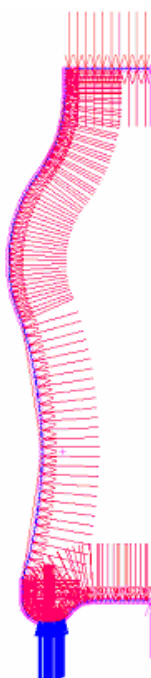




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΦΙΑΛΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία της
Σηφαλάκη Αντιγόνης

Εξεταστική Επιτροπή

Επιβλέπων: Μπιλάλης Νικόλαος (Αναπληρωτής Καθηγητής)
Νικολός Ιωάννης (Λέκτορας)
Γεωργιάκης Παύλος (Επικουρος Καθηγητής)

Χανιά 2004

**Αφιερώνεται
Στους γονείς μου**

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο να μελετηθούν οι αντοχές πλαστικών φιαλών που έχουν σχεδιαστεί με περιβαλλοντικά κριτήρια. Αποτελεί κατά ένα τρόπο συνέχεια μίας προηγούμενης εργασίας, του κ. Κουρουμπλάκη Μανώλη, ο οποίος ασχολήθηκε με το σχεδιασμό τμημάτων τέτοιων φιαλών. Το κριτήριο για το σχεδιασμό τους ήταν η ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού. Έπρεπε λοιπόν να διερευνηθεί το αν ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός επηρεάζει τις φιάλες, όσον αφορά τις αντοχές τους στις διάφορες καταπονήσεις και με τί τρόπο.

Συνολικά δημιουργήθηκαν 17 φιάλες, στις οποίες εφαρμόστηκαν φορτία πολλαπλάσια από το βάρος τους, όπως αναμένεται ότι θα συμβαίνει κατά τη δεματοποίησή τους. Ο σχεδιασμός και η συναρμολόγηση των φιαλών έγιναν στο σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks, ενώ η ανάλυση έγινε με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, στο πρόγραμμα Msc Marc with Mentat2000.

Πρόλογος

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό σε κάποιους ανθρώπους, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας, κ. Μπιλάλη Νικόλαο, για τη βοήθεια του στην εκπόνηση της εργασίας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία, για τις πολύτιμες συμβουλές του στον τομέα των Πεπερασμένων Στοιχείων και τη φιλοξενία στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, στο οποίο και είναι υπεύθυνος.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Αντωνιάδη Αριστομένη, για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και τη βοήθεια στη διόρθωση της εργασίας.

Ξεχωριστές ευχαριστίες στο Μαυριγιαννάκη Στέλιο, τόσο για τις οδηγίες και τη συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας, όσο και για την ψυχολογική υποστήριξη.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους ξεχωριστούς φίλους μου, επειδή ήταν εκεί όταν τους χρειαζόμουν.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ.....	3
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2.2 ΓΙΑΤΙ ΓΙΝΕΤΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	4
2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	5
2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	6
3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΙΑΛΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	8
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
3.2 ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS	8
3.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ	9
3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΦΙΑΛΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	14
3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	16
3.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΠΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΑΝ.....	18
4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	19
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	19
4.2.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών	21
4.2.2 Η Μέθοδος των Συνοριακών Συνθηκών	21
4.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	21
4.3.1 Εισαγωγή.....	21
4.3.2 Ιστορία.....	22
4.3.4 Γενικά.....	23
4.3.5 Βασικά στοιχεία της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	24
4.3.6 Φιλοσοφία επίλυσης προβλημάτων ελαστικότητας με τη ΜΠΣ.....	25
5. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MARC	37
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	37
5.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MARC.....	38
5.3 ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ MARC	39
5.4 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ MARC	40
5.5 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ MARC.....	41
5.6 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟ MARC	42
5.6.1 Διακριτοποίηση	42
5.6.3 Συνοριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες.....	45
5.6.4 Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες υλικών	46
5.6.5 Οι λειτουργίες Loadcases και Jobs.....	47
5.6.6 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	47
6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΣΤΟ MARC	48
6.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ MARC	48
6.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΣΤΟ MARC	50
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	63
7.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	64
7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	76
7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα προϊόντα παράγονται, διακινούνται και χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους λόγω των ιδιοτήτων τους. *Σχεδιασμός προϊόντος* ονομάζεται η διαδικασία της δημιουργίας των σχεδίων που χρειάζονται για τη βιομηχανική παραγωγή ενός προϊόντος.

Στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή, οι κατασκευαστές ενός προϊόντος συνήθως δεν είναι οι ίδιοι με τους σχεδιαστές του. Σε ένα εργοστάσιο, η παραγωγή των προϊόντων γίνεται με βάση ένα σχέδιο το οποίο έχει δημιουργηθεί από το σχεδιαστικό τμήμα της εταιρίας ή από ένα εξωτερικό σχεδιαστικό γραφείο. Το σχέδιο περιγράφεται από τεσσάρων ειδών δεδομένα: το σχήμα και τις διαστάσεις του προϊόντος, τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένο κάθε τμήμα του, από τις κατεργασίες που πρέπει να γίνουν για τη δημιουργία του και τέλος από τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να συναρμολογηθούν τα τμήματα μεταξύ τους.

Ο σχεδιασμός προϊόντος αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης διαδικασίας που ονομάζεται *ανάπτυξη προϊόντος*. Η ανάπτυξη προϊόντος συνδυάζει την ανάπτυξη των σχεδίων ενός καινούριου προϊόντος με τα σχέδια για την παραγωγή του, τη διανομή και τις πωλήσεις (Roozenburg, Eekels, 1991).

Η ανάπτυξη προϊόντος αποτελεί και αυτή τμήμα μίας ακόμη ευρύτερης διαδικασίας που ονομάζεται *βιομηχανική καινοτομία*. Η βιομηχανική καινοτομία συμπεριλαμβάνει όλες τις διαδικασίες που προηγούνται της υιοθέτησης ενός νέου προϊόντος από την αγορά (ή την εφαρμογή μίας νέας διαδικασίας παραγωγής). Αυτές είναι η βασική και εφαρμοσμένη έρευνα, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη, η έρευνα αγοράς, ο προγραμματισμός αγοράς, η παραγωγή, η διανομή, οι πωλήσεις και η υποστήριξη του προϊόντος μετά την πώληση.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες σχετίζονται άμεσα με τον *κύκλο ζωής* του προϊόντος. Ένα προϊόν περνάει από αρκετά στάδια κατά τη διάρκεια της ζωής του. Αυτά τα στάδια διαφέρουν ανάμεσα στα διάφορα προϊόντα, ανάλογα με την αποδοτικότητά τους και την τακτική πωλήσεων της εταιρίας. Σε γενικές γραμμές όμως υπάρχουν τέσσερα στάδια: η εισαγωγή στην αγορά, η ανάπτυξη, η ωρίμανση και η απόρριψη.

Σε όλη αυτή τη διαδικασία της βιομηχανικής καινοτομίας το στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος είναι ένα από τα σημαντικότερα. Εκεί θα καθοριστούν τα πιο βασικά στοιχεία του προϊόντος, όπως το σχήμα και οι διαστάσεις του, το χρώμα, τα υλικά από τα οποία θα αποτελείται και όλες οι ιδιότητες που θα το κάνουν ελκυστικό για τον αγοραστή.

Η παρούσα εργασία σχετίζεται με αυτό το στάδιο και εξετάζει παραμέτρους που επηρεάζουν αρκετούς ακόμη τομείς της βιομηχανικής καινοτομίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται ένας έλεγχος αντοχής φιαλών οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με περιβαλλοντικά κριτήρια. Η λογική στην οποία έχει στηριχτεί ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων φιαλών είναι ότι θα

πρέπει να έχουν διαστάσεις τέτοιες που να ελαχιστοποιούν τον όγκο του χρησιμοποιούμενου υλικού, για ίδιο όγκο περιεχομένου. Οι καταπονήσεις στις οποίες υποβάλλονται είναι αυτές που θεωρητικά υπάρχουν κατά τη δεματοποίησή τους, σε μία απλοποιημένη μορφή, και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των αντοχών είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το σχεδιαστικό πακέτο στο οποίο δημιουργήθηκαν οι φιάλες είναι το πακέτο στερεάς μοντελοποίησης SolidWorks, ενώ το πακέτο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση είναι το Marc.

2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σημερινή εποχή υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με τις τρομακτικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει η ανθρώπινη δραστηριότητα στο περιβάλλον. Δεν είναι δυνατόν κανείς πλέον να πιστεύει ότι η τεχνολογική και βιομηχανική κοινότητα μπορεί να υπάρχει ως ανεξάρτητη οντότητα ενός πολύ μεγαλύτερου συστήματος από το οποίο μπορούν να εξάγονται πρώτες ύλες και στη συνέχεια να απορρίπτονται απόβλητα. Η κοινωνία δημιουργεί και καταναλώνει τόσο μεγάλο μέρος από τα αποθέματα της γης, που είναι απαραίτητο να γίνεται προσεκτική μελέτη όλων των περιβαλλοντικών επιδράσεων κάθε απόφασης που λαμβάνεται. Ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός (DFE: Design For Environment) είναι μία προσέγγιση στο σχεδιασμό προϊόντος για την ελαχιστοποίηση των βλαβερών επιπτώσεων του προϊόντος στο περιβάλλον.

Τα διάφορα προϊόντα μπορεί να έχουν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους, είτε λόγω των διαδικασιών παραγωγής που μπορεί να είναι ιδιαίτερα ρυπογόνες, είτε λόγω μεγάλης κατανάλωσης πρώτων υλών. Μπορούν επίσης να έχουν ανεπιθύμητες επιπτώσεις λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας ή ακόμη και λόγω της μεγάλης διάρκειας ημι-ζωής τους κατά την αποσύνθεση. Επομένως, πρέπει να ληφθεί υπόψη όλος ο κύκλος ζωής του προϊόντος, από τη δημιουργία, μέχρι τη χρήση και την αποσύνθεση. Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής υπάρχουν πολλά γεγονότα που δημιουργούν μόλυνση στο περιβάλλον και πολλές ευκαιρίες για ανακύκλωση, ανακατασκευή, επαναχρησιμοποίηση και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Σχήμα 2.1). Απλά η χρήση μη τοξικών υλικών δεν είναι αρκετή. Πρέπει λοιπόν οι σχεδιαστές των προϊόντων να επιστρατεύσουν όλη την εφευρετικότητά τους για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της δημιουργίας περιβαλλοντικά φιλικών προϊόντων (Otto, Wood, 2001).



2.2 ΓΙΑΤΙ ΓΙΝΕΤΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός αποτελεί μία πολύ σημαντική δραστηριότητα για την ομάδα σχεδιασμού, λόγω του ότι οι βλαβερές περιβαλλοντικές επιδράσεις, στις περισσότερες περιπτώσεις, επηρεάζονται από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού ενός προϊόντος. Όπως και με το κόστος παραγωγής, μία λογική εκτίμηση είναι ότι το 80% της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από ένα προϊόν προκύπτει αφού έχει ολοκληρωθεί το 20% του σχεδιασμού.

Από επιχειρηματική άποψη, οι λόγοι για τους οποίους μία ομάδα σχεδιασμού θα πρέπει να επιλέξει να σχεδιάσει ένα προϊόν που να ικανοποιεί κάποια περιβαλλοντικά κριτήρια, είναι ότι οι σύγχρονοι καταναλωτές απαιτούν προϊόντα με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Καθώς ο πληθυσμός σε όλο τον κόσμο συνειδητοποιεί τις επιδράσεις της κοινωνίας, προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τις επιπτώσεις των δραστηριοτήτων του στο περιβάλλον. Επομένως, η δημιουργία ενός προϊόντος που είναι λιγότερο βλαβερό για το περιβάλλον, του δίνει αυτόματα ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην αγορά.

Οι κυβερνήσεις παγκοσμίως ζητούν πλέον από τις βιομηχανίες να αναπτύξουν διαδικασίες παραγωγής φιλικές προς το περιβάλλον, ενώ η νομοθεσία γύρω από αυτά τα θέματα γίνεται διαρκώς πιο αυστηρή. Επίσης, έχουν θεσμοθετηθεί κάποιοι κανονισμοί

(standards) οι οποίοι υποστηρίζουν τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό σαν πρακτική. Στη σύγχρονη εποχή ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός αποτελεί ανάγκη.

2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

Στην πιο βασική του προσέγγιση, ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός ενός προϊόντος μπορεί να γίνει ακολουθώντας κάποιες γενικές γραμμές οι οποίες οδηγούν το σχεδιαστή να δημιουργήσει ένα νέο προϊόν το οποίο θα προκαλεί μικρή ζημιά στο περιβάλλον. Η γερμανική εταιρία VDI (1993), η βρετανική ICER (1993), το πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ (Dowie και Simon, 1994), η General Electric (1995), η Fiskel (1996) και η Bras (1998), όλες τους παρέχουν τέτοιου είδους γενικές γραμμές όσον αφορά το σχεδιασμό του προϊόντος: δομή του προϊόντος, επιλογή υλικών κλπ.

Αυτές οι γενικές γραμμές είναι πολύ απλές και αποτελεσματικές όταν εφαρμόζονται. Αφού αναπτυχθεί μία αρχική ιδέα, αρχίζουν να λαμβάνονται υπόψη οι γενικές γραμμές για τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Για κάθε μία υπάρχει συζήτηση για το κατά πόσο το προϊόν την τηρεί και πως μπορεί να βελτιωθεί όσον αφορά τη συγκεκριμένη παράμετρο. Καθώς προστίθενται και οι τελευταίες λεπτομέρειες στο προϊόν, η ίδια διαδικασία πρέπει να ξαναγίνει, για να είναι βέβαιο ότι το προϊόν θα αναπτυχθεί σύμφωνα με αυτές τις γενικές γραμμές.

Με βάση αυτή την προσέγγιση έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές τεχνικές για τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό προϊόντος, όπως η μέθοδος εκτίμησης του σταθμισμένου αθροίσματος, η μέθοδος εκτίμησης του κύκλου ζωής και η βασική μέθοδος εκτίμησης ενός περιβαλλοντικά υπεύθυνου προϊόντος.

Για την υποστήριξη των παραπάνω μεθόδων χρειάζονται ακόμη τεχνικές επανασχεδιασμού, για να βελτιωθεί η εκτίμηση των επιδόσεων των προϊόντων σύμφωνα με την κάθε μέθοδο. Έχουν αναπτυχθεί εργαλεία που βοηθούν τον επανασχεδιασμό ενός προϊόντος για να βελτιώσουν τις επιπτώσεις του στο περιβάλλον. Υπάρχουν αρκετές βασικές προσεγγίσεις:

1. Σχεδιασμός για ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού
2. Σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση
3. Σχεδιασμός για ανακύκλωση
4. Σχεδιασμός για ανακατασκευή
5. Σχεδιασμός για ελαχιστοποίηση των βλαβερών υλικών

6. Σχεδιασμός για εξοικονόμηση ενέργειας

7. Σχεδιασμός για ικανοποίηση των κανονισμών και των νόμων

Στο σχεδιασμό για *ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού* σχεδιάζονται συστήματα που να χρησιμοποιούν την ελάχιστη ποσότητα υλικού. Στο σχεδιασμό για *αποσυναρμολόγηση* σχεδιάζονται τα υποσυστήματα των προϊόντων με τέτοιο τρόπο που να μπορούν να αποσυναρμολογηθούν από το σύστημα και να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Στο σχεδιασμό για *ανακύκλωση* τα προϊόντα σχεδιάζονται έτσι που να μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν. Στο σχεδιασμό για *ανακατασκευή* τα τμήματα που αποτελούν ένα προϊόν σχεδιάζονται ώστε να μπορούν, αφού αποσυναρμολογηθούν, να καθαριστούν, να επιθεωρηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Στο σχεδιασμό για *ελαχιστοποίηση των βλαβερών υλικών*, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο προϊόν είναι όσο το δυνατόν λιγότερο βλαβερά για το περιβάλλον. Στο σχεδιασμό για *εξοικονόμηση ενέργειας*, που είναι συνήθως και από τα πιο σημαντικά στάδια στην ανάπτυξη ενός προϊόντος ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας από το προϊόν. Τέλος, στο σχεδιασμό για *ικανοποίηση των κανονισμών και των νόμων* εξασφαλίζεται η συμβατότητα του προϊόντος με τους νόμους και τους κανονισμούς πιστοποίησης (Otto, Wood, 2001).

2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους του περιβαλλοντικού σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του υλικού που χρησιμοποιείται σε ένα προϊόν. Κάτι τέτοιο είναι πολύ αποτελεσματικό, ιδιαίτερα για υλικά πολύ βλαβερά για το περιβάλλον. Γενικά η μείωση των χρησιμοποιούμενων υλικών μπορεί να επιτευχθεί σε τρεις περιοχές: στη δεματοποίηση και τη διανομή, στη διαδικασία παραγωγής και τέλος στο ίδιο το προϊόν.

Πολλά προϊόντα παραδίδονται σε συσκευασία μίας χρήσης, με διάφορα σχέδια και χρώματα, όπως τα κουτιά παπουτσιών, των ηλεκτρικών συσκευών και των ειδών οικοσκευής. Αυτά τα κουτιά όμως μπορούν να μειωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, πολλές εταιρίες υπολογιστών έχουν προγράμματα για να δέχονται πίσω τα κουτιά αποστολής και το υλικό που χρησιμοποιείται για την προστασία των συσκευών. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται πολύ ο όγκος των υλικών συσκευασίας (Otto, Wood, 2001).

Εκτός από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία του προϊόντος και για τη διαδικασία παραγωγής, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν οι βλαβερές επιπτώσεις στο περιβάλλον από το ίδιο το προϊόν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας εξαρτήματα που δεν είναι κατασκευασμένα από ιδιαίτερα επιβλαβή υλικά, ή μειώνοντας τον όγκο του υλικού που απαιτείται για το προϊόν. Κάθε τμήμα του παραγόμενου προϊόντος πρέπει να

εξετάζεται μήπως κάποια εξαρτήματά του μπορούν να αντικατασταθούν από άλλα πιο φιλικά προς το περιβάλλον.

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος είναι η συμβατότητα των εξαρτημάτων σε μία συναρμολόγηση. Δύο υλικά είναι συμβατά αν μπορούν να επεξεργαστούν μαζί, ως αναμιγμένα υλικά. Αν είναι συμβατά, τότε μπορεί να μη χρειαστούν αποσυναρμολόγηση. Γενικά, η διατήρηση των υλικών σε μία συναρμολόγηση όσο το δυνατόν πιο αγνά και χωρίς προσμείξεις, βελτιώνει τη δυνατότητα ανακύκλωσής τους.

Η επίτευξη της συμβατότητας των υλικών είναι αρκετά απλή ως σκέψη. Το μόνο που χρειάζεται είναι βασικές γνώσεις σχεδιασμού, ώστε να μπορούν να τροποποιηθούν τα σχέδια και να δημιουργηθεί ένα λειτουργικό προϊόν. Από την άλλη, οι αλλαγές που είναι απαραίτητες για να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη δεματοποίηση, τη διαδικασία παραγωγής και τη διανομή, χρειάζονται πιο ανοικτή σκέψη. Αυτό το γεγονός κάνει την προσπάθεια δύσκολη και υψηλής επικινδυνότητας. Είναι όμως πολύ αποδοτική όταν είναι επιτυχής. Η μείωση του όγκου των χρησιμοποιούμενων υλικών στην κατασκευή ενός προϊόντος και η απαλοιφή κάποιων σταδίων της διαδικασίας παραγωγής οδηγεί στη μείωση του κόστους παραγωγής και έτσι οι εταιρίες πάντα θα έχουν ένα κίνητρο να χρησιμοποιούν αυτή την προσέγγιση στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Το προϊόν όμως που παράγεται σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ελεγχθεί ώστε να ικανοποιεί στον ίδιο βαθμό με το αρχικό προϊόν τις απαιτήσεις αντοχής, ασφάλειας και εργονομίας. Στην παρούσα εργασία γίνεται ένας έλεγχος των αντοχών φιαλών οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού.

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΙΑΛΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια του περιβαλλοντικού σχεδιασμού των προϊόντων εκπονήθηκε από τον Κουρουμπλάκη Μανόλη μία μεταπτυχιακή διατριβή με θέμα την παραμετρική σχεδίαση φιαλών με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου όγκου υλικού. Ο σχεδιασμός των φιαλών έγινε στο σχεδιαστικό πακέτο Solidworks και για την εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων που ελαχιστοποιούν τον όγκο του υλικού αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε μία βιβλιοθήκη διαφόρων τύπων επιμέρους τμημάτων φιαλών (λαιμοί, κορμοί, πάτοι και χερούλια) και έγινε η αυτοματοποίηση της διαδικασίας δημιουργίας ολοκληρωμένων φιαλών στο πακέτο CAD SolidWorks. Έπειτα, κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic, το BOMVET, το οποίο λαμβάνοντας τα απαραίτητα δεδομένα από το SolidWorks προσδιορίζει τις επιπτώσεις που έχει η μεταβολή διαστάσεων στον όγκο υλικού του αντικειμένου.

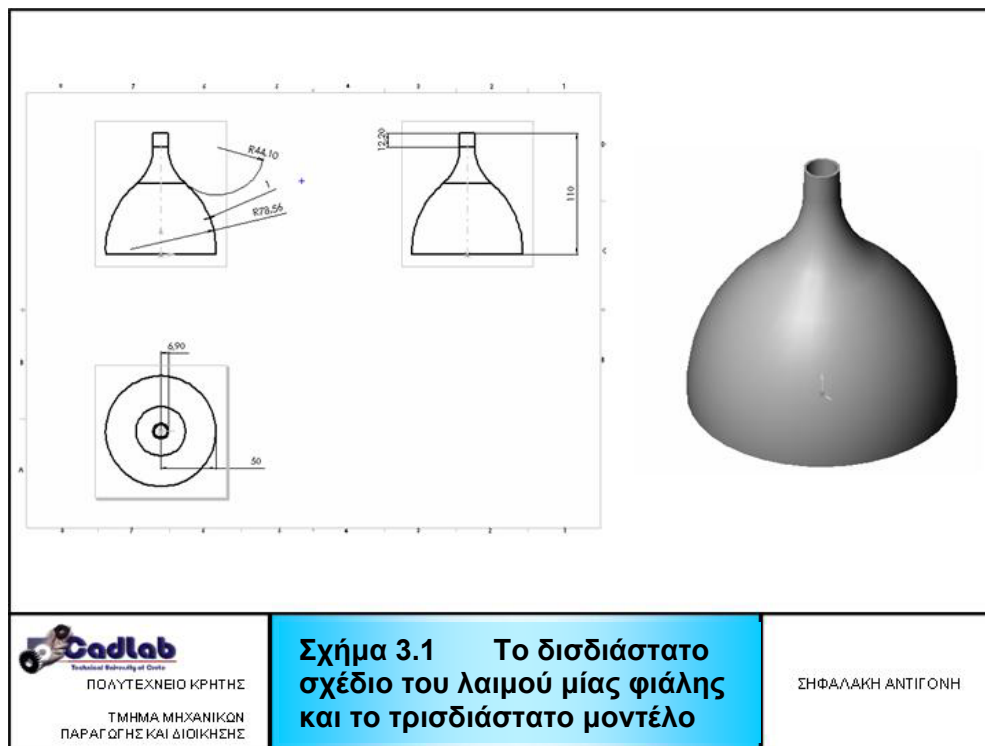
Οι φιάλες είναι προϊόντα που απαιτούν πρώτες ύλες και ενέργεια για την παραγωγή και την ανακύκλωσή τους. Συνεπώς, επιβαρύνουν το περιβάλλον με τις διαδικασίες αυτές. Περισσότερο υλικό (μέταλλα, γυαλί, πλαστικό) ανά φιάλη έχει ως αποτέλεσμα περισσότερη κατανάλωση πρώτης ύλης και ενέργειας κατά την παραγωγή και περισσότερη κατανάλωση ενέργειας για εξαγωγή πρώτων υλών, μεταφορά και ανακύκλωση. Επιπλέον, μειώνεται ο ρυθμός παραγωγής και αυξάνει το κόστος μεταφοράς των γεμάτων φιαλών στους χώρους κατανάλωσης. Από τα παραπάνω γίνεται ξεκάθαρη η ανάγκη για την ανάπτυξη μίας μεθόδου σχεδιασμού φιαλών που θα οδηγήσει σε μείωση του όγκου υλικού ανά φιάλη, άρα και σε μικρότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

3.2 ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ SOLIDWORKS

Το SolidWorks είναι ένα πακέτο CAD με παραμετρικά χαρακτηριστικά μοντελοποίησης που χρησιμοποιεί το περιβάλλον εργασίας των Windows της Microsoft. Αποτελεί ένα σπουδαίο εργαλείο για τη δημιουργία μοντέλων, πειραματισμό με τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις τους, και εξαγωγή λεπτομερών μηχανολογικών σχεδίων τους με απλό τρόπο. Η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης των αντικειμένων, η παραμετρική μοντελοποίηση και η εφαρμογή των μορφολογικών χαρακτηριστικών, είναι ορισμένες από τις πολύ σημαντικές δυνατότητες του SolidWorks.

Με το SolidWorks είναι δυνατή η δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων και όχι μόνο δισδιάστατων σχεδίων αυτών. Αρχικά πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του

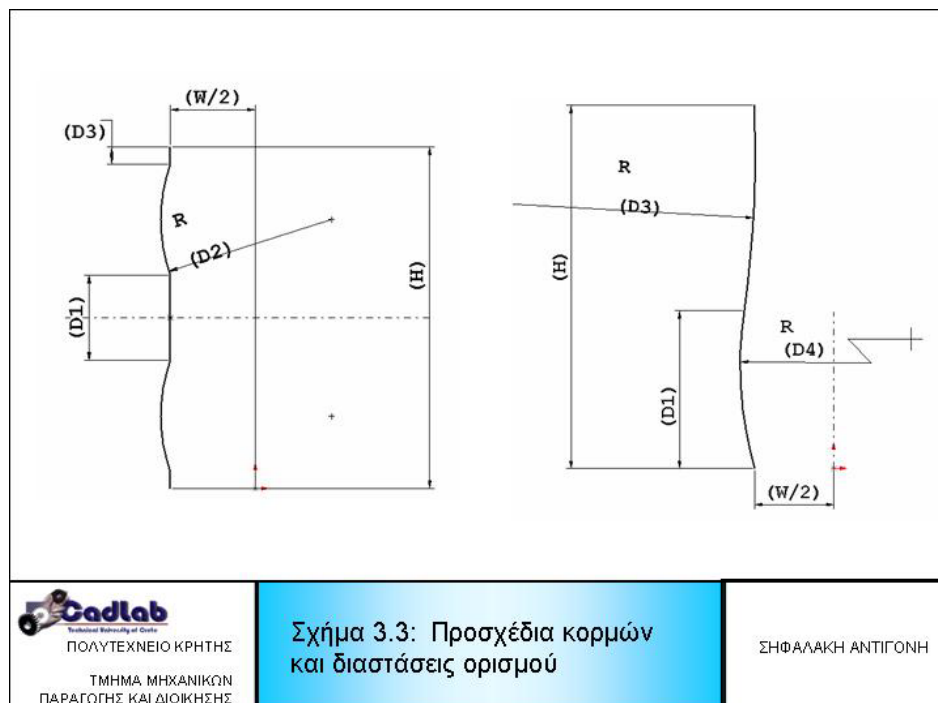
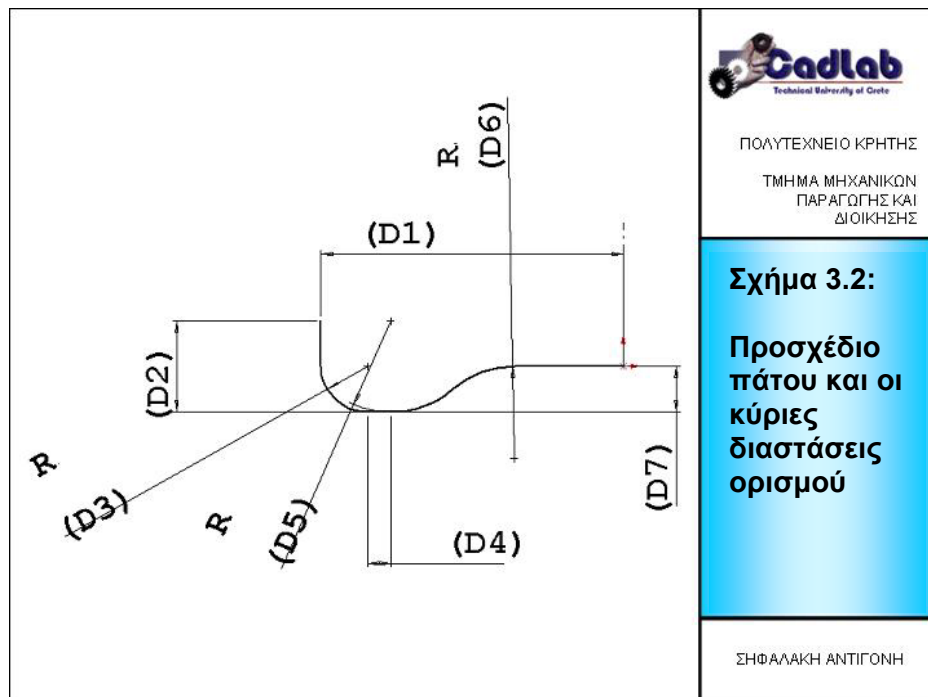
τρισδιάστατου μοντέλου και στη συνέχεια, με μία απλή και αυτοματοποιημένη διαδικασία, δημιουργείται το αντίστοιχο μηχανολογικό του σχέδιο (Σχήμα 3.1). Επίσης, μία πολύ σημαντική δυνατότητα που παρέχει το πρόγραμμα είναι αυτή της συναρμολόγησης πολλών διαφορετικών τεμαχίων για την κατασκευή ενός πιο πολύπλοκου τρισδιάστατου μοντέλου.

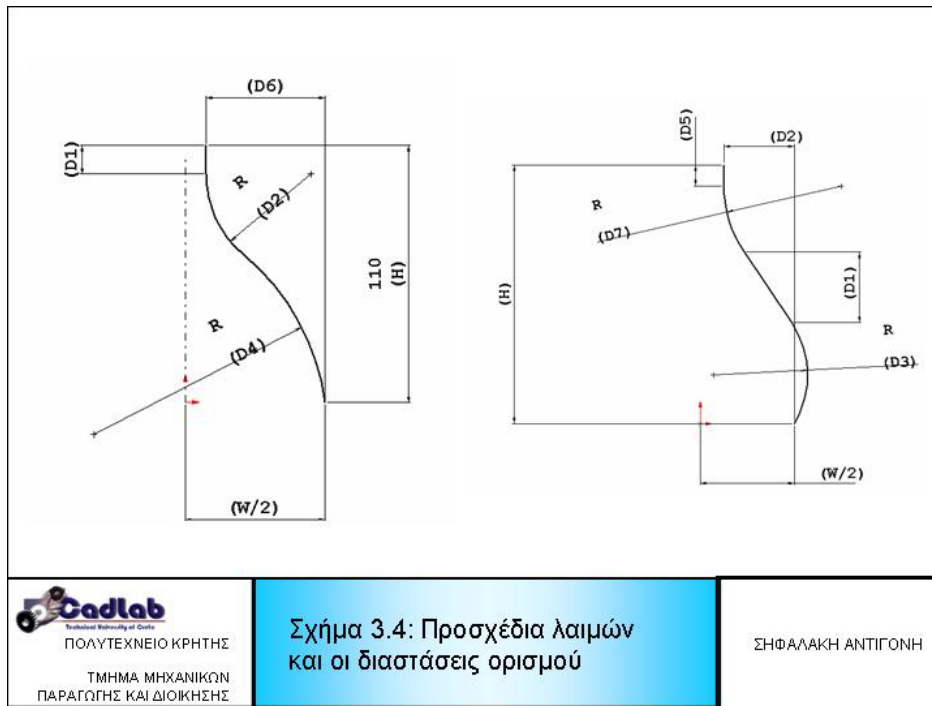


3.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ

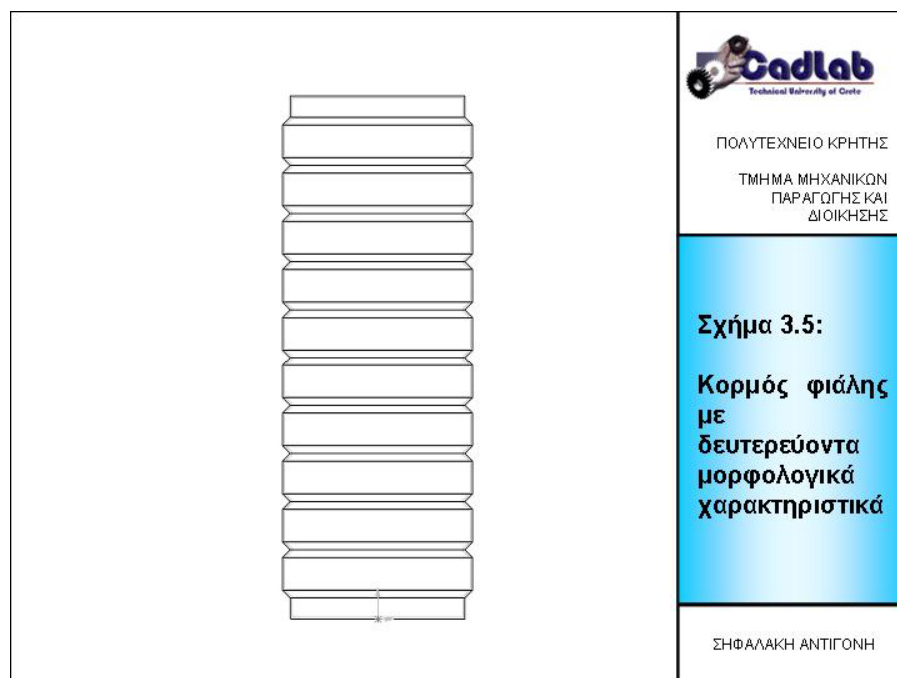
Η διαδικασία σχεδιασμού μίας φιάλης περιλαμβάνει το σχεδιασμό των επιμέρους τμημάτων της και τη συναρμολόγησή τους. Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται είναι ο κορμός, ο λαιμός και ο πάτος. Συνολικά για την εργασία του Μανώλη Κουρουμπλάκη σχεδιάστηκαν 70 επιμέρους τεμάχια. Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής επιλέχθηκαν κάποια από αυτά τα τεμάχια και συναρμολογήθηκαν, με στόχο να προκύψουν φιάλες με διαφορετικές διατομές και αναλογίες διαστάσεων ώστε να συγκριθούν ως προς τις αντοχές τους σε κατακόρυφες καταπονήσεις.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η σχεδίαση με μορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά χωρίζονται σε κύρια και δευτερεύοντα, ανάλογα με τη λειτουργία τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά επηρεάζουν τον όγκο της φιάλης και στην πραγματικότητα αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία των τεμαχίων που την αποτελούν. Παρακάτω παρουσιάζονται προσχέδια των τεμαχίων (σχήματα 3.2, 3.3, 3.4). Παρατηρείται ότι έχει σχεδιαστεί μια απλή ανοιχτή καμπύλη, η οποία όταν κινηθεί πάνω σε μία καμπύλη οδηγό, δίνει το επιθυμητό σώμα. Με τον τρόπο αυτό σχεδιάστηκαν όλα τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία.





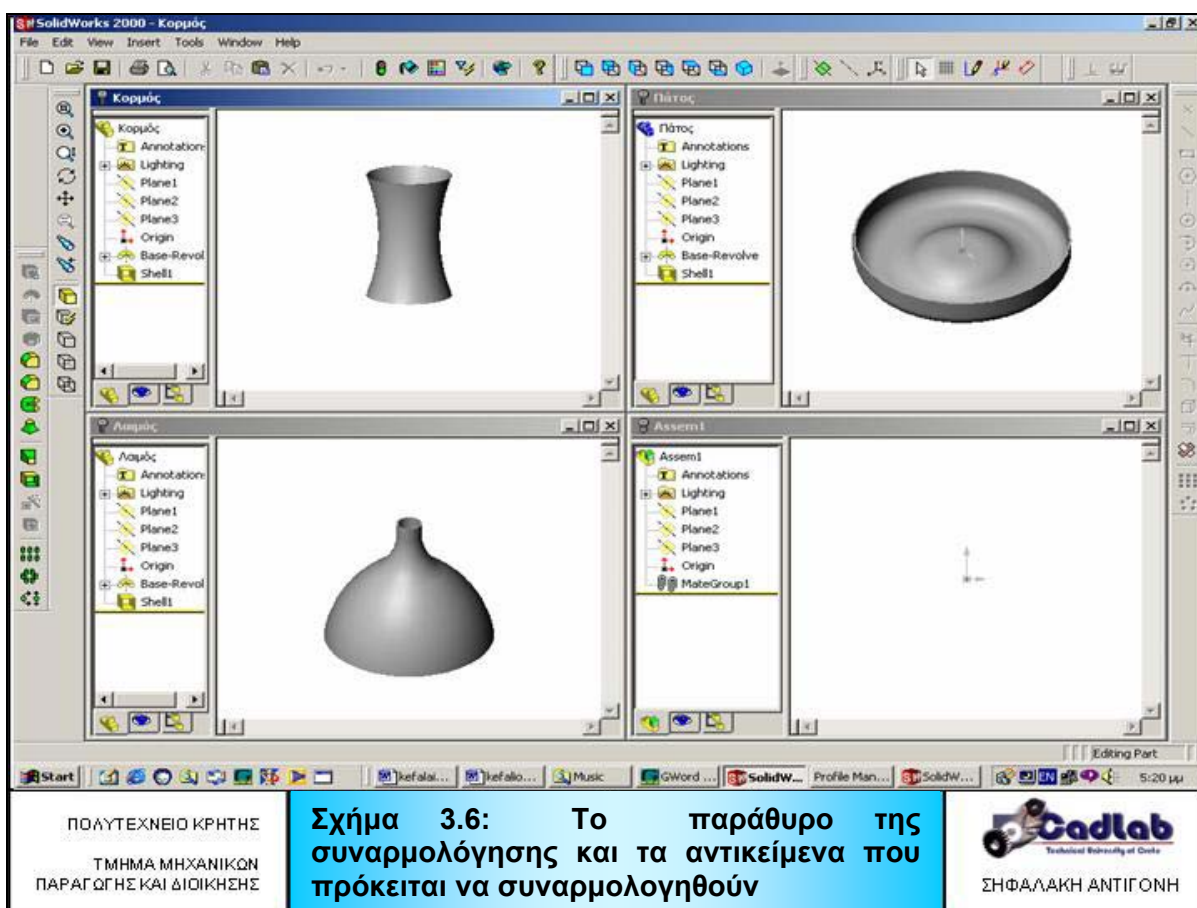
Τα δευτερεύοντα μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι οι εσοχές και οι προεξοχές στην εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος και γενικότερα όλα τα επιπλέον χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν το προϊόν και δημιουργούνται στη δεύτερη φάση του σχεδιασμού. Χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντοχής του, την καλύτερη αισθητική του εμφάνιση και για άλλους λόγους. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κορμός μίας φιάλης με πολλαπλά μορφολογικά χαρακτηριστικά που προστέθηκαν στο κυρίως σώμα του (Σχήμα 3.5).



Αφού έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός των επιμέρους τεμαχίων της φιάλης, ακολουθεί η συναρμολόγησή τους. Η διαδικασία αυτή γίνεται αρκετά απλή με τη βοήθεια των εργαλείων που παρέχει το Solidworks και ουσιαστικά στηρίζεται στην ταύτιση μεταξύ επιπέδων και αξονικών γραμμών των επιμέρους τεμαχίων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση φιάλης με κυκλική διατομή, προκειμένου να συναρμολογηθεί ο κορμός με το λαιμό της, αρκεί να ταυτιστούν οι αξονικές γραμμές των δύο τεμαχίων και το επίπεδο του λαιμού που εφάπτεται της κάτω βάσης του, με το επίπεδο του κορμού που εφάπτεται της άνω βάσης του.

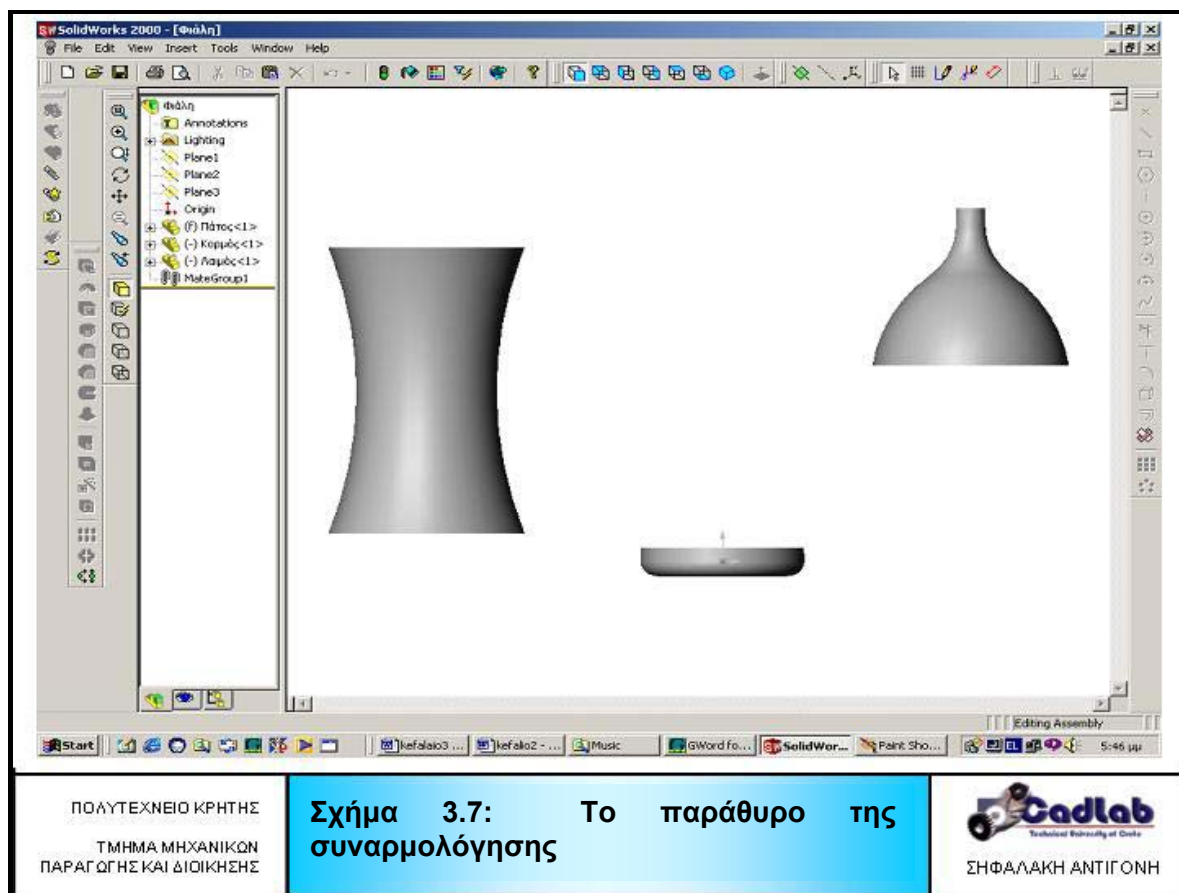
Όμοια εκτελείται η διαδικασία και για τη συναρμολόγηση κορμού με πάτο.

Η συναρμολόγηση λαμβάνει χώρα σε ένα ξεχωριστό αρχείο του προγράμματος, το λεγόμενο Assembly (συναρμολόγηση). Στο παράθυρο της συναρμολόγησης πραγματοποιείται η ταυτοποίηση των επιφανειών και των αξόνων των τεμαχίων, τα οποία εισάγονται εκεί με μία απλή διαδικασία. Αρχικά, ο χρήστης ανοίγει το παράθυρο της συναρμολόγησης και τα αντικείμενα που πρόκειται να συναρμολογηθούν (Σχήμα 3.6)



Στη συνέχεια, τα αντικείμενα τοποθετούνται στο κυρίως παράθυρο της συναρμολόγησης. Είναι βασικό να αναφερθεί ότι οποιαδήποτε αλλαγή στα επιμέρους

τεμάχια εμφανίζεται άμεσα και στη συναρμολόγηση. Παρακάτω παρουσιάζεται το παράθυρο της συναρμολόγησης με τα τεμάχια, πριν να γίνει η συναρμολόγηση της φιάλης (Σχήμα 3.7).



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Σχήμα 3.7: Το παράθυρο της συναρμολόγησης

Cadlab
Technical University of Crete
ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Η ταύτιση των επιφανειών και των αξόνων γίνεται με τη εργαλείο **mate** του προγράμματος. Το εργαλείο αυτό επιτρέπει στο χρήστη να συσχετίσει οντότητες που ανήκουν σε διαφορετικά επιμέρους τεμάχια και με αυτόν τον τρόπο να επιτευχθεί η συναρμολόγηση. Αφού εκτελεστεί αυτή η διαδικασία για τα τεμάχια που θα συναρμολογηθούν, προκύπτει το τελικό αντικείμενο, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.



Αφού έχει συναρμολογηθεί το αντικείμενο, μπορεί να γίνει επιπλέον επεξεργασία, μέχρι να αποκτήσει την τελική του μορφή.

3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΦΙΑΛΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

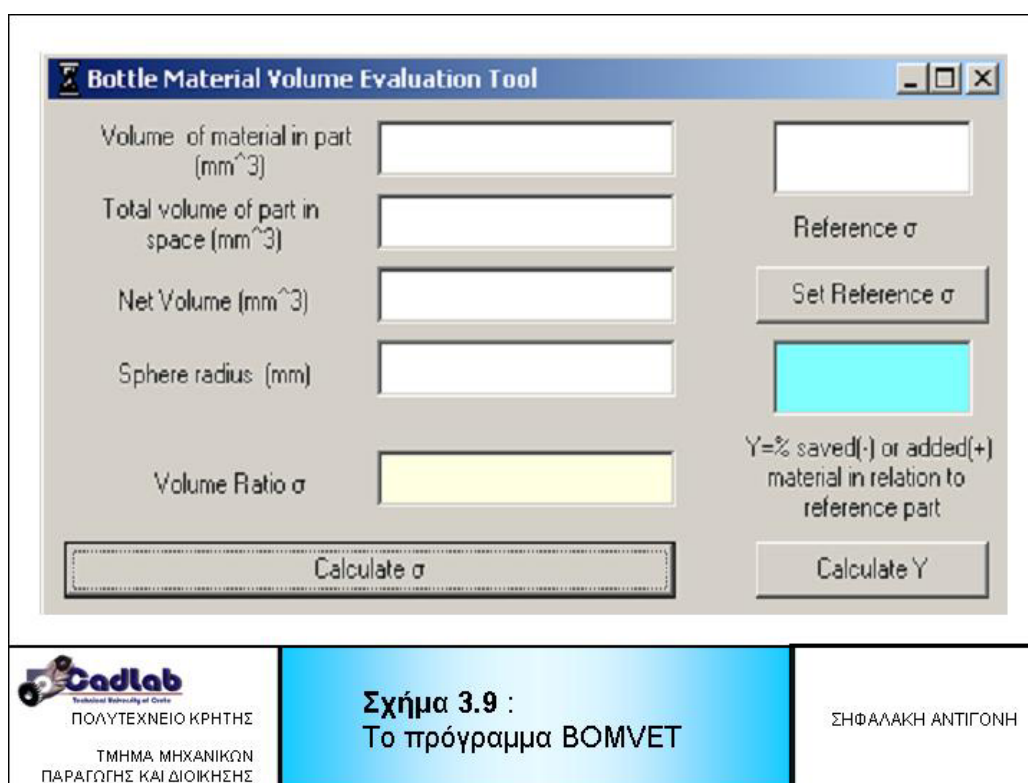
Η αξιολόγηση των φιαλών ή των επιμέρους τεμαχίων τους ως προς τον όγκο του υλικού τους, βασίζεται στη σύγκρισή τους με μία σφαίρα ίσου πάχους και όγκου περιεχομένου με την φιάλη ή το επιμέρους τμήμα της. Η σφαίρα επιλέχθηκε ως μέτρο σύγκρισης λόγω του ότι είναι το γεωμετρικό σχήμα με τη μικρότερη επιφάνεια, άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι πρόκειται για το ιδανικότερο σχήμα μίας φιάλης. Βέβαια, η σχεδιαστική ταύτιση της φιάλης με μία σφαίρα δεν επιτρέπεται, λόγω πρακτικών περιορισμών αλλά και για λόγους αισθητικής και εργονομίας. Μπορεί όμως κανείς να περιμένει ότι όσο το σχήμα της φιάλης προσεγγίζει αυτό της σφαίρας, τόσο καλύτερα θα είναι τα αποτελέσματα ως προς την εξοικονόμηση υλικού. Προκειμένου να γίνει η σύγκριση θα πρέπει το αντικείμενο που σχεδιάζεται, να είναι ένα κλειστό κέλυφος ομοιόμορφου πάχους, όπως είναι η σφαίρα.

