

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΙΟΜΠΕΛΙΤΙΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Γ. Ζώκαρης^{*1}, Α. Δεσκάλι^{1,2}, Μ. Δ. Καμίτσου^{1,2}, Δ. Γ. Κανελλοπούλου^{1,2}, Α. Χριστογέρου^{1,2} & Γ. Ν. Αγγελόπουλος^{1,2}

¹ Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο, Ελλάδα

² INVALOR: Ερευνητική Υποδομή για την Αξιοποίηση Αποβλήτων και Αειφόρου Διαχείρισης Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα
(*zokarisgeorge@gmail.com)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση μίας ήδη εγκατεστημένης μονάδας παραγωγής θειομπελιτικών τσιμέντων με τη χρήση μαθηματικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα που μελετάται προς επίλυση είναι η μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος για τη διεργασία έψησης του κλίνκερ, μιας από τις πιο δαπανηρές διεργασίες της παραγωγής. Το μαθηματικό μοντέλο που προτείνεται βασίζεται στη μελέτη των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για τη διεργασία και στην επιλογή συμβατικών ή/ και εναλλακτικών καυσίμων. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης είναι ένα βέλτιστο μείγμα καυσίμων και πρώτων υλών που ελαχιστοποιεί τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και μειώνει το ετήσιο κόστος παραγωγής. Η εφαρμογή αυτού του μοντέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιασδήποτε κλίμακας τσιμεντοβιομηχανία.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τσιμέντο είναι ένα συνδετικό υλικό με υδραυλικές ιδιότητες και αποτελεί το συνηθέστερο δομικό υλικό για την κατασκευή κτιρίων και έργων κοινής ωφελείας. Η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου είναι μία αμιγώς μεταλλευτική-μεταλλουργική δραστηριότητα με μεγάλες εξαγωγικές δυνατότητες και σπουδαία συμβολή στην παγκόσμια οικονομία.

Διεθνώς, η ετήσια παραγωγή τσιμέντου υπερβαίνει τους 3Gt. Δεδομένου ότι η διεργασία παραγωγής αυτού του υλικού είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και επιβαρυντική για το περιβάλλον, η ερευνητική κοινότητα ασχολείται με την εύρεση νέου τύπου τσιμέντων, πιο φιλικών προς το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά τσιμέντα τύπου Portland (OPC). Με αυτήν την κατευθυντήρια γραμμή, στο Εργαστήριο Υλικών και Μεταλλουργίας^[1,2] του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, γίνεται μελέτη για την ανάπτυξη θειομπελιτικών τσιμέντων και για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής τους. Το συγκεκριμένου τύπου υλικό, λόγω της σύστασής του και των χαμηλότερων θερμοκρασιών έψησης και συνεπώς της μικρότερης απαίτησης σε θερμική ενέργεια, αποφέρει μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, καθώς και μείωση του κόστους παραγωγής εξαιτίας της μικρότερης απαίτησης σε καύσιμα.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το παρόν μαθηματικό μοντέλο εστιάζει στο σύστημα του περιστροφικού κλιβάνου και χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό των βέλτιστων μειγμάτων πρώτων υλών και καυσίμων, συμβατικών και προερχόμενων από απόβλητα. Γίνεται επιλογή μεταξύ έξι πρώτων υλών και έξι καυσίμων, εκ των οποίων τα δύο ορίζονται ως συμβατικά (γαιάνθρακας και PetCoke) και τέσσερα ως εναλλακτικά όπως, καύσιμα απόβλητα (RDF), λυματολάσπη (SS), άχρηστα ελαστικά (TDF) και άλευρα οστών ζώων (MBM). Οι πρώτες ύλες που επιλέχθηκαν για τη σύνθεση του νέου τσιμέντου είναι ο ασβεστόλιθος, ο σχιστόλιθος, η ερυθρά ιλύς, ο γύψος FGD, η καθαρή αλούμινα, καθώς και η τέφρα που θεωρείται ότι ενσωματώνεται πλήρως στο κλίνκερ. Επιχειρείται η υποκατάσταση των συμβατικών υλικών με εναλλακτικά, για τη διεργασία της έψησης, με σκοπό τη μείωση των

