

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΆΜΜΟΥ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Δ.Χ.Τσαματσούλης

Δρ. Χημικός Μηχανικός, Συντονιστής Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε.

Π.Γκριτζάλη

Μεταλλειολόγος Μηχανικός, Διευθύντρια Ποιότητας του Λατομείου ΧΑΛΥΨ

Λέξεις κλειδιά: Αδρανή υλικά, Ισοδύναμο άμμου, κοκκομετρία, συσχέτιση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται ημειπειρικό μοντέλο προσομοίωσης της καμπύλης διαχωρισμού δυναμικού αεροδιαχωριστή 3^{ης} γενιάς του εργοστάσιου τσιμέντου ΧΑΛΥΨ, στηριγμένο σε σημαντικό αριθμό πειραμάτων. Τα πειράματα σχεδιάστηκαν σε μια ευρεία κλίμακα λειτουργικών παραμέτρων του κυκλώματος άλεσης. Η πρωτοτυπία της εφαρμογής έγκειται στο γεγονός ότι οι παράμετροι του προτύπου συσχετίστηκαν επιτυχώς με τις παραμέτρους λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί στην τρέχουσα λειτουργία του συγκεκριμένου μύλου τσιμέντου, συμβάλλοντας στην βελτιστοποίηση της παραγωγής και της ποιότητας, όσο και για σχεδιαστικούς λόγους στην περίπτωση παραγωγής ενός νέου τύπου τσιμέντου.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρότυπο EN 12620: 2002 «Αδρανή για Σκυρόδεμα», έχει ως αναφορά σχετικά με τη μέτρηση του ισοδύναμου της άμμου, το πρότυπο EN 933-8: 1999 «Εκτίμηση των λεπτών – Δοκιμή ισοδύναμου άμμου» Έως τώρα η δοκιμή του ισοδύναμου άμμου – ΙΑ ή SE - γινόταν με βάση της ASTM μέθοδο, D 2419:1991. Η βασικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων είναι οι εξής: Κατά την EN 933-8 μέθοδο λαμβάνεται το κλάσμα της άμμου διερχόμενο στο κόσκινο οπής 2mm και επιτρέπεται να έχει υγρασία έως και 2%. Αντίθετα κατά την ASTM μέθοδο, λαμβάνεται το κλάσμα το διερχόμενο στο κόσκινο οπής 4.75 mm, το οποίο πρέπει επιπλέον να είναι ξηρό. Βέβαια στο παράρτημα Α του EN 933-8, το οποίο είναι τυποποιητικό, επιτρέπεται να λαμβάνεται το κλάσμα το διερχόμενο στο κόσκινο 4 mm, στην περίπτωση όμως αυτή το αποτέλεσμα της μέτρησης αναφέρεται ως SE₄, ώστε να διακρίνεται από το αποτέλεσμα που προκύπτει εάν εφαρμοστεί η μεθοδολογία που περιγράφεται στο κύριο κείμενο του

προτύπου. Γενικά όσο μεγαλύτερη η τιμή του SE, τόσο πιο μικρό το ποσοστό των λεπτών της άμμου άρα και των πιθανά περιεχόμενων αργιλικών προσμίξεων. Στόχος της μελέτης που ακολουθεί είναι να διερευνηθεί εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μετρήσεων. Λόγω ακριβώς της διαφορετικής μεθόδου κατασκευής του δείγματος προς μέτρηση, αναμένεται το SE κατά ASTM, να είναι μεγαλύτερο του SE κατά EN 933-8.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε περισσότερα των 170 δειγμάτων άμμου παραγωγής του λατομείου ΧΑΛΥΨ, τα οποία καλύπτουν χρονική περίοδο άνω του ενός έτους μετρήθηκε το Ισοδύναμο Άμμου και με τις δύο μεθόδους. Παράλληλα μετρήθηκε το πέρασμα στο κόσκινο των 2 mm, εφόσον για να σχηματιστεί το δείγμα στο το οποίο θα μετρηθεί το SE κατά EN 933-8, η άμμος κοσκινίζεται στο κόσκινο αυτό. Για να αποκτήσουν οι τυχόν παραγόμενες συσχετίσεις, όσο το δυνατόν ευρύτερη αξία, όχι μόνο μετρήθηκε μεγάλος αριθμός δειγμάτων αλλά και κατανεμήθηκαν σε μεγάλο χρονικό διάστημα παραγωγής. Κάθε αποτέλεσμα αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο δύο μετρήσεων. Κατ' αρχήν συσχετίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά ASTM και EN και προκύπτει η εξίσωση (1):

$$SE_{ASTM} = 38.2 + 0.61 \cdot SE_{EN} \quad R = 0.85 \quad Std_Err = 2 \quad (1)$$