Αυτό που στην πράξη υπολογίζεται είναι ένας συντελεστής, ο συντελεστής σ , ο οποίος εκφράζει το πόσο ο όγκος υλικού μιας φιάλης (ή ενός επιμέρους τμήματος αυτής) πλησιάζει τον όγκο υλικού μιας σφαίρας ίσου πάχους και όγκου περιεχομένου. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής σ είναι ίσος με το πηλίκο του όγκου υλικού της σφαίρας, $V_{\text{υλικού σφαίρας}}$, προς τον όγκο υλικού του τεμαχίου, $V_{\text{υλικού τεμαχίου}}$:

$$\sigma = \frac{V_{\text{υλικού σφαίρας}}}{V_{\text{υλικού τεμαχίου}}}$$

και είναι πάντα μικρότερος της μονάδας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής σ τόσο καλύτερο είναι το σχέδιο του αντικειμένου από άποψη εξοικονόμησης υλικού, δηλαδή τόσο περισσότερο υλικό εξοικονομείται.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή σ , αλλά και της εξοικονόμησης υλικού κατά τη σύγκριση δύο διαφορετικών αντικειμένων, κατασκευάστηκε το πρόγραμμα **Bottle Material Volume Evaluation Tool (BOMVET)** σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6 .



Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9, με την εισαγωγή των κατάλληλων δεδομένων, το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα το συντελεστή σ και το Y (το ποσοστό εξοικονόμησης ή πρόσθεσης υλικού κατά τη σύγκριση δύο αντικειμένων).

Στο πλαίσιο “**Volume of material in part**” απεικονίζεται ο όγκος υλικού του αντικειμένου, $V_{\text{υλικού,τεμαχίου}}$, που σχεδιάζεται στο SolidWorks σε μονάδες mm^3 .

Στο πλαίσιο “**Total Volume of part in space**” απεικονίζεται ο όγκος του συμπαγούς αντικειμένου, $V_{\text{ολικό,τεμαχίου}}$, και στο πλαίσιο “**Net Volume**” ο όγκος περιεχομένου του αντικειμένου, $V_{\text{περιεχομένου}}$ σε μονάδες mm^3 .

Στο πλαίσιο “**Sphere radius**” απεικονίζεται η εσωτερική ακτίνα της σφαίρας, $R_{\sigma\phi, \epsilon\sigma}$ που έχει όγκο περιεχομένου και πάχος ίσο με τον όγκο περιεχομένου, $V_{\text{περιεχομένου}}$ και το πάχος του αντικειμένου. Τέλος στο πλαίσιο “**Volume Ratio**” απεικονίζεται ο συντελεστής σ .

Πατώντας το κουμπί “**Calculate σ** ” ενεργοποιείται ο κώδικας του προγράμματος και υπολογίζεται ο συντελεστής σ .

Το πρόγραμμα λαμβάνει αυτόματα τα απαραίτητα, για τον υπολογισμό του συντελεστή σ , δεδομένα από το SolidWorks.

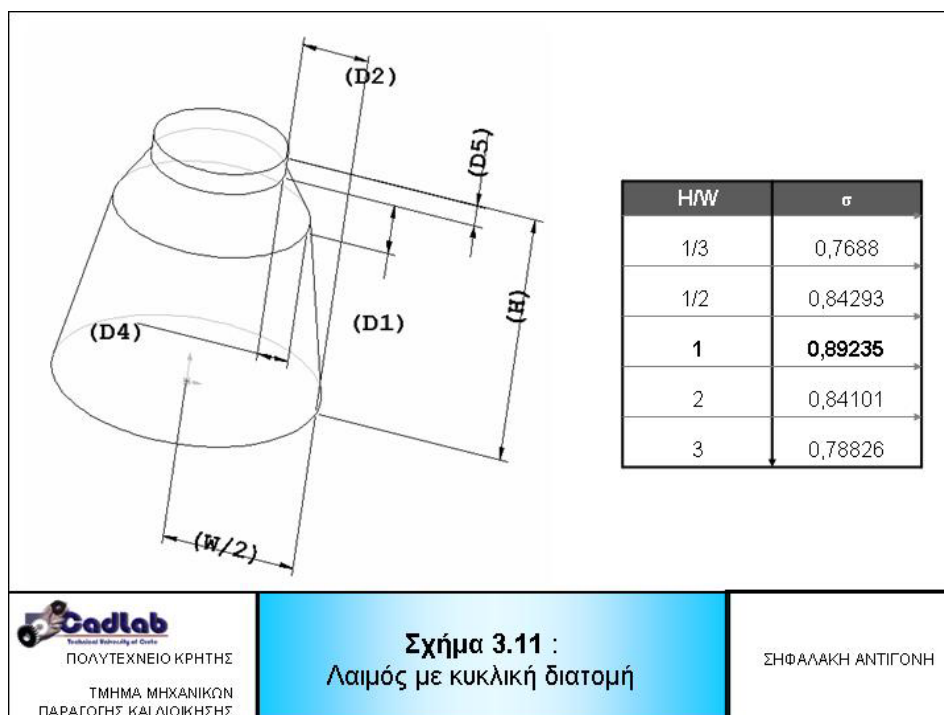
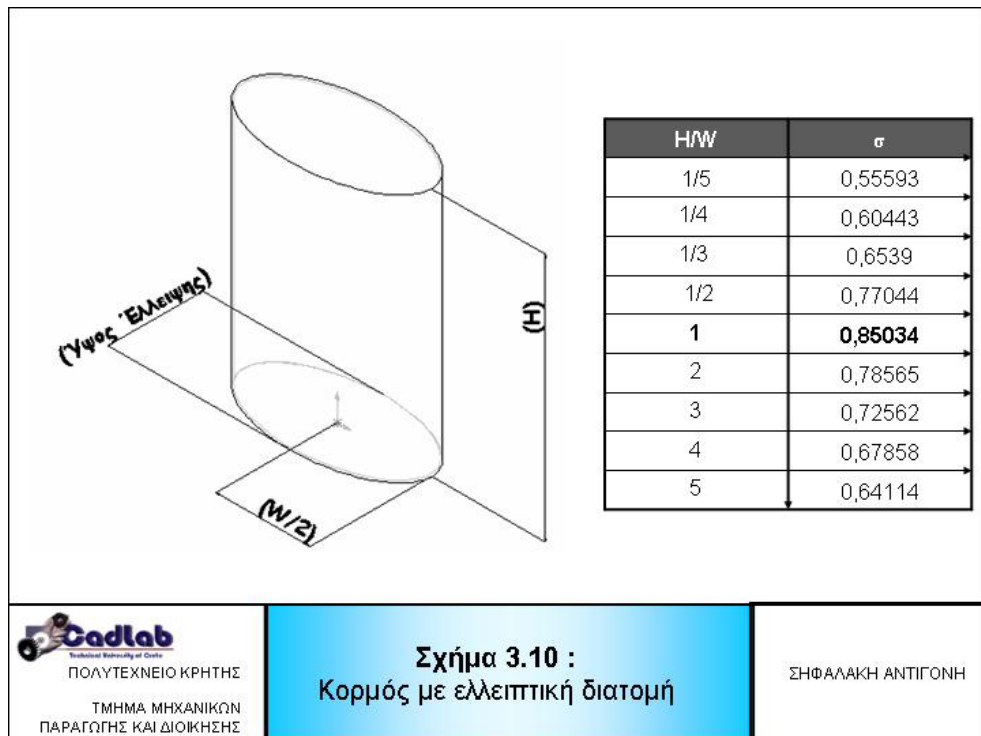
3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

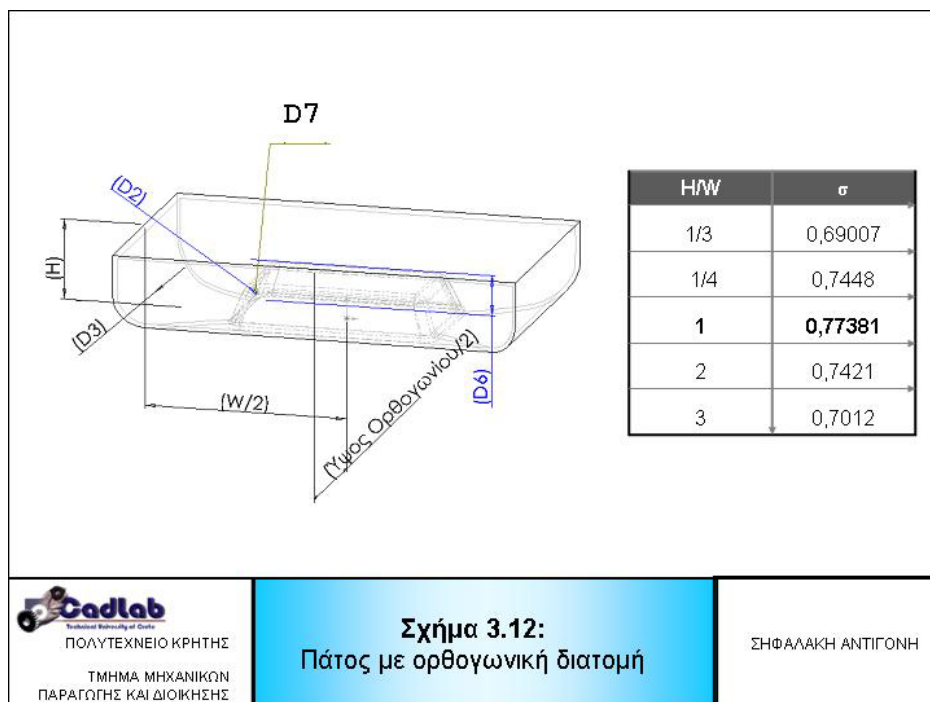
Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε έναν μεγάλο αριθμό από επιμέρους τεμάχια φιαλών (λαιμοί, κορμοί, πάτοι). Για κάθε ένα από αυτά βρέθηκαν οι συντελεστές που αντιστοιχούσαν σε διάφορες αναλογίες ύψους προς πλάτος, έτσι ώστε να διαπιστωθεί ποια αναλογία ήταν η πιο ικανοποιητική από άποψη εξοικονόμησης υλικού. Έπειτα εξεταζόταν η τιμή του συντελεστή όταν μεταβάλλονταν ορισμένες από τις διαστάσεις των τεμαχίων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη ήταν σε γενικές γραμμές τα εξής:

- Η βέλτιστη αναλογία ύψους προς πλάτος και αυτή που δίνει το μεγαλύτερο σ , είναι η 1/1, ενώ πολύ καλά αποτελέσματα δίνουν οι αναλογίες 2/1 και 1/2.
- Οι διατομές με το βέλτιστο σ είναι οι κυκλικές, ακολουθούν οι ελλειπτικές και τελευταίες έρχονται οι ορθογωνικές διατομές.
- Καθώς αυξάνει το ύψος μίας ελλειπτικής διατομής, βελτιώνεται ο συντελεστής σ μέχρι η διατομή να γίνει κυκλική. Το ίδιο συμβαίνει με τις ορθογωνικές διατομές, όπου το σ αυξάνεται, καθώς η διατομή τείνει να γίνει τετραγωνική.
- Στους κορμούς το σ αυξάνεται καθώς τείνουν να γίνουν κυλινδρικοί, ενώ μειώνεται όσο πιο πολύπλοκη μορφή έχουν (εσοχές και προεξοχές).
- Όπως αναμενόταν, το σ βελτιώνεται όσο τα αντικείμενα τείνουν να πάρουν σφαιρική μορφή.

Στα σχήματα 3.10, 3.11, 3.12 φαίνονται παραδείγματα από κάθε τμήμα φιάλης και πως διαμορφώνεται το σ με βάση την αναλογία ύψος / πλάτος.





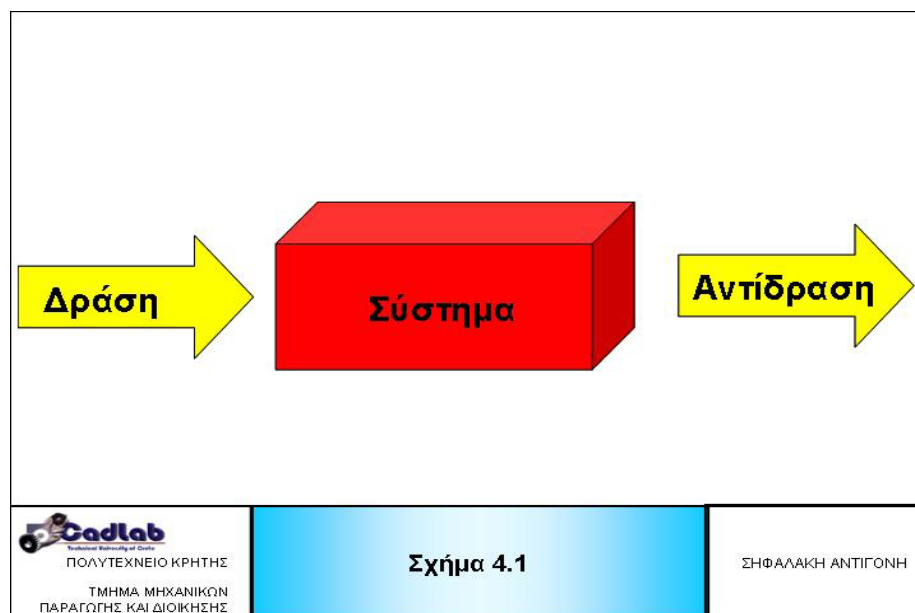
3.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΠΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΑΝ

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας συναρμολογήθηκαν δεκαεπτά φιάλες κυκλικής διατομής, πάχους 1mm, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, προκειμένου να ελεγχθεί η αντοχή τους σε κατακόρυφες καταπονήσεις. Οι φιάλες επιλέχθηκαν να έχουν όλες κυκλική διατομή για δύο κυρίως λόγους: α) Αποδείχτηκε ότι αυτές έχουν το βέλτιστο συντελεστή σ και β) Οι περισσότερες φιάλες που υπάρχουν στην αγορά είναι κυκλικής διατομής, επομένως είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί αυτή η περίπτωση. Οι φιάλες έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαφοροποιούνται αρκετά, όχι μόνο ως προς τις αναλογίες ύψους προς πλάτος, αλλά και ως προς τα γενικότερα χαρακτηριστικά τους, την πολυπλοκότητα της μορφής τους και την αισθητική. Επίσης, η χωρητικότητά τους κυμαίνεται από 200ml περίπου ως 4lt. Είναι δηλαδή φιάλες που χρησιμοποιούνται ευρέως στην καθημερινή ζωή. Τέλος, το υλικό από το οποίο παρασκευάζονται είναι το PET (Polyethylene Terephthalate) δηλαδή το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται στη σύγχρονη εποχή για φιάλες αυτής της κατηγορίας. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται όλες οι φιάλες σε τρισδιάστατη απεικόνιση, όπως δηλαδή κατασκευάστηκαν στο σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks καθώς και η διατομή τους, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση.

4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός σύγχρονων συστημάτων αποτελεί μία μεγάλη πρόκληση. Ένα βασικό πρόβλημα είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς κατασκευών ή δομικών στοιχείων κάτω από την επίδραση εξωτερικών αιτιών. Μία ερώτηση κλειδί που πρέπει να κάνει ο σχεδιαστής μηχανικός είναι η εξής: Ποια είναι η συμπεριφορά ενός συστήματος κατασκευής όταν υπόκειται σε εξωτερικές επιδράσεις (π.χ. δυνάμεις ή θερμοκρασιακές αλλαγές). Για παράδειγμα, αν είναι γνωστές οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα, είναι δυνατόν να βρεθούν οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις οι οποίες προκύπτουν σε αυτό;

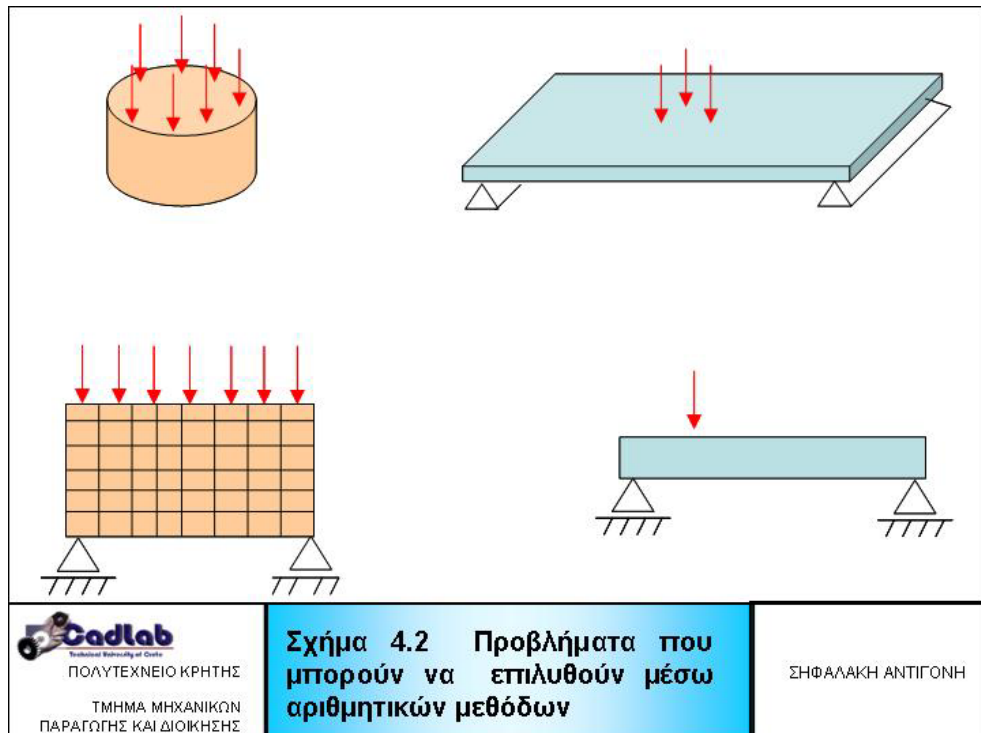


Οι σχεδιαστές πιθανόν να χρειάζεται να γνωρίζουν την συγκέντρωση των τάσεων σε μία δοκό, την κατανομή της θερμοκρασίας στα τοιχώματα ενός βραστήρα, τη δυναμική αντίδραση ενός κτιρίου σε ένα σεισμό ή τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία γύρω από ένα σύνολο μετασχηματιστών. Η μελέτη της απόκρισης των υλικών σε διάφορα αίτια είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Ανάλογα με το είδος του προβλήματος που εξετάζεται κάθε φορά, είναι δυνατόν κάποιοι παράγοντες να επιδρούν περισσότερο ή λιγότερο στον υπολογισμό και την εκτίμηση της συμπεριφοράς των υλικών. Οι εξισώσεις της φυσικής και της μηχανικής περιγράφουν τις σχέσεις ανάμεσα στις ζητούμενες ποσότητες.

4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι διαδικασίες επίλυσης προβλημάτων αντοχής υλικών περιλαμβάνουν αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους. Οι αναλυτικές μέθοδοι προϋποθέτουν την ύπαρξη αναλυτικής

λύσης των διαφορικών ή άλλων εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα (καταστατικές εξισώσεις) για συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες. Υπάρχουν τρεις τύποι αναλυτικής επίλυσης ενός προβλήματος: α) Η ακριβής επίλυση των διαφορικών εξισώσεων β) η προσεγγιστική επίλυση και γ) η ενεργειακή επίλυση (Reyleigh- Ritz). Αυτές οι μέθοδοι είναι εφικτές μόνο για απλές γεωμετρίες και απλά φορτία και συνοριακές συνθήκες. Ένα δείγμα των προβλημάτων που μπορούν να επιλυθούν μέσω των αριθμητικών μεθόδων φαίνεται στο Σχήμα 4.2



Με τον όρο αριθμητικές ή υπολογιστικές μέθοδοι εννοείται η αριθμητική επίλυση των καταστατικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα, για τις ίδιες συνοριακές συνθήκες. Η αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος προκύπτει τεμαχίζοντας το συνολικό σύστημα σε μικρότερα τμήματα (υποσυστήματα). Σε κάθε τμήμα υπολογίζονται οι λύσεις στις ζητούμενες εξισώσεις. Ο συνδυασμός των μερικών λύσεων από τα τμήματα του συστήματος δίνει μία προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα. Όποια διαδικασία και να ακολουθηθεί, συνήθως καταλήγει στην επίλυση ενός γραμμικού (και πιο σπάνια μη γραμμικού) συστήματος εξισώσεων, του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από τον τρόπο διαίρεσης του αρχικού πεδίου και από τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας κατά την επίλυση του προβλήματος. Οι βασικές αριθμητικές μέθοδοι είναι:

- ★ Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM)
- ★ Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method, BEM)

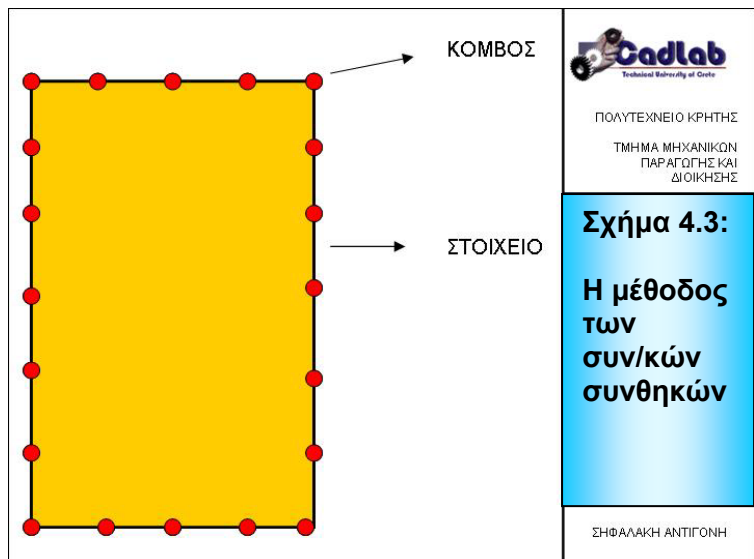
★ Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM)

4.2.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών

Στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, ο υπό μελέτη χώρος διαιρείται σε ένα ομοιόμορφο κάνναβο, έτσι ώστε να σχηματισθούν κελιά συνήθως του ίδιου μεγέθους. Η διαφορική εξίσωση εκφράζεται με βάση την τιμή της συνάρτησης σε κάθε σημείο του καννάβου, καθώς και τις παραγώγους της συνάρτησης γύρω από κάθε σημείο. Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού των παραγώγων σε κάθε σημείο του καννάβου (forward, backward, κ.λ.π.). Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται σε κάθε σημείο του καννάβου με την επίλυση του αντίστοιχου αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων. Αυτή η μέθοδος είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για πολύπλοκες γεωμετρίες και συνοριακές συνθήκες (Αγιουτάντης, 2002).

4.2.2 Η Μέθοδος των Συνοριακών Συνθηκών

Στη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων, το σύνορο κάθε ομοιογενούς περιοχής του υπό μελέτη χώρου (boundary) διαιρείται σε γραμμικά ή επιφανειακά στοιχεία για δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα αντίστοιχα (Σχήμα 4.3). Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για επίλυση προβλημάτων με γραμμική συμπεριφορά των



υλικών. Σε μη γραμμικές περιπτώσεις πρέπει να γίνει επιπλέον διακριτοποίηση του χώρου, ενώ η εφαρμογή της είναι δύσκολη για διαφορετικά υλικά ή τύπους στοιχείων. Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται συνήθως στο κέντρο βάρους κάθε συνοριακού στοιχείου και στη συνέχεια με κατάλληλες σχέσεις υπολογίζονται στα εσωτερικά σημεία του μέσου (Αγιουτάντης, 2002).

4.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.3.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μία πολύ ισχυρή αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων σε κατασκευές. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε πολλές εφαρμογές στην μηχανική και τη μηχανολογία, την ναυπηγική, την αεροναυπηγική κ.α. Η χρήση της μεθόδου έχει επεκταθεί και σε αναλύσεις

ρευστομηχανικής, θερμοδυναμικής και ηλεκτρομαγνητισμού. Σε περιπτώσεις όπου με τις αναλυτικές μεθόδους δεν είναι εφικτή η επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, όπως στο σχεδιασμό γεννητριών, τουρμπίνων, αεροσκαφών ή σηράγγων, προσφέρει μία αποτελεσματική λύση. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι κατάλληλη για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων με τη βοήθεια υπολογιστών. Οδηγεί σε ένα πλήθος εξισώσεων που μπορούν εύκολα να επιλυθούν στον υπολογιστή. Οι άλλες μέθοδοι συνήθως απαιτούν πιο περίπλοκες τεχνικές επίλυσης. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση σχεδίων, τη μείωση του κόστους και του κύκλου ανάπτυξης του προϊόντος. Μειώνεται επίσης και η ανάγκη για δοκιμές σε φυσικά πρωτότυπα.

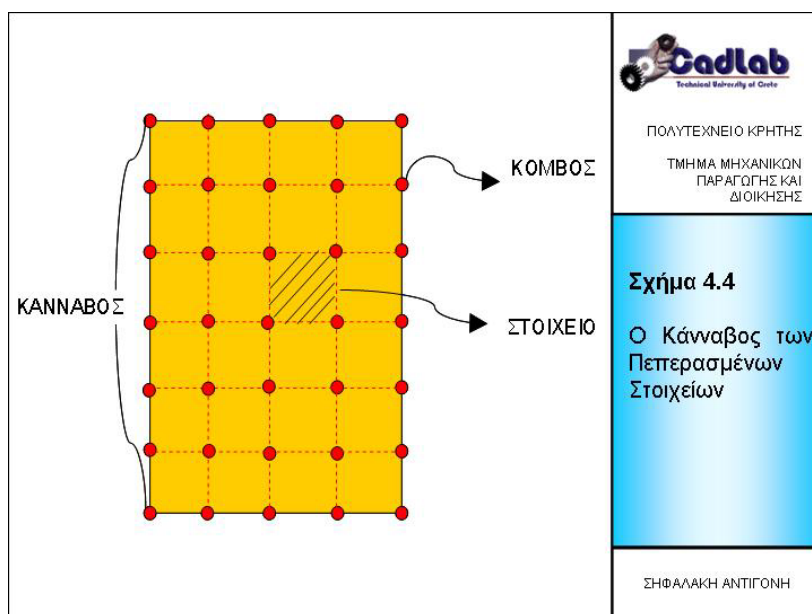
4.3.2 Ιστορία

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία έχει σχετικά μικρή ιστορία. Η αύξηση της δημοτικότητάς της ταυτίστηκε με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, ενώ η θεωρία στη οποία στηρίζεται χρονολογείται στις αρχές του εικοστού αιώνα.

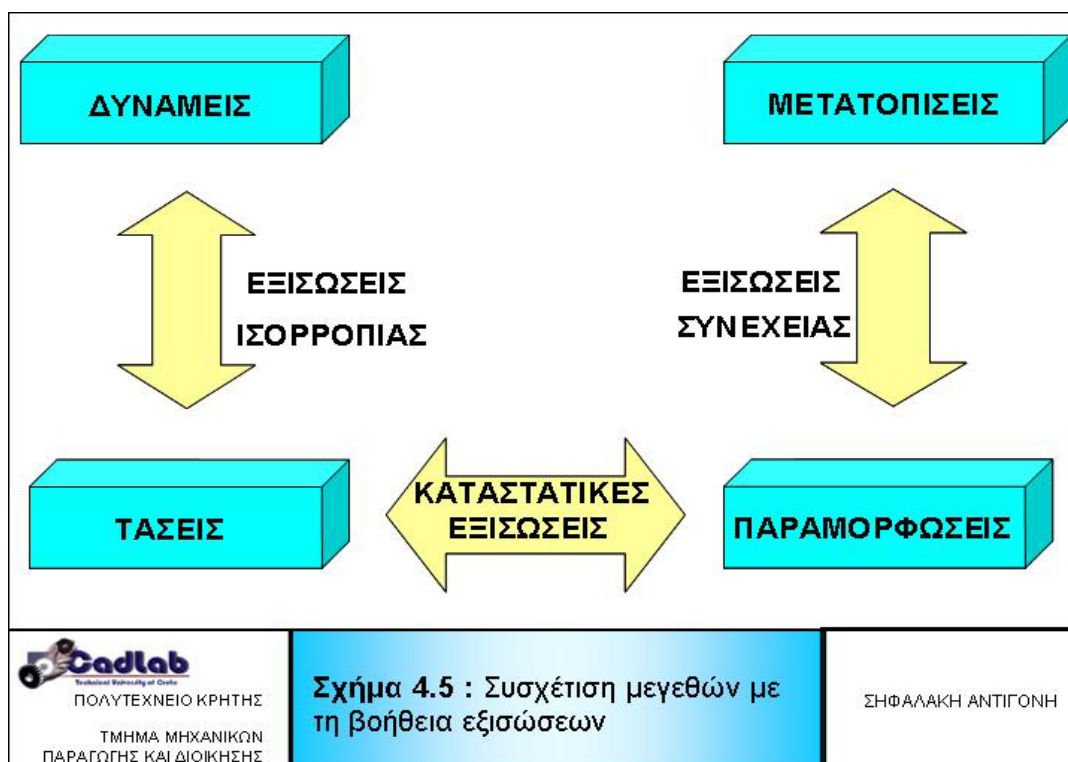
Η πρώτη δουλειά που οδήγησε στη σύγχρονη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, χρονολογείται στο 1906, όπου κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα «δίκτυο ανάλογο» για την ανάλυση τάσεων. Το 1943, ο Courant πρότεινε τη διακριτοποίηση ενός σώματος με τρίγωνα για να απλοποιήσει την επίλυση και προσέγγισε το πρόβλημα από μαθηματική άποψη. Η δουλειά του είχε κατά ένα μεγάλο μέρος αγνοηθεί μέχρι που οι μηχανικοί την ανέπτυξαν αυτόνομα. Στη δεκαετία του 1950 χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση κατασκευών με μήτρες, στη μηχανολογία και την αεροναυπηγική. Δίκτυα που προσέγγιζαν τις κατασκευές χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθούν οι εξισώσεις που προσομοίωναν το πρόβλημα και οι ψηφιακοί υπολογιστές που υπήρχαν τότε χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση σχετικά μικρών προβλημάτων (της τάξης των 100 βαθμών ελευθερίας). Η μέθοδος των μετατοπίσεων, όπου οι μετατοπίσεις είναι οι άγνωστοι, προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε επίσης στη δεκαετία του '50. Η ορολογία «Πεπερασμένα Στοιχεία» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1960 από τον Clough, ενώ αναπτύσσονταν νέα στοιχεία για την αντιμετώπιση διαφορετικών μορφών προβλημάτων. Τα στοιχεία αρχικά αναπτύσσονταν με το ένστικτο, αλλά σιγά σιγά αναπτύχθηκε το μαθηματικό υπόβαθρο. Η εξάπλωση της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων υποβοηθήθηκε κατά ένα μεγάλο βαθμό από τη ραγδαία ανάπτυξη στη βιομηχανία των υπολογιστών, καθώς γρηγορότεροι υπολογιστές και με μεγαλύτερες δυνατότητες αποθήκευσης, επέτρεπαν την επίλυση πιο πολύπλοκων προβλημάτων και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στη δεκαετία του '80 τα προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων έτρεχαν και σε προσωπικούς υπολογιστές. Σήμερα είναι εφικτή η επίλυση προβλημάτων με πάνω από 100.000 βαθμούς ελευθερίας σε ένα σχετικά απλό υπολογιστή (CosmosWorks tutorial video).

4.3.4 Γενικά

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), ο υπό μελέτη χώρος (domain) διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία). Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους και σε αυτούς ζητείται ο υπολογισμός άγνωστων μεγεθών (Σχήμα 4.4).



Ο αριθμός των διαστάσεων των στοιχείων είναι συνήθως αντίστοιχος με τον αριθμό των διαστάσεων του υπό μελέτη χώρου. Για παράδειγμα η μελέτη μια επιφάνειας γίνεται με δισδιάστατα στοιχεία.



Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η διάσταση του στοιχείου διαφέρει από τη διάσταση του χώρου, όπως για παράδειγμα η μελέτη ενός τρισδιάστατου δικτυώματος με μονοδιάστατα στοιχεία.

Η συμπεριφορά του κάθε τμήματος περιγράφεται μέσα από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας και ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μία μοναδική λύση από το γραμμικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (Becker, 1992, Hoek et al., 1991) (Σχήμα 4.5).

Οι μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων ανήκει στις διαφορικές μεθόδους. Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται στους κόμβους του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής υπολογίζονται στα υπόλοιπα σημεία του μέσου. Απλοποιητικές παραδοχές για τη δισδιάστατη μελέτη προβλημάτων ελαστικότητας είναι οι παραδοχές της επίπεδης τάσης και της επίπεδης παραμόρφωσης.

4.3.5 Βασικά στοιχεία της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε προβλήματα παραμόρφωσης υλικών, σε δύο ή τρεις διαστάσεις, περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Desai, 1979):

- Διαίρεση του πεδίου, το οποίο εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα τμήματα.
- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανοιγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain-displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανοιγμένη παραμόρφωση (stress-strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο, (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.
- Κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equations).
- Υπέρθεση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.
- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.
- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανοιγμένες παραμορφώσεις, τάσεις, κλπ.).
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα στάδια αυτά είναι γενικά και αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από την ΜΠΣ.

4.3.6 Φιλοσοφία επίλυσης προβλημάτων ελαστικότητας με τη ΜΠΣ

ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Βασικό στοιχείο στη ΜΠΣ είναι η διακριτοποίηση (decretization) ή η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα (elements), με τέτοιο τρόπο, ώστε το σύνολο των άγνωστων μεταβλητών να αντιπροσωπεύεται επαρκώς σε όλο το σώμα. Σε αυτό το στάδιο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η προσεκτική μοντελοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου στην ανάλυση. Συνήθως γίνεται προσέγγιση των διαστάσεων ενός προβλήματος, όπου γίνεται εκμετάλλευση της πιθανής συμμετρίας του.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

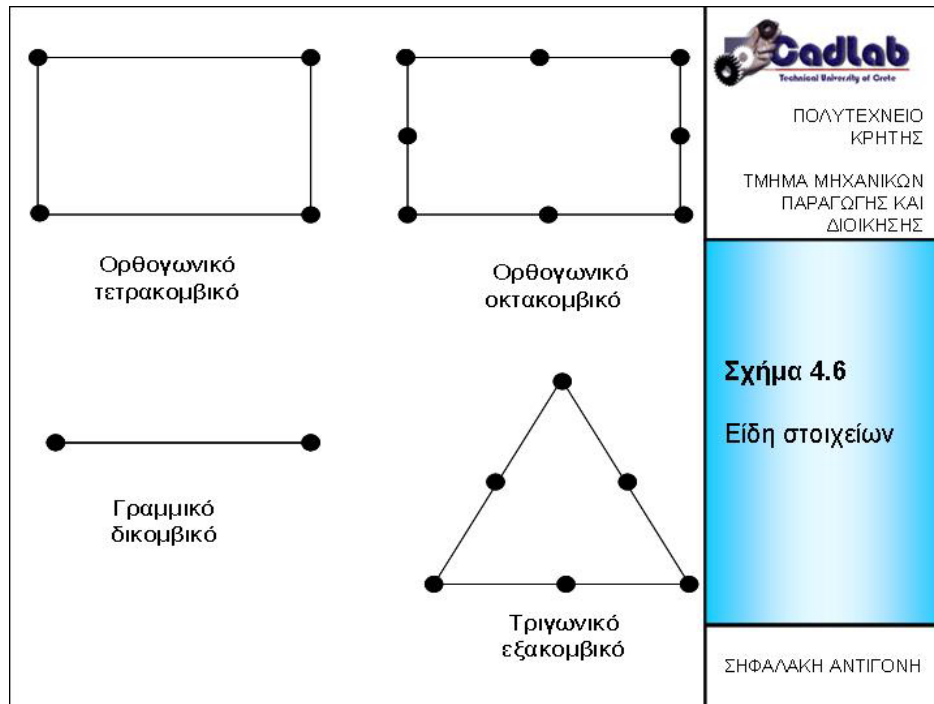
Όλες οι κατασκευές στην πραγματικότητα είναι τρισδιάστατες. Παρ' όλα αυτά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν προσεγγίσεις στη γεωμετρία των σωμάτων για την απλοποίηση της διαδικασίας της ανάλυσης. Αν η γεωμετρία και τα φορτία ενός προβλήματος μπορούν να περιγραφούν απόλυτα σε ένα επίπεδο, τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δισδιάστατο. Σώματα τα οποία είναι επιμήκη και η γεωμετρία τους όπως και τα φορτία τους δε μεταβάλλονται ιδιαίτερα κατά μήκος τους, μπορούν να μοντελοποιηθούν με αυτό τον τρόπο. Όμοια μπορούν να απλοποιηθούν σώματα λόγω της συμμετρίας τους. Υπάρχουν τέσσερις τύποι συμμετρίας που συναντώνται σε προβλήματα μηχανικής: η αξονική, η επίπεδη, η κυκλική και η περιοδική. Αν η μορφή του σώματος και των εξωτερικών συνθηκών είναι αντίστοιχα συμμετρική, τότε μόνο το επαναλαμβανόμενο τμήμα της κατασκευής χρειάζεται να μοντελοποιηθεί. Είναι όμως πολύ σημαντικό η φόρτιση και οι συνοριακές συνθήκες να είναι τέτοιες που να αντικατοπτρίζουν πραγματικά τη συμμετρία του προβλήματος.

Στην περίπτωση των φιαλών, υπάρχει αξονική συμμετρία, και είναι μία περίπτωση η οποία συναντάται πολύ συχνά. Για αυτό το λόγο, στα λογισμικά πακέτα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνονται αξονοσυμμετρικά στοιχεία. Αυτά λαμβάνουν υπόψη την ομοιομορφία της μεταβλητής στην περιφερειακή διεύθυνση, με τον ίδιο τρόπο που αναλύονται τα αξονοσυμμετρικά προβλήματα και θεωρητικά. Η κατανομή των φορτίων γίνεται μόνο προς δύο κατευθύνσεις, την ακτινική και την αξονική.

ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα στοιχεία αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμο ή καμπύλο τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους (nodes) του πλέγματος ή κάνναβου διακριτοποίησης (grid or mesh) του προβλήματος.

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και τα ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά στις τρεις διαστάσεις. Ειδικότερη περίπτωση αποτελούν τα κελυφοειδή στοιχεία (shell elements). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων έχουν αριθμό κόμβων ίσο με των αριθμό των πλευρών τους. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου περισσότεροι κόμβοι περιγράφουν ένα στοιχείο (Σχήμα 4.6)



Σχήμα 4.6

Είδη στοιχείων

ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Ουσιαστικά, σε κάθε κόμβο αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο (π.χ. δύναμη, τάση) και το αποτέλεσμα (π.χ. μετατόπιση, παραμόρφωση). Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom) ενός στοιχείου αναφέρεται στο σύνολο των άγνωστων μεταβλητών που αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο.

Η διαδικασία διαίρεσης του σώματος σε επιμέρους τμήματα περιλαμβάνει τις εξής παραμέτρους:

- Επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- Επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου και κατ' επέκταση των βαθμών ελευθερίας κάθε στοιχείου
- Επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου
- Επιλογή της πυκνότητας του κάρναβου

Η λογική που επικρατεί είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγαλύτερες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών. Στις δύο διαστάσεις για παράδειγμα χρησιμοποιούνται συνήθως τριγωνικά τρικομβικά ή τετραπλευρικά τετρακομβικά στοιχεία. Είναι όμως δυνατόν να προστεθούν περισσότεροι κόμβοι σε ένα στοιχείο, ώστε να αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας του, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Η διακριτοποίηση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς και εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές τα στοιχεία είναι μεγαλύτερα

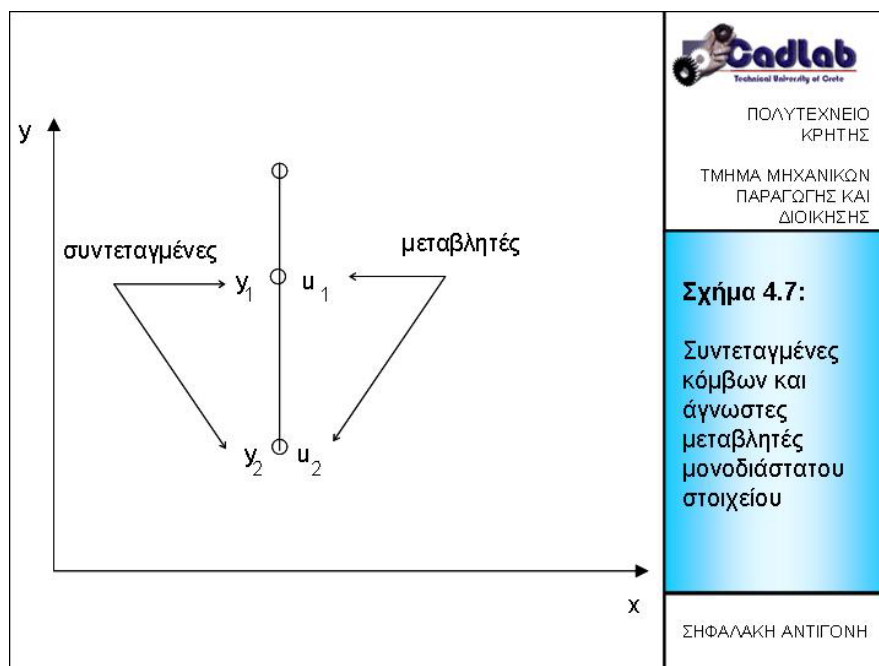
Η επιλογή των συναρτήσεων που εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους, συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς αλλά και με το χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται συναρτήσεις μορφής.

ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, οι συναρτήσεις μορφής (shape or approximation functions) εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο, συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους. Οι συναρτήσεις μορφής μπορούν να παρομοιαστούν με συναρτήσεις επιρροής κάθε κόμβου προς το περιβάλλον του. Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές. Στις περιπτώσεις στοιχείων με ισάριθμες ακμές και κόμβους εφαρμόζονται συνήθως γραμμικές συναρτήσεις, ενώ όταν ο αριθμός των κόμβων υπερβαίνει τον αριθμό των ακμών του στοιχείου, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μη γραμμικές συναρτήσεις (Αγιουτάντης, 2002).

ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΗ

Στη γενική περίπτωση, η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των γενικευμένων συντεταγμένων (δηλαδή των συντεταγμένων των κόμβων και των τιμών στους κόμβους). Παρακάτω εκφράζεται η μετατόπιση για ένα στοιχείο με δύο κόμβους (Σχήμα 4.7):



$$u = \alpha_1 + \alpha_2 y \quad (4.1)$$

$$\{u\} = [1 \ y] \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \{u\} = [\Phi] \{\alpha\} \quad (4.2)$$

όπου τα α_1 και α_2 περιέχουν τις μετατοπίσεις, καθώς και τις συντεταγμένες των κόμβων 1,2 . αντικαθιστώντας στη σχέση 3.1, τα διανύσματα u και y με τις επιμέρους συνιστώσες τους (σημεία 1 και 2) προκύπτει:

$$\begin{aligned} u_1 &= \alpha_1 + \alpha_2 y_1 \\ u_2 &= \alpha_1 + \alpha_2 y_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

και επομένως:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{q\} = [A] \{\alpha\} \quad (4.4)$$

όπου $\{q\}$ είναι το διάνυσμα των άγνωστων μετατοπίσεων, $[A]$ είναι ο πίνακας με τις συντεταγμένες του στοιχείου και $\{\alpha\}$ οι άγνωστοι συντελεστές. Επιλύοντας προκύπτει:

$$\{\alpha\} = [A]^{-1} \{q\} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} y_2 & -y_1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

επομένως:

$$\alpha_1 = \frac{y_2 u_1 - y_1 u_2}{l}$$

$$\alpha_2 = \frac{-u_1 + u_2}{l} \quad (4.6)$$

Αντικαθιστώντας στην αρχική εξίσωση, προκύπτει μία εξίσωση της μορφής:

$$\{u\} = [\Phi] \{\alpha\} \Rightarrow \{u\} = [\Phi] [A]^{-1} \{q\} \Rightarrow \{u\} = [N] \{q\} \quad (4.7)$$

όπου $[N] = [\Phi][A]^{-1}$, δηλαδή

$$u = \sum_{i=1}^n u_i N_i \quad (4.8)$$

που είναι μία έκφραση της μετατόπισης για ένα στοιχείο ως συνάρτηση των μεταβλητών στους κόμβους. Επίσης, οι συναρτήσεις N_i μπορούν να εκφραστούν σε τοπικές και αδιαστασιοποιημένες συντεταγμένες.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Συνήθως, οι συναρτήσεις μορφής υπολογίζονται σε ένα αυθαίρετο σύστημα τοπικών συντεταγμένων (local coordinates) και όχι στο σύστημα των καθολικών ή γενικευμένων συντεταγμένων (global coordinates), όπου είναι ορισμένο το υπό μελέτη σώμα. Με αυτό τον τρόπο οι συναρτήσεις μορφής εξαρτώνται μόνο από τη σχετική γεωμετρία κάθε στοιχείου και όχι από τη θέση του στο χώρο. Ο μετασχηματισμός από το σύστημα των τοπικών στο σύστημα των καθολικών συντεταγμένων περιγράφεται από τη σχέση:

$$dA = dx dy = |J| ds dt \quad (4.9)$$

όπου $J = \eta$ Ιακωβιανή του συστήματος

Η Ιακωβιανή χρησιμοποιείται για την αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων όχι των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός στοιχείου, αλλά των συναρτήσεων που συνδέονται με το στοιχείο και για τις οποίες απαιτείται διαφορίση. Η ορίζουσα της Ιακωβιανής υπολογίζεται βάση των συναρτήσεων μορφής (Αγιουτάντης, 2002).

ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Με βάση τον ορισμό της γραμμικής παραμόρφωσης, έχουμε τις εξής σχέσεις (για μικρές μετατοπίσεις παραμορφώσεις):

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y}$$

Ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας κάθε στοιχείου, η παραπάνω σχέσεις μετασχηματίζονται. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο κανόνας της αλυσίδας. Έτσι, για δύο βαθμούς ελευθερίας, έχουμε:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y}$$

Για τον υπολογισμό των άγνωστων ποσοτήτων, που είναι οι μερικές παράγωγοι της μορφής $\frac{\partial s}{\partial x}$, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{1}{|J|} \left[\frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial s}{\partial s} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} \right] = \frac{1}{|J|} \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{1}{|J|} \left[\sum \frac{\partial N_i}{\partial t} y_i \right] \quad (4.12)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει μία σχέση της μορφής:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \quad (4.13)$$

όπου $\{\varepsilon\}$ = πίνακας παραμορφώσεων, με διάσταση $[3 \times 1]$

$\{q\}$ = το διάνυσμα μετατοπίσεων στους κόμβους, με διάσταση $[n \times 1]$

$[B]$ = ο πίνακας συσχετισμού, με διάσταση $[3 \times n]$

n = οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Μέχρι αυτή τη φάση, οι ενέργειες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη σύνδεση αιτίου – αποτελέσματος, στην περίπτωση των δισδιάστατων στοιχείων είναι οι ακόλουθες (κατ' αντιστοιχία ενεργούμε και για τα τρισδιάστατα στοιχεία):

- Η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους $\{u_i\}$ από τη σχέση

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad (4.14)$$

(Η σχέση αυτή είναι αντίστοιχη της [3.8] για την περίπτωση των δισδιάστατων στοιχείων)

- Η παραμόρφωση σε κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση [4.11]
- Οι καταστατικές εξισώσεις συμπεριφοράς που παριστάνονται υπό μορφή πινάκων ως εξής

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (4.15)$$

όπου ο πίνακας $[E]$ παριστάνει ένα γενικευμένο μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού.

