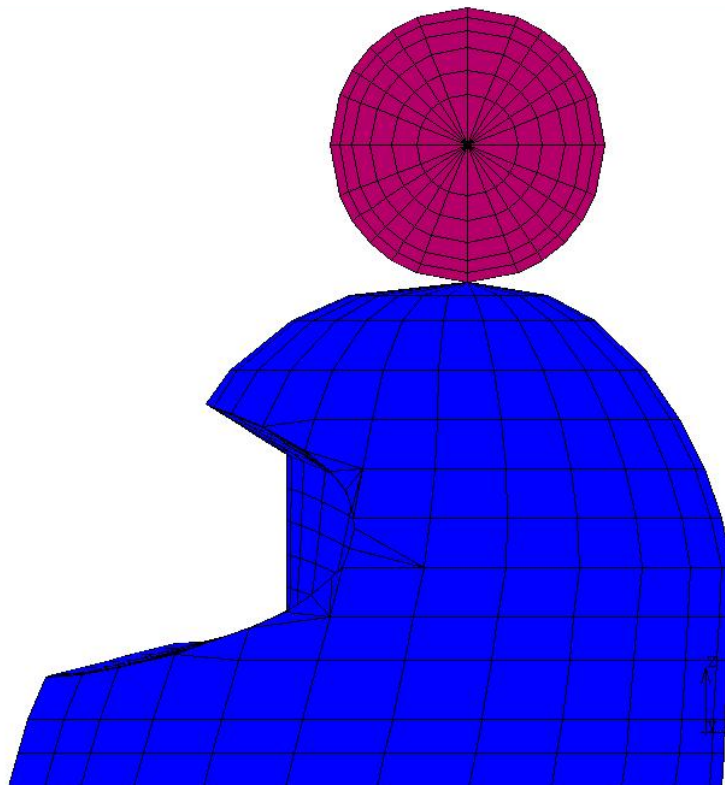




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΡΑΝΟΥΣ
ΜΟΤΟΣΙΚΛΕΤΙΣΤΗ ΣΕ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ



ΝΙΚΗΦΟΡΟΣ Ι. ΣΤΕΦΑΝΟΥΔΑΚΗΣ

Διατριβή για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

ΧΑΝΙΑ 2004

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αφορά τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ενός κράνους μοτοσυκλετιστή κατά την διάρκεια σύγκρουσης με ακίνητο αντικείμενο (crash test). Η έρευνα επιστημόνων από όλο τον κόσμο στο συγκεκριμένο θέμα έχει σημειώσει αλματώδη πρόοδο τις τελευταίες πέντε δεκαετίες με την εφαρμογή τεχνολογικών επιτευγμάτων στον αγώνα για την προστασία της ανθρώπινης ζωής.

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές:

Αγιουτάντη Ζαχαρία, Καθηγητή στο Πολυτεχνείο Κρήτης

Τσομπανάκη Ιωάννη, Επίκουρο Καθηγητή στο Πολυτεχνείο Κρήτης,

για την υποστήριξη και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχαν κατά την διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου:

Προβιδάκη Κωνσταντίνο, Αναπληρωτή Καθηγητή στο Πολυτεχνείο Κρήτης,

για την καθοδήγησή του στην εκπόνηση και συγγραφή της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη Δρ. Σταυρουλάκη Μαρία, για την πολύτιμη βοήθεια της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη ασχολείται με την αριθμητική προσομοίωση της δυναμικής φόρτισης ενός κράνους μοτοσικλετιστή κατά τη διάρκεια σύγκρουσης του με σταθερό αντικείμενο (crash test). Η προσομοίωση της σύγκρουσης γίνεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος MARC Mentat, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης της δυναμικής φόρτισης που προέκυψε δίνουν ικανοποιητικές απαντήσεις για τα αίτια πιθανής αστοχίας των υλικών, αφού εντοπίζουν τις περιοχές του κράνους όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις και οι μέγιστες παραμορφώσεις. Επίσης οι τιμές που λαμβάνονται από κατάλληλο κριτήριο τραυματισμού του κεφαλιού για τη συγκεκριμένη φόρτιση βοηθούν στην εκτίμηση της επιθυμητής αντοχής του κράνους έτσι ώστε να μην διατρέχει κίνδυνο ο αναβάτης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 :ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΡΑΝΟΥΣ	14
1.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων δοκιμών ελέγχου κράνους	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΕΦΑΛΙΟΥ	23
2.1 Γενικά	23
2.2 Το κριτήριο HIC	24
2.2.1 Ορισμός του HIC	25
2.2.2 Περιορισμοί του κριτηρίου HIC	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΡΑΝΟΥΣ	27
3.1 Υλικά κατασκευής κελυφών	27
3.1.1 Θερμοπλαστικά κελύφη	27
3.1.2 Σύνθετα κελύφη	28
3.2 Εσωτερικό αφρώδες υλικό	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΚΡΑΝΟΥΣ	32
4.1 Εξωτερικό κέλυφος	32
4.2 Αφρώδες υλικό	34
4.3 Το κεφάλι	37
4.4 Τα ινοπλισμένα σύνθετα πολυμερή (FRP)	37
4.4.1 Η φύση των σύνθετων πολυμερών	37
4.4.2 Λειτουργία των συνθετικών πολυμερών	38

4.4.3 Τα κυριότερα συνθετικά πολυμερή	40
4.5 Διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS)	42
4.5.1 Παραμόρφωση του EPS	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	47
5.1 Γενικά	47
5.2 Ανάλυση τάσεων στο χώρο των τριών διαστάσεων	51
5.2.1 Χαρακτηριστικά τετραεδρικών στοιχείων	53
5.3 Μη γραμμική ανάλυση	58
5.3.1 Γενική προσέγγιση μη γραμμικών προβλημάτων	59
5.3.2 Επιτάχυνση της σύγκλισης	63
5.4 Ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία	64
5.4.1 Εξάεδρο (Στερεό) Ισοπαραμετρικό Στοιχείο	65
5.5 Σύνθετα και ορθοτροπικά υλικά	68
5.5.1 Ορθοτροπικό Υλικό	68
5.5.2 Οι Μηχανισμοί και οι Θεωρίες Αποτυχίας Ορθοτροπικού Υλικού	71
5.6 Επιλογή τύπου στοιχείου	74
5.7 Μειονεκτήματα της μεθόδου	76
5.8 Ακρίβεια της μεθόδου	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΑΝΟΥΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	
(FEM)	78
6.1 Μεθοδολογία	78
6.1.1 Μοντελοποίηση του εξωτερικού κελύφους	81
6.1.2 Μοντελοποίηση του εσωτερικού αφρώδους υλικού	83
6.1.3 Μοντελοποίηση του κεφαλιού	85
6.1.4 Συνοριακές συνθήκες και αρχικές τιμές φόρτισης	86

6.2 Αποτελέσματα	87
6.2.1 Τα αποτελέσματα στο εξωτερικό κέλυφος “Kevlar”	93
6.2.2 Τα αποτελέσματα στο εσωτερικό μέρος του κελύφους	110
6.2.3 Τα αποτελέσματα στο εσωτερικό αφρώδες υλικό (πολυστυρένιο)	122
6.2.4 Τα αποτελέσματα στο κεφάλι	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ–	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	138
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	152

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μοτοσυκλέτα είναι ένα ευρέως διαδεδομένο μεταφορικό μέσο η χρησιμοποίηση του οποίου συνεχώς αυξάνεται τις τελευταίες δεκαετίες. Οι λόγοι είναι κυρίως η οικονομία και η ευκολία που προσφέρει αυτό το μέσο στην μετακίνηση, ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα όπου το κυκλοφοριακό πρόβλημα συνεχώς επιδεινώνεται. Δυστυχώς όμως, όπως φαίνεται και από στατιστικά στοιχεία, ο κίνδυνος που διατρέχει ο μοτοσυκλετιστής για τραυματισμό σε περίπτωση ατυχήματος είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι ένας οδηγός αυτοκινήτου. Αυτό οφείλεται σε ένα μέρος στη μικρότερη προστασία που προσφέρει η μοτοσυκλέτα σε σύγκριση με το αυτοκίνητο. Για τον λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί μια σειρά προϊόντων που θα μπορέσουν να προστατέψουν τον αναβάτη σε περίπτωση πτώσης του από τη μηχανή. Το σημαντικότερο από αυτά τα προϊόντα είναι το κράνος, καθώς αυτό προστατεύει το κεφάλι του αναβάτη και μπορεί με τη χρησιμοποίηση του να μειώσει τον αριθμό των σοβαρών τραυματισμών που σημειώνονται κάθε χρόνο.

Από την στιγμή που διαπιστώθηκε ότι το κράνος “σώζει ζωές” έχουν γίνει πληθώρα ερευνών και προσπαθειών ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του στις κρούσεις και παράλληλα να αυξηθεί η προστασία που προσφέρεται στον αναβάτη. Αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας ήταν τα κράνη, τις τελευταίες δεκαετίες να αλλάξουν πάρα πολύ, τόσο στη σύνθεση των υλικών τους όσο και στο σχεδιασμό τους.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να γίνει ένας έλεγχος της ενέργειας που απορροφάται από ένα κράνος κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης και κατά συνέπεια να ελεγχθεί η προστασία που προσφέρει στον αναβάτη. Ένα μεγάλο μέρος της

εργασίας επικεντρώθηκε στην μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών, με στόχο τον έλεγχο της αντοχής και δυνατότητα αστοχίας σε διαχωρισμό των στρωμάτων των υλικών του. Για τον έλεγχο ποιότητας του κράνους χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές που προτείνονται από τα διεθνή κέντρα πιστοποίησης κρανών, ενώ για την πιθανότητα τραυματισμού του κεφαλιού από την περιγραφόμενη σύγκρουση χρησιμοποιήθηκε το “**κριτήριο τραυματισμού του κεφαλιού**”: Head Injury Criterion-HIC. Το HIC σαν κριτήριο είναι διεθνώς αποδεκτό για την εύρεση της πιθανότητας τραυματισμού του κεφαλιού και συνήθως χρησιμοποιείται σαν μέτρο για την ποιότητα των διάφορων υλικών και των δομών τους που συσχετίζονται με την προστασία του κεφαλιού.

Τα κυριότερα μέρη από τα οποία απαρτίζεται ένα κράνος είναι: το **εξωτερικό κέλυφος**, που εμποδίζει την διείσδυση ξένων σωμάτων στο κράνος και εξασφαλίζει να μην υπάρχει επαφή του κεφαλιού με εξωτερικά αντικείμενα, διανέμει το φορτίο σε μεγάλη επιφάνεια ώστε να μην υπάρχει συγκέντρωση φορτίων σε ένα σημείο και τέλος απορροφάει και ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας κρούσης που μπορεί να φτάσει και το 34%, και το **αφρώδες εσωτερικό υλικό** που σκοπό έχει να απορροφήσει το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας. Γενικά είναι κατανοητό ότι όποια και αν είναι η τελική επιλογή των υλικών για την κατασκευή των μερών του κράνους δεν θα μπορέσει αυτό να μας προσφέρει το μέγιστο της προστασίας για όλες τις περιπτώσεις[1]. Ωστόσο όπως φαίνεται και από τους καταλόγους των κατασκευαστών τα τελευταία χρόνια η χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών για το εξωτερικό κέλυφος αυξάνεται συνεχώς. Για το εσωτερικό αφρώδες υλικό, το διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS) έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων υλικών και προτιμάται[2]. Τα υπόλοιπα μέρη του κράνους τα οποία όμως δεν απορροφούν ενέργεια και για αυτό δεν εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία είναι

τα *μαξιλαράκια* που χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερη άνεση και καλύτερη εφαρμογή του κράνους στο κεφάλι του αναβάτη, το *πλαστικό τζάμι* που σκοπό έχει να προστατέψει τον αναβάτη από τον αέρα και τέλος το *λουράκι* με το οποίο συγκρατείται το κράνος στο κεφάλι του αναβάτη.

Η μοντελοποίηση–προσομοίωση των διαφορετικών αντικειμένων με τα οποία έρχεται σε σύγκρουση ένα κράνος κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος είναι επίσης κάτι που απαιτείται να μελετηθεί. Γενικά τα αντικείμενα αυτά προσομοιάζονται σε ένα πείραμα με πέντε διαφορετικούς τρόπους. Τα επίπεδα αντικείμενα που μπορούν να παραμορφωθούν, τα επίπεδα που όμως δεν παραμορφώνονται, τα καμπύλα παραμορφώσιμα και μη, καθώς και τα αιχμηρά μη παραμορφώσιμα αντικείμενα. Στατιστικά οι συγκρούσεις ενός κράνους γίνονται κυρίως με επίπεδα αντικείμενα που δεν δέχονται παραμορφώσεις και σπανίως με αιχμηρά αντικείμενα.

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο για την ανάλυση σύγκρουσης κράνους είναι με πιο σημείο του θα έρθει σε επαφή με τα εξωτερικά αντικείμενα. Αν και στατιστικά το πιθανότερο σημείο είναι το μπροστινό και το πλαϊνό μέρος για κράνη όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή ωστόσο η προσομοίωση έγινε με την κρούση να γίνεται στο πάνω μέρος του κράνους, καθώς κάτι τέτοιο επιτρέπεται από τις διεθνείς συνθήκες μετρήσεων. Στην συγκεκριμένη εργασία για την προσομοίωση του συστήματος και της κρούσης χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο Snell M95[3].

Για να γίνει όμως δυνατή η ανάλυση το προβλήματος απαιτείται και η μοντελοποίηση του κεφαλιού πάνω στο οποίο θα γίνει έλεγχος της τάσης που θα δεχθεί και επομένως του βαθμού προστασίας που προσφέρει το κράνος στον αναβάτη στις διάφορες περιπτώσεις κρούσεων. Επιλέχθηκε το κεφάλι να προσομοιωθεί ως μεταλλικό (αλουμίνιο) μη παραμορφώσιμο υλικό (πολύ μεγαλύτερης ακαμψίας σε σχέση με το κράνος). Αν και αυτή η υπόθεση είναι αυθαίρετη εντούτοις είναι διεθνώς

αποδεκτή και χρησιμοποιείται στα περισσότερα πρωτόκολλα για την πιστοποίηση ενός κράνους. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το μεταλλικό μη παραμορφώσιμο κεφάλι έγκειται στη δυσκολία που υπάρχει στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων μιας τόσο πολύπλοκης κατασκευής όπως είναι το ανθρώπινο κεφάλι και ο βαθμός λεπτομέρειας με την οποία πρέπει να γίνει η ανάλυση του προκειμένου τα αποτελέσματα διαφορετικών οίκων δοκιμών να μπορούν να συγκριθούν. Επίσης το μεταλλικό μη παραμορφώσιμο κεφάλι δεν απορροφάει ενέργεια και έτσι δεν επηρεάζει την απόδοση του κράνους σε μια ανάλυση όπως η παρούσα.

Πειράματα[4,5] απέδειξαν ότι υπάρχει σημαντική κρούση στο εσωτερικό μέρος του αφρώδους υλικού από το μεταλλικό κεφάλι και αυτό παρατηρήθηκε κυρίως όταν οι κρούσεις έγιναν σε επίπεδη μη παραμορφώσιμη επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο του κεφαλιού δεν εφαρμόζει ακριβώς στην εσωτερική επιφάνεια του κράνους. Γίνεται έτσι κατανοητό πόση μεγάλη σημασία έχει για την ασφάλεια του αναβάτη το κράνος του να έχει το σωστό μέγεθος.

Υπάρχουν πολλοί μέθοδοι για να εξετάσει κάποιος την αντοχή ενός κράνους και κατά προέκταση την ασφάλεια που προσφέρει το κράνος στους μοτοσυκλετιστές.

Οι Kostopoulos et al[6] χρησιμοποιούν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων Finite Element Method (FEM) για την προσομοίωση της δυναμικής καταπόνησης με κρούση σε ένα κράνος με τρία διαφορετικά σύνθετα υλικά για το εξωτερικό κέλυφος. Καταλήγει ότι το Kevlar έχει καλύτερη συμπεριφορά από τις ίνες άνθρακα (CFRP) και γυαλιού (GRP). Για την τελική κρίση του κράνους χρησιμοποιεί σαν κριτήριο την επιτάχυνση στο κεφάλι και το HIC.

Οι Gilchrist and Mills[4] χρησιμοποίησαν πειραματικές μετρήσεις με την βοήθεια επιταχυνσιομέτρων που ήταν τοποθετημένα πάνω στο κράνος κατά την κρούση και κατασκεύασαν ένα 1-D μοντέλο σε υπολογιστή που επέτρεπε την

πρόβλεψη της αλληλεπίδρασης διάφορων υλικών στα κελύφη με αφρώδες υλικό διαφορετικών πυκνοτήτων. Επισημαίνουν ότι η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη καθώς η σκληρότητα του κελύφους και η ελαστική περιοχή του αφρώδους υλικού δεν μπορούν να υπολογιστούν μόνο από τις διαστάσεις και τις ιδιότητες των υλικών.

Οι Willinger et al[7] χρησιμοποίησαν το 1-D μοντέλο των Gilchrist and Mills αλλά πρόσθεσαν στη θέση του απαραμόρφωτου κεφαλιού ένα μοντέλο το οποίο προσομοιάζει την μετατόπιση του εγκεφάλου και κατέληξαν ότι το απαραμόρφωτο κεφάλι που τα διεθνή κριτήρια χρησιμοποιούν οδηγεί σε λανθασμένες τιμές μετρήσεων. Στο συμπέρασμα ότι τα διεθνή πρότυπα πρέπει να επαναπροσδιορίσουν τις δοκιμές πιστοποίησης κράνους καταλήγουν και οι Gilchrist and Mills[8] καθώς στις πειραματικές μετρήσεις τους σε πλάγιες συγκρούσεις κράνους βρίσκουν ότι για σωστότερα αποτελέσματα πρέπει να επιτρέπεται και η περιστροφή του κεφαλιού μέσα στο κράνος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η επιρροή των περιβαλλοντικών συνθηκών στην απόδοση ενός κράνους. Σε υψηλά επίπεδα υγρασίας, παρατηρείται μείωση του σημείου κάμψης του πολυστυρενίου και της τιμής του HIC, παράλληλα όμως το HIC παρατηρείται ότι αποκτάει μεγαλύτερο εύρος τιμών (Liu et al[9].)

Οι Di Landro et al[10] και Borsellino et al[11] αντί να σχεδιάσουν ολόκληρο το κράνος έκαναν πειράματα σε πλάκες υλικών προσομοιάζοντας τις στρώσεις υλικών που υπάρχουν σε ένα κράνος. Συγκεκριμένα οι Borsellino et al[11] σε στατικές μετρήσεις βρήκαν ότι το Kevlar έχει τις μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τις ίνες άνθρακα και γυαλιού. Στη συνέχεια σύγκριναν τις πειραματικές μετρήσεις με ανάλυση σε πεπερασμένα στοιχεία βρίσκοντας ότι στις μεγάλες παραμορφώσεις τα αποτελέσματα ήταν ανακριβή.

Οι Lyn[12] και Zhang et al[13] κάνουν ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία στο εσωτερικό αφρώδες υλικό κράνους. Παρά τα καλά αποτελέσματα τονίζουν την περαιτέρω προσπάθεια που πρέπει να γίνει για καλύτερη μοντελοποίηση του υλικού. Αρκετές πειραματικές μετρήσεις έχουν γίνει προκειμένου να συγκριθούν τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στο εξωτερικό κέλυφος ενός κράνους. Το Kevlar με πλεκτές ίνες παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς αναπτύσσονται ισχυρότεροι ενδοεπιφανειακοί δεσμοί[14, 15]. Παρατηρήθηκε όμως επίσης ότι η απόδοση του όμως επηρεάζεται από το ποσοστό παραμόρφωσης[16]. Οι Zhang et al[17, 18] απέδειξαν ότι το Kevlar με πλεκτές ίνες δεν συμπεριφέρεται ακριβώς σαν ορθοτροπικό υλικό και προτείνουν ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο περιγράφει με ακρίβεια τους μη γραμμικούς μηχανισμούς ενός τέτοιου υλικού.

Για να γίνει σωστά μια πλήρη ανάλυση των φαινομένων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης πρέπει οι αναλύσεις να γίνουν κατά τη διάρκεια της ελαστικής παραμόρφωσης του αφρώδους υλικού. Οι συνοριακές συνθήκες που καθορίζονται από το μη παραμορφώσιμο κεφάλι και την ελαστική παραμόρφωση του κελύφους είναι περίπλοκες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η επίλυση του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία. Άλλος ένας λόγος που καθιστά απαραίτητη τη χρησιμοποίηση πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η ακαμψία του κελύφους και η ελαστική περιοχή του αφρώδους υλικού δεν μπορούν να υπολογιστούν μόνο από τις διαστάσεις τους και από τις ιδιότητες των υλικών τους. Όμως η μοντελοποίηση του κράνους με πεπερασμένα στοιχεία αντιμετωπίζει ορισμένες δυσκολίες. Η απορρόφηση ενέργειας από τα υλικά βασίζεται σε πολύπλοκους νόμους και απαιτείται για να γίνει μια σωστή μοντελοποίηση γνώσεις από διάφορους τομείς όπως είναι η εμβιομηχανική, η σύνθετη ανάλυση τάσεων, τα σύνθετα υλικά, κ.α.

Το μοντέλο του κράνους που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αντιπροσωπεύει ένα τυπικό δείγμα κράνους που πωλείται στο εμπόριο και κατασκευάστηκε με την χρήση φωτογραφιών. Με τη βοήθεια μιας σειράς φωτογραφιών οι οποίες απεικόνιζαν ένα κράνος εμπορίου περιμετρικά και του προγράμματος Photomodeler κατασκευάστηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του κράνους σε μορφή αρχείου AUTOCAD-DXF. Στη συνέχεια το μοντέλο αυτό με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος MSC Mentat που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διαχωρίστηκε σε επίπεδα, τόσα όσα και τα διαφορετικά υλικά του κράνους και τέλος σε κάθε επίπεδο έγινε η διακριτοποίηση με την εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων. Το εξωτερικό κέλυφος χωρίστηκε σε δυο μέρη που αντιπροσωπεύουν τα δυο επίπεδα του σύνθετου υλικού. Το κάθε επίπεδο έχει πάχος 1 mm με αποτέλεσμα το συνολικό πάχος του εξωτερικού κελύφους να είναι 2 mm το οποίο ανταποκρίνεται στον μέσο όρο για τα κράνη που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Το εσωτερικό αφρώδες υλικό έχει συνήθως πάχος 30-40 mm, και στο μοντέλο δόθηκε ο μέσος όρος δηλαδή 35 mm. Για την κατασκευή του αλουμινένιου κεφαλιού χρησιμοποιήθηκε η ίδια τεχνική που χρησιμοποιήθηκε και για το κράνος. Η φόρτιση του κράνους γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κινητική ενέργεια της κρούσης να ισούται με 150 J. Το βάρος του κράνους επιλέχθηκε να είναι 0.9 kg που αποτελεί ένα τυπικό βάρος για το κέλυφος και το αφρώδες υλικό. Το βάρος του κεφαλιού θεωρήθηκε ότι είναι 5.5 kg και έτσι όλο μαζί το σύστημα κράνος-κεφάλι έχει βάρος 6.4 kg. Για να απελευθερωθεί κατά την κρούση ενέργεια ίση με 150 J θα πρέπει να δοθεί στο σύστημα κράνος-κεφάλι μια αρχική ταχύτητα 6.84 m/sec (περίπου 24.5 km/h).

Η παρούσα διατριβή εξετάζει την δυναμική φόρτιση του κράνους όταν αυτό συγκρούεται στην κορυφή του με ένα σταθερό απαραμόρφωτο αντικείμενο. Το

ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ενέργεια παραμόρφωσης και στις τάσεις που αναπτύσσονται στα υλικά που αποτελούν το κράνος, καθώς και στις επιπτώσεις της φόρτισης στο κεφάλι. Τα αποτελέσματα προκύπτουν με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και την εφαρμογή του λογισμικού MARC-MENTAT.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται τα διεθνή πρότυπα ποιότητας και πιστοποίησης ενός κράνους καθώς και το σύνολο των ελέγχων που γίνονται προκειμένου ένα κράνος να πιστοποιηθεί. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το κριτήριο τραυματισμού του κεφαλιού HIC και αναφέρονται οι τυχόν περιορισμοί του κριτηρίου. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται οι ισχύοντες κατασκευαστικές τεχνικές των κυριότερων τμημάτων ενός κράνους, δηλαδή, του εξωτερικού κελύφους και του εσωτερικού αφρώδους υλικού. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα στοιχεία της κατασκευής ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στη διαδικασία επίλυσης που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων του συστήματος κράνος-κεφάλι. Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθεται η μεθοδολογία επίλυσης και γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στο τελικό μέρος της εργασίας, στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και προτείνονται σημεία περαιτέρω έρευνας στο αντικείμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ
ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΡΑΝΟΥΣ

Σε ένα ατύχημα με μοτοσικλέτα ο αναβάτης διατρέχει μεγάλο κίνδυνο να υποστεί τραυματισμό, ενώ και σε αρκετές περιπτώσεις τα ατυχήματα είναι τόσο σοβαρά που μπορούν να επιφέρουν ακόμα και το θάνατο. Τα κράνη που διατίθενται στην αγορά προσφέρουν ποικίλους βαθμούς προστασίας. Φυσικά, ο κάθε οδηγός δεν μπορεί να κρίνει από μόνος του τη σχετική αποτελεσματικότητα ενός δεδομένου μοντέλου. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται διεθνώς αναγνωρισμένοι κανονισμοί με βάση τους οποίους διακρίνονται τα κράνη σε αυτά που ανταποκρίνονται στα ισχύοντα πρότυπα για την αντοχή των συστημάτων προστασίας σε συγκρούσεις και εκείνων που όχι.

Το ίδρυμα Snell[3] υποστηρίζει ότι τα προστατευτικά κράνη απαιτούνται για όλα τα άτομα που χρησιμοποιούν μοτοσικλέτες και ενθαρρύνει το ευρύ κοινό να χρησιμοποιεί κράνη που ανταποκρίνονται στα κατάλληλα πρότυπα απόδοσης. Αυτά τα πρότυπα καθιερώνουν τα χαρακτηριστικά απόδοσης τα οποία είναι κατάλληλα για μοτοσικλετιστές και δεν έχουν ως στόχο να καθιερώσουν συγκεκριμένη επιμέρους δομή και τις προδιαγραφές των υλικών. Το ίδρυμα, δηλαδή, δεν συστήνει συγκεκριμένα υλικά ή σχέδια αλλά οι κατασκευαστές υποβάλλουν εθελοντικά τα προϊόντα τους, τα οποία εξετάζονται σε αυτά τα πρότυπα και εάν το εξεταζόμενο κράνος πληροί τα πρότυπα τότε εκδίδεται γι' αυτό μια σχετική πιστοποίηση.

Τέσσερα από τα κρισιμότερα στοιχεία που έχουν βαρύνουσα σημασία στις προστατευτικές ιδιότητες ενός κράνους είναι[3]:

1. Η διαχείριση μιας κρούσης, δηλαδή το πόσο καλά προστατεύει το κράνος από τις συγκρούσεις με μεγάλα αντικείμενα.
2. Η ικανότητα του κράνους να παραμείνει στη θέση του.
3. Η αξιοπιστία των συστημάτων διατήρησης, δηλαδή κατά πόσο τα συνδετήρια στοιχεία (λουράκια) είναι αρκετά ισχυρά για να κρατήσουν το κράνος στο κεφάλι κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης.
4. Η έκταση της προστασίας, δηλαδή η περιοχή του κεφαλιού που προστατεύεται από το κράνος.

Υπάρχουν διεθνή πρότυπα που περιγράφουν τις απλές δοκιμές και για τα τέσσερα αυτά στοιχεία. Εντούτοις, η δεύτερη απαίτηση, δηλαδή η σταθερότητα του κράνους, αναγκαστικά θα πρέπει να καλυφθεί από τον εκάστοτε αγοραστή, ο οποίος πρέπει να φροντίζει να φοράει το σωστό μέγεθος κράνους ώστε να μπορέσει να έχει τα μέγιστα δυνατά επίπεδα προστασίας που το κράνος που χρησιμοποιεί μπορεί να του παρέχει.

Στα πλήρη κράνη, τα οποία προσφέρουν προστασία από διάφορα είδη τραυματισμού, έχει ενσωματωθεί μια δύσκαμπτη επιφάνεια στο ύψος του πηγουνιού, η οποία τοποθετείται από την αριστερή ως την δεξιά μεριά ενός κράνους στο χαμηλότερο τμήμα του κράνους. Οι διεθνείς κανονισμοί έχουν συμπεριλάβει ειδικά τεστ για αυτό το τμήμα του κράνους. Τα κράνη που εφοδιάζονται με ανοιγοκλεινόμενο προστατευτικό πηγουνιού αντιμετωπίζονται από τα ιδρύματα ως ανοιχτά κράνη.

Τα εξωτερικά κελύφη, τόσο των ανοιχτών όσο και των κλειστών τύπων κράνους, πρέπει να παρέχουν ένα συγκεκριμένο βαθμό προστασίας από την διείσδυση και γι' αυτό υπάρχουν ειδικές μετρήσεις για την αντοχή σε διείσδυση κατά

τα διεθνή πρότυπα. Στα κλειστά-πλήρη κράνη γίνονται επιπροσθέτως και ειδικές δοκιμές για την αντοχή σε διάτρηση στο ανοιγοκλεινόμενο πλαστικό τμήμα που σκοπό έχουν την προστασία των ματιών. Για τα υπόλοιπα κράνη, επειδή το τμήμα αυτό δεν προσφέρει την ίδια προστασία με τα κλειστά δεν υπόκεινται σε ειδικές δοκιμές.

Τα κράνη πρέπει να αφαιρούνται εύκολα έτσι ώστε σε περίπτωση ατυχήματος να μπορέσει ένας γιατρός ή ένας νοσοκόμος να το αφαιρέσει γρήγορα για να προσφέρει τις πρώτες βοήθειες. Για το λόγο αυτό υπάρχουν επίσης ειδικές δοκιμές για τον έλεγχο τους. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ελεγχθεί σε ένα κράνος έτσι ώστε να εγκριθεί είναι η ορατότητα που προσφέρει σε αυτόν που το φοράει. Το κράνος πρέπει να προσφέρει ένα ελάχιστο οπτικό πεδίο το οποίο κυμαίνεται ανάλογα με τη χρήση του. Για τα κράνη που χρησιμοποιούνται σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα και τα οποία είναι για συγκεκριμένες χρήσεις υπάρχουν ειδικές προειδοποιητικές ενδείξεις για τη μη χρήση τους στο δρόμο καθώς η ορατότητα δεν επαρκεί.

Γενικά προκειμένου να πιστοποιηθεί ένα κράνος θα πρέπει[3]:

α) να τοποθετείται στο σωστό μέγεθος κεφαλιού:

Αν το κράνος έχει ένδειξη όπου καθορίζεται το μέγεθος του κεφαλιού τότε επιλέγεται αυτό, αλλιώς η επιλογή του κεφαλιού γίνεται σύμφωνα με την κρίση του ιδρύματος που διεξάγει την δοκιμή.

β) να γίνεται επιθεώρηση του κράνους:

Κάθε κράνος ελέγχεται για τις απαραίτητες ενδείξεις που πρέπει να φέρει. Το βάρος του και άλλα στοιχεία καταγράφονται ώστε να συγκριθούν με άλλα δείγματα όμοια με το εξεταζόμενο κράνος. Μερικά κράνη μπορούν να ενσωματώνουν καινοτομίες. Σε αυτή την περίπτωση τα μέλη του ιδρύματος Snell εξετάζουν την αξία τους. Οτιδήποτε μπορεί να μειώσει τη δυνατότητα

προστασίας του κεφαλιού μπορεί να γίνει η αιτία για την απόρριψη του κράνους.

- γ) να διεξαχθούν όλες οι απαραίτητες δοκιμές αξιολόγησης:
- i) δυναμικές καταπονήσεις για τον έλεγχο της αντοχής του συστήματος συγκράτησης,
 - ii) δοκιμή για την ευστάθεια του κράνους,
 - iii) δοκιμή για τη διαχείριση της σύγκρουσης,
 - iv) δοκιμή για την αντοχή του εξωτερικού κελύφους σε διείσδυση,
 - v) δοκιμή για τη δυνατότητα αφαίρεσης του κράνους,
 - vi) δοκιμές για την προστασία του πηγουνιού και του προσώπου (αν αυτό χρειάζεται κάτι το οποίο εξαρτάται από το είδος του κράνους).

Οι δοκιμές αυτές γίνονται κάθε φορά σε διαφορετικά κράνη του ίδιου τύπου, τα οποία βρίσκονται στο χώρο των εργαστηρίων και σε προκαθορισμένες συνθήκες. Τα δοκίμια μπορεί να φυλάσσονται σε θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος ή σε συνθήκες κρύου, ζέστης ή υγρασίας. Σε οποιοδήποτε μέρος των δοκιμών το τεχνικό προσωπικό του ιδρύματος μπορεί να μεταβάλει τις συνθήκες, για παράδειγμα από περιβάλλοντος να μετατραπούν σε κρύο, ζεστό ή με υγρασία, αλλά από τη στιγμή που θα αλλάξουν θα παραμείνουν σταθερές για το συγκεκριμένο κράνος μέχρι την ολοκλήρωση των δοκιμών.

Οι δοκιμές για την ευστάθεια ενός κράνους πρέπει να γίνονται σε συνθήκες περιβάλλοντος και χωρίς προηγουμένως να έχουν γίνει άλλες δοκιμές στο συγκεκριμένο κράνος. Το κράνος δοκιμάζεται στο μικρότερο από τα κατάλληλα για το συγκεκριμένο κράνος μεγέθη κεφαλιών. Η μορφή του κεφαλιού πρέπει να στηρίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα σημεία του στον κάθετο άξονα και με φορά

του προσώπου προς τα κάτω να σχηματίζουν γωνία 135 μοιρών με τη διεύθυνση της βαρύτητας. Στη συνέχεια το κράνος τοποθετείται στο κεφάλι και εφαρμόζεται σε αυτό ώστε να καταγραφούν τα αποτελέσματα για το σύστημα συγκράτησης.

Ένα καλώδιο γαντζώνεται στην άκρη του κράνους στην οπίσθια κεντρική γραμμή και αφήνεται προς τα εμπρός έτσι ώστε το άκρο του να είναι ελεύθερο και να κρέμεται προς τα κάτω κατά μήκος της κορυφής του κράνους. Ένα αδρανές σφυρί κρεμείται από το ελεύθερο άκρο του σχοινιού. Αυτό το αδρανές σφυρί θα επιτρέψει σε μια μάζα 4.0 kg να πέσει με προκαθορισμένη πορεία από απόσταση 0.6 μέτρων προκειμένου να εφαρμοσθεί ένα απότομο φορτίο στο κράνος. Το φορτίο της κρούσης θα αναγκάσει το κράνος να περιστραφεί προς τα εμπρός σε σχέση με το κεφάλι. Τα κράνος μπορεί να μετατοπιστεί αλλά πρέπει να παραμείνει στο κεφάλι. Το κεφάλι επανατοποθετείται αλλά αυτή τη φορά το πρόσωπο είναι προς τα πάνω και η δοκιμή ξαναγίνεται. Το συνολικό βάρος του αδρανούς σφυριού και της μάζας που πέφτει δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 5.0 kg.

Η δυναμική δοκιμή του συστήματος διατήρησης μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε δείγμα κράνους, είτε αυτό βρίσκεται σε θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος είτε είναι ρυθμισμένες οι συνθήκες σε ζεστή, κρύο ή με υγρασία. Αυτή η δοκιμή μπορεί να εκτελεσθεί πριν από, μετά από, ή μεταξύ οποιασδήποτε από τις άλλες διαδικασίες στην ακολουθία δοκιμής. Το κράνος τοποθετείται σε ένα κεφάλι κατά τέτοιο τρόπο ώστε το λουράκι το οποίο δένει στο πηγούνι να μπορεί να στερεωθεί κάτω από μια συσκευή της οποίας το ανώτερο όριο προσεγγίζει το περίγραμμα της οστεώδους δομής του σαγονιού. Στη συσκευή θα δοθεί έπειτα ένα μηχανικό φορτίο ακολουθούμενο από μια δυναμική φόρτιση. Το σύστημα διατήρησης αποτυγχάνει εάν δεν μπορεί να υποστηρίξει τα μηχανικά φορτία ή εάν η μέγιστη εκτροπή κατά τη διάρκεια του δυναμικού φορτίου υπερβαίνει τα 30 mm. Το

σύστημα διατήρησης αποτυγχάνει επίσης εάν δεν μπορεί να ξεσφιχτεί εύκολα και γρήγορα μετά από τη δοκιμή.

Προκειμένου να γίνουν δοκιμές για τη διαχείριση της κρούσης το δείγμα δεν θα πρέπει προηγουμένως να έχει υποβληθεί στη δοκιμή διείδυσης του εξωτερικού κελύφους. Αυτές οι δοκιμές περιλαμβάνουν μια σειρά ελεγχόμενων κρούσεων στο κράνος το οποίο είναι τοποθετημένο στο κεφάλι της δοκιμής. Στη συνέχεια το σύστημα κράνος-κεφάλι πέφτει καθοδηγούμενο πάνω σε συγκεκριμένα σταθερά αντικείμενα. Η περιοχή της κρούσης και η ενέργεια κρούσης πρέπει να καλύψουν ορισμένες απαιτήσεις που ισχύουν για τις συγκεκριμένες δοκιμές. Εάν σε μια έγκυρη δοκιμή, η μέγιστη επιτάχυνση που μεταδίδεται στο κεφάλι υπερβεί τα 300 g, το κράνος θα απορριφθεί.

Για την σωστή διεξαγωγή των δοκιμών και προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα έχει καθοριστεί ότι:

- α) Το δείγμα κεφαλιού να είναι το κατάλληλο για το εξεταζόμενο κράνος. Αυτό το δείγμα κεφαλιού θα είναι από άκαμπτο, χαμηλού συντονισμού μέταλλο όπως το κράμα μαγνησίου και θα έχει τη γεωμετρία που διευκρινίζεται από το ISO-DIS 6220-1983.
- β) Το σταθερό σώμα με το οποίο θα συγκρουστεί το σύστημα κεφαλιού-κράνους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 135 kg. Το στερεό αυτό μπορεί να είναι μια επίπεδη, σφαιρική, ή αιχμηρή επιφάνεια. Στην περίπτωση της επίπεδης επιφάνειας το εμβαδό της πρέπει να είναι 0.0127 m² και θα πρέπει να είναι κάθετη στην τροχιά του κράνους. Εάν είναι σφαιρική επιφάνεια τότε θα πρέπει να έχει ακτίνα 48 mm.

Οι αεραγωγοί και οποιοδήποτε άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα του κράνους μέσα στην περιοχή κρούσης είναι περιοχές που ελέγχονται στις δοκιμές. Κάθε περιοχή κρούσης υποβάλλεται σε ομάδα μιας ή δύο κρούσεων, ανάλογα με το απαραμόρφωτο σώμα που επιλέγεται για να γίνει η κρούση. Εάν μια κρούση συμβαίνει σε απόσταση μικρότερη από 120 mm με οποιαδήποτε προηγούμενη κρούση διαφορετικής ομάδας κρούσεων, τότε η πιο πρόσφατη κρούση θα θεωρείται άκυρη. Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός σχετικά με την επιλογή των απαραμόρφωτων σωμάτων δοκιμής. Οι ενέργειες κρούσεως για κάθε δοκιμή είναι οι ακόλουθες:

- α) Πραγματοποιούνται δύο κρούσεις σε κάθε σημείο που εξετάζεται ενάντια στην επίπεδη επιφάνεια. Για την πρώτη κρούση, η ενέργεια θα είναι 150 J για όλες τις δοκιμές ανεξάρτητα από το μέγεθος ή το βάρος του κεφαλιού. Για τη δεύτερη κρούση, η ενέργεια θα είναι 110 J ανεξάρτητα από το μέγεθος ή το βάρος του κεφαλιού. Λαμβάνοντας υπόψη μια ιδανική, χωρίς τριβή, μηχανική δοκιμή οι παραπάνω ενέργειες κρούσης αντιπροσωπεύουν πτώσεις κεφαλιού βάρους πέντε κιλών από απόσταση μεγαλύτερη των 3.0 και 2.2 μέτρα, αντίστοιχα.
- β) Τα χαρακτηριστικά της κρούσης που γίνονται με το σφαιρικό σώμα είναι τα ίδια με αυτά των κρούσεων με την επίπεδη επιφάνεια. Στην περίπτωση όμως της επιφάνειας με ακμές γίνεται μόνο μια κρούση, ενέργειας 150 J.
- γ) Αν η ενέργεια κρούσης ξεπερνάει την προκαθορισμένη περισσότερο από 3% τότε η κρούση θεωρείται άκυρη.

1.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων δοκιμών ελέγχου κράνους

Η μέγιστη επιτάχυνση του κεφαλιού δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 300 g για καμία έγκυρη κρούση. Επίσης η προστατευτική δομή του κράνους πρέπει να έχει παραμείνει άθικτη. Εάν το τεχνικό προσωπικό του ιδρύματος Snell καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το κράνος έχει εκτεθεί από την κρούση το δείγμα θα απορριφθεί. Εάν στη δοκιμή πιστοποίησης ένα δείγμα βρεθεί ότι ικανοποιεί όλα τα κριτήρια δοκιμής αλλά κάποια από τις κρούσεις ήταν μικρότερη από το 97% της ενέργειας που απαιτήθηκε, η δοκιμή για εκείνο το δείγμα θα θεωρηθεί άκυρη και θα πρέπει να επαναληφθεί. Ομοίως, εάν υπάρχουν δύο κρούσεις της ίδιας ομάδας κρούσεων όπου το δεύτερο χτύπημα έγινε σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 mm από την πρώτη, η δοκιμή για το δείγμα θα θεωρηθεί άκυρη και θα πρέπει να επαναληφθεί. Τέλος, εάν μια άκυρη δοκιμή παραγάγει μια μέγιστη επιτάχυνση που υπερβαίνει τα 300 g, η δοκιμή για το δείγμα θα κριθεί αναποτελεσματική και θα επαναληφθεί.

Οι διαδικασίες δοκιμής κρούσης δίνουν την ευχέρεια στον ελεγκτή των κρανών σχετικά με την επιλογή των περιοχών και των σωμάτων με τα οποία θα γίνει η κρούση. Αναμένεται ότι ο ελεγκτής θα προβεί σε όλες τις απαραίτητες δοκιμές προκειμένου να ερευνηθούν οι πιθανές αδυναμίες αλλά και για να δοκιμάσει κάθε πιθανό τρόπο αστοχίας. Εάν στο τέλος μιας σειράς δοκιμής πιστοποίησης, ο ελεγκτής καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται στις έγκυρες φορτίσεις-κρούσεις δεν είναι επαρκή για να καθορίσουν εάν το κράνος καλύπτει τις απαιτήσεις απόδοσης, πρόσθετα δείγματα μπορεί να ζητηθούν και να εξεταστούν τα οποία πρέπει να καλύψουν όλες τις απαιτήσεις δοκιμής.

Απ' όσα προαναφέρθηκαν γίνεται κατανοητή η προσπάθεια για αυστηρό έλεγχο της ποιότητας ενός κράνους με όσο το δυνατό διεξοδικότερο έλεγχο τους. Ο έλεγχος

γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορέσει να καλύψει όλες τις πιθανές περιπτώσεις ατυχημάτων. Τα πρότυπα και οι έλεγχοι αναμένεται να γίνονται ακόμη αυστηρότεροι με το πέρασμα του χρόνου καθώς η ανάγκη για προστασία της ανθρώπινης ζωής γίνεται επιτακτικότερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΕΦΑΛΙΟΥ

2.1 Γενικά

Σύμφωνα με το εθνικό συμβούλιο ασφαλείας των Η.Π.Α. τα ατυχήματα είναι ο τέταρτος κατά σειρά λόγος θανάτου ανεξαρτήτου ηλικίας, ακολουθώντας τις ασθένειες της καρδιάς, τον καρκίνο και τα εγκεφαλικά. Τα αυτοκινητιστικά ατυχήματα είναι τα πιο συχνά (49%), οι πτώσεις στο σπίτι έρχονται δεύτερες (28%) και τα ατυχήματα με μοτοσικλέτες αλλά και στο χώρο εργασίας αποτελούν το υπόλοιπο ποσοστό δηλαδή το 23%. Έχει υπολογιστεί ότι το 50% των τραυματισμών που συμβαίνει στα ατυχήματα με μοτοσικλέτες αφορούν τραυματισμό του κεφαλιού. Είναι επομένως κατανοητό πόση μεγάλη σημασία έχει για την προστασία του αναβάτη να φοράει κράνος.

Γενικά οι τραυματισμοί στο κεφάλι μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- (α) κατάγματα κρανίου,
- (β) τοπικοί τραυματισμοί εγκεφάλου,
- (γ) διατάραξη ισορροπίας εγκεφαλονωτιαίου υγρού.

Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί προκειμένου να βρεθεί η πιθανότητα που υπάρχει για τραυματισμό του κεφαλιού, οι περισσότερες από αυτές προσπαθούν να συσχετίσουν παραμέτρους από μετρήσεις της δυναμικής ή της κινηματικής απόκρισης του κράνους με το φαινόμενο του τραυματισμού. Ένα από τα πιο διαδεδομένα κριτήρια για την ανοχή τραυματισμού του κεφαλιού κατά τη διάρκεια συγκρούσεων είναι το “κριτήριο τραυματισμού κεφαλιού” ή *Head Injury Criterion-*

HIC. Το *HIC* χρησιμοποιείται πάνω από 20 χρόνια στους κανονισμούς μηχανοκίνητης ασφαλείας στη Βόρεια Αμερική για τον προσδιορισμό της πιθανότητας τραυματισμού σε συγκρούσεις. Το *HIC* υπολογίζεται από την γραμμική επιτάχυνση που παρατηρείται στο μοντέλο ενός κεφαλιού κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης.

2.2 Το κριτήριο HIC

Η τιμή του *HIC* συνήθως χρησιμοποιείται ως μέτρο για την ποιότητα των διάφορων κατασκευών που συσχετίζονται με την προστασία του κεφαλιού. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο με το οποίο έγινε η μοντελοποίηση στην παρούσα εργασία (Snell M95) η μέγιστη επιτάχυνση που δέχεται το κεφάλι δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 300 g. Σύμφωνα όμως με τους τελευταίους ευρωπαϊκούς κανονισμούς για την ασφάλεια ενός κράνους μοτοσικλετιστή (EN ECE 22-05) το όριο της μέγιστης επιτάχυνσης είναι 275 g ενώ το μέγιστο *HIC* είναι 2400, το οποίο φαίνεται να είναι πιο αυστηρό από το κριτήριο Snell M95.

Κατά τη σύγκρουση του κεφαλιού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το *HIC* υπολογίστηκε από την επιτάχυνση που μετρήθηκε στο κεφάλι. Η επιτάχυνση είναι γενικά ανάλογη της

- 1) Δύναμης σύγκρουσης,
- 2) Της μέγιστης διατμητικής τάσης που δέχεται το κεφάλι,
- 3) Ιδιότητες του κεφαλιού που προσομοιάζεται.

2.2.1 Ορισμός του HIC

Κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης είναι δύσκολο να υπολογιστούν οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται στα ανθρώπινα μέρη του σώματος. Αντίθετα είναι πολύ πιο εύκολο να μετρηθεί η επιτάχυνση και για τον λόγο αυτό είναι αυτή που λαμβάνεται υπόψη στα πειράματα σύγκρουσης. Επιτάχυνση είναι ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει η ταχύτητα ενός αντικειμένου που έχει μάζα. Ο ρυθμός αλλαγής της κίνησης εκφράζεται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο και η βασική μονάδα της επιτάχυνσης g ισούται με την επιτάχυνση της βαρύτητας στη Γη ($g=9.81 \text{ m/sec}^2$).

Το HIC προσδιορίζεται με την παρακάτω αναλυτική εξίσωση:

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ \frac{1}{(t_2 - t_1)^{3/2}} \left[\int_{t_1}^{t_2} \alpha(t) dt \right]^{5/2} \right\} \quad (3.1)$$

όπου $\alpha(t)$ είναι το μέγεθος της γραμμικής επιτάχυνσης που καταγράφεται στο κέντρο μάζας του μοντελοποιημένου κεφαλιού κατά τη σύγκρουση. Η συνισταμένη της επιτάχυνσης (μετριέται σε g) είναι μιας διάρκειας T , και τα t_1 και t_2 είναι δύο χρονικά σημεία της δοκιμής (μετριούνται σε δευτερόλεπτα) κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης για τ οποία ισχύει $0 \leq t_1 < t_2 \leq T$. Επιλέχθηκε η διάρκεια του χρόνου (t_2-t_1) να είναι 15ms και έτσι το HIC χαρακτηρίζεται σαν HIC_{15} . Το HIC_{15} είναι το μέτρο σύγκρισης της έντασης της σύγκρουσης που χρησιμοποιείται συχνότερα και έχει αντικαταστήσει το HIC_{30} που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν.

2.2.2 Περιορισμοί του HIC

Το HIC είναι ένα κριτήριο για τον μη τραυματισμό του κεφαλιού και δεν συνδέεται απευθείας με σοβαρούς τραυματισμούς ούτε λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην μάζα του κεφαλιού ή στην κατεύθυνση του φορτίου. Το HIC βασίζεται στην αντίστροφη σχέση μεταξύ των ανεκτών επιπέδων της επιτάχυνσης του κεφαλιού και της διάρκειας. Ο υποτιθέμενος χρόνος εξαρτάται από το μέσο όρο της επιτάχυνσης. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην πρόβλεψη ότι μικρής διάρκειας και υψηλής επιτάχυνσης γεγονότα έχουν την ίδια επικινδυνότητα με άλλα μεγαλύτερης διάρκειας αλλά μικρότερης επιτάχυνσης. Αυτή ήταν και η βασική διαφωνία του Newman για τη χρήση του HIC[19].

Άλλο ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την περιστροφική επιτάχυνση. Θεωρώντας το κεφάλι σαν ένα απαραμόρφωτο σώμα και ότι η σύγκρουση γίνεται έκκεντρα το αποτέλεσμα είναι ένας συνδυασμός επίδρασης της παράλληλης και περιστροφικής επιτάχυνσης. Το μέγεθος της ροπής εξαρτάται από τον βαθμό εκκεντρότητας της εφαρμοζόμενης δύναμης αλλά και από τον βαθμό που το υπόλοιπο του ανθρώπινου σώματος δέχεται την ροπή του κεφαλιού. Η περιστροφή του κεφαλιού έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής στο λαιμό που μπορεί ακόμα και αν είναι το $HIC < 2400$ να προκαλέσει σπάσιμο του λαιμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΡΑΝΟΥΣ

Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία στα κράνη μοτοσυκλετιστών είναι οι εφαρμοζόμενες κατασκευαστικές τεχνικές, οι οποίες επηρεάζουν πάρα πολύ τον σχεδιασμό των κρανών. Το κράνος θεωρείται ότι αποτελείται από δύο κυρίως μέρη, δηλαδή το εξωτερικό κέλυφος και το εσωτερικό αφρώδες υλικό. Η κατασκευή του κάθε μέρους μελετάται ξεχωριστά. Για την κάθε μέθοδο περιγράφεται η κατασκευαστική διαδικασία και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

3.1 Υλικά κατασκευής κελύφων

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι υλικών οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κελυφών στα κράνη και ο κάθε τύπος έχει διαφορετικές τεχνικές κατασκευής. Οι δύο τύποι κελυφών είναι τα θερμοπλαστικά και τα σύνθετα.

3.1.1 Θερμοπλαστικά κελύφη

Η έγχυση σε καλούπια είναι η κύρια διαδικασία παραγωγής κρανών για αυτό τον τύπο υλικών. Τα πιο γνωστά θερμοπλαστικά υλικά είναι το Ακρυλονιτρίλιο-Βουτάνιο-Στυρένιο (ABS) και ο πολυάνθρακας (PCs). Ωστόσο και τα δύο υλικά δεν αντέχουν λόγω φωτοοξειδωσης, σε μακροχρόνια έκθεση στο περιβάλλον. Η διαδικασία κατασκευής του θερμοπλαστικού υλικού γίνεται με έγχυση του ρευστοποιημένου πολυμερούς μέσα σε ένα καλούπι το οποίο αποτελείται από δύο

μέρη, μια θετική και μια αρνητική μήτρα, υπό προκαθορισμένη θερμοκρασία και πίεση. Η απόσταση μεταξύ των δύο μητρών καθορίζει το πάχος του κελύφους.

3.1.2 Σύνθετα κελύφη

Ο τύπος της ενίσχυσης είναι συνήθως ίνες γυαλιού (GRP) λόγω της καλής του απόδοσης και του μικρού τους κόστους. Μερικά κράνη τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μηχανοκίνητα αθλήματα είναι από αραμίδιο (Kevlar) τα οποία έχουν καλύτερη απόδοση από τα GRP, αλλά έχουν και αυξημένο κόστος. Ανεξάρτητα από τον τύπο της ενίσχυσης που επιλέγεται η μέθοδος κατασκευής είναι σχεδόν ίδια.

Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούνται δύο τύποι μητρών, μία θετικού και μία αρνητικού τύπου. Αρχικά ένα λεπτό στρώμα ρητίνης, κατά προτίμηση εποξικής τοποθετείται στη θετική μήτρα (στην περίπτωση της παρούσας εργασίας στο αφρώδες υλικό). Ένας πρώτος ιστός ινών προστίθεται στην ακόμη ρευστή ρητίνη. Ο ιστός έχοντας διαστάσεις περίπου 100 cm επί 45 cm καλύπτει όλη την επιφάνεια της θετικής μήτρας. Στη συνέχεια ο ιστός πιάνεται από τις άκρες και τραβιέται προς τα κάτω ή εντείνεται χωρίς άσκηση ιδιαίτερης δύναμης ώστε να καλύψει όλη την επιφάνεια ομοιόμορφα. Οι άκρες των ιστών διπλώνονται στο διαμήκη τμήμα έτσι ώστε οι περιοχή που καλύπτει το πηγούνι του μοτοσικλετιστή να καλύπτεται από δύο στρώσεις ιστού.

Τέλος, και αφού ο πρώτος ιστός έχει προστεθεί σε ολόκληρη την επιφάνεια προσεχτικά εμπλουτίζεται με την ρητίνη και στη συνέχεια καλύπτεται από τον δεύτερο ιστό κατά τον ίδιο τρόπο. Η πράξη έχει δείξει ότι συνολικά πέντε τέτοιου είδους ιστοί είναι επαρκείς για να καλύψει το κράνος όλα τα απαραίτητα πρότυπα. Ο

τύπος των ινών του ιστού που χρησιμοποιήθηκε στη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω είναι το αρωματικό πολυαμίδιο με την εμπορική ονομασία αραμίδιο. Έχει αναφερθεί ότι η ίδια διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί και σε άλλους τύπους ινών, όπως γυαλιού και άνθρακα[2].

Το κύριο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών έναντι των θερμοπλαστικών από κατασκευαστική άποψη είναι το μικρότερο κόστος τόσο από πλευρά μηχανημάτων όσο και διαδικασίας. Τα μειονεκτήματα επικεντρώνονται στο γεγονός ότι υπάρχει μικρότερη ακρίβεια κατά την προσθήκη των ινών από ότι σε ένα θερμοπλαστικό κέλυφος και ότι το κέλυφος από σύνθετα υλικά απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος κατασκευής.

