

## **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΘΕΙΚΩΝ ΣΕ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΟΡΥΚΤΕΣ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ Α΄ ΥΛΕΣ**

### **Δ. Τσαματσούλης**

*Δρ. Χημικός Μηχανικός, Συντονιστής Ποιότητας της ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε., 17<sup>ο</sup> Χλμ.  
Εθνικής Οδού Αθηνών-Κορίνθου, 19300, Ασπρόπυργος Αττικής*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στόχος της μελέτης είναι η βελτιστοποίηση του ποσοστού των θεικών που περιέχονται σε τσιμέντα παραγόμενα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. Η βελτιστοποίηση αφορά τις αντοχές του τσιμέντου σε ηλικία 28 ημερών. Ως πρώτες ύλες για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκαν, εκτός του κλίνκερ και των ορυκτών – γύψος, ποζολάνη, ασβεστόλιθος – και εναλλακτικές όπως γύψος από αποθείωση (FGD) και ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα. Για όλες τις συνθέσεις που μελετήθηκαν παρέχεται γενικευμένο διάγραμμα, οι αντίστοιχες εξισώσεις καθώς και ανάλυση διασποράς, εργαλεία τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για σχεδιασμό και βελτιστοποίηση της σύνθεσης τσιμέντου καθώς και για αποτελεσματικότερη χρήση των εναλλακτικών α΄ υλών.

*Λέξεις κλειδιά: βελτιστοποίηση, τσιμέντο, θεικά, συσχέτιση, διασπορά*

# OPTIMIZATION OF SULPHATES CONTENT OF CEMENTS CONTAINING MINERAL AND ALTERNATIVE RAW MATERIALS

**D. Tsamatsoulis**

*Chemical Engineer, PhD, Quality Coordinator of the Halyps Building Materials SA., 17th km.Nat.Rd. Athens-Korinth, 193 00 Aspropyrgos, Attica*

**ABSTRACT:** The aim of this study is to optimise the percentage of sulphate contained in cement produced according to the norm ELOT EN 197-1. The optimisation refers to the cement 28-days compressive strength. Except clinker and mineral compounds (gypsum, pozolane, limestone), other alternative raw materials (as FGD, calcareous fly ash), were also utilized. For all the compositions studied, a generalized figure, as well as the corresponding equations and variance analysis, have been provided. These tools could be useful for the design and optimization of the cement composition as well as for the effective utilization of alternative raw materials.

*Keywords: optimization, cement, sulphates, correlation, variance*

## ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Αντικείμενο της μελέτης είναι η βελτιστοποίηση των θεικών που περιέχονται σε τσιμέντα παραγόμενα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 (2000). Η βελτιστοποίηση αφορά τις αντοχές του τσιμέντων σε ηλικία 28 ημερών. Πέραν του κλίνκερ, ως πρώτες ύλες για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκαν εκτός των ορυκτών – γύψος, ποζολάνη, ασβεστόλιθος – και εναλλακτικές όπως γύψος προερχόμενη από μονάδα αποθείωσης (FGD) εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής και ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα. Το περιεχόμενο SO<sub>3</sub> της FGD ήταν παραπλήσιο με αυτό της ορυκτής γύψου – 43% - ενώ της ιπτάμενης τέφρας ήταν 3.1 %.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με τσιμέντα που παρασκευάστηκαν εργαστηριακά, των οποίων οι συνθέσεις ήταν παραπλήσιες με τα βιομηχανικά παραγόμενα. Στόχος της μελέτης είναι να συγκριθεί η βέλτιστη τιμή θεικών που αντιστοιχεί στην χρήση εναλλακτικών α! υλών με αυτή που προκύπτει από την χρήση ορυκτών υλικών.

