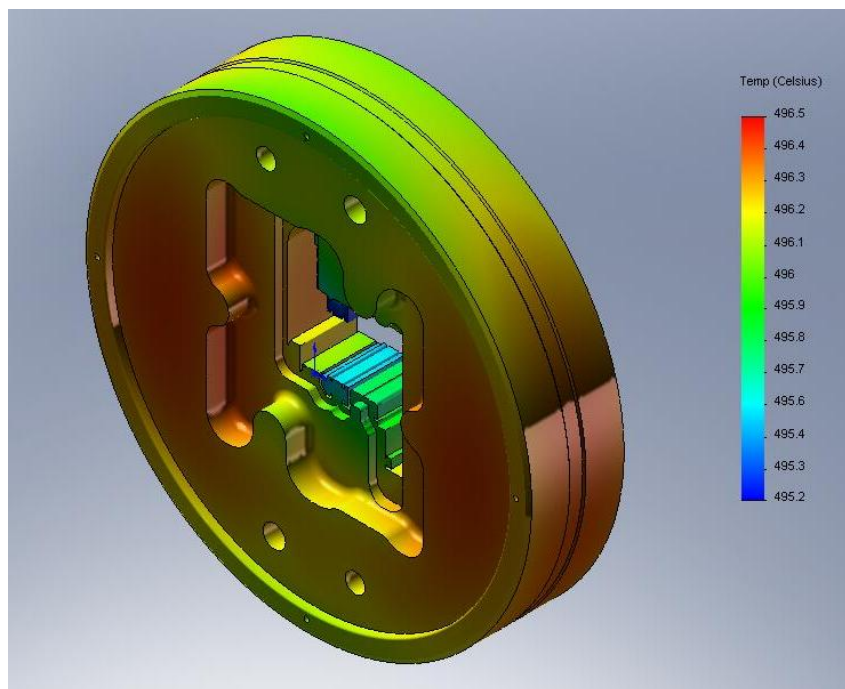




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βελτιστοποίηση της απόψυξης κατά τη θερμική κατεργασία
μήτρας διέλασης από χάλυβα.



Σπουδαστής : Παπαγεωργίου Δημήτριος (Α.Μ. : 02103670)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Γ. Χ ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ

Στον πατέρα που έφυγε νωρίς.

Θέμα : « Βελτιστοποίηση της απόψυξης κατά τη θερμική κατεργασία μήτρας διέλασης από χάλυβα».

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την αναζήτηση των ιδανικότερων συνθηκών, από πλευράς απόψυξης, μήτρας διέλασεως αλουμινίου κατά τη θερμική της κατεργασία , με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή σκληρότητας σε όλη τη μάζα της.

Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταλλουργική συμπεριφορά του υλικού κατασκευής της μήτρας κατά την θερμική κατεργασία σκλήρυνσης του, αναζητήθηκε η συνάρτηση μεταβολής του συντελεστή συναγωγής του μέσου που θα εξασφαλίσει συγκεκριμένο ρυθμό απόψυξης και κατ' επέκταση συγκεκριμένη τιμή αποκτηθείσας σκληρότητας. Η πολύπλοκη μορφή της μήτρας δημιουργεί εν γένει ανομοιογένεια στο ρυθμό ψύξης από σημείο σε σημείο.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος έγινε με κατάλληλη επιλογή του είδους του σχεδιασμού πειραμάτων (D-optimal design) για την προσομοίωση της απόψυξης, υπακούοντας σε συγκεκριμένο κριτήριο (D-optimality). Εκτελέστηκε το σύνολο των προβλεπόμενων δοκιμών και προσεγγίστηκε η πραγματική επιφάνεια απόκρισης του ρυθμού απόψυξης σε σχέση με το συντελεστή συναγωγής με ένα τροποποιημένο πολώνυμο δευτέρας τάξεως , εφαρμόζοντας την μεθοδολογία εύρεσης επιφανειών απόκρισης(RSM).

Επιλέχθηκαν τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία εσωτερικά και εξωτερικά της μήτρας και εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης του συντελεστή συναγωγής. Μία στοχαστική , με την μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων και μία ντετερμινιστική μέσω ενός μη-γραμμικού αλγορίθμου με περιορισμούς. Με τον τρόπο αυτό αποτιμάται η λειτουργικότητα των δύο μεθόδων σε προβλήματα αυτού του είδους αλλά και δίδεται λύση στο πρόβλημα που τέθηκε αρχικά.

Λέξεις-κλειδιά: μήτρα διέλασης , σκληρότητα , συντελεστής συναγωγής , D-optimal σχεδιασμός πειραμάτων , D-optimality κριτήριο , μοντέλο επιφανειών απόκρισης , βελτιστοποίηση , γενετικός αλγόριθμος, ντετερμινιστική μέθοδος.

ABSTRACT

Title: “Quenching optimization of an extrusion die made of tool steel”.

The main scope of the present thesis referred to the quenching rate optimization of an aluminum extrusion die during quenching. The objective is to achieve the best level of hardness homogeneity through the part.

Taking into consideration the heat treatment properties of the tool steel used for the construction of the die, extensive searching was made to find the proper function describing the transient nature of the total convection factor during quenching. The temperature-dependent convection factor form accounts for the die hardness which will undergo after hardening. Die's complicated shape provoke an uneven cooling rate through the workpiece.

Trying to correlate the total convection factor with cooling rate ,experiments were designed appropriately (D-optimal design) abiding by specific criterion (D-optimality).All of the trial runs imposed by D-optimality criterion were executed. Following the response surface methodology, the real response surface invoking convection factor and cooling rate , was approximated by a modified second-order polynomial.

Four distinct points of the die where chosen trying to cover the widest range of cooling rates (surface, core, cavities) due to part complicity. Two kinds of optimization methods were used. A stochastic method based on evolutionary algorithms and a deterministic via non-linear algorithm with constrains .The effectiveness of these methods and the solution of the problem stated above were the main results exerted by the thesis.

Key-words: extrusion die, hardness , convection factor , D-optimal design of experiments, D-optimality criterion, response surface model (RSM) ,optimization , evolutionary algorithm , determinist method.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελίδα
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	11
2.1Θερμικές κατεργασίες χαλύβων	11
2.1.1.Γενικά στοιχεία	11
2.1.2.Στάδια απόψυξης	12
2.1.3.Περιγραφή φαινομένου	17
2.1.4.Εξέλιξη φαινομένου	19
2.1.5Μέσα απόψυξης	21
2.1.6.Παρατηρήσεις	27
2.2.Διέλαση	28
2.2.1Γενικά στοιχεία	28
2.2.2.Είδη διέλασης	29
2.2.3.Υλικά κατασκευής μητρών και εξαρτημάτων διέλασης	33
2.2.4.Επιλογή υλικού για μήτρες διέλασης	37

2.3.Βελτιστοποίηση	39
2.3.1.Προβλήματα βελτιστοποίησης	40
2.3.2.Κατηγορίες (μέθοδοι) βελτιστοποίησης	41
2.3.3.Εξελκτικοί Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	46
2.4.Η επιστήμη του Σχεδιασμού των Πειραμάτων	56
2.4.1.Εισαγωγή	56
2.4.2.Παράμετροι σχεδιασμού και Αποκρίσεις	57
2.4.3.Βασικές Αρχές του Σ.τ Π.	58
2.4.4.Σχήματα Μοντέλων	60
2.4.5.Στόχοι του Σχεδιασμού των Πειραμάτων	61
2.4.6.Είδη Σχεδιασμού Πειραμάτων	63
2.4.7.Σχεδιασμοί Καταλληλότητας με βάση την ορίζουσα (D-optimal Designs)	65
2.5.Μεθοδολογία εύρεσης των Μοντέλων Επιφανειών Απόκρισης (M.E.A.)	76
2.5.1.Μοντέλα απόκρισης	79
2.5.2.Διαδικασία-εφαρμογή της μεθοδολογίας των M.E.A.	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	86
3.1.Επιλογή τεμαχίου	86
3.2.Επιλογή υλικού	88

3.3.Προσομοίωση απόψυξης	90
3.4.Περιγραφή του προβλήματος	91
3.4.1.Μεταφορά θερμότητας	91
3.4.2.Συναγωγή	91
3.4.3.Ακτινοβολία	92
3.4.4.Οριακές συνθήκες	93
3.4.5.Λανθάνουσα θερμότητα κατά τους μετασχηματισμούς φάσεων	93
3.5.Μεθοδολογία εύρεσης των Μ.Ε.Α.	95
3.5.1.Προκαταρκτικό στάδιο-Καθορισμος παραμέτρων σχεδιασμού ,κατάλληλος Σ.τ.Π.	96
3.5.2.Πρώτη φάση-Αναζήτηση συνόλου τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού	101
3.5.3.Δευτερη φάση-Αναζήτηση των Μ.Ε.Α.	106
3.6.Διαμόρφωση προβλημάτων βελτιστοποίησης	109
3.6.1.Βελτιστοποίηση μέσω ντετερμινιστικής μεθόδου	109
3.6.2.Βελτιστοποίηση μέσω στοχαστικής μεθόδου	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	112
4.1.Αποτελέσματα ντετερμινιστικής μεθόδου (Stat-Ease)	112
4.2.Αποτελέσματα εξελικτικής μεθόδου	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	116
-------------------------------	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΕΙΣ

6.ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΕΙΣ	118
-----------------------	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	119
--	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	129
--	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	155
--	------------

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σύγχρονες απαιτήσεις για απόδοση και αξιοπιστία των υλικών αυξάνεται με την εξέλιξη και τα επιτεύγματα της επιστήμης και της τεχνολογίας. Η ταχεία απόψυξη (quenching) είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εφαρμοζόμενη στον τομέα των κατασκευών για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εκάστοτε υλικού και κυρίως των χαλύβων. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή αποτελεί έναν από τους βασικότερους λόγους αστοχίας τεμαχίων και εξαρτημάτων τα οποία θα πρέπει να επανεπεξεργαστούν ή να ξανακατασκευαστούν. Ως πρόβλημα, επηρεάζει τους σχεδιαστές και τους τεχνικούς στον τομέα των κατασκευών και των εργαλείων όσον αφορά τη διαστασιακή παραμόρφωσή τους αλλά και τις τάσεις που εγκλωβίζονται σ' αυτά με το πέρας των θερμικών κατεργασιών.

Αν και η αρχική θερμοκρασία του τεμαχίου προς απόψυξη είναι ομοιογενής, η θερμοκρασιακή διαφορά σε διαφορετικές περιοχές του κατά την απόψυξη μπορεί να είναι πολύ μεγάλη εξαιτίας π.χ. της πολυπλοκότητας της μορφής του. Επιπλέον, τα ποσοστά της κάθε δημιουργούμενης φάσης και οι θερμοφυσικές ιδιότητες τους, όπως οι συντελεστές συναλλαγής θερμότητας, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, η ειδική θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία θα διαφέρουν ανάλογα με τον χρόνο απόψυξης. Εφόσον η επιλογή των υλικών αλλά και οι παράμετροι ρύθμισης για την εκτέλεση μιας διαδικασίας έχουν σημαντική επίδραση στα επόμενα στάδια μίας κατασκευής, απαιτούνται καλύτεροι τρόποι ελέγχου που όμως παράλληλα συνοδεύονται με αύξηση του οικονομικού κόστους. Οι παράμετροι εξόδου που θα οδηγήσουν σε επιθυμητά αποτελέσματα κατά τη σκλήρυνση μέσω συνεχούς αποψύξεως των χαλύβων (quench hardening) είναι :

- οι παραμένουσες τάσεις και οι παραμορφώσεις μετά την απόψυξη,
- η αποφυγή έναρξης ρηγματώσεων,
- η εξέλιξη της μικροδομής κατά την απόψυξη,
- η κατανομή σκληρότητας στο τεμάχιο.

Η διαδικασία της ταχείας απόψυξης είναι μία υψηλής τάξης μη-γραμμική διαδικασία όπου ο επηρεασμός από την θερμοκρασία, ο μετασχηματισμός των φάσεων και η ανάπτυξη τάσεων/παραμορφώσεων σχετίζονται μεταξύ τους σε ένα θέρμο-ελαστο-πλαστικό πρόβλημα ενός μη-γραμμικού υλικού.[1]

Διάφορα μαθηματικά μοντέλα, με διαφορετική ακρίβεια και πολυπλοκότητα, έχουν αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία ώστε να περιγράψουν το φαινόμενο της ταχείας απόψυξης των χαλύβων.

Υπάρχουν τρεις γενικοί τύποι μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων που θα αποκτηθούν από το υλικό αλλά και την προσομοίωση της συγκεκριμένης διαδικασίας. Τα στατικά, τα δυναμικά και τα υβριδικά μοντέλα που χρησιμοποιούν ταυτόχρονα τα δύο προηγούμενα. Τα στατικά μοντέλα βασίζονται σε απλές, εμπειρικές σχέσεις που προέρχονται από πειραματικά δεδομένα μετά από ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis). Τα δυναμικά μοντέλα βασίζονται στην επίλυση μιας σειράς μερικών διαφορικών εξισώσεων. Μια σημαντική κατηγορία των δυναμικών μοντέλων βασίζεται στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την εφαρμογή των εξισώσεων ώστε να προβλεφθεί η παραμόρφωση, οι παραμένουσες τάσεις και η κατανομή της σκληρότητας στο κατασκευαζόμενο τεμάχιο.

Η προσομοίωση μέσω πεπερασμένων στοιχείων της διαδικασίας σκλήρυνσης των χαλύβων με θέρμανση και ταχεία απόψυξη (βαφή) περιλαμβάνει μεταφορά θερμότητας, μετασχηματισμούς φάσεων, και ανάπτυξη παραμορφώσεων.

Κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας, διάφορες παράμετροι επηρεάζουν την ποιότητα των θερμικά κατεργαζόμενων τεμαχίων. Η πειραματική βάση δεδομένων που υπάρχει μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τον σχεδιασμό της εκάστοτε θερμικής κατεργασίας. Σαν παράδειγμα, μπορεί να αναφερθεί το πείραμα εμβαιπτότητας Jominy ενός υλικού του οποίου τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας κατά το σχεδιασμό της θερμικής κατεργασίας σκλήρυνσης. Παρ' όλα αυτά, η χρήση πειραματικών δεδομένων είναι περιορισμένη λόγω του γεγονότος της ύπαρξης μόνο συγκεκριμένου αριθμού υλικών σε τεχνικά εγχειρίδια, συνήθως των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων. Στην βιομηχανία, η μέθοδος της δοκιμής και λάθους (trial and error method) χρησιμοποιείται ακόμη ευρύτατα για τον καθορισμό των συνθηκών κάτω από τις οποίες θα εκτελούνται θερμικές κατεργασίες. Η μέθοδος αυτή μειονεκτεί ως προς το κόστος αλλά και το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωσή της. Επιπλέον, το σημαντικότερο είναι ότι δεν μπορεί να δώσει την βέλτιστη λύση. Αυτά τα μειονεκτήματα έκαναν την προσομοίωση αυτής της θερμικής κατεργασίας μέσω H/Y και τη βελτιστοποίηση της περισσότερο επιτακτική.

Δύο βασικά σχήματα βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση των θερμικών κατεργασιών. Το πρώτο σχήμα βασίζεται σε πληροφορίες που προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) του μοντέλου,

υπολογιζόμενες με ακρίβεια μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών ή μέσω αναλυτικών μεθόδων. Το άλλο σχήμα χρησιμοποιεί την προσεγγιστική μέθοδο, όπως τα μοντέλα εύρεσης των επιφανειών απόκρισης (M.E.A.)(RSM, response surface models).[2]

Τα μοντέλα εύρεσης επιφανειών απόκρισης στηρίζονται στην κατάστρωση μιας πολυωνυμικής εξίσωσης που συνδέει τις παραμέτρους σχεδιασμού με την απόκριση του μεγέθους του οποίου μελετάται η συμπεριφορά. Η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτεί προσεκτική επιλογή των παραμέτρων που θα επιδρούν ουσιαστικά στο προς μελέτη μέγεθος αλλά και τη γνώση των ενδεχόμενων αλληλοσυσχετισμών μεταξύ τους. Η τελική, προσεγγιστική, σχέση που θα προκύψει θα εμπεριέχει :

- την αβεβαιότητα όλων εκείνων των εξωγενών παραγόντων (πειραματικών στοιχείων, μετρήσεων, κ.α.) που επέδρασαν κατά τη επεξεργασία συγκεκριμένου συνδυασμού τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού μέχρι την τελική τιμή της απόκρισης
- το σφάλμα προσέγγισης μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών που εξάγονται από το μοντέλο για την τιμή της απόκρισης, προερχόμενης από συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού. Το σφάλμα προσέγγισης μπορεί να ελεγχθεί με δύο τρόπους :
 - με την αξιολόγηση όλων των όρων του πολυωνύμου και τη διαγραφή όσων από αυτούς είναι ασήμαντοι (δεν προσφέρουν στην προσέγγιση του φαινομένου από το μοντέλο, αντίθετα ενισχύουν την ανακρίβεια του).
 - με την εφαρμογή του κατάλληλου κριτηρίου (π.χ. d-optimality) κατά το σχεδιασμό των πειραμάτων (design of experiments) ώστε να προκύψει το απαιτούμενο πλήθος δοκιμών και συνδυασμών των παραμέτρων σχεδιασμού που θα καλύπτει όλο το χώρο των δυνατών λύσεων (design space).

Εν συνεχεία, μετά την κατάστρωση του μοντέλου και την ανάλυση διακύμανσής του (variance analysis) ακολουθεί η εύρεση των ολικών ακροτάτων, της συνάρτησης κόστους ή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία θα συσχετίζεται με την απόκριση και θα εξαρτάται από ενδεχόμενους περιορισμούς. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπορεί να είναι είτε ντετερμινιστικές, είτε στοχαστικές. Καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή της μεθόδου αποτελεί η φύση του προβλήματος και η μορφή της ή των αντικειμενικών συναρτήσεων, ή των συναρτήσεων κόστους.

2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. Θερμικές κατεργασίες χαλύβων

2.1.1. Γενικά στοιχεία

Η βιομηχανική θερμική κατεργασία των κοινών ανθρακούχων και των κραματωμένων χαλύβων αποτελείται από τρία στάδια, την ωστενιτοποίηση, την απόψυξη και την επαναφορά. Η σκλήρυνση μέσω ταχείας απόψυξης (βαφή) των κοινών και κραματωμένων χαλύβων επιτυγχάνεται θερμαίνοντας το υλικό μέχρι την απαιτούμενη θερμοκρασία (εύρος θερμοκρασιών) ώστε να αποκτήσει δομή ωστενίτη. Η θερμοκρασία αυτή για τον κοινό ανθρακούχο χάλυβα με 0.50 % κ.β. άνθρακα (AISI 1050) έχει κατώτερη θερμοκρασία τους 850⁰C. Αφού το υλικό ωστενιτοποιηθεί, αποψύχεται ταχέως, τυπικά, με εμβάπτιση σε νερό, λάδι, διάλυμα πολυμερών, μπάνιο αλάτων ή υψηλής πίεσης αέριο[4].

Στο χάλυβα, το στάδιο με την μεγαλύτερη σημασία είναι το στάδιο της απόψυξης. Η ταχεία απόψυξη από την φάση του ωστενίτη δημιουργεί την υψηλής σκληρότητας φάση του μαρτενσίτη. Η τιμή και το βάθος μέχρι το οποίο θα φτάσει η σκληρότητα σε ένα τεμάχιο εξαρτάται από τους ρυθμούς απόψυξης και το ποσοστό της κραμάτωσης του υλικού. Μερικά σιδηρούχα υλικά θα πρέπει να αποψυχθούν πολύ γρήγορα από τις θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης τους ώστε να σκληρυνθούν αρκετά λόγω της χαμηλής εμβαπτότητας τους (AISI 1050) , ενώ άλλα μπορούν να σκληρυνθούν ακόμη και με αργό ρυθμό αποκτώντας μαρτενσιτική δομή σε όλη την μάζα τους.[4]

Στο στάδιο αυτό υπάρχει μεγάλη ποικιλία στα είδη των μετασχηματισμών των φάσεων που μπορούν να συμβούν. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι απόψυξης όπως :

- η συνεχής απόψυξη (direct quenching),
- η κλιμακωτή απόψυξη (time quenching),
- η επιλεκτική απόψυξη (selective quenching),
- η απόψυξη υψηλής πίεσης (high pressure quenching).

1. Η συνεχής απόψυξη είναι η διαδικασία της άμεσης απόψυξης του μετάλλου από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στην θερμοκρασία του μέσου. Αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος σκλήρυνσης των χαλύβων.

2. Η κλιμακωτή απόψυξη αφορά δύο διαφορετικούς ρυθμούς. Χρησιμοποιεί τον ένα ρυθμό για να ψύξει το τεμάχιο μέχρι μια θερμοκρασία “κοντά” στην θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s) και εν συνεχεία, τον άλλο ρυθμό, που συνήθως είναι πιο αργός και καθορίζεται ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για να ελαχιστοποιηθούν οι παραμορφώσεις και η πιθανότητα ρηγματώσεων που σχετίζονται με τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό διαστασιακά μεγάλων τεμαχίων.[4]
3. Η επιλεκτική απόψυξη αφορά συγκεκριμένη περιοχή ενός εξαρτήματος ή εργαλείου με σκοπό την πρόσδοση συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την απομόνωση των περιοχών που δεν επιθυμείται κάποια αλλαγή στις ιδιότητες τους από το μέσο απόψυξης.
4. Η απόψυξη υψηλής πίεσης χρησιμοποιεί συνεχή, πεπιεσμένη ροή κάποιου αερίου για να αποψύξει το τεμάχιο. Οι ρυθμοί απόψυξης που επιτυγχάνονται συνήθως είναι πολύ μεγάλοι. Η ταχύτητα της ροής επιτρέπει την απομάκρυνση των δημιουργούμενων φυσαλίδων και διασπά οποιαδήποτε δημιουργία ατμών συσχετιζόμενη με την εξάτμιση του μέσου απόψυξης.

Μετά την απόψυξη , η σκληρότητα του υλικού είναι πολύ υψηλή καθιστώντας το ακατάλληλο για χρήση λόγω της ψαθυρότητάς του. Η επαναφορά που ακολουθεί χρησιμοποιείται για να δώσει τις απαιτούμενες τελικές μηχανικές ιδιότητες . Η διαδικασία της επαναφοράς περιλαμβάνει αναθέρμανση του σκληρυμένου χάλυβα σε μια θερμοκρασία χαμηλότερη της ευτηκτοειδούς ώστε να μειωθεί η σκληρότητα και να αυξηθεί η δυσθραυστότητα. [4]

2.1.2. Στάδια απόψυξης

Η απόψυξη στους χάλυβες γίνεται ώστε να αποφευχθεί ο μετασχηματισμός σε φερρίτη και περλίτη και να διευκολυνθεί η δημιουργία μπενίτη και μαρτενσίτη [1]. Για συγκεκριμένη χημική σύσταση ενός χάλυβα και συγκεκριμένες συνθήκες θερμικής κατεργασίας , υπάρχει ένας “ οριακός ” ρυθμός απόψυξης ώστε να γίνει πλήρης μαρτενσιτικός μετασχηματισμός όπου το ποσοστό του ωστενίτη στην υψηλή θερμοκρασία έχει μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη χωρίς τον σχηματισμό περλίτη ή μπενίτη.[4]

Είναι ουσιώδες να κατανοηθούν οι μηχανισμοί της απόψυξης και οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη διεργασία , στο βαθμό που οι παράγοντες αυτοί έχουν σημαντική επιρροή στην επιλογή του μέσου απόψυξης και στην επιθυμητή απόδοση του. Στην περίπτωση των υγρών μέσων απόψυξης όπως το λάδι και το νερό , η ψύξη συνήθως επιδρά σε τρία βασικά στάδια :

1. δημιουργία ομοιογενούς λεπτού στρώματος εξατμιζόμενου μέσου (film boiling),
2. μεταβατικό στάδιο εξάτμισης (transition boiling),
3. εκ νέου εξάτμιση του μέσου με νέα επαφή με το τεμάχιο (nucleate boiling),
4. Συναγωγή (convection) ,

όπου στο καθένα το μέσο παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα διαδοχικά στάδια της απόψυξης αλλά και η μεταβολή των ρυθμών απόψυξης σε αυτά.

Ομοιογενές λεπτό στρώμα εξατμιζόμενου μέσου

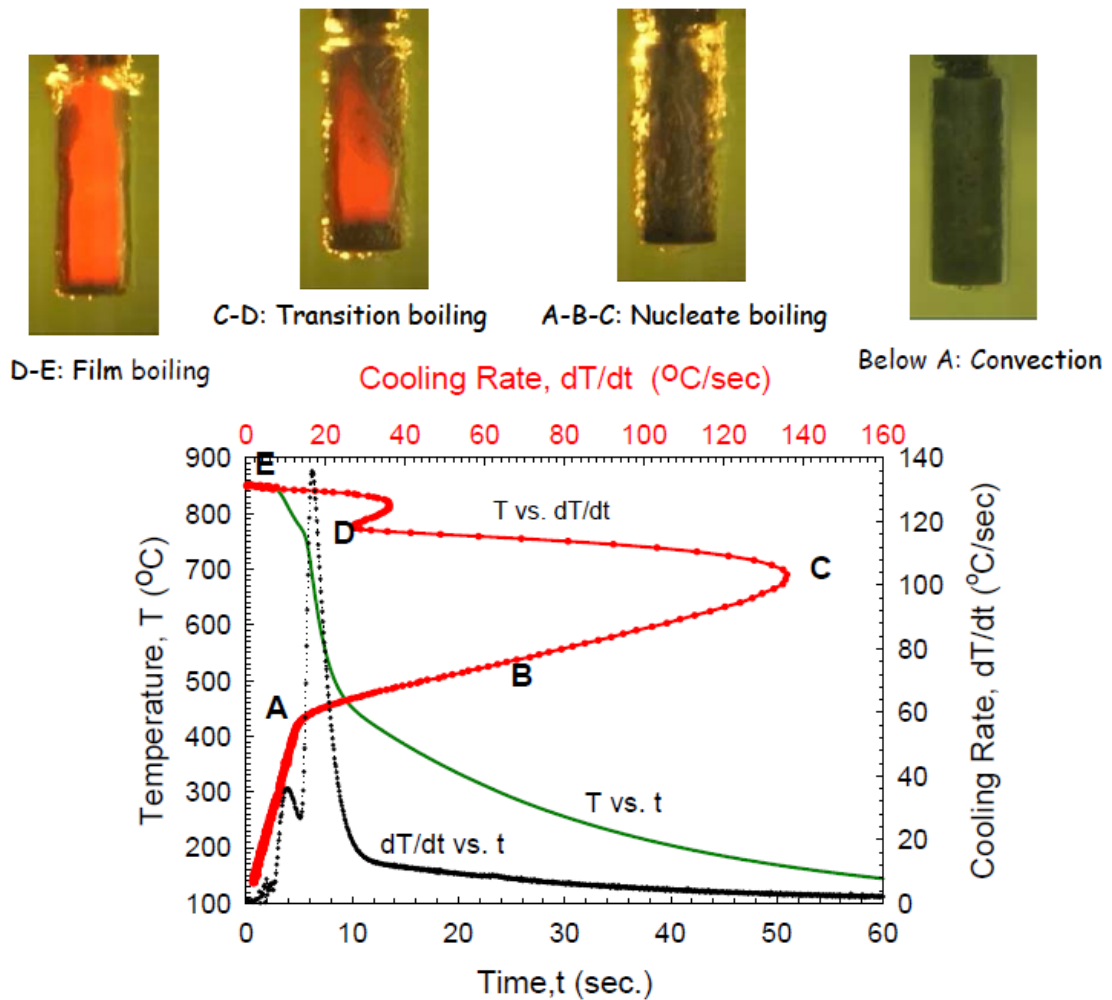
Το πρώτο στάδιο της απόψυξης , το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 μεταξύ των σημείων D-E και γενικότερα μεταξύ 700⁰C και 900⁰C χαρακτηρίζεται από την δημιουργία ενός πολύ λεπτού στρώματος εξατμισμένου μέσου που δεν επιτρέπει την επαφή του τεμαχίου με το μέσο που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Αυτό το κάλυμμα από το εξατμισμένο μέσο αναπτύσσεται και διατηρείται εξαιτίας της θερμότητας που προέρχεται από την επιφάνεια του τεμαχίου η οποία ξεπερνά την θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση του. Το λεπτό αυτό στρώμα απομονώνει το τεμάχιο και ένας μικρός αριθμός από μεγάλες φυσαλίδες διαφεύγουν από την επιφάνεια του τεμαχίου.

Το φαινόμενο αυτό της «απομόνωσης» του τεμαχίου χαρακτηρίζεται από μικρό ποσό μεταφοράς θερμότητας και κατ' επέκταση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Η μεταφορά ουσιαστικά γίνεται με συναγωγή και ακτινοβολία μέσω του λεπτού στρώματος αερίου μέσου.

Εκ νέου εξάτμιση του μέσου με νέα επαφή με το τεμάχιο

Κατά την περαιτέρω ψύξη του τεμαχίου μεταξύ των σημείων D-C-B-A ξεκινά το επόμενο στάδιο της απόψυξης μέχρι την θερμοκρασία όπου παρουσιάζεται ο μεγαλύτερος ρυθμός απόψυξης.

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός απόψυξης χαρακτηρίζεται από βίαιο βρασμό του μέσου όταν αυτό έρχεται σε επαφή, για μικρό χρονικό διάστημα, με την επιφάνεια του μετάλλου, γεγονός που συμβαίνει ακανόνιστα. Στην φάση αυτή υπάρχουν περισσότερα σημεία από τα όποια ξεκινούν φυσαλίδες εξαιτίας του βρασμού του μέσου.



Σχήμα 2.1.Λιαδικασία απόψυξης [4]

Στο σημείο όπου παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας (σημείο C) και συνεπώς ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λαμβάνει την μέγιστη τιμή του διαχωρίζεται η περιοχή του μεταβατικού βρασμού από την εκ νέου εξάτμιση του

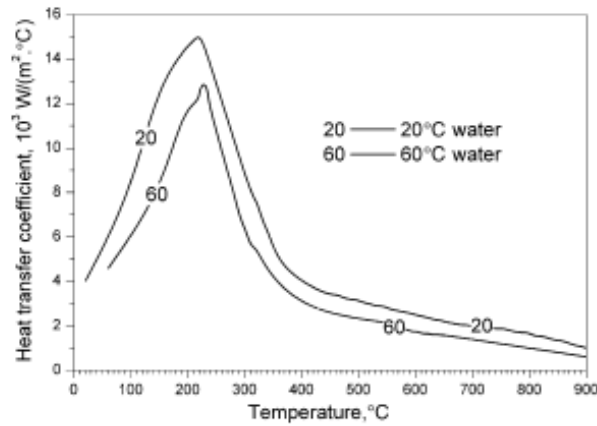
μέσου. Καθώς το τεμάχιο ψύχεται , ο βρασμός γίνεται ηπιότερος αφού το μέταλλο πλησιάζει το σημείο βρασμού του μέσου (εξάρτηση της έντασης του φαινομένου από τη διαφορά θερμοκρασίας ρευστού-στερεού).

Συναγωγή

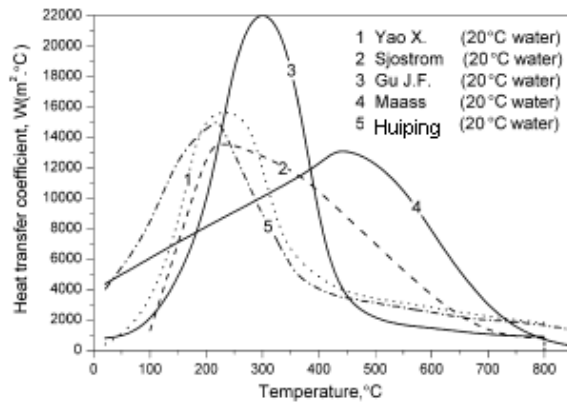
Κάτω από το σημείο A ,ανάλογα με το μέσο απόψυξης , η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού βρίσκεται χαμηλότερα από την θερμοκρασία εξάτμισης του μέσου , π.χ. όταν το μέσο είναι το νερό , το στάδιο αυτό ξεκινά ακριβώς κάτω από τους 100⁰C.Στο στάδιο αυτό δεν παρατηρείται βρασμός.

Οι τιμές των θερμοκρασιών που παρουσιάζονται διαδοχικά τα διάφορα στάδια της απόψυξης και κατ' επέκταση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διαφέρουν ανάλογα με το μέσο και τις φυσικές του ιδιότητες , τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, τη χημική σύσταση του χάλυβα, την αναλογία μάζας υλικού/μέσου αλλά και άλλους παράγοντες που εξαρτώνται από το τεχνικό σύστημα που διαθέτει η βιομηχανία ή το εκάστοτε εργαστήριο. Κατά την απόψυξη, η χρονική διάρκεια της φάσης του βρασμού και της θερμοκρασίας όπου παρουσιάζεται η μέγιστη μεταφορά θερμότητας έχει σημαντικότερη επιρροή στην ικανότητα του υλικού να σκληρυνθεί σε όλη την μάζα του. Ο ρυθμός ψύξης στην φάση της συναγωγής είναι επίσης σημαντικός αφού γενικά βρίσκεται μεταξύ των θερμοκρασιών όπου λαμβάνει χώρα ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός και έτσι μπορεί να επηρεάσει τις παραμένουσες τάσεις μετά την απόψυξη, τις διαστασιακές μεταβολές αλλά και την πιθανότητα έναρξης ρωγμών.[5]

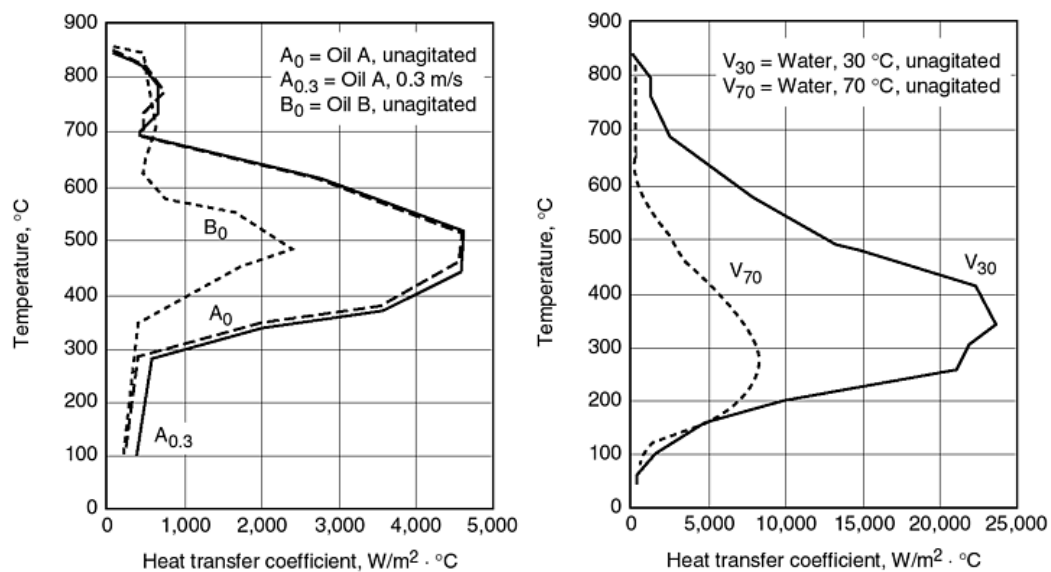
Εξαιτίας της ομοιότητας των μαθηματικών μοντέλων της συναγωγής και ακτινοβολίας σε σχέση με τις οριακές συνθήκες, αυτά συνενώθηκαν και παρουσιάζονται από έναν ενιαίο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ανάλογα με το μέσο απόψυξης και την εξέλιξη της θερμοκρασίας που έχουν προκύψει από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές:



Διάγραμμα 2.1. Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του αποψυχόμενου τεμαχίου από χάλυβα P20 (AISI) και νερού. [5]



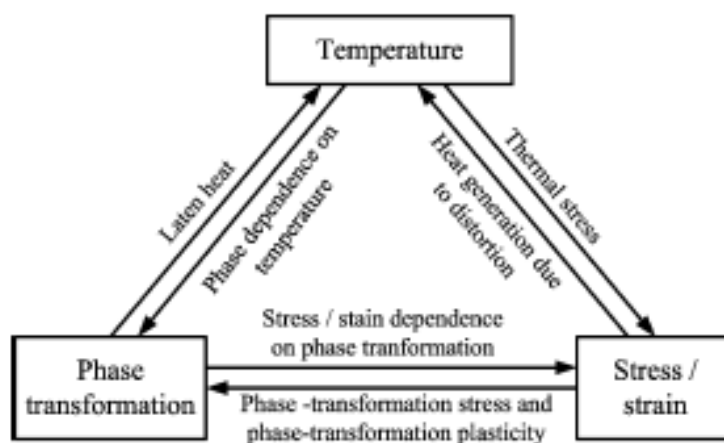
Διάγραμμα 2.2. Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας νερού και χάλυβων από διάφορες μελέτες. [5]



Διάγραμμα 2.3. Μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h ($\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$), (α) για διάφορες συνθήκες απόψυξης σε λάδι, (β) για διάφορες συνθήκες για απόψυξη σε νερό. [7]

2.1.3. Περιγραφή του φαινομένου

Στη διαδικασία σκλήρυνσης μέσω απόψυξης, ο περλίτης, ο φερρίτης και ο μπενίτης ή ο μαρτενσίτης σχηματίζονται από τον ωστενίτη ανάλογα με την ταχύτητα απόψυξης. Η κατανομή των τάσεων επίσης διαφοροποιείται με την θερμοκρασία και των μετασχηματισμό των φάσεων. Το θερμοκρασιακό πεδίο, το πεδίο μετασχηματισμών των φάσεων και το πεδίο των τάσεων/παραμορφώσεων επηρεάζονται μεταξύ τους και οι συσχετισμοί τους φαίνονται στο Σχήμα 2.2 [3]:



Σχήμα 2.2.Σύζευξη των φαινομένων που αλληλεπιδρούν κατά την απόψυξη.[3]

Οι αλληλεπιδράσεις αυτές ονομάζονται μεταλλο-θερμο-μηχανικό φαινόμενο (metallo-thermal-mechanical coupling).Οι συσχετισμοί της σύζευξης αυτής περιλαμβάνουν την εξάρτηση των τάσεων-παραμορφώσεων από τα πεδία θερμοκρασίας και μετασχηματισμού φάσεων, την εξάρτηση της θερμοκρασίας από τα πεδία τάσεων/παραμορφώσεων και μετασχηματισμού φάσεων, την εξάρτηση του μετασχηματισμού των φάσεων από τα πεδία θερμοκρασίας και τάσεων/παραμορφώσεων .Οι επηρεασμοί αυτοί δεν είναι ανεξάρτητοι από την χημική σύσταση του χάλυβα.

Οι διάφορες περιοχές του τεμαχίου αποψύχονται με διαφορετικό τρόπο , ειδικά αν αυτό είναι πολύπλοκης μορφής. Η μεταφορά θερμότητας κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα με όλους τους δυνατούς τρόπους δηλαδή, με αγωγή, με συναγωγή και με ακτινοβολία. Θερμότητα εκλύεται από την επιφάνεια του τεμαχίου με συναγωγή προς το μέσο απόψυξης καθώς και με ακτινοβολία, γεγονός το οποίο οδηγεί σε διαφορές θερμότητας επιφάνειας και εσωτερικού του. Αυτή η διαφορά αποτελεί την αιτία της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή. Η συναγωγή προς το μέσο απόψυξης

αποτελεί τον σημαντικότερο τρόπο μεταφοράς θερμότητας κατά την απόψυξη με εμβάπτιση. [6]

Οι διαφορές της μεταβολής της θερμοκρασίας από σημείο σε σημείο στο τεμάχιο οδηγούν στην διαφορετική θερμική διαστολή του τεμαχίου από τμήμα σε τμήμα και σε συνδυασμό με τους μετασχηματισμούς φάσεων ευθύνονται για τη δημιουργία μηχανικών τάσεων.

Θερμοκρασία-μετασχηματισμοί-θερμοκρασία

Κατά την ψύξη, η θερμοδυναμική ισορροπία του ωστενίτη διαταράσσεται, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μετασχηματισμούς φάσεων. Ο ρυθμός με τον οποίο γίνονται οι μετασχηματισμοί εξαρτάται από την θερμοκρασία, το ρυθμό απόψυξης και τις τάσεις. Από την άλλη πλευρά, το θερμοκρασιακό πεδίο διαταράσσεται από την λανθάνουσα θερμότητα που εκλύεται κατά τον μετασχηματισμό, η οποία δεν είναι αμελητέα στην περίπτωση που το πεδίο απαιτείται να υπολογιστεί με ακρίβεια.[6]

Θερμοκρασία-τάσεις-θερμοκρασία

Ο διαφορετικός ρυθμός ψύξης των σημείων του τεμαχίου προκαλεί διαφορετική διαστασιακή μεταβολή από σημείο σε σημείο με αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμικών τάσεων. Αντίστοιχα, οι τάσεις που δημιουργούνται εξαιτίας αυτών των διαφορών μεταβολής θερμοκρασίας, επηρεάζουν το γενικότερο θερμοκρασιακό πεδίο του τεμαχίου. Όταν στο τεμάχιο αναπτύσσονται τάσεις, ποσό της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των παραμορφώσεων που προκαλούν. Γενικότερα, η θερμότητα αυτή είναι αμελητέα αλλά στην περίπτωση της μη-ελαστικής παραμόρφωσης, η θερμότητα που δημιουργείται δεν μπορεί να αγνοηθεί.[3]

Τάσεις –μετασχηματισμοί- τάσεις

Οι τάσεις και η πλαστικότητα του υλικού επηρεάζουν τους μετασχηματισμούς των φάσεων διαταράσσοντας την θερμοδυναμική σταθερότητα και την κινητική τους. Έχει παρατηρηθεί αλλοίωση των κρίσιμων θερμοκρασιών και χρόνων από την επίδραση των τάσεων. Σε μερικές περιπτώσεις, οι μετασχηματισμοί μπορεί να επηρεάστηκαν ή να προκλήθηκαν εξ' ολοκλήρου από την ανάπτυξη τάσεων. Εκτός των ελαστικών τάσεων, η όποια προγενέστερη πλαστική παραμόρφωση του ωστενίτη επηρεάζει τους μετέπειτα μετασχηματισμούς φάσεων.[6] Σαν παράδειγμα

μπορεί να αναφερθεί ότι ο χρόνος για το μετασχηματισμό σε περλίτη μικραίνει και αντίστροφα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός δημιουργείται ακόμη και σε υψηλότερες θερμοκρασίες από την πραγματική θερμοκρασία έναρξης (M_s), όταν το υλικό βρίσκεται κάτω από την επίδραση κάποιας τάσης.[3]Αν και υπάρχει σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων που σχετίζεται με το φαινόμενο αυτό ,δεν υπάρχει κοινά αποδεκτό μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να προβεί σε ποσοτική ανάλυση.

Οι μετασχηματισμοί των φάσεων επηρεάζουν το μηχανικό πεδίο μέσω των διαστολικών παραμορφώσεων που προκαλούνται λόγω της διαφοράς πυκνότητας και της μεταβολής της πλαστικότητας (transformation induced plasticity, TRIP) μεταξύ των αρχικών φάσεων και των φάσεων που προέκυψαν μετά τον μετασχηματισμό. Οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω διαστολής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις θερμικές τάσεις. Ακόμη και για ένα εξωτερικά εφαρμοζόμενο φορτίο, για το οποίο η αντίστοιχη ισοδύναμη τάση είναι αρκετά μικρότερη συγκρινόμενη με το όριο διαρροής του υλικού, πλαστική παραμόρφωση υπάρχει. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από την ύπαρξη μη αναστρέψιμης παραμόρφωσης προερχόμενης από μετασχηματισμό φάσης κάτω από διαστασιακό περιορισμό.[6]Το φαινόμενο TRIP σχετίζεται με την πολύ μεγάλη αύξηση της πλαστικότητας κατά την διάρκεια του μετασχηματισμού των φάσεων.

Τελικά , κατά τη λεπτομερειακή προσομοίωση της απόψυξης , θα πρέπει να συμπεριληφθούν η επιρροή των μετασχηματισμών φάσεων στο πεδίο των τάσεων/παραμορφώσεων, η ανάπτυξη μηχανικών τάσεων λόγω διαστολής αλλά και το φαινόμενο TRIP.

2.1.4. Εξέλιξη του φαινομένου

Το φαινόμενο της ταχείας συνεχούς απόψυξης των χαλύβων με σκοπό την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων τους αποτελείται ουσιαστικά από τρία στάδια:

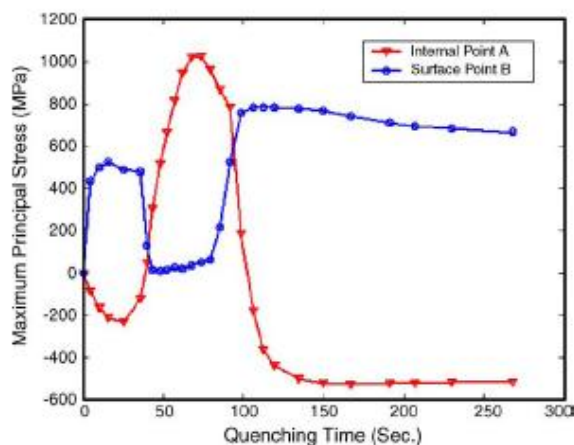
1. Ψύξη του ωστενίτη χωρίς μετασχηματισμό του.
2. Έναρξη μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.
3. Μετασχηματισμοί δομής στον πυρήνα του τεμαχίου.

Στο πρώτο στάδιο, δεν υπάρχουν μετασχηματισμοί και η μόνη επίδραση στο τεμάχιο είναι η ανάπτυξη θερμικών τάσεων. Κατά την απόψυξη, η επιφάνεια ψύχεται γρηγορότερα από τον πυρήνα του τεμαχίου. Έτσι η επιφάνεια συστέλλεται

γρηγορότερα από τον πυρήνα με αποτέλεσμα η επιφάνεια να υπόκειται σε εφελκυστικές τάσεις σε αντίθεση με την καρδιά που βρίσκεται κάτω από θλιπτικές τάσεις εξισορροπώντας ουσιαστικά τις τάσεις της επιφανείας. Οι θερμικές τάσεις στο σημείο αυτό μπορούν να προκαλέσουν μη-ομογενή πλαστική ροή στον θερμό αλλά και μαλακό ωστενίτη.

Στο δεύτερο στάδιο, ξεκινά ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός στην επιφάνεια του τεμαχίου που χαρακτηρίζεται από την αύξηση όγκου λόγω αλλαγής της κρυσταλλικής δομής του υλικού. Η διαστολή της επιφάνειας συνοδεύεται από την ανάπτυξη τάσεων/παραμορφώσεων που προκαλεί στις αμετασχημάτιστες περιοχές του εσωτερικού εφελκυστικές τάσεις. Από την άλλη πλευρά, τα εσωτερικά σημεία ασκούν θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια για να τις εξισορροπήσουν. Το αποτέλεσμα αυτών των αλληλεπιδράσεων οδηγεί στην γρήγορη αποφόρτιση των επιφανειακών εφελκυστικών τάσεων και την ανάπτυξη θλιπτικών αλλά και την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο εσωτερικό.

Στο τρίτο στάδιο, λαμβάνουν χώρα οι μετασχηματισμοί δομής (διαχυτικοί και μη) στον πυρήνα του τεμαχίου. Οι ήδη μετασχηματισμένες περιοχές της επιφάνειας λόγω της περαιτέρω ψύξης τους, συστέλλονται, ενώ αντίθετα οι εσωτερικές περιοχές διογκώνονται κατά τον μετασχηματισμό τους. Το αποτέλεσμα είναι να αντιστραφούν οι τάσεις επιφανειακά και από θλιπτικές μετατρέπονται σε εφελκυστικές. Αντίθετα η διόγκωση της καρδιάς συναντά τη συστολή της επιφάνειας και οι προηγούμενα εφελκυστικές τάσεις μετατρέπονται σε θλιπτικές. Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η χρονική εναλλαγή των τάσεων μεταξύ επιφανειακού και εσωτερικού σημείου κατά την διάρκεια της απόψυξης.[2,6]



Διάγραμμα 2.4.Μεταβολή των τάσεων κατά την απόψυξη[2]

Οι μετασχηματισμοί των φάσεων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κατά την διαδικασία της απόψυξης, ιδιαίτερα για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων και των παραμορφώσεων. Για διαφορετικά σχήματα και μεγέθη του θερμικά κατεργαζόμενου αντικειμένου, τα αποτελέσματα την απόψυξης μπορεί να είναι διαφορετικά και γι' αυτό το λόγο το Διάγραμμα 2.4 μπορεί να είναι διαφορετικό, χωρίς όμως να αλλάζει η γενικότερη εξέλιξη του φαινομένου. Μετά την απόψυξη, οι παραμένουσες επιφανειακές εφελκυστικές τάσεις είναι ανεπιθύμητες επειδή μπορούν να προκαλέσουν μείωση της αντοχής σε κόπωση και κατ' επέκταση της ζωής του τεμαχίου. Για ένα σκληρυμένο τεμάχιο απαιτείται επαναφορά με σκοπό την μείωση των παραμενουσών τάσεων αλλά και την αύξηση της δυσθραυστότητας μέσω της μετατροπής του μαρτενσίτη (χωροκεντρωμένο τετραγωνικό κρυσταλλικό πλέγμα) σε επαναφερμένο μαρτενσίτη (χωροκεντρωμένο κυβικό κρυσταλλικό πλέγμα).

2.1.5. Μέσα Απόψυξης

Ένα ιδανικό ψυκτικό μέσο θα έπρεπε να επιβάλλει μεγάλη ταχύτητα απόψυξης ειδικά κατά το πρώτο στάδιο της απόψυξης ώστε να μην υπάρξουν ανεπιθύμητοι μετασχηματισμοί του μετάλλου, συγχρόνως όμως, μικρή ταχύτητα απόψυξης στο τρίτο στάδιο ώστε να αποφεύγονται έντονες παραμορφώσεις. Μεταξύ των υπάρχοντων ψυκτικών μέσων, τα οποία όμως αδυνατούν να ικανοποιήσουν πλήρως αυτές τις απαιτήσεις, ξεχωρίζουν το νερό και τα διαλύματα οργανικών αλάτων, που παρουσιάζουν μεγάλη ταχύτητα απόψυξης σε όλα τα στάδια της απόψυξης και ορισμένα λάδια που παρουσιάζουν μεγάλη ταχύτητα ψύξης κατά το πρώτο στάδιο απόψυξης και μικρότερη κατά το δεύτερο. Επίσης ένα μέσο που παρουσιάζει ολοένα και μεγαλύτερη χρήση είναι ο πεπιεσμένος αέρας ή κάποιο άλλο αέριο όπως το Ήλιο και Άζωτο αλλά και τα πολυμερή όπως η πολυαλκαλική γλυκόλη.