3.2 Κατασκευή του εσωτερικού αφρώδους υλικού

Ο κύριος σκοπός του εσωτερικού αφρώδους υλικού είναι να απορροφάει την ενέργεια κρούσης σε ένα ατύχημα. Η συμπεριφορά ενός κράνους και η δυνατότητα του να προστατέψει το κεφάλι εξαρτάται κατά πολύ από τον τύπο του αφρώδους υλικού αφού κάθε τύπος συμπεριφέρεται διαφορετικά κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Αρκετοί τύποι αφρώδους υλικού χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία για την κατασκευή του εσωτερικού μέρους ενός κράνους. Η τελική επιλογή ενός τύπου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας εκ των οποίων είναι η ευκολία κατασκευής του. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει παρακάτω θα βοηθήσει να κατανοηθεί καλύτερα η συμπεριφορά ενός κράνους κατά τη διάρκεια σύγκρουσης.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος κατασκευής του εσωτερικού μέρους ενός κράνους από διαστελλόμενο πολυστυρένιο (EPS). Ο λόγος για την επικράτηση του EPS στην αγορά είναι οι πολλή καλές του ιδιότητες και το μικρό του βάρος. Τα

κράνη από EPS αποτελούνται από πλαστικά κελιά τα οποία έχουν ενωθεί μεταξύ τους και έχουν πάρει τη μορφή του κράνους κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Το EPS είναι απαράμορφωτο, σχεδόν άκαμπτο, ανελαστικό υλικό.

Τα κράνη από EPS κατασκευάζονται συνήθως με τη διαδικασία της χύτευσης. Ένα τυπικό καλούπι για το εσωτερικό μέρος του κράνους από EPS αποτελείται από ένα κεντρικό πυρήνα και ένα κοίλωμα. Η απόσταση μεταξύ των δύο καθορίζει τη μορφή του κράνους. Το κέντρο του καλουπιού έχει γενικά σφαιρικό σχήμα και προσομοιάζει το πάνω μέρος του ανθρώπινου κεφαλιού. Όταν ρευστοποιείται το ακατέργαστο πολυστυρένιο τα μόρια εισέρχονται σε μια μεγάλη κυλινδρική δεξαμενή η οποία θερμαίνεται από ένα μεταφερόμενο ζεστό υγρό. Η πίεση στη δεξαμενή αυξάνεται με ζεστό αέρα για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να προκαλέσει την ομοιόμορφη απάλυση του χωρίς όμως να διογκωθεί. Ύστερα από ένα διάστημα αφαιρείται μια ποσότητα αέρα δημιουργώντας έτσι ένα κενό στη δεξαμενή και επιτρέποντας στο υλικό να διογκωθεί μέχρι την επιθυμητή πυκνότητα. Το πεντάνιο που δημιουργείται μέσα στη δεξαμενή αφαιρείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Στη συνέχεια και ενώ έχει επιτραπεί στο πολυστυρένιο να διογκωθεί, η πίεση στη δεξαμενή επιστρέφει στα ατμοσφαιρικά επίπεδα και το υλικό διοχετεύεται σε καθορισμένα δοχεία. Αυτό το στάδιο ονομάζεται προ-διόγκωση. Σε αυτό το σημείο το υλικό, και ενώ παραμένει ζεστό, οδηγείται στα καλούπια.

Μεταφέροντας το αφρώδες υλικό, το οποίο περιέχει σε αυτή τη φάση φυσαλίδες (συνήθως με ζεστό αέρα ή ατμό σε υψηλή θερμοκρασία), στο καλούπι συνεχίζεται παράλληλα η διόγκωση του. Η περαιτέρω διόγκωση του EPS εξαναγκάζει τα αέρια που είναι σε μορφή φυσαλίδων να πάρουν τη μορφή του καλουπιού και λόγω της πίεσης να αναπτύξουν μεταξύ τους ισχυρούς δεσμούς. Το καλούπι στη συνέχεια ψύχεται, επιτρέποντας στο EPS να σταθεροποιηθεί και οι δύο μήτρες χωρίζονται

συνήθως με τη σύσπαση της εξωτερικής και αφήνοντας το EPS να είναι κολλημένο στη κεντρική μήτρα του καλουπιού. Στη συνέχεια το αφρώδες υλικό αποκολλάται και από την εσωτερική μήτρα διοχετεύοντας αέρα υπό πίεση. Η όλη διαδικασία πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή ώστε να μην προκληθεί φθορά στο EPS. Για να γίνεται η απελευθέρωση του EPS ευκολότερα η εσωτερική μήτρα είναι συνήθως επενδεδυμένη με ένα υλικό όπως το τεφλόν.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τη διαδικασία παρασκευής του EPS είναι η ανάγκη για δημιουργία οπών, είτε για να εγκατασταθεί το σύστημα σταθεροποίησης, είτε για τον αερισμό του κράνους. Ένας τρόπος για τη δημιουργία των οπών είναι χειρονακτικά με τον κίνδυνο όμως οι οπές που θα σχηματιστούν να είναι ανομοιόμορφες, ενώ και το κόστος κατασκευής του κράνους αυξάνεται σημαντικά. Ένας άλλος τρόπος για να σχηματιστούν οι οπές είναι να σχηματιστούν οι κατάλληλες τρύπες στα καλούπια έτσι ώστε να μπορούν να προστεθούν οι κατάλληλοι πρόβολοι που θα δημιουργήσουν τις οπές στο κράνος. Ωστόσο η κατασκευή αυτών των προβόλων είναι αρκετά δαπανηρή στην κατασκευή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΚΡΑΝΟΥΣ

Στην παρούσα εργασία μελετάτε ένα τυπικό κράνος μοτοσικλετιστή το οποίο είναι κατασκευασμένο εξωτερικά από σύνθετα υλικά και εσωτερικά από διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS). Πριν από την περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα στοιχεία ή στα υλικά από τα οποία αποτελείται το κράνος και στα πλεονεκτήματα ή στα μειονεκτήματα τους έναντι των άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός κράνους.

4.1 Εξωτερικό κέλυφος

Το εξωτερικό κέλυφος του κράνους και η αντίδραση του στη σύγκρουση καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα του κράνους και την προστασία που αυτό μπορεί να προσφέρει στον αναβάτη. Κύριος σκοπός του εξωτερικού κελύφους είναι να εμποδίζει την διείσδυση ξένων σωμάτων στο κράνος και την επαφή τους με το κεφάλι του αναβάτη. Επίσης, διανέμει το φορτίο της σύγκρουσης σε μεγαλύτερη επιφάνεια ώστε να μην υπάρχει συγκέντρωση φορτίων σε ένα σημείο και τέλος απορροφάει και ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας κρούσης που μπορεί να φτάσει και το 34%.

Τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του εξωτερικού κελύφους ενός κράνους μπορούν να χωριστούν σε δυο κύριες κατηγορίες: τα θερμοπλαστικά και τα σύνθετα υλικά. Η επιλογή των υλικών του εξωτερικού

κελύφους γίνεται με γνώμονα το κόστος και τις ανάγκες τις οποίες πρέπει να καλύψει, π.χ. αγωνιστικές ή καθημερινής χρήσης.

Στη παρούσα εργασία το εξωτερικό κέλυφος χωρίζεται σε δυο μέρη που αντιπροσωπεύουν τα δυο επίπεδα του σύνθετου υλικού. Το κάθε επίπεδο έχει πάχος 1 mm με αποτέλεσμα το συνολικό πάχος του εξωτερικού κελύφους να είναι 2 mm το οποίο ανταποκρίνεται στον μέσο όρο για τα κράνη που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Για το εξωτερικό μέρος του κελύφους χρησιμοποιήθηκε σύνθετο υλικό. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι είναι κατασκευασμένο από νηματώδη πολυεστέρα ενισχυμένο με Kevlar και η επιλογή τους έγινε λόγω της αυξημένης χρησιμοποίησης τους από τους κατασκευαστές. Το εσωτερικό μέρος του κελύφους θεωρήθηκε κατασκευασμένο από συνεχείς ίνες γυαλιού (GRP).

Γενικά είναι αποδεκτό και σύνηθες τα σύνθετα υλικά που προορίζονται για το εξωτερικό κέλυφος του κράνους να παράγονται χρησιμοποιώντας φόρμες νηματώδεις, πλεχτές σε διάφορες διευθύνσεις και με συμπιεσμένες ίνες για την ενίσχυση τους. Η ενίσχυση με ίνες οι οποίες είναι τοποθετημένες στην ίδια κατεύθυνση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σωστά κατά την διαδικασία παραγωγής του κράνους λόγω των μεγάλων καμπύλων που πρέπει να ακολουθούν.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της χρήσης σύνθετων υλικών είναι ότι λόγω της μεγάλης τους ακαμψίας μπορεί να οδηγήσουν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες σε σημαντικές επιταχύνσεις και καταπονήσεις του κεφαλιού. Αντίθετα το μεγάλο τους πλεονέκτημα έναντι των άλλων υλικών είναι η μεγάλη τους ικανότητα στην απορρόφηση ενέργειας που βασίζεται κυρίως στη θραύση των ινών. Έχει αποδειχθεί δηλαδή, ότι σε κρούσεις που απελευθερώνεται μεγάλη ενέργεια η συμπεριφορά τους είναι ακόμα καλύτερη. Κάτι τέτοιο δεν αναμένεται να παρατηρηθεί στη συγκεκριμένη ανάλυση καθώς η ενέργεια κρούσης είναι μικρή όπως επιβάλουν και οι

διεθνείς συνθήκες μέτρησης για την πιστοποίηση ενός κράνους. Γενικά οι μεγαλύτερες δυνατότητες που έχουν τα σύνθετα υλικά πιστοποιούνται και από το γεγονός ότι αυτά είναι που χρησιμοποιούν οι περισσότερες εταιρίες για την κατασκευή αγωνιστικών κρανών.

Από την άλλη πλευρά, τα πιο συνήθη θερμοπλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το συμπολυμερές Ακρυλονιτρίλιο-Βουτάνιο-Στυρένιο γνωστό ως ABS και το Πολυανθρακούχο (PCs) με το πρώτο να προτιμάται λόγω της καλύτερης απόδοσης του στην κρούση αλλά και τα λιγότερα προβλήματα υποβάθμισης σε σχέση με το κέλυφος PC. Ωστόσο και τα δύο θερμοπλαστικά υλικά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε φώτο-οξειδωση ύστερα από μακρύ διάστημα έκθεσης του σε συνθήκες περιβάλλοντος. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των θερμοπλαστικών έναντι των σύνθετων υλικών είναι το μικρό τους κόστος.

4.2 Αφρώδες υλικό

Ο σκοπός του εσωτερικού αφρώδους υλικού είναι να απορροφήσει το υπόλοιπο της ενέργειας κρούσης που δεν μπόρεσε να απορροφήσει το εξωτερικό κέλυφος. Η επιλογή του υλικού, το πάχος αλλά και η πυκνότητα του εσωτερικού αφρώδους υλικού επηρεάζουν το μέγεθος του κράνους, την αεροδυναμική του, αλλά και το βάρος του. Κατά τη θλίψη του εσωτερικού αφρώδους υλικού οι επιφάνειες των εσωτερικών στοιχείων του υλικού αρχίζουν και γίνονται πολύ σκληρές όταν η παραμόρφωση περάσει ένα συγκεκριμένο όριο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και η τάση λόγω θλίψης να αυξάνεται ραγδαία.

Η επιλογή του πάχους του αφρώδους υλικού πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά την σύγκρουση η παραμόρφωση να μην φτάνει το όριο αυτό. Για

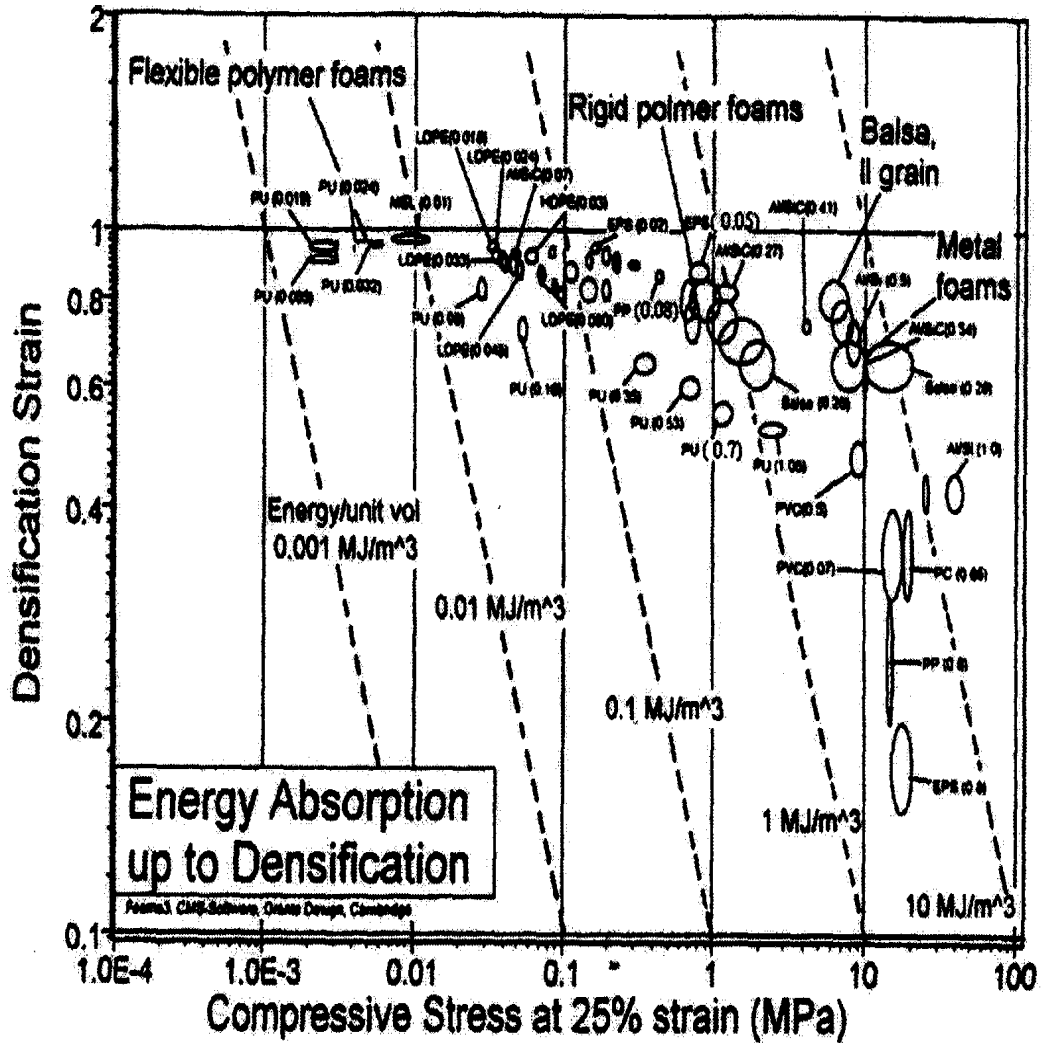
υλικό με πυκνότητα 50 kg/m^3 , ίσο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση της παρούσας εργασίας, το όριο της παραμόρφωσης ισούται με το 80% του πάχους του αφρώδους υλικού.

Για την επιλογή του καλύτερου υλικού οι Gibson et al[20] έκαναν δοκιμές χρησιμοποιώντας όλα τα αφρώδη υλικά που ήταν κατάλληλα για χρήση σε κράνος μοτοσικλετιστή. Αυτή η διαδικασία ήταν βασισμένη στην απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα όγκου των διαφορετικών αφρών.

Το σχήμα 4.1 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής του αφρού σε παραμόρφωση 25% και του ορίου παραμόρφωσης του αφρού ϵ_D για σταθερή ενέργεια κρούσης ανά μονάδα όγκου. Η ενέργεια εμφανίζεται στο διάγραμμα με ευθείες διακεκομμένες γραμμές. Η καλύτερη επιλογή ενός αφρού είναι αυτή που μπορεί να απορροφήσει την περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου, ενώ παράλληλα να ελαχιστοποιήσει το φορτίο που φτάνει στο ανθρώπινο κεφάλι κάτω από τα επίπεδα στα οποία μπορεί να προκληθεί τραυματισμός.

Το σχήμα 4.1 χρησιμοποιείται για την επιλογή των αφρών με κριτήριο τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Τρεις πιθανές επιλογές μπορούν να γίνουν:

- (i) Το διογκωμένο πολυστυρένιο με πυκνότητα 0.05 mg/m^3 που μπορεί να απορροφήσει περίπου 0.8 MJ/m^3 ενέργειας.
- (ii) Το πολουρεθάνιο με πυκνότητα 0.7 mg/m^3 που μπορεί να απορροφήσει ελαφρώς μικρότερη ενέργεια αλλά είναι πολύ βαρύτερο από το πολυστυρένιο.
- (iii) Το πολυπροπυλένιο με πυκνότητα 0.08 mg/m^3 έχει μικρότερη πυκνότητα από το PU αλλά απορροφά τη λιγότερη ενέργεια ($\sim 0.7 \text{ MJ/m}^3$).



Σχήμα 4.1: Σύγκριση υλικών που χρησιμοποιούνται σαν αφρώδη υλικά σε κράνη[20].

Συγκρίνοντας τα τρία παραπάνω υλικά που παρουσιάζουν την καλύτερη απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα όγκου μπορούμε να αναφέρουμε τα παρακάτω. Το διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS) έχει κυριαρχήσει στην αγορά. Ο λόγος είναι η πολύ καλή απόδοση του και το μικρό βάρος του. Το κόστος παρασκευής του μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των κομματιών. Το πολυουρεθάνιο (PU) είναι το φθηνότερο, έχει καλή απόδοση στα χτυπήματα και ιδιαίτερα στα πολλαπλά αλλά είναι αρκετά βαρύ. Τέλος, το πολυπροπυλένιο (PP) έχει το μειονέκτημα ότι είναι

ευαίσθητο στις μεγάλες αλλαγές θερμοκρασίας. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε το διογκωμένο πολυστυρένιο σαν υλικό για το αφρώδες υλικό με πυκνότητα 50 kg/m^3 και πάχος 35 mm.

4.3 Το κεφάλι

Για να διεξαχθεί το πείραμα απαιτείται και η μοντελοποίηση ενός κεφαλιού πάνω στο οποίο θα γίνει έλεγχος της τάσης που θα δεχθεί το κεφάλι και επομένως της προστασίας που προσφέρει το κράνος στον αναβάτη στις διάφορες περιπτώσεις κρούσεων. Επιλέχθηκε το κεφάλι να προσομοιωθεί ως μεταλλικό, μη-παραμορφώσιμο υλικό. Αν και αυτή η υπόθεση είναι αυθαίρετη εντούτοις είναι διεθνώς αποδεκτή και χρησιμοποιείται στα περισσότερα πρωτόκολλα για την πιστοποίηση ενός κράνους. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το μεταλλικό μη-παραμορφώσιμο κεφάλι έγκειται στη δυσκολία που υπάρχει να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες μιας τόσο πολύπλοκης κατασκευής όπως είναι το ανθρώπινο κεφάλι. Επίσης πρέπει οι λεπτομέρειες της ανάλυσης να είναι ίδιες προκειμένου τα αποτελέσματα από δοκιμές σε διαφορετικούς οργανισμούς να μπορούν να συγκριθούν. Τέλος, το μη-παραμορφώσιμο κεφάλι από αλουμίνιο δεν απορροφάει ενέργεια και έτσι δεν επηρεάζει την απόδοση του κράνους σε μια δοκιμή κρούσης.

4.4 Τα ινοπλισμένα σύνθετα πολυμερή (FRP)

4.4.1 Η φύση των σύνθετων πολυμερών

Τα FRP είναι σύνθετα υλικά που προέρχονται από ένα μεγάλο αριθμό σκληρών, άκαμπτων ινών ενισχυμένα με ένα δεύτερο υλικό γνωστό ως συγκολλητική ύλη. Η

ύπαρξη της συγκρατούσας ύλης επιτρέπει στην ίνα να είναι φυσική ή τεχνητή, μεταλλική, ανόργανη ή οργανική. Επιπλέον η θεμελιώδης ύλη μπορεί να είναι μέταλλο ή κράμα μετάλλου, ανόργανο τσιμέντο ή γυαλί ή φυσικό ή συνθετικό πολυμερές. Κυρίως στα συνθετικά πολυμερή που είναι πιο διαδεδομένα η συγκρατούσα ύλη είναι ρητίνη ή πλαστικό υλικό.

Τα σύνθετα πολυμερή κατασκευάζονται από νήματα διαμέτρου 3-5 μm που τοποθετούνται σε μήτρες με ρητίνη. Οι μηχανικές τους ιδιότητες διαφέρουν σημαντικά, ανάλογα με τον τύπο και την αναλογία ινών και ρητίνης. Υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός στοιχείων και ρητινών ο συνδυασμός των οποίων δίνει ένα μεγάλο αριθμό πιθανών σύνθετων υλικών FRP. Είναι δυνατόν η διαφοροποίηση των ινών, όσο και ο προσανατολισμός τους να αλλάξει την αναλογία της ρητίνης σε συνδυασμό με τη βασική ύλη.

Τα απλά συνθετικά πολυμερή (FRP) που συνήθως χρησιμοποιούνται περιέχουν γυαλί, άνθρακα και αραμίδιο. Τα πιο σύνθετα (GFRP), τα οποία περιέχουν σε μεγαλύτερη αναλογία γυαλί, είναι αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται στις σύνθετες δομές περισσότερο λόγω του χαμηλού τους κόστους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι διαθέτουν την ανάλογη αντοχή σε διάβρωση και τις εξωτερικές φορτίσεις.

Άλλοι τύποι σύνθετων πολυμερών, που βασίζονται στον άνθρακα (CFRP) και στο αραμίδιο (AFRP), μπορούν να διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους μέσα στο σύνθετο υλικό, όπως για παράδειγμα το όριο ελαστικότητάς τους.

4.4.2 Λειτουργία των συνθετικών πολυμερών

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές δεν έχουν συγκεκριμένο σχήμα και καθορισμένη σκληρή επιφάνεια. Οι ίνες από μόνες τους αντέχουν στα θλιπτικά

φορτία αλλά δεν είναι ανθεκτικές σε κάμψη, στρέψη ή σε λυγισμό. Ο κατάλληλος συνδυασμός τους με ρητίνες παράγει σύνθετα υλικά που οι ιδιότητες τους προσεγγίζουν αυτές του χάλυβα. Έτσι γίνονται ικανά να αντισταθούν σε τεράστια φορτία θλίψης, εφελκυσμού και λυγισμού. Αυτά τα σύνθετα υλικά έχουν ορισμένο σχήμα και ανθεκτική επιφάνεια που μπορεί υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα μπορούσε κάποιος να καταλήξει ότι:

- Οι μηχανικές ιδιότητες των FRP είναι υπερβολικά υψηλές και συχνά υπερβαίνουν τις ιδιότητες του κυρίου σώματος που ενισχύουν. Σημαντικές ιδιότητες τους είναι η εφελκυστική τους αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και η πυκνότητα ή το ειδικό τους βάρος.
- Τα ινοπλισμένα συνθετικά πολυμερή FRP έχουν σχήμα μακρύ και λεπτό (μέγιστο πάχος 1.5 mm). Ο λόγο μήκος/διάμετρος υπερβαίνει το 100.
- Λόγω της υπερβολικά μικρής υποδιαίρεσης του όγκου των υλικών η επιφάνεια εφαρμογής είναι πολύ μεγάλη. Οι πιο εμπορικές ίνες έχουν διάμετρο μικρότερη από 20 μm, περίπου 1/10 της ανθρώπινης τρίχας. Ένα εκατομμύριο ίνες μπορούν να τοποθετηθούν σε 1 mm³ FRP μαζί με τη βασική ύλη και τη ρητίνη.
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης είναι περιορισμένες. Είναι πολύ πιο χαμηλές ως προς την αντοχή και την ακαμψία συγκριτικά με αυτές των ενισχυμένων ινών, τόσο στο μέγεθος όσο και στη σπάνια ικανότητά τους να παραλαμβάνουν φορτία σε όλο τους το μήκος. Ωστόσο υπάρχουν κόλλες, με εξαιρετικές ιδιότητες αρκετά ικανές για να παραλάβουν διατμητική φόρτιση στο σημείο επαφής με κάθε ενισχυμένη ίνα.

4.4.3 Τα κυριότερα συνθετικά πολυμερή

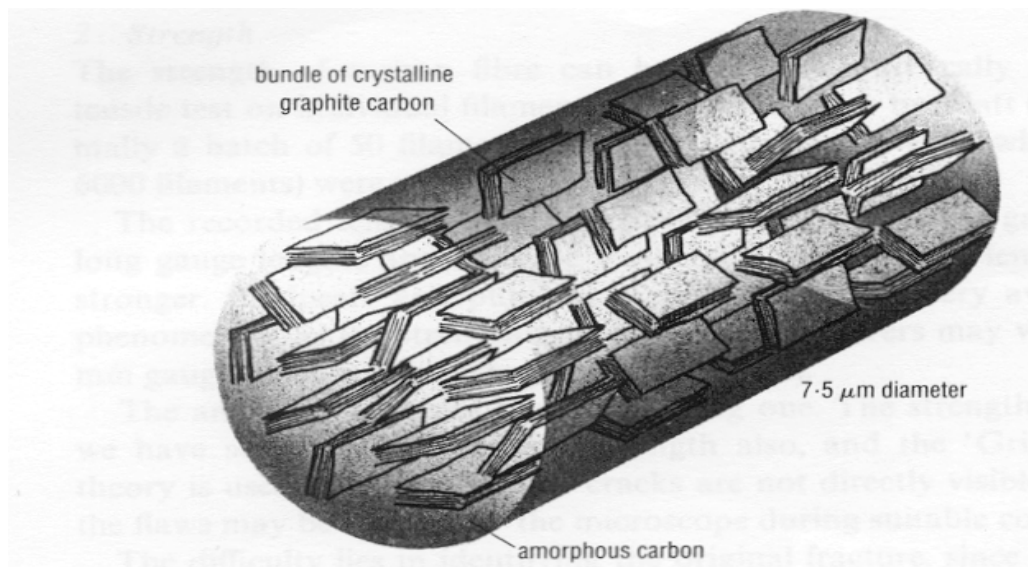
Η παραγωγή των νέων υλικών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές της μηχανικής ακολουθεί μια καμπύλη εκθετικής ανάπτυξης. Αυτή η καμπύλη χαρακτηρίζεται αρχικά από μια αργή αύξηση, όπου τα υλικά “αγωνίζονται” για την αποδοχή τους, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί ένα εκρηκτικός ρυθμός ανάπτυξης. Έτσι για τα συνθετικά πολυμερή η παγκόσμια ζήτηση το 1987 ήταν 11607 ton.

Τα σημαντικότερα ινοπλισμένα συνθετικά πολυμερή και οι διάφοροι τύποι τους είναι[20] :

- α.** Οι ίνες γυαλιού (GFRP) είναι οι πιο συνηθισμένες, κύριο συστατικό τους είναι το διοξείδιο του πυριτίου. Γενικότερα αποτελείται από καθαρούς (διαυγείς) άμορφους κρυστάλλους. Τα σημαντικότερα είδη που παράγονται και χρησιμοποιούνται ευρέως είναι:
1. E-glass, η κύρια φόρμουλα της ίνα γυαλιού,
 2. S-glass, το δυνατότερο άκαμπτο γυαλί που χρησιμοποιείται κυρίως στις στρατιωτικές ρουκέτες.
 3. R-glass, μια έκδοση του S-glass για σημαντικές κατασκευαστικές εφαρμογές.
 4. C-glass, για χημική αντίσταση κυρίως σε όξινη προσβολή.
- β.** Οι ίνες άνθρακα (CFRP), οι οποίες έχουν μια μεγάλη ιστορία που ξεκινάει από τα μέσα της δεκαετία του 60. Ήταν οι πρώτες που παράχθηκαν λόγω της γνωστής ικανότητας του άνθρακα: της υψηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητάς. Η δυνατότητα του άνθρακα να εμφανίζεται σε πολλές αλλοτροπικές φόρμες κίνησε το ενδιαφέρον, ιδιαίτερα όσον αφορά το μέτρο

ελαστικότητας του γραφίτη που φτάνει τα 68 GPa. Ανάλογα με τη συμπεριφορά του στη θερμοκρασία επιλέγουμε τρεις διαφορετικούς τύπους ανθρακονήματος:

1. Με το πιο άκαμπτο και σκληρό άνθρακα (το πρώτο που ανακαλύφθηκε).
2. Με τη δυνατότερη ίνα άνθρακα, στη θερμοκρασία της απανθράκωσης που καταγράφεται η μέγιστη εφελκυστική αντοχή. Η ακαμψία είναι μικρότερη από την πρώτη περίπτωση και η αντοχή μεγαλύτερη, όμως η ένταση της αστοχίας αυξάνεται κάπως. Ακόμη στο όριο των 1600 °C γίνεται πιο ανθεκτικός, ενώ έχει και χαμηλότερο κόστος παραγωγής.
3. Με την αποδεδειγμένα φτηνότερη ίνα άνθρακα, όπου η ακαμψία του είναι μικρότερη σε σχέση με τα προηγούμενα, αλλά η αντοχή του σε αποδεκτά επίπεδα.



Σχήμα 4.2: Σχηματικό Διάγραμμα της κατασκευής του ανθρακονήματος. Δέσμη από προσανατολισμένους κρυστάλλους άνθρακα που συγκρατούνται σε καλούπι (μήτρα) από άμορφο άνθρακα [22].

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η ικανότητα αντίδρασης του ανθρακονήματος έναντι της ηλεκτρολυτικής και της θερμικής οξειδωσης διαφοροποιούνται με τη θερμοκρασία της πρωτογενής απανθράκωσης. Στις ελάχιστα χημικά ενεργές επιφάνειες υπάρχουν εκείνες οι οποίες είναι περισσότερο κρυστάλλινες ή εκείνες που προήλθαν από έκρηξη στην υψηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσής τους (φορμαρίσματος).

γ. Οι ίνες από αραμίδιο (AFRP) είναι σύνθετα πολυμερή με βάση το αραμίδιο. Παράγονται δύο τύποι: υψηλότερου και χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας.

1. Αυτό με το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας είναι λιγότερο άκαμπτο με δυνατότητα μεγαλύτερης επιμήκυνσης.
2. Ενώ αυτά με το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας επιλέγονται για άκαμπτες ίνες με μεγαλύτερη δυσκαμψία και μικρότερη δυνατότητα επιμήκυνσης. Έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα όσον αφορά τη συγκολλησιμότητα τους, όμως προστατεύουν σε κρούση λόγω της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική.

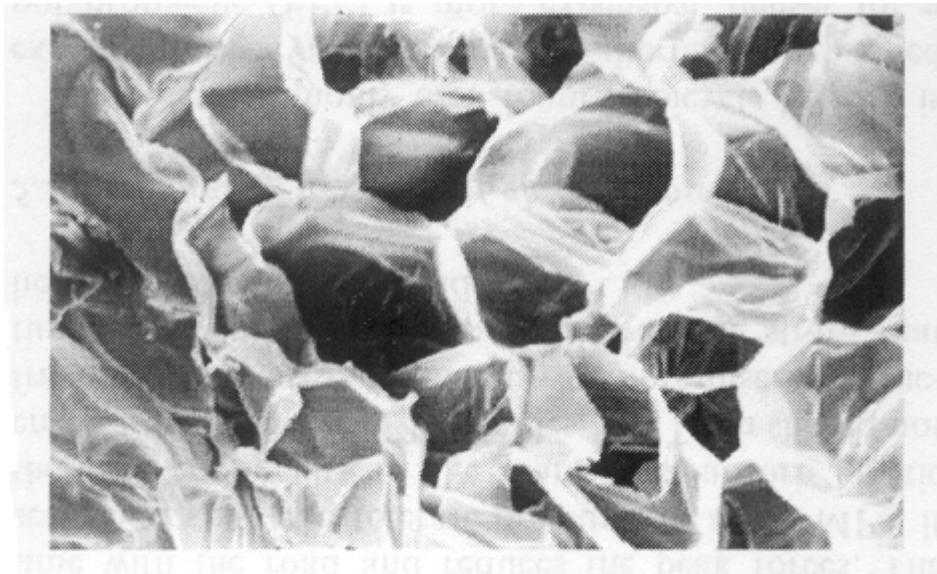
4.5 Διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS)

Τα πολυμερή αφρώδη υλικά αποτελούνται από μια στερεή πολυμερή μήτρα και μια αεριώδη φάση. Παρέχουν ένα μοναδικό συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων και χαμηλής πυκνότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η συσκευασία

και τα προστατευτικά κράνη. Στη συγκεκριμένη εργασία για το εσωτερικό αφρώδες μέρος του κράνους χρησιμοποιήθηκε χαμηλής πυκνότητας διογκωμένο πολυστυρένιο από μικρά στρογγυλά σωματίδια.

Το ακατέργαστο EPS (με πυκνότητα 50 kg/m^3) αποτελείται από σωματίδια στυρενίου. Τα σωματίδια αυτά έχουν 5%-8% λιωμένο πεντάνιο στο οποίο οφείλεται και κατά κύριο λόγο η διόγκωση του πολυστυρενίου. Η πρώτη διόγκωση συμβαίνει με τη συμμετοχή αέρα και ατμού σε πίεση 0.5 bar. Η τιμή της θερμοκρασίας και ο λόγος αέρα προς ατμό είναι αυτά που καθορίζουν και την πυκνότητα του EPS. Στη συνέχεια το στυρένιο στεγνώνει με την βοήθεια του αέρα και συγκεντρώνεται σε ένα κλωβό όπου παραμένει εκεί για 48 ώρες σε θερμοκρασία 30–35 °C. Στη συνέχεια εγχέεται με πίεση 7 bar σε μια κλειστή φόρμα μαζί με ατμό η πίεση του οποίου είναι 1–2 bar για να επιτευχθεί πυροσυσσωμάτωση των σφαιριδίων. Στο μεταξύ η φόρμα ψύχεται εξωτερικά ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω διόγκωση του πεντανίου. Ολόκληρος ο κύκλος παραγωγής διαρκεί 150 sec.

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται μια τυπική μορφή EPS και η συμπεριφορά του σε θλίψη. Το συγκεκριμένο EPS λόγω της μικρής πυκνότητας του, μικρότερη από 80 kg/m^3 , αποτελείται από κλειστά κελιά πολυγωνικής μορφής



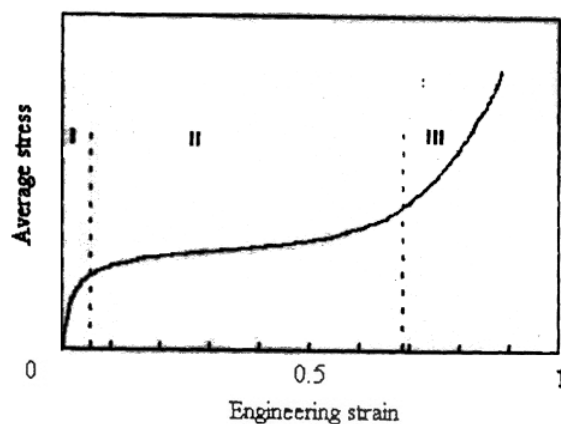
Σχήμα 4.3: Θραυσμένη επιφάνεια αφρώδους EPS πυκνότητας 50 Kg m^{-3} το οποίο έχει συμπιεστεί πριν σπάσει. Οι επιφάνειες έχουν συρρικνωθεί η κάθε μια διαφορετικά [23]

4.5.1 Παραμόρφωση του EPS

Οι ιδιότητες του αφρώδους πολυστυρενίου εξαρτώνται από παραμέτρους οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δυο διαφορετικές ομάδες.

- Αυτές που περιγράφουν τη δομή του αφρώδους υλικού, π.χ. το μέγεθος και η μορφή των κελιών, η πυκνότητα και η διανομή των πλευρών και των επιφανειών των κελιών.
- Αυτές που περιγράφουν τις εγγενείς ιδιότητες του υλικού το οποίο συγκροτεί τα κελιά.

Η καμπύλη τάσης–παραμόρφωσης ενός τυπικού ελαστομερούς μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχεδιάγραμμα (σχ.4.4).



Σχήμα 4.4 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης ελαστομερούς[10].

Τα τρία μέρη της καμπύλης είναι η ελαστική περιοχή (I), όπου η τάση είναι μικρή, που ακολουθείται από μια περιοχή, όπου η παραμόρφωση είναι μεγάλη για μικρή αύξηση της τάσης (II), και η οποία οδηγεί στην περιοχή (III) όπου αυξάνεται ραγδαία η τάση χωρίς αντίστοιχη μεγάλη αύξηση της παραμόρφωσης.

Στη γραμμική ελαστικότητα (I) με τις μικρές (3–5%) παραμορφώσεις τρεις διαφορετικές εντάσεις συμβαίνουν: κάμψη των επιφανειών των κελιών, θλίψη των αερίων τα οποία παγιδεύονται μέσα στα κελιά και εφελκυσμός των τοιχωμάτων των κελιών.

Στην περιοχή (II) αυτά τα αφρώδη υλικά κατασκευάζονται από υλικά που έχουν ένα μέγιστο σημείο τάσης πέρα από το οποίο αρχίζει η μόνιμη πλαστική τους παραμόρφωση και στη συνέχεια η αστοχία τους. Η παραμόρφωση αυτή στα αφρώδη υλικά που αποτελούνται από κλειστά κελιά συμβαίνει σε τρία στάδια. Όταν η καμπτική ροπή που ενεργεί στα τοιχώματα των κελιών υπερβεί την επιτρεπόμενη ροπή στις άκρες τους, τότε αρχίζει να συμβαίνει μια μόνιμη στρέβλωση, γίνεται ένα πλαστικό τέντωμα των τοιχωμάτων των στοιχείων και η πίεση του ρευστού που περιλαμβάνεται στα κελιά αυξάνεται.

Στο τελευταίο στάδιο (III) όπου η θλιπτική ένταση είναι μεγάλη τα κελιά έχουν πλέον διαλυθεί, ενώ και το υλικό έχει αστοχήσει σε θλίψη.

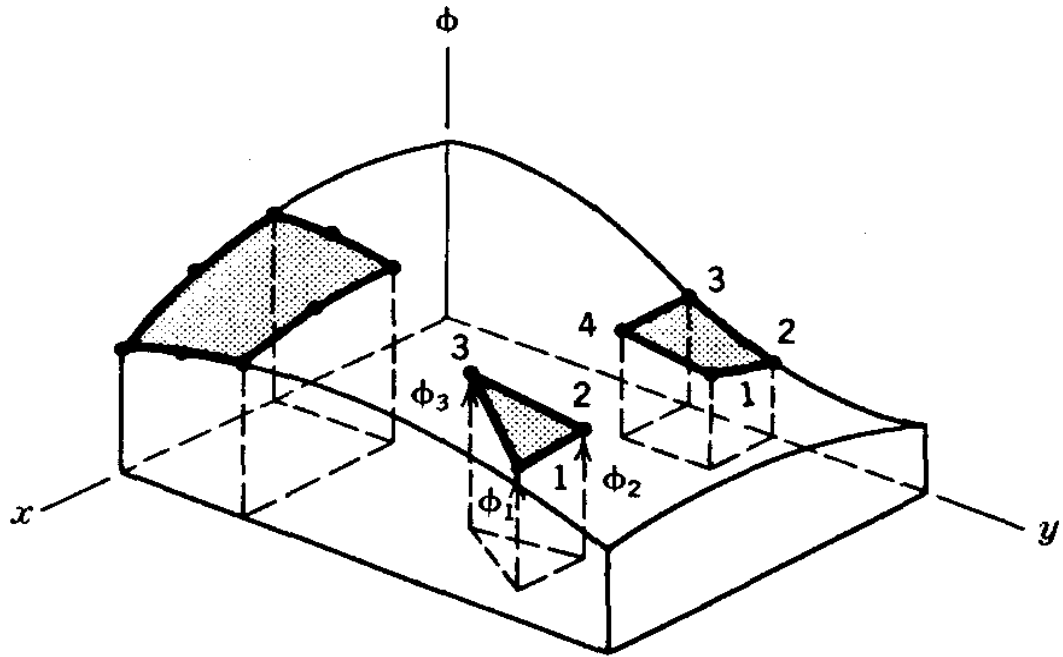
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική προσέγγιση για την ανάλυση κατασκευών. Συνήθως τα εξεταζόμενα προβλήματα είναι αρκετά πολύπλοκα για να λυθούν με ικανοποιητικό τρόπο από τις κλασσικές αναλυτικές μεθόδους. Τα προβλήματα που εξετάζονται μπορεί να αφορούν την ανάλυση τάσεων, την μεταφορά θερμότητας ή οτιδήποτε άλλο από διάφορες περιοχές ανάλυσης. Η διαδικασία των πεπερασμένων στοιχείων παράγει πολλά συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων, τα οποία παράγονται και λύνονται με προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αποτελέσματα είναι σπάνια απολύτως ακριβή. Εντούτοις, ο βαθμός του λάθους μπορεί να μειωθεί προσθέτοντας και άλλες εξισώσεις, χωρίς συνήθως να απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλο κόστος για κάτι τέτοιο.

Ένα σημαντικό στοιχείο στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι η συμπεριφορά των μεμονωμένων στοιχείων. Λίγα, “καλά” στοιχεία μπορούν να παράγουν καλύτερα αποτελέσματα απ’ ό,τι πολλά, αλλά “φτωχά” στοιχεία. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1 διάφοροι τύποι στοιχείων μπορεί να επιλεγθούν για την διακριτοποίηση μιας επιφάνειας.



Σχήμα 5.1: Διακριτοποίηση επιφάνειας με διαφορετικών τύπων στοιχεία[24].

Η συνάρτηση Φ του παραπάνω σχήματος ποικίλλει ομαλά στη συγκεκριμένη κατασκευή και μπορεί να αντιπροσωπεύει οποιαδήποτε από τα φυσικά μεγέθη. Η έννοια της Φ σε διάφορα προβλήματα είναι η εξής:

- 1) για στρέψη: η Φ αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση παραμόρφωσης ή στρέψης
- 2) για ροή ρευστού: η Φ αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση ροής ή τη δυναμική ταχύτητα
- 3) για ηλεκτρικά πεδία: η Φ αντιπροσωπεύει το δυναμικό πεδίο (ηλεκτρική τάση)
- 4) για μεταφορά θερμότητας: η Φ αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία.

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων τυπικά αποδίδει μια τμηματικά ομαλή αντιπροσώπευση της Φ . Μεταξύ των στοιχείων μπορεί να υπάρχουν ανωμαλίες παραγωγής της Φ ως προς x , y . Για κάθε στοιχείο η Φ είναι μια ομαλή συνάρτηση που εκφράζεται από ένα απλό πολυώνυμο. Η μορφή του πολυωνύμου εξαρτάται από

το είδος του στοιχείου και συγκεκριμένα για το τριγωνικό στοιχείο είναι ένα γραμμικό πολυώνυμο της μορφής:

$$\Phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (5.1)$$

όπου τα α_i είναι σταθερές. Αυτές οι σταθερές μπορούν να εκφραστούν σαν όροι των Φ_1 , Φ_2 και Φ_3 τα οποία είναι οι τιμές της Φ για κάθε έναν από τους τρεις κόμβους. Τα τριγωνικά στοιχεία μπορούν να αναπαράγουν μια επιφάνεια επίπεδων τριγωνικών όψεων. Για το τεσσάρων κόμβων τετραεδρικό στοιχείο καταλληλότερη είναι η διγραμμική συνάρτηση:

$$\Phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \quad (5.2)$$

Οι εξισώσεις 5.1 και 5.2 αποτελούν την παρεμβολή της συνάρτησης Φ σε σχέση με τους όρους που καθορίζουν τη θέση (x, y) ενός στοιχείου. Έτσι όταν ο όρος α_i έχει καθοριστεί από τις τιμές των κόμβων της Φ_i οι εξισώσεις 5.1 και 5.2 καθορίζουν τη Φ ενός στοιχείου αν είναι γνωστά τα Φ_i και οι συντεταγμένες. Είναι φανερό ότι αν η διακριτοποίηση της επιφάνειας με στοιχεία γίνει σωστά και αν η Φ_i τυχαίνει να είναι ακριβής τότε η Φ μακριά από τους κόμβους θα είναι μια καλή προσέγγιση. Οι τιμές των κόμβων Φ_i δεν θα είναι ακριβείς αν η διακριτοποίηση της επιφάνειας δεν είναι πολύ καλή και αν οι ιδιότητες ενός στοιχείου δεν έχουν διατυπωθεί κατάλληλα.

Η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου για την ανάλυση της εκάστοτε κατασκευής δεν είναι τόσο απλή. Ένα στοιχείο που είναι κατάλληλο για ένα πρόβλημα μπορεί να είναι ανεπαρκές για κάποιο άλλο. Ακόμα και σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα π.χ. ανάλυσης τάσεως, ένα στοιχείο μπορεί να συμπεριφέρεται σωστά ή λάθος ανάλογα με τη γεωμετρία, τη φόρτιση και τις συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται. Ο αρμόδιος μηχανικός πρέπει να είναι γνώστης της συμπεριφοράς διάφορων στοιχείων κάτω από διάφορες συνθήκες.

Συνοψίζοντας μπορεί να δοθεί ο παρακάτω ορισμός για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων:

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια μέθοδος σταδιακής προσέγγισης κατά την οποία η προσεγγιστική εξίσωση Φ δίνεται από την ένωση άλλων απλούστερων εξισώσεων οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζονται από μικρές περιοχές, (τα στοιχεία). Ένα πεπερασμένο στοιχείο είναι μια περιοχή στο χώρο μέσα στην οποία μια συνάρτηση Φ έχει παρεμβληθεί από τις κομβικές τιμές της Φ στα σύνορα της περιοχής αυτής κατά τέτοιο τρόπο ώστε η περιοχή ανάμεσα στα στοιχεία να είναι συνεχής και να μπορέσει να ισχύσει η Φ στην συναρμολόγηση των επιμέρους στοιχείων.

Η ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χωρίζεται στα παρακάτω βήματα. Η αναφορά στην ανάλυση τάσεων γίνεται γιατί αποτελεί μια τυπική εφαρμογή. Τα βήματα 1 και 4 απαιτούν αποφάσεις από τον χρήστη ο οποίος και θα δώσει τα απαραίτητα στοιχεία στο πρόγραμμα του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα βήματα 2, 3, 5 και 6 γίνονται αυτόματα από το πρόγραμμα.

1. Υποδιαίρεση της κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία.
2. Τυποποίηση των ιδιοτήτων του κάθε στοιχείου.
3. Συναρμολόγηση των στοιχείων.
4. Εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων και των συνοριακών συνθηκών.
5. Επίλυση γραμμικών αλγεβρικών.
6. Στην ανάλυση τάσεων, υπολογισμός της εντατικής παραμόρφωσης των στοιχείων από τις μετατοπίσεις των κόμβων και υπολογισμός της τάσης από την παραμόρφωση.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έγκειται κυρίως στη μεγάλη γενικότητα της. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πάρα πολλά και διαφορετικά μεταξύ τους φυσικά προβλήματα. Το σώμα που αναλύεται μπορεί να έχει αυθαίρετη μορφή, φορτία και συνθήκες στήριξης. Η διακριτοποίηση της κατασκευής μπορεί να γίνει με την χρησιμοποίηση διαφορετικών στοιχείων τόσο από άποψη τύπου, σχήματος όσο και από πλευράς φυσικών ιδιοτήτων. Ένα ακόμα στοιχείο που ελκύει στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι και η πολύ καλή προσέγγιση της κανονικής κατασκευής με το υπολογιστικό μοντέλο που κατασκευάζεται.

5.2 Ανάλυση τάσεων στο χώρο των τριών διαστάσεων

Το απλούστερο επίπεδο συνεχές πεπερασμένο στοιχείο είναι το τριγωνικό. Στο χώρο των τριών διαστάσεων το ισοδύναμο στοιχείο είναι το τετράεδρο, το οποίο είναι ένα στοιχείο που έχει τέσσερις κόμβους στις αντίστοιχες ακμές του. Ένα πρόβλημα που υπάρχει γενικά στην ανάλυση κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία είναι ο σωστός τρόπος αρίθμησης των κόμβων μιας κατασκευής που διακριτοποιείται σε τέτοια στοιχεία, καθώς επηρεάζει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου.

Είναι επίσης προφανές ότι ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός βαθμός ακρίβειας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος. Αυτό έχει όμως σαν αποτέλεσμα σε ένα πρακτικό πρόβλημα την δημιουργία πάρα πολλών αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες μπορούν στην πράξη να οδηγήσουν σε μεγάλο περιορισμό της χρήσης της μεθόδου. Περαιτέρω αύξηση του αριθμού των εξισώσεων έχει σαν αποτέλεσμα να γίνονται μεγαλύτερες οι απαιτήσεις σε μνήμη και χρόνο του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Για να γίνει κατανοητό το μέγεθος του προβλήματος που παρουσιάζεται ως υποθεθεί ότι η ακρίβεια των τριγώνων στη δισδιάστατη ανάλυση είναι συγκρίσιμη με αυτή των τετράεδρων στις τρεις διαστάσεις. Εάν μια επαρκής ανάλυση τάσης μιας τετραγωνικής, δισδιάστατης περιοχής απαιτεί ένα πλέγμα με $20 \times 20 = 400$ κόμβους, ο συνολικός αριθμός αλγεβρικών εξισώσεων είναι γύρω στις 800 δεδομένου ότι ο κάθε κόμβος έχει δύο δυνατότητες κινήσεως (βαθμούς ελευθερίας).

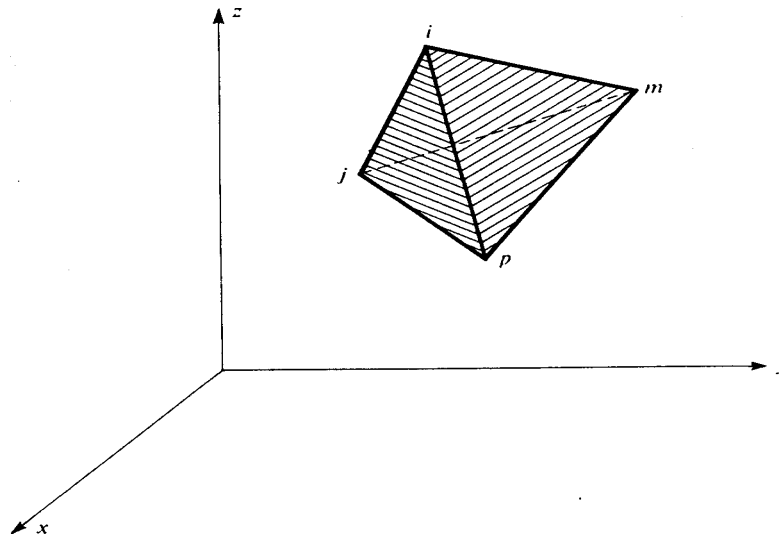
Μια ισοδύναμη ανάλυση στην τρισδιάστατη περιοχή είναι αυτή ενός κύβου με $20 \times 20 \times 20 = 8000$ κόμβους. Ο συνολικός αριθμός εξισώσεων είναι τώρα 24000 καθώς σε κάθε κόμβο υπάρχουν τρεις μεταβλητές μετατοπίσεων.

Δεδομένου ότι με τις συνηθισμένες άμεσες τεχνικές επίλυσης η προσπάθεια υπολογισμού είναι κατά προσέγγιση ανάλογη προς τον αριθμό εξισώσεων και προς το τετράγωνο του εύρους του μητρώου του συστήματος μπορεί να εκτιμηθεί και το κόστος. Δεν είναι έκπληξη επομένως οι προσπάθειες που γίνονται στο χώρο της τρισδιάστατης ανάλυσης για να βελτιωθεί η ακρίβεια της λύσης μέσω της χρησιμοποίησης σύνθετων στοιχείων με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας.

5.2.1 Χαρακτηριστικά τετραεδρικών στοιχείων

5.2.1.1 Συναρτήσεις μετατοπίσεων

Το σχήμα 5.2 επεξηγεί ένα τετραεδρικό στοιχείο με κόμβους i, j, m, p στο χώρο που καθορίζεται από τις x, y , και z συντεταγμένες.



Σχήμα 5.2: Τετραεδρικό Στοιχείο[23].

Η μετατόπιση ενός σημείου καθορίζεται από τις τρεις συνιστώσες της μετατόπισης, τις u , v , και w οι οποίες βρίσκονται αντίστοιχα στις κατευθύνσεις των τριών συντεταγμένων x , y , και z . Κατά συνέπεια:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$

Ακριβώς όπως σε ένα επίπεδο τριγωνικό στοιχείο όπου μια γραμμική αλλαγή μιας ποσότητας καθορίστηκε από τις τρεις τιμές των κόμβων της, εδώ μια γραμμική αλλαγή θα καθοριστεί από τις τέσσερις κομβικές τιμές. Έτσι:

$$\mathbf{u} = \alpha_1 + \alpha_2 \mathbf{x} + \alpha_3 \mathbf{y} + \alpha_4 \mathbf{z} \quad (5.4)$$

Εξισώνοντας τις τιμές της μετατόπισης στους κόμβους σχηματίζονται τέσσερις εξισώσεις της μορφής:

$$\mathbf{u}_i = \alpha_1 + \alpha_2 \mathbf{x}_i + \alpha_3 \mathbf{y}_i + \alpha_4 \mathbf{z}_i \quad (i, j, m, p) \quad (5.5)$$

από τις οποίες μπορούν εύκολα να υπολογιστούν οι τιμές των a_1 έως a_4 και να σχηματιστεί η παρακάτω εξίσωση.

$$u = \frac{1}{6V} \{ (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) u_i - (a_j + b_j x + c_j y + d_j z) u_j + (a_m + b_m x + c_m y + d_m z) u_m - (a_p + b_p x + c_p y + d_p z) u_p \} \quad (5.6)$$

όπου

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (5.7)$$

Η τιμή του V είναι αυτή που καθορίζει και το βαθμό του τετράεδρου. Επεκτείνοντας και στις άλλες σχετικές ορίζουσες:

$$a_i = \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_m & y_m & z_m \\ x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad b_i = \det \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (5.8)$$

$$c_i = \det \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_m & 1 & z_m \\ x_p & 1 & z_p \end{vmatrix} \quad d_i = \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_m & y_m & 1 \\ x_p & y_p & 1 \end{vmatrix}$$

Με τις υπόλοιπες σταθερές να καθορίζονται από κυκλικές μεταβολές των p , i , j , και m .

Η αρίθμηση των κόμβων πρέπει να ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2 Σε αυτό το σχήμα οι πρώτοι τρεις κόμβοι έχουν

αριθμηθεί αντίστροφα με την κίνηση των δεικτών του ρολογιού όταν κοιτάζοντας από τον τελευταίο.

