

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ**

### **ΟΛΙΚΗ ΑΡΘΡΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΙΟΥ**

## 1.1 Εισαγωγή

Η ζωή είναι κίνηση και η κίνηση είναι ζωή. Η κατεστραμμένη άρθρωση του ισχίου δυσχεραίνει την κίνηση και αποτελεί μια σοβαρή αιτία αναπηρίας και δυσβάστακτου πόνου. Η αντικατάσταση της με τεχνητή είναι ένα από τα μεγαλύτερα σύγχρονα επιτεύγματα της ορθοπαιδικής χειρουργικής και γενικότερα της ιατρικής επιστήμης. Επιτρέπει σε ασθενείς που θα ήταν καταδικασμένοι σε μόνιμη επώδυνη αναπηρία, καθηλωμένοι στο κρεβάτι να βαδίζουν χωρίς πόνο και να γίνουν ικανοί να εξυπηρετήσουν τους εαυτούς τους.

## 1.2 Το προβληματικό ισχίο

Ανεξάρτητα από την ηλικία των ατόμων, τα προβλήματα στην άρθρωση του ισχίου μπορούν να κρατήσουν μακριά από δραστηριότητες που απολάμβαναν παλαιότερα. Ο πόνος και η δυσκαμψία μπορούν ακόμα να περιορίσουν και τις δραστηριότητες της καθημερινής ζωής. Τα προβλήματα τείνουν να χειροτερεύουν όσο περνά ο καιρός. Ο πόνος στο ισχίο μπορεί να προκαλείται από κάποια από τις παρακάτω αιτίες :

- Ένα σοβαρό τραύμα το οποίο δεν επουλώθηκε σωστά (πχ. κάταγμα στο ισχίο.)
- Μια χρόνια νόσο όπως η ρευματοειδής αρθρίτιδα.
- Φθορά της άρθρωσης από την μακροχρόνια χρήση.

## 1.3 Η χειρουργική επέμβαση μπορεί να βοηθήσει

Οι πάσχοντες δεν είναι υποχρεωμένοι να ζουν έχοντας πόνο στο ισχίο τους για το υπόλοιπο της ζωής τους .Η ολική αρθροπλαστική του ισχίου σχεδόν πάντα μειώνει τον πόνο. Με την χειρουργική επέμβαση αυτή, το κατεστραμμένο ισχίο αντικαθιστάται από ένα τεχνητό που ονομάζεται πρόθεση. Η επέμβαση αυτή δεν μπορεί να ξανακάνει νέους τους γεροντότερους, αλλά προσφέρει αρκετά σημαντικά οφέλη.

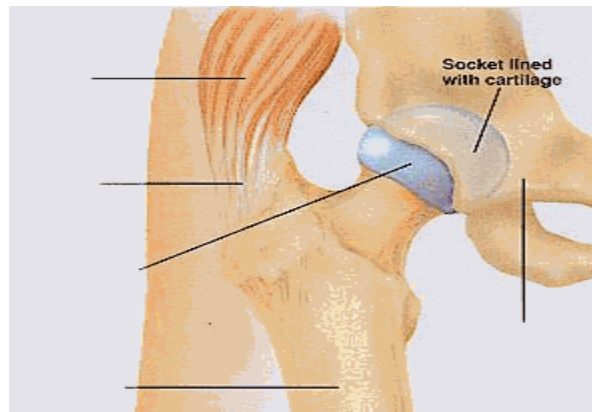
Μετά την ολική αρθροπλαστική του ισχίου μπορούν να περιμένουν ότι θα κινούνται πιο άνετα.[e1, e2-e7]. Οι περισσότεροι άνθρωποι απολαμβάνουν όλα τα οφέλη που αναφέρονται παρακάτω. Η ολική αρθροπλαστική του ισχίου σχεδόν πάντα:

Σταματάει ή μειώνει σημαντικά τον πόνο. Ακόμα και ο πόνος από την επέμβαση θα πρέπει να εξαφανιστεί σε λίγες εβδομάδες .

- Αυξάνει την δύναμη των κάτω άκρων. Χωρίς τον πόνο στο ισχίο θα μπορούν να χρησιμοποιούν περισσότερο τα πόδια τους. Αυτό θα δυναμώσει τους μύες τους .
- Βελτιώνει την ποιότητα ζωής επιτρέποντάς τους να εκτελούν δραστηριότητες της καθημερινής ζωής με μεγαλύτερη ευκολία.
- Προσφέρει χρόνια ευκολότερης κίνησης. Οι περισσότερες αρθροπλαστικές του ισχίου διαρκούν για αρκετά χρόνια.
- Τους βοηθά να κρατηθούν σε καλύτερη υγεία και ευεξία γιατί η κίνηση είναι πηγή ζωής για τον οργανισμό.

#### 1.4 Ανατομία του ισχίου

Η άρθρωση του ισχίου περιλαμβάνει την κεφαλή του μηριαίου και την κοτύλη της λεκάνης που περιβάλλονται από χόνδρο ο οποίος βοηθά στις κινήσεις προσφέροντας μια λεία ολισθηρή επιφάνεια. Η κοτύλη σχηματίζει ένα κύπελλο μέσα στο οποίο βρίσκεται και κινείται η κεφαλή του μηριαίου. Την άρθρωση σταθεροποιούν ισχυροί σύνδεσμοι και την κινούν οι ισχυροί μύες που βρίσκονται στην περιοχή (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 : Η άρθρωση του ισχίου

### 1.5 Για πιο λόγο χρειάζεται η επέμβαση

Η οστεοαρθρίτιδα του ισχίου είναι μια χρόνια εκφυλιστική νόσος. Ο χόνδρος που φυσιολογικά καλύπτει τις επιφάνειες των οστών που έρχονται σε επαφή στην άρθρωση του ισχίου, παθαίνει βλάβη ως αποτέλεσμα της μακρόχρονης χρήσης και της τριβής. Η διαδικασία της εκφύλισης αρχίζει με οίδημα, μαλάκυνση του χόνδρου και αργότερα παρουσιάζονται διαβρώσεις (σχήμα 1.2). Καθώς η νόσος προχωράει αναπτύσσονται οστεόφυτα, τα οποία συνιστούν ανώμαλες οστικές προεκβολές στα περιφερειακά συνήθως όρια της άρθρωσης, που όταν μεγαλώσουν αρκετά μπορούν να περιορίσουν τις κινήσεις. Στο τελικό στάδιο της νόσου συμβαίνει ολοκληρωτική καταστροφή του αρθρικού χόνδρου με αποτέλεσμα τις ανώμαλες επιφάνειες προστριβής των οστών και τα εκτεταμένα οστεόφυτα στα χείλη της άρθρωσης.

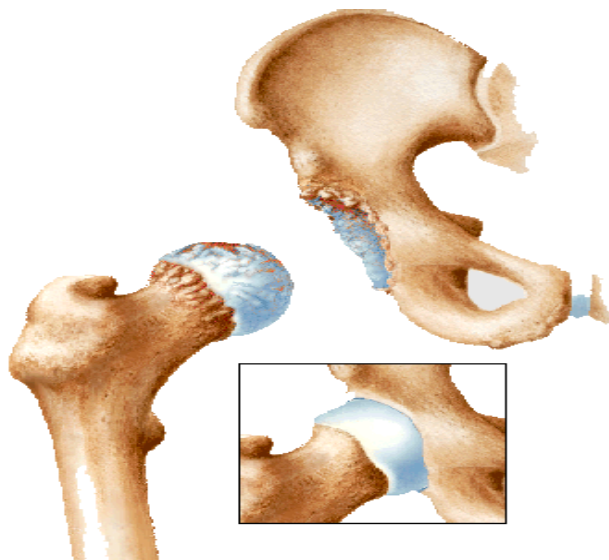
Αυτές οι προοδευτικές αλλοιώσεις έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια της λειτουργικότητας του ισχίου και την εμφάνιση σταδιακά αυξανόμενου πόνου κυρίως κατά την βάρδιση και την στήριξη του βάρους στο πόδι που πάσχει. Ο πόνος γίνεται συνήθως αισθητός στη βουβωνική περιοχή ή στην πρόσθια περιοχή του μηρού και αντανακλά μερικές φορές στην εσωτερική πλευρά του γόνατος.

Η ολική αρθροπλαστική είναι η θεραπεία εκλογής στους ασθενείς που πάσχουν από οστεοαρθρίτιδα καθώς και από ρευματοειδή αρθρίτιδα του ισχίου, όταν η καταστροφή της άρθρωσης από τη νόσο αφορά και την κοτύλη και το μηριαίο[1-3]. Η επέμβαση μερικές φορές γίνεται και σε άλλες περιπτώσεις όπως σε κατάγματα του ισχίου ή σε άσηπτη νέκρωση. Η άσηπτη νέκρωση είναι μια νόσος στην οποία

νεκρώνεται η κεφαλή του μηριαίου. Οι περισσότεροι ασθενείς που υποβάλλονται σε ολική αρθροπλαστική ισχίου είναι πάνω από 55 χρονών αλλά καμιά φορά η επέμβαση γίνεται και σε νεότερους ασθενείς.

Οι συνηθισμένες ενδείξεις για την ολική αρθροπλαστική είναι:

- Πόνος σοβαρός ο οποίος περιορίζει όχι μόνο την ικανότητα για εργασία αλλά και τις δραστηριότητες της καθημερινής ζωής.
- Πόνος που δεν ανακουφίζεται ικανοποιητικά από παυσίπονα, από τη χρήση βοηθητικού μαστουνιού ή από τον περιορισμό της δραστηριότητας του ατόμου.
- Σοβαρού βαθμού δυσκαμψία στο ισχίο.



Σχήμα 1.2 : Ο χόνδρος που φυσιολογικά καλύπτει τις επιφάνειες των οστών που έρχονται σε επαφή στην άρθρωση του ισχίου, παθαίνει βλάβη

## 1.6 Συστατικά της ολικής αρθροπλαστικής

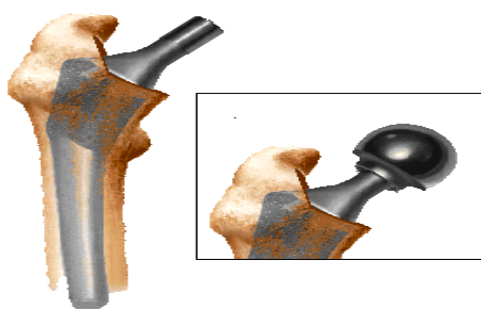
Ένα άσπρο πλαστικό κυπέλλιο από πολυαιθυλένιο, περιβάλλεται από μεταλλικό κέλυφος που εφαρμόζει στην κοτύλη και ένα μεταλλικό στέλεχος (στειλεός) που εφαρμόζει στο μηριαίο και έχει στην άκρη του μια μεταλλική κεφαλή (σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 : τεχνητό εμφύτευμα ισχίου

## 1.7 Η επέμβαση για την ολική αρθροπλαστική

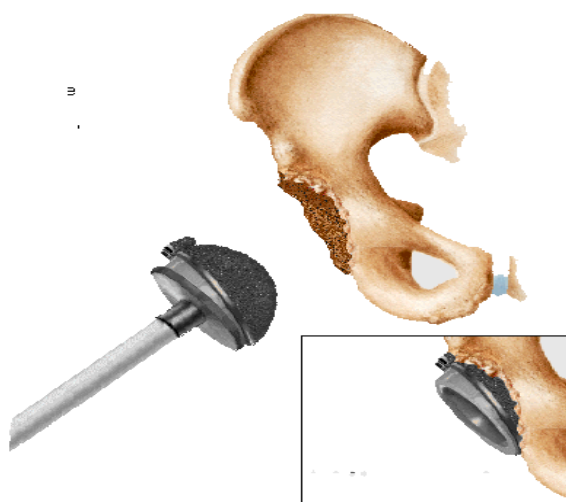
Η επέμβαση για ολική αρθροπλαστική ισχίου συνήθως γίνεται σε ασθενείς που υποφέρουν από σοβαρή αρθροπάθεια ή άλλες πιο σπάνιες παθήσεις που προσβάλλουν το ισχίο. Κατά τη διάρκεια της επέμβασης αφαιρείται η άρθρωση του ισχίου και αντικαθίσταται από τεχνητή άρθρωση (σχήμα 1.4). Η κεφαλή του μηριαίου κόβεται και αφαιρείται ενώ στη θέση της τοποθετείται ένα μεταλλικό στέλεχος (στειλεός) στο οποίο προσαρμόζεται μια μεταλλική κεφαλή (σχήμα 1.5). Η κατεστραμμένη κοτύλη αντικαθίσταται από ένα άσπρο κυπέλλιο από ειδικό πλαστικό που περιβάλλεται από μεταλλικό κέλυφος το οποίο εφαρμόζει στην κοτύλη. Η χρησιμοποίηση του πλαστικού γίνεται διότι προσφέρει μικρότερο συντελεστή τριβής με την μεταλλική κεφαλή. (σχήμα 1.6) [e5, e6, 3, 4, 8]



Σχήμα 1.4 : αντικατάσταση από τεχνητή άρθρωση



Σχήμα 1.5 : η κεφαλή του μηριαίου κόβεται



Σχήμα 1.6 : αντικατάσταση κατεστραμμένης κοτύλης

## 1.8 Τι μπορούμε να περιμένουμε από την ολική αρθροπλαστική

Η ολική αρθροπλαστική θα προσφέρει ανακούφιση από τον πόνο σε ποσοστό 90 % με 95 % των ασθενών. Θα επιτρέψει να εκτελούμε τις συνήθεις καθημερινές δραστηριότητες χωρίς προβλήματα. Η επέμβαση ίσως επιτρέψει να ασχοληθούμε με ορισμένα αθλήματα ή βαρύτερες εργασίες πάντα με τις οδηγίες του γιατρού μας. Η κινητικότητα του ισχίου θα βελτιωθεί σχεδόν σε όλους τους ασθενείς. Οι περισσότεροι ασθενείς με σοβαρή δυσκαμψία θα επανακτήσουν σχεδόν φυσιολογική κινητικότητα.

## 1.9 Αντοχή της τεχνητής άρθρωσης στο χρόνο

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το 90 με 95 τις εκατό των ολικών αρθροπλαστικών του ισχίου είναι επιτυχείς μέχρι και 10 χρόνια μετά την επέμβαση. Το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται όσο περνά ο χρόνος είναι η μηχανική χαλάρωση της πρόθεσης.[7-10] Με την έννοια της χαλάρωσης περιγράφουμε την απώλεια της σταθερής συγκράτησης της τεχνητής άρθρωσης στα οστά. Το κύριο σύμπτωμα είναι ο πόνος, ο οποίος είναι εντονότερος κατά την έναρξη της βάδισης, ενώ μερικοί ασθενείς αντιλαμβάνονται μικροκινήσεις λόγω της αστάθειας στην τεχνητή άρθρωση. Στα 10 χρόνια μετά την επέμβαση περίπου το 25 % όλων των τεχνητών ισχίων θα παρουσιάσουν σημεία χαλάρωσης στην ακτινογραφία. Λιγότερα από τα μισά από αυτά (περίπου το 5 % με 10 % όλων των τεχνητών ισχίων) θα είναι επώδυνα και θα χρειάζονται ξανά χειρουργική επέμβαση για τοποθέτηση νέας τεχνητής άρθρωσης. Η χαλάρωση μεταξύ άλλων παραγόντων εξαρτάται από το σωματικό μας βάρος και τις δραστηριότητες μας. Αυτός είναι ο λόγος που αποφεύγουμε τις επεμβάσεις σε υπέρβαρους ασθενείς καθώς και σε νέους και σωματικά δραστήριους. Οι χαλαρές και επώδυνες τεχνητές αρθρώσεις μπορεί να χρειαστούν αντικατάσταση. Τα αποτελέσματα μιας δεύτερης επέμβασης δεν είναι τόσο καλά όσο της αρχικής και η πιθανότητα επιπλοκών είναι μεγαλύτερη.



## 1.10 Ο ρόλος του Μηχανικού στην αντιμετώπιση στα προβλήματα του ισχίου

Συχνά, ακούγεται η άποψη ότι το ανθρώπινο σώμα είναι μια καλοσχεδιασμένη μηχανή. Η άποψη αυτή δεν είναι διόλου αβάσιμη, καθώς το ανθρώπινο σώμα θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι ένα σύνολο «εξαρτημάτων» – κύτταρα, ιστοί, οστά, μύες κ.τ.λ. – τα οποία συνεργάζονται με έναν αρκετά πολύπλοκο, αλλά πολύ αποτελεσματικό τρόπο, προκειμένου να θέσουν σε λειτουργία τη «μηχανή» που λέγεται άνθρωπος. Με βάση αυτή την οπτική γωνία τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το ανθρώπινο σώμα μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης του μηχανικού. Η αντίληψη αυτή οδήγησε στη συνεργασία της ιατρικής επιστήμης με την τεχνολογία δημιουργώντας έτσι τον κλάδο της Βιοϊατρικής Τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, η συνεργασία της ιατρικής με τη μηχανική έχουν οδηγήσει στη δημιουργία του νέου κλάδου της Εμβιομηχανικής. Ο νέος αυτός κλάδος χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της μηχανικής σε ιατρικά προβλήματα καλείται να δώσει νέες λύσεις σε πλήθος προβλημάτων υγείας, όπως είναι τα προβλήματα του ισχίου, που ταλαιπωρούν τον άνθρωπο. Ένα από τα βασικά εργαλεία επίλυσης προβλημάτων της μηχανικής, και κατ' επέκταση της εμβιομηχανικής, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια υπολογιστική μέθοδος μηχανικής ανάλυσης που βασίζεται στην ανάλυση μιας πολύπλοκης γεωμετρίας σε ένα πλέγμα (mesh) πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος όπου στους κόμβους (nodes) του επιλύονται συγκεκριμένες διαφορικές εξισώσεις. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Modeling) είναι η δυνατότητα που παρέχει να μελετούνται, από μηχανικής απόψεως, μοντέλα και όχι τα πραγματικά δοκίμια, η εύρεση των οποίων σε αρκετές περιπτώσεις, όπως και στην παρούσα εργασία, είναι δύσκολη (είναι αδύνατο να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά ενός ισχίου, που ανήκει σε ένα έμβιο ον). Από την άλλη, βέβαια, δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι η μέθοδος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis) είναι μια υπολογιστική μέθοδος, που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που δίνει είναι προσεγγιστικά.

### 1.11 Ο σκοπός της εργασίας

Η μελέτη μέσω πεπερασμένων στοιχείων και μοντελοποίηση του στατικού ελέγχου των μηριαίων κεφαλών των εμφυτευμάτων ισχίου με βάση τα διεθνή πρότυπα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ**

### **ΥΛΙΚΑ ΜΗΡΙΑΙΩΝ ΚΕΦΑΛΩΝ**

## 2.1 Ιστορική αναδρομή

Για περισσότερο από έναν αιώνα, οι ορθοπεδικοί προσπαθούν να ανακατασκευάσουν κατεστραμμένους γοφούς και να δώσουν λύση στο πρόβλημα χιλιάδων ασθενών. Η άρθρωση του ισχίου αποτελείται από την πυελική υποδοχή στην περιοχή της λεκάνης, γνωστή ως κοτύλη, και την μηριαία κεφαλή στην οποία καταλήγει το μηριαίο οστό. Η σχετική κίνηση της μηριαίας κεφαλής σε σχέση με την κοτύλη παρέχει την απαραίτητη κίνηση του ισχίου. Η άρθρωση αυτή καταπονείται καθημερινά με μεγάλα φορτία και η μηριαία κεφαλή τρίβεται σε σχέση με την κοτύλη κατά εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες φορές ημερησίως. Η δε λειτουργικότητά της κρίνεται πρωτεύουσας σημασίας διότι εκτός των άλλων, παρέχει και την απαραίτητη ισορροπία στο ανθρώπινο σώμα. Για όλους τους ανωτέρω λόγους, ο σύνδεσμος αυτός είναι γενικά ευπαθής σε ένα μεγάλο ποσοστό ατόμων, κυρίως μεγάλου σωματικού βάρους και έντονης δραστηριότητας, καθώς και σε ασθενείς που πάσχουν από ρευματοειδή αρθρίτιδα και γενικά από οστεοπορωτικά οστά με ευρύ αυλό του μηριαίου.[14]

Οι πρώτες ιατρικές προσεγγίσεις σε προβληματικές αρθρώσεις του ισχίου, αποσκοπούσαν στην κατεργασία των συνεργαζόμενων επιφανειών κοτύλης και μηριαίας κεφαλής, οι οποίες είχαν παραμορφωθεί από χρόνια αρθρίτιδα. Προχωρούσαν, λοιπόν, στην επικάλυψη των οστών με χρυσό, μαγνήσιο, ψευδάργυρο, ακόμη και με μέρη από κύστες ζώων. Άλλοι αντικαθιστούσαν τη μηριαία κεφαλή με μεταλλικές σφαίρες ή επανακατεργάζονταν την κοτύλη με ακρυλικές ρητίνες.

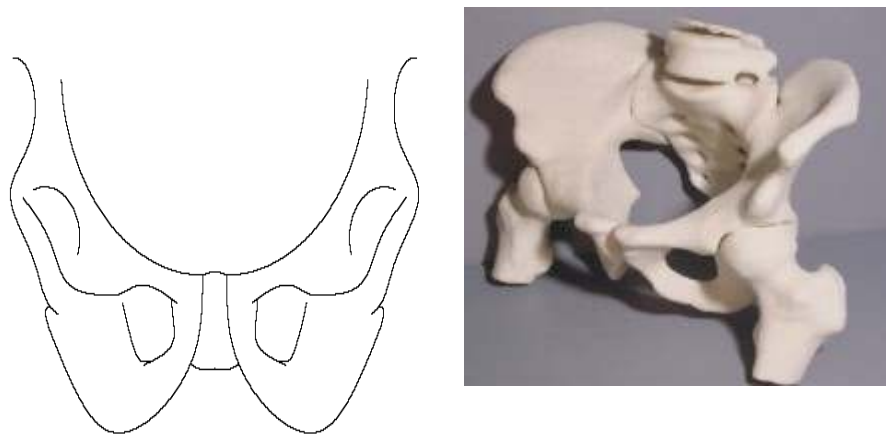
Αποτέλεσμα αυτών των πρώιμων σχεδιαστικών και εγχειρητικών προσπαθειών ήταν η βραχυπρόθεσμη επίλυση του προβλήματος. Στις καλύτερες των περιπτώσεων οι ασθενείς κέρδιζαν μερική από την κινητικότητα του συνδέσμου και για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Οι προσεγγίσεις αυτές αδυνατούσαν να διαμορφώσουν συνδέσμους ικανούς να ανταπεξέλθουν στα μεγάλα φορτία που καταπονούν τον ανθρώπινο γοφό.

Αρνητικά λειτούργησε το γεγονός ότι οι ορθοπεδικοί στην πλειοψηφία τους αντιμετώπιζαν το πρόβλημα μονοδιάστατα και ασχολούνταν άλλοτε με την κοτύλη και άλλοτε με τη μηριαία κεφαλή. Ο πρώτος ορθοπεδικός ο οποίος αντιμετώπισε τον ισχιακό σύνδεσμο σαν ένα ενιαίο σύστημα, ήταν ο Βρετανός John Charnley, μετέπειτα εχρισμένος ως Sir John Charnley, το 1958. Οι ριζοσπαστικές απόψεις του

Charnley περί ολικής ανακατασκευής του ισχιακού συνδέσμου (Σχήμα 2.1) προκαλούσε την αντίδραση των συναδέλφων του. Το 1962 ο ίδιος μετακομίζει σε ένα απομονωμένο νοσοκομείο έξω από την περιοχή του Μάντσεστερ, το οποίο στο παρελθόν λειτουργούσε ως σανατόριο για ασθενείς με φυματίωση. Εκεί έγιναν και οι πρώτες σύγχρονες ολικές αρthroπλαστικές του ισχίου.

Σε πρώτο στάδιο ο Charnley προχώρησε στην αφαίρεση του άνω τμήματος του μηριαίου οστού. Στη θέση του τοποθέτησε μια μεταλλική σφαίρα προσαρτημένη πάνω σε ένα μεταλλικό στέλεχος, το οποίο βύθισε στο εναπομείναν οστό. Στη συνέχεια χρησιμοποίησε οδοντιατρικό τσιμέντο για να προσκολλήσει ένα ειδικά διαμορφωμένο κυπέλλιο στο εσωτερικό της κοτύλης. Το κυπέλλιο αυτό αποτελούνταν από ένα ειδικό κάλυμμα, φτιαγμένο από πολυαιθυλένιο υψηλού μοριακού βάρους, μέσα σε ένα μεταλλικό κέλυφος. Όταν η μεταλλική σφαίρα εισχωρούσε στο κοτυλιδικό κέλυφος, προκαλούσε παραμόρφωση του πολυαιθυλικού καλύμματος, επιτυγχάνοντας την συναρμογή του συνόλου. Το αποτέλεσμα ήταν η κατασκευή ενός αρκετά λειτουργικού ένσφαιρου τριβέα, του οποίου η εμφύτευση αποδείχθηκε εύκολη μέσω μιας απλής χειρουργικής επέμβασης. Τα κύρια προβλήματα του παρελθόντος είχαν πλέον ξεπεραστεί. Οι ασθενείς εμφάνιζαν μετά την επέμβαση εμφανή μείωση του πόνου και αυξημένη κίνηση του συνδέσμου. Τα περισσότερα εμφυτεύματα διαρκούσαν 10 με 15 χρόνια.

Εν τούτοις ο Charnley έμελλε να προχωρήσει σε έναν κρίσιμο συμβιβασμό. Η μεταλλική σφαίρα που χρησιμοποιούσε είχε διάμετρο αρκετά μικρότερη από την μηριαία κεφαλή που είχε αφαιρέσει. Ο λόγος ήταν η προσπάθειά του να μειώσει τη φθορά, περιορίζοντας την διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της μηριαίας κεφαλής και του πολυαιθυλικού καλύμματος σε κάθε βήμα του ασθενή. Με αυτή την προσαρμογή του εμφυτεύματος οι ασθενείς μπορούσαν να στέκονται και να κινούνται με άνεση. Οι μικρότερες κεφαλές όμως δεν ήταν το ίδιο σταθερές με τον αρχικό σύνδεσμο. Στην πορεία αποδείχθηκε ότι είχαν την τάση να εμφανίζουν εξarthρώσεις σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό και η κινητικότητα των ασθενών περιοριζόταν σε μεγάλο βαθμό.[17, 18]



Σχήμα 2.1 Γραμμική απεικόνιση της σκελετικής μορφολογίας της ανθρώπινης λεκάνης. Διακρίνουμε τον αυλό του μηριαίου και τις γωνίες πρόσδεσης αυτού εν συγκρίσει με το λαγόνιο και το ισχιακό οστό.

## 2.2 Ολική αρthroπλαστική ισχίου

Η ολική αρthroπλαστική ισχίου αποτελεί για δεκαετίες το βασικό αντικείμενο ερευνών στο χώρο της προσθετικής ιατρικής. Πρώιμα εμφυτεύματα ισχίου, εμφανίζονται στις αρχές του 20ου αιώνα, αλλά τα πρώτα αξιόλογα αποτελέσματα εμφανίζονται τη δεκαετία του '60, όταν ο βρετανός Sir John Charnley εισήγαγε την ολική αρthroπλαστική ισχίου (THA, Total Hip Arthroplasty). Η καινοτόμος λύση του Sir Charnley αποτελείται από μια μεταλλική μηριαία κεφαλή προσαρτημένη επάνω σε ένα μεταλλικό στέλεχος, σε συνεργασία με ένα κοτυλιδικό κέλυφος από πολυαιθυλένιο UHMPE. Η πρόσφυση στο οστό επιτυγχάνεται με χρήση πολυμεθακρυλικού μεθυλίου-PMMA.