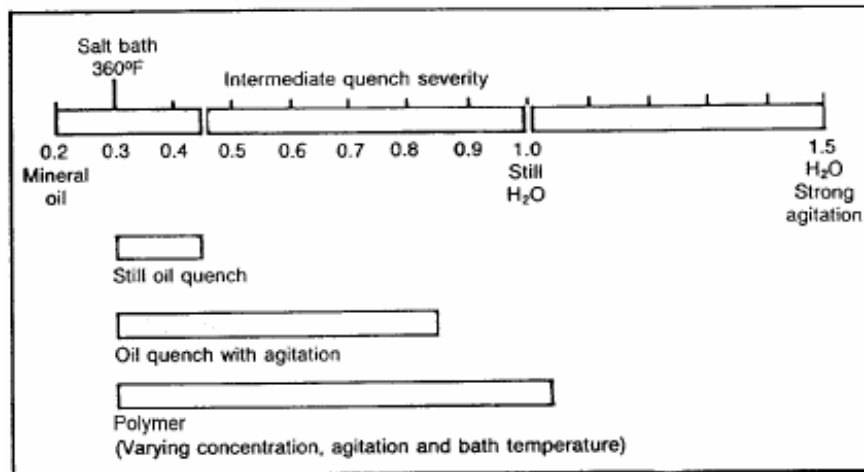
Η αποτελεσματικότητα, από απόψεως ταχύτητας απόψυξης για δεδομένο μέσο βαφής δίδεται από έναν αριθμητικό συντελεστή, οποίος ονομάζεται δραστηριότητα του μέσου βαφής ή συντελεστής Grossman. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως το κλάσμα του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας προς το διπλάσιο της θερμικής αγωγιμότητας του μετάλλου:

$$H = \frac{h}{2k} \quad (1)$$

Η τιμή του εξαρτάται από το εάν η απόψυξη συνοδεύεται ή όχι από ανάδευση του μέσου και έχει χαρακτηριστική τιμή για καθένα από αυτά. Η δραστηριότητα του νερού θερμοκρασίας 20⁰C σε ηρεμία ισούται με την μονάδα (H=1).Ο συντελεστής για το νερό αυξάνεται με την προσθήκη αλάτων (NaCl ,Na₂CO₃, NH₄Cl) και ελαττώνεται με την προσθήκη σαπουνιού, γλυκερίνης ή NaSiO₃.Ο συντελεστής δραστηριότητας παίρνει πρακτικά την μέγιστη τιμή του (H=5) για υδατικό διάλυμα άλατος με 15% NaCl.Η μέγιστη θεωρητική τιμή του H τείνει στο άπειρο (H=∞).Με ένα τέτοιο ψυκτικό μέσο συντελείται θεωρητικά η ιδανική βαφή του χάλυβα, η οποία ορίζεται ως η βαφή κατά την οποία η ταχύτητα απαγωγής θερμότητας από την μεταλλική επιφάνεια, διαμέσου του λουτρού καθίσταται άπειρη. Πρόκειται δηλαδή για βαφή κατά την οποία προκαλείται ακαριαία απόψυξη του δοκιμίου, από πολύ υψηλή θερμοκρασία, στη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου.

Η σειρά φθίνουσας δραστηριότητας των ψυκτικών μέσων είναι : αλατούχο υδατικό διάλυμα, H₂O, πολυμερή, τήγματα ή υγρά άλατα, διαλύματα λαδιών, καθαρά λάδια, ατμοσφαιρικός αέρας ή ελεγχόμενη ατμόσφαιρα αέρα ή αερίων. [8] Για την ψύξη συγκεκριμένων χαλύβων αλλά και ιδιαίτερων σχημάτων τεμαχίων χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα πολυμερή όπως πολύ-(ακρυλική γλυκόλη), πολύ-(βίνυλ πυρολιδόνη), πολύ-(ακριλικό νάτριο) [9] .Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες και διαγράμματα με την τιμή του συντελεστή Grossman για διάφορα μέσα απόψυξης με την προϋπόθεση της σημαντικής διαφοράς όγκου μεταξύ του μέσου απόψυξης κα του αποψυχόμενου τεμαχίου.

Ο Πίνακας 2.1 και το Διάγραμμα 2.5 δίνει μόνο μια ιδέα για την σχετική δραστηριότητα της ταχύτητας απόψυξης .Οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας διαφέρουν πολύ κατά την διάρκεια της απόψυξης και η χρήση της τιμής του H για τον χαρακτηρισμό της είναι μια υπεραπλούστευση, αν και, παρ' όλα αυτά είναι αρκετά χρήσιμη για πρακτικούς λόγους.



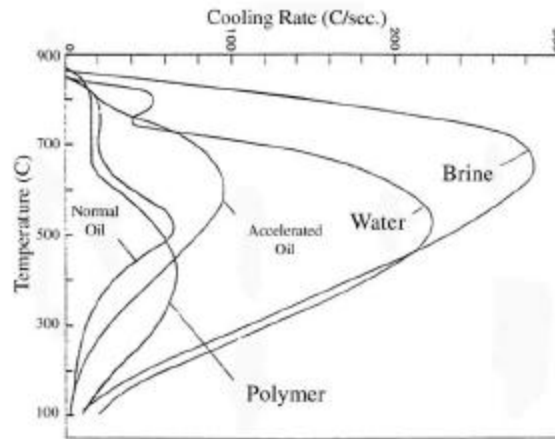
Διάγραμμα 2.5.Τιμές του συντελεστή H για διάφορα μέσα βαφής[9]

ΜΕΣΟ ΒΑΦΗΣ	ΣΕ ΗΡΕΜΙΑ	ΗΠΙΑ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	ΜΕΤΡΙΑ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	ΚΑΛΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	ΙΣΧΥΡΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	ΙΣΧΥΡΟΤΑΤΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ
Αέρας	0,02	-	-	-	-	-
Λάδι/Λουτρό αλάτων	0,25- 0,30	0,30-0,35	0,35-0,40	0,40-0,50	0,50-0,80	0,80-1,10
Νερό ¹	0,9-1,00	1,00-1,10	1,20-1,30	1,40-1,50	1,60-2,00	4,00
Υδατικό διάλυμα άλατος	2,00	2,00-2,20	-	-	-	5,00
Ιδανικό μέσο	∞		-		-	-

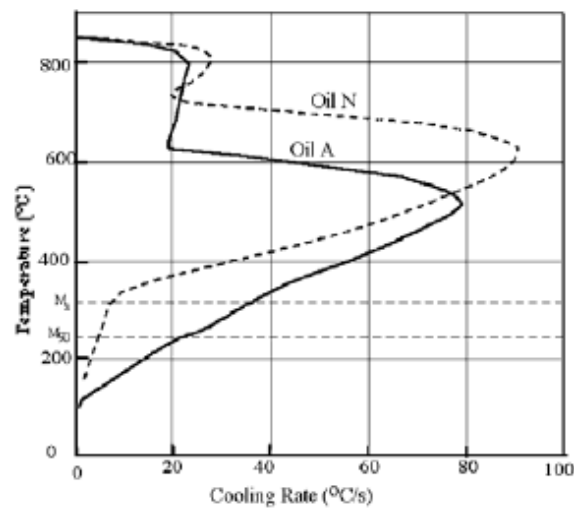
Πίνακας 2.1.Τιμές δραστηκότητας διαφόρων ψυκτικών μέσων χαλύβων κάτω από διάφορες συνθήκες [9]

Ενδεικτικά παρατίθενται τα παρακάτω διαγράμματα των ρυθμών απόψυξης διαφόρων μέσων:

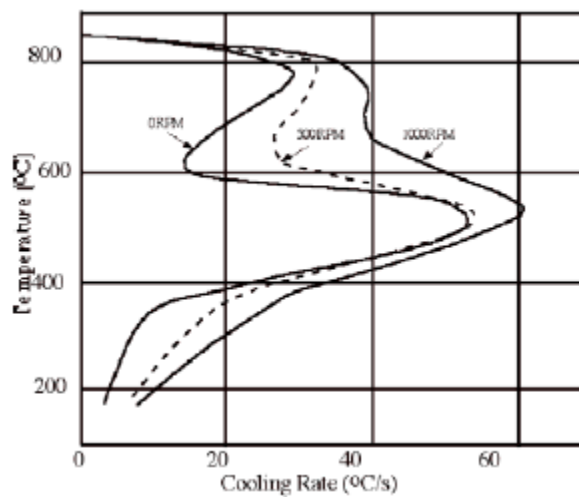
¹ το νερό βρίσκεται σε θερμοκρασία 150°C(580°F)



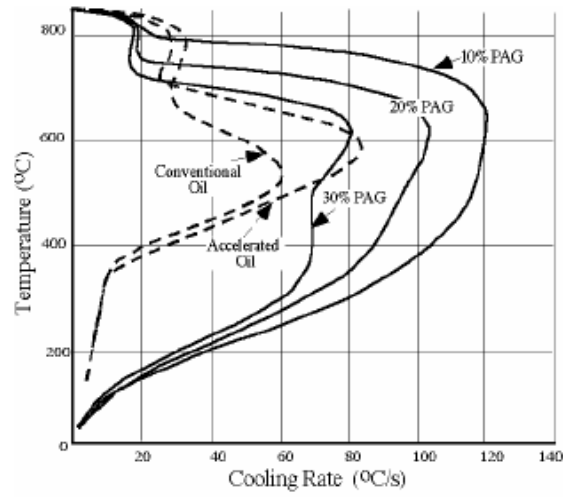
Διάγραμμα 2.6.Τυπικές καμπύλες ρυθμών απόψυξης διαφόρων μέσων στους 30°C ,χωρίς ανάδευση.[18]



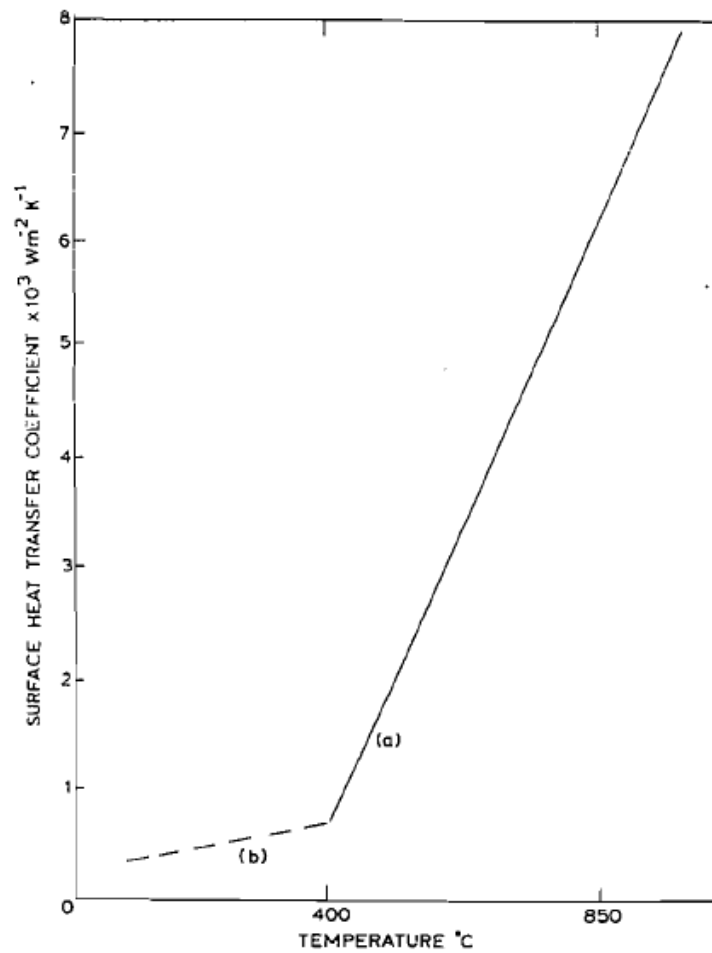
Διάγραμμα 2.7.Ρυθμοί απόψυξης δύο διαφορετικών λαδιών [18]



Διάγραμμα 2.8.Καμπύλες ρυθμών απόψυξης συμβατικού λαδιού στους 40°C , μεταβαλλόμενες με την ανάδευση. [18]



Διάγραμμα 2.9.Καμπύλες ρυθμών απόψυξης πολυμερούς μέσου PAG συγκρινόμενες με αυτές του λαδιού [18]



Διάγραμμα 2.10. Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της επιφάνειας ανοξειδωτου γάλυβα. (α) Απόψυξη από τους 850^οC μέχρι τους 400^οC σε λουτρό αλάτων , (b) απόψυξη από τους 400^οC μέχρι τους 20^οC σε λάδι.[10]

Είναι φανερό, ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού μέσου, τόσο ελαττώνεται η ταχύτητα ψύξης της επιφάνειας του μετάλλου, δεδομένου ότι το υγρό βρίσκεται πλησιέστερα του σημείου εξάτμισης του, άρα έχει ανάγκη μικρότερου ποσού θερμότητας για να σχηματισθεί ατμός. Στην περίπτωση των λαδιών, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τους γίνονται πιο λεπτόρρευστα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας λόγω αγωγής και ως εκ τούτου, αυξάνεται η δραστικότητα τους ως ψυκτικών μέσων.

Η ταχύτητα ανάδευσης επιδρά θετικά στην ταχύτητα απόψυξης ,καταστρέφοντας το σχηματιζόμενο στρώμα ατμών και ελαττώνοντας έτσι το θερμοκρασιακό εύρος του πρώτου σταδίου απόψυξης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα δραστικά λουτρά προκαλούν μεγαλύτερες εσωτερικές τάσεις και ενδέχεται να προκαλέσουν τη ρηγμάτωση του χάλυβα, κατά τη βαφή. Σε ότι αφορά το μέταλλο που θα υποστεί βαφή, είναι προφανές ότι λεπτές πλάκες και σύρματα μικρής διαμέτρου παρουσιάζουν γρηγορότερη ψύξη από τις σφαιρικές μεταλλικές μορφές.

Η μάζα του αντικειμένου παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο βαφής. Κατά την βαφή, μια ράβδος χάλυβα μεγάλης διαμέτρου απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο για την εξίσωση των θερμοκρασιών μέσου-αντικειμένου σε σχέση με μία μικρότερης διαμέτρου.

Η χημική σύσταση του χάλυβα αποτελεί καταλυτικό παράγοντα κατά την επιλογή του μέσου απόψυξης αφού αυξανόμενου του ποσοστού κραμάτωσής του (αύξηση της εμβαπτότητας) μπορεί να μειωθεί η δραστικότητα του μέσου που θα δώσει πλήρη μαρτενσιτική δομή στο τεμάχιο.

Τέλος, σε ότι αφορά τα σχηματιζόμενα οξειδία όπως εξανθράκωση στη μεταλλική επιφάνεια, επιβραδύνουν, γενικά , την ταχύτητα απόψυξης , εκτός από την περίπτωση που ένα μέρος αποκολλάται ή αποσπάται, οπότε συντελούν στην ανομοιομορφη ψύξη της. Προκειμένου να μειωθεί η παραγωγή των οξειδίων αυτών, είτε γίνεται επικάλυψη της μεταλλικής επιφάνειας με Cu ή ενδεχομένως με Al ή άλλο μέταλλο, είτε η ψύξη πραγματοποιείται σε αδρανή ατμόσφαιρα (π.χ.υδρογονωμένου αζώτου), είτε χρησιμοποιούνται υγρά άλατα ουδέτερα προς το χάλυβα, είτε, τέλος, το μέταλλο θερμαίνεται σε κάμινο που περιέχει ρινίσματα σιδήρου, τα οποία δεσμεύουν ευκολότερα το οξυγόνο προς δημιουργία οξειδίων.

2.1.6. Παρατηρήσεις

1) Όπως παρουσιάστηκε στα Διαγράμματα 2.1 έως 2.3, αλλά και στα Διαγράμματα 2.6 έως 2.10 ο ισοδύναμος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h δεν είναι σταθερός κατά την διάρκεια της απόψυξης και γενικότερα η μεταβολή του με τη θερμοκρασία μπορεί να αποτυπωθεί, με πολύ καλή προσέγγιση, από ένα πολώνυμο τετάρτου βαθμού (ουσιαστικά είναι έκτου αλλά οι όροι των δύο τελευταίων τάξεων είναι αμελητέοι).

2) Η επιλογή του μέσου βαφής αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την απόψυξη του χάλυβα σε σχέση με την κραμάτωσή του. Όσο περισσότερο κραματωμένος είναι ένας χάλυβας, τόσο ηπιότερο το μέσο που θα του δώσει μαρτενσιτική δομή σε όλη τη μάζα του, τόσο μικρότερες οι παραμένουσες τάσεις μετά την απόψυξη αλλά και τόσο μικρότερες οι πιθανότητες ρηγματώσεων κατά την θερμική κατεργασία του τεμαχίου.

3) Η χρήση των διαφόρων αερίων ως μέσα απόψυξης σε φούρνους υψηλής πίεσης γίνεται όλο και πιο δημοφιλής αφού:

- Το εύρος της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ επιφάνειας του τεμαχίου και του κυκλοφορούμενου αερίου είναι μεγάλο. Αυξάνοντας την πίεση μέσα στο φούρνο, την ταχύτητα ροής του αερίου και χρησιμοποιώντας ακροφύσια σε διαφορετικές περιοχές της επιφάνειας του τεμαχίου, πολλά είδη χαλύβων μπορούν να αποκτήσουν πλήρως μαρτενσιτική δομή αντί να γίνει η απόψυξη σε λάδι (ισχυρότερο μέσο απόψυξης).

- Η ταχύτητα απόψυξης μπορεί να είναι πιο ομοιόμορφη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παραμόρφωση.

- Με χρήση ευγενούς αερίου, τα τεμάχια μετά την απόψυξη είναι καθαρά χωρίς επιφανειακά στρώματα που θα πρέπει μετέπειτα να απομακρυνθούν.

- Η βαφή μέσω αερίων είναι περιβαλλοντικά φιλικότερη σε σχέση με την χρήση υγρών μέσων βαφής.[2]

Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι σημαντικά αλλά από την άλλη πλευρά :

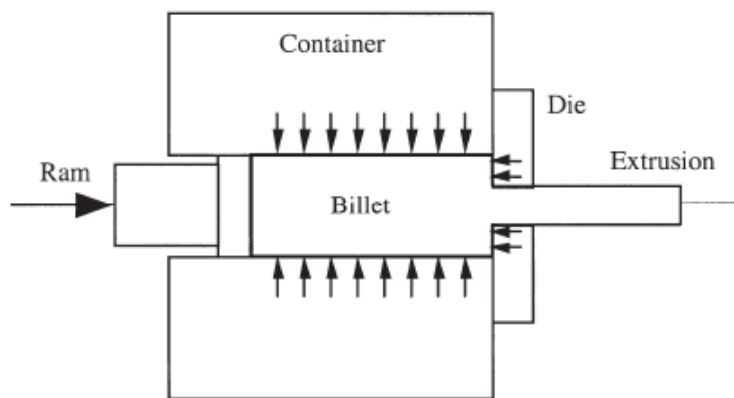
-τα αέρια εξακολουθούν να αποτελούν ήπια μέσα τα όποια μπορούν να χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένους χάλυβες, ελαφρά και υψηλά κραματομένων. Στην Ελλάδα σήμερα χρησιμοποιούνται κατά βάση χάλυβες κατασκευών χωρίς αυξημένες απαιτήσεις κραμάτωσης.

-το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης είναι αρκετά υψηλό αφού πρόκειται για μια βασική αλλαγή στη λειτουργία της εταιρείας θερμικών κατεργασιών. Θα πρέπει να υπάρξει πολύ σημαντικό κίνητρο (όπως τα περιβαλλοντικά οφέλη που προαναφέρθηκαν) ώστε μια εταιρεία να αλλάξει εξοπλισμό παρά την κεκτημένη τεχνογνωσία της με την οποία καταφέρνει να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα όσον αφορά τις εκτελούμενες θερμικές κατεργασίες οποιουδήποτε υλικού.[8]

2.2.Διέλαση

2.2.1. Γενικά στοιχεία

Διέλαση είναι η διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης στην οποία ,ειδικά διαμορφωμένος κύλινδρος από μέταλλο (μπιγιέτα) πιέζεται και εξαναγκάζεται να περάσει από μια ειδικά διαμορφωμένη σπή μήτρας, μικρότερης διατομής από την αρχική. Η συγκεκριμένη κατεργασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3.Ορισμός και αρχή λειτουργίας της κατεργασίας της διέλασης.[11]

Η διέλαση είναι μια έμμεση διαδικασία συμπίεσης. Οι έμμεσα εφαρμοζόμενες δυνάμεις συμπίεσης που αναπτύσσονται με την αλληλεπίδραση της μπιγιέτας με τον θάλαμο και τη μήτρα που λαμβάνει χώρα η συμπίεση και της μήτρας φτάνουν σε πολύ μεγάλες τιμές. Η αλληλεπίδραση της μπιγιέτας με το θάλαμο και την μήτρα οδηγεί σε υψηλές θλιπτικές τάσεις οι οποίες μπορούν ελαχιστοποιήσουν τις

ρηγματώσεις του υλικού κατά την διάρκεια του βασικού σταδίου της κατεργασίας. Η διέλαση είναι καλή μέθοδος για την καταστροφή της δομής της χύτευσης της μπιγιέτας γιατί υποβάλλεται μόνο σε θλιπτικές τάσεις.

Η διέλαση μπορεί να είναι εν ψυχρώ (<200⁰C) ή εν θερμώ (>200⁰C), γεγονός που εξαρτάται από το κράμα και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Στη θερμή διέλαση , η μπιγιέτα προθερμαίνεται ώστε να διευκολύνει την πλαστική παραμόρφωση.[11]

2.2.2. Είδη Διέλασης

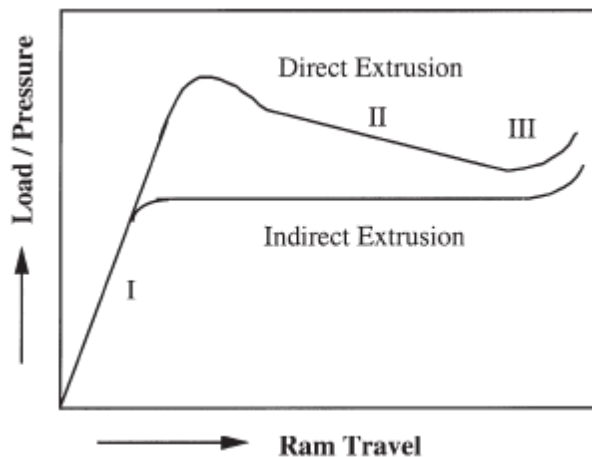
Τα δύο βασικά είδη διέλασης είναι η άμεση και η έμμεση , οι οποίες χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες αλουμινίου όπως φαίνεται στα σχήματα 3 και 8. Συμπαγή και κοίλα σχήματα σχεδιάζονται και υπόκεινται σε διέλαση για ένα μεγάλο φάσμα περιπτώσεων. Παραδείγματα αποτελούν :

- Συμπαγή τμήματα, μπάρες, ράβδοι που προέρχονται από μπιγιέτες μετά από άμεση διέλαση.
- Σωλήνες και κοίλες περιοχές που προέρχονται από μπιγιέτες μετά από διέλαση μέσα από κυκλικές οπές ή τύπου γέφυρας μητρών.
- Σωλήνες και κοίλες επιφάνειες που προέρχονται από κοίλες ή συμπαγείς μπιγιέτες μετά από άμεση διέλαση.
- Πολύπλοκης μορφής συμπαγείς διατομές, μπάρες και ράβδοι που προήλθαν από συμπαγείς μπιγιέτες που εισήλθαν μέσα σε σφραγισμένο θάλαμο , περνώντας στην συνέχεια μέσα από μήτρες τοποθετημένες στο κινούμενο στέλεχος του καλουπιού με έμμεση διέλαση.

Άμεση διέλαση (Συμβατική)

Η πιο σημαντική και συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται στην διέλαση αλουμινίου είναι η άμεση διέλαση. Το Σχήμα 2.3 δείχνει την γενική αρχή της αμέσου διελάσεως όπου η μπιγιέτα έχει τοποθετηθεί στο θάλαμο του καλουπιού και πιέζεται μέσα από την μήτρα μέσω ενός εμβόλου. Η άμεση διέλαση βρίσκει εφαρμογή στην βιομηχανική κατασκευή συμπαγών ράβδων, μπαρών, κοίλων σωλήνων και γενικότερα κοίλων και συμπαγών τμημάτων σύμφωνα με το σχήμα της μήτρας. Στην άμεση διέλαση , η διεύθυνση της ροής

του μετάλλου είναι ίδια με αυτή που έχει το έμβολο πίεσης. Κατά την διάρκεια της άμεσης διέλασης η καμπύλη φορτίου ή πίεσης συναρτήσει της κίνησης του εμβόλου φαίνεται στο Σχήμα 2.4:



Σχήμα 2.4.Μεταβολή της τιμής του φορτίου ή της πίεσης με την μετατόπιση του εμβόλου (άμεση , έμμεση διέλαση) [11]

Τυπικά , η κατεργασία αυτή περιγράφεται σαν να έχει τρεις διακριτές περιοχές :

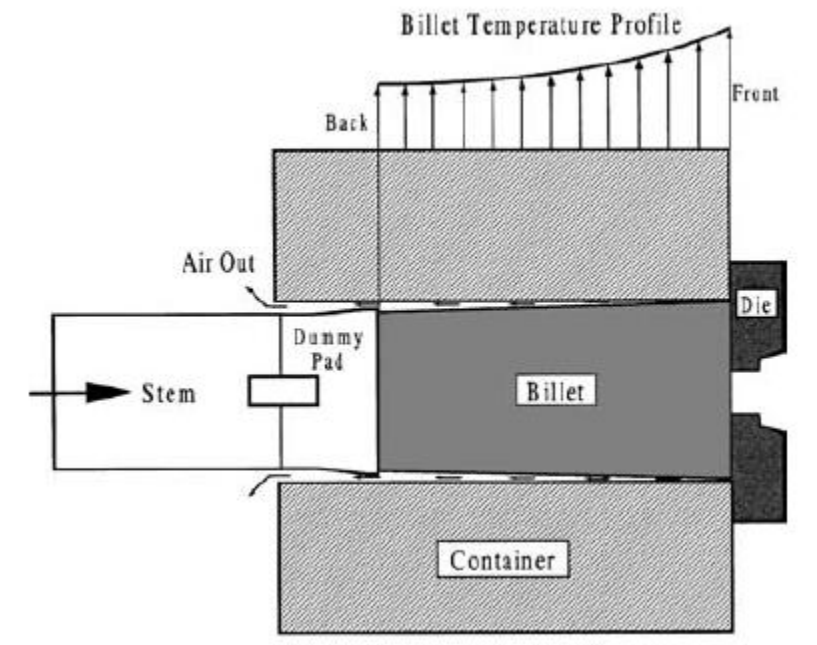
- I. Η μπιγιέτα αρχίζει να πιέζεται μέσα στο θάλαμο και η πίεση αυξάνει γρήγορα μέχρι την μέγιστη τιμή της.
- II. Η πίεση ελαττώνεται και η διέλαση μεταπίπτει σε μια σταθερή κατάσταση.
- III. Η πίεση φτάνει την μικρότερη τιμή της ακολουθούμενη από μια απότομη αύξηση κατά την συμπίεση του τελευταίου τμήματος.

Εν σειρά διέλαση μπιγιετών (Billet-to-billet extrusion)

Η εν σειρά διέλαση μπιγιετών είναι μια ειδική μέθοδος για κράματα αλουμινίου τα οποία συγκολλούνται εύκολα μεταξύ τους στην θερμοκρασία και πίεση της διέλασης. Θα πρέπει να έχει γίνει τέλεια συγκόλληση των δύο μπιγιετών κατά την ολίσθησή τους μέσα στο θάλαμο του καλουπιού ώστε να μην υπάρξει κάποια αποκόλληση κατά τις παρακάτω απαιτήσεις:

1. Καλή συγκολλησιμότητα στη θερμοκρασία της πλαστικής παραμόρφωσης.
2. Ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας.
3. Η επιφάνεια της μπιγιέτας να είναι καθαρή.
4. Μπιγιέτες με προιονισμένα και καθαρά από λιπαντικά άκρα.

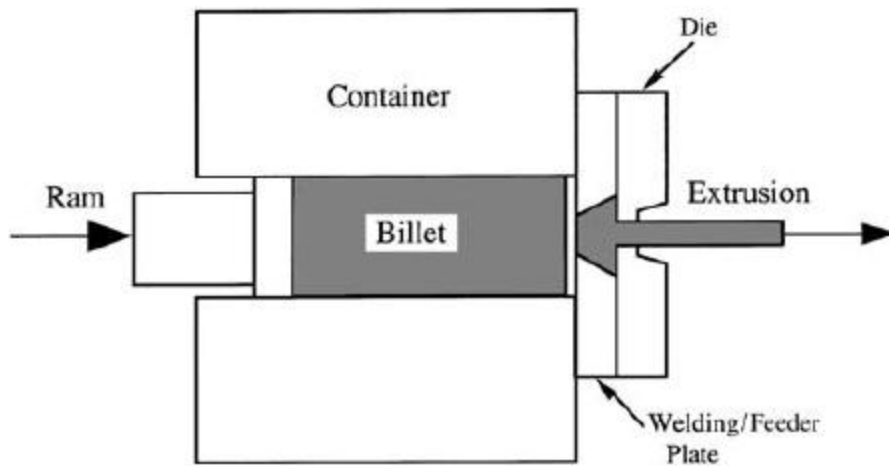
5. Ο θάλαμος του καλουπιού να είναι πλήρως απαεριωμένος κατά την έναρξη της διέλασης χρησιμοποιώντας μπιγιέτα με βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων (Σχήμα 5) ώστε να αποφευχθούν φουσκάλες στην επιφάνεια ή άλλες ατέλειες.



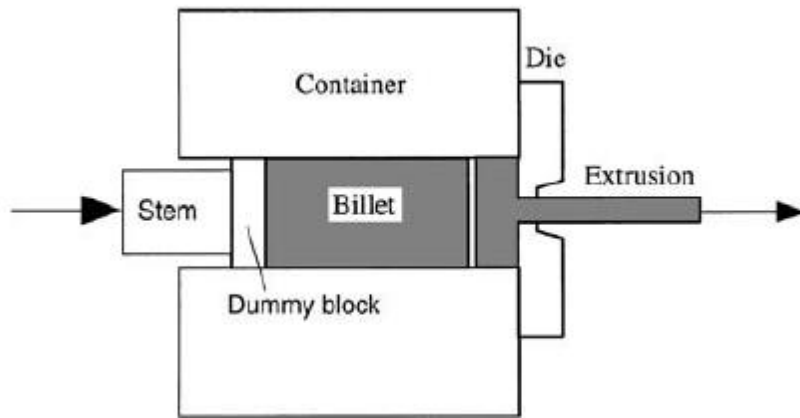
Σχήμα 2.5.Απαερίωση του θαλάμου κατά την κατεργασία.[11]

Έχουν αναπτυχθεί δύο μέθοδοι της εν σειρά διέλασης. Κατά την πρώτη μέθοδο , μετά την διέλαση και του τελικού άκρου της προηγηθείσας μπιγιέτας η επόμενη συγκολλάται με το προηγούμενο ακριβώς στο σημείο που έχει απομείνει μέσα στη μήτρα (πλάκα τροφοδοσίας) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.

Η δεύτερη μέθοδος δεν απαιτεί την ύπαρξη της απόληξης της προηγηθείσας μπιγιέτας ώστε να υπάρξει συγκόλληση , αλλά η επερχόμενη μπιγιέτα πιέζεται απευθείας στην προηγούμενη που βρίσκεται μέσα στο θάλαμο του καλουπιού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Το τμήμα που είναι προσαρμοσμένο πάνω στο έμβολο αποκόπτει ένα δακτύλιο αλουμινίου από την μπιγιέτα κατά την διαδρομή της μέσα στο θάλαμο του καλουπιού ο οποίος πρέπει να απομακρύνεται σε κάθε επιστροφή του εμβόλου κατά την φόρτωση νέας.[11]



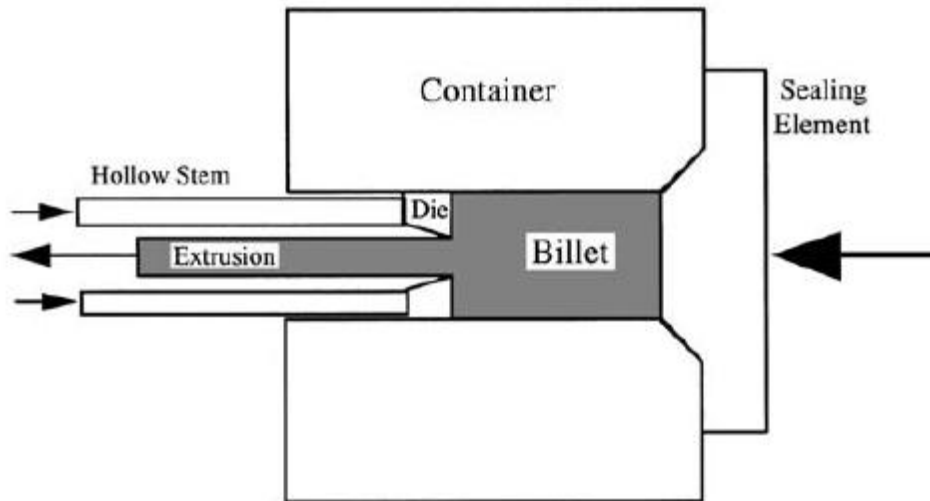
Σχήμα 2.6. Εν σειρά διέλαση με χρήση πλάκας συγκόλλησης πριν από την μήτρα (Μέθοδος 1).[11]



Σχήμα 2.7.Διέλαση εν σειρά (Μέθοδος 2).[11]

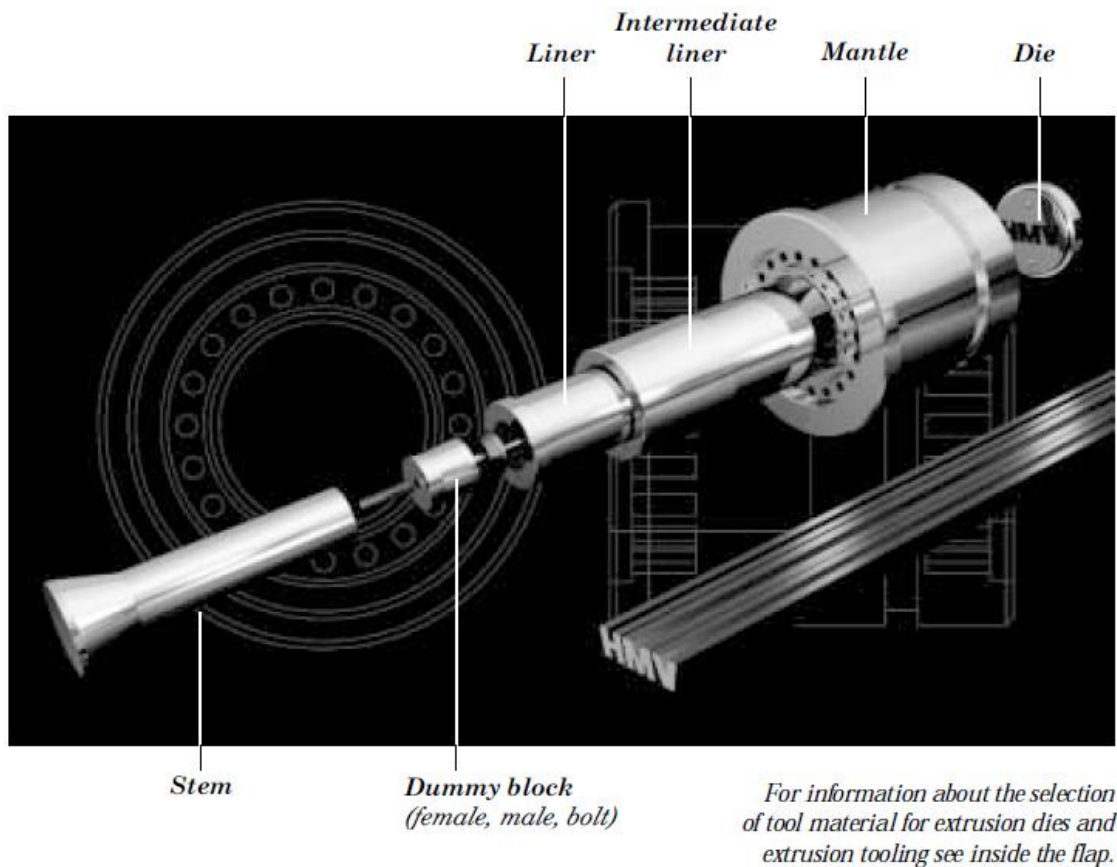
Έμμεση διέλαση

Στην έμμεση διέλαση , η μήτρα από την εμπρός πλευρά του εμβόλου είναι διάτρητη και προχωρά σε σχέση με το θάλαμο, αλλά δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της μπιγιέτας και το θαλάμου.(Σχήμα 2.8)Για το λόγο αυτό, η κατεργασία χαρακτηρίζεται από την απουσία ανάπτυξης τριβής μεταξύ της επιφάνειας της μπιγιέτας και του θαλάμου του καλουπιού αλλά και δεν υπάρχει μετατόπιση του κέντρου της μπιγιέτας σε σχέση με τις περιοχές πέριξ της. Η μεταβολή του φορτίου ή της πίεσης σε σχέση με την διαδρομή του εμβόλου παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα2.8. Έμμεση διέλαση.[11]

2.2.3. Υλικά κατασκευής μητρών και εξαρτημάτων διέλασης



Σχήμα 2.9. Τμήματα και εξαρτήματα μιας πρέσας διέλασης.[12]

Οι απαιτήσεις από τον εργαλειοχάλυβα που προορίζεται για την κατασκευή τμήματος ή εξαρτήματος των μητρών για την κατεργασία της διέλασης εξαρτώνται από την συνολική θερμοκρασία λειτουργίας, το μέταλλο που υπόκειται σε διέλαση και από την τοπολογία του εξαρτήματος σε σχέση με την θερμή μπιγιέτα και το παραγόμενο προφίλ διέλασης. Το τμήμα το οποίο υφίσταται τη μεγαλύτερη και σοβαρότερη θερμική επιρροή αλλά και τις μεγαλύτερες τάσεις είναι η μήτρα. Τα υπόλοιπα μέρη τα οποία υφίστανται υψηλές θερμοκρασίες είναι το άμεσο περίβλημα του τεμαχίου (liner) , το ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ εμβόλου και μπιγιέτας (dummy block) , και σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται , ο μεταλλικός πυρήνας (π.χ. στην κατασκευή σωλήνων χαλκού)(βλέπε Σχήμα 2.9) .

Οι τυπικές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα τμήματα αυτά είναι:

- Στη διέλαση Αλουμινίου και των κραμάτων του: 400⁰C-500⁰C.
- Στη διέλαση Χαλκού και των κραμάτων του: 600⁰C -1100⁰C.
- Στη διέλαση χάλυβα:1100⁰C -1250⁰C.

Η βέλτιστη επιλογή του εργαλειοχάλυβα και η σωστή θερμική κατεργασία είναι οι καταλυτικοί παράγοντες για την αύξηση του χρόνου ζωής των εργαλείων και μητρών διέλασης τα οποία υπόκεινται σε αυτές τις θερμοκρασιακές συνθήκες.[12]

Η διαφοροποίηση της έντασης του θερμικού περιβάλλοντος στα διάφορα τμήματα της μήτρας διέλασης λειτουργούσας «εν θερμώ » (hot work tool steel) σημαίνει ότι απαιτείται διαφορετική θερμική αντοχή από τον εργαλειοχάλυβα στα επιμέρους σημεία της πρέσας. Το προφίλ σε σχέση με τις απαραίτητες ιδιότητες που πρέπει να διαθέτει ο εργαλειοχάλυβας είναι:

1. Επαρκής αντοχή σε τριβή σε υψηλή θερμοκρασία.
2. Αυξημένη αντοχή και σκληρότητα σε υψηλή θερμοκρασία.
3. Αντίσταση στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά αλλά και κατά την λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία.
4. Καλή αντοχή σε θλίψη (αναγκαία ιδιότητα στα τμήματα μεταξύ εμβόλου-μπιγιέτας) και κάμψη (αναγκαία ιδιότητα στους μεταλλικούς πυρήνες) σε υψηλή θερμοκρασία.
5. Υψηλή αντοχή σε ερπυσμό.
6. Αποδεκτή αντίσταση στην έναρξη ρηγματώσεων από θερμική κόπωση.

Οι πιο ενδιαφέρουσες από τις ιδιότητες αυτές συζητούνται στη συνέχεια.

Αντίσταση στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά.

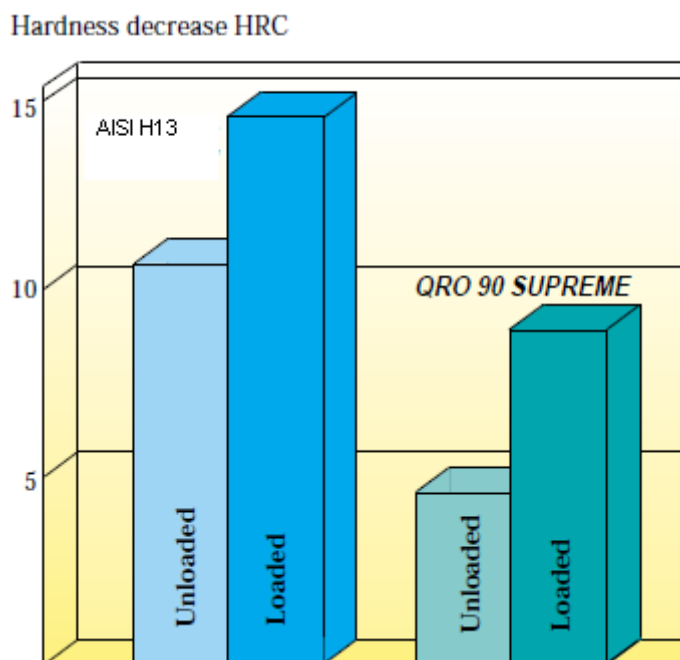
Η αντοχή στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά ενός σκληρυμένου εργαλειοχάλυβα μπορεί να καθοριστεί από την καμπύλη επαναφοράς του. Σε αυτή, παρουσιάζεται η σκληρότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς για δεδομένο χρόνο επαναφοράς. Μία εναλλακτική μέθοδος για την παρουσίαση της ιδιότητας αυτής είναι μέσω διαγράμματος που εμφανίζει την σκληρότητα του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με την πάροδο του χρόνου για δεδομένη θερμοκρασία επαναφοράς. Όσο περισσότερο ένα υλικό διατηρεί την σκληρότητά του κατά την αύξηση της θερμοκρασίας ή με την πάροδο του χρόνου τόσο καλύτερη είναι η αντοχή του στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά.

Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων και σκληρότητας σε υψηλή θερμοκρασία.

Γενικά , η βελτιωμένη αντοχή στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά σχετίζεται με την αυξημένη αντοχή και σκληρότητα σε υψηλή θερμοκρασία. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σχετικά καλές τιμές αντοχής και σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες είναι σημαντικό προαπαιτούμενο για να υπάρχει αντοχή στην τριβή στη θερμοκρασία αυτή. Υψηλές τιμές αντοχής και σκληρότητας σε υψηλή θερμοκρασία είναι επίσης σημαντικές με σκοπό να επιτευχθεί η απαραίτητη αντίσταση στις ρηγματώσεις από θερμική κόπωση.

Αντοχή σε θλίψη και κάμψη σε υψηλή θερμοκρασία

Όσο υψηλότερες είναι οι τιμές της αντοχής και της σκληρότητας σε υψηλή θερμοκρασία τόσο ανεβασμένες θα είναι οι τιμές της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής στη θερμοκρασία αυτή. Η βελτιωμένη θλιπτική αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία φαίνεται στο Διάγραμμα 2.11 όπου παρουσιάζεται η πτώση σκληρότητας για μια δεδομένη αρχική τιμή για τους εργαλειοχάλυβες εργαζόμενους «εν θερμώ» AISI H13 (εμπορική ονομασία ORVAR 2M Microdized) και QRO 90 SUPREME (μόνο εμπορική ονομασία, δεν υπάρχει αντίστοιχη τυποποίηση) με και χωρίς θλιπτική φόρτιση για εικοσιτέσσερις ώρες στους 600⁰C. Από την σύγκριση τους, φαίνεται ότι η μηχανική φόρτιση επιταχύνει το μαλάκωμα του χάλυβα.Ο



Διάγραμμα 2.11.Συγκριτική μεταβολή της σκληρότητας δύο εργαλειοχάλυβων σε υψηλές θερμοκρασίες .Χρόνος δοκιμής:24 ώρες , θερμοκρασία δοκιμής:600⁰C ,καταπόνηση: θλίψη.[12]

QRO 90 SUPREME διατηρεί την υπεροχή του σε σχέση με τον AISI H13 και στις δύο περιπτώσεις.

Η αντοχή σε κάμψη σε υψηλή θερμοκρασία επηρεάζεται, εκτός από την σκληρότητα σε υψηλή θερμοκρασία , από την δυσθραυστότητα αλλά και την ολκιμότητα του χάλυβα.

Ολκιμότητα και Δυσθραυστότητα

Η ολκιμότητα ενός υλικού αντιπροσωπεύει την ικανότητα του να αντέχει την πλαστική επιμήκυνση χωρίς να υφίσταται θραύση και επηρεάζεται έντονα από την καθαρότητα και την ομοιογένεια του.

Η δυσθραυστότητα ενός υλικού προορισμένου για την κατασκευή μητρών αντιπροσωπεύει την ικανότητα του να αντέχει στην φόρτιση , χωρίς να υπόφισταται θραύση σε εγκοπές ή σε άλλα σημεία συγκέντρωσης τάσεων.

Αντοχή σε ερπυσμό

Ερπυσμός είναι η αργή , χρονικά εξαρτημένη παραμόρφωση ενός μετάλλου που υφίσταται μηχανική φόρτιση σε τιμές μικρότερες από αυτές που φυσιολογικά θα απαιτούνταν για την πλαστική παραμόρφωση του σε δεδομένη θερμοκρασία. Υψηλές

τιμές της αντοχής σε ερπυσμό έχουν σαν αποτέλεσμα καλή αντοχή σε θραύση σε υψηλή θερμοκρασία και την επιμήκυνση της χρονικής διάρκειας υποβολής συγκεκριμένου φορτίου χωρίς ουσιαστική διαστασιακή μεταβολή. [12]

2.2.4. Επιλογή υλικού για μήτρες διέλασης

Μία μήτρα διέλασης εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες που προέρχονται όχι μόνο από την μπιγιέτα που έχει θερμανθεί αλλά επίσης και από την θερμότητα που εκλύεται εξ' αιτίας των παραμορφώσεων λόγω της διαμορφώσεως του υλικού αλλά και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων τριβής μεταξύ μπιγιέτας-μήτρας. Επιπλέον, η μήτρα εκτίθεται σε υψηλές πιέσεις και στην περιοχή της διαμορφώσεως σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές δυνάμεων τριβής. Στη διέλαση αλουμινίου το πολύ λεπτό στρώμα του σκληρού οξειδίου, το οποίο δημιουργείται ακαριαία στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου μετάλλου, προκαλεί στη μήτρα εκτεταμένη φθορά λόγω εκτριβής (abrasion wear) κατά τη λειτουργία της.

Σχεδιασμός μητρών

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή μητρών διέλασης είναι μια πολύ εξειδικευμένη διαδικασία. Είναι απαραίτητο να προβλεφθούν οι απαραίτητες ανοχές λόγω συστολής, ελαστικής παραμόρφωσης, η φύση της κατατομής του προφίλ, καθώς και η υψηλή ανομοιογένεια στην κατανομή της ταχύτητας κατά τη διέλαση πολύπλοκων μορφών, έτσι ώστε οι διατομές διέλασης να παραμένουν κατά το δυνατόν κάθετες στη διεύθυνση της διέλασης. Τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρούνται κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή της μήτρας είναι τα παρακάτω:

- Υψηλή διαστασιακή ακρίβεια, ώστε το παραγόμενο προφίλ να μην έχει υπερβολικό βάρος ανά μέτρο μήκους.
- Σωστή γεωμετρία μήτρας από την αρχή, ώστε να αποφεύγεται η εκτεταμένη, δαπανηρή, επανακατεργασία.
- Πολύ προσεγμένο φινίρισμα ώστε να είναι να είναι αποδεκτή η ποιότητα επιφανείας στο παραγόμενο προφίλ.
- Κατάλληλος σχεδιασμός, επιλογή του υλικού, θερμική κατεργασία κ.τ.λ. ώστε να αποκτά η μήτρα την μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής.
- Ορθολογική παραγωγή η οποία οδηγεί σε χαμηλό κόστος κατασκευής της μήτρας.

Παράγοντες που καθορίζουν το χρόνο ζωής της μήτρας.

Οι τάσεις που αναπτύσσονται σε μια μήτρα διέλασης κατά την λειτουργία της είναι κυρίως μηχανικές και θερμικές. Παρόλα αυτά, οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών είναι γενικά μέτριας τάξης κατά την διέλαση, αφού οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταβάλλονται αρκετά αργά. Για το λόγο αυτό οι ρηγματώσεις λόγω θερμοκρασιακής κόπωσης αναπτύσσονται περισσότερο προοδευτικά κατά τη διέλαση απ' ότι σε άλλες κατεργασίες όπου χρησιμοποιούνται εν θερμώ εργαλαιοχάλυβες. Στις περιπτώσεις αυτές οι θερμοκρασιακοί κύκλοι είναι πολύ πιο δριμείς όπως σε καλούπια χύτευσης. Από την άλλη πλευρά, η φθορά από τριβή είναι πιο έντονη στη διέλαση, από τη στιγμή που η κατεργασία εμπλέκει την ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα της μήτρας και του υπό διέλαση μετάλλου.

Για τους παραπάνω λόγους, ο χρόνος ζωής του καλουπιού είναι πεπερασμένος και περιορισμένος από : (κατά σειρά σοβαρότητας)

- Φθορά από τριβή.
- Πλαστική παραμόρφωση ή ρηγματώσεις.
- Θραύση επιφανειακά ή σε ακμή.
- Φθορά στη σταθερότητα των στηρίξεων του εργαλείου.
- Δημιουργία θερμοκρασιακών ρηγματώσεων.

Ο δεύτερος κατά σειρά λόγος απαιτεί περαιτέρω ανάλυση. Η πλαστική παραμόρφωση και οι ρηγματώσεις μπορούν να εμφανιστούν κατά την διέλαση πολύ πολύπλοκων προφίλ μέσα από καλούπια με υψηλούς λόγους μήκος / πάχος (tongue ratio). Σε αυτή την περίπτωση, η πολύ μεγάλη τάση στο σημείο εξαγωγής του προφίλ συνδυασμένη με την τοπικά μεγάλη θερμοκρασία μπορεί να δημιουργήσει κάμψη και σε μερικές περιπτώσεις, αποκοπή αν η δυσθραυστότητα που παρουσιάζει τ ο χάλυβας κάθετα ως προς τη ροή του αλουμινίου είναι ανεπαρκής.

Ένας εργαλαιοχάλυβας με καλή αντοχή στην επαναφορά και επαρκή δυσθραυστότητα κάθετα ως προς τη διεύθυνση διέλασης αποτελεί πανάκεια για καλούπια με μεγάλους λόγους μήκους/πάχους.

Βελτίωση της αντοχής στη φθορά

Οι εργαλειοχάλυβες που λειτουργούν «εν θερμώ» είναι κατάλληλοι για εναζώτωση η οποία δημιουργεί ένα σκληρό επιφανειακό στρώμα με υψηλή αντοχή στη φθορά. Η εναζώτωση συνήθως γίνεται μέσω λουτρού αλάτων. Εναζώτωση (Tufftriding) σε μήτρα διελάσεως μπορεί να γίνει πολλές φορές μέχρι να κριθεί ακατάλληλο το καλούπι. Η εναζώτωση των μητρών διέλασης δεν βελτιώνει μόνο την αντοχή στην τριβή αλλά μειώνει και την τριβή.

Όσον αφορά την αντοχή στη φθορά από τριβή, η αντοχή στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά και η διατήρηση της αντοχής και της σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες αποτελούν τις σημαντικότερες ιδιότητες για το υλικό. Όσον αφορά την επαφή της μήτρας με το προς διέλαση μέταλλο, εκλύονται μεγάλα ποσά θερμότητας και αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, λόγω παραμόρφωσης και τριβής. Έτσι, προκαλείται υπολογίσιμη φθορά αν η θερμοκρασία ανεβεί τόσο πολύ ώστε ο εργαλειοχάλυβας στην περιοχή της διαμόρφωσης του προφίλ να μαλακώσει πολύ. Στην περίπτωση της εναζωτωμένης μήτρας, το μητρικό μέταλλο δεν μπορεί κάτω από αυτές τις συνθήκες, να δώσει την απαιτούμενη στήριξη στο εναζωτωμένο τμήμα το οποίο θα φθαρεί γρηγορότερα από το συνηθισμένο.

