

ΣΥΖΕΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ TAGUCHI ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΠΟ ΑΤΜΟ**Χ.Γ. Τσάκωνας^{1,2}, Θ.Χ. Ξενίδου^{3,*}, Ν.Χ. Μαρκάτος³**¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα²Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) / Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΕΧΜΗ), Πάτρα, Ελλάδα³Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα(*thexen@chemeng.ntua.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι διεργασίες Χημικής Απόθεσης από Ατμό (ΧΑΑ) χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υμενίων σε υποστρώματα μέσω χημικών αντιδράσεων υπό την επίδραση της μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας. Η ποιότητα των υμενίων, με σημαντικές εφαρμογές στη μικρο- και νανοτεχνολογία, καθορίζεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταφοράς-αντίδρασης, οι οποίες εξαρτώνται από το γεωμετρικό σχεδιασμό του αντιδραστήρα και τις λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας. Αν και η ΧΑΑ είναι ουσιαστικά μια χημική διεργασία, το βασικό ζητούμενο στο σχεδιασμό των αντιδραστήρων είναι η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής και θερμικής συμπεριφοράς έτσι ώστε η απόθεση να πραγματοποιείται επιλεκτικά στην επιφάνεια του υποστρώματος με μεγάλη χωρική ομοιομορφία.

Η σύγχρονη τάση για την ανάπτυξη υμενίων με αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας απαιτεί σημαντικό χρόνο και κόστος για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας του αντιδραστήρα. Έτσι, για το σχεδιασμό διεργασιών ΧΑΑ απαιτούνται υβριδικά υπολογιστικά πλαίσια που βασίζονται σε αυστηρά μαθηματικά πρότυπα και ευέλικτους αλγόριθμους σύζευξης. Με απώτερο στόχο τη μείωση του κόστους, απαιτείται ο σχεδιασμός μιας διεργασίας ΧΑΑ που θα οδηγεί στον προσδιορισμό του βέλτιστου επιπέδου κάθε μεταβλητής για την αποδοτικότερη λειτουργία του αντιδραστήρα. Στην παρούσα εργασία, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων μέσω της φιλοσοφίας Taguchi^[1], η οποία εφαρμόζεται με επιτυχία σε προβλήματα ενός στόχου. Ωστόσο, οι στόχοι που προκύπτουν από τις προδιαγραφές ποιότητας στις διεργασίες ΧΑΑ είναι περισσότεροι τους ενός και συνήθως αντικρουόμενοι: υψηλός ρυθμός απόθεσης και μικρή ανομοιομορφία πάχους των παραγόμενων υμενίων. Ο περιορισμός του ενός στόχου της μεθόδου Taguchi αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με την υβριδική χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης, οι οποίες μετατρέπουν το πρόβλημα πολλών στόχων σε πρόβλημα ενός στόχου. Οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης που διερευνώνται είναι η μέθοδος GRA^[2] που βασίζεται στη θεωρία των γκρι συστημάτων και η μέθοδος TOPSIS^[3] που βασίζεται στην έννοια της ευκλείδειας απόστασης.

Το υβριδικό υπολογιστικό πλαίσιο εφαρμόζεται στον πολυκριτηριακό σχεδιασμό ενός αντιδραστήρα ΧΑΑ για την παραγωγή υμενίων βολφραμίου. Για την υπολογιστική ανάλυση της διεργασίας χρησιμοποιείται το μοντέλο ΧΑΑ^[4] που έχει αναπτυχθεί με χρήση του λογισμικού υπολογιστικής μηχανικής Phoenics^[5].

