

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΑΣΙΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΑΛΚΑΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Δ. Κιούπης\*, Σ. Τσιβιλής, Γ. Κακάλη

Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Τ.Κ. 15773, Αθήνα, Ελλάδα

(\*[kioupid@gmail.com](mailto:kioupid@gmail.com))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να προταθεί η μεθοδολογία και τα μαθηματικά εργαλεία για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη γεωπολυμερικών υλικών από βιομηχανικά απόβλητα και παραπροϊόντα. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε ακολουθεί τον κλασματικό πειραματικό σχεδιασμό Taguchi επιτρέποντας την διερεύνηση της συνδυαστικής επίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων στην απόκριση του συστήματος με την διεξαγωγή του ελάχιστου αριθμού πειραμάτων. Στην εργασία παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης της γεωπολυμερικής σύνθεσης με βάση τις μηχανικές αντοχές και την φαινόμενη πυκνότητα των προϊόντων, στις οποίες εφαρμόστηκε επιτυχώς η μεθοδολογία Taguchi.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σημαντικό κομμάτι της παγκόσμιας βιομηχανίας (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταλλευμάτων, ρυζιού, κατασκευών κλπ.) συνδέεται με την συμπαραγωγή μεγάλων ποσοτήτων βιομηχανικών παραπροϊόντων ή άλλων στερεών αποβλήτων. Τα υλικά αυτά πολλές φορές περιέχουν ανεπιθύμητες ενώσεις με αποτέλεσμα η απόθεση τους να αποτελεί μεγάλο κοινωνικό πρόβλημα με επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία. Ο καλύτερος τρόπος για να αντιμετωπιστεί η διαχείριση των παραπάνω στερεών αποβλήτων είναι μέσω της ανακύκλωσης και ασφαλούς ενσωμάτωσης των υλικών αυτών σε νέα προϊόντα<sup>[1]</sup>.

Τα τελευταία χρόνια, μια νέα κατηγορία υλικών, τα ανόργανα πολυμερή ή γεωπολυμερή, έχουν προταθεί για την αξιοποίηση των στερεών αποβλήτων αργιλοπυριτικής σύστασης και την ανάπτυξη νέων κατασκευαστικών υλικών υψηλής προστιθέμενης αξίας<sup>[2]</sup>. Τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν ιδιότητες συγκρίσιμες ή ακόμη και καλύτερες σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά, όπως ταχεία ανάπτυξη αντοχών, βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Ταυτόχρονα, τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και συμβάλουν στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και ενέργειας<sup>[3]</sup>. Όμως, το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι, ανάλογα με την σχεδιάσή τους, αποκτούν ιδιότητες προσαρμοσμένες στις ανάγκες του τελικού χρήστη<sup>[4]</sup>.

Η σύνθεση των γεωπολυμερών περιλαμβάνει την αντίδραση μιας αργιλοπυριτικής πρώτης ύλης με ένα έντονα αλκαλικό διάλυμα και την μετατροπή του αρχικού μίγματος σε ένα ανόργανο προϊόν με άμορφη έως ημικρυσταλλική δομή. Το αλκαλικό διάλυμα περιέχει τις απαραίτητες ποσότητες αλκαλίου και διαλυτού Si για την ενεργοποίηση του γεωπολυμερισμού (υπό την μορφή υδροξειδίων ή πυριτικών ενώσεων) ενώ η πρώτη ύλη περιλαμβάνει σημαντικά ποσοστά άμορφου SiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Συχνά παραδείγματα βιομηχανικών παραπροϊόντων ή αποβλήτων που έχουν χρησιμοποιηθεί ως πρώτες ύλες γεωπολυμερισμού είναι η ιπτάμενη τέφρα που προέρχεται από την καύση του λιγνίτη στους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, η σκωρία υψικαμίνων και η μεταλλουργική σκωρία που αποτελούν παραπροϊόντα μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (τούβλα, πλακάκια, σκυρόδεμα κλπ.) καθώς και η τέφρα από την καύση του φλοιού του ρυζιού.

Ο γεωπολυμερισμός αποτελεί μια πολύπλοκη διεργασία όπου οι παράμετροι της σύνθεσης έχουν συνδυαστική και αλληλοεξαρτώμενη επίδραση, γεγονός που περιπλέκει την διαδικασία βελτιστοποίησής τους. Παράγοντες όπως η χημική σύσταση της αργιλοπυριτικής πρώτης ύλης, οι

αναλογίες των αντιδρώντων συστατικών και οι συνθήκες ωρίμανσης των δοκιμών επιδρούν σημαντικά στην διεργασία του γεωπολυμερισμού.