Η εκτίμηση της βέλτιστης τιμής θεικών καθώς και η ανάλυση της ευαισθησίας της, έχει άμεσο πρακτικό χαρακτήρα και αποτέλεσμα στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής, διότι με βάση αυτή μπορούν να σχεδιαστούν ή και να επανασχεδιαστούν οι οδηγίες ρύθμισης της γύψου που τροφοδοτείται στους μύλους τσιμέντου

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Όλες οι πρώτες ύλες αλέστηκαν ξεχωριστά σε εργαστηριακό μύλο έτσι ώστε να διέρχονται 100% από το κόσκινο των 90 μ. Ειδικά το κλίνκερ αλέστηκε σε ειδική επιφάνεια Blaine 3400-3600 cm<sup>2</sup>/gr και λεπτότητα R40, 16%-22%. Στη συνέχεια αναμίχθηκαν οι κατάλληλες ποσότητες ώστε να ληφθούν εργαστηριακά τσιμέντα επιθυμητής σύνθεσης. Για κάθε παραγόμενο τύπο τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποιότητα κλίνκερ. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά, καθώς και η ορυκτολογική κατά Bogue σύνθεση των κλίνκερ δίνεται στον πίνακα 1. Οι χημικές αναλύσεις έγιναν με χρήση XRF.

Πίνακας 1. Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των κλίνκερ

Plant	Blaine	R40	SO <sub>3</sub>	LSF	SM	AM	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Κλίνκερ No 1	3600	16	1.08	95.4	2.48	1.72	56.1	19.8	9.2	9.8
Κλίνκερ No 2	3600	18	1.38	96.2	2.51	1.66	57.0	18.3	8.7	9.7
Κλίνκερ No 3	3400	22	1.47	96.8	2.57	1.64	57.5	17.7	8.3	9.6

Από τον πίνακα 1 παρατηρείται ότι τα κλίνκερ που χρησιμοποιήθηκαν ήταν παραπλήσιες σύνθεσης.

Οι τύποι τσιμέντου και οι συνθέσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Στον ίδιο πίνακα για κάθε σύνθεση τσιμέντου δίνονται οι τιμές των θεικών και της θλιπτικής αντοχής 28 ημερών. Από τον πίνακα αυτό παρατηρείται ότι σε κάθε σύνθεση υπάρχει μία τιμή θεικών όπου επιτυγχάνεται ένα μέγιστο αντοχής. Η τιμή αυτή δεν είναι ίδια για όλους τους τύπους, αλλά δείχνει να έχει εξάρτηση από το ποσοστό του περιεχόμενου κλίνκερ.

Πίνακας 2. Τύποι, συνθέσεις τσιμέντου και αποτελέσματα δοκιμών

%Κλίνκερ	%Γύψος	%SO <sub>3</sub>	Αντοχή 28 ημ.	%Κλίνκερ	%Γύψος	%SO <sub>3</sub>	Αντοχή 28 ημ.
CEM I 42.5 <sup>(1)</sup>				CEM II A-L 42.5 <sup>(1)</sup>			
100	0	1.08	49.0	80	0	0.75	38.7
99	1	1.50	49.6	80	2	1.44	46.4
98	2	1.90	51.9	80	3	2.01	46.7
97	3	2.28	50.8	80	4	2.42	48.6
96	4	2.72	51.7	80	5	2.96	49.2
95	5	3.18	54.0	80	6	3.39	48.4
94	6	3.56	52.2	80	7	3.94	48.0
93	7	3.91	52.0				
CEM II B-M (P-L) 32.5 <sup>(1)</sup>				CEM IV B (P-W) 32.5 <sup>(1)</sup>			
65	0	0.76	31.7	62	0	1.36	42.7
65	1	1.18	36.4	62	1	1.78	43.8
65	2	1.78	36.9	62	2	2.20	44.9
65	3	2.13	38.1	62	3	2.57	46.6
65	4	2.58	36.5	62	4	3.13	46.1
65	5	3.05	35.3	62	5	3.44	44.1
65	6	3.51	35.8	62	6	3.82	42.2
65	7	3.94	33.9	62	7	4.14	43.1
CEM I 42.5 <sup>(2)</sup>				CEM I 42.5 <sup>(3)</sup>			
100	0	1.38	46.5	100	0	1.47	44.9
99	1	1.78	48.8	99	1	1.84	45.9
98	2	2.16	49.8	98	2	2.34	46.1
97	3	2.66	51.1	97	3	2.74	47.6
96	4	2.99	51	96	4	3.22	50.8
95	5	3.51	50.2	95	5	3.66	51.5
94	6	3.90	49.7	94	6	4.21	51.5
93	7	4.33	47.6	93	7	4.49	50

