έχει παραχθεί με άλλες μεθόδους σε τσιμέντο που πληροί τις προδιαγραφές του ΕΛΟΤ EN 197-1.

Η Ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χωριστεί είτε σε πυριτική, είτε σε ασβεστούχος τέφρα. Στην περίπτωση της πυριτικής, διαθέτει ποζολανικές ιδιότητες, ενώ στην περίπτωση της ασβεστούχου μπορεί να έχει και υδραυλικές ιδιότητες. Η απώλεια πύρωσης της ιπτάμενης τέφρας, όπως προσδιορίζεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 196-2, δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 5,0 % κατά βάρος.

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα λεπτόκοκκο, ποζολανικό υλικό που παράγεται ως παραπροϊόν από την καύση λιγνίτη ή άνθρακα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Χρησιμοποιείται ευρέως ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα, με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της τσιμεντοβιομηχανίας. Περιέχει κυρίως:

- ✓ Πυρίτιο (SiO_2)
- ✓ Αργίλιο (Al_2O_3)
- ✓ Σίδηρο (Fe_2O_3)
- ✓ Ασβέστιο (CaO) — ανάλογα με τον τύπο της τέφρας (F ή C)

Η τέφρα δρα ως ποζολάνη, δηλαδή αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, σχηματίζοντας δευτερογενή C-S-H (πυριτικό ασβέστιο υδρίτη) — το κύριο στοιχείο που προσδίδει αντοχή στο σκυρόδεμα.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της ιπτάμενης τέφρα συνοψίζονται παρακάτω:

- ✓ Βελτιώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος
- ✓ Αυξάνει την τελική αντοχή και την πυκνότητα του υλικού
- ✓ Μειώνει την θερμοκρασία ενυδάτωσης
- ✓ Αυξάνει την ανθεκτικότητα σε θειικά άλατα και επιθετικούς παράγοντες
- ✓ Προάγει τη βιωσιμότητα, μειώνοντας την ποσότητα τσιμέντου και επαναχρησιμοποιώντας βιομηχανικά απόβλητα

Οι προβληματισμοί και περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση της τέφρας και αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία αφορούν στα εξής:

- ✓ Απαιτεί περισσότερο χρόνο για ανάπτυξη αντοχών
- ✓ Ποιότητα και σύσταση μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την πηγή
- ✓ Δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου απαιτείται άμεση αντοχή

Σε ό,τι αφορά στην περιβαλλοντική διάσταση, η χρήση ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα μειώνει τις εκπομπές CO₂ και συμβάλλει στην ανακύκλωση βιομηχανικών αποβλήτων, προωθώντας την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη ανάπτυξη στον κατασκευαστικό τομέα. Γενικότερα, η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ένα πολύτιμο υλικό για τη βελτίωση της ποιότητας και της βιωσιμότητας του σκυροδέματος. Η ορθή και ελεγχόμενη χρήση της παρέχει τεχνικά και περιβαλλοντικά οφέλη, ιδίως σε μεγάλης κλίμακας έργα υποδομής.

2.3.5. Ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι κονίες, οι οποίες εντάσσονται στον κλάδο των υδραυλικών κονίων. Αποτελούνται κυρίως από πυριτικά υλικά (SiO₂) και περιέχουν σε μικρότερη αναλογία οξείδια του αργιλίου, ασβεστίου, σιδήρου κ.α. Παρά την περιορισμένη τους υδραυλικότητα, οι ποζολάνες ενυδατώνονται όπως τα τσιμέντα όταν αναμειγνύονται με κάποιο φυσικό διεγερτή, για παράδειγμα γύψο ή τσιμέντο. Επιπλέον, διαχωρίζονται σε φυσικές ποζολάνες, όπως οι ηφαιστειογενείς (π.χ. θηραϊκή γη) και οι ιζηματογενείς (π.χ. γη διατόμων) και σε τεχνητές, οι οποίες προκύπτουν απ' τη θερμική επεξεργασία αργών υλικών που έχουν CaO και υδραυλικούς παράγοντες, για παράδειγμα η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία καμίνου και η πυριτική παιπάλη.

Ειδικότερα, οι ποζολάνες είναι φυσικά ή τεχνητά υλικά που περιέχουν διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) και οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃), τα οποία σε λεπτοτριμμένη μορφή δεν είναι συγκολλητικά από μόνα τους, αλλά όταν έρθουν σε επαφή με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂), που προκύπτει από την ενυδάτωση του τσιμέντου, συμμετέχουν σε ποζολανικές αντιδράσεις και παράγουν ενώσεις τύπου C-S-H, που προσδίδουν αντοχή και στεγανότητα στο σκυρόδεμα.

Οι ποζολάνες πήραν το όνομά τους από την περιοχή Pozzuoli κοντά στη Νάπολη της Ιταλίας, όπου οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν φυσικές ηφαιστειακές στάχτες για να κατασκευάσουν εξαιρετικά ανθεκτικά έργα, όπως το Πανθεόν και υδραγωγεία που διατηρούνται μέχρι σήμερα. Περαιτέρω, οι ποζολάνες διακρίνονται στους εξής τύπους:

1. Φυσικές Ποζολάνες

- Ηφαιστειακή τέφρα
- Τούφες
- Διογκωμένη περλίτης
- Διάτομα γαία

2. Τεχνητές Ποζολάνες

- - Ιπτάμενη τέφρα (Fly Ash)
- - Σκωρία υψικαμίνου (GGBFS)
- - Καπνός πυριτίου (Silica Fume)
- - Μετακαολίνη

Στα πλεονεκτήματα της χρήσης των ποζολανών συγκαταλέγονται τα εξής:

- Μειώνουν την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και τις εκπομπές CO₂
- Βελτιώνουν τη μακροχρόνια αντοχή
- Αυξάνουν την ανθεκτικότητα σε χημικές προσβολές
- Μειώνουν τη θερμοκρασία ενυδάτωσης
- Βελτιώνουν την πυκνότητα και τη στεγανότητα του σκυροδέματος

Οι περιορισμοί, οι οποίοι άπτονται της χρήσης των ποζολανών, συνίστανται στα παρακάτω:

- Ποιοτική αστάθεια, ειδικά σε φυσικές ποζολάνες
- Περισσότερος χρόνος για την ανάπτυξη αντοχών
- Απαιτείται μελέτη για συγκεκριμένες εφαρμογές

Περιβαλλοντικά, η χρήση ποζολανών προάγει τη βιωσιμότητα στη δόμηση, μειώνοντας τη χρήση τσιμέντου, αξιοποιώντας βιομηχανικά παραπροϊόντα και ενισχύοντας την κυκλική οικονομία.

