

ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗΣ

Προσομοίωση Ανατροπής Βυτιοφόρου Οχήματος

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουλοχέρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2023

IOANNIS ANGELIDAKIS

Rollover Simulation of Road Fuel Tanker

Section: Mechanical Design & Automatic Control

Supervisor: Dimitris Koulocheris, N.T.U.A. Associate Professor

Athens 2023



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

--- κενή σελίδα ---

Ευχαριστίες

Με την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας, κλείνει ο ιδιαίτερα απαιτητικός, μεγάλος και γεμάτος διδάγματα κύκλος της φοίτησής μου στη σχολή μας. Ευχαριστώ προ πάντων την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια· τους φίλους/ες μου για τις ευχάριστες ώρες που περάσαμε, παρέχοντας μου έτσι την αναγκαία εκτόνωση από την πνευματική και ψυχική κόπωση, όπως και τους καθηγητές/τριες, το εργαστηριακό προσωπικό, τους διδακτορικούς φοιτητές/ριες, την γραμματεία και όλο το υπόλοιπο εργατικό δυναμικό της σχολής μας, για την υποδειγματική τέλεση του λειτουργήματός της μετάδοσης σε εμάς, δύσκολης γνώσης, αλλά και της φροντίδας μας.

Ειδικά ευχαριστώ, τους επιβλέποντες μου κ. Κουλοχέρη και την μεταδιδακτορική ερευνήτρια του εργαστηρίου μας κα.Κλειώ Βόσσου, για την συνδρομή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την κατανόησή που έδειξαν στις δυσκολίες που αντιμετώπισα μέχρι την ολοκλήρωσή της.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ιωάννης Αγγελιδάκης

Περιεχόμενα

1.	Σύνοψη – Περίληψη	8
2.	Abstract.....	9
3.	Εισαγωγή	10
3.1	Πλαίσιο	10
3.2	Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι	10
3.3	Οριοθέτηση.....	11
4.	Θεωρητικό Μέρος - Βυτιοφόρα	12
4.1	Βυτιοφόρα – Κατηγοριοποίηση – Προδιαγραφές	12
4.2	Οδική Συμπεριφορά Βυτιοφόρων Οχημάτων	15
5.	Θεωρητικό Μέρος - Ανάλυση με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA)	19
5.1	Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων	19
5.1.1	Μονοδιάστατα Στοιχεία	20
5.1.2	Διδιάστατα Στοιχεία	21
5.1.3	Τριδιάστατα Στοιχεία.....	24
5.1.4	1 ^{ης} και 2 ^{ης} τάξης Πεπερασμένα Στοιχεία	26
5.2	Μέθοδοι βελτίωσης Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων	28
5.2.1	Απλοποίηση Γεωμετρίας	28
5.2.2	Επιλογή κατάλληλου πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων	29
5.2.3	Εύρεση κατάλληλου Ρυθμού επιβολής φορτίου και Χρονικών βημάτων προσομοίωσης	29
5.3	Τύποι και Ρυθμίσεις Πεπερασμένων Στοιχείων στο ANSYS Workbench.....	30
5.3.1	Τετραεδρικά (Tetrahedrons)	31
5.3.2	Κυρίαρχα Εξαεδρικά (Hex-Dominant)	32
5.3.3	Sweep.....	33
5.3.4	Multizone.....	34
5.3.5	Καρτεσιανά (Cartesian)	35
5.3.6	Global Controls	36
5.4	Τύπος ανάλυσης: Explicit vs Implicit	40
5.4.1	Explicit (Explicit Dynamics)	40
5.4.2	Implicit (Transient Structural).....	40
5.4.3	Explicit vs Implicit: Διαφορές και τελική επιλογή	41
6.	Μοντελοποίηση Βυτιών (Tanker) - Περιγραφή.....	43
6.1	Μοντέλα Tanker - Περιγραφή	43
6.1.1	Γενική Γεωμετρία.....	43
6.1.2	Διαφοροποιήσεις μεταξύ μοντέλων	48
6.1.3	Ρυθμίσεις Προσομοίωσης	50
6.2	Μοντέλο 1 (Κυκλική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Μονή Κόλληση)	59
6.2.1	Ανατροπή 90 μοιρών (1.1).....	59
6.2.2	Ανατροπή 180 μοιρών (1.2).....	66
6.3	Μοντέλο 2 (Κυκλική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Διπλή Κόλληση)	72

6.3.1	Ανατροπή 90 μοιρών (2.1).....	72
6.3.2	Ανατροπή 180 μοιρών (2.2).....	77
6.4	Μοντέλο 3 (Κυκλική Διατομή – Αλουμίνιο – Μονή Κόλληση).....	83
6.4.1	Ανατροπή 90 μοιρών (3.1).....	83
6.4.2	Ανατροπή 180 μοιρών (3.2).....	88
6.5	Μοντέλο 4 (Κυκλική Διατομή – Αλουμίνιο – Διπλή Κόλληση).....	94
6.5.1	Ανατροπή 90 μοιρών (4.1).....	94
6.5.2	Ανατροπή 180 μοιρών (4.2).....	99
6.6	Μοντέλο 5 (Ελλειπτική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Μονή Κόλληση).....	105
6.6.1	Ανατροπή 90 μοιρών (5.1).....	105
6.6.2	Ανατροπή 180 μοιρών (5.2).....	110
6.7	Μοντέλο 6 (Ελλειπτική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Διπλή Κόλληση).....	116
6.7.1	Ανατροπή 90 μοιρών (6.1).....	116
6.7.2	Ανατροπή 180 μοιρών (6.2).....	121
6.8	Μοντέλο 7 (Ελλειπτική Διατομή – Αλουμίνιο – Μονή Κόλληση)	127
6.8.1	Ανατροπή 90 μοιρών (7.1).....	127
6.8.2	Ανατροπή 180 μοιρών (7.2).....	132
6.9	Μοντέλο 8 (Ελλειπτική Διατομή – Αλουμίνιο – Διπλή Κόλληση)	138
6.9.1	Ανατροπή 90 μοιρών (8.1).....	138
6.9.2	Ανατροπή 180 μοιρών (8.2).....	143
6.10	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	149
7.	Επίλογος – Συμπεράσματα	154
8.	Κατάλογος Πινάκων.....	155
9.	Κατάλογος Διαγραμμάτων	156
10.	Κατάλογος Εικόνων	157
11.	Κατάλογος Αναφορών - Βιβλιογραφία	163

1. Σύνοψη – Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία, έχει ως στόχο, να παράσχει πληροφορίες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μία δεξαμενή βυτιοφόρου οχήματος ώστε να αποφευχθεί η θραύση της, σε σενάρια ανατροπής 90 και 180 μοιρών.

Τα βυτιοφόρα οχήματα φέρουν στις δεξαμενές τους μέχρι και εξαιρετικά επικίνδυνες ουσίες, οι οποίες θα πρέπει να μεταφέρονται με την δέουσα προσοχή. Οι επιπτώσεις σε περίπτωση ανατροπής ενός τέτοιου βυτιοφόρου και θραύσης της δεξαμενής του, μπορεί να είναι σοβαρές, όχι μόνο για τον οδηγό και τους περαστικούς, αλλά και μονιμότερες στο περιβάλλον.

Αυτών λεγομένων, για ακριβέστερα αποτελέσματα, πονήθηκε παραμετρική ανάλυση μέσω της οποίας, εκτιμήθηκε η καλύτερη γεωμετρία, υλικό, πάχος των δεξαμενών και είδος συγκόλλησης, με γνώμονα την ακεραιότητα των δεξαμενών. Βασικός οδηγός και πηγή πληροφοριών όσον αφορά τις προδιαγραφές των βυτιοφόρων, των δεξαμενών και των σεναρίων, πάνω στον οποίο στηρίχθηκε η παρούσα διπλωματική, αποτέλεσε η μελέτη: **Technical Assessment of Petroleum Road Fuel Tankers**, που συντάχθηκε το 2014 για χάρη του Βρετανικού Υπουργείου Μεταφορών από τους: [1] **B Robinson (TRL), D Webb (HSL), J Hobbs (HSL) & T London (TWI)**. *

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό των μοντέλων είναι το SOLIDWORKS ενώ για την επίλυση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS.

*αυτή θα αναφέρεται στο εξής ως η πρότυπη μελέτη [1]

2. Abstract

The main goal of this diploma thesis is to assess the specifications that should be met by a road fuel tanker for it to withstand rollover (90 and 180 degree) scenarios.

Road fuel tankers carry massive quantities of extremely dangerous goods, thus, transporting these substances must always be a meticulous procedure. Ramifications in rollover accidents and cases of ruptured tanks can be not only severe for the truck driver and pedestrians around, but also long lasting for the environment on a bigger scale.

A parametric analysis was taken for best results and for drawing a safe conclusion, considering shell's geometry, material, thickness and weld type between baffles-bands with goal to be finding the least ruptured tank of all tested, thus the safest. Almost entire of this thesis, was based on information found on the following valuation: [1]**Technical Assessment of Petroleum Road Fuel Tankers, by B Robinson (TRL), D Webb (HSL), J Hobbs (HSL) & T London (TWI), 2014** for the British Department of Transportation. *

All the models were completed using SOLIDWORKS software and then simulated each scenario using ANSYS software.

* [1]

3. Εισαγωγή

3.1 Πλαίσιο

Το θέμα της διπλωματικής αυτής εργασίας, αποτελεί προέκταση της εργασίας εξαμήνου για το μάθημα της Δυναμικής – Σχεδιασμού Οχημάτων του 9^{ου} εξαμήνου, που εκπονήθηκε από τον ίδιο, παραμετρική ανάλυση για την «Προσομοίωση σύγκρουσης δεξαμενής βυτιοφόρου οχήματος». Σε εκείνην, δοκιμάστηκε ένα βυτίο κυκλικής γεωμετρίας με επίπεδα άκρα και παραμέτρους το πάχος τοιχώματος, το υλικό, τα εσωτερικά διαμερίσματα και την ταχύτητα σύγκρουσης, όμως σε περιπτώσεις μετωπικής και πλάγιας κρούσης.

Τα βυτιοφόρα οχήματα και τα βυτία τους, θα πρέπει να ακολουθούν εκ κατασκευής αυστηρότατες προδιαγραφές, ώστε υπό οποιεσδήποτε συνθήκες να μην αποτελούν δημόσιο κίνδυνο και αυτό είναι κάτι που και τον ίδιο ενδιέφερε, αλλά και αποτελεί ένα τομέα στον οποίο το Εργαστήριο Οχημάτων της Σχολής ειδικεύεται.

3.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

Ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται βυτιοφόρα οχήματα που μεταφέρουν επικίνδυνες ουσίες αν και συμβαίνουν, σπάνια θα υπάρξει κάποια διαρροή της μεταφερόμενης ουσίας. Αυτό ισχύει για τα βυτιοφόρα που ακολουθούν τις κείμενες αυστηρές προδιαγραφές. Υπάρχουν όμως και βυτία όπου δεν συμβαδίζουν εκ κατασκευής με αυτές και για αυτά, οι πιθανότητες κάποιου σοβαρού ατυχήματος ή και δυστυχήματος είναι αυξημένες.

Σκοπός λοιπόν, ήταν να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα, για το πώς επηρεάζουν διάφορα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μίας κοινής δεξαμενής, την συμπεριφορά και την αντοχή της, στο πιο σύνηθες σενάριο ατυχήματος, την ανατροπή, που καθιστά την

δεξαμενή ευεπίφορη σε θραύση. Οι παράμετροι που τέθηκαν για την ανάλυσή μας είναι οι εξής:

Γεωμετρία: Κυκλική, Ελλειπτική

Υλικό: Ανοξείδωτος Χάλυβας, Κράμα Αλουμινίου

Είδος Συγκόλλησης: Μονή, Διπλή

Ανατροπή: 90°, 180°

ενώ το **πάχος των τοιχωμάτων** τέθηκε **3mm για χάλυβα** και **5mm για αλουμίνιο**.

Ειδικό ενδιαφέρον υπάρχει στην επίδραση που θα έχει το είδος της συγκόλλησης, ενώ βασικό ερώτημα στην περάτωση της εργασίας και για την ασφάλεια των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, ήταν το είδος, το πλήθος, και η ποιότητα των πεπερασμένων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, όπως και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες.

3.3 Οριοθέτηση

Η παρούσα μελέτη γίνεται για άδειες δεξαμενές, καθώς η πλήρωσή τους με ρευστό θα έκανε την υλοποίηση της ανάλυσης υπερβολικά χρονοβόρα και υπολογιστικά άκρως απαιτητική.

Το είδος των δεξαμενών, είναι τυπικού ρυμουλκούμενου 8 διαμερισμάτων, χωρητικότητας 45000 lt για βυτιοφόρο 6 αξόνων (3+3) των 7,5 Tn (όπως αυτό περιγράφεται στην πρότυπη μελέτη* [1]).

4. Θεωρητικό Μέρος - Βυτιοφόρα

4.1 Βυτιοφόρα – Κατηγοριοποίηση – Προδιαγραφές

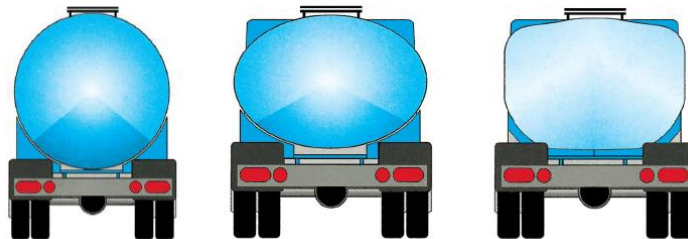
Βυτίο ή δεξαμενή είναι [2] ένας υποδοχέας αποτελούμενος από ένα ή περισσότερα κυλινδρικά μέρη, κλειστά στα άκρα τους, με συνολική χωρητικότητα άνω του 1 m³. Τα βυτία διακρίνονται ανάλογα με:

- α) τη δομή της κατασκευής τους,
- β) τη διατομή τους,
- γ) την ύλη που μεταφέρουν και
- δ) τον τρόπο καταμερισμού του χώρου τους.

Βυτιοφόρο όχημα είναι [2] ένα όχημα εξοπλισμένο με ένα ή περισσότερα ενσωματωμένα βυτία, σχεδιασμένο για να μεταφέρει υγρά, αέρια ή στερεά σε σκόνες ή κόκκους. Τα βυτιοφόρα οχήματα διακρίνονται σε:

- α) Απλά βυτιοφόρα.
- β) Οδικούς συρμούς αποτελούμενους από ρυμουλκό βυτιοφόρο και ρυμουλκούμενο βυτιοφόρο και
- γ) Επικαθήμενα βυτιοφόρα.

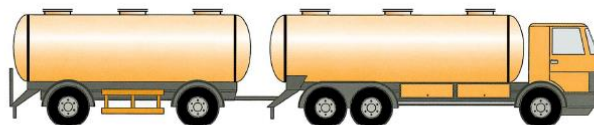
Μερικά από αυτά εικονίζονται παρακάτω:



Βυτιοφόρα με κυκλική (αεριο-υποπίεση), ελλειπτική και πεπλατυσμένη (πετρελαιοειδή), διατομή βυτίου.

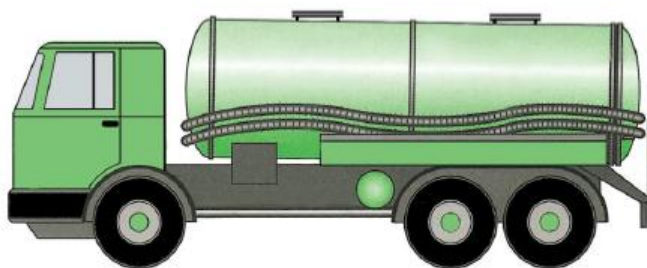


Βυτιοφόρο με σιλό (στερεές ύλες).

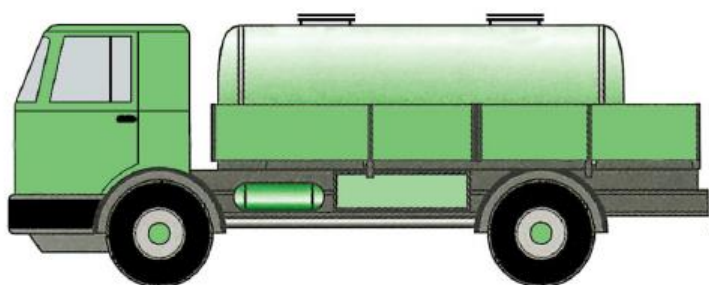


Οδικός συρμός με ρυμουλκό και ρυμουλκούμενο βυτιοφόρο.

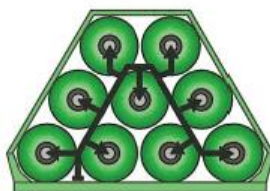
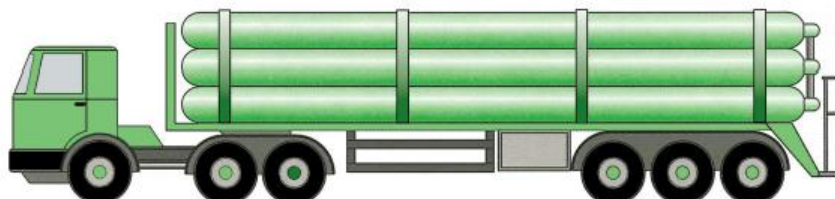
Εικόνα 1: Είδη Βυτιοφόρων 1



Βυτιοφόρο όχημα με σταθερή δεξαμενή.



Βυτιοφόρο όχημα με αποσπώμενη δεξαμενή.



Βυτιοφόρο με συστοιχία δοχείων (battery).

Εικόνα 2: Είδη Βυτιοφόρων 2

Τεχνικές προδιαγραφές βυτίων:

Τα περιβλήματα των βυτίων πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται σύμφωνα με τις διατάξεις της Συμφωνίας A.D.R.(Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road) και τις λοιπές διατάξεις, που έχουν καθορισθεί από την εκάστοτε αρμόδια υπηρεσία Υ.Μ.Ε. Πρέπει όμως, σε κάθε περίπτωση, να πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις που αναφέρονται παρακάτω.

Υλικά κατασκευής βυτίων:

Χάλυβες: Για βυτία μεταφοράς πετρελαιοειδών, αερίων υπό πίεση κλπ.

Λεπτόκοκκοι χάλυβες: Για βυτία μεταφοράς υγροποιημένων αερίων ειδικής επεξεργασίας βαθιάς καταψύξεως κλπ.

Κράματα αλουμινίου: Για βυτία μεταφοράς διαβρωτικών αερίων της κλάσεως 2, υδροφθορικού οξέος της κλάσεως 8, αμμωνίας υγροποιημένης ή διαλυμένης υπό πίεση κλπ.

Ενισχυμένα πλαστικά: Για βυτία μεταφοράς πετρελαίου (αργού, θερμάνσεως, ντίζελ), θεϊκού οξέος, υδατικών διαλυμάτων υπεροξειδίου του υδρογόνου κλπ.

Οι γενικές αρχές, που ισχύουν για την κατασκευή των περιβλημάτων των βυτίων, είναι οι εξής:

α) Τα κελύφη των βυτίων θα κατασκευάζονται από κατάλληλα μεταλλικά υλικά τα οποία, εκτός εάν προβλέπεται διαφορετικά στα ειδικά κεφάλαια της Συμφωνίας ADR που αφορούν στις διάφορες κλάσεις, θα αντέχουν στην «ψαθυρή θραύση» και στη δημιουργία ρηγμάτων λόγω διαβρώσεως, σε θερμοκρασίες μεταξύ -20°C και $+50^{\circ}\text{C}$.

β) Για συγκολλημένα περιβλήματα θα χρησιμοποιούνται μόνο υλικά, που έχουν τέλεια δυνατότητα συγκολλησεως και με εγγυημένη επαρκή «κρουστική αντοχή» σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -20°C , ειδικά στις ραφές συγκολλησεως και στις γειτονικές τους ζώνες.

γ) Οι συγκολλήσεις θα είναι επιδέξια κατασκευασμένες και θα προσφέρουν πλήρη ασφάλεια. Η συγκόλληση θα γίνεται από ειδικευμένους συγκολλητές, που εφαρμόζουν διαδικασία συγκολλησεως, της οποίας η αποτελεσματικότητα (περιλαμβανομένων και τυχόν απαιτούμενων θερμαντικών διεργασιών) έχει επιδειχθεί με δοκιμή.

δ) Τα υλικά των περιβλημάτων και οι προστατευτικές επενδύσεις τους που έρχονται σε επαφή με το περιεχόμενο, δεν θα περιέχουν ύλες, οι οποίες μπορεί να αντιδράσουν επικίνδυνα με το περιεχόμενο, να σχηματίσουν επικίνδυνες ενώσεις, ή να αδυνατίσουν ουσιαστικά το υλικό.

ε) Η προστατευτική επένδυση των βυτίων πρέπει να είναι σχεδιασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε η στεγανότητά της να παραμένει αμετάβλητη σε κάθε παραμόρφωση, που μπορεί να συμβεί σε κανονικές συνθήκες μεταφοράς.

στ) Αν η επαφή μεταξύ της μεταφερόμενης ύλης και του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του περιβλήματος, συνεπάγεται προσδευτική μείωση του πάχους των τοιχωμάτων, το πάχος θα αυξάνεται κατά την κατασκευή αναλόγως. Το πρόσθετο αυτό πάχος θα αποτελεί ανοχή για τη διάβρωση και δε θα λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του πάχους των τοιχωμάτων του βυτίου.

Πάχος των περιβλημάτων των βυτίων:

Τα περιβλήματα των βυτίων, τα προσαρτήματά τους, τα μέσα προσδέσεως των περιβλημάτων, καθώς και ο λειτουργικός και κατασκευαστικός εξοπλισμός των βυτίων, σχεδιάζονται με ειδικό τρόπο. Έτσι αντέχουν, χωρίς απώλεια περιεχομένου του βυτίου (εκτός από τις ποσότητες του αερίου που διαφεύγουν από τυχόν ειδικούς εξαεριστήρες),

την «πίεση υπολογισμού» του βυτίου και τις εντάσεις και δυνάμεις, που αναπτύσσονται τόσο σε κανονικές συνθήκες μεταφοράς όσο και σε συνθήκες επιταχύνσεως, επιβραδύνσεως ή κάθετης κινήσεως του φορτίου. **Ειδικότερα, για τον υπολογισμό του πάχους των τοιχωμάτων του περιβλήματος των βυτίων, λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:**

α) Η «πίεση υπολογισμού» του βυτίου.

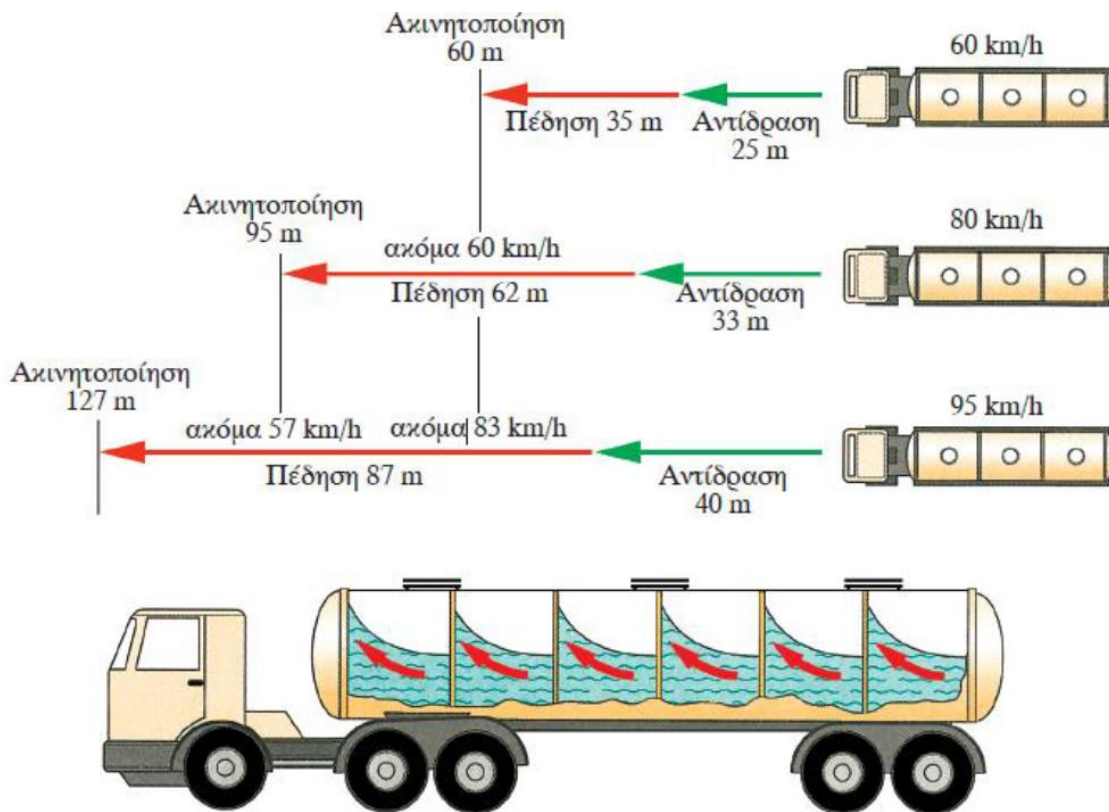
β) Οι στατικές και δυναμικές εντάσεις σε κανονικές συνθήκες μεταφοράς.

γ) Οι παρακάτω δυνάμεις:

- Δύναμη επί του βυτίου ίση με το διπλάσιο του συνολικού βάρους του οχήματος προς την κατεύθυνση της πορείας του.
- Δύναμη επί του βυτίου ίση με το ολικό βάρος του οχήματος σε ορθή γωνία με την κατεύθυνση της πορείας του.
- Δύναμη επί του βυτίου ίση με το ολικό βάρος του οχήματος με κατεύθυνση κατακόρυφα προς τα πάνω.
- Δύναμη επί του βυτίου ίση με το διπλάσιο του ολικού βάρους του οχήματος με κατεύθυνση κατακόρυφα προς τα κάτω.

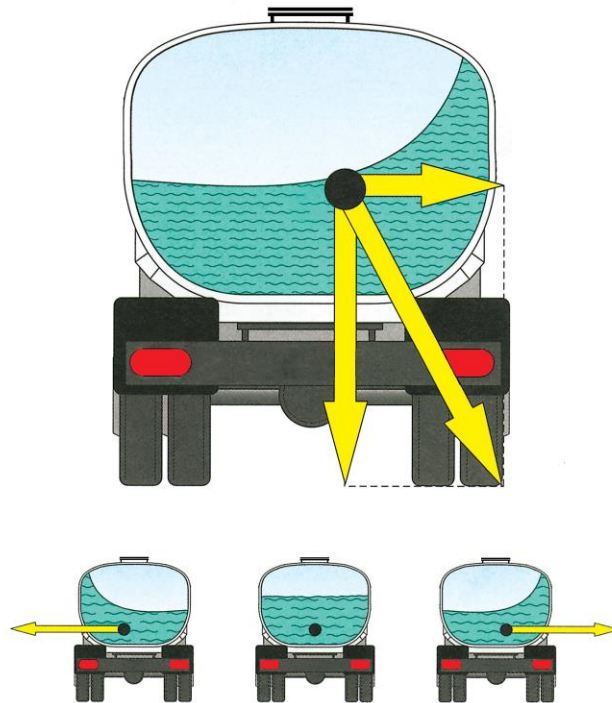
4.2 Οδική Συμπεριφορά Βυτιοφόρων Οχημάτων

Η οδική συμπεριφορά των βυτιοφόρων οχημάτων είναι [2] διαφορετική από τη συμπεριφορά των άλλων κατηγοριών οχημάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η οδική συμπεριφορά των οχημάτων της κλάσεως αυτής επιβαρύνεται και από τη σχετική κίνηση του υγρού μέσα στο βυτίο κατά την επιτάχυνση ή επιβράδυνση του οχήματος ή την κυκλική κίνησή του στις στροφές. Η κίνηση αυτή του υγρού επηρεάζει το όχημα και μπορεί να το οδηγήσει σε αστάθεια, σε περιπτώσεις που σε άλλα οχήματα, σταθερού φορτίου, με τις ίδιες διαστάσεις και βάρη, δε θα παρουσιαζόταν πρόβλημα. Η δύναμη, που μετακινεί το μεταφερόμενο υγρό, προέρχεται από την αδράνεια του υγρού και για το λόγο αυτό η δύναμη είναι ανάλογη με τη μάζα του υγρού που μετακινείται.



Εικόνα 3: Οδική Συμπεριφορά Βυτιοφόρων

Η ανατροπή του οχήματος θα συμβεί, όταν το κέντρο βάρους του συστήματος «όχημα-φορτίο», δηλαδή η συνισταμένη δύναμη, η οποία σχηματίζεται από τη φυγόκεντρο δύναμη, που είναι οριζόντια, και από τη δύναμη του βάρους του οχήματος, που είναι κατακόρυφη, περνά έξω από την ακραία ακμή του τροχού του οχήματος (ακμή ανατροπής). Σε διπλές στροφές το υγρό κινείται πρώτα προς τη μια πλευρά και μετά προς την αντίθετη. Στην περίπτωση αυτή ανάλογα μεταφέρεται και η φόρτιση. Ταυτόχρονα, όμως, αναπτύσσεται και κυματισμός του υγρού, που μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνο κλυδωνισμό του οχήματος. Συνήθως, ο κλυδωνισμός παρατηρείται μετά το τέλος της στροφής και έτσι το οριακό σημείο ανατροπής αποτρέπεται, αφού το όχημα έχει επιστρέψει στην ευθεία πορεία. Η επίδραση της μετατοπίσεως του φορτίου περιορίζεται, όταν το βυτίο είναι διηρημένο σε διαμερίσματα, και ελαττώνεται ακόμα περισσότερο, όταν μέσα στα διαμερίσματα υπάρχουν πλέγματα. Στα διαμερισματοποιημένα βυτία το φρενάρισμα και η επιτάχυνση του οχήματος μπορούν να μετατοπίσουν το υγρό μόνο μέχρι το διαχωριστικό τοίχωμα. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η ευστάθεια του βυτιοφόρου οχήματος επηρεάζεται από τις κινήσεις του υγρού μέσα στο βυτίο, οι οποίες είναι εντονότερες, όταν ο βαθμός πληρώσεως του βυτίου είναι μικρός. Για το λόγο αυτό πρέπει σε κάθε περίπτωση να τηρείται ο ελάχιστος βαθμός πληρώσεως του βυτίου.



Εικόνα 4: Δύναμη που ασκεί το μεταφερόμενο υγρό στο όχημα, σε συνθήκη στροφής

Γενικά, κατά την κίνηση ενός βυτιοφόρου οχήματος η δύναμη που ασκεί το υγρό φορτίο πάνω στο όχημα, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του υγρού που μετακινείται. Για να αποφεύγονται οι μεγάλες μετακινήσεις υγρού μέσα στο βυτίο, τα βυτία χωρίζονται σε διαμερίσματα με ενδιάμεσα τοιχώματα. Όταν το βυτίο είναι σχεδόν γεμάτο, το υγρό δεν έχει χώρο να μετακινηθεί, γιαυτό και η δύναμη που ασκεί το υγρό φορτίο είναι περιορισμένη. Μόνο το ανώτερο στρώμα του υγρού έχει ελεύθερο χώρο για να κινηθεί. Όταν το βυτίο είναι σχεδόν άδειο, υπάρχει χώρος για να κινηθεί το υγρό αλλά η μάζα του είναι πολύ μικρή για να αναπτύξει μεγάλες δυνάμεις ικανές να ανατρέψουν το όχημα. Όταν το όχημα είναι μισογεμάτο, τότε και η μάζα του υγρού είναι υπολογίσιμη και υπάρχει ελεύθερος χώρος για να κινηθεί όλη αυτή η μάζα. Σε αυτήν την περίπτωση αναπτύσσονται οι ισχυρότερες δυνάμεις και είναι η πιο επικίνδυνη για ανατροπή. **Η πιο κρίσιμη ποσότητα είναι όταν πληρείται το 70% περίπου του χώρου του βυτίου.**

Για να επιτευχθεί η ασφαλέστερη κίνηση του οχήματος, πρέπει να εφαρμοσθούν οι ακόλουθοι γενικοί κανόνες:

- α)** Τα βυτία δεν πρέπει να είναι μισογεμάτα. Στα βυτία τα οποία δε χωρίζονται σε διαμερίσματα όγκου μέχρι 7.500 λίτρα, ο ελάχιστος βαθμός πληρώσεως του βυτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον το 80% του συνολικού όγκου του διαμερίσματος και συνεπώς το μέγιστο ελεύθερο περιθώριο του βυτίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20%.
- β)** Οδήγηση του οχήματος με μικρή ταχύτητα και ιδιαίτερα στις στροφές.

- γ)** Αποφυγή των αποτόμων χειρισμών (απότομο φρενάρισμα ή απότομη επιτάχυνση).
- δ)** Φρενάρισμα πριν από τις στροφές και όχι επάνω σε αυτές.
- ε)** Τα επικαθήμενα και τα ρυμουλκούμενα βυτία ανατρέπονται πιο εύκολα από τα απλά βυτιοφόρα.
- ζ)** Στα ημιρυμουλκούμενα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο κίνδυνος ανατροπής σε στροφή είναι μεγαλύτερος, όταν είναι γεμάτα μόνο τα εμπρός διαμερίσματα, διότι το κέντρο βάρους βρίσκεται πολύ κοντά στη γραμμή ανατροπής.
- η)** Τήρηση της σωστής σειράς φορτώσεως και εκφορτώσεως των πολυδιαμερισματικών βυτίων.
- θ)** Τήρηση της σωστής σειράς εκφορτώσεως σε περίπτωση τμηματικών παραδόσεων.

5. Θεωρητικό Μέρος - Ανάλυση με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA)

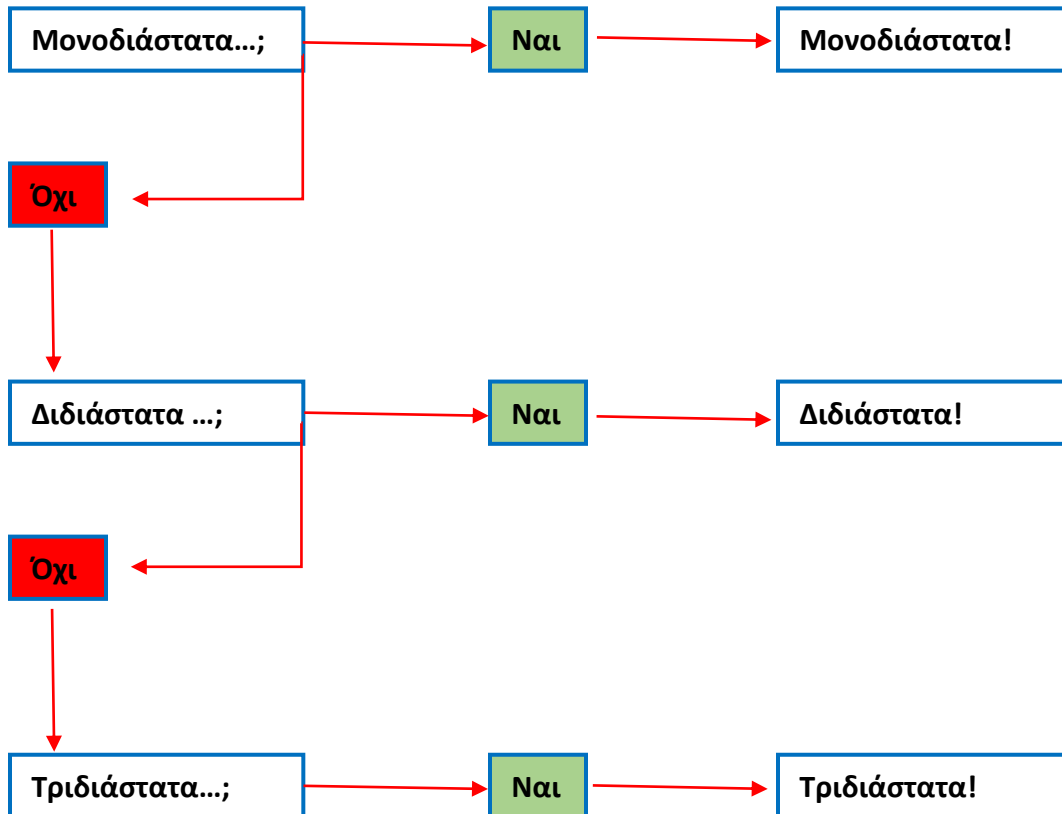
5.1 Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων

Η θεωρία **Πεπερασμένων Στοιχείων** μελετά τη **μηχανική, ρευστομηχανική, δυναμική, θερμική και ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά σωμάτων** και έχει πλέον σημαντικά εκτοπίσει τις αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν τα παραπάνω φαινόμενα. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται αφενός στη μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση των Πεπερασμένων Στοιχείων και αφετέρου, στην ολοένα αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ των σύγχρονων υπολογιστών, που έχει πλέον κάνει εφικτή τη λύση των πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων που προκύπτουν από αυτά. Ουσιαστικά δηλαδή, η Θεωρία Πεπερασμένων Στοιχείων έχει ουσία μόνο σε συνδυασμό με υπολογιστικές μηχανές: λύση των μοντέλων με «πράξεις στο χέρι», κάθε άλλο παρά συμφέρουσα είναι.

Τα μαθηματικά που περιγράφουν τα μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων είναι ιδιαίτερα σύνθετα και μάλιστα, κάθε λογισμικό της αγοράς (ANSYS, Abaqus, COMSOL κ.α.) κρατά κρυφούς τους επιλύτες (solvers) και τα μαθηματικά μοντέλα που τους διέπουν, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τέτοια μεγάλα πακέτα ενδεχομένως να χρησιμοποιούν διαφορετικά μεταξύ τους μαθηματικά μοντέλα ή ίσως και βελτιωμένα, μέσα από δοκιμές και εμπειρία, από αυτά που αποκαλούνται «κοινή γνώση».

Όντας πολύπλοκος τομέας, στην παρούσα εργασία δε θα γίνει παρουσίαση του μαθηματικού υποβάθρου που τον περιγράφει, καθώς θεωρείται ότι κάτι τέτοιο θα διέφευγε από την οριοθέτησή της, αλλά απλώς θα παρατεθούν στο παρόν υποκεφάλαιο οι «τύποι» **Πεπερασμένων Στοιχείων με κριτήριο τη δομή τους στο χώρο**. Ορίζονται, λοιπόν, τα **Μονοδιάστατα** Στοιχεία (Beams), τα **Διδιάστατα** (Plates) και τα **Τριδιάστατα** (Solids).

Γενικότερα, όσο λιγότερων διαστάσεων είναι τα χρησιμοποιούμενα Στοιχεία, τόσο απλούστερο είναι το μοντέλο προς επίλυση, επομένως, όπου είναι εφικτό, προτιμώνται τα Μονοδιάστατα Στοιχεία. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημά τους εντοπίζεται στην περιορισμένη δυνατότητα αξιόλογης περιγραφής σύνθετων γεωμετριών και συμπεριφορών, οπότε πολλές φορές πρέπει να προτιμηθούν Διδιάστατα ή και Τριδιάστατα Στοιχεία. Η παραπάνω αρχή μπορεί να περιγραφεί σχηματικά στο παρακάτω **Διάγραμμα**.



Διάγραμμα 1: Σχηματική αναπαράσταση εκλογής τύπου Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1.1 Μονοδιάστατα Στοιχεία

Τα Μονοδιάστατα Στοιχεία πρέπει γενικά να είναι η πρώτη προτίμηση, διότι φέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα:

- **Η μοντελοποίηση και η επίλυση είναι πολύ γρήγορες.** Λόγω της απλότητας των εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός μονοδιάστατου στοιχείου οι απαιτούμενες πράξεις για την επίλυση του μοντέλου είναι αφενός απλούστερες και αφετέρου λιγότερες σε αριθμό.

- Οι αλλαγές στο μοντέλο είναι εύκολες και απαιτούν μικρούς υπολογισμούς για την ενημέρωση του πλέγματος.
- Πολλοί κανόνες που περιγράφουν το μοντέλο ρυθμίζονται αυτόματα από το λογισμικό, κάνοντας την επίλυση ακόμα πιο «φθηνή».

Το πρόβλημα με τη χρήση Μονοδιάστατων Στοιχείων έγκειται στο γεγονός ότι δεν είναι όλες οι γεωμετρικές δοκοί ή δεν μπορούν να περιγραφούν ως δοκοί. Ένας απλός κανόνας για την εκλογή ή όχι Μονοδιάστων Στοιχείων θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής:

«Εάν η μέγιστη διάσταση της διατομής του μοντέλου είναι τουλάχιστον 10 φορές μικρότερη από το μήκος του, τότε μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δοκός».

Σαφώς, υπάρχουν λεπτομέρειες και εμπόδια σε αυτό που δεν μπορούν να αμεληθούν, όπως για παράδειγμα αλλαγή διατομής, η παρουσία εγκοπών κ.α. Αυτά μερικές φορές μπορεί να διαδραματίζουν κάποιο σημαντικό ρόλο, αλλά μερικές φορές όχι και είναι κάτι που επαφίεται στην κρίση και εμπειρία του Μηχανικού. Επίσης, ο παραπάνω κανόνας είναι καθαρά βοηθητικός και δε σημαίνει ότι δεν μπορεί να «παραβιαστεί». Για παράδειγμα, σε μία δοκό μήκους 3000mm, με διατομή είναι 300x300mm, η κοπή των τελευταίων 10mm ή και 100mm ή κάποια αλλαγή στη μορφοποίηση σε εκείνο το μήκος δεν είναι απαραίτητο ότι θα απαγορεύσει τη μοντελοποίηση της από Μονοδιάστατα Στοιχεία. Συχνά χρησιμοποιούνται Μονοδιάστατα Στοιχεία σε δοκούς που εκφεύγουν σημαντικά του παραπάνω περιορισμού. Ωστόσο, όντας πάνω από την 1/10 αναλογία, μπορούν με αρκετά μεγάλη ασφάλεια να χρησιμοποιηθούν Μονοδιάστατα Στοιχεία, χωρίς να αναμένονται μεγάλες εκπλήξεις.

5.1.2 Διδιάστατα Στοιχεία

Φυσικά, με βάση τα παραπάνω, τα Μονοδιάστατα στοιχεία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιο περίπλοκα από μία δοκό μοντέλα, όπως για παράδειγμα η δεξαμενή ενός βυτιοφόρου. Με βάση το παραπάνω **Διάγραμμα**, η επόμενη επιλογή όταν τα Μονοδιάστατα Στοιχεία δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν, είναι τα Διδιάστατα, τα οποία προσφέρουν μερικά καλά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα Τριδιάστατα:

- Η **μοντελοποίηση και η επίλυση είναι μεσαίων απαιτήσεων**. Συγκριτικά με περίπλοκα Τριδιάστατα Στοιχεία, όπως για παράδειγμα Εξαεδρικά, τα Διδιάστατα Στοιχεία είναι εξαιρετικά απλή και φθηνή υπολογιστικά λύση. Ενώ με τα Τριδιάστατα Στοιχεία ενδέχεται να υπολογιστεί γρηγορότερα η λύση για την ίδια ποσότητα στοιχείων (συνήθως έχουν μόνο 3 Β.Ε ανά κόμβο, αλλά περισσότερους κόμβους ανά στοιχείο), το ίδιο μοντέλο μιας πλάκας για παράδειγμα θα χρειαστεί πολύ περισσότερα Τριδιάστατα Στοιχεία για να μοντελοποιηθεί, οπότε τελικά η επίλυσή του με Διδιάστατα είναι κατά πολύ «φθηνότερη».

- **Συγκεκριμένες αλλαγές στο μοντέλο** (π.χ. αλλαγή του πάχους τοιχώματος μιας πλάκας) **μπορούν να εφαρμοστούν με μηδαμινές αλλαγές στο πλέγμα**. Σίγουρα δεν ισχύει στο βαθμό που ισχύει για τα Μονοδιάστατα Στοιχεία, ωστόσο, με κατάλληλη πρόβλεψη μπορεί να αποφευχθεί η δαπάνη σημαντικού χρόνου κατά τις αλλαγές/διορθώσεις του μοντέλου.

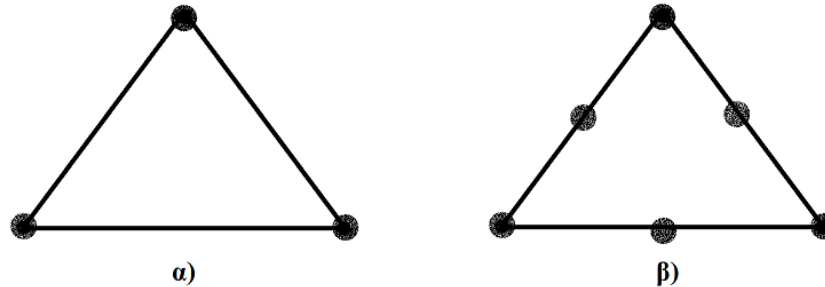
Ο αντίστοιχος κανόνας που μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτή την περίπτωση διατυπώνεται ως εξής:

«Εάν το μοντέλο έχει πάχος 10 φορές μικρότερο από τις άλλες δύο διαστάσεις του (μήκος και πλάτος), τότε μπορεί να μοντελοποιηθεί με Διδιάστατα Στοιχεία»

Και σε αυτή την περίπτωση, ένα σταθερό κατά μήκος και κατά πλάτος πάχος είναι σίγουρα σημαντικό, ωστόσο υπάρχουν γενικότερα διάφοροι τρόποι για να αντιμετωπιστούν τυχόν διακυμάνσεις του. Μερικές φορές, από την άλλη, ακόμη και πλάκες που υπακούουν απόλυτα στον παραπάνω κανόνα, ενδέχεται, για διάφορους λόγους να πρέπει να μοντελοποιηθούν με Τριδιάστατα Στοιχεία. Αυτό, ωστόσο, είναι μια εξαίρεση και όχι ο κανόνας. Μπορεί με σχετικά μεγάλη σιγουριά να ειπωθεί ότι η συντριπτική πλειοψηφία των πλακών μπορεί να μοντελοποιηθεί με Διδιάστατα Στοιχεία, ενώ ένα σημαντικό επίσης ποσοστό των γενικότερων γεωμετριών (που δεν μπορούν δηλαδή να οριστούν ως «πλάκες») μπορεί επίσης να περιγραφεί ιδιαιτέρως ικανοποιητικά από τέτοια Στοιχεία.

Συνήθως, χρησιμοποιούνται γραμμικά (1^{ης} τάξης δηλαδή) Μονοδιάστατα Στοιχεία, καθώς είναι ικανά να εκτελέσουν τη λειτουργία τους, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης μεγαλύτερης τάξης. Για το λόγο αυτό, δε θα γίνει περαιτέρω ανάλυση που να αφορά τα Μονοδιάστατα Στοιχεία.

Ωστόσο, τα **Διδιάστατα Στοιχεία** μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως **1^{ης} τάξης** (γραμμικά – linear) είτε ως μεγαλύτερης τάξης (εδώ θα παρουσιαστούν τα **2^{ης} τάξης** – quadratic). Εκτός από αυτή την κατηγοριοποίηση ενδιαφέρει, επίσης, και τα σχήμα των στοιχείων, με τα κυρίαρχα να είναι τα **Τριγωνικά** και τα **Τετραγωνικά**.

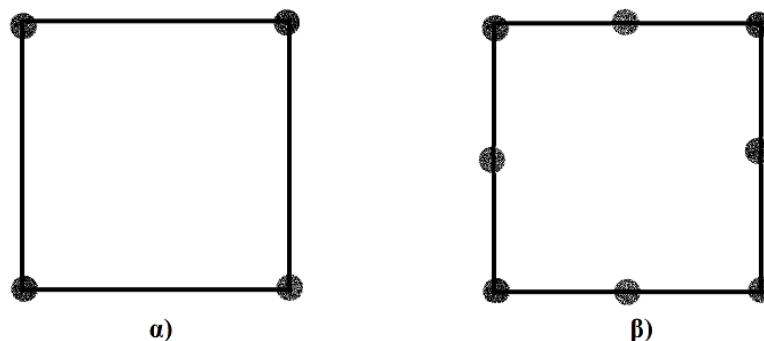


Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση Τριγωνικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης

Στην παραπάνω **Εικόνα** φαίνονται ένα **Τριγωνικό Στοιχείο 1^{ης} τάξης** (αριστερά) και ένα **2^{ης} τάξης** (δεξιά). Όπως γίνεται κατανοητό, μία εύκολη τεχνική για τον καθορισμό της τάξης ενός στοιχείου είναι ο αριθμός των κόμβων του σε σχέση με τον αριθμό των πλευρών του. Έτσι, ένα στοιχείο με 3 πλευρές και 3 κόμβους είναι 1^{ης} τάξης και περιγράφεται από γραμμικές εξισώσεις, ενώ ένα στοιχείο με 6 κόμβους και 3 πλευρές είναι 2^{ης} τάξης.

Τα τριγωνικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης γενικότερα δε θεωρούνται αποτελεσματικά και εύχρηστα, διότι είναι άκαμπτα σε προβλήματα κάμψης, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν σταθερή τάση κατά μήκος του στοιχείου. Αυτό απλώς καθιστά πολύ δύσκολο για το λογισμικό να υπολογίσει σωστά την απόκριση της κάμψης, εκτός εάν χρησιμοποιηθούν πολλά στοιχεία, κάτι το οποίο προφανώς δεν είναι επιθυμητό.

Από την άλλη, τα τριγωνικά Στοιχεία 2^{ης} τάξης καταφέρνουν να αντιμετωπίσουν ικανοποιητικά τους ανωτέρω περιορισμούς, οπότε θεωρούνται μία καλή λύση όταν επιλέξουμε να καταφύγουμε σε τριγωνικά Στοιχεία.



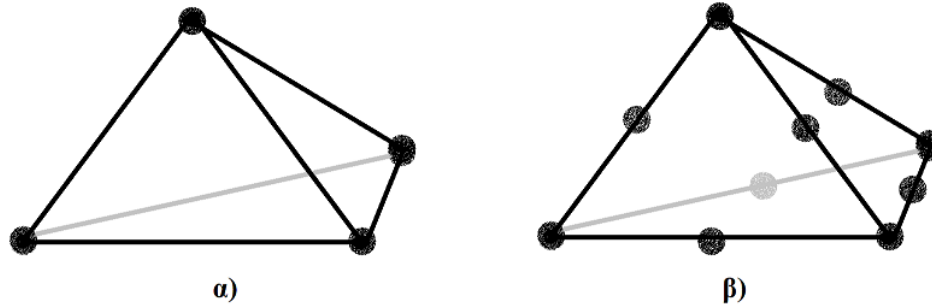
Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση Τετραγωνικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης

Κατ' αναλογία, με τον ίδιο τρόπο μπορούν να οριστούν και τα **Τετραγωνικά Στοιχεία**, τα οποία βέβαια, εξ ορισμού **φέρουν καλύτερες ιδιότητες από τα αντίστοιχα Τριγωνικά**. Γενικότερα, τα τετραγωνικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης συχνά θεωρούνται ως τα «γενικά» ή «κοινά» Διδιάστατα Στοιχεία, λόγω της αποτελεσματικότητάς τους και της πολύ συχνής τους χρήσης. Προφανώς, τα τετραγωνικά 2^{ης} τάξης είναι κατά πολύ αποτελεσματικότερα, ωστόσο αυξάνουν αρκετά τα υπολογιστικό κόστος, με αποτέλεσμα πολλές φορές να απορρίπτονται προς χάρη των πλεονεκτημάτων που φέρουν τα 1^{ης} τάξης.

5.1.3 Τριδιάστατα Στοιχεία

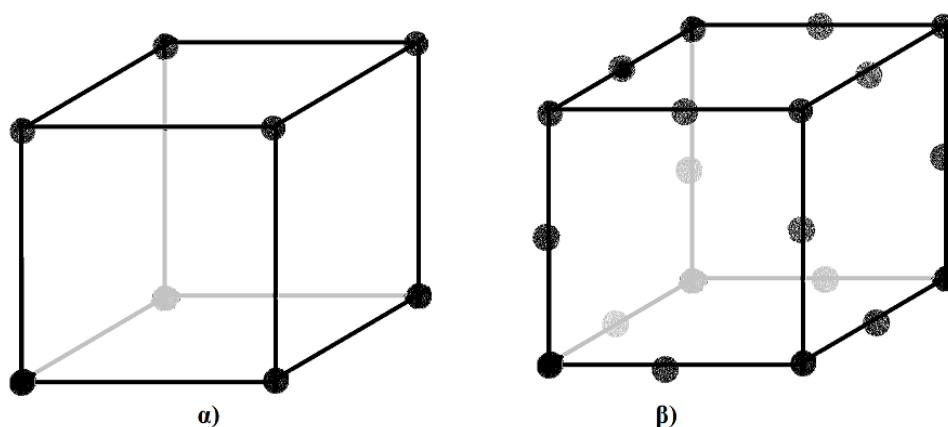
Η τελευταία κατηγορία, τα **Τριδιάστατα Στοιχεία**, είναι αυτή που βρίσκει εφαρμογή εκεί που δεν επαρκούν οι υπόλοιπες δύο. Όντας Στοιχεία που περιγράφονται από πιο σύνθετα μοντέλα από τα προηγούμενα, πρέπει να αποφεύγονται και να χρησιμοποιούνται μόνο σε περίπτωση που αυτό επιβάλλεται από τις συνθήκες. Για παράδειγμα, ο κορμός ενός κινητήρα, ένας ενισχυμένος άξονας μικρού μήκους, ένα γρανάζι και πολλές άλλες γεωμετρίες, πρέπει να μοντελοποιηθούν από τα Τριδιάστατα Στοιχεία.

Αντίστοιχα, στα Τριδιάστατα Στοιχεία ενδιαφέρει αφενός ο αριθμός των πλευρών του Στοιχείου και αφετέρου η τάξη του. Εδώ, με αναγωγή από τις δύο διαστάσεις προκύπτουν δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες ομάδες Στοιχείων: τα **Τετραεδρικά** (Tetrahedral) και τα **Εξαεδρικά** (Hexahedron).



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση Τετραεδρικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης

Τα **Τετραεδρικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης** είναι γενικότερα ιδιαίτερα αμφιλεγόμενα ως προς την απόδοσή τους. Έχουν το ισχυρό πλεονέκτημα της δημιουργίας ενός γρήγορου και απλού πλέγματος, ωστόσο συχνά αντιμετωπίζουν προβλήματα στην επίλυση. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, μία συχνή τακτική είναι η μείωση του μεγέθους τους ώστε να περιγράφουν καλύτερα το μοντέλο, αλλά κάτι τέτοιο πρέπει να γίνεται μέχρι το σημείο που αυτό είναι αποδοτικό. Τα **2^{ης} τάξης Τετραεδρικά Στοιχεία** αποδίδουν καλύτερα κατά την επίλυση, οπότε πολλές φορές αποτελούν μία καλή εναλλακτική των 1^{ης} τάξης, αυξάνοντας ωστόσο αρκετά το υπολογιστικό κόστος.



Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση Εξαεδρικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης

Αντίστοιχα, τα **Εξαεδρικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης**, είναι στον Τριδιάστατο χώρο ό,τι και τα Τετραγωνικά 1^{ης} τάξης στο Διδιάστατο: τα «κοινά». Γενικά, περιγράφουν ικανοποιητικά μεγάλο αριθμό γεωμετριών και αποδίδουν στην επίλυση. Ένας γενικός κανόνας που τα ακολουθεί συχνά θέτει ως απαραίτητη προϋπόθεση να μην περιγράφεται ποτέ το πάχος του μοντέλου από ένα μόνο τέτοιο στοιχείο, αλλά τουλάχιστον από δύο, κάτι που όταν τα πάχη είναι μικρά οδηγεί σε αναγκαστική σμίκρυνση των Στοιχείων επίσης. Αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση Εξαεδρικών Στοιχείων 2^{ης} τάξης, καθότι διαθέτουν κόμβους και επί των πλευρών, αλλά, από την άλλη, οδηγούν σε πολύ πιο περίπλοκα μαθηματικά μοντέλα προς επίλυση.

5.1.4 1^{ης} και 2^{ης} τάξης Πεπερασμένα Στοιχεία

Ως γενικός εμπειρικός κανόνας, προτείνεται η χρήση Στοιχείων 2^{ης} τάξης έναντι 1^{ης} τάξης, διότι παραμορφώνονται πιο ρεαλιστικά και μπορούν επίσης να αποτυπώσουν καλύτερα περίπλοκες γεωμετρικές λεπτομέρειες. Σε γενικές γραμμές:

Τα Στοιχεία 1^{ης} τάξης:

- Είναι υπολογιστικά πιο αποδοτικά και
- Φέρουν βελτιωμένη σύγκλιση επαφών

ενώ:

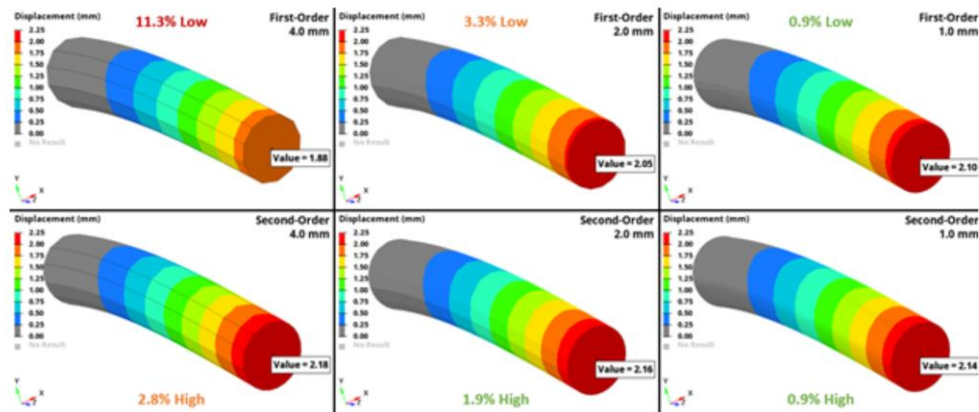
Τα Στοιχεία 2^{ης} τάξης:

- Περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την παραμόρφωση
- Παρέχουν καλύτερη γεωμετρική αναπαράσταση, αλλά
- Είναι υπολογιστικά «ακριβά»

Ωστόσο, υπάρχουν **δύο βασικοί λόγοι για τους οποίους προτιμώνται τα Στοιχεία 2^{ης} τάξης**:

- παρέχουν πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα και
- μπορούν να είναι πιο αποτελεσματικά ανάλογα με τη στρατηγική που ακολουθείται κατά τη δόμηση του πλέγματος.

Στην παρακάτω **Εικόνα** παρουσιάζεται ένα πρόβλημα κάμψης στο οποίο μια δοκός με ακτίνα 10mm και μήκος 100mm είναι πακτωμένη στο ένα άκρο και φορτίζεται με 10000 N στο ελεύθερο άκρο της. **Για την επίλυση χρησιμοποιούνται 1^{ης} τάξης Στοιχεία** (επάνω σειρά εικόνων), **με μεγέθη 4, 2 και 1 mm** (από αριστερά προς τα δεξιά) και **2^{ης} τάξης** (κάτω σειρά εικόνων) **με ίδια μεγέθη**.



Εικόνα 9: Σύγκριση αποτελεσμάτων Στοιχείων 1ης και 2ης τάξης

Όταν χρησιμοποιούνται **Στοιχεία 1^{ης} τάξης** (επάνω γραμμή εικόνων), η **απόκλιση είναι σημαντική και μάλιστα άμεσα εξαρτώμενη από το μέγεθος των Στοιχείων**. Αντίθετα, για τα **Στοιχεία 2^{ης} τάξης** φαίνεται ότι η **περιγραφή είναι περίπου ταυτόσημη, ανεξαρτήτως του μεγέθους τους** και συμφωνεί με τη «βέλτιστη» πρόβλεψη των Στοιχείων 1^{ης} τάξης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα Τετραεδρικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης είναι πολύ άκαμπτα, ένα φαινόμενο το οποίο γίνεται πιο έντονο καθώς αυξάνεται το μέγεθος των Στοιχείων.

Κάποιοι **γενικοί κανόνες**, λοιπόν, για την τάξη των Πεπερασμένων Στοιχείων, μπορούν να τεθούν ως εξής:

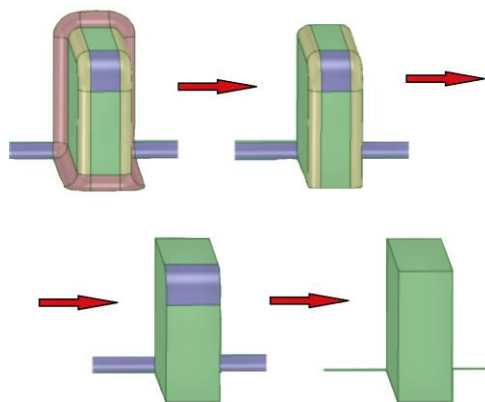
- Να χρησιμοποιούνται Στοιχεία 2^{ης} τάξης όποτε είναι δυνατόν.
- Να μην χρησιμοποιούνται Τετραεδρικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης, διότι είναι πολύ άκαμπτα.
- Τα Εξαεδρικά Στοιχεία 1^{ης} τάξης παρέχουν έναν εξαιρετικό συνδυασμό αποτελεσματικότητας και ακρίβειας.

5.2 Μέθοδοι βελτίωσης Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

Η κατασκευή ενός αποτελεσματικού και αποδοτικού μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να είναι μια δύσκολη διαδικασία, σε συνδυασμό με το ότι αναμένεται ότι θα είναι σε θέση να απαντά σε ερωτήσεις όσο το δυνατόν γρηγορότερα και με τα πιο ακριβή αποτελέσματα. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο απαιτούνται συγκεκριμένες ενέργειες και μεθοδολογίες, μερικές από τις οποίες παρατίθενται παρακάτω.

5.2.1 Απλοποίηση Γεωμετρίας

Η απλοποίηση του μοντέλου έρχεται πρώτη κατά την έναρξη της ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων. Φυσικά, η απλοποίηση του μοντέλου μπορεί να μην είναι δυνατή σε όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο, πρέπει σε κάθε περίπτωση να γίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο επιμελής εργασία για την εξάλειψη των περιττών μερών του σχεδιασμού, τα οποία δεν επηρεάζουν καθόλου ή επηρεάζουν ελάχιστα τη συμπεριφορά την οποία πρόκειται να αναλυθεί και περιπλέκουν πολύ τη γεωμετρία. Η απλοποίηση του μοντέλου μερικές φορές μπορεί να είναι μικρές γεωμετρικές διορθώσεις, όπως φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα** (π.χ. αφαίρεση ραδίων, αφαίρεση «φτερών», γεωμετριών που εξέχουν κ.λπ.) που δεν επηρεάζουν έντονα τη μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου, ενώ άλλες φορές αφαιρέσεις μεγαλύτερων μερών της γεωμετρίας, που για παράδειγμα δεν εμπλέκονται στο προς εξέταση φαινόμενο.



Εικόνα 10: Παράδειγμα απλοποίησης μοντέλου με αφαίρεση ραδίων

5.2.2 Επιλογή κατάλληλου πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων

Υπάρχει μια σειρά από ιδιότητες του πλέγματος που είναι ρυθμιζόμενες κατά την κατασκευή του πλέγματος όπως: defeating, μέγεθος πλέγματος, refinement, proximity κ.λπ. (Λεπτομερής ανάλυση παρακάτω – 5.3.6). Ωστόσο, στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύεται η επιλογή των σωστών και πιο αποτελεσματικών τύπων στοιχείων.

Μπορεί να φαίνεται διαισθητικά σωστό να υποτεθεί ότι το 3D πλέγμα (Τριδιάστατα Στοιχεία) αποδίδει περισσότερες λεπτομέρειες, αλλά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει πάντα. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις μεγάλης κάμψης, τα Τριδιάστατα Στοιχεία συχνά δημιουργούν τεχνητά άκαμπτες δομές όταν χρησιμοποιούνται για την πλέξη γεωμετριών με λεπτά τοιχώματα, με αποτέλεσμα ανακριβείς προσομοιώσεις (ιδιαίτερα όταν μιλάμε για Τετραεδρικά Στοιχεία 1ης τάξης). Επιπλέον, μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να τελειοποιηθεί το πλέγμα και να δημιουργηθούν αρκετά στοιχεία μέσω του πάχους μιας λεπτότοιχης δομής, ώστε να επιτευχθούν ακριβή αποτελέσματα μετατοπίσεων/παραμορφώσεων και καταπόνησης.

Επιπλέον, εάν η γεωμετρία είναι αρκετά σύνθετη, οι δομές με λεπτά τοιχώματα μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα ένα πλέγμα κακής ποιότητας όταν χρησιμοποιούνται συμπαγή στοιχεία, δημιουργώντας στοιχεία που μοιάζουν με λωρίδες, με κακούς λόγους διαστάσεων, επηρεάζοντας έτσι αρνητικά τα αποτελέσματα.

5.2.3 Εύρεση κατάλληλου Ρυθμού επιβολής φορτίου και Χρονικών βημάτων προσομοίωσης

Ο καθορισμός των κατάλληλων εφαρμογών φορτίου είναι ένα σημαντικό βήμα της ανάλυσης. Η εφαρμογή του φορτίου είναι η είσοδος του μοντέλου για την οποία δοκιμάζεται το αντικείμενο και μπορεί να είναι (ανάλογα με το φαινόμενο) ένας θερμικός κύκλος, μια κρούση από πτώση, μια δόνηση ή μια στατική κάμψη.

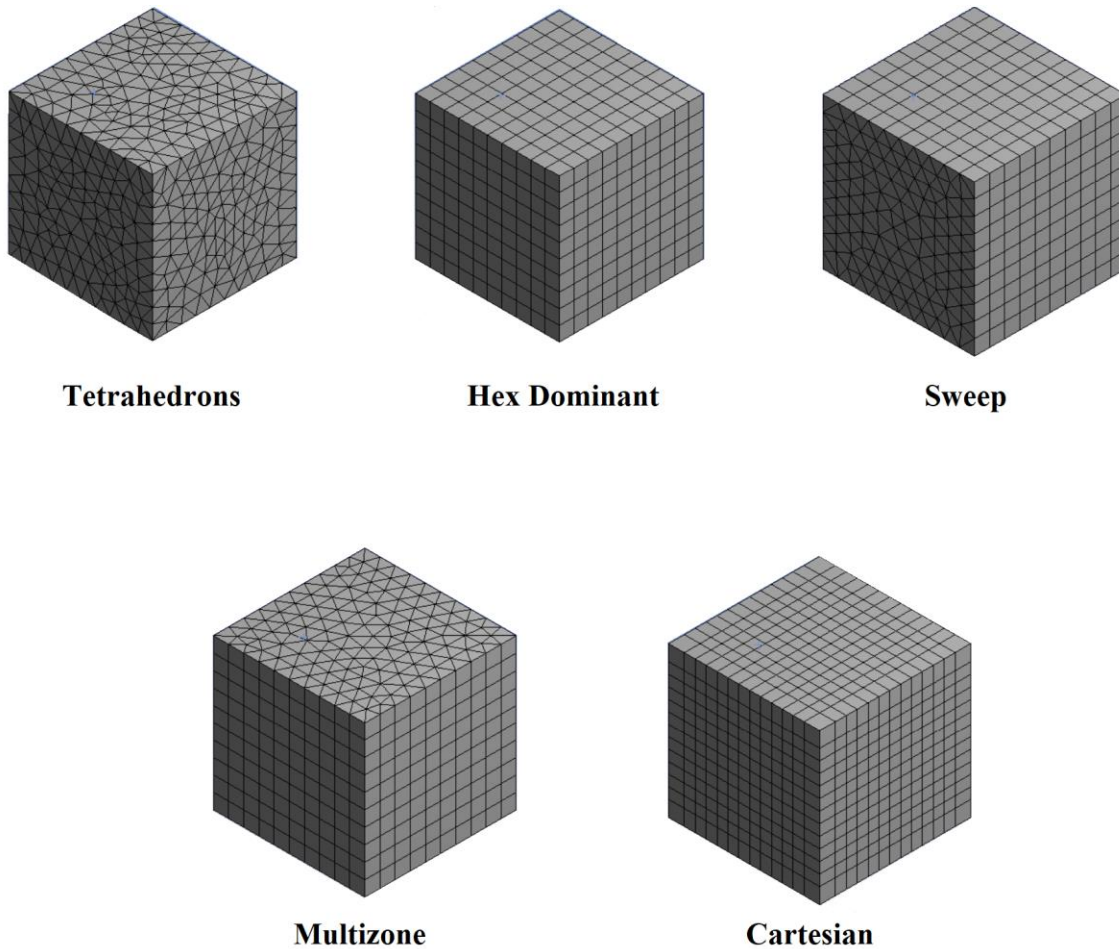
Ένα κοινό παράδειγμα είναι ο καθορισμός του εάν τα φορτία που εφαρμόζονται πρέπει να εφαρμόζονται ως στατικά (μελέτη μόνιμης κατάστασης) ή μεταβατικά (μελέτη μεταβατικής κατάστασης). Για παράδειγμα, εάν προσομοιώνεται η κάμψη μιας κατασκευής κατά τη συναρμολόγηση, μπορεί να είναι αποδεκτό να μοντελοποιηθεί το φορτίο ως στατική μετατόπιση (ως μόνιμη κατάσταση) επειδή οι ρυθμοί καταπόνησης είναι πιθανό να είναι πολύ αργοί και τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από το χρόνο. Ωστόσο, εάν μοντελοποιηθεί η παραμόρφωση που προκαλείται από την πτώση του ίδιου συστήματος, πιθανότατα θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεταβατικό μοντέλο (μεταβατική κατάσταση), ώστε να καταγραφούν τα σχετικά αδρανειακά φαινόμενα, επειδή ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου είναι πολύ πιο μικρός και τα αποτελέσματα εξαρτώνται από αυτόν.

Επίσης, είναι σημαντικό να λαμβάνονται πάντα υπόψιν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες του πραγματικού κόσμου που πιθανότατα θα επηρεάσουν το αντικείμενο που μελετάται. Η

σωστή εισαγωγή αυτών των παραγόντων οδηγεί σε μια ανάλυση που είναι ακριβής, έγκυρη και εφαρμόσιμη.