Σήμερα οι μηριαίες κεφαλές παρασκευάζονται κυρίως από μεταλλικά κράματα. Σχεδόν 250.000 εγχειρήσεις ολικής αρthroπλαστικής ισχίου και γονάτου γίνονται κάθε χρόνο σε Ευρώπη και Αμερική. Ο αριθμός αυτός, αναμένεται να αυξηθεί αισθητά τα επόμενα χρόνια εξ αιτίας κυρίως της γήρανσης του πληθυσμού αλλά και των αυξημένων απαιτήσεων ασθενών μικρότερων ηλικιών με προβλήματα χρόνιας αρθρίτιδας και άλλων εκφυλιστικών ασθενειών.[12, 13, 15]

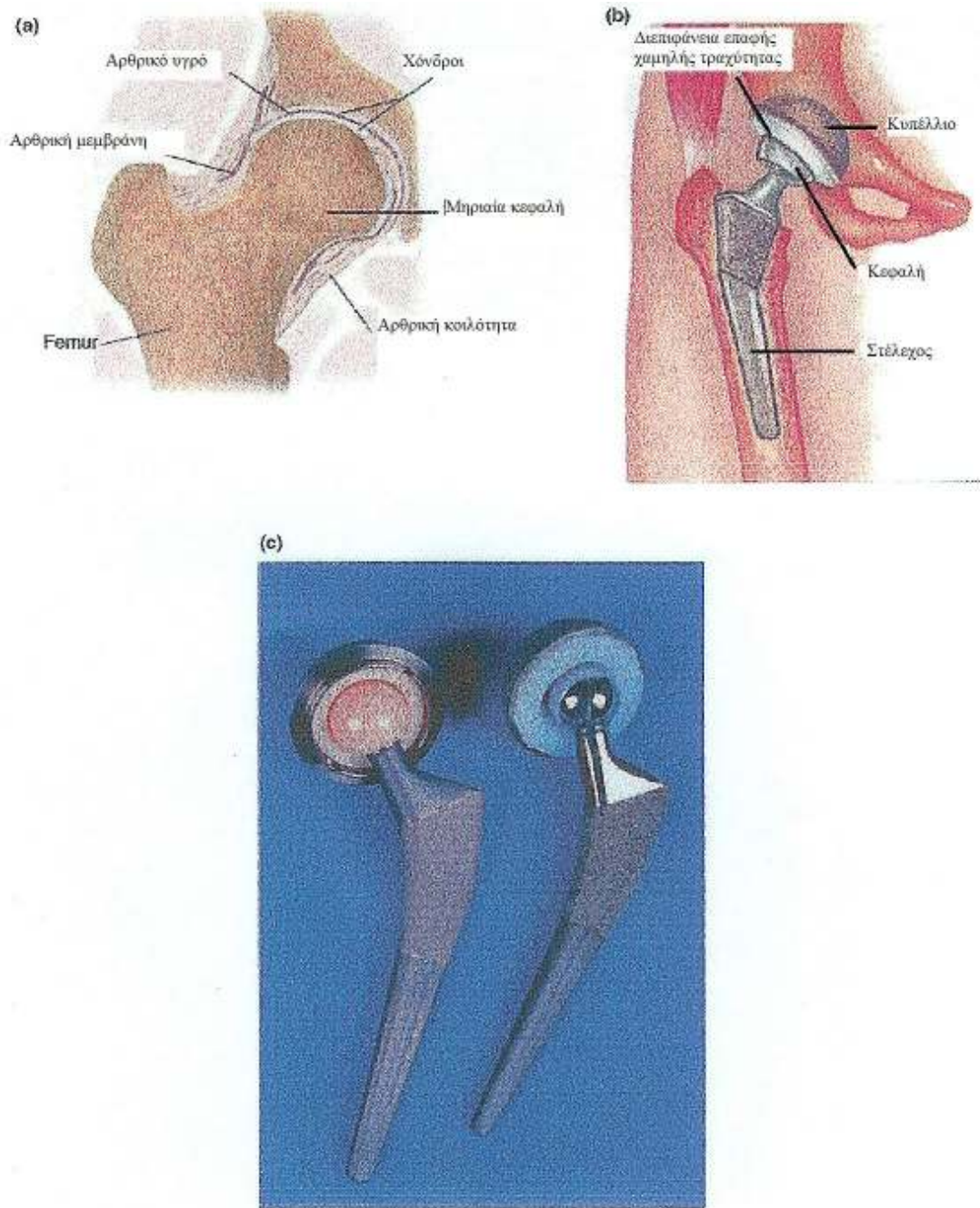
Για όλους τους πάσχοντες, η σύγχρονη ιατρική είναι σήμερα σε θέση να προσφέρει αξιόπιστες και άκρως λειτουργικές λύσεις, με εμφυτεύματα που αντέχουν

σε μεγάλες καταπονήσεις και ικανά να διαρκούν και να λειτουργούν ικανοποιητικά για αρκετά χρόνια. Ο μέσος όρος ζωής ενός εμφυτεύματος κυμαίνεται μεταξύ των 10 και 15 ετών, ενώ το 25% των ΤΗΑ που γίνονται ετησίως, αποτελούν μετεγχειρητικές επεμβάσεις λόγω πρόωρης αστοχίας ή εξάρθρωσης του εμφυτεύματος, αποτέλεσμα του φαινομένου της χαλάρωσης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στα μικροσκοπικά σωματίδια που παράγονται σταδιακά κατά την τριβή των συνεργαζόμενων επιφανειών του συνδέσμου, τα οποία με τον καιρό επικάθονται στους περιβάλλοντες ιστούς.

Τα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σαν μια εναλλακτική πρόταση απέναντι στα μεταλλικά κράματα. Στις αρχές της δεκαετίας του '70 εισήχθη στο χώρο της προσθετικής ιατρικής η αλουμίνα, ενώ μια δεκαετία αργότερα εμφανίστηκε ένα νέο και πολλά υποσχόμενο κεραμικό υλικό, η ζirkονία. Σήμερα, η αλουμίνα αποτελεί το ευρύτερα διαδεδομένο κεραμικό υλικό στην ολική αρθροπλαστική ισχίου. Υπολογίζεται ότι από το 2005, πάνω από 5 εκατ. μηριαίες κεφαλές και περισσότερα από 500,000 κοτυλιδικά κελύφη έχουν κατασκευαστεί από το υλικό αυτό παγκοσμίως. Το πλεονέκτημα της χρήσης κεραμικών υλικών είναι η μεγάλη μείωση του ρυθμού φθοράς των ενεργών επιφανειών στην προσθετική ισχίου. Τα χαμηλά επίπεδα φθοράς είναι επιθυμητά από μηχανική αλλά και από κλινική πλευρά, περιορίζοντας στο ελάχιστο τα υποπροϊόντα τριβής και κατά επέκταση το φαινόμενο της χαλάρωσης και της απώλειας οστικής μάζας.

Κατά αυτόν τον τρόπο, μειώνεται και ο αριθμός μετεγχειρητικών επεμβάσεων, οι οποίες καταπονούν ιδιαίτερα τους ασθενείς και εγκυμονούν επιπρόσθετους κινδύνους εμφάνισης παράπλευρων νοσημάτων.

Καθώς ο αριθμός των επεμβάσεων ΤΗΑ σε νέους και δραστήριους ασθενείς αυξάνει συνεχώς, η μείωση των φαινομένων φθοράς στα σύγχρονα εμφυτεύματα (Σχήμα 2.2) αποτελεί εξαιρετικά σημαντικό παράγοντα προς την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των κεραμικών υλικών. Στον αντίποδα αυτής της κατηγορίας υλικών βρίσκονται και μερικά σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία δυσχεραίνουν και περιορίζουν τη χρήση τους στη σύγχρονη προσθετική ιατρική. Το σημαντικότερο εξ' αυτών αποτελεί η ψαθυρότητα, η οποία μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της χαλάρωσης του τεχνητού συνδέσμου και τελικά στην αστοχία αυτού.



Σχήμα 2.2 α) Απεικόνιση του ισχιακού συνδέσμου. β) Τεχνητή άρθρωση ισχίου γ) Ολικά εμφυτεύματα ισχίου κεραμικό με κεραμικό (αριστερά) και μεταλλικής κεφαλής με κάλυμμα (δεξιά).



## 2.3 Κατηγορίες υλικών για THA

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των συνεργαζόμενων επιφανειών ενός τεχνητού εμφυτεύματος, πρέπει να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες και να υπακούν σε αυστηρά ποιοτικά κριτήρια. Οι βασικές κατηγορίες των επιθυμητών χαρακτηριστικών ενός σύγχρονου βιοϋλικού είναι (Σχήμα 2.3):

- Υψηλή μηχανική αντοχή, μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, υψηλή αντοχή σε κόπωση και μεγάλο παράγοντα έντασης τάσεως. Ένας από τους κύριους στόχους αποτελεί η καλύτερη δυνατή αντοχή απέναντι στα επιβαλλόμενα φορτία και η εξάλειψη των παραμορφώσεων του υλικού. Τα φορτία με τα οποία καταπονείται ένα μέσο τεχνητό εμφύτευμα ποικίλλει από 3 έως και 8 φορές το βάρος του ανθρώπινου σώματος.
- Υψηλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά για τη μακρόχρονη και σωστή λειτουργία του εμφυτεύματος, καθώς και υψηλή βιοσυμβατότητα.
- Υψηλή σκληρότητα και άριστο φινίρισμα των συνεργαζόμενων επιφανειών για τη μέγιστη αντοχή σε φθορά και την επίτευξη μικρού συντελεστή τριβής.
- Τέλος, απαιτείται καλή λίπανση του συνδέσμου, άριστη συναρμογή και μικρή γωνία εισόδου του αρθρικού υγρού στον ενδιάμεσο χώρο του εμφυτεύματος.

Είναι δε απαραίτητο το υλικό να διατηρεί μια σταθερή απόδοση ως προς τις ανωτέρω ιδιότητες για περισσότερα από 10 χρόνια ενεργούς δράσης (in vivo), καθώς σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία, κάθε τεχνητό εμφύτευμα υπόκειται σε πάνω από 2 εκατομμύρια κύκλους επιβαλλόμενου φορτίου ανά έτος.

Τα σύγχρονα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στη παρασκευή ολικών εμφυτευμάτων ισχίου, χωρίζονται στις ακόλουθες κύριες κατηγορίες :

- Μεταλλικά κράματα, οι ανοξείδωτοι χάλυβες καθώς και κράματα τιτανίου με επικρατέστερο το κράμα Ti-6Al-4V. Τα υλικά αυτά σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα οξειδίου πάχους μερικών νανομέτρων στην επιφάνεια των μηριαίων κεφαλών ή των αντίστοιχων συνεργαζόμενων επιφανειών στη περίπτωση των ολικών αρθροπλαστικών γονάτου.

- Μονοκρύσταλλοι κεραμικών οξειδίων όπως η αλουμίνα και η ζirkονία , ή και κεραμικών ελλείπει οξυγόνου, όπως το νιτρίδιο του πυριτίου  $\text{Si}_3\text{N}_4$  το οποίο χρησιμοποιείται σε προσθετικές ισχίου και γονάτου την τελευταία μόλις δεκαετία. Το τελευταίο σχηματίζει στην επιφάνειά του ένα στρώμα πάχους μερικών νανομέτρων μεγάλης περιεκτικότητας σε οξείδιο του πυριτίου.
- Σύνθετα κεραμικά υλικά όπως η αλουμίνα ενισχυμένη με ζirkονία (ZTA), στην οποία το κεραμικό πλέγμα της αλουμίνας εμπλουτίζεται και ενισχύεται με μια αναλογία ζirkονίας. Το παραγόμενο υλικό εμφανίζει σημαντικά βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς είναι λιγότερο ψαθυρό από τη ζirkονία και την αλουμίνα χωριστά.
- Δύστηκτα μέταλλα με ειδική κατεργασία επιφανείας μέσω οξείδωσης. Τέλειο παράδειγμα αυτής της κατηγορίας υλικών αποτελεί το οξίνιο. Πρόκειται για ζirkόνιο το οποίο μετά την αρχική του κατεργασία στην επιθυμητή γεωμετρία υπόκειται σε επιφανειακή οξείδωση αποκτώντας ένα λεπτό στρώμα κεραμικής ζirkονίας.

Εναλλακτικά τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί πρόσθετες μέθοδοι παρασκευής σύνθετων κεραμικών υλικών, με επιφανειακή επικάλυψη στρώματος από υπέρσκληρα υλικά όπως το νιτρίδιο του τιτανίου και καρβίδια συνθετικών διαμαντιών (DLC).



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση ολικών προσθετικών ισχίου και των συνδυασμών των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα.

## 2. 4 Μηριαίες κεφαλές μεγάλου διαμετρήματος

Η ανάπτυξη νέων μεθόδων παρασκευής πολυαιθυλενίου διασταυρούμενων αλυσίδων (crosslinked PE) έχει αυξήσει θεαματικά τις ικανότητες και την αξιοπιστία των υλικών αυτών. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι σε κοτυλιδικά κελύφη από τέτοια υλικά, τα επίπεδα φθοράς μειώνονται μέχρι και 90%. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών νέας γενιάς αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμες στο χώρο της προσθετικής ιατρικής και τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους σε μια ολική αρθροπλαστική ποικίλλουν. Το μεγαλύτερο εξ αυτών όμως είναι η δυνατότητα κατασκευής μηριαίων κεφαλών μεγαλύτερης διαμέτρου μιμούμενων πιο αποτελεσματικά τη μηχανική μιας φυσικής ισχιακής άρθρωσης.

Τα σύγχρονα τεχνητά εμφυτεύματα οφείλουν την ύπαρξή τους στον Sir Charnley ο οποίος με σκοπό να περιορίσει τα επίπεδα φθοράς χρησιμοποίησε μηριαίες κεφαλές μικρού διαμετρήματος περιορίζοντας όμως την ελευθερία κινήσεων και μειώνοντας την σταθερότητα του συνδέσμου. Μια μικρή μηριαία κεφαλή μπορεί να περιστρέφεται κατά απόσταση ίση με την ακτίνα της πριν το μεταλλικό στέλεχος προσκρούσει στην άκρη της κοτύλης. Εάν και η εφαρμοζόμενη πίεση αυξηθεί τότε ο κίνδυνος να προκληθεί εξάρθρωση είναι μεγάλος. Οι μηριαίες κεφαλές μεγαλύτερης διαμέτρου μπορούν να εξαλείψουν το πρόβλημα. Έχοντας μεγαλύτερη ακτίνα, προσφέρουν μεγαλύτερη επιφάνεια συνεργασίας και επομένως μεγαλύτερη ακτίνα μετατόπισης του συνδέσμου. Οι ασθενείς μπορούν έτσι να τρέξουν ή να ασχοληθούν με άλλα δραστήρια αθλήματα, κάτι που πριν μερικά χρόνια φάνταζε πρακτικά αδύνατο.

## 2.5 Μηριαίες Κεφαλές

### 2.5.1 Κατασκευή μηριαίων κεφαλών

Στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατασκευάστηκαν σε τόρνο CNC, (βλέπε σχ.2.4) μηριαίες κεφαλές από πολυκρυσταλλική αλουμίνα διαμέτρου 22mm και από ανοξείδωτου χάλυβα διαμέτρου 28mm.

Με τη βοήθεια και υποστήριξη του ΕΚΕΠΥ (Ανώνυμη Εταιρεία Τεχνολογικής Ανάπτυξης Κεραμικών και Πυρίμαχων), παρασκευάστηκε το αρχικό τεμάχιο από πολυκρυσταλλική αλουμίνα υψηλής καθαρότητας (99.5%) και χαμηλού πορώδους, σύμφωνα με τα πρότυπα που διέπουν την παρασκευή κεραμικών βιοϋλικών.

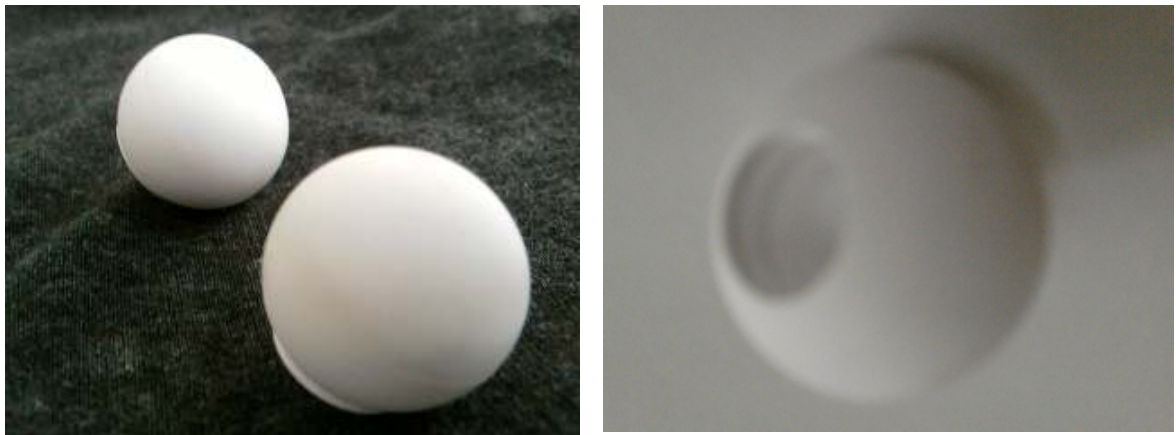


Σχήμα 2.4 Τόρνος CNC της εταιρείας OKUMA του τομέα Τεχνολογία των Κατεργασιών του ΕΜΠ.

## 2.5.2 Τραχύτητα επιφανείας

Στο εργαστήριο S.E.M του τμήματος Τεχνολογίας των Κατεργασιών, έγιναν μετρήσεις των μηριαίων κεφαλών που παρασκευάστηκαν (σχήματα 2.5α,β και 6), με σκοπό να ερευνηθεί η ποιότητα επιφανείας τους μέσω μετρήσεων τραχύτητας. Οι μετρήσεις έγιναν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο της εταιρείας DME (Danish Micro Engineering).

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κάθε κεφαλή, σε καθορισμένα σημεία βάση της προδιαγραφής ISO 7206-2.



Σχήμα 2.5 α) Αριστερά : οι μηριαίες κεφαλές που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο  
β) Δεξιά : Η κεραμική μηριαία κεφαλή με τη διαμόρφωση της εσωτερικής κωνικής οπής.



Σχήμα 2.6 Η μεταλλική μηριαία κεφαλή με τη διαμόρφωση της εσωτερικής κωνικής οπής.

## 2.6 Συμπεράσματα

Τα σύγχρονα κεραμικά υλικά, υπερέχουν σε πολλά σημεία συγκριτικά με τα μεταλλικά κράματα, όσον αφορά στον τομέα της προσθετικής ιατρικής. Η μεγάλη σκληρότητα και η βιοσυμβατότητα που τα χαρακτηρίζει, αποτελούν τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των υλικών αυτών και προσφέρουν νέες προοπτικές στην ανάπτυξη τεχνητών εμφυτευμάτων υψηλών απαιτήσεων. Η αχίλλειος φτέρνα τους είναι η ψαθυρότητα, η οποία ακόμα περιορίζει την χρήση τους και απαιτούνται περαιτέρω μελέτες ως προς την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από αυτό.

Η πρόοδος των τεχνητών εμφυτευμάτων, συγκλίνει προς την επίτευξη τεχνητών αρθρώσεων που θα προσομοιάζουν όσο γίνεται περισσότερο την φύση. Τα μεταλλικά κράματα αποτελούν μια αξιόπιστη και οικονομική λύση και η εφαρμογή τους καλύπτει σήμερα το μεγαλύτερο ποσοστό των εγχειρήσεων που λαμβάνουν χώρα ετησίως. Όμως η υψηλή τους πυκνότητα και ο φόβος πρόκλησης διάφορων παρενεργειών, μεταξύ των οποίων η πρόκληση μερικών μορφών καρκίνου, αναγκάζουν τη σύγχρονη βιομηχανία να προχωρήσει στην εξέλιξη των κεραμικών υλικών. Η προσπάθεια κατασκευής μηριαίων κεφαλών μεγάλου διαμετρήματος (48-55mm) ανάλογες με το μέγεθος της κεφαλής ενός μέσου ενήλικα, βρίσκει ακόμα αρκετά εμπόδια, καθώς η ψαθυρότητα των κεραμικών υλικών δεν επιτρέπει την

κατασκευή κοτυλιδικών κελυφών μικρού πάχους, κάτι που προφανώς περιορίζει τη διάμετρο της κεφαλής. Αντίθετα, το πολυαιθυλένιο υψηλού μοριακού βάρους διασταυρούμενων αλυσίδων, υπερέχει αισθητά στον τομέα αυτό και η χρήση του μοιάζει αναγκαία για τα επόμενα χρόνια.

Τέλος, οι μέθοδοι κατεργασίας των κεραμικών υλικών καθώς και ο παρασκευαστικές μέθοδοι, φαίνεται πως αποτελούν το κλειδί προς την ανάπτυξη στο μέλλον νέων κεραμικών υλικών με πολύ μεγαλύτερη αντοχή στη θραύση. Οι κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων προσφέρουν προϊόντα υψηλών προδιαγραφών και πολύ χαμηλής τραχύτητας επιφανείας. Τα υλικά αυτά σε λίγα χρόνια, πιθανώς να αποσπάσουν το μονοπώλιο στην αγορά της προσθετικής ιατρικής, υπερέχοντας σε όλους τους τομείς.

Προς το παρόν, τα κεραμικά υλικά αποτελούν μια εναλλακτική λύση, με πολύ ικανοποιητική λειτουργικότητα, υψηλή βιοσυμβατότητα και πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή στα επιβαλλόμενα φορτία που καταπονούν τον ανθρώπινο ισχιακό σύνδεσμο.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ**

### **ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ISO**

### 3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας συνάδει με τα πρότυπα πιστοποίησης ISO 7206. Όλες οι παράμετροι που συναντήθηκαν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για τον σχεδιασμό βρίσκονται κατά κύριο λόγο μέσα σε αυτές τις πιστοποιήσεις.

### 3.2 Πρότυπα ISO που χρησιμοποιήθηκαν

- ISO 7206-2 Χειρουργικά εμφυτεύματα – Μερική ή ολική μεταμόσχευση ισχίου. Αρθρωτές επιφάνειες από μεταλλικό, κεραμικό και πλαστικό υλικό.

Σε αυτό το κομμάτι του ISO 7206 διευκρινίζονται οι απαιτήσεις για υγιή και στιβαρό σύνδεσμο μετά την εγχείρηση. Σε αυτό το κομμάτι του ISO 7206-2 διευκρινίζονται πιο συγκεκριμένα οι απαιτήσεις για την διαμόρφωση της τραχύτητας και σφαιρικότητας των μεταλλικών και κεραμικών κεφαλών τεχνητού ισχίου που είναι σε απόλυτη συμφωνία και με το ISO 7206-1.

- ISO 7206-4 Χειρουργικά εμφυτεύματα– Μερική ή ολική μεταμόσχευση ισχίου. Προσδιορισμός της αντοχής του εμφυτεύματος.

Αυτό το κομμάτι του ISO 7206 διευκρινίζει την πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της αντοχής όλων των μερών που αποτελούν το ισχίο, κάτω από συνθήκες εργαστηρίου. Διευκρινίζονται αυτές οι συνθήκες έτσι ώστε οι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα διαφορετικά μέρη να λαμβάνονται όντως υπ όψιν, και περιγράφεται το πώς είναι στημένη η διάταξη για τις μετρήσεις.

Μεθοδολογία: στην κεφαλή του ισχίου ασκείται φορτίο έτσι ώστε να δοκιμάζεται σε στρέψη και κάμψη, μέχρις ότου αστοχήσει ή μέχρι να ολοκληρωθούν οι προγραμματισμένες επαναλήψεις του πειράματος. Το δείγμα εξετάζεται προσεκτικά για ελαττώματα που προκλήθηκαν κατά την φόρτιση. Η διάταξη που χρησιμοποιείται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

Το σφάλμα του ασκούμενου φορτίου δεν ξεπερνά το  $\pm 2\%$  της μέγιστης τιμής που μπορεί να λάβει το φορτίο.

Διατάξεις ελέγχου ηλεκτρονικών συστημάτων, που δείχνουν τις τιμές του μέγιστου και του ελάχιστου φορτίου καθώς και την απόκλιση της κεφαλής του εξεταζόμενου δείγματος με ακρίβεια 0,05 mm, που σταματούν την μηχανή όταν η απόκλιση υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή καθώς και η καταγραφή των αντίστοιχων επαναλήψεων που εκτελούνται ή του συνολικού χρόνου διάρκειας της πειραματικής διαδικασίας.

Οι σφικτήρες που συγκρατούν το δείγμα έχουν δομή και διαστάσεις ώστε να ταιριάζουν στην διάταξη και να εφαρμόζουν πλήρως στην μηχανή και το δείγμα.

Μηχανισμός συγκρατεί το δείγμα από την κεφαλή, και το κρατά ευθυγραμμισμένο κατά την διαδικασία του πειράματος χωρίς να το αφήνει να κουνηθεί από την αρχική θέση ευθυγράμμισης του.

- ISO 7206-10 Χειρουργικά εμφυτεύματα– Μερική ή ολική μεταμόσχευση ισχίου. Προσδιορισμός της αντοχής σε στατική φόρτιση της κεφαλής του τεχνητού ισχίου.

Αυτό το κομμάτι του ISO 7206 αναφέρεται στην κεφαλή του ισχίου μερικής ή ολικής εμφύτευσης, και περιγράφει την μέθοδο προσδιορισμού του φορτίου που απαιτείται, μέσα σε εργαστηριακό περιβάλλον, για να προκαλέσει αστοχία της κεφαλής. Αφορά όλα τα μέρη από μεταλλικό και μη μεταλλικό υλικό.

Μεθοδολογία: ένα στατικό θλιπτικό φορτίο εφαρμόζεται στην κεφαλή του ισχίου και αυξάνεται μέχρις ότου η κεφαλή ή ο λαιμός ή η μεταξύ τους σύνδεση, αστοχήσει ή εφαρμοστεί η μέγιστη δύναμη που έχει οριστεί χωρίς αστοχία του υλικού.

Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιείται και διαφορετική κεφαλή.

Όσον αναφορά στις στατικές καταπονήσεις λαμβάνουμε υπ' όψιν μας τα εξής :

Η διάταξη που χρησιμοποιούμε είναι ικανή να ασκήσει και να καταγράψει την κάθετη θλιπτική δύναμη στο σύστημα με ακρίβεια  $\pm 1\%$  μεταξύ του 20% και 100% του εύρους τιμών της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε.

Όλα τα μέρη της διάταξης που έρχονται σε επαφή κατά τη διάρκεια της άσκησης του φορτίου, είναι ικανά να αντέξουν το μέγεθος της παραμόρφωσης έως και το όριο θραύσης του υλικού της κεφαλής (έως 200kN). Είναι τοποθετημένα έτσι ώστε το κέντρο του φορτίου και το κέντρο της κεφαλής να είναι απολύτως ευθυγραμμισμένα.

Η κωνική επιφάνεια που χρησιμοποιείται είναι συγκεκριμένων διαστάσεων και αποτελείται από μέταλλο σκληρότητας μεταξύ 150HB και 200 HB.

Αυτό που χρησιμοποιείται ως ο λαιμός του ισχίου έχει τις ίδιες διαστάσεις, είναι κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό, με τα ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά με τον πραγματικό τεχνητό λαιμό του εμφυτεύματος.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ**

**Εμβιομηχανική & θεωρία πεπερασμένων στοιχείων**

## 4.1 Εμβιομηχανική

Με τον όρο εμβιομηχανική εννοούμε την εφαρμογή των γνώσεων κλάδων της Μηχανικής (Στατική, Ρομποτική, Μηχανική των Ρευστών κτλ) για τη μελέτη του ανθρώπινου σώματος και των προβλημάτων που αντιμετωπίζει, με σκοπό πάντα την βελτίωση της ζωής του ανθρώπου. Φυσικά, ο κλάδος της εμβιομηχανικής είναι διεπιστημονικός και ασχολούνται με αυτόν συνεργαζόμενοι επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων, κυρίως βιολόγοι, ιατροί, μηχανικοί και φυσικοί.

## 4.2 Πεπερασμένα στοιχεία

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων και έγινε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Clough, ο Ritz και άλλοι.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.
- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- Όταν τελειώσει η επίλυση και διαμορφωθούν τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

#### 4.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην εμβιομηχανική και τη μελέτη του τεχνητού ισχίου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σημαντικό εργαλείο σε πολλές δραστηριότητες του μηχανικού. Πρόκειται για μια μέθοδο καλά δοκιμασμένη, που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό πληθώρας προϊόντων – από ηλεκτρονικά συστήματα μέχρι μεγάλες κατασκευές κτηρίων.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά το 1950 στην αεροπορική βιομηχανία, στην οποία εξακολουθεί μέχρι σήμερα να εφαρμόζεται ευρέως για τη σχεδίαση σημαντικών εξαρτημάτων του αεροπλάνου. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου στον τομέα της εμβιομηχανικής έγινε το 1972. Από τότε ο αριθμός των εφαρμογών στο συγκεκριμένο τομέα έχει πολλαπλασιαστεί με σκοπό τη λεπτομερειακή μελέτη και ανάλυση της συμπεριφοράς των ανθρωπίνων οργάνων.

Η αύξηση της υπολογιστικής ικανότητας των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) δίνει τη δυνατότητα μελέτης και ανάλυσης όλο και συνθετότερων προβλημάτων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται και η μελέτη του ισχίου. Μπορούν να γίνουν επίσης πειραματικές και κλινικές μελέτες που θα μπορούσαν να θεωρηθούν επαρκείς, ωστόσο, η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία δίνει πληροφορίες που

τα εργαστηριακά πειράματα αδυνατούν να δώσουν. Για παράδειγμα, επιτρέπει τη μελέτη ενός τεραστίου εύρους και συνδυασμού φυσιολογικών συνθηκών που βοηθά στην καλύτερη και σε βάθος κατανόηση της εμβιομηχανικής του συστήματος. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα μελέτης διαφορετικών μεθόδων θεραπείας και χειρουργικών επεμβάσεων, χωρίς κανένα κόστος για την υγεία του ασθενούς, βοηθώντας με τον τρόπο αυτό στην επιλογή της καταλληλότερης θεραπείας ή χειρουργικής επέμβασης. Τέλος, βοηθά στη βελτίωση των εμφυτευμάτων που χρησιμοποιούνται από τους ιατρούς.

#### 4.4 Γενική Περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική μέθοδος της αριθμητικής ανάλυσης. Μέσω αυτής, γίνεται φυσική προσέγγιση του προβλήματος διαμερίζοντας το χώρο σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία στα οποία ορίζονται εξισώσεις που έχουν ακριβή λύση. Λόγω του ότι τα προβλήματα της μηχανικής του παραμορφώσιμου στερεού περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις μερικών παραγώγων, μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα προβλήματα της μηχανικής προκύπτουν από άλλες σχέσεις όπως οι παρακάτω [10], [11]:

Σύνδεση ανηγμένων παραμορφώσεων-μετατοπίσεων:

$$\varepsilon_x = \frac{\theta_u}{\theta_x} \quad \varepsilon_y = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad \varepsilon_z = \frac{\theta_u}{\theta_z}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\theta_w}{\theta_y} + \frac{\theta_v}{\theta_z} \quad \gamma_{xz} = \frac{\theta_w}{\theta_x} + \frac{\theta_v}{\theta_z} \quad \gamma_{xy} = \frac{\theta_u}{\theta_y} + \frac{\theta_v}{\theta_x}$$

Εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων:



$$\frac{\theta^2 \varepsilon_i}{\theta_j^2} + \frac{\theta^2 \varepsilon_j}{\theta_i^2} = \frac{\theta^2 \gamma_{i,j}}{\theta_j \theta_i}$$

όπου τα  $i, j$  είναι  $x, y$  ή  $y, z$  ή  $z, x$ .