2.3. Βελτιστοποίηση

Για να εφαρμοστεί μία μέθοδος βελτιστοποίησης σε κάποιο πρόβλημα, πρέπει να προηγηθεί η μοντελοποίηση του ώστε να έχει τρία βασικά στοιχεία :

- i. την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) που περιγράφει μαθηματικά αυτό που πρέπει να επιτευχθεί με την διαδικασία βελτιστοποίησης,
- ii. τις παραμέτρους βελτιστοποίησης (optimization parameters) που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα προσαρμόζεται για να πετύχει τους στόχους που έχουν τεθεί. Αυτοί, συνήθως, ταυτίζονται με τον αριθμό αγνώστων της αντικειμενικής συνάρτησης και το αποτέλεσμα μίας μεθόδου βελτιστοποίησης, είναι να βρεθεί το διάλυμα τιμών των παραμέτρων βελτιστοποίησης, που ικανοποιεί με τον απαιτούμενο τρόπο την αντικειμενική συνάρτηση, και

- iii. τους περιορισμούς (constraints) που διέπουν τις μεταβλητές του προβλήματος και οδηγούν την βελτιστοποίηση μέσα από καταστάσεις που πρέπει να ικανοποιούνται.

Από τις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στη συνέχεια οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αλλά και ντερμινιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία

2.3.1. Προβλήματα Βελτιστοποίησης

2.3.1.1. Αιτιοκρατικά και Στοχαστικά Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Μία διάκριση των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι σε αιτιοκρατικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic). Προσοχή, εδώ γίνεται αναφορά στο πρόβλημα και όχι στην μέθοδο βελτιστοποίησης. Τα περισσότερα οικονομικά και εμπορικά προβλήματα βελτιστοποίησης είναι στοχαστικά, με την έννοια ότι θέματα ζήτησης και προσφοράς προϊόντων και υπηρεσιών υπόκεινται στην τυχαιότητα της αγοράς και δεν μπορούν να προκαθοριστούν με σαφήνεια. Η συντριπτική πλειοψηφία των προβλημάτων βελτιστοποίησης στην αεροδυναμική είναι αιτιοκρατικά.

2.3.1.2. Συνεχή και Διακριτά Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Βασική διάκριση των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι στα **συνεχή** και στα **διακριτά** προβλήματα (continuous, discrete optimization). Τα συνεχή προβλήματα εμπλέκουν πραγματικές μεταβλητές ως ελεύθερες μεταβλητές ή ελεύθερες παραμέτρους ή μεταβλητές σχεδιασμού ή μεταβλητές βελτιστοποίησης, ενδεχομένως με άνω και κάτω όρια που οριοθετούν και τον χώρο ανίχνευσης κάθε μεταβλητής. Είναι προφανές ότι στην συνεχή βελτιστοποίηση αναζητείται η βέλτιστη λύση από ένα άπειρο πλήθος υποψηφίων λύσεων. Στα διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης αναζητούνται ακέραιες λύσεις από ένα πεπερασμένο πλήθος (συνήθως τεράστιο, με την έννοια ότι είναι πρακτικά αδύνατο να δοκιμασθούν όλες, μία προς μία) επιθυμητών λύσεων. Ουσιαστικά, αναζητούνται λύσεις που αντιστοιχούν σε αριθμό 'αντικειμένων'. Τα συνεχή προβλήματα έχουν συνήθως συνεχείς και παραγωγίσιμες αντικειμενικές συναρτήσεις (συναρτήσεις-στόχοι) και συναρτήσεις περιορισμών. Έτσι, επιτρέπουν τον υπολογισμό ή την προσέγγιση ,για κάθε υποψήφια λύση , της κλίσης της αντικειμενικής ή της συνάρτησης περιορισμού και γενικότερα είναι επιδεκτικά 'ευκολότερων' τρόπων επίλυσης.

Να λαμβάνεται υπόψη ότι η προσπάθεια επίλυσης διακριτών προβλημάτων με ‘συνεχείς’ μεθόδους βελτιστοποίησης (επειδή αυτές συνήθως διατίθενται) είναι επισφαλές. Το να οριστεί προσωρινώς η διακριτή μεταβλητή βελτιστοποίησης ως συνεχής, να λυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης και στη συνέχεια να στρογγυλευτούν οι λύσεις μπορεί να δώσει τελικά λύση που να απέχει αρκετά από την πραγματικά βέλτιστη.

2.3.2.Κατηγορίες (μέθοδοι) βελτιστοποίησης

Η μέθοδος βελτιστοποίησης είναι το εργαλείο που ανιχνεύει το χώρο των υποψηφίων λύσεων και οδηγεί (έξυπνα και γρήγορα αν είναι μια πραγματικά καλή μέθοδος βελτιστοποίησης) στον εντοπισμό της βέλτιστης από όλες τις υποψήφιες λύσεις. Οι τελευταίες έχουν συνήθως πολλαπλά άπειρο πλήθος και, για το λόγο αυτό, η ταχύτητα της μεθόδου βελτιστοποίησης είναι σημαντικός παράγων. Όμως, κατά την ανίχνευση του χώρου των υποψηφίων λύσεων απαιτείται υποστήριξη από ένα δεύτερο υπολογιστικό εργαλείο, αυτό που θα αξιολογεί και θα βαθμολογεί ως προς τους στόχους που τέθηκαν κάθε υποψήφια λύση.[20,21]

2.3.2.1. Μια Πρώτη Κατηγοριοποίηση

Ένας δυνατός, όχι όμως ο μοναδικός, τρόπος κατηγοριοποίησης των αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι ο χωρισμός σε έξι ομάδες. Ειδικότερα, ισχύει :

1. *Βελτιστοποίηση μέσω της διαδικασίας δοκιμής-λάθους (trial-and-error) και βελτιστοποίηση μέσω μαθηματικής συνάρτησης μεταφοράς.* Υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν γνωρίζουμε αρκετά για τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι εισόδου ενός συστήματος επηρεάζουν την έξοδό του. Για παράδειγμα, κατά την επιλογή της θέσης μίας κεραίας εσωτερικής λήψεως μίας συσκευής τηλεόρασης για την οποία η λήψη είναι η καλύτερη. Αν και υπάρχει πλήρης άγνοια πολλών και κρίσιμων πληροφοριών, όπως είναι η ακριβής θέση του πομπού και η ισχύς του, ωστόσο η προσπάθεια γίνεται. Μετά από διάφορες τυχαίες δοκιμές, καταλήγει κάποιος σε εκείνη τη θέση με το πλέον ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Οι πειραματιστές προτιμούν αυτού του είδους τις προσεγγίσεις προβλημάτων. Άλλωστε, μερικές από τις πλέον σημαντικές ανακαλύψεις έγιναν με αυτόν τον τρόπο, όπως είναι η αντιβιοτική δράση της πενικιλίνης. Στον αντίποδα, οι θεωρητικοί προτιμούν εκείνη την

βελτιστοποίηση η οποία στηρίζεται στην αποκάλυψη του συσχετισμού μεταξύ εισόδου-εξόδου και κατόπιν στη μοντελοποίηση αυτού.

2. Εάν υπάρχει μόνο μία παράμετρος, τότε η βελτιστοποίηση χαρακτηρίζεται ως *μονοδιάστατη*. Ένα πρόβλημα με δύο ή περισσότερες παραμέτρους απαιτεί την χρήση *βελτιστοποίησης πολλαπλών διαστάσεων*. Όσο ο αριθμός των διαστάσεων αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η δυσκολία επίλυσης του αντίστοιχου προβλήματος. Αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης πολλαπλών διαστάσεων στηρίζονται στην αναγωγή του προβλήματος σε μία σειρά από μονοδιάστατες βελτιστοποιήσεις.
3. *Δυναμική βελτιστοποίηση* σημαίνει ότι η έξοδος είναι συνάρτηση του χρόνου, εν αντιθέσει με την *στατική βελτιστοποίηση*, στην οποία η έξοδος είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Για παράδειγμα, η μετάβαση από ένα μέρος μίας μεγάλης πόλης σε ένα άλλο είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ποια, ωστόσο, είναι η βέλτιστη διαδρομή; Από την άποψη της χιλιομετρικής απόστασης, πρόκειται για ένα πρόβλημα στατικής βελτιστοποίησης, η λύση του οποίου βρίσκεται σχετικά εύκολα με την βοήθεια ενός χάρτη ή του οδομέτρου ενός αυτοκινήτου. Ωστόσο, από την άποψη του απαιτούμενου χρόνου, πρόκειται για ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα δυναμικής βελτιστοποίησης. Σε αυτήν την περίπτωση η πιο κοντινή διαδρομή δεν είναι σίγουρα και η συντομότερη, καθώς διάφοροι παράγοντες διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο, όπως είναι η ώρα της μετακίνησης (π.χ. ώρα αιχμής), ο καιρός (εάν βρέχει ή όχι), αστάθμητοι παράγοντες (π.χ. τυχόν τροχαίο ατύχημα). Η προσθήκη της παραμέτρου του χρόνου προσαυξάνει μεν την δυσκολία επίλυσης, ωστόσο προσδίδει και γοητεία στο πρόβλημα.
4. *Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης κατηγοριοποιούνται και με κριτήριο τη συνεχή ή διακριτή φύση των παραμέτρων*. Οι διακριτές παράμετροι μπορούν να πάρουν μόνο ορισμένες τιμές, ενώ οι συνεχείς παράμετροι μπορούν να λάβουν ένα άπειρο πλήθος τιμών. Σε ένα διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, η βέλτιστη λύση είναι ένας από τους πιθανούς συνδυασμούς των διακριτών μεγεθών. Ακριβώς για τον λόγο αυτό, έχει επικρατήσει και ο όρος συνδυαστική βελτιστοποίηση. Ωστόσο, σημειώνεται ότι, ανάλογα με το πρόβλημα, το πλήθος των δυνατών συνδυασμών μπορεί να είναι σχετικά μικρό ή απαγορευτικά μεγάλο. Ως παράδειγμα, αναφέρεται η σχεδίαση ενός οδοντωτού τροχού. Ο μηχανικός-σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει ένα πλήθος οδόντων, π.χ. 7 ή 9 ή 13. Ωστόσο, δεν έχει έννοια να σχεδιάσει γρανάζι με 9,3

οδόντες. Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα λιπαντικού που θα χρησιμοποιήσει δεν απαγορεύεται να είναι 1,23415112 lt, άσχετα με το αν για καθαρά πρακτικούς λόγους προτιμάται η στρογγυλοποίηση σε κάποιο δεκαδικό ψηφίο.

5. Οι παράμετροι συνήθως έχουν όρια ή περιορισμούς. *Βελτιστοποίηση άνευ περιορισμών*, όπως άλλωστε δηλώνει και ο όρος, σημαίνει ότι οι παράμετροι μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή. *Βελτιστοποίηση με περιορισμούς* σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση αναζητείται με ταυτόχρονη επιβολή ορισμένων συνθηκών που αφορούν στις παραμέτρους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, προβλήματα με περιορισμούς μπορούν να εκφραστούν σε προβλήματα άνευ περιορισμών. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισοτικοί ή ανισοτικοί, γραμμικοί ή μη γραμμικοί. Όταν το πρόβλημα βελτιστοποίησης χαρακτηρίζεται από γραμμικούς ισοτικούς ή ανισοτικούς περιορισμούς τότε χαρακτηρίζεται ως γραμμικό. Σε αντίθετη περίπτωση, χαρακτηρίζεται ως μη γραμμικό.
6. Μερικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αναζητούν την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης εκκινώντας από ένα αρχικό σετ τιμών, το οποίο διαρκώς διορθώνεται μέχρι το πέρας του αλγορίθμου. Όταν αυτή η διόρθωση υπακούει σε κανόνες των μαθηματικών και της αριθμητικής ανάλυσης, τότε η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως *ντετερμινιστική*. Βασικό μειονέκτημα τους είναι ο εγκλωβισμός τους σε τοπικά ακρότατα. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν αυτή η διόρθωση επιτυγχάνεται μέσα από διαδικασίες πιθανοτικού λογισμού, τότε χαρακτηρίζονται ως *στοχαστικές*. Βασικό πλεονέκτημα τους είναι η μικρότερη πιθανότητα εγκλωβισμού τους σε τοπικά ακρότατα, ενώ βασικό τους μειονέκτημα είναι ο πιο αργός ρυθμός σύγκλισης.[20,21]

2.3.2.2. Μια Δεύτερη Παραλλαγμένη Κατηγοριοποίηση

Ο βασικότερος διαχωρισμός των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι σε δύο κατηγορίες, τις **διακριτές** και τις **συνεχείς**. Ο διαχωρισμός αυτός προέρχεται από την μορφή του πεδίου ορισμού της προς βελτιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης.

Ένας δεύτερος διαχωρισμός βασίζεται στο αν για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιούνται παράγωγοι της αντικειμενικής συνάρτησης και ποιός τάξης. Έτσι, υπάρχουν οι μέθοδοι βελτιστοποίησης **μηδενικής, πρώτης και δεύτερης τάξης**. Οι μέθοδοι μηδενικής τάξης δεν χρησιμοποιούν πληροφορίες παραγώγου, η πρώτη

τάξης χρησιμοποιούν πληροφορίες πρώτης παραγώγου ενώ οι δεύτερης τάξης χρειάζονται και τον υπολογισμό της δεύτερης παραγώγου.

Οι μέθοδοι μηδενικής τάξης διαχωρίζονται σε **αιτιοκρατικές** και **στοχαστικές**, ανάλογα με τον τρόπο που επιλέγουν την νέα πιθανή λύση (διάνυσμα τιμών παραμέτρων βελτιστοποίησης) του προβλήματος που επιλύουν.

Οι **αιτιοκρατικές μέθοδοι** (deterministic methods) στηρίζονται στη βαθμιαία ολίσθηση μιας αρχικής λύσης προς την βέλτιστη μέσω απλών βηματικών διορθώσεων. Δυστυχώς, κάθε τροποποίηση στη συνάρτηση κόστους ή στην μοντελοποίηση του προβλήματος απαιτεί επαναδιατύπωση του μοντέλου βελτιστοποίησης. Παρότι οι αιτιοκρατικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα γρήγορες, διατρέχουν τον κίνδυνο να μην συγκλίνουν στο ολικό βέλτιστο αλλά να ‘παγιδευτούν’ σε περιοχές τοπικών ακροτάτων, γεγονός που εξαρτάται από την επιλογή αρχικής λύσης.

Μια αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί την γενικευμένη έννοια της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, τιμές της οποίας καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει. Χαρακτηριστικό των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Πολλές σύγχρονες μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν συγχρόνως στοιχεία και από τις δύο κατηγορίες μεθόδων.

Η παραπάνω πρόταση κλείνει μέσα της σε αδρές γραμμές τη σύγκριση των αιτιοκρατικών και των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης, τουλάχιστον όσο αφορά την χρήση τους σε (πολύπλοκα) προβλήματα αεροδυναμικής : Το να δημιουργηθεί μία αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο επένδυσης από την πλευρά του μηχανικού-προγραμματιστή και είναι δυσκολότερα επεκτάσιμη σε άλλα παρεμφερή προβλήματα (λ.χ. όταν αλλάζει η αντικειμενική συνάρτηση), συγκλίνουν γενικά γρήγορα στην βέλτιστη λύση, με τον κίνδυνο όμως η λύση αυτή να είναι τοπικό και όχι το καθολικό βέλτιστο, ανάλογα με το σημείο εκκίνησης. Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι περισσότερο γενικοί, με την έννοια ότι εύκολα προσαρμόζονται για να λυθεί ένα διαφορετικό πρόβλημα, είναι συνήθως περισσότερο αργοί από τις αιτιοκρατικές μεθόδους βελτιστοποίησης, με κέρδος όμως το να μπορούν να εντοπίσουν το καθολικό ακρότατο ανεξάρτητα από τη λύση ή τις λύσεις με τις οποίες αρχικοποιούνται.

Οι **στοχαστικές μέθοδοι** (stochastic methods), από την άλλη, βασίζονται στην συγκροτημένα τυχαία αναζήτηση νέων λύσεων, καλύτερων ως προς την υπάρχουσα, που τελικά οδηγεί στην βέλτιστη. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν εγκλωβίζονται εύκολα σε τοπικά ακρότατα. Ακριβώς λόγω της ικανότητας απεγκλωβισμού τους από τις περιοχές των τοπικών βέλτιστων, προτιμούνται για την επίλυση δύσκολων συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το μοναδικό τους μειονέκτημα είναι ότι, συχνά, έχουν αυξημένο υπολογιστικό κόστος, σε σχέση με τις αιτιοκρατικές μεθόδους.

Καθολική και Τοπική Βελτιστοποίηση

Οι όροι **καθολική** και **τοπική βελτιστοποίηση** (global and local optimization) χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν αν η αναζήτηση αφορά το ολικό ή καθολικό ακρότατο ή, αντίθετα, αρκείται σε ένα τοπικό ακρότατο, μια λύση δηλαδή που απλά υπερτερεί όλων των ‘γειτονικών’ της. Η αναζήτηση του καθολικά βέλτιστου είναι πάντα η επιθυμητή και, ανάλογα με την μέθοδο βελτιστοποίησης που θα επιλέξουμε, αυτή μπορεί να ή να μην εξασφαλίζεται.

Γενικά, η αποφασιστική διάκριση μεθόδων σε αυτές που εντοπίζουν καθολικά βέλτιστες λύσεις και σε αυτές που μπορούν να εγκλωβιστούν και άρα να υποδείξουν τοπικά βέλτιστες λύσεις είναι ριψοκίνδυνη. Ένας απλός τρόπος (όχι αναγκαστικά ο καλύτερος και συντομότερος) ώστε να εντοπίσουμε την καθολικά βέλτιστη λύση χρησιμοποιώντας διαθέσιμο αλγόριθμο τοπικής βελτιστοποίησης είναι να το χρησιμοποιήσουμε αρκετές φορές, από διαφορετικά σημεία εκκίνησης.

Ένας τελευταίος διαχωρισμός των μεθόδων βελτιστοποίησης γίνεται βάσει του αν οι λύσεις που ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης χειρίζεται ‘ταυτόχρονα’ είναι μεμονωμένες ή αποτελούν πληθυσμό. Η πιο γνωστή μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί πληθυσμό λύσεων είναι οι **Γενετικοί Αλγόριθμοι** (Genetic Algorithms). Επίσης, πληθυσμό λύσεων χρησιμοποιούν οι **Αποικίες Μυρμηγκιών** (Ant System) και οι **Στρατηγικές Εξέλιξης** (Evolution System). Όταν χρησιμοποιείται ένας πληθυσμός ατόμων τότε τα άτομα μπορεί να επικοινωνούν μεταξύ τους είτε άμεσα είτε έμμεσα. Αντίθετα, μεμονωμένες λύσεις εμφανίζονται στην εφαρμογή της μεθόδου της Προσομοιούμενης Ανόπτησης που ανήκει στις στοχαστικές μεθόδους, αλλά και σε όλες τις αιτιοκρατικές.

Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω ανήκουν σε μία ιδιαίτερη κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που ονομάζονται **εξελικτικές τεχνικές**. Οι εξελικτικές τεχνικές μοντελοποιούν κάποιο φαινόμενο, είτε *φυσικό* (π.χ. η ανόπτηση στα μέταλλα), είτε *κοινωνικό* (π.χ. η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και του πολιτισμού τους ή γενικότερα μεταξύ των ζώντων οργανισμών και του περιβάλλοντός τους), είτε *βιολογικό* (π.χ. η εξέλιξη των ειδών). Συχνά, παρουσιάζουν παράλληλη δομή, δηλαδή έχουν *πράκτορες* (agents) ή *άτομα* (individuals) που ‘δραστηριοποιούνται’ ταυτόχρονα και δημιουργούν πολλαπλές λύσεις του προβλήματος. Τέλος, οι εξελικτικές τεχνικές είναι αλγόριθμοι προσαρμόσιμοι σε διαφορετικά ‘περιβάλλοντα’ και παρουσιάζουν ‘στιβαρότητα’, με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργήσουν αγνοώντας το θόρυβο αλλά και να αξιοποιηθούν σε διαφορετικά είδη προβλημάτων με ελάχιστες αλλαγές στον καθαυτό κώδικα.

Γενικά, σήμερα, ένα μεγάλο μέρος της έρευνας για αποδοτικούς αλγορίθμους εύρεσης βέλτιστων λύσεων κατευθύνεται προς τους ευριστικούς αλγορίθμους και συγκεκριμένα σε αυτούς που εμπνέονται από φυσικά, κοινωνικά ή βιολογικά φαινόμενα, δηλαδή βασίζονται στις εξελικτικές τεχνικές. Όπως συμβαίνει στους στοχαστικούς αλγορίθμους, έτσι και οι ευριστικοί, έχουν την ιδιότητα να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα και μάλιστα μπορούν να εντοπίσουν την περιοχή της συνολικά βέλτιστης λύσης, συνήθως μετά από έναν μεγάλο αριθμό εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης.[20,21]

2.3.3. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Από τη δεκαετία του 1990 και έκτοτε, η γεωμετρική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και το προσιτό κόστος των μεγάλων και γρήγορων υπολογιστών συνετέλεσαν στην ευρεία αποδοχή και χρήση στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης με έναν από τους βασικότερους εκπροσώπους τους εξελικτικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης (evolutionary algorithms, EA). Βασικό στοιχείο που οδήγησε στη γρήγορη και ευρεία επικράτησή τους ήταν αφενός το ενδιαφέρον, μη-μαθηματικό υπόβαθρό τους, η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης και, κυρίως, η δυνατότητά τους (ως στοχαστική μέθοδος) να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των EA είναι ότι, πρακτικά, σε ένα νέο πρόβλημα η χρήση τους είναι γενικά άμεση χωρίς τις παρεμβάσεις στην διαδικασία βελτιστοποίησης που απαιτούν οι αιτιοκρατικές μέθοδοι, αν και αναμφισβήτητα η

γνώση του προβλήματος και η χρήση πληροφορίας από αυτό μέσω ειδικών τελεστών επιταχύνει το ρυθμό σύγκλισης. Παρόλα αυτά, βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων, γεγονός που φαίνεται κυρίως όταν κάθε αξιολόγηση (λ.χ. κάθε ανάλυση μιας υποψήφιας αεροτομής γίνεται με χρονοβόρο λογισμικό, όπως είναι κώδικες Navier-Stokes). Οι ΕΑ δεν είναι νέες μέθοδοι. Είχαν προταθεί από τη δεκαετία του 1960, αλλά την τελευταία δεκαετία η χρήση τους εξαπλώθηκε πολύ περισσότερο.

Βασικό γνώρισμα των ΕΑ είναι ότι χειρίζονται πληθυσμούς υποψηφίων λύσεων (population-based methods) και όχι μια μεμονωμένη λύση σε κάθε επανάληψη, όπως άλλες στοχαστικές μέθοδοι (λ.χ. η μέθοδος της προσομοιούμενης απόπτωσης). Οι ΕΑ, ενώ αρχικά αναπτύχθηκαν για την επίλυση προβλημάτων ενός στόχου, με κατάλληλες μετατροπές μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλών στόχων και μάλιστα υπερτερούν ως προς αυτό το θέμα σε σχέση με άλλες μεθόδους λόγω του γεγονότος ότι χειρίζονται έναν πληθυσμό ατόμων και, με την ολοκλήρωσή τους, αποδίδουν ένα σύνολο λύσεων.

Με τον όρο 'εξέλιξη' χαρακτηρίζουμε την αυτόματη διαδικασία της προσαρμογής κάθε συστήματος στο περιβάλλον. Ο όρος 'περιβάλλον' περιλαμβάνει το σύνολο των εξωτερικών συνθηκών που επηρεάζουν το σύστημα. Οι ΕΑ είναι υπολογιστικά μοντέλα τα οποία με χρήση αντίστοιχης με τη φύση διαδικασίας προσαρμογής στο περιβάλλον, επιλύουν προβλήματα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούν στοχαστικούς μηχανισμούς εξέλιξης προερχόμενους από τη φύση και βασίζονται στις αρχές εξέλιξης των ειδών, όπως αυτές διατυπώθηκαν αρχικά από τον Δαρβίνο το 1960. Οι ΕΑ προσομοιώνουν μερικώς και με απλουστευμένο τρόπο την εξέλιξη των φυσικών πληθυσμών. Σύμφωνα με την θεωρία του Δαρβίνου, τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την απόκτηση πόρων όπως στέγη, τροφή και για την προσέλκυση συντρόφου. Τα επιτυχημένα άτομα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγηθούν σε αναπαραγωγή και να διαιωνισθούν. Αυτή η φυσική επιλογή, σημαίνει ότι τα γονίδια των επιτυχημένων ατόμων ή των ατόμων που έχουν προσαρμοσθεί καλύτερα στο περιβάλλον επιβιώνουν και με την πάροδο των γενεών τα χαρακτηριστικά τους μεταφέρονται σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων. Ο συνδυασμός καλών χαρακτηριστικών από διαφορετικούς επιτυχημένους γονείς ενδεχομένως να παράγει απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον τρόπο αυτό οι φυσικοί πληθυσμοί εξελίσσονται και προσαρμόζονται στο εκάστοτε περιβάλλον.

Οι **γενετικοί αλγόριθμοι** (genetic algorithms, ΓΑ) είναι μάλλον η πιο διαδεδομένη κατηγορία εξελικτικών αλγορίθμων, ιδίως στην περιοχή της αεροδυναμικής και των στροβιλομηχανών. Οι **εξελικτικές στρατηγικές** (evolution strategies, ΣΕ) είναι μια λιγότερο χρησιμοποιούμενη τεχνική. Ως τρίτη κατηγορία, αρκετά διαφορετική από τις δύο προηγούμενες, αναφέρεται ο γενετικός προγραμματισμός (ΓΠ). Αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και αποτελεί μια σημαντική παραλλαγή των ΓΑ όπου ως άτομα του πληθυσμού χρησιμοποιούνται προγράμματα υπολογιστή. Πρόκειται για μία μέθοδο δημιουργίας προγραμμάτων που λύνουν ή προσεγγίζουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Ο ΓΠ γράφεται συνήθως σε μια απλοποιημένη εκδοχή της LISP με την οποία είναι δυνατή η εφαρμογή κατάλληλων γενετικών τελεστών ώστε να παραχθούν προγράμματα με ορθή σύνταξη. Επειδή οι λύσεις του ΓΠ είναι προγράμματα, δεν είναι άμεση η εφαρμογή του σε πρακτικά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Αν και κάθε κατηγορία των ΕΑ (ΓΑ, ΣΕ, ΓΠ) έχει η καθεμία τα δικά της διακριτικά γνωρίσματα, η αυστηρή ταξινόμησή τους μοιάζει πλέον να στερείται νοήματος. Ο λόγος είναι ότι οι σύγχρονοι ΕΑ αλληλοδανείζονται στοιχεία όπως τρόπο κωδικοποίησης ή τελεστές εξέλιξης, ανάλογα με την εμπειρία ή την καταλληλότητα τους στο κάθε πρόβλημα.

Ολοκληρώνοντας, μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ώστε να χαρακτηριστεί εξελικτικός :

- Να χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων τα οποία εξελίσσονται συγχρόνως, αντί μεμονωμένων ατόμων.
- Η εξέλιξη του πληθυσμού από γενιά σε γενιά (ορολογία αντίστοιχη των κύκλων ή των επαναλήψεων στους ντετερμινιστικούς) να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας (μεγιστοποίηση) ή τιμή κόστους ατόμων (ελαχιστοποίηση), με βάση κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση.
- Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με την δημιουργία νέων ατόμων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή καταλληλότητάς τους.
- Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών.[20,21]

2.3.3.1. Περιγραφή ενός Εξελικτικού Αλγορίθμου

Ένας Γενικευμένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (EA), με σύμμεικτα χαρακτηριστικά που έχουν ληφθεί από τους Γενετικούς Αλγορίθμους (GA) και τις Στρατηγικές Εξέλιξης (SE). Προφανώς, με επιλογή κατάλληλων τιμών των εμπλεκόμενων παραμέτρων και άλλες απλές αλγοριθμικές παρεμβάσεις, ο αλγόριθμος που θα περιγραφεί μεταπίπτει στη μία ή την άλλη κατηγορία.

Οι EA χειρίζονται πληθυσμούς λύσεων. Κατά την εξέλιξη, που είναι η βασική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός μ υποψηφίων λύσεων (γονείς, κατά τη γενετική ορολογία) εξελίσσεται στον πληθυσμό των λ απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις, που προκύπτουν από τους μ γονείς, έχοντας, ενδεχομένως, καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους λ απογόνους, με κριτήριο την καταλληλότητα τους, επιλέγονται οι μ γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται, γενιά με γενιά, μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου σύγκλισης. Τέτοια κριτήρια υπάρχουν αρκετά και ένας EA μπορεί να έχει σε ισχύ περισσότερα του ενός από αυτά. Μεταξύ αυτών είναι : (α) το να μην βελτιώνεται περαιτέρω η λύση για έναν αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών, (β) το να έχει ομογενοποιηθεί ο πληθυσμός ή/και (γ) η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επέτρεπε ο χρήστης.

Η παραπάνω παρουσίαση του τι συμβαίνει σε έναν EA μπορεί να θεμελιωθεί αυστηρότερα. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε γενιά g ενός EA μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συνυπάρχουν τρία διακριτά σύνολα ατόμων. Η ορολογία προέρχεται από την αντίστοιχη της βιολογίας. Έτσι, υπάρχει το σύνολο των γονιών $S^{g \cdot \mu}$ με μ μέλη, των απογόνων $S^{g \cdot \lambda}$ με λ μέλη και των επίλεκτων ή ελίτ ατόμων $S^{g \cdot e}$. Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό το γιατί, σε έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην εξέλιξη, υπάρχουν σύνολα γονιών και απογόνων, σε κάθε γενιά. Το σύνολο $S^{g \cdot e}$ αποθηκεύει τα επίλεκτα-καλύτερα άτομα (δηλαδή, υποψήφιας λύσεις) που έχουν προκύψει από τη διαδικασία εξέλιξης μέχρι την παρούσα γενιά. Ο σκοπός ύπαρξης του συνόλου είναι διπλός. Ένας λόγος είναι ότι, οποτεδήποτε σταματήσει η εξέλιξη, το $S^{g \cdot e}$ περιέχει την ή τις βέλτιστες λύσεις. Ένας άλλος λόγος είναι ότι κατά την εξέλιξη, χρησιμοποιείται πληροφορία από το σύνολο $S^{g \cdot e}$ για την ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών των μελών της νέας γενιάς που θα προκύψει. Αυτή η ενίσχυση αποτελεί το λεγόμενο 'ελιτισμό' στους EA.

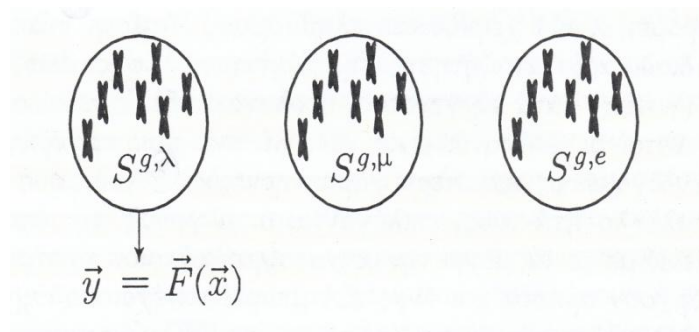
Παρακολουθώντας, βήμα-βήμα το τι συμβαίνει σε κάθε γενιά ενός ΕΑ ,η απλή εισαγωγική περιγραφή ενός ΕΑ που προηγήθηκε, εδώ θα αποκτήσει μορφή διακριτών βημάτων, εμπλέκοντας επιπλέον και το σύνολο των επίλεκτων ατόμων. Γίνεται η υπόθεση ότι το πρόβλημα είναι ενός στόχου.

Βήμα 1: Επιλέγονται βασικές παράμετροι της μεθόδου, όπως το μέγεθος των δύο βασικών πληθυσμών $S^{g,\mu}$ και $S^{g,\lambda}$, δηλαδή οι τιμές των μ και λ . Τίθεται $g = 0$ συμβολίζοντας έτσι την αρχικοποίηση, τη λεγόμενη και μηδενική γενιά. Επιλέγονται τυχαία τα μέλη του αρχικού πληθυσμού $S^{g,\lambda}$.

Βήμα 2: Αξιολογούνται τα λ άτομα του συνόλου $S^{g,\lambda}$. Σχηματικά, το βήμα αυτό περιγράφεται από τη διαδικασία (Σχήμα 2.10) :

$$y(\vec{x}) = F(\vec{x}), \quad \forall \vec{x} \in S^{g,\lambda} \quad (2.1)$$

Αν πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης στην αεροδυναμική, και για την αξιολόγηση απαιτούνται αριθμητικές αναλύσεις του πεδίου ροής, το βήμα αυτό πρακτικά απαιτεί λ κλήσεις του κώδικα ανάλυσης της ροής (λογισμικό αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes). Είναι δηλαδή το τμήμα του αλγορίθμου που φέρει το μεγαλύτερο (πρακτικά, ολόκληρο) το υπολογιστικό κόστος.

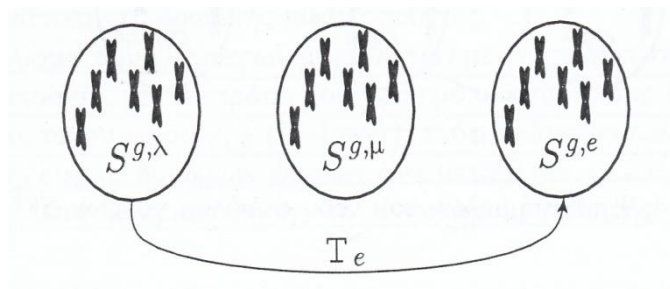


Σχήμα2.10: Αξιολόγηση των μελών του $S^{g,\lambda}$.

Βήμα 3: Ανανεώνεται το σύνολο των επίλεκτων $S^{g,e}$ με όσα μέλη του $S^{g,\lambda}$ αξίζουν, με κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, να ενταχθούν σε αυτό. Κατά την παρούσα φάση, είναι εξίσου πιθανό να διαγραφούν κάποια μέλη του $S^{g,e}$ αν προκύψουν άτομα του $S^{g,\lambda}$ αποκτήσουν «καλύτερη» τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Σχηματικά:

$$S^{g+1,e} = T_e(S^{g,\lambda} \cup S^{g,e}) \quad (2.2)$$

όπου με T_e συμβολίζεται ο τελεστής εντοπισμού των επίλεκτων μελών,(βλ. και Σχήμα 2.11).Σε πρόβλημα ενός στόχου, η πιο απλή εκδοχή του τελεστή T_e είναι να εντοπίζει το (ένα) καλύτερο άτομο από τα δύο σύνολα που επεξεργάζεται ($S^{g,\lambda}$ και $S^{g,e}$). Εδώ, υπάρχει πάντα η περίπτωση κανένας από τους λ να μην υπερτερεί της τρέχουσας βέλτιστης λύσης, δηλαδή του μοναδικού στοιχείου του $S^{g,e}$. Τότε, πρακτικά, το $S^{g,e}$ παραμένει ως έχει και αυτό είναι ένδειξη ότι ο EA δεν κατάφερε να βελτιώσει τη λύση κατά την τελευταία γενιά. Τονίζεται ότι ο EA δεν είναι υποχρεωτικό να βελτιώνει τη λύση σε κάθε γενιά. Σε προβλήματα πολλών στόχων (αλλά ακόμη και σε προβλήματα ενός στόχου αν έτσι αποφασισθεί) το σύνολο $S^{g,e}$ μπορεί να περιέχει περισσότερα του ενός (πλήθος e) στοιχεία.

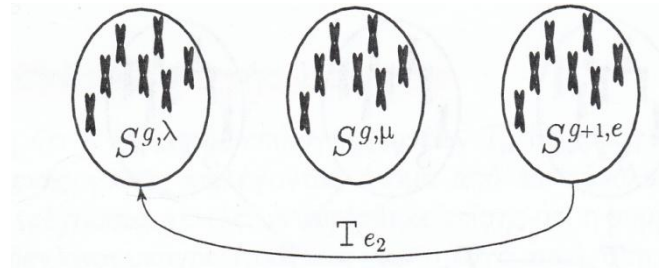


Σχήμα 2.11: Ανανέωση των μελών του $S^{g,e}$.

Βήμα 4: Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλεκτικότητας ή ελιτισμού, με τον οποίο (συνήθως τυχαία επιλεγόμενα) άτομα από το σύνολο των επίλεκτων $S^{g,e}$ αντικαθιστούν άτομα του $S^{g,\lambda}$. Το ποιά θα αντικατασταθούν εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως τα χειρότερα) αν και μέρος αυτών μπορεί να επιλέγεται τυχαία. Σχηματικά:

$$S^{g,\lambda} = T_{e2}(S^{g,\lambda} \cup S^{g+1,e}) \quad (2.3)$$

όπου με T_{e2} συμβολίζεται ο τελεστής ελιτισμού, (βλ. και Σχήμα 2.12). Με τον ελιτισμό αποφεύγεται μια νέα γενιά να δώσει βέλτιστη λύση χειρότερη από αυτήν της προηγούμενης γενιάς (θα έχει τουλάχιστον ίδια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης) αν και τα οφέλη είναι αρκετά περισσότερα και πιο σύνθετα από αυτό που μόλις αναφέρθηκε.

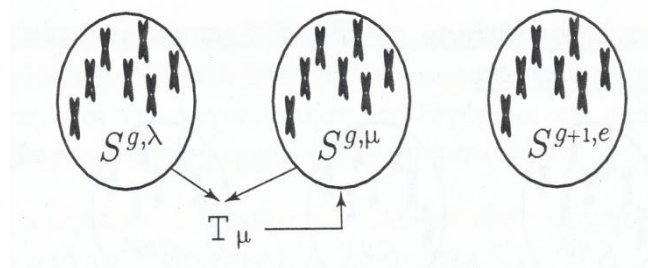


Σχήμα 2.12: Ανανέωση των μελών του $S^{g,\lambda}$.

Βήμα 5: Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων T_μ με τη βοήθεια του οποίου επιλέγεται το σύνολο των μελών του νέου πληθυσμού γονέων $S^{g+1,\mu}$. Για το σχηματισμό του, χρησιμοποιούνται οι τρέχοντες πληθυσμοί γονέων $S^{g,\mu}$ και απογόνων $S^{g,\lambda}$ αν και υπάρχουν ορισμένες κλασικές διατυπώσεις όπου οι μ γονείς επιλέγονται μόνο από τους πρόσφατους λ απογόνους. Σχηματικά:

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu (S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda}) \quad (2.4)$$

όπου με T_μ συμβολίζεται ο τελεστής επιλογής γονέων, (βλ. και Σχήμα 2.13).

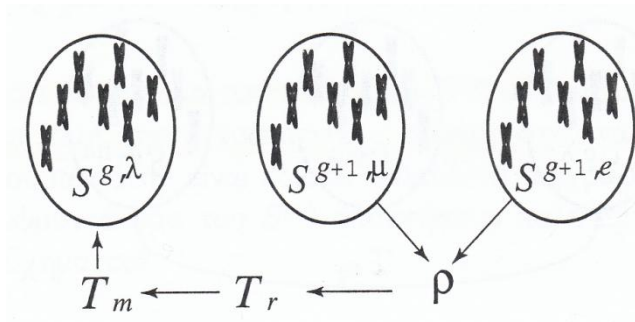


Σχήμα 2.13: Επιλογή μελών του νέου συνόλου γονέων $S^{g+1,\mu}$.

Βήμα 6: Ακολουθεί η διαδικασία αναπαραγωγής για τη δημιουργία του συνόλου απογόνων της επόμενης γενεάς $S^{g+1,\lambda}$. Για τη δημιουργία καθενός από τα λ άτομα του, επιλέγονται τυχαία ρ (συνήθως $\rho = 2$, αλλά δεν αποκλείεται η περίπτωση $\rho > 2$, όπως λ.χ. τρεις γονείς να δημιουργούν τρεις απογόνους, κλπ) γονείς από το σύνολο των γονέων $S^{g+1,\mu}$. Σε διάφορες αλγοριθμικές παραλλαγές, επιτρέπεται ενίοτε κάποιο ή κάποια από τα ρ άτομα να προέρχονται από το σύνολο $S^{g+1,e}$, επιλεγόμενα συνήθως με μικρή πιθανότητα, οπότε ο αλγόριθμος εμφανίζει ισχυρότερα χαρακτηριστικά ελιτισμού. Για κάθε σύνολο ρ γονέων που επιλέχθηκαν, εφαρμόζονται διαδοχικά διάφοροι τελεστές, μεταξύ των οποίων οι πιο γνωστοί είναι ο τελεστής διασταύρωσης

ή επανασυνδυασμού (T_r , crossover ή recombination operator) και ο τελεστής μετάλλαξης (T_m , mutation operator). Σχηματικά: (βλ. και Σχήμα 2.14).

$$S^{g+1,\lambda} = T_m (T_r (S^{g+1,\mu} \cup S^{g+1,e})) \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.14: Επιλογή μελών του νέου συνόλου γονέων $S^{g+1,\mu}$.

Βήμα 7: Εφαρμόζεται το κριτήριο σύγκλισης και αν η μέθοδος θεωρείται ότι δεν έχει συγκλίνει αρχίζει μια νέα γενιά, δηλαδή επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 ως 6, θέτοντας $g+1 \rightarrow g$.

Τελεστές Επιλογής Γονέων

Αναφέρθηκε ήδη ότι ο τελεστής επιλογής γονέων T_μ δημιουργεί το σύνολο γονέων $S^{g+1,\mu}$ της επόμενης γενιάς επιλέγοντας άτομα από τα σύνολα απογόνων $S^{g,\lambda}$ και γονέων $S^{g,\mu}$ της τρέχουσας γενιάς. Αναφέρθηκε επίσης ότι η συμμετοχή του $S^{g,\mu}$ στην επιλογή γονέων δεν είναι υποχρεωτική και, για το λόγο αυτό, στη σύντομη παρουσίαση που ακολουθεί θα θεωρήσουμε ότι:

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu (S^{g,\lambda}) \quad (2.6)$$

Η διαδικασία επιλογής γονέων αναλαμβάνει να δώσει μεγαλύτερες πιθανότητες στα άτομα του $S^{g,\lambda}$ με καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης να συμμετάσχουν στη δημιουργία απογόνων. Αντίθετα, οι χειρότερες από τις τρέχουσες λύσεις έχουν μικρότερες πιθανότητες να συμμετάσχουν στο σύνολο $S^{g+1,\mu}$. Άρα, η επιλογή βασίζεται στις (σχετικές, κυρίως) τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη βιβλιογραφία προτείνονται σχήματα όπως η **αναλογική επιλογή** (proportional

selection), η **γραμμική κατάταξη** (linear ranking), η **πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό** (probabilistic tournament selection), κ.α.

Στην αναλογική επιλογή, στο j -ιοστό από τα λ άτομα αντιστοιχεί πιθανότητα ίση με $F(\vec{x}_j) / \sum_{i=1}^{\lambda} F(\vec{x}_i)$ (αναφερόμαστε σε προβλήματα μεγιστοποίησης). Οι γονείς επιλέγονται με τη βοήθεια μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω πιθανότητες. Έτσι, καλύτερα άτομα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγούν. Παρόλα αυτά, εγκυμονεί ο κίνδυνος, η παρουσία μιας συγκριτικά καλής λύσης στις αρχικές γενιές να οδηγήσει στην πρόωρη επικράτηση της και άρα στην παγίδευση σε ένα τοπικό ακρότατο. Στη γραμμική κατάταξη, τα λ άτομα κατατάσσονται ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και επιλέγονται μ από αυτά, όπου τα καλύτερα εμφανίζονται με περισσότερα αντίτυπα στο $S^{g+1,\mu}$ ενώ απουσιάζουν τα χειρότερα. Στην πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό, επιλέγονται τυχαία k άτομα τη φορά, συμμετέχουν σε διαγωνισμό μεταξύ τους με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και επιλέγεται ο καλύτερος ως ένα ακόμη μέλος του $S^{g+1,\mu}$. Πολλές φορές, ο διαγωνισμός αποκτά και στοιχεία στοχαστικότητας, επιτρέποντας και στο χειρότερο διαγωνιζόμενο να επιλεγεί με μικρή πιθανότητα.[21]

Τελεστές Διασταύρωσης

Για τη δυαδική κωδικοποίηση, η διασταύρωση συνδυάζει δύο τυχαία επιλεγμένους γονείς για να δημιουργήσει ισόποσους απογόνους. Στη βιβλιογραφία συναντώνται και διασταύρωση στην οποία συμμετέχουν περισσότεροι από δύο γονείς.

Στη δυαδική κωδικοποίηση, η λεγόμενη **διασταύρωση απλού σημείου** (single-point crossover) αρχικά επιλέγει τυχαία μια θέση μεταξύ δύο διαδοχικών δυαδικών ψηφίων του χρωμοσώματος. Στη συνέχεια, επιλέγει τυχαία δύο γονείς από τη δεξαμενή των επιλεγέντων γονέων με χρήση των τελεστών επιλογής που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τους δύο αυτούς γονείς διασταυρώνει., δηλαδή εναλλάσσει τα δύο μέρη εκατέρωθεν της θέσης διασταύρωσης, παράγοντας έτσι δύο απογόνους.

Ως παράδειγμα, παρουσιάζεται η διασταύρωση ενός σημείου για δύο επιλεγέντες γονείς, τους

10110001011001

00101101110101

όπου έστω ότι έτυχε ως θέση διασταύρωσης το τέλος του πέμπτου δυαδικού ψηφίου, δηλαδή :

10110 | 001011001

00101 | 101110101

άρα, οι δύο απόγονοι που θα προκύψουν από τη διασταύρωση είναι οι :

10110101110101

00101001011001

Στη βιβλιογραφία συναντώνται ποικιλία σχημάτων διασταύρωσης. Εύκολα, με βάση τα παραπάνω, κατανοείται και η **διασταύρωση δύο σημείων** (δύο τυχαίες θέσεις διασταύρωσης, ο πρώτος απόγονος σχηματίζεται από το πρώτο και τρίτο τμήμα του πρώτου γονέα και το δεύτερο τμήμα του δεύτερου γονέα, κ.ο.κ.) ή τη διασταύρωση ενός σημείου ανά μεταβλητή (επιλέγεται τυχαία ένα σημείο διασταύρωσης ανά μεταβλητή, η υπόλοιπη διαδικασία είναι όμοια). Άλλα σχήματα διασταύρωσης, είναι η **διακριτή** και η **ομοιόμορφη διασταύρωση**.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι, στο πλαίσιο ενός στοχαστικού αλγορίθμου, όπως είναι ο εξελικτικός αλγόριθμος, η διασταύρωση πραγματοποιείται με πιθανότητα P_r (συνήθως, κοντά στη μονάδα, λ.χ. $P_r = 0.90$). Ο ρόλος της μη-μοναδιαίας πιθανότητας διασταύρωσης είναι να επιτρέπει με μικρή πιθανότητα (ίση με $1 - P_r$) τη μεταφορά αναλλοίωτων χαρακτηριστικών των γονέων στους απογόνους. Ενεργοποιείται, δηλαδή, και αυτή με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών: με πιθανότητα P_r γίνεται κανονικά η διασταύρωση ενώ με πιθανότητα $1 - P_r$ οι απόγονοι ταυτίζονται με τους γονείς.

Τελεστές Μετάλλαξης

Ο τελεστής μετάλλαξης εφαρμόζεται σε κάθε νέο απόγονο που προέκυψε από την εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης. Η μετάλλαξη στοχεύει στην εισαγωγή νέου

γενετικού υλικού στον πληθυσμό των απογόνων, με πιθανότητα P_m (συνήθως πολύ μικρή, ενδεικτικά $P_m=0.01$).[21]

Στη δυαδική κωδικοποίηση, η μετάλλαξη επιτρέπει (με την παραπάνω μικρή πιθανότητα) να αντιστραφεί το δυαδικό ψηφίο που θα επιλεγεί (αν ήταν 0 να γίνει 1 και αντιστρόφως). Πρακτικά, για όλα τα δυαδικά ψηφία κάθε απογόνου που προήλθε από τη διασταύρωση γεννάται ένας τυχαίος αριθμός (στο διάστημα $[0,1]$) και η μετάλλαξη γίνεται μόνο αν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος του P_m . Ενδεικτικά, αν το κριτήριο για τη μετάλλαξη ενεργοποιηθεί για το έβδομο ψηφίο του πρώτου από τους δύο απογόνους που σχηματίστηκαν στο παράδειγμα της διασταύρωσης, δηλαδή του:

10110101110101

ο μεταλλαγμένος απόγονος γίνεται :

10110111110101 [21]

2.4. Η επιστήμη του Σχεδιασμού των Πειραμάτων.

2.4.1. Εισαγωγή

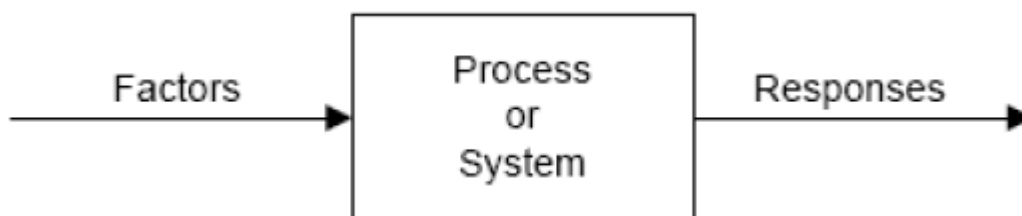
Γενικά, ένα πείραμα είναι μία παρατήρηση η οποία οδηγεί σε μία χαρακτηριστική πληροφορία για το προς μελέτη αντικείμενο. Ο συνήθης λόγος για μια τέτοια παρατήρηση είναι μια υπόθεση η οποία θα πρέπει να εξακριβωθεί ή να απορριφθεί μέσω έρευνας. Σε αυτή την κλασσική προσέγγιση, η πειραματική προετοιμασία επιλέγεται σύμφωνα με το εκάστοτε πρόβλημα που παρουσιάζεται και ο πειραματιστής εξετάζει αν η υπόθεσή του είναι αληθής ή ψευδής [26].

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται μια διαφορετική χρήση των πειραμάτων. Με βάση την επιστήμη του Σχεδιασμού των Πειραμάτων (ΣτΠ) , χρησιμοποιείται ένα σύνολο από ‘καλά επιλεγμένα’ πειράματα τα οποία θα πρέπει να διεξαχθούν από τον πειραματιστή. Ο σκοπός του λεγόμενου αυτού ‘σχεδιασμού’ είναι η βελτιστοποίηση μιας διαδικασίας ή ενός συστήματος με τη διενέργεια πειραμάτων και την ταυτόχρονη εξαγωγή συμπερασμάτων της συμπεριφοράς του προς μελέτη αντικειμένου (εν προκειμένω ,πλήρης μαρτενσιτικός μετασχηματισμός μήτρας διελάσεως από εργαλειοχάλυβα) μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Μελετώντας το κόστος για ένα απλό πείραμα, η επιδίωξη της ελαχιστοποίησης του αριθμού των προς εκτέλεση πειραμάτων αποτελεί βασικό σκοπό. Με τον ΣτΠ, αυτός

ο αριθμός διατηρείται όσο χαμηλά γίνεται επιλέγοντας τους συνδυασμούς των παραμέτρων σχεδιασμού που μπορούν να δώσουν τις περισσότερες πληροφορίες. Γι' αυτό το λόγο, ο ΣτΠ είναι μία αποδοτική και οικονομική λύση.

2.4.2. Παράμετροι Σχεδιασμού και Αποκρίσεις

Πάντα υπάρχουν δύο τύποι μεταβλητών σχεδιασμού κατά τη διενέργεια πειραμάτων στο τομέα του ΣτΠ , οι αποκρίσεις και οι παράμετροι σχεδιασμού. Η απόκριση δίνει την πληροφορία για το προς μελέτη σύστημα, και οι παράμετροι σχεδιασμού χρησιμοποιούνται για τη διαχείρισή του. Οι συνήθεις παράμετροι σχεδιασμού μπορεί να είναι ένα σύνολο από δύο ή περισσότερες ποσότητες με καθορισμένο εύρος. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, εξαρτώμενες από διαφορετικά κριτήρια:



Σχήμα 2.15.Παράμετροι Σχεδιασμού και Αποκρίσεις : μία διεργασία ή ένα σύστημα μπορεί να διαχειριστεί από μία ή περισσότερες παραμέτρους εισόδου.

1. Ελεγχόμενες και Μη Ελεγχόμενες παράμετροι σχεδιασμού.