5.3 Τύποι και Ρυθμίσεις Πεπερασμένων Στοιχείων στο ANSYS Workbench

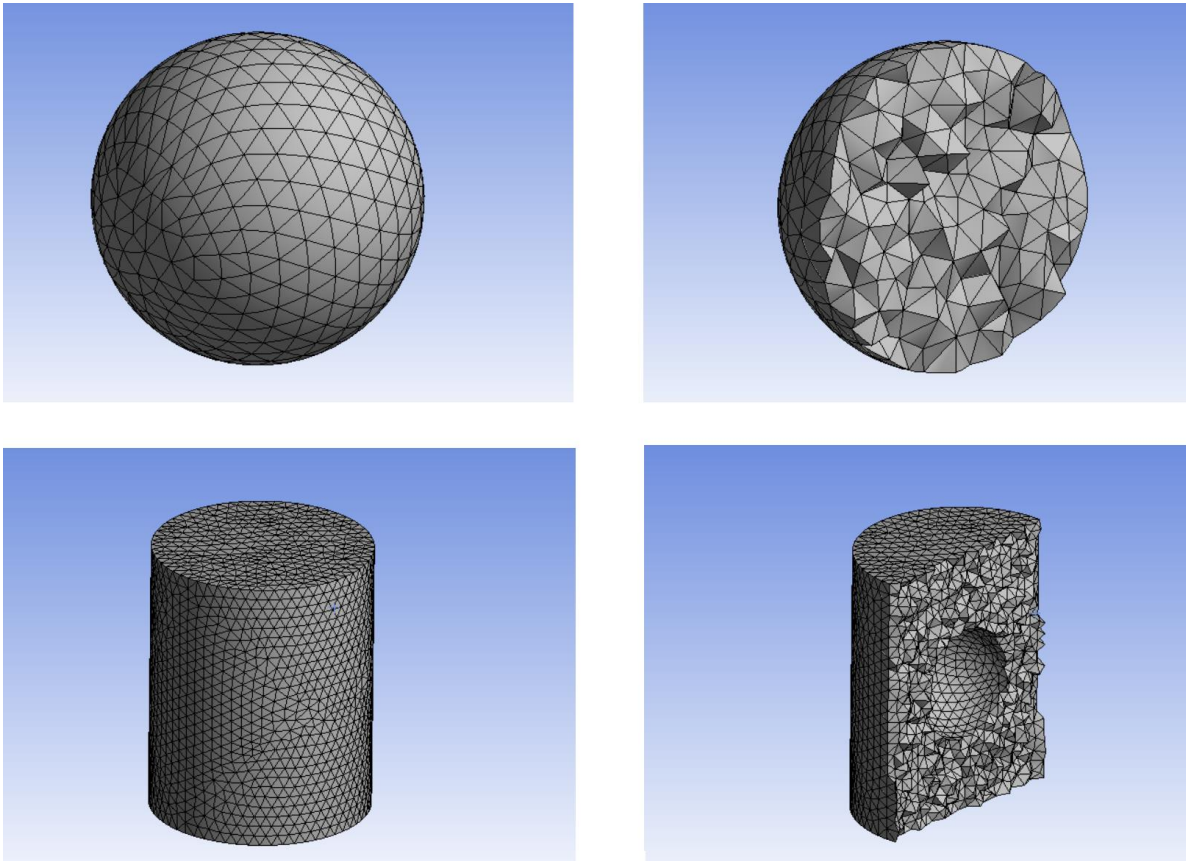
Στο λογισμικό ANSYS Workbench, υπάρχει η δυνατότητα να αποφασιστεί αυτόματα από το λογισμικό ποια μέθοδος πλέγματος θα χρησιμοποιηθεί βάσει των συνοριακών συνθηκών και της γεωμετρίας ή να επιλέξει ο χρήστης κάποιες μεθόδους για να «επηρεάσει» τη δομή πλέγματος του. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στη διεπαφή χρήστη (αν δεν χρησιμοποιούνται εντολές APDL – ANSYS Parametric Design Language, δηλαδή προγραμματισμός του μοντέλου μέσω της γλώσσας προγραμματισμού του ANSYS) το λογισμικό δεν επιτρέπει να επιλεγθεί ένας συγκεκριμένος τύπος στοιχείου, όπως για παράδειγμα SOLID186 (Εξαεδρικό 2^{ης} τάξης) ή SOLID187 (Τετραεδρικό 2^{ης} τάξης) ή SHELL181 (Τετραγωνικό 1^{ης} τάξης) κ.λπ. Το μόνο που επιτρέπεται είναι ο μερικός έλεγχος του πλέγματος, με χρήση των «Μεθόδων Πλέγματος» των Τετραέδρων (Tetrahedron), Hex Dominant, Sweep, Multizone και Cartesian.



Εικόνα 11: "Μέθοδοι" Πλέγματος στο ANSYS Workbench

5.3.1 Τετραεδρικά (Tetrahedrons)

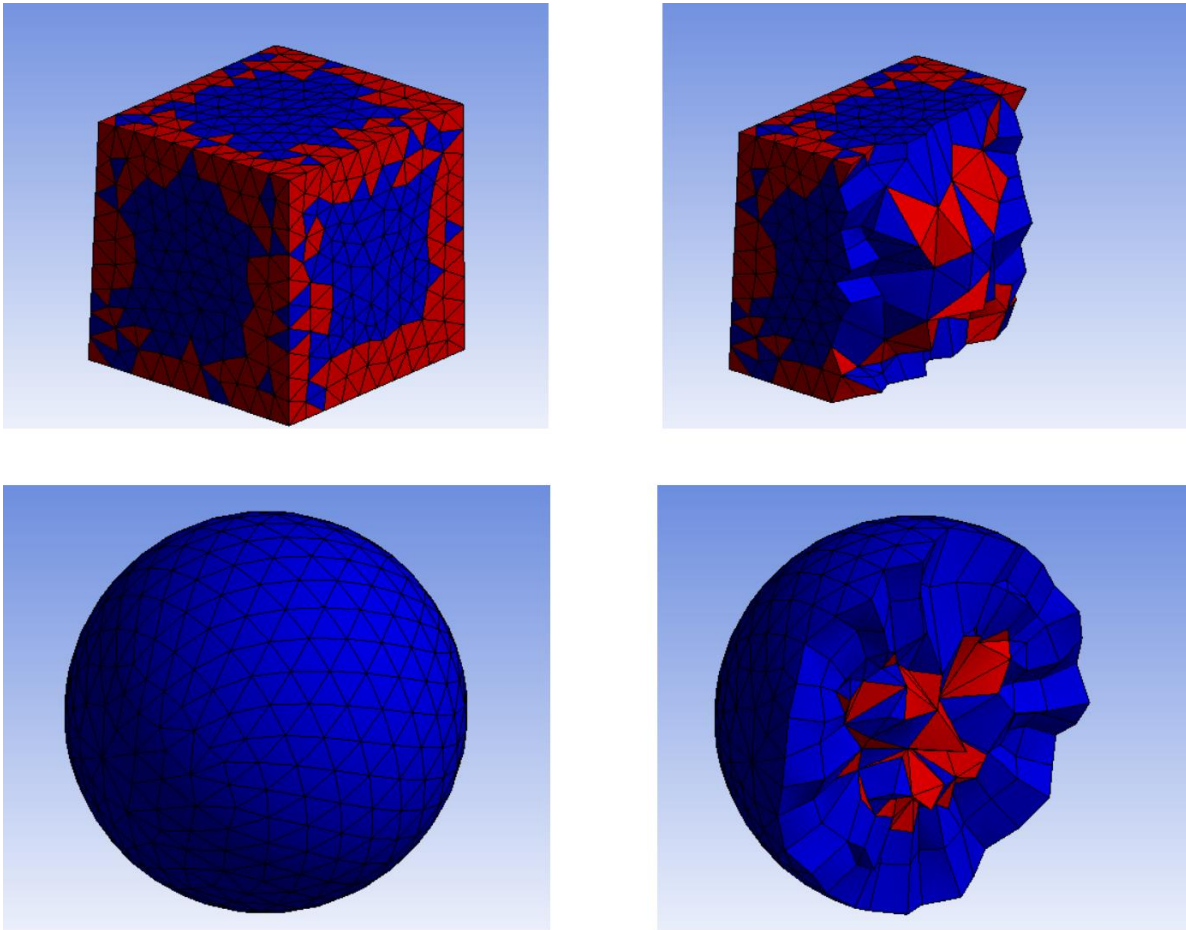
Σε αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιούνται Τετραεδρικά Στοιχεία για τη δημιουργία του πλέγματος. Μερικές φορές μπορεί να υπάρχουν και Πρισματικά Στοιχεία στη γεωμετρία του πλέγματος πέρα από Τετραεδρικά. Αυτή η μέθοδος προτιμάται για σχετικά σύνθετες γεωμετρίες όπως αυλακώσεις, κανάλια και γωνίες. Τα Τετραεδρικά Στοιχεία μπορούν να δημιουργήσουν μεγαλύτερο αριθμό κόμβων από τα Εξαγωνικά για ισοδύναμο μέγεθος πλέγματος. Η μορφή γεωμετριών που περιγράφονται από Τετραεδρικά Στοιχεία και οι τομές τους παρουσιάζονται στην παρακάτω **Εικόνα**.



Εικόνα 12: Πλέγματα Τετραεδρικών Στοιχείων

5.3.2 Κυρίαρχα Εξαεδρικά (Hex-Dominant)

Ο στόχος του «Hex-Dominant» είναι να δημιουργήσει πλέγματα όπου κυριαρχούν τα Εξαεδρικά Στοιχεία, τόσο σε αριθμό όσο και σε όγκο. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος βασίζεται στην τεχνική της συγχώνευσης τριγώνων η οποία χρησιμοποιείται για να ανασυνδυάσει τα τρίγωνα του αρχικού πλέγματος σε τετράπλευρα. Επομένως, η χρήση αυτής της μεθόδου δεν σημαίνει ότι όλα τα Στοιχεία τελικά θα είναι Εξαεδρικά. Έτσι με τις κατάλληλες εντολές, μπορούν να παρατηρηθούν πολλά Τετραεδρικά ή Πρισματικά Στοιχεία στη γεωμετρία του πλέγματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα**.

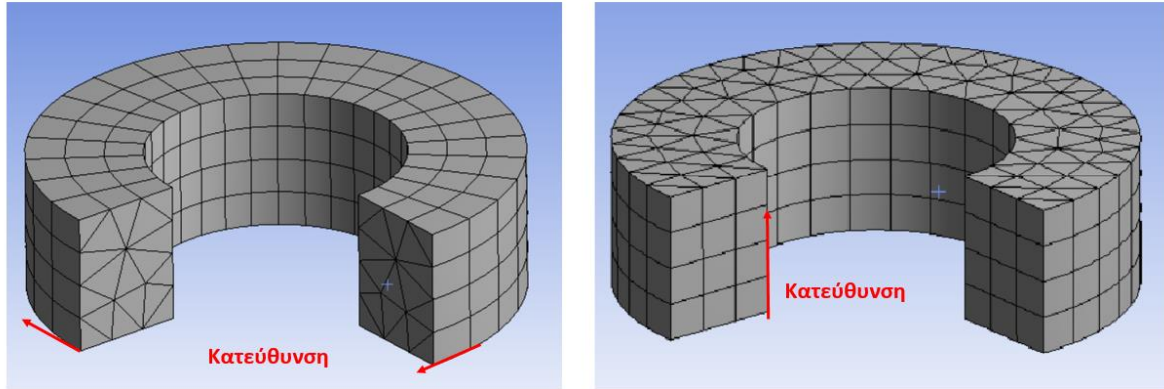


Εικόνα 13: Πλέγματα Τετραεδρικών και Εξαεδρικών Στοιχείων

Στις παραπάνω γεωμετρίες εμφανίζονται με **μπλε χρώμα τα Εξαεδρικά Στοιχεία** και με **κόκκινο τα Τετραεδρικά**.

5.3.3 Sweep

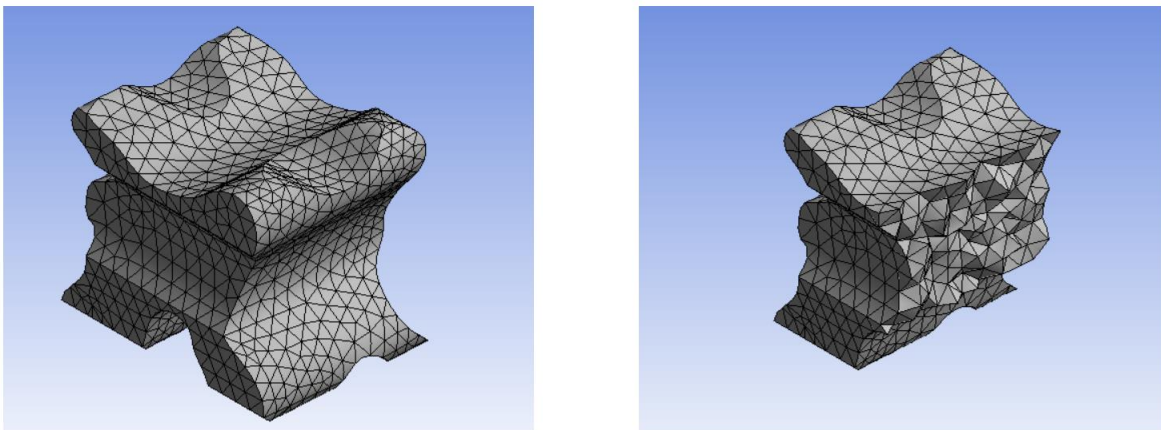
Το Sweep αναφέρεται στη μέθοδο κατά την οποία σε μια επιφάνεια του σώματος δημιουργείται πλέγμα (ίσως με Τριγωνικά ή Τετραγωνικά Στοιχεία υψηλής ποιότητας) και στη συνέχεια το πλέγμα «σαρώνεται» μέσα από το σώμα δημιουργώντας ένα πλέγμα καθ' όλο τον όγκο του σώματος. Το σώμα πρέπει να έχει τοπολογικά σταθερή διατομή προκειμένου η «σάρωση» να γίνει χωρίς προβλήματα. Στην παρακάτω **Εικόνα** απεικονίζεται ένα τέτοιο σώμα, στο οποίο επιλέγονται δύο διαφορετικές επιφάνειές του ως αρχικές. Προκειμένου να οριστεί η κατεύθυνση της σάρωσης πρέπει να επιλεγεί και η επιφάνεια-Στόχος.



Εικόνα 14: Πλέγματα με δύο διαφορετικές εφαρμογές της μεθόδου Sweep

5.3.4 Multizone

Το Multizone μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν τα μέρη του σώματος που είναι πολύ περίπλοκα για τη μέθοδο Sweep. Η μέθοδος πλέγματος MultiZone παρέχει μια αυτόματη αποσύνθεση της γεωμετρίας σε χαρτογραφημένες (δομημένες/σαρωτικές) περιοχές και ελεύθερες (μη δομημένες) περιοχές. Δημιουργεί αυτόματα ένα καθαρό Τετραεδρικό ή Εξαεδρικό πλέγμα, όπου είναι δυνατόν στη συνέχεια να γεμίσει τις πιο δύσκολες περιοχές με μη δομημένο πλέγμα.



Εικόνα 15: Πλέγμα Τετραεδρικών Στοιχείων με τη μέθοδο Multizone

5.3.5 Καρτεσιανά (Cartesian)

Αυτή η μέθοδος δημιουργεί ένα πλέγμα χωρίς την ανάγκη βελτιστοποίησης, το οποίο είναι προσαρμοζόμενο σε αλλαγές διατομής ή στενώσεις σε ένα σύστημα αγωγών για παράδειγμα. Δηλαδή, κάθε φορά που το επιβάλλει η γεωμετρία, τα Στοιχεία απλά «κόβονται», ώστε να προσαρμοστούν σε αυτή.

Δεδομένου ότι τα κομμένα κελιά που δημιουργούνται στο όριο μπορεί να είναι ιδιαίτερος μικρά, επιβάλλουν έναν σοβαρό περιορισμό στο **σταθερό χρονικό βήμα μιας explicit (παρακάτω – 5.4.1) προσομοίωσης**.

Το παραπάνω μαθηματικά περιγράφεται από τη συνθήκη Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

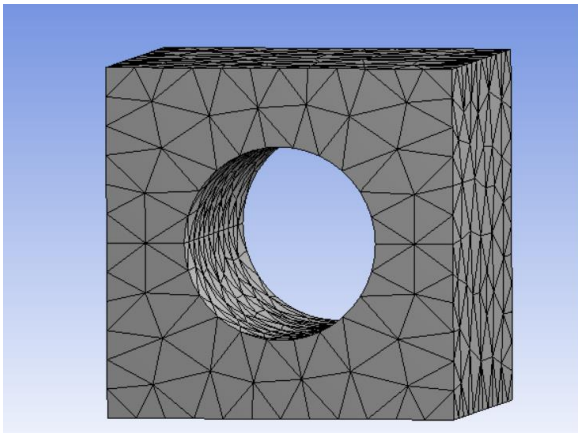
$$\Delta t \leq f \cdot \left[\frac{h}{c} \right]_{min}$$

όπου:

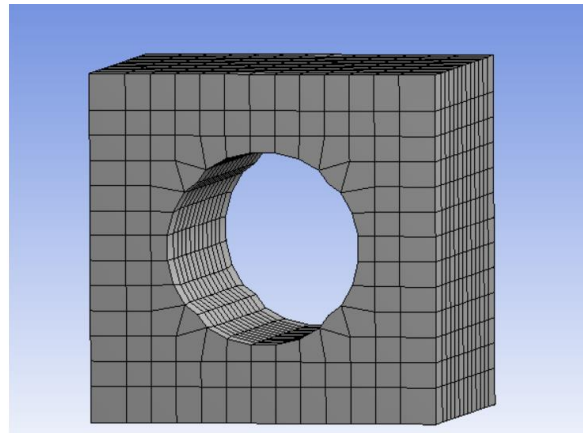
- h είναι το χαρακτηριστικό **μήκος του μικρότερου Στοιχείου** του πλέγματος
- c η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο υλικό η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του και ταυτίζεται (σε γενικές γραμμές) με την ταχύτητα της διάδοσης των μηχανικών διαταραχών. Δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- f ένας συντελεστής ασφαλείας, ίσος ή μικρότερος του 1.



Τετραεδρικά



Καρτεσιανά

Εικόνα 16: Πλέγμα Τετραεδρικών και Καρτεσιανών Στοιχείων

Η πρόκληση είναι να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα των εξαιρετικά μικρών Στοιχείων, με τη χρήση διαφόρων τεχνικών.

5.3.6 Global Controls

Η ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να δώσει την ευκαιρία να προσομοιωθούν ακόμη και πολύ περίπλοκα φαινόμενα σε μερικές ώρες, ωστόσο, μερικές φορές, ακόμη και ιδιαίτερα απλά φαινόμενα μπορεί να οδηγήσουν σε χρονοβόρες λύσεις, όταν οι ρυθμίσεις της προσομοίωσης δεν είναι σωστές.

Τα Global controls του πλέγματος περιλαμβάνουν λειτουργίες όπως sizing, inflation, smoothing, defeaturing κ.λπ.

Από προεπιλογή (χωρίς κάποια παρέμβαση του χρήστη) το πρόγραμμα:

- Υπολογίζει αυτόματα τα καθολικά μεγέθη στοιχείων με βάση τη μικρότερη γεωμετρική οντότητα
- Διάφορες «έξυπνες» προεπιλογές επιλέγονται με βάση τις προτιμήσεις του τύπου προσομοίωσης (π.χ. CFD, Mechanical, Non-linear Mechanical κ.λπ)

Προχωρημένες ρυθμίσεις μεγέθους – Advanced Size Function

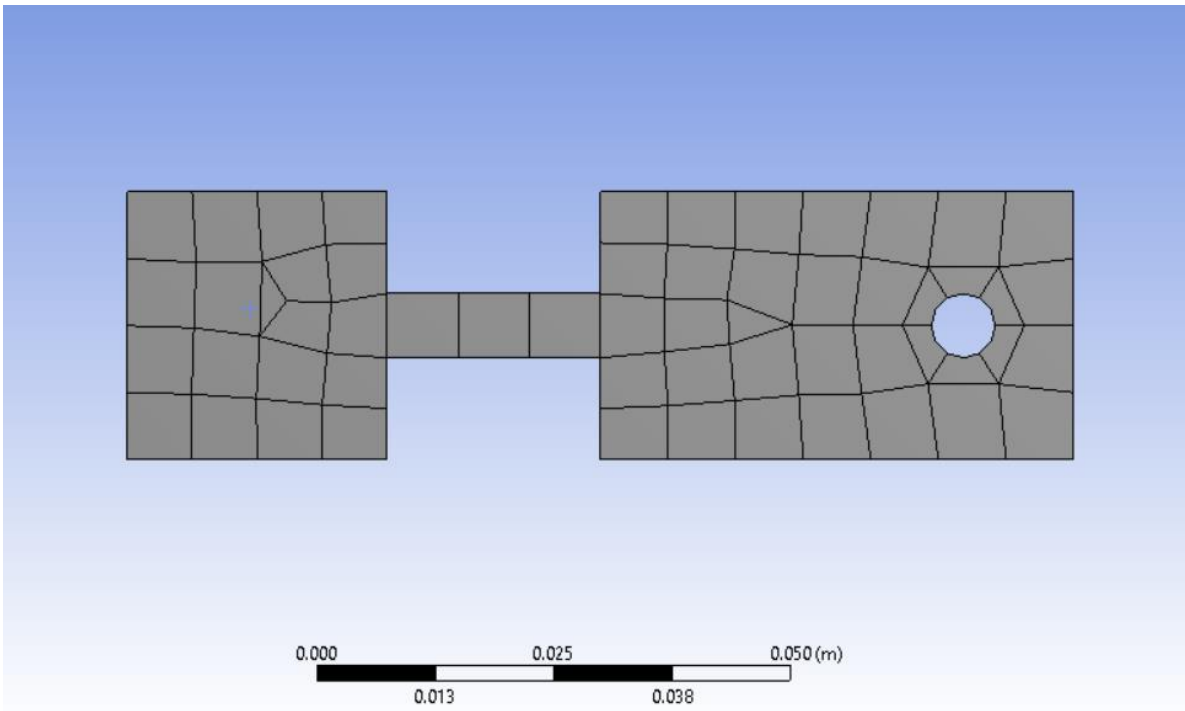
Ελέγχεται η ανάπτυξη και η κατανομή του πλέγματος σε σημαντικές περιοχές υψηλής καμπυλότητας ή σε κοντινή απόσταση από επιφάνειες.

Υπάρχουν πέντε επιλογές:

- Off. Μη διαθέσιμο για Assembly Meshing
- Proximity and Curvature
- Curvature
- Proximity
- Fixed

Off:

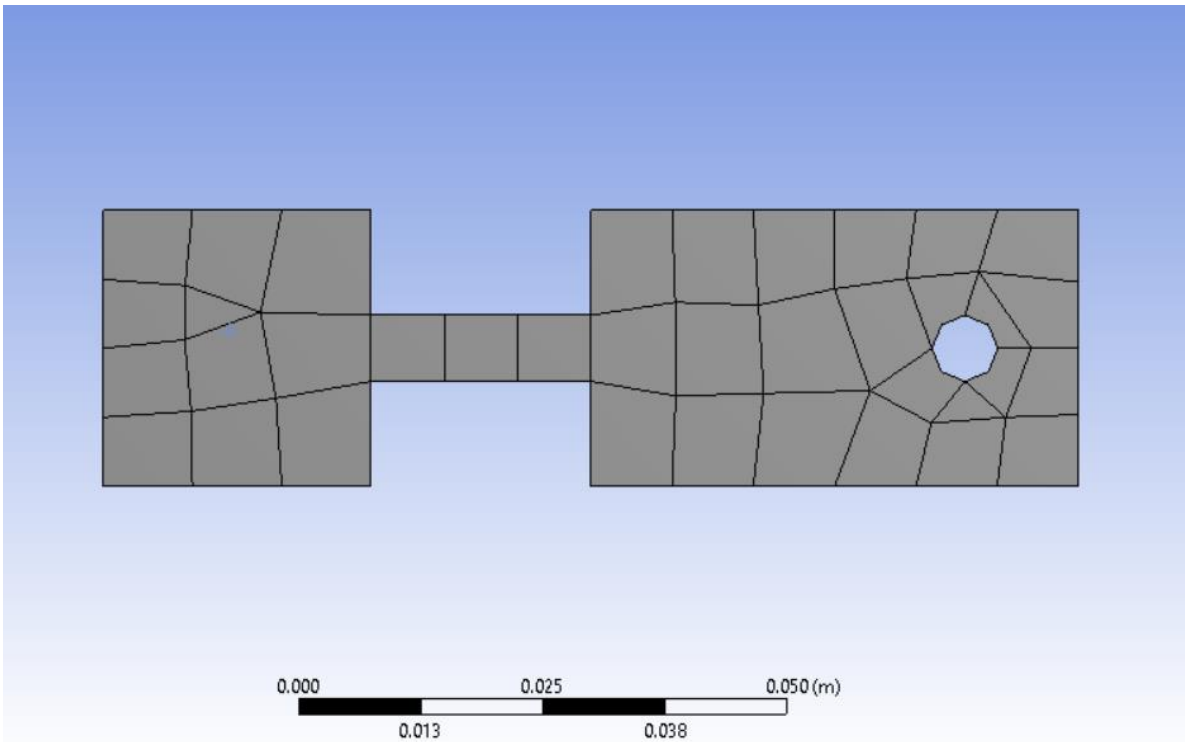
- Οι άκρες είναι δικτυωμένες με πλέγμα με το Global μέγεθος στοιχείου
- Στη συνέχεια, οι άκρες βελτιώνονται για καμπυλότητα και 2D εγγύτητα
- Στο τέλος δημιουργείται το αντίστοιχο πλέγμα προσώπου και όγκου
- Η αλλαγή του μεγέθους κατά μήκος του σώματος ορίζεται από το Transition



Εικόνα 17: Advanced Size Function-Ρύθμιση off

Curvature:

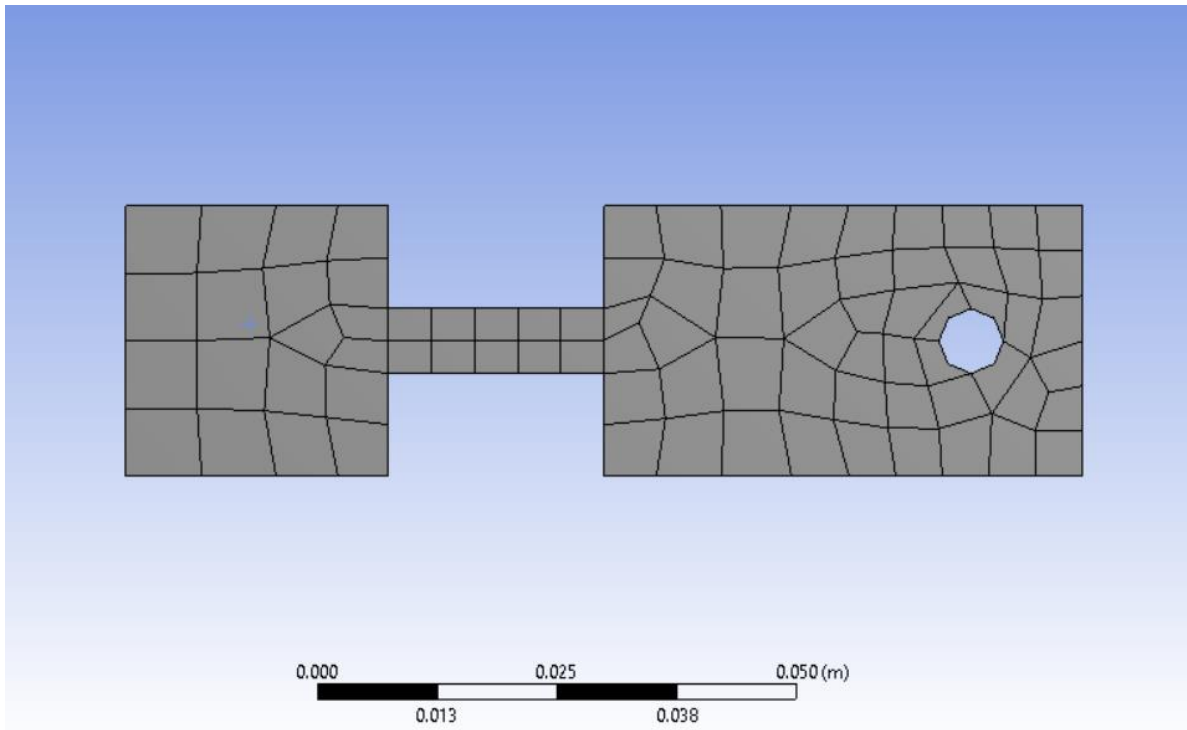
- Καθορίζει τα μεγέθη των άκρων και των προσώπων με βάση την κανονική γωνία καμπυλότητας (Curvature Normal Angle)
- Το Finer Curvature Normal Angle δημιουργεί λεπτότερο πλέγμα επιφάνειας
- Η αλλαγή του μεγέθους κατά μήκος του σώματος ορίζεται από το Growth Rate



Εικόνα 18: Advanced Size Function-Ρύθμιση Curvature

Proximity:

- Ελέγχει την ανάλυση πλέγματος σε περιοχές εγγύτητας (Proximity) στο μοντέλο
- Τοποθετεί καθορισμένο αριθμό Στοιχείων στις στενώσεις της γεωμετρίας
- Ο υψηλότερος αριθμός Στοιχείων κατά μήκος του διακένου δημιουργεί πιο λεπτότερο πλέγμα επιφάνειας
- Η αλλαγή του μεγέθους κατά μήκος του σώματος ορίζεται από το Growth Rate



Εικόνα 19: Advanced Size Function-Ρύθμιση Proximity

Ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος Στοιχείων

Μέγεθος Στοιχείου: Μέγεθος στοιχείου που χρησιμοποιείται για ολόκληρο το μοντέλο. Αυτό το μέγεθος χρησιμοποιείται για το πλέγμα όλων των άκρων, των προσώπων και των σωμάτων. Η προεπιλεγμένη τιμή βασίζεται στη Συνάφεια (Relevance) και το Αρχικό Μέγεθος Seed (Initial Size Seed). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει την απαιτούμενη τιμή σύμφωνα με τις γεωμετρικές διαστάσεις.

Ελάχιστο μέγεθος: Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου που θα δημιουργήσει η συνάρτηση μεγέθους. Ορισμένα μεγέθη στοιχείων μπορεί να είναι μικρότερα από αυτό το μέγεθος ανάλογα με τα μήκη των άκρων.

Μέγιστο μέγεθος: Μέγιστο μέγεθος στοιχείου που μπορεί να αναπτυχθεί στο εσωτερικό του πλέγματος (κατά την έννοια του όγκου).

Ρυθμός Ανάπτυξης – Growth Rate

Ο ρυθμός ανάπτυξης επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο η ποιότητα του πλέγματος θα διαφέρει από λεπτές έως χονδροειδείς συμπεριφορές.

5.4 Τύπος ανάλυσης: Explicit vs Implicit

5.4.1 Explicit (Explicit Dynamics)

Η Explicit μέθοδος επιλύει με βάση την επιτάχυνση και έτσι, **δεν απαιτούνται επαναλήψεις επειδή οι κομβικές επιταχύνσεις υπολογίζονται απευθείας**. Οι κινηματικές συνθήκες υπολογίζονται από μια μικρή αύξηση του χρόνου (χρονικό βήμα) και χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν στο επόμενο χρονικό βήμα. Επομένως, η κατάσταση στο τέλος του εν λόγω βήματος βασίζεται μόνο στις μετατοπίσεις, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις στην αρχή του βήματος. Αυτό που συνέβη στο προηγούμενο βήμα είναι άσχετο και η σύγκλιση δεν είναι θέμα.

Δεδομένου ότι οι διαδικασίες της Explicit μεθόδου χρησιμοποιούν πάντα διαγώνιους πίνακες μάζας, **η επίλυση των επιταχύνσεων είναι σημαντικά λιγότερο υπολογιστικά δαπανηρή από τις ταυτόχρονες εξισώσεις που διέπουν την Implicit μέθοδο**. Η επιτάχυνση κάθε κόμβου καθορίζεται πλήρως από τη μάζα του και τη δύναμη που ασκείται πάνω του.

Ωστόσο, υπάρχει ένα μειονέκτημα υπολογιστικού κόστους αυτής της μεθόδου: **η ανάγκη να χωριστεί η ανάλυση σε πολύ μικρά χρονικά βήματα**. Ο κανόνας της «κεντρικής διαφοράς» υπολογίζει τη μεταβολή της ταχύτητας, υποθέτοντας ότι η επιτάχυνση είναι σταθερή. Με δεδομένο ότι αυτή η μεταβολή στην ταχύτητα προστίθεται στη γνωστή ταχύτητα από το μέσο του προηγούμενου βήματος και στη συνέχεια ενσωματώνεται στο χρόνο για να παρέχει μετατόπιση, πρέπει να προσομοιώνονται μόνο μικρές αυξήσεις κατά τις οποίες η επιτάχυνση είναι σχεδόν σταθερή.

5.4.2 Implicit (Transient Structural)

Η Transient Structural ή αλλιώς **Implicit μέθοδος λειτουργεί δοκιμάζοντας λύσεις ή επαναλήψεις** σε προσπάθειες να δημιουργηθεί **στατική ισορροπία** (εντός ορισμένης ανοχής) σε σχέση με το φορτίο ή τη μετατόπιση που εφαρμόζεται. Επιλύονται άγνωστες μετατοπίσεις μέσω αντιστρόφων πινάκων. Όταν το πρόβλημα είναι μη γραμμικό με οποιονδήποτε τρόπο (για παράδειγμα αναφορικά με τη γεωμετρία, το υλικό ή την επαφή), η λύση λαμβάνεται με έναν αριθμό μικρών προσαυξήσεων και **η λύση για το τρέχον χρονικό βήμα βασίζεται στο αποτέλεσμα από το προηγούμενο**. Όταν εξετάζονται μεγάλα μοντέλα ή μοντέλα που χαρακτηρίζονται από σημαντική μη γραμμικότητα, η αντιστροφή του πίνακα είναι εξαιρετικά δαπανηρή από υπολογισμούς και μερικές φορές αδύνατη. Όταν μπορούν να βρεθούν λύσεις, είναι σταθερές (ανεξαρτήτως παραγόντων όπως το χρονικό βήμα) και **επιτρέπουν την άμεση επίλυση «μεγάλων» σε διάρκεια φαινομένων**.

Όταν η επιβολή του φορτίου είναι αργή, τα όρια είναι καλά καθορισμένα και η μη γραμμικότητα είναι διαχειρίσιμη, αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική. Ωστόσο, όταν η επιβολή του φορτίου γίνει πολύπλοκη ή η μη γραμμικότητα είναι πολύ σημαντική, η Implicit μέθοδος γίνεται εξαιρετικά δαπανηρή και μερικές φορές είναι αδύνατο να συγκλίνει σε μια σταθερή απάντηση.

5.4.3 Explicit vs Implicit: Διαφορές και τελική επιλογή

Είναι σαφές ότι η **Implicit μέθοδος απαιτεί επιπλέον υπολογιστικό κόστος** για την επίλυση μιας εξίσωσης για κάθε χρονικό βήμα και μπορεί να είναι πολύ δύσκολο (χρονοβόρο) να λυθεί για πρακτικά προβλήματα. Η Explicit μέθοδος, φαίνεται να μην έχει τέτοια προβλήματα.

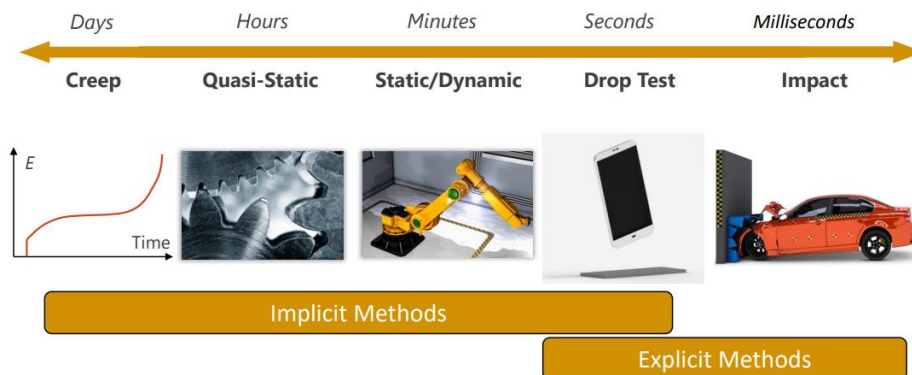
Η **Explicit μέθοδος είναι γνωστό ότι έχει προβλήματα σταθερότητας** εάν το μέγεθος του χρονικού βήματος δεν επιλεγθεί με σύνεση (βλ. 5.3.5), ενώ η Implicit μέθοδος είναι αποδεδειγμένα ευσταθής για γραμμικά συστήματα.

Λόγω του περιορισμού του μεγέθους του χρονικού βήματος, η **Explicit μέθοδος συνήθως δεν χρησιμοποιείται σε δυναμικά προβλήματα μεγάλης διάρκειας.**

	Explicit	Implicit
Σταθερότητα	Εξαρτάται από το μέγεθος του χρονικού βήματος	Ανεξάρτητη
Μέγεθος χρονικού βήματος	Πολύ μικρό	Μεγάλο
Μη-γραμμικό πρόβλημα	Δεν απαιτείται επαναληπτική μέθοδος	Απαιτείται επαναληπτική μέθοδος
Ταχύτητα επίλυσης για ένα βήμα	Μικρή	Μεγάλη

Πίνακας 1: Σύγκριση μεθόδων Explicit και Implicit

Ένα διάγραμμα – οδηγός για την εκλογή του τύπου ανάλυσης φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 20: Εκλογή τύπου ανάλυσης ανάλογα με τη διάρκεια του φαινομένου

Εύκολα εξάγεται από τα παραπάνω ότι η Explicit μέθοδος είναι καλό να επιλέγεται μόνο για φαινόμενα εμφάνισης μεγάλων τάσεων, μεγάλων ρυθμών παραμόρφωσης και ιδιαιτέρως μικρής διάρκειας. Φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα φυσικά είναι εφικτό να λυθούν με τη μέθοδο Explicit, ωστόσο ο υπολογιστικός χρόνος που θα απαιτηθεί θα είναι της τάξεως των ημερών, ακόμη και με ισχυρούς επεξεργαστές των 8 πυρήνων. Συμπερασματικά, η Explicit μέθοδος είναι κατάλληλη για προβλήματα που διαρκούν χονδρικά μερικά εκατοστά του δευτερολέπτου και σε ελάχιστες περιπτώσεις, ίσως και 0.1 sec.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, για τις προσομοιώσεις των μοντέλων της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η Implicit μέθοδος, διότι, πέρα από το γεγονός ότι το προφίλ της μεθόδου συμφωνεί πολύ περισσότερο με τις συνθήκες του φαινομένου, με δοκιμές αποδείχθηκε ότι η εξέταση των μοντέλων με τη μέθοδο Explicit θα απαιτούσε κατά προσέγγιση 4 φορές περισσότερο χρόνο.

** ο υπολογιστής στον οποίο έγιναν όλα τα μοντέλα και οι αναλύσεις τους είχε τα εξής χαρακτηριστικά, τα οποία αξιοποιήθηκαν πλήρως:*

Επεξεργαστής: 8core – 16threads με max συχνότητα 4,8GHz

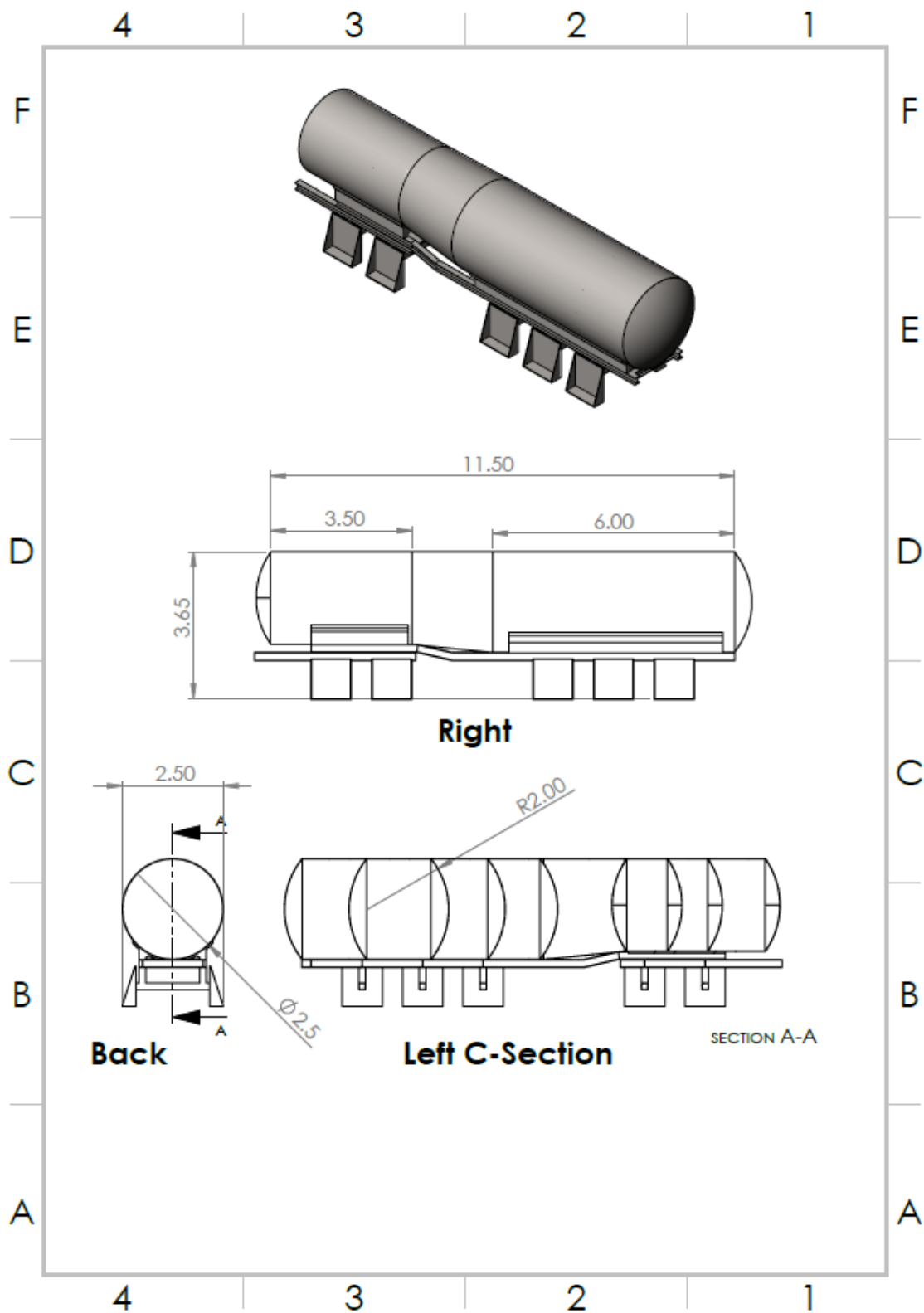
Ram: 16 GB DDR4 2993MHz

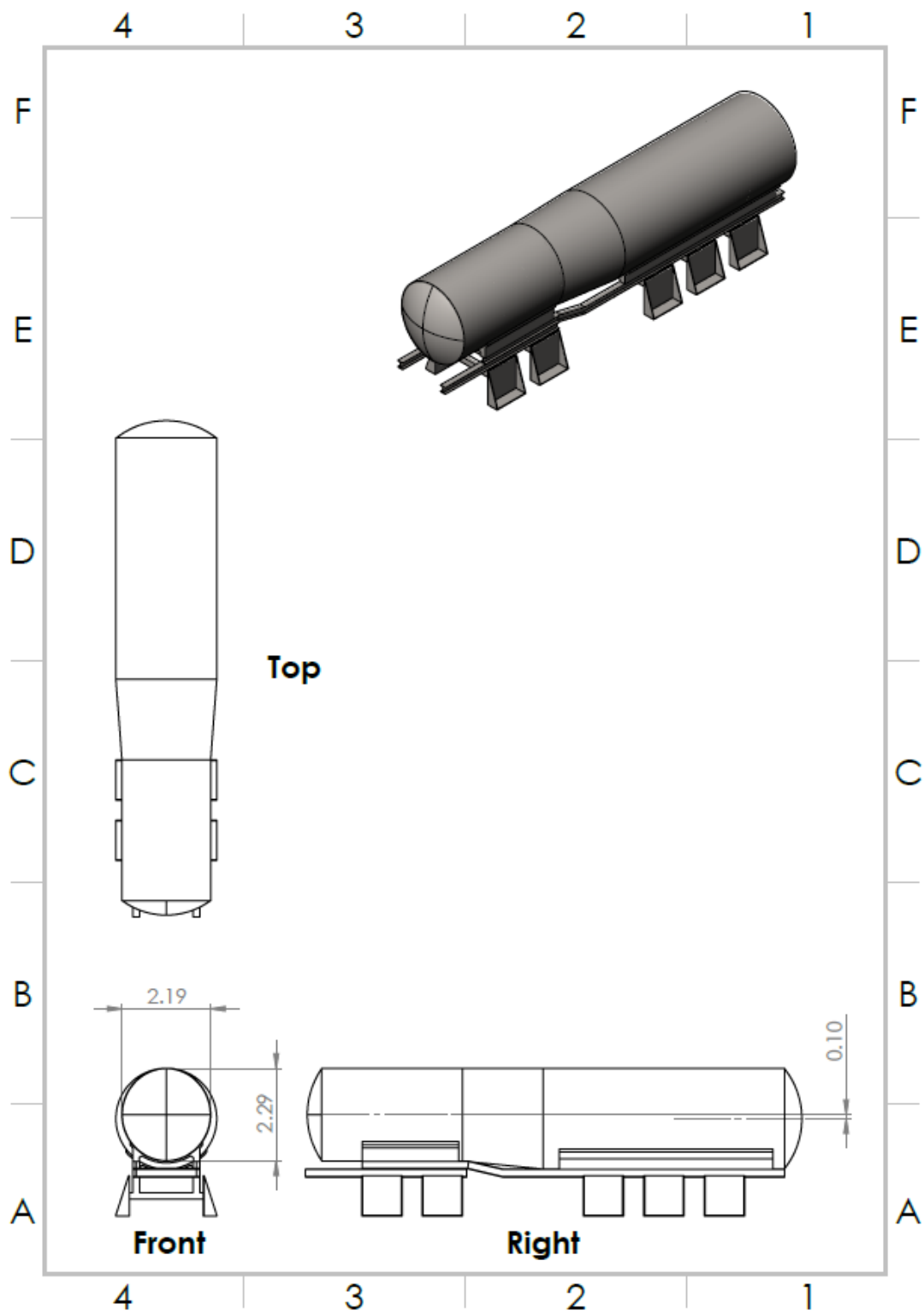
6. Μοντελοποίηση Βυτίων (Tanker) - Περιγραφή

6.1 Μοντέλα Tanker - Περιγραφή

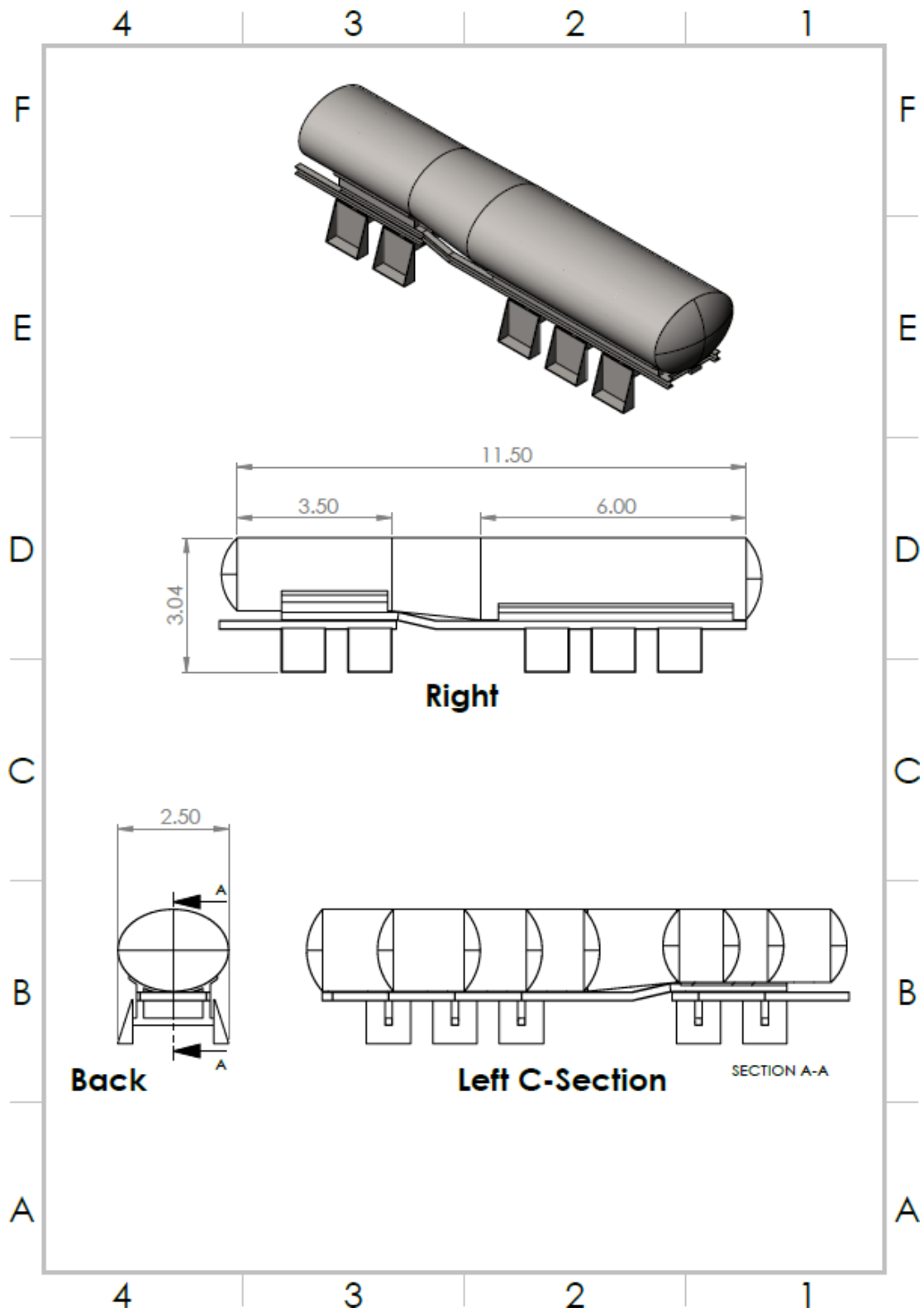
6.1.1 Γενική Γεωμετρία

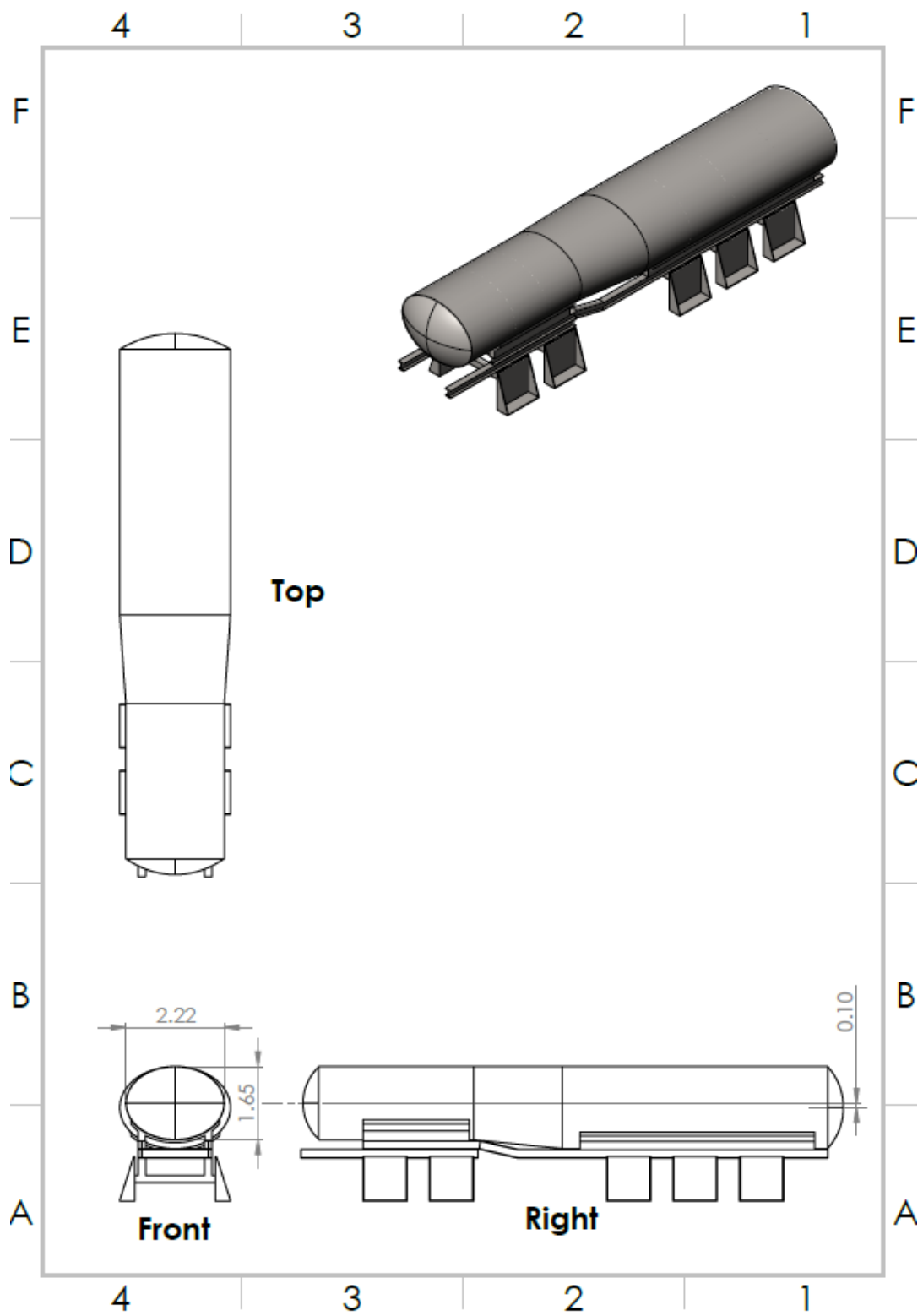
Μετά από έρευνα που διεξήχθη στο χώρο των κατασκευαστών βυτιοφόρων, με βάση τις οδηγίες που δόθηκαν από τους επιβλέποντες της παρούσας εργασίας, αλλά και βάσει της βιβλιογραφίας (πρότυπη μελέτη [1]), σχεδιάστηκαν στο λογισμικό Solidworks, μοντέλα δεξαμενών κυκλικής και ελλειπτικής διατομής των οποίων οι γενικές διαστάσεις παρουσιάζονται στα σκαριφήματα των παρακάτω **Εικόνων**.





Εικόνα 21: Σκαρίφημα γενικών διαστάσεων μοντέλων κυκλικής διατομής





Εικόνα 22: Σκαρίφημα γενικών διαστάσεων μοντέλων ελλειπτικής διατομής

Όλα τα μοντέλα σχεδιάστηκαν αποτελούμενα από **8 «διαμερίσματα»** (9 συνολικά διαχωριστικά τοιχώματα – λαμβάνοντας υπόψιν και τα εξωτερικά), τα οποία είναι **εσωτερικά συγκολλημένα στη δεξαμενή με δύο διαφορετικούς τύπους συγκόλλησης**. Επίσης, εξετάστηκε η συμπεριφορά δύο υλικών κατασκευής, κοινά χρησιμοποιούμενων για αυτή την χρήση: του **Ανοξείδωτου Χάλυβα** και ενός κράματος **Αλουμινίου**. Το **σασί** όλων των μοντέλων προσομοιώθηκε «χονδροειδώς», τόσο που να ασκεί τις επιθυμητές ρεαλιστικές επιδράσεις επί του βυτίου, αλλά ώστε να μην επιβαρύνει πολύ την προσομοίωση και αποτελούνταν σε όλες τις περιπτώσεις από **Ανοξείδωτο Χάλυβα**. Τέλος, διάφορες λεπτομέρειες των πραγματικών μοντέλων οι οποίες κρίθηκε ότι δε θα επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα, αλλά θα αυξήσουν τον υπολογιστικό χρόνο, δεν συμπεριλήφθηκαν στα μοντέλα των προσομοιώσεων.

6.1.2 Διαφοροποιήσεις μεταξύ μοντέλων

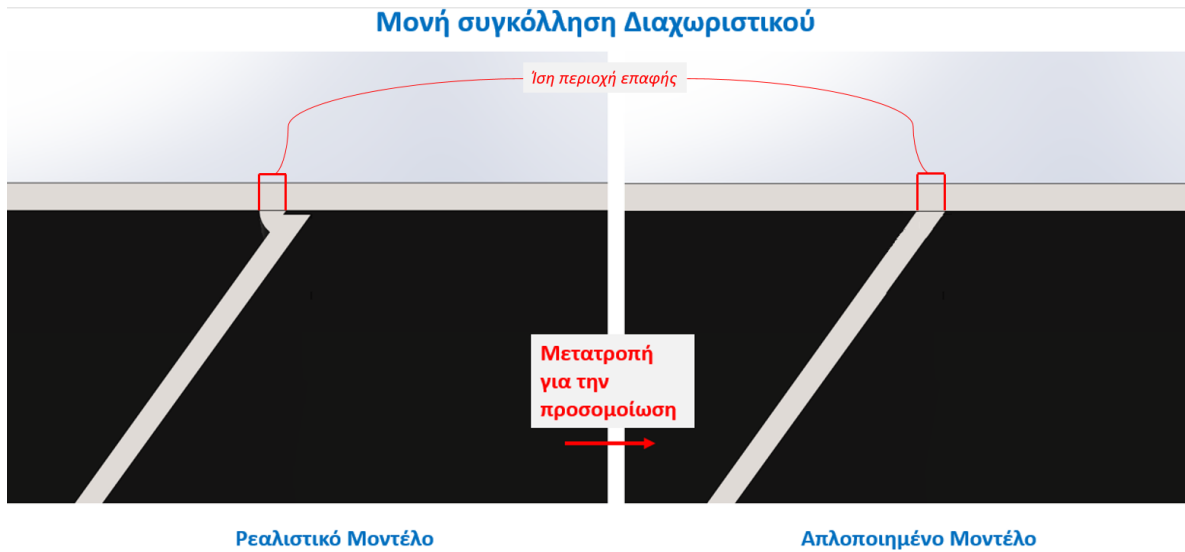
Υλικά και πάχη τοιχωμάτων:

Βάσει του ΕΛΟΤ EN 14286 αλλά και βιβλιογραφικά, (πρότυπη μελέτη [1]) αποδुकνείται ότι τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υλικά για κατασκευή βυτίων είναι οι **Ανοξείδωτοι Χάλυβες** και διάφορα κράματα **Αλουμινίου**. Μάλιστα, φαίνεται να ακολουθείται πιστά η κατασκευή διαφορετικού πάχους τοιχωμάτων, ανάλογα με το υλικό του βυτίου. Μία μέση τιμή πάχους τοιχώματος όταν το υλικό κατασκευής είναι **Ανοξείδωτος Χάλυβας** είναι τα **3mm**, ενώ στην περίπτωση που αυτό είναι **κράμα Αλουμινίου** τα **5mm** και αυτές ακριβώς οι τιμές εξετάζονται και στην παρούσα εργασία.

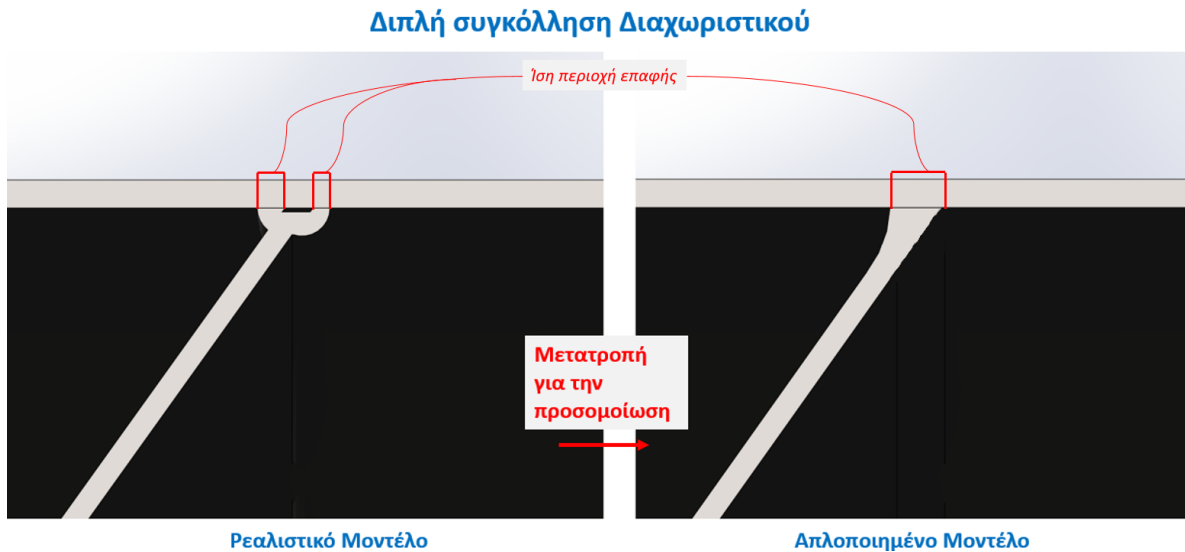
Συγκόλληση (Μονή ή Διπλή):

Επίσης, εξήχθη το συμπέρασμα ότι στη βιομηχανία εφαρμόζονται δύο τύποι συγκόλλησης, ώστε τα εσωτερικά διαχωριστικά τοιχώματα των διαμερισμάτων του βυτίου να πακτωθούν και να στεγανώσουν: η μονή και η διπλή συγκόλληση (όλες ακτίνας 5mm), όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω **Εικόνες**.

Προκειμένου να εισαχθούν οι περιοχές των συγκολλήσεων στην προσομοίωση, χωρίς να επιβαρύνουν άνευ ουσίας το πλέγμα, λόγω συνθετότητας της γεωμετρίας, τα μοντέλα απλοποιήθηκαν όπως παρουσιάζεται στις **δεξιά Εικόνες**.



Εικόνα 23: Μονή συγκόλληση διαχωριστικού διαμερισμάτων



Εικόνα 24: Διπλή συγκόλληση διαχωριστικού διαμερισμάτων

Έτσι, εξετάστηκαν 8 μοντέλα, σε καθένα από τα οποία εφαρμόστηκε ανατροπή 90° και ανατροπή 180°, οπότε συνολικά εκτελέστηκαν 16 προσομοιώσεις. Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται τα μοντέλα συγκεντρωτικά:

A/A Μοντέλου	Διατομή Δεξαμενής	Υλικό	Συγκόλληση	Πάχος τοιχωμάτων	Ανατροπή
1.1	Κυκλική	Ανοξείδωτος χάλυβας	Μονή	3mm	90°
1.2					180°
2.1			Διπλή		90°
2.2					180°
3.1		Κράμα Αλουμινίου	Μονή	5mm	90°
3.2					180°
4.1			Διπλή		90°
4.2					180°
5.1	Ελλειπτική	Ανοξείδωτος χάλυβας	Μονή	3mm	90°
5.2					180°
6.1			Διπλή		90°
6.2					180°
7.1		Κράμα Αλουμινίου	Μονή	5mm	90°
7.2					180°
8.1			Διπλή		90°
8.2					180°

Πίνακας 2: Παρουσίαση των προς εξέταση μοντέλων

6.1.3 Ρυθμίσεις Προσομοίωσης

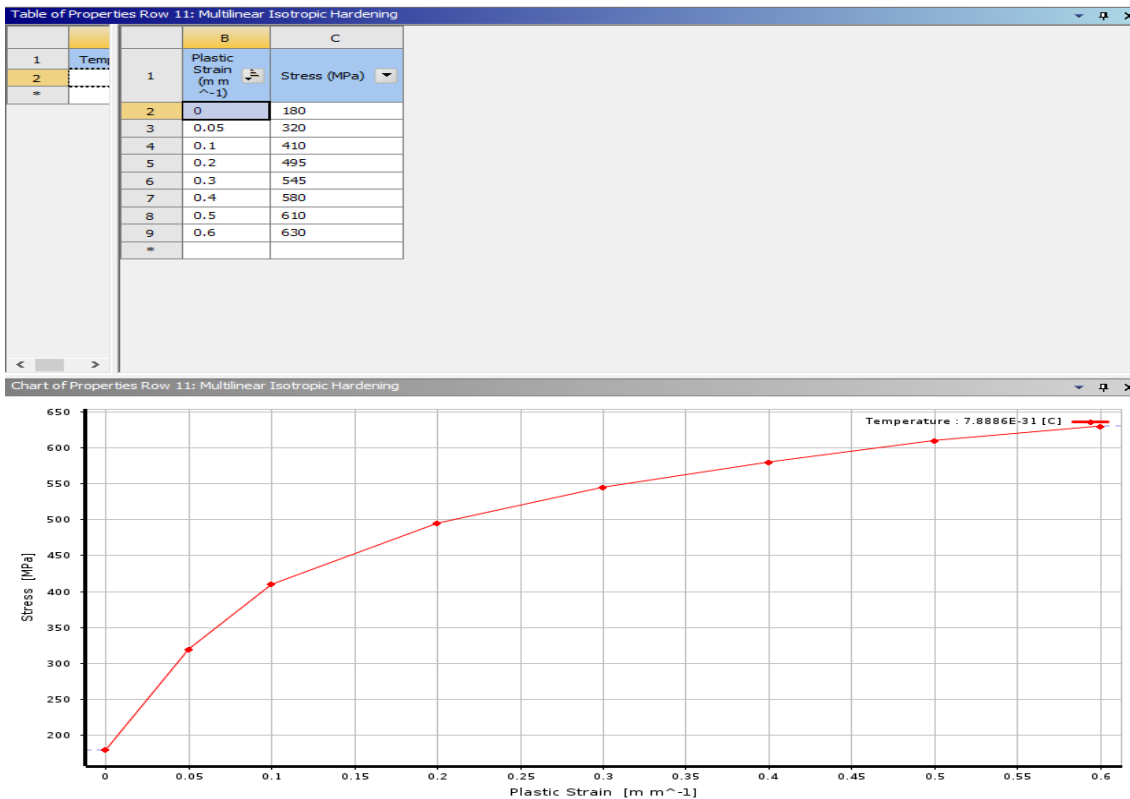
Επιλογή υλικών

Στο ANSYS Workbench, στην ενότητα Engineering Data, επιλέχθηκαν ως υλικά ένας **Ωστενιτικός Ανοξείδωτος Χάλυβας (304)** και ένα **κράμα Αλουμινίου (EN AW 5086 βάσει του DIN EN 14286)**, οι ιδιότητες των οποίων ορίστηκαν πλήρως όπως και οι καμπύλες **Τάσης – Παραμόρφωσης των πλαστικών περιοχών** και για τα δύο υλικά, διότι, εν γένει αυτή η πληροφορία απουσιάζει από τα περισσότερα υλικά της βιβλιοθήκης του ANSYS. Οι ρυθμίσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στις παρακάτω **Εικόνες**.

Properties of Outline Row 4: Stainless steel, austenitic

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7900	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
7	Young's Modulus	1.98E+11	Pa
8	Poisson's Ratio	0.27	
9	Bulk Modulus	1.4348E+11	Pa
10	Shear Modulus	7.7953E+10	Pa
11	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
12	Scale	1	
13	Offset	0	MPa
14	Tensile Yield Strength	2.43E+08	Pa
15	Tensile Ultimate Strength	6.3E+08	Pa

Εικόνα 25: Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένου Ωστενιτικού Χάλυβα

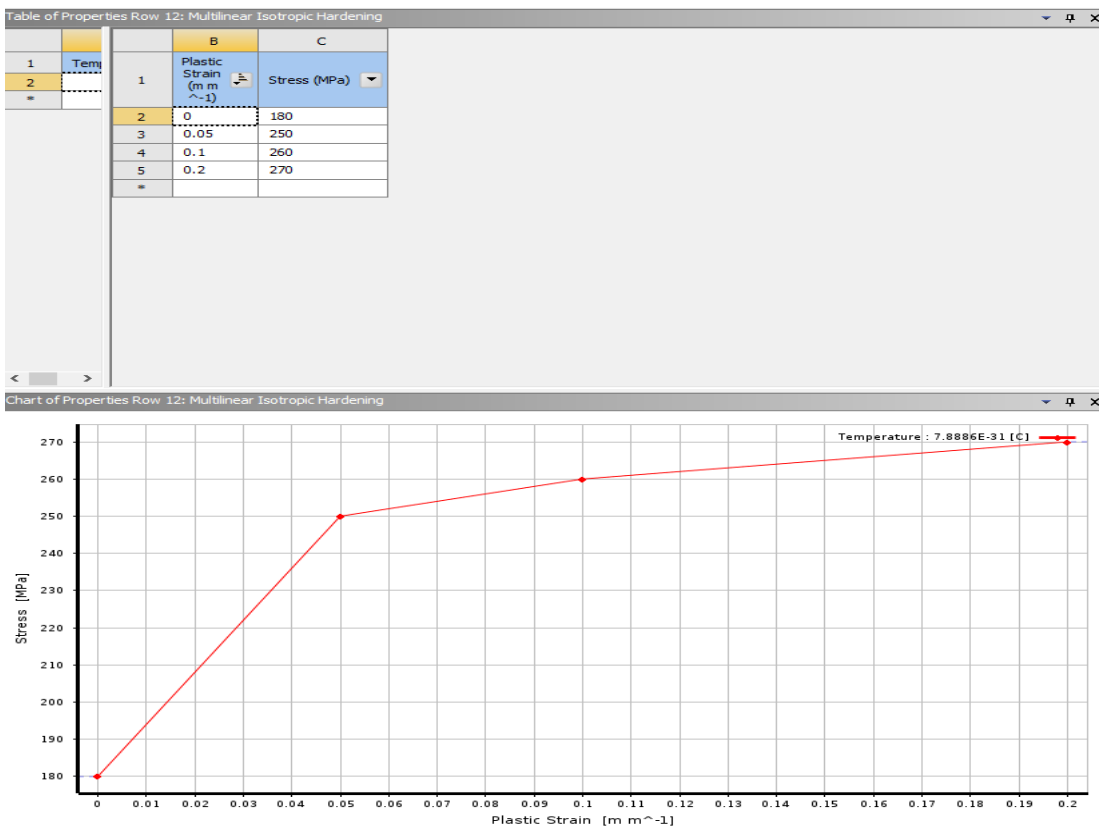


Εικόνα 26: Καμπύλη Τάσης - Παραμόρφωσης πλαστικής περιοχής επιλεγμένου Ωστενιτικού Χάλυβα

Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2770	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	7.1E+10	Pa
9	Poisson's Ratio	0.33	
10	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa
11	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa
12	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
13	Scale	1	
14	Offset	0	MPa
15	Tensile Yield Strength	2E+08	Pa
16	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
17	Tensile Ultimate Strength	2.7E+08	Pa
18	Compressive Ultimate Strength	3E+08	Pa

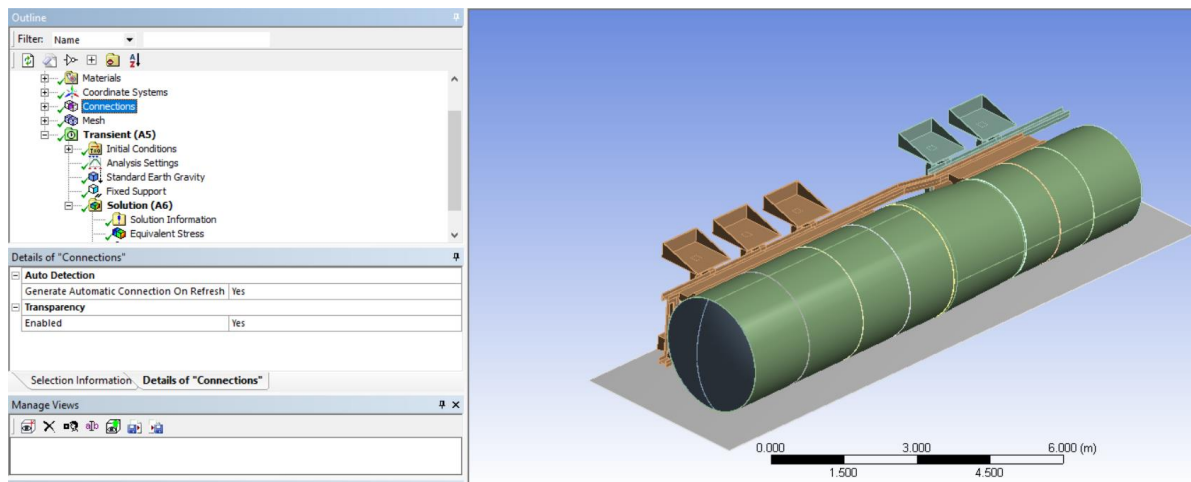
Εικόνα 27: Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένου κράματος Αλουμινίου



Εικόνα 28: Καμπύλη Τάσης - Παραμόρφωσης πλαστικής περιοχής επιλεγμένου κράματος Αλουμινίου

Ρυθμίσεις Γεωμετρίας, Οριακών συνθηκών, Πλέγματος και Ανάλυσης:

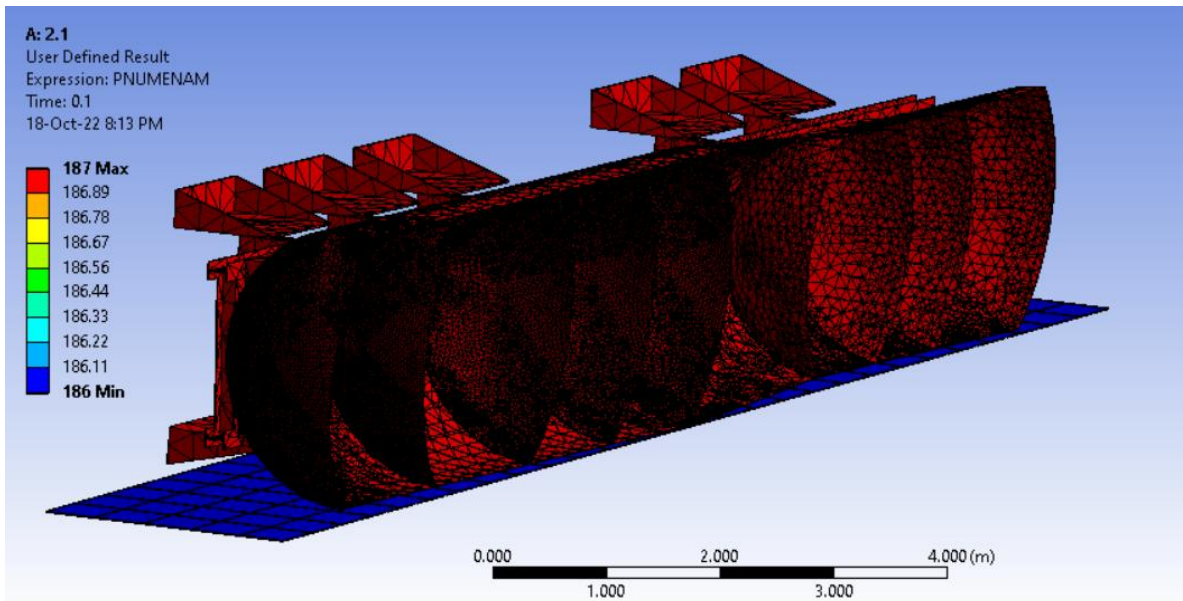
Οι διάφορες ρυθμίσεις που επιβλήθηκαν στα μοντέλα είχαν σαν σκοπό τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων, σε συνδυασμό με την κατά το δυνατόν μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Τα **Connections** στα μοντέλα ρυθμίστηκαν έτσι ώστε **να περιγράφουν τις πραγματικές σχέσεις των σωμάτων μεταξύ τους**. Αυτό σημαίνει πως τα αυτόματα Connections που τίθενται από το ANSYS μεταβλήθηκαν σε κάθε ένα από τα μοντέλα. **Μεταξύ του μοντέλου και του «δρόμου»** (επίπεδο σώμα στο κάτω μέρος) ορίστηκαν **Επαφές χωρίς τριβή (Frictionless)**, διότι επαφές με τριβή μετατρέπουν τα πρόβλημα σε εντόνως μη-γραμμικό και επίσης δεν προσφέρουν κάποια αξιοσημείωτη διαφορά στα αποτελέσματα. **Μεταξύ των υπολοίπων σωμάτων (Σασί, Δεξαμενή και Διαχωριστικά)** τέθηκαν **Bonded επαφές**, σύμφωνα με τις οποίες τα σώματα είναι «δεμένα» μεταξύ τους, αλλά **επιτρέπονται μικρές μετακινήσεις και υπάρχει δυνατότητα αποκόλλησης** όταν οι τάσεις ξεπεράσουν το όριο θραύσης του υλικού. Τα μοντέλα τοποθετήθηκαν σε παράλληλη διάταξη με το έδαφος και η προσομοίωση ξεκινούσε ακριβώς τη στιγμή της πρώτης επαφής τους με το έδαφος, με αρχικές συνθήκες οι οποίες βασίστηκαν στη βιβλιογραφία και παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω.