Η χρήση ενός πλήρως παραγοντικού σχεδιασμού πειραμάτων για την αριστοποίηση της σύνθεσης απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό πειραμάτων που είναι πρακτικά αδύνατον να πραγματοποιηθούν. Αντιθέτως, η εφαρμογή ενός κλασματικού πολυπαραγοντικού σχεδιασμού επιτρέπει την διερεύνηση της συνδυαστικής επίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων με την διεξαγωγή του ελάχιστου αριθμού πειραμάτων. Στην συγκεκριμένη εργασία προτείνεται ο κλασματικός σχεδιασμός πειραμάτων με την μέθοδο Taguchi που έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα βιομηχανικά και ερευνητικά πεδία και τελευταία έχει βρει εφαρμογή και στον κατασκευαστικό τομέα.

Στις επόμενες παραγράφους, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον σχεδιασμό ενός πολυπαραγοντικού μοντέλου Taguchi καθώς και η μαθηματική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με την ανάλυση της διακύμανσης (Analysis of Variance, ANOVA). Τέλος, παρουσιάζονται δύο παραδείγματα αριστοποίησης της γεωπολυμερικής σύνθεσης, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την πρώτη ύλη και την ιδιότητα στόχο της αριστοποίησης. Το πρώτο παράδειγμα αφορά την σύνθεση γεωπολυμερών από απόβλητα τούβλων όπου ο στόχος της αριστοποίησης είναι η ενίσχυση των μηχανικών αντοχών ενώ το δεύτερο σχετίζεται με την παραγωγή γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας χαμηλής πυκνότητας.

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Ο στόχος κάθε παραμετρικού πειραματικού σχεδιασμού είναι να αναγνωρίσει τους παράγοντες της εξεταζόμενης διεργασίας που βελτιστοποιούν το επιθυμητό χαρακτηριστικό και δεν είναι ευαίσθητοι σε παράγοντες θορύβου. Ο σχεδιασμός πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi ανήκει στους κλασματικούς παραγοντικούς σχεδιασμούς όπου πραγματοποιείται ταυτόχρονη αλλαγή πολλών παραγόντων κατά τρόπο συστηματικό που διασφαλίζει την αξιόπιστη και ανεξάρτητη μελέτη των επιδράσεων των παραγόντων<sup>[5]</sup>.

Η μέθοδος Taguchi περιλαμβάνει τα εξής στάδια: i) ορισμός του προβλήματος που πρέπει να επιλυθεί, ii) καθορισμός των επιδόσεων της εξεταζόμενης διεργασίας (ποιοτικό χαρακτηριστικό – στόχος), iii) επιλογή των παραγόντων που επιδρούν στην διεργασία καθώς και του εύρους τιμών τους, iv) σχεδιασμός και διεξαγωγή των πειραμάτων, v) ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων, vi) ερμηνεία των αποτελεσμάτων και vii) διεξαγωγή επαληθευτικών πειραμάτων για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου. Το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου Taguchi και κάθε κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού είναι ότι απαιτείται σημαντικά μικρότερος αριθμός δοκιμών ώστε να περιγραφεί πλήρως το σύστημα, σε σύγκριση με ένα πλήρες παραγοντικό μοντέλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δραστική μείωση τόσο του χρόνου όσο και του κόστους του όλου σχεδιασμού. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μία ομάδα δοκιμών η οποία βασίζεται στον κλασματικό σχεδιασμό.

**Πίνακας 1.** Μια ομάδα δοκιμών με τη μεθοδολογία Taguchi (ορθογώνια διάταξη  $L_9(3^3)$ ).

Δοκιμή	Παράγοντας Α	Παράγοντας Β	Παράγοντας Γ
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Ένα πειραματικό σύστημα που εξετάζεται με την μέθοδο Taguchi μπορεί να απεικονιστεί με την βοήθεια ορθογώνιων διατάξεων (Πίνακας 1). Οι διατάξεις αυτές είναι στην ουσία πίνακες όπου

στις στήλες τους αντιστοιχούν οι εξεταζόμενοι παράμετροι ενώ στις γραμμές τους τα επίπεδα των παραγόντων για κάθε δοκιμή. Οι ορθογώνιες διατάξεις συμβολίζονται με:  $L_r(n^k)$ , όπου το γράμμα  $L$  προέρχεται από το *Latin Squares*, ο δείκτης  $r$  είναι ο αριθμός των γραμμών,  $k$  ο αριθμός των παραγόντων και  $n$  ο αριθμός των επιπέδων των παραγόντων. Γενικά, μπορεί να σχεδιαστεί ένας μεγάλος αριθμός ορθογώνιων διατάξεων ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του εκάστοτε πειράματος. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται κάποιες από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ορθογώνιες διατάξεις. Είναι φανερό πως η επιλογή της μεθόδου Taguchi μειώνει δραστικά τον αριθμό των δοκιμών σε σχέση με το αντίστοιχο πλήρες παραγοντικό μοντέλο.

