

**Αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, βάσει  
τεχνολογίας PENETRON<sup>®</sup>, με ανάπτυξη κρυστάλλων στο  
σκυρόδεμα**

**Increase the durability of concrete, based on crystal growth  
technology, PENETRON<sup>®</sup>**

**Θεόδωρος ΜΕΝΤΖΙΚΟΦΑΚΗΣ<sup>-1</sup>, Δημήτριος ΜΠΟΥΡΑΪΜΗΣ<sup>-2</sup>**

Λέξεις κλειδιά: PENETRON, Τεχνολογία Ανάπτυξης Κρυστάλλων, Ανθεκτικότητα Σκυροδέματος  
Keywords: PENETRON, Crystal Growth Technology, Durability of Concrete

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Τα προϊόντα, με ανάπτυξη κρυστάλλων στο σκυρόδεμα, του συστήματος PENETRON<sup>®</sup> είναι τσιμεντοειδούς βάσης και παρέχουν στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα μόνιμη στεγανοποίηση και προστασία. Βάσει αυτής της τεχνολογίας, η μείωση της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά ποσοστά (έως και σε μηδενική διείσδυση), ενώ ταυτόχρονα ενισχύεται η θλιπτική αντοχή, η χημική ανθεκτικότητα, καθώς και η αντιδιαβρωτική προστασία. Επακόλουθο του συνδυασμού των παραπάνω ιδιοτήτων είναι η μεγάλη αύξηση της πραγματικής διάρκειας ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω της συνολικής αύξησης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος (Durability of Concrete). Τέλος, η κατά περίπου 60 χρόνια αύξηση της διάρκειας ζωής των δειγμάτων, που περιείχαν το PENETRON ADMIX<sup>®</sup>, επιβεβαιώνει πλήρως την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.

**ABSTRACT:** PENETRON<sup>®</sup>, integral crystalline waterproofing materials, are cement based and provide permanent waterproofing and protection in reinforcement concrete. Based on this technology the reduction of water permeability can be reached at very high levels (up to zero penetration), while at the same time the compressive strength, chemical resistance, and anti-corrosion protection is enhanced. The results of the above properties are the high increase of the actual lifetime of reinforced concrete structures due to the overall durability of concrete. Finally, the 60-year increase in the shelf life of the samples containing PENETRON ADMIX<sup>®</sup>, confirms the increase of durability of concrete.

---

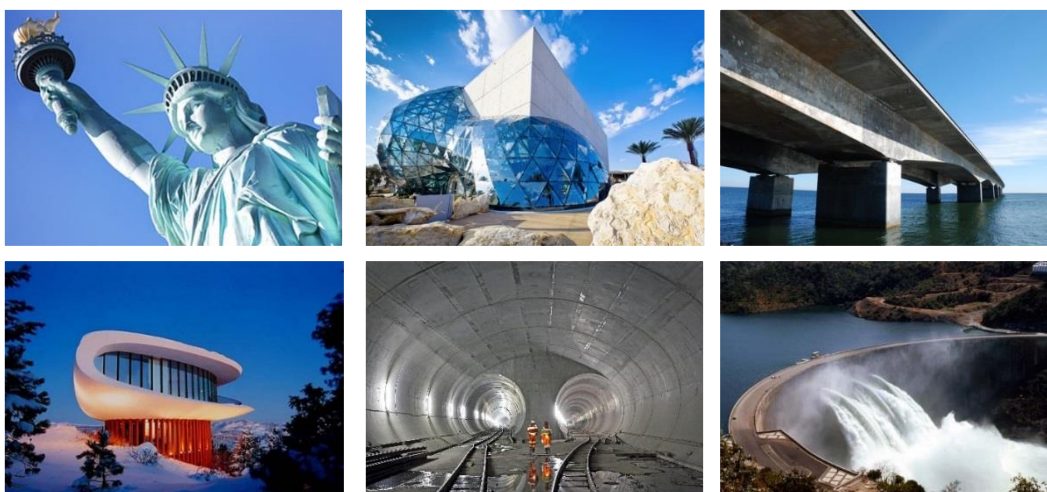
<sup>1</sup> Διευθύνων Σύμβουλος Penetron Hellas, email: [t.mentzikofakis@penetron.gr](mailto:t.mentzikofakis@penetron.gr)

<sup>2</sup> Πολιτικός Μηχανικός MSc., Τεχνική Υποστήριξη Πωλήσεων Penetron Hellas, email [d.bouraimis@penetron.gr](mailto:d.bouraimis@penetron.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα είναι το πιο κοινό, ανθρωπογενές, δομικό υλικό στον κόσμο και συγκεκριμένα αποτελεί το δεύτερο σε κατανάλωση προϊόν στη Γη μετά το νερό. Διαθέτει μια σχετικά καλή αντοχή στο νερό και τα δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα μπορούν να διαμορφωθούν αρκετά εύκολα σε διάφορα σχήματα και μεγέθη (Σχήμα 1).