Η μετατόπιση του στοιχείου καθορίζεται από τις δώδεκα συνιστώσες της μετατόπισης ενός κόμβου:

$$a^e = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_m \\ a_p \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

όπου $a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}$ κ.λ.π και η μετατόπιση ενός τυχαίου σημείου μπορεί να γραφτεί σαν

$$\mathbf{u} = [\mathbf{I}N_i, \mathbf{I}N_j, \mathbf{I}N_m, \mathbf{I}N_p] \mathbf{a}^e \quad (5.10)$$

με το N να καθορίζεται ως:

$$N_i = (\mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i \mathbf{x} + \mathbf{c}_i \mathbf{y} + \mathbf{d}_i \mathbf{z}) / 6V(i, j, m, p) \quad (5.11)$$

και \mathbf{I} είναι ένας τρία επί τρία όμοιος πίνακας.

Τέλος, οι παραπάνω εξισώσεις μετατόπισης που χρησιμοποιήθηκαν πληρούν και τη συνέχεια που απαιτείται ανάμεσα στα στοιχεία, και το οποίο είναι αποτέλεσμα της γραμμικότητας στη διαφορά της μετατόπισης.

5.2.1.2 Μητρώο παραμόρφωσης

Έξι συνιστώσες της παραμόρφωσης είναι αρκετές για την ανάλυση στο χώρο των τριών διαστάσεων. Το μητρώο της έντασης μπορεί να καθοριστεί ως εξής:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = \mathbf{L}u \quad (5.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 5.6 έως 5.10 εύκολα επαληθεύεται ότι

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{a}^e = [\mathbf{B}_i \mathbf{B}_j \mathbf{B}_m \mathbf{B}_p] \mathbf{a}^e \quad (5.13)$$

όπου για τον πίνακα \mathbf{B} ισχύει:

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N'_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N'_i}{\partial y} & \frac{\partial N'_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial z} & \frac{\partial N'_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N'_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ 0 & d_i & c_i \\ d_i & 0 & b_i \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

οι υπόλοιποι υποπίνακες σχηματίζονται κατά τον ίδιο τρόπο.

5.2.1.3 Μητρώο ελαστικότητας

Σε ένα πλήρες ανισότροπο υλικό το μητρώο \mathbf{D} , το οποίο συσχετίζει τις έξι συνιστώσες της τάσης με τις συνιστώσες της παραμόρφωσης μπορεί να περιέχει μέχρι και 21 ανεξάρτητες σταθερές.

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (5.15)$$

Αν και καμία ιδιαίτερη δυσκολία δεν παρουσιάζεται στους υπολογισμούς όταν το πρόβλημα αφορά ανισότροπα υλικά, ωστόσο για λόγους ευκολίας περιγράφεται το μητρώο D για ένα ισότροπο υλικό. Έτσι γνωρίζοντας τα E (μέτρο ελαστικότητας) και ν (λόγος Poisson) το D προκύπτει εύκολα από την παρακάτω εξίσωση:

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{bmatrix} 1, & \nu/(1-\nu), & \nu/(1-\nu), & 0, & 0, & 0, \\ & 1, & \nu/(1-\nu), & 0, & 0, & 0, \\ & & 1, & 0, & 0, & 0, \\ & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}, & 0, & 0, \\ & & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}, & 0, \\ & & & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}, \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

5.2.1.4 Μητρώα ακαμψίας, και φόρτισης

Το μητρώο ακαμψίας μπορεί να ενσωματωθεί μιας και η τάση και η παραμόρφωση παραμένουν σταθερά μέσα σε ένα στοιχείο. Ο γενικός ij υποπίνακας του μητρώου ακαμψίας είναι ένα τρία επί τρία μητρώο που καθορίζεται ως:

$$K_{ij}^e = B_i^T D B_j V^e \quad (5.17)$$

όπου το V^e αντιπροσωπεύει τον βαθμό του στοιχειώδους τετράεδρου. Οι δυνάμεις στους κόμβους μετά την αρχική παραμόρφωση δίνονται από τη σχέση

$$f_i^e = -B_i^T D_{e_o} V^e \quad (5.18)$$

5.3 Μη γραμμική ανάλυση

Τα περισσότερα προβλήματα μηχανικής, είναι δυνατόν να προσομοιωθούν θεωρώντας γραμμική συμπεριφορά των υλικών. Στην πραγματικότητα όμως όλα σχεδόν τα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι μη-γραμμικά, γιατί η φύση τους είναι μη-γραμμική. Η διαφορά μεταξύ της γραμμικής και της μη γραμμικής λύσης κάποιου προβλήματος συνίσταται στο κατά πόσο η επιλογή της γραμμικής συμπεριφοράς, είναι ικανή να δώσει σωστά αποτελέσματα για το πρόβλημα ή όχι. Όταν η απόκλιση μεταξύ γραμμικής και μη-γραμμικής λύσης είναι μικρή, τότε είναι δυνατή η γραμμική προσομοίωση του προβλήματος. Αρκετές όμως είναι οι φορές που το πρόβλημα είναι έντονα μη γραμμικό οπότε δεν είναι εφικτή η επίλυσή του με γραμμικά μοντέλα.

Στη μηχανική κάποιο πρόβλημα θεωρείται μη γραμμικό εάν το μητρώο ακαμψίας ή το διάνυσμα φόρτισης εξαρτώνται από το διάνυσμα της μετατόπισης. Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα γραμμικά και στα μη-γραμμικά προβλήματα είναι ότι ενώ στα γραμμικά προβλήματα η λύση ήταν πάντα μοναδική αυτό δεν ισχύει σε πολλές μη-γραμμικές καταστάσεις. Κατά συνέπεια, εάν επιτευχθεί μια λύση μπορεί να μην είναι απαραίτητος και η σωστή. Για να επιτευχθεί μια σωστή λύση, η τεχνική που θα εφαρμοστεί σε ένα ιδιαίτερο πρόβλημα προσεγγίζεται συχνά με τη διαίσθηση και την εμπειρία.

5.3.1 Γενική προσέγγιση μη-γραμμικών προβλημάτων

Η διακριτοποίηση μη γραμμικών συστημάτων μπορεί γενικά να γραφτεί σαν ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων της ακόλουθης μορφής.

$$\Psi(a) \equiv P(a) + f \equiv K(a) a + f = 0 \quad (5.19)$$

Η παραπάνω γενική μορφή της εξίσωσης εξαρτάται από το είδος του προβλήματος και τη μέθοδο της διακριτοποίησης. Στην παραπάνω εξίσωση το a περιγράφει την προσέγγιση του άγνωστου ή άγνωστων συντελεστών.

Ενώ η λύση της εξίσωσης

$$K(a) + f = 0 \quad (5.20)$$

μπορεί να επιτευχθεί εύκολα σε γραμμικά προβλήματα, σε μη γραμμικά προβλήματα απαιτείται η μέθοδος της επανάληψης μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

5.3.1.1 Μέθοδος άμεσης επανάληψης

Η πιο προφανής λύση άμεσης προσέγγισης είναι αυτή της επανάληψης, η οποία ξεκινάει με τη μορφή:

$$K a + f = 0 \quad (5.21)$$

στην οποία

$$K = K(a)$$

Αν αρχικά υποθεθεί ότι για μερικές τιμές ισχύει $a = a^0$ μια βελτιωμένη προσέγγιση θα προκύψει:

$$a^1 = -(K^0)^{-1} f \quad (5.22)$$

όπου

$$K^0 = K(a^0)$$

Η επανάληψη της διαδικασίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$a^n = - (K^{n-1})^{-1} f \quad (5.23)$$

η διαδικασία θα λάβει τέλος όταν το λάθος:

$$e = a^n - a^n \quad (5.24)$$

γίνει αρκετά μικρό. Συνήθως χρησιμοποιούνται ορισμένοι κανόνες για τον καθορισμό της τιμής του λάθους που πρέπει να επιτευχθεί. Υπάρχουν διάφοροι κανόνες και κριτήρια σύγκλισης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως :

$$|e| = \max e_i \text{ (η μέγιστη τιμή για οποιοδήποτε στοιχείο)}$$

δηλαδή

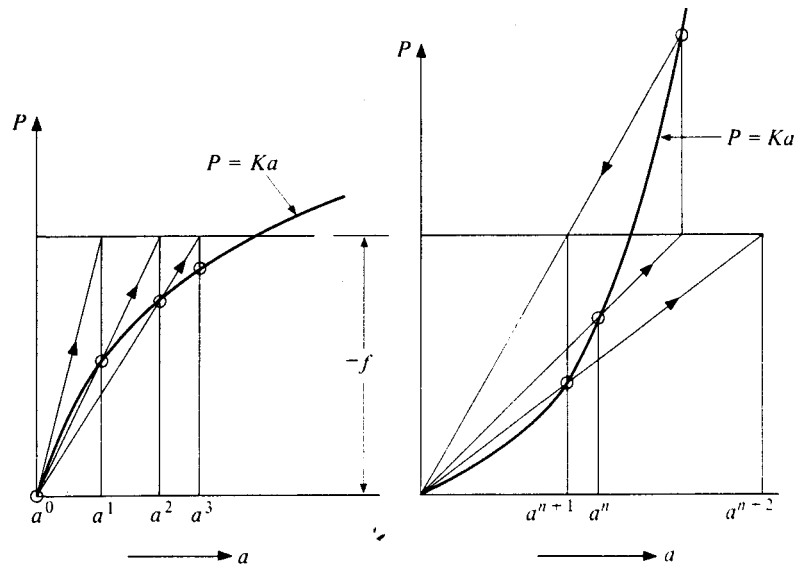
$$|e| = \sqrt{e^T e} \quad (5.25)$$

σε αυτή την περίπτωση η σύγκλιση θεωρείται επιτυχημένη όταν θα ισχύσει

$$|e| \leq \alpha |a| \quad (5.26)$$

όπου α είναι συγκεκριμένο κλάσμα.

Η μέθοδος της άμεσης επανάληψης είναι χρήσιμη σε ορισμένα είδη προβλημάτων, ωστόσο συχνά οδηγεί σε μια έλλειψη σύγκλισης. Στο σχήμα 5.3 επεξηγεί τις δυνατότητες σύγκλισης και απόκλισης μιας τέτοιας επανάληψης σε πρόβλημα με μια μεταβλητή. Σε αυτή την διαδικασία πρέπει να επιλυθεί ένα σύστημα διαφορετικών γραμμικών εξισώσεων σε κάθε βήμα του υπολογισμού.



(α) Σύγκλιση

(β) Απόκλιση

Σχήμα 5.3 Μέθοδος άμεσης επανάληψης[25].

5.3.1.2 Μέθοδος Newton-Raphson

Αν μια κατά προσέγγιση λύση $\mathbf{a} = \mathbf{a}^n$ έχει επιτευχθεί τότε η λύση μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας την περιορισμένη έκφραση του Taylor η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Psi(\mathbf{a}^{n+1}) \equiv \Psi(\mathbf{a}^n) + \left(\frac{d\Psi}{da} \right)_n \Delta \mathbf{a}^n = 0 \tag{5.27}$$

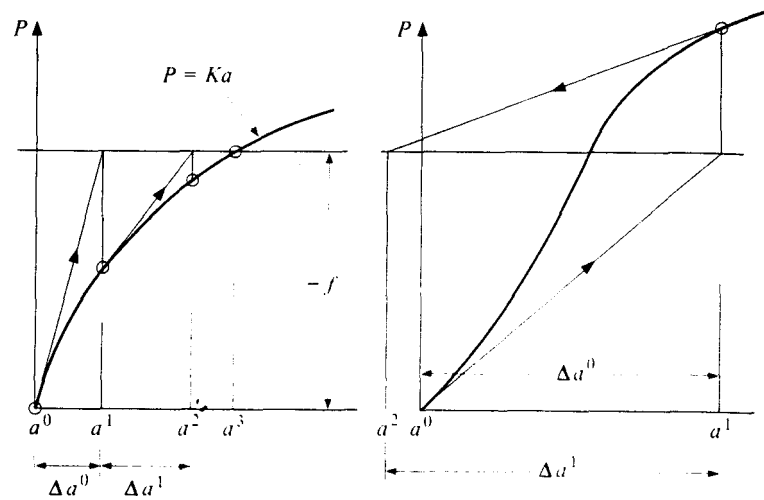
όπου

$$\mathbf{a}^{n+1} = \mathbf{a}^n + \Delta \mathbf{a}^n$$

και αντιπροσωπεύει μια εφαπτομενική μήτρα. Η βελτιωμένη τιμή της \mathbf{a}^{n+1} μπορεί να προκύψει υπολογίζοντας το $\Delta \mathbf{a}^n$ από την παρακάτω εξίσωση

$$\Delta \mathbf{a}^n = -(\mathbf{K}_T^n)^{-1} \Psi^n = -(\mathbf{K}_T^n)^{-1} (\mathbf{P}^n + \mathbf{f}) \tag{5.28}$$

Η διαδικασία εξηγείται από το Σχήμα 5.4 σημειώνοντας ότι σε κάθε βήμα της επίλυσης μια καινούρια ομάδα γραμμικών εξισώσεων πρέπει να επιλύονται για το Δa^n .



Σχήμα 5.4 Μέθοδος Newton – Raphson[25].

Η διαδικασία συνήθως συγκλίνει στην περιοχή της λύσης, αν ωστόσο η αρχική τιμή δεν είναι αρκετά κοντά στη σωστή τότε πάλι παρατηρείται απόκλιση.

5.3.1.3 Τροποποιημένη μέθοδος Newton – Raphson

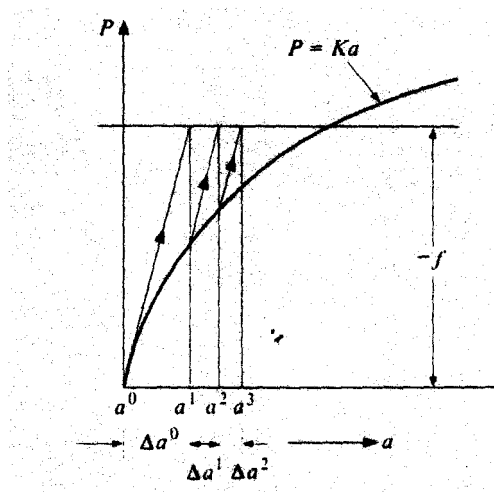
Προκειμένου να ξεπεραστεί η δυσκολία της επίλυσης νέων εξισώσεων σε κάθε στάδιο επανάληψης συχνά γίνεται μια προσέγγιση χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$K_T^n = K_T^o \quad (5.29)$$

η χρησιμοποίηση της οποίας οδηγεί στην τροποποίηση της περιορισμένης έκφρασης του Taylor στην παρακάτω μορφή.

$$\Delta a^n = -(K_T^o)^{-1}(P^n + f) \quad (5.30)$$

έτσι μια ανάλυση του ίδιου συστήματος εξισώσεων χρησιμοποιείται επανειλημμένος. Αυτή η μέθοδος είναι σαφώς πιο οικονομική για κάθε βήμα ωστόσο η σύγκλιση επιτυγχάνεται με περισσότερες επαναλήψεις. Σε πολλές περιπτώσεις όμως αυτή η μέθοδος είναι συνολικά πιο σύντομη. Η μέθοδος εξηγείται από το σχήμα 5.5



Σχήμα 5.5: Τροποποιημένη μέθοδος Newton – Raphson [25].

5.3.2. Επιτάχυνση της σύγκλισης

Σε όλες τις προαναφερόμενες μεθόδους υπάρχουν διάφορες τεχνικές επιτάχυνσης. Όλες οι διαδικασίες επανάληψης ξεκινάνε από μια τιμή η οποία επιλέγεται από τον χρήστη. Αν η διαδικασία της σύγκλισης του σφάλματος μπορεί να παρατηρηθεί κατά την διαδικασία επανάληψης, τότε είναι συχνά δυνατόν συμπερασματικά να παραχθεί μια καλύτερη τιμή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αρχική. Εναλλακτικά μπορεί στη μέθοδο Newton – Raphson ή στη τροποποιημένη μέθοδο Newton – Raphson η διόρθωση Δa^n να πολλαπλασιαστεί με μια σταθερά, όπου συχνά είναι κοντά στην τιμή 2 προκειμένου να βελτιωθεί ο βαθμός σύγκλισης.

5.4 Ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία

Η ισοπαραμετρική διατύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πολλών χρήσιμων στοιχείων. Ο ισοπαραμετρικός τύπος κάνει δυνατή τη δημιουργία στοιχείων τα οποία δεν είναι ορθογώνια αλλά έχουν καμπύλες πλευρές. Αυτές οι μορφές των στοιχείων είναι πολύ χρήσιμες για τη διακριτοποίηση και την αναπαραγωγή κυρτών επιφανειών. Η οικογένεια των ισοπαραμετρικών στοιχείων περιλαμβάνει στοιχεία επίπεδα, στερεά, πλάκες και κελύφη για την επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων.

Η αρχή στην οποία στηρίζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στη θεώρηση κατ' αρχάς μιας απεικόνισης ένα προς ένα μεταξύ των καμπυλόγραμμων και των καρτεσιανών συντεταγμένων. Έχοντας αυτή την απεικόνιση είναι δυνατόν να καταγραφούν σε τοπικά συστήματα οι συναρτήσεις σχήματος και στη συνέχεια με κατάλληλους μετασχηματισμούς να θεμελιωθούν οι ιδιότητες του στοιχείου βάσει των καμπυλόγραμμων συντεταγμένων. Όμως για να πάρουμε τις τελικές εξισώσεις ισορροπίας του σώματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αντίστροφη απεικόνιση, εφ' όσον οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται στον καρτεσιανό χώρο.

Στον τύπο των ισοπαραμετρικών στοιχείων πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι τοπικές συντεταγμένες (σύστημα ξ, η, ζ). Τα διαστήματα εκφράζονται αρχικά στα τοπικά συστήματα συντεταγμένων και στη συνέχεια καθορίζονται και στο ολικό. Για να γίνει αυτή η μετατροπή πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας **J** που ονομάζεται “Ίακωβιανό” μητρώο.

Για να είναι ένα στοιχείο ισοπαραμετρικό θα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες συνθήκες. Με τον όρο ισοπαραμετρικό εννοείται “ίδιοι παράμετροι”, που σημαίνει ότι επειδή οι μετατοπίσεις αλλά και οι συντεταγμένες εξαρτώνται από τον βαθμό των

κόμβων θα πρέπει οι πίνακες N και \tilde{N} να είναι ίδιοι για να είναι ένα στοιχείο ισοπαραμετρικό. Οι N και \tilde{N} δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

1. ο βαθμός ελευθερίας του κόμβου $\{d\}$ καθορίζει τη μετατόπιση $[u \ v \ w]$ ενός σημείου στο στοιχείο η οποία δίνεται από το μητρώο $[u \ v \ w]^T = [N] \{d\}$.
2. οι συντεταγμένες του κόμβου $\{c\}$ καθορίζουν τις συντεταγμένες $[x \ y \ z]$ ενός σημείου στο στοιχείο με το μητρώο $[x \ y \ z]^T = [\tilde{N}] \{c\}$.

Οι πίνακες N και \tilde{N} είναι συναρτήσεις των ξ , η και ζ . Αν ο N είναι μεγαλύτερου βαθμού από ότι ο \tilde{N} τότε το στοιχείο ονομάζεται υποπαραμετρικό, αλλά αν ο N είναι μικρότερου βαθμού από τον \tilde{N} τότε το στοιχείο λέγεται υπερπαραμετρικό.

5.4.1 Εξαεδρικό (Στερεό) Ισοπαραμετρικό Στοιχείο

Στο χώρο των τριών διαστάσεων η ισοπαραμετρική διαδικασία μοιάζει αρκετά με αυτή που γίνεται στον δισδιάστατο χώρο. Η γενική διαδικασία που χρησιμοποιείται στα ισοπαραμετρικά στοιχεία έχει λίγο να κάνει με την μορφή του συγκεκριμένου στοιχείου.

Για τα γεωμετρικά μεγέθη του στοιχείου και του χώρου Φ ενός στερεού ισοπαραμετρικού στοιχείου ισχύει:

$$x = \sum N_i x_i \quad y = \sum N_i y_i \quad z = \sum N_i z_i \quad \Phi = \sum N_i \Phi_i$$

όπου το i εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου. Η εξίσωση μορφής N_i είναι συναρτήσεις των ισοπαραμετρικών συντεταγμένων ξ , η και ζ . οι επιφάνειες του στοιχείου βρίσκονται $\xi = \pm 1$, $\eta = \pm 1$, και $\zeta = \pm 1$. Το “Ιακωβιανό” μητρώο είναι τρία επί τρία και έχει τη μορφή:

$$[J] = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} & z_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} & z_{,\eta} \\ x_{,\zeta} & y_{,\zeta} & z_{,\zeta} \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} N_{i,\xi} x_i & N_{i,\xi} y_i & N_{i,\xi} z_i \\ N_{i,\eta} x_i & N_{i,\eta} y_i & N_{i,\eta} z_i \\ N_{i,\zeta} x_i & N_{i,\zeta} y_i & N_{i,\zeta} z_i \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

ισχύει $[\Gamma] = [J]^{-1}$

$$[\Phi_{,x} \quad \Phi_{,y} \quad \Phi_{,z}]^T = [\Gamma][\Phi_{,\xi} \quad \Phi_{,\eta} \quad \Phi_{,\zeta}]^T \quad (5.32)$$

Για n αριθμό κόμβων ανά στοιχείο το μητρώο ακαμψίας του στοιχείου δίνεται από τη σχέση

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T k [B] J d\xi d\eta d\zeta \quad (5.33)$$

$\begin{matrix} nxn & & nx3 & 3xn \end{matrix}$

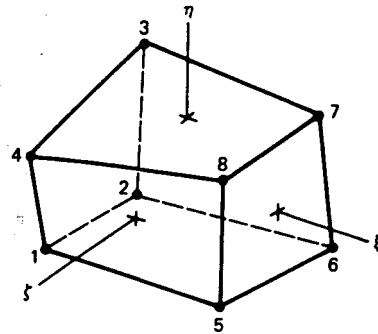
όπου k είναι οι ιδιότητες του υλικού. Η ορίζουσα του “Ίακωβιανού” μητρώου $J = \det [J]$ εκφράζει το λόγο των dx, dy, dz ως προς τις $d\xi, d\eta$ και $d\zeta$. Γενικά οι $[J]$ και $[B]$ είναι συναρτήσεις των ξ, η και ζ . Η σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης – μετατόπισης δίνεται από την εξίσωση

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [B]\{\mathbf{d}\} \quad (5.34)$$

όπου το διάνυσμα $\{\mathbf{d}\}$ περιέχει τις μετατοπίσεις των κόμβων του στοιχείου και $[B]$ είναι χωρικό παράγωγο των μεταβλητών του χώρου. Για τη μηχανική των κατασκευών που ασχολείται με τις μετατοπίσεις u, v και w οι οποίες είναι παράλληλες ως προς τους άξονες x, y και z αντίστοιχα η σχέση της παραμόρφωσης – μετατόπισης γίνεται:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = [H] \begin{Bmatrix} u_{,x} \\ u_{,y} \\ u_{,z} \\ v_{,x} \\ \vdots \\ w_{,z} \end{Bmatrix}, \quad \text{where } [H]_{6 \times 9} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Η εξίσωση μορφής ενός γραμμικού στερεού στοιχείου σχήμα 5.6 είναι

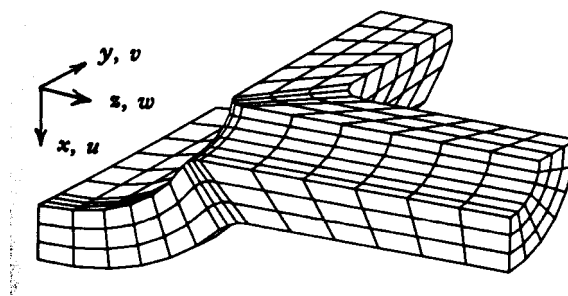


Σχήμα 5.6: Οκτακομβικό στερεό στοιχείο.

$$N_i = \frac{1}{8}(1 \pm \xi)(1 \pm \eta)(1 \pm \zeta) \quad (5.36)$$

όπου $i = 1, 2 \dots 8$.

Τα τετραεδρικά στοιχεία μπορεί να είναι αποδεκτά για την διακριτοποίηση κατασκευών όπως αυτή του σχήματος 5.7 σε ένα και μόνο επίπεδο στοιχείων, εκτός από την περιοχή που ενώνονται οι δύο κύλινδροι, γιατί εκεί η διαφορά τάσης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.



Σχήμα 5.7: Μοντέλο 1/8 ενός κύλινδρου σε ένωση με άλλον κύλινδρο [24].

5.5 Σύνθετα και ορθοτροπικά υλικά

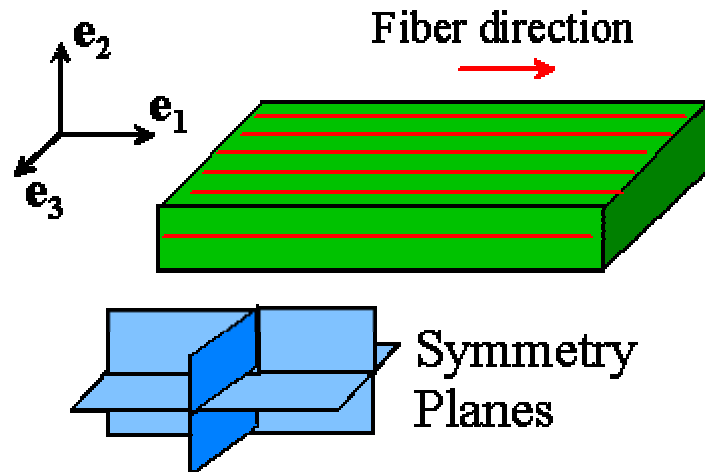
Ο σκοπός της δημιουργίας των σύνθετων υλικών είναι ο σχεδιασμός ενός υλικού που να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες που δεν είναι δυνατόν να έχουν τα “συμβατικά” υλικά. Ως εκ τούτου τα σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στρώσεις υλικών, σε μακροσκοπικό επίπεδο, αποκτούν τις σχεδιαζόμενες ιδιότητες τους από την σύνθεση των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελούνται. Συνήθως το ένα τουλάχιστον από τα υλικά του σύνθετου υλικού είναι ασυνεχές, πιο δύσκαμπτο, ισχυρότερο, έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση και ονομάζεται ενισχυτικό ενώ το άλλο είναι συνεχές, λιγότερο δύσκαμπτο και ισχυρό και ονομάζεται μήτρα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού εξαρτάται από τις ιδιότητες των συστατικών, τη γεωμετρία, και την διανομή των στρωμάτων. Ο πιο σημαντικός παράγοντας από αυτούς είναι ο βαθμός κλάσματος της ενίσχυσης και η διανομή της ενίσχυσης. Αυτά καθορίζουν την ομοιογένεια και την ομοιομορφία του σύνθετου υλικού.

Κάθε μια από τις στρώσεις υλικού έχει ένα συγκεκριμένο ρόλο στη γενικότερη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού και η επιλογή τους εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή του σύνθετου υλικού.

5.5.1 Ορθοτροπικό Υλικό

Όλα τα υλικά δεν είναι πλήρως ανισότροπα, τα περισσότερα έχουν τουλάχιστον ένα, και συνήθως περισσότερα, επίπεδα συμμετρίας. Για παράδειγμα, τα ενισχυμένα με ίνα υλικά έχουν τρία επίπεδα συμμετρίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8



Σχήμα 5.8: Επίπεδα συμμετρίας σε σύνθετο υλικό[26].

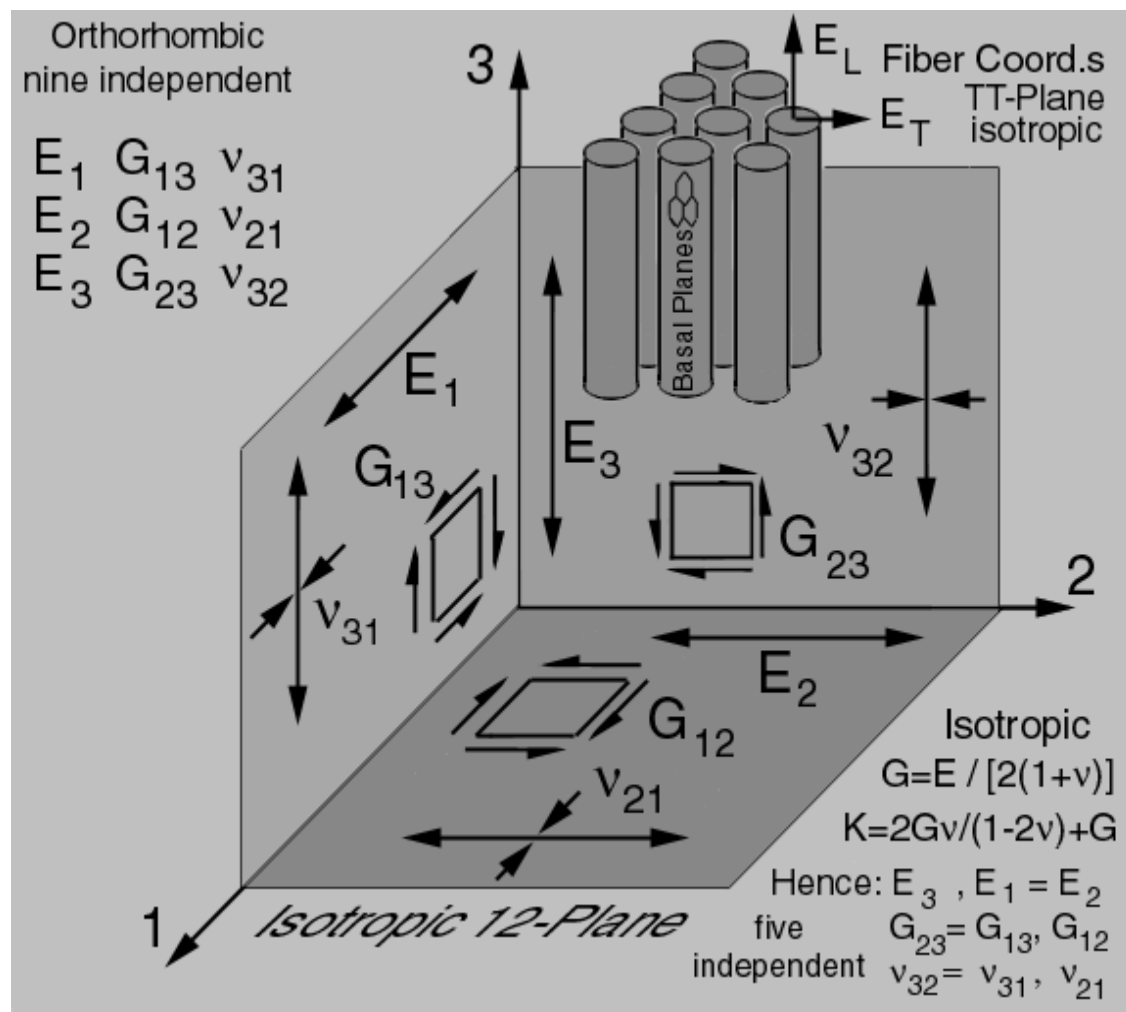
Ένα υλικό με αυτά τα επίπεδα συμμετρίας είναι γνωστό ως ορθοτροπικό υλικό. Εάν τα διανύσματα βάσης επιλέγονται στα επίπεδα συμμετρίας, η σχέση ελαστικότητας τάσης - παραμόρφωσης για ένα ορθοτροπικό υλικό μπορεί να γραφτεί:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{bmatrix}$$

Οι ιδιότητες ενός ορθοτροπικού υλικού προσδιορίζονται από 9 ανεξάρτητες σταθερές.

Τα ορθοτροπικά υλικά έχουν ειδική σχέση με τα σύνθετα υλικά. Πρακτικά οι απλούστερες περιπτώσεις των σύνθετων υλικών είναι ορθοτροπικά υλικά. Οι ελαστικές ιδιότητες: σταθερά ελαστικότητας E , σταθερά διάτμησης G , και ο λόγος Poisson ν , σε κάθε ορθογώνιο επίπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τις εννέα ανεξάρτητες ορθοτροπικές σταθερές. Στο σχήμα 5.9 όπου

εμφανίζεται η μηχανική συμπεριφορά (παραμόρφωση) σε κάθε επιφάνεια είναι ευκολότερο να φανεί ότι κάθε μια από αυτές τις εννέα ιδιότητες είναι ανεξάρτητη. Εάν όλες οι ίνες ευθυγραμμίζονται κατά μήκος του κάθετου άξονα, είναι εύκολο να δει ότι η επιφάνεια 12 είναι εγκάρσιως ισοτροπική και ο αριθμός των ανεξάρτητων ελαστικών ιδιοτήτων μειώνεται σε 5 (εξαγωνική συμμετρία) και ότι οι ισοτροπικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο επίπεδο 12.



Σχήμα 5.9: Εγκάρσια ισομετρικές ίνες άνθρακα και τα σύνθετα τους.

5.5.2 Οι Μηχανισμοί και οι Θεωρίες Αποτυχίας Ορθοτροπικού Υλικού

Η περιγραφή της συμπεριφοράς υλικού το οποίο είναι ομογενές και ισοτροπικό υπήρξε το θέμα πολλών μελετών για πάνω από πενήντα χρόνια. Αυτά τα υλικά όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο κ.α όμως συμπεριφέρονται διαφορετικά, κάτω από ορισμένες συνθήκες, από ότι θα περίμενε κάποιος σύμφωνα με τις θεωρίες που είχαν αναπτυχθεί. Ακόμα και τώρα δεν είναι δυνατόν να περιγραφεί ακριβώς η συμπεριφορά τους όταν για παράδειγμα ο λόγος της έντασης είναι πολύ μεγάλος, ή όταν η πλαστική παραμόρφωση είναι αρκετά μεγάλη.

Ένας από τους προφανείς λόγους είναι ότι τα υλικά δεν μπορεί να είναι ομοιογενή όπως θεωρήθηκε. Η ομοιογένεια του υλικού παραβιάζεται όταν κάποια από τα παραπάνω συμβαίνει και έτσι οι θεωρίες δεν ισχύουν.

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία έχουμε δεχτεί ότι είναι ομοιογενή όσον αφορά την μακρο-ελαστική συμπεριφορά τους. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει όταν ερευνούνται οι μηχανισμοί αποτυχίας. Εδώ είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δυο διαφορετικά επίπεδα. Τις ίνες τη μήτρα. Για το λόγο αυτό πρέπει να κατανοηθεί αρχικά ο μηχανισμός αστοχίας για κάθε υλικό ξεχωριστά. Ο πιο συνήθεις μηχανισμός αστοχίας στα σύνθετα υλικά είναι κατά πρώτο λόγο οι ρωγμές που σχηματίζονται στη μήτρα και κατά δεύτερο το σπάσιμο των ινών.

Παρακάτω θα αναλυθούν τέσσερις από τις πιο γνωστές θεωρίες. Βασίζονται στη μικρομηχανική μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών με την υπόθεση ότι αυτά είναι ομοιογενείς.

5.5.2.1 Θεωρία μέγιστης τάσης

Σύμφωνα με τη θεωρία της μέγιστης τάσης η αστοχία συμβαίνει όταν κάποια από τις τάσεις, κατά μήκος των επιπέδων συμμετρίας του ορθότροπου υλικού, υπερβαίνει την αντίστοιχη τιμή της στην κατεύθυνση αυτή. Έτσι υπάρχουν πέντε σταθερές του υλικού (εγκάρσια θλίψη/τάση εφελκυσμού και η οριακή τάση διάτμησης) για την επίπεδη κατάσταση της τάσης. Για να μην υπάρχει αστοχία του υλικού θα πρέπει να ισχύουν οι τρεις παρακάτω ανισότητες.

$$\begin{aligned} -F_{1c} < \sigma_1 < F_{1t} \\ -F_{2c} < \sigma_2 < F_{2t} \\ |\tau_6| < F_6 \end{aligned} \quad (5.37)$$

5.5.2.2 Θεωρία μέγιστης έντασης

Σύμφωνα με τη θεωρία της μέγιστης έντασης η αστοχία συμβαίνει όταν κάποια από τις εντάσεις, κατά μήκος των επιπέδων συμμετρίας του ορθότροπου υλικού, υπερβαίνει την αντίστοιχη τιμή της στην κατεύθυνση αυτή. Έτσι υπάρχουν και εδώ όπως και στη θεωρία της μέγιστης τάσης πέντε σταθερές του υλικού. Για να μην υπάρχει αστοχία του υλικού θα πρέπει να ισχύουν οι τρεις παρακάτω ανισότητες.

$$\begin{aligned} -E_{1c} < \varepsilon_1 < E_{1t} \\ -E_{2c} < \varepsilon_2 < E_{2t} \\ |\gamma_6| < E_6 \end{aligned} \quad (5.38)$$

5.5.2.3 Θεωρία απόκλισης της ενέργειας έντασης (Tsai-Hill)

Αυτό το κριτήριο είναι πιο περίπλοκο από ότι τα δυο προηγούμενα. Βασίζεται στην υπόθεση του κριτηρίου διαρροής του von Mises για ισότροπα όλκιμα υλικά. Οι Azzi και Tsai προσάρμοσαν την τροποποίηση του Hill για ανισότροπα υλικά, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ορθοτροπικά υλικά. Η τελική εξίσωση του κριτηρίου Tsai – Hill είναι:

$$\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\tau_6^2}{F_6^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_1^2} < 1 \quad (5.39)$$

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι υπάρχει μόνο μια εξίσωση η οποία πρέπει να εκτιμηθεί αντί για τρεις που έχουν τα άλλα δυο κριτήρια. Σε αυτό όμως το κριτήριο δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί εισάγοντας την κατάλληλη τιμή ανάλογα με το πρόσημο της τάσης. (π.χ. $F_1 = F_{1c}$ όταν $\sigma_1 < 0$ και $F_1 = F_{1t}$ όταν $\sigma_1 > 0$ κ.λ.π)

5.5.2.4 Θεωρία αλληλεπίδρασης πολυώνυμου τανυστή (Tsai – Wu)

Αυτό το κριτήριο συνδυάζει και τα δυο προαναφερόμενα πλεονεκτήματα, δηλαδή υπάρχει η διάκριση μεταξύ εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων σε μια μόνο εξίσωση.

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + f_{66}\tau_6^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (5.40)$$

Οι σταθερές f_i, f_{ii} καθορίζονται από τον μέσο όρο πειραματικών μετρήσεων οι οποίες συνήθως είναι:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} & f_2 &= \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \\
 f_{11} &= \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} & f_{22} &= \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \\
 f_{66} &= \frac{1}{F_6^2} & f_{12} &\cong -\frac{1}{2}\sqrt{f_{11}f_{22}}
 \end{aligned} \tag{5.41}$$

5.6 Επιλογή τύπου στοιχείου

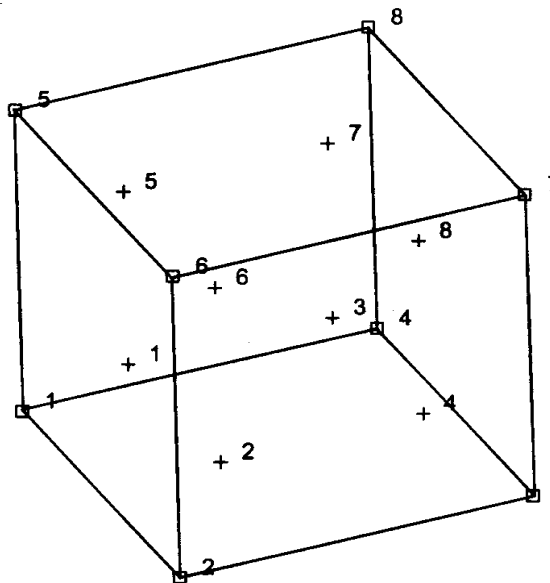
Η επιλογή του είδους των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν βασίζεται σε διάφορα κριτήρια μεταξύ των οποίων είναι:

1. Η διάσταση του προβλήματος αν είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο.
2. Η γεωμετρία της κατασκευής.
3. Το είδος του υλικού.
4. Το είδος και ο τρόπος της φόρτισης.
5. Η μέθοδος των αλγεβρικών εξισώσεων ισορροπίας.
6. Το είδος των επιθυμητών αποτελεσμάτων

Οι οικογένειες στοιχείων που βασίζονται στα τριγωνικά, ορθογωνικά και τετραεδρικά στοιχεία εν γένει δεν μπορούν να παραστήσουν ικανοποιητικά τα όρια ενός σώματος για αυτό το λόγο και είναι απαραίτητη η χρήση των ισοπαραμετρικών στοιχείων. Για την περίπτωση του τρισδιάστατου προβλήματος τα ισοπαραμετρικά στοιχεία που ανταποκρίνονται στα δεδομένα της παρούσας εργασίας είναι τα παρακάτω:

5.6.9.1 Τρισδιάστατο αυθαίρετα παραμορφώσιμο εξάεδρο πλήρους ολοκλήρωσης

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται το στοιχείο με αριθμό 7, στην βιβλιοθήκη των στοιχείων του Marc. Είναι ένα εξάεδρο με οκτώ κόμβους, πλήρους ολοκλήρωσης, κατάλληλο για επίλυση προβλημάτων τρισδιάστατης φύσης. Το συγκεκριμένο στοιχείο χρησιμοποιεί δεδομένη εξίσωση παραμόρφωσης, η οποία ορίζεται στις φυσικές συντεταγμένες, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο καλύτερη απεικόνιση των διατμητικών παραμορφώσεων του στοιχείου. Το στοιχείο προτιμάται έναντι άλλων στοιχείων υψηλότερης τάξης, στην επίλυση προβλημάτων που αναλύουν φαινόμενα επαφής (contact analysis)[27,28].



Εικόνα 5.10: Απεικόνιση του στοιχείου 7 (έδρες, κόμβοι και τα οκτώ σημεία ολοκλήρωσης) [28].

Το στοιχείο 7 παρουσιάζει τα παρακάτω γνωρίσματα:

Συνοχή: Οκτώ κόμβοι ανά στοιχείο (Σχήμα 5.10). η αρίθμηση των κόμβων πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένο τρόπο. Αναλυτικότερα: οι κόμβοι 1,2,3 και 4 ορίζονται στις γωνίες της μία έδρας και αριθμώνται από την εσωτερική πλευρά του στοιχείου με ανθρωπολογιακή φορά. Ο κόμβος 5 βρίσκεται στην ίδια έδρα με τον κόμβο 1, ο κόμβος 6 βρίσκεται στην ίδια έδρα με τον κόμβο 2, ο κόμβος 7 βρίσκεται στην ίδια έδρα με τον κόμβο 3 και ο κόμβος 8 βρίσκεται στην ίδια έδρα με τον κόμβο 4.

Συντεταγμένες: Το στοιχείο 7 έχει τρεις συντεταγμένες στο παγκόσμιο σύστημα αξόνων x,y,z .

Βαθμοί ελευθερίας: Οι βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου 7 είναι τρεις (u,v,w) ανά κόμβο.

5.7 Μειονεκτήματα της μεθόδου

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι ένα αριθμητικό αποτέλεσμα προσδιορίζεται για ένα ορισμένο πρόβλημα. Δεν υπάρχει κάποια έκφραση που να επιτρέπει αναλυτική μελέτη των αποτελεσμάτων αλλάζοντας διάφορες παραμέτρους του προβλήματος. Για την ορθή λύση του συγκεκριμένου προβλήματος η σωστή επιλογή και προπάντων η σωστή χρήση τον προγράμματος είναι απαραίτητη προκειμένου να υπάρξουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης η σωστή επιλογή υπολογιστή μεγάλης ταχύτητας επεξεργασίας και χωρητικότητας μνήμης είναι απαραίτητη. Η σημασία της μεθόδου θα ήταν πολύ μικρή, εάν δεν υπήρχαν υπολογιστές μεγάλης ικανότητας που θα μπορούσαν να λύσουν τις σύνθετες περιπτώσεις προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην πράξη. Απαιτείται εμπειρία και καλή γνώση της μηχανικής για

να κατασκευαστεί μία σωστή διακριτοποίηση που θα περιγράφει, με ακρίβεια τη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής.

5.8 Ακρίβεια της μεθόδου

Η θεωρητική ακρίβεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τον τύπο του στοιχείου, δηλαδή τον αριθμό των κόμβων και των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο, τον αριθμό των κομβικών παρεμβολών και τον βαθμό του πολωνύμου.
- Τον τύπο του κανάβου, δηλαδή αραιός ή πυκνός κ.λ.π.
- Την ύπαρξη ανωμαλιών στο εξεταζόμενο πρόβλημα, δηλαδή ρωγμές κ.λ.π.
- Τον τρόπο υπολογισμού των κομβικών φορτίων και γενικά τον τρόπο εισαγωγής των συνοριακών συνθηκών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.**ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΑΝΟΥΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (FEM)****6.1 Μεθοδολογία**

Η μελέτη της συμπεριφοράς και της προστασίας που προσφέρει ένα κράνος κατά την σύγκρουση έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Στην προσπάθεια αντιμετώπισης αυτού του σημαντικού προβλήματος που έχει σκοπό τη προστασία της ανθρώπινης ζωής επιλέχθηκε να μελετηθεί συνολικά η συμπεριφορά ενός κράνους, πραγματικών διαστάσεων και χαρακτηριστικών (σχήμα 6.1) και όχι ξεχωριστά η προστασία που προσφέρει το κάθε επιμέρους τμήμα του. Πιο συγκεκριμένα το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του ενισχυμένου με ινοπλισμένα συνθετικά πολυμερή εξωτερικού κελύφους του κράνους υπό την επίδραση κάθετης φόρτισης στην κορυφή του κράνους. Το σύστημα ενίσχυσης με ινοπλισμένα συνθετικά πολυμερή που εξετάζεται είναι αυτό από αραμίδιο (Kevlar).



Σχήμα 6.1: Το κράνος που εξετάζεται.

Τα μέρη του κράνους που απορροφούν ενέργεια και τα οποία εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία είναι:

- α) το εξωτερικό κέλυφος,
- β) το εσωτερικό αφρώδες υλικό.

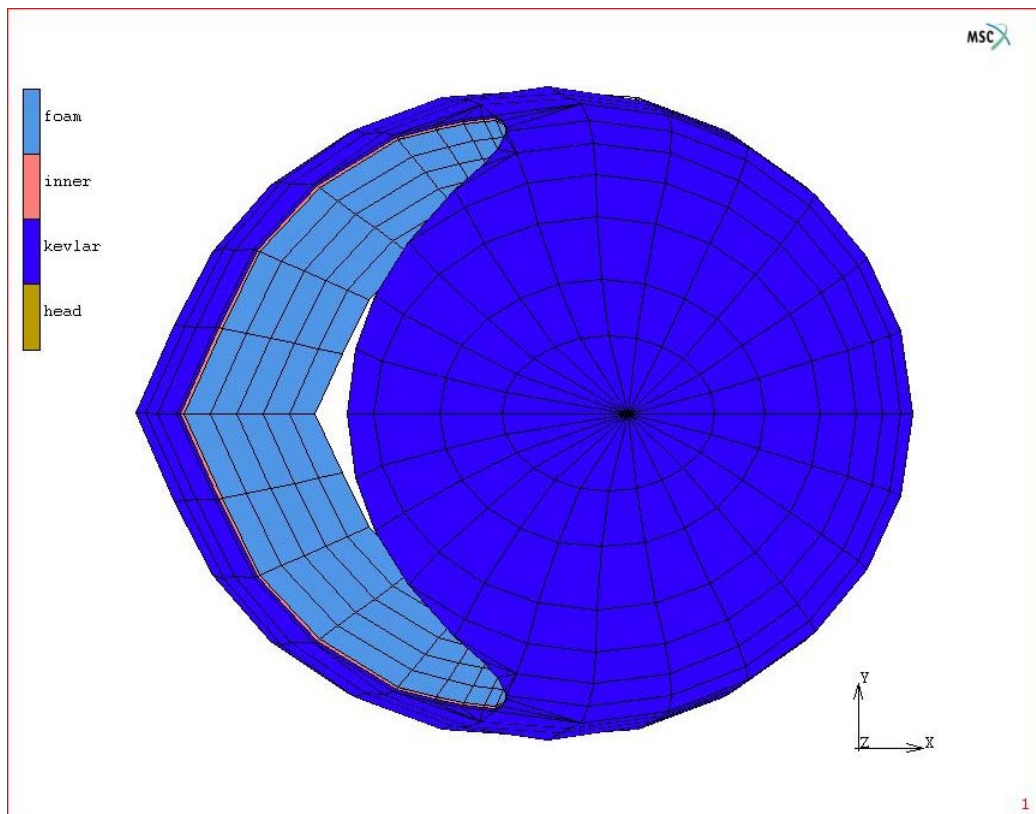
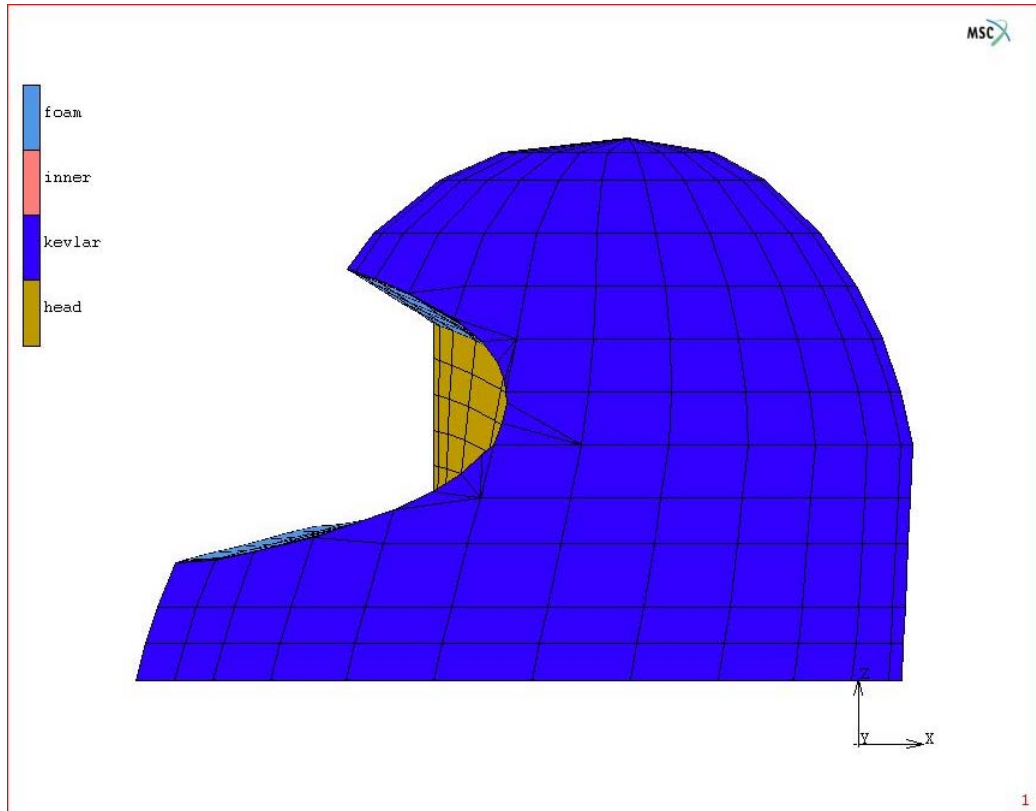
Τα υπόλοιπα μέρη του κράνους το γείσο, το εσωτερικό γέμισμα για άνεση, το σύστημα διατήρησης (λουράκι) και τα διάφορα λειτουργικά στοιχεία του κράνους δεν εξετάζονται γιατί η παρουσία τους στο κράνος δεν έχει σκοπό την απορρόφηση ενέργειας.

Σύμφωνα όμως με τις διεθνείς συνθήκες μέτρησης της ικανότητας ενός κράνους σε σύγκρουση πρέπει εκτός του κράνους να προσομοιαστεί:

- 1) το κεφάλι του αναβάτη
- 2) ένα σφαιρικό στερεό στο οποίο πέφτει το σύστημα κεφάλι – κράνος με ορισμένη ταχύτητα.

Το κράνος παρουσιάζει καμπυλότητα και για την απεικόνιση του περιγράμματός του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Photomodeler, όπου με τη βοήθεια περιμετρικών φωτογραφιών κράνους δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του σε μορφή dxf. Στη συνέχεια εισάγοντας το μοντέλο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MSC/MARC και ακολουθώντας μια σειρά από εντολές, δημιουργήθηκαν τα διάφορα επίπεδα που αντιπροσωπεύουν τα διαφορετικά υλικά του κράνους.

Η διακριτοποίηση του συστήματος κεφάλι-κράνος έγινε χρησιμοποιώντας 2172 ισοπαραμετρικά εξαπλευρικά στοιχεία οχτώ κόμβων του τύπου 7 πλήρους ολοκλήρωσης. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι κατάλληλος για περιγραφή μηχανικής παραμόρφωσης σε τρισδιάστατα στερεά.



Σχήμα 6.2: Εικόνα του μοντέλου του κράνους σε πλάγια όψη και κάτοψη

Για το σφαιρικό στερεό, το οποίο οι διεθνείς συνθήκες μέτρησης θεωρούν ότι είναι απαραμόρφωτο, δεν χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία αλλά μια κυκλική επιφάνεια ακτίνας 48 mm. Οι εξωτερικές διαστάσεις του κράνους είναι 300.92 mm κατά μήκος και 212.558 mm κατ' ύψος

6.1.1 Μοντελοποίηση του εξωτερικού κελύφους

Το εξωτερικό κέλυφος του κράνους χωρίστηκε σε δύο επίπεδα τα οποία αντιπροσωπεύουν τα δύο μέρη του σύνθετου υλικού. Το κάθε επίπεδο έχει πάχος 1 mm και συνολικά το πάχος του εξωτερικού κελύφους του κράνους είναι 2 mm, που είναι ένα αντιπροσωπευτικό πάχος για το εξωτερικό κέλυφος ενός κράνους.

Το εξωτερικό επίπεδο του σύνθετου υλικού είναι πλεκτά ενισχυμένο με ινοπλισμένο συνθετικά πολυμερές από αραμίδιο (Kevlar). Ως υλικό το ινοπλισμένο συνθετικό πολυμερές με πλέξη θεωρείται ορθοτροπικό γιατί παρουσιάζει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση. Οι μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων συνθετικών πολυμερών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Μηχανικές Ιδιότητες	Kevlar
Πυκνότητα (kg/m^3)	235,53
E_1 (MPa)	32400
E_2 (MPa)	32400
E_3 (MPa)	9500
ν_{12}	0.0484
ν_{13}	0.3
ν_{23}	0.3
G_{12} (MPa)	1800
G_{13} (MPa)	1350
G_{23} (MPa)	1350

Πίνακας 6.1: Οι μηχανικές ιδιότητες του Kevlar.

Όπου E_1, E_2, E_3 είναι οι σταθερές ελαστικότητας του υλικού, G_{12}, G_{23}, G_{31} είναι οι σταθερές διάτμησης του υλικού και $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}$ είναι οι λόγοι του Poisson του υλικού στους άξονες $x, y,$ και z αντίστοιχα. Οι ιδιότητες αντοχής του Kevlar παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

	Αντοχή (MPa)	Kevlar
Εσωτερικό επίπεδο	S_x	400
	S_y	400
	S'_y	200
	S_{xy}	50
Εξωτερικό επίπεδο	Κάθετη εφελκυστική (πολυεστέρας)	50
	S_{yz}	80
	S_{xz}	80

Πίνακας 6.2: Ιδιότητες αντοχής του Kevlar.

Όπου S_x, S_y είναι η αντοχή σε διαμήκη και εγκάρσιο εφελκυσμό αντίστοιχα, S'_y η αντοχή σε εγκάρσια θλίψη και S_{xy}, S_{yz}, S_{xz} η αντοχή σε διάτμηση στα τρία επίπεδα.

