

ΡΟΥΤΙΝΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΤΟ PRO - MECHANICA

Μαρία Ν. Μανουσαρίδου

Εργαστηριακός Συνεργάτης Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Τμήματος Ναυπηγικής & Πολ. Έργων Υποδομής

e-mail: mman@teiath.gr

Περίληψη

Καθώς οι απαιτήσεις και οι ανάγκες για τη σχεδίαση ενός προϊόντος αυξάνονται συνεχώς, οι παραδοσιακές μέθοδοι σχεδίασης είναι ανεπαρκείς να ανταποκριθούν με συνέπεια και αποτελεσματικότητα στο ρόλο τους. Έτσι, τα νέα υπολογιστικά εργαλεία που έχουν αναπτυχθεί εξασφαλίζουν την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα των προϊόντων και συγχρόνως προσφέρουν έτοιμες ρουτίνες σχεδιαστικής βελτιστοποίησης, ώστε το βέλτιστο ηλεκτρονικό προϊόν να είναι διαθέσιμο προς παραγωγή μέσα μόνο σε λίγες μέρες ή εβδομάδες, κάτι που κατά το παρελθόν ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο και αβέβαιο να επιτευχθεί με τις συμβατικές μεθόδους.

Λέξεις κλειδιά: γεωμετρική βελτιστοποίηση, σχεδίαση προϊόντος, Pro Mechanica, μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

1. Εισαγωγή

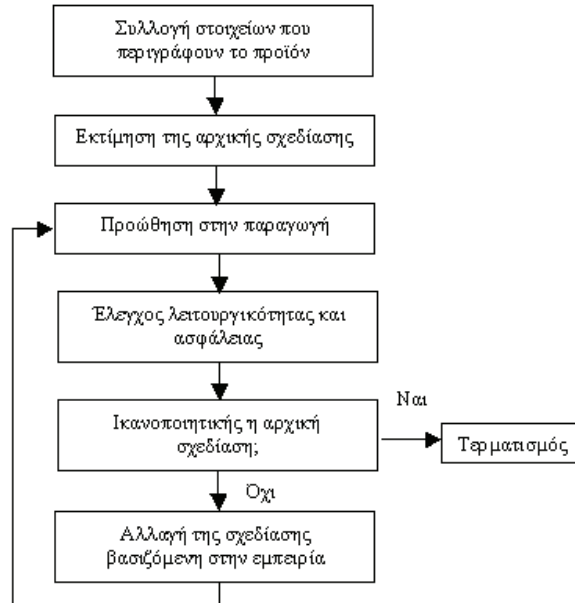
Η διαδικασία σχεδίασης ενός προϊόντος ή μίας κατασκευής γίνεται αισθητά πιο περίπλοκη, καθώς η τεχνολογία και η επιστήμη εξελίσσονται συνεχώς παρέχοντας νέα γνώση. Έτσι, οι σχεδιαστές αντιμετωπίζουν την πρόκληση της συνεχούς ενημέρωσης και εξοικείωσης με τα νέα τεχνολογικά εργαλεία ώστε το προϊόν της εργασίας τους να είναι επιβιώσιμο και ανταγωνιστικό. Επιπλέον, οι σχεδιαστές πρέπει να επεκτείνονται και σε άλλους τομείς εξειδίκευσης έτσι ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα το αρχικό προϊόν να καλύπτει όλες τις απαιτούμενες ανάγκες και τους περιορισμούς και συνεπώς να ελαττώνεται ο χρόνος ανάπτυξης και παραγωγής του τελικού προϊόντος.

Κατά το παρελθόν, οι βιομηχανικοί σχεδιαστές ετοίμαζαν το προϊόν το οποίο περνούσε στην παραγωγή χωρίς πλήρη έλεγχο της λειτουργικότητας και της ασφάλειας του και συχνά χωρίς να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί που είχαν τεθεί για το συγκεκριμένο προϊόν. Η συνολική διαδικασία ήταν αρκετά αργή, δοκιμαστική και τα λάθη της σχεδίασης γινόντουσαν αντιληπτά με ιδιαίτερη καθυστέρηση. Η δυνατότητα παραγωγής του προϊόντος δεν ήταν εφικτή με την πρώτη δοκιμή και αρκετές επαναλήψεις ακολουθούσαν μέχρι την τελική λύση.

Με την ανάπτυξη όμως των κατάλληλων λογισμικών εργαλείων η σχεδίαση ενός προϊόντος μπορεί να είναι γρήγορη, ασφαλής και αποδοτική, καθώς ελέγχεται η ικανοποίηση των κριτηρίων λειτουργίας και των λοιπών συνθηκών πριν το προϊόν μπει στη διαδικασία παραγωγής.

2. Μεθοδολογία Βέλτιστης Σχεδίασης

Η παραδοσιακή προσέγγιση της σχεδίασης βασίζεται κυρίως στην ατομική γνώση, την εμπειρία και σε γενικούς κανονισμούς. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κλασική διαδικασία σχεδίασης. Αρχικά, προσδιορίζεται το πρόβλημα και η λύση προσεγγίζεται βάσει της προηγούμενης εμπειρίας και επίκτητης γνώσης. Το προϊόν περνά στην παραγωγή, εάν ικανοποιεί πλήρως τις απαιτούμενες συνθήκες, αλλιώς τροποποιείται για να γίνει ο έλεγχος εκ νέου. Η επαναληπτική διαδικασία σχεδίασης εκτελείται μέχρις ότου επιτευχθεί μια ικανοποιητική λύση.