Αφού ο συντελεστής συσχέτισης R είναι εν γένει ικανοποιητικός, η σχέση (1) θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια αρχική συσχέτιση. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 2419, για υψηλές τιμές του SE αναμένεται επαναληψιμότητα 1.5 και μέγιστη διαφορά δύο αποτελεσμάτων δοκιμών εκτελεσμένων από τον ίδιο χειριστή, με ίδιο εξοπλισμό στο ίδιο δείγμα 4.2. Το τυπικό σφάλμα Std_Err της σχέσης (1) είναι υψηλότερο από την αναμενόμενη επαναληψιμότητα της μεθόδου ASTM D 2419. Εάν ληφθεί η αντίστροφη συνάρτηση μεταξύ SE_{EN} , SE_{ASTM} , ενώ προκύπτει ο ίδιος συντελεστής συσχέτισης, το τυπικό σφάλμα ισούται με 2.8, γεγονός που σημαίνει ότι η μέγιστη διαφορά μεταξύ δύο αποτελεσμάτων αναμένεται να είναι $2.58 \cdot 2.8 = 7.1$. Στην περίπτωση του προτύπου EN 933-8 η επιτρεπτή μέγιστη διαφορά είναι 4 μονάδες. Άρα η σχέση (1) δεν μπορεί τελικά να θεωρείται ως επαρκής και θα πρέπει να αναζητηθεί κάποια πληρέστερη. Ωστόσο από τη σχέση (1) προκύπτει ένα σημαντικό συμπέρασμα: Η διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων δεν είναι σταθερή – αλλά είναι συνάρτηση του επιπέδου της δοκιμής.

Εφόσον για να προετοιμαστεί το δείγμα που θα μετρηθεί κατά EN 933-8, πρώτα κοσκινίζεται στα 2 mm, αναμένεται το % πέρασμα της άμμου στο κόσκινο των 2 mm, P_2mm, να αποτελεί μια σημαντική ανεξάρτητη

μεταβλητή, ώστε να προκύψει μια ισχυρότερη συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η εξίσωση (2)

$$SE_{ASTM} = 43.6 + 0.71 \cdot SE_{EN} - 0.20 \cdot P_{2mm}$$

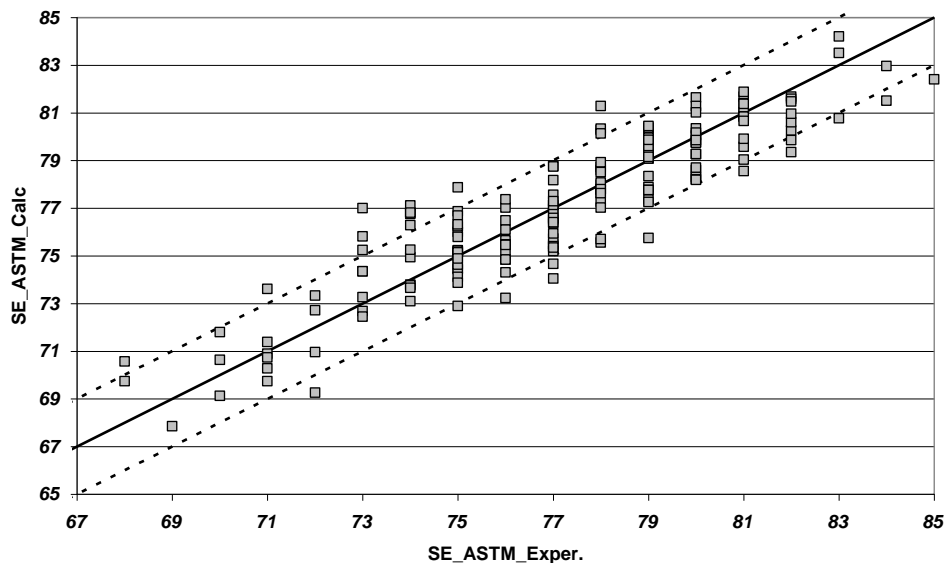
$$R = 0.93 \quad Std_Err = 1.44 \quad (2)$$