Το εσωτερικό επίπεδο του εξωτερικού κελύφους είναι ινοπλισμένος σύνθετος πολυεστέρας με επίστρωση γυαλιού. Ως υλικό το ινοπλισμένο συνθετικό πολυμερές επίστρωσης θεωρείται ισοτροπικό υλικό. Ο τρόπος σκλήρυνσης είναι ισοτροπικός.

Μηχανικές Ιδιότητες	Ενισχυμένος πολυεστέρας με ίνες γυαλιού
Πυκνότητα (kg/m^3)	285,48
E (MPa)	8000
N	0.28
Τάση διαρροής (MPa)	80
Σταθερά εφαπτομένης πλαστικής παραμόρφωσης (MPa)	4000

Πίνακας 6.3: Οι μηχανικές ιδιότητες στο εσωτερικό επίπεδο του κελύφους.

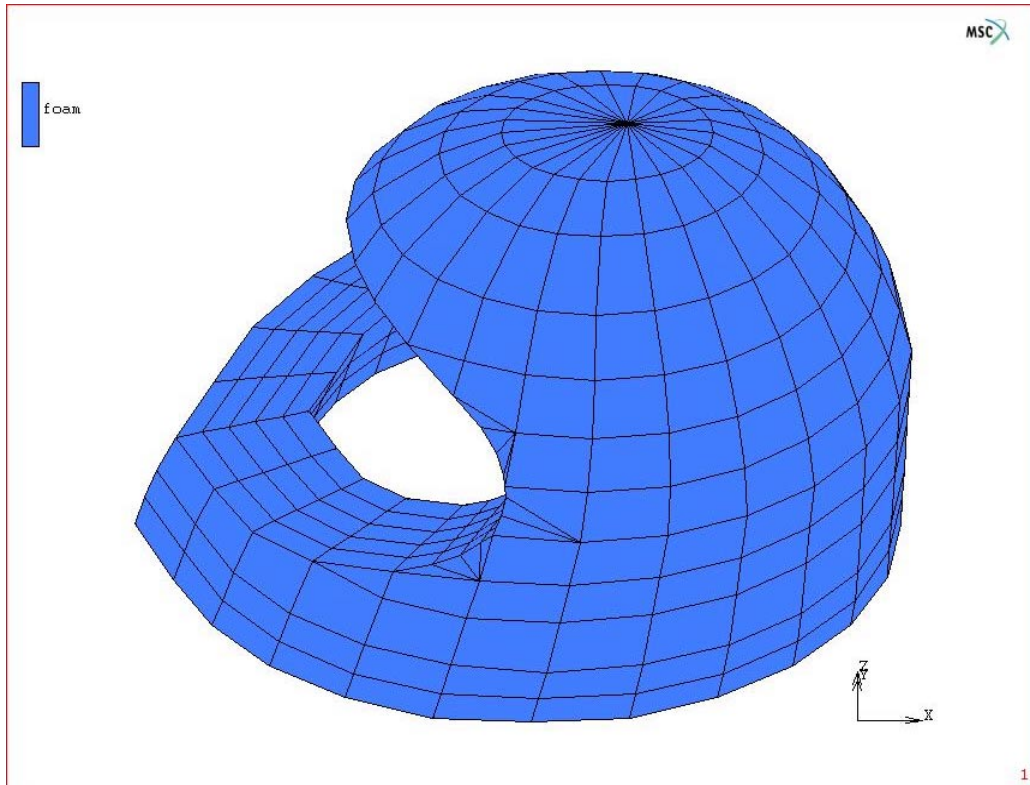
6.1.2 Μοντελοποίηση του εσωτερικού αφρώδους υλικού

Για το εσωτερικό αφρώδες υλικό του κράνους χρησιμοποιήθηκε διογκωμένο πολυστηρένιο (EPS). Το πάχος του πολυστηρενίου στο κράνος είναι 35 mm που αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό πάχος για το εσωτερικό αφρώδες υλικό ενός κράνους.

Μηχανικές Ιδιότητες	Διογκωμένο πολυστηρένιο (EPS)
Πυκνότητα (kg/m^3)	50
E (MPa)	23
ν	-
Τάση διαρροής (MPa)	0,57

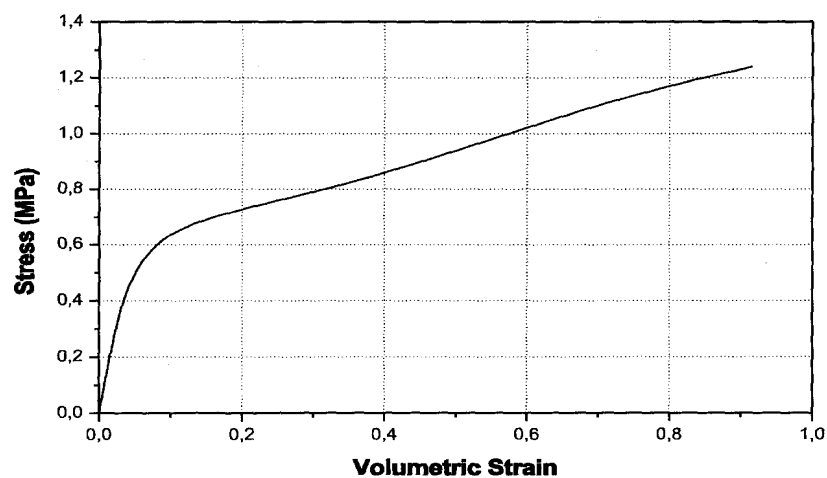
Πίνακας 6.4: Οι μηχανικές ιδιότητες του EPS

Η διακριτοποίηση του διογκωμένου πολυστυρενίου έγινε χρησιμοποιώντας 1330 ισοπαραμετρικά εξαπλευρικά στοιχεία οχτώ κόμβων του τύπου 7, πλήρους ολοκλήρωσης.



Σχήμα 6.3: Εικόνα του μοντέλου του EPS.

Το διάγραμμα τάσης–παραμόρφωσης του σχήματος 6.4 για το EPS με τη συγκεκριμένη πυκνότητα παράχθηκε ύστερα από πειραματικές μετρήσεις.



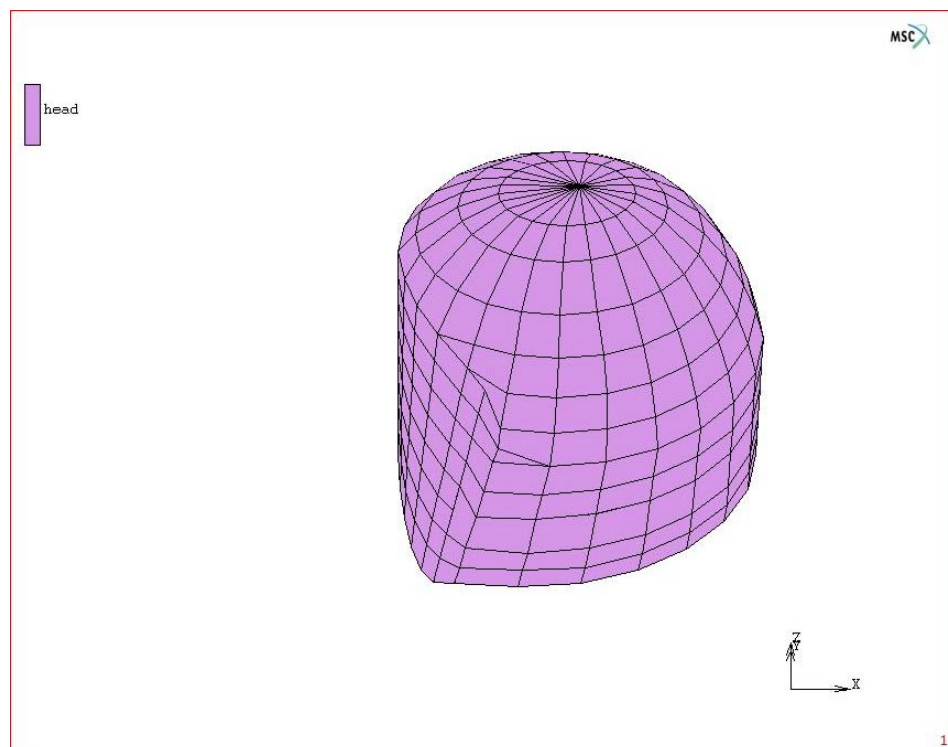
Σχήμα 6.4: Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του EPS [6].

6.1.3 Μοντελοποίηση του κεφαλιού

Το κεφάλι προσομοιώνεται σαν αλουμίνιο ισότροπο μη παραμορφώσιμο. Η διακριτοποίηση του κεφαλιού έγινε χρησιμοποιώντας 310 ισοπαραμετρικά εξαπλευρικά στοιχεία οχτώ κόμβων του τύπου 7 πλήρους ολοκλήρωσης. Το μέγεθος του κεφαλιού σχεδιάστηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εφαρμόζει στην εσωτερική επιφάνεια του EPS.

Μηχανικές Ιδιότητες	τιμή
Πυκνότητα (kg/m ³)	8023.65
E (MPa)	4 x 10 ¹⁰
ν	0.22

Πίνακας 6.5: Οι μηχανικές ιδιότητες του κεφαλιού.



Σχήμα 6.5: Εικόνα του μοντέλου του κεφαλιού.

6.1.4 Συνοριακές συνθήκες και αρχικές τιμές φόρτισης

Οι επιλογές που έγιναν στις συνοριακές συνθήκες ικανοποιούν τις διεθνείς συνθήκες μέτρησης αντοχής σε κράνη μοτοσικλετιστών και συγκεκριμένα το πρωτόκολλο Snell M95. Σύμφωνα με τις διεθνείς συνθήκες το κράνος πρέπει να συγκρουστεί με ένα σφαιρικό σταθερό σώμα και η ενέργεια που θα απελευθερωθεί πρέπει να είναι 150 J. Για να ικανοποιηθεί αυτό το κριτήριο και για να υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα δόθηκε στο σύστημα κεφάλι-κράνος μια αρχική ταχύτητα 6.84 m/sec. Το κεφάλι προσομοιώθηκε έτσι ώστε να έχει βάρος 5.5 kg και το συνολικό βάρος του συστήματος κεφάλι – κράνος είναι 6.4 kg. Το σύστημα κεφάλι-κράνος έχοντας ως σταθερή ταχύτητα την αρχική συγκρούεται στο πάνω μέρος του με το σφαιρικό στερεό το οποίο είναι πακτωμένο και δεν μετακινείται ούτε περιστρέφεται από την αρχική του θέση.

Τα τρία υλικά που υπάρχουν στο κράνος βρίσκονται σε επαφή και υπάρχει τριβή μεταξύ τους. Κατά την ανάλυση καθορίστηκε ότι το κεφάλι βρίσκεται σε επαφή με το εσωτερικό αφρώδες υλικό και ότι μεταξύ τους υπάρχει τριβή με συντελεστή 0.3. Επίσης ότι βρίσκεται σε επαφή και το αφρώδες υλικό με την εσωτερική στρώση του εξωτερικού κελύφους όπου επίσης υπάρχει τριβή με συντελεστή 0.5. Το εξωτερικό κέλυφος αποτελείται από δυο στρώσεις υλικών, την εξωτερική στρώση η οποία είναι από Kevlar και την εσωτερική η οποία είναι από συνεχείς ίνες γυαλιού. Η τριβή που υπάρχει μεταξύ τους έχει συντελεστή 0.4. Στην ανάλυση με το MARC ελέγχθηκε και η γνωστή συνθήκη του Hallquist (6.1) για το διαχωρισμό στρώσεων σε δομές σύνθετων υλικών:

$$\frac{\sigma_z^2}{S_n^2} + \left(\frac{\sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2}{S_s^2} \right) \geq 1 \quad (6.1)$$

όπου σ_z είναι η κάθετη τάση έξω από το επίπεδο, σ_{xz} σ_{yz} είναι οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην ενδιάμεση στρώση των υλικών, S_n είναι η κάθετη αντοχή του υλικού έξω από το επίπεδο και S_s είναι η αντοχή σε διάτμηση στην ενδιάμεση στρώση των υλικών.

Η ανάλυση που χρησιμοποιείται είναι μη-γραμμική μεταβατική ανάλυση, η οποία επιλέχθηκε λόγω της φύσεως του προβλήματος έτσι ώστε και τα αποτελέσματα να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Γενικά η στρατηγική στη μη-γραμμική επίλυση είναι η επιβολή του φορτίου με προσαναπόμοτρο τρόπο μέχρι την επιβολή του επιθυμητού φορτίου, ωστόσο λόγω της φύσης του προβλήματος η επιβολή του φορτίου είναι άμεση.

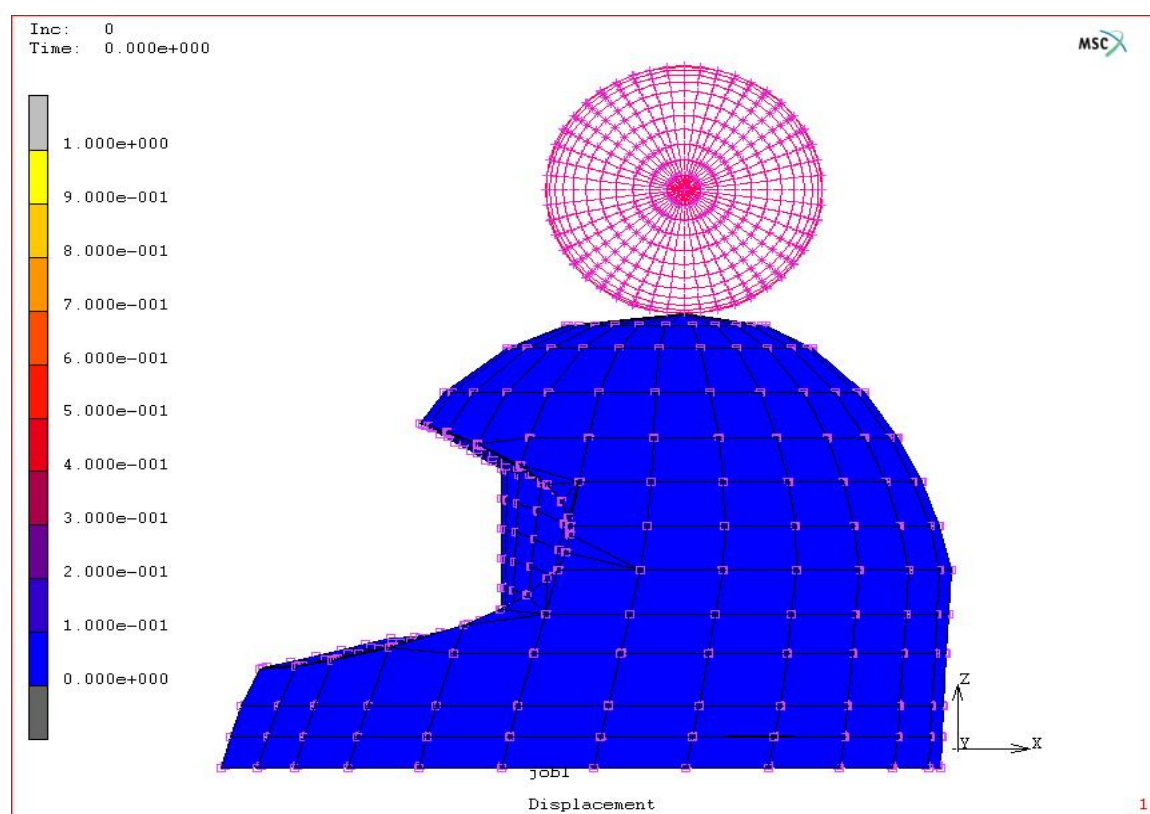
Η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η πλήρης μέθοδος Newton Raphson. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε για να υπάρχει ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η συνολική χρονική διάρκεια της σύγκρουσης ορίστηκε στα 15 msec. Η διαδικασία καθορισμού του βήματος ορίστηκε να είναι αναπροσαρμοζόμενο. Τα κριτήρια με τα οποία το βήμα προσαρμοζόταν είναι τα ακόλουθα:

- Το αρχικό κλάσμα του συνολικού χρόνου καθορίστηκε ίσο με 0.01,
- Το ελάχιστο κλάσμα του συνολικού χρόνου καθορίστηκε ίσο με 1×10^{-5} ,
- Το μέγιστο κλάσμα του συνολικού χρόνου καθορίστηκε ίσο με 0.5,
- Ο συντελεστής αύξησης του χρόνου καθορίστηκε ίσος με 1.2.

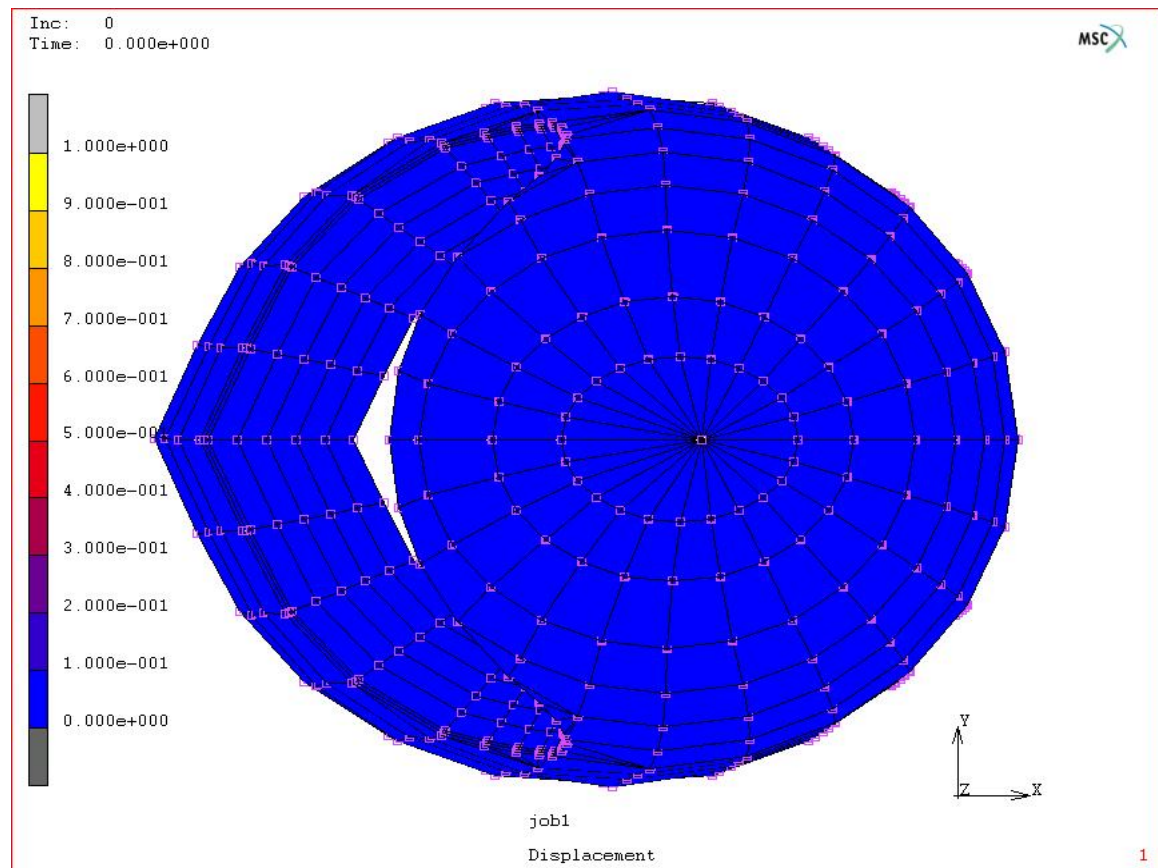
6.2 Αποτελέσματα

Η θεώρηση της φόρτισης στο σύστημα κράνος–κεφάλι ως δυναμική επιτρέπει την εξέταση της μεταβολής των αποτελεσμάτων με το χρόνο. Κάθε αποτέλεσμα μελετάται σε μια τυχαία χρονική στιγμή, η οποία όμως είναι η ίδια για όλα τα

αποτελέσματα, καθώς και στο τέλος της σύγκρουσης. Τα αποτελέσματα της μελέτης αφορούν: α) την ανάπτυξη των ισοδύναμων τάσεων στο σύστημα και σε κάθε υλικό του κράνους ξεχωριστά, β) την ανάπτυξη της επιτάχυνσης στο σύστημα, γ) την ανάπτυξη των κυρίων τάσεων στο σύστημα και δ) την ανάπτυξη της ενέργειας παραμόρφωσης. Επίσης επιλέχθηκε στο πρόγραμμα και η εμφάνιση της συνολικής παραμόρφωσης (deformation) του συστήματος. Για την καλύτερη κατανόηση της απόκρισης του κράνους οι τάσεις καθώς και η συνολική μετατόπιση εκτίθενται σε δύο όψεις. Μια από το πλάι, και μια στον κατακόρυφο άξονα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται πιο εύκολη η παρατήρηση των αποτελεσμάτων.

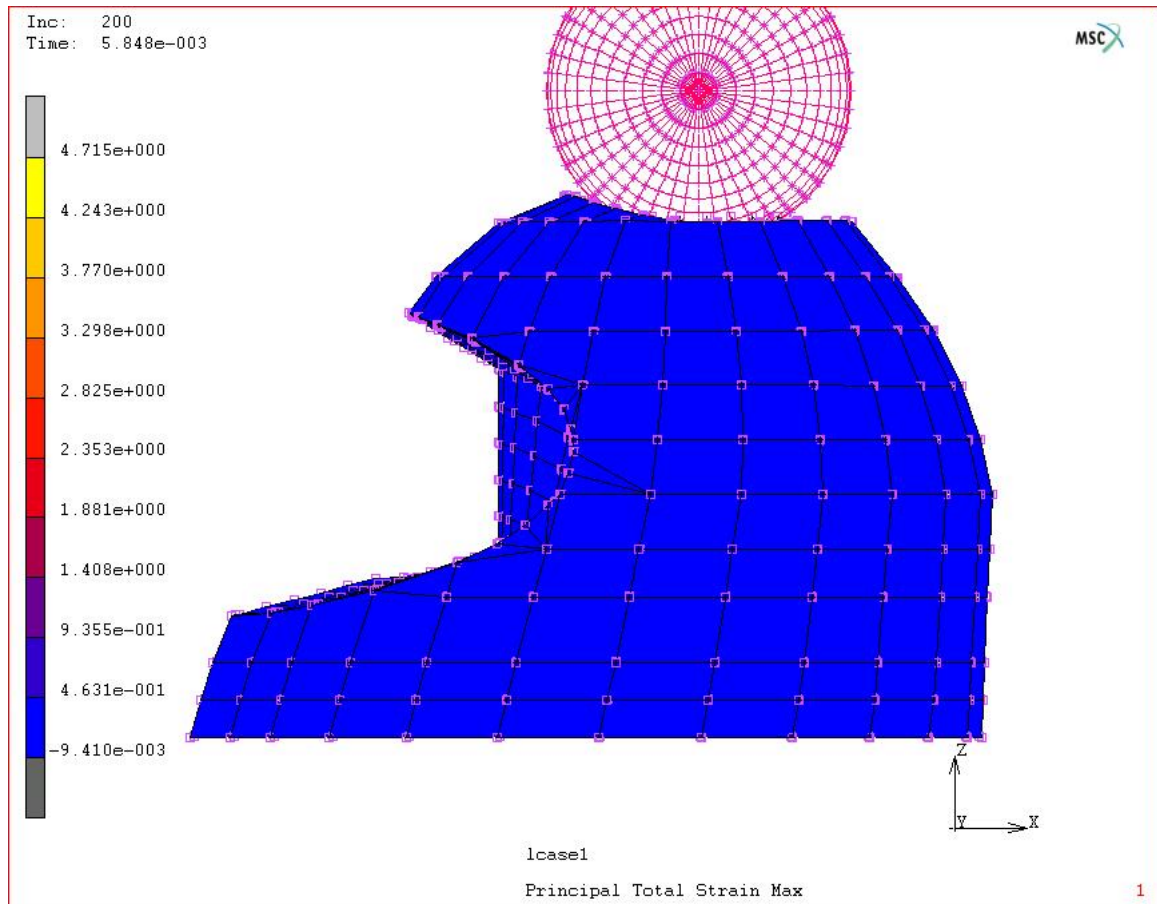


Σχήμα 6.6: Αρχική θέση του κράνους και του στερεού με το οποίο γίνεται η σύγκρουση-Πλάγια όψη.

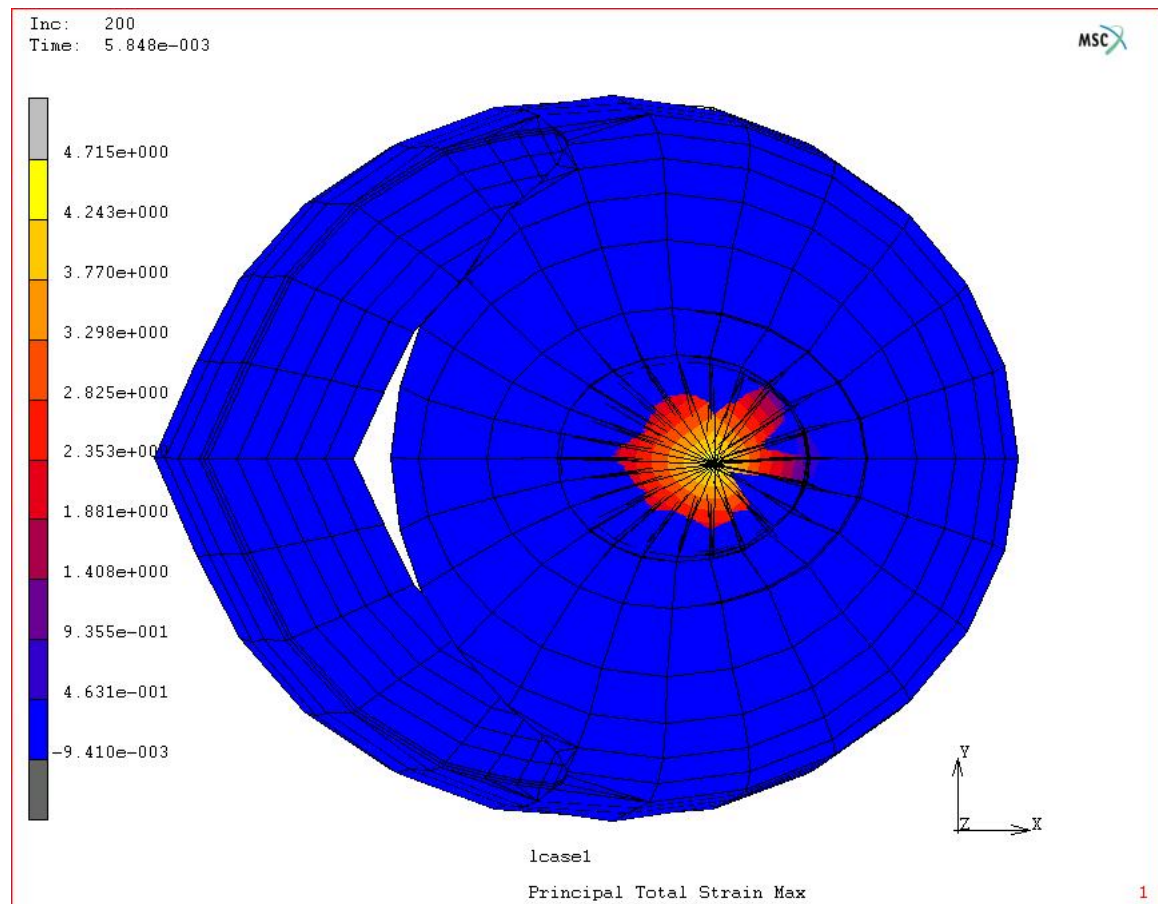


Σχήμα 6.7: Αρχική θέση του κράνους.-Κάτοψη.

Στα σχήματα 6.6 και 6.7 φαίνεται η γεωμετρία του κράνους και του σταθερού απαραμόρφωτου στερεού με το οποίο γίνεται η σύγκρουση. Στο σύστημα έχει δοθεί μια αρχική ταχύτητα 6.84 m/sec στο z άξονα και κάθετα στο στερεό σώμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6. Στα σχήματα 6.8 και 6.9 φαίνεται η συνολική παραμόρφωση του κράνους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο ένα τρίτο του συνολικού χρόνου (15 msec) που διαρκεί το φαινόμενο

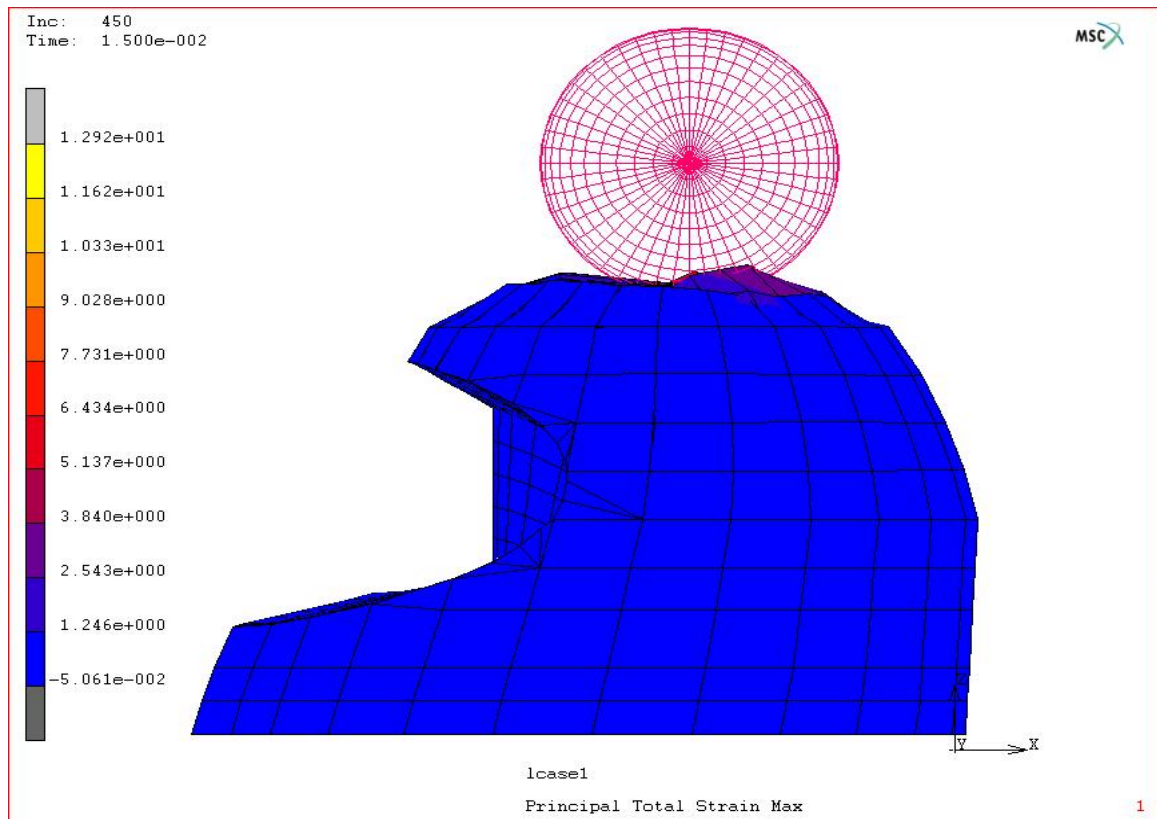


Σχήμα 6.8: Οι συνολικές κύριες παραμορφώσεις του κράνους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

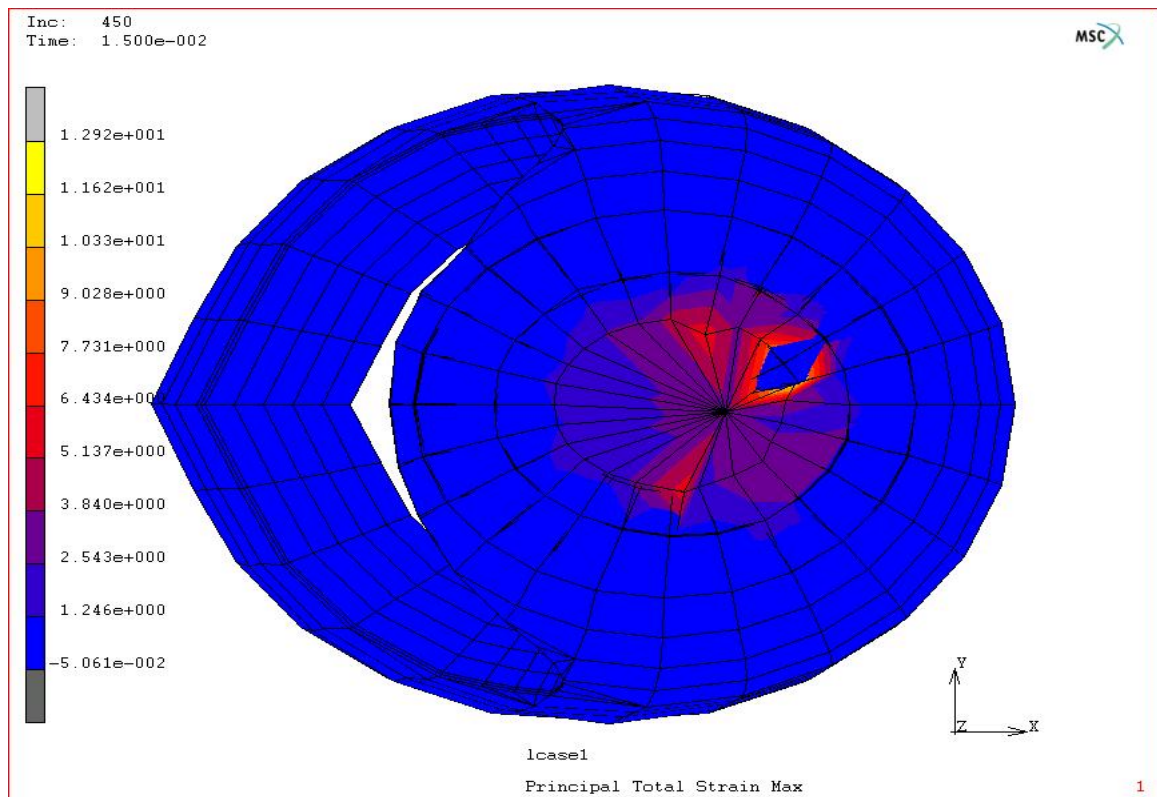


Σχήμα 6.9: Οι συνολικές κύριες παραμορφώσεις του κράνους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Στο σημείο που γίνεται η κρούση τα στοιχεία παρουσιάζουν τις μέγιστες παραμορφώσεις, 4.715. Ενώ στο υπόλοιπο τμήμα του κράνους οι παραμορφώσεις είναι έως 0.4631. Στα σχήματα 6.10 και 6.11 φαίνεται η συνολική παραμόρφωση του συστήματος στο τέλος του φαινομένου όπου οι μέγιστες κύριες παραμορφώσεις έχουν φτάσει τις μέγιστες τιμές τους, 12.92 σε σημεία περιφερειακά από το σημείο σύγκρουσης.



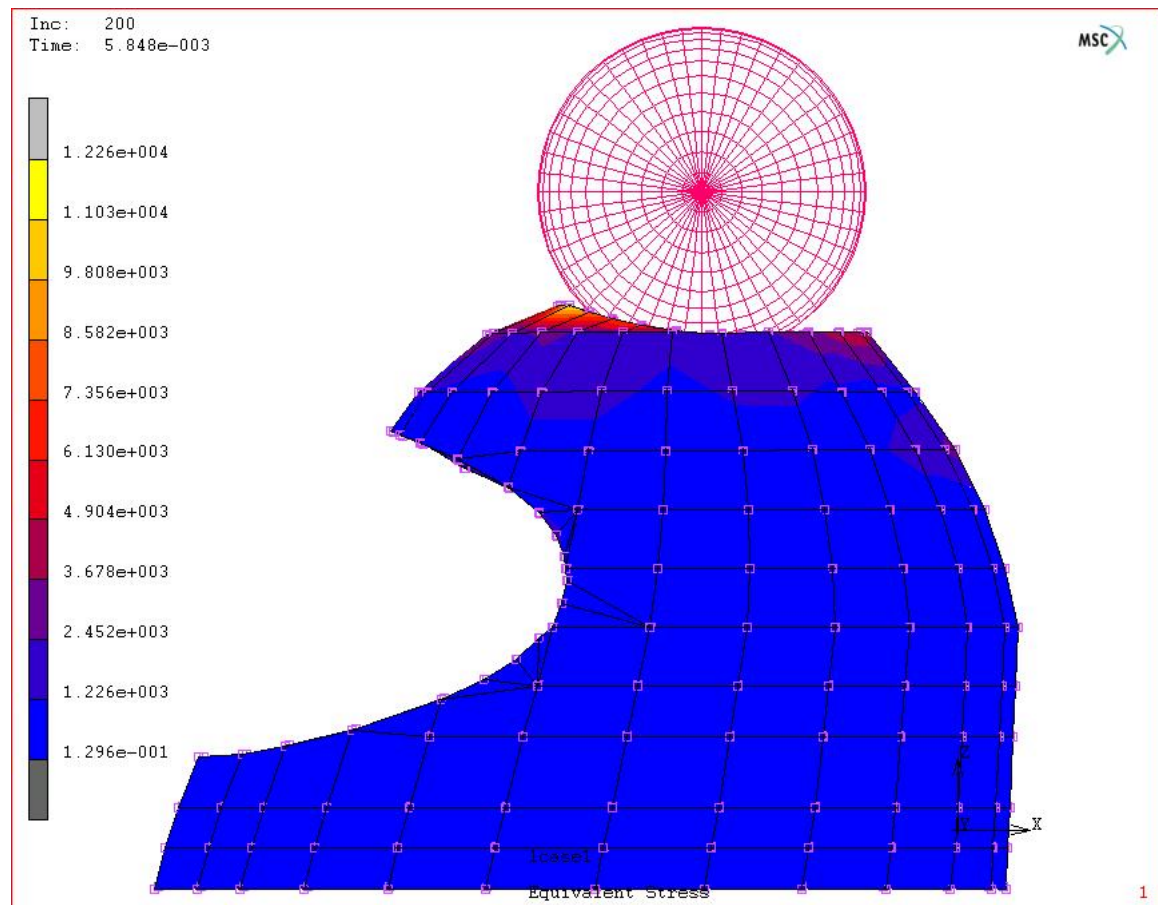
Σχήμα 6.10: Παραμόρφωση του κράνους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.



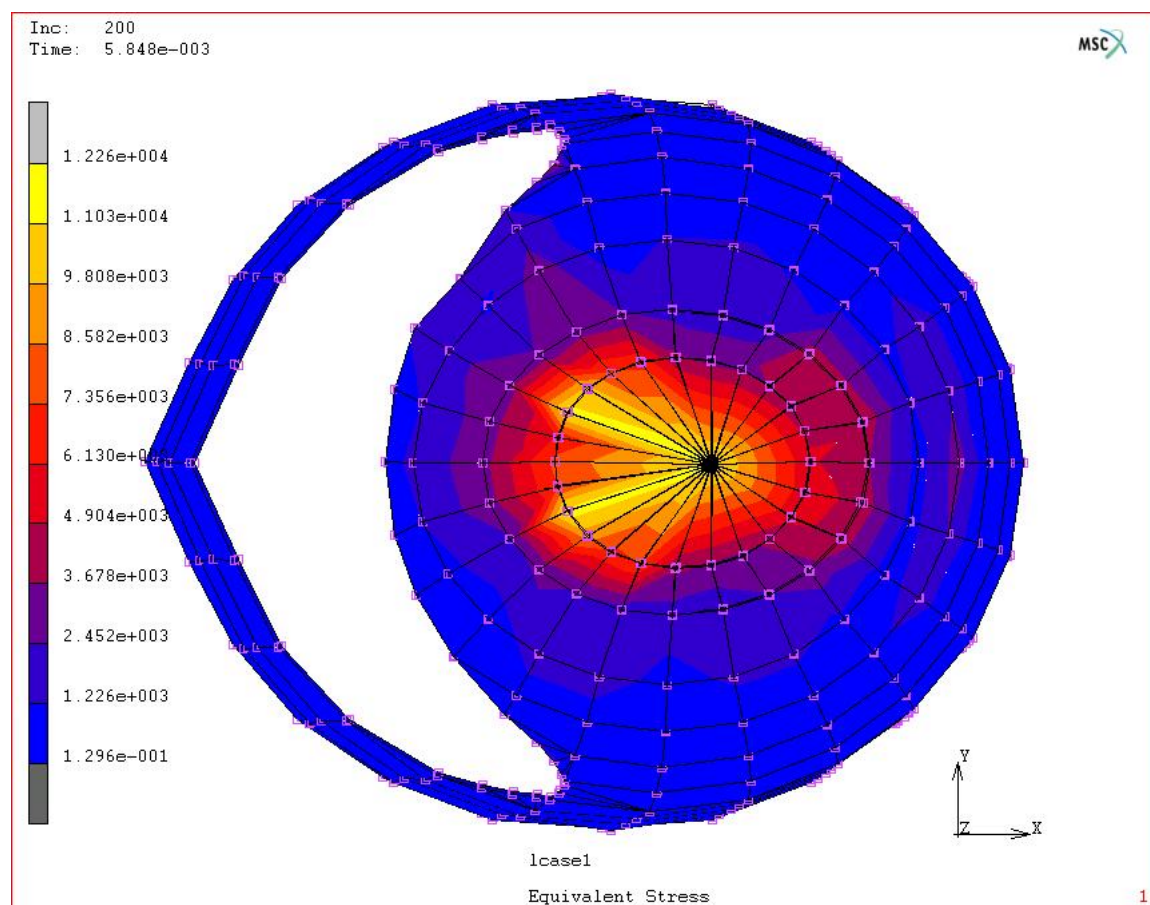
Σχήμα 6.11: Παραμόρφωση του κράνους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

6.2.1 Τα αποτελέσματα στο εξωτερικό κέλυφος “Kevlar”

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν: οι ισοδύναμες τάσεις και οι μέγιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στο Kevlar, καθώς επίσης και οι επιταχύνσεις και η ενέργεια παραμόρφωσης του Kevlar κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



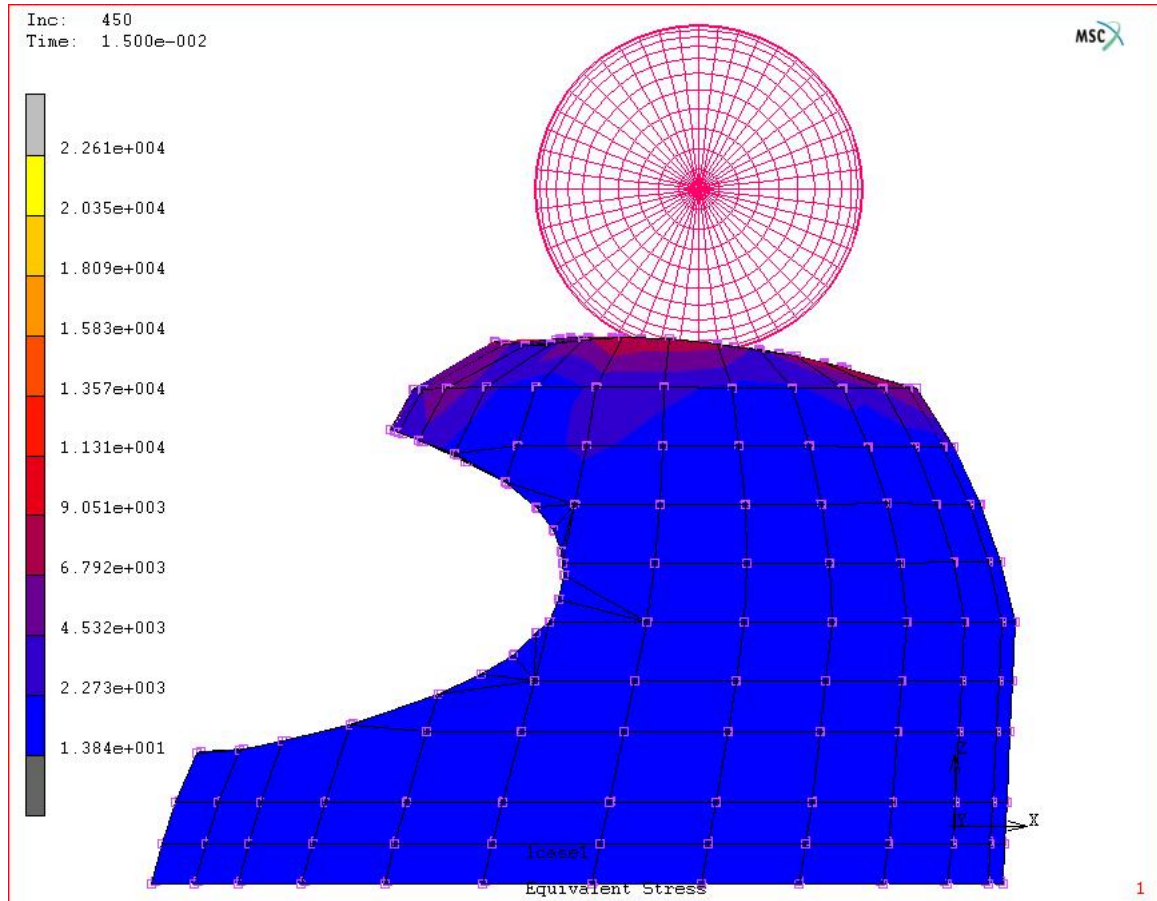
Σχήμα 6.12: Ισοδύναμη τάση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.



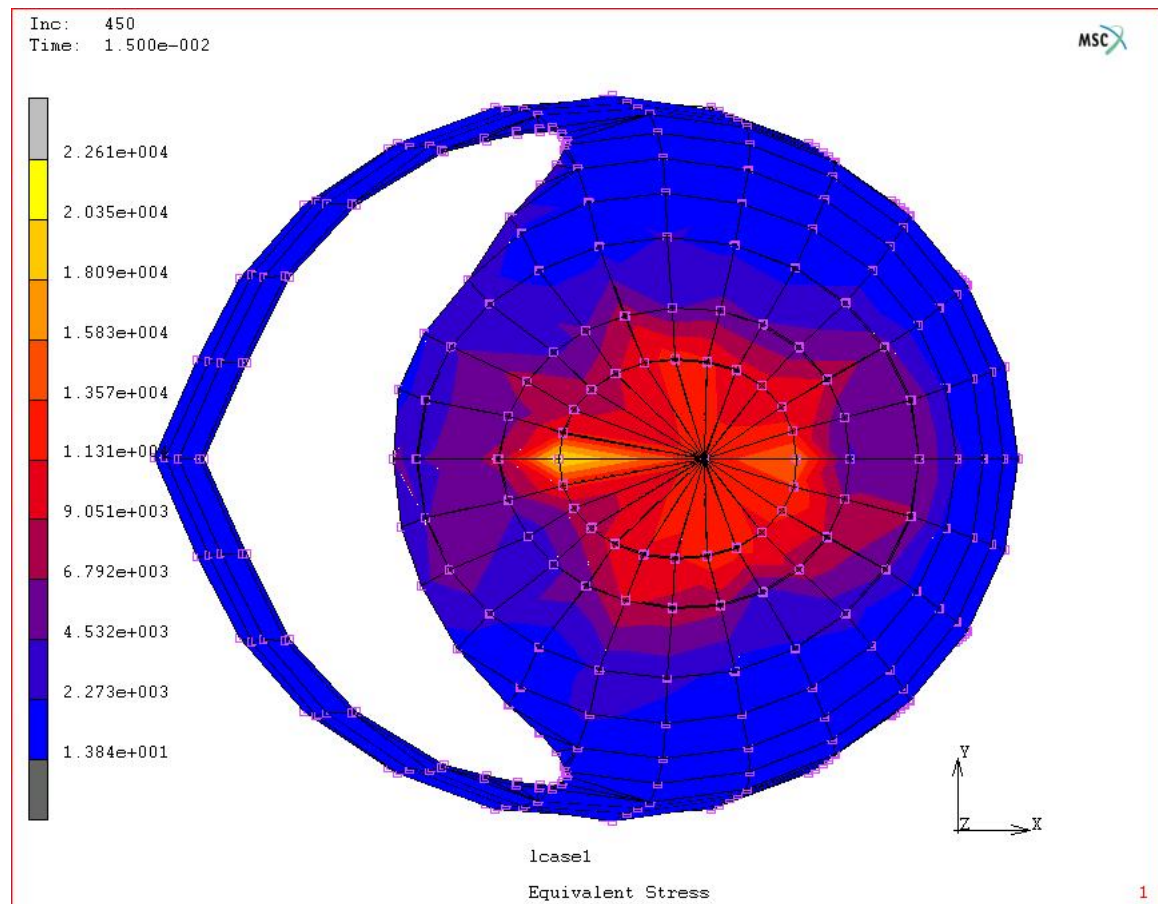
Σχήμα 6.13: Ισοδύναμη τάση στο kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Στο σχήμα 6.13 φαίνεται ότι υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην περιοχή γύρω από το σημείο της σύγκρουσης. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο κύριος σκοπός του εξωτερικού κελύφους είναι να κατανέμει τη δύναμη σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια ώστε να αποφευχθεί η διάτρηση του κράνους. Στο σημείο που γίνεται η κρούση το υλικό έχει αστοχήσει, αφού οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις είναι ίσες με 12260 MPa. Ενώ στα περιφερειακά στοιχεία οι τάσεις κυμαίνονται από 2452 MPa έως 11030 MPa. Στο υπόλοιπο κράνος η τάση κυμαίνεται από 0.1296 MPa έως 1226 MPa. Στο σχήμα 6.12 φαίνεται καλύτερα η καθ' ύψος κατανομή της τάσης, η οποία στο πίσω μέρος φτάνει μέχρι αρκετά χαμηλά. Η αύξηση

της τάσεως σε εκείνο το σημείο οφείλεται και στις δυνάμεις που αναπτύσσονται από το εσωτερικό μέρος του κράνους το οποίο έχει μεγαλύτερη ταχύτητα.

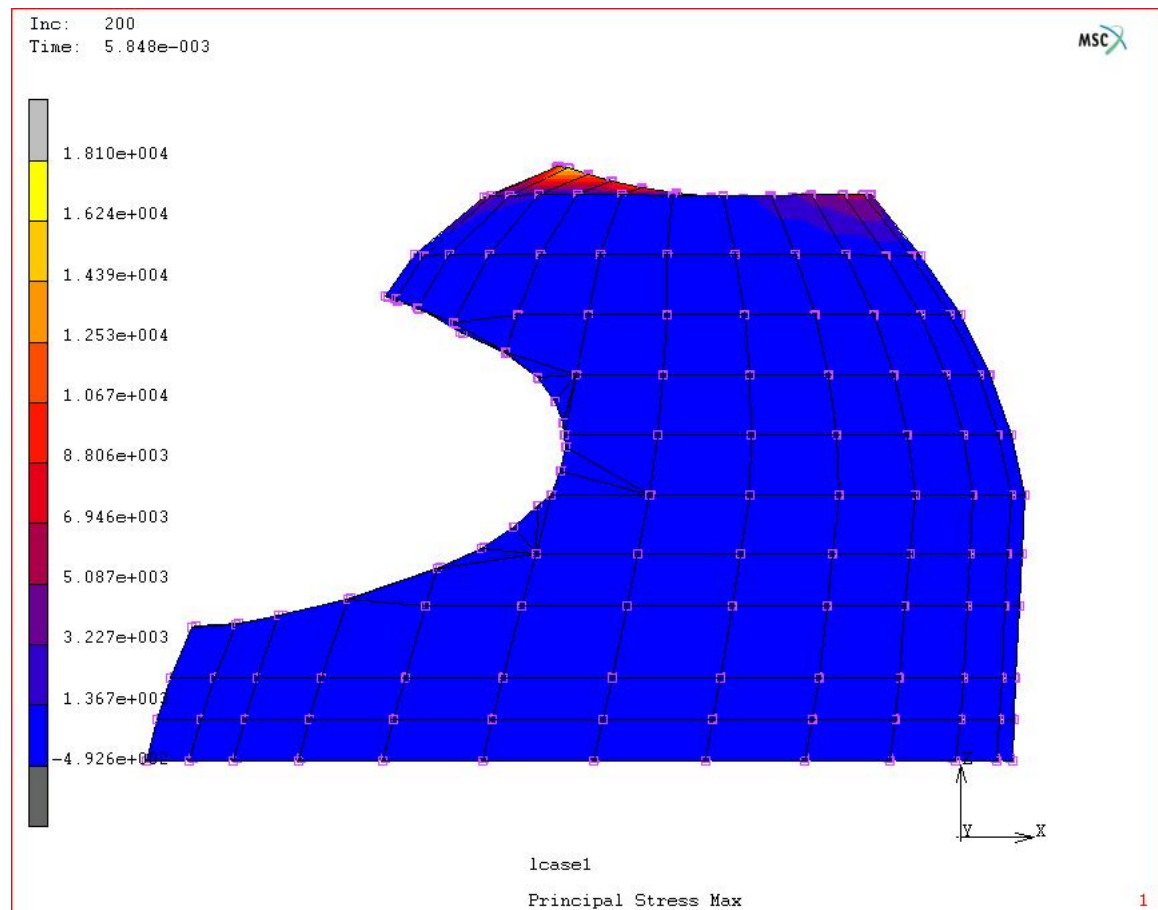


Σχήμα 6.14: Ισοδύναμη τάση στο kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.



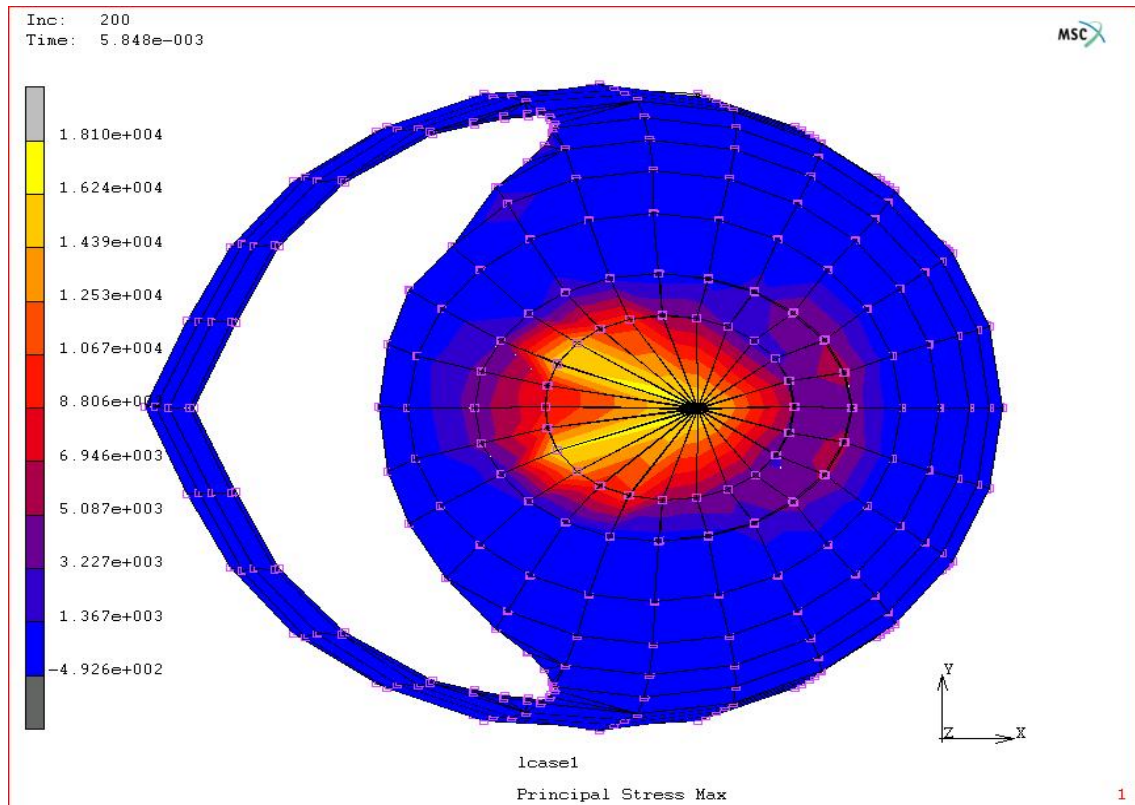
Σχήμα 6.15: Ισοδύναμη τάση στο kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

Σε χρόνο 15 msec και ενώ το φαινόμενο λαμβάνει τέλος, η τιμή της ισοδύναμης τάσης έχει σχεδόν διπλασιαστεί φτάνοντας σημειακά τα 22610 MPa. Σε ένα μεγάλο μέρος του πάνω τμήματος του κράνους η τάση κυμαίνεται από 11310 MPa έως 13570 MPa. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει ότι η μέγιστη τάση που είχε παρατηρηθεί σημειακά σε χρόνο 0.005848 sec (σχήμα 6.12 και 6.13) τώρα έχει κατανεμηθεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια διευκολύνοντας το Kevlar, αλλά και τα υπόλοιπα υλικά να απορροφήσουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια. Τέλος παρατηρείται ότι και η συνολική ισοδύναμη τάση στο υπόλοιπο τμήμα του κράνους έχει αυξηθεί, καθώς κυμαίνεται από 213.84 MPa έως 273 MPa.

