

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



## ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Μελέτη φιάλης νερού με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Συγγραφέας: Μπότος Αθανάσιος

Επιβλέπων: Καθηγητής Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2011

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
<b>1. Κεφάλαιο Εισαγωγή</b>	
1.1. Σκοπός μελέτης	3
1.2. Βασικές έννοιες ανάλυσης	4
1.3. Υλικό φιάλης	6
1.4. Τεχνικές μορφοποίησης	8
<b>2. Κεφάλαιο Βασικές έννοιες των πεπερασμένων στοιχείων και του Comsol multiphysics</b>	
2.1. Πεπερασμένα στοιχεία	10
2.2. Εισαγωγή στο λογισμικό Comsol multiphysics	17
<b>3. Κεφάλαιο Εισαγωγή και φιλοσοφία του Pro Engineer</b>	
3.1. Εισαγωγή	19
3.2. Φιλοσοφία	20
<b>4. Κεφάλαιο Σχεδιασμός της φιάλης</b>	21
<b>5. Κεφάλαιο Ανάλυση του μοντέλου στο Comsol multiphysics</b>	
5.1. Αρχικές ρυθμίσεις	24
5.2. Εισαγωγή του μοντέλου από το Pro engineer στο Comsol multiphysics	26
5.3. Εισαγωγή του υλικού στο μοντέλο	28
5.4. Εισαγωγή παραμέτρων για την μελέτη του προβλήματος	30
5.5. Διακριτοποίηση (meshing) της φιάλης	33
5.6. Επίλυση του προβλήματος	36
5.7. Ανάλυση αποτελεσμάτων	37
<b>Βιβλιογραφία</b>	44
<b>Ευχαριστίες</b>	

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της εργασίας, καθηγητή Γεώργιο Ε. Σταυρουλάκη για την εμπιστοσύνη, την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπαιδευτώ στο Comsol multiphysics και για την άριστη συνεργασία μας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην κυρία Άντζελα Βογιατζή, για την μεγάλη βοήθεια της, για τα δεδομένα και τις γνώσεις που μου προσέφερε.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική εργασία στους γονείς μου, που με προσωπικές τους θυσίες μου έδωσαν την ευκαιρία να σπουδάσω στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

# 1.Κεφάλαιο Εισαγωγή

## 1.1. Σκοπός μελέτης

Οι φιάλες νερού 18.9 λίτρων κατασκευάζονται με την τεχνική μορφοποίησης, χύτευση με εμφύσηση (blow molding) (Σχήμα 1.8) και ακολουθούν την εξής παραγωγική διαδικασία:

- Εισάγονται στην μηχανή χύτευσης με εμφύσηση η α' ύλη, οι πολυκαρβονικοί σβόλοι (polycarbonate pellets) (Σχήμα 1.1)
- Κατασκευή προπλάσματος (parison) (Σχήμα 1.2)
- Χύτευση του με εμφύσηση (blow molding) (Σχήμα 1.8)
- Εμφιάλωση και τυποποίηση
- Συσκευασία για αποστολή (Σχήμα 1.3)



Σχήμα 1.1: polycarbonate pellets



Σχήμα 1.2: πρόπλασμα



Σχήμα 1.3: συσκευασία για αποστολή

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η αντοχή της φιάλης, το ερέθισμα δόθηκε από τον τρόπο συσκευασίας των φιαλών (Σχήμα 1.3), η κατώτερη σειρά στην συσκευασία δέχεται το βάρος από τις υπόλοιπες φιάλες, ως εκ τούτου αναπτύσσονται τάσεις στο λαιμό της φιάλης και στο υπόλοιπο σώμα. Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν οι συγκεκριμένες τάσεις και η παραμόρφωση που προκαλούν, η μελέτη θα γίνει με την βοήθεια του Comsol multiphysics ενός σύγχρονου λογισμικού για μοντελοποίηση και επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων(finite elements).

## 1.2. Βασικές έννοιες ανάλυσης

Λόγο του ότι σκοπός της εργασίας είναι η μηχανική μελέτη της φιάλης παρακάτω εξηγούνται μερικές βασικές έννοιες.

**Έννοιες τάσης και παραμόρφωσης:** Όταν ένα φορτίο είναι στατικό ή μεταβάλλεται σχετικά αργά με το χρόνο και εφαρμόζεται σε μία κάθετη διατομή ή επιφάνεια ενός σώματος, η μηχανική του συμπεριφορά μπορεί να εξακριβωθεί με μία απλή δοκιμή τάσης-παραμόρφωσης.

Οι βασικοί τρόποι με τους οποίους το φορτίο μπορεί να ασκηθεί είναι τρεις:

- εφελκυσμός
- θλίψη
- διάτμηση

Η τάση ορίζεται από την σχέση:

$$\sigma = F / A_0$$

,όπου F είναι το ακαριαίο φορτίο που εφαρμόζεται κάθετα στην διατομή και  $A_0$  το αρχικό εμβαδόν της διατομής.

Η παραμόρφωση ορίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

,όπου  $\Delta l$  η μεταβολή μήκους και  $l_0$  το αρχικό μήκος

**Μέτρο ελαστικότητας** (Young's Modulus) (E): Η ιδιότητα ενός αντικειμένου να παραμορφώνεται ελαστικά (όχι μόνιμα) όταν πάνω του ασκείται φορτίο, χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας. Μαθηματικά το μέτρο ελαστικότητας δίνεται από την κλίση της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης στην περιοχή της ελαστικής παραμόρφωσης. Το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζεται από την θερμοκρασία και τον χρόνο φόρτισης του δείγματος, ακόμη το μέτρο ελαστικότητας στα πολυμερή ονομάζεται εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας.

$$E \equiv \frac{\text{tensile stress}}{\text{tensile strain}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L}$$

,όπου:  $\sigma$ =τάση

$\varepsilon$ =παραμόρφωση

F=ασκούμενη δύναμη

$A_0$ =Αρχική διατομή

$\Delta L$ =μεταβολή του μήκους

$L_0$ =αρχικό μήκος

**Λόγος Poisson** ( $\nu$ ): Κατά τον αξονικό εφελκυσμό ενός στοιχείου, η επιμήκυνση του στοιχείου συνοδεύεται από μια μείωση της διατομής του. Αντίθετα, στην θλίψη έχουμε βράχυνση του στοιχείου και αύξηση της διατομής του.

Οι τιμές του λόγου του Poisson κυμαίνονται θεωρητικά από το -1 μέχρι το 0.5 για τα περισσότερα υλικά, αν και μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές σε σπάνιες περιπτώσεις όπου αυξάνεται η διατομή ενός στοιχείου κατά τον εφελκυσμό του. Μια ενδεικτική τιμή για τα μέταλλα είναι στα 0.3, ενώ για τα πολυμερή οι τιμές κυμαίνονται ανάμεσα στα 0.3 και 0.50.

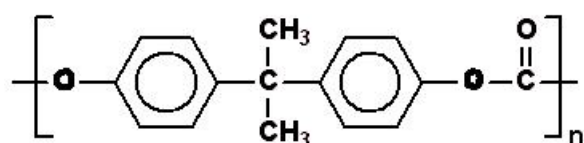
$$\nu = -\frac{d\varepsilon_{\text{trans}}}{d\varepsilon_{\text{axial}}} = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x}$$

**Αντοχή διαρροής:** Οι περισσότερες κατασκευές σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν ότι θα προκύψουν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις κατά την εφαρμογή τάσεων. Ως εκ τούτου είναι επιθυμητό να γνωρίζεται το επίπεδο της τάσης στο οποίο η πλαστική παραμόρφωση ξεκινά, ή το σημείο όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της διαρροής.

**Αντοχή στον εφελκυσμό:** Μετά την διαρροή η τάση που απαιτείται για να συνεχιστεί η πλαστική παραμόρφωση στα μέταλλα αυξάνει μέχρι ενός μεγίστου και στην συνέχεια μειώνεται μέχρι την εμφάνιση θραύσης. Η εφελκυστική αντοχή είναι η τάση στο μέγιστο της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης. Ως τάση θραύσεως των πλαστικών πολυμερών όπως ο πολυκαρβονικός εστέρας (Polycarbonate), ο οποίος χρησιμοποιείται στην κατασκευή της φιάλης, εκλαμβάνεται η αντοχή στον εφελκυσμό.

### 1.3. Υλικό της φιάλης

Το υλικό με το οποίο κατασκευάζονται οι φιάλες των 18.9 λίτρων είναι ο πολυκαρβονικός εστέρας (polycarbonate) (PC) (Σχήμα 1.4) και κάθε φιάλη φέρει την ειδική σήμανση (Σχήμα 1.5)



Σχήμα 1.4: Χημική ένωση πολυκαρβονικού εστέρα



Σχήμα 1.5: ειδική σήμανση ότι το αντικείμενο κατασκευάστηκε από (polycarbonate)

Ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών, δηλαδή είναι κυρίως γραμμικά πολυμερή. Για το λόγο αυτό έχουν την τάση να μαλακώνουν με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι δεσμοί σπάνε επιτρέποντας το υλικό να διαρρέει σαν ρευστό με υψηλό ιξώδες. Η ιδιότητα τους αυτή επιτρέπει την εύκολη εν θερμώ μορφοποίησή τους. Σε κανονική θερμοκρασία είναι εύθραυστα ή σκληρά – ελαστικά. Τα θερμοπλαστικά τήκονται, συγκολλούνται, είναι διαλυτά και μπορούν να στερεοποιηθούν με ψύξη πολλές φορές.

Αυτά τα πλαστικά χρησιμοποιούνται ευρέως στη σύγχρονη χημική βιομηχανία. Οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες (αντοχή στην θερμοκρασία, μηχανική αντοχή και οπτικές ιδιότητες) τους δίνουν μια ξεχωριστή θέση ανάμεσα στα πλαστικά και τις πλαστικές ύλες για βιομηχανική χρήση.

Το (PC) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στα οικιακά είδη, καθώς στα εργαστήρια και στη βιομηχανία, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου οποιοδήποτε από τα κύρια χαρακτηριστικά του (υψηλή μηχανική αντοχή, αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, οπτικές ιδιότητες), είναι απαραίτητα.

Χαρακτηριστικά	Τιμή/Μονάδες
Μέτρο ελαστικότητας (E)(Young's Modulus)	2,38[GPa]
Πυκνότητα (density)	1,2 [g / cm <sup>3</sup> ]
Λόγος Poisson	0.36
Αντοχή σε εφελκυσμό	62,8-72,4[MPa]
Αντοχή διαρροής	62,1[MPa]

Πίνακας 1.1: Μηχανικά χαρακτηριστικά πολυκαρβονικού εστέρα σε θερμοκρασία δωματίου

## 1.4. Τεχνικές Μορφοποίησης

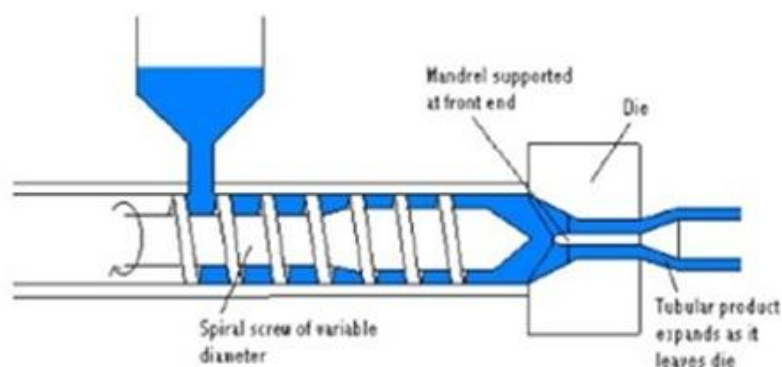
Η αυξανόμενη χρήση των πλαστικών οφείλεται στην εύκολη μορφοποίησή τους, στο χαμηλό βάρος, στην ανθεκτικότητά τους όταν έρχονται σε επαφή με χημικές ουσίες ή με νερό ακόμη στις καλές θερμικές, ηλεκτρικές ιδιότητες στο οικονομικό όφελος από το χαμηλό κόστος παραγωγής και ότι μπορούν να ανακυκλωθούν. Ανάλογα με την γεωμετρία του τελικού προϊόντος ακολουθείτε και η κατάλληλη μέθοδος για την παραγωγή του. Η παραγωγική διαδικασία με την οποία κατασκευάζονται οι φιάλες όλων των μεγεθών και τύπων είναι η μορφοποίηση τους με χύτευση.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι στην συγκεκριμένη διαδικασία :

- Χύτευση με εξώθηση (extrusion molding)
- Χύτευση με έγχυση (injection molding)
- Χύτευση με εμφύσηση (blow molding)

### **Χύτευση με εξώθηση (Extrusion molding)**

Σε αυτή την τεχνική το πολυμερές εισάγεται στη μηχανή με τη μορφή σβόλων (pellets) θερμαίνεται και στη συνέχεια περνά μέσα από τους κοχλίες όπου γίνεται πιο ομογενές και καταλήγει σε καλούπι όπου παίρνει την επιθυμητή μορφή. Η στερεοποίηση του εξωθημένου σώματος επιταχύνεται με εμφύσηση αέρα, ή με ψεκασμό νερού. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα προσαρμοσμένη ώστε να παράγει συνεχή επιμήκη τεμάχια με σταθερές γεωμετρικές διατομές, για παράδειγμα ράβδους, σωλήνες, φύλλα και λεπτά νήματα (Σχήμα 1.6).

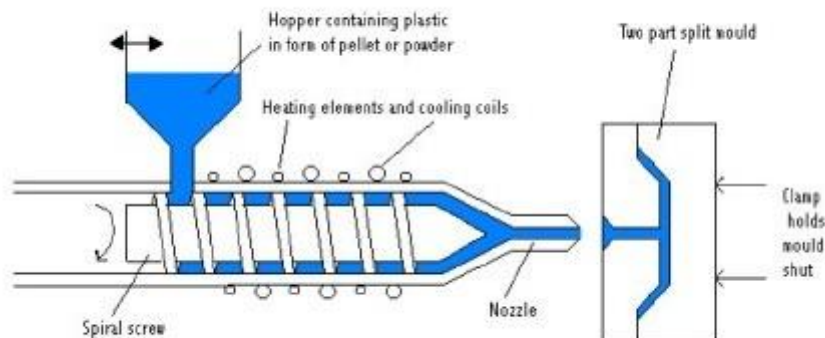


Σχήμα 1.6: Τυπική συσκευή εξώθησης σε τομή [Recycling Plastics Technical Brief]



## Χύτευση με έγχυση (Injection molding)

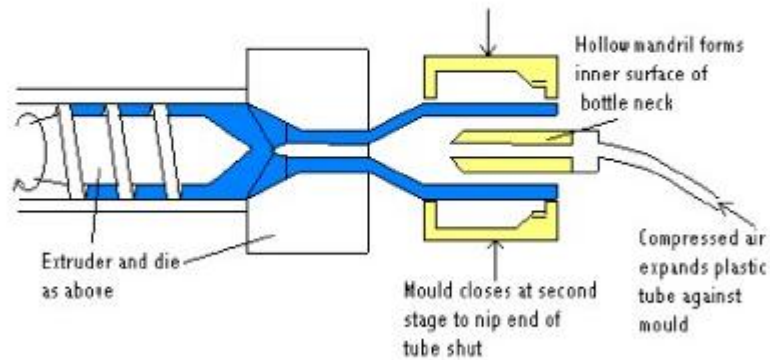
Το ανάλογο της χύτευσης με μήτρα (die casting) των μετάλλων στα πολυμερή, αποτελεί την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική μορφοποίησης θερμοπλαστικών σε ασυνεχείς μορφές. Κατά αυτήν ένα θερμοπλαστικό πολυμερές εισάγεται με τη μορφή νιφάδων ή σκόνης μέσα σε ένα κύλινδρο μέσω της κίνησης ενός εμβόλου (ram). Το φορτίο πιέζεται προς ένα θερμαινόμενο θάλαμο, όπου θερμαίνεται και τήκεται με σκοπό να σχηματίσει ένα παχύρρευστο υγρό. Στη συνέχεια, το ρευστό πλέον θερμοπλαστικό εγχέεται υπό υψηλή πίεση μέσω κατάλληλου ακροφυσίου στο ψυχρό καλούπι όπου ψύχεται και στερεοποιείται (Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7: Διάταξη συσκευής χύτευση με έγχυση [Recycling Plastics Technical Brief]

## Χύτευση με εμφύσηση (Blow molding)

Η τεχνική της εμφύσησης χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την παραγωγή γυάλινων φιαλών και επεκτάθηκε η χρήση της για πλαστικές φιάλες ή γενικά κοίλα αντικείμενα. Σε αυτήν, το τήγμα του πολυμερούς διέρχεται μέσω κυλινδρικής μήτρας εκβολής για την παραγωγή ενός κυλινδρικού προμορφώματος (parison). Καθώς ο σωλήνας του προμορφώματος κατέρχεται, ένα εκμαγείο κλείνει τα άκρα του έτσι ώστε στο ένα άκρο του να έχει διεισδύσει ένα ακροφύσιο. Η εμφύσηση του αέρα μέσω του ακροφυσίου εξογκώνει το προμόρφωμα εξαναγκάζοντάς το να πάρει το σχήμα της κοιλότητας του εκμαγείου (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: Διαδικασία μορφοποίησης με εμφύσηση [Recycling Plastics Technical Brief]

## 2.Κεφάλαιο Βασικές έννοιες των πεπερασμένων στοιχείων και του Comsol multiphysics

### 2.1. Πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) (finite element method), είναι μία υπολογιστική τεχνική ανάλυσης τάσεων που δημιουργούνται σε κατασκευές, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε το 1943 από τον R. Courant, ο οποίος χρησιμοποίησε μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης κατά Ritz, αλλά γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη κατά τη δεκαετία του 1970 λόγω της σημαντικής αύξησης της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος.

