ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΤΜΟΥ»

Λαγγουράνης Κωνσταντίνος
Α.Μ.: 021-161-09

Επιβλέπων Καθηγητής: κ.Θεοτόκογλου Ευστάθιος

ΑΘΗΝΑ 2019

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2017-2018 και 2018-2019 στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η προσομοίωση της συμπεριφοράς αυλών λεβήτων Ατμοηλεκτρικών Σταθμών που μεταφέρουν ατμό υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία, καθώς και η αξιολόγηση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε ένα κράμα χάλυβα, το 10CrMo9-10.

Υπολογίστηκε η συμπεριφορά δικτύου αυλών υπό συνθήκες φόρτισης θερμοκρασίας, εσωτερικής πίεσης, διαφορετικών στηρίξεων και τέλος η υπέρθεση αυτών, τόσο σε οριζόντια όσο και σε κάθετη θέση. Επίσης πραγματοποιήθηκε υπολογισμός για κάθε 1 από τις παραπάνω περιπτώσεις αλλάζοντας την διάμετρο του αγωγού, το μήκος του και το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιήθηκε ένα σετ προσομοιώσεων και υπολογισμών, για κάθε πιθανό συνδυασμό, έτσι ώστε να εντοπιστούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά των αυλών.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του λογισμικού Autodesk Fusion 360. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως αρχικά το λογισμικό που είχε επιλεγεί για την εκπόνηση της εργασίας ήταν το ABAQUS, αλλά λόγω του μεγάλου αριθμού των κόμβων δεν μπορούσε να “τρέξει”, και γι’αυτό τον λόγο επιλέχθηκε το Fusion 360 της Autodesk.

Abstract

The present diploma thesis took place during the academic years 2017-2018 and 2018-2019 at the Laboratory of Material Strength of School of Applied Mathematical and Physical Sciences, at National Technical University of Athens. The purpose of this study is to model and simulate the behavior boiler's pipelines delivering steam under high pressure and temperature, and to evaluate the corresponding results. The modeling was performed for alloy steel, 10CrMo9-10.

It was calculated the behavior of the piping network under conditions of temperature loading, internal pressure, different type of support, and finally their overlap, in both horizontal and vertical direction. Also, a calculation was made for each of the above cases by changing the diameter of the pipe, its length and the grid of finite elements. In this way, a set of simulations and calculations was performed, for each possible combination, to identify all the factors that influence the mechanical behavior of the pipes.

The simulations were performed using Autodesk Fusion 360 software. At this point it should be mentioned that the software originally selected for this study was ABAQUS, but due to the large number of nodes it could not run, so Autodesk's Fusion 360 was finally chosen.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε περίοδο πολύ απαιτητικών επαγγελματικών υποχρεώσεων, και είναι σίγουρο πως χωρίς την υποστήριξη κάποιων ανθρώπων, δεν θα είχε έλθει εις πέρας.

Γι' αυτόν τον λόγο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ηλία και Αντωνία για την ψυχολογική τόνωση που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα, την προτροπή να μην το βάλω ποτέ κάτω και γενικότερα για όλα τα εφόδια με τα οποία με εξόπλισαν στη ζωή μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ξαδελφό μου Γιάννη Α. για την χαρά με την οποία με υποδείχτηκε στο σπίτι του και για την άψογη συγκατοίκηση που είχαμε κατά τη διάρκεια των υποχρεωτικών μαθημάτων του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον καθηγητή μου και επιβλέποντα της συγκεκριμένης διπλωματικής κ. Ευστάθιο Θεοτόκογλου, καταρχάς για την τιμή που μου έκανε δίνοντάς μου την ευκαιρία να συνεργαστούμε, και γενικότερα για όλη την βοήθεια, την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα. Ήταν πάντα παρών σε ό,τι χρειάστηκα, δείχνοντας πραγματικό ενδιαφέρον τόσο για την εξέλιξη της εργασίας όσο και της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς επιτροπής, την κυρία Ε. Κοντού, καθηγήτρια ΣΕΜΦΕ, και τον κύριο Δ. Μανωλάκο, καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ για την τιμή που μου έκαναν με την παρουσία τους στην εξέταση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το κρατώ για την φίλη μου Αιμιλία Κ., που η υποστήριξή της στον ψυχολογικό τομέα ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη **3**

Abstract **4**

Ευχαριστίες **5**

Περιεχόμενα **6**

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή, περιγραφή του προβλήματος **9**

1.1 Περιγραφή προβλήματος 9

1.2 Σκοπός 10

1.3 Δομή Εργασίας 10

Κεφάλαιο 2: Μορφές αστοχίας αγωγών **11**

2.1 Ερπυσμός 11

2.2 Κόπωση 13

2.3 Διάβρωση 16

2.4 Οξείδωση 18

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση τάσεων - παραμορφώσεων **19**

3.1 Λεπτότοιχοι σωλήνες – θεωρία των κελυφών (shell approach) 19

3.2 Αξονικές τάσεις λόγω πίεσης 21

3.3 Περιφερειακές τάσεις (hoop stresses) 22

3.4 Ισοδύναμη τάση Von Mises 23

3.5 Παραμορφώσεις 24

Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση **25**

4.1 Διαστάσεις, ιδιότητες υλικών 25

4.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων 28

4.2.1 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων 28

4.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο 28

4.2.3 Πυκνότητα πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε 33

4.3 Αλλαγή διαστάσεων, προσανατολισμού 34

4.4 Φορτίσεις 35

4.5 Στηρίξεις 36

4.6 Ανακεφαλαίωση 36

Κεφάλαιο 5: Υπολογιστική Ανάλυση **37**

5.1 Προσεγγίσεις κανονικού μοντέλου με κύλιση (πάχος 5,6mm, κανονικό πλέγμα) 37

5.1.1 Οριζόντια θέση 37
5.1.2 Κατακόρυφη θέση 64
5.1.3 Συμπεράσματα προσομοιώσεων μοντέλου με κύλιση και πάχος 5,6mm 91
5.2 Προσεγγίσεις κανονικού μοντέλου χωρίς κύλιση (πάχος 5,6mm, κανονικό πλέγμα) 92
5.2.1 Οριζόντια θέση 92
5.2.2 Κατακόρυφη θέση 109
5.2.3 Σύγκριση προσομοιώσεων μοντέλου κατακόρυφης – οριζόντιας θέσης, ύπαρξη – μη ύπαρξη 2ης στήριξης (κύλιση), για L=15,2m 127
5.3 Προσεγγίσεις μοντέλων μεγαλύτερου πάχους (t=11,6) 127
5.3.1 Οριζόντια θέση με κύλιση 128
5.3.2 Οριζόντια θέση χωρίς κύλιση 136
5.3.3 Κατακόρυφη θέση με κύλιση 144
5.3.4 Κατακόρυφη θέση χωρίς κύλιση 152
5.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων κεφαλαίου 161
5.4 Προσεγγίσεις μοντέλων πυκνότερου πλέγματος 162
5.4.1 Κατακόρυφη θέση με κύλιση, L=15,2mm και t=5,6mm 162
5.4.2 Σύγκριση με αντίστοιχο μοντέλο με αρχικό πλέγμα 171
5.5 Διάγραμμα σύγκρισης μετατοπίσεων 171
5.5. Συγκριτικά διαγράμματα 172
5.6 Προσομοίωση με διαφορετικές θερμοκρασίες 172
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα 174
6.1 Συμπεράσματα 174
6.2 Προτάσεις για τωρινή βελτίωση 175
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα 176
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία 177

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή, περιγραφή του προβλήματος

1.1 Περιγραφή προβλήματος

Οι λέβητες των ΑΗΣ (Ατμοηλετρικών Σταθμών) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ, περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους πολλά χιλιόμετρα αυλών, δύο βασικών κατηγοριών: αυλοί που μεταφέρουν νερό και αυλοί που μεταφέρουν ατμό. Η θερμότητα της καύσης μεταδίδεται μέσα από το πάχος του αυλού στο ρευστό που αυτός περιέχει, με αποτέλεσμα την θέρμανση του ρευστού. Διακρίνονται οι αυλοί του οικονομητήρα (που φέρουν νερό), οι αυλοί των τοιχωμάτων του λέβητα (που φέρουν νερό και, κοντά στην κορυφή του λέβητα, μείγμα νερού-ατμού), οι αυλοί του υπέρθερμου και του ανάθερμου τμήματος του λέβητα (που φέρουν ατμό).

Οι αυλοί, ανάλογα το ρευστό που φέρουν, τη θέση τους στο λέβητα, και την πίεση και θερμοκρασία του ρευστού που πρέπει να επιτευχθεί για να οδηγηθεί στον ατμοστρόβιλο, είναι διαφόρων διατομών (διάμετρος x πάχος) και χαλύβων. Όλοι οι αυλοί ξεκινούν και καταλήγουν σε μεγάλα κυλινδρικά δοχεία πίεσης, που λέγονται συλλέκτες, και βρίσκονται ακριβώς δίπλα στο λέβητα, έξω από αυτόν και την επίδραση της καύσης. Όλοι οι αυλοί αιωρούνται μέσα στο λέβητα, με σημεία στήριξης τους συλλέκτες στην είσοδο και την έξοδό τους από το λέβητα, και με ενδιάμεσα σημεία στήριξης μέσα σε αυτόν.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που δημιουργούνται στους αυλούς λόγω των εξαιρετικά δυσμενών συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του λέβητα, αλλά και λόγω του ρευστού που φέρουν, είναι η αστοχία τους, υπό μορφή διάτρησης ή θραύσης. Η αστοχία αυτή προκαλεί διαρροή νερού/ατμού και οδηγεί στο σταμάτημα της λειτουργίας του λέβητα προκειμένου να αντικατασταθεί το τμήμα που αστόχησε. Οι μηχανισμοί που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία είναι πολλοί, όπως ο ερπυσμός (κύριος παράγοντας), η κόπωση (θερμική – μηχανική), η οξείδωση, η μηχανική διάβρωση, η διάβρωση λόγω θείου, η ρωγμάτωση υδρογόνου.

Στην φωτογραφία που επισυνάπτεται, φαίνονται κάποιοι αυλοί. Πάνω αναγράφεται το υλικό τους και οι διαστάσεις τους. Συγκεκριμένα είναι:

a) 38 mm (εξ. διάμετρος) x5,6 (πάχος) mm με υλικό 10CrMo9-10 , steelnumber : 1.7380

b) 42 mm (εξ. διάμετρος) x5 (πάχος) mm με υλικό 15Mo3 , steelnumber : 1.5415

Εικόνα 1.1: Αυλοί που χρησιμοποιούνται

1.2 Σκοπός

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετήσει τους μηχανισμούς αστοχιών που εμφανίζονται στους προαναφερθέντες αυλούς.

Μέσω της ανάλυσης που ακολουθεί, γίνεται αντιληπτό σε ποια τμήματα αστοχούν οι αγωγοί, ποια είναι τα όρια διαρροής, ποιες οι επιθυμητές στηρίξεις αλλά και γενικότερα όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν, άμεσα ή έμμεσα, την μηχανική συμπεριφορά των αγωγών.

1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία είναι χωρισμένη στις εξής ενότητες:

- Εισαγωγή, με το τι θα ασχοληθούμε στην παρούσα μελέτη, περιγραφή προβλήματος
- Θεωρητικό κομμάτι, τις μορφές με τις οποίες αστοχούν οι αγωγοί, ανάλυση τάσεων παραμορφώσεων
- Μοντελοποίηση προβλήματος, υλικά που χρησιμοποιούνται
- Υπολογιστική ανάλυση, με χρήση κατάλληλου λογισμικού ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων
- Αποτελέσματα ανάλυσης
- Συμπεράσματα
- Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 2: Μορφές αστοχίας αγωγών

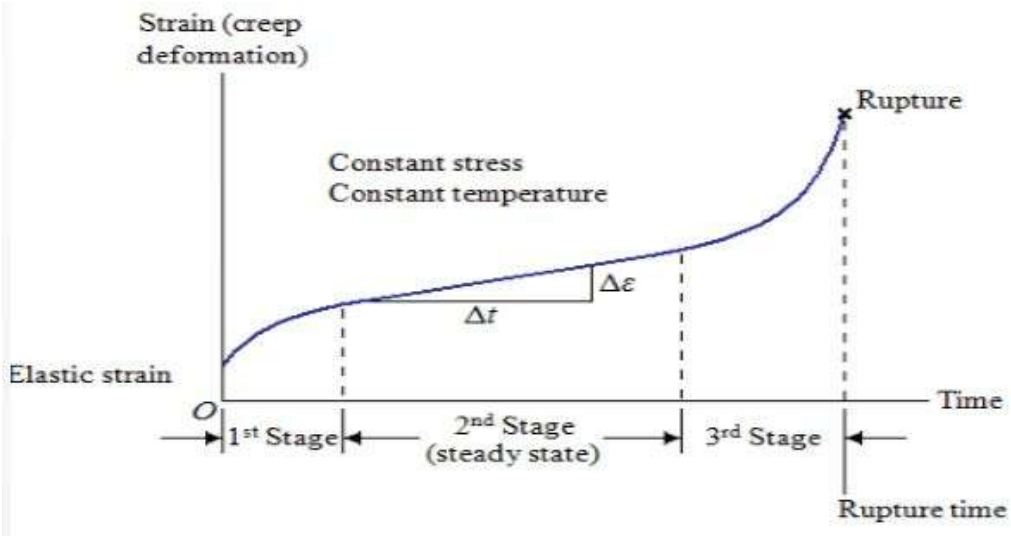
2.1 Ερπυσμός

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το φαινόμενο του ερπυσμού είναι το ο κύριος παράγοντας που προκαλεί αστοχία σε αγωγούς που μεταφέρουν ατμό, υπό την επίδραση υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τις περισσότερες φορές, οι φθορές εμφανίζονται σε τοπικά σημεία των αγωγών, όπως συγκολλήσεις, καμπύλες και ενώσεις τύπου T [1].

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο κατά το οποίο παρατηρείται συνεχής αύξηση της παραμόρφωσης ενός φορέα συναρτήσει του χρόνου, υπό την επίδραση σταθερής τάσης και υπό σταθερή θερμοκρασία [2]. Ταχύτητα ερπυσμού ονομάζεται ο χρονικός ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου [2].

Η διατήρηση σταθερής τιμής τάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να προκαλέσει βαθμιαία διαρροή και μεταβολή των διαστάσεων ενός φορέα. Ο ερπυσμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε περιοχές γύρω στους 0.4 Tm, όπου Tm είναι η απόλυτη θερμοκρασία τήξης (σε βαθμούς K) [2],[3].

Η καμπύλη ερπυσμού, είναι μια καμπύλη παραμόρφωσης-χρόνου.



Εικόνα 2.5: Καμπύλη ερπυσμού

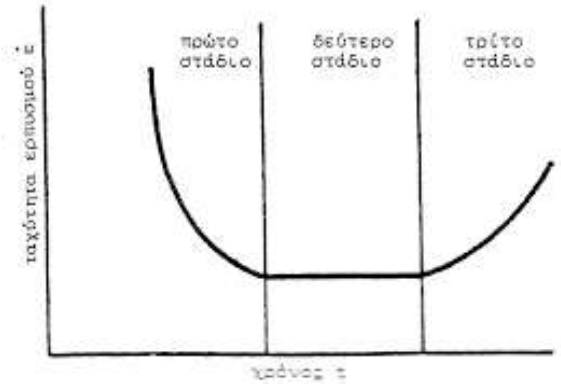
Στην εικόνα 2.5, διακρίνουμε 3 στάδια:

- 1° στάδιο - Πρωτογενής ερπυσμός. Η ταχύτητα ερπυσμού μειώνεται με τον χρόνο, επικρατεί η διάχυση των ατόμων που βρίσκονται στα όρια των κόκκων και η κίνηση των διαταραχών, προκαλώντας σκλήρυνση του υλικού
- 2° στάδιο – Δευτερογενής ερπυσμός. Η ταχύτητα ερπυσμού παραμένει σταθερή, επικρατεί ολίσθηση ή/και αναρρίχηση των διαταραχών, αντισταθμίζεται το φαινόμενο της σκλήρυνσης και το υλικό παρουσιάζει παραμορφώσεις σταθερά αυξανόμενες με τον χρόνο. Σε αυτό το στάδιο, παρουσιάζεται πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση.
- 3° στάδιο – Τριτογενής ερπυσμός. Στο στάδιο αυτό, έχουμε επιτάχυνση της παραμόρφωσης, μέχρι να σημειωθεί αστοχία του υλικού, δηλαδή θραύση.

Ο ερπυσμός είναι μια συνάρτηση της τάσης, του χρόνου και της θερμοκρασίας. Μπορεί να δημιουργηθεί σε υψηλά επίπεδα τάσεων ή σε μεγάλο χρονικό διάστημα ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες [4].

Αντοχή στον ερπυσμό ορίζεται η μέγιστη τάση όπου το υλικό δεν παρουσιάζει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υψηλή παραμόρφωση. Αντοχή κατάρρευσης σε ερπυσμό ορίζεται ως η μέγιστη τάση στην οποία ένα υλικό μπορεί να ανταποκριθεί χωρίς να αστοχήσει [4].

Αν σχεδιαστεί η καμπύλη ταχύτητα παραμόρφωσης – χρόνου (εικόνα 2.6), εμφανίζονται πάλι 3 στάδια που αντιστοιχούν στους 3 τύπους ερπυσμού. Κατά το πρώτο στάδιο, με την αύξηση της θερμοκρασίας, ένα υλικό υφίσταται μείωση του ερπυσμού. Κατά το δεύτερο στάδιο, παρατηρείται ερπυσμός με σταθερό ρυθμό ενώ στο τρίτο το φαινόμενο του ερπυσμού αυξάνεται εκθετικά.



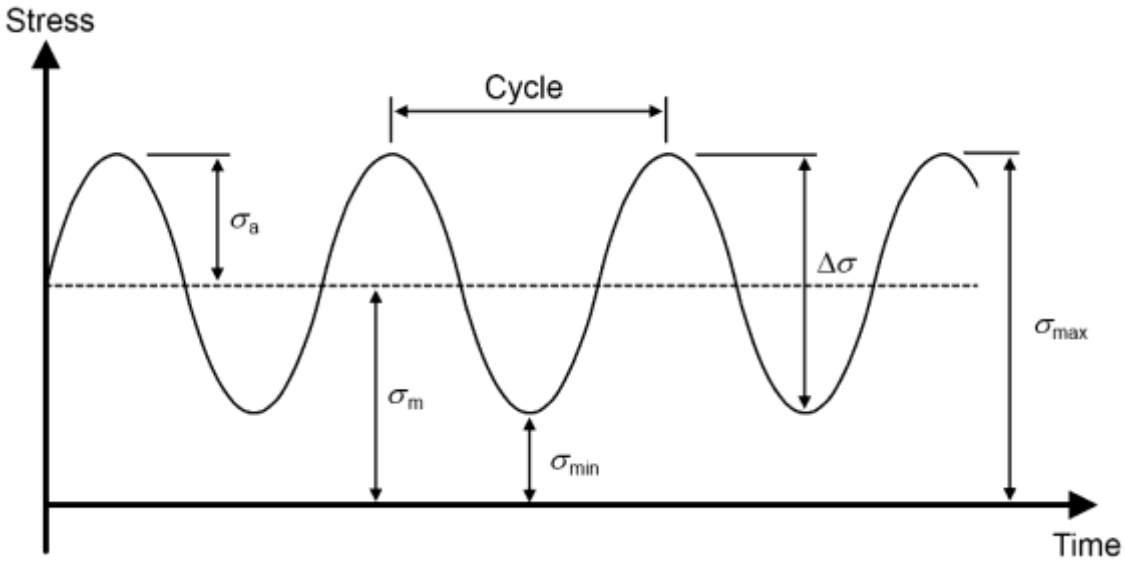
Εικόνα 2.6: Ταχύτητα παραμόρφωσης ερπυσμού συναρτήσει χρόνου

2.2 Κόπωση

Τα μεταλλικά υλικά, όταν καταπονούνται από επαναλαμβανόμενες ή χρονικά μεταβαλλόμενες (δυναμικές) τάσεις, μπορούν να αστοχήσουν σε θραύση, ακόμη και όταν οι τιμές των τάσεων αυτών βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα από την αντοχή του υλικού σε θραύση. Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται κόπωση (fatigue) [5]. Το βασικό χαρακτηριστικό της κόπωσης είναι ότι απαιτεί μία σημαντική χρονική περίοδο λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μίας κατασκευής για να εμφανιστεί.

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που απαιτούνται για να εμφανισθεί αστοχία από κόπωση: α) μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση, β) μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία και γ) ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης [6]. Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση επηρεάζεται και από μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό, κ.α. [7].

Στην εικόνα 2.7, απεικονίζεται μια πλήρης αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση ημιτονοειδούς μορφής (εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία πολύ σπάνια συναντάται σε πραγματικές εφαρμογές).



Εικόνα 2.7: Ημιτονοειδής δυναμική καταπόνηση

Μία δυναμική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο «συνιστώσες»: μία μέση (ή ‘‘σταθερή’’) τάση σ_m και μία μεταβαλλόμενη τάση σ_α. Επίσης, στην ανάλυση μιας δυναμικής καταπόνησης πρέπει να λάβουμε υπόψη και το εύρος της τάσης, Δσ.

Το εύρος τάσης ορίζεται σαν η αλγεβρική διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τάση:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{2-1}$$

Η μεταβαλλόμενη τάση, σ_α, ορίζεται σαν το μισό του εύρους Δσ, δηλαδή:

$$\sigma_\alpha = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \tag{2-2}$$

Η μέση τάση, σ_m, είναι ο αλγεβρικός μέσος όρος της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης του κύκλου φόρτισης:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \tag{2-3}$$

Πολύ συχνά στην ανάλυση προβλημάτων δυναμικών καταπονήσεων και κόπωσης χρησιμοποιούνται δύο ακόμη μεγέθη. Το ένα είναι η αναλογία τάσεων (stress ratio), η οποία ορίζεται ως εξής:

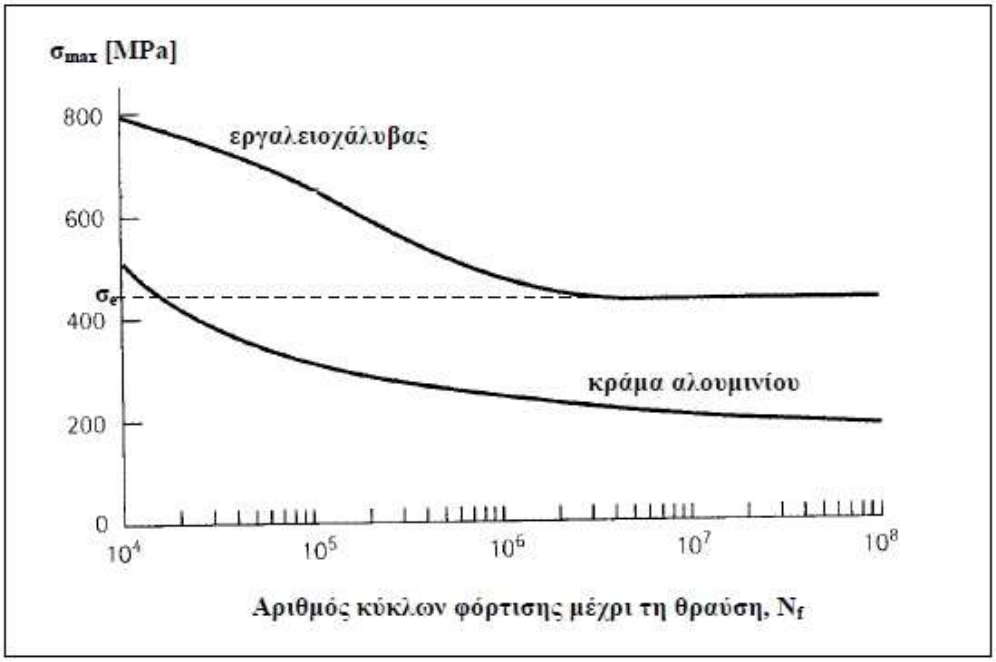
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{2-4}$$

Το άλλο μέγεθος είναι η αναλογία εύρους τάσεων (amplitude ratio), που ορίζεται ως:

$$A = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \tag{2-5}$$

Η βασική μορφή με την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία πειραματικά δεδομένα, σχετικά με την συμπεριφορά μεταλλικών υλικών σε κόπωση, είναι οι καμπύλες S – N ή, όπως είναι πιο γνωστές, οι καμπύλες Wöhler [8].

Οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα που στον κατακόρυφο άξονα έχουν ένα μέγεθος ‘‘S’’ σχετιζόμενο με την τάση (συνηθέστερα κάποιο από τα σ_α, σ_{max} ή σ_{min}), ενώ στον οριζόντιο άξονα δείχνουν τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση, δηλαδή την διάρκεια ζωής σε κόπωση N_f, του υλικού. Ο άξονας του αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση σχεδόν πάντοτε είναι εκφρασμένος σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 2.8: Καμπύλη Wöhler για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα

Οι καμπύλες S-N αναφέρονται σε θραύση λόγω κόπωσης μετά από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, δηλαδή για $N_f > 10^4$ κύκλους. Στις περιπτώσεις αυτές οι τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα μακροσκοπικά να μην προκαλείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η κόπωση αυτού του είδους ονομάζεται πολυκυκλική κόπωση (high cycle fatigue – HCF).

Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με συνέπεια αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά ($N_f < 10^4$ κύκλοι). Επειδή στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί η δυναμική καταπόνηση σε όρους τάσης, οι δοκιμές κόπωσης διεξάγονται έτσι, ώστε σε κάθε κύκλο φόρτισης να προσδίδεται στο υλικό ένα προκαθορισμένο ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, παρά μία προκαθορισμένη μεταβολή τάσης. Αυτό το είδος κόπωσης ονομάζεται ολιγοκυκλική κόπωση (low cycle fatigue – LCF) [7].

2.3 Διάβρωση

Με τον όρο διάβρωση ενός μετάλλου εννοούμε το σύνολο των χημικών αντιδράσεων, που λαμβάνουν χώρα σ' αυτό, υπό την επίδραση του άμεσου περιβάλλοντός του, και που οδηγούν στην αλλοίωση του, με αποτέλεσμα τη χειροτέρευση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του [9].

Η διάβρωση των μετάλλων οδηγεί στην υποβάθμιση των κατασκευών ή και στη μείωση του χρόνου ζωής τους, το οποίο συνεπάγεται υψηλό κόστος συντήρησης ή/και αντικατάστασης των κατασκευών.

Μια πλήρης αντίδραση διάβρωσης ενός μεταλλικού υλικού βασίζεται στην ύπαρξη μιας ανοδικής και μιας καθοδικής περιοχής, μεταξύ των οποίων εμφανίζεται διαφορά δυναμικού. Έτσι όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε επαφή (π.χ. χάλκινο εξάρτημα προσαρμοσμένο σε χαλύβδινο σωλήνα ύδρευσης) δημιουργείται άνοδος και κάθοδος. Επίσης αν μέσα στο ίδιο μέταλλο υπάρχουν προσμίξεις δημιουργείται ανοδική και καθοδική περιοχή.

Αν περιοχές του ίδιου μετάλλου είναι εκτεθειμένες σε διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα δημιουργείται ανοδική και καθοδική περιοχή λόγω διαφορών στη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη. Ακόμη και σε μέταλλο που είναι εκτεθειμένο στο ίδιο διαβρωτικό περιβάλλον υπάρχουν ανοδικές και καθοδικές περιοχές, εξαιτίας τοπικών διαφορών στην εσωτερική ενέργεια, π.χ. στρέβλωση κρυσταλλικού πλέγματος από μηχανική καταπόνηση, που οδηγεί σε ενεργειακή αναβάθμιση ή ακόμα και λόγω τραχύτητας στην επιφάνεια του μετάλλου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση είναι οι κάτωθι [10]:

- *Η δραστικότητα του μετάλλου*. Όσο πιο μεγάλο είναι το κανονικό δυναμικό αναγωγής ενός μετάλλου, τόσο λιγότερο δραστικό είναι, τόσο πιο δύσκολα οξειδώνεται και επομένως τόσο πιο πολύ αντέχει στη διάβρωση.
- *Οι συγκεντρώσεις οξειδωτικών ουσιών στο περιβάλλον του μετάλλου.* Συνήθως η ύπαρξη οξειδωτικών ουσιών στο περιβάλλον του μετάλλου επιταχύνει τη διάβρωση του.
- *Η οξύτητα του περιβάλλοντος του μετάλλου.* Κατά την επαφή μετάλλου με διαλύματα, υπάρχει τάση του μετάλλου να διαβρωθεί αντικαθιστώντας τα ιόντα υδρογόνου του διαλύματος.
- *Η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος.* Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάβρωση.

- *Η ταχύτητα ροής του ρευστού (αέρας ή υγρό) που περιβάλλει το μέταλλο*. Η μετάβαση από την ακινησία στη κίνηση και η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού που περιβάλλει ένα μέταλλο, τείνει να επιταχύνει τη διάβρωση του.
- *Η θερμοκρασία του μετάλλου.* Ο ρυθμός της διάβρωσης του μετάλλου αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- *Η δημιουργία παθητικών στρωμάτων στην επιφάνεια του μετάλλου.* Τα στρώματα αυτά μπορούν να είναι είτε αδιαπέραστα και αδρανή, οπότε εμποδίζουν τη διάβρωση να προχωρήσει, είτε διαπερατά, οπότε η διάβρωση συνεχίζεται.
- *Η ανομοιογένεια της επιφάνειας του υλικού.* Ακαθαρσίες και ρύπανση στην επιφάνεια του υλικού επιταχύνουν την διάβρωση.
- *Η ύπαρξη μηχανικών τάσεων*. Μηχανική καταπόνηση του υλικού προκαλεί στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου, με αποτέλεσμα τοπική ενεργειακή αναβάθμιση στην περιοχή. Οι ενεργειακά αναβαθμισμένες περιοχές είναι χημικά δραστικότερες και επομένως οξειδώνονται ευκολότερα.

Υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισης της διάβρωσης, οι κυριότεροι από τους οποίου είναι:

- *Χρήση μετάλλων υψηλής καθαρότητας.* Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία γαλβανικών στοιχείων διάβρωσης.
- *Λείανση των επιφανειών*. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία ανοδικών και καθοδικών περιοχών μέσα στο ίδιο το μέταλλο.
- *Θερμική κατεργασία των μετάλλων*. Η ανόπτηση οδηγεί στην άρση των κατάλοιπων τάσεων (στρέβλωση κρυσταλλικού πλέγματος) που προήλθαν από μηχανική καταπόνηση.
- *Επιφανειακές κατεργασίες των μετάλλων*. Το μέταλλο, που πρόκειται να προστατευθεί από τη διάβρωση, υφίσταται κατεργασία με ειδικές ουσίες (π.χ. φωσφορικά ή χρωμικά διαλύματα), που σχηματίζουν στην επιφάνεια του προστατευτικά επιστρώματα.
- *Μεταλλικές επικαλύψεις*. Το μέταλλο, που πρόκειται να προστατευθεί από τη διάβρωση, επικαλύπτεται επιφανειακά (επιμεταλλώνεται) με μέταλλο πιο ευγενές (π.χ. επικασσιτέρωση, επιχάλκωση, επαργύρωση, κ.λπ.) ή με μέταλλο που αυτοπροστατεύεται παθητικά (π.χ. επιψευδαργύρωση, επιχρωμίωση, κλπ.).
- *Μη μεταλλικές επικαλύψεις.* Το μέταλλο, που πρόκειται να προστατευθεί από τη διάβρωση, επικαλύπτεται με μη μεταλλικά υλικά (π.χ. βερνίκια, σμάλτα, γυαλιά, πλαστικά κλπ.), τα οποία είναι ανθεκτικά στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Η ταχύτητα διάβρωσης δίνεται από την ακόλουθη γενική σχέση:

$$r(t) = \frac{dy}{dt} \tag{2.6}$$

όπου

r = η ταχύτητα της διάβρωσης του μεταλλικού αντικειμένου

dy = η μεταβολή της μάζας ή του πάχους του διαβρωμένου τμήματος του μεταλλικού αντικειμένου

dt = το χρονικό διάστημα εντός του οποίου επήλθε η μεταβολή dy

2.4 Οξείδωση

Οξείδωση ονομάζεται η διαδικασία στην οποία ένα μόριο, άτομο ή ιόν χάνει ηλεκτρόνια (αυξάνεται ο βαθμός οξείδωσης-σθένος). Ως αντίδραση οξείδωσης χαρακτηρίζεται κυρίως ο σχηματισμός οξειδίων με μόρια οξυγόνου [11].

Η οξείδωση των μετάλλων είναι μια ανεπιθύμητη αυθόρμητη χημική αντίδραση με δυσμενείς οικονομικές επιπτώσεις σε διεθνές επίπεδο. Η εύρεση τρόπων και υλικών κατάλληλων για την αποτροπή ή επιβράδυνση της διάβρωσης μετάλλων και κραμάτων αυτών κρίνεται επιτακτική.

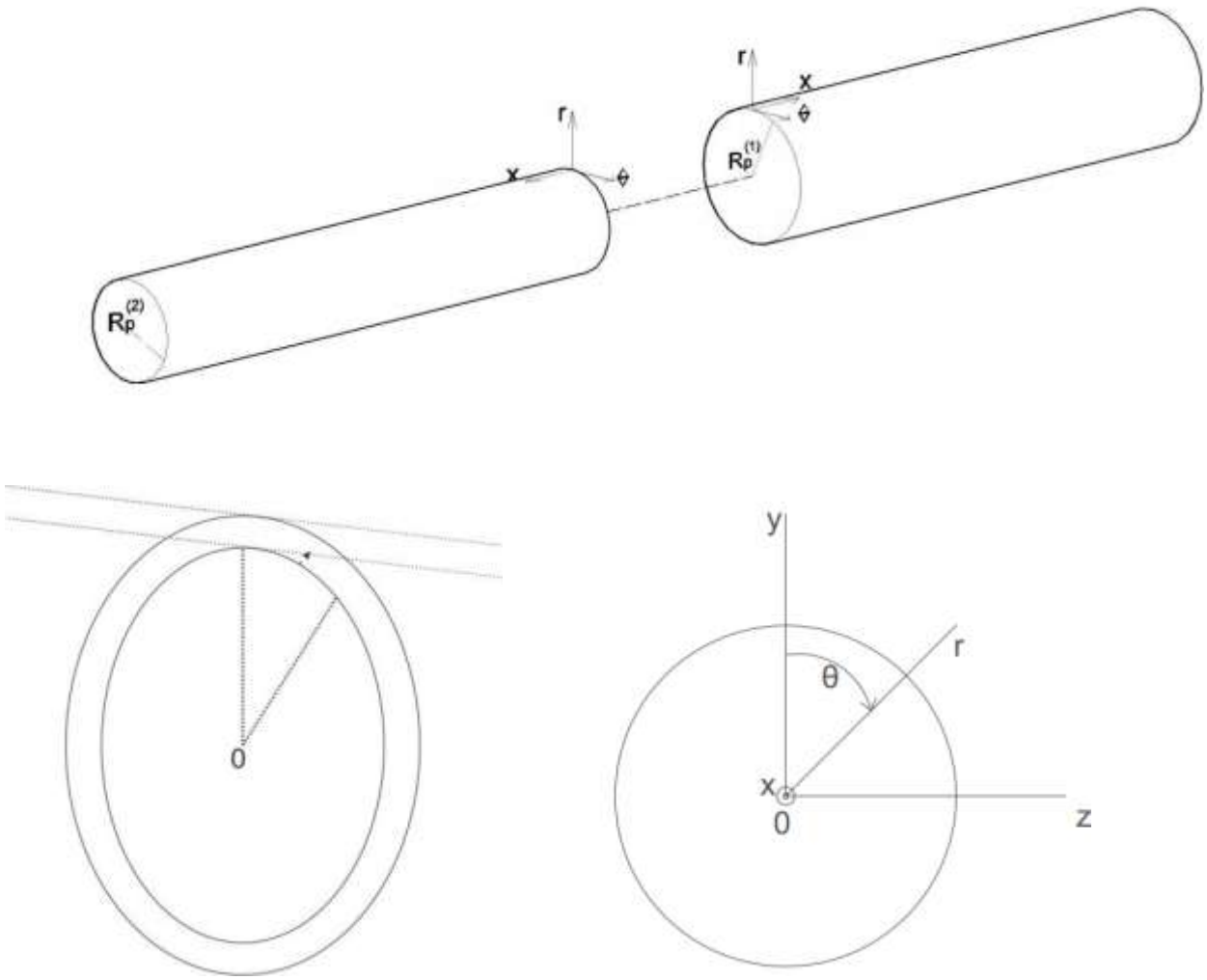
Τα μέταλλα συνήθως αντιδρούν με το οξυγόνο, χάνοντας ηλεκτρόνια, και σχηματίζουν διάφορα οξείδια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάβρωση του σιδήρου.

Οι αντιδράσεις οξείδωσης λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των μετάλλων. Στην περίπτωση του σιδήρου το στρώμα σκουριάς που σχηματίζεται καθώς η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με οξυγόνο, έχει μορφή νιφάδων, τρίβεται εύκολα και συνεπώς αποκαλύπτει διαρκώς νέα επιφάνεια μετάλλου. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή διάβρωση του σιδήρου.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση τάσεων - παραμορφώσεων

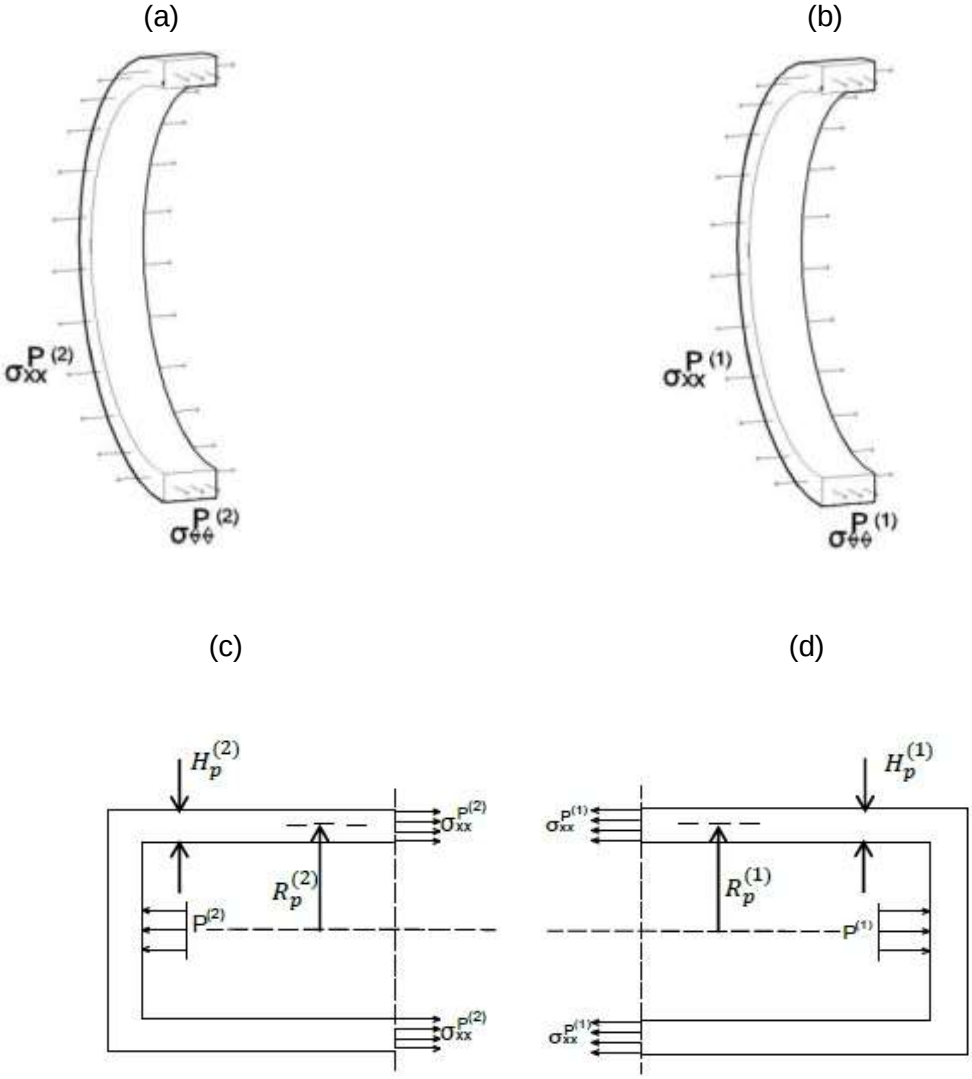
3.1 Λεπτότοιχοι σωλήνες – θεωρία των κελυφών (shell approach)

Για την καλύτερη κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου, θεωρούμε τους σωλήνες ως λεπτότοιχα κυλινδρικά κελύφη υπό εσωτερική πίεση p [12]. Τα κελύφη έχουν αξονική συμμετρία και καλούνται κελύφη εκ περιστροφής. Τομές στην επιφάνεια του κελύφους, οι οποίες εμπεριέχουν τον άξονα συμμετρίας καλούνται μεσημβρινές τομές, ενώ οι τομές που είναι κάθετες στον άξονα συμμετρίας ονομάζονται παράλληλες τομές. Λόγω συμμετρίας και στην γεωμετρία των κελυφών, αλλά και στην φόρτιση στις μεσημβρινές και στις παράλληλες τομές δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις, πάρα μόνο ορθές.



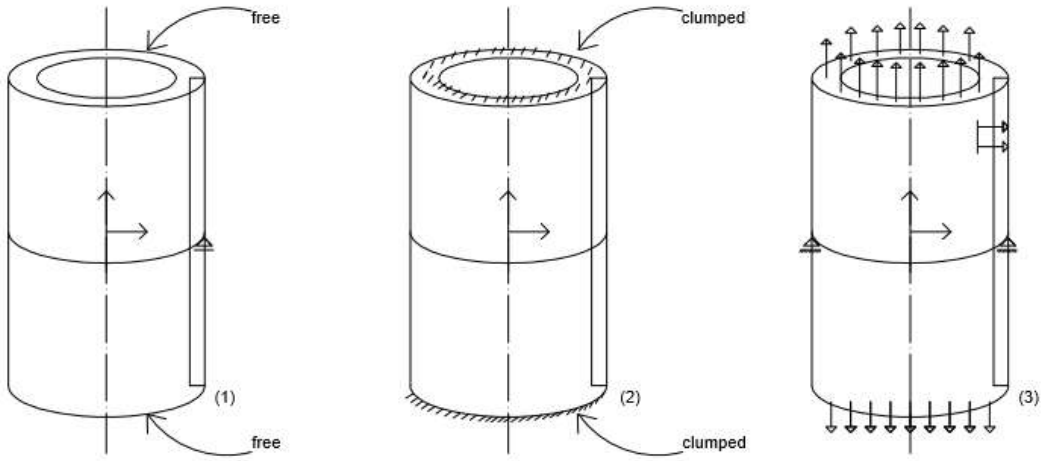
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση αγωγών ως λεπτά κυλινδρικά κελύφη (x,r,θ,)

$R_p^{(1)}$, $R_p^{(2)}$ είναι η αρχική ακτίνα κάθε σωλήνα και $H_p^{(1)}$, $H_p^{(2)}$ είναι το αρχικό πάχος κάθε σωλήνα. Κάνοντας 2 παράλληλες τομές σε απειροστή απόσταση δL και μια μεσημβρινή απομονώνουμε το κομμάτι από κάθε σωλήνα, που φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (3.2.a και (3.2.b). Στην συνέχεια, γίνεται μια εγκάρσια τομή σε κάθε σωλήνα και εξάγονται τα παρακάτω σχήματα (εικόνες 3.2.c, 3.2.d). Αξίζει να σημειωθεί πως εφόσον η πίεση είναι θλιπτική στην εσωτερική επιφάνεια κάθε σωλήνα, οι αξονικές τάσεις στην τομή θα είναι εφελκυστικές, λόγω ισορροπίας [13]. Στα κλειστά κυλινδρικά κελύφη η αξονική τάση είναι ίση με το μισό της περιφερειακής τάσης. Στην ανάλυση που ακολουθεί $R_p^{(i)} >> H_p^{(i)}$, όπου i=1,2.



Εικόνα 3.2: $\sigma_{xx}^{p^{(1)}}, \sigma_{xx}^{p^{(2)}}$: οι αξονικές τάσεις εξαιτίας της πίεσης, στους σωλήνες (1),(2) αντίστοιχα. $\sigma_{\theta\theta}^{p^{(1)}}, \sigma_{\theta\theta}^{p^{(2)}}$: οι περιφερειακές τάσεις, στους αντίστοιχους σωλήνες

Στην παρακάτω εικόνα (3.3) παριστάνονται οι συνοριακές συνθήκες στα 3 είδη συστημάτων. Οι διατομές αυτές, κατά σειρά, είναι: (a) οι ανοιχτές, (b) οι πακτωμένες και (c) οι κλειστές. Οι συνθήκες φόρτισης για κάθε μία από τις παραπάνω διατομές είναι η ομοιόμορφη πίεση, η θερμοκρασία και η συνδυασμένη φόρτιση πίεσης και θερμοκρασίας.



(a) (b) (c)

Εικόνα 3.3: Συνοριακές συνθήκες

3.2 Αξονικές τάσεις λόγω πίεσης

Για έναν κλειστό κύλινδρο και στα 2 άκρα, η εσωτερική πίεση δημιουργεί μια δύναμη κατά μήκος του άξονα x, longitudinal (axial) stresses:

Α) Για κλειστές διατομές (3.3.b), έχουμε τις εξής αξονικές τάσεις:
Ο παρακάτω τύπος συνδέει τις αξονικές τάσεις λόγω πίεσης με το πάχος και την ακτίνα των σωλήνων, λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή των μεγεθών λόγω της θερμικής μεταβολής [14].

$$\sigma_{xx}^{p} = \frac{R_p\, p}{2\, H_p} \tag{3-1}$$

Β) Για ανοιχτές διατομές (3.3.a), δεν έχουμε αξονικές τάσεις λόγω πίεσης, δηλαδή

$$\sigma_{xx}^{p} = 0 \tag{3-2}$$

Γ) Για την πακτωμένη περίπτωση, όπως αυτή της εικόνας (3.3.c), έχουμε

$$\sigma_{xx}^{p} = -E\, a\, \Delta T + \nu\, \frac{R_p\, p}{H_p} \tag{3-3}$$

Όπου:

Ε: μέτρο ελαστικότητας του υλικού

α: συντελεστής θερμικής διαστολής

ΔΤ: θερμοκρασιακή μεταβολή

ν: λόγος Poisson

Στην περίπτωσή μας, θεωρούμε πως δεν έχουμε θερμοκρασιακή μεταβολή επομένως το 1^{ο} γινόμενο είναι ίσο με το μηδέν.

3.3 Περιφερειακές τάσεις (hoop stresses)

Περιφερειακή τάση είναι η τάση που δημιουργείται για να αντισταθεί στην αντίσταση της εφαρμοζόμενης εσωτερικής πίεσης και ασκείται περιφερειακά, ώστε να είναι κάθετη τόσο στον άξονα x, όσο και στην ακτινική διεύθυνση [15].

Οι περιφερειακές τάσεις δεν αλλάζουν σε κλειστές, ανοιχτές ή πακτωμένες διατομές, οπότε και για τις 3 προαναφερθείσες περιπτώσεις ισχύει ο ίδιος τύπος που συνδέει τις περιφερειακές τάσεις με το πάχος και την ακτίνα των σωλήνων, μετά την αλλαγή αυτών λόγω πίεσης.

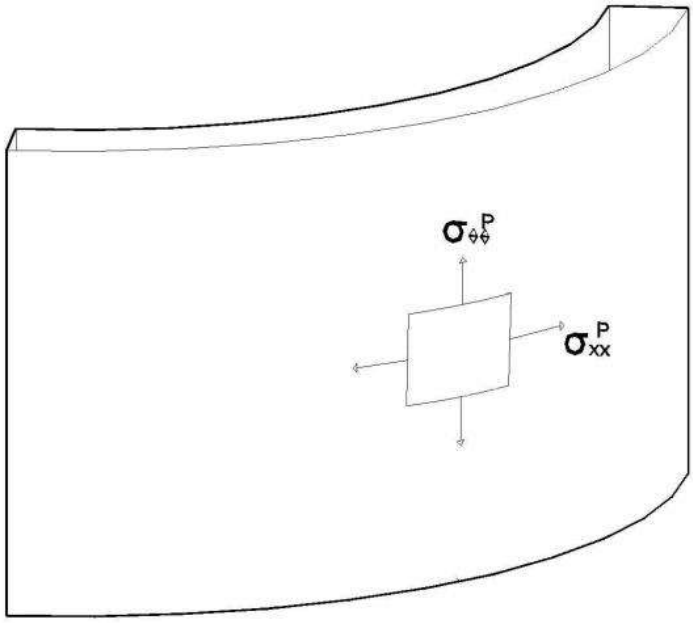
Η σχέση που μας δίνει την περιφερειακή τάση είναι η ακόλουθη:

$$\sigma_{\theta\theta}^{p} = \frac{R_p\, p}{H_p} \tag{3-4}$$

Όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε πως η μεταβολή της θερμοκρασίας σε όλο το πάχος των σωλήνων είναι σταθερή. Από αυτό προκύπτει πως στην επιφάνεια του κελύφους υπάρχει μια κατάσταση επίπεδης τάσης, με κύριες τάσεις:

$\sigma_1 = \sigma_{xx}^{p}$

$\sigma_2 = \sigma_{\theta\theta}^{p}$



Εικόνα 3.4: Τμήμα αγωγού με αξονικές και περιφερειακές τάσεις

3.4 Ισοδύναμη τάση Von Mises

Η ισοδύναμη τάση Von Mises χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει πότε ένα ισότροπο και όλκιμο υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά και ουσιαστικά πότε διαρρέει όταν υπόκειται σε περίπλοκη περίπτωση φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της τάσης Von Mises και την σύγκρισή της με την τάση διαρροής του υλικού. Η σχέση 3-5 μας δίνει την τάση αυτή [16].

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \qquad (3\text{-}5)$$

Όπου:

$\sigma_1 =$ αξονικές τάσεις
$\sigma_2 =$ περιφερειακές τάσεις
$\sigma_3 = \sigma_{rr} =$ ακτινικές τάσεις

Οι ακτινικές τάσεις σ_{rr} θεωρούνται ίσες με το 0, καθώς είναι αμελητέες σε σύγκριση με τις άλλες 2 τάσεις.

3.5 Παραμορφώσεις

Οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από την εφαρμογή της εσωτερικής πίεσης, είναι 3 ειδών: αξονικές, περιφερειακές και παραμορφώσεις στον όγκο του σωλήνα [17].

Οι αξονικές παραμορφώσεις, εκφράζουν την παραμόρφωση που υφίσταται ο σωλήνας κατά την αξονική διεύθυνση και υπολογίζονται με τον εξής τρόπο:

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E}(\sigma_{xx}^p - \nu\sigma_{\theta\theta}^p) \xRightarrow{(3-1),(3-4)} \varepsilon_L = \frac{1}{E}(\frac{PD}{4t} - \nu\frac{PD}{4t}) \rightarrow$$

$$\varepsilon_L = \frac{P\,D}{4\,t\,E}\,(1-2\nu) \qquad (3\text{-}6)$$

Όπου :

P=εσωτερική πίεση

D=εσωτερική διάμετρος

t=πάχος του σωλήνα

v= λόγος Poisson

E=μέτρο ελαστικότητας

Η περιφερειακή παραμόρφωση, προκύπτει ως παρακάτω:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta\theta}^p - \nu\sigma_{xx}^p) \xRightarrow{(3-1),(3-4)} \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\frac{PD}{2t} - \nu\frac{PD}{4t}) \rightarrow$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{P\,D}{4\,t\,E}\,(2-\nu) \qquad (3\text{-}7)$$

Τέλος, η παραμόρφωση όγκου υπολογίζεται ως:

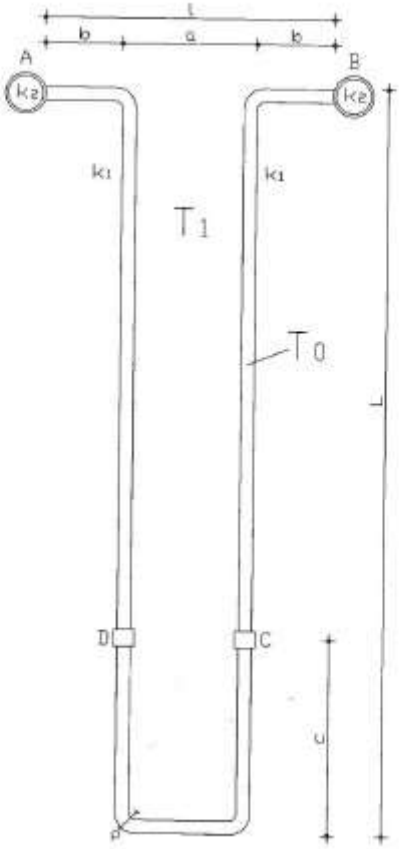
$$\varepsilon_V = \varepsilon_L + 2\,\varepsilon_\theta \xRightarrow{(3-6),(3-7)} \varepsilon_V = \frac{P\,D}{4\,t\,E}\,(1-2\nu) + 2\,\frac{P\,D}{4\,t\,E}\,(2-\nu) = \frac{P\,D}{4\,t\,E}(1-2\nu+4-2\nu) \rightarrow$$

$$\varepsilon_V = \frac{P\,D}{4\,t\,E}\,(5-4\nu) \qquad (3\text{-}8)$$

Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση

4.1 Διαστάσεις, ιδιότητες υλικών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το δίκτυο των αγωγών που εξετάζουμε φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Σχέδιο αυλών

Στους επόμενους πίνακες, επεξηγούνται οι διαστάσεις, οι θερμοκρασίες και τα σημεία στήριξης του σχεδίου.

Σύμβολο	Τιμή (°C)
T_0	500
T_1	20

Πίνακας 4-1. Θερμοκρασίες προβλήματος

Σύμβολο	Τιμή (mm)
L	15200
l	1400
a	1000
b	200
c	6200
ρ	50

Πίνακας 4-2. Διαστάσεις αυλών

Σύμβολο	Στήριξη
A	Πάκτωση
B	Πάκτωση
C	Κύλιση
D	Κύλιση

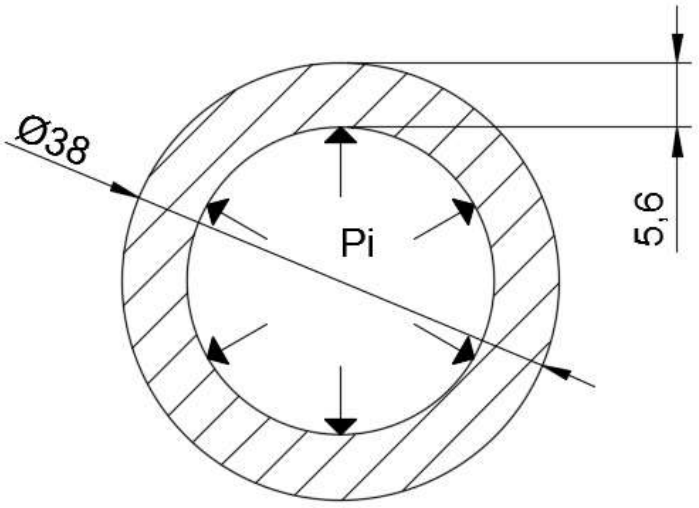
Πίνακας 4-3. Στηρίξεις

Συνοψίζοντας, υπέρθερμος ατμός θερμοκρασίας 500°C μεταφέρεται μέσω των αυλών, οι οποίοι βρίσκονται σε θερμοκρασία αναφοράς (περιβάλλοντος) 20°C. Στα σημεία A,B έχουμε πάκτωση ενώ στα C,D κύλιση.

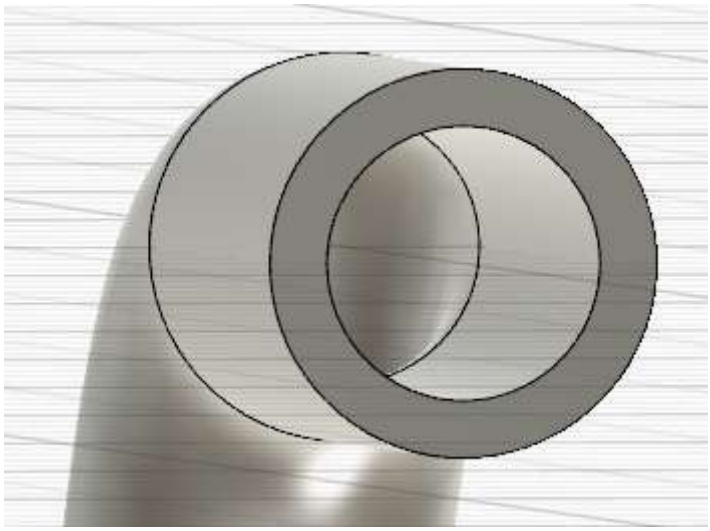
Η πίεση που ασκείται στο εσωτερικό των αγωγών είναι **190 bar** (19MPa). Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το υλικό 10CrMo9-10, με εξωτερική διάμετρο 38mm και πάχος 5,6mm (βλέπε παρακάτω εικόνες). Οι ιδιότητες του υλικού αυτού και του ατμού στους 500°C παρουσιάζονται στον πίνακα 4-4.

Υλικό	Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (W/(m·K))	Δυναμικό ιξώδες (Pa·s)
10CrMo9-10	7850	175	35.2	
Ατμός	68,133		0,09	2,97E-05

Πίνακας 4-4. Ιδιότητες ατμού και 10CrMo9-10



Εικόνα 4.2: Σχέδιο διατομής αγωγού, υπό εσωτερική πίεση Pi=190bar



Εικόνα 4.3: 3D σχέδιο διατομής

4.2 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

4.2.1 *Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων*

Η υπολογιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση τριγωνικών ισοπαραμετρικών πεπερασμένων στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά βασίζονται στην ισοπαραμετρική διατύπωση που δίνει τη δυνατότητα απόκτησης στοιχείων με καμπυλόγραμμες πλευρές. Τα ισοπαραμετρικά στοιχεία βρίσκουν εφαρμογή σε προβλήματα επιπέδων κατασκευών, στερεών κατασκευών, ελασμάτων και κελυφών, είναι στοιχεία με περισσότερους κόμβους, άρα και μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η αρχή στην οποία στηρίζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία στηρίζεται στη θεώρηση καταρχάς μιας απεικόνισης ένα προς ένα μεταξύ των καμπυλόγραμμων και καρτεσιανών συντεταγμένων. Έχοντας αυτή την απεικόνιση μπορούμε να πάρουμε σε τοπικά συστήματα τις συναρτήσεις σχήματος και στη συνέχεια με κατάλληλους μετασχηματισμούς να θεμελιώσουμε τις ιδιότητες του στοιχείου βάσει των καμπυλόγραμμων συντεταγμένων. Για να πάρουμε τις τελικές εξισώσεις ισορροπίας του σώματος όμως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αντίστροφη απεικόνιση, εφόσον οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται στον καρτεσιανό χώρο.

4.2.2 *Θεωρητικό υπόβαθρο*

Θεωρώντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) και ότι οι κομβικοί παράμετροι είναι οι συντεταγμένες (x_i, y_i, z_i), των κόμβων (i=1,2,..), για κάθε στοιχείο e, ισχύει η σχέση:

$$x = N' x^e \tag{4-1}$$

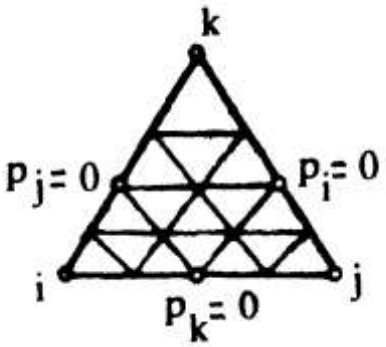
Όπου

$$x^T = [x, y, z] \tag{4-2}$$

$$x^{e^T} = [x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2] \tag{4-3}$$

και N’ το μητρώο το συναρτήσεων σχήματος [18].

Κατά τον υπολογισμό των διάφορων συναρτήσεων σχήματος vi, έχει βρεθεί ότι αυτές είναι τις περισσότερες φορές συναρτήσεις, όχι των x,y,z αλλά ορισμένων άλλων μεταβλητών, π.χ. των ξ,η για τα ορθογώνια και των pi (i=1,2,3) για τα τριγωνικά στοιχεία. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση του N’, άρα και των v'_i.



Εικόνα 4.4: Τριγωνικό ισοπαραμετρικό στοιχείο

Ένα τυπικό αρχικό στοιχείο, το γενεσιουργό στοιχείο που αναφέρεται σε ένα σύστημα φυσικών ή τοπικών συντεταγμένων, μπορεί να απεικονισθεί με τη βοήθεια των κατάλληλων συναρτήσεων σχήματος v'_i σε ένα παραμορφωμένο στοιχείο, το παράγωγο στοιχείο στο καρτεσιανό σύστημα.

Ανάλογα την επιλογή των συντεταγμένων x_i, y_i, z_i των κόμβων i, ένας κύβος του φυσικού χώρου για παράδειγμα μπορεί να μετασχηματισθεί σε ένα περισσότερο ή λιγότερο στρεβλό εξάεδρο. Η απεικόνιση αυτή είναι μοναδική όταν η Ιακωβιανή (4-2) της σχέσης 4-1 δεν αλλάζει πρόσημο στον χώρο κάθε στοιχείου [19].

$$J = \frac{\partial(x,y,\dots)}{\partial(\xi,\eta,\dots)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \dots \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \dots \\ . & . & \dots \\ . & . & \dots \\ . & . & \dots \end{bmatrix} \tag{4-2}$$

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, προκύπτει πως ένα τυπικό αρχικό στοιχείο που αναφέρεται σε ένα σύστημα φυσικών ή τοπικών συντεταγμένων, μπορεί να απεικονισθεί με τη βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων σχήματος v_i σε ένα παράγωγο στοιχείο στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Εάν ο αριθμός των κόμβων σε κάθε πλευρά του στοιχείου που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των συντεταγμένων (x_i, y_i, z_i), συμπίπτει με τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των μετατοπίσεων (u_i, υ_i, w_i), τότε N'=N, και το στοιχείο αυτό λέγεται ισοπαραμετρικό. Σε αντίθετη περίπτωση, λέγεται υπερπαραμετρικό ή υποπαραμετρικό (εάν οι κόμβοι που περιγράφουν τις μετατοπίσεις είναι λιγότεροι ή περισσότεροι αντίστοιχα από τους κόμβους που περιγράφουν τις συντεταμένες).

Έστω ένα ισοπαραμετρικό στοιχείο (N=N'), η σχέση που μας δίνει τη μεταβολή των μετατοπίσεων σε ένα τυχαίο στοιχείο e, είναι

$$q = N\, q^e \tag{4-3}$$

ή

$$u = \sum_{i=1}^{p} \nu_i u_i \ , \qquad \upsilon = \sum_{i=1}^{p} \nu_i \upsilon_i \ , \qquad w = \sum_{i=1}^{p} \nu_i w_i \tag{4-4}$$

Όπου p ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου e και q_i (i=1,2,..,p) η μετατόπιση του κόμβου i.

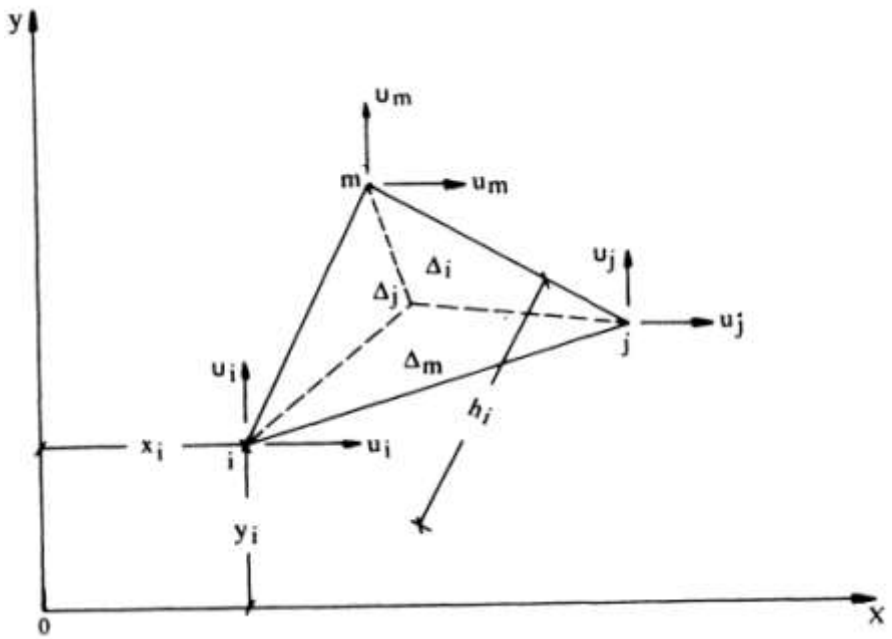
Επίσης, έστω η σχέση που μας δίνει τη μεταβολή του πεδίου των συντεταγμένων στο τυχαίο στοιχείο e είναι

$$x = N\, x^e \tag{4-5}$$

ή

$$x = \sum_{i=1}^{p} \nu_i x_i \ , \qquad y = \sum_{i=1}^{p} \nu_i y_i \ , \qquad z = \sum_{i=1}^{p} \nu_i z_i \tag{4-6}$$

Όπου x_i, y_i, z_i οι μετατοπίσεις του κόμβου i στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 4.5: Επίπεδο τριγωνικό στοιχείο

Σε ένα επίπεδο τριγωνικό στοιχείο όπως της παραπάνω εικόνας (4.5), το μητρώο δυσκαμψίας προκύπτει από τη σχέση [20]

$$k^e = \int_{V^e}^{V} B^T\, D\ \ B\, dV \tag{4-7}$$

Όπου:

V^e ο στοιχειώδης όγκος του στοιχείου

B το μητρώο που δίνεται από τη σχέση (4-8)

D το μητρώο ελαστικών σταθερών που δίνεται από τη σχέση (4-9)

$$B = \frac{1}{2\,\Delta}\begin{bmatrix} y_{jm} & 0 & y_{mi} & 0 & y_{ij} & 0 \\ 0 & x_{mj} & 0 & x_{im} & 0 & x_{ji} \\ x_{mj} & y_{jm} & x_{im} & y_{mi} & x_{ji} & y_{ij} \end{bmatrix} \tag{4-8}$$

Όπου Δ η συνολική επιφάνεια του τριγώνου.