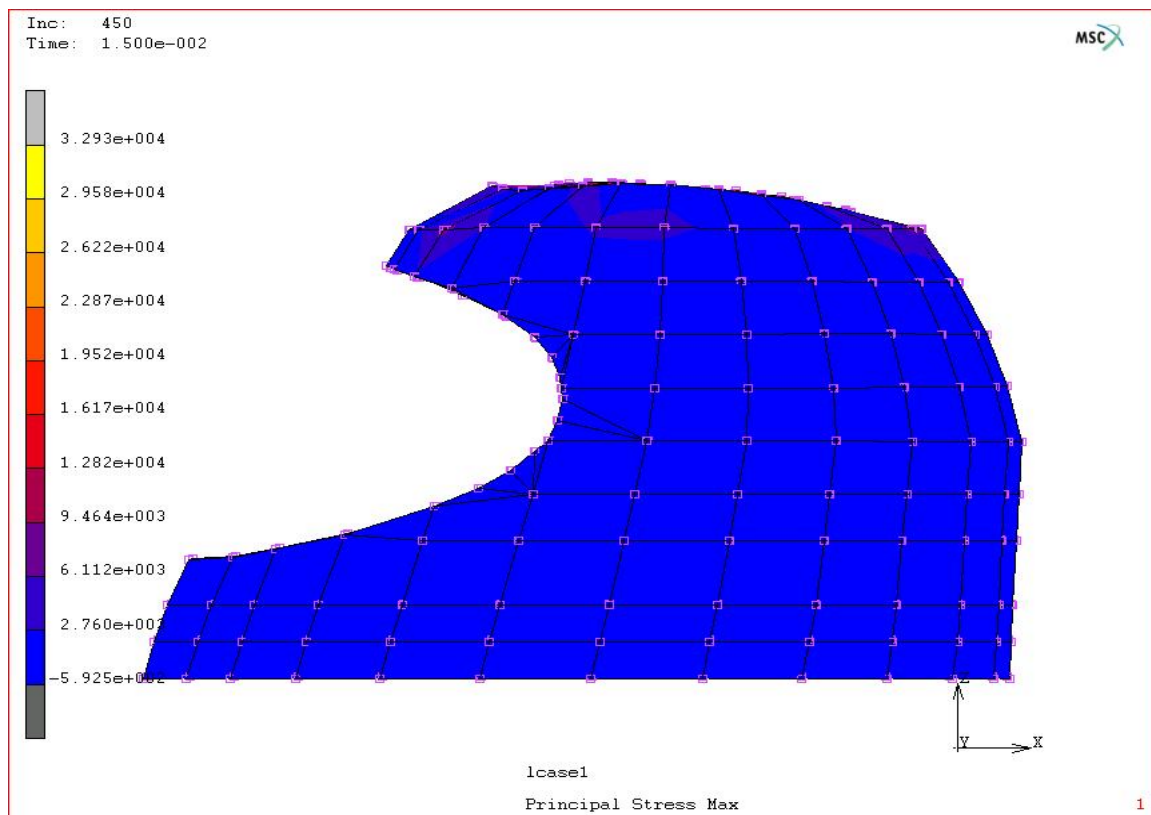


Σχήμα 6.16: Κύρια τάση στο kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

Οι μέγιστες κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στο εξωτερικό κέλυφος φαίνονται στα σχήματα 6.16 και 6.17 και αποτελούν μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στο σχήμα 6.17 παρατηρείται ότι οι μέγιστες κύριες τάσεις αν και εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές στα ίδια σημεία του Kevlar όπου και οι ισοδύναμες τάσεις λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους, ωστόσο παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές και μικρότερη κατανομή στο άνω τμήμα του κράνους. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης είναι 18100 MPa.

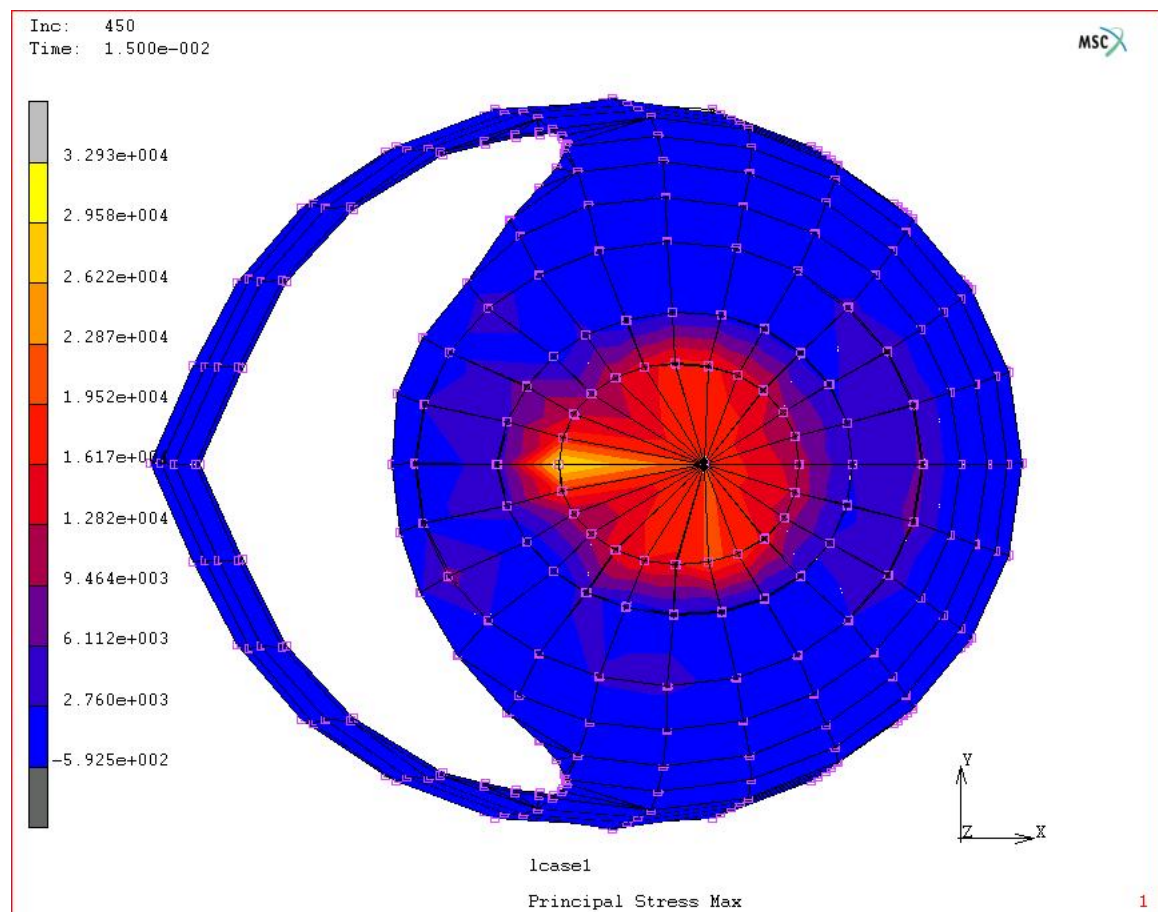


Σχήμα 6.17: Κύρια τάση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.



Σχήμα 6.18: Κύρια τάση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

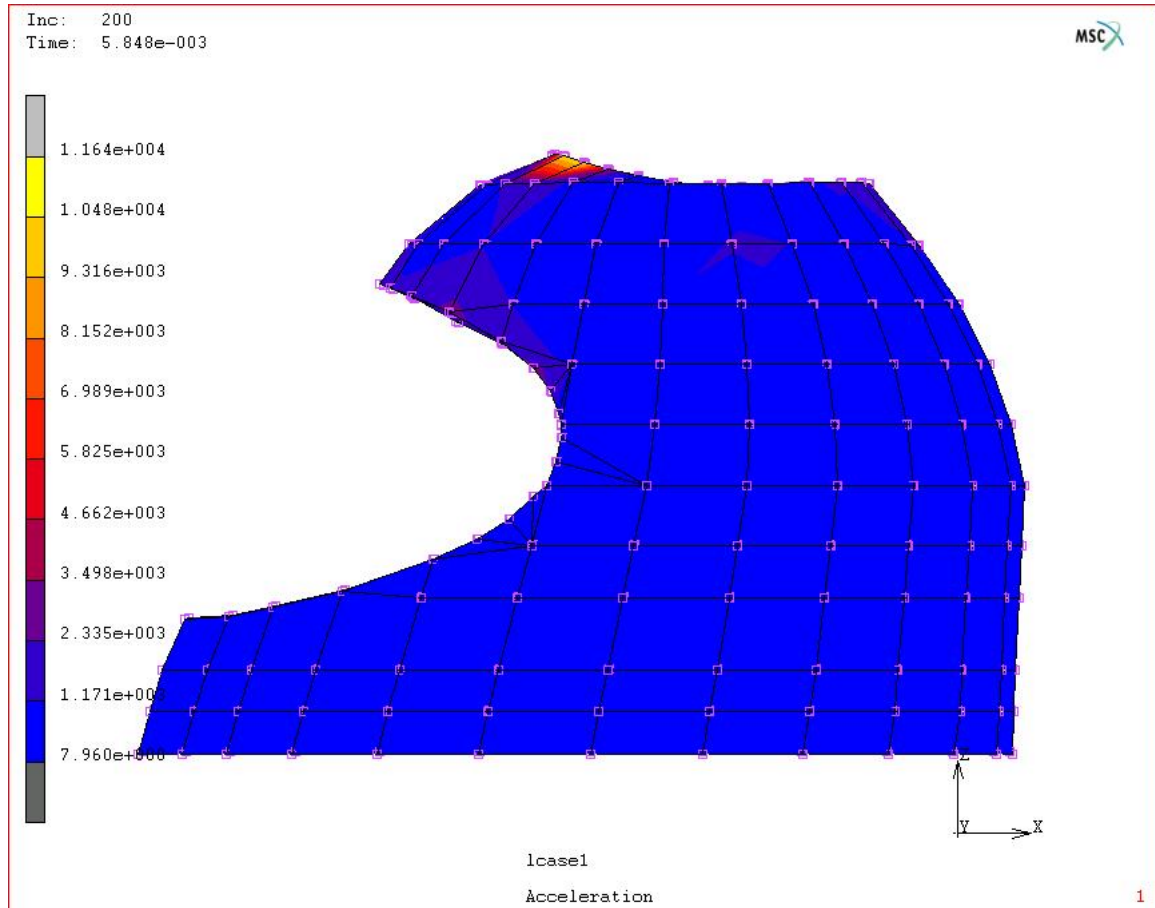
Η διαφορά αυτή ανάμεσα στην ισοδύναμη και στην κύρια τάση, τόσο στις τιμές τους όσο και στην κατανομή τους συνεχίζει να υπάρχει και στα 15 msec. Στο σχήμα 6.19 φαίνεται ότι η μέγιστη κύρια τάση έχει φτάσει τα 32930 MPa. Στο σχήμα 6.18 φαίνεται καλύτερα η συνολική παραμόρφωση του κράνους και η κατανομή της κύριας τάσης καθ' ύψος. Προκειμένου να διευκολυνθεί η παρατήρηση του κράνους έχει αφαιρεθεί το απαραμόρφωτο σφαιρικό στερεό.



Σχήμα 6.19: Κύρια τάση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

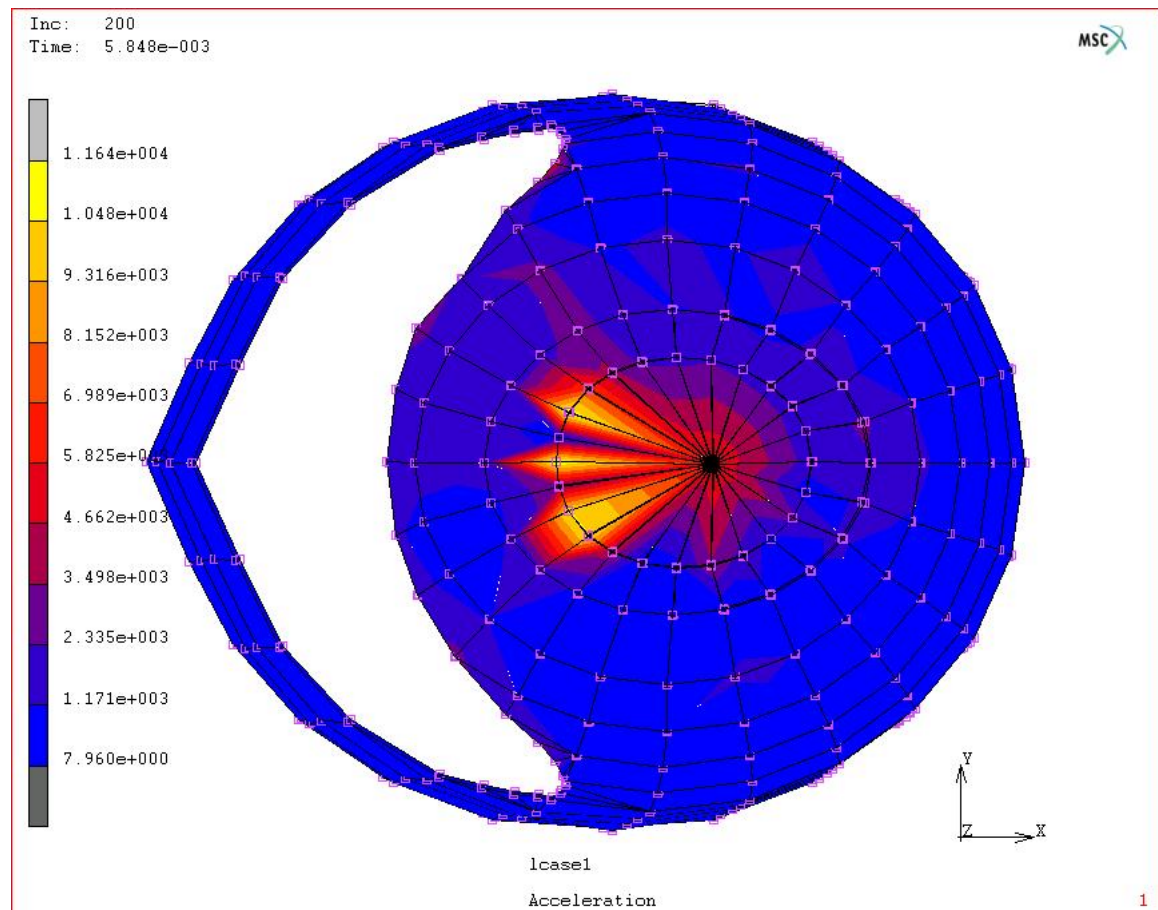
Οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στο κράνος κατά τη σύγκρουση είναι ένας πάρα πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς η αποτελεσματικότητα του κράνους και η

προστασία που προσφέρει στο ανθρώπινο κεφάλι κρίνεται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος της επιτάχυνσης που θα δεχτεί το κεφάλι σε μια σύγκρουση.



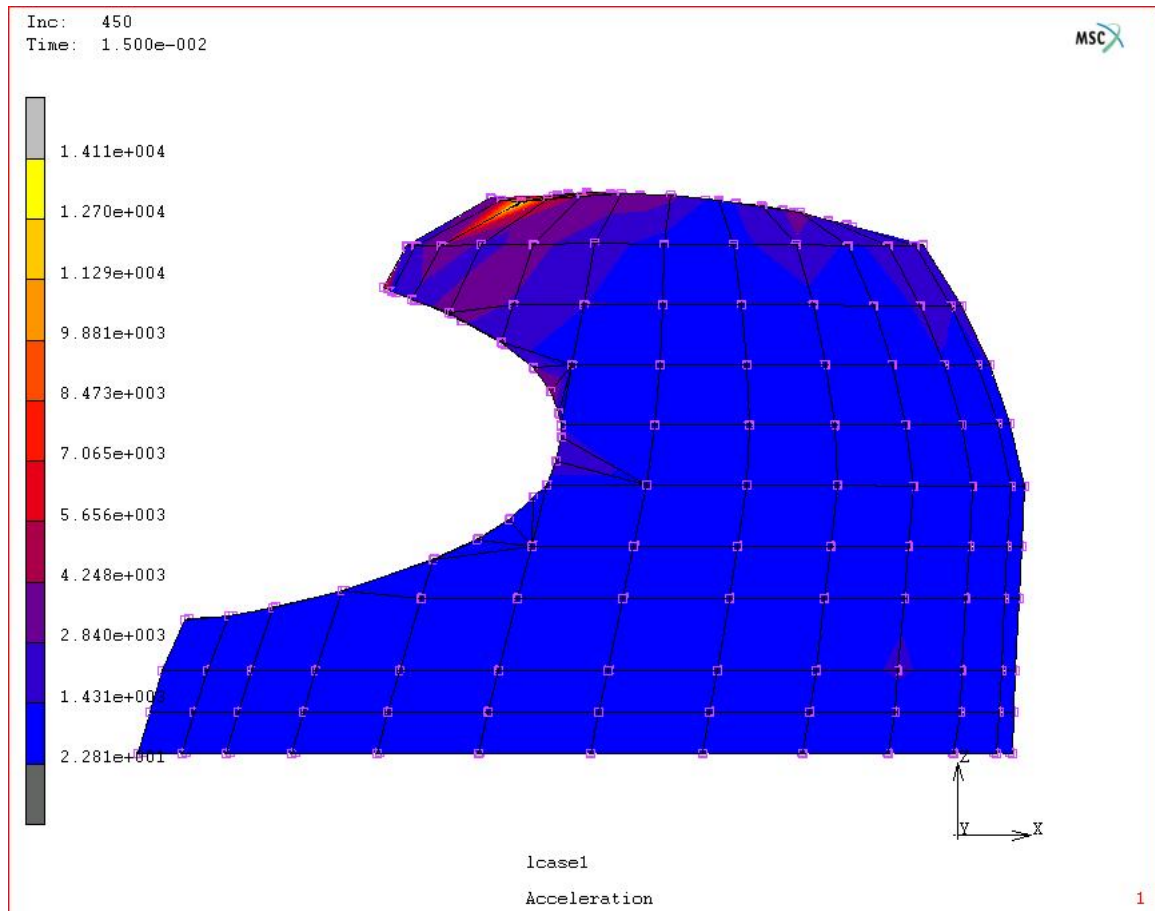
Σχήμα 6.20: Επιτάχυνση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.05848 sec.-Πλάγια όψη.

Στο σχήμα 6.20 φαίνεται ότι στο επάνω και μπροστινό τμήμα του κράνους αναπτύσσονται τμηματικά επιταχύνσεις μεγέθους από 1171 m/sec^2 έως 2335 m/sec^2 ενώ το υπόλοιπο τμήμα του κράνους δέχεται μια πολύ μικρή επιτάχυνση 7.96 m/sec^2 .



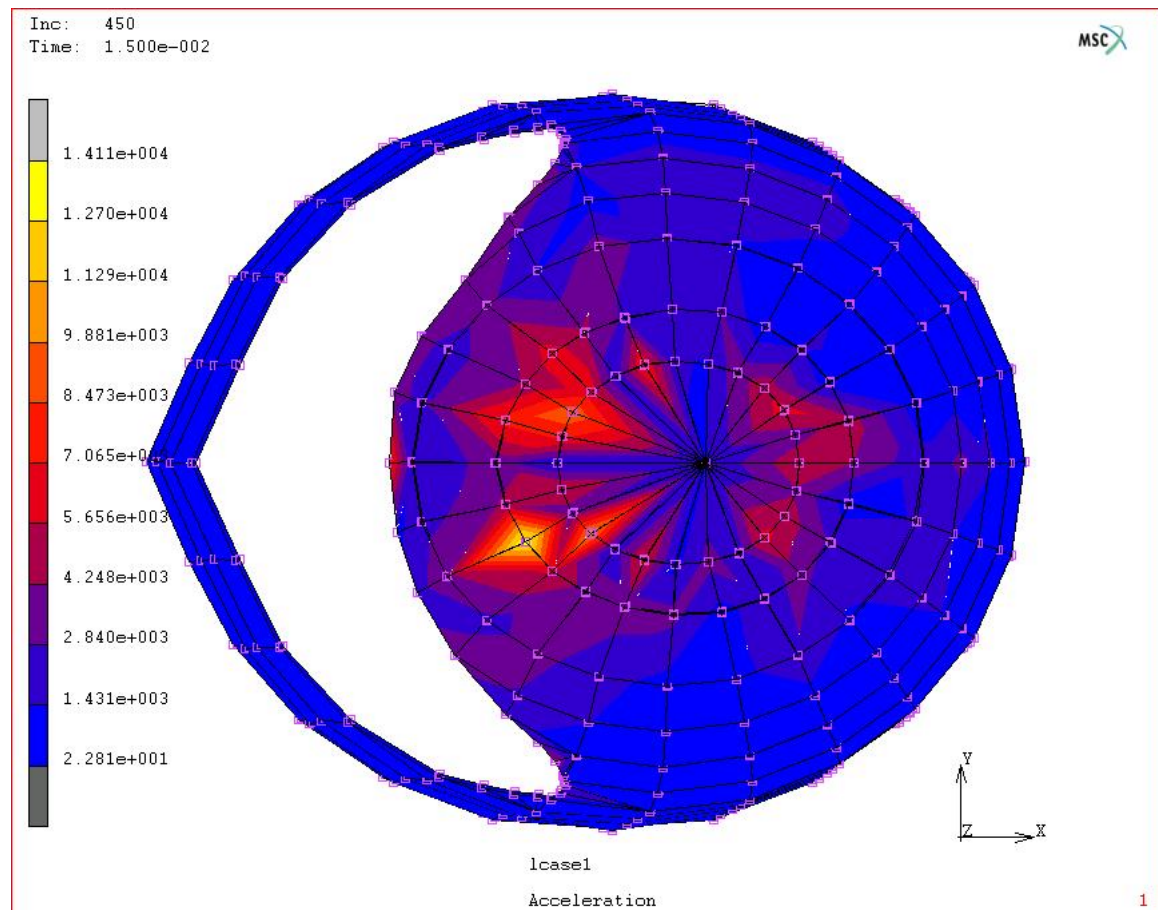
Σχήμα 6.21: Επιτάχυνση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Στο σχήμα 6.21 φαίνεται η μέγιστη επιτάχυνση στο σημείο κρούσης το οποίο είναι 11640 m/sec^2 . Αν και οι μέγιστες τιμές παρουσιάζουν μια ομοιομορφία ως προς τον άξονα συμμετρίας, δηλαδή οι τιμές από 3498 m/sec^2 έως τη μέγιστη, εντούτοις στο δεξιό τμήμα του κράνους αναπτύσσονται υψηλές επιταχύνσεις (από 1171 m/sec^2 έως και 2335 m/sec^2) οι οποίες δεν εμφανίζονται στο αριστερό άνω τμήμα του κράνους. Μια πιθανή εξήγηση για αυτήν τη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων είναι ότι το σημείο σύγκρουσης δεν βρίσκεται ακριβώς πάνω στον άξονα συμμετρίας όπως αρχικά είχε υπολογιστεί.



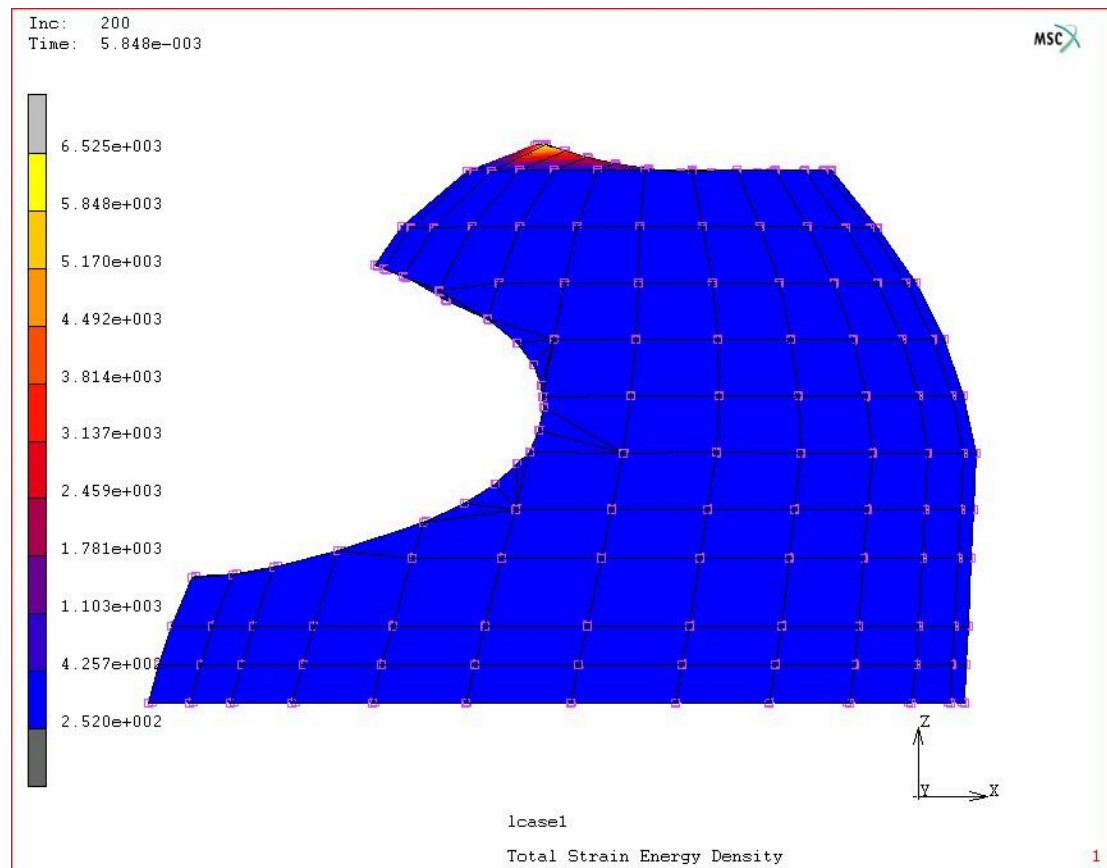
Σχήμα 6.22: Επιτάχυνση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

Στα 15 msec (σχήματα 6.22 και 6.23) οι επιταχύνσεις έχουν αυξηθεί φτάνοντας η μέγιστη τιμή τα 14110 m/sec² ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 22.81 m/sec².



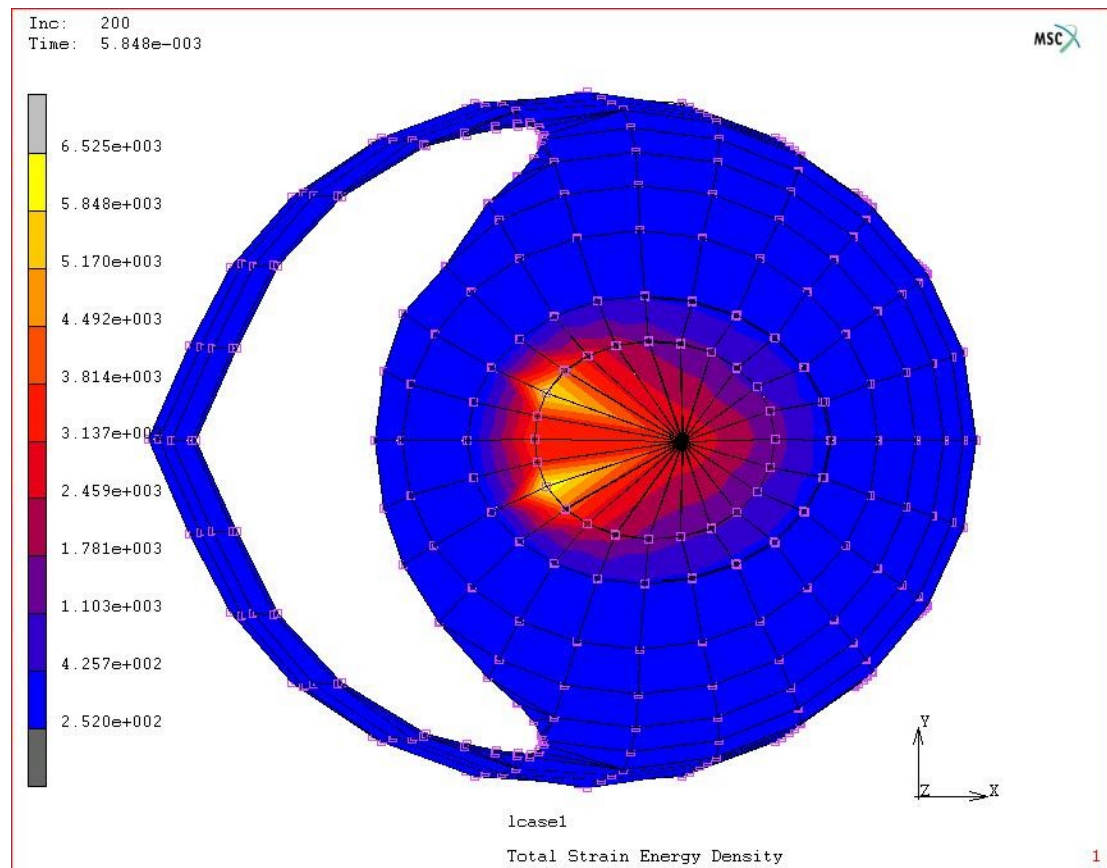
Σχήμα 6.23: Επιτάχυνση στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

Με την ενέργεια παραμόρφωσης μετράται η ενέργεια που απορρόφησε το κάθε υλικό κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Ο σκοπός του εξωτερικού κελύφους, εκτός από το να κατανέμει τη δύναμη σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια, είναι να απορροφήσει και ένα μέρος από την ενέργεια της σύγκρουσης.



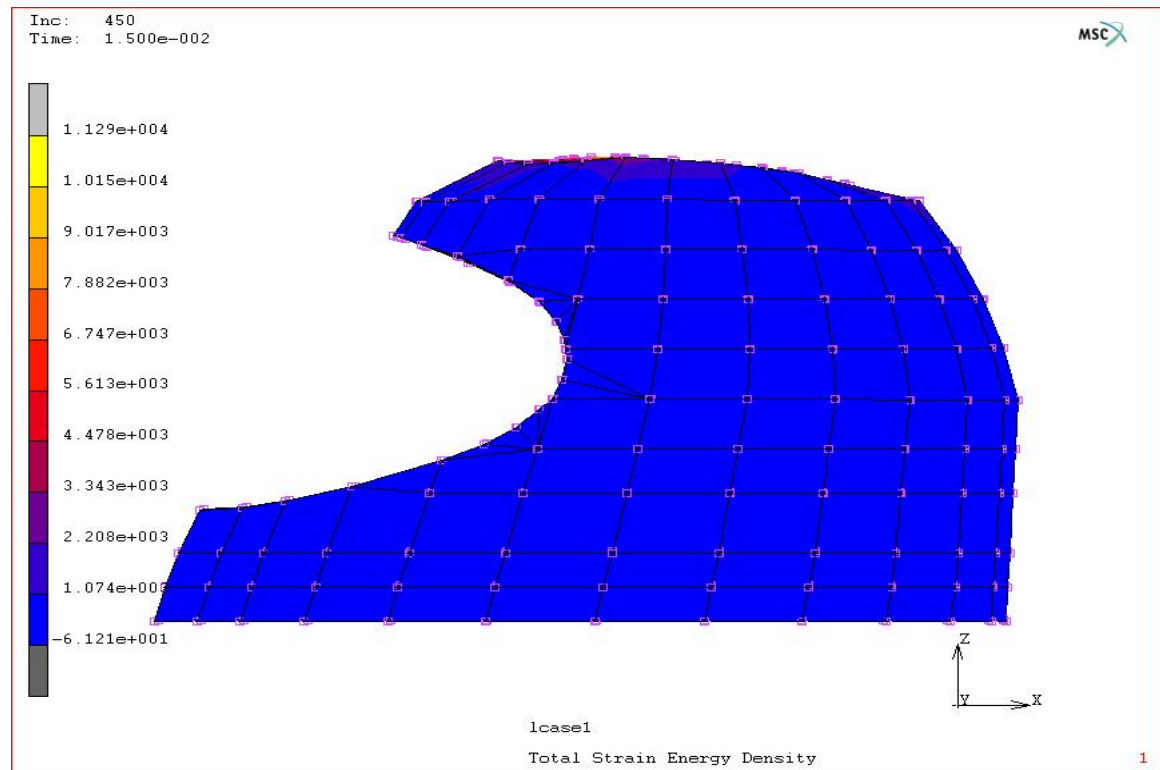
Σχήμα 6.24: Ενέργεια παραμόρφωσης στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.- Πλάγια όψη.

Στα σχήματα 6.24 και 6.25 φαίνεται ότι η ενέργεια παραμόρφωσης κατανέμεται ομοιόμορφα στο τμήμα του κράνους που παραμορφώνεται. Η μέγιστη τιμή της φτάνει τα 6525, ενώ σε ολόκληρη την παραμορφωμένη επιφάνεια κυμαίνεται από τα 1103 έως την μέγιστη τιμή. Στο υπόλοιπο τμήμα του κράνους η ενέργεια παραμόρφωσης έχει τιμές από 252 έως 425.7 οι οποίες είναι σχετικά μικρές.

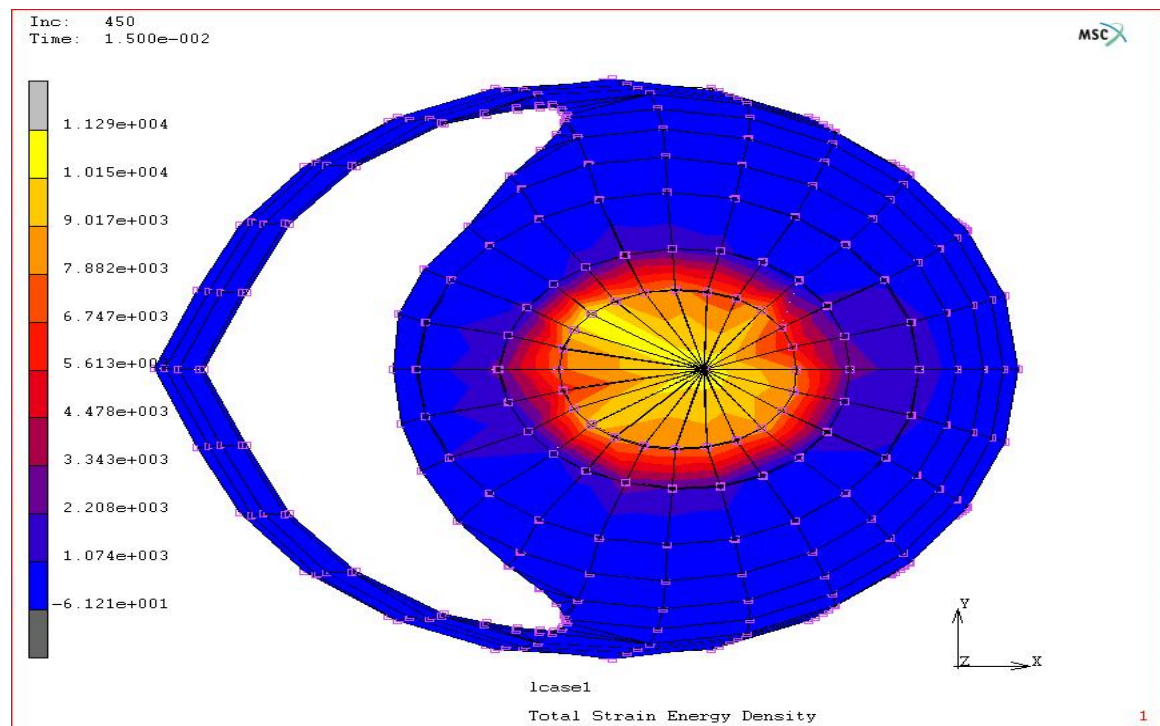


Σχήμα 6.25: Ενέργεια παραμόρφωσης στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.- Κάτοψη.

Στο τέλος του φαινομένου (σχήματα 6.26 και 6.27) φαίνεται το συνολικό τμήμα του κράνους που έχει απορροφήσει την ενέργεια της σύγκρουσης. Η ενέργεια παραμόρφωσης είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη με τις μεγαλύτερες τιμές της να βρίσκονται κοντά στο σημείο επαφής με το στερεό. Η μέγιστη τιμή της ενέργειας παραμόρφωσης είναι 11290.

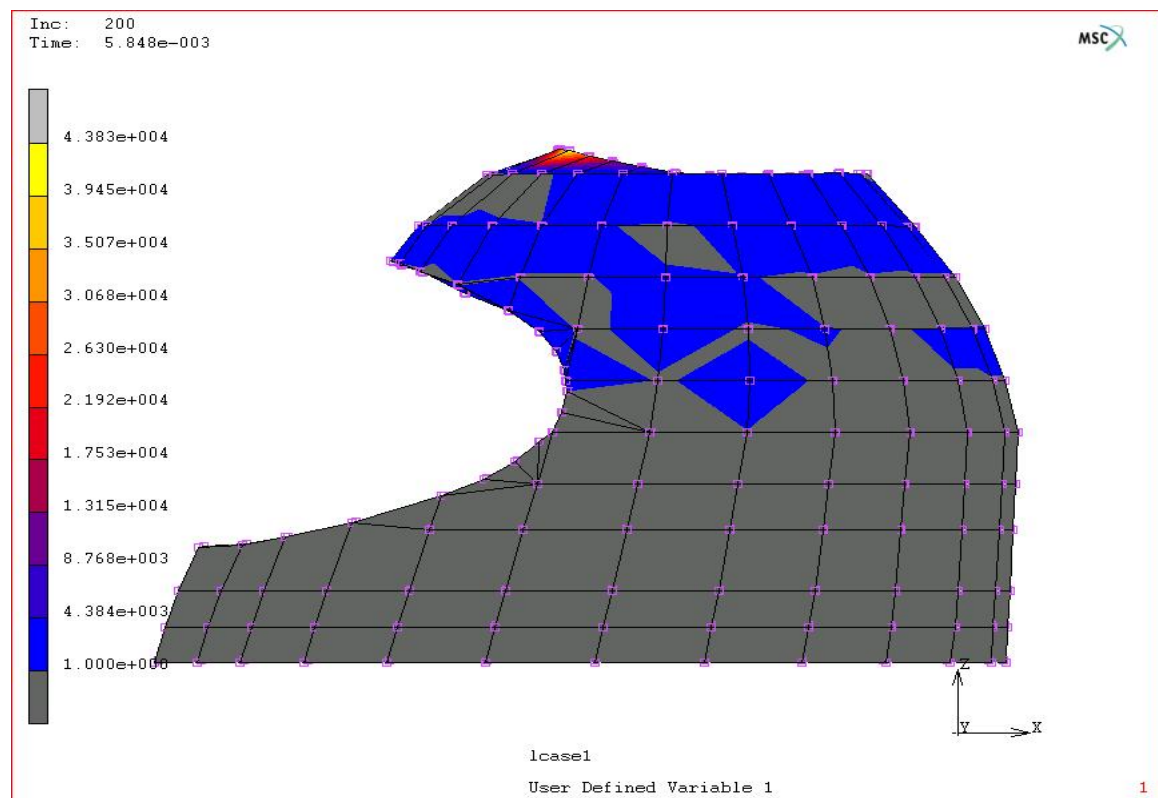


Σχήμα 6.26: Ενέργεια παραμόρφωσης στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

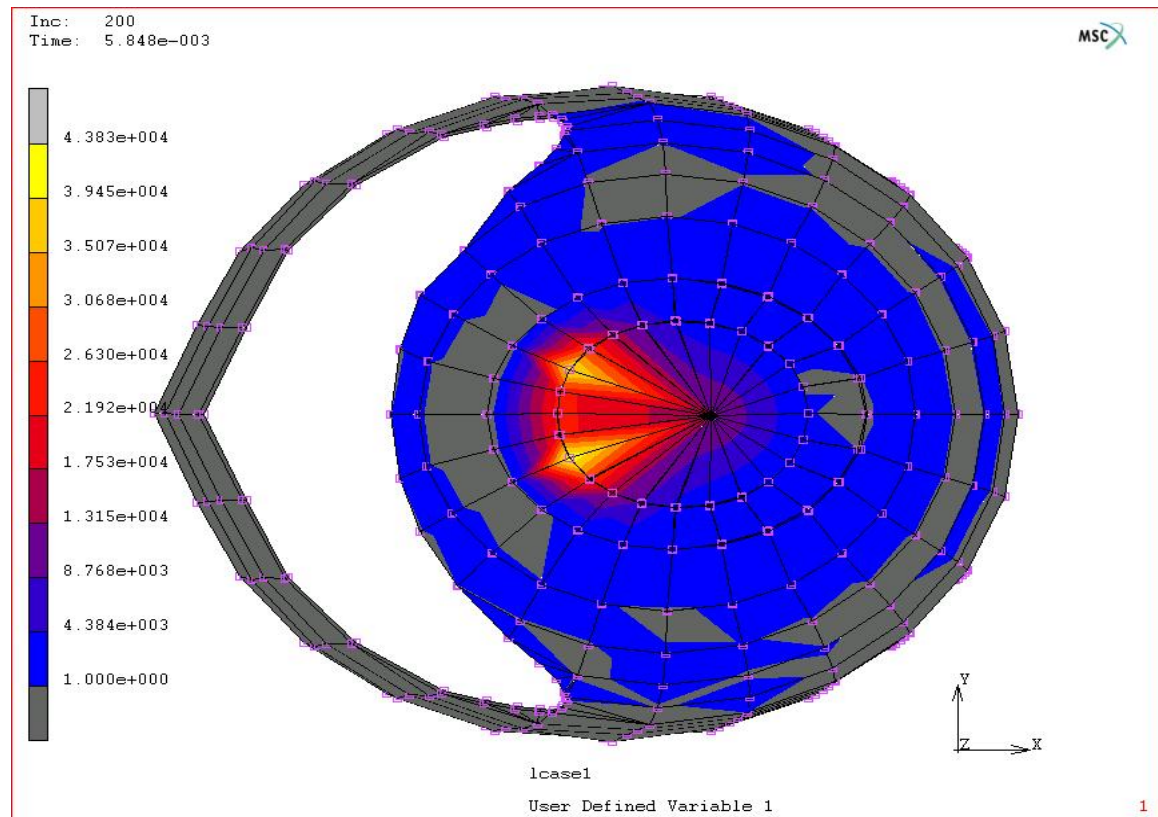


Σχήμα 6.27: Ενέργεια παραμόρφωσης στο Kevlar τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτωψη

Το εξωτερικό κέλυφος αποτελείται από δυο στρώσεις υλικών, την εξωτερική στρώση η οποία είναι από Kevlar και την εσωτερική η οποία είναι από συνεχείς ίνες γυαλιού. Εισάγοντας τη συνθήκη του Hallquist (6.1) για τον διαχωρισμό των στρώσεων του πολυμερούς στο πρόγραμμα Marc προκύπτει ότι για τιμές της τάσης μεγαλύτερες της μονάδας οι δεσμοί μεταξύ των δύο στρώσεων αστοχούν, αν και τα δυο υλικά συνεχίζουν να βρίσκονται σε επαφή. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν ατοχούν οι δεσμοί μεταξύ των δύο στρώσεων δεν μπορούν μεν να αναπτυχθούν οι εφελκυστικές δυνάμεις μεταξύ των δυο στρώσεων, αλλά όμως συνεχίζουν να υπάρχουν οι θλιπτικές.

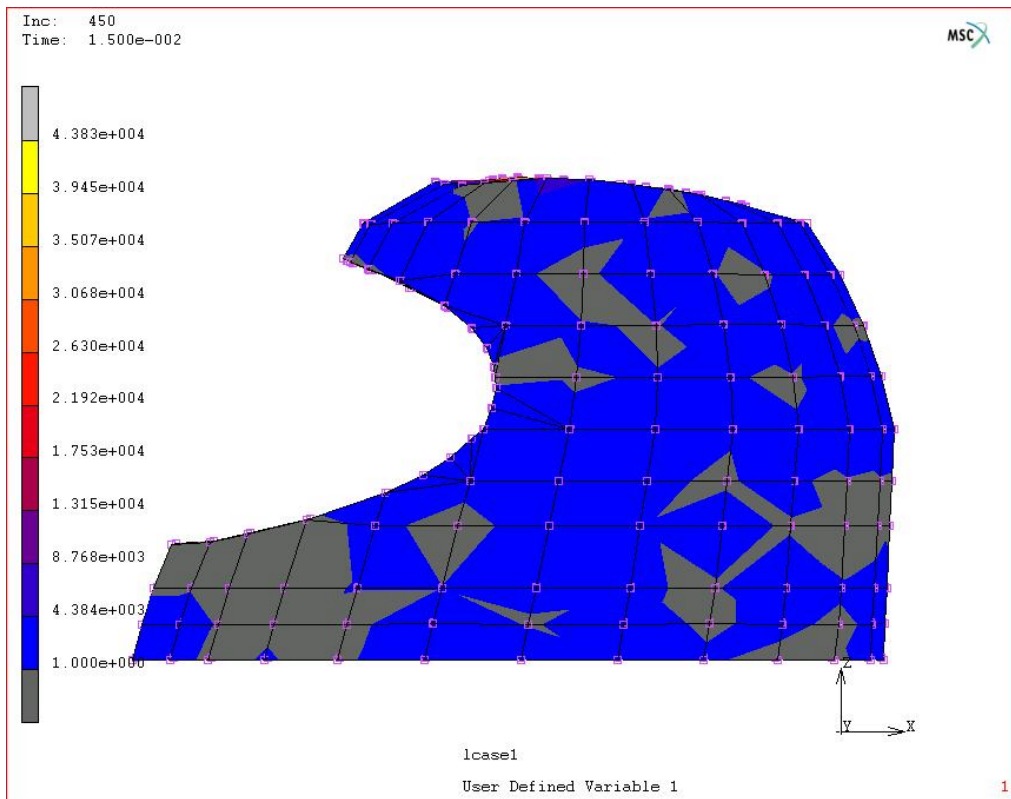


Σχήμα 6.28: Διαχωρισμός των στρώσεων στο εξωτερικό κέλυφος τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

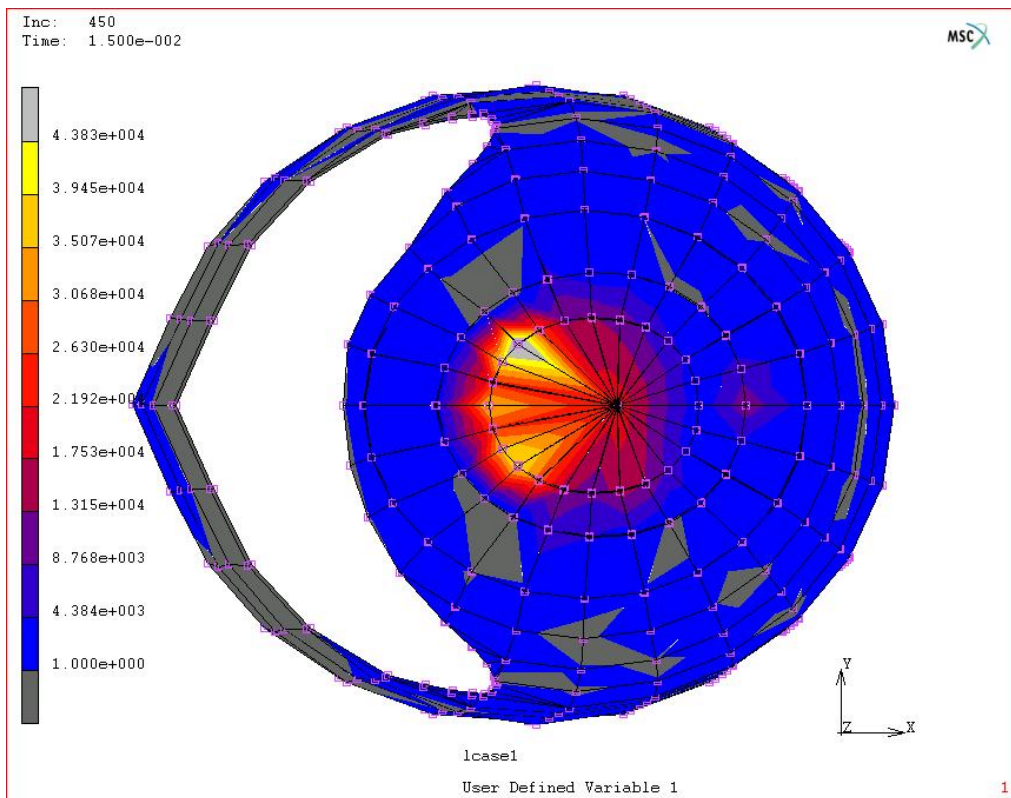


Σχήμα 6.29: Διαχωρισμός των στρώσεων στο εξωτερικό κέλυφος τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Στα σχήματα 6.28, 6.29, 6.30, 6.31 φαίνεται σε ποια σημεία του εξωτερικού κελύφους υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ των στρώσεων των υλικών. Στα στοιχεία με το γκρι χρωματισμό οι δεσμοί μεταξύ των στρώσεων συνεχίζουν να υπάρχουν. Αν και τη χρονική στιγμή 0.005848 sec το φαινόμενο περιορίζεται στο άνω τμήμα του κράνους, ωστόσο με την ολοκλήρωση της σύγκρουσης στα 0.015 sec. παρατηρείται ότι έχει επέλθει διαχωρισμός μεταξύ των δυο στρώσεων στο μεγαλύτερο τμήμα του κράνους.



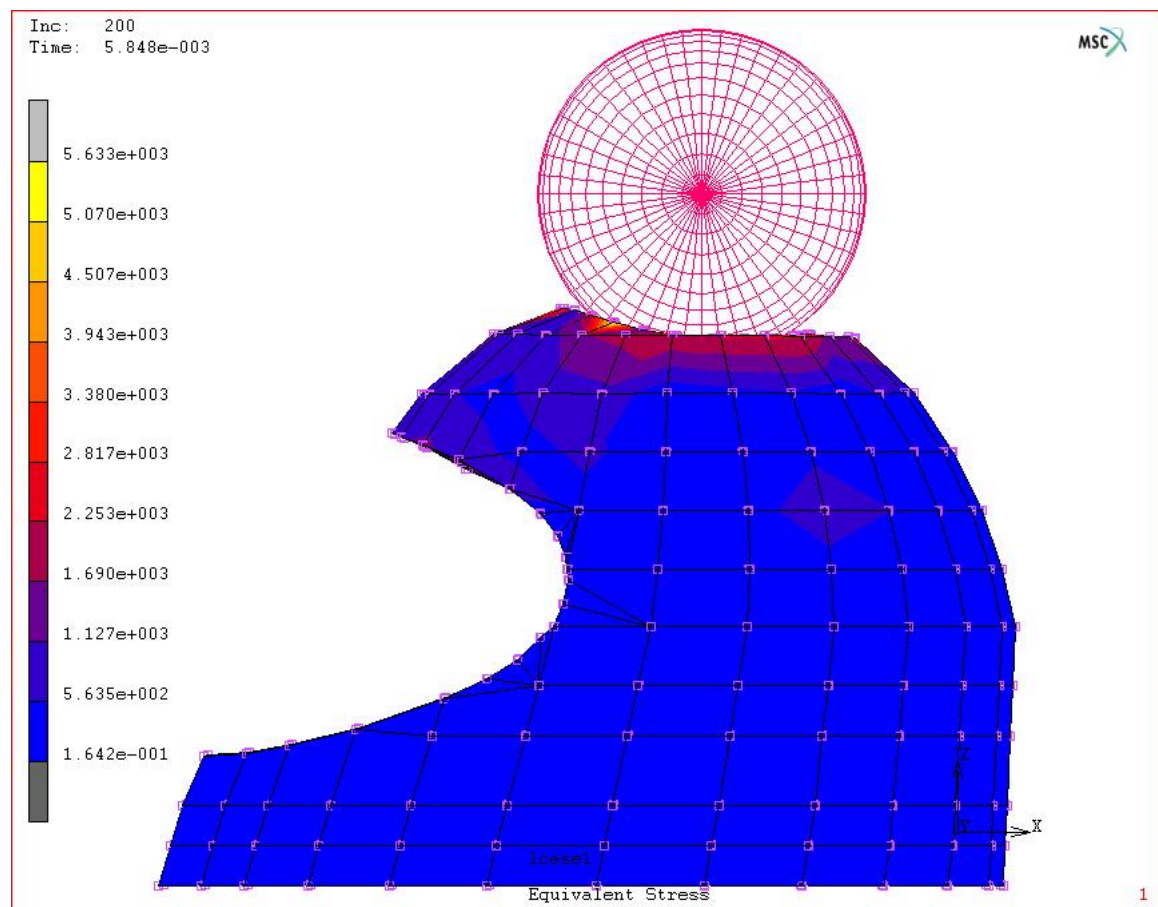
Σχήμα 6.30: Διαχωρισμός των στρώσεων στο εξωτερικό κέλυφος τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.