Ανθεκτικότητα του σκυροδέματος από υδραυλικό τσιμέντο ορίζεται ως η ικανότητά του να ανθίσταται στις καιρικές συνθήκες, στη χημική προσβολή, στην τριβή ή σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο αλλοίωσης. Το ανθεκτικό σκυρόδεμα θα διατηρήσει την αρχική του μορφή, την ποιότητα και την λειτουργικότητά του, όταν βρίσκεται εκτεθειμένο στο περιβάλλον του. Τόσο οι ανάγκες των κατασκευών, όσο και οι σύγχρονες τάσεις των παγκόσμιων μοντέλων, οδηγούν στη χρήση του Ανθεκτικού Σκυροδέματος (Σχήμα 2).



**Σχήμα 1:** Κατασκευές με υψηλές απαιτήσεις στεγάνωσης και προστασίας

Παρά την ανθεκτικότητά του, το σκυρόδεμα – ακόμα και τα υψηλής ποιότητας σκυροδέματα – είναι ένα πορώδες υλικό. Το πλεονάζον εξατμιζόμενο νερό στο στάδιο ενυδάτωσης του σκυροδέματος θα δημιουργήσει εκατομμύρια πόρους και τριχοειδή στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, οι ενδιάμεσες ζώνες μετάβασης (ITZ) – ένα μέρος της μικροδομής του σκυροδέματος που περιγράφει την ζώνη, που υπάρχει ανάμεσα στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα και σε μεγάλα σωματίδια αδρανούς – είναι (PENETRON INTERNATIONAL 2015) επιρρεπείς στη ρωγμάτωση κατά το στάδιο ωρίμανσης του σκυροδέματος, εξαιτίας της συρρίκνωσης, των θερμοκρασιακών τάσεων και των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων. Αυτές οι μικρορωγμές στην ενδιάμεση ζώνη μετάβασης είναι συνήθως μεγαλύτερες από τις περισσότερες τριχοειδείς κοιλότητες που υπάρχουν στο σκυρόδεμα. Οι πόροι και

οι μικρορωγμές (ειδικά εάν διασυνδέονται σε όλο το σκυρόδεμα) αυξάνουν το πορώδες της μήτρας σκυροδέματος και θα επιτρέψουν στον αέρα και στο νερό να εισέλθουν στο ωριμασμένο σκυρόδεμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την διάβρωση του οπλισμού και άλλες φθορές, του σκυροδέματος που προκαλούνται από άλατα και χημικά, που συνεισφέρουν επίσης στην επιδείνωση και αποδυνάμωση της αντοχής του σκυροδέματος, επηρεάζοντας άμεσα την ανθεκτικότητά του (PENETRON INTERNATIONAL 2015).



Σχήμα 2: Ανθεκτικότητα του Σκυροδέματος

Το νερό (θαλασσίνο, υπόγειο, ποτάμιο, λιμναίο, χιόνι, πάγος και υδρατμός) είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για την δημιουργία και την καταστροφή του σκυροδέματος – και εμπλέκεται βαθιά σχεδόν σε κάθε μορφή αποσάθρωσης του σκυροδέματος. Η εμπειρία στον τομέα δείχνει, ότι, κατά σειρά φθίνουσας σημασίας, οι πρωταρχικές αιτίες της επιδείνωσης είναι η διάβρωση του οπλισμού, η έκθεση σε κύκλους πήξης – τήξης, η αλκαλοπυριτική αντίδραση, και η χημική προσβολή (PENETRON INTERNATIONAL 2017).

Το πρόβλημα του πορώδους και της ρωγμάτωσης του σκυροδέματος αυξάνεται σε κατασκευές που εκτίθενται συνεχώς σε διαφορετικά φορτία, ανακατανομή τάσεων και τεκτονικές σεισμικές επιρροές.

## ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### Διάβρωση

- Το σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγάλη αντοχή θλίψης αλλά μικρή αντοχή εφελκυσμού, οπότε απαιτείται η χρήση μεταλλικού οπλισμού, ώστε να αποτρέψει την διάσπασή του υπό φορτίο.
- Όμως, το **νερό** επιτρέπεται να διέρχεται μέσω των ρηγματώσεων, των κενών και των πόρων του σκυροδέματος, μεταφέροντας διαβρωτικές χημικές ουσίες, που προσβάλλουν τον οπλισμό (Σχήμα 3).
- Άπαξ και αρχίσει ο μηχανισμός της διάβρωσης δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί η έκταση της ζημίας, διότι μπορεί να συμβεί οπουδήποτε κατά μήκος του δικτύου του οπλισμού (PENETRON INTERNATIONAL 2015).



