



Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΟΜΗΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Δρ Αθ. Ρούτουλας Καθηγητής

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΗΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

ΕΝΟΤΗΤΑ 3^η – ΤΣΙΜΕΝΤΑ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

ΑΣΚΗΣΗ 9^η: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΑCΙ-211

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010



ΑΣΚΗΣΗ 9^η

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΑCI-211

Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι ο σχεδιασμός μελέτης σύνθεσης 1 m³ σκυροδέματος σύμφωνα με την προδιαγραφή ΑCI-211.

Θεωρητικό Μέρος

1. Η Έννοια της Μελέτης Σύνθεσης

Με τον όρο *μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος* δηλώνεται ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των επί μέρους συστατικών του σκυροδέματος για την παραγωγή 1 m³.

Η μελέτη σύνθεσης μπορεί να γίνει μόνο εργαστηριακά, βάσει μίας διαδικασίας διαδοχικών δοκιμών, χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα υλικά που είναι διαθέσιμα για την παρασκευή του σκυροδέματος.

Πρέπει να διεξάγεται στην αρχή κάθε έργου και να επαναλαμβάνεται:

- όταν αλλάζει η πηγή λήψης αδρανών
- όταν τα αδρανή παρουσιάζουν διαφορετική διαβάθμιση από εκείνη που είχαν στη μελέτη σύνθεσης, με αποκλίσεις που ξεπερνούν το 10% για τα κόσκινα τα μεγαλύτερα των $\square 4$ ή Νο. 4, το 8% για τα κόσκινα της άμμου (πλην του $\square 0.25$) και το 5% για το κόσκινο $\square 0.25$
- όταν αλλάζουν τα πρόσμικτα ή ο τύπος τσιμέντου ή η κατηγορία αντοχής τσιμέντου
- όταν το μίγμα παρουσιάζει τάσεις απόμιξης ή η κάθισή του δεν ικανοποιεί τις σχετικές απαιτήσεις μολονότι τηρούνται οι αναλογίες της μελέτης σύνθεσης.

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος 1997, μελέτες σύνθεσης μπορούν να γίνονται μόνο από Εργαστήρια του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., από Εργαστήρια των Α.Ε.Ι. και από αναγνωρισμένα ιδιωτικά Εργαστήρια (διαπιστευμένα Εργαστήρια και Εργαστήρια που εποπτεύονται από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι **ο Ελληνικός Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 1997 στερείται αριθμητικής διαδικασίας για τη μελέτη σύνθεσης.**

2. Απαιτήσεις για το Σκυρόδεμα

Η σύνθεση των επί μέρους συστατικών του σκυροδέματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε το σκυρόδεμα που θα προκύψει να εξυπηρετεί το στόχο για τον οποίο παρασκευάζεται. Ο στόχος αυτός είναι διττός:

- Στη νωπή κατάσταση να μπορεί να πάρει τη μορφή του φορέα που σκυροδετείται χωρίς να προκύπτουν κενά (ώστε να μην μειώνεται η αντοχή του σκυροδέματος).
- Στη σκληρυμένη κατάσταση να αποκτήσει την αντοχή, την ανθεκτικότητα και τα μηχανικά χαρακτηριστικά για τα οποία έχει σχεδιαστεί η κατασκευή.

Ανάλογα με τη χρήση της κατασκευής, ορισμένα από τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος μπορεί να εξειδικεύονται π.χ. η διαπερατότητα (δεξαμενές, υδροηλεκτρικά έργα), η χημική ανθεκτικότητα (έργα θεμελιώσεων, συλλογής λυμάτων), η αντίσταση σε τριβή (βιομηχανικά δάπεδα, χώροι στάθμευσης, οδοστρώματα από σκυρόδεμα) κλπ. Για την ικανοποίηση των στόχων αυτών τίθενται οι παρακάτω απαιτήσεις για την ποσοτική σύνθεση των συστατικών του σκυροδέματος:



- Το νωπό σκυρόδεμα θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένη τιμή εργασιμότητας. Μέτρο της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος αποτελεί η κάθιση (slump) καθορισμένου όγκου σκυροδέματος, μετά τη συμβατική συμπύκνωση του.
- Το σκληρυμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να διαθέτει ορισμένη θλιπτική αντοχή, καθώς όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένα από αυτήν. Μέτρο της θλιπτικής αντοχής του σκληρυμένου σκυροδέματος είναι η συμβατική του αντοχή f_{ck} για δοκίμια κυλινδρικού ή κυβικού σχήματος.

3. Βασικές Σχέσεις της Μελέτης Σύνθεσης

Σε οποιαδήποτε μεθοδολογία για την εκπόνηση μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος, ακολουθούνται σε γενικές γραμμές τα εξής βήματα, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τα κριτήρια και τις απαιτήσεις των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων προδιαγραφών, κανονισμών ή προτύπων.

Τα δεδομένα του προβλήματος είναι συνήθως:

- η απαιτούμενη αντοχή f_a
- η μορφή των δοκιμίων ελέγχου (κυβικά ή κυλινδρικά)
- η κάθιση του νωπού σκυροδέματος
- ο μέγιστος κόκκος αδρανών
- η ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου
- τυχόν ειδικές απαιτήσεις (π.χ. επιχρισμένο ή ανεπίχριστο σκυρόδεμα, παραθαλάσσιο περιβάλλον, υδατοστεγανότητα κ.τ.λ.).

Τα ζητούμενα μεγέθη είναι συνήθως τρία:

- η ποσότητα (σε kg) του τσιμέντου (C),
- η ποσότητα (σε kg) του νερού (W) και
- η ποσότητα (σε kg) των αδρανών (A).

Αναζητούνται τρεις σχέσεις με αγνώστους τα παραπάνω μεγέθη C, W και A.

Η πρώτη σχέση προκύπτει από τον ορισμό της μελέτης σύνθεσης που περιγράφει ότι οι ποσότητες C, W και A αντιστοιχούν σε 1 m^3 σκυροδέματος, από όπου υπολογίζεται ο συνολικός στερεός όγκος των αδρανών σε 1 m^3 αναμίγματος, αφαιρώντας από το 1 m^3 σκυροδέματος τον όγκο του νερού, του τσιμέντου και του αέρα των κενών :

$$\text{Όγκος στερεών αδρανών ανά } 1 \text{ m}^3 \text{ σκυροδέματος} = 1 - \frac{m_C}{\rho_C} - \frac{m_W}{1000} - \text{Όγκος αέρα (m}^3 \text{)} \quad (1)$$

όπου m_C : η μάζα του τσιμέντου σε 1 m^3 σκυροδέματος (kg)

ρ_C : η πυκνότητα του τσιμέντου (περίπου ίση με 3100 kg/m^3)

m_W : η μάζα του νερού σε 1 m^3 σκυροδέματος (kg)

Η δεύτερη σχέση προκύπτει από την σχέση εργασιμότητας και νερού, η οποία συνήθως δίνεται γραφικά και που προκύπτει εύκολα μετρώντας την κάθιση δοκιμαστικών μιγμάτων με διάφορες ποσότητες νερού. Η καμπύλη αυτή διαφοροποιείται αν αλλάξει η κοκκομετρική διαβάθμιση ή ο τύπος των αδρανών, ιδιαίτερα της άμμου.