Γενικότερα, οι ποζολάνες αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος και για την επίτευξη βιώσιμων κατασκευών. Η ορθή χρήση τους εξασφαλίζει τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

2.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η μέθοδος παρασκευής κυλινδρούμενου σκυροδέματος γίνεται με τη διαδικασία κοσκίνισματος των αδρανών υλικών, έτσι ώστε να συγκεντρωθούν οι απαραίτητες ποσότητες σε κάθε κόσκινο. Έπειτα, με τη χρήση ηλεκτρονικής ζυγαριάς, ζυγίζονται τα υλικά που απαιτούνται για την παρασκευή μιας παρτίδας και τοποθετούνται σε κυλινδρικό δοχείο.

Στο κυλινδρικό δοχείο, πραγματοποιείται ξηρή ανάδευση των αδρανών υλικών με τη βοήθεια ηλεκτροκίνητου αναμικτήρα, ενώ στη συνέχεια προστίθενται το τσιμέντο και το νερό. Όσο αναφορά το χρόνο ανάμειξης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 1 λεπτό και συνήθως μετράται μετά την προσθήκη όλων των υλικών στον αναμικτήρα.

Η παρασκευή του κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete - RCC) διαφέρει σημαντικά από εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος, κυρίως λόγω της ξηρότερης σύστασης και της μη συμβατικής τοποθέτησης και συμπίκνωσης. Ακολουθεί η βασική μεθοδολογία:

1. Σχεδιασμός Μείγματος (Mix Design)

Η μελέτη σύνθεσης του RCC είναι κρίσιμη. Το μείγμα αποτελείται από:

- Αδρανή υλικά (άμμος, χαλίκι, θραυστά)

- Τσιμέντο (σε μικρότερη αναλογία από το κοινό σκυρόδεμα)
- Πολύ μικρή ποσότητα νερού
- Ενδεχομένως πρόσθετα, όπως ιπτάμενη τέφρα ή σκωρίες για βελτίωση αντοχής και ανθεκτικότητας

Στόχος είναι να επιτευχθεί ένα πυκνό, «ξηρό» μείγμα που μπορεί να διαστρωθεί και να συμπτυκνωθεί εύκολα χωρίς αποκόλληση.

2. Ανάμιξη

Το RCC αναμιγνύεται σε κεντρικούς αναμκτήρες μεγάλης χωρητικότητας (τύπου pugmill ή twin-shaft), ώστε να διασφαλιστεί ομοιογένεια στο μείγμα. Η ανάμιξη είναι σύντομη αλλά έντονη, ώστε να προληφθούν σβώλοι.

3. Μεταφορά

Το μείγμα μεταφέρεται με ταινιόδρομους, φορτηγά ή ειδικά τροφοδοτικά οχήματα απευθείας στο εργοτάξιο. Η μεταφορά πρέπει να γίνεται άμεσα, διότι το RCC δεν έχει ρευστότητα.

4. Διάστρωση

Η διάστρωση γίνεται με οδοστρωτήρες διάστρωσης (pavers) παρόμοιους με αυτούς που χρησιμοποιούνται στην άσφαλτο. Η διαδικασία πρέπει να είναι συνεχής, χωρίς διακοπές, για αποφυγή αρμών.

5. Συμπύκνωση

Το μείγμα συμπτυκνώνεται άμεσα μετά τη διάστρωση με βαρείς δονητικούς οδοστρωτήρες, εξασφαλίζοντας την επιθυμητή πυκνότητα και αντοχή. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη, καθώς το RCC δεν περιέχει αρκετό νερό για αυτοσυμπύκνωση.

6. Συντήρηση (Curing)

Μετά τη συμπύκνωση, η επιφάνεια πρέπει να προστατεύεται από την εξάτμιση με χρήση νερού, ψεκασμού ή κάλυψης με φύλλα πολυαιθυλενίου. Η διάρκεια της συντήρησης εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες (συνήθως 7 ημέρες).

Τα σημεία, στα οποία θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι τα κάτωθι:

- Αποφυγή καθυστερήσεων στη διάστρωση
- Διατήρηση σταθερότητας στο μείγμα

- Συνεχής έλεγχος υγρασίας για αποφυγή ρωγμών

2.5. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι εργαστηριακές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τις συνθέσεις μιγμάτων RCC και για τον έλεγχο της ποιότητάς τους στηρίζονται σε τυπικές μεθόδους της εδαφομηχανικής.

Ο ποιοτικός έλεγχος του RCC περιλαμβάνει τις εξής δοκιμές :

- α) Υγρασία νωπού μίγματος
- β) Συνεκτικότητα RCC
- γ) Έλεγχοι συμπίκνωσης
- δ) Αντοχή RCC

2.5.1.Υγρασία νωπού μίγματος

Πριν την έναρξη της διαδικασίας παραγωγής RCC γίνεται προσδιορισμός της υγρασίας των αδρανών RCC στους χώρους αποθήκευσης και σε τακτά χρονικά διαστήματα εντός της ημέρας. Σύμφωνα με τις υγρασίες των αδρανών γίνεται προσαρμογή της απαιτούμενης ποσότητας νερού, άμμου και χαλικιών. Οι έλεγχοι υγρασίας νωπών μιγμάτων RCC πρέπει να γίνονται συνεχώς, τόσο κατά την παραγωγή, όσο και κατά τη διάστρωση του RCC.