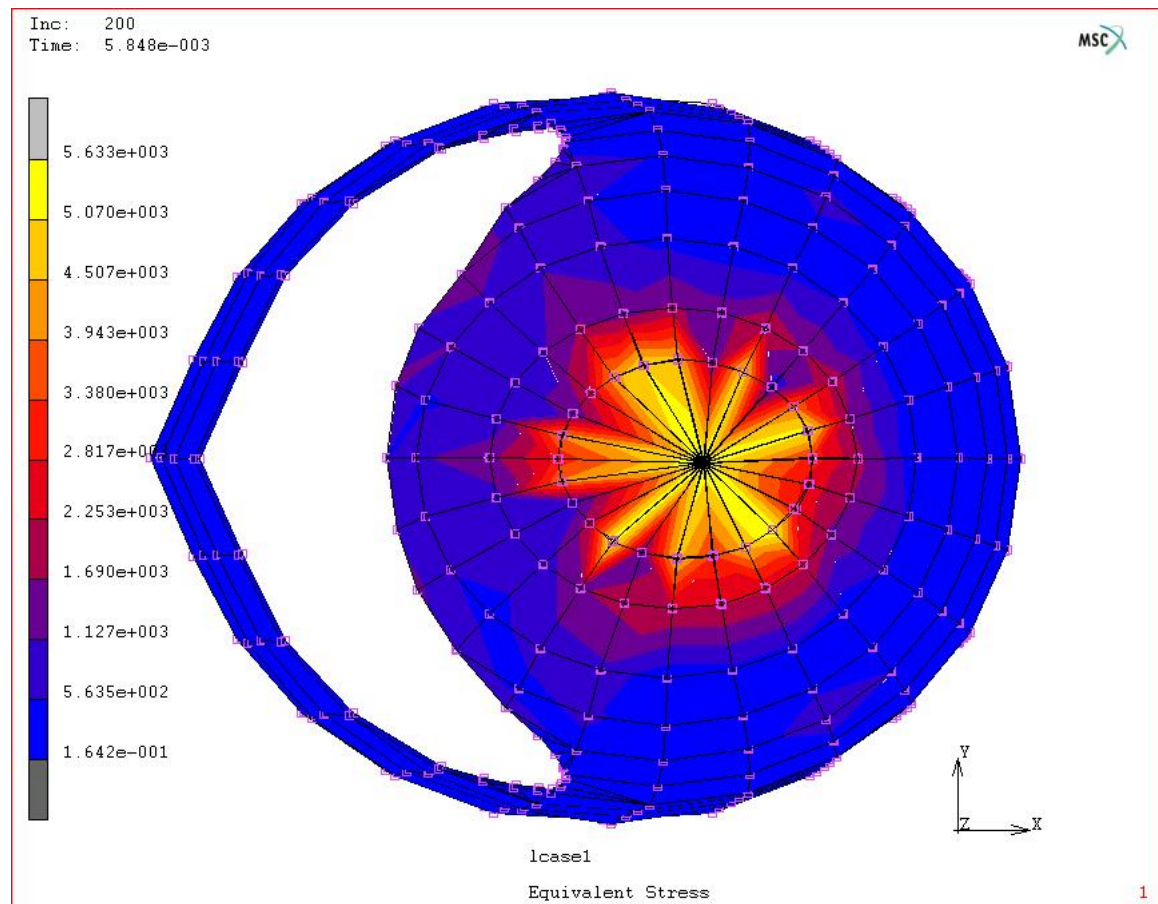
Σχήμα 6.31: Διαχωρισμός των στρώσεων στο εξωτερικό κέλυφος τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

6.2.2 Τα αποτελέσματα στο εσωτερικό μέρος του κελύφους

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την εσωτερική στρώση του εξωτερικού κελύφους, η οποία αποτελείται από συνεχές ίνες γυαλιού, τις ίδιες χρονικά στιγμές που εξετάστηκαν και για το Kevlar.

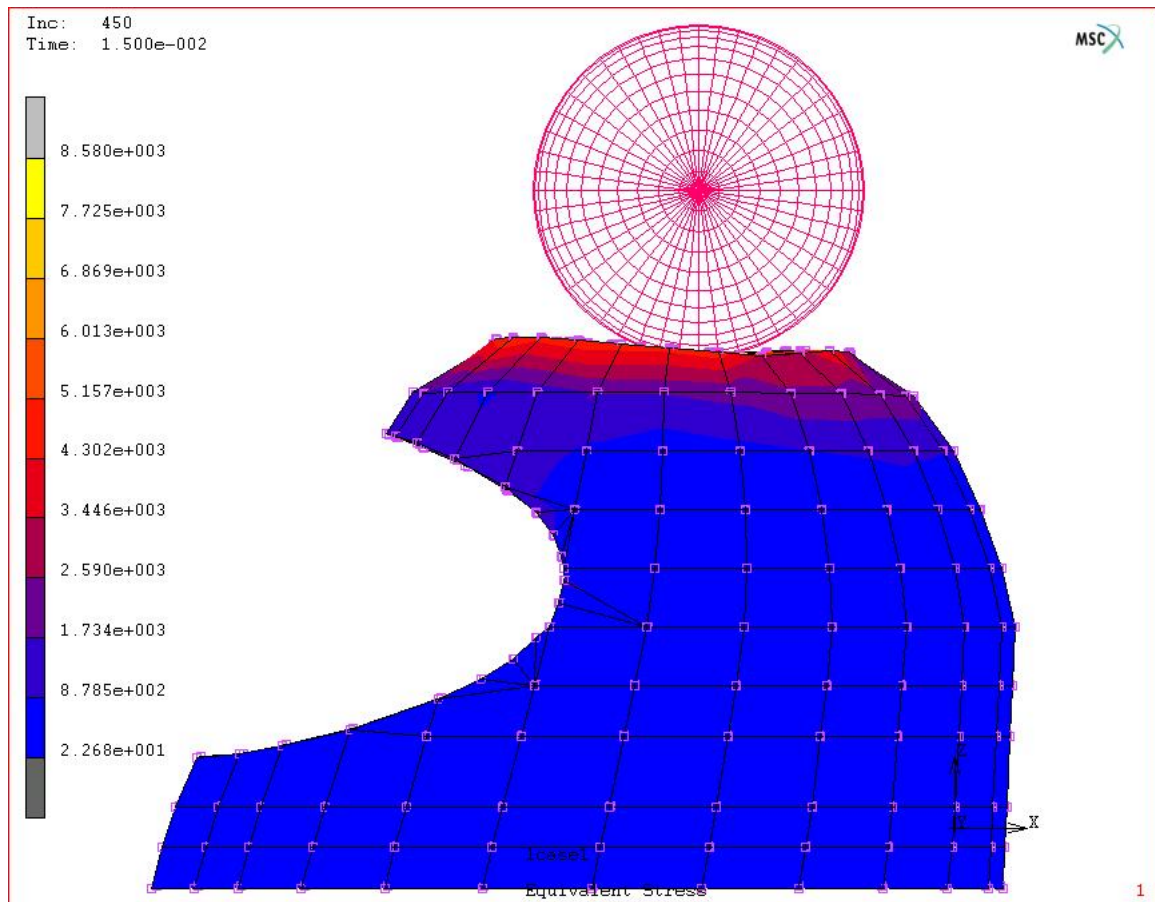


Σχήμα 6.32: Ισοδύναμη τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec. -Πλάγια όψη.



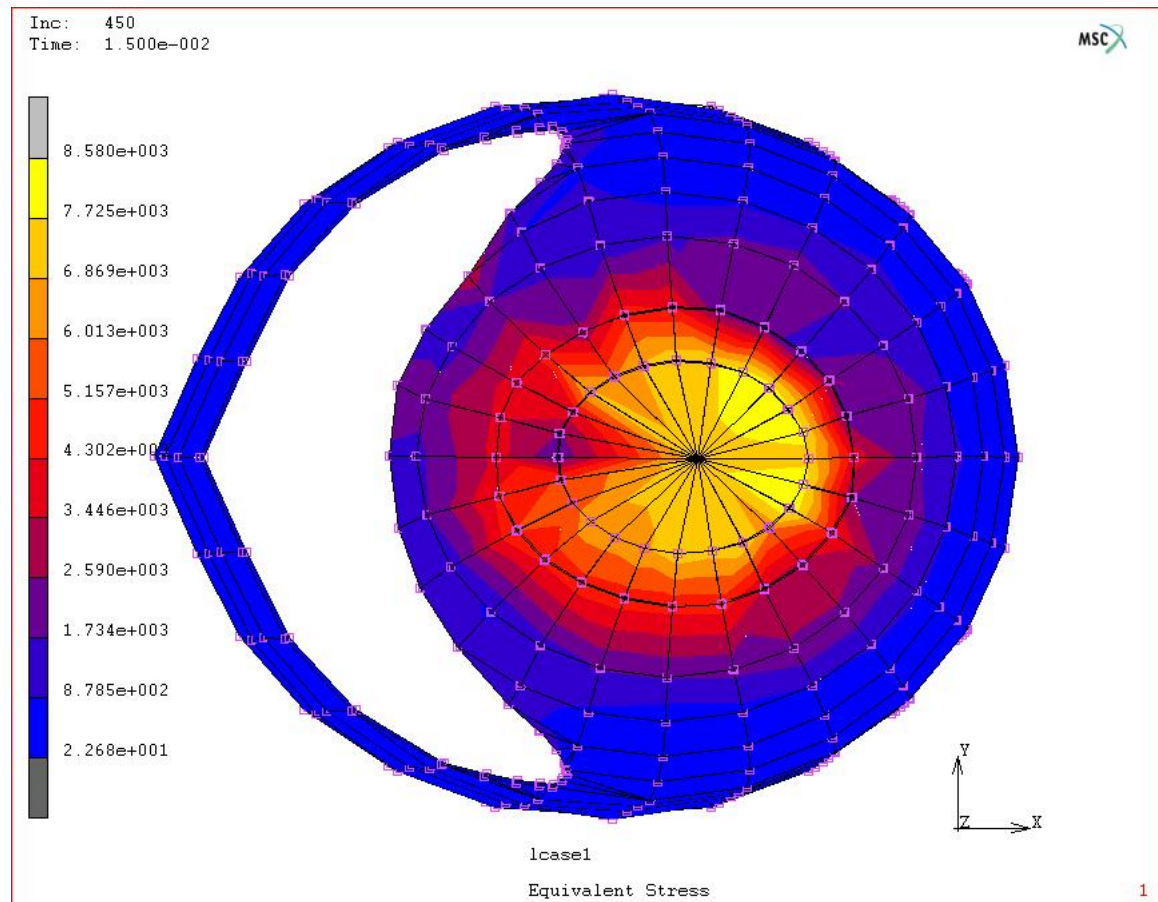
Σχήμα 6.33: Ισοδύναμη τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Οι ισοδύναμες τάσεις που αναπτύσσονται στην εσωτερική στρώση του εξωτερικού κελύφους έχουν σχεδόν το μισό μέγεθος σε σχέση με τις τιμές των τάσεων που παρατηρήθηκαν στο Kevlar, καθώς κυμαίνονται από 5070 MPa έως 5633 MPa. Παρατηρείται όμως ότι αυτές οι μέγιστες περιοχές έχουν μεγαλύτερη έκταση από ότι στο Kevlar συμπεριλαμβάνοντας και τα σημεία όπου η τάση κυμαίνεται από 7356 MPa έως 8582 MPa. Υπάρχει δηλαδή μια ομοιογενέστερη κατανομή σε μεγαλύτερη επιφάνεια των μέγιστων τιμών της ισοδύναμης τάσης στο κρίσιμο άνω μέρος του κράνους.



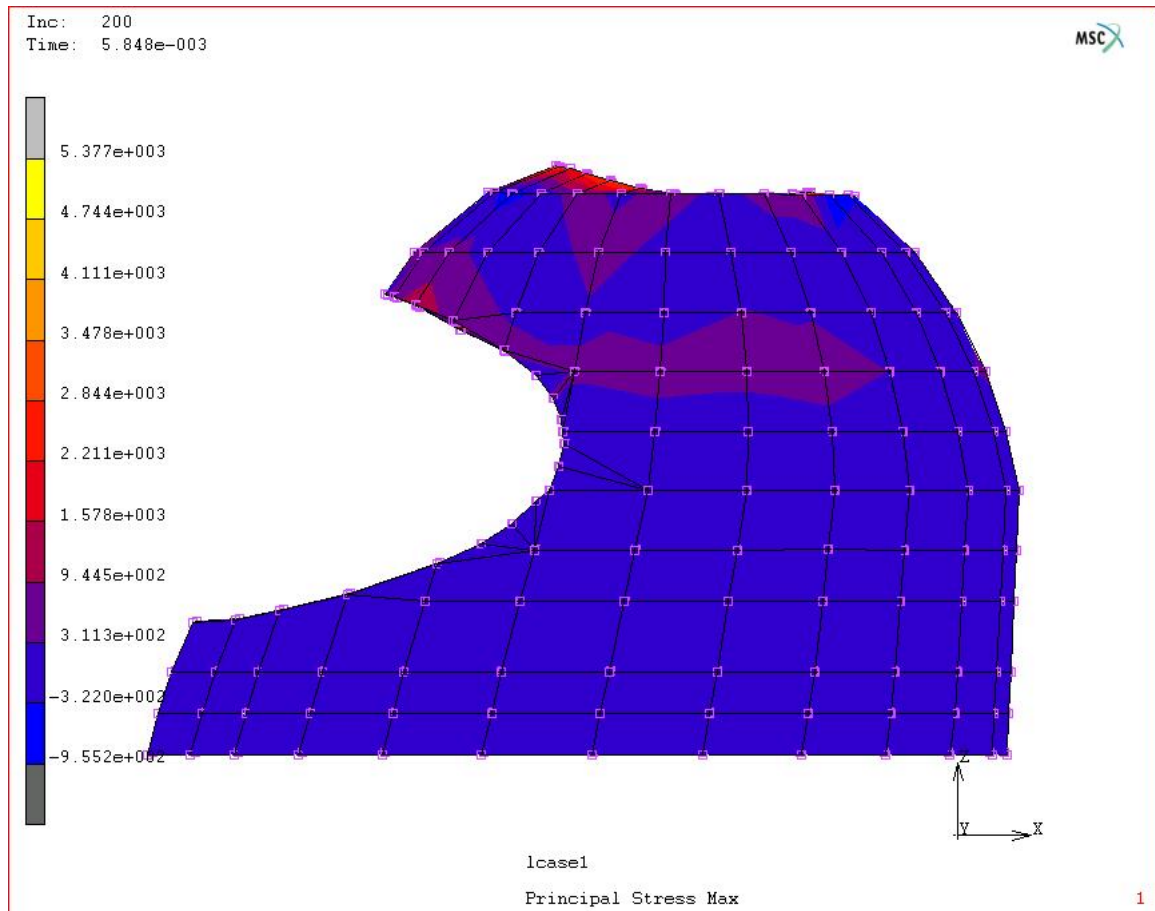
Σχήμα 6.34: Ισοδύναμη τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.34 και 6.35 οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις κυμαίνονται από 7725 MPa έως 8580 MPa. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης η οποία είναι 22.68 MPa είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ελάχιστη τιμή που παρατηρείται την ίδια χρονική στιγμή στο Kevlar. Αυτό αποδεικνύει ότι το Kevlar κατανέμει το φορτίο της σύγκρουσης σε μεγαλύτερη επιφάνεια.



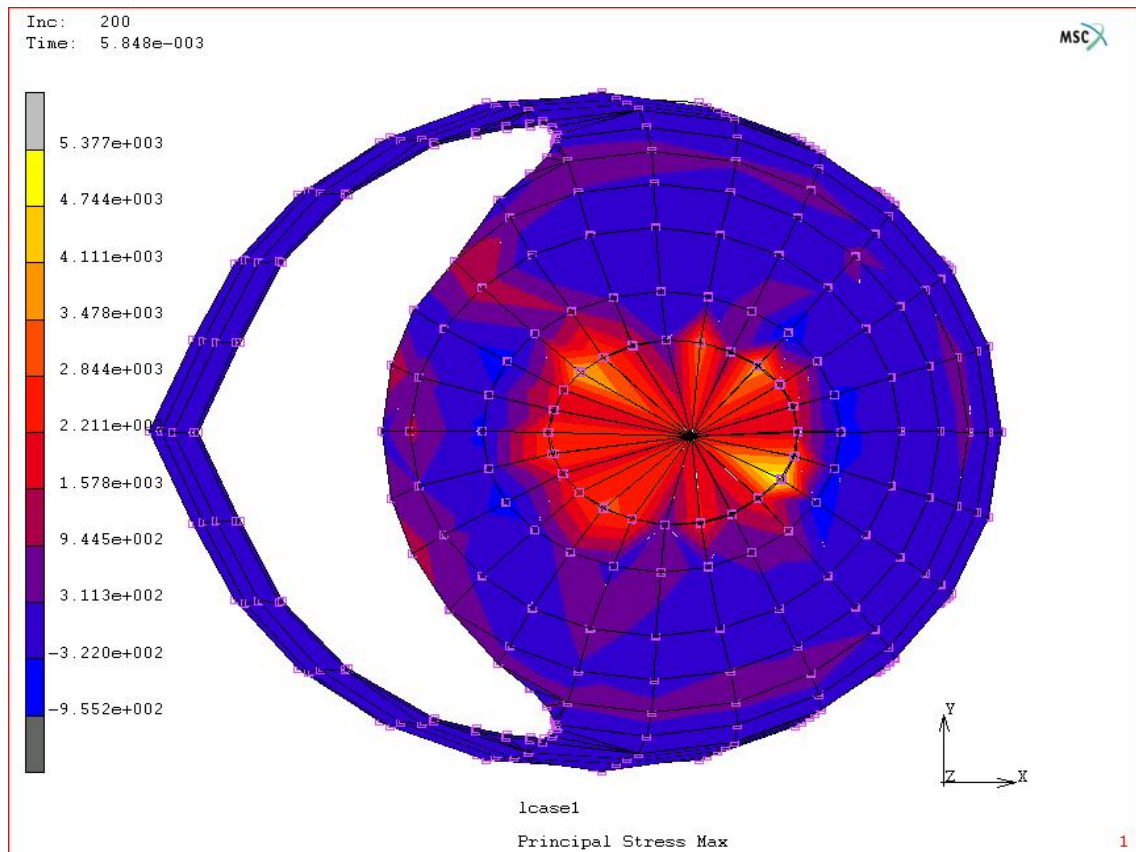
Σχήμα 6.35: Ισοδύναμη τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

Οι κύριες τάσεις στο εσωτερικό μέρος του κελύφους είναι μικρότερες από τις ισοδύναμες σε αντίθεση με το Kevlar, όπου παρατηρήθηκε το αντίστροφο φαινόμενο. Οι μέγιστες κύριες τάσεις είναι από 4744 MPa έως 5377 MPa, ενώ στο μεγαλύτερο τμήμα του υλικού η τάση κυμαίνεται από -955.2 MPa έως 311.3 MPa.

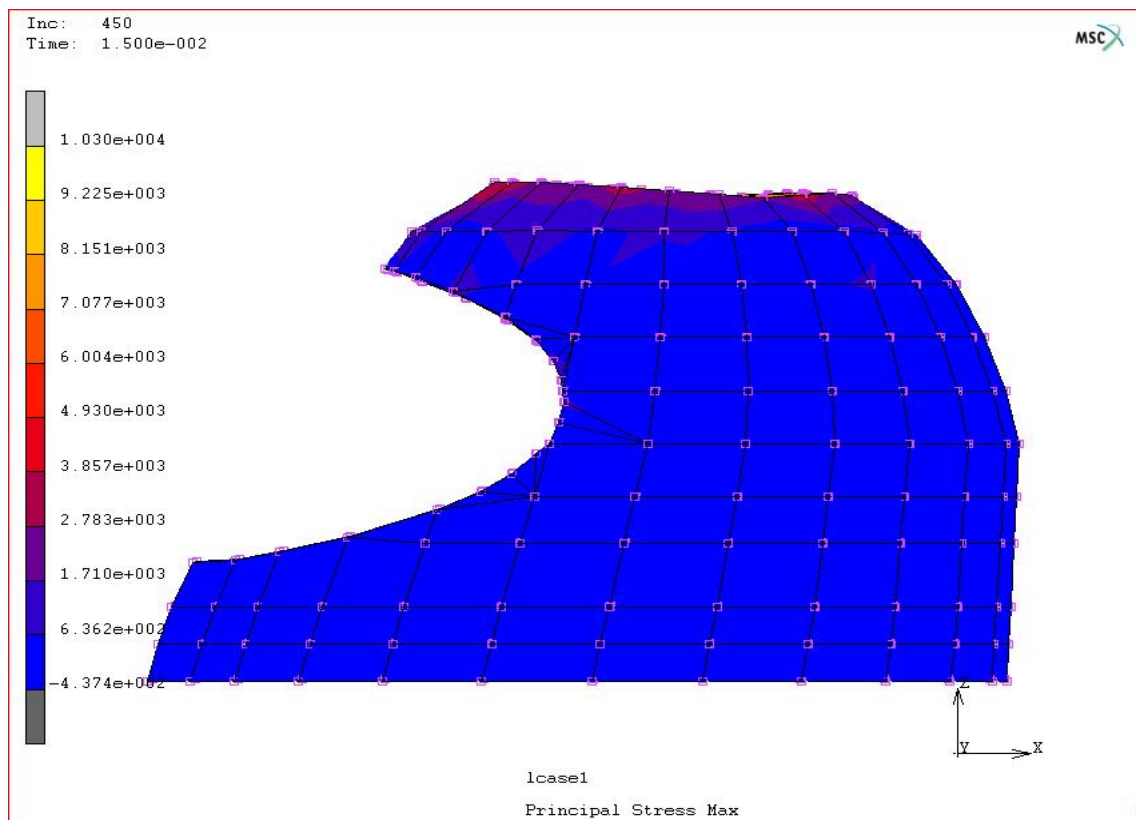


Σχήμα 6.36: Κύρια τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

Στο μπροστινό τμήμα του κράνους παρατηρούνται αυξημένες τιμές των κύριων τάσεων, σε σχέση με το πίσω μέρος. Οι τιμές της κύριας τάσης στο μπροστινό και άνω τμήμα του κράνους κυμαίνονται από 311.3 MPa έως 944.5 MPa.

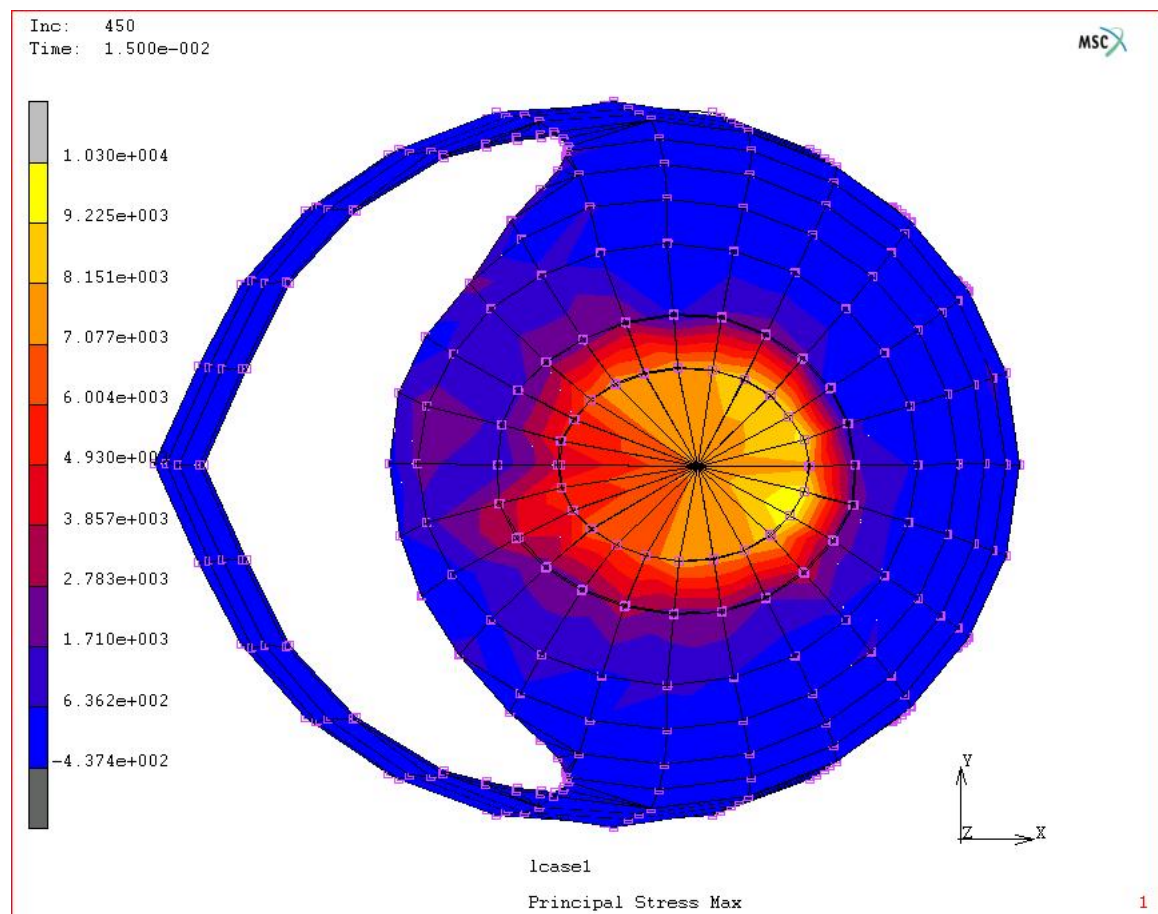


Σχήμα 6.37: Κόρια τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.



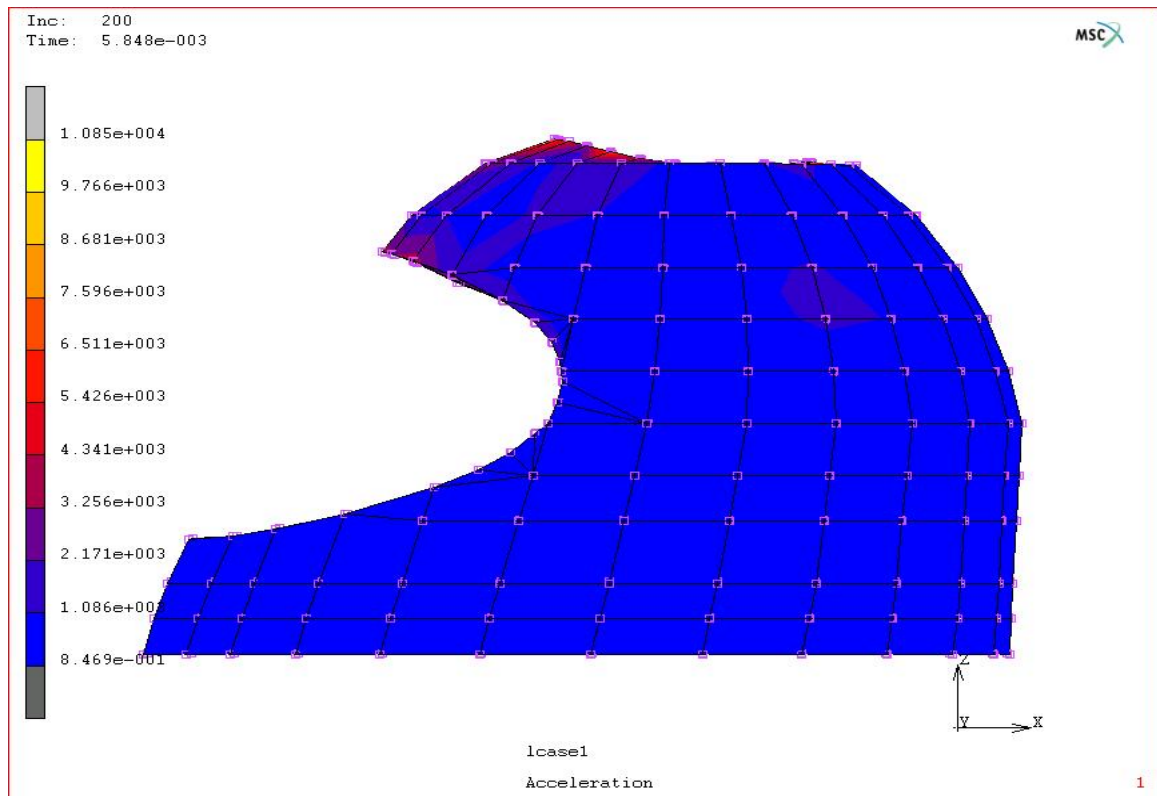
Σχήμα 6.38: Κόρια τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

Οι μέγιστες κύριες τάσεις στο τέλος του φαινομένου κυμαίνονται από 9225 MPa έως 10300 MPa, δηλαδή εμφανίζεται μια ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Οι τιμές των κύριων τάσεων στην περιοχή όπου υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση κυμαίνονται από 2783 MPa έως και την μέγιστη τιμή, με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στην πίσω πλευρά του κράνους.

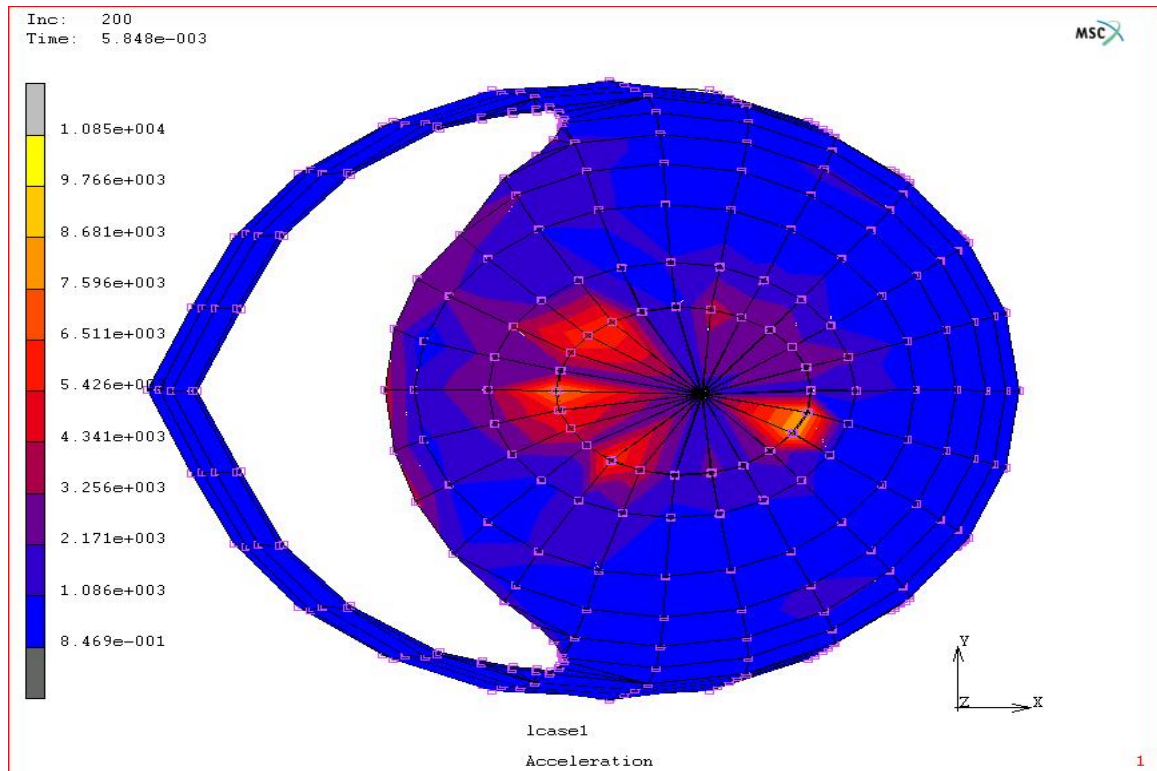


Σχήμα 6.39: Κύρια τάση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

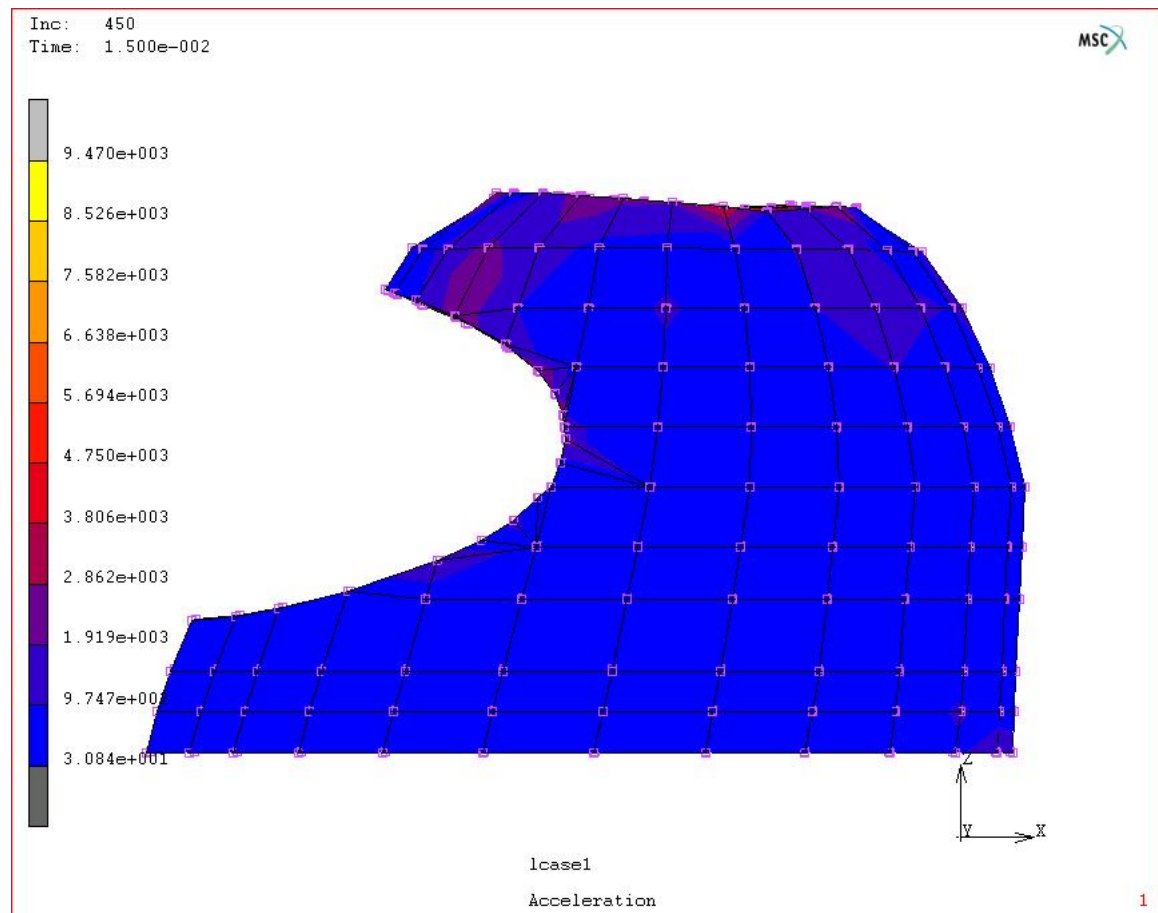
Η μέγιστη επιτάχυνση στα 0.005848 sec όπως φαίνεται στα σχήματα 6.40 και 6.41 φτάνει τα 10850 m/sec². Στο υπόλοιπο τμήμα του κράνους η επιτάχυνση είναι από 0.8469 m/sec² έως 1086 m/sec².



Σχήμα 6.40: Επιτάχυνση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

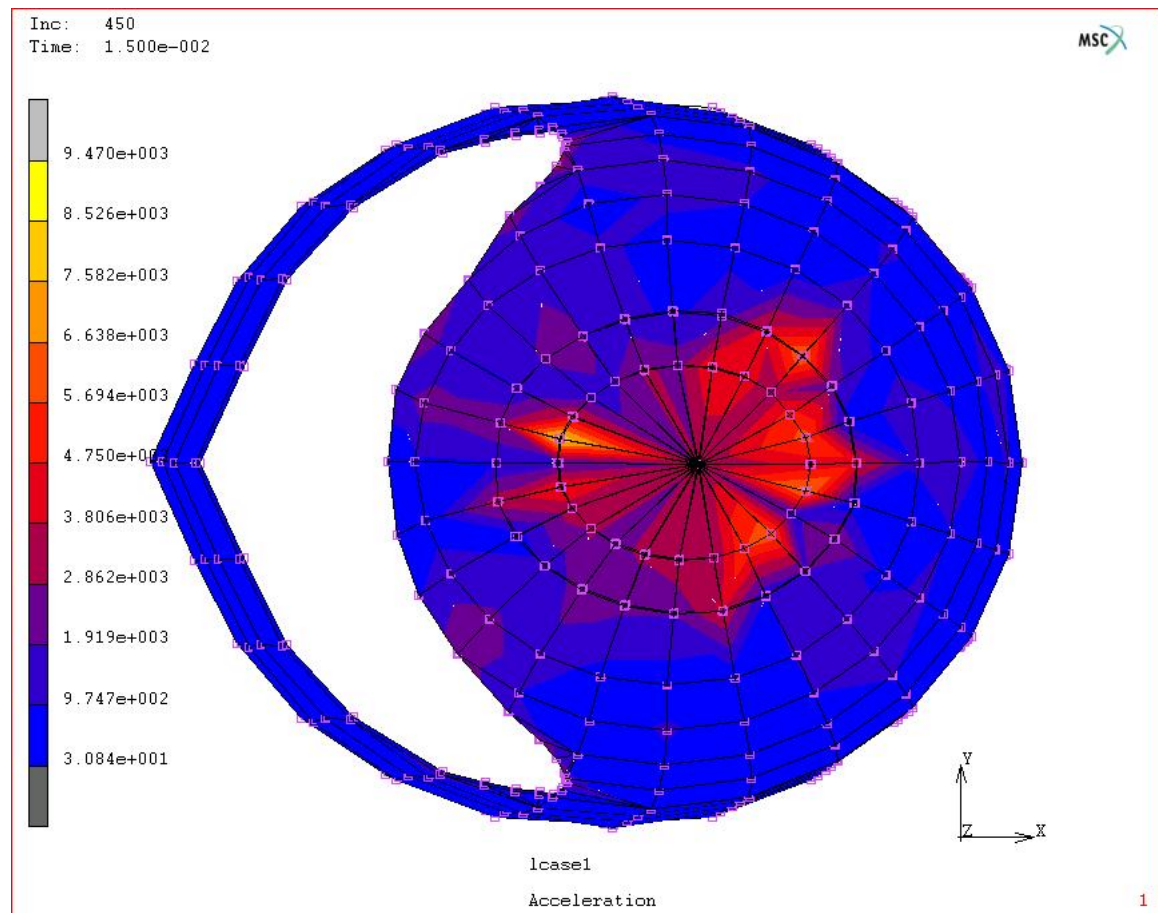


Σχήμα 6.41: Επιτάχυνση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.



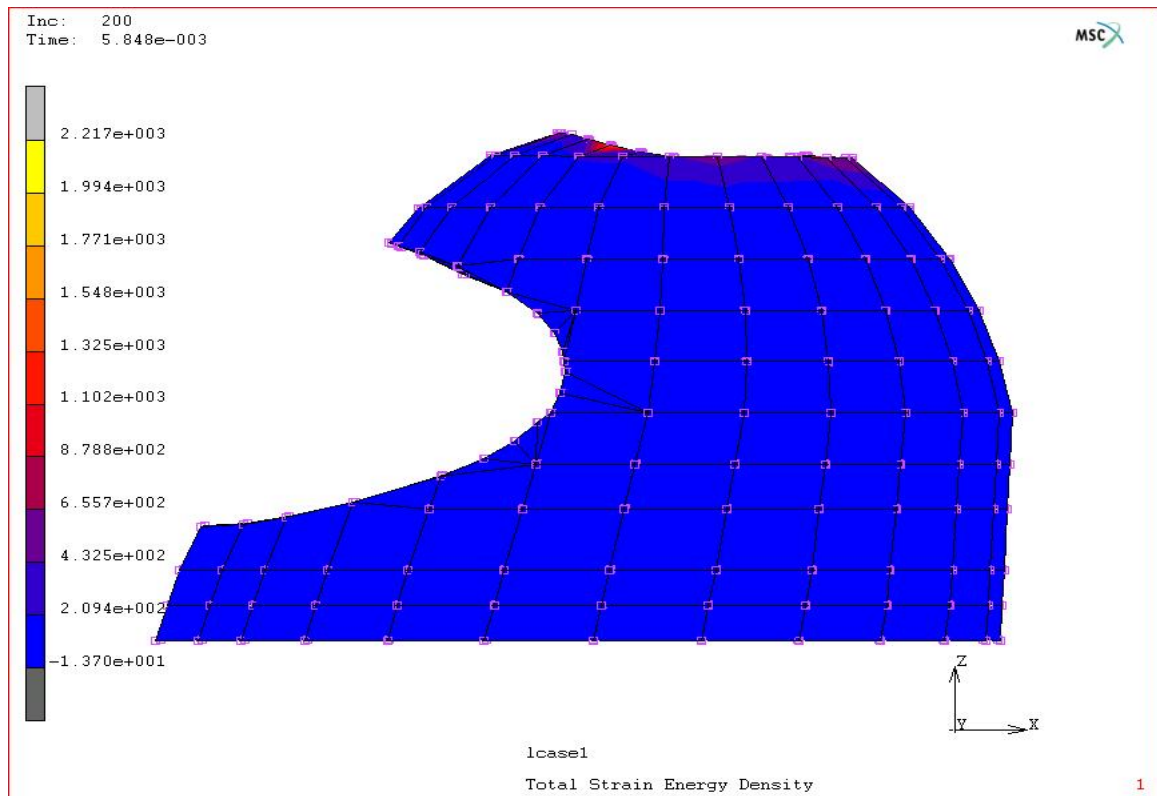
Σχήμα 6.42: Επιτάχυνση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

Στα σχήματα 6.42 και 6.43 φαίνονται οι επιταχύνσεις στα 15 msec. Η κατανομή της επιτάχυνσης έχει ομαλοποιηθεί, δίνοντας μικρότερες μέγιστες τιμές από ότι στα 0.005848 sec. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης σε αυτή τη χρονική στιγμή είναι 9470 m/sec² ενώ η ελάχιστη 3084 m/sec².

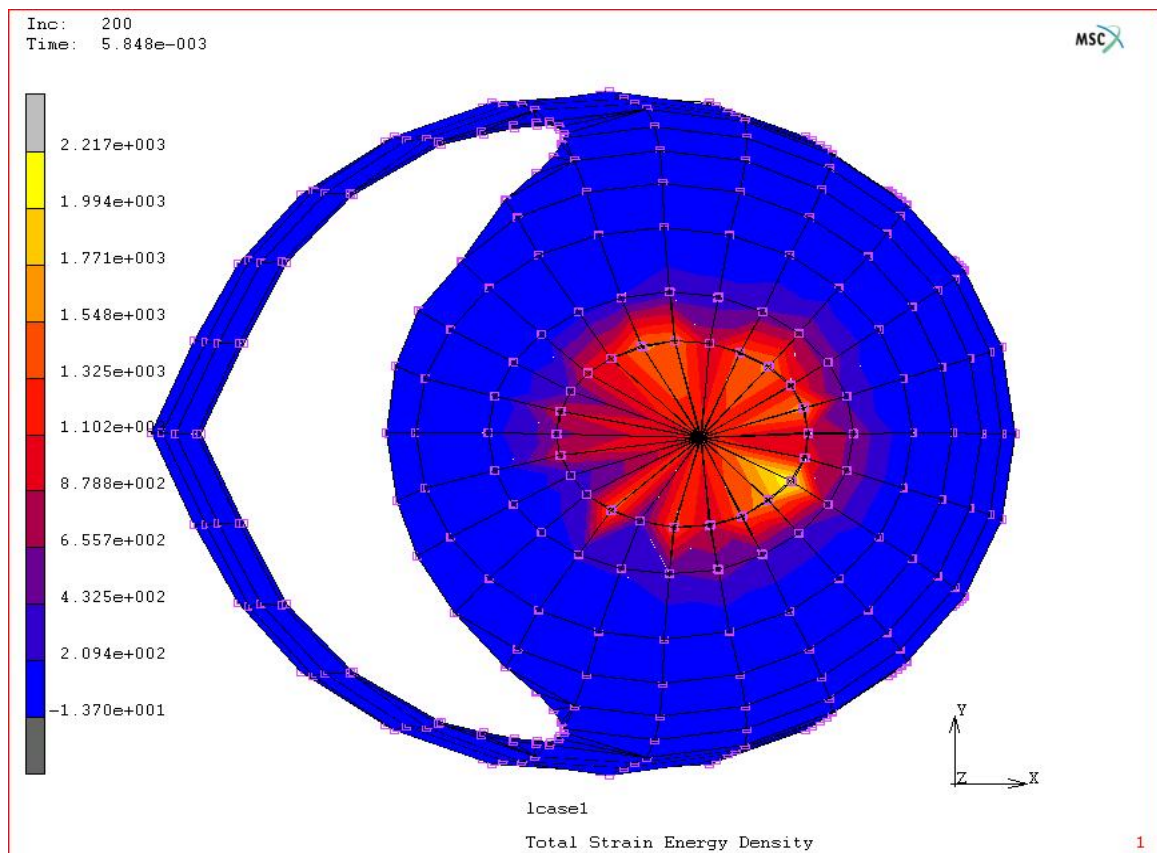


Σχήμα 6.43: Επιτάχυνση στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

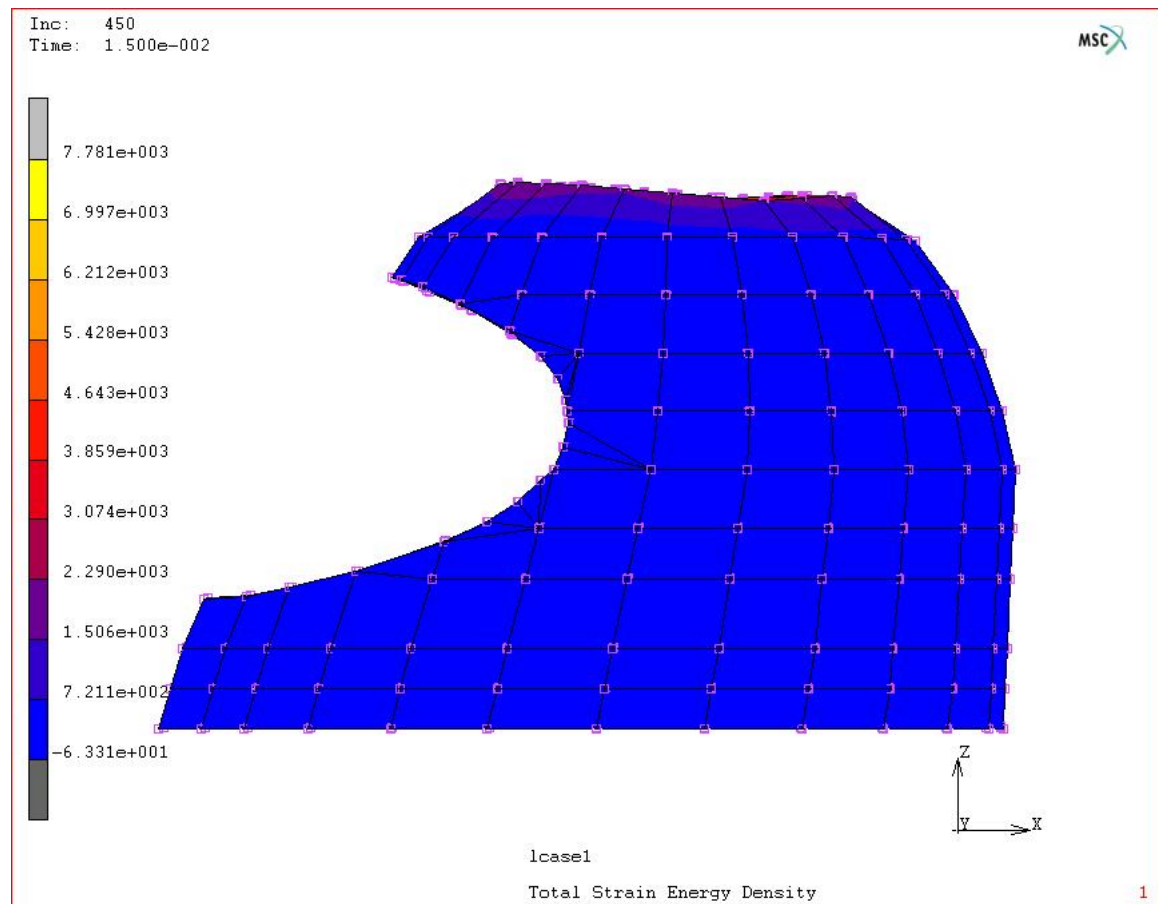
Η ενέργεια παραμόρφωσης τη χρονική στιγμή 0.005848 sec για τη στρώση από συνεχές ίνες γυαλιού έχει μέγιστη τιμή 2217. Το άνω τμήμα του υλικού που παραμορφώνεται περισσότερο απορροφάει ενέργεια από 432.5 έως 1771, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα του υλικού η ενέργεια παραμόρφωσης κυμαίνεται από -13.7 έως 209.4



Σχήμα 6.44: Ενέργεια παραμόρφωσης στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

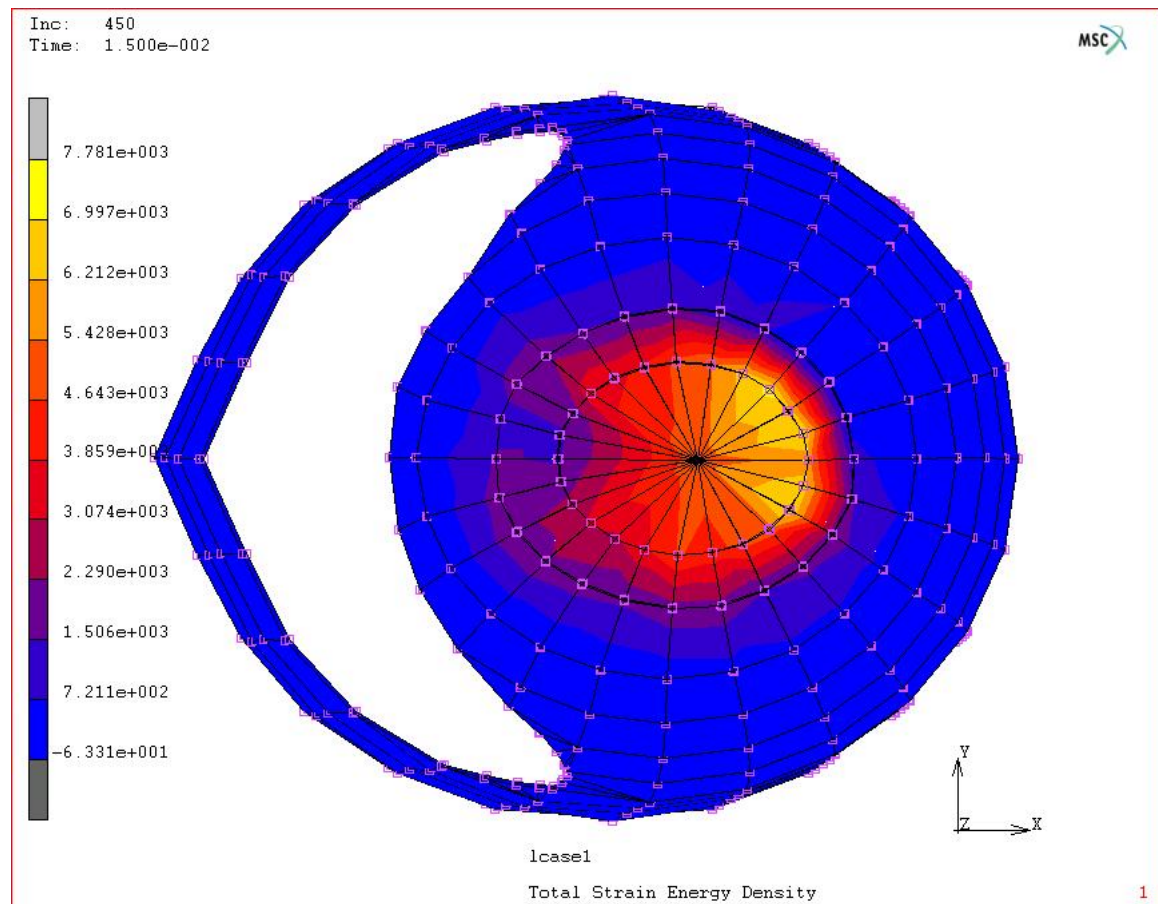


Σχήμα 6.45: Ενέργεια παραμόρφωσης στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.



