

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΙΜΗΣ  
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ:  
ΜΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ**

**Ι.Β. Κουτσομήτης<sup>1</sup>, Ε.Η. Ηλιάκης<sup>1</sup>, Χ.Γ. Τσάκωνας<sup>2,3</sup>, Θ.Χ. Ξενίδου<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

<sup>2</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

<sup>3</sup>Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) / Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΕΧΜΗ),  
Πάτρα, Ελλάδα

(\*[thexen@chemeng.ntua.gr](mailto:thexen@chemeng.ntua.gr))

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια μεθοδολογική προσέγγιση παρουσιάζεται για την ανάπτυξη ενός υπολογιστικού πλαισίου βελτιστοποίησης διεργασιών και συστημάτων χρησιμοποιώντας καθαρά δεδομένα εισόδου και εξόδου μαθηματικών προτύπων χωρίς την ανάγκη γνώσης των εξισώσεων που περιέχονται σε αυτά. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται στο πλαίσιο της διερεύνησης νέων πεδίων αξιοποίησης της μεθόδου Taguchi σε συνδυασμό με μαθηματικές προσεγγίσεις που ανήκουν σε ευρύ φάσμα της υπολογιστικής επιστήμης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός απλοποιημένου μαθηματικού μοντέλου απόσταξης ισορροπίας το οποίο υποστηρίζει τη διεξοδική διερεύνηση των επιμέρους μεθόδων ανάλυσης στα αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Ο περιορισμός του ενός στόχου της μεθόδου Taguchi αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με την υβριδική χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης οι οποίες μετατρέπουν το πρόβλημα πολλαπλών στόχων σε πρόβλημα ενός στόχου. Οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού που προτείνονται από τις δύο μεθόδους, GRA και TOPSIS, και τη χρήση του ορθογώνιου πίνακα Taguchi, ταυτίζονται και επαληθεύονται από την πλήρη παραγοντική ανάλυση. Ο υπολογισμός των συντελεστών στάθμισης τόσο από την εντροπία, όσο και από την ανάλυση κύριων συνιστωσών, έδειξε πως η παροχή του ρεύματος κορυφής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με τη σύστασή του. Η χρήση της μεθόδου των ίσων βαρών οδήγησε σε σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων αναδεικνύοντας τη μέθοδο TOPSIS-Taguchi ως την πιο αξιόπιστη.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εύρωστη μηχανική εξελίχθηκε συστηματικά, με αφετηρία τη δεκαετία του 1950, με στόχο την παροχή μιας οικονομικά αποδοτικής μεθοδολογίας στις βιομηχανίες, προκειμένου να ενισχυθεί η ανταγωνιστική θέση τους στην παγκόσμια αγορά. Οι έννοιες της εύρωστης μηχανικής βασίζονται στη φιλοσοφία του Genichi Taguchi, ο οποίος τις παρουσίασε έπειτα από αρκετά χρόνια έρευνας <sup>[1]</sup>. Οι αρχές των μεθόδων Taguchi έχουν αξιοποιηθεί με επιτυχία σε μεγάλο εύρος εφαρμογών μηχανικής για τη βελτίωση της απόδοσης ενός προϊόντος ή μίας διεργασίας <sup>[2]</sup>.

