

**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

**Διπλωματική Εργασία**

**Νίκου Λάππα**

**2010010078**

**Θέμα:** Θερμομηχανική ανάλυση κοχλιωτού συνδέσμου μεταλλικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

**Χανιά 2016**

**Η παρόν εργασία ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2016 στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του κ. Σταυρουλάκη.**

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες των ευχαριστιών στον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο για την υπόδειξη του θέματος, την εμπιστοσύνη που έδειξε εξ' αρχής, τη συνεχή υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια της εργασίας. Η παρουσία του και η μεγάλη επιστημονική του εμπειρία υπήρξαν καταλυτικές για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης καθώς και για τη διόρθωση παραλήψεων και την επίλυση αποριών από μέρους μου.

Όπως επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τον κ. Δροσόπουλο Γεώργιο, Ερευνητικό Συνεργάτη του εργαστηρίου Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης, για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε καθώς και για την επιστημονική και διαπροσωπική στήριξη που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της διπλωματικής εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1	Πληροφορίες σχετικά με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων .....	6
1.2	Σκοπός εργασίας και λίγα λόγια για αυτή.....	6
1.3	Θεμελιώδεις έννοιες και βασικοί ορισμοί.....	7
1.3.1	Κριτήριο Von Mises .....	7
1.3.2	Θερμική αγωγιμότητα.....	9
1.3.3	Θερμική διαστολή.....	10
1.3.4	Μέτρο Young.....	11
1.3.5	Μηχανική Διαρροή .....	11
1.3.6	Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης.....	11
1.4	Θερμομηχανική ανάλυση.....	12
1.4.1	Γενικές πληροφορίες.....	12
1.4.2	Μέθοδος επίλυσης της ανάλυσης μας.....	13
1.4.3	Λόγοι που επιλέξαμε την διερεύνηση των Θερμικών – Μηχανικών φορτίσεων.....	14
2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	15
2.1	Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου στο abaqus.....	15
2.2	Μηχανολογικό σχέδιο μοντέλου και εικόνες από το πείραμα που έγινε στο πανεπιστήμιο του J.U.S.T. ....	20
2.2.1	Μηχανολογικό σχέδιο .....	20
2.2.2	Πραγματικές εικόνες φορέα.....	21
2.3	Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης μετά την διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (mesh) 22	
3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΛΗΦΘΕΙ ΥΠ’ ΟΨΙΝ Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ .....	26
3.1	Μοντελοποίηση θερμικού προβλήματος .....	27
3.1.1	Περιγραφή θερμικής ανάλυσης.....	27
3.1.2	Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης θερμικού προβλήματος.....	29
3.2	Μοντελοποίηση μηχανικού προβλήματος .....	32
3.2.1	Περιγραφή μηχανικής ανάλυσης .....	32
3.2.2	Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης μηχανικού προβλήματος.....	35
3.3	Μοντελοποίηση θερμομηχανικού προβλήματος .....	37
3.3.1	Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης ώστε της μηχανικής ανάλυσης ώστε να συνδυαστεί με την θερμική .....	37



4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΛΗΦΘΕΙ ΥΠ' ΟΨΙΝ Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ .....	39
4.1	Παρουσίαση καθαρά θερμικών αποτελεσμάτων .....	39
4.2	Παρουσίαση καθαρά μηχανικών αποτελεσμάτων .....	43
4.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων της διαδοχικά συνδυασμένης θερμικής – μηχανικής ανάλυσης..	49
4.4	Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.....	55
5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ .....	57
5.1	Περιγραφή και βασικά στοιχεία μοντελοποίησης.....	57
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ .....	61
6.1	Παρουσίαση καθαρά θερμικών και μηχανικών αποτελεσμάτων.....	61
6.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων της διαδοχικά συνδυασμένης θερμικής – μηχανικής ανάλυσης..	61
6.3	Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.....	68
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	69
7.1	Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης .....	69
7.2	Συμπεριφορά ένωσης στύλου – δοκού.....	70
7.3	Γενικά συμπεράσματα .....	70
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	71

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια μέθοδος με την οποία μπορεί να γίνει πρόβλεψη για το πώς αντιδρά ένα υλικό σε πραγματικές συνθήκες όπως η δόνηση, η θερμότητα, η ροή υγρού και άλλα φυσικά φαινόμενα. Η εφαρμογή της μεθόδου εκτείνεται σε μεγάλο εύρος όπως η παραμόρφωση και η ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, σε κτίρια και γενικότερα κατασκευές, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας και υγρών [1].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η κυρίαρχη τεχνική διακριτοποίησης στη κατασκευαστική μηχανική. Η βασική ιδέα πίσω από την μέθοδο είναι η υποδιαίρεση του μαθηματικού μοντέλου σε απλά γεωμετρικά (μη επικαλυπτόμενα) σχήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες των υλικών καθώς και οι διέπουσες σχέσεις που χρειάζονται για την ανάλυση θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων.

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΛΙΓΑ ΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΑΥΤΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς μιας μεταλλικής κατασκευής από χάλυβα, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο περιβάλλον διεπαφής ABAQUS, τόσο σε θερμικό όσο και σε μηχανικό επίπεδο. Βασικός σκοπός είναι η παρουσίαση της συμπεριφοράς του μοντέλου σε συνθήκες φόρτισης, που προέρχονται ενδεχομένως από κάποια σεισμική δραστηριότητα, με παράλληλη επενέργεια θερμότητας από πιθανή φωτιά που έχει ξεσπάσει [2]. Θα διερευνηθεί αρχικά, η επίδραση της φωτιάς στην αντοχή της κατασκευής οδηγώντας ενδεχομένως σε πρόωρη αστοχία και δεύτερον, η συμπεριφορά του φορέα στην περιοχή της σύνδεσης.

Θα εξετάσουμε δύο σενάρια, στο πρώτο σενάριο, θα γίνει ανάλυση του μοντέλου χωρίς να ληφθεί υπόψη η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων από την αύξηση της θερμοκρασίας. Αντίθετα, στο δεύτερο σενάριο θα συμπεριληφθεί η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων από την αύξηση της θερμοκρασίας οδηγώντας σε μία σειρά από αλλαγές στην ανάλυση μας, όπως η τιμή του μέτρου ελαστικότητας και η τάση διαρροής για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η συγκεκριμένη διπλωματική βασίζεται σε αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση που διεξήλθε στο κατασκευαστικό εργαστήριο του Jordan University of Science and Technology [3] και η δομή της μεταλλικής κατασκευής που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η ίδια. Είναι μία μεταλλική κατασκευή όπου ένας στύλος συνδέεται με μία δοκό με την χρήση μεταλλικών κοχλιών. Σε ένα καθορισμένο σημείο κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού ασκείται κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο [4]. Για την επέκταση της πειραματικής μελέτης προσθέσαμε θερμικό

φορτίο σε συγκεκριμένες επιφάνειες της δοκού και του στύλου ορίζοντας παράλληλα σταθερές θερμοκρασίες στην βάση και στο ελεύθερο άκρο της κατασκευής.

