

## ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### Σκληρυμένο Σκυρόδεμα

#### Σκληρυμένο Σκυρόδεμα (Hardened Concrete):

χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που έχει στερεοποιηθεί και έχει αναπτύξει μηχανικές αντοχές

- ▶ Σταθερότητα όγκου: η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στις μεταβολές του όγκου του σκυροδέματος που οφείλονται:
  - ▶ στην μετακίνηση του περιεχόμενου νερού, προς το περιβάλλον ή εντός του σκυροδέματος
  - ▶ στις θερμοκρασιακές μεταβολές
  - ▶ στην ανεπιθύμητη δράση διαφόρων συστατικών που άγονται στο σκυρόδεμα με τον αέρα ή το νερό (παράγοντες ανθεκτικότητας).

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: Συστατικά

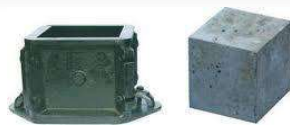
272

## ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - Ιδιότητες & Δοκιμές

### Σκληρυμένο Σκυρόδεμα - Ιδιότητες

- ▶ Μηχανική αντοχή (strength): εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αντεπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται. Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια ( $N/mm^2$  ή  $MPa$ ).

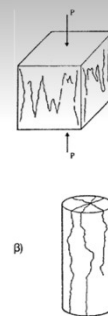
- προσδιορίζεται πειραματικά



ΚΥΒΙΚΑ 150\*150\*150 (mm)



ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ  $\phi$ 150\*300 (mm)



Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: Συστατικά

273

## ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - Ιδιότητες & Δοκιμές

### Σκληρυμένο Σκυρόδεμα - Ιδιότητες

- ▶ Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια ( $N/mm^2$  ή MPa).

$$f_{cm} = \frac{F(N)}{A(mm^2)} = \frac{F}{A} [N/mm^2]$$

- αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος
- βασικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε εφελκυσμό), εκφράζονται μέσω εμπειρικών σχέσεων, συναρτήσεων της  $f_c$

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: Συστατικά

274

### Σκληρυμένο Σκυρόδεμα – Χαρακτηριστική Αντοχή

**Θλιπτική αντοχή  $f_c$ :** τυχαία μεταβλητή κανονικής κατανομής, μέσης τιμής  $f_{cm}$  και τυπικής απόκλισης,  $\sigma$

$$f_{ck} = f_{cm} - 1.64\sigma$$

Προσεγγιστικά  $\sigma=5 N/mm^2$

$$f_{cm} = f_{ck} + 1.64\sigma = f_{ck} + 1.64 \times 5 = f_{ck} + 8MPa$$

**Χαρακτηριστική αντοχή,  $f_{ck}$ :**

υποθετικά, αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρέπεται σε δοκίμια, το 5% αυτών θα είχαν αντοχή μικρότερη της  $f_{ck}$

**Συμβατική αντοχή,  $f_{28}$ :**

- δοκίμια τυποποιημένης μορφής και διαστάσεων, ΚΥΒΙΚΑ 150\*150\*150 (mm), ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ  $\phi 150 \times 300$  (mm)
- παρασκευάζονται από νωπό σκυρόδεμα, κατά τη διάστρωση
- συντηρούνται με καθορισμένο τρόπο
- δοκιμάζονται σε θλίψη με τυποποιημένο τρόπο

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: Συστατικά

275

## ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – Κατηγορίες Σκυροδέματος

Πίνακας 2.2. Κατηγορίες Σκυροδέματος

κατηγορία σκυροδέματος	$f_{ck,κυλ.}$ (MPa)	$f_{ck,κύβου}$ (MPa)
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 15/20	15	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C35/45	35	45
C 40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: Συστατικά

276



## ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ Ι. Εισαγωγή στην Ανθεκτικότητα

Concrete – Introduction to durability



278

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

278

## ΔΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

### Εισαγωγή στην Ανθεκτικότητα

- Μεταβολή όγκου σκυροδέματος - Ρηγμάτωση
- Δράση Χλωριόντων - Διάβρωση
- Ενανθράκωση - Διάβρωση
- Αλκαλοπυριτική αντίδραση
- Χημικές δράσεις - Δράση θεικών
- Χημικές δράσεις - Δράση οξέων
- Ψύξη – Απόψυξη
- Απότριψη – Κρούση

### Σχεδιασμός για την Ανθεκτικότητα

- Προδιαγραφές
- Μελέτη σύνθεσης και ανθεκτικότητα
- Αποτίμηση ανθεκτικότητας

279

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

279

## ΟΡΙΣΜΟΙ

**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ** μιας κατασκευής είναι η ικανότητα της να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (φυσικές ή χημικές) κατά τη διάρκεια του χρόνου χωρίς να παρουσιάζει απώλεια της επιτελεστικότητάς της κάτω από ένα ανεκτό όριο

**ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ** μιας κατασκευής είναι η ταυτόχρονη εκπλήρωση των ακόλουθων απαιτήσεων:

1. Ασφάλεια (ικανότητα ανάληψης των επιβαλλόμενων δράσεων υπό στατική αλλά και επαναλαμβανόμενη μορφή - αντοχή σε κόπωση)
2. Λειτουργικότητα (ικανοποίηση των σκοπών της κατασκευής, παραμορφώσεις, κραδασμοί, στεγανότητα κ.α)
3. Αισθητική εμφάνιση (αποφυγή εμφανών φθορών όπως ρηγματώσεων αλλαγής γεωμετρικών χαρακτηριστικών

280

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

280

## Διάρκεια ζωής κατασκευής

Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής, έτη (yrs)	Παραδείγματα
10	Προσωρινές κατασκευές
10-25	Τμήματα κατασκευών που επιδέχονται αντικατάσταση ( π.χ. τμήματα μεταλλικών κατασκευών)
15-30	Κατασκευές αγροτικών δραστηριοτήτων
50	Κτίρια και άλλες κοινές κατασκευές
100	Μνημεία, γέφυρες και λοιπά έργα υποδομής

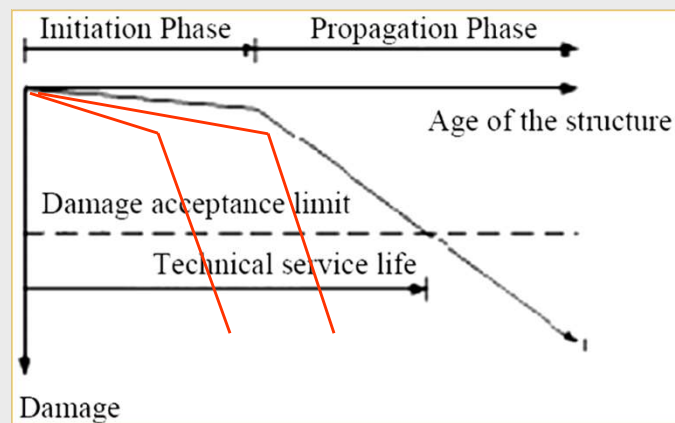
Κοινός στόχος όλων των κατασκευών:  
Η επίτευξη κατά το μέγιστο, της σχεδιασμένης διάρκειας ζωής

282

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

282

## Ανθεκτικότητα & διάρκεια ζωής κατασκευής

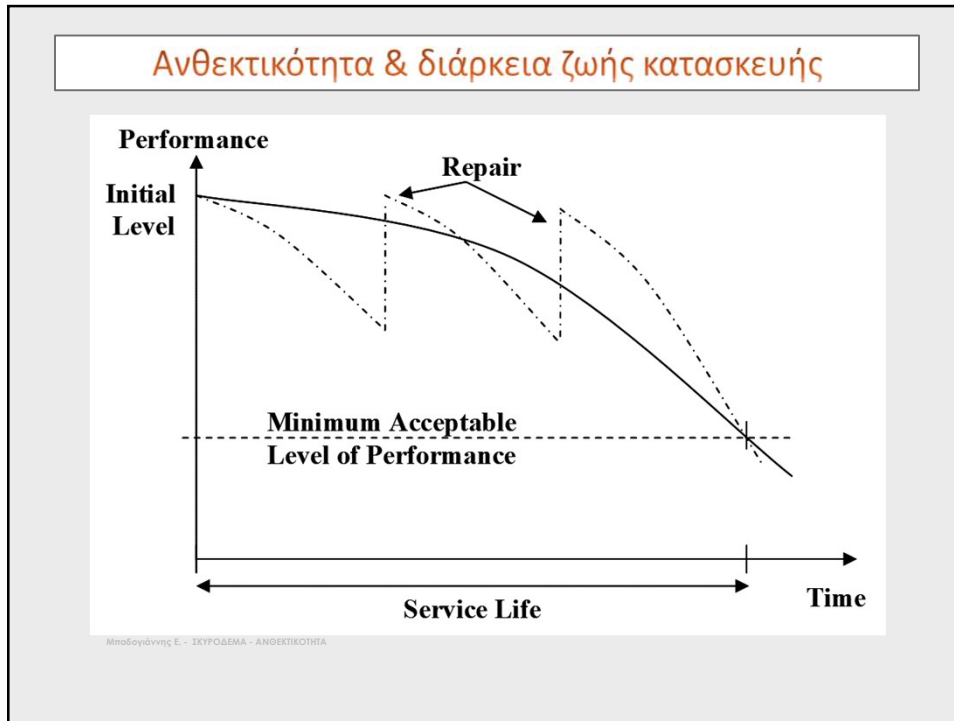


Service life of concrete structures. A two-phase modelling of deterioration (Tuutti, 1982)