Ένας τρόπος διαχωρισμού των παραμέτρων είναι σε ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες. Οι ελεγχόμενες παράμετροι είναι οι συνήθεις παράμετροι μίας διεργασίας, οι οποίοι είναι εύκολο να αποτυπωθούν και να μελετηθούν. Ο πειραματιστής μπορεί να τις παρατηρήσει και έχει την ευχέρεια να τις αλλάξει. Αντίθετα, μια μη ελεγχόμενη παράμετρος είναι δύσκολο να ρυθμιστεί διότι είναι περισσότερο μία παράμετρος διαταραχής ή ένας εξωτερικός επηρεασμός, που υπόκειται στην τυχαιότητα. Οι μη ελεγχόμενες παράμετροι μπορεί να έχουν μεγάλη επιρροή στην απόκριση και για αυτό θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη κατά τα πειράματα. (23,25) Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ελεγχόμενης παραμέτρου είναι η θερμοκρασία μέσα σε μία κλειστή κατασκευή. Σε αντίθεση με αυτό, η εξωτερική θερμοκρασία είναι ένα παράδειγμα μη ελεγχόμενης παραμέτρου η οποία δεν μπορεί να επηρεαστεί.

2. Ποσοτικές και Ποιοτικές παράμετροι σχεδιασμού.

Μια άλλη μέθοδος κατηγοριοποίησης των παραμέτρων σχεδιασμού, με ευρύτερη έννοια, είναι ο διαχωρισμός τους σε ποιοτικές και ποσοτικές. Οι τιμές μιας ποσοτικής παραμέτρου έχουν συγκεκριμένο εύρος και είναι συνεχείς, ενώ οι ποιοτικές παράμετροι έχουν μόνο διακριτές τιμές. [24,25] Χρησιμοποιώντας το προηγούμενο παράδειγμα, η θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί ως μια ποσοτική μεταβλητή. Ένα παράδειγμα μιας ποιοτικής μεταβλητής είναι η διαφοροποίηση μεταξύ διαφόρων τύπων λιπαντικού λαδιού, προερχόμενων από διαφορετικούς κατασκευαστές.

3. Παράμετροι Διεργασίας και Παράμετροι Συνδυασμού.

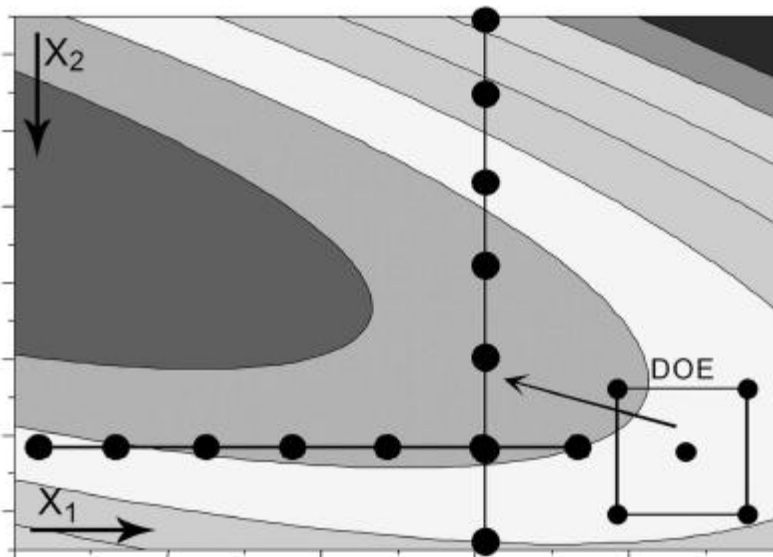
Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τις παραμέτρους διεργασίας και συνδυασμού. Οι παράμετροι διεργασίας μπορούν να αλλάζουν ανεξάρτητα και δεν επηρεάζουν ο ένας τον άλλο. Συνήθως εκφράζονται μέσω μιας ποσότητας ή μιας κλίμακας διαφορετικών επιπέδων και μπορούν να αντιμετωπιστούν ως συνήθεις μεταβλητές σχεδιασμού. Οι παράμετροι συνδυασμού αναπαριστούν ποσότητες συστατικών ενός συνδυασμού μεταβλητών. Όλες αποτελούν μέρος μιας διατύπωσης, η οποία τελικά καταλήγει να είναι ίση με 100%. Μία παράμετρος συνδυασμού δεν μπορεί να μεταβληθεί ανεξάρτητα, και για αυτό ειδικοί σχεδιασμοί απαιτούνται για να διαχειριστούν τέτοιου είδους παραμέτρους.[23,24].

Μια απόκριση μπορεί να είναι συνεχής ή διακριτή ποσότητα. Μία διακριτή κλίμακα θα μπορούσε να έχει τρεις ποσότητες (καλή, OK, κακή). Αυτές οι ποσότητες είναι δύσκολες στη διαχείρισή τους, για αυτό και πάντα προτείνεται η χρήση συνεχούς κλίμακας, αν αυτό είναι εφικτό. Είναι πιθανό, και πολλές φορές χρήσιμο, να μετρώνται πολλαπλές αποκρίσεις οι οποίες επηρεάζονται διαφορετικά από τις ρυθμίσεις των παραμέτρων σχεδιασμού.[25]

2.4.3. Βασικές Αρχές του ΣτΠ

Για να κατανοηθεί η βασική ιδέα του ΣτΠ, θα πρέπει πρώτα να εξεταστεί πως γινόταν παραδοσιακά ο πειραματικός σχεδιασμός. Όπως περιγράφεται από τους Eriksson et al. (2000, σελ.2), η διαισθητική προσέγγιση ήταν η αλλαγή της τιμής κάθε μιας παραμέτρου ξεχωριστά κάθε φορά μέχρι να μην είναι δυνατό να υπάρξει περαιτέρω βελτίωση της αποκρίσεως. Το Σχήμα 2.16 απεικονίζει την δυσκολία εύρεσης του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων με την ονομαζόμενη COST

προσέγγιση (Change Only one Separate factor at a Time). Ο πειραματιστής δεν γνωρίζει σε ποια ποσότητα της παραμέτρου x_1 θα πρέπει να σταματήσει, διότι η περαιτέρω μεταβολή δεν μπορεί να παρατηρηθεί. Η εύρεση όμως της ακριβούς τιμής του x_1 είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί, λαμβάνοντας την υπόψη σε συνδυασμό με την παράμετρο x_2 η οποία προστίθεται προς μελέτη αργότερα.

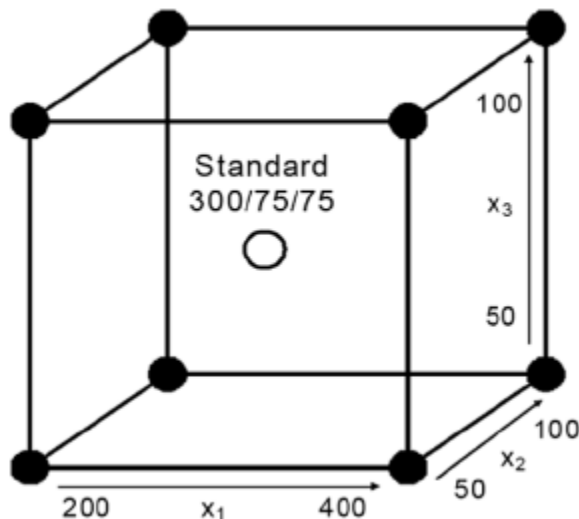


Σχήμα2.16 : Προσέγγιση COST και ΣτΠ, βασισμένη στους Eriksson et al. (2000, σελ.3, εικ.0.1) : Αλλάζοντας όλες τις παραμέτρους ταυτόχρονα, όπως φαίνεται στο δεξιά κάτω άκρο, δίνει καλύτερη πληροφορία για το βέλτιστο από ότι η COST προσέγγιση, όπου όλες οι παράμετροι μεταβάλλονταν διαδοχικά.

Η περίπτωση που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16, θα μπορούσε να ερευνηθεί με τη χρήση του ΣτΠ .Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα συγκεκριμένο σύνολο πειραμάτων γύρω από το επονομαζόμενο ‘κεντρικό σημείο’ (center-point). Όπως φαίνεται στην κάτω δεξιά γωνία του διαγράμματος, χρησιμοποιείται ένα ομοιόμορφο σύνολο πειραμάτων τα οποία επιτρέπουν την εύρεση της κατεύθυνσης για ένα καλύτερο αποτέλεσμα. Αυτά τα βασικά παραδείγματα απεικονίζουν ξεκάθαρα τα πλεονεκτήματα της ταυτόχρονης μεταβολής όλων των σχετικών με το προς εξέταση πρόβλημα παραμέτρων και κατά συνέπεια, δείχνουν τη σπουδαιότητα του ΣτΠ.[23,25]

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, η βασική μεθοδολογία του ΣτΠ είναι η διευθέτηση μιας συμμετρικής κατανομής των πειραμάτων γύρω από τα ‘κεντρικά σημεία. Με δεδομένο το εύρος μεταβολής όλων των παραμέτρων εισόδου, ο υπολογισμός του σημείου αυτού είναι εύκολος. Το σχήμα 2.17 παρουσιάζει ένα απλό

παράδειγμα με τις παραμέτρους σχεδιασμού x_1 (200 έως 400) , x_2 (50 έως 100) και x_3 (50 έως 100). Το υπολογιζόμενο κεντρικό σημείο, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο ενός κύβου, έχει συντεταγμένες 300, 75, 75.



Σχήμα 2.17 : Συμμετρική Κατανομή Πειραμάτων, βασισμένη στον Eriksson et al. (2000, σελ. 8, εκ. 1.1) : Οι τρεις παράμετροι x_1 , x_2 και x_3 είναι, ανάλογα με το εύρος τιμών τους, τοποθετημένοι σε κυβική διάταξη γύρω από το κεντρικό σημείο.

2.4.4. Σχήματα Μοντέλων

Η βάση για το ΣτΠ είναι μία προσέγγιση της πραγματικότητας με τη βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου. Το σημαντικότερο τμήμα του προς μελέτη συστήματος παρουσιάζεται μέσω των παραμέτρων σχεδιασμού και των αποκρίσεων. Ένα μοντέλο δεν είναι ποτέ 100% ακριβές, αλλά απλά βοηθάει στη μετατροπή της πολυπλοκότητας της πραγματικότητας σε μία εξίσωση την οποία μπορεί εύκολα να διαχειριστεί κανείς.[23] Το πιο απλό είναι ένα γραμμικό μοντέλο στο οποίο οι g παράμετροι σχεδιασμού x_1, x_2, \dots, x_g επηρεάζουν την απόκριση y με τον ακόλουθο τρόπο :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_g x_g + \epsilon.$$

Σε αυτή την περίπτωση $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_g$ αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές παλινδρόμησης (regression coefficients) και το ϵ είναι το κομμάτι του μοντέλου που υπόκειται στην τυχαιότητα, το οποίο υποτίθεται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή το μηδέν και διακύμανση σ^2 (Wu & Hamada 2000, σελ. 12). Η εξίσωση αυτή μπορεί να επεκταθεί από σε N πολλαπλές αποκρίσεις καταλήγοντας στη σχέση:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_g x_{ig} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, N,$$

όπου y_i παριστά την i -οστη απόκριση με τις παραμέτρους $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ig}$. Κάθε μια από τις N εξισώσεις μπορεί να γραφεί σε μητρική γραφή ως εξής:

$$Y = X\beta + \epsilon,$$

όπου ο $N \times (g+1)$ πίνακας X περιέχει όλες τις παραμέτρους για τις αποκρίσεις, Y και ϵ είναι τα $N \times 1$ διανύσματα αποκρίσεων και τυχαιότητας. Οι συντελεστές παλινδρόμησης β είναι η άγνωστη παράμετρος στο μοντέλο.[25]

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \dots & x_{Ng} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix}$$

Η επιλογή του μοντέλου είναι ένα σημαντικό βήμα κατά την μελέτη. Για το λόγο αυτό, ο πειραματιστής θα πρέπει σε αυτό το σημείο να δώσει μεγάλη προσοχή. Πέραν από το γραμμικό μοντέλο, υπάρχουν και άλλα μαθηματικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού ή άλλα που διαθέτουν και όρους δεύτερης τάξης.

2.4.5. Στόχοι του Σχεδιασμού των Πειραμάτων

Ο όρος ‘στόχοι των πειραμάτων’ είναι γενικότερα κατανοητός ως ο σκοπός της δημιουργίας του σχεδιασμού και μπορεί να χωριστεί σε τρεις σημαντικά βήματα:

1. Εύρεση παραμέτρων σχεδιασμού (screening)

Ένας τέτοιος σχεδιασμός γίνεται συνήθως στην αρχή μιας έρευνας, όταν ο πειραματιστής θέλει να χαρακτηρίσει την διεργασία. Σε αυτή την περίπτωση, ο χαρακτηρισμός σημαίνει τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού και την εξέταση των αλλαγών της απόκρισης μεταβάλλοντας κάθε έναν από αυτούς. Εξαιτίας του χαρακτηριστικού της αναζήτησης πιθανών λύσεων που διαθέτει ο ΣτΠ, η εύρεση κατάλληλων παραμέτρων σχεδιασμού χρησιμοποιείται συχνά για να αναλύσει σχεδιασμούς με μεγάλο αριθμό παραμέτρων εισόδου. Αυτός ο προσδιορισμός των κρίσιμων παραμέτρων μπορεί να είναι πολύ χρήσιμος κατά την

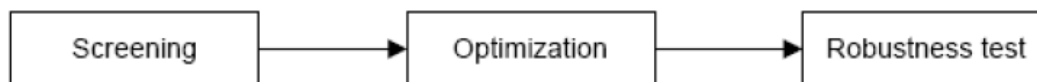
μετέπειτα βελτιστοποίηση της διεργασίας, λόγω του ότι μόνο ένα υποσύνολο των παραμέτρων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

2. Βελτιστοποίηση (Optimization)

Ο συγκεκριμένος στόχος δεν πρέπει να συγχέεται με τη βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης ή ενός μοντέλου , αφορά μια προγενέστερη διαδικασία επιλογής των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων που θα οδηγήσουν το προς μελέτη μέγεθος στη βέλτιστη λύση. Μετά την εύρεση παραμέτρων σχεδιασμού είναι σύνηθες να γίνεται μια βελτιστοποίηση του μοντέλου. Αυτός ο σχεδιασμός δίνει στον πειραματιστή λεπτομερές πληροφορίες για την επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού και προσδιορίζει το συνδυασμό εκείνο που θα οδηγήσει στην καλύτερη απόκριση. Με απλούς όρους, στο βήμα αυτό επιδιώκεται να βρεθεί το βέλτιστο πειραματικό σημείο μέσω της πρόβλεψης των τιμών των αποκρίσεων για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεταβλητών.[24] Μέσω της εύρεσης των μοντέλων επιφανειών απόκρισης (M.E.A.) δίνεται η ευχέρεια να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση ή η τετραγωνική επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στην απόκριση και για αυτό δίνει μία ιδέα για τη μορφή της απόκρισης του προβλήματος που μελετάται. Για αυτό το λόγο τα M.E.A. συνήθως χρησιμοποιούνται για να βρουν αυτές τις βελτιωμένες ή βελτιστοποιημένες ρυθμίσεις μιας διεργασίας και βοηθούν στο να καθοριστούν οι ρυθμίσεις των παραμέτρων εισόδου, οι οποίες είναι αναγκαίες ώστε να βρεθεί η επιθυμητή έξοδος.

3. Έλεγχος Στιβαρότητας (Robustness Test)

Κανονικά ένας έλεγχος στιβαρότητας είναι το τελευταίο τμήμα το οποίο δημιουργείται πριν την ολοκλήρωση της όλης διαδικασίας. Σκοπός του είναι η διαπίστωση του τρόπου με τον οποίο οι παράμετροι σχεδιασμού θα πρέπει να συμμετέχουν στο μοντέλο ώστε να εξασφαλίζεται η στιβαρότητά του .Σε αυτή την περίπτωση, στιβαρότητα σημαίνει ότι μικρές διακυμάνσεις των παραμέτρων σχεδιασμού δεν θα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση. Αν η συνολική διαδικασία δεν εκτελέσει αυτό τον σειριακό έλεγχο, θα πρέπει να μεταβληθούν οι όροι του μοντέλου ώστε να επιτευχθεί η στιβαρότητα.[23]



Σχήμα 2.18 : Στόχοι του ΣτΠ : Στον ΣτΠ είναι σύνηθες να εκτελούνται και τα τρία βήματα με τη σειρά που φαίνεται παραπάνω. Το πρώτο δίνει πληροφορίες για τις παραμέτρους αυξημένης σημαντικότητας. Μετά από αυτό, διενεργείται η βελτιστοποίηση όπου αυτές οι σημαντικές παράμετροι χρησιμοποιούνται για να δώσουν την καλύτερη απόκριση. Το τελευταίο βήμα έχει να κάνει με τον έλεγχο της στιβαρότητας του μοντέλου.

2.4.6. Είδη Σχεδιασμού Πειραμάτων

2.4.6.1. Στατιστικοί Σχεδιασμοί

Εκτός από τους στόχους του σχεδιασμού των πειραμάτων, θα πρέπει να επιλεγθεί ποιός τύπος στατιστικού σχεδιασμού θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι για μια συνήθη περιοχή, όπου είναι επιτρεπτή η εκτέλεση πειραμάτων. Οι τύποι αυτοί έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και πεδία εφαρμογής.

1. Πλήρως Παραγοντικοί Σχεδιασμοί (Full Factorial Designs)

Η πρώτη κατανομή πειραμάτων του σχεδιασμού αυτού φαίνονται στο Σχήμα 19. Ονομάζονται πλήρεις επειδή μελετούνται όλα τα σημεία ενός νοητού κύβου, γύρω από το κεντρικό σημείο, συμπεριλαμβανομένου όλων των ακμών του. Επιπροσθέτως, επαναλαμβανόμενα πειράματα γίνονται με τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού για το κεντρικό σημείο. Σε αυτή την περίπτωση όταν οι παράμετροι σχεδιασμού έχουν δύο επίπεδα μελέτης (την μικρότερη και τη μεγαλύτερη τιμή του μεγέθους) και έτσι για k παραμέτρους σχεδιασμού απαιτούνται 2^k πειράματα. Αυτός ο τύπος σχεδιασμού χρησιμοποιείται για την εύρεση των παραμέτρων σχεδιασμού (1^ο στόχος) σε συνδυασμό με ένα γραμμικό ή ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης.[23]

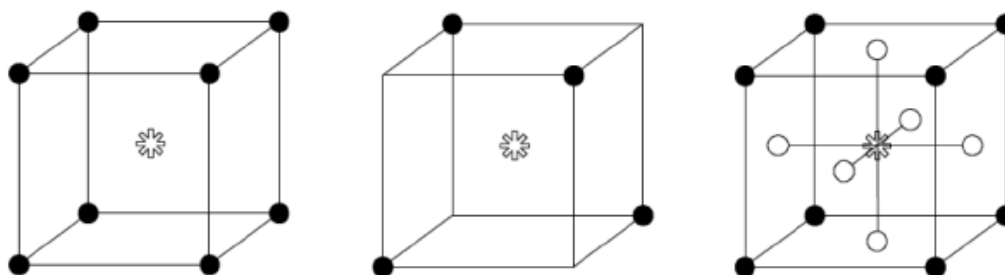
2. Μερικώς Παραγοντικοί Σχεδιασμοί (Fractional Factorial Designs)

Ένας κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός δεν λαμβάνει υπόψη όλες τις πιθανές ακμές του νοητού κύβου και μειώνει τον αριθμό των πειραμάτων που πρέπει να γίνουν επιλέγοντας μόνο μερικά από τα 2^k πειράματα του πλήρως παραγοντικού σχεδιασμού. Το Σχ παρουσιάζει ένα παράδειγμα, όπου μόνο τέσσερα από τα οκτώ σημεία μελέτης εξετάστηκαν. Οι μερικώς παραγοντικού σχεδιασμοί

χρησιμοποιούνται συνήθως για την εύρεση παραμέτρων σχεδιασμού καθώς και για τον έλεγχο στιβαρότητας.[23]

3. Σύνθετοι Σχεδιασμοί (Composite designs)

Ο τελευταίος τύπος σχεδιασμού για μία συνήθη πειραματική περιοχή είναι ο σύνθετος σχεδιασμός. Συνδυάζει τα εξεταζόμενα σημεία ενός παραγοντικού σχεδιασμού, τις ακμές και τις επαναλήψεις των κεντρικών σημείων, με τη χρήση πειραμάτων που προκύπτουν πάνω στους άξονες που διέρχονται από το κεντρικό σημείο. Ο κύβος που βρίσκεται δεξιά στο Σχήμα 2.19 δείχνει ένα παράδειγμα σχεδιασμού με τρεις παραμέτρους, όπου αξονικά πειράματα τοποθετήθηκαν στις έξι πλευρές του νοητού κύβου. Οι παράμετροι σχεδιασμού έχουν συνήθως τρία ή πέντε επίπεδα εξέτασης και για αυτό το λόγο ο τύπος αυτός σχεδιασμού χρησιμοποιείται σε μοντέλα δευτέρου βαθμού.



Σχήμα 2.19 : Σύγκριση των Στατιστικών Σχεδιασμών, βασισμένο στους Eriksson et al. (2000, σελ. 15, εικ. 1.13) : Αυτές οι εικόνες παρουσιάζουν τρεις διαφορετικούς σχεδιασμούς για μία μελέτη με τρεις παραμέτρους και ένα κεντρικό σημείο. Το πρώτο σχήμα δείχνει ένα παράδειγμα πλήρως παραγοντικού σχεδιασμού, όπου όλες οι πιθανές ακμές εξετάστηκαν. Ο μερικώς παραγοντικός σχεδιασμός στο κέντρο λαμβάνει υπόψη του μόνο ένα μέρος από όλα τα σημεία μελέτης και χρειάζεται τοπ μισό αριθμό δοκιμών. Ο τελευταίος κύβος δείχνει ένα σύνθετο σχεδιασμό, ο οποίος έχει έξι επιπλέον αξονικά πειράματα.

Πεδίο Διεξαγωγής Πειραμάτων

Η συνήθης περιοχή που μπορούν να διεξαχθούν τα πειράματα δίνουν στους τρεις αυτούς σχεδιασμούς μία ενιαία γεωμετρική μορφή η οποία τους καθιστά εύκολα διαχειριζόμενους. Παρακάτω θα αναλυθούν και άλλοι σχεδιασμοί όταν η περιοχή διεξαγωγής των πειραμάτων είναι ανώμαλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι δύο πρώτοι σχεδιασμοί που περιγράφηκαν παραπάνω δεν είναι εφαρμόσιμοι και η χρήση άλλων λύσεων είναι απαραίτητη. [23]

2.4.7. Σχεδιασμοί Καταλληλότητας με βάση την Ορίζουσα (D-Optimal Designs)

2.4.7.1. Η αναγκαιότητα των Σχεδιασμών Καταλληλότητας με βάση την Ορίζουσα (D-Optimal Designs)

Παραπάνω παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές του ΣτΠ και χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις βασικοί σχεδιασμοί για συνήθεις περιοχές πειραμάτων. Πέρα από αυτές τις οικογένειες σχεδιασμών, έχουμε και διάφορες άλλες εναλλακτικές περιπτώσεις σχεδιασμών οι οποίες είναι χρήσιμες σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετούνται οι σχεδιασμοί D-Optimal, οι οποίοι εκτελούνται μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή αφού ο όγκος των υπολογισμών είναι τεράστιος, και απαιτούνται όταν :

- το πεδίο των πειραμάτων είναι ανώμαλο,
- πρέπει να συμπεριληφθούν πειράματα που έχουν ήδη εκτελεστεί,
- οι ποιοτικές παράμετροι έχουν περισσότερα από δύο επίπεδα,
- πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των επαναλήψεων των σχεδιασμών,
- πρέπει να προσαρμοστούν ειδικά μοντέλα παλινδρόμησης,
- χρησιμοποιούνται παράμετροι διεργασίας και συνδυασμού στον ίδιο σχεδιασμό.

2.4.7.2. Ανώμαλα Πεδία Πειραμάτων

Το πεδίο των προς εκτέλεση πειραμάτων προσδιορίζεται από τις παραμέτρους που διερευνώνται. Ο τύπος κάθε παραμέτρου, τα διαστήματά ορισμού τους καθώς και ο συνολικός αριθμός τους επηρεάζουν το σχήμα του πεδίου. Για να απεικονιστεί η περιοχή ορισμού, η χρήση ενός απλού σχεδίου είναι το πιο αποτελεσματικό εργαλείο. Παραπάνω περιγράφηκε η χρήση των τετραγωνικών και κυβικών σχεδιασμών, αλλά πέρα από αυτό μπορούν να βρεθούν και άλλα πεδία πειραμάτων όπως υπερκυβικά ή μεγαλύτερου βαθμού.

Όλες αυτές οι περιοχές των πειραμάτων δεν έχουν καθόλου περιορισμούς κατά τη διατύπωση του προβλήματος. Ένας περιορισμός σημαίνει ότι, π.χ. η μία γωνία της περιοχής δεν είναι "προσβάσιμη" για πειραματισμούς. Η μεσαία στήλη του Σχήματος

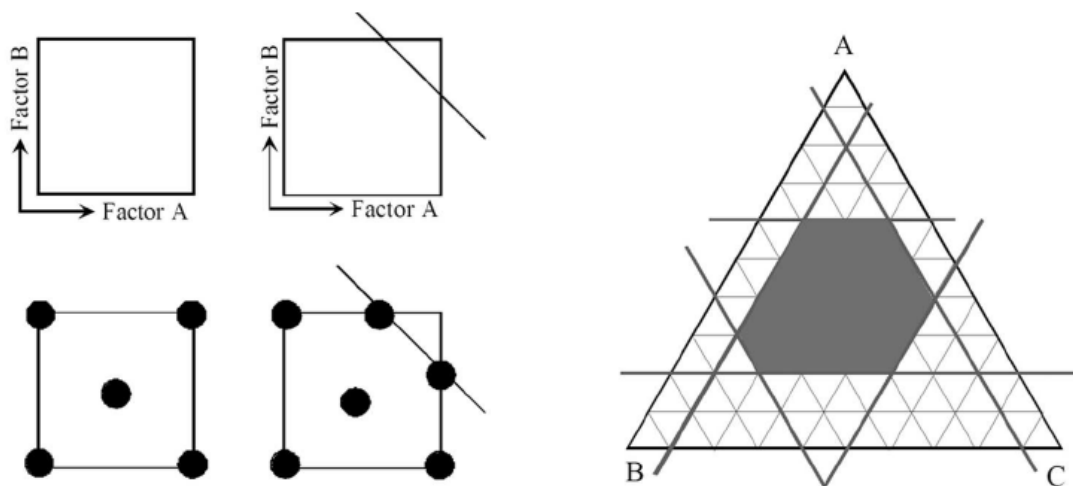
20 απεικονίζει ένα παράδειγμα τετραγωνικού σχεδιασμού, με τον περιορισμό στην επάνω δεξιά γωνία. Αυτή η γωνία δεν ερευνάται και για αυτό το λόγο δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένας σχεδιασμός που αφορά ένα ομαλό πεδίο πιθανών λύσεων. Λόγοι για κάτι τέτοιο μπορεί να είναι ότι ο πειραματιστής επιθυμεί να εμποδίσει τη δημιουργία ιδιαίτερων συνδυασμών των παραμέτρων ή ότι η γωνία αυτή δεν μπορεί να ερευνηθεί εξαιτίας εξωτερικών επηρεασμών.[23]

Υπάρχουν δύο τρόποι χειρισμού των ανώμαλων πεδίων πειραμάτων του Σχήματος 20. Ο πιο εύκολος από τους δύο είναι να περιοριστεί η περιοχή μέχρι να αποκτήσει και πάλι μία τετραγωνική μορφή, αλλά αυτός ο τρόπος θα διαστρεβλώσει την όλη έρευνα και δεν προτείνεται. Μια πιο αποτελεσματική λύση είναι η δημιουργία ενός, υποβοηθούμενου υπολογιστικά μέσω H/Y, σχεδιασμού D-Optimal. Όπως διακρίνεται στο κάτω δεξιά από τα τέσσερα τετράγωνα του Σχήματος 20, ο αλγόριθμος του σχεδιασμού D-Optimal επιλέγει δύο σημεία στο όριο του περιορισμού αντί της γωνίας που έχει αποκλειστεί. Αυτό αυξάνει τον αριθμό των επαναλήψεων των σχεδιασμών αλλά είναι βασική παράμετρος ώστε να αντιμετωπιστεί η πολυπλοκότητα της περιορισμένης περιοχής των πειραμάτων. Επιπλέον, το κεντρικό σημείο είναι παραπονημένο.[23]

Οι συνδυαστικοί σχεδιασμοί μπορούν, επίσης, να έχουν ανώμαλο πεδίο πειραμάτων. Το τρίγωνο του Σχήματος 2.20 δείχνει ένα σχεδιασμό με τις τρεις παραμέτρους A, B και C . Φυσιολογικά, όλες οι γωνίες του τριγώνου είναι προσβάσιμες , αλλά σε αυτό το παράδειγμα οι παράμετροι υπόκεινται σε περιορισμό. Για τις παραμέτρους συνδυασμού, ένας περιορισμός σημαίνει ότι τα κατώτερα και τα ανώτερα όρια διαφέρουν από 0 έως 1.[23]

Συνυπολογισμός ήδη Πραγματοποιησίων Πειραμάτων

Σε μερικές περιπτώσεις, ο πειραματιστής έχει ήδη εκτελέσει έναν αριθμό πειραμάτων και επιθυμεί την περάτωση της έρευνας του. Στους κλασσικούς σχεδιασμούς δεν είναι εφικτή η προσθήκη πειραμάτων στο σχεδιασμό. Με την εφαρμογή των D-optimal σχεδιασμών, υπάρχει η ευχέρεια να περιληφθούν οι επιπλέον δοκιμές ως μέρος του σχεδιασμού και η μελέτη τους κατά την δημιουργία του τελικού μοντέλου. [23]



Σχήμα 2.20 : Παραδείγματα Ανώμαλων Πεδίων των Πειραμάτων, βασισμένα στους Eriksson et al. (2000, σελ. 214, εικ. 18.1-3) : Τα τέσσερα τετράγωνα στα αριστερά της εικόνας αναπαριστούν ένα πείραμα με δύο παραμέτρους διεργασίας. Η πρώτη στήλη δείχνει μία συνήθης περιοχή πειραμάτων, με ένα πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό. Στη δεύτερη στήλη η περιοχή έχει ένα περιορισμό στην πάνω δεξιά γωνία, και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένας σχεδιασμός D-Optimal. Το παραπάνω τρίγωνο δείχνει ένα σχεδιασμό συνδυασμών με κατώτατα και ανώτερα όρια, που διαφέρουν μεταξύ 0 και 1. Το πεδίο του πειράματος είναι ανώμαλο, επίσης.

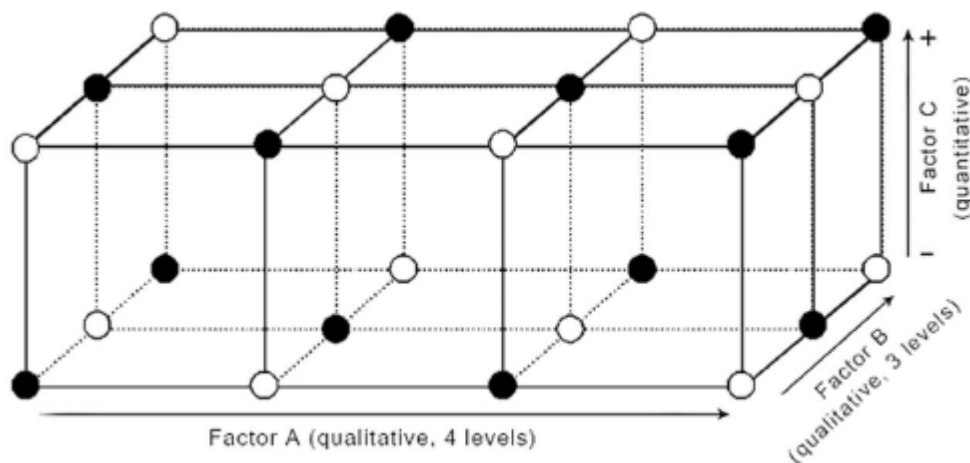
Η χρήση των ποιοτικών παραμέτρων σχεδιασμού

Μία ποιοτική παράμετρος σχεδιασμού έχει μόνο διακριτές τιμές και όχι συνεχείς. Αν ο αριθμός αυτών των διακριτών τιμών αυξηθεί πέραν των δύο, ο αριθμός των πειραμάτων που πρέπει να εκτελεστούν αυξάνεται δραστικά. Το παρακάτω Σχήμα (21) απεικονίζει μια έρευνα με δύο ποιοτικές παραμέτρους και μια ποσοτική. Με τρεις και τέσσερις διακριτές τιμές για τις δύο ποιοτικές παραμέτρους, ένας πλήρως παραγοντικός σχεδιασμός θα απαιτούσε $4 \times 3 \times 2 = 24$ δοκιμές για να λυθεί το πρόβλημα.

Η προσέγγιση D-optimal μειώνει τον αριθμό των προς εκτέλεση δοκιμών σε μόνο 12 πειράματα. Αυτά τα πειράματα, που φαίνονται στο Σχήμα 2.21 με τους γεμισμένους κύκλους, επιλέχθηκαν ώστε να εξασφαλίσουν έναν ισορροπημένο σχεδιασμό με διασπορά δοκιμών μέσα σε όλο το πεδίο δυνατών λύσεων. "Ένας ισορροπημένος σχεδιασμός έχει τον ίδιο αριθμό δοκιμών για κάθε επίπεδο της ποιοτικής μεταβλητής".[23]

Μείωση του αριθμού των δοκιμών

Οι κλασσικοί σχεδιασμοί είναι πολύ αναποτελεσματικοί εάν ο αριθμός των παραμέτρων σχεδιασμού είναι αυξημένος. Ο παρακάτω Πίνακας (2) παρουσιάζει παραδείγματα για τον ελάχιστο αριθμό δοκιμών για έναν πλήρως παραγοντικό, έναν



Σχήμα 2.21 : Σχεδιασμός με πολλαπλών επιπέδων ποιοτικών παραμέτρων: η εικόνα αυτή απεικονίζει την περιοχή δυνατών λύσεων προβλημάτων τριών παραμέτρων. Οι παράμετροι A και B είναι ποιοτικοί και έχουν τρία και τέσσερα διακριτά επίπεδα τιμών αντίστοιχα. Η παράμετρος C λαμβάνει δύο διακριτές τιμές +1 και -1.Οι γεμάτοι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα επιλεγμένα σημεία από ένα σχεδιασμό D-optimal.Ένας πλήρως 4x3x2 παραγοντικός σχεδιασμός θα επέλεγε 24 σημεία.

μερικός παραγοντικό και έναν D-Optimal σχεδιασμό. Οι απαιτούμενες δοκιμές για τον D-Optimal σχεδιασμό είναι συνεχώς λιγότερες και δεν αυξάνονται τόσο γρήγορα όσο στον κλασσικό σχεδιασμό με την αύξηση του αριθμού των παραμέτρων σχεδιασμού.

Factors	Full Factorial	Fractional Factorial	D-Optimal
5	32	16	16
6	64	32	28
7	128	64	35
8	256	64	43
9	512	128	52

Πίνακας 2 : Ελάχιστος αριθμός δοκιμών κατά την εύρεση παραμέτρων ενός σχεδιασμού.

Προσαρμογή Εξειδικευμένων Μοντέλων Παλινδρόμησης

Οι D-Optimal σχεδιασμοί δίνουν την δυνατότητα τροποποίησης του μοντέλου με διαφορετικούς τρόπους. Η παρακάτω εξίσωση δείχνει ότι είναι πιθανό να διαγραφούν επιλεγμένοι όροι του μοντέλου, εάν ο πειραματιστής γνωρίζει ότι αυτοί είναι ασήμαντοι ως προς την απόκριση. Αυτό επιτρέπει τη μείωση του αριθμού των δοκιμών χωρίς αυτό να έχει μεγάλη επίδραση στη συνολική διεξαγόμενη έρευνα.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_{12} + \beta_{13} x_{13} + \beta_{23} x_{23} + \epsilon \quad (2.7)$$

Η δεύτερη πιθανή τροποποίηση του μοντέλου είναι η προσθήκη απλών όρων υψηλής τάξης. Με τους κλασσικούς σχεδιασμούς είναι μόνο πιθανό να αλλαχθεί όλο το μοντέλο, π.χ. από ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης σε ένα μοντέλο δεύτερου βαθμού. Σε αντίθεση με αυτό, οι D-Optimal σχεδιασμοί επιτρέπουν την πρόσθεση ανεξαρτήτων όρων σε σχέση με το αρχικό μοντέλο. Η παρακάτω εξίσωση αποτελεί παράδειγμα γραμμικού μοντέλου με έναν επιπλέον όρο αλληλεπίδρασης.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{23} x_{23} + \epsilon \quad (2.8)$$

2.4.7.3. Η D-Optimal Προσέγγιση

Ένας D-Optimal σχεδιασμός είναι ένας σχεδιασμός πειραμάτων, υποβοηθούμενος από ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος περιέχει το καλύτερο υποσύνολο από όλα τα πιθανά πειράματα. Βασιζόμενος σε ένα επιλεγμένο κριτήριο και σε έναν δεδομένο αριθμό δοκιμών, ο καλύτερος σχεδιασμός δημιουργείται από μία διαδικασία επιλογής.

Σύνολο Υποψηφίων Λύσεων

Το σύνολο υποψηφίων λύσεων είναι ένας πίνακας ο οποίος περιέχει όλες τις, θεωρητικά και πρακτικά, πιθανές περιπτώσεις πειραμάτων, όπου κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει τις τιμές των παραμέτρων για ένα πείραμα και κάθε στήλη μία μεταβλητή. Αυτός είναι ο λεγόμενος πίνακας των υποψηφίων σημείων, έχει N γραμμές και παρουσιάζεται ως ξ_N .

Για μία απλή έρευνα με δύο μεταβλητές σχεδιασμού x_1 και x_2 , το σύνολο των υποψηφίων λύσεων έχει δύο στήλες και τέσσερις γραμμές. Έχουμε τέσσερις γραμμές επειδή έχουμε 2^k πειράματα, τα οποία έχουν μία ελάχιστη ή μέγιστη τιμή για κάθε παράμετρο.

$$\xi_4 = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Πίνακας Σχεδιασμού

Ο πίνακας σχεδιασμού X είναι ένας $n \times p$ πίνακας, ο οποίος εξαρτάται από ένα μοντέλο με p συντελεστές. Ο αριθμός των γραμμών n μπορεί να επιλεγθεί από τον πειραματιστή και αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πειραμάτων του σχεδιασμού. Με δεδομένο το μοντέλο και τον πίνακα υποψηφίων λύσεων, η κατασκευή του πίνακα σχεδιασμού είναι εύκολη. Κάθε στήλη περιέχει ένα συνδυασμό από παραμέτρους από το σύνολο των υποψηφίων λύσεων, εξαρτώμενο από τους όρους του μοντέλου. Ο πίνακας αυτός μπορεί επίσης να ονομαστεί πίνακας του μοντέλου, αλλά τις περισσότερες φορές ο πίνακας του μοντέλου εννοείται ένας $N \times P$ πίνακας, ο οποίος περιέχει γραμμές εξαρτώμενες από το μοντέλο για κάθε υποψήφια λύση.

Συνεχίζοντας το παραπάνω παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη τον πίνακα ξ_4 και το μοντέλο της εξίσωσης 2.7 και για $n=4$ δοκιμές.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (2.10)$$

Προκύπτει ο πίνακας του μοντέλου με τέσσερις γραμμές και τέσσερις στήλες, όπου όλες οι υποψήφιες λύσεις από τον ξ_4 χρησιμοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό. Κανονικά, το υποψήφιο σύνολο περιέχει πολύ περισσότερα πειράματα και ο πίνακας του μοντέλου είναι ένα μικρό υποσύνολο. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με αριθμό παραμέτρων σχεδιασμού ίσο με 5, με δύο επίπεδα κωδικοποίησης (-1 min, 0 mean, +1 max), με και πλήρες μοντέλο δευτέρας τάξεως ο παρακάτω πίνακας γίνεται 125×15 .

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Η πρώτη στήλη του X παρουσιάζει τον σταθερό όρο β_0 , γι' αυτό το λόγο είναι όλοι οι όροι μοναδιαίοι. Η δεύτερη και τρίτη στήλη περιέχει όρους του μοντέλου για τους προς μελέτη όρους x_1 και x_2 , λαμβανομένους από το σύνολο υποψηφίων λύσεων ξ_4 . Η τελευταία στήλη του πίνακα X αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραπάνω όρων, για το λόγο αυτό η τελευταία στήλη προκύπτει από τον

πολλαπλασιασμό των στηλών των παραμέτρων σχεδιασμού από τον πίνακα υποψηφίων λύσεων ξ_4 .

Στην περίπτωση ενός μεγαλύτερου συνόλου υποψηφίων λύσεων όπως αυτό που προκύπτει στην παρούσα εργασία με πέντε παραμέτρους σχεδιασμού, τριών επιπέδων ο καθένας, ο αριθμός των υποσυνόλων υποψηφίων λύσεων ξ_N αυξάνεται και έτσι η επιλογή του πίνακα σχεδιασμού θα πρέπει να γίνει σε σχέση με κάποιο ειδικό κριτήριο. Ο καλύτερος συνδυασμός αυτών των σημείων καλείται «ευνοϊκότερος» και ο πίνακας σχεδιασμού που προκύπτει είναι «ο ευνοϊκότερος» πίνακας σχεδιασμού X^* . [27]

Πίνακας Πληροφορίας και Πίνακας Διασποράς (Information and Dispersion Matrix).

Για την επιλογή των κριτηρίων για τον καλύτερο σχεδιασμό, θα πρέπει να οριστούν και κάποιοι άλλοι τύποι πινάκων. Ο πρώτος από αυτούς λέγεται Πίνακας Πληροφορίας (ΠΠ) $(X'X)$. Αυτός ο πίνακας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ανάστροφου του πίνακα X , X' και του ίδιου του πίνακα X . Ο Πίνακας Διασποράς (ΠΔ), $(X'X)^{-1}$, είναι ο αντίστροφος πίνακας που προκύπτει από τον προηγούμενο υπολογισμό. Η προέλευση των πινάκων αυτών θα πρέπει να αναζητηθεί στην θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων, στον υπολογισμό του πίνακα β ενός υποθετικού μοντέλου. Η μητρική γραφή ενός τέτοιου (γραμμικού, $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \epsilon$) μοντέλου είναι:

$$y = X\beta + \epsilon \quad (2.11)$$

, και το σύνολο συντελεστών των αγνώστων β , σύμφωνα με την θεωρία ελαχίστων τετραγώνων, δίδεται από τον τύπο:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y. \quad (2.12)$$

(Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει σε αντίστοιχα βιβλία άλγεβρας ή σε οποιοδήποτε άλλο που δίνονται οι βασικές αυτές γνώσεις παρένθετα) [22]

2.4.7.4.Κριτήρια για τον καλύτερο D-optimal σχεδιασμό

Τα διάφορα κριτήρια που παρατίθενται παρακάτω , με βασικότερο το D-optimality κριτήριο, αφορούν D-optimal σχεδιασμούς και ανήκουν στην γενικότερη κατηγορία των κριτηρίων που βασίζονται στον Πίνακα Πληροφορίας ($X'X$) (information-based criteria) λόγω του γεγονότος ότι προσπαθούν να τον μεγιστοποιήσουν.

Κριτήριο D-optimality

Το D-optimality κριτήριο είναι το πιο σύνηθες κριτήριο το οποίο επιδιώκει να μεγιστοποιήσει την ορίζουσα του Πίνακα Πληροφορίας $|X'X|$. Αυτό σημαίνει ότι ο ευνοϊκότερος πίνακας σχεδιασμού X^* περιέχει τα n εκείνα πειράματα που μεγιστοποιούν την ορίζουσα του $(X^{*'}X^*)$.Με άλλα λόγια , τα n πειράματα καλύπτουν το μεγαλύτερο δυνατό κομμάτι του πειραματικού χωρίου. Η εξίσωσή (2.13) δείχνει την επιλογή του ΠΠ X^* μεταξύ όλων των πιθανών πινάκων σχεδιασμού επιλεγμένων από τον πίνακα ξ_N . Η σχέση μεταξύ του πίνακα σχεδιασμού και την ορίζουσα εξηγεί την χρήση του γράμματος D (από τη λέξη determinant) στην ονομασία του σχεδιασμού ως D-optimal.

$$|X^{*'}X^*| = \max_{\xi_n \in N} (|X'X|) \quad (2.13)$$

Μεγιστοποιώντας την ορίζουσα του ΠΠ , $(X'X)$, ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση της ορίζουσας του ΠΔ , $(X'X)^{-1}$.Η αντιστοίχιση αυτή είναι πολύ χρήσιμη ώστε να κρατηθούν οι υπολογισμοί σε όσο το δυνατόν χαμηλές τιμές γίνεται.

$$|X'X| = \frac{1}{|(X'X)^{-1}|} \quad (2.14)$$

Αλλά είδη κριτηρίων

Η εκτενής ανάλυση των υπαρχόντων κριτηρίων ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσης εργασίας και για το λόγο αυτό γίνεται μια απλή αναφορά για λόγους πληρότητας.

Κριτήριο A-optimality (Trace)

$$\text{trace}(X^{*'}X^*)^{-1} = \min_{\xi_n \in N} (\text{trace}(X'X)^{-1})$$

$$\text{trace}(X'X)^{-1} = \sum_{i=1}^p c_{ii}$$

Κριτήριο V-optimality (Average Prediction Variance)

$$d(\chi_i) = \chi_i' * (X'X)^{-1} * \chi_i,$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_i' * (X^{*'}X^*)^{-1} * \chi_i = \min_{\xi_n \in N} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_i' * (X'X)^{-1} * \chi_i \right)$$

Κριτήριο G-optimality (Maximum Prediction Variance)

$$\max (\chi_i' * (X^{*'}X^*)^{-1} * \chi_i) = \min_{\xi_n \in N} (\max (\chi_i' * (X'X)^{-1} * \chi_i))$$

Κριτήριο G-Efficiency

$$G_{eff} = 100\% * \left(\frac{p}{n * d_{max}(\chi)} \right)$$

2.4.7.5. Προσαρμογή του μοντέλου (Fitting the model)

Ο D-optimal σχεδιασμός είναι πλήρως εξαρτώμενος από το μοντέλο που θα επιλεγεί για να περιγράψει το προς μελέτη φαινόμενο. Αν αλλαχθεί το χρησιμοποιούμενο μοντέλο , τότε θα προκύψει ένας νέος πίνακας σχεδιασμού X και κατά συνέπεια άλλος ΠΠ , (X'X) . Έτσι , η επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί είναι ένα σημαντικό βήμα για τον καθορισμό του. Τα είδη των μοντέλων που χρησιμοποιούνται είναι γραμμικά , αλληλεπίδρασης ,δευτέρας τάξεως ,κυβικά , υπερκυβικά κ.α. , σε πλήρη ή μερική μορφή.

Γραμμικά μοντέλα

Τα γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιούνται κατά το αρχικό στάδιο της αναζήτησης των παραμέτρων σχεδιασμού ή κατά το στάδιο ελέγχου της στιβαρότητας του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή όλες οι παράμετροι σχεδιασμού είναι γραμμικά εξαρτώμενοι από την απόκριση. Ο γραμμικός όρος περιλαμβάνει τον συντελεστή

παλινδρόμησης β και την παράμετρο σχεδιασμού x . Ένα γραμμικό μοντέλο με τρεις παραμέτρους έχει την παρακάτω μορφή:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \epsilon. \quad (2.15)$$

Μοντέλα Αλληλεπίδρασης

Τα μοντέλα αλληλεπίδρασης είναι πιο πολύπλοκα, αποτελούν επέκταση των γραμμικών και χρησιμοποιούνται για τις ίδιες περιπτώσεις παραμέτρων σχεδιασμού όπως στα γραμμικά. Τα μοντέλα αλληλεπίδρασης περιλαμβάνουν τους ίδιους όρους με τα γραμμικά έχοντας επιπλέον τους όρους αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού. Ένας όρος αλληλεπίδρασης είναι ο συνδυασμός δύο παραμέτρων x_i και x_j πολλαπλασιασμένων με τον αντίστοιχο συντελεστή παλινδρόμησης β_{ij} . Η παρακάτω εξίσωση αποτελεί ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης με τρεις παραμέτρους σχεδιασμού:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \epsilon \quad (2.16)$$

Μοντέλα δευτέρου βαθμού

Τέλος, στα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα συγκαταλέγονται και τα μοντέλα δευτέρας τάξης, που ουσιαστικά αποτελούν επέκταση των μοντέλων αλληλεπίδρασης με την προσθήκη των δευτέρου βαθμού για κάθε παράμετρο σχεδιασμού. Ένας όρος δευτέρας τάξης αποτελείται από τον συντελεστή παλινδρόμησης β_{ii} πολλαπλασιασμένο με το τετράγωνο της παραμέτρου σχεδιασμού x_i . Τα μοντέλα δευτέρου βαθμού είναι τα πιο πολύπλοκα από τους τρεις βασικούς τύπους και χρησιμοποιούνται κατά το ενδιάμεσο στάδιο της βελτιστοποίησης. Ένα μοντέλο δευτέρου βαθμού με τρεις παραμέτρους σχεδιασμού φαίνεται παρακάτω:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \epsilon. \quad (2.17)$$

2.4.7.6. Αδιαστατοποίηση των παραμέτρων

Το πεδίο ορισμού των πρωτογενών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού ενδέχεται να είναι διαφορετικό όπως επίσης να υπάρχει διαστατική διαφοροποίηση. Για τους λόγους αυτούς, δημιουργείται μια ενιαία κλίμακα, συνήθως από το μείον ένα έως το ένα όπου το μηδέν και το ένα αντιστοιχεί στο κάτω όριο και στο πάνω

όριο της εκάστοτε παραμέτρου αντίστοιχα. Υπάρχουν τρία είδη αδιαστατοποιήσεων όπου στον D-optimal σχεδιασμό χρησιμοποιείται η ορθογωνική αδιαστατοποίηση.

Ορθογωνική αδιαστατοποίηση

Στην ορθογωνική αδιαστατοποίηση (orthogonal scaling) οι παράμετροι κλιμακοποιούνται και δημιουργείται σημείο αναφοράς που εξαρτάται από την μέγιστη ,την ελάχιστη και την τιμή στο μέσο του εύρους του καθενός τους. Μία παράμετρος σχεδιασμού x_i αδιαστατοποιείται ως εξής :

$$z_i = \frac{x_i - \bar{M}}{\bar{R}}, \quad (2.18)$$

όπου \bar{M} είναι η το μέσο του εύρους μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής , \bar{R} είναι το εύρος μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{M} = \frac{\max x + \min x}{2}, \quad \bar{R} = \frac{\max x_{def} - \min x_{def}}{2} \quad (2.19)$$

Αδιαστατοποίηση μέσου εύρους

Κατά την αδιαστατοποίηση μέσου εύρους (midrange scaling) ,η τιμή αναφοράς ορίζεται από το ήμισυ του διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής συγκρίνοντας όλα τα πεδία ορισμού των ανεξάρτητων μεταβλητών:

$$z_i = x_i - \bar{M} \quad (2.20)$$

Αδιαστατοποίηση ανηγμένη ως προς τη διακύμανση

Η ανηγμένη αδιαστατοποίηση ως προς τη διακύμανση (unit variance scaling) χρησιμοποιεί επίσης το ήμισυ του εύρους μεταξύ μεγαλύτερης και μικρότερης τιμής από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών ως σημείο αναφοράς. Επιπροσθέτως , η αδιαστατοποίηση γίνεται ως προς την τυπική απόκλιση σ όπως φαίνεται παρακάτω:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{M}}{\sigma} \quad (2.21)$$

2.4.7.7. Σύνολο των εκτελούμενων πειραμάτων

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή ενός κριτηρίου βελτιστοποίησης είναι η προσαρμογή ενός μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα. Η ακριβής προσαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων σε ένα μαθηματικό μοντέλο απαιτεί έναν ελάχιστο αριθμό πειραμάτων. Η επιλογή του αριθμού αυτού είναι πολύ σημαντική διότι αλλάζοντας τον αριθμό των πειραμάτων αλλάζει ο πίνακας του μοντέλου X και κατ' επέκταση επιλέγεται νέος βέλτιστος σχεδιασμός μέσω της ορίζουσας $|X'X|$. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος αριθμός ή μαθηματική εξίσωση που να δίνει την τιμή αυτή, υπάρχει όμως συγκεκριμένο κάτω όριο που ισούται με τον αριθμό p των συντελεστών παλινδρόμησης του μοντέλου. Ένα μοντέλο με p συντελεστές μπορεί να μελετηθεί με ένα D-optimal σχεδιασμό όταν πρόκειται να εκτελεστούν τουλάχιστον p πειράματα. Στις περισσότερες φορές, είναι θεμιτό να δημιουργούνται, για το ίδιο πρόβλημα, διαφορετικοί σχεδιασμοί στους οποίους να διαφοροποιείται ο αριθμός των πειραμάτων ώστε να συγκρίνεται η καταλληλότητα τους. Ένας σχεδιασμός με λίγες περισσότερες δοκιμές από τις απαιτούμενες p μπορεί να έχει μεγαλύτερη ορίζουσα και κατ' επέκταση να υπάρξει καλύτερος σχεδιασμός. Ο αριθμός των δοκιμών δεν θα πρέπει να είναι οριακά μεγαλύτερος του αριθμού των συντελεστών παλινδρόμησης αφού το πιθανότερο είναι να μην καλύπτεται ικανοποιητικά όλο το πεδίο των δυνατών συνδυασμών ή η πιθανότητα ύπαρξης λύσης σε σημείο "μακριά" από τα σημεία μελέτης να είναι μεγάλη.[22]

2.5. Μεθοδολογία εύρεσης των Μοντέλων Επιφανειών Απόκρισης (M.E.A.)