Η δυναμική ενέργεια κάθε στοιχείου, προκύπτει ως άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας καθώς και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο στοιχείο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Δυναμική Ενέργεια} = \text{Εσωτερική Ενέργεια} - \text{Έργο δυνάμεων}$$

Οι εξωτερικές δυνάμεις ανήκουν σε τρεις κατηγορίες: α) δυνάμεις πεδίου (π.χ. βαρυτικές) β) τάσεις (π.χ. υδροστατική) γ) σημειακές τάσεις. Επομένως, η δυναμική ενέργεια ενός στοιχείου μπορεί να εκφρασθεί από μία σχέση της μορφής:

$$\begin{aligned} \Pi_p &= \iiint \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dx dy dz - \iiint \{F\} dx dy dz - \iint \{T\} dx dy - \sum_i F_i u_i \Rightarrow \\ \Pi_p &= \int_V \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dV - \int_V \{F\} dV - \int_A \{T\} dS - \sum_i F_i u_i \end{aligned} \quad (4.16)$$

Όπου ο πρώτος όρος περιγράφει τη δυναμική ενέργεια, ο όρος $\int_V \{F\}dV$ το έργο των δυνάμεων λόγω του πεδίου, ο όρος $\int_A \{T\}dS$ το έργο λόγω τάσεων ή κατανεμημένων δυνάμεων που ασκούνται σε ακμές ή επιφάνειες και ο όρος $\sum_i F_i u_i$ περιγράφει το έργο λόγω σημειακών δυνάμεων.

Η ελαχιστοποίηση της δυναμικής ενέργειας προκύπτει από το διαφορικό της σχέσης (4.16):

$$\delta \Pi_p = 0 \rightarrow \frac{\partial \Pi_p}{\partial \{q\}} = 0 \quad (4.17)$$

Η εφαρμογή της σχέσης (4.17) απαιτεί τη διαφορίση της δυναμικής ενέργειας Π_p ως προς κάθε συνιστώσα του διανύσματος $\{q\}$. Δηλαδή για κάθε στοιχείο προκύπτουν n εξισώσεις της μορφής $\frac{\partial \Pi_p}{\partial q_i} = 0$, όπου $i = 1, \dots, n$ και n ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας του στοιχείου.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω λογική για όλους τους βαθμούς ελευθερίας, που ουσιαστικά αποτελεί το κριτήριο ελαχιστοποίησης της δυναμικής ενέργειας κάθε στοιχείου (χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σώματος σε ισορροπία), προκύπτει η ακόλουθη σχέση, η οποία συνδέει τη δύναμη $\{F\}$ που δέχεται κάθε κόμβος, με τη μετατόπιση $\{q\}$ που υφίσταται, δηλαδή το αίτιο και το αποτέλεσμα :

$$\{F\} = [K]\{q\} \quad (4.18)$$

Η διάσταση του διανύσματος $\{F\}$ για κάθε στοιχείο εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου και από το βαθμό ελευθερίας κάθε κόμβου.

Το μητρώο $[K]$ είναι ο πίνακας ακαμψίας το οποίου οι σταθερές K_{ij} έχουν φυσικό ισοδύναμο τις σταθερές ελατηρίων (Αγιουτάντης, 2002).

ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στα προβλήματα ελαστικότητας η φόρτιση των υλικών μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- A) Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου (βαρυτικές δυνάμεις)
- B) Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις)
- Γ) Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις)
- Δ) Επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου

Όλες οι δυνάμεις πρέπει να αναλυθούν με τον κατάλληλο τρόπο σε κομβικές δυνάμεις, καθώς αυτές είναι που χρησιμοποιούνται στην επίλυση κάθε προβλήματος.

Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση των προβλημάτων και συνήθως εκφράζεται με τις συνθήκες ισορροπίας πεδίου. Η φόρτιση του υλικού αποτελεί επίσης κατά κάποιο τρόπο μία συνοριακή συνθήκη, καθώς, σε αντίθετη περίπτωση η υπολογιζόμενη παραμόρφωση είναι μηδενική. Ένα σώμα που φορτίζεται και όλοι του οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση ή στροφή. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος με την προαναφερόμενη μέθοδο, διότι το φαινόμενο δεν υπακούει στην ίδια καταστατική εξίσωση (Αγιουτάντης, 2002).

Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών:

A) Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές και είναι γνωστές ως συνθήκες Dirichlet.

B) Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες και είναι γνωστές και ως συνθήκες Neumann.

Γ) Προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.

Στην περίπτωση προβλημάτων ελαστικότητας οι γεωμετρικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} u_x &= u_o \\ u_y &= u_o \end{aligned} \quad (4.19)$$

Οι φυσικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} f_x &= f_o \\ f_y &= f_o \end{aligned} \quad (4.20)$$

Οι σχέσεις (3.19) θεωρούνται φυσικές συνοριακές συνθήκες, διότι αν θεωρηθεί το μονοδιάστατο πρόβλημα ελαστικότητας, ισχύει ότι:

$$\sigma = E\varepsilon \Rightarrow F = AE\varepsilon \Rightarrow F = AE \frac{du}{dx} \quad (4.21)$$

Επομένως η δύναμη είναι ανάλογη της μεταβολής της μετατόπισης

Σημειώνεται ότι με την αξιοποίηση της συμμετρίας ενός προβλήματος και την κατάλληλη χρήση των συνοριακών συνθηκών είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των κόμβων ενός προβλήματος και επομένως ο χρόνος της επίλυσης.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΩΜΑΤΟΣ

Από κάθε επίλυση σε επίπεδο στοιχείου προκύπτει μία σχέση της μορφής (4.18). Για την επίλυση όλου του σώματος πρέπει να γίνει υπέρθεση ή συνάθροιση των εξισώσεων αυτών (assembly of element equations) με γνώμονα τη συνάθροιση των επιμέρους εξισώσεων που επηρεάζουν κάθε κόμβο και μετά την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών, να γίνει η επίλυση του τελικού γραμμικού συστήματος. Το σύστημα είναι η εξισώσεων με η αγνώστους, όπου η είναι ο αριθμός βαθμών ελευθερίας κάθε κόμβου (Αγιουτάντης, 2002).

ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού, καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών του μοντέλου αυτού, αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών υλικών.

Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό μοντέλο, σε μία, δύο ή περισσότερες διαστάσεις. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα όπως δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right] \quad (4.22)$$

ή για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μία διάσταση, από τη σχέση:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.23)$$

Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς, όπως μοντέλα μη ιστροπικής ελαστικής συμπεριφοράς και μοντέλα μη ελαστικής συμπεριφοράς.

Για τις φιάλες με τις οποίες ασχολείται η παρούσα εργασία, έχει χρησιμοποιηθεί το γραμμικό ελαστικό μοντέλο.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Σε περίπτωση όπου, λόγω φόρτισης ενός υλικού, μπορεί να επέλθει η αστοχία του, είναι απαραίτητο να καθοριστεί και το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας ή διαρροής υλικού.

Τα κριτήρια αστοχίας των υλικών είναι δυνατόν να επιδράσουν με δύο τρόπους:

A) Να θεωρήσουν ότι ένα στοιχείο αστοχεί, όταν η εντατική κατάσταση που δέχεται το υλικό υπερβαίνει το όριο αντοχής του και επομένως εμποδίζουν το στοιχείο αυτό να δεχτεί μία ανώτερη εντατική κατάσταση.

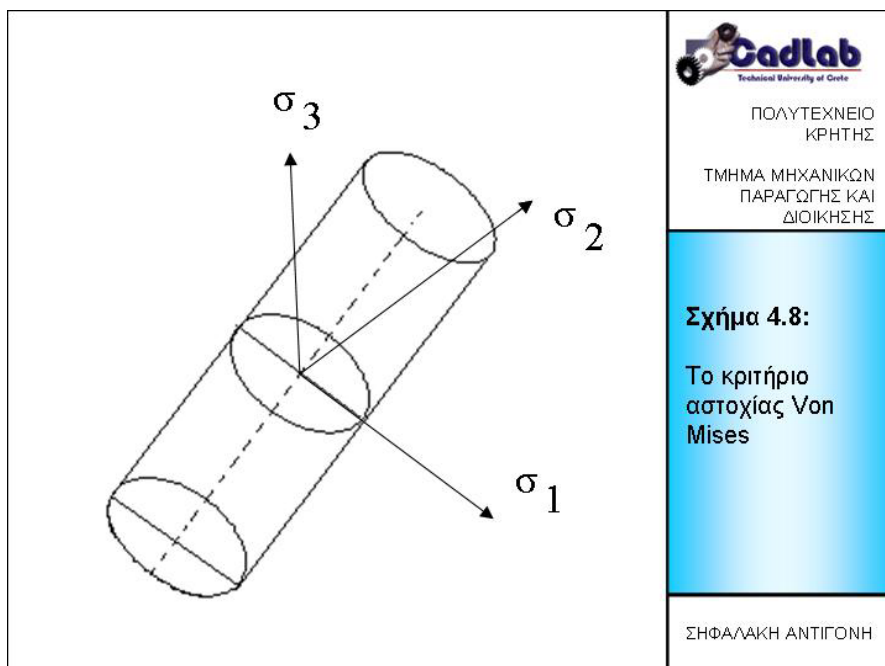
B) Με τη θεώρηση ότι το υλικό αστόχησε στη παραπάνω εντατική κατάσταση, να τροποποιήσουν (μειώσουν κατάλληλα) τις ελαστικές (ή πλαστικές) σταθερές των στοιχείων, ώστε να προσομοιάσουν την αστοχία.

Τα κριτήρια αστοχία που συναντώνται συχνότερα είναι τα κριτήρια των Mohr-Coulomb, Von Mises, Tresca, Drucker – Prager κ.λ.π.

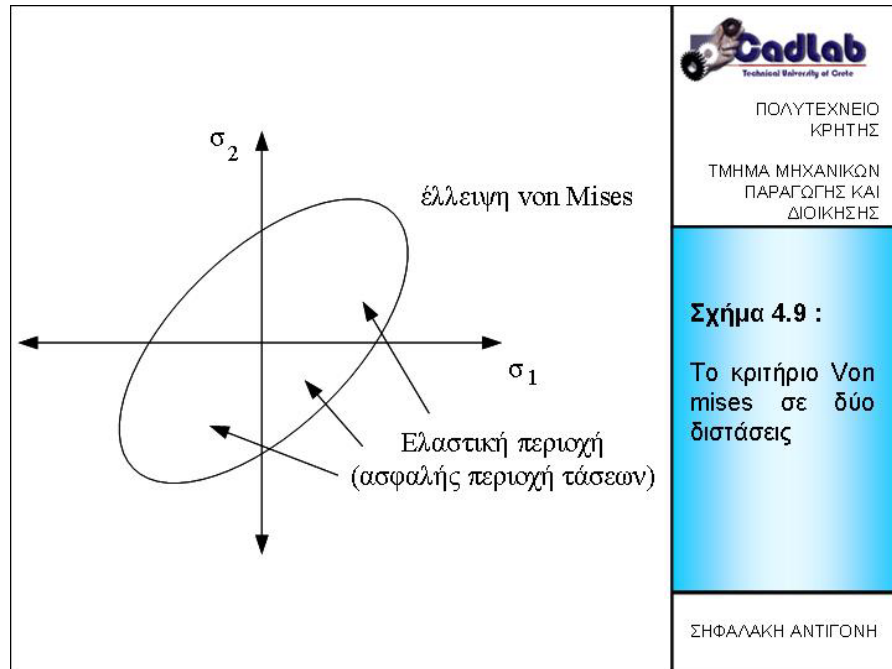
Σύμφωνα με τη θεωρία Von Mises, η διαρροή ενός υλικού που βρίσκεται κάτω από την επίδραση σύνθετης εντατικής κατάστασης, αρχίζει όταν η ισοδύναμη τάση σ_{eq} ισούται με την αντοχή σε εφελκυσμό, όπως αυτή μετριέται κατά τη διαρροή του υλικού λόγω καθαρού εφελκυσμού. Το κριτήριο αυτό μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τις κύριες τάσεις:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / \sqrt{2} \quad (4.24)$$

Στις τρεις διαστάσεις, το κριτήριο αυτό παριστάνεται από έναν κύλινδρο ακτίνας σ_A . Στο Σχήμα 4.8 δίνεται παραστατικά η επιφάνεια αστοχίας. Εάν το σημείο που εκφράζει την τυχαία εντατική κατάσταση βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο, τότε το υλικό βρίσκεται μέσα στην ελαστική περιοχή. Εάν το σημείο βρίσκεται έξω από τον κύλινδρο,



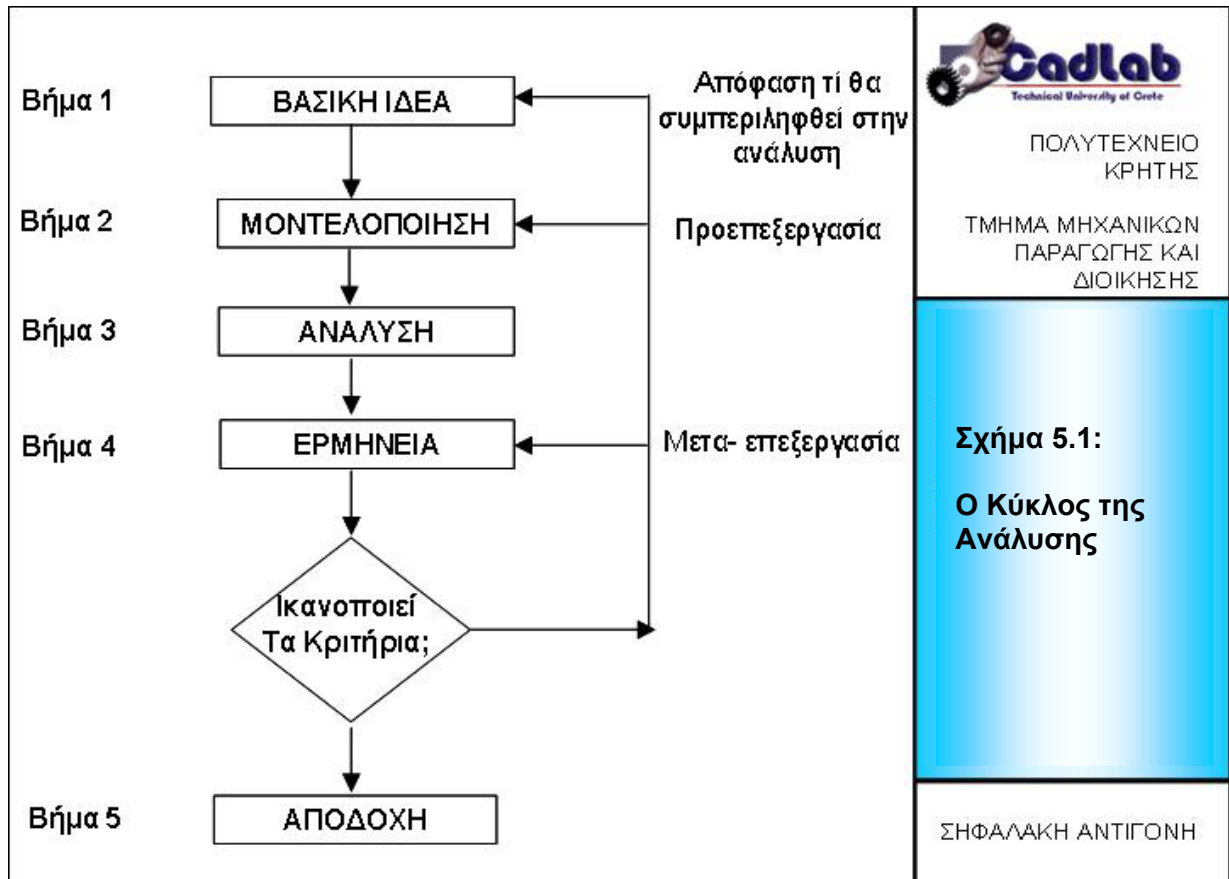
τότε έχει ήδη δημιουργηθεί πλαστική παραμόρφωση στο υλικό. Στην περίπτωση δισδιάστατης εντατικής κατάστασης, τότε το κριτήριο von Mises σε άξονες σ_1 , σ_2 , δίνεται από μία έλλειψη (Σχήμα 4.9).



5. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MARC

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Marc είναι ένα πρόγραμμα που επιτρέπει στο χρήστη να εκτελέσει τη διαδικασία ανάλυσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων από την αρχή ως το τέλος.



Ο κύκλος της ανάλυσης περιλαμβάνει 5 βασικά βήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Αυτή η διαδικασία μπορεί να εκτελεσθεί περισσότερες από μία φορές για το ίδιο σχέδιο. Δηλαδή, αν τα αποτελέσματα δεν συναντούν τα σχεδιαστικά κριτήρια, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, επιστρέφοντας είτε στο πρώτο βήμα (βασική ιδέα), είτε στο δεύτερο (μοντελοποίηση).

5.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MARC

Το σύστημα Marc περιλαμβάνει μια σειρά από προγράμματα που διευκολύνουν την ανάλυση προβλημάτων μηχανικής, σε πολλούς τομείς, όπως η στατική, η μετάδοση θερμότητας και ο ηλεκτρομαγνητισμός. Το Marc περιλαμβάνει τα ακόλουθα προγράμματα:

- **MARC**
- **MENTAT**

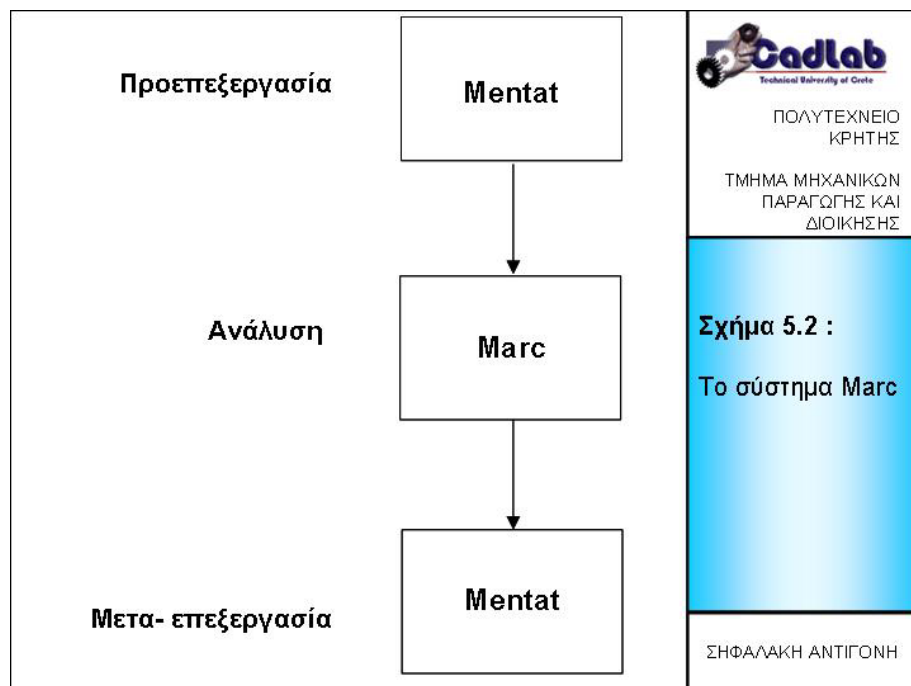
Αυτά τα προγράμματα συνεργάζονται με στόχο να :

A) Κατασκευάσουν γεωμετρικές πληροφορίες που ορίζουν το πρόβλημα (Marc και MSC.Marc Mentat).

B) Αναλύσουν την κατασκευή (Marc)

Γ) Να αναπαραστήσουν γραφικά τα αποτελέσματα (Marc και Mentat)

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι σχέσεις ανάμεσα σε αυτά προγράμματα



5.3 ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ MARC

Marc

Το Marc μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή γραμμικής ή μη γραμμικής ανάλυσης τάσεων, στη στατική και τη δυναμική αλλά και για ανάλυση μετάδοσης θερμότητας. Οι μη γραμμικότητες μπορεί να οφείλονται είτε στη συμπεριφορά του υλικού ή σε μεγάλες παραμορφώσεις ή σε συνοριακές συνθήκες.

Τα προβλήματα σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση μίας ποικιλίας από στοιχεία. Οι γεννήτριες της διακριτοποίησης, τα γραφικά και όλες οι δυνατότητες μεταεπεξεργασίας, που βοηθούν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, είναι διαθέσιμα στο Marc.

Mentat

Το Mentat είναι ένα πρόγραμμα που προετοιμάζει και επεξεργάζεται τα δεδομένα για τη χρήση στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η αμφίδρομη σχέση που δημιουργείται με το χρήστη μπορεί να μειώσει σημαντικά την προσπάθεια που καταβάλλεται για την επίλυση του προβλήματος. Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων μειώνει περαιτέρω αυτή την προσπάθεια, παρέχοντας ένα αποτελεσματικό τρόπο επίβλεψης του μεγάλου όγκου δεδομένων που τυπικά σχετίζονται με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του προγράμματος είναι ότι παρέχει μία άμεση αμφίδρομη σχέση με το χρήστη. Το Mentat ελέγχει τα δεδομένα που εισάγονται μέσω του πληκτρολογίου και κάνει προτάσεις ή προειδοποιήσεις στο χρήστη όταν αντιλαμβάνεται αμφίβολα εισαγόμενα. Επίσης επιτρέπει να ελεγχθούν γραφικά οποιεσδήποτε αλλαγές προκύπτουν στην πορεία της εισαγωγής δεδομένων.

Το Mentat μπορεί να επεξεργαστεί δισδιάστατες και τρισδιάστατες διακριτοποιήσεις έτσι ώστε : α) να δημιουργήσει και να παρουσιάσει οπτικά τη διακριτοποίηση, β) να δημιουργήσει και να παρουσιάσει τις συνοριακές συνθήκες και τις φορτίσεις γ) να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα της ανάλυσης και να δημιουργήσει διαγράμματα παραμορφωμένου σώματος, χρονικής εξέλιξης κ. α.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τα εξής:

Συντεταγμένες των κόμβων

Συνεκτικότητα των στοιχείων

Συνοριακές συνθήκες των κόμβων

Συστήματα συντεταγμένων των κόμβων

Ιδιότητες υλικού των στοιχείων

Γεωμετρικές ιδιότητες των στοιχείων

Φορτία των στοιχείων

Φορτία των κόμβων/ μη μηδενικές συνοριακές συνθήκες

Σύνολα από στοιχεία και κόμβους

5.4 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ MARC

Το Marc έχει τέσσερις βιβλιοθήκες που κάνουν το πρόγραμμα να βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα χρήσεων. Αυτές οι βιβλιοθήκες περιέχουν κατασκευαστικές διαδικασίες, υλικά, στοιχεία και λειτουργίες του προγράμματος. Τα περιεχόμενα κάθε βιβλιοθήκης περιγράφονται παρακάτω.

Βιβλιοθήκη διαδικασιών

Η βιβλιοθήκη κατασκευαστικών διαδικασιών περιέχει διαδικασίες όπως στατική, δυναμική, ερπυσμός, μετάδοση θερμότητας, ρευστομηχανική και ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.

Η βιβλιοθήκη συνδέει αυτές τις διαδικασίες με φυσικά φαινόμενα, καθώς καθοδηγεί το χρήστη σε ενέργειες που επιτρέπουν για παράδειγμα μη γραμμική δυναμική ανάλυση.

Βιβλιοθήκη υλικών

Η βιβλιοθήκη υλικών περιέχει πολλά μοντέλα υλικών που αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των υλικών της μηχανικής. Παραδείγματα είναι τα μέταλλα μη ελαστικής συμπεριφοράς, τα πετρώματα και τα ελαστικά υλικά. Πολλά μοντέλα παρουσιάζουν μη γραμμικές ιδιότητες, όπως πλαστικότητα, βισκοελαστικότητα και υποελαστικότητα. Η γραμμική ελαστικότητα περιλαμβάνεται επίσης. Όλες οι ιδιότητες μπορεί να εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Βιβλιοθήκη στοιχείων

Η βιβλιοθήκη στοιχείων περιλαμβάνει 157 στοιχεία. Επιτρέπει με αυτό τον τρόπο στο χρήστη να περιγράψει οποιαδήποτε γεωμετρία υπό οποιεσδήποτε συνθήκες φόρτισης.

Βιβλιοθήκη λειτουργιών του προγράμματος

Οι λειτουργίες του προγράμματος όπως επιλεκτική συναρμολόγηση, υπορουτίνες που παρέχονται στο χρήστη και επανεκκίνηση έχουν δομηθεί έτσι ώστε να είναι φιλικές προς αυτόν, να απλοποιούν και να επιταχύνουν το έργο της ανάλυσης. Το Marc επιτρέπει το συνδυασμό όλων των στοιχείων από όλες τις βιβλιοθήκες του, για αυτό και αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος μηχανικής.

5.5 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ MARC

Από τα μέσα της δεκαετίας του '70 το Marc έχει αναγνωριστεί ως ένα από κυριότερα προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η ευελιξία του προγράμματος έχει οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή του.

Το Marc έχει βοηθήσει στην ανάλυση και έχει επηρεάσει τα τελικά σχέδια προϊόντων όπως:

Εξαρτήματα αυτοκινήτων	Διαστημικά οχήματα
Πυρηνικοί αντιδραστήρες	Ηλεκτρονικά εξαρτήματα
Εξοπλισμός Βιοϊατρικής	Συστήματα αγωγών ατμού
Θαλάσσιες εξέδρες	Έμβολα μηχανών
Μεγάλες κατασκευές από Fiberglass	Ελαστικά
Σκαριά Πλοίων	Ρότορες μηχανών αεροσκαφών
Στηρίγματα κινητήρων από ελαστομερή	Διαδικασίες χύτευσης
Περιβλήματα κινητήρων ρουκετών	Εξώθηση μετάλλων με μεγάλη παραμόρφωση

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις υπήρχαν σημαντικά οφέλη που προέκυψαν από το Marc και δε θα ήταν δυνατόν να επιτευχθούν με άλλες μεθόδους:

- Έγκυρα αποτελέσματα, τόσο στη γραμμική όσο και στη μη γραμμική ανάλυση
- Καλύτερα σχέδια, που οδηγούν σε βελτιωμένη απόδοση και αξιοπιστία

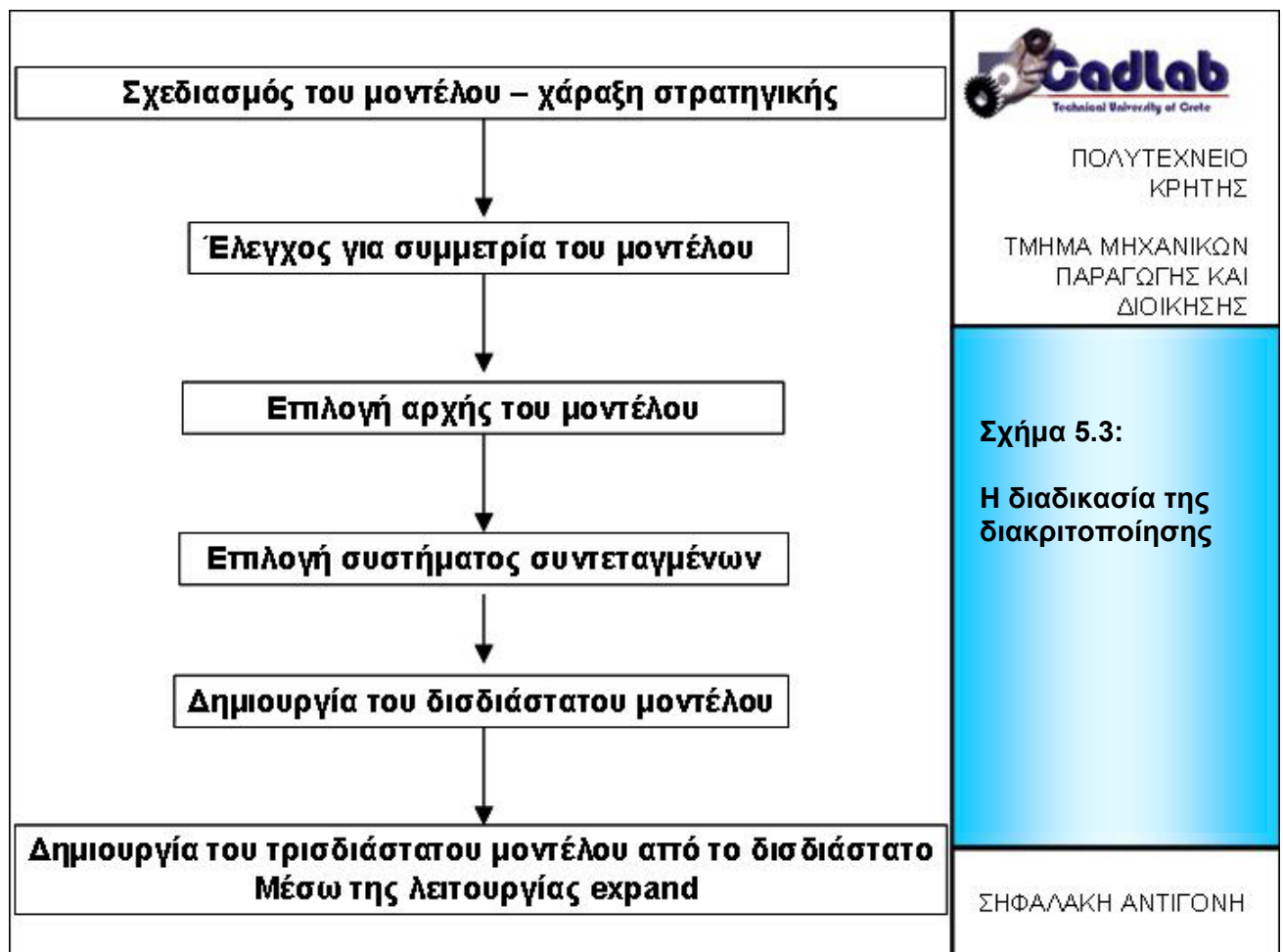
- Δυνατότητα να μοντελοποιηθούν περίπλοκες κατασκευές και να συνδυαστεί μη γραμμική συμπεριφορά λόγω γεωμετρίας και λόγω υλικού.

5.6 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟ MARC

5.6.1 Διακριτοποίηση

Η προεπεξεργασία των δεδομένων, θεωρείται ένα από τα πιο βασικά στάδια της ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων. Στην πραγματικότητα, αποτελεί το πιο περίπλοκο και χρονοβόρο κομμάτι της διαδικασίας. Για αυτό το λόγο είναι πολύ βασικό να καθοριστεί εξαρχής ο στόχος της ανάλυσης και οι απαντήσεις οι οποίες αναζητούνται, καθώς και τα δύο ερωτήματα παίζουν βασικό ρόλο στην επιλογή του μοντέλου.

Οι βασικές γραμμές της διακριτοποίησης παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 5.3



Το Mentat διαχωρίζει δύο τεχνικές για τη δημιουργία της διακριτοποίησης. Η πρώτη είναι η άμεση προσέγγιση, όπου ο χρήστης δημιουργεί όλα τα στοιχεία ένα προς ένα. Η

δεύτερη είναι η γεωμετρική προσέγγιση, όπου το μοντέλο δημιουργείται αρχικά ως μια γεωμετρική κατασκευή και στη συνέχεια ακολουθεί η μετατροπή του γεωμετρικού σχήματος σε πεπερασμένα στοιχεία. Οι δυο τεχνικές αλληλοσυμπληρώνονται και συνήθως τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται από το συνδυασμό τους. Στη διαδικασία διακριτοποίησης των φιαλών, χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τεχνικές.

Τα βήματα αυτά περιγράφονται αναλυτικά κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης και ανάλυσης μίας φιάλης, στο επόμενο κεφάλαιο.

Μονάδες διακριτοποίησης

Υπάρχουν δύο τύποι μονάδων διακριτοποίησης: οι κόμβοι και τα στοιχεία. Οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από τρεις συντεταγμένες. Τα στοιχεία αποτελούνται από ακμές και επιφάνειες που ορίζονται από μία σειρά από κόμβους. Ο αριθμός ακμών, επιφανειών και κόμβων εξαρτάται από την κλάση του στοιχείου.

Γεωμετρικές μονάδες

Τα δομικά στοιχεία της τεχνικής γεωμετρικής διακριτοποίησης είναι τα σημεία, οι καμπύλες, οι επιφάνειες και τα στερεά. Τα σημεία χαρακτηρίζονται από τρεις συντεταγμένες και συμβολίζονται με ένα + στην οθόνη. Οι καμπύλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανήκουν σε πολλές κατηγορίες: γραμμές, τόξα, φιλέτα, κύκλοι, καμπύλες Bezier, Nurb και σύνθετες καμπύλες. Οι επιφάνειες που αναγνωρίζει το Marc είναι : απλές επιφάνειες που ορίζονται από τέσσερα σημεία, κυλινδρικές επιφάνειες, Bezier, Nurb, σφαιρικές, coons κ.α. Στερεό είναι ένας όγκος ο οποίος ορίζεται από κάποιες επιφάνειες. Οι στερεές επιφάνειες ορίζονται από στερεές ακμές και οι στερεές ακμές ορίζονται από στερεές κορυφές. Υπάρχουν στο Mentat πέντε βασικές μορφές στερεών: κύβος, κύλινδρος, σφαίρα, κώνος και πρίσμα. Αυτά μπορούν να υποστούν επεξεργασία με τις κατάλληλες λειτουργίες του συστήματος και να προκύψουν πιο σύνθετα στερεά.

Η τεχνική της άμεσης διακριτοποίησης

Τα στοιχεία χρησιμοποιούνται σαν βασικές δομικές μονάδες για τη δημιουργία μίας απλής διακριτοποίησης, η οποία μπορεί να τελειοποιηθεί αργότερα, με τη βοήθεια των εργαλείων που παρέχονται από το Marc για αυτό το σκοπό. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου το σώμα έχει απλή γεωμετρία. Η τεχνική της άμεσης διακριτοποίησης δε βασίζεται σε κάποιο αλγόριθμο αλλά αποτελείται από τα δεδομένα που έχουν δοθεί από το χρήστη και αντιπροσωπεύουν τη γεωμετρία του σώματος .

Η γεωμετρική τεχνική της διακριτοποίησης

Οι βασικές δομικές μονάδες για αυτή την τεχνική είναι κατά βάση γεωμετρικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να μετατραπούν σε στοιχεία διακριτοποίησης αφού έχει ολοκληρωθεί το γεωμετρικό μοντέλο. Η προσέγγιση αυτή είναι πιο σύνθετη από την άμεση διακριτοποίηση, είναι όμως πιο ευέλικτη όταν πρόκειται για σύνθετες γεωμετρίες. Είναι σημαντικό να γίνει ξεκάθαρος ο διαχωρισμός των γεωμετρικών μονάδων από τις μονάδες διακριτοποίησης. Δηλαδή ένα γραμμικό στοιχείο με δύο κόμβους δεν είναι το ίδιο με μία γραμμή και ο κόμβος δεν είναι το ίδιο με ένα σημείο.

Για να μετατραπεί το γεωμετρικό μοντέλο σε διακριτοποιημένο σώμα χρησιμοποιείται η λειτουργία `convert` (μετατροπή) του προγράμματος. Για παράδειγμα καμπύλες μπορούν να μετατραπούν σε γραμμικά στοιχεία και επιφάνειες σε επιφανειακά στοιχεία. Οι ακόλουθες μετατροπές είναι εφικτές:

σημείο	κόμβος
καμπύλη	γραμμικό στοιχείο
επιφάνεια	επιφανειακό στοιχείο

Τι συνιστά μία καλή διακριτοποίηση

Δυστυχώς αυτό το ερώτημα μπορεί να απαντηθεί μόνο μετά το τέλος της ανάλυσης. Μόνο τότε μπορεί να γίνει μία μελέτη σύγκλισης των αποτελεσμάτων και μπορεί να δοθεί μία ποσοτική απάντηση σε αυτό το θέμα (πόσο καλή είναι η διακριτοποίηση). Οι αρχικές ιδιότητες που πρέπει να έχει μία σωστή διακριτοποίηση, παρόλο που είναι απαραίτητες, δεν είναι αρκετές.

Τα στοιχεία έχουν ιδανικό σχήμα όταν υπάρχει πολύ μικρό ή μηδενικό σφάλμα στους πίνακες ακαμψίας των στοιχείων. Θα ήταν ιδανικό να ήταν όλα τα τριγωνικά στοιχεία ισοσκελή, τα τετράπλευρα τετράγωνα και τα εξάεδρα κύβοι. Όμως είναι σχεδόν αδύνατο να μοντελοποιηθούν πολύπλοκα συστήματα με στοιχεία ιδανικού σχήματος.

Με βάση τα παραπάνω, η ποιότητα μιας διακριτοποίησης καθορίζεται από τρία κριτήρια :

- **Λόγος Πλευρών (Aspect Ratio):** Είναι ο λόγος ανάμεσα στη μεγαλύτερη και τη μικρότερη διάσταση του στοιχείου. Εξ' ορισμού είναι μεγαλύτερος ή ίσος του ένα. Αν είναι ίσος με ένα, το στοιχείο είναι ιδανικό. Οι αποδεκτές τιμές για αυτό το μέτρο εξαρτώνται από το είδος του στοιχείου και από το πρόβλημα, αλλά γενικά για

γραμμικά στοιχεία μία τιμή $AR < 3$ θεωρείται καλή, ενώ για επιφανειακά στοιχεία η τιμή είναι $AR < 10$.

- **Στρέβλωση (Distortion):** Η στρέβλωση των στοιχείων και η αναδίπλωσή τους εκτός του επιπέδου που βρίσκονται είναι σημαντικά ζητήματα. Στρέβλωση ορίζεται ως η διαφοροποίηση των γωνιών των κορυφών των στοιχείων από τις 90 μοίρες για τα τετράπλευρα και από τις 60 για τα τρίγωνα. Η αναδίπλωση προκύπτει όταν όλοι οι κόμβοι των τρισδιάστατων στοιχείων δε βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ή όταν όλοι οι κόμβοι μίας επιφάνειας ενός στερεού δε βρίσκονται μόνο σε ένα επίπεδο.
- **Μεταβατικότητα (Transitioning):** Υπάρχουν δύο τύποι μετάβασης. Ο βασικότερος τύπος είναι η αλλαγή της πυκνότητας των στοιχείων στη διεύθυνση αύξησης των τάσεων.

5.6.3 Συνοριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες

Το Mentat κατηγοριοποιεί τις συνοριακές συνθήκες ως εξής:

- A) Μηχανικές
- B) Θερμικές
- Γ) Ενεργειακές
- Δ) Ακουστικές
- Ε) Ηλεκτροστατικές
- Ζ) Μαγνητικές
- Η) Ηλεκτρομαγνητικές

Ανάλογα με την κλάση της ανάλυσης, οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να ληφθούν από μία από αυτές τις κατηγορίες. Εξαίρεση στον κανόνα αποτελεί η διπλή ανάλυση, για την οποία χρησιμοποιούνται μηχανικές και θερμικές συνοριακές συνθήκες. Στη κατηγορία των μηχανικών συνοριακών συνθηκών βασικοί τύποι είναι οι παρακάτω:

- 1) Σταθερή μετατόπιση
- 2) Σταθερή επιτάχυνση
- 3) Σημειακό φορτίο
- 4) Φορτίο σε ακμή

- 5) Επιφανειακό φορτίο
- 6) Βαρυτικό φορτίο
- 7) Κεντρομόλος δύναμη
- 8) Υδροστατική πίεση
- 9) Σταθερή ακμή
- 10) Σταθερή επιφάνεια
- 11) Μεταβαλλόμενη κατάσταση
- 12) Κομβική θερμοκρασία
- 13) Ελεύθεροι κόμβοι

Εκτός από τις συνοριακές συνθήκες, συχνά μπορεί να υπάρχουν και κάποιες αρχικές συνθήκες. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι η αρχική ταχύτητα σε μία δυναμική ανάλυση και η αρχική θερμοκρασία σε μία ανάλυση μετάδοσης θερμότητας.

5.6.4 Γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες υλικών

Σε γενικές γραμμές δεδομένα για όλες τις κατηγορίες υλικών μπορούν να εισαχθούν στο Marc μέσω του Mentat. Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τις ακόλουθα δεδομένα και κατηγορίες υλικών:

- 1) Ισότροπο
- 2) Ορθότροπο
- 3) Ανισότροπο
- 4) Υποελαστικό
- 5) Αφρός
- 6) Πέτρωμα
- 7) Σκόνη
- 8) Μετάδοση θερμότητας
- 9) Θερμική ενέργεια

- 10) Ακουστική
- 11) Ηλεκτροστατική
- 12) Μαγνητική
- 13) Ηλεκτρομαγνητική

5.6.5 Οι λειτουργίες Loadcases και Jobs

Αφού έχουν καθοριστεί όλοι οι παραπάνω παράγοντες σε μία ανάλυση, μένει να οριστεί το σύνολο των φορτίσεων τις οποίες υφίσταται το σώμα σε κάθε χρονική περίοδο. Κάθε τέτοιο σύνολο φορτίσεων ονομάζεται *Loadcase*. Η λειτουργία *Jobs* ουσιαστικά ελέγχει το σύνολο της ροής της ανάλυσης. Αυτό περιλαμβάνει τον τύπο της ανάλυσης, τις επιλογές της ανάλυσης, την περίπτωση φόρτισης που θα χρησιμοποιηθεί, τα αρχικά φορτία και άλλες παραμέτρους.

Αφού επιβεβαιωθούν όλες οι παράμετροι από το σύστημα, ορίζονται τα αποτελέσματα τα οποία ενδιαφέρουν το χρήστη μπορεί να ξεκινήσει η ανάλυση.

5.6.6 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Αφού έχει ολοκληρωθεί η ανάλυση πρέπει να γίνει ερμηνεία και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα που λαμβάνονται μπορούν να παρουσιαστούν γραφικά σε διάφορα διαγράμματα, όπως το διάγραμμα παραμορφωμένου σώματος, όπου παρουσιάζεται η αρχική κατάσταση του σώματος και η κατάστασή του μετά από κάποια βήματα της διαδικασίας, τα γραφήματα, όπου με τη βοήθεια καμπυλών παρουσιάζεται η σχέση δύο ή περισσότερων παραμέτρων που ενδιαφέρουν το χρήστη κ.α. Ακόμη είναι δυνατόν να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε άλλα προγράμματα όπως το excel, για περαιτέρω επεξεργασία και μελέτη.

6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΣΤΟ MARC

Το Marc παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα σχεδιασμού των μοντέλων που θα αναλυθούν. Στην περίπτωση των φιαλών όμως, τα μοντέλα είχαν σχεδιαστεί σε ένα άλλο πρόγραμμα, το SolidWorks. Αυτό έγινε για δύο κυρίως λόγους:

A) Τα τμήματα των φιαλών είχαν ήδη δημιουργηθεί στο συγκεκριμένο πρόγραμμα και έτσι έμενε μόνο να γίνει ο συνδυασμός και η συναρμολόγηση των τεμαχίων, χωρίς να χρειαστεί επανασχεδίαση στο Marc. Επίσης, με τη βοήθεια του SolidWorks και του BOMVET έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή σ των φιαλών.

B) Η διαδικασία σχεδιασμού στο Marc είναι αρκετά πιο δύσκολη από ότι στο SolidWorks, καθώς δεν είναι ένα κατεξοχήν σχεδιαστικό πρόγραμμα, αλλά ένα πρόγραμμα ανάλυσης. Έτσι, ο σχεδιασμός πολύπλοκων αντικειμένων είναι αρκετά χρονοβόρος και πολλές φορές είναι αρκετά δύσκολο να γίνει από ένα σχετικά αρχάριο χρήστη.

6.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ MARC

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση δεν είναι τα τρισδιάστατα μοντέλα που σχεδιάστηκαν, αλλά μία πολύ απλούστερη μορφή τους. Καθώς οι φιάλες είναι αξονοσυμμετρικές, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μία μόνο ακμή τους -η οποία όταν περιστραφεί γύρω από ένα άξονα κατά 360° δίνει το τρισδιάστατο σώμα- προκειμένου να γίνει η ανάλυση. Η ανάλυση που πραγματοποιείται σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται αξονοσυμμετρική ανάλυση και αποτελεί έναν ολόκληρο κλάδο της ανάλυσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με αυτό τον τρόπο πρέπει να δοθεί προσοχή κυρίως σε δύο σημεία: α) Το πρόβλημα πρέπει να είναι απολύτως αξονοσυμμετρικό και β) οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να είναι τέτοιες που να αντιπροσωπεύουν την πραγματική διάσταση του προβλήματος. Λόγω της ευρείας εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου έχουν αναπτυχθεί πολλά αξονοσυμμετρικά στοιχεία που βοηθούν στη μοντελοποίηση οποιουδήποτε προβλήματος.

Από το τρισδιάστατο μοντέλο που σχεδιάστηκε στο SolidWorks, με μία αυτοματοποιημένη διαδικασία μπορεί να προκύψει το μηχανολογικό σχέδιο του αντικειμένου. Στην περίπτωση των φιαλών χρειάστηκε να δημιουργηθεί η πρόσοψη και στη συνέχεια από αυτήν προέκυψε μία κάθετη διατομή του αντικειμένου (Σχήμα 6.1). Οι διατομές όλων των φιαλών παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

Έπειτα, έγινε εξαγωγή των αρχείων που περιείχαν τις διατομές, σε μορφή .dxf, ώστε να εισαχθούν στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCad. Αυτό ήταν απαραίτητο, διότι έπρεπε να γίνει περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να ληφθεί η μισή διατομή που στην πραγματικότητα χρειάζεται για την ανάλυση. Κάτι τέτοιο δεν μπορούσε να γίνει στο SolidWorks, καθώς η πρόσοψη και η

διατομή δημιουργήθηκαν με ένα

αυτοματοποιημένο

τρόπο από το

τρισδιάστατο σχέδιο, και

ήταν άμεσα εξαρτημένες

από αυτό. Δεν

μπορούσαν επομένως

να υποστούν κάποια

επιπλέον επεξεργασία.