**Πίνακας 2.** Ορθογώνιες διατάξεις του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού.

Ορθογώνια διάταξη	Αριθμός δοκιμών	Αριθμός επιπέδων	Αριθμός παραγόντων	Αριθμός δοκιμών του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού
$L_4(2^3)$	4	2	3	8
$L_8(2^7)$	8	2	7	128
$L_{12}(2^{11})$	12	2	11	2048
$L_{16}(2^{15})$	16	2	15	32768
$L_{32}(2^{31})$	32	2	31	2147483648
$L_9(3^4)$	9	3	4	81

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΟΒΑ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών του πειραματικού μοντέλου Taguchi επεξεργάζονται στατιστικά μέσω της μεθόδου ANOVA<sup>[6]</sup>. Ο κύριος στόχος της ANOVA είναι να αναλύσει την συνολική διασπορά που παρατηρείται στις τιμές του επιλεγμένου ποιοτικού χαρακτηριστικού και να την αποδώσει επιμέρους στους εξεταζόμενους παράγοντες, έτσι ώστε να εξαχθεί η σημαντικότητα τους πάνω στο σύστημα. Η σημαντικότητα κάθε παράγοντα περικλείει και την τυχαία διασπορά (σφάλμα) που θα υπήρχε στα αποτελέσματα αν κανένας από τους εξεταζόμενους παράγοντες δεν τα επηρέαζε. Η τυχαία διασπορά περιλαμβάνει το πειραματικό σφάλμα, την επίδραση εξωπειραματικών παραγόντων και παραγόντων του πειράματος που θεωρήθηκαν ασήμαντοι. Η παρακάτω σχέση συνοψίζει την βάση της ανάλυσης ANOVA:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Διασπορά} \end{array} \right) = \sum_k \left( \begin{array}{c} \text{Διασπορά λόγω της} \\ \text{επίδρασης του} \\ \text{παράγοντα } k \end{array} \right) + (\text{Υπόλοιπο})$$

Στην ανάλυση ANOVA η σημαντικότητα των εξεταζόμενων παραμέτρων υπολογίζεται ως το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στο επιλεγμένο ποιοτικό χαρακτηριστικό της διεργασίας. Η συνεισφορά ενός παράγοντα στο σύστημα είναι σημαντική όταν μια μεταβολή της τιμής του, προκαλεί και μεγάλη επίπτωση στην απόκριση του συστήματος. Για να χαρακτηριστεί ένας παράγοντας σημαντικός ή όχι χρησιμοποιείται κατάλληλη στατιστική μέθοδος που ονομάζεται έλεγχος σημαντικότητας. Η μέθοδος αυτή κατατάσσει τους παράγοντες σε σημαντικούς ή ασήμαντους ανάλογα με το αν η διασπορά που προκαλείται από τη μεταβολή τους είναι τυχαία ή όχι.

Αφού προσδιοριστούν οι σημαντικοί παράγοντες, υπολογίζονται τα βέλτιστα επίπεδα των εξεταζόμενων παραγόντων. Για κάθε παράγοντα η τιμή του επιπέδου που προσεγγίζει περισσότερο την επιθυμητή απόκριση θεωρείται ως βέλτιστο επίπεδο. Θέτοντας τους σημαντικούς παράγοντες στο βέλτιστο επίπεδο η απόκριση του συστήματος μπορεί να προβλεφθεί μέσα σε ένα διάστημα εμπιστοσύνης.

Η μέθοδος της ανάλυσης ANOVA τελειώνει με την διεξαγωγή πειραμάτων επαλήθευσης ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο ο πειραματικός σχεδιασμός είναι επιτυχής άρα και τα εξαγόμενα συμπεράσματα σωστά. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων επιλέγεται ο συνδυασμός παραμέτρων που βελτιστοποιεί το εξεταζόμενο ποιοτικό χαρακτηριστικό και ελέγχεται αν τα

αποτελέσματα εμπίπτουν εντός του οριζόμενου διαστήματος εμπιστοσύνης. Αν τα αποτελέσματα επαληθεύουν τις προβλέψεις σημαίνει πως όντως βρέθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός παραγόντων-επιπέδων και ότι το πειραματικό σύστημα έχει περιγραφεί σωστά. Στην αντίθετη περίπτωση, ο σχεδιασμός έχει αποτύχει να ανιχνεύσει την επίδραση των παραγόντων και το σύστημα επανεξετάζεται.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις αριστοποίησης της γεωπολυμερικής σύνθεσης με εφαρμογή του πολυπαραγοντικού σχεδιασμού Taguchi. Στο πρώτο παράδειγμα, ο στόχος του πειραματικού σχεδιασμού είναι η ανάπτυξη γεωπολυμερών από απόβλητα τούβλου με ενισχυμένες μηχανικές αντοχές ώστε να χρησιμοποιηθούν ως καθαρά δομικά υλικά. Το δεύτερο παράδειγμα έχει ως στόχο να αναπτύξει γεωπολυμερή από ιπτάμενη τέφρα με μειωμένη πυκνότητα τα οποία θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή ως κατασκευαστικά υλικά με θερμομονωτικές ιδιότητες.