Στην περίπτωση αυτή η συσχέτιση αποδεικνύεται επαρκής εφόσον, πέραν του ικανοποιητικού συντελεστή συσχέτισης, το τυπικό σφάλμα είναι μικρότερο του επιπέδου επαναληψιμότητας όπως παρέχεται από το πρότυπο ASTM D 2419. Το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα της αντίστροφης συσχέτισης όπου η τιμή SE_{ASTM} θεωρείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή και η τιμή SE_{EN} ως εξαρτημένη είναι 1.9. Στην περίπτωση αυτή η συσχέτιση δίνεται από την εξίσωση (3).

$$SE_{EN} = -50 + 1.22 \cdot SE_{ASTM} + 0.28 \cdot P_{2mm}$$

$$R = 0.93 \quad Std_Err = 1.90 \quad (3)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ το πρότυπο ASTM D 2419 αναφέρει τιμές επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας, αντίστοιχες τιμές δεν δίνονται στο πρότυπο EN 933-8. Τέτοιες τιμές θα μπορούσαν να αποκτηθούν μέσω ενός διεργαστηριακού πειράματος. Στο σχήμα 1 δίνονται οι πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές του SE_{ASTM} με βάση την εξίσωση (2).



Σχήμα 1. Πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές του SE_{ASTM} .

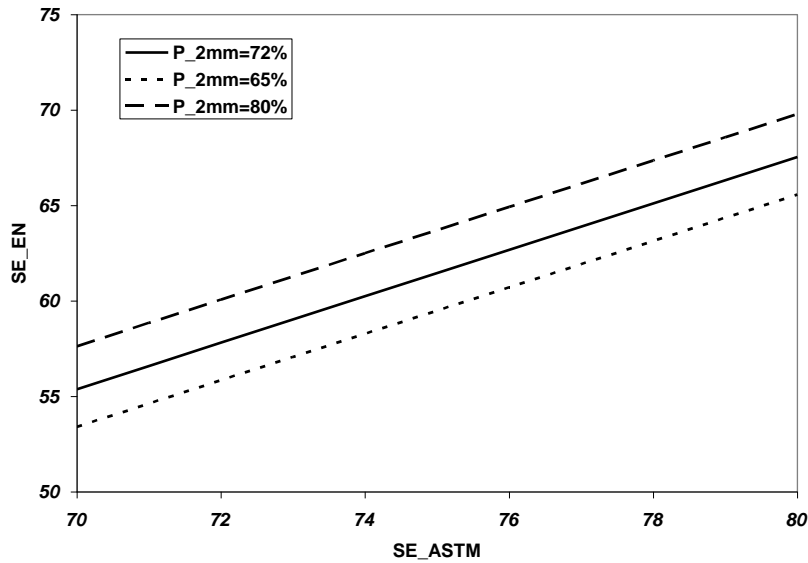
Από την εξίσωση 2 προκύπτει το σημαντικό συμπέρασμα ότι η τιμή του SE_{ASTM} είναι συνάρτηση όχι μόνο της τιμής του SE_{EN} αλλά επίσης και του % περάσματος στο κόσκινο των 2 mm. Άρα δύο παρτίδες άμμου που έχουν την ίδια τιμή ισοδύναμου κατά ASTM αλλά διαφορετική τιμή του P_{2mm} , τότε η τιμή του ισοδύναμου τους κατά EN θα διαφέρει. Το πρότυπο EN 12620:2002 θέτει όρια όσον αφορά την κοκκομετρία της άμμου σε συγκεκριμένα κόσκινα, δεν θέτει όμως για το ισοδύναμο. Στο παράρτημα D του συγκεκριμένου προτύπου αναφέρεται μεταξύ άλλων: (α) Τα λεπτά αδρανή θεωρούνται μη επιβλαβή, όταν η τιμή του SE ξεπερνά ένα κάτω όριο. (β) Ο έλεγχος συμμόρφωσης γίνεται με πιθανότητα 90% (γ) Ακριβή όρια δεν μπορούν εκ των προτέρων να τοποθετηθούν, έως ότου υπάρξουν παραπέρα αποτελέσματα σε ορισμένα μέρη της Ευρώπης. Τα όρια και οι κατηγορίες πρέπει να καθιερωθούν με βάση την εμπειρία των υπαρχουσών απαιτήσεων των υλικών για τοπική ικανοποιητική χρήση.