εκπομπών CO₂ και του ετήσιου κόστους παραγωγής της εγκατάστασης. Λαμβάνεται υπόψη η θερμογόνος δύναμη καθώς και η διαθεσιμότητα και το κόστος των υλικών. Η τελική επιλογή της βέλτιστης λύσης βασίζεται στην ελαχιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία συμπεριλαμβάνει το κόστος των πρώτων υλών, των καυσίμων και εκπομπής CO₂. Το κόστος των εναλλακτικών καυσίμων συμπεριλαμβάνει το πάγιο κόστος κατασκευής των απαραίτητων υποδομών για τη χρήση του εκάστοτε καυσίμου. Το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από τα ισοζύγια των Ά υλών, των καυσαερίων, καθώς και της ενέργειας, τα οποία εκφράζουν οι ισοτικοί περιορισμοί. Επίσης, συμπεριλαμβάνει κριτήρια ποιότητας του κλίνκερ (δείκτες AR, SR και LSF και τα όρια τους, για τον περιορισμό των συγκεντρώσεων κύριων οξειδίων του κλίνκερ), τα οποία εκφράζουν οι ανισοτικοί περιορισμοί. Το μοντέλο αποτελεί ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και επιλύεται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η μάζα του κάθε οξειδίου, αλκαλίου και μετάλλου στο κλίνκερ από την Εξ.1. Εξαιρέση αποτελούν το θειικό οξύ και το οξυγόνο, τα οποία υπόκεινται σε ιδιαιτερότητες και περιγράφονται από τις εξ. 2 και 3 αντίστοιχα. Ως βάση των υπολογισμών της μάζας του κάθε στοιχείου, ορίζεται ο 1 t παραγόμενου κλίνκερ και όλα τα ισοζύγια εκφράζονται ως προς αυτήν την παραδοχή.

$$m_i^C = \sum_j \omega_{i,j}^R m_j^R + \sum_l \omega_{i,l}^F m_l^F \quad (1)$$

Η μάζα του θειικού οξέως (SO₃) υπολογίζεται διαφορετικά από αυτή των οξειδίων και των αλκαλίων, καθώς ποσότητα του θειικού οξέως απαντάται και στο αέριο καύσης.

$$m_{SO_3}^C = \sum_j \omega_{SO_3,j}^R m_j^R + \sum_l \omega_{SO_3,l}^F m_l^F - V_{fg} C_{SO_3}^{fg} \quad (2)$$

Το ισοζύγιο μάζας του οξυγόνου στο ολικό σύστημα της διεργασίας που μελετάται μπορεί να περιγραφεί από την Εξ.3.

$$m_{O_2}^{fg} = 0.232m^{Air} - \sum_l m_l^F St_{O_2,l} \quad (3)$$

Επίσης, λαμβάνονται υπόψη και οι εξισώσεις του Bogue, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία του τσιμέντου για να προβλέψουν τις τέσσερις βασικές ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ για βέλτιστη σχεδίαση των τσιμεντών Portland^[3], μετά από κατάλληλη τροποποίηση για τα θειομπελιτικού τύπου τσιμέντα. Η βασική υπόθεση είναι ότι οι τέσσερις κύριες φάσεις στα θειομπελιτικά τσιμέντα είναι η αργιλοφερριτική (C₄AF), ο γελεμίτης (C₄A₃Ŝ), ο μπελίτης (C₂S) και ο ανυδρίτης (ĈS) και η μάζα της εκάστοτε φάσης στην τελική σύνθεση του κλίνκερ υπολογίζεται από την Εξ.4. Τέλος, η εφαρμογή των εξισώσεων προϋποθέτει την παραδοχή θερμοδυναμικής ισορροπίας στο σύστημα που μελετάται.

$$m_p^{CB} = \sum_i Bogue_{p,i} m_i^C, \quad \forall p \in \text{Φάσεις κλίνκερ} \quad (4)$$

Όπου η m_p^{CB} είναι η μάζα της φάσης p στο κλίνκερ, όπως αυτή προβλέπεται από τις τροποποιημένες σχέσεις του Bogue για κάθε $Bogue_{p,i}$:

$$Bogue = \begin{matrix} C_4AF \\ C_4A_3\hat{S} \\ C_2S \\ C\hat{S} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.038 & 0 \\ 0 & 1.99 & -1.268 & 0 \\ 2.87 & 0 & 0 & 0 \\ -1.87 & -0.99 & -0.769 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Στον πίνακα της Εξ. 5, η 1η στήλη αντιστοιχεί στο οξείδιο του πυριτίου (SiO₂) και οι επόμενες κατά σειρά στο οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃), του σιδήρου (Fe₂O₃) και του ασβεστίου (CaO).