Σχήμα 3: Διάβρωση Οπλισμού

### Αλκαλοπυριτική Αντίδραση (ASR)

- Η ASR προκαλείται από την αντίδραση ανάμεσα στα ιόντα υδροξυλίου στο αλκαλικό διάλυμα πόρων τσιμέντου στο σκυρόδεμα και σε δραστικές μορφές πυριτίου στο αδρανές (π.χ. κερατόλιθος, χαλαζίτης, οπάλιο, κατεργασμένοι κρύσταλλοι χαλαζία). Παράγεται μια γέλη, που αυξάνεται σε όγκο,



απορροφώντας νερό και επομένως ασκεί μια πίεση λόγω διόγκωσης, με αποτέλεσμα την αστοχία του σκυροδέματος (Σχήμα 4). Αυτή η γέλη μπορεί να συμβεί σε ρωγμές ακόμα και μέσα στα σωματίδια του αδρανούς (PENETRON INTERNATIONAL 2015).

Για να πραγματοποιηθεί στο σκυρόδεμα η ASR, χρειάζεται:

- Ένα αρκετά υψηλό αλκαλικό περιεχόμενο στο τσιμέντο (ή αλκάλια από άλλες πηγές)
- Ένα δραστικό αδρανές (π.χ. κερατόλιθος ή χαλαζίτης)
- Νερό στο σκυρόδεμα, καμία ASR δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, καθώς η δημιουργία της αλκαλοπυριτικής γέλης απαιτεί νερό.



Σχήμα 4: Αλκαλοπυριτική Αντίδραση

### Παγοπληξία – Αντιψυκτικά Άλατα

Σε ψυχρά κλίματα η φθορά σε οδοστρώματα από σκυρόδεμα, τοίχους αντιστήριξης, καταστρώματα γεφυρών και κιγκλιδώματα, που οφείλεται στους κύκλους πήξης – τήξης, είναι μια από τις μεγαλύτερες αιτίες για εργασίες επισκευής και συντήρησης. Τα μόρια του νερού είναι πολύ μικρά και επομένως ικανά να διεισδύσουν ακόμα και στους πιο λεπτούς πόρους και τριχοειδή του σκυροδέματος. Όταν το νερό εισέλθει στο σύστημα τριχοειδών και το παγώσει, θα διογκωθεί και θα διαστείλει τον πόρο ή την κοιλότητα του σκυροδέματος, ασκώντας υδραυλική πίεση που παράγεται από την διόγκωση. Αυτή η πίεση θα διευρύνει σιγά, σιγά – σε διάστημα πολλαπλών κύκλων – τους πόρους ή τα τριχοειδή. Μόλις το νερό στους πόρους τηχθεί, θα προχωρήσει βαθύτερα στο σκυρόδεμα, όπου η διαδικασία θα επαναληφθεί, όταν το νερό παγώσει ξανά και ούτω καθεξής. Οι φθορές που δημιουργούνται στο σκυρόδεμα από τους κύκλους πήξης – τήξης είναι συνήθως ρωγμές και αποφλοιώσεις του σκυροδέματος (Σχήμα 5), εξαιτίας της προοδευτικής διόγκωσης της τσιμεντόπαστας (PENETRON INTERNATIONAL 2015).

Το φαινόμενο του κύκλου πήξης-τήξης αυξάνεται δραστικά, όταν η υγρασία και τα αντιψυκτικά άλατα – που χρησιμοποιούνται στην συντήρηση των δρόμων – είναι

παρόντα, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη αποφλοίωση της επιφάνειας του σκυροδέματος. Η αποφλοίωση και ρωγμάτωση του σκυροδέματος θα εκθέσει στο τέλος τον οπλισμό στην διάβρωση, εξαιτίας των χλωριδίων και της διείσδυσης νερού.