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας που προτείνονται, με τη μέθοδο GRA και τη χρήση του ορθογώνιου πίνακα, ταυτίζονται με αυτές της πλήρους παραγοντικής ανάλυσης. Αντίθετα, με τη μέθοδο TOPSIS τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας τόσο από την εντροπία, όσο και από την ανάλυση κύριων συνιστωσών, έδειξε ότι η ανομοιομορφία του πάχους του παραγόμενου υμενίου εμφανίζει μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας σε σχέση με τον αντικρουόμενο στόχο, το ρυθμό απόθεσης του υμενίου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κλειδί για την ανταγωνιστική θέση μιας επιχείρησης και την υπεροχή της στην αγορά είναι η έγκαιρη εισαγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας στις κατάλληλες τιμές. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η κατάκτηση της μέγιστης δυνατής αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας της έρευνας στην ανάπτυξη διεργασιών. Τόσο η επίτευξη της ποιότητας, όσο και η βελτίωσή της δύσκολα μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς τη χρήση στατιστικών μεθόδων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση πειραμάτων περιέχει τις απαραίτητες στατιστικές τεχνικές οι οποίες βοηθούν στην εκτίμηση της επίδρασης που έχουν οι παράγοντες ελέγχου (μεταβλητές σχεδιασμού) στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος και, συνεπώς, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό της διεργασίας παραγωγής.

Μια μεθοδολογία που κάνει χρήση στατιστικής και εφαρμόζεται σε παρά πολλές εφαρμογές με επιτυχία, αναπτύχθηκε από έναν Ιάπωνα μηχανικό, τον Genichi Taguchi^[6]. Ο Taguchi ανέπτυξε μια μέθοδο για το σχεδιασμό πειραμάτων, η οποία βασίστηκε στον τρόπο με τον οποίο οι διάφοροι παράγοντες ελέγχου επηρεάζουν τη μέση τιμή και τη διασπορά του υπό εξέταση ποιοτικού χαρακτηριστικού του προϊόντος. Η μέθοδος Taguchi εξασφαλίζει ιδιαίτερως μειωμένη μεταβλητότητα στο πείραμα με το βέλτιστο συνδυασμό των παραγόντων ελέγχου. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων που προτάθηκε συνίσταται στη χρήση «Ορθογώνιων Διανυσμάτων» ("Orthogonal Arrays", OA) για την οργάνωση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διεργασία καθώς και των επιπέδων διακύμανσης αυτών. Τα «Ορθογώνια Διανύσματα» δίνουν τη δυνατότητα των ελάχιστων απαιτούμενων πειραμάτων για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας μιας διεργασίας ή ενός προϊόντος. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ως μέθοδος βελτιστοποίησης με μικρό υπολογιστικό κόστος.

Η μεθοδολογία που πρότείνει ο Taguchi για το σχεδιασμό πειραμάτων, με σκοπό τη συνεχή βελτίωση της ποιότητας ενός προϊόντος ή μίας διεργασίας, περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια: 1)Καθορισμό προβλήματος, 2)Προσδιορισμό των συνθηκών πειραματισμού και των κρίσιμων μεταβλητών που σχετίζονται με την ποιότητα του προϊόντος ή της διεργασίας, 3)Σχεδιασμό Πειραμάτων, 4)Διεξαγωγή Πειραμάτων, 5)Ανάλυση αποτελεσμάτων και 6)Επαλήθευση αποτελέσματος.