Μέχρι τότε εφαρμόζονταν στην αεροναυτική και στην αμυντική και πυρηνική βιομηχανία, αλλά το εύρος χρήσης της ήταν σχετικά περιορισμένο. Την εποχή μας οι διαθέσιμοι υπερυπολογιστές καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό ακριβών αποτελεσμάτων για όλων των ειδών τις παραμέτρους.

Ενδεικτικό της προόδου της τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι οι σημερινοί προσωπικοί υπολογιστές είναι 10 φορές περίπου πιο ισχυροί από τους υπερυπολογιστές της δεκαετίας του 1980.

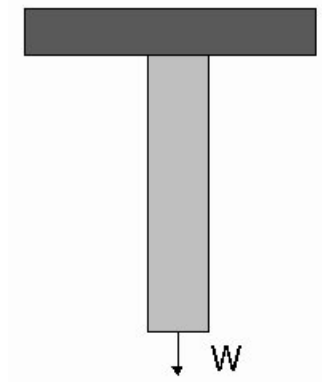
Στην ουσία η μέθοδος των ΠΣ είναι μία μαθηματική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Επειδή είναι μία αριθμητική (numerical) μέθοδος έχει τη δυνατότητα επίλυσης περίπλοκων προβλημάτων που είναι δυνατό να εκφραστούν με τη μορφή διαφορικών εξισώσεων. Τέτοιου είδους προβλήματα παρουσιάζονται σε όλα τα πεδία των φυσικών επιστημών, επομένως η μέθοδος των ΠΣ θεωρητικά δεν έχει όρια στην εφαρμογή της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων.

Εξαιτίας του υψηλού κόστους της υπολογιστικής ισχύος τα αρχικά χρόνια εφαρμογής τους τα ΠΣ χρησιμοποιούνταν για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων, αλλά τα τελευταία χρόνια χρησιμεύουν στην επίλυση όλων και περισσότερων προβλημάτων σε μεγάλη ποικιλία επιστημών.

Βεβαίως όπως και κάθε μέθοδος, τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά με την κατάλληλη εφαρμογή είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση των πηγών λάθους και η πληρέστερη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων. Η μελέτη ενός προβλήματος με ΠΣ συνίσταται στη δημιουργία ενός μοντέλου ενός υλικού ή μιας κατασκευής, το οποίο αναλύεται στη συνέχεια στον Η/Υ για την εξαγωγή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, τα οποία ερμηνεύουν τις ιδιότητές του ή προβλέπουν την επίδραση συγκεκριμένων συνθηκών.

Η μέθοδος χρησιμεύει στη δημιουργία νέων προϊόντων, τα οποία σχεδιάζονται στον Η/Υ και οι ιδιότητές τους μελετώνται λεπτομερώς προτού αυτό αποκτήσει φυσική υπόσταση. Επίσης χρησιμεύει στην τροποποίηση υπάρχοντων υλικών και στην περίπτωση μηχανικών αποτυχιών χρησιμεύει στη διαπίστωση και διόρθωση του προβλήματος. Η λογική στην οποία στηρίζεται η μέθοδος των ΠΣ παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα:

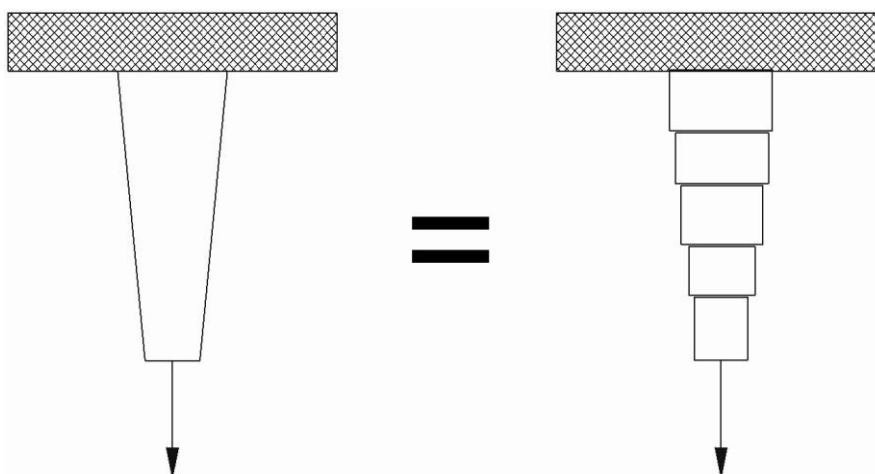
Η επιμήκυνση της δομής υπό την επίδραση ενός φορτίου εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης και από τις ιδιότητες του υλικού (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1

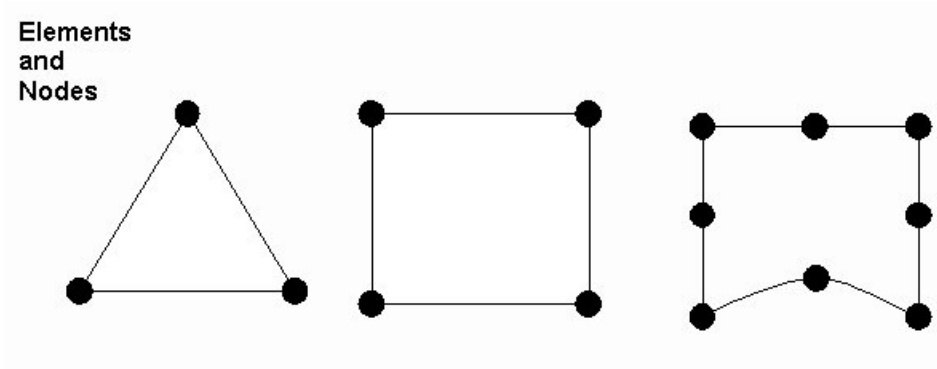
Η φόρτιση που ασκείται ισούται με το γινόμενο της ακαμψίας του υλικού επί την μεταβολή που προκαλεί η δράση της, σύμφωνα με το νόμο του Hooke.

Εάν η κατασκευή αυτή διαιρεθεί σε περισσότερα τμήματα (στοιχεία, elements), τα οποία θα συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι (nodes) (Σχήμα 2.2) η συνολική φόρτιση θα ισούται με το άθροισμα του γινομένου (ακαμψία  $\times$  μεταβολή) για κάθε τμήμα. Η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (mesh generation) ονομάζεται διακριτοποίηση (discretization).



Σχήμα 2.2

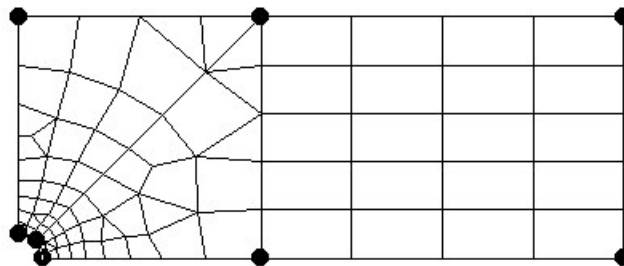
Τα στοιχεία είναι δυνατό να λάβουν κάθε μορφή, αλλά συνήθως έχουν τη μορφή γνωστών γεωμετρικών σχημάτων, όπως είναι το τρίγωνο, το παραλληλόγραμμο, το τετράγωνο (Σχήμα 2.3).



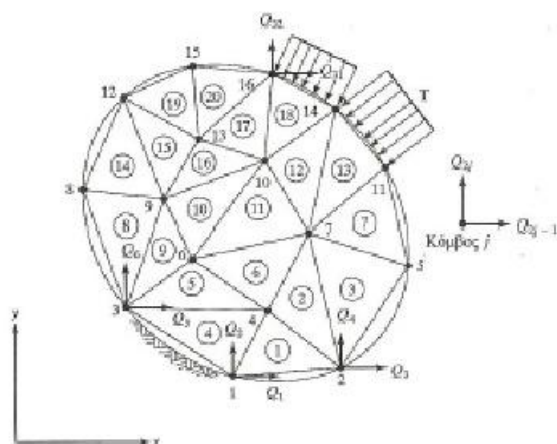
Σχήμα 2.3

Στις τρεις διαστάσεις τα στοιχεία είναι δυνατό να είναι κύβοι, παραλληλεπίπεδα.

Η ανάλυση ΠΣ χρησιμοποιεί ένα περίπλοκο σύστημα σημείων που καλούνται κόμβοι (nodes) οι οποίοι σχηματίζουν ένα δίκτυο που αποκαλείται πλέγμα (mesh). Μία πολύπλοκη κατασκευή αναλύεται σε ένα πλέγμα πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος (Σχήματα 2.4,2.5).



Σχήμα 2.4: Διακριτοποίηση συγκεκριμένης περιοχής με πεπερασμένα στοιχεία (mesh)



Σχήμα 2.5: Διακριτοποίηση συγκεκριμένης περιοχής με πεπερασμένα στοιχεία (mesh)

Το στοιχείο είναι η βασική δομική μονάδα με προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Το πλέγμα προσομοιάζει με ιστό αράχνης, στον οποίο από κάθε κόμβο εκτείνεται ένα στοιχείο πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιό τρόπο θα συμπεριφερθεί μία κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης. Οι κόμβοι τοποθετούνται με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Περιοχές με μεγαλύτερη αναμενόμενη τάση θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων από αυτές που η αναμενόμενη τάση είναι μικρότερη. Περιοχές που λαμβάνουν ιδιαίτερη σημασία είναι οι περιοχές στις οποίες είχε διαπιστωθεί σε πειραματικές μελέτες η παρουσία θραύσης ή γωνίες, κενά και περιοχές υψηλής τάσης.

Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Εάν το πλέγμα είναι αδρό τότε είναι δυσχερής η σωστή επίλυση του προβλήματος. Αντίθετα, εάν το πλέγμα είναι ιδιαίτερα λεπτομερές και περιέχει μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων από ότι είναι αναγκαίο, τότε το κόστος του υπολογιστικού χρόνου και ο αναγκαίος χρόνος για την ανάλυση είναι δυνατό να υπερβαίνουν το όφελος από την ανάλυση.

Είναι χρήσιμη μία σχετική γνώση σχετικά με την κατανομή των τάσεων εντός του υλικού. Υπάρχει ανάγκη λεπτομερούς πλέγματος όταν υπάρχει σημαντική μεταβολή των τάσεων και παραμορφώσεων και αδρού πλέγματος σε περιοχές με σταθερή σχετικά τάση. Η παραμόρφωση των στοιχείων θεωρείται ότι περιγράφεται από απλές πολυωνυμικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις ισορροπίας καταγράφονται σε ένα μαθηματικό πίνακα και επιλύονται από τον Η/Υ.

Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες συνθήκες περιορισμού (boundary conditions) και τις επιθυμητές φορτίσεις υπολογίζονται οι μεταβολές των κόμβων επιλύοντας τις εξισώσεις του πίνακα. Από τις μεταβολές των κόμβων υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που ασκούνται στην κατασκευή ή στο υλικό που μελετάται. Με τη μέθοδο των ΠΣ είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης σημαντικού αριθμού παραμέτρων, όπως είναι η μάζα, ο όγκος, η θερμοκρασία, η ενεργειακή τάση, η παραμόρφωση, η δύναμη, η παραμόρφωση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση. Είναι επίσης δυνατή η εφαρμογή πολλαπλών συνθηκών στο ίδιο μοντέλο. Κάθε πρόγραμμα ΠΣ συνοδεύεται από μία βιβλιοθήκη στοιχείων, όπως ράβδοι, δοκοί, πλάκες, συμπαγή στοιχεία, ελατήρια.

Είναι επίσης δυνατή η μελέτη υλικών με διαφορετικές ιδιότητες εντός του ίδιου μοντέλου, δηλαδή ιστροπικών υλικών (με ομοιογενείς ιδιότητες σε όλη τη έκτασή τους), ορθοτροπικών υλικών (οι ιδιότητές τους είναι όμοιες μόνο σε γωνία  $90^0$ ) και ανισοτροπικών υλικών (με διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε όλη την έκτασή τους).

Η δομική ανάλυση συνίσταται στη χρήση γραμμικών και μη γραμμικών μοντέλων. Τα γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιούν απλές παραμέτρους θεωρώντας ότι το υλικό δεν υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Στα μη γραμμικά μοντέλα πραγματοποιείται φόρτιση πέραν της ελαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή το υλικό θεωρείται ότι υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, η οποία και μελετάται. Παράδειγμα ανάλυσης με ΠΣ είναι η ανάλυση κόπωσης, με την οποία γίνεται πρόβλεψη της αντοχής μίας κατασκευής σε κυκλική φόρτιση. Τέτοιου είδους ανάλυση αποκαλύπτει τις περιοχές στις οποίες είναι περισσότερο πιθανή η δημιουργία ή η επέκταση μίας ρωγμής.

Η ανάλυση με ΠΣ αποτέλεσε τη λύση στο ζήτημα της πρόβλεψης της αποτυχίας ενός υλικού εξαιτίας μη γνωστών τάσεων, επιτρέποντας τη μελέτη της κατανομής τάσεων εντός του υλικού, αποκαλύπτοντας την ύπαρξη προβληματικών περιοχών. Η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο απλή από την κατασκευή και τον έλεγχο δειγμάτων για κάθε πιθανή περίπτωση. Άλλο παράδειγμα εφαρμογής είναι η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας, με την οποία μελετάται η αγωγιμότητα των υλικών ή των κατασκευών.

Ενώ η μέθοδος αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις ανάγκες τις αεροπορικής και της πυρηνικής βιομηχανίας η χρήση της μεθόδου εξαπλώθηκε σημαντικά για την επίλυση μεγάλου αριθμού προβλημάτων.

Μετά τη δημιουργία του πλέγματος των ΠΣ πραγματοποιείται η ανάλυση. Η ανάλυση των ΠΣ συνίσταται σε τρία κύρια στάδια, το προ-υπολογιστικό, το στάδιο επίλυσης και το μετά-υπολογιστικό στάδιο. Το προ-υπολογιστικό στάδιο (pre-processor stage) της ανάλυσης συνίσταται σε:

- Ορισμό του τίτλου του προβλήματος
- Επιλογή των προτιμήσεων (preferences)
- Ορισμός τύπου και της μορφής των πεπερασμένων στοιχείων (2D ή 3D)
- Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού (μέτρο ελαστικότητας Young, λόγος Poisson κλπ.)
- Δημιουργία μοντέλου με κατάλληλες διαστάσεις
- Καθορισμός πυκνότητας πλέγματος (mesh density)
- Δημιουργία πλέγματος (meshing)

Στο στάδιο της επίλυσης (computation stage) εφαρμόζονται στο μοντέλο οι συνθήκες φόρτισης και περιορισμού (loading and boundary conditions )

Στο μετά-υπολογιστικό στάδιο (post-processor stage) γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν τη μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων.

Το κόστος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι μικρότερο από την πειραματική δοκιμή των υλικών αλλά δεν είναι φτηνό. Το κόστος της χρήσης του ειδικού λογισμικού είναι σημαντικό, η χρήση του χρεώνεται σε ετήσια βάση, ενώ η τεχνική υποστήριξη και η εκπαίδευση είναι επίσης ακριβές.