Το μητρώο ελαστικών σταθερών δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{t^3 E}{12\,(1-\nu^2)}\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{4-9}$$

Το διάνυσμα που δίνει τις στατικά ισοδύναμες κομβικές δυνάμεις δίνεται από τις σχέση:

$$F^e = F_f^e + F_T^e + F_{e_0}^e = \int_{V^e}^{V} N^T\, f\, dV + \int_{S^e}^{S} N^T\, T\, dS + \int_{V^e}^{V} B^T D\, \varepsilon_0 dV \tag{4-10}$$

Όπου N ένα μητρώο τελεστής της μορφής:

$$N = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{4-11}$$

Στα ισοπαραμετρικά στοιχεία, στον υπολογισμό των σχέσεων (4-7) και (4-10) υπεισέρχονται τόσο οι συναρτήσεις σχήματος όσο και οι πρώτοι παράγωγοι των συναρτήσεων σχήματος ως προς x,y,z. Επομένως, για τον υπολογισμό των k^e, F^e είναι απαραίτητοι 2 μετασχηματισμοί:

1) Επειδή οι συναρτήσεις σχήματος v_i (i=1,2,…,p), (p ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου (e)), ορίζονται στο τοπικό (ή καμπυλόγραμμο) σύστημα συντεταγμένων, είναι απαραίτητο να βρεθεί η σχέση που συνδέει τις παραγώγου των v_i στο καρτεσιανό (ή καθολικό) σύστημα συντεταγμένων συναρτήσει των παραγώγων του v_i ως προς το τοπικό (ή καμπυλόγραμμο) σύστημα συντεταγμένων
2) Δεδομένου ότι τα μητρώα N και B είναι γνωστά μόνο στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, πρέπει να μετασχηματιστούν τα ολοκληρώματα στις σχέσεις (4-7) και (4-10) από ολοκληρώματα στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων σε ολοκληρώματα στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

Για τον πρώτο μετασχηματισμό έστω το σύστημα (ξ,η,ζ) των τοπικών συντεταγμένων που αντιστοιχεί στο (x,y,z) σύστημα των καθολικών συντεταγμένων. Χρησιμοποιώντας τον κανόνα μερικής διαφόρισης προκύπτει

$$\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial \xi} \tag{4-12}$$

Πραγματοποιώντας αντίστοιχα τη διαφόριση και για τις 2 άλλες συντεταγμένες, τελικά έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\zeta \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{4-13}$$

Όπου J το Ιακωβιανό μητρώο που συνδέει τις παραγώγους ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων με τις παραγώγους ως προς το καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Βάσει των συναρτήσεων σχήματος v'_i που καθορίζουν τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων ($v'_i = v_i$ στην περίπτωση των ισοπαραμετρικών στοιχείων), το μητρώο J γράφεται

$$J = \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \xi} x_i & \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \xi} y_i & \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \xi} z_i \\ \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \eta} x_i & \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \eta} y_i & \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \eta} z_i \\ \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \zeta} x_i & \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \zeta} y_i & \sum \frac{\partial v_i'}{\partial \zeta} z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1'}{\partial \xi} & \frac{\partial v_2'}{\partial \xi} & \frac{\partial v_3'}{\partial \xi} & \dots \\ \frac{\partial v_1'}{\partial \eta} & \frac{\partial v_2'}{\partial \eta} & \frac{\partial v_3'}{\partial \eta} & \dots \\ \frac{\partial v_1'}{\partial \zeta} & \frac{\partial v_2'}{\partial \zeta} & \frac{\partial v_3'}{\partial \zeta} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ . & . & . \end{bmatrix} \tag{4-14}$$

Οπότε, οι πρώτοι παράγωγοι ως προς το καθολικό σύστημα συντεταγμένων, λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (4-13) είναι

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} \tag{4-15}$$

Για τον 2° μετασχηματισμό όπου και απαιτείται αλλαγή τόσο στις μεταβλητές όσο και στα όρια ολοκλήρωσης, χρησιμοποιείται η σχέση

$$dV = t\,dx\,dy = t(detJ)d\xi\,d\eta \tag{4-16}$$

Όπου, t το πάχος του επίπεδου στοιχείου, και

$$detJ = \frac{\partial(x,y)}{\partial(\xi,\eta)} \tag{4-17}$$

Επίσης η σχέση

$$dV = dx\,dy\,dz = (detJ)d\xi\,d\eta\,d\zeta \tag{4-18}$$

για τρισδιάστατα προβλήματα.

Θεωρώντας ότι το αντίστροφο του J μπορεί να βρεθεί, η κατ' όγκο ολοκλήρωση που αντιστοιχεί στην εξίσωση (4-7) μπορεί να πραγματοποιηθεί στην περίπτωση ενός τρισδιάστατου προβλήματος ως εξής:

$$k_e = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\int_{1-}^{1} B^T D\,B\,(detJ)d\xi\,d\eta\,d\zeta \tag{4-19}$$

Όπου, οι καμπυλόγραμμες συντεταγμένες λαμβάνονται ανηγμένες ως προς το αρχικό σχήμα και όχι ως προς το παραμορφωμένο.

4.2.3 *Πυκνότητα πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε*

Για την υπολογιστική ανάλυση που ακολουθεί, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τα παραπάνω πεπερασμένα στοιχεία, με 2 διαφορετικά πλέγματα. Το μεγαλύτερο μέρος των υπολογισμών έγινε με το "κανονικό" πλέγμα, που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, με ένα πλέγμα σχετικά πυκνό, που επαρκούσε για ακριβείς υπολογισμούς. Για να διαπιστωθεί η διαφορά στα αποτελέσματα με πυκνότερο πλέγμα, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για ομάδα μοντέλων με πολύ πυκνό πλέγμα (ίδια στοιχεία με τα προηγούμενα), με περισσότερους κόμβους. Τα αποτελέσματα αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Εικόνα 4.6: Πλέγμα μοντέλου

4.3 Αλλαγή διαστάσεων, προσανατολισμού

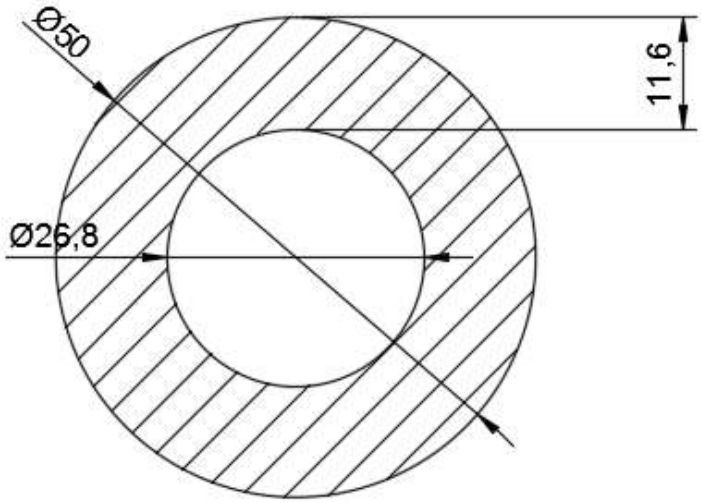
Εκτός από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για τις κανονικές διαστάσεις του μοντέλου (πίνακας 4-2), έγιναν ακόμη υπολογισμοί για 3 περιπτώσεις:

α) η μεγάλη διάσταση L (εικόνα 4-1), να έχει μικρότερο μήκος (10m,5m),

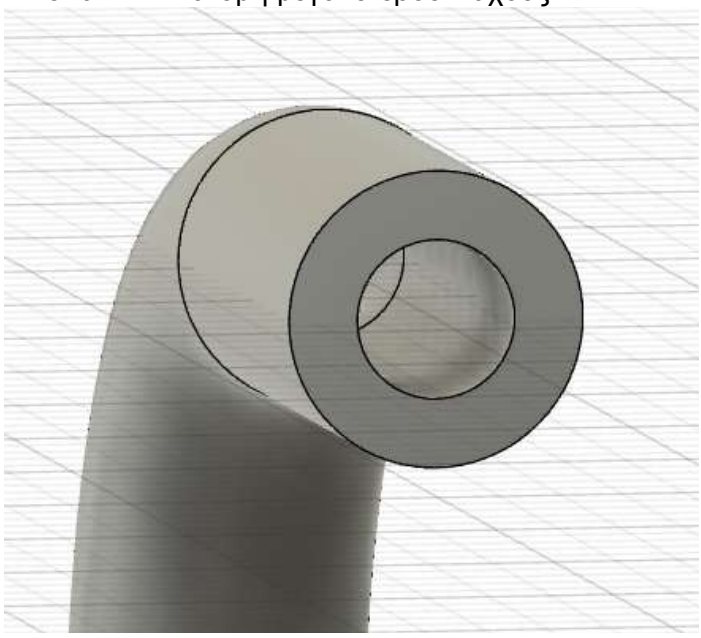
β) το πάχος του σωλήνα να είναι μεγαλύτερο από 5,6mm σε 11,6mm (εικόνες 4-7 και 4-8), και

γ) το δίκτυο των σωληνώσεων να βρίσκεται τόσο σε οριζόντια όσο και κατακόρυφη θέση

Με αυτόν τρόπο εξετάστηκε και η συσχέτιση των διαστάσεων και του πάχους του σωλήνα με τις φορτίσεις που επιβάλλονται.



Εικόνα 4.7: Διατομή μεγαλύτερου πάχους

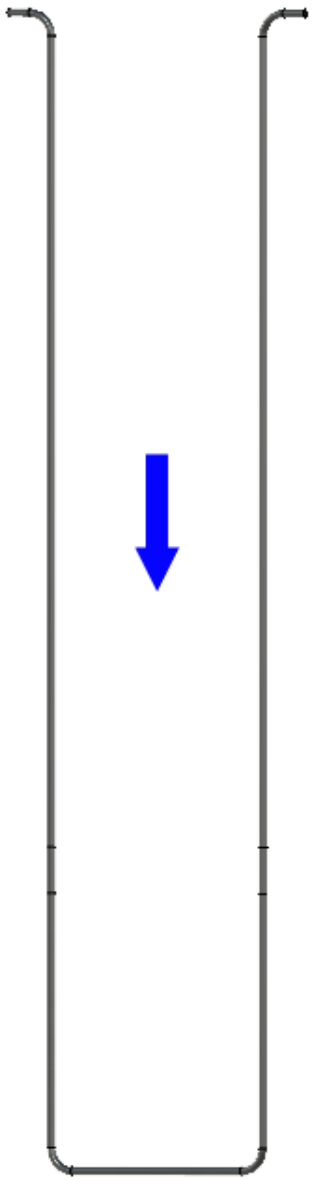


Εικόνα 4.8: 3D αποτύπωση διατομής μεγαλύτερου πάχους

4.4 Φορτίσεις

Οι φορτίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην υπολογιστική ανάλυση είναι οι εξής:

- Βαρύτητα
- Θερμοκρασία
- Εσωτερική πίεση
- Υπέρθεση όλων των προηγουμένων



Εικόνα 4.9: Μοντέλο υπό την επίδραση μόνο της βαρύτητας

4.5 Στηρίξεις

Όπως προαναφέρθηκε, οι στηρίξεις που του μοντέλου ήταν 2 ειδών:

- Πάκτωση στα σημεία A,B
- Κύλιση στα σημεία C,D

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις όμως, εκτός από το παραπάνω standard, χωρίς την κύλιση στα σημεία C και D για να εξεταστεί η συμπεριφορά των μοντέλων.

4.6 Ανακεφαλαίωση

Για όλα τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε σετ προσομοιώσεων, αλλάζοντας κάθε φορά μια παράμετρο κρατώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες, με σκοπό την όσο γίνεται καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο κεφάλαιο 5 ακολουθεί η υπολογιστική ανάλυση.

Κεφάλαιο 5: Υπολογιστική Ανάλυση

5.1 Προσεγγίσεις κανονικού μοντέλου με κύλιση (πάχος 5,6mm, κανονικό πλέγμα)

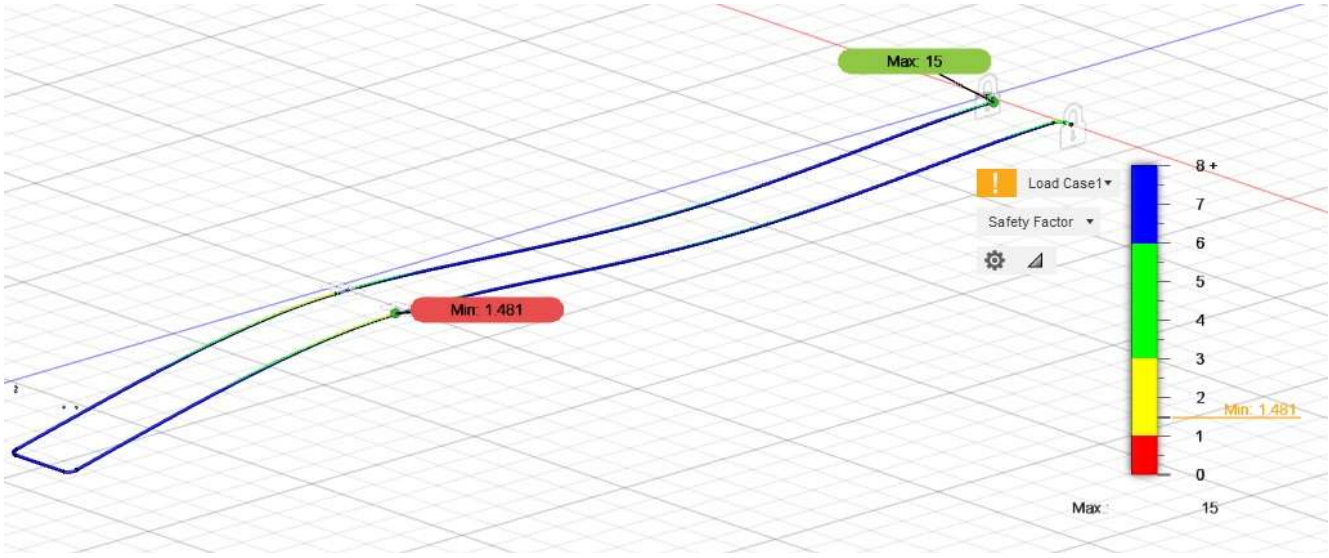
5.1.1 *Οριζόντια θέση*

5.1.1.1 *Μήκος σωληνώσεων, σύμφωνα με το σχέδιο (15,2m)*

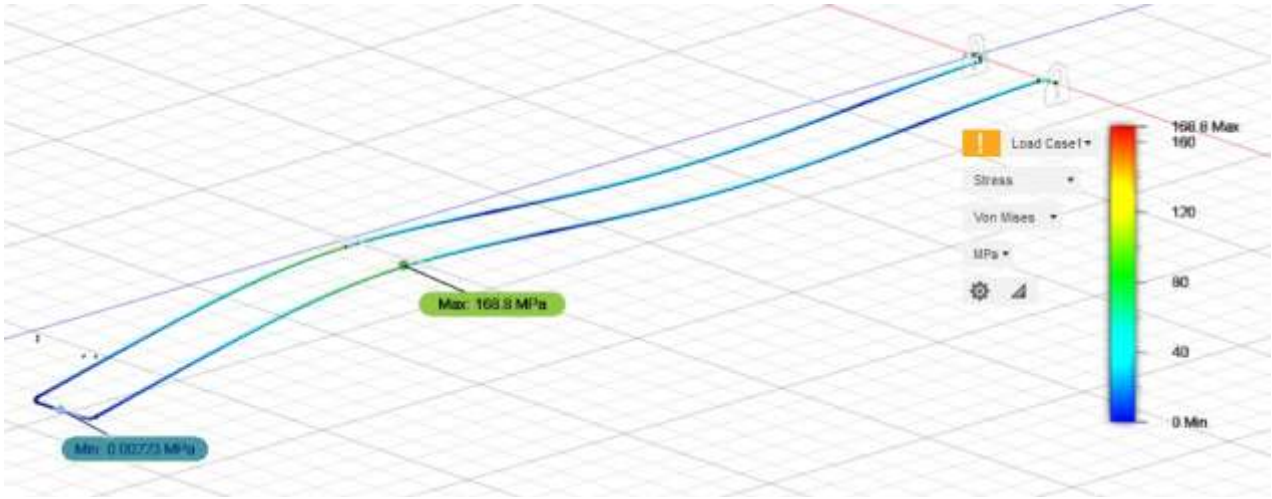
α) Επίδραση μόνο της βαρύτητας

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	1.481	15
Stress		
Von Mises	0.00223 MPa	168.8 MPa
1st Principal	-86.99 MPa	207.4 MPa
3rd Principal	-211.9 MPa	88.15 MPa
Normal XX	-96.63 MPa	92.45 MPa
Normal YY	-89.88 MPa	89.91 MPa
Normal ZZ	-210.6 MPa	207.3 MPa
Shear XY	-46.05 MPa	45.04 MPa
Shear YZ	-39.36 MPa	66.83 MPa
Shear ZX	-41.73 MPa	41.83 MPa
Displacement		
Total	0 mm	272.6 mm
X	-0.01949 mm	0.009687 mm
Y	-272.6 mm	0.04156 mm
Z	-1.4 mm	1.401 mm
Reaction Force		
Total	0 N	2750 N
X	-1611 N	1402 N
Y	-2316 N	2605 N
Z	-770.4 N	768.3 N
Strain		
Equivalent	1.185E-08	0.001032
1st Principal	5.08E-09	9.651E-04
3rd Principal	-9.264E-04	-1.357E-08
Normal XX	-2.4E-04	2.408E-04
Normal YY	-3.444E-04	3.381E-04
Normal ZZ	-8.368E-04	8.202E-04
Shear XY	-5.841E-04	5.713E-04
Shear YZ	-4.992E-04	8.477E-04
Shear ZX	-5.292E-04	5.305E-04

Πίνακας 5-1: Report επίδρασης μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.1: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.2: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση von Mises για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

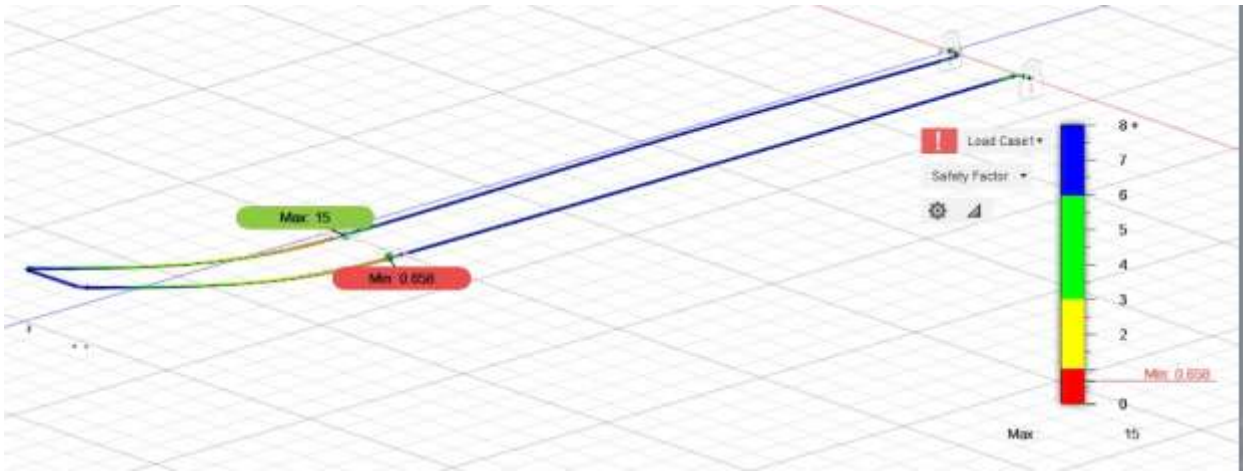
Παρατηρούμε ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας και η μέγιστη τάση είναι σε σημείο στήριξης του αγωγού, και συγκεκριμένα στην κύλιση. Ο μέγιστος συντελεστής ασφαλείας εντοπίζεται σε σημείο που ξεκινά το ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού, κάτω από την καμπύλη της του άκρου που είναι πακτωμένο.

β) Επίδραση μόνο της πίεσης

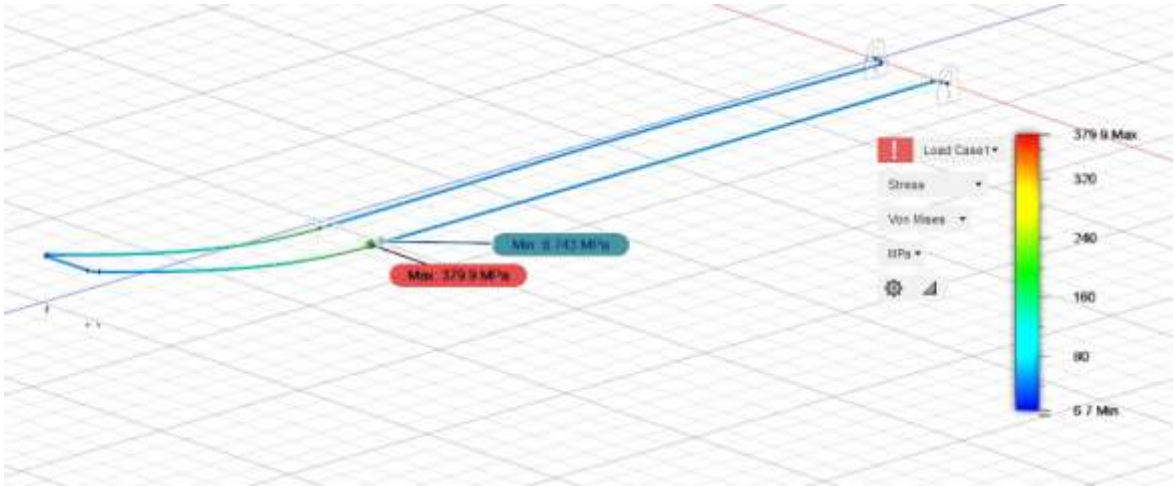
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.658	15
Stress		
Von Mises	6.743 MPa	379.9 MPa
1st Principal	-150.4 MPa	449.1 MPa

3rd Principal	-457.4 MPa	216.2 MPa
Normal XX	-181.5 MPa	220.7 MPa
Normal YY	-158.1 MPa	222.4 MPa
Normal ZZ	-457.2 MPa	446.2 MPa
Shear XY	-76.52 MPa	78.91 MPa
Shear YZ	-144.7 MPa	49.52 MPa
Shear ZX	-79.67 MPa	67.2 MPa
Displacement		
Total	0 mm	739.8 mm
X	-23.94 mm	3.638 mm
Y	-17.58 mm	739.8 mm
Z	-4.927 mm	3.688 mm
Reaction Force		
Total	0 N	6954 N
X	-4291 N	3895 N
Y	-6424 N	5027 N
Z	-678 N	575.2 N
Strain		
Equivalent	4.164E-05	0.002268
1st Principal	1.459E-05	0.001861
3rd Principal	-0.002185	1.733E-05
Normal XX	-6.933E-04	4.157E-04
Normal YY	-6.73E-04	7.809E-04
Normal ZZ	-0.001864	0.001718
Shear XY	-9.704E-04	0.001001
Shear YZ	-0.001835	6.28E-04
Shear ZX	-0.00101	8.522E-04

Πίνακας 5-2: Report επίδρασης μόνο της εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.3: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο της πίεσης



Εικόνα 5.4: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση von Mises για την επίδραση μόνο της πίεσης

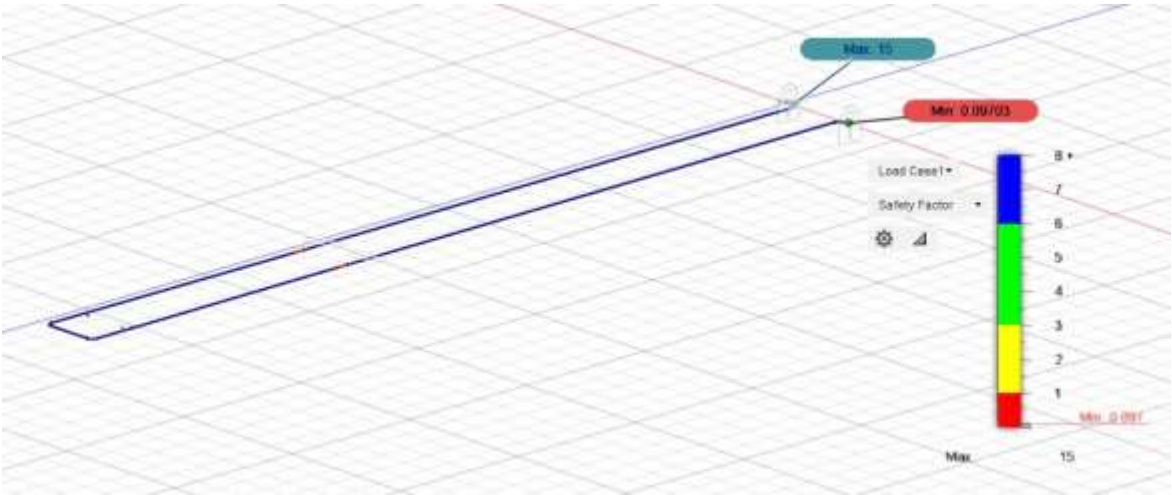
Παρατηρούμε ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας και η μέγιστη τάση εμφανίζονται γύρω από το σημείο της κύλισης.

γ) Επίδραση μόνο θερμοκρασίας

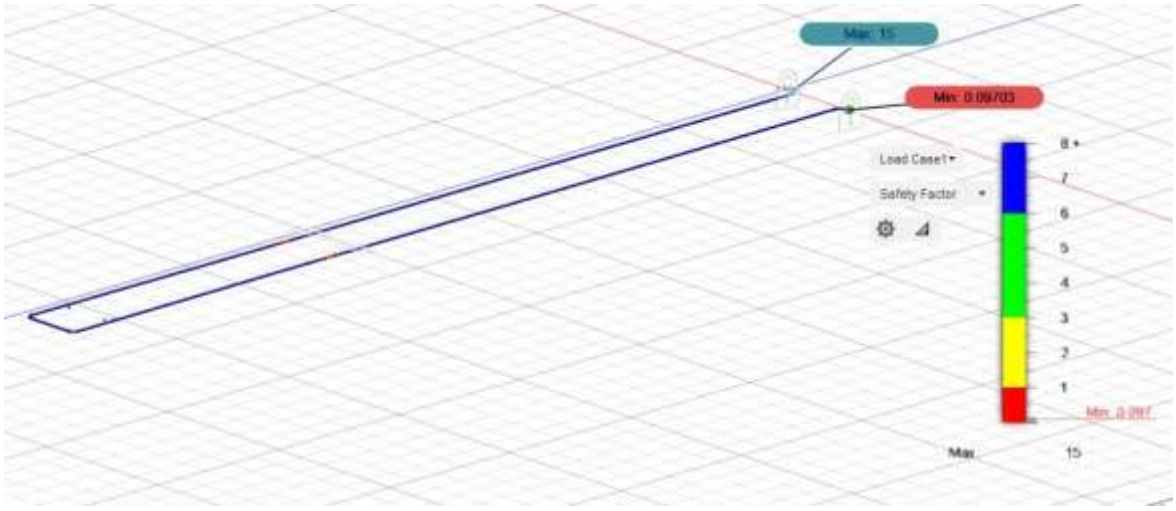
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09703	15
Stress		
Von Mises	0.0035 MPa	2576 MPa
1st Principal	-871.6 MPa	1547 MPa
3rd Principal	-3084 MPa	69.26 MPa
Normal XX	-1854 MPa	1535 MPa
Normal YY	-2224 MPa	476.9 MPa
Normal ZZ	-2256 MPa	669.2 MPa
Shear XY	-910.6 MPa	916.4 MPa
Shear YZ	-414.2 MPa	396.4 MPa
Shear ZX	-1121 MPa	1153 MPa
Displacement		
Total	0 mm	88.27 mm
X	-2.918 mm	3.01 mm
Y	-0.2756 mm	0.1408 mm
Z	-0.1111 mm	88.27 mm
Reaction Force		
Total	0 N	50150 N
X	-43546 N	45747 N
Y	-41429 N	41832 N
Z	-42050 N	42655 N

Strain		
Equivalent	0.006029	0.01949
1st Principal	0.005692	0.01976
3rd Principal	-0.01339	0.005844
Normal XX	-0.003414	0.01584
Normal YY	-0.003434	0.008622
Normal ZZ	-6.184E-04	0.01132
Shear XY	-0.01155	0.01162
Shear YZ	-0.005253	0.005028
Shear ZX	-0.01422	0.01462
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	2.834E-12 W / mm^2	3.25E-08 W / mm^2
X	-3.231E-08 W / mm^2	2.113E-08 W / mm^2
Y	-1.275E-08 W / mm^2	1.438E-08 W / mm^2
Z	-7.278E-09 W / mm^2	1.141E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	6.297E-11 C / mm	7.223E-07 C / mm
X	-4.695E-07 C / mm	7.179E-07 C / mm
Y	-3.195E-07 C / mm	2.833E-07 C / mm
Z	-2.536E-07 C / mm	1.617E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-3: Report επίδρασης μόνο θερμοκρασίας

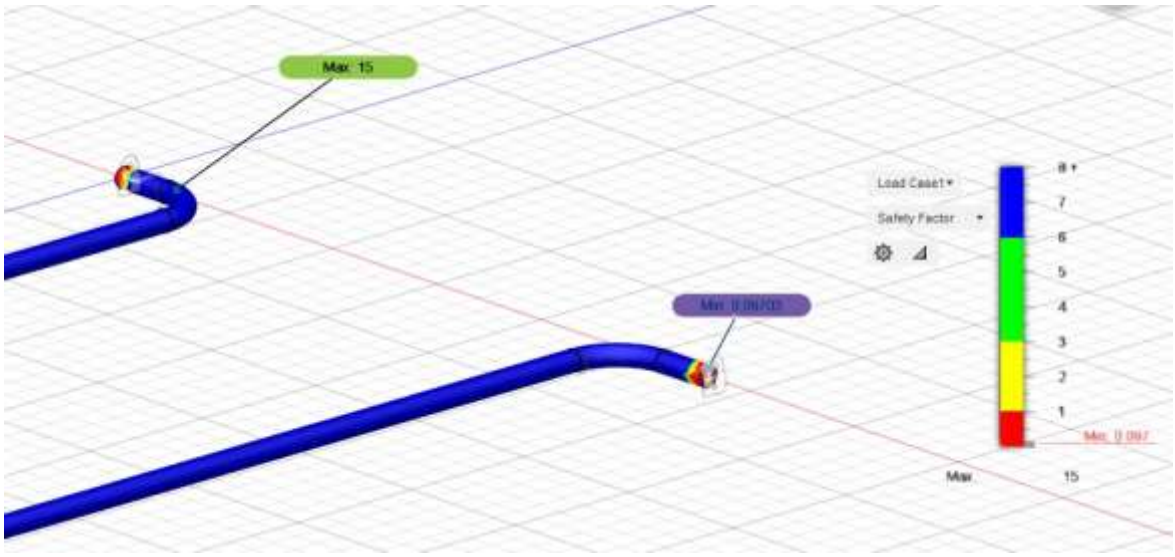


Εικόνα 5.5: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο της εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.6: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση von Mises για την επίδραση μόνο της θερμοκρασίας.

Παρατηρούμε ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (εικόνα 5.7) και η μέγιστη τάση εμφανίζονται στο σημείο της πάκτωσης.



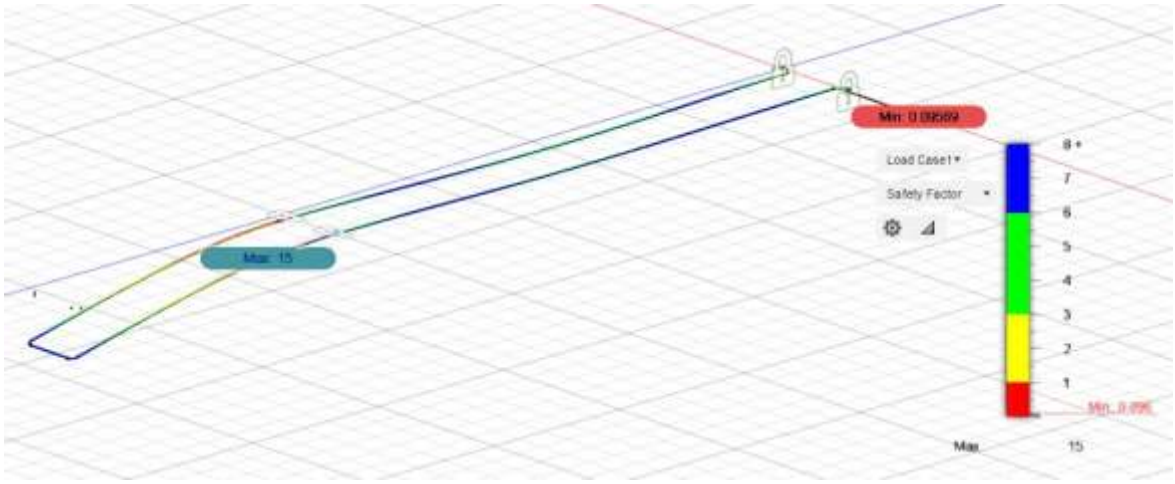
Εικόνα 5.7: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας, με την επίδραση της θερμοκρασίας

δ) Συνολική φόρτιση

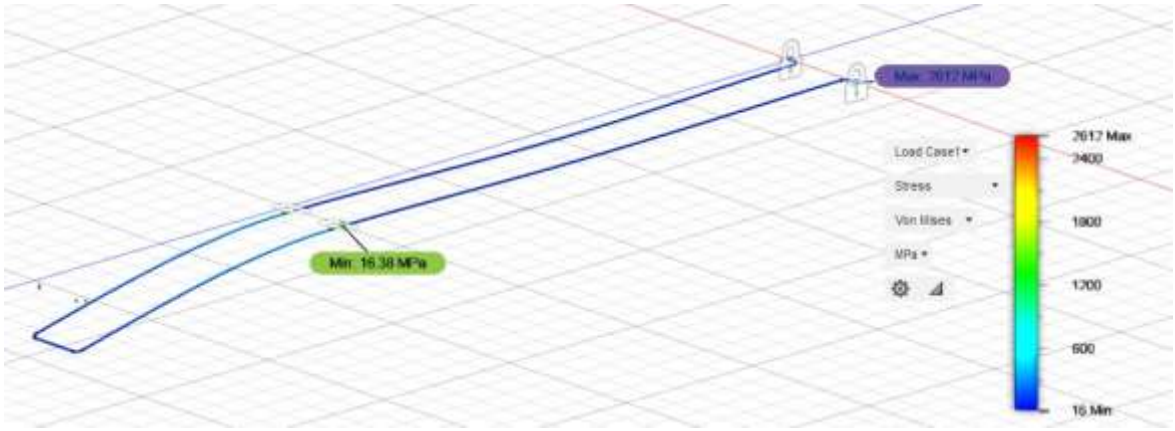
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09569	15
Stress		
Von Mises	16.38 MPa	2612 MPa
1st Principal	-1522 MPa	1611 MPa
3rd Principal	-3118 MPa	106 MPa

Normal XX	-2153 MPa	1604 MPa
Normal YY	-2251 MPa	456.3 MPa
Normal ZZ	-2268 MPa	989.8 MPa
Shear XY	-905.5 MPa	901.6 MPa
Shear YZ	-400 MPa	383.1 MPa
Shear ZX	-1113 MPa	1184 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1016 mm
X	-6.439 mm	24.53 mm
Y	-1013 mm	0.1313 mm
Z	-0.1505 mm	94.49 mm
Reaction Force		
Total	0 N	54982 N
X	-47935 N	46795 N
Y	-41416 N	50797 N
Z	-42084 N	42863 N
Strain		
Equivalent	0.004581	0.01961
1st Principal	0.004414	0.01985
3rd Principal	-0.01352	0.00587
Normal XX	-0.003503	0.0161
Normal YY	-0.00336	0.008935
Normal ZZ	-6.059E-04	0.01186
Shear XY	-0.01148	0.01144
Shear YZ	-0.005073	0.004859
Shear ZX	-0.01412	0.01502
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	2.834E-12 W / mm^2	3.25E-08 W / mm^2
X	-3.231E-08 W / mm^2	2.113E-08 W / mm^2
Y	-1.275E-08 W / mm^2	1.438E-08 W / mm^2
Z	-7.278E-09 W / mm^2	1.141E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	6.297E-11 C / mm	7.223E-07 C / mm
X	-4.695E-07 C / mm	7.179E-07 C / mm
Y	-3.195E-07 C / mm	2.833E-07 C / mm
Z	-2.536E-07 C / mm	1.617E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-4: Report συνολικής φόρτισης

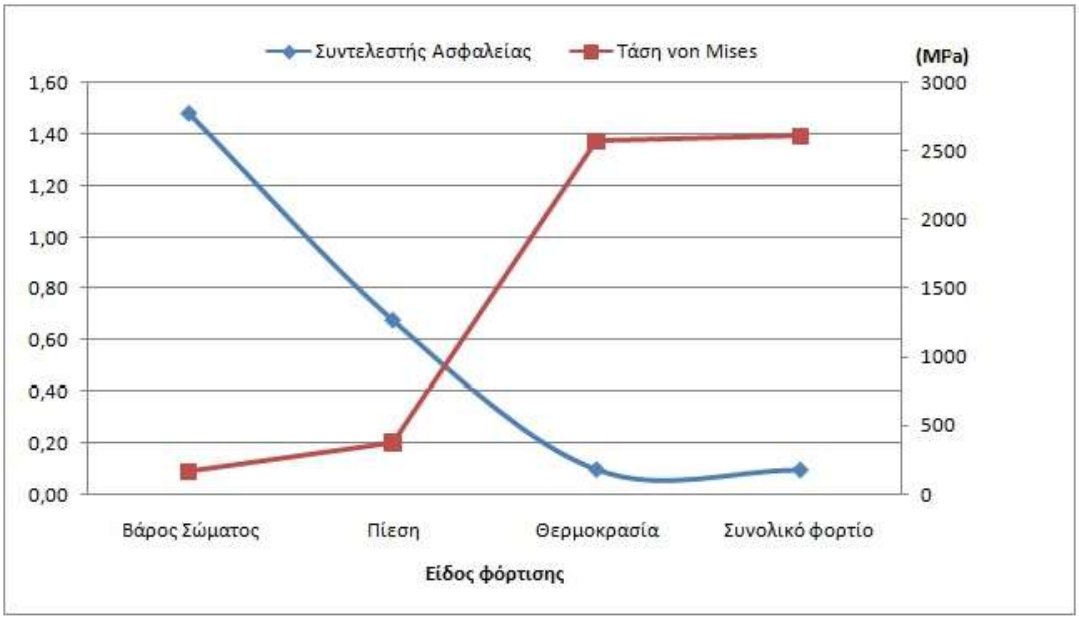


Εικόνα 5.7: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



Εικόνα 5.8: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση von Mises για συνολική φόρτιση

Παρατηρούμε πως οι πιο δυσμενείς συνθήκες εμφανίζονται ίδια σημεία που εμφανίζονταν με την επίδραση μόνο της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 5-1: Συντελεστής ασφαλείας και τάση von Mises συναρτήσει της φόρτισης για L=15,2m

Συνοψίζοντας, για το συγκεκριμένο μοντέλο σε οριζόντια θέση και με κύλιση, αυτό που παρατηρούμε είναι πως ο μεγαλύτερος παράγοντας που παίζει ρόλο για την διαμόρφωση του συντελεστή ασφαλείας και της τάσης von Mises, είναι η επίδραση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η επίδραση μόνο του βάρους του είναι ικανοποιητική συνθήκη.

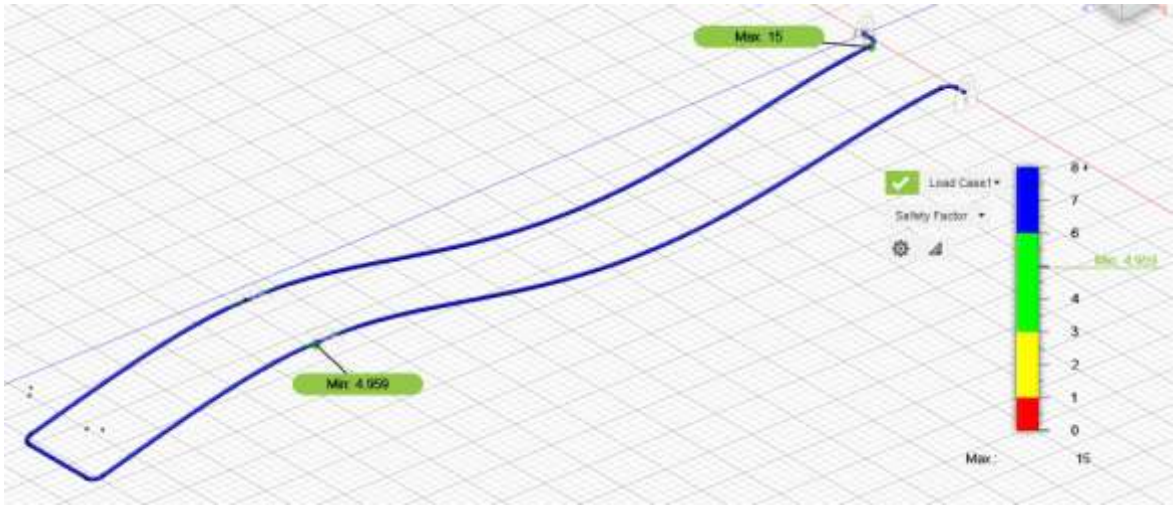
5.1.1.2 *Μικρότερο μήκος αγωγού, (L=10m)*

α) Επίδραση μόνο της βαρύτητας

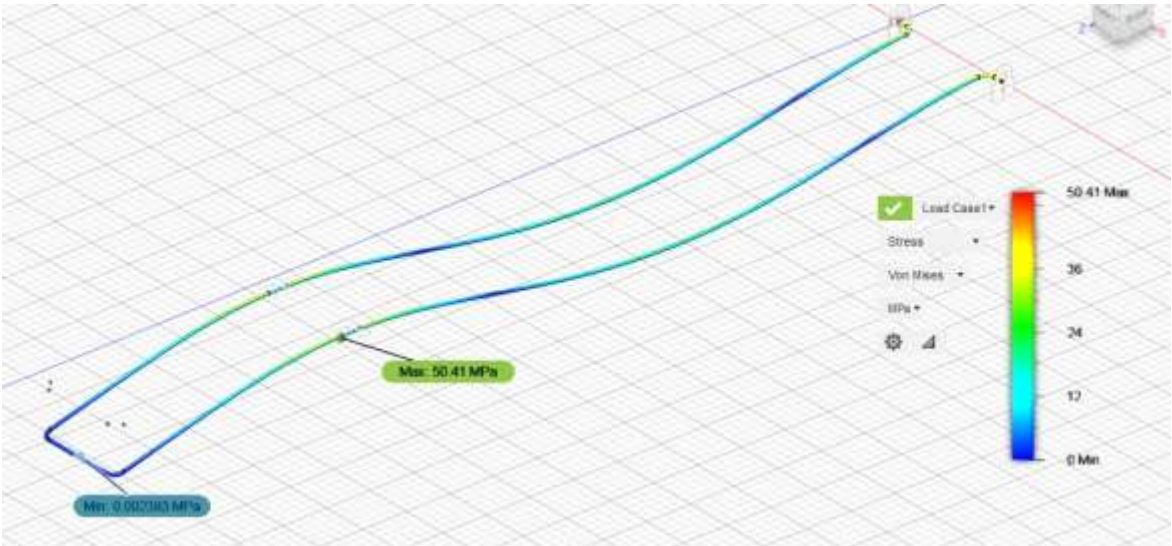
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	4.959	15
Stress		
Von Mises	0.002383 MPa	50.41 MPa
1st Principal	-26.43 MPa	66.16 MPa
3rd Principal	-64.98 MPa	28.71 MPa
Normal XX	-29.57 MPa	30.53 MPa
Normal YY	-27.17 MPa	29.69 MPa
Normal ZZ	-64.68 MPa	65.63 MPa
Shear XY	-23.21 MPa	23.33 MPa
Shear YZ	-20.28 MPa	20.48 MPa
Shear ZX	-21.21 MPa	21.16 MPa
Displacement		

Total	0 mm	24.07 mm
X	-0.002961 mm	0.002959 mm
Y	-24.07 mm	0.01801 mm
Z	-0.2387 mm	0.2387 mm
Reaction Force		
Total	0 N	942.2 N
X	-406.8 N	397.9 N
Y	-395.5 N	870.5 N
Z	-386.9 N	388.7 N
Strain		
Equivalent	1.987E-08	3.46E-04
1st Principal	1.445E-08	3.22E-04
3rd Principal	-3.212E-04	-1.572E-08
Normal XX	-8.925E-05	9.09E-05
Normal YY	-1.001E-04	9.785E-05
Normal ZZ	-2.491E-04	2.497E-04
Shear XY	-2.944E-04	2.958E-04
Shear YZ	-2.572E-04	2.597E-04
Shear ZX	-2.691E-04	2.684E-04

Πίνακας 5-5: Report επίδρασης βαρύτητας



Εικόνα 5.9: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.10: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση von Mises για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

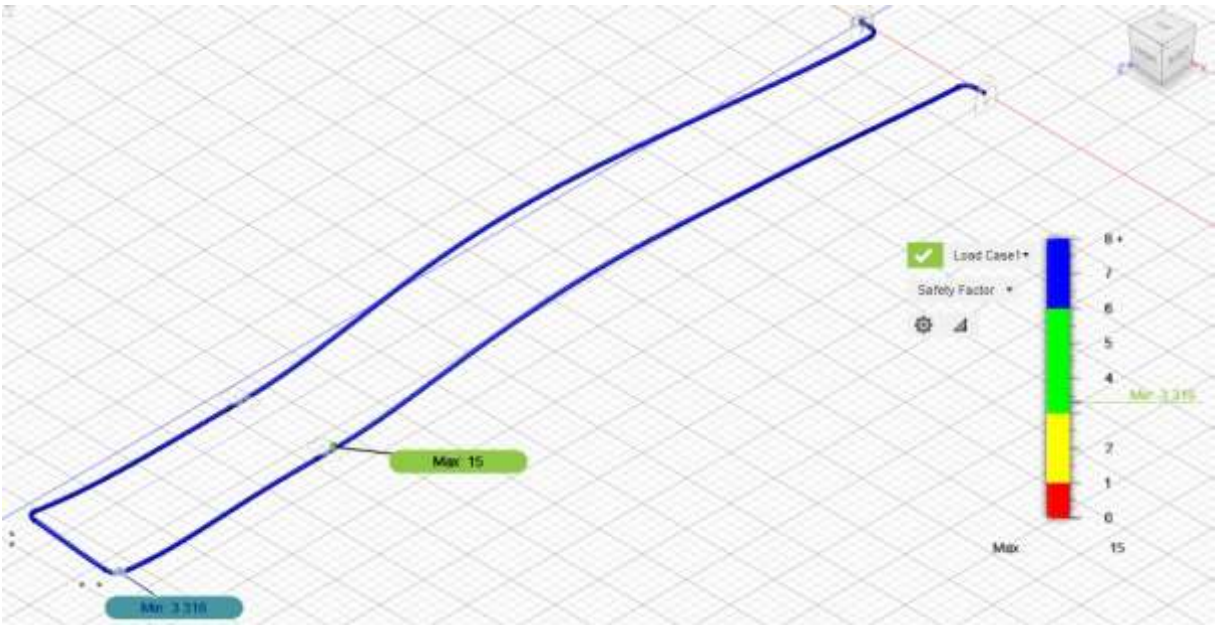
Όπως και στο προηγούμενη περίπτωση, βλέπουμε πως ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας παρατηρείται στο σημείο της κύλισης. Βλέπουμε όμως πως έχει αυξηθεί η τιμή του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας.

β) Επίδραση μόνο της εσωτερικής πίεσης

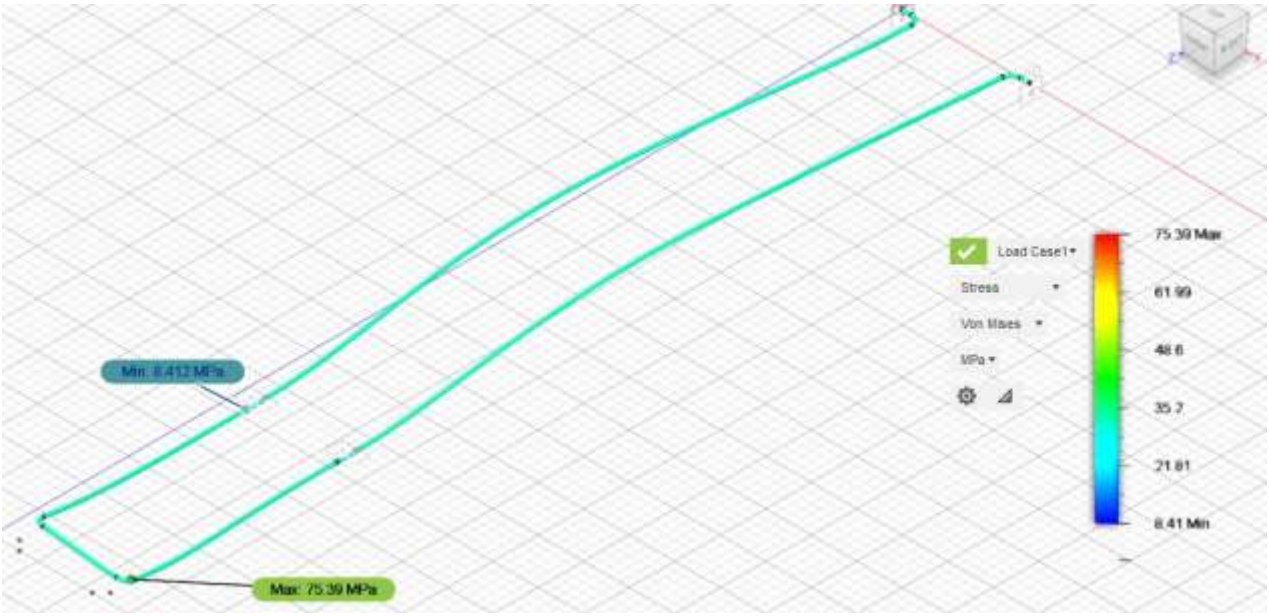
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.316	15
Stress		
Von Mises	8.412 MPa	75.39 MPa
1st Principal	-20.19 MPa	84.56 MPa
3rd Principal	-46.03 MPa	18.17 MPa
Normal XX	-42.5 MPa	74.12 MPa
Normal YY	-30.63 MPa	67.01 MPa
Normal ZZ	-21.24 MPa	62.61 MPa
Shear XY	-42.49 MPa	42.02 MPa
Shear YZ	-40.34 MPa	41.39 MPa
Shear ZX	-26.93 MPa	21.44 MPa
Displacement		
Total	0 mm	5.653 mm
X	-2.102 mm	3.398 mm
Y	-0.005808 mm	4.678 mm
Z	-0.006633 mm	0.4832 mm
Reaction Force		
Total	0 N	1450 N
X	-1340 N	1046 N
Y	-1166 N	1022 N

Z	-452.1 N	514.7 N
Strain		
Equivalent	5.693E-05	6.26E-04
1st Principal	1.188E-05	5.964E-04
3rd Principal	-4.977E-04	-4.982E-05
Normal XX	-2.326E-04	3.063E-04
Normal YY	-2.332E-04	3.381E-04
Normal ZZ	-2.175E-04	3.024E-04
Shear XY	-5.389E-04	5.329E-04
Shear YZ	-5.116E-04	5.249E-04
Shear ZX	-3.416E-04	2.719E-04

Πίνακας 5-6: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.12: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.13: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

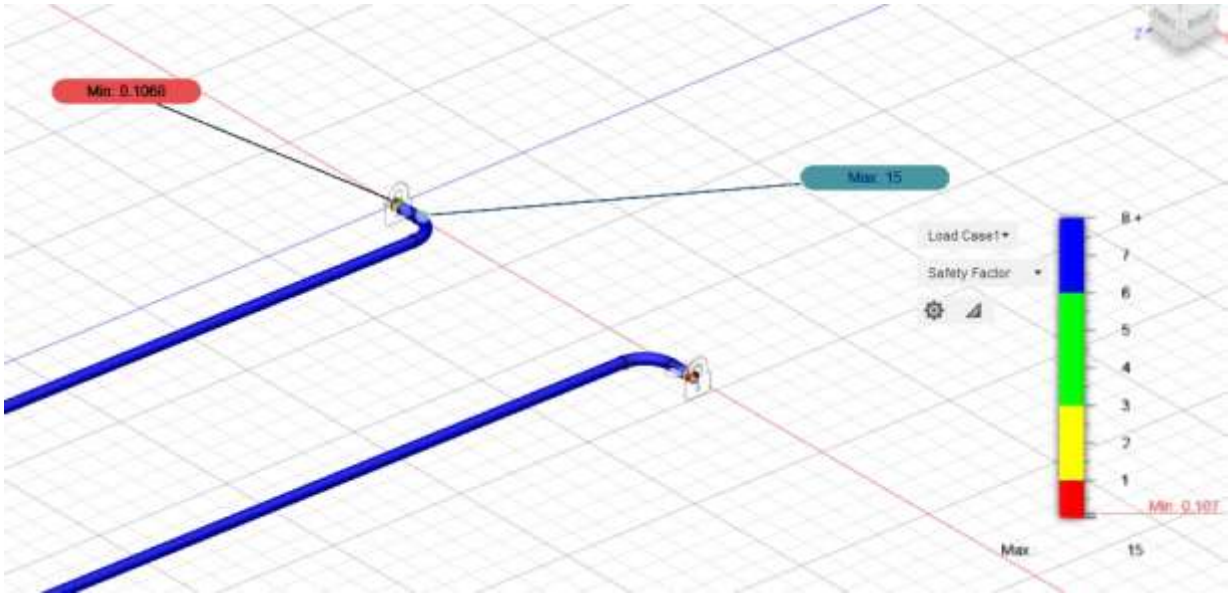
Παρατηρούμε πως οι πιο δυσμενείς συνθήκες εμφανίζονται στο ίδιο σημείο, στην καμπύλη στο κάτω μέρος τους αγωγού. Επίσης παρατηρούμε πως έχει αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας και έχει μειωθεί η τάση Von Mises, συγκριτικά με την ίδια ακριβώς προσομοίωση για L=15,2m.

γ) Επίδραση μόνο της θερμοκρασίας

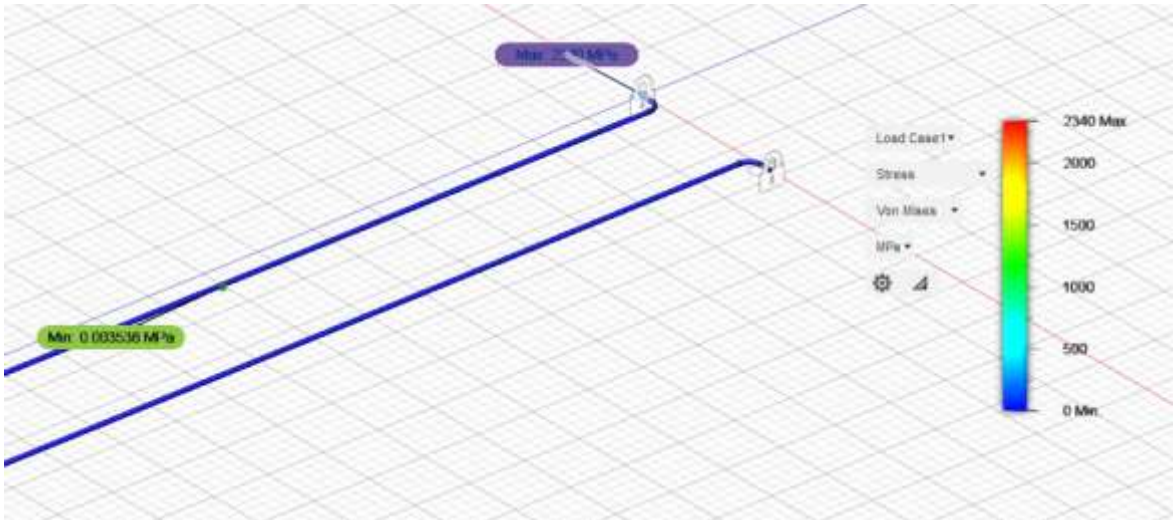
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.1068	15
Stress		
Von Mises	0.003536 MPa	2340 MPa
1st Principal	-823 MPa	1257 MPa
3rd Principal	-3102 MPa	63.71 MPa
Normal XX	-1806 MPa	1256 MPa
Normal YY	-2269 MPa	385.9 MPa
Normal ZZ	-2305 MPa	843.2 MPa
Shear XY	-945.5 MPa	942.9 MPa
Shear YZ	-548.8 MPa	528.9 MPa
Shear ZX	-1092 MPa	1110 MPa
Displacement		
Total	0 mm	58.43 mm
X	-2.898 mm	2.947 mm
Y	-0.1258 mm	0.1179 mm
Z	-0.1148 mm	58.43 mm

Reaction Force		
Total	0 N	46425 N
X	-39832 N	40007 N
Y	-40166 N	39031 N
Z	-30341 N	30329 N
Strain		
Equivalent	0.006064	0.01843
1st Principal	0.005752	0.01875
3rd Principal	-0.01261	0.00582
Normal XX	-0.003059	0.0149
Normal YY	-0.003213	0.0085
Normal ZZ	-6.928E-04	0.01212
Shear XY	-0.01199	0.01196
Shear YZ	-0.00696	0.006709
Shear ZX	-0.01385	0.01407
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.884E-14 W / mm^2	2.246E-10 W / mm^2
X	-9.227E-11 W / mm^2	8.711E-11 W / mm^2
Y	-7.134E-11 W / mm^2	5.128E-11 W / mm^2
Z	-2.139E-10 W / mm^2	1.208E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	8.631E-13 C / mm	4.99E-09 C / mm
X	-1.936E-09 C / mm	2.051E-09 C / mm
Y	-1.139E-09 C / mm	1.585E-09 C / mm
Z	-2.684E-09 C / mm	4.754E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-7: Report επίδρασης θερμοκρασίας



Εικόνα 5.14: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο της θερμοκρασίας



Εικόνα 5.15: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση θερμοκρασίας

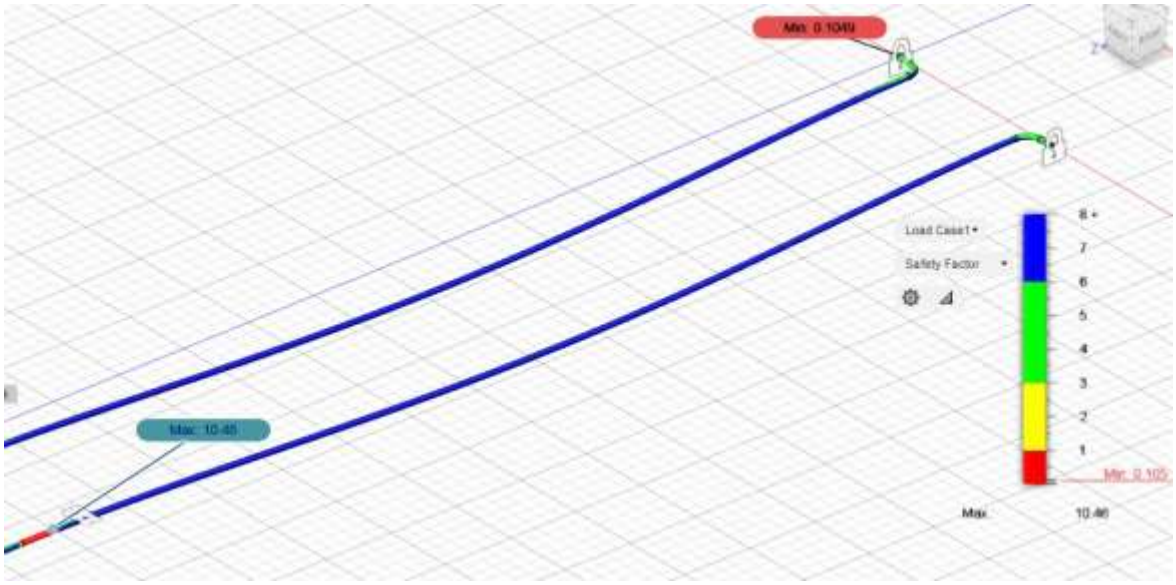
Όπως και στην εικόνα 5.7, παρατηρούμε ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας και η μέγιστη τάση εμφανίζονται στο σημείο της πάκτωσης. Οι τιμές αυτές είναι και εδώ ευνοϊκότερες συγκριτικά με το μεγαλύτερο μήκος.

δ) Συνολική φόρτιση

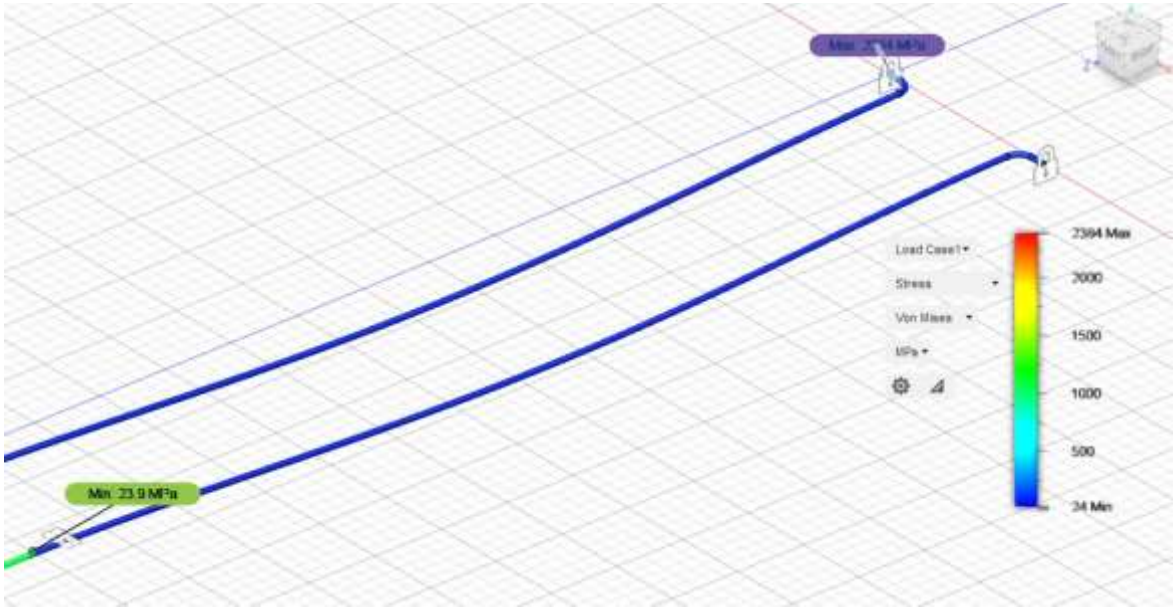
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.1049	10.46
Stress		
Von Mises	23.9 MPa	2384 MPa
1st Principal	-844 MPa	1324 MPa
3rd Principal	-3121 MPa	102.1 MPa

Normal XX	-1799 MPa	1322 MPa
Normal YY	-2275 MPa	387.1 MPa
Normal ZZ	-2310 MPa	886.9 MPa
Shear XY	-963.7 MPa	961.1 MPa
Shear YZ	-530.3 MPa	508.8 MPa
Shear ZX	-1109 MPa	1114 MPa
Displacement		
Total	0 mm	62.51 mm
X	-1.678 mm	6.29 mm
Y	-20.51 mm	0.1152 mm
Z	-0.1169 mm	58.98 mm
Reaction Force		
Total	0 N	46794 N
X	-40774 N	40647 N
Y	-40421 N	40741 N
Z	-30472 N	30630 N
Strain		
Equivalent	0.005978	0.01857
1st Principal	0.005783	0.01884
3rd Principal	-0.01277	0.005836
Normal XX	-0.003019	0.01515
Normal YY	-0.003185	0.008406
Normal ZZ	-6.833E-04	0.01232
Shear XY	-0.01222	0.01219
Shear YZ	-0.006726	0.006453
Shear ZX	-0.01407	0.01412
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.884E-14 W / mm^2	2.246E-10 W / mm^2
X	-9.227E-11 W / mm^2	8.711E-11 W / mm^2
Y	-7.134E-11 W / mm^2	5.128E-11 W / mm^2
Z	-2.139E-10 W / mm^2	1.208E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	8.631E-13 C / mm	4.99E-09 C / mm
X	-1.936E-09 C / mm	2.051E-09 C / mm
Y	-1.139E-09 C / mm	1.585E-09 C / mm
Z	-2.684E-09 C / mm	4.754E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

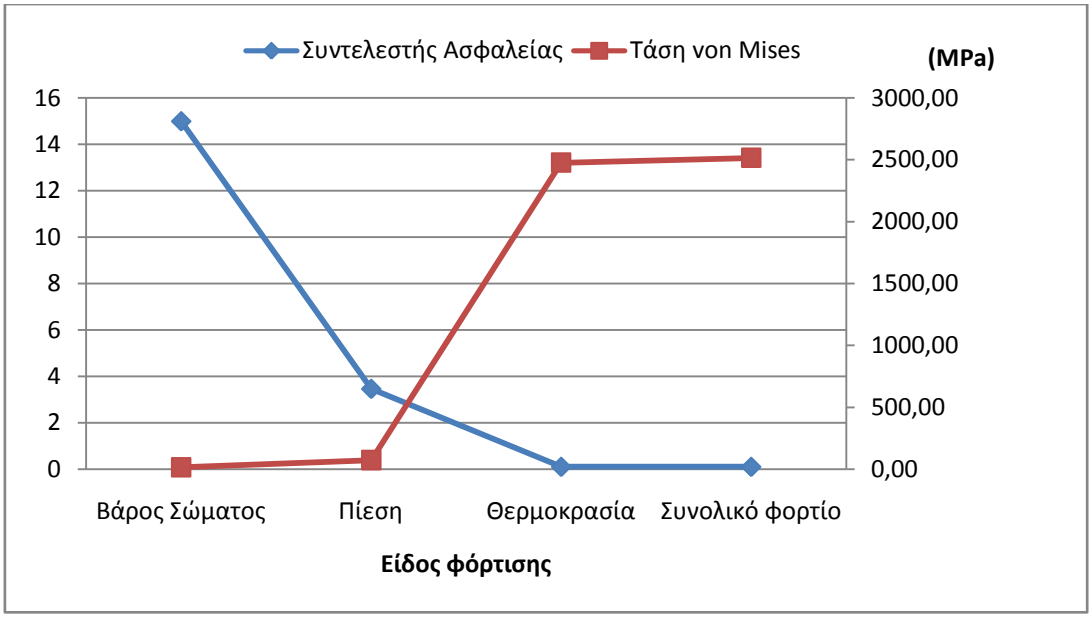
Πίνακας 5-8: Report συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.16: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



Εικόνα 5.17: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για ολική φόρτιση



Διάγραμμα 5-2: Συντελεστής ασφαλείας και τάση von Mises συναρτήσει της φόρτισης για L=10m

Συνοψίζοντας, για το συγκεκριμένο μοντέλο σε οριζόντια θέση και με κύλιση, αυτό που παρατηρούμε είναι πως η συμπεριφορά του είναι ακριβώς ίδια με το μοντέλο μεγαλύτερου μήκους, εμφανίζονται οι δυσμενείς συνθήκες στα ίδια σημεία, αλλά με καλύτερες τιμές (θα παρουσιαστεί συγκριτικό διάγραμμα στην συνέχεια).

