

# ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΤΑΧΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΥΤΗΣ

Α.Σ. Μαρίνος

*Μηχανικός υλικών, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών Π.Ι.*

Β.Ε. Καλοϊδίας

*Δρ. Χημικός Μηχανικός, Τεχνικός Διευθυντής Ελληνικού Κέντρου Έρευνας Τσιμέντου*

Θ.Ε. Ματίκας

*Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών Π.Ι.*

*Λέξεις κλειδιά: Ανθεκτικότητα, χλωριόντα, συντελεστής διάχυσης, ποζολάνες, διαπερατότητα χλωριόντων*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος αποτελεί βασική παράμετρο για τη μεγάλη διάρκεια ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σαν ελέγχουσα παράμετρος της ποιότητας και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος η διαπερατότητα των χλωριόντων, η οποία μετρήθηκε με τη χρήση συσκευής ταχείας μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων κατά *ASTM C 1202-97*. Μελετήθηκαν σκυροδέματα με διάφορους τύπους τσιμέντων που χρησιμοποιούνται κυρίως στην Ελλάδα, τα οποία διαφοροποιούνται τόσο ως προς την αντοχή όσο και ως προς τα ποσοστά των ποζολανικών υλικών. Παρασκευάστηκαν σκυροδέματα με τρεις διαφορετικούς λόγους νερό/τσιμέντο (N/T) και με τη χρήση κατάλληλης ποσότητας υπερρευστοποιητή επιτεύχθηκε η αυτή εργασιμότητα. Τα δοκίμια σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν συντηρήθηκαν σε δεξαμενές νερού για 28 ημέρες, 3 μήνες και 6 μήνες, ηλικίες για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις διαπερατότητας χλωριόντων και αντοχής σε θλίψη.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γενικά παραδεκτό πως το σκυρόδεμα αποτελεί σήμερα το σημαντικότερο δομικό υλικό και έχει κυρίαρχη θέση στον τομέα των κατασκευών, τόσο ως άοπλο όσο και ως οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα σπουδαία μηχανικά χαρακτηριστικά του καθώς και ο εύκολος και οικονομικός τρόπος παρασκευής του δικαιολογούν τη χρήση του ως υλικό σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των διάφορων κατασκευαστικών έργων, όπως η δόμηση κτιρίων,

φραγμάτων, γεφυρών και διάφορων υπόγειων αλλά και υποθαλάσσιων κατασκευών (Τσίμας, Σ., Τσιβιλής, Σ. 2004).

Βασικός στόχος κατά την ανάπτυξη τέτοιων κατασκευών είναι να εμφανίζουν υψηλή μηχανική αντοχή και μεγάλη διάρκεια ζωής. Δυστυχώς το περιβάλλον στο οποίο αυτές οι κατασκευές εκτίθενται καθώς και οι διάφορες φυσικές και χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν λόγω των διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών, επιδρούν αρνητικά είτε στο σκυρόδεμα, είτε στον οπλισμό (ράβδοι χάλυβα) των κατασκευών και επομένως προκαλούν πρόβλημα ως προς την επίτευξη του παραπάνω στόχου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα περιβάλλοντος που προκαλεί φθορές στο σκυρόδεμα αποτελεί το θαλάσσιο περιβάλλον. Σήμερα, περίπου τα 2/5 των κατασκευών από σκυρόδεμα παγκοσμίως εκτίθενται σε θαλάσσιο περιβάλλον. Έτσι διάφορα θαλάσσια άλατα και άλλα στοιχεία αυτού έρχονται σε επαφή με το σκυρόδεμα με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, προκαλώντας την καταστροφή είτε του ίδιου είτε του οπλισμού του (Lindvall, A. 2001).

Καθημερινά πραγματοποιούνται σε διεθνή κλίμακα έρευνες πάνω στις συνθέσεις των σκυροδεμάτων, στην ποιότητα και στις ιδιότητες τους καθώς και πάνω στην ποιότητα και τις ιδιότητες των διαφόρων τσιμέντων, με σκοπό την εύρεση λύσεων για τα προβλήματα που προκαλούνται στις κατασκευές από σκυρόδεμα λόγω της αλληλεπίδρασής τους με το περιβάλλον. Αν και οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη, ήδη κάποιες προτάσεις σήμερα υπάρχουν και εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση του προβλήματος, όπως η μείωση του πορώδους και η ανάπτυξη κατάλληλων προστατευτικών επικαλύψεων του σκυροδέματος.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της αξιολόγησης της ανθεκτικότητας ελληνικών τύπων σκυροδέματος στο θαλασσινό νερό. Για το σκοπό αυτό μετρήθηκε η διαπερατότητα των χλωριόντων του θαλασσινού νερού μέσα από διάφορους τύπους σκυροδέματος, ώστε να ελέγξουμε πώς τα διάφορα στοιχεία του σκυροδέματος (λόγος N/T, ποσοστό ποζολάνης κ.λ.π) επηρεάζουν τις ιδιότητες του (αντοχή, πορώδες κ.λ.π), καθώς και τη διαπερατότητα των χλωριόντων μέσω αυτού.