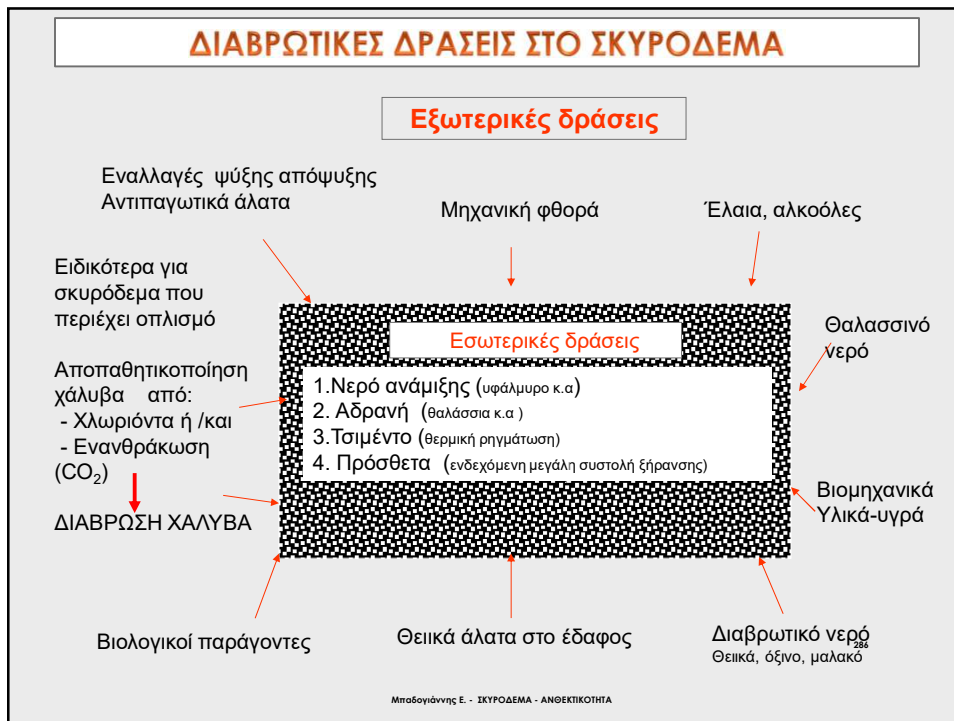
283

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

283

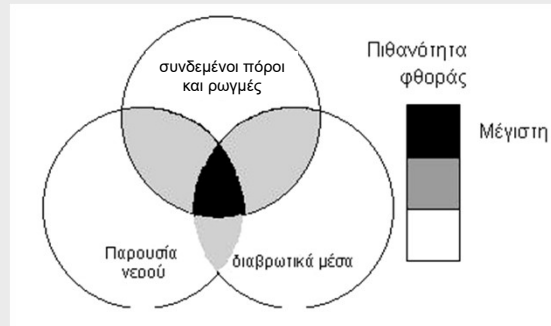


284



286

## Παράγοντες ανθεκτικότητας



287

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

287

### Παράγοντες ανθεκτικότητας 1α. Πορώδες (Συνδεδεμένοι πόροι)

Δημιουργείται από το νερό σύνθεσης και τον περιεχόμενο αέρα.

ΜΟΡΦΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Κλειστό</li> <li>▪ Ανοικτό (διαμπερές)</li> <li>▪ Ανοικτό από το ένα άκρο</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Γέλης (1.5 - 4 nm)</li> <li>▪ Τριχοειδές (4 nm – 10 μm)</li> <li>▪ Συρρικνώσεως (<math>\approx</math> 0.1 mm)</li> <li>▪ Αέρα (0.1 mm - 2 mm)</li> </ul>

288

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

288

### Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1α. Πορώδες – Μηχανισμοί ροής

1. Διάχυση υγρών και ιόντων ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2+}$ ) μέσα σε υγρά
2. Διάχυση αερίων ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) και ατμών (μετακίνηση υγρασίας)
3. Τριχοειδή αναρρόφηση ( πχ  $\text{Cl}^-$  μέσα στο νερό)
4. Πίεση (διαβρωτικές ουσίες σε υπόγεια νερά, ψύξη-απόψυξη κ.α)

#### ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ – ΔΙΑΧΥΣΗ

- Μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων
- Μέση διάμετρος των μορίων

#### Επιπλέον για τριχοειδές πορώδες:

- Διαφορά συγκέντρωσης
- Διαφορά πίεσης

291

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

291

### Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1α. Πορώδες – Μηχανισμοί ροής

#### ΡΟΦΗΣΗ

- ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ: επιφανειακή συγκράτηση (π.χ. νερού)
- ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ: συγκράτηση στο εσωτερικό (πορώδες)
- ΡΟΦΗΣΗ: συγκράτηση στο εξωτερικό επιφανειακά και εσωτερικό (πορώδες)
  - Επιφανειακή ενέργεια
  - Επιφανειακή τάση
  - Μορφολογία επιφάνειας πόρων
  - Δυνάμεις Van der Waals

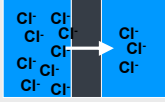
292

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

292



## Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1α. Πορώδες – Μηχανισμοί ροής



Ο βαθμός συγκέντρωσης  $C$  τείνει να εξισωθεί με μεταφορά ουσιών από την περιοχή με μεγαλύτερη συγκέντρωση στην περιοχή με μικρότερη συγκέντρωση.

$C_1$   $C_2$

Η διάχυση των υγρών και των ιόντων μέσα σε υγρά διέπεται από τον 2<sup>ο</sup> νόμο ενώ η διάχυση των αερίων διέπεται από τον 1<sup>ο</sup> νόμο του Fick. Η διάχυση υγρών είναι  $10^4$ - $10^5$  φορές βραδύτερη από τη διάχυση των αερίων γιατί και η υγρομετρική κατάσταση του σκυροδέματος παίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα διείσδυσης των διαβρωτικών παραγόντων

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$\frac{C_x}{C_o} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2(Dt)^{0.5}}$$

**Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών:**  
στοιχεία θεμελίωσης, αυτοκινητόδρομοι

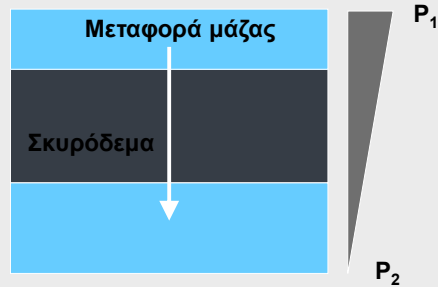
293

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

293

## Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1α. Πορώδες – Μηχανισμοί ροής

Μετακίνηση υγρών υπό πίεση:



**Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών:**  
φράγματα, τοιχώματα σπηραίων, δεξαμενές υγρών, υποβρύχιες κατασκευές

294

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

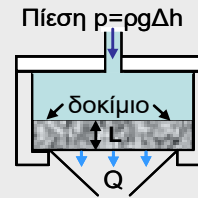
294

### Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1α. Πορώδες – Μηχανισμοί ροής

Η μετακίνηση υγρών υπό πίεση, διέπεται από τον νόμο του Darcy:

$$Q/A = -k \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta h / (\mu L) = -k \cdot p / (\mu \cdot L), \text{ όπου:}$$