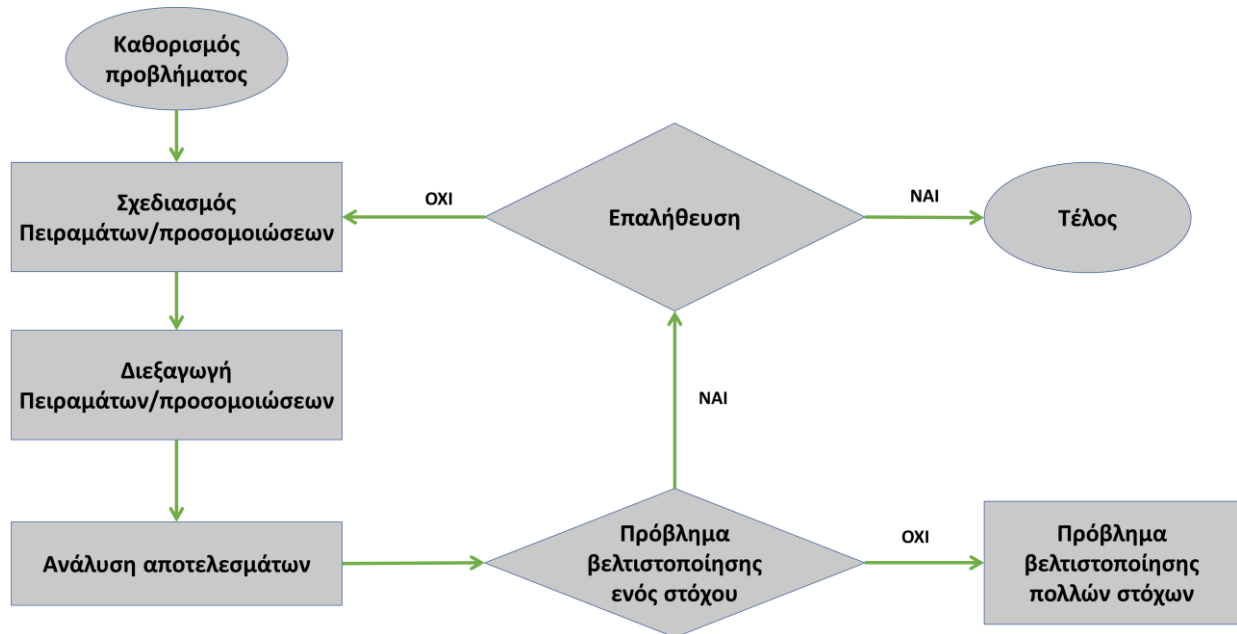
Χρησιμοποιώντας το λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N) ως δείκτη απόδοσης, η προσέγγιση του Taguchi μπορεί να προσφέρει κατάλληλες πληροφορίες για κάθε χαρακτηριστικό ποιότητας που πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Ωστόσο, αδυνατεί να προσφέρει μια συγκεκριμένη και επαρκή μαθηματική λύση για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση περισσότερων του ενός χαρακτηριστικών ενός προϊόντος ή μίας διεργασίας. Οι διαθέσιμες επιλογές σε ένα τέτοιο πρόβλημα παρουσιάζουν άριστη επίδοση μόνο ως προς έναν ή περισσότερους, αλλά ποτέ ως προς όλους τους στόχους ταυτόχρονα. Η επιλογή που θα ικανοποιούσε μια τέτοια συνθήκη θα ήταν η άριστη και δε θα υπήρχε πρόβλημα απόφασης. Επιπλέον, η ικανοποίηση των στόχων αυτών δεν μπορεί να είναι πλήρης. Είναι αναγκαίος λοιπόν ένας συμβιβασμός μεταξύ των αλληλοσυγκρουόμενων στόχων. Πρόκειται, επομένως, για πολυκριτηριακά προβλήματα καθώς τα διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης που θεσπίζονται για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων είναι συχνά αλληλοσυγκρουόμενα^[7]. Συγχρόνως, για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποδεκτό αποτέλεσμα γίνεται ένας συμβιβασμός των πολλαπλών στόχων^[8].

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε διεργασίες ΧΑΑ οι στόχοι είναι περισσότεροι τους ενός π.χ. υψηλός ρυθμός απόθεσης και μικρή ανομοιομορφία των παραγόμενων υμενίων. Ο περιορισμός του ενός στόχου της μεθόδου Taguchi αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με την υβριδική χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης, οι οποίες μετατρέπουν ένα πρόβλημα πολλών στόχων σε πρόβλημα ενός στόχου. Οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης που διερευνώνται είναι η μέθοδος GRA^[2] που βασίζεται στη θεωρία των γκρι συστημάτων και η μέθοδος TOPSIS^[3] που βασίζεται στην έννοια της ευκλείδειας