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται μετρήσεις της διαπερατότητας των χλωριόντων με χρήση συσκευής ταχείας μέτρησης και μετρήσεις θλιπτικής αντοχής σε ελληνικών τύπων σκυροδέματα, συντηρημένα σε νερό για ηλικίες 28 ημερών, 3 μηνών και 6 μηνών ενώ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος πρόκειται να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για ηλικίες ενός και δύο ετών. Παρουσιάζεται ο βαθμός συσχέτισης των

στοιχείων του σκυροδέματος με τη διαπερατότητα των χλωριόντων και το μέγεθος της θλιπτικής αντοχής αυτού και αναπτύσσεται ένα μαθηματικό – στατιστικό μοντέλο συσχέτισης του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων με την ποσότητα του κλίνκερ, την θερμοκρασία περιβάλλοντος και το χρόνος έκθεσης του σκυροδέματος σε περιβάλλον χλωριόντων.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

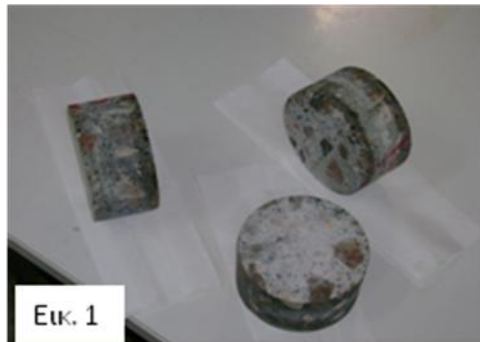
Το πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από κυβικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 15×15×15 cm και κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων Ø15cm×30cm, εννέα συνολικά διαφορετικών συνθέσεων. Τα στοιχεία της κάθε σύνθεσης φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Στοιχεία σύνθεσης ανά m<sup>3</sup>

| A/A Σύνθεσης   | 1       | 2              | 3               | 4       | 5               | 6               | 7      | 8               | 9              |
|----------------|---------|----------------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|----------------|
| Τύπος          | II 42,5 | II 42,5        | I 42,5          | IV 32,5 | IV 32,5         | IV 32,5         | I 52,5 | I 52,5          | I 52,5         |
| Τσιμέντου      |         |                |                 |         |                 |                 |        |                 |                |
| Ποσότητα       | 330     | 340            | 360             | 350     | 380             | 380             | 330    | 330             | 330            |
| Τσιμέντου (Kg) |         |                |                 |         |                 |                 |        |                 |                |
| N/T            | 0,6     | 0,55           | 0,45            | 0,6     | 0,55            | 0,45            | 0,6    | 0,55            | 0,45           |
| Glenium 51     | -       | 0,68<br>(0,2%) | 1,98<br>(0,55%) | -       | 0,57<br>(0,15%) | 2,58<br>(0,68%) | -      | 0,43<br>(0,13%) | 1,98<br>(0,6%) |
| Σκύρα (Kg)     | 667     | 671            | 684             | 635     | 626             | 651             | 670    | 681             | 703            |
| Γαρμπύλι (Kg)  | 220     | 218            | 229             | 212     | 209             | 221             | 221    | 225             | 235            |
| Άμμος (Kg)     | 945     | 967            | 992             | 922     | 908             | 967             | 949    | 966             | 1020           |

Με κατάλληλη επεξεργασία επιφέραμε στα κυλινδρικά δοκίμια την κατάλληλη μορφή ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στην συσκευή ταχείας μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων PROOVE it. Η τελική μορφή των δοκιμίων (Ø 95mm και ύψος 50mm) φαίνεται στην εικόνα 1.

Αφού τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε κενό κατά το πρότυπο *ASTM C 1202-97*, τοποθετήθηκαν έπειτα στο κελί μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 2 .