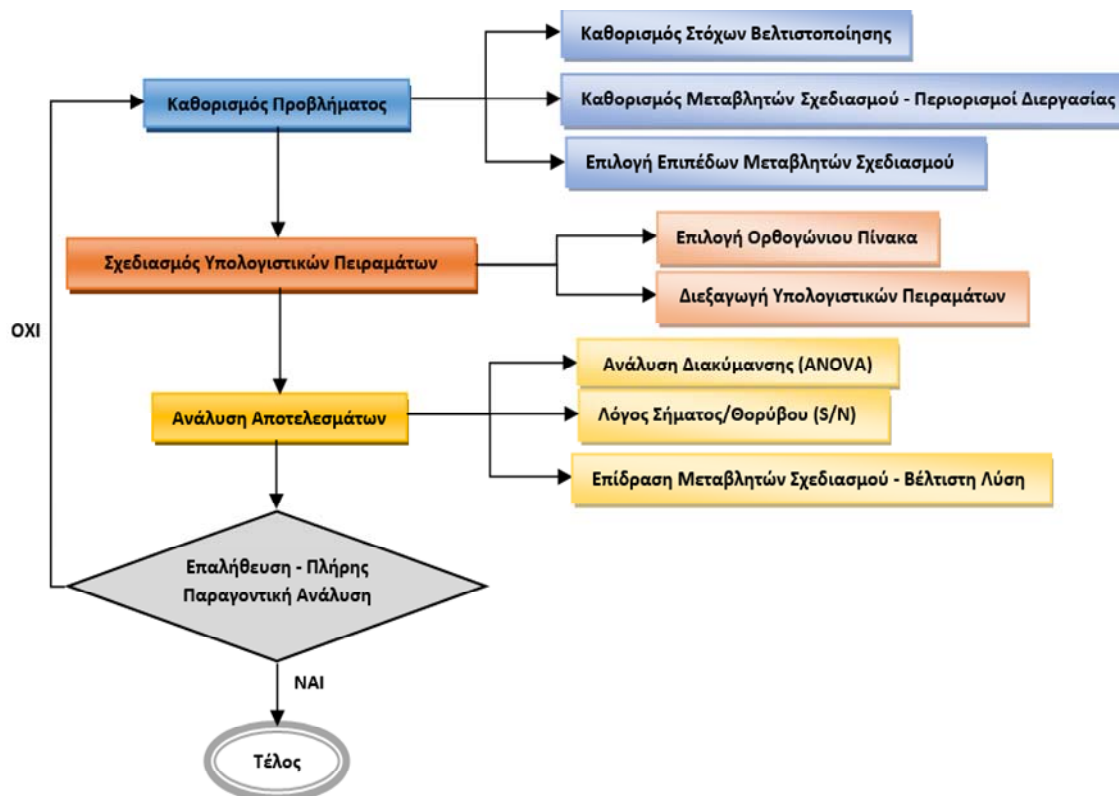
Η αρχική ιδέα της μεθοδολογίας Taguchi συνδέθηκε με το Στατιστικό Σχεδιασμό Πειραμάτων (Design of Experiments, DoE) για τον “εκτός διεργασίας” έλεγχο της ποιότητας. Ωστόσο, στις μέρες μας, η χρήση της έχει επεκταθεί σημαντικά στην περιοχή του Σχεδιασμού Υπολογιστικών Πειραμάτων (Design of Simulation Experiments) σε συνδυασμό με μεγάλο εύρος μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης με απώτερο στόχο το βέλτιστο σχεδιασμό διεργασιών και συστημάτων. Αυτό που καθιστά τη μεθοδολογία Taguchi ιδιαίτερα ελκυστική και ανταγωνιστική είναι η δυνατότητα που παρέχει να συνδυάζεται αποτελεσματικά με τις περισσότερες από τις σύγχρονες μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως για παράδειγμα, ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και γενετικούς αλγόριθμους (GA), με στόχο τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται από τις μεθόδους βελτιστοποίησης <sup>[3]</sup>.