Εικόνα 29: Μοντέλο στο χώρο του ANSYS Workbench

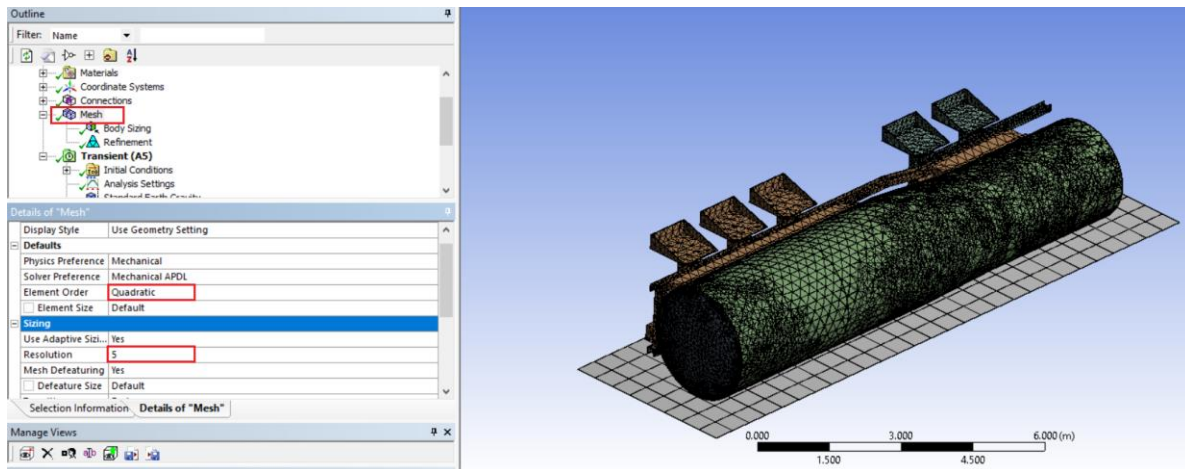
Αναφορικά με το πλέγμα που επιλέχθηκε κάθε φορά, διευκρινίζεται ότι αυτό βασίστηκε στη Θεωρία, όπως αυτή παρουσιάζεται παραπάνω και περιορίστηκε από τις επιλογές που δίνονται στο χρήστη από το ANSYS Workbench. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις **επιλέχθηκαν Στοιχεία 2^{ης} τάξης (Quadratic)**, λόγω της ικανότητάς τους να περιγράφουν καλύτερα σύνθετα φαινόμενα. Το πρόγραμμα επέλεξε την περιγραφή των γεωμετριών με **Εξαεδρικά και Τετραεδρικά Στοιχεία** (κάτι στο οποίο ο χρήστης δεν μπορεί να παρέμβει – σε τέτοια περίπτωση πιθανότατα θα επιλέγονταν **Διδιάστατα Στοιχεία για τη δεξαμενή και τα διαχωριστικά**). Στην παρακάτω **Εικόνα**, με την κατάλληλη εντολή, έχει ζητηθεί η επίδειξη του τύπου Στοιχείων, τα οποία παρουσιάζονται με τα ονόματα **SOLID186 (μπλε)** και

SOLID187 (κόκκινο), τα οποία αντιστοιχούν στα Εξαεδρικά 2^{ης} τάξης και Τετραεδρικά 2^{ης} τάξης, αντίστοιχα.

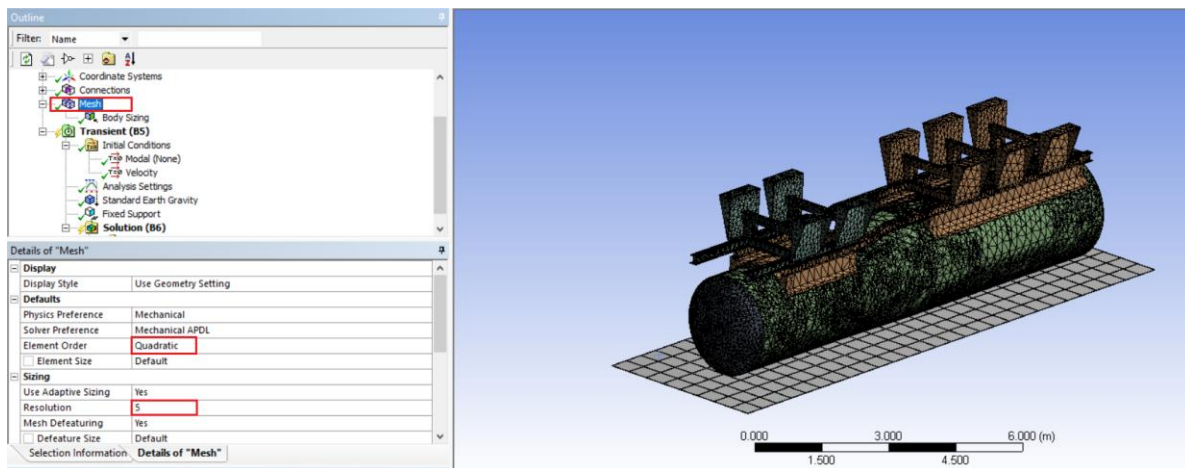


Εικόνα 30: Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων των μοντέλων

Το γεγονός ότι κατά το πάχος του τοιχώματος της δεξαμενής και των τοιχωμάτων υπήρχε κατά κανόνα ένα μόνο Στοιχείο, αντισταθμίστηκε από την επιλογή Στοιχείων 2^{ης} τάξης, τα οποία έχουν την ικανότητα να λαμβάνουν παραμορφώσεις και επί των πλευρών τους. Τέλος, επιτράπηκε η χρήση Προσαρμοσμένου Μεγέθους (Adaptive Size), ώστε τα Στοιχεία να έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν διάφορα μεγέθη, ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας τοπικά. Η γενική μορφή του πλέγματος, τόσο για την ανατροπή των 90° όσο και των 180° φαίνεται στις παρακάτω Εικόνες.



Εικόνα 31: Μορφή του πλέγματος για τα μοντέλα με ανατροπή 90 μοιρών

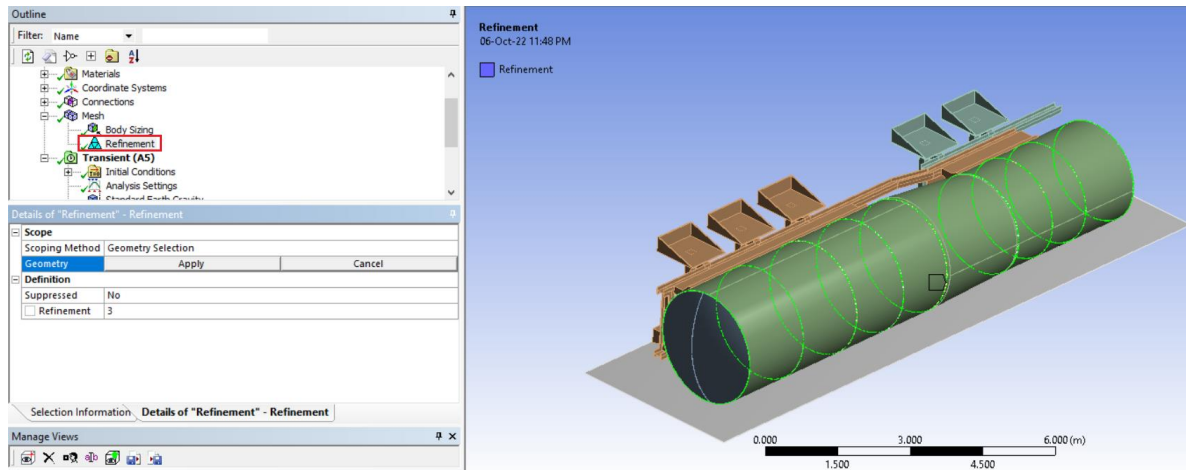


Εικόνα 32: Μορφή του πλέγματος για τα μοντέλα με ανατροπή 180 μοιρών

Στην παραπάνω Εικόνα φαίνεται, πέρα από το πλέγμα, και η διάταξη για τις προσομοιώσεις της ανατροπής των 180°: Τα μοντέλα τοποθετήθηκαν αντεστραμμένα κατά 180° και οι προσομοιώσεις ξεκίνησαν από τη στιγμή επαφής τους με το έδαφος.

Σε κάποια από τα μοντέλα, όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο, προστέθηκε και κάποια επιπλέον ρύθμιση αναφορικά με το πλέγμα, για την οποία θα γίνεται αναφορά (παρακάτω) κατά την επιμέρους ανάλυση των μοντέλων. Στις περιπτώσεις που κάτι τέτοιο συμπεριλήφθηκε, ουσιαστικά βελτιώθηκαν οι άκρες των διαχωριστικών με την εντολή **Refinement**, έτσι ώστε να μπορούν να περιγραφούν μεγάλες παραμορφώσεις (Εικόνα παρακάτω). Αυτό συνέβη διότι στις περιπτώσεις αυτές κρίθηκε ότι οι ρυθμίσεις του πλέγματος δεν κατάφεραν να αποδώσουν ρεαλιστικά τα σημεία αυτά (συνήθως λόγω

ιδιαιτέρως λεπτών τοιχωμάτων – όπως συμβαίνει δηλαδή στα μοντέλα που υλικό κατασκευής είναι ο Χάλυβας).



Εικόνα 33: Ακμές στις οποίες επιβλήθηκε η εντολή Refinement - όπου επιβλήθηκε

Η αρχική συνθήκη που τέθηκε στα μοντέλα για την ανατροπή των 90° ήταν μία κατακόρυφη ταχύτητα ίση με 5 m/s, η οποία έχει δειχθεί από τη Βιβλιογραφία (πρότυπη μελέτη [1]) ότι είναι μία μέση ταχύτητα πρόσκρουσης με το έδαφος στο συγκεκριμένο είδος ανατροπών. Από την άλλη, στα μοντέλα της ανατροπής των 180° τέθηκε μία ταχύτητα ίση με 6.2 m/s, η οποία προκύπτει από την υπόθεση ότι σε τέτοιες περιπτώσεις ανατροπών τα βυτιοφόρα συγκρούονται με το έδαφος αφού έχουν λάβει ένα ύψος 1-2 m από αυτό. Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τη σχέση του ύψους πτώσης και της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι:

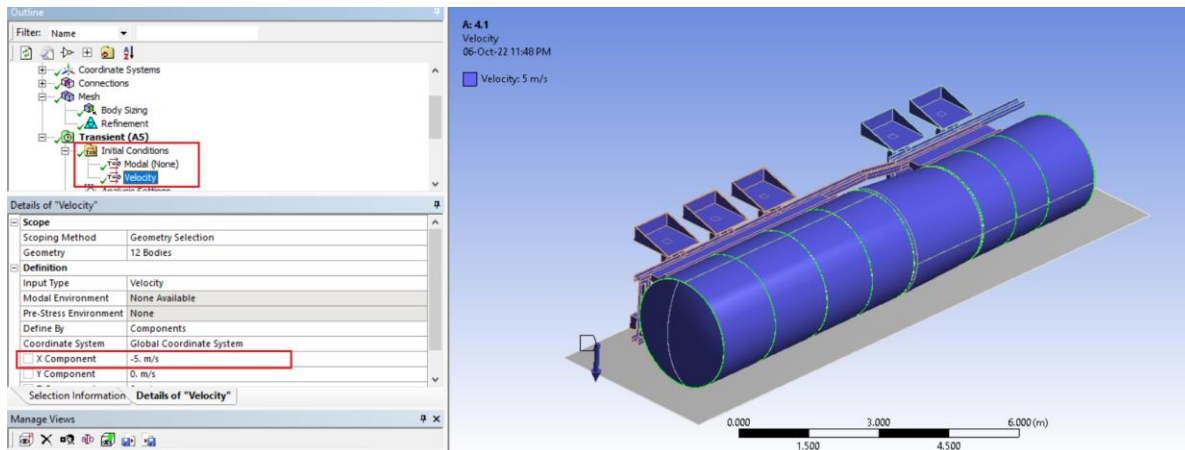
$$v_i = \sqrt{2gh}$$

Στις προσομοιώσεις εξετάστηκε το χείριστο των σεναρίων, οπότε τέθηκε ένα ύψος πτώσης ίσο με 2 m, άρα:

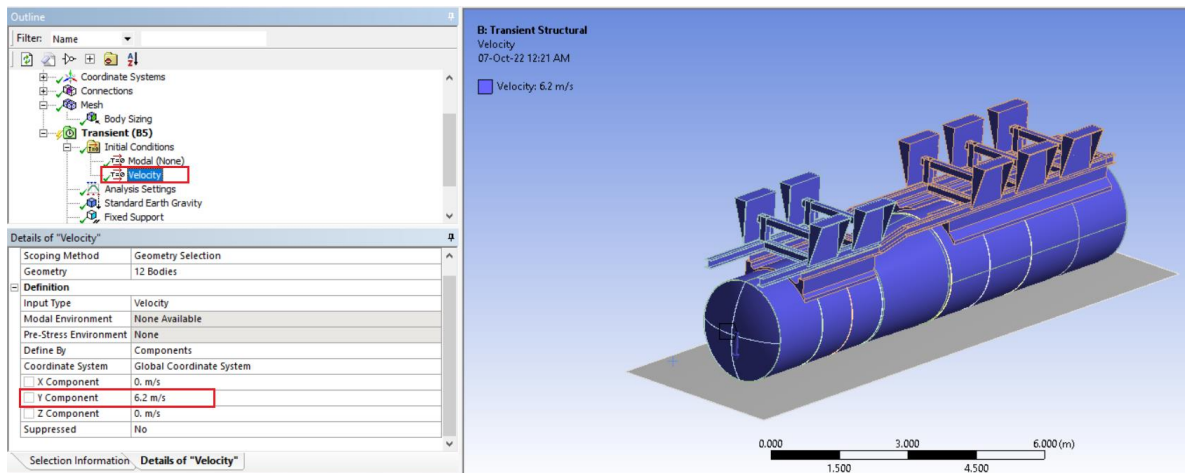
$$v_i = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2} \Rightarrow$$

$$v_i \approx 6.26 \text{ m/s}$$

Στις παρακάτω Εικόνες παρουσιάζεται η επιβολή αυτών των αρχικών συνθηκών για τα αντίστοιχα μοντέλα. Τέλος, τέθηκε κατακόρυφη επιτάχυνση της βαρύτητας και πάκτωση (Fixed Support) στο σώμα που προσομοιώνει το έδαφος.



Εικόνα 34: Επιβολή συνθηκών για τα μοντέλα με ανατροπή 90 μοιρών



Εικόνα 35: Επιβολή συνθηκών για τα μοντέλα με ανατροπή 180 μοιρών

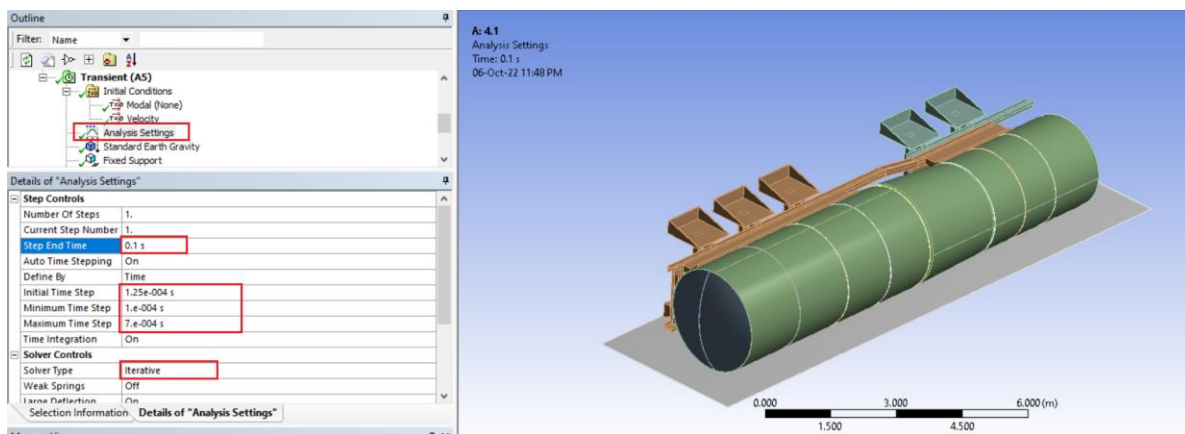
Όσον αφορά το **χρόνο μελέτης των φαινομένων**, αυτός τέθηκε **ίσος με 0.1 s** και στις δύο περιπτώσεις, κάτι το οποίο βασίστηκε και πάλι στη Βιβλιογραφία. Έχει παρατηρηθεί ότι σε περιπτώσεις ανατροπής βυτιοφόρων **το μεγαλύτερο ποσοστό της ζημιάς λαμβάνει χώρα εντός των πρώτων 0.1 s**, διότι μετά την παρέλευση αυτού του χρόνου το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας έχει απορροφηθεί. Η παραπάνω υπόθεση αποδείχθηκε σωστή τελικά με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, ωστόσο αυτό είναι κάτι που θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα παρακάτω.

Ο συνολικός χρόνος χωρίστηκε σε **χρονικά «βήματα»**, κάτι το οποίο απαιτείται προκειμένου η ανάλυση να εκτελεστεί τμηματικά. Στο ANSYS Workbench, σε περίπτωση

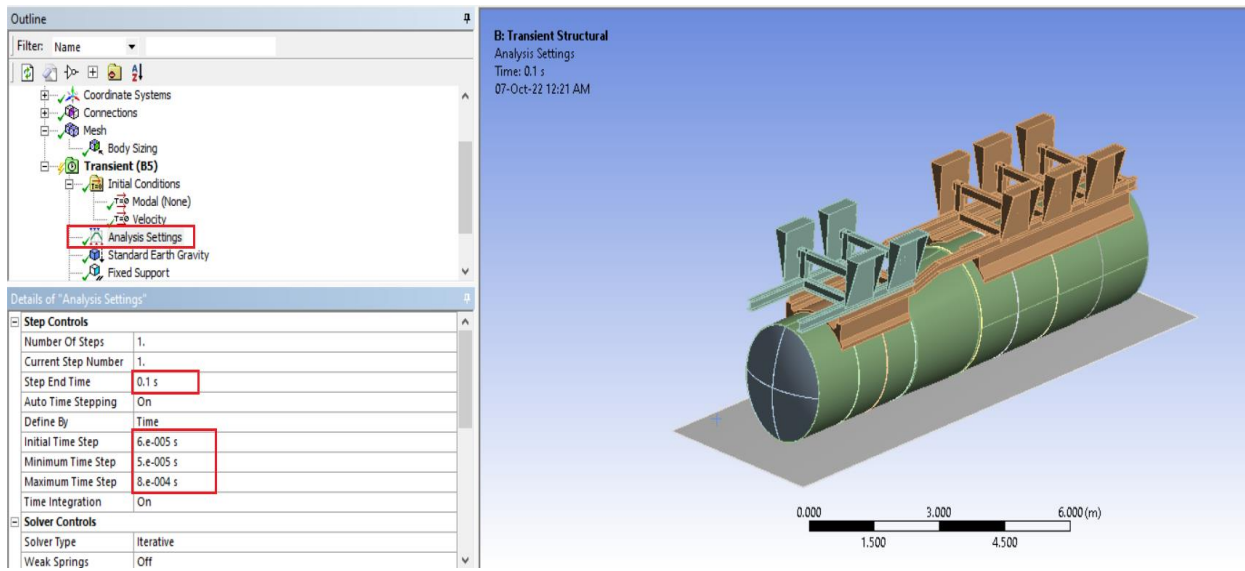
που επιλεχθεί, όπως στην παρούσα εργασία, η ρύθμιση της διάρκειας των βημάτων αυτών (και όχι ο αριθμός τους, που είναι ο άλλος τρόπος) απαιτείται να οριστούν οι τιμές της διάρκειας του αρχικού χρονικού βήματος, του ελάχιστου επιτρεπτού και του μέγιστου επιτρεπτού. Στις παρακάτω Εικόνες παρουσιάζονται οι χρόνοι αυτοί για δύο τυχαία μοντέλα, ένα από κάθε είδος προσομοίωσης. Προφανώς σε κάθε προσομοίωση οι τιμές αυτές διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ τους (παρουσιάζονται αναλυτικά στα επιμέρους μοντέλα παρακάτω), ωστόσο γίνεται φανερό πως στην ανατροπή των 180° τα χρονικά βήματα είναι σημαντικά μικρότερα, κάτι το οποίο επιλέχθηκε λόγω των κατά πολύ μεγαλύτερων παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα εκεί.

Τέλος, επιλέχθηκε Επαναληπτικός Επιλύτης (Iterative Solver) στις περιπτώσεις των μοντέλων δεξαμενής κυκλικής διατομής, λόγω των ισχυρών πλεονεκτημάτων που φέρει σε σχέση με τον Άμεσο (Direct Solver) σε προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν μεγάλους αριθμούς κόμβων και γενικότερα μοντέλα μεγάλων διαστάσεων. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτών είναι η καλύτερη διαχείριση μεγάλων μοντέλων, η μείωση του χρόνου επίλυσής τους και η μικρότερη κατανάλωση μνήμης RAM (κάτι το οποίο ήταν ζωτικής σημασίας).

Από την άλλη, στα μοντέλα με δεξαμενή ελλειπτικής διατομής επιλέχθηκε Άμεσος Επιλύτης (Direct Solver), λόγω του κατά πολύ μικρότερου προκύπτοντος αριθμού κόμβων και Στοιχείων, κάτι που οφείλεται καθαρά στη μικρότερη γεωμετρία που αποδίδεται με τη δεξαμενή ελλειπτικής διατομής. Στις περιπτώσεις αυτές ο Άμεσος Επιλύτης ήταν δυνατό να αξιοποιήσει πλήρως τα πλεονεκτήματά του, δηλαδή την ταχύτητα επίλυσης και την απλότητα, χωρίς να περιορισθεί από τις υψηλές απαιτήσεις μνήμης RAM που τον χαρακτηρίζουν.



Εικόνα 36: Ρυθμίσεις ανάλυσης για τα μοντέλα με ανατροπή 90 μοιρών



Εικόνα 37: Ρυθμίσεις ανάλυσης για τα μοντέλα με ανατροπή 180 μοιρών

6.2 Μοντέλο 1 (Κυκλική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Μονή Κόλληση)

6.2.1 Ανατροπή 90 μοιρών (1.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $1.25 \cdot 10^{-4}$ s

-Ελάχιστο: $1 \cdot 10^{-4}$ s

-Μέγιστο: $6 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 10h 21m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

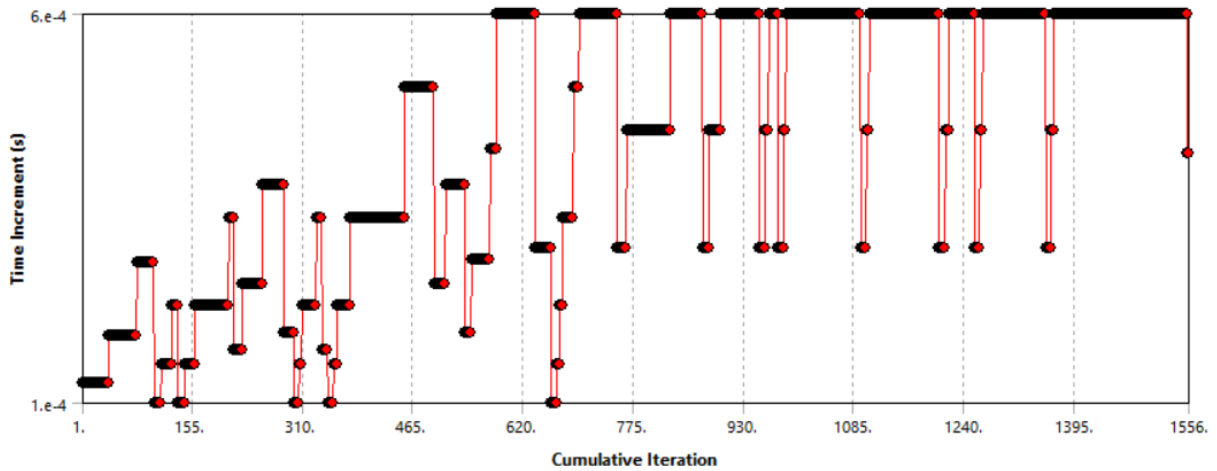
-Όριο θραύσης: 630 MPa

Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

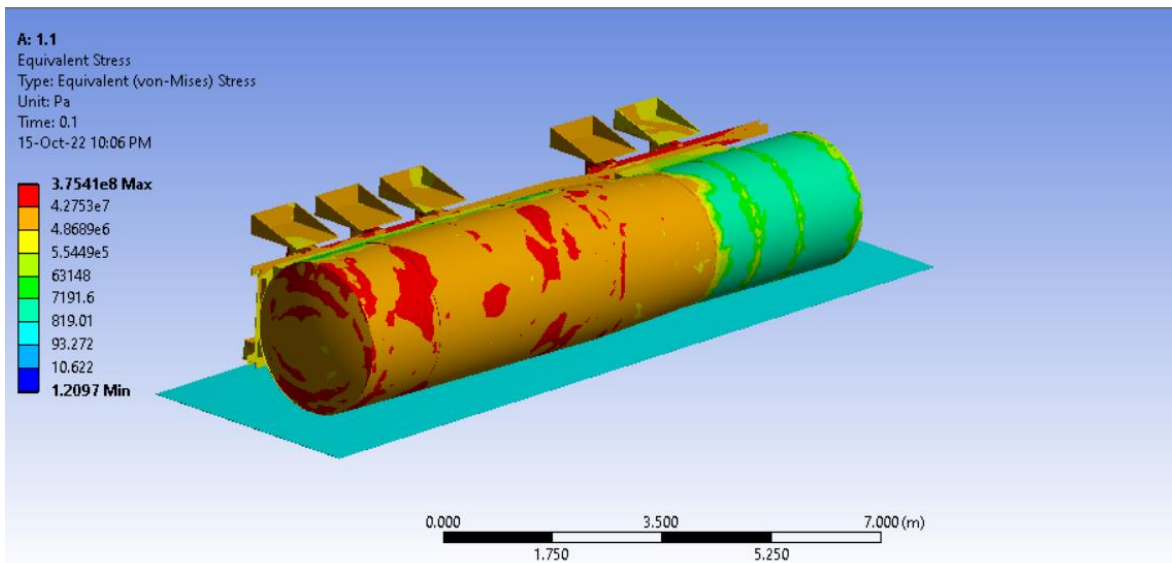
-Όριο θραύσης: 630 MPa

Στην παρακάτω **Εικόνα** παρουσιάζεται η εξέλιξη της εκλογής χρονικών βημάτων (στα πλαίσια των ορισμένων) κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Παρατηρείται ότι αν και τέθηκε μέγιστο χρονικό βήμα ίσο με $6 \cdot 10^{-4}$ s, το πρόγραμμα προσπάθησε αρκετές φορές να το επιτύχει (με σκοπό γρηγορότερη επίλυση), αλλά συχνά αποτύγχανε (μη επίτευξη σύγκλισης των κριτηρίων), με αποτέλεσμα να πέσει σε μικρότερο βήμα. Κάθε που συμβαίνει κάτι τέτοιο, ορίζεται ως «Bisection» και γίνεται προσπάθεια επίλυσης του μισού (κατά προσέγγιση) χρονικού βήματος. Τυπικά, το φαινόμενο αυτό είναι επιθυμητό να αποφεύγεται, διότι οι συγκεκριμένες επαναλήψεις αποτελούν «χαμένες» επαναλήψεις, ωστόσο πολλές φορές είναι αναπόφευκτο. Ο ορισμός πολύ μικρού μεγίστου χρονικού βήματος, σαφώς, θα λύσει αυτό το πρόβλημα, ωστόσο, θα αυξήσει ανεπιθύμητα (και ίσως τελικά περισσότερο) το χρόνο επίλυσης, σε σχέση με την εμφάνιση Bisections.



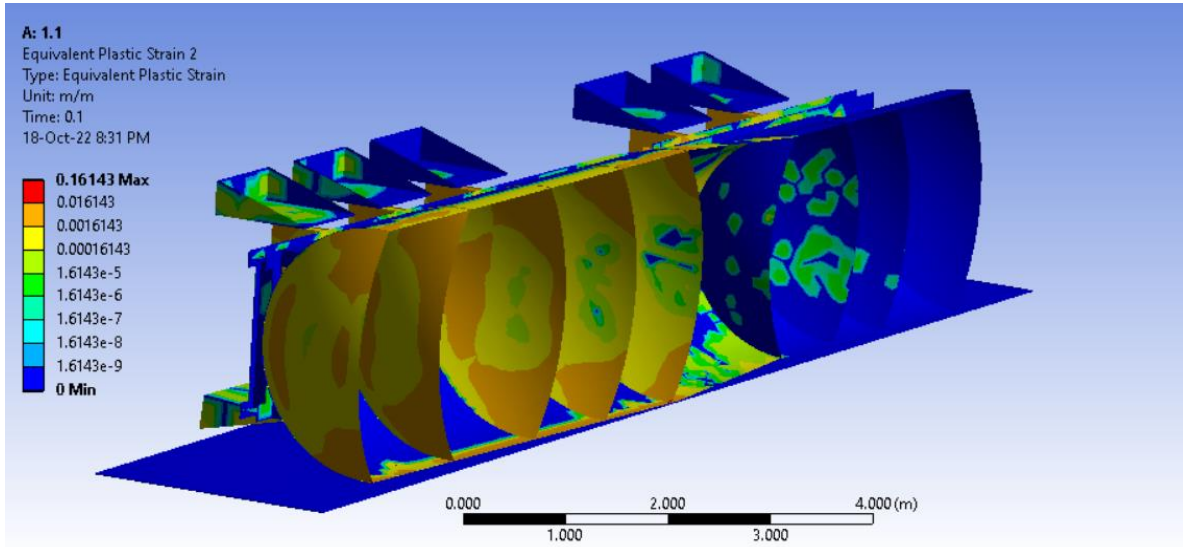
Εικόνα 38: 1.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση

Στην παρακάτω **Εικόνα** παρουσιάζονται **οι τάσεις επί του μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης (0.1 s)**. Παρατηρείται ότι, εκτός από το σασί, αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις και στο κέλυφος της δεξαμενής. Αυτές εμφανίζονται είτε κάτω, λόγω της άμεσης επαφής με το έδαφος, είτε πάνω και περιφερειακά, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της δεξαμενής με τα διαχωριστικά τοιχώματα.



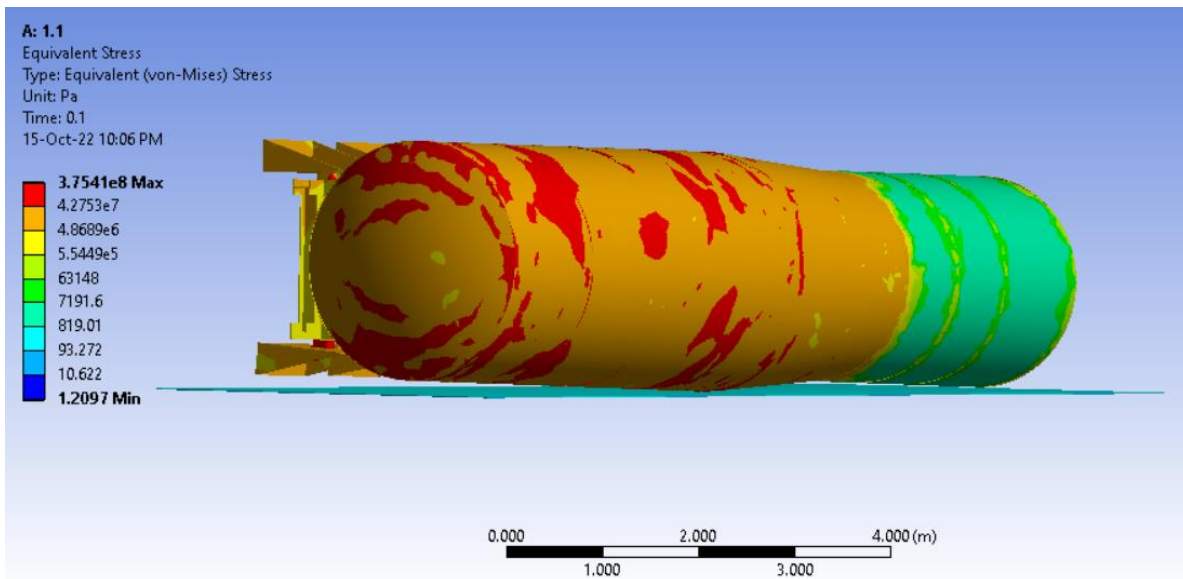
Εικόνα 39: 1.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης

Ενώ παρακάτω η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης σε τομή. Παρατηρείται ότι ένα μεγάλο μέρος των πλαστικών παραμορφώσεων προέρχεται από το σασί, αλλά επίσης η δεξαμενή και τα διαχωριστικά υπόκεινται σε σοβαρές εκατοστιαίες πλαστικές παραμορφώσεις, της τάξης του 0.016 ή **1.6%**.



Εικόνα 40: 1.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης

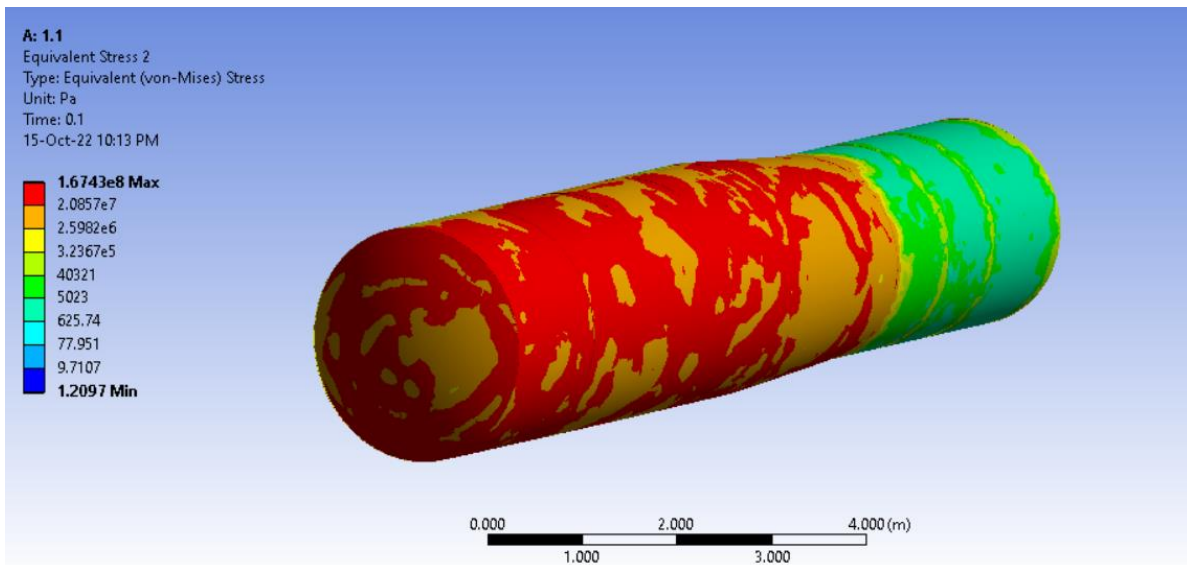
Στο τέλος της προσομοίωσης παρατηρείται, επίσης, αναπήδηση του μοντέλου εξαιτίας της πρόσκρουσης.



Εικόνα 41: 1.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης

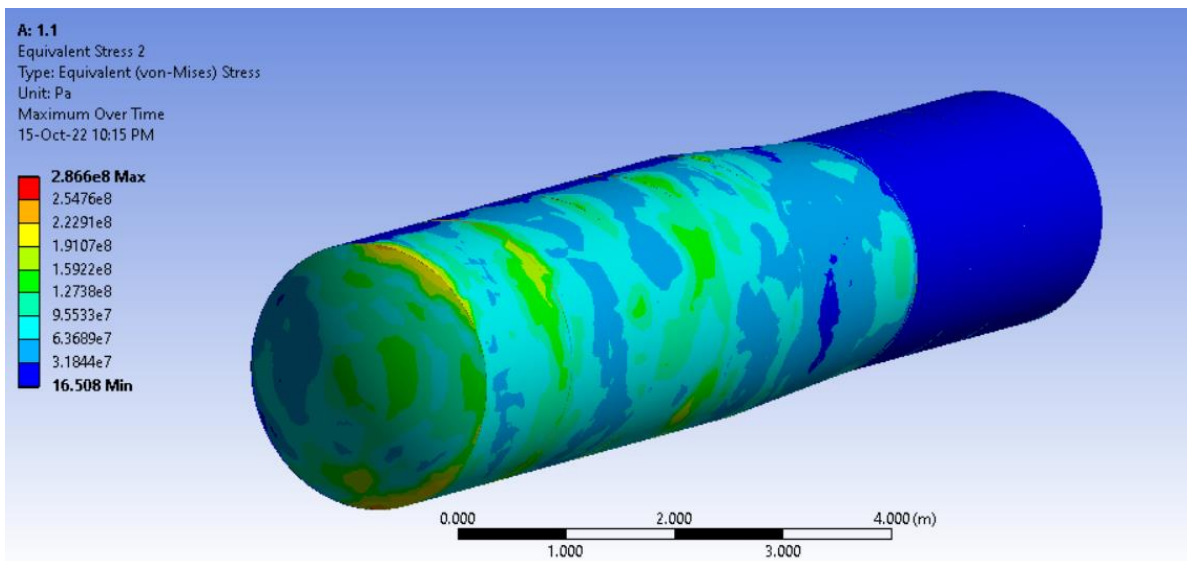
Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τη στιγμή που το μοντέλο θα έρθει για δεύτερη φορά σε επαφή με το έδαφος η κινητική του ενέργεια θα είναι κατά πολύ μικρότερη της αρχικής. Οπότε, όντως, **το μεγαλύτερο μέρος της ζημιάς έχει ήδη λάβει χώρα εντός των πρώτων 0.1 s** της πρόσκρουσης και όντως η προσομοίωση του φαινομένου για αυτό το χρονικό διάστημα μπορεί να θεωρηθεί αρκετή για την περιγραφή των παραμορφώσεων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, εύκολα παρατηρείται ότι ένα σημαντικό κομμάτι των παραπάνω τιμών των τάσεων προκαλείται από το σασί, το οποίο προφανώς δέχεται έντονες καταπονήσεις. Η απομόνωση της δεξαμενής και των διαχωριστικών τοιχωμάτων παρουσιάζεται στην παρακάτω **Εικόνα**, όπου φαίνονται οι τάσεις επί των σωμάτων αυτών κατά το τέλος της προσομοίωσης.



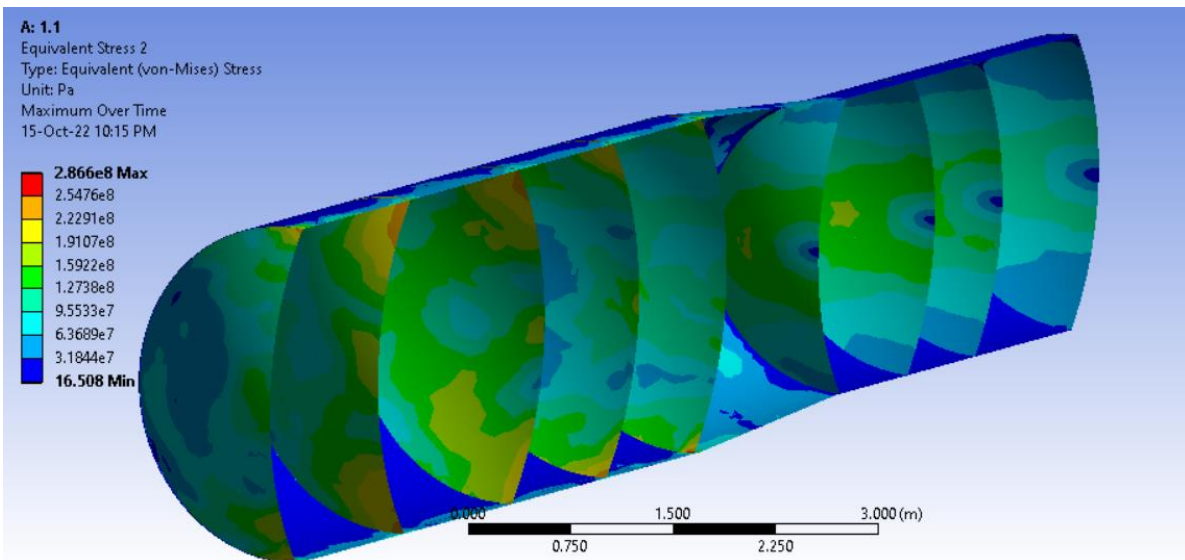
Εικόνα 42: 1.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

Ενώ οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές τους (σε κάποιο χρόνο νωρίτερα) στην Εικόνα που ακολουθεί.



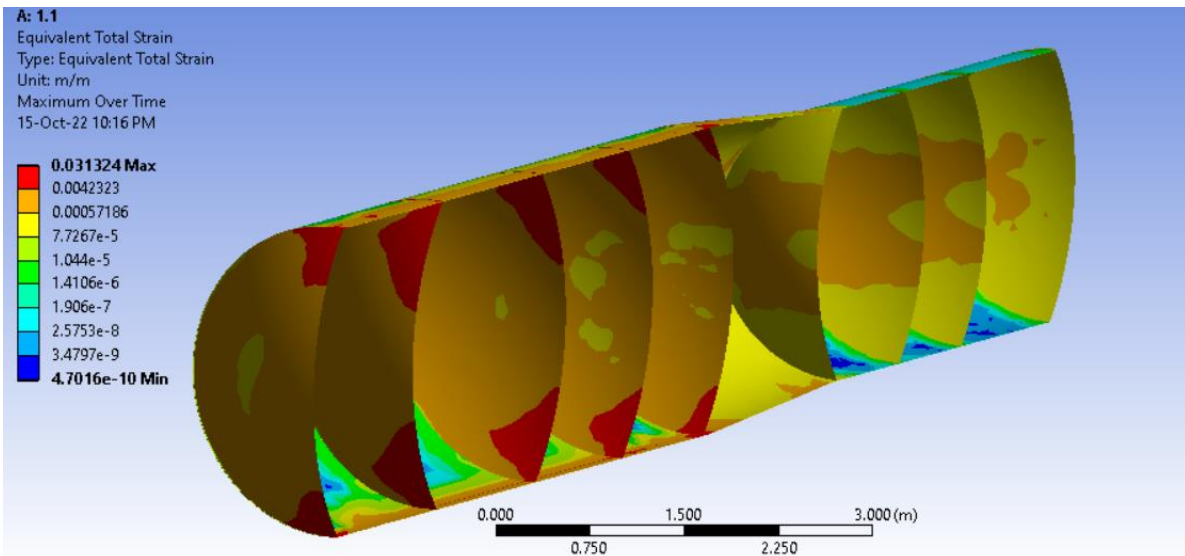
Εικόνα 43: 1.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών

Όπως είναι αναμενόμενο, η συγκέντρωση των τάσεων λαμβάνει κυρίως χώρα στα σημεία επαφής (και συγκόλλησης) της δεξαμενής με τα διαχωριστικά τοιχώματα, όπως φαίνεται στην παρακάτω τομή του μοντέλου.



Εικόνα 44: 1.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή

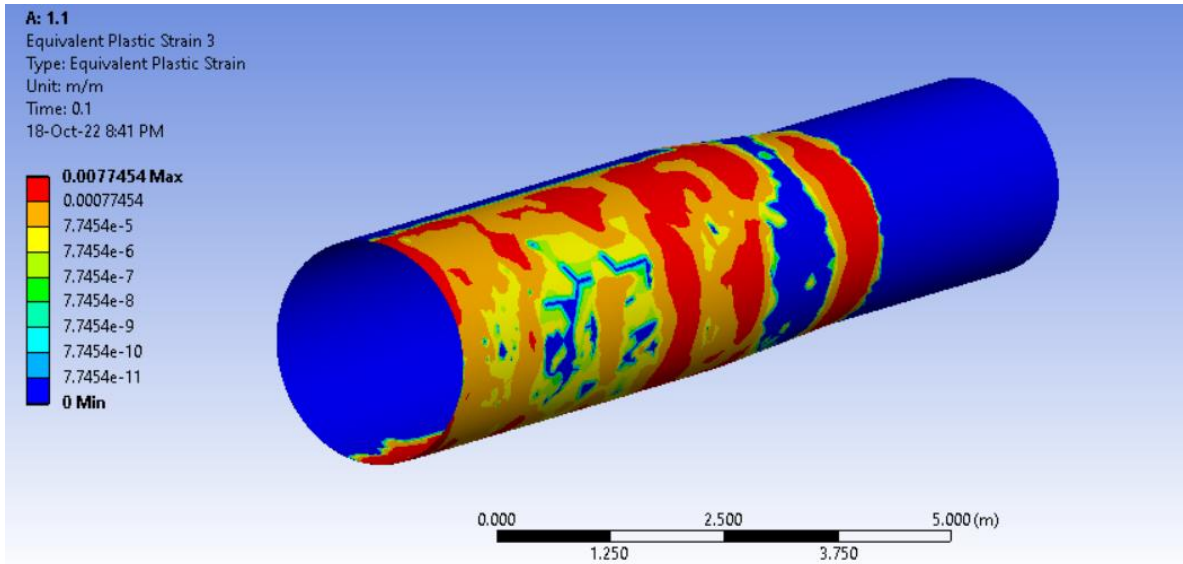
Σε αντίθεση με τις τιμές που παρουσιάζονται παραπάνω, όπου παρατηρούνται τιμές παραμόρφωσης της τάξης του 16% για ολόκληρο το μοντέλο, στην παρακάτω **Εικόνα**, φαίνεται ότι **η μέγιστη ολική (ελαστική και πλαστική) παραμόρφωση της δεξαμενής και των διαχωριστικών (σε χρόνο μικρότερο των 0.1 s) δεν ξεπερνά το 3.2%**, αν και φυσικά και αυτές οι τιμές αφορούν την πλαστική πλέον περιοχή.



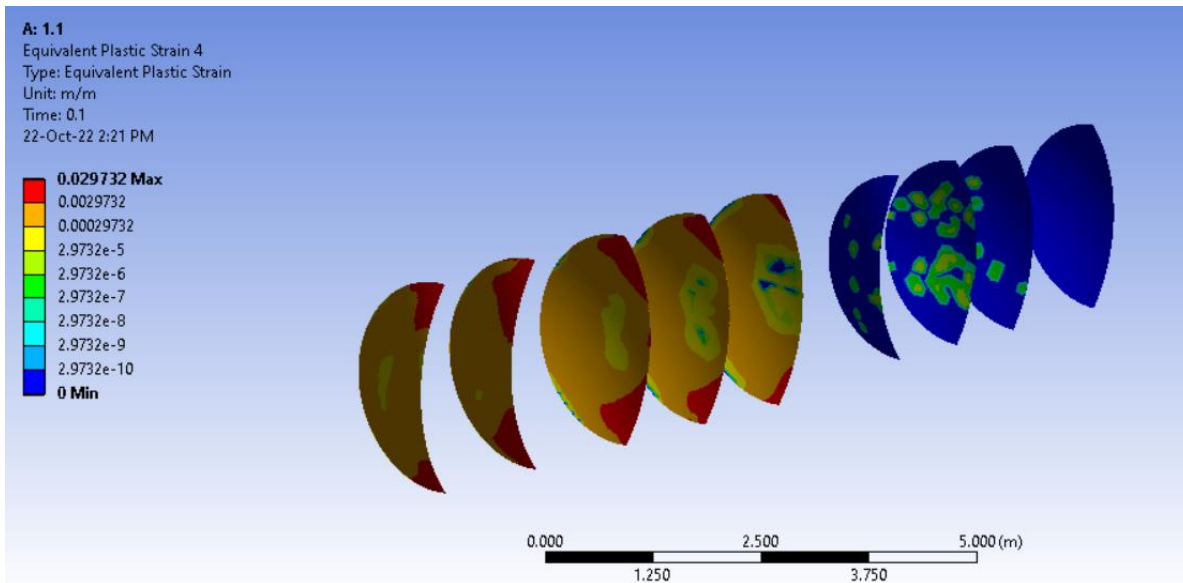
Εικόνα 45: 1.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών

Τέλος, κρίνεται σκόπιμη και μία παρουσίαση της **πλαστικής παραμόρφωσης της δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης (παρακάτω Εικόνα)**, με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση του υλικού των διαχωριστικών και της δεξαμενής, αλλά και του τύπου της

συγκόλλησης (μονή ή διπλή) στην παροχή υποστήριξης στα τοιχώματά της. Για τους αντίστοιχους λόγους, παρατίθεται και μία Εικόνα με τις **πλαστικές παραμορφώσεις των διαχωριστικών τοιχωμάτων στο τέλος της προσομοίωσης.**



Εικόνα 46: 1.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 47: 1.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

Εύκολα παρατηρείται από τη σύγκριση των δύο παραπάνω Εικόνων, ότι **οι πλαστικές παραμορφώσεις στα διαχωριστικά τοιχώματα είναι κατά πολύ μεγαλύτερες αυτών της δεξαμενής**, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο.

6.2.2 Ανατροπή 180 μοιρών (1.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Refinement στα άκρα των διαχωριστικών τοιχωμάτων.

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $8 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $5 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 13h 22m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

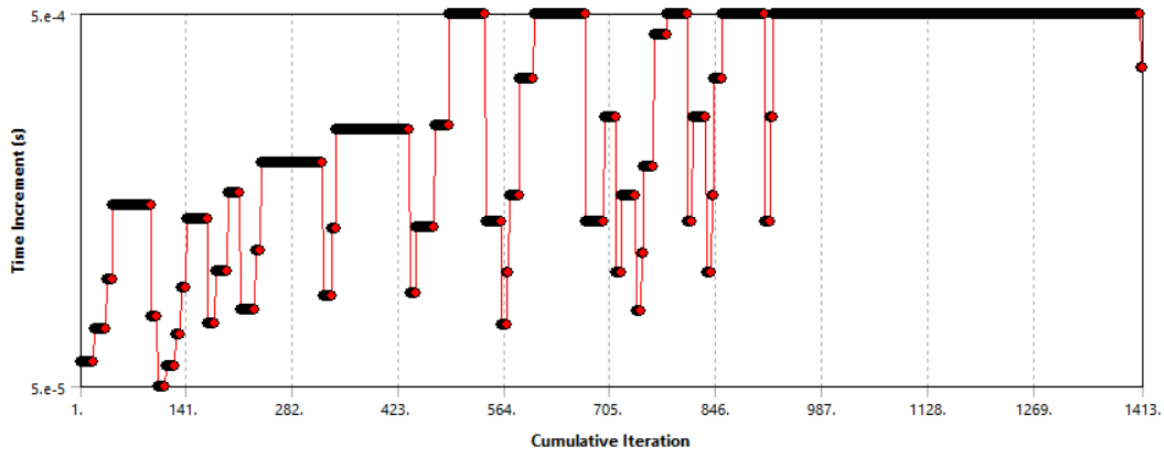
-Όριο θραύσης: 630 MPa

Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

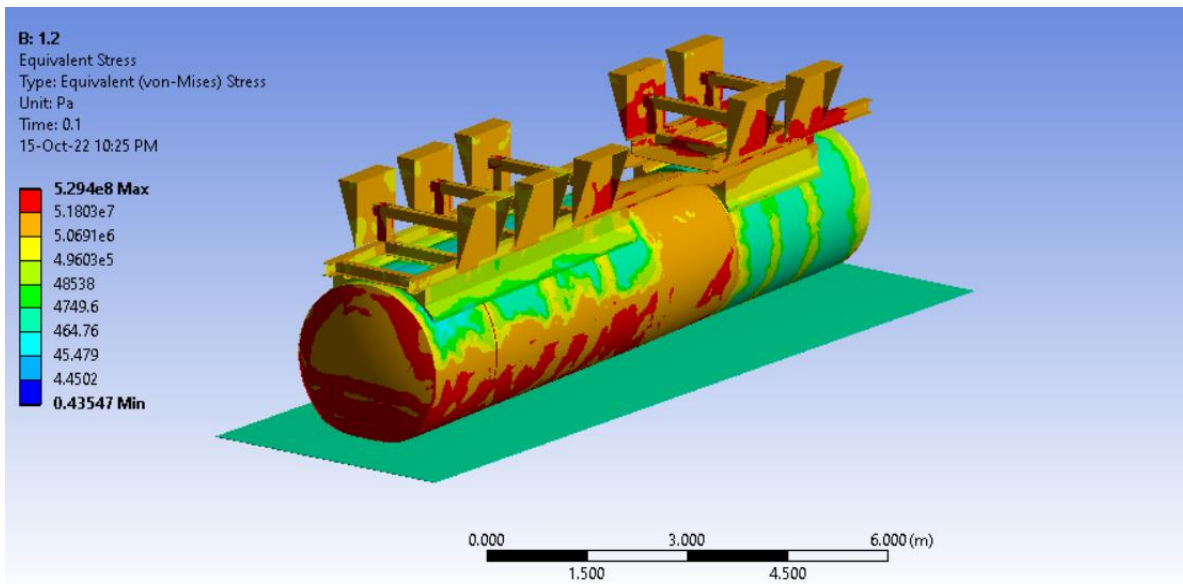
-Όριο θραύσης: 630 MPa

Αντίστοιχα με προηγουμένως, παρουσιάζεται στην παρακάτω **Εικόνα** η **εξέλιξη των χρονικών βημάτων** κατά τη διάρκεια της επίλυσης και παρατηρείται πως η μέγιστη τιμή που τέθηκε αξιοποιήθηκε περισσότερο σε σχέση με την παραπάνω προσομοίωση, αν και εμφανίστηκε και πάλι μερικές φορές τομή του βήματος και μετάπτωση σε μικρότερο.



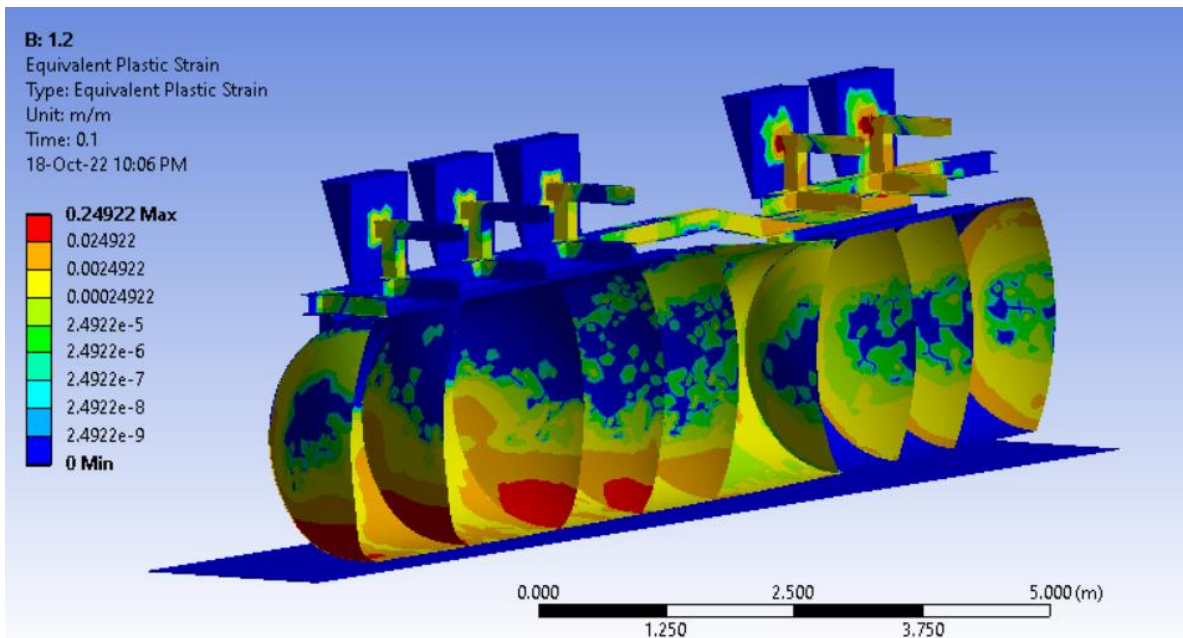
Εικόνα 48: 1.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τάσεις στο μοντέλο κατά το τέλος της προσομοίωσης και φαίνεται, σε αντίθεση με την ανατροπή των 90° ότι πια αφορούν σε μεγάλο βαθμό και τη δεξαμενή και τα διαχωριστικά τοιχώματα (και όχι μόνο το σασί).



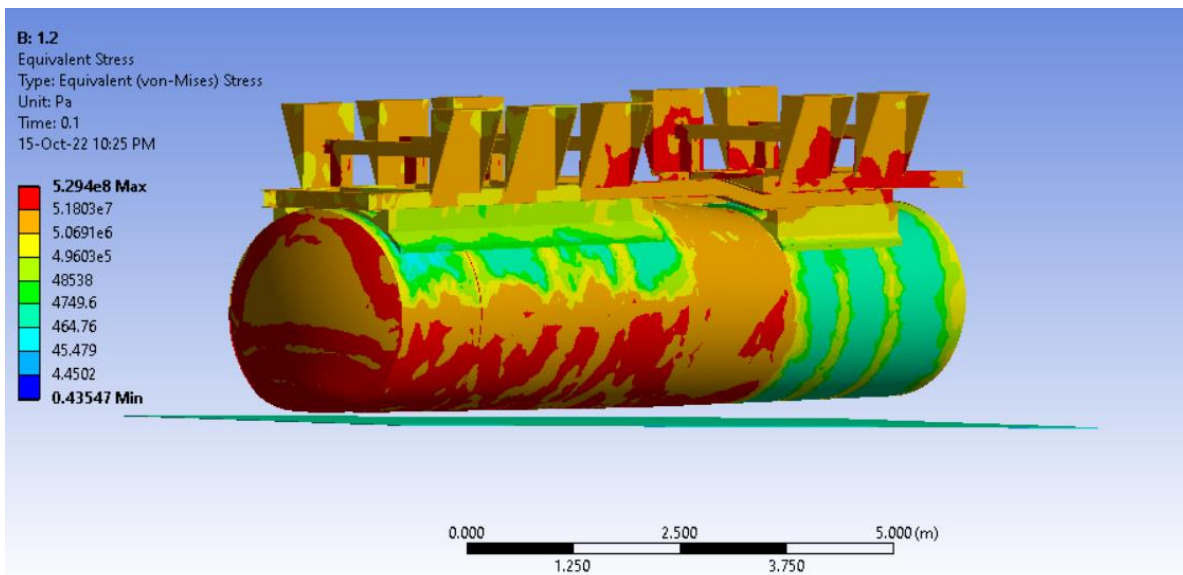
Εικόνα 49: 1.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης

Αντίστοιχα, στην επόμενη Εικόνα, φαίνονται σε τομή οι πλαστικές παραμορφώσεις του μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης, οι οποίες τώρα αγγίζουν το 25%.



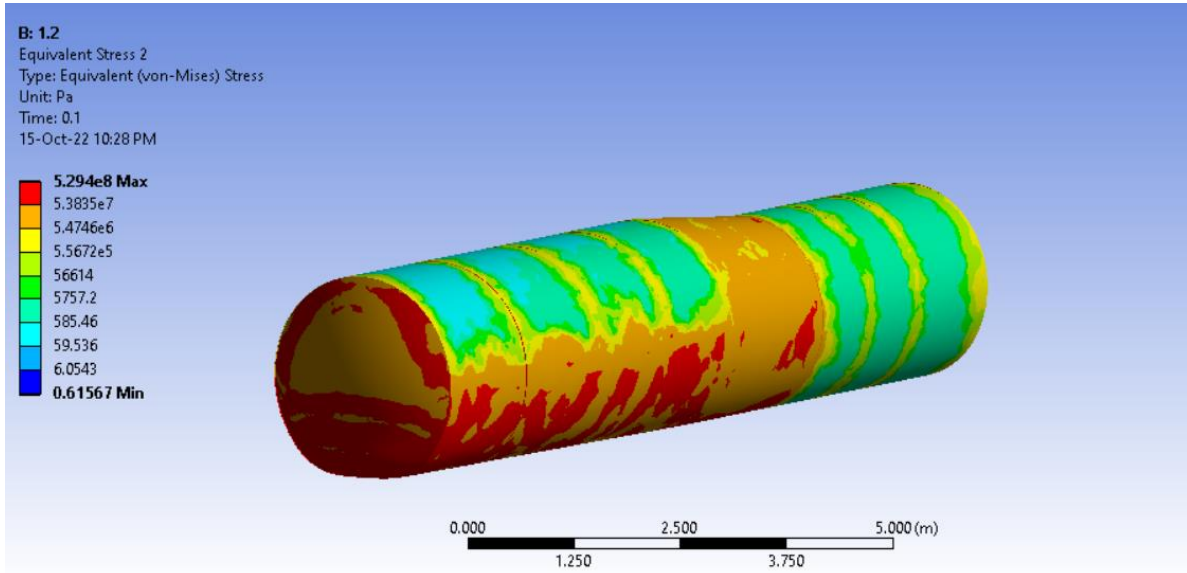
Εικόνα 50: 1.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης

Και στο σενάριο αυτό, παρατηρείται έντονη αναπήδηση του μοντέλου από το έδαφος στο τέλος της προσομοίωσης (0.1 s), κάτι που και πάλι, για το λόγο που αναλύθηκε παραπάνω, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μελέτη της πρόσκρουσης για το συγκεκριμένο χρόνο αποδίδει μία ιδιαίτερα ικανοποιητική περιγραφή των καταπονήσεων.



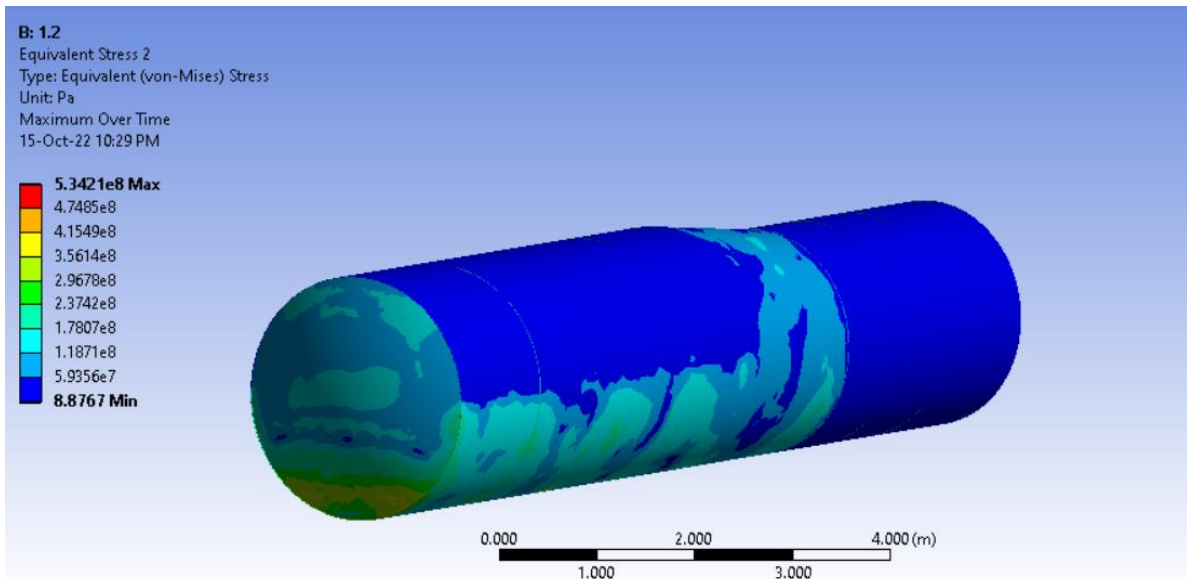
Εικόνα 51: 1.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης

Σε αντίθεση με την ανατροπή των 90°, εδώ η απομόνωση της **δεξαμενής** και των **διαχωριστικών τοιχωμάτων** δεν αλλάζει την κλίμακα των εμφανιζόμενων τάσεων, γεγονός που σημαίνει ότι **οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται πια, σε αυτά τα σώματα και μάλιστα, πλησιάζουν αρκετά το όριο θραύσης του Ανοξειδωτου Χάλυβα.**



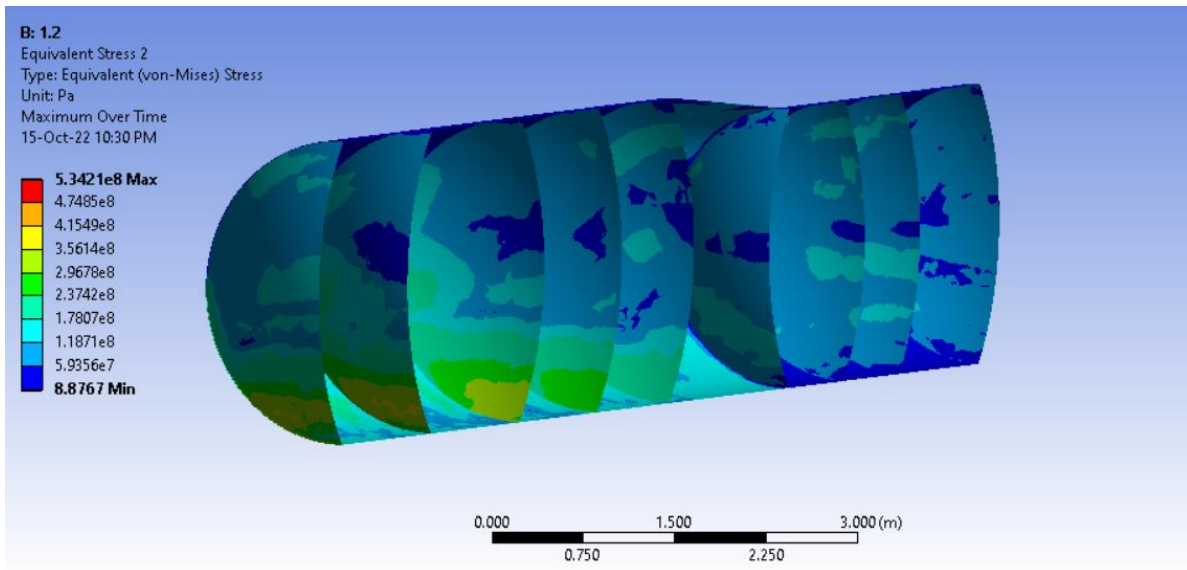
Εικόνα 52: 1.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

Οι τάσεις αυτές μάλιστα, εμφανίζουν και μία ελαφρώς μεγαλύτερη μέγιστη τιμή σε κάποιο χρόνο που προηγείται των 0.1 s, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω **Εικόνα**.



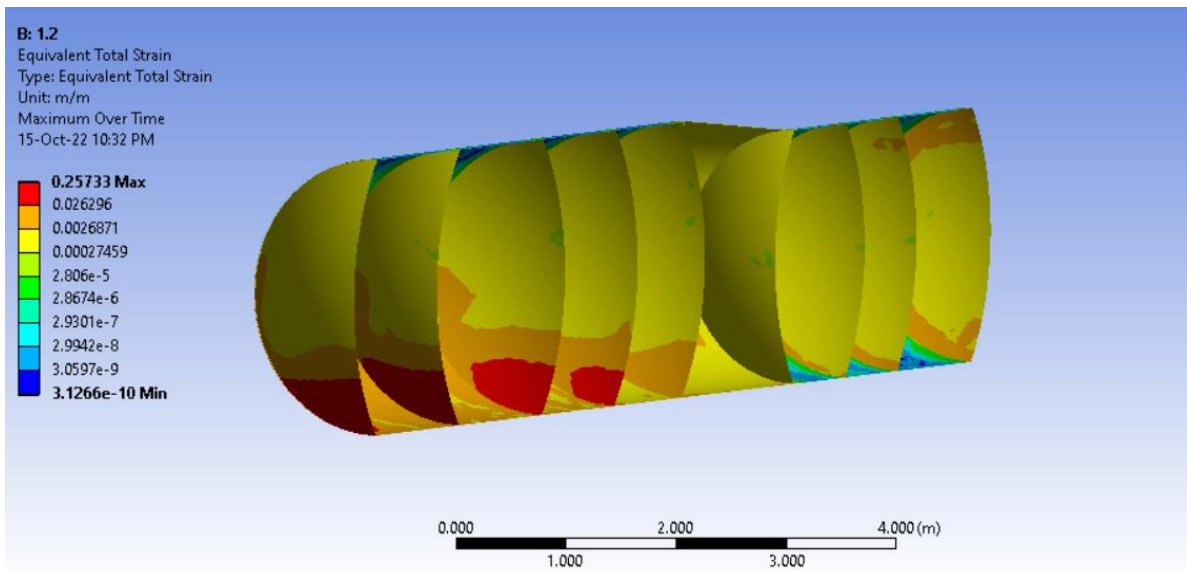
Εικόνα 53: 1.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών

Με την τομή και πάλι, γίνονται εμφανή τα σημεία συγκέντρωσης των τάσεων, τα οποία ταυτίζονται και εδώ με τα σημεία των συγκολλήσεων.