- Q = Παροχή m<sup>3</sup>/s
- A = επιφάνεια διατομής (m<sup>2</sup>)
- ρ = πυκνότητα υγρού (kg/m<sup>3</sup>)
- g = επιτάχυνση βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)
- Δh = ύψος στήλης νερού (m) που ισοδυναμεί με την  
p = υδροστατική πίεση (N/m<sup>2</sup>)
- L = πάχος υλικού μέσω του οποίου γίνεται η ροή (m)
- k = εγγενής διαπερατότητα (intrinsic permeability) – *ιδιοδιαπερατότητα* [m<sup>2</sup>]
- μ = ιξώδες του υγρού (Ns/m<sup>2</sup>)



295

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

295

### Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1α. Πορώδες – Μηχανισμοί ροής

Η **τριχοειδής αναρρόφηση** διέπεται από τους νόμους Laplace και ως προς την ταχύτητα αναρρόφησης από τη σχέση:

$$V/A = S \cdot t^{0.5}, \text{ όπου:}$$

- V = ο όγκος του αναρροφούμενου υγρού mm<sup>3</sup>
- A = η επιφάνεια της διατομής μέσω της οποίας γίνεται η αναρρόφηση mm<sup>2</sup>
- S = συντελεστής ρόφησης (*sorptivity-ιδιορροφητικότητα*) mm/min<sup>0.5</sup>
- t = χρόνος min



**Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών:**

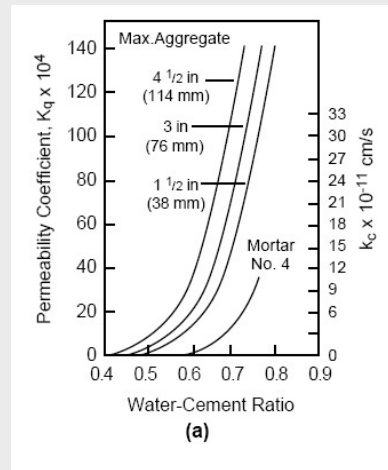
- κατασκευές υποκειμένες σε κύκλους ύγρανσης – αφύγρανσης, π.χ. παραθαλάσσιες κατασκευές, κοντά στη ζώνη κυματισμού

296

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

296

### Παράγοντες ανθεκτικότητας-1α. Πορώδες: Λόγος Ν/Τ (W/C)

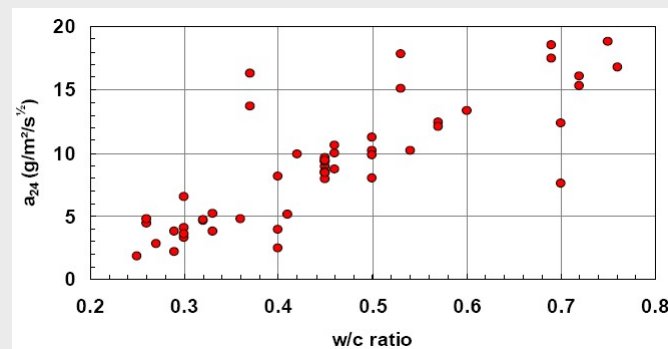


302

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

302

### Παράγοντες ανθεκτικότητας-1α. Πορώδες: Λόγος Ν/Τ (W/C)



Υδατοαπορροφητικότητα σε 24 h διαφόρων τύπων τσιμέντου, σε σχέση με το λόγο Ν/Τ

303

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

303

### Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1β. Ρηγμάτωση

Ρηγμάτωση σκυροδέματος συμβαίνει όταν:

#### Ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων >> εφελκυστική αντοχή

Τρεις θεμελιώδεις μηχανισμοί δημιουργούν εφελκυστικές τάσεις:

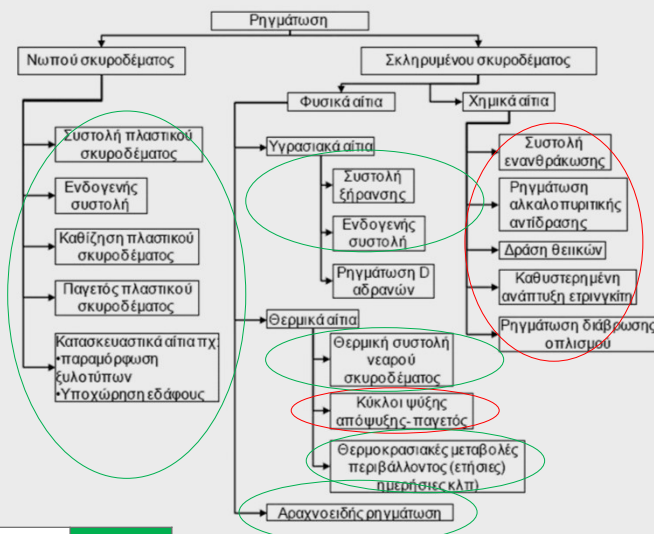
- 1. Κινήσεις εντός του σκυροδέματος:** π.χ. συστολή ξήρανσης, διαστολή λόγω διαβροχής, θερμοκρασιακές μεταβολές όγκου (Απαραίτητη η ύπαρξη περιορισμού κίνησης).
- 2. Διόγκωση δομικών συστατικών κατασκευής:** π.χ. διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος
- 3. Επιβολή εξωτερικών φορτίων:** π.χ. παραμόρφωση από επιβολή εξωτερικών φορτίων, υποχώρηση θεμελίωσης

304

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

304

### Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1β. Ρηγμάτωση



Προηγείται	
Έπεται	

305

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

305

## Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1β. Ρηγμάτωση

Πλαστική υποχώρηση, A, B, C

Πλαστική συρρίκνωση, D, E, F

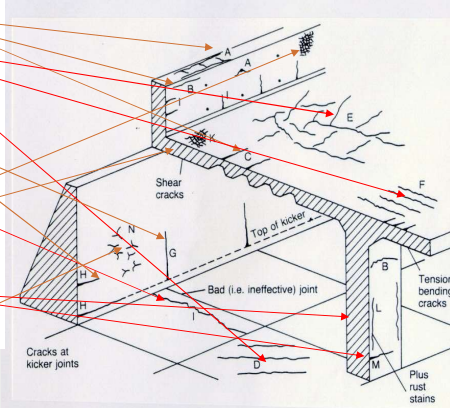
Θερμική συστολή σκυροδέματος  
πρώιμης ηλικίας, G, H