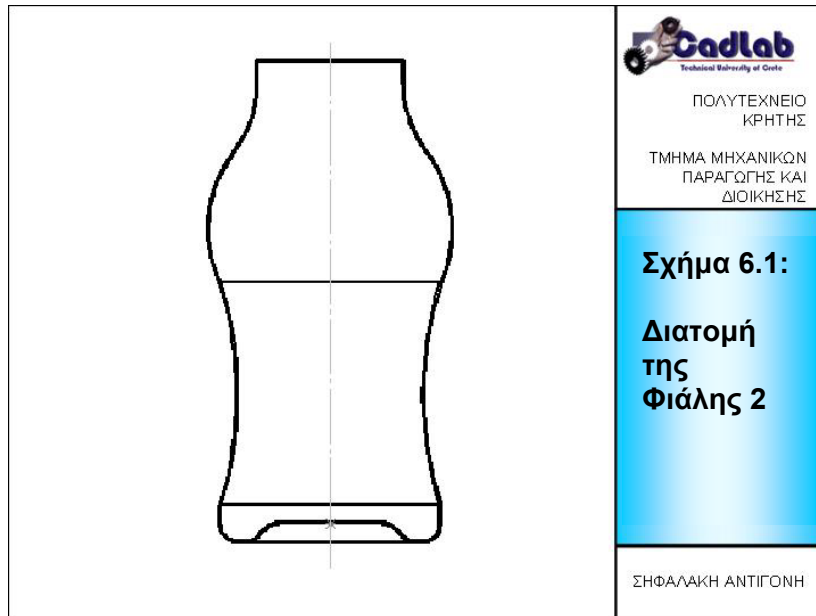
Επίσης, οι διατομές, οι

αντίστοιχες με αυτή του

σχήματος 6.1, έχουν

κάποιο πάχος, ίσο με

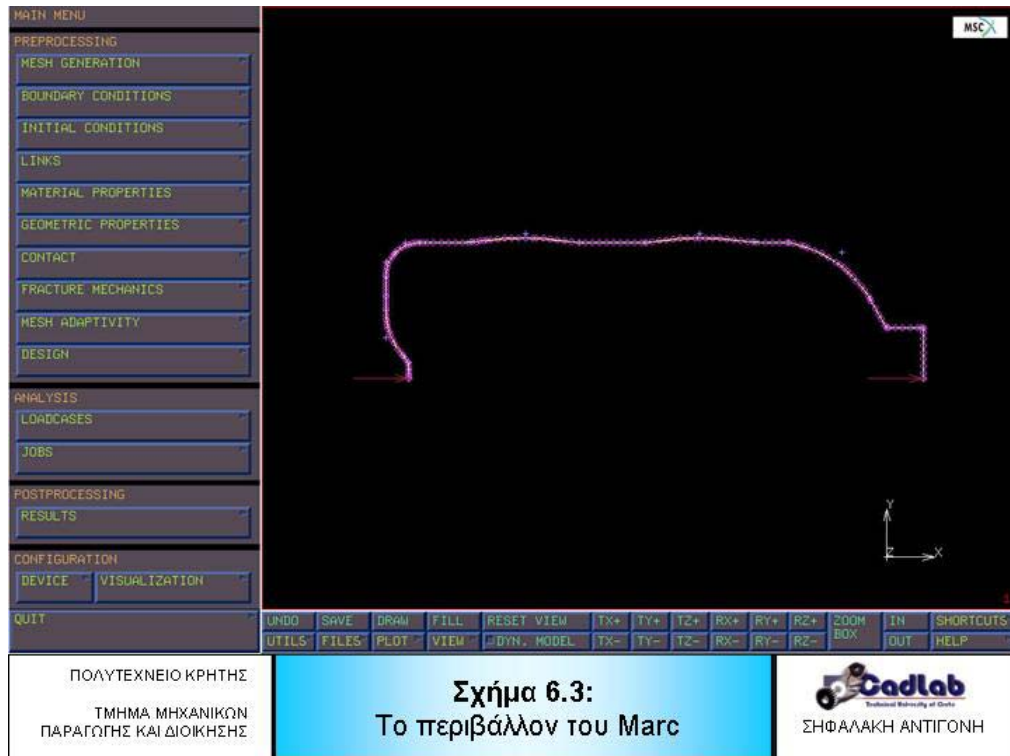
ένα χιλιοστό, όπως έχει οριστεί κατά τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου. Αυτό απεικονίζεται στο AutoCad με επιπλέον γραμμές οι οποίες δεν είναι απαραίτητες, καθώς το πάχος της φιάλης θα οριστεί στο Marc ίσο με το πάχος των στοιχείων. Μετά το πέρας της επεξεργασίας των διατομών στο AutoCad προέκυψαν απλές ακμές φιαλών, όπως αυτές που



παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2. Οι φιάλες είναι πλέον έτοιμες για την εισαγωγή τους στο Marc.

6.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΦΙΑΛΩΝ ΣΤΟ MARC

Βήμα 1^ο: Εισαγωγή των φιαλών στο πρόγραμμα



Από το μενού **FILES** του Marc επιλέγεται **import** (εισαγωγή) και στη συνέχεια **.dxf** για να εμφανιστούν όλα τα αρχεία της μορφής αυτής. Επιλέγεται το αρχείο που ενδιαφέρει το

χρήστη και **open**. Η μορφή που έχει το περιβάλλον του Marc παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3.



Βήμα 2^ο : Η διακριτοποίηση

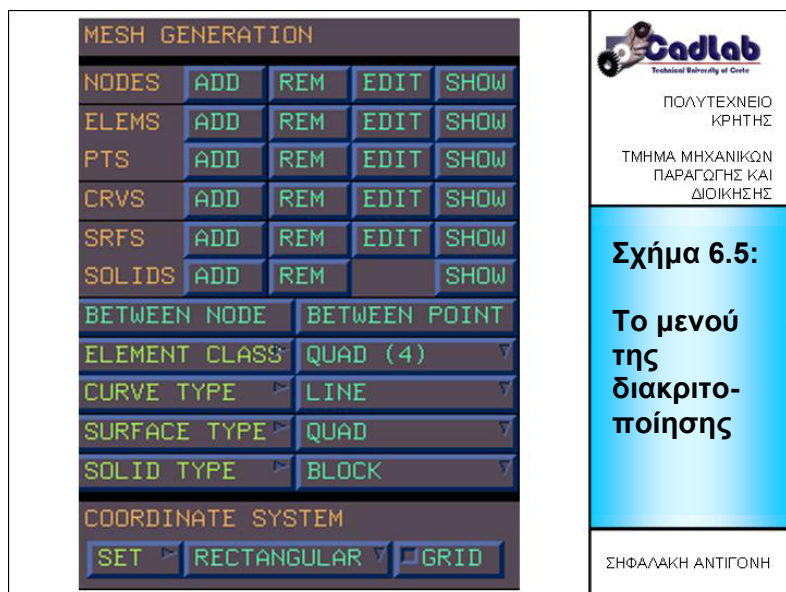
Στο κυρίως μενού του προγράμματος (Σχήμα 6.4) εμφανίζονται όλες οι βασικές παράμετροι που πρέπει να οριστούν για την προεπεξεργασία

(preprocessing), δηλαδή τη μοντελοποίηση του προβλήματος.

Αρχικά γίνεται η διακριτοποίηση.

Επιλέγοντας **MESH GENERATION** ανοίγει ένα δεύτερο μενού (Σχήμα 6.5). Αρχικά ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων από το **COORDINATE SYSTEM** → **SET**. Για την

αξονοσυμμετρική ανάλυση ο άξονας X ταυτίζεται πάντα με τον άξονα συμμετρίας του αντικειμένου.



Σχήμα 6.5:

Το μενού της διακριτοποίησης

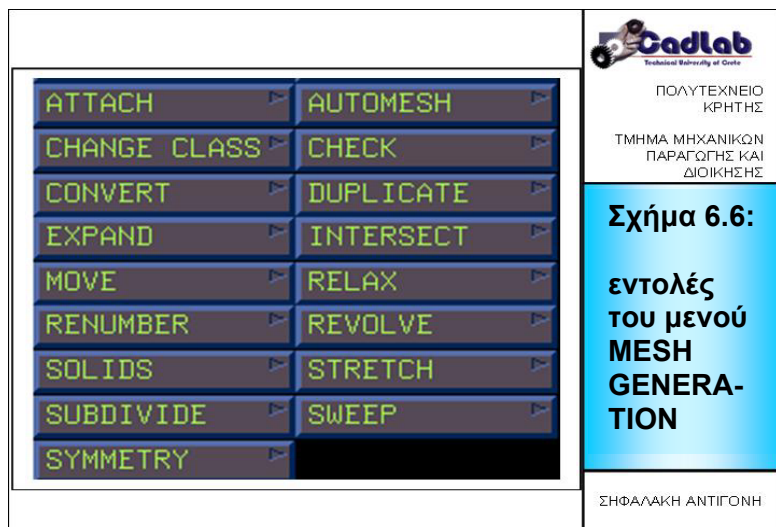
Επίσης δημιουργείται και ένα πλέγμα (**GRID**) το οποίο είναι απαραίτητο για το σχεδιασμό του μοντέλου και τη δημιουργία των στοιχείων, ιδιαίτερα αν γίνονται με την τεχνική της άμεσης προσέγγισης. Για το πλέγμα ορίζεται ο τύπος του (τετράπλευρο, κυκλικό ή κυλινδρικό) και η πυκνότητά του.

Καθώς οι γεωμετρικές οντότητες που συνιστούν τις φιάλες προϋπάρχουν, μένει μόνο να δημιουργηθούν τα στοιχεία.

Για τις φιάλες χρησιμοποιούνται γραμμικά στοιχεία. Σε αυτή τη φάση δε χρειάζεται να οριστεί ακριβώς ο τύπος του στοιχείου, αλλά μόνο η κλάση του. Από το **ELEMENT CLASS** επιλέγεται **LINE (2)**, δηλαδή γραμμικά στοιχεία με δύο κόμβους. Στη συνέχεια είναι δυνατόν να γίνει αλλαγή στην κλάση των στοιχείων, για παράδειγμα από **LINE (2)** σε **LINE (3)**, ώστε να υπάρχει καλύτερη προσέγγιση, κυρίως για καμπύλες.

Για την τεχνική της άμεσης δημιουργίας των στοιχείων, ο χρήστης επιλέγει **ELEMS→ADD** για να δημιουργήσει τα στοιχεία. Έπειτα πατάει με το ποντίκι πάνω σε δύο σημεία του πλέγματος για να ορίσει τον πρώτο και το δεύτερο κόμβο του κάθε στοιχείου. Είναι σημαντικό λοιπόν το πλέγμα να είναι τόσο πυκνό, ώστε τα σημεία που ορίζονται ως κόμβοι στοιχείων να βρίσκονται ακριβώς πάνω στις ακμές του μοντέλου. Επίσης, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην υπάρχουν ελεύθεροι κόμβοι στον κάνναβο διακριτοποίησης και στα σημεία που αναμένονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις ή που η μορφή του μοντέλου είναι πιο περίπλοκη, η διακριτοποίηση να είναι πιο πυκνή. Όταν οι κόμβοι δεν βρίσκονται ακριβώς εκεί που πρέπει, μπορούν να μετακινηθούν με τη βοήθεια των λειτουργιών **MOVE** και **ATTACH** που βρίσκονται επίσης στο μενού της διακριτοποίησης (Σχήμα 6.6)

Η εντολή MOVE είναι γενικότερη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετακίνηση

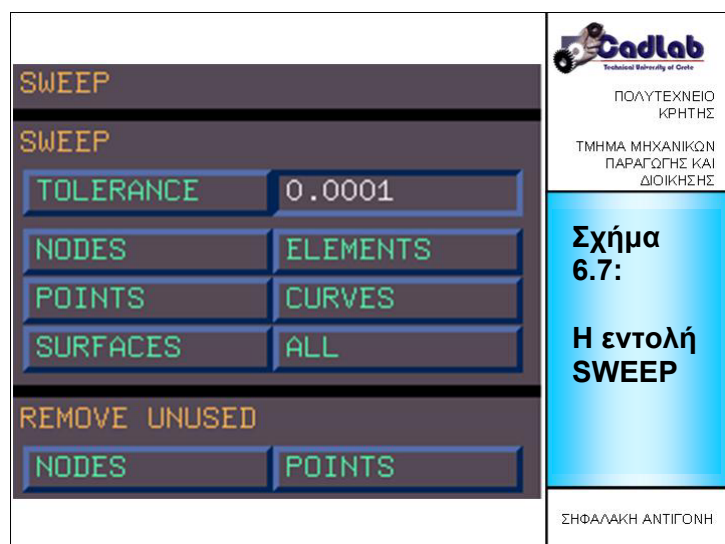


οποιασδήποτε οντότητας του μοντέλου, είτε αυτή είναι γεωμετρική είτε είναι κάποιο στοιχείο της διακριτοποίησης. Επιλέγεται το στοιχείο που θα μετακινηθεί και στη συνέχεια το πόσο πρέπει να μετακινηθεί σε κάθε κατεύθυνση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί.

Η εντολή ATTACH λειτουργεί ως εξής: επιλέγονται τα στοιχεία θα συνδεθούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση **nodes to curve**, δηλαδή οι κόμβοι να τοποθετηθούν πάνω στην καμπύλη. Κάθε φορά το πρόγραμμα ρωτάει ποιοι κόμβοι και πάνω σε ποια καμπύλη θέλει ο χρήστης να τοποθετηθούν. Επιλέγονται, πάντα με το ποντίκι και με δεξί κλικ εφαρμόζεται η εντολή.

Η διαδικασία αυτή δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη στην περίπτωση των φιαλών, αλλά θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και κουραστική αν το μοντέλο ήταν περίπλοκο, για παράδειγμα αν είχαν εισαχθεί οι φιάλες στην τρισδιάστατη μορφή τους.

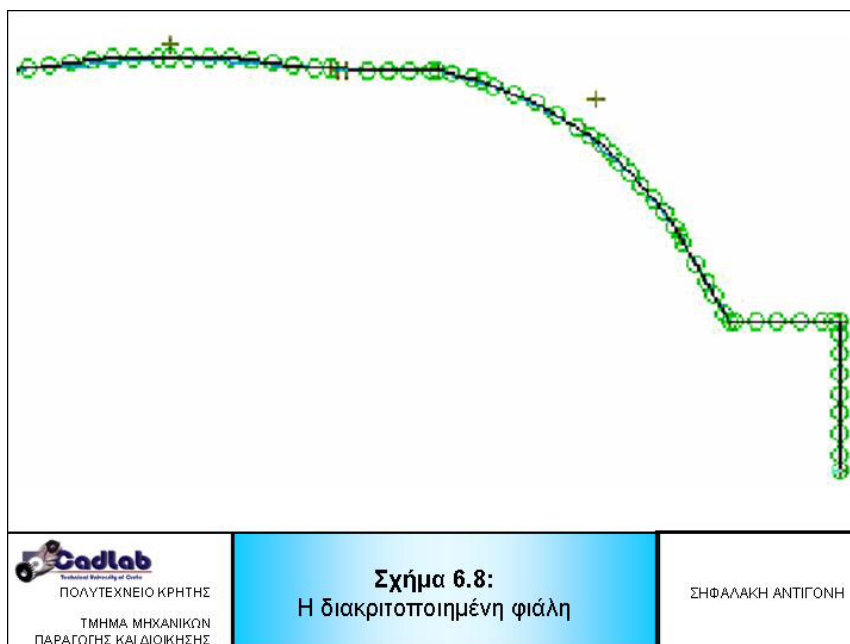
Η γεωμετρική προσέγγιση, ενώ έχει περισσότερα στάδια για τη δημιουργία των στοιχείων, στην πραγματικότητα είναι πιο απλή από την άμεση προσέγγιση και συνήθως λιγότερο χρονοβόρα. Αφού έχει δημιουργηθεί η μορφή του μοντέλου με τη βοήθεια γραμμών



και καμπύλων, με την εντολή **CONVERT → CURVES TO ELEMENTS** δίνεται η εντολή για μετατροπή των καμπύλων σε στοιχεία. Στη συνέχεια ο χρήστης επιλέγει ποιες γραμμές θέλει να μετατρέψει και σε πόσα στοιχεία να διαιρεθεί η κάθε μία. Σε αυτή την περίπτωση οι κόμβοι των στοιχείων βρίσκονται ακριβώς πάνω στις καμπύλες και έτσι δε χρειάζεται

να μετακινηθούν.

Κατά τη δημιουργία των στοιχείων είναι δυνατόν κάποιοι από τους κόμβους να έχουν οριστεί δύο φορές. Όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο, το πρόγραμμα δε μπορεί να τρέξει. Για αυτό το λόγο με επιλογή της εντολής **SWEEP** → **NODES** σβήνονται όλοι οι διπλοί κόμβοι.



Cadlab
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Σχήμα 6.8:
Η διακριτοποιημένη φιάλη

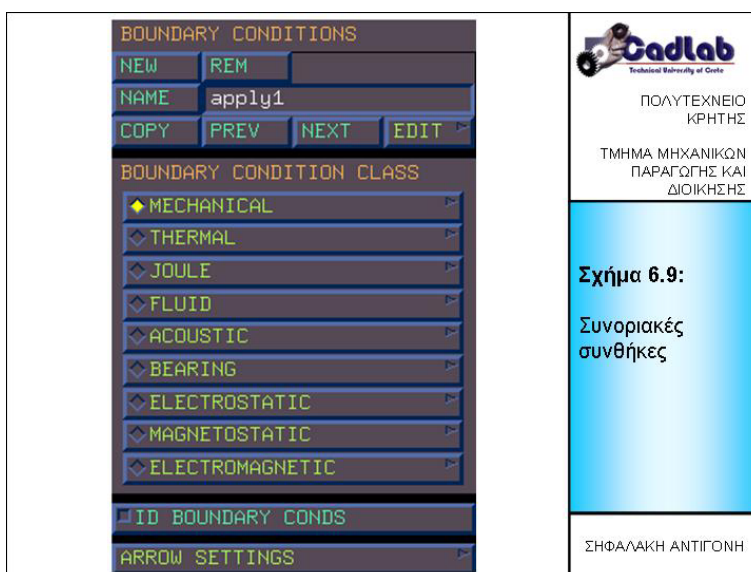
ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Ακόμη, σε αυτό το στάδιο, μπορεί να γίνει η αλλαγή κλάσης των στοιχείων, σε περίπτωση που ο χρήστης το επιθυμεί. Αυτό γίνεται με την εντολή **CHANGE CLASS**. Ο χρήστης επιλέγει την κλάση στην οποία θέλει να μετατραπούν τα στοιχεία, και τα στοιχεία στα οποία θέλει να εφαρμοστεί η μετατροπή αυτή. Με την αλλαγή κλάσης σε μεγαλύτερη, δημιουργούνται νέοι κόμβοι, οι οποίοι μπορεί να μη βρίσκονται ακριβώς πάνω στην καμπύλη. Αυτό διορθώνεται με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως, δηλαδή με την εντολή **MOVE** ή **ATTACH**.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται λεπτομέρεια από τη μορφή της διακριτοποιημένης φιάλης. Οι κύκλοι συμβολίζουν τους κόμβους των στοιχείων.

Βήμα 3^ο : Ορισμός των συνοριακών συνθηκών

Ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών είναι ένα πολύ σημαντικό στάδιο της



Cadlab
Technical University of Crete

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Σχήμα 6.9:

Συνοριακές
συνθήκες

ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

μοντελοποίησης. Χρησιμοποιώντας λάθος συνοριακές συνθήκες, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να είναι εντελώς εσφαλμένα. Στην περίπτωση των φιαλών ορίστηκαν τέσσερις συνοριακές συνθήκες που περιγράφουν το πρόβλημα.

Από το κυρίως μενού του Marc επιλέγεται **BOUNDARY CONDITIONS** → **NEW**. Εμφανίζεται το μενού των συνοριακών συνθηκών (Σχήμα 6.9), όπου επιλέγεται **MECHANICAL**. Στο υπομενού που ανοίγει (Σχήμα 6.10), ορίζονται μία μία οι συνοριακές συνθήκες για τη φιάλη.

Η πρώτη συνθήκη που ορίζεται είναι η **FIXED DISPLACEMENT**, δηλαδή σταθερή μετατόπιση, ως προς τους άξονες X και Z για τον πρώτο και τον τελευταίο κόμβο της φιάλης, οι οποίοι βρίσκονται πάνω στον άξονα συμμετρίας του μοντέλου (Σχήμα 6.11).

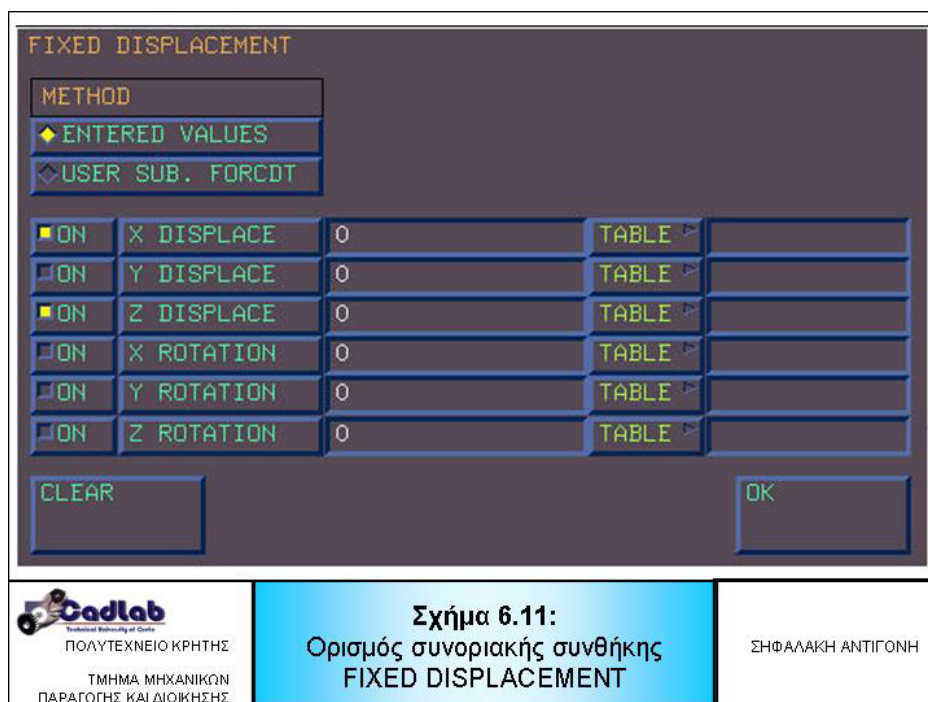


Σχήμα 6.10:

Μενού μηχανικών συνοριακών συνθηκών

ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη ουσιαστικά ορίζει τον άξονα συμμετρίας του μοντέλου, εξασφαλίζοντας την σταθερότητά του ως προς την ακτινική διεύθυνση.



Σχήμα 6.11:
Ορισμός συνοριακής συνθήκης
FIXED DISPLACEMENT

ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Η θεώρηση ότι οι φιάλες είναι γεμάτες με νερό, δίνει την επόμενη συνοριακή συνθήκη, αυτήν δηλαδή που προσομοιώνει την εσωτερική πίεση κάθε φιάλης. Στην πραγματικότητα, η πίεση αυτή δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα Χ, δηλαδή αυξάνεται από το λαιμό προς τον πάτο κάθε φιάλης. Οι τιμές της όμως είναι πολύ μικρές, και έτσι χωρίς ουσιαστικό σφάλμα θεωρείται σταθερή και ίση με τη μέγιστη τιμή για κάθε φιάλη. Επίσης, με αυτό τον τρόπο, η κάθε φιάλη υποβάλλεται σε μία πιο εντατική κατάσταση από την πραγματική και έτσι ο έλεγχος που γίνεται για την αντοχή της είναι ακόμη πιο αυστηρός.

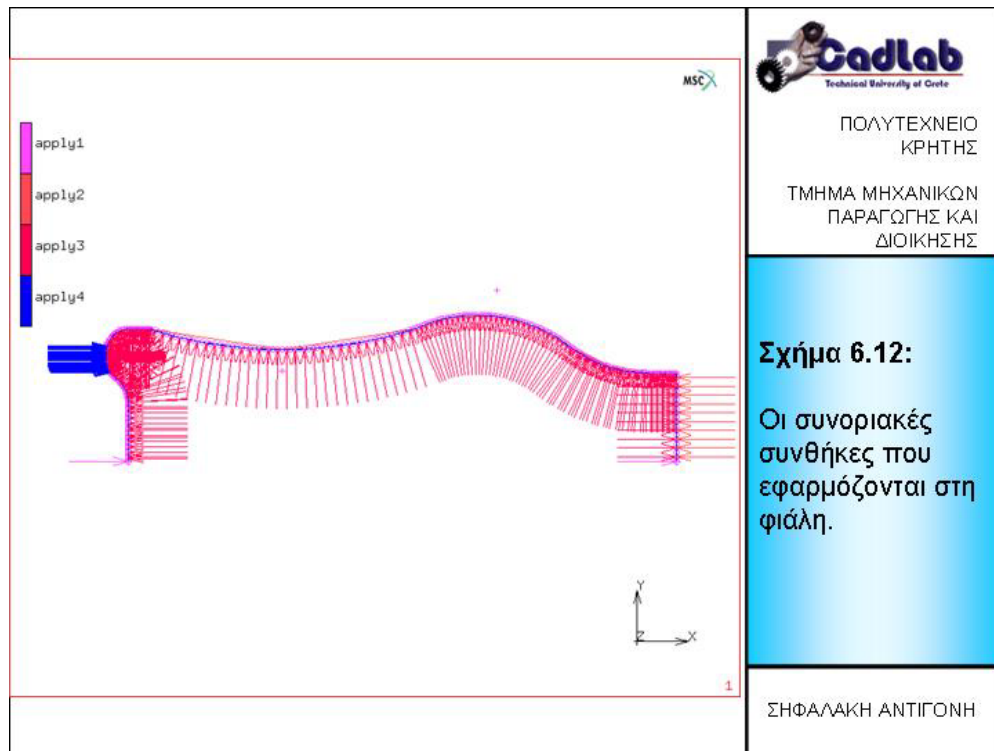
Για τον ορισμό της συνοριακής συνθήκης επιλέγεται από το μενού του σχήματος 6.10 το **EDGE LOAD**, δίνεται η τιμή που έχει υπολογιστεί για την πίεση και στη συνέχεια επιλέγονται οι ακμές στις οποίες θα εφαρμοστεί. Εδώ επιλέγονται όλες οι ακμές του μοντέλου.

Η επόμενη συνοριακή συνθήκη, αντιπροσωπεύει το βάρος των φιαλών που μπορεί να τοποθετηθούν πάνω από κάθε φιάλη. Θεωρώντας ότι οι φιάλες κατασκευάζονται από υλικό PET, και δεδομένου ότι είναι γεμάτες με νερό όπως προαναφέρθηκε, υπολογίζεται το συνολικό βάρος κάθε φιάλης. Υπολογίζονται επίσης οι τιμές για πενταπλάσιο, δεκαπλάσιο, δεκαπενταπλάσιο και εικοσαπλάσιο βάρος, με στόχο να ελεγχθεί η περίπτωση πάνω από μια φιάλη να βρίσκονται όχι μόνο μία, αλλά άλλες πέντε, δέκα, δεκαπέντε, είκοσι φιάλες αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο είναι πολύ πιθανό να συμβεί στην πραγματικότητα κατά τη δεματοποίηση και αποθήκευση των φιαλών.

Επιλέγεται και πάλι το **EDGE LOAD**, ορίζεται η διεύθυνση της δύναμης, παράλληλη προς τον άξονα Χ και δίνεται η τιμή της. Έπειτα ορίζεται ως ακμή εφαρμογής της η άνω ακμή του λαιμού της φιάλης. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι φιάλες έχουν δημιουργηθεί ως κλειστά κελύφη, δηλαδή δεν έχει σχεδιαστεί ξεχωριστό πώμα. Επομένως όλο το αντικείμενο είναι ομοιόμορφου πάχους και αποτελείται από το ίδιο υλικό.

Τελευταία συνοριακή συνθήκη είναι αυτή που ορίζει ότι η φιάλη είναι τοποθετημένη πάνω σε ένα σταθερό επίπεδο, επομένως οι ακμές του πάτου που είναι σε επαφή με το επίπεδο αυτό δε μετακινούνται. Η περίπτωση αυτή είναι αντίστοιχη με την πρώτη, επιλέγεται και πάλι **FIXED DISPLACEMENT** → **ON X DISPLACE, ON Z DISPLACE**.

Η φιάλη με όλες τις συνοριακές συνθήκες που έχουν εφαρμοστεί παρουσιάζεται στο σχήμα 6.12.



Βήμα 4^ο : Ορισμός των ιδιοτήτων του υλικού

Το υλικό που αποτελεί τη φιάλη είναι το PET (Polyethylene Terephthalate). Οι ιδιότητές του διαφοροποιούνται ελαφρά, ανάλογα με την κατεργασία την οποία έχει υποστεί και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Για τους σκοπούς της εργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες τιμές ιδιοτήτων, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1

Πυκνότητα	1,22g / cc
Απορρόφηση νερού	0,13%
Μέτρο Ελαστικότητας	1,8 GPa
Λόγος Poisson	0,3
Σημείο Τήξης	250° C

Πίνακας 6.1

Από το κυρίως μενού επιλέγεται **MATERIAL PROPERTIES**.

Το υλικό ορίζεται ως ισότροπο (Σχήμα 6.13) και έπειτα στο παράθυρο των ιδιοτήτων ισότροπου υλικού (Σχήμα 6.13) ορίζονται οι ιδιότητές του, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus), Λόγος Poisson (Poisson's Ratio) και πυκνότητα (Mass Density). Οι

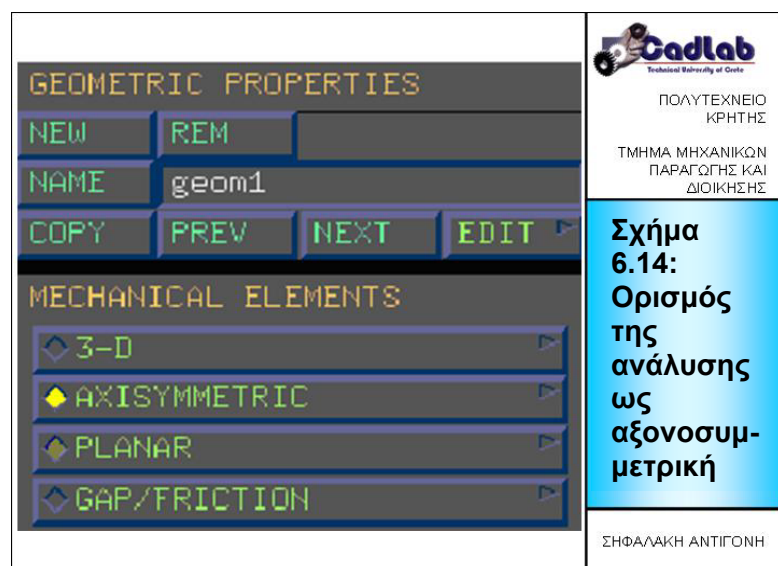
ιδιότητες αυτές εφαρμόζονται σε όλα τα στοιχεία μέσω των εντολών **ELEMS** → **ADD** → **ALL EXIST**.

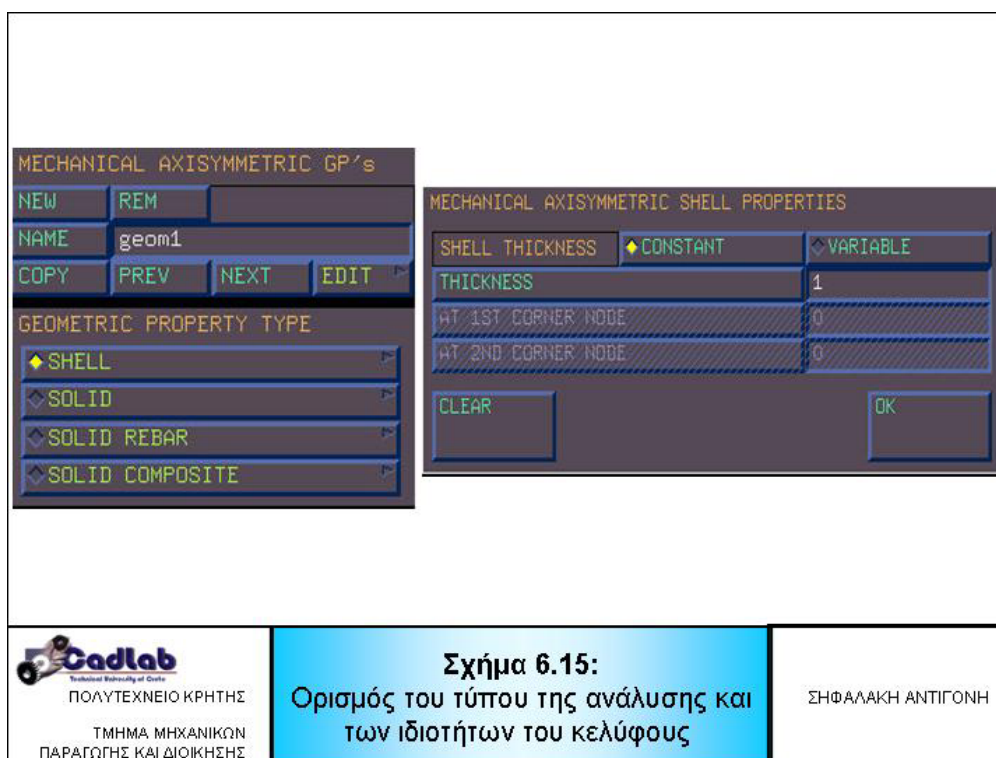


Βήμα 5^ο : Ορισμός γεωμετρικών ιδιοτήτων (ή θεώρηση επίλυσης)

Από το κυρίως μενού επιλέγεται **GEOMETRIC PROPERTIES**.

Έπειτα ορίζεται η ανάλυση ως αξονοσυμμετρική (Σχήμα 6.14), ο τύπος της SHELL (κέλυφος) και το πάχος του κελύφους ομοιόμορφο και ίσο με ένα χιλιοστό (Σχήμα 6.15) Οι ιδιότητες αυτές εφαρμόζονται σε όλα τα στοιχεία. Με τρόπο όμοιο με αυτό που προαναφέρθηκε.





Βήμα 6^ο: Περιπτώσεις φόρτισης (Loadcases)

Από το κυρίως μενού, στην περιοχή **ANALYSIS** επιλέγεται το **LOADCASES**. Σε αυτό το στάδιο επιβεβαιώνεται ότι οι συνθήκες που έχουν δοθεί στο μοντέλο μέχρι στιγμής έχουν εισαχθεί κανονικά. Οι διαδοχικές εντολές που δίνονται είναι οι εξής:

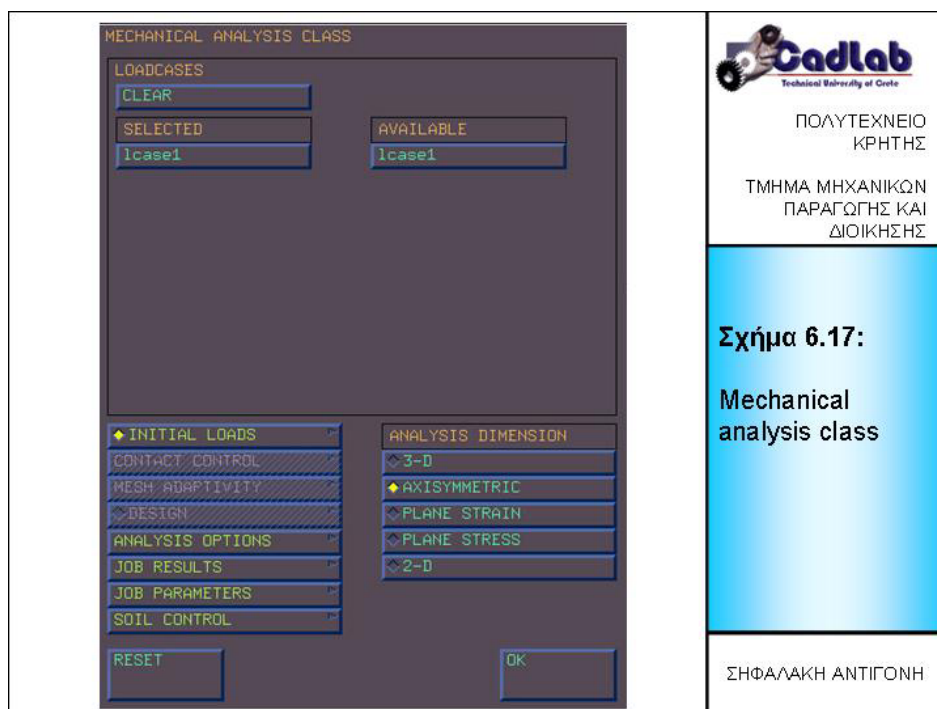
LOADCASES → **MECHANICAL** → **STATIC** → **LOADS** (Σχήμα 6.16). Εδώ ελέγχεται αν όλες οι συνοριακές συνθήκες έχουν ληφθεί υπόψη.



Βήμα 7^ο : JOBS

Είναι η τελευταία φάση πριν την ανάλυση. Γίνεται η επιλογή **JOBS** → **MECHANICAL** και στο παράθυρο που εμφανίζεται (Σχήμα 6.17) στο **ANALYSIS DIMENSION** επιλέγεται **AXISYMMETRIC**. Από τις διαθέσιμες περιπτώσεις φόρτισης επιλέγεται η lcase1 και γίνεται πάλι έλεγχος των συνοριακών συνθηκών (**INITIAL LOADS**). Επίσης επιλέγονται τα αποτελέσματα που θέλει να πάρει ο χρήστης από το πρόγραμμα (**JOB RESULTS**). Στην περίπτωση των φιαλών επιλέχθηκαν τα μεγέθη: τάση (stress), παραμόρφωση (strain),

ελαστική παραμόρφωση (elastic strain), Von Mises Stress. Επίσης το πρόγραμμα εμφανίζει πάντα αποτελέσματα για κάποια μεγέθη όπως η μετατόπιση (displacement).



Εδώ ορίζεται και ο τύπος των στοιχείων, από το **ELEMENT TYPES** → **AXISYMMETRIC** → **SHELL** → **89**. Από τη βιβλιοθήκη στοιχείων του προγράμματος επιλέγεται ο τύπος 89, που ορίζεται ως «**Thick curved axisymmetric shell**», δηλαδή καμπύλο, αξονοσυμμετρικό κελυφοειδές στοιχείο ορισμένου πάχους. Η επιλογή αυτή εφαρμόζεται σε όλο το μοντέλο.

Η προεπεξεργασία έχει ολοκληρωθεί και το μοντέλο είναι έτοιμο να τρέξει.

Με **CHECK** και **SAVE** αποθηκεύεται το αρχείο και τρέχει δίνοντας τις εντολές **RUN** → **SUBMIT 1** → **MONITOR**. Αν το μοντέλο τρέξει με επιτυχία ο κωδικός που εμφανίζεται (**EXIT NUMBER**) είναι 3004 (Σχήμα 6.18).



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Σχήμα 6.18:

Το παράθυρο
το τρεξίματος

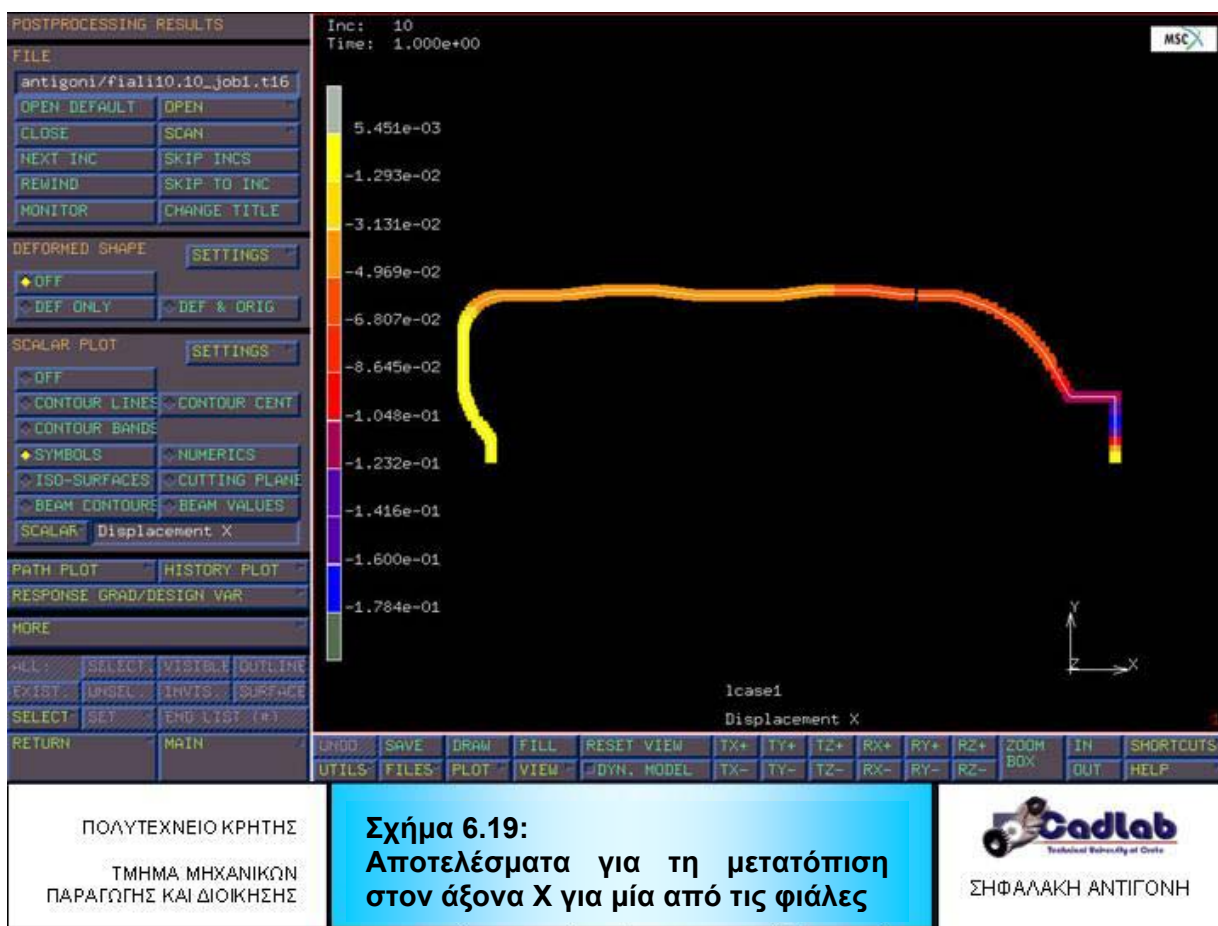
ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Βήμα 8^ο : Αποτελέσματα

Από το κυρίως μενού επιλέγεται **RESULTS** και στη συνέχεια με **OPEN DEFAULT** ανοίγει το τελευταίο μοντέλο που έχει τρέξει (Σχήμα 6.19). Από το εργαλείο **SCALAR** επιλέγονται οι μεταβλητές που θέλει να δει ο χρήστης. Επίσης είναι δυνατόν να παρουσιαστεί το παραμορφωμένο σώμα, και να δημιουργηθούν διαγράμματα για όλα τα μεγέθη που χρειάζεται να μελετηθούν. Μπορούν ακόμη να εμφανιστούν οι τιμές του μεγέθους που μας ενδιαφέρει σε κάθε κόμβο, και να μεγεθυνθεί κάποιο τμήμα της φιάλης για να μελετηθεί με περισσότερη λεπτομέρεια. Πολύ παραστατική είναι και η απεικόνιση της διαμόρφωσης των τιμών των μεγεθών με χρωματική κλίμακα που δίνει τη δυνατότητα οπτικής εμποπτείας του προβλήματος, για διαμόρφωση μιας αρχικής γενικής εικόνας.

Βασικό είναι επίσης το γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων που προέκυψαν από την ανάλυση σε προγράμματα όπως το Excel για περαιτέρω επεξεργασία και σύγκριση.

Για τις δεκαεπτά φιάλες που δημιουργήθηκαν πραγματοποιήθηκαν πέντε τρεξίματα για κάθε μία, για πέντε διαφορετικές τιμές της τάσης που εφαρμόζεται στο άνω μέρος του λαιμού και αντιπροσωπεύει το βάρος άλλων όμοιων φιαλών που μπορεί να είναι



τοποθετημένες πάνω της. Για κάθε ένα λοιπόν από τα συνολικά 85 μοντέλα, εισήχθησαν δεδομένα στο Excel όπου πραγματοποιήθηκε επιπλέον επεξεργασία και σύγκριση των φιαλών που προέκυψαν για τις διάφορες φιάλες. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τις δεκαεπτά φιάλες, στόχος ήταν να μελετηθεί η αντοχή τους στις καταπονήσεις στις οποίες υποβλήθηκαν. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων ήταν αντίστοιχες για όλες τις φιάλες και οι τιμές των τάσεων προέκυψαν με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φιαλών. Τα μεγέθη τα οποία μελετήθηκαν είναι η μετατόπιση (displacement), η παραμόρφωση (strain), και η τάση (stress). Τα τρία αυτά μεγέθη επιλέχθηκαν καθώς είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά. Το πρόγραμμα των Πεπερασμένων Στοιχείων υπολογίζει για όλα τα παραπάνω μεγέθη τις τιμές τους σε κάθε κόμβο του μοντέλου. Οι μέγιστες τιμές για κάθε μέγεθος και κάθε φιάλη παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

Επίσης γίνεται μία προσπάθεια διερεύνησης του εάν και με ποιο τρόπο μπορεί να συσχετιστεί ο περιβαλλοντικός συντελεστής σ με τα μεγέθη αυτά. Ουσιαστικά διερευνάται το εάν ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός των φιαλών επηρεάζει αρνητικά την αντοχή τους στις καταπονήσεις.

Για να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις φιάλες, οι δυνάμεις εκφράζονται ως πολλαπλάσια του βάρους της φιάλης που μελετάται κάθε φορά. Σε διαφορετική περίπτωση, η διακύμανση στις τιμές των τάσεων θα ήταν πολύ μεγάλη, αφού το μέγεθος των φιαλών ποικίλει, και τα μεγέθη δε θα ήταν συγκρίσιμα. Παρόλα αυτά, για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στη σύγκριση, οι φιάλες χωρίζονται σε δύο ομάδες, μικρές και μεγάλες φιάλες, δηλαδή φιάλες από 200ml – 750 ml και από 900ml – 3,5 lt. Οι δύο ομάδες και η κατάταξή τους με βάση το σ παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.1, 7.2.

Μεγάλες Φιάλες: Όγκος 900ml - 3,5 lt			
A/A	Φιάλη	σ	συνολικός όγκος φιάλης (lt)
1	1	0.88801	3.22277755
2	8	0.87932	1.23653160
3	15	0.86180	1.40804385
4	2	0.80986	2.44455359
5	16	0.80932	1.05459354
6	4	0.79525	1.82652985
7	6	0.74886	0.91589232
8	5	0.73108	1.00052951

Πίνακας 7.1: Κατάταξη μεγάλων φιαλών με βάση το σ

Μικρές φιάλες: Όγκος 200 ml - 750 ml			
A/A	Φιάλη	σ	συνολικός όγκος φιάλης (lt)
1	17	0.92108	0.68820851
2	14	0.90082	0.68941904
3	3	0.87824	0.62771855
4	10	0.87820	0.71463043
5	9	0.85144	0.56172721
6	13	0.81576	0.43285971
7	12	0.78455	0.44896356
8	11	0.77885	0.59417612
9	7	0.73229	0.22153511

Πίνακας 7.2: Κατάταξη μικρών φιαλών με βάση το σ

Για κάθε μία από τις ομάδες φιαλών δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Στην περίπτωση των μεγάλων φιαλών, παρουσιάζεται γενικά μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών, κάτι που δεν έχει σχέση τόσο με το σ , όσο με το μεγαλύτερο εύρος τιμών των όγκων των φιαλών. Επομένως για τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν είναι απαραίτητο να γίνει ακόμη πιο αυστηρή ομαδοποίηση των φιαλών. Για τις μικρές φιάλες, το εύρος των τιμών δεν είναι τόσο μεγάλο, επομένως μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά αποτελεσματική σύγκριση.