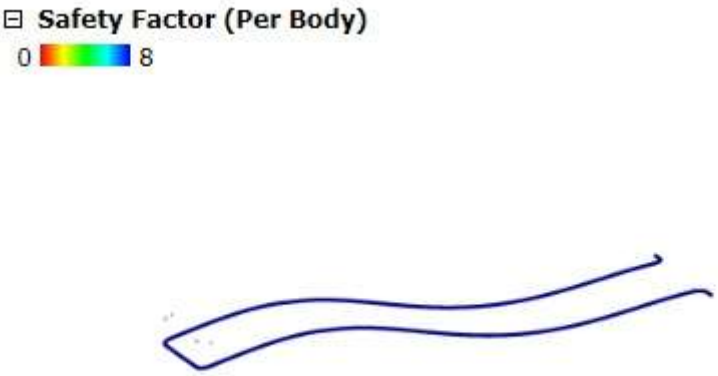
5.1.1.3 *Μικρότερο μήκος αγωγού, (L=5m)*

α) Επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

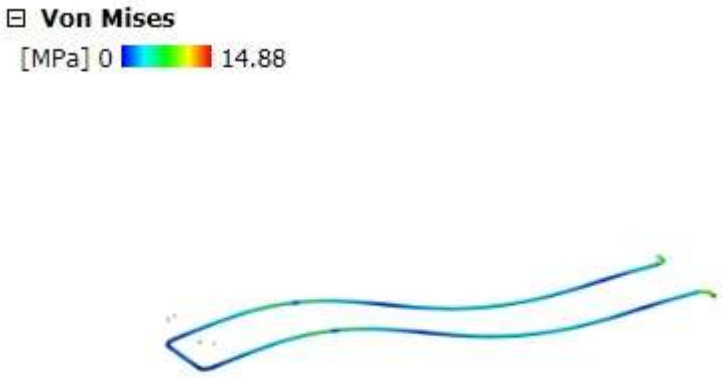
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	15	15
Stress		
Von Mises	6.199E-04 MPa	14.88 MPa
1st Principal	-8.148 MPa	19.13 MPa
3rd Principal	-19.16 MPa	7.817 MPa
Normal XX	-8.922 MPa	8.986 MPa
Normal YY	-8.324 MPa	8.067 MPa
Normal ZZ	-19.02 MPa	19 MPa
Shear XY	-5.422 MPa	5.405 MPa
Shear YZ	-5.454 MPa	6.05 MPa
Shear ZX	-4.843 MPa	4.836 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1.601 mm

X	-0.001684 mm	0.001602 mm
Y	-1.601 mm	0.001981 mm
Z	-0.0338 mm	0.0338 mm
Reaction Force		
Total	0 N	237.2 N
X	-87.37 N	90.76 N
Y	-92.5 N	219.1 N
Z	-90.71 N	90.13 N
Strain		
Equivalent	3.856E-09	9.057E-05
1st Principal	-1.241E-07	8.169E-05
3rd Principal	-8.132E-05	-2.849E-09
Normal XX	-1.975E-05	1.985E-05
Normal YY	-2.993E-05	2.888E-05
Normal ZZ	-7.266E-05	7.394E-05
Shear XY	-6.876E-05	6.855E-05
Shear YZ	-6.918E-05	7.674E-05
Shear ZX	-6.143E-05	6.134E-05

Πίνακας 5-9: Report επίδρασης μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.18: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας την επίδραση μόνο της βαρύτητας του σώματος



Εικόνα 5.19: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση μόνο της βαρύτητας του σώματος

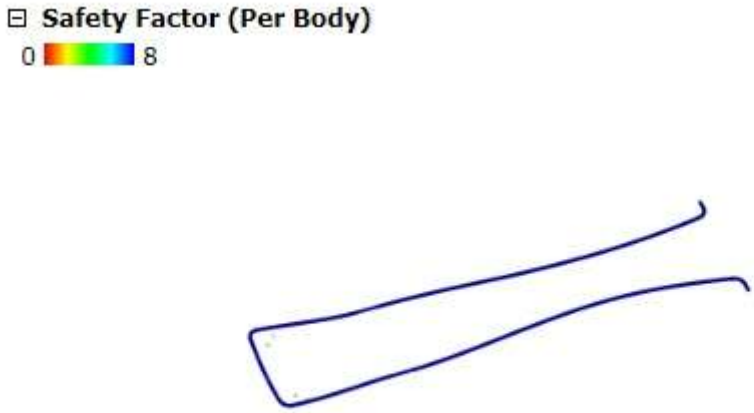
Παρατηρούμε, πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί κατά πολύ.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

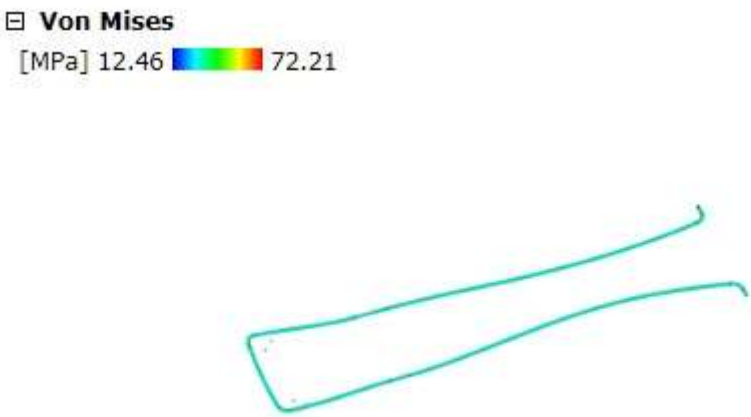
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.462	15
Stress		
Von Mises	12.46 MPa	72.21 MPa
1st Principal	-5.916 MPa	92.17 MPa
3rd Principal	-36.97 MPa	19.21 MPa
Normal XX	-33.37 MPa	80.5 MPa
Normal YY	-30.93 MPa	64.27 MPa
Normal ZZ	-20.94 MPa	59.69 MPa
Shear XY	-41.53 MPa	40.88 MPa
Shear YZ	-40.8 MPa	40.69 MPa
Shear ZX	-24.86 MPa	24.17 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.2571 mm
X	-0.1368 mm	0.1761 mm
Y	-0.1731 mm	0.003825 mm
Z	-0.006647 mm	0.2148 mm
Reaction Force		
Total	0 N	1089 N
X	-904.8 N	883.3 N
Y	-914.2 N	1006 N
Z	-346.1 N	338.6 N
Strain		
Equivalent	7.541E-05	6.111E-04

1st Principal	4.259E-05	5.643E-04
3rd Principal	-4.902E-04	-6.099E-05
Normal XX	-2.162E-04	2.991E-04
Normal YY	-2.191E-04	3.166E-04
Normal ZZ	-2.194E-04	2.887E-04
Shear XY	-5.267E-04	5.185E-04
Shear YZ	-5.174E-04	5.16E-04
Shear ZX	-3.153E-04	3.065E-04

Πίνακας 5-10: Report επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.20: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.21: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

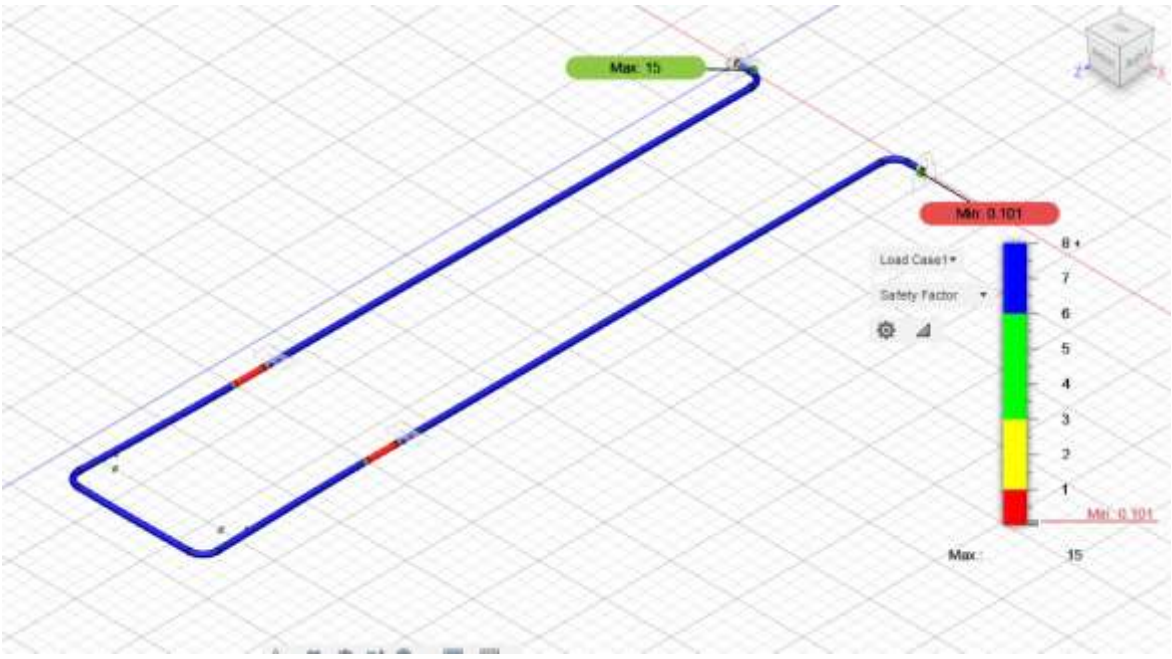
Παρατηρούμε τα ίδια με τα παραπάνω, δηλαδή πως οι πιο δυσμενείς συνθήκες εμφανίζονται στο ίδιο σημείο, στην καμπύλη στο κάτω μέρος τους αγωγού. Επίσης παρατηρούμε πως έχει αυξηθεί κι άλλο συντελεστής ασφαλείας και έχει μειωθεί η τάση Von Mises, συγκριτικά με την ίδια ακριβώς προσομοίωση για L=15,2m και L=10m.

γ) Επίδραση μόνο της θερμοκρασίας

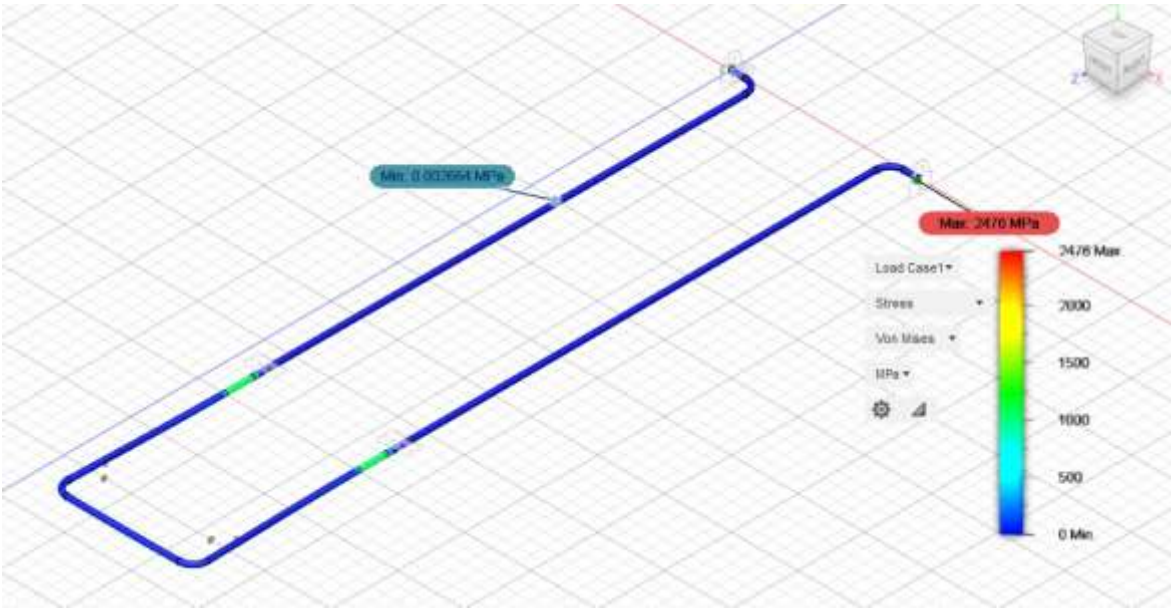
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.101	15
Stress		
Von Mises	0.002664 MPa	2476 MPa
1st Principal	-914.6 MPa	1465 MPa
3rd Principal	-3069 MPa	79.08 MPa
Normal XX	-1802 MPa	1458 MPa
Normal YY	-2328 MPa	420.8 MPa
Normal ZZ	-2319 MPa	912.6 MPa
Shear XY	-1022 MPa	1012 MPa
Shear YZ	-470.6 MPa	449.9 MPa
Shear ZX	-1056 MPa	1028 MPa
Displacement		
Total	0 mm	30.03 mm
X	-2.82 mm	2.816 mm
Y	-0.1346 mm	0.1308 mm
Z	-0.1118 mm	30.03 mm
Reaction Force		
Total	0 N	39579 N
X	-33001 N	32819 N
Y	-34200 N	36566 N
Z	-31059 N	30382 N
Strain		
Equivalent	0.005861	0.01758
1st Principal	0.005747	0.01782
3rd Principal	-0.01209	0.005839
Normal XX	-0.003018	0.01555
Normal YY	-0.003156	0.008568
Normal ZZ	-9.282E-04	0.01247
Shear XY	-0.01296	0.01283
Shear YZ	-0.005969	0.005706
Shear ZX	-0.0134	0.01304
Temperature		
Temperature	500 C	500 C

Heat Flux		
Total	3.476E-13 W / mm^2	1.528E-09 W / mm^2
X	-5.882E-10 W / mm^2	1.181E-09 W / mm^2
Y	-1.241E-09 W / mm^2	1.121E-09 W / mm^2
Z	-8.847E-10 W / mm^2	6.759E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	7.725E-12 C / mm	3.396E-08 C / mm
X	-2.624E-08 C / mm	1.307E-08 C / mm
Y	-2.49E-08 C / mm	2.759E-08 C / mm
Z	-1.502E-08 C / mm	1.966E-08 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-11: Report επίδραση θερμοκρασίας



Εικόνα 5.22: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο της θερμοκρασίας



Εικόνα 5.23: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση της θερμοκρασίας

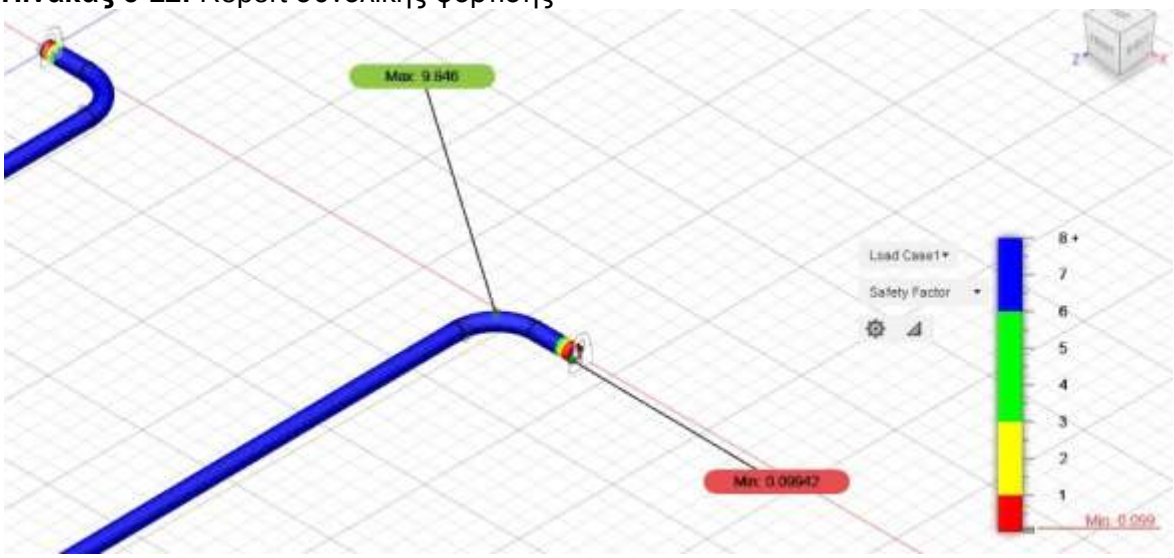
Όπως και παραπάνω, παρατηρούμε ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας και η μέγιστη τάση εμφανίζονται στο σημείο της πάκτωσης. Οι τιμές αυτές είναι και εδώ ευνοϊκότερες συγκριτικά με το μεγαλύτερο μήκος.

δ) Συνολική φόρτιση

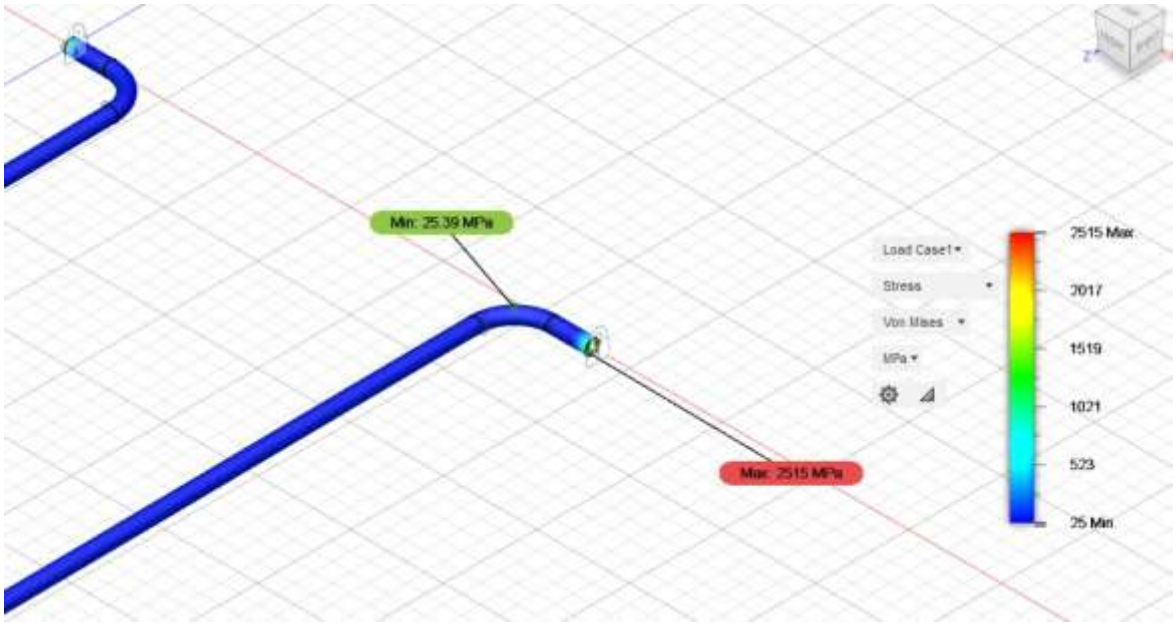
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09942	9.846
Stress		
Von Mises	25.39 MPa	2515 MPa
1st Principal	-912 MPa	1529 MPa
3rd Principal	-3089 MPa	114.9 MPa
Normal XX	-1793 MPa	1525 MPa
Normal YY	-2334 MPa	419.1 MPa
Normal ZZ	-2325 MPa	956.5 MPa
Shear XY	-1030 MPa	1023 MPa
Shear YZ	-445.9 MPa	423.4 MPa
Shear ZX	-1070 MPa	1042 MPa
Displacement		
Total	0 mm	30.3 mm
X	-2.817 mm	2.856 mm
Y	-1.853 mm	0.1155 mm
Z	-0.1148 mm	30.25 mm
Reaction Force		
Total	0 N	40905 N

X	-33992 N	33603 N
Y	-34889 N	37791 N
Z	-31269 N	30630 N
Strain		
Equivalent	0.005839	0.01775
1st Principal	0.005762	0.01793
3rd Principal	-0.01229	0.005809
Normal XX	-0.002976	0.0158
Normal YY	-0.003122	0.008404
Normal ZZ	-9.073E-04	0.01268
Shear XY	-0.01307	0.01297
Shear YZ	-0.005655	0.005369
Shear ZX	-0.01358	0.01321
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.476E-13 W / mm^2	1.528E-09 W / mm^2
X	-5.882E-10 W / mm^2	1.181E-09 W / mm^2
Y	-1.241E-09 W / mm^2	1.121E-09 W / mm^2
Z	-8.847E-10 W / mm^2	6.759E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	7.725E-12 C / mm	3.396E-08 C / mm
X	-2.624E-08 C / mm	1.307E-08 C / mm
Y	-2.49E-08 C / mm	2.759E-08 C / mm
Z	-1.502E-08 C / mm	1.966E-08 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

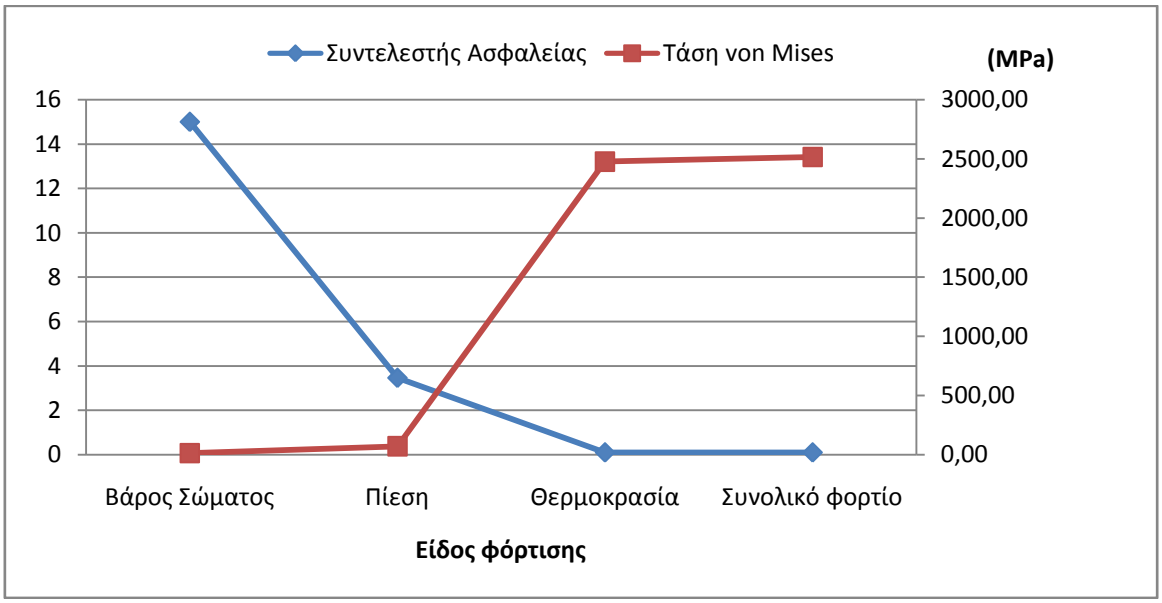
Πίνακας 5-12: Report συνολικής φόρτισης



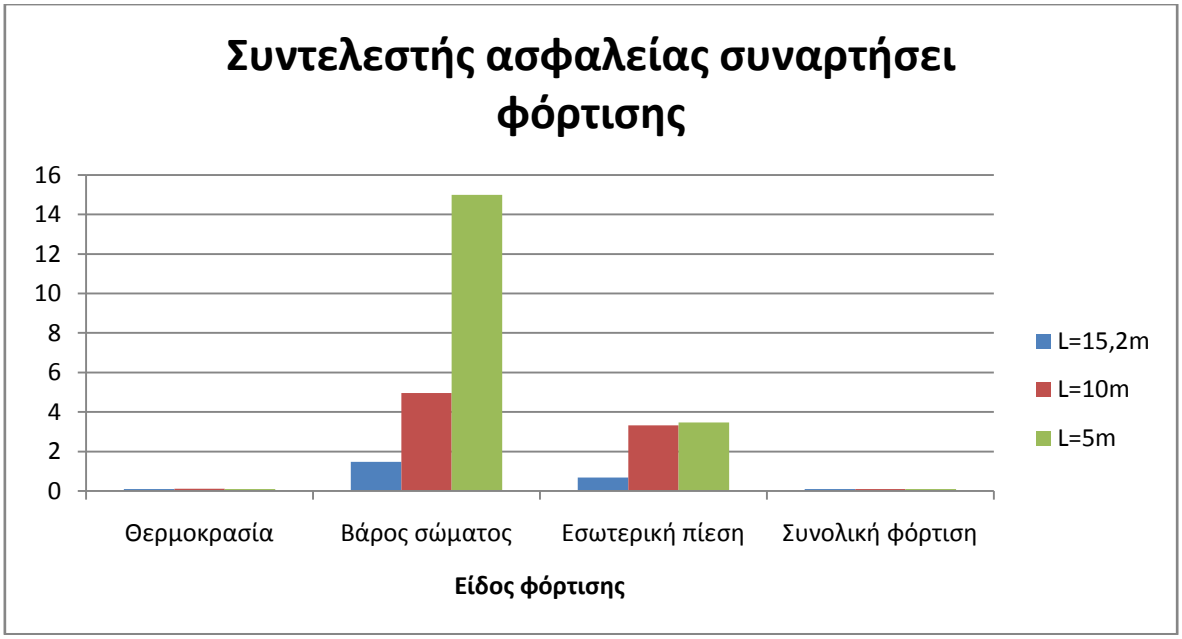
Εικόνα 5.24: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



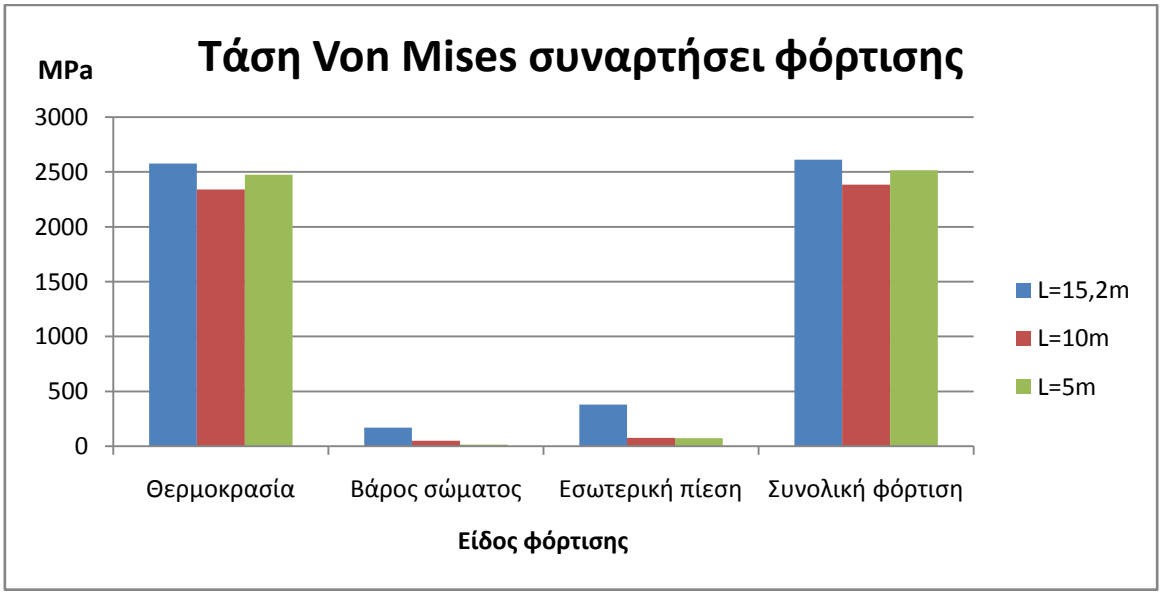
Εικόνα 5.25: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για συνολική φορτιση



Διάγραμμα 5-3: Συντελεστής ασφαλείας και τάση von Mises συναρτήσει της φόρτισης για L=5m



Διάγραμμα 5-4: Συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει φόρτισης για όλα τα μήκη των αγωγών



Διάγραμμα 5-5: Τάση Von Mises συναρτήσει φόρτισης για όλα τα μήκη των αγωγών

Από τα παραπάνω συνοπτικα διαγράμματα, συμπεραίνουμε πως όταν μειώνεται η μεγάλη διάσταση του αγωγού, αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας και μειώνεται η μέγιστη τάση Von Mises. Βέβαια, βλέπουμε πως αυτό ισχύει για τις φορτίσεις του βάρους του σώματος και της εσωτερικής πίεσης. Η εσωτερική θερμοκρασία, φαίνεται πως είναι το "χειρότερο" είδος φόρτισης, καταπονώντας τον αγωγό.

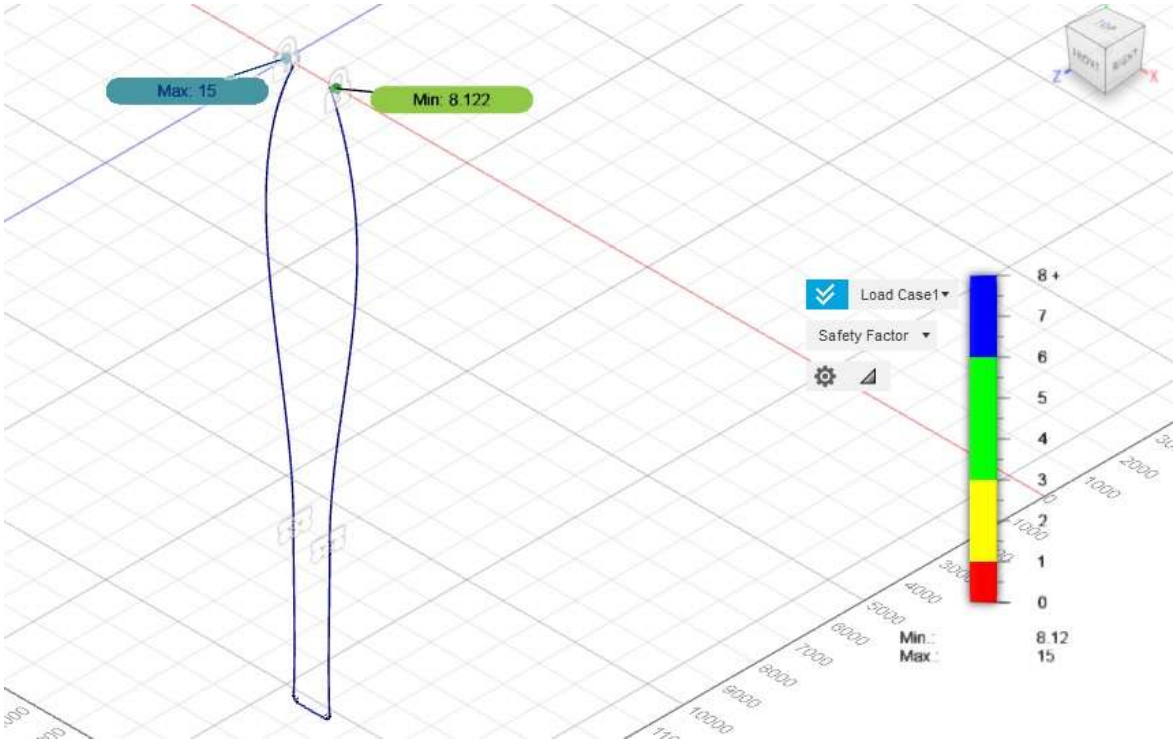
5.1.2 Κατακόρυφη θέση

5.1.2.1 Μήκος σωληνώσεων, σύμφωνα με το σχέδιο (15,2m)

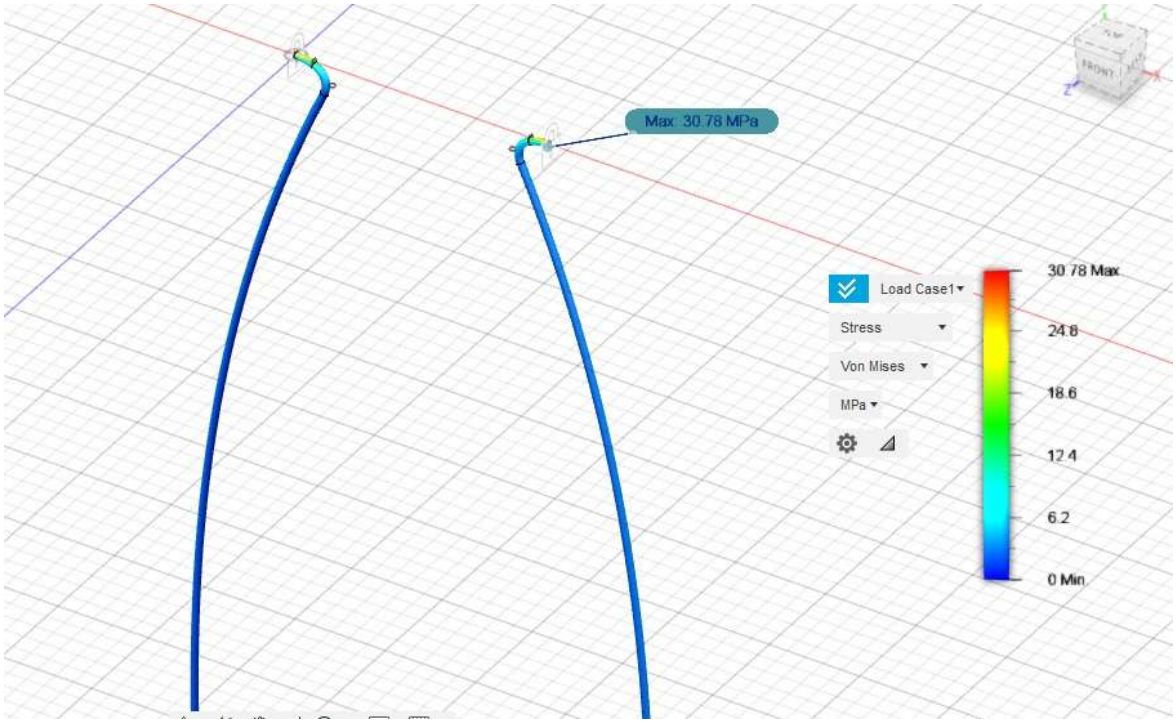
α) Επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	8.122	15
Stress		
Von Mises	7.427E-04 MPa	30.78 MPa
1st Principal	-14.62 MPa	38.1 MPa
3rd Principal	-39.52 MPa	10.48 MPa
Normal XX	-37.61 MPa	37.55 MPa
Normal YY	-16.49 MPa	10.67 MPa
Normal ZZ	-16.25 MPa	12.77 MPa
Shear XY	-6.037 MPa	4.264 MPa
Shear YZ	-2.391 MPa	2.245 MPa
Shear ZX	-3.416 MPa	3.565 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1.418 mm
X	-1.412 mm	1.411 mm
Y	-0.1856 mm	0 mm
Z	-6.887E-04 mm	6.996E-04 mm
Reaction Force		
Total	0 N	659.7 N
X	-593.3 N	612.2 N
Y	-76.5 N	223.4 N
Z	-133.6 N	115.6 N
Strain		
Equivalent	5.087E-09	1.473E-04
1st Principal	2.843E-09	1.655E-04
3rd Principal	-1.762E-04	2.615E-09
Normal XX	-1.528E-04	1.524E-04
Normal YY	-5.729E-05	5.752E-05
Normal ZZ	-4.306E-05	4.269E-05
Shear XY	-7.657E-05	5.408E-05
Shear YZ	-3.032E-05	2.848E-05
Shear ZX	-4.332E-05	4.522E-05

Πίνακας 5-13: Report επίδρασης μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.26: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος



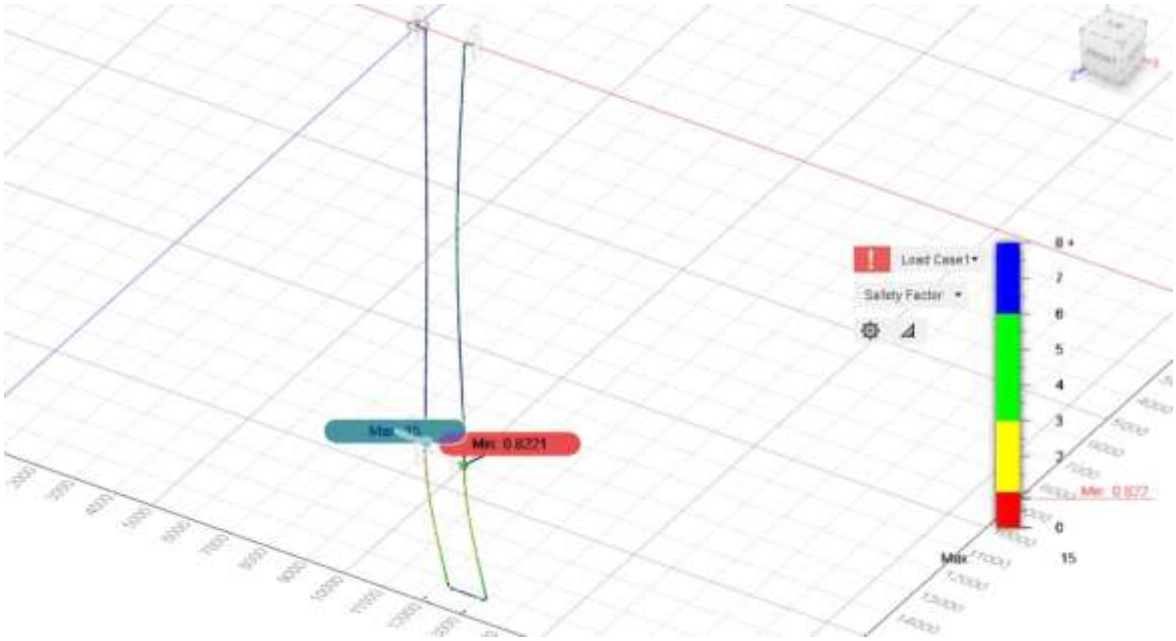
Εικόνα 5.27: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

Παρατηρούμε, πως οι δυσμενείς συνθήκες εμφανίζονται στην περιοχή της πάκτωσης. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας όμως, έχει αρκετά ικανοποιητική τιμή (8,122).

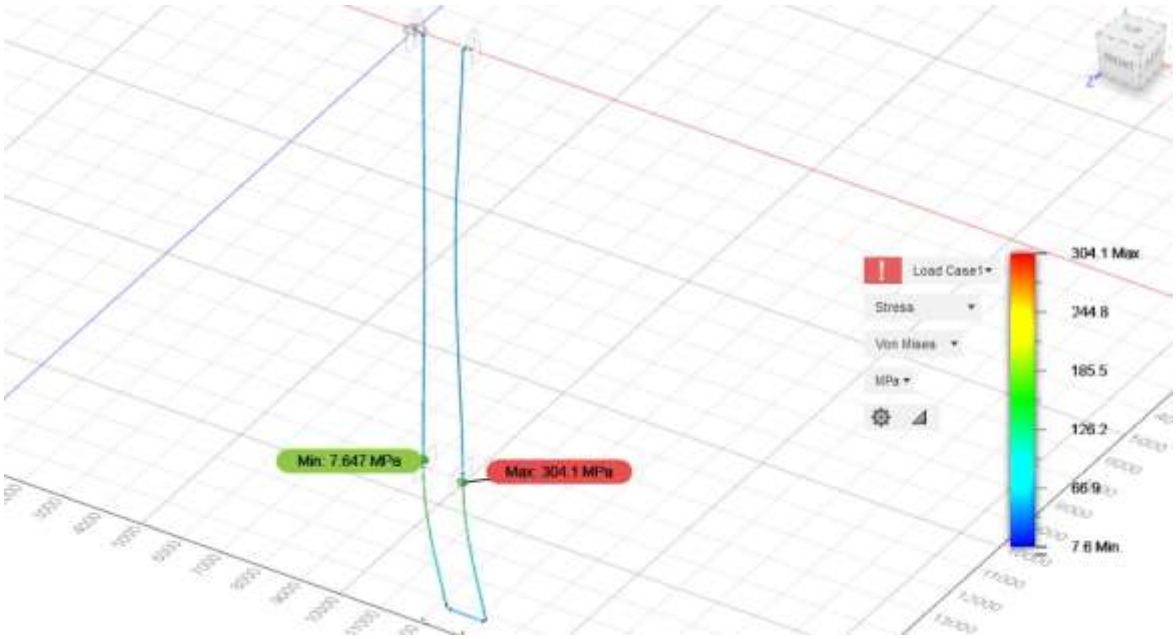
β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.8221	15
Stress		
Von Mises	7.647 MPa	304.1 MPa
1st Principal	-132.2 MPa	323.6 MPa
3rd Principal	-309 MPa	83.4 MPa
Normal XX	-138.6 MPa	116.6 MPa
Normal YY	-308.4 MPa	322.3 MPa
Normal ZZ	-173.3 MPa	104 MPa
Shear XY	-57.66 MPa	74.46 MPa
Shear YZ	-109.5 MPa	51.62 MPa
Shear ZX	-64.3 MPa	49.99 MPa
Displacement		
Total	0 mm	359.5 mm
X	-40.95 mm	61.32 mm
Y	-3.196 mm	2.425 mm
Z	-354.3 mm	72.05 mm
Reaction Force		
Total	0 N	7284 N
X	-3640 N	2378 N
Y	-785.6 N	860.7 N
Z	-3658 N	7284 N
Strain		
Equivalent	4.038E-05	0.001675
1st Principal	1.323E-05	0.001618
3rd Principal	-0.001408	-1.998E-05
Normal XX	-3.75E-04	5.761E-04
Normal YY	-0.001331	0.001434
Normal ZZ	-8.684E-04	7.997E-04
Shear XY	-7.313E-04	9.444E-04
Shear YZ	-0.001389	6.547E-04
Shear ZX	-8.155E-04	6.34E-04

Πίνακας 5-13: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.28: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.29: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές, και οι δυσμενότερες συνθήκες εμφανίζονται στο σημείο της κύλισης.

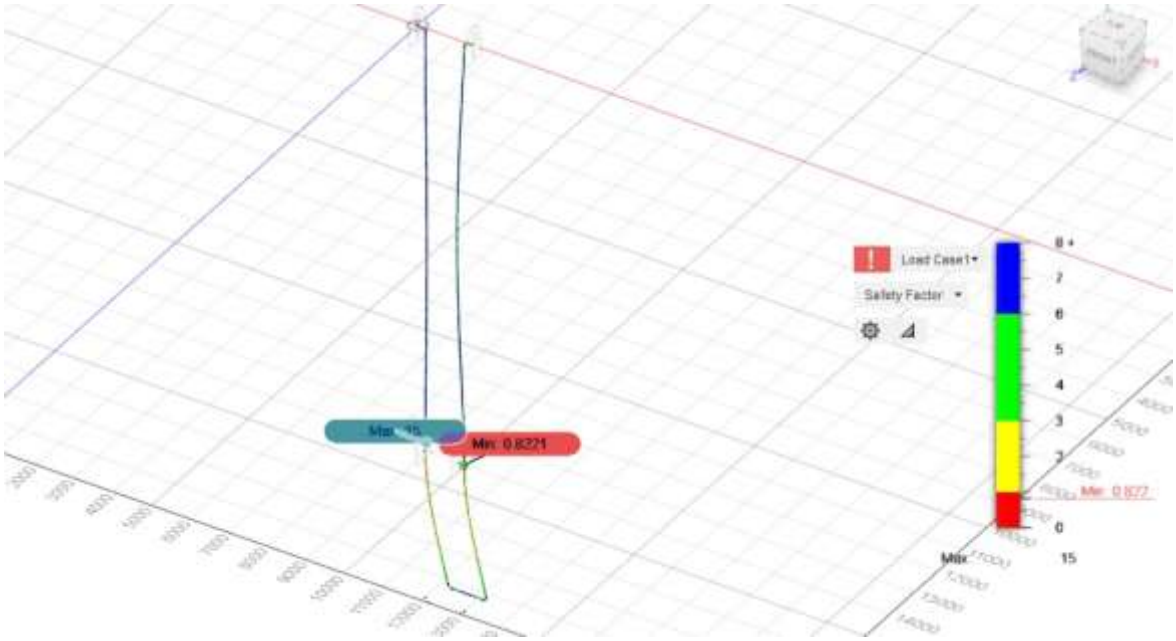
γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09655	15
Stress		
Von Mises	0.003828 MPa	2589 MPa

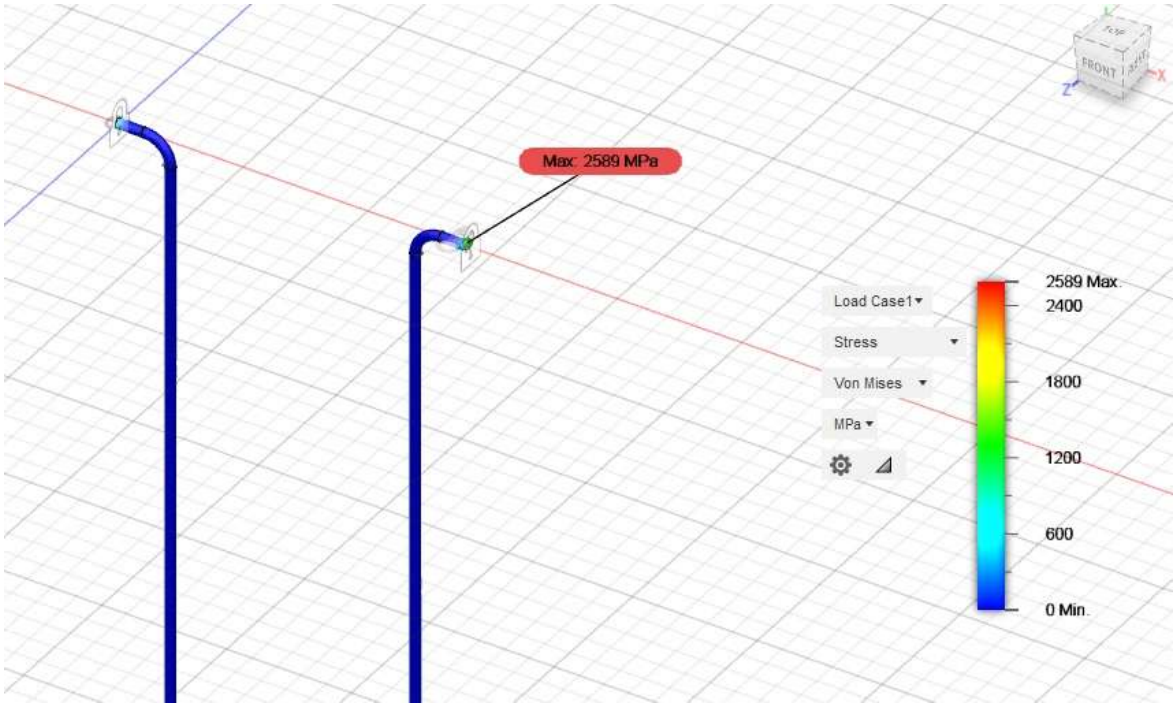
1st Principal	-844.7 MPa	1534 MPa
3rd Principal	-3056 MPa	89.76 MPa
Normal XX	-1835 MPa	1525 MPa
Normal YY	-2286 MPa	771.6 MPa
Normal ZZ	-2266 MPa	486.2 MPa
Shear XY	-973 MPa	667.5 MPa
Shear YZ	-424 MPa	418.5 MPa
Shear ZX	-1110 MPa	1117 MPa
Displacement		
Total	0 mm	88.3 mm
X	-2.961 mm	2.947 mm
Y	-88.3 mm	0.1164 mm
Z	-0.1481 mm	0.1218 mm
Reaction Force		
Total	0 N	48569 N
X	-41177 N	40252 N
Y	-28171 N	33527 N
Z	-42324 N	44872 N
Strain		
Equivalent	0.005974	0.01894
1st Principal	0.005651	0.01929
3rd Principal	-0.01289	0.005824
Normal XX	-0.003587	0.01619
Normal YY	-0.00103	0.01155
Normal ZZ	-0.003473	0.008879
Shear XY	-0.01234	0.008466
Shear YZ	-0.005378	0.005307
Shear ZX	-0.01408	0.01417
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.784E-12 W / mm^2	4.777E-08 W / mm^2
X	-4.667E-08 W / mm^2	4.511E-08 W / mm^2
Y	-2.464E-08 W / mm^2	2.21E-08 W / mm^2
Z	-4.088E-08 W / mm^2	3.982E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.285E-10 C / mm	1.062E-06 C / mm
X	-1.002E-06 C / mm	1.037E-06 C / mm
Y	-4.912E-07 C / mm	5.475E-07 C / mm
Z	-8.85E-07 C / mm	9.085E-07 C / mm
Applied Heat Flow		

Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-14: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.30: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.31: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

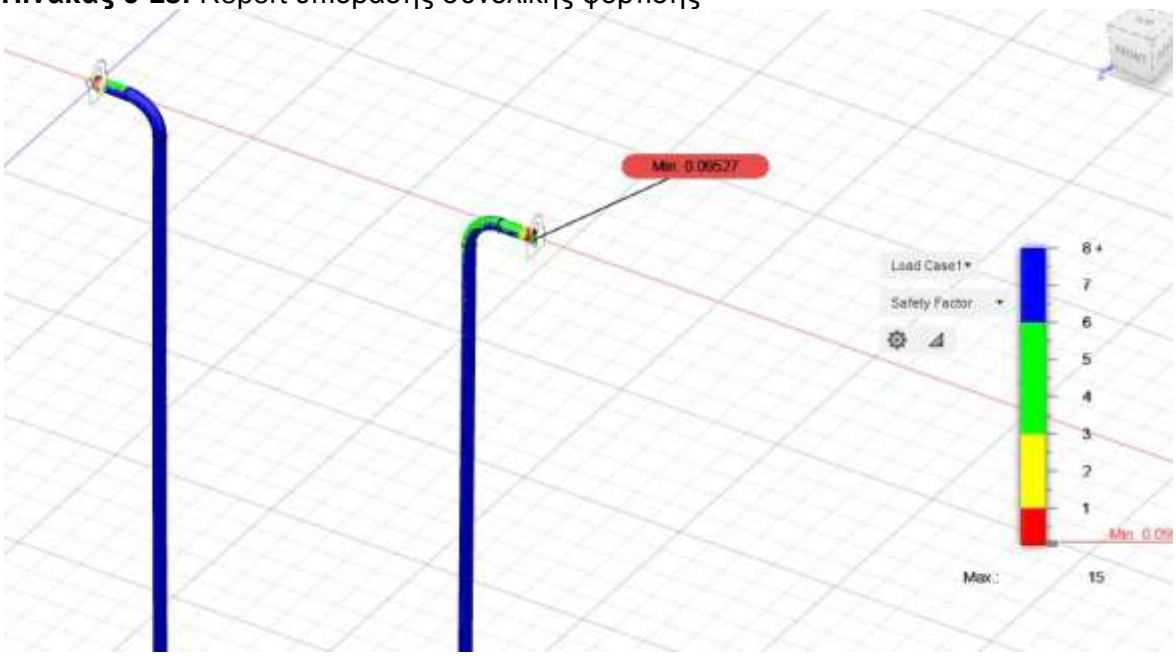
Παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές, και οι δυσμενότερες συνθήκες εμφανίζονται στο σημείο της πάκτωσης.

δ) Συνολική φόρτιση

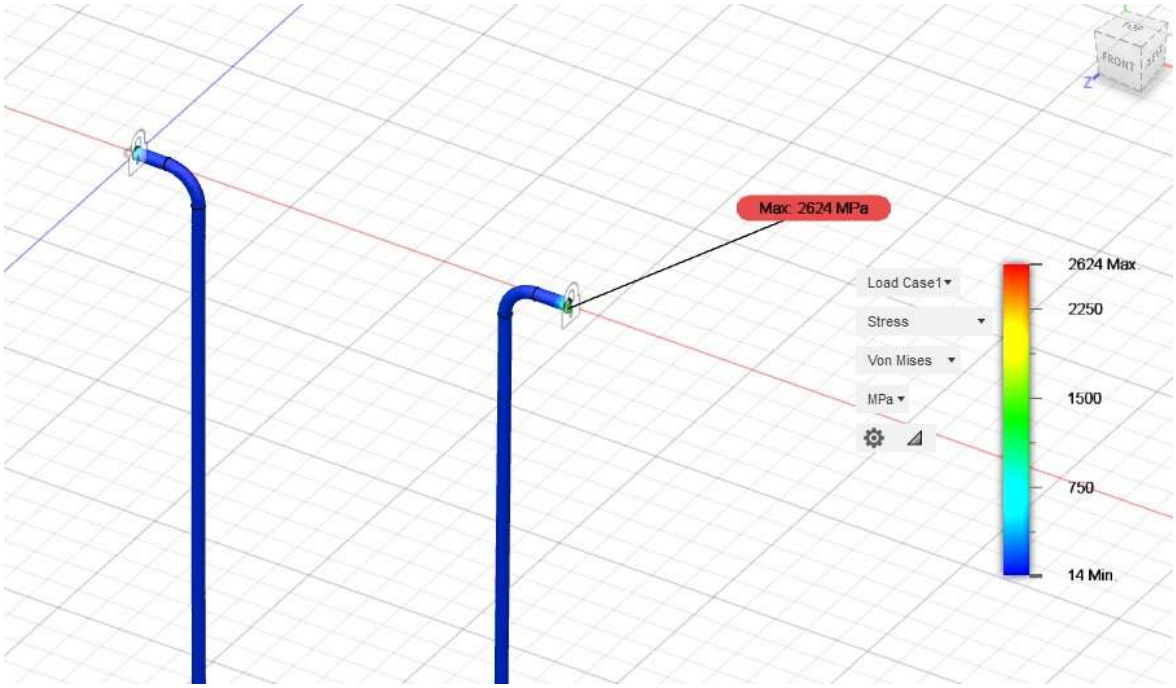
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09527	15
Stress		
Von Mises	14.49 MPa	2624 MPa
1st Principal	-865.4 MPa	1595 MPa
3rd Principal	-3093 MPa	107 MPa
Normal XX	-1833 MPa	1589 MPa
Normal YY	-2327 MPa	812.9 MPa
Normal ZZ	-2288 MPa	487.3 MPa
Shear XY	-998.7 MPa	681 MPa
Shear YZ	-412.7 MPa	403.4 MPa
Shear ZX	-1113 MPa	1123 MPa
Displacement		
Total	0 mm	329.8 mm
X	-3.005 mm	56.19 mm
Y	-91.22 mm	0.1194 mm
Z	-313.4 mm	11.58 mm
Reaction Force		
Total	0 N	49842 N
X	-42692 N	41520 N
Y	-27860 N	34215 N
Z	-43323 N	46048 N
Strain		
Equivalent	0.005908	0.01906
1st Principal	0.005746	0.01939
3rd Principal	-0.01299	0.005847
Normal XX	-0.003557	0.01643
Normal YY	-0.001018	0.01172
Normal ZZ	-0.003456	0.009001
Shear XY	-0.01267	0.008637
Shear YZ	-0.005234	0.005117
Shear ZX	-0.01412	0.01424
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.784E-12 W / mm^2	4.777E-08 W / mm^2
X	-4.667E-08 W / mm^2	4.511E-08 W / mm^2
Y	-2.464E-08 W / mm^2	2.21E-08 W / mm^2
Z	-4.088E-08 W / mm^2	3.982E-08 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	1.285E-10 C / mm	1.062E-06 C / mm
X	-1.002E-06 C / mm	1.037E-06 C / mm
Y	-4.912E-07 C / mm	5.475E-07 C / mm
Z	-8.85E-07 C / mm	9.085E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

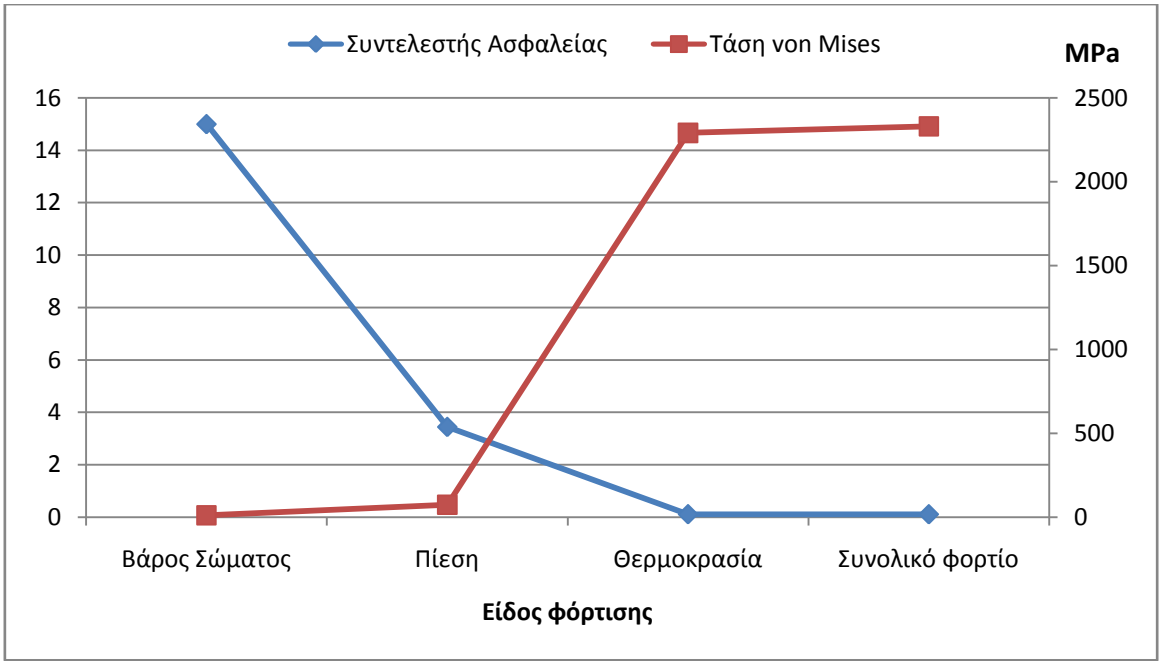
Πίνακας 5-15: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.32: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



Εικόνα 5.33: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για ολική φόρτιση



Διάγραμμα 5-6: Συντελεστής ασφαλείας και τάση von Mises συναρτήσει της φόρτισης για L=15,2m, σε κατακόρυφη θέση

Παρατηρούμε πως και εδώ, η θερμοκρασία παίζει τον σημαντικότερο ρόλο και μειώνει πάρα πολύ τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας. Το βάρος μόνο του σώματος ως φόρτιση, έχει καλά αποτελέσματα ενώ η εσωτερική πίεση συντελεστή ασφαλείας κοντά στο 1, το οποίο φυσικά δεν είναι αποδεκτό.

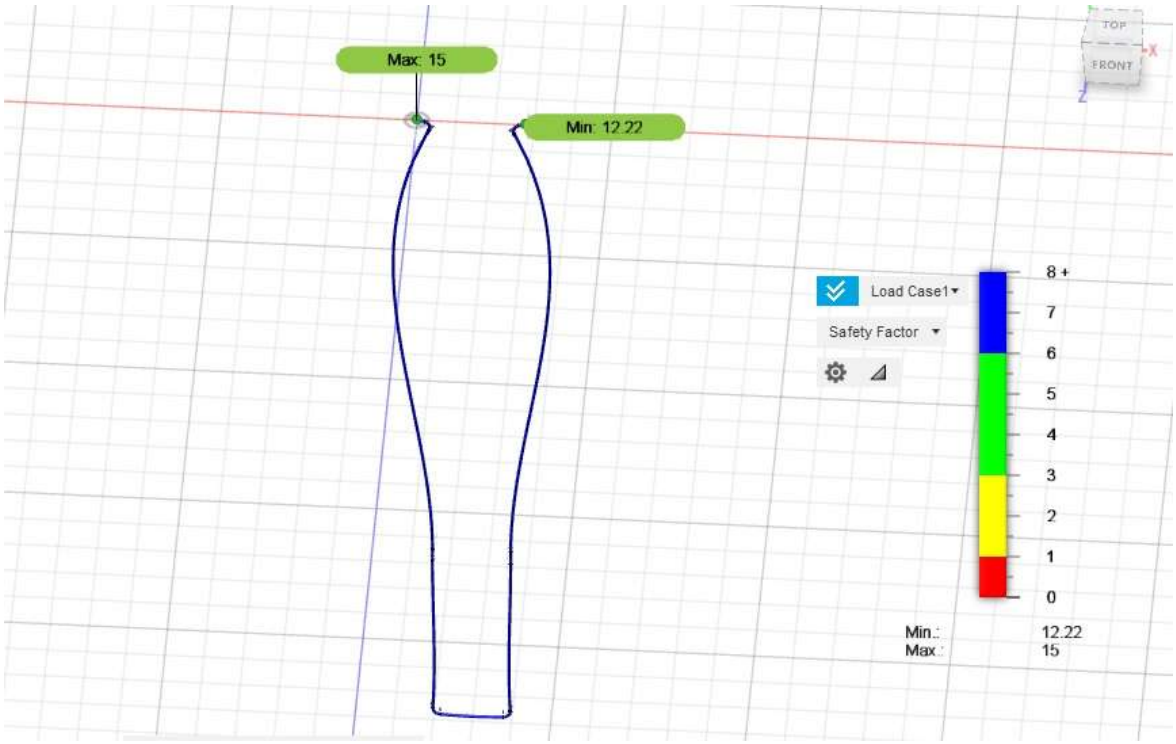
5.1.2.2 *Μικρότερο μήκος αγωγού, (L=10m)*

α) Επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

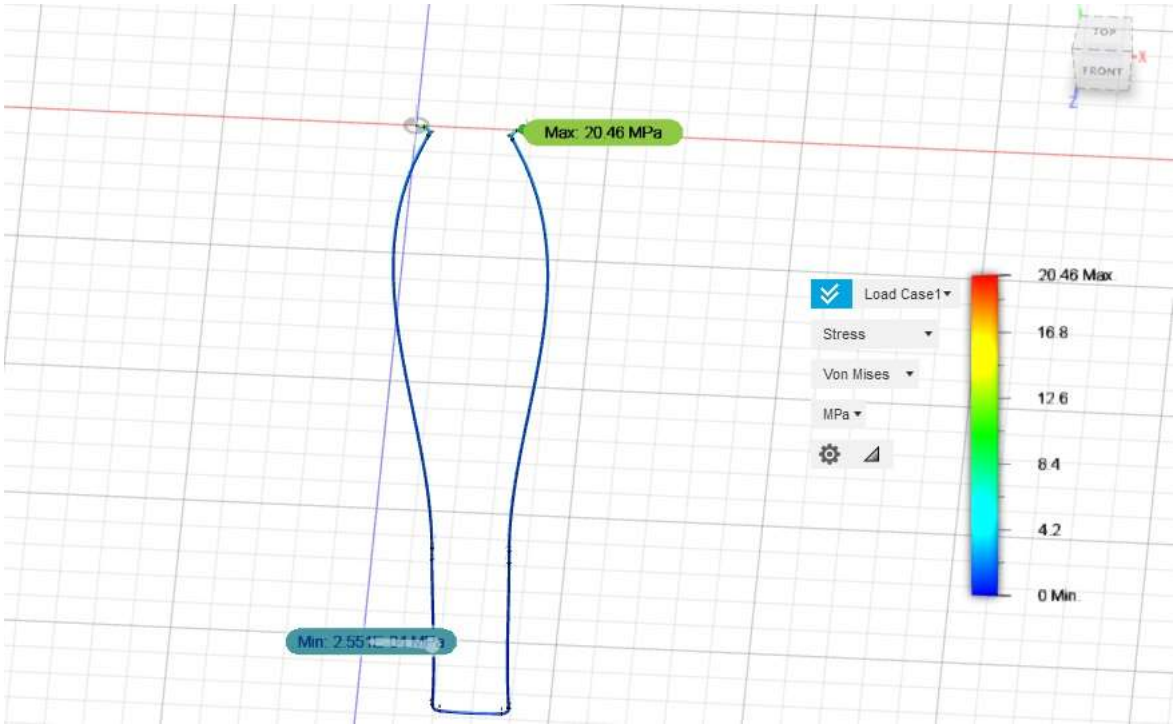
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	12.22	15
Stress		
Von Mises	2.548E-04 MPa	20.45 MPa
1st Principal	-9.42 MPa	27.3 MPa
3rd Principal	-25.68 MPa	9.741 MPa
Normal XX	-25.01 MPa	26.2 MPa
Normal YY	-10.63 MPa	10.85 MPa
Normal ZZ	-10.57 MPa	10.47 MPa
Shear XY	-3.733 MPa	4.255 MPa
Shear YZ	-1.599 MPa	1.446 MPa
Shear ZX	-3.006 MPa	2.918 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.6048 mm

X	-0.5991 mm	0.5991 mm
Y	-0.1173 mm	1.045E-06 mm
Z	-4.567E-04 mm	4.595E-04 mm
Reaction Force		
Total	0 N	437.8 N
X	-406.7 N	407.9 N
Y	-56.8 N	152.9 N
Z	-73.47 N	70.77 N
Strain		
Equivalent	2.124E-09	1.007E-04
1st Principal	7.048E-10	1.208E-04
3rd Principal	-1.157E-04	4.725E-09
Normal XX	-1.006E-04	9.97E-05
Normal YY	-3.978E-05	3.753E-05
Normal ZZ	-2.794E-05	2.811E-05
Shear XY	-4.734E-05	5.396E-05
Shear YZ	-2.028E-05	1.834E-05
Shear ZX	-3.813E-05	3.7E-05

Πίνακας 5-16: Report επίδρασης μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.34: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος.