**Σχήμα 5:** Παγοπληξία – Αντιψυκτικά Άλατα

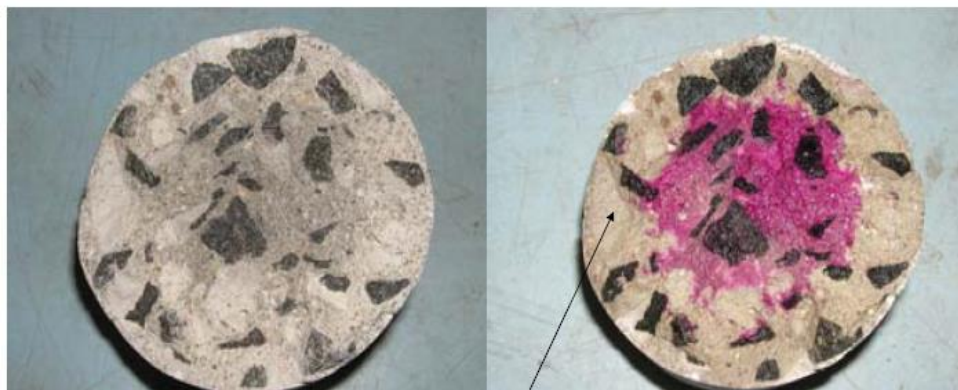
### **Ενανθράκωση**

- Η ενανθράκωση συμβαίνει, όταν διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα διεισδύει στο σκυρόδεμα και αντιδρά με υδροξείδια, όπως το υδροξείδιο του ασβεστίου, σχηματίζοντας ανθρακικά άλατα. Στην αντίδραση με υδροξείδιο του ασβεστίου, σχηματίζεται το ανθρακικό ασβέστιο.
- Η αντίδραση αυτή οδηγεί στη μείωση του pH του διαλύματος των πόρων χαμηλά στο 8,5 (Σχήμα 6) και σε αυτό το επίπεδο το παθητικό φιλμ οξειδίου του σιδήρου του χάλυβα δεν είναι σταθερό και θα ξεκινήσει η διάβρωση.

Το κοινό των παραπάνω παραγόντων, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τον υποβιβασμό του σκυροδέματος, είναι το νερό. Το νερό έχει μεγάλη σημασία για την πρώιμη ωρίμανση του σκυροδέματος, προκαλώντας την ενυδάτωση του τσιμέντου, στην οποία οφείλεται η σκληρότητα σκυροδέματος. Ωστόσο, η παρουσία του νερού μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση, τόσο στο σκυρόδεμα, όσο και στον οπλισμό. Το νερό, σαν άμεσος ή σαν παράγοντας μεταφοράς, μεταφέρει επιβλαβείς ουσίες, όπως ιόντα χλωρίου, θειικά ιόντα και οξέα, που μπορούν να ενεργοποιήσουν τη διαδικασία αποδόμησης του σκυροδέματος, μειώνοντας σημαντικά την αντοχή και την διάρκεια ζωής του. Η εξάλειψη της παρουσίας

νερού στην μάζα του σκυροδέματος πραγματοποιείται με την μείωση απορροφητικότητας (PENETRON INTERNATIONAL 2015).

Painting with Phenolphthalein →



Concrete exposed to CO<sub>2</sub>  
(accelerated test)

Carbonated concrete

**Σχήμα 6:** Ενανθράκωση – Έλεγχος με δείκτη Φαινολοφθαλεΐνης

Η διάρκεια ζωής, κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και σύμφωνα με τον 2<sup>ο</sup> Νόμο του FICK, για τα πρόσμικτα με ανάπτυξη κρυστάλλων, μπορεί να αυξηθεί κατά πολύ, ακόμη και σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Στην περίπτωση του PENETRON ADMIX<sup>®</sup>, μπορεί να αυξηθεί κατά περίπου 60 χρόνια και μάλιστα σε διαβρωτικό περιβάλλον πολλαπλάσιο κατά 4,7 φορές της διαβρωτικότητας του θαλασσινού νερού. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα, σύμφωνα με τον 2<sup>ο</sup> Νόμο του Fick και σε συμφωνία της αναφοράς του ACI 212.3P-10 (Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος), μεταξύ συμβατικού «μάρτυρα» κατηγορίας C30/37 και αντίστοιχων δειγμάτων (με κοινό και υψηλής αντοχής τσιμέντο), που περιέχουν το παραπάνω αναφερόμενο πρόσμικτο σκυροδέματος με ανάπτυξη κρυστάλλων, σε διαβρωτικό περιβάλλον 4,7 φορές υψηλότερο του θαλάσσιου (Σχήμα 7). Η κατά περίπου 60 χρόνια αύξηση της διάρκειας ζωής των δειγμάτων που περιείχαν το PENETRON ADMIX<sup>®</sup>, επιβεβαιώνει πλήρως την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, όπως αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά από την εταιρεία παραγωγής του (PENETRON INTERNATIONAL 2017).