3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

3.1 Παραμετρική ανάλυση

Τα ισοδύναμα άμμου μετρημένα με βάση τις δύο μεθόδους που αναφέρθηκαν, απλοποιημένα εκφράζουν το εξής: Το αποτέλεσμα της μέτρησης κατά ASTM εκφράζει το συνολικό χονδρόκοκκο ποσοστό της άμμου. Αντίθετα το αποτέλεσμα της μέτρησης κατά EN εκφράζει το ποσοστό χονδρόκοκκων το οποίο διέρχεται το κόσκινο των 2 mm. Για αυτό ακριβώς το λόγο η συσχέτισή τους είναι συνάρτηση του % περάσματος στα 2 mm. Για να μελετηθεί η επίδραση του P_{2mm} στο SE_{EN} θεωρείται η παρακάτω περίπτωση: Περιοχή SE_{ASTM} : 70 – 80, P_{2mm} : 65%, 72%, 80%. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2, από όπου παρατηρείται ότι η ίδια τιμή του SE_{EN} μπορεί να ληφθεί για διαφορετικές τιμές του SE_{ASTM} εάν το P_{2mm} μεταβάλλεται.

Το γεγονός αυτό πρακτικά σημαίνει πως αν και το πρότυπο EN 12620:2002 δεν θέτει περιορισμό συμμόρφωσης για το % πέρασμα στα 2mm για την άμμο 0/4 mm, ο παραγωγός αδρανών πρέπει να θέτει εσωτερικό στόχο παραγωγής στο συγκεκριμένο κόσκινο και να συμμορφώνεται με αυτόν. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι για συγκεκριμένες πρώτες ύλες και εγκαταστάσεις παραγωγής, η κοκκομετρία ακολουθεί συγκεκριμένη κατανομή. Έτσι εφόσον ο παραγωγός συμμορφώνεται στους περιορισμούς για τα κόσκινα 4, 1, 0.25, 0.063 mm, έμμεσα συμμορφώνεται σε εσωτερικά όρια για το κόσκινο των 2 mm



Σχήμα 2. Μεταβολή του SE_{EN} συναρτήσει του SE_{ASTM} για διάφορες τιμές του P_{2mm}

3.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Για να μελετηθεί πως η διασπορά του SE_{ASTM} και του P_{2mm} εφαρμόζεται στην εξίσωση (3) η ακόλουθη εξίσωση μετάδοσης σφάλματος για την γενική εξίσωση $Y=F(x_1, x_2, \dots, x_N)$:

$$s_Y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 s_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r_{ij} s_i s_j \quad (4)$$

όπου s_Y = τυπική απόκλιση της μεταβλητής Y , s_i = τυπική απόκλιση της μεταβλητής x_i και r_{ij} = συντελεστής παλινδρόμησης μεταξύ των μεταβλητών x_i και x_j .

Η εφαρμογή της γενικής αυτής εξίσωσης στην (3) καταλήγει στη σχέση:

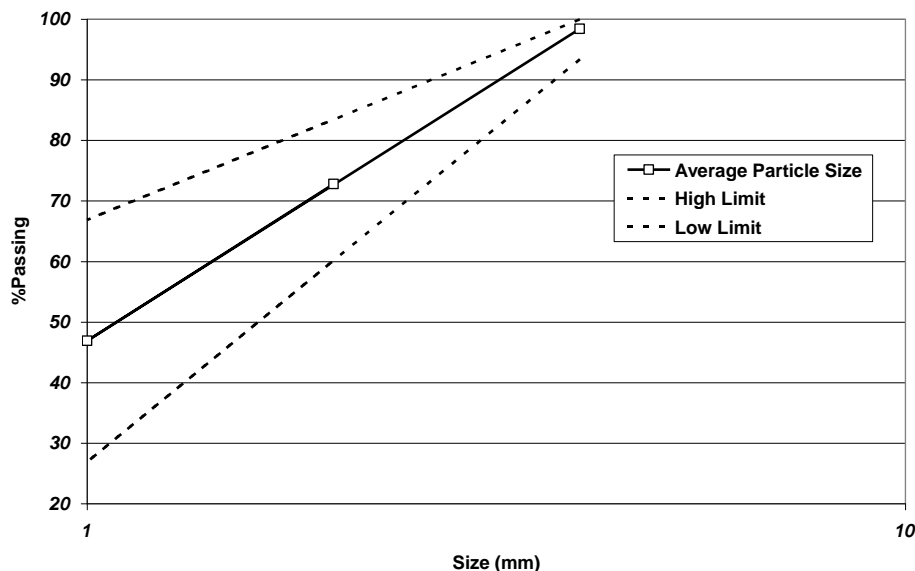
$$s_{EN}^2 = 1.49 \cdot s_{ASTM}^2 + 7.84 \cdot 10^{-2} \cdot s_{P2} + 0.68 \cdot s_{ASTM} \cdot s_{P2} \cdot r_{ASTM, P2} \quad (5)$$