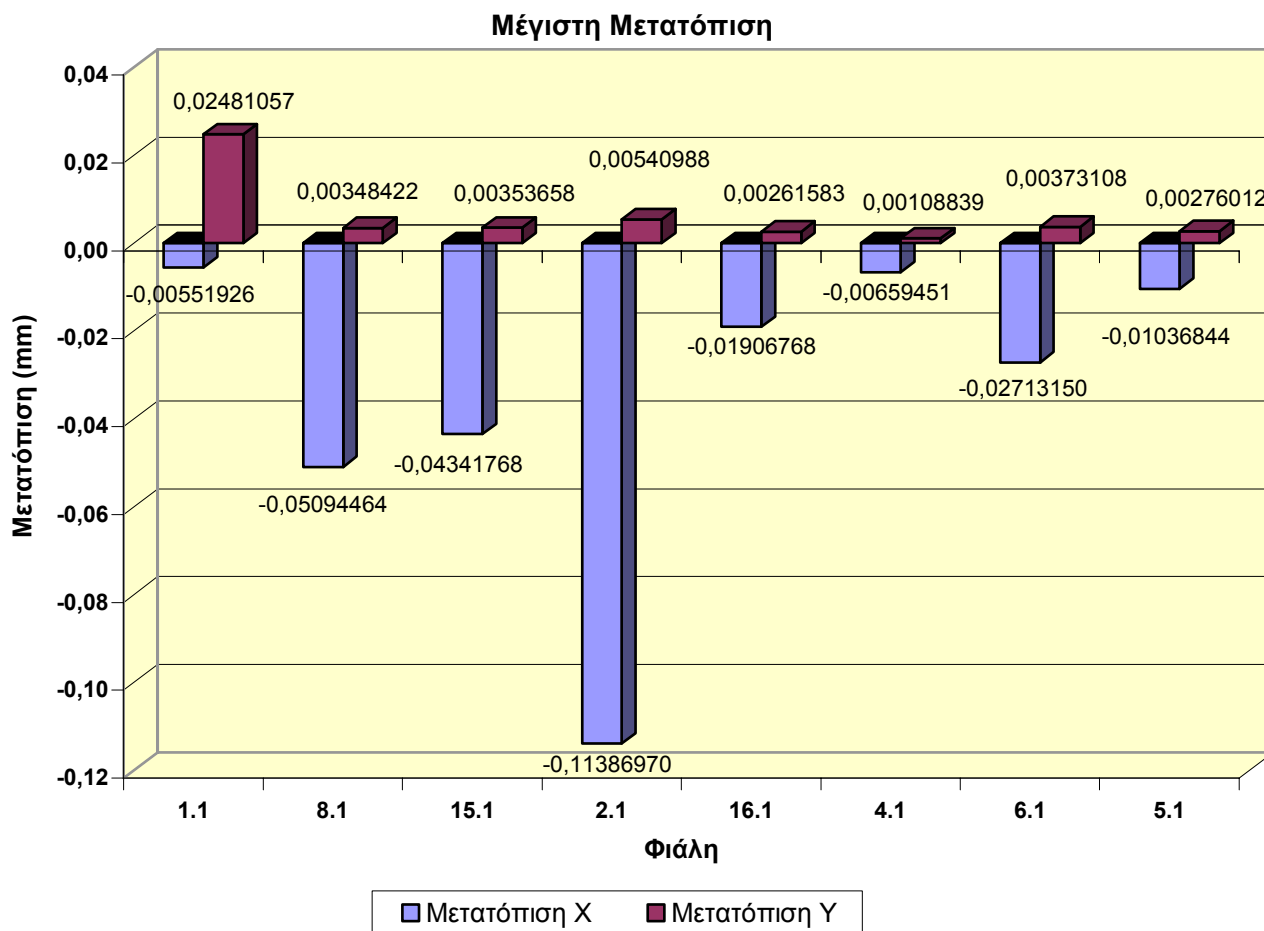
7.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Σε πρώτη φάση δημιουργούνται τα διαγράμματα μέγιστης Μετατόπισης, μέγιστης Παραμόρφωσης και μέγιστης Τάσης για τις φιάλες, στην περίπτωση που πάνω από αυτές τοποθετείται μία ίδια φιάλη. Οι φιάλες αυτές συμβολίζονται με τον αριθμό τους και το πρόθεμα **.1** (π.χ. Φιάλη 8.1). Στη συνέχεια δημιουργούνται τα ίδια διαγράμματα για τις φιάλες, όταν πάνω τους τοποθετούνται άλλες είκοσι ίδιες φιάλες (στην περίπτωση αυτή, ο συμβολισμός γίνεται με το πρόθεμα **.20**, (π.χ. φιάλη 8.20). Σκοπός είναι να μελετηθεί αν οι φιάλες αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο όταν η καταπόνηση είναι πολύ μεγαλύτερη.

Επίσης, σε όλα τα διαγράμματα οι φιάλες έχουν τοποθετηθεί με την ίδια σειρά, από αυτήν που έχει το μεγαλύτερο σ προς αυτήν με το μικρότερο σ . Αυτό γίνεται για να μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί αν υπάρχει κάποια εμφανής συσχέτιση της τιμής του σ με τα αντίστοιχα μεγέθη.

1^η Ομάδα φιαλών: Όγκος 900ml - 3,5 lt

Όσον αφορά τη μετατόπιση στους δύο άξονες, παρατηρούνται τα εξής:

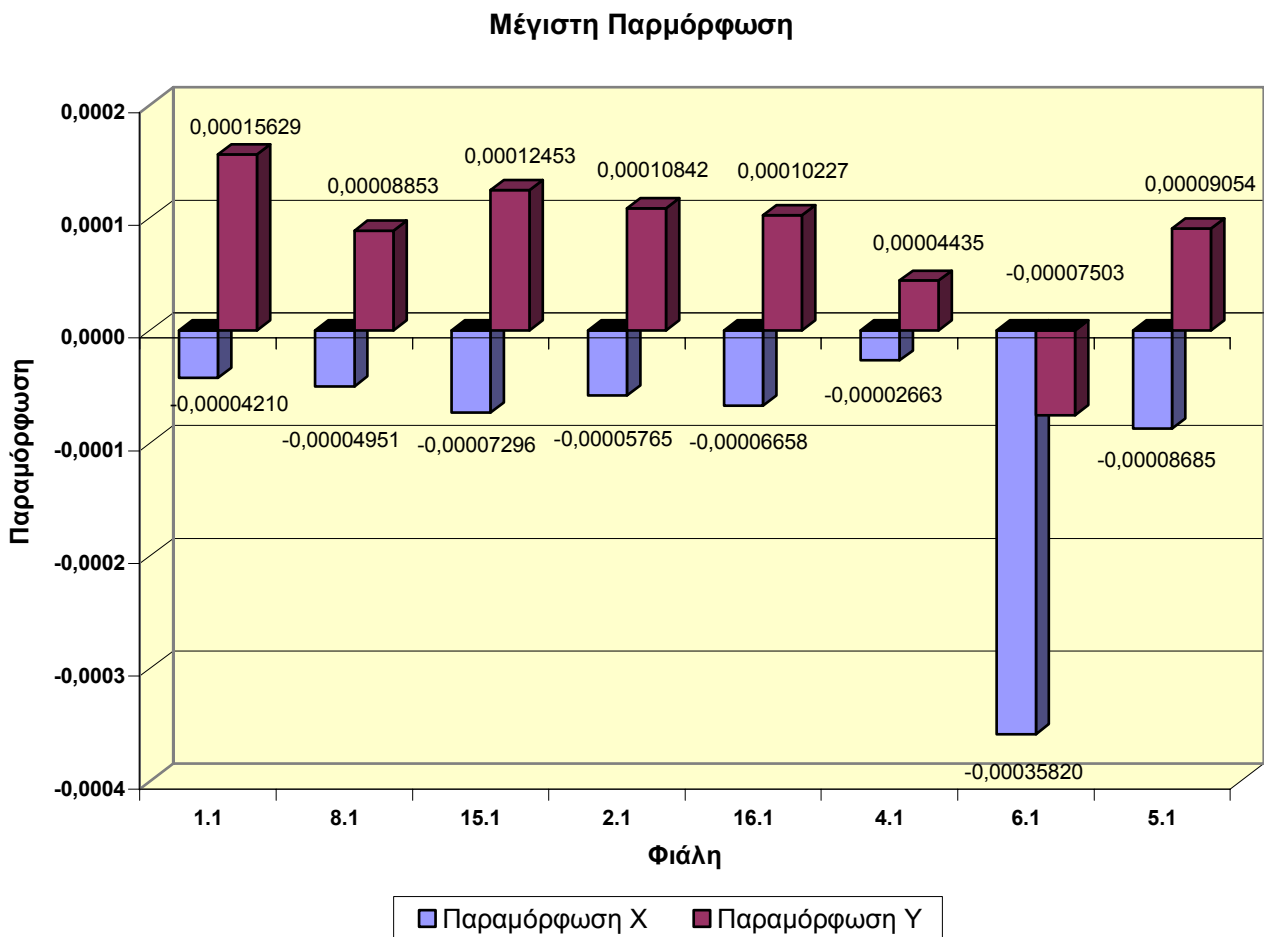


Η φιάλη 1.1, η οποία έχει το μεγαλύτερο σ , έχει τη μικρότερη μετατόπιση στον άξονα X, και τη μεγαλύτερη στον άξονα Y. Η φιάλη 2.1 έχει πολύ μεγάλη μετατόπιση στον άξονα X, ενώ τη μικρότερη μετατόπιση στον άξονα Y έχει η φιάλη 4.1. Εκτός από τη φιάλη 1.1, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, οι μετατοπίσεις στον άξονα X είναι αρκετά μεγαλύτερες από ότι στον άξονα Y, κάτι που είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι στα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί στο Marc, ο άξονας X είναι ο κατακόρυφος άξονας και άξονας συμμετρίας των φιαλών.

Συγκρίνοντας τις φιάλες 16.1, 6.1 και 5.1, οι οποίες έχουν σχεδόν ίδιο συνολικό όγκο, παρατηρείται ότι η φιάλη 16.1, η οποία έχει το μεγαλύτερο σ , έχει τη μικρότερη τιμή μετατόπισης στον άξονα Y, ενώ τη μικρότερη μετατόπιση στον άξονα X έχει η φιάλη 5.1. Ανάμεσα στις φιάλες 8.1, 15.1 και 4.1, που έχουν σχετικά κοντινές τιμές όγκου, η φιάλη 4.1 έχει τις μικρότερες τιμές μετατόπισης και στους δύο άξονες, έχει και το μικρότερο σ , ενώ τις μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζει στον άξονα X η φιάλη 8.1 και στον άξονα Y η φιάλη 15.1. Όσον αφορά τις δύο μεγαλύτερες φιάλες, 1.1 και 2.1, η φιάλη 1.1 παρουσιάζει τη μικρότερη

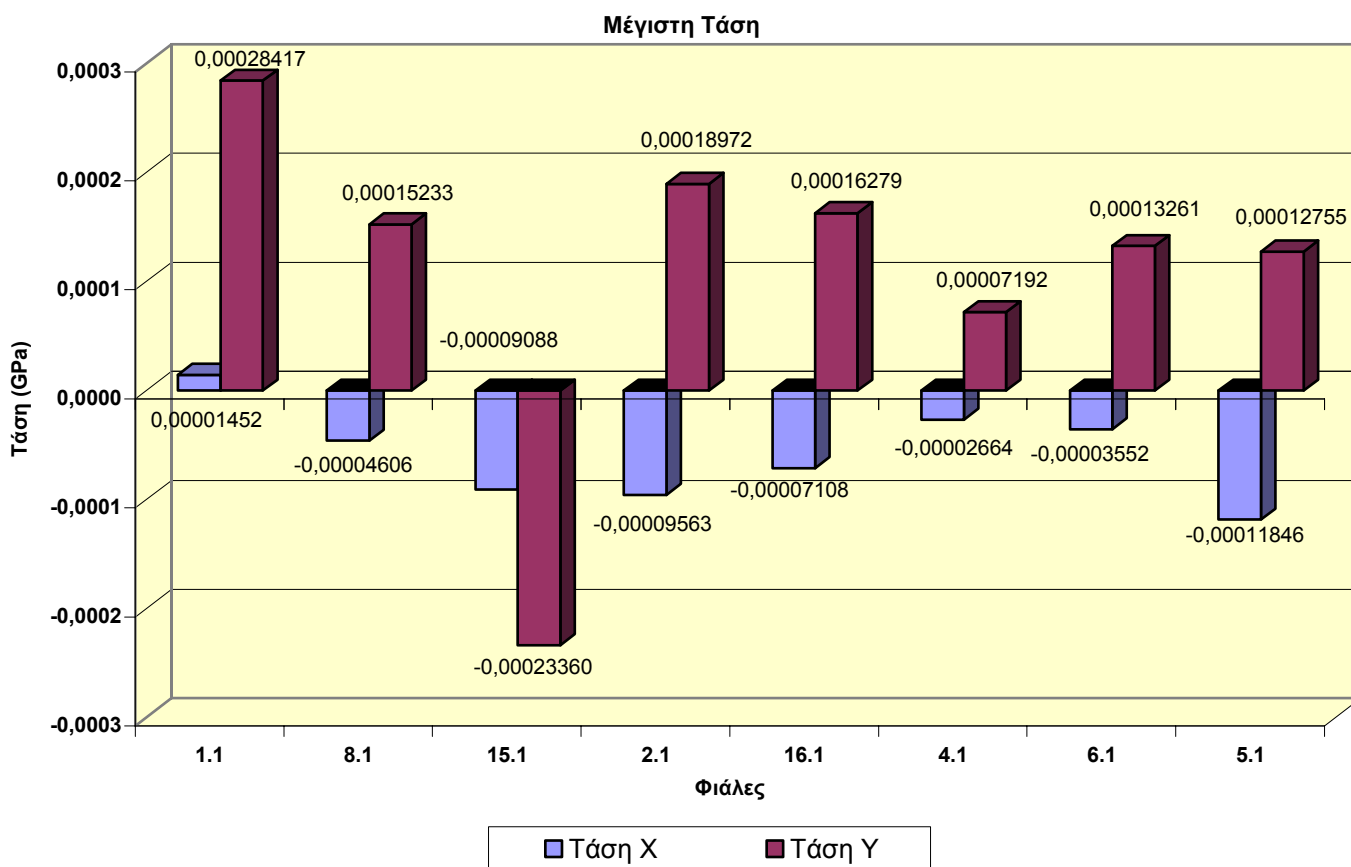
μετατόπιση στον άξονα Χ ανάμεσα στις δύο αλλά και ανάμεσα σε όλες τις φιάλες της ομάδας. Επίσης εμφανίζει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον άξονα Υ ανάμεσα σε όλες τις φιάλες. Η φιάλη 2.1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον άξονα Χ, με πολύ μεγάλη απόκλιση από τις τιμές των υπόλοιπων φιαλών.

Όσον αφορά λοιπόν τη μετατόπιση, δε φαίνεται να υπάρχει κάποια συσχέτιση με τον περιβαλλοντικό συντελεστή σ. Δηλαδή, οι φιάλες με το μεγαλύτερο σ σε κάποιες περιπτώσεις έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τις άλλες και σε κάποιες άλλες χειρότερη. Το συμπέρασμα αυτό είναι θετικό, διότι επιτρέπει το σχεδιασμό φιαλών με ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού, χωρίς να μειώνει απαραίτητα την αντοχή τους στις καταπονήσεις. Μάλιστα, σε πολλές περιπτώσεις οι περιβαλλοντικά σχεδιασμένες φιάλες παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα. Επομένως, η ομάδα σχεδιασμού του προϊόντος μπορεί να σχεδιάσει μία φιάλη με κατάλληλο τρόπο, ώστε να ικανοποιεί τόσο την απαίτηση



για εξοικονόμηση υλικού, όσο και την απαίτηση για αντοχή.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της μέγιστης Παραμόρφωσης, φαίνεται ότι οι φιάλες με το μεγαλύτερο σ έχουν μικρές παραμορφώσεις στον άξονα X, ενώ παρουσιάζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις στον άξονα Y από εκείνες με το μικρότερο σ . Για τις φιάλες 16.1, 6.1 και 5.1, η φιάλη 16.1 παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή παραμόρφωσης στον άξονα X και τη μεγαλύτερη τιμή στον άξονα Y. Η φιάλη 6.1 παρουσιάζει πολύ μεγάλη τιμή παραμόρφωσης στον άξονα X, με τιμή που αποκλίνει πολύ από τις τιμές των υπόλοιπων φιαλών της ομάδας. Ανάμεσα στις φιάλες 8.1, 15.1 και 4.1, η φιάλη 4.1 παρουσιάζει τις μικρότερες παραμορφώσεις τόσο στον άξονα X, όσο και στον άξονα Y. Η φιάλη 8.1 που έχει το μεγαλύτερο σ από τις τρεις, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες παραμορφώσεις, και οι τιμές και στους δύο άξονες κρίνονται ικανοποιητικές. Οι 1.1 και 2.1 παρουσιάζουν μικρή παραμόρφωση στον άξονα X, αρκετά μεγάλη όμως στον Y.

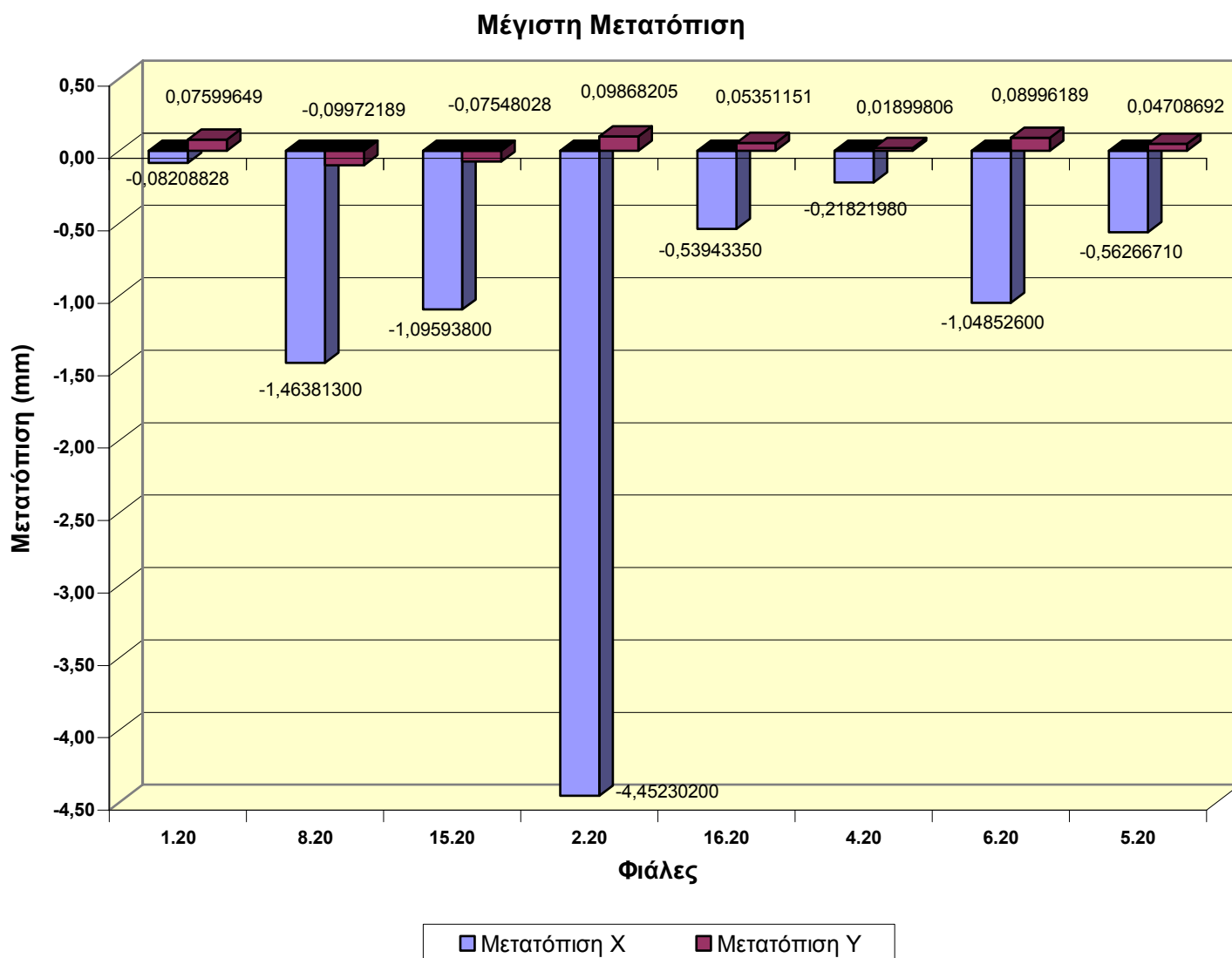


Σχετικά με την Τάση, παρατηρούνται τα εξής:

Η φιάλη 1.1. έχει τη μέγιστη τιμή τάσης στον άξονα Y και την ελάχιστη τιμή τάσης στον άξονα X. Την ελάχιστη τιμή τάσης στον άξονα Y παρουσιάζει η φιάλη 4.1, ενώ τη μέγιστη τάση στον άξονα X παρουσιάζει η φιάλη 5.1. Βέβαια, οι τιμές αυτές εξαρτώνται από την κατακόρυφη τάση που εφαρμόζεται αρχικά πάνω στις φιάλες. Συγκρίνοντας και πάλι τις φιάλες 16.1, 6.1 και 5.1, τη μικρότερη τάση στον άξονα X εμφανίζει η φιάλη 6.1, τη μεγαλύτερη η 5.1, ενώ στον άξονα Y οι τιμές τάσης είναι αρκετά κοντινές. Ανάμεσα στις

φιάλες 8.1, 15.1 και 4.1, η φιάλη 4.1 εμφανίζει τις μικρότερες τιμές τάσης και στους δύο άξονες.

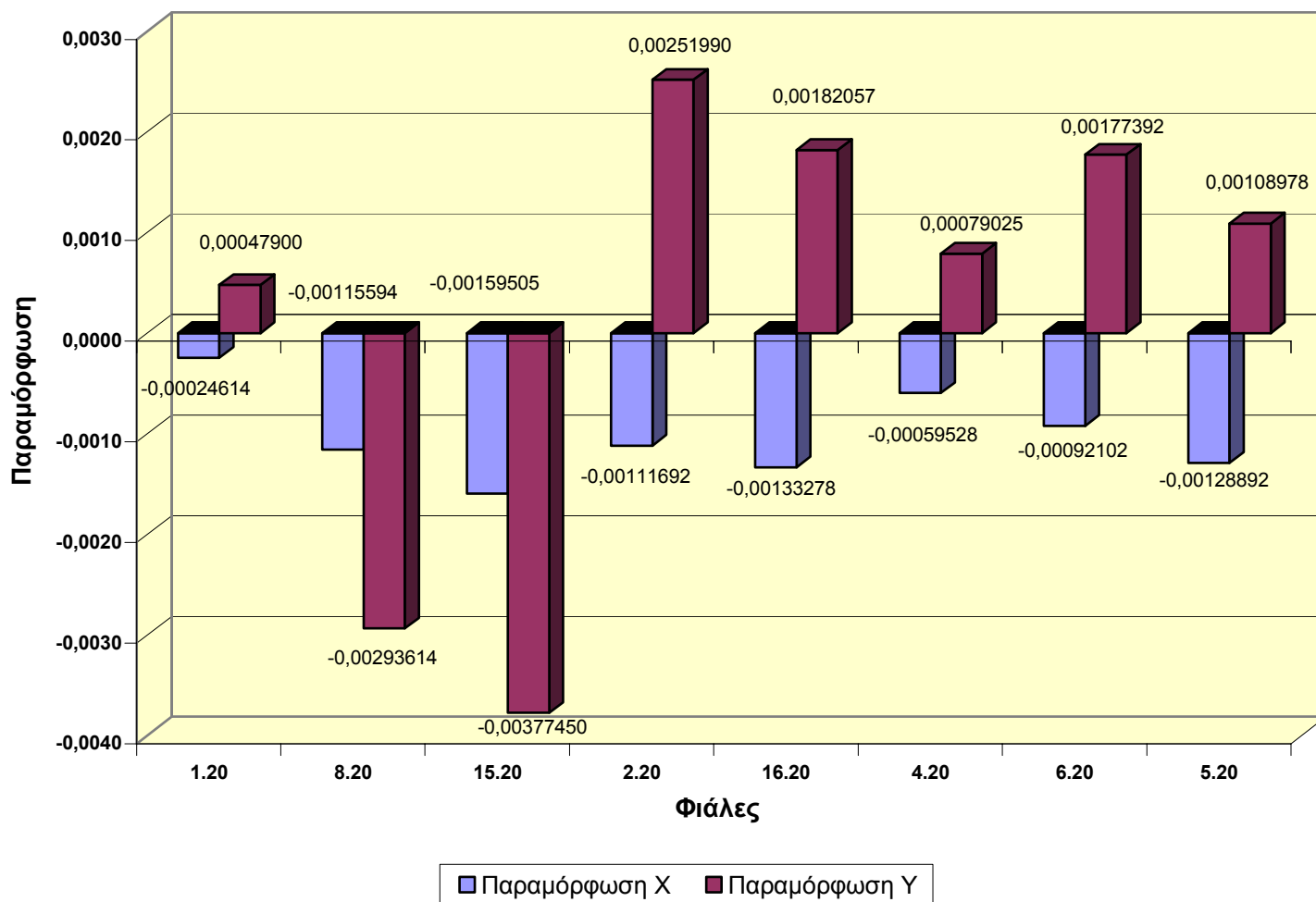
Στη συνέχεια γίνεται μελέτη της ίδιας ομάδας φιαλών, όταν σε αυτές έχει εφαρμοστεί τάση που προσομοιώνει την τοποθέτηση είκοσι όμοιων φιαλών πάνω τους.



Παρατηρείται και εδώ η πολύ μεγάλη τιμή της μετατόπισης στον άξονα X της φιάλης 2.20, η οποία φτάνει στα 4,45 mm, τη στιγμή που για τις υπόλοιπες φιάλες οι τιμές κυμαίνονται από 0,082 έως 1,4 mm. Τη μικρότερη μετατόπιση στον άξονα X παρουσιάζει η φιάλη 1.20, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ενώ στον άξονα Y τη μικρότερη τιμή παρουσιάζει και πάλι η φιάλη 4.20, που ως τώρα έχει γενικά πολύ καλή συμπεριφορά όσον αφορά όλα τα μεγέθη. Τη μεγαλύτερη τιμή μετατόπισης παρουσιάζει αυτή τη φορά η φιάλη 8.20. Μεταξύ των φιαλών 16.20, 6.20 και 5.20, η φιάλη 16.20 παρουσιάζει τις μικρότερες

μετατοπίσεις και στους δύο άξονες, ενώ η φιάλη 6.20 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις και στους δύο άξονες. Μεταξύ των φιαλών 8.20, 15.20 και 4.20, η φιάλη 8.20 παρουσιάζει τη μέγιστη μετατόπιση στους δύο άξονες και η φιάλη 4.20 την ελάχιστη.

Μέγιστη Παραμόρφωση

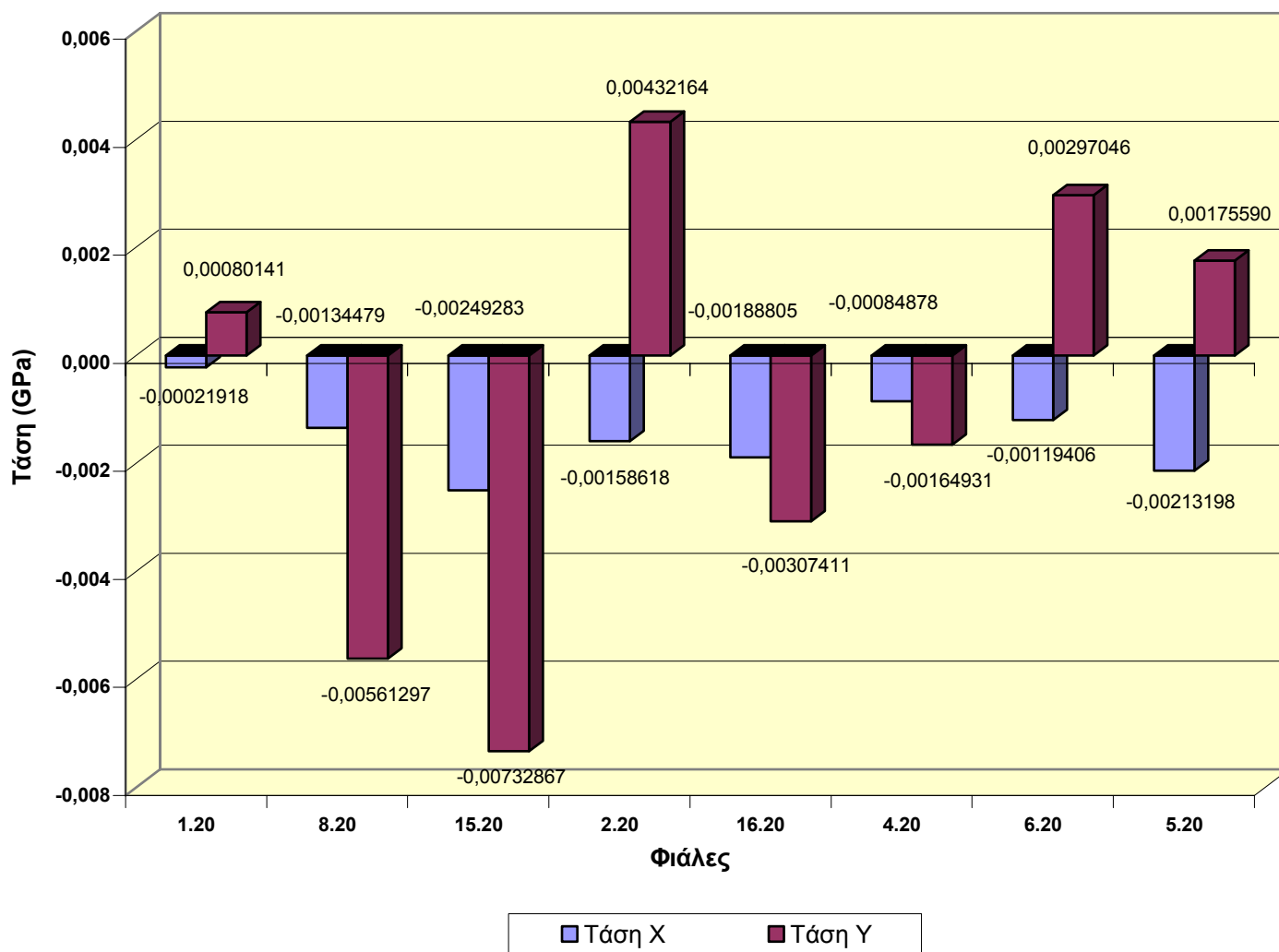


Με βάση το διάγραμμα μέγιστης Παραμόρφωσης για αυτή την περίπτωση, παρατηρείται ότι η Φιάλη 1.20 παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές τόσο στον άξονα X, όσο και στον Y. τις μεγαλύτερες τιμές και στους δύο άξονες παρουσιάζει η φιάλη 15.20. Συγκρίνοντας τώρα τις φιάλες 16.20, 6.20 και 5.20, παρατηρείται ότι η φιάλη 16.20 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση στον άξονα Y, ενώ τη μικρότερη παραμόρφωση σε αυτό τον άξονα εμφανίζει η φιάλη 5.20. Στον άξονα X η μικρότερη τιμή παρουσιάζεται στη φιάλη 6.20. Ανάμεσα στις 8.20, 15.20 και 4.20, τις μικρότερες τιμές παραμόρφωσης εμφανίζει η φιάλη 4.20.

Σχετικά με τη μέγιστη τάση παρατηρούνται τα εξής:

Η φιάλη 1.20 παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές τάσης και στους δύο άξονες, ενώ η φιάλη 4.20 παρουσιάζει επίσης πολύ καλές τιμές. Οι μεγαλύτερες τιμές τάσης εμφανίζονται στη φιάλη 15.20. Μεταξύ των φιαλών 16.20, 6.20 και 5.20, η μικρότερη τάση στον άξονα X

Μέγιστη τάση



παρουσιάζεται στη φιάλη 6.20 και η μικρότερη στον άξονα Y παρουσιάζεται στη φιάλη 5.20. Μεταξύ των 8.20, 15.20 και 4.20, η φιάλη 4.20 επιδεικνύει τις μικρότερες τιμές.

Με βάση τη σύγκριση της πρώτης ομάδας φιαλών, όγκου 900ml - 3,5 lt, προκύπτει ότι η φιάλη 1, η οποία έχει το μεγαλύτερο συντελεστή σ έχει αρκετά καλή συμπεριφορά, η οποία βελτιώνεται συγκριτικά με τις άλλες φιάλες, όταν η τιμή της κατακόρυφης τάσης που εφαρμόζεται είναι μεγαλύτερη.

Η φιάλη 4 γενικά επιδεικνύει πολύ καλή συμπεριφορά σε όλους τους τομείς που μελετήθηκαν και με συντελεστή σ κοντά στο 0,8 μπορεί να θεωρηθεί ως καλή περίπτωση

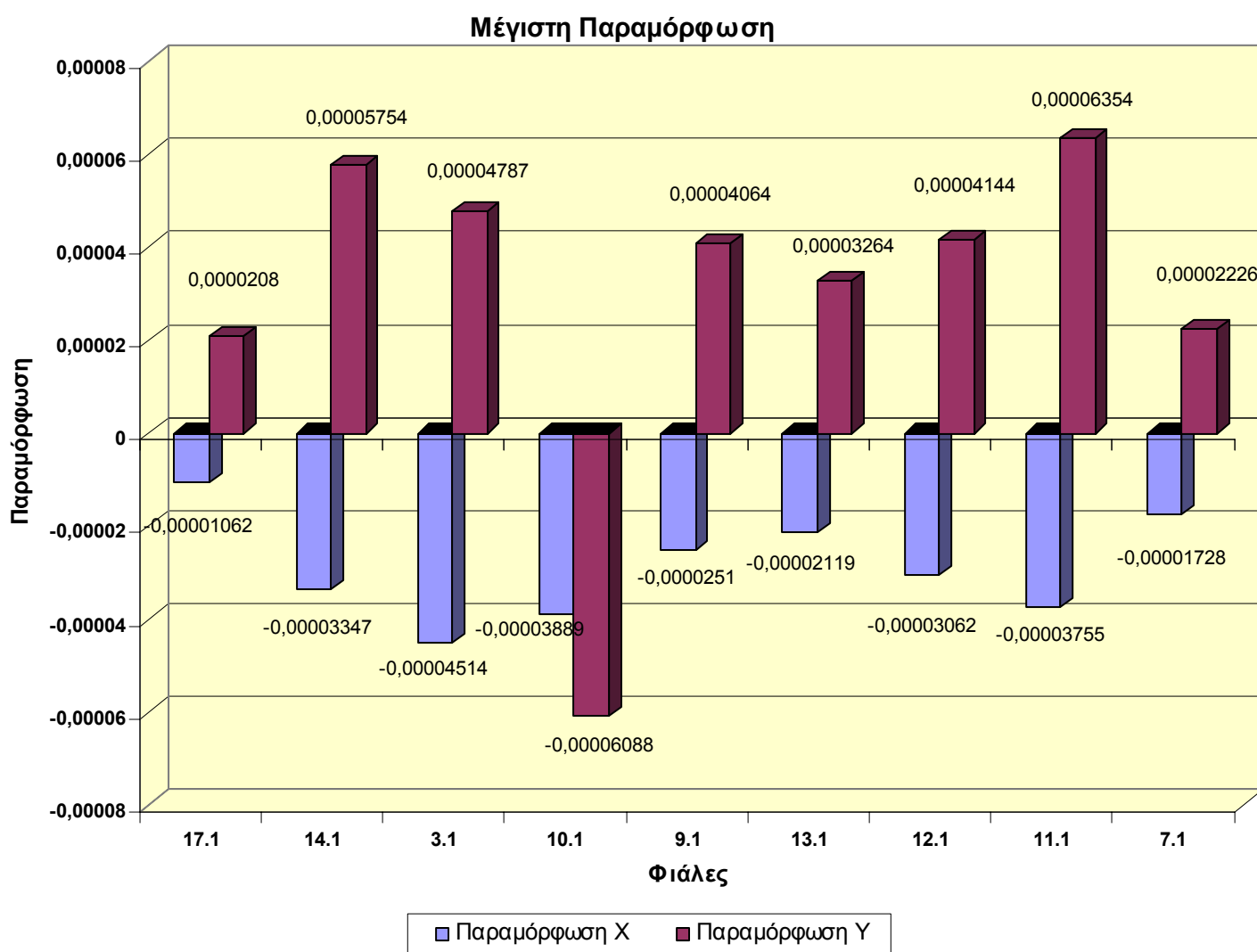
σχεδιασμού φιάλης για ελαχιστοποίηση υλικού. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης στη μορφή της, τα οποία θα μπορούν να αυξήσουν το συντελεστή σ και πιθανώς να βελτιώσουν και τις τιμές της φιάλης σε σχέση με τα μεγέθη που μελετήθηκαν.

2^η Ομάδα Φιαλών: Όγκος 200 ml - 750 ml

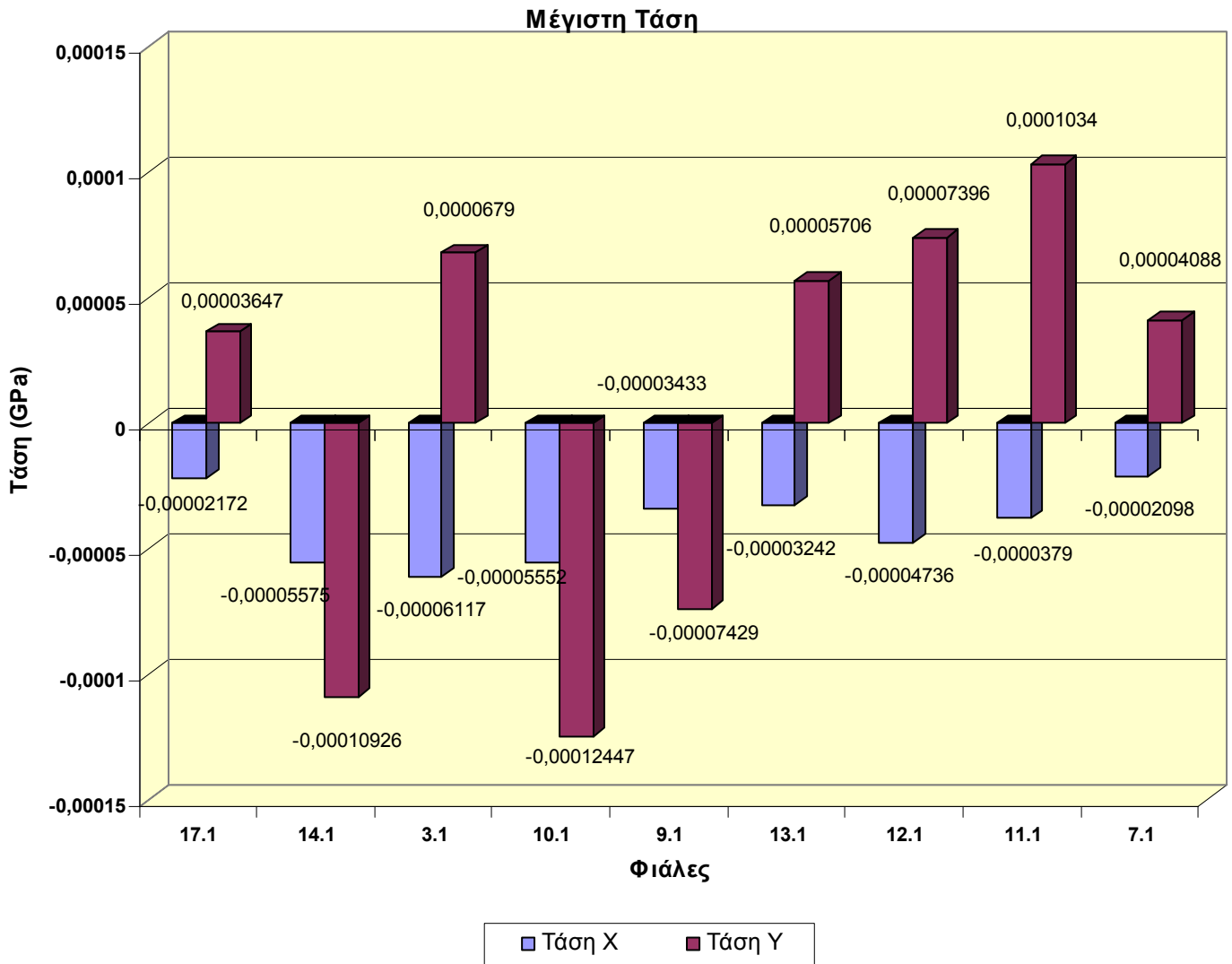
Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τις μικρότερες φιάλες. Από το διάγραμμα της μέγιστης μετατόπισης παρατηρείται ότι τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον άξονα Χ, αλλά και στον άξονα Υ, παρουσιάζει η φιάλη 14.1, η οποία έχει το δεύτερο μεγαλύτερο συντελεστή σ τις φιάλες της ομάδας αυτής. Η φιάλη 17.1, η οποία έχει το μεγαλύτερο συντελεστή σ, παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή μετατόπισης στον άξονα Υ και τη δεύτερη μικρότερη στον άξονα Χ. Μάλιστα, δεδομένου ότι η φιάλη 7.1 είναι πολύ μικρότερη σε όγκο από τις υπόλοιπες και αναμένεται να έχει και μικρότερες τιμές σε όλα τα μεγέθη, η φιάλη 17.1 παρουσιάζει τις καλύτερες τιμές μετατόπισης σε σχέση και με το μέγεθός της. Αρκετά χαμηλές τιμές παρουσιάζουν και οι φιάλες 3.1 και 12.1.

Σχετικά με την παραμόρφωση, παρατηρείται και πάλι ότι η φιάλη 17.1 παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές. Η μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης στον άξονα Χ εμφανίζεται στη φιάλη 3.1, ενώ στον άξονα Υ, τη μεγαλύτερη τιμή εμφανίζει η φιάλη 11.1. Η φιάλη 7.1 παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές, αλλά η σύγκρισή της με τις υπόλοιπες φιάλες δεν μπορεί να είναι ιδιαίτερα αντικειμενική, καθώς ο όγκος της είναι αρκετά μικρότερος και δεν υπάρχει κάποια άλλη φιάλη αντίστοιχου μεγέθους για να συγκριθεί.

Όσον αφορά το διάγραμμα της μέγιστης Τάσης, η φιάλη 7.1 παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές. Αν εξαιρεθεί η συγκεκριμένη φιάλη για τους λόγους που έχουν προαναφερθεί, η φιάλη 17.1 υπερτερεί και σε αυτόν τον τομέα σε σχέση με τις υπόλοιπες.

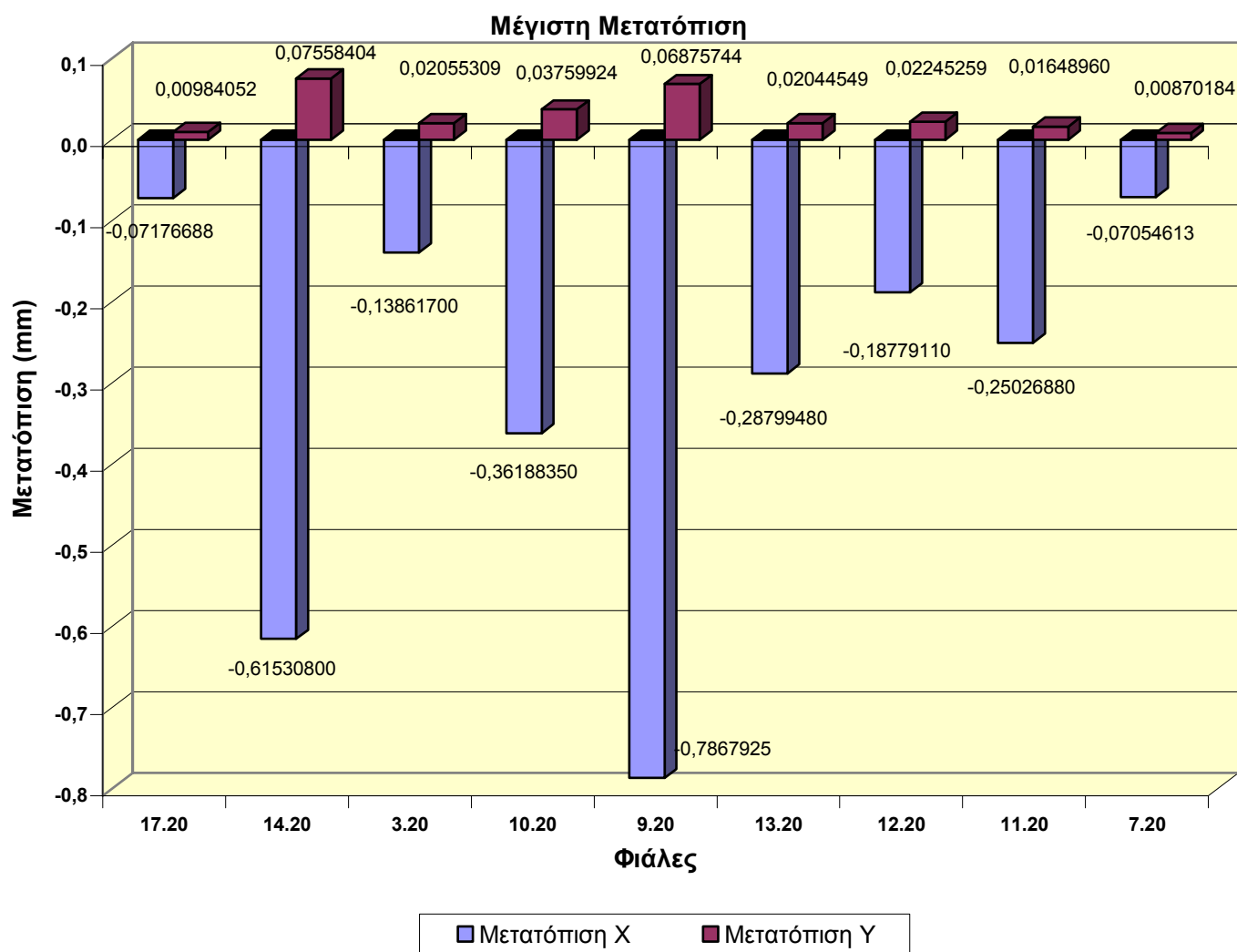


Τις μεγαλύτερες τιμές τάσης στον άξονα Χ εμφανίζει η φιάλη 3.1, ενώ στον άξονα Υ η φιάλη 10.1.