Η βάση των υπολογισμών που ορίζεται είναι ο 1 t παραγόμενου κλίνκερ, συνεπώς το ολικό ισοζύγιο μάζας της διεργασίας περιγράφεται από την Εξ.6.

$$\sum_i m_i^C + \sum_k m_k^C + m_{SO_3}^C = 1000 \text{ kg} \quad (6)$$

Το καυσαέριο αποτελείται από το διοξείδιο του άνθρακα (βιογενές και μη βιογενές), το άζωτο και το οξυγόνο. Από τις τρεις αυτές ενώσεις προκύπτουν και τα ισοζύγια μάζας του μείγματος.

Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από δύο παράλληλες αντιδράσεις, την αντίδραση της καύσης και την αντίδραση της θερμικής διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου. Η αντίδραση της καύσης του τροφοδοτούμενου καυσίμου ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή του βιογενούς διοξειδίου, ενώ η αντίδραση της θερμικής διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου, δηλαδή της πρώτης ύλης, ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) την παραγωγή του μη βιογενούς διοξειδίου. Το άθροισμα των δύο είναι η συνολική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα στο αέριο μείγμα καύσης ($m_{CO_2}^V$).

$$m_{CO_2}^V = m_{CO_2,NBG}^V + m_{CO_2,BG}^V \quad (7)$$

Οι δύο ποσότητες μπορούν να υπολογιστούν από τις Εξ. 8 και 9. Το κλάσμα μάζας βιογενούς άνθρακα C σε κάθε εναλλακτικό καύσιμο αναφέρεται ως φ_{BG} .

$$m_{CO_2,NBG}^V = \frac{44}{56} \sum_j \omega_{CaO,j}^R m_j^R + \sum_l (1 - \varphi_{BG}) CEF_l m_l^F \quad (8)$$

$$m_{CO_2,BG}^V = \sum_l \varphi_{BG} CEF_l m_l^F \quad (9)$$

$$m_{N_2}^{fg} = 0.768 m^{Air} \quad (10)$$

Το ολικό ισοζύγιο μάζας στο αέριο καύσης αποτελεί το άθροισμα των Εξ. 8, 9 και 10 (Εξ. 11).

$$m^{fg} = m_{N_2}^{fg} + m_{O_2}^{fg} + m_{CO_2}^V \quad (11)$$

Ως NCV ορίζεται η ενέργεια που αποδίδει η καύση 1 kg καυσίμου και ως TED η θερμική απαίτηση του κλιβάνου που μελετάται. Η απαίτηση σε ενέργεια ποικίλει μεταξύ 5.3×10^6 και 7.1×10^6 kJ/t κλίνκερ σε συστήματα υγρής διεργασίας και μεταξύ 3.2×10^6 και 3.5×10^6 kJ/t κλίνκερ σε συστήματα ξηρής διεργασίας^[4]. Η ενεργειακή απαίτηση, συνεπώς, ορίζεται με βάση την παραγωγικότητα της βιομηχανίας (2 Mt κλίνκερ/γ) και στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται δεκτό ότι είναι 3.5 GJ/t κλίνκερ.

$$\sum_l m_l^F NCV_l = TED \quad (12)$$

Στην περίπτωση χρήσης μείγματος εναλλακτικών καυσίμων στη διεργασία ως υποκατάστατο των καθιερωμένων καυσίμων (Γαιάνθρακας, PetCoke) εισάγεται στο πρόβλημα ο συντελεστής θερμικής υποκατάστασης TSR, ο οποίος εκφράζεται ως ποσοστό (%) της ενεργειακής απαίτησης του κλιβάνου, TED.

$$\sum_l m_l^F NCV_l \leq \left(\frac{TSR}{100} \right) TED \quad (13)$$

Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τσιμέντου έχουν ιδιότητες πληρωτικών και είναι συνήθως φυσικές πρώτες ύλες ή βιομηχανικά παραπροϊόντα. Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η ιπτάμενη τέφρα, είναι ανόργανες ενώσεις, που λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους είναι συμβατά με το τσιμέντο ή βελτιώνουν τις ιδιότητες του στην παραγωγή σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες ως «όρια», ώστε να εξασφαλιστεί η επιθυμητή σύσταση του παραγόμενου κλίνκερ.