2.5.2. Συνεκτικότητα RCC

Η συνεκτικότητα είναι η πιο σημαντική ιδιότητα των μιγμάτων RCC. Μίγματα με την κατάλληλη συνεκτικότητα διευκολύνουν τη διαδικασία διάστρωσης και συμπίκνωσης χωρίς να παρατηρείται διαχωρισμός. Αξίζει να σημειωθεί, πως η μέτρηση της συνεκτικότητας πραγματοποιείται με την συσκευή Vebe με βάση την προδιαγραφή ASTM C 1170. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της εργασιμότητας πολύ στεγνών μιγμάτων σκυροδέματος που παρουσιάζουν μηδενική κάθιση. Επίσης, ο προσδιορισμός συνεκτικότητας των δοκιμαστικών μιγμάτων στο εργαστήριο πραγματοποιείται με αναπροσαρμογή των συστατικών ανάλογα με το βάρος του αδρανούς υλικού και του νερού, κρατώντας σταθερή την ποσότητα του τσιμέντου . Κατά τη διαδικασία κατασκευής, το μείγμα RCC ελέγχεται συνεχώς καθώς η δοκιμή είναι απλή και δεν προκαλεί καθυστερήσεις.

2.5.3. Έλεγχοι συμπίκνωσης

Η συμπίκνωση του RCC προσδιορίζεται ως ποσοστό της υγρής πυκνότητας επί τόπου, προς την υγρή πυκνότητα που λαμβάνεται στο εργαστήριο το οποίο δοκιμάζεται σε τρεις στρώσεις του ίδιου μείγματος υλικών χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό σφυρί κρούσης σε κυλινδρικές μήτρες 150 mm x 300 mm. Επιπρόσθετα, η υγρή πυκνότητα προσδιορίζεται με

την μέθοδο της άμμου και το καθορισμένο βαθμό συμπίκνωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 95%.

2.5.4. Αντοχή RCC

Όλες οι δοκιμές αντοχής σε θραύση γίνονται σε κυλινδρικά δοκίμια σκληρυθέντος RCC διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm τα οποία παρασκευάζονται με σφυρί κρούσης σε τρεις στρώσεις όπως περιγράφεται παραπάνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία καταγραφή των φραγμάτων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, τόσο σε διεθνές επίπεδο, όσο και στην Ελλάδα.

3.1. Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος σε παγκόσμιο επίπεδο

Τα δέκα ψηλότερα φράγματα που έχουν κατασκευαστεί από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα παγκοσμίως παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2. Τα ψηλότερα φράγματα από RCC παγκοσμίως

Όνομα	Χώρα	Χρήση*	Ποταμός	Ύψος (m)	Μήκος (m)	Ωφέλιμος Όγκος (x10 ⁶ m ³)	Όγκος RCC (x10 ³ m ³)	Έτος περάτωσης
Gibe III	Αιθιοπία	P	Omo	246	630	14.690	6.200	2016
Longtan	Κίνα	Υ-P-Π	Hongshui	217	832	16.210	4.623	2009
Huangdeng	Κίνα	P-A	Lancang	203	-	1.613	2.753	2019
Guangzhao	Κίνα	P	Beipan	201	412	3.245	2.420	2009
Miel I	Κολομβία	P	La Miel	188	345	565	1.669	2002
Nam Theum 1	Λάος	P	Nam Kading	187	772	3.009	4.141	2022
Ayvali	Τουρκία	P	Oltu	177	405	308	1.650	2015
Alpe Gera	Ιταλία	P	Cormor	174	-	-	-	1964
Guandi	Κίνα	P	Yalong	168	516	760	2.970	2013
Ralco	Χιλή	P	Bio-Bio	155	360	1.200	1.596	2004

(*)Υ: Ύδρευση, Α: Άρδευση, Ρ: Παραγωγή Ηλεκτρικού Ρεύματος, Π: Ανάσχεση Πλημμυρικών Απορροών

Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες των φραγμάτων:



Εικόνα 16: Φράγμα Gibe III (Αιθιοπία)



Εικόνα 17: Φράγμα Longtan (Κίνα)



Εικόνα 18: Φράγμα Miel I (Κολομβία)



Εικόνα 19: Φράγμα Nam Theun 1 (Λάος)



Εικόνα 20: Φράγμα Ralco (Χιλή)



Εικόνα 21: Φράγμα Ayvali (Τουρκία)

Στη συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας με τα μεγαλύτερα φράγματα που έχουν κατασκευαστεί από RCC, με βάση τον ωφέλιμο όγκο τους :

Πίνακας 3. Τα μεγαλύτερα παγκοσμίως σε ωφέλιμο όγκο φράγματα από RCC

Όνομα	Χώρα	Χρήση *	Ποταμός	Ύψος (m)	Μήκος (m)	Ωφέλιμος Όγκος (x10 ⁶ m ³)	Όγκος RCC (x10 ³ m ³)	Έτος περάτωσης
Bureyskaya	Ρωσία	P-Π	Bureya	139	810	21.000	709	2009
Gibe III	Αιθιοπία	P	Omo	246	630	14.690	6.200	2016
Bui	Γκάνα	P-A	Bui	108	493	12.570	830	2014
Murum	Μαλαισία	P	Murum	146	440	12.043	1.520	2015
Tuoba	Κίνα	P	Langcang	158	508	10.394	-	2016
Wuchuanshaba	Κίνα	P	Wujlang	87	-	9.940	-	2007

(*)Y : Ύδρευση, A: Άρδευση, P: Παραγωγή Ηλεκτρικού Ρεύματος, Π: Ανάσχεση Πλημμυρικών Απορροών

3.2. Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος στον ελλαδικό χώρο

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα φράγματα που έχουν κατασκευαστεί από RCC στην Ελλάδα:

Πίνακας 4. Τα πέντε (5) φράγματα που έχουν κατασκευαστεί από RCC στην Ελλάδα

Όνομα	Χρήση(*)	Ποταμός	Ύψος (m)	Μήκος (m)	Ωφέλιμος Όγκος (x10 ⁶ m ³)	Όγκος RCC (x10 ³ m ³)
Πλατανόβρυση	P-A	Νέστος	95	305	84	420
Μαραθίου	Y-A	Μαράθι	30	265	3	32
Άνω Μερά	Y-A	Άνω Μερά	31	170	1	49
Στενό	Y-A	Στενό	29	186	0,7	56
Βαλσαμιώτης	A	Βαλσαμιώτης	67	335	6	640