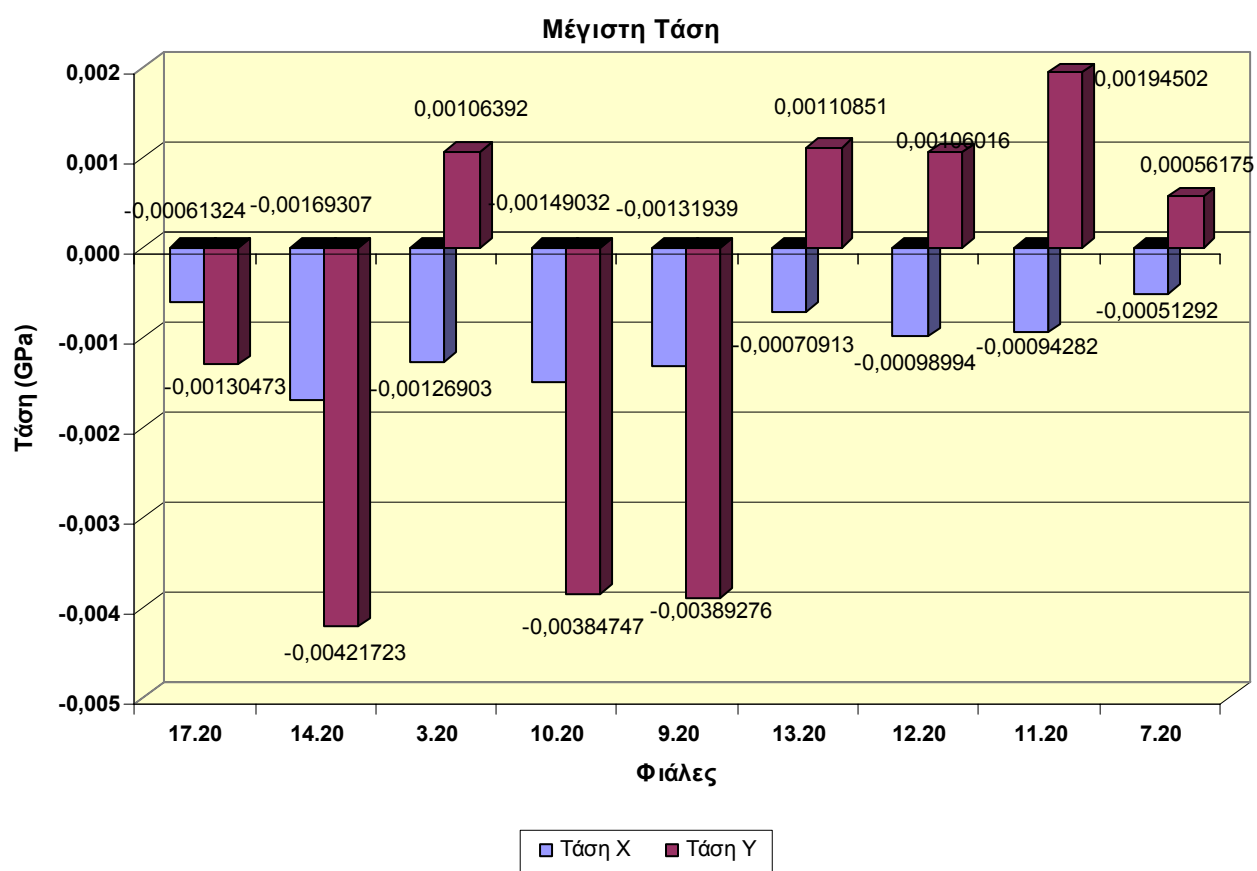
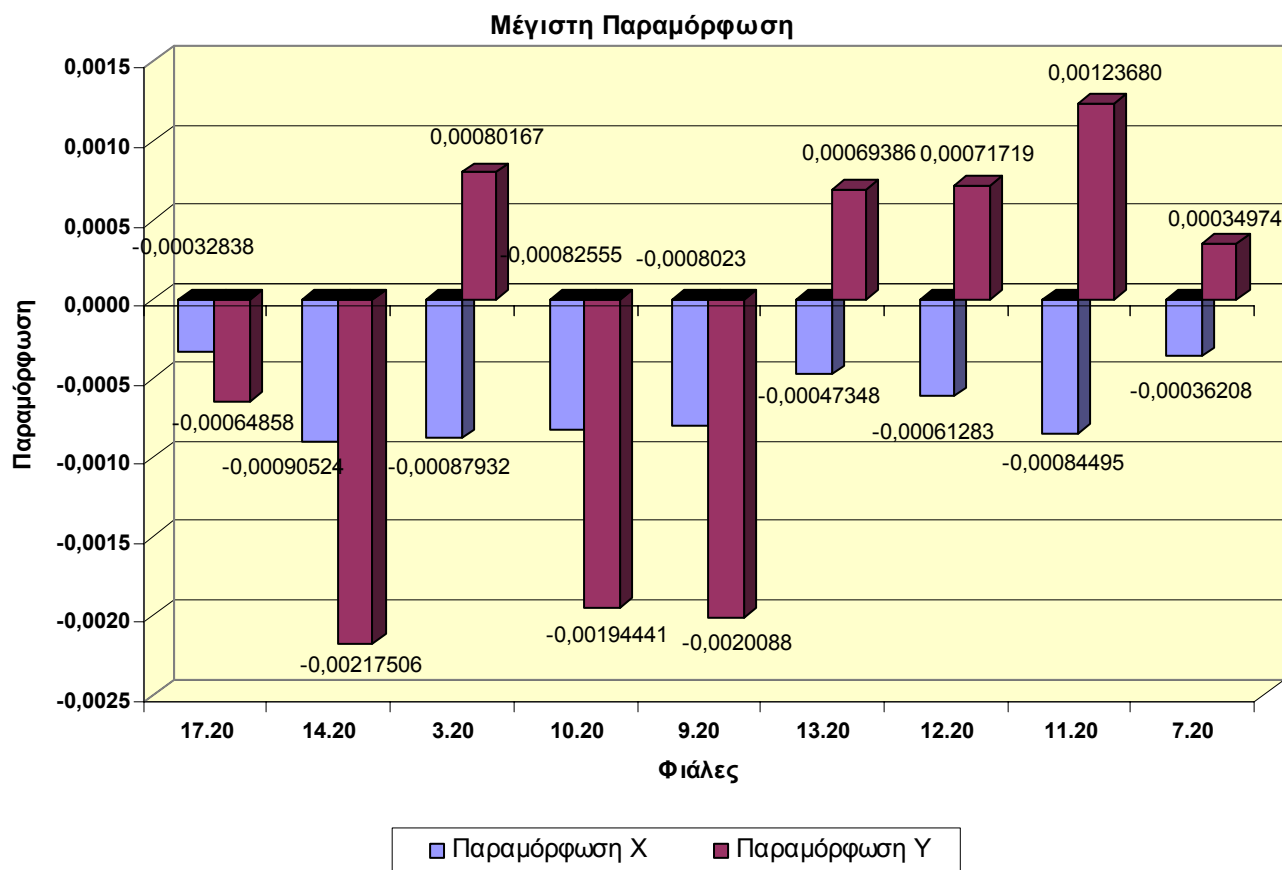
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις φιάλες 17.20, 14.20, 3.20, 10.20, 9.20, 13.20, 12.20, 11.20, 7.20.

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον άξονα Χ παρουσιάζει η φιάλη 9.20, ενώ στον άξονα Υ η φιάλη 14.20. Η Φιάλη 17.20 παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές μετατόπισης, τις μικρότερες από όλη την ομάδα, αν εξαιρεθεί η 7.20. Η φιάλη 3.20 επίσης παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.



Σχετικά με την παραμόρφωση παρατηρούνται τα εξής:

Τις μικρότερες τιμές παρουσιάζουν και εδώ οι φιάλες 17.20 και 7.20. Οι φιάλες 14.20, 3.20, 10.20, 9.20 και 11.20 εμφανίζουν κοντινές τιμές παραμόρφωσης στον άξονα Χ, ενώ το ίδιο συμβαίνει για τις φιάλες 13.20 και 10.20 στον άξονα Υ.



Στο διάγραμμα μέγιστης Τάσης παρατηρείται ότι η φιάλη 17.20 δεν έχει πλέον τις καλύτερες τιμές, παρόλο που εξακολουθούν να είναι μικρές. Στον άξονα Χ η φιάλη 13.20 παρουσιάζει μικρότερη τιμή τάσης, ενώ στον άξονα Υ τρεις ακόμη φιάλες παρουσιάζουν μικρότερες τιμές τάσης -οι φιάλες 3.20, 13.20 και 12.20-. Σημειώνεται και πάλι ότι η φιάλη 7.20 έχει βέβαια τις χαμηλότερες τιμές από όλες τις φιάλες της ομάδας, δεν θα ήταν όμως αντικειμενικό να συγκριθεί με αυτές, καθώς η αμέσως μεγαλύτερη φιάλη έχει όγκο διπλάσιο από αυτή.

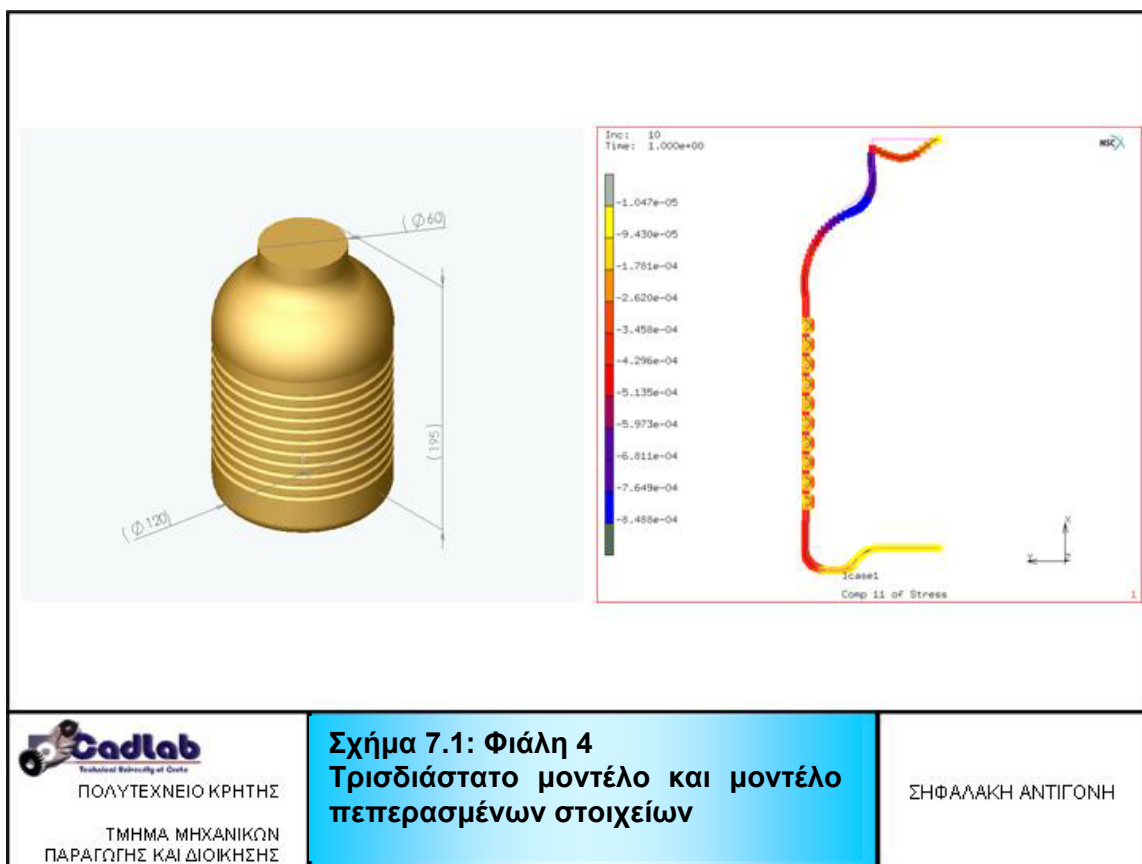
7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα εργασία είναι πως μπορεί να πραγματοποιηθεί περιβαλλοντικός σχεδιασμός φιαλών, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού, χωρίς αυτό να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή των φιαλών στις καταπονήσεις. Μάλιστα με τον κατάλληλο σχεδιασμό είναι δυνατή η βελτιστοποίηση και του συντελεστή σ αλλά και της αντοχής μίας φιάλης. Σε καμία περίπτωση όμως δεν μπορεί να ειπωθεί ότι βελτιώνοντας το σ , βελτιώνονται και τα άλλα μεγέθη που μελετήθηκαν ή το αντίστροφο.

Από τις φιάλες που σχεδιάστηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη, προκύπτει ότι:

- Από την ομάδα των φιαλών όγκου 900ml - 3,5 lt (Μεγάλες Φιάλες) η φιάλη 4 υπερτερεί σε σχέση τις υπόλοιπες φιάλες της ομάδας. Ο περιβαλλοντικός συντελεστής της σ είναι από τους μικρότερους της ομάδας, γενικά όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι χαμηλή η τιμή του, καθώς τιμές γύρω στο 0,8 μπορούν να θεωρηθούν πολύ καλές τιμές.
- Από την ομάδα φιαλών όγκου 200 ml - 750 ml (Μικρές Φιάλες), εξαιρουμένης πάντα της φιάλης 7, η φιάλη που υπερτερεί σε όλους τους τομείς είναι η φιάλη 17, η οποία έχει και το μεγαλύτερο συντελεστή σ .

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο αυτές φιάλες και γίνονται κάποιες επιπλέον παρατηρήσεις.

Φιάλη 4

Η φιάλη 4 παρουσίασε πάρα πολύ καλή συμπεριφορά σχετικά με τα μεγέθη που μελετήθηκαν. Αυτό οφείλεται στα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και κυρίως στο γεγονός ότι έχει μεγάλη διάμετρο βάσης αλλά και λαιμού, κάτι που είναι εμφανές και στο τρισδιάστατο μοντέλο της.

Όπως προαναφέρθηκε βέβαια, ο περιβαλλοντικός συντελεστής της αν και θεωρείται γενικά καλός, έχει κάποια περιθώρια βελτίωσης. Η μικρότερη τιμή του σε σχέση με κάποια αντίστοιχη φιάλη οφείλεται κυρίως στις αυλακώσεις που υπάρχουν στο σώμα της φιάλης, οι οποίες αυξάνουν την ποσότητα του απαραίτητου υλικού.

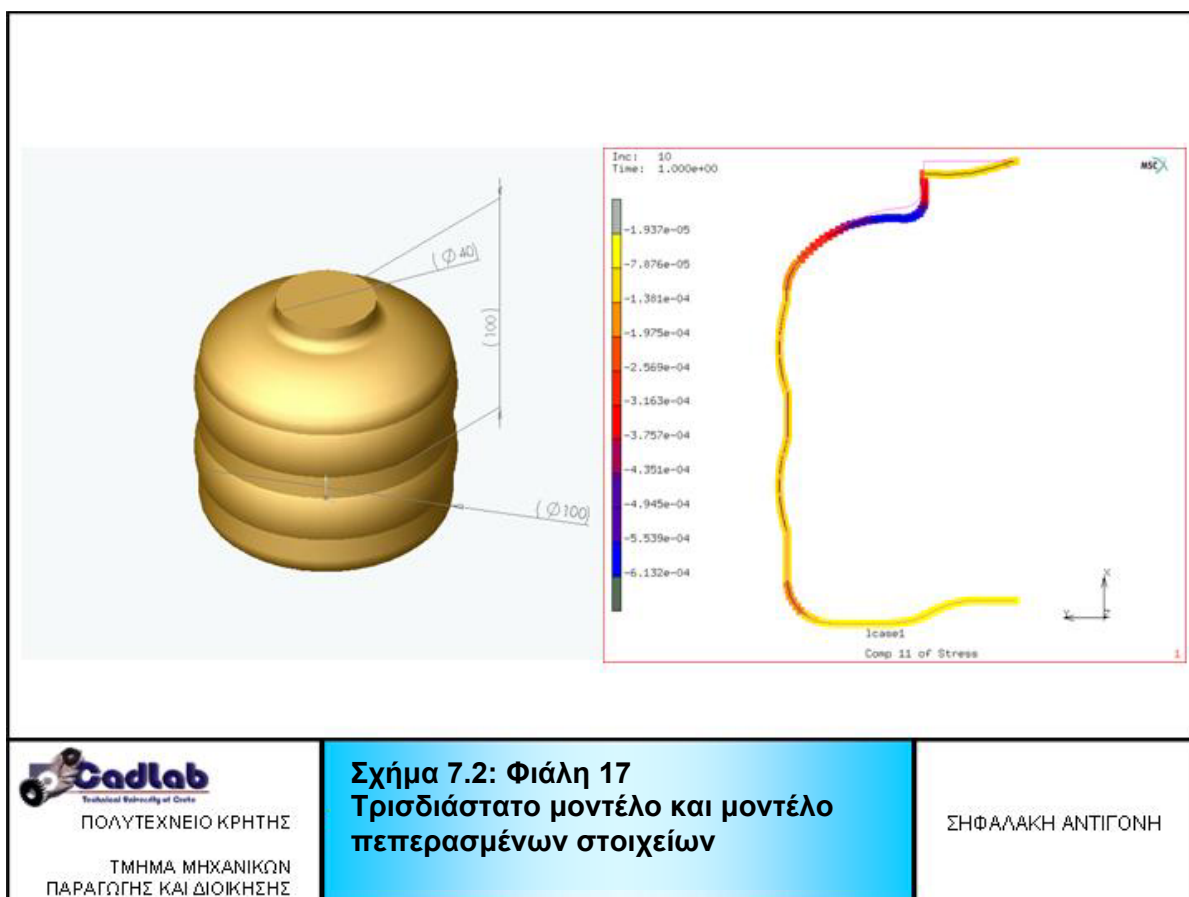
Με τη βοήθεια του μοντέλου των Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να παρατηρηθεί πώς ακριβώς κατανέμονται οι τάσεις στη φιάλη και πώς αυτή παραμορφώνεται. Είναι εμφανές ότι η μεγαλύτερες τιμές τάσης παρουσιάζονται στην περιοχή του λαιμού, η οποία αποτελεί την πιο επικίνδυνη περιοχή για όλες τις φιάλες. Όσον αφορά τη μετατόπιση των κόμβων, σε σχέση με την αρχική τους θέση, η μέγιστες τιμές εμφανίζονται στο άνω μέρος της φιάλης. Αυτό βεβαίως είναι αναμενόμενο, καθώς εκεί εφαρμόζεται η μεγαλύτερη τάση, αυτή

δηλαδή που προσομοιώνει το βάρος των άλλων φιαλών που τοποθετούνται πάνω από κάθε φιάλη.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι φιάλες που σχεδιάστηκαν, δημιουργήθηκαν ως ένα κλειστό κέλυφος, ομοιόμορφου πάχους και ίδιου υλικού. Στην πραγματικότητα, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει, καθώς οι φιάλες στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελούνται από το κυρίως σώμα και το πώμα. Το πώμα είναι διαφορετικού πάχους και αποτελείται από διαφορετικό υλικό, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλες αυτές παραμορφώσεις που παρατηρήθηκαν σε αυτή την περιοχή.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η φιάλη 17, η οποία έχει τον υψηλότερο συντελεστή σ από όλες τις φιάλες που σχεδιάστηκαν, με τιμή 0.92108, και παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά, όσον αφορά τα μεγέθη που μελετήθηκαν.

Φιάλη 17



Παρατηρώντας τη φιάλη 17 γίνονται εμφανείς οι λόγοι για τους οποίους παρουσιάζει τόσο καλά αποτελέσματα σε όλους τους τομείς:

- Έχει λόγο ύψους / διάμετρο βάσης = 1 / 1

- Έχει μεγάλη διάμετρο λαιμού
- Έχει λίγες και ομαλές αυλακώσεις στο κυρίως σώμα, γεγονός που κάνει τη φιάλη πιο ανθεκτική.

Παρατηρείται και εδώ η ευαισθησία της περιοχής του λαιμού που υπάρχει σε όλες τις φιάλες.

7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Η παρούσα εργασία είχε σαν στόχο να μελετηθούν οι αντοχές φιαλών, που προέκυψαν από περιβαλλοντικό σχεδιασμό με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου υλικού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Βέβαια, η μέθοδος αυτή είναι προσεγγιστική, οπότε είναι δυνατόν να υπάρχουν κάποια μικρά σφάλματα. Δυστυχώς, δεν έχουν γίνει δοκιμές σε πραγματικές φιάλες, ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Παρόλα αυτά, μπορεί κανείς να λάβει μία αρκετά ολοκληρωμένη εικόνα για τις φιάλες που σχεδιάστηκαν. Εταιρίες που ασχολούνται με την παραγωγή φιαλών θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τέτοιου είδους διαδικασίες για να βελτιώσουν τα σχέδιά τους και να δημιουργήσουν φιάλες φιλικές προς το περιβάλλον και συγχρόνως ανθεκτικές στις διάφορες καταπονήσεις. Κάτι τέτοιο μπορεί να προσφέρει στις εταιρίες ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην αγορά και μεγάλα κέρδη.

Ασφαλώς, οι παράγοντες που εξετάστηκαν δεν είναι οι μόνοι απαραίτητοι για να γίνει ένα προϊόν επιτυχημένο. Πολύ βασικό είναι να εξεταστούν παράμετροι όπως η εμφάνιση, το στυλ και η εργονομία των φιαλών και να επιλεγθεί για ανάπτυξη κάποια η οποία θα ικανοποιεί στο μεγαλύτερο βαθμό όλες τις προϋποθέσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Το παράρτημα περιλαμβάνει όλες τις φιάλες που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η παρουσίαση για κάθε φιάλη πραγματοποιείται σε δύο στάδια.

Το πρώτο αφορά το σχεδιασμό τους στο πακέτο παραμετρικής μοντελοποίησης Solid Works. Σε αυτό αναφέρονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ύψος, ακτίνα λαιμού, ακτίνα πάτου, εμβαδόν λαιμού) της κάθε φιάλης, καθώς και κάποια επιπλέον βασικά στοιχεία που δίνουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του υπό μελέτη αντικειμένου (όγκος υλικού στο αντικείμενο, συνολικός όγκος του αντικειμένου, καθαρός όγκος περιεχομένου). Επιπλέον δίνονται η μάζα του περιεχομένου, θεωρώντας ότι οι φιάλες είναι γεμάτες με νερό και το βάρος του υλικού της φιάλης, θεωρώντας ότι θα κατασκευαστεί από PET. Τέλος, δίνεται ο συντελεστής σ , δηλαδή ο λόγος του όγκου του υλικού μίας σφαίρας ίσου όγκου περιεχομένου και ίσου πάχους με τη φιάλη προς τον όγκο του υλικού της φιάλης αυτής. Επίσης δίνεται η ακτίνα της υποθετικής αυτής σφαίρας με την οποία συγκρίνεται τη φιάλη.

Το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τις δεκαεπτά φιάλες που δημιουργήθηκαν, όπως αυτές έχουν μοντελοποιηθεί στο MARC. Παρουσιάζεται η αρχική τους μορφή και η παραμορφωμένη, όταν πάνω σε αυτές έχει εφαρμοστεί τάση που ισούται με την εικοσαπλάσια τιμή του συνολικού βάρους τους, προς το εμβαδόν του λαιμού τους. Πιο απλά, προσομοιώνεται η περίπτωση που πάνω από κάθε φιάλη έχουν τοποθετηθεί άλλες είκοσι ίδιες φιάλες.

Επειδή οι παραμορφώσεις των φιαλών δεν είναι ευδιάκριτες, παρουσιάζονται σε κλίμακα 20:1. Δηλαδή η πραγματική παραμόρφωση που έχει υποστεί η κάθε φιάλη είναι είκοσι φορές μικρότερη από αυτή που φαίνεται στο σχήμα.

Επίσης, στην ίδια εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων στον άξονα X, και με τη βοήθεια μίας χρωματικής κλίμακας είναι δυνατόν να παρατηρήσει κανείς σε ποια σημεία αποκτά μέγιστη τιμή.

Τέλος, στους πίνακες που συνοδεύουν τα μοντέλα αναφέρονται οι τιμές των δυνάμεων που εφαρμόστηκαν καθώς και οι μέγιστες τιμές των μεγεθών που μελετήθηκαν για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης.

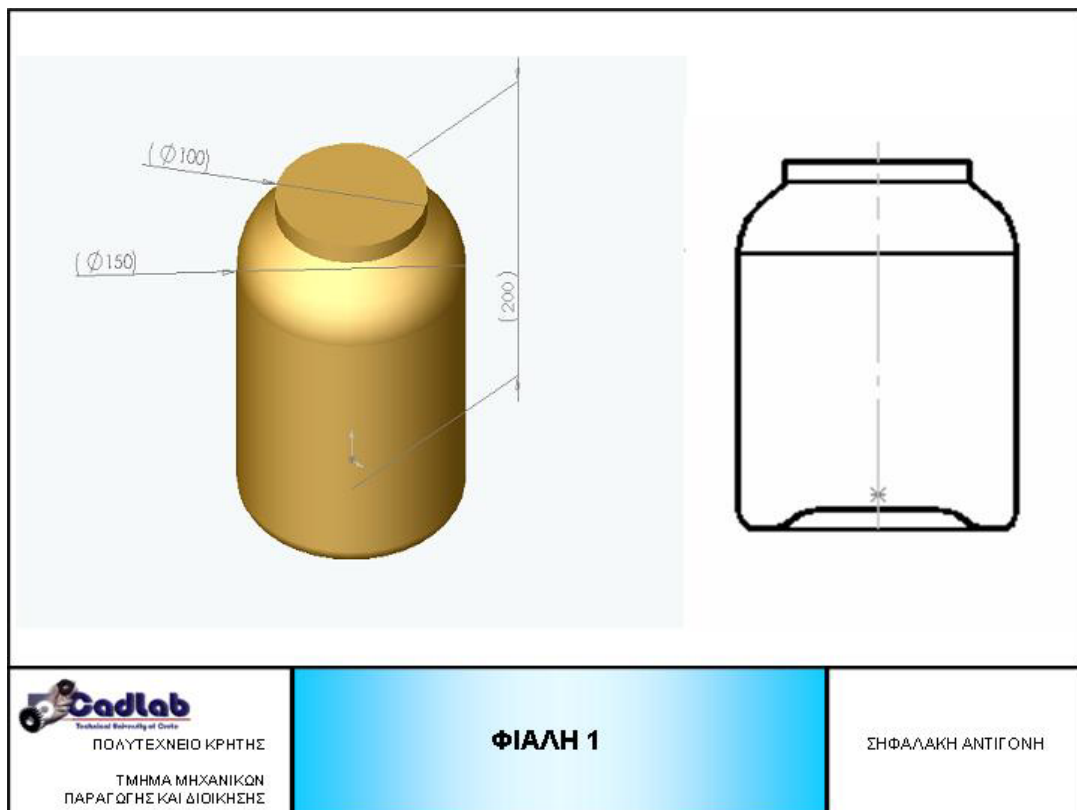
Στους πίνακες που παραθέτονται η κωδικοποίηση που έχει χρησιμοποιηθεί είναι η εξής:

Τάση 1, συμβολίζεται η τάση που ισούται με το πηλίκο του βάρους μίας φιάλης προς το εμβαδόν του λαιμού της. **Τάση 5** είναι η τάση που ισούται με το πηλίκο του βάρους πέντε

φιαλών προς το εμβαδόν του λαιμού της. Όμοιοι συμβολισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί και για τις υπόλοιπες τάσεις.

1.1 είναι η **φιάλη 1** στην οποία έχει εφαρμοστεί **τάση 1**, **1.5** είναι η **φιάλη 1** στην οποία έχει εφαρμοστεί **τάση 5** κ.λ.π.

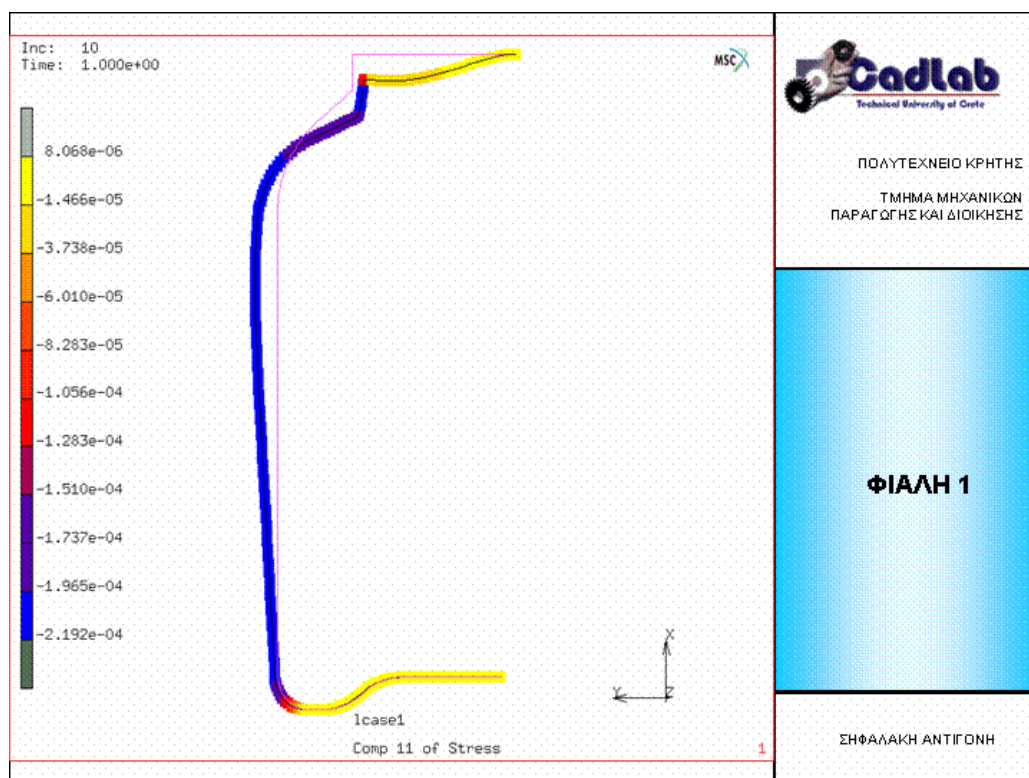
Οι συμβολισμοί **X**, **Y** δίπλα στα διάφορα μεγέθη αντιπροσωπεύουν τους άξονες στους οποίους αναφέρεται το κάθε μέγεθος.

ΦΙΑΛΗ 1

Φιάλη 1	
Υψος (mm)	200
Ακτίνα λαιμού (mm)	50
Ακτίνα πάτου (mm)	75
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	7850

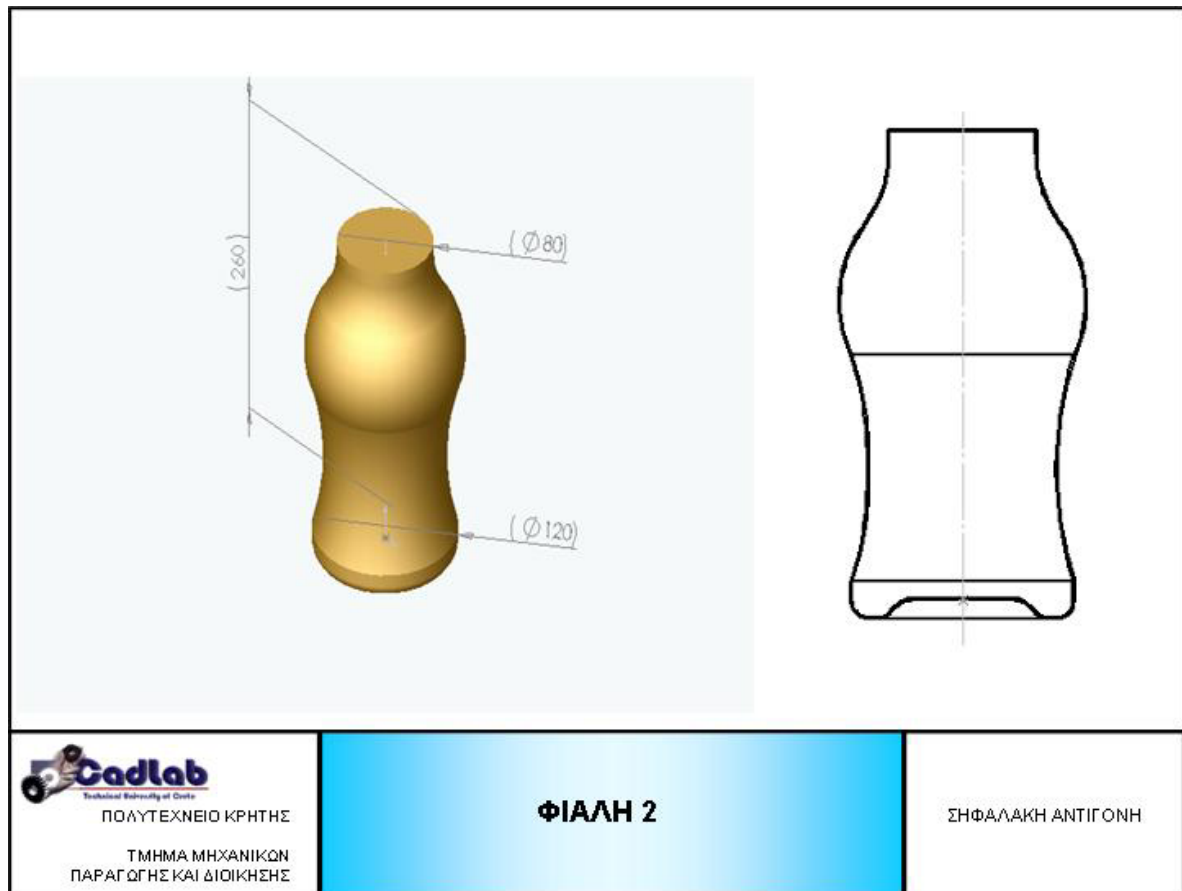
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,117206
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	3,222777
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	3,105571
Μάζα περιεχομένου (kg)	3,105571
Βάρος υλικού (N)	1,4299198

Ακτίνα σφαίρας (mm)	90,507
Συντελεστής σ	0,88801



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,961
Τάση 1 (KPa)	- 4,2076
Τάση 5 (KPa)	- 21,0382
Τάση 10 (KPa)	- 42,0763
Τάση 15 (KPa)	- 63,1145
Τάση 20 (KPa)	- 84,1527

	1.1	1.5	1.10	1.15	1.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00551926	-0,02149092	-0,04172200	-0,06185719	-0,08208828
Μετατόπιση Y (mm)	0,02481057	0,03439549	0,04801110	0,06192823	0,07599649
Παραμόρφωση X	-0,00004210	-0,00008273	-0,00013677	-0,00019112	-0,00024614
Παραμόρφωση Y	0,00015629	0,00021668	0,00030252	0,00038987	0,00047900
Τάση X (KPa)	14,52	-46,17	-103,93	-161,41	-219,18
Τάση Y (KPa)	284,17	379,51	517,24	657,77	801,41

ΦΙΑΛΗ 2

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

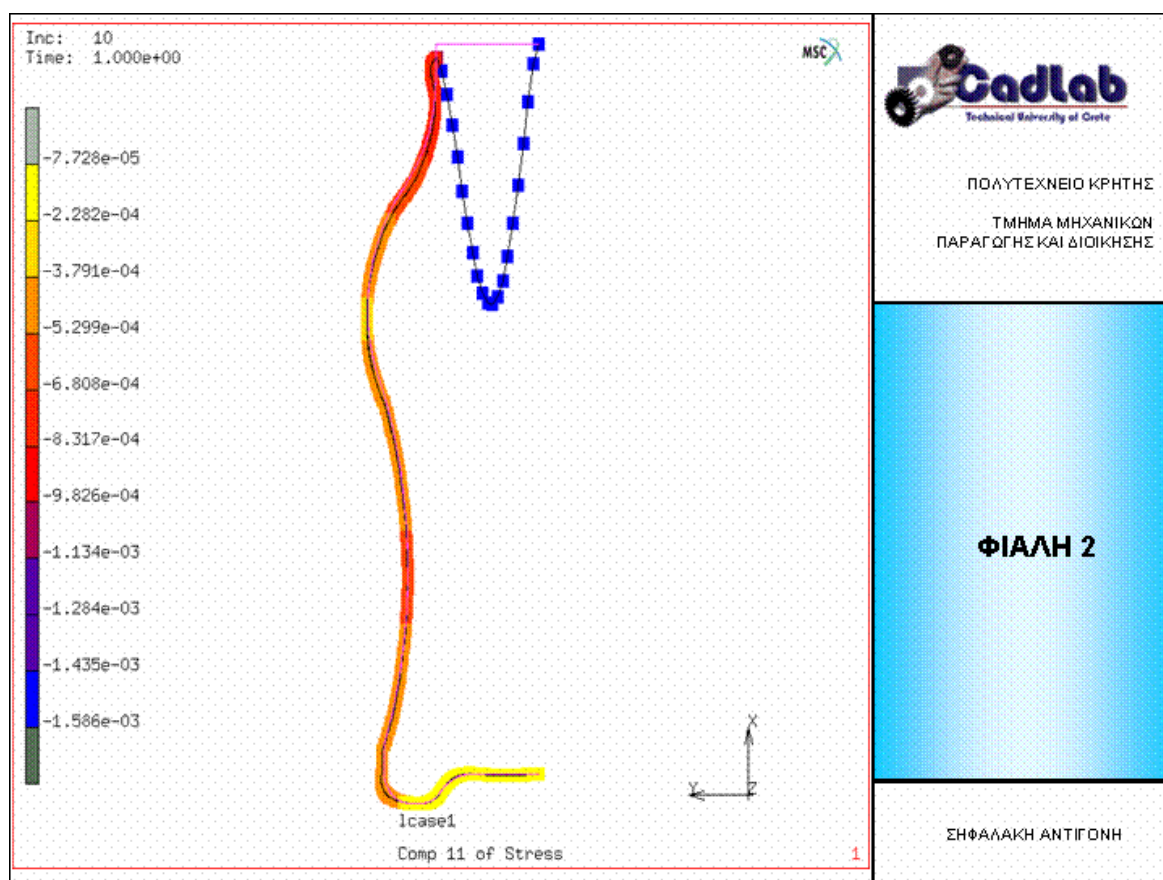
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**ΦΙΑΛΗ 2**

ΣΦΑΛΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Φιάλη 2	
Υψος (mm)	260
Ακτίνα λαιμού (mm)	40
Ακτίνα πάτου (mm)	60
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	5024

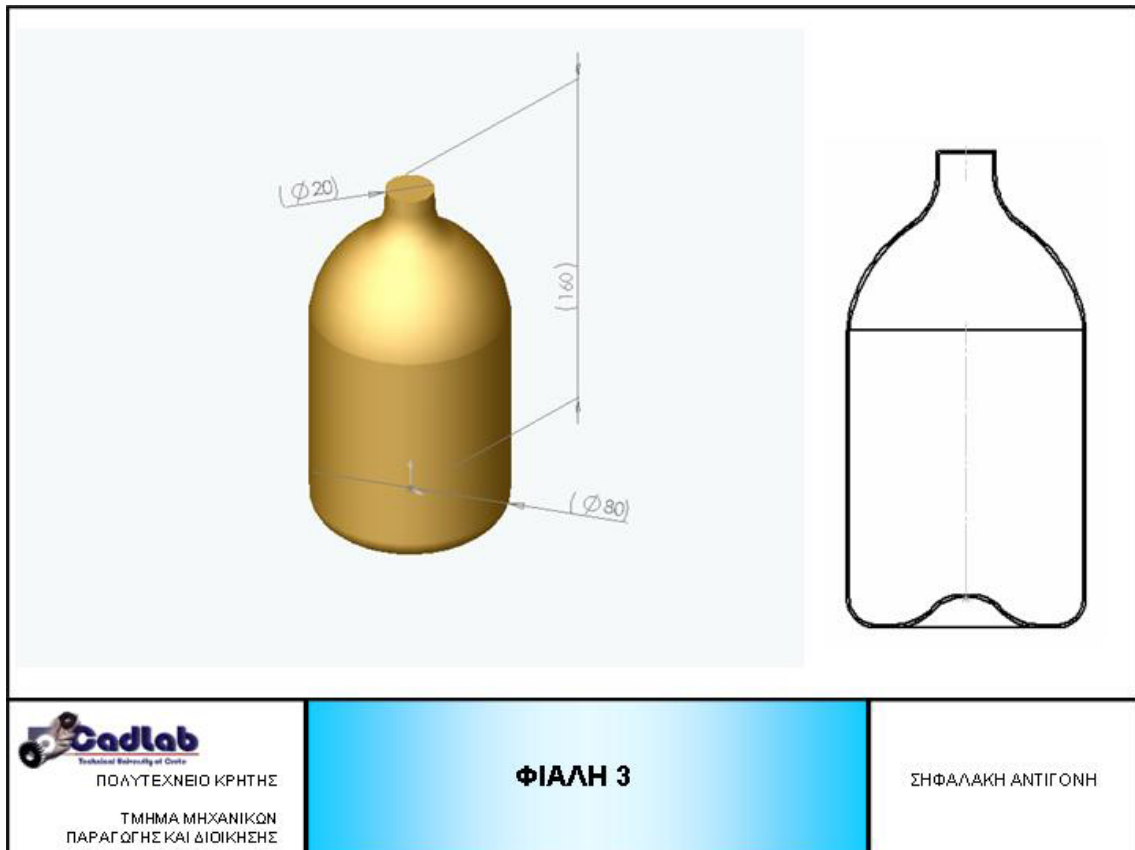
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,106475
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	2,4445536
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	2,338079
Μάζα περιεχομένου (kg)	2,338079
Βάρος υλικού (N)	1,2989897

Ακτίνα σφαίρας (mm)	82,336
Συντελεστής σ	0,80986



Εσωτερική Πίεση (KPa)	2,5500
Τάση 1 (KPa)	-5,0297
Τάση 5 (KPa)	-251483
Τάση 10 (KPa)	-50,2966
Τάση 15 (KPa)	-75,4448
Τάση 20 (KPa)	-100,5931

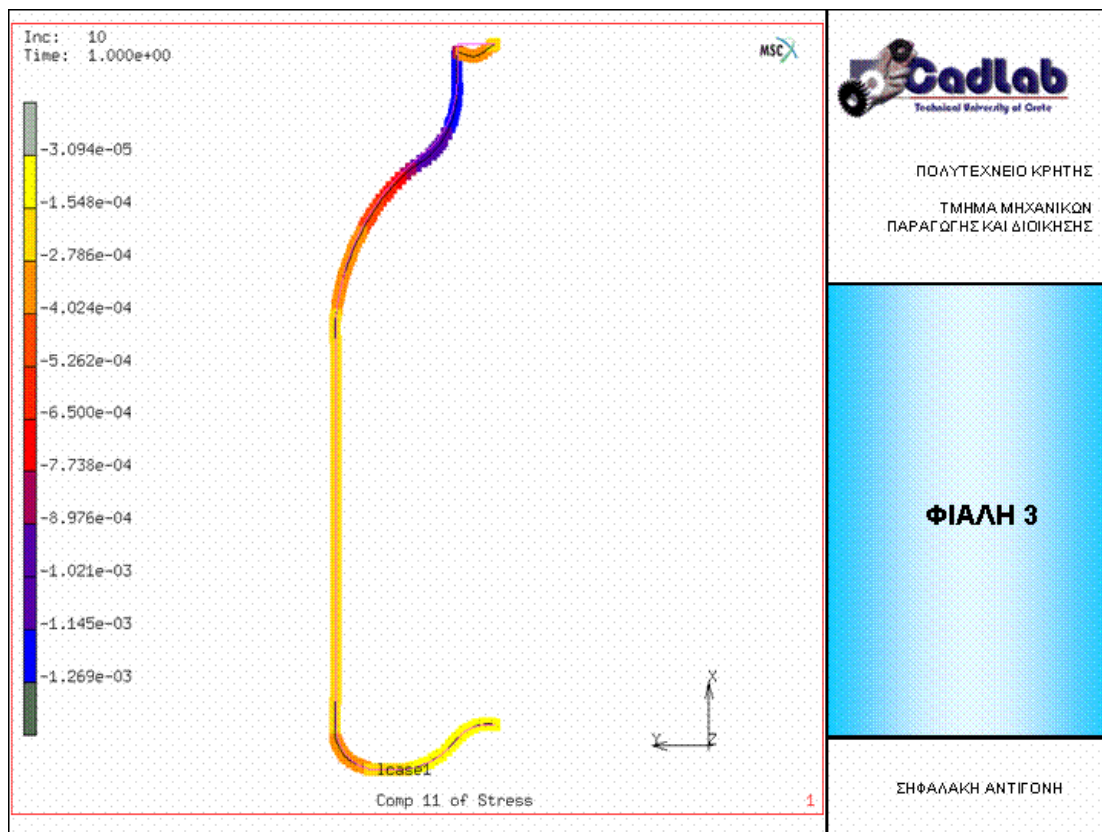
	2.1	2.5	2.10	2.15	2.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,11386970	-1,03071000	-2,18190000	-3,32852200	-4,45230200
Μετατόπιση Y (mm)	0,00540988	0,02422024	0,04927281	0,07422596	0,09868205
Παραμόρφωση X	-0,00005765	-0,00026892	-0,00055423	-0,00083841	-0,00111692
Παραμόρφωση Y	0,00010842	0,00061804	0,00125792	0,00189526	0,00251990
Τάση X (KPa)	-95,63	-357,61	-770,96	-1182,68	-1586,18
Τάση Y (KPa)	189,72	1062,92	2159,31	3251,35	4321,64

ΦΙΑΛΗ 3

Φιάλη 3	
Υψος (mm)	160
Ακτίνα λαιμού (mm)	10
Ακτίνα πάτου (mm)	40
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	314

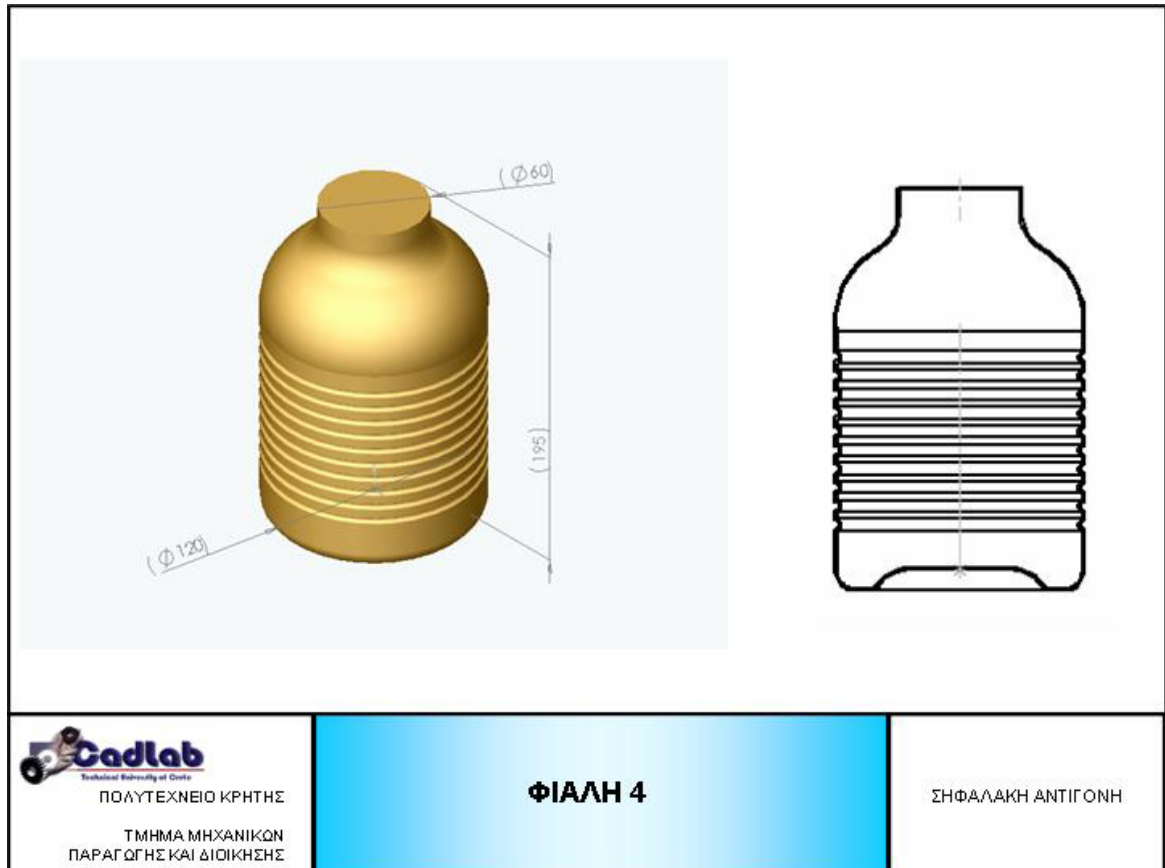
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,0394096
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,627719
Καθαρός όγκος περιεχομένου(lt)	0,588309
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,588309
Βάρος υλικού (N)	0,480797

Ακτίνα σφαίρας (mm)	51,98
Συντελεστής σ	0,87824



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,5690
Τάση 1 (KPa)	-21,1363
Τάση 5 (KPa)	-105,6815
Τάση 10 (KPa)	-211,3630
Τάση 15 (KPa)	-317,0444
Τάση 20 (KPa)	-422,7259