Εξισώσεις ισορροπίας:

$$\frac{\theta \sigma_{ix}}{\theta x} + \frac{\theta \sigma_{iy}}{\theta y} + \frac{\theta \sigma_{iz}}{\theta z} + F_i = 0$$

, όπου τα  $i=x,y,z$  και  $F_i$  οι μαζικές δυνάμεις.

Κάθε πρόβλημα όμως που εκφράζεται με διαφορικές εξισώσεις έχει κάποιες συνοριακές συνθήκες. Έτσι, και στα συγκεκριμένα προβλήματα έχουμε συνοριακές όπως φυσικές συνοριακές συνθήκες (φορτίσεις κλπ) και βασικές συνοριακές συνθήκες (συνθήκες Dirichlet και Neumann) (δεσμεύσεις, στηρίξεις κλπ.).

Συνοριακές συνθήκες  $\sigma_{ij} * n_j = G_j$  όπου  $n$  στο σύνορο και  $G_i$  η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας στο σύνορο.

Επίσης  $u_i = F_i$ , η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι το διάνυσμα των μετατοπίσεων ορίζεται σε περιοχές του σώματος.

Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η αρχή των δυνατών έργων [12], [13]. Έστω  $\sigma_{ij}$  και  $\varepsilon_{ij}$  είναι οι τανυστές των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων αντίστοιχα και  $P_i$ ,  $d_i$  είναι τα φορτία και οι δυνατές μετακινήσεις. Το έργο που προκαλείται από τα φορτία πρέπει να ισούται με το δυνατό έργο των παραμορφώσεων. Δηλαδή:

$$\sum P_i d_i = \int \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} dV$$

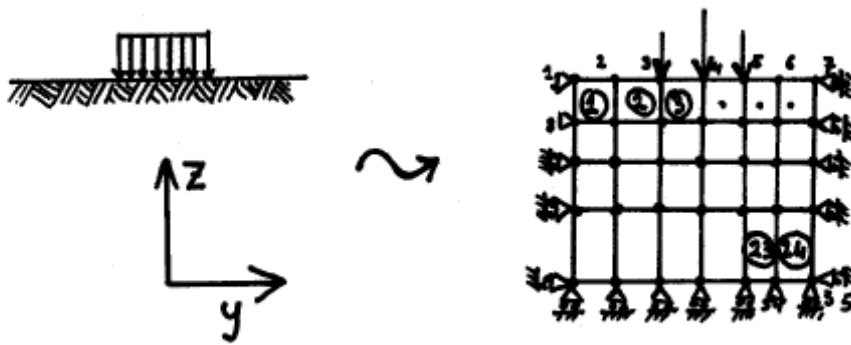
Προκειμένου να καταστρωθεί το πρόβλημα των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να χωριστεί το πεδίο του προβλήματος – το οποίο καταλαμβάνει κάποιο

πεπερασμένο όγκο – σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων απλούστερου σχήματος. Καθένα από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία χωρίζεται το πεδίο του προβλήματος αποτελείται από κάποιο αριθμό κόμβων (π.χ. στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δεκακομβικά τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία). Κάθε κόμβος έχει κάποιους βαθμούς ελευθερίας. Το πρόβλημα, λοιπόν, ανάγεται στην απόδοση τιμών σε αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας. Τα στοιχεία συναρμολογούνται σε κάποιους κοινούς βαθμούς ελευθερίας (ή κόμβους). Έτσι σε έναν κόμβο μπορεί να συνδέονται 2, 3 ή και παραπάνω στοιχεία. Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής [12] [13]:

$$[K] \cdot u = F$$

Όπου  $u$  είναι διάνυσμα διάστασης  $n$ , όπου το  $n$  ισούται με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος. Κάποιοι από τους βαθμούς ελευθερίας είναι δεσμευμένοι και αποτελούν τις συνθήκες Dirichlet. Το  $F$  είναι επίσης διάνυσμα διάστασης  $n$  και περιέχει τις συνοριακές συνθήκες των φορτίσεων, δηλαδή δυνάμεις στους κόμβους πιέσεις στις πλευρές των στοιχείων και μαζικές δυνάμεις. Ο πίνακας  $[K]$  έχει  $n \times n$  διαστάσεις και ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας. Ο πίνακας  $[K]$  περιλαμβάνει τη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητες των υλικών του προβλήματος. Ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας διότι δείχνει τη δυσκαμψία του προβλήματος να αντιδράσει σε κάποια εξωτερική φόρτιση – ή αλλιώς δείχνει την απόκριση του συστήματος σε εξωτερικά αίτια. Τελικά, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα επιλύεται το παραπάνω σύστημα εξισώσεων ως προς  $u$ . Αφού προσδιοριστούν οι τιμές των  $u$  με κατάλληλες αναγωγές μπορούν να προκύψουν και άλλα παράγωγα μεγέθη όπως οι τάσεις.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται σχηματοποιημένα η κατάστροψη ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία. Φαίνεται το πεδίο του προβλήματος, η διακριτοποίησή του σε πεπερασμένα στοιχεία που συναρμολογούνται από κόμβους, οι συνοριακές συνθήκες καθώς και ένα απομονωμένο στοιχείο με τους τοπικούς και καθολικούς βαθμούς ελευθερίας.

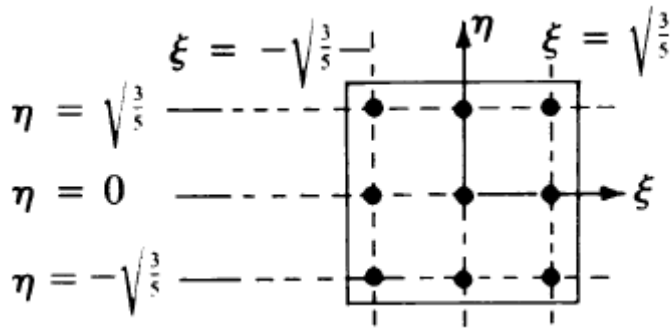


Σχήμα 4.1. Κατάστροψη προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία

#### 4.4.1 Σχηματισμός πίνακα δυσκαμψίας

Προκειμένου να σχηματιστεί ο πίνακας δυσκαμψίας  $[K]$  γίνεται συναρμολόγηση πολλών επιμέρους πινάκων  $[K_i]$  κάθε στοιχείου. Για να σχηματιστούν οι πίνακες  $[K_i]$  χρησιμοποιείται η αριθμητική ολοκλήρωση με τη μέθοδο των σημείων Gauss. Για να διευκολύνουμε τους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε πολυώνυμα τα οποία είναι εύκολα ολοκληρώσιμα - παραγωγίσιμα. Τα πολυώνυμα αυτά ονομάζονται πολυώνυμα μορφής. Ανάλογα με το βαθμό των πολυωνύμων λαμβάνεται και ανάλογη τάξη στα στοιχεία. Έτσι κάνοντας χρήση πολυωνύμων πρώτου βαθμού, στα στερεά προκύπτουν κυβικά στοιχεία 8 κόμβων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία ανώτερης τάξης όπως κυβικά στοιχεία 20 κόμβων. Μεγαλύτερη τάξη στοιχείων σημαίνει καλύτερη ακρίβεια στη λύση. Η ακρίβεια στη λύση μπορεί να επιτευχθεί και πυκνώνοντας το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πολυώνυμα μορφής εκφράζονται σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων  $(\xi, \eta, \zeta)$  το οποίο έχει κέντρο στο εσωτερικό του στοιχείου. Οι τιμές των συντεταγμένων στο τοπικό σύστημα παίρνουν τιμές από -1 έως 1. Τα πολυώνυμα μορφής παραγωγίζονται εύκολα ως προς τα  $(\xi, \eta, \zeta)$  και σχηματίζουν τα μητρώα  $[B_i]$  με τις παραγώγους

Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα σημεία ολοκλήρωσης Gauss για ένα δισδιάστατο στοιχείο. Για τρισδιάστατα στοιχεία υπάρχουν τρία τέτοια διατεταγμένα επίπεδα.



Σχήμα 4.2. Σημεία ολοκλήρωσης Gauss σε ένα επίπεδο στοιχείο

Προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια ολοκλήρωσης με τη μέθοδο Gauss αυξάνεται ο αριθμός σημείων ολοκλήρωσης. Ο τελικός τύπος για το σχηματισμό του μητρώου δυσκαμψίας ενός στοιχείου  $[K_e]$  είναι:

$$K_e = \int_V [B]^T [D] [B] dV$$

Ο παραπάνω τύπος με τη βοήθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης μπορεί να γραφεί σαν άθροισμα διακριτών όρων:

$$K_e = \sum_{i=1}^n H_i [B(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)]^T [D] [B(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)] |J(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)|$$

Οι  $H_i$  είναι συντελεστές της ολοκλήρωσης Gauss σε  $n$  διακριτά σημεία με συντεταγμένες  $(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)$ , ενώ η  $J$  είναι η Ιακωβιανή μετασχηματισμού από το καθολικό σύστημα συντεταγμένων  $X, Y, Z$  στο  $\xi, \eta, \zeta$ . Το  $[D]$  είναι ένα μητρώο που υπολογίζεται από τις ελαστικές σταθερές  $E, \nu$ .

#### 4.4.2 Επίλυση του συστήματος

Αφού επιλυθεί το σύστημα  $[K] \cdot u = F$  προκύπτουν οι τιμές των  $u$ . Ας θεωρήσουμε ότι τα  $u$  είναι μετατοπίσεις στους βαθμούς ελευθερίας (κατά  $x, y, z$  στους κόμβους). Μετά την επίλυση, πέραν των μετατοπίσεων, χρήσιμα μεγέθη είναι και οι τάσεις καθώς και διάφορα άλλα παράγωγα μεγέθη. Με αριθμητικές παραγωγίσεις του πεδίου είναι δυνατό να υπολογιστούν οι ανηγμένες παραμορφώσεις και οι τάσεις στο πεδίο του προβλήματος. Η κατανομή του πεδίου των μετατοπίσεων είναι συνεχής, δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τα παράγωγα μεγέθη τα οποία ενδέχεται να μην έχουν συνέχεια. Σε περίπτωση που τα πολυώνυμα μορφής είναι 1ου βαθμού, οι παράγωγοι είναι σταθεροί αριθμοί και η κατανομή τους για κάποιο στοιχείο είναι σταθερή.

Φαίνεται λοιπόν ότι με αύξηση της τάξης του μεγέθους των στοιχείων, βελτιώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ**

### **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ FEM**

## 5.1 Εισαγωγή

### Σύντομη ιστορική αναδρομή του κώδικα LS-DYNA

Η πρώτη έκδοση του προγράμματος LS-DYNA 3D εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην αγορά από το 1976 από το Lawrence Livermore National Laboratory . Η βασική χρήση του αφορούσε την μελέτη συγκρούσεων βαριών συμπαγών κατασκευών υπό μικρές όμως αναπτυσσόμενες ταχύτητες. Την εποχή εκείνη όμως η επιστήμη των υπολογιστών βρισκόταν ακόμα στα πρώτα στάδια ανάπτυξής της, οπότε ο χρόνος που απαιτούνταν για την μελέτη μιας τέτοιας εφαρμογής ήταν απαγορευτικά μεγάλος για την χρήση του προγράμματος. Η πρώτη έκδοση του προγράμματος έδινε στον χρήστη περιορισμένες δυνατότητες οι οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε τυπικά και απλά προβλήματα αλλά όχι σε περιπτώσεις σύνθετων κατασκευών που απαιτούσαν τη χρήση πολλών ειδών πεπερασμένων στοιχείων πολύπλοκης μορφής που ανέβαζε εκθετικά το μέσο χρόνο υπολογισμού τους κατά την ανάλυσή τους. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών καθώς και άλλων που εμφανιζόταν με το πέρασμα των χρόνων, ο κώδικας εξελισσόταν και βελτιωνόταν συνεχώς με την προσθήκη πολλών νέων δυνατοτήτων και την βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχουσών για να φτάσουμε στην τελευταία έκδοση που χρησιμοποιούμε σήμερα, η οποία αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στα χέρια των ερευνητών με ευρεία χρήση τόσο σε πανεπιστημιακά όσο και σε βιομηχανικά εργαστήρια.

#### 5.1.1 Μοντέλα

- Μοντέλα πρόβλεψης

Πριν την εισαγωγή της τεχνολογίας των μοντέλων πρόβλεψης , η μελέτη, ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση του τρόπου κατάρρευσης διαφόρων κατασκευών βασιζόταν αποκλειστικά στην πειραματική μέθοδο. Οι πειραματικές μέθοδοι όμως είναι χρονοβόρες επειδή απαιτούν μεγάλο αριθμό πολύπλοκων διατάξεων για να επιτευχθούν και συνάμα δαπανηρές αφού οι περισσότερες είναι καταστροφικές μέθοδοι πράγμα που σημαίνει ότι πριν από κάθε πείραμα απαιτείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός νέου δοκιμίου .Το κενό αυτό στον έλεγχο των κατασκευών ήρθε να

καλύπτει η εισαγωγή των μοντέλων πρόβλεψης τα οποία επιτρέπουν στον ερευνητή να μελετά την κατάρρευση των δοκιμών του με τρόπο γρήγορο, εύχρηστο που μπορεί άμεσα να επαναληφθεί σε συνθήκες εργαστηρίου και να λαμβάνει πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα αφού το σφάλμα των μεθόδων αυτών έχει υπολογιστεί ότι δεν ξεπερνά το 10%.

Τα κυριότερα μοντέλα πρόβλεψης τα οποία είναι γνωστά μέχρι σήμερα είναι τα μοντέλα συγκεντρωμένης μάζας –ελατηρίου, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και τα υβριδικά μοντέλα. Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας καθενός από τα παραπάνω μοντέλα.

- Μοντέλα συγκεντρωμένης μάζας-ελατηρίου

Τα μοντέλα συγκεντρωμένης μάζας-ελατηρίου, γνωστά και ως Lumped Mass-Spring (L.M.S.) είναι τα πιο απλοϊκά από τις τρεις κατηγορίες αφού περιλαμβάνουν μονοδιάστατα μοντέλα συγκεντρωμένων μαζών και ελατηρίων. Τα ελατήρια τα οποία είναι μη γραμμικά, στο σύνολό τους, χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση της ενέργειας των δοκιμών μελών του συστήματος. Σημαντικός παράγοντας είναι ο υπολογισμός της σταθεράς των ελατηρίων αυτών, που συνήθως γίνεται με στατικές δοκιμές θλίψης ή κάποιες φορές μπορεί να υπολογισθεί εμπειρικά.. Όταν λοιπόν με τον έναν ή με τον άλλον τρόπο οι σταθερές σύνθλιψης είναι γνωστές από τον ερευνητή τα μοντέλα L.M.S. μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα ως πρόβλεψης με ικανοποιητική αξιοπιστία. Αυτό όμως συμβαίνει μόνο σε περιπτώσεις σχεδιασμού ή επανασχεδιασμού ήδη γνωστών κατασκευών. Η αποτελεσματικότητά τους περιορίζεται σημαντικά στην περίπτωση σχεδιασμού νέων κατασκευών ή κατασκευών των οποίων τα χαρακτηριστικά σύνθλιψης και οι μηχανισμοί κατάρρευσης είναι άγνωστα στο επίπεδο ολόκληρου συστήματος. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι όπως προαναφέραμε αποτελείται από μονοδιάστατα μοντέλα τα οποία δεν είναι δυνατόν αν γενικευθούν για δισδιάστατες ή τρισδιάστατες κατασκευές που απαιτείται για την μελέτη ασύμμετρων και γενικότερα πολύπλοκων μηχανισμών κατάρρευσης. Εξαρτώνται δηλαδή εξ ολοκλήρου από την διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου η οποία όμως δεν είναι σταθερή στην πράξη αφού τα φαινόμενα σύνθλιψης είναι γενικά ανισότροπα και δύσκολα προσδιορίζονται εκ των προτέρων οι απαιτούμενες παράμετροι στην περίπτωση της σύνθετης φόρτισης. Η μέθοδος όμως αυτή δεν παύει να είναι απλούστερη και πιο εύχρηστη από



όλες και προτιμάτε από τις υπόλοιπες όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν να χρησιμοποιηθεί.

- Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

Μια γενίκευση των μοντέλων L.M.S αποτελεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που σκοπό έχει να ξεπεράσει το εμπόδιο της μονοδιάστατης ανάλυσης και να διευρύνει τους ορίζοντές της και στις τρεις διαστάσεις γενικεύοντας έτσι την χρήση της. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει γραμμικά και μη γραμμικά πακέτα η ανάλυση των οποίων γίνεται εξ ολοκλήρου με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η χρήση τους έχει ξεκινήσει εδώ και πολλά χρόνια με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε θλίψη διαφόρων κατασκευών και τη μελέτη ολόκληρων συστημάτων αλλά και μεμονωμένων συνιστωσών τους. Οι μελέτες που έχουν γίνει πάνω στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσπάθησαν να προβλέψουν τον τρόπο κατάρρευσης και το μηχανισμό σύνθλιψης με δεδομένα γενικές κατευθύνσεις που αφορούν τα φαινόμενα αυτά. Όμως ακόμα και σήμερα η επιστήμη δεν μπορεί να αποφανθεί στο κατά πόσο ακριβή είναι τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής αφού αμφισβητείται η αξιοπιστία των προγραμμάτων που εξυπηρετούν τον σκοπό αυτό καθώς και η ικανότητά τους να περιγράψουν και να προβλέψουν σαφώς τις παραμέτρους σχεδίασης, δηλαδή τις τάσεις, τις παραμορφώσεις και τις αναπτυσσόμενες ροπές.

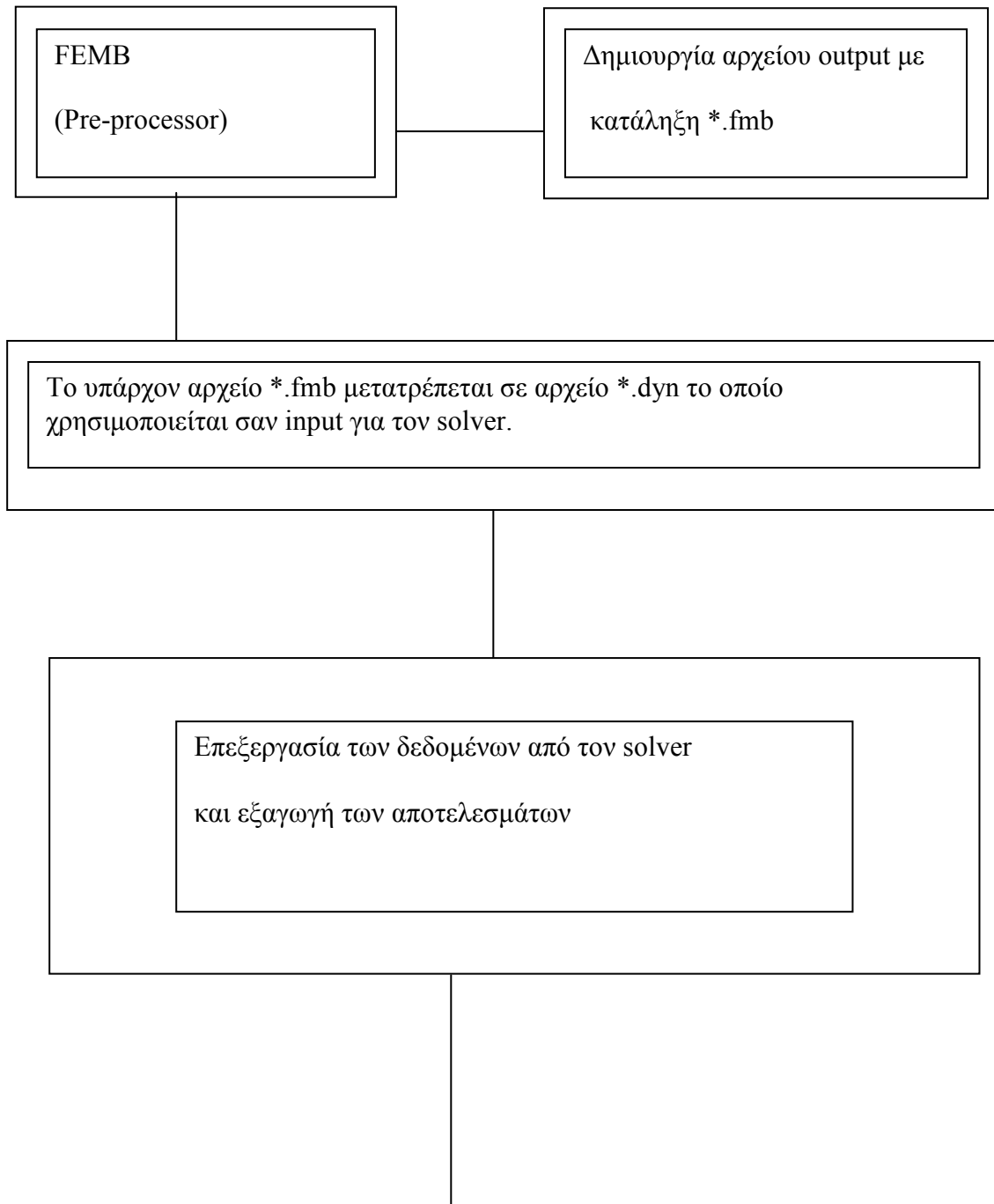
Τα παραπάνω προβλήματα βασίζονται κυρίως στο γεγονός ότι μέχρι και σήμερα δεν έχουν διατυπωθεί ενοποιημένες θεωρίες, οι οποίες να διέπουν τις καταστατικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των υλικών σε περιπτώσεις σύνθετης φόρτισης στη μη-γραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης –παραμόρφωσης. Όμως επειδή η επιστήμη αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς, τέτοιες δυσκολίες αναμένονται να ξεπεραστούν στο άμεσο μέλλον, οπότε και η αξιοπιστία των προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για τα μοντέλα πρόβλεψης πεπερασμένων στοιχείων ενδέχεται να βελτιωθεί σημαντικά και σε συνδυασμό με την γενικότητα της χρήσης τους είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα εξελιχθούν σε πανίσχυρα πακέτα.

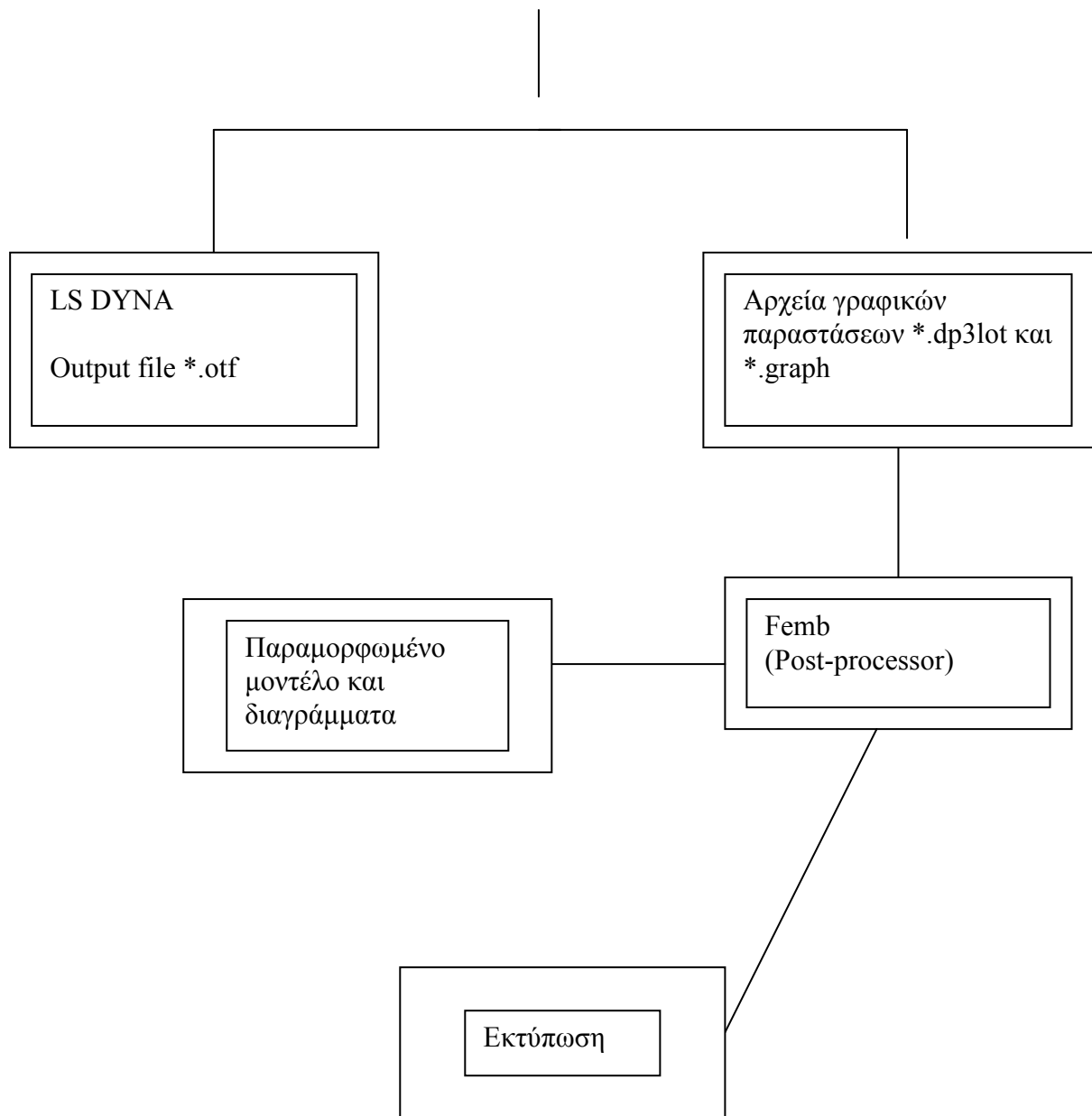
- Υβριδικά μοντέλα

Σαν μια ενδιάμεση λύση μεταξύ της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και της μεθόδου του L.M.S παρουσιάστηκε η μέθοδος των υβριδικών μοντέλων η οποία φιλοδοξεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της απλότητας της μεθόδου L.M.S με τις επαναληπτικές διαδικασίες των προγραμμάτων των πεπερασμένων στοιχείων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η γενίκευση του μοντέλου L.M.S σε δύο ή και τρεις διαστάσεις αφού πλέον τα χαρακτηριστικά σύνθλιψης των δομικών μελών υπολογίζονται μέσω προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων που είναι σαφώς πιο αξιόπιστα και εύκολα να γενικευθούν από τις παλαιότερες πειραματικές μεθόδους. Το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή είναι ότι δεν κατάφερε να απαλλαγθεί από τον περιορισμό της εξάρτησής της από την διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου που εμφανίζεται λόγω της χρήσης ελατηρίων με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ούτε και από τα θεωρητικά προβλήματα που παρουσιάζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στην προσπάθεια, δηλαδή, να ενοποιηθούν τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων, αναγκαστικά συμπαρασύρθηκαν και κάποια από τα μειονεκτήματα τους. Όμως συνεχείς μελέτες που γίνονται στον τομέα αυτό έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της μεθόδου της οποίας το ενδιαφέρον από την πλευρά της επιστήμης ανανεώνεται ολοένα και πιο πολύ.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για καθένα εκ των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτά ελήφθησαν με την βοήθεια του Post Processor του LS-DYNA και αφορούν την παραμόρφωση του πλέγματος των υπό εξέταση δοκιμίων κατά την διάρκεια των δοκιμών, το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης καθώς και την ανάλυση του τασικού πεδίου. Όλα τα αποτελέσματα συνοδεύονται από μετρήσεις, διαγράμματα και κατατοπιστικές εικόνες.

## 5.2 Λειτουργία του κώδικα LS-DYNA





Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, βλέπουμε ότι δύο είναι τα βασικά μέρη του προγράμματος τα οποία συντελούν στην μοντελοποίηση. Αρχικά το FEMB που χωρίζεται σε pre-processor και post-processor ανάμεσα σε αυτά τα δύο, πάντα με βάση το διάγραμμα, παρεμβάλλεται ο solver του προγράμματος. Ο solver μας δίνει αποτελέσματα υπό την μορφή διαγραμμάτων των διαφόρων μεγεθών με το χρόνο, καθώς και την μορφή του παραμορφωμένου δοκιμίου σε κάθε χρονική στιγμή.

Ακόμη, μια άλλη δυνατότητα που μας παρέχει το πρόγραμμα LS-DYNA είναι ο text editor με τον οποίο μπορούμε να παρέμβουμε ήδη σε ένα δημιουργημένο

αρχείο \*.dyn και να κάνουμε διαφοροποιήσεις στον κώδικα. Αυτές οι διαφοροποιήσεις μπορεί να είναι από απλές αλλαγές στις τιμές μεγεθών μέχρι την εισαγωγή πιο σύνθετων δεδομένων που έχουν ενσωματωθεί στα μενού του femb( μοντελοποίηση δυναμικού μοντέλου αντί στατικού, δημιουργία νέου τύπου υλικού κ.τ.λ.) [12-15].