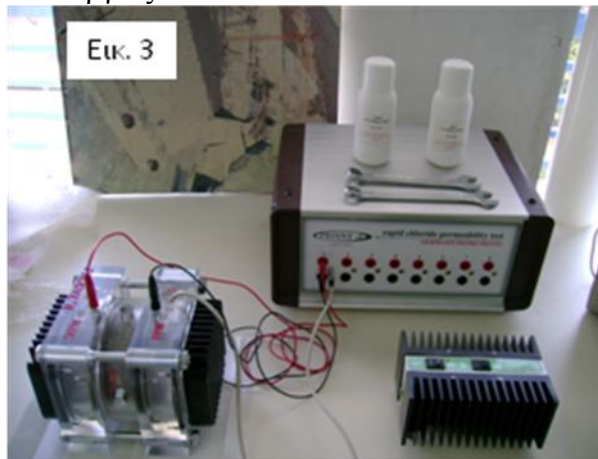
Εικ. 1



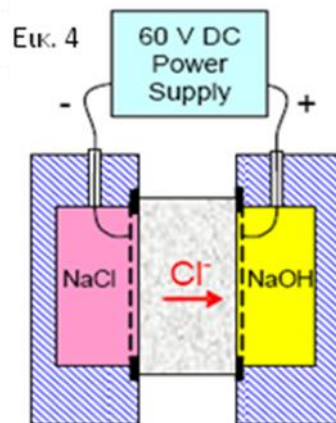
Εικ. 2

Εικόνα 1. Κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων  $\varnothing 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ .  
Εικόνα 2. Κελί μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων.

Στις εικόνες 3 και 4 απεικονίζεται το σύστημα PROOVE it και η αρχή λειτουργίας του.



Εικ. 3



Εικ. 4

Εικόνα 3. Το σύστημα PROOVE it.  
Εικόνα 4. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος PROOVE it.

Οι παράμετροι κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της διαπερατότητας των χλωριόντων μέσα από το σκυρόδεμα είναι οι εξής:

1. Τάση ρεύματος: 60V
2. Χρόνος διεξαγωγής του πειράματος: 6h
3. Διάμετρος δοκιμίου: 95mm
4. Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των διαλυμάτων: 90 °C.

Αφού το πείραμα τελείωσε πήραμε τα αποτελέσματα, τα οποία ήταν: Α)  
Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που πέρασε μέσα από το δοκίμιο και

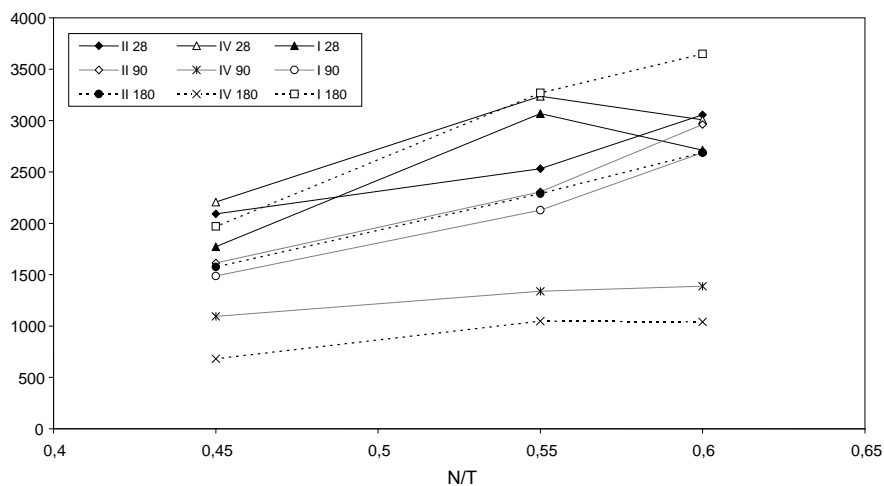
Β) Οι τιμές της έντασης του ρεύματος και τη θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Επίσης πραγματοποιήσαμε μετρήσεις μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής στα κυβικά δοκίμια με την υδραυλική μηχανή ελέγχου θλιπτικής αντοχής (πρέσα) με ρυθμό αύξησης φορτίου 10 KN/mm<sup>2</sup>/s.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

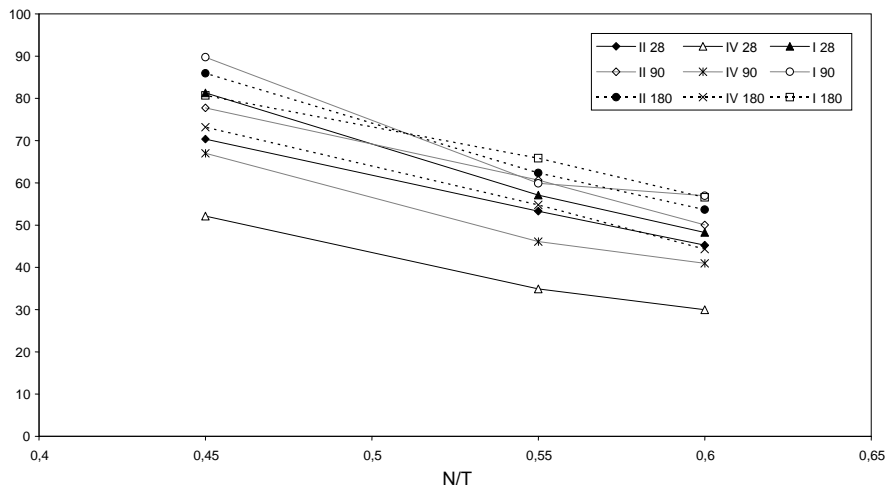
#### 3.1 Διάγραμμα N/T – Ηλεκτρικό φορτίο

Από την εικόνα 5 διαπιστώνουμε πως τα δοκίμια με λόγο N/T = 0.45 εμφανίζουν μικρότερη διαπερατότητα ηλεκτρικού φορτίου και επομένως χλωριόντων απ' ότι τα δοκίμια με λόγους N/T ίσους με 0.55 και 0.6. Επίσης παρατηρούμε ότι τα ποζολανικά τσιμέντα (CEM IV) εμφανίζουν μικρότερη διαπερατότητα με το πέρασμα του χρόνου σε σχέση με τα CEM I και CEM II.