Συστολή ξήρανσης, I

ρωγμές τελειώματος,  
«αράχνιασμα» J, K

Διάβρωση οπλισμού, L, M

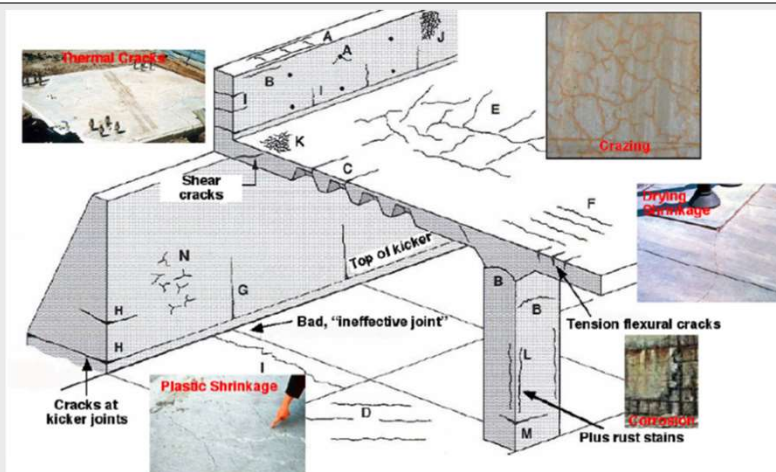
Αλκαλοσυρπτική αντίδραση, N



Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

306

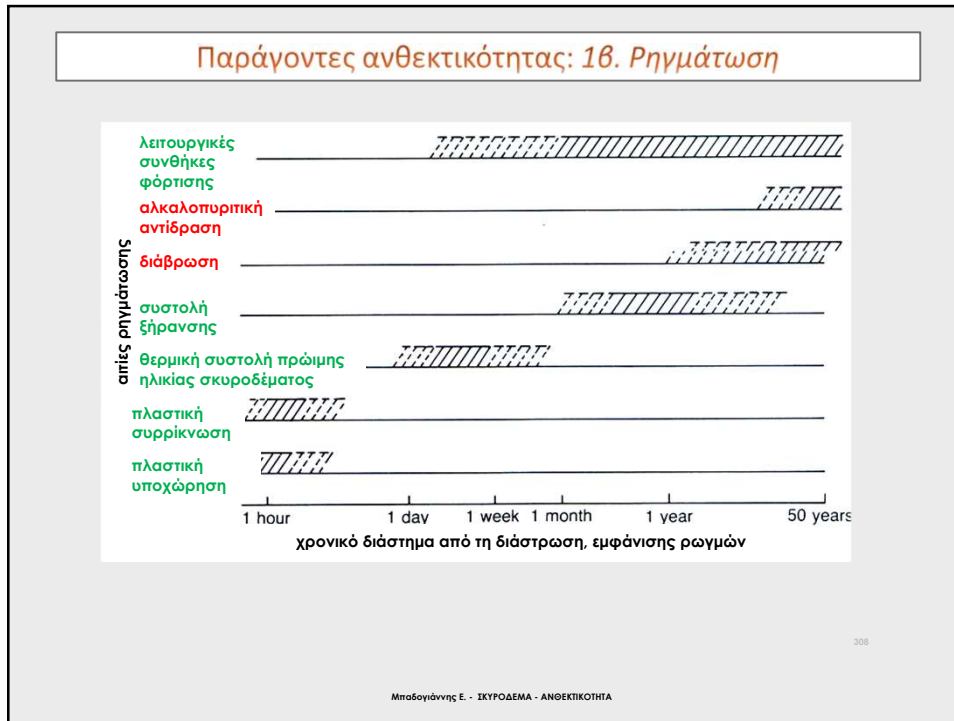
## Παράγοντες ανθεκτικότητας: 1β. Ρηγμάτωση



Πηγή: The Concrete Society, *Non-Structural Cracks in Concrete*, Technical Report 22, The Concrete Society, London, England, 1982

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

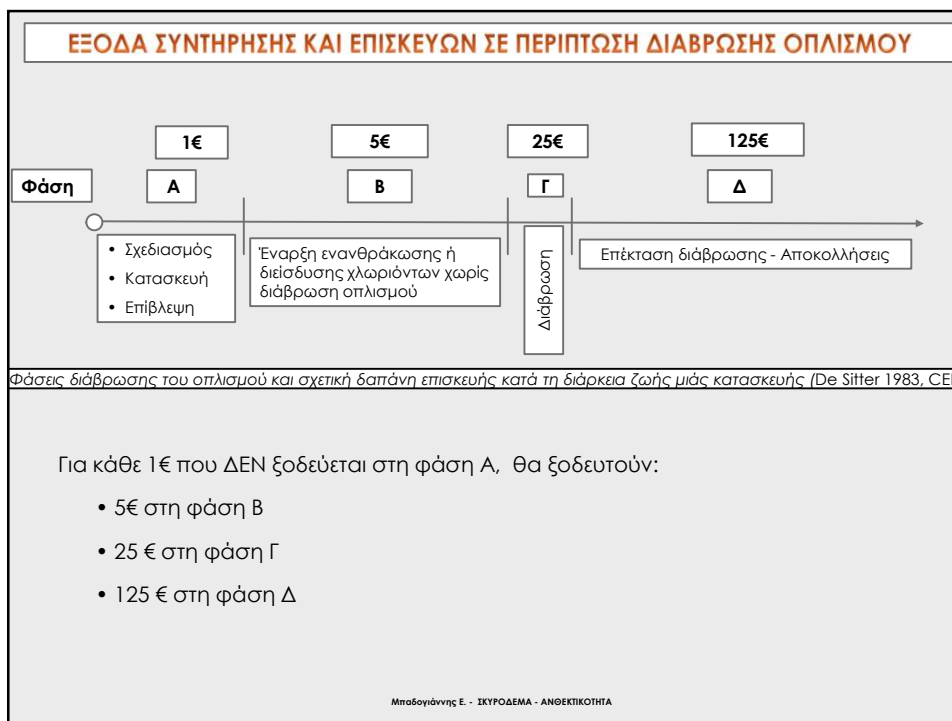
307



308



309



310

**ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Ο οπλισμός επικαλύπτεται από σκυρόδεμα και προστατεύεται από τις περιβαλλοντικές δράσεις με τρεις τρόπους:

1. Φυσική Προστασία	2. Χημική προστασία	3. Ηλεκτρική προστασία
<p>Η επικάλυψη του χάλυβα με σκυρόδεμα αποτελεί το <b>φυσικό εμπόδιο</b> μεταξύ περιβάλλοντος και οπλισμού.</p> <p>Οι παράγοντες ανθεκτικότητας παίζουν σημαντικό ρόλο: Η <b>διαπερατότητα</b> του σκυροδέματος και το <b>συνδεδεμένο πορώδες</b> καθορίζουν κυρίως την αντίσταση του υλικού έναντι της διείσδυσης περιβαλλοντικών παραγόντων διάβρωσης</p>	<p>Η χημική σύσταση του χάλυβα παρέχει το <b>στρώμα παθητικής προστασίας</b> του.</p> <p>Υψηλές τιμές pH (&gt;12) επιτρέπουν τη δημιουργία και τη διατήρηση ενός στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του χάλυβα, που δεν επιτρέπει τη διείσδυση νερού και οξυγόνου.</p> <p>Η <b>τσιμεντόπαστα</b> επίσης μπορεί να <b>δεσμεύσει σε ένα βαθμό</b> επιθετικά ιόντα.</p>	<p>Η επικάλυψη σκυροδέματος αποτελεί <b>μονωτή</b>.</p> <p>Το σκυρόδεμα έχει εγγενή ηλεκτρική αντίσταση που αποτρέπει και δυσχεραίνει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος.</p>

Μποδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

311

## ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Στρώμα παθητικής προστασίας FeO·OH

Περιβάλλον

Οπλισμός      Επικάλυψη σκυροδέματος

**Φυσική προστασία**

- Πάχος και διαπερατότητα του σκυροδέματος
- Πορώδες και συνδεσιμότητα

**Χημική προστασία**

- Λεπτό στρώμα (film) FeO·OH
- Σταθερό για pH > 12.5
- Έναρξη της διάβρωσης για pH < 12.5
- Δέσμευση επιθετικών ιόντων (π.χ. Cl) από την τσιμεντόπαστα

**Ηλεκτρική προστασία**

- Υγρασία σκυροδέματος
- Πορώδες και συνδεσιμότητα

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

312

## ΤΣΙΜΕΝΤΟ – ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ

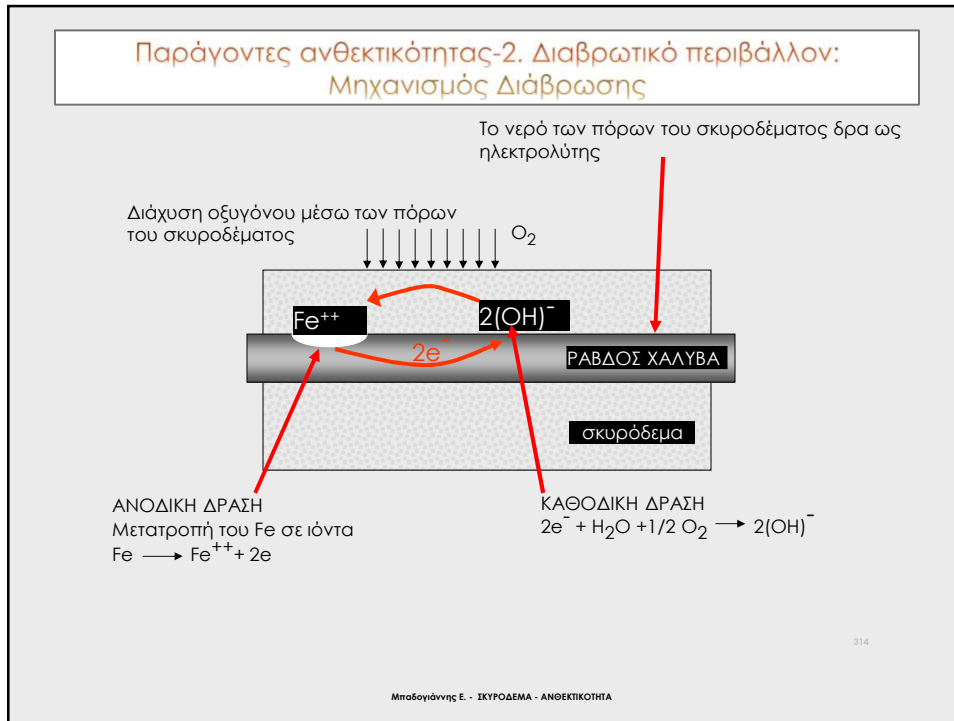
**Αντιδράσεις:**

- $C_3S: 2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$
- $C_2S: 2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