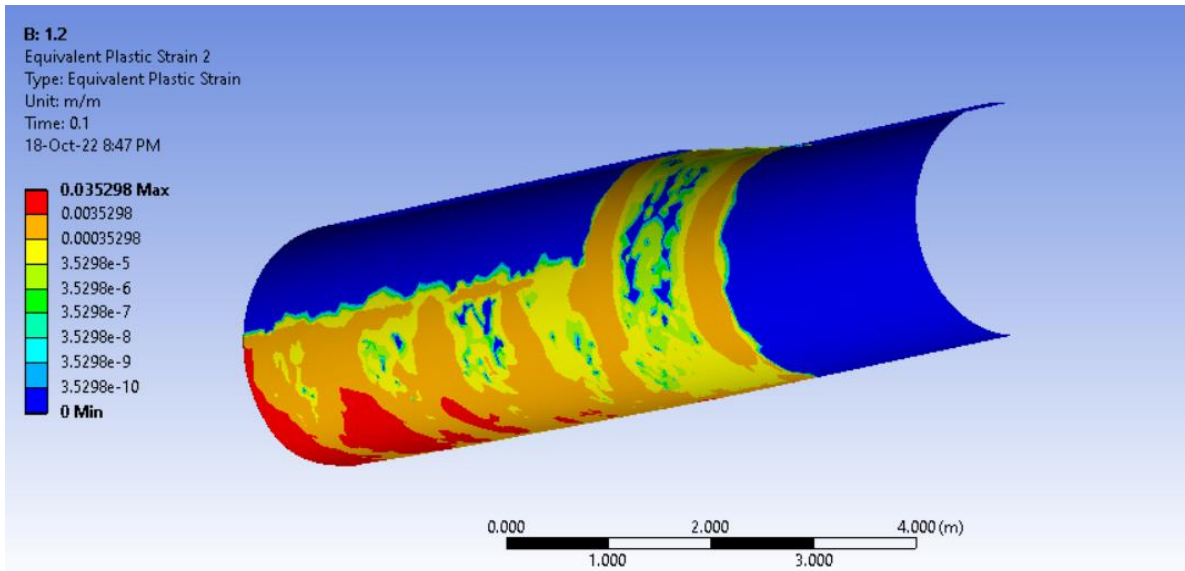
Εικόνα 54: 1.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή

Σε αντίθεση με την προηγούμενη προσομοίωση, παρατηρείται παρακάτω ότι η **μέγιστη ολική παραμόρφωση** (σε χρόνο μικρότερο των 0.1 s) της δεξαμενής και των **διαχωριστικών τοιχωμάτων είναι εξαιρετικά μεγάλη** (μεγαλύτερη του 25%).



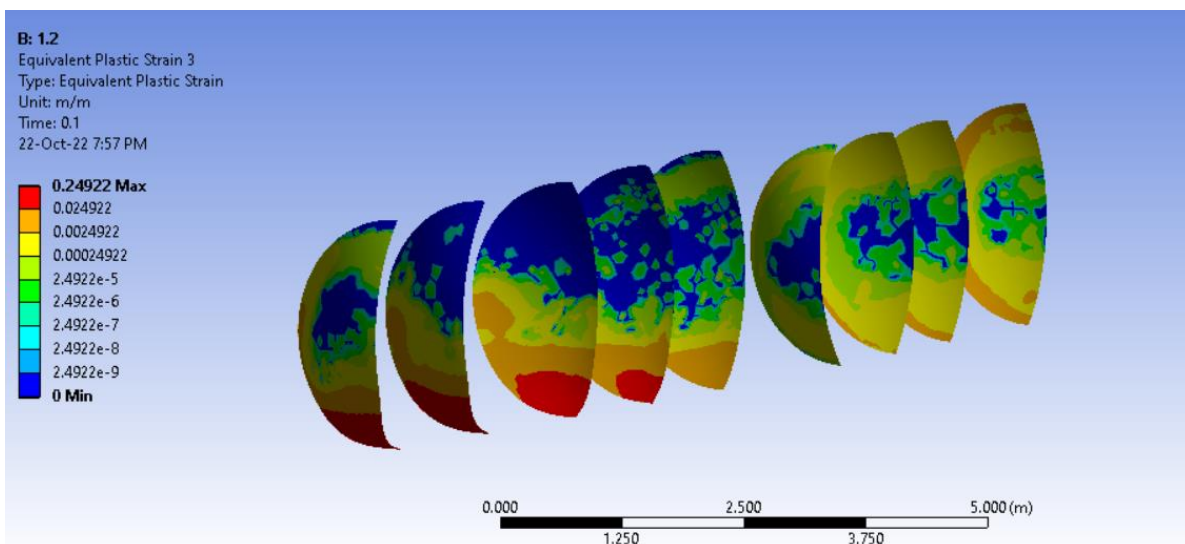
Εικόνα 55: 1.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών

Τέλος, σε απομόνωση της δεξαμενής (παρακάτω **Εικόνα**) φαίνεται ότι η **πλαστική παραμόρφωση είναι έντονη (3.5%)**, κάτι το οποίο φυσικά είναι αναμενόμενο, καθότι η πρόσκρουση στο σενάριο αυτό είναι πολύ πιο έντονη. Το αποτέλεσμα αυτό συγκρίνεται παρακάτω με τις αντίστοιχες ανατροπές των 180° των υπολοίπων 7 μοντέλων.



Εικόνα 56: 1.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης

Κατ'αντιστοιχία με προηγούμενως, παρατίθενται και **οι πλαστικές παραμορφώσεις των διαχωριστικών τοιχωμάτων κατά το τέλος της προσομοίωσης**. Και πάλι παρατηρείται εμφανής διαφορά από τις τιμές της πλαστικής παραμόρφωσης της δεξαμενής.



Εικόνα 57: 1.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.3 Μοντέλο 2 (Κυκλική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Διπλή Κόλληση)

6.3.1 Ανατροπή 90 μοιρών (2.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $1.25 \cdot 10^{-4}$ s

-Ελάχιστο: $1 \cdot 10^{-4}$ s

-Μέγιστο: $5 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 23h 4m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

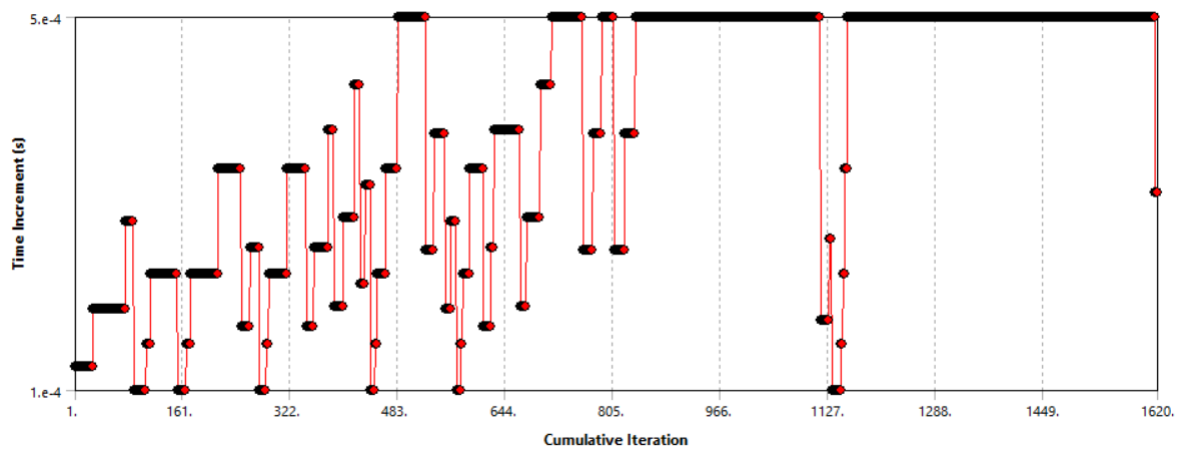
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

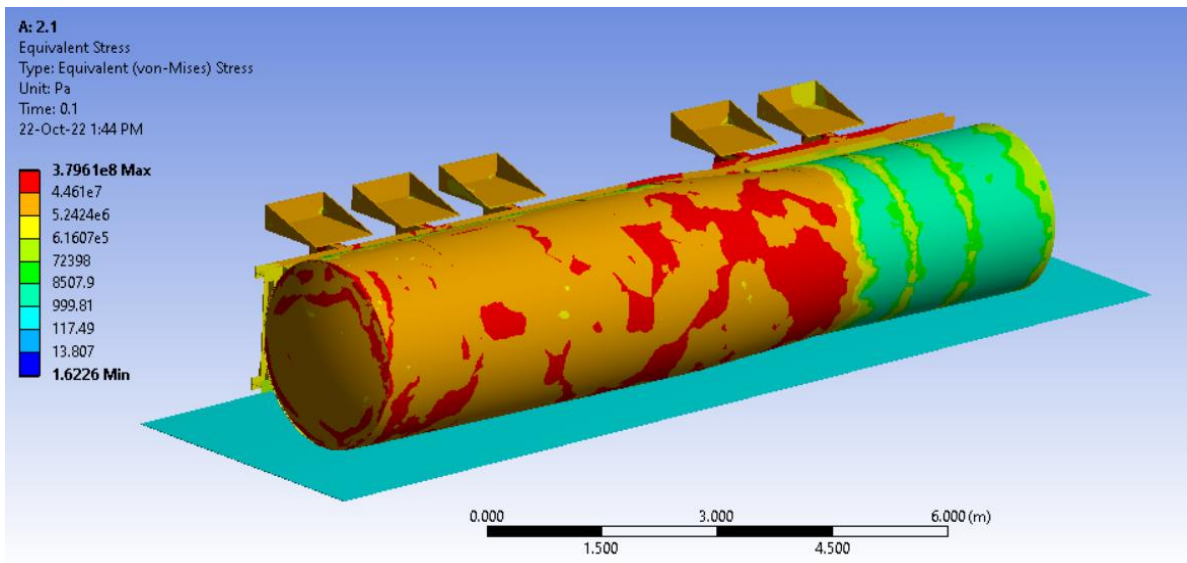
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

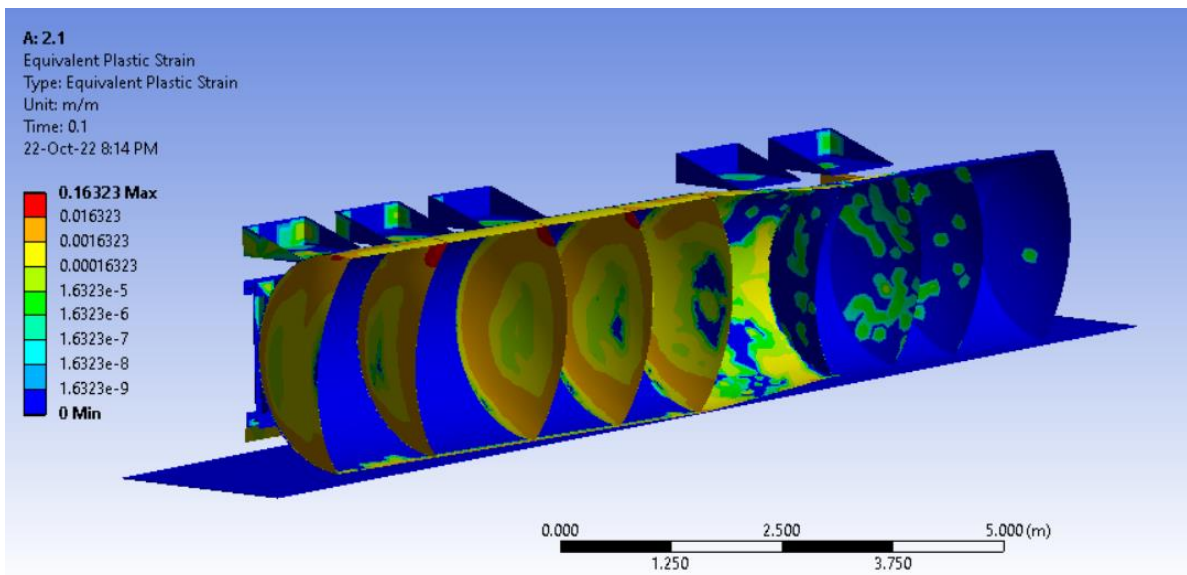
-Όριο θραύσης: 630 MPa



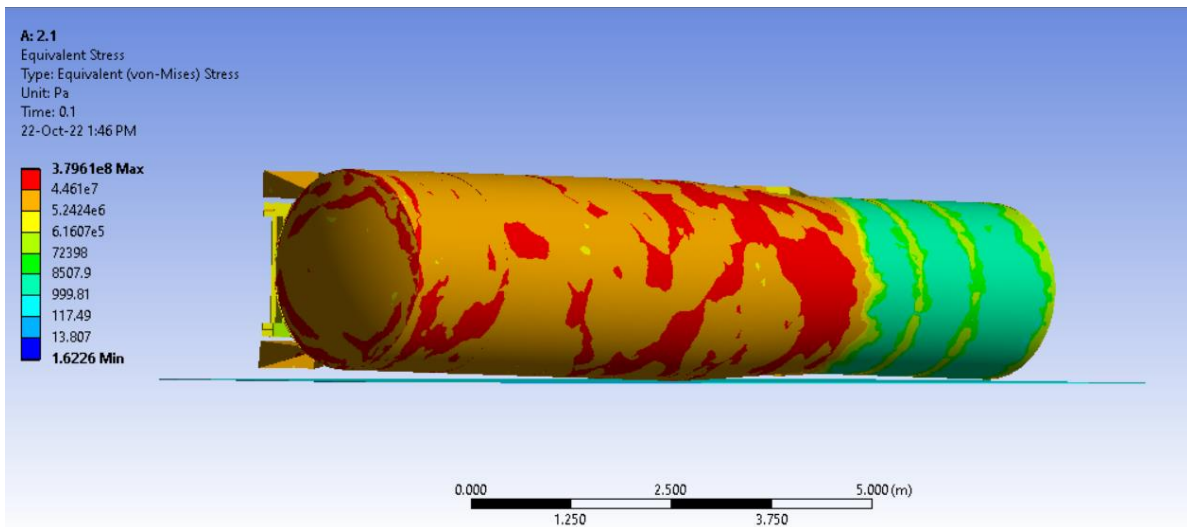
Εικόνα 58: 2.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



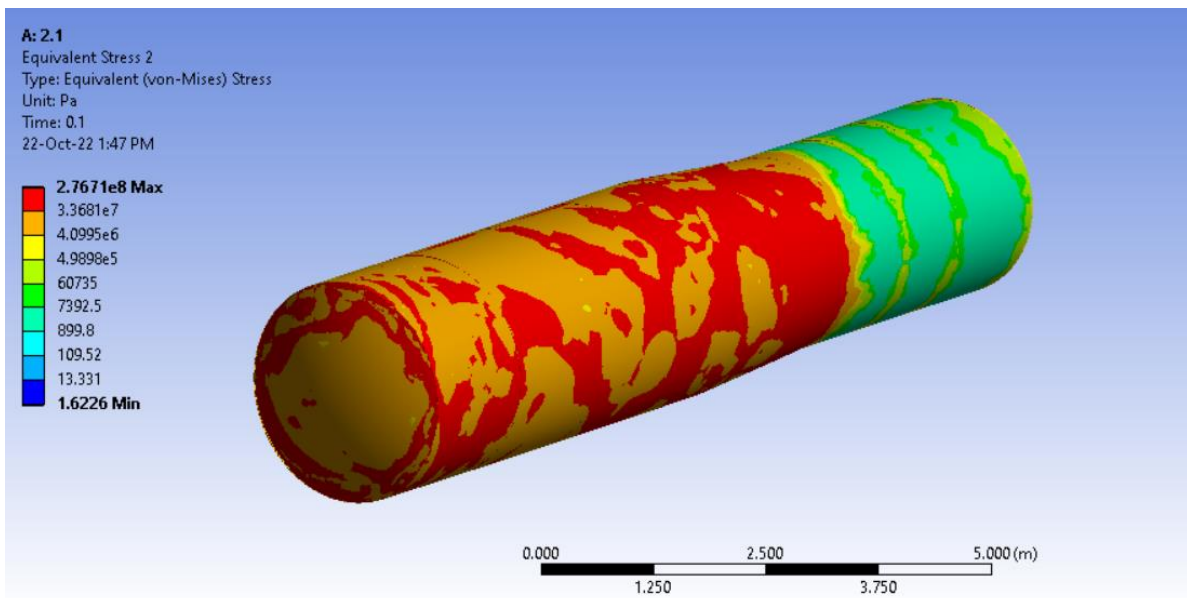
Εικόνα 59: 2.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



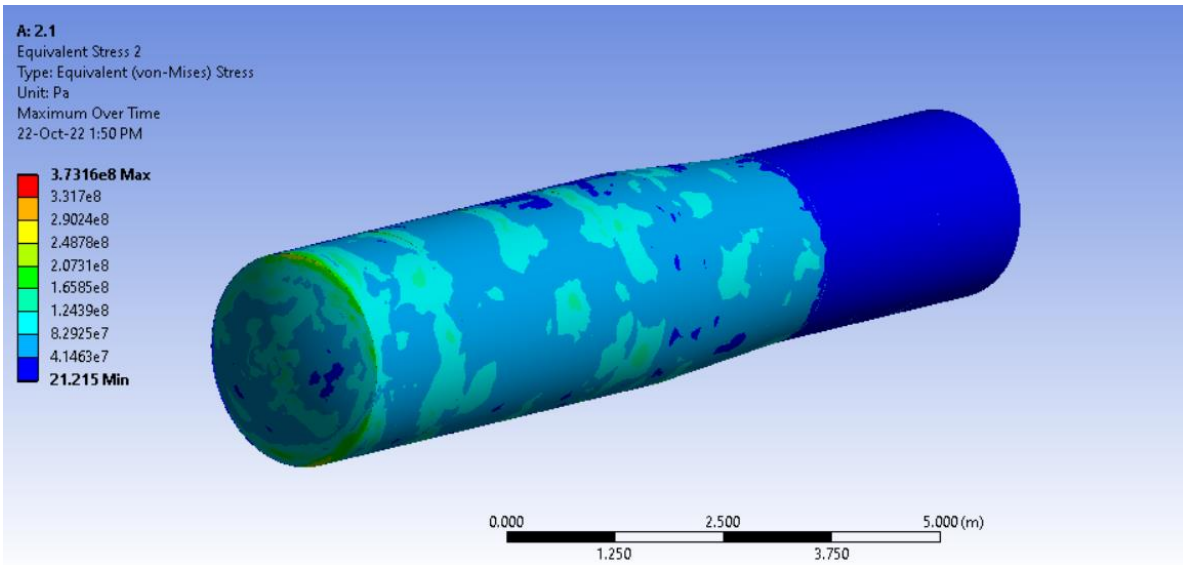
Εικόνα 60: 2.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



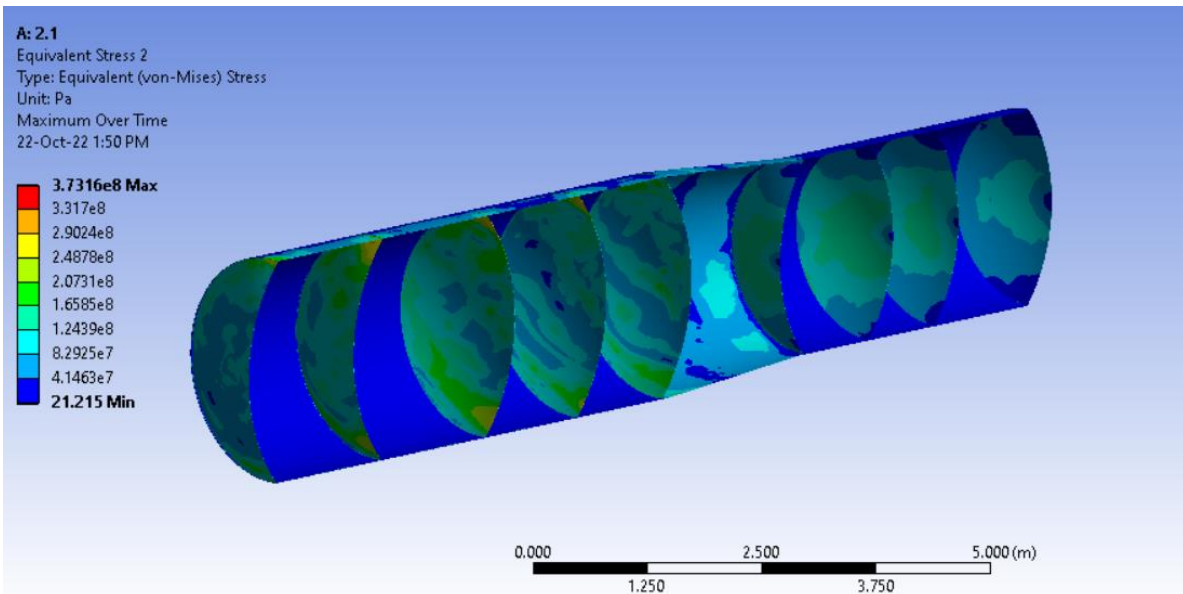
Εικόνα 61: 2.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



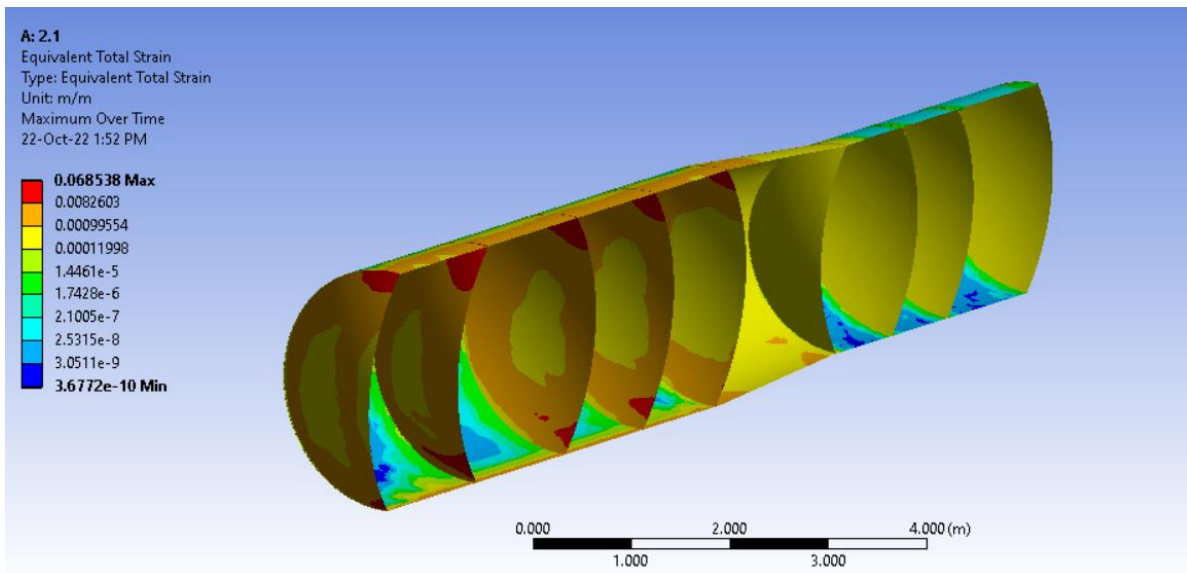
Εικόνα 62: 2.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



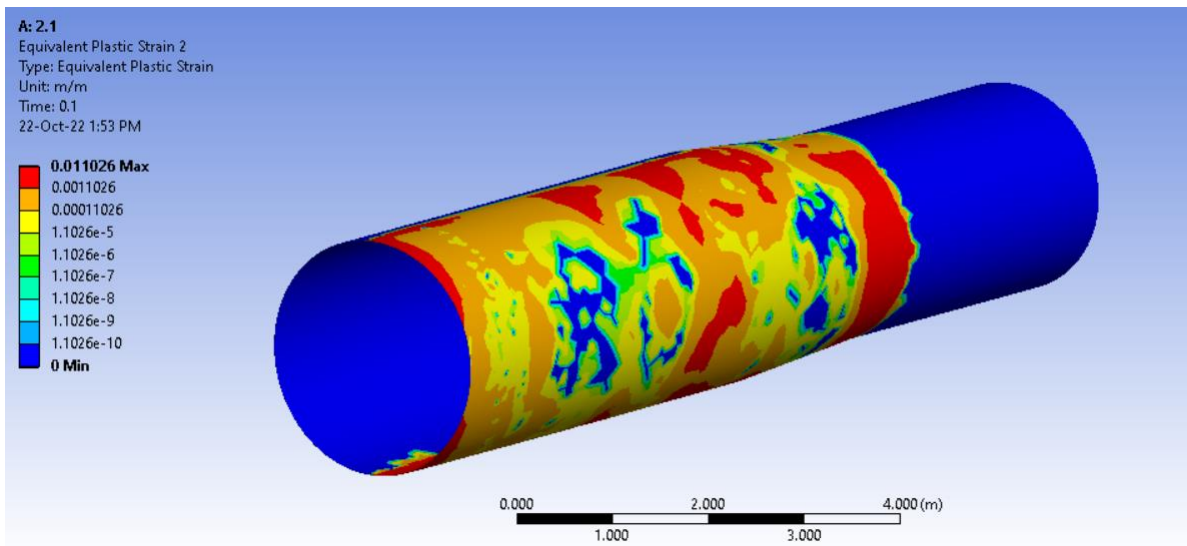
Εικόνα 63: 2.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



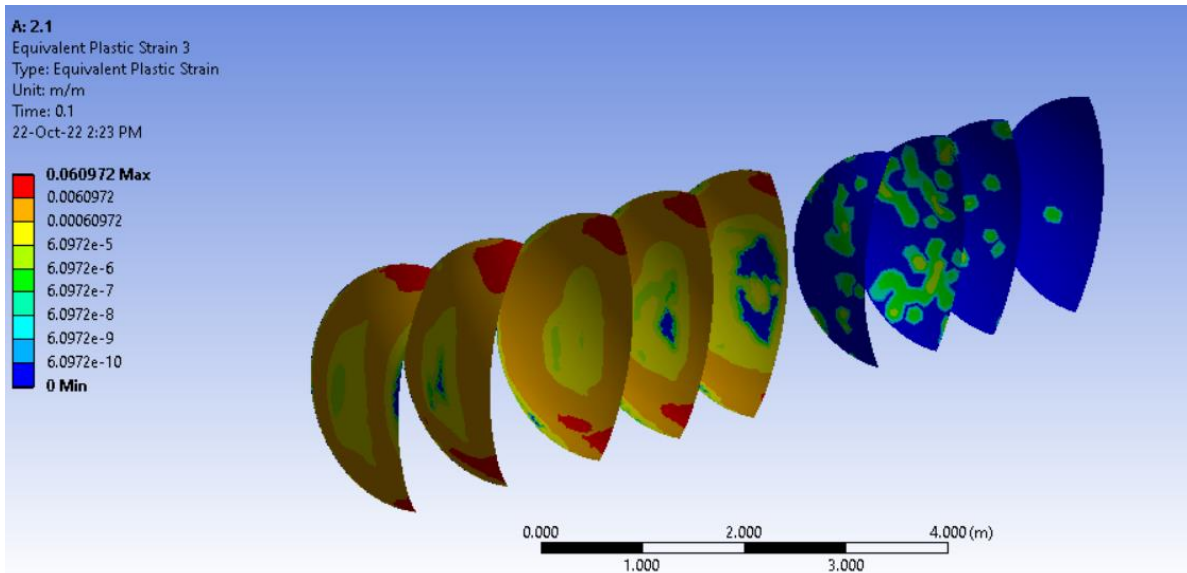
Εικόνα 64: 2.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 65: 2.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 66: 2.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 67: 2.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.3.2 Ανατροπή 180 μοιρών (2.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $6 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $1 \cdot 10^{-3}$ s

Χρόνος επίλυσης: 10h 7m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

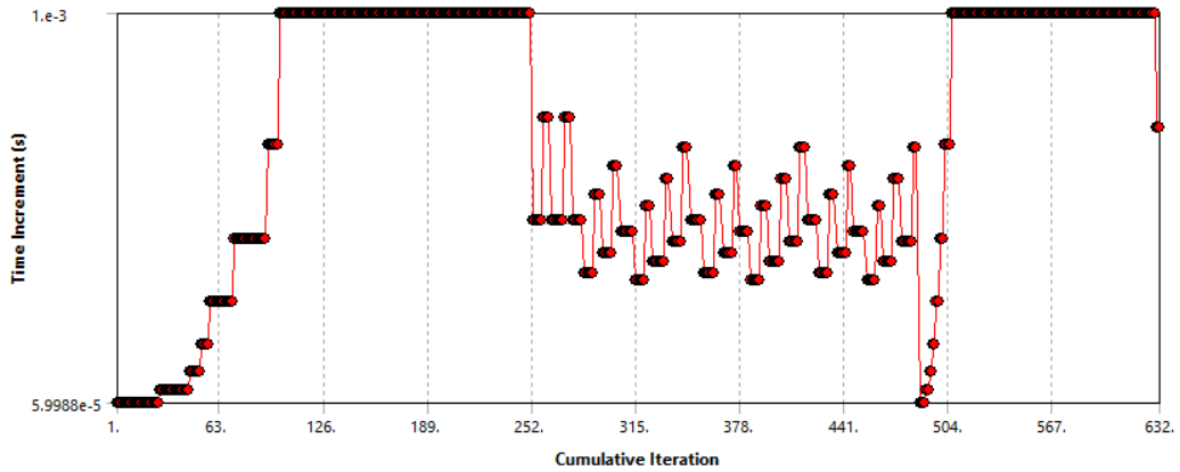
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

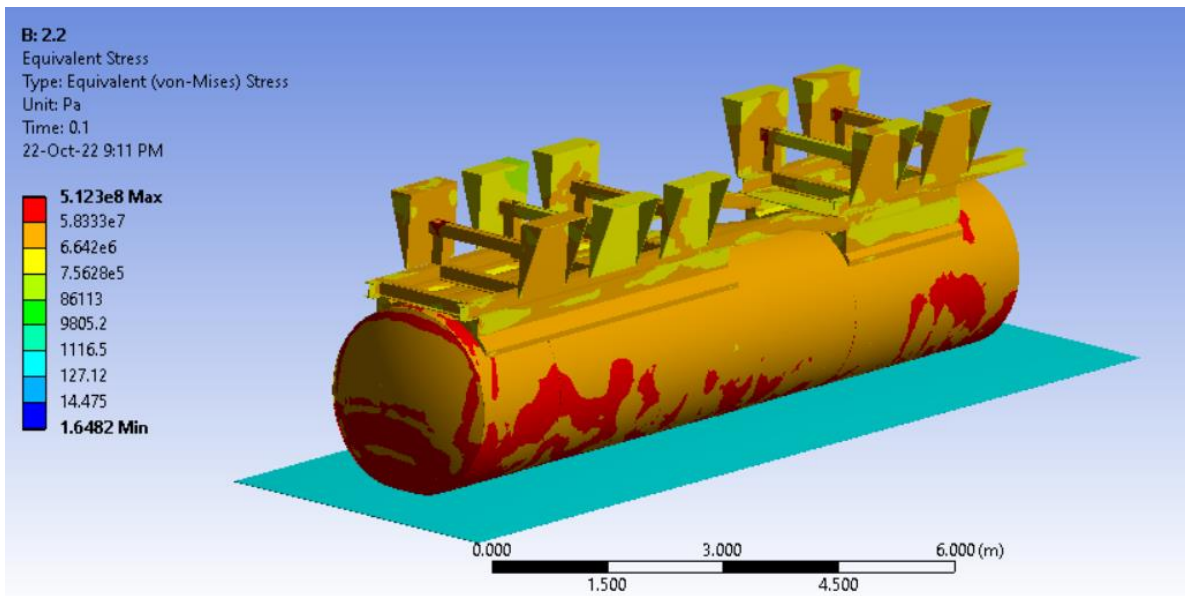
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

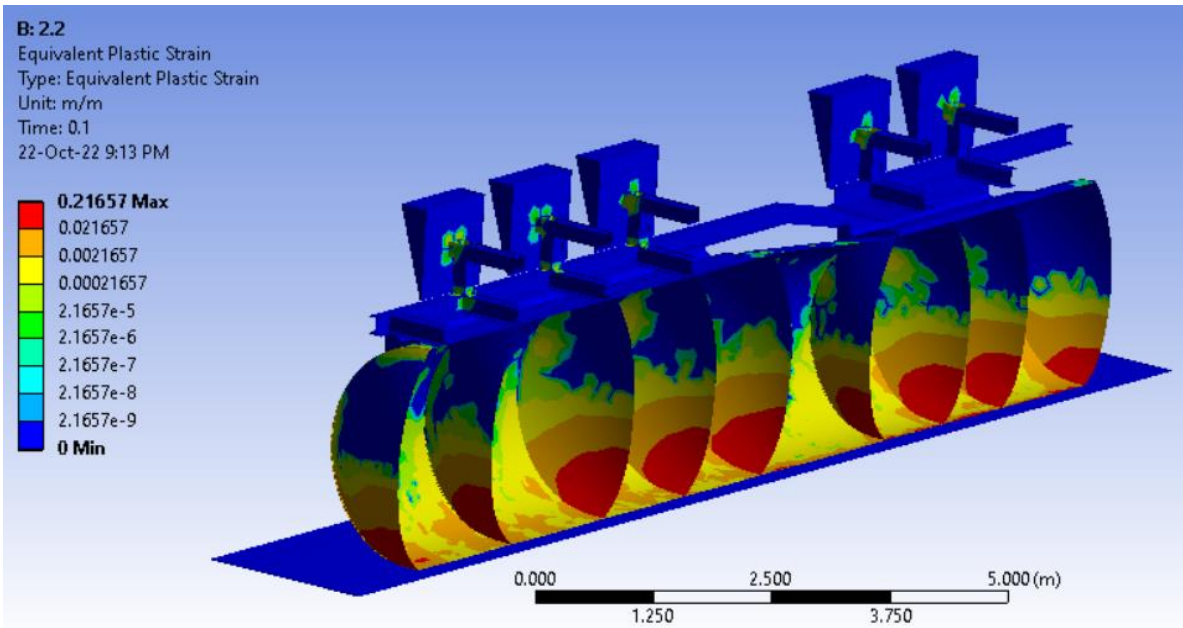
-Όριο θραύσης: 630 MPa



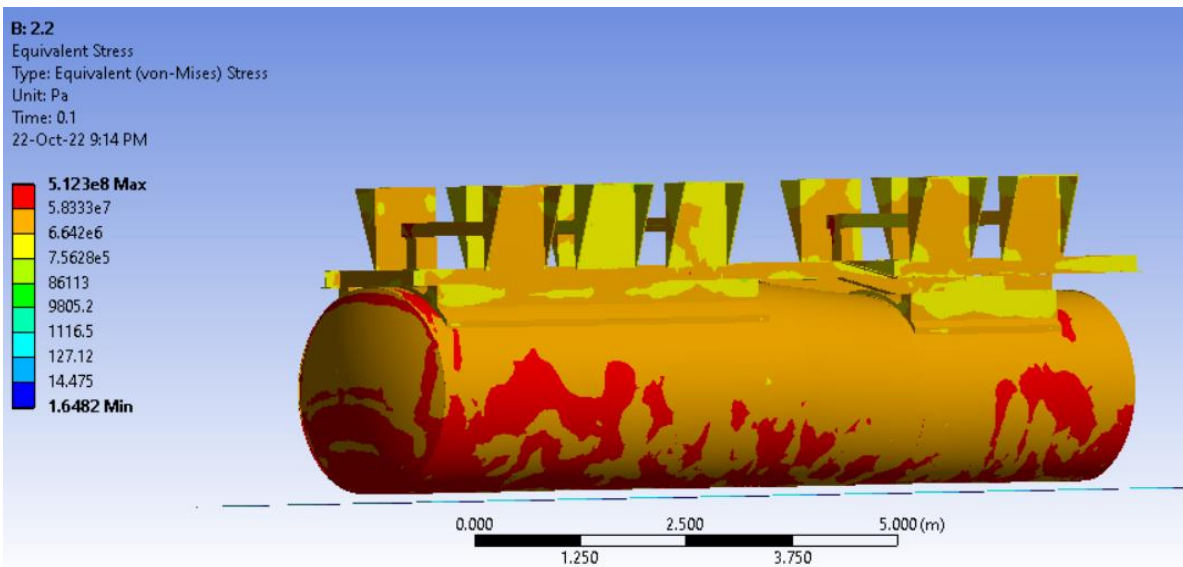
Εικόνα 68: 2.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



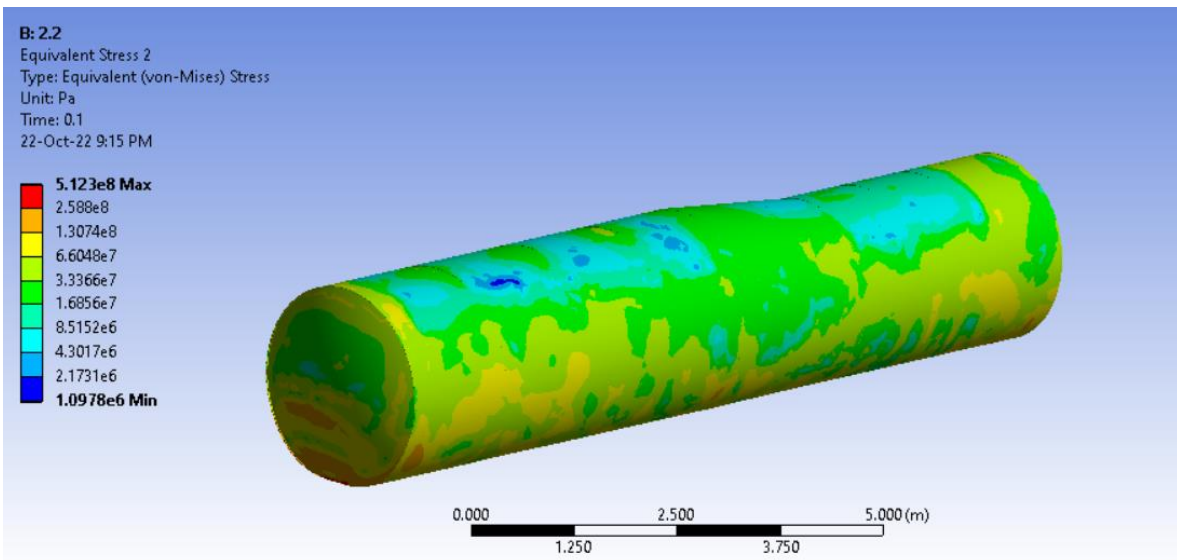
Εικόνα 69: 2.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



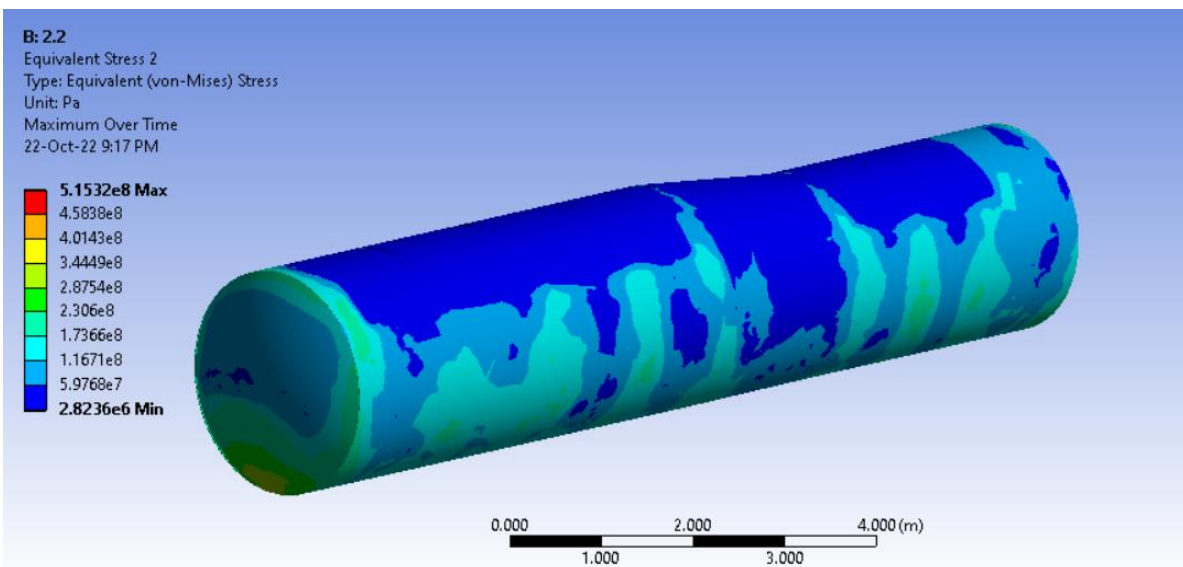
Εικόνα 70: 2.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



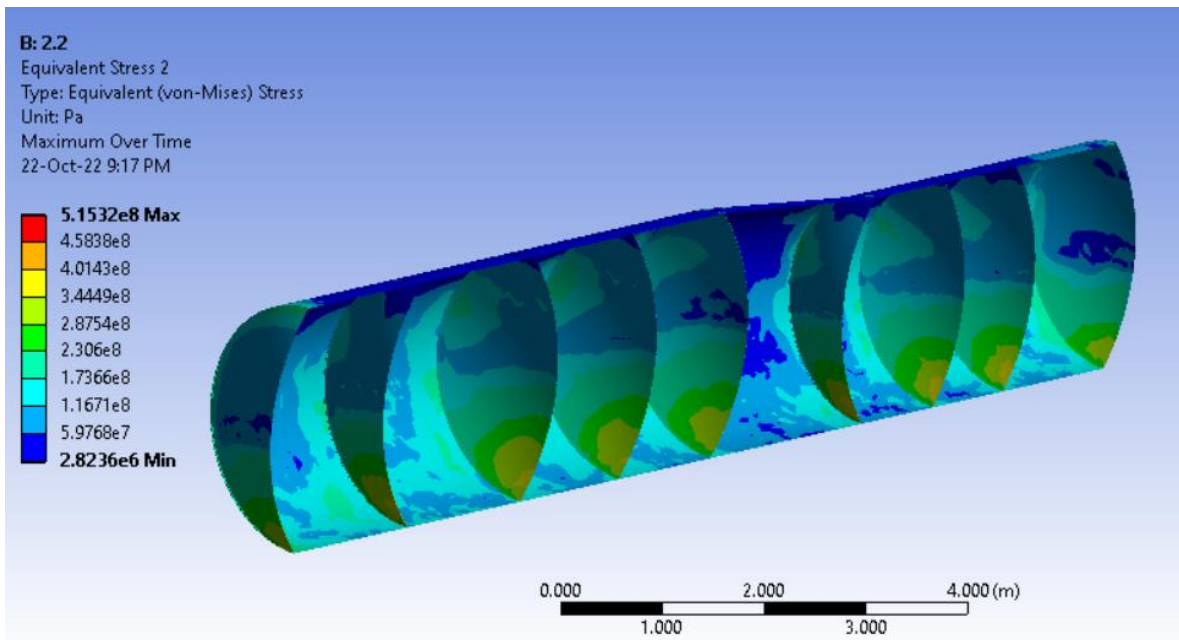
Εικόνα 71: 2.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



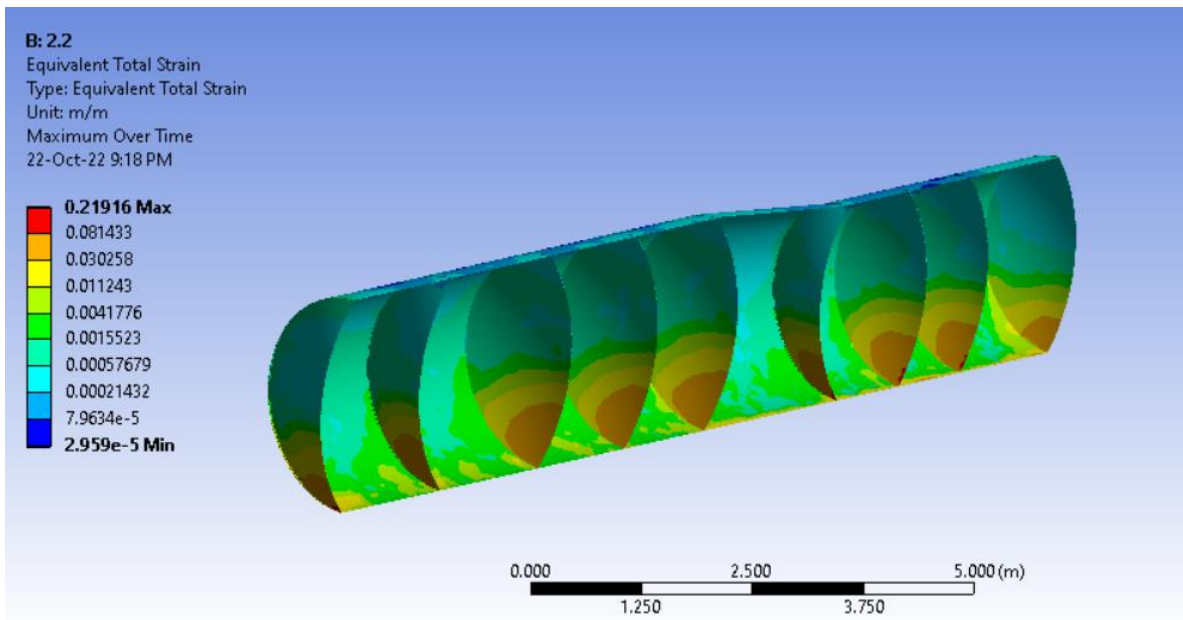
Εικόνα 72: 2.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



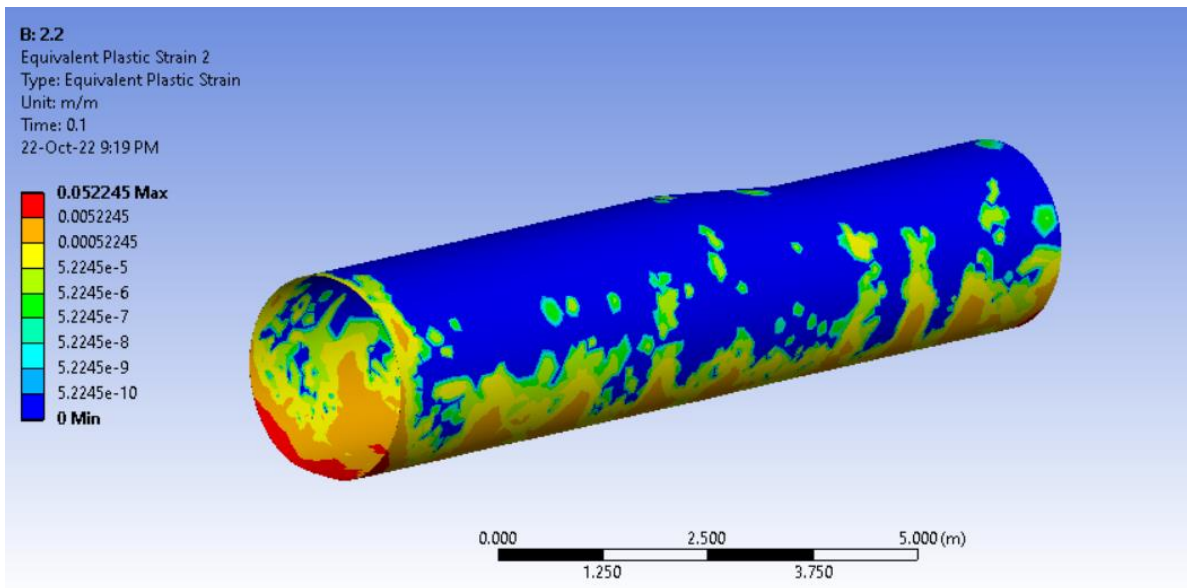
Εικόνα 73: 2.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



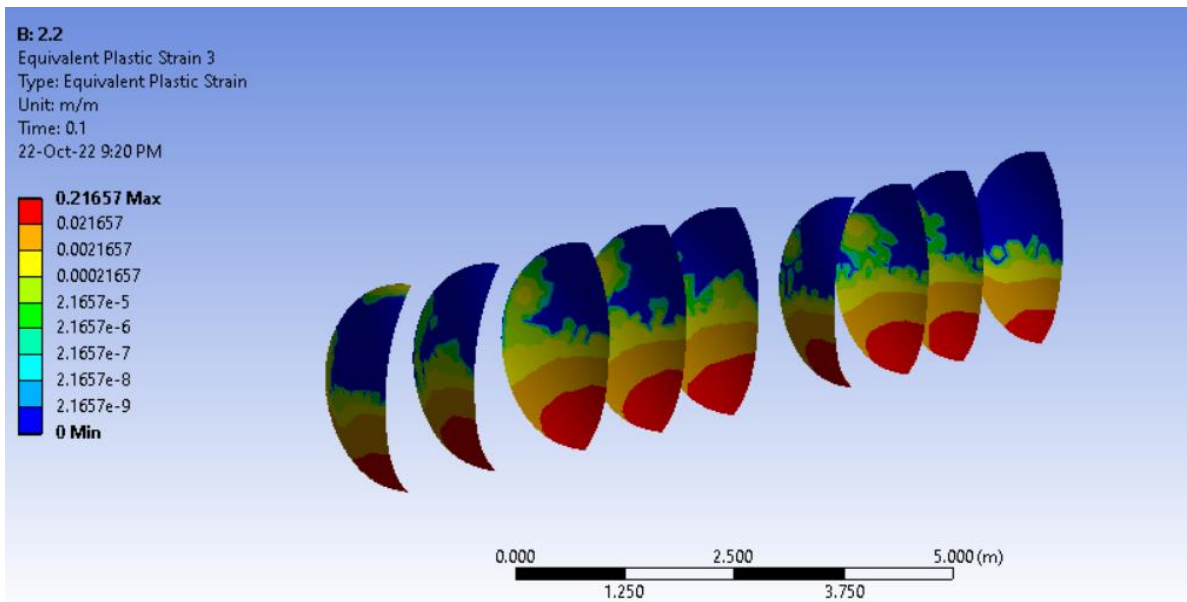
Εικόνα 74: 2.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 75: 2.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 76: 2.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 77: 2.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.4 Μοντέλο 3 (Κυκλική Διατομή – Αλουμίνιο – Μονή Κόλληση)

6.4.1 Ανατροπή 90 μοιρών (3.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Refinement στα άκρα των διαχωριστικών τοιχωμάτων

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $1.25 \cdot 10^{-4}$ s

-Ελάχιστο: $1 \cdot 10^{-4}$ s

-Μέγιστο: $5 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 6h 7m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

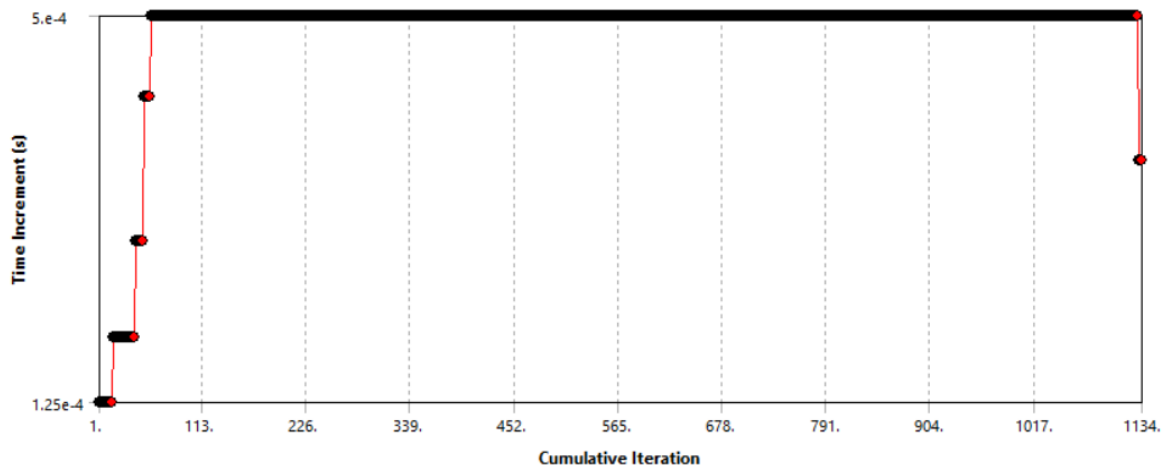
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

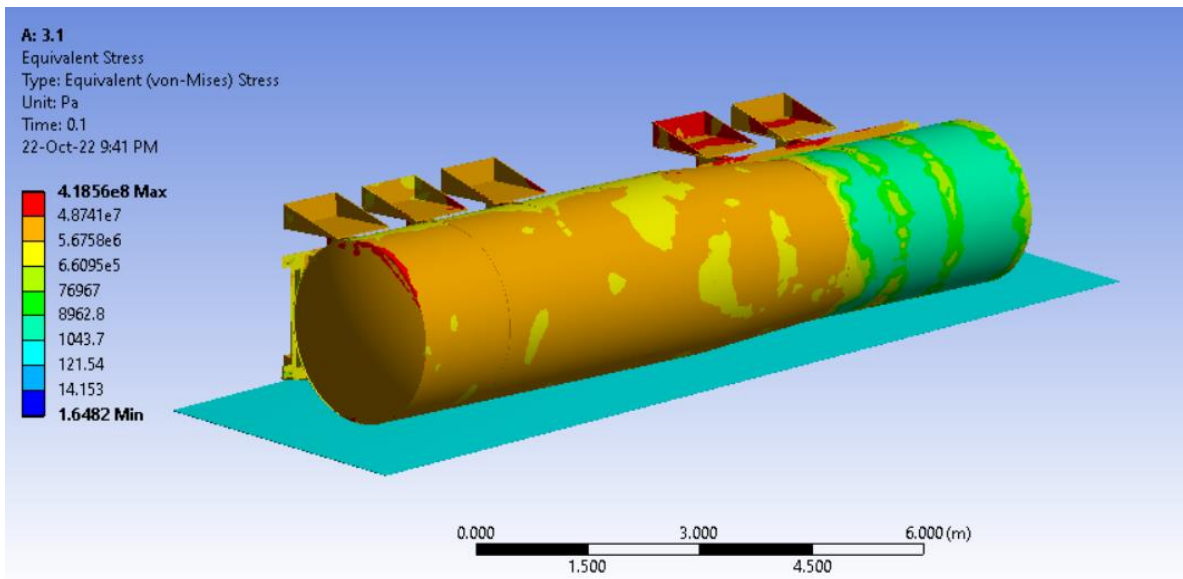
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

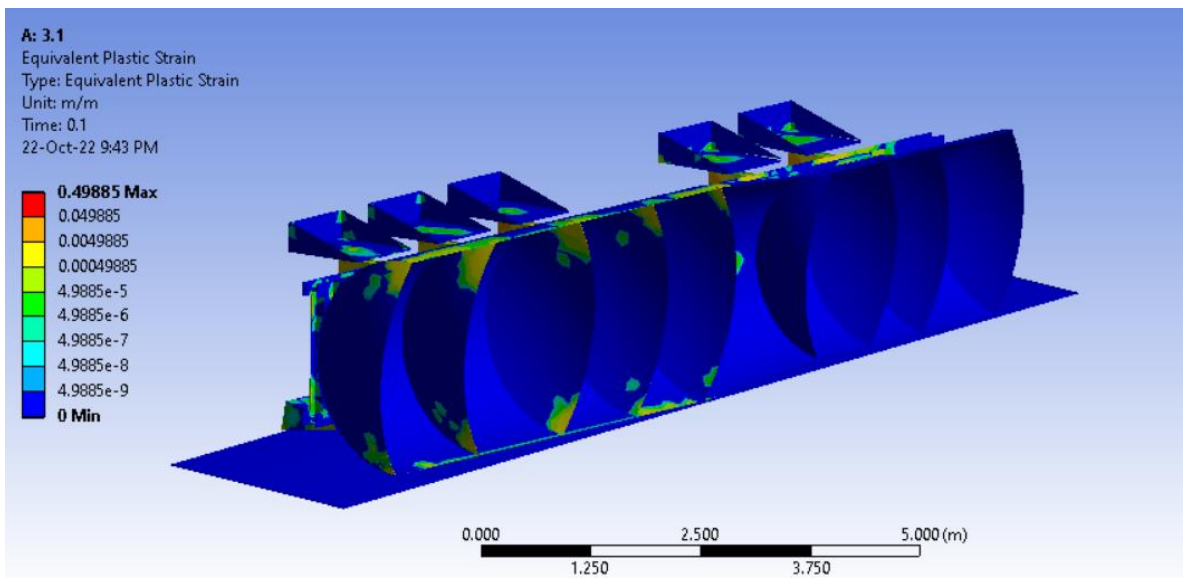
-Όριο θραύσης: 270 MPa



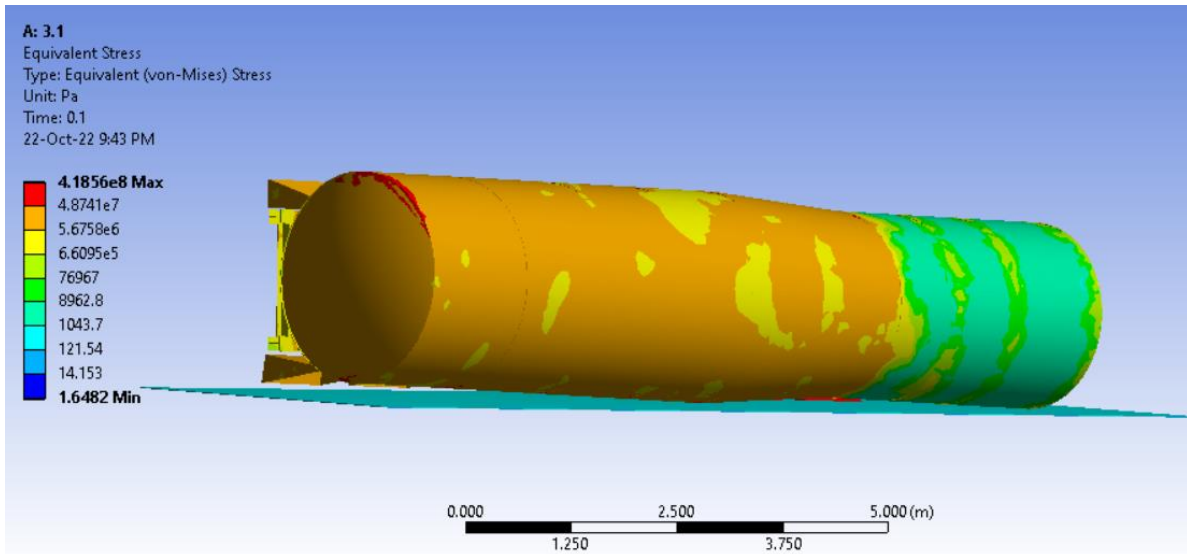
Εικόνα 78: 3.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



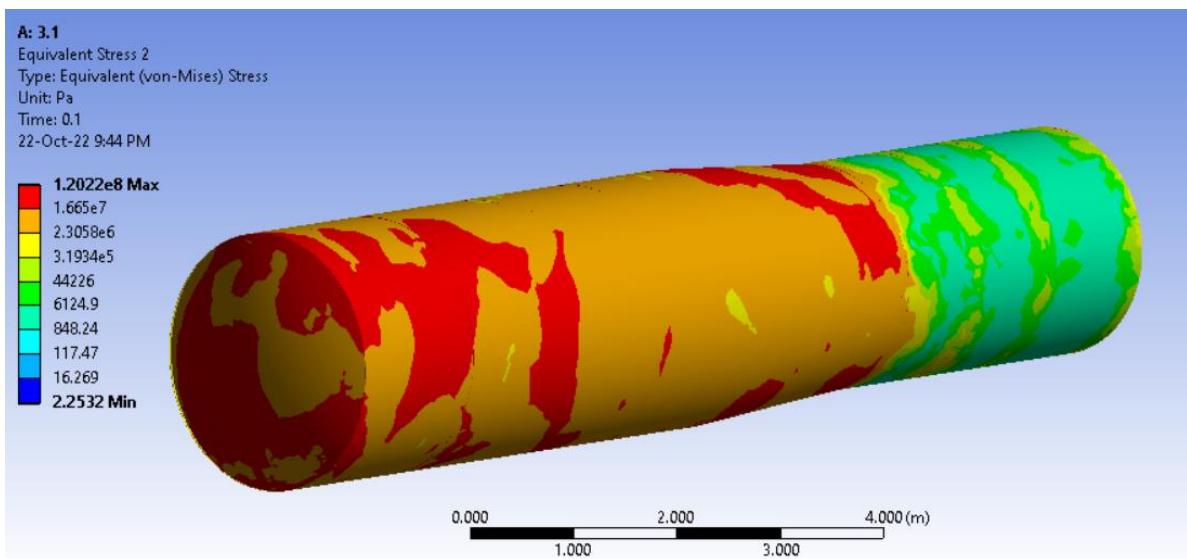
Εικόνα 79: 3.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



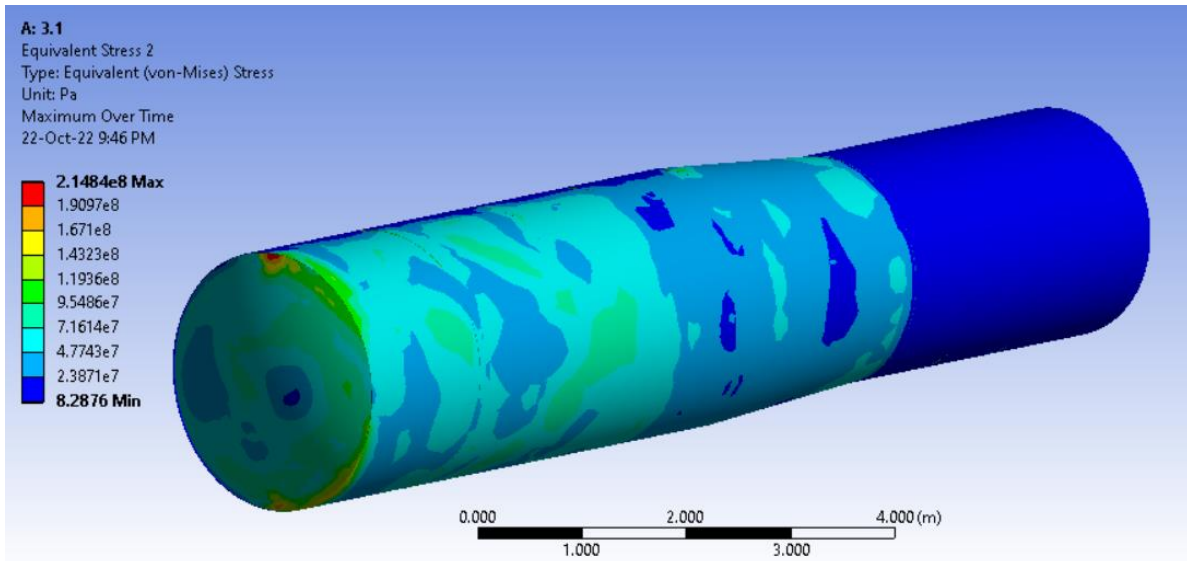
Εικόνα 80: 3.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



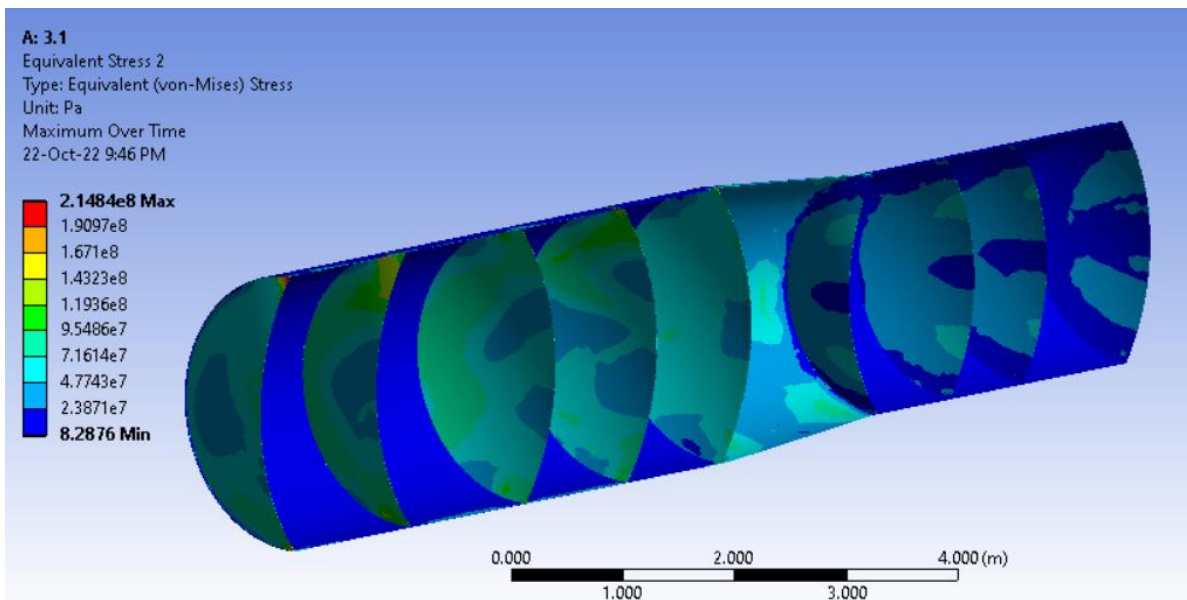
Εικόνα 81: 3.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



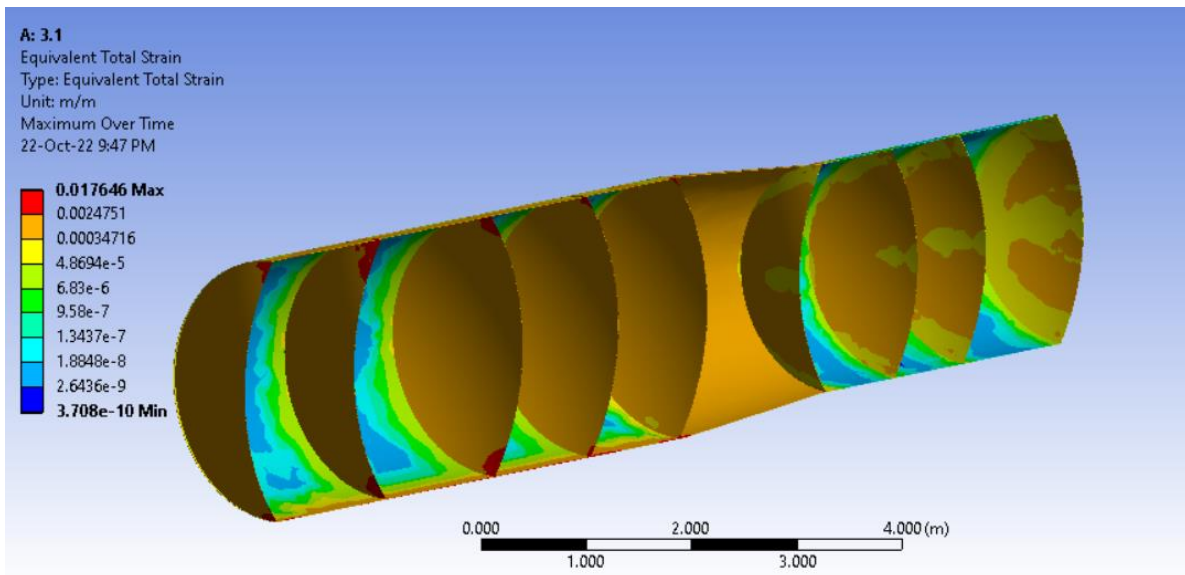
Εικόνα 82: 3.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



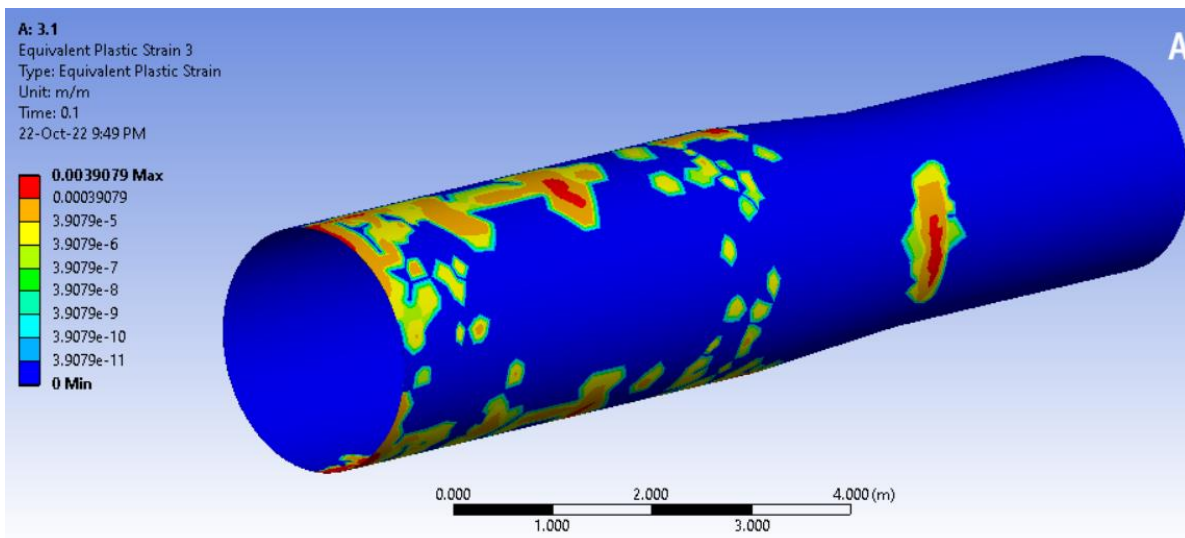
Εικόνα 83: 3.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



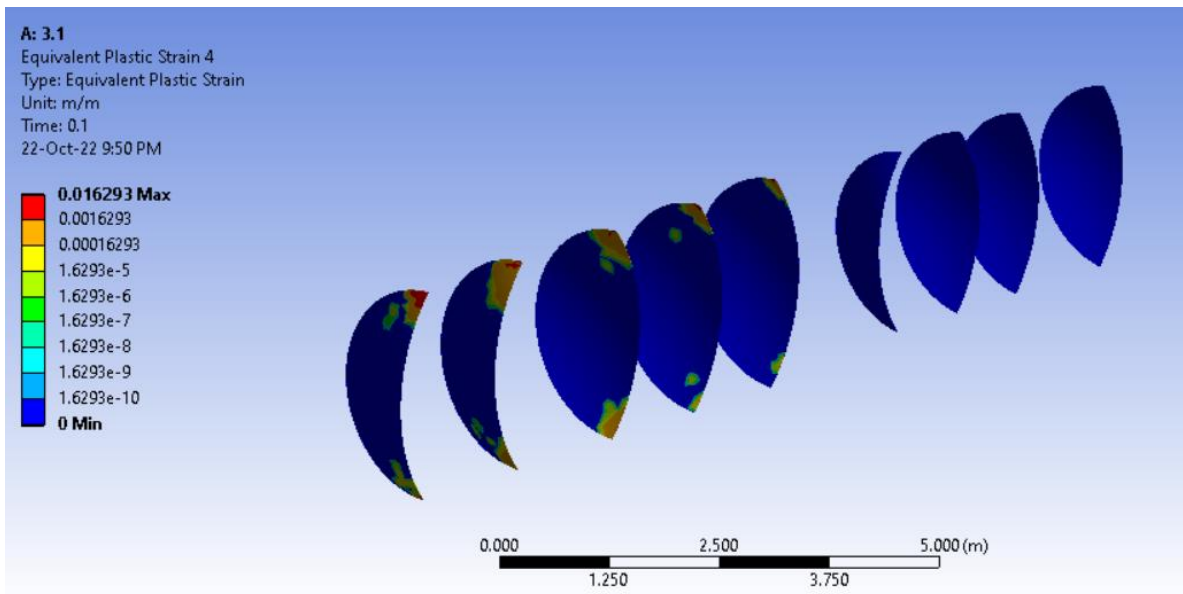
Εικόνα 84: 3.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 85: 3.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 86: 3.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 87: 3.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.4.2 Ανατροπή 180 μοιρών (3.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $3 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $5 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 37h 18m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