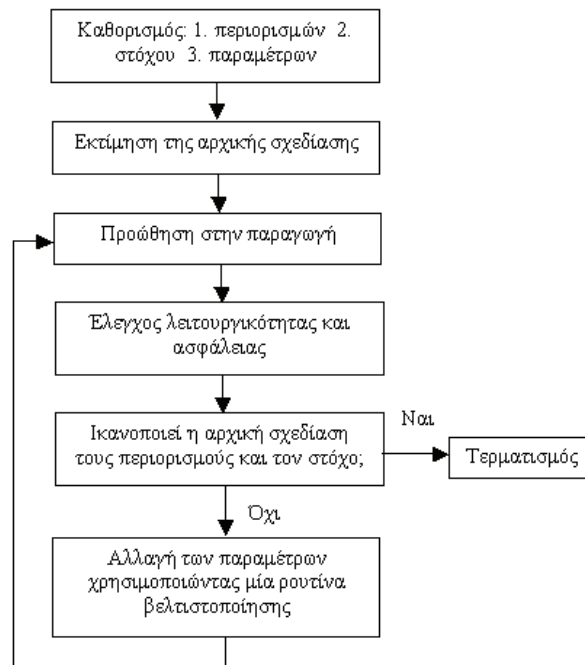


Σχήμα 1. Διάγραμμα παραδοσιακής μεθόδου προσέγγισης της σχεδίασης

Ακολουθώντας τη συμβατική μέθοδο προσέγγισης του προϊόντος, αρκετοί μήνες απαιτούνταν, ενώ παράλληλα τα κριτήρια που έπρεπε να ικανοποιούνται ήταν πιο ελαστικά με στόχο να αποφευχθούν οι πολυάριθμες επαναλήψεις και να προχωρήσει η διαδικασία παραγωγής. Αντίθετα στις μέρες μας, χάριν των υπολογιστικών εργαλείων, η σχεδίαση είναι πιο απαιτητική και αυστηρή και οι σχεδιαστές πρέπει να παρέχουν βέλτιστες και επαρκείς λύσεις για το προϊόν μέσα σε μερικές εβδομάδες.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η σχεδιαστική διαδικασία που ακολουθείται για την προσέγγιση βέλτιστου προϊόντος. Η βέλτιστη σχεδίαση επιτυγχάνεται με μεθόδους που παρέχονται από τα σύγχρονα λογισμικά πακέτα και τα οποία βασίζονται στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Έτσι,

εξασφαλίζονται πιο ακριβείς υπολογισμοί που επιτρέπουν την άμεση αξιολόγηση και βελτίωση των προϊόντων, καθώς τα νέα υπολογιστικά εργαλεία προσφέρουν τη δυνατότητα στον σχεδιαστή / ερευνητή να αναζητήσει εύκολα και γρήγορα βέλτιστες λύσεις για μία κατασκευή θέτοντας παραμέτρους, περιορισμούς και στόχους, κάτι που είναι εξαιρετικά χρονοβόρο και επίπονο να επιτευχθεί με τη συμβατική μέθοδο ή με αναλυτικό τρόπο.



Σχήμα 2. Διάγραμμα βέλτιστης σχεδίασης προϊόντος

3. Ρουτίνες Βελτιστοποίησης

Σε κάθε μελέτη βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται 2 βασικοί κανόνες. Αρχικά, λοιπόν, δεν πρέπει να προσδοκούμε μια διαδικασία βελτιστοποίησης που να σχεδιάζει αυτόματα τα προϊόντα. Επιπλέον, αν και οι ρουτίνες βελτιστοποίησης είναι σήμερα πολύ δυνατές και αποδοτικές, πρέπει στην αρχή της μελέτης να ερευνήσουμε τι πραγματικά μπορεί να συμβεί με το προϊόν, όσον αφορά τη γεωμετρία του, τις ιδιότητες του και τη συμπεριφορά του, έτσι ώστε να γνωρίζουμε το πιθανό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Ακολουθώντας αυτή τη μεθοδολογία, εξοικονομούμε χρόνο φτάνοντας στη βέλτιστη κατασκευή πιο σύντομα.

3.1. Πρώτο Στάδιο Βελτιστοποίησης

Στο 1^ο Στάδιο, εξετάζονται διεξοδικά οι αρχικές ιδέες για την πιθανή διάταξη της κατασκευής, η οποία καθορίζει τη λειτουργία, το κόστος τη διαδικασία παραγωγής και την προώθηση του προϊόντος. Έτσι, ένα λογισμικό πακέτο Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί γρήγορα να μας τροφοδοτήσει με άφθονες

πληροφορίες που αφορούν τα παραπάνω στοιχεία. Συνεπώς, στο 1^ο Στάδιο εξετάζεται και εκτιμάται μεγάλο πλήθος μοντέλων, συγκρίνονται διάφορα υλικά, μέθοδοι παραγωγής, γεωμετρικές διατάξεις και καταγράφονται παραδοχές που μπορεί να αφορούν τις εξωτερικές συνθήκες, την ενδεχόμενη επιπρόσθετη φόρτιση κ.ά. Άρα, στην 1^η Φάση γίνεται αρχικά μελέτη και καταγραφή μεγεθών που ενδιαφέρουν το χρήστη, όπως το βάρος ή η μέγιστη τιμή της τάσης *von Mises* για κάθε πιθανή περίπτωση της κατασκευής.