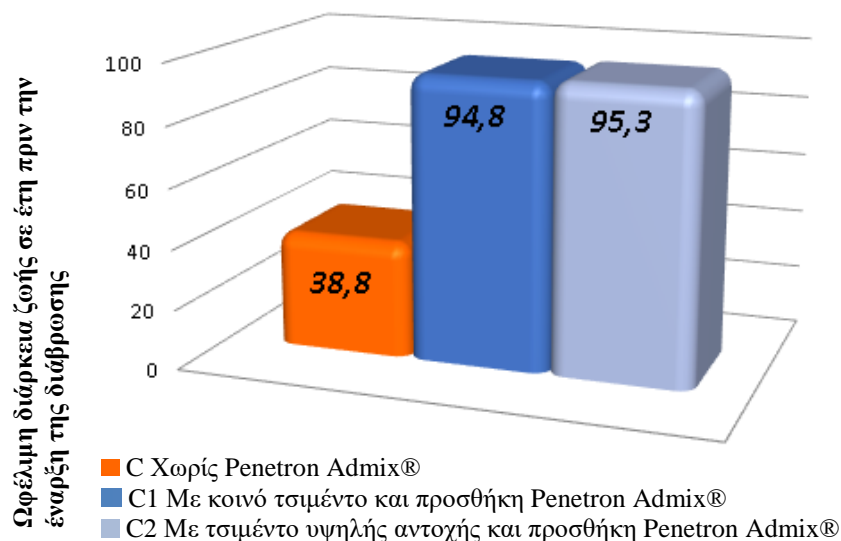
Πολύ σημαντική είναι η παρακάτω αναφορά του ACI, σχετικά με τα κρυσταλλικά πρόσμικτα σκυροδέματος, όπου διαχωρίζονται πλήρως οι κατηγορίες των πρόσμικτων μείωσης διαπερατότητας και βεβαίως διαφαίνονται τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας με ανάπτυξη κρυστάλλων.

Η «Αναφορά στα Κρυσταλλικά Πρόσμικτα Σκυροδέματος», η οποία εκδόθηκε από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI 212.3R-10 / Ιανουάριος 2011),

περιλαμβάνει ένα ξεχωριστό κεφάλαιο, που αφορά στα πρόσμικτα μείωσης της διαπερατότητας (Permeability-Reducing Admixtures – PRAs). Τα πρόσμικτα PRAs περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα προσμίκτων, για μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, και μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω δύο κατηγορίες (ACI 2011, 2013):

- **Πρόσμικτα Μείωσης της Διαπερατότητας για Μη-υδροστατικές Πιέσεις** (Permeability-Reducing Admixture for Non-hydrostatic Conditions – PRAN), τα οποία παλαιότερα αναφέρονταν και ως «damp proofing admixtures», όπου η αντίσταση σε νερό υπό πίεση είναι ελάχιστη και δεν κρίνονται κατάλληλα για εφαρμογή σε σκυρόδεμα, που βρίσκεται υπό υδροστατική πίεση.
- **Πρόσμικτα Μείωσης της Διαπερατότητας για Υδροστατικές Πιέσεις** (Permeability-Reducing Admixture for Hydrostatic Conditions – PRAN) ή αλλιώς «πρόσμικτα στεγάνωσης», τα οποία κρίνονται ως επαρκώς σταθερά, ώστε να αντιστέκονται σε νερό υπό πίεση και χρησιμοποιούνται για κατασκευή στεγανών δεξαμενών, θεμελιώσεις και κατασκευές αντιστήριξης, κ.λπ.

Σε γενικές γραμμές, η απόδοση των προσμίκτων μείωσης διαπερατότητας εξαρτάται από το εάν πρόκειται για PRAN ή PRAH.



**Σχήμα 7:** Σύγκριση δοκιμίων σκυροδέματος (βάσει του Νόμου του Fick) με και χωρίς την χρήση του Penetron Admix®

Τα PRANs αποτελούνται από υδρόφοβες ή υδατο-απωθητικές χημικές ενώσεις (σάπωνες και παράγωγα λιπαρών οξέων μακράς αλύσου, φυτικά έλαια και παράγωγα του πετρελαίου), στερεά ψιλής κοκκομετρίας (τάλκης, μπετονίτης,



πούδρες πυριτίου, άργιλο, ρητίνες και λιθανρακόπισσα) ή χημικώς δραστικά πληρωτικά υλικά (ασβέστης, και κολλοειδείς πυριτικές ενώσεις). Χρησιμοποιούνται ευρέως για θωράκιση του σκυροδέματος ενάντια στην υγρασία, σε μη υδροστατικές πιέσεις (ACI 2011, 2013):.