Στην μοντελοποίηση του μηχανικού μέρους θεωρήθηκαν ελαστοπλαστικές ιδιότητες των υλικών και μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη γραμμικότητα) και στην μοντελοποίηση του Θερμικού μέρους θερμικές ιδιότητες των υλικών [5].

Για την δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα χρειάζεται να εισάγουμε τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (της δοκού, του στύλου, των κάθετων επιφανειών και των κοχλιών). Οι τιμές των ιδιοτήτων που αναφέρθηκαν παραπάνω προέρχονται από την πειραματική εργασία που διεξήλθε πέρα από τα θερμικά χαρακτηριστικά και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών όπου διερευνώνται στην εργασία μας.

Θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της θερμομηχανικής μελέτης χωρίς η θερμοκρασία να επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής με την θερμομηχανική μελέτη που η θερμοκρασία επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Η σύγκριση αυτή, θα είναι ως προς την μορφή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης, ως προς την διαρροή στην κατασκευή, ως προς τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας (άνοιγμα αυτής) και προς την μορφή του φορέα κατά την αστοχία (πλαστική παραμόρφωση).

## 1.3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

### 1.3.1 Κριτήριο Von Mises

Το κριτήριο αυτό βασίζεται στον προσδιορισμό της παραμορφωμένης ενέργειας σε ένα δεδομένο υλικό, δηλαδή, της ενέργειας που συνδέεται με τις αλλαγές στο σχήμα του εν λόγω υλικού. Η τάση Von Mises χρησιμοποιείται ως κριτήριο στον προσδιορισμό της έναρξης της αστοχίας σε ελατά υλικά [1]. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, ένα δεδομένο δομικό υλικό είναι ασφαλές όσο η τάση Von Mises  $\sigma_{vm}$  είναι μικρότερη από την τάση διαρροής  $\sigma_y$  του υλικού. Σε μορφή ανισότητας το κριτήριο μπορεί να τεθεί ως:

$$\sigma_{vm} \leq \sigma_y$$

Η τάση Von Mises δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(I_1^2 - 3I_2)}$$

Όπου  $I_1$  και  $I_2$  είναι οι δύο πρώτες μεταβλητές του τανυστή τάσης. Για τη γενική κατάσταση της τάσης, η οποία δίνεται από την παραπάνω εξίσωση οι  $I_1$  και  $I_2$  δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2$$

Οι δύο μεταβλητές μπορούν να γραφούν συναρτήσει των κυρίων τάσεων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$ , ως:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_1 \cdot \sigma_3 + \sigma_2 \cdot \sigma_3$$

Είναι εύκολο να ελεγχθεί ότι η τάση Von Mises μπορεί πλέον να εκφραστεί από τον τύπο:

$$\sigma_{vm} = 1/\sqrt{2} \cdot (\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2})$$

Για την κατάσταση τη επίπεδης τάσης έχουμε:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y$$

$$I_2 = \sigma_x \cdot \sigma_y - \tau_{xy}^2$$

Και για την επίπεδη παραμόρφωση έχουμε:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \sigma_z - \tau_{xy}^2$$

$$\text{Όπου } \sigma_z = \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)$$

### 1.3.2 Θερμική αγωγιμότητα

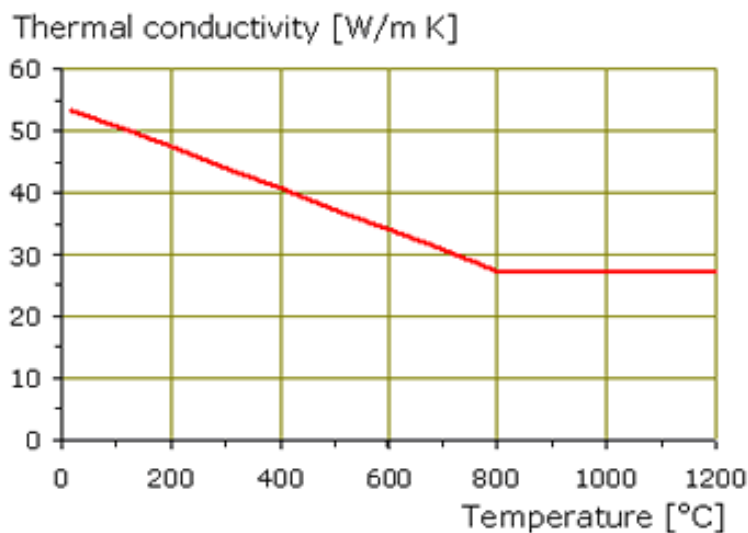
Ως θερμική αγωγιμότητα ορίζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Η Θερμική αγωγιμότητα μετριέται με τον "συντελεστή αγωγιμότητας" (συμβολίζεται συνήθως με  $k$ ) ο οποίος διαφέρει από σώμα σε σώμα.

Ανάλογα με την ευκολία της διάδοσης της θερμότητας τα σώματα (υλικά) διακρίνονται σε ευθερμαγωγά, ή καλοί αγωγοί θερμότητας, (όπως π.χ. τα μέταλλα) και σε δυσθερμαγωγά, ή κακοί αγωγοί θερμότητας, ή κατ' επέκταση θερμομονωτικά, (όπως π.χ. το ξύλο, ο αμίαντος, τα υγρά και τα αέρια).

Σύμφωνα με το νόμο αγωγής θερμότητας ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας ή αλλιώς ροή θερμότητας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H = k \cdot A \cdot (\Delta T / \Delta x)$$

όπου  $k$  η θερμική αγωγιμότητα,  $A$  το εμβαδό της διατομής δια μέσω της οποίας έχουμε αγωγή και  $\Delta T / \Delta x$  η μεταβολή της θερμοκρασίας σε απόσταση  $\Delta x$  κατά τη φορά αγωγής.