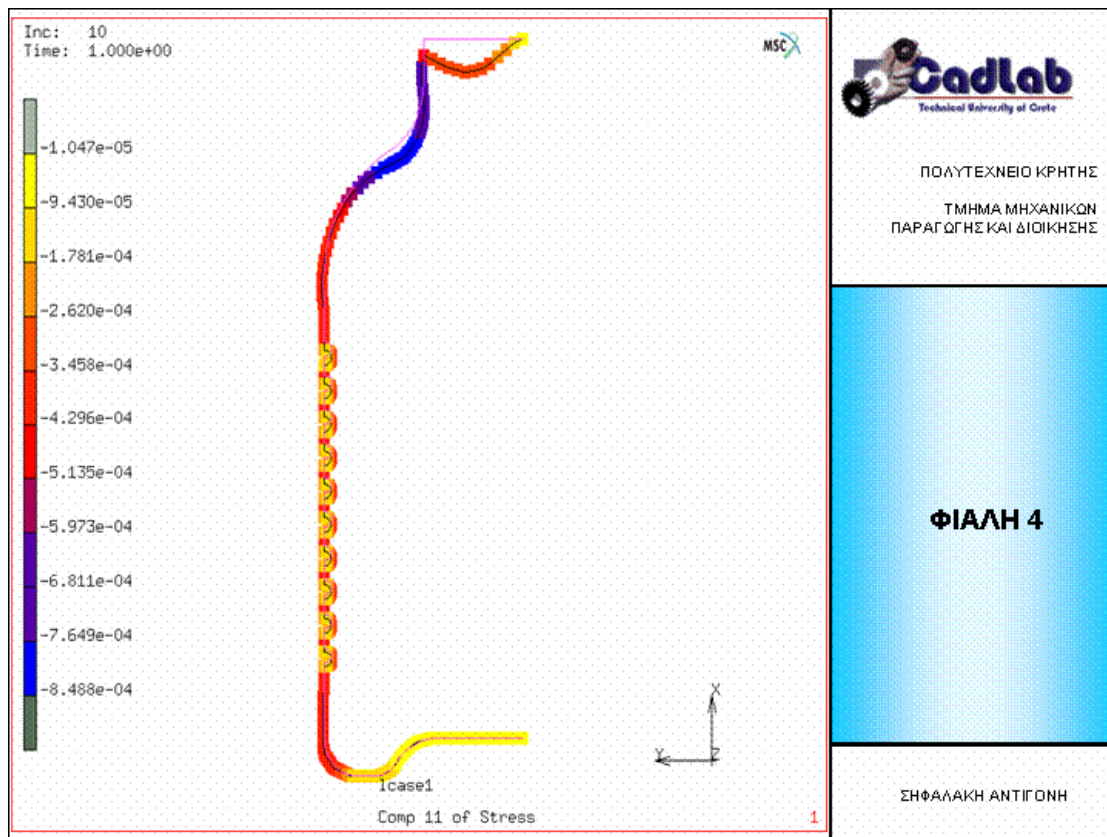
	3.1	3.5	3.10	3.15	3.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00517898	-0,03328869	-0,06840921	-0,10349650	-0,13861700
Μετατόπιση Y (mm)	0,00130009	0,00460613	0,00992247	0,01523526	0,02055309
Παραμόρφωση X	-0,00004514	-0,00022087	-0,00044042	-0,00065977	-0,00087932
Παραμόρφωση Y	0,00004787	0,00020666	0,00040506	0,00060327	0,00080167
Τάση X (KPa)	-61,17	-315,62	-633,52	-951,13	-1269,03
Τάση Y (KPa)	67,90	277,72	539,87	801,77	1063,92

ΦΙΑΛΗ 4

Φιάλη 4	
Υψος (mm)	195
Ακτίνα λαιμού (mm)	30
Ακτίνα πάτου (mm)	60
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	2826

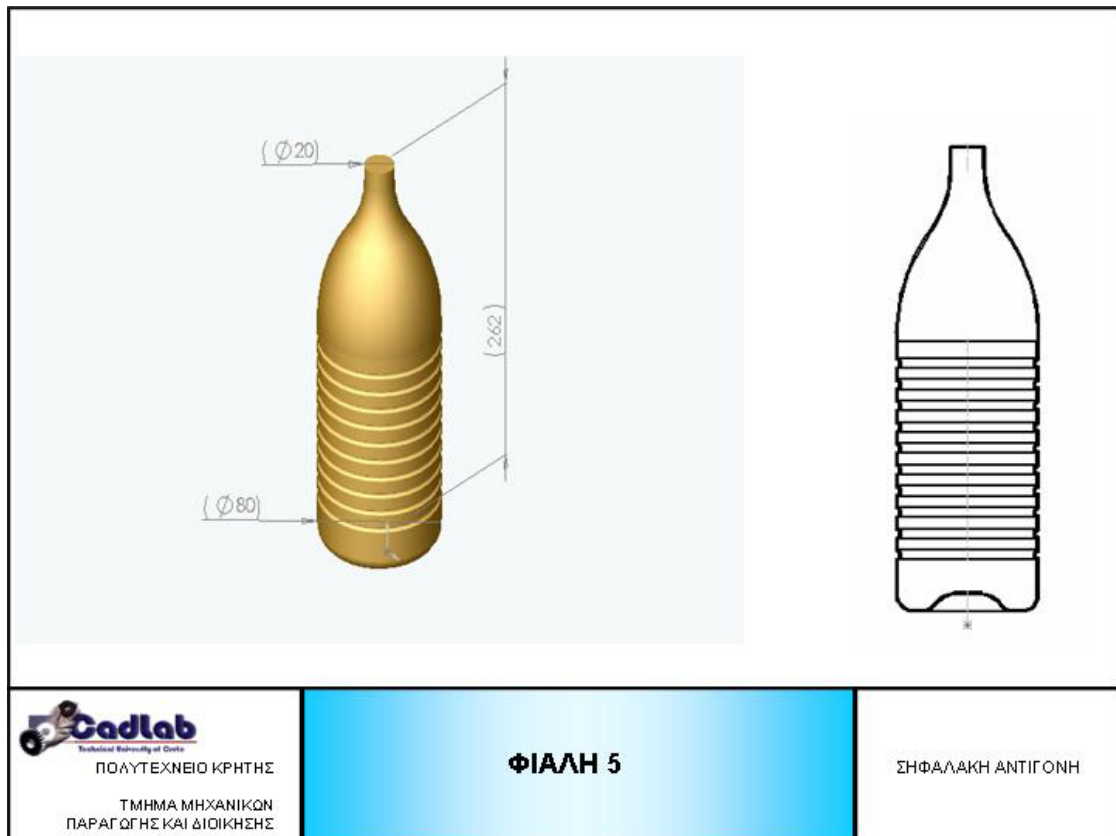
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,089071
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	1,826530
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	1,737459
Μάζα περιεχομένου (kg)	1,737459
Βάρος υλικού (N)	1,086660

Ακτίνα σφαίρας (mm)	74,578
Συντελεστής σ	0,79525



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,9120
Τάση 1 (KPa)	-6,7221
Τάση 5 (KPa)	-33,6105
Τάση 10 (KPa)	-67,2210
Τάση 15 (KPa)	-100,8315
Τάση 20 (KPa)	-134,4420

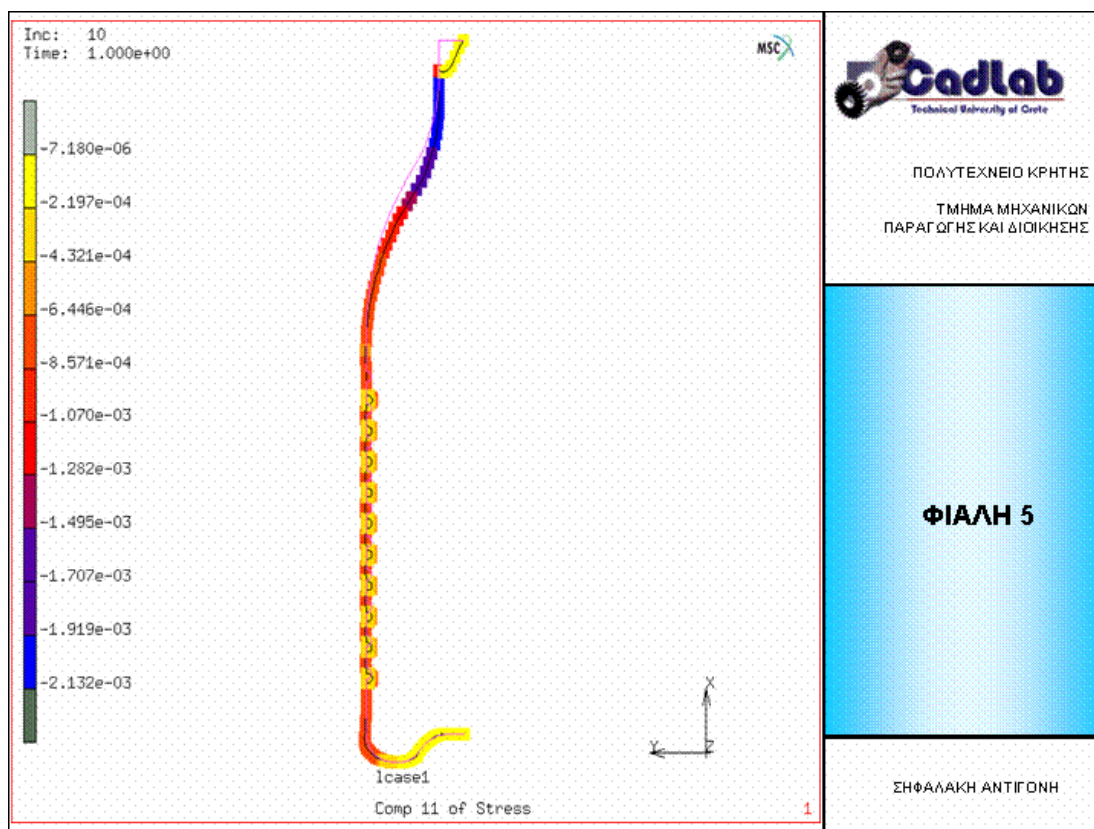
	4.1	4.5	4.10	4.15	4.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00659451	-0,05104406	-0,10676930	-0,16249450	-0,21821980
Μετατόπιση Y (mm)	0,00108839	0,00483221	0,00955416	0,01427611	0,01899806
Παραμόρφωση X	-0,00002663	-0,00014635	-0,00029599	-0,00044564	-0,00059528
Παραμόρφωση Y	0,00004435	0,00020138	0,00039767	0,00059396	0,00079025
Τάση X (KPa)	-26,64	-195,89	-413,52	-631,15	-848,78
Τάση Y (KPa)	71,92	-351,12	-783,85	-1216,58	-1649,31

ΦΙΑΛΗ 5

Φιάλη 5	
Υψος (mm)	262
Ακτίνα λαιμού (mm)	10
Ακτίνα πάτου (mm)	40
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	314

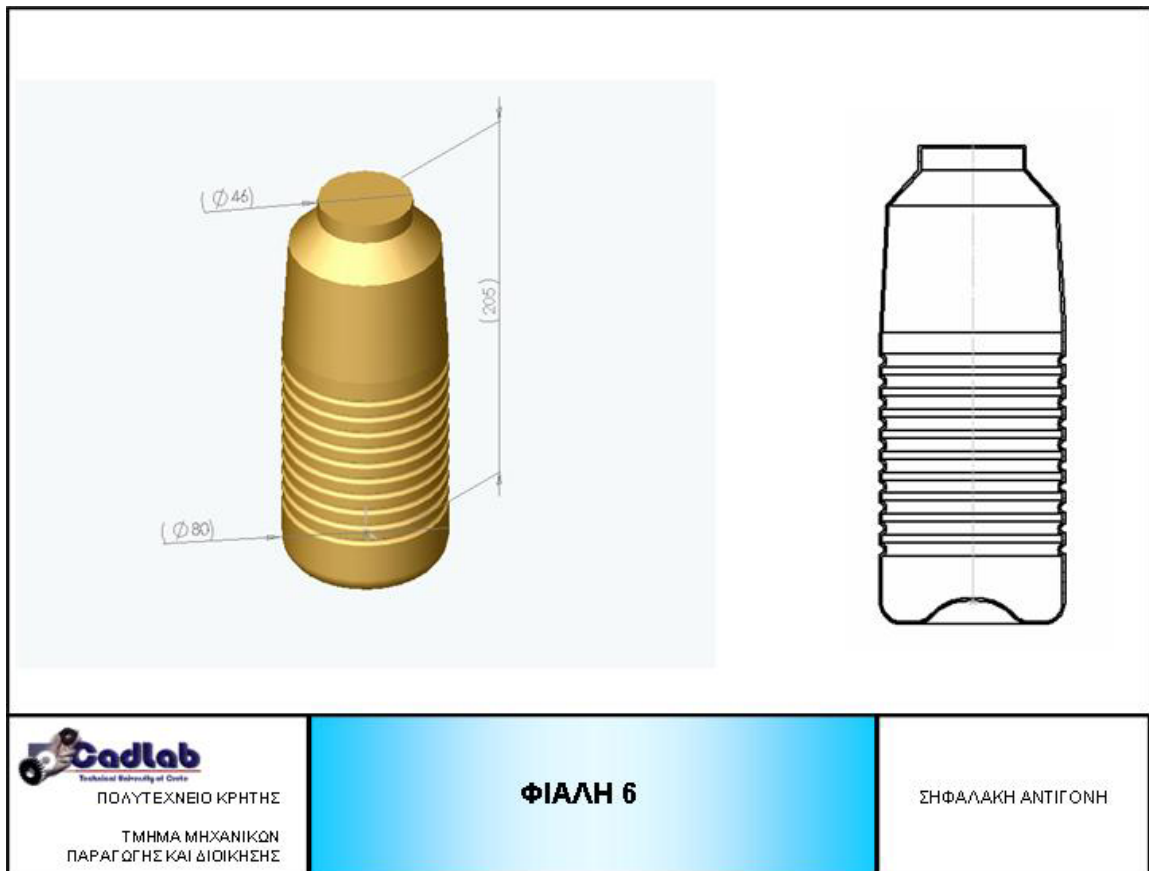
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,064352
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	1,000529
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,936177
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,936177
Βάρος υλικού (N)	0,785098

Ακτίνα σφαίρας (mm)	60,686
Συντελεστής σ	0,73108



Εσωτερική Πίεση (KPa)	2,5690
Τάση 1 (KPa)	-33,7487
Τάση 5 (KPa)	-168,7436
Τάση 10 (KPa)	-337,4872
Τάση 15 (KPa)	-506,2308
Τάση 20 (KPa)	-674,9744

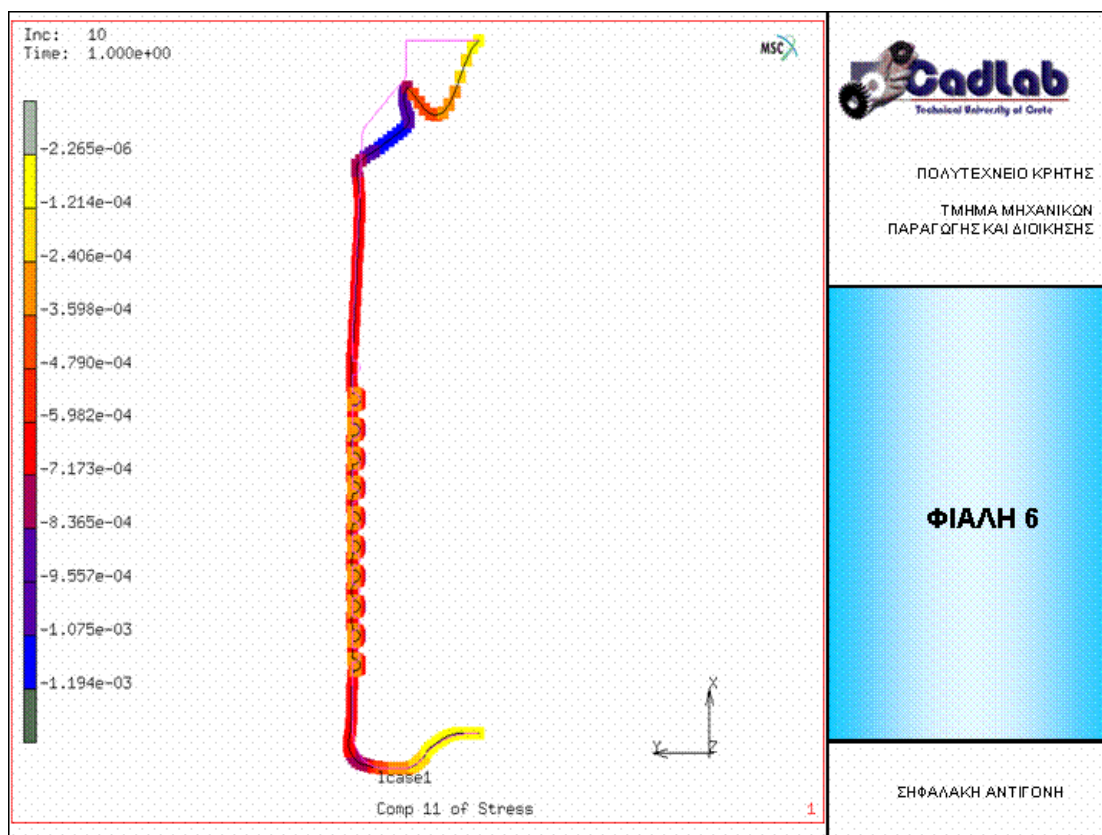
	5.1	5.5	5.10	5.15	5.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,01036844	-0,12401570	-0,27026170	-0,41642110	-0,56266710
Μετατόπιση Y (mm)	0,00276012	0,01135706	0,02322021	0,03512287	0,04708692
Παραμόρφωση X	-0,00008685	-0,00033984	-0,00065626	-0,00097250	-0,00128892
Παραμόρφωση Y	0,00009054	0,00025854	0,00053567	0,00081264	0,00108978
Τάση X (KPa)	-118,46	-542,22	-1072,25	-1601,96	-2131,98
Τάση Y (KPa)	127,55	424,95	868,69	1312,17	1755,90

ΦΙΑΛΗ 6

Φιάλη 6	
Ύψος (mm)	205
Ακτίνα λαιμού (mm)	23
Ακτίνα πάτου (mm)	40
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	1661,06

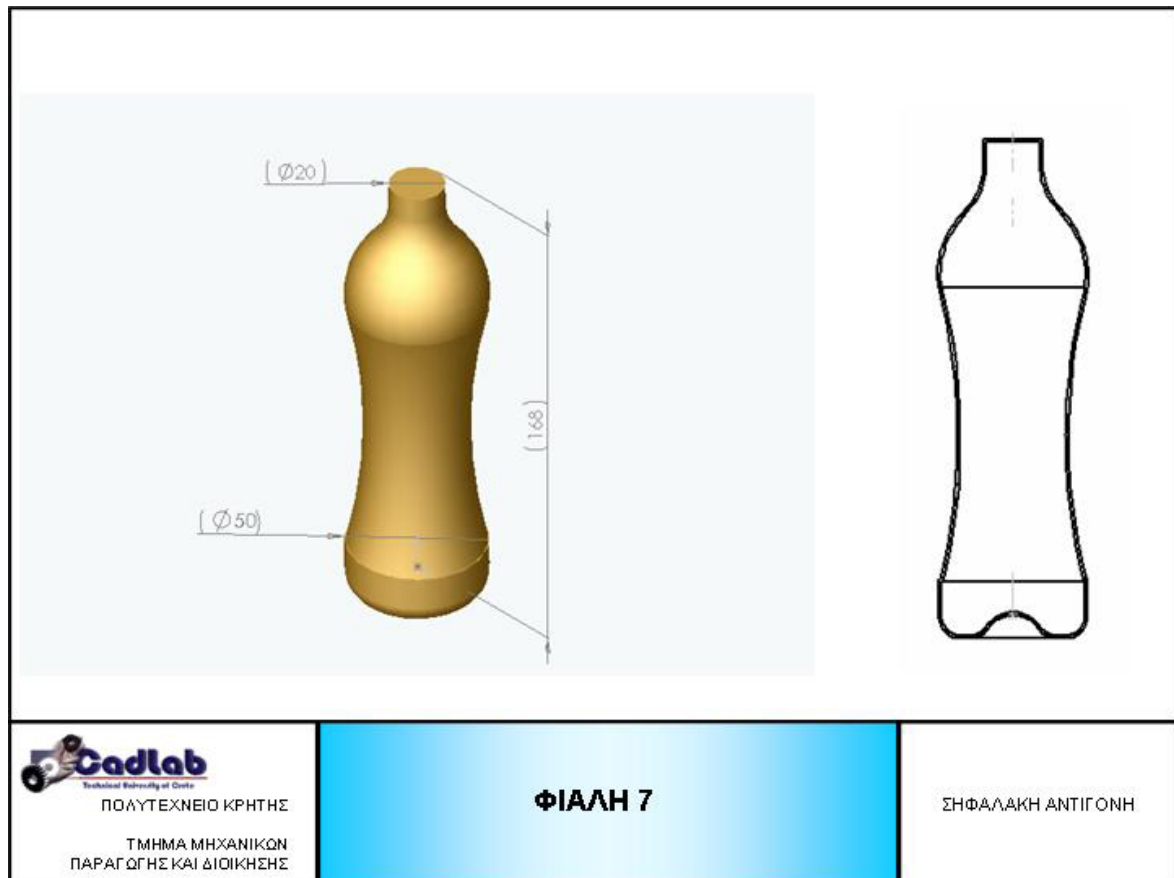
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,059243
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,915892
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,856649
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,856649
Βάρος υλικού (N)	0,722762

Ακτίνα σφαίρας (mm)	58,917
Συντελεστής σ	0,74886



Εσωτερική Πίεση (KPa)	2,0100
Τάση 1 (KPa)	-5,8425
Τάση 5 (KPa)	-29,2126
Τάση 10 (KPa)	-58,4251
Τάση 15 (KPa)	-87,6377
Τάση 20 (KPa)	-116,8502

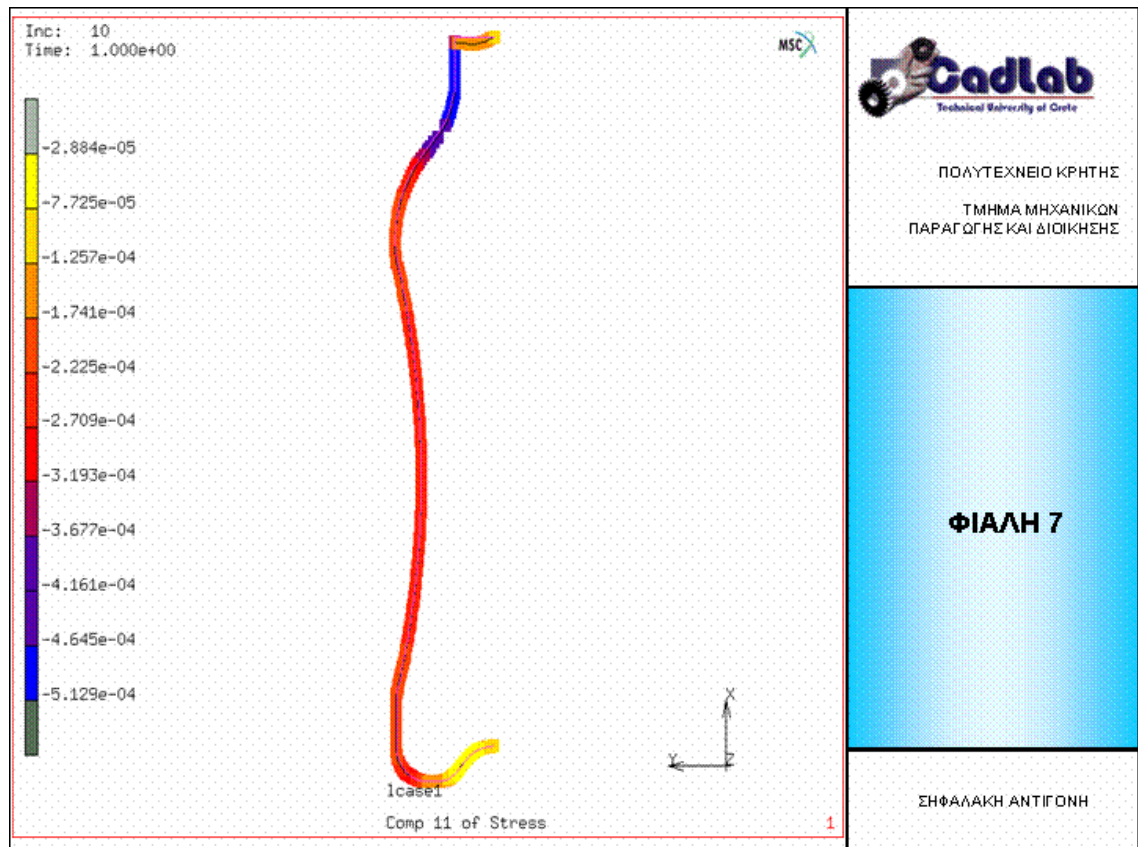
	6.1	6.5	6.10	6.15	6.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,02713150	-0,24196490	-0,51051200	-0,77905910	-1,04852600
Μετατόπιση Y (mm)	0,00373108	0,02183079	0,04451526	0,06719974	0,08996189
Παραμόρφωση X	-0,00003582	-0,00021475	-0,00044991	-0,00068506	-0,00092102
Παραμόρφωση Y	0,00007503	0,00042907	0,00087684	0,00132462	0,00177392
Τάση X (KPa)	-35,52	-273,57	-580,05	-886,53	-1194,06
Τάση Y (KPa)	132,61	725,14	1472,73	2220,31	2970,46

ΦΙΑΛΗ 7

Φιάλη 7	
Ύψος (mm)	168
Ακτίνα λαιμού (mm)	10
Ακτίνα πλάτους (mm)	25
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	314

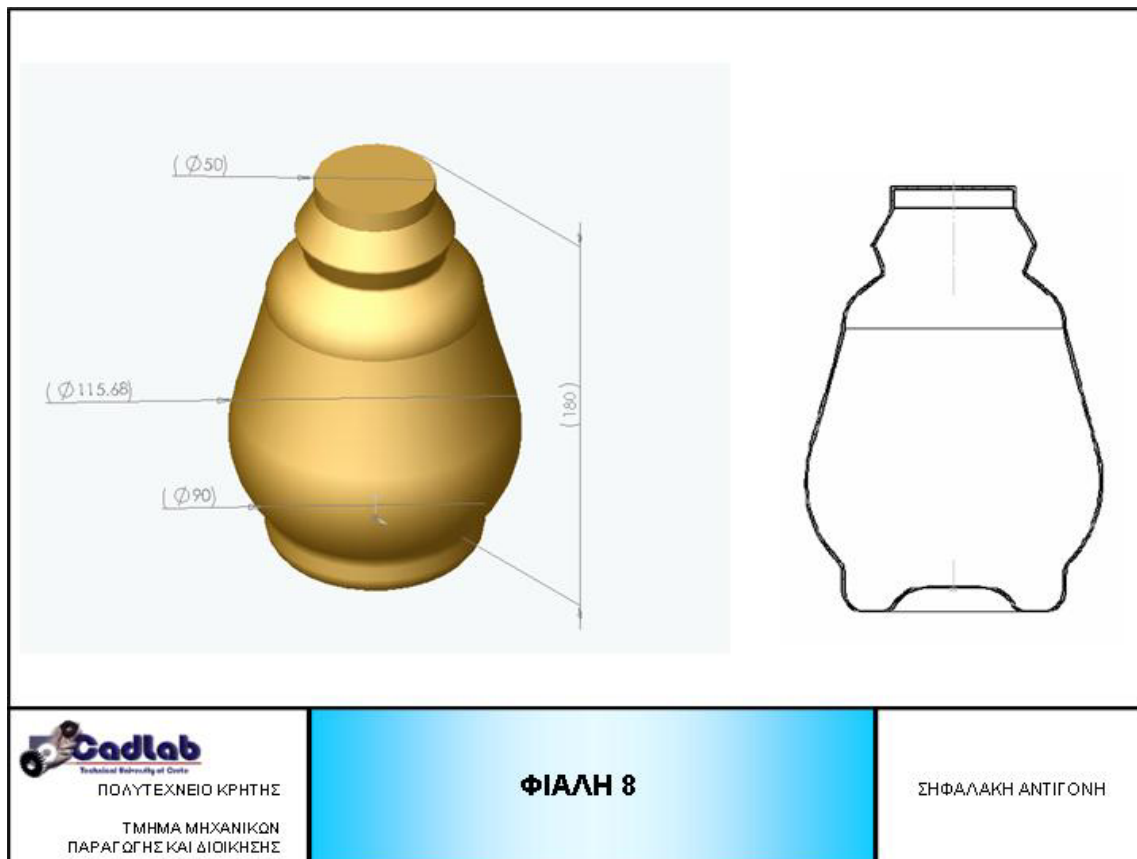
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,023094
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,221535
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,198441
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,198441
Βάρος υλικού (N)	0,281748

Ακτίνα σφαίρας (mm)	36,184
Συντελεστής σ	0,73229



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,6470
Τάση 1 (KPa)	-7,8177
Τάση 5 (KPa)	-39,0884
Τάση 10 (KPa)	-78,1767
Τάση 15 (KPa)	-117,2651
Τάση 20 (KPa)	-156,3534

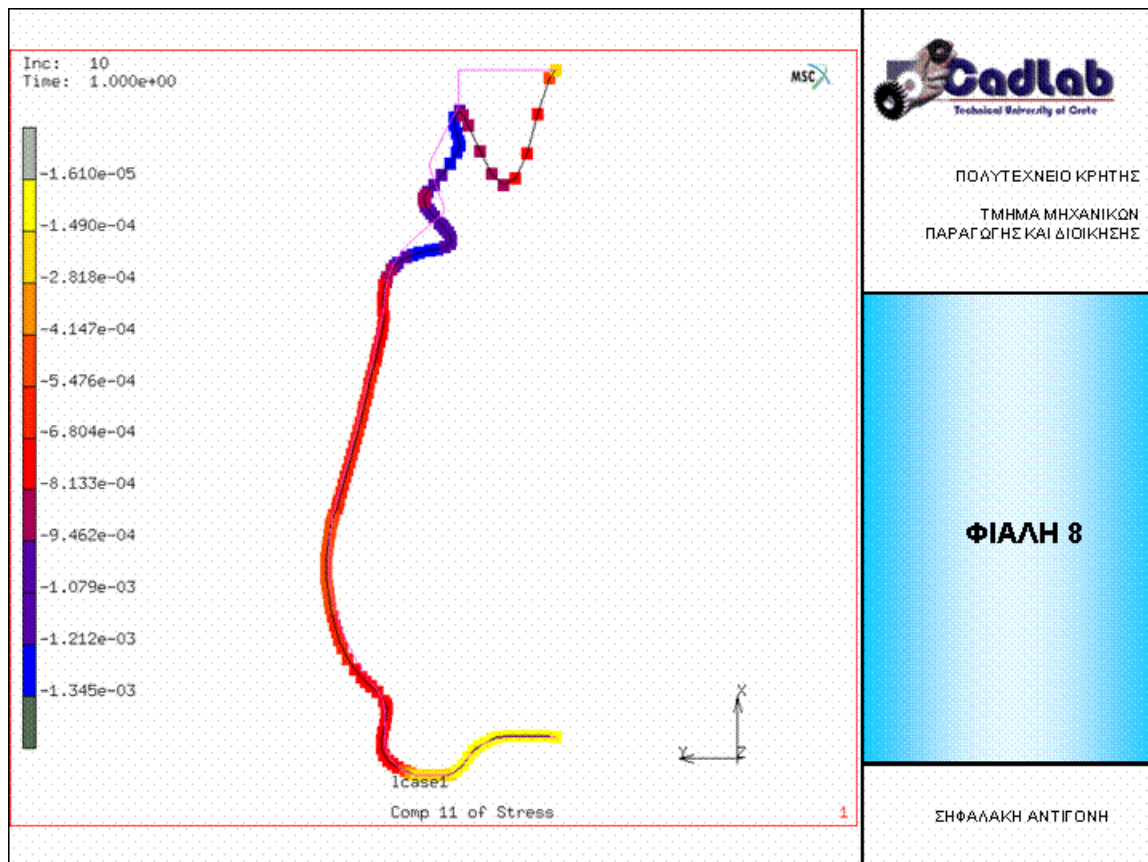
	7.1	7.5	7.10	7.15	7.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00237398	-0,01672429	-0,03466491	-0,05260552	-0,07054613
Μετατόπιση Y (mm)	0,00053031	0,00204202	0,00426196	0,00648190	0,00870184
Παραμόρφωση X	-0,00001728	-0,00008951	-0,00018036	-0,00027122	-0,00036208
Παραμόρφωση Y	0,00002226	0,00008852	0,00017333	0,00026023	0,00034974
Τάση X (KPa)	-20,98	-124,58	-254,02	-383,47	-512,92
Τάση Y (KPa)	40,88	134,22	276,52	419,14	561,75

ΦΙΑΛΗ 8

Φιάλη 8	
Υψος (mm)	180
Ακτίνα λαιμού (mm)	25
Ακτίνα πάτου (mm)	45
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	1962,5

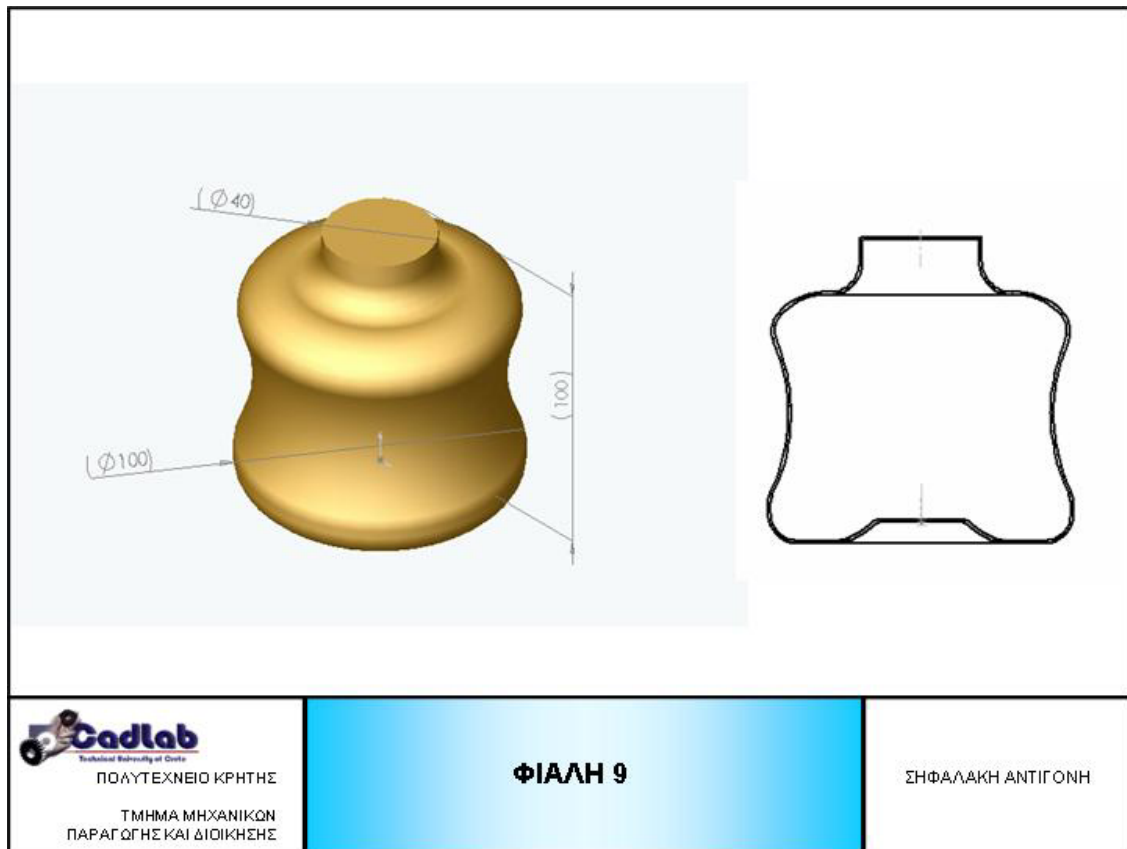
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,062158
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	1,236531
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	1,174374
Μάζα περιεχομένου (kg)	1,174374
Βάρος υλικού (N)	0,758325

Ακτίνα σφαίρας (mm)	65,449
Συντελεστής σ	0,87932



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,7650
Τάση 1 (KPa)	-6,5673
Τάση 5 (KPa)	-32,8365
Τάση 10 (KPa)	-65,6730
Τάση 15 (KPa)	-98,5095
Τάση 20 (KPa)	-131,3460

	8.1	8.5	8.10	8.15	8.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,05094464	-0,34815220	-0,72079430	-1,09230400	-1,46381300
Μετατόπιση Y (mm)	0,00348422	-0,02219562	-0,04809018	-0,07390603	-0,09972189
Παραμόρφωση X	-0,00004951	-0,00028226	-0,00057408	-0,00086501	-0,00115594
Παραμόρφωση Y	0,00008853	-0,00065273	-0,00141541	-0,00217577	-0,00293614
Τάση X (KPa)	-46,06	-306,60	-653,37	-999,08	-1344,79
Τάση Y (KPa)	152,33	-1251,89	-2708,54	-4160,75	-5612,97

ΦΙΑΛΗ 9

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

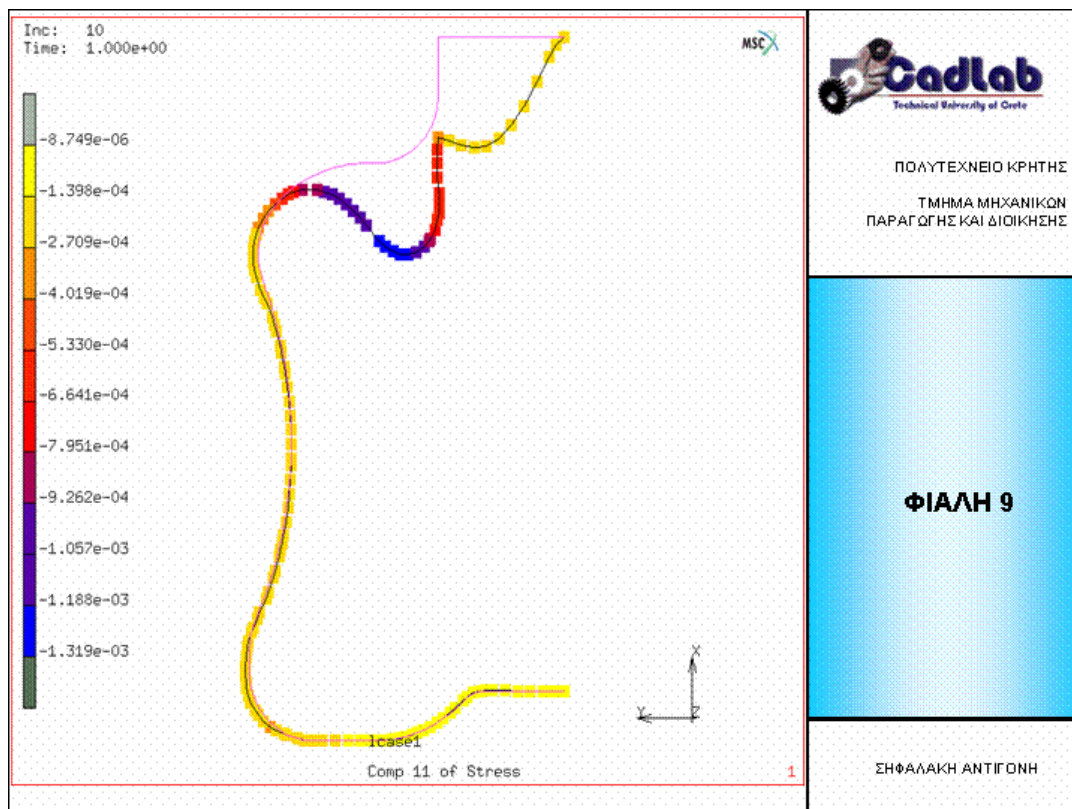
ΦΙΑΛΗ 9

ΣΗΦΑΛΑΚΗ ΑΝΤΙΓΟΝΗ

Φιάλη 9	
Υψος (mm)	100
Ακτίνα λαιμού (mm)	20
Ακτίνα πάτου (mm)	50
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	1256

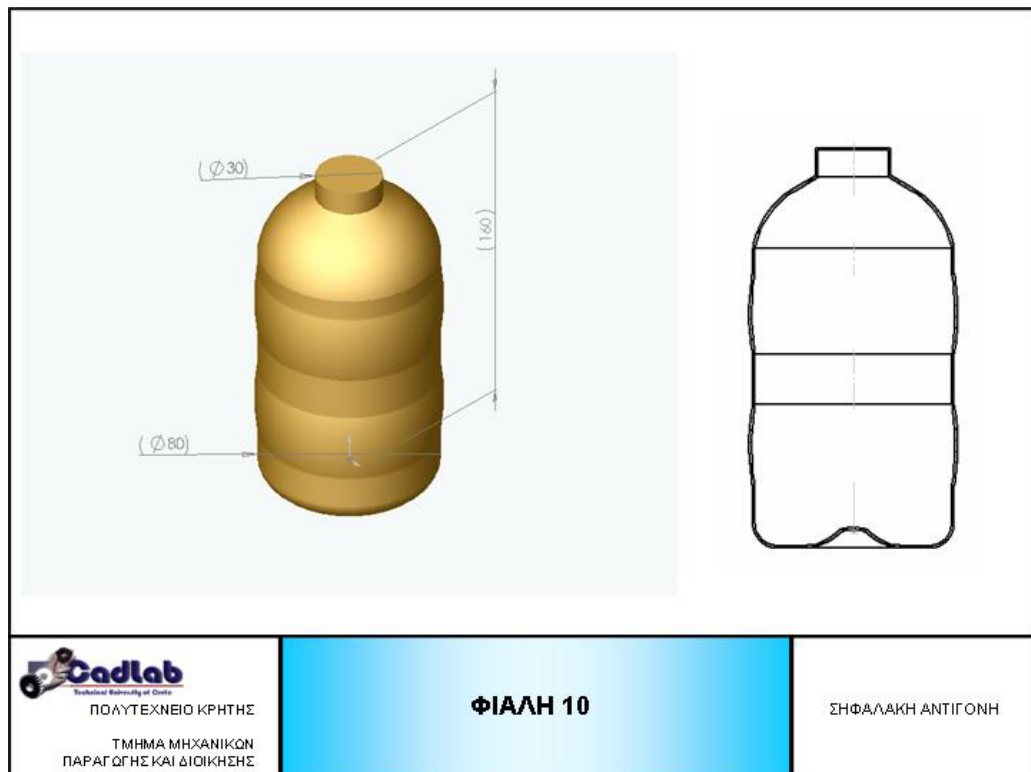
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,037662
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,561727
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,524065
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,524065
Βάρος υλικού (N)	0,459480

Ακτίνα σφαίρας (mm)	50,015
Συντελεστής σ	0,85144



Εσωτερική Πίεση (KPa)	0,9806
Τάση 1 (KPa)	4,7520
Τάση 5 (KPa)	23,7599
Τάση 10 (KPa)	47,5197
Τάση 15 (KPa)	71,2796
Τάση 20 (KPa)	95,0395

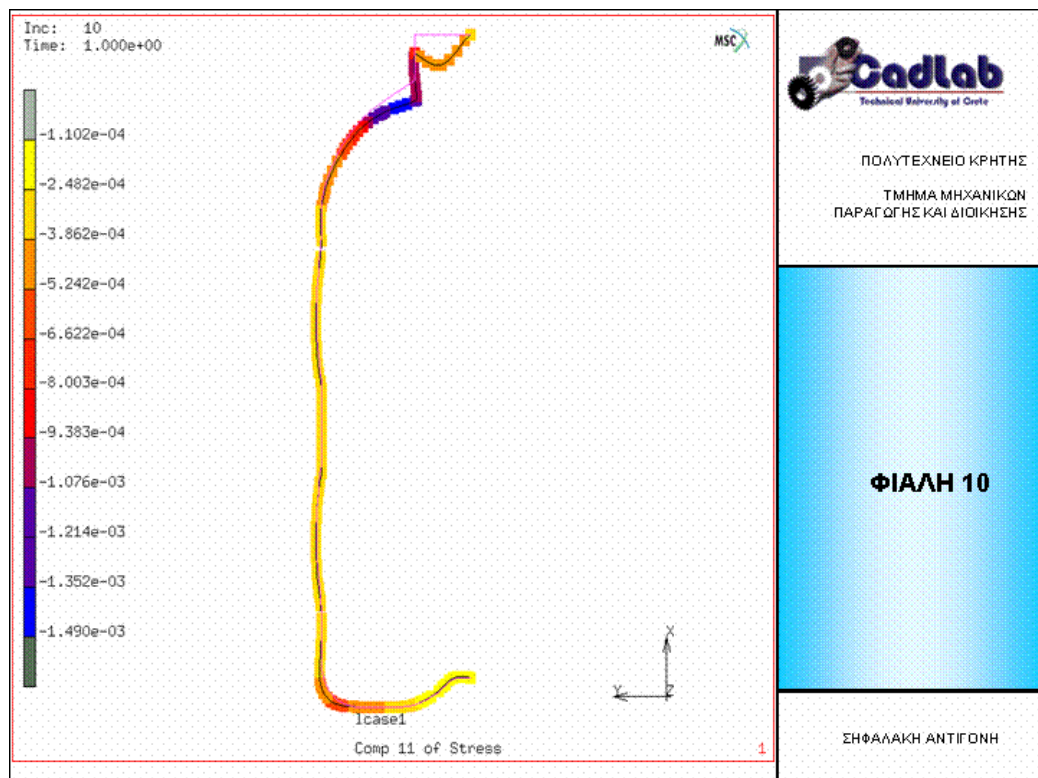
	9.1	9.5	9.10	9.15	9.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,01982867	-0,18029880	-0,38217940	-0,58491190	-0,78679250
Μετατόπιση Y (mm)	0,00169195	0,01559266	0,03323779	0,05103501	0,06875744
Παραμόρφωση X	-0,00002510	-0,00017904	-0,00038650	-0,00059484	-0,00080230
Παραμόρφωση Y	0,00004064	-0,00044942	-0,00096848	-0,00148973	-0,00200880
Τάση X (KPa)	-34,33	-302,38	-640,25	-980,54	-1319,39
Τάση Y (KPa)	-74,29	-874,94	-1879,47	-2888,24	-3892,76

ΦΙΑΛΗ 10

Φιάλη 10	
Ύψος (mm)	160
Ακτίνα λαιμού (mm)	15
Ακτίνα πάτου (mm)	40
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	706,5

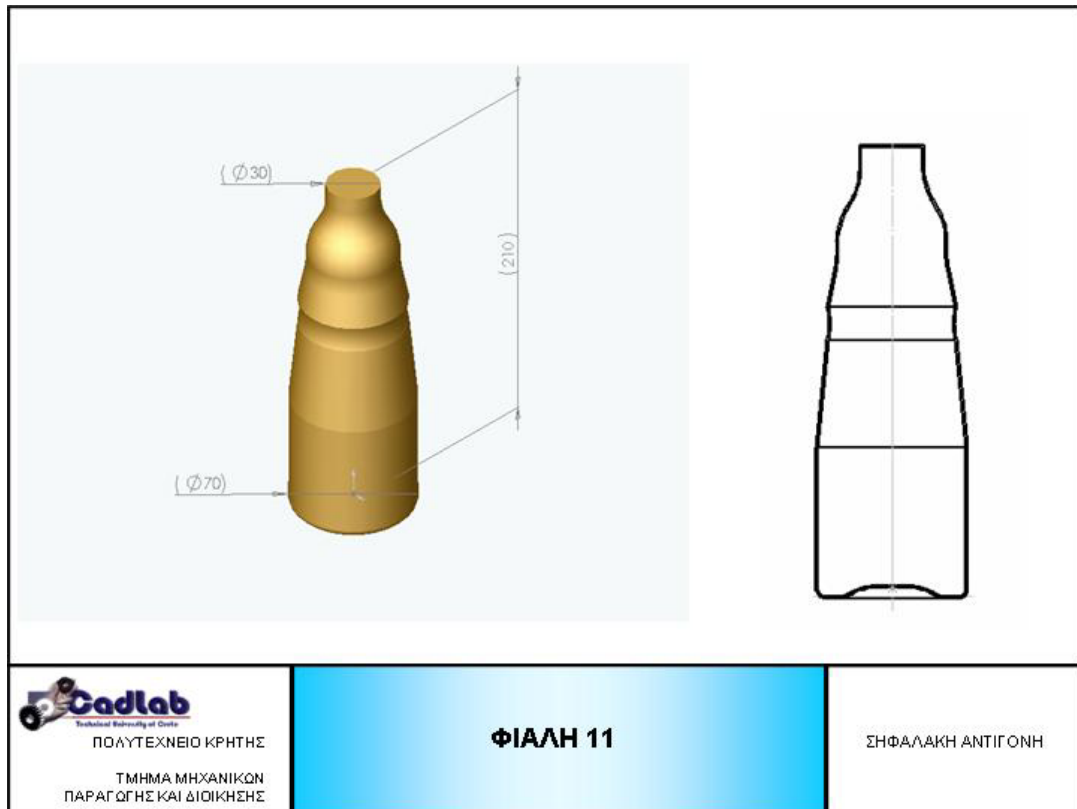
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,043014
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,714630
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,671617
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,671617
Βάρος υλικού (N)	0,524767