Η τρίτη σχέση προκύπτει από τη συσχέτιση της θλιπτικής αντοχής και του λόγου νερού/τσιμέντο, $w=W/C$, γνωστού και ως υδατοτσιμεντοσυντελεστή, η οποία δίνεται επίσης γραφικά. Προκύπτει



μετρώντας την αντοχή δοκιμαστικών μιγμάτων με διάφορους λόγους ω . Η καμπύλη αυτή διαφοροποιείται με τον τύπο του τσιμέντου.

Για σκυροδέματα για τα οποία δεν είναι γνωστό το ειδικό βάρος του νεπού μίγματος (με μη ασβεστολιθικά αδρανή) καθώς και για σκυροδέματα με ειδικές απαιτήσεις ακολουθείται ακριβέστερη μελέτη σύνθεσης.

Για συνήθη σκυροδέματα (με ασβεστολιθικά αδρανή και τσιμέντο CEM II 32,5) οι αναλογίες σύνθεσης του σκυροδέματος κυμαίνονται στα παρακάτω όρια:

Τσιμέντο: 300 έως 450 kg
Νερό: 180 έως 240 kg
Αδρανή: 1700 έως 1900 kg.

Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός της μελέτης σύνθεσης για την παραγωγή 1 m^3 σκυροδέματος σύμφωνα με την προδιαγραφή ACI-211 (American Concrete Institute).

Πειραματικό Μέρος

1. Προδιαγραφές

Ο σχεδιασμός της μελέτης σύνθεσης για την παραγωγή 1 m^3 σκυροδέματος διεξάγεται σύμφωνα με την προδιαγραφή ACI-211.

2. Υπολογιστική Διαδικασία

Γενικά

Η μελέτη σύνθεσης πραγματοποιείται από τον μηχανικό παραγωγής στο γραφείο, πριν δοθεί προς υλοποίηση στο εργοστάσιο παρασκευής σκυροδέματος, αφού προηγουμένως έχουν προδιαγραφεί οι τυχόν ειδικές απαιτήσεις του έργου.

Η πορεία εργασίας βασίζεται σε βιβλιογραφικά δεδομένα, σύμφωνα με την προδιαγραφή ACI-211, όπου από Πίνακες παρέχονται κατάλληλα δεδομένα και εξ' αυτών προκύπτουν οι απαραίτητες συστάσεις των υλικών του αναμίγματος. Οι τιμές που αναγράφονται στους Πίνακες και οι προκύπτουσες συστάσεις στηρίζονται σε Αμερικανικά δεδομένα. Θα πρέπει να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό ότι τα παραπάνω δεδομένα δεν είναι και υποχρεωτικά στη χρήση τους για την Ελλάδα, δεν αποτελούν απαιτήσεις του νόμου αλλά ελλείψει τέτοιας αριθμητικής διαδικασίας από τον Κ.Τ.Σ.-'97, χρησιμοποιούνται ως εργαλείο αναφοράς. Αν κατά την πορεία υπάρξει άλλη πληροφόρηση, μπορούν να ακολουθηθούν οι ανάλογες τροποποιήσεις από την διαδικασία κατά ACI-211.

Δεδομένα του προβλήματος

Το εργοστάσιο επιζητά να παράξει σκυρόδεμα κατηγορίας θλιπτικών αντοχών C25/30, κατηγορίας κάθισης S2, έκθεσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον (σύμφωνα με την προδιαγραφή ACI-211 η μέγιστη απόσταση κτίσματος στην παραλία από τη θάλασσα είναι τα 2 miles, ενώ η αντίστοιχη τιμή θεωρείται ίση με 1-2 km για την Ελλάδα). Ο μέγιστος κόκκος των αδρανών που θα



χρησιμοποιηθούν θα αντιστοιχεί σε χαλίκι 1" ή 25,4 mm. Επίσης απαιτείται ότι το παραγόμενο σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι αντλήσιμο, χωρίς αερακτικό πρόσθετο.

- Οι απαιτήσεις σχετικά με την κατηγορία θλιπτικών αντοχών (C25/30) του σκυροδέματος, το παραθαλάσσιο και την χρήση ή μη του αερακτικού προσθέτου επιβάλλονται/επιζητούνται από τον μηχανικό που εκπονεί τη μελέτη σύνθεσης
- Οι απαιτήσεις σχετικά με την εργασιμότητα (S2), επιβάλλονται/επιζητούνται από/για τον εργολάβο του έργου
- Οι απαιτήσεις σχετικά με τον μέγιστο κόκκο των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν (1" ή 25,4 mm), επιζητούνται από το εργοστάσιο
- Οι απαιτήσεις σχετικά με το αντλήσιμο, επιζητούνται από τη φύση του έργου.

Ειδικότερα:

Αν το σκυρόδεμα απαιτείται να μην έχει χαλίκι (γαρμπιλομετόν), μπορεί να χρησιμοποιηθεί τότε μόνον όταν στη σκυροδέτηση χρησιμοποιείται πυκνός οπλισμός, οπότε και απαιτείται η χρήση πιο λεπτόκοκκου μίγματος αδρανών ώστε να αποφευχθεί η επικάθιση των κόκκων του χαλικιού στον χάλυβα οπλισμού και η δημιουργία κενών, αλλά απαιτείται ειδική μελέτη.

Η χρήση αερακτικού προσθέτου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρήση αερακτικού προσθέτου εισάγει φυσαλίδες αέρα στο ανάμιγμα, με συνέπειες:

- την μείωση (υπερβολική ενίοτε) των μηχανικών αντοχών και
- την αύξηση (υπερβολική ενίοτε) του εργασιμου.

Συνεπώς, η χρήση αερακτικού προσθέτου θα πρέπει υποχρεωτικά να ληφθεί υπόψη στην μελέτη σύνθεσης με αποτέλεσμα η διαδικασία να περιπλέκεται σημαντικά. Αν τελικώς χρησιμοποιηθεί αερακτικό πρόσθετο, θα πρέπει να προστεθεί στο ανάμιγμα επιπλέον ποσότητα τσιμέντου για την αποφυγή της μείωσης των μηχανικών αντοχών, ενώ εφόσον το αερακτικό αυξάνει το εργάσιμο θα πρέπει να μειωθεί η συνολική ποσότητα νερού που θα χρησιμοποιηθεί, άρα πιθανότατα τα παραπάνω θα συνοδεύονται από αύξηση των μηχανικών αντοχών, οι οποίες θα πρέπει να παρατηρηθούν στον έλεγχο των μηχανικών αντοχών των δοκιμίων που θα ληφθούν.