Εικόνα 1.1: Παρουσίαση της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με την θερμοκρασία ανθρακούχου χάλυβα

### 1.3.3 Θερμική διαστολή

Η θερμική διαστολή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνονται οι διαστάσεις ενός σώματος καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του [6]. Γενικά η διαστολή αφορά όλες τις διαστάσεις του σώματος, αλλά μπορεί η αύξηση μιας ή δύο διαστάσεων να είναι αμελητέες. Έτσι, υπάρχουν τρία είδη θερμικών διαστολών:

- Γραμμική διαστολή, η οποία παρατηρείται σε μακρόστενα αντικείμενα και στην οποία αυξάνεται το μήκος τους, όπως π.χ. σε εναέρια καλώδια, συρματόσχοινα, αντηρίδες κ.λπ.. Βρίσκει εφαρμογή σε διμεταλλικά ελάσματα, θερμομέτρα και γενικά συσκευές που σχετίζονται με τη μηχανική και τη θερμοκρασία.
- Διαστολή εμβαδού, ή επιφανειακή, ή τετραγωνική, η οποία παρατηρείται σε επιφάνειες και στην οποία αυξάνεται το εμβαδόν τους, όπως π.χ. σε μεταλλικά σκέπαστρα, ψιλές λαμαρίνες κ.λπ..
- Διαστολή όγκου, ή κυβική διαστολή' όπου όλες οι διαστάσεις του αντικειμένου αυξάνονται σημαντικά.

Διαστολή παρατηρείται σε όλα τα σώματα, στερεά υγρά και αέρια, όταν θερμανθούν. Λόγω της θερμοκρασίας τα σωματίδια (άτομα) επιταχύνονται και απομακρύνονται με συνέπεια να αυξάνεται ο όγκος του σώματος. Το ποσοστό διαστολής του σώματος εξαρτάται από την θερμότητα που του προσφέρεται, το είδος του υλικού και τον όγκο του σώματος.

Τα άτομα έχουν μία μέση απόσταση ισορροπίας μεταξύ τους, η οποία εξαρτάται από την ταλάντωσή τους, η οποία εξαρτάται από τη θερμική ενέργεια. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται θερμική ενέργεια του σώματος, δηλαδή αυξάνεται η μέση ενέργεια του κάθε σωματιδίου. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται το πλάτος της ταλάντωσής τους, άρα αυξάνεται και η μέση απόσταση ισορροπίας μεταξύ των δομικών σωματιδίων του σώματος.

Ειδικότερα, η διαστολή οφείλεται στο γεγονός ότι η καμπύλη του δυναμικού του κρυσταλλικού πλέγματος μέσα σε ένα στερεό σώμα δεν είναι παραβολική. Από φυσικής άποψης, ενώ οι δυνάμεις ανάμεσα στα άτομα ακολουθούν το νόμο του Χουκ κοντά στη θέση ισορροπίας, καθώς προσφέρεται θερμότητα και τα άτομα απομακρύνονται από την αρχική τους θέση, το σύστημα συμπεριφέρεται σαν αναρμονικός ταλαντωτής. Έτσι, η "μέση θέση ισορροπίας" των ατόμων μετατοπίζεται, κάτι που σημαίνει αύξηση στον όγκο ενός σώματος.

### 1.3.4 Μέτρο Young

Το μέτρο του Young, όπως επίσης είναι γνωστό και ως μέτρο ελαστικότητας, είναι μία μηχανική ιδιότητα των γραμμικών ελαστικών στερεών υλικών και είναι αυτό που καθορίζει την σχέση μεταξύ της φόρτισης και της μετατόπισης σε ένα υλικό. Ένα στερεό σώμα παραμορφώνεται όταν ένα φορτίο εφαρμόζεται σε αυτό. Εάν το υλικό είναι ελαστικό, το σώμα επιστρέφει στο αρχικό σχήμα του αφού αφαιρεθεί το φορτίο. Το φορτίο ονομάζεται γραμμικό αν ο λόγος της φόρτισης προς την μετατόπιση παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της φόρτισης. Εάν ένα υλικό είναι απόλυτα άκαμπτο τότε η τιμή του μέτρου Young είναι άπειρη λόγω του άπειρου φορτίου που χρειάζεται ώστε να παραμορφωθεί. Τέλος, αν ένα υλικό έχει πολύ υψηλό μέτρο Young τότε μπορεί να θεωρηθεί και ως άκαμπτο.

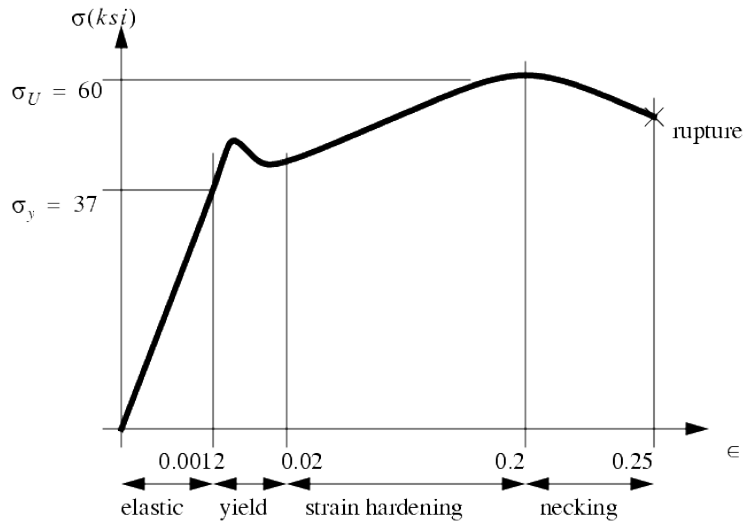
### 1.3.5 Μηχανική Διαρροή

Το σημείο διαρροής ενός υλικού είναι η ιδιότητα που ορίζεται ως η τάση στην οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Πριν από το σημείο διαρροής το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά και θα επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα όταν η εφαρμοζόμενη πίεση αφαιρεθεί. Μόλις περάσει αυτό το σημείο κάποιο κομμάτι της παραμόρφωσης παραμένει μόνιμο και μη αναστρέψιμο. Το σημείο διαρροής είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα του υλικού όπου λαμβάνεται υπόψιν για πολλές βασικές τεχνικές αξιοποίησης υλικών όπως μεταξύ άλλων σφυρηλάτηση, έλαση και διάτμηση.

### 1.3.6 Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης

Η σχέση μεταξύ του φορτίου και της μετατόπισης που παρουσιάζει ένα υλικό είναι γνωστή ως καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του συγκεκριμένου υλικού. Είναι μοναδική για κάθε υλικό και μπορεί να καταγραφεί από την ποσότητα της παραμόρφωσης (μετατόπισης) σε διακριτά διαστήματα όπου ασκείται φόρτιση.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ότι ένα υλικό παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι το σημείο διαρροής. Ύστερα τα φαινόμενα πλαστικής μετατόπισης γίνονται κυρίαρχά άρα και χρειάζεται μεγαλύτερο φορτίο για να συνεχίσει η παραμόρφωση. Τέλος, αφού φτάσει στο μέγιστο σημείο παραμόρφωσης ξεκινάει ο λαιμός και το εμβάδόν διατομής ελαττώνεται με ταχύ ρυθμό μέχρι το σημείο που το υλικό σπάει.