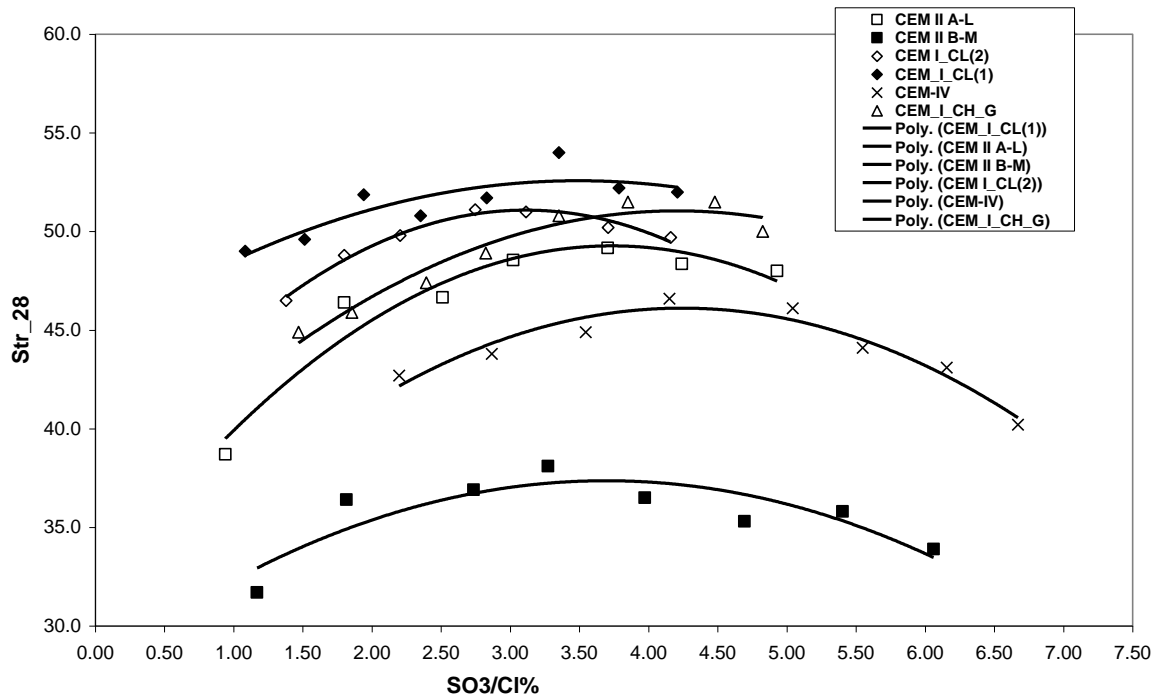
<sup>(1)</sup> Κλίνκερ No 1, ορυκτή γύψος

<sup>(2)</sup> Clinker No 2, ορυκτή γύψος

<sup>(3)</sup> Clinker No 3, γύψος FGD, χημική γύψος

#### ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΩΝ ΘΕΙΚΩΝ

Η μετρήσιμη ποσότητα με την οποία ρυθμίζεται το ποσοστό της γύψου είναι το περιεχόμενο %SO<sub>3</sub> του τσιμέντου. Εξάλλου στην τιμή των θεικών τίθενται άνω όρια από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. Κατά την τρέχουσα παραγωγή των μύλων τσιμέντου σε τακτικά χρονιά διαστήματα μετρούνται τα θεικά του τσιμέντου και δίνονται οι αντίστοιχες αλλαγές στις πλάστιγγες ώστε να επιτυγχάνεται ο στόχος των %SO<sub>3</sub>. Τα θεικά προέρχονται από την γύψο, ορυκτή ή χημική, το κλίνκερ, όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο πετκόκ, καθώς και την ιπτάμενη τέφρα. Για δεδομένο πετκόκ και λειτουργία της περιστροφική καμίνου, τα θεικά του κλίνκερ εμφανίζουν γενικά χαμηλές αποκλίσεις. Για δεδομένο επίσης προμηθευτή ορυκτής γύψου και το υλικό αυτό εμφανίζει χαμηλές αποκλίσεις. Για το λόγο λοιπόν ότι η βασική παράμετρος προς ρύθμιση είναι τα θεικά μελετήθηκε η συνάρτηση μεταξύ της αντοχής σε 28 ημέρες, Str<sub>28</sub> και του λόγου %SO<sub>3</sub>/Κλίνκερ - %SO<sub>3</sub>/Cl.