Η χρήση του αερακτικού επιβάλλεται στο έργο όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κοντά στους 0°C για παρατεταμένες περιόδους (στην Αθήνα συνιστάται η αναμονή για 1-2 μέρες οπότε και συνήθως επέρχεται βελτίωση των καιρικών συνθηκών και άνοδος της θερμοκρασίας), ή αν υποχρεωτικά πρέπει να γίνει σκυροδέτηση. Αν δεν προστίθεται αερακτικό θα υπάρξει κίνδυνος από το φαινόμενο της παγοπληξίας η οποία θα δημιουργήσει προβλήματα στη δομή του παραγόμενου σκυροδέματος από τη δημιουργία πάγου κατά την πήξη του νερού του αναμίγματος, με συνέπεια την διαστολή του η οποία θα οδηγούσε στη ρηγμάτωσή του αφενός, αφετέρου δε στην μείωση των μηχανικών αντοχών και την εισαγωγή ξένων ιόντων. Οι φυσαλίδες αναλαμβάνουν τις εντάσεις και μεταβολές όγκου από την διόγκωση του νερού λειτουργώντας ως θερμική ανάρτηση και έτσι αποφεύγεται η ρηγμάτωση.

Αν στο έργο λαμβανόταν έτοιμο εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς αερακτικό πρόσθετο και προτεινόταν η εκ των υστέρων προσθήκη αερακτικού, με τη δικαιολογία ότι κατά την διάρκεια της νύχτας θα ακολουθήσει πτώση της θερμοκρασίας η οποία δεν προβλέφθηκε εξ' αρχής, δεν θα πρέπει αυτό να προστεθεί στο προσκομισθέν εργοστασιακό σκυρόδεμα γιατί οι αντοχές του θα μειωθούν. Αν οι καιρικές συνθήκες και ο ιδιάζων χαρακτήρας του έργου επιβάλουν οπωσδήποτε την σκυροδέτηση (π.χ. έργο σε νησί όπου επικρατούν δυνατοί άνεμοι και χαμηλές θερμοκρασίες), η χρήση αερακτικού προτείνεται να αποφευχθεί και αντ' αυτού να χρησιμοποιηθούν τρόποι ανόδου



της θερμοκρασίας του σκυροδέματος κατά την συντήρηση, όπως π.χ. το σκέπασμα της κατασκευής με νάυλον οπότε λόγω του εξώθερμου της ενυδάτωσης, το νάυλον θα περιορίσει κατά το δυνατόν τις απώλειες σε θερμότητα, ή τη θέρμανση των δομικών στοιχείων με θερμαντικά μέσα για τις επόμενες 1-2 ημέρες.

Απαίτηση σε νερό

Χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικά δεδομένα τα οποία παρέχονται στην προδιαγραφή ACI-211, από τον Πίνακα A1.5.2.3 για το νερό ανάμιξης (mixing water) προκύπτει η απαιτούμενη ποσότητα για το νερό ανάμιξης της σύνθεσης, αφού προηγουμένως έχει δοθεί ως δεδομένο η απαιτούμενη κάθιση του σκυροδέματος και ο μέγιστος κόκκος των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν.

Πίνακας A1.5.2.3: Απαιτήσεις κατά προσέγγιση του νερού ανάμιξης συναρτήσει της κάθισης και του μέγιστου κόκκου των αδρανών [18].

Κάθιση (cm)	Απαίτηση σε νερό σε kg/m^3 σκυροδέματος συναρτήσει του μέγιστου κόκκου των αδρανών σε mm							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
Σκυρόδεμα χωρίς τη χρήση αερακτικού								
3 – 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 – 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 – 18	240	230	210	205	185	180	170	-
Κατά προσέγγιση ποσότητα παγιδευμένου αέρα σε σκυρόδεμα χωρίς αερακτικό (%)	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2
Σκυρόδεμα με τη χρήση αερακτικού								
3 – 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 – 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 – 18	215	205	190	185	170	165	160	-
Προτεινόμενο μέσο συνολικό ποσοστό παγιδευμένου αέρα σε σκυρόδεμα χωρίς αερακτικό (%)	8,0	7,0	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0

Η επιθυμητή εργασιμότητα του σκυροδέματος προδιαγράφεται από την κατηγορία κάθισης, η οποία στην περίπτωση της παρούσης είναι η S2, ήτοι κάθιση 50-90 mm ή 5-9 cm (η ACI χρησιμοποιεί cm). Για μέγιστο κόκκο αδρανών ίσο με 25 mm ($d_{\max}=25 \text{ mm}$), ο Πίνακας A1.5.2.3 δεν παρέχει δεδομένα για το νερό ανάμιξης για κάθιση στα 5-9 cm. Γι' αυτό θεωρώντας μια μέση τιμή κάθισης ίση με 7 cm , από τα δεδομένα του Πίνακα A1.5.2.3 θα είναι:

Για κάθιση 8-10 cm (μέση τιμή 9 cm) απαιτούνται 195 kg νερού ανάμιξης,
για κάθιση 3-5 cm (μέση τιμή 4 cm) $;\approx 180 \text{ kg}$

οπότε εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή ως εξής:

Για διαφορά μονάδων (9-4) cm=5 cm στην κάθιση, εμφανίζεται διαφορά μονάδων βάσης στο νερό ανάμιξης (195-180) kg=15 kg, ενώ για διαφορά (7-4) cm=3 cm στην κάθιση, $;\approx 9 \text{ kg}$.



Έτσι για κάθιση 4 cm αντιστοιχεί νερό ανάμιξης 180 kg,
για κάθιση 9 cm ;=189 kg νερού ανάμιξης.

Άρα για τη σύνθεση 1 m³ παραθαλάσσιου σκυροδέματος κατηγορίας αντοχών C25/30, κατηγορίας κάθισης S2, η απαιτούμενη ποσότητα νερού ανέρχεται σε 189 kg (W=189 kg).

Στο υπόμνημα του Πίνακα A1.5.2.7.1 που αφορά το αερακτικό πρόσθετο, για κατηγορία κάθισης S2 στα 8-10 cm υπάρχει οδηγία που αναφέρει να αφαιρεθούν 20 kg νερού (λόγω αύξησης του εργάσιμου).

Στον Πίνακα A1.5.2.4 (a) δίνεται η συσχέτιση μεταξύ της τιμής του λόγου νερού/τσιμέντο, W/C, συναρτήσει της αντοχής σε θλίψη 28 ημερών για κυλινδρικό και όχι κυβικό δοκίμιο, σε μονάδες kg/cm² (και όχι σε MPa). Έτσι για τη συνέχεια θα πρέπει να εκφραστεί η αντοχή σε θλίψη των 28 ημερών σε μονάδες kg/cm² για κυλινδρικό δοκίμιο, διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm.