313





314

**Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον:  
Μηχανισμός Διάβρωσης**

Χημικές Δράσεις

$Fe + H_2O + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons Fe(OH)_2$

$Fe(OH)^+ \rightleftharpoons Fe(OH)_2 \rightleftharpoons Fe(OH)_3$   
 pH 7.....pH 14

Ηλεκτροχημική δράση

- Άνοδος:  $Fe \rightarrow 2e^- + Fe^{2+}$
- Κάθοδος:  $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$

Τα ιόντα υδροξυλίου μετακινούνται μέσα στο νερό των πόρων από την κάθοδο προς την άνοδο, ενώνονται με τα ιόντα σιδήρου και σχηματίζουν σκουριά

$3Fe^{++} + 8(OH)^- \rightarrow Fe_3O_4 + 8e^- + 4H_2O \rightarrow$  ΔΙΟΓΚΩΣΗ  $\rightarrow$  ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ  $\rightarrow$

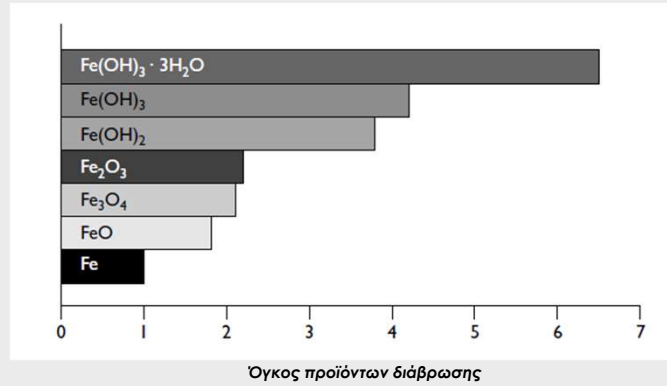
ΑΠΟΣΠΑΣΗ ΤΕΜΑΧΙΩΝ  $\rightarrow$  ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ  $\rightarrow$  ΑΠΩΛΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

315

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

315

## Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Μηχανισμός Διάβρωσης



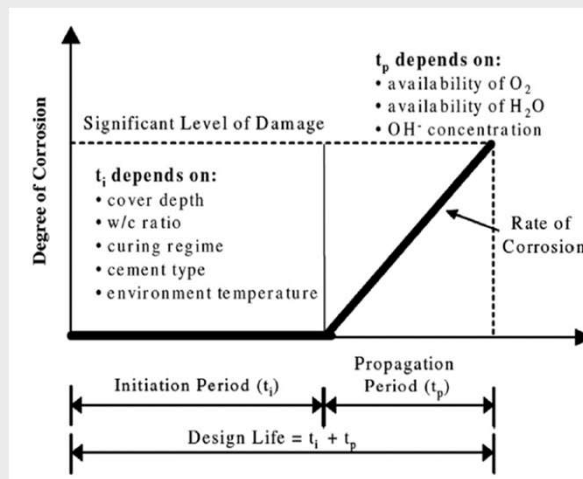
- Αύξηση όγκου περίπου 3 - 6 φορές
- Ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων
- Θραύση-αποσάθρωση επικάλυψης οπλισμού

316

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

316

## Ανθεκτικότητα & διάβρωση οπλισμού: στάδια

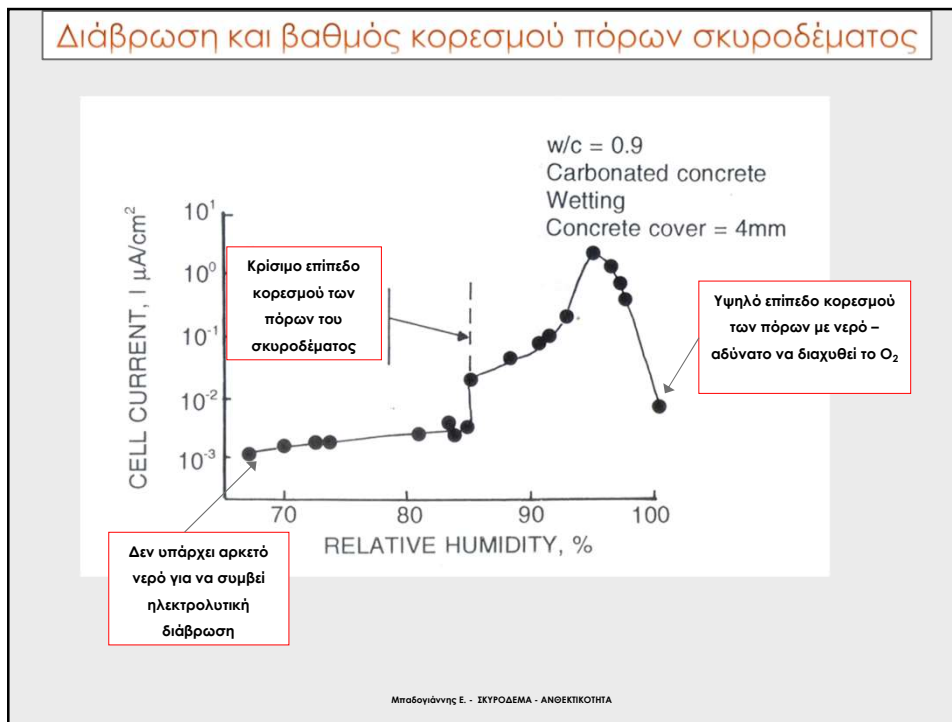


- Initiation Period  $t_i$  ή  $t_p$   
→ χρόνος αποπαθητικοποίησης του χάλυβα
- Propagation Period  $t_{cor}$  ή  $t_{prop}$  → χρόνος εμφάνισης της πρώτης ρωγμής (>0.1mm)

317

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

317



319

### Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Επικουρικοί Μηχανισμοί Διάβρωσης

#### Επικουρικοί Μηχανισμοί Διάβρωσης

- Η αλκαλικότητα εξασφαλίζεται με την παρουσία του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και των αλκαλίων (τσιμέντο Portland)
- Επηρεάζεται από την παρουσία  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας (Μηχανισμός ενανθράκωσης)
- Παρουσία  $\text{Cl}^-$  ( $\text{Cl}^-/\text{OH}^- > 0.6$ ),
  - Έναρξη της διάβρωσης ακόμη και για τιμές pH μεγαλύτερες του 12.5
  - Βελονοειδής διάβρωση

Διάβρωση χάλυβα

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

321

## Διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωση σκυροδέματος

Carbonation induced corrosion of  
steel reinforcement



322

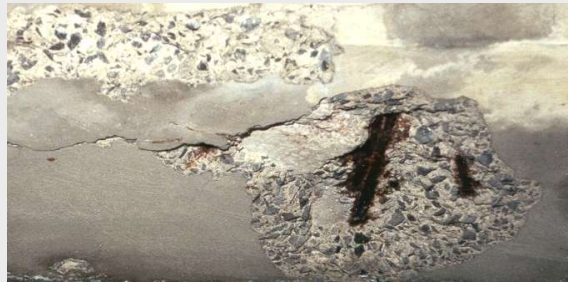
### Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

- Αναφέρεται στην χημική αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας ( $\text{CO}_2$ ) με τα αλκαλικά συστατικά του διαλύματος πόρων του σκυροδέματος.
- Το  $\text{CO}_2$  διαχέεται στους τριχοειδείς πόρους και αντιδρά με διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει αρκετά χρόνια.