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης ανθρακούχου χάλυβα

## 1.4 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 1.4.1 Γενικές πληροφορίες

Η θερμομηχανική ανάλυση αναφέρεται στην επίδραση που θα έχει στη μηχανική (στατική) συμπεριφορά των φορέων η αύξηση της θερμοκρασίας αυτών, παραδείγματος χάριν λόγω εκδήλωσης πυρκαγιάς. Βασικό στόχο αποτελεί η εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων των φορέων μετά την εκδήλωση της φωτιάς έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας αυτών σε παρόμοιες καταστάσεις. Συνεπώς κατά την διερεύνηση του φαινομένου διακρίνει κανείς τρεις κατηγορίες μελέτης: α) Μηχανική ανάλυση, β) Θερμική ανάλυση και γ) Θερμομηχανική ανάλυση η οποία και αποτελεί συνδυασμό των α και β.

Η Θερμομηχανική ανάλυση σύμφωνα με τις δυνατότητες που μας δίνονται από το λογισμικό της ανάλυσης μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους.

**A) Uncoupled heat transfer analysis (Αποσυνδεδεμένη ανάλυση μεταφοράς ενέργειας)**

**B) Sequentially coupled thermal – stress analysis (Διαδοχικά συνδεδεμένη θερμική – μηχανική ανάλυση)**

**C) Fully coupled thermal – stress analysis (Πλήρως συνδεδεμένη θερμική – μηχανική ανάλυση)**



Επεξηγώντας:

**A) Uncoupled heat transfer analysis:** Αποτελεί ουσιαστικά την καθαρά θερμική ανάλυση που προαναφέραμε. Ουσιαστικά επιλύει το πρόβλημα μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο αποσκοπεί μόνο στην μελέτη της μετάδοσης της θερμότητας και διάχυσης της θερμοκρασίας σε έναν φορέα, χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν τα κλασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του φορέα (μέτρο ελαστικότητας, νόμος διαρροής – πλαστικοποίησης υλικού). Έτσι ο φορέας μορφώνεται αποκλειστικά «σε όρους θερμοκρασίας»: θερμομηχανικές ιδιότητες υλικού, θερμοκρασιακό φορτίο, θερμοκρασιακές συνοριακές συνθήκες, δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων θερμοκρασίας, θερμομηχανική επίλυση.

**B) Sequentially coupled thermal – stress analysis:** Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η επίδραση της θερμοκρασιακής μεταβολής στη μηχανική συμπεριφορά του φορέα. Για να γίνει το παραπάνω πρέπει προηγουμένως να έχει ολοκληρωθεί η θερμική επίλυση του προβλήματος (uncoupled heat transfer analysis) και στην συνέχεια με χρήση της θερμικής επίλυσης να υπολογιστεί η επίδραση αυτής στο μηχανικό πρόβλημα (εισαγωγή αποτελεσμάτων θερμικής επίλυσης στο μηχανικό πρόβλημα). Σημειώνεται ότι εδώ δεν περιλαμβάνεται το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η περίπτωση επίδρασης των μηχανικών χαρακτηριστικών στην θερμοκρασία (π.χ. ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εξαιτίας δυνάμεων τριβής σε σύστημα πέδησης αυτοκινήτων, όπου η επαφή – τριβή των τμημάτων θα αυξήσει την θερμοκρασία).

**C) Fully coupled thermal – stress analysis:** Στην τελευταία αυτή περίπτωση περιλαμβάνεται επιπλέον και το αντίστροφο πρόβλημα το οποίο δεν συμπεριλαμβανόταν στην sequentially coupled thermal – stress analysis, δηλαδή μελετάται η ταυτόχρονη και αμφίδρομη επίδραση των μηχανικών στα θερμικά χαρακτηριστικά. Η χρήση αυτής της μεθόδου γίνεται όταν έχουμε ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανικής και θερμικής επίλυσης καθώς επίσης και σε περιπτώσεις επαναληπτικών θερμικών – μηχανικών αλληλεπιδράσεων [4].

#### 1.4.2 Μέθοδος επίλυσης της ανάλυσης μας

Στην παρούσα εργασία επιλέξαμε να κάνουμε χρήση της δεύτερης μεθόδου (Sequentially coupled thermal – stress analysis) για την επίλυση της. Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο δημιουργήσαμε μία καθαρά θερμική ανάλυση για το μοντέλο όπου ύστερα την εισήγαμε στο πρόβλημα της μηχανικής ανάλυσης σαν predefined field (προκαθορισμένο πεδίο) ώστε να εξάγουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