Πίνακας A1.5.2.4 (a): Συσχέτιση μεταξύ λόγου νερού/τσιμέντο (W/C) και θλιπτικών αντοχών σκυροδέματος 28 ημερών [18].

Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (kg/cm ²)	Τιμή λόγου W/C (κατά βάρος)	
	Σκυρόδεμα χωρίς τη χρήση αερακτικού	Σκυρόδεμα με τη χρήση αερακτικού
450	0,38	-
400	0,43	-
350	0,48	0,40
300	0,55	0,46
250	0,62	0,53
200	0,70	0,61
150	0,80	0,71

Χρήση επιβραδυντή

Σε περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί επιβραδυντής στο ανάμιγμα, η μάζα του υπολογίζεται επί τοις % ως προς το τσιμέντο της σύνθεσης.

Απαιτούμενη αντοχή f_a σκυροδέματος

Αυτή δίνεται από τη Σχέση 2:

$$f_a = f_{ck} + 1.64 \cdot S \quad (2)$$

Όπου:

f_{ck} τιμή χαρακτηριστικής αντοχής,

S τιμή τυπικής απόκλισης αντοχών του εργοστασίου.

Πρέπει να ερωτηθεί το εργοστάσιο σκυροδέματος ποια είναι η τυπική του απόκλιση (και επειδή συνήθως δεν τη γνωρίζει, τότε χρησιμοποιείται αυτή των 6 δοκιμίων).

Αν το εργοστάσιο σκυροδέματος δώσει ως τιμή τυπικής απόκλισης:

- $S < 3$ MPa, τότε στην Σχέση 1 χρησιμοποιείται τιμή τυπικής απόκλισης ίση με $S = 3$ MPa (άρα στη Σχέση 2 δεν νοείται $S < 3$ MPa)



- $S > 3$ MPa, τότε στην Σχέση 2 χρησιμοποιείται ότι βρέθηκε, ότι προσκομίστηκε από το εργοστάσιο για τυπική απόκλιση $S > 3$ MPa
- αν το εργοστάσιο επικαλεστεί ότι δεν έχει στοιχεία, τότε στην Σχέση 2 χρησιμοποιείται εξ' ορισμού η τιμή τυπικής απόκλισης $S = 5$ MPa (με αυτόν τον τρόπο ο κανονισμός τιμωρεί τον παραγωγό ετοίμου εργοστασιακού σκυροδέματος με μεγάλη τιμή στην τυπική απόκλιση που θα χρησιμοποιηθεί στη Σχέση 2, εφόσον δεν λάμβανε δοκίμια για μέτρηση αντοχών και στατιστική επεξεργασία)
- αν το εργοστάσιο δεν έχει στοιχεία και χρησιμοποιεί φυσικά συλλεκτά αδρανή, τότε στην Σχέση 2 χρησιμοποιείται τιμή τυπικής απόκλισης ίση με $S = 6$ MPa.

Η τιμή 1,64 υποδηλώνει ότι η χαρακτηριστική αντοχή f_{ck} βρίσκεται 1,64 τυπικές αποκλίσεις μακριά από τον μέσον όρο. Κάτω της χαρακτηριστικής αντοχής των 30 MPa το εργοστάσιο θα εμφανίζει 5% τιμές υποαντοχών.

Έστω εδώ ότι δηλώνεται ότι $S < 3$ MPa. Τότε στην Σχέση 2 για την τυπική απόκλιση θα χρησιμοποιηθεί η τιμή $S = 3$ MPa και άρα για τιμή χαρακτηριστικής αντοχής $f_{ck} = 30$ MPa (κυβικού δοκιμίου για την Ελλάδα) προκύπτει η τιμή της απαιτούμενης αντοχής ως:

$$f_a = (30 + 1,64 \cdot 3) \text{ MPa} = 34,9 \text{ MPa}.$$

Το σκυρόδεμα με τιμή απαιτούμενης αντοχής που προκύπτει από τη Σχέση 2 καλείται **οριακό**, λόγω του *minimum* 1,64. Ο νόμος δίνει το δικαίωμα να παραχθεί οριακό σκυρόδεμα με ανοχή 5%. Αν και εκ του νόμου δίδεται το δικαίωμα να βρεθούν κάτω από 5% υποαντοχές, εάν δεν ληφθούν από τον μηχανικό δοκίμια για προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών τότε δεν μπορεί να βρεθεί τίποτα (δηλαδή εργοστασιακό σκυρόδεμα με τιμή απαιτούμενων αντοχών ίση π.χ. με 36 MPa δεν εξασφαλίζει την καταλληλότητά του από πλευράς αντοχών).

Τα υψηλής ποιότητας εργοστάσια παράγουν συνθέσεις με τιμή απαιτούμενης αντοχής f_a , που προκύπτει από τη σχέση $f_a = f_{ck} + 2,00 \cdot S$ και όχι την $f_a = f_{ck} + 1,64 \cdot S$ (δηλαδή μειώνοντας το ποσοστό των υποαντοχών που πιθανόν να εμφανιστούν σε 2,5% από 5%, αλλά με ταυτόχρονη αύξηση του κόστους του σκυροδέματος αφού απαιτείται η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας τσιμέντου). Αν όλες οι σκυροδετήσεις ελέγχονταν, θα φαινόταν ότι κάποιοι πελάτες αγοράζουν και λαμβάνουν σκυρόδεμα με μικρότερες αντοχές.

Αν το εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου του εργοστασίου ειδοποιούσε ότι μετρήθηκε η τιμή της απαιτούμενης αντοχής f_a ίση με $f_a = 27$ MPa, τότε το εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου του εργοστασίου θα λάμβανε δοκίμια και την επόμενη ημέρα. Αν επαναληφθεί η μέτρηση της ίδιας με την παραπάνω τιμή για την απαιτούμενη αντοχή και την επόμενη ημέρα η (ακραίο ενδεχόμενο με ελάχιστη πιθανότητα να συμβεί), τότε το σκυρόδεμα είναι κακής ποιότητας, προφανώς έχει γίνει λάθος στην παραγωγική διαδικασία και το εργοστάσιο θα πρέπει να σταματήσει να δίνει σκυρόδεμα αυτής της παρτίδας (δεν μπορεί να συμπέσουν 2 ημέρες με 27 MPa) και πρέπει να ενημερώσει τους πελάτες του. Παρόλα ταύτα, για τον λόγο αυτό συνηθίζεται να λέγεται ότι «το σκυρόδεμα έχει φιλότιμο» μιας και οι αντιδράσεις ενυδάτωσης συνεχίζονται να εξελίσσονται σε βάθος χρόνου οπότε και σε 1,5-2 χρόνια το παραπάνω κακής ποιότητας σκυρόδεμα θα αποκτήσει την απαιτούμενη αντοχή.