Στο επόμενο στάδιο, λαμβάνεται μία ή και περισσότερες παράμετροι, που μπορεί να είναι το υλικό του μοντέλου, οι διαστάσεις του κ.τ.λ.. Έτσι, ξεκινά ένας έλεγχος που ονομάζεται *Local Sensitivity Study* και μπορεί να αποφανθεί κατά πόσο η αλλαγή της τιμής μίας παραμέτρου είναι σημαντική για την κατασκευή. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής: λαμβάνεται η τιμή μίας παραμέτρου (π.χ. το μήκος του μοντέλου) και εκτελείται έρευνα για τη συμπεριφορά κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών (όπως είναι το βέλος κάμψης, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση *von Mises* κ.ά.) για τιμές $\pm 0.5\%$ της ληφθείσας τιμής. Το αποτέλεσμα είναι ένα διάγραμμα ανάμεσα στην παράμετρο και κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος όπου μία ευθεία γραμμή ενώνει τα 2 σημεία που έχουν προκύψει. Αν η κλίση της ευθείας είναι μεγαλύτερη από **1**, τότε η παράμετρος αυτή επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του μοντέλου. Συμπεραίνουμε δηλ. ότι μία μικρή αλλαγή σε μία παράμετρο ($\pm 0.5\%$) αυξάνει αισθητά κάποιο μέγεθος. Όμως πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί στην περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε μία παράμετρο για ένα μεγάλο εύρος τιμών. Τα αποτελέσματα που θα πάρουμε από την *Local Sensitivity Study* μπορεί να μας παραπλανήσουν, αφού η αλλαγή μίας παραμέτρου δεν είναι πάντα γραμμική σε σχέση με κάποιο μέγεθος και το διάγραμμα θα προκύψει στην *Local Sensitivity Study* δεν θα είναι αντιπροσωπευτικό.

Ερευνώντας τη συμπεριφορά διαφόρων παραμέτρων, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καταλήγουμε σε έναν αριθμό παραμέτρων οι οποίες επιδρούν περισσότερο στη συμπεριφορά μιας κατασκευής. Έτσι, περιορίζουμε τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να εξετασθούν διεξοδικά στο επόμενο βήμα του 1^{ου} Σταδίου το οποίο ονομάζεται *Global Sensitivity Study*. Αυτό το στάδιο παρέχει μία ολοκληρωμένη και ευκρινή εικόνα της κατασκευής αλλάζοντας μία παράμετρο, εφόσον η έρευνα γίνεται για όλο το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η παράμετρος. Συνεπώς, λαμβάνουμε ένα γράφημα όπου εμφανίζεται ξεκάθαρα η εκάστοτε τιμή για κάποιο μέγεθος, καθώς αλλάζει η τιμή της παραμέτρου.

Συμπερασματικά, στο 1^ο Στάδιο εκτελούνται οι *Local* και *Global Sensitivity Studies* και κρίνοντας ο χρήστης τα αποτελέσματα για την εκάστοτε κατασκευή, περίπου 2 ή 3 ιδέες είναι πιο κοντά στο επιθυμητό προϊόν και να απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Έτσι, οι πιο βιώσιμες ιδέες, οι οποίες ικανοποιούν τις απαιτήσεις σε κόστος, ποιότητα, λειτουργία και ευελιξία προώθησης, περνούν στο 2^ο Στάδιο βελτιστοποίησης, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο και τον κόπο για τη προσέγγιση του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, η παραγωγή πρωτοτύπων στο 1^ο Στάδιο μπορεί να κριθεί επιθυμητή ή απαραίτητη, για τη διασφάλιση της ορθότητας των παραδοχών που έγιναν και τη διασταύρωση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

3.2. Δεύτερο Στάδιο Βελτιστοποίησης

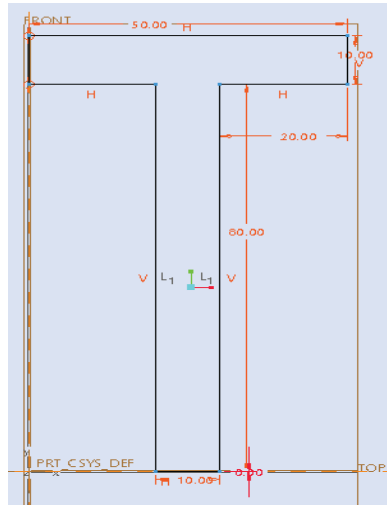
Στο 2^ο Στάδιο εκτελείται η μέθοδος *Optimization Study* (βελτιστοποίηση), η οποία παρέχεται επίσης από τα λογισμικά βελτιστοποίησης. Συνεπώς, μαζί με τον καθορισμό της αρχικής γεωμετρίας του μοντέλου, πρέπει να οριστούν στο πρόγραμμα ο στόχος, οι περιορισμοί και οι παράμετροι. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο στόχος είναι η μείωση του βάρους, του όγκου ή του κόστους. Αν και αυτά τα τρία συνδέονται μεταξύ τους, υπάρχουν περιπτώσεις όπου το μοντέλο μπορεί να αποτελείται από διάφορα υλικά. Άρα, σε μια τέτοια περίπτωση το πρόγραμμα προσπαθεί αρχικά να μειώσει τον όγκο των πιο δαπανηρών ή βαριών τμημάτων και εφόσον η μείωση δεν είναι επαρκής, τότε συνεχίζει με τα υπόλοιπα τμήματα.