### 1.4.3 Λόγοι που επιλέξαμε την διερεύνηση των Θερμικών – Μηχανικών φορτίσεων

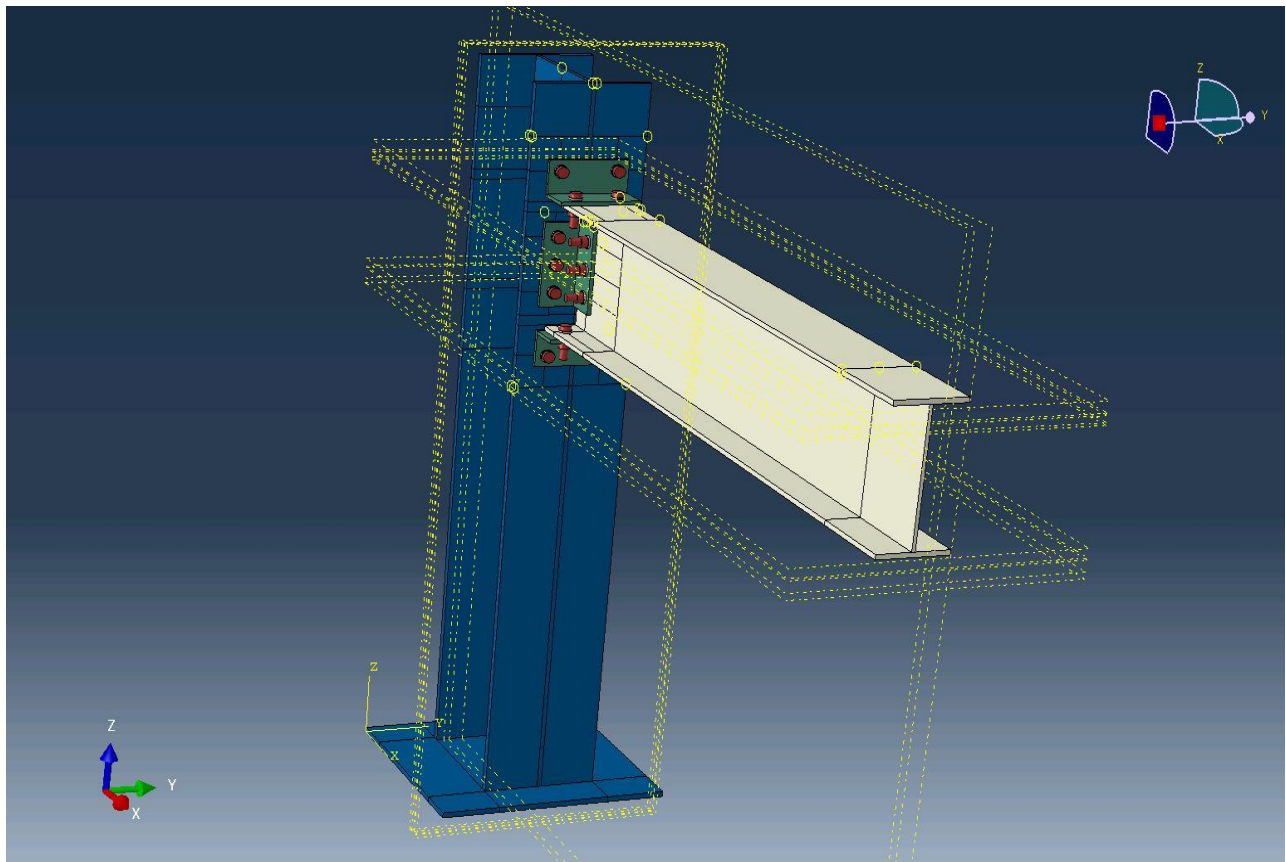
Η φωτιά η οποία στην δική μας μελέτη εμφανίζεται με την μορφή θερμικών φορτίων και αυξημένων θερμοκρασιών μπορεί να προκληθεί από πολλούς λόγους αλλά όπως επιβεβαιώνει και η παγκόσμια εμπειρία και έρευνες οι οποίες έχουν γίνει, ο σεισμός αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους εκδήλωσης της. Επίσης, αν αναλογιστεί κανείς ότι η φωτιά όταν ακολουθεί μετά από σεισμική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση στην διάρκεια ζωής και στις ιδιότητες των μεταλλικών κατασκευών λειτουργώντας σαν πρόσθετη καταπόνηση στην ήδη καταστροφική επενέργεια που έχει ο σεισμός, καθίσταται μια αρκετά σημαντική απειλή για τα μεταλλικά κτίρια. Αφετέρου ακόμη και να μην προκληθεί πυρκαγιά αμέσως μετά από κάποιο σεισμό, η πιθανότητα για μετέπειτα εκδήλωσή της θα πρέπει να ληφθεί σημαντικά στα υπ' όψιν καθώς οι ζημιές που προκαλούνται στην κατασκευή μας από τον σεισμό την κάνουν αρκετά πιο ευάλωτη σε τέτοια φαινόμενα. Το να εναποθέσουμε τις ελπίδες μας σε πυροσβεστικά συστήματα και σε άλλων ειδών τρόπους καταπολέμησης της φωτιάς δεν αποτελεί και την πλέον ενδεδειγμένη λύση καθώς τέτοιου είδους συστήματα εξαρτώνται από το πολύ ευάλωτο σε σεισμικές δραστηριότητες υδραυλικό και ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι λοιπόν σύμφωνα και με τις οδηγίες ευρωπαϊκών οργανισμών (European Commission) οι μεταλλικές κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε περίπτωση που ξεσπάσει φωτιά, η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής μας να μπορεί να διατηρηθεί για μια συγκεκριμένη χρονικά περίοδο, η δημιουργία και η εξάπλωση της φωτιάς και του καπνού μέσα στην κατασκευή μας να είναι περιορισμένη έτσι ώστε το εργαζόμενο προσωπικό που βρίσκεται εντός του κτιρίου να έχει τον απαιτούμενο χρόνο για να απομακρυνθεί από αυτό με ασφάλεια η ακόμη και να υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος για διάσωσή τους από κάποια συνεργεία διάσωσης.

## 2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

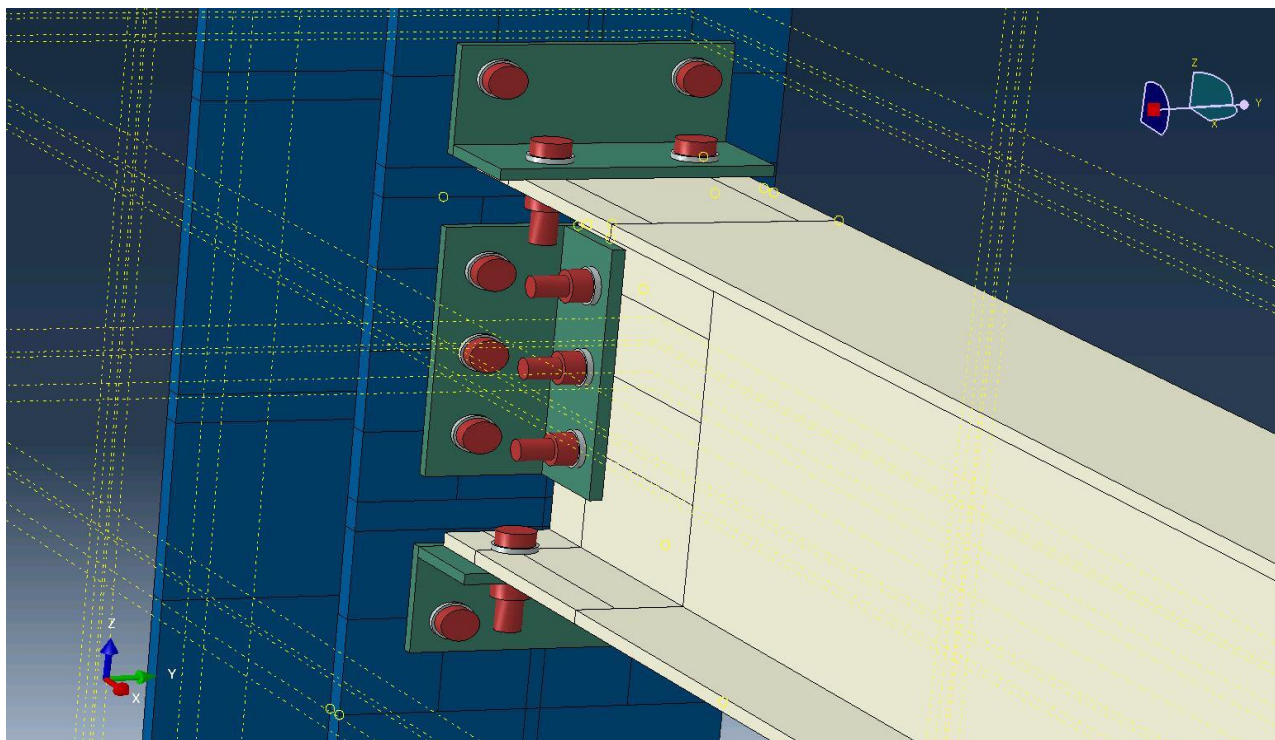
Ο φορέας που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση μας αποτελείται στο σύνολο του από 57 κομμάτια. Πιο συγκεκριμένα, αυτά είναι η οριζόντια δοκός, ο κάθετος στύλος, οι 17 κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση της δοκού με τον στύλο, οι 34 ροδέλες για να στερεωθούν οι κοχλίες και οι 4 φλάντζες που χρησιμοποιήθηκαν για την στήριξη της δοκού. Τα παραπάνω στοιχεία απεικονίζονται σε τρισδιάστατη μορφή στην συνέχεια.