(*)Υ: Ύδρευση, Α: Άρδευση, Ρ: Παραγωγή Ηλεκτρικού Ρεύματος, Π: Ανάσχεση Πλημμυρικών Απορροών

3.2.1. Φράγμα Πλατανόβρυσης

Το φράγμα αυτό βρίσκεται στο νομό Δράμας και μερικά χαρακτηριστικά του είναι:



Εικόνα 22:Φράγμα Πλατανόβρυσης

Τύπος:	RCC
Τροφοδοσία:	Ποταμός Νέστος
Ύψος(m):	95
Μήκος(m):	305
Όγκος αναχώματος($\times 10^3 \text{ m}^3$):	450
Ωφέλιμος όγκος($\times 10^6 \text{ m}^3$):	84
Επιφάνεια ταμιευτήρα:	3,3 km^2
Χρήση:	Άρδευση – Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας
Ιδιοκτήτης:	ΔΕΗ
Κατασκευή:	Κ/Ξ ΑΕΓΕΚ ΑΕ-HIDROGRANDJA
Έτος περάτωσης:	1999
Δαπάνη κατασκευής ($\times 10^6$):	10.7
Τσιμέντο (kg/m^3):	50 (Portland CEM142,5)

3.2.2. Φράγμα Μαραθίου

Τα χαρακτηριστικά του φράγματος το οποίο βρίσκεται στο νομό Κυκλάδων στη νήσο Μύκονο είναι :



Εικόνα 23:Φράγμα Μαραθίου

Τύπος:	RCC με στεγανωτική πλάκα σκυροδέματος ανάντη
Τροφοδοσία:	Από χείμαρρο μαράθι
Ύψος(m):	30
Μήκος(m):	265
Όγκος αναχώματος($\times 10^3 \text{ m}^3$):	32.500
Ωφέλιμος όγκος($\times 10^6 \text{ m}^3$):	3.000.000
Επιφάνεια ταμιευτήρα:	500.000 m^2
Χρήση:	Άρδευση – Ύδρευση
Ιδιοκτήτης:	ΥΠ.ΑΓ.ΑΝ.
Κατασκευή:	Κ/Ξ Σαραντόπουλος
Έτος περάτωσης:	1992
Δαπάνη κατασκευής ($\times 10^6$):	3.442.400
Τσιμέντο (kg/m^3):	55 (Portland II/35)

3.2.3. Φράγμα Άνω Μεράς

Τα χαρακτηριστικά του φράγματος όπου εντοπίζεται στις Κυκλάδες στη νήσο Μύκονο είναι:



Εικόνα 24: Φράγμα Άνω Μεράς

Τύπος:	RCC με στεγανωτική πλάκα σκυροδέματος ανάντη
Τροφοδοσία:	Από χείμαρρο Άνω Μερά
Ύψος(m):	31
Μήκος(m):	170
Όγκος αναχώματος($\times 10^3 \text{ m}^3$):	44.000
Ωφέλιμος όγκος($\times 10^6 \text{ m}^3$):	1.000.000
Επιφάνεια ταμιευτήρα:	150.000 m^2
Χρήση:	Άρδευση – Ύδρευση
Ιδιοκτήτης:	ΥΠ.ΑΓ.ΑΝ.
Κατασκευή:	Κ/Ξ Διάκεντρος, Σαραντόπουλος
Έτος περάτωσης:	1997
Δαπάνη κατασκευής ($\times 10^6$):	3.259.000
Τσιμέντο (kg/m^3):	55 (Portland II/35)

3.2.4. Φράγμα Στενό

Το φράγμα που τοποθετείται στις Κυκλάδες στη νήσο Σέριφο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:



Εικόνα 25:Φράγμα Στενό

Τύπος:	RCC με στεγανωτική πλάκα σκυροδέματος ανάντη
Τροφοδοσία:	Από χείμαρρο Στενό
Ύψος(m):	29
Μήκος(m):	186
Όγκος αναχώματος($\times 10^3 \text{ m}^3$):	70.000
Ωφέλιμος όγκος($\times 10^6 \text{ m}^3$):	720.000
Επιφάνεια ταμιευτήρα:	125.000 m^2
Χρήση:	Άρδευση – Ύδρευση
Ιδιοκτήτης:	ΥΠ.ΑΓ.ΑΝ.
Κατασκευή:	EDRACO ATE
Έτος περάτωσης:	2003
Δαπάνη κατασκευής ($\times 10^6$):	4.525.600
Τσιμέντο (kg/m^3):	55 (Portland II/35)

3.2.5. Φράγμα Βαλσαμιώτη

Τα χαρακτηριστικά του φράγματος που βρίσκεται στο νομό Χανίων είναι (Ο.Α.Κ. Α.Ε., 2018):



Εικόνα 26: Φράγμα Βαλσαμιώτη

Τύπος:	RCC με στεγανωτική πλάκα σκυροδέματος ανάντη
Τροφοδοσία:	Από χείμαρρο Βαλσαμιώτη
Ύψος(m):	67
Μήκος(m):	335
Όγκος αναχώματος($\times 10^3 \text{ m}^3$):	600
Ωφέλιμος όγκος($\times 10^6 \text{ m}^3$):	6
Επιφάνεια ταμιευτήρα:	2.850 m^2
Χρήση:	Άρδευση – Ύδρευση
Ιδιοκτήτης:	ΟΑΔΥΚ/ΥΠ.ΑΓ.ΑΝ.
Κατασκευή:	J&P AVAX
Έτος περάτωσης:	2014
Δαπάνη κατασκευής ($\times 10^6$):	≈ 40
Τσιμέντο (kg/m^3):	50 (CEMII-45)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΟΙΝΟΥ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των ιδιοτήτων και των περιβαλλοντικών επιδράσεων που άπτονται της χρήσης του κοινού και του κυλινδρούμενου σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα αποτελεί βασικό δομικό υλικό σε κατασκευαστικά έργα παγκοσμίως. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για βιώσιμες λύσεις, έχουν αναδειχθεί εναλλακτικά είδη σκυροδέματος, όπως το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete - RCC).