Η χημική ανάλυση των πρώτων υλών έδειξε πως τόσο τα απόβλητα τούβλων όσο και η ιπτάμενη τέφρα περιέχουν υψηλά ποσοστά  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Πίνακας 3) αναγκαία για την αντίδραση του γεωπολυμερισμού. Σημειώνεται ότι η διακύμανση στην σύσταση των πρώτων υλών έχει σημαντικό αντίκτυπο στο γεωπολυμερικό δυναμικό τους.

*Πίνακας 3. Χημική σύσταση της πρώτης ύλης (% κ.β.).*

Πρώτη Ύλη	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	Cl	L.O.I.
Τούβλο	51.31	14.62	8.45	6.33	8.10	2.28	0.57	0.44	0.66	0.08	0.04	39.70
Ιπ. τέφρα	46.96	21.00	9.83	13.74	2.20	1.36	0.16	2.42	-	-	-	1.94

Επιπροσθέτως, στις δύο προσεγγίσεις πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικά πειράματα με την μέθοδο της “αλλαγής ενός παράγοντα την φορά”, τα οποία βοήθησαν στην επιλογή του εύρους τιμών των παραγόντων που χρησιμοποιήθηκαν για την αριστοποίηση της σύνθεσης.

#### **Παράδειγμα 1: Επίτευξη ενισχυμένων μηχανικών αντοχών**

Στα γεωπολυμερή τούβλου, οι μηχανικές αντοχές σε θλίψη αποτελούν το ποιοτικό χαρακτηριστικό - στόχο βάσει του οποίου πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της σύνθεσης. Οι παράγοντες οι οποίοι επιλέχθηκαν για να εξεταστούν με τη μέθοδο Taguchi είναι ο μοριακός λόγος διαλυτό πυρίτιο προς οξειδίο του αλκαλίου ( $[\text{Si}]/\text{R}_2\text{O}$ ) που σχετίζεται με την ποσότητα του διαλυμένου Si στο διάλυμα ενεργοποίησης, ο μοριακός λόγος αλκάλιο προς αργίλιο ( $\text{R}/\text{Al}$ ) που εκφράζει την αλκαλικότητα του διαλύματος ενεργοποίησης και ο λόγος  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{K})$  που αφορά το είδος του αλκαλίου που συμμετέχει στην αντίδραση του γεωπολυμερισμού. Για την απεικόνιση του πειραματικού σχεδιασμού επιλέχθηκε η ορθογώνια διάταξη  $L_9(3^3)$  όπου περιλαμβάνει την εξέταση των τριών παραγόντων σε τρεις ξεχωριστές στάθμες τιμών (Πίνακας 4). Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε στις 7 ημέρες και ήταν ο μέσος όρος τριών μετρήσεων.

*Πίνακας 4. Παράγοντες και επίπεδα τιμών για το πειραματικό μοντέλο Taguchi.*

Παράγοντες	Στάθμη 1	Στάθμη 2	Στάθμη 3
$[\text{Si}]/\text{R}_2\text{O}$	0	1	2
$\text{R}/\text{Al}$	0.4	0.7	1.0
$\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$	0.0	0.5	1.0