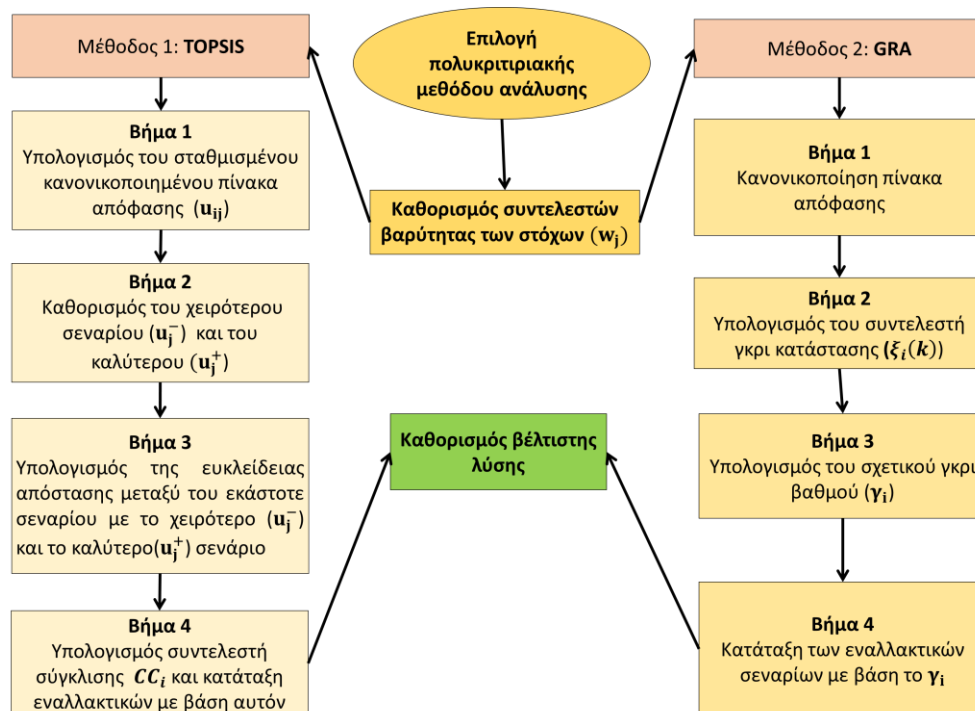
απόστασης. Ειδικότερα, εφαρμόζονται στο σχεδιασμό ενός αντιδραστήρα για την παραγωγή υμενίων βολφραμίου από εξαφθοριούχο βολφράμιο. Για την υπολογιστική ανάλυση της διεργασίας ΧΑΑ χρησιμοποιείται το μοντέλο ΧΑΑ που έχει αναπτυχθεί με χρήση του κώδικα υπολογιστικής μηχανικής Phoenics^[4-5].

Ο αλγόριθμος εύρεσης των βέλτιστων μεταβλητών ελέγχου μίας διεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1^[9].



Σχήμα 1. Αλγόριθμος εύρεσης των βέλτιστων μεταβλητών ελέγχου μίας διεργασίας.

Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται τα βήματα των δύο πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης (TOPSIS, GRA) που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2. Βήματα των δύο πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης (TOPSIS, GRA).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τις διαθέσιμες μεταβλητές λειτουργίας του αντιδραστήρα χημικής απόθεσης από ατμό, στην παρούσα ανάλυση επιλέγονται τρεις παράμετροι ελέγχου: η πίεση λειτουργίας του αντιδραστήρα, η παροχή του πρόδρομου συστατικού και η θερμοκρασία απόθεσης. Τα επίπεδα που επιλέγονται είναι τρία για κάθε μεταβλητή και παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μεταβλητές ελέγχου με τα αντίστοιχα επίπεδα

	Πίεση (atm)	Παροχή (sccm)	Θερμοκρασία (°C)
Επίπεδο 1	0,1	100	340
Επίπεδο 2	1	200	440
Επίπεδο 3	2	300	540

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των προκαθορισμένων σεναρίων σύμφωνα με τους ορθογώνιους πίνακες. Η εξεταζόμενη περίπτωση περιλαμβάνει 3 μεταβλητές ελέγχου με 3 επίπεδα διακύμανσης για κάθε μεταβλητή που αντιστοιχεί στον L_9 ορθογώνιο Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Ορθογώνιος πίνακας L_9