Η μέθοδος των ΠΣ είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο σε όσους ασχολούνται με το βιομηχανικό και μηχανολογικό σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε περιοχές όπως:

- Ο σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών
- Η ακουστική
- Η θερμική ανάλυση
- Η μελέτη των δονήσεων
- Η προσομοίωση συγκρούσεων
- Η μελέτη ηλεκτρικών φαινομένων
- Προβλήματα κάμψης
- Δυναμικές αναλύσεις
- Η μελέτη ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων



Ο σχεδιασμός ακόμα και των πιο απλών προϊόντων στηρίζεται στη χρήση των ΠΣ αφού τα σχεδιαστικά προβλήματα δεν είναι δυνατό να επιλυθούν φθηνότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια με άλλη διαθέσιμη μέθοδο. Η φυσική εξέταση των υλικών που για δεκαετίες ήταν ο κανόνας θεωρείται πλέον ακριβή και όπου είναι δυνατό αντικαθίσταται με φθηνότερες, αξιόπιστες μεθόδους

## 2.2. Εισαγωγή στο λογισμικό Comsol multiphysics

Το Comsol multiphysics είναι ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων βασισμένο στα πεπερασμένα στοιχεία.

Το περιβάλλον προσομοίωσης Comsol multiphysics , διευκολύνει όλα τα βήματα που απαιτούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου. Καθορίζει τη γεωμετρία, διακριτοποιεί, διευκρινίζει τη φυσική, λύνει και τέλος απεικονίζει τα αποτελέσματα.

Επιπλέον έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει διάφορες μελέτες ταυτόχρονα στην ίδια κατασκευή. Μπορεί να μελετήσει για παράδειγμα τη συμπεριφορά μιας κατασκευής ως προς την μηχανική και την μετάδοση θερμότητας δημιουργώντας διάφορα επίπεδα (layers) τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίλυση προβλημάτων συνδυασμένων πεδίων.

Η δημιουργία του μοντέλου είναι εύκολη και γρήγορη χάρη στο μεγάλο αριθμό προκαθορισμένων εφαρμογών που περιλαμβάνουν τη ρευστή μεταφορά ροής και μετάδοσης θερμότητας έως τη δομική μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ανάλυση. Δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων, καθορίζοντας φυσικές ποσότητες όπως ιδιότητες των υλικών, φορτία, περιορισμούς, πηγές και ροές χωρίς να καθορίζονται οι εξισώσεις. Το πρόγραμμα από μόνο του συνδυάζει μια σειρά από μερικές διαφορικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν το μοντέλο. Έτσι λοιπόν δεν απαιτείται η βαθιά γνώση μαθηματικών ή αριθμητικής ανάλυσης.

Τα προκαθορισμένα πρότυπα λύνουν πολλούς κοινούς τύπους προβλημάτων. Δίνεται επίσης η επιλογή να διαλέγουμε διαφορετική φυσική και να καθορίζουμε αλληλεξαρτήσεις οι ίδιοι. Μπορούμε επίσης να καθορίζουμε δικές μας διαφορικές εξισώσεις και να τις συνδέουμε με άλλες ήδη υπάρχουσες. Το Comsol multiphysics λειτουργεί ως κύριο εργαλείο για όλα τα μοντέλα καθώς είναι εύχρηστο και ευέλικτο επιτρέποντας επεκτάσεις ανάλογα με τις ανάγκες μας.

Με το Comsol multiphysics μπορούμε να πραγματοποιήσουμε διάφορους τύπους ανάλυσης:

- μόνιμη και μεταβαλλόμενη ανάλυση
- γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση
- ανάλυση ιδιοσυχνότητας
- στατικού τύπου ανάλυση

Για να λύσει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις το Comsol multiphysics χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό τρέχει την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων με διακριτοποίηση και έλεγχο λαθών χρησιμοποιώντας ποικιλία από αριθμητικές λύσεις. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις, διαμορφώνουν τη βάση για τους νόμους της επιστήμης και βοηθάνε στη μοντελοποίηση μιας τεράστιας ποικιλίας από επιστημονικά και μηχανικά προβλήματα.

Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το Comsol σε διάφορες περιοχές όπως:

- ακουστική(acoustics)
- ηλεκτρομαγνητική(AC/DC)
- χημικές αντιδράσεις(chemical species transport)
- ηλεκτροχημεία(electrochemistry)
- ρευστομηχανική(fluid flow)
- μετάδοση θερμότητας(heat transfer)
- δομική μηχανική(structural mechanics)
- ραδιοφωνικές συχνότητες (radio frequency)
- μαθηματικά μοντέλα(mathematics)
- plasma

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του Comsol multiphysics είναι η χρήση μεταβλητών για να συνδέσει τα μοντέλα μερικών διαφορικών εξισώσεων σε διάφορες γεωμετρίες, τέλος η ικανότητα του να αναμιγνύει τομείς από διαφορετικό χώρο στο ίδιο πρόβλημα προσφέρει ευελιξία που όχι μόνο απλοποιεί την μοντελοποίηση αλλά μειώνει και το χρόνο εκτέλεσης της.

## 3.Κεφάλαιο Εισαγωγή και φιλοσοφία του Pro Engineer

### 3.1. Εισαγωγή

Το Pro/ENGINEER είναι ένα λογισμικό το οποίο παρουσιάστηκε στην πρώτη του έκδοση, το 1987. Η πρώτη αυτή έκδοση μπορεί να ήταν αρκετά δύσχρηστη, αλλά το εργαλείο παραμετρικής σχεδίασης (parametric design) και μοντελοποίησης στερεών (solid modelling) που χρησιμοποιούσε ήταν εντελώς πρωτοποριακό για την εποχή του και αποτέλεσε την πρώτη ιδέα και σημείο αναφοράς για την δομή των αντίστοιχων προγραμμάτων που ακολούθησαν. Σήμερα το Pro/Engineer βρίσκεται στην 23η έκδοση, και κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς παγκοσμίως στα λογισμικά παραμετρικής σχεδίασης.

Το Pro/Engineer χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό, την ανάλυση και την κατασκευή ενός πρακτικά απεριόριστου εύρους προϊόντων. Συνοπτικά το Pro/Engineer είναι ένα παραμετρικό (Parametric) σύστημα στερεάς και επιφανειακής μοντελοποίησης (Solid-Surface Modelling) βασισμένο σε χαρακτηριστικά (Featured Based).

Featured Based	Parametric	Solid Modelling
Η δημιουργία αντικείμενων γίνεται με χαρακτηριστικά (features) όπως προσθήκες, ή αφαιρέσεις υλικού, στρογγυλέματα, οπές κλπ, αντί της χρήσης γεωμετρίας χαμηλού επιπέδου, όπως γραμμές, τόξα και κύκλοι. Έτσι ο σχεδιαστής μπορεί να σκεφτεί πως μπορεί να δημιουργήσει το αντικείμενο σε ένα υψηλό επίπεδο και να αφήσει την απεικόνιση όλων των γεωμετρικών λεπτομερειών στο pro engineer.	Το σχήμα του κάθε εξαρτήματος οδηγείτε από τις τιμές που έχουν δοθεί στις ιδιότητες των χαρακτηριστικών του. Έτσι ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τις τιμές των ιδιοτήτων αυτών, να ορίσει σχέσεις μεταξύ τους και να παρατηρήσει άμεσα τις αλλαγές που έκανε.	Το μοντέλο που δημιουργούμε περιέχει όλη την πληροφορία που ένα πραγματικό στερεό αντικείμενο μπορεί να έχει. Για παράδειγμα κάθε στερεό αντικείμενο έχει κάποιον όγκο, έτσι ώστε εάν δοθεί η πυκνότητα του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί να μπορεί να υπολογιστεί η μάζα και η αδράνεια του.

Πίνακας 3.1: Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά του Pro Engineer

### 3.2. Φιλοσοφία του Pro Engineer

Η φιλοσοφία του Pro/Engineer κρύβεται στα 3 βασικά χαρακτηριστικά του. Όταν σχεδιάζεται ένα κομμάτι (part), είναι σαν να το χτίζεται feature by feature. Τα features είναι στερεά που προκύπτουν από προέκταση, από περιστροφή κλπ, σε οπές, σε κοψίματα και άλλα. Κάθε κομμάτι δηλαδή, είναι ένα μπλοκ του οποίου τα μέρη που το συνιστούν είναι στοιχειώδη, τα features. Αυτά ορίζουν επακριβώς τον τρόπο με τον οποίο θα προστεθεί ή θα αφαιρεθεί υλικό και είναι έξυπνα, γιατί προσαρμόζονται αυτόματα στις αλλαγές που κάνει ο σχεδιαστής. Κάθε feature συνδέεται με κάποιες σχέσεις-παραμέτρους με το μοντέλο και με τα άλλα features. Ο χρήστης λοιπόν, ορίζει σε κάθε σχέδιο τις παραμέτρους με τέτοιο τρόπο ώστε :

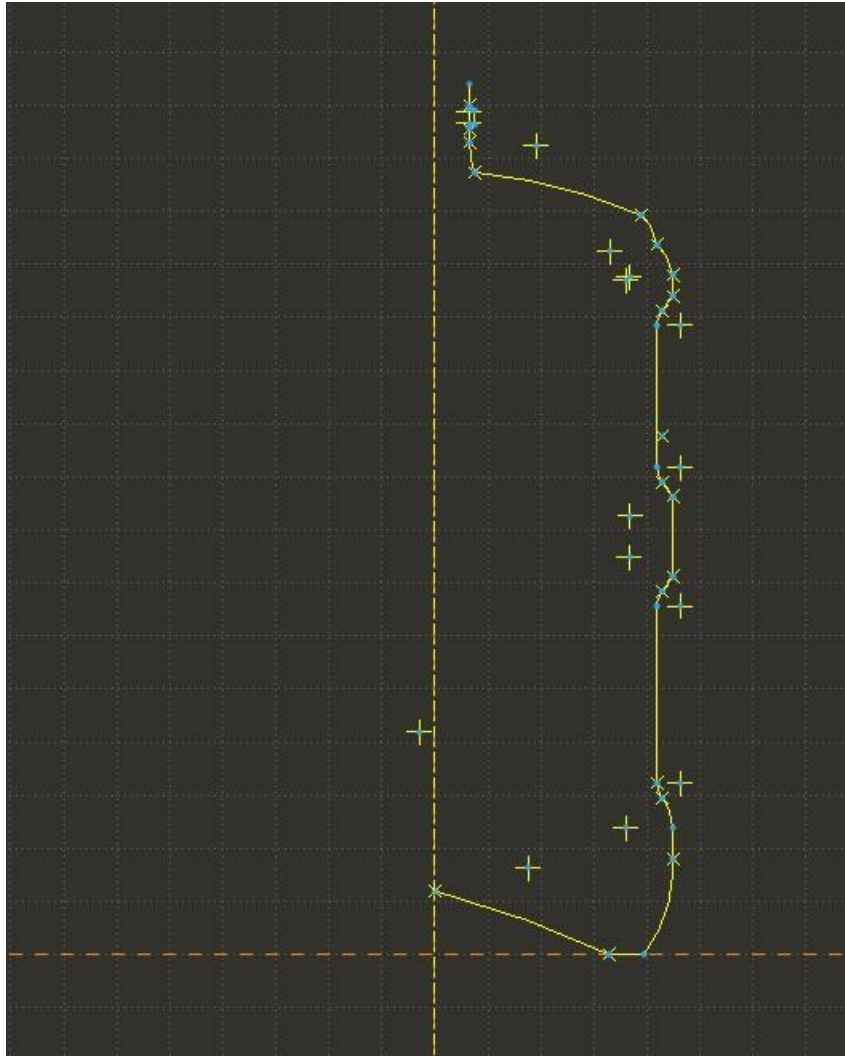
- να τον εξυπηρετούν να φτάσει τους στόχους του
- να έχει τη δυνατότητα με μερικές αλλαγές να μοντελοποιεί διαφορετικά το κομμάτι του, όπως επιθυμεί

Η παραμετρική μοντελοποίηση δίνει μεγάλες δυνατότητες στον χρήστη του προγράμματος, ο οποίος μπορεί να σχεδιάζει ελεύθερος, γνωρίζοντας ότι μπορεί ανά πάσα στιγμή να κάνει ριζικές αλλαγές με μικρό σχετικό κόστος.

## 4.Κεφάλαιο Σχεδιασμός της φιάλης

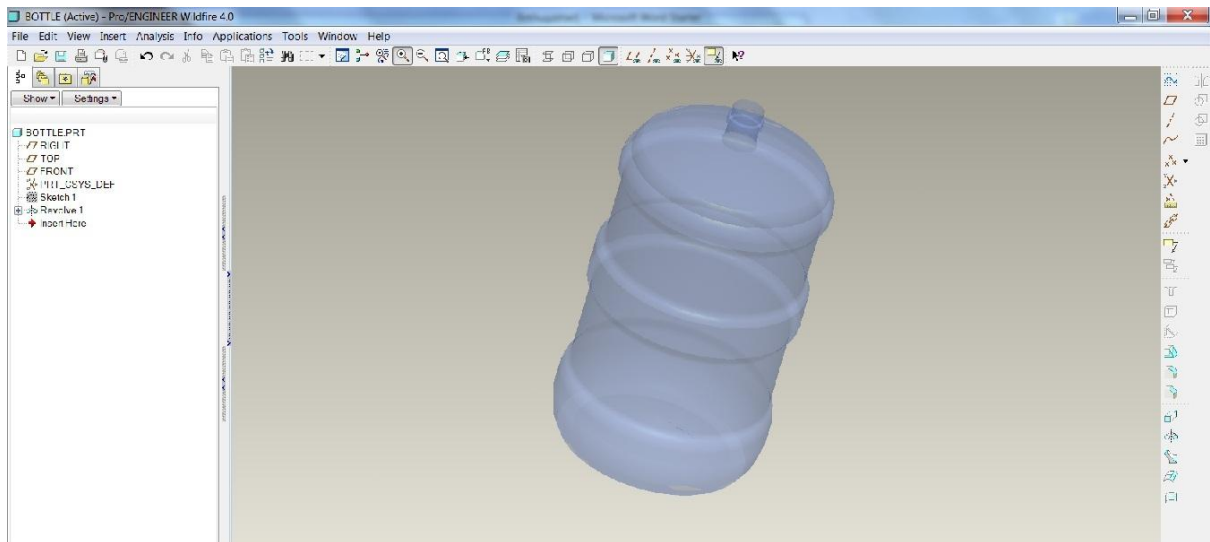
Ο σχεδιασμός της φιάλης έγινε στο λογισμικό Pro Engineer για λόγους ευκολίας, στο Comsol multiphysics υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής μοντέλου από Computer Aided Design(CAD) λογισμικά όπως το Pro Engineer ,Solidworks και άλλα. Με βάση στοιχείων όπου δόθηκαν από την εταιρεία κατασκευής πλαστικών φιαλών voglyplast όπως διαστάσεις και σχέδιο, δημιουργείτε το ηλεκτρονικό μοντέλο στο Pro Engineer. Παρακάτω ακολουθεί μια βηματική παρουσίαση του σχεδιασμού της φιάλης στο λογισμικό Pro Engineer.

Αρχικά σχεδιάζεται στο (sketch) το περίγραμμα, με κατάλληλες διαστάσεις έτσι ώστε όταν περιστραφεί ως προς κατάλληλη ευθεία (centerline) να δημιουργήσει το επιθυμητό μοντέλο (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1:Σχεδίαση περιγράμματος

Έπειτα εισάγοντας την εντολή (revolve) και επιλέγοντας τις κατάλληλες ρυθμίσεις, όπως να περιστραφεί  $360^\circ$  μοίρες ως προς τον άξονα που εισήχθη στο (sketch) και να περιστραφεί ως επιφάνεια (surface) δημιουργείτε το επιθυμητό μοντέλο (Σχήμα 4.2, 4.3).