### 5.3 Στοιχεία του μοντέλου

Τα βήματα που ακολουθήσαμε για την διακριτοποίηση του μοντέλου μας στο LS-DYNA είναι τα εξής :

Ξεκινώντας από τον pre-processor του femb κατασκευάζουμε την βασική γεωμετρία του μοντέλου μας δίνοντας τις διαστάσεις του.

Αφού ολοκληρώσουμε τον γεωμετρικό σχεδιασμό προχωρούμε στην διακριτοποίηση του μοντέλου, το χωρίζουμε δηλαδή σε πεπερασμένα στοιχεία.

Ορίζουμε τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων του πλέγματος.

Ορίζουμε τα υλικά τα οποία είναι κατασκευασμένα τα διάφορα τμήματα του μοντέλου καθώς και των φυσικών ιδιοτήτων τους.

Τέλος, δίνουμε τον τρόπο φόρτισης.

Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, έχουμε δημιουργήσει ένα αρχείο με κατάληξη \*.fmb το οποίο και χρησιμοποιούμε στη φάση του σχεδιασμού. Το αρχείο πρέπει να μετατραπεί σε αρχείο κατάληξης \*.dyn και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σαν input από τον solver του προγράμματος. Το αρχείο \*.dyn όπως αναφέραμε προηγουμένως μπορεί να επεξεργαστεί και από τον text editor. Αφού ολοκληρώσουμε δηλαδή την διαδικασία σχεδιασμού του δοκιμίου στον pre-processor πριν το εισάγουμε στον solver μέσα από τον text editor του προγράμματος κάνουμε τυχόν αλλαγές που χρειάζονται ή προσθέτουμε δεδομένα που δεν μπορούμε να τα περάσουμε από το femb.

Αφού το πρόγραμμα ολοκληρώσει την ανάλυση των δεδομένων που του δώσαμε, μας παρουσιάζει τα αποτελέσματα με την μορφή αρχείων \*.d3plot και \*.graph. Τα \*.d3plot χρησιμοποιούνται από τον pre-processor του προγράμματος και μας δείχνουν βήμα βήμα το πώς παραμορφώνεται το μοντέλο μας με τον χρόνο με την μορφή ενός animated clip.

#### 5.4 Αναλυτική περιγραφή του LS-DYNA και του femb

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην γεωμετρία του μοντέλου καθώς και στις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση. Πληροφορίες για τις παραμέτρους αυτές αντλήσαμε από δημοσιεύσεις που έχουν γίνει πάνω στο συγκεκριμένο θέμα και από τα πρότυπα ποιότητας ISO. Παράλληλα με τις επιλογές που κάναμε για το δικό μας μοντέλο, αναφέρονται κ άλλες που συναντήθηκαν.[2, 4, 6]

Το μοντέλο μας αποτελείται από 3 κομμάτια (parts) την κεφαλή του ισχίου , τον λαιμό και την επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή η κεφαλή, και πάνω στην οποία ασκείται η δύναμη. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές επιφάνειες, μια επίπεδη και μια κωνική ( γωνίας 100 μοιρών ).Ο διαχωρισμός σε 3 κομμάτια διευκολύνει την διαχείριση των επιμέρους τμημάτων, αφού κάθε part μπορεί να εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή ξεχωριστά. Τα γεωμετρικά καθώς και όλα τα άλλα στοιχεία των τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι απόλυτα σύμφωνα με τα ISO 7206.

Επειδή ο χρόνος που χρειάζεται για να εξαχθούν τα αποτελέσματα για ολόκληρο την κεφαλή είναι αρκετά μεγάλος, για λόγους προγραμματιστικής ευκολίας κρατήσαμε το ένα τεταρτημόριο της κεφαλής. Λόγω συμμετρίας και των οριακών συνθηκών που τέθηκαν τα αποτελέσματα-συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν για το σύνολο της κεφαλής.

Ο λαιμός και η επιφάνεια θεωρούνται απαραμόρφωτα (rigid).[10,10,1]. Το ύψος του λαιμού είναι κατά αρκετά μειωμένο (μας ενδιαφέρει μόνο το πάνω μέρος του που ενώνεται με την κεφαλή) ώστε να μειώσουμε το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων του, για να κερδίσουμε σε χρόνο.[19-22]

Η διακριτοποίηση στο λαιμό και στην κεφαλή έγινε με ογκικά πεπερασμένα στοιχεία [10,10,1]. Τα στοιχεία της κεφαλής που βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια έχουν το ίδιο μέγεθος με τα στοιχεία του λαιμού. Αυτό βελτιώνει την ακρίβεια υπολογισμού των δυνάμεων ανάμεσα σε κεφαλή και λαιμό.[15, 18]

Στις επαφές κεφαλής και επιφάνειας , ως κύρια επιφάνεια (master) έχει οριστεί η επιφάνεια που είναι απαραμόρφωτη, και ως δευτερεύουσα (slave) την κεφαλή που είναι παραμορφώσιμη.

Στις επαφές κεφαλής και λαιμού ως κύρια επιφάνεια έχει οριστεί ο λαιμός.

Η διάμετρος της μεταλλικής κεφαλής είναι 28 mm και της κεραμικής 22 mm.

Η διάμετρος της κεφαλής του λαιμού είναι 10 mm.

Η μία επιφάνεια είναι λεία και επίπεδη και η κωνική έχει 100 μοίρες γωνία.

Το μοντέλο ελέγχεται (check coincident) για τυχόν ασυνέχειες μεταξύ των σχηματιζόμενων κόμβων, για την ένωση γειτονικών κόμβων, για την επίτευξη της συνέχειας και την διαγραφή των περιττών κόμβων που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία.

Το μοντέλο ελέγχεται (auto normal) για τυχόν λάθη στην διακριτοποίηση και για να κάνουμε κοινή την φορά των πεπερασμένων στοιχείων.

Σε κάθε προσομοίωση ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός (0,35) [24].

## 5.5 Περιγραφή των υλικών

Στην ενότητα αυτή γίνεται ο καθορισμός των υλικών και των ιδιοτήτων τους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι υλικών για την κεφαλή : αλουμίνια ( $Al_2O_3$ ) και ανοξείδωτος χάλυβας (316L). Ακολουθούν οι τιμές που δόθηκαν για τις μηχανικές ιδιότητές των [e2] :

### Αλουμίνια

Πυκνότητα : 3,96 g/cc

Μέτρο ελαστικότητας E : 370 MPa

Λόγος Poisson : 0,22

Όριο διαρροής : 330 MPa

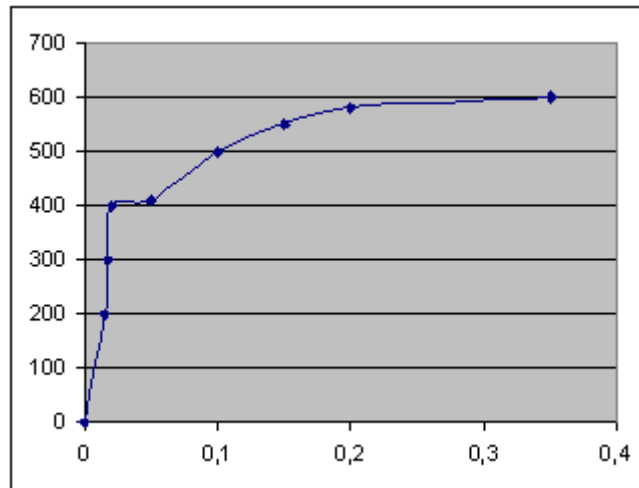
### Χάλυβας

Πυκνότητα : 8 g/cc

Μέτρο ελαστικότητας E : 193 GPa

Λόγος Poisson : 0,30

Περιγράφεται η αντίστοιχη καμπύλη (Σχήμα 5.1) τάσης-παραμόρφωσης που δίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.1 διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Η αντιστοίχιση του υλικού στο σχεδιασμένο μοντέλο έγινε ως εξής :

Από την επιλογή create material ορίζουμε τον τύπο του υλικού που αντιστοιχεί στα υλικά της κεφαλής του λαιμού και των επιφανειών. Από το εγχειρίδιο του LS-DYNA βρέθηκε ότι ο τύπος του υλικού που αντιστοιχεί στα υλικά λαιμού και επιφανειών είναι το \*mat\_rigid\_title.

### 5.6 Επίδραση τριβής

Η ορθή μοντελοποίηση περιλαμβάνει την εισαγωγή δεδομένων τριβής στα μοντέλα μας. Τα όσα παρατίθενται εδώ είναι σύμφωνα με την βιβλιογραφία.[24]  
Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται κατά τον στατικό έλεγχο διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην διεξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Γενικά:

Μηχανική τριβή υφίσταται όταν και τα δύο σώματα είναι στερεά. Στην περίπτωση που το ένα ολισθαίνει πάνω στο άλλο υπάρχει τριβή ολίσθησης. Όταν έχουμε τριβή μεταξύ στερεών σωμάτων, οι επιφάνειες επαφής μπορεί :

- Να έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους και τότε έχουμε ξηρά τριβή.
- Να διαχωρίζονται από ένα στρώμα λιπαντικού και τότε έχουμε ξηρά τριβή.
- Να υπάρχουν σημεία άμεσης επαφής και σημεία διαχωρισμού από στρώμα λιπαντικού, οπότε έχουμε την ενδιάμεση κατάσταση της ημιυγρής τριβής.



Στην παρούσα εργασία ο συντελεστής δυναμικής και στατικής τριβής είναι σταθερός και ίσος με 0.35.

## 5.7 Περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης

Η διαδικασία που ακολουθούμε σε κάθε προσομοίωση χωρίζεται στα εξής τρία στάδια :

- Σχεδίαση του μοντέλου και ορισμός των παραμέτρων του στον pre-processor.
- Πραγματοποίηση της ανάλυσης από τον υπολογιστή (run analysis).
- Προβολή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων στον post-processor.

Στην συνέχεια ακολουθεί σύντομη περιγραφή των σταδίων και δικαιολόγηση της επιλογής των παραμέτρων.

### 5.7.1 Στάδιο σχεδιασμού (pre-processor)

Στόχος μας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου απλού αλλά πλήρους, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ για την επίλυση του, περιέχοντας όμως όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονται από την προσομοίωση. Το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιήθηκε είναι το εξής :

Πηγαίνοντας στην καρτέλα Analysis/ επιλέγουμε :

Μονάδα μήκους το χιλιοστό(mm)

Μονάδα μάζας ο τόνος (ton)

Μονάδα χρόνου το δευτερόλεπτο (sec)

Μονάδα δύναμης το Newton(N)

Με βάση τις μονάδες αυτές προκύπτουν και οι μονάδες για τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο μας :

Μονάδα ταχύτητας (mm/sec)

Μονάδα επιτάχυνσης (mm/sec<sup>2</sup>)

Μονάδα πυκνότητας (t/mm<sup>3</sup>)

Τάση (MPa)

### 5.7.2 Parts

Ορίζουμε τρία διαφορετικά κομμάτια (parts)

- Την κεφαλή
- Την κωνική / επίπεδη επιφάνεια
- Τον λαιμό

### 5.7.3 Lines

Σχεδιάζουμε τα τέσσερα κομμάτια με γραμμές. Για τις δύο επιφάνειες μας δεν θέλουμε να λάβουμε υπόψη μας την παραμόρφωσή τους κατά την διαδικασία, τα θεωρούμε απαραμόρφωτα (rigid). Γι' αυτό το λόγο αρκεί για την περιγραφή τους ένα λεπτό εξωτερικό στρώμα υλικού. Με αυτόν τον τρόπο θα απαλλαχτούμε από μεγάλο αριθμό στοιχείων στο εσωτερικό τους που θα απαιτούσαν χρόνο από εμάς κατά την σχεδίαση όσο και από τον επεξεργαστή κατά την επίλυση.

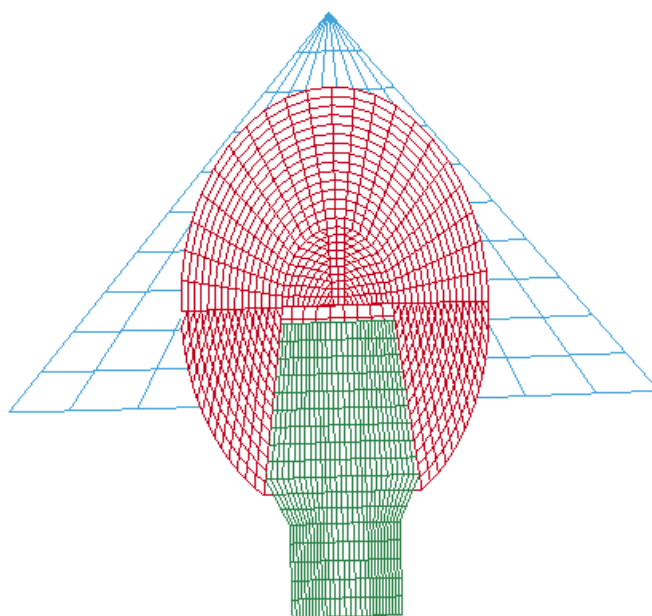
### 5.7.4 Elements

Στο σημείο αυτό φτιάχνουμε το πλέγμα στην κεφαλή, στο λαιμό και στις επιφάνειες. Αφού κάνουμε τρισδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιούμε τρισδιάστατο συμπαγές πλέγμα (plate/ solid mesh). Στην διάσταση του μήκους χρησιμοποιούμε 20 στοιχεία και στην διάσταση του πλάτους 20 στοιχεία. Επειδή μας ενδιαφέρει

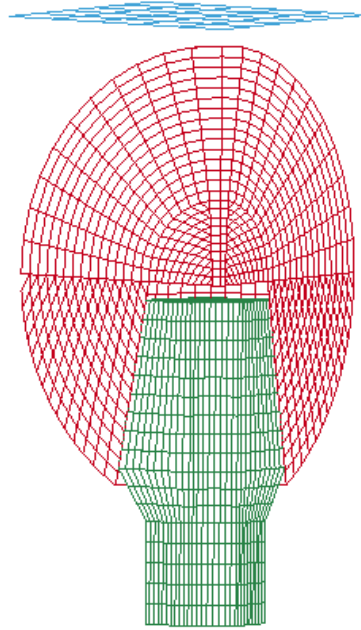
ιδιαίτερα η συμπεριφορά του υλικού στην συμπίεση, στην διάσταση του πάχους βάζουμε 24 στοιχεία.

Για μεγαλύτερη ομοιομορφία των πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο και για καλύτερα αποτελέσματα στην κεφαλή εργαστήκαμε ως εξής :

Αφού φτιάξαμε τις κύριες γραμμές σχεδίασής του, δημιουργήσαμε και κάποιες άλλες βοηθητικές, οι οποίες μας βοήθησαν να χωριστεί το εσωτερικό της κεφαλής σε επιμέρους τμήματα. Έτσι καταφέραμε να χωρέσουμε μεγαλύτερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων φροντίζοντας όμως οι κόμβοι του ενός χωρίου στην επαφή τους με το δίπλα, να συμπίπτουν. Παράλληλα ,όμως, αυξήθηκε και ο χρόνος που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Η πυκνότητα του πλέγματος σε ένα μοντέλο είναι επιλογή του προγραμματιστή ανάλογα με το αν επιθυμεί μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων ή μικρότερο χρόνο προσομοίωσης. Οι γραμμές αυτές ,στην συνέχεια, περιστράφηκαν για  $10^0$  (mirror/ rotate/ global). Η ολοκλήρωση της μορφής του μοντέλου γίνεται με αντιγραφή των πεπερασμένων στοιχείων, της ήδη διακριτοποιημένης «φέτας», για όλο το τεταρτημόριο. Στο σχήμα 5.2 (α και β) βλέπουμε πως έχει διαμορφωθεί το πλέγμα σε όλα τα κομμάτια του μοντέλου.



Σχήμα 5.2 α Πλέγμα και των τριών κομματιών σε επαφή με κωνική επιφάνεια



Σχήμα 5.2 β Πλέγμα και των τριών κομματιών σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια

#### 5.7.5 Nodes

Σε αυτήν την καρτέλα πραγματοποιούμε μια σειρά ελέγχων στο μοντέλο μας, για να αποφύγουμε τα λάθη που μπορεί να έχουμε κάνει κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Αρχικά ελέγχουμε για κόμβους που έχουν την ίδια ταυτότητα (check duplicate id). Στην συνέχεια, ελέγχουμε για κόμβους που συμπίπτουν (check coincident). Στο μοντέλο μας αυτοί οι κόμβοι δημιουργούνται στην κοινή επιφάνεια της κεφαλής και του λαιμού κατά τη διαδικασία πλέγματος σε αυτά. Τους κόμβους αυτούς τους συγχωνεύουμε (merge & delete), ειδάλλως θα δημιουργήσουμε πρόβλημα στην επαφή που θα ορίσουμε σε αυτά τα δύο parts στην συνέχεια. Τέλος, ελέγχουμε για κόμβους που δεν ανήκουν σε κάποιο κομμάτι.

#### 5.7.6 Check

Στην καρτέλα αυτή κάνουμε έναν τελευταίο έλεγχο στο μοντέλο μας, κατά τον οποίο ελέγχεται η κατεύθυνση των συμπαγών πεπερασμένων στοιχείων (solid elements) που έχουμε δημιουργήσει.

### 5.7.7 Materials

Σε αυτό το σημείο ορίζουμε τον τρόπο συμπεριφοράς των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένα τα διάφορα parts. Για την κεφαλή του ισχίου επιλέγουμε το `*mat_piecewise_linear_plasticity_title` για το 316L και για την AL2O3 το `*mat_orthotropic_elastic_title`. Η επιλογή μας δίνει την δυνατότητα να περιγράψουμε με ακρίβεια τη συμπεριφορά τους. Παράλληλα, ορίζουμε την πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson και δίνουμε την αντίστοιχη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.

Για τις επιφάνειες και για τον λαιμό, επειδή δεν θέλουμε τα μοντέλα μας να παραμορφώνονται, επιλέγουμε `mat rigid`. Οι μηχανικές ιδιότητες που ορίζουμε επίσης εδώ είναι η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson.

### 5.7.8 Contact

Στο σημείο αυτό ορίζουμε τις επαφές ανάμεσα στα κομμάτια. Το μοντέλο μας έχει τις εξής δύο επαφές :

Η κεφαλή του ισχίου με το λαιμό

Η κεφαλή του ισχίου με την επιφάνεια

Η επαφή ανάμεσα στην κεφαλή του ισχίου και το λαιμό ονομάζεται `contact surface to surface`. Δηλώνουμε ότι ο λαιμός είναι πρωτεύον (master) και η κεφαλή δευτερεύον (slave) στην επαφή. Επίσης δίνουμε τιμές στον συντελεστή στατικής και δυναμικής τριβής (0.35), αφήνοντας όλες τις άλλες τιμές που έχει ορίσει το πρόγραμμα (default). Η επαφή ανάμεσα στην κεφαλή του ισχίου και της επιφάνειας είναι και αυτή `contact surface to surface`. Δηλώνουμε ότι οι επιφάνειες είναι πρωτεύον (master) και η κεφαλή δευτερεύον (slave) στην επαφή.

### 5.7.9 Dynamisc

Στην καρτέλα `dynamisc/load` ορίζουμε με την μορφή γραφικής παράστασης την δύναμη που θα ασκηθεί στην κεφαλή σε συνάρτηση με τον χρόνο. Εφαρμόζουμε πέντε διαφορετικές φορτίσεις 3kN, 5kN, 10kN, 20kN και 30kN. Πηγαίνοντας τώρα

στην καρτέλα dynamics/control ενεργοποιούμε την επιλογή termination όπου και δηλώνουμε το χρόνο που θα διαρκέσει η ανάλυση. Οι χρόνοι που θέτουμε για όλα τα πειράματα είναι 30 sec με βήμα 0,02 sec.

Στην καρτέλα dynamics/database/ascii ενεργοποιούμε τα αρχεία τύπου ascii που επιθυμούμε να μας εξάγουν αποτελέσματα και ορίζουμε εμείς τη συχνότητα που το πρόγραμμα θα εξάγει τα αποτελέσματα αυτά. Εμείς ενεργοποιούμε τα αρχεία RCFORC, DEFGE0.

Τέλος, στην κάρτα dynamics/database/binary ενεργοποιούμε το αρχείο D3PLOT και ορίζουμε σε αυτό τη συχνότητα που το πρόγραμμα θα εξάγει αποτελέσματα σε αυτό. Το αρχείο αυτό περιέχει στιγμιότυπα της διαδικασίας που προσομοιώνεται, και το βλέπουμε με τον post processor του προγράμματος. Όσο περισσότερα στιγμιότυπα περιέχει το D3PLOT τόσο καλύτερη εικόνα μπορούμε να έχουμε για την διαδικασία και τις παραμορφώσεις που γίνονται κατά τη διάρκεια αυτής.

#### 5.7.10 Bc

Αφού το μοντέλο που εξετάζουμε είναι 900 και όχι ολόκληρο δημιουργούμε 3 διαφορετικά node set για να δεσμευτούν οι κινήσεις και οι ροπές στρέψης στις πλευρές (bc/ boundary/ spc). Το πρώτο node set είναι όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στον  $-y$ - άξονα, το δεύτερο node set είναι όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στον  $-x$ - άξονα, και το τρίτο node set είναι όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στον  $-z$ - άξονα. Δεσμεύουμε για το πρώτο node set, την κίνηση των κόμβων κατά  $-x$ - και τις ροπές στρέψης κατά  $-y$ - και  $-z$ -. Αντίστοιχα για το δεύτερο node set, την κίνηση των κόμβων κατά  $-y$ - και τις ροπές στρέψης κατά  $-x$ - και  $-z$ -. Τέλος για το τρίτο node set δεσμεύουμε την κίνηση των κόμβων κατά  $-x$ - και  $-y$ - και τις ροπές στρέψης κατά  $-x$ -,  $-y$ - και  $-z$ -.

#### 5.8 Στάδιο ανάλυσης (analysis)

Το αρχείο που δημιουργήθηκε από τον pre-processor κατά την παραπάνω διαδικασία είναι αρχείο \*.fmb. Ο τύπος αυτός του αρχείου μετατρέπεται σε μορφή \*.dyn (file/ export), ένα είδος κωδικοποιημένου αρχείου που μπορεί να αναγνωστεί με τον επεξεργαστή κειμένου notepad του λειτουργικού συστήματος. Αυτή η απλοϊκή

μορφή δίνει την ευχέρεια σε έναν έμπειρο χρήστη να ελέγξει γρήγορα το μοντέλο του για σφάλματα ή να πραγματοποιήσει αλλαγές σε κάθε παράμετρο που έχει ορίσει κατά τη διάρκεια της σχεδίασης.

Η ανάλυση πραγματοποιείται από τον solver του προγράμματος, ο οποίος μας ζητά να εισάγουμε αρχείο μορφής \*.dyn (input file) για να διαβάσει τα δεδομένα του μοντέλου. Δίνοντας την εντολή run ο solver ξεκινά την ανάλυση του προγράμματος και ελέγχει τα δεδομένα για τυχόν σφάλματα. Αφού διαβαστούν τα δεδομένα εισαγωγής κάνει κάποιους πρώτους υπολογισμούς, ανάμεσα στους οποίους και μία αρχική πρόβλεψη για το χρόνο που θα απαιτηθεί για να ολοκληρωθεί η ανάλυση.

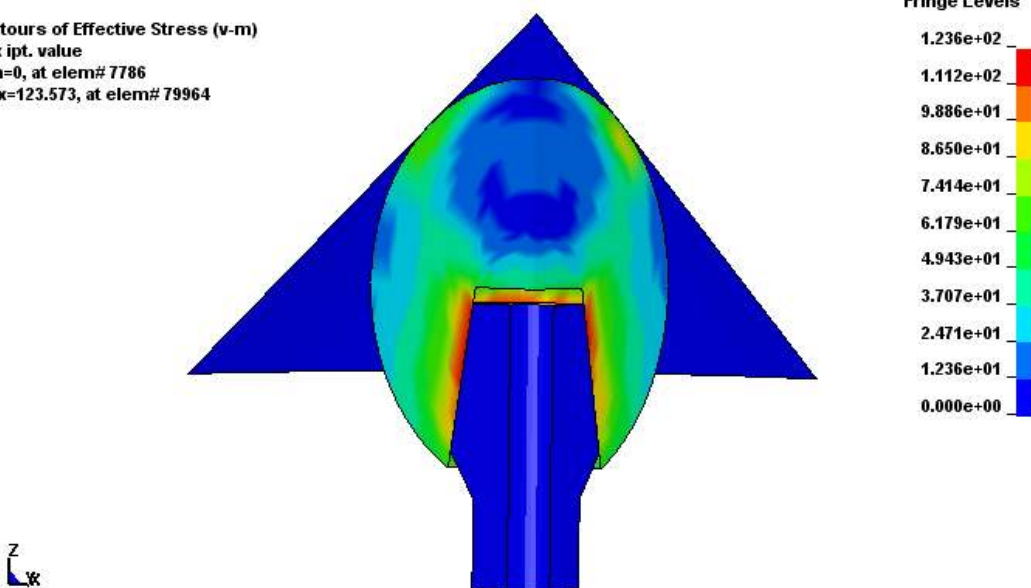
Στην ολοκλήρωση της ανάλυσης θα έχουν δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ένα σύνολο αρχείων ανάμεσα στα οποία θα είναι τα RCFORC, DEFGEO.