Εικόνα 5.35: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

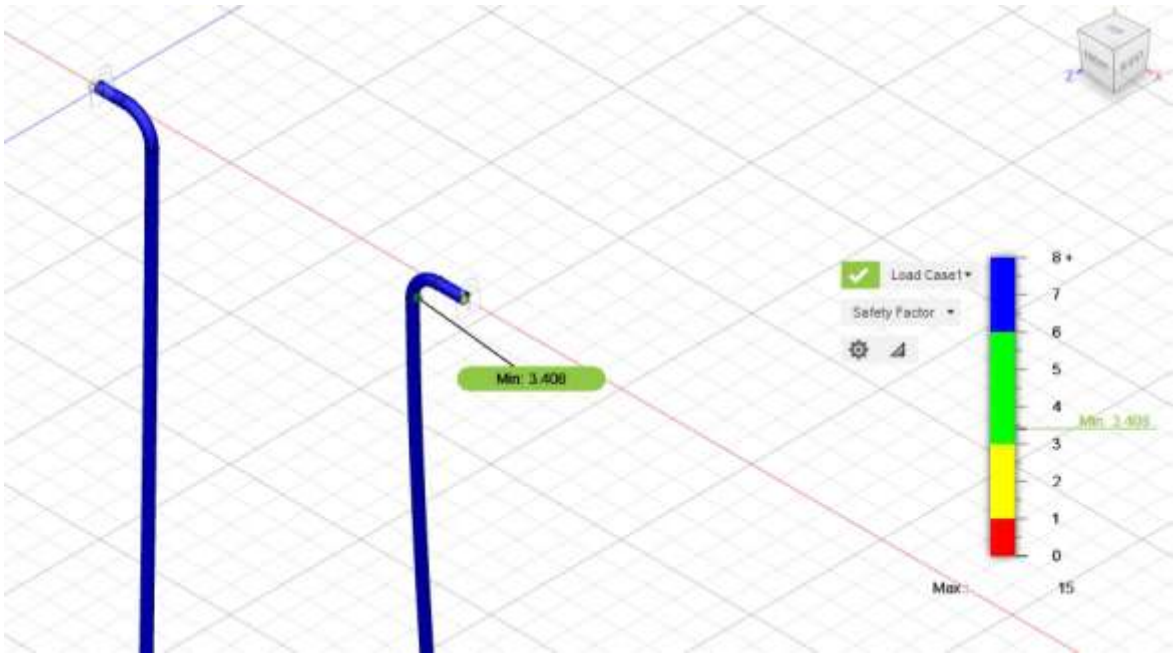
Παρατηρούμε πως και εδώ οι δυσμενείς συνθήκες εμφανίζονται στην περιοχή της πάκτωσης, αλλά με τιμές υπέρ του δέοντος ικανοποιητικές.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

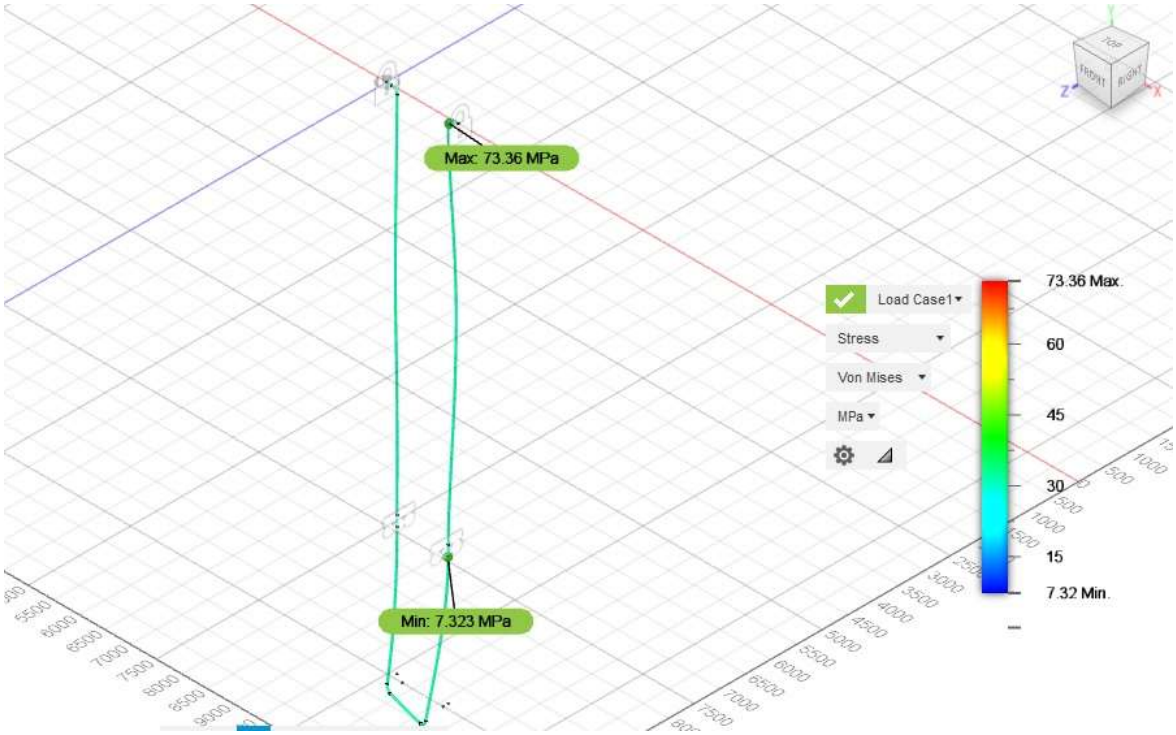
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.408	15
Stress		
Von Mises	7.323 MPa	73.36 MPa
1st Principal	-28.29 MPa	92.64 MPa
3rd Principal	-50.23 MPa	17.79 MPa
Normal XX	-34.57 MPa	79.92 MPa
Normal YY	-29.04 MPa	59.14 MPa
Normal ZZ	-47.87 MPa	62.71 MPa
Shear XY	-23.06 MPa	23.81 MPa
Shear YZ	-40.9 MPa	40.75 MPa
Shear ZX	-41.66 MPa	42.07 MPa
Displacement		
Total	0 mm	8.013 mm
X	-0.2705 mm	1.441 mm
Y	-0.4222 mm	0.02365 mm
Z	-2.408 mm	7.974 mm
Reaction Force		

Total	0 N	1655 N
X	-1184 N	1034 N
Y	-344 N	415.7 N
Z	-1529 N	1020 N
Strain		
Equivalent	5.636E-05	6.195E-04
1st Principal	7.27E-06	5.981E-04
3rd Principal	-4.916E-04	-4.737E-05
Normal XX	-2.257E-04	3.106E-04
Normal YY	-2.165E-04	2.855E-04
Normal ZZ	-2.346E-04	3.086E-04
Shear XY	-2.925E-04	3.02E-04
Shear YZ	-5.187E-04	5.169E-04
Shear ZX	-5.283E-04	5.336E-04

Πίνακας 5-17: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.36: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.37: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

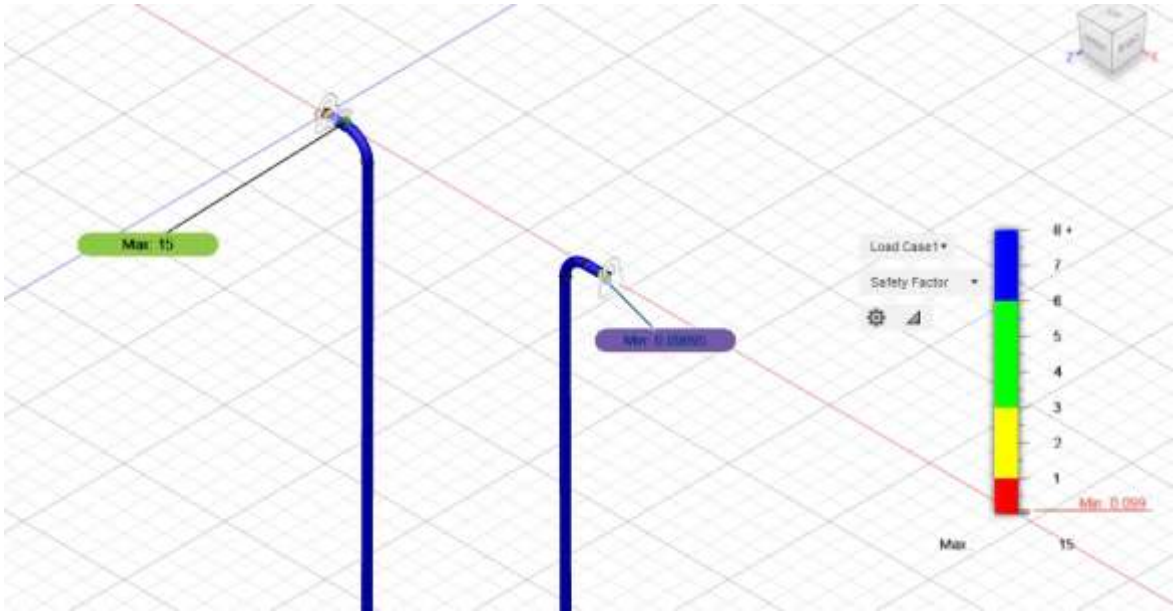
Παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί αρκετά σε σχέση με L=15,2, και εμφανίζεται στην καμπύλη κάτω από το σημείο της πάκτωσης.

γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

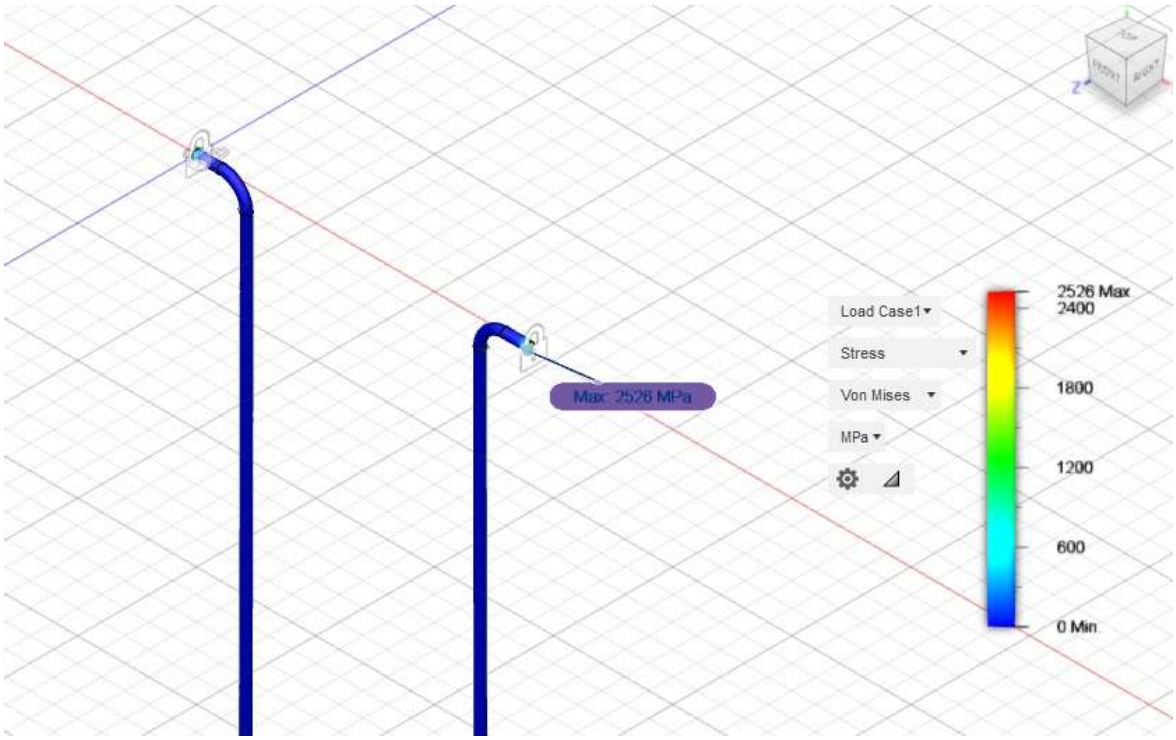
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09895	15
Stress		
Von Mises	0.002607 MPa	2526 MPa
1st Principal	-648.3 MPa	1538 MPa
3rd Principal	-3062 MPa	38.97 MPa
Normal XX	-1357 MPa	1525 MPa
Normal YY	-2293 MPa	368 MPa
Normal ZZ	-2324 MPa	399.8 MPa
Shear XY	-967.6 MPa	981.3 MPa
Shear YZ	-574.6 MPa	539.5 MPa
Shear ZX	-1046 MPa	1040 MPa
Displacement		
Total	0 mm	57.78 mm
X	-2.972 mm	2.987 mm
Y	-57.74 mm	0.111 mm
Z	-0.1127 mm	0.1169 mm

Reaction Force		
Total	0 N	42138 N
X	-19659 N	18418 N
Y	-34328 N	33507 N
Z	-31240 N	30086 N
Strain		
Equivalent	0.007533	0.01737
1st Principal	0.005718	0.01791
3rd Principal	-0.01185	0.005798
Normal XX	0.004096	0.01582
Normal YY	-9.636E-04	0.007681
Normal ZZ	-6.421E-04	0.008388
Shear XY	-0.01227	0.01245
Shear YZ	-0.007287	0.006843
Shear ZX	-0.01326	0.01319
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.684E-14 W / mm^2	1.54E-10 W / mm^2
X	-9.25E-11 W / mm^2	6.239E-11 W / mm^2
Y	-5.304E-11 W / mm^2	8E-11 W / mm^2
Z	-1.369E-10 W / mm^2	1.464E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	8.186E-13 C / mm	3.423E-09 C / mm
X	-1.386E-09 C / mm	2.056E-09 C / mm
Y	-1.778E-09 C / mm	1.179E-09 C / mm
Z	-3.252E-09 C / mm	3.042E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-18: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.38: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.39: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

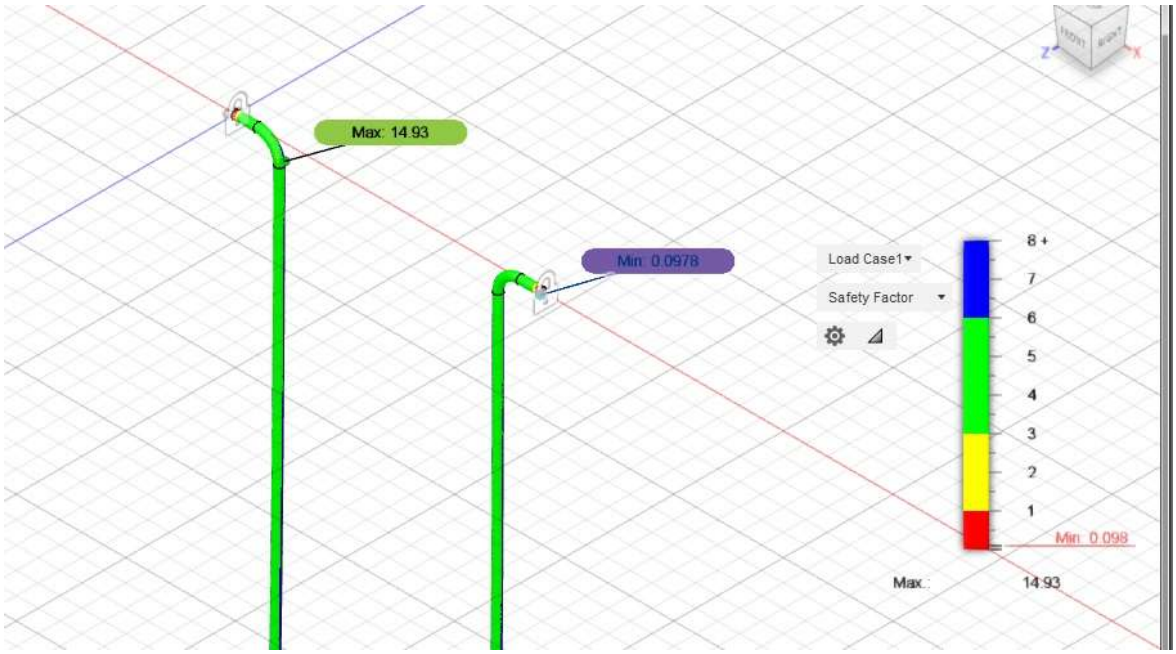
Παρατηρούμε και εδώ πως ο συντελεστής ασφαλείας πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές, ελάχιστες αυξημένος συγκρινόμενος με L=15,2m και οι δυσμενότερες συνθήκες εμφανίζονται στο σημείο της πάκτωσης.

δ) Συνολική φόρτιση

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.0978	14.93
Stress		
Von Mises	16.75 MPa	2556 MPa
1st Principal	-661.7 MPa	1604 MPa
3rd Principal	-3091 MPa	66.92 MPa
Normal XX	-1391 MPa	1595 MPa
Normal YY	-2307 MPa	366.4 MPa
Normal ZZ	-2338 MPa	397.7 MPa
Shear XY	-981.6 MPa	1011 MPa
Shear YZ	-551.6 MPa	512.4 MPa
Shear ZX	-1069 MPa	1056 MPa
Displacement		
Total	0 mm	530.6 mm
X	-1.137 mm	140 mm
Y	-59.61 mm	0.1307 mm
Z	-0.1226 mm	508.6 mm
Reaction Force		
Total	0 N	42064 N
X	-20571 N	18457 N
Y	-34405 N	34068 N
Z	-31735 N	30491 N
Strain		
Equivalent	0.007506	0.01754
1st Principal	0.005735	0.01802
3rd Principal	-0.01212	0.00582
Normal XX	0.003925	0.01603
Normal YY	-9.453E-04	0.00763
Normal ZZ	-6.21E-04	0.00834
Shear XY	-0.01245	0.01282
Shear YZ	-0.006997	0.006498
Shear ZX	-0.01356	0.01339
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.684E-14 W / mm^2	1.54E-10 W / mm^2
X	-9.25E-11 W / mm^2	6.239E-11 W / mm^2
Y	-5.304E-11 W / mm^2	8E-11 W / mm^2
Z	-1.369E-10 W / mm^2	1.464E-10 W / mm^2

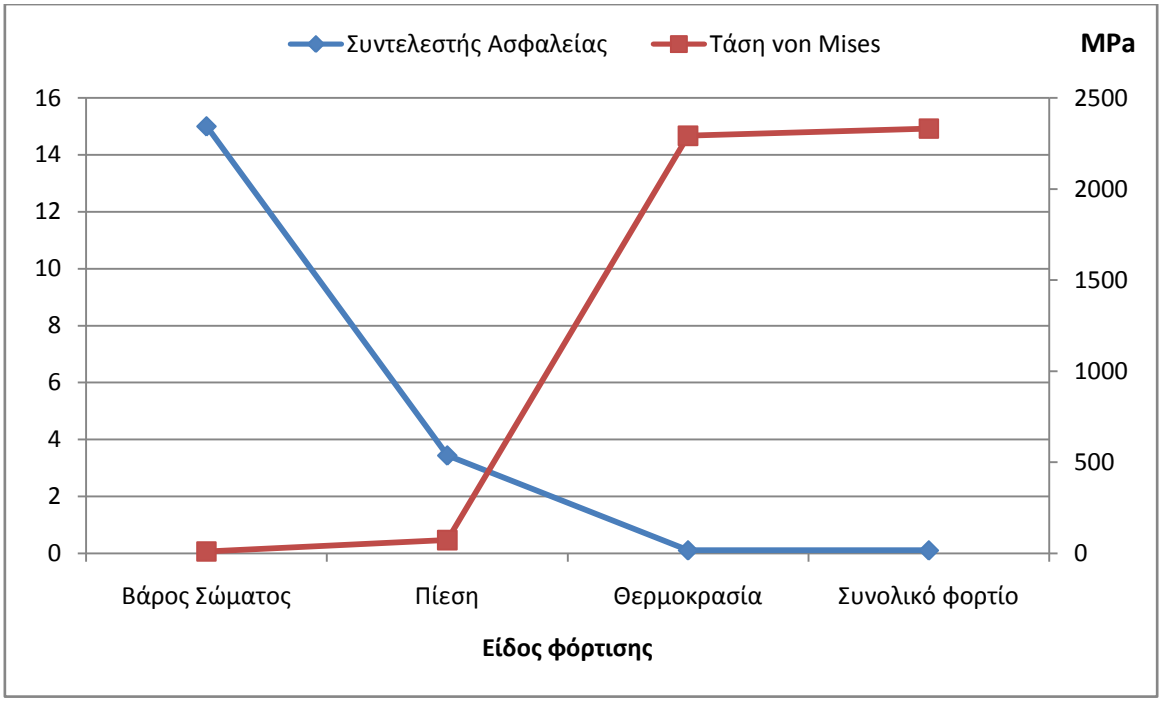
Thermal Gradient		
Total	8.186E-13 C / mm	3.423E-09 C / mm
X	-1.386E-09 C / mm	2.056E-09 C / mm
Y	-1.778E-09 C / mm	1.179E-09 C / mm
Z	-3.252E-09 C / mm	3.042E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-19: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.40: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση συνολικής φόρτισης

Εικόνα 5.41: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση συνολικής φόρτισης



Διάγραμμα 5-7: Συντελεστής ασφαλείας και τάση von Mises συναρτήσει της φόρτισης για L=10m, σε κατακόρυφη θέση

Παρατηρούμε πως και εδώ, η θερμοκρασία παίζει τον σημαντικότερο ρόλο και μειώνει πάρα πολύ τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας. Το βάρος μόνο του σώματος ως φόρτιση, έχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα ενώ στην επίδραση μόνο της εσωτερικής πίεσης βλέπουμε πως έχουμε σημαντική αύξηση του συντελεστή ασφαλείας. Στη θερμοκρασία και στην συνολική φόρτιση η αύξηση είναι πάρα πολύ μικρή.

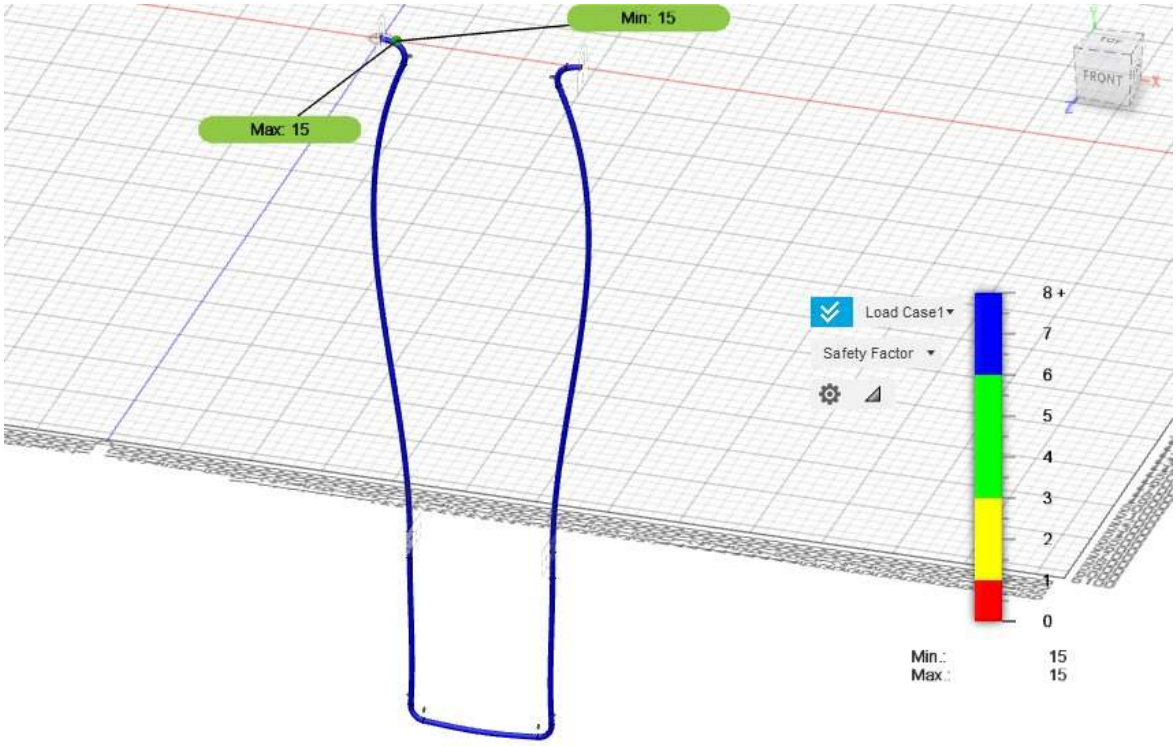
5.1.2.3 *Μικρότερο μήκος αγωγού, (L=5m)*

α) Επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

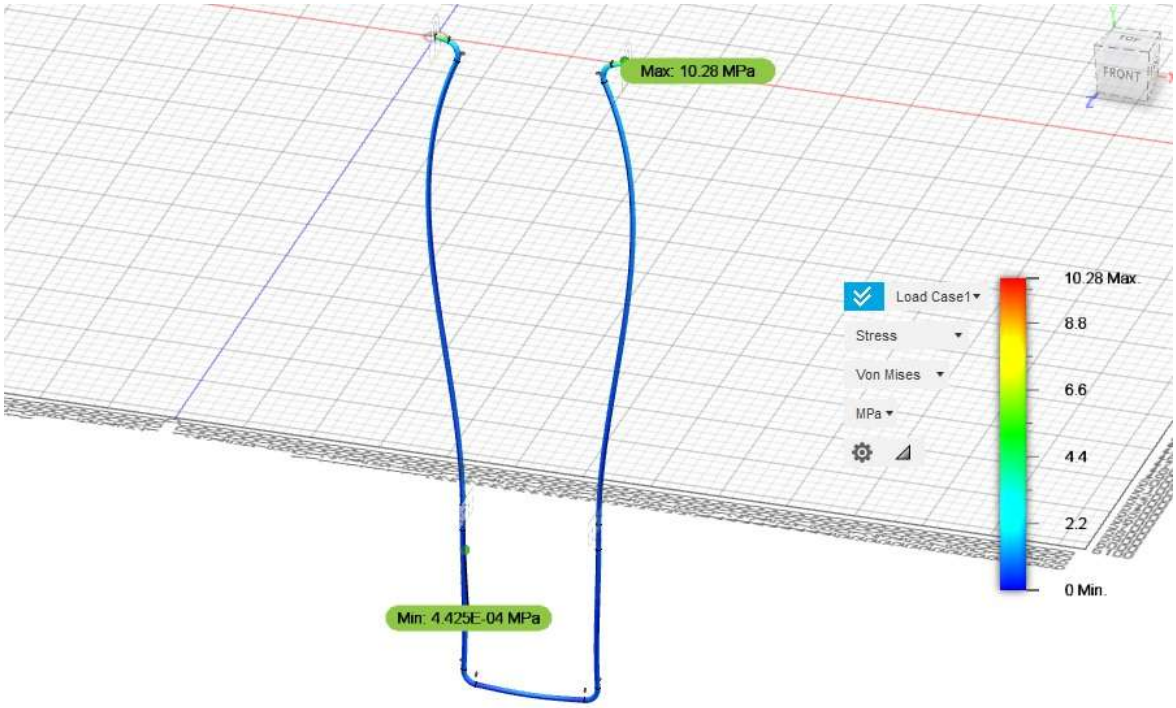
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	15	15
Stress		
Von Mises	4.425E-04 MPa	10.28 MPa
1st Principal	-4.883 MPa	13.34 MPa
3rd Principal	-13.48 MPa	4.859 MPa
Normal XX	-12.77 MPa	12.84 MPa
Normal YY	-5.555 MPa	5.502 MPa
Normal ZZ	-5.539 MPa	5.492 MPa
Shear XY	-2.011 MPa	2.058 MPa
Shear YZ	-0.7778 MPa	0.8012 MPa
Shear ZX	-1.506 MPa	1.6 MPa

Displacement		
Total	0 mm	0.1492 mm
X	-0.1442 mm	0.1442 mm
Y	-0.05857 mm	0 mm
Z	-2.073E-04 mm	2.041E-04 mm
Reaction Force		
Total	0 N	214 N
X	-201.6 N	201.7 N
Y	-22.25 N	68.08 N
Z	-33.68 N	32.78 N
Strain		
Equivalent	2.662E-09	5.115E-05
1st Principal	-2.595E-08	6.013E-05
3rd Principal	-6.103E-05	-1.439E-09
Normal XX	-5.053E-05	5.115E-05
Normal YY	-1.941E-05	1.801E-05
Normal ZZ	-1.383E-05	1.395E-05
Shear XY	-2.55E-05	2.61E-05
Shear YZ	-9.865E-06	1.016E-05
Shear ZX	-1.911E-05	2.029E-05

Πίνακας 5-20: Report επίδρασης του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.42: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.43: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος

Παρατητηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει φτάσει την μέγιστη τιμή της προσομοίωσης, δηλαδή 15.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.441	15
Stress		
Von Mises	11.72 MPa	72.65 MPa
1st Principal	-7.68 MPa	91.01 MPa
3rd Principal	-37.33 MPa	17.72 MPa
Normal XX	-32.46 MPa	79.35 MPa
Normal YY	-21.73 MPa	59.86 MPa
Normal ZZ	-33.67 MPa	63.55 MPa
Shear XY	-23.53 MPa	22.46 MPa
Shear YZ	-40.82 MPa	40.6 MPa
Shear ZX	-40.61 MPa	40.82 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.3557 mm
X	-0.0728 mm	0.0697 mm
Y	-0.2235 mm	0.003803 mm
Z	-0.07294 mm	0.2854 mm

Reaction Force		
Total	0 N	1021 N
X	-943.7 N	929.5 N
Y	-361.1 N	410.2 N
Z	-903.9 N	905.9 N
Strain		
Equivalent	6.971E-05	6.004E-04
1st Principal	4.257E-05	5.607E-04
3rd Principal	-4.761E-04	-5.176E-05
Normal XX	-2.246E-04	2.958E-04
Normal YY	-2.213E-04	2.925E-04
Normal ZZ	-2.197E-04	3.13E-04
Shear XY	-2.984E-04	2.848E-04
Shear YZ	-5.177E-04	5.149E-04
Shear ZX	-5.15E-04	5.177E-04

Πίνακας 5-21: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης

Εικόνα 5.44: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Εικόνα 5.45: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

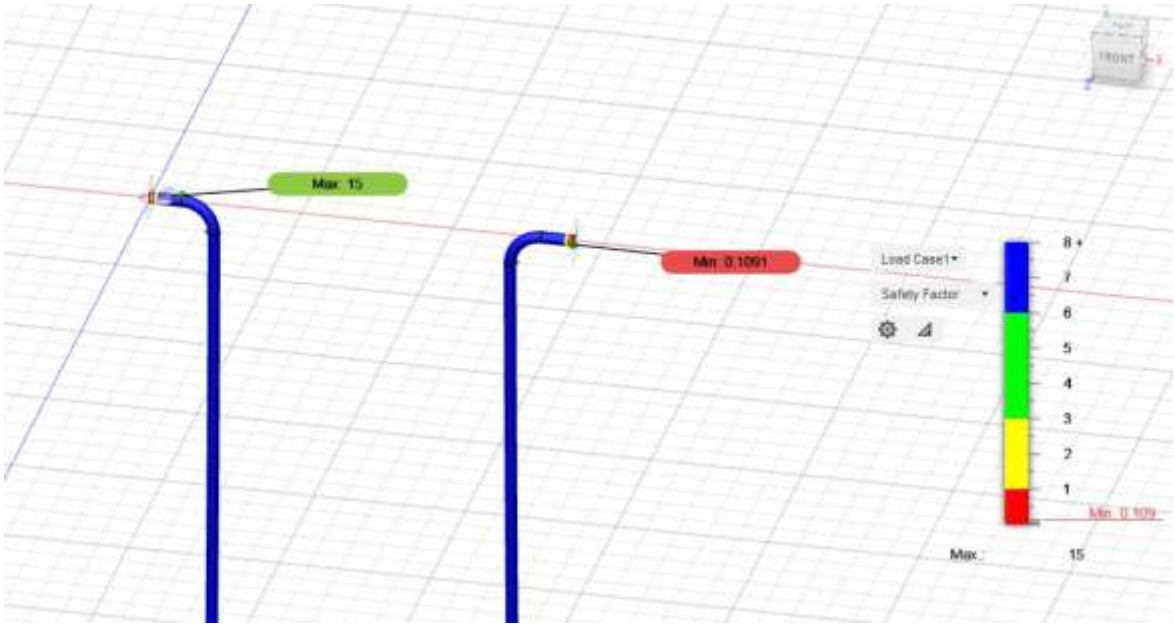
Παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί κι'άλλο και εμφανίζεται στην καμπύλη κάτω από το σημείο της πάκτωσης. Η διαφορά σε σχέση με το μοντέλο για L=10m δεν είναι μεγάλη, αλλά παρουσιάζει αύξηση.

γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

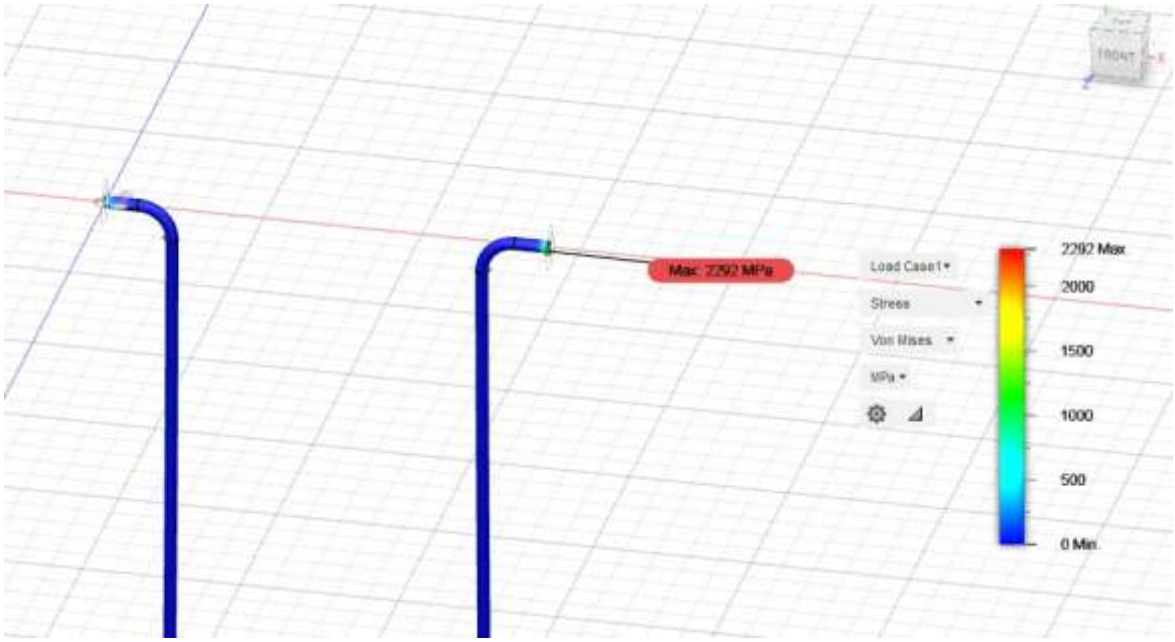
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.1091	15
Stress		
Von Mises	0.004364 MPa	2292 MPa
1st Principal	-709.2 MPa	1301 MPa
3rd Principal	-3151 MPa	52.68 MPa
Normal XX	-1487 MPa	1300 MPa
Normal YY	-2360 MPa	420.3 MPa
Normal ZZ	-2349 MPa	368.5 MPa
Shear XY	-1029 MPa	1026 MPa
Shear YZ	-437.7 MPa	459.2 MPa
Shear ZX	-1034 MPa	1022 MPa
Displacement		
Total	0 mm	29.05 mm
X	-2.955 mm	2.958 mm
Y	-29.01 mm	0.1122 mm
Z	-0.1126 mm	0.1121 mm
Reaction Force		
Total	0 N	38819 N

X	-18651 N	18799 N
Y	-30852 N	31432 N
Z	-29952 N	31070 N
Strain		
Equivalent	0.007587	0.01731
1st Principal	0.005718	0.01785
3rd Principal	-0.01218	0.00577
Normal XX	0.004112	0.01484
Normal YY	-7.713E-04	0.008167
Normal ZZ	-9.142E-04	0.008049
Shear XY	-0.01305	0.01302
Shear YZ	-0.005552	0.005824
Shear ZX	-0.01312	0.01296
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	6.293E-13 W / mm^2	1.927E-09 W / mm^2
X	-9.676E-10 W / mm^2	9.23E-10 W / mm^2
Y	-1.299E-09 W / mm^2	9.551E-10 W / mm^2
Z	-1.306E-09 W / mm^2	1.735E-09 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.398E-11 C / mm	4.283E-08 C / mm
X	-2.051E-08 C / mm	2.15E-08 C / mm
Y	-2.122E-08 C / mm	2.887E-08 C / mm
Z	-3.854E-08 C / mm	2.902E-08 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-22: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.46: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.47: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

Παρατηρούμε και εδώ πως ο συντελεστής ασφαλείας παραμένει σε πολύ χαμηλές τιμές, ελάχιστες αυξημένος συγκρινόμενος με L=10m και οι δυσμενότερες συνθήκες εμφανίζονται στο σημείο της πάκτωσης.

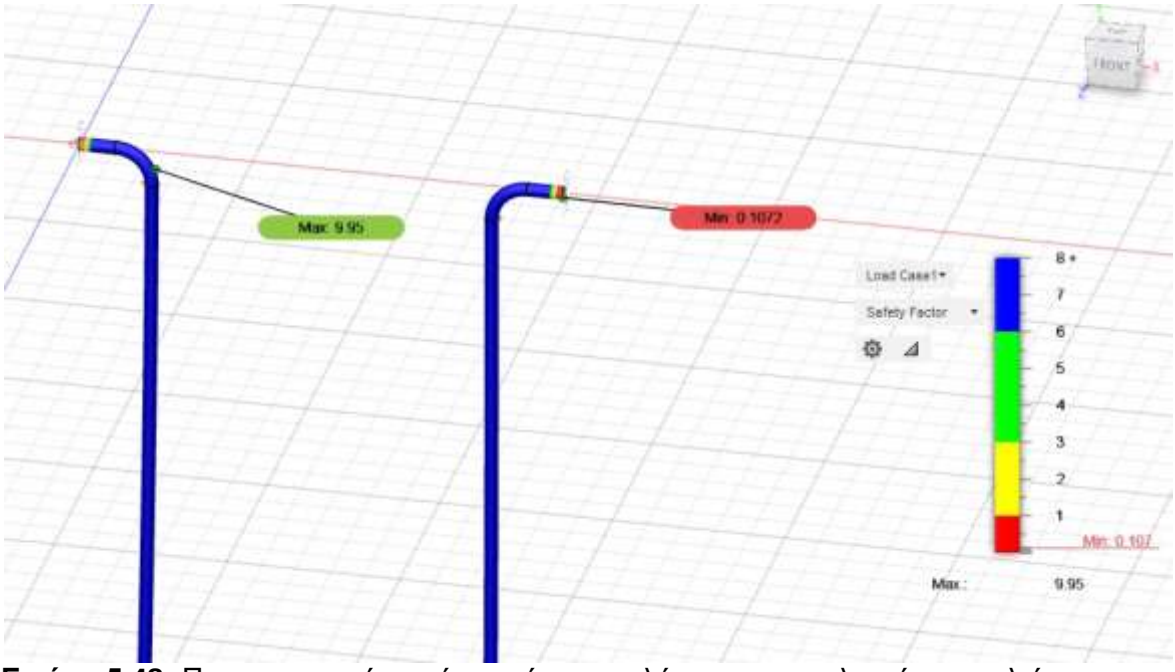
δ) Συνολική φόρτιση

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		

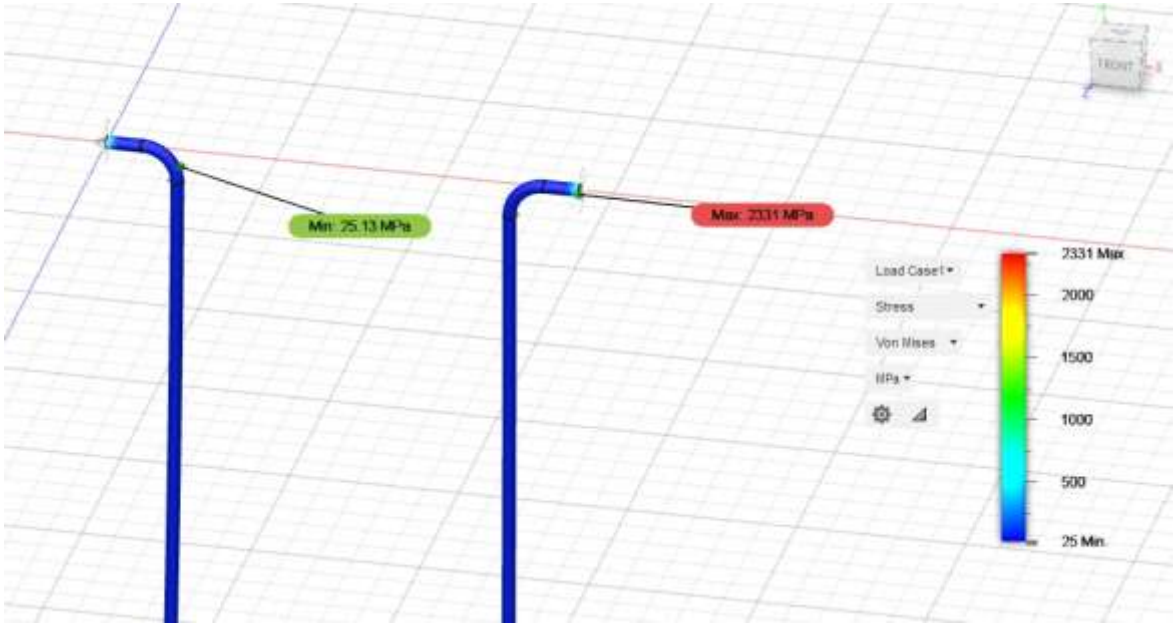
Safety Factor (Per Body)	0.1072	9.95
Stress		
Von Mises	25.13 MPa	2331 MPa
1st Principal	-722.6 MPa	1362 MPa
3rd Principal	-3186 MPa	90.78 MPa
Normal XX	-1521 MPa	1361 MPa
Normal YY	-2374 MPa	417.8 MPa
Normal ZZ	-2363 MPa	368.4 MPa
Shear XY	-1039 MPa	1039 MPa
Shear YZ	-414.9 MPa	430.4 MPa
Shear ZX	-1048 MPa	1035 MPa
Displacement		
Total	0 mm	35.41 mm
X	-7.455 mm	1.239 mm
Y	-29.29 mm	0.114 mm
Z	-0.1156 mm	18.86 mm
Reaction Force		
Total	0 N	39303 N
X	-18689 N	19197 N
Y	-30960 N	31751 N
Z	-30128 N	31273 N
Strain		
Equivalent	0.007537	0.01746
1st Principal	0.005726	0.01796
3rd Principal	-0.01241	0.005797
Normal XX	0.004104	0.01509
Normal YY	-7.521E-04	0.008112
Normal ZZ	-8.916E-04	0.007924
Shear XY	-0.01318	0.01318
Shear YZ	-0.005262	0.005459
Shear ZX	-0.0133	0.01312
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	6.304E-16 W / mm^2	1.148E-11 W / mm^2
X	-4.312E-12 W / mm^2	3.191E-12 W / mm^2
Y	-6.776E-12 W / mm^2	5.782E-12 W / mm^2
Z	-9.291E-12 W / mm^2	1.105E-11 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.401E-14 C / mm	2.55E-10 C / mm
X	-7.091E-11 C / mm	9.582E-11 C / mm

Y	-1.285E-10 C / mm	1.506E-10 C / mm
Z	-2.455E-10 C / mm	2.065E-10 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

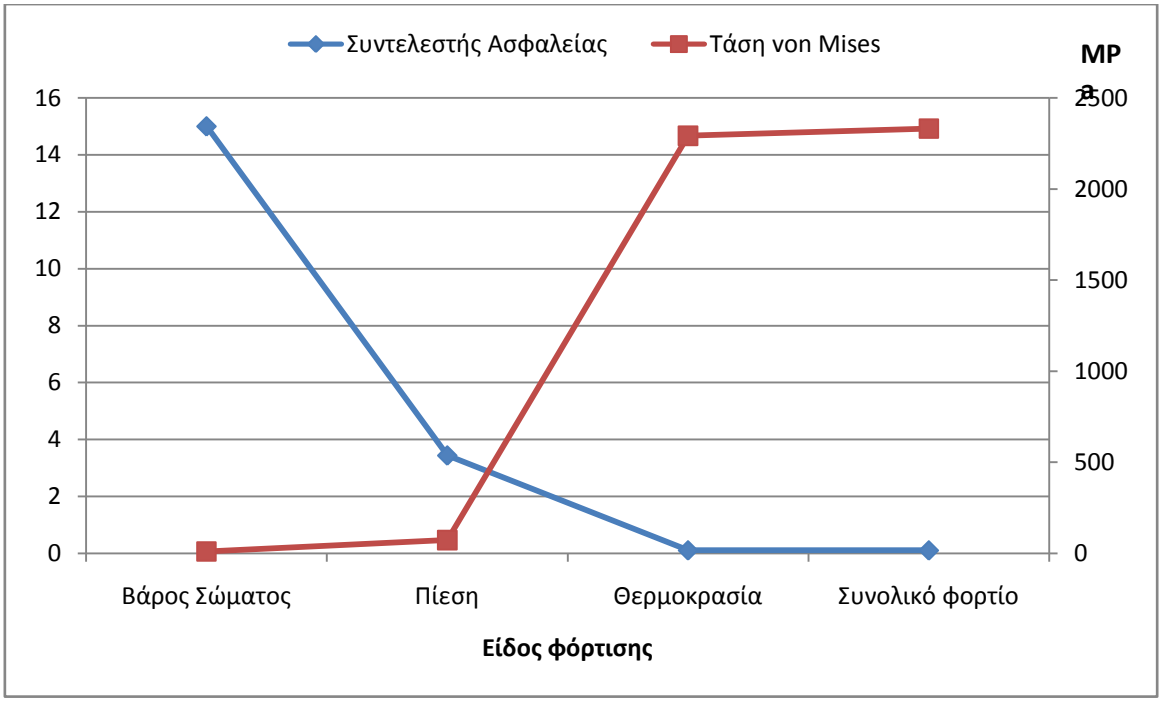
Πίνακας 5-23: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.48: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση συνολικής φόρτισης



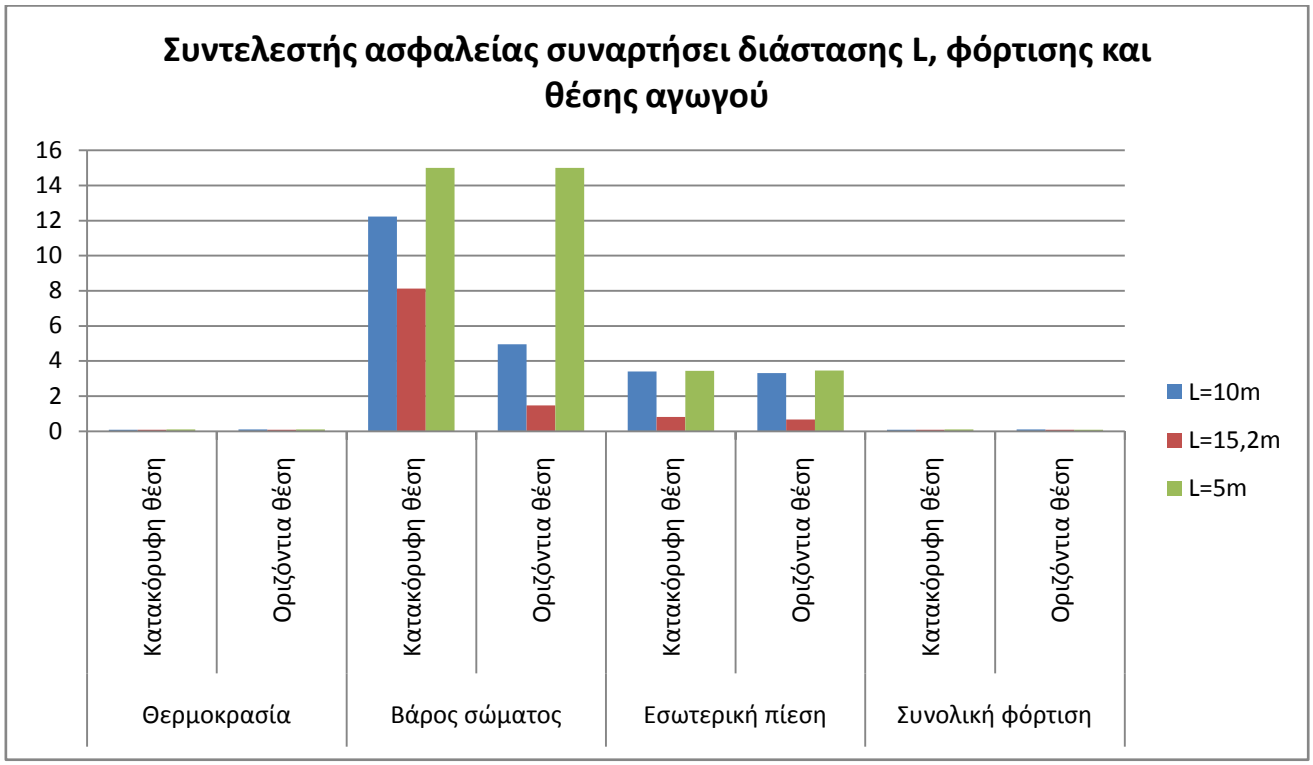
Εικόνα 5.49: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση συνολικής φόρτισης



Διάγραμμα 5-8: Συντελεστής ασφαλείας και τάση von Mises συναρτήσει της φόρτισης για L=10m, σε κατακόρυφη θέση

Παρατηρούμε πως και εδώ, η θερμοκρασία παίζει τον σημαντικότερο ρόλο και μειώνει πάρα πολύ τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας. Το βάρος μόνο του σώματος ως φόρτιση, έχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα ενώ στην επίδραση μόνο της εσωτερικής πίεσης βλέπουμε πως έχουμε μικρή αύξηση του συντελεστή ασφαλείας. Στη θερμοκρασία και στην συνολική φόρτιση η αύξηση είναι πάρα πολύ μικρή.

5.1.3 Συμπεράσματα προσομοιώσεων μοντέλου με κύλιση και πάχος 5,6mm



Διάγραμμα 5-9: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει διάστασης L, φόρτισης και θέσης αγωγού

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα που εξάγουμε από το διάγραμμα 5-9 είναι πως για το μοντέλο με κύλιση ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται με την μείωση της διάστασης L και στις 2 θέσεις για φορτίσεις το βάρος του σώματος και της εσωτερικής πίεσης, τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη θέση. Για την επίδραση της θερμοκρασίας αλλά και της συνολικής φόρτισης βλέπουμε πως ο συντελεστής ασφαλείας δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και παραμένει σε χαμηλές τιμές. Η πιο σημαντική διαφορά που εντοπίζεται για τις διαφορετικές θέσεις του τμήματος αγωγού, είναι πως στην επίδραση του βάρους του σώματος ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται αισθητά στην οριζόντια θέση σε σχέση με την κατακόρυφη. Επίσης το πιο αδύναμο σημείο στις χαμηλές τιμές του συντελεστή ασφαλείας, εντοπίζεται στο σημείο της πάκτωσης.

Τέλος, ανάλογη συμπεριφόρα παρουσιάζει και η κατανομή της μέγιστης τάσης Von Mises, γι'αυτό δεν παρατίθεται διάγραμμα (στα σημεία με ελάχιστες τιμές συντελεστή ασφαλείας παρουσιάζονται αντίστοιχα οι μέγιστες τάσεις).

5.2 Προσεγγίσεις κανονικού μοντέλου χωρίς κύλιση (πάχος 5,6mm, κανονικό πλέγμα)

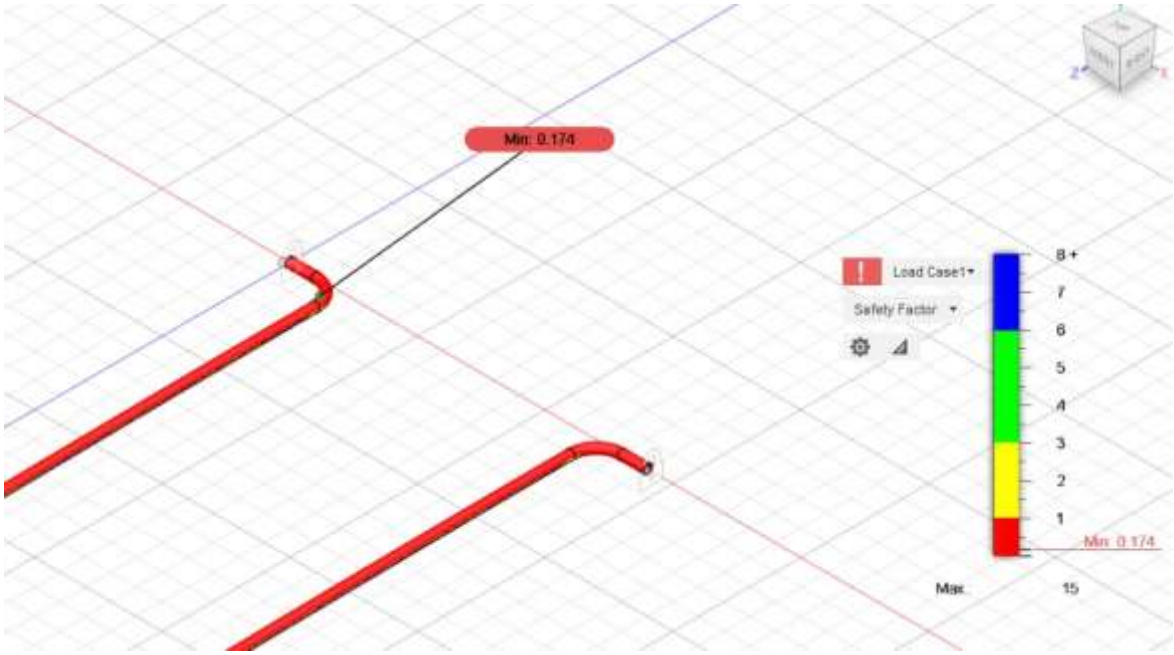
5.2.1 *Οριζόντια θέση*

5.2.1.1 *Μήκος σωληνώσεων, σύμφωνα με το σχέδιο (15,2m)*

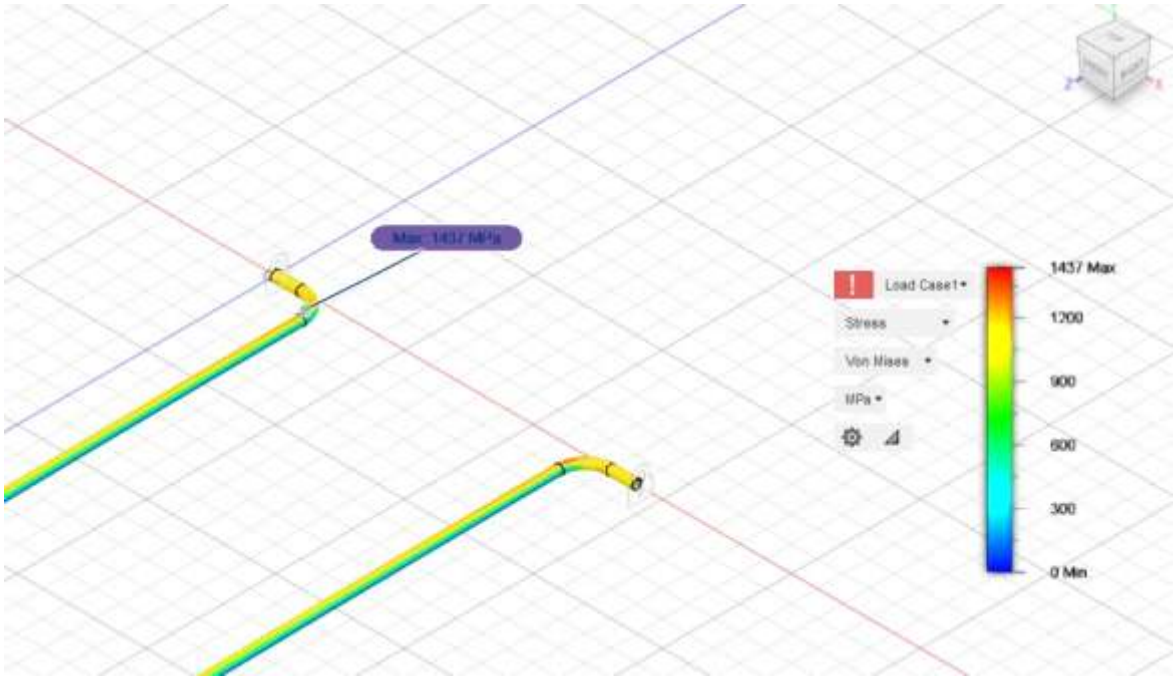
α) Επίδραση του βάρους του σώματος

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.174	15
Stress		
Von Mises	0.00503 MPa	1437 MPa
1st Principal	-94.69 MPa	1527 MPa
3rd Principal	-1510 MPa	84.51 MPa
Normal XX	-516.8 MPa	470.4 MPa
Normal YY	-475.7 MPa	477.4 MPa
Normal ZZ	-1478 MPa	1504 MPa
Shear XY	-732.3 MPa	722.6 MPa
Shear YZ	-435.8 MPa	388.9 MPa
Shear ZX	-662.7 MPa	662.3 MPa
Displacement		
Total	0 mm	20900 mm
X	-0.3635 mm	0.09584 mm
Y	-20900 mm	0.844 mm
Z	-34.62 mm	34.62 mm
Reaction Force		
Total	0 N	17257 N
X	-683.3 N	699.2 N
Y	-12134 N	17103 N
Z	-12259 N	12205 N
Strain		
Equivalent	3.772E-08	0.0108
1st Principal	1.676E-08	0.01008
3rd Principal	-0.00999	-1.945E-08
Normal XX	-0.002919	0.002853
Normal YY	-0.002793	0.002724
Normal ZZ	-0.006921	0.006941
Shear XY	-0.009288	0.009165
Shear YZ	-0.005527	0.004933
Shear ZX	-0.008405	0.0084

Πίνακας 5-24: Report επίδρασης μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.50: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.51: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

Συγκρίνοντας το αποτέλεμσα με τον πίνακα 5-1, βλέπουμε πως αφαιρόντας την κύλιση μειώνεται δραστικά ο συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο της βαρύτητας στο μοντέλο στην οριζόντια θέση.

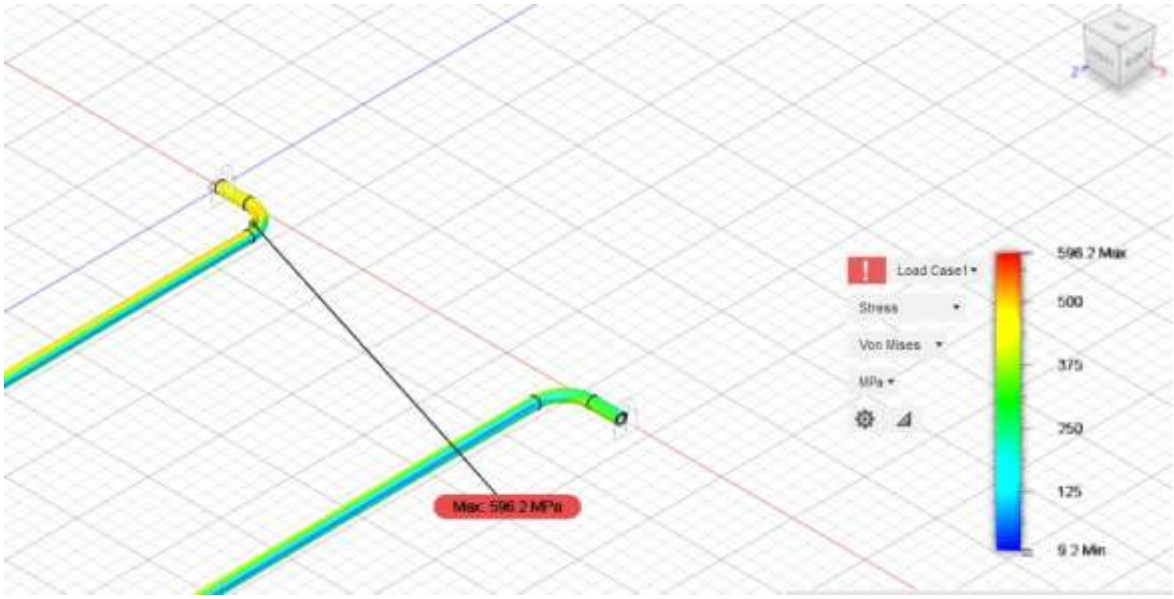
β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.4193	15

Stress		
Von Mises	9.153 MPa	596.2 MPa
1st Principal	-56.05 MPa	648.4 MPa
3rd Principal	-544.8 MPa	33.22 MPa
Normal XX	-216.7 MPa	248.2 MPa
Normal YY	-169.4 MPa	245.8 MPa
Normal ZZ	-542.4 MPa	637.9 MPa
Shear XY	-279.1 MPa	258.9 MPa
Shear YZ	-189 MPa	169.4 MPa
Shear ZX	-250.9 MPa	264.4 MPa
Displacement		
Total	0 mm	11539 mm
X	-0.1011 mm	1140 mm
Y	-11483 mm	0.3548 mm
Z	-23.34 mm	24.67 mm
Reaction Force		
Total	0 N	6987 N
X	-3791 N	3917 N
Y	-4755 N	4714 N
Z	-4899 N	4518 N
Strain		
Equivalent	5.339E-05	0.004183
1st Principal	5.394E-05	0.004404
3rd Principal	-0.003546	-3.692E-05
Normal XX	-0.001023	0.001276
Normal YY	-0.001157	0.001294
Normal ZZ	-0.002615	0.002855
Shear XY	-0.00354	0.003284
Shear YZ	-0.002397	0.002149
Shear ZX	-0.003183	0.003353

Πίνακας 5-25: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης

Εικόνα 5.52: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.53: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερική πίεσης

Συγκρίνοντας το αποτέλεσμα με τον πίνακα 5-2, του ίδιου μοντέλου δηλαδή χωρίς κύλιση, βλέπουμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει μειωθεί με την αφαίρεση της κύλισης.