Εικόνα 5. Μεταβολή της διαπερατότητας του ηλεκτρικού φορτίου ως προς τον λόγο N/T και την ηλικία.

### 3.2 Διάγραμμα N/T – θλιπτική αντοχή

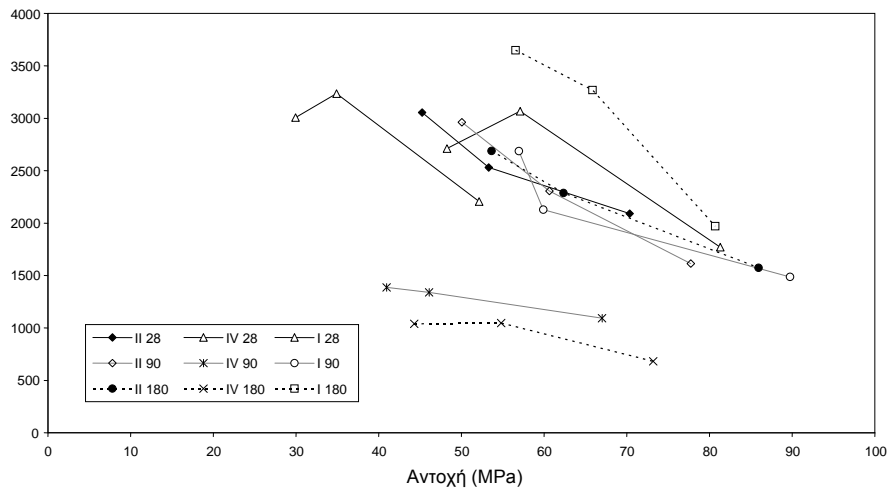


Εικόνα 6. Μεταβολή της αντοχής ως προς τον λόγο N/T και την ηλικία.

Από την εικόνα 6 διαπιστώνουμε ότι οι αντοχές των δοκιμίων για την ίδια ηλικία αυξάνονται με μείωση του λόγου N/T.

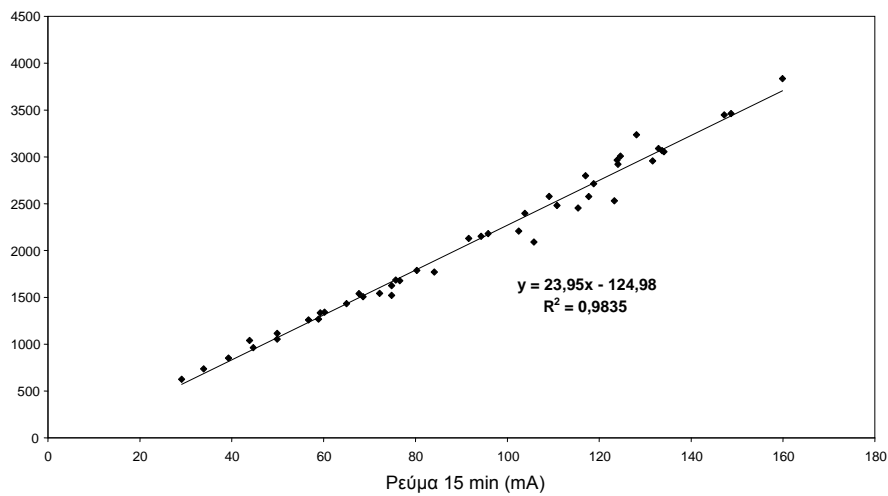
### 3.3 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής – Ηλεκτρικού φορτίου

Από την εικόνα 7 διαπιστώνουμε πως η ποσότητα του φορτίου που περνάει μέσα από το σκυρόδεμα μειώνεται ενώ οι αντοχές του αυξάνονται με αύξηση της ηλικίας του σκυροδέματος.



Εικόνα 7. Μεταβολή της διαπερατότητας ηλεκτρικού φορτίου και της αντοχής με την ηλικία.

### 3.4 Διάγραμμα Ρεύματος 15 min – Ηλεκτρικού φορτίου



Εικόνα 8. Συσχέτιση των τιμών του ρεύματος των 15min με το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο.