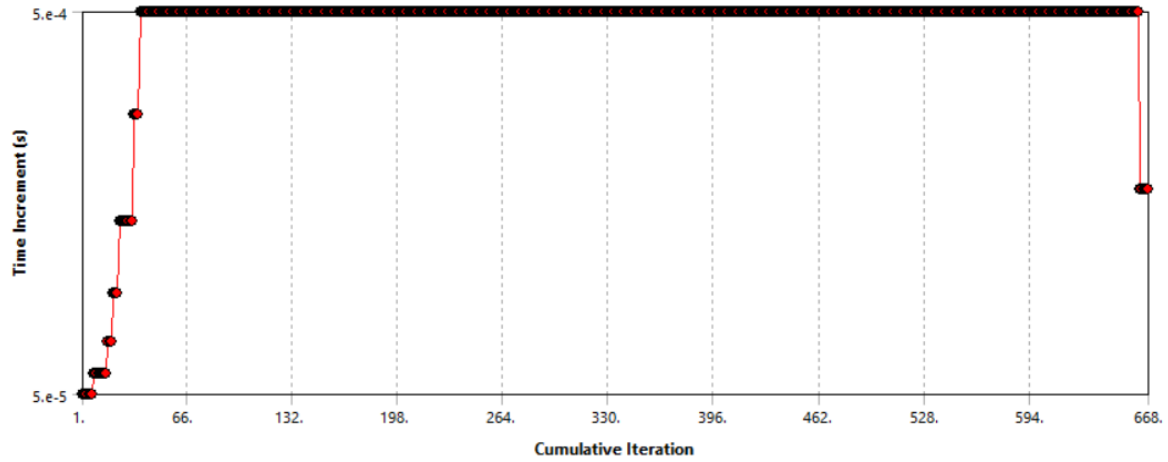
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

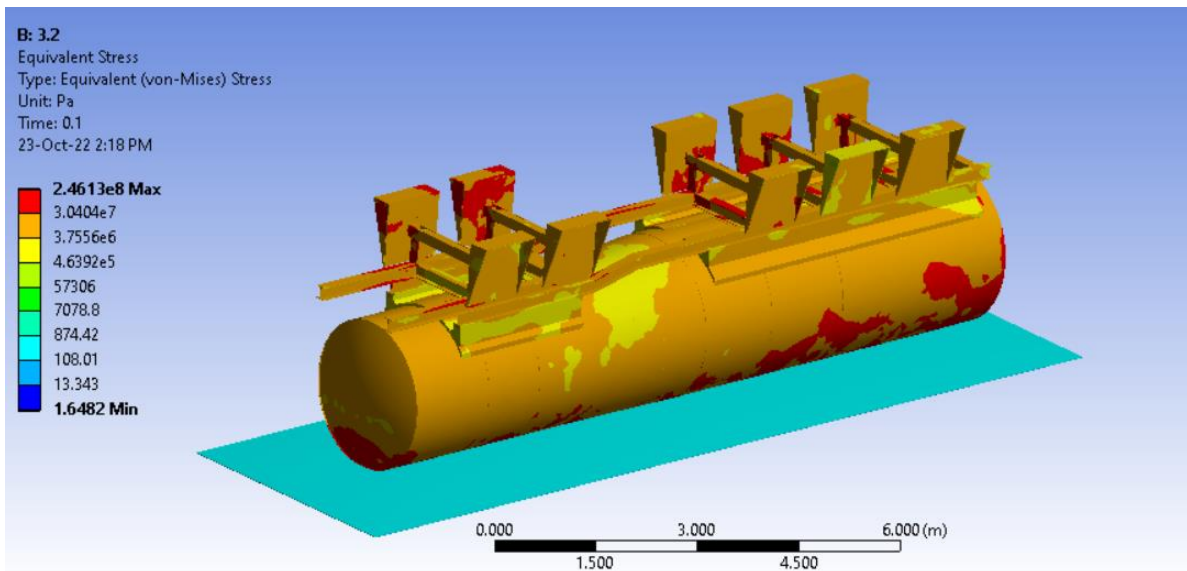
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

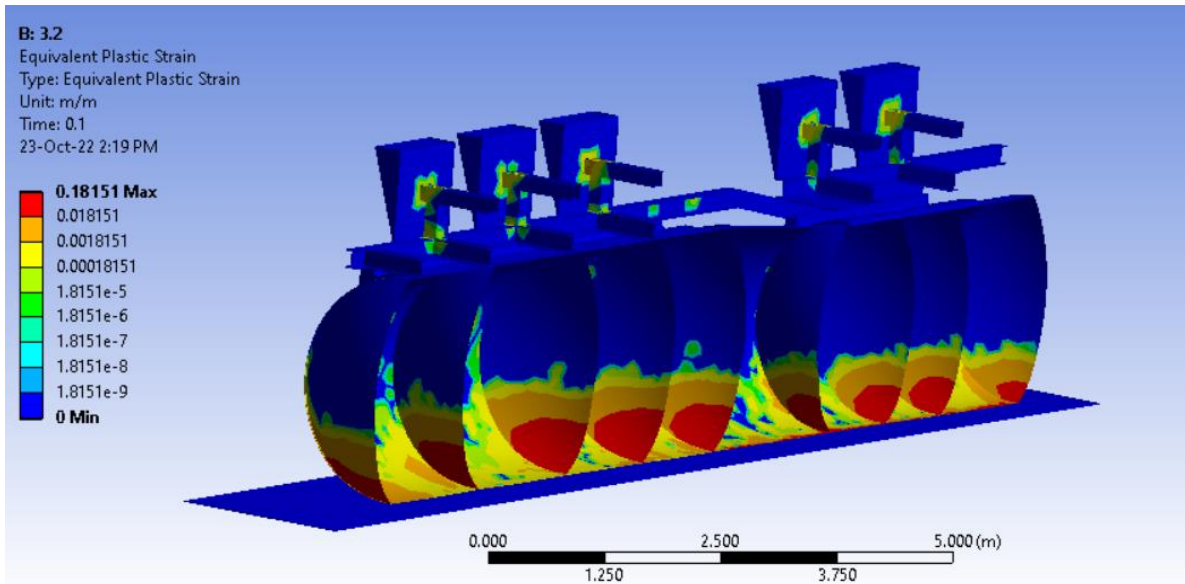
-Όριο θραύσης: 270 MPa



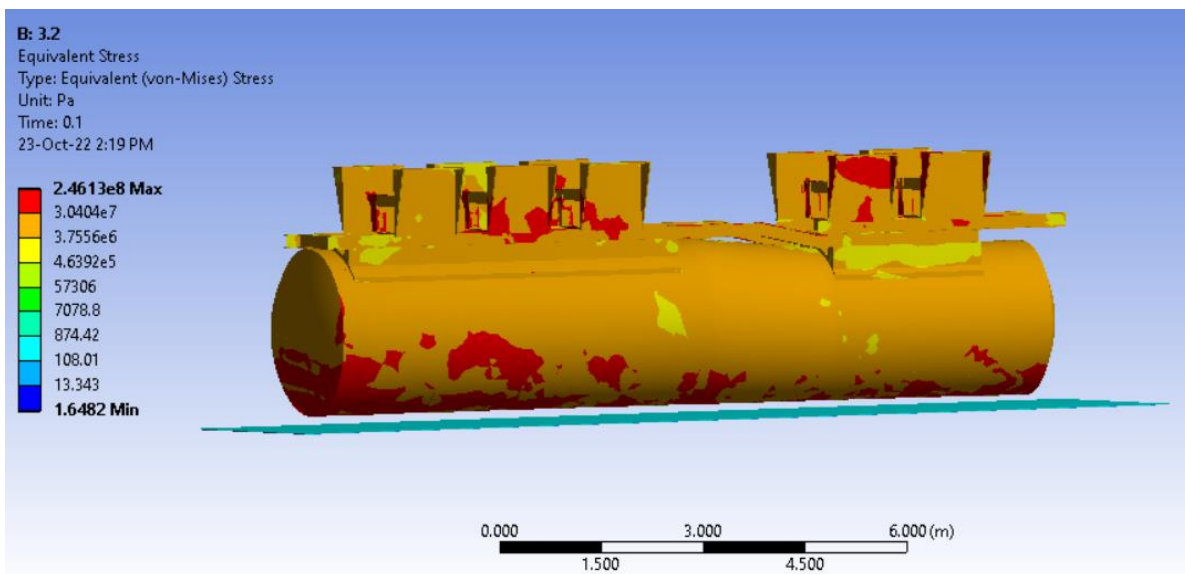
Εικόνα 88: 3.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



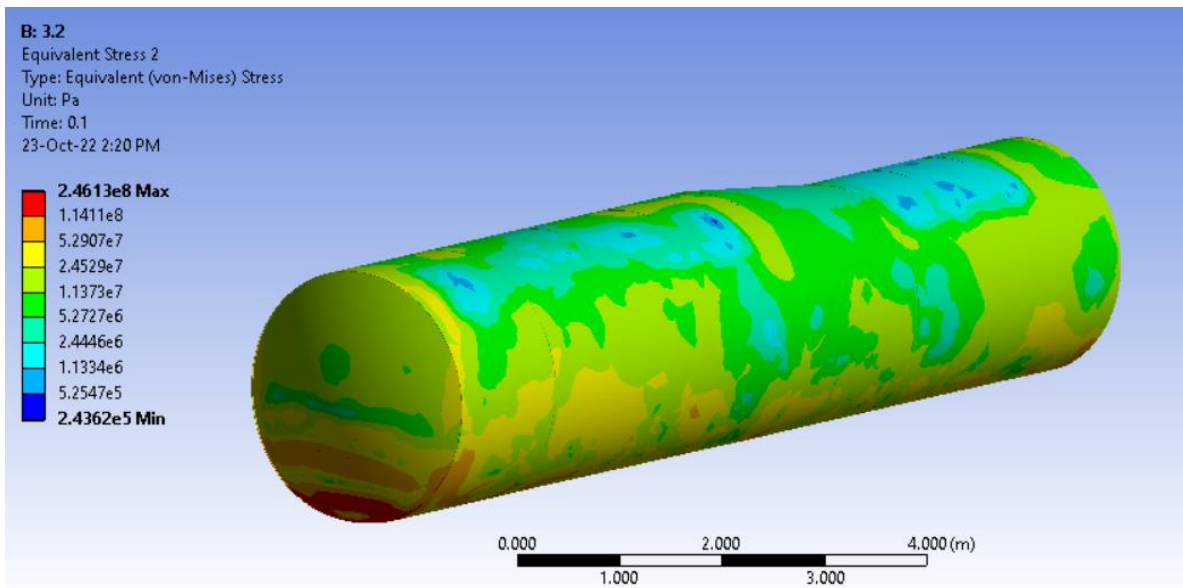
Εικόνα 89: 3.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



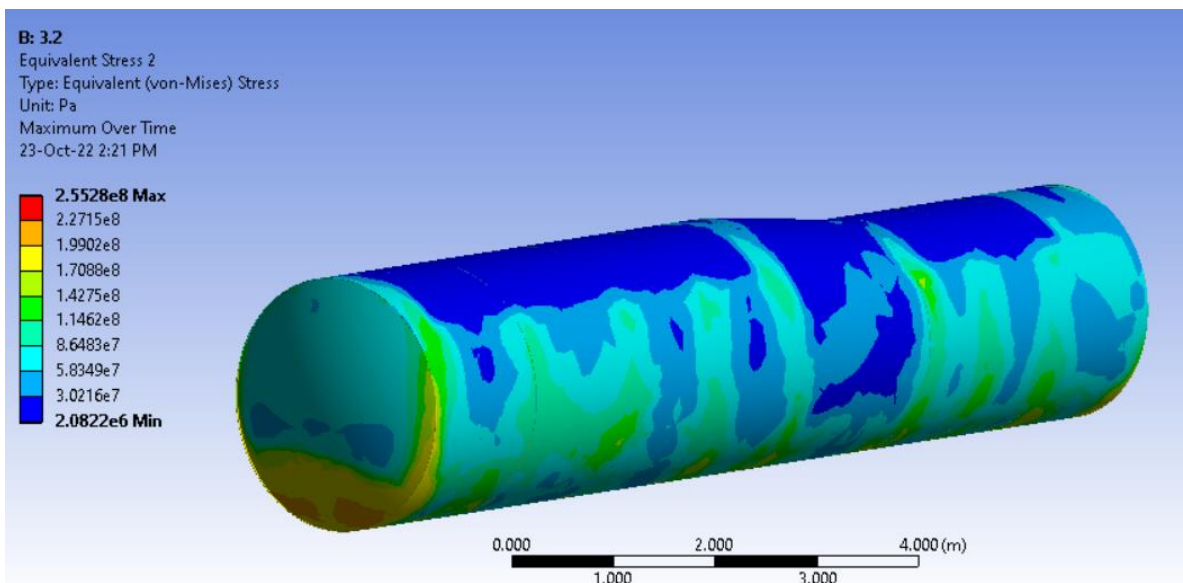
Εικόνα 90: 3.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



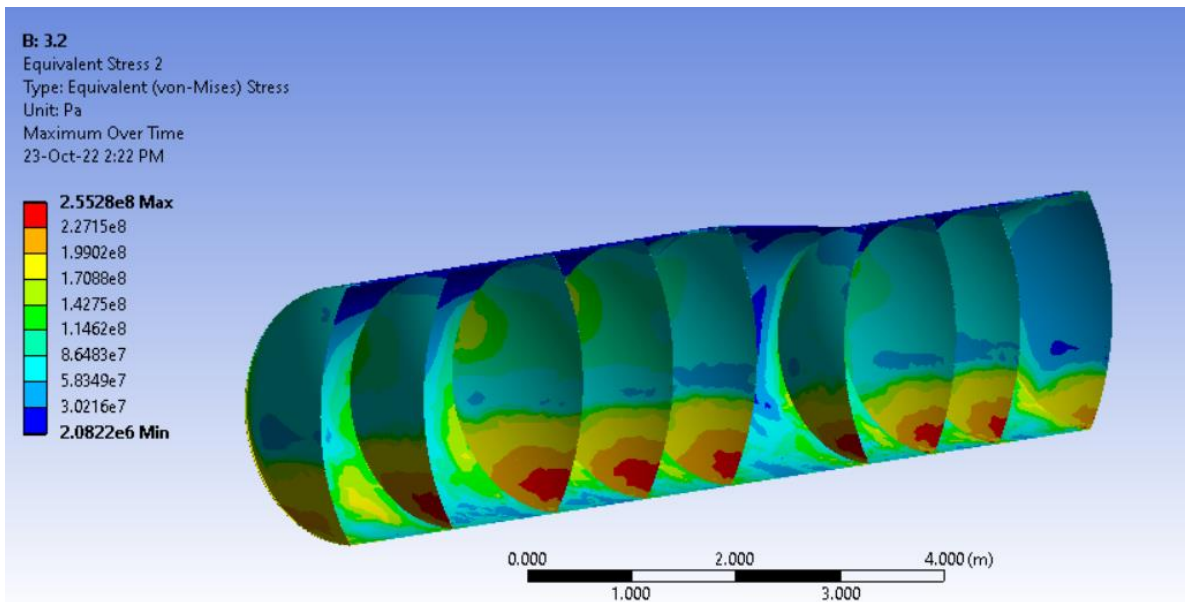
Εικόνα 91: 3.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



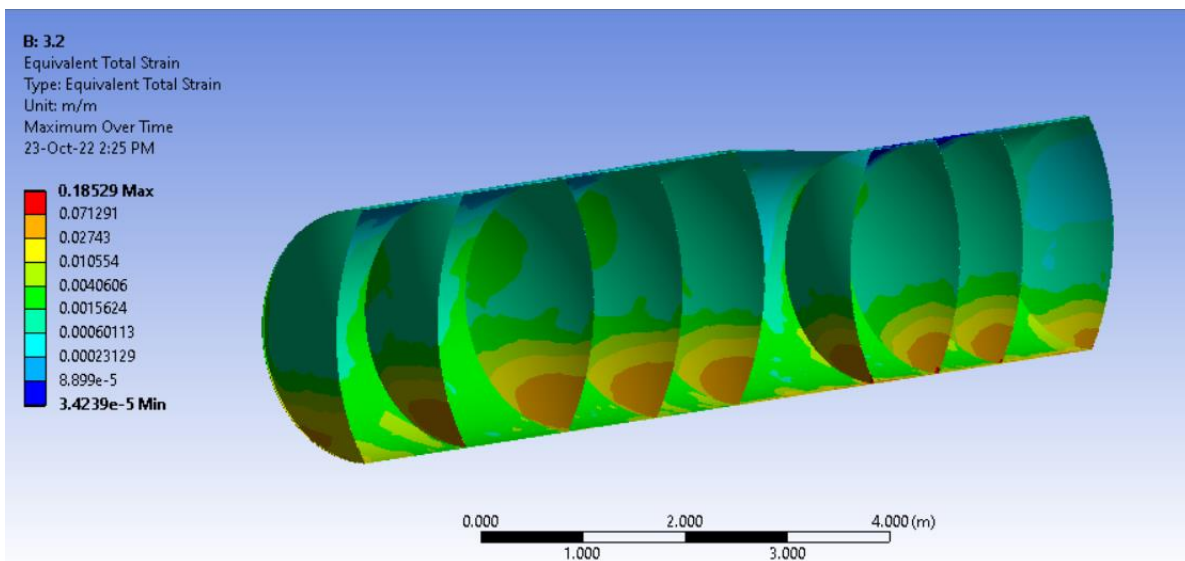
Εικόνα 92: 3.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



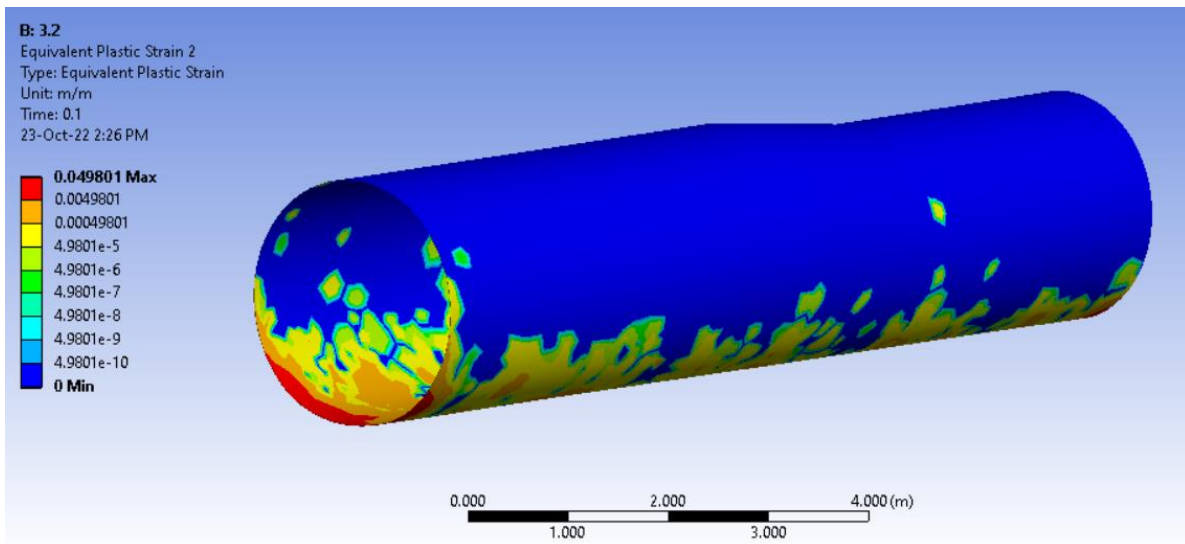
Εικόνα 93: 3.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



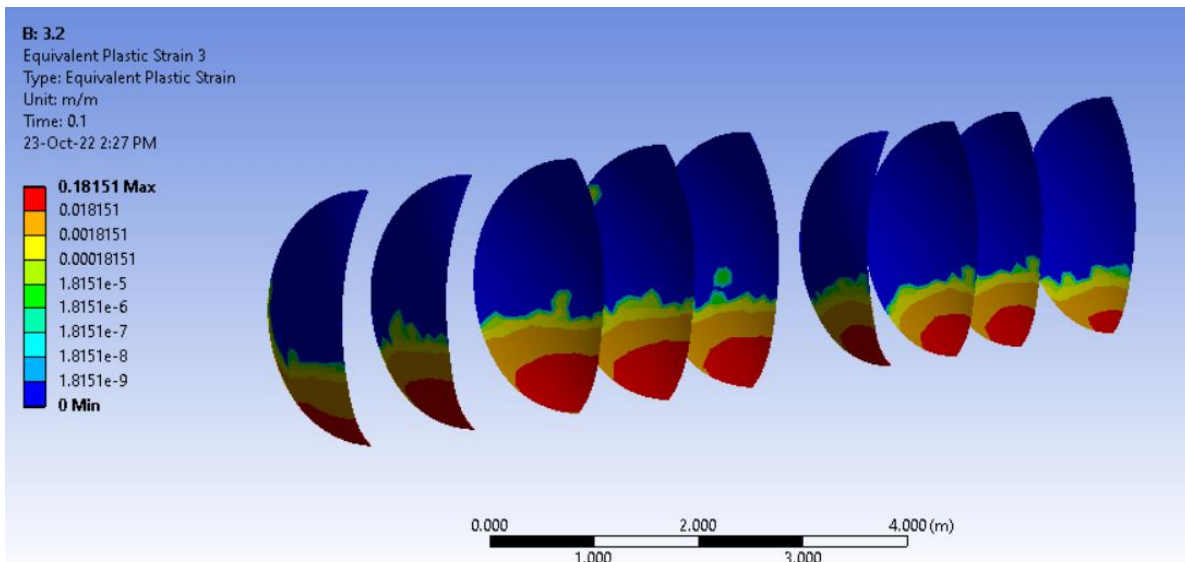
Εικόνα 94: 3.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 95: 3.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 96: 3.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 97: 3.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.5 Μοντέλο 4 (Κυκλική Διατομή – Αλουμίνιο – Διπλή Κόλληση)

6.5.1 Ανατροπή 90 μοιρών (4.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Refinement στα άκρα των διαχωριστικών τοιχωμάτων

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $1.25 \cdot 10^{-4}$ s

-Ελάχιστο: $1 \cdot 10^{-4}$ s

-Μέγιστο: $7 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 8h 29m

Υλικό σασί: Ανοξειδωτος Χάλυβας

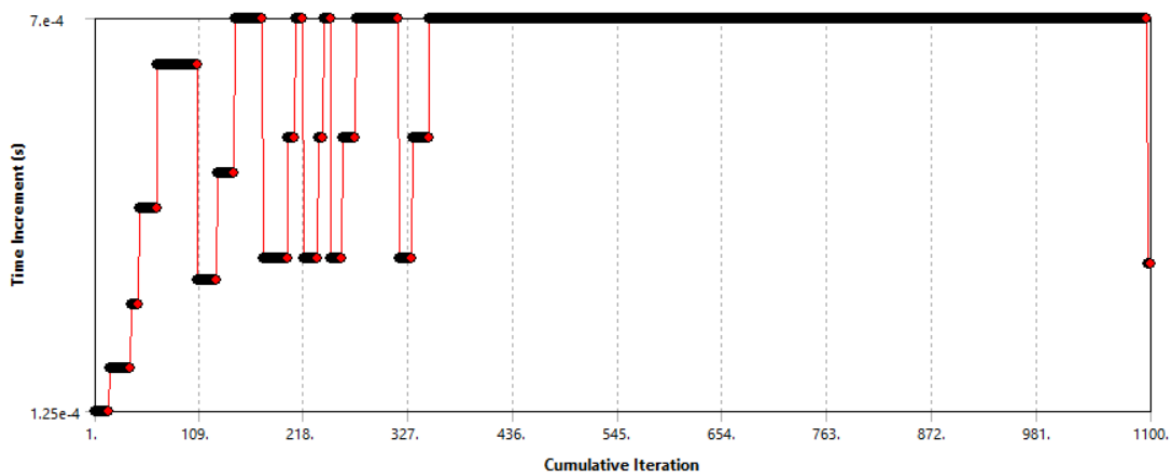
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

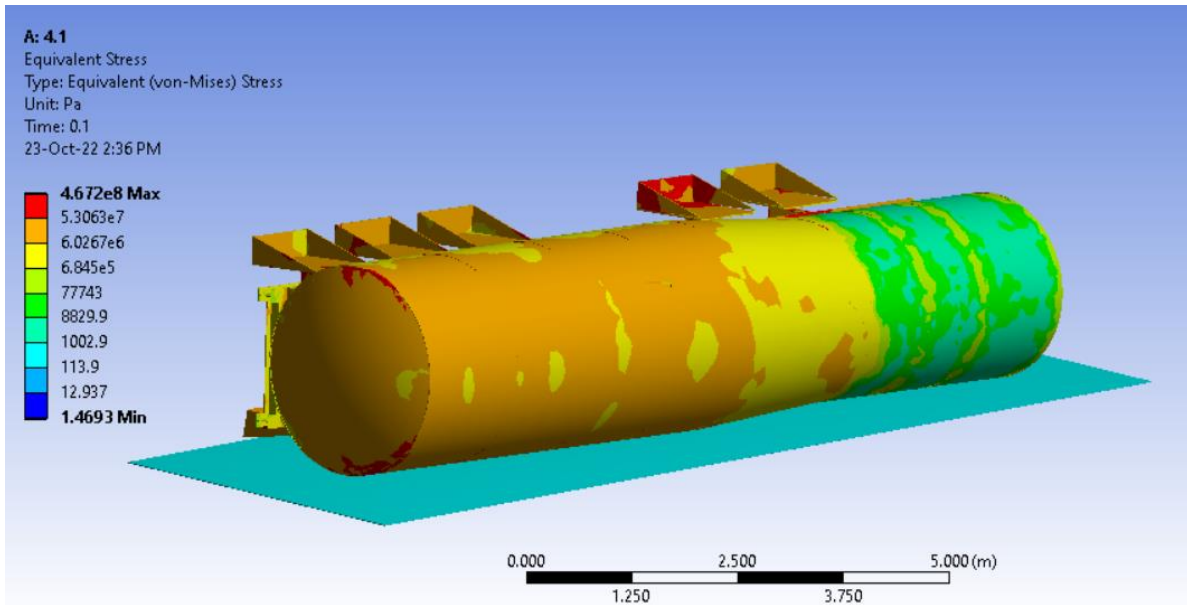
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

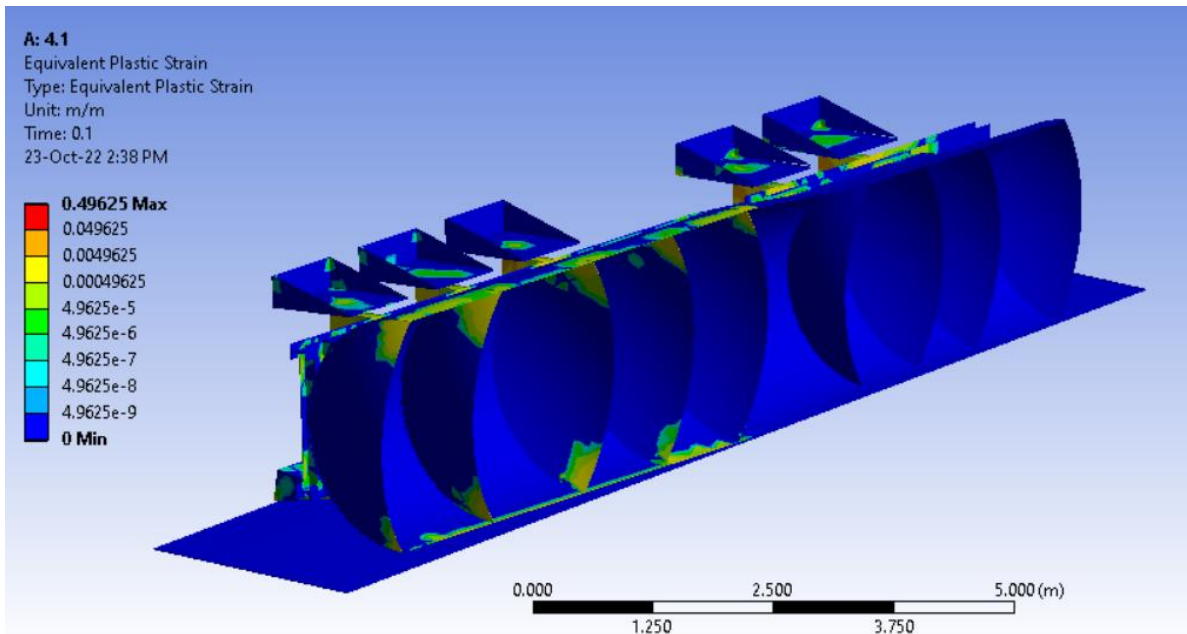
-Όριο θραύσης: 270 MPa



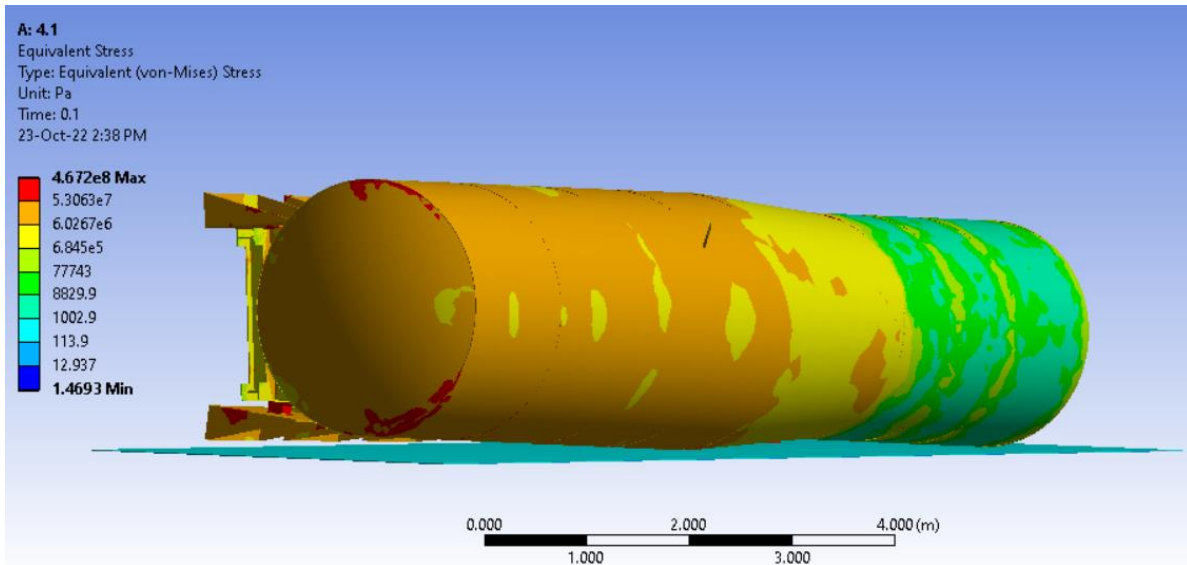
Εικόνα 98: 4.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



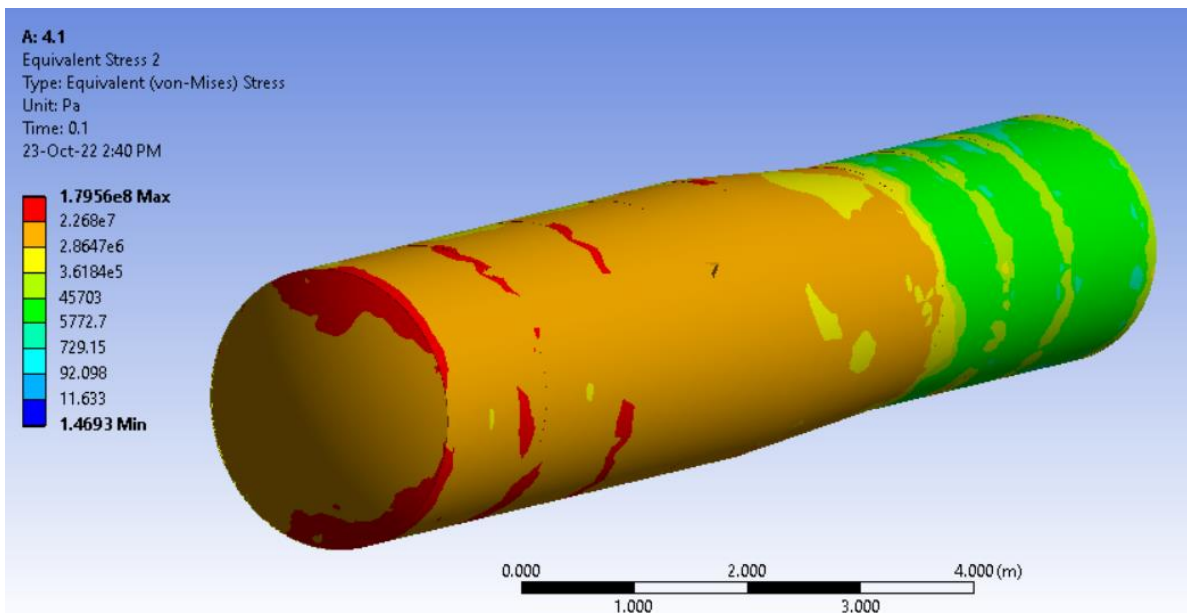
Εικόνα 99: 4.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



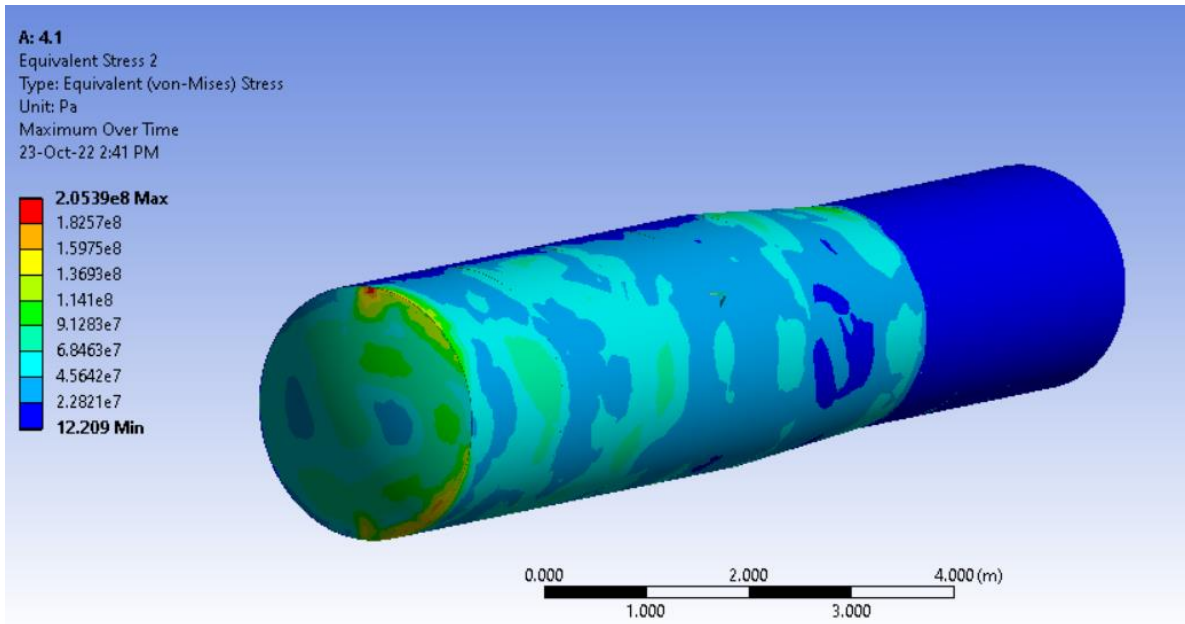
Εικόνα 100: 4.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



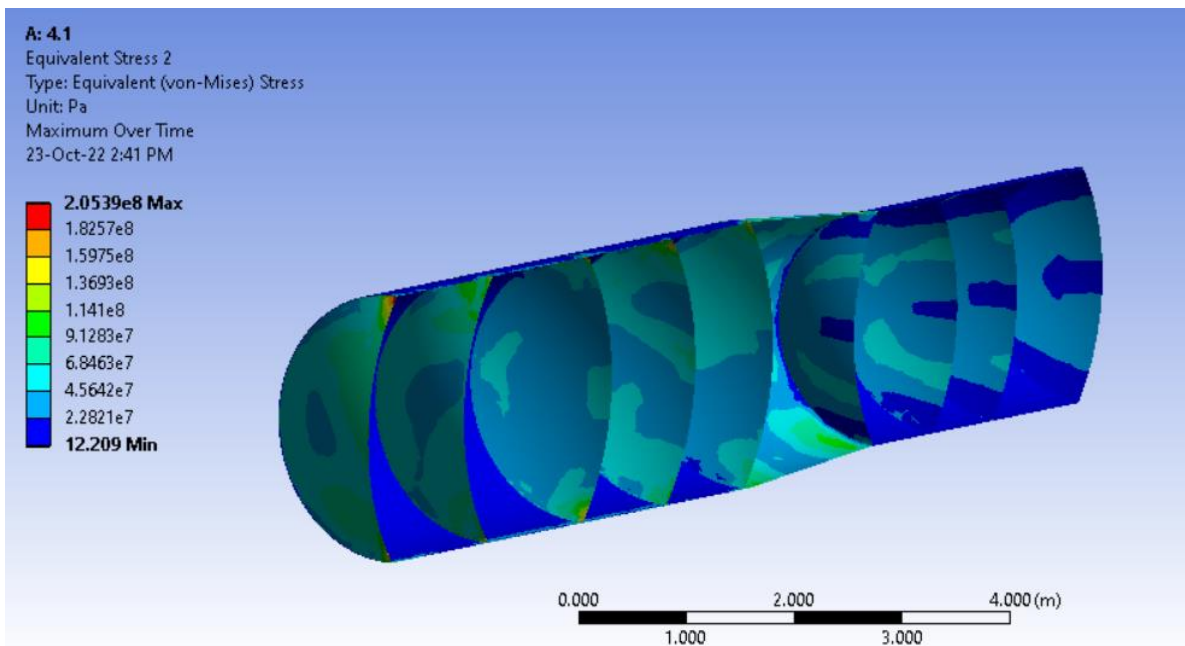
Εικόνα 101: 4.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



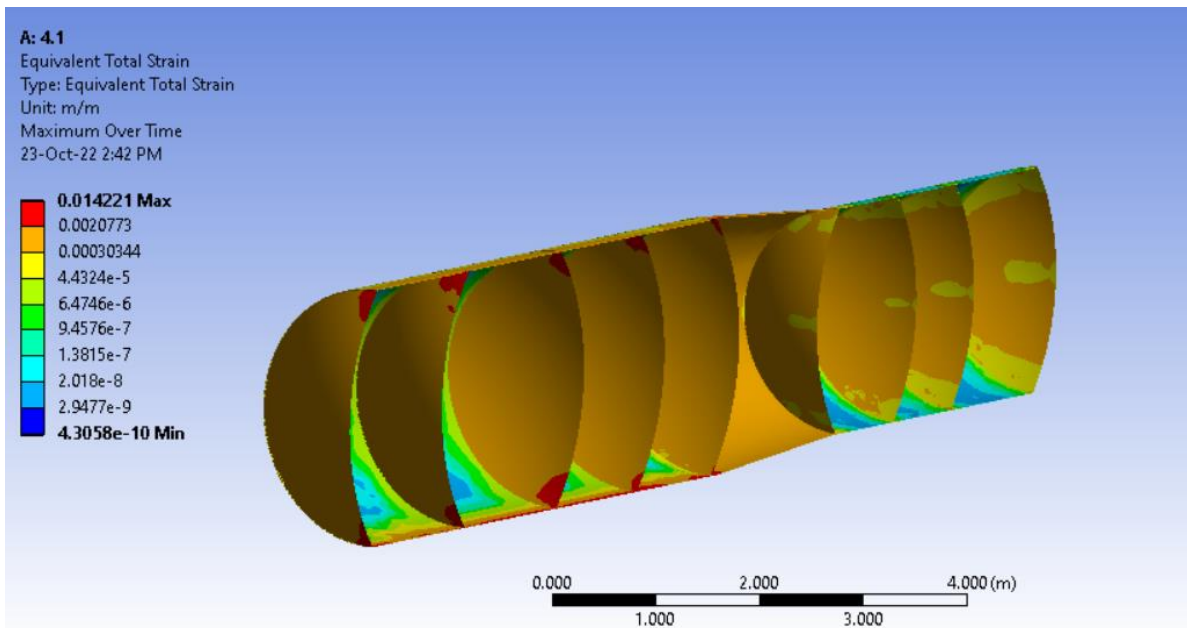
Εικόνα 102: 4.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



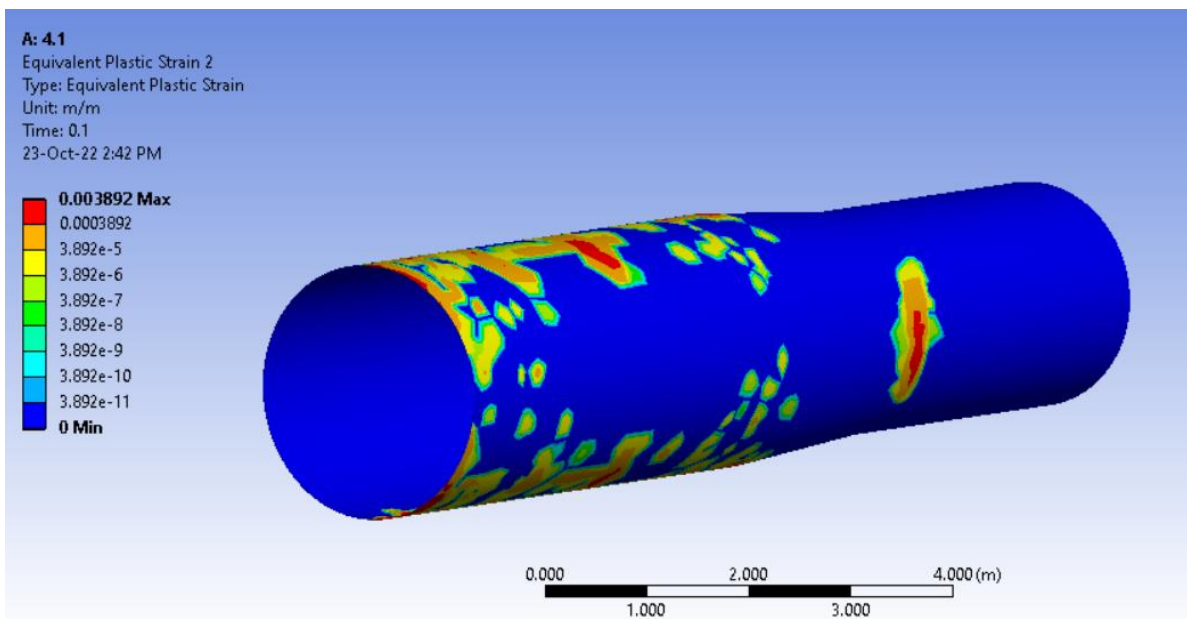
Εικόνα 103: 4.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



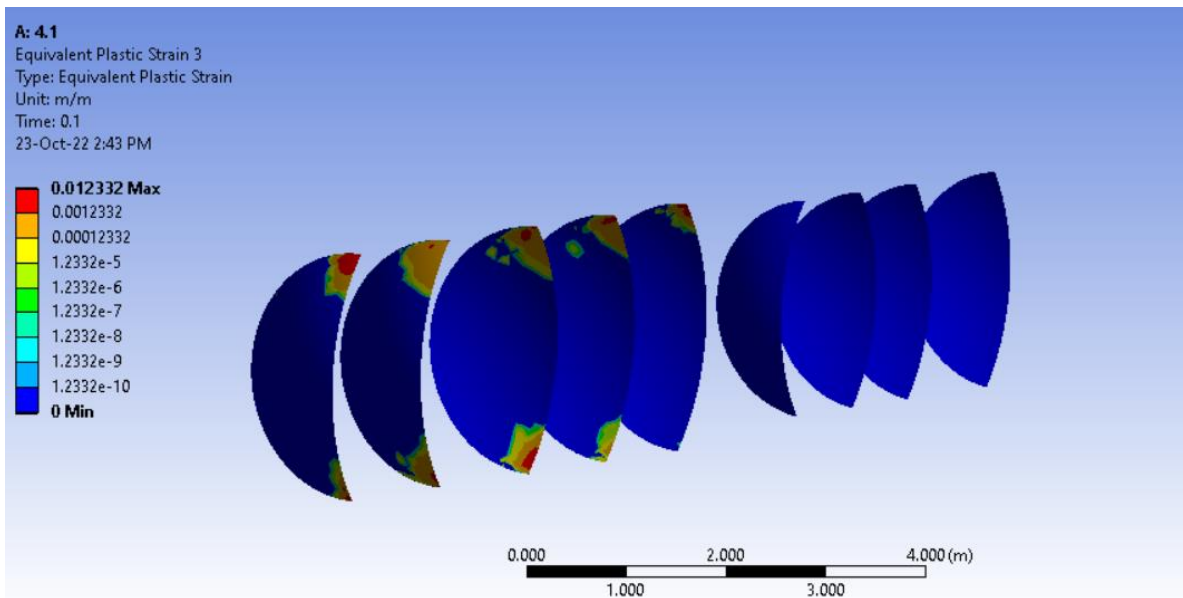
Εικόνα 104: 4.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 105: 4.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 106: 4.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 107: 4.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.5.2 Ανατροπή 180 μοιρών (4.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $6 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $8 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 39h 8m

Υλικό σασί: Ανοξειδωτος Χάλυβας

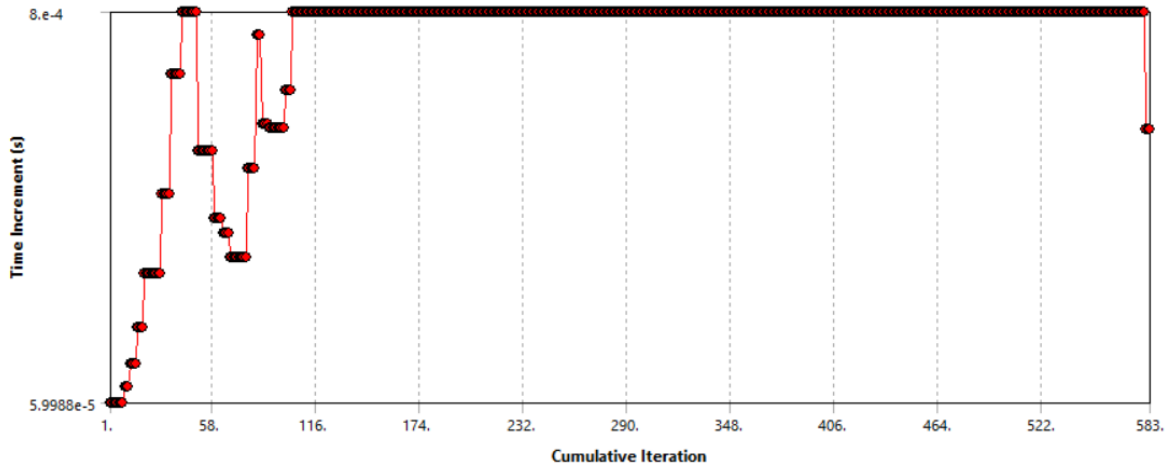
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

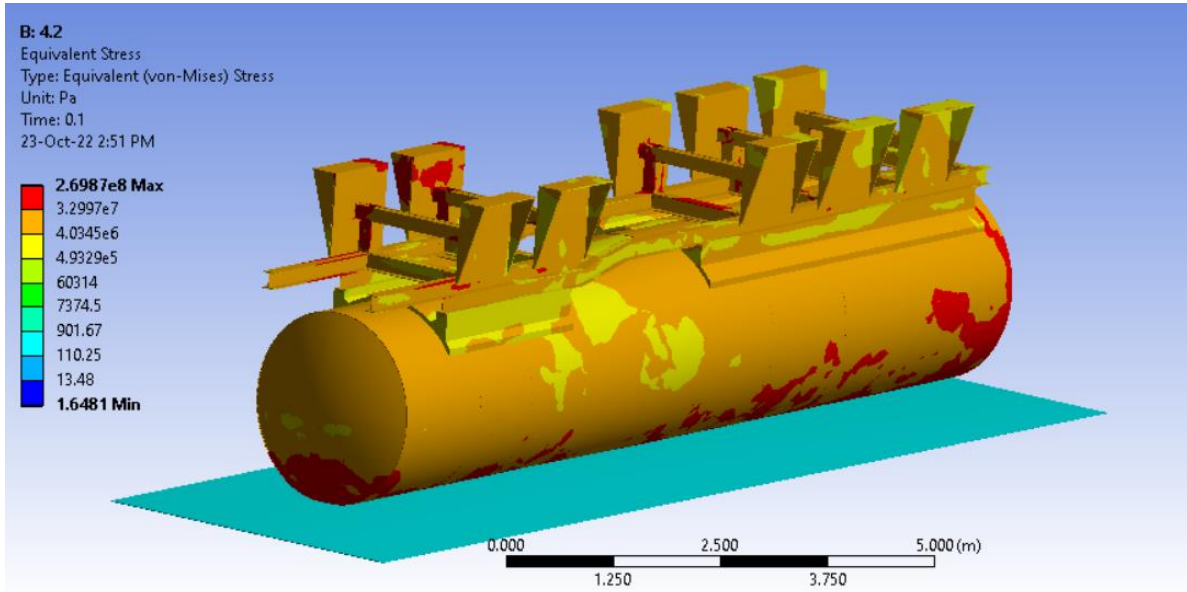
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

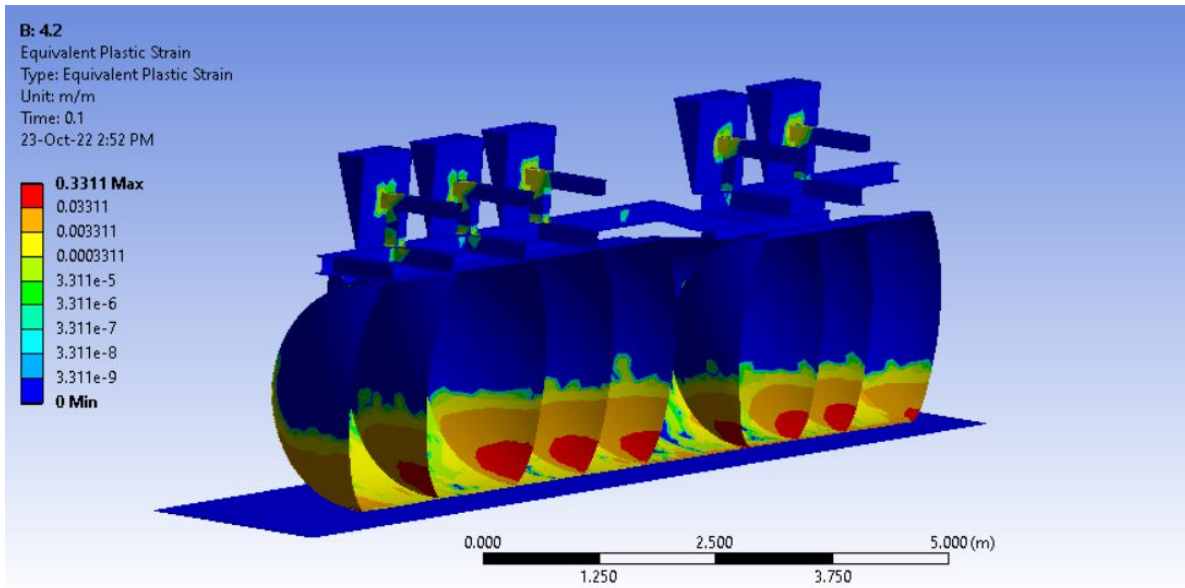
-Όριο θραύσης: 270 MPa



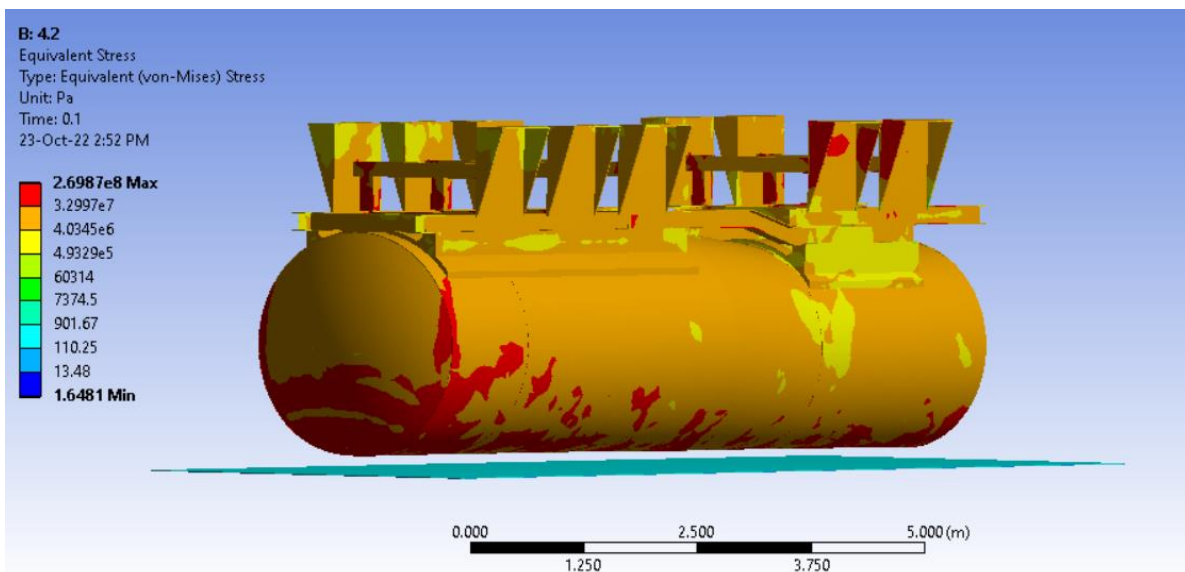
Εικόνα 108: 4.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



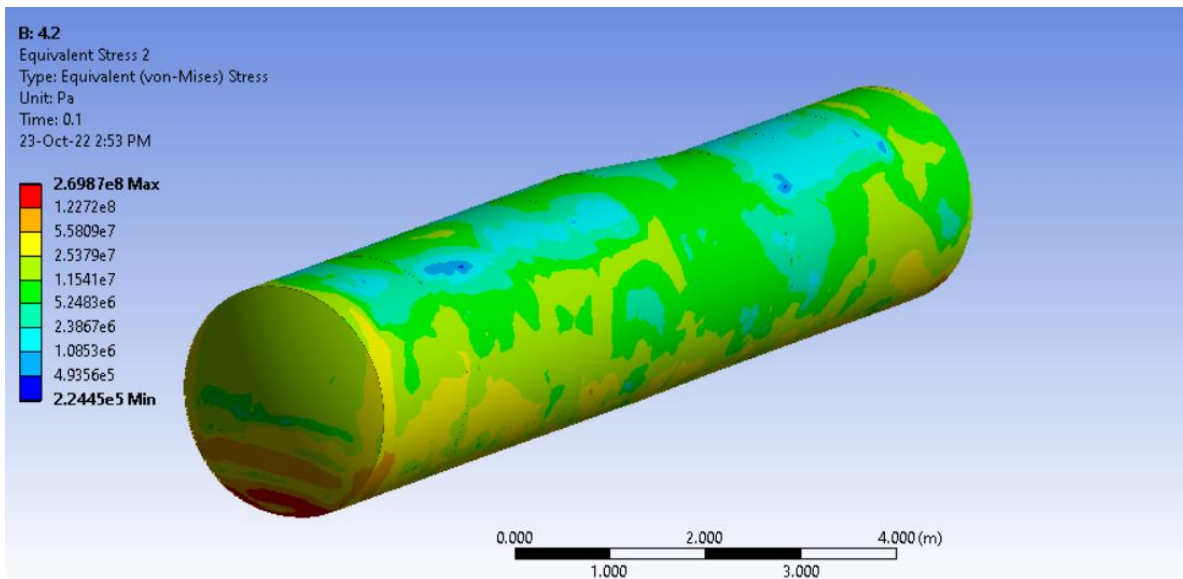
Εικόνα 109: 4.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομείωσης



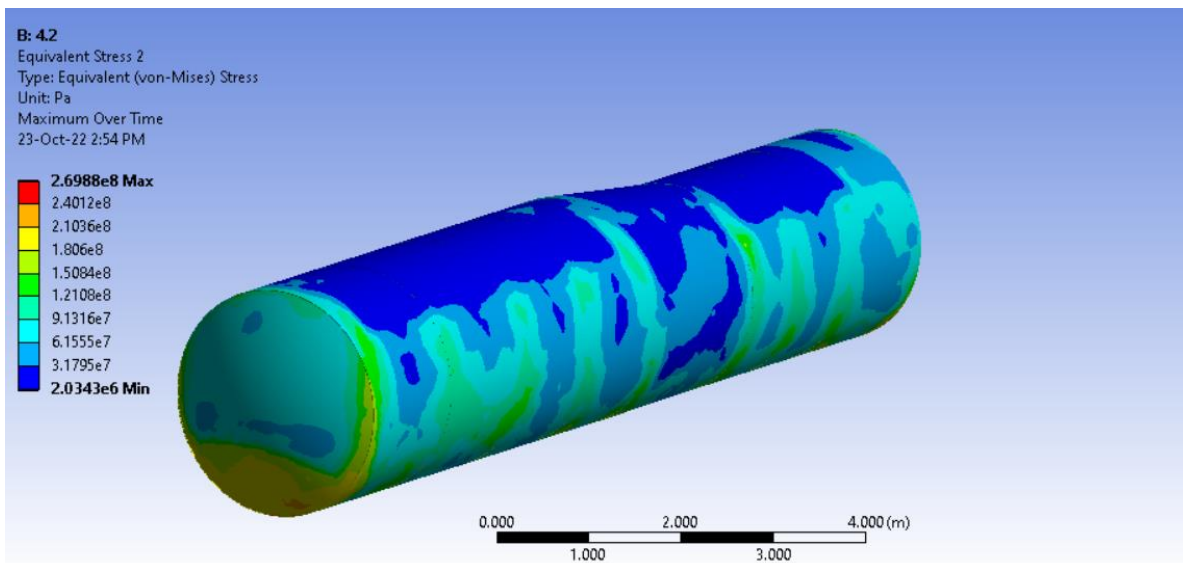
Εικόνα 110: 4.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



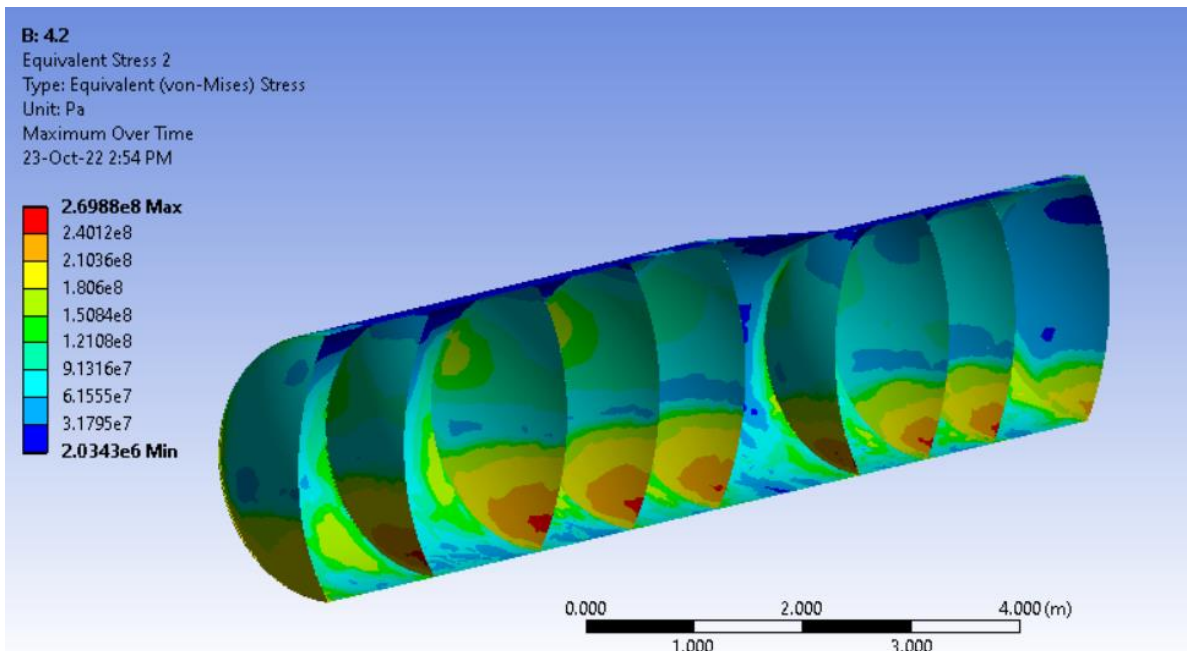
Εικόνα 111: 4.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



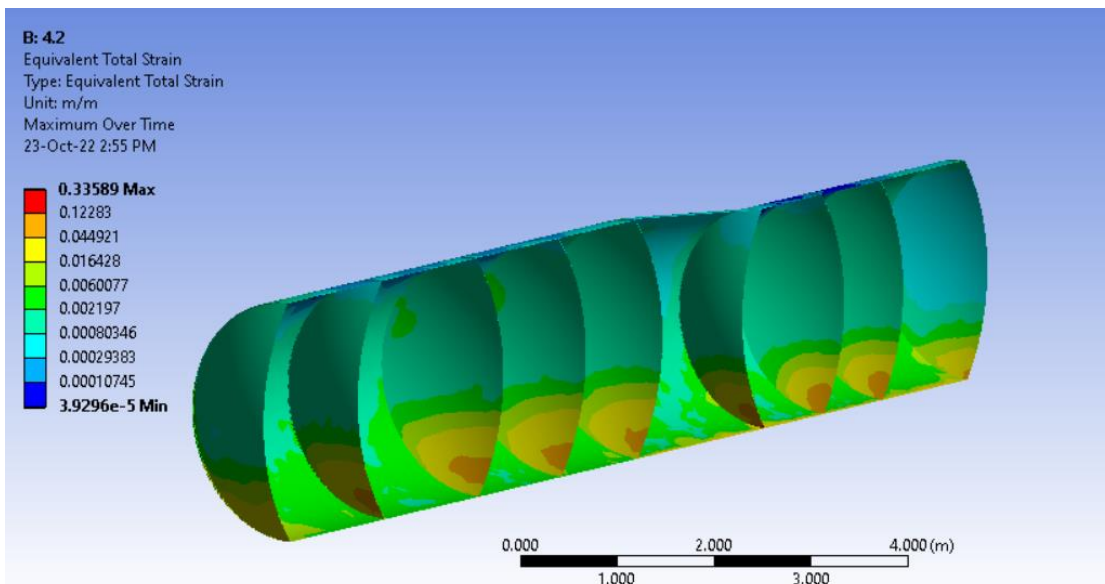
Εικόνα 112: 4.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



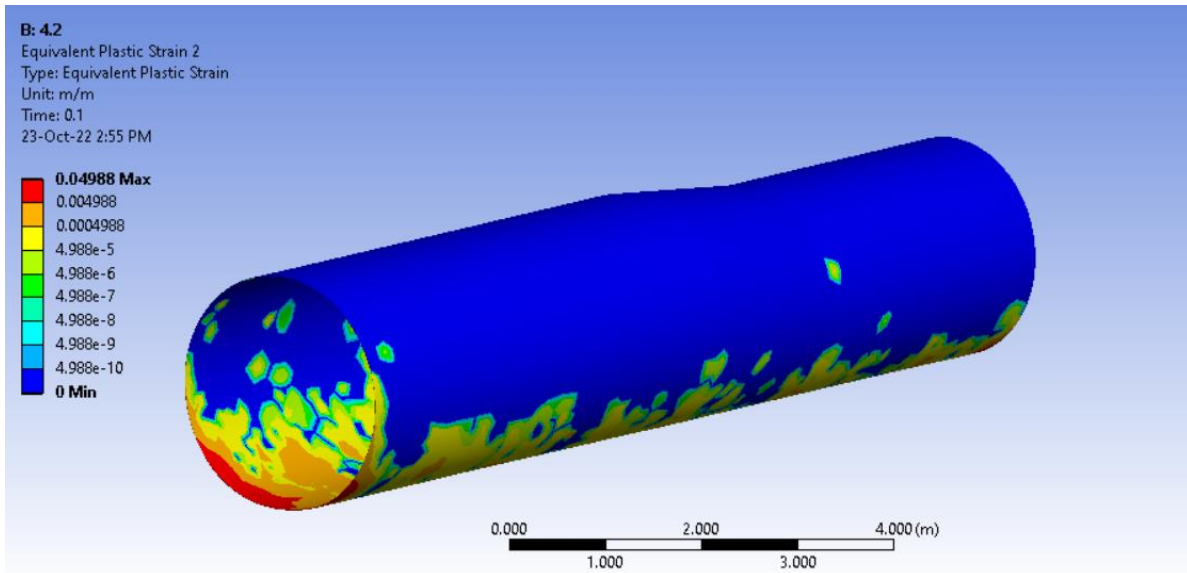
Εικόνα 113: 4.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



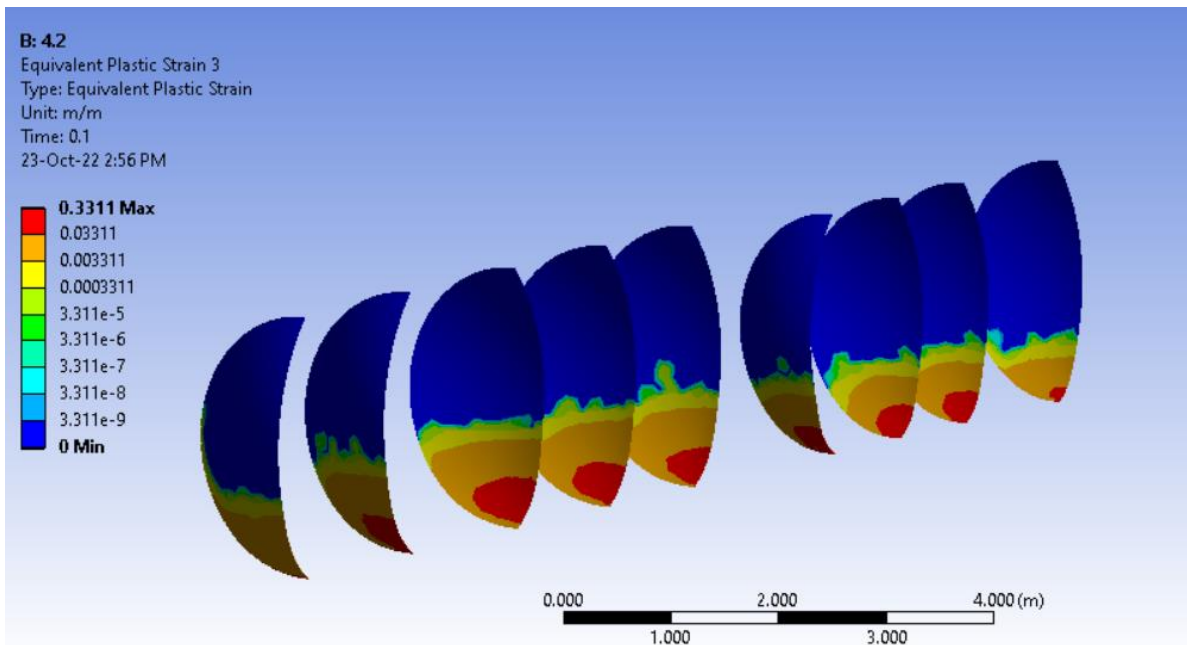
Εικόνα 114: 4.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 115: 4.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 116: 4.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 117: 4.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.6 Μοντέλο 5 (Ελλειπτική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Μονή Κόλληση)

6.6.1 Ανατροπή 90 μοιρών (5.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $6 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $1 \cdot 10^{-3}$ s

Χρόνος επίλυσης: 9h 34m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

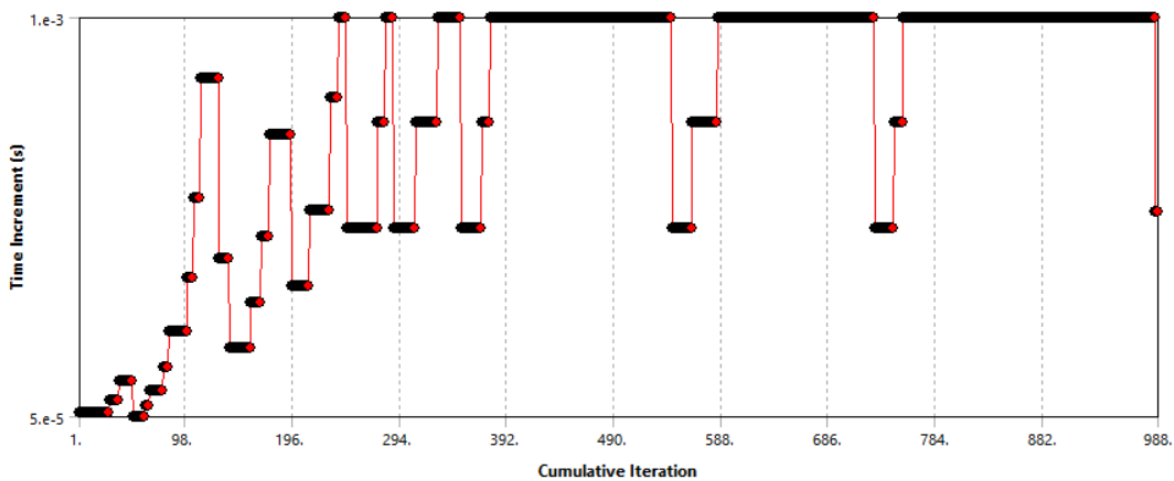
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

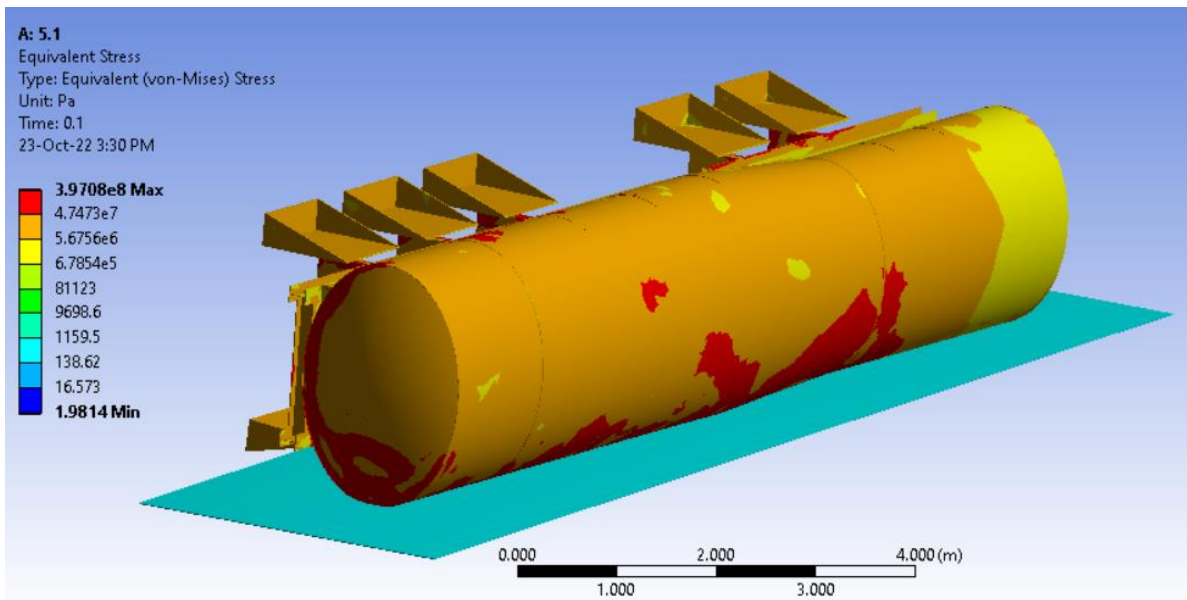
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