Σχήμα 6.46: Ενέργεια παραμόρφωσης στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

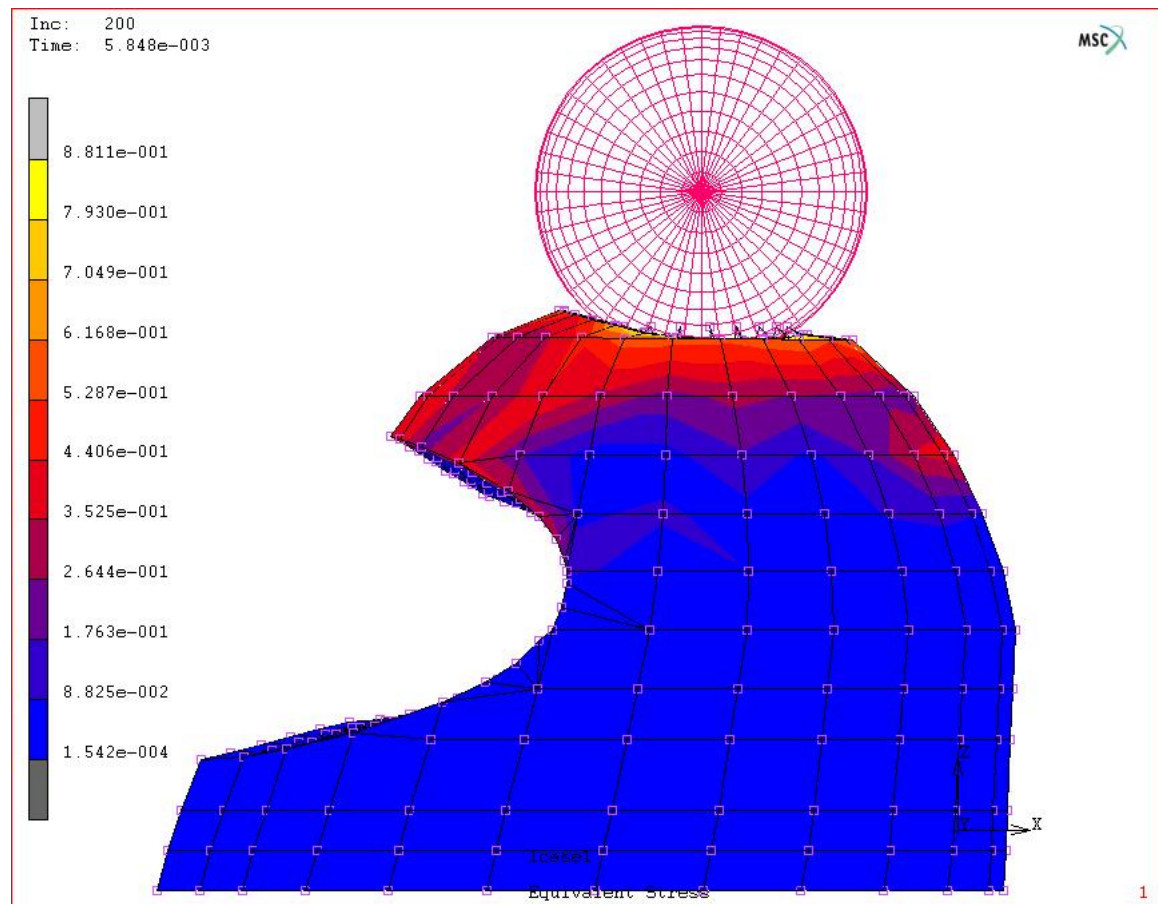
Στα 15 msec η ενέργεια παραμόρφωσης έχει σχεδόν τριπλασιαστεί σε όλα τα σημεία του υλικού. Στο τμήμα του υλικού πίσω από το σημείο που γίνεται η σύγκρουση παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές της, οι οποίες είναι από 6997 έως 7781. Στο μεγαλύτερο τμήμα του υλικού η τιμή για την ενέργεια παραμόρφωσης κυμαίνεται από μηδέν έως 721.1



Σχήμα 6.47: Ενέργεια παραμόρφωσης στο εσωτερικό υλικό του κελύφους τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

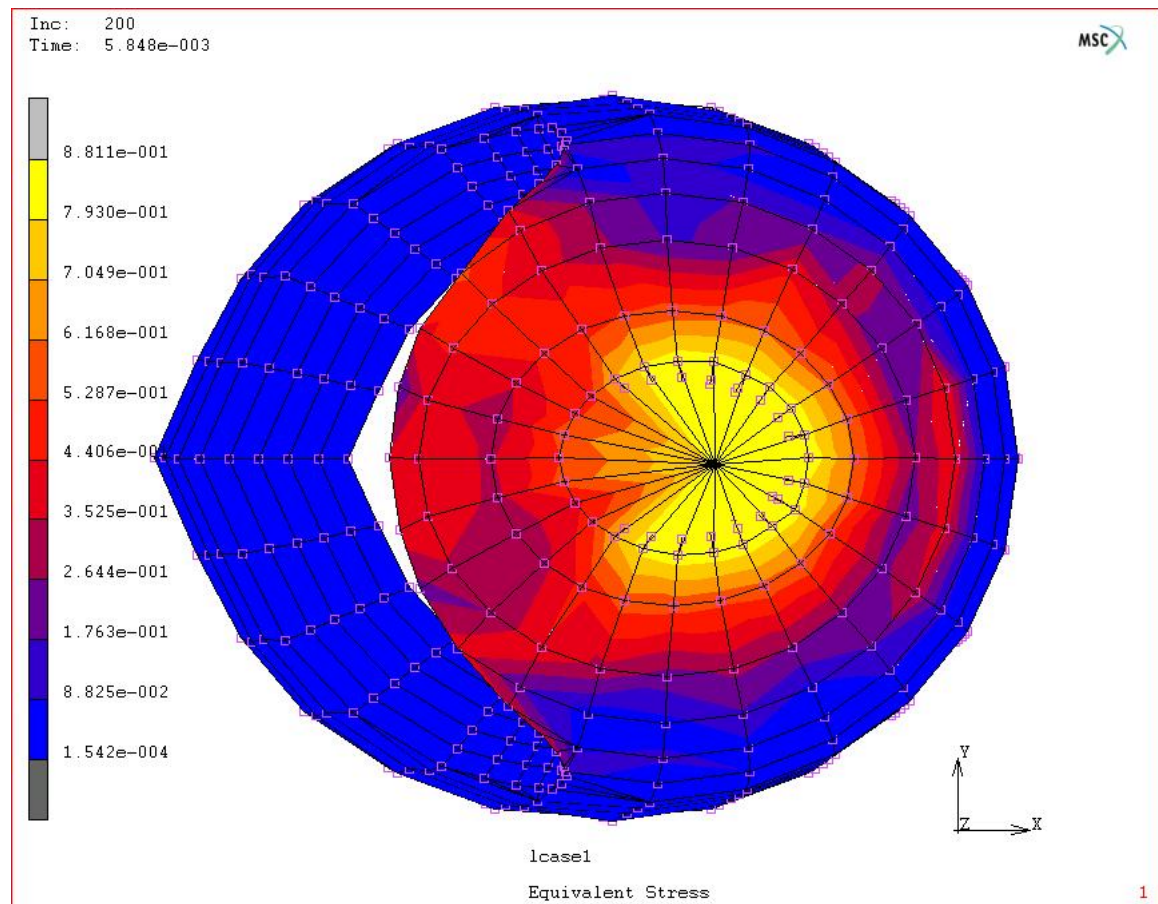
6.2.3 Τα αποτελέσματα στο εσωτερικό αφρώδες υλικό (πολυστυρένιο)

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο έτσι και εδώ θα εξεταστούν οι ισοδύναμες τάσεις, οι κύριες μέγιστες τάσεις, η επιτάχυνση καθώς και η ενέργεια παραμόρφωσης για το εσωτερικό αφρώδες υλικό το οποίο είναι από διογκωμένο πολυστυρένιο. Η κύρια χρησιμότητα του είναι να απορροφήσει το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας σύγκρουσης.



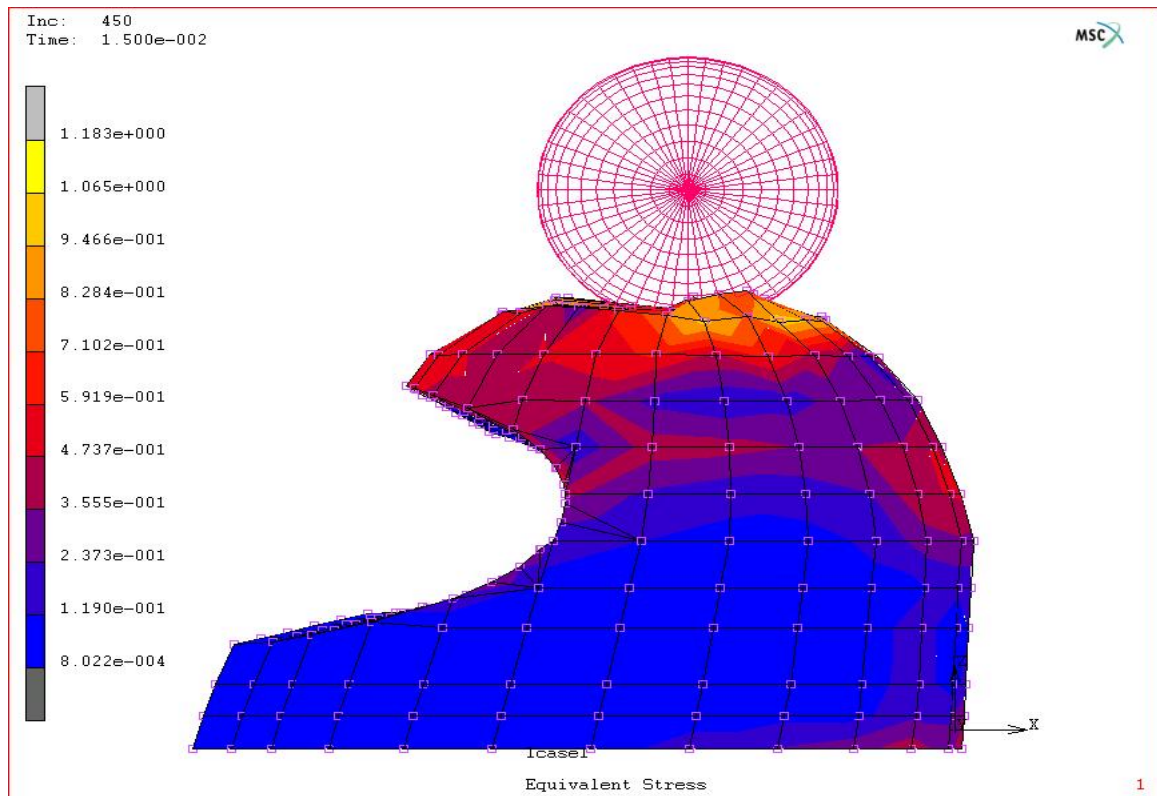
Σχήμα 6.48: Ισοδύναμη τάση στο πολυστερενίου τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.- Πλάγια όψη.

Στα σχήματα 6.48 και 6.49 φαίνονται οι ισοδύναμες τάσεις του πολυστερενίου για τη χρονική στιγμή 0.005848 sec. Οι μέγιστες τιμές της είναι από 0.793 MPa έως 0.811 MPa τιμές που είναι πάρα πολύ μικρές σε σχέση με αυτές που καταγράφηκαν στο εξωτερικό κέλυφος. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές της ισοδύναμης τάσης έχουν κατανεμηθεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Οι τιμές της τάσης στο υπόλοιπο τμήμα του πολυστερενίου είναι σχεδόν μηδενικές, κυμαίνονται από 0.0001542 MPa έως 0.08825 MPa.

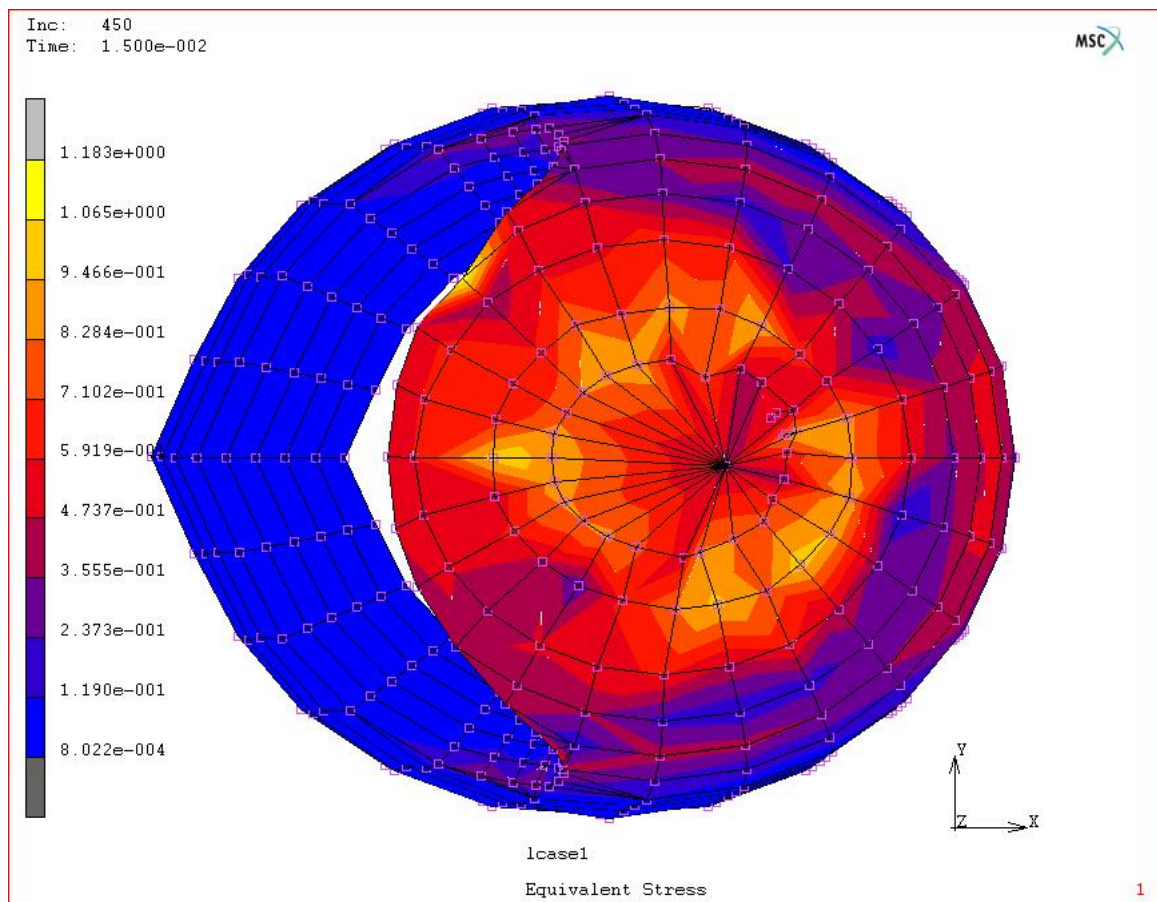


Σχήμα 6.49: Ισοδύναμη τάση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.- Κάτοψη.

Στα 15 msec η ισοδύναμη τάση στο πολυστυρένιο έχει κατανεμηθεί σε ακόμη μεγαλύτερη επιφάνεια φτάνοντας στο πίσω μέρος έως και το χαμηλότερο σημείο του υλικού. Ωστόσο οι μέγιστες τιμές της δεν έχουν διαφοροποιηθεί αρκετά από τα 0.005848 sec. παραμένοντας στα ίδια επίπεδα. Οι μέγιστες τιμές στα 15 msec κυμαίνονται από 1.065 MPa έως 1.183 MPa.

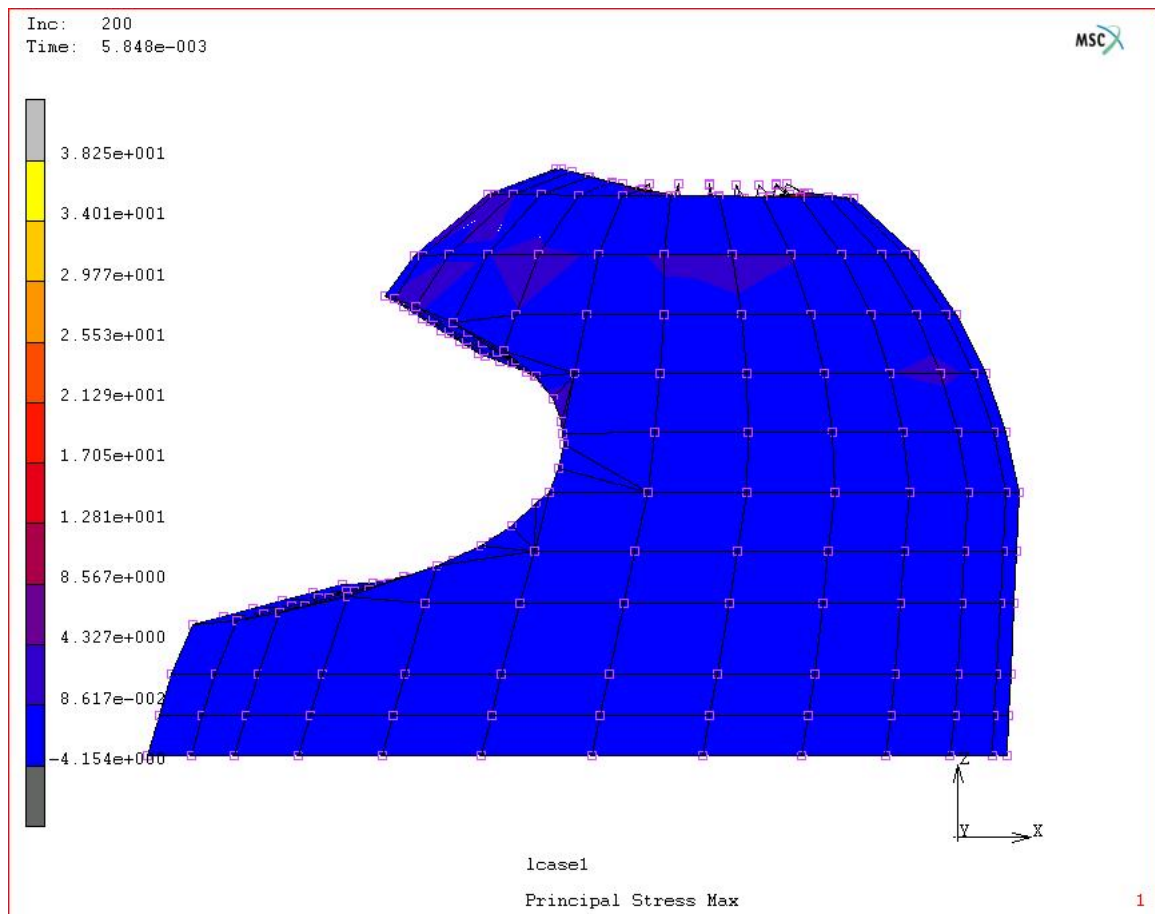


Σχήμα 6.50: Ισοδύναμη τάση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.

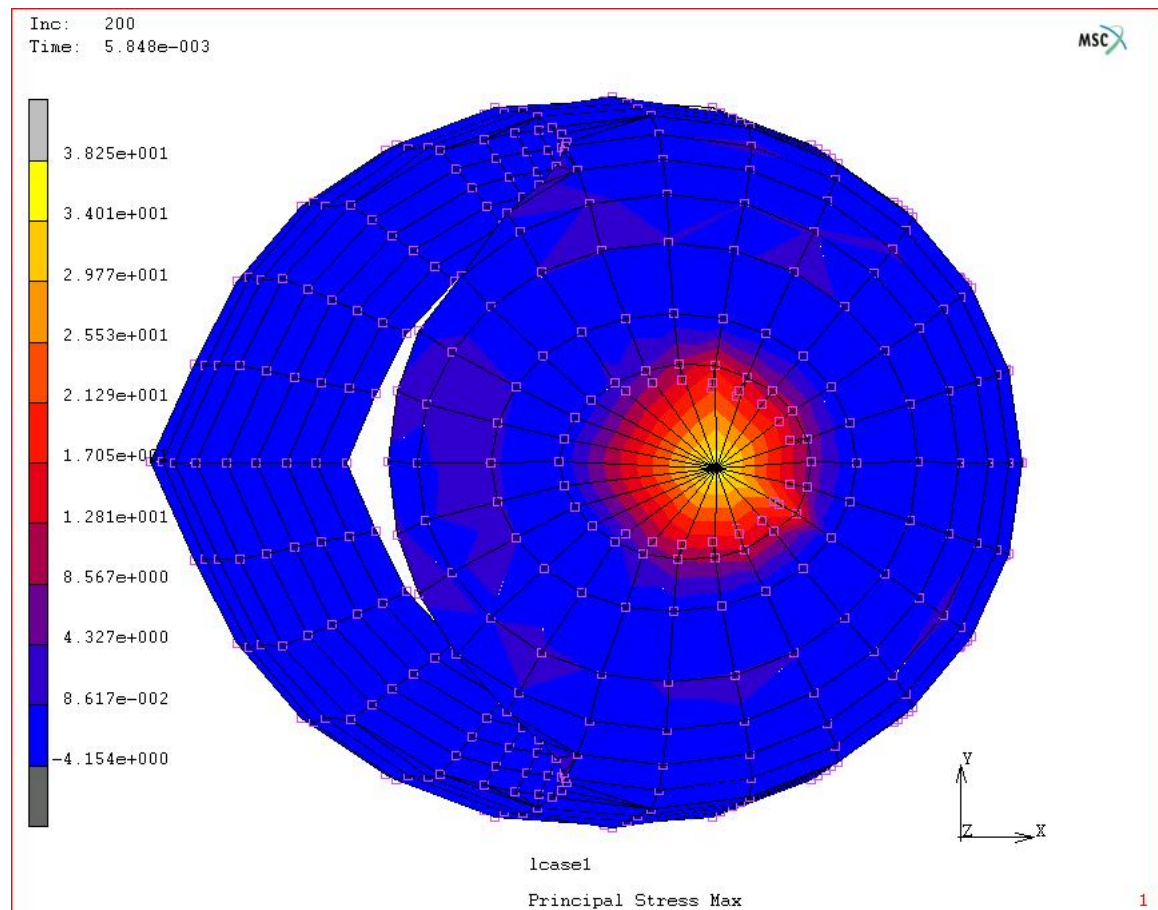


Σχήμα 6.51: Ισοδύναμη τάση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτοψη.

Οι κύριες τάσεις του πολυστυρενίου εμφανίζουν αυξημένες τιμές μόνο κοντά στον άξονα που γίνεται η σύγκρουση, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα του υλικού οι τιμές της τάσης είναι μηδενικές. Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.52 και 6.53 οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης είναι από 34.01 MPa έως 38.25 MPa για τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.

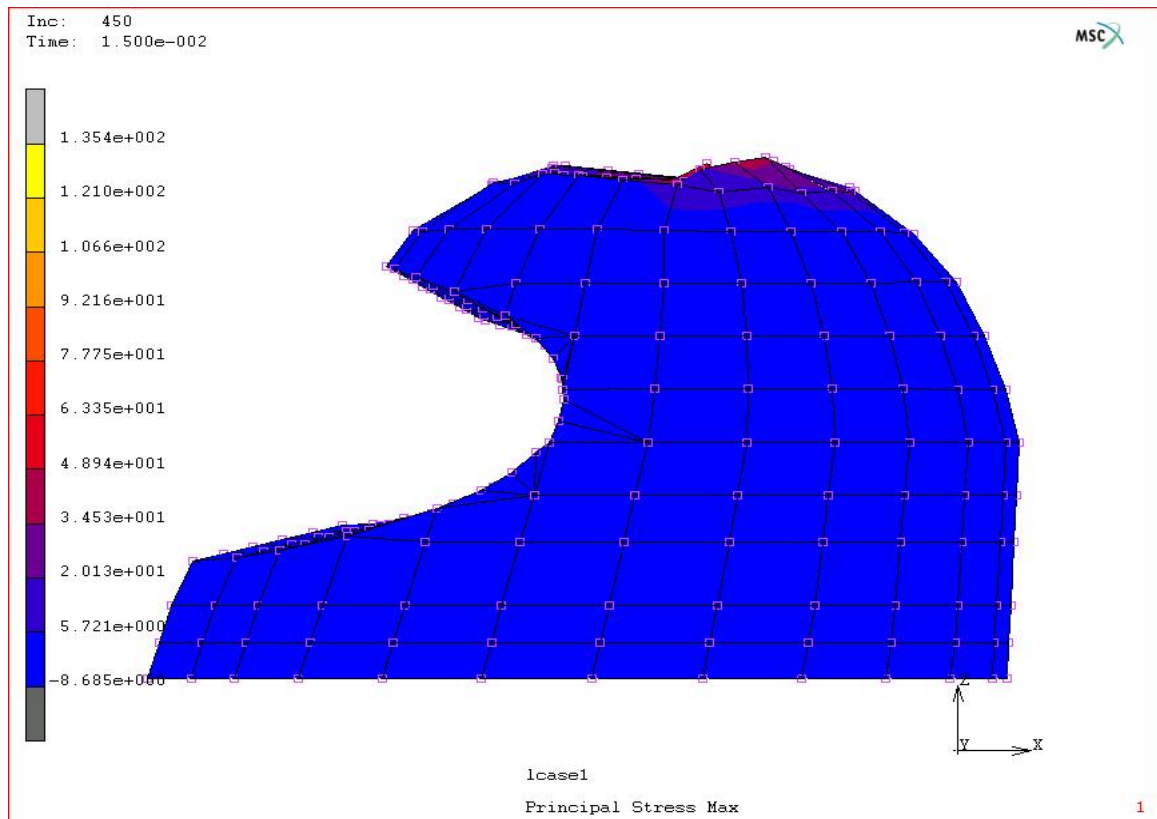


Σχήμα 6.52: Μέγιστη κύρια τάση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.- Πλάγια όψη.

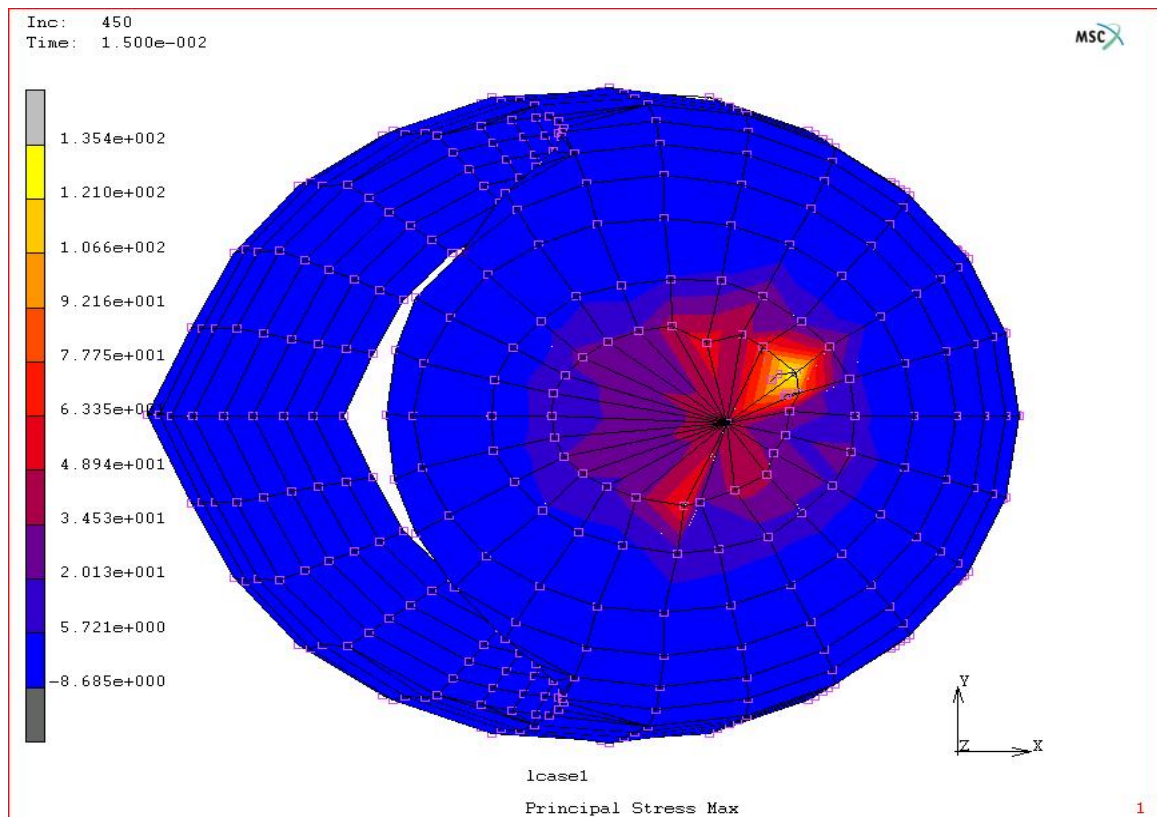


Σχήμα 6.53: Μέγιστη κύρια τάση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.- Κάτοψη.

Με την πάροδο του χρόνου και φτάνοντας στα 0.015 sec παρατηρείται μια αύξηση της τάσης στο πίσω μέρος του άνω τμήματος του πολυστυρενίου έχοντας τιμές από 121 MPa έως 135.4 MPa. Τα σημεία όμως που στα 0.005848 sec. είχαν τις μέγιστες τιμές της τάσης, έχουν και στο τέλος του φαινομένου περίπου τις ίδιες τιμές. Συγκεκριμένα σε αυτά τα σημεία η τάση είναι από 34.53 MPa έως 48.94 MPa.

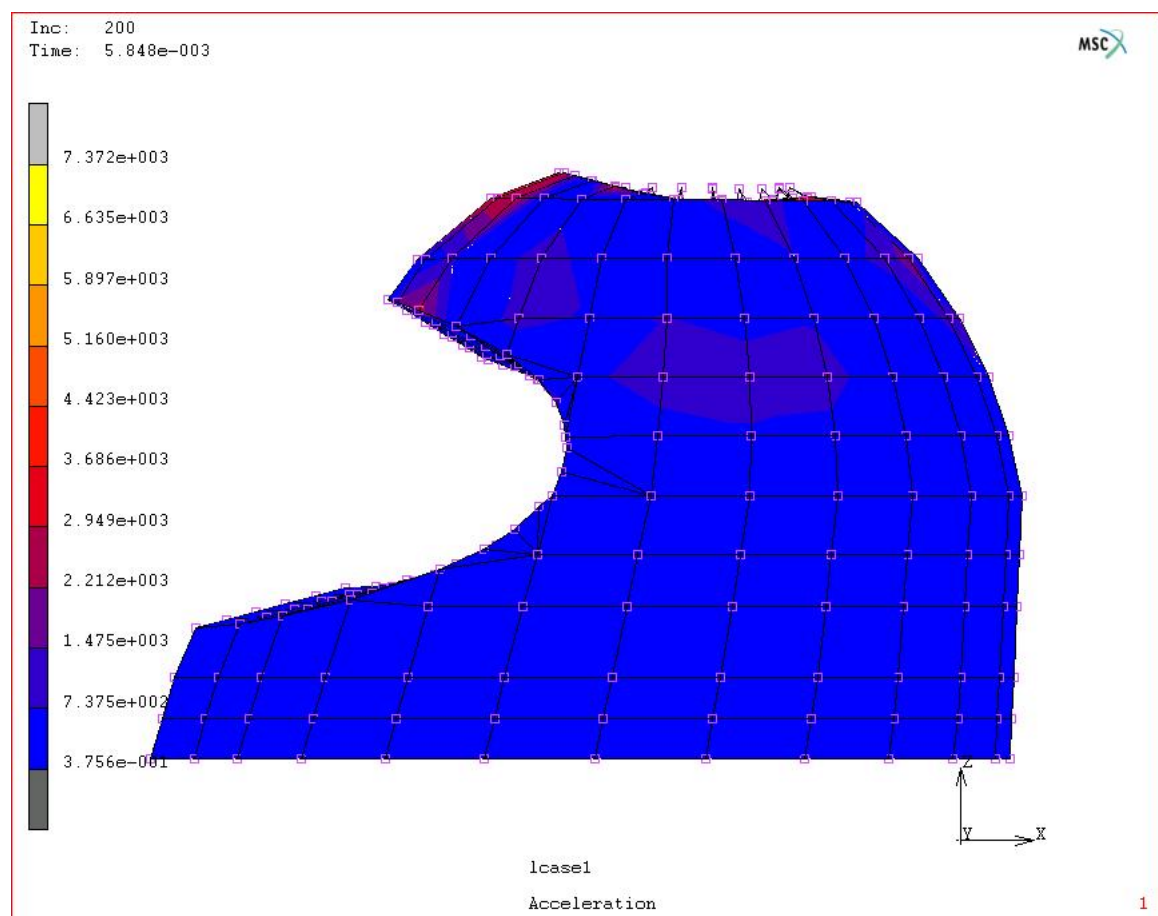


Σχήμα 6.54: Μέγιστη κύρια τάση στο πολυστρένιο τη χρονική στιγμή 0.015 sec.- Πλάγια όψη.

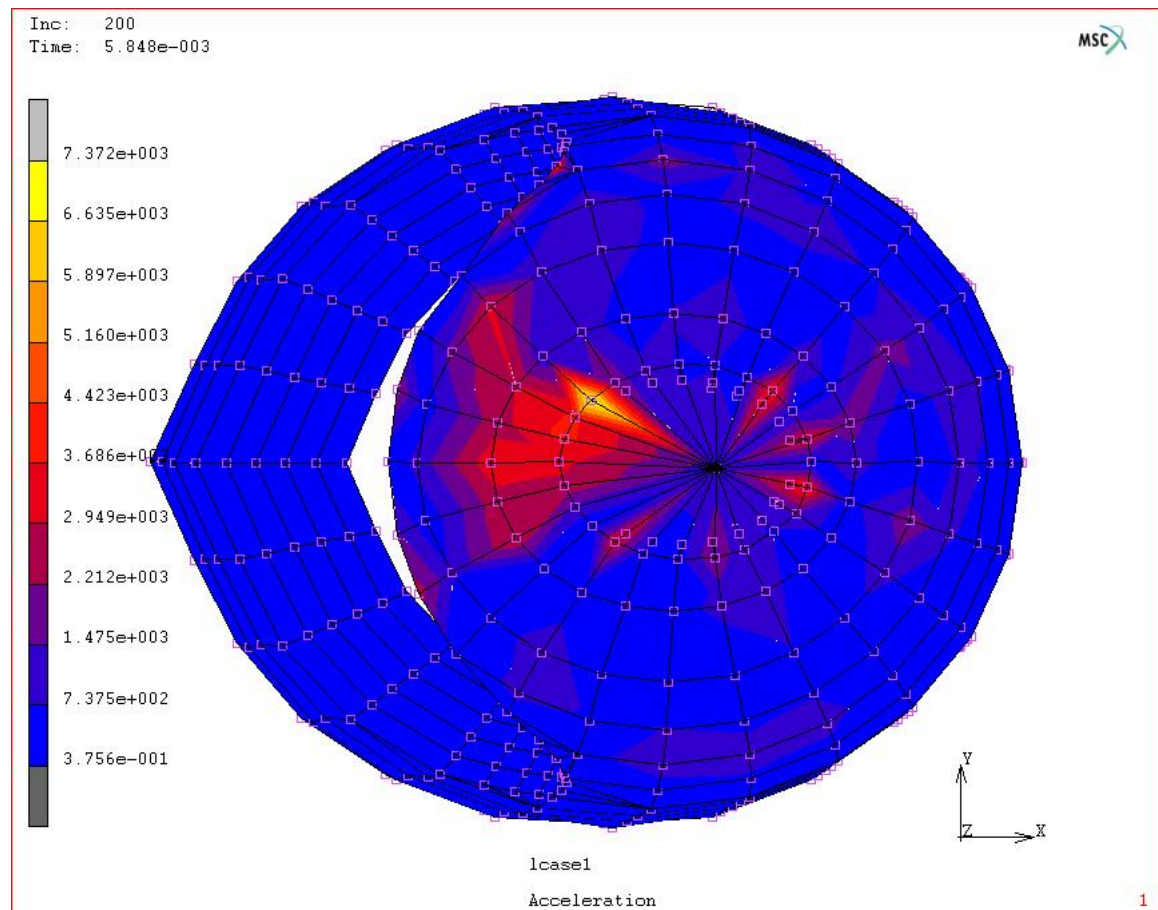


Σχήμα 6.55: Μέγιστη κύρια τάση στο πολυστρένιο τη χρονική στιγμή 0.015 sec.- Κάτοψη.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι επιταχύνσεις στο πολυστυρένιο για τις δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Όπως ήταν αναμενόμενο το πολυστυρένιο δέχεται μικρότερες επιταχύνσεις από ότι η στρώση από συνεχές ίνες γυαλιού, αν και οι διαφορές δεν είναι πολύ μεγάλες. Τα αποτελέσματα καταγράφονται κυρίως για να συγκριθούν με τις τιμές της επιτάχυνσης που δέχεται το κεφάλι.

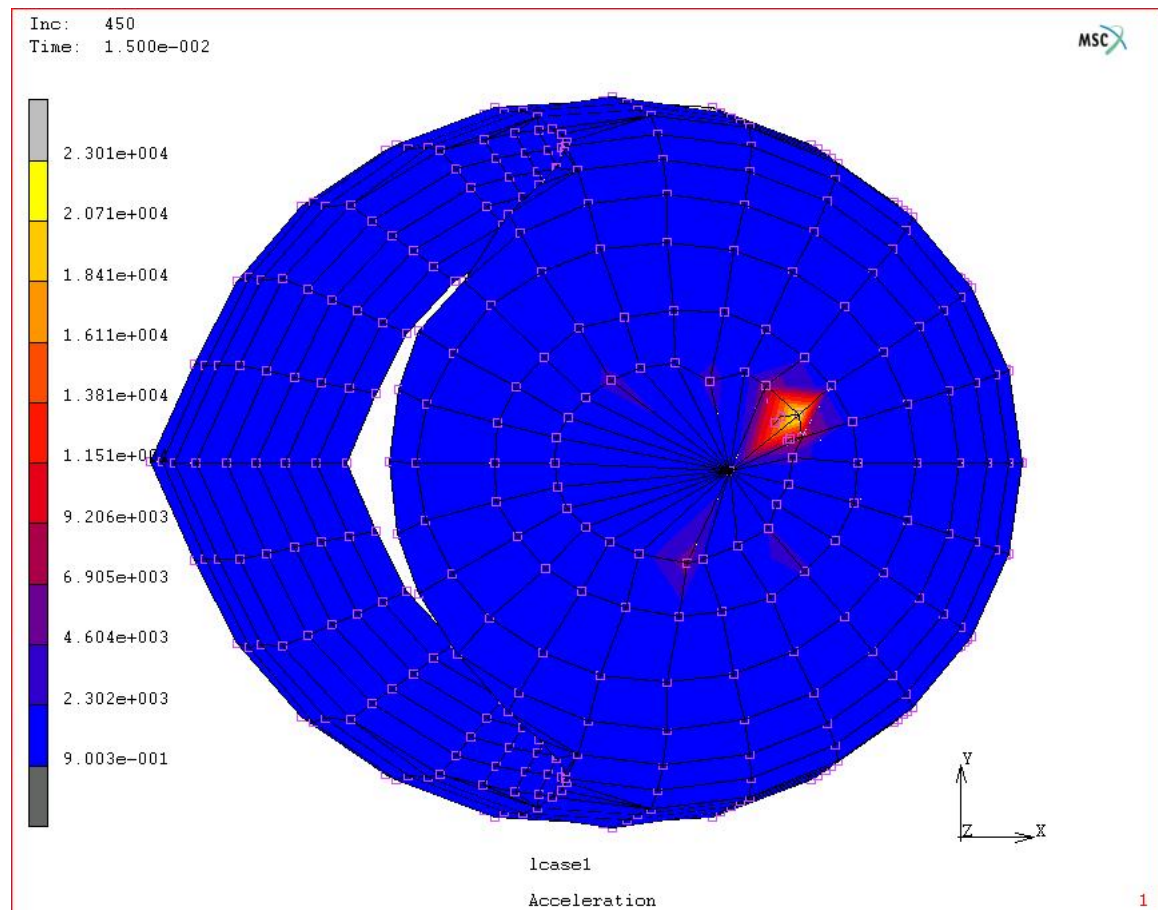


Σχήμα 6.56: Επιτάχυνση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.



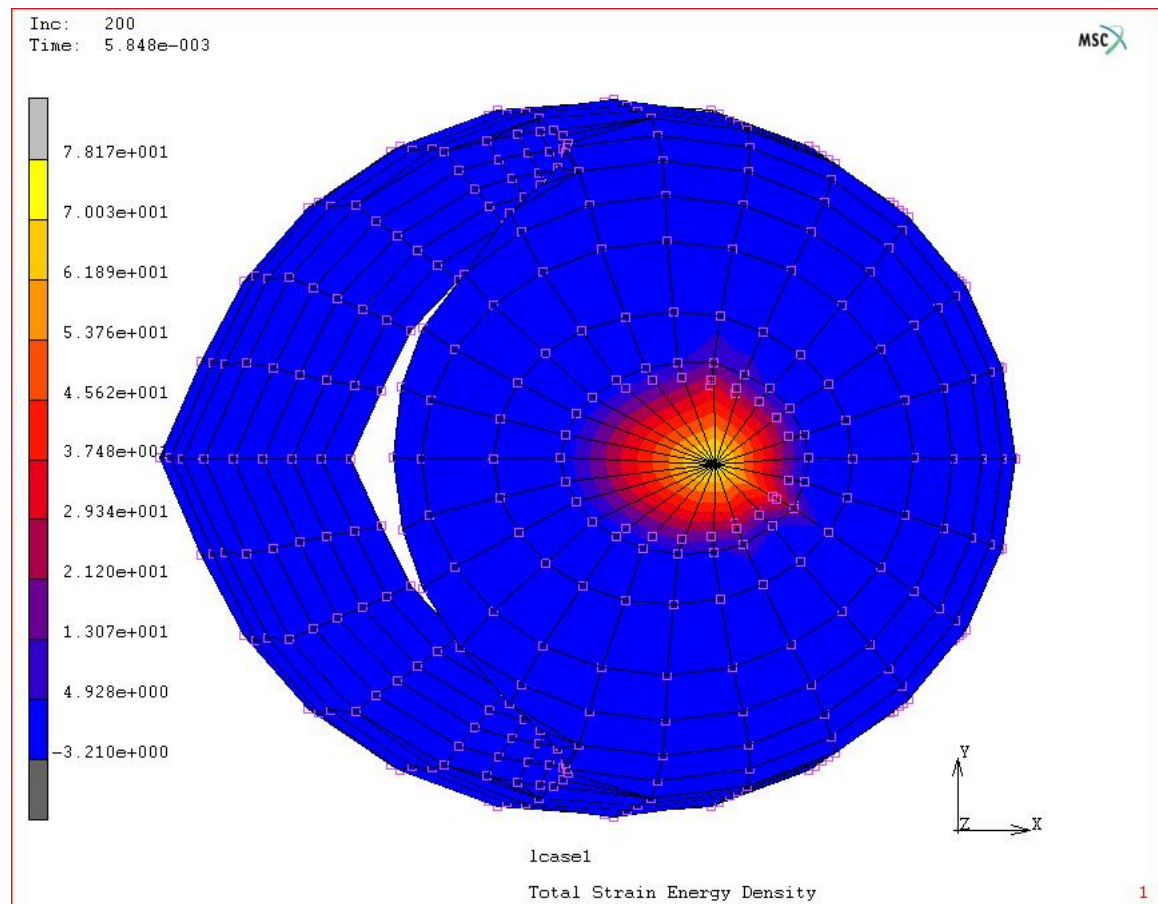
Σχήμα 6.57: Επιτάχυνση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Στα σχήματα 6.56 και 6.57 φαίνεται η επιτάχυνση κατά τη χρονική στιγμή 0.005848 sec. Εκείνη τη χρονική στιγμή η επιτάχυνση παρουσιάζει μέγιστες τιμές από 6635 m/sec² έως 7372 m/sec². Στο μπροστινό τμήμα του υλικού οι επιταχύνσεις είναι μεγαλύτερες από ότι στο πίσω τμήμα, ενώ και στο μέσο περίπου του υλικού παρουσιάζονται μεγαλύτερες επιταχύνσεις με τιμές από 737.5 m/sec² έως 1475 m/sec². Το υπόλοιπο τμήμα του πολυστυρενίου έχει από μηδενική επιτάχυνση έως 737.5 m/sec².



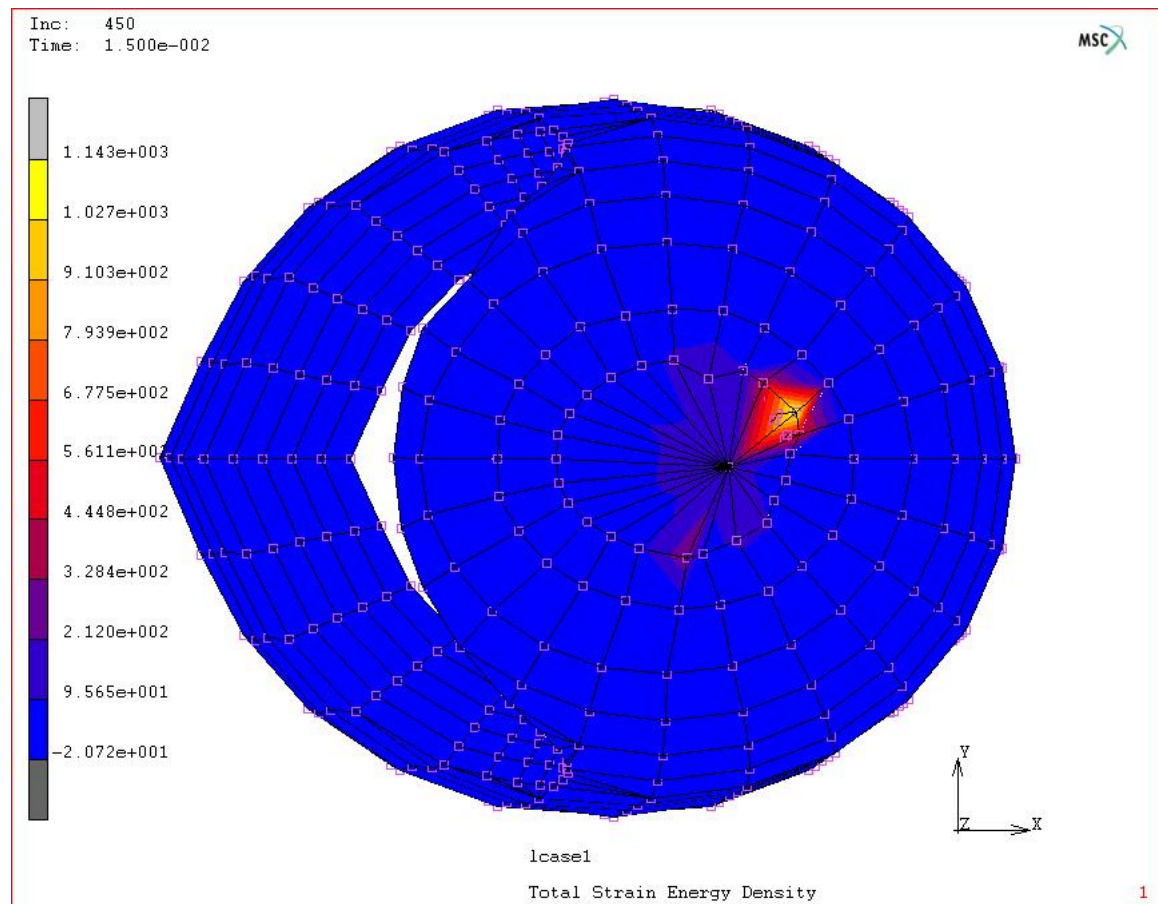
Σχήμα 6.58: Επιτάχυνση στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.015sec.-Κάτοψη.

Στο σχήμα 6.58 φαίνεται ότι στα 15 msec η επιτάχυνση στο μεγαλύτερο τμήμα του υλικού είναι ομαλοποιημένη έχοντας τιμές έως 2302 m/sec^2 ενώ σημειακά κοντά στο σημείο σύγκρουσης παρατηρείται αύξηση της επιτάχυνσης, η οποία φτάνει τα 23010 m/sec^2 .



Σχήμα 6.59: Ενέργεια παραμόρφωσης στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.005848sec.-Κάτοψη.

Στο σχήμα 6.59 φαίνεται η ενέργεια παραμόρφωσης του πολυστυρενίου, η οποία εκτός από μια μικρή περιοχή γύρω από το σημείο κρούσης έχει μηδενική τιμή. Οι μέγιστες τιμές της ενέργειας παραμόρφωσης στα 0.005848 sec είναι από 70.03 έως 78.17. Στα 0.015 sec η ενέργεια παραμόρφωσης του πολυστυρενίου έχει αυξηθεί αρκετά φτάνοντας τα 1027. Η διαφορά αυτή οφείλεται ότι στα 0.005848 sec μόλις είχε αρχίσει η παραμόρφωση του πολυστυρενίου από τη σύγκρουση.

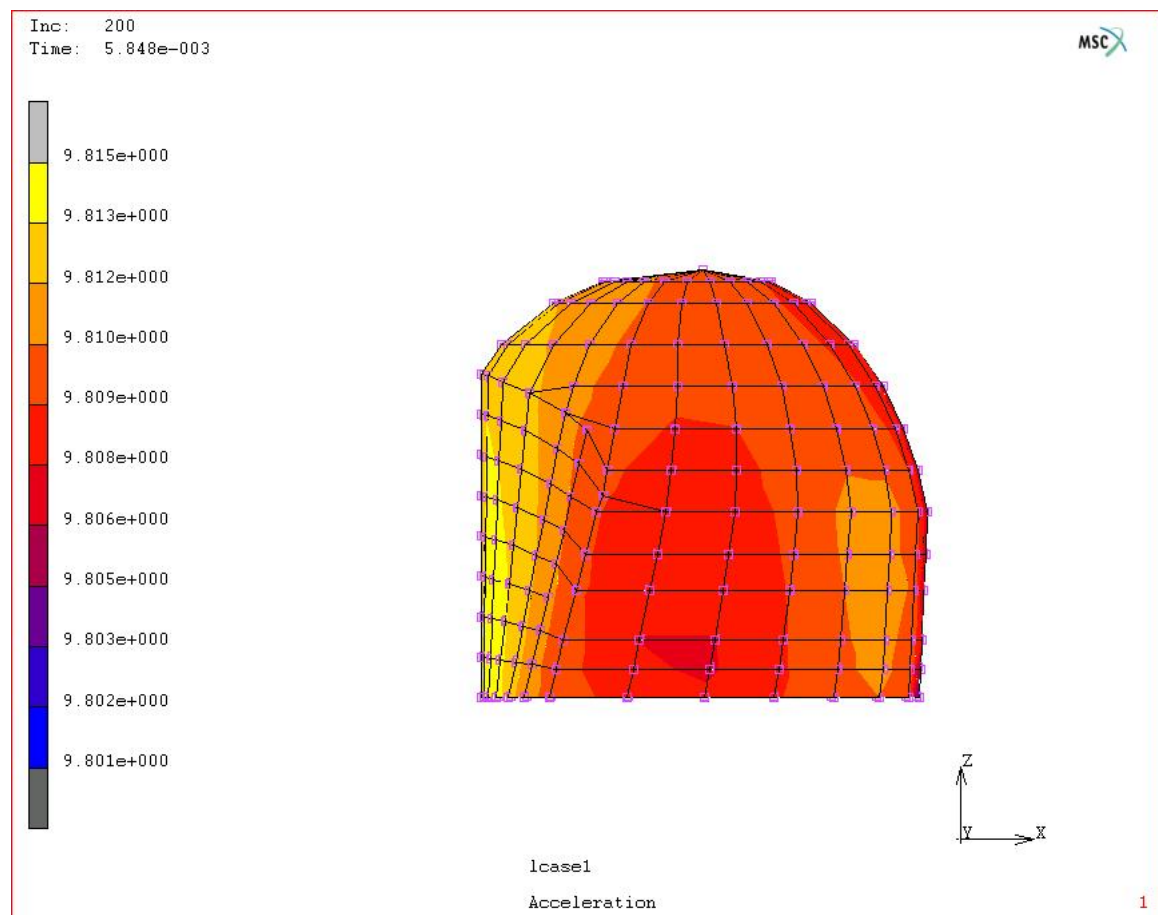


Σχήμα 6.60: Ενέργεια παραμόρφωσης στο πολυστυρένιο τη χρονική στιγμή 0.015 sec.- Κάτοψη.

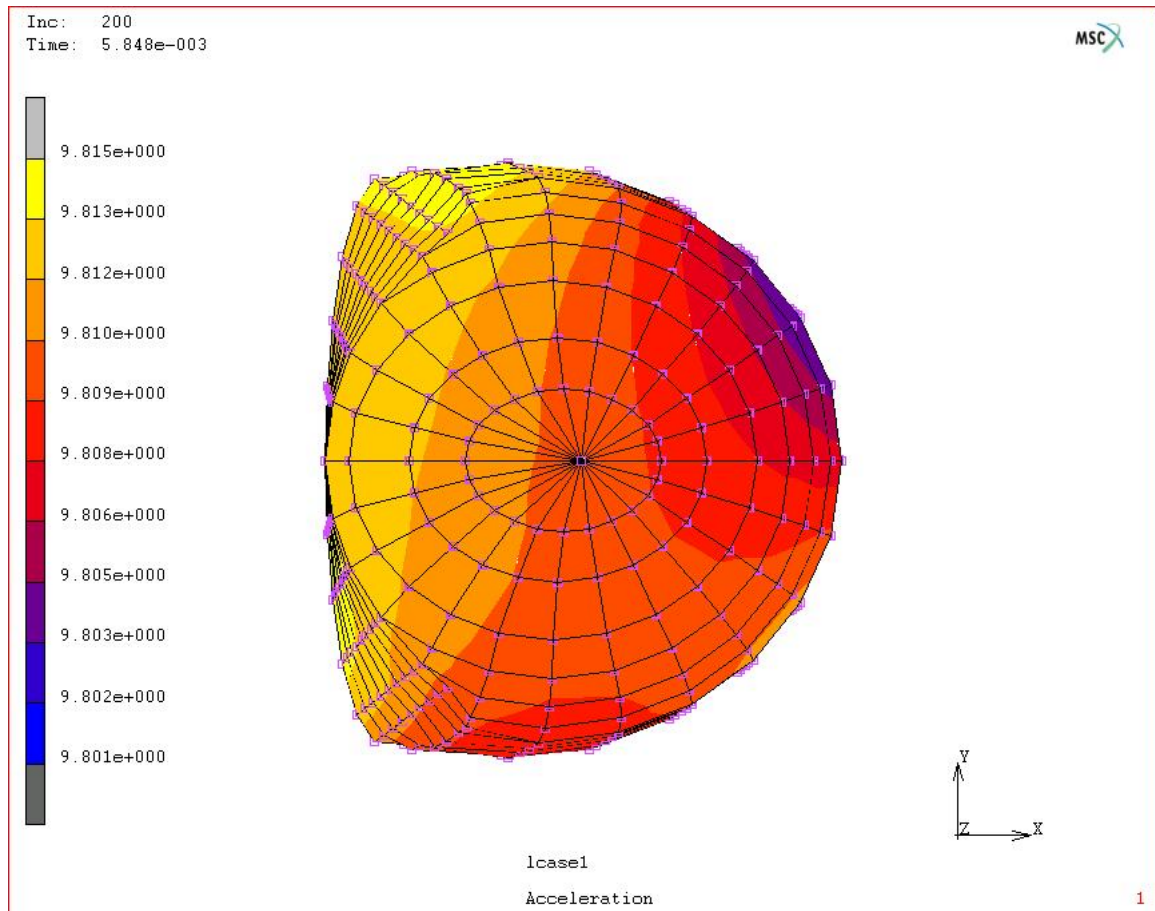
Συγκρίνοντας τις τιμές της ενέργειας παραμόρφωσης για τα διαφορετικά υλικά στο τέλος του φαινομένου παρατηρείται ότι οι τιμές στο πολυστυρένιο είναι μικρότερες από ότι στις δυο στρώσεις υλικών του εξωτερικού κελύφους. Θεωρητικά το πολυστυρένιο έπρεπε να απορροφήσει το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας σύγκρουσης. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια σύγκρουσης δεν ήταν τόσο μεγάλη έτσι ώστε το πολυστυρένιο να απορροφήσει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα της ενέργειας .

6.2.4 Τα αποτελέσματα στο κεφάλι

Σε αντίθεση με τα υλικά που απαρτίζουν το κράνος, στο κεφάλι θα αναλυθεί μόνο η επιτάχυνση που δέχεται. Ο λόγος είναι ότι το κεφάλι, σύμφωνα με τις διεθνείς συνθήκες, έχει προσομοιαστεί σαν αλουμινένιο απαραμόρφωτο υλικό, επομένως τα συμπεράσματα από τις τάσεις και από την ενέργεια παραμόρφωσης θα οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα.

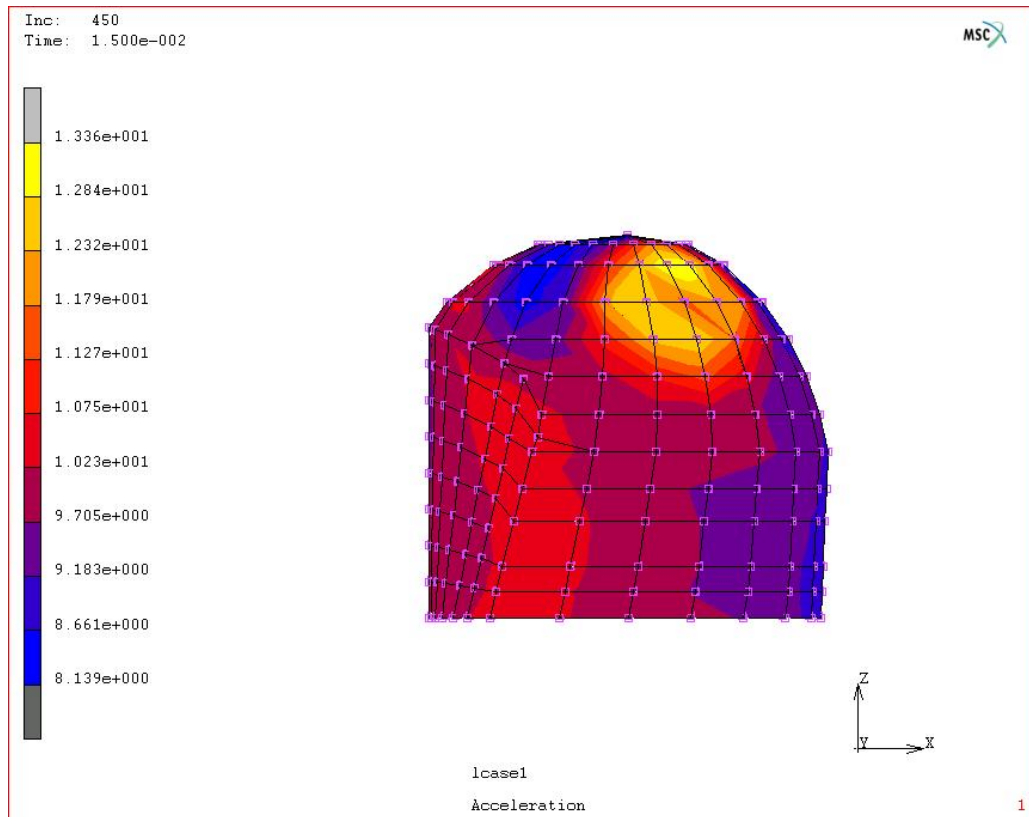


Σχήμα 6.61: Επιτάχυνση στο κεφάλι τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Πλάγια όψη.