Στην παρούσα εργασία, το ερευνητικό κίνητρο συνδέεται με την εφαρμογή της μεθοδολογίας Taguchi σε φυσικές διεργασίες ενδιαφέροντος χημικού μηχανικού, στις οποίες η θεωρητική ανάλυση συνδέεται με μαθηματικά μοντέλα επίλυσης των ισοζυγίων διατήρησης μάζας και ενέργειας σε μακροσκοπική κλίμακα. Ειδικότερα, διερευνάται η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού πλαισίου το οποίο αξιοποιεί την “εκτός διεργασίας” χρήση της μεθοδολογίας Taguchi στην υβριδική σύζευξη με μαθηματικά πρότυπα τύπου “black box”. Η προτεινόμενη υπολογιστική προσέγγιση εξυπηρετεί ταυτόχρονα την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας βελτιστοποίησης, η οποία περιλαμβάνει δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο εστιάζει στη χρήση της μεθοδολογίας Taguchi σε φυσικές διεργασίες, στους οποίους οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί αναδεικνύονται κυρίαρχοι, για την αποτύπωση και εξαγωγή της “πληροφορίας” και τον εντοπισμό των σημαντικών μεταβλητών σχεδιασμού της διεργασίας. Το δεύτερο στάδιο επιτρέπει την ενσωμάτωση των υποκειμενικών απαιτήσεων βέλτιστου σχεδιασμού μιας φυσικής διεργασίας παρέχοντας τα ασφαλή όρια στα οποία η μεθοδολογία Taguchi οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η μεθοδολογία Taguchi, με τη βοήθεια του παραμετρικού σχεδιασμού, έχει ως στόχο τη μείωση της μεταβλητότητας ενός προϊόντος ή ενός συστήματος. Η απόκλιση από τον επιθυμητό στόχο οφείλεται σε παράγοντες ελέγχου, οι οποίοι επηρεάζουν τη μέση τιμή και τη διασπορά του αποτελέσματος. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί ορθογώνιους σχηματισμούς (Orthogonal Arrays, OA) για την οργάνωση των παραγόντων ελέγχου και των επιπέδων διακύμανση αυτών που επηρεάζουν τη ποιότητα του προϊόντος. Για τη στατιστική ανάλυση χρησιμοποιούνται μέτρα απόδοσης, τα οποία συνδέονται με το λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N) <sup>[4]</sup>.

Τα βήματα που πρότείνει ο Taguchi για το σχεδιασμό των πειραμάτων και τη βελτίωση της ποιότητας ενός προϊόντος είναι: (1) Καθορισμός προβλήματος (2) Προσδιορισμός παραμέτρων ελέγχου/μεταβλητών σχεδιασμού (3) Σχεδιασμός πειραμάτων (4) Διεξαγωγή πειραμάτων (5) Ανάλυση αποτελεσμάτων και (6) Επαλήθευση αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος εντοπισμού των βέλτιστων μεταβλητών σχεδιασμού ενός συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 <sup>[5]</sup>.



Σχήμα 1. Αλγόριθμος εντοπισμού των βέλτιστων μεταβλητών σχεδιασμού ενός συστήματος.

Ένας σημαντικός περιορισμός της μεθοδολογίας Taguchi είναι ότι σχεδιάστηκε για προβλήματα ενός μόνο στόχου βελτιστοποίησης. Για την εφαρμογή σε προβλήματα περισσοτέρων του ενός στόχων, η μεθοδολογία Taguchi συνδυάζεται με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, οι οποίοι μετατρέπουν το πρόβλημα πολλών στόχων σε πρόβλημα ενός στόχου<sup>[6]</sup>. Στην παρούσα ανάλυση, χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι: η μέθοδος GRA (Grey Relational Analysis)<sup>[7]</sup> που βασίζεται στη θεωρία των γκρι συστημάτων και η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)<sup>[8]</sup> που βασίζεται στην έννοια της ευκλείδειας απόστασης. Και στις δύο μεθόδους απαιτείται ο υπολογισμός των συντελεστών στάθμισης (βαρών) που συνδέονται με τους στόχους βελτιστοποίησης. Ο καθορισμός των συντελεστών στάθμισης είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς επηρεάζει τη συνολική βαθμολογία και κατάταξη κάθε επιλογής. Από τις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού των συντελεστών στάθμισης των κριτηρίων/στόχων βελτιστοποίησης, στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται η μέθοδος της εντροπίας (Entropy method)<sup>[9]</sup> και η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA)<sup>[10]</sup>. Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης, οι συντελεστές στάθμισης υπολογίζονται με τη μέθοδο των ίσων βαρών<sup>[11]</sup>.