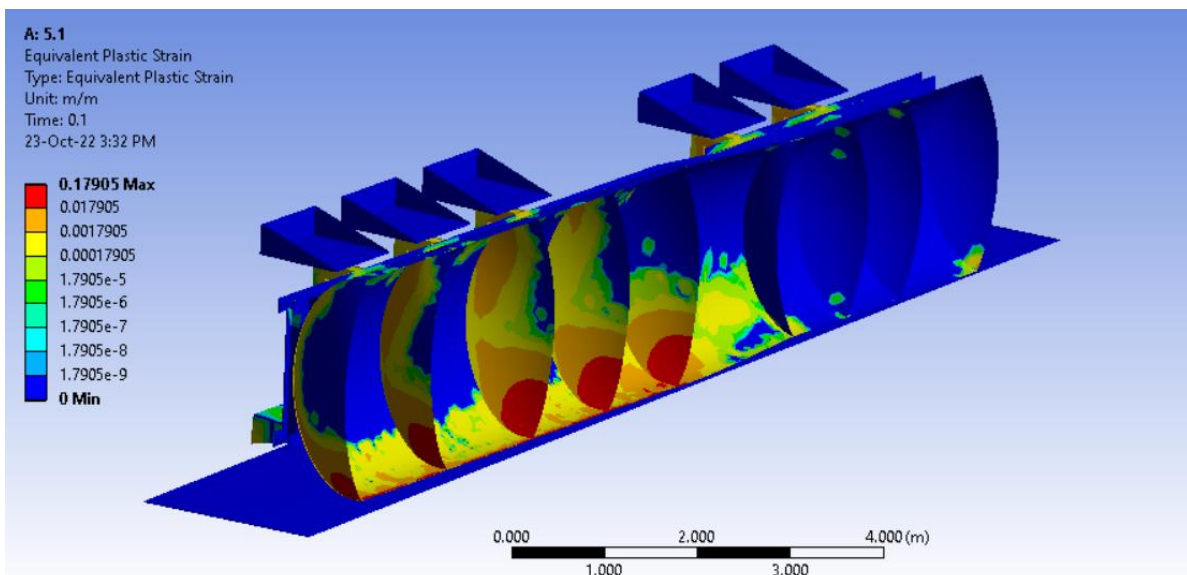
-Όριο θραύσης: 630 MPa



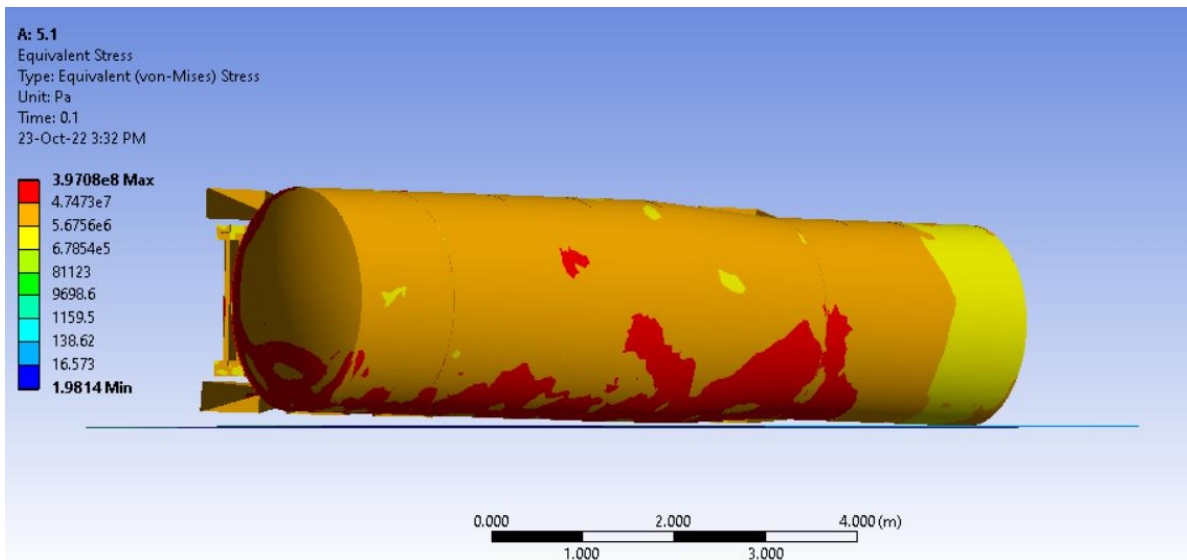
Εικόνα 118: 5.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



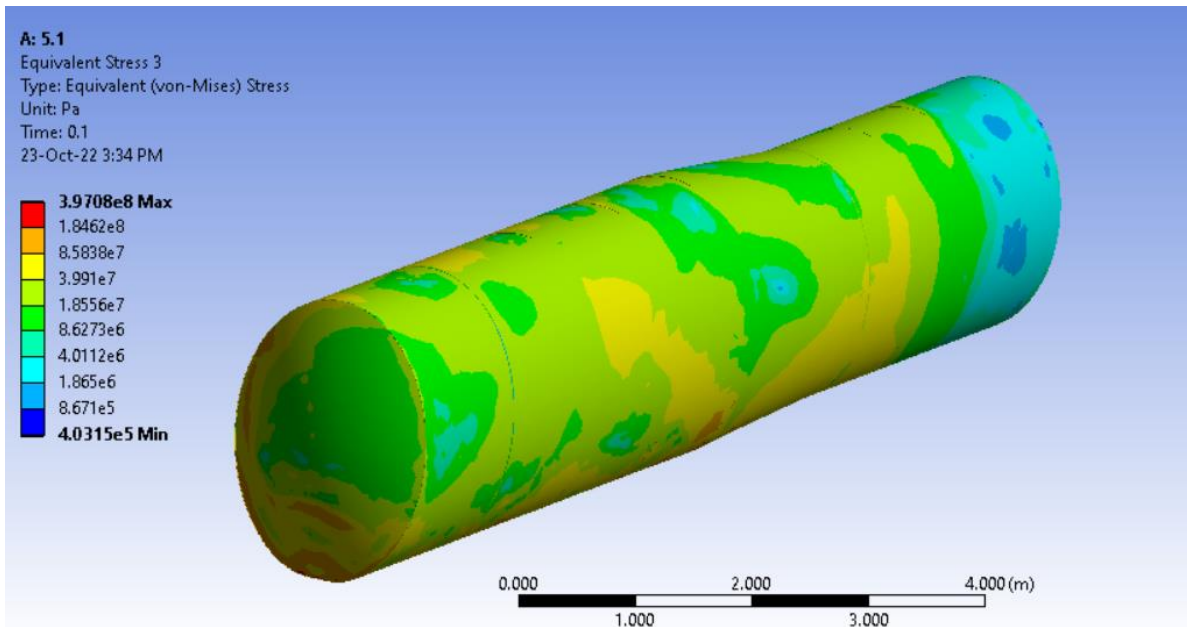
Εικόνα 119: 5.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



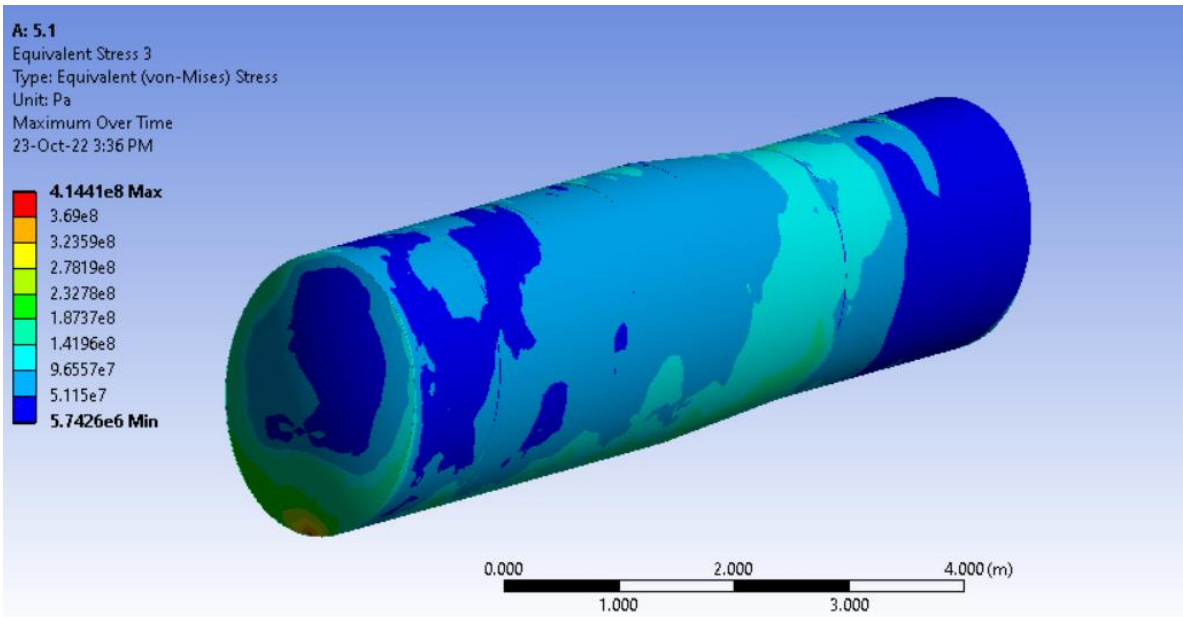
Εικόνα 120: 5.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



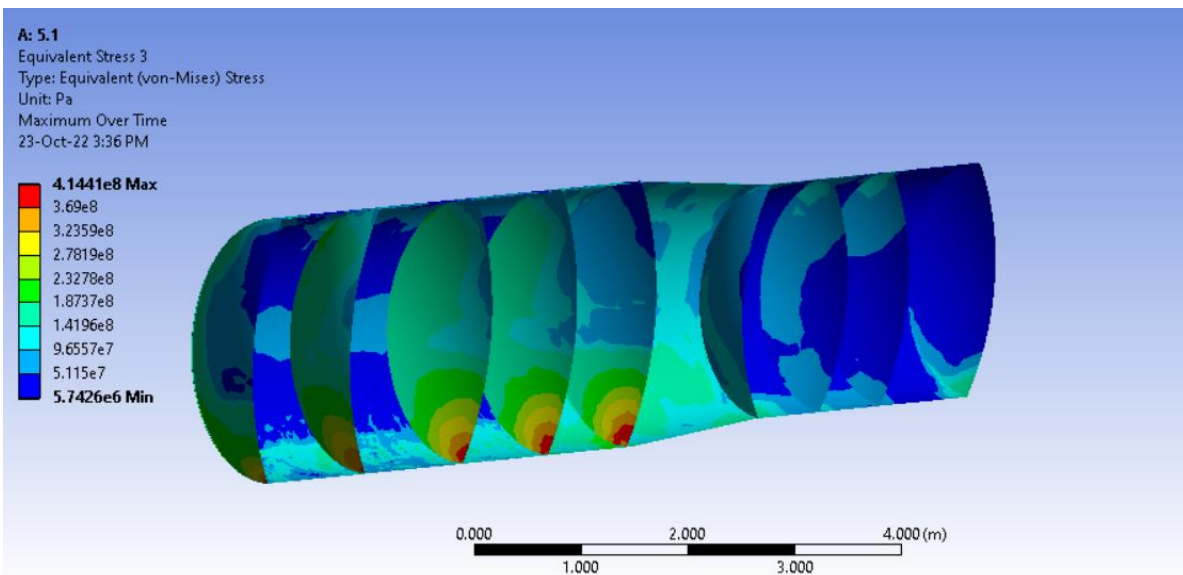
Εικόνα 121: 5.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



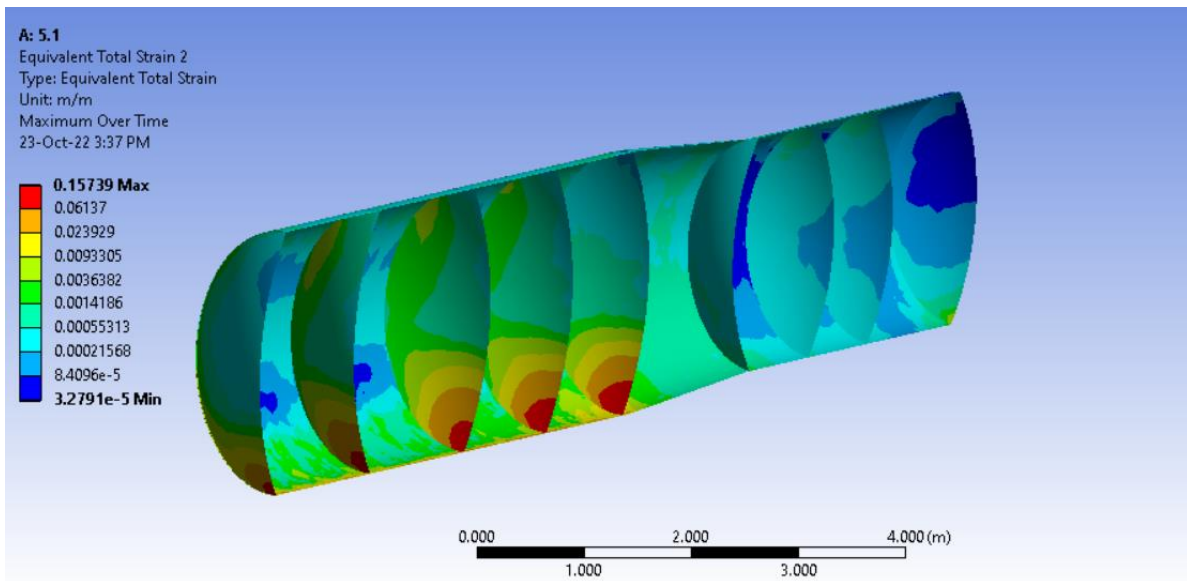
Εικόνα 122: 5.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



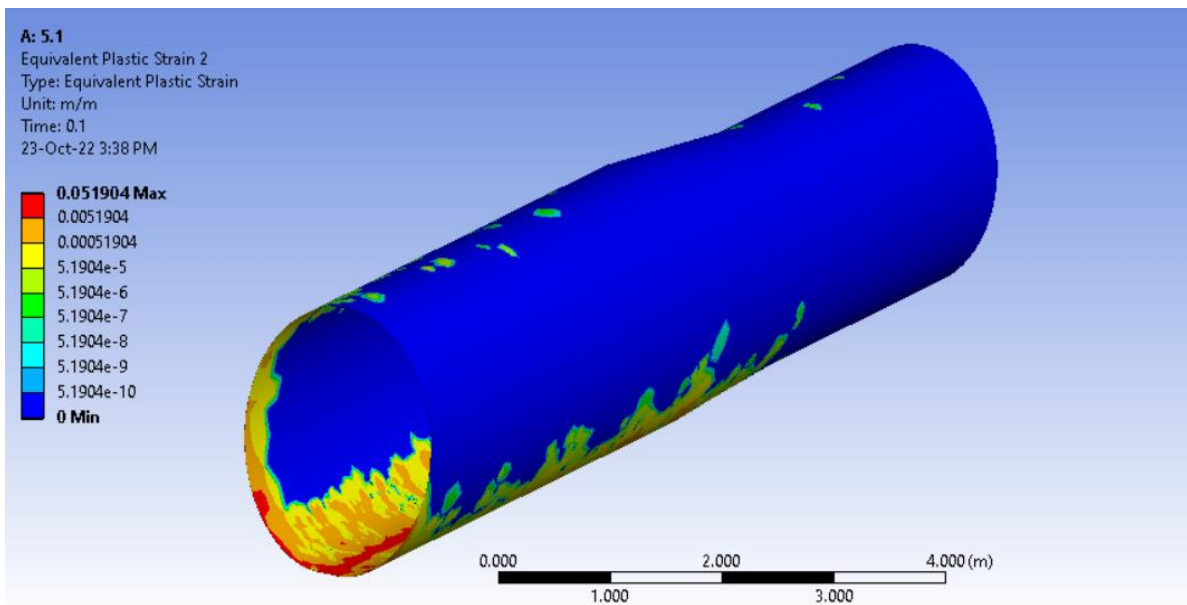
Εικόνα 123: 5.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



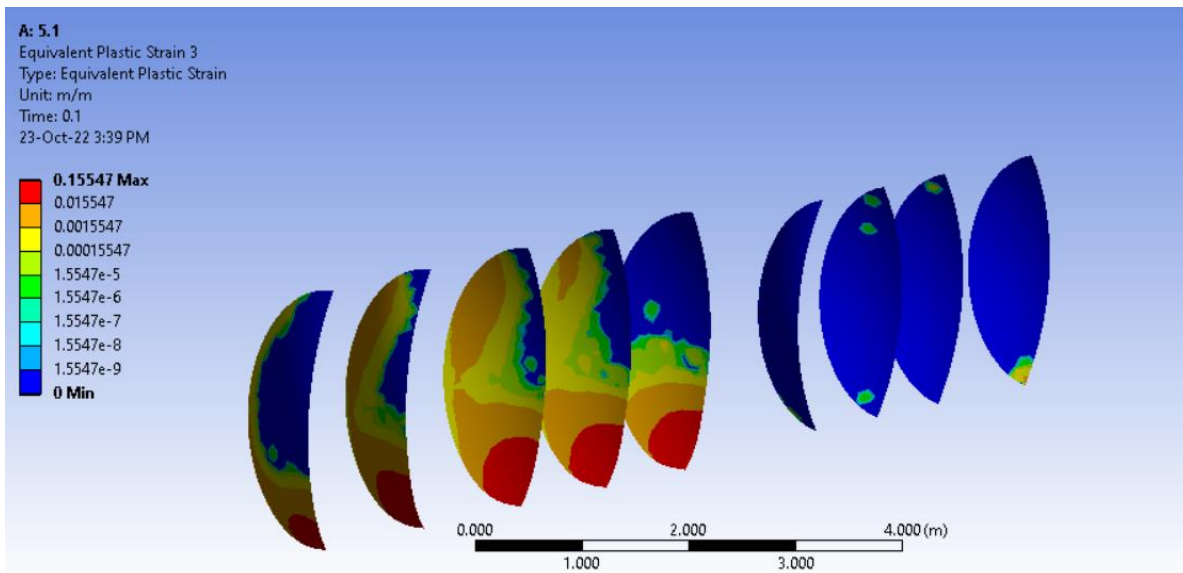
Εικόνα 124: 5.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 125: 5.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 126: 5.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 127: 5.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.6.2 Ανατροπή 180 μοιρών (5.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $4 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $6 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 4h 5m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

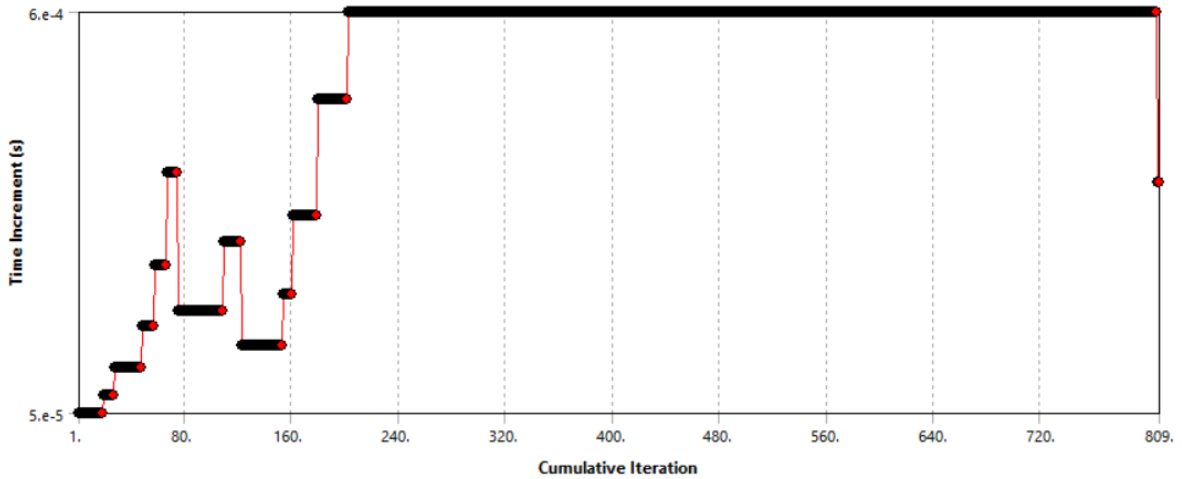
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

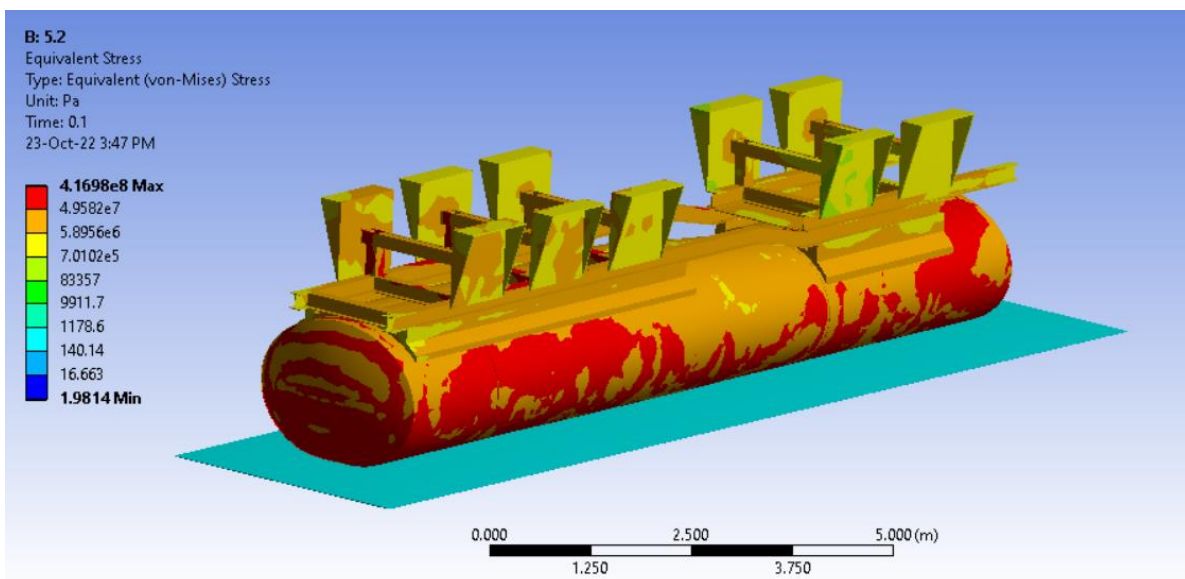
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

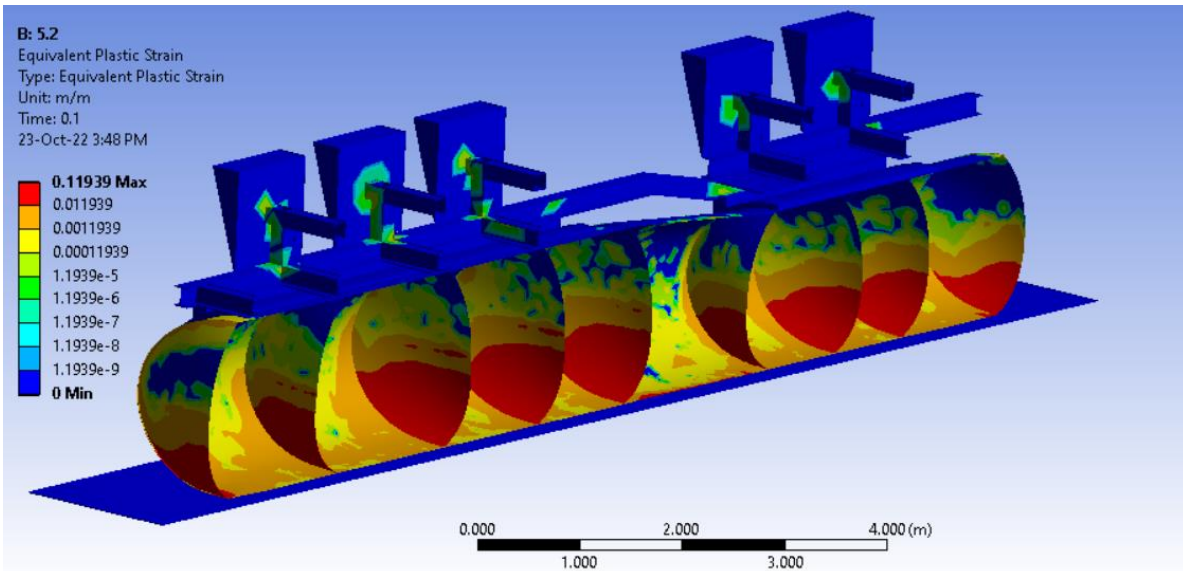
-Όριο θραύσης: 630 MPa



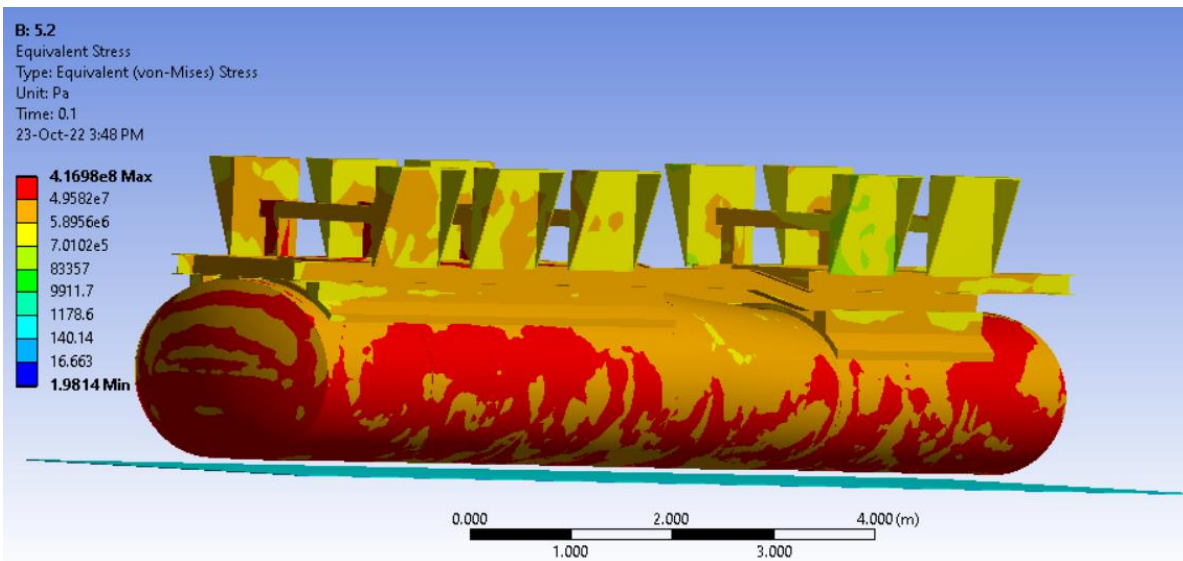
Εικόνα 128: 5.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



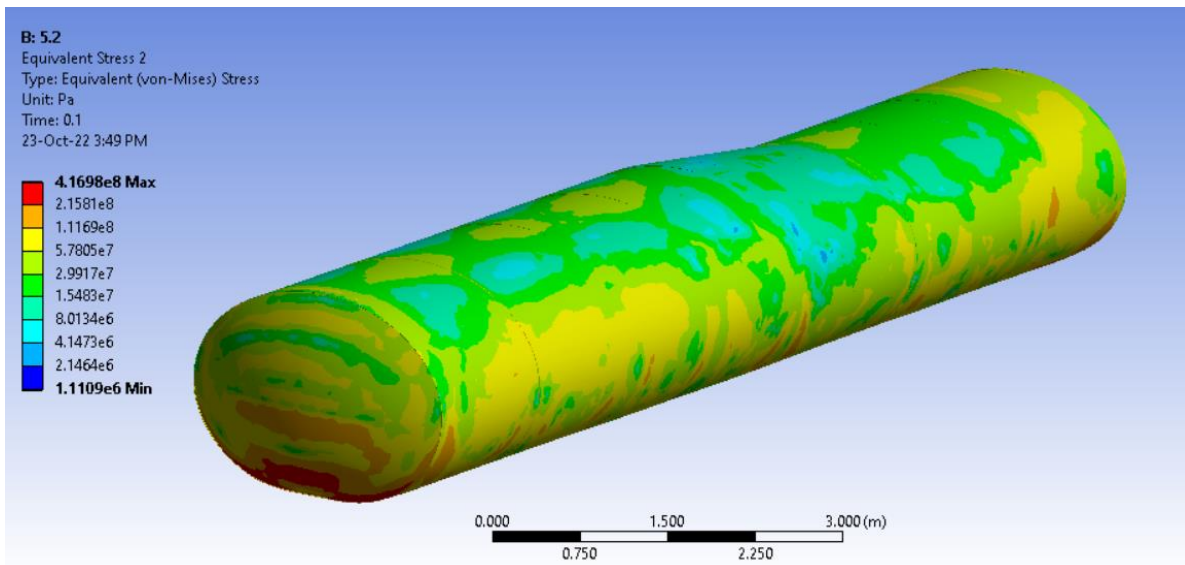
Εικόνα 129: 5.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



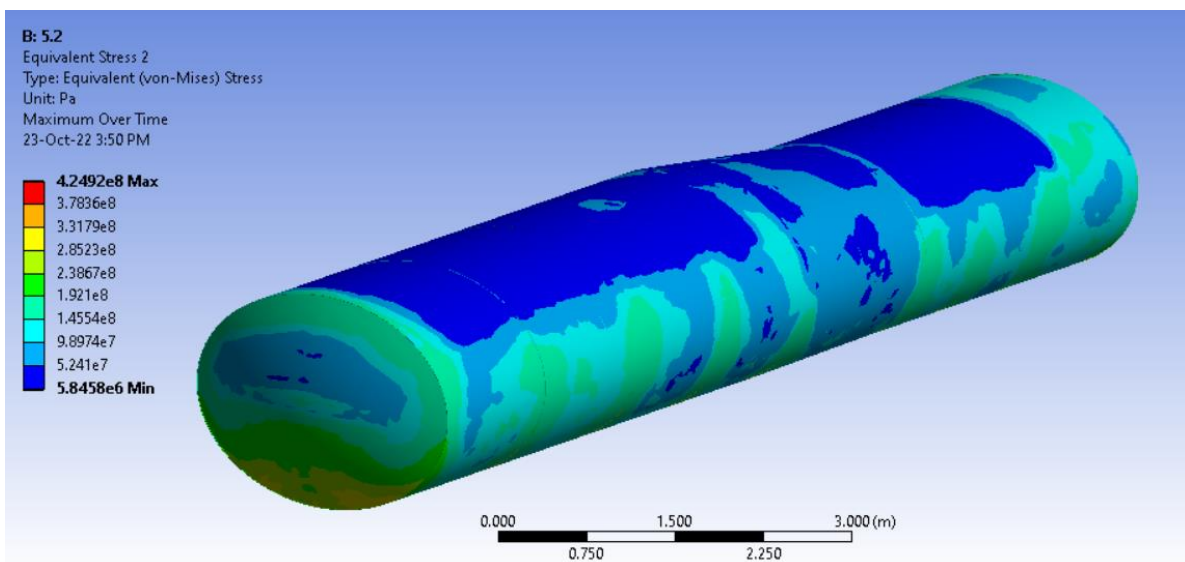
Εικόνα 130: 5.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



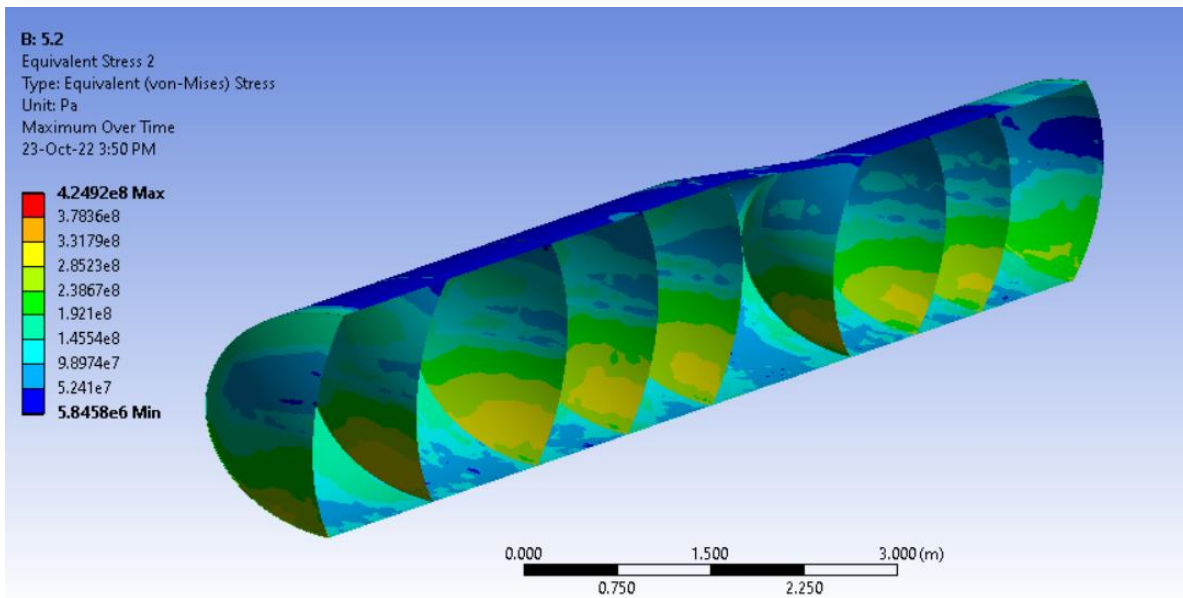
Εικόνα 131: 5.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



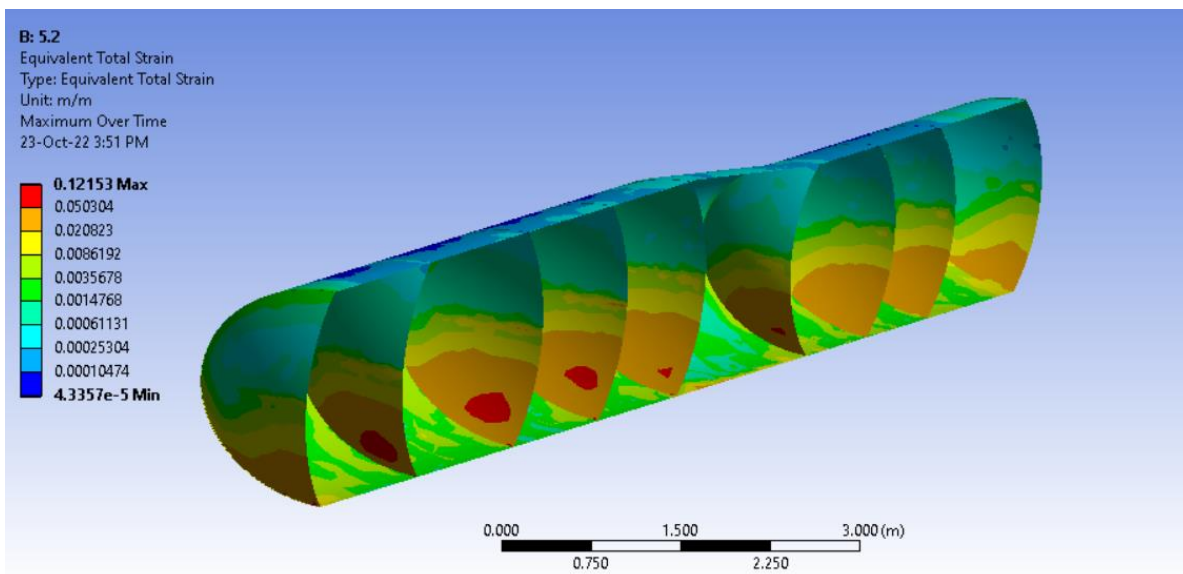
Εικόνα 132: 5.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



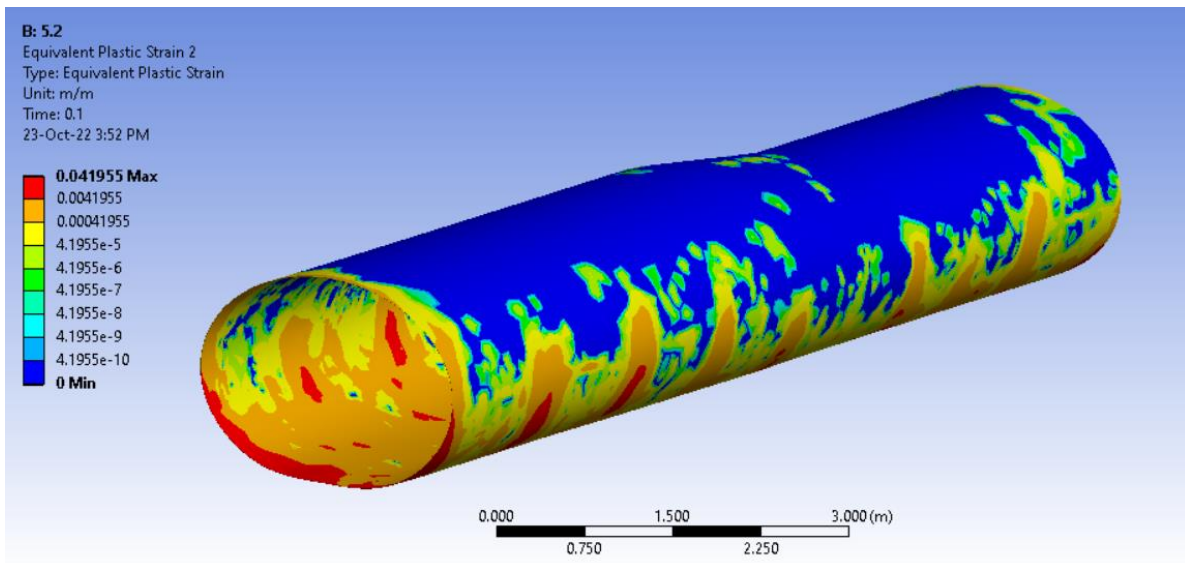
Εικόνα 133: 5.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



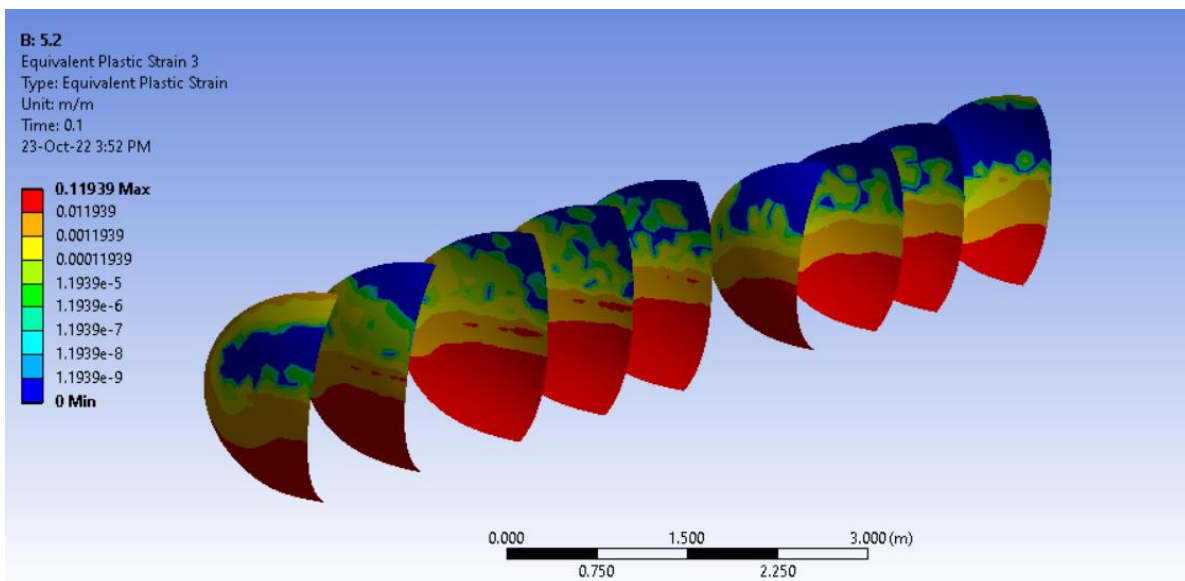
Εικόνα 134: 5.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 135: 5.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 136: 5.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 137: 5.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.7 Μοντέλο 6 (Ελλειπτική Διατομή – Αν. Χάλυβας – Διπλή Κόλληση)

6.7.1 Ανατροπή 90 μοιρών (6.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $6 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $8 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 4h 14m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

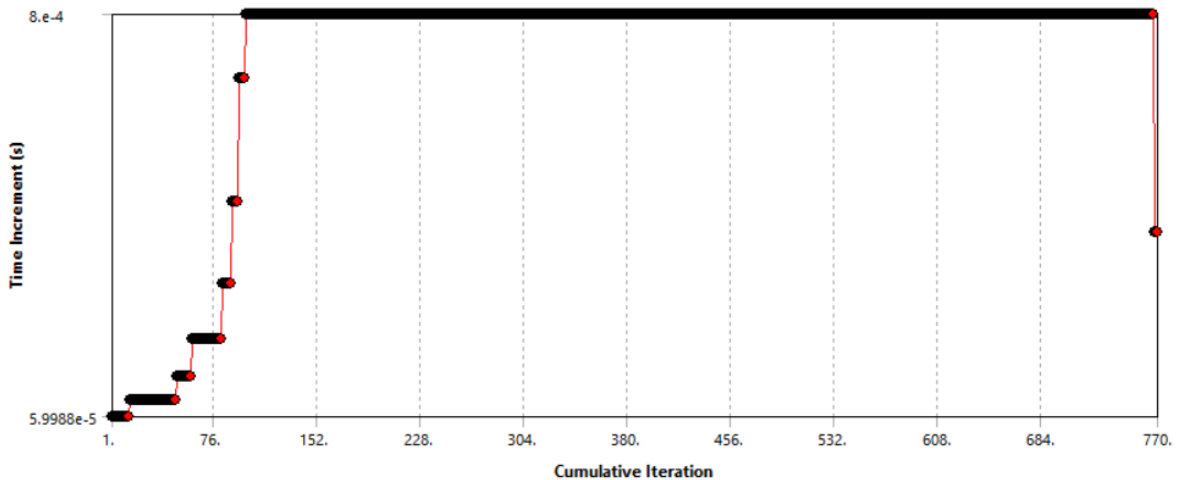
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

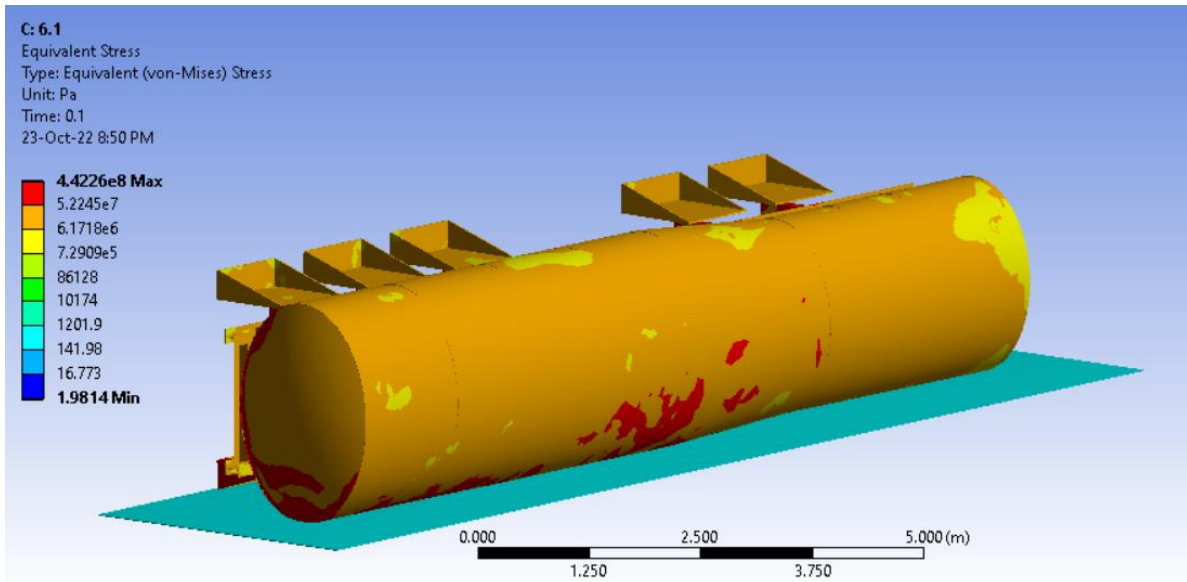
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

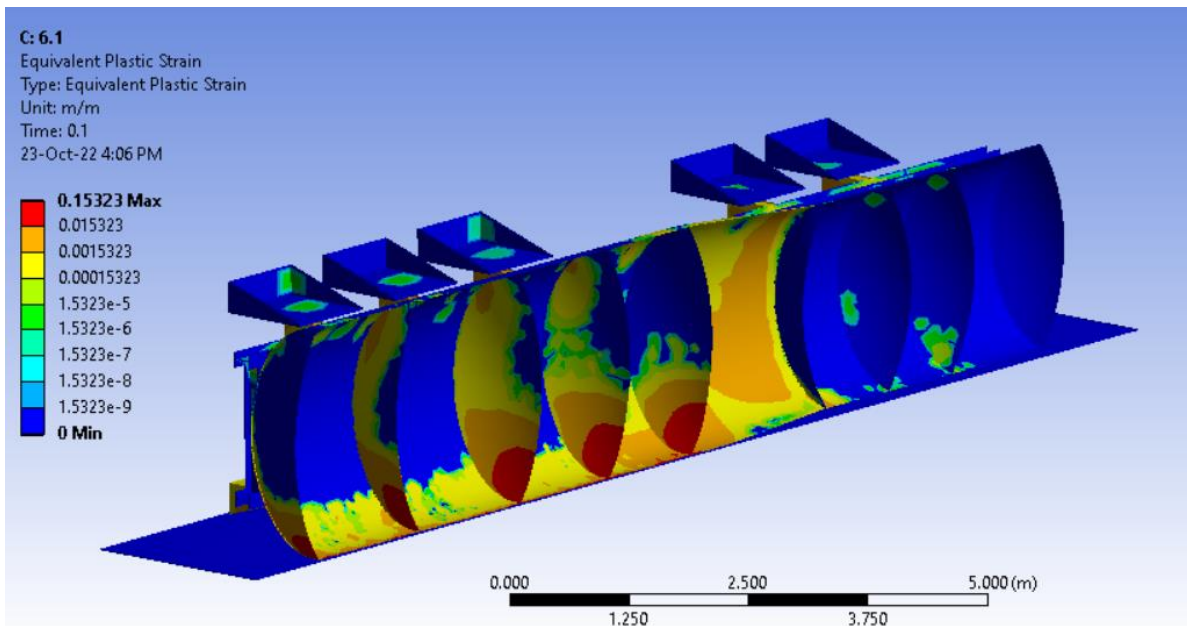
-Όριο θραύσης: 630 MPa



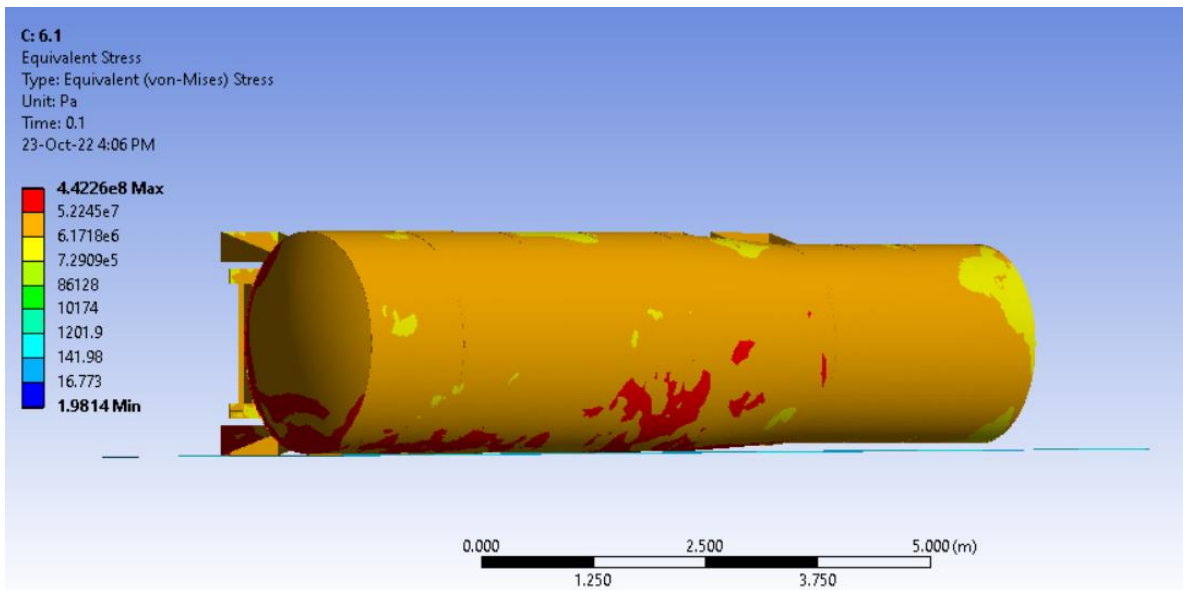
Εικόνα 138: 6.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



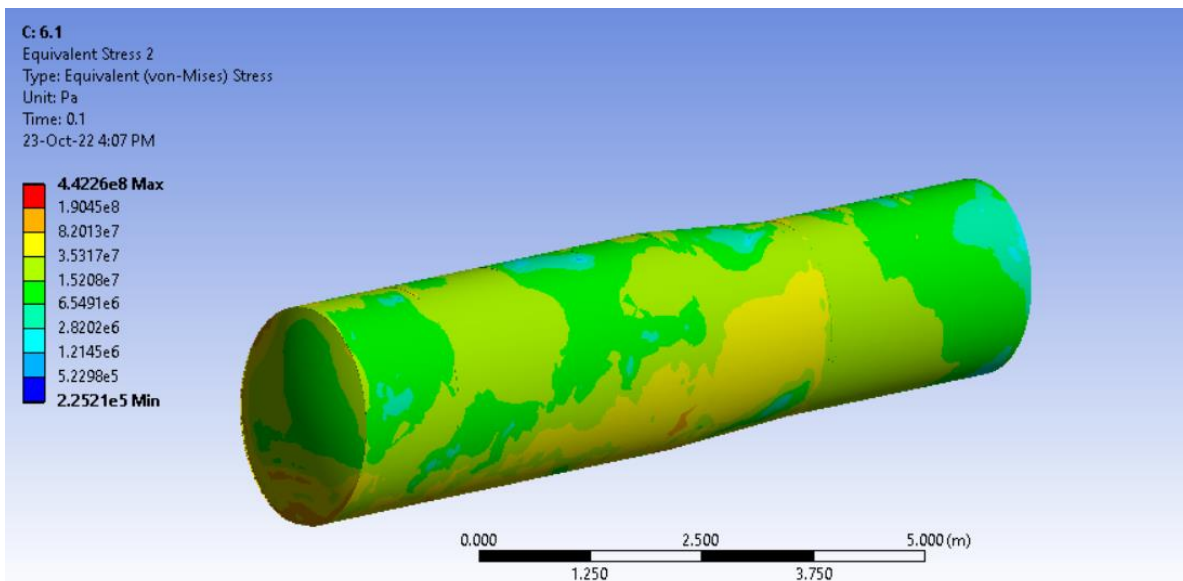
Εικόνα 139: 6.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



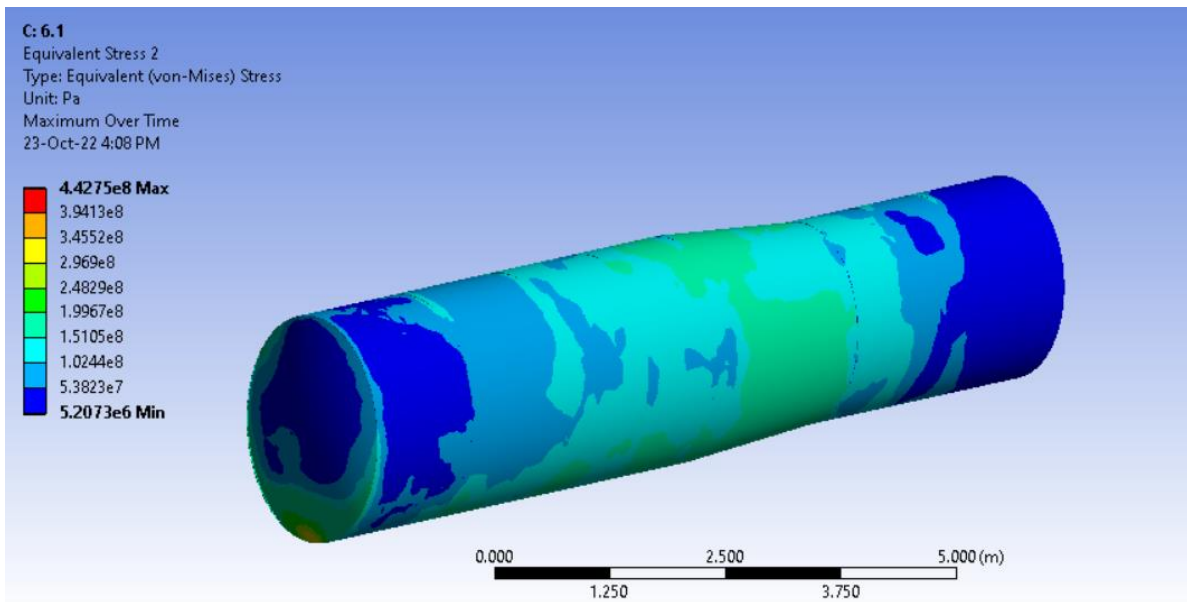
Εικόνα 140: 6.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



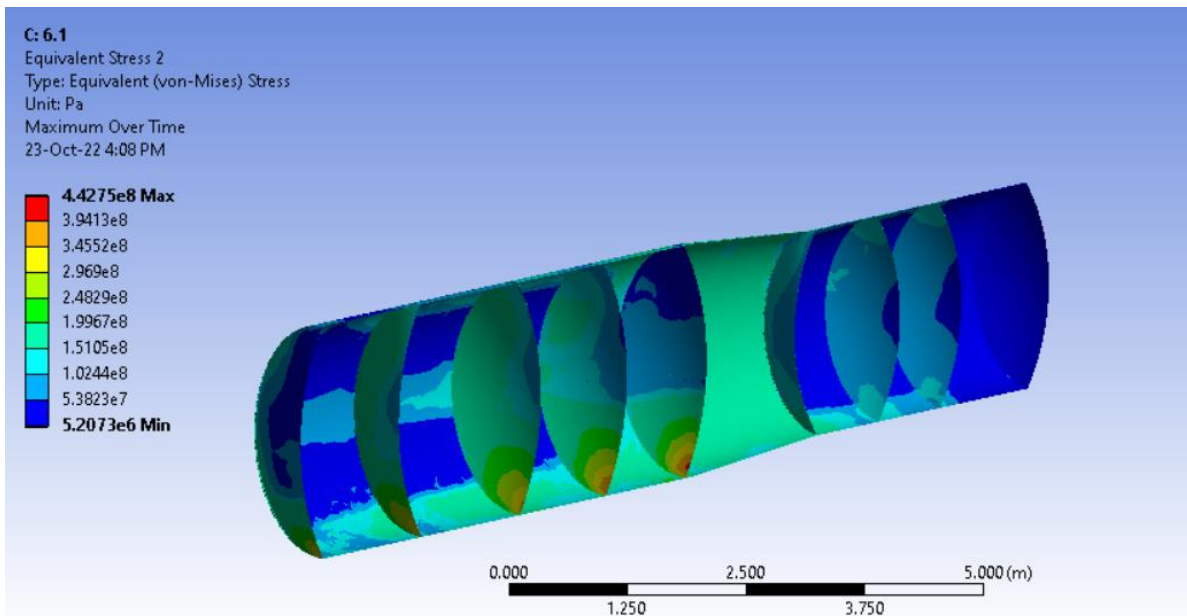
Εικόνα 141: 6.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



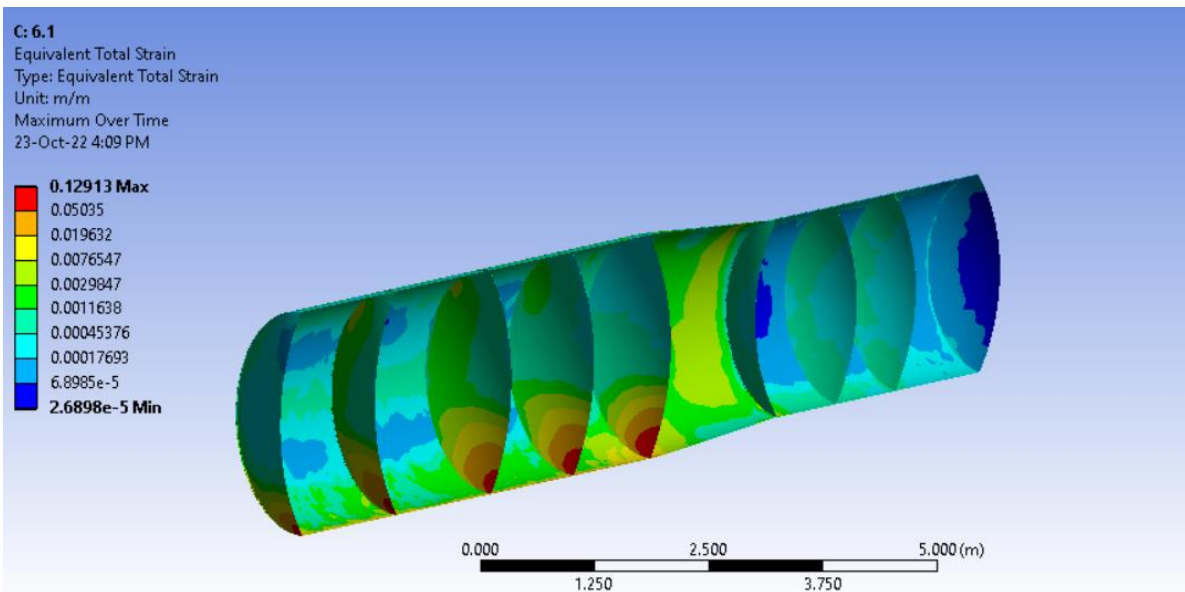
Εικόνα 142: 6.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



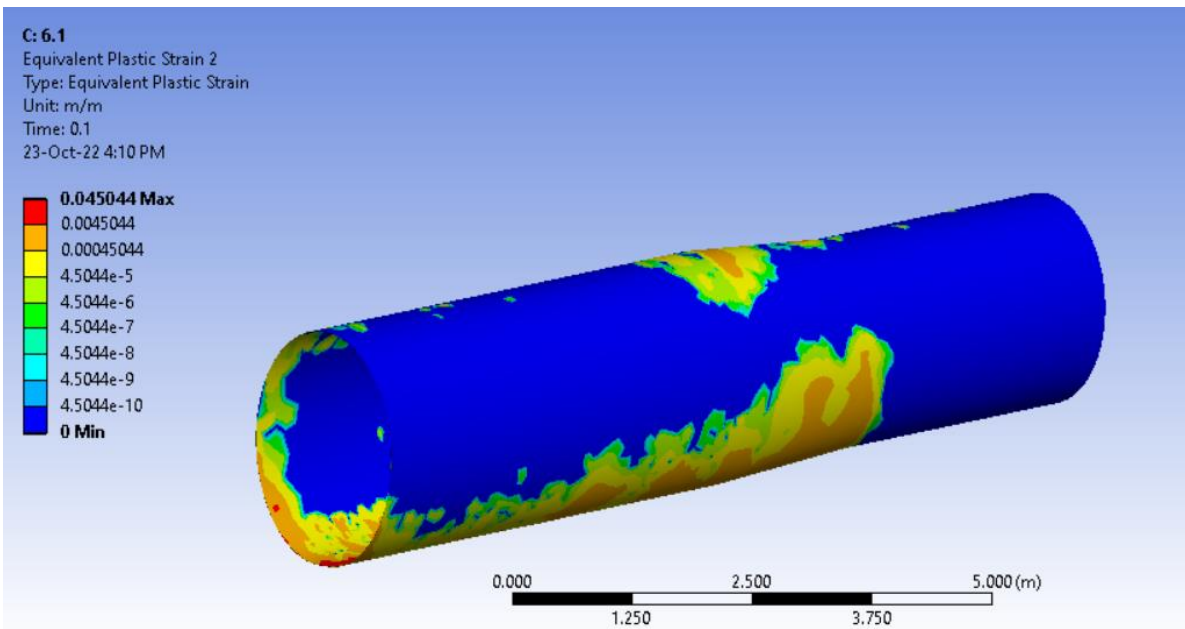
Εικόνα 143: 6.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



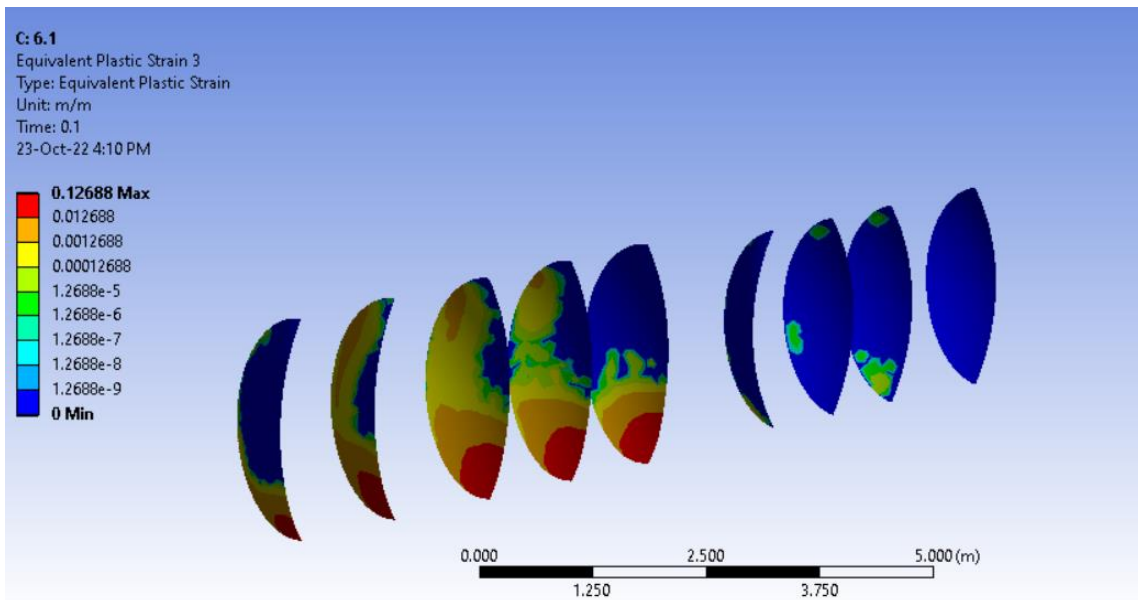
Εικόνα 144: 6.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 145: 6.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 146: 6.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 147: 6.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.7.2 Ανατροπή 180 μοιρών (6.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $4 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $6 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 4h 0m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

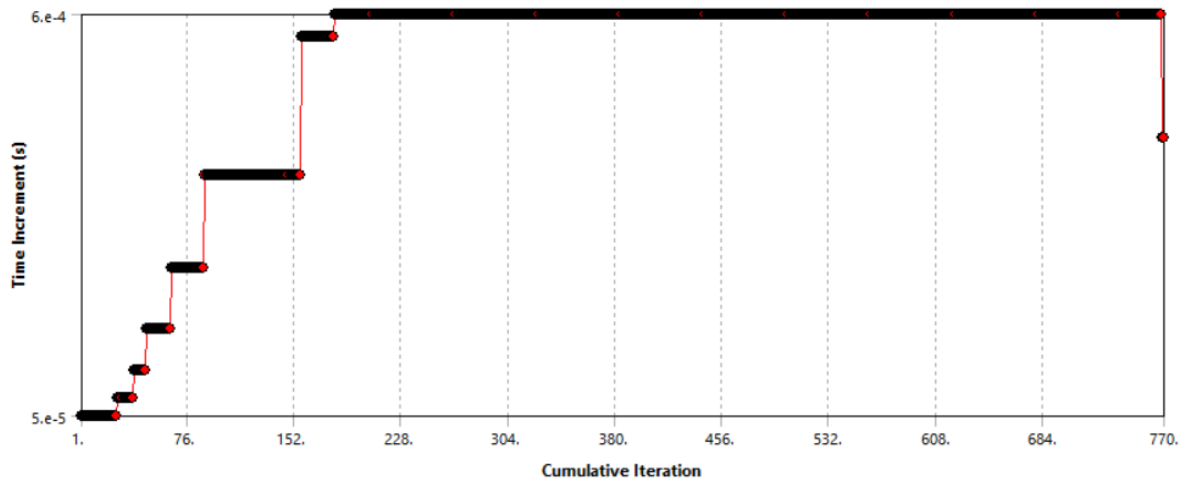
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

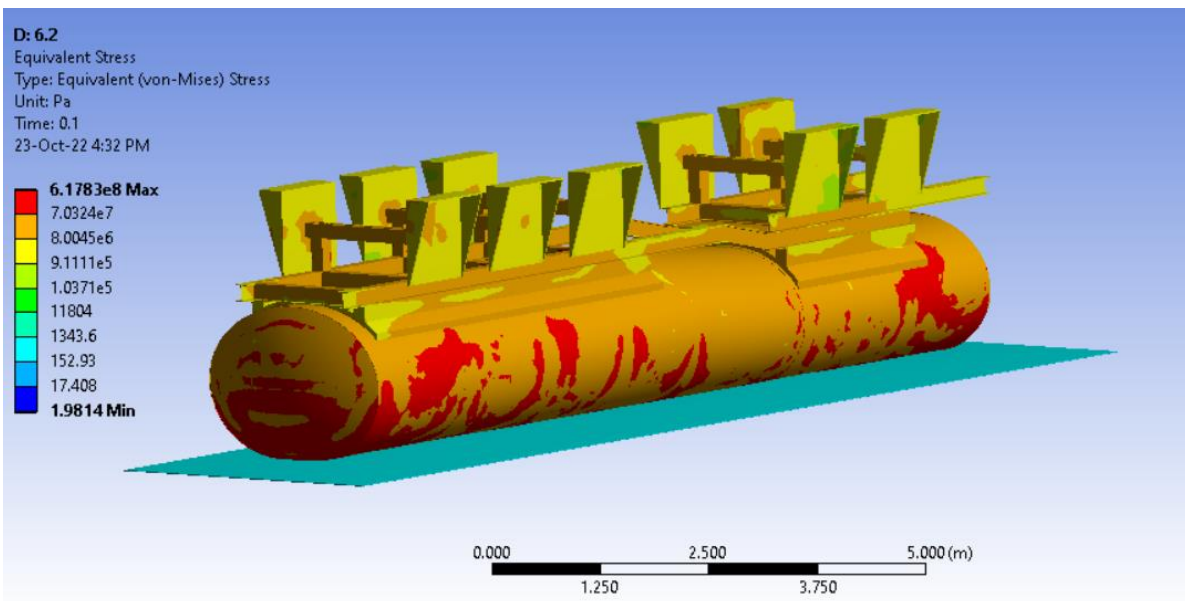
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Ανοξείδωτος Χάλυβας

-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

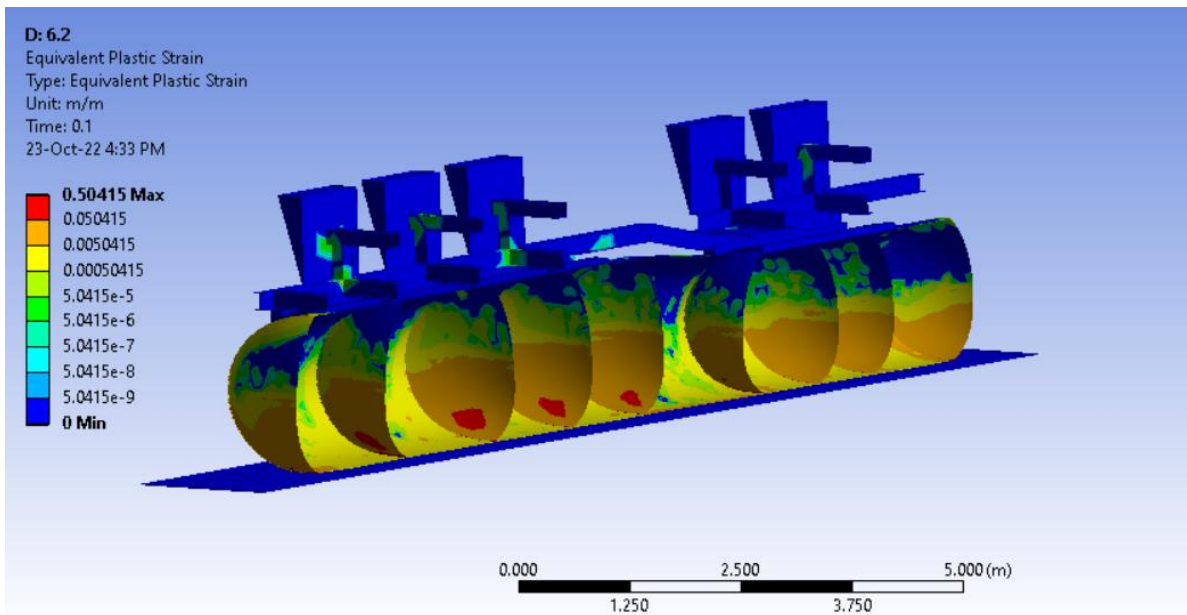
-Όριο θραύσης: 630 MPa



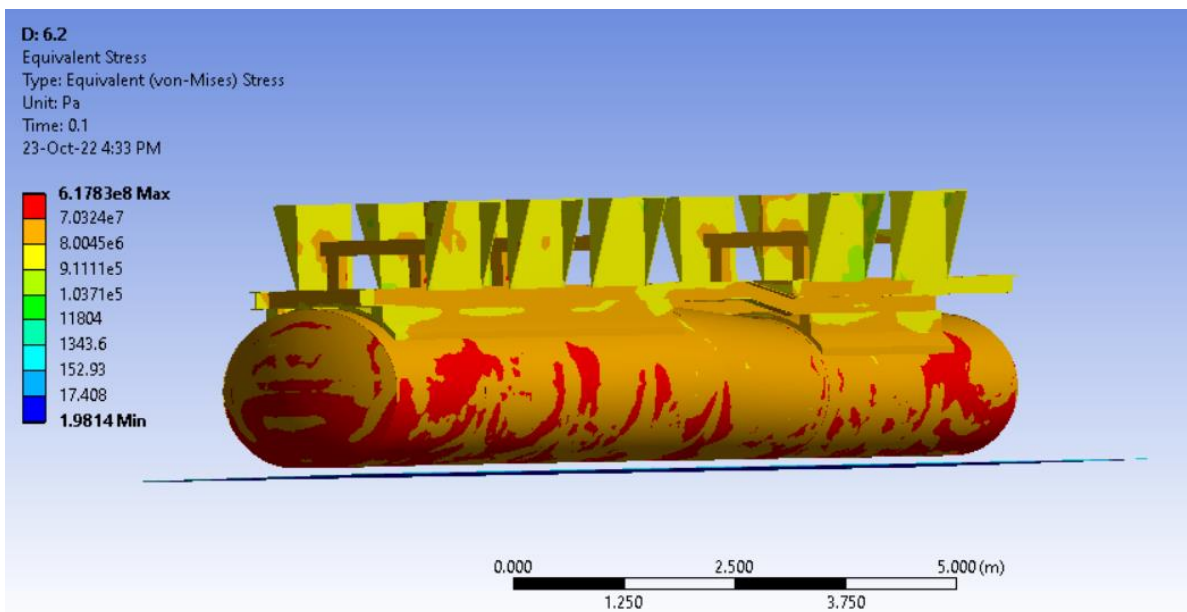
Εικόνα 148: 6.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



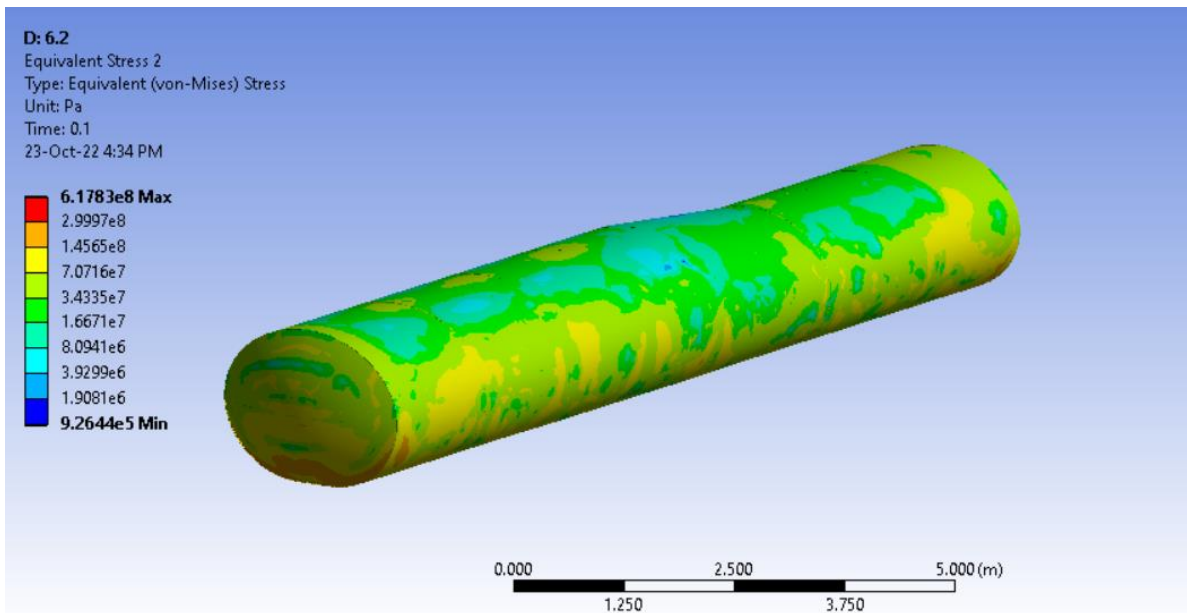
Εικόνα 149: 6.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