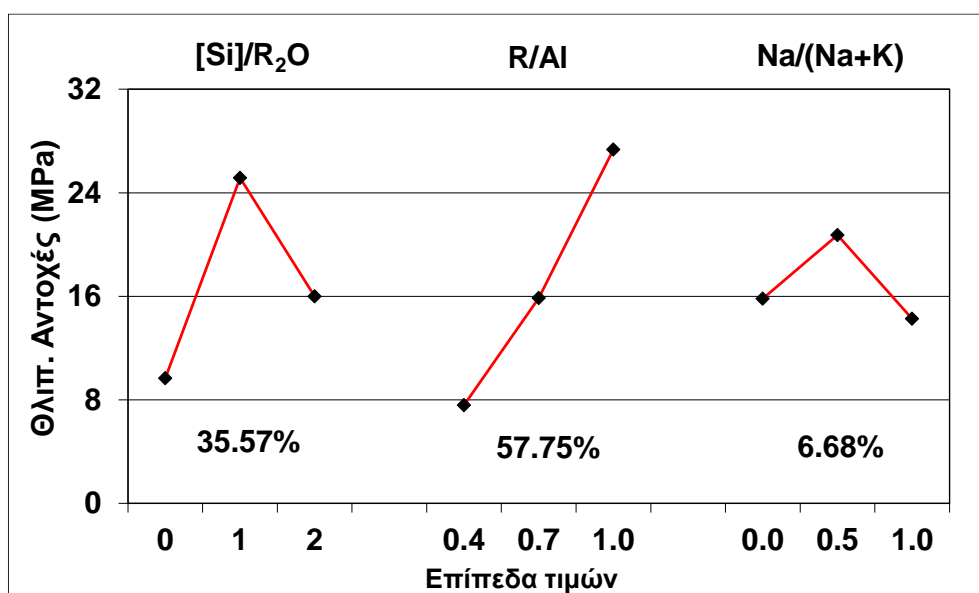
Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει το σύνολο των πειραμάτων που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο Taguchi μαζί με τις αντίστοιχες τιμές θλιπτικών αντοχών που προέκυψαν ύστερα από την διεξαγωγή των δοκιμών. Οι τιμές των μετρήσεων παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά (2.32–36.43 MPa), γεγονός που

φανερώνει ότι οι επιλεγμένοι παράγοντες και τα επίπεδα τους έχουν σημαντική επίδραση στο ποιοτικό χαρακτηριστικό – στόχο.

**Πίνακας 5.** Παράμετροι σύνθεσης και θλιπτικές αντοχές για τα παραγόμενα γεωπολυμερή.

Πείραμα	[Si]/R <sub>2</sub> O	R/Al	Na/Na+K	Θλιπτική Αντοχή (MPa)			Μέση Τιμή (Μ.Τ.)
				(1)	(2)	(3)	
1	0.0	0.40	0.00	2.46	2.25	2.26	2.32
2	0.0	0.70	0.50	15.36	12.90	14.90	14.39
3	0.0	1.00	1.00	12.30	12.00	12.59	12.29
4	1.0	0.40	0.50	14.48	14.05	14.94	14.49
5	1.0	0.70	1.00	25.71	23.07	24.86	24.54
6	1.0	1.00	0.00	36.04	36.81	36.44	36.43
7	2.0	0.40	1.00	6.62	4.91	6.36	5.96
8	2.0	0.70	0.00	8.32	8.29	9.51	8.71
9	2.0	1.00	0.50	32.49	29.80	37.68	33.32

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης ANOVA μέσω διαγραμματικής απεικόνισης της επίδρασης των εξεταζόμενων παραγόντων στις τιμές των θλιπτικών αντοχών των παραγόμενων δοκιμίων. Παράλληλα, εμφανίζονται τα ποσοστά συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στην απόκριση του συστήματος όπως υπολογίστηκαν με την μέθοδο του ελέγχου σημαντικότητας. Η παράμετρος με την μεγαλύτερη επίδραση στο σύστημα είναι ο μοριακός λόγος R/Al (57.75%) ενώ ακολουθεί ο μοριακός λόγος [Si]/R<sub>2</sub>O με ποσοστό συνεισφοράς 35.57%. Η επιλογή του αλκαλίου φαίνεται να μην έχει σημαντική επίδραση στις θλιπτικές αντοχές των γεωπολυμερών τούβλου (6.68%).



**Σχήμα 1.** Διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ANOVA.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του πολυπαραγοντικού μοντέλου Taguchi έδειξε πως οι βέλτιστες τιμές παραμέτρων για την σύνθεση γεωπολυμερών τούβλου με υψηλές θλιπτικές αντοχές είναι οι εξής: [Si]/R<sub>2</sub>O=1, R/Al=1.0 και Na/Na+K=0.5. Για να επαληθευτούν τα αποτελέσματα της αριστοποίησης πραγματοποιήθηκε σύνθεση δοκιμίων σύμφωνα με τις βέλτιστες συνθήκες. Η πειραματικά προσδιοριζόμενη τιμή μηχανικών αντοχών για την βέλτιστη σύνθεση υπολογίστηκε 40.98 MPa ενώ η προβλεπόμενη τιμή θλιπτικών αντοχών σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA (για 95% στάθμη σημαντικότητας) είναι 39.3574 ±4.7551 MPa. Όπως προκύπτει, η πειραματική τιμή θλιπτικών αντοχών συμφωνεί με την προβλεπόμενη, εμπίπτοντας εντός του διαστήματος



εμπιστοσύνης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ορθότητα των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την μαθηματική επεξεργασία με βάση την ANOVA.