Από τις απαιτήσεις του Κ.Τ.Σ.-'97 (§ 13.2.3.3.) φαίνεται ότι λόγω διαφορετικής γεωμετρίας, άρα και του διαφορετικού μηχανισμού κατανομής των θλιπτικών τάσεων, το κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 20 cm x 20 cm x 20 cm έχει μικρότερη θλιπτική αντοχή κατά 5% έναντι του κυλινδρικού δοκιμίου



διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm. Έτσι η τιμή της απαιτούμενης θλιπτικής αντοχής f_a για κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 20 cm x 20 cm x 20 cm θα μειωθεί κατά $0,05 \cdot 36 \text{ MPa} = 1,8 \text{ MPa}$, άρα θα αντιστοιχεί σε $(36,0 - 1,8) \text{ MPa} = 34,2 \text{ MPa}$ (τιμή της απαιτούμενης θλιπτικής αντοχής f_a κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm).

Στον Πίνακα 13.2.3. του Κ.Τ.Σ.-'97 δίνεται ο συντελεστής αναγωγής της αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων διαστάσεων 15 cm x 30 cm σε κύβους ακμής 20 cm.

Πίνακας 13.2.3.: Συντελεστές αναγωγής αντοχών κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος διαστάσεων 15 cm x 30 cm σε αντοχές κυβικών δοκιμίων ακμής 20 cm (για ενδιάμεσες τιμές γίνεται γραμμική παρεμβολή) [19].

Αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου 15 cm x 30 cm (MPa)	$\leq 9,2$	12,8	18,4	25,4	$\geq 39,5$
Συντελεστής αναγωγής σε κύβο ακμής 20 cm	1,3	1,25	1,22	1,18	1,14

Με γραμμική παρεμβολή για τα 34,2 MPa προκύπτει για την τιμή του συντελεστή αναγωγής:

Κύλινδρος 15 cm x 30 cm	Κύβος ακμής 20 cm	Για (45,03-29,9) MPa=15,06 MPa, αντιστοιχεί διαφορά (39,5-25,4) MPa =14,1 MPa. Για διαφορά βάσης (34,2-29,9) MPa=4,23 MPa, πόση θα είναι η διαφορά βάσης για 14,1; Προκύπτει τιμή ίση με 3,96 MPa.
14,1 { 25,4 39,5	4,23 { 29,9 34,2 45,03 } 15,06	

Είναι προφανές ότι όσο αυξάνει η αντοχή του κυβικού δοκιμίου, αυξάνει και η αντοχή του κυλινδρικού.

Άρα για το κυλινδρικό δοκίμιο που απαιτείται από την μεθοδολογία κατά ACI η θλιπτική αντοχή να είναι ίση με $(25,4 + 3,96) \text{ MPa} = 29,36 \text{ MPa}$, αυτή θα πρέπει να μετατραπεί σε kg/cm^2 .

Είναι γνωστό ότι $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ kg/cm}^2$, οπότε η τιμή αντοχής 29,36 MPa κυλινδρικού δοκιμίου 15 cm x 30 cm αντιστοιχεί σε $29,36 \text{ MPa} \cdot 10,19 \text{ kg/(cm}^2 \cdot \text{MPa)} = 299,18 \text{ kg/cm}^2$.

Λόγος νερού/τσιμέντο (W/C) και προσδιορισμός του απαιτούμενου τσιμέντου της σύνθεσης

Από τα βιβλιογραφικά δεδομένα του Πίνακα A1.5.2.4 (a) της ACI, για σκυρόδεμα χωρίς τη χρήση αερακτικού (non-air entrained concrete), θα προκύψει ο λόγος νερού/τσιμέντο W/C από την απαιτούμενη θλιπτική αντοχή των 28 ημερών (σε kg/cm^2) κυλινδρικού δοκιμίου 15 cm x 30 cm με γραμμική παρεμβολή ως εξής:

για τιμή θλιπτικής αντοχής 250 kg/cm^2 ο λόγος W/C έχει τιμή ίση με 0,62
για τιμή θλιπτικής αντοχής 300 kg/cm^2 ο λόγος W/C έχει τιμή ίση με 0,55



άρα για διαφορά $300-250=50 \text{ kg/cm}^2$ η διαφορά στον W/C είναι ίση με $W/C = 0,62-0,55=0,07$ (μιας και είναι ποσά αντιστρόφως ανάλογα),
για διαφορά $299,18-250=49,18 \text{ kg/cm}^2$ η διαφορά στον W/C=;
οπότε προκύπτει διαφορά στον λόγο W/C ίση με $W/C=0,07 \cdot 49,18/50=0,069$.
Έτσι όσο αυξάνεται η τιμή της θλιπτικής αντοχής, η τιμή του λόγου W/C μειώνεται, άρα θα πρέπει να μειωθεί η τιμή του λόγου W/C κατά 0,069, ήτοι $W/C=0,62-0,069=0,551$.

Στο σημείο αυτό εξάγεται η ποσότητα του τσιμέντου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί από τον λόγο νερού/τσιμέντο W/C που προέκυψε, γνωρίζοντας την απαίτηση σε νερό ($W=189 \text{ kg}$) ως εξής:
 $W/C=0,551$ άρα $C=189 \text{ kg}/0,551$, οπότε $C=343,0 \text{ kg}$ η απαιτούμενη ποσότητα του τσιμέντου της σύνθεσης.

Προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας αδρανών

Θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα του Πίνακα A1.5.2.6 για τον όγκο των χονδρόκοκκων αδρανών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος, όπου απαιτούνται τα παρακάτω δεδομένα:

1. μέγιστος κόκκος χονδρόκοκκων αδρανών
2. μέτρο λεπτότητας της άμμου (f_m).

Ως μέτρο λεπτότητας της άμμου (f_m) ορίζεται το πηλίκο του αθροίσματος των % ολικών συγκατατούμενων ($\%R_i$) στα κόσκινα 3", 1.5", ¾", 3/8", No 4, No 8, No 16, No 30, No 50, No 100, δια 100 (Σχέση 3).

$$f_m = \frac{\%R_{3''} + \%R_{1.5''} + \%R_{3/4''} + \%R_{3/8''} + \%R_{No4} + \%R_{No8} + \%R_{No16} + \%R_{No30} + \%R_{No50} + \%R_{No100}}{100} \quad (3)$$

Πίνακας A1.5.2.6: Όγκος χονδρόκοκκων αδρανών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος

Μέγιστος κόκκος χονδρόκοκκων αδρανών (mm)	Όγκος χονδρόκοκκων ξηρών αδρανών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος για διάφορες τιμές λεπτότητας άμμου f_m			
	2,40	2,60	2,80	3,00
10	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,76	0,74	0,72	0,70
50	0,78	0,76	0,74	0,72
70	0,81	0,79	0,77	0,75
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα προκύπτει ότι το μέτρο λεπτότητας της άμμου είναι ίσο με $f_m=2,88$, άρα με γραμμική παρεμβολή από τον Πίνακα A1.5.2.6 υπολογίζεται ο όγκος ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος αναλόγως του μέτρου λεπτότητας της άμμου ως εξής:

για $f_m=3,00$, ο όγκος ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών ανά όγκο σκυροδέματος έχει τιμή 0,65
για $f_m=2,80$, ο όγκος ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών ανά όγκο σκυροδέματος έχει τιμή 0,67



Ποια η διαφορά X στην τιμή όγκου ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών ανά όγκο σκυροδέματος με τιμή της $f_{m,}= 2,88$;

Μετά από πράξεις προκύπτει ότι $X=0,012$, άρα ο όγκος ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος είναι ίσος με $0,66 \text{ m}^3$. Αν φανταστούμε έναν κύβο σκυροδέματος ακμής 1 m , σύμφωνα με την ACI-211, η παραπάνω τιμή $0,66 \text{ m}^3$ για τον όγκο των ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών δηλώνει ότι εντός του κύβου το χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών θα έχει όγκο $0,66 \text{ m}^3$. Ο υπόλοιπος όγκος που απομένει αποτελείται από τους κόκκους της άμμου (το λεπτό κλάσμα), του τσιμέντου και του νερού οι οποίοι θα κατανεμηθούν στα ενδιάμεσα κενά και στην πάνω επιφάνεια του σκυροδέματος.

Αυτό είναι και ένα από τα σημεία αδυναμίας της μεθόδου κατά ACI, δηλαδή ότι υπολογίζεται ο όγκος των χονδρόκοκκων αδρανών και όχι η μάζα τους σε kg. Έτσι θα πρέπει να μετατραπούν οι όγκοι σε μάζες (σε kg), με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστά τα φαινόμενα ειδικά βάρη των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων κλασμάτων αδρανών.

Γνωρίζοντας τα φαινόμενα ειδικά βάρη (Φ.Β.) των χονδρόκοκκων αδρανών διεξάγονται οι προσδιορισμοί της μάζας του γαρμπιλιού, και του χαλικιού από τις μετατροπές του όγκου των χονδρόκοκκων.

Για να υπολογιστεί το φαινόμενο βάρος των χονδρόκοκκων πρέπει να δοθεί ποσόστωση για το χαλίκι και το γαρμπίλι (το επιβάλει ο νόμος).

Έστω (τυχαία) ότι το φαινόμενο βάρος των χονδρόκοκκων αδρανών είναι ίσο με 1580 kg/m^3 , δηλαδή 1 m^3 χονδρόκοκκων αντιστοιχούν σε μάζα 1580 kg ,

τα $0,66 \text{ m}^3$ χονδρόκοκκων θα αντιστοιχούν σε $=1043 \text{ kg}$ χονδρόκοκκων.

Για να προχωρήσει η επίλυση στο σημείο αυτό θα πρέπει να επιβληθεί μια ποσόστωση για το μίγμα των χονδρόκοκκων χαλικιού- γαρμπιλιού, είτε τυχαία (π.χ. 20%-80%), είτε να δοθεί μια τέτοια πληροφορία.

Έστω ποσόστωση 80% για το χαλίκι και 20% για το γαρμπίλι αντίστοιχα. Ούτως ή άλλως, ότι σύνθεση και αν προταθεί, το εργοστάσιο θα την ελέγξει στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου και θα διαπιστώσει αν όλα βαίνουν καλώς (π.χ. για ποσόστωση 60% χαλίκι – 40% γαρμπίλι θα γίνουν όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι. Αν η ποσόστωση είναι μικρή, τότε δοκιμάζεται αυτή με 70-30%, 80-20% κοκ).

Για τον συνδυασμό 80% χαλίκι – 20% γαρμπίλι η ευθεία Φ.Β. τυχαία δίνει 1580 kg/m^3 , οπότε για τα $0,66 \text{ m}^3$ προκύπτουν 1048 kg χονδρόκοκκων με την παραπάνω σύσταση.

Συνεπώς, η ποσότητα χαλικιού θα είναι ίση με $0,8 \cdot 1048 \text{ kg} = 834,4 \text{ kg}$ και ομοίως για το γαρμπίλι ίση με $0,2 \cdot 1048 \text{ kg} = 209,6 \text{ kg}$. Μένει εδώ να προσδιοριστεί πόση είναι η απαιτούμενη ποσότητα της άμμου.

Προκύπτουσα σύνθεση ανά m^3 σκυροδέματος

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί με τη μέθοδο ACI-211.

Αν διαιρεθούν τα παραπάνω βάρη με τα Φ.Β. των αδρανών, προκύπτει ο όγκος σε ℓ (λίτρα) των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση. Έτσι, στο 1 m^3 σκυροδέματος (ή 1000ℓ) τα 15ℓ είναι ο αέρας (υποθέτοντας ότι η αεροπεριεκτικότητα είναι περίπου ίση με 1,5%) και τα υπόλοιπα η άμμος. Από το Φ.Β. της άμμου και τον όγκο σε ℓ της άμμου προκύπτει η μάζα της άμμου σε kg.



Τα φαινόμενα ειδικά βάρη των αδρανών θα πρέπει να είναι γνωστά, οπότε με δεδομένες τις παρακάτω τιμές για κάθε κλάσμα αδρανών και για το τσιμέντο και νερό

$$\begin{aligned}\Phi.B_{\text{άμμου}} &= 2670 \text{ kg/m}^3 \\ \Phi.B_{\text{γαρμπιλιού}} &= 2704 \text{ kg/m}^3 \\ \Phi.B_{\text{χαλικιού}} &= 2702 \text{ kg/m}^3 \\ \Phi.B_{\text{τσιμέντου}} &= 3100 \text{ kg/m}^3 \\ \Phi.B_{\text{νερού}} &= 1000 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

καταλήγουμε στους όγκους όλων των συστατικών 1 m^3 σκυροδέματος:

$$\begin{aligned}\text{Αέρας} &= 15 \text{ } \ell \\ \text{Νερό} &= 189 \text{ } \ell \\ \text{Τσιμέντο} &= 110,7 \text{ } \ell \\ \text{Χαλίκι} &= 308,8 \text{ } \ell \\ \text{Γαρμπίλι} &= 77,5 \text{ } \ell \\ \text{Άμμος} &= ;\end{aligned}$$

Από τη Σχέση 1 προκύπτει ο όγκος της άμμου:

$$\text{Όγκος άμμου (} \ell \text{)} = 1000 \text{ } \ell \text{ σκυροδέματος} - (\text{Όγκος αέρα} + \text{νερού} + \text{τσιμέντου} + \text{χαλικιού} + \text{γαρμπιλιού})$$

$$\text{ίσος με } 299,0 \text{ } \ell \text{ ή } 299,0 \text{ } \ell \text{ άμμου} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \ell \cdot 2670 \text{ kg/m}^3 = 798,3 \text{ kg άμμου.}$$