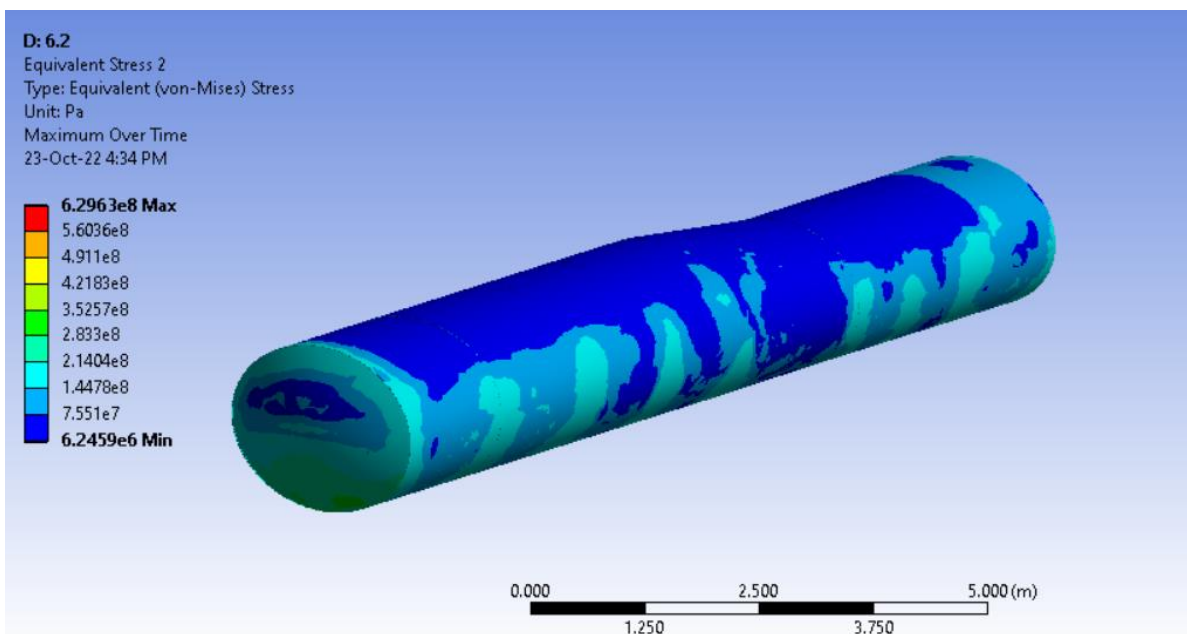
Εικόνα 150: 6.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομείωσης



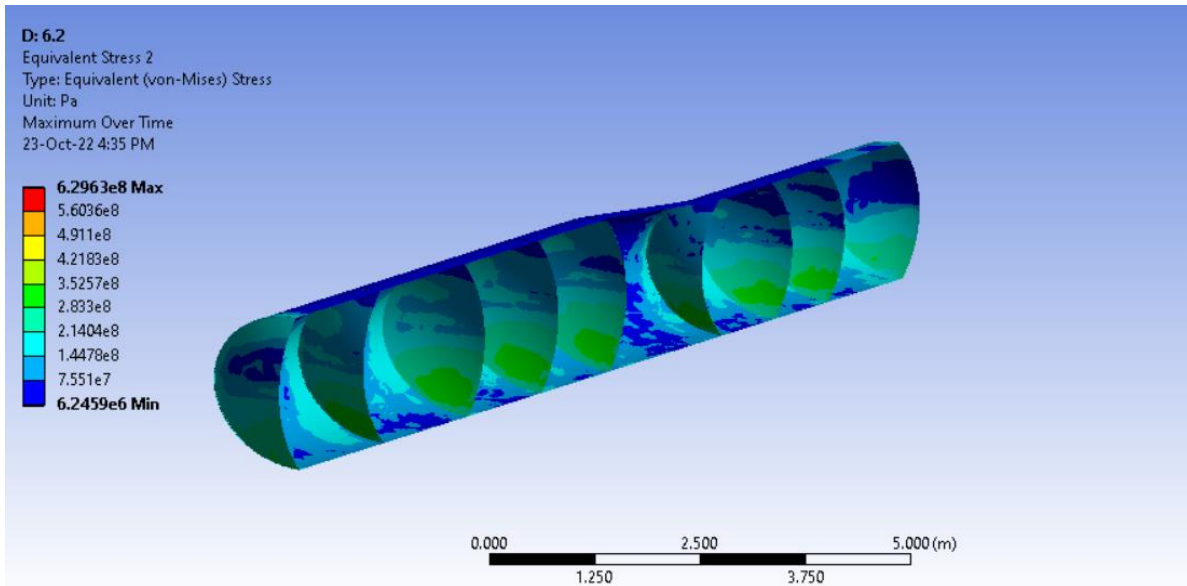
Εικόνα 151: 6.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομείωσης



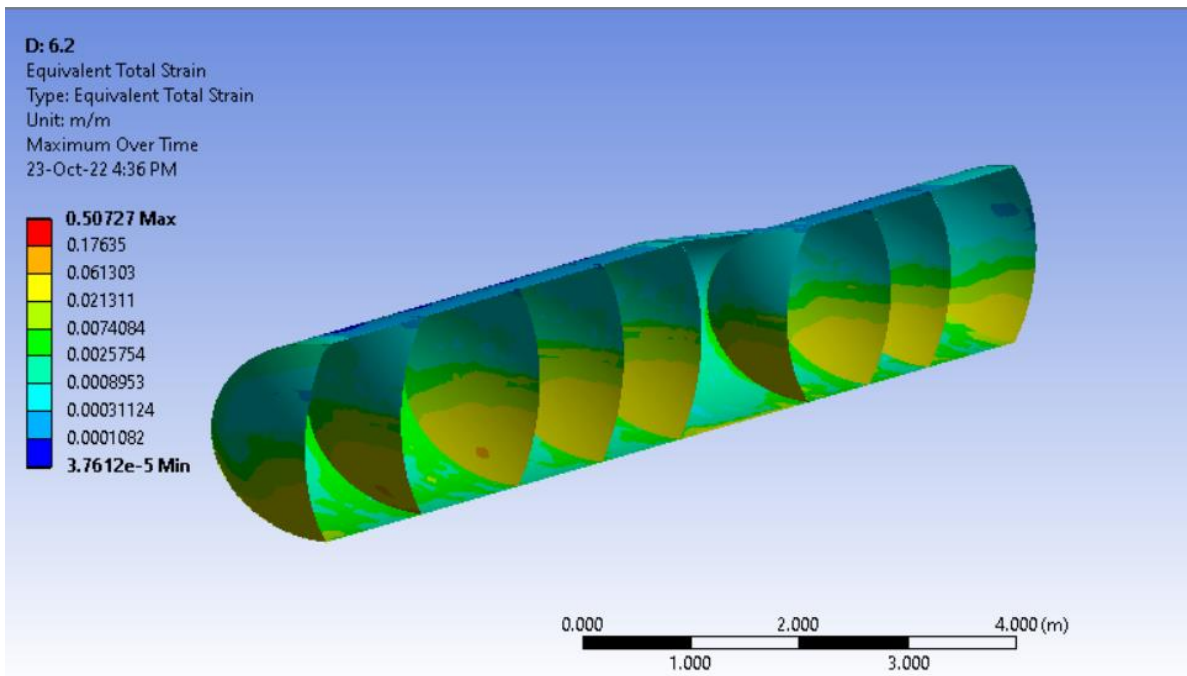
Εικόνα 152: 6.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



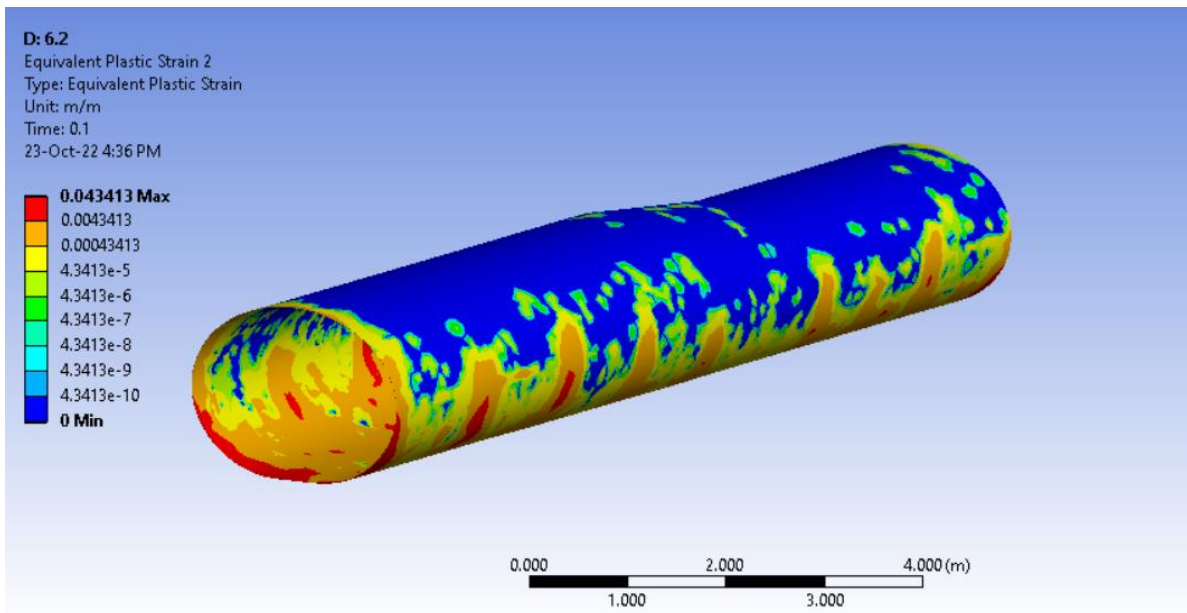
Εικόνα 153: 6.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



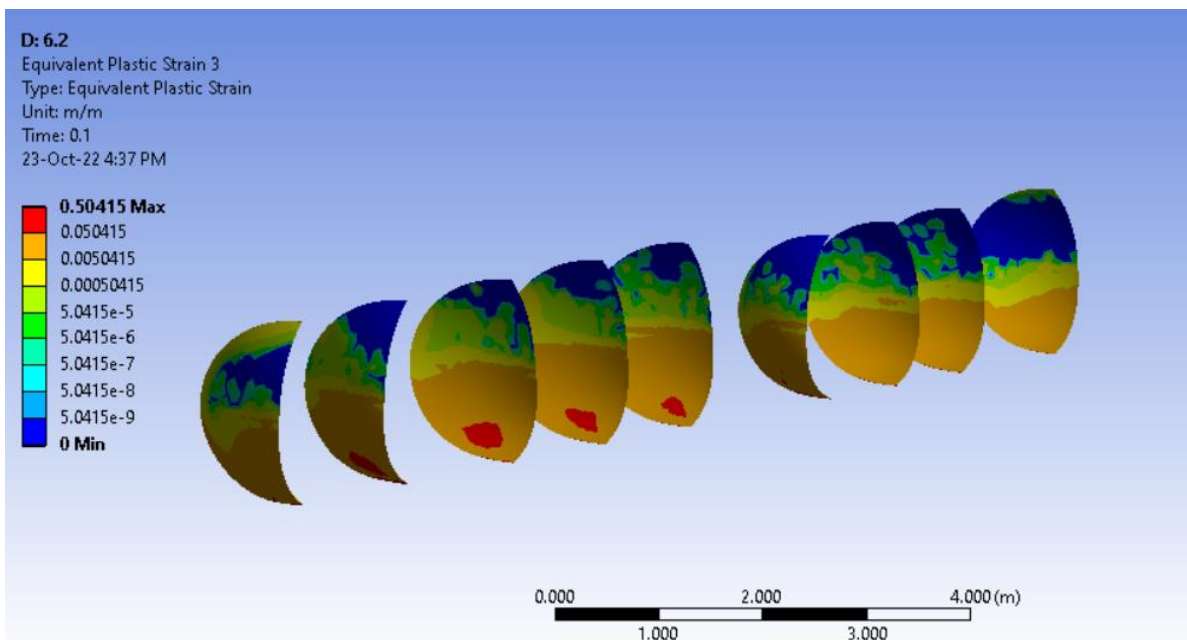
Εικόνα 154: 6.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομής



Εικόνα 155: 6.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 156: 6.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 157: 6.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.8 Μοντέλο 7 (Ελλειπτική Διατομή – Αλουμίνιο – Μονή Κόλληση)

6.8.1 Ανατροπή 90 μοιρών (7.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $6 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $1 \cdot 10^{-3}$ s

Χρόνος επίλυσης: 2h 52m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

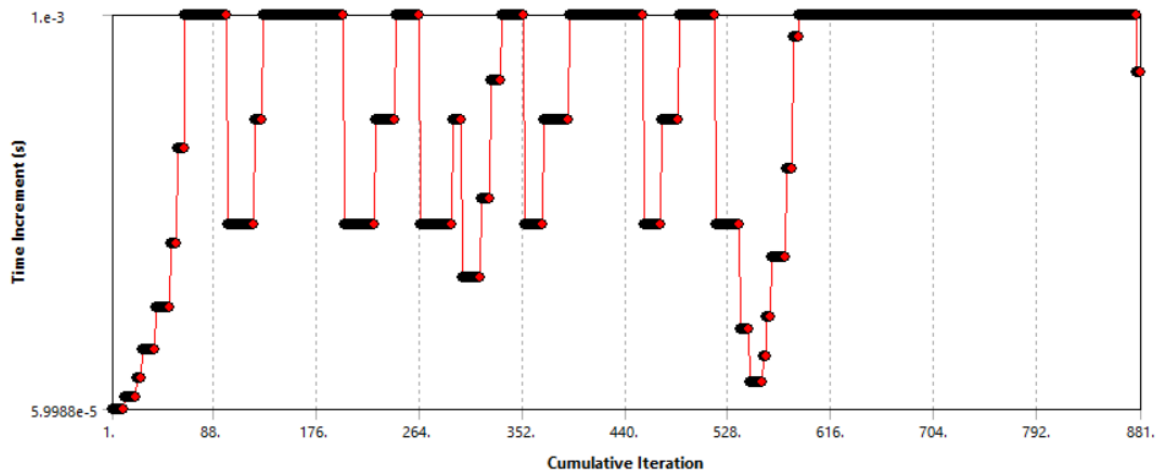
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

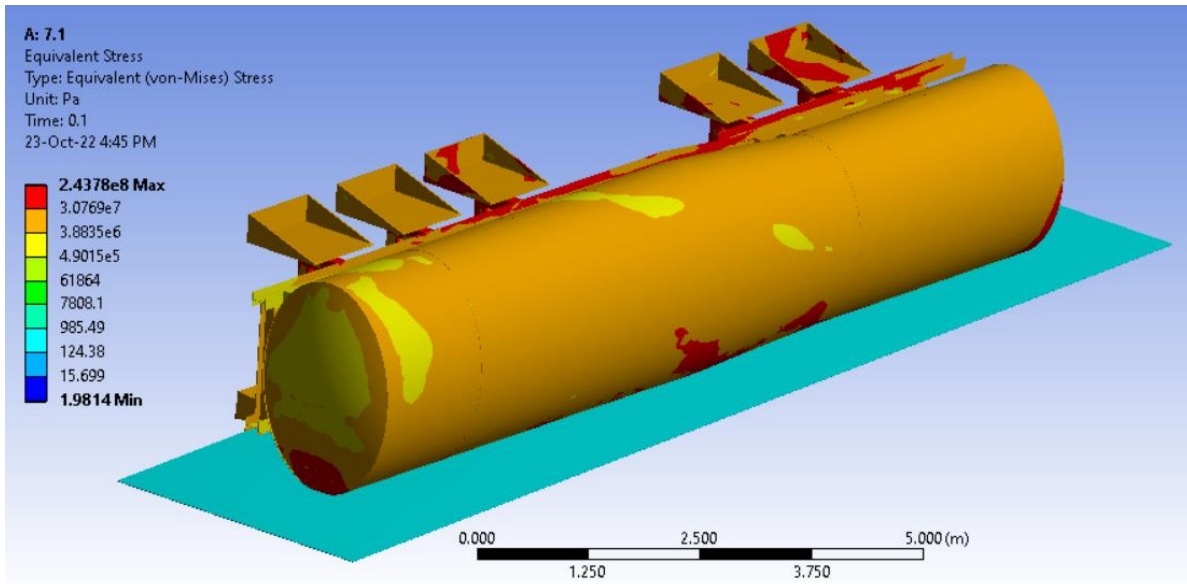
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

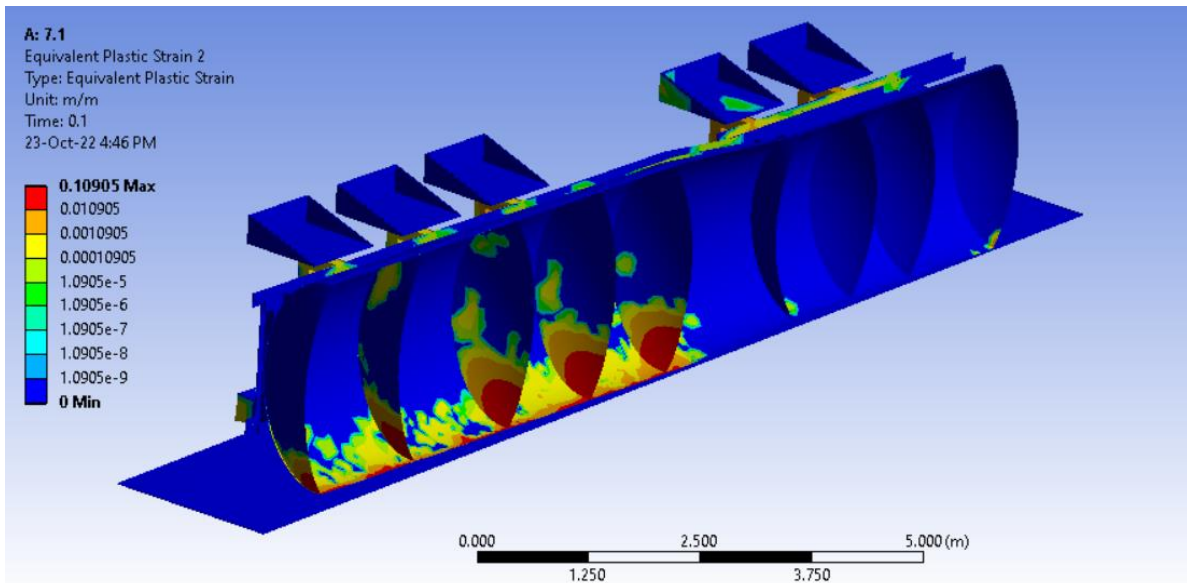
-Όριο θραύσης: 270 MPa



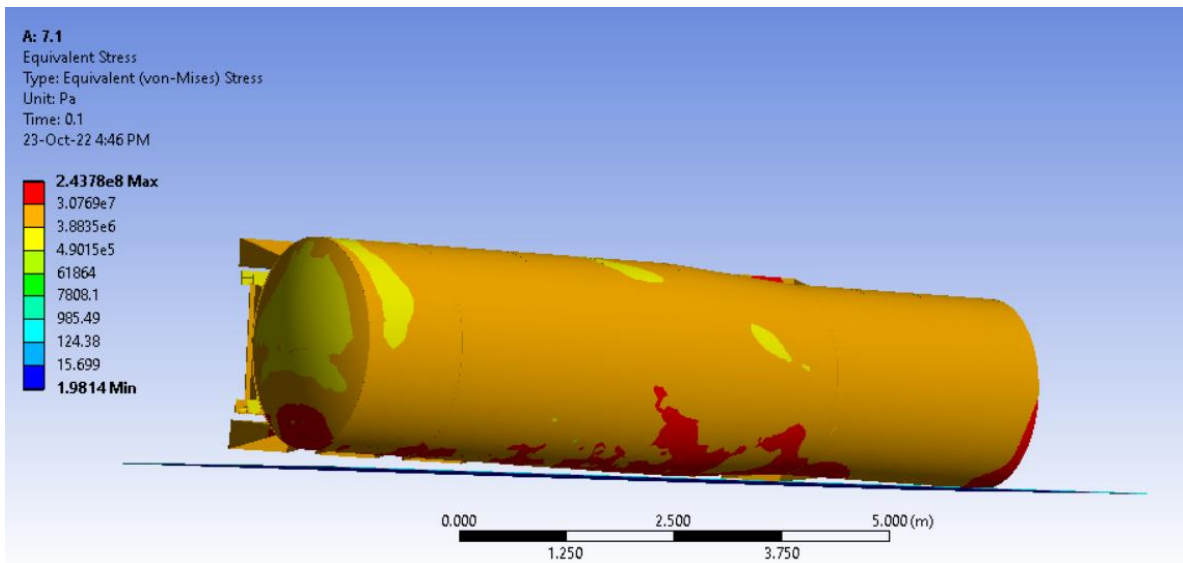
Εικόνα 158: 7.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



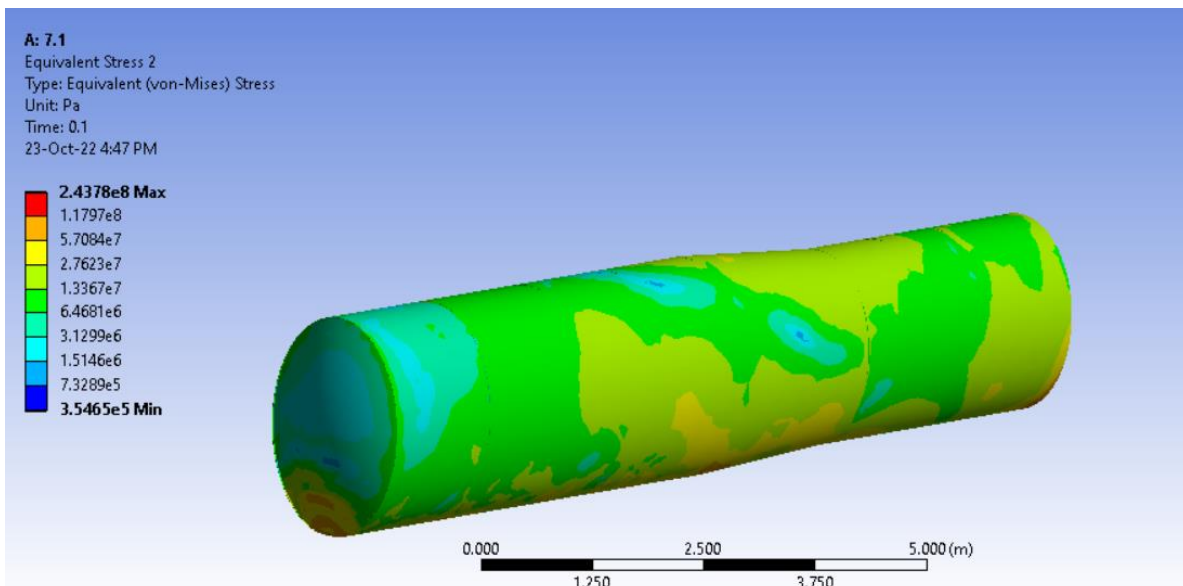
Εικόνα 159: 7.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



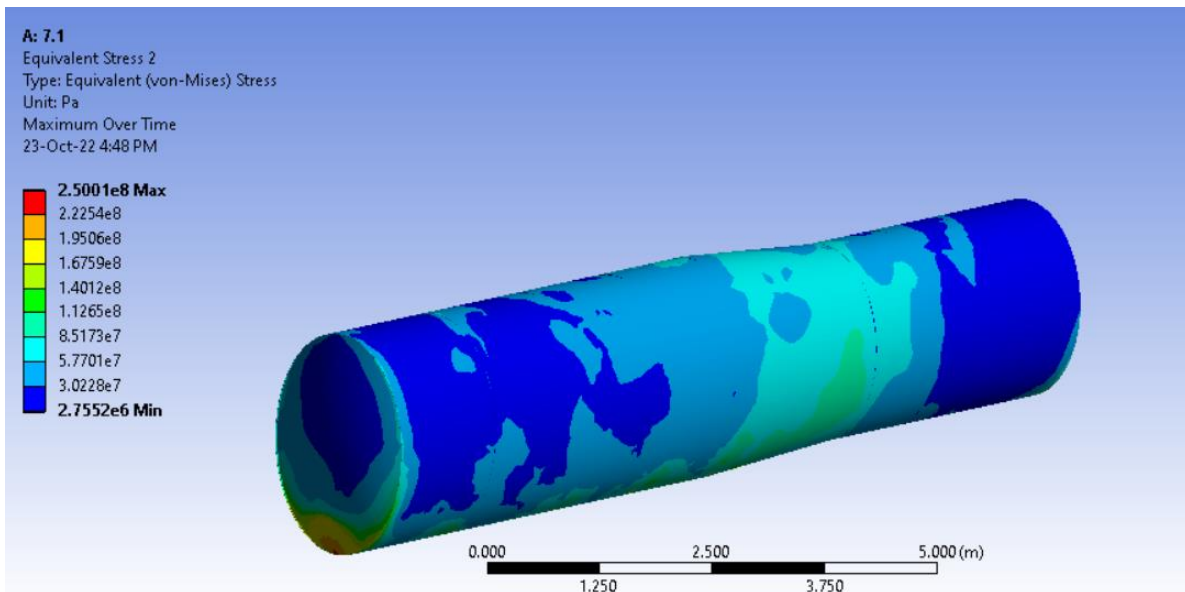
Εικόνα 160: 7.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



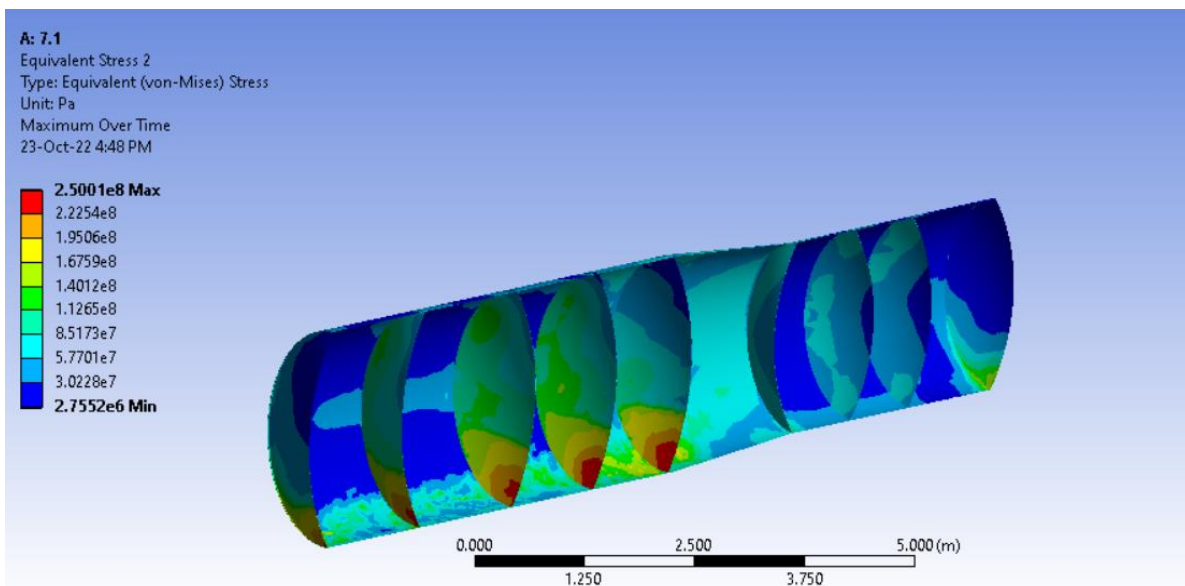
Εικόνα 161: 7.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομείωσης



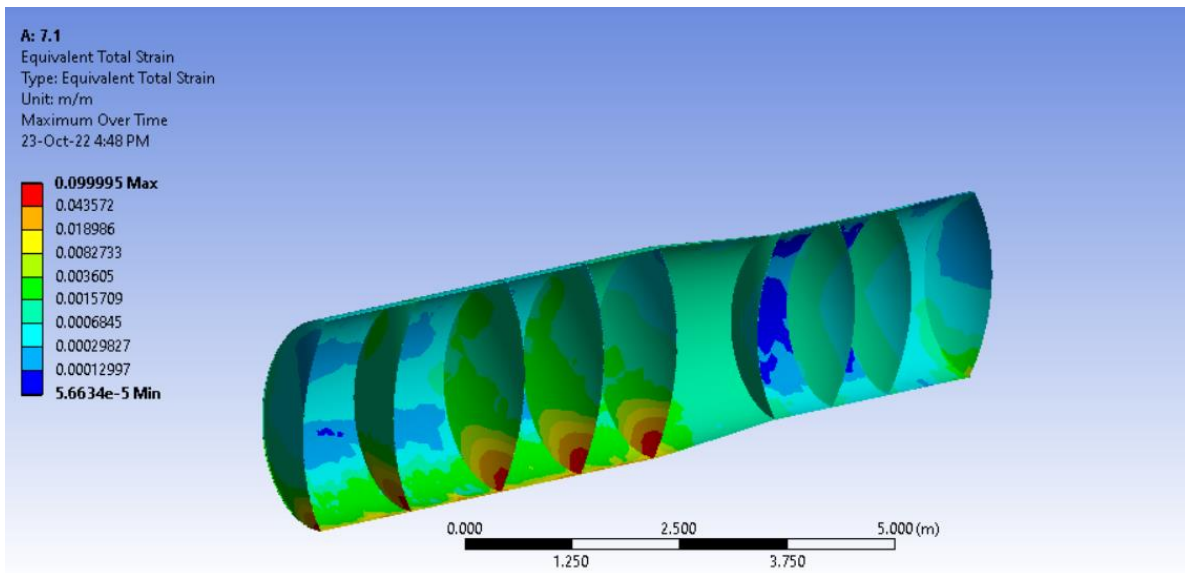
Εικόνα 162: 7.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομείωσης



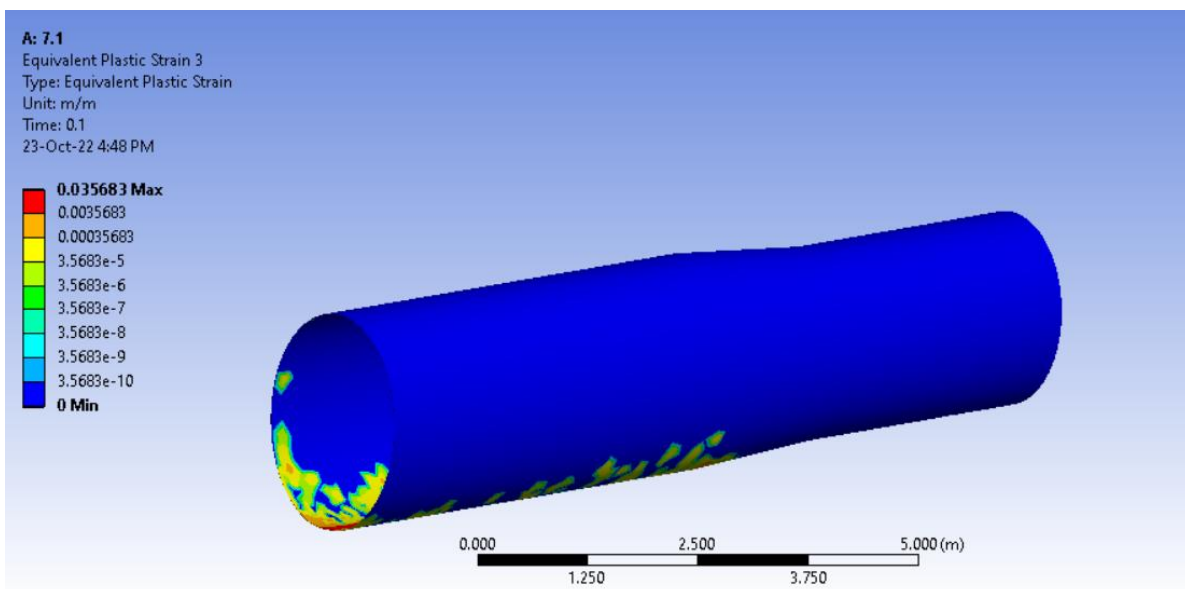
Εικόνα 163: 7.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



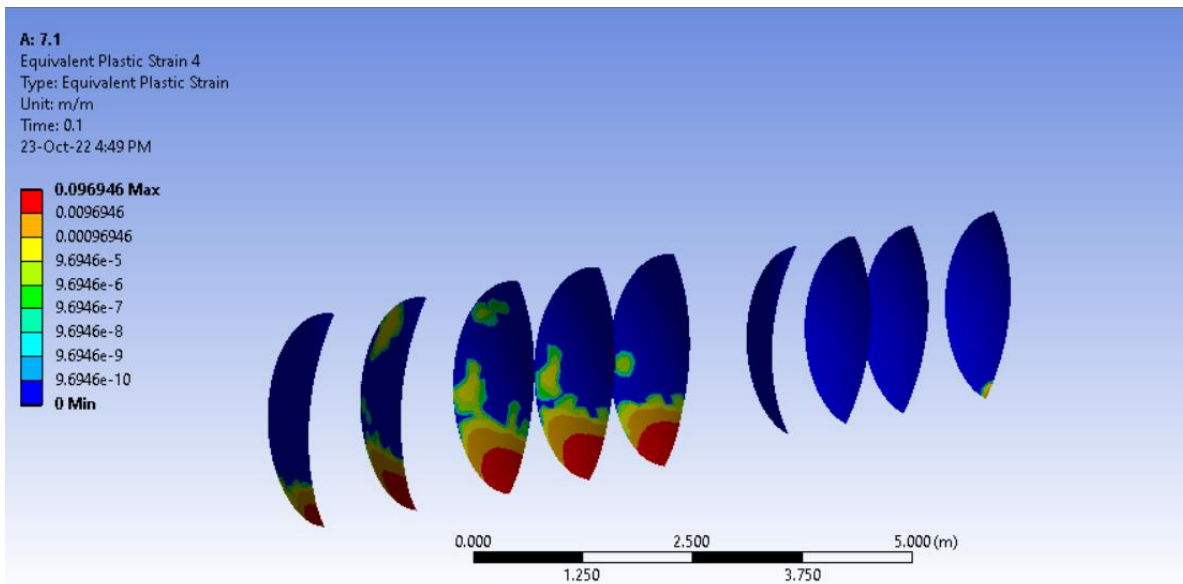
Εικόνα 164: 7.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 165: 7.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 166: 7.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομείωσης



Εικόνα 167: 7.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωση

6.8.2 Ανατροπή 180 μοιρών (7.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $4 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $8 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 1h 29m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

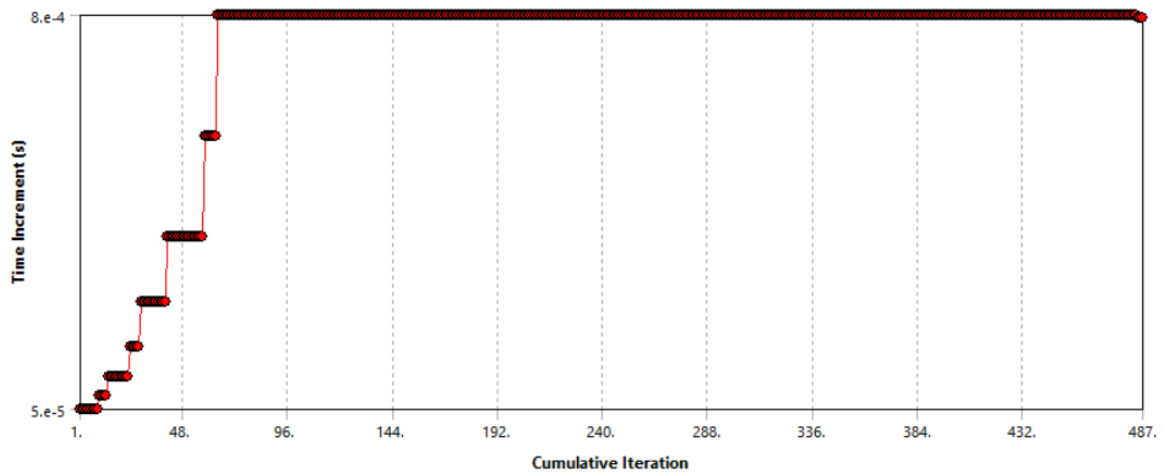
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

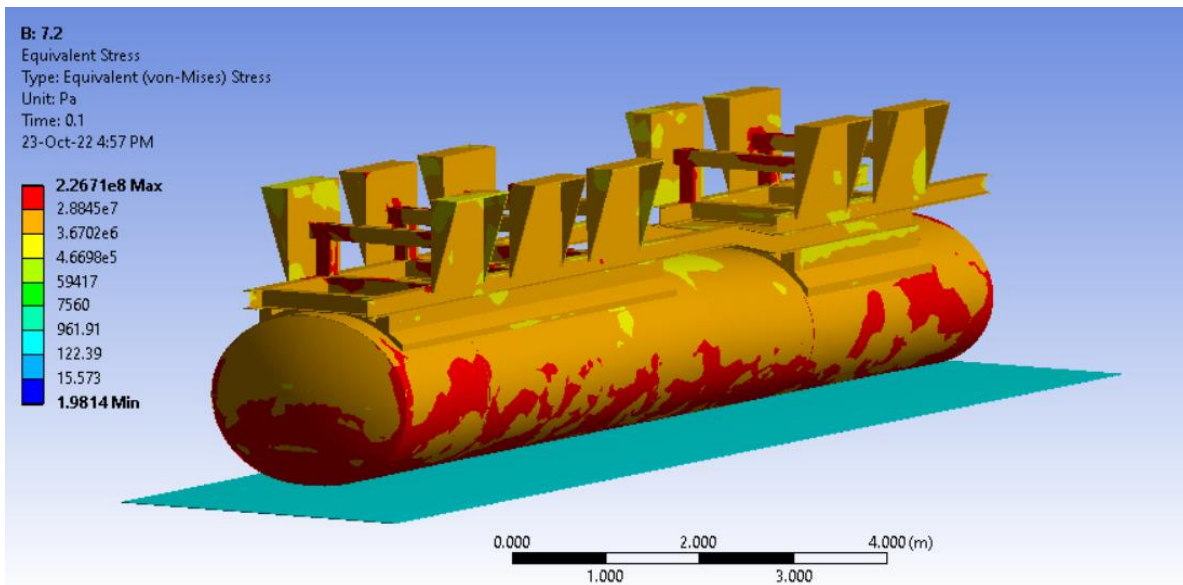
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

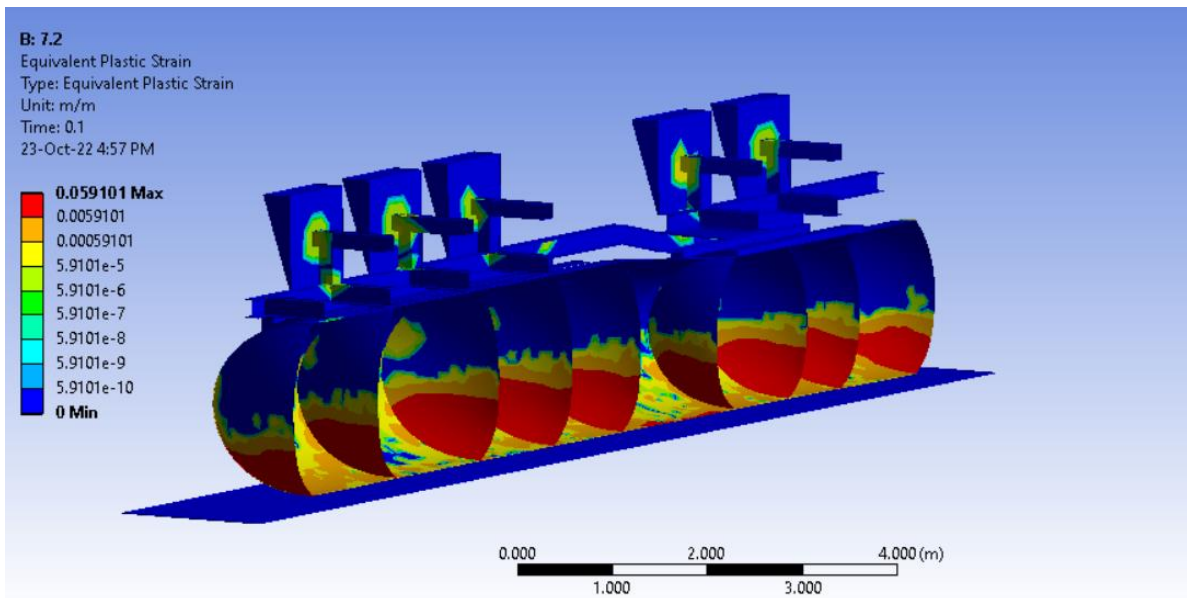
-Όριο θραύσης: 270 MPa



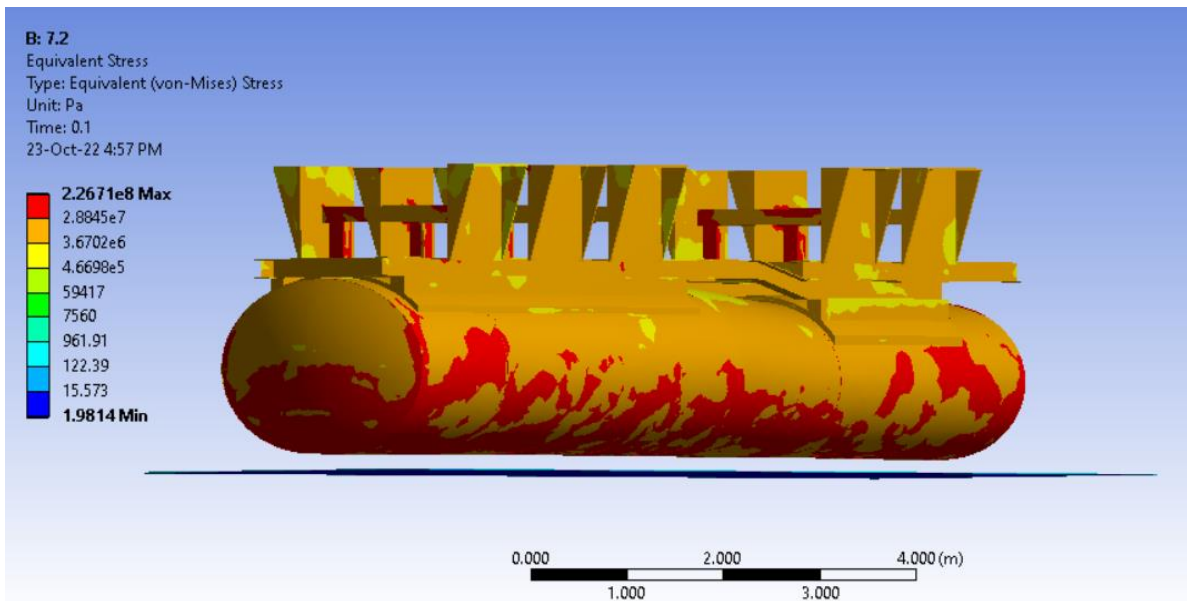
Εικόνα 168: 7.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



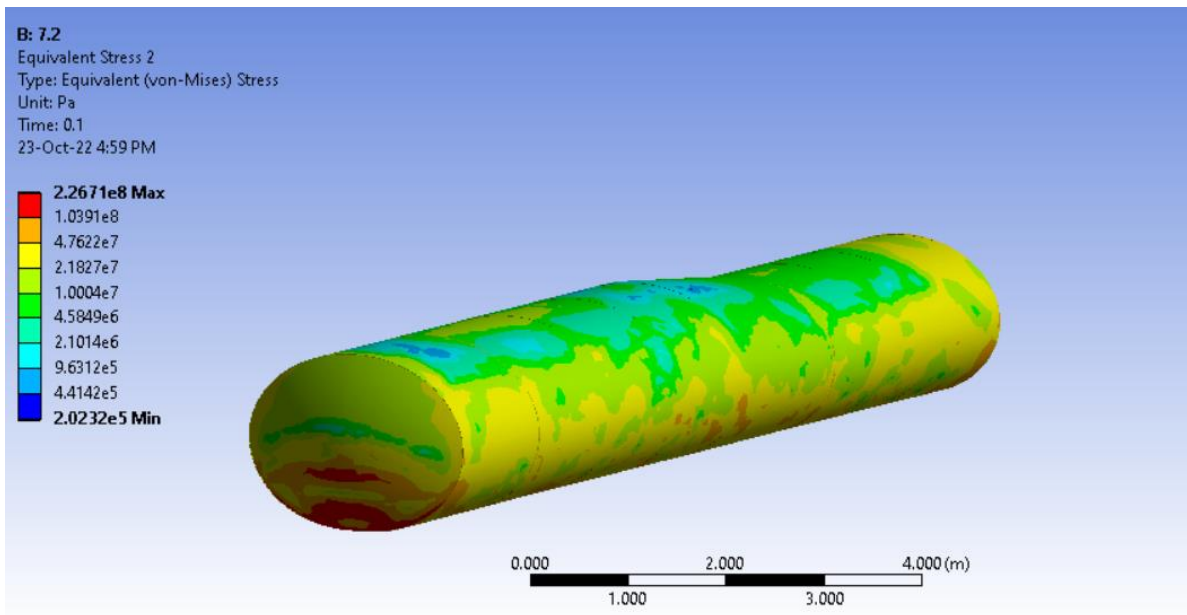
Εικόνα 169: 7.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



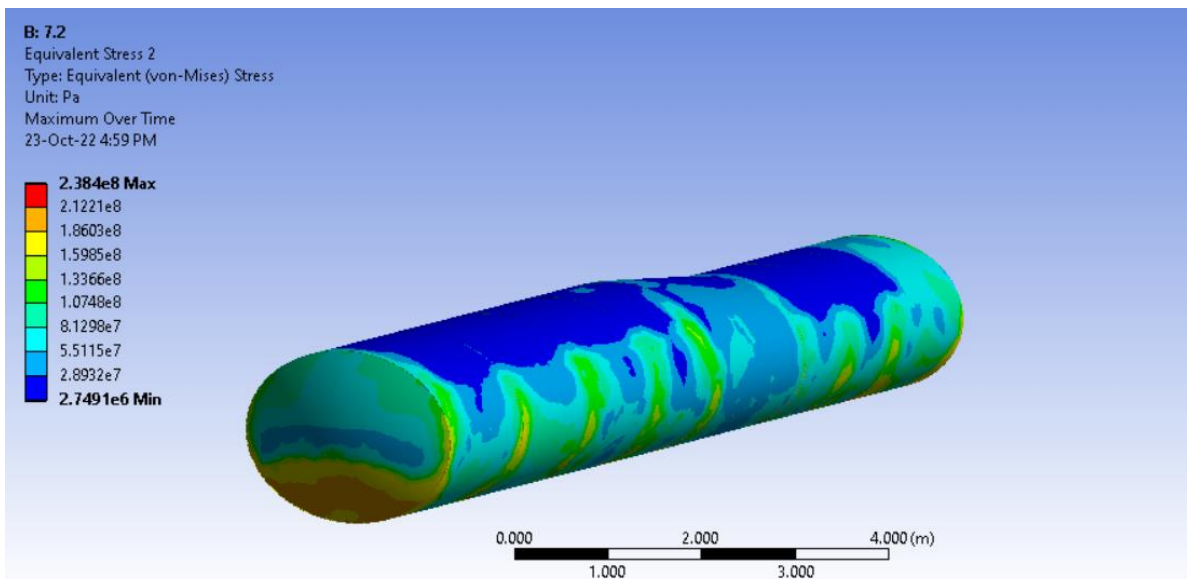
Εικόνα 170: 7.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



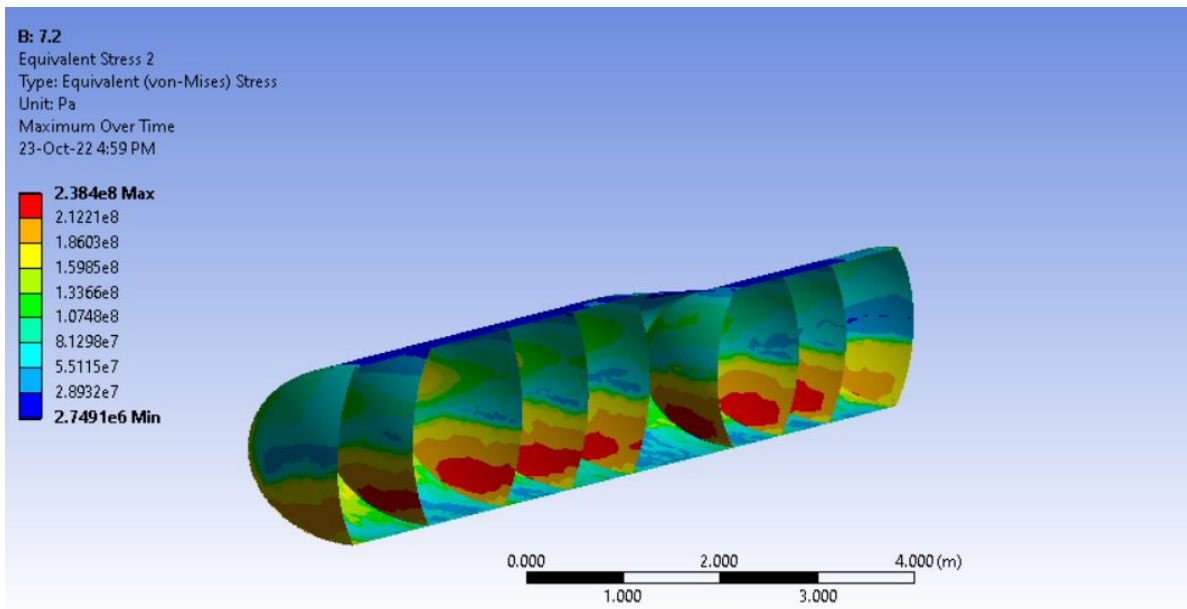
Εικόνα 171: 7.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



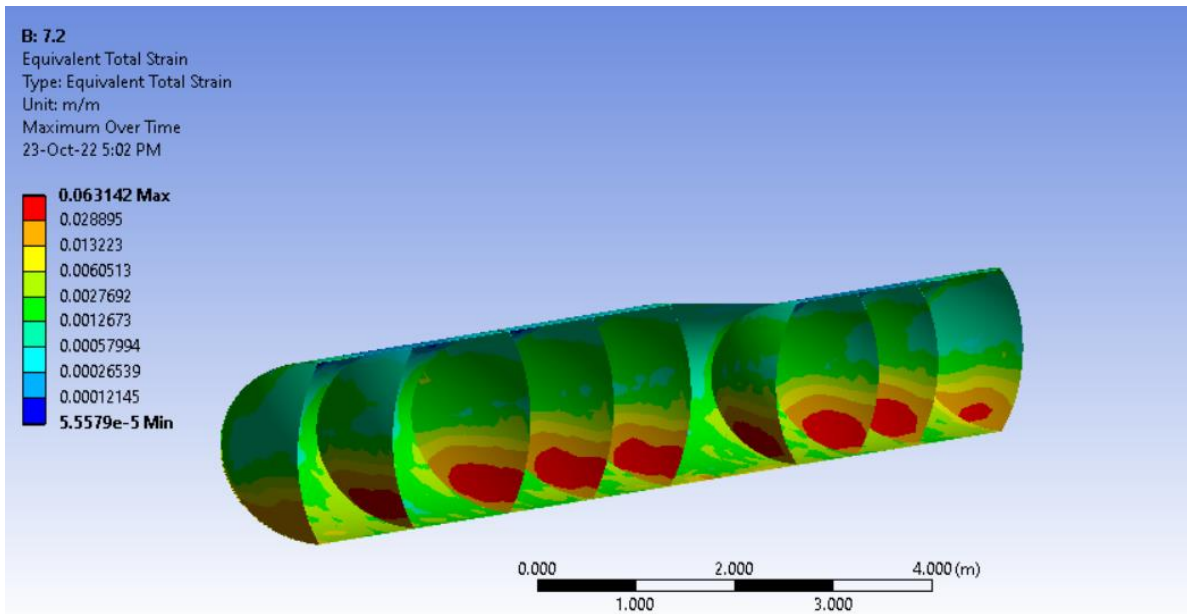
Εικόνα 172: 7.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



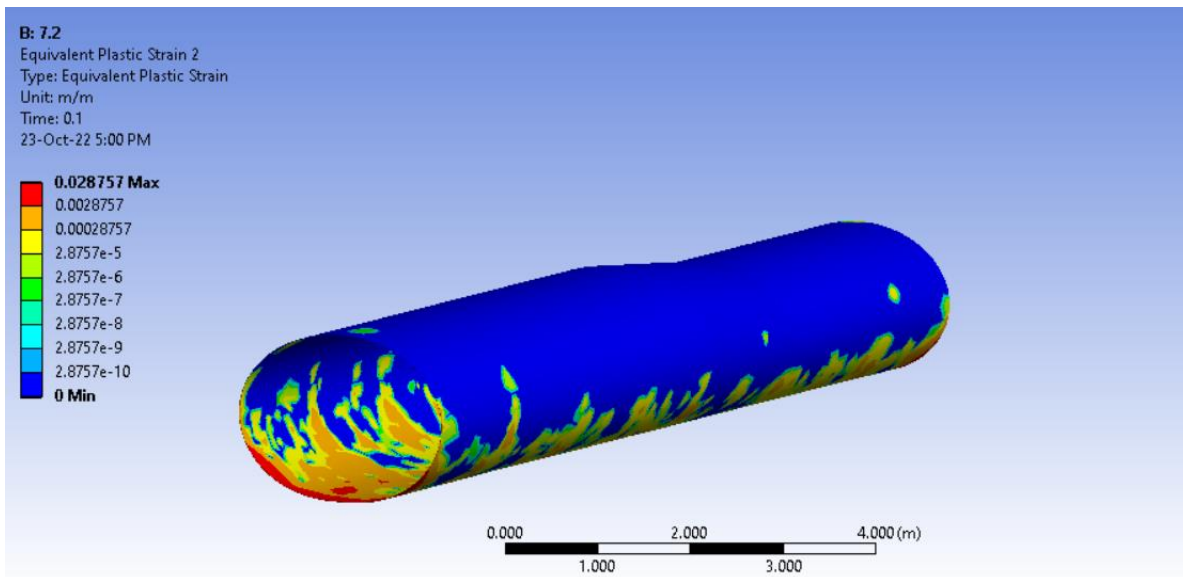
Εικόνα 173: 7.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



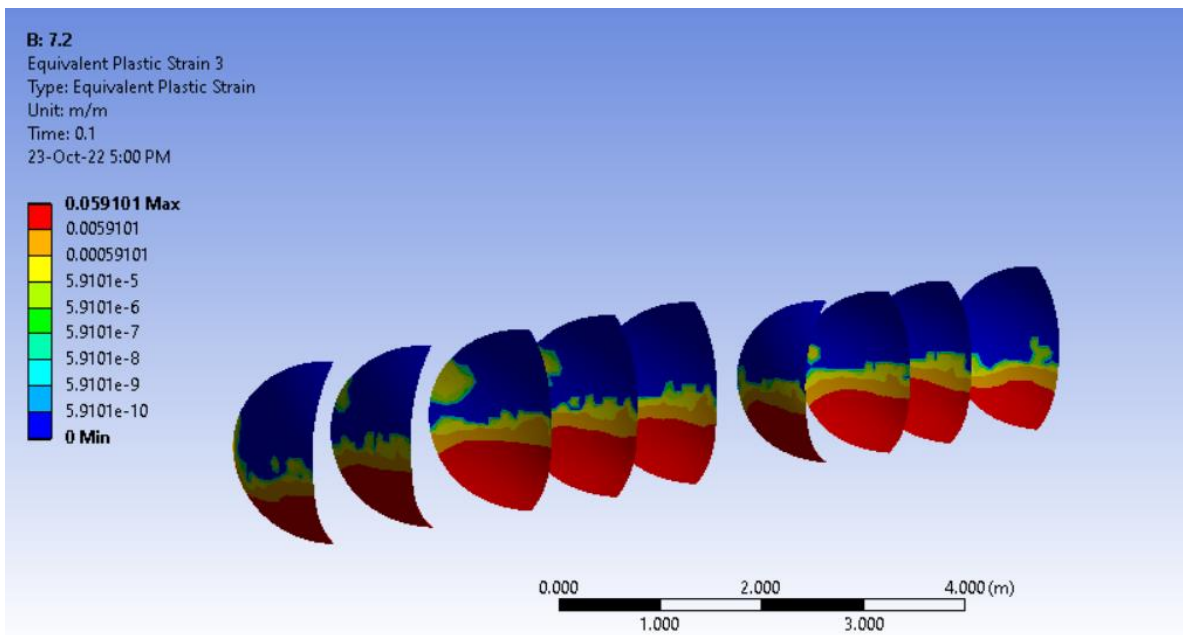
Εικόνα 174: 7.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 175: 7.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 176: 7.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 177: 7.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.9 Μοντέλο 8 (Ελλειπτική Διατομή – Αλουμίνιο – Διπλή Κόλληση)

6.9.1 Ανατροπή 90 μοιρών (8.1)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $6 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $8 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 3h 12m

Υλικό σασί: Ανοξείδωτος Χάλυβας

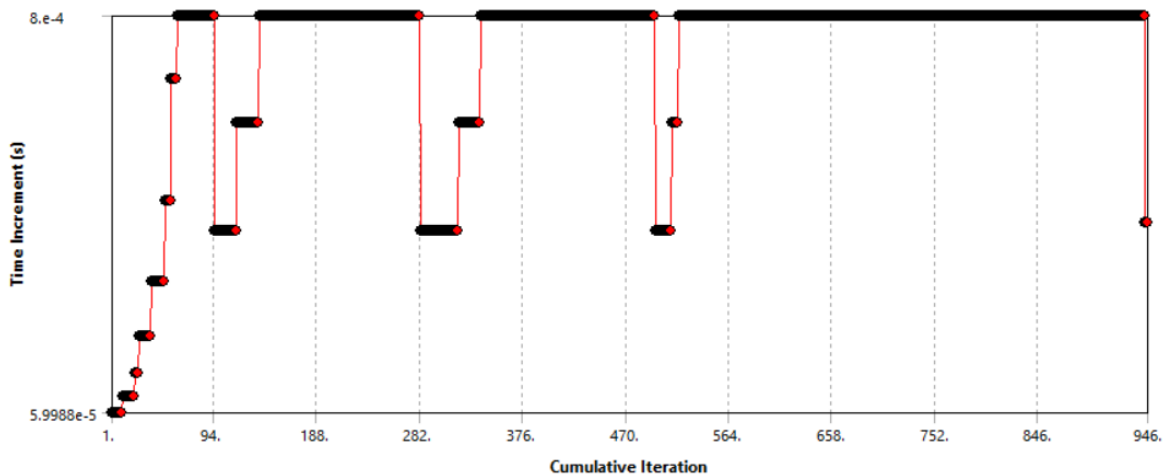
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

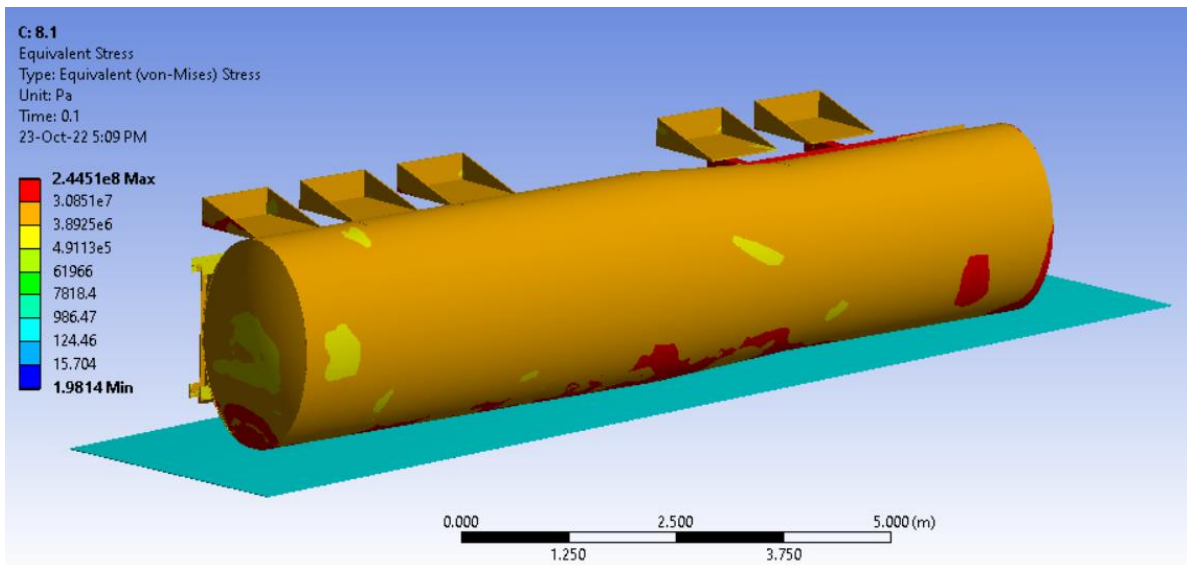
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

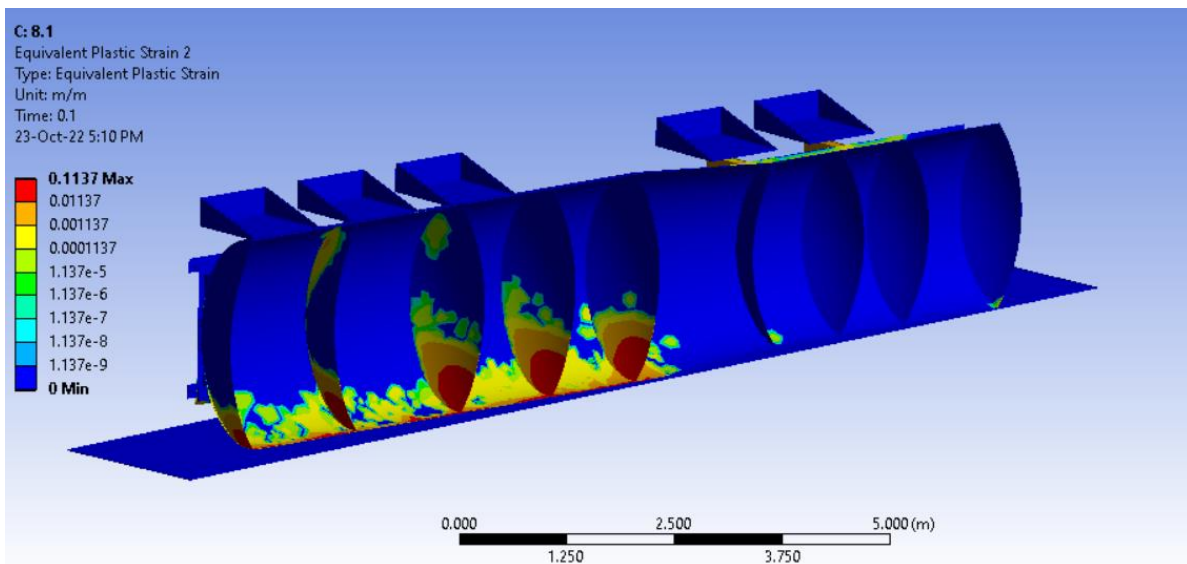
-Όριο θραύσης: 270 MPa



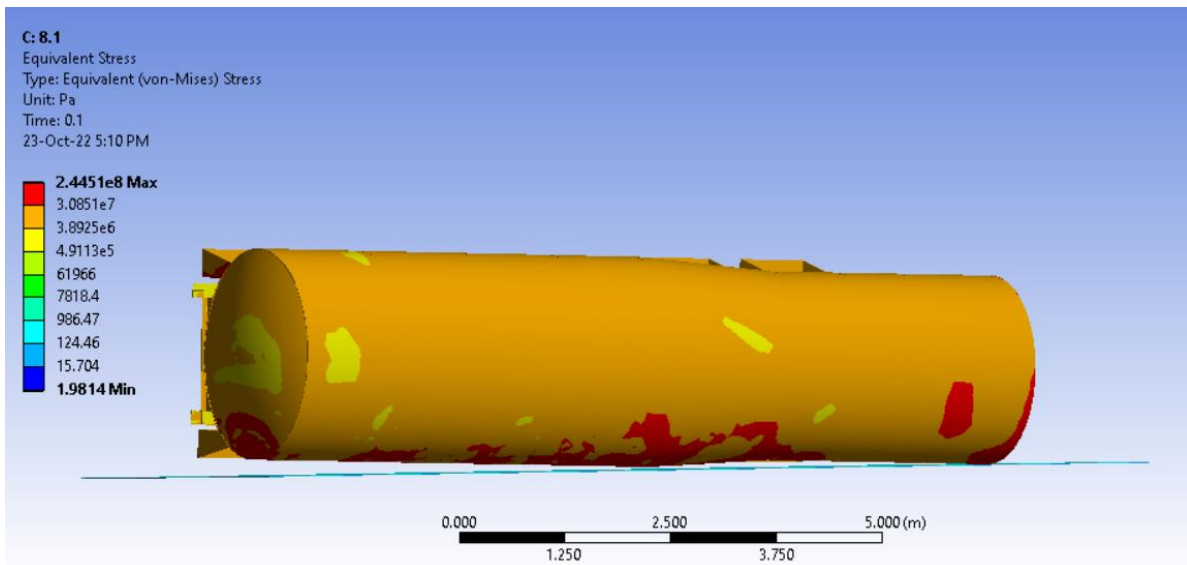
Εικόνα 178: 8.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



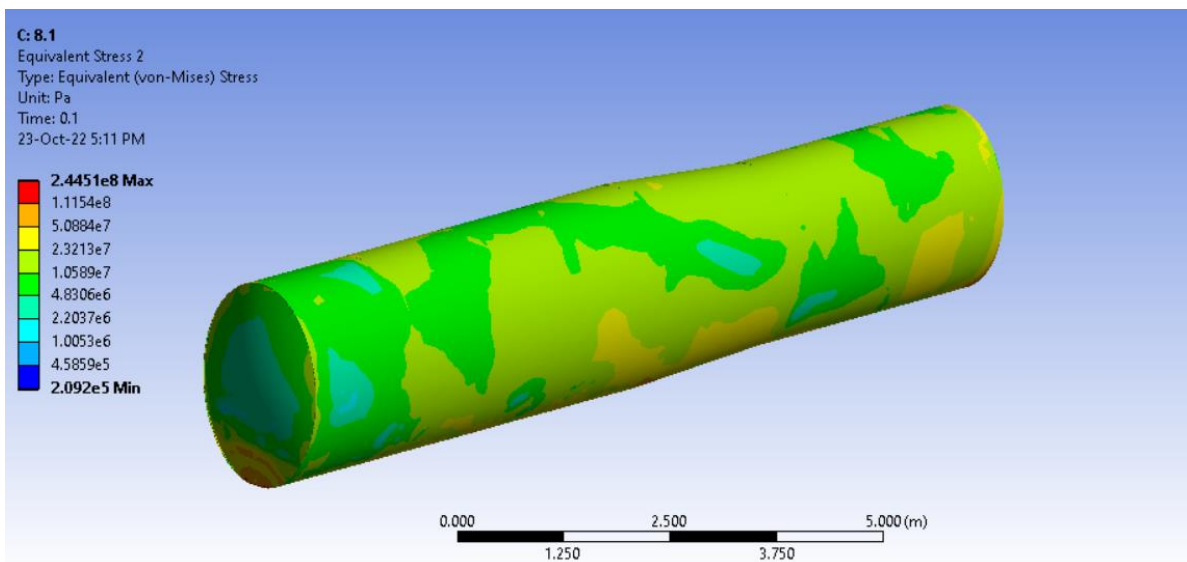
Εικόνα 179: 8.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



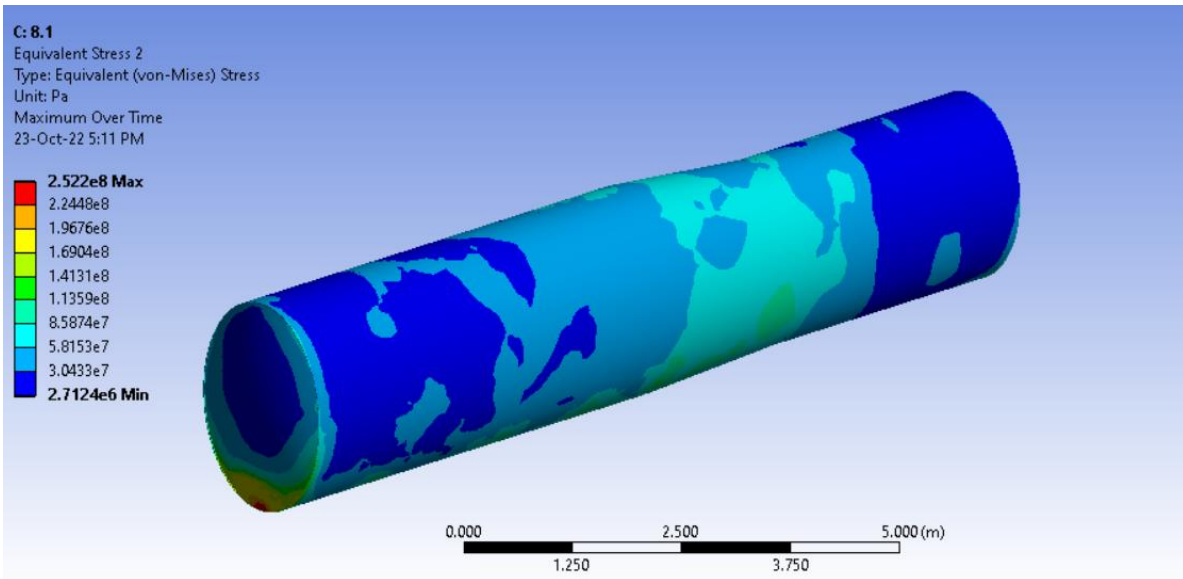
Εικόνα 180: 8.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



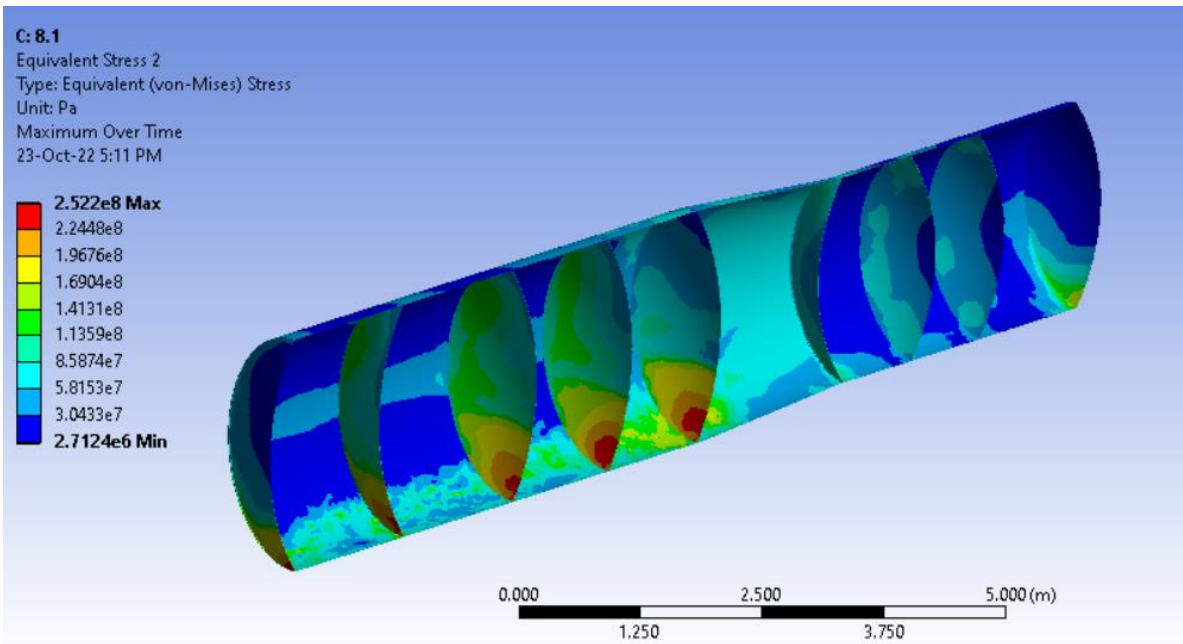
Εικόνα 181: 8.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