Τα PRAHs περιλαμβάνουν λεπτόκοκκα διαμερισμένα στερεά (όπως οι κολλοειδείς πυριτικές ενώσεις), υδρόφοβα σφραγιστικά πόρων και κρυσταλλικά πρόσμικτα. Ωστόσο, τα λεπτόκοκκα διαμερισμένα στερεά (συμπεριλαμβανομένων και των κολλοειδών πυριτικών ενώσεων), χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές σε μη υδροστατικές συνθήκες και μόνο μερικά από αυτά τα πολυμερή υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως PRAHs, ενώ τα υδρόφοβα σφραγιστικά πόρων χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές σε συνθήκες απουσίας υδροστατικών πιέσεων. Τα κρυσταλλικά υδρόφιλα πολυμερή (latex, υδατοδιαλυτά ή υγρά πολυμερή) χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές υπό υδροστατική πίεση. Τα κρυσταλλικά πρόσμικτα ανθίστανται στη διείσδυση του νερού σε συνθήκες υπό υδροστατική πίεση και έχει αποδειχθεί πως αποτελούν τα πλέον αποτελεσματικά προϊόντα PRAH, ενώ πλεονεκτούν έναντι των υδρόφοβων πολυμερών που βασίζονται σε άλλους μηχανισμούς ή μεθόδους συσσωμάτωσης των πολυμερών, ή άλλα υλικά πληρώσεως για σφράγιση ρηγματώσεων, μακροχρόνια αποτελεσματικότητα, αυξημένη ανθεκτικότητα της κατασκευής σκυροδέματος, κ.λπ. Τέλος, έχουν την ικανότητα γεφύρωσης ρηγματώσεων που σχηματίζονται λόγω θερμικής ή μηχανικής δράσης. Επομένως, προκύπτει πως μόνο τα κρυσταλλικά πρόσμικτα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν εξ'ολοκλήρου ως προϊόντα PRAHs. Όπως περιγράφεται και στον Πίνακα στη σελίδα 2 της Αναφοράς ACI 212.3R-10 για τα πρόσμικτα («Πρόσμικτα, τα χαρακτηριστικά & η χρήση τους»), μόνο τα κρυσταλλικά υδρόφιλα πολυμερή (latex, υδατοδιαλυτά ή υγρά πολυμερή) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες υπό υδροστατική πίεση.

## **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ PRAH**

Τα δραστικά συστατικά που περιέχονται στα κρυσταλλικά πρόσμικτα PRAH αντιδρούν με το νερό και τα σωματίδια τσιμέντου στο σκυρόδεμα, με σκοπό να αυξηθεί η πυκνότητα των σωματιδίων ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CHS) ή/και να παραχθούν τα κατάλληλα σφραγιστικά πόρων, ώστε να επικαθίσουν στις υφιστάμενες μικρο-ρηγματώσεις και τα τριχοειδή με σκοπό την αντίσταση στη διείσδυση του νερού. Οι τριχοειδείς ρωγμές συνεχίζουν να σχηματίζονται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος, οπότε και τα κρυσταλλικά πρόσμικτα συνεχίζουν να ενεργοποιούνται παρουσία υγρασίας, σφραγίζοντας τα επιπλέον κενά (ACI 2011, 2013):.

Όπως αναφέρεται και στην Αναφορά του ACI «Η αντίσταση στην υδροστατική πίεση με τη χρήση των PRAH πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός μηχανισμού σφράγισης του πορώδους με τη βοήθεια ανάπτυξης κρυστάλλων, συσσωμάτωση πολυμερών, ή άλλων πληρωτικών υλικών, αν και η ικανότητα της αντίστασης σε υδροστατική πίεση θα εξαρτηθεί από το βαθμό πλήρωσης των πόρων και τη σταθερότητά τους σε υδροστατική πίεση». Η διάκριση θα πρέπει να γίνει με βάση

την αποδεδειγμένη ικανότητα του μίγματος να μειώσει τη διείσδυση νερού υπό τις αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας». Ο μηχανισμός σφράγισης των πόρων βασίζεται στα ενεργά χημικά συστατικά που περιέχονται και έχουν αναμιχθεί με το μίγμα τσιμέντου/άμμου.

Επειδή τα πρόσμικτα PRAHs με μηχανισμό συσσωματώματος πολυμερών ή άλλων πληρωτικών ουσιών (fillers) δεν είναι ικανά να ανταπεξέλθουν στις υψηλές υδροστατικές πιέσεις, δεν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως «πραγματικά» πρόσμικτα PRAHs. Ο μηχανισμός σφράγισης των πόρων με τη χρήση κρυσταλλικής βάσης PRAHs, βασίζεται στα ενεργά χημικά συστατικά που περιέχονται στο μίγμα με το τσιμέντο και την άμμο, τα οποία ανταποκρίνονται μόνιμα και πλήρως σε υγρασία και αλλάζει ακόμη και όταν εκτίθεται σε υψηλή υδροστατική πίεση και σε αλλαγές, ακόμα και όταν εκτίθεται σε υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Σε αντίθεση με τα υδρόφοβα υλικά – όπως τα πρόσμικτα PRAN (PENETRON INTERNATIONAL 2017): που μελετήθηκαν ανωτέρω – τα κρυσταλλικά πρόσμικτα είναι υδρόφιλα και εναποτίθενται σε όλη την μάζα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να γίνονται μόνιμο μέρος της μάζας του σκυροδέματος, όταν εκτίθενται σε νερό. Με τη βοήθεια των προσμίκτων PRAHs είναι περιττή η χρήση εξωτερικών στεγανωτικών μεμβρανών, ακόμα και για σκυρόδεμα που βρίσκεται υπό υψηλή υδροστατική πίεση (ACI 2011, 2013):.