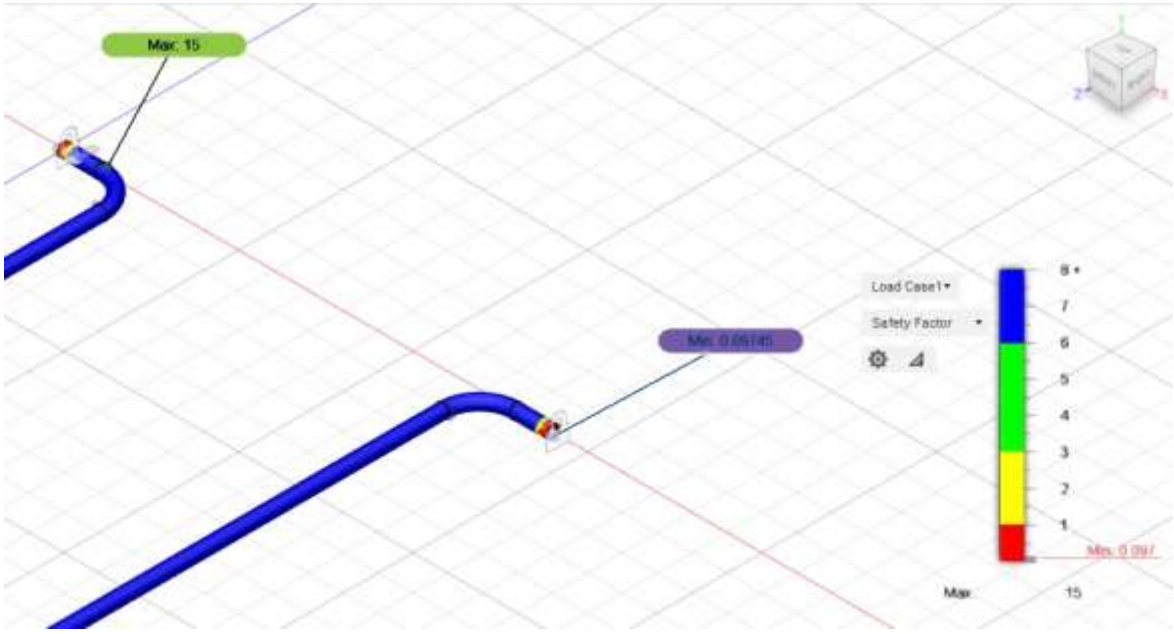
γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09745	15
Stress		

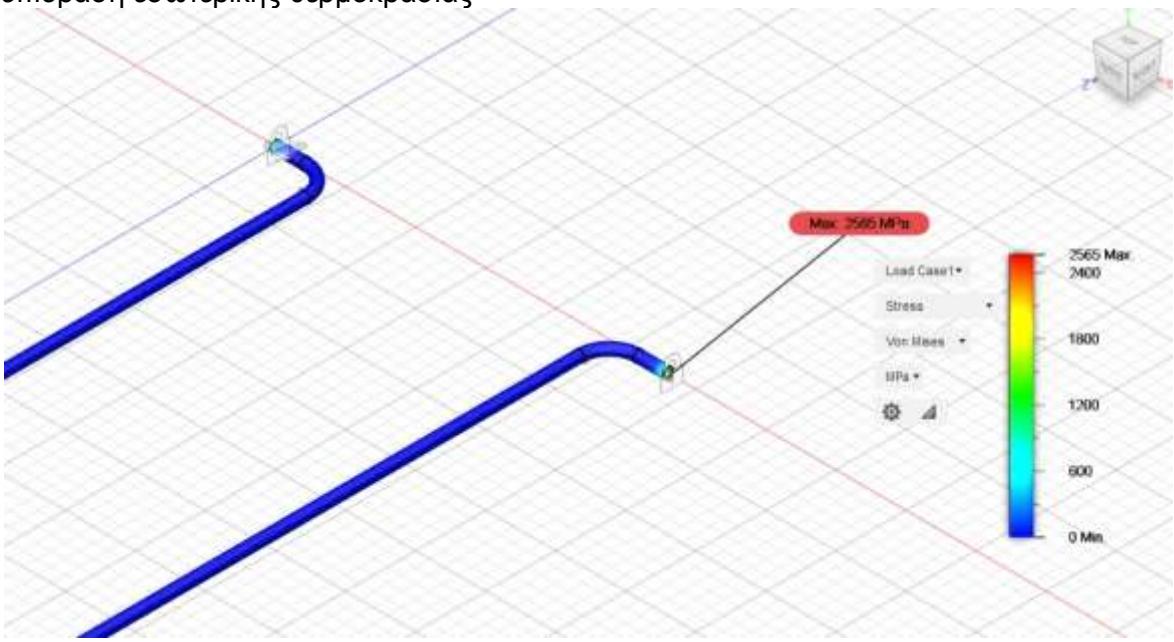
Von Mises	0.00343 MPa	2565 MPa
1st Principal	-563.4 MPa	1535 MPa
3rd Principal	-3059 MPa	81.26 MPa
Normal XX	-1255 MPa	1529 MPa
Normal YY	-2248 MPa	446.3 MPa
Normal ZZ	-2281 MPa	585.9 MPa
Shear XY	-963.8 MPa	967 MPa
Shear YZ	-415.4 MPa	410.5 MPa
Shear ZX	-1093 MPa	1149 MPa
Displacement		
Total	0 mm	87.69 mm
X	-2.995 mm	2.974 mm
Y	-0.118 mm	0.1243 mm
Z	-0.1145 mm	87.67 mm
Reaction Force		
Total	0 N	47874 N
X	-20057 N	22655 N
Y	-35165 N	34789 N
Z	-42173 N	42369 N
Strain		
Equivalent	0.007412	0.01944
1st Principal	0.005757	0.01974
3rd Principal	-0.01332	0.005778
Normal XX	0.00422	0.01582
Normal YY	-0.001022	0.008428
Normal ZZ	-8.403E-04	0.008376
Shear XY	-0.01222	0.01226
Shear YZ	-0.005269	0.005206
Shear ZX	-0.01386	0.01458
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.493E-11 W / mm^2	4.878E-07 W / mm^2
X	-3.552E-07 W / mm^2	2.062E-07 W / mm^2
Y	-1.549E-07 W / mm^2	3.299E-07 W / mm^2
Z	-1.097E-07 W / mm^2	1.428E-07 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.221E-09 C / mm	1.084E-05 C / mm
X	-4.582E-06 C / mm	7.894E-06 C / mm
Y	-7.33E-06 C / mm	3.442E-06 C / mm
Z	-3.173E-06 C / mm	2.438E-06 C / mm

Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-26: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.54: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.55: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

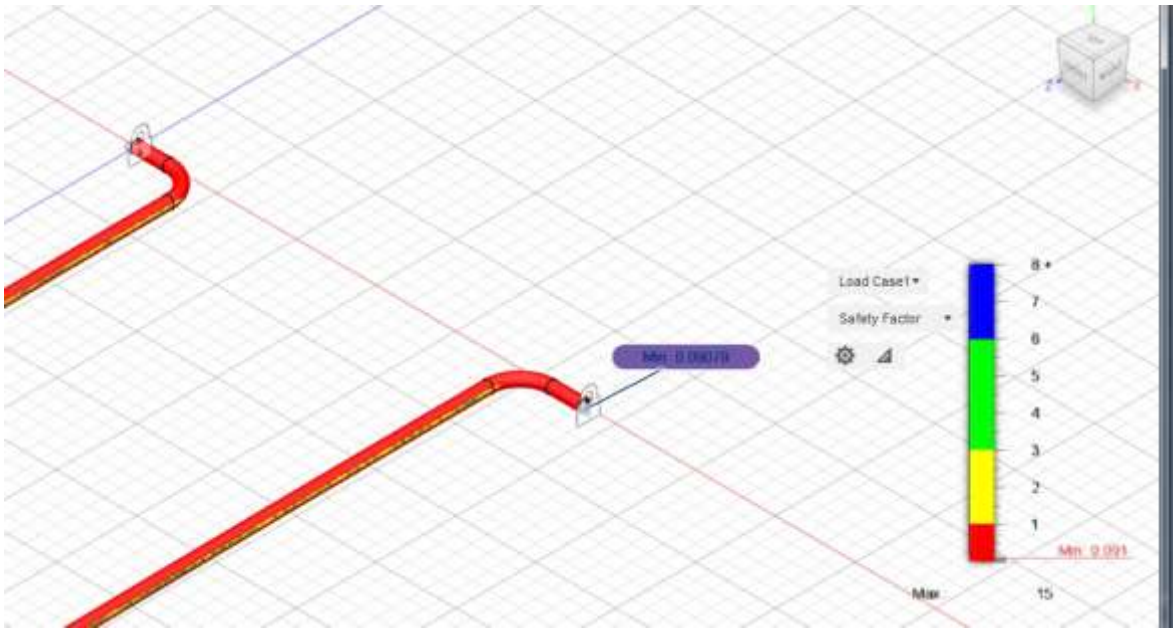
Παρατηρούμε πως για άλλη μία φορά η επίδραση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι η δυσμενέστερη συνθήκη φόρτισης, με τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας να εμφανίζεται στο σημείο της πάκτωσης.

δ) Συνολική φόρτιση

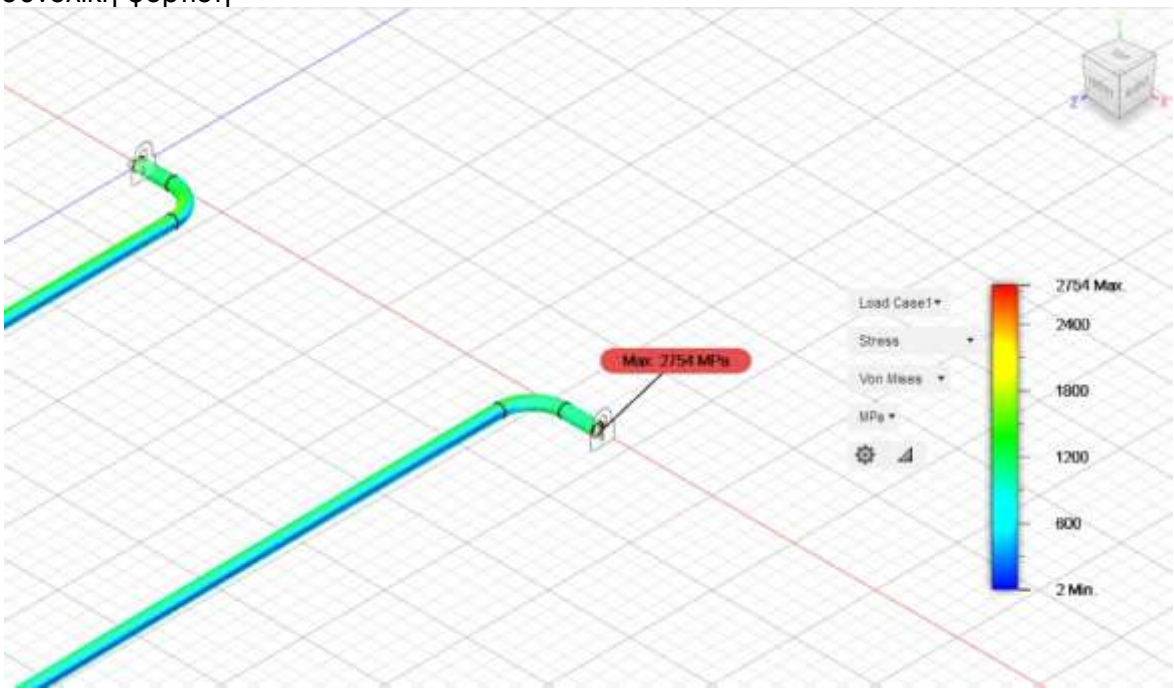
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09079	15
Stress		
Von Mises	2.403 MPa	2754 MPa
1st Principal	-505.8 MPa	1778 MPa
3rd Principal	-3437 MPa	114.6 MPa
Normal XX	-1503 MPa	1650 MPa
Normal YY	-2361 MPa	711.4 MPa
Normal ZZ	-2386 MPa	1767 MPa
Shear XY	-1223 MPa	1139 MPa
Shear YZ	-507.5 MPa	444.3 MPa
Shear ZX	-1152 MPa	1383 MPa
Displacement		
Total	0 mm	26404 mm
X	-1.001 mm	2347 mm
Y	-26300 mm	0.9423 mm
Z	-4.044 mm	137.3 mm
Reaction Force		
Total	0 N	53216 N
X	-25394 N	21793 N
Y	-33263 N	39458 N
Z	-46075 N	44565 N
Strain		
Equivalent	0.007627	0.02128
1st Principal	0.00573	0.02174
3rd Principal	-0.01577	0.005855
Normal XX	0.002773	0.01625
Normal YY	-0.001043	0.009262
Normal ZZ	-0.001749	0.01372
Shear XY	-0.01551	0.01444
Shear YZ	-0.006436	0.005635
Shear ZX	-0.0146	0.01754
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.493E-11 W / mm^2	4.878E-07 W / mm^2
X	-3.552E-07 W / mm^2	2.062E-07 W / mm^2
Y	-1.549E-07 W / mm^2	3.299E-07 W / mm^2
Z	-1.097E-07 W / mm^2	1.428E-07 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	1.221E-09 C / mm	1.084E-05 C / mm
X	-4.582E-06 C / mm	7.894E-06 C / mm
Y	-7.33E-06 C / mm	3.442E-06 C / mm
Z	-3.173E-06 C / mm	2.438E-06 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-27: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.56: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



Εικόνα 5.57: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για συνολική φόρτιση

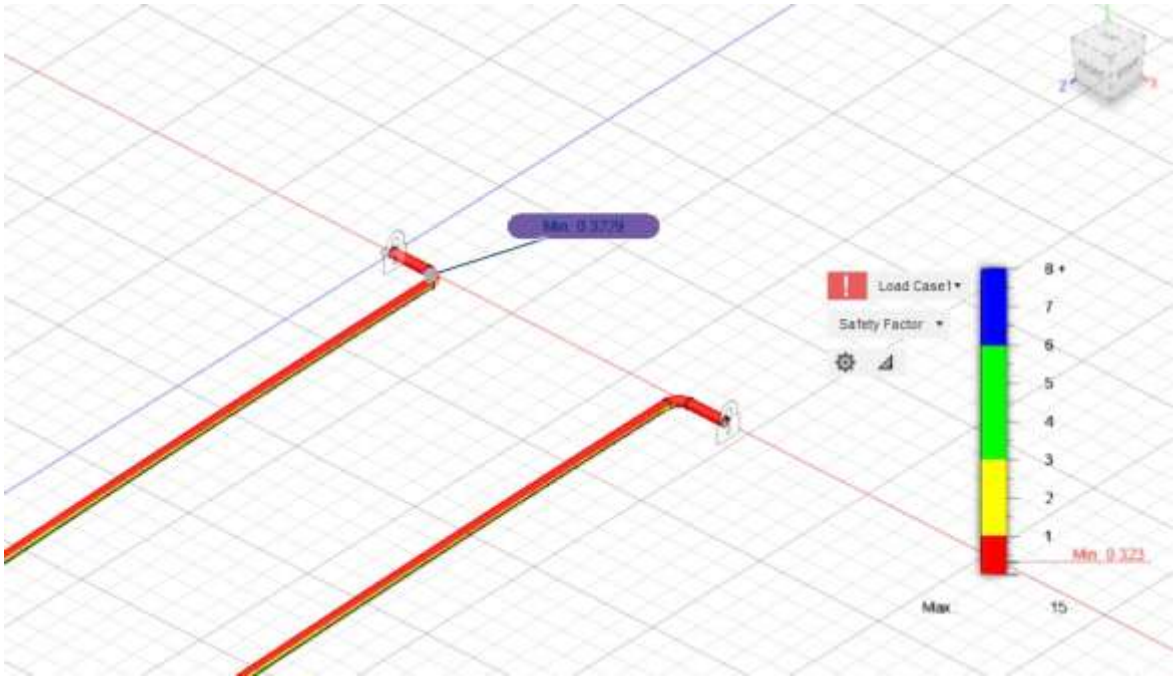
Γίνεται αντιληπτό πως η συμπεριφορά του μοντέλου ανάλογα με την φόρτιση είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για το μοντέλο με κύλιση, αλλά με διαφορετικές ελάχιστες τιμές ασφαλείας και μέγιστες τιμές τάσεων Von Mises. Στο τέλος του κεφαλαίου θα πραγματοποιθεί σύγκριση για τις παραμέτρους προσομοιώσεων συναρτήσει με ή χωρίς την ύπαρξη κύλισης.

***5.2.1.2** Μικρότερο μήκος αγωγού (L=10m)*

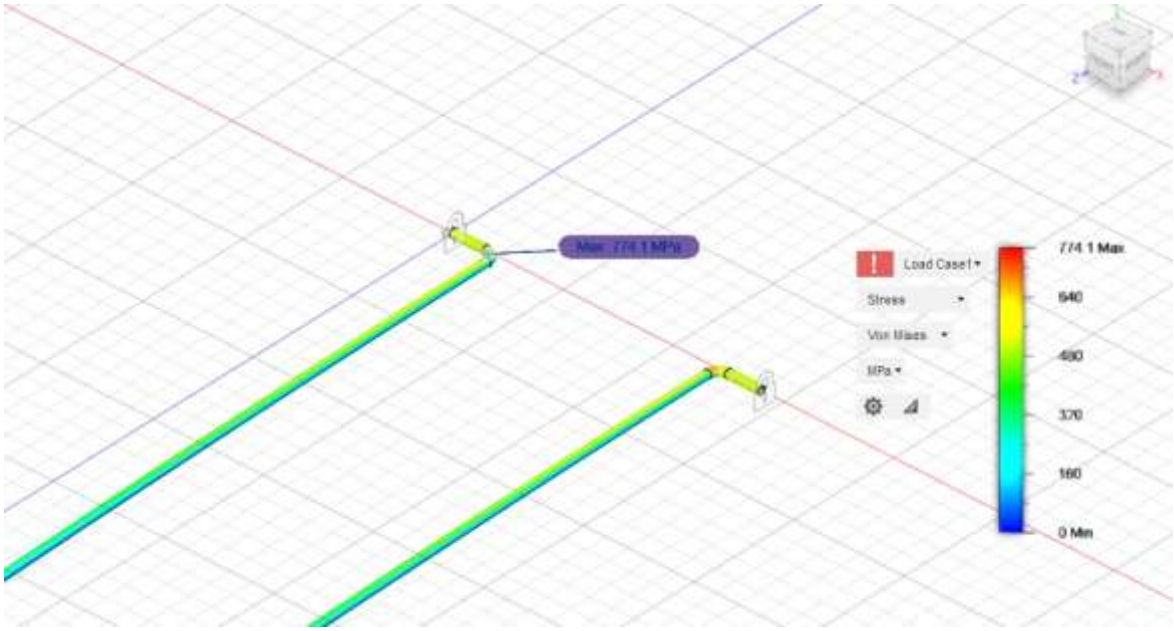
α) Επίδραση του βάρους του σώματος

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.3229	15
Stress		
Von Mises	0.002134 MPa	774.1 MPa
1st Principal	-65.16 MPa	871.9 MPa
3rd Principal	-861.7 MPa	61.32 MPa
Normal XX	-329.4 MPa	343.4 MPa
Normal YY	-422.5 MPa	410 MPa
Normal ZZ	-842 MPa	852.5 MPa
Shear XY	-385.1 MPa	382.5 MPa
Shear YZ	-256.4 MPa	217 MPa
Shear ZX	-296.9 MPa	298.5 MPa
Displacement		
Total	0 mm	4242 mm
X	-0.03104 mm	0.03113 mm
Y	-4242 mm	0.5085 mm
Z	-10.62 mm	10.62 mm
Reaction Force		
Total	0 N	7717 N
X	-403.4 N	410.6 N
Y	-5440 N	7612 N
Z	-5656 N	5658 N
Strain		
Equivalent	1.649E-08	0.005729
1st Principal	1.371E-08	0.005375
3rd Principal	-0.005459	-1.124E-08
Normal XX	-0.001579	0.001551
Normal YY	-0.001568	0.00159
Normal ZZ	-0.003723	0.003709
Shear XY	-0.004884	0.004852
Shear YZ	-0.003252	0.002752
Shear ZX	-0.003766	0.003785

Πίνακας 5-28: Report επίδρασης του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.58: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση της βαρύτητας του σώματος



Εικόνα 5.59: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

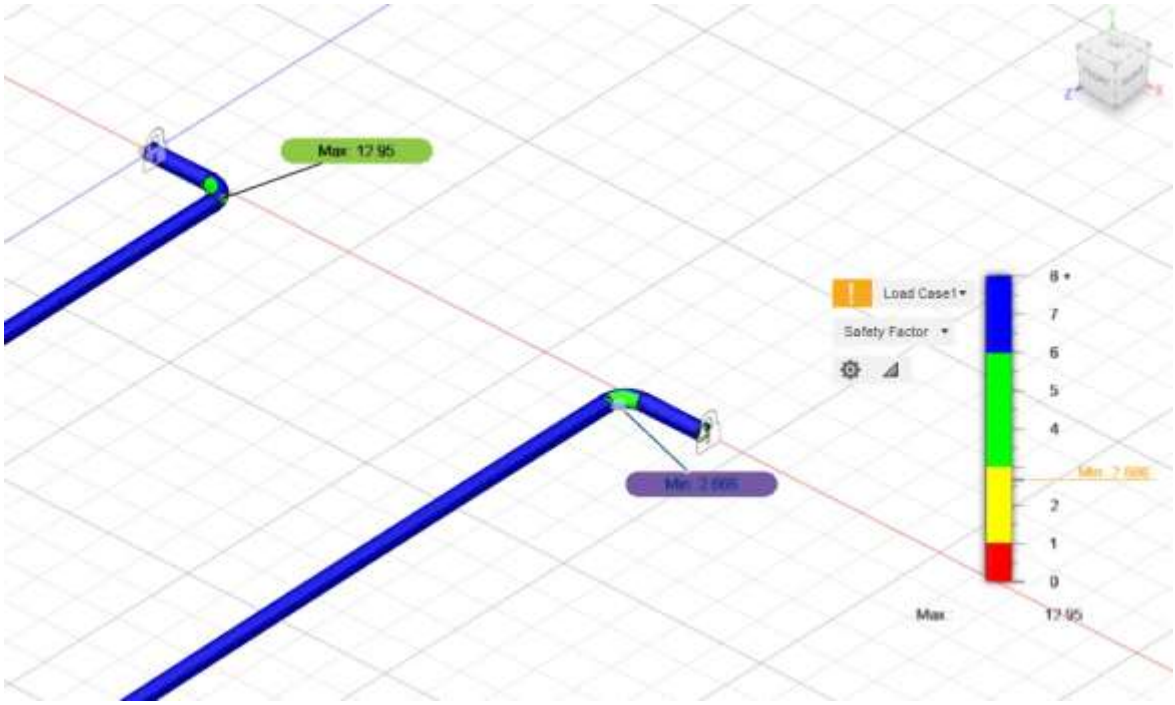
Παρατηρούμε όπως είναι αναμενόμενο, πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει μειωθεί από το μοντέλο με L=15,2 αλλά παραμένει πολύ πιο μικρός σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο με κύλιση.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

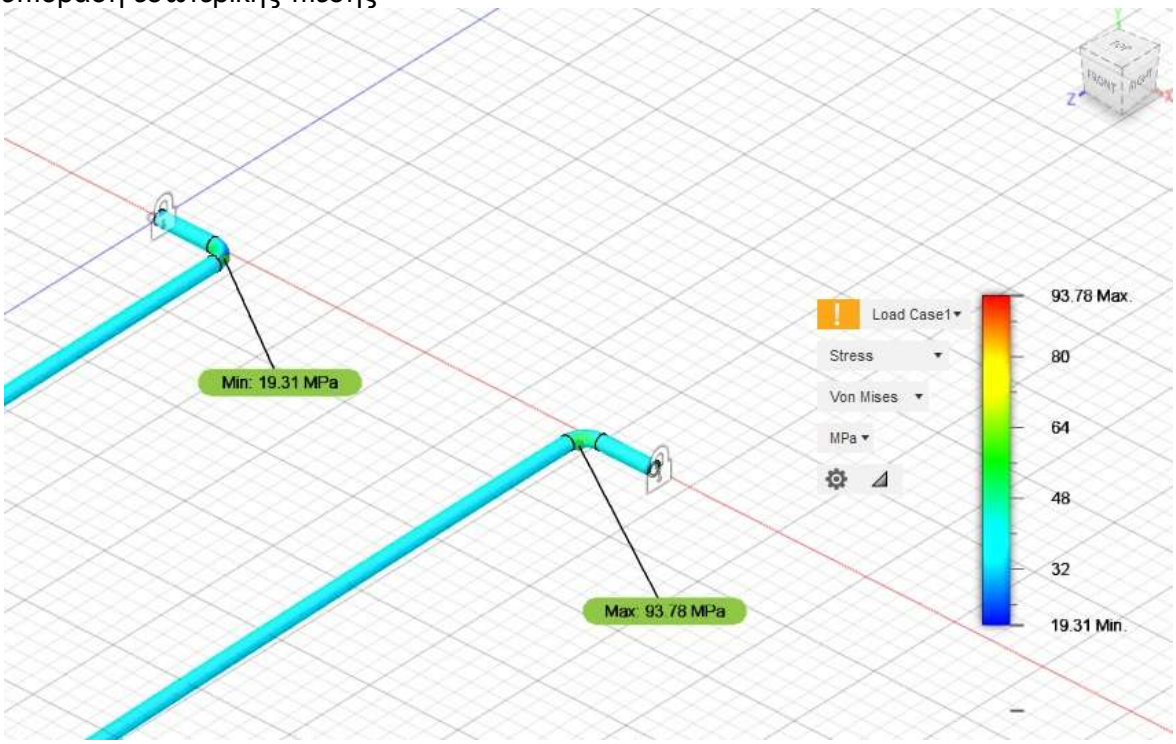
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	2.666	12.95

Stress		
Von Mises	19.31 MPa	93.78 MPa
1st Principal	8.951 MPa	89.52 MPa
3rd Principal	-28.9 MPa	15.72 MPa
Normal XX	-21.05 MPa	73.53 MPa
Normal YY	-23.69 MPa	75.22 MPa
Normal ZZ	-22.44 MPa	61.73 MPa
Shear XY	-48.72 MPa	50.22 MPa
Shear YZ	-42.58 MPa	45.15 MPa
Shear ZX	-28.72 MPa	28.74 MPa
Displacement		
Total	0 mm	216 mm
X	-0.02583 mm	10.44 mm
Y	-215.7 mm	0.02317 mm
Z	-0.3246 mm	0.9613 mm
Reaction Force		
Total	0 N	762 N
X	-643.8 N	637.8 N
Y	-420.3 N	396.1 N
Z	-601.9 N	587.6 N
Strain		
Equivalent	1.198E-04	7.796E-04
1st Principal	1.149E-04	7.862E-04
3rd Principal	-5.574E-04	-4.835E-05
Normal XX	-2.172E-04	3.07E-04
Normal YY	-2.516E-04	3.632E-04
Normal ZZ	-2.162E-04	2.985E-04
Shear XY	-6.179E-04	6.369E-04
Shear YZ	-5.4E-04	5.726E-04
Shear ZX	-3.643E-04	3.645E-04

Πίνακας 5-29: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.60: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.61: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

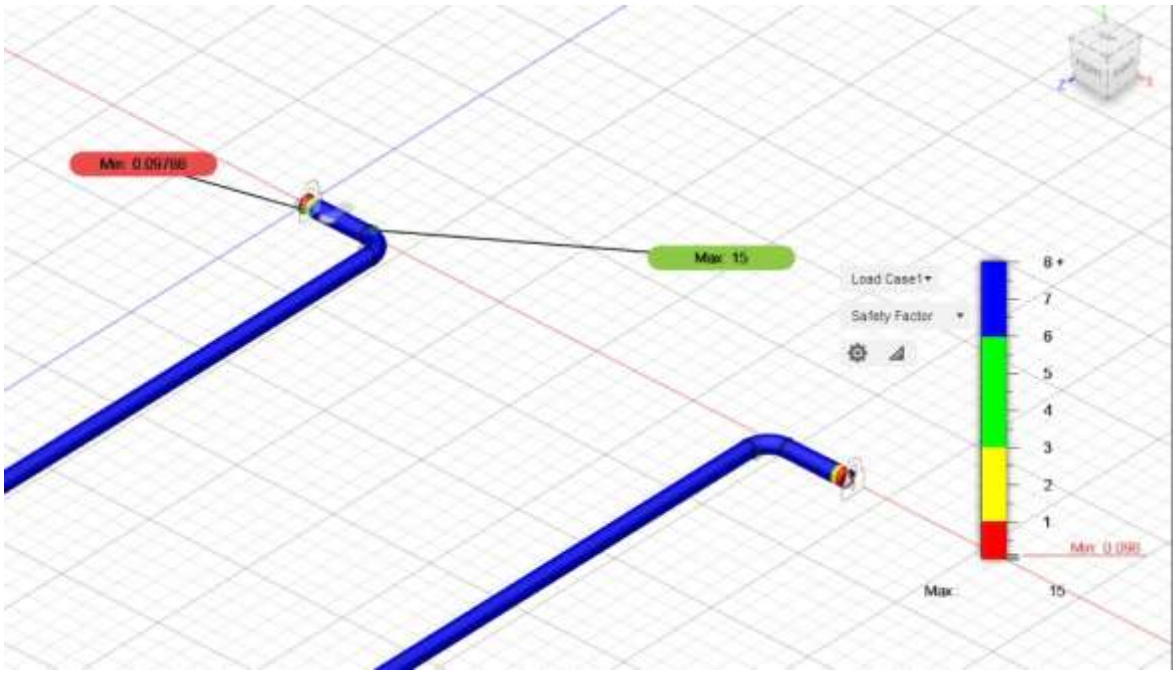
Όμοια συμπεράσματα, αυξημένος συντελεστής ασφαλείας σε σχέση με το μοντέλο L=15,2m και μικρότερος σε σχέση με αντίστοιχο μοντέλο με κύλιση.

γ) Επίδραση της θερμοκρασίας

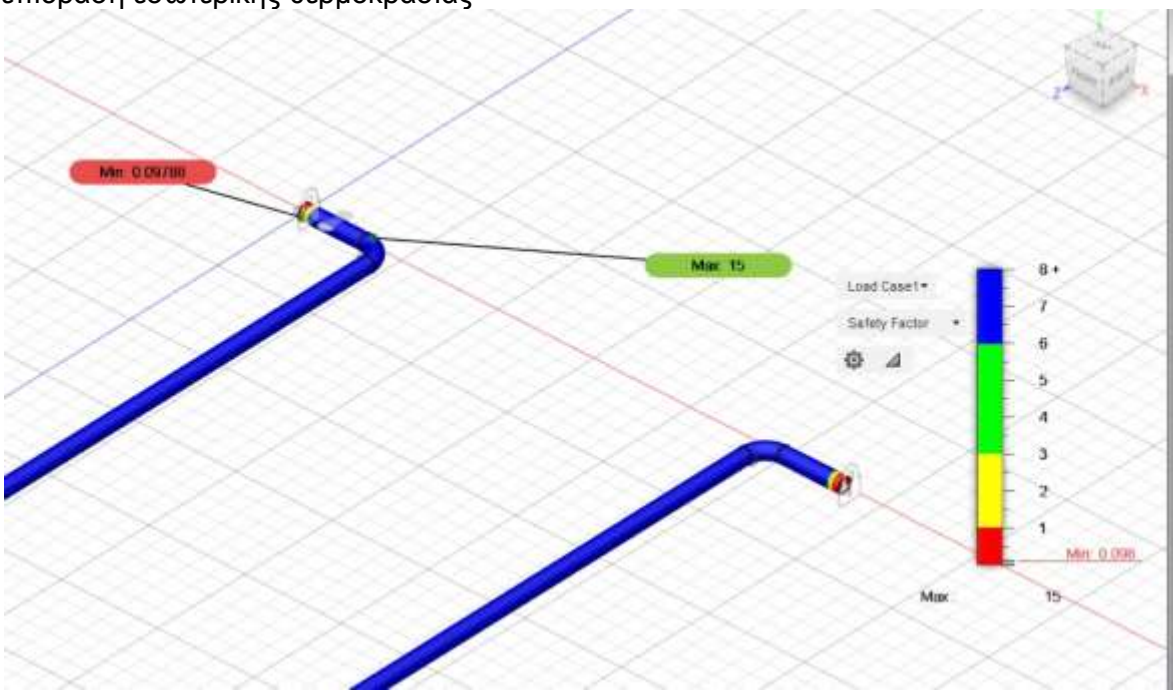
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09788	15
Stress		
Von Mises	0.003934 MPa	2554 MPa
1st Principal	-589.7 MPa	1496 MPa
3rd Principal	-2900 MPa	18.22 MPa
Normal XX	-1216 MPa	1474 MPa
Normal YY	-2232 MPa	441.7 MPa
Normal ZZ	-2266 MPa	504.9 MPa
Shear XY	-599.4 MPa	590.1 MPa
Shear YZ	-468.9 MPa	466 MPa
Shear ZX	-930 MPa	904.4 MPa
Displacement		
Total	0 mm	57.78 mm
X	-2.971 mm	2.997 mm
Y	-0.1134 mm	0.1178 mm
Z	-0.1111 mm	57.74 mm
Reaction Force		
Total	0 N	42113 N
X	-19606 N	16521 N
Y	-28423 N	28648 N
Z	-34437 N	32664 N
Strain		
Equivalent	0.007548	0.01593
1st Principal	0.005756	0.01648
3rd Principal	-0.01044	0.005778
Normal XX	0.004057	0.01596
Normal YY	-9.638E-04	0.008616
Normal ZZ	-6.854E-04	0.008543
Shear XY	-0.007603	0.007484
Shear YZ	-0.005947	0.00591
Shear ZX	-0.0118	0.01147
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.26E-14 W / mm^2	7.943E-10 W / mm^2
X	-2.827E-10 W / mm^2	6.485E-10 W / mm^2
Y	-1.748E-10 W / mm^2	3.832E-10 W / mm^2
Z	-2.876E-10 W / mm^2	7.217E-10 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	1.169E-12 C / mm	1.765E-08 C / mm
X	-1.441E-08 C / mm	6.283E-09 C / mm
Y	-8.516E-09 C / mm	3.884E-09 C / mm
Z	-1.604E-08 C / mm	6.391E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-30: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.62: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.63: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

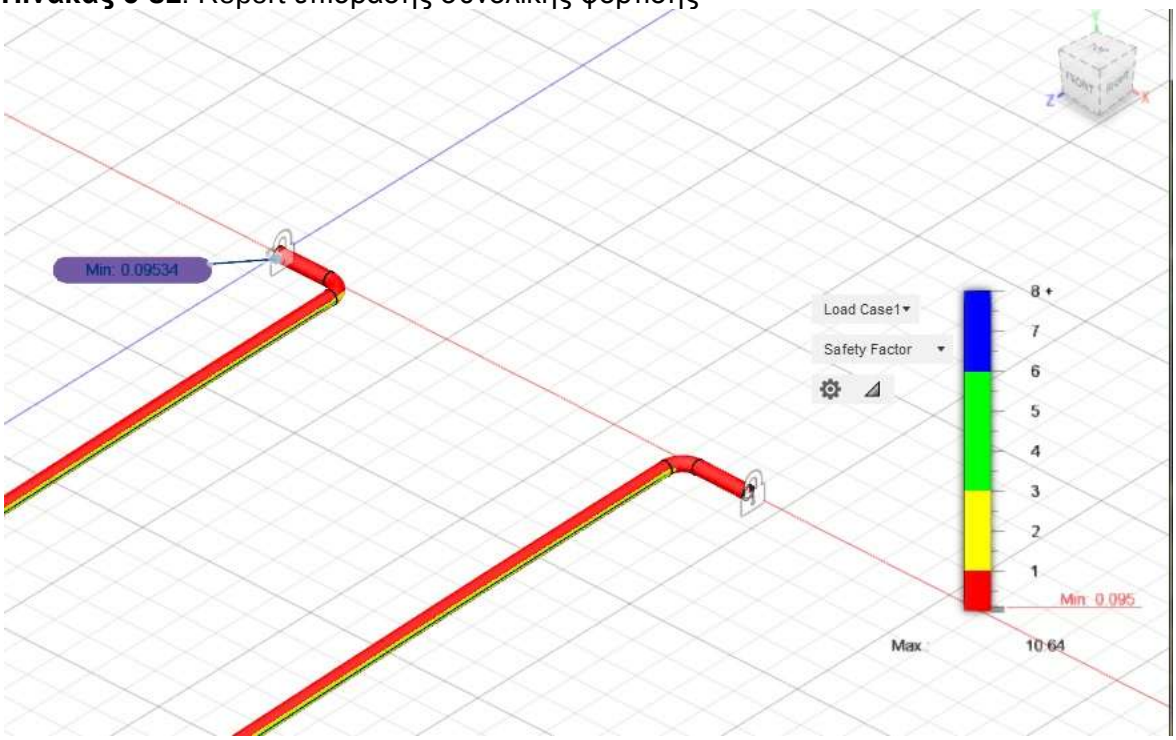
Παρατηρούμε πως ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας εμφανίζεται στο σημείο της πάκτωσης, και εδώ σε πάρα πολύ μικρή τιμή.

δ) Συνολική φόρτιση

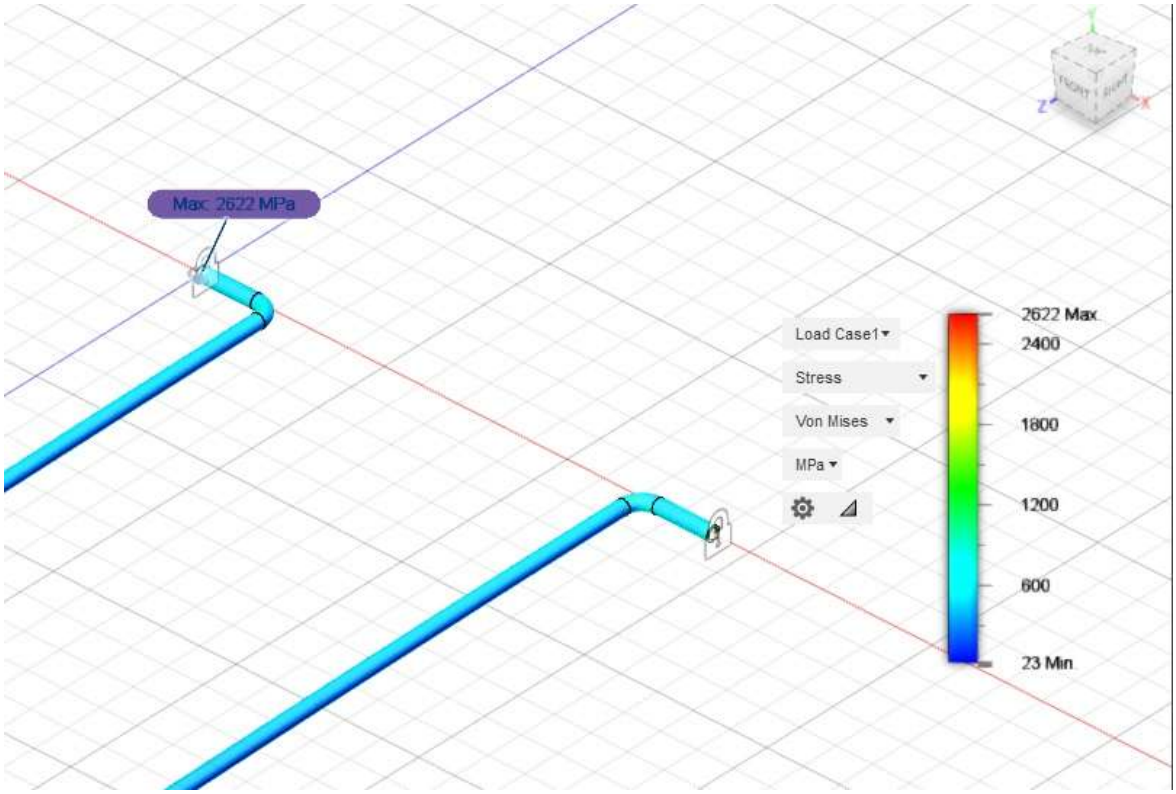
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09534	10.64
Stress		
Von Mises	23.49 MPa	2622 MPa
1st Principal	-514.7 MPa	1572 MPa
3rd Principal	-2879 MPa	46.86 MPa
Normal XX	-1152 MPa	1540 MPa
Normal YY	-2206 MPa	463.1 MPa
Normal ZZ	-2235 MPa	906.9 MPa
Shear XY	-709.9 MPa	710 MPa
Shear YZ	-465.8 MPa	448.5 MPa
Shear ZX	-786.8 MPa	985.8 MPa
Displacement		
Total	0 mm	4458 mm
X	-1.323 mm	13.47 mm
Y	-4458 mm	0.547 mm
Z	-0.6689 mm	69.21 mm
Reaction Force		
Total	0 N	41281 N
X	-18583 N	16950 N
Y	-28986 N	29024 N
Z	-31742 N	33970 N
Strain		
Equivalent	0.007676	0.01629
1st Principal	0.005727	0.01689
3rd Principal	-0.01063	0.005862
Normal XX	0.004097	0.01623
Normal YY	-9.191E-04	0.008654
Normal ZZ	-6.835E-04	0.009658
Shear XY	-0.009003	0.009005
Shear YZ	-0.005908	0.005688
Shear ZX	-0.009979	0.0125
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		

Total	5.26E-14 W / mm^2	7.943E-10 W / mm^2
X	-2.827E-10 W / mm^2	6.485E-10 W / mm^2
Y	-1.748E-10 W / mm^2	3.832E-10 W / mm^2
Z	-2.876E-10 W / mm^2	7.217E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.169E-12 C / mm	1.765E-08 C / mm
X	-1.441E-08 C / mm	6.283E-09 C / mm
Y	-8.516E-09 C / mm	3.884E-09 C / mm
Z	-1.604E-08 C / mm	6.391E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-31: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.64: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση ολικής φόρτισης

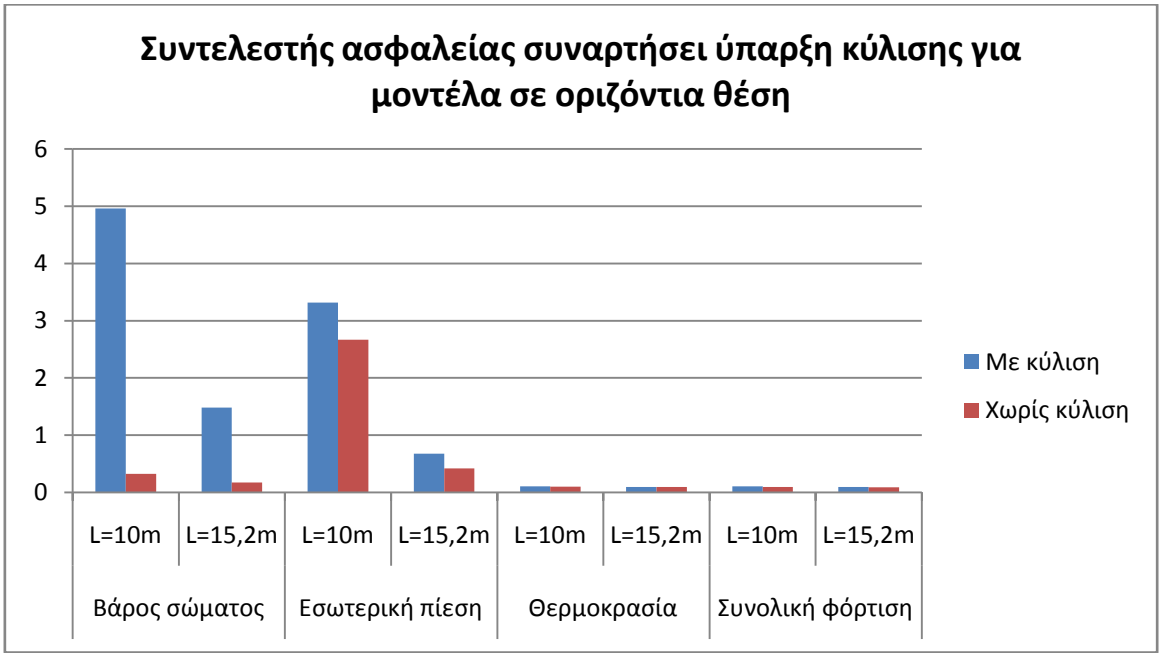


Εικόνα 5.65: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση ολικής φόρτισης

Γίνεται αντιληπτό και εδώ πως η συμπεριφορά του μοντέλου ανάλογα με την φόρτιση είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για το μοντέλο με κύλιση, αλλά με διαφορετικές ελάχιστες τιμές ασφαλείας και μέγιστες τιμές τάσεων Von Mises, με βελτίωση των τιμών αυτών λόγω μείωσης της μεγάλης διάστασης.

Λόγω των προφανών αποτελεσμάτων για L=5m, καθώς η συμπεριφορά θα είναι ανάλογη όπως στο παρόν κεφάλαιο για L=10m, δεν θα ακολουθήσει ανάλυση για L=5. Ακολουθεί η σύγκριση για L=15,2m και L=10m, για μοντέλο στην οριζόντια θέση συναρτήσει ύπαρξης ή όχι κύλισης.

***5.2.1.3** Συμπεράσματα προσομοιώσεων μοντέλων σε οριζόντια θέση με κύλιση και χωρίς κύλιση*



Διάγραμμα 5-10: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει ύπαρξη κύλισης για μοντέα σε οριζόντια θέση

Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε πως η ύπαρξη κύλισης βελτιώνει πολύ τον συντελεστή ασφαλείας κατά την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος και της εσωτερικής πίεσης. Η επίδραση της θερμοκρασίας (και επομένως και η συνολική φόρτιση) διατηρεί τον συντελεστή ασφαλείας σε χαμηλά επίπεδα, τόσο για μοντέλο με κύλιση όσο και για μοντέλο χωρίς κύλιση. Για την διάσταση L, έχουμε ήδη συμπεράνει πως όταν μειώνεται αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας.

***5.2.2** Κατακόρυφη θέση*

***5.2.2.1** Μήκος σωληνώσεων, σύμφωνα με το σχέδιο (15,2m)*

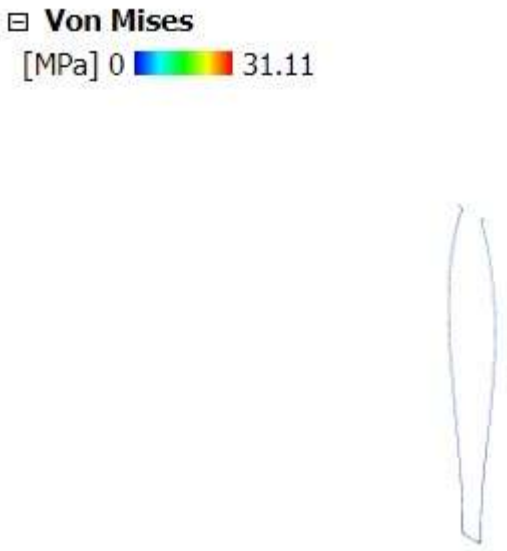
α) Επίδραση του βάρους του σώματος

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	8.036	15
Stress		
Von Mises	6.828E-04 MPa	31.11 MPa
1st Principal	-14.86 MPa	38.42 MPa
3rd Principal	-40.04 MPa	10.57 MPa
Normal XX	-38.14 MPa	37.87 MPa
Normal YY	-16.71 MPa	10.76 MPa
Normal ZZ	-16.47 MPa	12.93 MPa

Shear XY	-6.064 MPa	4.419 MPa
Shear YZ	-2.366 MPa	2.263 MPa
Shear ZX	-3.454 MPa	3.611 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1.922 mm
X	-1.917 mm	1.917 mm
Y	-0.1809 mm	0 mm
Z	-7.102E-04 mm	0.00447 mm
Reaction Force		
Total	0 N	667.3 N
X	-598.8 N	618.5 N
Y	-77.99 N	227.2 N
Z	-135.1 N	116.7 N
Strain		
Equivalent	5.075E-09	1.485E-04
1st Principal	2.882E-09	1.668E-04
3rd Principal	-1.779E-04	1.578E-09
Normal XX	-1.545E-04	1.538E-04
Normal YY	-5.814E-05	5.811E-05
Normal ZZ	-4.37E-05	4.33E-05
Shear XY	-7.691E-05	5.605E-05
Shear YZ	-3.001E-05	2.87E-05
Shear ZX	-4.381E-05	4.58E-05

Πίνακας 5-32: Report επίδρασης του βάρους του σώματος

Εικόνα 5.66: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.67: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

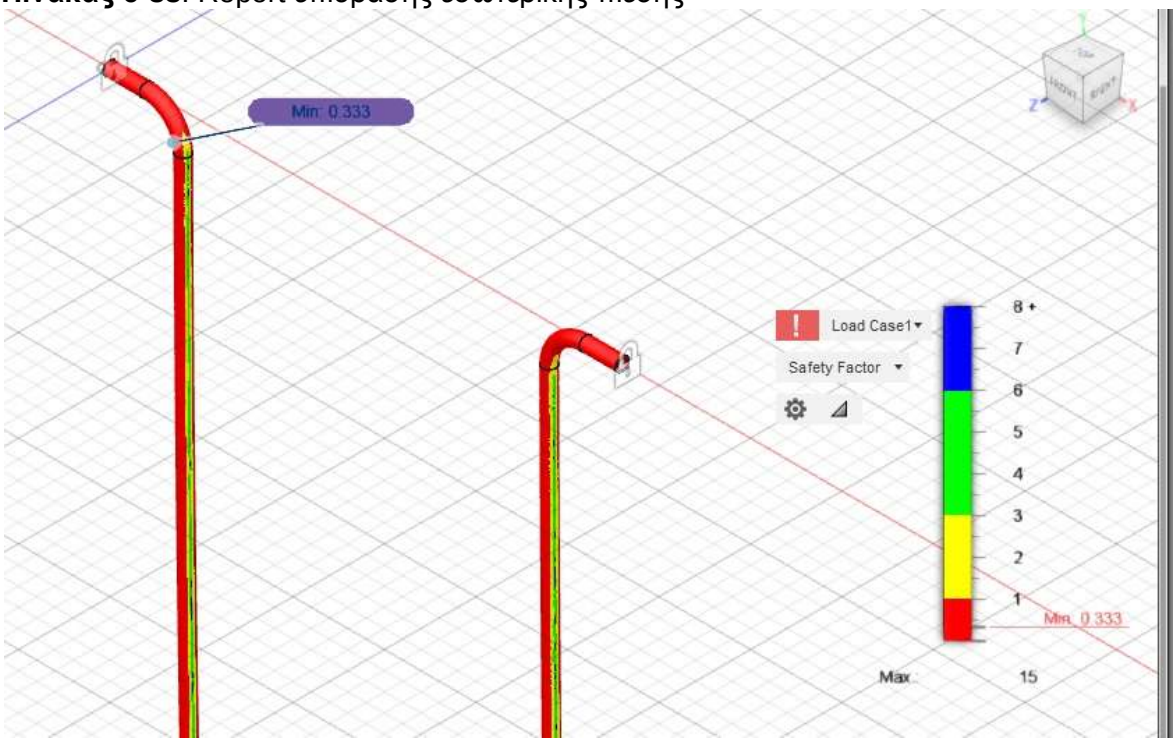
Παρατηρούμε πως σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο με κύλιση, ο συντελεστής ασφαλείας έχει μειωθεί αλλά σε μικρό βαθμό, παραμένονται σε ασφαλές επίπεδο.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

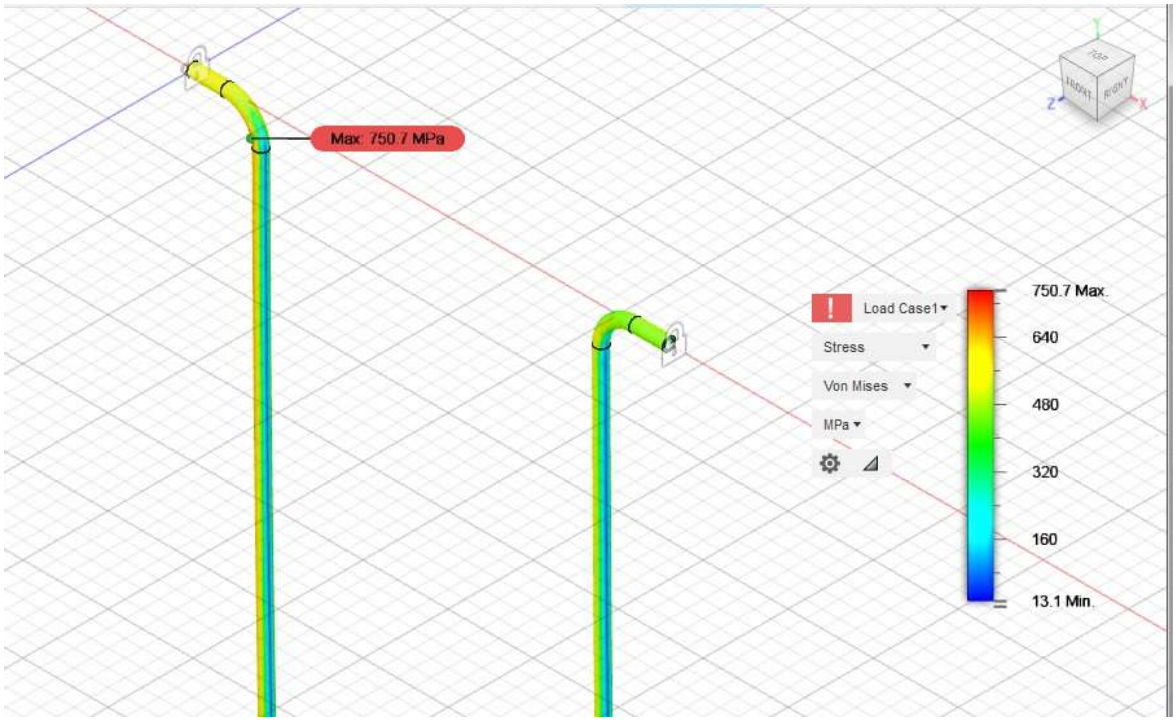
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.333	15
Stress		
Von Mises	13.13 MPa	750.7 MPa
1st Principal	-62.98 MPa	815.8 MPa
3rd Principal	-703.1 MPa	45.72 MPa
Normal XX	-311.5 MPa	321 MPa
Normal YY	-696.2 MPa	800.4 MPa
Normal ZZ	-236.2 MPa	281.1 MPa
Shear XY	-337.1 MPa	312.7 MPa
Shear YZ	-208.8 MPa	222.6 MPa
Shear ZX	-353.4 MPa	322.3 MPa
Displacement		
Total	0 mm	13389 mm
X	-0.03752 mm	2670 mm
Y	-26.95 mm	25.27 mm
Z	-13120 mm	0.4615 mm
Reaction Force		

Total	0 N	8631 N
X	-1381 N	921.8 N
Y	-5716 N	8628 N
Z	-6166 N	6172 N
Strain		
Equivalent	8.346E-05	0.005326
1st Principal	4.478E-05	0.005576
3rd Principal	-0.004503	-4.88E-05
Normal XX	-0.001423	0.001721
Normal YY	-0.003368	0.003637
Normal ZZ	-0.001373	0.001395
Shear XY	-0.004275	0.003966
Shear YZ	-0.002648	0.002823
Shear ZX	-0.004482	0.004088

Πίνακας 5-33: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.68: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.69: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

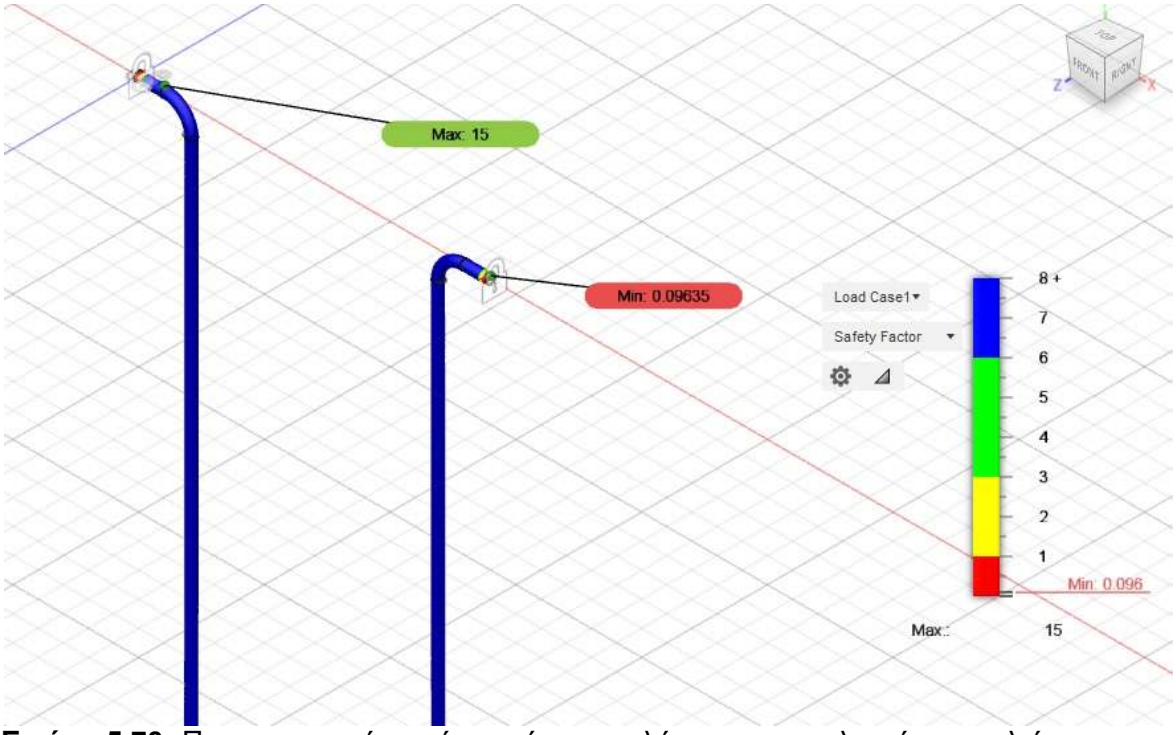
Όπως προηγουμένως, παραρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει μειωθεί σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο με κύλιση. Το πιο αδύναμο σημείο εμφανίζεται στην καμπύλη δίπλα από την πάκτωση του αγωγού.

γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

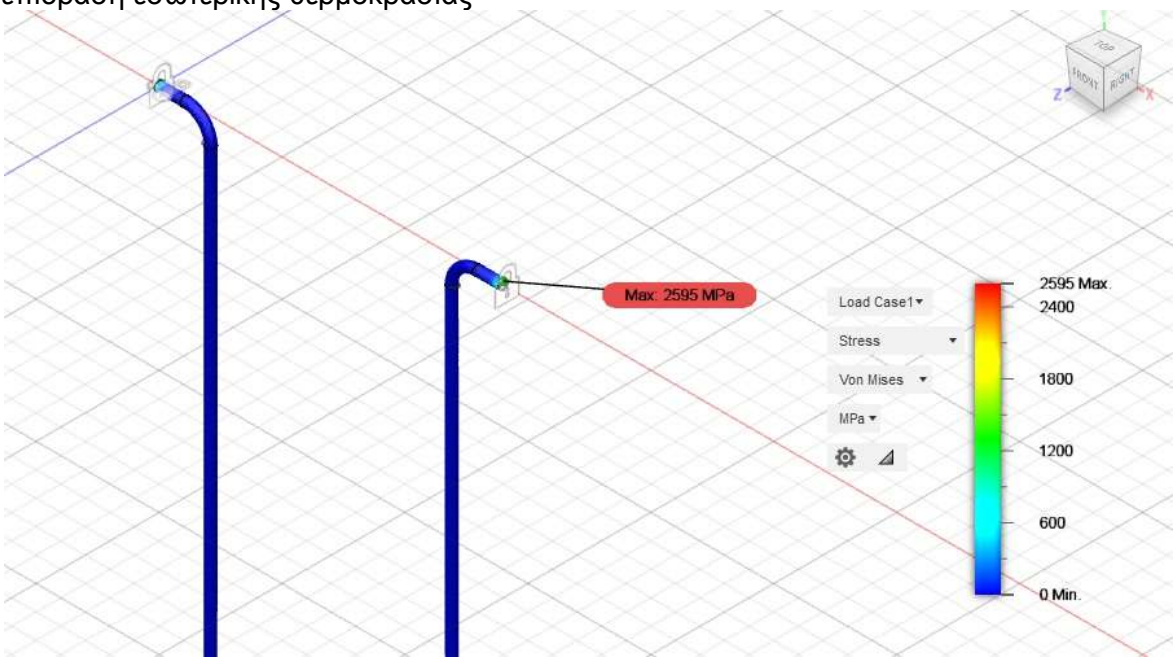
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09635	15
Stress		
Von Mises	0.004702 MPa	2595 MPa
1st Principal	-653.6 MPa	1546 MPa
3rd Principal	-3117 MPa	67.71 MPa
Normal XX	-1307 MPa	1538 MPa
Normal YY	-2303 MPa	438.1 MPa
Normal ZZ	-2273 MPa	555.6 MPa
Shear XY	-972.5 MPa	659 MPa
Shear YZ	-420 MPa	418.3 MPa
Shear ZX	-1082 MPa	1099 MPa
Displacement		
Total	0 mm	87.7 mm
X	-2.881 mm	3.088 mm
Y	-87.67 mm	0.1179 mm
Z	-0.1111 mm	0.1421 mm

Reaction Force		
Total	0 N	48386 N
X	-21675 N	19680 N
Y	-27463 N	33975 N
Z	-38746 N	42866 N
Strain		
Equivalent	0.007491	0.01892
1st Principal	0.005759	0.01906
3rd Principal	-0.01319	0.00577
Normal XX	0.00424	0.01622
Normal YY	-0.001066	0.008677
Normal ZZ	-8.443E-04	0.008254
Shear XY	-0.01233	0.008359
Shear YZ	-0.005327	0.005305
Shear ZX	-0.01372	0.01394
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	1.08E-11 W / mm^2	2.811E-07 W / mm^2
X	-6.506E-08 W / mm^2	2.57E-07 W / mm^2
Y	-1.563E-07 W / mm^2	1.725E-07 W / mm^2
Z	-1.793E-07 W / mm^2	2.079E-07 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	2.4E-10 C / mm	6.246E-06 C / mm
X	-5.711E-06 C / mm	1.446E-06 C / mm
Y	-3.832E-06 C / mm	3.473E-06 C / mm
Z	-4.619E-06 C / mm	3.985E-06 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-34: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.70: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.71: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκασίας

Ίδια συμπεράσματα όπως προηγουμένως.