Παρατηρώντας την εικόνα 8 διαπιστώνουμε την ύπαρξη γραμμικού συσχετισμού του ρεύματος των 15 min με το φορτίο που πέρασε από το

δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ο συντελεστής συσχετισμού  $R^2$  ισούται με 0.98, μια τιμή που δίνει καλή στατιστική συμφωνία. Έτσι θα μπορούσε κανένας, μετρώντας το αρχικό ρεύμα να προσδιορίσει με αρκετή ασφάλεια το διερχόμενο φορτίο (Cb) από το δοκίμιο, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο του πειράματος. Στη βιβλιογραφία (Nokken, M.R., Hooton, R.D. 2006) αναφέρεται αντίστοιχη μέτρηση της αγωγιμότητας των χλωριόντων για την εκτίμηση της διαπερατότητας χλωριόντων ενός σκυροδέματος.

#### 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Η κίνηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα (διάλυμα πόρων) υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου περιγράφεται από την εξίσωση Nernst-Planck:

$$-J_i = D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i v_i(x) \quad (1)$$

όπου  $J$  = ροή των χλωριόντων,  $D$  = συντελεστής διάχυσης,  $C(x)$  = συγκέντρωση χλωριόντων στη θέση  $x$ ,  $T$  = θερμοκρασία,  $E(x)$  = εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στη θέση  $x$ ,  $v(x)$  = ταχύτητα αγωγής,  $R$  = σταθερά των αερίων και  $F$  = σταθερά Faraday.

Έτσι στην γενικότητά της η μεταφορά των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορεί να εκφρασθεί ως το άθροισμα των μεταφερομένων χλωριόντων με:

- 1) Καθαρή διάχυση λόγω διαφοράς συγκέντρωσης.
- 2) Καθαρή ηλεκτρική μεταφορά λόγω του εφαρμοζόμενου πεδίου (διαφορά δυναμικού).
- 3) Καθαρή διαφορά διαλύματος λόγω διαφοράς πίεσης.

Στα πειράματά μας στο κελίο της ταχείας εκτίμησης διεύθυνσης χλωριόντων δεν υπάρχει διαφορά πίεσης ή υγρασίας και έτσι ο τρίτος όρος της εξίσωσης είναι μηδενικός. Επίσης λόγω της μικρής διάρκειας του πειράματος και της μικρής τιμής του συντελεστή διάχυσης σε σύγκριση με την μεταφορά χλωριόντων λόγω ηλεκτρικού πεδίου ο πρώτος όρος της εξίσωσης, δηλαδή η μεταφορά με καθαρή διάχυση λόγω διαφοράς συγκεντρώσεων, θεωρείται αμελητέος. Έτσι η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$J = \frac{z_i F D_i C_i}{RT} \frac{\partial E}{\partial x} \quad (2)$$

στην οποία με μεγάλη ασφάλεια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η πτώση τάσης του πεδίου κατά μήκος του δοκιμίου είναι γραμμική.

Θεωρώντας ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων στην κάθοδο του κελίου είναι σταθερή και ότι κατά την διάρκεια του πειράματος έχει επιτευχθεί σταθερή κατάσταση μπορούμε να λύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς



τον συντελεστή διάχυσης. Η μεταφερθείσα ποσότητα χλωριόντων στα πειράματά μας εκφράζεται με την τιμή του ρεύματος που διέρχεται από το κελίο η από την αντίστοιχη συνολική ποσότητα φορτίου (Coulombs).

Τελικά για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης έχουμε την παρακάτω εξίσωση

$$D_{eff} = \frac{RT i t_n L}{n F^2 E A C Z} \quad (3)$$

όπου  $I$  = διερχόμενο ρεύμα σε A,  $L$  = μήκος του δοκιμίου σε m,  $A$  = κάθετη επιφάνεια του δοκιμίου σε  $m^2$ ,  $E$  = το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε V,  $T$  = απόλυτη θερμοκρασία σε  $^{\circ}K$ ,  $t_n$  = ο αριθμός μεταφοράς των χλωριόντων που είναι 0.65 από σχετική βιβλιογραφία,  $Z$  = το ηλεκτρικό φορτίο των χλωριόντων,  $n$  = το σθένος των χλωριόντων,  $F$  = η σταθερά Faraday,  $C$  = η συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα NaCl και  $R$  = σταθερά των αερίων.

Θεωρούμε ότι ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων μεταβάλλεται με την θερμοκρασία με τον παρακάτω νόμο

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

όπου  $U$  = ενέργεια ενεργοποίησης σε  $J/mol$ ,  $T$  = απόλυτη θερμοκρασία σε  $^{\circ}K$ ,  $T_{ref}$  = απόλυτη θερμοκρασία αναφοράς σε  $^{\circ}K$ ,  $D_{ref}$  = συντελεστής διάχυσης σε  $m^2/s$  για  $T_{ref}$ .