Σχήμα 4.2

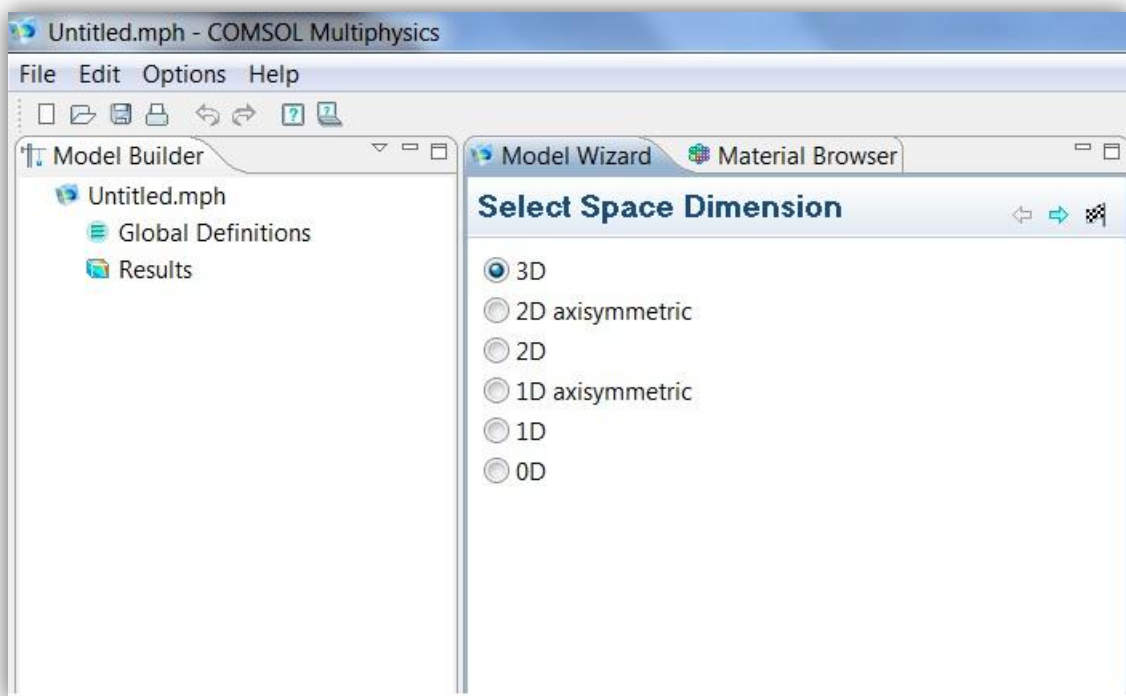


Σχήμα 4.3: Μοντέλο φιάλης στο Pro Engineer

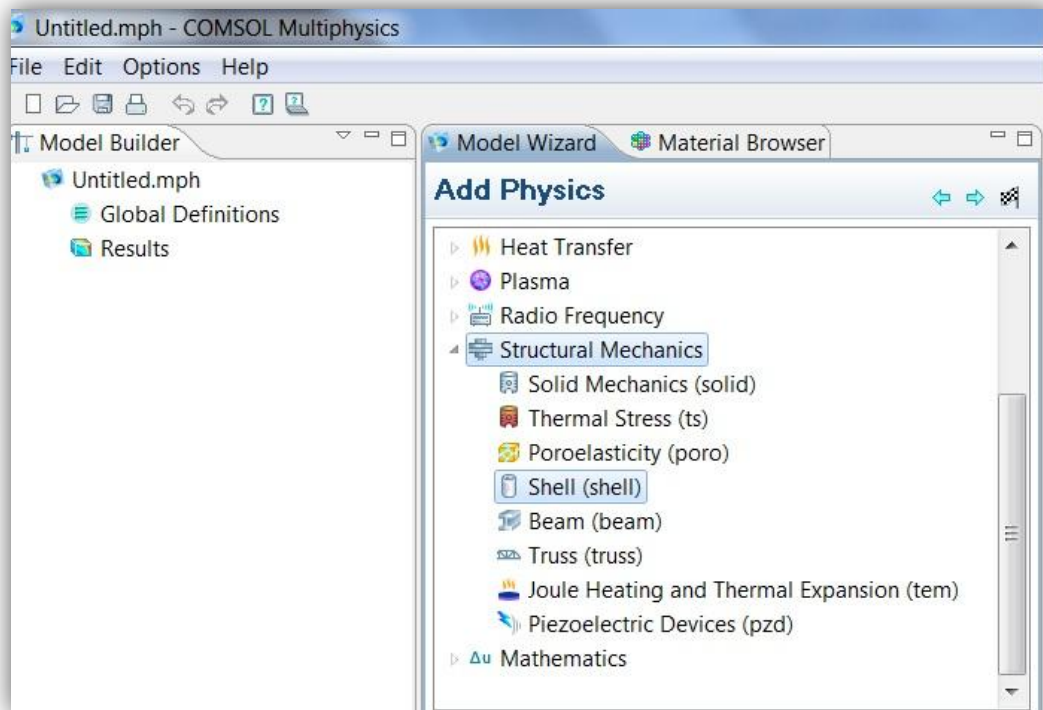
## 5.Κεφάλαιο Ανάλυση του μοντέλου στο λογισμικό Comsol multiphysics

### 5.1. Αρχικές ρυθμίσεις

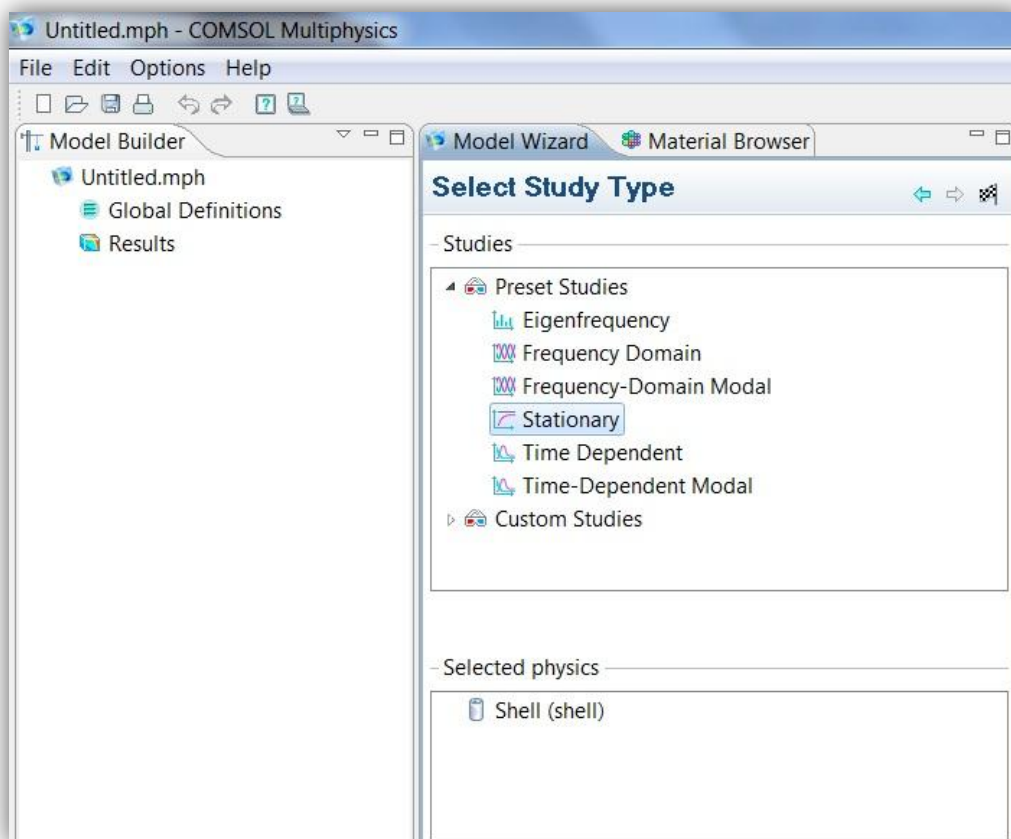
Πρωτίστως τοποθετούμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να καταλάβει το λογισμικό τι είναι αυτό το οποίο καλείται να επιλύσει. Έτσι δηλώνετε ότι θα μελετηθεί σε τρεις διαστάσεις(3D) (Σχήμα 5.1),έπειτα η ανάλυση που θα γίνει είναι δομική μηχανική(structural mechanics) και το μοντέλο θα είναι κέλυφος(shell)(Σχήμα 5.2), τέλος ο τύπος μελέτης θα είναι στατικός(stationary)(Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.1:επιλογή του χώρου μελέτης



Σχήμα 5.2:επιλογή του τύπου ανάλυσης



Σχήμα 5.3:επιλογή του τύπου μελέτης



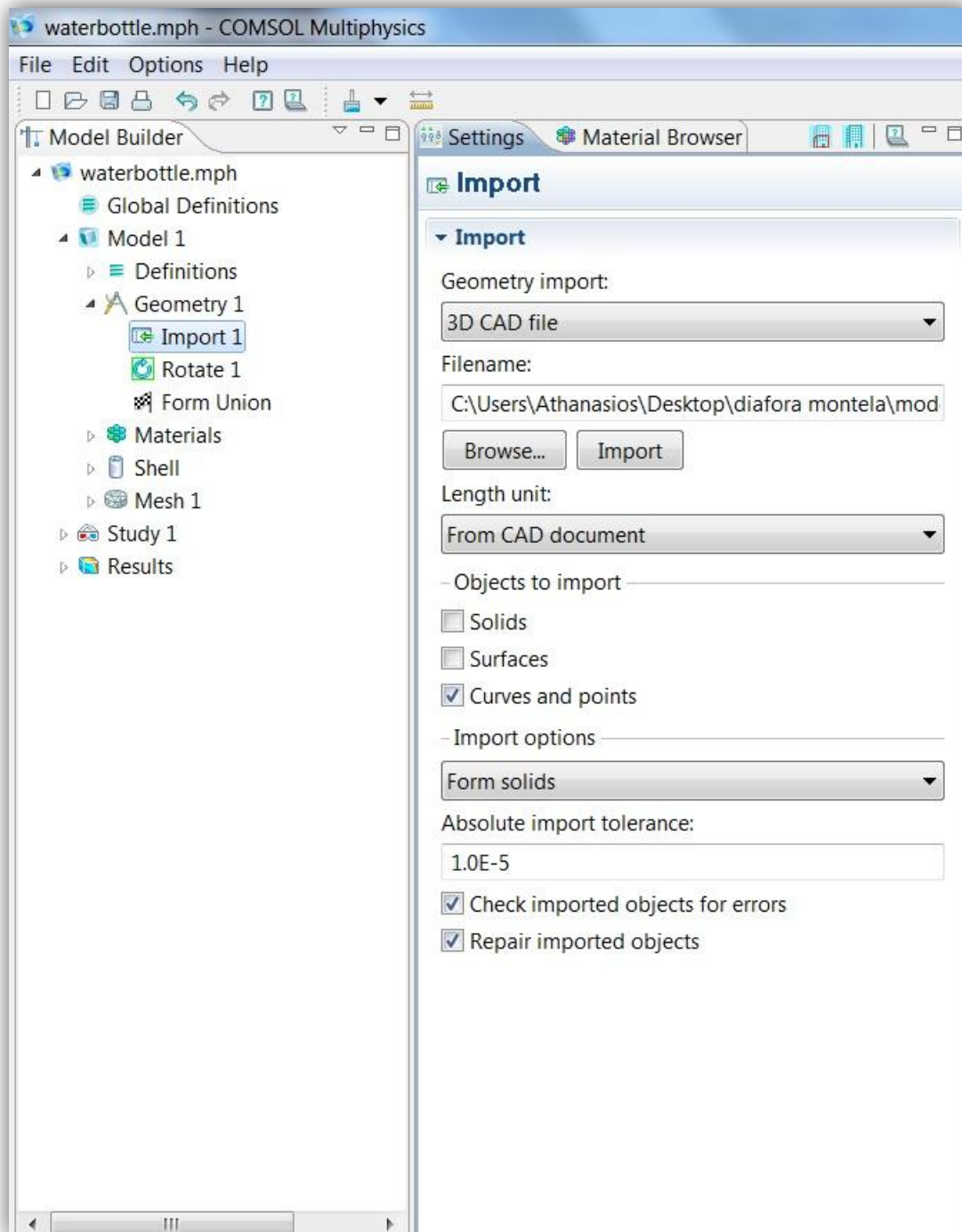
## 5.2. Εισαγωγή του μοντέλου από το Pro engineer στο Comsol multiphysics

Στην επιλογή του δέντρου (geometry) καθορίζεται η γεωμετρία του εκάστοτε μοντέλου, επιλέγοντας εισαγωγή (import) εμφανίζονται οι καρτέλες, όπου τοποθετούμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις για την επιτυχή εισαγωγή της φιάλης (Σχήματα 5.4, 5.5) :

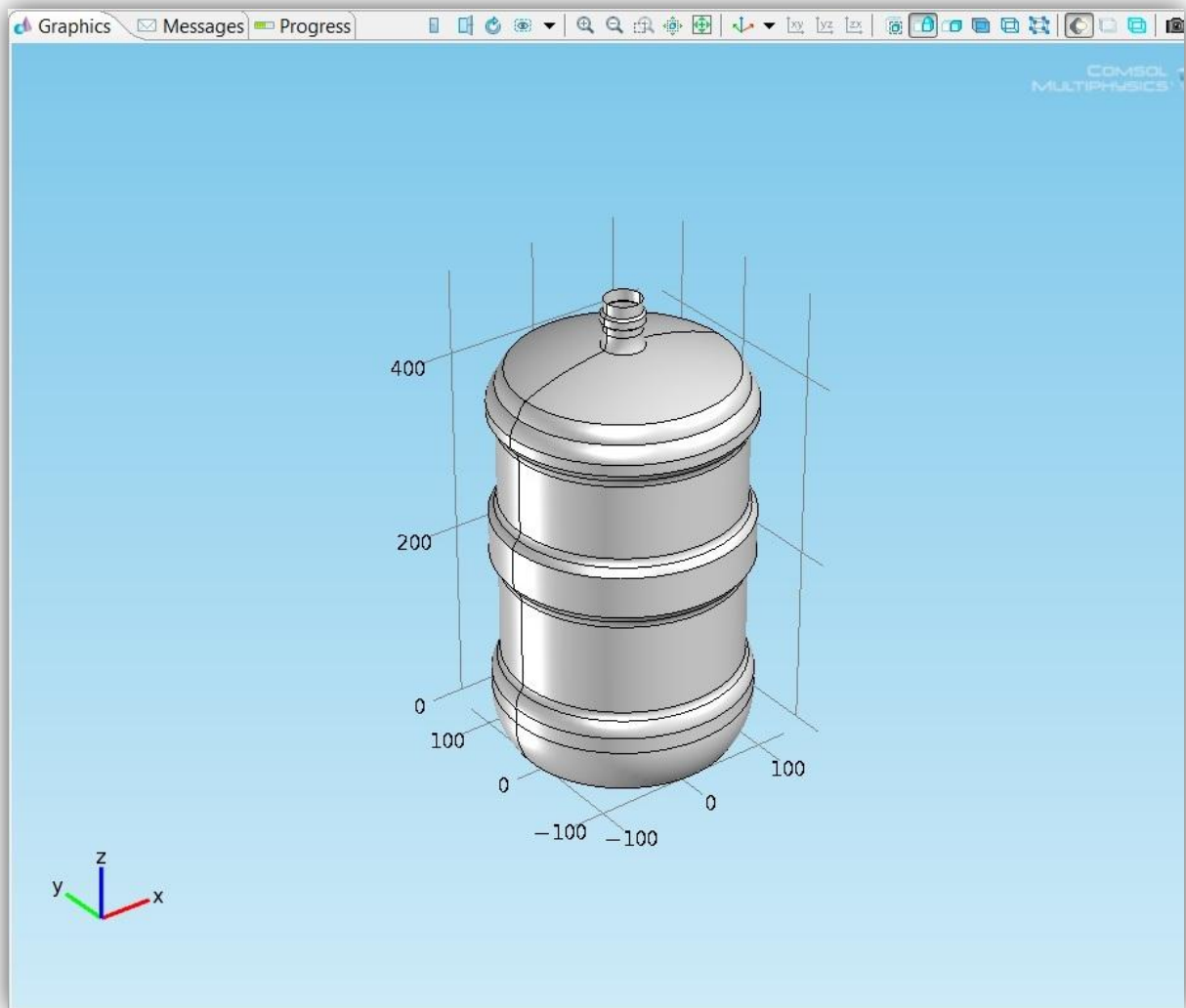
- ο τύπος αρχείου που θα εισαχτεί (Geometry import)
- το αρχείο (Filename)
- την προέλευση των μονάδων που θα χρησιμοποιεί το Comsol για να καθορίζει την γεωμετρία του μοντέλου (Length unit)
- τι είδους γεωμετρίες θα κάνει εισαγωγή (Objects to import)