4.1. Συγκριτική διερεύνηση ιδιοτήτων κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Το συμβατικό σκυρόδεμα αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά, νερό, τσιμέντο και συνήθως πρόσμικτα. Το RCC παρότι έχει παρόμοια σύνθεση με το συμβατικό σκυρόδεμα, η διαφορά τους εντοπίζεται στα λεπτόκοκκα υλικά που το αποτελούν και στη χρήση λιγότερου νερού, με αποτέλεσμα το μείγμα να είναι πιο ξηρό.

Το συμβατικό σκυρόδεμα όσο αναφορά το κόστος κατασκευής είναι υψηλό συγκριτικά με το RCC, εξαιτίας του χρόνου και την εργασία που απαιτεί, καθώς αξίζει να σημειωθεί ότι διαφέρει η μεταφορά του υλικού, διότι το RCC απλώνεται με οδοστρωτήρες, ενώ το συμβατικό μεταφέρεται με αντλίες σκυροδέματος.

Επιπρόσθετα, το RCC εμφανίζει μειωμένη συρρίκνωση και ερπυσμό, στοιχείο που συνεισφέρει στη μακροβιότητά του, σε σχέση με το κοινό σκυρόδεμα. Τέλος η επιφάνεια του συμβατικού είναι πιο λεία, σε αντίθεση με την επιφάνεια του RCC, η οποία μπορεί να έχει υποστεί μηχανική επεξεργασία, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής.

Πίνακας 5. Συγκριτική διερεύνηση ιδιοτήτων κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Ιδιότητες κοινού σκυροδέματος	Ιδιότητες κυλινδρούμενου σκυροδέματος
Παρασκευάζεται από χονδρόκοκκα υλικά, τσιμέντο, νερό, συνήθως με πρόσμικτα	Έχει παρόμοια σύνθεση, αποτελείται από λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα υλικά, αλλά με λιγότερο νερό (δηλαδή είναι ξηρότερο)
Μειωμένη ικανότητα σε κρούση και ανθεκτικότητα	Μακροχρόνια ανθεκτικότητα
Έχει μικρή αντοχή σε φθορές τριβής	Αντιστέκεται στην τριβή, ακόμη και κάτω από βαριά φορτία

Το κόστος είναι υψηλό, λόγω εργασίας και χρόνου	Χαμηλό κόστος κατασκευής
Κατάλληλο κυρίως για στατικά φορτία	Χρησιμοποιείται ευρέως για λιμάνια, δρόμους, φράγματα, στρατιωτικές εγκαταστάσεις
Πραγματοποιείται έλεγχος στο εργαστήριο κυρίως κατά την παραγωγή του	Πραγματοποιείται έλεγχος κυρίως στο εργοτάξιο, αφού τοποθετηθεί
Γίνεται χρήση δονητών για να αποκτηθεί μεγαλύτερη πυκνότητα σκυροδέματος	Δεν χρησιμοποιούνται δονητές, αντιθέτως τοποθετείται σε στρώσεις και συμπυκνώνεται με οδοστρωτήρες
Μεταφέρεται στη θέση με αντλία σκυροδέματος	Μεταφέρεται με ανατρεπόμενα φορτηγά και απλώνεται στη θέση με οδοστρωτήρες
Η διάρκεια ζωής του είναι 1,30 ώρες από την φόρτωση του στο εργοστάσιο	Το RCC έχει μικρότερη διάρκεια ζωής, λόγω χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό
Τελική επιφάνεια είναι πιο λεία	Τελική επιφάνεια μπορεί να είναι φυσική, να έχει υποστεί μηχανική επίστρωση
Αυξημένη συρρίκνωση και ερπυσμός	Μειωμένη συρρίκνωση και ερπυσμός
Ο λόγος νερό/τσιμέντο κυμαίνεται από 0.70-0.50, ανάλογα με τις εργασίες	Ο λόγος νερό/τσιμέντο κυμαίνεται από 0.30-0.40, ανάλογα με τις εργασίες

4.2. Συγκριτική διερεύνηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Αρχικά, κατά την παραγωγή του συμβατικού σκυροδέματος, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς του σε τσιμέντο εμφανίζονται αυξημένες εκπομπές CO₂, καθώς και η διαδικασία αυτή και η εφαρμογή του, έχουν ως συνέπεια τη παραγωγή μεγάλης ποσότητας αποβλήτων, εφόσον απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας, λόγω εξοπλισμού.

Αντίθετα, το RCC χαρακτηρίζεται ως μία σύγχρονη και βιώσιμη επιλογή εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο και νερό, όπως επίσης συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων.

Επιπλέον, η τοποθέτηση του γίνεται χωρίς τη χρήση δονητών, με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την παραγωγή αποβλήτων. Τέλος, η αυξημένη αντοχή σε βαριά φορτία, καθιστά το RCC ιδανικό για έργα, με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης.

Στον πίνακα που ακολουθεί, επιχειρείται μία σύγκριση των περιβαλλοντικών επιδράσεων που προκύπτουν από τη χρήση κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος.