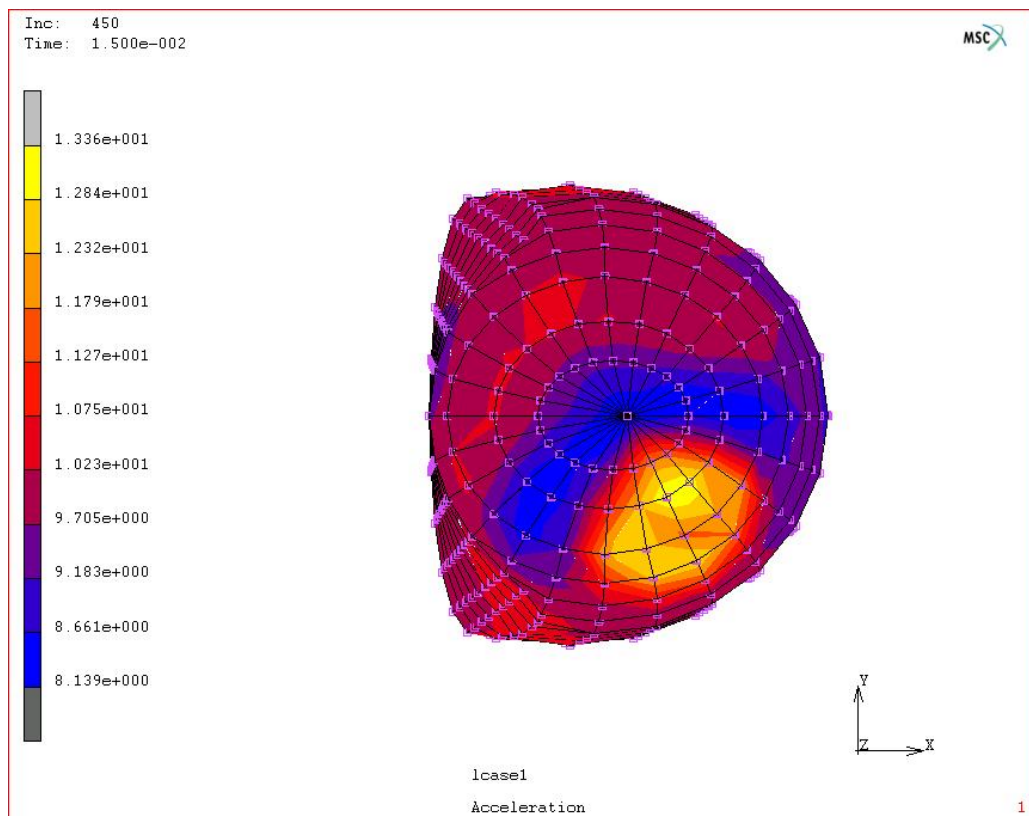


Σχήμα 6.62: Επιτάχυνση στο κεφάλι τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Κάτοψη.

Στα σχήματα 6.61 και 6.62 φαίνονται οι επιταχύνσεις στο κεφάλι στα 0.005848 sec. Η ελάχιστη επιτάχυνση τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι 9.801 m/sec^2 ενώ η μέγιστη 9.815 m/sec^2 , δηλαδή οι διαφορές αυτές είναι πάρα πολύ μικρές και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.



Σχήμα 6.63: Επιτάχυνση στο κεφάλι τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Πλάγια όψη.



Σχήμα 6.66: Επιτάχυνση στο κεφάλι τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Κάτωψη.

Στα 0.015 sec η επιτάχυνση είναι λίγο μεγαλύτερη, πιο συγκεκριμένα στο αριστερό τμήμα του κεφαλιού, όπου η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη, κυμαίνεται από 12.84 m/sec² έως 13.36 m/sec², ενώ οι αντίστοιχες τιμές στο δεξιό τμήμα του κεφαλιού κυμαίνονται από 9.705 m/sec² έως 10.23 m/sec². Οι ελάχιστες τιμές παρουσιάζονται κοντά στον άξονα της σύγκρουσης με τιμές από 8.139 m/sec² έως 8.661 m/sec².

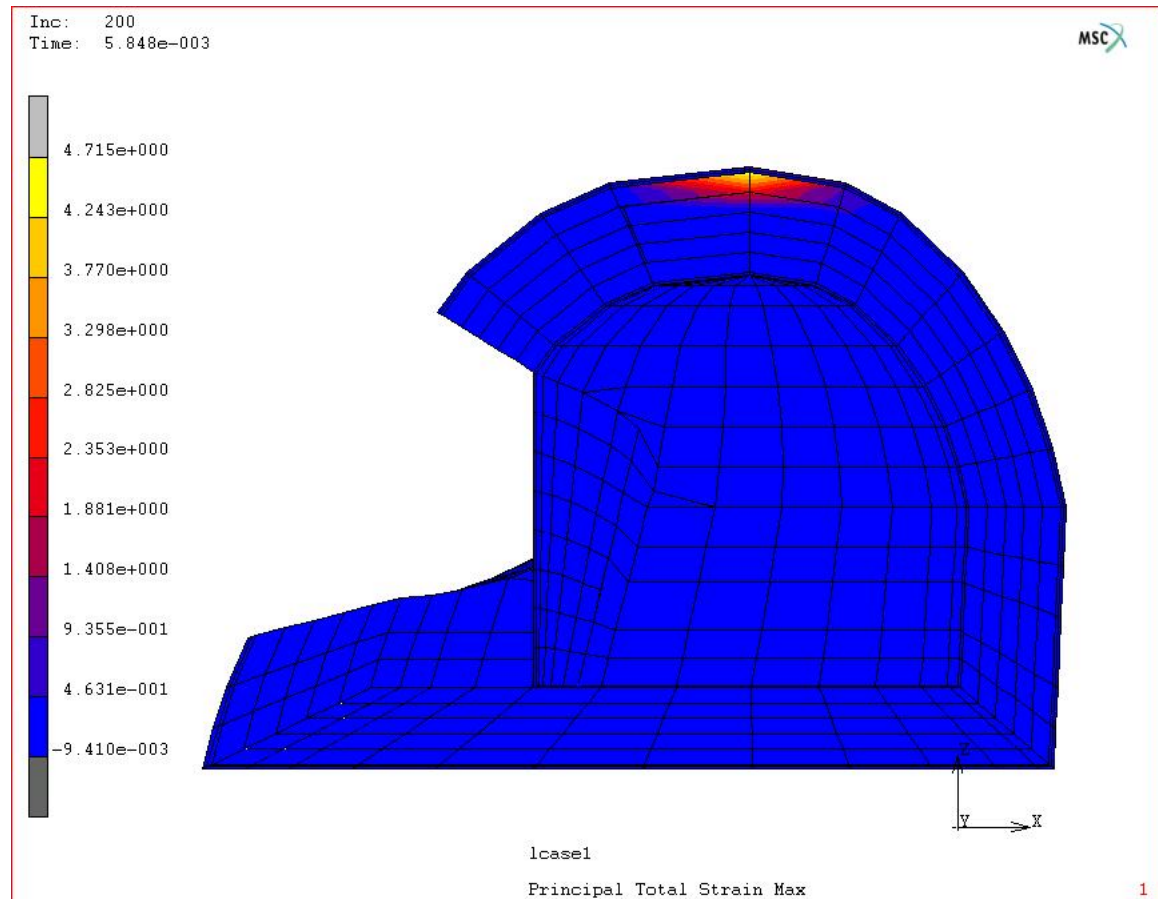
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

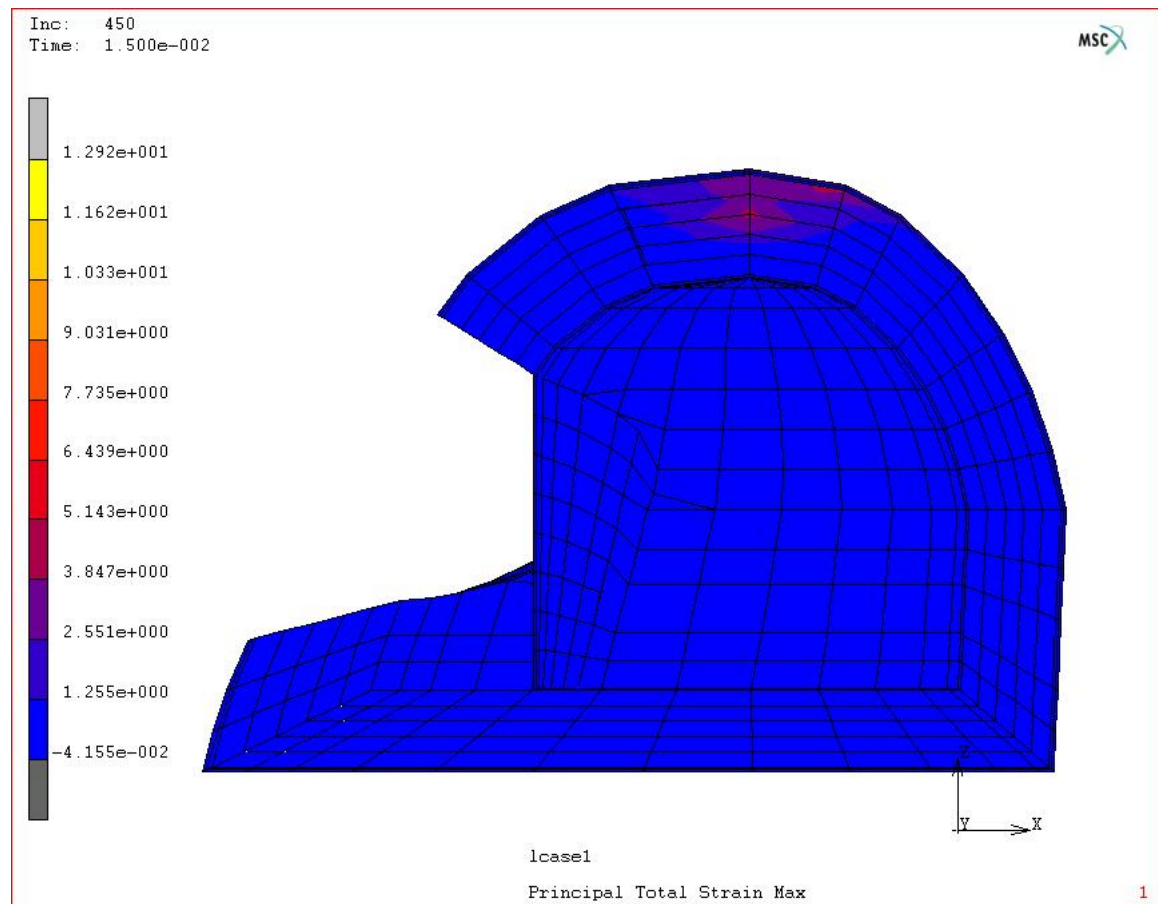
Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να διερευνηθείτην συμπεριφορά του συστήματος κράνος-κεφάλι σε σύγκρουση με σφαιρικό αντικείμενο. Το συγκεκριμένο θέμα παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι το κράνος αποτελεί τον κύριο εξοπλισμό ασφαλείας ενός μοτοσικλετιστή. Τα τελευταία χρόνια οι βιομηχανίες έχουν καταλήξει στη χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών στο εξωτερικό κέλυφος και κυρίως στο Kevlar. Αν αυτή είναι η καλύτερη λύση που μας προσφέρουν σήμερα οι βιομηχανίες τότε το ερώτημα που τίθεται είναι: ποια είναι η προστασία που παρέχει αυτό το υλικό;

Στις παραγράφους 6.1 και 6.2 αναλύθηκαν οι συνθήκες και τα αποτελέσματα της δυναμικής φόρτισης στην οποία υποβλήθηκαν τα κυριότερα μέρη (το εξωτερικό κέλυφος με τις δύο στρώσεις υλικών και το εσωτερικό αφρώδες υλικό) ενός κράνους. Οι συνθήκες φόρτισης ήταν σύμφωνες με τις διεθνείς συνθήκες ελέγχου ποιότητας ενός κράνους. Για την καλύτερη μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης είναι απαραίτητη η σύγκριση των τάσεων που αναπτύσσονται στα υλικά του κράνους, για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν οι ισοδύναμες και οι μέγιστες κύριες τάσεις. Κύριος σκοπός όμως ενός κράνους είναι να απορροφήσει την ενέργεια κρούσης ώστε να προστατέψει το κεφάλι του αναβάτη από κακώσεις γι' αυτό και μελετήθηκαν και οι ενέργειες παραμόρφωσης των υλικών. Τέλος, εξετάστηκαν και οι επιταχύνσεις τόσο στο κράνος, όσο και στο κεφάλι, καθώς η επιτάχυνση του κεφαλιού μαζί με το HIC (ολοκλήρωση της επιτάχυνσης σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα) που αποτελούν διεθνώς κριτήρια για τον έλεγχο του βαθμού προστασίας που προσφέρει ένα κράνος στο κεφάλι του αναβάτη.

Στα σχήματα 7.1 και 7.2 φαίνονται οι μέγιστες κύριες παραμορφώσεις στο επίπεδο συμμετρίας του συστήματος. Για να υπάρχει καλύτερη εικόνα της απόκρισης στο κράνος, οι παραμορφώσεις απεικονίζονται στις δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές μόνο αριθμητικά, ενώ το σχήμα του κράνους παρουσιάζεται απαραμόρφωτο.



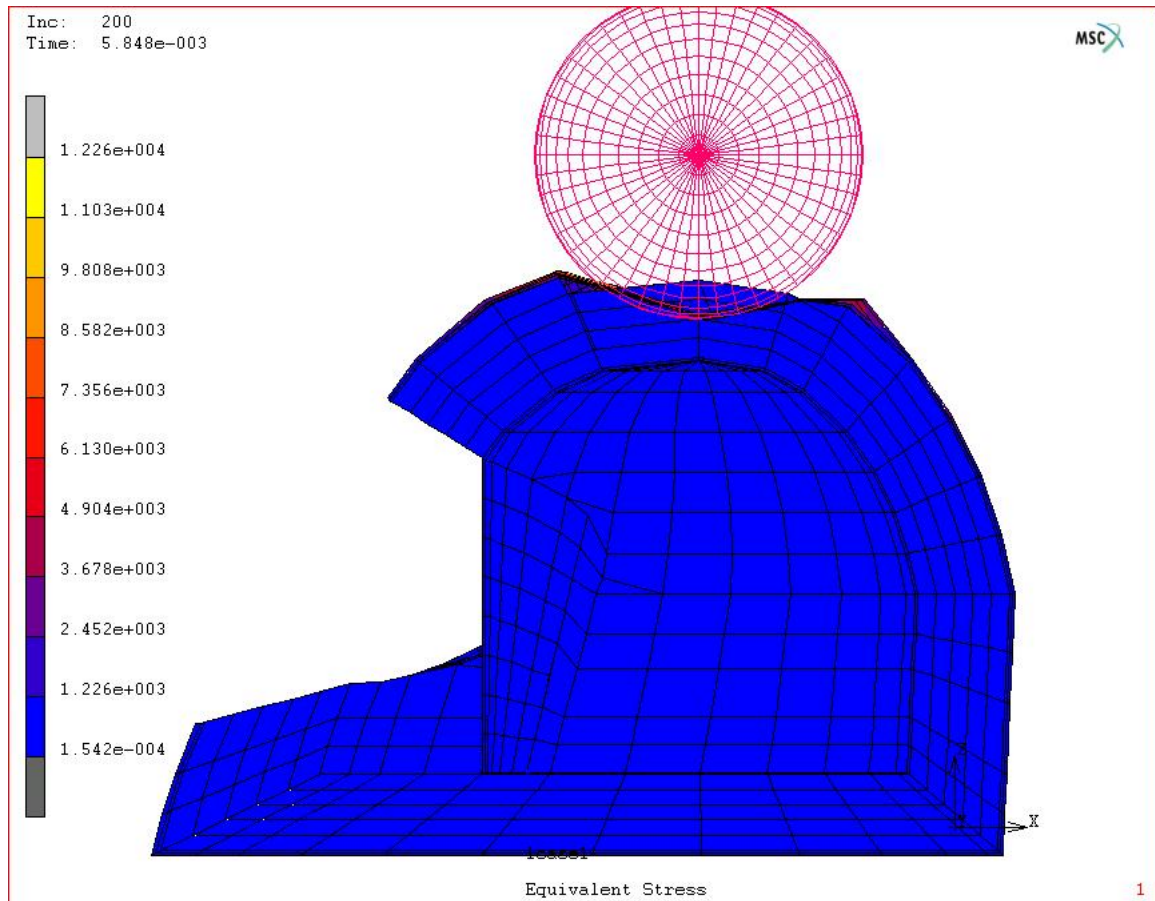
Σχήμα 7.1: Μέγιστες κύριες παραμορφώσεις του συστήματος τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Τομή στο επίπεδο συμμετρίας του συστήματος.



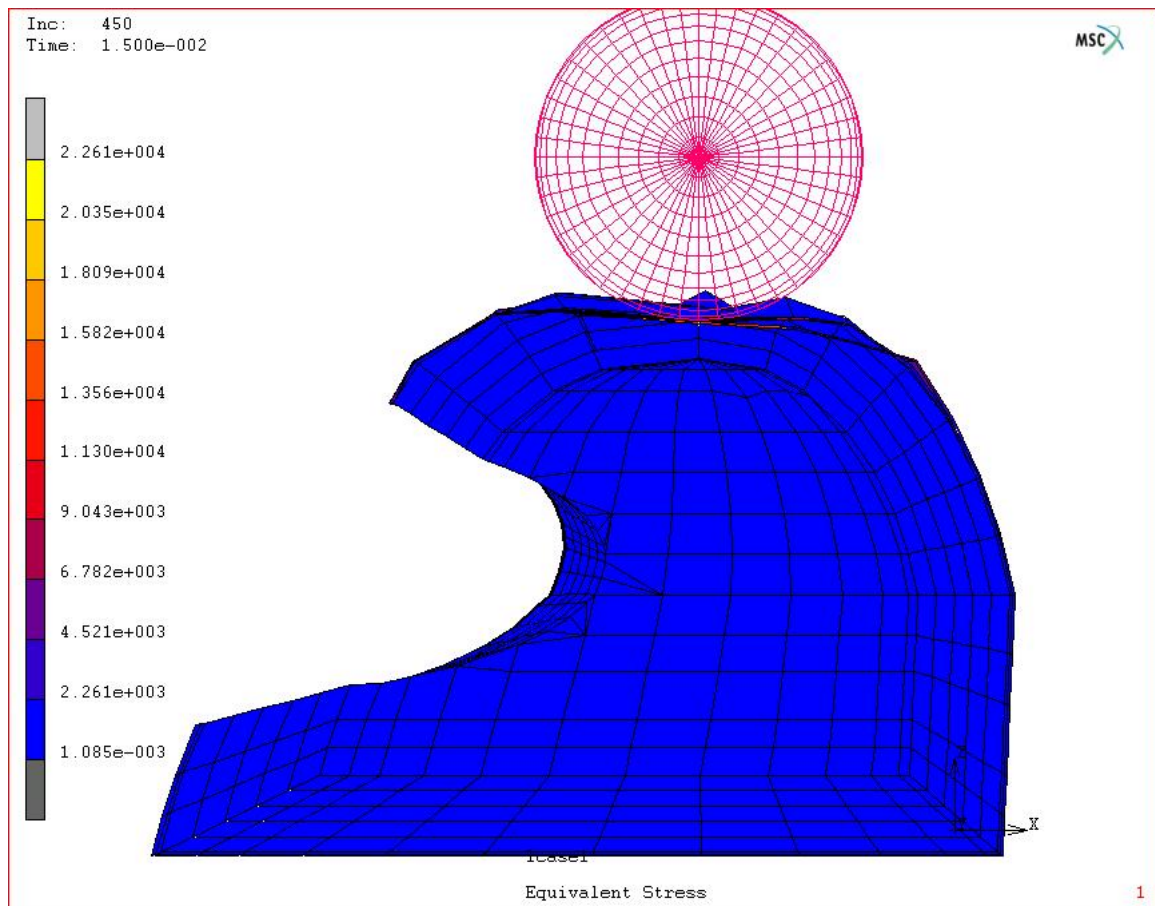
Σχήμα 7.2: Μέγιστες κύριες παραμορφώσεις του συστήματος τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Τομή στο επίπεδο συμμετρίας του συστήματος.

Από την παρατήρηση των ισοδύναμων τάσεων στα τρία διαφορετικά υλικά του κράνους φαίνεται ότι οι τάσεις αναπτύσσονται κοντά στο σημείο σύγκρουσης ενώ προχωρώντας προς τα εσωτερικά υλικά του κράνους οι τάσεις κατανέμονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Σύγκριση των τιμών των ισοδύναμων τάσεων δείχνει ότι αυτές σταδιακά μειώνονται προχωρώντας από το εξωτερικό προς το εσωτερικό μέρος του κράνους. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σχήματα 7.3 και 7.4 όπου απεικονίζονται οι ισοδύναμες τάσεις στο μισό κράνος, στις δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στο σχήμα 7.3 μαζί με το κράνος απεικονίζεται και το κεφάλι, ενώ στο σχήμα 7.4 απεικονίζεται μόνο το κράνος ώστε να υπάρχει και εικόνα του πλάγιου τμήματος του αφρώδους υλικού. Στα σχήματα αυτά παρατηρείται ότι οι ισοδύναμες τάσεις στο εξωτερικό μέρος του κράνους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσονται

στο εσωτερικό μέρος του. Εκτός όμως από τις ισοδύναμες τάσεις στο σχήματα αυτά φαίνεται και η παραμόρφωση του κράνους.

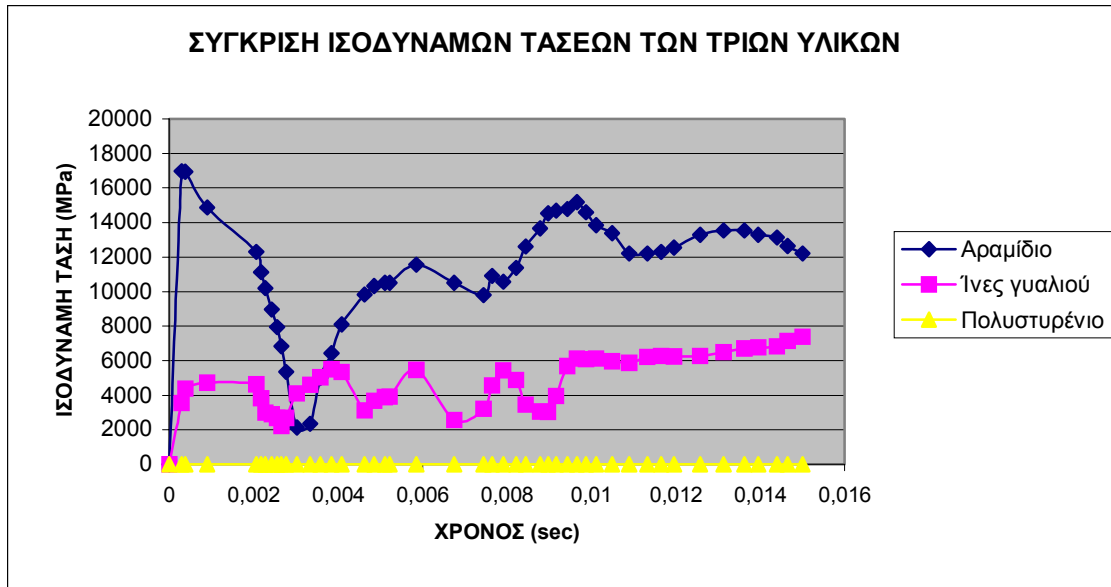


Σχήμα 7.3: Ισοδύναμη τάση στο κεφάλι τη χρονική στιγμή 0.005848 sec.-Τομή στο επίπεδο συμμετρίας του συστήματος.

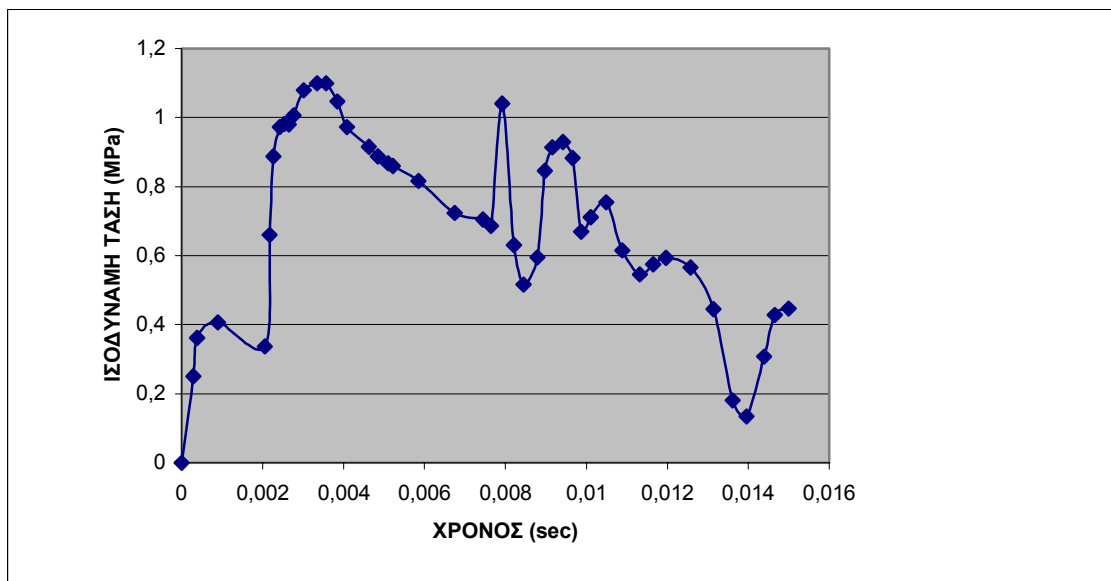


Σχήμα 7.4: Ισοδύναμη τάση στο κεφάλι τη χρονική στιγμή 0.015 sec.-Τομή στο επίπεδο συμμετρίας του κράνους.

Για να υπάρχει μια καλύτερη εικόνα της χρονικής μεταβολής των ισοδύναμων τάσεων και της διαφοροποίησης τους στα διαφορετικά υλικά επιλέχτηκαν τα ανώτερα σημεία κάθε υλικού ως προς τον z άξονα και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 7.5 και 7.6.



Σχήμα 7.5: Οι ισοδύναμες τάσεις στα τρία υλικά του κράνους.

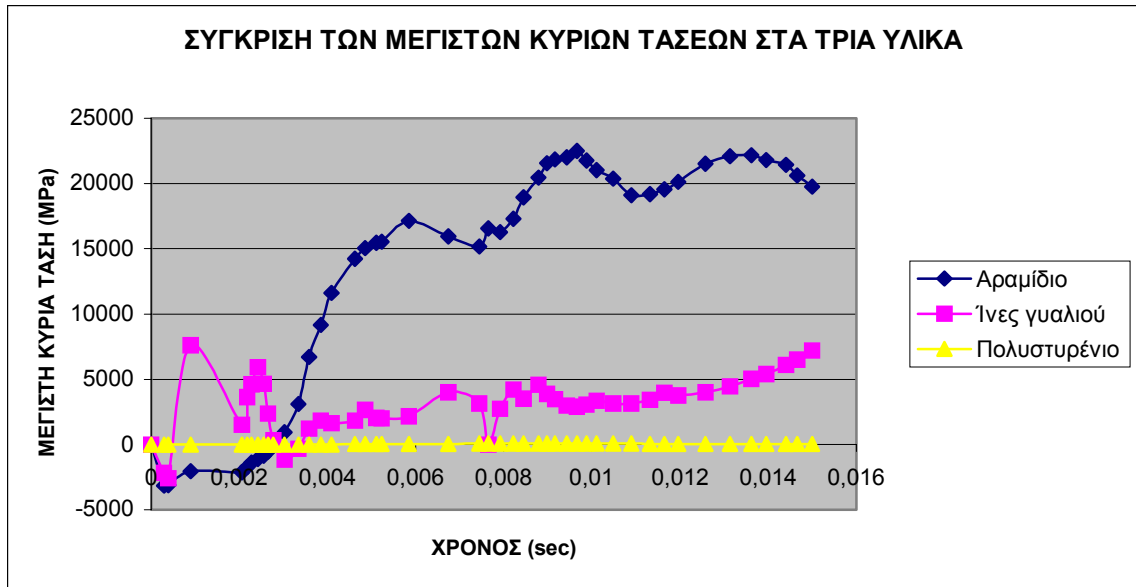


Σχήμα 7.6: Οι ισοδύναμες τάσεις στο εσωτερικό αφρώδες υλικό.

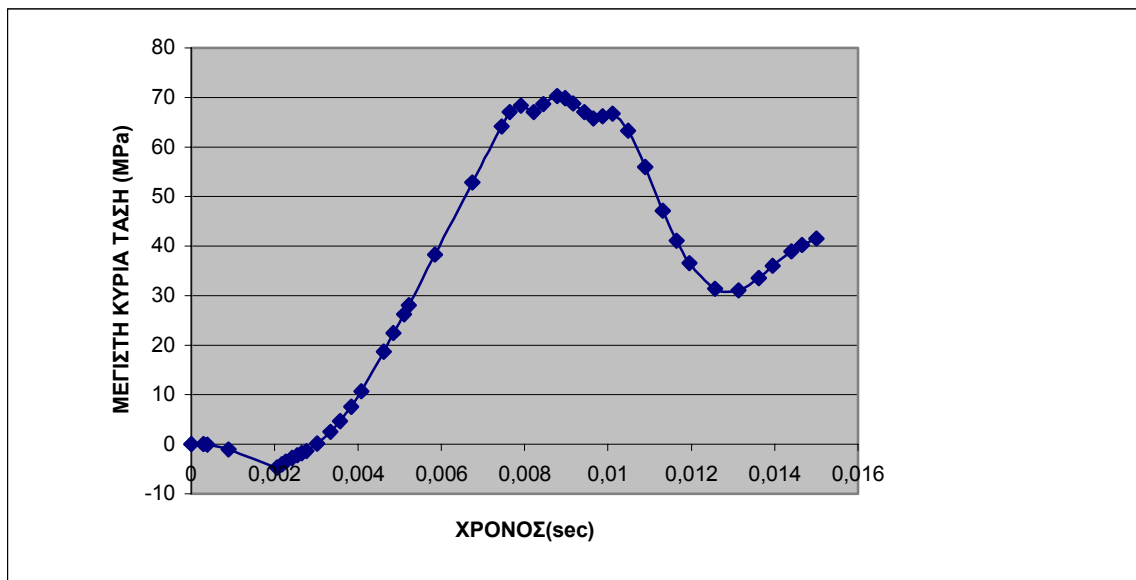
Στο σχήμα 7.5 φαίνονται οι διαφορές που υπάρχουν στο μέγεθος των ισοδύναμων τάσεων στα τρία υλικά. Λόγω της μεγάλης διαφοράς στις τάσεις που αναπτύσσονται στο Kevlar και στο εσωτερικό αφρώδες υλικό, οι τάσεις στο δεύτερο φαίνονται μηδενικές. Στην πραγματικότητα όμως, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.6, οι τάσεις στο συγκεκριμένο σημείο του πολυστυρενίου μεταβάλλονται χρονικά και έχουν μέγιστη τιμή τα 1.099 MPa στα 0.00334 sec.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές που καταγράφονται στα διαγράμματα δεν είναι οι μέγιστες που παρατηρούνται στα τρία υλικά, αλλά οι τιμές που κατεγράφησαν σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου στον κάθετο άξονα πάνω στο σημείο που γίνεται η σύγκρουση.

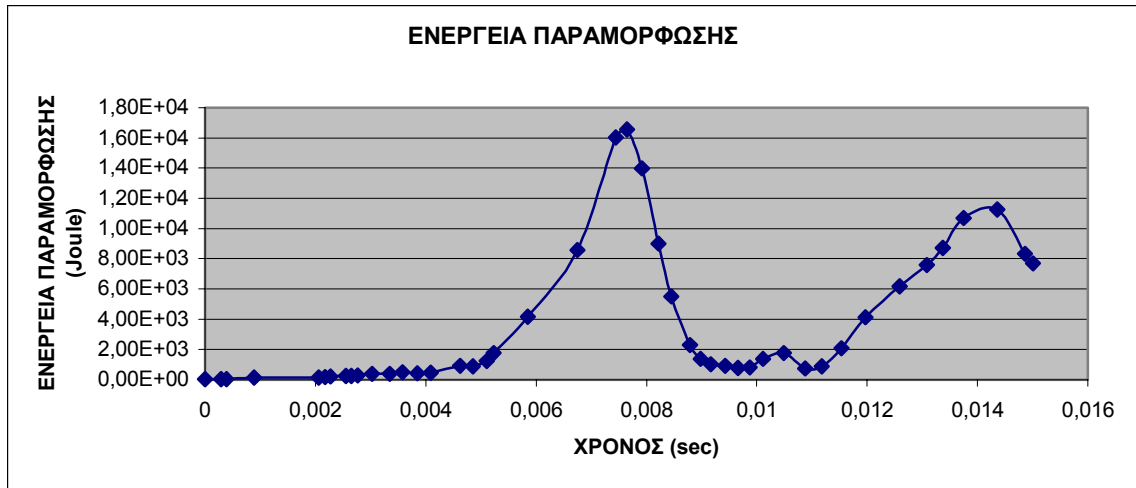
Η μελέτη των ισοδύναμων τάσεων είναι γενικά αξιόπιστη πηγή εξαγωγής συμπερασμάτων για την μηχανική συμπεριφορά ενός σώματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εμφάνιση τάσεων στο κράνος συμβαίνει περιφερειακά του διαμήκους άξονα του συστήματος. Πιο ρεαλιστική προσέγγιση στα φαινόμενα που αναπτύσσονται στο σύστημα παρέχει η παρακολούθηση της ανάπτυξης των μέγιστων κύριων τάσεων. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι η τάση στο Kevlar και στο πολυστυρένιο παίρνει τις μέγιστες τιμές της κοντά στα 0.01 sec και στη συνέχεια ακολουθεί μια πτωτική πορεία.



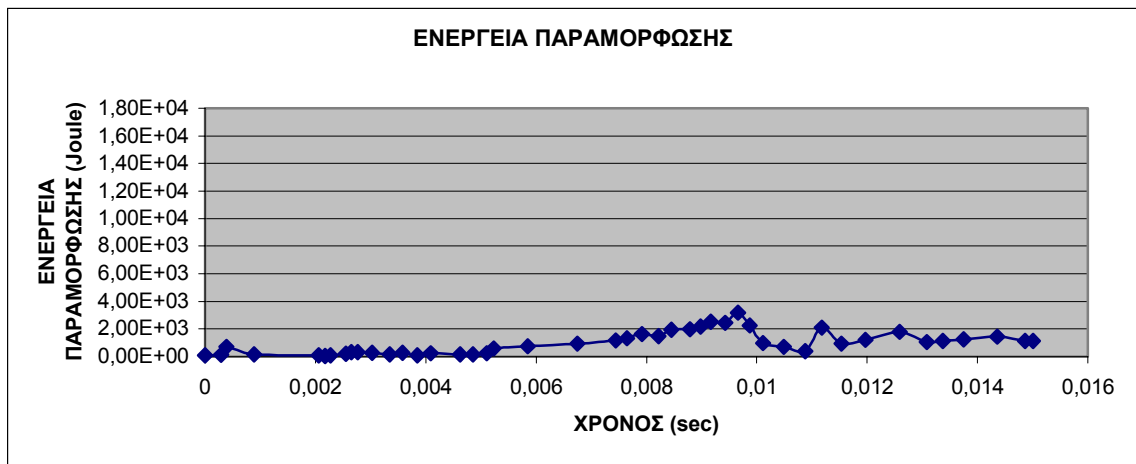
Σχήμα 7.7: Οι μέγιστες κύριες τάσεις στα τρία υλικά του κράνους.



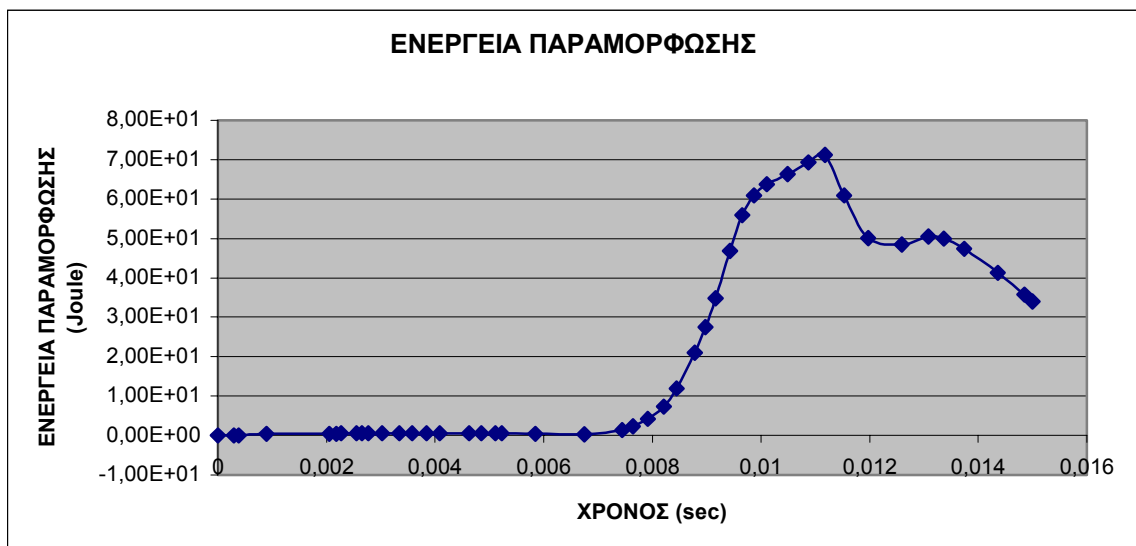
Σχήμα 7.8: Οι μέγιστες κύριες τάσεις στο εσωτερικό αφρώδες υλικό.



(α) Αραμίδιο



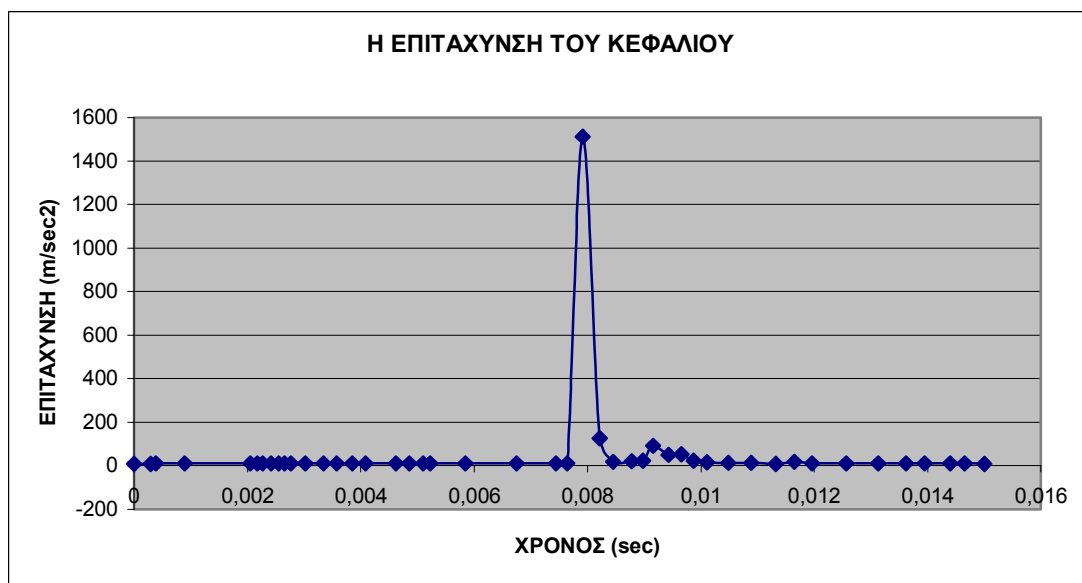
(β) Ίνες γυαλιού



(γ) Πολυουρεθάνιο

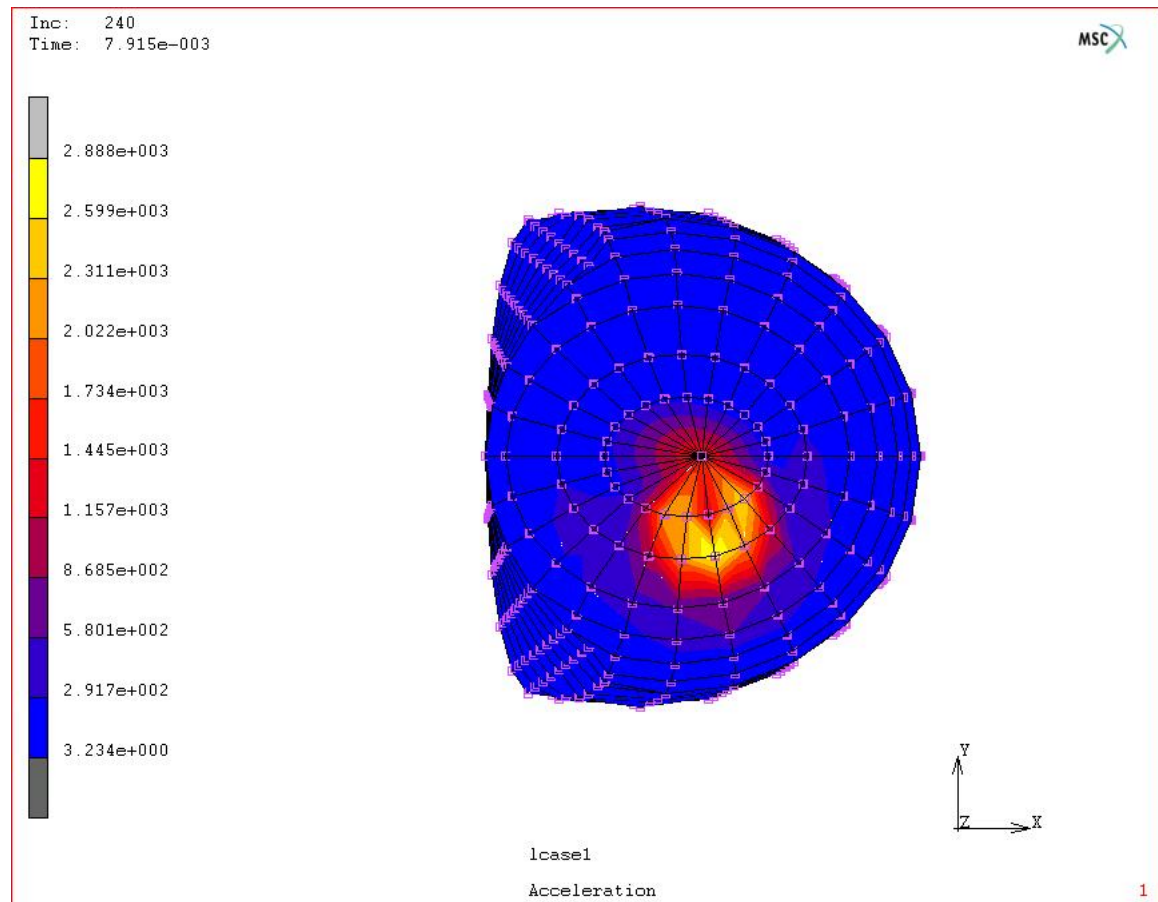
Σχήμα 7.9: Η ενέργεια παραμόρφωσης στα τρία διαφορετικά υλικά.

Στο σχήμα 7.9 φαίνεται η χρονική διακύμανση της ενέργειας παραμόρφωσης για το κάθε υλικό ξεχωριστά. Οι τιμές αφορούν μια περιοχή κοντά στο σημείο σύγκρουσης. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της ενέργειας παραμόρφωσης εμφανίζεται διαδοχικά για κάθε υλικό. Στο Kevlar στα 0.00765 sec, στην εσωτερική στρώση υλικού του εξωτερικού κελύφους στα 0.00965 sec και στο εσωτερικό αφρώδες υλικό στα 0.01117 sec.



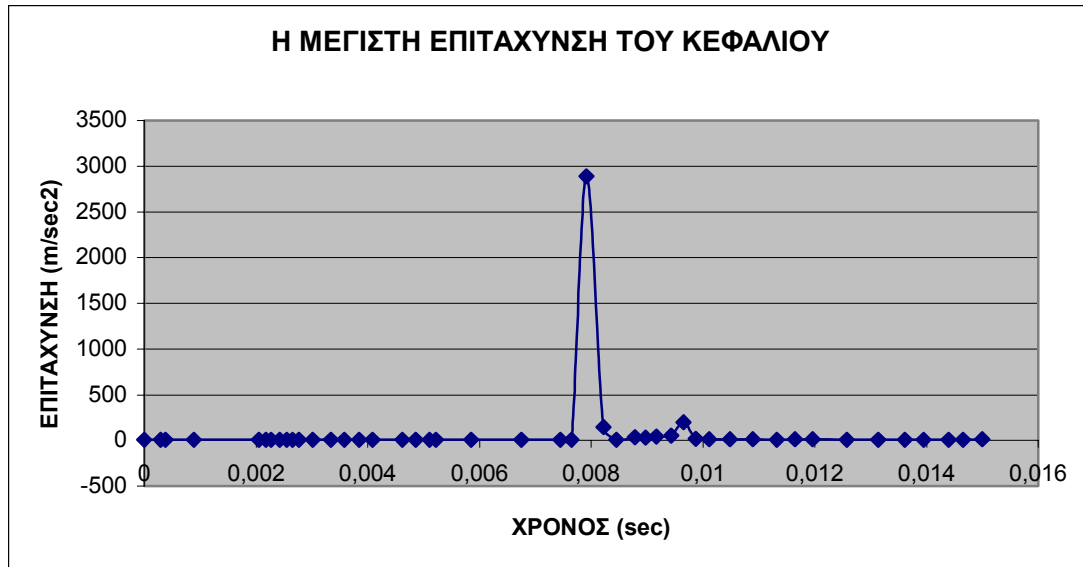
Σχήμα 7.10: Η επιτάχυνση του κεφαλιού στο σημείο κάθετα από το σημείο σύγκρουσης.

Στο σχήμα 7.10 όπου αναλύεται χρονικά η επιτάχυνση στο ανώτερο σημείο του κεφαλιού, ως προς τον άξονα z φαίνεται ότι στα 0.0079152 sec παρουσιάζεται μια μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης. Ενώ σε όλο το χρονικό διάστημα η επιτάχυνση στο κεφάλι δε ξεπερνάει τα 100 m/sec^2 , τη δεδομένη χρονική στιγμή φτάνει ακαριαία τα 1511.6 m/sec^2 . Στο σχήμα 7.11 φαίνεται η επιτάχυνση σε ολόκληρο το κεφάλι για εκείνη τη χρονική στιγμή.



Σχήμα 7.11: Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στο κεφάλι.

Σε αντίθεση με το αναμενόμενο η μέγιστη επιτάχυνση δεν παρουσιάζεται στο σημείο κάθετα από το σημείο σύγκρουσης αλλά λίγο πιο αριστερά. Στο σχήμα 7.12 φαίνεται η διακύμανση της επιτάχυνσης στο σημείο που παρατηρείται η μέγιστη τιμή της, η οποία είναι 2886.51 m/sec^2 .



Σχήμα 7.12: Η μέγιστη επιτάχυνση του κεφαλιού.

Το σημείο αυτό είναι και εκείνο που παρουσιάζει το μεγαλύτερο κίνδυνο για να τραυματιστεί ο αναβάτης. Εφαρμόζοντας τον τύπο για το κριτήριο τραυματισμού του κεφαλιού, σχέση 3.1 και για $(t_2 - t_1)$ ίσον με 15 msec υπολογίζεται ότι $HIC_{15} = 2193$. Η τιμή αυτή του HIC είναι μικρότερη από το όριο των ευρωπαϊκών κανονισμών το οποίο είναι 2400.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετήσει την μηχανική συμπεριφορά ενός κράνους μοτοσικλετιστή. Γενικά, μελέτες σε ένα κράνος μπορούν να γίνουν ακολουθώντας συμβατικές πειραματικές δοκιμές (μηχανήματα μηχανικού ελέγχου), ή με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων. Στη συγκεκριμένη μελέτη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς ενός κράνους μοτοσικλετιστή χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα MARC/MENTAT. Το προς μελέτη κράνος υποβλήθηκε σε δυναμική φόρτιση. Συγκεκριμένα στο σύστημα κράνος–κεφάλι δόθηκε μια αρχική ταχύτητα 6.84 m/sec. Με αυτή την ταχύτητα το σύστημα συγκρούεται με ένα απαραμόρφωτο στερεό, το σχήμα του οποίου είναι σφαιρικό. Οι συνθήκες της σύγκρουσης τέθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα μελέτης και πιστοποίησης ενός κράνους. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην συμπεριφορά του εξωτερικού κελύφους, του εσωτερικού αφρώδους υλικού και του κεφαλιού κατά τη σύγκρουση του κράνους με το σφαιρικό αντικείμενο στο άνω τμήμα του. Τα αποτελέσματα της μελέτης κρίνονται ικανοποιητικά, καθώς συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα παρόμοιων μελετών.

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελλοντική μελέτη της συμπεριφοράς του ίδιου κράνους με διαφορετικά αντικείμενα, όπως επίπεδη επιφάνεια ή επιφάνεια με ακμές τα οποία προσομοιάζουν διαφορετικά αντικείμενα με τα οποία μπορεί να έρθει σε πρόσκρουση το κεφάλι ενός αναβάτη. Επίσης, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ελέγχου, ο δοκιμαστής μπορεί να μεταβάλλει τις συνθήκες και να ελέγξει τη συμπεριφορά του κράνους σε περιπτώσεις κρούς, ζέστης ή υγρασίας. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης ο έλεγχος του κράνους και σε άλλα σημεία, όπως είναι η περιοχή

γύρω από το πηγούνι. Τέλος, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα συγκεκριμένα υλικά με άλλα που επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία κατασκευής κρανών. Για παράδειγμα, το υλικό για το εξωτερικό κέλυφος θα μπορούσε να είναι είτε σύνθετο υλικό από ίνες γυαλιού (GRP), ή άνθρακα, ή ακόμα και από θερμοπλαστικό υλικό το οποίο κοστίζει λιγότερο και θεωρείται μικρότερης αντοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. J. Mills and A. Gilchrist, *The effectiveness of foams in bicycle and motorcycle helmets*, *Accid. Anal. & Prev.*, Vol. 23, 153-163, 1991.
- [2] F.M. Shuaeib et al., *Motorcycle helmet Part II. Materials and design issues*, *J. of Materials Processing Technology*, 123, 422 – 431, 2002.
- [3] Snell Memorial Foundation M95, *Standard for protective headgear for use with motorcycles and other motorized vehicles*, North Highlands, CA, 1995.
- [4] Gilchrist A, Mills NJ., *Modeling of the impact response of motorcycle helmets*, *Int. J. Impact. Engng.*, 15, 201-218, 1994.
- [5] N.J. Mills, A. Gilchrist, *Motorcycle helmet shell optimization*, *Proc. Assoc. for Adv. of Automotive Medicine conf.*, Portland, Oregon, 149-162, AAAM, Des Plaines, Illinois, 1992.
- [6] V. Kostopoulos et al., *Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets*, *Composites, Part B* 33, 99 –107, 2002.
- [7] R. Willinger et al., *Dynamic characterization of motorcycle helmets: Modeling and coupling with the human head*, *Journal of sound and vibration*, 235(4), 611 – 625, 2000.
- [8] Gilchrist A, Mills NJ., *Protection of the side of the head*, *Accid. Anal. And Prev.*, Vol. 28, No. 4, 525 – 535, 1996.
- [9] De – Shin Liu et al., *Influence of environmental factors on energy absorption degradation of polystyrene foam in protective helmets*, *Engineering Failure Analysis*, 10 581 – 591, 2003.
- [10] Luca Di Landro, Giuseppe Sala and Daniela Olivieri, *Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams of protective helmets*, *Polymer Testing*, 21, 217 – 228, 2002.
- [11] C. Borsellino et al., *Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structure*, *Composite Science and Technology*, 2004.
- [12] G. Lyn, N.J. Mills, *Design of foam crash mats for head impact protection*, *The engineering of Sport 4*, Eds S. Ujihashi and S.J. Haake, Blackwell, 2002.
- [13] Jun Zhang et al., *Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading*, *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 21, No. 5, 369 –386, 1998.
- [14] Y. Wang and D. Zhao, *Characterization of interlaminar fracture behaviour of woven fabric reinforced polymeric composites*, *Composites*, 26, 115 –124, 1995.

- [15] K. Padmanabhan, Kishore, *Interlaminar shear of woven fabric Kevlar – epoxy composites in three - point loading*, Materials Science and Engineering, A197, 113 – 118, 1995.
- [16] Y. Wang and Y.Xia, *The effects of strain rate on the mechanical behaviour of Kevlar fibre bundles : an experimental and theoretical study*, Composites Part A, 29A, 1411- 1415, 1998.
- [17] Y.T. Zhang and Y.B. Fu, *A micromechanical model of woven fabric and its application to the analysis of buckling under uniaxial tension. Part I : The micromechanical model*, International Journal of Engineering Science, 38, 1895-1906, 2000.
- [18] Y.T. Zhang and Y.Xie, *Nonlinear micro – mechanical model for plain woven fabric*, Acta Mechanica Solida Sinica, Vol. 16, No.2, June, 2003.
- [19] J.A. Newman, *Head Injury Criterion in automotive crash testing*, Proc. 24th Stapp Car Crash Conference, SAE Paper 801317, 1980.
- [20] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids Structures and Properties*, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [21] Leslie N Phillips, *Design with Advanced Composite Materials*, Springer – Verrlag, London, 1989.
- [22] Παπαδάκη Ε., *Ενίσχυση τοιχοποιιών με την χρήση ινοπλισμένων πολυμερών: Μελέτη-Βελτιστοποίηση*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2001.
- [23] N.J. Mills et al., *Polymer foams for personal protection : cushions, shoes and helmets*, Composites Science and Technology.
- [24] R. Cook, D. Malkus, M. Plesha, *Concepts and Application of Finite Element Analysis*, J. Wiley, 1989.
- [25] O.C. Zienkiewicz, *The finite element method*, Third edition, McGraw – Hill, 1977.
- [26] <http://www.engin.brown.edu/courses/en175/>
- [27] MARC, *heory and user Information*, **Volume A**, 1997.
- [28] MARC, *Element Library*, **Volume B**, 1997.
- [29] Βαρδουλάκης Ιωάννης, *Τεχνική Μηχανική II*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999.