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

323

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: -  
Ενανθράκωση (XC)



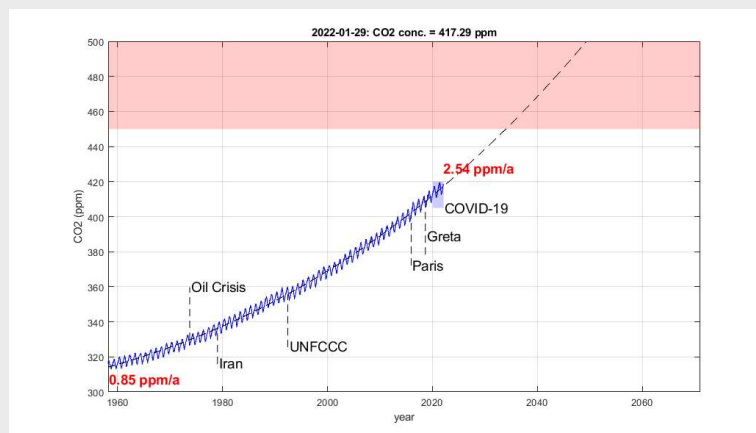
Διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης

324

Μποδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

324

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO<sub>2</sub> ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ



- Τυπική συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα: σε 0.035% κ.ο. (350 ppm). Στη βιομηχανική ζώνη φτάνει και στο 1.0% κ.ο (1000 ppm)
- Η κλίση έχει αυξηθεί. Σύμφωνα με τις προβλέψεις αναμένεται αύξηση της συγκέντρωσης στα 600-1000 ppm στα επόμενα 100 έτη.

Μποδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

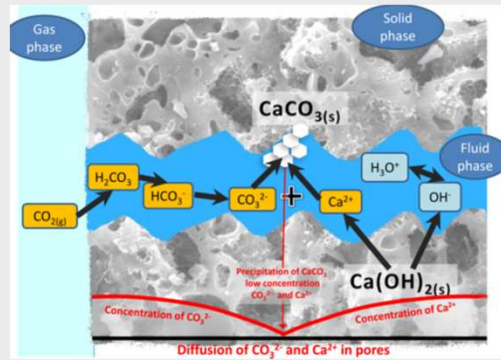
325

## Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Ενανθράκωση

Η αντίδραση του με τα αλκαλικά συστατικά του σκυροδέματος ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) χωρίζεται σε 3 στάδια:

### Στάδιο 1 – Διείσδυση/Διάχυση $\text{CO}_2$

Το  $\text{CO}_2$  εισέρχεται με διάχυση στο σκυροδέμα μέσω του πορώδους του, εξαιτίας της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ ατμόσφαιρας και σκυροδέματος.



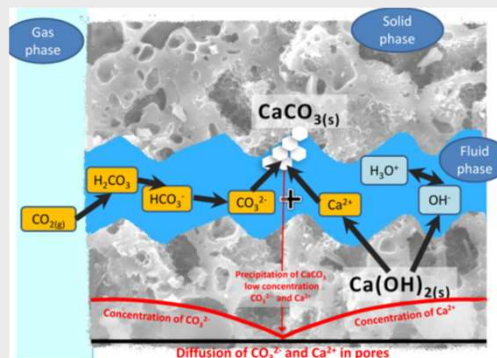
Μποδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

326

## Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Ενανθράκωση

### Στάδιο 2 – Αντίδραση $\text{CO}_2$ με το διάλυμα των πόρων

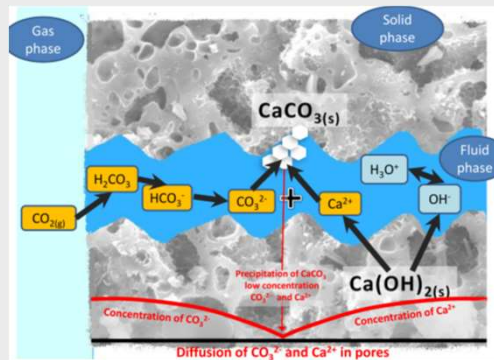
$\text{CO}_2$  διαλύεται στο υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και σχηματίζει ανθρακικό οξύ



Μποδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

327

## Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Ενανθράκωση



### Στάδιο 3 – Σχηματισμός ανθρακικών

- 3.1.  $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$
- 3.2.  $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
- 3.3.  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

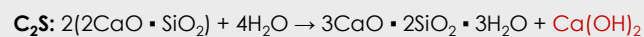
328

## Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Ενανθράκωση

*...ένας επικουρικός μηχανισμός της διάβρωσης*

- Η αντίδραση προκαλεί τη μείωση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τελικά θα οδηγήσει σε διάσπαση του στρώματος παθητικής προστασίας του οπλισμού - λεπτό στρώμα (film) FeO·OH - σταθερό για pH > 12.5
- Η αλκαλικότητα εξασφαλίζεται με την παρουσία του Ca(OH)<sub>2</sub> και των αλκαλίων (τσιμέντο Portland). Υπενθυμίζεται:

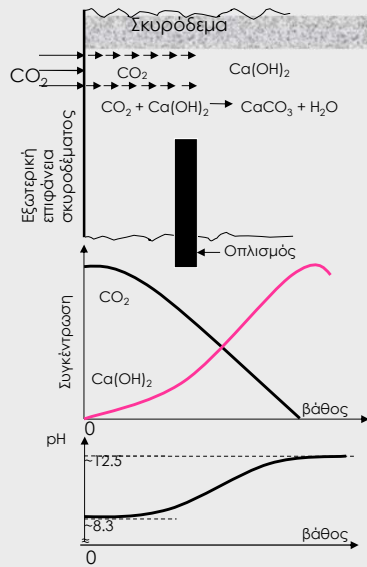
### ΤΣΙΜΕΝΤΟ – ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ



Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

329

### Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Ενανθράκωση



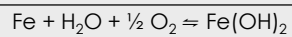
Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

330

330

### Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: Ενανθράκωση

Παρουσία υγρασίας και οξυγόνου, διάβρωση του οπλισμού.



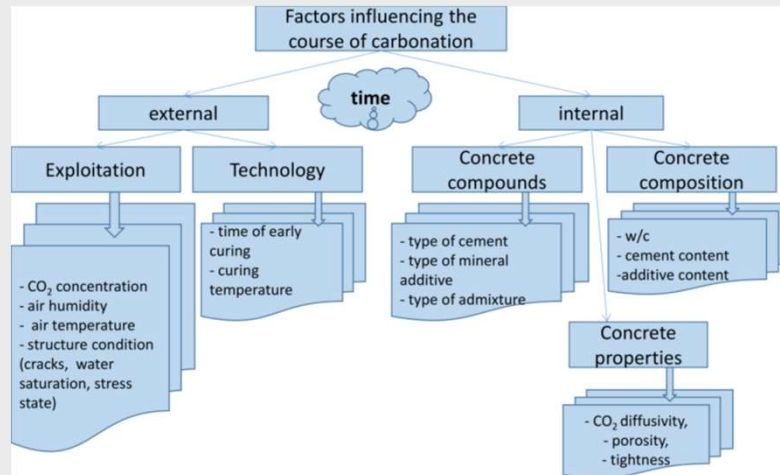
Αν και πολύ σπάνια καταστροφική, η ενανθράκωση είναι η κύρια αιτία υποβάθμισης της λειτουργικότητας των κατασκευών, καθώς προκαλεί διάβρωση, αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος και έκθεση του οπλισμού στην ατμόσφαιρα.

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

331



Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: -  
Ενανθράκωση (XC) - παράμετροι

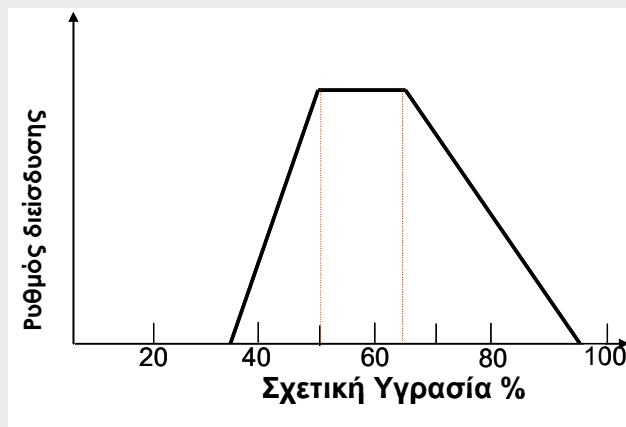


332

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

332

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: -  
Ενανθράκωση (XC) - παράμετροι