Η προτεινόμενη υπολογιστική προσέγγιση σχεδιασμού εφαρμόζεται στο φυσικό σύστημα της απόσταξης ισορροπίας, ένα σχετικά απλό σύστημα που έχει ως στόχο το διαχωρισμό ενός μίγματος ατμού/υγρού με επιθυμητά επίπεδα καθαρότητας. Η απλούστερη μορφή μιας τέτοιας διάταξης, περιλαμβάνει τη στήλη και το πληρωτικό της υλικό, τον αναβραστήρα και τον συμπυκνωτήρα. Η τροφοδοσία (F), σύστασης  $z_i$ , συνήθως προθερμαίνεται ώστε να φθάσει σε κατάσταση κορεσμένου υγρού. Ο αναβραστήρας είναι υπεύθυνος για την παραγωγή ατμού (V), μοριακής σύστασης  $y_i$ , ο οποίος ανεβαίνει μέσω της στήλης και έρχεται σε επαφή με το υγρό (L), σύστασης  $x_i$ , που προέρχεται από τον συμπυκνωτήρα. Ο ατμός καθώς ανέρχεται εμπλουτίζεται στα πτητικά συστατικά του μίγματος, ενώ τα λιγότερο πτητικά μεταφέρονται στην υγρή φάση<sup>[12]</sup>.

Η θερμοδυναμική υπαγορεύει ότι σε ένα δυαδικό μίγμα όταν ξεκινά ο βρασμός - σημείο φυσαλίδας - η θερμοκρασία δεν είναι συνάρτηση μόνο της πίεσης λειτουργίας, όπως στο βρασμό ενός συστατικού, αλλά και της σύστασης/αναλογίας του μίγματος. Όμοια ισχύουν και στο σημείο υγροποίησης του μίγματος - σημείο δρόσου. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, καθορίζονται οι παράμετροι ελέγχου / μεταβλητές σχεδιασμού και συγκεκριμένα η πίεση (P) και η θερμοκρασία (T) λειτουργίας της στήλης απόσταξης ανάλογα με τη σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα, για καθορισμένη πίεση λειτουργίας, η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών των θερμοκρασιών των σημείων δρόσου και φυσαλίδας του μίγματος, ορίζοντας ένα παράθυρο λειτουργίας, σύμφωνα με τη διφασική περιοχή<sup>[13]</sup>.

Το μίγμα που επιλέχθηκε στην παρούσα ανάλυση αποτελείται από κανονικό εξάνιο και κανονικό επτάνιο. Το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού στα συστήματα απόσταξης ισορροπίας εστιάζει συνήθως στην ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων κορυφής και πυθμένα. Στην παρούσα ανάλυση επιλέγονται δύο στόχοι βελτιστοποίησης: η παροχή (V) και η σύσταση ( $y_i$ ) του ρεύματος κορυφής. Το μαθηματικό πρότυπο για την προσομοίωση του συστήματος απόσταξης ισορροπίας, αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για την εφαρμογή της μεθόδου Taguchi στο σύστημα της απόσταξης ισορροπίας, για κάθε μία από τις τρεις μεταβλητές σχεδιασμού (σύσταση τροφοδοσίας, πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας) επιλέγονται τρία επίπεδα διακύμανσης, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Μεταβλητές σχεδιασμού με τα αντίστοιχα επίπεδα

	Σύσταση (-)	Πίεση (bar)	Μετασηματισμένη θερμοκρασία (-)
Επίπεδο 1	0,4	0,5	0,9807
Επίπεδο 2	0,5	1,0	1,0000
Επίπεδο 3	0,6	1,5	1,0193

Στο επόμενο βήμα της μεθοδολογίας, γίνεται η επιλογή των υπολογιστικών πειραμάτων σύμφωνα με τους ορθογώνιους πίνακες. Η παρούσα ανάλυση περιλαμβάνει τρεις μεταβλητές σχεδιασμού με τρία επίπεδα διακύμανσης για κάθε μεταβλητή που αντιστοιχεί στον ορθογώνιο πίνακα  $L_9$ . Η διεξαγωγή των υπολογιστικών πειραμάτων γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2.** Ορθογώνιος πίνακας  $L_9$

Υπολογιστικό Πείραμα	Σύσταση (-)	Πίεση (bar)	Μετασηματισμένη θερμοκρασία (-)
1	0,4	0,5	0,9807
2	0,4	1,0	1,0000
3	0,4	1,5	1,0193
4	0,5	0,5	1,0000
5	0,5	1,0	1,0193
6	0,5	1,5	0,9807
7	0,6	0,5	1,0193
8	0,6	1,0	0,9807
9	0,6	1,5	1,0000