#### **Τεχνολογία PRAH: Δοκιμές σε Συνθήκες Υψηλών Υδροστατικών Πιέσεων**

Όμοια με την γενικότερη τεχνολογία που αφορά στη δράση των πρόσμικτων PRAH, όπως περιγράφεται ανωτέρω, τα ενεργά συστατικά του πρόσμικτου ανάπτυξης κρυστάλλων αντιδρούν με τα παραπροϊόντα της ενυδάτωσης του σκυροδέματος, σε νέες κατασκευές σκυροδέματος. Βάσει αυτών των αντιδράσεων, μετά το στάδιο της υδρόλυσης, παράγονται μόρια ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH) και αδιάλυτοι κρύσταλλοι στη μήτρα του σκυροδέματος. Αυτοί οι αδιάλυτοι σχηματισμοί σφραγίζουν τους πόρους και τα τριχοειδή του σκυροδέματος, με σκοπό την δραματική μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος.

Όταν το πρόσμικτο ανάπτυξης κρυστάλλων προστίθεται τη στιγμή της παρασκευής της παρτίδας του σκυροδέματος, οι κρυσταλλικές διατάξεις που παράγονται σφραγίζουν μόνιμα τη μάζα του σκυροδέματος και τις τριχοειδείς ρηγματώσεις («τριχιάσματα»), που σχηματίζονται καθ'όλη τη διάρκεια του σκυροδέματος. Τα προϊόντα της PENETRON® έχουν μελετηθεί εκτενώς σε ανεξάρτητα εργαστήρια, σε συνθήκες κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις (συμπεριλαμβανομένων των προτύπων ASTM D5084, NBR 10.787/94, USAE CRD C48, BS EN 12390-8 και Υδατοπερατότητα κατά DIN 1048-5). Όπως παρατηρήθηκε σε αυτές τις μελέτες, οι κρυσταλλικές διατάξεις μειώνουν αποτελεσματικά τη διαπερατότητα των δειγμάτων από σκυρόδεμα, σε σχέση με τα «τυφλά» δείγματα, καθώς η διαρροή στα υπό μελέτη δείγματα που περιείχαν το πρόσμικτο ανάπτυξης κρυστάλλων είχε εξαλειφθεί, ακόμη και όταν αυτά εκτίθενται σε δοκιμές σε συνθήκες υψηλής υδροστατικής πίεσης. Τα παρακάτω παραδείγματα παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα και την βελτίωση του σκυροδέματος λόγω των αντιδράσεων των ενεργών συστατικών του PENETRON ADMIX® που οδηγούν σε μείωση της

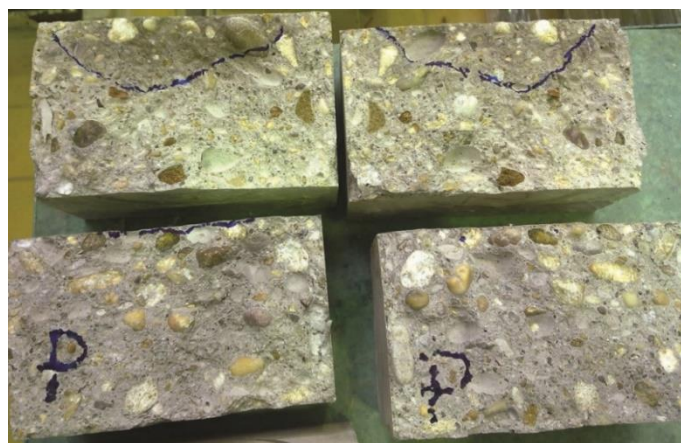
διαπερατότητας, υπό συνθήκες υψηλής υδροστατικής πίεσης (PENETRON INTERNATIONAL 2017).