Πίνακας 6. Συγκριτική διερεύνηση περιβαλλοντικών επιδράσεων κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Κοινό σκυρόδεμα	Κυλινδρούμενο σκυρόδεμα
Αυξημένη παραγωγή CO ₂ , λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο	Μειωμένη παραγωγή CO ₂
Χρειάζεται περισσότερο νερό για να έχει την απαιτούμενη εργασιμότητα	Το RCC χρειάζεται λιγότερη χρήση νερού, λόγω χαμηλής περιεκτικότητας νερού (πιο ξηρό μείγμα) και το καθιστά πιο φιλικό προς το περιβάλλον σε περιοχές με έλλειψη νερού
Το κοινό σκυρόδεμα παράγει σημαντικές ποσότητες αποβλήτων, λόγω της φύσης της παραγωγής και της εφαρμογής του	Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα παράγει λιγότερα απόβλητα, λόγω της μεθόδου τοποθέτησης, της σύνθεσης και της αποδοτικότητάς του
Υψηλή κατανάλωση ενέργειας, λόγω σύνθετης διαδικασίας, καθώς απαιτεί δονητές και συμβατικό εξοπλισμό	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, λόγω μη συμβατικής τοποθέτησης
Ανθεκτικό, αλλά απαιτεί συντήρηση σε βάθος χρόνου(ρωγμές, υγρασία)	Πιο ισχυρό για βαριές φορτίσεις (πχ. Οδοστρώματα, φράγματα) με λιγότερη συντήρηση

Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να συγκριθούν οι βασικές ιδιότητες του κοινού και του RCC με στόχο την αξιολόγηση της τεχνικής και περιβαλλοντικής τους απόδοσης.

1. Περιβαλλοντική Επίδραση

Το κοινό σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Επιπλέον, απαιτεί μεγάλη ποσότητα νερού για να διατηρήσει την εργασιμότητά του, επιβαρύνοντας περαιτέρω τους φυσικούς πόρους.

Αντίθετα, το RCC είναι φιλικότερο προς το περιβάλλον, καθώς περιέχει λιγότερο τσιμέντο και χρησιμοποιεί πολύ λιγότερο νερό λόγω της ξηρής του σύστασης. Η μέθοδος τοποθέτησης του RCC, χωρίς συμβατικούς δονητές, συντελεί και στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, παράγει λιγότερα απόβλητα κατά την εφαρμογή του.

2. Ενεργειακή Κατανάλωση και Μέθοδοι Τοποθέτησης

Η τοποθέτηση του κοινού σκυροδέματος απαιτεί δονητές και ειδικό εξοπλισμό, γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Το RCC τοποθετείται χωρίς χρήση δονητών, με πιο αποδοτικές μεθόδους, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος και την πολυπλοκότητα της εφαρμογής.

3. Αντοχή και Συντήρηση

Το κοινό σκυρόδεμα εμφανίζει καλή ανθεκτικότητα αλλά απαιτεί συχνή συντήρηση, καθώς είναι επιρρεπές σε ρωγμές και προβλήματα υγρασίας με την πάροδο του χρόνου. Το RCC είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές υψηλής φόρτισης (όπως οδοστρώματα και φράγματα) και προσφέρει αυξημένη μηχανική αντοχή με μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης.

Η ανάλυση δείχνει ότι το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα υπερτερεί σε θέματα περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, ενεργειακής αποδοτικότητας και μακροχρόνιας αντοχής. Αν και το κοινό σκυρόδεμα παραμένει χρήσιμο για πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές, το RCC αποτελεί πιο αποτελεσματική λύση σε έργα με υψηλές απαιτήσεις φορτίου και όπου δίνεται έμφαση στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος.

Οι ανωτέρω αναφορές καταγράφονται συνοπτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7. Σύγκριση περιβαλλοντικής βιωσιμότητας κοινού και κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Κριτήριο	Κοινό Σκυρόδεμα	Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα (RCC)
Εκπομπές CO ₂	Υψηλές, λόγω μεγάλης περιεκτικότητας σε τσιμέντο	Μειωμένες, χάρη σε λιγότερο τσιμέντο
Κατανάλωση νερού	Υψηλή, απαιτείται για εργασιμότητα	Χαμηλή, λόγω ξηρής σύνθεσης
Απόβλητα παραγωγής	Σημαντικά, λόγω μεθόδου τοποθέτησης	Ελάχιστα, χάρη στην αποδοτική κατασκευή
Κατανάλωση ενέργειας	Υψηλή – απαιτεί δονητές	Χαμηλή – χωρίς δονητές
Αντοχή σε φορτία	Καλή, αλλά απαιτεί συντήρηση	Πολύ υψηλή – για βαριά φορτία
Συντήρηση	Απαιτείται σε βάθος χρόνου	Ελάχιστη συντήρηση
Περιβαλλοντική φιλικότητα	Μειωμένη	Αυξημένη
Κατασκευαστική ταχύτητα	Χρονοβόρα μέθοδος	Ταχύτερη εφαρμογή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας, βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάδειξη των περιβαλλοντικών οφελών των κατασκευασμένων φραγμάτων από RCC. Κατόπιν της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που έλαβε χώρα, προκύπτει πως από την αρχαιότητα έως και σήμερα, τα φράγματα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνικές κατασκευές του ανθρώπου, με σκοπό τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Αξιοσημείωτο είναι ότι ήδη από τους αρχαίους πολιτισμούς της Αιγύπτου και αργότερα της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, ο άνθρωπος κατασκεύαζε φράγματα για άρδευση, ύδρευση και προστασία από πλημμύρες. Ωστόσο, με την πάροδο των αιώνων, η τεχνολογία των φραγμάτων έχει υποστεί σημαντική εξέλιξη, τόσο στα υλικά όσο και στις μεθόδους κατασκευής.

Στη σύγχρονη εποχή, όπου η αειφόρος ανάπτυξη και η μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης προβάλλουν ως επιτακτικές ανάγκες, παρατηρείται στροφή σε λύσεις, όπως το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC), το οποίο συνδυάζει αποτελεσματικότητα με σεβασμό προς το περιβάλλον.

Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete - RCC) είναι ένας τύπος άκαμπτου σκυροδέματος, ο οποίος διαθέτει χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό και υψηλή πυκνότητα, καθιστώντας τον ιδανικό για κατασκευές μεγάλης κλίμακας και βαριάς χρήσης. Το RCC διαστρώνεται και συμπυκνώνεται με οδοστρωτήρες (rollers), αντί για τις παραδοσιακές μεθόδους δόνησης που απαιτούνται στο κοινό σκυρόδεμα.