Από την εξίσωση αυτή υπολογίσθηκε ο συντελεστής διάχυσης στην θερμοκρασία των  $25^{\circ}C$  για να απαλειφθεί η επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των πειραμάτων σε διαφορετικές εποχές.

## 5. ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΝΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΚΙΑΣ ΑΥΤΟΥ

Στην βιβλιογραφία αλλά και στο υπολογιστικό μοντέλο LIFE-365 (Thomas, M.D.A., Bentz, E.C. 2000), ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα θεωρείται ότι μεταβάλλεται με την ηλικία του σκυροδέματος σύμφωνα με τον ακόλουθο νόμο

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (5)$$

όπου  $D_{ref}$  = συντελεστής διάχυσης σε μια ηλικία αναφοράς  $t_{ref}$  (28 ημέρες για το LIFE-365),  $t_{ref}$  = ηλικία αναφοράς,  $t$  = ηλικία του σκυροδέματος,  $D(t)$  = συντελεστής διάχυσης στην ηλικία  $t$ ,  $m$  = εκθέτης που εξαρτάται από την σύνθεση του σκυροδέματος.

Ο εκθέτης  $m$  συνήθως λαμβάνεται ως γραμμική συνάρτηση του ποσοστού του ποζολανικού υλικού στο τσιμέντο ή αντίστοιχα της περιεκτικότητας σε κλίνκερ των τσιμέντων, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$m = a + b * X \quad (6)$$

όπου  $X$  το κλάσμα του κλίνκερ = % κλίνκερ/100.

Στο LIFE-365 θεωρείται ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (7)$$

όπου %FA = ποσοστό του ποζολανικού υλικού (ποζολάνη + ιπτάμενη τέφρα) στο τσιμέντο και %SG = ποσοστό σκωρίας υγικαμίνων στο τσιμέντο.

Τα σύνθετα τσιμέντα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματά μας περιείχαν μόνο ποζολάνη και ιπτάμενη τέφρα και για αυτόν το λόγο πήραμε την παραπάνω απλοποιημένη σχέση. Επίσης από την βιβλιογραφία αλλά και από την μορφή των καμπυλών των πειραμάτων μας φαίνεται ότι για τον συντελεστή διάχυσης της ηλικίας αναφοράς σε σχέση με τον λόγο νερό / τσιμέντο (w/c) ισχύει η παρακάτω εκθετική συνάρτηση

$$D_{ref} = k * 10^{(p + r * (w/c))} \quad (8)$$

όπου  $p$  και  $r$  σταθερές.

Το LIFE-365 δίνει αντίστοιχα την παρακάτω σχέση:

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40W/CM)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (9)$$

Από τον συγκερασμό των παραπάνω σχέσεων φαίνεται ότι ισχύει η παρακάτω γραμμική συνάρτηση:

$$\ln(D(t)) = A * X + B * \ln(t) + C * X * \ln(t) + D * (w/c) + E \quad (10)$$

για θερμοκρασία αναφοράς 25 °C .

Λαμβάνοντας τις υπολογιστικές τιμές του  $D(t)$  και τις πειραματικές τιμές των άλλων μεγεθών εφαρμόσαμε την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής

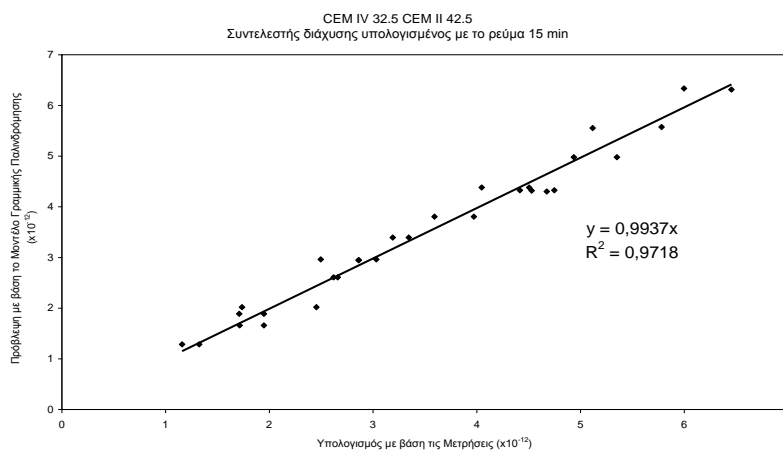
παλινδρόμησης στο EXCEL και το αποτέλεσμα ήταν να λάβουμε σημαντικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0.90$  και γραμμικούς συντελεστές στατιστικά σημαντικούς ( $t_{\text{student}} > 6$ ).

Με τον τρόπο αυτό επιτύχαμε να έχουμε μια σχέση πρόβλεψης του συντελεστή Διάχυσης των χλωριόντων συναρτήσει του ποσοστού του ποζολανικού υλικού στο τσιμέντο, του λόγου νερό / τσιμέντο (w/c) και της ηλικίας του σκυροδέματος.