Στις παραπάνω ρυθμίσεις επιλέχτηκαν:

- (3D CAD FILE), διότι το μοντέλο σχεδιάστηκε στο Pro engineer
- (From CAD document), διότι εκεί σχεδιάστηκαν και ορίστηκαν οι κατάλληλες μονάδες
- (Curves and points) επιλέχτηκαν να μεταφερθούν μόνο καμπύλες και σημεία, όπου είναι και ο οικονομικότερος τρόπος μελέτης



Σχήμα 5.4: εισαγωγή του μοντέλου από το pro engineer



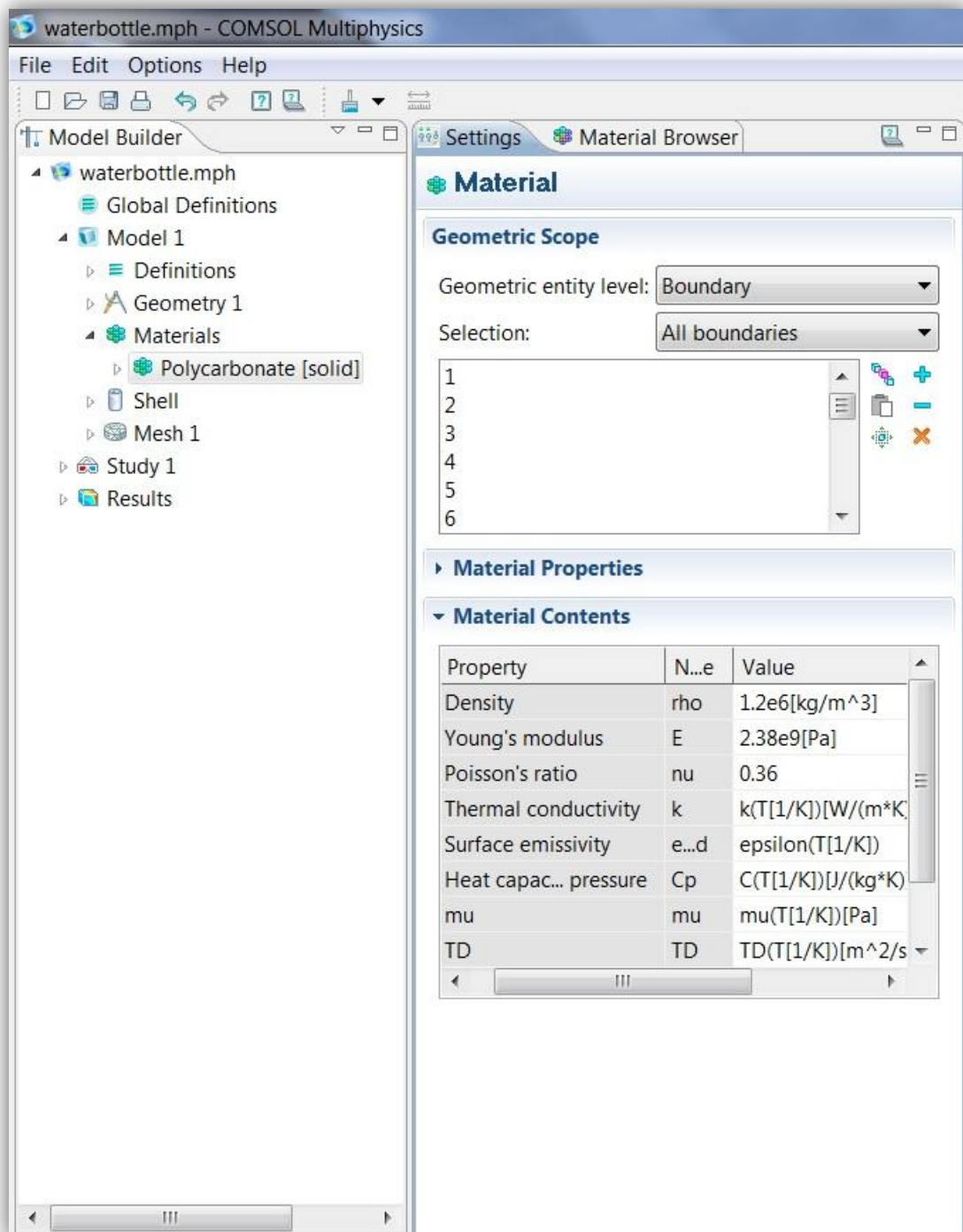
Σχήμα 5.5:εισαγωγή του μοντέλου από το pro engineer

### 5.3. Εισαγωγή του υλικού στο μοντέλο

Στην επιλογή του δέντρου (materials) επιλέγεται το επιθυμητό υλικό από την βιβλιοθήκη υλικών του Comsol multiphysics, δίδοντας τις κατάλληλες τιμές στις εξής καρτέλες, γίνεται η επιτυχής εισαγωγή του υλικού στο μοντέλο (Σχήμα 5.6).

Στην καρτέλα (Geometric scope) επιλέγονται πια μέρη του μοντέλου θα έχουν το υλικό, από την ρύθμιση (geometric entity level) επιλέγεται (boundary) και από την ρύθμιση (selection) η επιλογή (all boundaries),αφού έχουμε ίδιο υλικό σε όλη την γεωμετρία του μοντέλου.

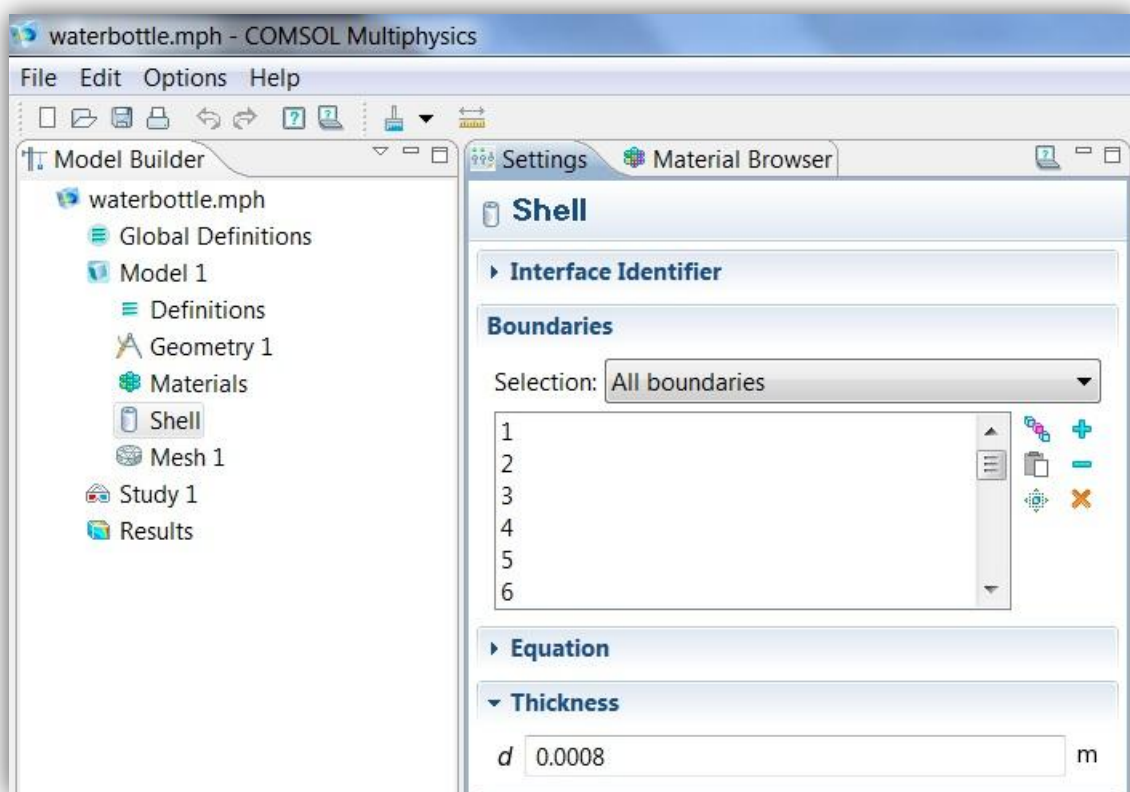
Στην καρτέλα (Material Contents) δηλαδή τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού εισάγονται οι απαιτούμενες τιμές με βάση τον (πίνακα 4.1)



Σχήμα 5.6:Εισαγωγή υλικού στο μοντέλο

## 5.4. Εισαγωγή παραμέτρων για την μελέτη του προβλήματος

Στην επιλογή του δέντρου (shell) εισάγονται παραμέτροι, όπως οι επιφάνειες προς μελέτη και το πάχος της κάθε επιφάνειας, αναγκαία δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος (Σχήμα 5.7).

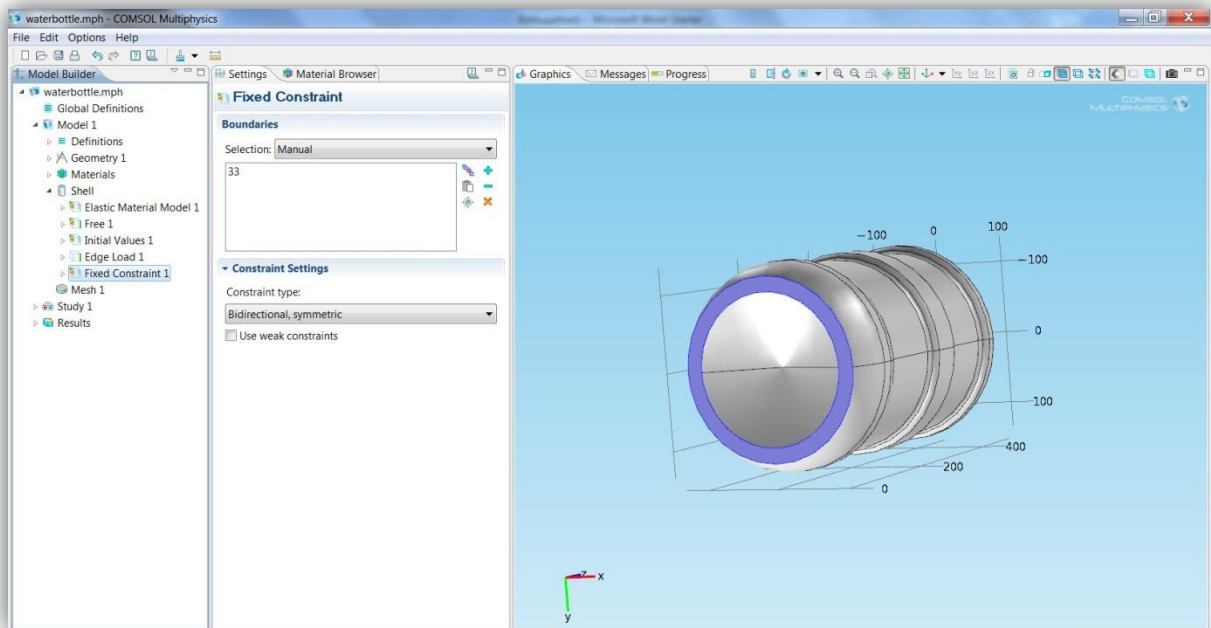


Σχήμα 5.7 :βασικές ρυθμίσεις του (shell)

Επιλέγονται όλες οι επιφάνειες διότι όλο το αντικείμενο είναι προς μελέτη και ορίζεται το πάχος του αντικειμένου ίσο με 0.8mm.

Ακόμη βασικά δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος εισάγονται από στις ρυθμίσεις του (shell) (Σχήμα 5.8).

Στην ρύθμιση (fixed constrain) ορίζεται η επιφάνεια που εφάπτεται στο έδαφος, οπότε δεν θα παρουσιάσει κάποια μετατόπιση στον χώρο.



Σχήμα 5.8 :επιλογή σταθερής επιφάνειας

Στην ρύθμιση (Edge load) εισάγονται:

- Στην επιλογή (Edges), τα άκρα στα οποία θα εφαρμοστεί η δύναμη, επιλέγεται το στόμιο της φιάλης διότι εκεί εφαρμόζεται η δύναμη από το βάρος των υπόλοιπων φιαλών στην συσκευασία (Σχήμα 5.9).
- Στην επιλογή (Force) το μέγεθος και το μέτρο της δύναμης ανά μονάδα μήκους(F/m) (Σχήμα 5.9)

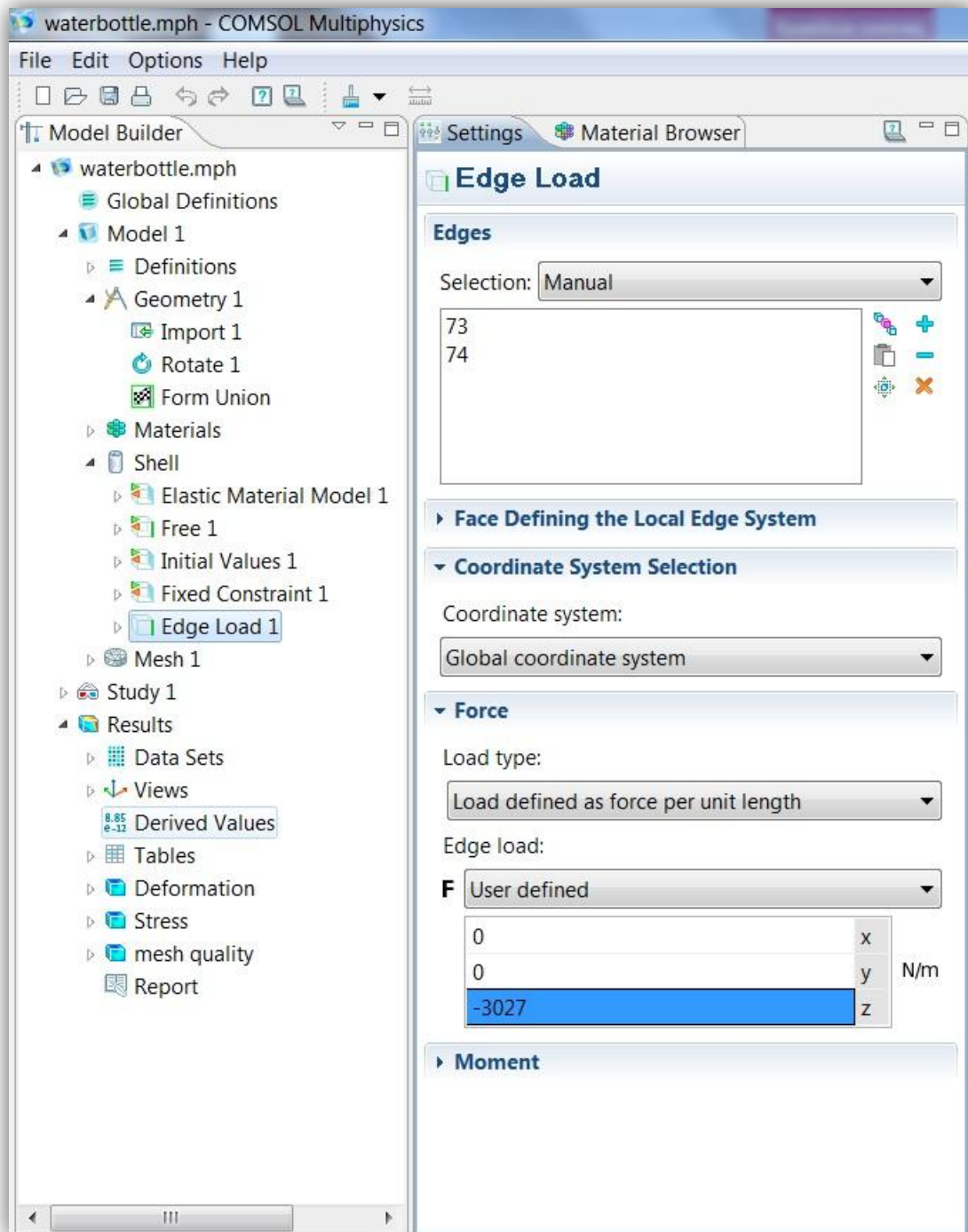
Η δύναμη προέρχεται από το βάρος των υπόλοιπων φιαλών για να υπολογιστεί γίνονται δύο παραδοχές:

- Το βάρος ενός λίτρου νερού ισούται με 1kg
- Η δύναμη μοιράζεται ομοιόμορφα στην εκάστοτε φιάλη στήριξης

Η συνολική δύναμη ισούται με:

$$F_{\text{βάρους}} = m \cdot g = (18.9\text{kg} \cdot 2\text{φιάλες}) \cdot 9.81\text{m/s}^2 \Rightarrow 370,818\text{N}$$

Το μήκος της περιμέτρου του λαιμού είναι ίσο με 0.1225m, άρα η τιμή που εισάγεται θα είναι ίση με **3027N/m**, με το αρνητικό πρόσημο μπροστά λόγω διεύθυνσης της δύναμης.