Σχήμα 1. Συσχέτιση αντοχής 28 ημερών με τον λόγο %SO<sub>3</sub>/Κλίνκερ

Η συνάρτηση αυτή για όλες τις συνθέσεις που αναλύθηκαν δίνεται στο σχήμα 1. Για όλες τις συνθέσεις εκτός του CEM IV – συμπεριλαμβανόμενης της σύνθεσης που παρασκευάστηκε με χρήση FGD, το βέλτιστο εμφανίζεται στην περιοχή του 3.7%. Αντίθετα για τον τύπο CEM IV το βέλτιστο εμφανίζεται στην περιοχή του 4.3. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στην σύνθεση του CEM IV η μέση ιπτάμενη τέφρα ήταν 14% η οποία περιείχε θειικά 3.1%.

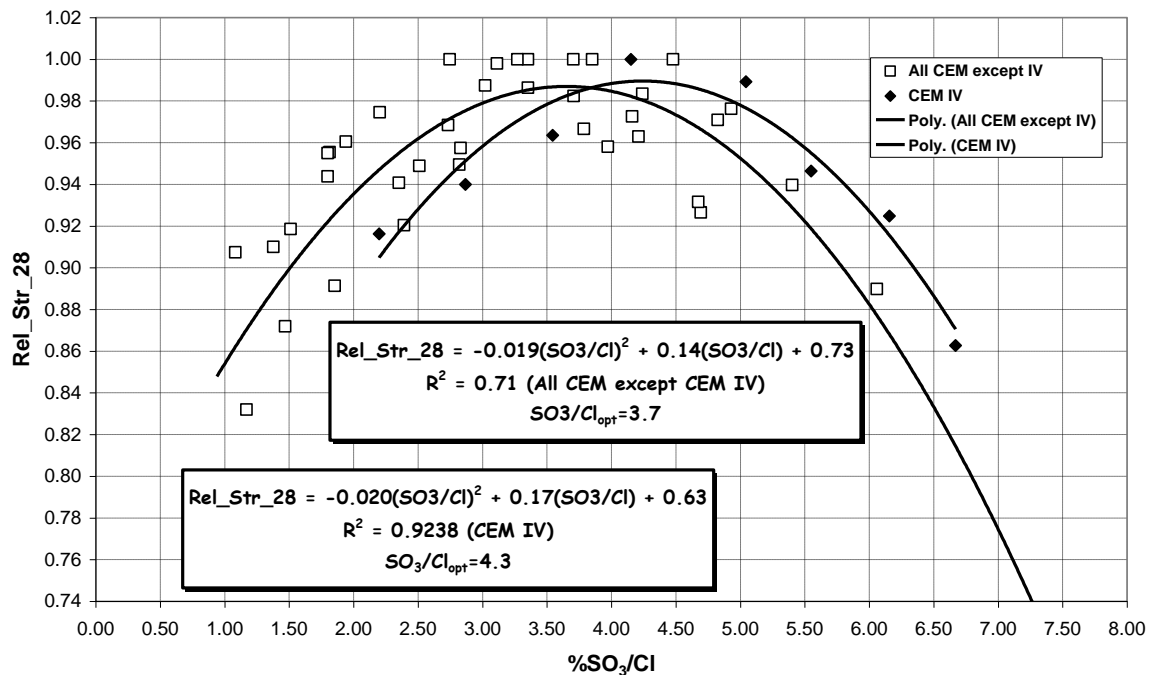
Για να διερευνηθεί αναλυτικότερα το παραπάνω θεωρείται για κάθε πειραματική αντοχή ενός ορισμένου τύπου τσιμέντου, η αδιάστατη μορφή της αντοχής,  $Rel\_Str\_28$ , που δίνεται από τον λόγο της  $str\_28$  προς την μέγιστη αντοχή  $str\_28\_Max$  που παρατηρήθηκε για την δεδομένη αυτή σύνθεση:

$$Rel\_Str\_28 = \frac{Str\_28}{Str\_28\_Max} \quad (1)$$

Τα πειραματικά σημεία ομαδοποιήθηκαν σε δύο κατηγορίες:

- (i) Του τύπου CEM IV
- (ii) Όλα οι υπόλοιποι τύποι ασχέτως αν χρησιμοποιείται ορυκτή ή χημική γύψος

Τα αποτελέσματα και οι παραγόμενες εξισώσεις δίνονται στο σχήμα 2. Παρατηρούνται για τις δύο κατηγορίες σημείων δύο διακριτά βέλτιστα αντοχής σε διαφορετική περιοχή θεικών. Συμπερασματικά ενώ η χρήση χημικής γύψου δεν δείχνει να μεταβάλλει την θέση του βέλτιστου σε σχέση με την ορυκτή, στην περίπτωση τύπων τσιμέντου που περιέχουν σημαντικό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας, η μέγιστη αντοχή παρατηρείται σε διαφορετική θέση θεικών. Το γεγονός αυτό απαιτείται να λαμβάνεται απαραίτητα υπόψη στην τοποθέτηση του στόχου θεικών για τους διάφορους τύπους τσιμέντου, γύρω από τους οποίους θα ρυθμίζεται η περιεκτικότητα της γύψου.



Σχήμα 2. Αδιάστατη αντοχή συναρτήσει του λόγου %Γύψος/Κλίνκερ

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το άνω όριο θεικών που θέτει το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 εισάγει περιορισμούς στην τοποθέτηση του στόχου στην περιοχή του βελτίστου. Για παράδειγμα για ένα τσιμέντο CEM I 42.5 κατηγορίας πρώιμης αντοχής N με ποσοστό κλίνκερ ίσο με 95%, η εφαρμογή της αντίστοιχης εξίσωσης δίνει θεικά 3.5%, που είναι ακριβώς ίση με το άνω επιτρεπτό όριο. Με βάση την βιομηχανική εμπειρία ο στόχος πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.3% μικρότερος από το άνω όριο. Επίσης για τσιμέντο με σημαντικό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας, προκύπτει ότι για ποσοστό κλίνκερ μεγαλύτερο του 80%, δηλ. για CEM II A πρώιμης αντοχής N, το βέλτιστο είναι στην περιοχή θεικών 3.5%. Σε όλες τις άλλες κατηγορίες το βέλτιστο αντοχής βρίσκεται εντός των ορίων του προτύπου.

#### ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Στην προηγούμενη παράγραφο για μια ποικιλία συνθέσεων τσιμέντου που περιέχουν ορυκτές αλά και εναλλακτικές α! ύλες, προσδιορίστηκε η βέλτιστη περιεκτικότητα σε SO<sub>3</sub>, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή 28 ημερών. Εφόσον υπάρχει τέτοιου τύπου συσχέτιση αναμένεται να υπάρχει και συσχέτιση της διασποράς των δύο μεγεθών:

Οι εξισώσεις που αναφέρονται στο σχήμα 3, ξαναγράφονται με την εξής μορφή:

$$Str_{28} = Str_{28\_Max} \left( A \left( \frac{SO_3}{\%Cl} 100 \right)^2 + B \left( \frac{SO_3}{\%Cl} 100 \right) + C \right) \quad (2)$$