Η σύστασή του περιλαμβάνει:

- Τσιμέντο (σε μικρότερη ποσότητα απ' ό,τι στο συμβατικό σκυρόδεμα)
- Αδρανή υλικά (άμμος, χαλίκι)
- Πολύ μικρή ποσότητα νερού
- Προαιρετικά: πρόσθετα και βιομηχανικά υποπροϊόντα (π.χ. ιπτάμενη τέφρα)

Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα αναπτύχθηκε αρχικά με σκοπό την παραγωγή ενός υλικού που διαθέτει τις δομικές ιδιότητες του σκυροδέματος, ενσωματώνοντας ειδικά υλικά επιχωμάτωσης. Έχει παρόμοια σύνθεση με το κοινό σκυρόδεμα, αλλά είναι ένα ξηρό και άκαμπτο μίγμα που μπορεί να συμπιεστεί με δονητικούς κυλίνδρους. Ενδεικτικά, χρησιμοποιείται σε:

- Οδοστρώματα και λιμενικές εγκαταστάσεις
- Φράγματα και αναχώματα
- Πλατείες και βιομηχανικές επιφάνειες
- Κατασκευές όπου απαιτείται ταχύτητα και αντοχή

Το RCC προσφέρει ταχύτητα στην κατασκευή, απαιτεί ελάχιστη εργασία και εφαρμόζεται εύκολα. Σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα, διαθέτει υψηλή αντοχή σε κάμψη και συμπίεση, ενώ ο σχεδιασμός του είναι απλός. Επιπλέον, η εμπειρία από τη χρήση

φραγμάτων RCC στην Ελλάδα και παγκοσμίως αποδεικνύει ότι αποτελεί μια καθιερωμένη και δοκιμασμένη τεχνολογία, με επιτυχημένες εφαρμογές που επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητά της. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως μολονότι στην Ελλάδα η εφαρμογή της μεθόδου RCC βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο, παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον εξαιτίας των περιβαλλοντικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει.

Τα χαρακτηριστικά του και τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ενσωμάτωσή του στα τεχνικά έργα, συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Υψηλή αντοχή σε φορτία: Ιδανικό για οδοστρώματα, φράγματα, βιομηχανικά δάπεδα και στρατιωτικές εγκαταστάσεις.
- Μειωμένη ανάγκη για συντήρηση: Δεν παρουσιάζει εύκολα ρωγμές ή φθορές.
- Φιλικό προς το περιβάλλον: Λόγω χαμηλής κατανάλωσης νερού και μικρότερης παραγωγής CO₂.
- Γρήγορη κατασκευή: Μπορεί να τοποθετηθεί με συνεχή ροή χωρίς αρμούς.
- Οικονομικό: Χάρη στην απλή τοποθέτηση και τον περιορισμό δαπανηρών υλικών.

Πέραν των ομολογουμένως σημαντικών πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από τη χρήση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC), υφίστανται και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία συνοψίζονται ως ακολούθως:

- **Περιορισμένη αισθητική εμφάνιση**

Το RCC έχει πιο τραχιά και «βιομηχανική» υφή σε σχέση με το κοινό σκυρόδεμα. Δεν είναι κατάλληλο για έργα όπου απαιτείται αρχιτεκτονική αισθητική ή λείες επιφάνειες, εκτός αν προστεθεί επίστρωση.

- **Δυσκολία στην κατεργασία μετά την τοποθέτηση**

Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό, δεν μπορεί εύκολα να κοπεί ή να τροποποιηθεί μετά τη διάστρωση. Η μορφοποίηση πρέπει να είναι ακριβής από την αρχή.

- **Απαιτεί ειδικό εξοπλισμό**

Η τοποθέτηση του RCC απαιτεί βαρέα μηχανήματα (οδοστρωτήρες, συνεχείς τροφοδότες), κάτι που ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμο σε μικρά εργοτάξια.

- **Αυξημένη ανάγκη για έλεγχο σύνθεσης**

Το μείγμα RCC πρέπει να είναι σωστά σχεδιασμένο. Μικρή απόκλιση στην υγρασία ή στα αδρανή μπορεί να επηρεάσει την τελική αντοχή και συνοχή.

- **Ευαισθησία στη ρηγμάτωση επιφανείας**

Αν δεν γίνει σωστή συντήρηση (π.χ. διατήρηση υγρασίας μετά την τοποθέτηση), υπάρχει αυξημένος κίνδυνος για ρηγματώσεις, ειδικά σε θερμά ή ξηρά κλίματα.

- **Δεν ενδείκνυται για πολύπλοκες κατασκευές**

Το RCC είναι ιδανικό για οριζόντιες επιφάνειες και μεγάλα επίπεδα έργα. Δεν ενδείκνυται για λεπτομερείς ή κατακόρυφες κατασκευές (π.χ. υποστυλώματα, τοιχία).

Γενικά, το RCC είναι εξαιρετική επιλογή για έργα μεγάλης κλίμακας που απαιτούν αντοχή, ταχύτητα και χαμηλό κόστος. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, καλαισθησία ή κατασκευή πολύπλοκων μορφών.

Εν κατακλείδι, το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC) αποτελεί μία τεχνολογικά εξελιγμένη λύση που ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες της κατασκευής, συνδυάζοντας ανθεκτικότητα, ταχύτητα και περιβαλλοντική υπευθυνότητα. Η χαμηλή περιεκτικότητά του σε νερό και τσιμέντο μειώνει το οικολογικό αποτύπωμα, ενώ η δυνατότητα γρήγορης και οικονομικής τοποθέτησης το καθιστά ιδανικό για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

Η εξαιρετική του μηχανική αντοχή, η ανθεκτικότητα σε καταπονήσεις και φορτία, καθώς και οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης ενισχύουν τη θέση του RCC ως υλικού επιλογής σε υποδομές όπως οδοστρώματα, φράγματα, λιμένες και βιομηχανικά δάπεδα. Επιπλέον, η μειωμένη παραγωγή αποβλήτων και η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας κατά την τοποθέτηση το καθιστούν συμβατό με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης.

Αν και απαιτεί κατάλληλο εξοπλισμό και δεν προσφέρει την αισθητική ευελιξία του συμβατικού σκυροδέματος, τα πολλαπλά πλεονεκτήματά του υπερτερούν σημαντικά, ειδικά σε έργα όπου προέχει η λειτουργικότητα, η ταχύτητα υλοποίησης και η αντοχή στον χρόνο.