### 5.9 Στάδιο ανάλυσης (analysis)

Το αρχείο d3plot ανοίγει με τον post-processor και αποτελεί την οπτική προσομοίωση της κατεργασίας. Με αυτό έχουμε την δυνατότητα να εξετάζουμε οπτικά σε κάθε στιγμιότυπο το μοντέλο μας, να δούμε την παραμόρφωσή του, να επιλέξουμε την χρωματική απεικόνιση των τάσεων κατά von mises. Το υπόμνημα των τάσεων βρίσκεται στην πάνω δεξιά γωνία. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι προσομοιώσεις των κεφαλών, όταν σε αυτές έχει εφαρμοσθεί η μέγιστη δύναμη του εκάστοτε πειράματος. ( σχήμα 5.3.1-5.3.20 )

#### LS-DYNA USER INPUT

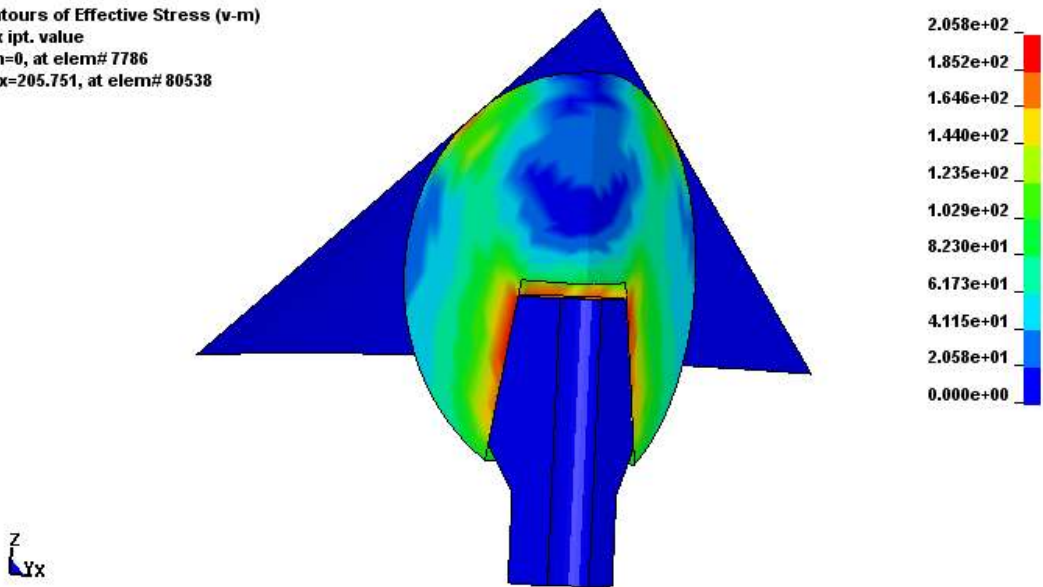
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=123.573, at elem# 79964



σχήμα 5.3.1 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 3 kN

LS-DYNA USER INPUT

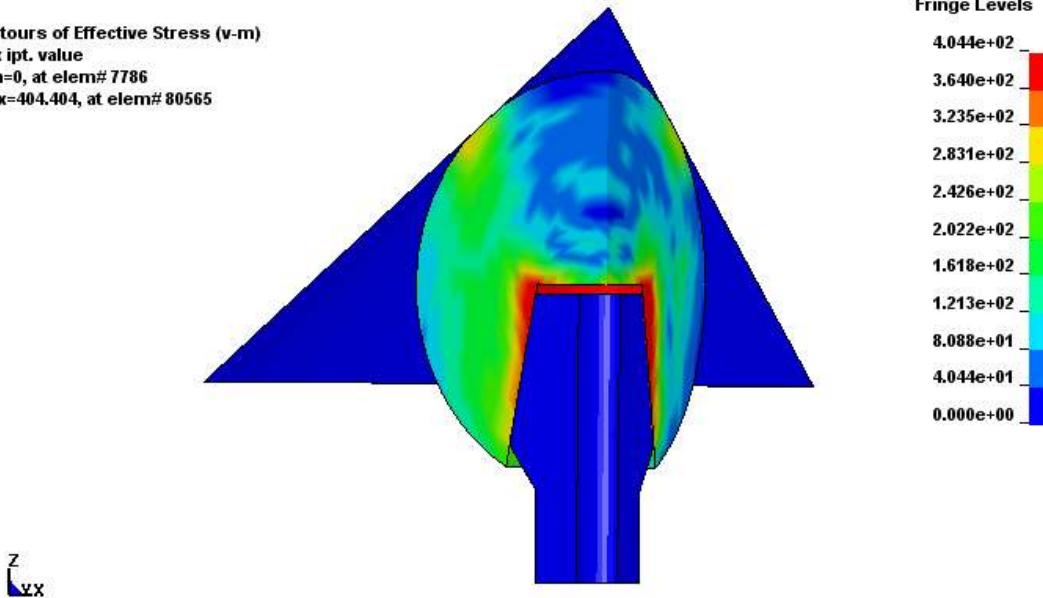
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=205.751, at elem# 80538



σχήμα 5.3.2 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 5 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=404.404, at elem# 80565

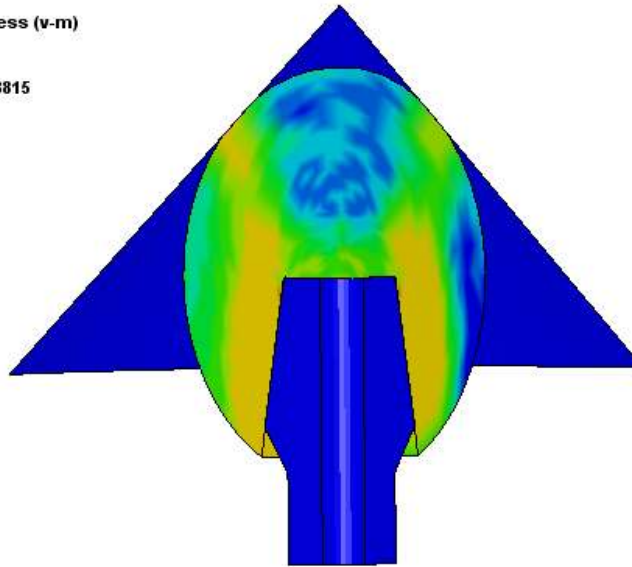


σχήμα 5.3.3 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 10 kN

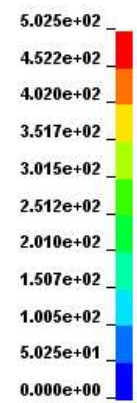


LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=502.459, at elem# 78815



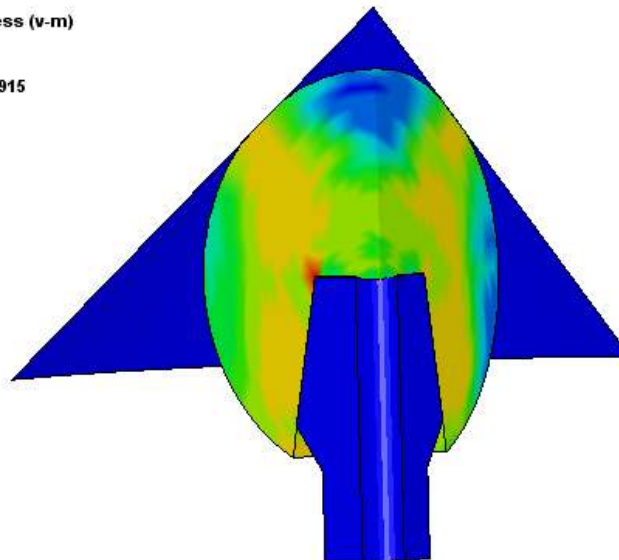
Fringe Levels



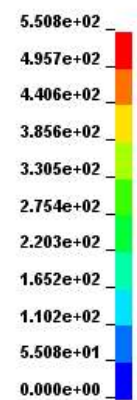
σχήμα 5.3.4 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 20 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=550.796, at elem# 80915



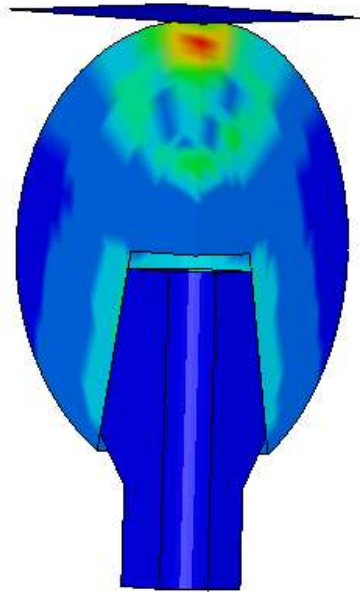
Fringe Levels



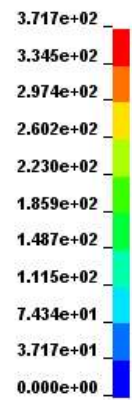
σχήμα 5.3.5 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 30 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=371.703, at elem# 79553



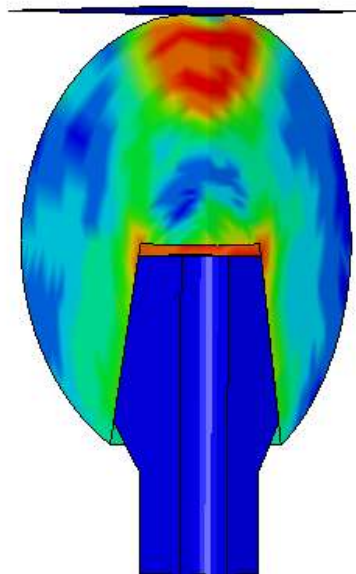
Fringe Levels



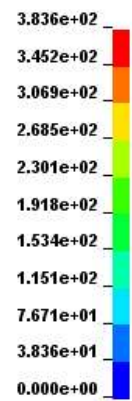
σχήμα 5.3.6 316L σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 3 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=383.573, at elem# 79203



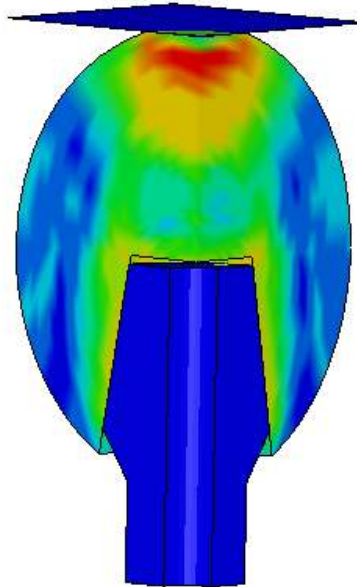
Fringe Levels



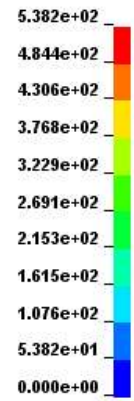
σχήμα 5.3.7 316L σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 5 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=538.248, at elem# 78502



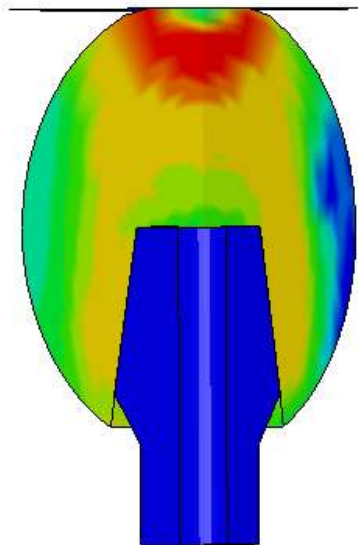
Fringe Levels



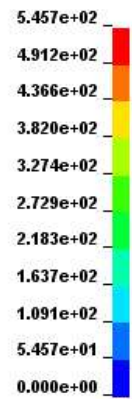
σχήμα 5.3.8 316L σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 10 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=545.733, at elem# 77870



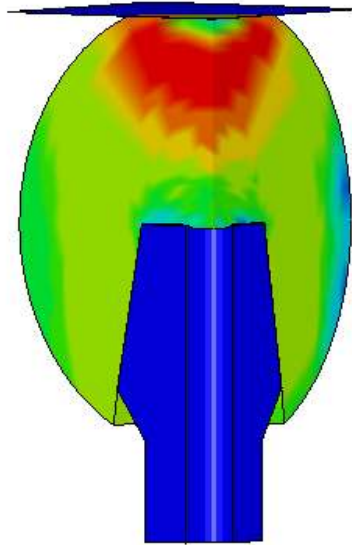
Fringe Levels



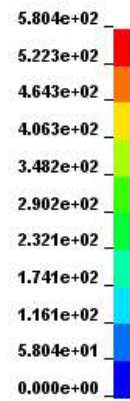
σχήμα 5.3.9 316L σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 20 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=580.365, at elem# 79981



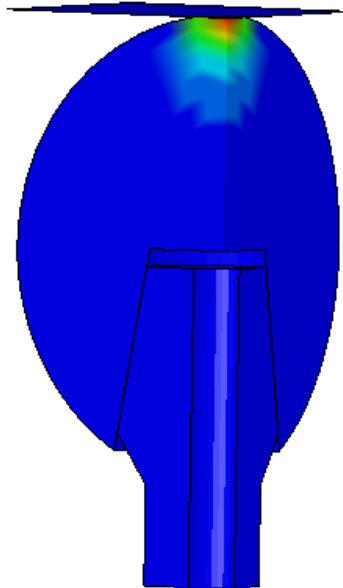
Fringe Levels



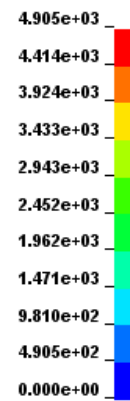
σχήμα 5.3.10 316L σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 30 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=4904.81, at elem# 77804



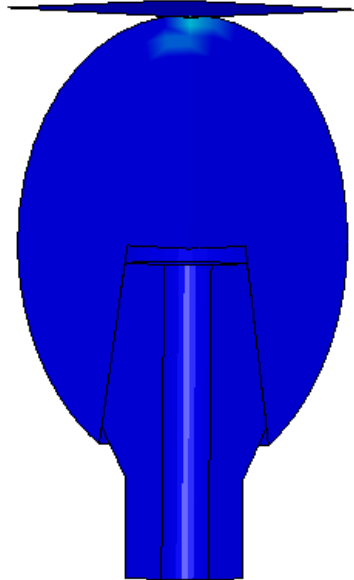
Fringe Levels



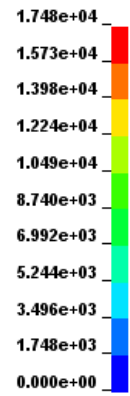
σχήμα 5.3.11 AL2O3 σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 3 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=17480.9, at elem# 79903



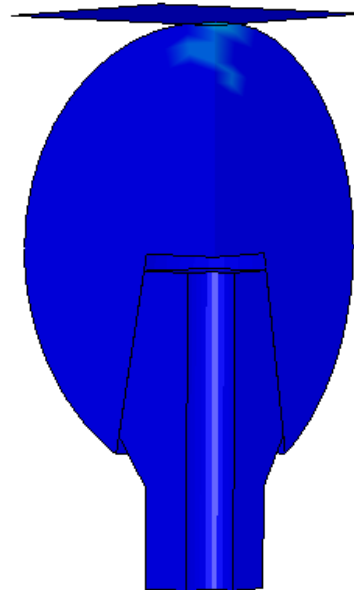
Fringe Levels



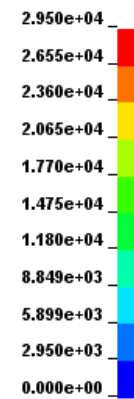
σχήμα 5.3.12 AL2O3 σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 5 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=29497.3, at elem# 79903

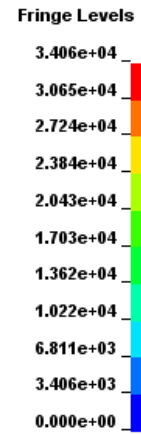
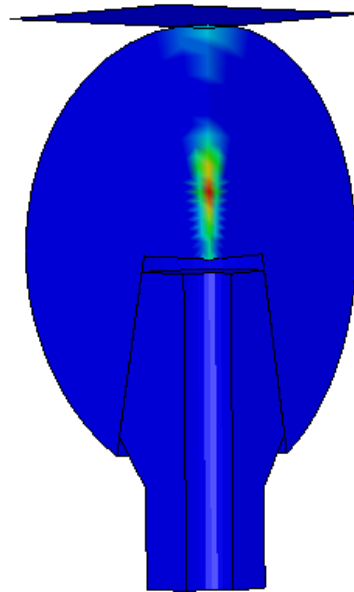


Fringe Levels



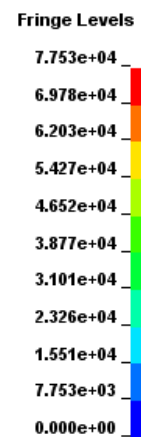
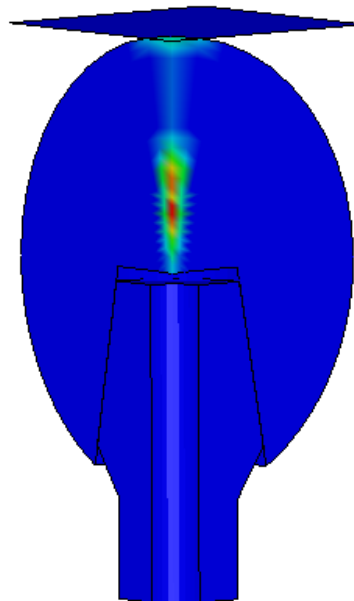
σχήμα 5.3.13 AL2O3 σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 10 kN

LS-DYNA USER INPUT  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=34055.8, at elem# 80587



σχήμα 5.3.14 AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 20 kN

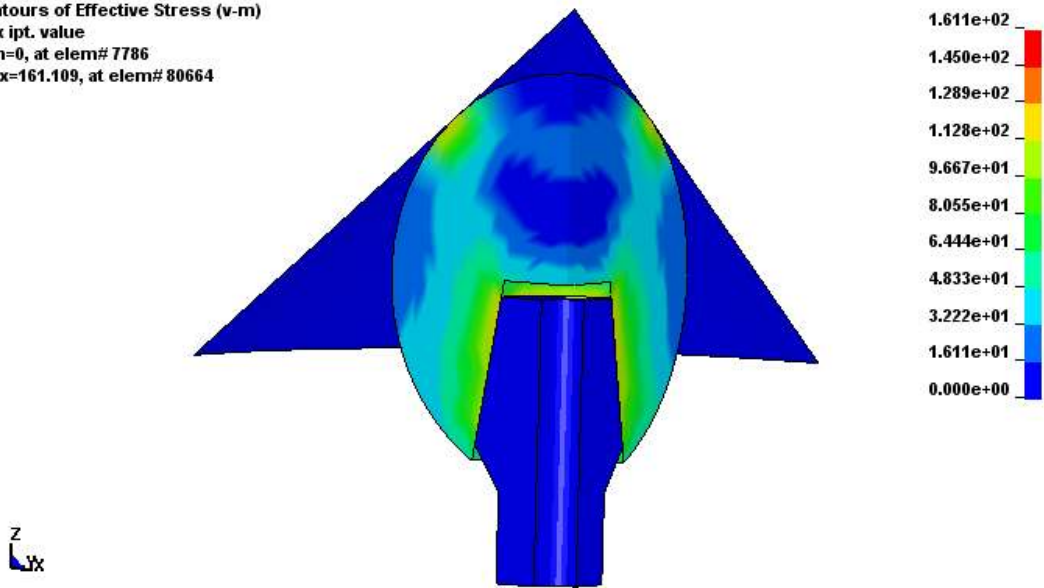
LS-DYNA USER INPUT  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 80930  
max=77532.9, at elem# 77787



σχήμα 5.3.15 AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια. Δύναμη 30 kN

LS-DYNA USER INPUT

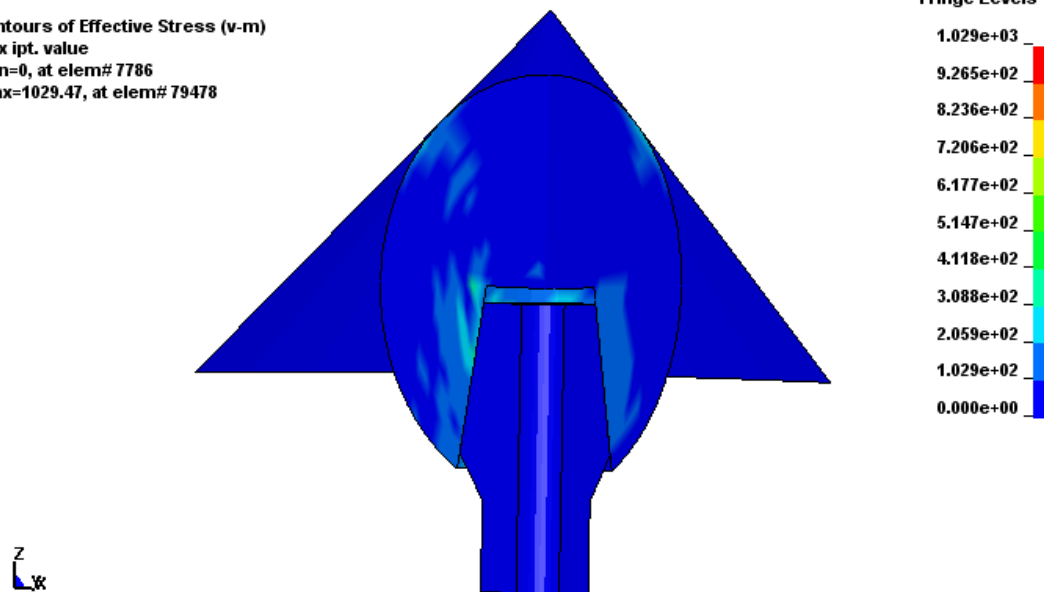
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=161.109, at elem# 80664



σχήμα 5.3.16 AL2O3 σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 3 kN

LS-DYNA USER INPUT

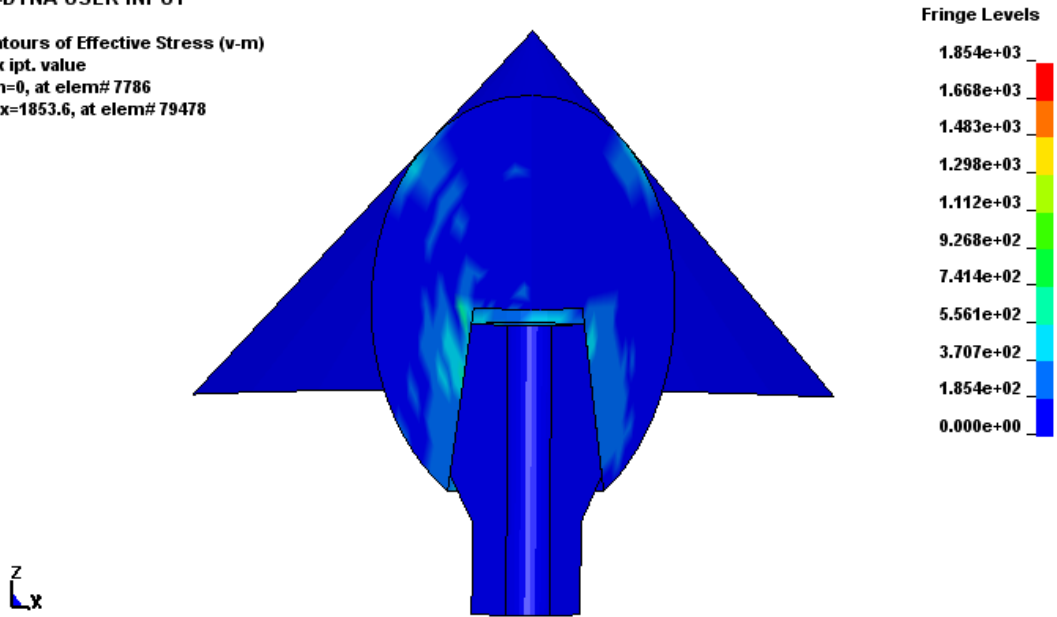
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=1029.47, at elem# 79478



σχήμα 5.3.17 AL2O3 σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 5 kN

LS-DYNA USER INPUT

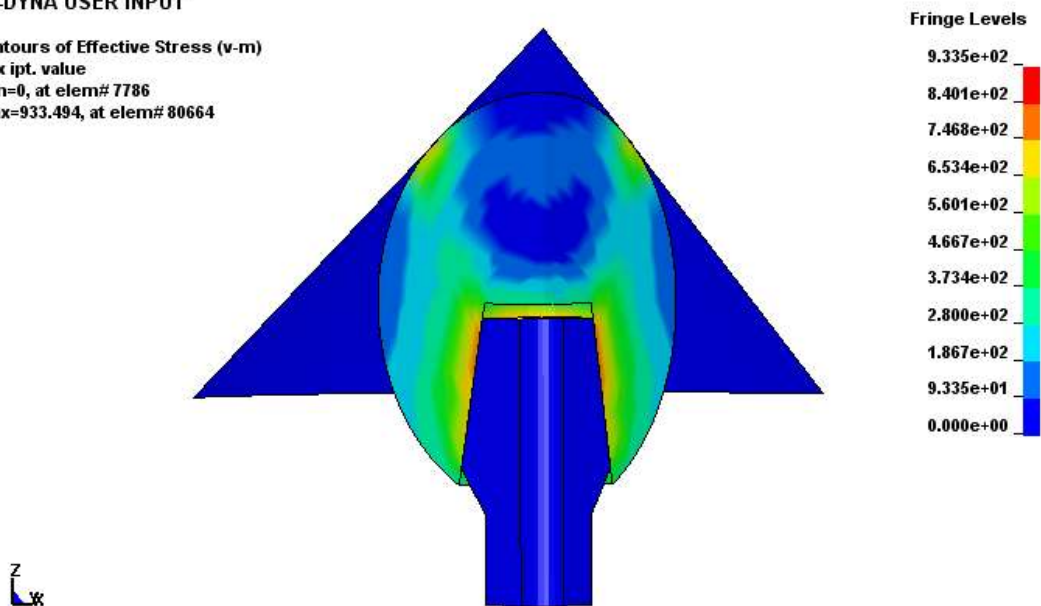
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=1853.6, at elem# 79478



σχήμα 5.3.18 AL2O3 σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 10 kN

LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=933.494, at elem# 80664

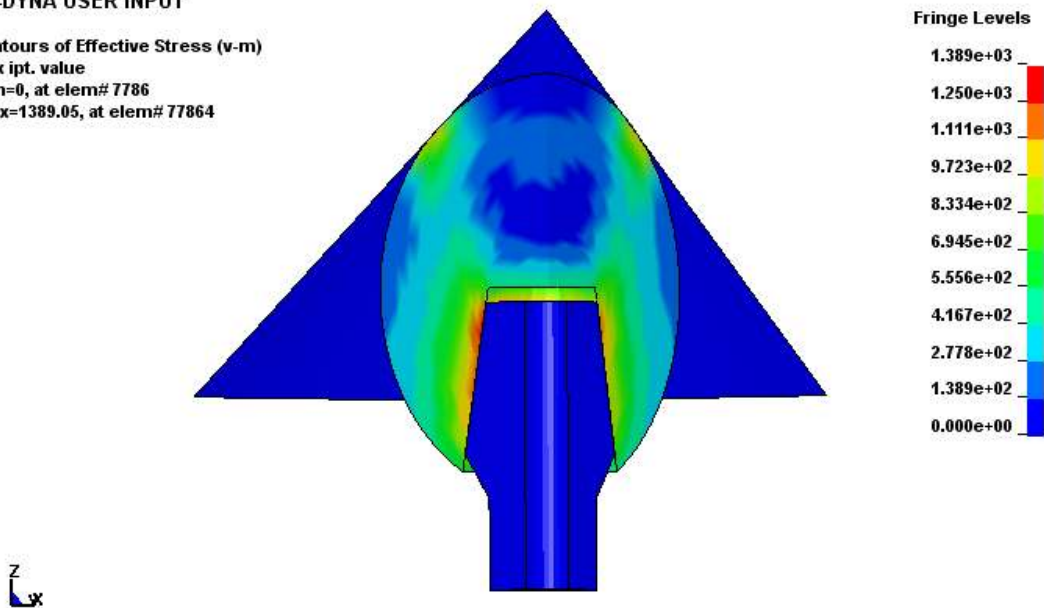


σχήμα 5.3.19 AL2O3 σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 20 kN



#### LS-DYNA USER INPUT

Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 7786  
max=1389.05, at elem# 7784



σχήμα 5.3.20 AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επαφή με κωνική επιφάνεια. Δύναμη 30 kN

Οι προσομοιώσεις έγιναν σε υπολογιστή του τομέα κατεργασιών του Ε.Μ.Π. με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά :

Επεξεργαστής INTEL PENTIUM 4 2.8GHz

Μνήμη 512 ram

Λειτουργικό σύστημα WINDOWS XP PROFESSIONAL

Η διάρκεια κάθε προσομοίωσης κυμαινόταν από 30 έως 50 ώρες.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

## 6.1 Εισαγωγή

Στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με την βοήθεια της μηχανής στατικού ελέγχου INSTRON 4482 και του υπολογιστή που ήταν συνδεδεμένος με αυτήν, τη χρήση λειτουργικού προγράμματος BLUEHILL 2, το οποίο μας βοηθά στην εισαγωγή των παραμέτρων της όλης διάταξης, διεξήχθησαν τα πειράματα για τον έλεγχο των μεταλλικών και κεραμικών κεφάλων ισχύου. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν είκοσι πειράματα, (δέκα με κωνική επιφάνεια και δέκα με επίπεδη επιφάνεια), διάρκειας πέντε έως δέκα λεπτών.

## 6.2 Λογισμικό πρόγραμμα BLUEHILL 2

Το πρόγραμμα BLUEHILL 2 είναι πακέτο λογισμικού με την βοήθεια του οποίου γίνεται η εισαγωγή των παραμέτρων της όλης διαδικασίας και η καταγραφή των αποτελεσμάτων (σχ. 6.1). Λόγω των πολλών ξεχωριστών παραθύρων του προγράμματος για κάθε βήμα της διαδικασίας, ο προγραμματισμός ήταν αρκετά εύκολος [23, ε9]. Παράμετροι όπως η άσκηση της δύναμης κατά κατεύθυνση αλλά και σε πιο μέρος της κεφαλής ασκείται, ο τερματισμός της διαδικασίας και οι υπολογισμοί γίνονται μέσω του BLUEHILL 2. Τα αποτελέσματα μας δείχνουν την μεταβολή του ύψους και την παραμόρφωση στον άξονα  $-Z-$  που υφίσταται κάθε κεφαλή.



Σχήμα 6.1 Περιβάλλον εργασίας Bluehill2

Διεξήχθησαν πέντε πειράματα με υλικό κεφαλής 316L σε επαφή με κωνική επιφάνεια και πέντε με επίπεδη επιφάνεια.

Διεξήχθησαν πέντε πειράματα με υλικό κεφαλής AL2O3 σε επαφή με κωνική επιφάνεια και πέντε με επίπεδη επιφάνεια.

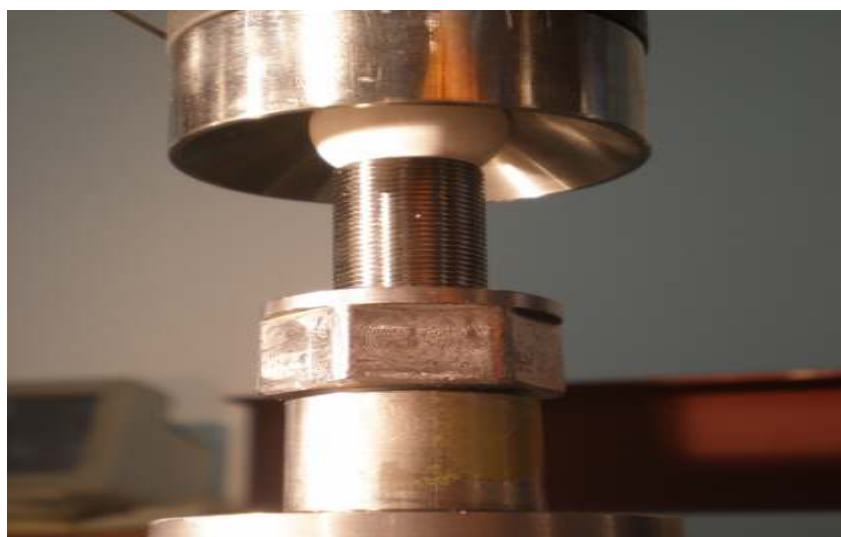
Εισαγωγή των δεδομένων στο BLUEHILL 2.

- Το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιήθηκε είναι σε S.I.
- Οι δυνάμεις που ασκήθηκαν είναι της τάξης των 3kN, 5kN, 10kN, 20kN και 30kN.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κεραμικών (22 mm διάμετρος και ύψος ) και μεταλλικών (28 mm διάμετρος και ύψος ) κεφαλών είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην εισαγωγή δεδομένων στο LS-DYNA.
- Ρυθμός μεταβολής καθόδου 0,001 mm/sec.
- Κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας είναι η επιβολή του μέγιστου φορτίου.
- Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχείο \*.pdf.

### 6.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Κάθε κεφαλή πριν ξεκινήσει το πείραμα υφίσταται πλύση με νερό βρύσης, στην συνέχεια ξεπλένεται με αποσταγμένο νερό και αφήνει να στεγνώσει σε θερμοκρασία δωματίου για να απομακρυνθούν τυχόν ρινίσματα ή ανεπιθύμητα ξένα σώματα που έχουν προσκολληθεί στην επιφάνεια της κεφαλής και μπορεί να επηρεάσουν την επαφή μεταξύ κεφαλής και επιφάνειας (κωνικής ή επίπεδης) και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα μας .