Υπολογιστικό Πείραμα	Πίεση (atm)	Παροχή (sccm)	Θερμοκρασία (°C)
1	0,1	100	340
2	0,1	200	440
3	0,1	300	540
4	1	100	440
5	1	200	540
6	1	300	340
7	2	100	540
8	2	200	340
9	2	300	440

Ακολουθεί η διεξαγωγή των υπολογιστικών πειραμάτων που περιγράφονται στον Πίνακα 2. Στα αποτελέσματα των υπολογιστικών πειραμάτων εφαρμόζεται η μεθοδολογία Taguchi σε συνδυασμό με τις μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη μετατροπή του προβλήματος πολλών στόχων σε πρόβλημα ενός στόχου. Οι δύο μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται είναι η Grey Relational Analysis (GRA) και η TOPSIS. Και στις δύο μεθοδολογίες απαιτείται ο υπολογισμός συντελεστών στάθμισης που αναφέρονται στους δύο στόχους βελτιστοποίησης. Από τις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού των συντελεστών στάθμισης, επιλέγεται η μέθοδος της εντροπίας (Entropy method)^[10] ή η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA)^[11]. Η πληροφορία λαμβάνεται από τα προκαθορισμένα υπολογιστικά πειράματα. Ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας με τη μέθοδο της εντροπίας κατέδειξε ότι ο συντελεστής βαρύτητας είναι 0,2 για το ρυθμό απόθεσης και 0,8 για την ανομοιομορφία. Παρόμοιοι συντελεστές υπολογίστηκαν και με τη μέθοδο της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών (PCA). Ακολουθώντας τα βήματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 2 έγινε εκτίμηση της βέλτιστης λύσης για κάθε περίπτωση.

Η επαλήθευση της λύσης που προτείνεται στη μεθοδολογία του Σχήματος 1 γίνεται με βάση τη βέλτιστη λύση που προέκυψε από την πλήρη παραγοντική ανάλυση. Να σημειωθεί ότι δεν είναι πάντα εφικτό να επαληθευτεί η λύση που προτείνεται από τις στατιστικές μεθόδους με την πλήρη παραγοντική ανάλυση. Ο Πίνακας 3 περιλαμβάνει τις βέλτιστες παραμέτρους ελέγχου που προέκυψαν από τα δύο υβριδικά υπολογιστικά πλαίσια, καθώς και εκείνες που αντιστοιχούν στην πλήρη παραγοντική ανάλυση.

Πίνακας 3. Βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας αντιδραστήρα ανά μέθοδο

	TOPSIS - Taguchi	GRA - Taguchi	TOPSIS - Πλήρης	GRA - Πλήρης
Πίεση (atm)	0,1	0,1	0,1	0,1
Παροχή (sccm)	200	200	200	200
Θερμοκρασία (°C)	340	440	440	440

Από την πλήρη παραγοντική ανάλυση παρατηρούμε ότι και οι δύο μεθοδολογίες οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα και προτείνουν την ίδια βέλτιστη λύση. Από τη μεθοδολογία Taguchi-GRA ως βέλτιστη λύση προτείνεται η λύση που προτάθηκε και από την πλήρη παραγοντική ανάλυση ενώ με την μεθοδολογία Taguchi-TOPSIS προτείνεται διαφορετική βέλτιστη λύση. Δηλαδή, η μεθοδολογία GRA εντοπίζει τη βέλτιστη λύση ενώ η TOPSIS αδυνατεί να την εντοπίσει.

Όταν ο αριθμός των δυνατών προσομοιώσεων είναι απαγορευτικά μεγάλος για να εκτελεστεί η πλήρης παραγοντική ανάλυση τότε ελέγχεται εάν ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με μία προσομοίωση αναφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση διασποράς (ANOVA)^[12] για την εκτίμηση της μεταβλητής που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στο αποτέλεσμα.