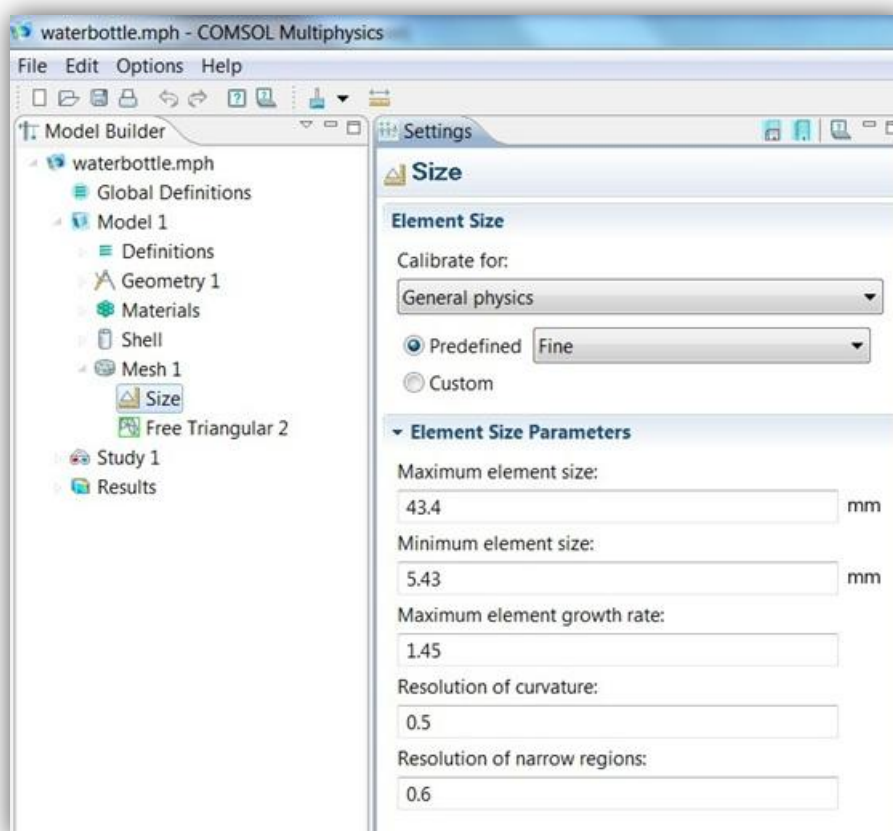
Σχήμα 5.9: Εφαρμογή δύναμης

## 5.5. Διακριτοποίηση (meshing) της φιάλης

Στην επιλογή του δέντρου (Mesh) εισάγονται παράμετροι όπως το μέγεθος, το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων και οι επιφάνειες του μοντέλου προς διακριτοποίηση.

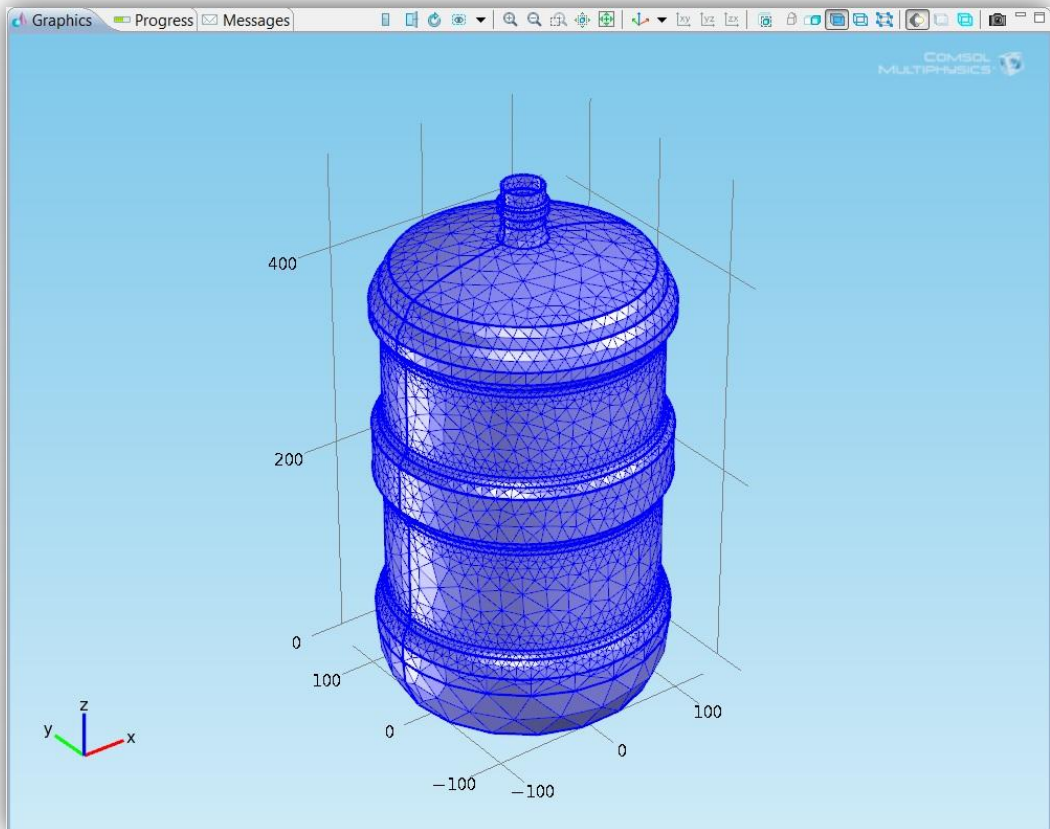
Στην ρύθμιση (Element size) διαλέγεται η επιλογή (Fine) με το προκαθορισμένο μέγεθος από το λογισμικό (Σχήμα 5.10)

Από τις ρυθμίσεις του (Mesh) επιλέγεται το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων (Free triangular) και οι επιφάνειες στις οποίες θα γίνει διακριτοποίηση (Σχήμα 5.11), όπου δίνει στο μοντέλο μια σχετικά καλή διακριτοποίηση (Σχήμα 5.12).

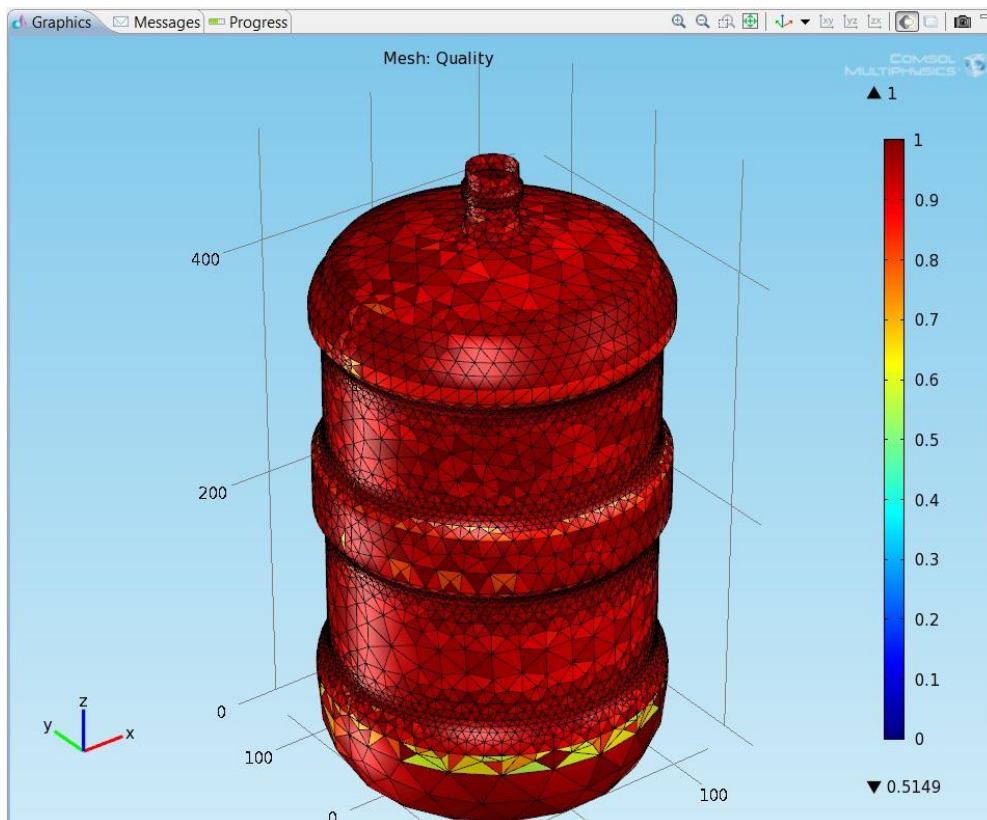


Σχήμα 5.10: Μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων



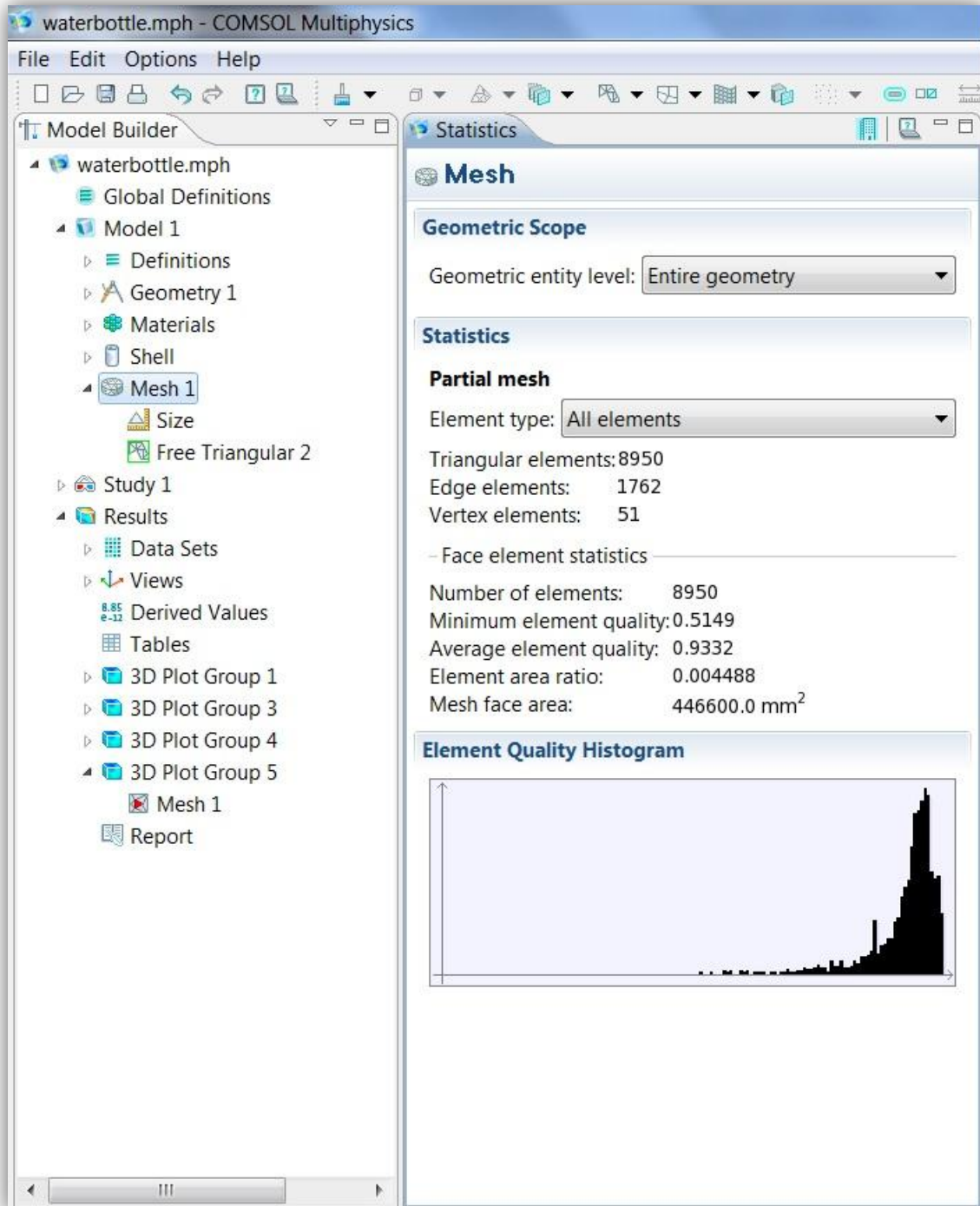


Σχήμα 5.11:Γεωμετρία διακριτοποίησης



Σχήμα 5.12: Τρισδιάστατο διάγραμμα που απεικονίζει την ποιότητα της διακριτοποίησης

Τέλος μπορούμε να δούμε μερικά στατιστικά δεδομένα που αφορούν τα πεπερασμένα στοιχεία επιλέγοντας την ρύθμιση (statistics) (Σχήμα 5.13)

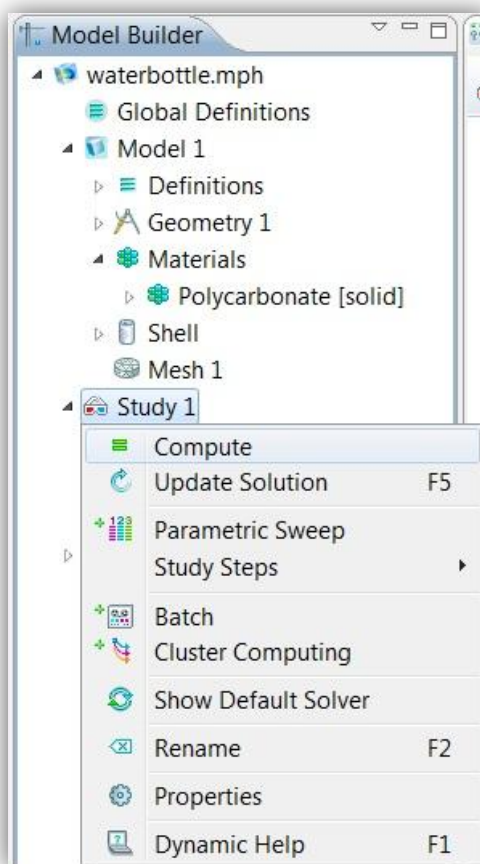


Σχήμα 5.13: Στατιστικά δεδομένα πεπερασμένων στοιχείων

## 5.6. Επίλυση του προβλήματος

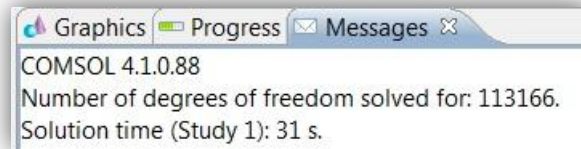
Στην επιλογή του δέντρου (study 1), καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης όπου είχε καθοριστεί στις αρχικές ρυθμίσεις ως (stationary).