όπου s_{EN} = τυπική απόκλιση του SE_{EN} , s_{ASTM} = τυπική απόκλιση του SE_{ASTM} , s_{P2} = τυπική απόκλιση του P_{2mm} και $r_{ASTM, P2}$ = συντελεστής παλινδρόμησης μεταξύ των μεταβλητών SE_{ASTM} και P_{2mm} .

Με βάση την ομάδα δεδομένων από τα οποία έγινε εξαγωγή της εξίσωσης (3) υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ SE_{ASTM} και P_{2mm} και βρέθηκε ίσος με -0.01 , δηλ. οι δύο μεταβλητές είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες και ο τρίτος όρος της εξίσωσης (5) ισούται με 0

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί μια μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση για το P_{2mm} , με βάση τα κριτήρια συμμόρφωσης για τα κόσκινα 4 και 1 mm. Στο σχήμα 3 δίνεται τυπική κοκκομετρία άμμου στα κόσκινα 1,2,4 mm καθώς και τα άνω και κάτω όρια συμμόρφωσης. Από το διάγραμμα και μέσω γραμμικής παρεμβολής των ορίων με τους λογαρίθμους των διαστάσεων προκύπτει ένα μέσο μέγιστο εύρος ίσο με $\pm 11.5\%$. Τα όρια αυτά πρέπει καλύπτονται με δίπλευρη πιθανότητα 10%, άρα 5% για κάθε πλευρά. Με εφαρμογή της κανονικής κατανομής προκύπτει μέγιστη τυπική απόκλιση $SP_{2_Max} = 11.5 / 1.645 = 7.0$

Με βάση αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται η τυπική απόκλιση του SE_{EN} για $S_{ASTM} = 3..10$ και $SP_2 = 3, 7$. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 4.

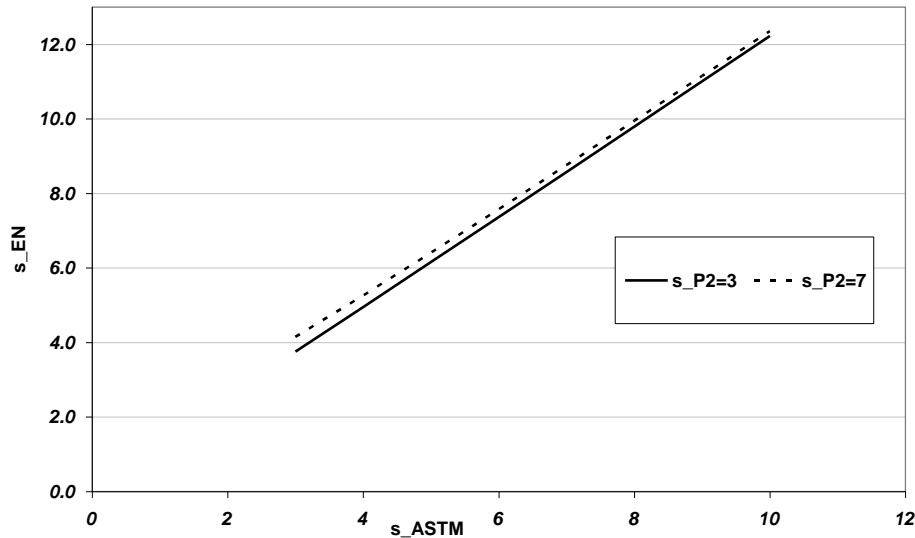


Σχήμα 3. Όρια συμμόρφωσης του προτύπου EN 12620 για κόσκινα 1 και 4 mm

Από το σχήμα 4 παρατηρούνται τα εξής:

(i) Πάρα το γεγονός ότι η τιμή του P_{2mm} επιδρά ισχυρά στην τιμή του SE_{EN} , όπως φαίνεται από το σχήμα 2, η απόκλισή του επιδρά σημαντικά λιγότερο στην αντίστοιχη απόκλιση του ισοδυνάμου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι μεταβλητές SE_{ASTM} και P_{2mm} αποδεικνύονται μεταξύ τους ανεξάρτητες.

(ii) Για δεδομένη απόκλιση του SE_{ASTM} , η απόκλιση του SE_{EN} είναι σημαντικά υψηλότερη (30% για χαμηλά επίπεδα αποκλίσεως, έως 20% για υψηλά επίπεδα).



Σχήμα 4. Συσχέτιση τυπικών αποκλίσεων SE_{EN} και SE_{ASTM}

Στη συνέχεια μελετάται η παρακάτω περίπτωση: Έστω ένα εργοστάσιο που παράγει άμμο σκυροδέματος με μέση τιμή $P_{2mm} = 73\%$ και τυπική απόκλιση $s_{P2} = 4$. Για μετρήσεις ισοδύναμου άμμου κατά ASTM θεωρεί ως κάτω όριο 65 με πιθανότητα 95%. Με βάση τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν καθώς και με χρήση κανονικής κατανομής απαιτείται να υπολογιστούν:

(i) Ο στόχος του SE_{ASTM} , $SE_{ASTM,TARGET}$ συναρτήσει της απόκλισης s_{ASTM} για επίπεδα αποκλίσεως 3 έως 10

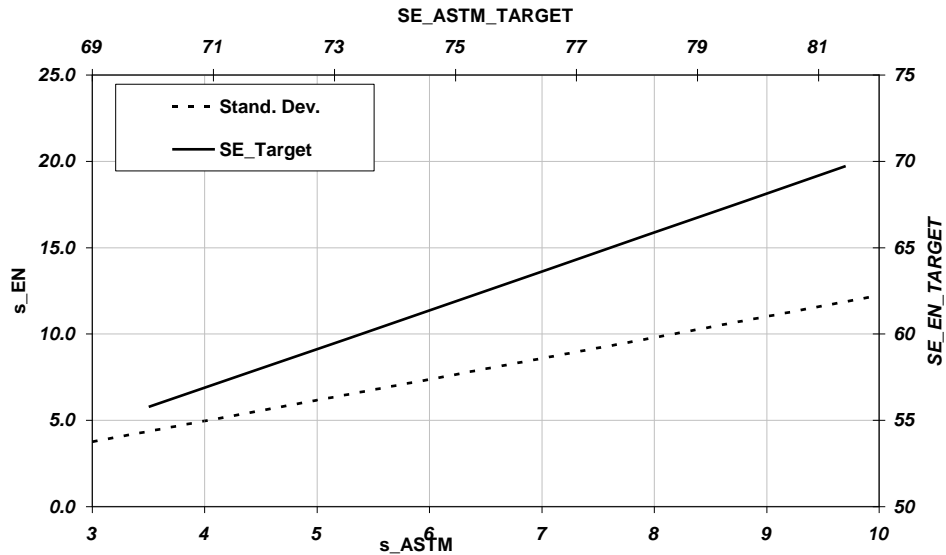
(ii) Το κάτω όριο SE_{EN} , που να αντιστοιχεί σε τιμή $SE_{ASTM} = 65$, με πιθανότητα 90%, όπως προβλέπεται από το πρότυπο EN 12620: 2002

(iii) Ο στόχος του SE_{EN} , $SE_{EN,TARGET}$ συναρτήσει του στόχου SE_{ASTM} όπως υπολογίστηκε από το βήμα (i)