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που έχουν να αντιμετωπίσουν οι πειραματιστές σε πολλά τεχνικά πεδία είναι η εύρεση της σχέσης μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης y και του συνόλου των ανεξάρτητων μεταβλητών $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$

Σε μερικά συστήματα στη φύση, η σχέση μεταξύ της απόκρισης y και των ανεξάρτητων μεταβλητών x είναι γνωστή "ακριβώς" επειδή βασίζεται σε συγκεκριμένες μηχανικές, χημικές ή φυσικές αρχές. Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να γράψουμε ένα μοντέλο της μορφής $y=g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)+\varepsilon$, όπου ο όρος

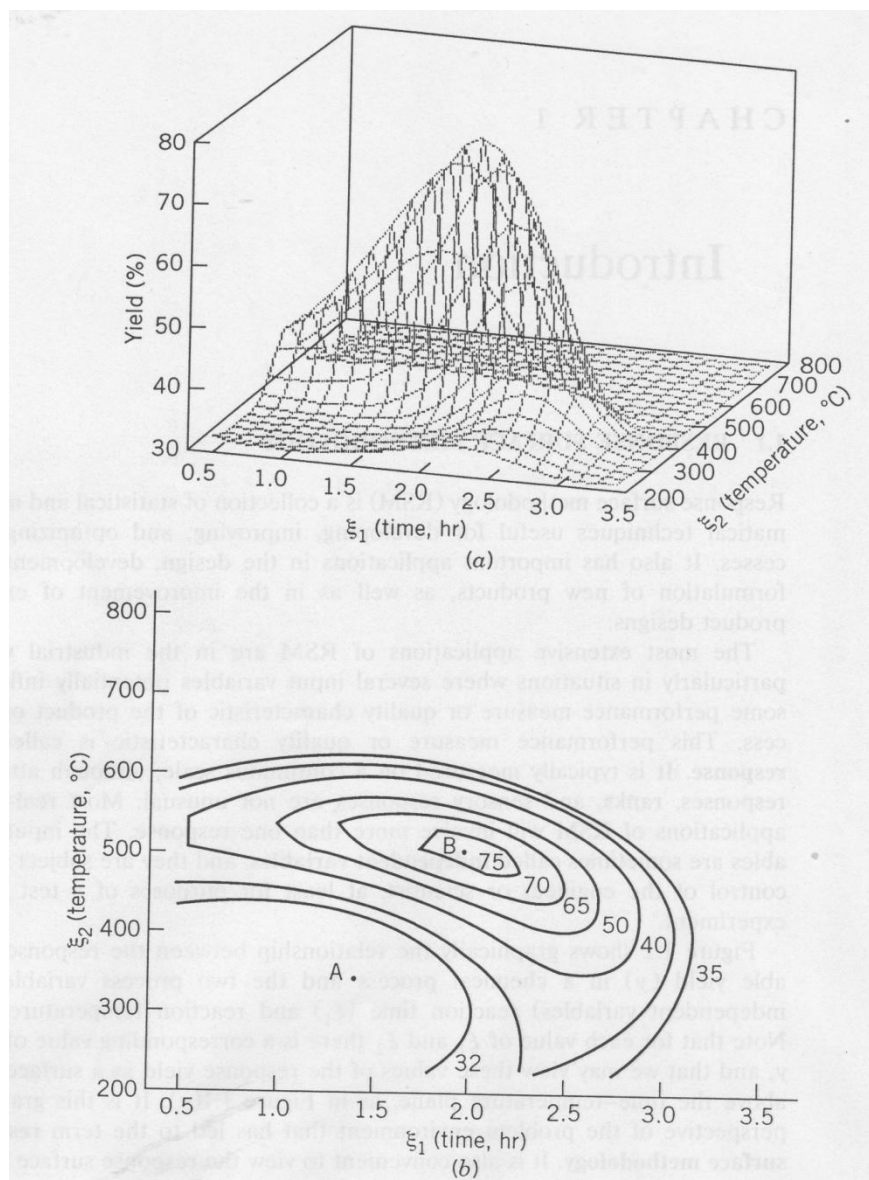
ε στο μοντέλο αυτό αντιπροσωπεύει το "σφάλμα" ή το "θόρυβο" του συστήματος. Αυτού του είδους η σχέση ονομάζεται συχνά μηχανιστικό μοντέλο.

Σε μία πιο κοινή περίπτωση, δεν είναι πλήρως γνωστή η αρχή που συνοδεύει τη συμπεριφορά ενός συστήματος και ο πειραματιστής θα πρέπει να προσεγγίσει την άγνωστη συνάρτηση g με ένα "κατάλληλο" εμπειρικό μοντέλο $y=f(x_1,x_2,x_3,\dots,x_k)+\varepsilon$. Συνήθως η συνάρτηση f είναι μια πρώτης ή δευτέρας τάξης πολυωνυμική συνάρτηση. Αυτό το εμπειρικό μοντέλο ονομάζεται μοντέλο επιφανειών απόκρισης (M.E.A.). Η εύρεση και η προσαρμογή του κατάλληλου μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα απαιτεί βασικές γνώσεις στατιστικού σχεδιασμού πειραμάτων, τεχνικές κατασκευής μοντέλων μέσω παλινδρόμησης και γνώσεις βελτιστοποίησης. Οι τρεις αυτοί τομείς καθορίζουν την μεθοδολογία εύρεσης των M.E.A.

Η μεθοδολογία εύρεσης των M.E.A. αποτελεί μία συλλογή από στατιστικές και μαθηματικές τεχνικές των οποίων ο συνδυασμός χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη, βελτίωση και βελτιστοποίηση μια διαδικασίας. Έχει επίσης σημαντικές εφαρμογές στο σχεδιασμό και στην περαιτέρω εξέλιξη νέων ή παλαιότερων προϊόντων.

Οι πιο εκτενείς εφαρμογές των M.E.A. είναι στον τομέα της βιομηχανίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου αρκετές παράμετροι πιθανώς να επηρεάζουν ένα μέγεθος που καθορίζει την απόδοση ή ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας. Η απόδοση ή το ποιοτικό χαρακτηριστικό ονομάζεται απόκριση. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση ονομάζονται παράμετροι σχεδιασμού και είναι ανεξάρτητες μεταβλητές.

Στο σχήμα 2.22 απεικονίζεται γραφικά η σχέση μεταξύ της απόδοσης μιας χημικής διαδικασίας και των δύο ανεξάρτητων παραμέτρων αυτής, τον χρόνο αντίδρασης (ξ_1) και την θερμοκρασία διεξαγωγής της (ξ_2). Για κάθε τιμή των μεταβλητών ξ_1 και ξ_2 αντιστοιχεί μια τιμή της απόδοσης y της χημικής αντίδρασης με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας επιφάνειας που αντικατοπτρίζει την απόκριση πάνω στο επίπεδο χρόνου-θερμοκρασίας (Σχήμα 2.22α). Η επιφάνεια αυτή μπορεί να απεικονιστεί και δισδιάστατα σε ένα επίπεδο θερμοκρασίας-χρόνου δημιουργώντας ισογραμμές ίδιας τιμής απόδοσης y . Είναι φανερό ότι με την δημιουργία ενός τέτοιου γραφήματος μπορεί πλέον εύκολα να γίνει βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Παρατηρώντας το διάγραμμα, η απόδοση μεγιστοποιείται όταν ο χρόνος $\xi_1=2$ hr και η θερμοκρασία $\xi_2=500^{\circ}\text{C}$:



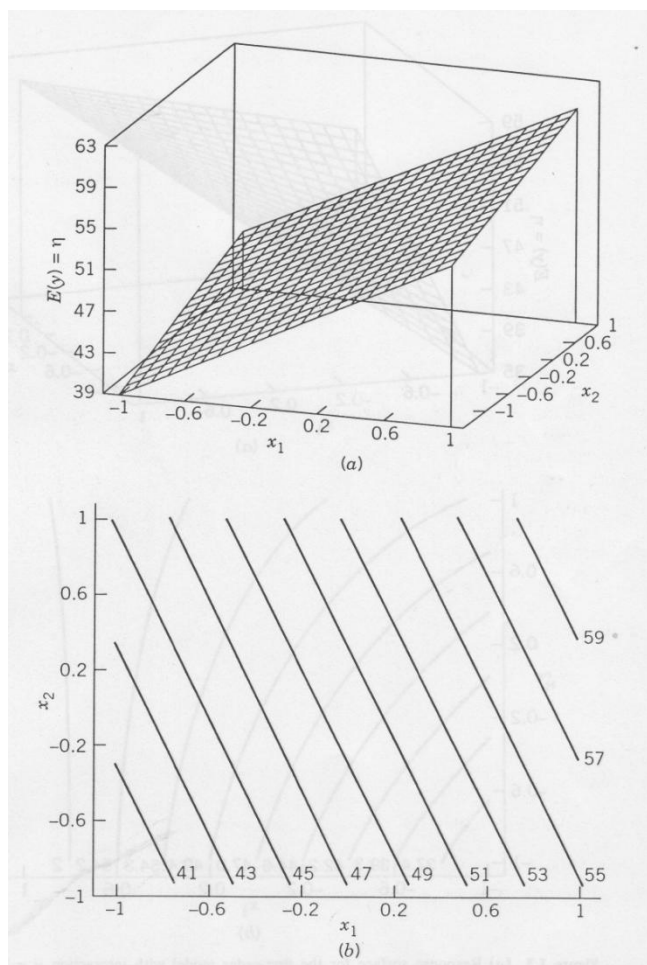
Σχήμα 2.22.(α)Προκύπτουσα επιφάνεια απόκρισης απεικονίζοντας τη σχέση μεταξύ της απόδοσης της χημικής διεργασίας , του χρόνου ξ_1 και της θερμοκρασίας αντίδρασης ξ_2 .(b)Διδιάστατο διάγραμμα ισογραμμών της απόκρισης σε σχέση με τις παραμέτρους σχεδιασμού.[24]

Δυστυχώς ,στις περισσότερες περιπτώσεις στην πράξη η πραγματική συνάρτηση f που περιγράφει την επιφάνεια απόκρισης ,όπως στο σχήμα 2.22 , δεν είναι γνωστή. Κρίνεται επιτυχής η χρήση των Μ.Ε.Α. εάν ο πειραματιστής έχει καταφέρει να προσεγγίσει πολύ καλά την f . Η μεθοδολογία εύρεσης Μ.Ε.Α. περιλαμβάνει τη "στρατηγική" που θα ακολουθηθεί κατά την διεξαγωγή των κατάλληλων πειραμάτων ώστε να εξερευνηθεί όλο το πεδίο τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών , εμπειρική στατιστική μοντελοποίηση για την ανάπτυξη της σχέσης μεταξύ απόκρισης και ανεξάρτητων μεταβλητών και μέθοδοι βελτιστοποίησης για να βρεθούν εκείνα τα

σύνολα τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού που θα δώσουν τις καλύτερες τιμές απόκρισης.

2.5.1.Μοντέλα απόκρισης

Για λόγους πληρότητας παρατίθενται περιπτώσεις μοντέλων που προσεγγίζουν επιφάνειες απόκρισης. Η περίπτωση του γραμμικού μοντέλου $y=50+8x_1+3x_2$,με δύο παραμέτρους σχεδιασμού φαίνεται γραφικά παρακάτω:

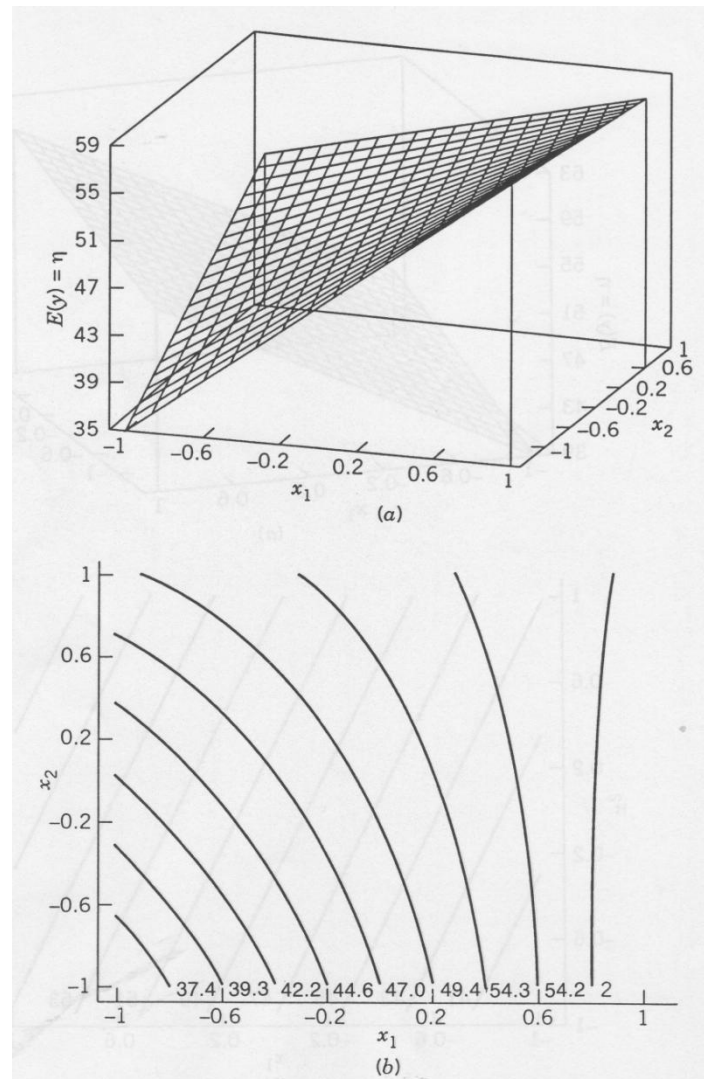


Σχήμα 2.23.(α)Επιφάνεια απόκρισης του μοντέλου πρώτης τάξης $y=50+8x_1+3x_2$, (β)Διάγραμμα ισογραμμών του μοντέλου.[24]

Στις τρεις διαστάσεις, η επιφάνεια απόκρισης είναι ένα κεκλιμένο επίπεδο που απλώνεται πάνω από το εύρος τιμών των ανεξαρτήτων μεταβλητών x_1 και x_2 . Στο διάγραμμα ισογραμμών, το γραμμικό μοντέλο απεικονίζεται με παράλληλες ευθείες γραμμές στο επίπεδο που δημιουργούν οι παράμετροι σχεδιασμού x_1 και x_2 . [24]

Στην περίπτωση ύπαρξης, πέραν των άμεσων επηρεασμών των παραμέτρων σχεδιασμού στην τιμή της απόκρισης, αλληλεπίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών, στο αρχικό μοντέλο μπορεί να προστεθούν όροι αλληλεπηρεασμού.

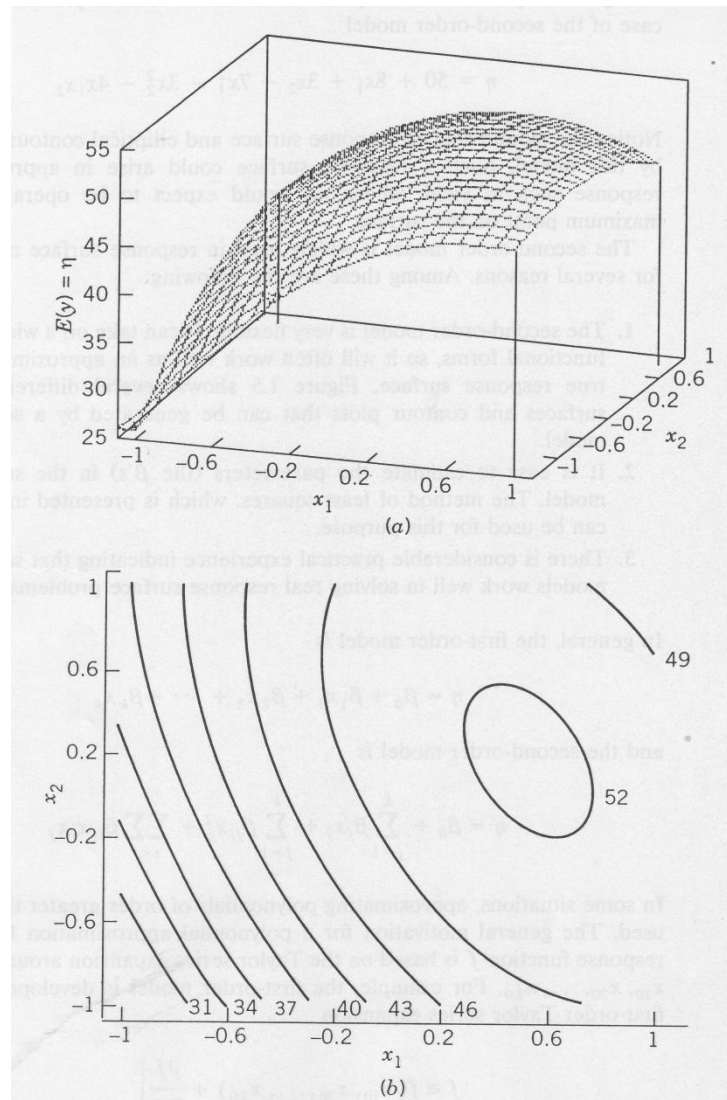
Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το προηγούμενο γραμμικό μοντέλο επαυξημένο με τον όρο αλληλεξάρτησης $4x_1x_2$. Στο σχήμα 2.24 παρατίθεται γραφικά η επιφάνεια απόκρισης του μοντέλου $y=50+8x_1+3x_2-4x_1x_2$:



Σχήμα 2.24(α) Επιφάνεια απόκρισης γραμμικού μοντέλου με αλληλεπίδραση παραμέτρων σχεδιασμού $y=50+8x_1+3x_2-4x_1x_2$. (β) Διάγραμμα ισογραμμών του μοντέλου αυτού.[24]

Στο σχήμα 2.24(b), σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα που αντιπροσωπεύει το γραμμικό μοντέλο, παρατηρείται ο όρος $-4x_1x_2$ να προσδίδει μια καμπυλότητα στην απεικόνιση της επιφάνειας απόκρισης. Συχνά, η καμπυλότητα που προσέφερε το μοντέλο δεν είναι αρκετή στο περιγράψει την καμπυλότητα που παρουσιάζει η πραγματική επιφάνεια απόκρισης. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένα μοντέλο δεύτερης τάξης ώστε η προσέγγιση να είναι ακριβέστερη. Γενικά ένα μοντέλο πρώτης τάξης είναι συνήθως αρκετό για την περιγραφή σημείων όπως το σημείο A του

διαγράμματος 2.22(α) και αντίστοιχα, σημεία που παρουσιάζουν εκτεταμένη καμπυλότητα όπως το σημείο Β του ίδιου διαγράμματος περιγράφονται με μοντέλα δεύτερης τάξης . Το σχήμα 2.25 παρουσιάζει μια επιφάνεια απόκρισης και μια επιφάνεια ισογραμμών του μοντέλου δεύτερης τάξης $y=50+8x_1+3x_2-7x_1^2-3x_2^2-4x_1x_2$:

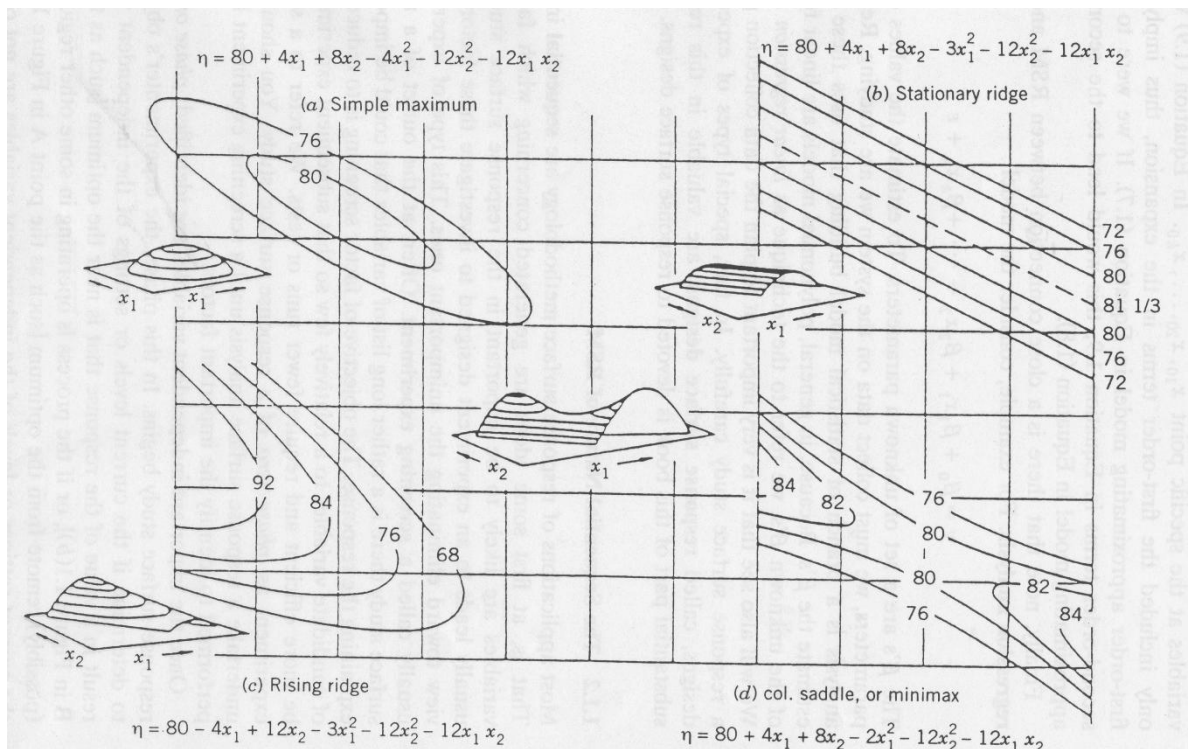


Σχήμα 2.25(α)Επιφάνεια απόκρισης του μοντέλου δεύτερης τάξης $y=50+8x_1+3x_2-7x_1^2-3x_2^2-4x_1x_2$.
(b)Διάγραμμα ισογραμμών του μοντέλου.[24]

Στο μοντέλο αυτό , δημιουργούνται έντονες καμπυλότητες και ελλειπτικές ισογραμμές. Τέτοιου είδους επιφάνειες απόκρισης μπορεί να προκύψουν κατά την προσέγγιση αποκρίσεων που αναμένεται να παρουσιάσουν σημεία μέγιστου ή ελαχίστου (περιοχές λειτουργίας του συστήματος , της διεργασίας ή του προϊόντος).Τα μοντέλα δευτέρας τάξης είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στη μεθοδολογία εύρεσης των Μ.Ε.Α. για διάφορους λόγους , κυριότεροι των οποίων είναι:

- Τα μοντέλα δευτέρας τάξεως είναι πολύ ευέλικτα. Μπορούν να πάρουν πλήθος λειτουργικών μορφών , με να παρουσιάζει μεγάλη λειτουργικότητα κατά την προσέγγιση της πραγματικής επιφάνειας απόκρισης.
- Είναι εύκολος ο υπολογισμός των συντελεστών παλινδρόμησης μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.
- Υπάρχει σημαντική πρακτική εμπειρία εστιαζόμενη στην χρήση των μοντέλων δευτέρας τάξεως για την λύση προβλημάτων εύρεσης επιφανειών απόκρισης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται διάφοροι τύποι μοντέλων δεύτερης τάξης με δύο παραμέτρους σχεδιασμού:



Σχήμα 2.26.Μερικά παραδείγματα επιφανειών οριζόμενα από μοντέλα δεύτερης τάξης με δύο παραμέτρους σχεδιασμού.[28]

Ως κατακλείδα , θα πρέπει να παρατηρηθεί η πολύ κοντινή σχέση μεταξύ των Μ.Ε.Α. και της γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης. Για παράδειγμα , στο μοντέλο $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$ οι συντελεστές β είναι το σύνολο των αγνώστων παραμέτρων. Για τον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων αυτών, θα πρέπει να συλλεγούν πληροφορίες από το προς μελέτη σύστημα. Η ανάλυση παλινδρόμησης είναι ένας κλάδος κατά την κατασκευή του στατιστικού μοντέλου όπου χρησιμοποιεί τα πειραματικά δεδομένα του συστήματος για τον υπολογισμό των συντελεστών β .

Επειδή, γενικότερα, τα πολυωνυμικά μοντέλα είναι γραμμικές συνάρτησεις των συντελεστών β , η συγκεκριμένη διαδικασία αναφέρεται ως ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης.[24]

2.5.2 Διαδικασία-εφαρμογές της μεθοδολογίας εύρεσης των Μ.Ε.Α.

Ακολουθία ενεργειών για την εύρεση των Μ.Ε.Α.

Η συνήθης ακολουθία των ενεργειών για την εύρεση των Μ.Ε.Α. ξεκινά όταν ήδη υπάρξει η αρχική ιδέα από τον πειραματιστή για το ποιοί μπορεί να είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος ,διαδικασίας ή προϊόντος. Στο γεγονός αυτό στηρίζεται ο σχεδιασμός των πειραμάτων που σκοπεύει ουσιαστικά να ερευνήσει τους παράγοντες αυτούς και να εξαλείψει τους πιο ασήμαντους. Με τον τρόπο αυτό , στο προκαταρκτικό αυτό στάδιο (screening experiment , δες §2.4.5.) γίνεται εντοπισμός των παραμέτρων επηρεασμού και γίνεται επιλογή των σημαντικότερων ώστε να τα πειράματα που θα επακολουθήσουν να είναι λιγότερα και αποδοτικότερα.

Η πρώτη φάση της εφαρμογής της μεθόδου της εύρεσης των Μ.Ε.Α. αφορά την αναζήτηση του συνόλου τιμών της κάθε παραμέτρου σχεδιασμού ώστε η τιμή της προκύπτουσας απόκρισης να βρίσκεται κοντά στην επιθυμητή περιοχή ή στην περιοχή του βέλτιστου, αν αυτό έχει με κάποιο τρόπο εντοπιστεί. Στην συγκεκριμένη εργασία η παράμετρος απόψυξης λ (απόκριση) θα πρέπει να κυμαίνεται σε όρια που θα δίνουν τιμές σκληρότητας συγκεκριμένου εύρους στα επιλεγμένα σημεία της μήτρας διελάσεως. Ουσιαστικά είτε αναζητούνται τα όρια τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών που να δίνουν αποκρίσεις σε περιοχές όπως του σημείου Β (Σχήμα 2.22) είτε ,αν τα όρια τιμών είναι δεδομένα (π.χ. μηχανή που είναι οι ρυθμίσεις της είναι εντός συγκεκριμένων ορίων) , ελέγχεται η ενδεχόμενη απόκλιση από την περιοχή βέλτιστης λειτουργίας (σημείο Α, Σχήμα 2.22(b)).Στην δεύτερη περίπτωση , αν οι τρέχουσες ρυθμίσεις των ορίων των παραμέτρων σχεδιασμού δεν βρίσκονται κοντά στην περιοχή μέγιστης απόκρισης τότε ο μηχανικός ή ο πειραματιστής θα πρέπει να ορίσει ένα σύνολο τροποποιήσεων τους ώστε να οδηγήσει την διεργασία στην περιοχή του βέλτιστου (ορισμός μοντέλου πρώτης τάξης , εφαρμογή της μεθόδου απότομης ανόδου).

Η δεύτερη φάση ξεκινά με την προϋπόθεση ότι η διεργασία βρίσκεται στην περιοχή του βέλτιστου . Ο πειραματιστής αναζητά ένα μοντέλο που θα προσεγγίσει με ακρίβεια την πραγματική συνάρτηση της επιφάνειας απόκρισης μέσα σε μια σχετικά περιορισμένη περιοχή γύρω από το βέλτιστο. Επειδή σε μια τέτοια περιοχή η επιφάνεια παρουσιάζει καμπυλότητα , η χρήση ενός μοντέλου δευτέρας τάξης ,εν γένει , μπορεί να προσεγγίσει την επιφάνεια απόκρισης. Η εκτέλεση των πειραμάτων γίνεται σε μία υποπεριοχή του συνολικού πεδίου λειτουργίας (ορίζεται από το εύρος τιμών της κάθε παραμέτρου σχεδιασμού , όλη η περιοχή που ορίζουν οι παράμετροι ξ_1, ξ_2 Σχήμα 2.22(b)). Η υποπεριοχή αυτή μπορεί να είναι κυβική όπως φαίνεται γύρω από το σημείο Α (Σχήμα 2.22(b)) ή κυκλική όπως φαίνεται στο σημείο Β (Σχήμα 2.22(b)).

Κατά την εξέλιξη της αναζήτησης των Μ.Ε.Α. και μέχρι την εξαγωγή του τελικού συμπεράσματος , ο πειραματιστής μαθαίνει:

1. Αν απαιτείται επανάληψη (καλύτερη προσέγγιση της τάξης μεγέθους των μη συστηματικών σφαλμάτων) ή διεξαγωγή περισσότερων πειραμάτων (μη ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής επιφάνειας απόκρισης από το μοντέλο).
2. Την περιοχή όπου βρίσκεται η βέλτιστη λύση.
3. Τον τύπο της συνάρτησης προσέγγισης που απαιτείται.
4. Την καταλληλότερη επιλογή του Σ.τ Π. για το προς μελέτη πρόβλημα.
5. Αν απαιτούνται ή όχι μετασχηματισμοί του είδους των αποκρίσεων ή των παραμέτρων σχεδιασμού.

Τομείς εφαρμογής των Μ.Ε.Α.

Τα Μ.Ε.Α. είναι χρήσιμα στην λύση βιομηχανικών προβλημάτων. Γενικά , χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες.

1. Χαρτογράφηση της επιφάνειας απόκρισης σε συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος. Στην περίπτωση του υπολογισμού της απόδοσης μιας χημικής διεργασίας , (Σχήμα 2.22(α)) έχει βρεθεί το σημείο ρύθμισης των παραμέτρων χρόνου και θερμοκρασίας, παρ'όλα αυτά κάποιες φορές απαιτούνται αλλαγές. Εάν έχει προσεγγιστεί με ακρίβεια η επιφάνεια απόκρισης γύρω από την σύνηθες σημείο λειτουργίας , τότε ο μηχανικός μπορεί να προβλέψει εκ των

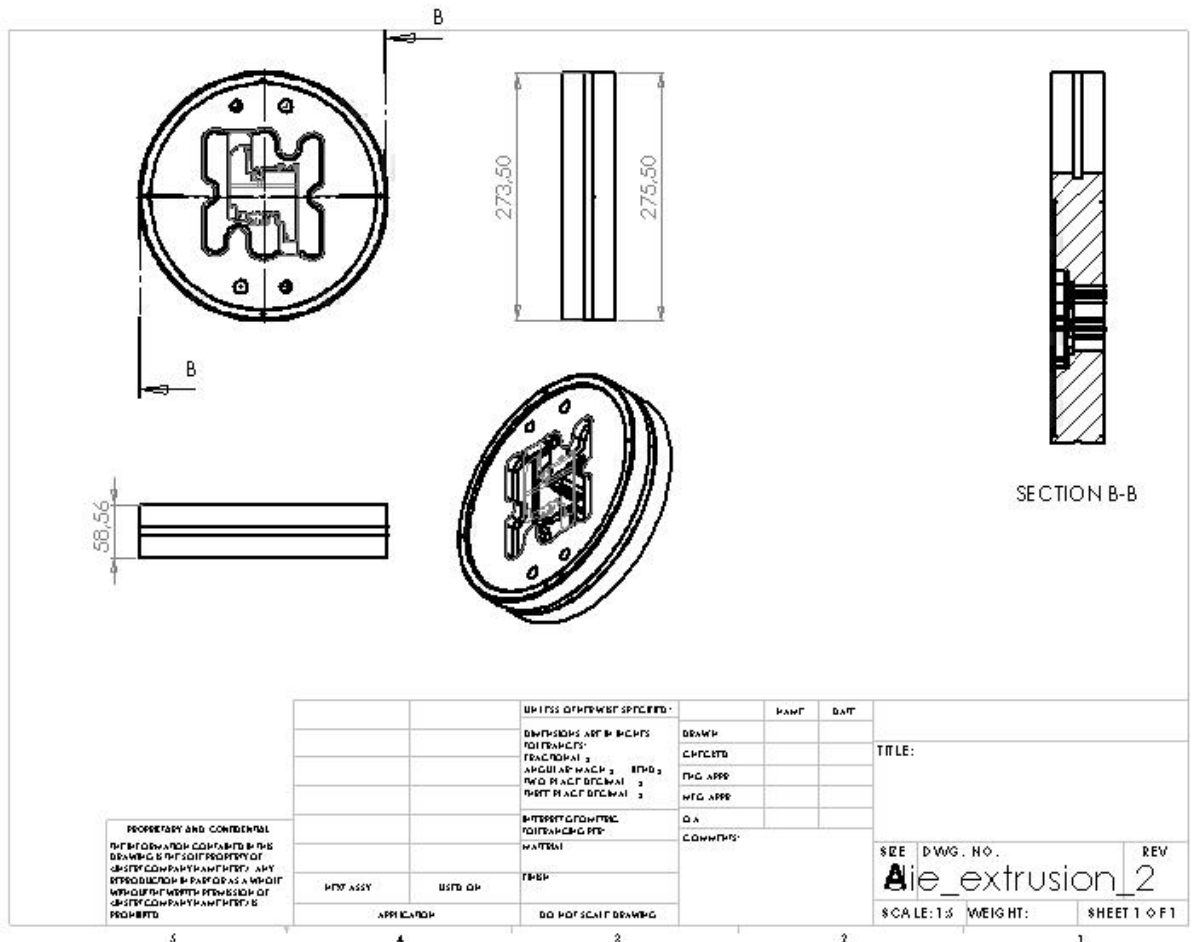
προτέρων τις αλλαγές που θα υποστεί η απόκριση λόγω των τροποποιήσεων στις παραμέτρους σχεδιασμού.

2. Βελτιστοποίηση της απόκρισης. Στη βιομηχανία, ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα είναι ο καθορισμός των συνθηκών ώστε να βελτιστοποιηθεί μια διεργασία ή ένα προϊόν. Σε μια μελέτη εύρεσης των Μ.Ε.Α. , ο μηχανικός μπορεί να ξεκινήσει από είναι σημείο Α (Σχήμα 2.22(b)) και να καταλήξει στο βέλτιστό σημείο Β.
3. Επιλογή των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας για την συμμόρφωση με τις απαιτήσεις προδιαγραφών ή του πελάτη.Στα περισσότερα προβλήματα εύρεσης επιφανειών Μ.Ε.Α. θα πρέπει με κάποιο τρόπο να πληρούνται ταυτόχρονα και άλλα κριτήρια, κατά βάση οικονομικά. Στην περίπτωση π.χ. της χημικής διεργασίας στο σχήμα 2.22 , προσθέτοντας δύο παραμέτρους ακόμη , την συγκέντρωση και το κόστος ,θα πρέπει να διατηρείται η απόδοση της πάνω από το 70% ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να κρατηθεί το κόστος κάτω από 34€/kg.Επίσης , ο πελάτης έχει ορίσει στις προδιαγραφές του ότι η συγκέντρωση θα πρέπει να είναι 65γρ./λίτρο $\pm 3\gamma\rho/\lambda\iota\rho\rho$.

3.ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Επιλογή Τεμαγίου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το προς μελέτη εξάρτημα επιλέχθηκε να είναι μία μήτρα, η οποία χρησιμοποιείται για την διέλαση αλουμινίου. Η μορφή της μήτρας αυτής δίδεται στο μηχανολογικό σχέδιο και στα τρισδιάστατα σχήματα που φαίνονται στις εικόνες 3.1-3.4.



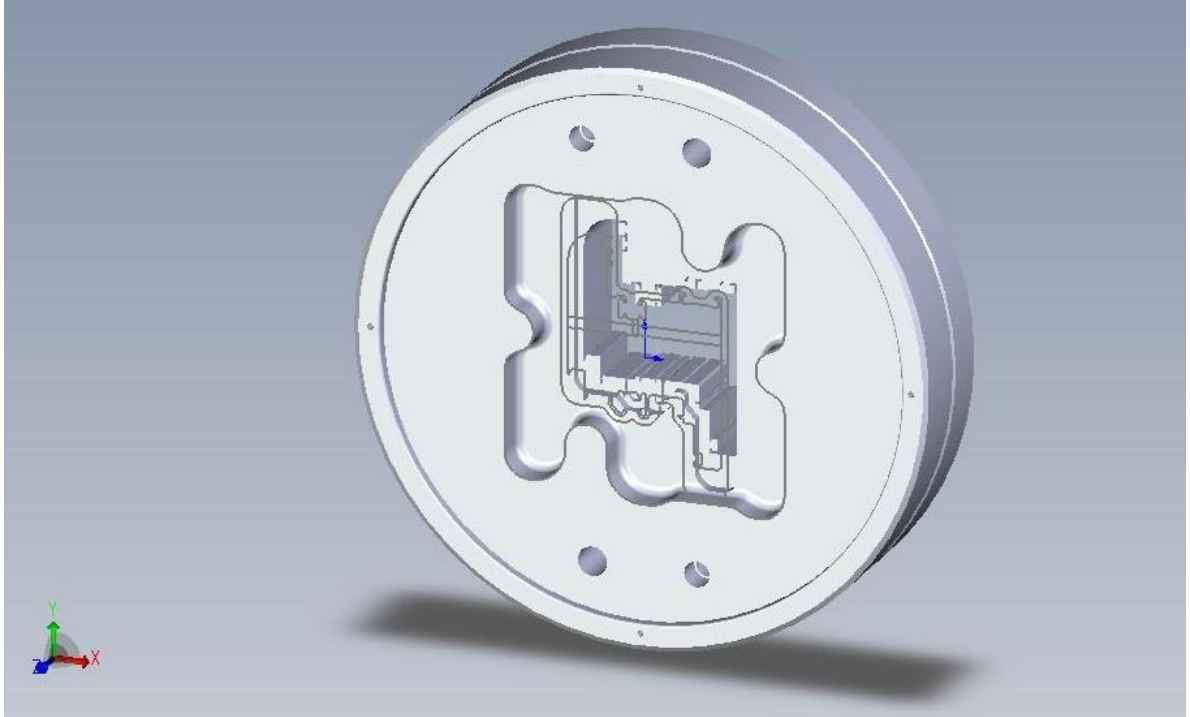
Εικόνα 3.1.Μηχανολογικό Σχέδιο της μήτρας διελάσεως. [SolidWorks]

Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία αφού στην Ελλάδα κατά την εκτίμηση του συγγραφέα ο συγκεκριμένος τομέας της βιομηχανίας παρουσιάζει ιδιαίτερη άνθηση, όχι μόνο στα πλαίσια της παραγωγής προφίλ αλουμινίου αλλά και της δαπάνης κεφαλαίων στον τομέα της Έρευνας και της Ανάπτυξης.

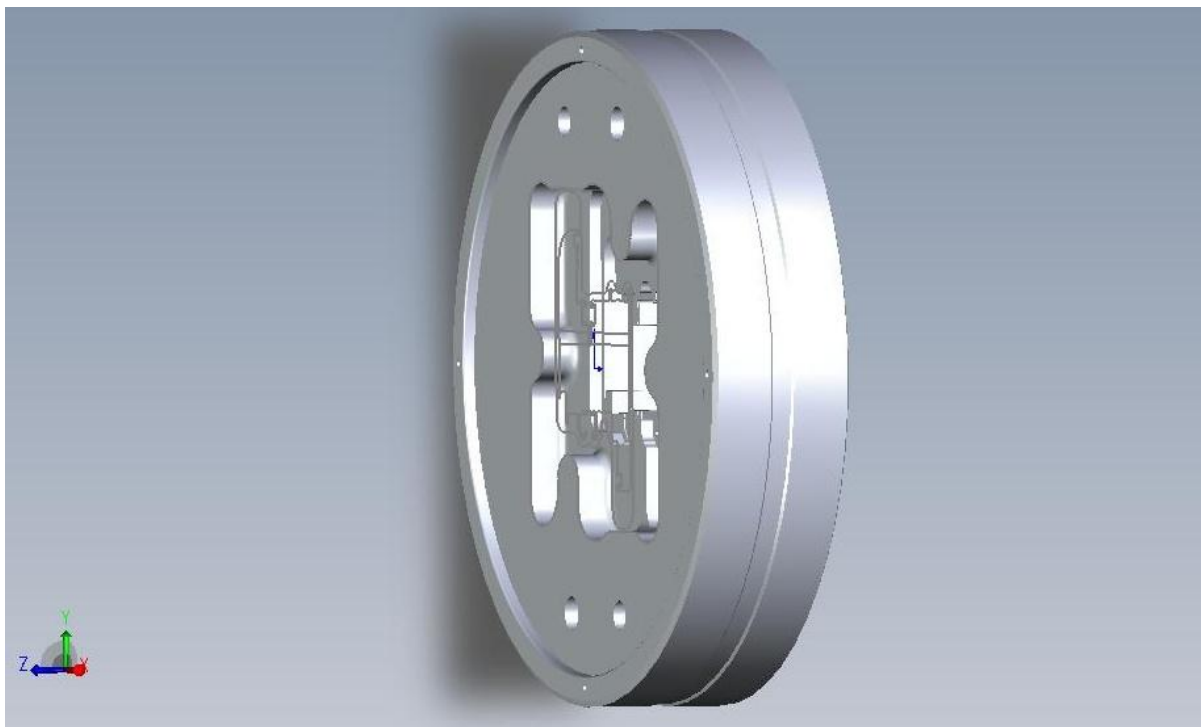
Αντικείμενα του τομέα αυτού αποτελούν ο σχεδιασμός των μητρών και της πρέσας διέλασης, με σκοπό την ομαλότερη ροή του υλικού, τη διαφορετική κατανομή θερμοκρασίας σ' αυτήν, την πολυπλοκότερη διατομή για συγκεκριμένους σκοπούς και την αύξηση του χρόνου ζωής τους. Ένας ζήτημα που συνδέεται άμεσα με τον

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

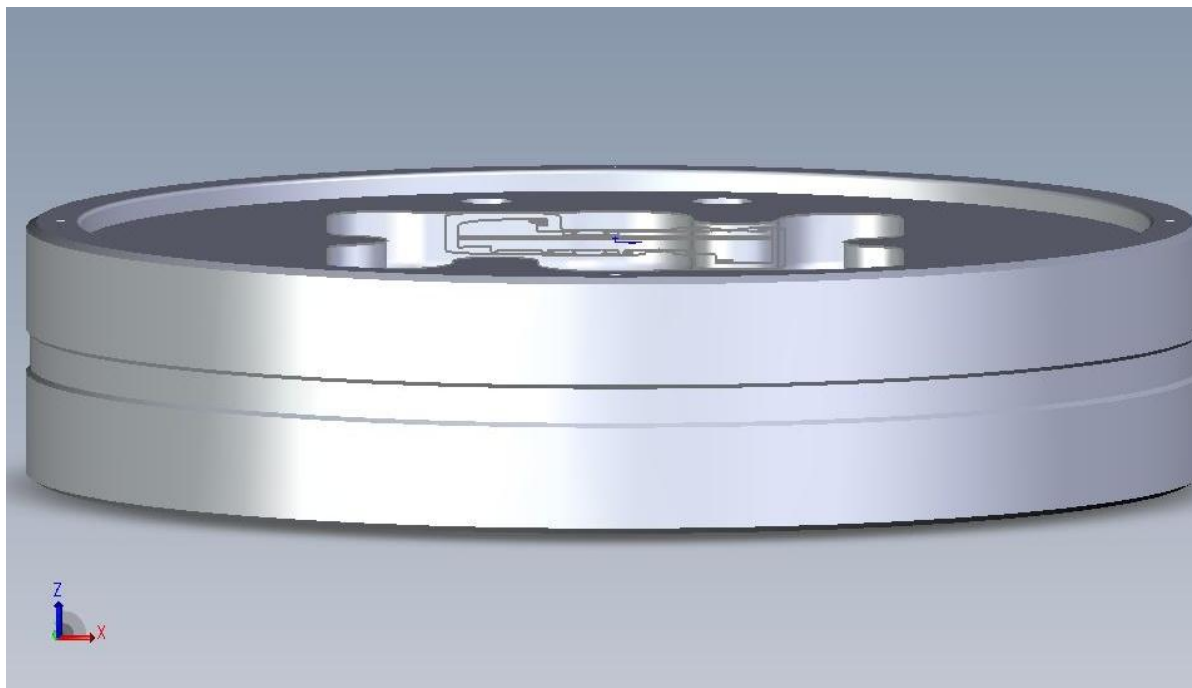
χρόνο ζωής της μήτρας είναι και η θερμική κατεργασία που έχει υποστεί για την απόκτηση των επιθυμητών ιδιοτήτων, όπως σκληρότητα, η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, η αντοχή σε κόπωση κ.λ.π. (βλέπε Κεφ 2^ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο).



Εικόνα 3.2. Εμπρόσθια όψη του τεμαχίου. [SolidWorks]



Εικόνα 3.3. Πλάγια δεξιά, τρισδιάστατη όψη του τεμαχίου. [SolidWorks]



Εικόνα 3.4. Πάχος της μήτρας διέλασης. [SolidWorks]

3.2. Επιλογή Υλικού

Το υλικό που επιλέχθηκε για την μήτρα αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε αυτές τις περιπτώσεις. Η τεχνογνωσία, που έχει αποκτηθεί από τις εταιρίες κατασκευής μητρών και καλουπιών, συγκλίνει στη χρήση του εργαλειοχάλυβα H13, κατά την τυποποίηση AISI (American Iron and Steel Institute) με χημική σύσταση που φαίνεται στον Πίνακα 3.1:

Τυπική Χημική Σύσταση %	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,39	1,0	0,4	5,3	1,3	0,9

Πίνακας 3.1. Χημική σύσταση του εργαλειοχάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή της μήτρας.

Ο εργαλειοχάλυβας είναι ισχυρά κραματωμένος (ποσοστό κραματοποιητικών στοιχείων μεγαλύτερο του 5%) Χρωμίου-Μολυβδαινίου-Βαναδίου. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου χάλυβα είναι :

- Καλή αντοχή σε τριβή σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες.
- Υψηλή δυσθραυστότητα και ολκιμότητα.
- Ομοιόμορφη κατεργασιμότητα και ικανότητα ‘γαλίσματος’ (polishability).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

- Καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και αντίσταση στην κόπωση από θερμικά φορτία.
- Πάρα πολύ καλές ιδιότητες κατά την σκλήρυνση.
- Πολύ περιορισμένη παραμόρφωση κατά την βαφή.

Τα χαρακτηριστικά αυτά, συγκρινόμενα με το προφίλ του υλικού για την συγκεκριμένη χρήση (κατασκευή μήτρας διέλασης), ταυτίζονται.

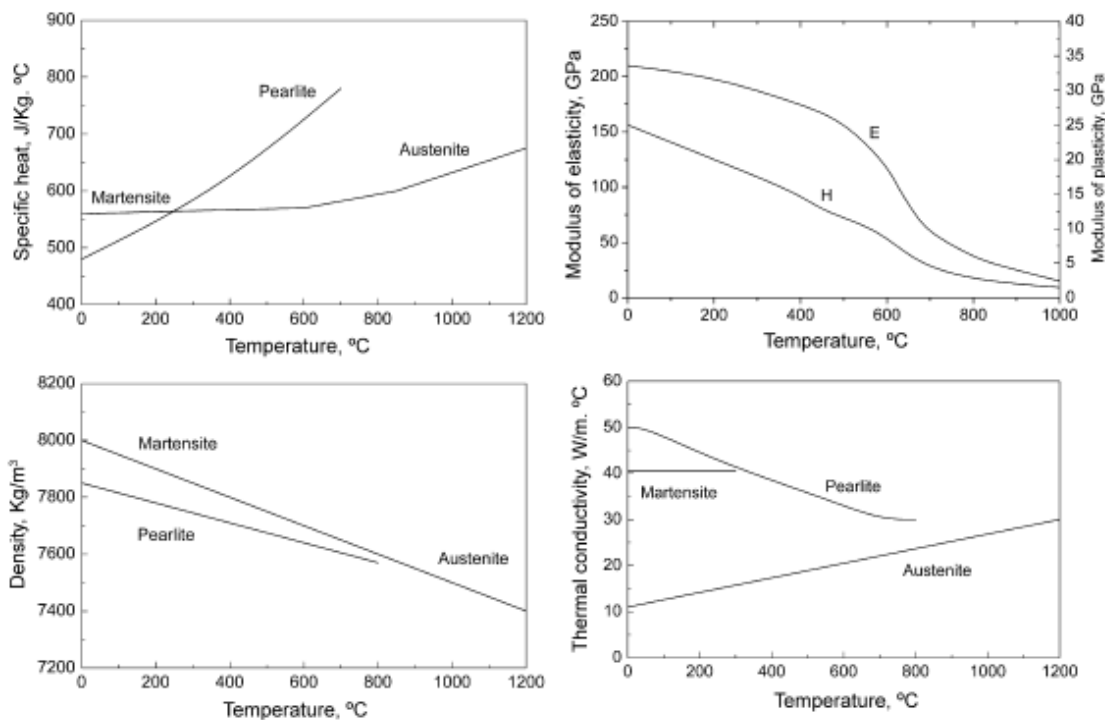
Το συγκεκριμένο υλικό έχει τις παρακάτω φυσικές ιδιότητες [13,14,15] :

Θερμοκρασία (°C)	20	100	200	300	400	500	600	700*	800*	900*	1.000*	1.200*
Πυκνότητα (Kg/m³)	7.800	-	-	-	7.700		7.600	-	7.500*	-	7.400*	7.300*
Μέτρο Ελαστικότητας (N/mm²)	210.000	-	-	-	180.000	-	140.000	-	120.000*	-	80.000*	40.000*
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής (ανά °C από 20°C - 10⁻⁶ °C⁻¹)	-	10,7	11,9	12,2	12,5	12,7	13,1	13,5	13,7	13,9	14,1	14,4
Θερμική Αγωγιμότητα (W/m°C)	25	-	-	-	29*	28,5	30	-	30,7*	-	31,3*	31,7*

Πίνακας 3.2.Φυσικές ιδιότητες του υλικού κατασκευής της μήτρας.

Οι τιμές σε υψηλές θερμοκρασίες του Πίνακα 2 (με αστερίσκο) προέκυψαν με την υπόθεση της γραμμικής μεταβολής της εκάστοτε φυσικής ιδιότητας. Η υπόθεση αυτή βασίστηκε σε δημοσιευμένες εργασίες [1,29] και παρουσιάζεται ενδεικτικά στο διάγραμμα 3.1.