Συνοψίζοντας, το RCC αποτελεί μια σύγχρονη, αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον λύση που αξίζει σοβαρή εξέταση από μηχανικούς και κατασκευαστές, ιδιαίτερα σε έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας και υψηλών απαιτήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βλογιάρη, Κ. (2016). Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC) σαν υλικό κατασκευής. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα. (Πτυχιακή Εργασία), Τρίκαλα:(Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.).
2. Δουλη, Ε. (2014). Τα φράγματα και οι επιδράσεις τους στο τοπίο. Αθήνα: ΕΜΠ (Σχολή Αρχιτεκτονικών Μηχανικών). Ανάκτηση από <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/>
3. ΕΕΜΦ. (2013). Τα φράγματα της Ελλάδας. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων.
4. ΕΛΟΤ. (2009). Φράγματα από ισχνό Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα «Σκληρό Επίχωμα». . Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης Α.Ε.: Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή ΤΠ 1501-13-03-00-00: 2009.
5. ΕΛΟΤ. (2009). Φράγματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Κ.Σ.). Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης Α.Ε.: Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή ΤΠ 1501-13-04-00-00:2009.
6. Θεοδώρου, Χ. (2013). Ινοπλισμένο εκτοξευμένο σκυρόδεμα, συγκρίσεις του και μηχανικές του ιδιότητες. "19ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές κα Ενισχύσεις Κατασκευών ". Πάτρα.
7. Κολλάτου, Ά.-Μ. (2017). Δυναμική Ανάλυση Τοξωτού Φράγματος βαρύτητας από Κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Π.Θ. , (Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών).
8. Κούμouλος, Δ.Γ. & Κοργιαλός, Θ.Π. (2008). Φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC) - Τεχνολογία κατασκευής και ποιοτικός έλεγχος. 1ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΜΕΓΑΛΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΚΑΙ ΕΚΘΕΣΗ ΥΛΙΚΩΝ. Λάρισα: ΤΕΕ. Ανάκτηση από <https://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis>
9. Λαμπροπούλου, Π. (2019). Φράγματα από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα με χρήση Ανακυκλωμένων Υλικών (Διπλωματική Εργασία). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας). Ανάκτηση από <https://apothesis.eap.gr/>
10. Μακεδών , Θ. (χ.χ.). Φράγματα. Π.Μ.Σ. Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία.
11. Μαλλιάρης, Α. (2006). νέα Εγκυκλοπαιδεία (Τόμ. 26). Μαλλιάρης-Παιδεία.
12. Μελίστα, Ε. (2015). Χωμάτινα φράγματα της Ελλάδας. (Πτυχιακή Εργασία), ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, (Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών), Πάτρα.
13. Ο.Α.Κ.Α.Ε. (2018). Φράγμα Βαλσαμιώτη. Ανάκτηση από <https://oakae.gr/portfolio-item/fragma-valsamioti/>

14. Στουρνάρας, Β. (2012). Μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με δορυφορικές μεθόδους. (Διπλωματική εργασία), ΕΜΠ (Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών), Αθήνα.
15. TEE. (χ.χ.). Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. Ανάκτηση από https://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_CEMENT/ts2.4.htm
16. Τριανταφύλλου, Α. (2017). Δομικά Υλικά. Πάτρα: Εκδόσεις: GOTSIS.
17. Υπ.Α.Α.Τ. (χ.χ.). ΦΡΑΓΜΑ ΑΝΩ ΜΕΡΑΣ Ν. ΜΥΚΟΝΟΥ- ΤΥΠΟΣ. Ανάκτηση από https://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/Egeies_Beltioseis/kataskevasthent_a_erga/fragmata_limnodexamenes/fragma_anomerias_mykonou.pdf
18. Υπ.Α.Α.Τ. (χ.χ.). ΦΡΑΓΜΑ ΜΑΡΑΘΙΑΣ Ν. ΜΥΚΟΝΟΥ- ΤΥΠΟΣ. Ανάκτηση από https://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/Egeies_Beltioseis/kataskevasthent_a_erga/fragmata_limnodexamenes/fragma_marathia_mykonou.pdf
19. Υπ.Α.Α.Τ. (χ.χ.). ΦΡΑΓΜΑ ΣΤΕΝΟ ΣΕΡΙΦΟΥ- ΤΥΠΟΣ. Ανάκτηση από https://www.minagric.gov.gr/images/stories/docs/agrotis/Egeies_Beltioseis/kataskevasthenta_erga/fragmata_limnodexamenes/fragma_steno_serifou.pdf

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

20. Al Baghdady, S., & Khan, L. (2018). Designing Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. Μεταπτυχιακή Διατριβή, KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment.
21. Association of State Dam Safety Officials (ASDSO). (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://damsafety.org/dams101>
22. Bhakra Beas Management Board (BBMB). (χ.χ.). Benefits of Large Dams. Ανάκτηση από <https://bbmb.gov.in/benefits-of-large-dams2.htm>
23. Gracon LLC. (χ.χ.). Advantages of Dams. Ανάκτηση από <https://graconllc.com/advantages-of-dams/>
24. Jansen, R. B. (1980). Dams and Public Safety. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
25. Malcolm Dunstan & Associates. (χ.χ.). Specialists in Roller Compacted Concrete Dams. Ανάκτηση από <https://rccdams.co.uk/>
26. Structurae. (χ.χ.). International Database and Gallery of Structures. Ανάκτηση από <https://structurae.net/en/>
27. Tarmac. (χ.χ.). Roller Compacted Concrete – Benefits. Ανάκτηση από <https://www.tarmac.com/products/concrete/roller-compacted-concrete/#benefits>
28. The Constructor. (χ.χ.). Roller Compacted Concrete - Properties, Advantages and Applications. Ανάκτηση από <https://theconstructor.org/concrete/roller-compacted-concrete/5863/>

29. U.S.B.R. (1987). Design of Small Dams. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation. Ανάκτηση από <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/4294/>