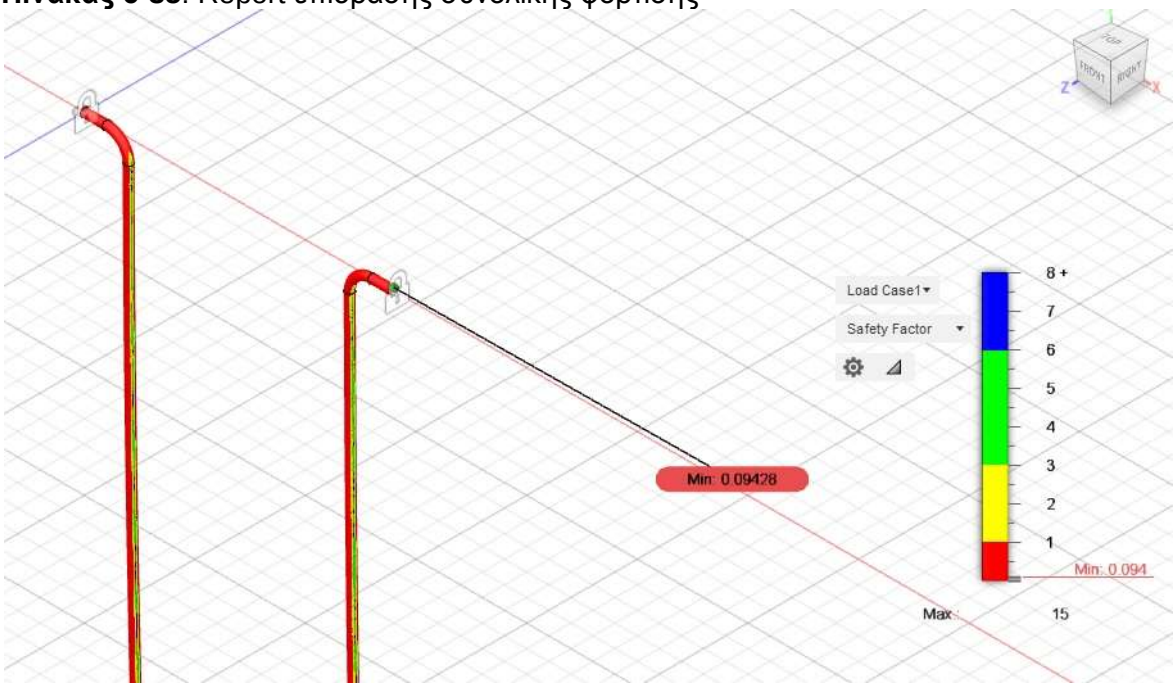
δ) Συνολική φόρτιση

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09428	15
Stress		

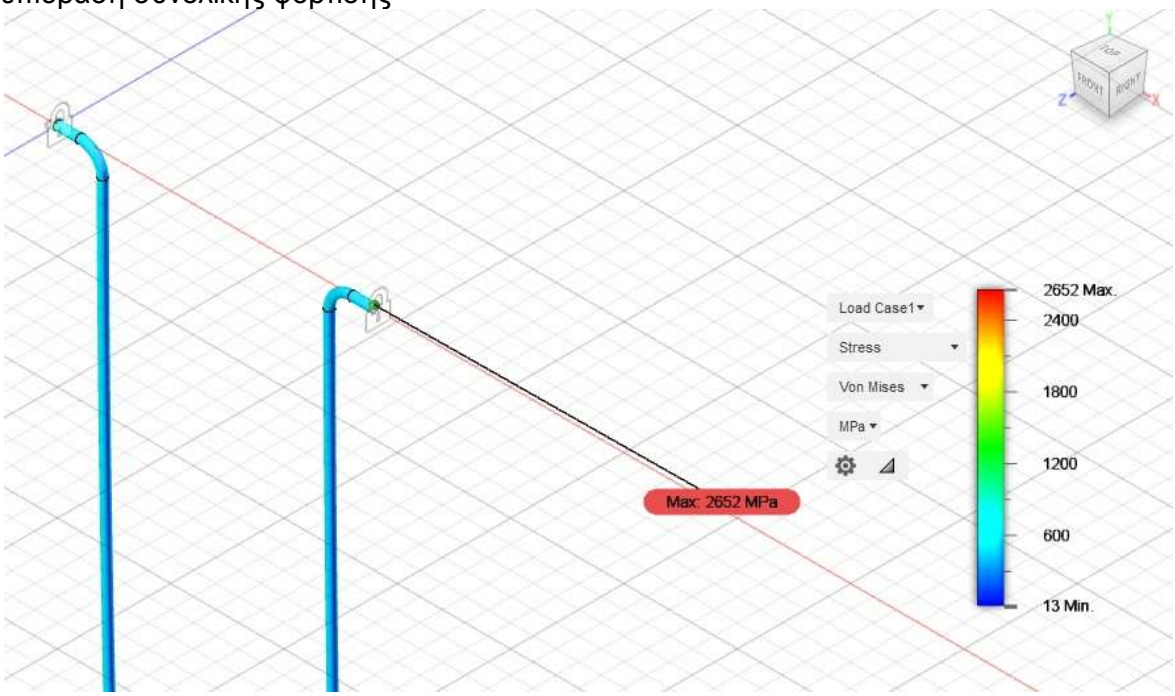
Von Mises	13.08 MPa	2652 MPa
1st Principal	-621.8 MPa	1633 MPa
3rd Principal	-3159 MPa	45.44 MPa
Normal XX	-1323 MPa	1608 MPa
Normal YY	-2307 MPa	801.8 MPa
Normal ZZ	-2280 MPa	551.8 MPa
Shear XY	-871.7 MPa	749.3 MPa
Shear YZ	-404 MPa	406 MPa
Shear ZX	-1168 MPa	1235 MPa
Displacement		
Total	0 mm	13389 mm
X	-1.071 mm	2673 mm
Y	-114.7 mm	0.8074 mm
Z	-13120 mm	0.4753 mm
Reaction Force		
Total	0 N	48799 N
X	-21516 N	19759 N
Y	-29804 N	32002 N
Z	-40588 N	42530 N
Strain		
Equivalent	0.007752	0.01925
1st Principal	0.005698	0.01956
3rd Principal	-0.01352	0.005863
Normal XX	0.004258	0.01657
Normal YY	-0.001033	0.009403
Normal ZZ	-8.289E-04	0.008242
Shear XY	-0.01106	0.009504
Shear YZ	-0.005124	0.005149
Shear ZX	-0.01481	0.01567
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	1.08E-11 W / mm^2	2.811E-07 W / mm^2
X	-6.506E-08 W / mm^2	2.57E-07 W / mm^2
Y	-1.563E-07 W / mm^2	1.725E-07 W / mm^2
Z	-1.793E-07 W / mm^2	2.079E-07 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	2.4E-10 C / mm	6.246E-06 C / mm
X	-5.711E-06 C / mm	1.446E-06 C / mm
Y	-3.832E-06 C / mm	3.473E-06 C / mm
Z	-4.619E-06 C / mm	3.985E-06 C / mm

Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-35: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.72: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.73: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση συνολικής φόρτισης

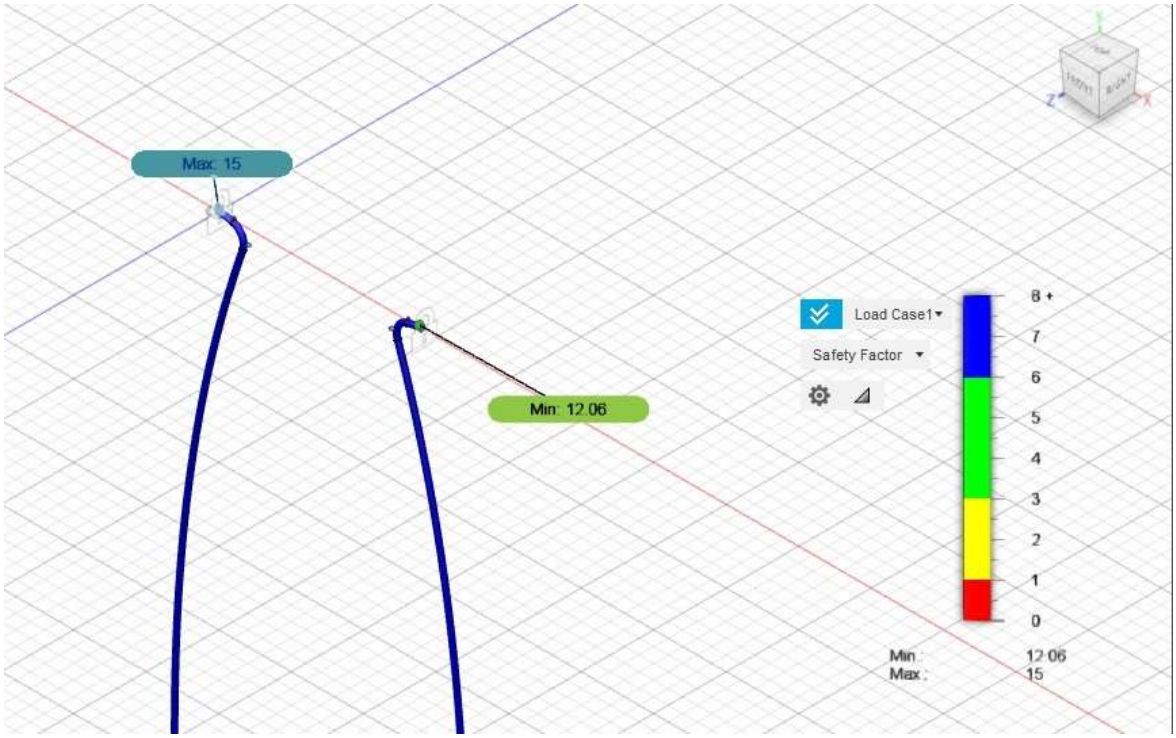
Ίδιες παρατηρήσεις με πριν. Στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί συγκριτικό διάγραμμα για τις προσομοιώσεις αντίστοιχων μοντέλων στην κατακόρυφη θέση τόσο με την ύπαρξη κύλισης, όσο και χωρίς αυτή. Για τους ίδιους λόγους όπως πριν, ακολουθεί ανάλυση μόνο για L=10m και όχι και για L=5m.

***5.2.2.2** Μικρότερο μήκος σωλήνα (L=10m)*

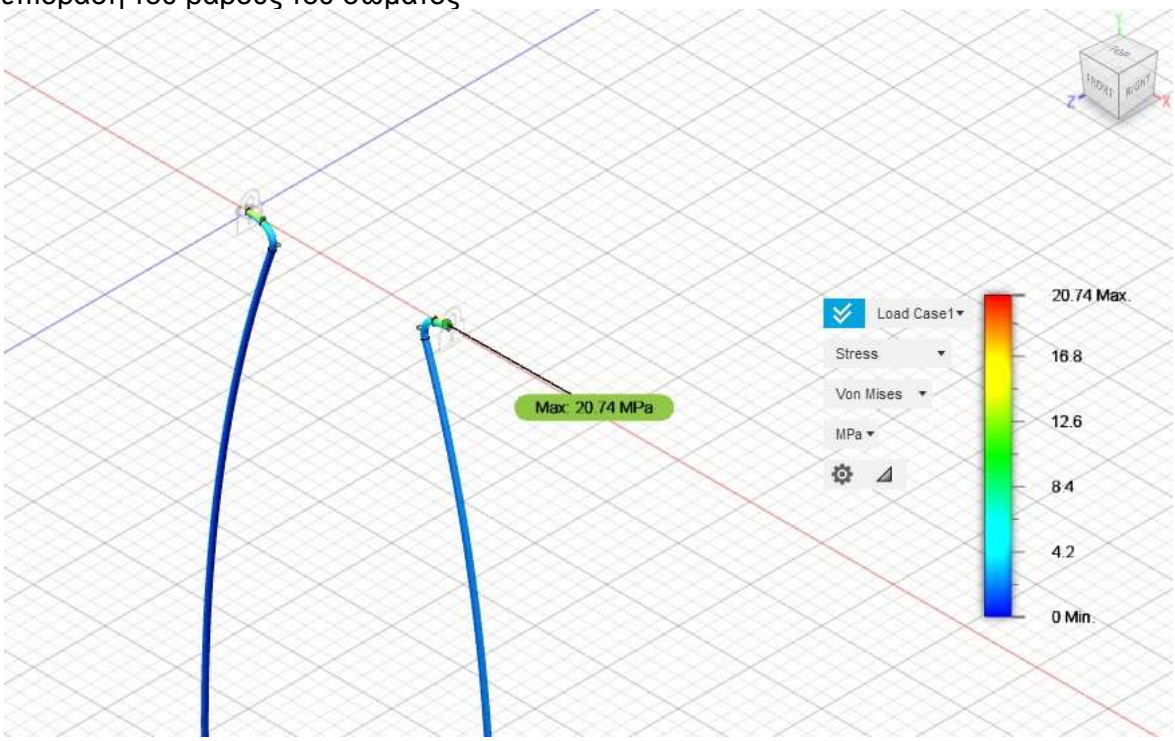
α) Επίδραση του βάρους του σώματος

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	12.06	15
Stress		
Von Mises	4.538E-04 MPa	20.74 MPa
1st Principal	-9.538 MPa	27.65 MPa
3rd Principal	-25.99 MPa	9.866 MPa
Normal XX	-25.32 MPa	26.53 MPa
Normal YY	-10.76 MPa	10.99 MPa
Normal ZZ	-10.7 MPa	10.61 MPa
Shear XY	-3.804 MPa	4.306 MPa
Shear YZ	-1.623 MPa	1.597 MPa
Shear ZX	-3.044 MPa	2.384 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.8152 mm
X	-0.8106 mm	0.8105 mm
Y	-0.1148 mm	0 mm
Z	-4.783E-04 mm	4.81E-04 mm
Reaction Force		
Total	0 N	443.7 N
X	-411.8 N	413.4 N
Y	-57.57 N	154.8 N
Z	-74.52 N	71.65 N
Strain		
Equivalent	2.905E-09	1.02E-04
1st Principal	1.25E-09	1.224E-04
3rd Principal	-1.17E-04	-4.165E-10
Normal XX	-1.019E-04	1.01E-04
Normal YY	-4.033E-05	3.802E-05
Normal ZZ	-2.838E-05	2.862E-05
Shear XY	-4.824E-05	5.461E-05
Shear YZ	-2.058E-05	2.025E-05
Shear ZX	-3.86E-05	3.023E-05

Πίνακας 5-36: Report επίδρασης βάρους του σώματος



Εικόνα 5.74: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση του βάρους του σώματος



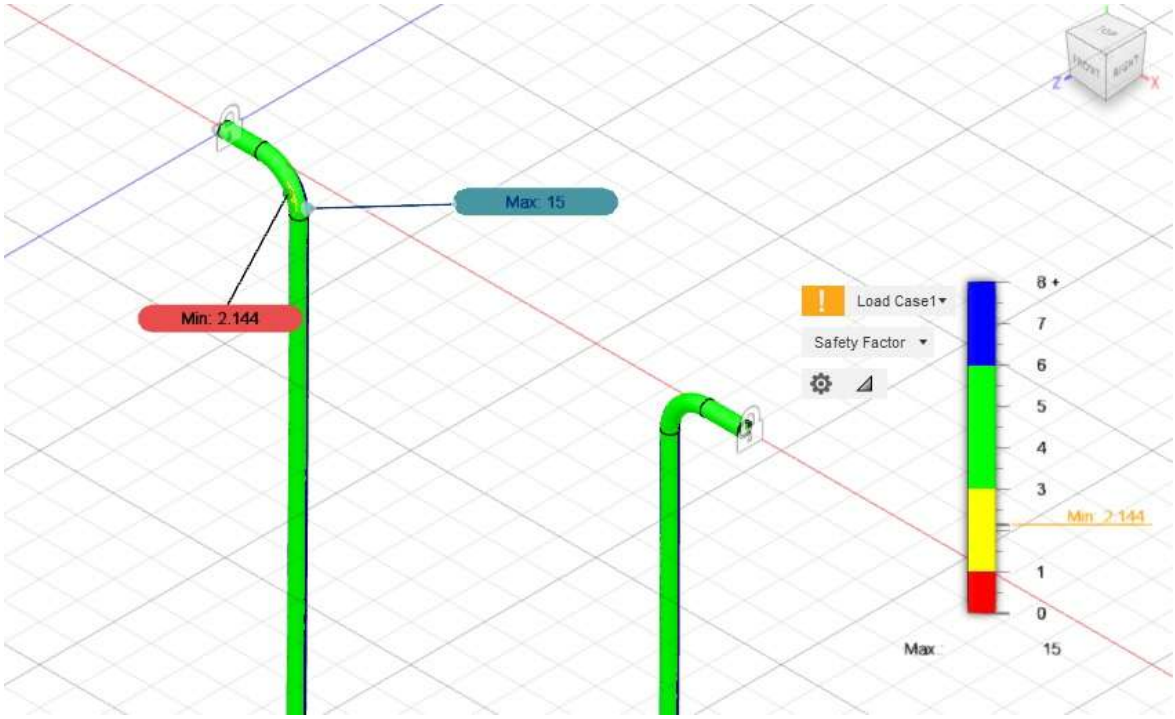
Εικόνα 5.75: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

Παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει μειωθεί ελάχιστα σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο με κύλιση.

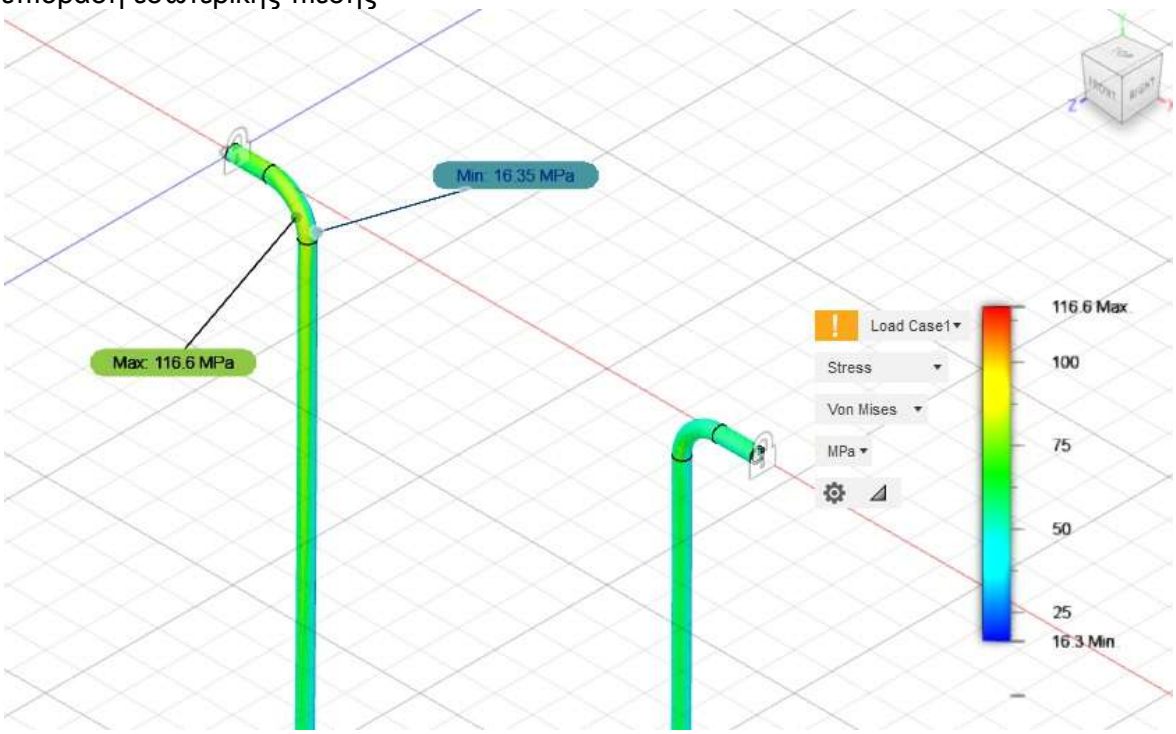
β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	2.144	15
Stress		
Von Mises	16.35 MPa	116.6 MPa
1st Principal	-0.1821 MPa	113.1 MPa
3rd Principal	-68.19 MPa	22.89 MPa
Normal XX	-44.86 MPa	95.84 MPa
Normal YY	-53.55 MPa	109.1 MPa
Normal ZZ	-24.39 MPa	87.57 MPa
Shear XY	-38.24 MPa	46.93 MPa
Shear YZ	-41.91 MPa	48.41 MPa
Shear ZX	-50.38 MPa	59.77 MPa
Displacement		
Total	0 mm	526.7 mm
X	-0.0188 mm	137.2 mm
Y	-1.889 mm	1.217 mm
Z	-0.0413 mm	508.6 mm
Reaction Force		
Total	0 N	1478 N
X	-1166 N	956.5 N
Y	-580.1 N	692.1 N
Z	-652.9 N	694.7 N
Strain		
Equivalent	1.208E-04	9.407E-04
1st Principal	9.609E-05	9.887E-04
3rd Principal	-6.298E-04	-4.74E-05
Normal XX	-2.691E-04	4.257E-04
Normal YY	-3.173E-04	4.367E-04
Normal ZZ	-3.228E-04	4.405E-04
Shear XY	-4.85E-04	5.952E-04
Shear YZ	-5.315E-04	6.139E-04
Shear ZX	-6.389E-04	7.581E-04

Πίνακας 5-37: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.76: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.77: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Ίδια συμπεράσματα όπως προηγουμένως.

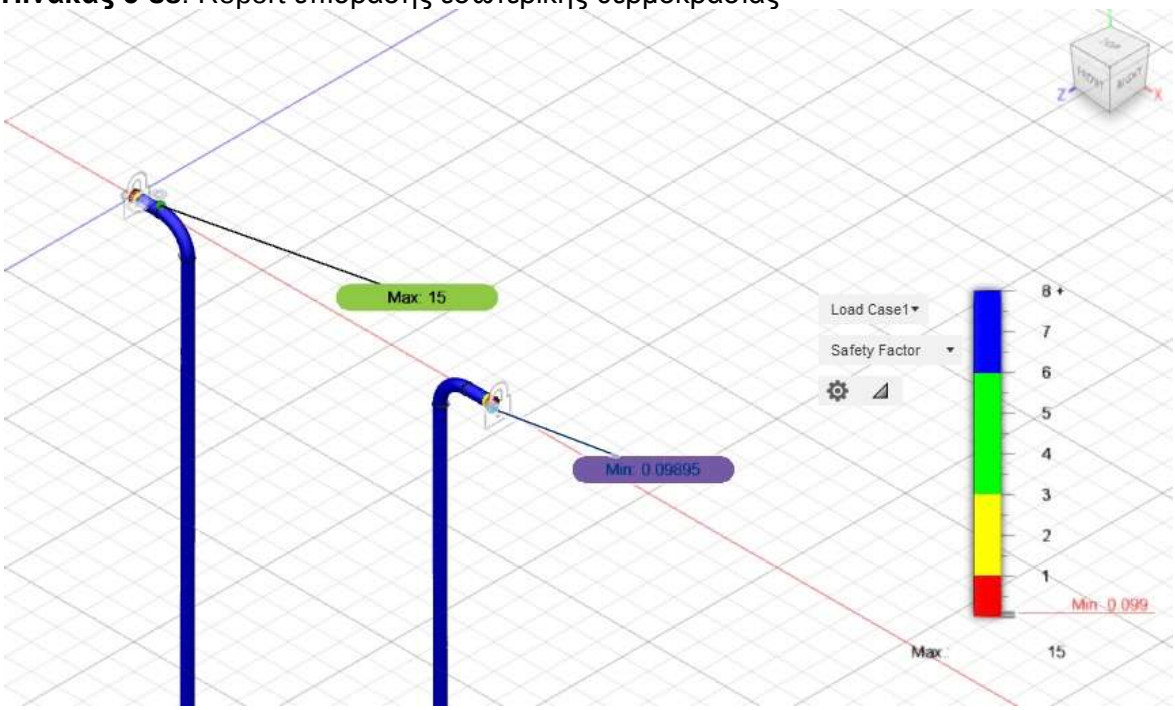
γ) Επίδραση θερμοκρασίας

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09895	15

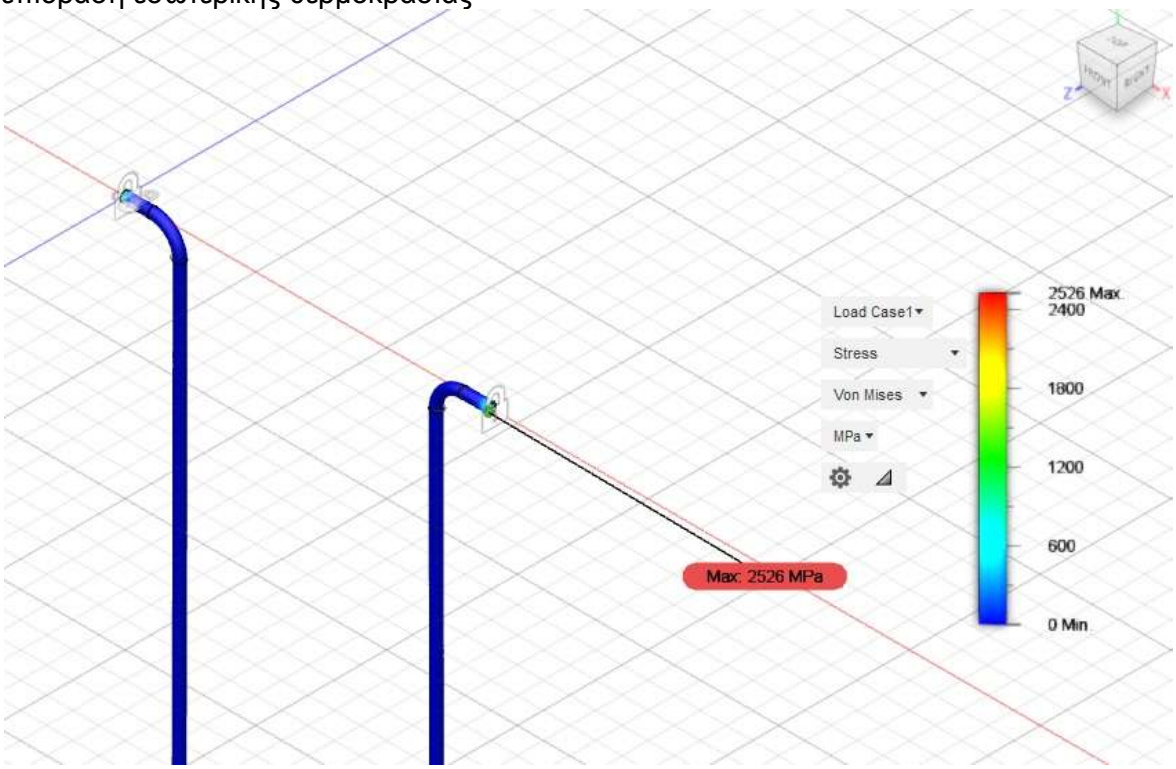
Stress		
Von Mises	0.002607 MPa	2526 MPa
1st Principal	-648.3 MPa	1538 MPa
3rd Principal	-3062 MPa	38.97 MPa
Normal XX	-1357 MPa	1525 MPa
Normal YY	-2293 MPa	368 MPa
Normal ZZ	-2324 MPa	399.8 MPa
Shear XY	-967.6 MPa	981.3 MPa
Shear YZ	-574.6 MPa	539.5 MPa
Shear ZX	-1046 MPa	1040 MPa
Displacement		
Total	0 mm	57.78 mm
X	-2.972 mm	2.987 mm
Y	-57.74 mm	0.111 mm
Z	-0.1127 mm	0.1169 mm
Reaction Force		
Total	0 N	42138 N
X	-19659 N	18418 N
Y	-34328 N	33507 N
Z	-31240 N	30086 N
Strain		
Equivalent	0.007533	0.01737
1st Principal	0.005718	0.01791
3rd Principal	-0.01185	0.005798
Normal XX	0.004096	0.01582
Normal YY	-9.636E-04	0.007681
Normal ZZ	-6.421E-04	0.008388
Shear XY	-0.01227	0.01245
Shear YZ	-0.007287	0.006843
Shear ZX	-0.01326	0.01319
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.684E-14 W / mm^2	1.54E-10 W / mm^2
X	-9.25E-11 W / mm^2	6.239E-11 W / mm^2
Y	-5.304E-11 W / mm^2	8E-11 W / mm^2
Z	-1.369E-10 W / mm^2	1.464E-10 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	8.186E-13 C / mm	3.423E-09 C / mm
X	-1.386E-09 C / mm	2.056E-09 C / mm
Y	-1.778E-09 C / mm	1.179E-09 C / mm

Z	-3.252E-09 C / mm	3.042E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-38: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.78: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.79: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

Ίδια συμπεράσματα όπως προηγουμένως.

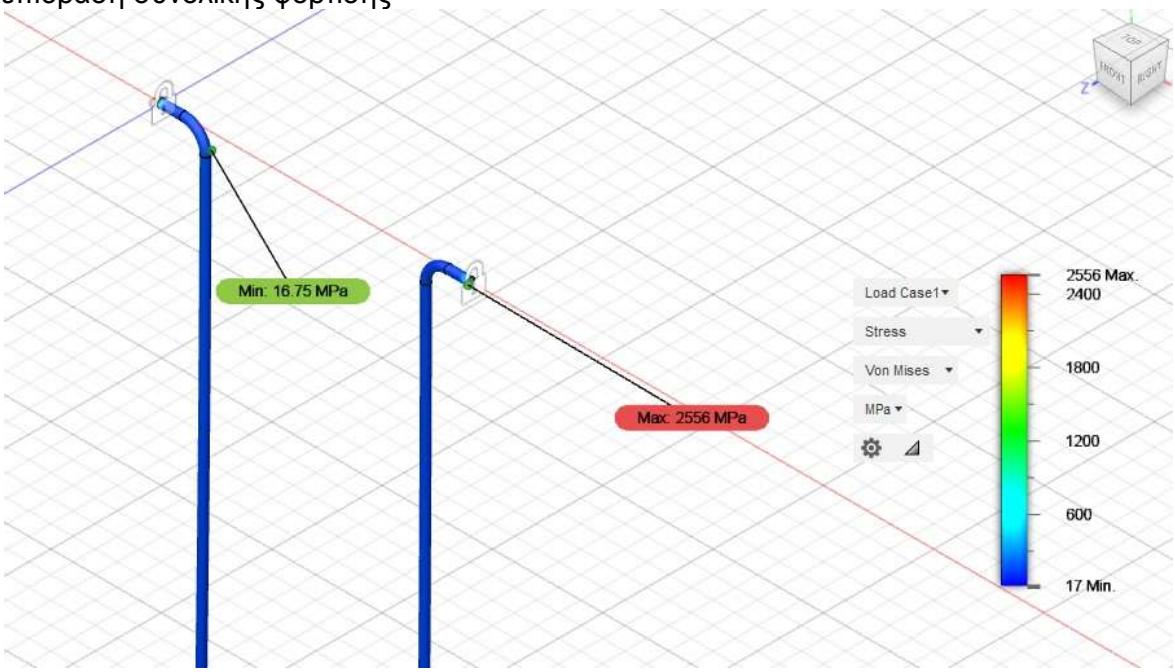
δ) Συνολική φόρτιση

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.0978	14.93
Stress		
Von Mises	16.75 MPa	2556 MPa
1st Principal	-661.7 MPa	1604 MPa
3rd Principal	-3091 MPa	66.92 MPa
Normal XX	-1391 MPa	1595 MPa
Normal YY	-2307 MPa	366.4 MPa
Normal ZZ	-2338 MPa	397.7 MPa
Shear XY	-981.6 MPa	1011 MPa
Shear YZ	-551.6 MPa	512.4 MPa
Shear ZX	-1069 MPa	1056 MPa
Displacement		
Total	0 mm	530.6 mm
X	-1.137 mm	140 mm
Y	-59.61 mm	0.1307 mm
Z	-0.1226 mm	508.6 mm
Reaction Force		
Total	0 N	42064 N
X	-20571 N	18457 N
Y	-34405 N	34068 N
Z	-31735 N	30491 N
Strain		
Equivalent	0.007506	0.01754
1st Principal	0.005735	0.01802
3rd Principal	-0.01212	0.00582
Normal XX	0.003925	0.01603
Normal YY	-9.453E-04	0.00763
Normal ZZ	-6.21E-04	0.00834
Shear XY	-0.01245	0.01282
Shear YZ	-0.006997	0.006498
Shear ZX	-0.01356	0.01339
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.684E-14 W / mm^2	1.54E-10 W / mm^2
X	-9.25E-11 W / mm^2	6.239E-11 W / mm^2
Y	-5.304E-11 W / mm^2	8E-11 W / mm^2
Z	-1.369E-10 W / mm^2	1.464E-10 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	8.186E-13 C / mm	3.423E-09 C / mm
X	-1.386E-09 C / mm	2.056E-09 C / mm
Y	-1.778E-09 C / mm	1.179E-09 C / mm
Z	-3.252E-09 C / mm	3.042E-09 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

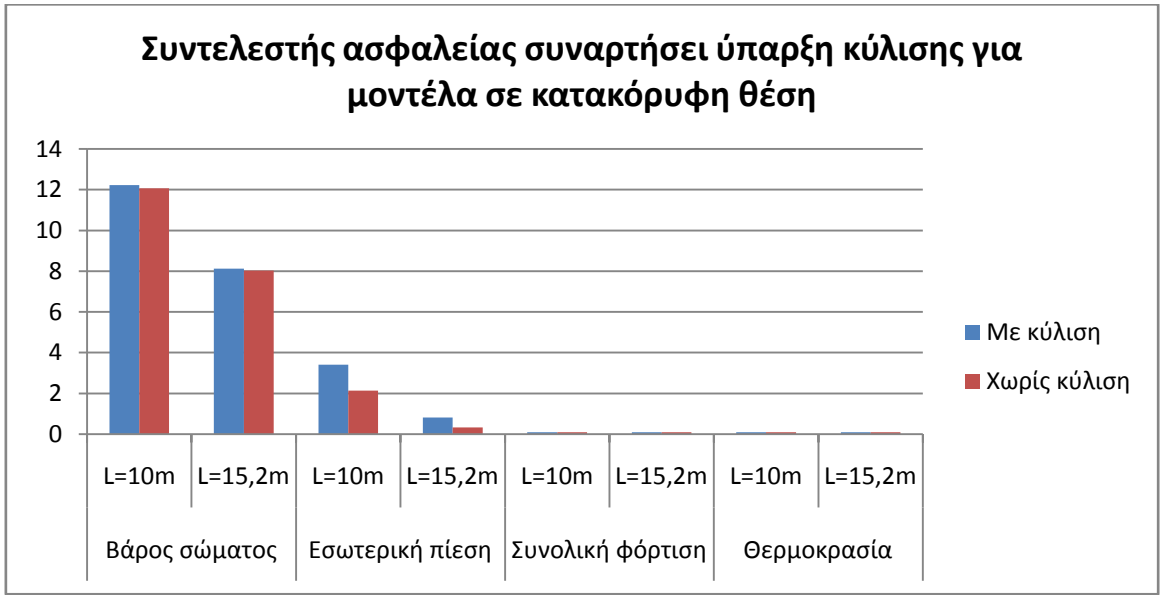
Πίνακας 5-39: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης

Εικόνα 5.80: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.81: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση συνολικής φόρτισης

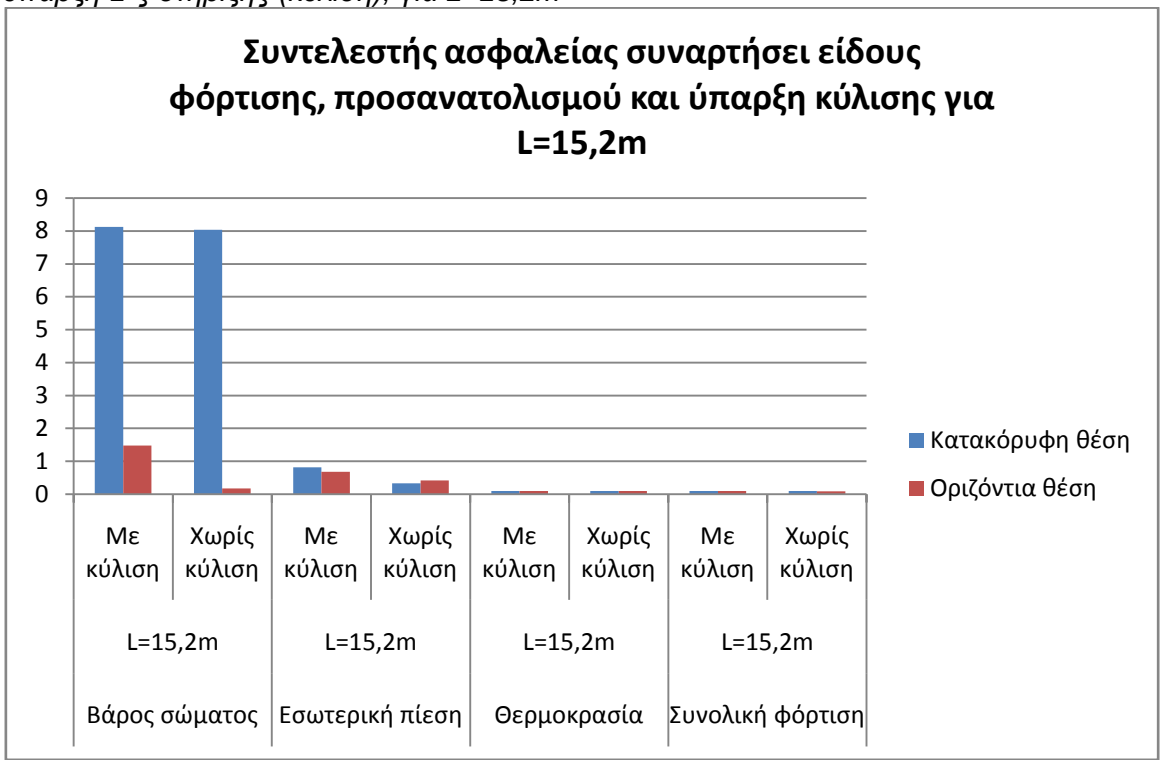
***5.2.2.3** Συμπεράσματα προσομοιώσεων μοντέλων σε κατακόρυφη θέση με κύλιση και χωρίς κύλιση*



Διάγραμμα 5-11: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει ύπαρξη κύλισης για μοντέλα σε κατακόρυφη θέση

Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε πως η ύπαρξη κύλισης βελτιώνει σε μικρό βαθμό τον συντελεστή ασφαλείας κατά την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος και της εσωτερικής πίεσης, σε αντίθεση με την οριζόνται θέση που είδαμε πως τον αυξάνει κατά πολύ. Η επίδραση της θερμοκρασίας (και επομένως και η συνολική φόρτιση) διατηρεί τον συντελεστή ασφαλείας σε χαμηλά επίπεδα, τόσο για μοντέλο με κύλιση όσο και για μοντέλο χωρίς κύλιση. Για την διάσταση L, έχουμε ήδη συμπεράνει πως όταν μειώνεται αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας.

***5.2.3** Σύγκριση προσομοιώσεων μοντέλου κατακόρυφης – οριζόντιας θέσης, ύπαρξη – μη ύπαρξη 2ης στήριξης (κύλιση), για L=15,2m*



Διάγραμμα 5-12: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει είδους φόρτισης, προσανατολισμού και ύπαρξη κύλισης για L=15,2m.

Από το παραπάνω διάγραμμα, φαίνονται πιο καθαρά συμπεράσματα προηγούμενων υποκεφαλαίων που έχουν ήδη παρατεθεί. Δηλαδή, πως στην κατακόρυφη θέση, ανεξαρτήτου ύπαρξης κύλισης, ο συντελεστής ασφαλείας είναι πολύ υψηλός για την επίδραση του βάρους του σώματος, η κύλιση γενικά βελτιώνει τον συντεεστή ασφαλείας ενώ η εσωτερική θερμοκρασία σταθερά είναι η δυσμενότερη συνθήκη, ανεξαρτήτου άλλης παραμέτρου.

5.3 Προσεγγίσεις μοντέλων μεγαλύτερου πάχους (t=11,6)

Από την προηγούμενη ανάλυση, δεν κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, παρά μόνο για ένα σετ μοντέλων ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τα αντίστοιχα με πάχος της εκφώνησης (t=5,6mm).

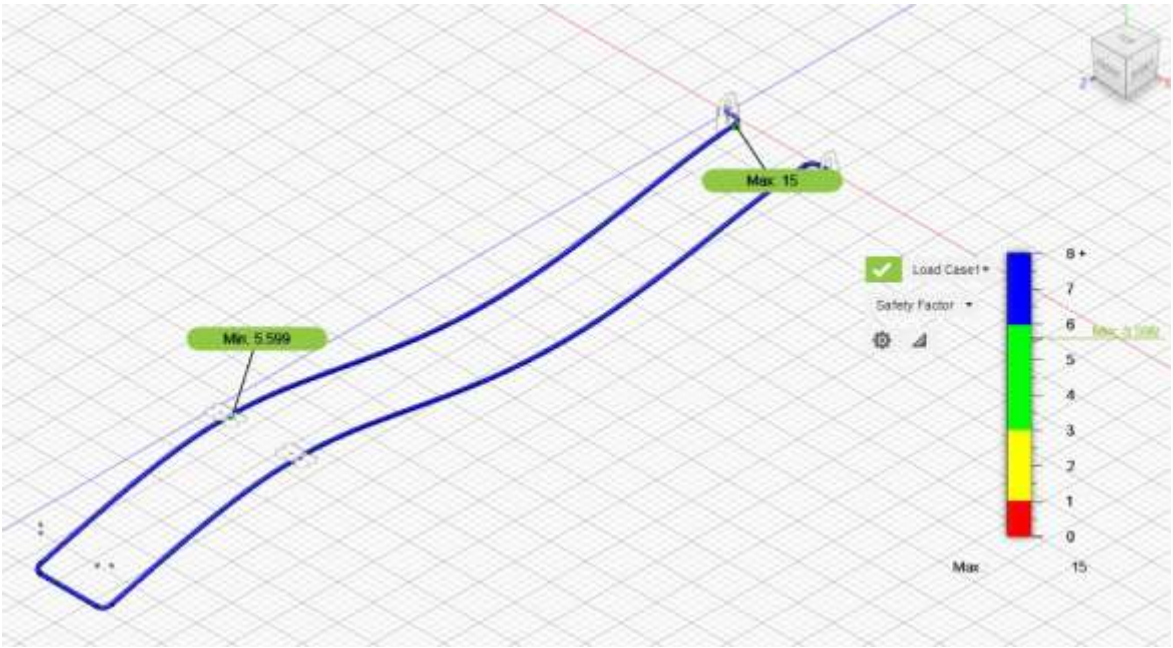
Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν είναι για μοντέλο με διάσταση **L=10m**, σε κατακόρυφη και οριζόντια θέση, τόσο με κύλιση όσο και χωρίς. Η σύγκριση θα γίνει με τα αντίστοιχα πάχους t=5,6mm για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

5.3.1 Οριζόντια θέση με κύλιση

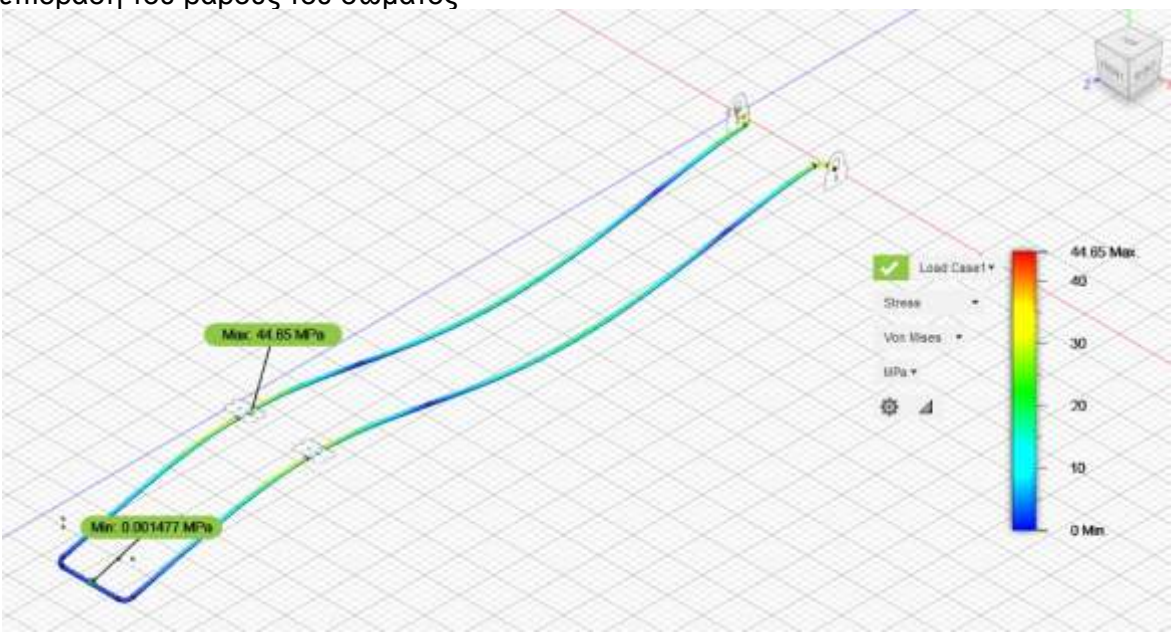
α) Επίδραση μόνο της βαρύτητας

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	5.599	15
Stress		
Von Mises	0.001477 MPa	44.65 MPa
1st Principal	-24.88 MPa	56.65 MPa
3rd Principal	-54.33 MPa	25.28 MPa
Normal XX	-24.95 MPa	25.42 MPa
Normal YY	-26.46 MPa	27.25 MPa
Normal ZZ	-54.3 MPa	56.63 MPa
Shear XY	-20.91 MPa	21.18 MPa
Shear YZ	-17.72 MPa	17.28 MPa
Shear ZX	-18.8 MPa	18.83 MPa
Displacement		
Total	0 mm	16.3 mm
X	-0.002536 mm	0.002537 mm
Y	-16.3 mm	0.01817 mm
Z	-0.2118 mm	0.2118 mm
Reaction Force		
Total	0 N	1699 N
X	-650 N	632.4 N
Y	-1145 N	1569 N
Z	-1135 N	1141 N
Strain		
Equivalent	1.145E-08	3.182E-04
1st Principal	-1.827E-06	2.934E-04
3rd Principal	-2.931E-04	2.163E-06
Normal XX	-6.276E-05	6.291E-05
Normal YY	-7.636E-05	9.329E-05
Normal ZZ	-2.168E-04	2.164E-04
Shear XY	-2.652E-04	2.686E-04
Shear YZ	-2.248E-04	2.191E-04
Shear ZX	-2.385E-04	2.388E-04

Πίνακας 5-40: Report επίδρασης βάρους του σώματος



Εικόνα 5.82: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.83: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

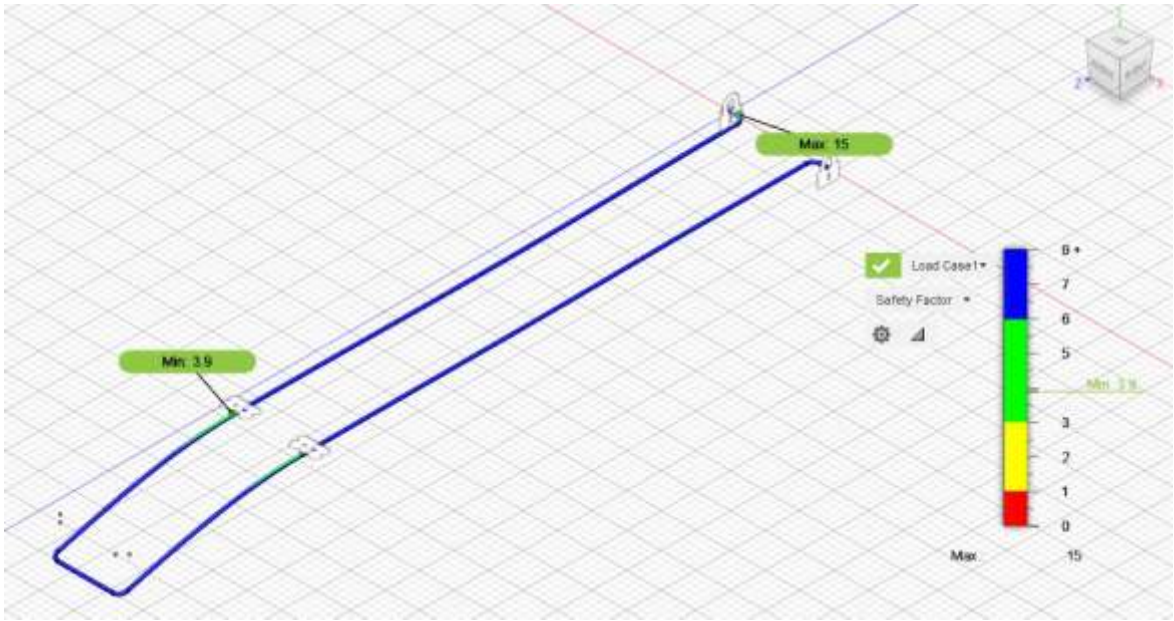
Παρατηρούμε, συγκρίνοντας το αποτέλεσμα με το αντίστοιχο του πίνακα 5-5 (σελ. 44-45), πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.9	15
Stress		
Von Mises	5.294 MPa	64.09 MPa
1st Principal	-35.53 MPa	73.99 MPa

3rd Principal	-68.44 MPa	15.82 MPa
Normal XX	-37.67 MPa	40.01 MPa
Normal YY	-45.73 MPa	42.54 MPa
Normal ZZ	-68.44 MPa	73.98 MPa
Shear XY	-28.14 MPa	27.73 MPa
Shear YZ	-27.71 MPa	27.78 MPa
Shear ZX	-15.13 MPa	16.08 MPa
Displacement		
Total	0 mm	25.95 mm
X	-1.448 mm	1.563 mm
Y	-25.91 mm	0.5363 mm
Z	-0.2326 mm	0.5511 mm
Reaction Force		
Total	0 N	3351 N
X	-1641 N	2187 N
Y	-1156 N	3096 N
Z	-502.9 N	559.4 N
Strain		
Equivalent	3.595E-05	4.139E-04
1st Principal	-2.053E-06	3.902E-04
3rd Principal	-3.603E-04	-4.781E-06
Normal XX	-1.685E-04	2.383E-04
Normal YY	-1.958E-04	2.244E-04
Normal ZZ	-2.66E-04	3.207E-04
Shear XY	-3.569E-04	3.517E-04
Shear YZ	-3.515E-04	3.523E-04
Shear ZX	-1.919E-04	2.039E-04

Πίνακας 5-41: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.84: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Εικόνα 5.85: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

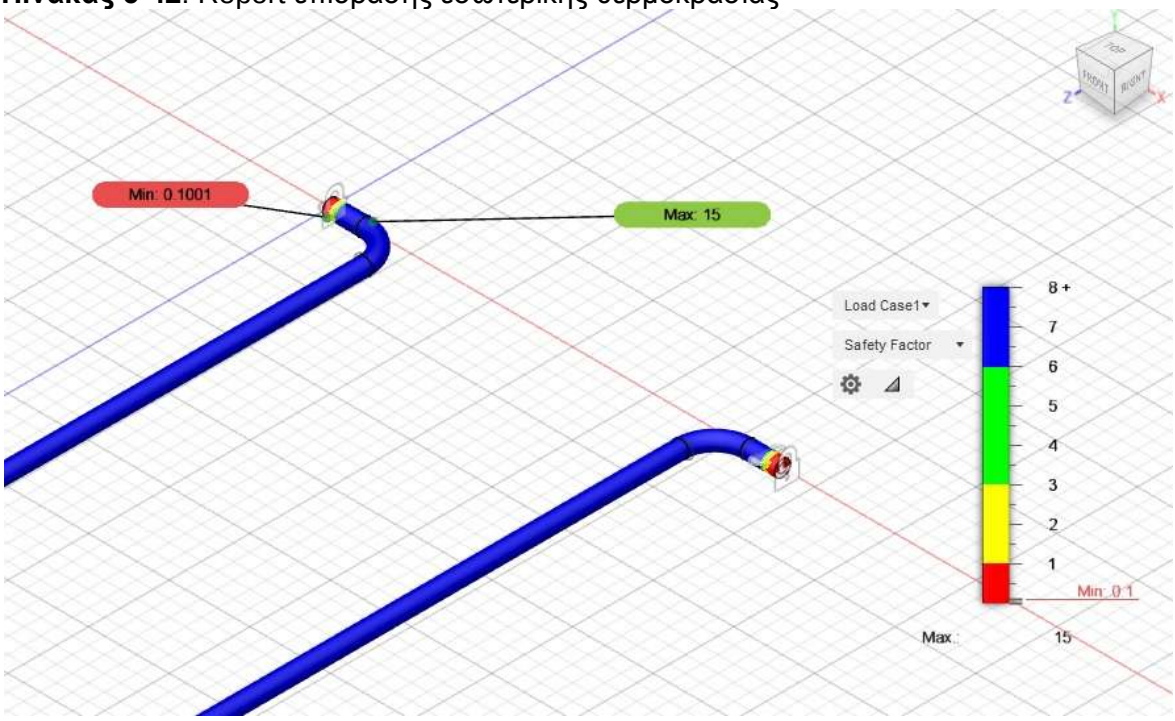
Παρατηρούμε πως και εδώ με την αύξηση του πάχους, ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί και εμφανίζεται στην κύλιση.

γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

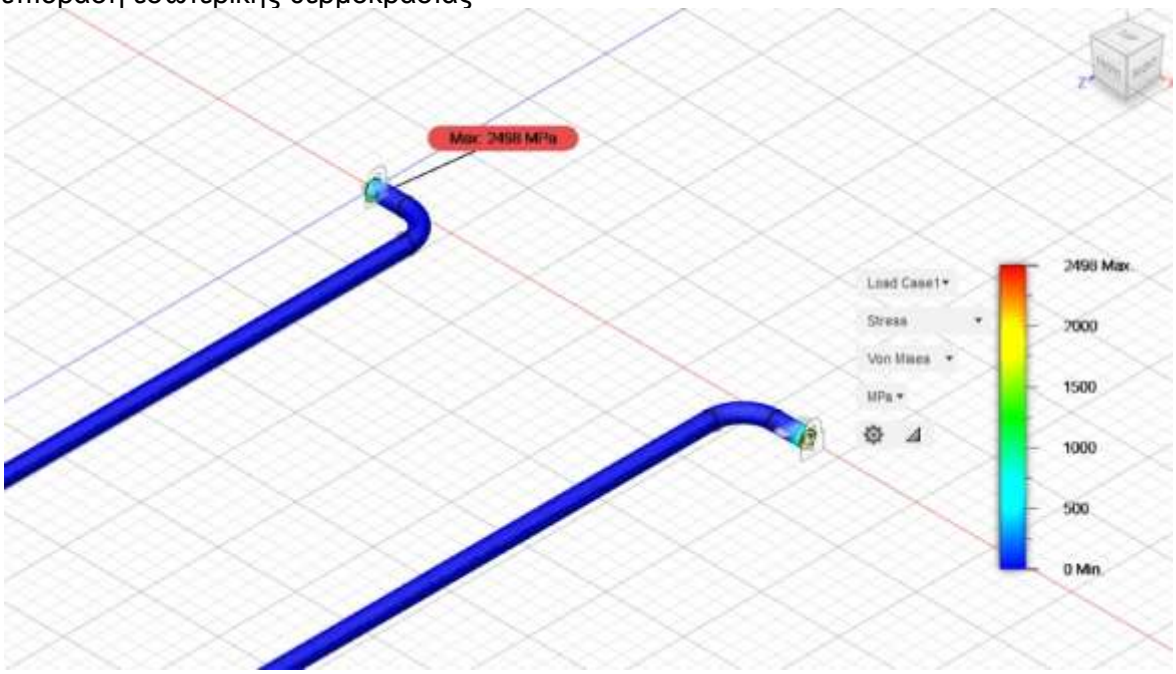
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.1001	15
Stress		
Von Mises	0.003572 MPa	2498 MPa
1st Principal	-707.6 MPa	1254 MPa

3rd Principal	-3267 MPa	226.6 MPa
Normal XX	-2268 MPa	1199 MPa
Normal YY	-2332 MPa	668.8 MPa
Normal ZZ	-2292 MPa	722.4 MPa
Shear XY	-1217 MPa	1141 MPa
Shear YZ	-504.3 MPa	465.5 MPa
Shear ZX	-1038 MPa	982.7 MPa
Displacement		
Total	0 mm	58.63 mm
X	-2.914 mm	2.999 mm
Y	-0.2048 mm	0.1915 mm
Z	-0.1462 mm	58.63 mm
Reaction Force		
Total	0 N	113367 N
X	-99468 N	104738 N
Y	-103425 N	103797 N
Z	-82924 N	83709 N
Strain		
Equivalent	0.006549	0.02017
1st Principal	0.005718	0.02002
3rd Principal	-0.01448	0.006161
Normal XX	-0.005291	0.01507
Normal YY	-0.005317	0.009381
Normal ZZ	-6.67E-04	0.01228
Shear XY	-0.01544	0.01447
Shear YZ	-0.006396	0.005904
Shear ZX	-0.01316	0.01246
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	1.07E-11 W / mm^2	2.968E-08 W / mm^2
X	-1.755E-08 W / mm^2	2.276E-08 W / mm^2
Y	-1.307E-08 W / mm^2	2.388E-08 W / mm^2
Z	-1.177E-08 W / mm^2	1.438E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	2.377E-10 C / mm	6.595E-07 C / mm
X	-5.057E-07 C / mm	3.901E-07 C / mm
Y	-5.307E-07 C / mm	2.904E-07 C / mm
Z	-3.195E-07 C / mm	2.615E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-42: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.86: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.87: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση θερμοκρασίας

Παρατηρούμε ελάχιστη αύξηση συντελεστή ασφαλείας, παραμένοντας σε χαμηλά επίπεδα και εμφανίζεται και εδώ στο σημείο της πάκτωσης.

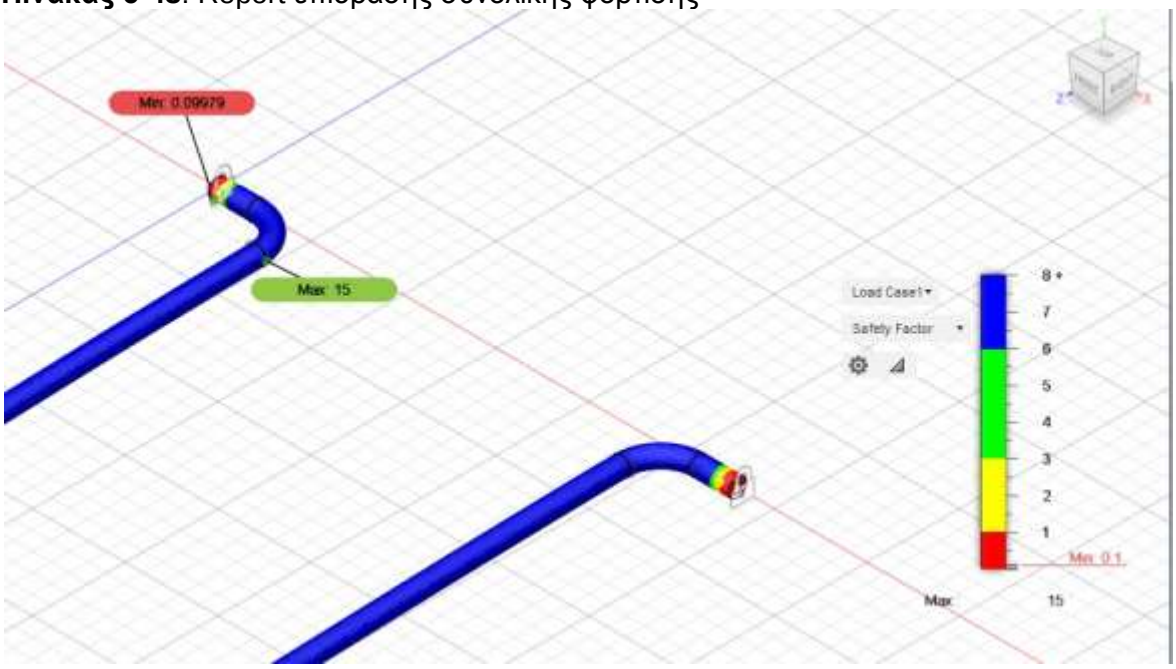
δ) Συνολική φόρτιση

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09979	15

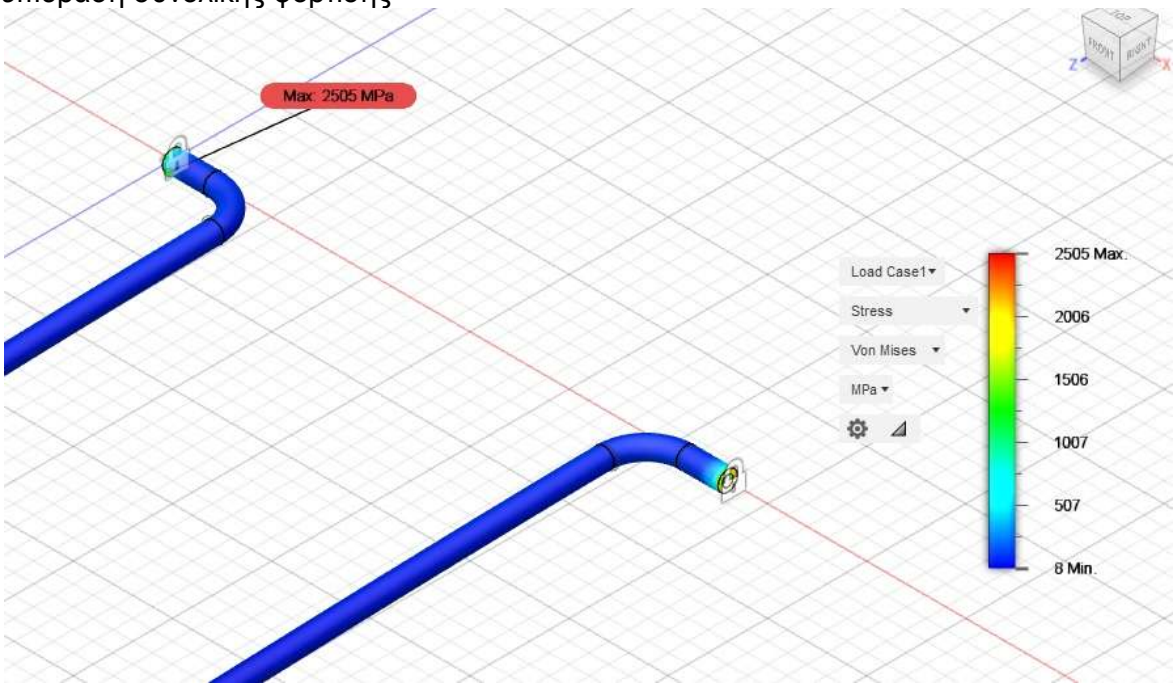
Stress		
Von Mises	7.559 MPa	2505 MPa
1st Principal	-770.5 MPa	1280 MPa
3rd Principal	-3280 MPa	233 MPa
Normal XX	-2254 MPa	1230 MPa
Normal YY	-2322 MPa	680.6 MPa
Normal ZZ	-2297 MPa	740.8 MPa
Shear XY	-1230 MPa	1127 MPa
Shear YZ	-484.9 MPa	449.1 MPa
Shear ZX	-1037 MPa	982 MPa
Displacement		
Total	0 mm	72.51 mm
X	-4.335 mm	2.309 mm
Y	-42.17 mm	0.1493 mm
Z	-0.1472 mm	59.26 mm
Reaction Force		
Total	0 N	117399 N
X	-100047 N	107540 N
Y	-101035 N	108462 N
Z	-83487 N	84280 N
Strain		
Equivalent	0.006369	0.02025
1st Principal	0.005652	0.02007
3rd Principal	-0.01457	0.006104
Normal XX	-0.005203	0.01518
Normal YY	-0.00525	0.009264
Normal ZZ	-6.559E-04	0.01237
Shear XY	-0.0156	0.0143
Shear YZ	-0.00615	0.005695
Shear ZX	-0.01315	0.01245
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	1.07E-11 W / mm^2	2.968E-08 W / mm^2
X	-1.755E-08 W / mm^2	2.276E-08 W / mm^2
Y	-1.307E-08 W / mm^2	2.388E-08 W / mm^2
Z	-1.177E-08 W / mm^2	1.438E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	2.377E-10 C / mm	6.595E-07 C / mm
X	-5.057E-07 C / mm	3.901E-07 C / mm
Y	-5.307E-07 C / mm	2.904E-07 C / mm

Z	-3.195E-07 C / mm	2.615E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-43: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.88: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.89: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για συνολική φόρτιση

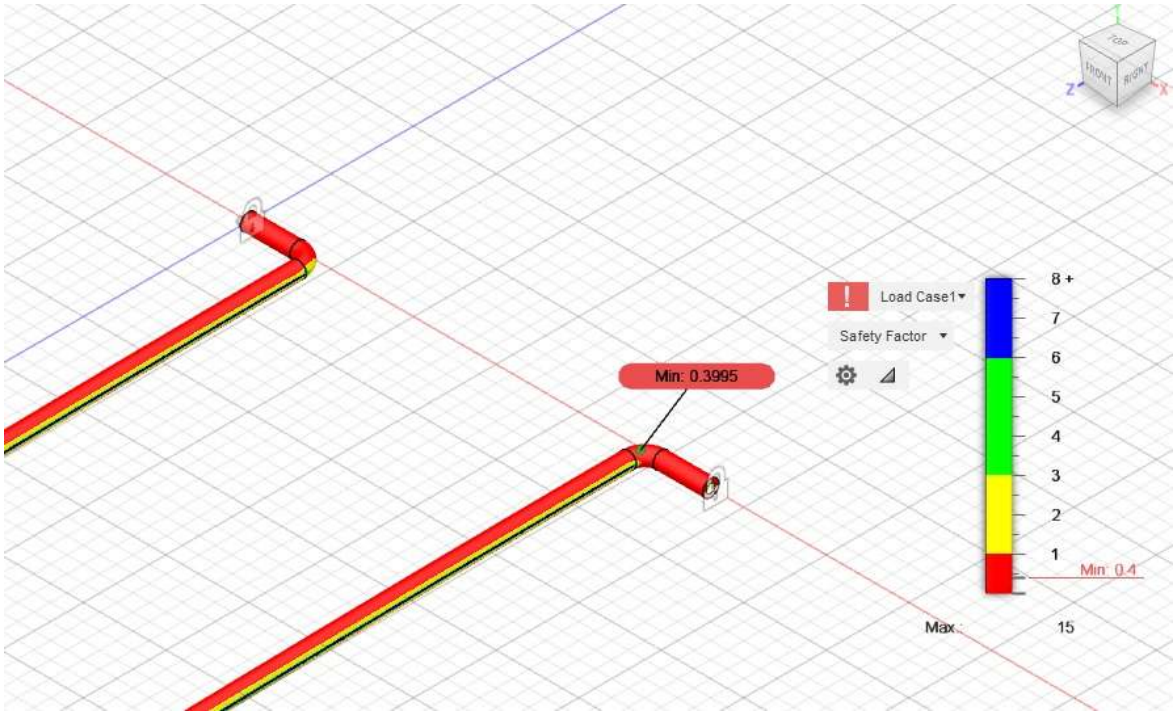
Ίδια συμπεράσματα όπως και προηγουμένως.