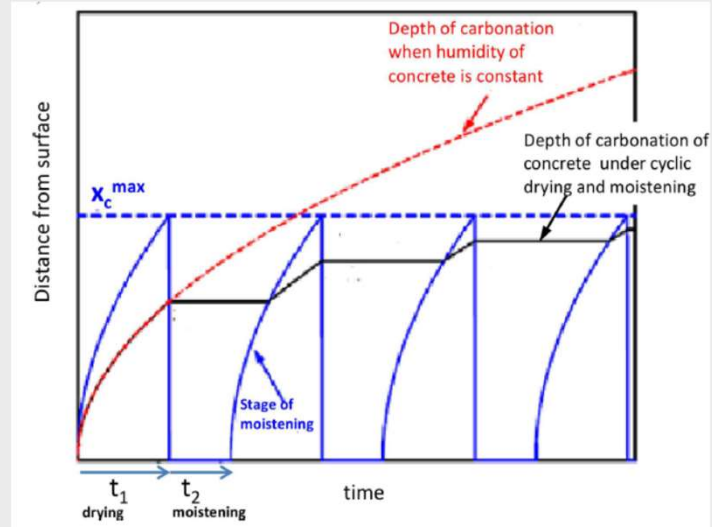
Επίδραση σχετικής υγρασίας (%) στο ρυθμό ενανθράκωσης

333

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

333

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: -  
Ενανθράκωση (XC) - παράμετροι



334

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

334

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: -  
Ενανθράκωση (XC) - παράμετροι

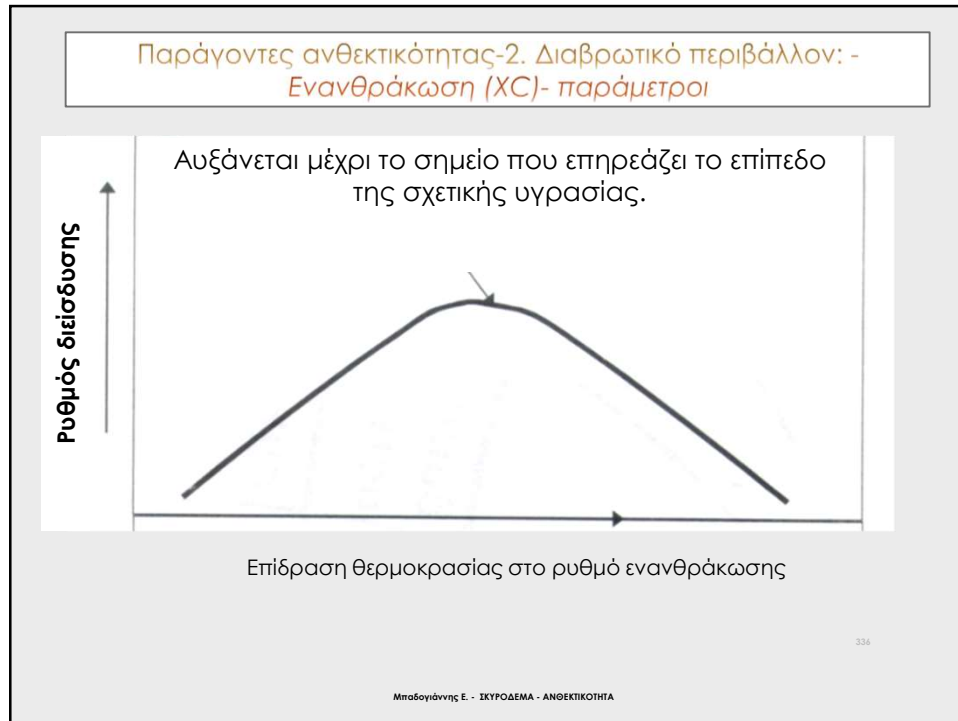
$$R_{CO_2} = \int_{x=0}^{x=x_{CO_2}} \frac{dx}{D_{CO_2}(RH(x))},$$

L.-O. Nilsson: επίδραση σχετικής υγρασίας (%) στην αντίσταση του σκυροδέματος ( $R_{CO_2}$ ) έναντι ενανθράκωσης

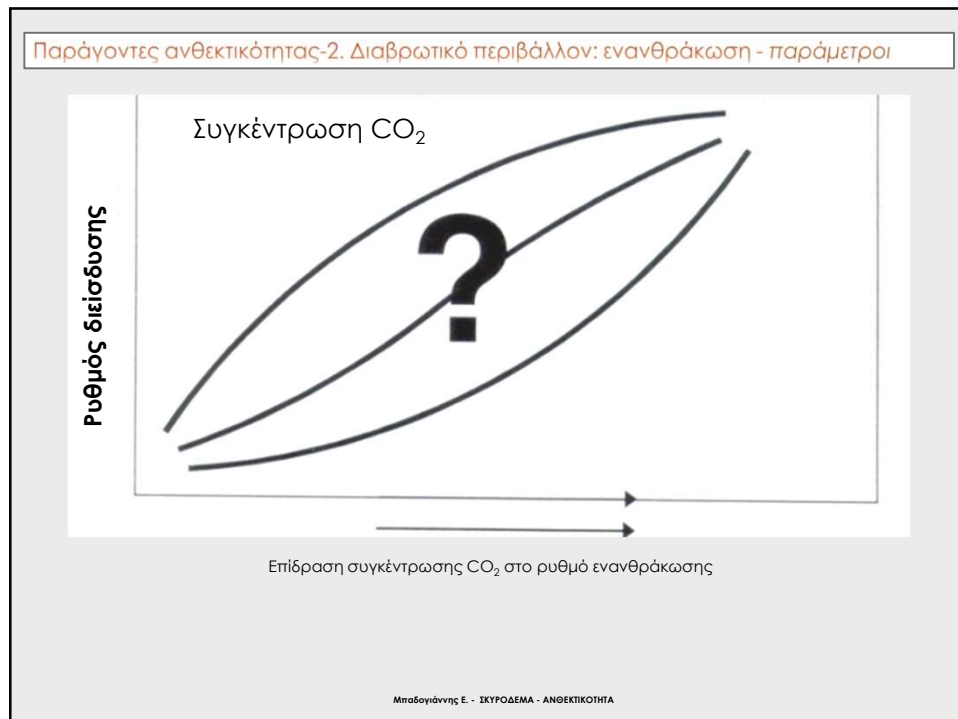
335

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

335

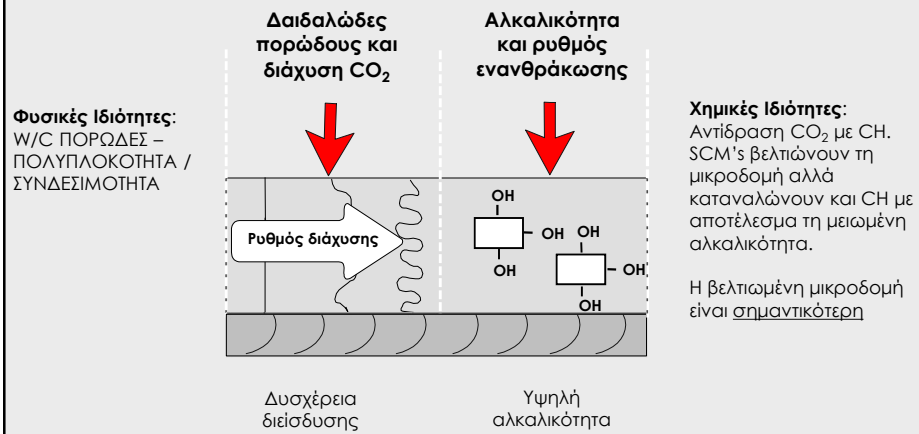


336



337

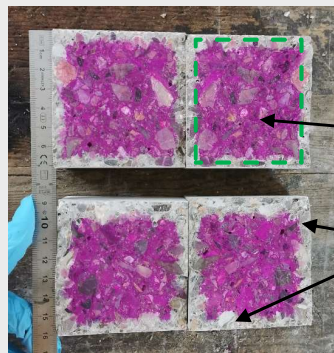
Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση - παράμετροι



Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

338

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσδιορισμός



**Ψεκασμός δοκιμίου ή σκόνης σκυροδέματος με δείκτη ΦΑΙΝΟΛΟΦΘΑΛΕΙΝΗΣ**

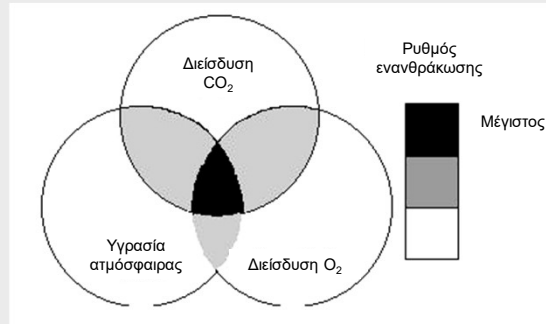
- Αλλαγή χρώματος, όπου το pH >11.
- Αχρωμο, όπου το pH <11