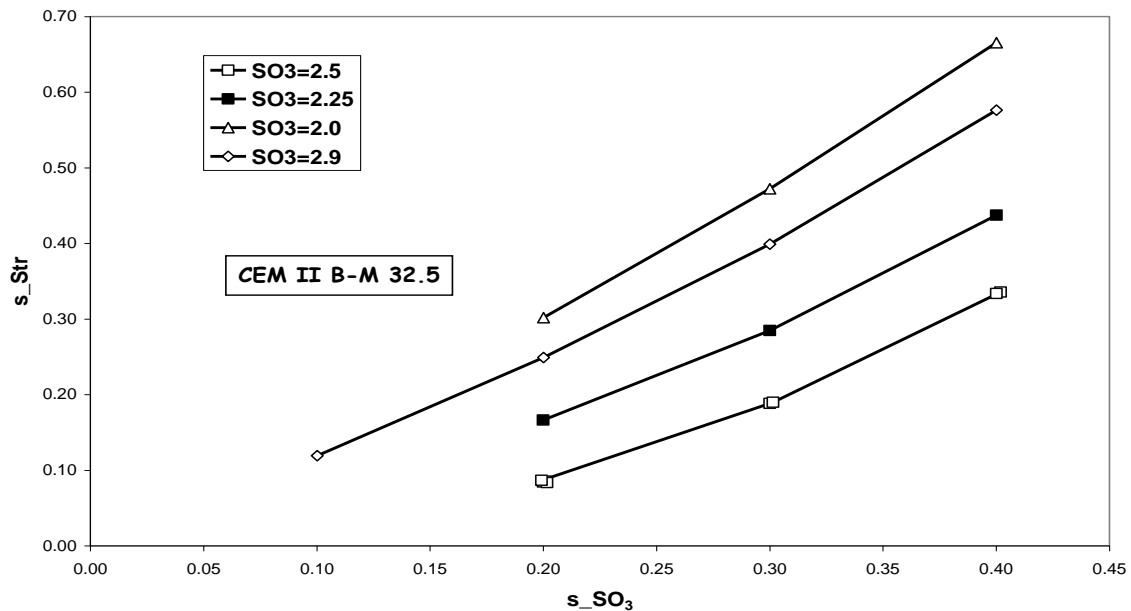
Σύμφωνα με το πρότυπο UNI CEI ENV 13005 (2000) η διασπορά της αντοχής δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_{Str}^2 = Str\_28\_Max^2 \left( \frac{2A * SO3}{\left(\frac{\%Cl}{100}\right)^2} + \frac{B}{\left(\frac{\%Cl}{100}\right)} \right)^2 \sigma_{SO3}^2 \quad (3)$$

Επομένως οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{Str} = Str\_28\_Max * ABS \left( \frac{2A * SO3}{\left(\frac{\%Cl}{100}\right)^2} + \frac{B}{\left(\frac{\%Cl}{100}\right)} \right) \sigma_{SO3} \quad (4)$$

Από την σχέση (4) συνάγεται πως όταν η μέση τιμή  $SO_3$  πραγματοποιεί τον στόχο και αυτός είναι τοποθετημένος στην περιοχή του βέλτιστου, τότε η επίδραση της απόκλισης των θεικών στην απόκλιση της αντοχής είναι πολύ μικρή, στην δε ιδανική περίπτωση 0. Στην αντίθετη περίπτωση όσο η μέση τιμή απομακρύνεται από το βέλτιστο, τόσο μεγαλύτερη η επίδραση της απόκλισης των θεικών στην απόκλιση της αντοχής. Όσον αφορά τις αναφερόμενες μεταβλητές η μεταβλητή στόχος θεικών είναι μεταβλητή της οποίας η τιμή προαποφασίζεται. Στη συνέχεια με μεταβλητή χειρισμού το ποσοστό της γύψου, ρυθμίζεται η μέση τιμή ώστε να είναι κοντά στον στόχο και να εμφανίζει την μικρότερη δυνατή τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3. Επίδραση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των θεικών στην τυπική απόκλιση της αντοχής 28 ημερών.