Ο χάλυβας αυτός χρησιμοποιείται μόνο μετά από βαφή και επαναφορά. Η υψηλή κραμάτωση του δίνει την ευχέρεια της χρήσης και ηπιότερων μέσων απόψυξης, όπως το λάδι και τα υψηλής ταχύτητας αέρια. Οι διαστάσεις και η μορφή της μήτρας επιτρέπουν τη συνεχή απόψυξη χωρίς να παρουσιαστεί το φαινόμενο μάζας (πολύ διαφορετικός ρυθμός απόψυξης μεταξύ επιφάνειας και εσωτερικών σημείων του τεμαχίου, που οδηγούν στο σχηματισμό διαφορετικών φάσεων, με διαφορετικές ιδιότητες). Θα πρέπει να επιλεγεί εκείνο το μέσο απόψυξης που να δίνει όσο το δυνατόν ομοιογενέστερη δομή, που θα προκύψει από παρεμφερείς ρυθμούς απόψυξης σε όλα τα σημεία της μήτρας. Αυτός είναι και ο στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης που θα εφαρμοστεί μέσω ντετερμινιστικών και γενετικών αλγορίθμων.



Διάγραμμα 3.1. Μεταβολή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων διαφόρων φάσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία . [1,29]

3.3. Προσομοίωση της απόψυξης

Κατά την απόψυξη του τεμαχίου λαμβάνει χώρα το μεταλλο-θερμο-μηχανικό φαινόμενο (βλέπε Κεφ 2^ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο) και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους διαδικασιών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθεί διεξοδικά το θερμικό φαινόμενο, δηλαδή η αναζήτηση της θερμοκρασιακής κατανομής σε συνάρτηση με το χρόνο κατά την απόψυξη του τεμαχίου.

Το φαινόμενο μετασχηματισμού των φάσεων, που λαμβάνει χώρα, υπολογίζεται έμμεσα αφού οι ρυθμοί απόψυξης, οι οποίοι είναι αποδεκτοί για κάθε σημείο του καλουπιού, αφορούν τον πλήρη μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Ο μικρότερος αποδεκτός ρυθμός απόψυξης δίνει 5% Μπενίτη (Διάγραμμα συνεχούς απόψυξης του συγκεκριμένου χάλυβα, §3.5.2.) , όπου η λανθάνουσα θερμότητα που συνοδεύει την δημιουργία του δεν διαφοροποιεί έντονα την κατανομή θερμότητας.

Η κατανομή των παραμορφώσεων δεν συμμετέχει καθόλου στους υπολογισμούς. Αυτό συμβαίνει διότι ο τρόπος με τον οποίο έχει διαμορφωθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την εύρεση του ηπιότερου δυνατού μέσου για την

επίτευξη συγκεκριμένου εύρους σκληρότητας, το οποίο κατ' επέκταση θα δίνει και τις μικρότερες δυνατές παραμορφώσεις.

3.4. Περιγραφή του Προβλήματος

3.4.1 Μεταφορά Θερμότητας

Γενικά, η εξίσωση Fourier για τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα, συνδυασμένη με την λανθάνουσα θερμότητα των μετασχηματισμών φάσεων, μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας όπου για το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων έχει την μορφή : [1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

όπου λ : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού,

T : η στιγμιαία θερμοκρασία του αποψυχόμενου τεμαχίου,

ρ : η πυκνότητα του υλικού,

C_p : η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση και

t : ο χρόνος.

Οι αρχικές συνθήκες αφορούν την αρχική θερμοκρασία του αποψυχόμενου τεμαχίου. Αυτό είναι και το σημείο από το οποίο αρχίζει ο υπολογισμός. Οι συνήθεις θερμοκρασίες που ωστενιτοποιείται ο χάλυβας αυτός για την κατασκευή μητρών είναι 1020° -1030° C. Ειδικότερα, επιλέγεται η θερμοκρασία των 1020° C (1293,2° K).

3.4.2.Συναγωγή

Η θερμότητα που μεταφέρεται από το τεμάχιο προς το μέσο απόψυξης γίνεται με συναγωγή και ακτινοβολία. Η συναγωγή εκφράζεται με τον νόμο απόψυξης του Newton :

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_f)$$

,όπου Q_{conv} : η θερμότητα που αποβάλλεται από την επιφάνεια του στερεού,

T_s : η στιγμιαία θερμοκρασία του στερεού και

T_f : η θερμοκρασία του μέσου.

Ο συντελεστής συναγωγής εκφράζεται σε W/m^2K . Ο συντελεστής αυτός δεν είναι μία θερμοδυναμική ιδιότητα, είναι μια απλοποιημένη συσχέτιση της κατάστασης του υγρού και των συνθηκών της ροής γι' αυτό αποτελεί περισσότερο μια ροϊκή ιδιότητα.[17]

Μέσο Απόψυξης	Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας h ($W/m^2 \cdot K$)
Αέρας (Φυσική Συναγωγή)	5-25
Αέρας/Υπέρθερμος Ατμός (Εξαναγκασμένη Συναγωγή)	20-300
Λάδι (Εξαναγκασμένη Συναγωγή)	60-1.800
Νερό (Εξαναγκασμένη Συναγωγή)	300-6.000
Νερό (Υπό Εξάτμιση)	3.000-60.000
Ατμός (Συμπυκνωμένος)	6.000-120.000

Πίνακας 3.Τυπικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h.[16]

3.4.3.Ακτινοβολία

Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας γίνεται με τη βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στην μεταφορά αυτή εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας. Ενώ στην αγωγή και στην συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για την μεταφορά θερμότητας, στην ακτινοβολία δεν συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό. Την ακτινοβολούμενη θερμότητα ενός σώματος δίνει η μορφοποιημένη εξίσωση Stefan-Boltzman, η οποία είναι :

$$Q_{radiation} = \varepsilon - \sigma A (T_s^4 - T_a^4)$$

όπου ε : η ικανότητα ακτινοβολίας του υλικού. Είναι η ιδιότητα του υλικού η οποία εξαρτάται από την επιφανειακή θερμοκρασία και την τραχύτητά του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και για επιφάνεια με πολύ μικρή τραχύτητα, η τιμή του ε κυμαίνεται από 0,52 έως 0,56 στους 750° - 1050° C.

σ : η σταθερά ακτινοβολίας του μελανού σώματος (σταθερά Stefan-Boltzman), η οποία ισούται με $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, και A : η επιφάνεια εκπομπής.[17]

3.4.4.Οριακές Συνθήκες

Για τα δύο είδη μεταφοράς θερμότητας, ακτινοβολία και συναγωγή, καθορίζονται οι οριακές συνθήκες για την συναλλαγή θερμότητας μεταξύ της μήτρας και του μέσου απόψυξης. Η οριακή συνθήκη της απόψυξης είναι τρίτου τύπου και αφορά την σύνθεση των συναλλαγών θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή. Μπορεί να γραφεί ως εξής : [1]

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = hA(T_s - T_f) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_f^4) = H(T_s - T_f) ,$$

όπου προκύπτει ένας ισοδύναμος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας H . Λαμβάνοντας υπ' όψην ότι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς είναι με συναγωγή [6], ο ισοδύναμος συντελεστής μπορεί να ταυτίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια με τον συντελεστή συναγωγής h . Κατά την προσομοίωση υπολογίζεται και βελτιστοποιείται μόνο ο συντελεστής συναγωγής h ή H .

3.4.5.Λανθάνουσα θερμότητα κατά τους μετασχηματισμούς φάσεων

Κατά την εξέλιξη της θερμικής κατεργασίας της βαφής, η λανθάνουσα θερμότητα θα εκλύεται ή θα απορροφάται κατά το ξεκίνημα των μετασχηματισμών φάσεων στη μήτρα. Αν και η λανθάνουσα θερμότητα μιας στερεάς φάσης είναι μικρότερη από αυτή της τήξης και στερεοποίησης του μετάλλου, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το θερμοκρασιακό πεδίο. Από πλευράς μαθηματικών, η λανθάνουσα θερμότητα συμμετέχει στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, που περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο, και αυξάνει την δυσκολία επίλυσής της. [1]

Σε αυτή την εργασία η λανθάνουσα θερμότητα του κάθε πεπερασμένου στοιχείου θα αντιμετωπίζεται ως μία εσωτερική πηγή θερμότητας. Κατά την απόψυξη η εσωτερική αυτή θερμότητα προέρχεται από τον μετασχηματισμό του Ωστενίτη (A) σε Μπενίτη (B) και Μαρτενσίτη (M). Ο μετασχηματισμός καθορίζεται να είναι μόνο μαρτενσιτικός (πέραν της «ακραίας» περίπτωσης που δίνει και 5% Μπενίτη) , οπότε ενδιαφέρον κατά τον υπολογισμό παρουσιάζει μόνο η θερμότητα που συνδέεται με

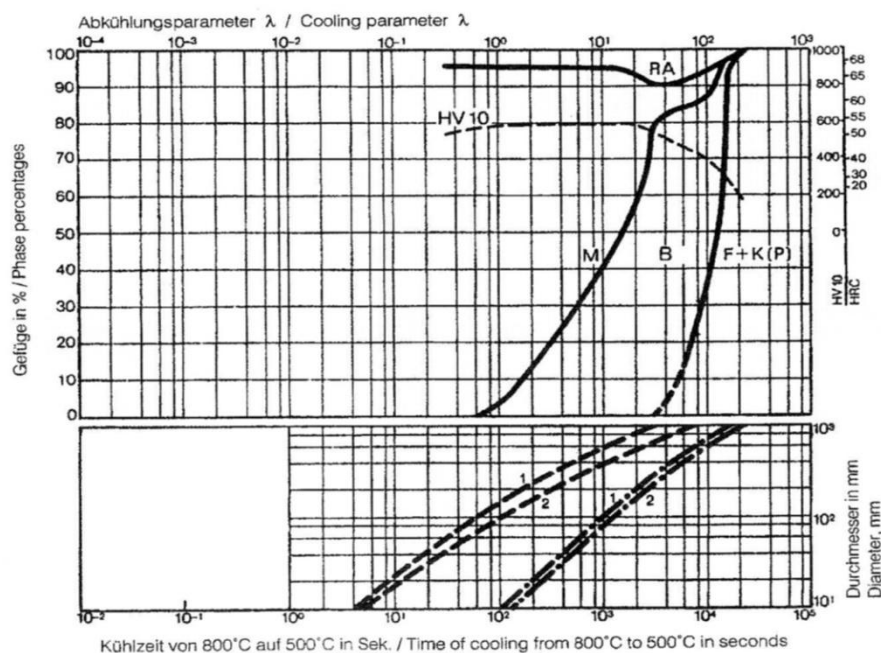
τον σχηματισμό του Μαρτενσίτη. Από το ποσοτικό διάγραμμα του χάλυβα αυτού (Διάγραμμα 2) διαπιστώνεται ότι κατά την απόψυξη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει χωρίς να έχει μετασχηματιστεί 5% ωστενίτης (υπολειπόμενος ωστενίτης).

Για τη διαδικασία της βαφής, το κλάσμα $\left(\frac{\text{όγκος Μαρτενσίτη}}{\text{αρχικός όγκος Ωστενίτη}}\right)$ του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (μη διαχυτικού) εξαρτάται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας έναρξης μετασχηματισμού και της τρέχουσας θερμοκρασίας. Η λανθάνουσα θερμότητα του μετασχηματισμού δίνεται από την σχέση : [1]

$$q_v = \Delta H \cdot \Delta V ,$$

όπου ΔH : η ενθαλπία του σχηματισμού Ωστενίτη σε Μαρτενσίτη και

ΔV : το κλάσμα του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού από μία χρονική στιγμή στην επόμενη.



Διάγραμμα 3.2. Ποσοτικό διάγραμμα του εργαλειοχάλυβα H13 [14]

Το κλάσμα του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού δεν εξαρτάται από την μεταβολή θερμοκρασίας μέχρι αυτή να φτάσει στην θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού αυτού. Χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση των τάσεων στο μη-διαχυτικό μετασχηματισμό, οι Koistinen και Marburger δημιούργησαν μια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

εξίσωση της εξέλιξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία : [1]

$$V = 1 - \exp [-\alpha (M_s - T)] ,$$

όπου M_s : η θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και

α : σταθερά, η οποία εξαρτάται από το υλικό. Βρίσκεται προσεγγιστικά ότι η τιμή του α , που ικανοποιεί και την παρούσα εργασία, είναι $1,10 \cdot 10^{-2}$.

Από το διάγραμμα CCT του εργαλειοχάλυβα αυτού λαμβάνεται η τιμή της $M_s = 350^\circ \text{C}$.

Έτσι η εξίσωση γίνεται :

$$V = 1 - \exp [-1,10 \cdot 10^{-2} \cdot (350 - T)]$$

Προκύπτει τελικά ο παρακάτω πίνακας εκλυόμενης θερμότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία :

Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός				
Θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$)	Μαρτενσίτης (%)	ΔV	$q_v(\text{W/m}^3)$	$q(\text{W/m}^2)$
20	0,95	0	0,00	0,00
50	0,95	0,013927861	9053109,78	9053,11
100	0,936072139	0,046875297	30468943,15	30468,94
150	0,889196842	0,08124675	52810387,67	52810,39
200	0,807950091	0,140821175	91533763,80	91533,76
250	0,667128916	0,244078727	158651172,34	158651,17
300	0,42305019	0,42305019	274982623,25	274982,62
350	0	0	0,00	0,00
Κλάσμα Μαρτενσίτη που δημιουργήθηκε		0,95		

Πίνακας 3.4. Δημιουργία της μαρτενσιτικής φάσης κατά την απόψυξη.

Στην παρούσα περίπτωση, ο υπολογισμός της ταχύτητας απόψυξης ορίζεται με βάση το χρονικό διάστημα που βρίσκεται η μήτρα μεταξύ των θερμοκρασιών των 800°C και 500°C (παράμετρος απόψυξης λ , Διάγραμμα 3.2) με αποτέλεσμα να μην υπάρχει διαφοροποίηση του αποτελέσματος αν δεν ληφθεί υπ' όψην η αλλοίωση του θερμοκρασιακού πεδίου που συντελείται κάτω από τους 300°C .

3.5.Μεθοδολογία εύρεσης των μοντέλων επιφανειών απόκρισης.

3.5.1. Προκαταρκτικό στάδιο – Καθορισμός παραμέτρων σχεδιασμού , κατάλληλος Σ.τ Π.

Παράμετροι σχεδιασμού

Στο πρώτο αυτό στάδιο αναζητούνται τα μεγέθη εκείνα από τα οποία εξαρτάται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που θα τεθεί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα μεγέθη αυτά σχετίζονται μεταξύ τους είτε με φυσικούς νόμους είτε μέσω εμπειρικών μαθηματικών μοντέλων. Η αντικειμενική συνάρτηση αντίστοιχα μπορεί να εκφράζει τη μεταβολή ενός μεγέθους ή απλά μια συνάρτηση ποινής.

Στην περιγραφή του ευθέως προβλήματος, η απόψυξη του τεμαχίου συνδέεται άμεσα με την αποβολή θερμότητας από αυτό. Όπως περιγράφηκε παραπάνω , ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς θερμότητας στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι μέσω συναγωγής άρα ο ισοδύναμος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h θα αποτελεί το κρίσιμο μέγεθος του οποίου η τιμή, που είναι γνωστή λόγω του χρησιμοποιούμενου μέσου απόψυξης, καθορίζει την ταχύτητα απόψυξης της μήτρας. Στην περίπτωση του αντίστροφου προβλήματος , όπου βρίσκουν εφαρμογή οι μέθοδοι βελτιστοποίησης , είναι γνωστή η τιμή της ταχύτητας απόψυξης η οποία εξασφαλίζει τη μεταλλογραφική δομή εκείνη ώστε η αποκτηθείσα σκληρότητα ,σε επιλεγμένα χαρακτηριστικά σημεία της μήτρας, να βρίσκεται εντός συγκεκριμένου εύρους. Άγνωστο μέγεθος αποτελεί ο συντελεστής συναγωγής h και άρα το μέσο απόψυξης ώστε να εξασφαλιστεί συγκεκριμένη ταχύτητα απόψυξης (συγκεκριμένη σκληρότητα), καθώς και η σχέση που τον συνδέει με αυτή. Η σχέση αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά σημεία της μήτρας που επελέγησαν ,γεγονός που σημαίνει ότι σε ενδεχόμενη αλλαγή της μορφολογίας της (αλλαγή του παραγόμενου προφίλ), η μαθηματική σχέση που θα προκύψει από την παρούσα εργασία μπορεί να έχει εφαρμογή μόνο δίνοντας μια τάξη μεγέθους στο συντελεστή h .

Ο συντελεστής συναγωγής θα βρεθεί με την εφαρμογή των μεθόδων βελτιστοποίησης και η ζητούμενη σχέση μέσω της μεθόδου της εύρεσης των Μ.Ε.Α.Η ταχύτητα απόψυξης εκφράζεται μέσω της παραμέτρου απόψυξης λ [ή αλλιώς CP (Cooling Parameter)] η οποία ορίζεται ως το ένα εκατοστό του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για τη μεταβολή της θερμοκρασίας της μήτρας (δεν είναι

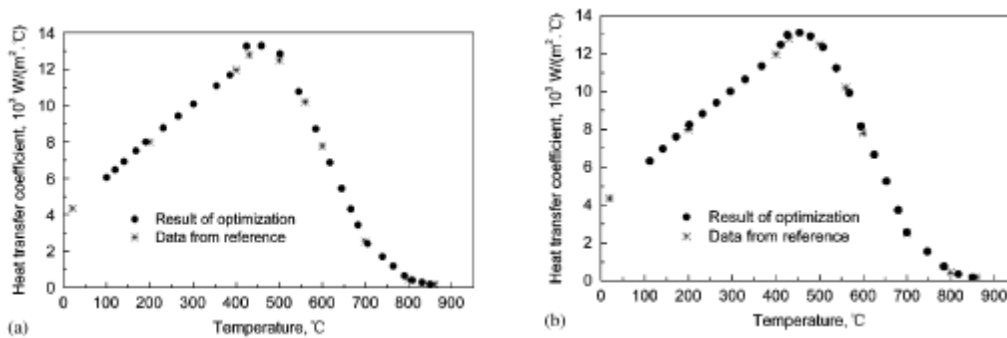
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

παντού η ίδια , άλλωστε αυτός είναι ο λόγος που λαμβάνονται τιμές της παραμέτρου λ σε διαφορετικά/χαρακτηριστικά σημεία) από τους 800^οC στους 500^οC. Ητοι:

$$CP = \frac{\Delta t_{800^{\circ}C-500^{\circ}C}}{100},$$

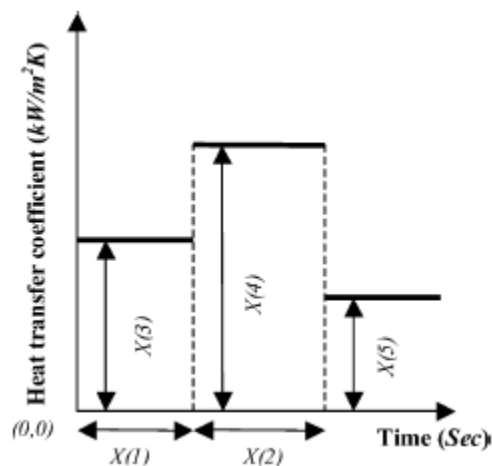
που αντιμετωπίζεται ως αδιάστατο μέγεθος. (Βλέπε Διάγραμμα 3.2)

Στις περισσότερες μελέτες αντίστροφου σχεδιασμού (inverse design) για την εύρεση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης , η μεταβολή του σε συνάρτηση με την θερμοκρασία έχει βρεθεί να έχει την μορφή :



Διάγραμμα 3.5. Μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας όπως υπολογίστηκε μέσω μεθόδου βελτιστοποίησης για απόψυξη σε νερό εργαλειοχάλυβα P20 (AISI). [29]

Ακόμη , δημοσιευμένες εργασίες υπολογισμού και βελτιστοποίησης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω μοντέλων εύρεσης επιφανειών απόκρισης (response surface models) έθεσαν ως παραμέτρους σχεδιασμού σταθερές τιμές του σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα (βλ. διάγραμμα 3.6):



Διάγραμμα 3.6. Παράμετροι σχεδιασμού του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. [30]

Οι περιπτώσεις αυτές οδήγησαν στην εκτίμηση ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας θα μπορούσε να είναι ένα πολυώνυμο (προσέγγιση του Διαγράμματος 3.5) της αυτής μορφής, λαμβάνοντας υπόψη μια διακύμανση εξαρτημένη από το μέσο απόψυξης και τις γενικότερες συνθήκες ροής του μέσου (βλέπε Διάγραμμα 3.6).

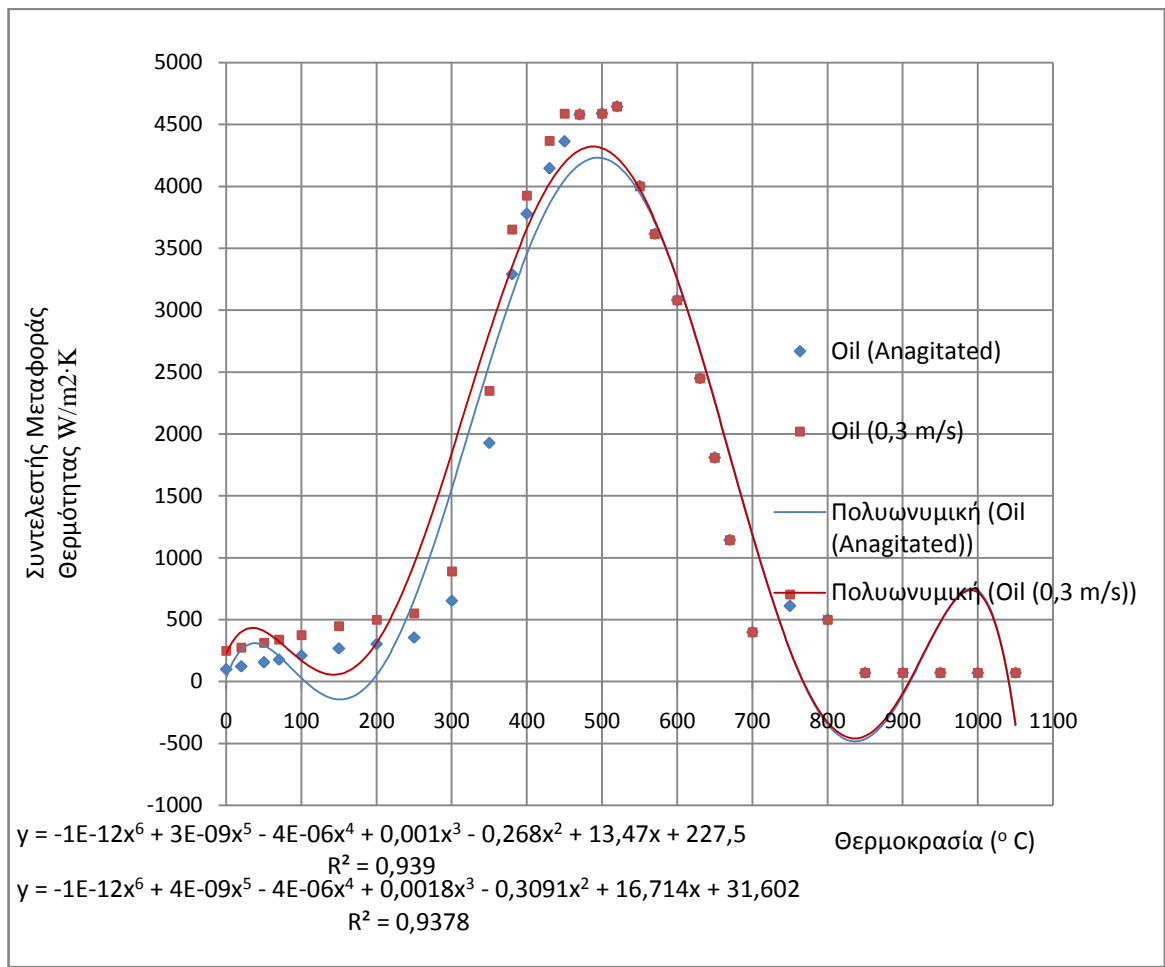
Με βάση τη χημική σύσταση του εργαλειοχάλυβα και αναζητώντας την μορφή της εξίσωσης που θα χαρακτηρίζει την μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (ουσιαστικά του συντελεστή συναγωγής), η μεταβολή του θα περιγράφεται τελικά από ένα πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού, της μορφής :

$$h = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \alpha_4 T^4 .$$

Αυτό προέκυψε προσεγγίζοντας πολυωνυμικά την μεταβολή του συντελεστή συναγωγής για απόψυξη σε λάδι (Διάγραμμα 2.3(α), Κεφάλαιο 2^ο), το οποίο αποτελεί ένα ήπιο μέσο όπου θα μπορούσε να αποψυχθεί ο συγκεκριμένος εργαλειοχάλυβας.

Αρχικά επιδιώχθηκε η προσέγγιση του από πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού όπως φαίνεται στο Διάγραμμά 3.7. Παρακάτω παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις που προέκυψαν από 4^{ου} και 6^{ου} βαθμού πολυώνυμα (Διαγράμματα 3.7 και 3.8). Θεωρήθηκε ότι η προσέγγιση με 6^{ου} βαθμού πολυώνυμο είναι ικανοποιητική ($R^2 \approx 0,94$), απέχει όμως αρκετά από την συμπεριφορά ενός πραγματικού μέσου απόψυξης .Αποτελεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα η προσέγγιση με πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού ($R^2 \approx 0,93-0,99$) (βλ. Διάγραμμα 3.8). Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από την τάξη μεγέθους που παρουσιάζουν οι συντελεστές της 6^{ης} και της 5^{ης} δύναμης της θερμοκρασίας (10^{-12} και 10^{-9}).

Η ύπαρξη αρνητικών τιμών του συντελεστή συναγωγής μετά την προσέγγιση, κοντά στους 100^ο C και στην περιοχή από 800^ο C -1000^ο C (βλ. Διάγραμμα 3.7), δεν έχει φυσική σημασία και το γεγονός αυτό θα αποτελεί βασικό περιορισμό στην τελική εξαγωγή της συνάρτησης μεταβολής του συντελεστή συναγωγής στο στάδιο της βελτιστοποίησης. Για την αποφυγή αποτελεσμάτων που δεν θα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα έγινε προσεκτική επιλογή των θερμοκρασιών που θα αποτυπώνουν την θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ώστε κατά την προσέγγιση να μην παρουσιάζονται αρνητικές τιμές, βλ. Διάγραμμα 3.8.



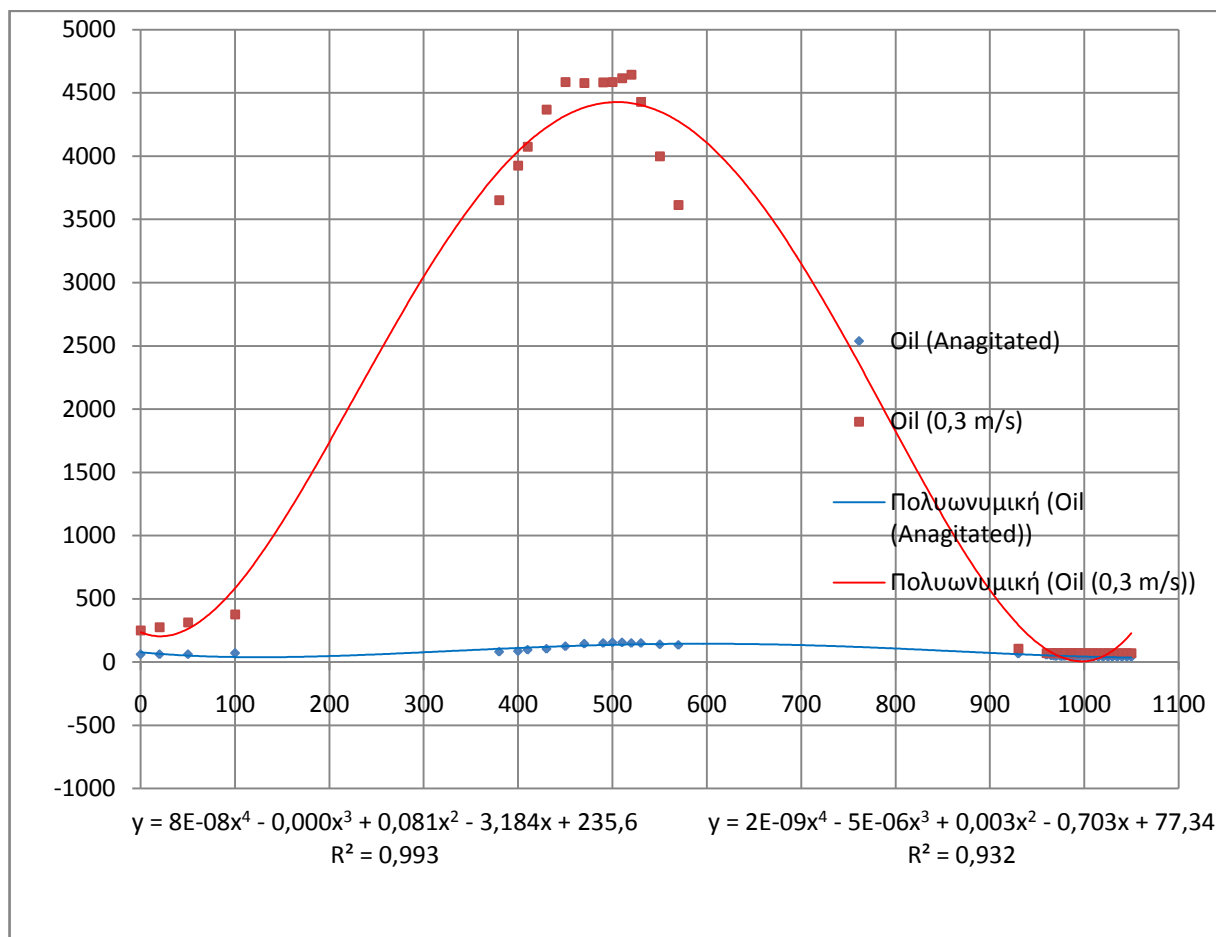
Διάγραμμα 3.7. Προσέγγιση των τιμών του συντελεστή συναγωγής με πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού.

Ο συντελεστής h , όπως έχει ήδη αναλυθεί, παρουσιάζει εξάρτηση από την θερμοκρασία αλλά και η θερμοκρασία είναι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος κατά την απόψυξη.

Η μαθηματική σχέση που θα προκύψει μεταξύ του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της παράμετρου απόψυξης θα είναι της μορφής :

$$CP = CP(h(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, T(t))),$$

που η χρονική εξάρτηση της θερμοκρασίας αποτυπώνεται μέσω του ορισμού της παραμέτρου απόψυξης κατά τον υπολογισμό της για δεδομένες τιμές των συντελεστών των δυνάμεων του πολυωνύμου (καταχρηστικά, συντελεστές γραμμικής παλινδρόμησης).



Διάγραμμα 3.8. Προσέγγιση των τιμών του συντελεστή συναγωγής με πολυώνυμο 4^ο βαθμού.

Συμπερασματικά, οι τιμές των συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης του πολυωνύμου που εκφράζει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διαμορφώνουν τη δραστηριότητα του μέσου απόψυξης και καθορίζουν τις μετέπειτα τιμές των υπολοίπων μεγεθών, γεγονός που σημαίνει ότι αυτοί θα αποτελούν τις παραμέτρους σχεδιασμού στα προβλήματα βελτιστοποίησης που θα τεθούν. Ο τρόπος διαχείρισης τους στην αντικειμενική συνάρτηση κατά την εφαρμογή των διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης αποτελεί το βασικό άξονα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συσχέτιση μεγεθών CP, h - Σ.τ.Π

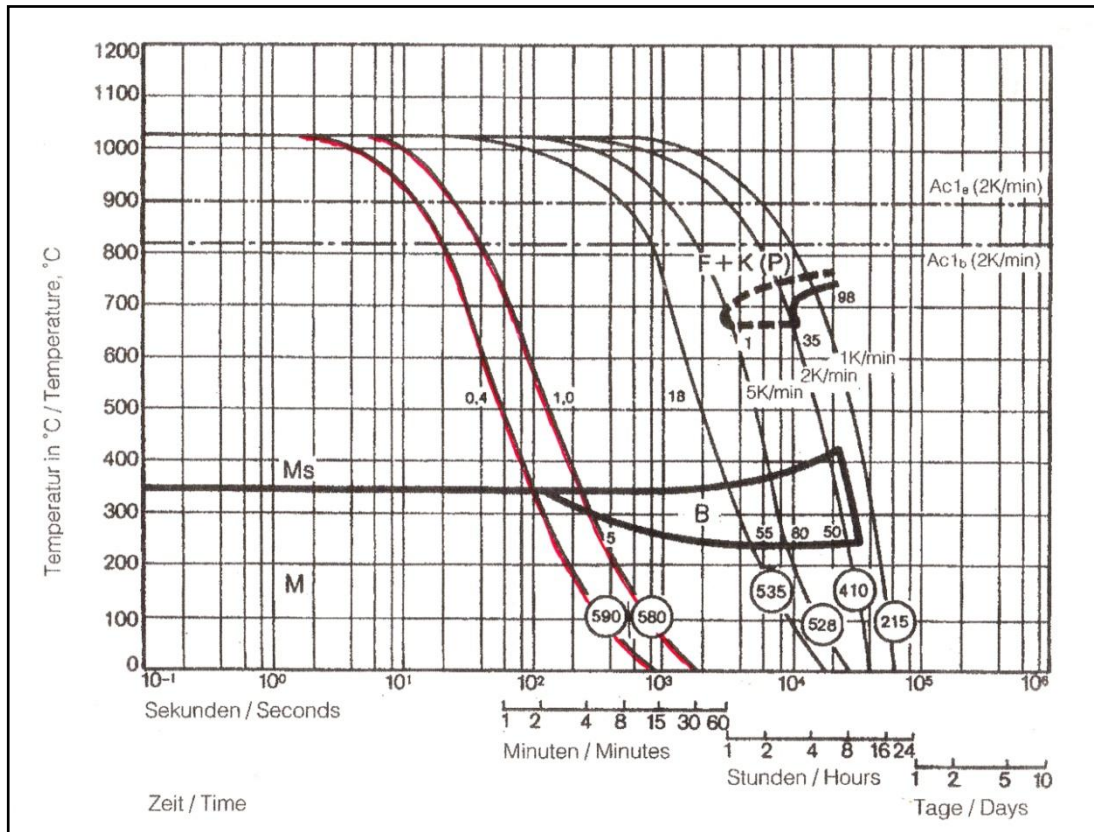
Η εύρεση της μαθηματικής σχέσης μεταξύ της παραμέτρου απόψυξης (απόκριση) και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (δεδομένο σύνολο παραμέτρων σχεδιασμού) απαιτεί αρχικά την εκτέλεση ενός συνόλου πειραμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων αποτελούν την αναγκαία πειραματική πληροφορία. Αναζητήθηκε ο κατάλληλος Σχεδιασμός των Πειραμάτων (Design of Experiments) με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προερχόμενα από τη φύση του προβλήματος:

- Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας , εκφρασμένος μέσω του πολυωνύμου , δεν μπορεί να λαμβάνει αρνητικές τιμές σε καμία τιμή θερμοκρασίας από τους 0 έως τους 1020⁰C δεδομένου των φυσικών περιορισμών που υπάρχουν. Με βάση το γεγονός αυτό υπάρχουν περιορισμοί στο σύνολο τιμών των συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης. Έτσι , δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένας συμβατικός σχεδιασμός που να αφορά ένα ομαλό πεδίο λύσεων.
- Θα πρέπει να υπάρχει περιορισμένος αριθμός πειραμάτων που θα εκτελεστούν αφού ο υπολογιστικός χρόνος της κάθε προσομοιούμενης απόψυξης με τυπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή τελευταίας τεχνολογίας μέσω του προγράμματος CosmosWorks (SolidWorks) φτάνει τις οκτώ (8) ώρες.
- Τίθεται ως απαίτηση για την επιλογή του κατάλληλου Σχεδιασμού των Πειραμάτων να υπάρχει η ευχέρεια να δοθεί ακριβής αριθμός προσομοιώσεων , συγκεκριμένα σύνολα των συντελεστών του πολυωνύμου που θα δημιουργήσουν την υποψήφια λύση (μεταβολή του συντελεστή h με την θερμοκρασία) αλλά και το εύρος τιμών του καθενός από αυτούς.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδήγησαν στην επιλογή του D-optimal Σχεδιασμού των Πειραμάτων εφαρμόζοντας το D-optimality κριτήριο (δες §2.4.7.).

3.5.2. Πρώτη φάση-Αναζήτηση συνόλου τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού.

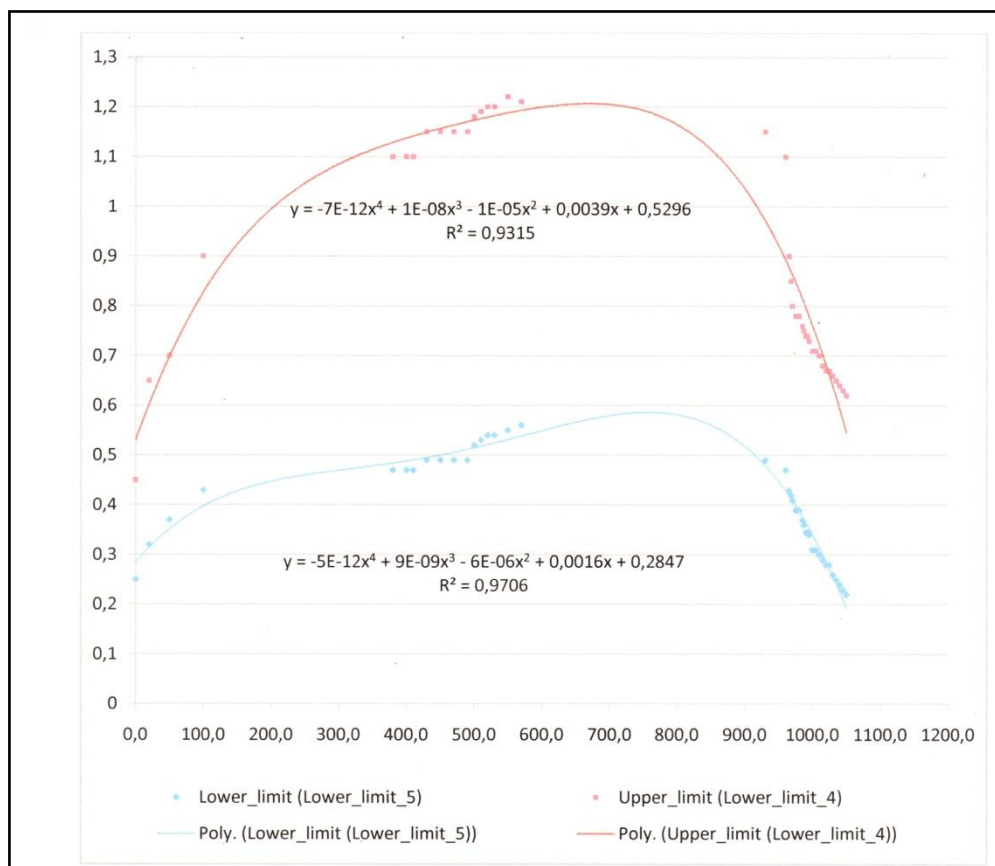
Η αναζήτηση των συνόλων τιμών των συντελεστών του πολυωνύμου (παράμετροι σχεδιασμού) προήλθε από την εφαρμογή της μεθόδου δοκιμής και λάθους (trial and error).Μέσω του διαγράμματος συνεχούς απόψυξεως του εργαλειοχάλυβα κατασκευής της μήτρας βρέθηκαν τα όρια εντός των οποίων κυμαίνεται η παράμετρος απόψυξης λ ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό εύρος σκληρότητας που απαιτείται να αποκτήσει η μήτρα. Ειδικότερα , στο Διάγραμμα 3.9 παρουσιάζεται η συνεχή απόψυξη με τα επιτρεπτά όρια μεταβολής της παραμέτρου απόψυξης μεταξύ 0,4 και 1,0 ώστε να επιτυγχάνεται σκληρότητα από 580 έως 590HV (54,2 – 54,7 HRC).Βέλτιστος θεωρείται ο ρυθμός ψύξης που έχει παράμετρο απόψυξης λ ίσο με 0,6.Αυτή η τιμή σκληρότητας είναι η ενδεδειγμένη μετά από τη συνεχή απόψυξη σύμφωνα με την υπόδειξη Μεταλλουργών Μηχανικών της βιομηχανίας παραγωγής μητρών διελάσεως και επιδιώκεται μικρή διασπορά περί της ιδανικής τιμής.



Διάγραμμα 3.9. Διάγραμμα Συνεχούς Απόψυξης (CCT) εργαλειοχάλυβα H13 κατά AISI. [14]

Δίνοντας διάφορες τιμές στους σταθερούς συντελεστές α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , α_4 του πολωνύμου και με διαδοχικές προσομοιώσεις (επτά διαδοχικές) με το λογισμικό CosmosWorks (βλ. αναφορά του προγράμματος για τα στοιχεία εισόδου μετά από μια τυχαία δοκιμή στο Παράρτημα Β) ώστε να προκύπτουν παράμετροι απόψυξης εντός των επιθυμητών ορίων βρέθηκαν τα σύνολα τιμών τους. Στο Διάγραμμα 10 παρουσιάζονται τα πολωνύμα προσέγγισης μέσω του προγράμματος EXCEL των τιμών του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Τα τελικά όρια που προέκυψαν είναι:

Συντελεστές πολωνύμου	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
Κάτω όριο ($\lambda=0,4$)	0,2847	0,0016	-6E-06	9E-09	-4,78E-12
Άνω όριο ($\lambda=1,0$)	0,5296	0,0039	-1E-05	1E -08	-4,3E-12



Διάγραμμα 3.10. Παρουσίαση συναρτήσεων μεταβολής του συντελεστή συναγωγής όπως αυτές προέκυπταν μετά από προσεγγίσεις των τιμών του σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

Παρατηρήσεις

- Οι τιμές των σταθερών συντελεστών της δεύτερης και τέταρτης δύναμης του πολυωνύμου στο κάτω όριο είναι μεγαλύτερες από αυτές του άνω ορίου με αποτέλεσμα, κατά την καταχώρηση των ορίων των παραμέτρων σχεδιασμού στο λογισμικό εφαρμογής του D-optimal κριτηρίου, τα δεδομένα αυτά να τοποθετηθούν αντίθετα, από το μικρότερο στο μεγαλύτερο. Ο επηρεασμός από την αλλαγή αυτή έχει να κάνει μόνο με την επιλογή των προς μελέτη σημείων κατά τον σχεδιασμό του πειράματος, τα οποία όμως καμιά επιρροή δεν έχουν στο τελικό αποτέλεσμα που πρόκειται να βγει. Σημαντική επιρροή υπάρχει στην τυχαία επιλογή των συνόλων (πεντάδων) τιμών των συντελεστών κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης μέσω εξελικτικών αλγορίθμων όπου δεν μπορεί να "εντοπιστεί" εύκολα η περιοχή όπου δίδει παράμετρο απόψυξης εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων.
- Για την εξαγωγή των συντελεστών τέθηκαν περιορισμοί για την τιμή που μπορεί να πάρει το πολυώνυμο σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες ώστε να μην

παραβαίνονται οι φυσικοί νόμοι. Έτσι για τις θερμοκρασίες των 50 , 450 , 1000^oC και 1040^oC η τιμή του h δεν μπορεί να είναι αρνητική. Δηλαδή :

$$h(50)= \alpha_0 + 50\alpha_1 + (50)^2\alpha_2+(50)^3\alpha_3+(50)^4\alpha_4 > 0$$

$$h(450)= \alpha_0 + 450\alpha_1 + (450)^2\alpha_2+(450)^3\alpha_3+(450)^4\alpha_4 > 0$$

$$h(1000)= \alpha_0 + 1000\alpha_1 + (1000)^2\alpha_2+(1000)^3\alpha_3+(1000)^4\alpha_4 > 0$$

$$h(1040)= \alpha_0 + 1040\alpha_1 + (1040)^2\alpha_2+(1040)^3\alpha_3+(1040)^4\alpha_4 > 0$$

,να ισχύουν ταυτόχρονα. Οι συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασιών λήφθηκαν με γνώμονα να καλύπτουν την θερμοκρασιακή περιοχή μελέτης από 20^oC έως τους 1040^oC.

Χρήση Λογισμικού Design Expert 7

Δόθηκαν ως δεδομένα :

1. Ο αριθμός των παραμέτρων σχεδίασης , ίσος με πέντε (5) όσοι και οι συντελεστές των δυνάμεων του πολυωνύμου τετάρτης τάξης με επιπρόσθετο το σταθερό όρο. Οι ονοματολογία τους από α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , α_4 μετατράπηκε σε A,B,C,D,E, ώστε να προσαρμοστεί στη σημειολογία του λογισμικού.
2. Τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να παίρνει τιμές η κάθε παράμετρος σχεδίασης, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω
3. Ο μέγιστος αριθμός των πειραμάτων που θα απαιτηθεί και που μπορεί να εκτελεστεί σε δεδομένα χρονικά πλαίσια χωρίς να δημιουργείται ελλιπής κάλυψη της περιοχής δυνατών λύσεων (design space). Το σύνολο των πειραμάτων προέκυψε ίσο με 47 με 100% κάλυψη της περιοχής δυνατών λύσεων με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (βλ. Παράρτημα Α όπου δίδονται αναλυτικά τα σημεία όπου θα γίνουν οι δοκιμές και το αντίστοιχο διάγραμμα)
4. Οι τέσσερις περιορισμοί στις τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.
5. Το είδος του πολυωνύμου που θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της επιφάνειας απόκρισης $CR=CR(h)$ που ορίζεται από το σύνολο των δοκιμών που θα επιλεγούν. Δημοσιευμένες εργασίες προσεγγίζουν [2,30,31] τις αποκρίσεις μεγεθών εξαρτώμενων από τη συνεχή απόψυξη του υλικού μέσω πλήρων μοντέλων δευτέρας τάξεως (full quadratic models) τα οποία εκφυλίζονται στη συνέχεια σε ελλειπή (reduced quadratic models) μετά την απομάκρυνση των ασήμαντων όρων εφαρμόζοντας συνήθως την πίσω και

πρόσω παλινδρόμηση (mixed regression analysis). Έτσι το μοντέλο που επιλέγεται για την προσέγγιση αυτή είναι ένα εξ' αρχής ελλειπές μοντέλο δευτέρας τάξης από το οποίο έχουν παραληφθεί οι όροι αλληλεπίδρασης αφού κάτι τέτοιο δεν μπορεί να ισχύει για το συγκεκριμένο είδος παραμέτρων σχεδιασμού (δεν μπορούν οι συντελεστές των όρων του πολυωνύμου να συνδέονται μεταξύ τους, π.χ. να αναζητούνται πολυώνυμα με σταθερό λόγο α_0/α_1). Αποκόπτοντας τους όρους αλληλεπίδρασης που ουσιαστικά θα αποτελούσαν ασήμαντους όρους που θα έπρεπε να απομακρυνθούν, αυξάνονται οι πιθανότητες το μοντέλο να προσεγγίσει καλύτερα το σύνολο των τιμών απόκρισης.

Έτσι το μοντέλο προσέγγισης (παλινδρόμησης) θα είναι της μορφής :

$$CR = \beta_0 + \beta_1\alpha_0 + \beta_2\alpha_1 + \beta_3\alpha_2 + \beta_4\alpha_3 + \beta_5\alpha_4 + \beta_{11}\alpha_0^2 + \beta_{22}\alpha_1^2 + \beta_{33}\alpha_2^2 + \beta_{44}\alpha_3^2 + \beta_{55}\alpha_4^2 \quad (\kappa)$$

, όπου οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού έχουν καθοριστεί από τη μορφή του πολυωνύμου μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Αγνώστους αποτελούν οι τιμές των συντελεστών των παραμέτρων σχεδιασμού μαζί με το σταθερό όρο που θα προκύψουν μετά την εφαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων.

Ο πίνακας υποψηφίων σημείων (πίνακας που περιέχει όλες τις θεωρητικές και πρακτικές περιπτώσεις πειραμάτων) είναι $\xi_5 = 25 \times 5$ διότι υπάρχουν πέντε (5) παράμετροι σχεδιασμού και δύο (2) επίπεδα κωδικοποίησης (1, +1). Από τον πίνακα αυτό προκύπτει ο πίνακας X του D-optimal σχεδιασμού που είναι 121×11 (1 στήλη των σταθερών όρων, 10 στήλες των παραμέτρων σχεδιασμού σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο, 121 δυνατές περιπτώσεις πειραμάτων).

Μέσω του λογισμικού Design Expert εφαρμόζοντας το D-optimal σχεδιασμό, βρέθηκε ο πίνακας πληροφορίας $(X'X)$ καθώς και πίνακας διασποράς $(X'X)^{-1}$. Εφαρμόζοντας το D-optimality κριτήριο για αριθμό πειραμάτων ίσο με σαράντα επτά (47), βρέθηκε ο πίνακας σχεδιασμού 47×11 , X^* , για τον οποίο η ορίζουσα του αντίστοιχου πίνακα πληροφορίας $|X^*X^*|^{-1}$ ελαχιστοποιείται. Βρέθηκε ως εξής και παρατίθενται στο Παράρτημα Α :

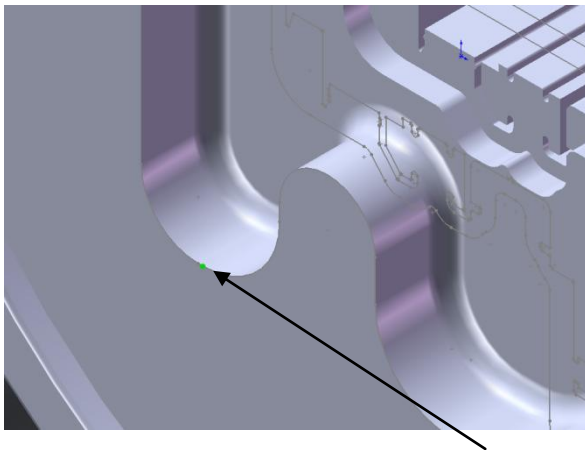
- $|X^*X^*|^{-1} = 2,851E-14$
- Καλύπτεται πλήρως το πεδίο δυνατών λύσεων με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.
- Το σύνολο των τιμών των συντελεστών του πολυωνύμου για κάθε μια υποψήφια προσομοίωση.

- Η διαμόρφωση του πεδίου δυνατών λύσεων με επιλεγμένες σταθερές τιμές κάποιων παραμέτρων σχεδιασμού (διαφορετικά θα απαιτούνταν απεικόνιση σε πέντε διαστάσεις) .

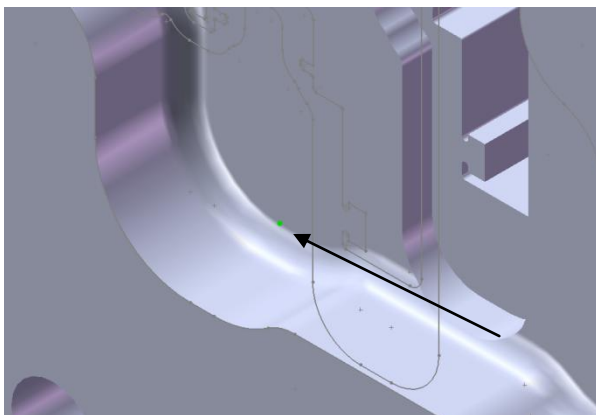
3.5.3.Δεύτερη φάση- Αναζήτηση των Μοντέλων Επιφανειών Απόκρισης.