Οι τιμές των συντελεστών στάθμισης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της εντροπίας είναι 0,83 για την παροχή και 0,17 για τη σύσταση του ρεύματος κορυφής. Παρόμοιοι συντελεστές στάθμισης υπολογίστηκαν και με την ανάλυση των κύριων συνιστωσών (PCA). Η επαλήθευση της λύσης γίνεται με βάση τη βέλτιστη λύση που προέκυψε από την πλήρη παραγοντική ανάλυση. Ο Πίνακας 3 περιλαμβάνει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού που προέκυψαν από τα δύο υβριδικά υπολογιστικά πλαίσια, καθώς και εκείνες που αντιστοιχούν στην πλήρη παραγοντική ανάλυση.

**Πίνακας 3.** Βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας στήλης απόσταξης

	TOPSIS - Taguchi	GRA - Taguchi	TOPSIS - Πλήρης	GRA - Πλήρης
Σύσταση (-)	0,4	0,4	0,4	0,4
Πίεση (bar)	1,5	1,5	1,5	1,5
Μετασηματισμένη θερμοκρασία (-)	1,0193	1,0193	1,0193	1,0193

Παρατηρούμε ότι οι δύο μεθοδολογίες προτείνουν την ίδια βέλτιστη λύση, η οποία αντιστοιχεί στο υπολογιστικό πείραμα 3 από τα 9 που περιλαμβάνονται στον ορθογώνιο πίνακα  $L_9$  (Πίνακας 2). Από την πλήρη παραγοντική ανάλυση, παρατηρούμε ότι και οι δύο μεθοδολογίες οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα και προτείνουν την ίδια βέλτιστη λύση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση διασποράς ANOVA<sup>[14]</sup> συνοψίζονται στους Πίνακες 4 και 5, για τις μεθοδολογίες TOPSIS-Taguchi και GRA-Taguchi, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται πως και στις δύο μεθοδολογίες, η θερμοκρασία αναδεικνύεται ως η μεταβλητή σχεδιασμού με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στον καθορισμό του αποτελέσματος.