Τα απαιτούμενα υλικά της σύνθεσης που υπολογίστηκαν δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω Πίνακα:

Υλικό	Απαιτούμενη ποσότητα (kg)	Όγκος (ℓ) ανά m^3 σκυροδέματος
Νερό	189,0	189,0
Τσιμέντο	343,0	110,7
Χαλίκι	834,4	308,8
Γαρμπίλι	209,6	77,5
Άμμος	798,3	299,0
Αέρας	-	15,0
Σύνολο	2274,3	1000,0

Επισημάνσεις - Παρατηρήσεις

- Σύμφωνα με το υπόμνημα του Πίνακα A1.5.2.7.1 της ACI-211, απαιτούνται διορθώσεις εάν τα δεδομένα που ζητούσε η σύνθεση σε σύγκριση με αυτά που προέκυψαν καλύπτονται ή όχι (π.χ. κατηγορία κάθισης S2, παραθαλάσσιο σκυροδέμα κτλ).
- Από τον Πίνακα 5.2.5.1 του Κ.Τ.Σ.-'97 για ειδικά σκυροδέματα, για παραθαλάσσιο σκυροδέμα θα πρέπει:



1. ο μέγιστος λόγος νερού / τσιμέντο να είναι ίσος με 0.60 ($\max W/C=0.60$) > 0.551 που υπολογίστηκε, άρα καλύπτεται αυτή η απαίτηση
 2. η ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου να είναι ίση με 330 kg ($\min C=330$ kg) < 343 kg που υπολογίστηκαν παραπάνω, η οποία επίσης καλύπτεται.
- Είναι γνωστό ότι για τη σύνθεση σκυροδέματος κατηγορίας αντοχών C25/30, η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου της σύνθεσης είναι τα 330 kg, ενώ από την παραπάνω ανάλυση προσδιορίστηκε σε 343 kg. Θα μπορούσε για λόγους μείωσης του κόστους να επιλεγούν στη σύνθεση 330 kg τσιμέντου που είναι και το ελάχιστο, δηλαδή να αφαιρεθούν 13 kg τσιμέντου;
Αν επιχειρηθεί να μειωθεί η ποσότητα του τσιμέντου κατά 13 kg, τότε θα μεταβληθεί αυτομάτως και ο λόγος W/C στην τιμή $W/C=189$ kg/ 330 kg= $0.57 < 0.60$ που είναι το μέγιστο, άρα τα κριτήρια του Πίνακα 5.2.5.1 του Κ.Τ.Σ.-'97 για ειδικά σκυροδέματα καλύπτονται ακόμη. Δεν πρέπει να επιχειρείται να μεταβληθεί η ποσότητα του νερού αφού μειώνοντας την απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου θα προκληθεί αναπόφευκτα και μείωση των μηχανικών αντοχών.
 - Τέλος θα πρέπει να ελεγχθεί και το αντλήσιμο, δηλαδή θα πρέπει το άθροισμα της ποσότητας του τσιμέντου και της παιπάλης των αδρανών που υπολογίστηκαν να υπερβαίνει τα 450 kg.

Αφού η άμμος στη σύνθεση είναι λίγη σε ποσότητα (περίπου 800 kg), το σκυροδέμα δεν είναι αντλήσιμο (καθίσταται αντλήσιμο όταν χρησιμοποιηθούν κατ' ελάχιστον 910 kg άμμου).

Άρα αποφασίζεται η προσθήκη επιπλέον 110 kg άμμου για να επιτευχθεί το αντλήσιμο, οπότε κατά σύνολο 110 kg θα μειωθεί η μάζα του χαλικιού (σε μεγαλύτερο βαθμό αφού μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της πρέσας μεταφοράς σκυροδέματος) και το υπόλοιπο από την ποσότητα του γαρμπιλιού.

Η σύνθεση θα αποτελείται σίγουρα από 189 kg νερό, 910 kg άμμο (πληροφορία), 330 kg τσιμέντο και για σύνολο 2375 kg σκυροδέματος θα πρέπει να τροποποιηθεί η ποσότητα του χαλικιού περίπου στα 738 kg (αφαιρούνται 13 kg τσιμέντο και προστίθενται 110 kg άμμου).

Στην υποσημείωση του Πίνακα A1.5.2.7.1 της ACI, αναφέρεται ότι για κάθε 5 kg διαφορά από το νερό ανάμιξης που προκύπτει από τον Πίνακα A1.5.2.3 για κάθιση από $8-10$ cm, απαιτείται διόρθωση.

Αν επιχειρηθεί να αφαιρεθούν ή να προστεθούν 5 kg νερού, θα πρέπει το σύνολο της σύνθεσης (2375 kg) να μειωθεί κατά 8 kg στην αντίθετη κατεύθυνση. Για κάθε 20 kg διαφοράς στο τσιμέντο, πρέπει να διορθωθεί το βάρος της σύνθεσης κατά 3 kg στην ίδια κατεύθυνση. Δηλαδή αν πρέπει να αυξηθεί η ποσότητα τσιμέντου κατά 20 kg, θα πρέπει να αυξηθεί και η μάζα της σύνθεσης κατά $(2375+3)$ kg. Αντίθετα διεξάγονται οι υπολογισμοί για μείωση της ποσότητας του τσιμέντου κατά 20 kg.

Στην πορεία επίλυσης που περιγράφηκε παραπάνω, αφαιρέθηκαν από τη μάζα της σύνθεσης 13 kg τσιμέντου και θεωρήθηκε λανθασμένα ότι το βάρος της σύνθεσης παρέμεινε το ίδιο

ΚΑΝΟΝΑΣ: Οποιαδήποτε προσθαφαίρεση υλικών στο 1 m³ σκυροδέματος (διορθώσεις ποσοτήτων) θα γίνεται με βάση τον όγκο (σε ℓ) και όχι την μάζα (σε kg).



Τα -13 kg τσιμέντο αντιστοιχούν σε $-13 \text{ kg}/(3,1 \text{ kg}/\ell)=4,19 \ell$ τσιμέντου.

Εφόσον παραπάνω αποφασίστηκε να προστεθεί άμμος, θα προστεθούν 4,19 ℓ άμμου (Φ.Β.άμμου=2670 kg/m³) ή $4,19 \ell \cdot 2,67 \text{ kg}/\ell=11,19 \text{ kg}$ άμμου, ή κατά προσέγγιση 11 kg άμμου. Άρα όλη η σύνθεση θα έχει βάρος 2373 kg (διαφορά $-13+11 \text{ kg}=2 \text{ kg}$).

Προσθαφαιρέσεις: Τσιμέντο με τσιμέντο (σε ℓ)
Αδρανή με αδρανή (σε kg)
Νερό σε αδρανή (σε ℓ)

Αν προστεθούν στα 800 kg άμμου και επιπλέον 99 kg άμμου, αφαιρώντας ταυτόχρονα 99 kg χαλκιού, η σύνθεση θα γινόταν: άμμος=910 kg, χαλίκι=735 kg, γαρμπίλι=208 kg, τσιμέντο=330 kg, νερό=189 kg).