Επιλέγοντας την εντολή (compute) (Σχήμα 5.14) το λογισμικό επιλύει το πρόβλημα



Σχήμα 5.14: επίλυση του προβλήματος

Στην καρτέλα των μηνυμάτων εμφανίζονται πληροφορίες σχετικά με την επίλυση όπως βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος (degree of freedom) και ο χρόνος επίλυσης του (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15: Πληροφορίες σχετικά με την επίλυση

## 5.7. Ανάλυση αποτελεσμάτων

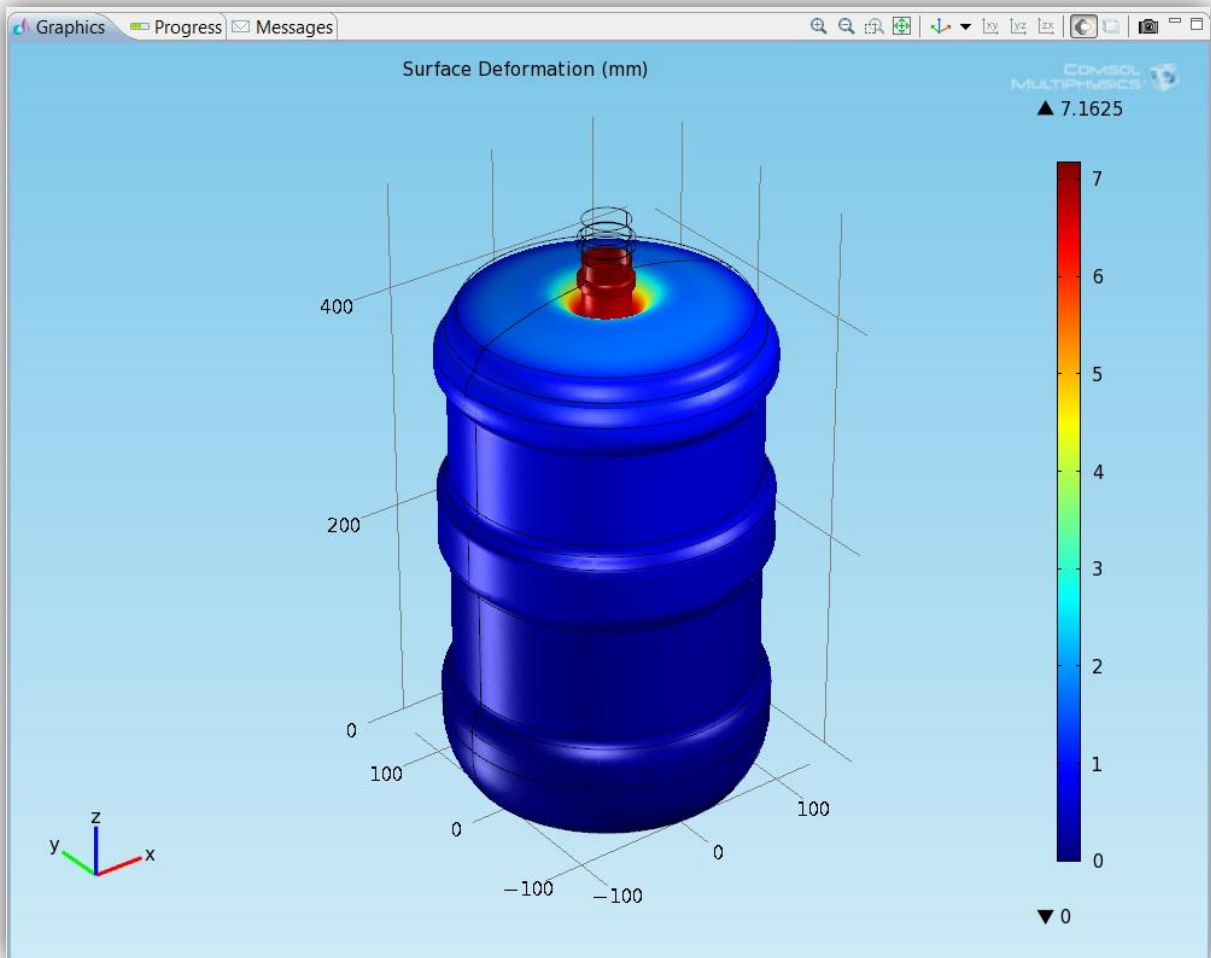
Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο σκοπός της εργασίας είναι η μηχανική ανάλυση της φιάλης, άρα θα μελετηθεί η παραμόρφωση και η τάσεις που αναπτύσσονται στην φιάλη.

### ➤ Μελέτη Παραμόρφωσης

Στην επιλογή του δέντρου (results) γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων, επιλέγεται να εμφανιστεί ένα τρισδιάστατο γράφημα (3D plot) όπου δείχνει την παραμόρφωση σε [mm].

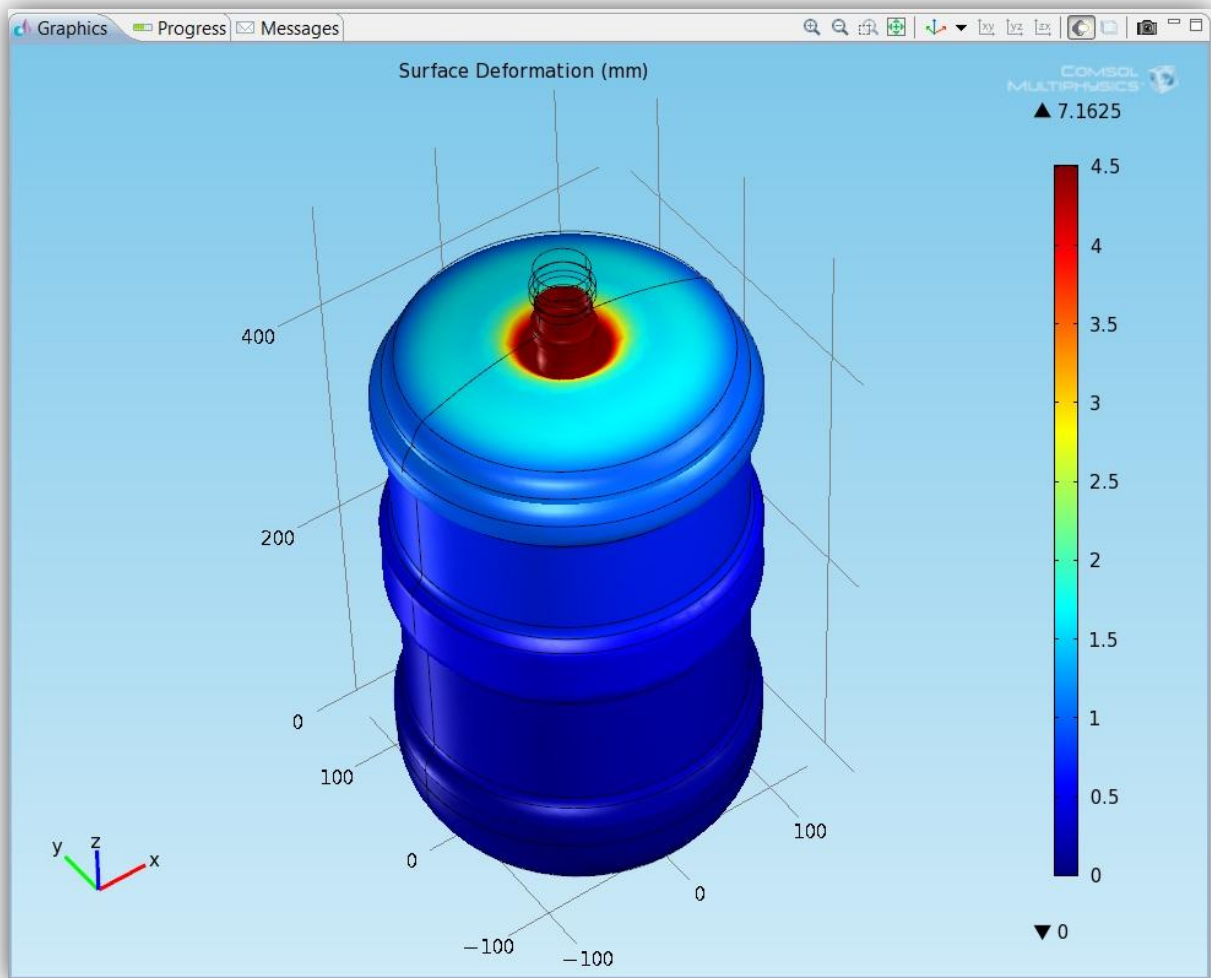
Για να γίνει η επιτυχής εισαγωγή του γραφήματος επιλέγονται οι εξής ρυθμίσεις:  
**Results→3D Plot→Surface→Deformation**

Η μέγιστη παραμόρφωση βρίσκεται στον λαιμό της φιάλης και είναι ίση περίπου με 7mm, γύρω από τον λαιμό υπάρχει παραμόρφωση που ξεκινάει από 1,6mm μέχρι 5,5mm (Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.16 :τρισεδιάστατο γράφημα παραμόρφωσης

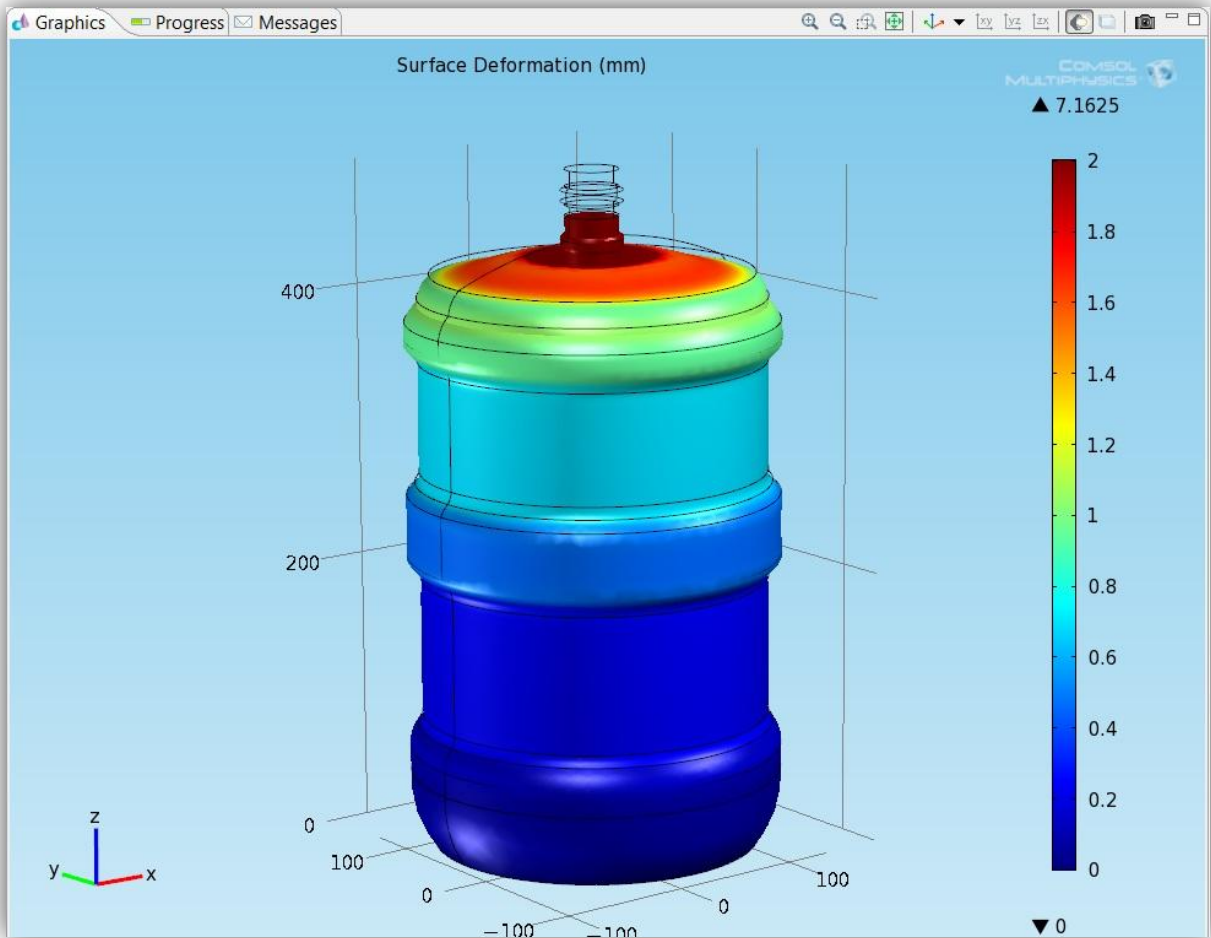
Με την ρύθμιση του πεδίου των τιμών της παραμόρφωσης εμφανίζονται και οι άλλες μικρότερες παραμορφώσεις στο σώμα της φιάλης. Στις πρώτες καμπύλες επιφάνειες υπάρχει παραμόρφωση από 0,9mm μέχρι 1,6mm (Σχήμα 5.17)



Σχήμα 5.17

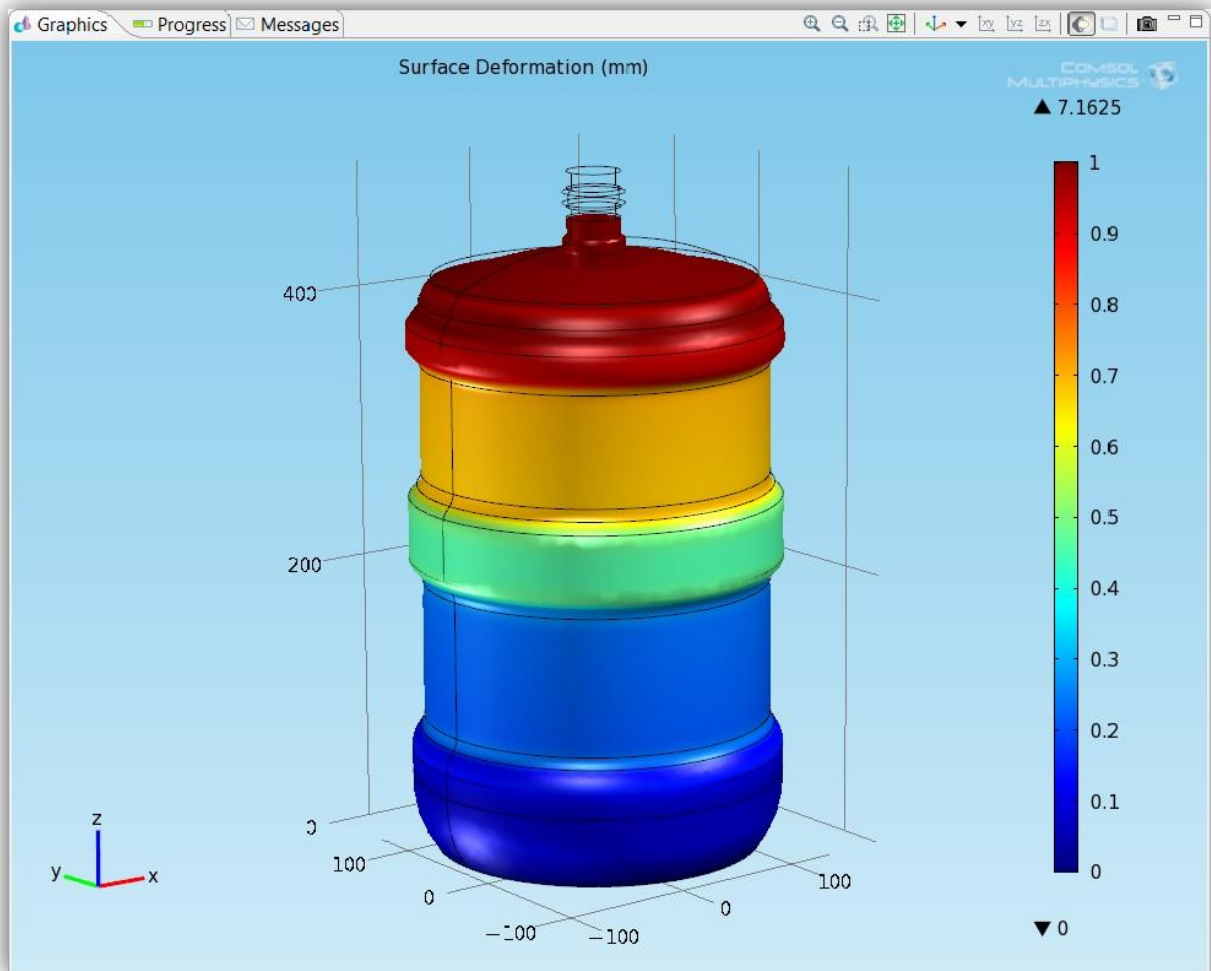
Συνεχίζοντας με τον ίδιο τρόπο, εμφανίζεται στο πάνω μέρος του κορμού η παραμόρφωση που ξεκινάει να μειώνεται από πάνω προς τα κάτω με τιμές 0.9 μέχρι 0.6 (Σχήμα 5.18).





Σχήμα 5.18

Τέλος η ελάχιστη παραμόρφωση βρίσκεται στο κάτω μέρος της φιάλης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα όπου η παραμόρφωση κυμαίνεται από 0.6mm μέχρι την μηδενική παραμόρφωση στον πάτο της φιάλης (Σχήμα 5.19).