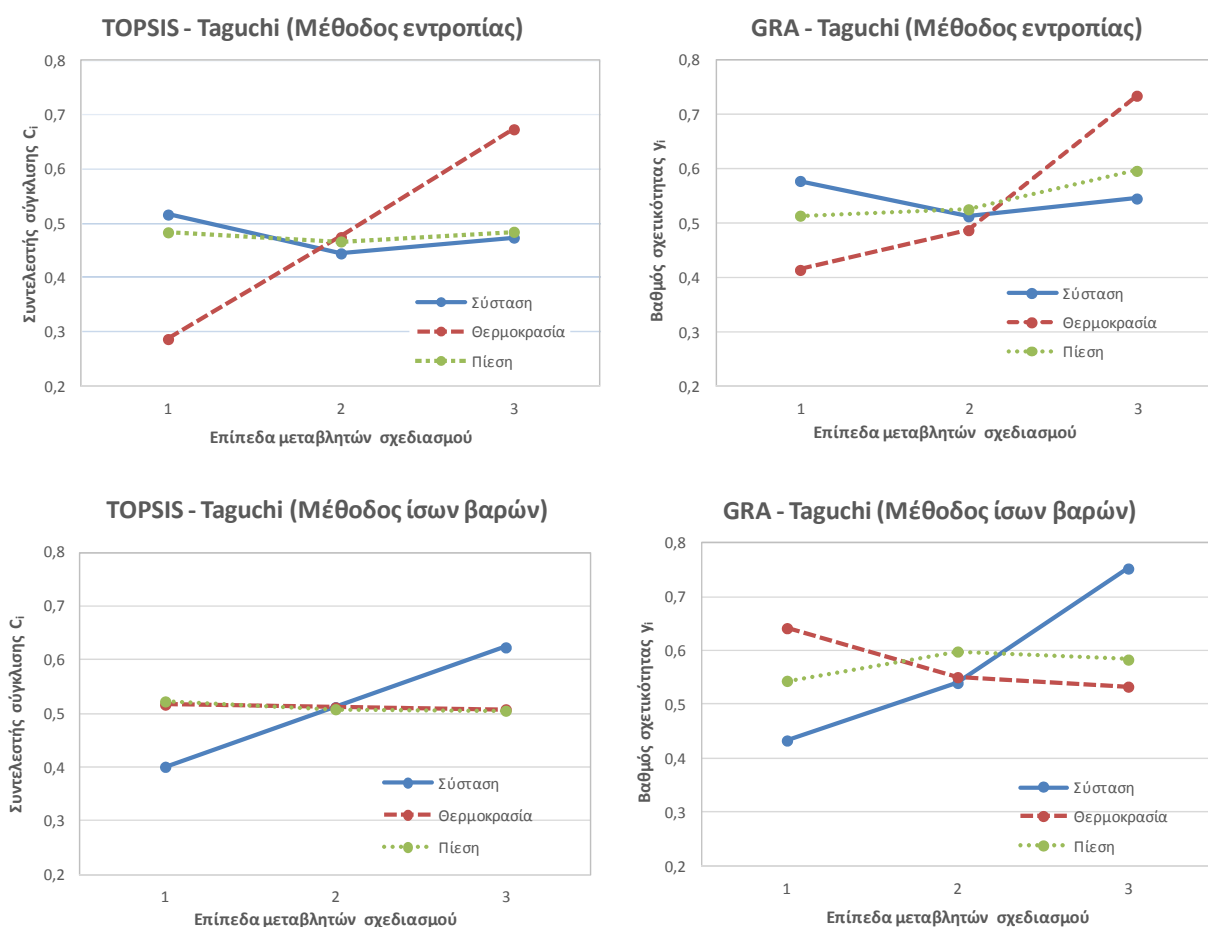
**Πίνακας 4.** Αποτελέσματα ανάλυσης διασποράς (ANOVA) για τη μέθοδο TOPSIS

	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο τετράγωνο	Λόγος διακυμάνσεων	P	%
Πίεση (atm)	2	0,0078	0,0039	0,0982	0,910	2,492
Παροχή (sccm)	2	0,0006	0,0003	0,0076	0,992	0,193
Θερμοκρασία (°C)	2	0,2249	0,1125	2,8345	0,260	71,93
Σφάλμα	2	0,0794	0,0397			
Συνολικά	8	0,3127				

**Πίνακας 5.** Αποτελέσματα ανάλυσης διασποράς (ANOVA) για τη μέθοδο GRA

	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο τετράγωνο	Λόγος διακυμάνσεων	P	%
Πίεση (atm)	2	0,00637	0,00032	0,0720	0,939	2,3
Παροχή (sccm)	2	0,01198	0,0060	0,1352	0,8809	4,3
Θερμοκρασία (°C)	2	0,16951	0,0848	1,9125	0,3433	61,3
Σφάλμα	2	0,08863	0,0443			
Συνολικά	8	0,27650				

Στη συνέχεια, η ανάλυση επαναλαμβάνεται και για τις δύο μεθόδους, για συντελεστές στάθμισης που αντιστοιχούν στη μέθοδο των ίσων βαρών, δηλαδή για τιμή συντελεστή των δύο στόχων ίση με 0,5. Στο Σχήμα 2, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συγκρίνονται με εκείνα που προκύπτουν από τη μέθοδο της εντροπίας. Όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα που προτείνουν οι δύο μέθοδοι διαφοροποιούνται σημαντικά, εξαιτίας της ενίσχυσης του συντελεστή στάθμισης της σύστασης του προϊόντος κορυφής στη μέθοδο των ίσων βαρών. Από την πλήρη παραγοντική ανάλυση διαπιστώνεται πως οι δύο μεθοδολογίες προτείνουν διαφορετική βέλτιστη λύση. Επιπλέον, μόνο η μέθοδος TOPSIS – Taguchi αποδεικνύεται αποτελεσματική ενώ η μέθοδος GRA – Taguchi εντοπίζει βέλτιστη λύση διαφορετική από εκείνη που προκύπτει από την πλήρη παραγοντική ανάλυση. Από την ανάλυση διακύμανσης ANOVA και οι δύο μεθοδολογίες προτείνουν ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στον καθορισμό του αποτελέσματος έχει η σύσταση.