Όσον αφορά τους περιορισμούς, αυτοί πρέπει να επιλεγούν με προσοχή, διότι στην περίπτωση που δεν είναι ρεαλιστικοί, τότε το πρόγραμμα θα προσπαθεί για αρκετό χρόνο να προσαρμόσει το μοντέλο στις απαιτήσεις, μέχρις ότου να εγκαταλείψει την προσπάθεια. Ο καλύτερος και ασφαλέστερος τρόπος να διασφαλίσει κάποιος ότι οι περιορισμοί είναι λογικοί είναι η εκτέλεση μελέτης τύπου *Global Sensitivity* πριν την έναρξη της βελτιστοποίησης. Έτσι, θα εξασφαλιστεί ότι υπάρχει μέσα στα όρια των περιορισμών τουλάχιστον μία λύση. Οι περιορισμοί που συνήθως ορίζονται είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, η ελάχιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση αλλά επίσης και κάποιο όριο για το βάρος του μοντέλου.

Τέλος, οι παράμετροι που καθορίζονται είναι αυτοί που έχουν εντοπιστεί νωρίτερα στο 1^ο Στάδιο και όπως έχουμε ήδη αναφέρει είναι παράμετροι που επιδρούν σημαντικά στη συμπεριφορά της κατασκευής. Επίσης, ο περιορισμός στον αριθμό των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου που απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η έρευνα της βελτιστοποίησης. Εξάλλου είναι πιο αποδοτικό να ξεκινήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης κοντά στη βέλτιστη διάταξη που έχει κρίνει ο χρήστης και να την τελειοποιήσει. Μπορεί φυσικά να φαίνεται ότι ο χρήστης κάνει εν μέρει τη δουλειά του λογισμικού, αλλά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δεν έχει την ευφυΐα και την εμπειρία και δεν μπορεί να προβλέψει πιθανά σφάλματα.

4. Παράδειγμα Γεωμετρικής Βελτιστοποίησης Καμπτόμενου Προβόλου στο Pro – Mechanics

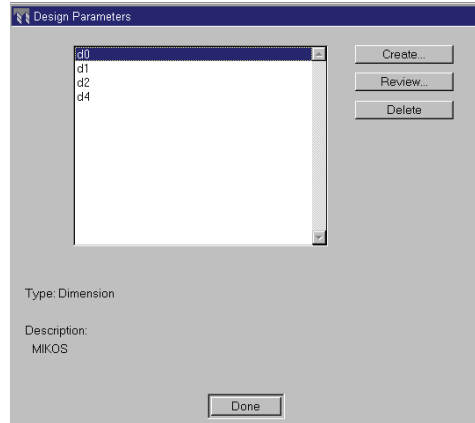
Παρακάτω με τη χρήση ενός απλού παραδείγματος παρουσιάζονται οι 3 μέθοδοι βελτιστοποίησης στο περιβάλλον του *Pro - Mechanics*. Συγκεκριμένα, έχουμε έναν πρόβολο στο ελεύθερο άκρο του οποίου εφαρμόζεται δύναμη ίση με 900 N . Η διατομή του είναι σχήματος T και οι ακριβείς του διαστάσεις σε mm φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Το μήκος του προβόλου είναι 2000 mm και το υλικό του *χάλυβας*.



Σχήμα 3. Διατομή προβόλου

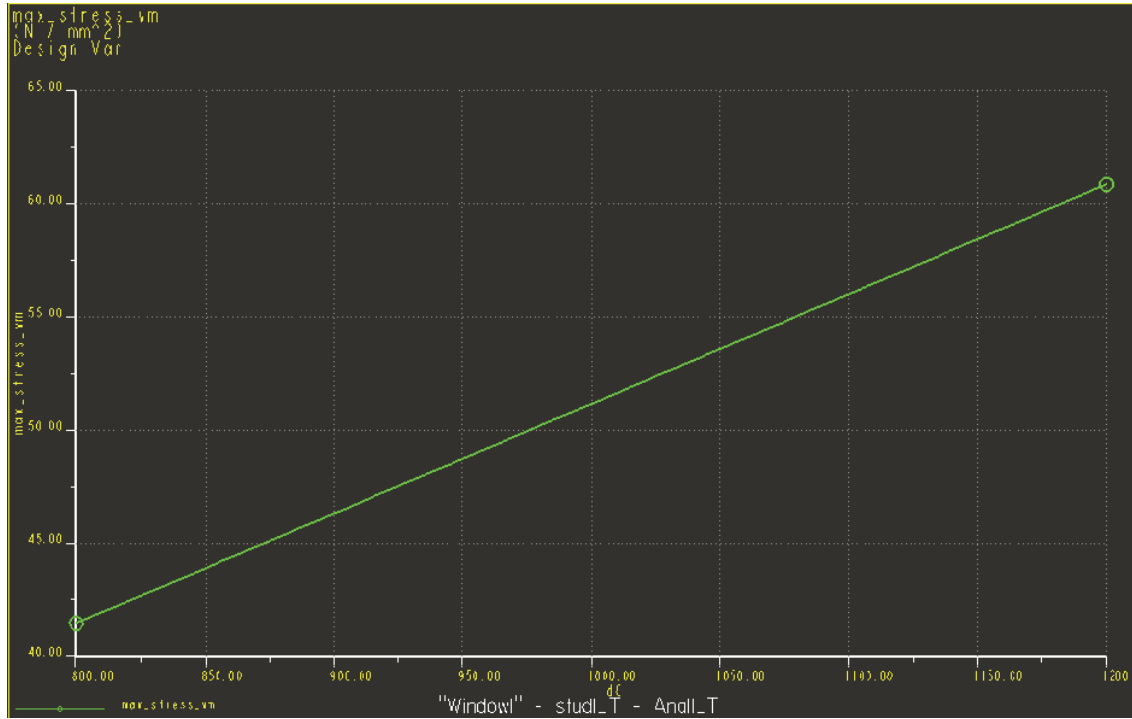
Αρχικά, θα επιλέξουμε 4 διαστάσεις του μοντέλου μας για να εξετάσουμε ποια ή ποιες από αυτές επηρεάζουν περισσότερο την ανάπτυξη της τάσης *von Mises*. Συνεπώς, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο *Local Sensitivity Study* η οποία περιγράφηκε παρακάτω.