### 2.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ABAQUS

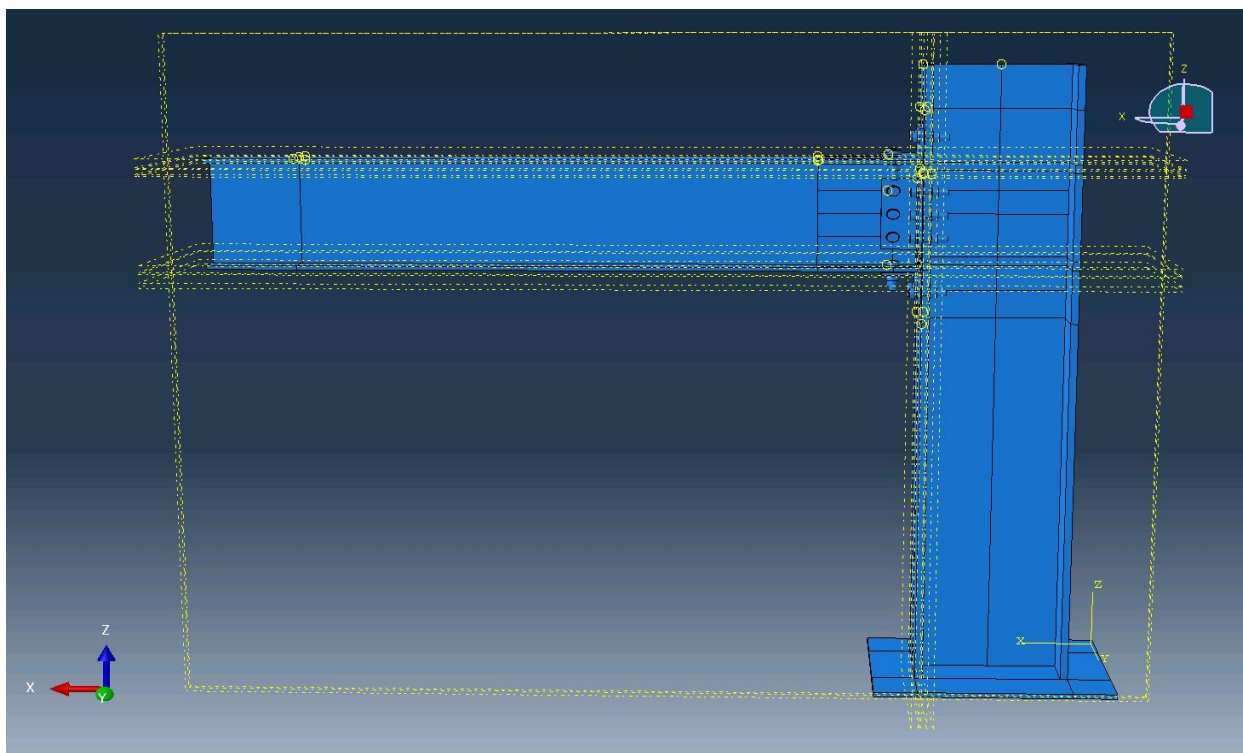
Τελική μορφή διάταξης και επιμέρους κομμάτια:



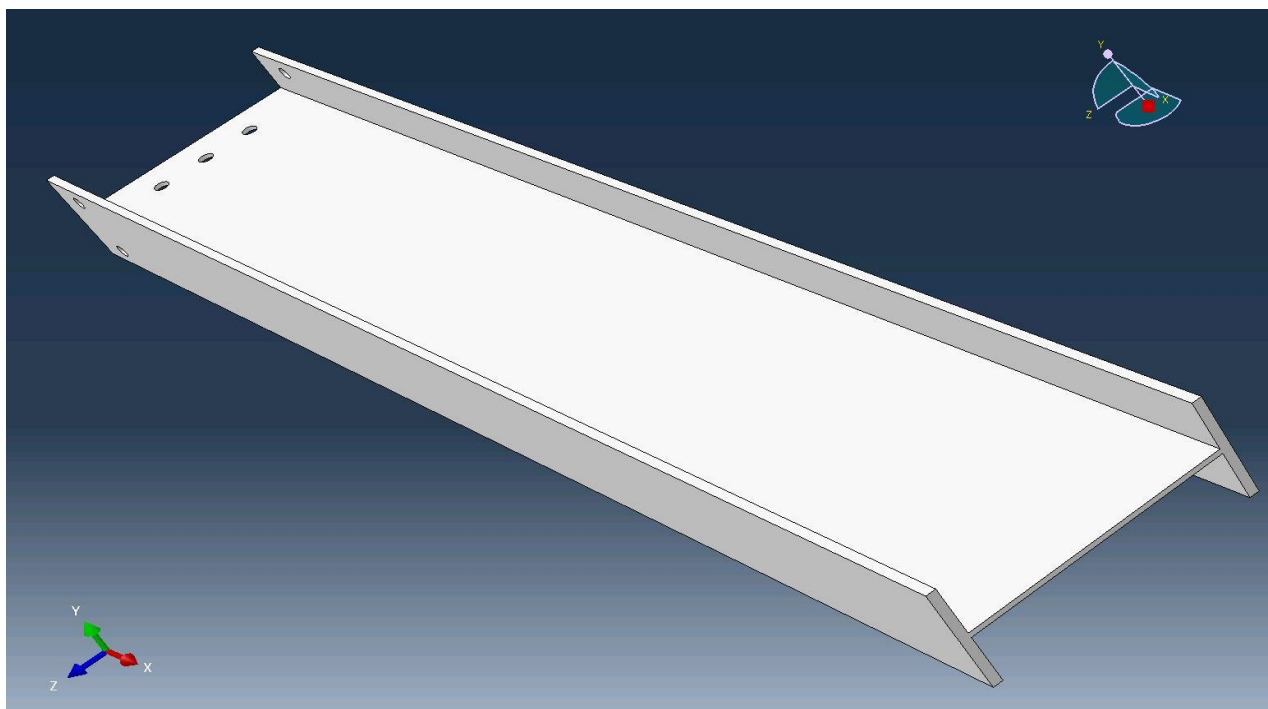
Εικόνα 2.1: Συναρμολογημένη διάταξη με χρωματισμό των τμημάτων (sections) που έχουν ορισθεί