Σε κάθε τεστ χρησιμοποιούνται διαφορετικές κεφαλές όπως επίσης και διαφορετικοί λαιμοί στήριξης των. Η κεφαλή στερεώνεται πάνω στο λαιμό. Ο τρόπος που η κεφαλή έρχεται σε επαφή με την εκάστοτε επιφάνεια (κωνική ή επίπεδη) καθώς και η ευθυγράμμιση λαιμού-κεφαλής-επιφάνειας, πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και είναι σύμφωνες με το πρότυπο ISO 7206-10(σχ. 6.2 α, β σχ. 6.3 α, β και σχ. 6.4 α, β).



Σχήμα 6.2 α Φωτογραφία κατά την διάρκεια στατικού ελέγχου κεραμικής κεφαλής με κωνική επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10



Σχήμα 6.2 β Φωτογραφία κατά την διάρκεια στατικού ελέγχου κεραμικής κεφαλής με επίπεδη επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10

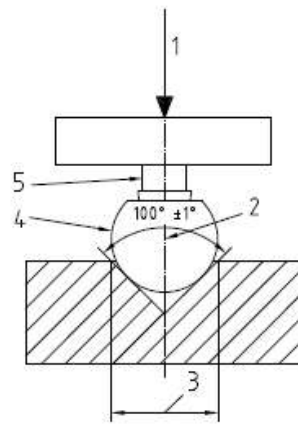


Σχήμα 6.3 α Φωτογραφία κατά την διάρκεια στατικού ελέγχου μεταλλικής κεφαλής με επίπεδη επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10



Σχήμα 6.3 β Φωτογραφία κατά την διάρκεια στατικού ελέγχου μεταλλικής κεφαλής με κωνική επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10

Dimensions in millimetres

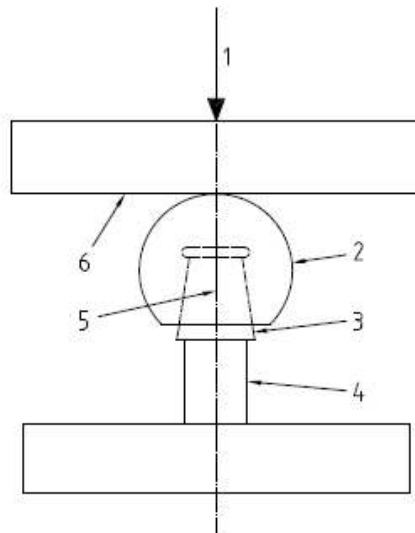


**Key**

- |                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| 1 load axis                      | 4 head |
| 2 neck axis                      | 5 neck |
| 3 0,75 × diameter of head (min.) |        |

Σχήμα 6.4 α Επαφή κεφαλής με κωνική επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10

ISO 7206-10:2003



The methods shown in Figure 3 a) or 3 b) may also be used.

**Key**

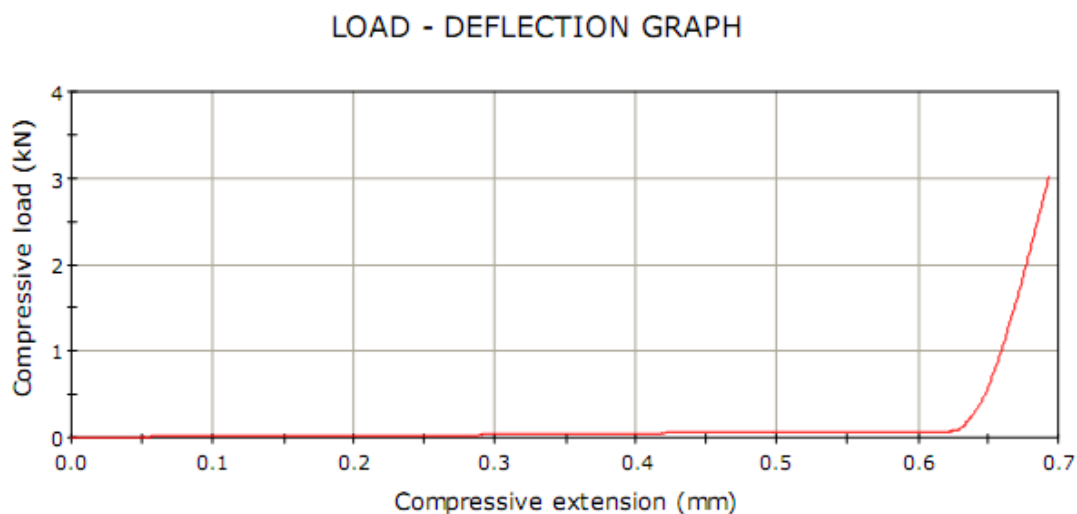
- |             |              |
|-------------|--------------|
| 1 load axis | 4 neck       |
| 2 head      | 5 neck axis  |
| 3 cone      | 6 flat plate |

Σχήμα 6.4 β Επαφή κεφαλής με επίπεδη επιφάνεια σύμφωνα με το ISO 7206-10

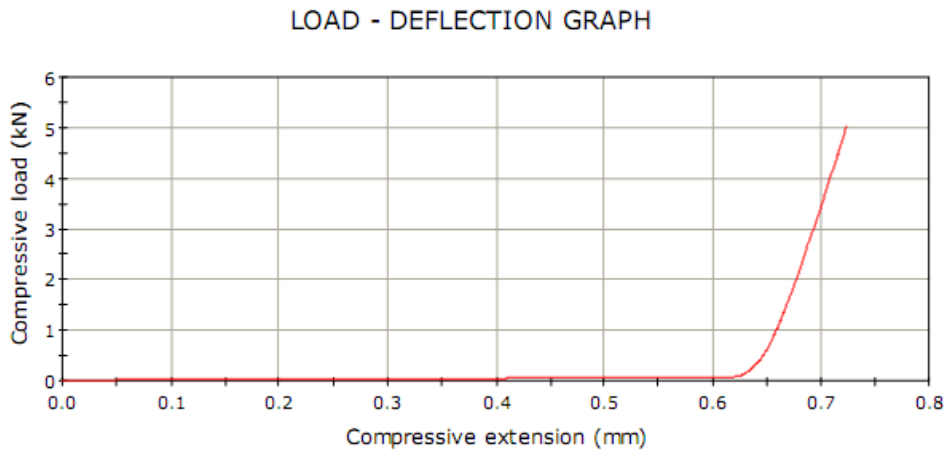


Το φορτίο ασκείται στην κεφαλή μέχρις ότου φτάσει στην μέγιστη τιμή που έχει προγραμματιστεί, εκτός και αν σπάσει μέχρι να φτάσει στην τιμή αυτή. Ύστερα από κάθε τεστ ελέγχονται οι εκάστοτε επιφάνειες επαφής για τυχόν ελαττώματα ή ζημιές που μπορεί να παρουσιαστούν λόγω φορτίσεων και αν διαπιστωθούν προβλήματα αντικαθιστούνται με άλλες. Όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν τελείωσαν κανονικά φτάνοντας στη μέγιστη δύναμη χωρίς να σπάσει κάποια κεφαλή. Δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα ούτε και στις επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποθηκεύτηκαν σε αρχεία \*.pdf για να μπορεί να γίνει περαιτέρω επεξεργασία τους και σύγκριση με τα αποτελέσματα του LS-DYNA. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο.

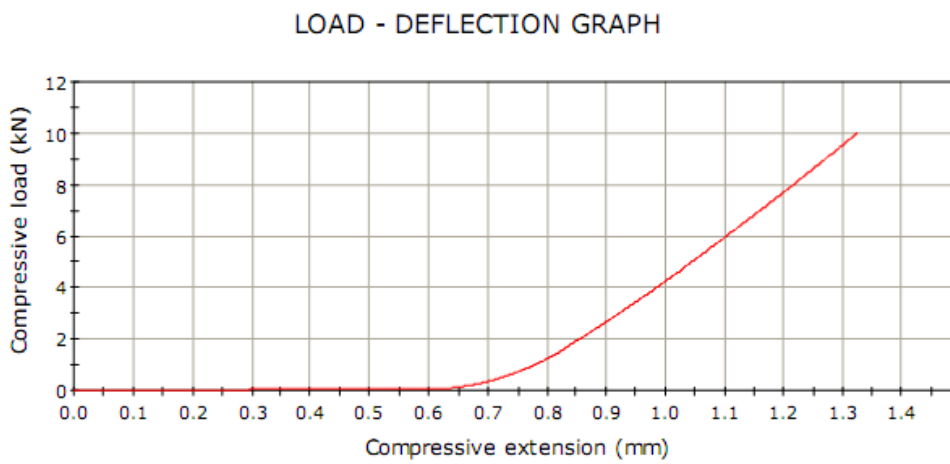
Στην συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, με μορφή διαγραμμάτων (δύναμης-παραμόρφωσης). (σχήμα 6.5.1-6.5.20)



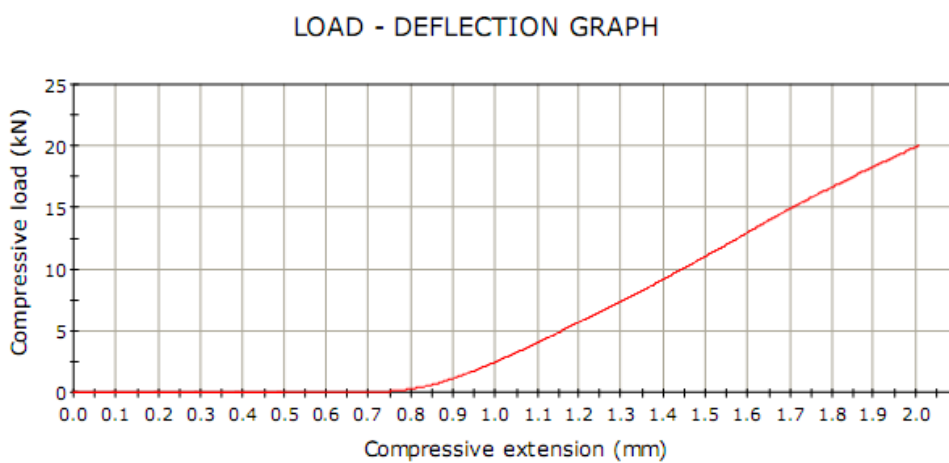
Σχήμα 6.5.1 Ασκούμενη δύναμη 3 kN σε κεφαλή 316L σε κωνική επιφάνεια



Σχήμα 6.5.2 Ασκούμενη δύναμη 5 kN σε κεφαλή 316L σε κωνική επιφάνεια

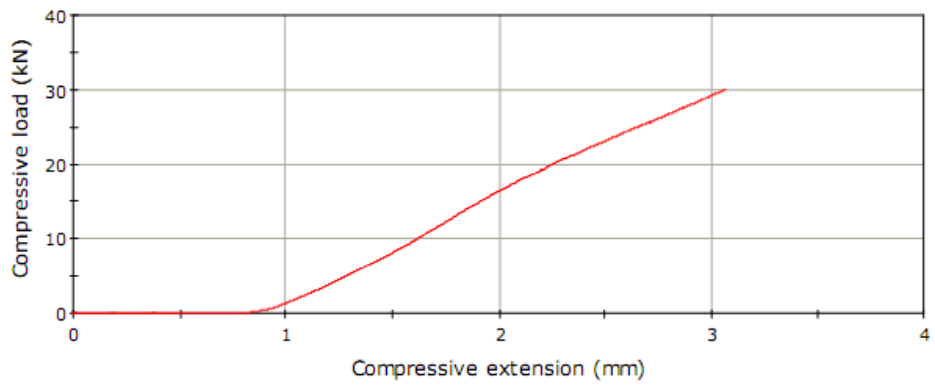


Σχήμα 6.5.3 Ασκούμενη δύναμη 10 kN σε κεφαλή 316L σε κωνική επιφάνεια



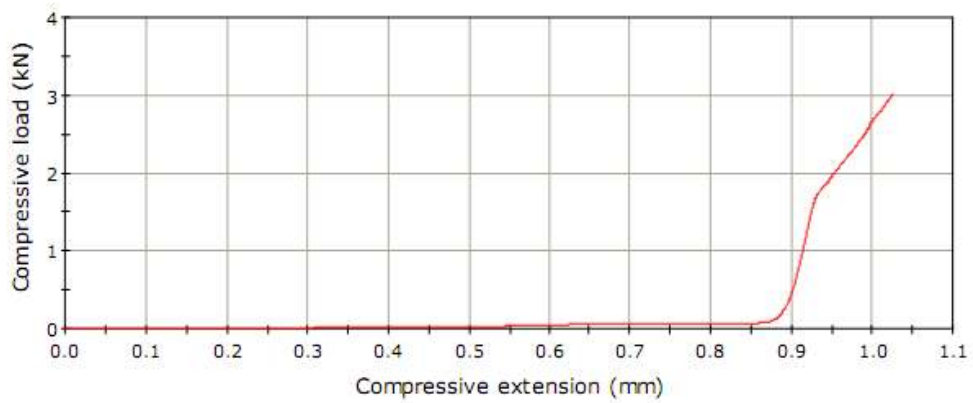
Σχήμα 6.5.4 Ασκούμενη δύναμη 20 kN σε κεφαλή 316L σε κωνική επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



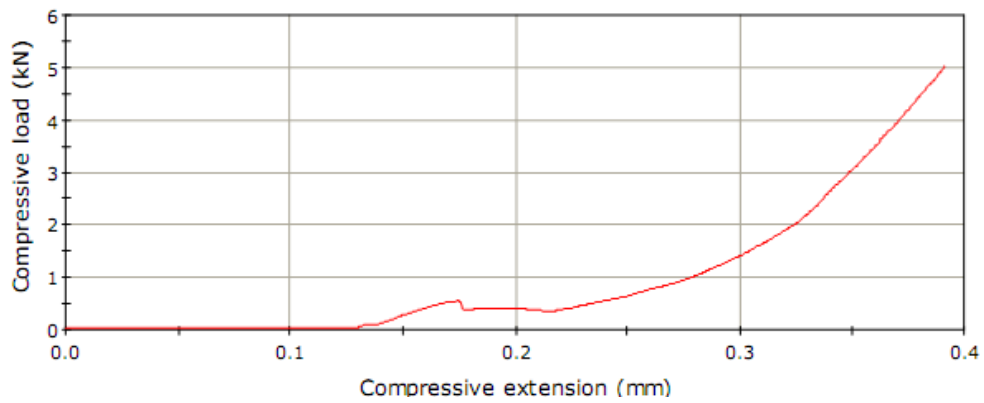
Σχήμα 6.5.5 Ασκούμενη δύναμη 30 kN σε κεφαλή 316L σε κωνική επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



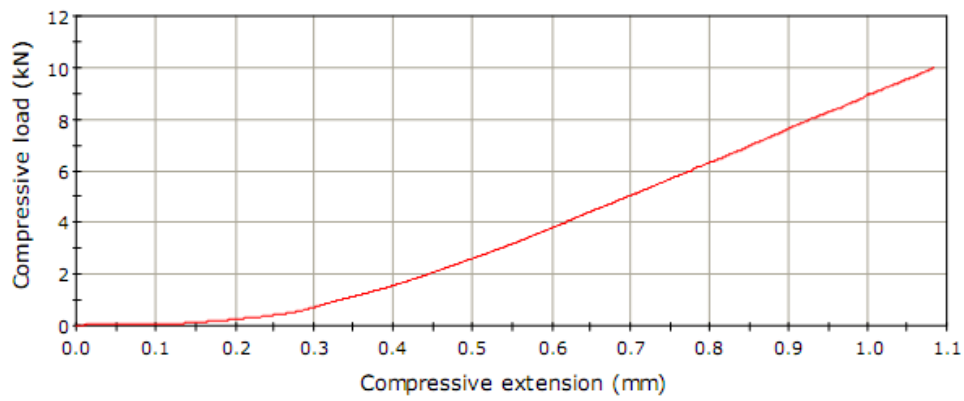
Σχήμα 6.5.6 Ασκούμενη δύναμη 3 kN σε κεφαλή 316L σε επίπεδη επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



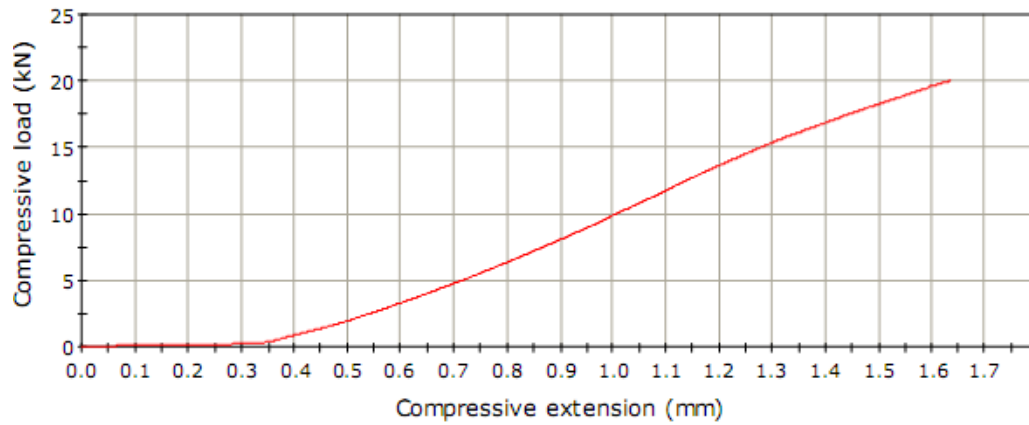
Σχήμα 6.5.7 Ασκούμενη δύναμη 5 kN σε κεφαλή 316L σε επίπεδη επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



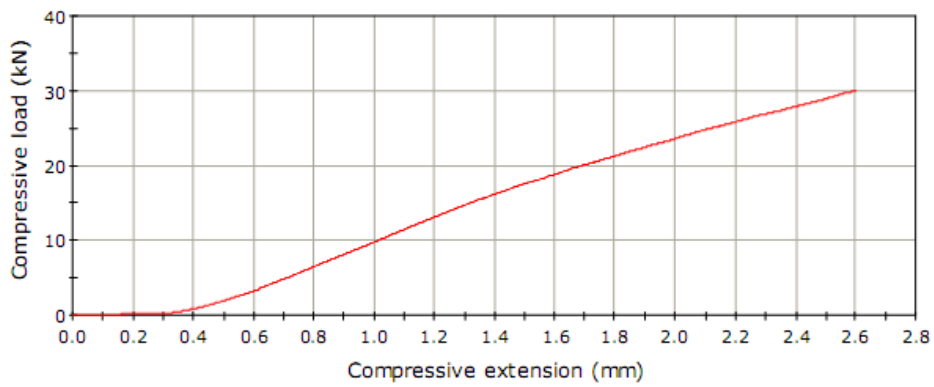
Σχήμα 6.5.8 Ασκούμενη δύναμη 10 kN σε κεφαλή 316L σε επίπεδη επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH

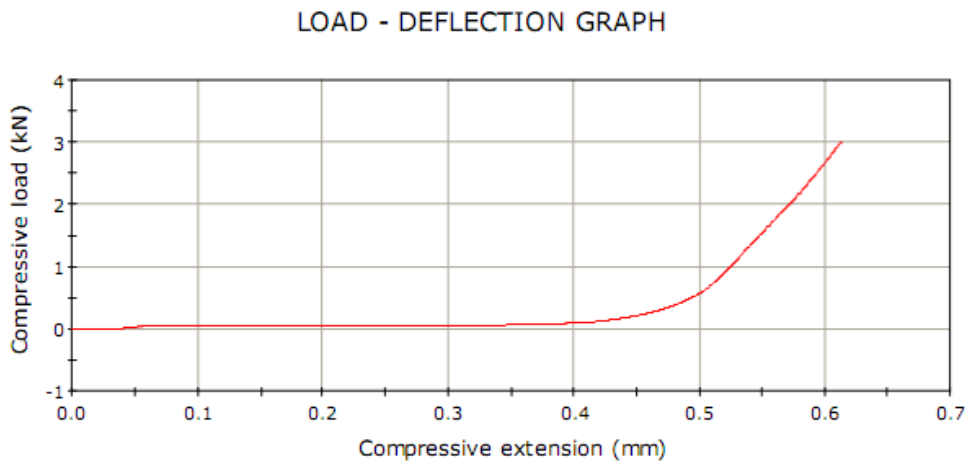


Σχήμα 6.5.9 Ασκούμενη δύναμη 20 kN σε κεφαλή 316L σε επίπεδη επιφάνεια

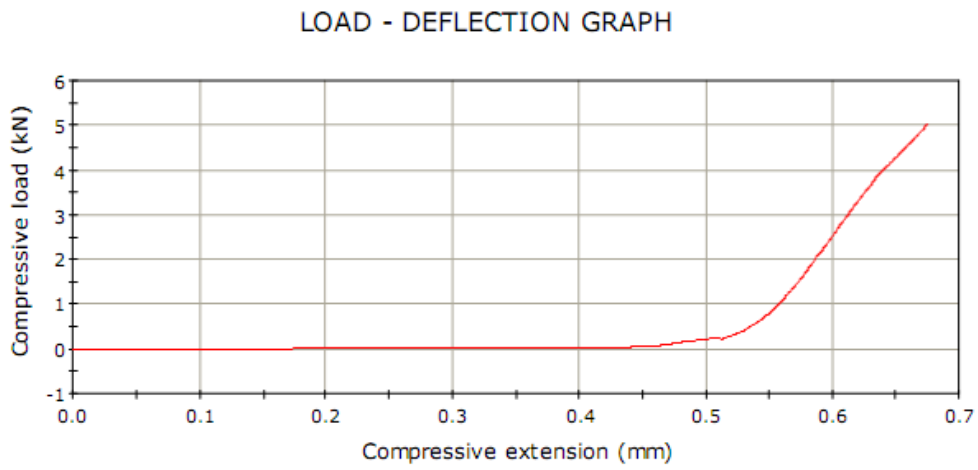
LOAD - DEFLECTION GRAPH



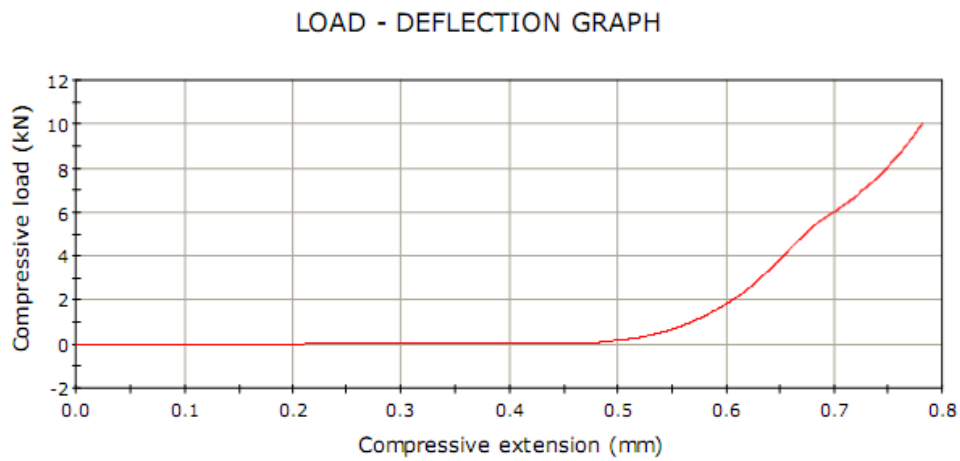
Σχήμα 6.5.10 Ασκούμενη δύναμη 30 kN σε κεφαλή 316L σε επίπεδη επιφάνεια



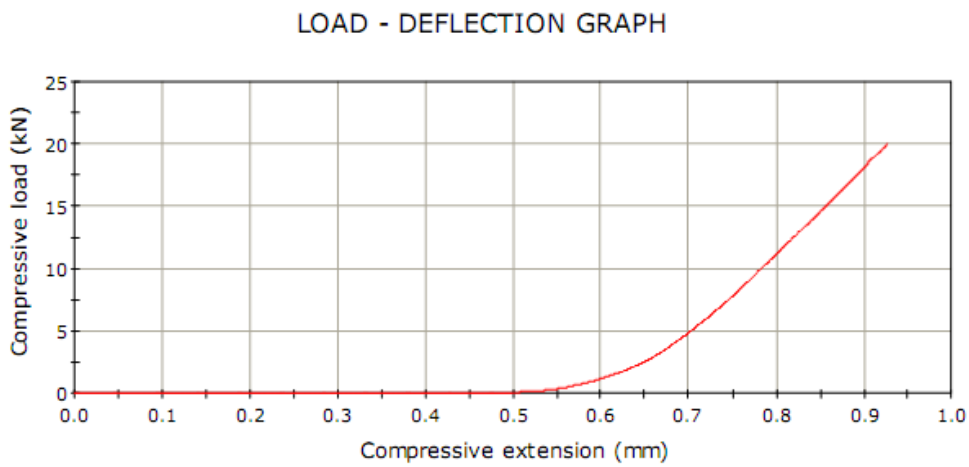
Σχήμα 6.5.11 Ασκούμενη δύναμη 3 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια



Σχήμα 6.5.12 Ασκούμενη δύναμη 5 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια

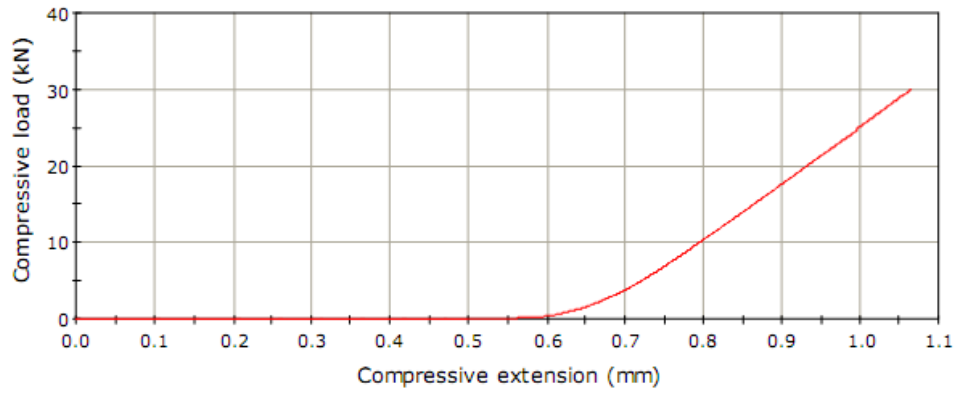


Σχήμα 6.5.13 Ασκούμενη δύναμη 10 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια



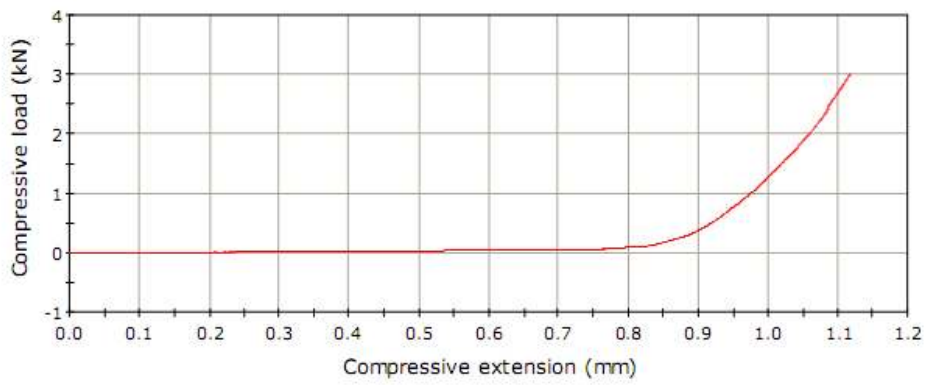
Σχήμα 6.5.14 Ασκούμενη δύναμη 20 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σχήμα 6.5.15 Ασκούμενη δύναμη 30 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια

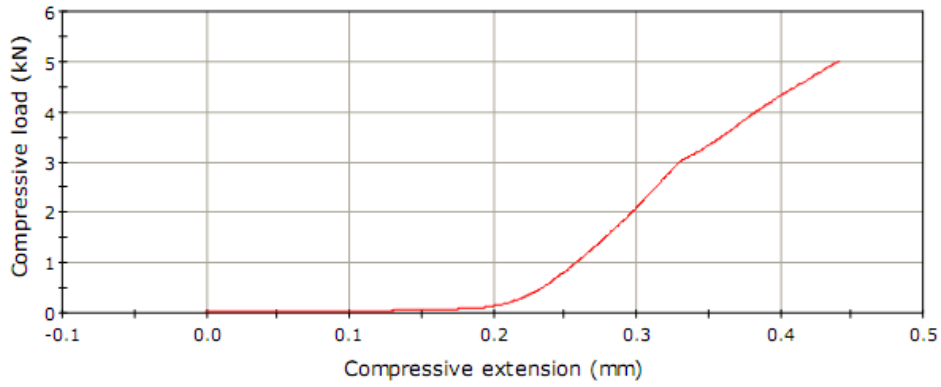
LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σχήμα 6.5.16 Ασκούμενη δύναμη 3 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια

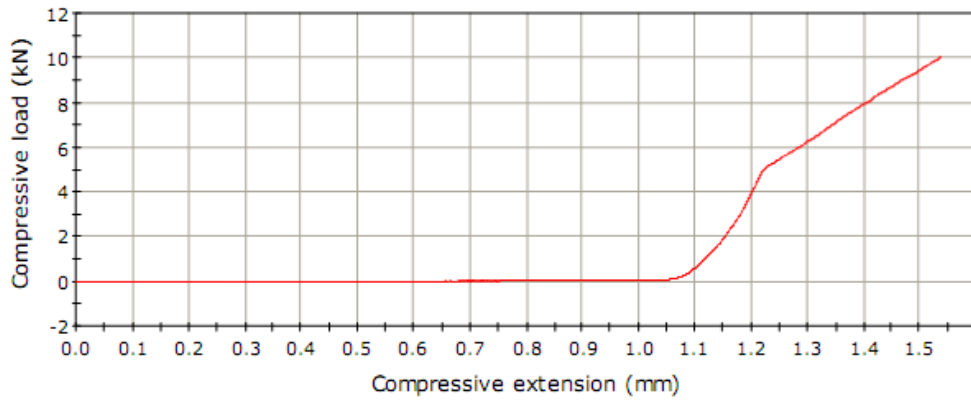


LOAD - DEFLECTION GRAPH



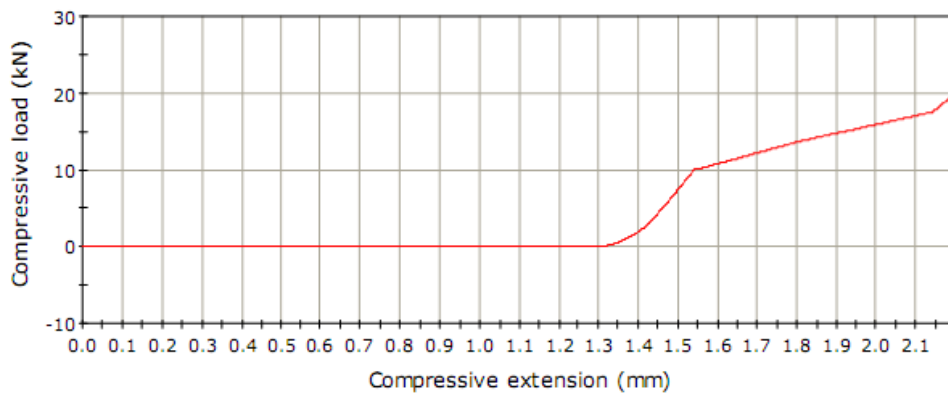
Σχήμα 6.5.17 Ασκούμενη δύναμη 5 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



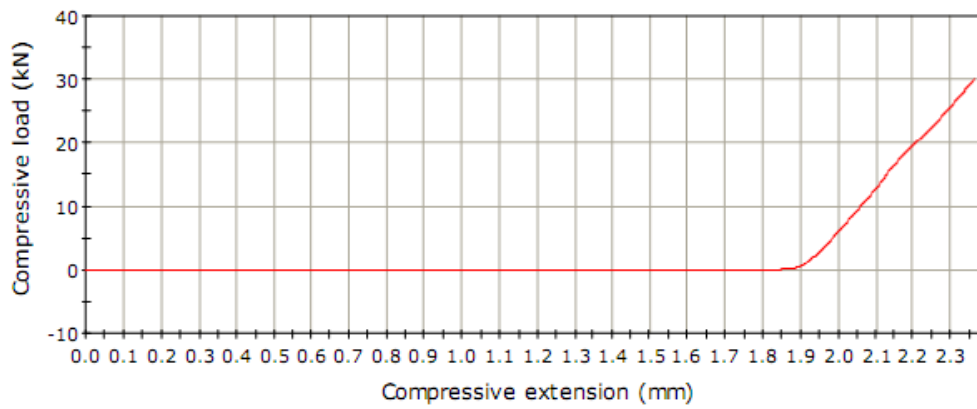
Σχήμα 6.5.18 Ασκούμενη δύναμη 10 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σχήμα 6.5.19 Ασκούμενη δύναμη 20 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σχήμα 6.5.16 Ασκούμενη δύναμη 30 kN σε κεφαλή AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ**

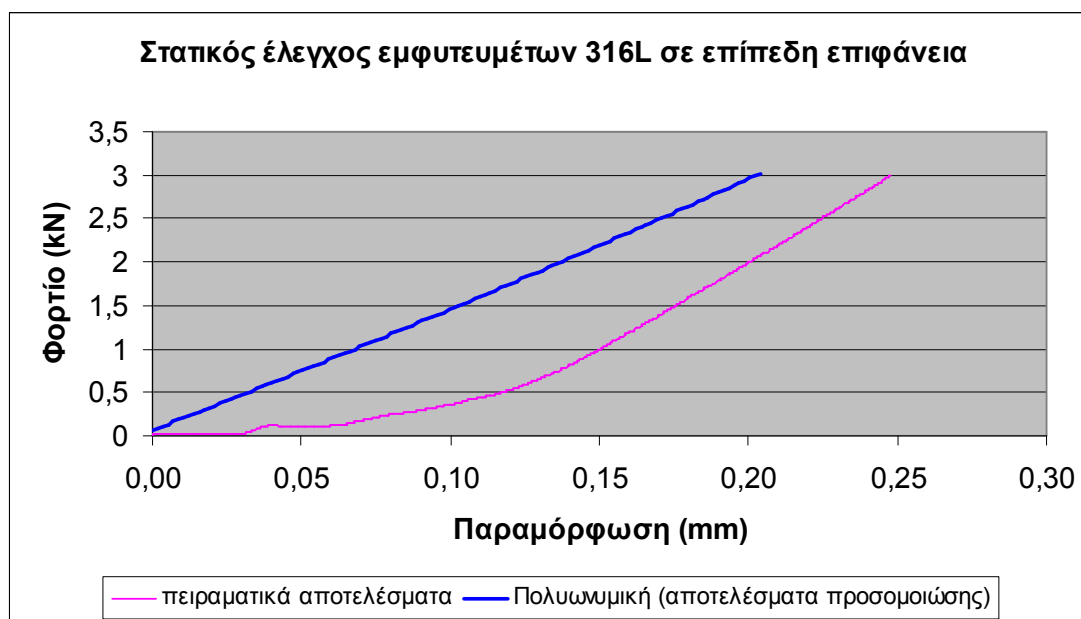
### **ΣΥΖΗΤΗΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## 7.1 Εισαγωγή

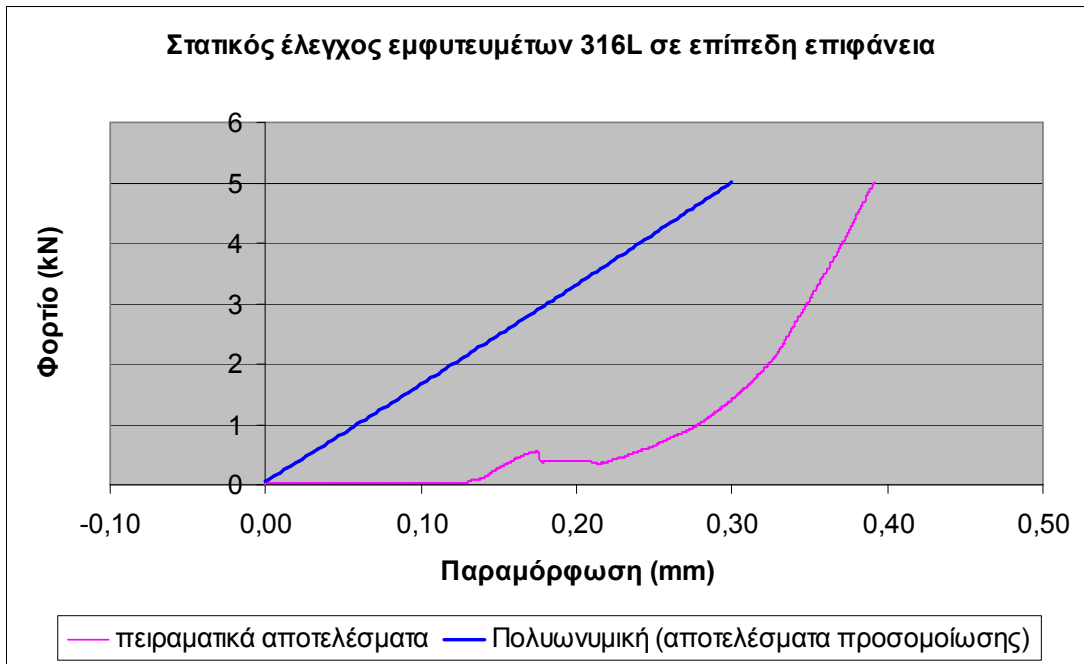
Ανακεφαλαιώνοντας όσα αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, συνειδητοποιεί κανείς πόσο σημαντική και συνάμα περίπλοκη είναι η επιτυχής προσέγγιση και προσομοίωση του στατικού ελέγχου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται ομαδοποιημένα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη της πειραματικής και αριθμητικής προσομοίωσης του ελέγχου. Ακολουθούν μια σύντομη αναφορά σε αδυναμίες και πλεονεκτήματα της μεθόδου καθώς και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

## 7.2 Συνοπτικά αποτελέσματα πειραματικής και αριθμητικής διαδικασίας

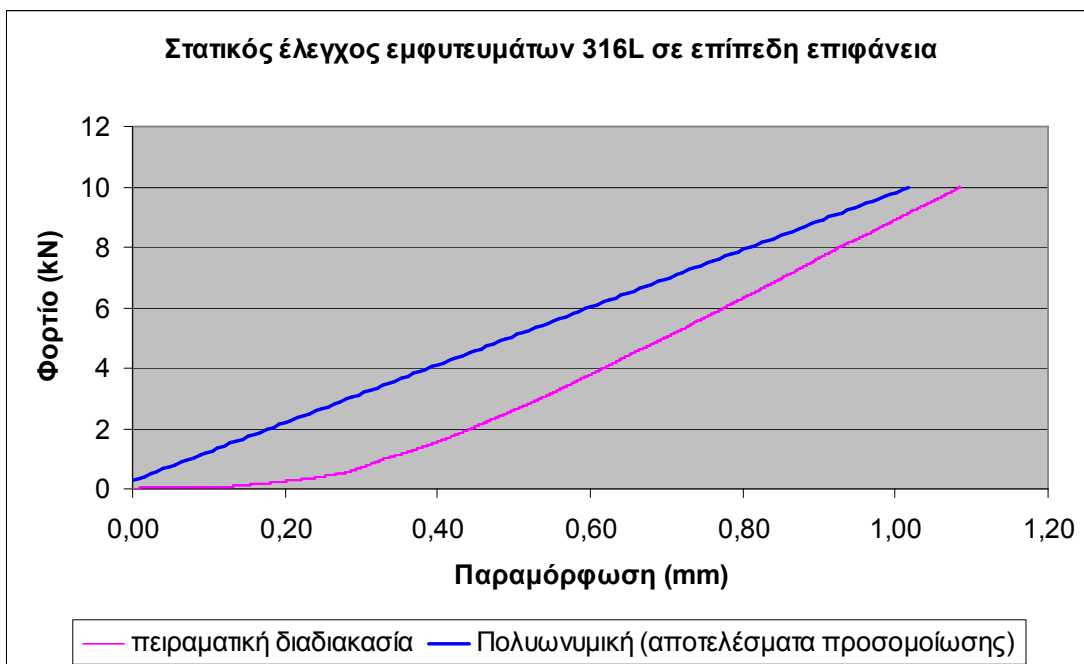
Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται στα ίδια διαγράμματα τα αποτελέσματα της αριθμητικής και πειραματικής διαδικασίας με επίπεδη αλλά και με κωνική επιφάνεια..(σχήμα 7.1.1-7.1.20)



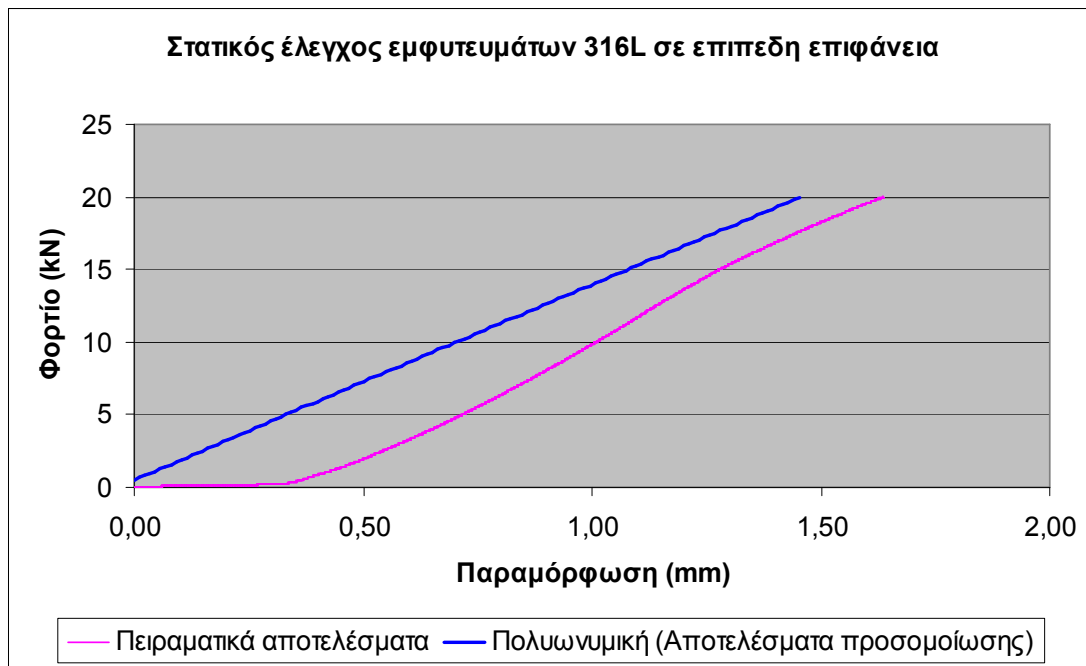
Σχήμα 7.1.1 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια



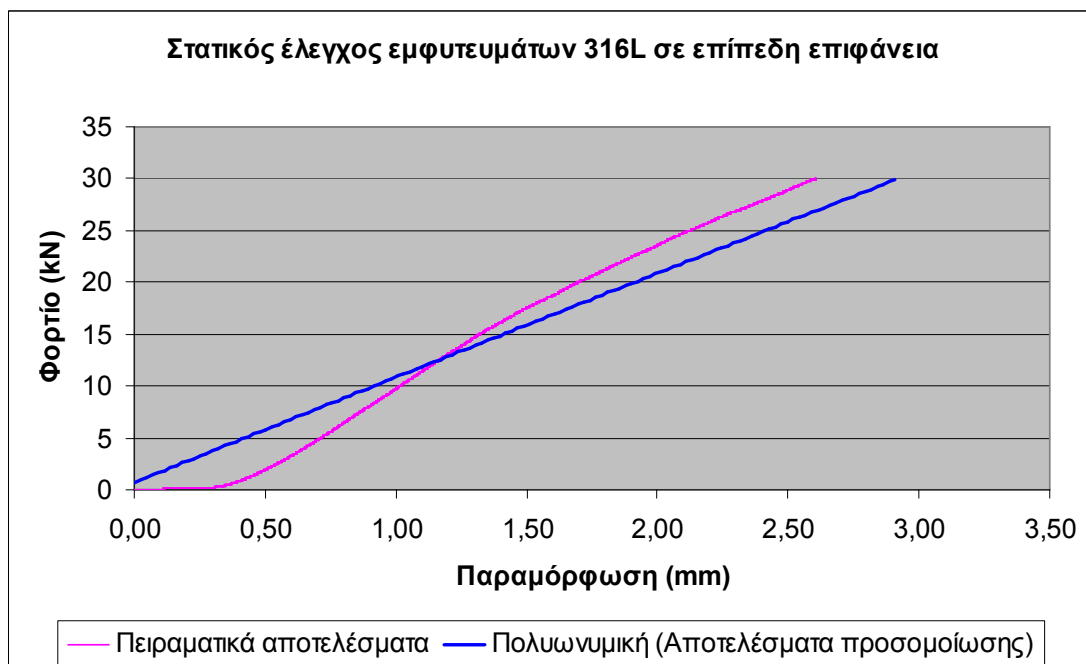
Σχήμα 7.1.2 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια



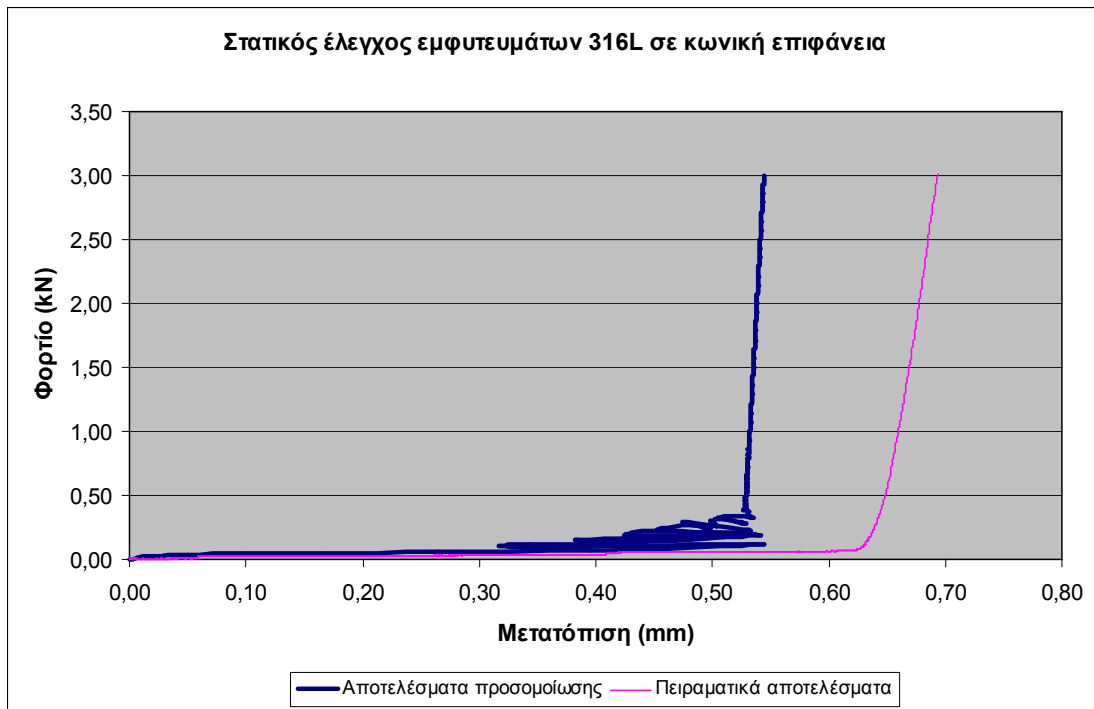
Σχήμα 7.1.3 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια



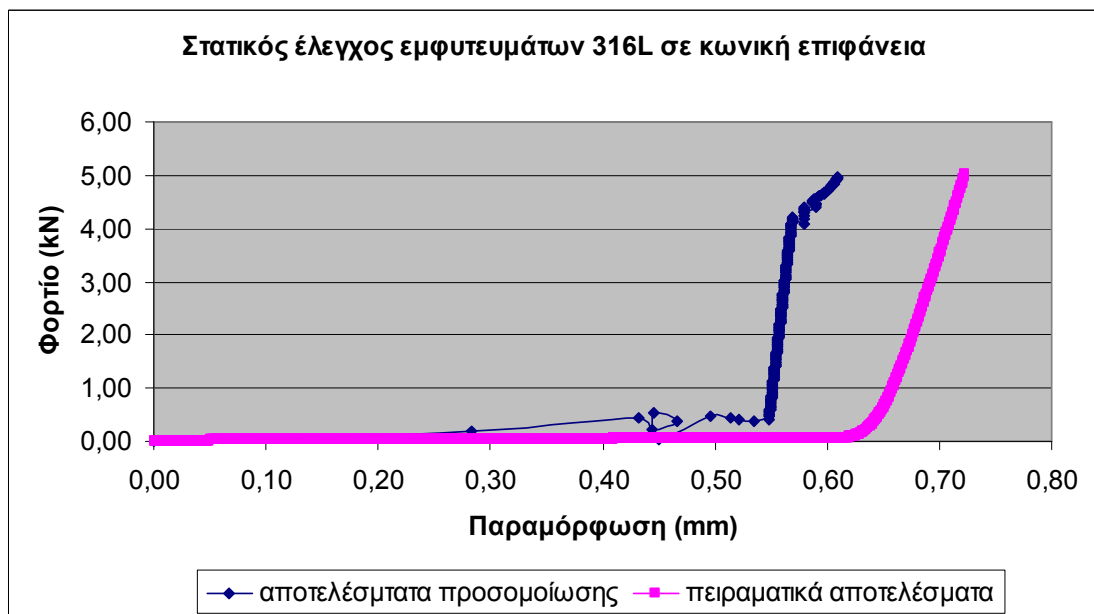
Σχήμα 7.1.4 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια



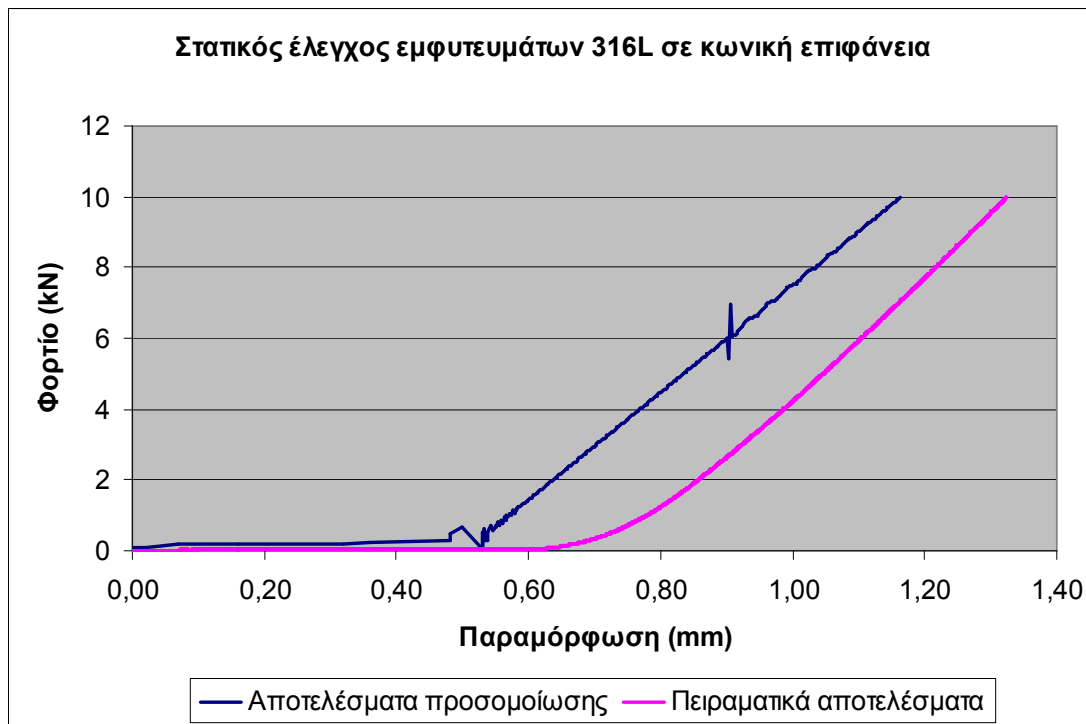
Σχήμα 7.1.5 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό 316L σε επίπεδη επιφάνεια



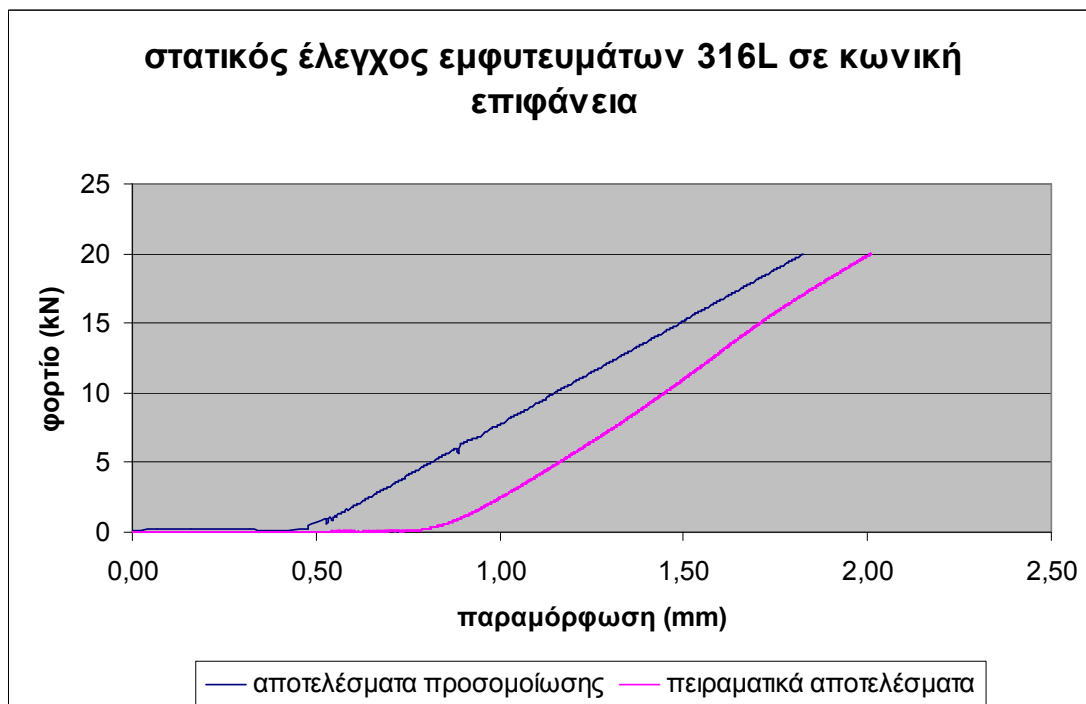
Σχήμα 7.1.6 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια



Σχήμα 7.1.7 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια

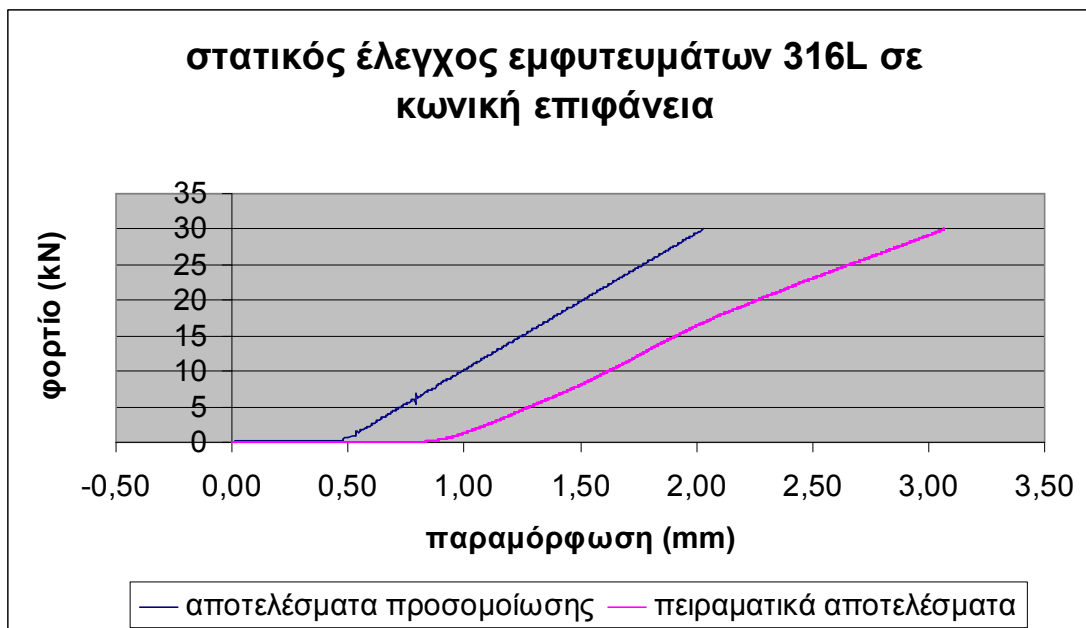


Σχήμα 7.1.8 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια

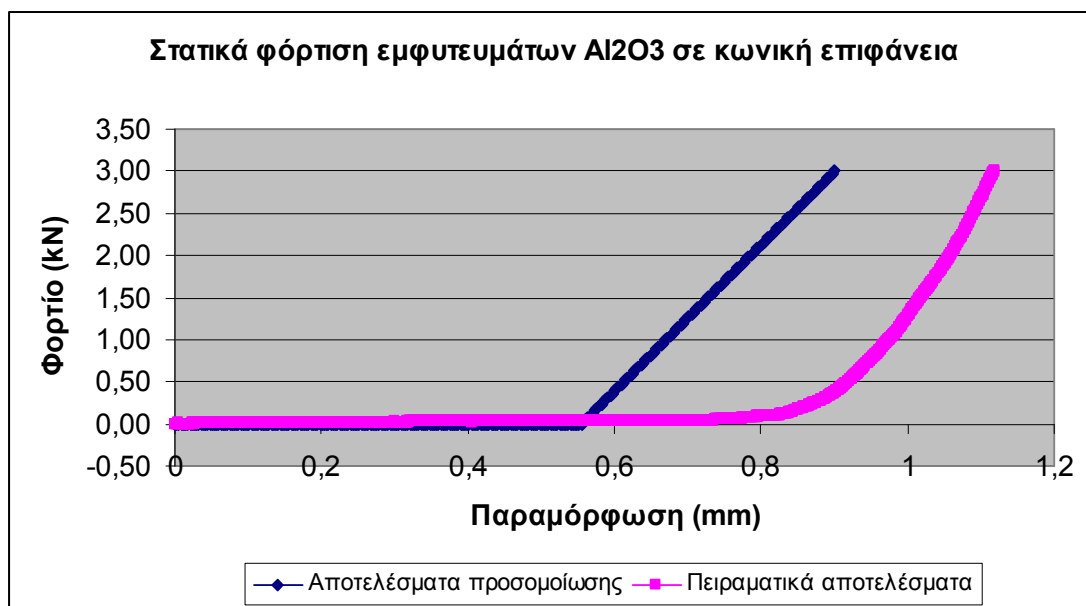


Σχήμα 7.1.9 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια

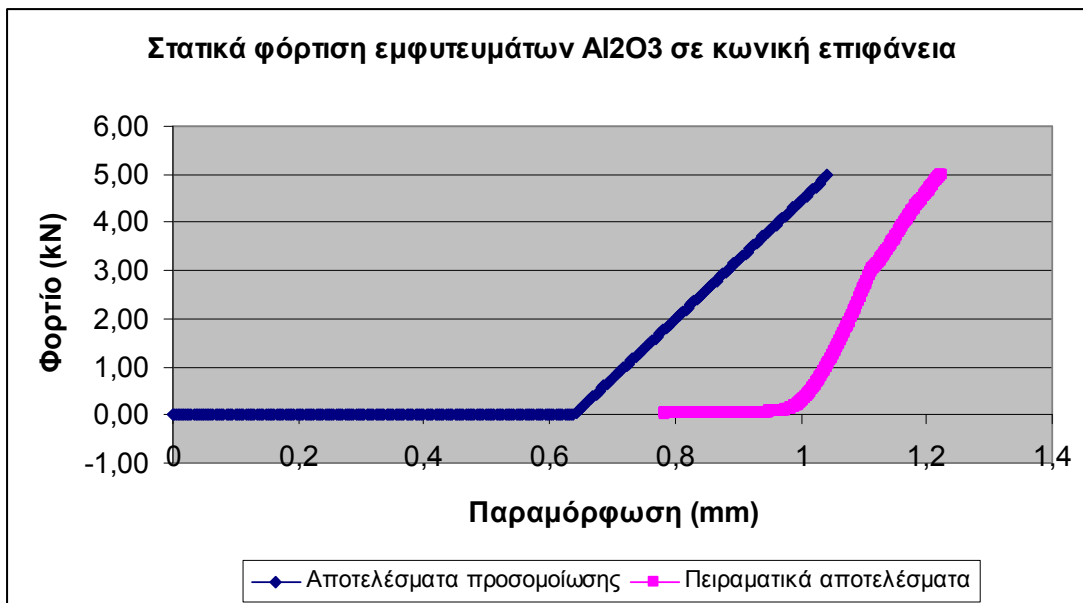




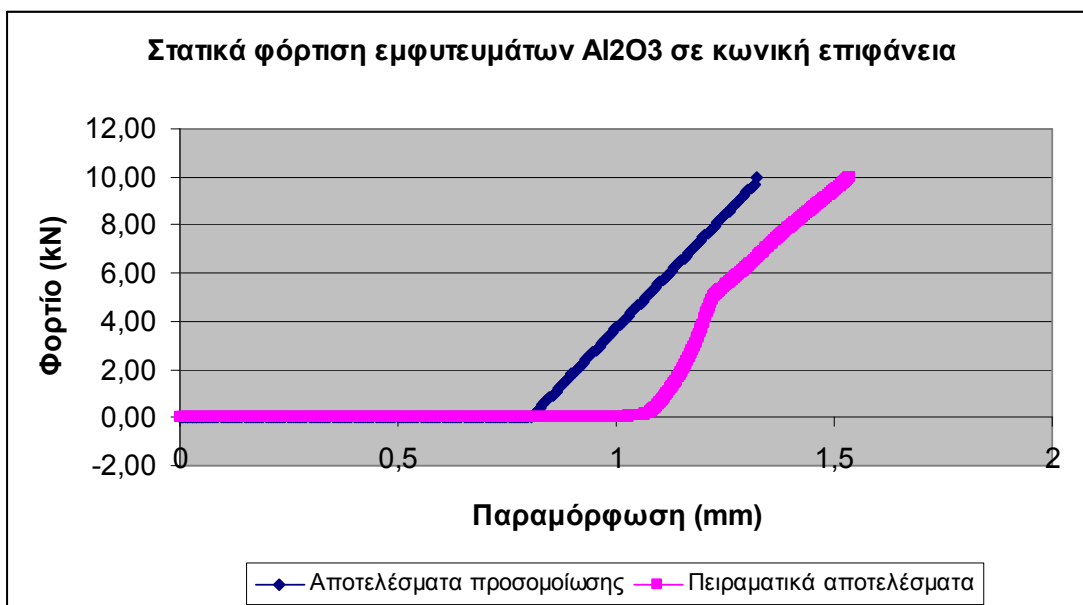
Σχήμα 7.1.10 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό 316L σε κωνική επιφάνεια



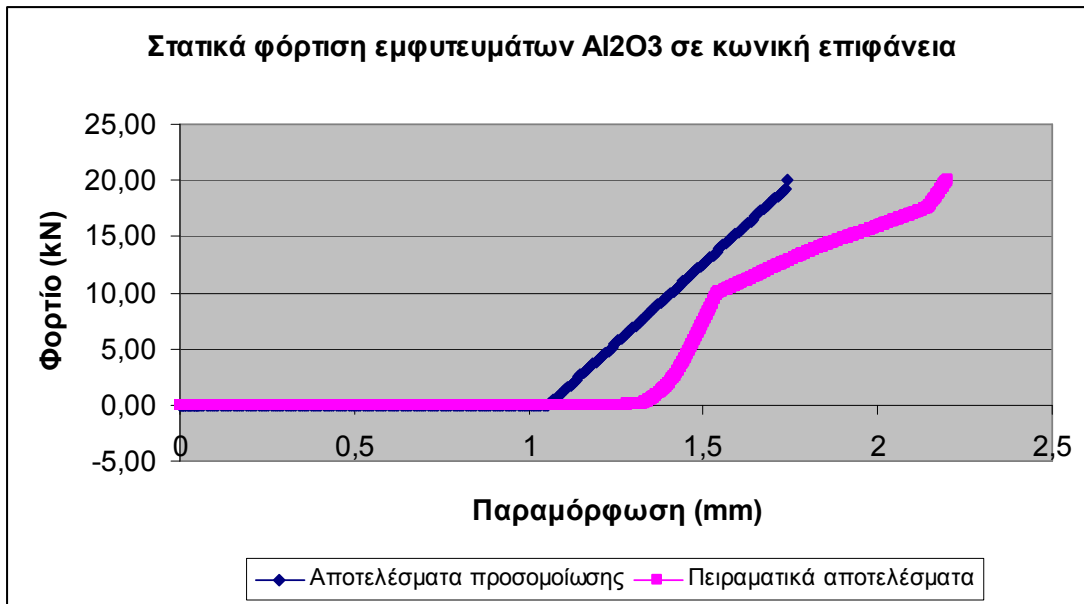
Σχήμα 7.1.11 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό Al2O3 σε κωνική επιφάνεια



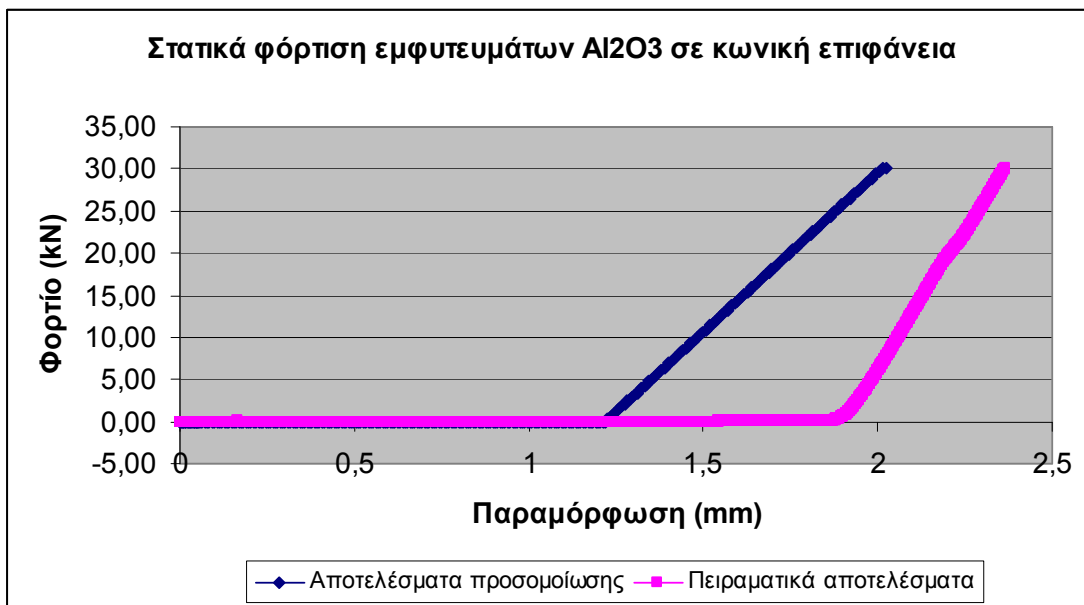
Σχήμα 7.1.12 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια



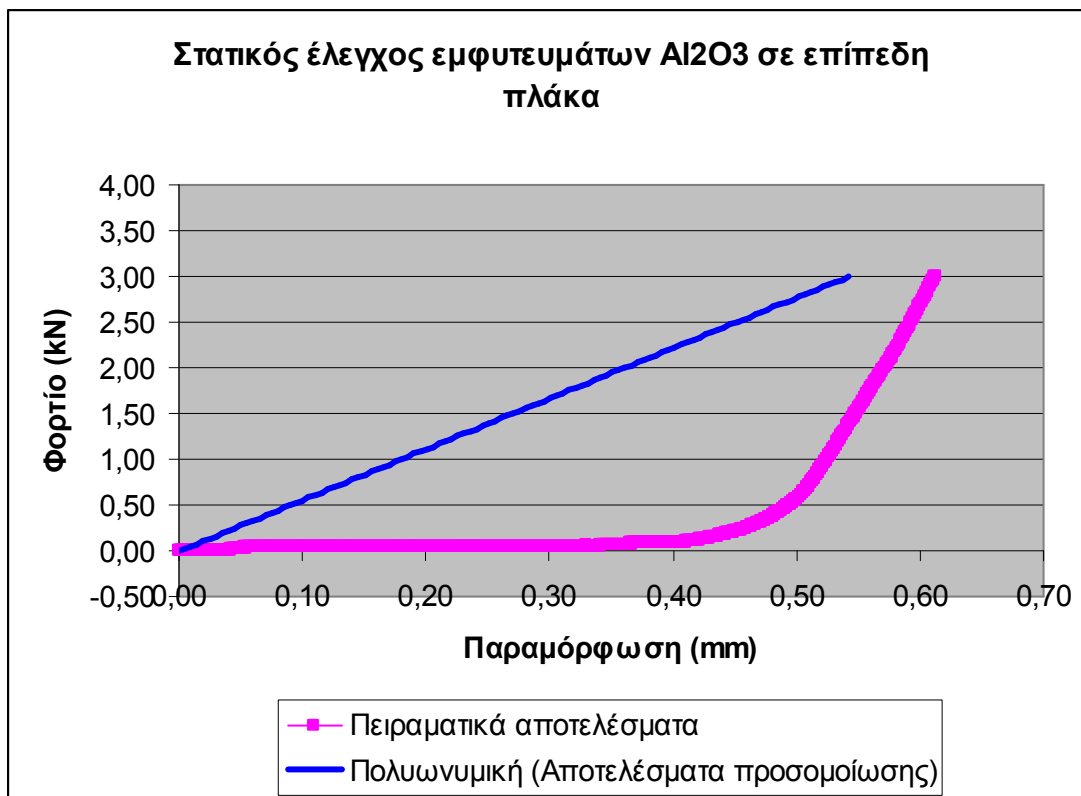
Σχήμα 7.1.13 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια



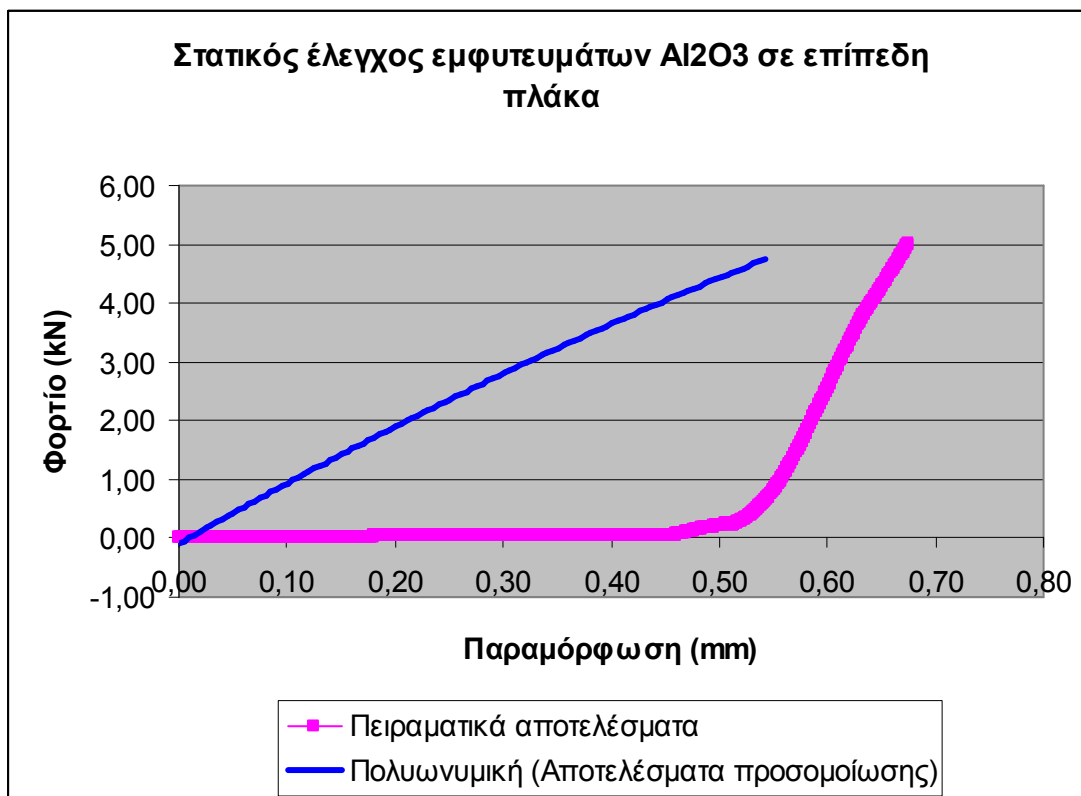
Σχήμα 7.1.14 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια



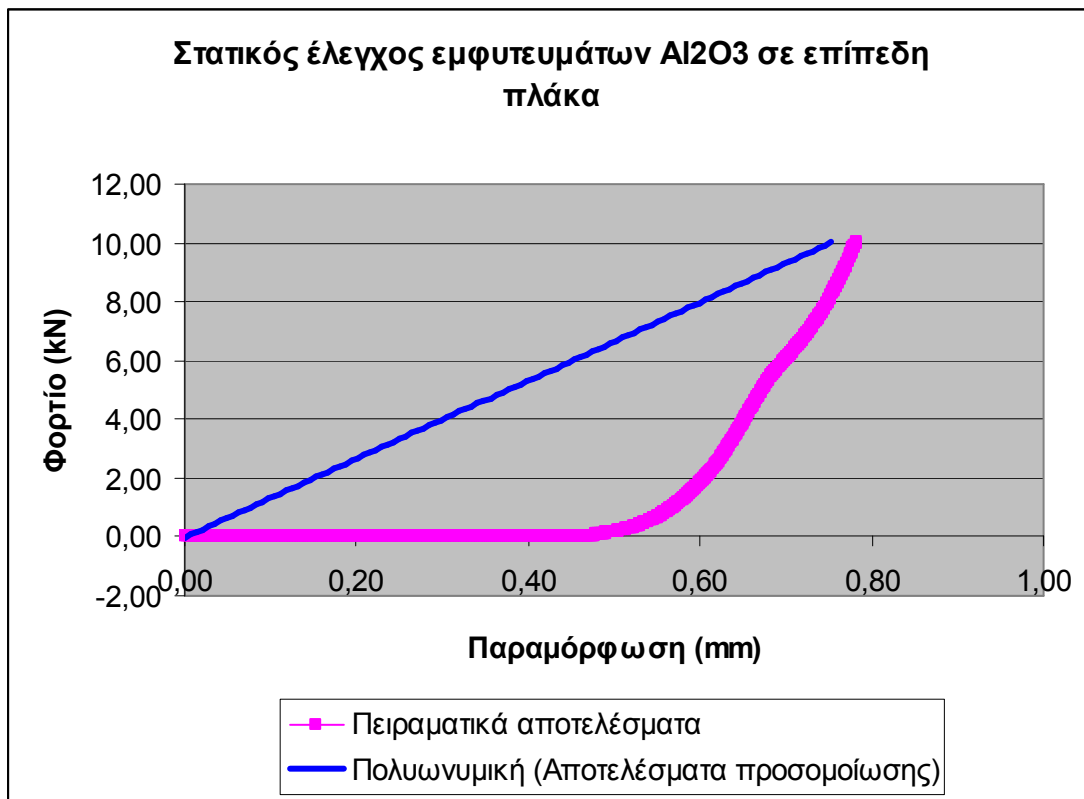
Σχήμα 7.1.15 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε κωνική επιφάνεια



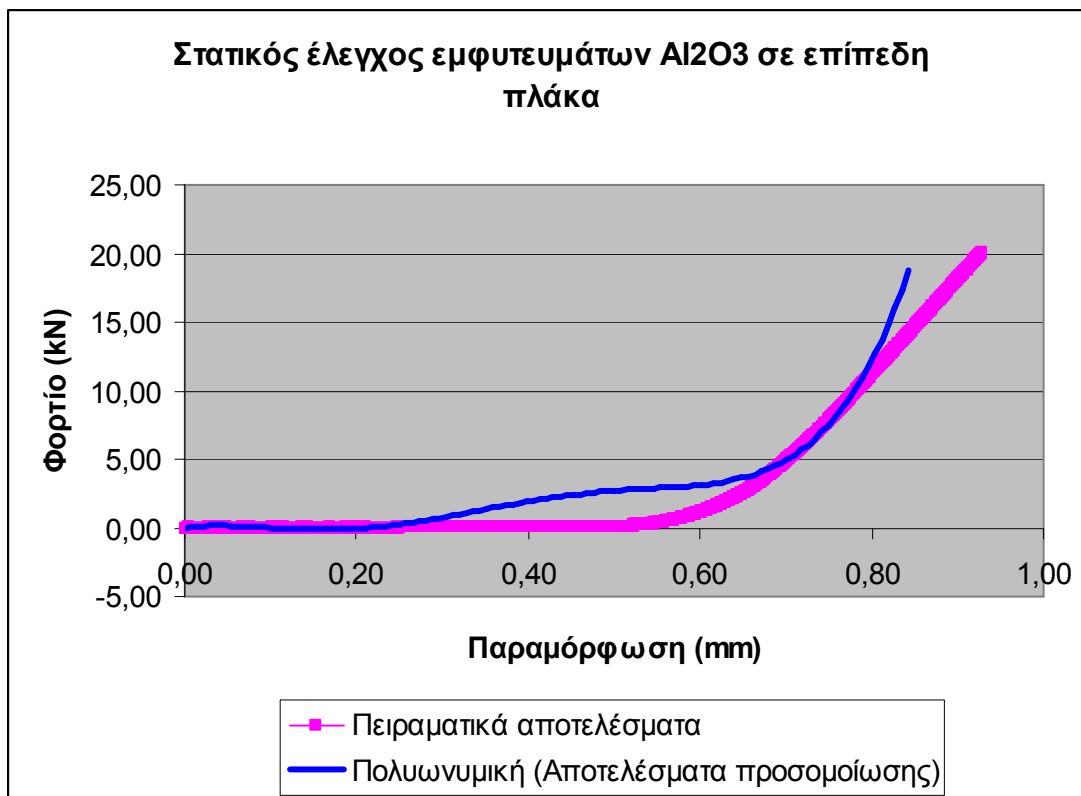
Σχήμα 7.1.16 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 3 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια



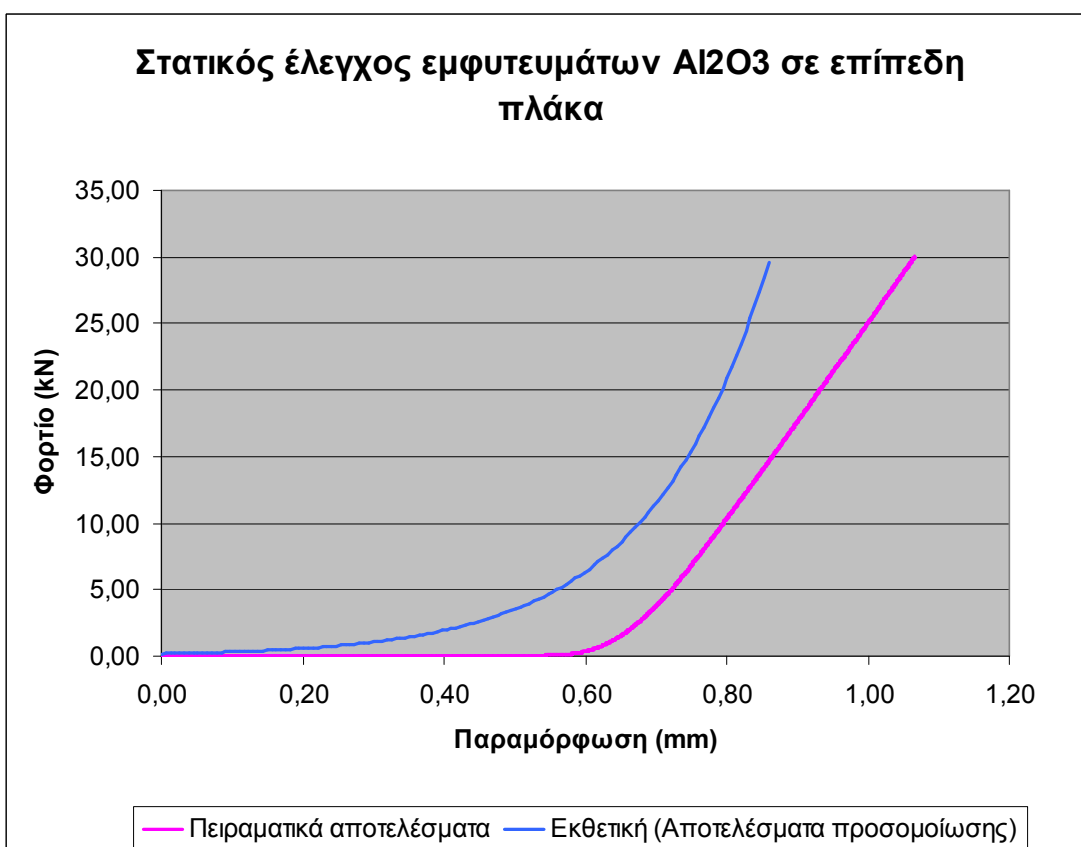
Σχήμα 7.1.17 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 5 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια



Σχήμα 7.1.18 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 10 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια



Σχήμα 7.1.19 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 20 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια



Σχήμα 7.1.20 Διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου μέγιστης δύναμη 30 kN σε υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επίπεδη επιφάνεια

## 7.3 Γενικά σχόλια

### 7.3.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Γενικά από τη μελέτη των γραφημάτων προκύπτει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είσαι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αν μελετήσουμε προσεκτικά τα διαγράμματα θα δούμε ότι για τον ανοξείδωτο χάλυβα, η μορφή τους είναι γραμμική λόγω του ότι τα πειράματα γίνονται στην ελαστική περιοχή του υλικού. Αυτό παρατηρείται τόσο στην κωνική επιφάνεια όσο και στην επίπεδη πλάκα. Όσον αφορά τα κεραμικά εμφυτεύματα για την κωνική επιφάνεια ακολουθούν την γραμμική συμπεριφορά, αλλά στην επίπεδη επιφάνεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενώ έχουν γραμμική συμπεριφορά για τα χαμηλά φορτία, στα υψηλά ξεκινάει να είναι λίγο πολυωνυμική. Βέβαια τα γραφήματα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων ακολουθούν την ίδια μορφή με τα πειραματικά, απλώς είναι λίγο μετατοπισμένα προς τα αριστερά ή τα δεξιά. Η απόκλιση αυτή δεν ξεπερνάει τα 15% και είναι πολύ λογική, μιας και με τα πεπερασμένα στοιχεία δεν μπορούν να περιγράψουν με τέλεια ακρίβεια ένα πείραμα, λόγω σφαλμάτων στον κώδικα της λύσης και άλλων παραμέτρων που δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό. Αντίθετα μέσω των πεπερασμένων στοιχείων μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα για την εξέλιξη μιας διαδικασίας, κάτι ευκολότερο και πιο οικονομικό από μια σειρά πειραμάτων.

### 7.3.2 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης

Το πλεονέκτημα της μεθόδου μοντελοποίησης του στατικού ελέγχου με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έγκειται στο ότι προσφέρει αποτελέσματα με λεπτομέρεια και ακρίβεια. Ακόμη και αν η μοντελοποίηση δεν κρίνεται ως ιδανική από κάποιες απόψεις, σίγουρα η εικόνα των μεγεθών που προσφέρεται μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα κατατοπιστική.

Η αλλαγή οποιωνδήποτε παραμέτρων είναι εύκολη και γρήγορη, οπότε δίνεται η δυνατότητα πειραματισμού ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος επίλυσης από πλευράς ακρίβειας των αποτελεσμάτων και από πλευράς κόστους.

Όστόσο ο βασικός περιορισμός της μεθόδου της αριθμητικής προσομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έγκειται στο ότι προς το παρόν, δεν υπάρχουν δημοσιευμένες ανάλογες εργαστηριακές μετρήσεις για να ελεγχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Και σε αυτήν την περίπτωση όμως ότι έχουν εισαχθεί σωστά τα δεδομένα και έχουν χρησιμοποιηθεί οι κατάλληλες τιμές των

κρίσιμων παραμέτρων της διαδικασίας, τα αποτελέσματα πιθανότατα είναι ενδεικτικά της πραγματικής κατάστασης.

Στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας, και στα χρονικά όρια που η εκπόνηση της συνεπάγεται, δεν κρίθηκε σκόπιμο να αυξηθεί περαιτέρω ο βαθμός διακριτοποίησης, διότι τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στην πειραματική διαδικασία σε ικανοποιητικό βαθμό. Σε περίπτωση όμως ερευνητικής εργασίας της οποίας ο χρονικός ορίζοντας το επιτρέπει, θα είχε ενδιαφέρον να εξετάσει κανείς εάν με αύξηση του βαθμού διακριτοποίησης θα επιτυγχάνονταν προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας με μεγαλύτερη ακρίβεια

#### 7.4 Επικύρωση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Η επικύρωση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε πραγματοποιήθηκε με άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής και πειραματικής προσομοίωσης και με οπτικές παρατηρήσεις των κεφαλών που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Στην δημιουργία των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η ίδια γεωμετρία και δομή των κεφαλών που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές.

Έγινε προσπάθεια ώστε οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών, που εισήχθησαν κατά την μοντελοποίηση, να ταυτίζονται με τις πραγματικές, ωστόσο δεν ήταν εφικτό σε όλες τις περιπτώσεις. Παρά την αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού των ιδιοτήτων αυτών, εισήχθησαν τιμές που θεωρείται ότι προσεγγίζουν τις πραγματικές σε ικανοποιητικό βαθμό.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στους ακόλουθους παράγοντες :

- Οριακές συνθήκες (κυρίως τριβές) στις οποίες δεν ήταν διαθέσιμες ακριβείς πληροφορίες για την εισαγωγή του στον κώδικα του LS-DYNA και επελέγησαν κάποιες τιμές σύμφωνα με την βιβλιογραφία.
- Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η κινηματική ακρίβεια του πειραματικού εξοπλισμού.
- Τέλος, διαφορές πιθανότατα προκύπτουν και από το γεγονός ότι στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA μοντελοποιείται ένα δυναμικό φαινόμενο ενώ στο πείραμα η καταπόνηση είναι στατική.



Στην παρούσα διπλωματική εργασία η σύγκριση των εκάστοτε μοντέλων με τα πειραματικά δεδομένα υπέδειξαν συμφωνία των αποτελεσμάτων, γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία και εγκυρότητα της ερευνητικής διαδικασίας που αναπτύσσεται στο παρόν σύγγραμμα.

#### 7.5 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων τα τελευταία έτη έχει διαγράψει λαμπρή πορεία στο χώρο της προσομοίωσης των κατασκευών που χρησιμοποιείται ευρύτατα. Είναι σαφές ότι το μέλλον μόνο θετικές εξελίξεις μπορεί να υποσχεθεί στον τομέα αυτό. Ειδικά δε για την μοντελοποίηση και προσομοίωση του ελέγχου ισχιακών κεφαλών, εκτός από τον στατικό έλεγχο εμφυτευμάτων ισχίου, πεδίο που πραγματεύτηκε η παρούσα εργασία, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκ του μηδενός μοντελοποίηση ή/και βελτίωση των υπάρχοντων μοντέλων :

- Δυναμικός έλεγχος εμφυτευμάτων ισχίου