Ο λόγος AR (Alumina Ratio ή Alumina Modulus) καλείται αργιλικός δείκτης και ελέγχει τη σύσταση του κλίνκερ όσον αφορά τις αναλογίες μεταξύ της αργιλοφερριτικής φάσης (C_4AF) και του γελεμίτη (C_4A_3S). Ο αργιλικός δείκτης κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3 για τα τσιμέντα Portland.

$$AR_L \leq \frac{m_{Al_2O_3}^C}{m_{Fe_2O_3}^C} \leq AR^U \quad (14)$$

Ο πυριτικός δείκτης SR (Silica Ratio ή Silica Modulus) δίνει τη σχετική τιμή των συνολικών πυριτικών ενώσεων (C_2S) προς την αργιλοφερριτική (C_4AF) και τον γελεμίτη ($C_4A_3\hat{S}$). Οι συνήθεις τιμές του κυμαίνονται μεταξύ του 1.5 και 2.5 για τα τσιμέντα Portland. Αύξηση του λόγου SR έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των περιεχόμενων πυριτικών ενώσεων εις βάρος των αργιλικών, φάσεις οι οποίες καθορίζουν την ποσότητα της υγρής φάσης κατά την τήξη των πρώτων υλών.

$$SR_L \leq \frac{m_{SiO_2}^C}{m_{Al_2O_3}^C + m_{Fe_2O_3}^C} \leq SR^U \quad (15)$$

Ο δείκτης κορεσμού σε άσβεστο LSF (Lime Saturation Factor) εκτιμά το ποσοστό του ασβεστίου που αντέδρασε προς σχηματισμό των ορυκτολογικών φάσεων του κλίνκερ. Μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0.70 και 1.00 για τα τσιμέντα Portland, ωστόσο στην παρούσα εργασία επιλέγονται πιο συνηθισμένα όρια, μεταξύ 0.85 και 1.00.

$$LSF_L \leq \frac{m_{CaO}^C}{2.8m_{SiO_2}^C + 1.1m_{Al_2O_3}^C + 0.65m_{Fe_2O_3}^C} \leq LSF^U \quad (16)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση που ορίζεται αποτελεί τη συνάρτηση που καλείται να ελαχιστοποιήσει το λογισμικό. Πρέπει να περιλαμβάνει το κόστος των πρώτων υλών και των καυσίμων που χρησιμοποιούνται, τα πάγια κόστη σε περίπτωση χρήσης κάποιου εναλλακτικού καυσίμου, καθώς και το οικονομικό αποτύπωμα σε περίπτωση μεταβολής (αύξηση ή μείωση) των εκπομπών του μη βιογενούς διοξειδίου του άνθρακα. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος} = & \left(\sum_j UC_j^R m_j^R + \sum_l UC_l^F m_l^F \right) \\ & + \sum_l \left(\frac{\varepsilon}{AC} FCI_l^F X_l^F + VC_l m_l^F \right) + C_{Tax} \delta m_{CO_2, NBG} \end{aligned} \quad (17)$$

, όπου

$$\delta m_{CO_2, NBG} = m_{CO_2, NBG}^{fg} + \tilde{m}_{CO_2, NBG}^{fg} \quad (18)$$

$$m_{L,l}^F X_l^F \leq m_l^F \leq m_l^{F,U} X_l^F \quad (19)$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αρχικά, το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόστηκε χωρίς τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Ο υπολογισμός αυτός αποτέλεσε στη συνέχεια τη βάση των συγκρίσεων που έγιναν σε περίπτωση υποκατάστασης ποσοστού των συμβατικών καυσίμων με μείγμα εναλλακτικών καυσίμων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 στη στήλη με 0% υποκατάσταση (TSR = 0%). Στην περίπτωση που δεν καταναλωθούν καύσιμα εναλλακτικού τύπου, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα είναι στα αναμενόμενα επίπεδα.

Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν περιπτώσεις υποκατάστασης ποσοστού των συμβατικών καυσίμων με μείγμα εναλλακτικών και τέλος προκρίθηκε το ποσοστό υποκατάστασης (TSR = 59%), στο οποίο απαντάται η βέλτιστη λύση του προβλήματος ως προς κάθε μεταβλητή που εξετάστηκε. Σε κάθε περίπτωση, οι ποσοστιαίες μεταβολές των δύο κύριων μεταβλητών βελτιστοποίησης, δηλαδή της εκπομπής CO_2 και του κόστους παραγωγής, αποτυπώνονται στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 1.