Ακτίνα σφαίρας (mm)	54,326
Συντελεστής σ	0,8782



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,5690
Τάση 1 (KPa)	-10,6621
Τάση 5 (KPa)	-53,3105
Τάση 10 (KPa)	-106,6209
Τάση 15 (KPa)	-159,9314
Τάση 20 (KPa)	-213,2418

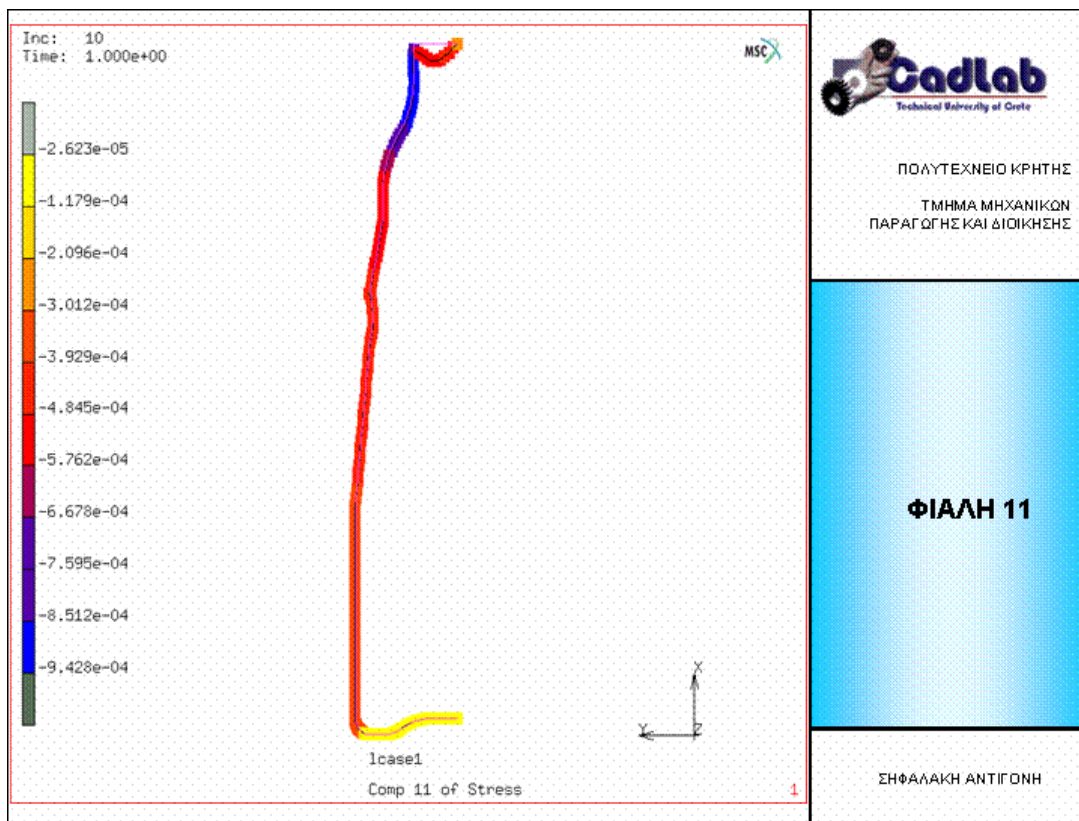
	10.1	10.5	10.10	10.15	10.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,01368176	-0,08675446	-0,17835320	-0,27011840	-0,36188350
Μετατόπιση Y (mm)	0,00153025	0,00850338	0,01820200	0,02790062	0,03759924
Παραμόρφωση X	-0,00003889	-0,00020451	-0,00041152	-0,00061854	-0,00082555
Παραμόρφωση Y	-0,00006088	-0,00045741	-0,00095308	-0,00144874	-0,00194441
Τάση X (KPa)	-55,52	-356,32	-734,32	-1112,32	-1490,32
Τάση Y (KPa)	-124,47	-908,26	-1888,00	-2867,73	-3847,47

ΦΙΑΛΗ 11

Φιάλη 11	
Ύψος (mm)	210
Ακτίνα λαιμού (mm)	15
Ακτίνα πάτου (mm)	35
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	706,5

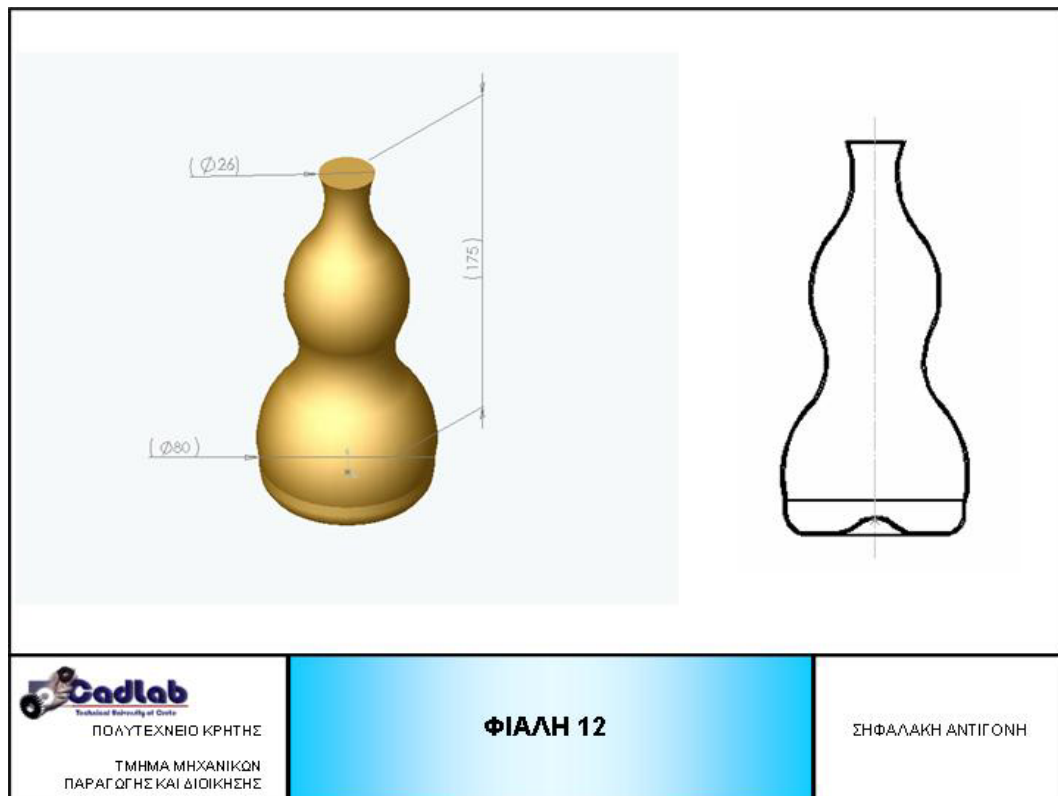
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,042587
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,594176
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,551589
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,551589
Βάρος υλικού (N)	0,519565

Ακτίνα σφαίρας (mm)	50,876
Συντελεστής σ	0,77885



Εσωτερική Πίεση (KPa)	2,0590
Τάση 1 (KPa)	- 8,9831
Τάση 5 (KPa)	- 44,9155
Τάση 10 (KPa)	- 89,8310764
Τάση 15 (KPa)	-134,7466146
Τάση 20 (KPa)	-179,6621528

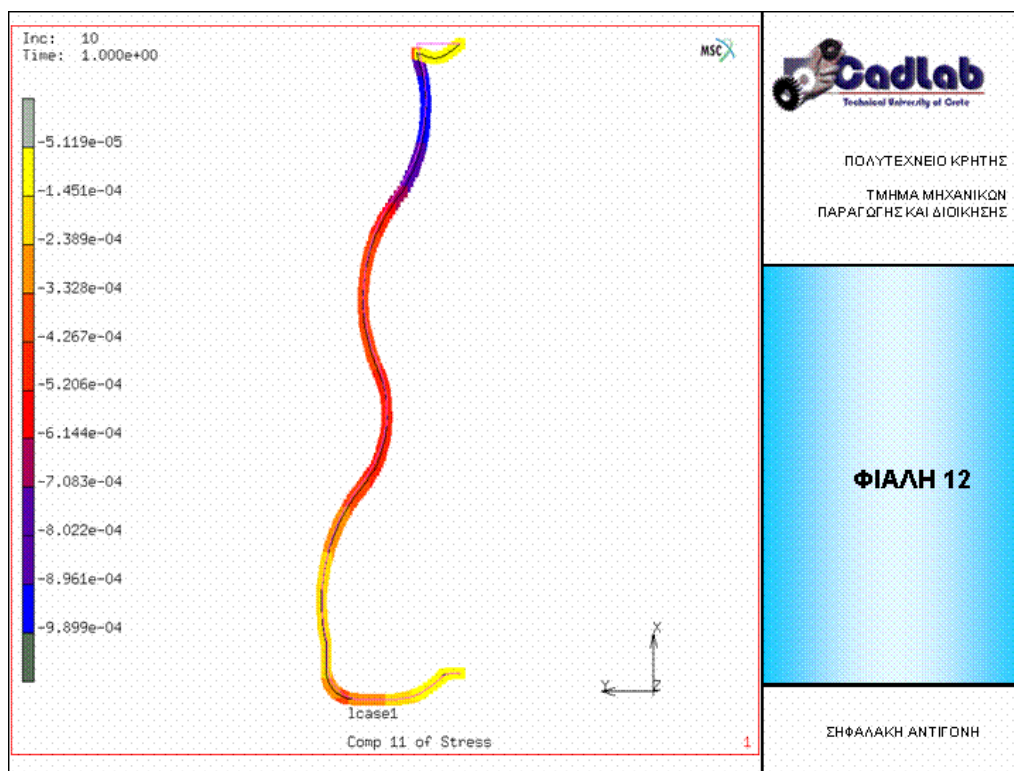
	11.1	11.5	11.10	11.15	11.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00941117	-0,06008833	-0,12343480	-0,18678120	-0,25026880
Μετατόπιση Y (mm)	0,00140529	0,00415749	0,00826514	0,01237280	0,01648960
Παραμόρφωση X	-0,00003755	-0,00020743	-0,00041978	-0,00063213	-0,00084495
Παραμόρφωση Y	0,00006354	0,00031040	0,00062432	0,00092754	0,00123680
Τάση X (KPa)	-37,90	-227,42	-465,71	-704,00	-942,82
Τάση Y (KPa)	103,40	490,88	975,24	1459,59	1945,02

ΦΙΑΛΗ 12

Φιάλη 12	
Ύψος (mm)	175
Ακτίνα λαιμού (mm)	13
Ακτίνα πάτου (mm)	40
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	530,66

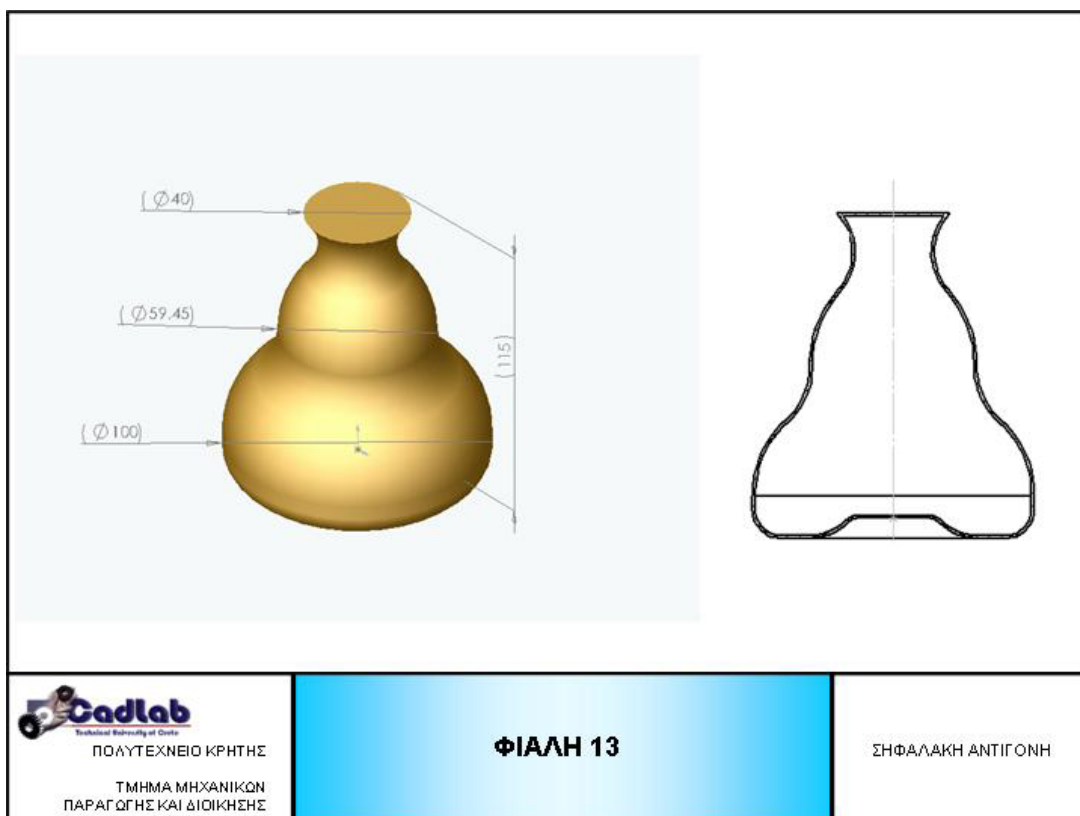
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,34984
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,448964
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,413979
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,413979
Βάρος υλικού (N)	0,426811

Ακτίνα σφαίρας (mm)	46,234
Συντελεστής σ	0,78455



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,7160
Τάση 1 (KPa)	-9,1015
Τάση 5 (KPa)	-45,5076
Τάση 10 (KPa)	-91,0152
Τάση 15 (KPa)	-136,5228
Τάση 20 (KPa)	-182,0303

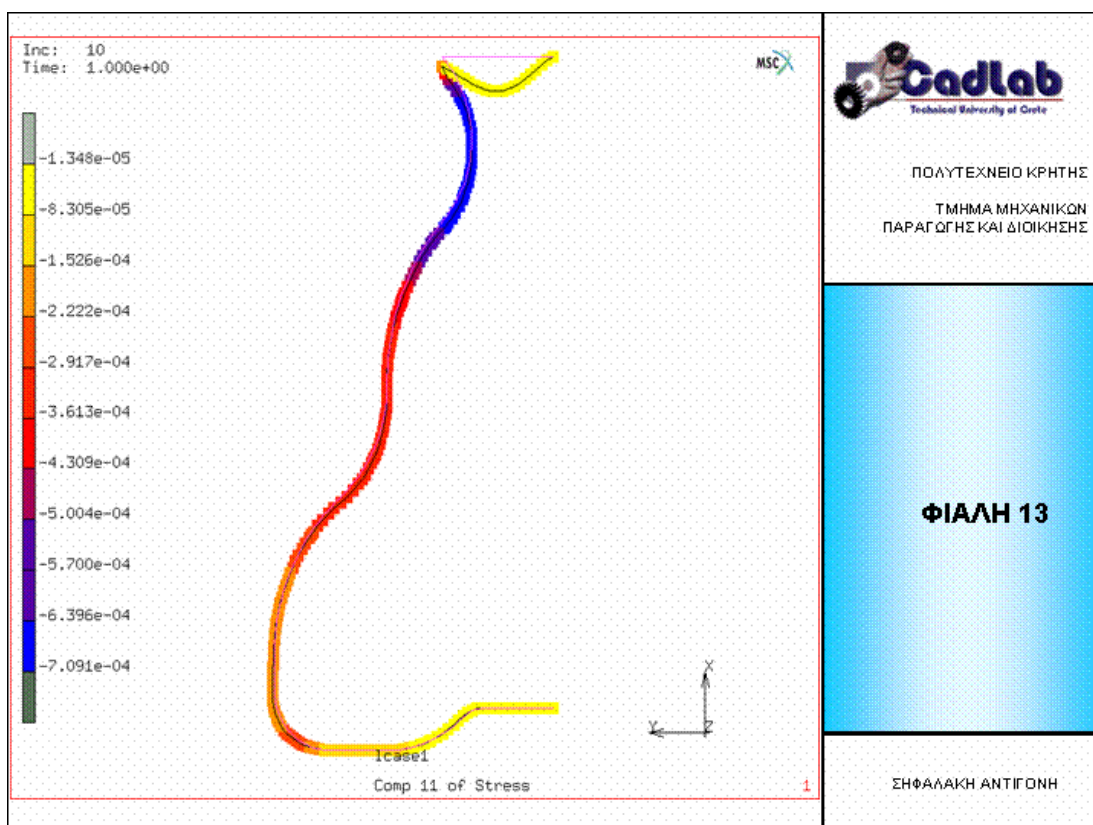
	12.1	12.5	12.10	12.15	12.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00571597	-0,04389380	-0,09185958	-0,13982540	-0,18779110
Μετατόπιση Y (mm)	0,00151921	0,00468426	0,01060704	0,01652981	0,02245259
Παραμόρφωση X	-0,00003062	-0,00015319	-0,00030640	-0,00045961	-0,00061283
Παραμόρφωση Y	0,00004144	0,00018366	0,00036150	0,00053935	0,00071719
Τάση X (KPa)	-47,36	-245,80	-493,85	-741,89	-989,94
Τάση Y (KPa)	73,96	274,06	536,09	798,13	0,001060,16

ΦΙΑΛΗ 13

Φιάλη 13	
Ύψος (mm)	115
Ακτίνα λαιμού (mm)	20
Ακτίνα πάτου (mm)	50
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	1256

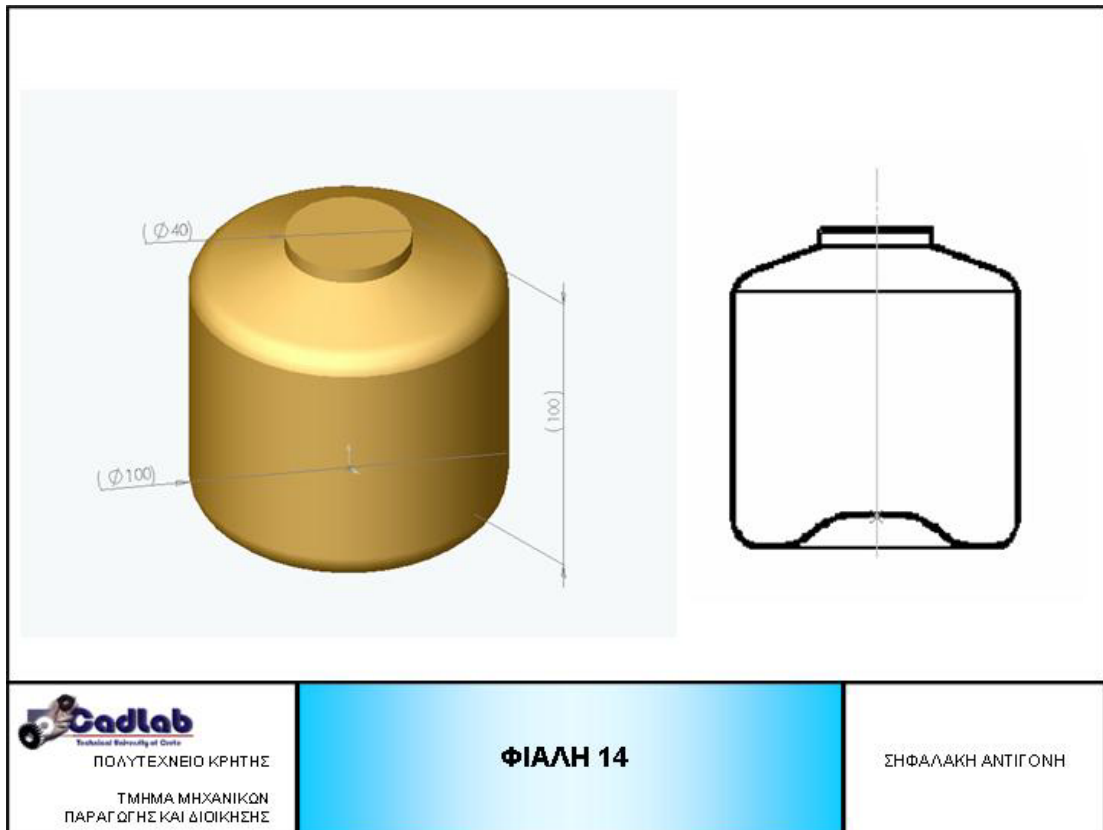
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,32891
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,432860
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,399969
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,399969
Βάρος υλικού (N)	0,401266

Ακτίνα σφαίρας (mm)	45,707
Συντελεστής σ	0,81576



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,1280
Τάση 1 (KPa)	-3,6993
Τάση 5 (KPa)	-18,4963
Τάση 10 (KPa)	-36,9926
Τάση 15 (KPa)	-55,4888
Τάση 20 (KPa)	-73,9851

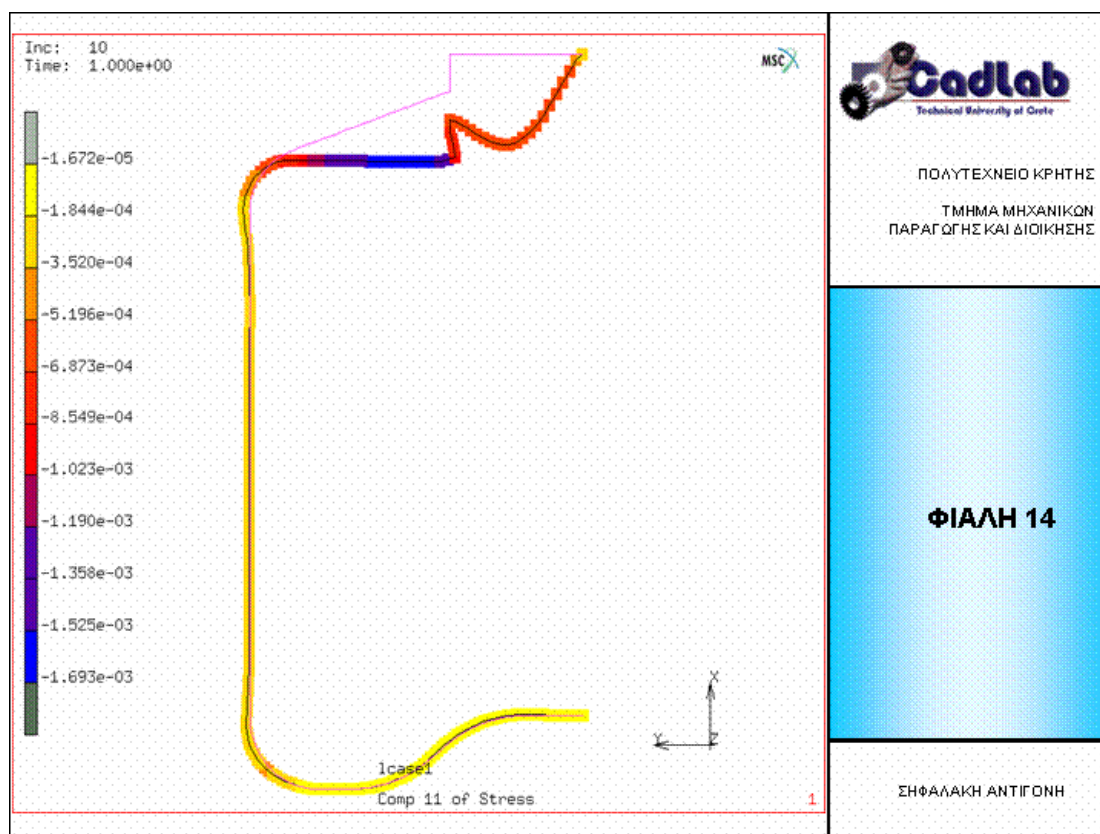
	13.1	13.5	13.10	13.15	13.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00877888	-0.06756117	-0,14103900	-0,21451690	-0,28799480
Μετατόπιση Y (mm)	0,00112324	0.00423064	0,00962768	0,01502472	0,02044549
Παραμόρφωση X	-0,00002119	-0.00011641	-0,00023543	-0,00035445	-0,00047348
Παραμόρφωση Y	0,00003264	0.00017141	0,00034556	0,00051971	0,00069386
Τάση X (KPa)	-32,42	-174,88	-352,95	-531,03	-709,13
Τάση Y (KPa)	57,06	274,53	552,53	830,52	1108,51

ΦΙΑΛΗ 14

Φιάλη 14	
Ύψος (mm)	100
Ακτίνα λαιμού (mm)	20
Ακτίνα πάτου (mm)	50
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	1256

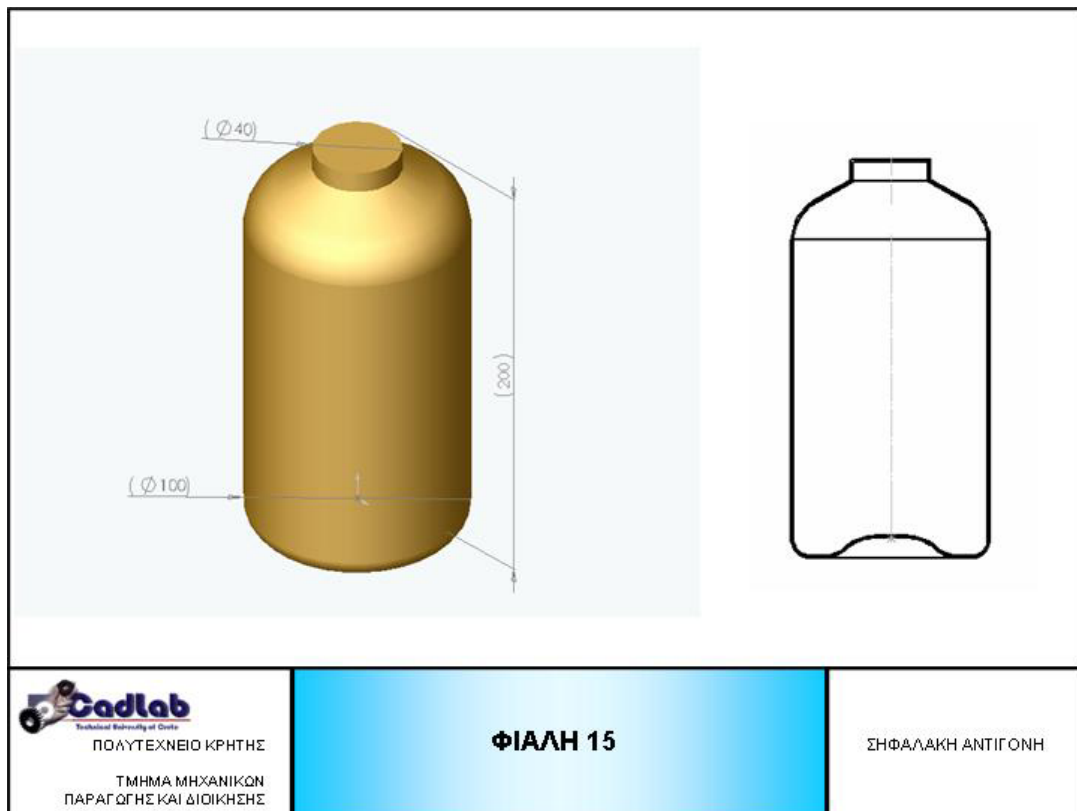
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,040972
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,689419
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,648447
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,648447
Βάρος υλικού (N)	0,499862

Ακτίνα σφαίρας (mm)	53,694
Συντελεστής σ	0,90082



Εσωτερική Πίεση (KPa)	0,9806
Τάση 1 (KPa)	-5,7809
Τάση 5 (KPa)	-28,9047
Τάση 10 (KPa)	-57,8094
Τάση 15 (KPa)	-86,7141
Τάση 20 (KPa)	-115,6188

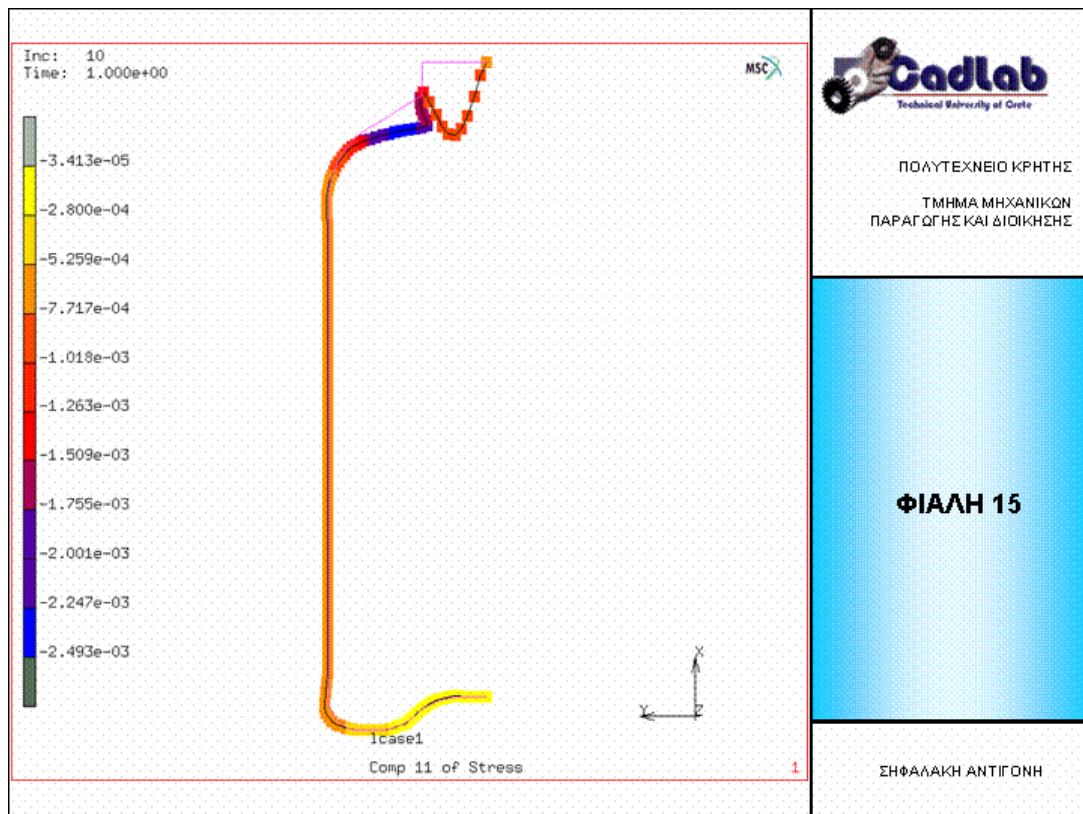
	14.1	14.5	14.10	14.15	14.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,02052340	-0,14542710	-0,30205400	-0,45868100	-0,61530800
Μετατόπιση Y (mm)	0,00216539	0,01707230	0,03657621	0,05608013	0,07558404
Παραμόρφωση X	-0,00003347	-0,00021225	-0,00044300	-0,00067412	-0,00090524
Παραμόρφωση Y	0,00005754	-0,00050022	-0,00105850	-0,00161678	-0,00217506
Τάση X (KPa)	-55,75	-396,49	-828,68	-1260,88	-1693,07
Τάση Y (KPa)	-109,26	-974,10	-2055,14	-3136,19	-4217,23

ΦΙΑΛΗ 15

Φιάλη 15	
Ύψος (mm)	200
Ακτίνα λαιμού (mm)	20
Ακτίνα πάτου (mm)	50
Εμβαδόν λαιμού (mm ²)	1256

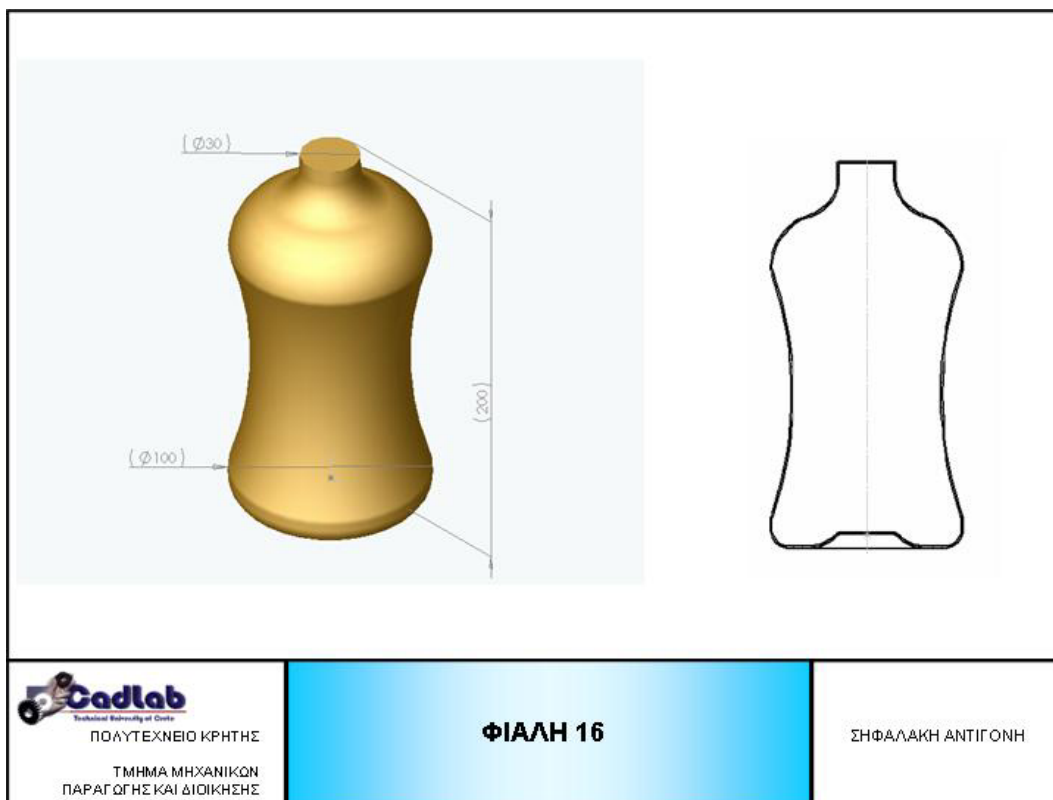
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,069168
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	1,408044
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	1,338875
Μάζα περιεχομένου (kg)	1,338875
Βάρος υλικού (N)	0,843855

Ακτίνα σφαίρας (mm)	68,373
Συντελεστής σ	0,8618



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,9610
Τάση 1 (KPa)	-11,6671
Τάση 5 (KPa)	-58,3354
Τάση 10 (KPa)	-116,6708
Τάση 15 (KPa)	-175,0062
Τάση 20 (KPa)	-233,3416

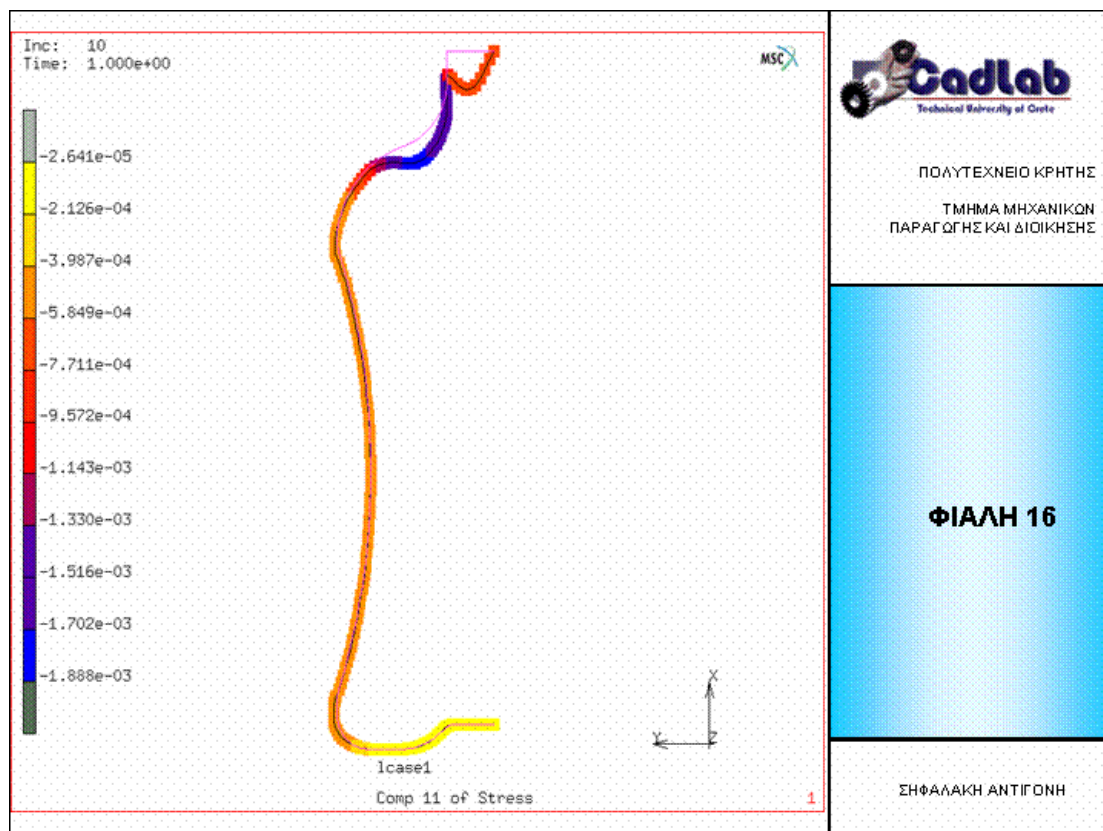
	15.1	15.5	15.10	15.15	15.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,04341768	-0,26475090	-0,54212990	-0,81903390	-1,09593800
Μετατόπιση Y (mm)	0,00353658	0,01811786	-0,03696885	-0,05622457	-0,07548028
Παραμόρφωση X	-0,00007296	-0,00039304	-0,00079417	-0,00119461	-0,00159505
Παραμόρφωση Y	0,00012453	-0,00088638	-0,00185019	-0,00281235	-0,00377450
Τάση X (GPa)	-90,88	-590,94	-1223,59	-1858,21	-2492,83
Τάση Y (GPa)	-233,60	-1725,62	-3595,44	-5462,05	-7328,67

ΦΙΑΛΗ 16

Φιάλη 16	
Ύψος (mm)	200
Ακτίνα λαιμού (mm)	15
Ακτίνα πάτου (mm)	50
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	706,5

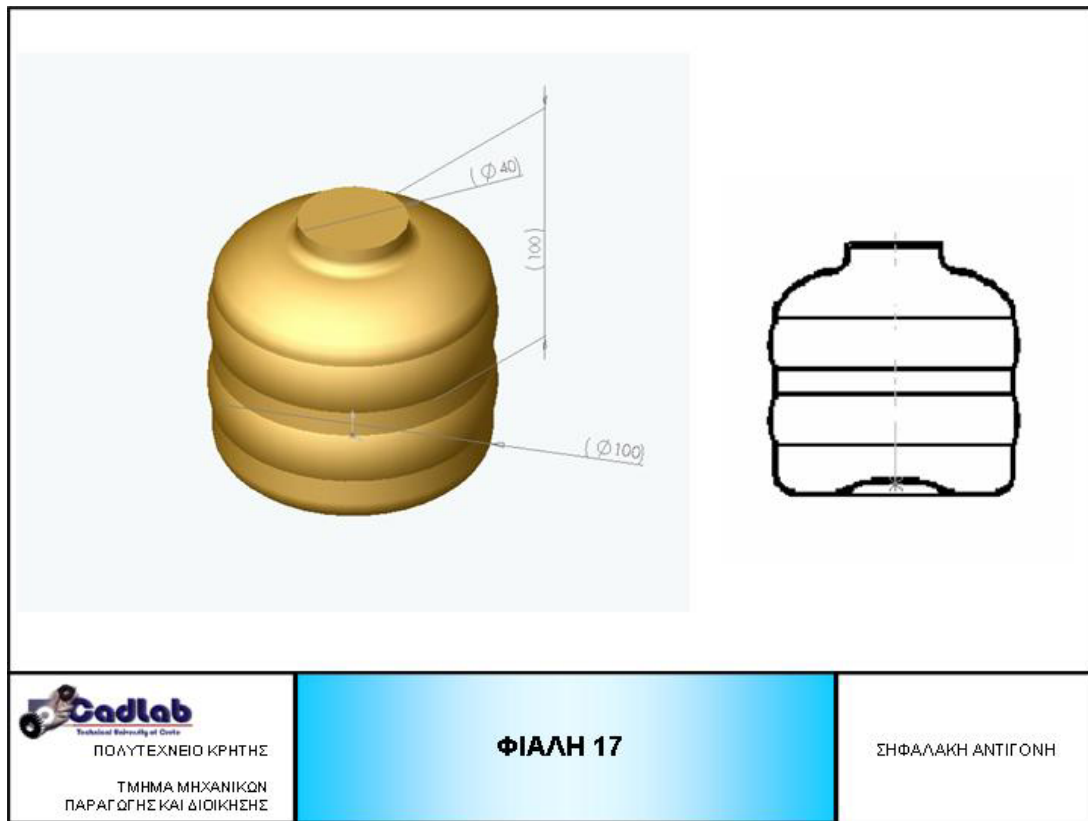
Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,060485
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	1,054595
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,994109
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,994109
Βάρος υλικού (N)	0,737915

Ακτίνα σφαίρας (mm)	61,913
Συντελεστής σ	0,80932



Εσωτερική Πίεση (KPa)	1,9610
Τάση 1 (KPa)	-15,6800
Τάση 5 (KPa)	-78,4000
Τάση 10 (KPa)	-156,7999
Τάση 15 (KPa)	-235,1999
Τάση 20 (KPa)	-313,5999

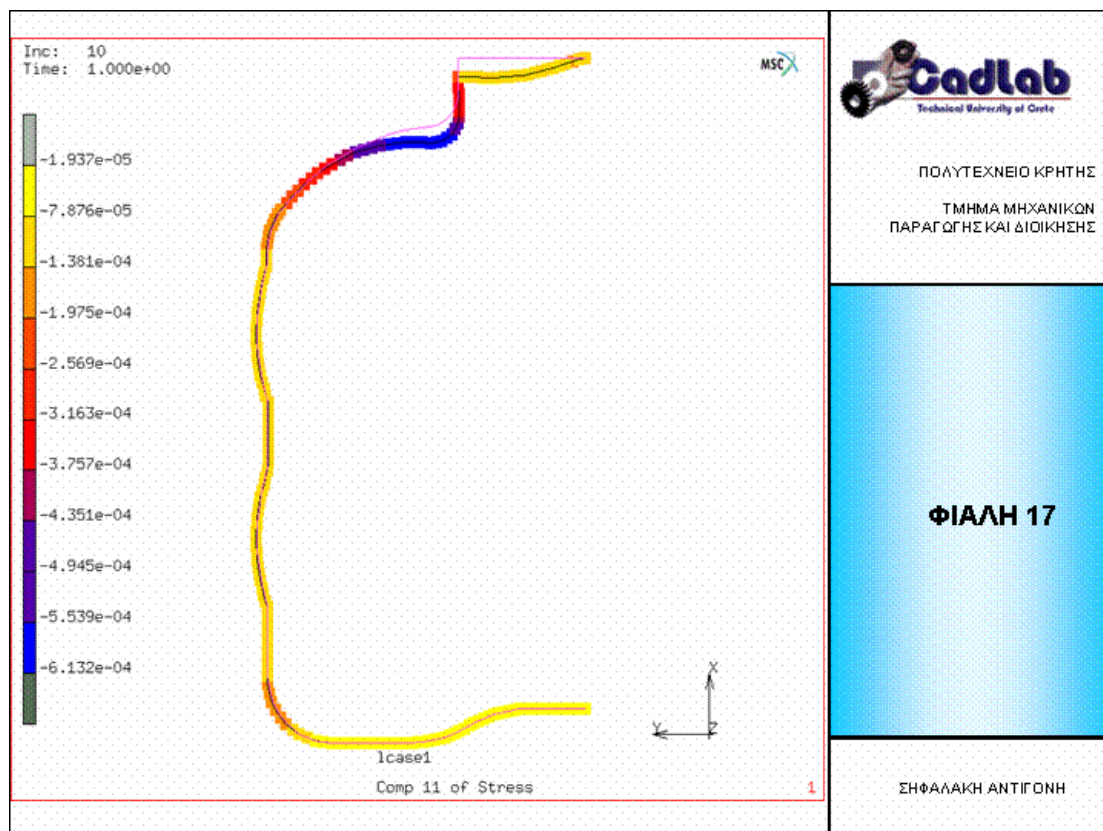
	16.1	16.5	16.10	16.15	16.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,01906768	-0,12818960	-0,26527090	-0,40235220	-0,53943350
Μετατόπιση Y (mm)	0,00261583	0,01327813	0,02668926	0,04010038	0,05351151
Παραμόρφωση X	-0,00006658	-0,00033308	-0,00066631	-0,00099955	-0,00133278
Παραμόρφωση Y	0,00010227	0,00046393	0,00091614	0,00136835	0,00182057
Τάση X (KPa)	-71,08	-438,78	-921,59	-1404,40	-1888,05
Τάση Y (KPa)	162,79	720,01	1461,60	-2267,85	-3074,11

ΦΙΑΛΗ 17

Φιάλη 17	
Ύψος (mm)	100
Ακτίνα λαιμού (mm)	40
Ακτίνα πάτου (mm)	50
Εμβαδόν λαιμού (mm²)	1256

Όγκος υλικού του αντικειμένου (lt)	0,040059
Συνολικός όγκος το αντικειμένου (lt)	0,688208
Καθαρός όγκος περιεχομένου (lt)	0,648149
Μάζα περιεχομένου (kg)	0,648149
Βάρος υλικού (N)	0,488719

Ακτίνα σφαίρας (mm)	53,686
Συντελεστής σ	0,92108



Εσωτερική Πίεση (KPa)	0,9806
Τάση 1 (KPa)	-135,4847
Τάση 5 (KPa)	-677,4233
Τάση 10 (KPa)	-1354,8467
Τάση 15 (KPa)	-2032,2700
Τάση 20 (KPa)	-2709,6934

	17.1	17.5	17.10	17.15	17.20
Μετατόπιση X (mm)	-0,00238962	-0,01682864	-0,03497338	-0,05311812	-0,07176688
Μετατόπιση Y (mm)	0,00041717	0,00236246	0,00583421	0,00730013	0,00984052
Παραμόρφωση X	-0,00001062	-0,00007634	-0,00015958	-0,00024282	-0,00032838
Παραμόρφωση Y	0,00002080	-0,00014482	-0,00031120	-0,00047758	-0,00064858
Τάση X (KPa)	-21,72	-144,58	-299,36	-454,15	-613,24
Τάση Y (KPa)	36,47	-293,93	-627,77	-961,61	-1304,73

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Αγιουτάντης Ζαχαρίας (2002). «Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων». ΙΩΝ.
- 2) Κουρουμπλάκης Μανόλης (2000). «Παραμετρική μοντελοποίηση φιαλών με περιβαλλοντικά κριτήρια». Μεταπτυχιακή διατριβή
- 3) Becker, A.A. (1992), “*The Boundary Element Method in Engineering*”. McGraw Hill.
- 4) “*CosmosWorks user’s Guide*” (2002).
- 5) “*CosmosWorks tutorial video*” (2002).
- 6) Desai Chandrakant. – John F. Abel (1979). *Introduction to the Finite Element Method*. East-West Press.
- 7) Fagan M.J. (1992). “*Finite Element analysis- Theory and Practice*”. Longman Scientific& Technical.
- 8) Hoek, E., M.W. Grabinsky and M.S. Diedrichs (1991). “*Numerical Modeling for Underground Excavation Design*”. Trans. IMM, Section A, 100, January-April, pp. A22-A30.
- 9) Magrab Edward (1997). “*Integrated Product and Process Design and Development*”. CRC Press.
- 10) MSC.Marc & MSC.Marc Mentat 2000 documentation
- 11) www.marc.com
- 12) N.F.M. Roozenburg & J. Eekels (1991). *Product Design: Fundamentals and Methods*. Wiley.
- 13) Otto Kevin & Kristin Wood (2001). “*Product Design*”. Prentice-Hall Inc.
- 14) “*Solidworks getting started*”.(2002). Solidworks documentation.
- 15) www.solidworks.com