5.3.2 Οριζόντια θέση χωρίς κύλιση

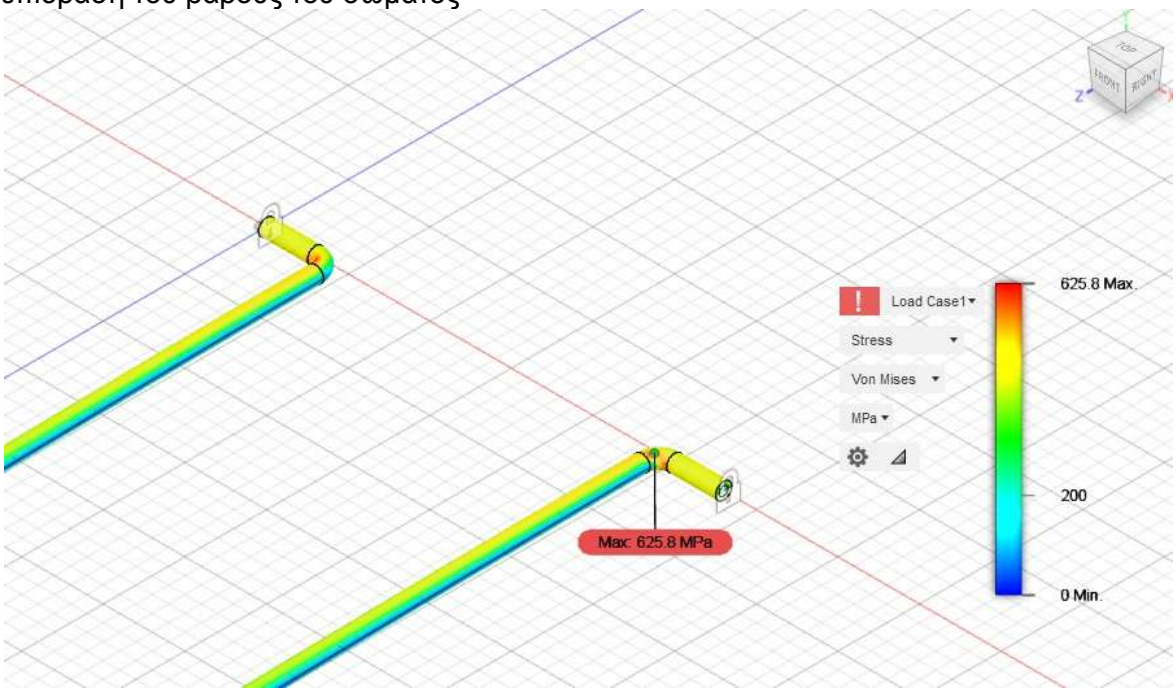
α) Επίδραση βαρύτητας

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.3995	15
Stress		
Von Mises	0.001223 MPa	625.8 MPa
1st Principal	-38.89 MPa	665 MPa
3rd Principal	-665.7 MPa	36.83 MPa
Normal XX	-156.4 MPa	158.8 MPa
Normal YY	-225.5 MPa	270.6 MPa
Normal ZZ	-643.1 MPa	642 MPa
Shear XY	-350 MPa	335.1 MPa
Shear YZ	-184.3 MPa	134.7 MPa
Shear ZX	-264.9 MPa	263.7 MPa
Displacement		
Total	0 mm	2843 mm
X	-0.01967 mm	0.01936 mm
Y	-2843 mm	0.4589 mm
Z	-9.365 mm	9.365 mm
Reaction Force		
Total	0 N	16151 N
X	-1125 N	1078 N
Y	-16151 N	16084 N
Z	-16046 N	15990 N
Strain		
Equivalent	1.028E-08	0.005131
1st Principal	7.687E-09	0.004854
3rd Principal	-0.004777	-7.278E-09
Normal XX	-9.36E-04	9.471E-04
Normal YY	-0.001158	0.001157
Normal ZZ	-0.002948	0.002954
Shear XY	-0.004439	0.00425
Shear YZ	-0.002338	0.001708
Shear ZX	-0.00336	0.003345

Πίνακας 5-44: Report επίδρασης του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.90: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.91: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

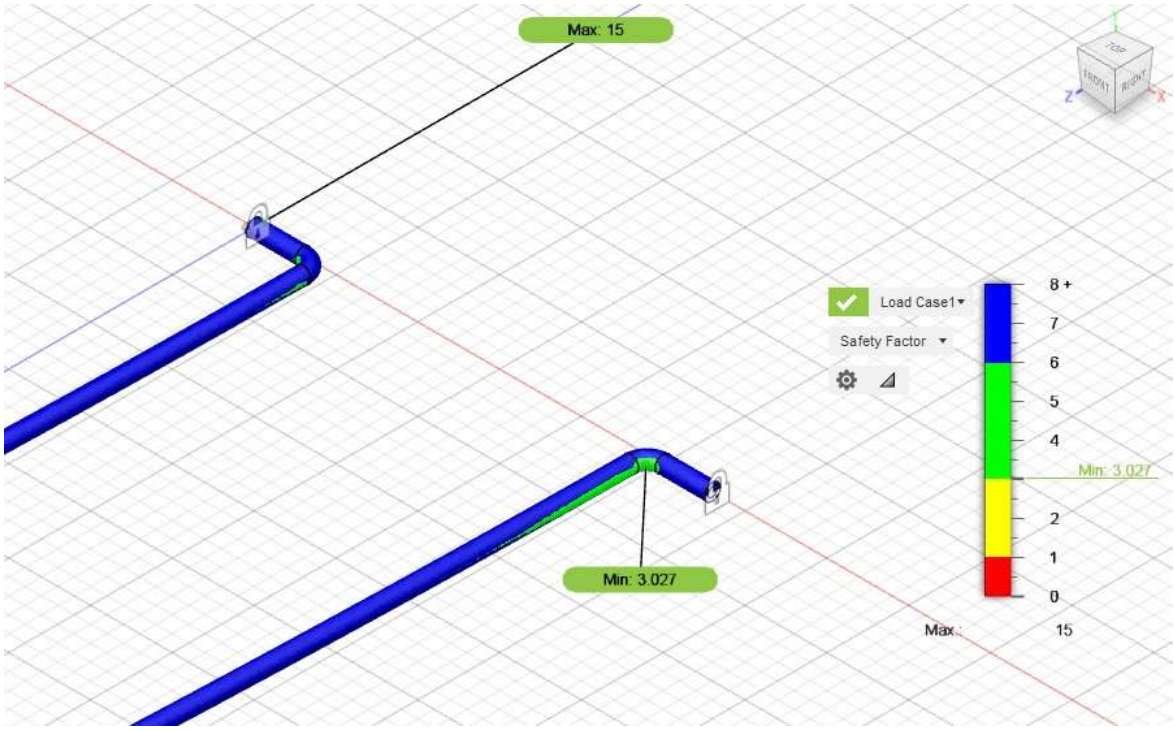
Παρατηρούμε, σε σύγκριση με τον πίνακα 5-28 (σελ.99) πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.027	15

Stress		
Von Mises	6.235 MPa	82.59 MPa
1st Principal	-10.67 MPa	96.8 MPa
3rd Principal	-77.25 MPa	9.801 MPa
Normal XX	-56.99 MPa	80.44 MPa
Normal YY	-22.99 MPa	66.4 MPa
Normal ZZ	-62.4 MPa	85.01 MPa
Shear XY	-30.85 MPa	31.1 MPa
Shear YZ	-32.17 MPa	32.87 MPa
Shear ZX	-45.69 MPa	30.91 MPa
Displacement		
Total	0 mm	162.2 mm
X	-160.1 mm	0.02614 mm
Y	-0.004843 mm	25.97 mm
Z	-0.6876 mm	0.7605 mm
Reaction Force		
Total	0 N	2073 N
X	-1981 N	2066 N
Y	-510 N	519.7 N
Z	-552 N	563.8 N
Strain		
Equivalent	3.431E-05	6.867E-04
1st Principal	2.969E-05	6.54E-04
3rd Principal	-6.11E-04	-3.723E-06
Normal XX	-2.664E-04	3.176E-04
Normal YY	-1.964E-04	3.363E-04
Normal ZZ	-2.876E-04	3.378E-04
Shear XY	-3.913E-04	3.944E-04
Shear YZ	-4.08E-04	4.169E-04
Shear ZX	-5.794E-04	3.92E-04

Πίνακας 5-45: Report επίδρασης επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.92: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Εικόνα 5.93: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

Συγκρίνοντας με τον πίνακα 5-29, παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί και εμφανίζεται στο ίδιο σημείο, στην καμπύλη κάτω από την πάκτωση.

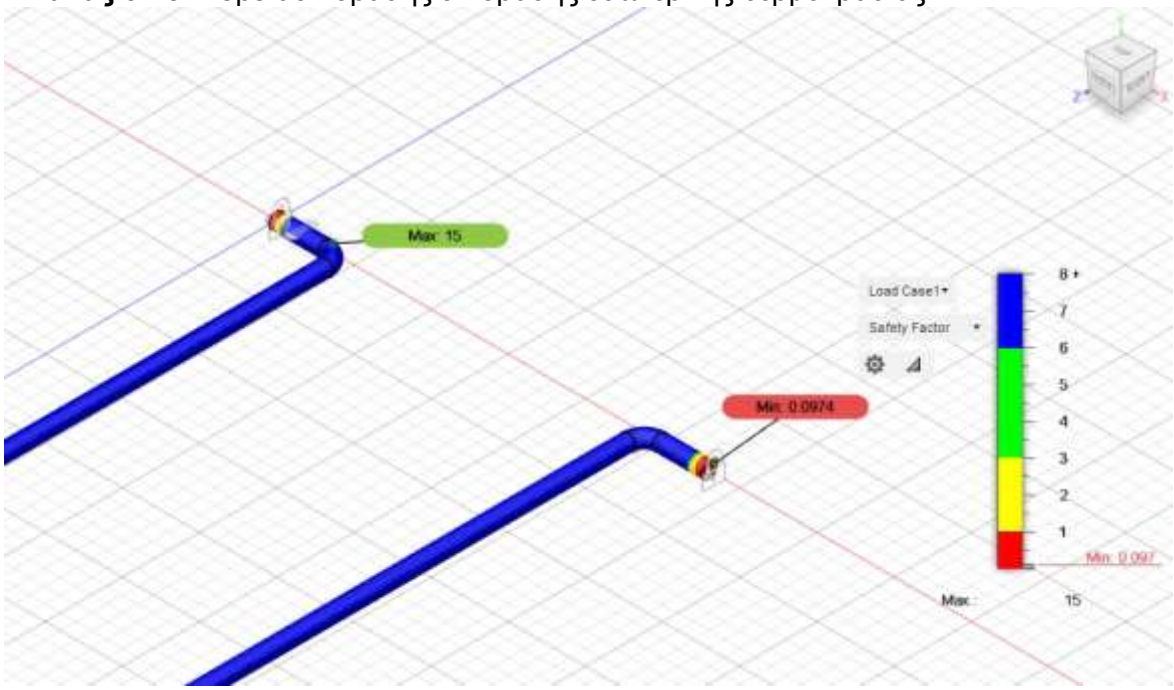
γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

Name	**Minimum**	**Maximum**

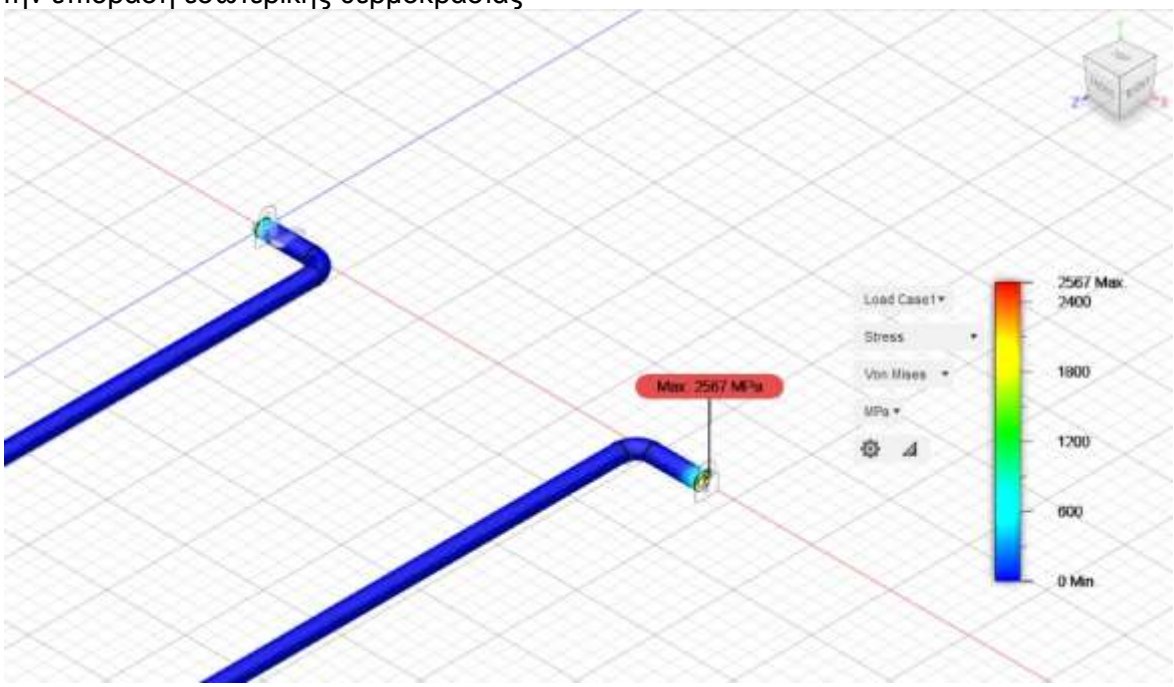
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.0974	15
Stress		
Von Mises	0.003191 MPa	2567 MPa
1st Principal	-457.1 MPa	1367 MPa
3rd Principal	-3199 MPa	103.4 MPa
Normal XX	-1341 MPa	1341 MPa
Normal YY	-2294 MPa	311 MPa
Normal ZZ	-2277 MPa	408.3 MPa
Shear XY	-1184 MPa	1076 MPa
Shear YZ	-520.7 MPa	526.6 MPa
Shear ZX	-1185 MPa	1237 MPa
Displacement		
Total	0 mm	57.82 mm
X	-2.986 mm	3.052 mm
Y	-0.1466 mm	0.1568 mm
Z	-0.1464 mm	57.77 mm
Reaction Force		
Total	0 N	89282 N
X	-41161 N	42236 N
Y	-72695 N	70750 N
Z	-72044 N	71691 N
Strain		
Equivalent	0.007584	0.02058
1st Principal	0.005758	0.02064
3rd Principal	-0.01446	0.005762
Normal XX	0.004327	0.01469
Normal YY	-8.554E-04	0.007876
Normal ZZ	-9.132E-04	0.007586
Shear XY	-0.01501	0.01365
Shear YZ	-0.006603	0.006678
Shear ZX	-0.01503	0.01569
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	6.689E-12 W / mm^2	3.935E-08 W / mm^2
X	-2.5E-08 W / mm^2	2.312E-08 W / mm^2
Y	-3.914E-08 W / mm^2	2.451E-08 W / mm^2
Z	-9.283E-09 W / mm^2	1.593E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.486E-10 C / mm	8.744E-07 C / mm

X	-5.137E-07 C / mm	5.556E-07 C / mm
Y	-5.447E-07 C / mm	8.699E-07 C / mm
Z	-3.541E-07 C / mm	2.063E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-46: Report επίδρασης επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.94: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



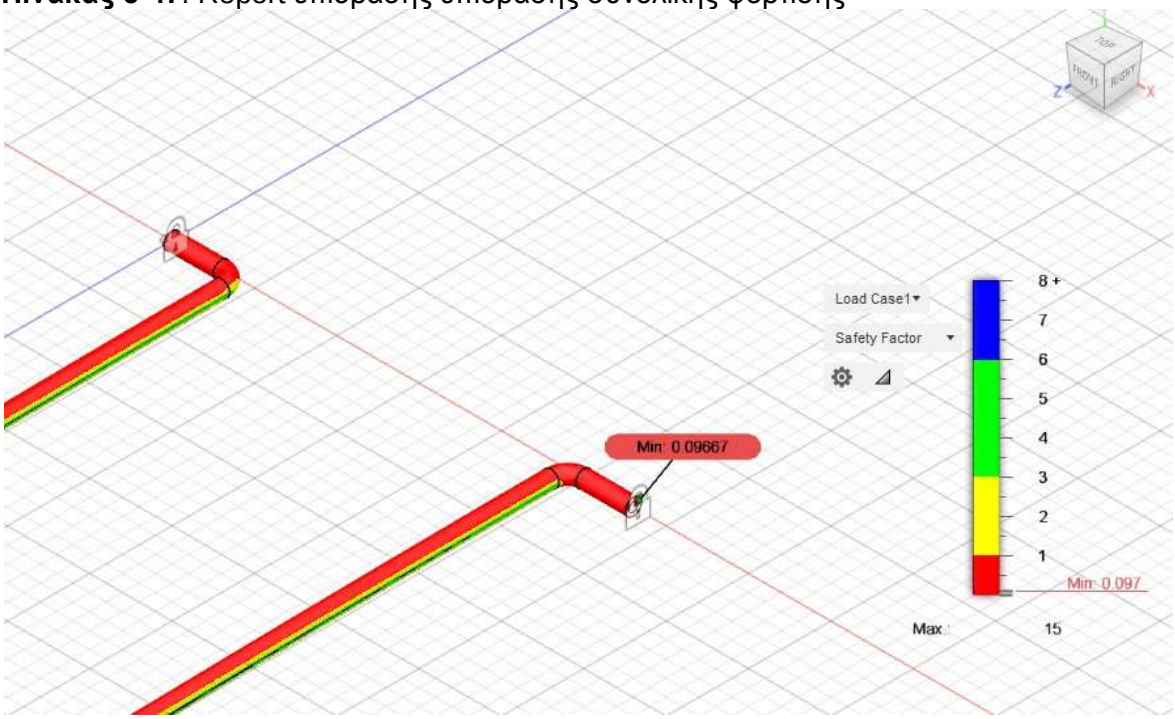
Εικόνα 5.95: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

δ) Συνολική φόρτιση

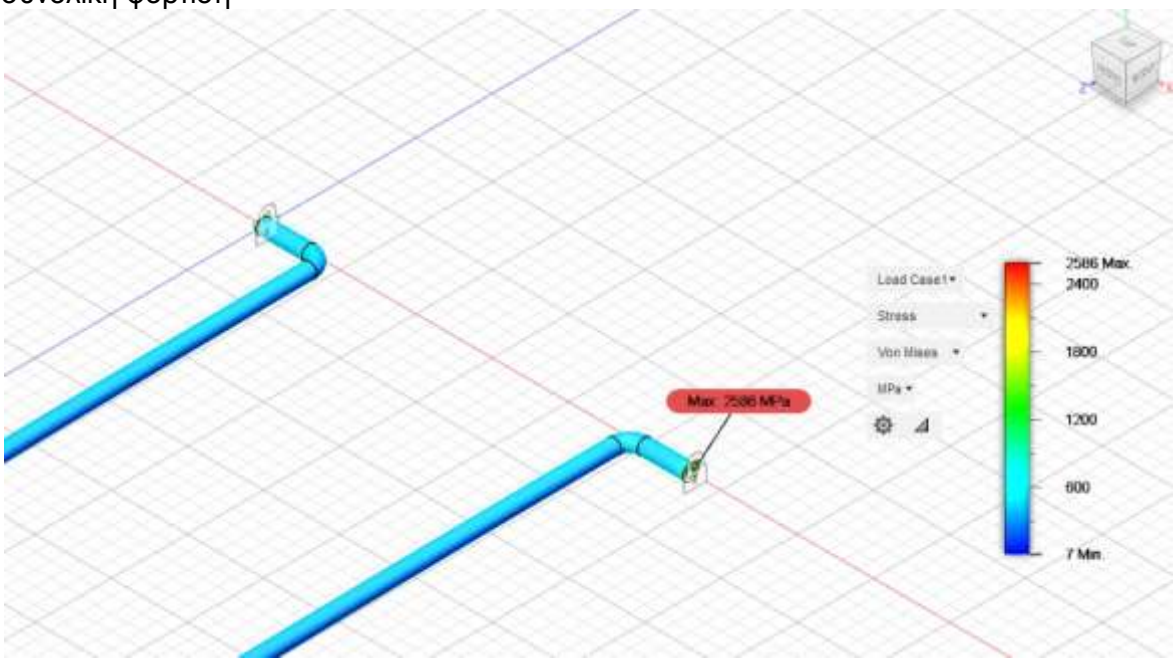
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09667	15
Stress		
Von Mises	6.694 MPa	2586 MPa
1st Principal	-421.7 MPa	1412 MPa
3rd Principal	-3248 MPa	41.39 MPa
Normal XX	-1359 MPa	1375 MPa
Normal YY	-2301 MPa	287.9 MPa
Normal ZZ	-2286 MPa	675.3 MPa
Shear XY	-1095 MPa	1132 MPa
Shear YZ	-516.9 MPa	537.2 MPa
Shear ZX	-1273 MPa	1293 MPa
Displacement		
Total	0 mm	2824 mm
X	-162.9 mm	1.276 mm
Y	-2819 mm	0.4862 mm
Z	-0.6518 mm	67.26 mm
Reaction Force		
Total	0 N	90692 N
X	-40536 N	43721 N
Y	-69317 N	73091 N
Z	-74473 N	75033 N
Strain		
Equivalent	0.00782	0.02072
1st Principal	0.005661	0.0208
3rd Principal	-0.01455	0.005849
Normal XX	0.004296	0.01469
Normal YY	-8.673E-04	0.007826
Normal ZZ	-8.994E-04	0.008842
Shear XY	-0.01389	0.01436
Shear YZ	-0.006556	0.006813
Shear ZX	-0.01615	0.0164
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	6.689E-12 W / mm^2	3.935E-08 W / mm^2
X	-2.5E-08 W / mm^2	2.312E-08 W / mm^2
Y	-3.914E-08 W / mm^2	2.451E-08 W / mm^2
Z	-9.283E-09 W / mm^2	1.593E-08 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	1.486E-10 C / mm	8.744E-07 C / mm
X	-5.137E-07 C / mm	5.556E-07 C / mm
Y	-5.447E-07 C / mm	8.699E-07 C / mm
Z	-3.541E-07 C / mm	2.063E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-47: Report επίδρασης επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.96: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



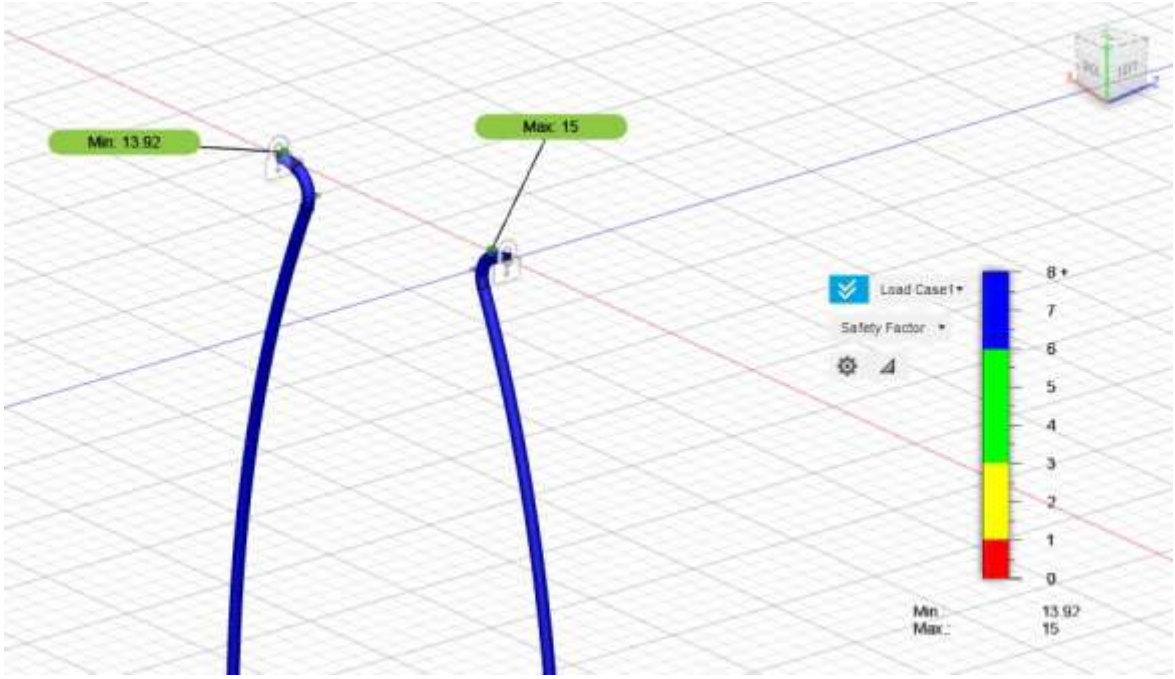
Εικόνα 5.97: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για συνολική φόρτιση

5.3.3 Κατακόρυφη θέση με κύλιση

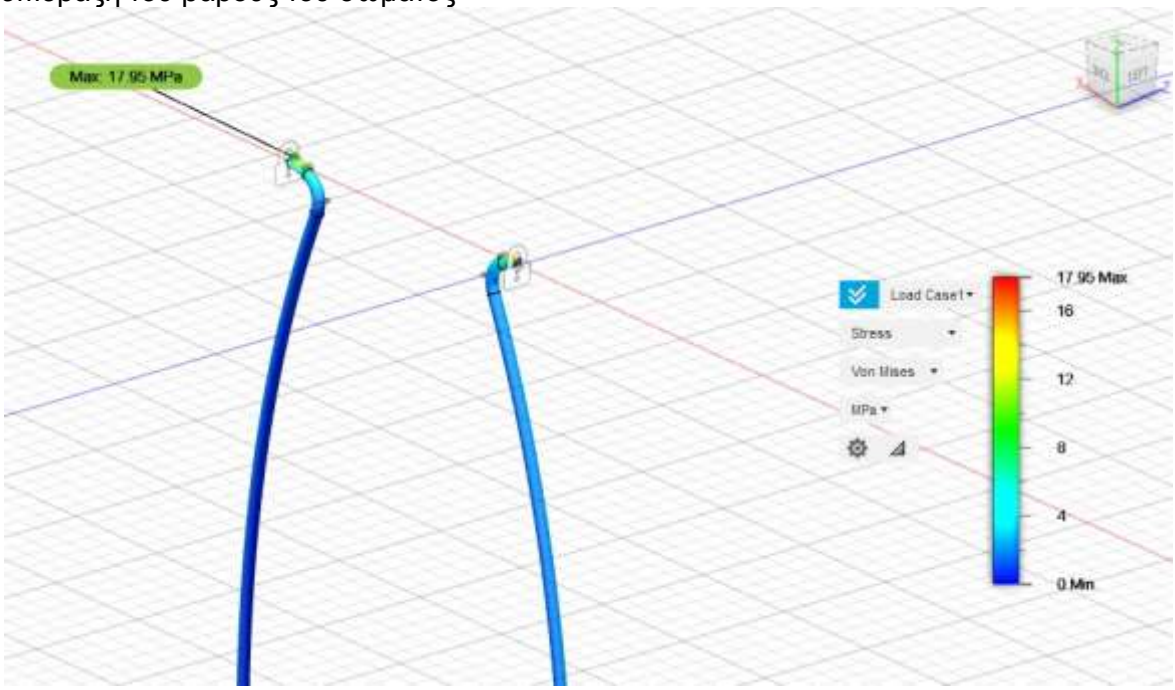
α) Επίδραση βάρους του σώματος

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	13.92	15
Stress		
Von Mises	5.083E-04 MPa	17.95 MPa
1st Principal	-8.092 MPa	24.52 MPa
3rd Principal	-24.9 MPa	8.032 MPa
Normal XX	-23.47 MPa	23.02 MPa
Normal YY	-9.517 MPa	9.523 MPa
Normal ZZ	-9.158 MPa	9.071 MPa
Shear XY	-4.681 MPa	4.726 MPa
Shear YZ	-1.018 MPa	1.033 MPa
Shear ZX	-2.126 MPa	2.795 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.4026 mm
X	-0.3984 mm	0.3983 mm
Y	-0.08572 mm	0 mm
Z	-2.868E-04 mm	2.896E-04 mm
Reaction Force		
Total	0 N	1034 N
X	-1033 N	987.8 N
Y	-71.17 N	224.9 N
Z	-157.4 N	155.4 N
Strain		
Equivalent	2.35E-09	9.925E-05
1st Principal	1.299E-09	1.162E-04
3rd Principal	-1.175E-04	1.159E-08
Normal XX	-8.907E-05	8.888E-05
Normal YY	-3.256E-05	3.298E-05
Normal ZZ	-2.356E-05	2.361E-05
Shear XY	-5.938E-05	5.995E-05
Shear YZ	-1.291E-05	1.31E-05
Shear ZX	-2.696E-05	3.545E-05

Πίνακας 5-48: Report επίδρασης επίδρασης του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.98: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.99: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

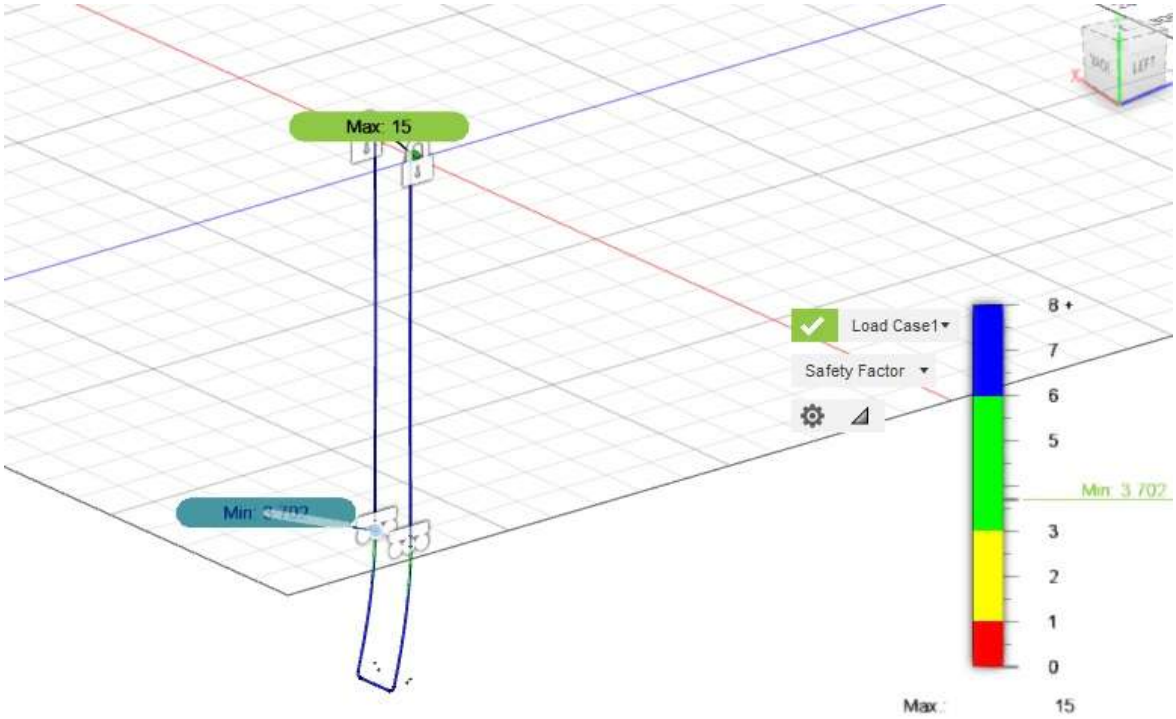
Συγκρίνοντας με τον πίνακα 5-16, βλέπουμε πως ο συντελεστής ασφαλείας έχει αυξηθεί.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

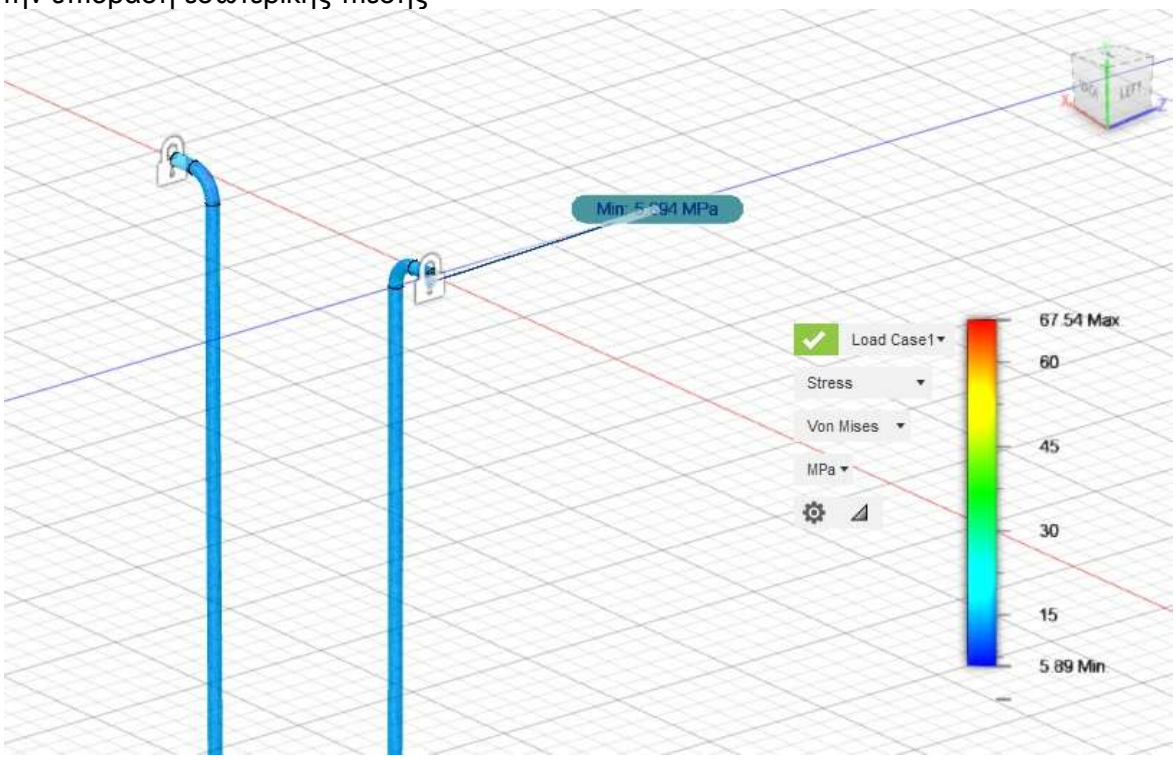
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	3.702	15
Stress		
Von Mises	5.894 MPa	67.54 MPa

1st Principal	-37.13 MPa	77.67 MPa
3rd Principal	-73.92 MPa	16.38 MPa
Normal XX	-40 MPa	40.73 MPa
Normal YY	-73.81 MPa	77.57 MPa
Normal ZZ	-44.31 MPa	47.15 MPa
Shear XY	-18.95 MPa	19.39 MPa
Shear YZ	-29.54 MPa	26.85 MPa
Shear ZX	-27.9 MPa	28.04 MPa
Displacement		
Total	0 mm	27.06 mm
X	-5.497 mm	0.297 mm
Y	-0.5486 mm	0.2766 mm
Z	-26.5 mm	0.5108 mm
Reaction Force		
Total	0 N	3576 N
X	-1195 N	2814 N
Y	-397.1 N	418.1 N
Z	-1116 N	3304 N
Strain		
Equivalent	3.67E-05	4.33E-04
1st Principal	-5.009E-06	4.291E-04
3rd Principal	-3.671E-04	-1.139E-05
Normal XX	-1.706E-04	2.493E-04
Normal YY	-2.78E-04	3.393E-04
Normal ZZ	-2.066E-04	2.536E-04
Shear XY	-2.403E-04	2.46E-04
Shear YZ	-3.747E-04	3.405E-04
Shear ZX	-3.538E-04	3.557E-04

Πίνακας 5-49: Report επίδρασης επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.100: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.101: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

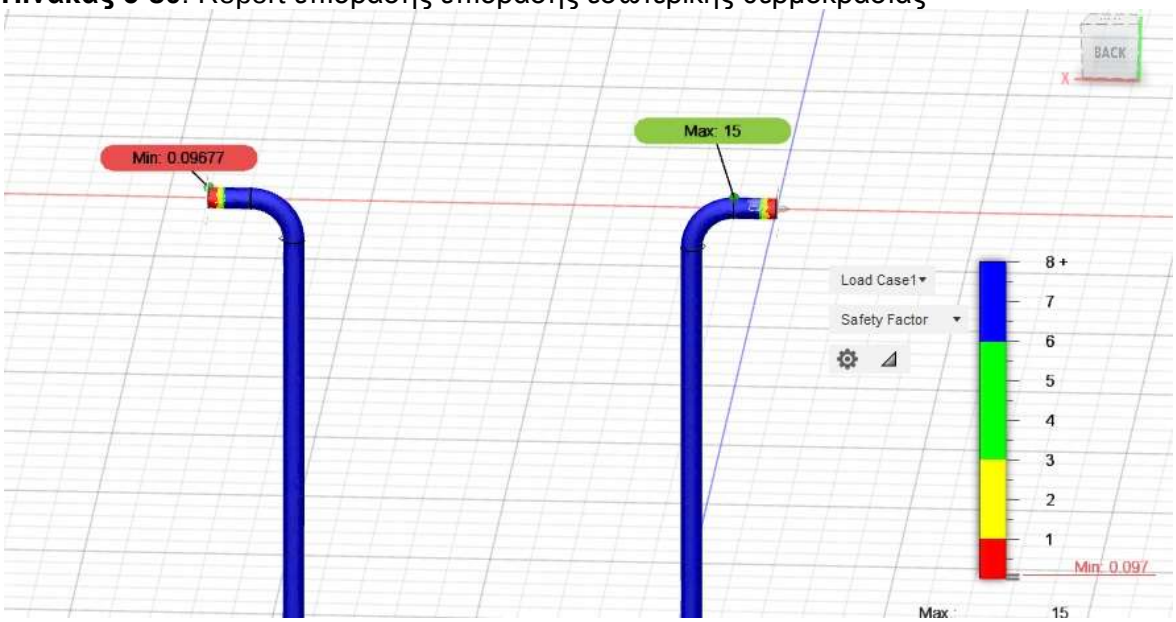
Συγκρίνοντας με τον πίνακα 5-17, βλέπουμε πως ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται.

γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

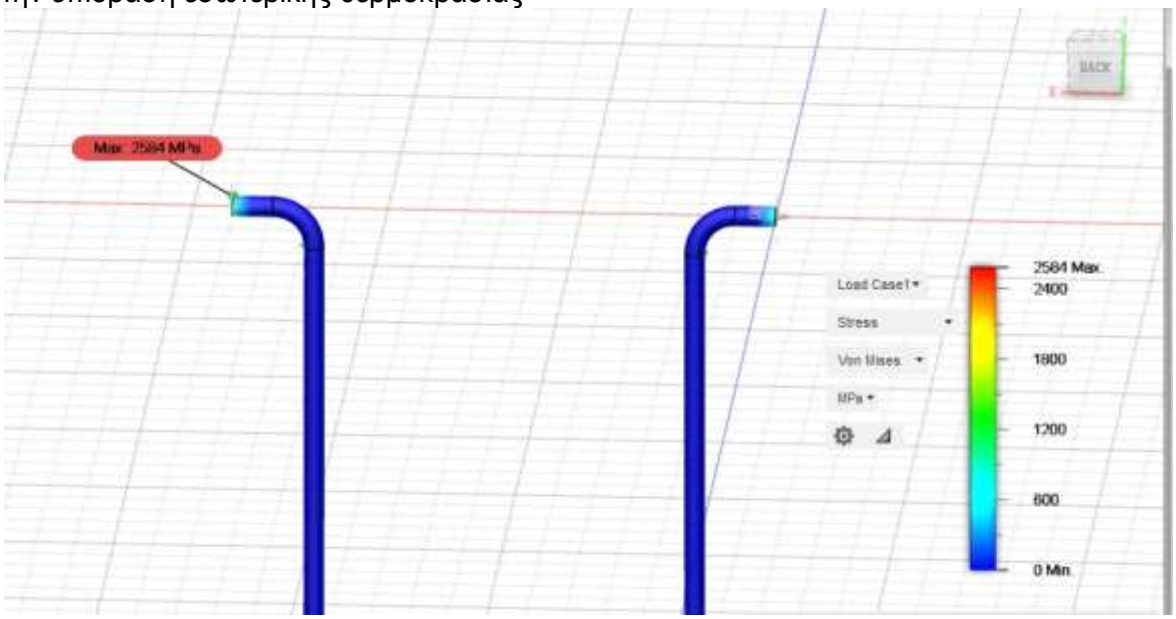
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09677	15
Stress		
Von Mises	0.004158 MPa	2584 MPa
1st Principal	-688.3 MPa	1255 MPa
3rd Principal	-3187 MPa	170.4 MPa
Normal XX	-2330 MPa	1203 MPa
Normal YY	-2256 MPa	777.5 MPa
Normal ZZ	-2279 MPa	452.2 MPa
Shear XY	-1258 MPa	919.9 MPa
Shear YZ	-503.9 MPa	457.5 MPa
Shear ZX	-1141 MPa	1162 MPa
Displacement		
Total	0 mm	58.62 mm
X	-2.979 mm	2.934 mm
Y	-58.62 mm	0.15 mm
Z	-0.1556 mm	0.2009 mm
Reaction Force		
Total	0 N	113237 N
X	-102889 N	104355 N
Y	-64208 N	64711 N
Z	-104617 N	102079 N
Strain		
Equivalent	0.006534	0.02062
1st Principal	0.005638	0.02079
3rd Principal	-0.01434	0.005778
Normal XX	-0.00546	0.01512
Normal YY	-0.001043	0.01218
Normal ZZ	-0.005213	0.009374
Shear XY	-0.01595	0.01167
Shear YZ	-0.00639	0.005803
Shear ZX	-0.01447	0.01474
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.499E-12 W / mm^2	1.461E-08 W / mm^2
X	-4.981E-09 W / mm^2	1.249E-08 W / mm^2
Y	-4.765E-09 W / mm^2	6.443E-09 W / mm^2
Z	-1.058E-08 W / mm^2	6.989E-09 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	7.775E-11 C / mm	3.247E-07 C / mm
X	-2.775E-07 C / mm	1.107E-07 C / mm
Y	-1.432E-07 C / mm	1.059E-07 C / mm
Z	-1.553E-07 C / mm	2.352E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-50: Report επίδρασης επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.102: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



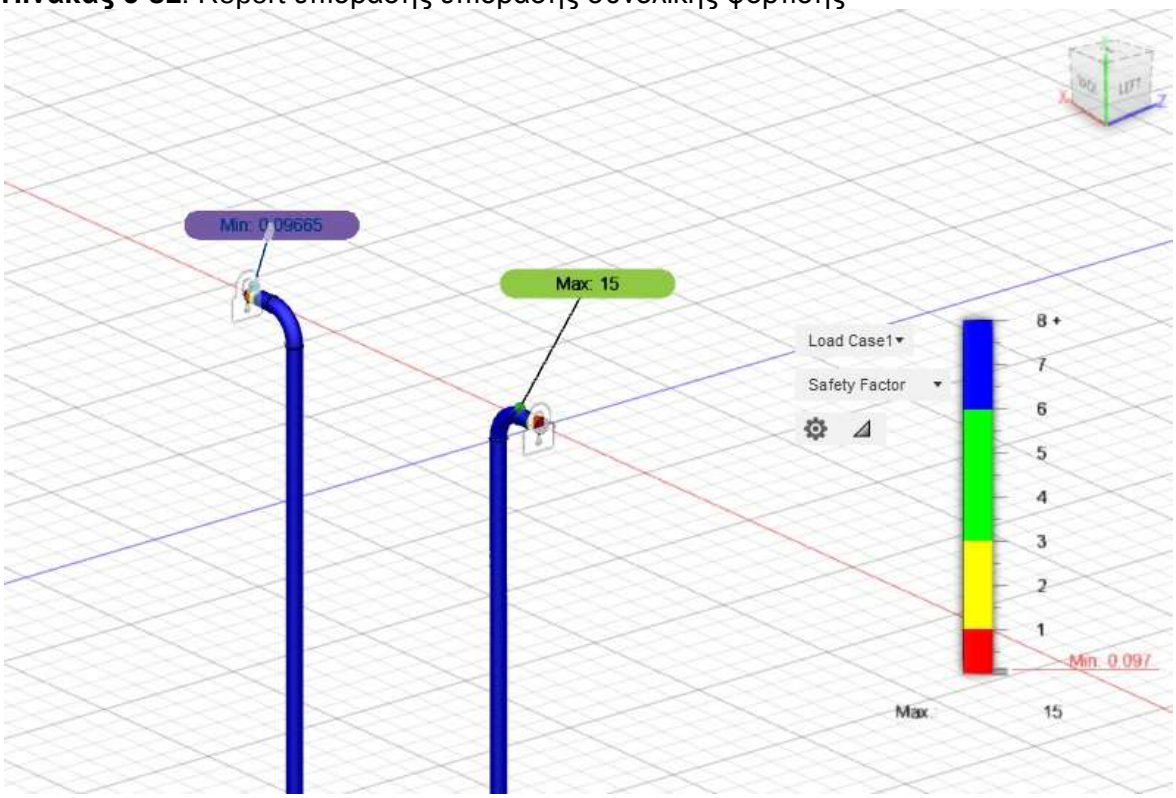
Εικόνα 5.103: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

δ) Συνολική φόρτιση

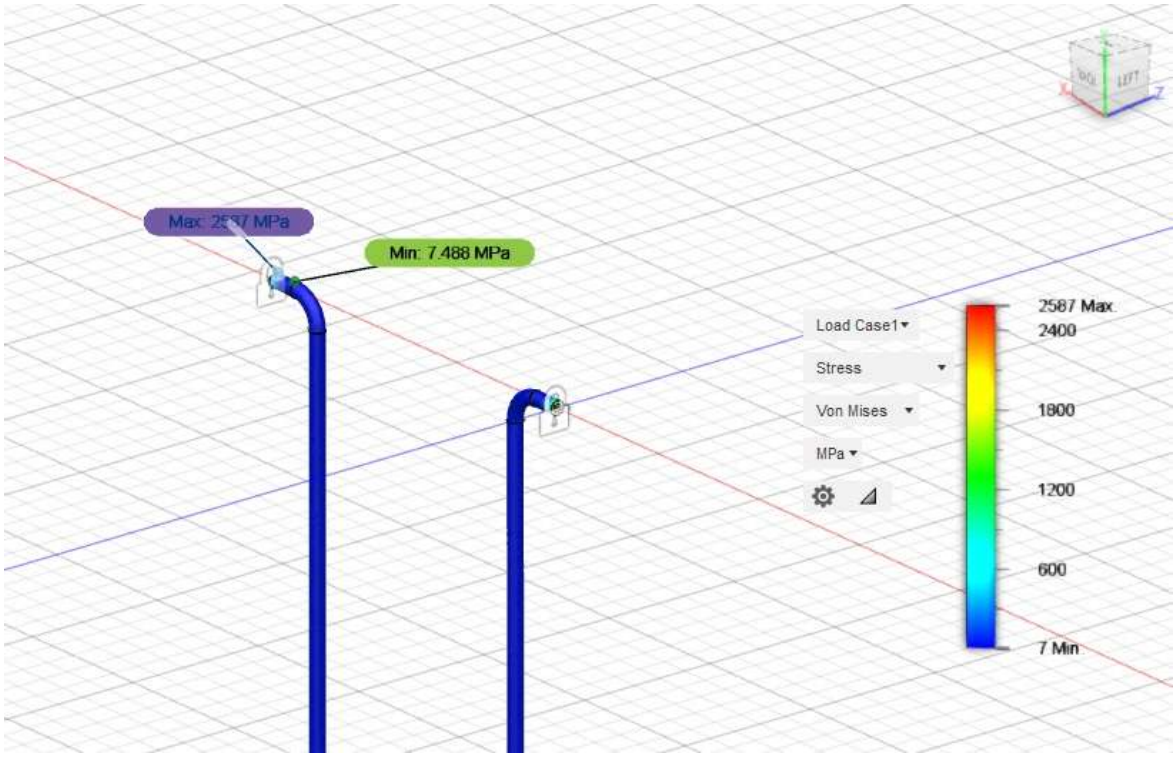
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09665	15
Stress		
Von Mises	7.488 MPa	2587 MPa
1st Principal	-721.6 MPa	1283 MPa
3rd Principal	-3208 MPa	183 MPa
Normal XX	-2320 MPa	1237 MPa
Normal YY	-2265 MPa	789.2 MPa
Normal ZZ	-2268 MPa	447.3 MPa
Shear XY	-1258 MPa	923.7 MPa
Shear YZ	-485.4 MPa	441.3 MPa
Shear ZX	-1126 MPa	1148 MPa
Displacement		
Total	0 mm	64.85 mm
X	-8.412 mm	1.314 mm
Y	-59.11 mm	0.1502 mm
Z	-26.51 mm	0.7006 mm
Reaction Force		
Total	0 N	115986 N
X	-102332 N	107157 N
Y	-64207 N	65102 N
Z	-103982 N	104955 N
Strain		
Equivalent	0.00649	0.02063
1st Principal	0.005649	0.02083
3rd Principal	-0.01445	0.005794
Normal XX	-0.005362	0.01524
Normal YY	-0.001026	0.01226
Normal ZZ	-0.005143	0.009251
Shear XY	-0.01596	0.01171
Shear YZ	-0.006157	0.005596
Shear ZX	-0.01428	0.01456
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	3.499E-12 W / mm^2	1.461E-08 W / mm^2
X	-4.981E-09 W / mm^2	1.249E-08 W / mm^2
Y	-4.765E-09 W / mm^2	6.443E-09 W / mm^2
Z	-1.058E-08 W / mm^2	6.989E-09 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	7.775E-11 C / mm	3.247E-07 C / mm
X	-2.775E-07 C / mm	1.107E-07 C / mm
Y	-1.432E-07 C / mm	1.059E-07 C / mm
Z	-1.553E-07 C / mm	2.352E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-51: Report επίδρασης επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.104: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση



Εικόνα 5.105: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για συνολική φόρτιση

Ομοίως με προηγουμένως, απειροελάχιστη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας.

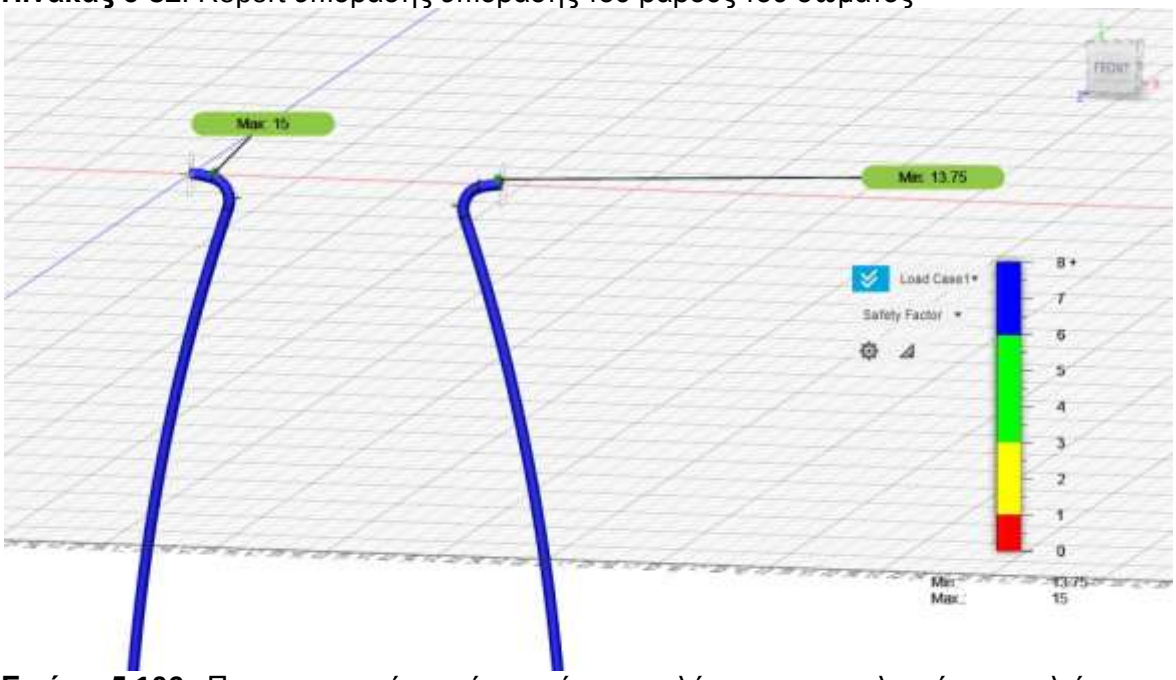
5.3.4 Κατακόρυφη θέση χωρίς κύλιση

α) Επίδραση του βάρους του σώματος

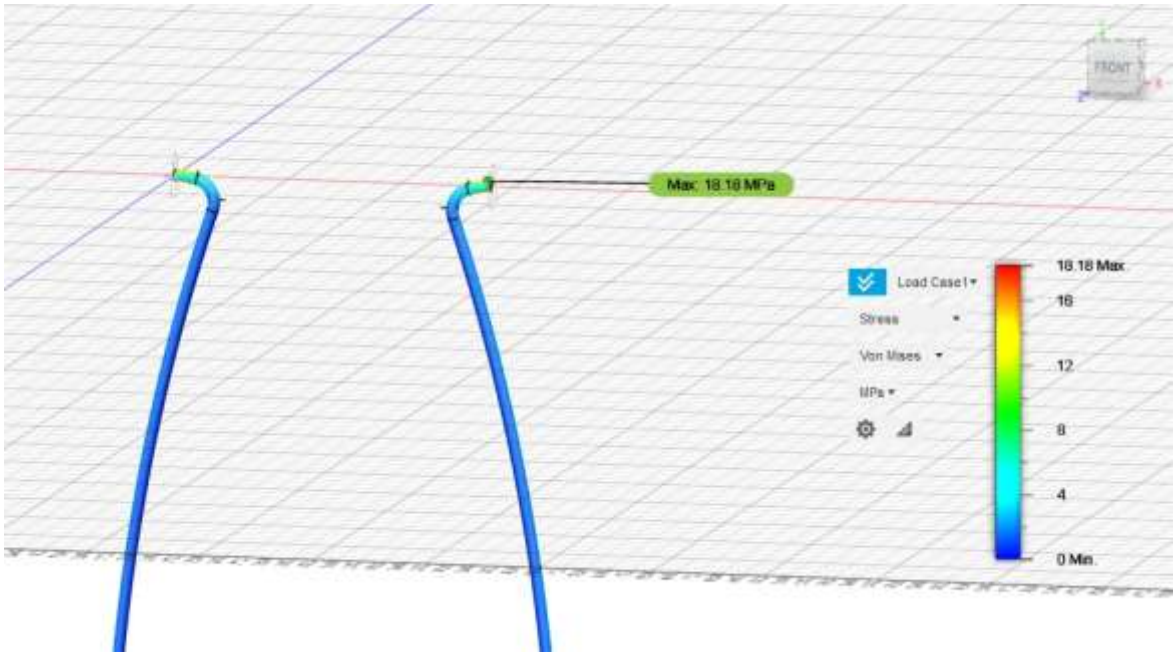
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	13.75	15
Stress		
Von Mises	4.471E-04 MPa	18.18 MPa
1st Principal	-8.214 MPa	24.76 MPa
3rd Principal	-25.2 MPa	8.11 MPa
Normal XX	-23.77 MPa	23.25 MPa
Normal YY	-9.646 MPa	9.617 MPa
Normal ZZ	-9.283 MPa	9.137 MPa
Shear XY	-4.721 MPa	4.775 MPa
Shear YZ	-1.027 MPa	1.008 MPa
Shear ZX	-2.324 MPa	2.855 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.5405 mm
X	-0.537 mm	0.537 mm
Y	-0.08412 mm	0 mm

Z	-2.895E-04 mm	2.928E-04 mm
Reaction Force		
Total	0 N	1048 N
X	-1047 N	995.8 N
Y	-73.53 N	227 N
Z	-150.1 N	156.6 N
Strain		
Equivalent	3.712E-09	1.003E-04
1st Principal	9.891E-10	1.174E-04
3rd Principal	-1.188E-04	1.055E-09
Normal XX	-9.023E-05	9.003E-05
Normal YY	-3.295E-05	3.341E-05
Normal ZZ	-2.387E-05	2.401E-05
Shear XY	-5.987E-05	6.056E-05
Shear YZ	-1.303E-05	1.278E-05
Shear ZX	-2.947E-05	3.62E-05

Πίνακας 5-52: Report επίδρασης επίδρασης του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.106: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας την επίδραση του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.107: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

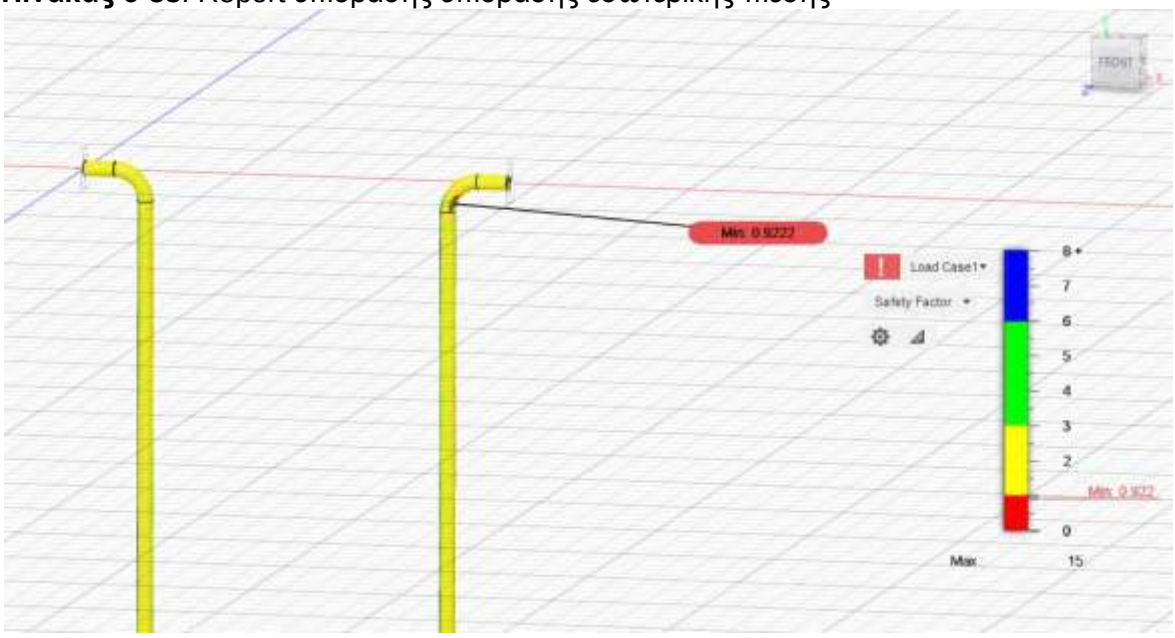
Στο τέλος του κεφαλαίου, θα παρατεθούν συγκριτικά διαγράμματα, επομένως όλα τα συμπεράσματα θα ανακεφαλαιωθούν εκεί.