Με τους περιορισμούς που εισήχθησαν ο αλγόριθμος προκρίνει το βέλτιστο μείγμα πρώτων υλών και καυσίμων που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Ο τελευταίος στόχος επιτεύχθηκε με εκτίμηση του κόστους αγοράς της εκάστοτε πρώτης ύλης (UC) και εισαγωγή στο μαθηματικό μοντέλο μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Για να καταλήξει ο αλγόριθμος στη βέλτιστη σύσταση του μείγματος

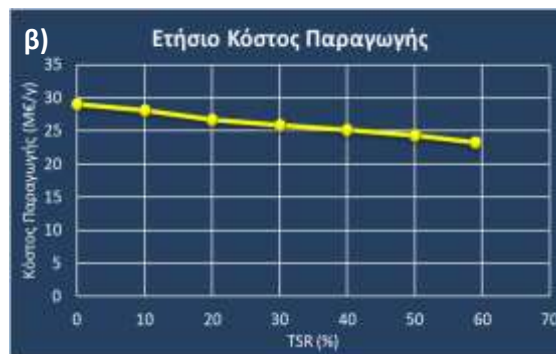
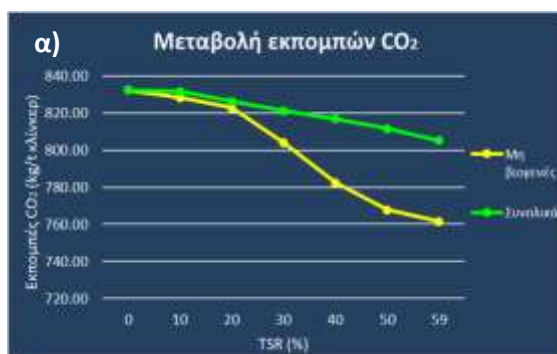
των πρώτων υλών, μεταβάλλει κυρίως τις τιμές του ασβεστόλιθου, του σχιστόλιθου και της τέφρας, αφού αποτελούν τις λιγότερο κοστοβόρες πρώτες ύλες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Αποτελέσματα επίλυσης του προβλήματος για ενδεικτικές τιμές υποκατάστασης.

TSR (%) kg/t κλίνκερ	0	10	20	30	40	50	59
m _{Ασβεστόλιθου}	1202.64	1201.92	1201.68	1200.57	1199.27	1198.53	1198.22
m _{Σχιστόλιθου}	217.69	228.75	228.92	231.31	233.79	236.12	237.89
m _{E.I.}	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
m _{FGD}	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
m _{Αλούμινας}	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
m _{Τέφρας}	47.49	37.42	37.65	35.36	32.86	30.31	28.98
m _{Ανθρακα}	50.00	26.69	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
m _{PetCoke}	60.61	71.19	66.67	56.06	45.46	34.85	25.30
m _{RDF}	0.00	1.00	1.00	5.00	10.00	15.00	15.00
m _{SS}	0.00	1.00	1.00	5.00	10.00	15.00	15.00
m _{TDF}	0.00	9.09	20.03	23.59	25.31	29.69	39.53
m _{MBM}	0.00	1.00	1.00	5.00	10.00	10.00	10.00
Μη βιογενές CO ₂	832.36	828.24	822.83	804.11	782.47	767.85	761.46
Βιογενές CO ₂	0.00	3.43	3.43	17.15	34.30	43.75	43.75
Συνολικό CO ₂	832.36	831.67	826.26	821.26	816.77	811.60	805.21
AR	2.229	2.203	2.204	2.203	2.203	2.202	2.201
SR	2.105	2.140	2.142	2.147	2.152	2.158	2.161
LSF	0.871	0.873	0.873	0.871	0.869	0.867	0.865
Κόστος Παραγωγής (Μ€/γ)	29.027	28.087	26.665	25.843	25.128	24.377	23.248

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Ποσοστιαία μεταβολή κόστους και εκπομπών CO₂ με ενδεικτικές τιμές υποκατάστασης.