### **Παράδειγμα 2: Επίτευξη μειωμένης πυκνότητας**

Στην περίπτωση των γεωπολυμερών της ιπτάμενης τέφρας, το ποιοτικό χαρακτηριστικό - στόχος για την αριστοποίηση της σύνθεσης είναι η φαινόμενη πυκνότητα των παραγομένων δοκιμών. Παράμετρος μείωσης της πυκνότητας των προϊόντων αποτελεί το ποσοστό εισαγωγής αφριστικού παράγοντα (σκόνη μεταλλικού Al) εντός της γεωπολυμερικής μήτρας. Οι παράγοντες της σύνθεσης που έλαβαν μέρος στο πολυπαραγοντικό μοντέλο Taguchi είναι οι εξής: α) η % κ.β. περιεκτικότητα σε Al της σύνθεσης (υπολογισμός επί της ποσότητας της ιπτάμενης τέφρας), β) ο μοριακός λόγος R/Al που συσχετίζει την ποσότητα αλκαλίων (R: Na ή K) που περιέχονται στο διάλυμα ενεργοποίησης με την ποσότητα Al της πρώτης ύλης και γ) ο λόγος Na/(Na + K) που σχετίζεται με το είδος του αλκαλίου που συμμετέχει στο διάλυμα ενεργοποίησης. Για την βελτιστοποίηση της σύνθεσης εξετάζονται τρεις παράγοντες σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα οπότε η ορθογώνια διάταξη  $L_9(3^4)$  επιλέχθηκε για να περιγράψει το πειραματικό σύστημα. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, η φαινόμενη πυκνότητα της κάθε δοκιμής υπολογίζεται ως ο μέσος όρος τριών μετρήσεων. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι παράγοντες και τα επίπεδα τιμών για το σχεδιαζόμενο πειραματικό μοντέλο.

**Πίνακας 6.** Παράγοντες και επίπεδα τιμών για το πειραματικό μοντέλο Taguchi.

Παράγοντες	Στάθμη 1	Στάθμη 2	Στάθμη 3	Στάθμη 4
Al % κ.β.	0.010	0.035	0.065	0.100
R/Al	0.8	1.2	1.6	2.0
Na/(Na + K)	0.00	0.35	0.65	1.00

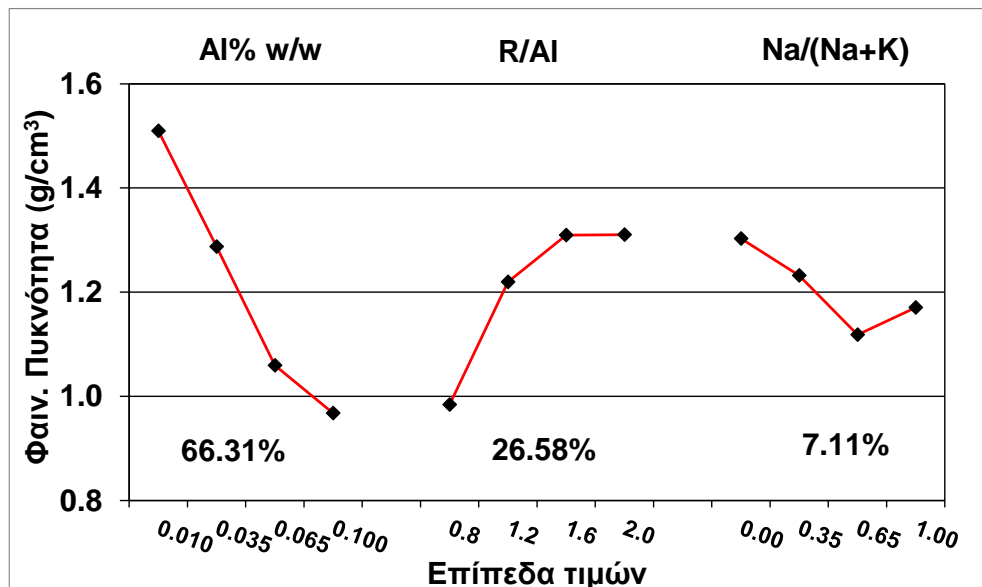
Οι τιμές φαινόμενης πυκνότητας καθώς και θλιπτικών αντοχών όλων των δοκιμών του πειραματικού σχεδιασμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Όπως και στην περίπτωση των γεωπολυμερών τούβλου, η απόκριση του συστήματος εμφανίζει μεγάλη διασπορά τιμών (0.64–1.56 g/cm<sup>3</sup>) αποτελώντας ένδειξη σωστής επιλογής των επιλεγμένων παραγόντων καθώς και του εύρους τιμών τους.