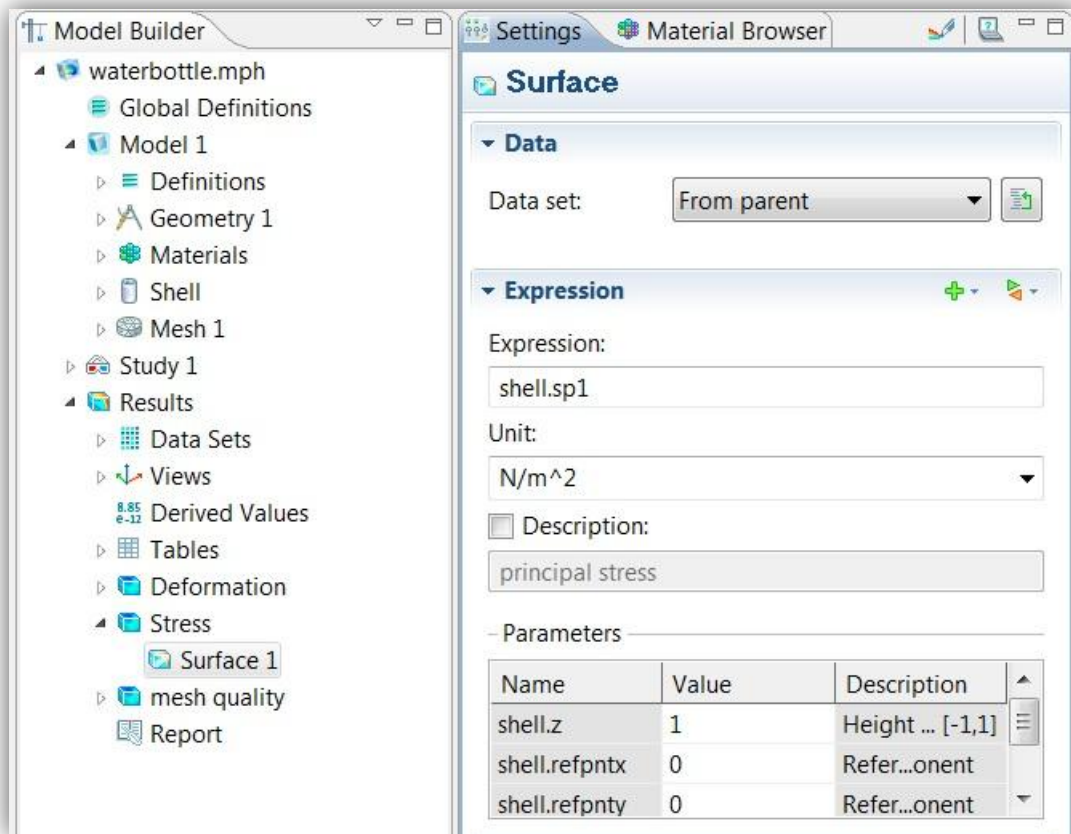
Σχήμα 5.19

➤ Μελέτη τάσεων

Στην επιλογή του δέντρου (results) γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων, επιλέγεται να εμφανιστεί ένα τρισδιάστατο γράφημα (3D plot) όπου δείχνει την τάση σε  $[N/m^2]$ .

Για να γίνει η επιτυχής εισαγωγή του γραφήματος επιλέγονται οι εξής ρυθμίσεις: **Results**→**3D Plot**→**Surface**, έπειτα στην καρτέλα (Expression) (Σχήμα 5.20) εισάγεται η εντολή (shell.sp1) ώστε να εμφανιστούν στο γράφημα οι επιθυμητές τάσεις.





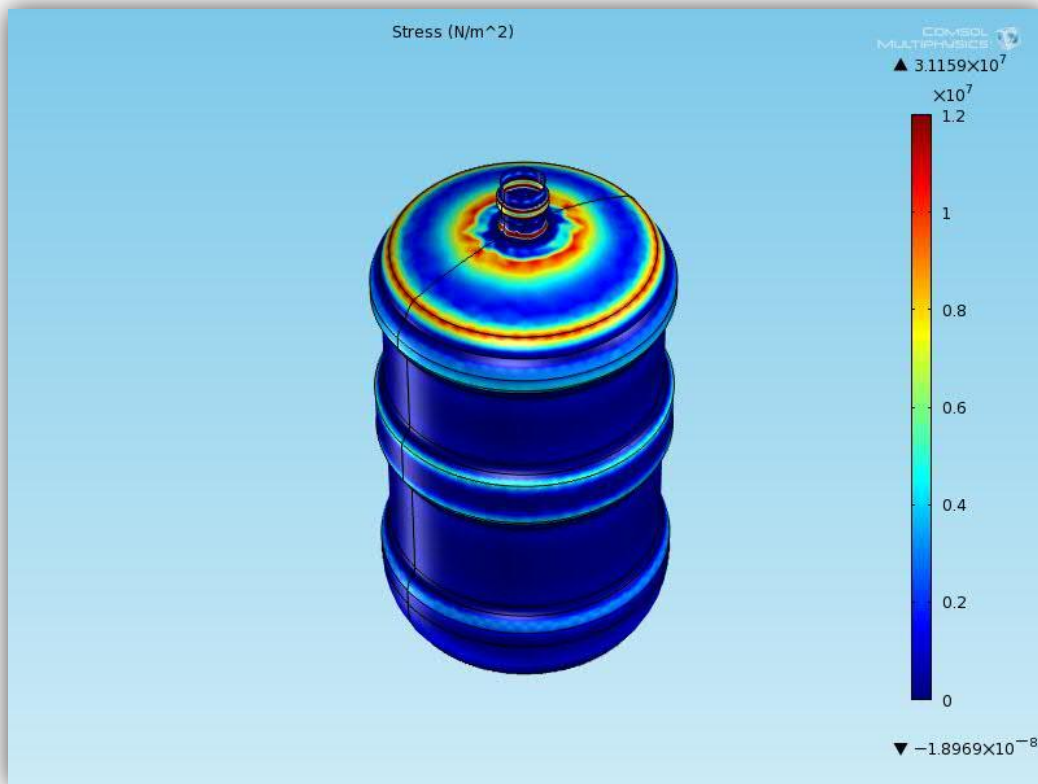
Σχήμα 5.20: Εισαγωγή τρισδιάστατου γραφήματος τάσεων

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήματα 5.21 - 5.24) οι περισσότερες τάσεις εμφανίζονται στα καμπύλα τμήματα της φιάλης, αυτό μας δείχνει ότι οι καμπύλες απορροφούν τα αξονικά φορτία και θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό τους.

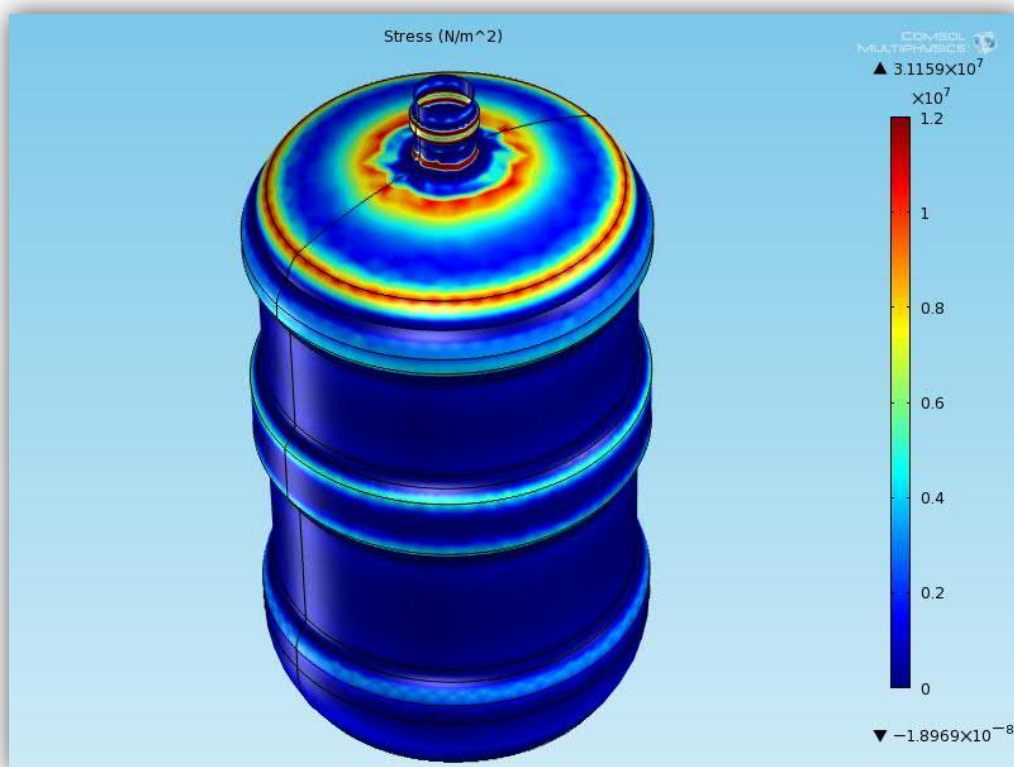
Η μέγιστη τάση είναι ίση με **31,159[MPa]**, όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο στα πλαστικά πολύμερη ως όριο θραύσης ορίζεται η αντοχή στον εφελκυσμό, όπου είναι ίση με 62.8 – 75[MPa] στον πολυκαρβονικό εστέρα (Πίνακας 1.1).

Επίσης η αντοχή διαρροής όπου είναι η τάση στο μέγιστο της καμπύλης (τάσης – παραμόρφωσης) της ελαστικής περιοχής, στον πολυκαρβονικό εστέρα είναι ίση με 62.1[MPa]

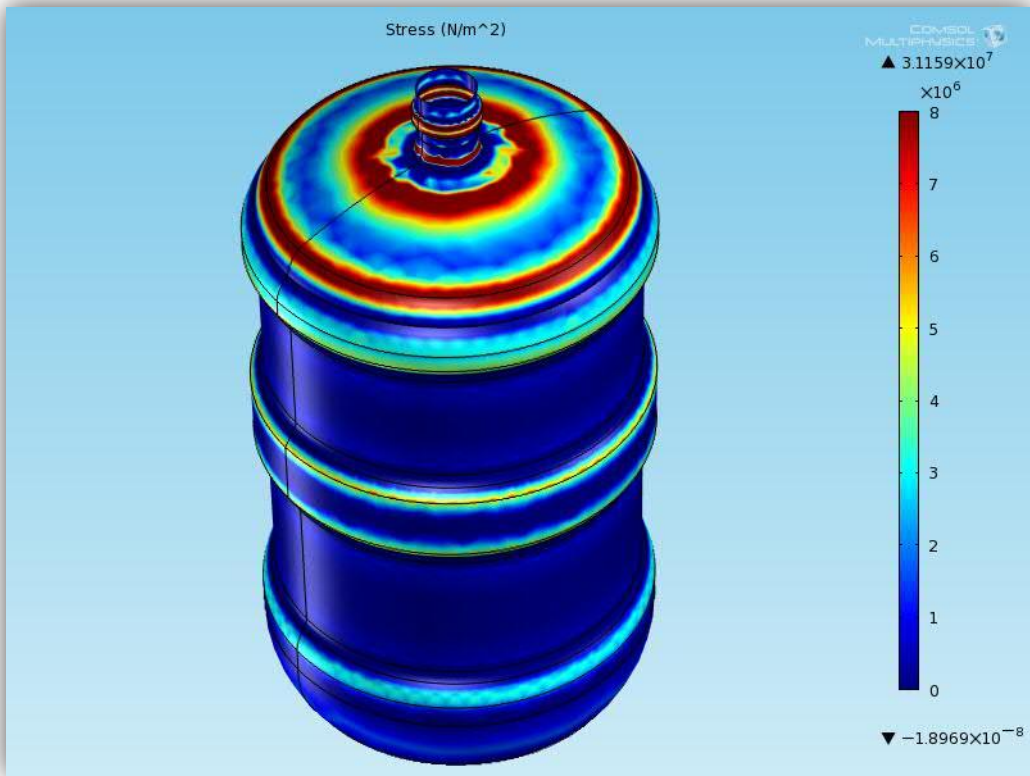
Συμπερασματικά η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στην φιάλη δεν προκαλεί σίγουρα θραύση αλλά ούτε πλησιάζει την πλαστική παραμόρφωση. Με τη προσθήκη άλλης μια σειράς φιαλών στην συσκευασία η μέγιστη τάση που αναπτύσσετε στην φιάλη είναι ίση με **42[MPa]**, τάση επίσης αποδεκτή για την ασφάλεια του αντικειμένου.



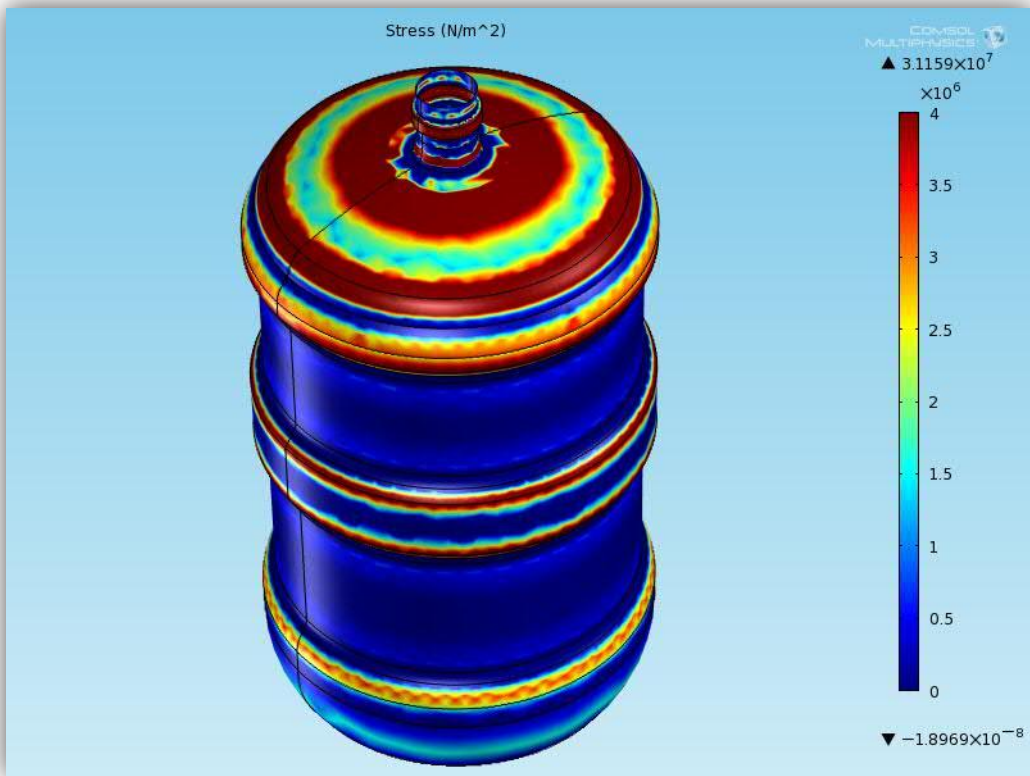
Σχήμα 5.21: τρισδιάστατο διάγραμμα τάσεων



Σχήμα 5.22



Σχήμα 5.23



Σχήμα 5.24

## Βιβλιογραφία

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ,ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ*, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΗΓΑΣΟΣ,ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2000.

WILLIAM D,CALLISTER,JR,*ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ*,ΜΕΤΑΦΡ. ΟΜΑΔΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΑΛΙΩΤΗΣ Κ. Α.,ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑΣ,ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2008.

L.H. SPERLING,*INTRODUCTION TO PHYSICAL POLYMER SCIENCE*,2006.

ASHBY,M. F. JONES,DAVID RAYNER HUNKIN,*ENGINEERING MATERIALS : AN INTRODUCTION TO THEIR PROPERTIES AND APPLICATIONS*,PERGAMON PRESS,NEW YORK 1980.

CHANDRUPATLA, ASHOK D. BELEGUNDU,*ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*,ΕΚΔΟΣΕΙΣΩΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ,ΑΘΗΝΑ 2005.

ΚΑΝΑΡΑΧΟΣ,ΑΝΔΡΕΑΣ–ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ,ΙΩΑΝΝΗΣ,*ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΩΝ*,ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ,ΑΘΗΝΑ 1998.

ΠΑΠΑΜΙΧΟΣ,ΕΥΡΙΠΙΔΗΣ,ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΗΣ,ΝΙΚΟΣ,*ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*,ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ,ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006.

ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗΣ ΜΑΝΟΛΗΣ,<ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΤΟ PRO ENGINEER>,www.eclass.tuc.gr,ΧΑΝΙΑ 2003.

## Ιστοσελίδες

<http://www.matweb.com>

<http://www.voglyplast.gr>

<http://en.wikipedia.org>

[Recycling Plastics Technical Brief] World Resource Foundation, [www.wrf.org.uk](http://www.wrf.org.uk)