Η απαίτηση (i) υπολογίζεται με εφαρμογή της κανονικής κατανομής για πιθανότητα $P=0.95$, η οποία παρέχει απόσταση από τη μέση τιμή $z_a=1.645$. Τότε ο απαιτούμενος στόχος δίνεται από την εξίσωση (6) για $s_{ASTM}=3..10$

$$SE_{ASTM,TARGET} = 65 + 1.645 \cdot s_{ASTM} \quad (6)$$

Η τιμή στην απαίτηση (ii) δίνεται από την εξίσωση (3). Η εφαρμογή της για τα δεδομένα του παραγωγού, δίνει $SE_{EN} = 50$



Σχήμα 5. Συσχέτιση στόχων SE_{EN} και SE_{ASTM}

Για να υπολογιστεί ο απαιτούμενος στόχος κατ' αρχήν εκτιμάται η αναμενόμενη τυπική απόκλιση s_{EN} για $s_{ASTM} = 3..10$ και $s_{P2} = 4$ από την εξίσωση (5). Στη συνέχεια με χρήση κανονικής κατανομής και πιθανότητα $P=0.90$, υπολογίζεται απόσταση από τη μέση τιμή $z_a=1.282$. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η εξίσωση (7) για τις τιμές του s_{EN} που υπολογίστηκαν από τη σχέση (5). Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 5. Ο κάτω οριζόντιος και ο αριστερός κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τις τυπικές αποκλίσεις, ενώ ο επάνω οριζόντιος και ο δεξιός κατακόρυφος τους στόχους των ισοδυνάμων άμμου μετρημένων με τις δύο μεθόδους. Από το σχήμα παρατηρείται ότι ενώ για χαμηλά επίπεδα αποκλίσεων του SE, η διαφορά μεταξύ των δύο στόχων είναι 14 μονάδες όταν το επίπεδο απόκλισης είναι υψηλό, η διαφορά μειώνεται στις 11 μονάδες

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη αναπτύσσεται συσχέτιση μεταξύ του ισοδυνάμου άμμου μετρημένου κατά το πρότυπο EN 933-8 και το πρότυπο ASTM το οποίο εφαρμόζεται μέχρι σήμερα στη χώρα μας. Για αδρανή σκυροδέματος, σύμφωνα με το EN 206-1:2000, επιβάλλεται πλέον η μέτρηση σύμφωνα με

την EN μέθοδο. Η συσχέτιση βασίζεται σε σημαντικό πλήθος βιομηχανικών δεδομένων και λαμβάνει παράλληλα υπόψη το % πέρασμα στο κόσκινο των 2 mm. Χωρίς να φιλοδοξεί να έχει γενικότερο χαρακτήρα, εφόσον εφαρμόστηκε σε δεδομένα ενός μόνο εργοστασίου, μπορεί να χρησιμεύσει ως οδηγός στην εκτέλεση διεργαστηριακών πειραμάτων σε προϊόντα άμμου παραγόμενα από διαφορετικά πετρώματα και παραγωγούς. Το SE_{ASTM} είναι πάντα σημαντικά υψηλότερο του SE_{EN} λόγω της διαφορετικής μεθοδολογίας παρασκευής του δείγματος προς μέτρηση. Η τιμή του P_{2mm} έχει ισχυρή επίδραση στην τιμή του SE_{EN} .

Παράλληλα επιχειρήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του προτεινόμενου απλουστευμένου μαθηματικού μοντέλου. Για δεδομένα επίπεδα τυπικής απόκλισης του σ , η εκτιμώμενη τυπική απόκλιση του είναι 20% έως 30% υψηλότερη. Αντίθετα η τυπική απόκλιση του P_{2mm} δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκλιση του ισοδυνάμου κατά EN. Ως αποτέλεσμα του μαθηματικού προτύπου που αναπτύχθηκε παρατίθεται αλγόριθμος υπολογισμού παραγωγικών στόχων ποιότητας όσον αφορά την τιμή του SE_{EN} . Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμεύσει ως καθοδήγηση για το αποτελεσματικό πέρασμα από μετρήσεις ισοδυνάμου κατά ASTM, σε μετρήσεις κατά EN.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ASTM D2419-1991. "Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregates", ASTM Book of Standards, Volume 04.03 (1991).

EN 12620:2002, "Aggregates for concrete", CEN, Brussels (2002).

EN 206-1:2000, "Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity", Brussels (2000).

EN 933-8:1999. "Tests for geometrical properties of aggregates – Part 8: Assessment of fines – Sand equivalent test", CEN, Brussels (1999).