**Πίνακας 7.** Παράμετροι σύνθεσης και τιμές φαινόμενης πυκνότητας των γεωπολυμερών

Πείραμα	Al (%)	R/Al	Na/(Na+K)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )				Θλιπτικές Αντοχές (Μ.Τ.)
				(1)	(2)	(3)	Μέση Τιμή (Μ.Τ.)	
1	0.010	0.800	0.000	1.44	1.44	1.45	1.44	22.05
2	0.010	1.200	0.350	1.54	1.57	1.57	1.56	24.18
3	0.010	1.600	0.650	1.49	1.47	1.46	1.47	11.57
4	0.010	2.000	1.000	1.57	1.57	1.55	1.56	4.39
5	0.035	0.800	0.350	1.14	1.13	1.14	1.14	9.27
6	0.035	1.200	0.000	1.31	1.28	1.27	1.28	10.54
7	0.035	1.600	1.000	1.37	1.39	1.36	1.37	4.77
8	0.035	2.000	0.650	1.36	1.36	1.35	1.36	4.19
9	0.065	0.800	0.650	0.72	0.71	0.71	0.72	2.16
10	0.065	1.200	1.000	1.12	1.11	1.08	1.11	9.64
11	0.065	1.600	0.000	1.28	1.29	1.29	1.29	5.58
12	0.065	2.000	0.350	1.14	1.13	1.11	1.13	2.75
13	0.100	0.800	1.000	0.65	0.64	0.63	0.64	2.27
14	0.100	1.200	0.650	0.94	0.92	0.93	0.93	5.02
15	0.100	1.600	0.350	1.09	1.12	1.11	1.11	2.74
16	0.100	2.000	0.000	1.20	1.19	1.19	1.20	3.65

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την ανεξάρτητη επίδραση των παραγόντων σύνθεσης στην φαινόμενη πυκνότητα των παραγομένων δοκιμών όπως αυτή προέκυψε από την ανάλυση ANOVA. Η

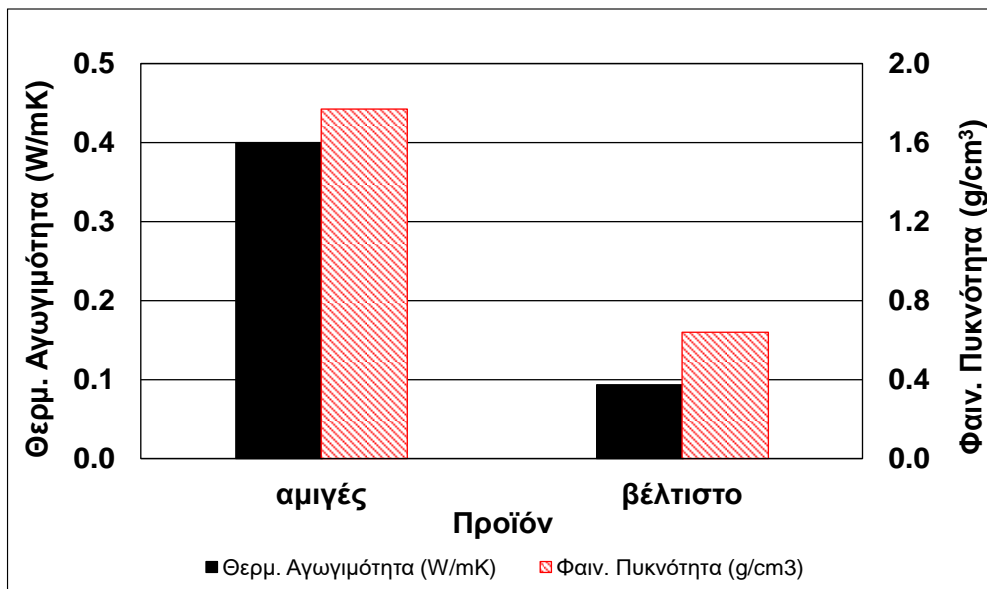
σημαντικότητα του κάθε παράγοντα εκφράζεται με το ποσοστό συνεισφοράς στο ποιοτικό χαρακτηριστικό-στόχος (φαινόμενη πυκνότητα). Η σημαντικότερη παράμετρος για το εξεταζόμενο σύστημα είναι η % κ.β. περιεκτικότητα σε Al της σύνθεσης με ποσοστό συνεισφοράς 66.31%. Ο μοριακός λόγος R/Al αποτελεί τον δεύτερο πιο σημαντικό παράγοντα (26.58%) ενώ η επιλογή του αλκαλίου φαίνεται να μην έχει σημαντική επίδραση στην φαινόμενη πυκνότητα των παραγόμενων γεωπολυμερών (7.11%).