Επιλογή Σημείων

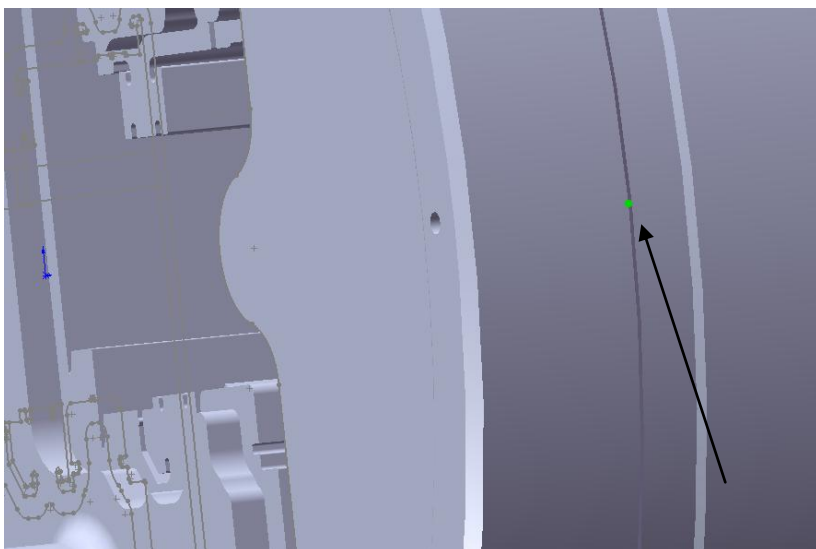
Επιλέγονται τέσσερα (4) σημεία, δύο εξωτερικά και δύο εσωτερικά στη μήτρα, τέτοια ώστε να καλυφθούν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις όσον αφορά την δυσκολία προσέγγισης του μέσου επιφανειακά (σημεία σε πολύπλοκες μορφές) αλλά και σημεία που βρίσκονται μακριά από την επιφάνεια, όπου ο ρυθμός απόψυξης μικραίνει (εσωτερικά σημεία).Στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 3.5-3.8) της υπό μελέτη μήτρας παρουσιάζονται τα επιλεγθέντα σημεία :



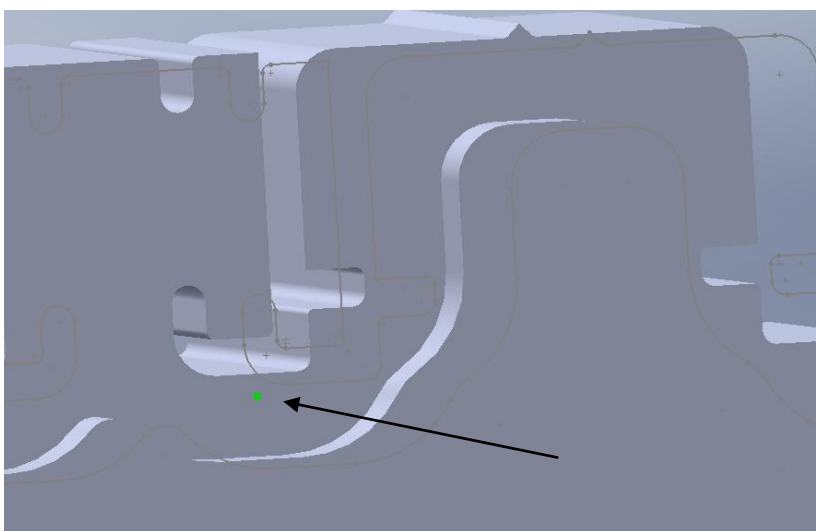
Εικόνα 3.5. Απεικόνιση του πρώτου επιλεγθέντος σημείου (surface_1).



Εικόνα 3.6. Απεικόνιση του δεύτερου επιλεγθέντος σημείου (surface_curve_2).



Εικόνα 3.7.Απεικόνιση του τρίτου επιλεγθέντος σημείου (right_core_4).



Εικόνα 3.8.Απεικόνιση του τέταρτου επιλεγθέντος σημείου (profil_core_2_8).

Η επιλογή των σημείων βασίστηκε στην κατά το δυνατόν κάλυψη των διαφορετικών ρυθμών απόψυξης που υφίσταται η μήτρα από σημείο σε σημείο. Επιλέχθηκε σημείο της επιφάνειας (surface_1) , επιφανειακό σημείο σε κοιλότητα (surface_curve_2) , εσωτερικό σημείο στην «καρδιά» της μήτρας (right_core_4) και ένα εσωτερικό σημείο πλησίον της περιοχής διαμόρφωσης του τελικής μορφής του αλουμινίου που χαρακτηρίζεται για την πολυπλοκότητα του.

Στα τέσσερα αυτά σημεία υπάρχει διαφορετικό μοντέλο που συνδέει το ρυθμό απόψυξης με το συντελεστή συναγωγής γεγονός που αποδεικνύεται από τα μοντέλα επιφανειών απόκρισης που προέκυψαν τελικά (βλέπε Παράρτημα Β στα αποτελέσματα των Μ.Ε.Α.). Σε κάθε προσομοίωση του λογισμικού CosmosWorks (βλ. Παράρτημα Β των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν

σε μια χαρακτηριστική περίπτωση) λαμβάνεται ο ρυθμός απόψυξης και στα τέσσερα σημεία , γεγονός που δείχνει ότι υπάρχουν CP_1, CP_2, CP_3, CP_4 .

Το σύνολο των επιλεχθέντων σημείων βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης λύσης όπως αυτό εξασφαλίστηκε κατά το προκαταρκτικό στάδιο. Μετά την εκτέλεση του συνόλου των προσομοιώσεων έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων ώστε να προκύψει το μοντέλο εκείνο, για καθένα σημείο ξεχωριστά, που προσεγγίζει ακριβέστερα την πραγματική συνάρτηση της επιφάνειας απόκρισης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την εκτέλεση των προσομοιώσεων φαίνονται στο Παράρτημα Β.

Πρώτο στάδιο :

Γίνεται μέσω του λογισμικού Design Expert 7 ο έλεγχος συνάφειας του επιλεχθέντος μοντέλου παλινδρόμησης (σχέση k) με τα δεδομένα των αποκρίσεων CP για κάθε ένα από τα τέσσερα σημεία μελέτης όπως αυτά επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής δίνουν την πληροφορία για το αν το μοντέλο που επιλέχτηκε μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα ή ποιιάς μορφής θα πρέπει να είναι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προσέγγιση.

Δεύτερο στάδιο :

Εφαρμόζεται η μικτή παλινδρόμηση (mixed regression , διαδοχική εφαρμογή της πίσω και πρόσω παλινδρόμησης μέχρι ένα συγκεκριμένο κριτήριο να τηρείται) ώστε από το προτεινόμενο μοντέλο της πρώτης φάσης να "απομακρυνθούν" οι ασήμαντοι όροι και να βρεθεί το τελικό μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα την συνάρτηση της επιφάνειας απόκρισης.

Στο Παράρτημα Β δίδονται τα συνολικά αποτελέσματα για τον έλεγχο συνάφειας (fitting of the model) και για τα τέσσερα σημεία μελέτης, όπου :

- Και στις τέσσερις περιπτώσεις προτείνεται μοντέλο παλινδρόμησης δευτέρας τάξης όπως ακριβώς αρχικά θεωρήθηκε με βάση δημοσιευμένες εργασίες.

Επίσης δίδονται τα συνολικά αποτελέσματα για τα τελικά μοντέλα που προέκυψαν για κάθε σημείο μελέτης μετά την ανάλυση διακύμανσης (analysis of variance) , όπου :

- Όλα τα μοντέλα παλινδρόμησης είναι ακριβείς προσεγγίσεις των πραγματικών επιφανειών απόκρισης όπως προέκυψαν από το σύνολο των προσομοιώσεων.
- Σε όλες τις περιπτώσεις ζητούνταν για μεγαλύτερη ακρίβεια του μοντέλου να απομακρυνθεί ο όρος α_3 (D:D) ως ασήμαντος, πράγμα που δεν έγινε αφού αποτελεί ιεραρχικό όρο του πολυωνύμου. Το γεγονός αυτό επηρέασε μόνο το τέταρτο σημείο σε επίπεδο συνάφειας. Δίδεται ότι υπάρχει πιθανότητα 0,11% να παρουσιαστεί ασυμβατότητα μεταξύ μοντέλου-αποκρίσεων και αυτό λόγω τυχαιότητας του πειράματος (θόρυβος). Η πιθανότητα είναι πολύ μικρή, επιπροσθέτως δεν υπάρχει «θόρυβος» κατά την προσομοίωση (στο ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα θα καταλήγει σε κάθε εκτέλεση αν οι πληροφορίες εισόδου παραμένουν ίδιες). Παρατηρείται ότι η ακρίβεια και αυτού του μοντέλου είναι επαρκής.

3.6. Διαμόρφωση προβλήματων βελτιστοποίησης

3.6.1. Βελτιστοποίηση μέσω ντετερμινιστικής μεθόδου

Χρησιμοποιείται μέσω του λογισμικού Design Expert ένας γενικός μη-γραμμικός αλγόριθμος με περιορισμούς. Τα διαδοχικά βήματα που ακολουθούνται είναι :

1. Ορίζεται X ένα διάνυσμα με x_i , $i=1...5$ το οποίο αντιπροσωπεύει τις παραμέτρους σχεδιασμού $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ μέσα στην περιοχή δυνατών λύσεων στην οποία σαφώς βρίσκεται και η βέλτιστη.
2. Ορίζονται y_j, U_j, L_j , με $j=1...4$ οι αποκρίσεις για τα τέσσερα σημεία σχεδιασμού με το μεγαλύτερο και το μικρότερο όριο που εδώ λειτουργούν ως περιορισμοί.
3. Ορίζεται $y(X)$ η απόκριση που θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Επιλέχθηκε να ζητείται η ίδια τιμή της παραμέτρου απόψυξης CP ίση με 0,6, τιμή που βρίσκεται στο μέσο του εύρους τιμών που κρίνεται αποδεκτό (δες διάγραμμα συνεχούς αποψύξεως). Τίθεται $f(X)=y(X)$ για ελαχιστοποίηση και $f(X)=-y(X)$ για την περίπτωση της μεγιστοποίησης. Καθορίζονται οι περιορισμοί ως ένα σύνολο ασυνεχών συναρτήσεων: $g_j(X)=y_j(X)-U_j$ για $y_j > U_j$

$$g_j(X)=0 \quad \text{για} \quad L_j \leq y_j \leq U_j$$

$$g_j(X)=L_j-y_j(X) \quad \text{για} \quad y_j < L_j$$

Έτσι δημιουργείται ένα σύστημα με 4 περιορισμούς το οποίο μπορεί να λυθεί ως ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμούς μέσω μιας συνάρτησης ποινής :

$\text{Min } \{f(X) + p \sum g_j(X)\}$, όπου το p είναι μια παράμετρος ποινής ,θετική,για $j=1$ έως 4.

(Η παράμετρος ποινής p ξεκινά από το 1 και αυξάνει μετά από κάθε επανάληψη επί 100 .Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι ορισμένος μέχρι και 15 , όπου δίνει $p=10^{30}$.

4. Η τιμή της συνάρτησης ποινής ξεκινά από μικρές τιμές σε μια πολυδιάστατη έρευνα μοτίβων τύπου καθόδου simplex (Nelder –Mead) και συνήθως συγκλίνει είτε σε στάσιμο σημείο ή σε όριο της περιοχής δυνατών λύσεων. Οι τιμές των ορίων της περιοχής δυνατών λύσεων προσεγγίζονται κατά την επανάληψη με τιμή $f(X)+10^{10}$ στα όρια των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού. Η αναζήτηση του τελικού σημείου σύγκλισης επανεκινά δίνοντας μεγαλύτερη τιμή στη συνάρτηση ποινής .Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν η διαφορά στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μεταξύ δύο διαδοχικών βημάτων είναι μικρότερη από 10^{-6} .
5. Τα αρχικά $N+1$ σημεία simplex δημιουργούνται με την πρόσθεση ή αφαίρεση στο αρχικό σημείο εκκίνησης ενός κλάσματος καθεμιάς από τις περιοχές των N παραγόντων. Η απόφαση της πρόσθεσης ή της αφαίρεσης λαμβάνεται για να διατηρηθεί η μέγιστη απόσταση από τα ακραία όρια των παραμέτρων σχεδιασμού.

3.6.2.Βελτιστοποίηση μέσω στοχαστικής μεθόδου

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης μέσω στοχαστικής μεθόδου χρησιμοποιείται η μέθοδος των εξελικτικών αλγορίθμων που εφαρμόζεται μέσω του λογισμικού E.A.SY. (Evolutionary Algorithm SYstem) , Πανεπιστημιακή έκδοση που δημιουργήθηκε στο Ε.Μ.Π. , στο εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανων.

Η εξελικτική μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης ενός στόχου , πολλών στόχων , με ή χωρίς περιορισμούς αλλά και με την βοήθεια μεταμοντέλων (hierarchical distributed metamodels assisted).

Ως αντικειμενική συνάρτηση (αναζητείται το ελάχιστό της) επιλέγεται να είναι μία συνάρτηση ποινής που ουσιαστικά ‘τιμωρεί’ την ‘απομάκρυνση’ της παραμέτρου απόψυξης CP του κάθε προς μελέτη σημείου από έναν ιδανικό ρυθμό απόψυξης που εκφράζεται με το μέγεθος CP_{IDEAL} .Η τιμή του CP_{IDEAL} επιλέγεται να ταυτίζεται με την προηγούμενη περίπτωση και είναι ίση με 0,6.

Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση είναι :

$$CP = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (CP_i - CP_{IDEAL})^2} ,$$

όπου CP_i : η παράμετρος απόψυξης του καθενός χαρακτηριστικού σημείου. Ο ρυθμός απόψυξης CP σε σχέση με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h δίδεται από τις ίδιες εξισώσεις που προέκυψαν μέσω της εφαρμογής της μεθοδολογίας για την εύρεση M.E.A. Έτσι, για δεδομένο σύνολο (πεντάδες) υποψήφιων λύσεων που επιλέγονται από τον εξελικτικό αλγόριθμο κατά το πέρασμα των "γενεών" προκύπτουν συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου απόψυξης για κάθε υπό μελέτη σημείο, οι οποίες και "ελέγχονται" αν πληρούν την απαίτηση ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης.

Χαρακτηριστικό της περίπτωσης αυτής είναι ότι οι αξιολογήσεις (evaluations), που εδώ αντικατοπτρίζουν τις προσομοιώσεις (πολύ χρονοβόρες) δεν γίνονται εντός της επανάληψης αλλά έχουν προηγηθεί δίνοντας στον εξελικτικό αλγόριθμο ένα μαθηματικό μοντέλο που έχει προκύψει από M.E.A. Οι προσομοιώσεις, που πιθανώς λόγω του περιορισμένου αριθμού τους με τη μέθοδο D-optimal, "στοιχίζουν" λιγότερο ώστε να αποτυπώνουν με ακρίβεια μια μεταβολή. Μπορεί να ειπωθεί ότι τα M.E.A., στην περίπτωση αυτή λειτουργούν ως μεταμοντέλα.

Εξετάζονται πέντε περιπτώσεις διαφορετικής εκκίνησης και δεδομένων για την εξέλιξη των "γενεών" κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αυτού αλγορίθμου τα οποία δίνονται στο Παράρτημα Γ μαζί με το πρόγραμμα cooling1.for το οποίο δίνει την αντικειμενική συνάρτηση, τα μεταμοντέλα και χρησιμοποιείται κατά τις αξιολογήσεις.

Οι περιορισμοί που τίθενται κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης αφορούν τα όρια τιμών για καθεμιά παράμετρο σχεδιασμού δηλαδή τους συντελεστές του πολυωνύμου θερμοκρασιακής μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h (βλ. §3.5.2.).

4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1.Αποτελέσματα ντετερμινιστικής μεθόδου (Stat-Ease).

Με την εφαρμογή του μη-γραμμικού αλγορίθμου με περιορισμούς τέθηκε η απαίτηση η προκύπτουσα ,βέλτιστη , λύση να παρουσιάζει για κάθε ένα χαρακτηριστικό σημείο μελέτης , τιμή παραμέτρου ψύξης πλησίον της τιμής 0,6.

Η απαίτηση αυτή ήταν πλήρως συμβατή με το πρόβλημα , με αποτέλεσμα να προκύψει μια ικανοποιητικότερη προσέγγιση.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες :

Πίνακας4.1.Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα

Constraints

<u>Name</u>	<u>Goal</u>	<u>Lower</u>	<u>Upper</u>	<u>Lower</u>	<u>Upper</u>	<u>Importance</u>
		<u>Limit</u>	<u>Limit</u>	<u>Weight</u>	<u>Weight</u>	
A(α_0)	is in range	0,2847	0,5296	1	1	3
B(α_1)	is in range	0,0016	0,0039	1	1	3
C(α_2)	is in range	-0,00001	-0,000006	1	1	3
D(α_3)	is in range	0,000000009	0,000000001	1	1	3
E(α_4)	is in range	-4,54E-12	-4,54E-12	1	1	3
CP ₁	is target = 0.600000	0,222666	1,012449	1	1	3
CP ₂	is target = 0.600000	0,222666	1,012449	1	1	3
CP ₃	is target = 0.600000	0,2271566	1,008033	1	1	3
CP ₄	is target = 0.600000	0,216415	1,016896	1	1	3

Solutions

<u>Number</u>	<u>A (α_0)</u>	<u>B (α_1)</u>	<u>C (α_2)</u>	<u>D (α_3)</u>	<u>E (α_4)</u>
1	0,350755818	0,001678247	-6,00433E-06	9,98744E-09	-4,54E-12
2	0,358848129	0,001639665	-6E-06	9,96456E-09	-4,54E-12
3	0,38160927	0,001600001	-6,31097E-06	9,99997E-09	-4,54E-12
4	0,381961289	0,001600002	-6,00919E-06	9,03846E-09	-4,54E-12
5	0,347938916	0,00176575	-6,23096E-06	9,00002E-09	-4,54E-12
6	0,514552903	0,001600308	-7,07447E-06	9,99999E-09	-4,54E-12
7	0,493242885	0,001634878	-7,50323E-06	9,99997E-09	-4,54E-12
8	0,465228158	0,00161925	-7,46751E-06	9,99997E-09	-4,54E-12
9	0,527968567	0,001692711	-7,52404E-06	9,99998E-09	-4,54E-12
10	0,447335709	0,001628233	-7,46803E-06	9,99996E-09	-4,54E-12

Πίνακας 4.2. Τιμές των παραμέτρων απόψυξης των χαρακτηριστικών σημείων

Solutions Number	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	<u>Desirability</u>	
1	0,599037893	0,600000039	0,604991078	0,599999022	0,996291773	Selected
2	0,599806322	0,600674555	0,606044361	0,599986774	0,995731898	
3	0,599288762	0,600004002	0,605710345	0,597855768	0,99461562	
4	0,597931956	0,599650402	0,60847348	0,599999903	0,993171425	
5	0,599450765	0,601680259	0,609560787	0,599996212	0,992711945	
6	0,600017904	0,599774896	0,605607091	0,592013666	0,991159993	
7	0,599993296	0,600140314	0,606001516	0,591197614	0,990448224	
8	0,599992977	0,600374269	0,606418245	0,5916869	0,990373729	
9	0,600049521	0,599919289	0,605233403	0,59033848	0,990358543	
10	0,5999991	0,600553624	0,606569967	0,591841698	0,990279111	

Παρατηρήσεις

- Η τελευταία στήλη (Desirability) αποδεικνύει την ακρίβεια της προσέγγισης της επιθυμητής λύσης όπως άλλωστε φαίνεται και από τις τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι απόψυξης.
- Η ακριβέστατη αυτή προσέγγιση ήταν αναμενόμενη διότι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί προέκταση του D-optimal σχεδιασμού για την βελτιστοποίηση των M.E.A. που προέκυψαν από αυτόν.
- Η απαιτούμενη θερμοκρασιακή μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h που ουσιαστικά χαρακτηρίζει το ενδεδειγμένο μέσο απόψυξης για τη συνεχή απόψυξη της συγκεκριμένης μήτρας είναι:

$$h=0,350755818 + 0,001678247T - (6,00433E - 06)T^2 + (9,98744E09)T^3 - (4,54E - 12)T^4 .$$

- Το πρακτικό πρόβλημα που τίθεται είναι ποιό το μέσο αυτό απόψυξης και πώς μπορεί να προκύψει η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με τέτοια ακρίβεια. Η απάντηση είναι μάλλον γνωστή, μόνο προσεγγιστικά μπορεί να επιτευχθεί μια τέτοια μεταβολή με μέσα απόψυξης αδρανή αέρια χρησιμοποιούμενα σε φούρνους κενού. Είναι πλέον γνωστή η τάξη μεγέθους του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασιακής μεταβολής ώστε να αποτελεί τον επιθυμητό στόχο κατά την θερμική κατεργασία της παρούσας μήτρας από το τμήμα θερμικών κατεργασιών.

4.2.Αποτελέσματα εξελικτικής μεθόδου (EASY).

Εφαρμόστηκε η στοχαστική μέθοδος των εξελικτικών αλγορίθμων μέσω του λογισμικού EASY με πέντε χαρακτηριστικές περιπτώσεις (έκτελέστηκαν περισσότερες , απλά κρατήθηκαν οι αντιπροσωπευτικότερες) και αλλάζοντας κάθε φορά τα δεδομένα εισόδου όσον αφορά τον τρόπο αναζήτησης της βέλτιστης λύσης.

Η βασική διαφοροποίηση με την νετερμινιστική προσέγγιση έγκειται στην μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης όπου εδώ αποτυπώνεται μέσω μιας συνάρτησης ποινης σε αντίθεση με τον άμεσο υπολογισμό στο παραπάνω πρόβλημα.

Η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης δεν επιτυγχάνεται στο βαθμό που απαιτείται λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που δόθηκαν μέσω της νετερμινιστικής μεθόδου. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πέντε δοκιμών μαζί με τα δεδομένα εισόδου που δόθηκαν

Πίνακας4.3Δεδομένα εισόδου για τις πέντε χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής του εξελικτικού αλγορίθμου.

Μηχανή Αναζήτησης								
Γενικά		Σύγκλιση	Πληθυσμός					
Δήμοι	Αρχικοποίηση		Πληθυσμός και απόγονοι			Ελιτισμός		
			Γονείς	Πλήθος απογόνων	Γονείς ενός απογόνου	Αριθμός επιλεκτων μετά από κάθε γενιά	Αριθμός επιλεκτων που μεταφέρονται στο σύνολο υποψηφίων απογόνων	Πιθανότητα να επιλεγεί ως γονιός ένας από τους επιλεκτους
1	1	10	20	40	2	10	2	10%
1	777	15	20	40	3	10	2	20%
1	123	15	30	60	2	10	2	15%
3 ²	504	15	20	40	2	10	1	15%
1	157	15	15	30	2	10	1	15%
Μηχανή αναζήτησης								Σύνολο αξιολογήσεων
Πληθυσμός								
Επιλογή γονέων		Τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης						
Ανταγωνισμός	Πιθανότητα να υπερσχύσει ο νικητής του ανταγωνισμού	Διασταύρωση		Μετάλλαξη				
		Πιθανότητα για διασταύρωση	Σημεία διασταύρωσης	Πιθανότητα μετάλλαξης	Πολ/στής	Γενιές χωρίς επίτευξη νέας λύσης		
random	15%	20%	Ενός σημείου	20%	1	10	10000	
random	10%	60%	Δύο σημείων	50%	0,9	5	15000	
random	10%	60%	Δύο σημείων	47%	0,6	10	40000	
random	10%	30%	Δύο σημείων/ τυχαία	30%	1	7	40000	
random	10%	100%	Δύο σημείων /τυχαία	60%	0,7	5	40000	

² Η επιλογή της δημιουργίας διαφορετικών συνόλων λύσεων συνοδεύεται και από ρυθμίσεις που σχετίζονται με την «επικοινωνία» που θα έχουν μεταξύ τους (π.χ. «μετανάστευση» λύσεων).Δόθηκαν οι εξ' ορισμού τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.4 και 4.5) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από την εκτέλεση των πέντε χαρακτηριστικών περιπτώσεων δίνοντας τις τιμές των συντελεστών του πολυωνύμου του συντελεστή μεταφοράς , τις τιμές των παραμέτρων απόψυξης των τεσσάρων σημείων αλλά και την τιμή που προσέγγισε η αντικειμενική συνάρτηση.

Πίνακας 4.4.Τιμές συντελεστών του πολυωνύμου του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Solution number	A (α_0)	B (α_1)	C (α_2)	D (α_3)	E (α_4)
1	0.28613636363	0.001629227761485	-9,9726295E-06	9,25513196E-09	-4,5336656E-012
2	0.2847	0.0016	-9.9804496E-06	9.00097751E-09	-4.52099706E-012
3	0.2847	0.0016	-1.0000E-05	9.0000E-09	-4.78E-012
4	0.28781212121	0.001604496578690	-9.9452590E-06	9.11925708E-09	-4.69366568E-012
5	0.2847	0.0016	-1.0000E-05	9.0000E-09	-4.78E-012

Πίνακας 4.5.Αποτελέσματα των παραμέτρων απόψυξης των χαρακτηριστικών σημείων για κάθε χαρακτηριστική δοκιμή.

Solution number	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	CR
1	0.38262897856782	0.36122507763909	0.3913514674247	0.38717161989586	0.43942434392017
2	0.39512780011707	0.37373986532522	0.40517556828330	0.39950197417096	0.41391096190242
3	0.39577728996783	0.37438248101701	0.4058399130998	0.400373739451544	0.4125032889429
4	0.386587677493232	0.3652175091992604	0.396072209664306	0.3907676500116355	0.43131468481514
5	0.39577728996783	0.37438248101701	0.40583991309988	0.400373739451544	0.4125032889429

Οι τιμές των συντελεστών του πολυωνύμου που ελαχιστοποίησαν την αντικειμενική συνάρτηση έδωσαν στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας την παρακάτω μορφή:

$$h=0,2847 + 0,0016T - (1,000E - 05)T^2 + (9,000E - 09)T^3 - (4,78E - 12)T^4 .$$

5.ΣΧΟΛΙΑ –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η τρίτη χαρακτηριστική περίπτωση κατά την ανάλυση μέσω εξελικτικών αλγορίθμων προσέγγισε το άνω όριο της επιτρεπόμενης παραμέτρου απόψυξης, βρέθηκε όμως να αποκλίνει αρκετά από την ιδανική ταχύτητα απόψυξης. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε:
 1. Αδυναμία οφειλόμενη στη μορφή έκφρασης της αντικειμενικής συνάρτησης (μορφή της συνάρτησης ποινής).
 2. Στο γεγονός ότι δεν υπήρχε περιορισμός στην τιμή των παραμέτρων απόψυξης ώστε να ‘ποινικοποιήσει’ ενδεχόμενες λύσεις αποκλίνουσες πολύ από την ενδεδειγμένη , ίση με 0,6 (να δίδονται πολύ μεγάλες τιμές στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης).
 3. Δεν τέθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι κατά την επιλογή πληθυσμού, τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης , κριτήριο σύγκλισης ώστε να καθοδηγηθεί προς την περαιτέρω ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συναρτησης.
- Η προσεγγιστική λύση μέσω των εξελικτικών αλγορίθμων προήλθε από έντονα προσανατολισμένες περιπτώσεις στη διασταύρωση και μετάλλαξη.
- Πιο ακριβής παρουσιάζεται η χρήση της ντετερμινιστικής μεθόδου έχοντας το πλεονέκτημα ότι είναι προσαρμοσμένη στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μοντέλων επιφανειών απόκρισης που προέρχονται από D-optimal σχεδιασμούς πειραμάτων. Παρ’ όλα αυτά, η τάξη μεγέθους των συντελεστών του πολυωνύμου είναι της αυτής τάξης μεγέθους με τις τιμές που προέκυψαν μέσω της ντετερμινιστικής μεθόδου.
- Η εύρεση της μορφής της μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας δίνει την τιμή-στόχο σε κάθε θερμοκρασία , που η επίτευξή του θα δώσει την πιο ομοιόμορφη απόψυξη στη μήτρα αλλά και την μεγαλύτερη ομοιομορφία σκληρότητας. Υπάρχουν σήμερα συστήματα αποψύξεων με χρήση ευγενών αερίων υπό πίεση (φούρνοι κενού υψηλής πίεσης) που προσεγγίζουν τέτοιες μορφές στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Η συνολική μελέτη βασίστηκε στην επίλυση δυναμικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας κατά την προσομοίωση μέσω του λογισμικού CosmosWorks.Υπάρχουν πλέον λογισμικά που προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια το φαινόμενο της βαφής , λογισμικά που με κατάλληλο καθορισμό

των εισόδων να αποτελέσουν ένα ακόμη ακριβέστερο εργαλείο για την εξαγωγή των Μ.Ε.Α.

- Μέσω των παραπάνω λογισμικών θα μπορούν με την ίδια μεθοδολογία να εξαχθούν συμπεράσματα για τις παραμένουσες τάσεις , τις διαστασιακές μεταβολές αλλά και την πλήρη κατανομή των φάσεων που προέκυψαν μετά την απόψυξη.

6.ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΕΙΣ

Ελληνική βιβλιογραφία

[8] Παντελής Δ., Χρυσουλάκης Γ., Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1996, σελ. 479-481.

[17] Κακάτσιος Ξ. , Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης , Εκδόσεις Συμέων , Αθήνα 2006 , σελ 13-15.

[20] Προβατίδης Χ. , Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ , πρόχειρες σημειώσεις , Πανεπιστημιακές Εκδόσεις , Θωμαΐδειο Ίδρυμα ,Αθήνα 2004, σελ 4.1-4.14.

[21] Γιαννάκογλου Κ.Χ , Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική , 4^η Έκδοση , Πανεπιστημιακές Εκδόσεις , Θωμαΐδειο Ίδρυμα ,Αθήνα 2006, σελ 30-34, 123-131.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

[1] Li Huping, Zhao Guoqun, Niu Shanting, Huang Chuanzhen, FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results, Mat. Sc.& Eng. A,452-453 (2007), pp.705-714.

[2] Zhichao Li, Ramana V. Grandhi, Raghavan Srinivasan, J. of Mat. Proc.Tech.,172 (2006), pp.249-257.

[4] Rondeau Darell, The effects of part orientation and fluid flow on heat transfer around a cylinder, Msc Thesis, Worcester Polytechnic Institute, West Midlands, England, May 6 2004.

[5] Huping Li, Guoqun Zhao, Lianfang He, Yue Mu, Measurement , 41 (2008) , pp. 676-686.

[6] Caner Simsir, C.Hakan Gur, J. of Mat. Proc.Tech., 207 (2008) ,pp. 211-221.

[7] Dowling E. William Jr., Nagendra Palle, Design for Heat Treatment, ASM Handbook, Vol 20, ASM International, Metals Park, OH, 1997, pp. 1848.

[9] G.E. Totten, G.M. Webster, C.E. Bates, S.W. Han and S.H. Kang, "Limitations of the Use of Grossman Quench Severity Factors", in 17th Heat Treating Society Conference Proceedings Including the 1st International Induction Heat Treating Symposium, Eds., D. Milam, D. Poteet, G. Pfaffmann, W. Albert, A. Muhlbauer and V. Rudnev, ASM International, Materials Park, OH, 1997, pp. 411-422.

[10] G. Meyrick , Robert H. Wagoner , Physical Metallurgy of Steel ,class notes and lecture material for MSE 651.01 , August 1 2001.

[11] P.K. Saha, Aluminium Extrusion Technology, ASM International, Materials Park, OH, 2000.

[12] Uddeholm, Die steels and components for extrusion ,user guide, 2002.

[13]Uddeholm , Orvar 2M Microdized , sales leaflet, 2002.

[14] Bohler ,W302 , sales leaflet , 2003.

[15] MetalRavne , UTOPMO2 , sales leaflet , 2003.

- [16] SolidWorks 2007- tutorial/help.
- [18] John D. Verhoeven , Metallurgy of steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel, Iowa State University,USA , March 2005.
- [19] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, Numerical Methods for Engineers, Fifth Ed. , McGraw-Hill Companies Inc, New York , 2006.
- [22] Triefenbach F. ,Design of Experiments : The D-Optimal Approach and Its Implementation As a Computer Algorithm, Bachelor's thesis , Ume^oa University , Sweden - South Westphalia University of Applied Sciencies,Germany , January 2008.
- [23] Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstr^om, C. & Wold, S. (2000),Design of Experiments: Principles and Applications, Learnways AB, Ume^oa.
- [24] Montgomery, D. C. (1991), Design and Analysis of Experiments, third ed., John Wiley& Sons, INC., USA , pp xiii-10.
- [25] Wu, C. F. J. & Hamada, M., Design of Experiments: Planing, Analysis andParameter Design Optimization, John Wiley & Sons, INC., USA.,2000.
- [26] Trochim, W. M. (2006), Research Methods Knowledge Base. URL: <http://www.socialresearchmethods.net/kb/design.php>, επισκέφθηκε την 22/12/2007.
- [27] de Aguiar, P. F., Bourguignon, B., Khots, M. S., Massart, D. L. & Phan-Thau-Luu,R. (1995), 'D-optimal Designs', Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems30 (2002), pp.199-210.
- [28] Box, G.E.P. , Draper, N.R. ,Empirical Model-Building and Response Surfaces ,John Wiley & Sons , New York ,1987.
- [29] Li Huiping, Zhao Guoqun, Niu Shanting, Luan Yiguo, Inverse heat conduction analysis of quenching process using finite-element and optimization method, Finite Element Analysis & Design , 42 (2006) ,pp. 1087-1096.
- [30] Z. Li, R.V. Grandhi, R. Shivpuri, Optimum design of heat-transfer coefficient during gas quenching using the response surface method, Int. J. of Mach. Tools & Manuf. ,42 (2002), pp. 549-558.
- [31] Li Huiping, Zhao Guoqun, Niu Shanting, Luan Yiguo, Optimazation parameters for the plane-strain component in the process of gas quenching ,App. Math. Modeling , 32 (2008), pp.860-872.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αποτελέσματα του λογισμικού Design Expert 7 για το σύνολο των υποψήφιων σημείων μελέτης μετά την εφαρμογή του D-optimal σχεδιασμού με D-optimality κριτήριο.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ D-optimal ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

5 Factors: A, B, C, D, E

Design Matrix Evaluation for Response Surface Reduced Quadratic Model

No aliases found for Reduced Quadratic Model

Aliases are calculated based on your response selection, taking into account missing datapoints, if necessary. Watch for aliases among terms you need to estimate.

Degrees of Freedom for Evaluation

Model	10
Residuals	36
Lack Of Fit	28
Pure Error	8
Corr Total	46

A recommendation is a minimum of 3 lack of fit df and 4 df for pure error.

This ensures a valid lack of fit test.

Fewer df will lead to a test that may not detect lack of fit.

Power at 5 % alpha level to detect signal/noise ratios of

Term	StdErr**	VIF	Ri-Squared	0.5 Std. Dev.	1 Std. Dev.	2 Std. Dev.
A	0.18	1.03	0.0306	28.0 %	78.5 %	99.9 %
B	0.20	1.29	0.2241	23.7 %	69.9 %	99.9 %
C	0.31	1.99	0.4986	12.1 %	34.2 %	87.4 %
D	0.19	1.17	0.1433	25.6 %	74.0 %	99.9 %
E	0.18	1.04	0.0360	27.8 %	78.2 %	99.9 %
A ²	0.32	1.03	0.0290	32.2 %	85.0 %	99.9 %
B ²	0.35	1.08	0.0780	28.5 %	79.4 %	99.9 %
C ²	0.41	1.51	0.3365	22.2 %	66.3 %	99.7 %
D ²	0.34	1.07	0.0651	30.1 %	81.9 %	99.9 %
E ²	0.33	1.04	0.0370	32.0 %	84.7 %	99.9 %

**Basis Std. Dev. = 1.0

Standard errors should be similar within type of coefficient. Smaller is better.

Ideal VIF is 1.0. VIF's above 10 are cause for alarm, indicating coefficients are poorly estimated due to multicollinearity.

Ideal Ri-squared is 0.0. High Ri-squared means terms are correlated with each other,

page 1 of 3 for Results of Evaluation of D:\DX7Trial\Design6_final_final_dp.dx7 07:08 AM Oct 24, 2009

possibly leading to poor models.

If the design has multilinear constraints multicollinearity will exist to a greater degree.

The presence of multicollinearity increases the VIF's and the RI-squareds.

Due to imposed constraints, the design is only valid for a limited set of combinations.

High VIF's and high RI-Squareds are less of a concern.

Power is an inappropriate tool to evaluate response surface designs.

Use precision-based metrics provided in this program via fraction of design space (FDS) statistics.

Click on the Graphs button at the top of this screen, look for the [?] button on the FDS Tool for detailed instructions.

Be sure to set the Model (on previous screen) to be an estimate of the terms you expect to be significant.

Measures Derived From the (X'X)⁻¹ Matrix

Std	Leverage	Point Type
1	0.2383	CentEdge
2	0.2060	Center
3	0.2483	CentEdge
4	0.2208	CentEdge
5	0.2418	CentEdge
6	0.2403	CentEdge
7	0.2534	CentEdge
8	0.2457	CentEdge
9	0.2374	CentEdge
10	0.2338	Vertex
11	0.2440	CentEdge
12	0.2102	CentEdge
13	0.2199	Vertex
14	0.2375	CentEdge
15	0.2088	Vertex
16	0.2171	CentEdge
17	0.2383	CentEdge
18	0.2060	Center
19	0.2403	CentEdge
20	0.2374	CentEdge
21	0.2534	CentEdge
22	0.2320	CentEdge
23	0.2457	CentEdge
24	0.2222	CentEdge
25	0.2475	CentEdge
26	0.2559	CentEdge
27	0.2521	CentEdge

28	0.2402	CentEdge
29	0.2227	CentEdge
30	0.2418	CentEdge
31	0.2337	PlaneCent
32	0.2417	CentEdge
33	0.2433	CentEdge
34	0.2286	PlaneCent
35	0.2418	CentEdge
36	0.2371	CentEdge
37	0.2325	CentEdge
38	0.2475	CentEdge
39	0.2324	CentEdge
40	0.2397	CentEdge
41	0.2372	CentEdge
42	0.2316	CentEdge
43	0.2338	Vertex
44	0.2274	CentEdge
45	0.2181	Vertex
46	0.2183	PlaneCent
47	0.2162	CentEdge
Average =	0.2340	

Watch for leverages close to 1.0. Consider replicating these points or make sure they are run very carefully.

Maximum Prediction Variance (at a design point) = 0.256

Average Prediction Variance = 0.234

Condition Number of Coefficient Matrix = 6.155

If this value is 100-1000, there is moderate to strong multicollinearity. Values above 1000 indicate severe multicollinearity.

Scaled D-optimality Criterion = 2.759

When comparing designs, a smaller value is better.

Determinant of $(X'X)^{-1}$ = 2.851E-14

Trace of $(X'X)^{-1}$ = 1.091

These can only be used when comparing designs with the same number of runs, a smaller value is better.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7⁰: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

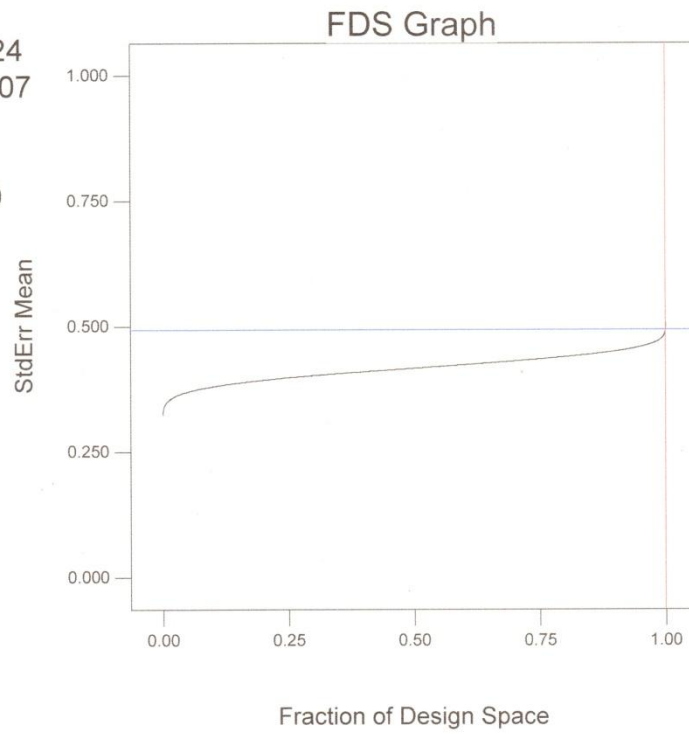
Std	Id	Run	Factor 1 A:A	Factor 2 B:B	Factor 3 C:C	Factor 4 D:D	Factor 5 E:E	Response 1 R1
18	2	1	0.400213	0.00268261	-6.93681E-00	9.47082E-009	-4.55389E-012	
1	1	2	0.40715	0.0016	-7.66401E-00	1E-008	-4.3E-012	
7	7	3	0.2847	0.0016	-6E-006	9E-009	-4.53613E-012	
5	5	4	0.5296	0.00275	-7.843E-006	9E-009	-4.3E-012	
6	6	5	0.5296	0.0039	-6E-006	1E-008	-4.54E-012	
21	7	6	0.2847	0.0016	-6E-006	9E-009	-4.53613E-012	
11	11	7	0.2847	0.0039	-8.46276E-00	9E-009	-4.54E-012	
15	15	8	0.5296	0.0039	-8.4296E-006	9E-009	-4.78E-012	
17	1	9	0.40715	0.0016	-7.66401E-00	1E-008	-4.3E-012	
10	10	10	0.5296	0.0039	-9.98876E-00	1E-008	-4.3E-012	
9	9	11	0.40715	0.0039	-6E-006	9E-009	-4.78E-012	
19	6	12	0.5296	0.0039	-6E-006	1E-008	-4.54E-012	
2	2	13	0.400213	0.00268261	-6.93681E-00	9.47082E-009	-4.55389E-012	
8	8	14	0.2847	0.0039	-6E-006	9.5E-009	-4.3E-012	
20	9	15	0.40715	0.0039	-6E-006	9E-009	-4.78E-012	
3	3	16	0.2847	0.00275	-6E-006	1E-008	-4.78E-012	
16	16	17	0.2847	0.00275435	-7.10159E-00	9E-009	-4.78E-012	
4	4	18	0.5296	0.0016	-6.73806E-00	9.5E-009	-4.78E-012	
12	12	19	0.40715	0.0039	-9.35639E-00	1E-008	-4.78E-012	
14	14	20	0.5296	0.0016	-6E-006	9.5E-009	-4.3E-012	
13	13	21	0.2847	0.0039	-9.76234E-00	1E-008	-4.3E-012	
22	17	22	0.5296	0.00275	-6E-006	9E-009	-4.3E-012	
23	8	23	0.2847	0.0039	-6E-006	9.5E-009	-4.3E-012	
24	18	24	0.5296	0.0039	-8.9496E-006	9.5E-009	-4.78E-012	
25	19	25	0.5296	0.00275	-6E-006	1E-008	-4.78E-012	
26	20	26	0.2847	0.0016	-6E-006	9.50402E-009	-4.78E-012	
27	21	27	0.40715	0.0039	-9.87555E-00	1E-008	-4.3E-012	
28	22	28	0.5296	0.0016	-7.51764E-00	1E-008	-4.54E-012	
29	23	29	0.2847	0.0039	-7.88117E-00	1E-008	-4.3E-012	
30	24	30	0.40715	0.0016	-6E-006	9E-009	-4.3E-012	
31	25	31	0.388292	0.00256888	-6E-006	9.42148E-009	-4.57749E-012	
32	26	32	0.2847	0.00275	-8.1374E-006	1E-008	-4.78E-012	
33	27	33	0.5296	0.0039	-9.72918E-00	1E-008	-4.54E-012	
34	28	34	0.40715	0.0039	-7.54798E-00	9.5E-009	-4.54E-012	
35	5	35	0.5296	0.00275	-7.843E-006	9E-009	-4.3E-012	
36	29	36	0.40715	0.0039	-6E-006	1E-008	-4.3E-012	
37	30	37	0.40715	0.0016	-6E-006	1E-008	-4.78E-012	
38	31	38	0.2847	0.0016	-7.29122E-00	1E-008	-4.54E-012	
39	32	39	0.2847	0.0039	-8.72317E-00	9.5E-009	-4.78E-012	
40	33	40	0.2847	0.00275	-6E-006	1E-008	-4.3E-012	
41	34	41	0.5296	0.0016	-7.25723E-00	9.5E-009	-4.3E-012	
42	35	42	0.5296	0.0039	-7.7348E-006	1E-008	-4.78E-012	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

	Std	Id	Run	Factor 1 A:A	Factor 2 B:B	Factor 3 C:C	Factor 4 D:D	Factor 5 E:E	Response 1 R1
	43	10	43	0.5296	0.0039	-9.98876E-00	1E-008	-4.3E-012	
	44	36	44	0.2847	0.0039	-7.36117E-00	9E-009	-4.3E-012	
	45	37	45	0.5296	0.0016	-6E-006	9E-009	-4.78E-012	
	46	38	46	0.388292	0.00256888	-7.6764E-006	9.42148E-009	-4.57749E-012	
	47	39	47	0.5296	0.0039	-6E-006	9E-009	-4.54E-012	

Design-Expert® Software

Min StdErr Mean: 0.324
Max StdErr Mean: 0.507
Constrained
Points = 50000
 $t(0.05/2, 36) = 2.02809$
FDS = 1.00
StdErr Mean = 0.493



Design-Expert® Software

StdErr of Design

● Design Points



X1 = A: A

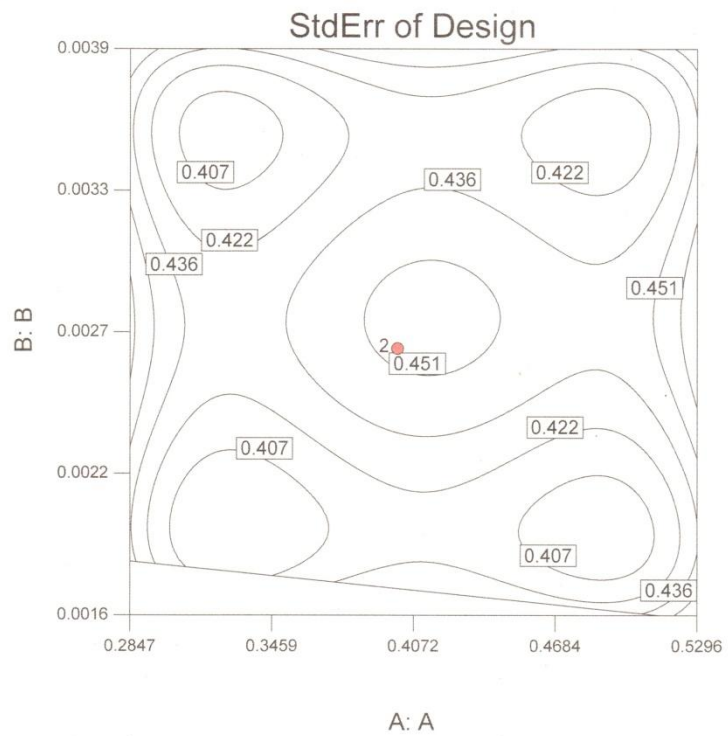
X2 = B: B

Actual Factors

C: C = -6.9368E-06

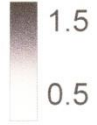
D: D = 9.4708E-09

E: E = -4.5539E-12



Design-Expert® Software

StdErr of Design



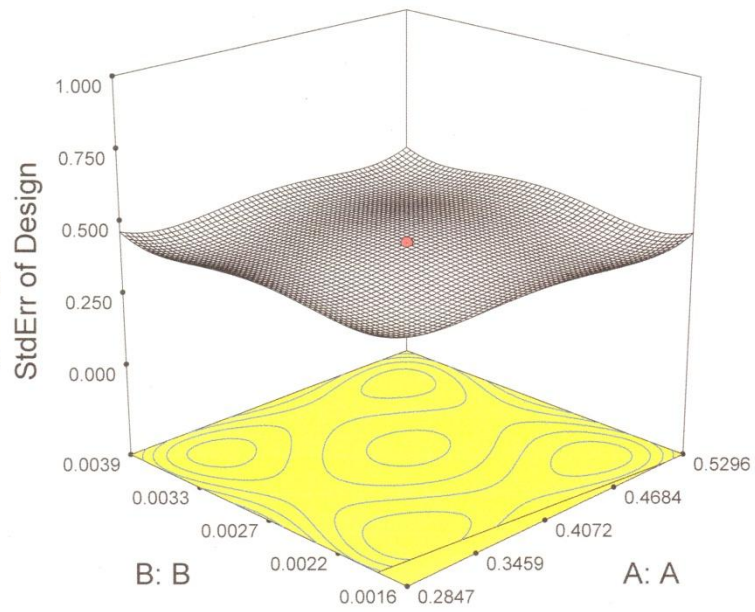
X1 = A: A
X2 = B: B

Actual Factors

C: C = -6.9368E-06

D: D = 9.4708E-09

E: E = -4.5539E-12



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

- Συγκεντρωτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις .
- Συνολική αναφορά μετά από κάθε προσομοίωση από το λογισμικό SolidWorks 2007 (47_η δοκιμή) .
- Αποτελέσματα συνάφειας μοντέλου-απόκρισης (fitting summary)
- Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης (analysis of variance)

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Run	Factor 1 A(a0)	Factor 2 B(a1)	Factor 3 C(a2)	Factor 4 D(a3)	Factor 5 E(a4)	Response CP1	Response CP2	Response CP3	Response CP4
1	0,4002132	0,002683	-6,93681E-06	9,471E-09	-4,55389E-12	0,395228	0,403198	0,391357	0,399023
2	0,40715	0,0016	-7,66401E-06	1E-08	-4,3E-12	0,395228	0,391357	0,395228	0,399023
3	0,2847	0,0016	-0,000006	9E-09	-4,53613E-12	0,718459	0,718459	0,740889	0,640889
4	0,5296	0,00275	-7,843E-06	9E-09	-4,3E-12	0,375076	0,379269	0,379269	0,383379
5	0,5296	0,0039	-0,000006	1E-08	-4,54E-12	0,222666	0,222666	0,2271566	0,216415
6	0,2847	0,0016	-0,000006	9E-09	-4,53613E-12	0,718459	0,718459	0,740889	0,740889
7	0,2847	0,0039	-8,46276E-06	9E-09	-4,54E-12	0,364894	0,364894	0,368397	0,357681
8	0,5296	0,0039	-8,4296E-06	9E-09	-4,78E-12	0,281475	0,281475	0,281475	0,275911
9	0,40715	0,0016	-7,66401E-06	1E-08	-4,3E-12	0,395228	0,391357	0,395228	0,399023
10	0,5296	0,0039	-9,98876E-06	1E-08	-4,3E-12	0,316893	0,316893	0,316893	0,307195
11	0,40715	0,0039	-0,000006	9E-09	-4,78E-12	0,241829	0,248875	0,241829	0,248875
12	0,5296	0,0039	-0,000006	1E-08	-4,54E-12	0,222666	0,222666	0,2271566	0,216415
13	0,4002132	0,002683	-6,93681E-06	9,471E-09	-4,55389E-12	0,395228	0,403198	0,391357	0,399023
14	0,2847	0,0039	-0,000006	9,5E-09	-4,3E-12	0,264237	0,264237	0,266495	0,268708
15	0,40715	0,0039	-0,000006	9E-09	-4,78E-12	0,241829	0,248875	0,241829	0,248875
16	0,2847	0,00275	-0,000006	1E-08	-4,78E-12	0,378497	0,389429	0,371831	0,378497
17	0,2847	0,002754	-7,10159E-06	9E-09	-4,78E-12	0,482562	0,482562	0,477836	0,482562
18	0,5296	0,0016	-6,73806E-06	9,5E-09	-4,78E-12	0,537265	0,537265	0,531138	0,537265
19	0,40715	0,0039	-9,35639E-06	1E-08	-4,78E-12	0,33688	0,33688	0,33688	0,33688
20	0,5296	0,0016	-0,000006	9,5E-09	-4,3E-12	0,454499	0,454499	0,454499	0,459132
21	0,2847	0,0039	-9,76234E-06	1E-08	-4,3E-12	0,398997	0,398997	0,41132	0,41132
22	0,5296	0,00275	-0,000006	9E-09	-4,3E-12	0,298855	0,301724	0,298855	0,304537
23	0,2847	0,0039	-0,000006	9,5E-09	-4,3E-12	0,264237	0,264237	0,266495	0,246675
24	0,5296	0,0039	-8,9496E-06	9,5E-09	-4,78E-12	0,295928	0,295928	0,295928	0,295928
25	0,5296	0,00275	-0,000006	1E-08	-4,78E-12	0,287157	0,292617	0,289914	0,292617
26	0,2847	0,0016	-0,000006	9,504E-09	-4,78E-12	0,726712	0,726712	0,726712	0,726712
27	0,40715	0,0039	-9,87555E-06	1E-08	-4,3E-12	0,361091	0,361091	0,361091	0,364886
28	0,5296	0,0016	-7,51764E-06	1E-08	-4,54E-12	0,608305	0,608305	0,608305	0,608305
29	0,2847	0,0039	-7,88117E-06	1E-08	-4,3E-12	0,329131	0,329131	0,316943	0,329131
30	0,40715	0,0016	-0,000006	9E-09	-4,3E-12	0,57153	0,57153	0,57153	0,554227
31	0,388292	0,002569	-0,000006	9,421E-09	-4,57749E-12	0,375198	0,375198	0,371831	0,364422
32	0,2847	0,00275	-8,1374E-06	1E-08	-4,78E-12	0,549159	0,549159	0,549159	0,532533
33	0,5296	0,0039	-9,72918E-06	1E-08	-4,54E-12	0,313996	0,313996	0,310629	0,30449
34	0,40715	0,0039	-7,54798E-06	9,5E-09	-4,54E-12	0,27306	0,281163	0,278567	0,275606
35	0,5296	0,00275	-7,843E-06	9E-09	-4,3E-12	0,375076	0,379269	0,379269	0,383379
36	0,40715	0,0039	-0,000006	1E-08	-4,3E-12	0,239134	0,239134	0,237049	0,241177
37	0,40715	0,0016	-0,000006	1E-08	-4,78E-12	0,517234	0,517234	0,533209	0,527997
38	0,2847	0,0016	-7,29122E-06	1E-08	-4,54E-12	1,012449	1,012449	1,008033	1,016896
39	0,2847	0,0039	-8,72317E-06	9,5E-09	-4,78E-12	0,368606	0,372252	0,372252	0,364894
40	0,2847	0,00275	-0,000006	1E-08	-4,3E-12	0,381732	0,381732	0,378497	0,381732
41	0,5296	0,0016	-7,25723E-06	9,5E-09	-4,3E-12	0,577161	0,577161	0,584495	0,584495
42	0,5296	0,0039	-7,7348E-06	1E-08	-4,78E-12	0,257186	0,249705	0,257186	0,252102
43	0,5296	0,0039	-9,98876E-06	1E-08	-4,3E-12	0,316893	0,316893	0,316893	0,307195
44	0,2847	0,0039	-7,36117E-06	9E-09	-4,3E-12	0,316943	0,307809	0,319812	0,322625
45	0,5296	0,0016	-0,000006	9E-09	-4,78E-12	0,467192	0,472415	0,472415	0,477534
46	0,388292	0,002569	-7,6764E-06	9,421E-09	-4,57749E-12	0,441113	0,441113	0,473701	0,401113
47	0,5296	0,0039	-0,000006	9E-09	-4,54E-12	0,225738	0,225738	0,227853	0,2270315

Thermal analysis of die_extrusion

Author: Papageorgiou Dimitrios

Company: NTUA

Date: 12/07/2009

1. [Introduction](#)
2. [File Information](#)
3. [Materials](#)
4. [Load & Restraint Information](#)
5. [Study Property](#)
6. [Contact](#)
7. [Results](#)
 - a. [Default Results](#)
8. [Appendix](#)

1. Introduction

Summarize the FEM analysis on die_extrusion

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. COSMOSWorks helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

2. File Information

Model name: die_extrusion

Model location: D:\ÖÜêâëïð\diplomati_ki_new\diplomati_ki_pc_central\Solidworks-sketches\die_extrusion\die_extrusion.SLDPRT

Results location: C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work

Study name: Study 2 (-Default-)

3. Materials

No.	Part Name	Material	Mass	Volume
1	die_extrusion	orvar_1	0.0028625 kg	0.0028625 m ³

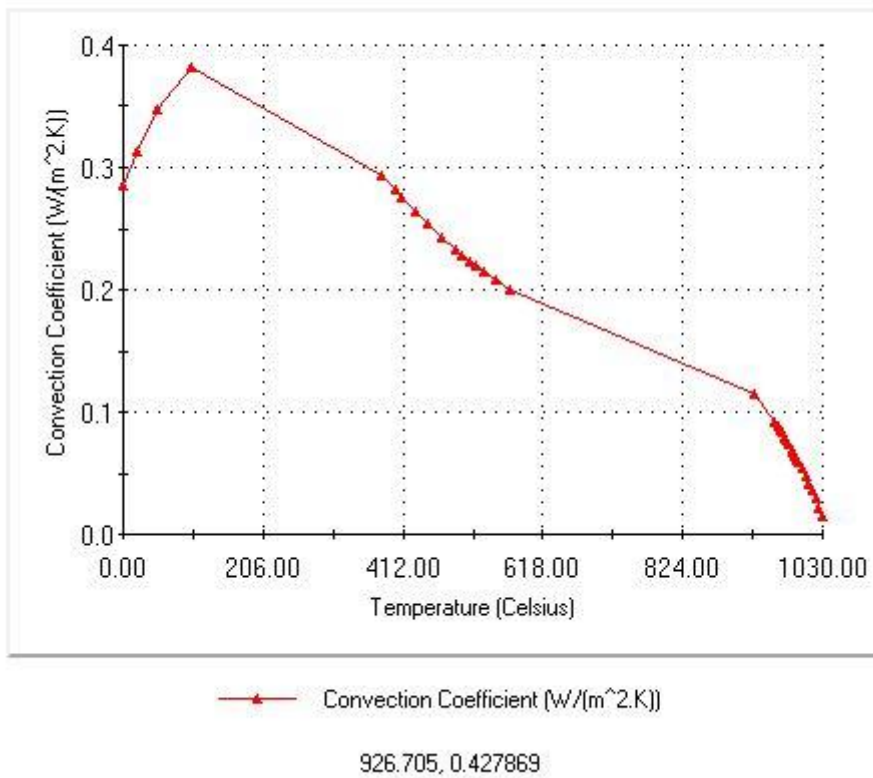
4. Load & Restraint Information

Temperature-1 <die_extrusion>	on with temperature 1293.2 Kelvin	
Description:		
Convection-1 <die_extrusion>	on 365 Face(s) with film coefficient 1 W/(m².K) and bulk temperature 294 Kelvin	Based on curve
Description:		

Curve name: Temperature curve

Description:

Temperature curve



5. Study Property

Mesh Information	
Mesh Type:	Solid mesh
Mesher Used:	Standard
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	Off
Jacobian Check:	4 Points
Element Size:	3.85 mm
Tolerance:	0.1925 mm
Quality:	High
Number of elements:	341421

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Number of nodes:	488373
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:23
Computer name:	NTUA-ED54950732

Solver Information	
Quality:	High
Solver Type:	FFEPlus
Solution type:	Transient:
Total time:	170 seconds.
Time Increment:	2 seconds.
Initial Temperature:	0 Celsius.