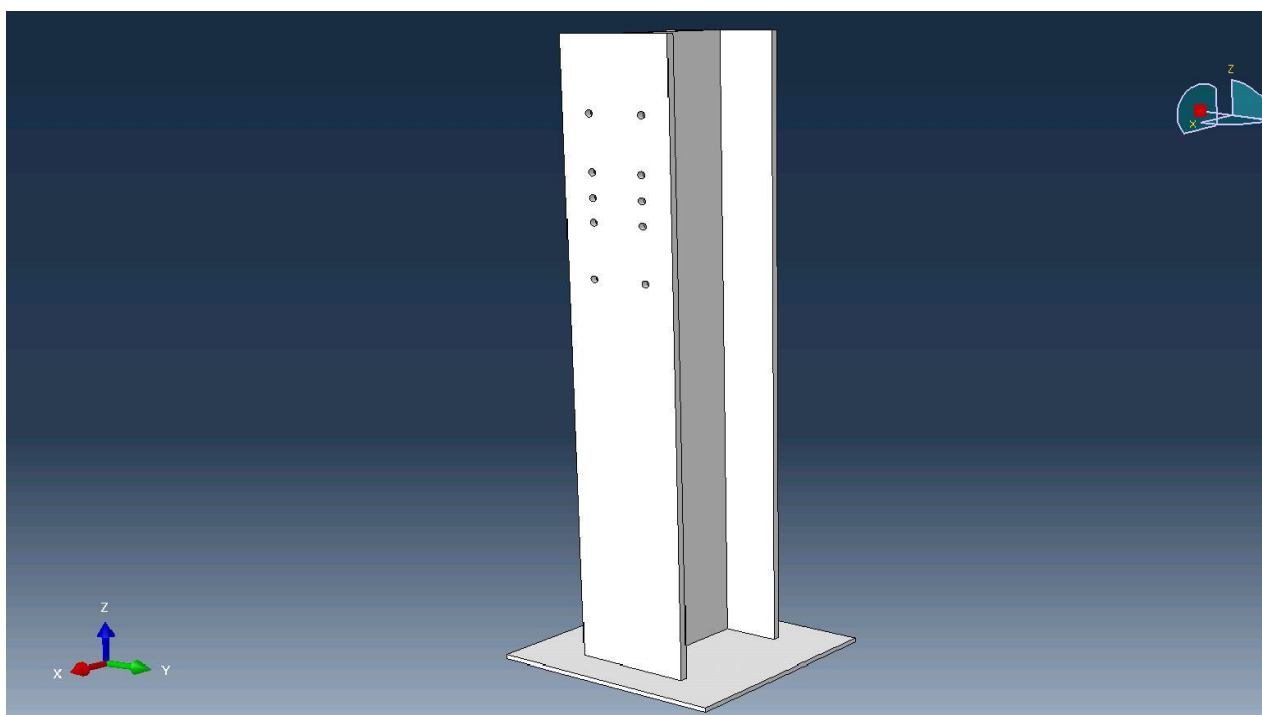
Εικόνα 2.2: Κοντινή προβολή ένωσης δοκού - στήλης με χρήση κοχλιών με χρωματισμό των τμημάτων που έχουν ορισθεί



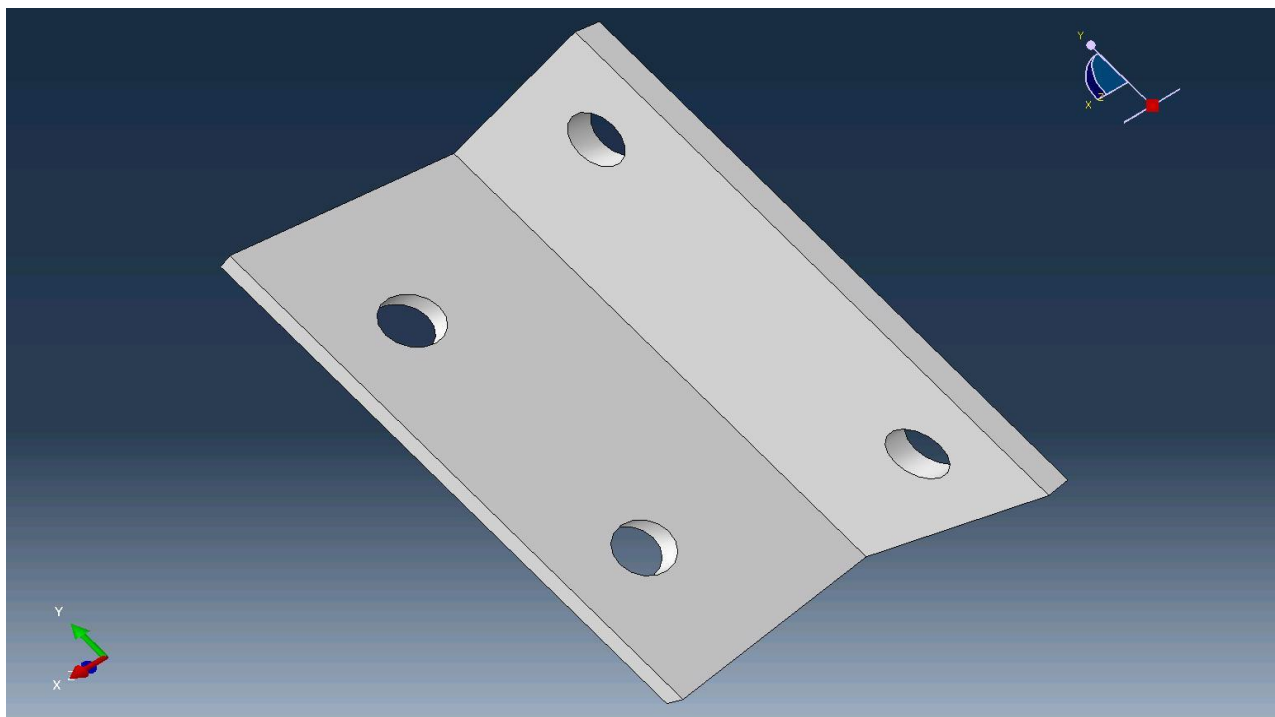
Εικόνα 2.3: Πλαϊνή προβολή συναρμολογημένης διάταξης