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

	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο τετράγωνο	Λόγος διακυμάνσεων	P	%
Πίεση (atm)	2	0,1228	0,0614	1,4309	0,4113	35,77
Παροχή (sccm)	2	0,0477	0,0239	0,5563	0,6425	13,90
Θερμοκρασία (°C)	2	0,0869	0,0434	1,0126	0,4968	25,32
Σφάλμα	2	0,0858	0,0429			
Συνολικά	8	0,3434				

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

	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο τετράγωνο	Λόγος διακυμάνσεων	P	%
Πίεση (atm)	2	0,0607	0,0304	1,7903	0,3584	44,76
Παροχή (sccm)	2	0,0280	0,0140	0,8263	0,5477	20,66
Θερμοκρασία (°C)	2	0,0130	0,0065	0,3834	0,7228	9,59
Σφάλμα	2	0,0339	0,01696			
Συνολικά	8	0,1357				

Από την ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) και οι δυο μεθοδολογίες προτείνουν ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο καθορισμό του αποτελέσματος έχει η πίεση λειτουργίας του αντιδραστήρα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογιών που βασίζονται στη φιλοσοφία Taguchi και σε πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης απόφασης με στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας ενός αντιδραστήρα Χημικής Απόθεσης από Ατμό. Η εφαρμογή δύο πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης, της μεθόδου Grey Relational Analysis (GRA), που βασίζεται στη θεωρία γκριζών συστημάτων (Grey Systems Theory) και της μεθόδου Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), που βασίζεται στην έννοια της ευκλείδειας απόστασης, ανέδειξε ιδιαιτερότητες και περιορισμούς, που επηρεάζουν καθοριστικά τα αποτελέσματα καθώς και τη διαδικασία ανάλυσης και αξιολόγησης.

Διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή των εξεταζόμενων μεθοδολογικών πλαισίων στη διεργασία ΧΑΑ δεν οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, οι συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας που προτείνονται με τη μέθοδο GRA και τη χρήση του ορθογώνιου πίνακα ταυτίζονται με αυτές της πλήρους παραγοντικής ανάλυσης, ενώ με τη μέθοδο TOPSIS τα αποτελέσματα παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις. Με εφαρμογή της μεθόδου GRA και χρήση του ορθογώνιου πίνακα κατά Taguchi, εντοπίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων, μειώνοντας στο 1/3 το υπολογιστικό κόστος σε σχέση με την πλήρη παραγοντική ανάλυση.

Ο υπολογισμός της εντροπίας της πληροφορίας και η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA) ενίσχυσαν τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας που παίζουν σημαντικό ρόλο στη χρήση των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης. Τόσο ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας από την εντροπία της πληροφορίας, όσο και από την ανάλυση κύριων συνιστωσών, ανέδειξε ότι η ανομοιομορφία του πάχους του παραγόμενου υμενίου έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με το ρυθμό απόθεσης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με τις απαιτήσεις της σύγχρονης μικροηλεκτρονικής για παραγωγή υμενίων υψηλής ομοιομορφίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Taguchi G, Elsayed EA, Hsiang T. (1989). *Quality Engineering in Production Systems*, McGraw-Hill Book Company.
- [2] Deng J. J. *Grey System*, (1989). 1(2): 103-117.
- [3] Hwang, CL, Yoon K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.
- [4] Xenidou TC, Boudouvis AG, Tsamakos DM, Markatos NC. (2004). *J. Electrochem. Soc.* 151(12): C757-C764.
- [5] www.cham.co.uk
- [6] Fei NC et al., (2013). *Practical Applications of Taguchi Method for Optimization of Processing Parameters for Plastic Injection Moulding: A Retrospective Review*.
- [7] Simon A. Herbert, (1957). *Models of Man: Social and Rational*, John Wiley and Sons, New York.
- [8] Goicoechea A., Hansen R. Don, Duckstein L. (1982). *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*.
- [9] Roy R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers.
- [10] Gray, Robert M. (2009). *Entropy and Information Theory*.
- [11] Jolliffe I.T. (2002). *Principal Component Analysis (Springer Series in Statistics) 2nd Edition*.
- [12] Montgomery, Douglas C. (2001). *Design and Analysis of Experiments (5th ed.)*.