**Σχήμα 2.** Επίδραση της μεθόδου υπολογισμού των συντελεστών στάθμισης στη μέση τιμή του συντελεστή σύγκλισης (TOPSIS-Taguchi) και του βαθμού σχετικότητας (GRA-Taguchi).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με στόχο το βέλτιστο σχεδιασμό διεργασιών και συστημάτων, αναπτύχθηκε ένα υβριδικό υπολογιστικό πλαίσιο το οποίο συνδυάζει τη μεθοδολογία Taguchi με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης και απλοποιημένα μαθηματικά πρότυπα φυσικών διεργασιών τύπου “black box”. Η επιλογή της απόσταξης ισορροπίας εξυπηρέτησε την απαίτηση για μικρούς χρόνους προσομοίωσης της διεργασίας, προκειμένου να διερευνηθούν διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης στα επιμέρους στάδια της υβριδικής μεθοδολογικής προσέγγισης. Στο σχεδιασμό των υπολογιστικών πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταβλητές σχεδιασμού με τρία επίπεδα διακύμανσης για κάθε μία από αυτές. Οι δύο πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης απόφασης που αξιολογήθηκαν, η μέθοδος GRA που βασίζεται στη θεωρία των γκρι συστημάτων και η μέθοδος TOPSIS που βασίζεται στην έννοια της ευκλείδειας απόστασης, οδήγησαν στην ίδια βέλτιστη λύση, η οποία επαληθεύτηκε και από την πλήρη παραγοντική ανάλυση.

Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης, η διερεύνηση τριών διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των συντελεστών στάθμισης ανέδειξε δυνατότητες και περιορισμούς, που συμβάλλουν καθοριστικά στη διαδικασία ανάλυσης και αξιολόγησης των επιλογών καθώς και στα τελικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, τόσο η μέθοδος της εντροπίας όσο και η ανάλυση κύριων συνιστωσών έδειξαν ότι η παροχή του ρεύματος κορυφής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με τη σύστασή του. Τα αποτελέσματα διαφοροποιήθηκαν σημαντικά με τη μέθοδο των ίσων βαρών αφού μόνο η μέθοδος TOPSIS – Taguchi εντόπισε βέλτιστη λύση η οποία επαληθεύτηκε από την πλήρη παραγοντική ανάλυση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. Taguchi, R. Jugulum. The Mahalanobis-Taguchi strategy: A pattern technology system. John Wiley & Sons (2002).
- [2] G. Taguchi, R. Jugulum, S. Taguchi. Computer-based robust engineering: essentials for DFSS. ASQ Quality Press (2004).
- [3] N.C. Fei, N.M. Mehat, S. Kamaruddin. ISRN Industrial Engineering (2013), 1-11].
- [4] G. Taguchi, E.A. Elsayed, T. Hsiang. Quality Engineering in Production Systems, McGraw-Hill Book Company (1989).
- [5] R.K. Roy. A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers (2010).
- [6] A. Goicoechea, R.D. Hansen, L. Duckstein. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications (1982).
- [7] J.J. Deng. J. Grey System, 1(2) (1989) 103-117.
- [8] C.L. Hwang, K. Yoon. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York, Springer-Verlag (1981).
- [9] R.M. Gray. Entropy and Information Theory (2009).
- [10] I.T. Jolliffe. Principal Component Analysis (Springer Series in Statistics) 2nd Edition (2002).
- [11] K. Raman, S.B. Paramjit, S. Sehijpal, Journal of Cleaner Production 164 (2017) 45-57.
- [12] W. McCabe, J. Smith, P. Harriott. Unit Operations of Chemical Engineers, 6th Edition (2015) 589-560, 717-720].
- [13] D.P. Tassios. Applied Chemical Engineering Thermodynamics 26-28, (2001) 439-455.
- [14] D.C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments (5th ed.) (2002).