Οι διαστάσεις που θα επιλέξουμε είναι το μήκος του προβόλου (d_0), το πλάτος του πέλματος (d_2), το ύψος του κορμού (d_4) και το πάχος του πέλματος (d_1).

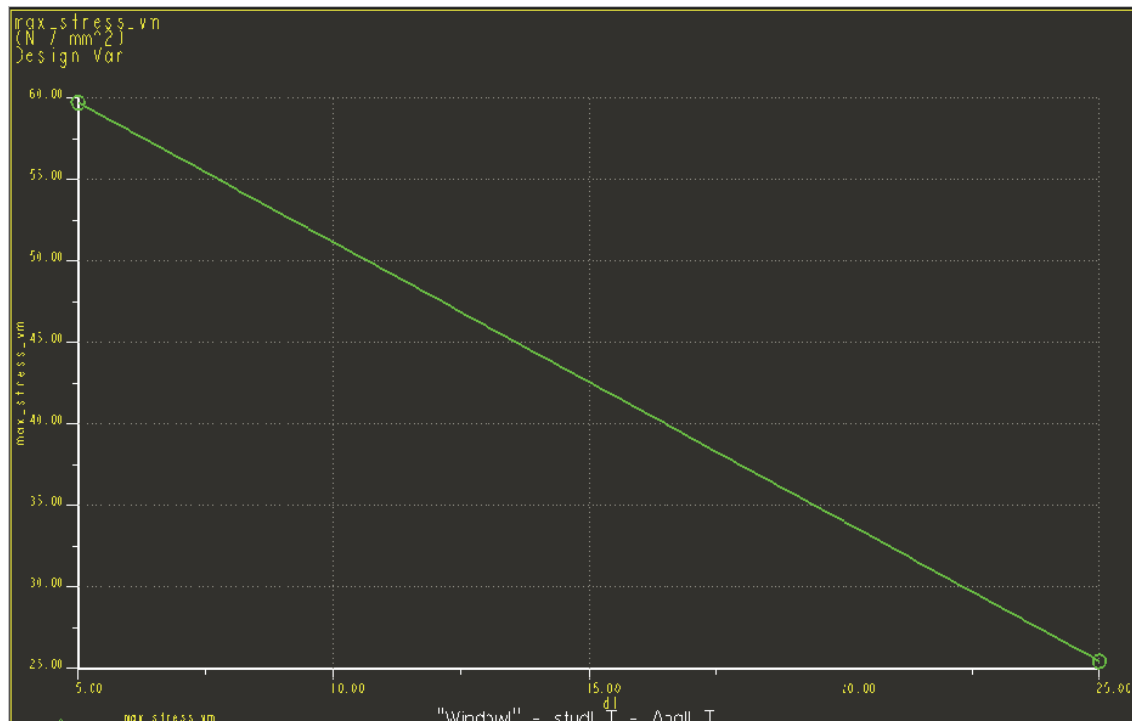


Σχήμα 4. Ορισμός σχεδιαστικών παραμέτρων

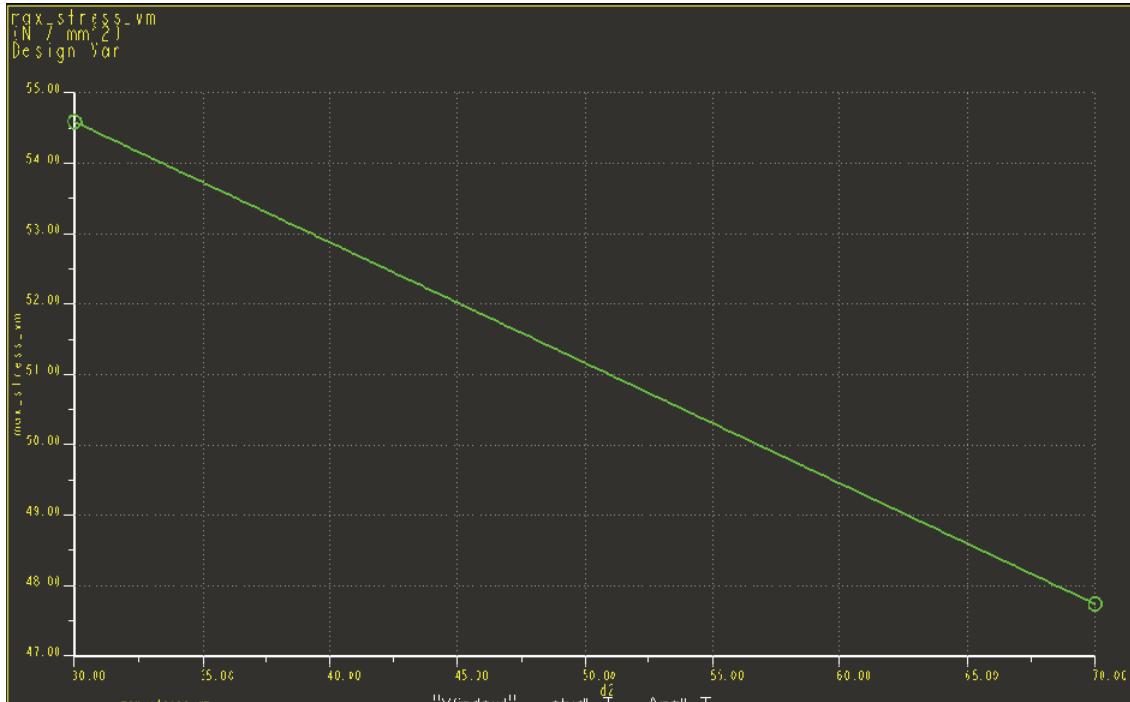
Εκτελώντας την *Local Sensitivity Study* εξάγουμε τα διαγράμματα ανάμεσα στις προαναφερόμενες διαστάσεις και την τάση *von Mises* (*stress vm*).