6. Contact

Contact state: Touching faces - Bonded

7. Results

7a. Default Results

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Thermal1	TEMP: Temperature	495.234 Celsius Node: 10987	(-12.1323 mm, 17.4102 mm, -55 mm)	496.522 Celsius Node: 18116	(-92.1851 mm, -7.97226 mm, -27.6542 mm)

8. Appendix

Material name: orvar_1

Description:

Material Source: Library files

Material Library Name: materials_dipl

Material Model Type: Linear Elastic Isotropic

Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	1	N/m ²	Temperature Dependant
Mass density	1	kg/m ³	Temperature Dependant
Thermal expansion coefficient	1	/Kelvin	Temperature Dependant
Thermal conductivity	1	W/(m.K)	Temperature Dependant
Specific heat	1	J/(kg.K)	Temperature Dependant

Curve name: EX Curve

Description:

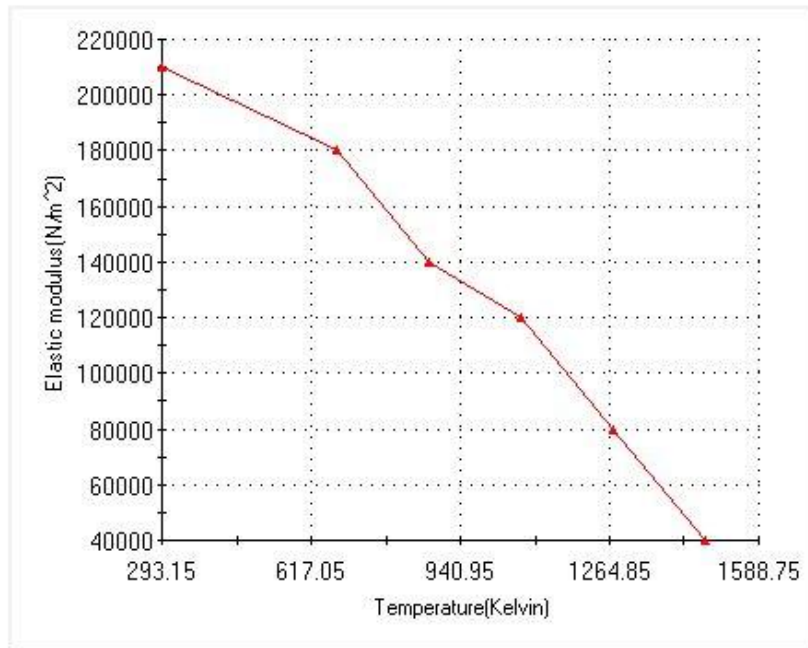
Data Points:

Temperature (in Kelvin)	Elastic modulus (in N/m ²)
293.15	2.1e+005
673.15	1.8e+005
873.15	1.4e+005

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

1073.2	1.2e+005
1273.2	80000
1473.2	40000

EX Curve



0.0

Curve name: DENS Curve

Description:

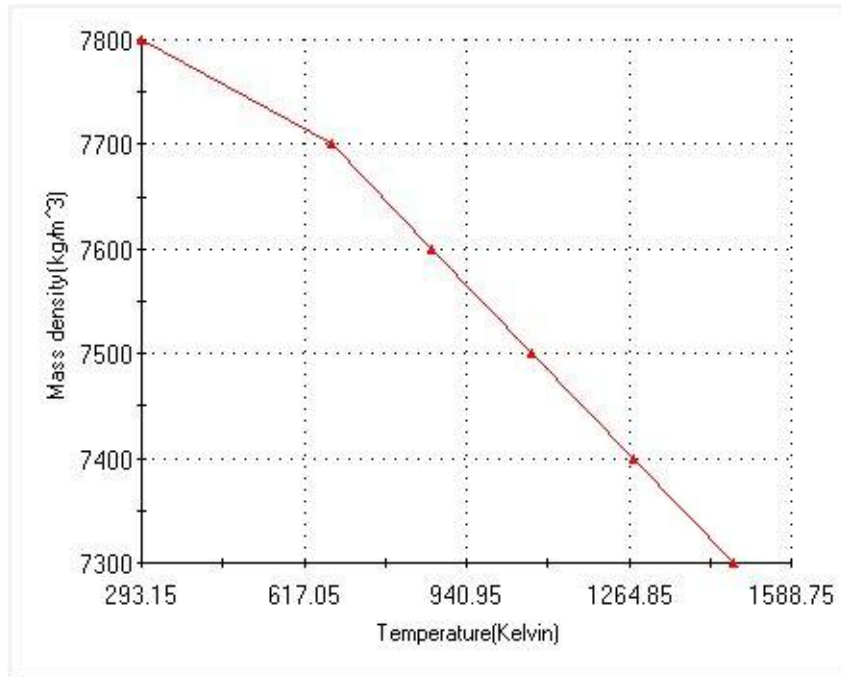
Data Points:

Temperature (in Kelvin)	Mass density (in kg/m ³)
293.15	7800
673.15	7700
873.15	7600

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

1073.2	7500
1273.2	7400
1473.2	7300

DENS Curve



0.0

Curve name: ALPX Curve

Description:

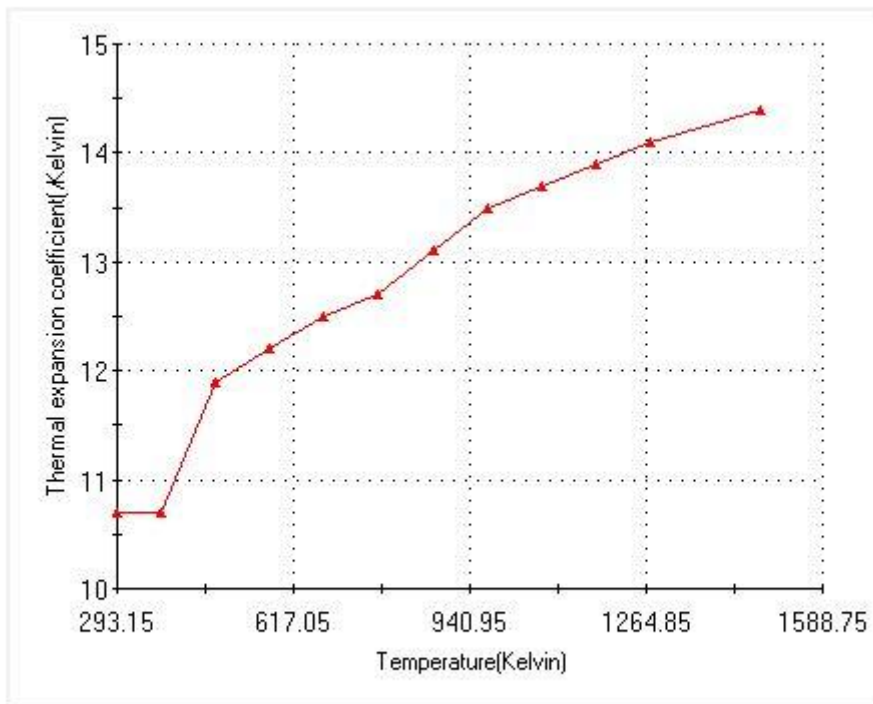
Data Points:

Temperature (in Kelvin)	Thermal expansion coefficient (in /Kelvin)
293.15	10.7
373.15	10.7
473.15	11.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

573.15	12.2
673.15	12.5
773.15	12.7
873.15	13.1
973.15	13.5
1073.2	13.7
1173.2	13.9
1273.2	14.1
1473.2	14.4

ALPX Curve



0.0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

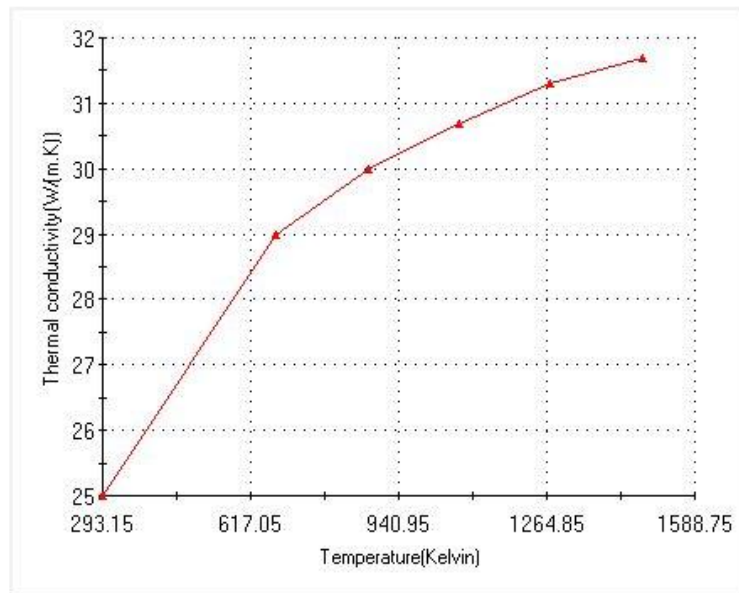
Curve name: KX Curve

Description:

Data Points:

Temperature (in Kelvin)	Thermal conductivity (in W/(m.K))
293.15	25
673.15	29
873.15	30
1073.2	30.7
1273.2	31.3
1473.2	31.7

KX Curve



0.0

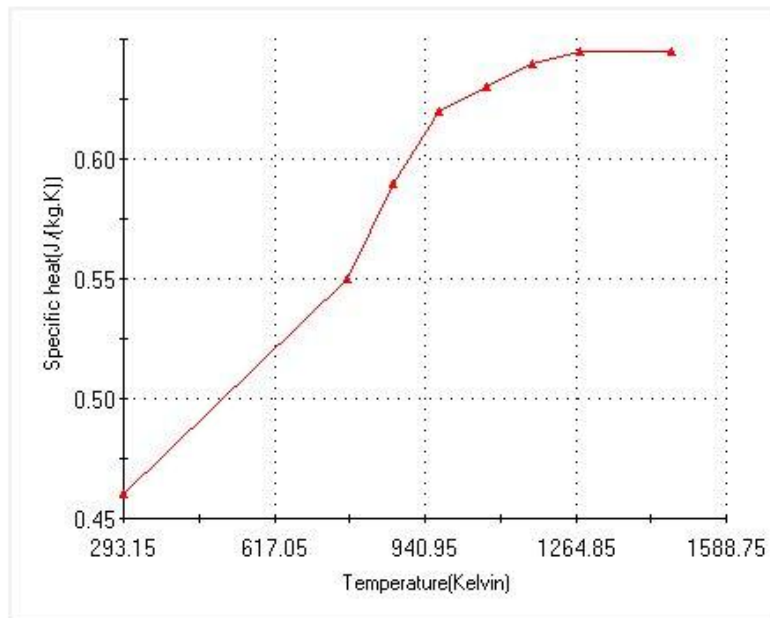
Curve name: C Curve

Description:

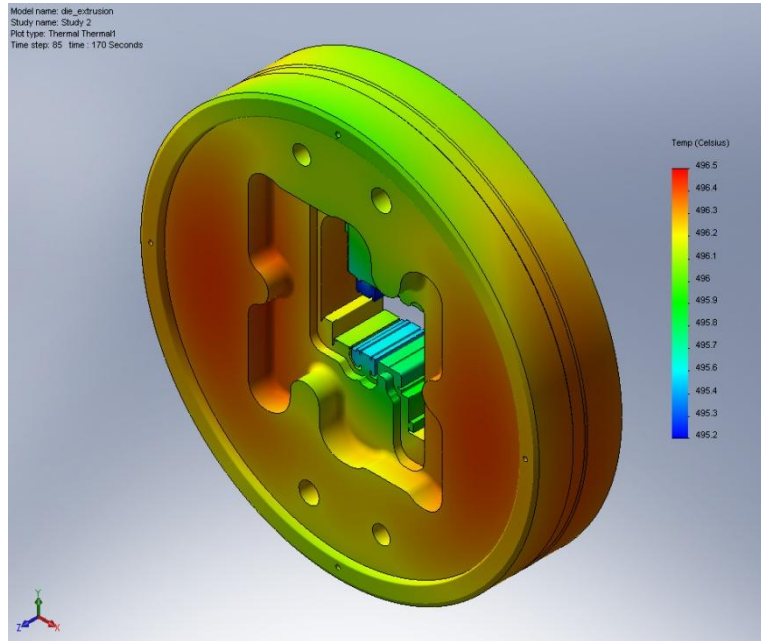
Data Points:

Temperature (in Kelvin)	Specific heat (in J/(kg.K))
293.15	0.46
773.15	0.55
873.15	0.59
973.15	0.62
1073.2	0.63
1173.2	0.64
1273.2	0.645
1473.2	0.645

C Curve

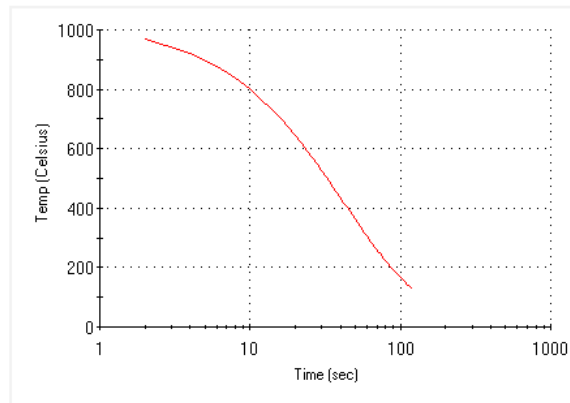


0.0



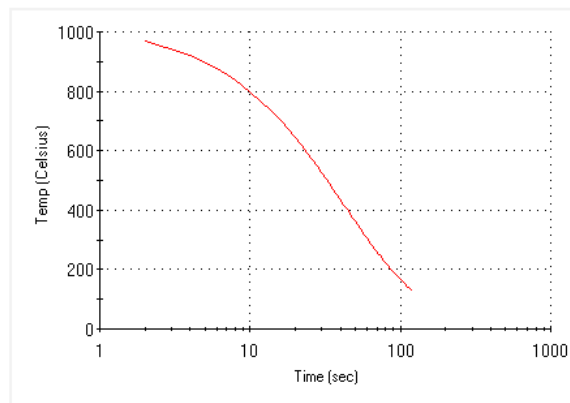
Τρισδιάστατη απεικόνιση της θερμοκρασιακής κατανομής της μήτρας κατά το τέλος της προσομοίωσης .
 Δεν ενδιαφέρει η περαιτέρω μεταβολή της θερμοκρασίας (δες ορισμό παραμέτρου απόψυξης)

Study name: Extrusion die-Run_47
 Plot type: surface_1



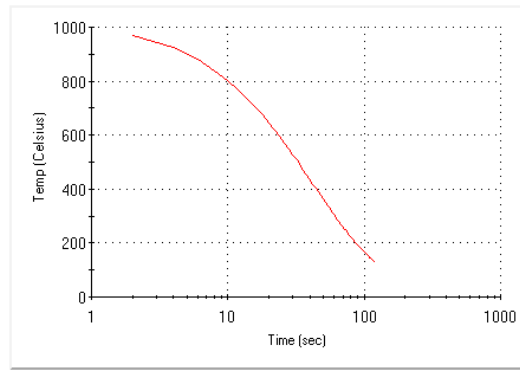
— Node 6174
 0.29002, 820.175

Study name: Extrusion die-Run_47
 Plot type: surface_curve_2



— Node 6102
 0.487373, 1039.47

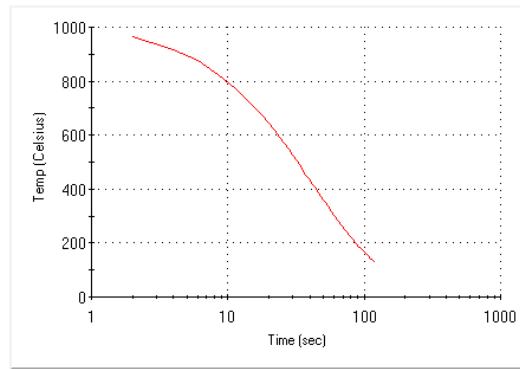
Study name: Extrusion die-Run_47
Plot type: right_core_4



Node 339774

0.538535, 1078.95

Study name: Extrusion die-Run_47
Plot type: profil_core_2_8



Node 407404

0.354106, 627.193

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ-ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Response 1: CP₁ Transform: None

***** WARNING: The Cubic Model is Aliased! *****

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	7.59	1	7.59			
<u>Linear vs Mean</u> 0.91	<u>5</u>	<u>0.18</u>	<u>26.22</u>	<u>< 0.0001</u>	<u>Suggested</u>	
2FI vs Linear0.078	10	7.795E-003	1.17	0.3466		
<u>Quadratic vs 2FI</u> 0.078	<u>5</u>	<u>0.016</u>	<u>3.17</u>	<u>0.0229</u>	<u>Suggested</u>	
Cubic vs Quadratic	0.13	18	7.122E-003	6.366E+007	< 0.0001	Aliased
Residual	0.000	8	0.000			
Total	8.78	47	0.19			

"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	0.28	33	8.617E-003		
2FI	0.21	23	8.975E-003		
Quadratic	0.13	18	7.122E-003		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	8	0.000		

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
<u>Linear</u>	<u>0.083</u>	<u>0.7617</u>	<u>0.7327</u>	<u>0.6866</u>	<u>0.37</u>	<u>Suggested</u>
2FI	0.082	0.8270	0.7434	0.6020	0.47	
<u>Quadratic</u>	<u>0.070</u>	<u>0.8926</u>	<u>0.8100</u>	<u>0.6404</u>	<u>0.43</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.000	1.0000	1.0000		+	Aliased

+ Case(s) with leverage of 1.0000: PRESS statistic not defined

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Response 2 : CP₂ Transform: None

*** WARNING: The Cubic Model is Aliased! ***

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	7.63	1	7.63			
Linear vs Mean	0.91	5	0.18	26.34	< 0.0001	Suggested
2FI vs Linear	0.075	10	7.472E-003	1.12	0.3814	
Quadratic vs 2FI	0.078	5	0.016	3.11	0.0248	Suggested
Cubic vs Quadratic	0.13	18	7.213E-003	6.366E+007	< 0.0001	Aliased
Residual	0.000	8	0.000			
Total	8.82	47	0.19			

"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	0.28	33	8.551E-003		
2FI	0.21	23	9.021E-003		
Quadratic	0.13	18	7.213E-003		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	8	0.000		

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.083	0.7626	0.7337	0.6877	0.37	Suggested
2FI	0.082	0.8255	0.7410	0.5968	0.48	
Quadratic	0.071	0.8908	0.8068	0.6334	0.44	Suggested
Cubic	0.000	1.0000	1.0000		+	Aliased

+ Case(s) with leverage of 1.0000: PRESS statistic not defined

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Response 3 : CP₃ Transform: None

*** WARNING: The Cubic Model is Aliased! ***

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	7.68	1	7.68			
Linear vs Mean	0.93	5	0.19	26.33	< 0.0001	Suggested
2FI vs Linear	0.085	10	8.490E-003	1.28	0.2825	
Quadratic vs 2FI	0.081	5	0.016	3.38	0.0175	Suggested
Cubic vs Quadratic	0.12	18	6.912E-003	6.366E+007	< 0.0001	Aliased
Residual	0.000	8	0.000			
Total	8.90	47	0.19			

"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	0.29	33	8.791E-003		
2FI	0.21	23	8.922E-003		
Quadratic	0.12	18	6.912E-003		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	8	0.000		

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.084	0.7625	0.7335	0.6875	0.38	Suggested
2FI	0.081	0.8320	0.7507	0.6141	0.47	
Quadratic	0.069	0.8981	0.8198	0.6580	0.42	Suggested
Cubic	0.000	1.0000	1.0000		+	Aliased

+ Case(s) with leverage of 1.0000: PRESS statistic not defined

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Response 4 : CP₄ Transform: None

*** WARNING: The Cubic Model is Aliased! ***

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Mean vs Total	7.52	1	7.52		
Linear vs Mean	0.89	5	0.18	25.81	< 0.0001
2FI vs Linear	0.064	10	6.390E-003	0.90	0.5407
<u>Quadratic vs 2FI</u> 0.077	<u>5</u>	<u>0.015</u>	<u>2.80</u>	<u>0.0373</u>	<u>Suggested</u>
Cubic vs Quadratic	0.14	18	7.614E-003	11.62	0.0007 Aliased
Residual	5.243E-003	8	6.553E-004		
Total	8.69	47	0.18		

"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	0.28	33	8.414E-003	12.84	0.0004
2FI	0.21	23	9.294E-003	14.18	0.0003
<u>Quadratic</u>	<u>0.14</u>	<u>18</u>	<u>7.614E-003</u>	<u>11.62</u>	<u>0.0007</u>
Cubic	0.000	0			Aliased
Pure Error	5.243E-003	8	6.553E-004		

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	0.083	0.7589	0.7295	0.6842	0.37
2FI	0.084	0.8134	0.7230	0.5752	0.50
<u>Quadratic</u>	<u>0.074</u>	<u>0.8787</u>	<u>0.7854</u>	<u>0.5987</u>	<u>0.47</u>
Cubic	0.026	0.9955	0.9743		+ Aliased

+ Case(s) with leverage of 1.0000: PRESS statistic not defined

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ

Response 1 : CP₁
ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p- value Prob > F
Model	1.01	8	0.13	26.84	< 0.0001
significant					
A-A0.15	1	0.15	32.60	< 0.0001	
B-B0.79	1	0.79	168.18	< 0.0001	
C-C	0.072	1	0.072	15.29	0.0004
D-D	7.113E-004	1	7.113E-004	0.15	0.7001
E-E0.013	1	0.013	2.68	0.1098	
A ² 0.044	1	0.044	9.34	0.0041	
B ² 0.025	1	0.025	5.20	0.0283	
E ² 0.041	1	0.041	8.70	0.0054	
Residual	0.18	38	4.723E-003		
Lack of Fit	0.18	30	5.982E-003		
Pure Error	0.000	8	0.000		
Cor Total	1.19	46			

The Model F-value of 26.84 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, B, C, A², B², E² are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.069	R-Squared	0.8496
Mean	0.40	Adj R-Squared	0.8180
C.V. %	17.10	Pred R-Squared	0.7627
PRESS	0.28	Adeq Precision	20.121

The "Pred R-Squared" of 0.7627 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.8180.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 20.121 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Coefficient Factor	Estimate	Standard df	95% CI Error	95% CI Low	High	VIF
Intercept	0.42	1	0.031	0.36	0.49	
A-A	-0.069	1	0.012	-0.094	-0.045	1.02
B-B	-0.17	1	0.013	-0.20	-0.14	1.20
C-C	-0.069	1	0.018	-0.11	-0.033	1.36
D-D	-4.891E-003	1	0.013	-0.030	0.021	1.12
E-E	-0.020	1	0.012	-0.044	4.692E-003	1.02
A ²	0.068	1	0.022	0.023	0.11	1.02
B ²	0.054	1	0.024	6.045E-003	0.10	1.05
E ²	-0.066	1	0.022	-0.11	-0.021	1.02

Final Equation in Terms of Coded Factors:

CP₁ =

+0.42

-0.069 * A

-0.17 * B

-0.069 * C

-4.891E-003 * D

-0.020 * E

+0.068 * A²

+0.054 * B²

-0.066 * E²

Final Equation in Terms of Actual Factors:

CP₁ =

+1.45657

-3.99231 * A

-367.67537 * B

-32630.85012 * C

-1.18109E+007 * D

-9.00366E+010 * E

+4.21228 * A²

+40103.76513 * B²

+0.000000 * E²

Response 2 : CP₂

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	1.01	8	0.13	26.36	< 0.0001
significant					
A-A0.15	1	0.15	31.88	< 0.0001	
B-B0.79	1	0.79	165.04	< 0.0001	
C-C	0.071	1	0.071	14.78	0.0004
D-D	8.514E-004	1	8.514E-004	0.18	0.6752
E-E0.014	1	0.014	2.93	0.0951	
A ² 0.042	1	0.042	8.83	0.0051	
B ² 0.022	1	0.022	4.55	0.0395	
E ² 0.042	1	0.042	8.73	0.0053	
Residual	0.18	38	4.776E-003		
Lack of Fit	0.18	30	6.050E-003		
Pure Error	0.000	8	0.000		
Cor Total	1.19	46			

The Model F-value of 26.36 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, B, C, A², B², E² are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.069	R-Squared	0.8473
Mean	0.40	Adj R-Squared	0.8152
C.V. %	17.15	Pred R-Squared	0.7592
PRESS	0.29	Adeq Precision	19.937

The "Pred R-Squared" of 0.7592 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.8152.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 19.937 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Coefficient		Standard	95% CI	95% CI		
Factor	Estimate	df	Error	Low	High	VIF
Intercept	0.43	1	0.031	0.36	0.49	
A-A	-0.069	1	0.012	-0.093	-0.044	1.02
B-B	-0.17	1	0.013	-0.19	-0.14	1.20
C-C	-0.069	1	0.018	-0.10	-0.033	1.36
D-D	-5.351E-003	1	0.013	-0.031	0.020	1.12
E-E	-0.021	1	0.012	-0.046	3.811E-003	1.02
A ²	0.066	1	0.022	0.021	0.11	1.02
B ²	0.051	1	0.024	2.556E-003	0.099	1.05
E ²	-0.066	1	0.022	-0.11	-0.021	1.02

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned}
 CP_2 = & \\
 & +0.43 \\
 & -0.069 \quad * A \\
 & -0.17 \quad * B \\
 & -0.069 \quad * C \\
 & -5.351E-003 \quad * D \\
 & -0.021 \quad * E \\
 & +0.066 \quad * A^2 \\
 & +0.051 \quad * B^2 \\
 & -0.066 \quad * E^2
 \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned}
 CP_2 = & \\
 & +1.41517 \\
 & -3.90607 \quad * A \\
 & -353.69804 \quad * B \\
 & -32232.50595 \quad * C \\
 & -1.27455E+007 \quad * D \\
 & -9.43314E+010 \quad * E \\
 & +4.11025 \quad * A^2 \\
 & +37663.81225 \quad * B^2 \\
 & +0.000000 \quad * E^2
 \end{aligned}$$

Response 3 : CP₃

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	1.04	8	0.13	27.75	< 0.0001
significant					
A-A0.16	1	0.16	33.55	< 0.0001	
B-B0.81	1	0.81	173.14	< 0.0001	
C-C	0.075	1	0.075	15.97	0.0003
D-D	1.516E-003	1	1.516E-003	0.32	0.5734
E-E0.012	1	0.012	2.66	0.1113	
A ² 0.043	1	0.043	9.21	0.0043	
B ² 0.027	1	0.027	5.65	0.0226	
E ² 0.047	1	0.047	10.01	0.0031	
Residual	0.18	38	4.698E-003		
Lack of Fit	0.18	30	5.951E-003		
Pure Error	0.000	8	0.000		
Cor Total	1.22	46			

The Model F-value of 27.75 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, B, C, A², B², E² are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.069	R-Squared	0.8538
Mean	0.40	Adj R-Squared	0.8231
C.V. %	16.96	Pred R-Squared	0.7699
PRESS	0.28	Adeq Precision	20.491

The "Pred R-Squared" of 0.7699 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.8231.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 20.491 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Coefficient		Standard	95% CI	95% CI		
Factor	Estimate	df	Error	Low	High	VIF
Intercept	0.43	1	0.031	0.37	0.49	
A-A	-0.070	1	0.012	-0.094	-0.045	1.02
B-B	-0.17	1	0.013	-0.20	-0.14	1.20
C-C	-0.071	1	0.018	-0.11	-0.035	1.36
D-D	-7.140E-003	1	0.013	-0.033	0.018	1.12
E-E	-0.020	1	0.012	-0.044	4.763E-003	1.02
A ²	0.067	1	0.022	0.022	0.11	1.02
B ²	0.056	1	0.024	8.288E-003	0.10	1.05
E ²	-0.070	1	0.022	-0.12	-0.025	1.02

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned}
 CP_3 = & \\
 & +0.43 \\
 & -0.070 \quad * A \\
 & -0.17 \quad * B \\
 & -0.071 \quad * C \\
 & -7.140E-003 \quad * D \\
 & -0.020 \quad * E \\
 & +0.067 \quad * A^2 \\
 & +0.056 \quad * B^2 \\
 & -0.070 \quad * E^2
 \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned}
 CP_3 = & \\
 & +1.50783 \\
 & -3.94650 \quad * A \\
 & -378.01789 \quad * B \\
 & -33158.74701 \quad * C \\
 & -1.64496E+007 \quad * D \\
 & -8.99815E+010 \quad * E \\
 & +4.14802 \quad * A^2 \\
 & +41660.95143 \quad * B^2 \\
 & +0.000000 \quad * E^2
 \end{aligned}$$

Response 4 : CP₄
ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	0.99	10	0.099	18.99	< 0.0001
Model significant					
A-A0.14	1	0.14	27.83	< 0.0001	
B-B0.75	1	0.75	145.22	< 0.0001	
C-C	0.055	1	0.055	10.58	0.0025
D-D	9.421E-004	1	9.421E-004	0.18	0.6727
E-E0.013	1	0.013	2.57	0.1174	
A ² 0.040	1	0.040	7.62	0.0090	
B ² 0.021	1	0.021	4.13	0.0495	
C ² 1.412E-003	1	1.412E-003	0.27	0.6053	
D ² 1.294E-003	1	1.294E-003	0.25	0.6208	
E ² 0.032	1	0.032	6.17	0.0178	
Residual	0.19	36	5.194E-003		
Lack of Fit	0.18	28	6.491E-003	9.90	0.0011
Lack of Fit significant					
Pure Error	5.243E-003	8	6.553E-004		
Cor Total	1.17	46			

The Model F-value of 18.99 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case A, B, C, A², B², E² are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 9.90 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 0.11% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise.

Significant lack of fit is bad -- we want the model to fit.

Std. Dev.	0.072	R-Squared	0.8406
Mean	0.40	Adj R-Squared	0.7964
C.V. %	18.02	Pred R-Squared	0.7218
PRESS	0.33	Adeq Precision	16.796

The "Pred R-Squared" of 0.7218 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.7964.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 16.796 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Coefficient		Standard	95% CI	95% CI		
Factor	Estimate	df	Error	Low	High	VIF
Intercept	0.40	1	0.035	0.33	0.48	
A-A	-0.067	1	0.013	-0.093	-0.041	1.03
B-B	-0.17	1	0.014	-0.20	-0.14	1.29
C-C	-0.073	1	0.023	-0.12	-0.028	1.99
D-D	-5.739E-003	1	0.013	-0.033	0.022	1.17
E-E	-0.021	1	0.013	-0.046	5.422E-003	1.04
A ²	0.065	1	0.023	0.017	0.11	1.03
B ²	0.051	1	0.025	1.232E-004	0.10	1.08
C ²	0.015	1	0.029	-0.044	0.075	1.51
D ²	0.012	1	0.024	-0.037	0.062	1.07
E ²	-0.058	1	0.024	-0.11	-0.011	1.04

Final Equation in Terms of Coded Factors:

CP₄ =

+0.40

-0.067 * A

-0.17 * B

-0.073 * C

-5.739E-003 * D

-0.021 * E

+0.065 * A²

+0.051 * B²

+0.015 * C²

+0.012 * D²

-0.058 * E²

Final Equation in Terms of Actual Factors:

CP₄=

+1.57015

-3.89920 * A

-362.62955 * B

+6559.50093 * C

-1.12477E+007 * D

-8.96684E+010 * E

+4.12081 * A²

+39125.7978 * B²

+2.53187E+009 * C²

+0.000000 * D²

+0.00000 * E²

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

- Αλγόριθμος υπολογισμού αντικειμενικής συνάρτησης cooling1.for.
- Υπόδειγμα εμφάνισης των εισόδων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτέλεση του λογισμικού EASY (1^η Περίπτωση).

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

```
program cooling_rate
  implicit double precision (a-h,o-z)
  open (1,file='task.dat')
    read(1,*)
    read(1,*) x1
    read(1,*) x2
    read(1,*) x3
    read(1,*) x4
  read(1,*) x5
close(1)
elid=0.6d0
x11=x1*(-3.99231)
x21=x2*(-367.67537)
x31=x3*(-32630.85012)
x41=x4*(-1.18109)*(10**7)
x51=x5*(-9.00366)*(10**10)
xq11=(x1**2)*4.21228
xq21=(x2**2)*(40103.76513)

x12=x1*(-3.90607)
x22=x2*(-353.69804)
x32=x3*(-32232.50595)
x42=x4*(-1.27455)*(10**7)
x52=x5*(-9.43314)*(10**10)
xq12=(x1**2)*4.11025
xq22=(x2**2)*(37663.81225)
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9⁰: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

$$x13=x1*(-3.94650)$$

$$x23=x2*(-378.01789)$$

$$x33=x3*(-33158.74701)$$

$$x43=x4*(-1.64496)*(10**7)$$

$$x53=x5*(-8.99815)*(10**10)$$

$$xq13=(x1**2)*4.14802$$

$$xq23=(x2**2)*(41660.95143)$$

$$x14=x1*(-3.89920)$$

$$x24=x2*(-362.62955)$$

$$x34=x3*(6559.50093)$$

$$x44=x4*(-1.12477)*(10**7)$$

$$x54=x5*(-8.96684)*(10**10)$$

$$xq14=(x1**2)*4.12081$$

$$xq24=(x2**2)*(39125.79786)$$

$$xq34=(x3**2)*(2.53187)*(10**9)$$

$$el1=1.45657+x11+x21+x31+x41+x51+xq11+xq21$$

$$el2=1.41517+x12+x22+x32+x42+x52+xq12+xq22$$

$$el3=1.50783+x13+x23+x33+x43+x53+xq13+xq23$$

$$el4=1.57015+x14+x24+x34+x44+x54+xq14+xq24+xq34$$

$$y1=(el1-elid)**2$$

$$y2=(el2-elid)**2$$

$$y3=(el3-elid)**2$$

$$y4=(el4-elid)**2$$

$$cr=dsqrt(y1+y2+y3+y4)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

```
open (1,file='task.res')
```

```
    write(1,*) cr
```

```
close(1)
```

```
open(1,file='task.cns')
```

```
    write(1,*) e1
```

```
    write(1,*) e2
```

```
    write(1,*) e3
```

```
    write(1,*) e4
```

```
close(1)
```

```
stop
```

```
end
```

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ Ε.Α.

Case Organization

Parameterization sheet 1 Number of parameterization sheets: 1 Accept Delete sheet

Design Variables & Constraints

Design Parameters

Free parameters: 5 Fixed parameters: 0 Total parameters: 5

ID	Min	Max	Const	bits	Comment
1	0.2847	0.5296	<input type="checkbox"/>	10	null
2	0.0016	0.0039	<input type="checkbox"/>	10	null
3	-1.0E-5	-6.0E-6	<input type="checkbox"/>	10	null
4	9.0E-9	1.0E-8	<input type="checkbox"/>	10	null
5	-4.78E-12	-4.3E-12	<input type="checkbox"/>	10	null
6			<input type="checkbox"/>		
7			<input type="checkbox"/>		
8			<input type="checkbox"/>		
9			<input type="checkbox"/>		
10			<input type="checkbox"/>		
11			<input type="checkbox"/>		
12			<input type="checkbox"/>		
13			<input type="checkbox"/>		
14			<input type="checkbox"/>		

Constraints - Penalty function

Number of constraints: 0

ID	Nominal threshold	Relaxed threshold	Amplification factor	Comment
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Case Organization

Search level 1 Number of levels: 1 Apply Delete Current

Level type: EA SD/CG SQP

Search Engine: Evolutionary Algorithm

General Hierarchical Distributed Convergence Population Operators IPE

Basic Configuration

Demes: 1 Script ID: 1 Parameterization sheet: 1
 Solution store step: 0 State store step: 0 Allow penalized elites:

Initialization

PRNG seed state: 1 Initialization mode: Random

Fitness assignment (Multiobjective optimization, MOO, only)

Multiobjective mode: SPEA 2 Sharing distance: 0,1 Distance space: Objectives
 Distance non-dim: Var Bounds Nested dist. mult.: 1,2

Design parameters limit adaptation

Frequency: 0 Maximum adaptations: 0 Adaptation factor: 1

Case Organization	Search level 1	Number of levels: 1	Apply	Delete Current																												
Design Variables & Constraints	Level type: <input checked="" type="radio"/> EA <input type="radio"/> SD/CG <input type="radio"/> SQP																															
Search Engines (Multilevel)	Search Engine: Evolutionary Algorithm																															
Evaluation Scripts	<table border="1"> <tr> <td>General</td> <td>Hierarchical</td> <td>Distributed</td> <td>Convergence</td> <td>Population</td> <td>Operators</td> <td>IPE</td> </tr> <tr> <td colspan="7">Convergence criteria</td> </tr> <tr> <td>Maximum generations</td> <td>0</td> <td>Maximum idle generations</td> <td>10</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Maximum evaluations</td> <td>0</td> <td>Maximum idle evaluations</td> <td>0</td> <td colspan="3"></td> </tr> </table>				General	Hierarchical	Distributed	Convergence	Population	Operators	IPE	Convergence criteria							Maximum generations	0	Maximum idle generations	10				Maximum evaluations	0	Maximum idle evaluations	0			
General	Hierarchical	Distributed	Convergence	Population	Operators	IPE																										
Convergence criteria																																
Maximum generations	0	Maximum idle generations	10																													
Maximum evaluations	0	Maximum idle evaluations	0																													
Parallel Evaluations																																
Run & Results																																

Case Organization	Search level 1	Number of levels: 1	Apply	Delete Current																																																																						
Design Variables & Constraints	Level type: <input checked="" type="radio"/> EA <input type="radio"/> SD/CG <input type="radio"/> SQP																																																																									
Search Engines (Multilevel)	Search Engine: Evolutionary Algorithm																																																																									
Evaluation Scripts	<table border="1"> <tr> <td>General</td> <td>Hierarchical</td> <td>Distributed</td> <td>Convergence</td> <td>Population</td> <td>Operators</td> <td>IPE</td> </tr> <tr> <td colspan="7">Parents and offspring</td> </tr> <tr> <td>Parent population size</td> <td>20</td> <td>Offspring population size</td> <td>40</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Max life span</td> <td>0</td> <td>Parents of one offspring</td> <td>2</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td colspan="7">Elitism</td> </tr> <tr> <td>Elite archive size</td> <td>10</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>Elite indiv. to force as new offspring</td> <td>2</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>Probability to select an elite</td> <td>0,1</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td colspan="7">Parent Selection</td> </tr> <tr> <td>Tournament size</td> <td>1</td> <td>Tournament prob.</td> <td>0,15</td> <td colspan="3"></td> </tr> </table>				General	Hierarchical	Distributed	Convergence	Population	Operators	IPE	Parents and offspring							Parent population size	20	Offspring population size	40				Max life span	0	Parents of one offspring	2				Elitism							Elite archive size	10						Elite indiv. to force as new offspring	2						Probability to select an elite	0,1						Parent Selection							Tournament size	1	Tournament prob.	0,15			
General	Hierarchical	Distributed	Convergence	Population	Operators	IPE																																																																				
Parents and offspring																																																																										
Parent population size	20	Offspring population size	40																																																																							
Max life span	0	Parents of one offspring	2																																																																							
Elitism																																																																										
Elite archive size	10																																																																									
Elite indiv. to force as new offspring	2																																																																									
Probability to select an elite	0,1																																																																									
Parent Selection																																																																										
Tournament size	1	Tournament prob.	0,15																																																																							
Parallel Evaluations																																																																										
Run & Results																																																																										

Case Organization Design Variables & Constraints Search Engines (Multilevel) Evaluation Scripts Parallel Evaluations Run & Results	Search level 1 ▾ Number of levels: 1 ▾ Apply Delete Current
	Level type: <input checked="" type="radio"/> EA <input type="radio"/> SD/CG <input type="radio"/> SQP
	Search Engine: Evolutionary Algorithm
	General Hierarchical Distributed Convergence Population Operators IPE
	Coding Binary - Gray ▾ Initial std dev 0,1 ▾
	Crossover - Recombination Probability 0,2 ▾ Mode One Point ▾ Strategy One Point ▾
	Mutation Probability 0,2 ▾ Mode Standard ▾ Refinement 0,2 ▾ Multiplier 1 ▾ Idle generations 10 ▾

Case Organization Design Variables & Constraints Search Engines (Multilevel) Evaluation Scripts Parallel Evaluations Run & Results	Scripts (for evaluation and interlevel data exchange in Multilevel Parameterization)																																																																		
	Number of scripts: 1																																																																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Script ID</th> <th>Script Filename</th> <th>Maximum evaluations</th> <th>Aux file (grid)</th> <th>Cost unit (estim.)</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>task.bat</td><td>10000</td><td></td><td>1.0</td><td>null</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Script ID	Script Filename	Maximum evaluations	Aux file (grid)	Cost unit (estim.)	Comment	1	task.bat	10000		1.0	null	2						3						4						5						6						7						8						9						10					
	Script ID	Script Filename	Maximum evaluations	Aux file (grid)	Cost unit (estim.)	Comment																																																													
	1	task.bat	10000		1.0	null																																																													
	2																																																																		
	3																																																																		
4																																																																			
5																																																																			
6																																																																			
7																																																																			
8																																																																			
9																																																																			
10																																																																			
Multilevel Parameterization - Interlevel links & adaptations																																																																			
Number of link entries: 0																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Source param. sheet</th> <th>Destination param. sheet</th> <th>Script ID</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	ID	Source param. sheet	Destination param. sheet	Script ID	Comment	1					2					3					4					5					6					7					8					9					10																
ID	Source param. sheet	Destination param. sheet	Script ID	Comment																																																															
1																																																																			
2																																																																			
3																																																																			
4																																																																			
5																																																																			
6																																																																			
7																																																																			
8																																																																			
9																																																																			
10																																																																			

ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Ε.Α. (1^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ)

EASY v2.0

FINAL SOLUTION FILE

Level id: 1 - Level type: EA

Number of entries: 10

Number of objectives: 1

Objective (cr)	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	
0,439424344	0,286136364	0,001629228	-9,9726295210E-06	9,2551319648E-09	-4,5336656891E-12	<u>Selected</u>
0,440234152	0,286854545	0,001629228	-1,0000000000E-05	9,2746823069E-09	-4,5331964809E-12	
0,440493578	0,285418182	0,001635973	-9,9022482893E-06	9,0694037146E-09	-4,5951319648E-12	
0,442042077	0,287333333	0,001604497	-9,9178885630E-06	9,5141739980E-09	-4,5177126100E-12	
0,44212865	0,288769697	0,001629228	-9,9608993157E-06	9,0136852395E-09	-4,4951906158E-12	
0,442506086	0,287093939	0,001629228	-9,9726295210E-06	9,2590420332E-09	-4,4754838710E-12	
0,446887955	0,286854545	0,001642717	-1,0000000000E-05	9,2864125122E-09	-4,3065689150E-12	
0,448903604	0,286375758	0,001626979	-9,8475073314E-06	9,2922776149E-09	-4,3093841642E-12	
0,451461572	0,287572727	0,001629228	-9,9608993157E-06	9,5141739980E-09	-4,4951906158E-12	
0,451489385	0,289009091	0,001626979	-9,9804496579E-06	9,4389051808E-09	-4,5289736070E-12	

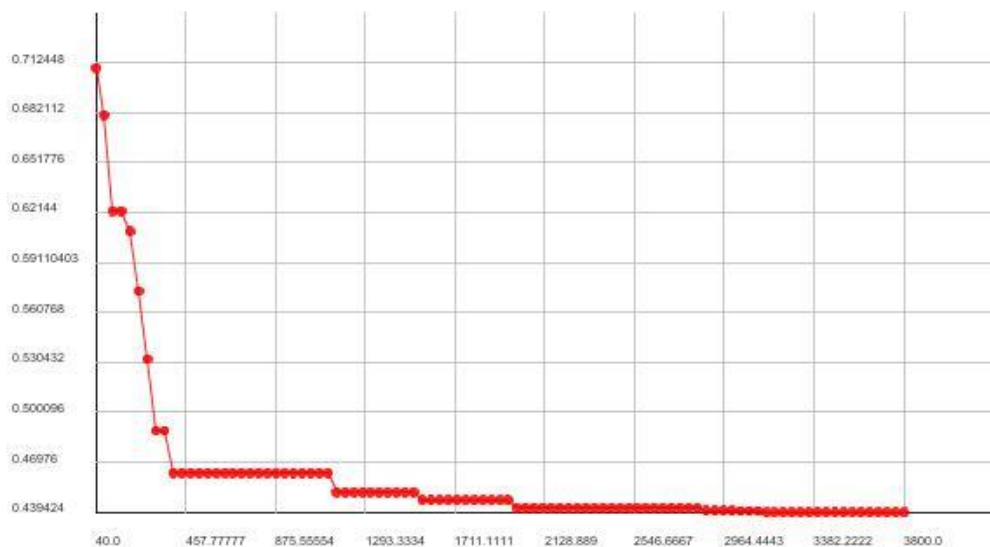
Total variables: 5 Free variables: 5

Number of constrains 0

Cooling parameters

CP_1 CP_2 CP_3 CP_4
 0,3826289786 0,3612250776 0,3913514674 0,3871716199

Διάγραμμα αποτύπωσης της ταχύτητας σύγκλισης προς την εξαχθείσα τιμή.



Εγώ , ο Δημήτριος Παπαγεωργίου , επιβεβαιώνω ότι η παρούσα διπλωματική εργασία και η μελέτη που παρουσιάζεται μέσα σε αυτή είναι δικό μου δημιούργημα . Είναι εκφρασμένη με δικά μου λόγια. Οι όποιες χρήσεις προτάσεων, τμημάτων κειμένων, διαγραμμάτων, εικόνων αλλά και παντός είδους άλλου υλικού που ανήκουν σε άλλο συγγραφέα/ερευνήτη και χρησιμοποιήθηκαν μέσα σε αυτή, διαθέτουν την αντίστοιχη παραπομπή στο σημείο που αναφέρονται.

Δημήτριος Παπαγεωργίου ,

Αθήνα , 8^η Οκτωβρίου 2009.