Ουσιαστικά το βάθος της ενανθράκωσης είναι το βάθος του σκυροδέματος στο οποίο το pH αλλάζει

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

339

**Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: διάβρωση λόγω ενανθράκωσης - μέθοδοι αντιμετώπισης**



**Φυσικές μέθοδοι:** Μείωση μέσου πορώδους, κατανομή πόρων, διασύνδεση πόρων.

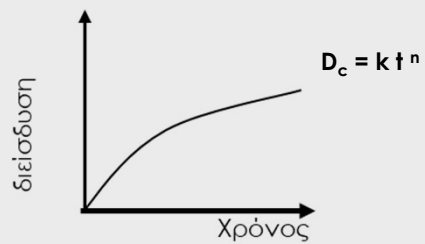
**Χημικές μέθοδοι:** Εξασφάλιση υψηλής αλκαλικότητας

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

340

**Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση**

Η διείσδυση CO<sub>2</sub> είναι εκθετική (n) συνάρτηση του (χρόνου)<sup>n</sup>



$D_c$  = βάθος ενανθράκωσης

$t$  = χρόνος (years)

$k$  = Συντελεστής ενανθράκωσης, συνάρτηση της ποιότητας του σκυροδέματος

$n$  = συνάρτηση των περιβαλλοντικών συνθηκών (Θερμοκρασία, RH, CO<sub>2</sub>), συνήθως 1/2

Μπασιγιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

341

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση

Παπαδάκη/Βαγενά/Φαρδή

$$x = \frac{\rho_c \left(\frac{N}{T}\right)^{-0,3}}{k \left(1 + \rho_c \frac{N}{T}\right)} \left(1 - \frac{RH}{100}\right) = \sqrt{\left(1 + \rho_c \frac{N}{T} + \frac{\rho_c A}{\rho_a T}\right) p_{CO_2} t}$$

$$x = \sqrt{\frac{2Dt[CO_2]}{[Ca(OH)_2] + 3[CSH] + 3[C_3S] + 2[C_2S]}}$$

342

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

342

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση

$$x = \sqrt{\frac{2Dt[CO_2]}{[Ca(OH)_2] + 3[CSH] + 3[C_3S] + 2[C_2S]}}$$

**Groves**



$$x = \sqrt{\frac{2Dt[CO_2]}{[Ca(OH)_2] + 3[CSH]}}$$

343

Μπαδογιάννης Ε. - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

343

**Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση**

**Usoto**

$$x = (2.084 - 0.8471 \log C_{CO_2}) \times e^{8.748 - \frac{2563}{T}} \\ \times \left[ 2.39 \left( \frac{w}{c} \right)^2 + 0.446 \frac{w}{c} - 0.398 \right] \times \sqrt{C_{CO_2} \times t},$$

Το μοντέλο αναπτύχθηκε σε:

- φυσικές και επιταχυνόμενες συνθήκες (υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>),
- δείγματα με υψηλό βαθμό κορεσμού με νερό (περίπου 80%)

344

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

344

**Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση**

**Comite Euro-Internationale du Beton**

$$x = \sqrt{2k_1 k_2 k_3 \Delta c} \sqrt{\frac{D_{nom}}{a} t} \times \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \quad a = 0.75 \cdot C \cdot [\text{CaO}] \cdot \alpha_H \cdot (M_{CO_2}/M_{CaO}),$$

- D<sub>nom</sub> – diffusion coefficient at RH = 65% and T = 20°C, mm<sup>2</sup>/year;
- Δc – difference of CO<sub>2</sub> concentration on the surface of concrete and inside the concrete; a – amount of CO<sub>2</sub> for concrete full carbonation, kg/m<sup>3</sup>;
- n – coefficient of influence of changes in external conditions; laboratory conditions n = 0, for natural conditions n = 0.3 (the higher the changes of conditions the higher value of n);
- t<sub>0</sub> – reference period – in natural conditions, t<sub>0</sub> = 1 climatic year;
- t – time of exposition, years;
- k<sub>1</sub> – coefficient of concrete humidity, from 0.3 to 1.0;
- k<sub>2</sub> – coefficient of time of early curing; 1.0 for "good" curing or 2.0 for "bad" curing;
- k<sub>3</sub> – coefficient of concrete bleeding, equal from 1.0 (minimum of bleeding) to 1.5 (for high degree of bleeding).
- C – content of cement, kg/m<sup>3</sup>; [CaO] – CaO content in the cement composition; H – the degree of hydration of cement; MCO<sub>2</sub> and MCaO – molar masses.

345

Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

345

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση

$$\text{Brown} \quad x = \frac{(K_C \times t^{1/2})}{f_c}$$

$$\text{Duval} \quad x = \sqrt{365t} \left( \frac{1}{2,1\sqrt{f_{c28}}} - 0.6 \right)$$

X = βάθος ενανθράκωσης

t = χρόνος(years)

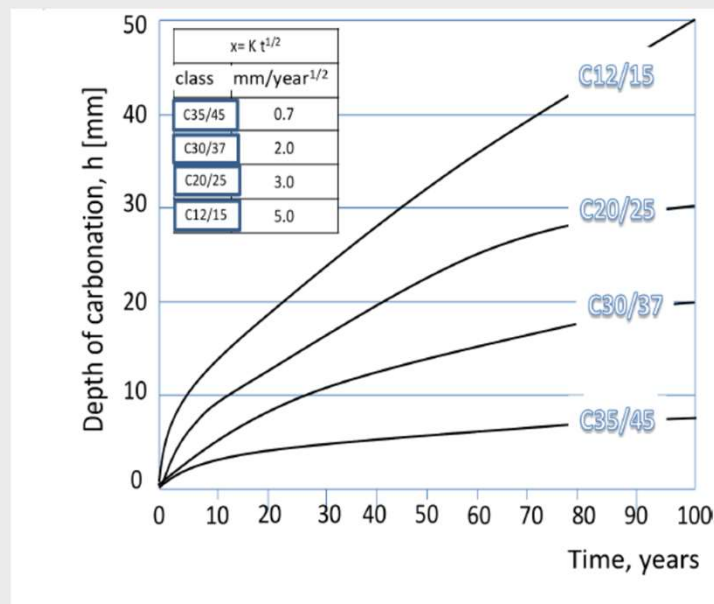
Kc = Συντελεστής ενανθράκωσης , συνάρτηση της ποιότητας του σκυροδέματος

f<sub>c</sub> =Θλιπτική αντοχή

Μπαδογιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

346

Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση

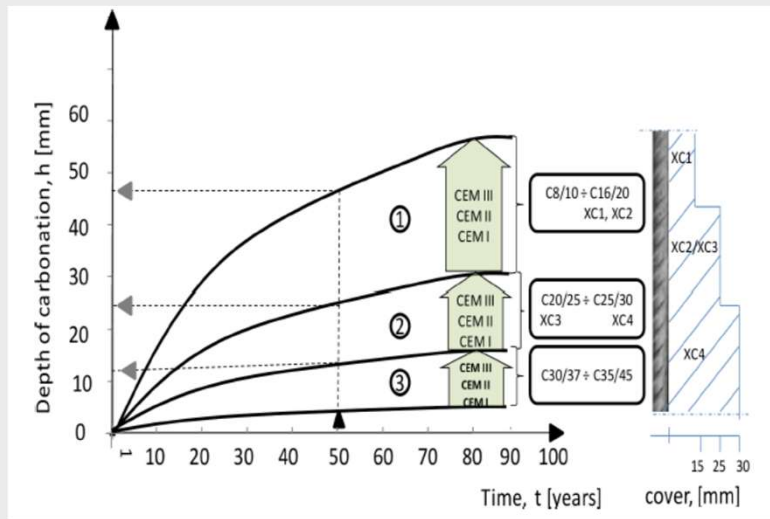


Μπαδογιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

347



Παράγοντες ανθεκτικότητας-2. Διαβρωτικό περιβάλλον: ενανθράκωση, προσομοίωση



Μπασιγιάννης Ε. - ΙΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