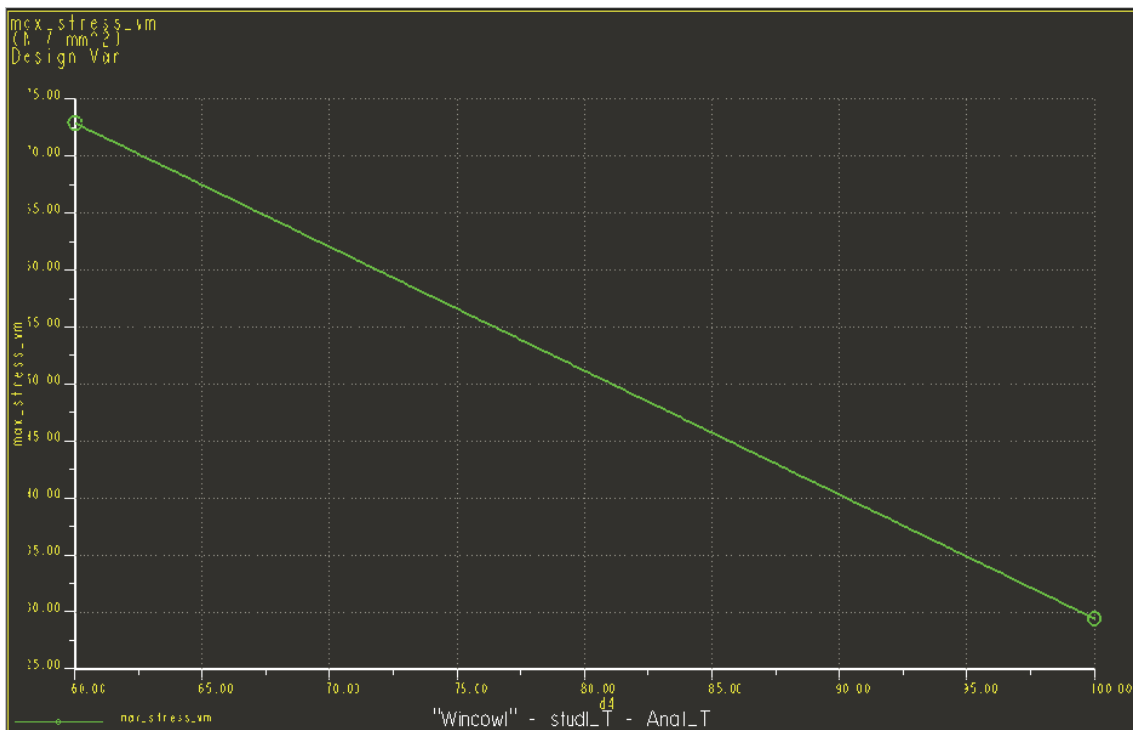
Σχήμα 5. Διάγραμμα $max\ stress\ vm - d0$



Σχήμα 6. Διάγραμμα $max\ stress\ vm - d1$



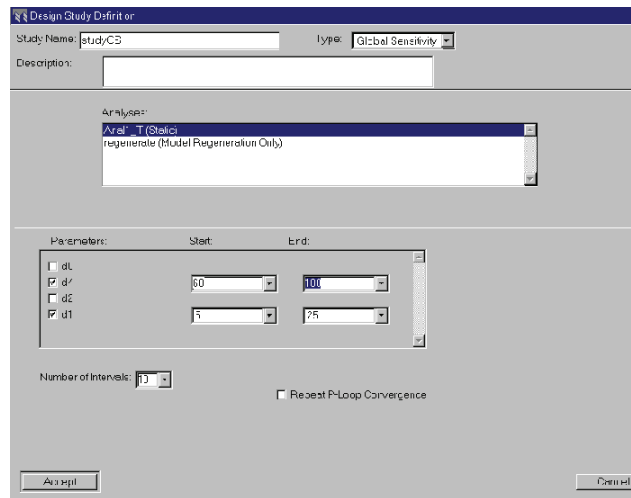
Σχήμα 7. Διάγραμμα $max\ stress\ vm - d2$