### **ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ – NBR 10.787/94 / ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 700 KPa (101,5 PSI) / EN 12390-8**



**Σχήμα 8:** Υδροστατική Πίεση

Μετά την έκθεση των 4 εβδομάδων σε υδροστατική πίεση 700 kPa (περ. 70 m ύψους στήλης νερού), οι κρυσταλλικοί σχηματισμοί από τις αντιδράσεις των ενεργών συστατικών του συστήματος ανάπτυξης κρυστάλλων είχαν μειώσει την διαπερατότητα του σκυροδέματος και σχεδόν εξ'ολοκλήρου εξαλείψει κάθε διαρροή (Σχήμα 8) (PENETRON INTERNATIONAL 2015).



**Σχήμα 9:** Μέτρηση Διείσδυσης των θραυσμένων δοκιμίων

Παραπάνω παρουσιάζονται δείγματα που έχουν επεξεργαστεί με το πρόσμικτο ανάπτυξης κρυστάλλων (φέρουν τη σήμανση P) και δύο «τυφλά» δείγματα. Αυτή η φωτογραφία τραβήχτηκε αμέσως μετά τη θραύση των δειγμάτων στη μέση, ώστε να μετρηθεί το βάθος διείσδυσης νερού. Τα δείγματα που είχαν επεξεργαστεί με το πρόσμικτο ανάπτυξης κρυστάλλων παρουσίασαν μείωση της διαπερατότητας της τάξης του 94,4%, σε σχέση με τα «τυφλά» δείγματα, ενώ τα περισσότερα από αυτά στην 4<sup>η</sup> εβδομάδα δοκιμών, παρουσίασαν διείσδυση σε mm μηδέν (0). Αντίστοιχα αποτελέσματα με μηδενική διείσδυση, παρουσίασαν και τα δοκίμια (κατά τη φάση δοκιμών 2015-2018) με διαφορετικούς τύπους σκυροδέματος (C20/25 και C30/37), αλλά και με τσιμέντα από (ERGOTEST 2015, 2016) διαφορετικές εταιρείες παραγωγής (TITAN, ΧΑΛΥΨ, LAFARGE και ΛΑΡΣΙΝΟΣ).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η τεχνολογία PENETRON<sup>®</sup> με ανάπτυξη κρυστάλλων στο σκυρόδεμα αυξάνοντας θεμελιώδεις και ουσιαστικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως η στεγανότητα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής, η αντιδιαβρωτική προστασία και η χημική ανθεκτικότητα έχει σαν αποτέλεσμα την συνολική αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος (Durability of Concrete) με συνέπεια την αύξηση του χρόνου ζωής των κατασκευών.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο συγκριτικό διάγραμμα, με αύξηση κατά περίπου 60 χρόνια της διάρκειας ζωής του σκυροδέματος, σύμφωνα με τον 2<sup>ο</sup> Νόμο του Fick και σε συμφωνία της αναφοράς του ACI 212.3P-10 (Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος), μεταξύ συμβατικού «μάρτυρα» κατηγορίας C30/37 και αντίστοιχων δειγμάτων (με κοινό και υψηλής αντοχής τσιμέντο) που περιέχουν το πρόσμικτο σκυροδέματος με ανάπτυξη κρυστάλλων PENETRON ADMIX<sup>®</sup>, σε διαβρωτικό περιβάλλον 4,7 φορές υψηλότερου του θαλάσσιου, είναι η απτή απόδειξη των παραπάνω αναφορών και των ευεργετικών αποτελεσμάτων του εν λόγω συστήματος.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

PENETRON INTERNATIONAL, The Concrete Solution, General Brochure, USA (2014).

American Concrete Institute, Report on Chemical Admixtures for Concrete, ACI 212.3R-10, (2011).

American Concrete Institute, Chemical Admixtures for Concrete, ACI Education Bulletin E4-12, (2013).

PENETRON INTERNATIONAL, Durability of Concrete, USA (2017).



PENETRON INTERNATIONAL, Advantages of the PENETRON® Integral Waterproofing System with a Focus on PENETRON ADMIX®, Brochure, USA (2015).

University of Bologna, Determination of the water absorption at atmospheric pressure and under pressure of a total of 42 cylindrical concrete test pieces made on your behalf at the Laboratorio del Consorzio Cave of Bologna (2005).

Ergotest (2015), Βάθος νερού υπό πίεση, ποιότητας σκυροδέματος C20/25, ΕΛΟΤ EN 12390.08:2009 (2015).

Ergotest (2015), Βάθος νερού υπό πίεση, ποιότητας σκυροδέματος C30/37, ΕΛΟΤ EN 12390.08:2009 (2015).

Ergotest (2016), Βάθος νερού υπό πίεση, ποιότητας σκυροδέματος C20/25, ΕΛΟΤ EN 12390.08:2009 (2016).