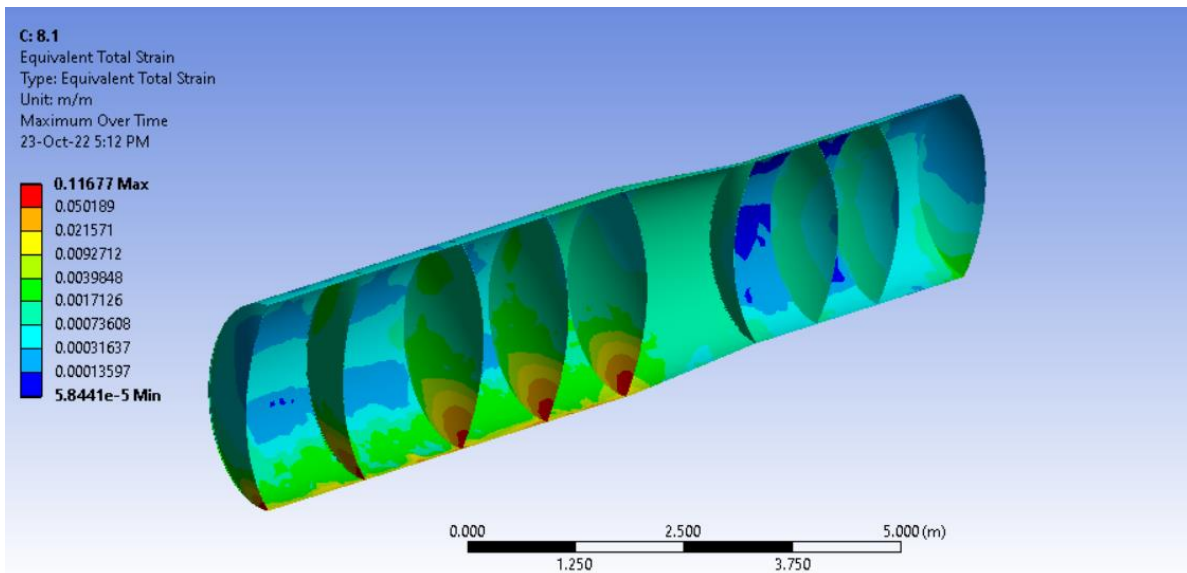
Εικόνα 182: 8.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



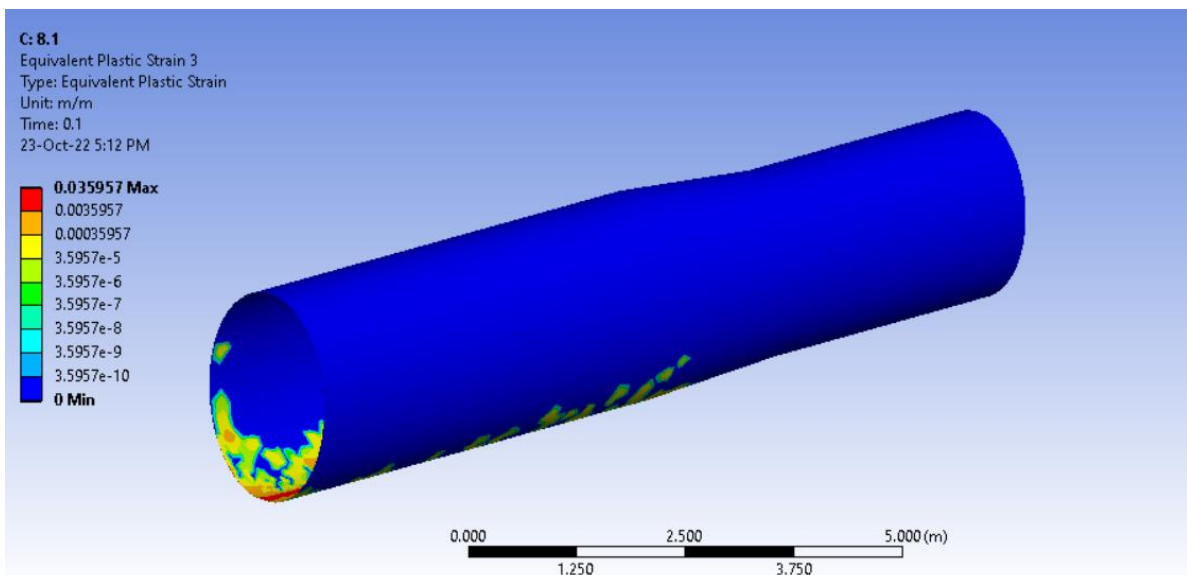
Εικόνα 183: 8.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



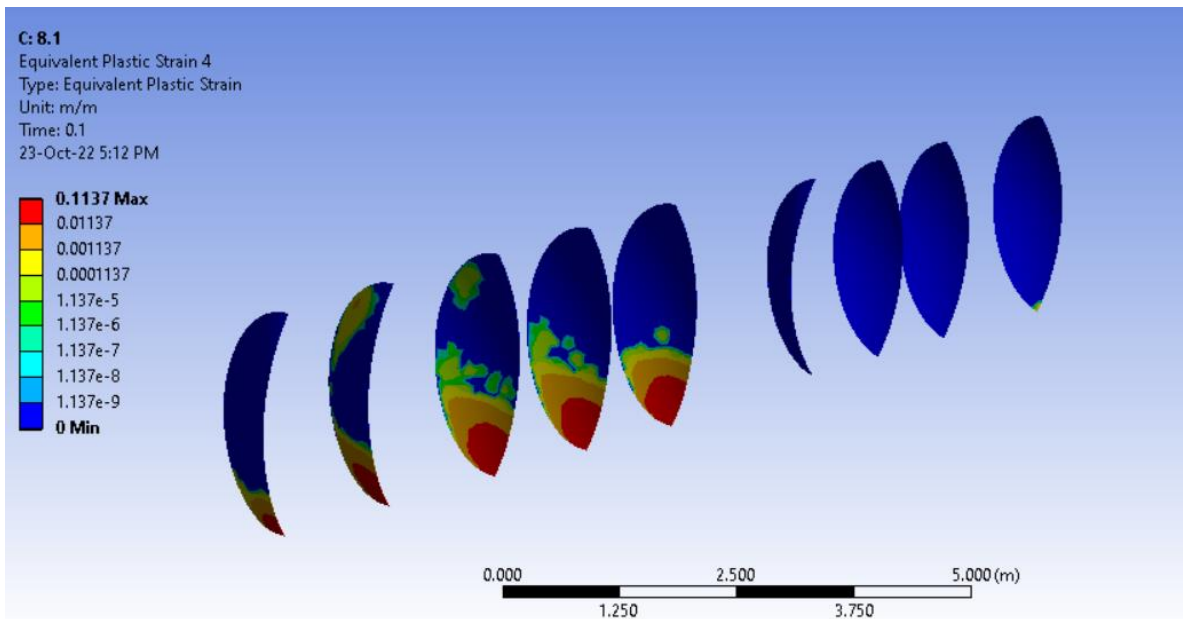
Εικόνα 184: 8.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 185: 8.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



Εικόνα 186: 8.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης



Εικόνα 187: 8.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

6.9.2 Ανατροπή 180 μοιρών (8.2)

Διαφοροποιήσεις πλέγματος σε σχέση με τις ρυθμίσεις: Καμμία

Διάρκεια χρονικών βημάτων:

-Αρχικό: $5 \cdot 10^{-5}$ s

-Ελάχιστο: $4 \cdot 10^{-5}$ s

-Μέγιστο: $8 \cdot 10^{-4}$ s

Χρόνος επίλυσης: 2h 0m

Υλικό σασί: Ανοξειδωτος Χάλυβας

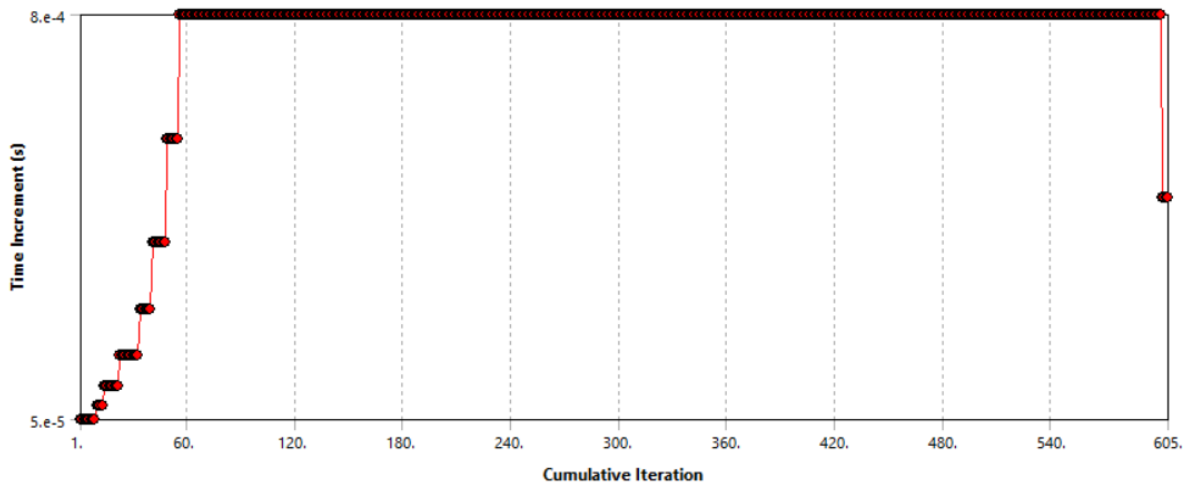
-Όριο πλαστικής περιοχής: 243 MPa

-Όριο θραύσης: 630 MPa

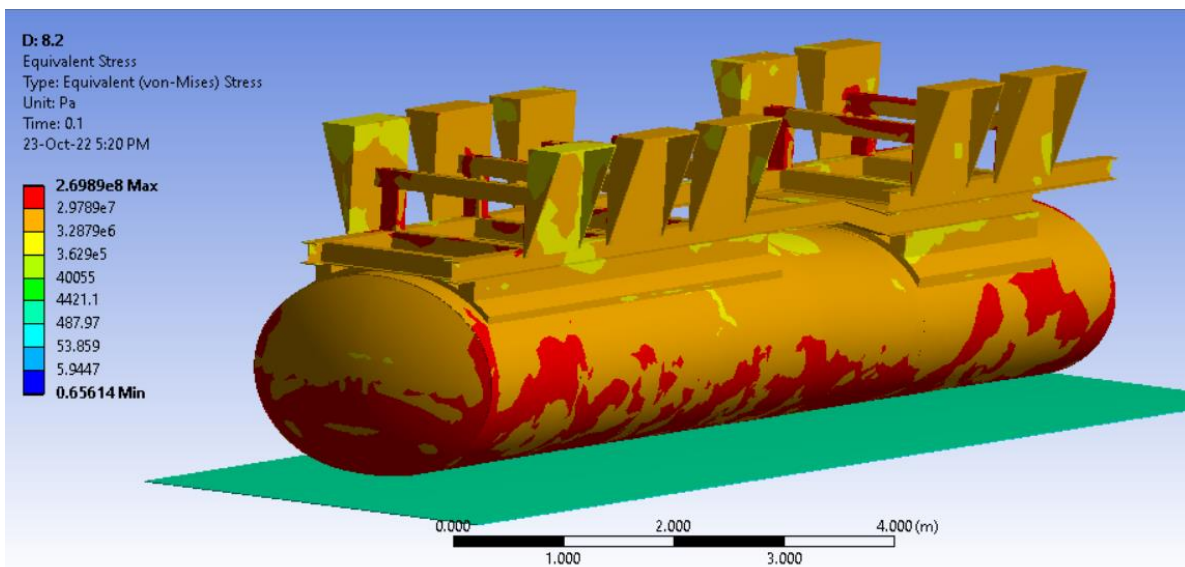
Υλικό δεξαμενής και διαχωριστικών τοιχωμάτων: Κράμα Αλουμινίου

-Όριο πλαστικής περιοχής: 200 MPa

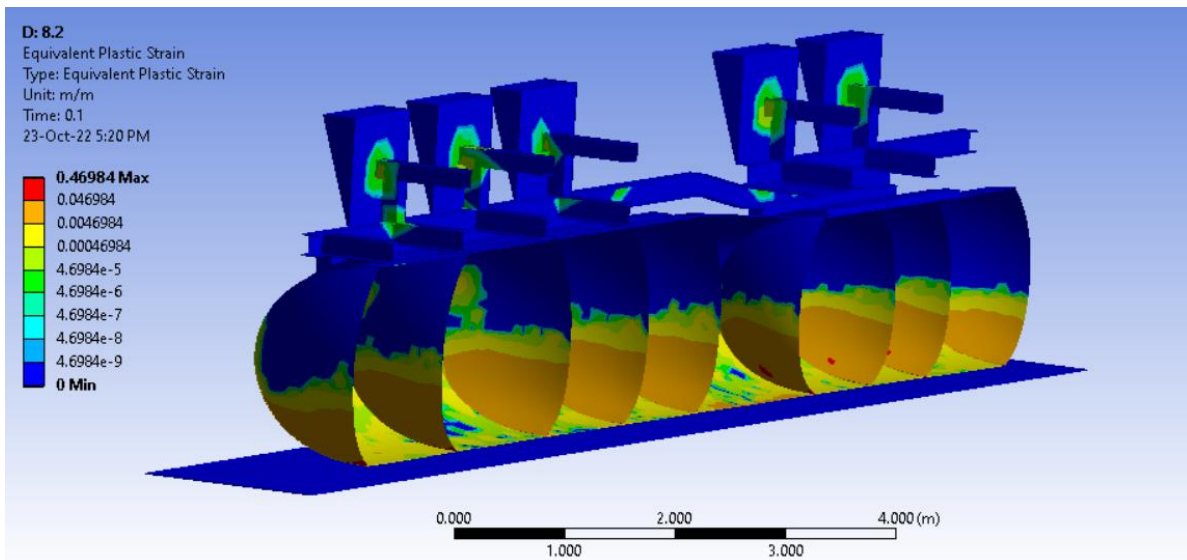
-Όριο θραύσης: 270 MPa



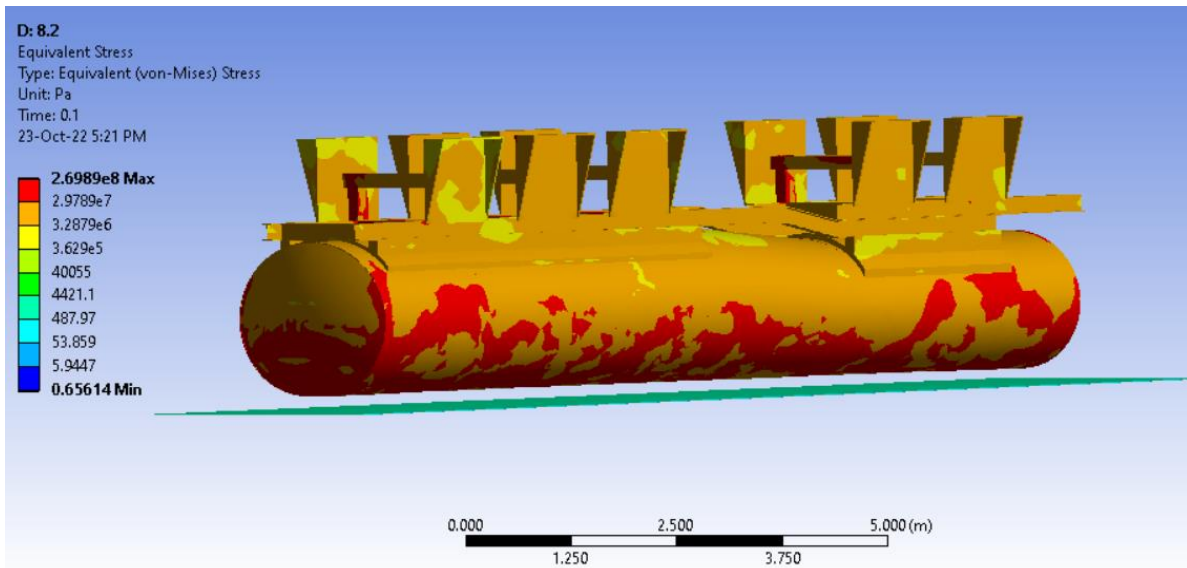
Εικόνα 188: 8.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση



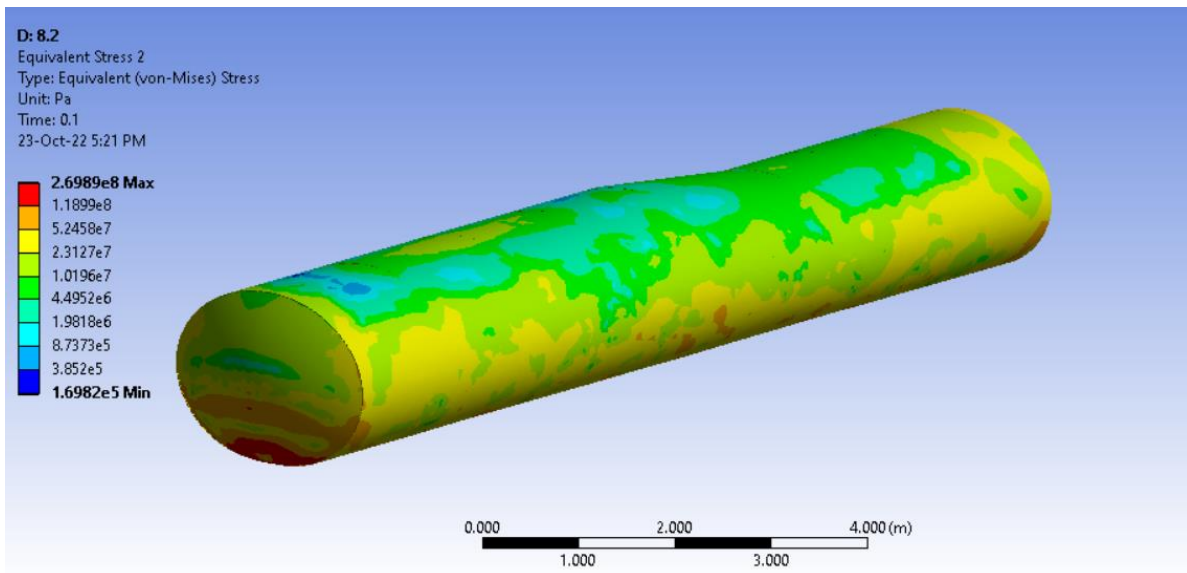
Εικόνα 189: 8.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



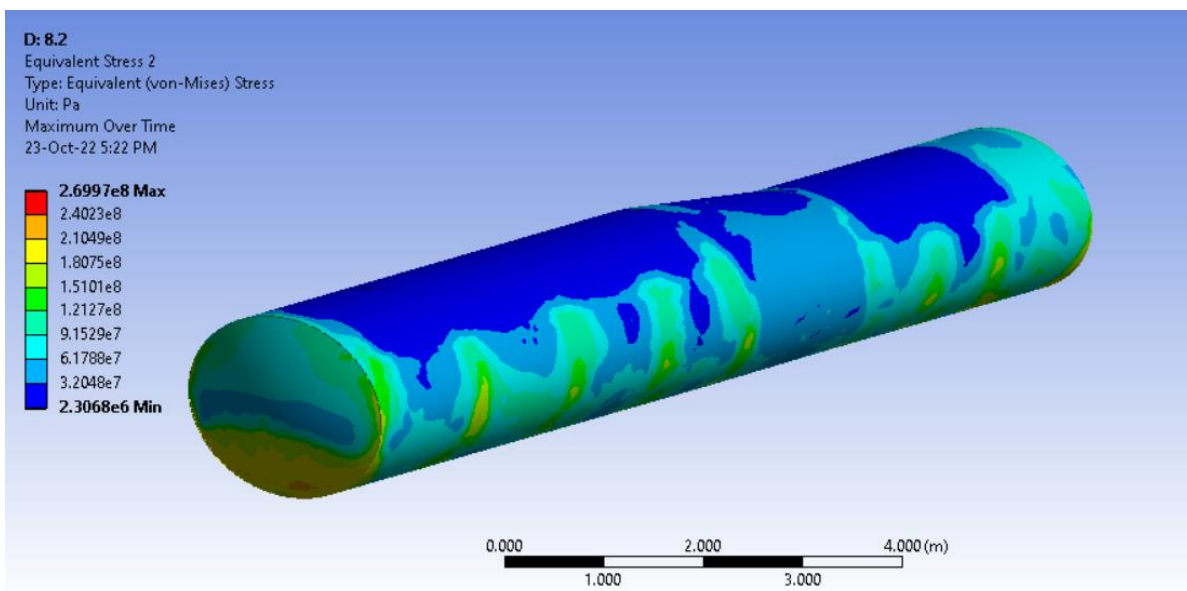
Εικόνα 190: 8.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης



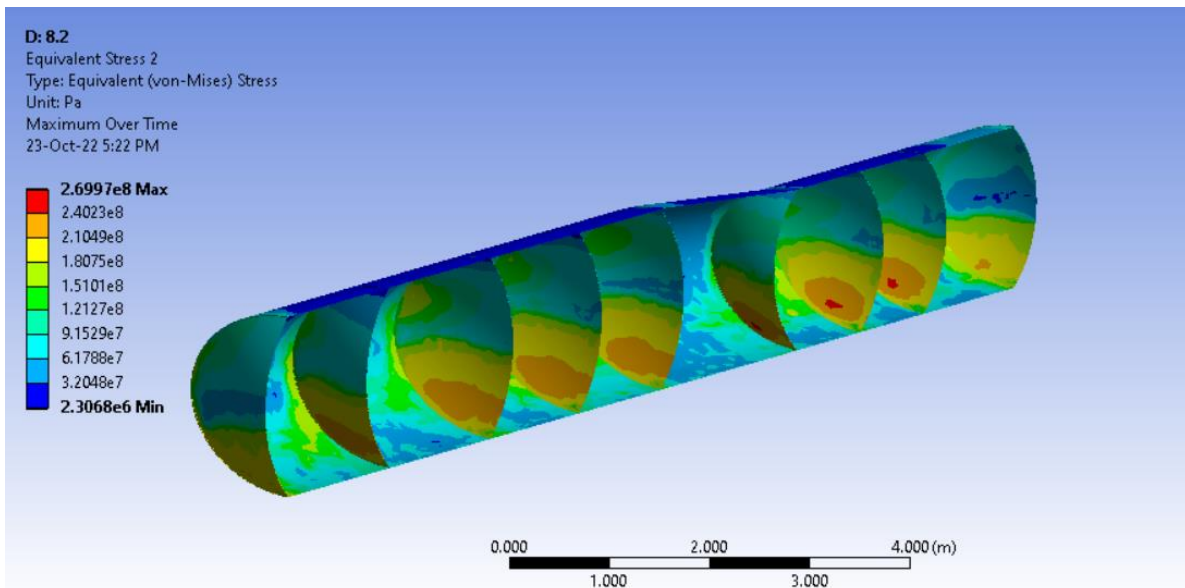
Εικόνα 191: 8.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης



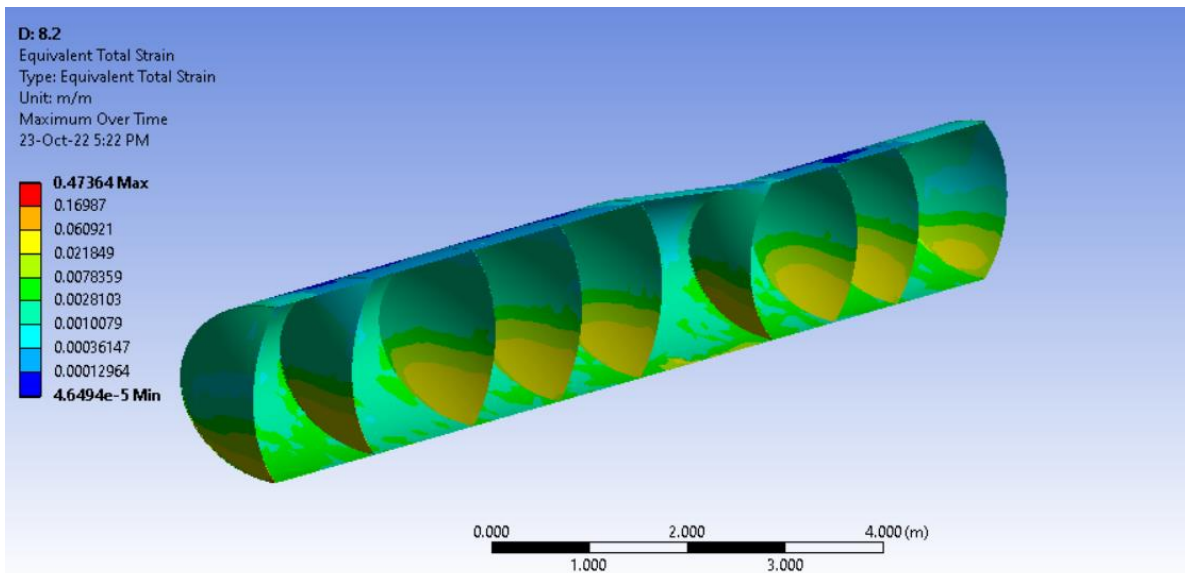
Εικόνα 192: 8.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης



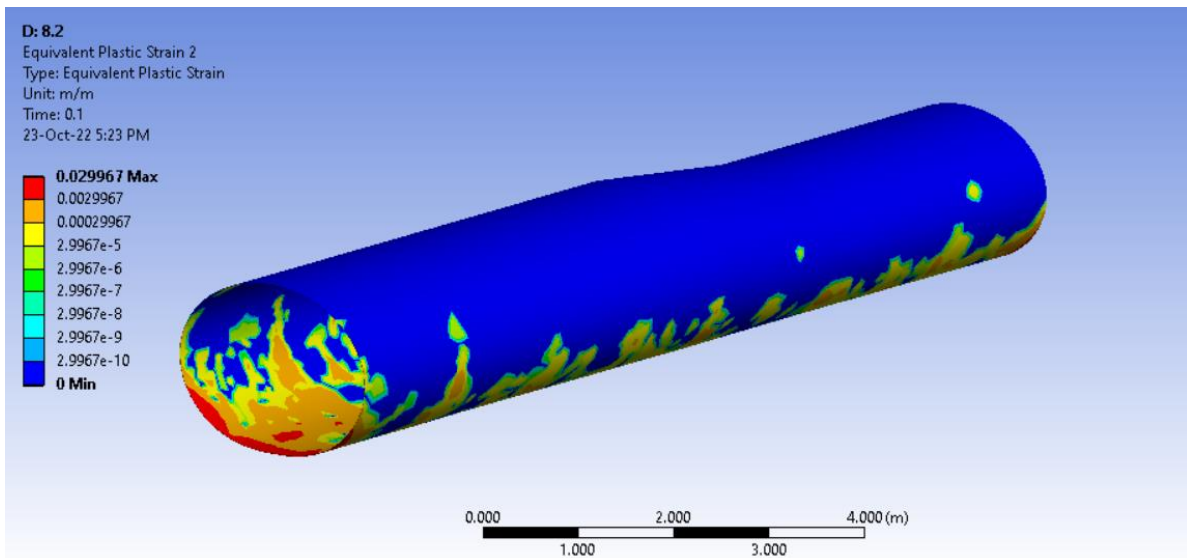
Εικόνα 193: 8.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών



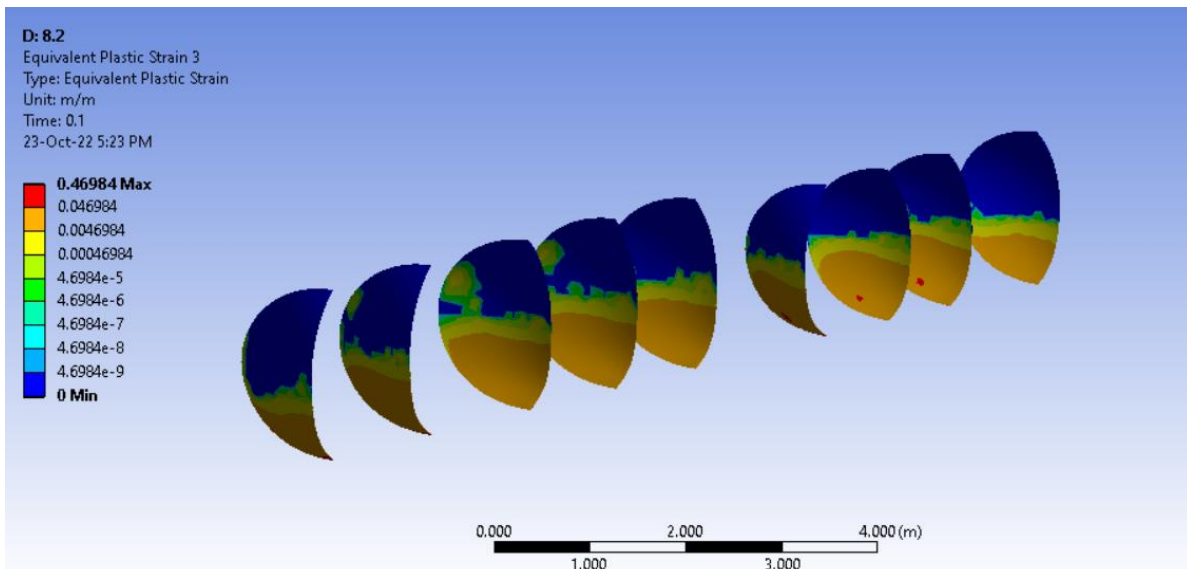
Εικόνα 194: 8.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή



Εικόνα 195: 8.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών

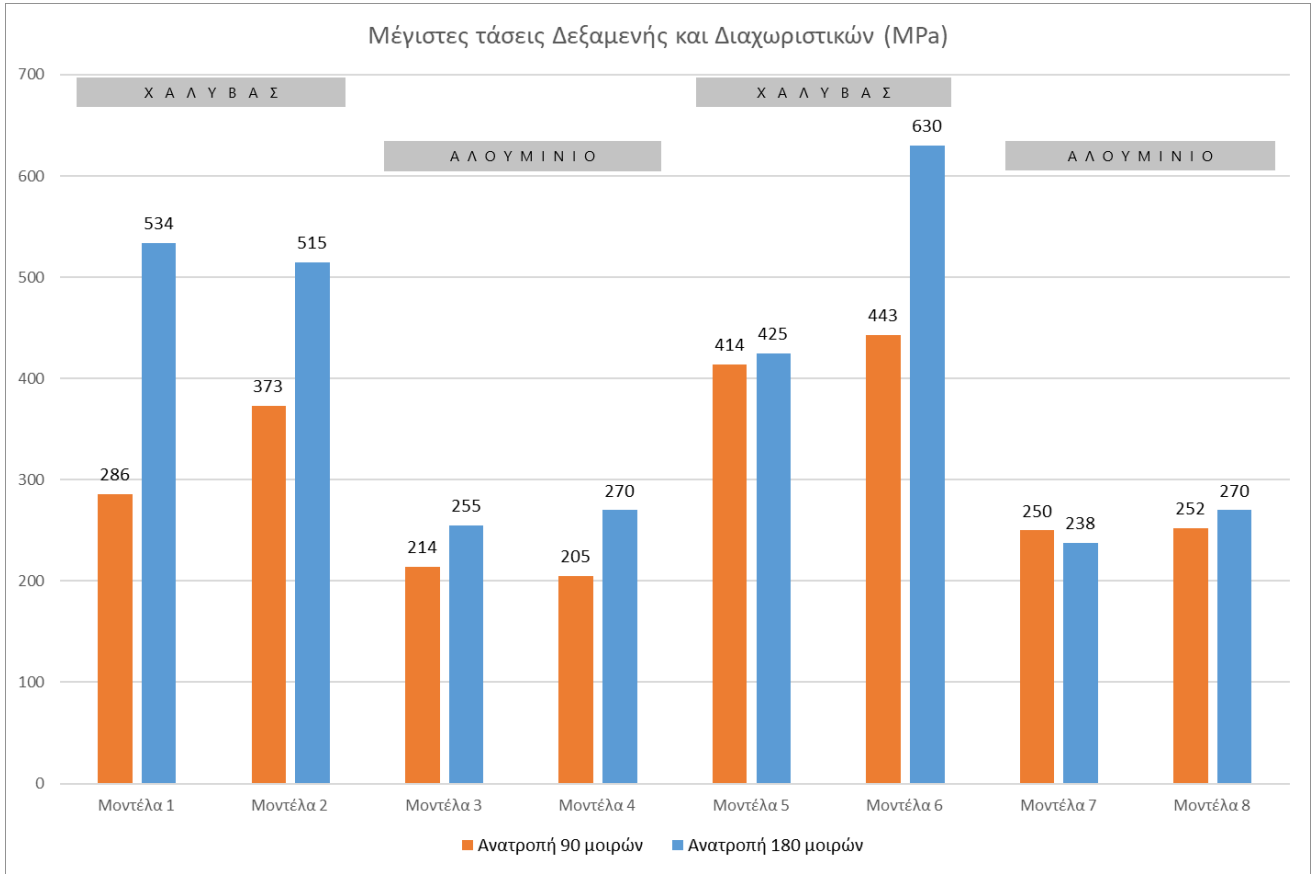


Εικόνα 196: 8.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης

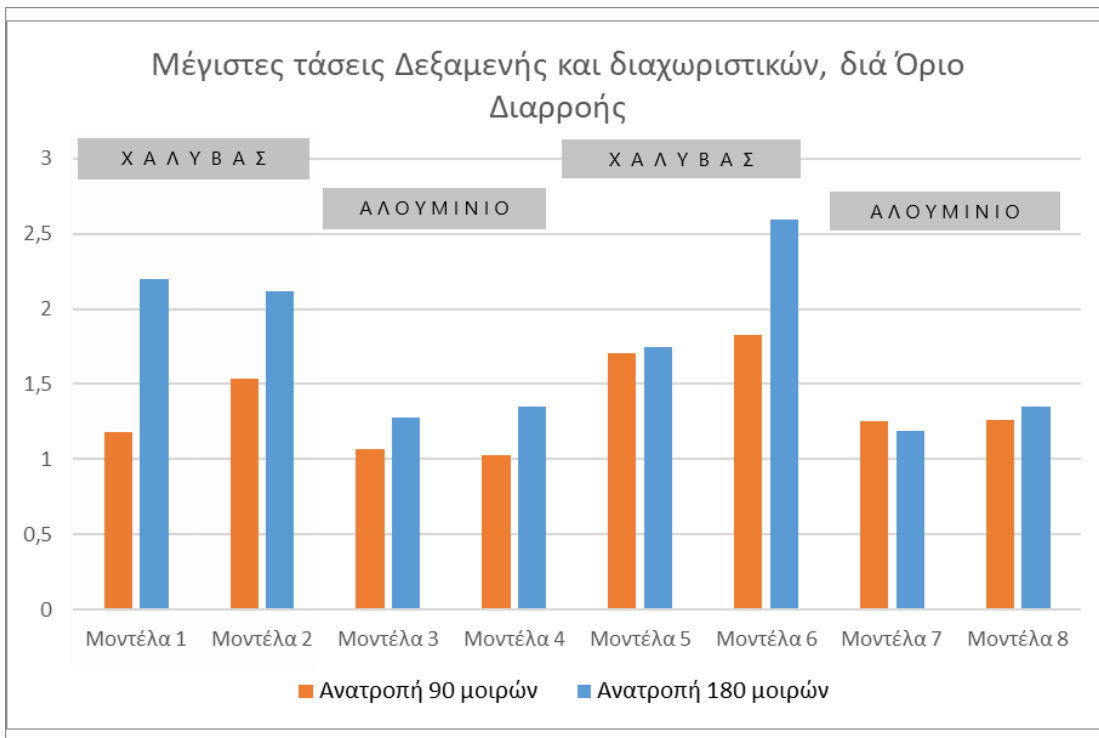


Εικόνα 197: 8.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης

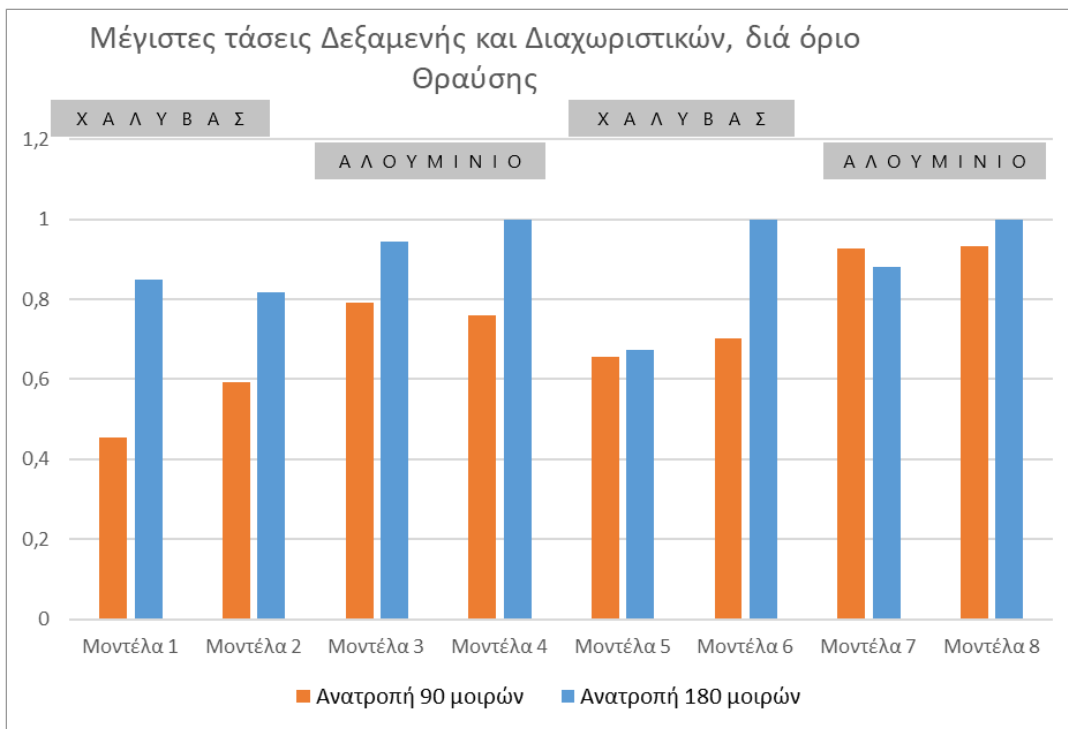
6.10 Σύγκριση Αποτελεσμάτων



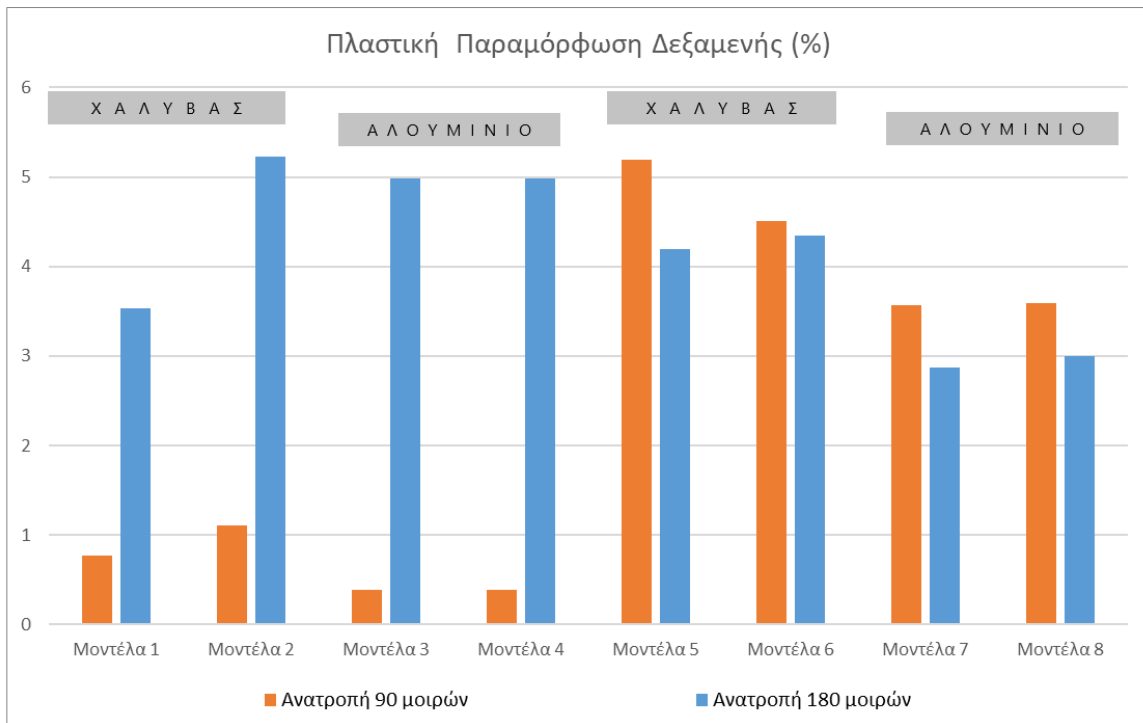
Διάγραμμα 2: Μέγιστες Τάσεις Δεξαμενής και Διαχωριστικών



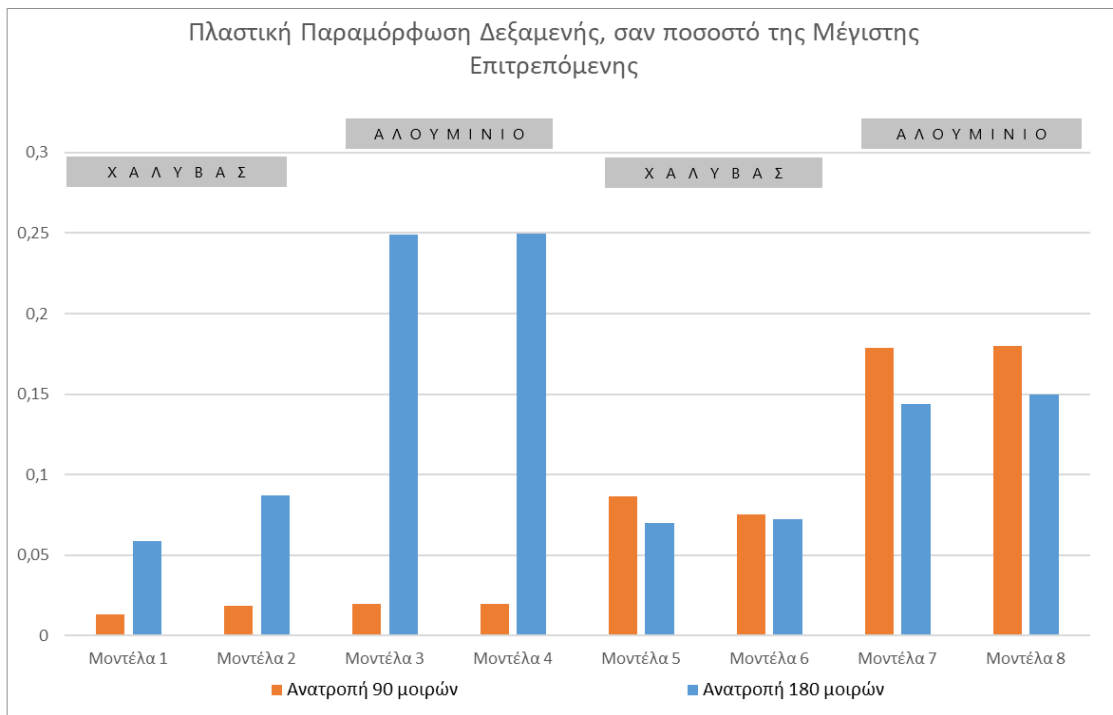
Διάγραμμα 3: Μέγιστες Τάσεις Δεξαμενής και διαχωριστικών διά Όριο Διαρροής



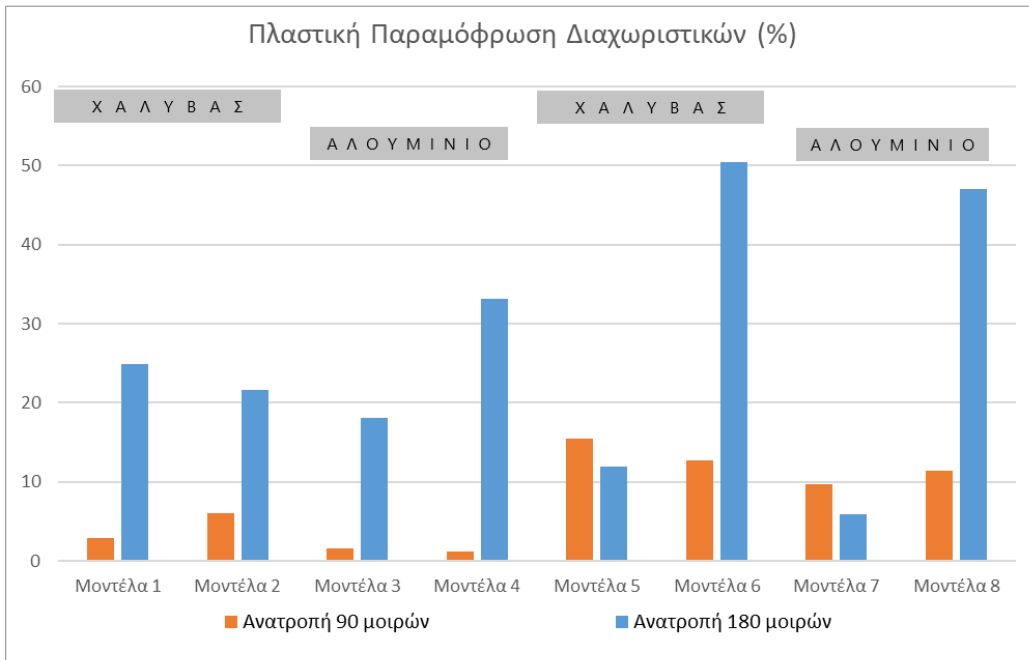
Διάγραμμα 4: Μέγιστες Τάσεις Δεξαμενής και διαχωριστικών δια Όριο Θραύσης



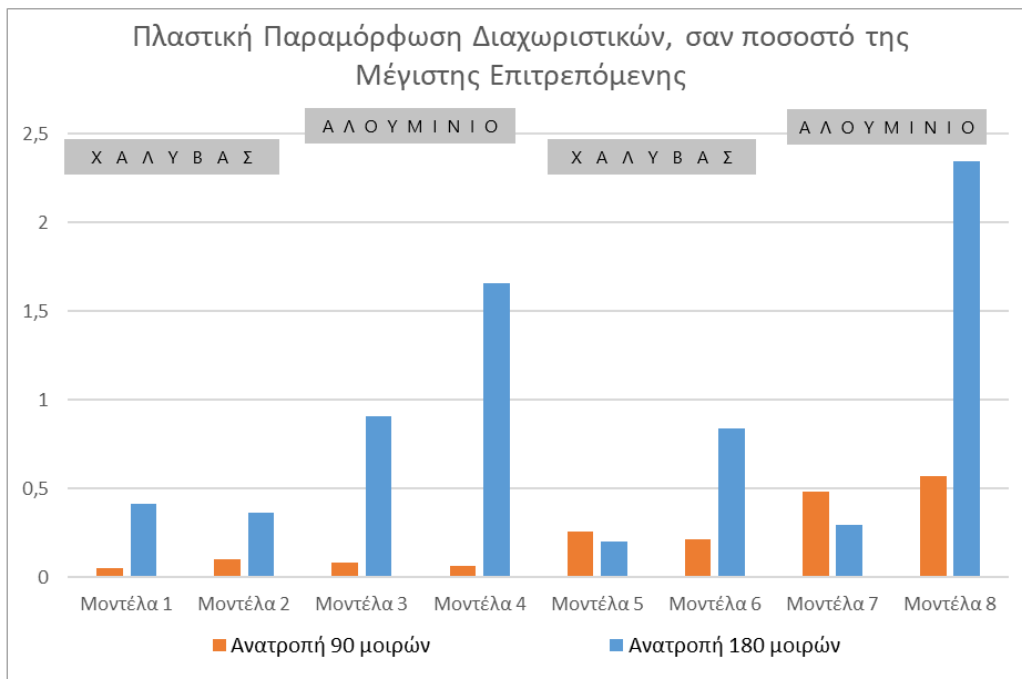
Διάγραμμα 5: Πλαστική Παραμόρφωση Δεξαμενής (%)



Διάγραμμα 6: Πλαστική Παραμόρφωση Δεξαμενής, σαν ποσοστό της Μέγιστης Επιτρεπόμενης

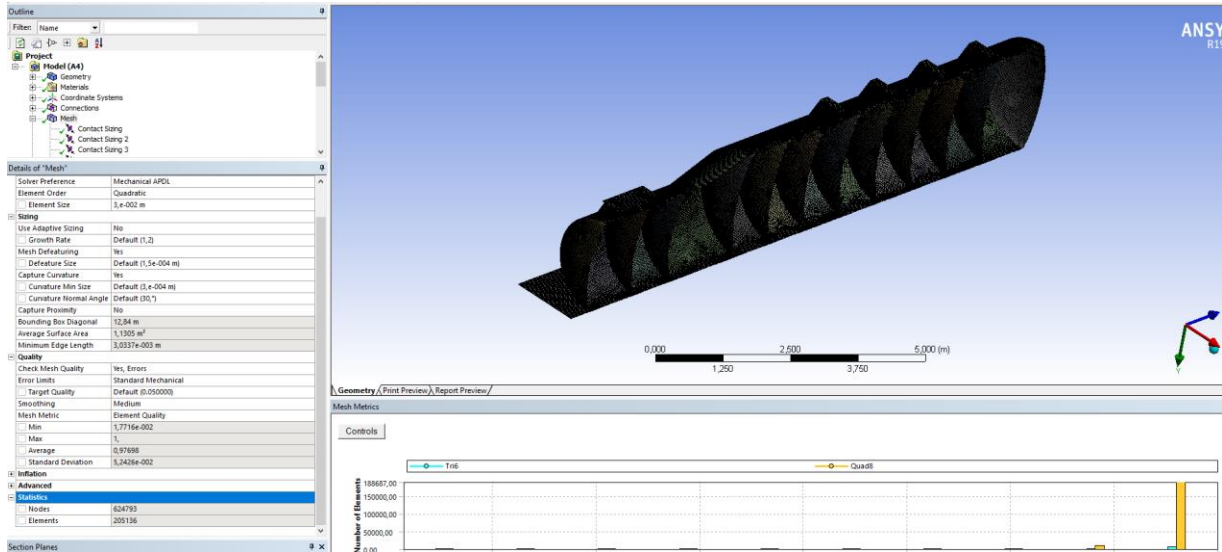


Διάγραμμα 7: Πλαστική Παραμόρφωση Διαχωριστικών (%)



Διάγραμμα 8: Πλαστική Παραμόρφωση Διαχωριστικών, σαν ποσοστό της Μέγιστης Επιτρεπόμενης

Τα αποτελέσματα ενός από τα μοντέλα μας (3.2) συγκρίθηκε με αυτά ενός ιδανικού-πρότυπου μοντέλου, σχεδιασμού του Εργαστηρίου Οχημάτων της Σχολής μας, συνολικού μήκους 12m, 11διαμερισμάτων με υλικό αλουμινίου 5mm πάχους, το οποίο πληρεί τις προδιαγραφές του ΕΛΟΤ και το οποίο έχει Element quality 94% και Aspect Ratio 1,9. Το πρότυπο μοντέλο και οι τιμές τους παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 198 Πρότυπο μοντέλο

Μοντέλα	Πρότυπο	3.2 (χωρίς σασί)
Equivalent Stress max over time [MPa]	207	247
Equivalent Total Strain [%]	9	8.3
Equivalent Plastic Strain end time [%]	9	8
Equivalent Plastic Strain διαχωριστικών end time [%]	9	8

Πίνακας 3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Πρότυπου μοντέλου - 3.2

7. Επίλογος – Συμπεράσματα

Αρχικά, η επιλογή να προσομοιώσουμε για 1/10 του δευτερολέπτου, βάσει της βιβλιογραφίας, επιβεβαιώθηκε, καθώς όλα τα φαινόμενα ολοκληρώθηκαν μέχρι το σημείο της μέγιστης καταπόνησης των δεξαμενών σε όλα τα σενάρια μας. Δεν ισχύει το ίδιο, για τα χρονικά βήματα που επιλέξαμε να ορίσουμε στον επιλύτη σε κάποια από τα σενάρια, όπου υπήρχαν αρκετές "χαμένες" επαναλήψεις (Bisections). Για γρηγορότερη λουπόν, σύγκλιση των κριτηρίων και τελικά γρηγορότερη επίλυση, (στην παρούσα όλα τα τελικά τρεξίματα πήραν περί τις 185 ώρες) κάποια επόμενη αντίστοιχη μελέτη προτείνεται στα σενάρια όπου υπήρχαν πολλαπλά Bisections να γίνει με μικρότερα μέγιστα όρια χρονικών βημάτων. Ακόμα, τα μοντέλα κυκλικής διατομής, όπου είχαν μεγαλύτερο όγκο από αυτά της ελλειπτικής και άρα περισσότερους κόμβους στο mesh, επιλύθηκαν με επαναληπτικό επιλύτη, λόγω περιορισμένης μνήμης ram του συστήματος, όμως ένα άλλο σύστημα χωρίς αυτό τον περιορισμό, θα μπορέσει να επιλύσει γρηγορότερα τα σενάρια αυτά επιλέγοντας Direct επιλύτη.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, διαπιστώνεται γενικότερα, ότι τα μοντέλα ελλειπτικής διατομής δεξαμενής ήταν περισσότερο ευεπίφορα σε θραύση και μάλιστα, στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτά με υλικό αλουμινίου, κάτι το οποίο συμφωνεί με την διαθέσιμη βιβλιογραφία. Δυσμενέστερο σενάριο ήταν, αυτό της ανατροπής 180°, καθώς στις ανατροπές 90° το σασί πολλές φορές απορρόφησε αξιόλογης τάξης φορτία, προστατεύοντας έτσι την δεξαμενή αλλά και για τον προφανή λόγο της μεγαλύτερης ταχύτητας πρόσκρουσης στο έδαφος στο σενάριο ανατροπής των 180°.

Ακόμα, διαισθητικά, ίσως αναμενόταν τα μοντέλα με διπλή συγκόλληση να ανταποκριθούν καλύτερα από αυτά με τη μονή, όμως, όπως διαπιστώνεται στα πιο πάνω συγκεντρωτικά διαγράμματα αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις, κάτι το οποίο είναι πολύ ενδιαφέρον. Απ'ό,τι φαίνεται, σε κάποιες περιπτώσεις η διπλή συγκόλληση τελικά "εγκλωβίζει" τη δεξαμενή και τα διαχωριστικά τοιχώματα, κάνοντάς τα πιο άκαμπτα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σε κάποιες περιπτώσεις, μεγαλύτερες παραμορφώσεις της δεξαμενής καθώς παρασύρεται από τα τοιχώματα, ή και θραύση της συγκόλλησης (εμφανίζονται έτσι μεγαλύτερες τάσεις), κάτι το οποίο στην περίπτωση της μονής δεν υφίσταται. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την σημαντικότητα που φαίνεται ότι έχουν τα διαχωριστικά στην απορρόφηση της συνολικής ενέργειας, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιλογή συγκόλλησης είναι ένα πολύ ευαίσθητο ζήτημα που χρίζει περαιτέρω ανάλυσης από μόνο του, όμως με βάση την παρούσα μελέτη η μονή συγκόλληση είναι προτιμητέα.

Η δεξαμενή λοιπόν η οποία είναι λιγότερο ευεπίφορη στην θραύση σε σενاريو ανατροπής έχει χαρακτηριστικά:

- Κυκλική διατομή, υλικό ανοξείδωτου χάλυβα (3mm) και μονή συγκόλληση.

8. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση μεθόδων Explicit και Implicit	41
Πίνακας 2: Παρουσίαση των προς εξέταση μοντέλων	50
Πίνακας 3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Πρότυπου μοντέλου - 3.2	153

9. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Σχηματική αναπαράσταση εκλογής τύπου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	20
Διάγραμμα 2: Μέγιστες Τάσεις Δεξαμενής και Διαχωριστικών	149
Διάγραμμα 3: Μέγιστες Τάσεις Δεξαμενής και διαχωριστικών διά Όριο Διαρροής	150
Διάγραμμα 4: Μέγιστες Τάσεις Δεξαμενής και διαχωριστικών διά Όριο Θραύσης.....	150
Διάγραμμα 5: Πλαστική Παραμόρφωση Δεξαμενής (%).....	151
Διάγραμμα 6: Πλαστική Παραμόρφωση Δεξαμενής, σαν ποσοστό της Μέγιστης Επιτρεπόμενης	151
Διάγραμμα 7: Πλαστική Παραμόρφωση Διαχωριστικών (%).....	152
Διάγραμμα 8: Πλαστική Παραμόρφωση Διαχωριστικών, σαν ποσοστό της Μέγιστης Επιτρεπόμενης	152

10. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Είδη Βυτιοφόρων 1	12
Εικόνα 2: Είδη Βυτιοφόρων 2	13
Εικόνα 3: Οδική Συμπεριφορά Βυτιοφόρων.....	16
Εικόνα 4: Δύναμη που ασκεί το μεταφερόμενο υγρό στο όχημα, σε συνθήκη στροφής....	17
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση Τριγωνικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης.....	23
Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση Τετραγωνικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης	24
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση Τετραεδρικού Στοιχείου α) 1ης και β) 2ης τάξης.....	25
Εικόνα 9: Σύγκριση αποτελεσμάτων Στοιχείων 1ης και 2ης τάξης.....	27
Εικόνα 10: Παράδειγμα απλοποίησης μοντέλου με αφαίρεση ραδίων	28
Εικόνα 11: "Μέθοδοι" Πλέγματος στο ANSYS Workbench.....	31
Εικόνα 12: Πλέγματα Τετραεδρικών Στοιχείων	32
Εικόνα 13: Πλέγματα Τετραεδρικών και Εξαεδρικών Στοιχείων	33
Εικόνα 14: Πλέγματα με δύο διαφορετικές εφαρμογές της μεθόδου Sweep	34
Εικόνα 15: Πλέγμα Τετραεδρικών Στοιχείων με τη μέθοδο Multizone.....	34
Εικόνα 16: Πλέγμα Τετραεδρικών και Καρτεσιανών Στοιχείων	35
Εικόνα 17: Advanced Size Function-Ρύθμιση off.....	37
Εικόνα 18: Advanced Size Function-Ρύθμιση Curvature	38
Εικόνα 19: Advanced Size Function-Ρύθμιση Proximity	39
Εικόνα 20: Εκλογή τύπου ανάλυσης ανάλογα με τη διάρκεια του φαινομένου	41
Εικόνα 21: Σκαρίφημα γενικών διαστάσεων μοντέλων κυκλικής διατομής	45
Εικόνα 22: Σκαρίφημα γενικών διαστάσεων μοντέλων ελλειπτικής διατομής	47
Εικόνα 23: Μονή συγκόλληση διαχωριστικού διαμερισμάτων	49
Εικόνα 24: Διπλή συγκόλληση διαχωριστικού διαμερισμάτων	49
Εικόνα 25: Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένου Ωστενιτικού Χάλυβα	51
Εικόνα 26: Καμπύλη Τάσης - Παραμόρφωσης πλαστικής περιοχής επιλεγμένου Ωστενιτικού Χάλυβα	51
Εικόνα 27: Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένου κράματος Αλουμινίου	52
Εικόνα 28: Καμπύλη Τάσης - Παραμόρφωσης πλαστικής περιοχής επιλεγμένου κράματος Αλουμινίου	52
Εικόνα 29: Μοντέλο στο χώρο του ANSYS Workbench	53
Εικόνα 30: Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων των μοντέλων	54
Εικόνα 31: Μορφή του πλέγματος για τα μοντέλα με ανατροπή 90 μοιρών	55
Εικόνα 32: Μορφή του πλέγματος για τα μοντέλα με ανατροπή 180 μοιρών	55
Εικόνα 33: Ακμές στις οποίες επιβλήθηκε η εντολή Refinement - όπου επιβλήθηκε	56
Εικόνα 34: Επιβολή συνθηκών για τα μοντέλα με ανατροπή 90 μοιρών	57
Εικόνα 35: Επιβολή συνθηκών για τα μοντέλα με ανατροπή 180 μοιρών	57
Εικόνα 36: Ρυθμίσεις ανάλυσης για τα μοντέλα με ανατροπή 90 μοιρών	58
Εικόνα 37: Ρυθμίσεις ανάλυσης για τα μοντέλα με ανατροπή 180 μοιρών	59

Εικόνα 38: 1.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	60
Εικόνα 39: 1.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	61
Εικόνα 40: 1.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	61
Εικόνα 41: 1.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	62
Εικόνα 42: 1.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης ...	63
Εικόνα 43: 1.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	63
Εικόνα 44: 1.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	64
Εικόνα 45: 1.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	64
Εικόνα 46: 1.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	65
Εικόνα 47: 1.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	65
Εικόνα 48: 1.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	67
Εικόνα 49: 1.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	67
Εικόνα 50: 1.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	68
Εικόνα 51: 1.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	68
Εικόνα 52: 1.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης ...	69
Εικόνα 53: 1.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	69
Εικόνα 54: 1.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	70
Εικόνα 55: 1.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	70
Εικόνα 56: 1.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	71
Εικόνα 57: 1.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	71
Εικόνα 58: 2.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	72
Εικόνα 59: 2.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	73
Εικόνα 60: 2.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	73
Εικόνα 61: 2.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	74
Εικόνα 62: 2.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης ...	74
Εικόνα 63: 2.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	75
Εικόνα 64: 2.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	75
Εικόνα 65: 2.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	76
Εικόνα 66: 2.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	76
Εικόνα 67: 2.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	77
Εικόνα 68: 2.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	78
Εικόνα 69: 2.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	78
Εικόνα 70: 2.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	79
Εικόνα 71: 2.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	79
Εικόνα 72: 2.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης ...	80
Εικόνα 73: 2.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	80
Εικόνα 74: 2.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	81
Εικόνα 75: 2.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	81

Εικόνα 76: 2.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	82
Εικόνα 77: 2.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	82
Εικόνα 78: 3.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	83
Εικόνα 79: 3.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	84
Εικόνα 80: 3.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	84
Εικόνα 81: 3.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	85
Εικόνα 82: 3.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης ...	85
Εικόνα 83: 3.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	86
Εικόνα 84: 3.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	86
Εικόνα 85: 3.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	87
Εικόνα 86: 3.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	87
Εικόνα 87: 3.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	88
Εικόνα 88: 3.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	89
Εικόνα 89: 3.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	89
Εικόνα 90: 3.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	90
Εικόνα 91: 3.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	90
Εικόνα 92: 3.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης ...	91
Εικόνα 93: 3.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	91
Εικόνα 94: 3.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	92
Εικόνα 95: 3.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	92
Εικόνα 96: 3.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	93
Εικόνα 97: 3.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	93
Εικόνα 98: 4.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	94
Εικόνα 99: 4.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	95
Εικόνα 100: 4.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	95
Εικόνα 101: 4.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	96
Εικόνα 102: 4.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης .	96
Εικόνα 103: 4.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	97
Εικόνα 104: 4.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	97
Εικόνα 105: 4.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών ..	98
Εικόνα 106: 4.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης ..	98
Εικόνα 107: 4.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	99
Εικόνα 108: 4.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	100
Εικόνα 109: 4.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	100
Εικόνα 110: 4.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	101
Εικόνα 111: 4.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	101
Εικόνα 112: 4.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	102

Εικόνα 113: 4.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	102
Εικόνα 114: 4.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή.....	103
Εικόνα 115: 4.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	103
Εικόνα 116: 4.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	104
Εικόνα 117: 4.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	104
Εικόνα 118: 5.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	105
Εικόνα 119: 5.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	106
Εικόνα 120: 5.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	106
Εικόνα 121: 5.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	107
Εικόνα 122: 5.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	107
Εικόνα 123: 5.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	108
Εικόνα 124: 5.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή.....	108
Εικόνα 125: 5.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	109
Εικόνα 126: 5.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	109
Εικόνα 127: 5.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	110
Εικόνα 128: 5.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	111
Εικόνα 129: 5.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	111
Εικόνα 130: 5.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	112
Εικόνα 131: 5.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	112
Εικόνα 132: 5.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	113
Εικόνα 133: 5.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	113
Εικόνα 134: 5.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή.....	114
Εικόνα 135: 5.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	114
Εικόνα 136: 5.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	115
Εικόνα 137: 5.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωση	115
Εικόνα 138: 6.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	116
Εικόνα 139: 6.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	117
Εικόνα 140: 6.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	117
Εικόνα 141: 6.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	118
Εικόνα 142: 6.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	118
Εικόνα 143: 6.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	119
Εικόνα 144: 6.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή.....	119
Εικόνα 145: 6.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	120
Εικόνα 146: 6.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	120
Εικόνα 147: 6.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	121
Εικόνα 148: 6.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	122
Εικόνα 149: 6.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	122

Εικόνα 150: 6.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	123
Εικόνα 151: 6.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	123
Εικόνα 152: 6.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης .	124
Εικόνα 153: 6.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	124
Εικόνα 154: 6.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	125
Εικόνα 155: 6.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	125
Εικόνα 156: 6.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	126
Εικόνα 157: 6.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	126
Εικόνα 158: 7.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	127
Εικόνα 159: 7.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	128
Εικόνα 160: 7.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	128
Εικόνα 161: 7.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	129
Εικόνα 162: 7.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	129
Εικόνα 163: 7.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	130
Εικόνα 164: 7.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	130
Εικόνα 165: 7.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	131
Εικόνα 166: 7.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	131
Εικόνα 167: 7.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	132
Εικόνα 168: 7.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	133
Εικόνα 169: 7.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	133
Εικόνα 170: 7.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	134
Εικόνα 171: 7.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	134
Εικόνα 172: 7.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	135
Εικόνα 173: 7.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	135
Εικόνα 174: 7.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	136
Εικόνα 175: 7.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	136
Εικόνα 176: 7.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	137
Εικόνα 177: 7.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	137
Εικόνα 178: 8.1-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	138
Εικόνα 179: 8.1-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	139
Εικόνα 180: 8.1-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	139
Εικόνα 181: 8.1-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	140
Εικόνα 182: 8.1-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	140
Εικόνα 183: 8.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	141
Εικόνα 184: 8.1-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	141
Εικόνα 185: 8.1-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	142
Εικόνα 186: 8.1-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	142

Εικόνα 187: 8.1-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	143
Εικόνα 188: 8.2-Εξέλιξη των χρονικών βημάτων κατά την επίλυση	144
Εικόνα 189: 8.2-Τάσεις συνολικού μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	144
Εικόνα 190: 8.2-Πλαστική παραμόρφωση κατά το τέλος της προσομοίωσης.....	145
Εικόνα 191: 8.2-Θέση μοντέλου κατά το τέλος της προσομοίωσης	145
Εικόνα 192: 8.2-Τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	146
Εικόνα 193: 8.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών.....	146
Εικόνα 194: 8.2-Μέγιστες τάσεις δεξαμενής και διαχωριστικών-Τομή	147
Εικόνα 195: 8.2-Μέγιστες εκατοστιαίες παραμορφώσεις δεξαμενής και διαχωριστικών	147
Εικόνα 196: 8.2-Πλαστική παραμόρφωση δεξαμενής κατά το τέλος της προσομοίωσης	148
Εικόνα 197: 8.2-Πλαστική παραμόρφωση διαχωριστικών κατά το τέλος της προσομοίωσης	148
Εικόνα 198 Πρότυπο μοντέλο	153

11. Κατάλογος Αναφορών - Βιβλιογραφία

Πρότυπη Μελέτη - Οδηγός:

[1] **Technical Assessment of Petroleum Road Fuel Tankers**,
B Robinson (TRL), D Webb (HSL), J Hobbs (HSL) & T London (TWI), 2014

Για το κεφάλαιο 4:

[2] **Οδική Μεταφορά επικίνδυνων Εμπορευμάτων – Μεταφορές με Βυτία**,
Δημήτριος Γ.Καλυβιτώτης – Κωνσταντίνος Π.Παπαδόπουλος, Ίδρυμα
Ευγενίδου, Αθήνα 1999.

https://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr_e.html

<https://www.en-standard.eu/din-en-14286-aluminium-and-aluminium-alloys-weldable-rolled-products-for-tanks-for-the-storage-and-transportation-of-dangerous-goods/>

*Αποποίηση κάθε είδους ιδιοκτησίας για οποιαδήποτε εικόνα χρησιμοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο. Όλες αντλήθηκαν από [2]

Για το κεφάλαιο 5:

Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών,
Χριστόφορος Γ. Προβατίδης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.

Βελτιστοποίηση και Λογισμικό Κατασκευών: Πεπερασμένα Στοιχεία, Ισογεωμετρικά Στοιχεία, Συνοριακά Στοιχεία, Χριστόφορος Γ. Προβατίδης,
Εκδόσεις Τζιόλα 2017.

5.1

https://wiki.freecadweb.org/FEM_Element_Types

http://fea-cae-engineering.com/fea-cae-engineering/element_types.html

<https://enterfea.com/what-are-the-types-of-elements-used-in-fea/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method

5.2

<https://www.ansys.com/blog/how-to-improve-fea>

<https://www.researchgate.net/publication/24328340> Mesh refinement in finite element analysis by minimization of the stiffness matrix trace

<https://www.comsol.com/multiphysics/mesh-refinement>

5.3

[https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Mourad-Lafifi/post/How-to-remove-warping-angle-and-violation-of-heuristic-criterion-warning-in-LS-](https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Mourad-Lafifi/post/How-to-remove-warping-angle-and-violation-of-heuristic-criterion-warning-in-LS-Dyna/attachment/5d0c0713cfe4a7968dacddf1/AS%3A771994878496770%401561069330997/download/Meshing-Tutorial-Ansys.pdf)

[Dyn/attachment/5d0c0713cfe4a7968dacddf1/AS%3A771994878496770%401561069330997/download/Meshing Tutorial Ansys.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Mourad-Lafifi/post/How-to-remove-warping-angle-and-violation-of-heuristic-criterion-warning-in-LS-Dyna/attachment/5d0c0713cfe4a7968dacddf1/AS%3A771994878496770%401561069330997/download/Meshing-Tutorial-Ansys.pdf)

5.4

Comparison of explicit and implicit finite element methods and its effectiveness for drop test of electronic control unit, Kamarajan Balakrishnan, Arvind Sharma, Rajib Ali, 2016.

<https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/02/Lesson3-DiscussionOfTimeStepSize.pdf>

<https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>

<https://www.mechead.com/what-is-explicit-dynamics-in-ansys/>

<https://www.simscale.com/blog/implicit-vs-explicit-fem/>

<https://info.simuleon.com/blog/implicit-vs-explicit-finite-element-analysis>

<https://enterfea.com/implicit-vs-explicit/>

Για το κεφάλαιο 6:

[1]

<http://www.engineering-truck.com/blog/typical-tanker-truck-dimensions/>

<https://www.anstertrailer.com/tank-trailer-designs-specifications/>

<https://www.titanvehicle.com/article/how-many-litres-does-a-fuel-tanker-carry-oil-tank-trailer-size-capacity-drawing.html>

<https://careertrend.com/facts-8052576-typical-tanker-truck-dimensions.html>

<https://www.pandamech.com/product/30-60-kl-fuel-tanker-trailers>

<https://law.resource.org/pub/in/bis/S08/is.13187.1991.pdf>

<https://www.pandamech.com/info/how-long-is-a-tanker-trailer-i00013i1.html>

<https://www.sinotruckgroup.com.cn/product-40.html>