β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

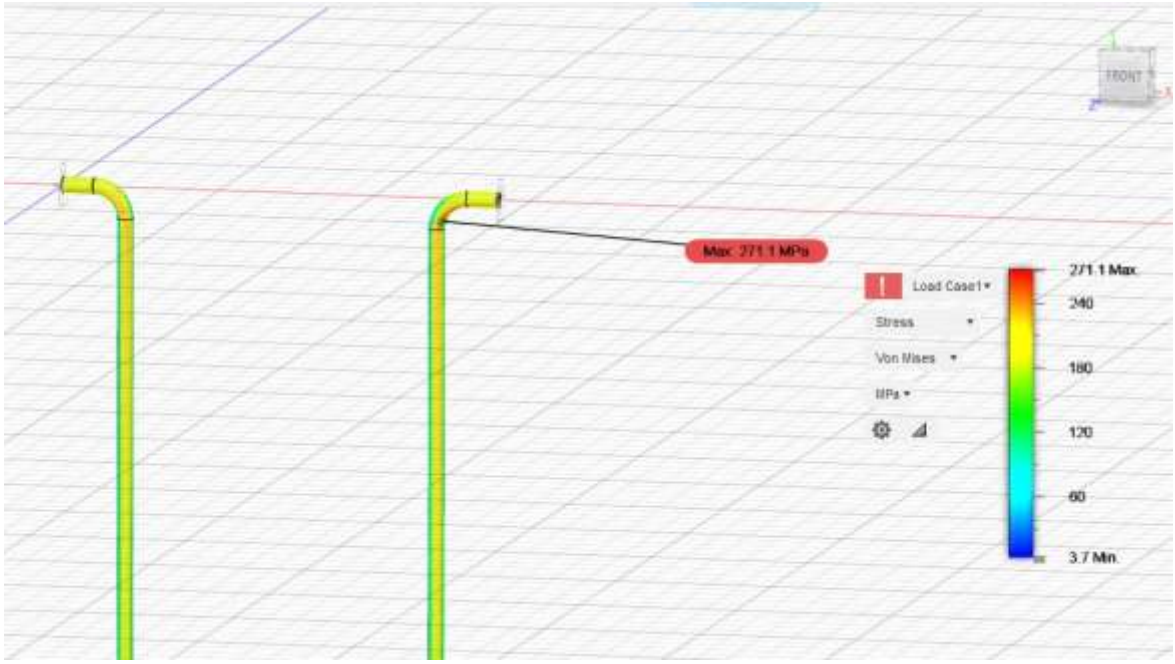
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.9222	15
Stress		
Von Mises	3.703 MPa	271.1 MPa
1st Principal	-22.87 MPa	295.9 MPa
3rd Principal	-277.7 MPa	9.539 MPa
Normal XX	-84.78 MPa	103.2 MPa
Normal YY	-271.2 MPa	284.9 MPa
Normal ZZ	-51.88 MPa	111.1 MPa
Shear XY	-110.4 MPa	122.8 MPa
Shear YZ	-59.81 MPa	78.17 MPa
Shear ZX	-123.4 MPa	125.4 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1577 mm
X	-303.9 mm	0.03554 mm
Y	-6.204 mm	5.935 mm
Z	-1547 mm	0.1564 mm
Reaction Force		
Total	0 N	7671 N

X	-3290 N	2484 N
Y	-7408 N	6469 N
Z	-6926 N	6955 N
Strain		
Equivalent	2.424E-05	0.002029
1st Principal	1.677E-05	0.002163
3rd Principal	-0.002102	-1.033E-05
Normal XX	-4.024E-04	4.907E-04
Normal YY	-0.001283	0.001303
Normal ZZ	-4.493E-04	5.958E-04
Shear XY	-0.001401	0.001558
Shear YZ	-7.586E-04	9.914E-04
Shear ZX	-0.001566	0.00159

Πίνακας 5-53: Report επίδρασης επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.108: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας την επίδραση εσωτερικής πίεσης



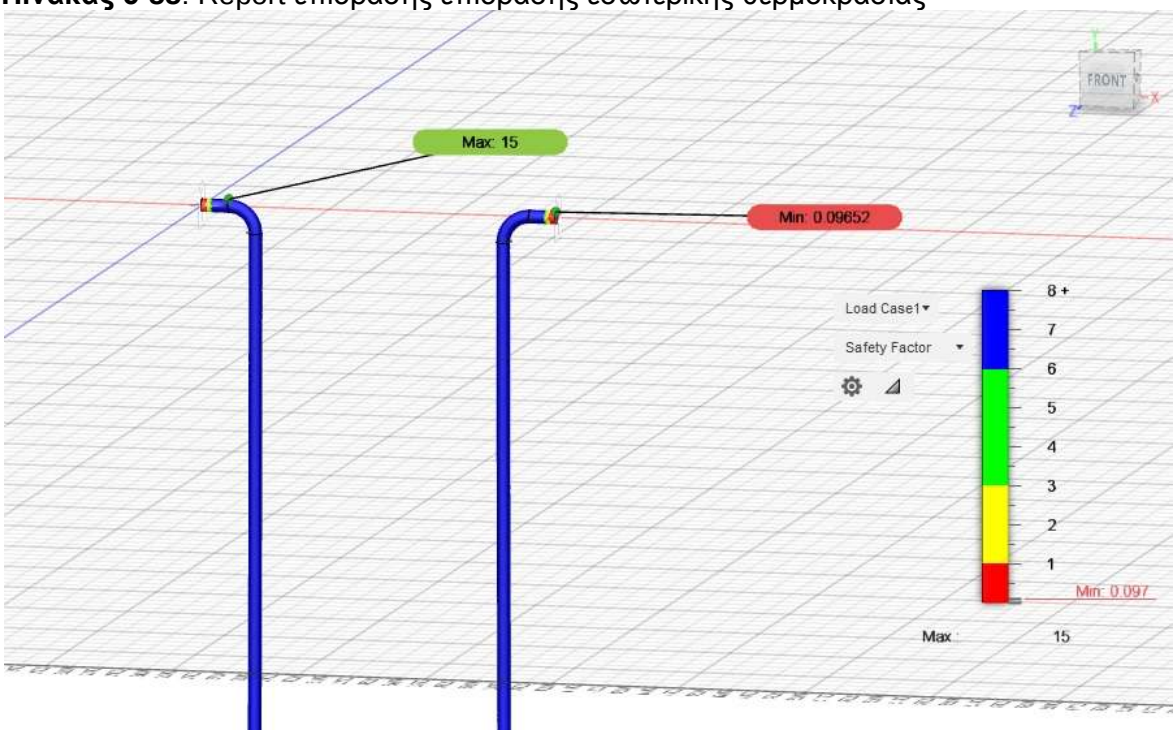
Εικόνα 5.109: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

γ) Επίδραση θερμοκρασίας

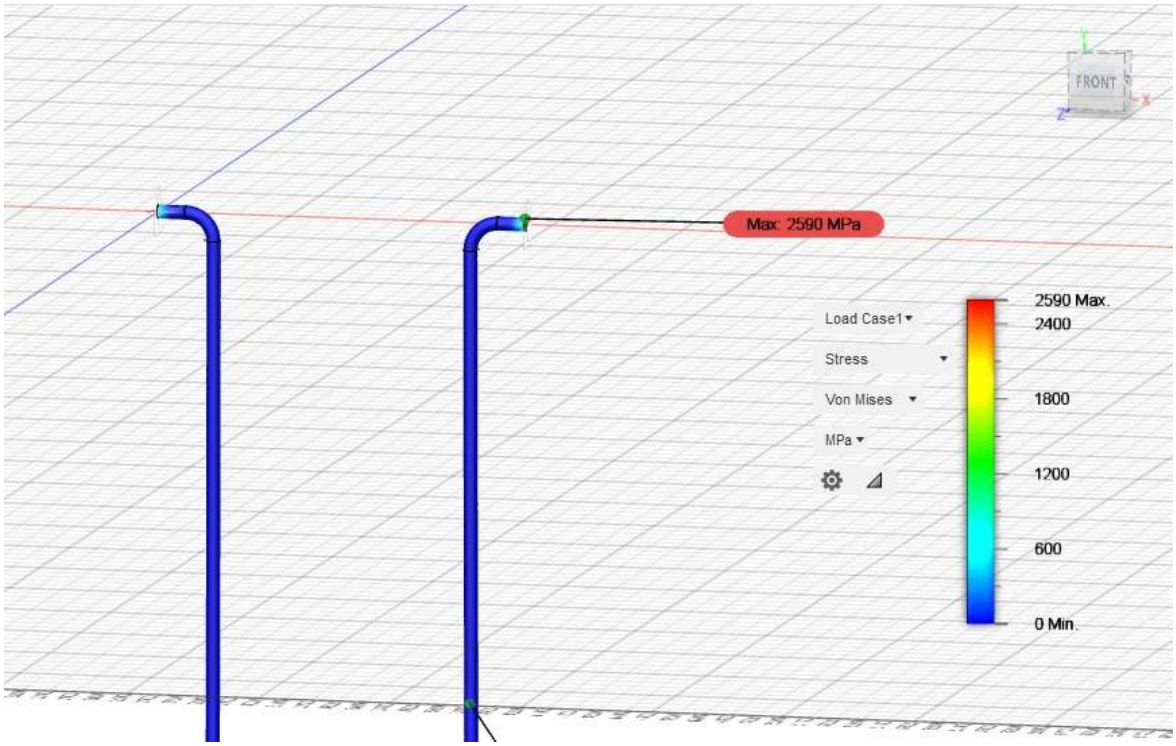
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09652	15
Stress		
Von Mises	0.0035 MPa	2590 MPa
1st Principal	-392.4 MPa	1247 MPa
3rd Principal	-3214 MPa	97.18 MPa
Normal XX	-1269 MPa	1194 MPa
Normal YY	-2267 MPa	293.5 MPa
Normal ZZ	-2245 MPa	431.4 MPa
Shear XY	-1264 MPa	916.9 MPa
Shear YZ	-491.9 MPa	474.6 MPa
Shear ZX	-1044 MPa	1095 MPa
Displacement		
Total	0 mm	57.81 mm
X	-2.929 mm	3.099 mm
Y	-57.77 mm	0.149 mm
Z	-0.1503 mm	0.1692 mm
Reaction Force		
Total	0 N	99149 N
X	-44552 N	43951 N
Y	-64467 N	65068 N
Z	-80501 N	82234 N

Strain		
Equivalent	0.007581	0.02069
1st Principal	0.005671	0.02084
3rd Principal	-0.0146	0.005807
Normal XX	0.004148	0.01506
Normal YY	-0.001047	0.007646
Normal ZZ	-0.001113	0.008192
Shear XY	-0.01603	0.01163
Shear YZ	-0.006239	0.00602
Shear ZX	-0.01324	0.01389
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	1.245E-11 W / mm^2	3.612E-08 W / mm^2
X	-2.143E-08 W / mm^2	1.48E-08 W / mm^2
Y	-3.053E-08 W / mm^2	3.37E-08 W / mm^2
Z	-1.895E-08 W / mm^2	1.705E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	2.767E-10 C / mm	8.027E-07 C / mm
X	-3.29E-07 C / mm	4.763E-07 C / mm
Y	-7.488E-07 C / mm	6.786E-07 C / mm
Z	-3.788E-07 C / mm	4.211E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-55: Report επίδρασης επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.110: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



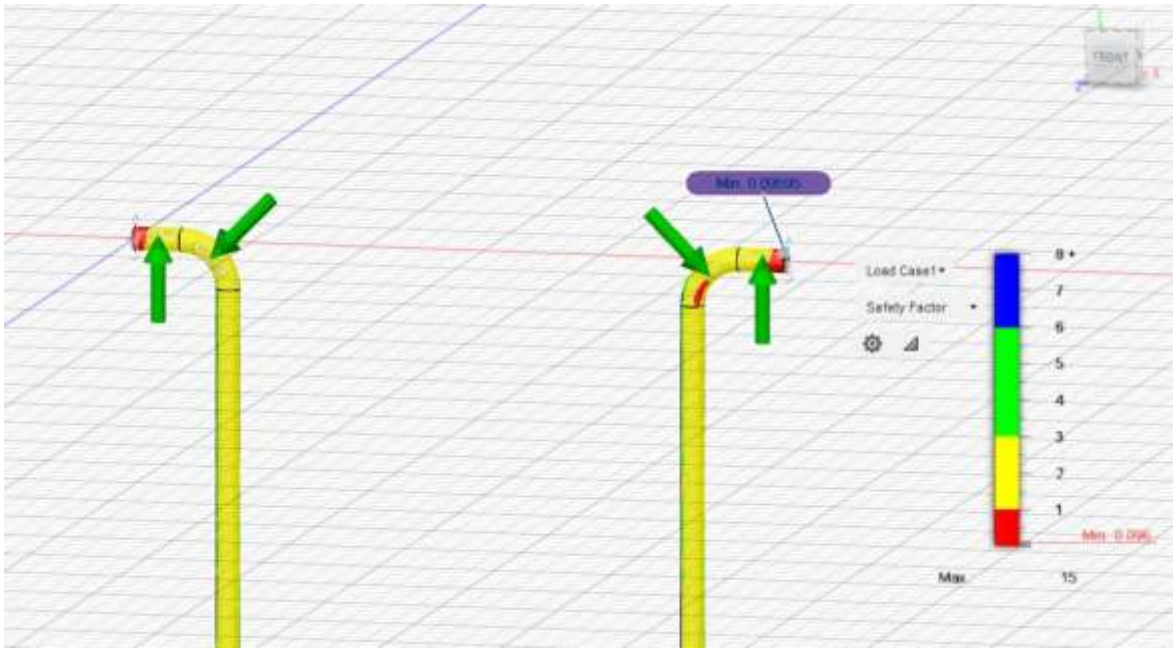
Εικόνα 5.111: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

δ) Συνολική φόρτιση

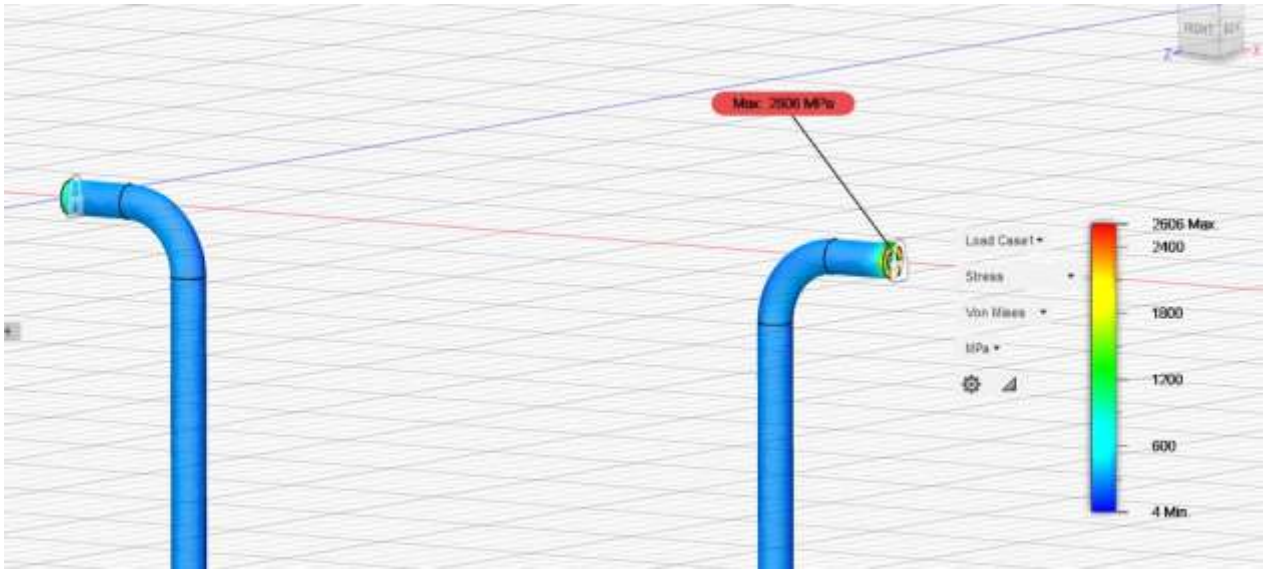
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09595	15
Stress		
Von Mises	3.738 MPa	2606 MPa
1st Principal	-411.3 MPa	1299 MPa
3rd Principal	-3294 MPa	61.67 MPa
Normal XX	-1352 MPa	1252 MPa
Normal YY	-2303 MPa	297 MPa
Normal ZZ	-2280 MPa	427.9 MPa
Shear XY	-1300 MPa	912.1 MPa
Shear YZ	-476.9 MPa	457.3 MPa
Shear ZX	-1039 MPa	1137 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1578 mm
X	-306.6 mm	1.14 mm
Y	-63.9 mm	0.2798 mm
Z	-1547 mm	0.2134 mm
Reaction Force		

Total	0 N	100490 N
X	-44163 N	45302 N
Y	-66570 N	67606 N
Z	-82004 N	84749 N
Strain		
Equivalent	0.007576	0.02096
1st Principal	0.00572	0.02095
3rd Principal	-0.0151	0.005867
Normal XX	0.004068	0.01527
Normal YY	-0.001019	0.007472
Normal ZZ	-0.001107	0.008153
Shear XY	-0.01649	0.01157
Shear YZ	-0.006048	0.0058
Shear ZX	-0.01318	0.01442
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	1.245E-11 W / mm^2	3.612E-08 W / mm^2
X	-2.143E-08 W / mm^2	1.48E-08 W / mm^2
Y	-3.053E-08 W / mm^2	3.37E-08 W / mm^2
Z	-1.895E-08 W / mm^2	1.705E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	2.767E-10 C / mm	8.027E-07 C / mm
X	-3.29E-07 C / mm	4.763E-07 C / mm
Y	-7.488E-07 C / mm	6.786E-07 C / mm
Z	-3.788E-07 C / mm	4.211E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-56: Report επίδρασης επίδρασης συνολικής φόρτισης

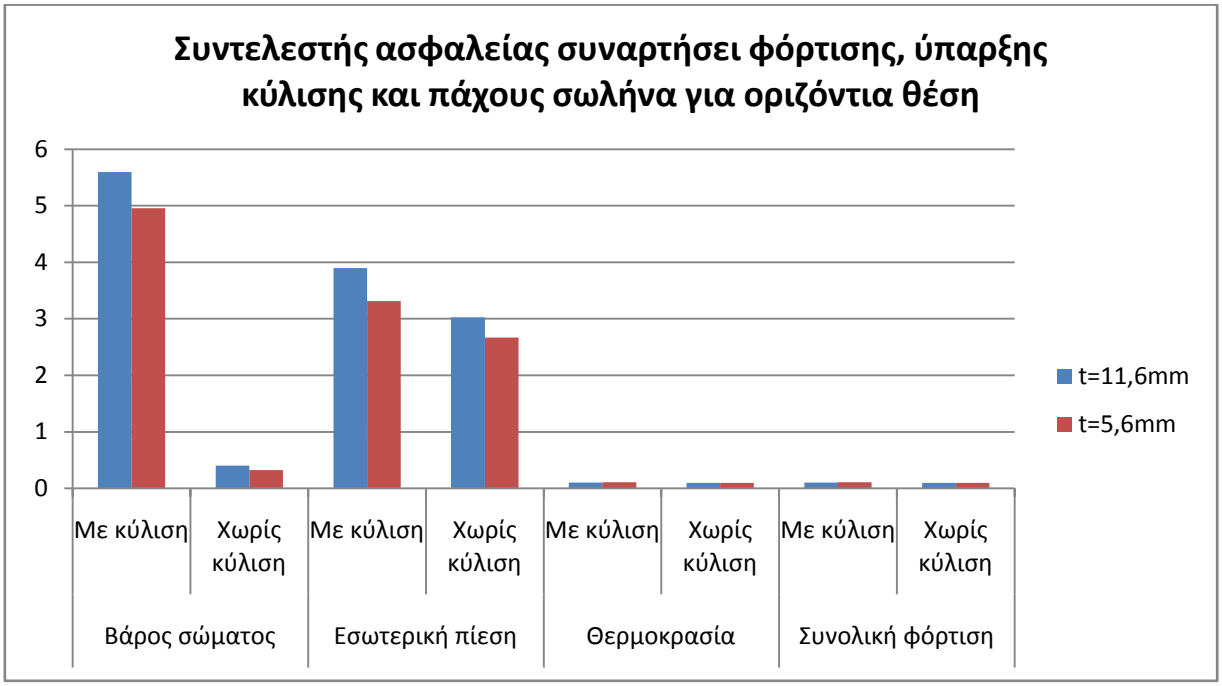


Εικόνα 5.112: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για συνολική φόρτιση

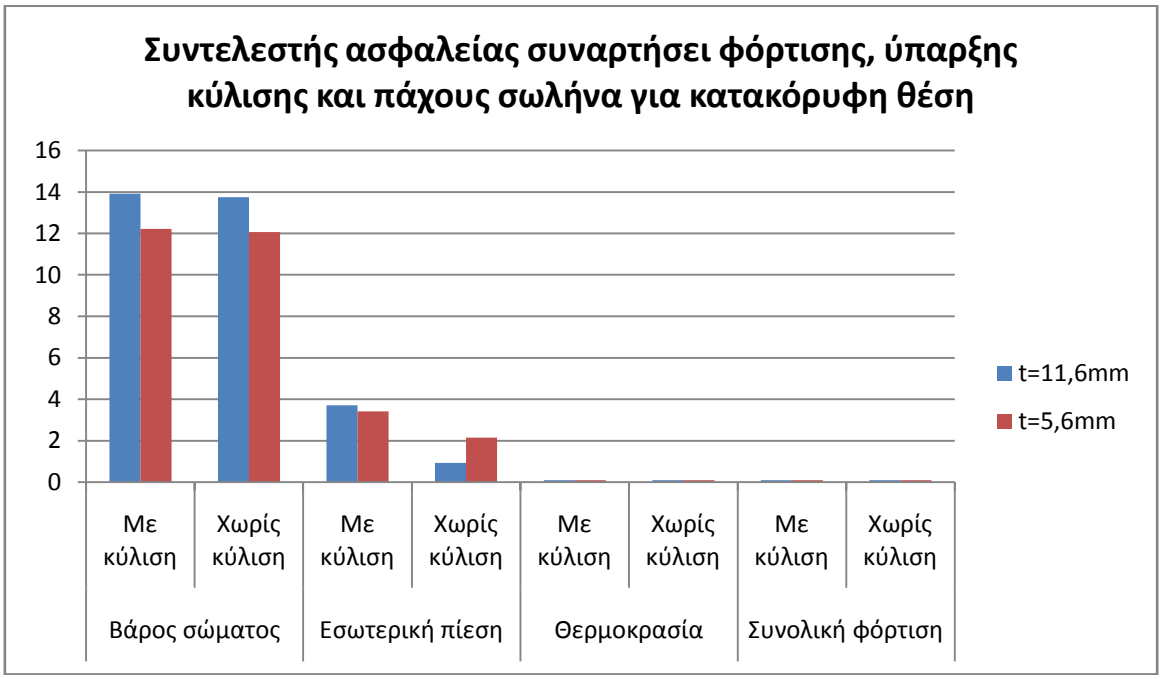


Εικόνα 5.113: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για συνολική φόρτιση

5.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων κεφαλαίου



Διάγραμμα 5-13: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει είδους φόρτισης, ύπαρξη κύλισης και πάχους σωλήνα για L=10m στην οριζόντια κατεύθυνση.



Διάγραμμα 5-14: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει είδους φόρτισης, ύπαρξη κύλισης και πάχους σωλήνα για L=10m στην κατακόρυφη κατεύθυνση

Από τα 2 παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνουμε πως η αύξηση του πάχους βελτιώνει τον συντελεστή ασφαλείας τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη θέση, για τις φορτίσεις βαρύτητας σώματος και εσωτερικής πίεσης.

5.4 Προσεγγίσεις μοντέλων πυκνότερου πλέγματος

Ομοίως με το υποκεφάλαιο 5.3, δεν κρίνεται απαραίτητο η μοντελοποίηση να γίνει για πλήθος μοντέλων καθώς η συμπεριφορά πλέον είναι λίγο πολύ αναμενόμενη, αλλά θα πραγματοποιηθεί μόνο για το πρωτότυπο μοντέλο, δηλαδή L=15,2m, κατακόρυφη θέση και με κύλιση. Η σύγκριση θα γίνει με το αντίστοιχο μοντέλο.

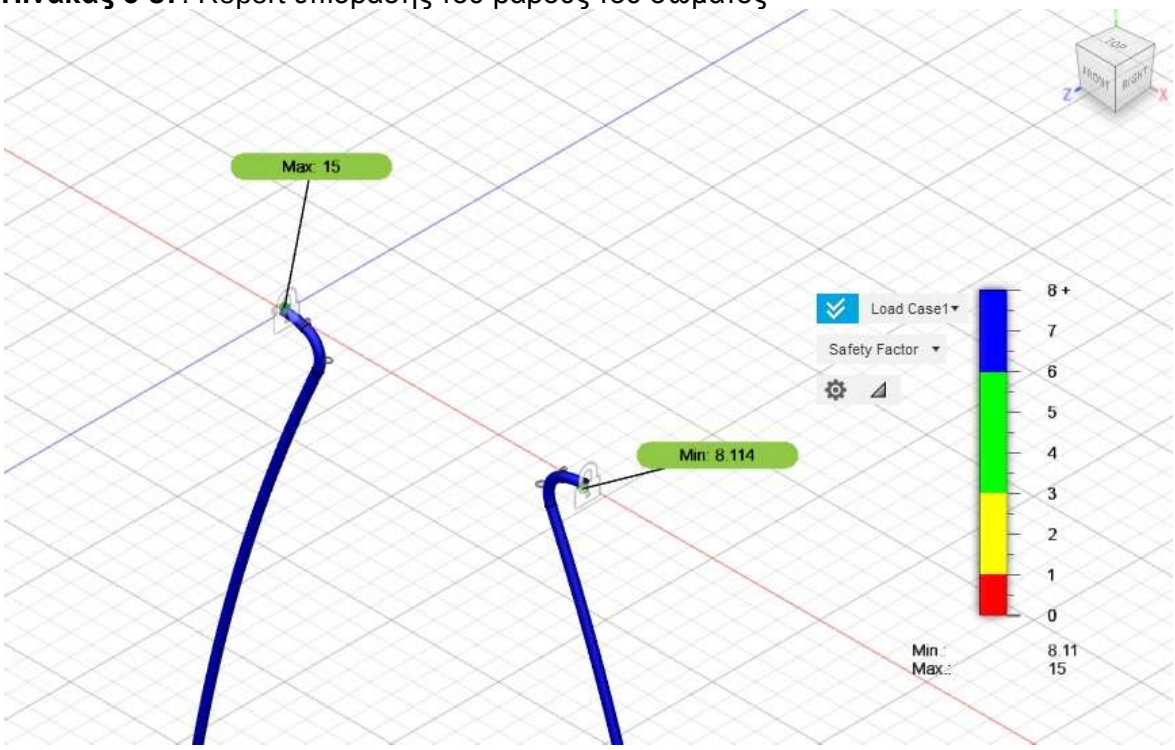
5.4.1 *Κατακόρυφη θέση με κύλιση, L=15,2mm και t=5,6mm*

α) Επίδραση του βάρους του σώματος

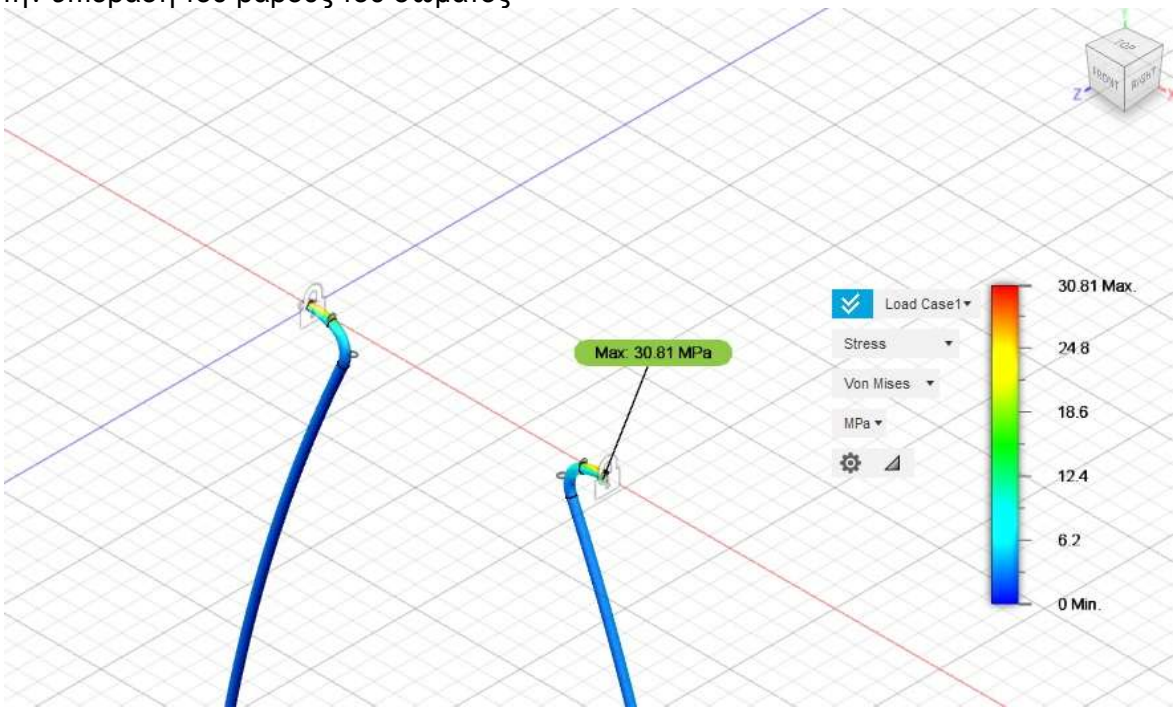
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	8.114	15
Stress		
Von Mises	2.585E-04 MPa	30.81 MPa
1st Principal	-14.62 MPa	38.06 MPa
3rd Principal	-39.48 MPa	10.29 MPa
Normal XX	-37.58 MPa	37.51 MPa
Normal YY	-16.47 MPa	10.61 MPa
Normal ZZ	-16.23 MPa	12.82 MPa
Shear XY	-5.994 MPa	4.365 MPa
Shear YZ	-2.332 MPa	2.378 MPa
Shear ZX	-3.584 MPa	3.67 MPa
Displacement		
Total	0 mm	1.418 mm
X	-1.412 mm	1.411 mm
Y	-0.1856 mm	0 mm
Z	-6.934E-04 mm	0.001034 mm
Reaction Force		
Total	0 N	660.2 N
X	-595.8 N	612.6 N
Y	-77.39 N	223.4 N
Z	-133.7 N	118.5 N
Strain		
Equivalent	3.494E-09	1.469E-04
1st Principal	-1.695E-08	1.651E-04
3rd Principal	-1.759E-04	2.918E-09
Normal XX	-1.53E-04	1.523E-04
Normal YY	-5.748E-05	5.759E-05
Normal ZZ	-4.297E-05	4.271E-05
Shear XY	-7.602E-05	5.536E-05

Shear YZ	-2.957E-05	3.016E-05
Shear ZX	-4.546E-05	4.655E-05

Πίνακας 5-57: Report επίδρασης του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.114: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση του βάρους του σώματος



Εικόνα 5.115: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση του βάρους του σώματος

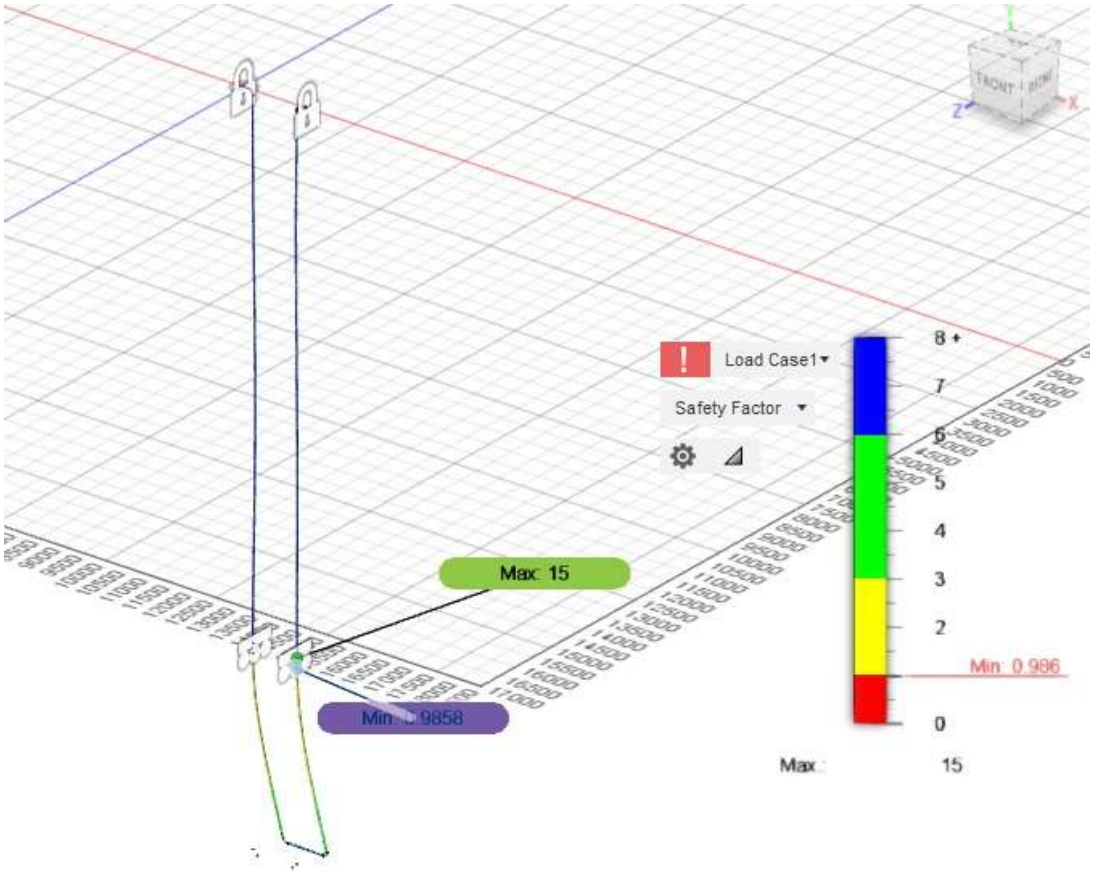
Στο τέλος της ενότητας, θα παρουσιαστεί συγκριτικό διάγραμμα με το αντίστοιχο μοντέλο με το προηγούμενο πλέγμα. Στην προκειμένη περίπτωση πάντως, φαίνεται μια

ελάχιστη διαφορά στον συντελεστή ασφαλείας, η οποία οφείλεται σε καλύτερη ακρίβεια λόγω της αύξησης του πλέγματος.

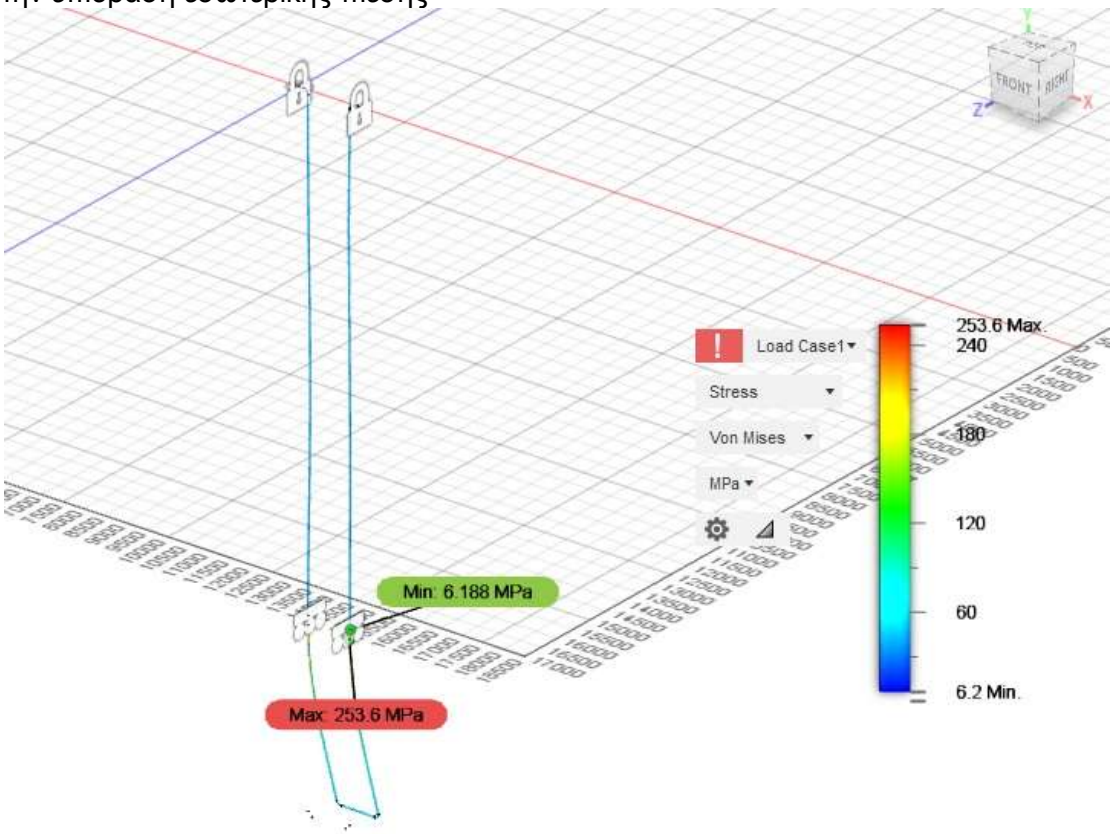
β) Επίδραση εσωτερικής πίεσης

Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.9858	15
Stress		
Von Mises	6.188 MPa	253.6 MPa
1st Principal	-119.7 MPa	279.5 MPa
3rd Principal	-264.1 MPa	69.93 MPa
Normal XX	-122.1 MPa	100.3 MPa
Normal YY	-263.7 MPa	279.3 MPa
Normal ZZ	-120.1 MPa	96.13 MPa
Shear XY	-48.03 MPa	63.87 MPa
Shear YZ	-91.56 MPa	43.38 MPa
Shear ZX	-47.07 MPa	46.75 MPa
Displacement		
Total	0 mm	317.9 mm
X	-2.863 mm	53.49 mm
Y	-2.923 mm	1.95 mm
Z	-313.4 mm	11.48 mm
Reaction Force		
Total	0 N	6127 N
X	-3258 N	1779 N
Y	-443.3 N	464.7 N
Z	-3076 N	5863 N
Strain		
Equivalent	4.252E-05	0.00141
1st Principal	-1.111E-05	0.001381
3rd Principal	-0.001173	-2.26E-05
Normal XX	-3.248E-04	5.287E-04
Normal YY	-0.001102	0.001199
Normal ZZ	-7.286E-04	5.098E-04
Shear XY	-6.091E-04	8.101E-04
Shear YZ	-0.001161	5.502E-04
Shear ZX	-5.97E-04	5.929E-04

Πίνακας 5-58: Report επίδρασης εσωτερικής πίεσης



Εικόνα 5.116: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής πίεσης



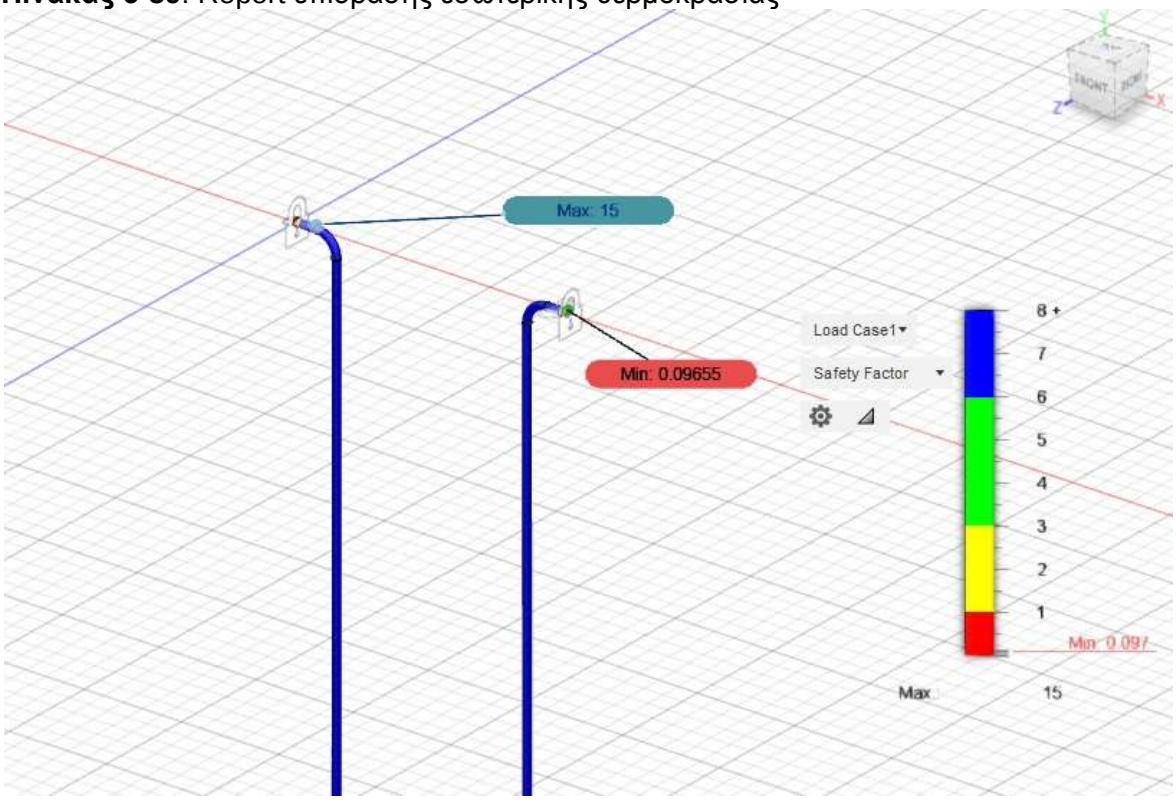
Εικόνα 5.117: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής πίεσης

γ) Επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

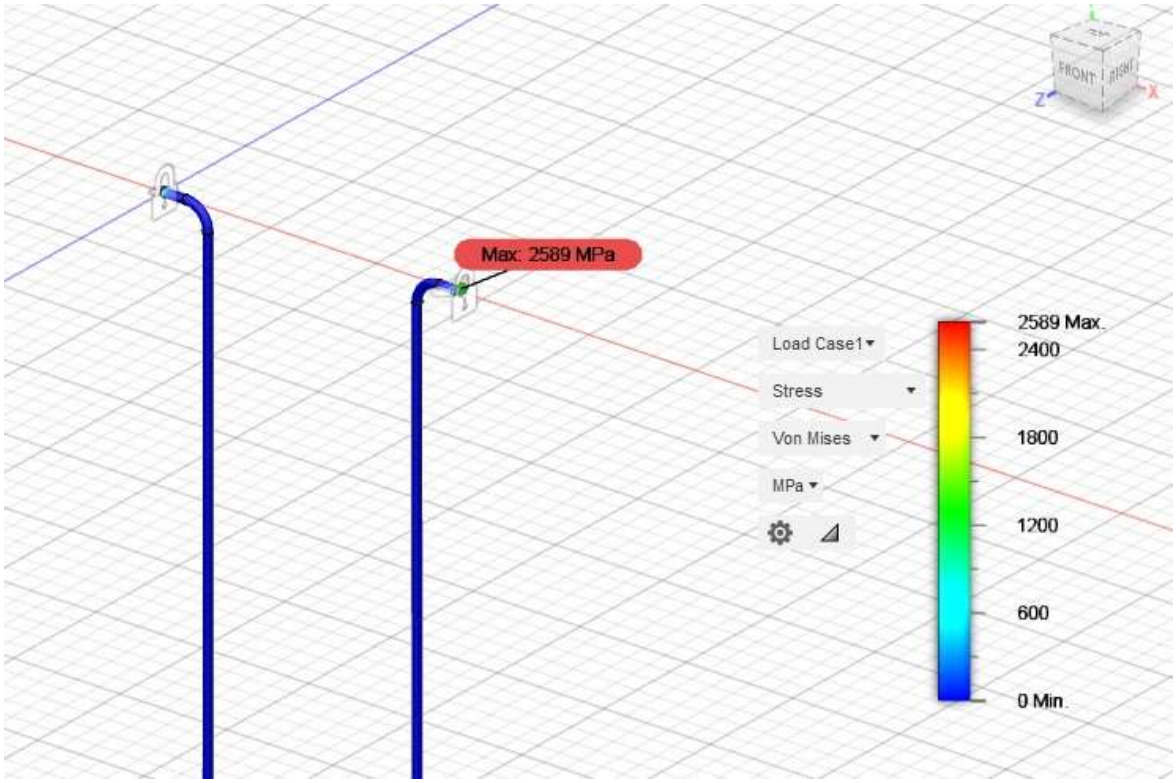
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09655	15
Stress		
Von Mises	0.003828 MPa	2589 MPa
1st Principal	-844.7 MPa	1534 MPa
3rd Principal	-3056 MPa	89.76 MPa
Normal XX	-1835 MPa	1525 MPa
Normal YY	-2286 MPa	771.6 MPa
Normal ZZ	-2266 MPa	486.2 MPa
Shear XY	-973 MPa	667.5 MPa
Shear YZ	-424 MPa	418.5 MPa
Shear ZX	-1110 MPa	1117 MPa
Displacement		
Total	0 mm	88.3 mm
X	-2.961 mm	2.947 mm
Y	-88.3 mm	0.1164 mm
Z	-0.1481 mm	0.1218 mm
Reaction Force		
Total	0 N	48569 N
X	-41177 N	40252 N
Y	-28171 N	33527 N
Z	-42324 N	44872 N
Strain		
Equivalent	0.005974	0.01894
1st Principal	0.005651	0.01929
3rd Principal	-0.01289	0.005824
Normal XX	-0.003587	0.01619
Normal YY	-0.00103	0.01155
Normal ZZ	-0.003473	0.008879
Shear XY	-0.01234	0.008466
Shear YZ	-0.005378	0.005307
Shear ZX	-0.01408	0.01417
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.784E-12 W / mm^2	4.777E-08 W / mm^2
X	-4.667E-08 W / mm^2	4.511E-08 W / mm^2
Y	-2.464E-08 W / mm^2	2.21E-08 W / mm^2
Z	-4.088E-08 W / mm^2	3.982E-08 W / mm^2

Thermal Gradient		
Total	1.285E-10 C / mm	1.062E-06 C / mm
X	-1.002E-06 C / mm	1.037E-06 C / mm
Y	-4.912E-07 C / mm	5.475E-07 C / mm
Z	-8.85E-07 C / mm	9.085E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-59: Report επίδρασης εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 5.118: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας



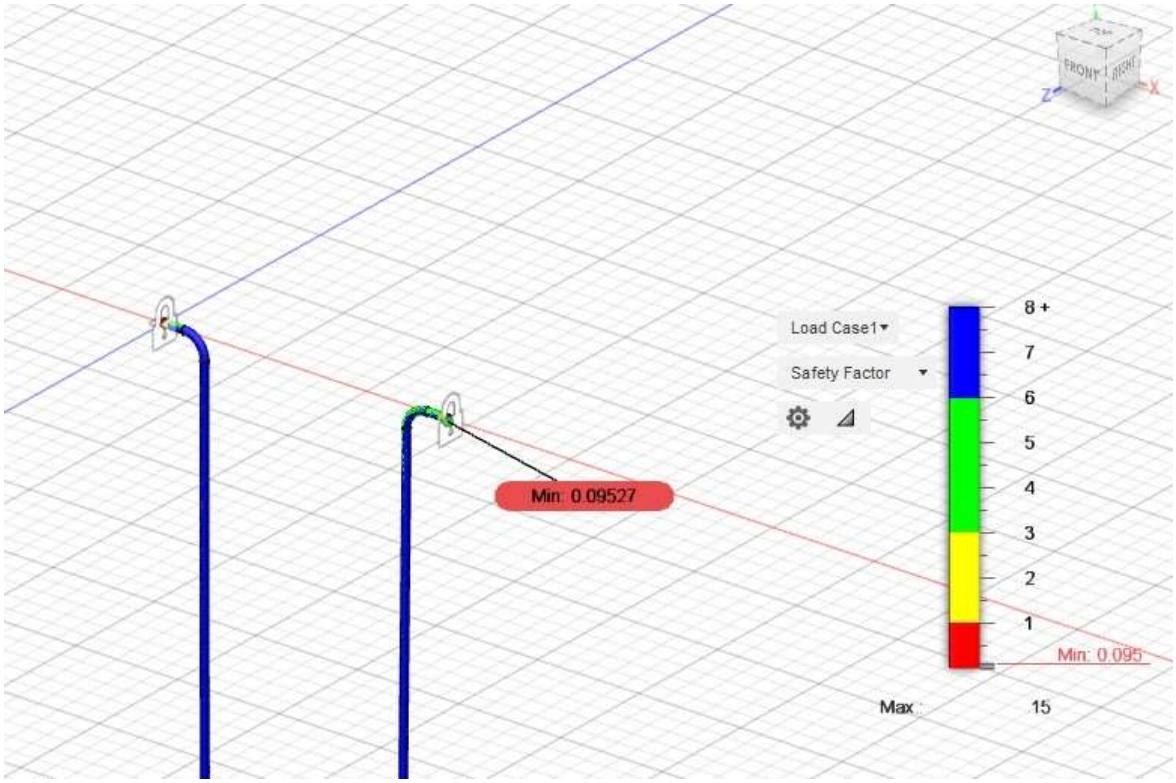
Εικόνα 5.119: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας

δ) Συνολική φόρτιση

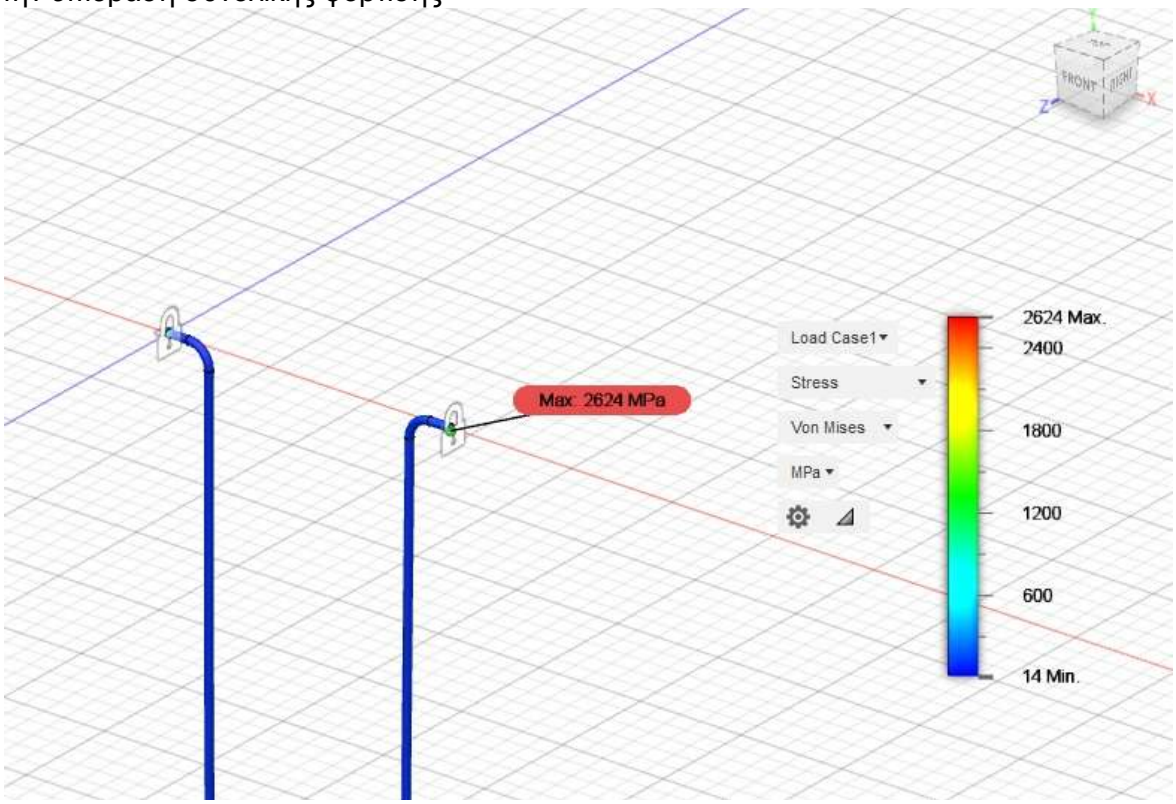
Name	**Minimum**	**Maximum**
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	0.09527	15
Stress		
Von Mises	14.49 MPa	2624 MPa
1st Principal	-865.4 MPa	1595 MPa
3rd Principal	-3093 MPa	107 MPa
Normal XX	-1833 MPa	1589 MPa
Normal YY	-2327 MPa	812.9 MPa
Normal ZZ	-2288 MPa	487.3 MPa
Shear XY	-998.7 MPa	681 MPa
Shear YZ	-412.7 MPa	403.4 MPa
Shear ZX	-1113 MPa	1123 MPa
Displacement		
Total	0 mm	329.8 mm
X	-3.005 mm	56.19 mm
Y	-91.22 mm	0.1194 mm
Z	-313.4 mm	11.58 mm
Reaction Force		
Total	0 N	49842 N
X	-42692 N	41520 N

Y	-27860 N	34215 N
Z	-43323 N	46048 N
Strain		
Equivalent	0.005908	0.01906
1st Principal	0.005746	0.01939
3rd Principal	-0.01299	0.005847
Normal XX	-0.003557	0.01643
Normal YY	-0.001018	0.01172
Normal ZZ	-0.003456	0.009001
Shear XY	-0.01267	0.008637
Shear YZ	-0.005234	0.005117
Shear ZX	-0.01412	0.01424
Temperature		
Temperature	500 C	500 C
Heat Flux		
Total	5.784E-12 W / mm^2	4.777E-08 W / mm^2
X	-4.667E-08 W / mm^2	4.511E-08 W / mm^2
Y	-2.464E-08 W / mm^2	2.21E-08 W / mm^2
Z	-4.088E-08 W / mm^2	3.982E-08 W / mm^2
Thermal Gradient		
Total	1.285E-10 C / mm	1.062E-06 C / mm
X	-1.002E-06 C / mm	1.037E-06 C / mm
Y	-4.912E-07 C / mm	5.475E-07 C / mm
Z	-8.85E-07 C / mm	9.085E-07 C / mm
Applied Heat Flow		
Applied Heat Flow	0 W / mm^2	0 W / mm^2

Πίνακας 5-60: Report επίδρασης συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.120: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστος-ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση συνολικής φόρτισης



Εικόνα 5.121: Παραμορφωμένο σώμα, μέγιστη-ελάχιστη τάση Von Mises για την επίδραση συνολικής φόρτισης

5.4.2 Σύγκριση με αντίστοιχο μοντέλο με αρχικό πλέγμα

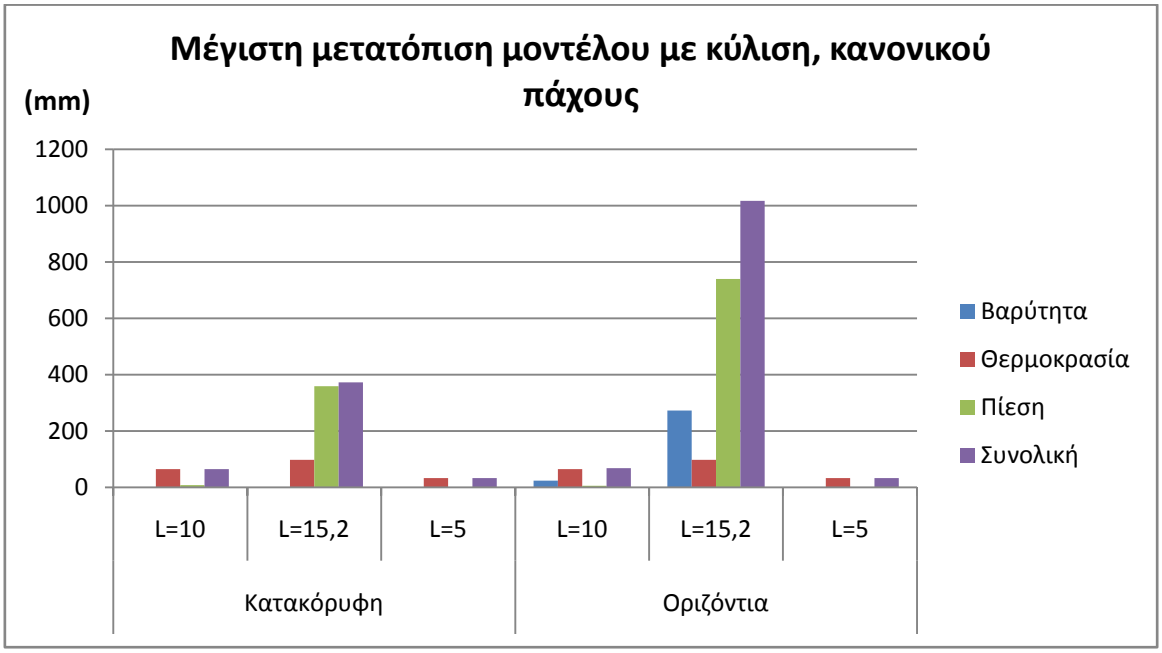
Διάγραμμα 5-15: Συγκριτικό διάγραμμα συμπεριφοράς συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει είδους φόρτισης και πλέγματος, για μοντέλο με κύλιση σε κατακόρυφη θέση, με L=15,2m και t=5,6mm.

Από το παραπάνω διάγραμμα, συμπεραίνουμε πως με το πιο πυκνό πλέγμα έχουμε πολύ μικρή διαφορά στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας, με περισσότερη ακρίβεια. Επίσης, λόγω αυτής της μικρής διαφοράς συμπεραίνουμε πως εξαρχής είχε γίνει καλή επιλογή πυκνότητας πλέγματος, για ακριβέστερα αποτελέσματα.

5.5 Διάγραμμα σύγκρισης μετατοπίσεων

Συνοψίζοντας κάποια από τα παραπάνω αποτελέσματα των reports, ακολουθεί διάγραμμα που εμφανίζει τις μέγιστες μετατοπίσεις των κόμβων, συναρτήσει φόρτισης, προσανατολισμού αγωγών και μήκους μεγάλης διάστασης L. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που ακολοθούν αφορούν τα μοντέλα με κύλιση, με το αρχικό πλέγμα που είχε επιλεγεί.

5.5. Συγκριτικά διαγράμματα

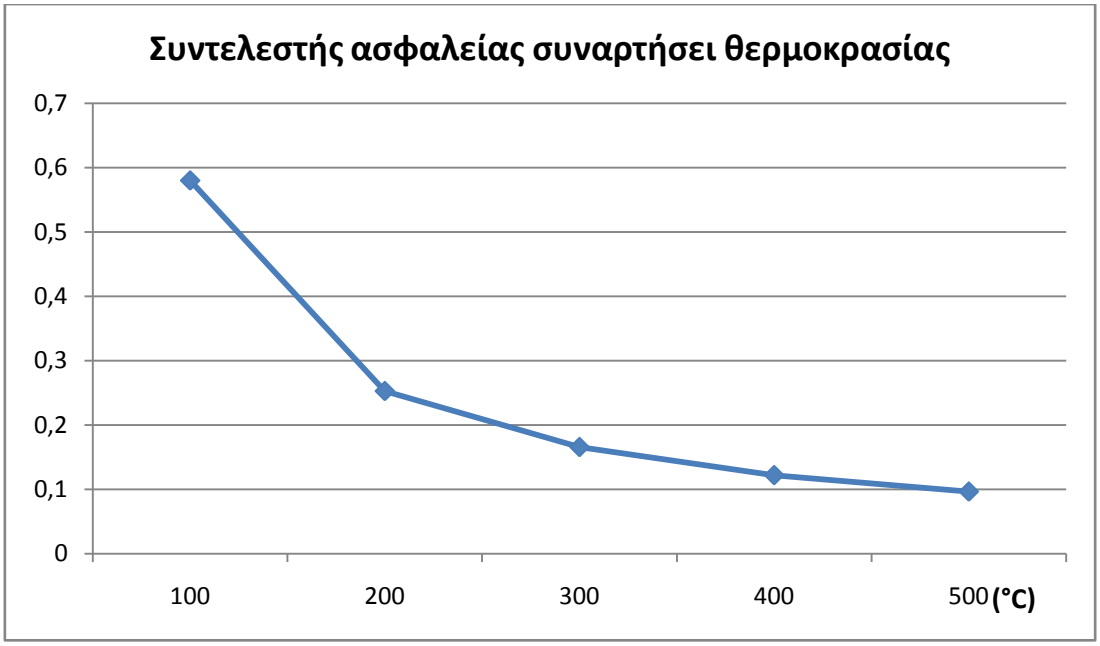


Διάγραμμα 5-16: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης μετατόπισης συναρτήσει είδους φόρτισης, προσανατολισμού αγωγών, μήκους μεγάλης διάστασης L για t=5,6mm.

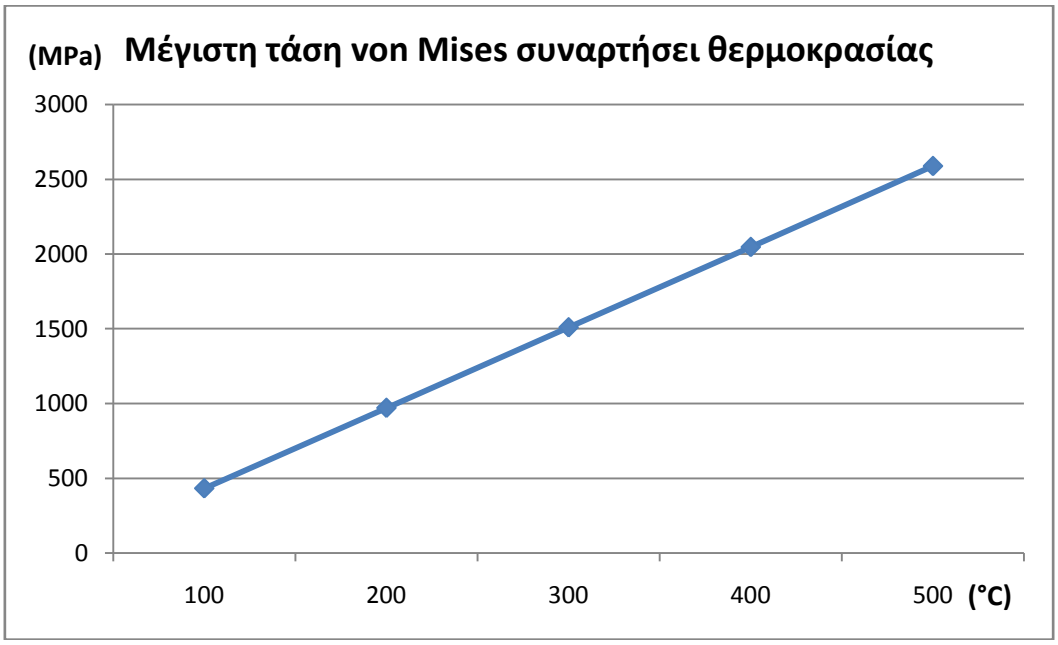
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως η φόρτιση που επηρεάζει στην στατική ανάλυση τις μέγιστες μετατοπίσεις, είναι η εσωτερική πίεση. Βλέπουμε επίσης πως με την μείωση της μεγάλης διάστασης, μειώνεται αισθητά η μέγιστη μετατόπιση των κόμβων.

5.6 Προσομοίωση με διαφορετικές θερμοκρασίες

Τέλος, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για το αρχικό μοντέλο σε διαφορετικές θερμοκρασίες, για να δούμε την συμπεριφορά του συντελεστή ασφαλείας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 5-17: Συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει θερμοκρασίας για το κανονικό μοντέλο (L=15,2m, κατακόρυφη θέση με κύλιση, t=5,6mm.)



Διάγραμμα 5-18: Μέγιστη τάση von Mises συναρτήσει θερμοκρασίας για το κανονικό μοντέλο (L=15,2m, κατακόρυφη θέση με κύλιση, t=5,6mm.)

Από τα παραπάνω βλέπουμε πόσο πολύ μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας η αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνει την μέγιστη τάση. Βέβαια, σε αυτό το σημείο αξίζει να τονίσουμε πως λόγω της πάκτωσης που έχει μοντελοποιηθεί στο πρόγραμμα, έχουμε ίσως αυτές τις τιμές στον συντελεστή ασφαλείας. Στην πραγματικότητα σε εκείνο το σημείο δεν υπάρχει πάκτωση, αλλά ένωση με άλλο τμήμα αγωγού.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Συγκεντρώνοντας όλα τα επιμέρους συμπεράσματα και σχόλια κάτω από τα διαγράμματα και τις εικόνες, συνοψίζονται στα εξής:

- Στην οριζόντια θέση με κύλιση, στις φορτίσεις βάρους του σώματος και εσωτερική πίεση, η δυσμενότερη συνθήκη εμφανίζεται στην κύλιση
- Κατά την φόρτιση εσωτερικής θερμοκρασίας, η δυσμενότερη συνθήκη εμφανίζεται στην πάκτωση
- Κατά την υπέρθεση των φορτίσεων, η εσωτερική θερμοκρασία, φαίνεται πως είναι το “χειρότερο” είδος φόρτισης, καταπονώντας τον αγωγό
- Όταν μειώνεται η μεγάλη διάσταση του αγωγού, αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας. Αυτό ισχύει για τις φορτίσεις του βάρους του σώματος και της εσωτερικής πίεσης
- Στην κατακόρυφη θέση με κύλιση, στην φόρτιση επίδραση του βάρους του σώματος, η δυσμενότερη συνθήκη εμφανίζεται στην πάκτωση, ενώ στην εσωτερική πίεση εμφανίζεται στην κύλιση.
- Στην κατακόρυφη θέση, στην επίδραση της βαρύτητας ο συντελεστής ασφαλείας παίρνει ικανοποιητικές τιμές
- Στην κατακόρυφη θέση υπο την επίδραση εσωτερικής πίεσης, το δυσμέστερο σημείο μπορεί να εμφανιστεί και στην καμπύλη κάτω από το σημείο της πάκτωσης
- Στην επίδραση του βάρους του σώματος ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται αισθητά στην οριζόντια θέση σε σχέση με την κατακόρυφη.
- Αφαιρώντας την κύλιση μειώνεται δραστικά ο συντελεστής ασφαλείας για την επίδραση μόνο της βαρύτητας στο μοντέλο στην οριζόντια θέση
- Η ύπαρξη κύλισης στην οριζόντια θέση βελτιώνει πολύ τον συντελεστή ασφαλείας κατά την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος και της εσωτερικής πίεσης.
- Η ύπαρξη κύλισης στην κατακόρυφη θέση βελτιώνει σε μικρό βαθμό τον συντελεστή ασφαλείας κατά την επίδραση μόνο του βάρους του σώματος και της εσωτερικής πίεσης.
- Στην κατακόρυφη θέση, ανεξαρτήτου ύπαρξης κύλισης, ο συντελεστής ασφαλείας είναι πολύ υψηλός για την επίδραση του βάρους του σώματος.
- Η κύλιση γενικά βελτιώνει τον συντελεστή ασφαλείας, είτε πολύ είτε ελάχιστα (π.χ. θερμοκρασία).

- Η αύξηση του πάχους βελτιώνει τον συντελεστή ασφαλείας τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη θέση, για τις φορτίσεις βαρύτητας σώματος και εσωτερικής πίεσης
- Με το πιο πυκνό πλέγμα έχουμε πολύ μικρή διαφορά στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας, με περισσότερη ακρίβεια (η μικρή διαφορά οφείλεται στην εξαρχής πυκνή επιλογή πλέγματος).
- Σαν εσωτερική φόρτιση, η πίεση παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στις μέγιστες μετατοπίσεις των κόμβων
- Με την μείωση της θερμοκρασίας, βλέπουμε σημαντική αύξηση στον συντελεστή ασφαλείας

Εν κατακλείδει, συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να κρατήσουμε τα εξής:

- Η βαρύτητα είναι η καλύτερη συνθήκη φόρτισης, ειδικά στην κατακόρυφη θέση
- Η θερμοκρασία είναι η χειρότερη συνθήκη από όλες, ανεξαρτήτου άλλης παραμέτρου
- Τα σημεία στηρίξεων αλλά και οι καμπύλες είναι τα πιο ευαίσθητα σημεία
- Η κύλιση γενικά βελτιώνει τον συντελεστή ασφαλείας, είτε πολύ είτε ελάχιστα (π.χ. θερμοκρασία)
- Η μείωση της μεγάλης διάστασης και η αύξηση του πάχους βελτιώνουν τον συντελεστή ασφαλείας
- Η αύξηση του πάχους βελτιώνει τον συντελεστή ασφαλείας τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη θέση, για τις φορτίσεις βαρύτητας σώματος και εσωτερικής πίεσης

6.2 Προτάσεις για τωρινή βελτίωση

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν αλλά και την προσωπική μου εργασειακή εμπειρία, κάποιες βελτιωτικές ενέργειες που θα μπορούσαν να γίνουν για την αύξηση της αξιοπιστίας είναι οι ακόλουθες:

- Μείωση συγκολλήσεων στα τμήματα των αγωγών (αν όντως υπάρχουν) και η χρησιμοποίηση καινούργιων κατασκευασμένων κομματιών, ώστε να υπάρχουν όσο τον δυνατόν λιγότερες συγκολλήσεις στους αγωγούς (συγκόλληση=αδύναμο σημείο, πιθανό να αστοχήσει)
- Πραγματοποίηση ανόπτησης σε όλους τους αγωγούς, για την βελτίωση των μηχανικών τους δυνατοτήτων
- Προσθήκη μόνωσης (με υαλοβάμβακα π.χ.) για την λιγότερη απώλεια θερμότητας και μείωση του cracking μέσω της θερμικής διαστολής

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με βάση όλη την παραπάνω ανάλυση, πιστεύουμε πως θα άξιζαν έρευνας τα εξής:

- Προσομοίωση με τις κατάλληλες θέσεις στήριξης των αγωγών, ο κατάλληλος προσανατολισμός αλλά και διαστάσεις ώστε να έχουμε αύξηση του χρόνου ζωής
- Προσομοίωση με την χρήση διαφορετικού υλικού (carbon steel για παράδειγμα) και σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής
- Λύση ίδιου προβλήματος, αλλά δυναμικά
- Προσομοίωση ολόκληρου του δικτύου σωληνώσεων για ρεαλιστικότερα αποτελέσματα

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

[1] Creep damage prediction of the steam pipelines with high temperature and high pressure, Xiao-Chi Niu, Jian-Ming Gong*, Yong Jiang, Jun-Tao Bao,College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009,PR China

[2] Γεωργαντζίνος Κ. Στ., Τμήμα Τεχνολογίας Αεροσκαφών, Σ.Τ.Ε. ΤΕΙ Χαλκίδας, Αντοχή Υλικών, Πείραμα Ερπυσμού, Εργαστηριακή Άσκηση 4η, σελ. 5/16, 2014

[3] Χατζηγεωργίου Αντώνης, ανάπτυξη κώδικα για την υπολογιστική ανάλυση διάδοση ρωγμής σε κατασκευές, Αθήνα 2018, σελ. 13

[4] Γεωργαντζίνος Κ. Στ., Τμήμα Τεχνολογίας Αεροσκαφών, Σ.Τ.Ε. ΤΕΙ Χαλκίδας, Αντοχή Υλικών, Πείραμα Ερπυσμού, Εργαστηριακή Άσκηση 4η, σελ. 10/16, 2014

[5] Σαββάκης Κώστας, ΤΕΙ Κρήτης, τεχνολογία υλικών, 6η διάλεξη, σελ. 42/102, 2018

[6] S. Suresh,1998. Fatigue of Materials, 2nd ed. Cambridge University Press.

[7] N.E. Dowling, 1993. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fractures and Fatigue, Prentice Hall.

[8] Κερμανίδης Α., Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Μηχανική συμπεριφορά υλικών, VIII. Μηχανική συμπεριφορά σε δυναμικές καταπονήσεις, σελ. 171-172, 2018

[9] Φουντουκίδης Ε., ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Χημική Τεχνολογία, Ενότητα 9, Διάβρωση των Μετάλλων, σελ. 6, 2017

[10] Φουντουκίδης Ε., ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Φυσικής Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών, Διάβρωση των μετάλλων, σελ. 14, 2017

[11] Παναγούσης Δ., Μελέτη οξείδωσης σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και διάβρωσης της μεταλλικής επικάλυψης θερμικού ψεκασμού 12C-Al, σελ. 6, 2013

[12] Advanced Structural Analysis EGF316 4. Cylinders Under Pressure, p.1-5

[13] Υπολογιστική ανάλυση τάσεων, Ζησοπούλου Ασημίνα, Αθήνα 2017, σελ. 13

[14] S. Denis, E. Gautier, A. Simon & G. Beck, 1985. Stress–phase-transformation interactions – basic principles, modelling, and calculation of internal stresses, Materials Science and Technology, vol. 1, pp. 805-814.

[15] Dr Ragbe M. Abdusslam, Stresses Analysis of Petroleum Pipe Finite Element Under Internal Pressure, p. 33-35, 2016

[16] Senthamaraaikannan P., Thin Cylinders, p. 19-22

[17] K.N. Smith, P. Watson and T.H. Topper , 1970. A stress-strain function for the fatigue of metals. Journal of Materials, vol.4: 767-778.

[18] Τσαμασφύρος Γ., Θεοτόκογλου Ε., Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων 1, σελ. 178, 2015

[19] Τσαμασφύρος Γ., Θεοτόκογλου Ε., Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων 1, σελ. 180, 2015
[20] Τσαμασφύρος Γ., Θεοτόκογλου Ε., Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων 1, σελ. 182-185, 2015