**Σχήμα 2.** Επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στην φαινόμενη πυκνότητα των γεωπολυμερών.

Συνοψίζοντας, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πολυπαραγοντικού μοντέλου Taguchi, ευνοείται η παραλαβή ελαφροβαρούς προϊόντος για τις εξής τιμές παραμέτρων: Al % 0.10, R/Al= 0.80 και Na/Na+K=0.65. Για την δοκιμή επιβεβαίωσης, παρασκευάστηκε γεωπολυμερές με τις παραπάνω παραμέτρους, για το οποίο μετρήθηκε φαινόμενη πυκνότητα ίση με  $0.65 \text{ g/cm}^3$ , η οποία εμπίπτει μέσα στο εύρος των προβλεπόμενων τιμών ( $0.6575 \pm 0,0539 \text{ g/cm}^3$ ) για στάθμη σημαντικότητας 95%.

Για να αξιολογηθεί η θερμομονωτική συμπεριφορά των παραγόμενων γεωπολυμερών μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα των δοκιμίων. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι τιμές φαινόμενης πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας του αμιγούς γεωπολυμερούς ( $55.46 \text{ MPa}$  και  $1.77 \text{ g/cm}^3$ ) και της βέλτιστης σύνθεσης ( $2.27 \text{ MPa}$  και  $0.65 \text{ g/cm}^3$ ) όπως αυτή προέκυψε από το πειραματικό μοντέλο. Είναι εμφανές πως η προσθήκη μεταλλικού Al στα αντιδρώντα συστατικά της σύνθεσης έχει ως αποτέλεσμα την δραστική μείωση τόσο της πυκνότητας όσο και της θερμικής αγωγιμότητας. Χαρακτηριστικά, το αμιγές προϊόν εμφανίζει τιμή αγωγιμότητας της τάξης των  $0.40 \text{ W/mK}$  ενώ η βέλτιστη σύνθεση έχει τιμή θερμικής αγωγιμότητας κατά μια τάξη μεγέθους μικρότερη ( $0.09 \text{ W/mK}$ ). Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδεικνύουν την επιτυχή εφαρμογή του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού Taguchi στην ανάπτυξη ελαφροβαρών γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας με θερμομονωτικές ιδιότητες.



Σχήμα 3. Θερμική αγωγιμότητα και φαινόμενη πυκνότητα του αμιγούς και βέλτιστου γεωπολυμερούς.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση του πολυπαραγοντικού σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi για την ανάπτυξη γεωπολυμερικών υλικών με επιθυμητές ιδιότητες. Για τον σχεδιασμό του πειράματος είναι σημαντικό να οριστεί η επιθυμητή ιδιότητα – στόχος στην οποία βασίζεται η βελτιστοποίηση της σύνθεσης και να επιλεγούν οι παράγοντες σύνθεσης που επιδρούν σημαντικά στη ιδιότητα αυτή, καθώς και το εύρος τιμών τους. Στη συνέχεια, με την βοήθεια κατάλληλων ορθογώνιων διατάξεων καθορίζονται οι πειραματικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επεξεργάζονται στατιστικά με την βοήθεια της ANOVA και προσδιορίζονται τα επίπεδα των εξεταζόμενων παραγόντων που βελτιστοποιούν την ιδιότητα – στόχο. Τέλος, σύμφωνα με τα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων διενεργείται η δοκιμή επιβεβαίωσης η οποία επαληθεύει ή όχι τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στην ανάπτυξη γεωπολυμερών υψηλών αντοχών από απόβλητα τούβλων και ελαφροβαρών γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας, με επιτυχή αποτελέσματα. Τα παραγόμενα γεωπολυμερή παρουσίασαν τιμές θλιπτικών αντοχών, πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας στην περιοχή 2 – 55 MPa, 0.6 – 2.0 g/cm<sup>3</sup> και 0.09 – 0.40 W/mK, αντίστοιχα.

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου “Green Integrated Structural Elements for Retrofitting and New Construction of Buildings – GreenINSTRUCT”, χρηματοδοτούμενου από τη Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του προγράμματος Horizon2020.



### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] del Rio Merino M, Navarro J, Saez P. (2011). *OpenConstr. Build. Technol. J.*, 5:124 – 130.
- [2] Komnitsas K, Zaharaki D, Vlachou A, Bartzas G, Galetakis M. (2015). *Adv. Powder Technol.*, 26:368–376.
- [3] Provis JL, Palomo A, Shi C. (2015). *Cem. Concr. Res.*, 78:110–125.
- [4] Duxson P, Mallicoat SW, Lukey GC, Kriven WM, van Deventer JSJ. (2007). *Coll. Surf. A: Physicochem Eng. Asp.*, 292(1):8–20
- [5] Barker T.B. *Quality by experimental design*. (2005). Third Edition, Chapman & Hall/CRC.
- [6] Roy R.K. *Design of experiments using the Taguchi approach*. (2001). John Wiley & sons, New York.