Για να διευκρινιστούν καλύτερα τα παραπάνω θεωρείται η εξής εφαρμογή: Εστω ένα εργοστάσιο παράγει τσιμέντο CEM II B-M και το περιεχόμενο κλίνκερ είναι 67%. Ο στόχος αντοχής είναι 39

Mpa και αντιστοιχεί στην βέλτιστη αντοχή που υπολογίστηκε με δοκιμή βελτιστοποίησης θεικών. Από το σχήμα 2, προκύπτει ο στόχος θεικών ώστε να λαμβάνεται αυτή η μέγιστη τιμή που ισούται με 2.47%. Στη συνέχεια με βάση την σχέση (6) για διάφορα επίπεδα μέσης τιμής και τυπικές αποκλίσεις θεικών, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση της αντοχής. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.

Για να μελετηθεί παραπέρα τι σημαίνουν οι τιμές που αναφέρονται στο σχήμα 3, γίνονται οι εξής υποθέσεις: Το εργοστάσιο παράγει 1000 ΚΤ τσιμέντο αυτού του τύπου. Έστω ότι ο στόχος είναι τοποθετημένος στο βέλτιστο δηλ. στην τιμή 2.5 και μια απόκλιση των θεικών ίση με 0.20% χαρακτηρίζει την ομαλή λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή η επίδραση στην απόκλιση είναι μόνο 0.08 Μpa. Έστω ότι η πραγματοποιημένη μέση τιμή λόγω μη επαρκούς ρύθμισης ή άγνοιας του βέλτιστου είναι 2.0% και η αντίστοιχη απόκλιση είναι 0.4%. Τότε η απόκλιση του τσιμέντου αυξάνει στην τιμή 0.67. Στην περίπτωση αυτή η αύξηση της απόκλισης από την βασική τιμή είναι  $\Delta\sigma = (0.67^2 - 0.08^2)^{1/2} = 0.67$  Μpa. Το εργοστάσιο για να διατηρήσει το ίδιο κάτω όριο αντοχής, πρέπει να αυξήσει την μέση αντοχή κατά  $2 * 0.67 = 1.3$  Μpa. Σύμφωνα με το Τσαματσούλη (1999) για παραπλήσιας σύνθεσης τύπους τσιμέντου, αύξηση κατά 1% του περιεχόμενου κλίνκερ, αυξάνει την αντοχή κατά 0.5 Μpa. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως το εργοστάσιο πρέπει να αυξήσει την περιεκτικότητα σε κλίνκερ κατά 2.6%, ή κατά 26 ΚΤ σε ετήσια βάση. Αυτό αποτελεί μια πολύ σημαντική επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, εφόσον είναι γνωστό ότι η παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου είναι από τους πλέον ενεργοβόρους κλάδους της βαριάς βιομηχανίας.

Άρα σε κάθε περίπτωση απαιτείται πειραματικός υπολογισμός του βέλτιστου θεικών, τοποθέτηση του στόχου στην περιοχή του βέλτιστου και συνεχής ρύθμιση της τρέχουσας παραγωγής ώστε να επιτυγχάνεται ο στόχος με την χαμηλότερη δυνατή απόκλιση. Η ανάγκη αυτή καθίσταται πλέον ισχυρή στην περίπτωση τσιμέντων CEM IV, όπου τα θεικά της ιπτάμενης τέφρας είναι σχετικά υψηλά αλλά και εμφανίζουν υψηλή απόκλιση. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η ύπαρξη σημαντικής αποθηκευμένης ποσότητας πριν την τροφοδοσία στους μύλους τσιμέντου, ώστε να δίνεται η δυνατότητα επαρκούς ανάμιξης της εισερχόμενης στο εργοστάσιο με την προϋπάρχουσα. Τα παραπάνω σημαίνουν αυξημένο όγκο εγκαταστάσεων και φυσικά επαρκή και αποτελεσματικό ποιοτικό έλεγχο.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση σχεδιασμό και εκτέλεση πειραμάτων, μαθηματική μοντελοποίηση και στατιστική ανάλυση επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση του ποσοστού των περιεχομένων θεικών στο τσιμέντο, όσον αφορά την θλιπτική αντοχή των 28 ημερών. Η ανάλυση περιλάμβανε εκτός του κλίνκερ τόσο ορυκτές α! ύλες, όσο και εναλλακτικές όπως γύψο προερχόμενη από μονάδα αποθείωσης (FGD) εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής – χημική γύψος – καθώς και ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα.