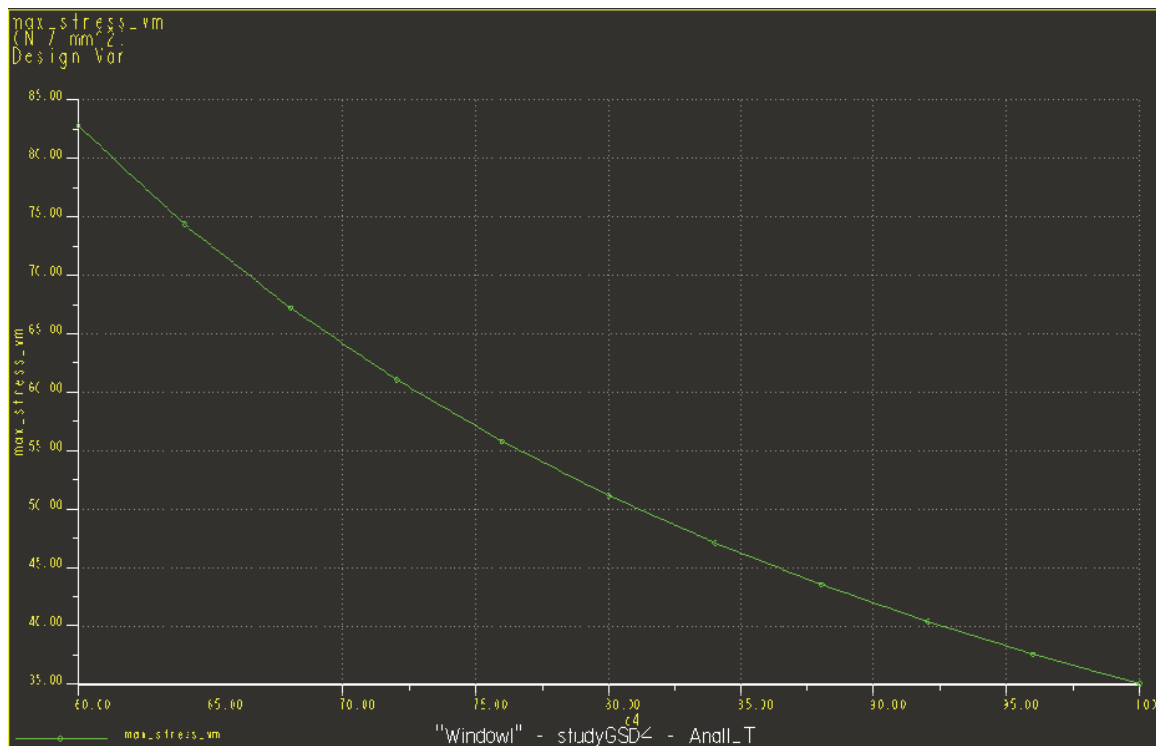
Σχήμα 8. Διάγραμμα $max\ stress\ vm - d4$

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι οι παράμετροι $d1$ και $d4$ (σχήμα 6 και 8) επιδρούν περισσότερο στην ανάπτυξη της τάσης von Mises, εφόσον οι ευθείες γραμμές που προέκυψαν έχουν κλίση μεγαλύτερη του 1. Συνεπώς, στο ακόλουθο στάδιο της βελτιστοποίησης θα εξετάσουμε αυτές τις δύο παραμέτρους.

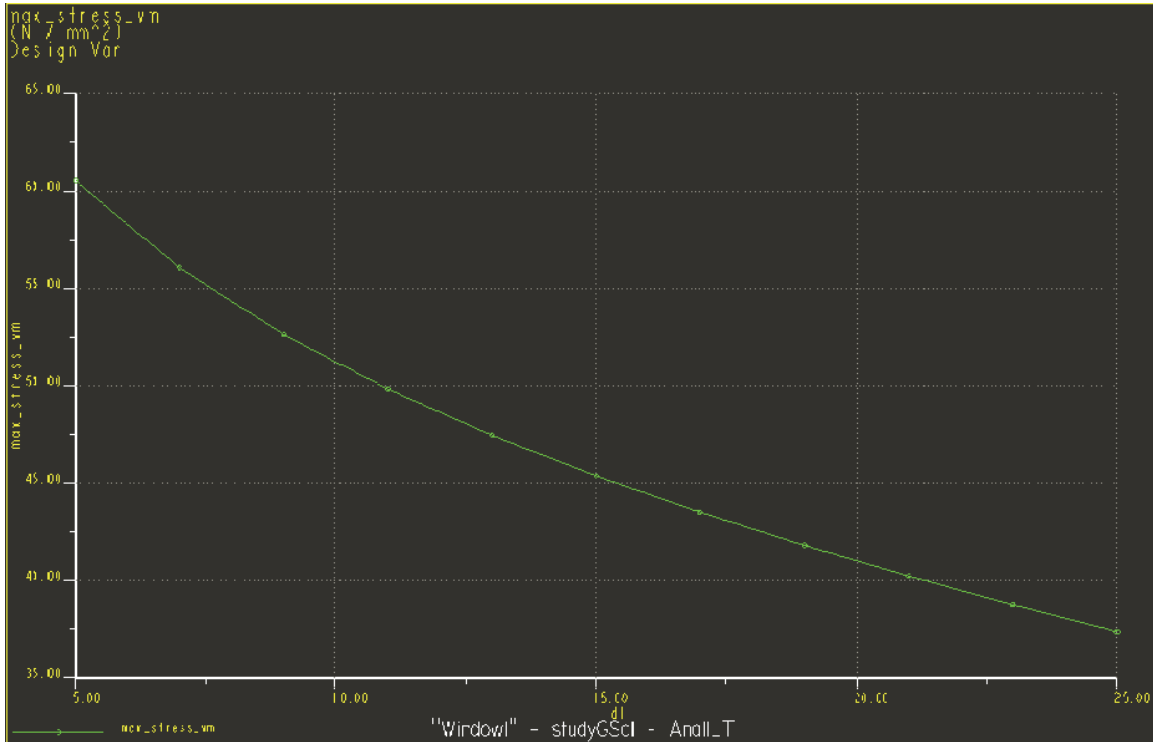
Ορίζουμε, λοιπόν, την *Global Sensitivity Study* για τις παραμέτρους $d1$, $d4$ και έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα όπου φαίνεται με ακρίβεια η εκάστοτε τιμή της τάσης vm για όλο το εύρος τιμών των δύο παραμέτρων.