TSR (%)	(%)	0	10	20	30	40	50	59
m _{(CO2)n}	kg/t	832.36	828.24	822.83	804.11	782.47	767.85	761.46
m _{(CO2)b}		0.00	3.43	3.43	17.15	34.30	43.75	43.75
m _{(CO2)t}		832.36	831.67	826.26	821.26	816.77	811.60	805.21
Δm _{(CO2)n}	(%)	-	-0.50	-1.14	-3.39	-5.99	-7.75	-8.52
Δm _{(CO2)t}		-	-0.08	-0.73	-1.33	-1.87	-2.49	-3.26
Κόστος	€/t	14.51	14.04	13.33	12.92	12.56	12.19	11.62
ΔΚόστος	(%)	-	-3.24	-8.14	-10.97	-13.43	-16.02	-19.91



Σχήμα 1.: α) Μεταβολή των εκπομπών CO₂ και β) Μείωση ετήσιου κόστους παραγωγής, για ενδεικτικές τιμές υποκατάστασης

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για την ταυτόχρονη επιλογή πρώτων υλών και καυσίμων, συμβατικών και προερχόμενων από απόβλητα. Η τροφοδοσία του μείγματος επιλογής σε εγκατάσταση παραγωγής τσιμέντου στόχευε στη μείωση των εκπομπών

διοξειδίου του άνθρακα και του κόστους παραγωγής και είχε τα εξής αποτελέσματα:

- Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση μαθηματικών συστημάτων που ενσωματώνουν περιορισμούς ανάλογους μιας πραγματικής βιομηχανικής εγκατάστασης, αφού βασίζεται σε ισοζύγια μάζας, ενέργειας και θερμοδυναμικές σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη σημαντικές οικονομικές παραμέτρους μίας τσιμεντοβιομηχανίας. Ο αλγόριθμος ενδείκνυται για προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ανεξαρτήτως του αριθμού των μεταβλητών και των σχέσεων που βελτιστοποιούνται.
- Το μείγμα των εναλλακτικών καυσίμων που προκρίθηκε αποτελείται από καύσιμα απόβλητα (RDF), από λυματολάσπη (SS), άχρηστα ελαστικά (TDF) και από άλευρα οστών ζώων (MBM). Η επιλογή των συγκεκριμένων καυσίμων έγινε με βάση τη θερμογόνο δύναμη, το κόστος καθώς και τη διαθεσιμότητα. Ωστόσο, η επιλογή είναι ενδεικτική και επιδέχεται τροποποιήσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν παρουσιάστηκε μείωση της εκπομπής του μη βιογενούς CO₂ στην περιστροφική κάμινο. Στο βέλτιστο ποσοστό υποκατάστασης, που υπολογίστηκε στο 59%, η μείωση των εκπομπών ανέρχεται στο 8.5% (70 kg/t κλίνκερ).
- Η επιλογή της βέλτιστης σύστασης Α' υλών και μείγματος καυσίμων επιτυγχάνει τη σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής κατά 19.9%. Αυτό επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους. Αφενός μέσω του χαμηλότερου κόστους αγοράς καυσίμων (ο λιγνίτης και το PetCoke είναι πιο ακριβά από τα εναλλακτικά), αφετέρου μέσω της εξοικονόμησης από φόρους εκπομπών (2.80 Μ€ για το 59% υποκατάστασης) και επιπλέον την ελαφρώς μειωμένη απαίτηση σε ασβεστόλιθο.

Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά σε περίπτωση που κάποια βιομηχανία επιλέξει την παραγωγή θειομπελιτικών τσιμέντων με ταυτόχρονη χρήση πιο φιλικών περιβαλλοντικά καυσίμων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «INVALOR: Ερευνητική Υποδομή για την Αξιοποίηση Αποβλήτων και Αειφόρου Διαχείρισης Φυσικών Πόρων» (MIS 5002495) που εντάσσεται στη Δράση «Ενίσχυση των Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κουμπούρη Δ., (2015). *Παραγωγή Τσιμέντων Μπελιτικού Τύπου με Παράλληλη Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων*. Πατρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [2] Παπίλας Γ., (2018). *Μελέτη Σύνθεσης Θεϊκομπελιτικών τσιμέντων*. Εργαστήριο Υλικών και Μεταλλουργίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [3] Stutzman P., (2011). *Contributions of NIST/NBS Researchers to the Crystallography of Construction Materials*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, pp. 106-112.
- [4] Kookos I.K., Yiannis Pontikes, George N. Angelopoulos, Gerasimos Lyberatos, (2011). *Classical and alternative fuel mix optimization in cement production using mathematical programming*.