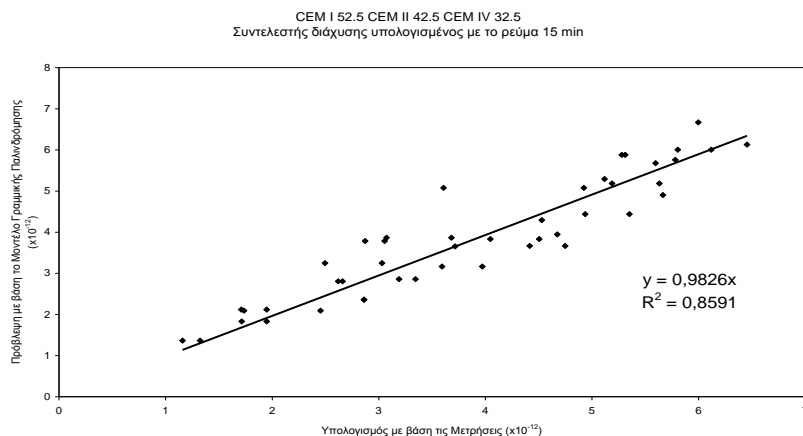
Εάν εφαρμόσουμε την γραμμική παλινδρόμηση μόνο στα δεδομένα των συνθέτων τσιμέντων CEM IV 32.5 και CEM II 42.5 τότε ο συντελεστής συσχέτισης γίνεται ακόμη υψηλότερος και έχει την τιμή  $R^2 = 0.97$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνεται ο υπολογισθείς συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων από τα πειράματα και ο προβλεφθείς από το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης.

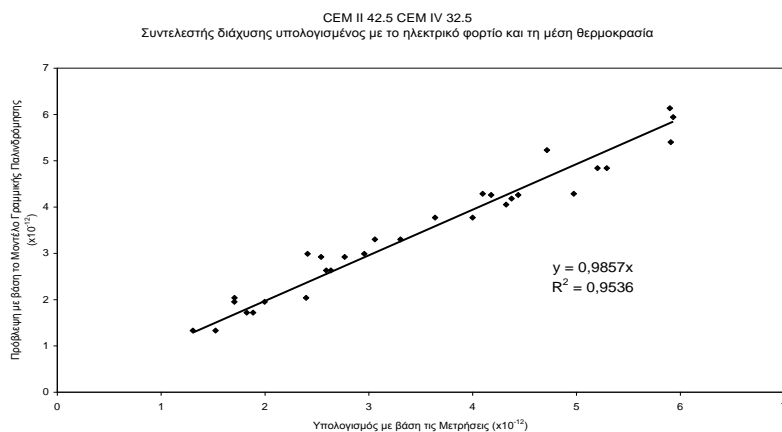
Από τις εικόνες 9,10,11 και 12 φαίνεται η καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές τιμές. Η συμφωνία αυτή είναι ιδιαίτερα καλή για τα σύνθετα τσιμέντα CEM IV 32.5 και CEM II 42.5.



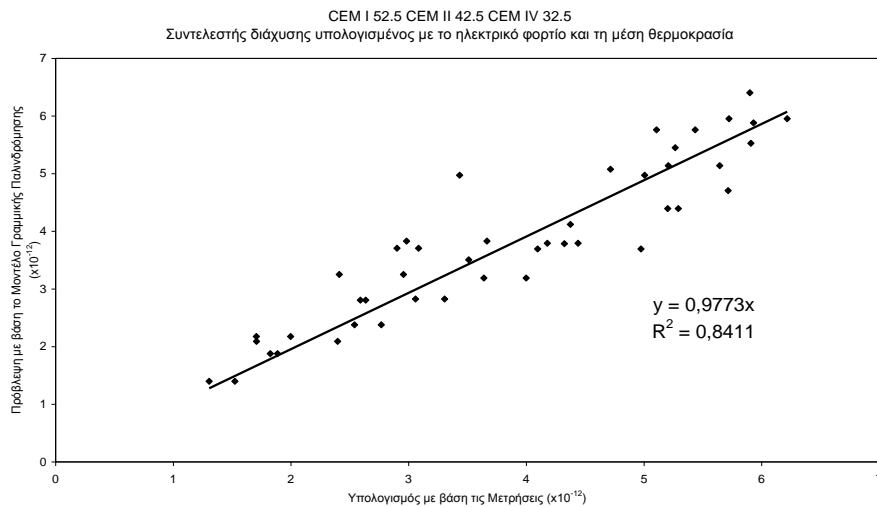
Εικόνα 9. Συσχέτιση των πειραματικών τιμών του συντελεστή διάχυσης με αυτές του Μοντέλλου Γραμμικής Παλινδρόμησης για τα CEM IV 32.5 και CEM II 42.5.