Σχήμα 9. Ορισμός της *Global Sensitivity Study* για τις παραμέτρους $d1$, $d4$



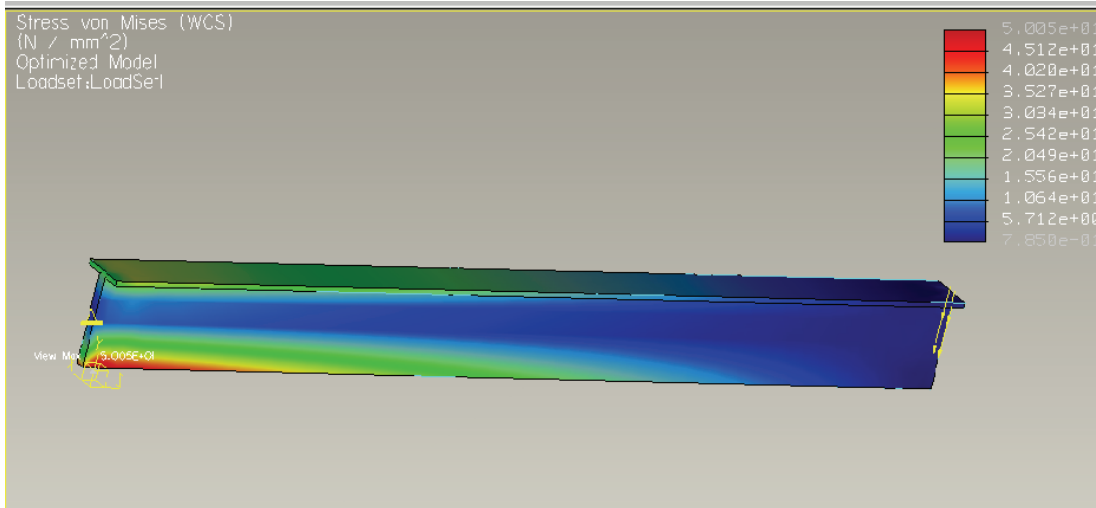
Σχήμα 10. Διάγραμμα $max\ stress\ vm - d4$ από την Global Sensitivity Study



Σχήμα 11 Διάγραμμα. $max\ stress\ vm - d1$ από την Global Sensitivity Study

Στο τελευταίο στάδιο της βελτιστοποίησης (*Optimization Study*) θέτουμε ως στόχο την *ελαχιστοποίηση της μάζας* του μοντέλου υπό την συνθήκη ότι η αναπτυσσόμενη τάση vm δεν θα ξεπερνά την τιμή $50\ N/mm^2$. Η έρευνα φυσικά θα διεξαχθεί μόνο για τις παραμέτρους $d1$ και $d4$, που παίζουν πιο καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της τάσης vm .

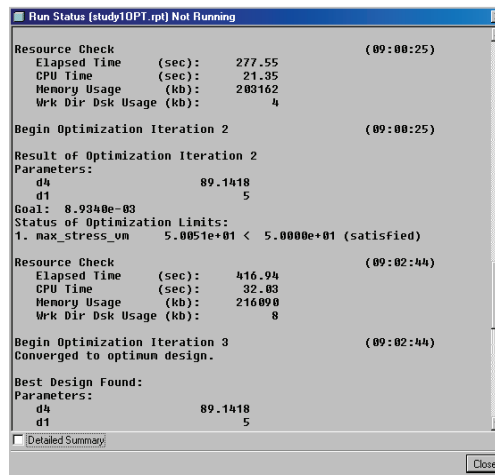
Παρακάτω φαίνεται το βέλτιστο μοντέλο όπως διαμορφώθηκε μετά την *Optimization Study*. Παρατηρούμε ότι η τάση vm έχει ως μέγιστη τιμή αυτή που τέθηκε ως περιορισμός για την βελτιστοποίηση του μοντέλου.



Σχήμα 12 Βέλτιστο μοντέλο

Τέλος, από το αρχείο με τα συνολικά αποτελέσματα (*summary file*) λαμβάνουμε τις τιμές των παραμέτρων για τις οποίες ικανοποιείται ο περιορισμός ($max\ stress\ vm < 50\ N/mm^2$) και ο στόχος (*ελαχιστοποίηση της μάζας του μοντέλου*). Οι τιμές αυτές είναι $d4 = 89.14\ mm$ και $d1 = 5\ mm$.

Σχήμα 13 Summary file



Βιβλιογραφία:

1. Adams V., Askenazi A., 1999, *Building better products with finite element analysis*, Onword Press
2. Vandeplats G., 1984, *Numerical Optimization for engineering design with Applications*, McGraw – Hill book Company, St. Barbara
3. K. Bathe, 1996, *Finite element procedures*, Prentice – Hall International inc
4. Tomovic M., 2005, *Product Lifecycle Management in Education: Integration of Product Optimization with Manufacturability*, *Inderscience Enterprises Ltd.*
5. Toogood R., *Pro – Mechanics Tutorial structure*, SDC publications, Alberta 2001,
6. Παπανίκος Π., 2005, Σημ. *Ανάλυση με Πεπερασμένα στοιχεία*