Όσον αφορά πέντε συνθέσεις τσιμέντου, που δεν περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, βρέθηκε κοινή βέλτιστη περιοχή ποσοστού θεικών, ανεξάρτητα εάν χρησιμοποιείται ορυκτή ή χημική γύψος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πως η χημική γύψος μπορεί να υποκαταστήσει την ορυκτή σε πολύ μεγάλο βαθμό, εάν βέβαια παραλαμβάνεται με ένα αποδεκτό ποσοστό υγρασίας και ομοιομορφίας όσον αφορά την σύσταση, ώστε να μπορεί να διαχειριστεί. Επιπλέον οποιαδήποτε άλλη σύνθεση που περιέχει ως συστατικά αυτά που χρησιμοποιήθηκαν, δηλ. κλίνκερ, γύψο ορυκτή ή χημική, ποζολάνη και ασβεστόλιθο αναμένεται να εμφανίζει την βέλτιστο περιεχόμενο θεικών στην ίδια περιοχή.



Όσον αφορά την σύνθεση τσιμέντου που περιλαμβάνει υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας , η περιοχή του βέλτιστου βρίσκεται σε μια διακριτή περιοχή από την προηγούμενη απέχοντας 0.6 %SO<sub>3</sub> . Επομένως για τα τσιμέντα που περιέχουν ψηλό ποσοστό τέφρας απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος του βέλτιστου. Βέβαια απαιτείται η εισαγόμενη στην μονάδα ή τροφοδοτούμενη ιπτάμενη τέφρα να έχει έναν αποδεκτό βαθμό ομοιομορφίας, διότι τέφρες με σημαντικά διαφορετικά ποσοστά θεικών αναμένεται να εμφανίζουν βέλτιστο σε διαφορετική περιοχή θεικών τσιμέντου όταν η σύνθεσή του διατηρείται σταθερή.

Η ανάλυση διασποράς υποδεικνύει πως όταν η πραγματοποιημένη μέση τιμή θεικών απέχει σημαντικά από την βέλτιστη ή και όταν η τρέχουσα ρύθμιση των θεικών δεν είναι επαρκής με αποτέλεσμα μεγάλη τυπική απόκλιση γύρω από την μέση τιμή τους, τότε προκαλείται σημαντική αύξηση της απόκλισης της αντοχής του τσιμέντου δηλ. χειροτέρευση της ποιότητάς του και αυξημένες ενεργειακές καταναλώσεις. Βέβαια πρέπει να τονιστεί πως όταν η τροφοδοτούμενη πρώτη ύλη είναι πολύ ανομοιόμορφη όσον αφορά την σύστασή της, τότε το έργο της ρύθμισης καθίσταται σημαντικά δυσκολότερο.

Ο σχεδιασμός και η εκτέλεση τέτοιου τύπου δοκιμών συμβάλλει σημαντικά στην βελτιστοποίηση των συνθέσεων του τσιμέντου και στην αξιοποίηση των εναλλακτικών πρώτων υλών που αναφέρθηκαν. Επιπλέον για την επιτυχή χρήση τους ώστε να αποφεύγονται η υποβάθμιση της ποιότητας και πλέον ενεργοβόρες διεργασίες παραγωγής , που μάλιστα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>, είναι απαραίτητη η ύπαρξη σύγχρονων εγκαταστάσεων και τεχνικών αποθήκευσης, ανάμιξης και τροφοδότησης καθώς και ο διαρκής και πάνω από όλα αποτελεσματικός ποιοτικός έλεγχος και συνεχής ρύθμιση της τρέχουσας παραγωγής.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ΕΛΟΤ EN 197-1, 2000. *Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα*, Αθήνα, ΕΛΟΤ.
2. UNI CEI ENV 13005, 2000. *Guida all' espressione dell' incertezza di misura*, Milano, UNI – CEI.
3. Τσαματσούλης Δ., 1999. Συσχέτιση αντοχών τσιμέντου με φυσικές και χημικές ιδιότητες μέσω μαθηματικής μοντελοποίησης, *13<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*, Τόμος II, σελ. 176-183.