Εικόνα 10. Συσχέτιση των πειραματικών τιμών του συντελεστή διάχυσης με αυτές του Μοντέλλου Γραμμικής Παλινδρόμησης για τα CEM I 52.5, CEM IV 32.5 και CEM II 42.5.



Εικόνα 11. Συσχέτιση των πειραματικών τιμών του συντελεστή διάχυσης με αυτές του Μοντέλλου Γραμμικής Παλινδρόμησης για τα CEM IV 32.5 και CEM II 42.5.



Εικόνα 12. Συσχέτιση των πειραματικών τιμών του συντελεστή διάχυσης με αυτές του Μοντέλλου Γραμμικής Παλινδρόμησης για τα CEM I 52.5, CEM IV 32.5 και CEM II 42.5

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν μπορούν να διατυπωθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο λόγος N/T σχετίζεται με τη μεταβολή της διαπερατότητας των χλωριόντων μέσα από το σκυρόδεμα και μάλιστα όσο ο λόγος αυξάνεται, η διαπερατότητα των χλωριόντων αυξάνεται, αφού ισχύει η σχέση Υψηλός N/T => Υψηλό πορώδες.
- Η ηλικία του σκυροδέματος για τον ίδιο λόγο N/T σχετίζεται με τη μεταβολή της διαπερατότητας των χλωριόντων μέσα από το σκυρόδεμα, κάτι το οποίο είναι λογικό αφού όσο μεγαλύτερη είναι η συντήρηση του σκυροδέματος σε νερό τόσο μεγαλύτερη είναι η ενυδάτωση του σκυροδέματος και επομένως έχουμε μεγαλύτερη μείωση του πορώδους. Έτσι όσο μεγαλώνει η ηλικία του σκυροδέματος, τόσο μειώνεται η διαπερατότητα των χλωριόντων σε αυτό.
- Ο λόγος N/T σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη, αφού Υψηλός N/T => Υψηλό πορώδες και επομένως η θλίψη του σκυροδέματος είναι ευκολότερη.
- Η ηλικία του σκυροδέματος για τον ίδιο λόγο N/T σχετίζεται ανάλογα με τη μεταβολή της αντοχής σε θλίψη, αφού όσο μεγαλύτερη η ηλικία του

σκυροδέματος, τόσο μικρότερο το πορώδες του και επομένως τόσο μεγαλύτερη η αντοχή του.

- Τα σύνθετα τσιμέντα CEM II 42,5 και CEM IV 32,5 εξαιτίας της ποζολάνης που περιέχουν, παρουσιάζουν μείωση του πορώδους του σκυροδέματος σε μεγαλύτερο βαθμό από το CEM I 52,5 και μάλιστα όσο η ηλικία του σκυροδέματος μεγαλώνει τόσο η ποζολάνη μειώνει το πορώδες του σκυροδέματος, κάτι που συνεπάγεται μείωση της διαπερατότητάς του.

- Αύξηση της αντοχής συνεπάγεται μείωση της διαπερατότητας. Αυτή η ιδιότητα του σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για την εκτίμηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε χλωριόντα καθώς και για το βαθμό προστασίας του οπλισμού από το σκυρόδεμα.

- Μέσω των διαγραμμάτων του ρεύματος των 15 min είδαμε ότι το ρεύμα των 15 min παρουσιάζει πολύ καλό συσχετισμό με το φορτίο που πέρασε από το δοκίμιο άρα και με τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Έτσι συμπεραίνουμε ότι το ρεύμα των 15 min σε μία μέτρηση ταχείας εκτίμησης της διαπερατότητας των χλωριόντων μέσα από σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετή ασφάλεια για την εκτίμηση του ποσοστού των χλωριόντων που διαπερνούν το σκυρόδεμα.

- Συγκρίνοντας τις τιμές του μοντέλου της γραμμικής παλινδρόμησης που αναπτύξαμε με αυτές που πήραμε από τις μετρήσεις μας όσον αφορά το συντελεστή διάχυσης, είδαμε ότι συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό και επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο συντελεστής διάχυσης μπορεί να υπολογιστεί ικανοποιητικά συναρτήσει κάποιων στοιχείων του σκυροδέματος, όπως ο λόγος N/T και το ποσοστό του κλίνκερ.

## 7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Τσίμας, Σ., Τσιβιλής, Σ., «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ», Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα (2004)

Lindvall, A., “Environmental actions and response – reinforced concrete structures exposed in road and marine environment”. Nordic Concrete Research, Vol 27, No 6 (2001), 63-81

Nokken, M.R., Hooton, R.D., “Electrical Conductivity Testing: A prequalification and quality assurance tool”. Concrete International, Vol 28, No 10 (2006), 58-63

Thomas, M.D.A., Bentz, E.C., «Manual of Life-365, a computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposes to chlorides», October 2000

ASTM test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration, ASTM Standard C1202-97 (1997)