Αν προστεθούν 5 kg νερό (=5 ℓ) τότε θα πρέπει να αφαιρεθούν 5 ℓ χαλκιού (=13,5 kg), άρα από τη σύνθεση χάνονται 8,5 kg (όπως αναφέρεται και στην υποσημείωση του Πίνακα A1.5.2.7.1 της ACI-211).

Τέλος για το αντλήσιμο της σύνθεσης, όπως ειπώθηκε και παραπάνω θα πρέπει η συνολική μάζα των λεπτοκοκκων υλικών να υπερβαίνει τα 450 kg, δηλαδή (τσιμέντο + παιπάλη) > 450 kg, άρα (330 kg τσιμέντο + παιπάλη) > 450 kg.

Γνωρίζεται η περιεκτικότητα της παιπάλης στην άμμο που χρησιμοποιήθηκε, π.χ. έστω 17,3%, δηλαδή $0,173 \cdot 910 \text{ kg}=157,43 \text{ kg}$ παιπάλης, άρα (330 kg τσιμέντο + 157,43 kg παιπάλη)=487 kg > 450 kg, άρα δεν δημιουργείται πρόβλημα όσον αφορά το αντλήσιμο.

Πρόσθετες ερωτήσεις (για να γίνει αντιληπτή η πολυπλοκότητα των ασκήσεων)

i. Αν στη συγκεκριμένη σύνθεση (όπου θεωρητικά οι αντοχές θα είναι 36 MPa) προστεθεί αερακτικό, πόσο θα μεταβληθεί η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος των 28 ημερών και πόσο η εργασιμότητά του (να υπολογιστούν);

Η πορεία εργασίας περιλαμβάνει την χρήση των αντίστροφων Πινάκων για τη χρήση αερακτικού (non-entrained air concrete).

ii. Πόσα kg τσιμέντο πρέπει να προστεθούν στη σύνθεση ώστε η απαιτούμενη θλιπτική αντοχή να μην μεταβληθεί;

Στην πράξη το εργοστάσιο σκυροδέματος θα πρέπει να διαθέτει διαφορετικές μελέτες σύνθεσης για κάθε διαφορετική κατηγορία εργασιμότητας (π.χ. S2, S3, S4 και S5), για δεδομένη κατηγορία θλιπτικών αντοχών (π.χ. την C16/20). Αν η πρακτική που προταθεί είναι να προστεθεί επιπλέον νερό ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη κατηγορία κάθισης, τότε αυτομάτως θα πρέπει να προστεθεί στην σύνθεση και επιπλέον ποσότητα τσιμέντου ώστε να προκληθεί αύξηση της θλιπτικής αντοχής (η οποία θα μειωνόταν με την προσθήκη νερού), με συνέπεια την αύξηση της τιμής της του σκυροδέματος. Τότε κανείς εργολάβος δεν θα δεχόταν να δίνει διαφορετικές τιμές για σκυρόδεμα ίδιων αντοχών σε κάθιση S2, S3, S4 και S5. Για το λόγο αυτό το εργοστάσιο παρασκευάζει μία σύνθεση για κατηγορία αντοχών C16/20 και κάθιση S2 και για την παραγωγή σκυροδέματος ίδιας κατηγορίας αντοχών αλλά μεγαλύτερης κατηγορίας κάθισης προσθέτει υπερρρευστοποιητή. Αυτή είναι η πρακτική της σημερινής εποχής. Παλαιότερα, όπου δεν υπήρχε υπερρρευστοποιητής, όλοι οι υπολογισμοί έπρεπε να γίνουν εξ' αρχής.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική:

1. Α. Τριανταφύλλου, *Δομικά Υλικά*, 7^η Εκδ., Πάτρα, 2005
2. R. Wendehorst, *Δομικά Υλικά*, 2^η Έκδ., Εκδόσεις Μ. Γκιούρδα, Αθήνα, 1981
3. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, *Σκυροδέμα. Μικροδομή, ιδιότητες και υλικά*, (σε μετάφραση Ι. Παπαγιάννη), 3^η Έκδ., Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2009
4. Χ. Οικονόμου, *Τεχνολογία του Σκυροδέματος*, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις “ΣΕΛΚΑ - 4Μ” ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ, Αθήνα, 2003

Ξενογλώσση:

5. ASTM Standards, Section 4: Construction, Volume 04.02: Concrete and Aggregates
6. G. D. Taylor, *Materials in Construction – Principles, Practice and Performance*, Pearson Education, U.K., 2002
7. S. Somayaji, *Civil Engineering Materials*, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A., 2001
8. M. S. Mamlouk, J. P. Zaniewski, *Materials for Civil and Construction Engineers*, 2nd Ed., Pearson Education, New Jersey, U.S.A., 2006
9. R. A. Flinn, P. K. Trojan, *Engineering Materials and their Applications*, 4th ed., Houghton Mifflin Company, Boston, U.S.A., 1990
10. S. Mindess, J. F. Young, D. Darwin, *Concrete*, 2nd ed., Pearson Education, New Jersey, U.S.A., 2003
11. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed., Pearson Education, London, U.K., 2004
12. P. C. Hewlett, *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, 4th ed., Edward Arnold, London, 1998
13. H. F. W. Taylor, *Cement Chemistry*, 2nd ed., Thomas Telford Publishing, London, U.K., 1997
14. M. S. J. Gani, *Cement and Concrete*, Chapman & Hall, London, U.K., 1997
15. S. N. Gosh, *Cement and Concrete Science and Technology*, Vol. I Part I, ABI Books Pvt., New Delhi, India, 1991
16. S. N. Gosh, *Cement and Concrete Science and Technology*, Vol. I Part II, ABI Books Pvt., New Delhi, India, 1992

Κανονισμοί – Πρότυπα:

17. ASTM Standards, Section 4: Construction, Volume 04.02: Concrete and Aggregates
18. ACI-211: Concrete Mix Design Procedure
19. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΣ-97 (ΦΕΚ 315/Β/17-4-97)
20. ΕΛΟΤ EN 12620: Αδρανή σκυροδέματος
21. ΕΛΟΤ EN 13043: Αδρανή ασφαλτομιγμάτων
22. ΕΛΟΤ EN 13139: Αδρανή Κονιαμάτων
23. ΕΛΟΤ EN 13383-1: Αδρανή για Ογκόλιθους για λιμενικά και υδραυλικά έργα
24. ΕΛΟΤ EN 13450: Αδρανή για έρμα σιδηροδρομικής γραμμής
25. ΕΛΟΤ EN 13242: Αδρανή για βάσεις και υποβάσεις σταθεροποιημένες ή μη
26. ΕΛΟΤ EN 13055: Ελαφροβαρή Αδρανή