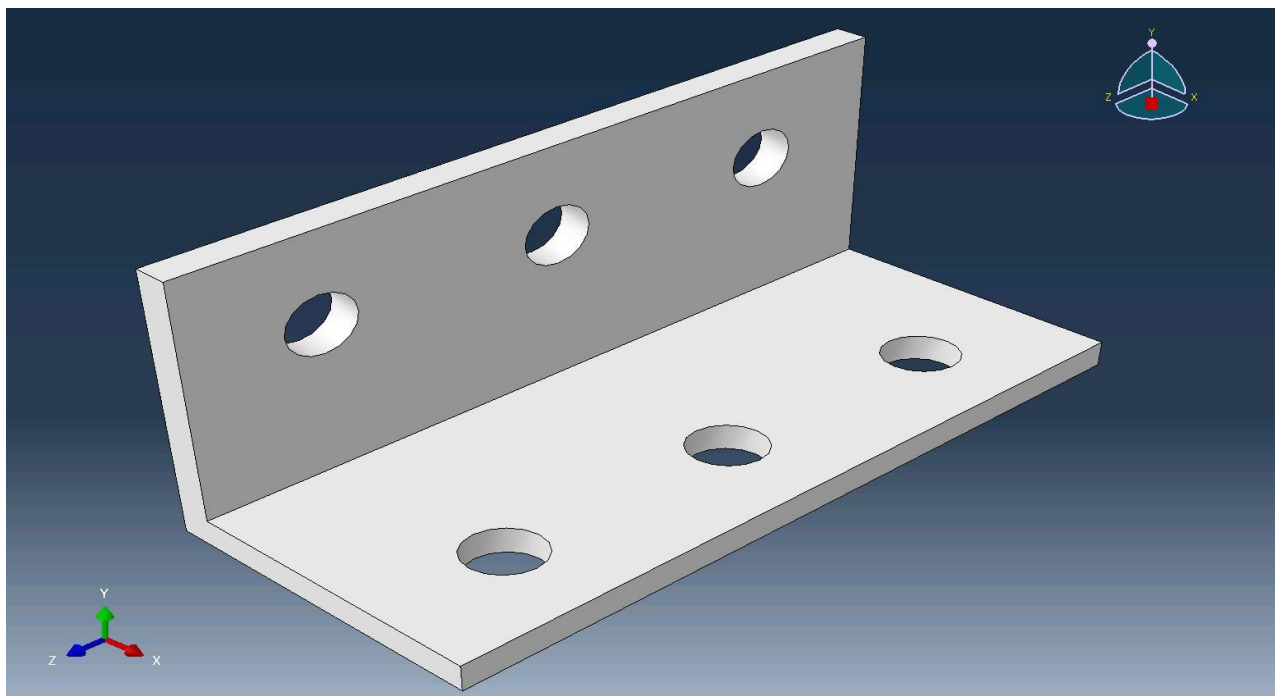
Εικόνα 2.4: Οριζόντια δοκός διάταξης



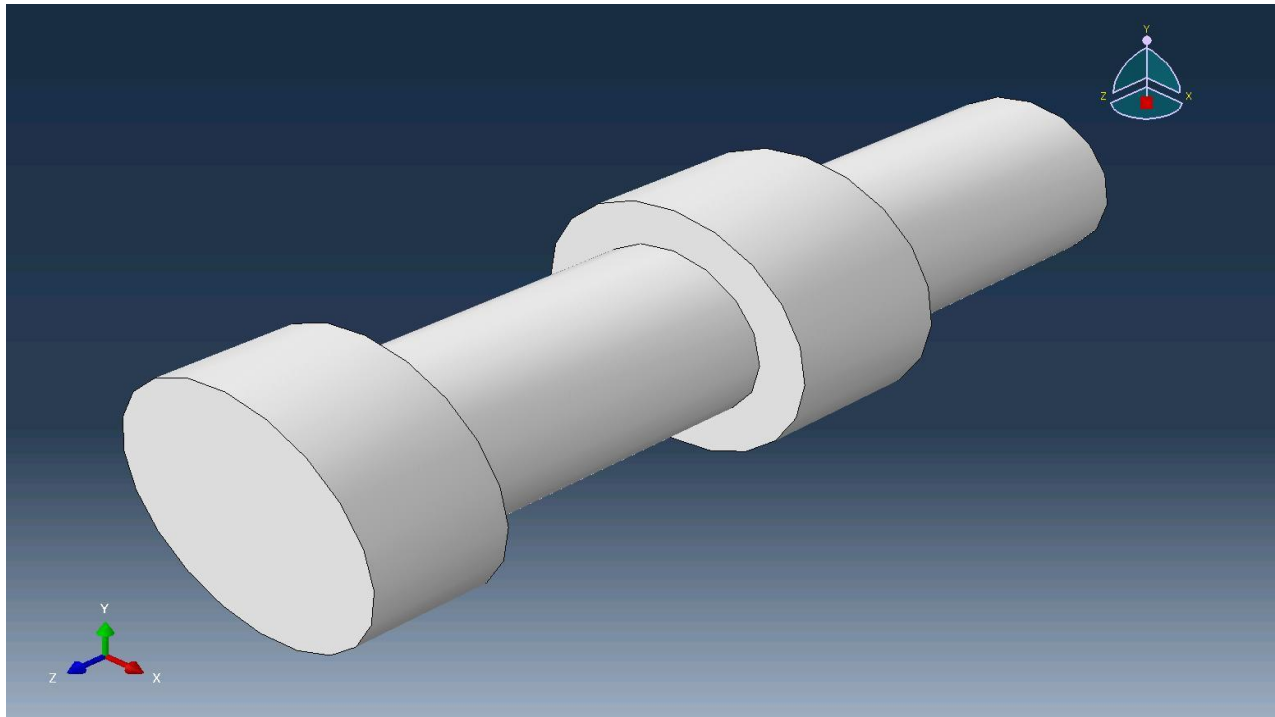
Εικόνα 2.5: Προβολή κάθετου στύλου διάταξης



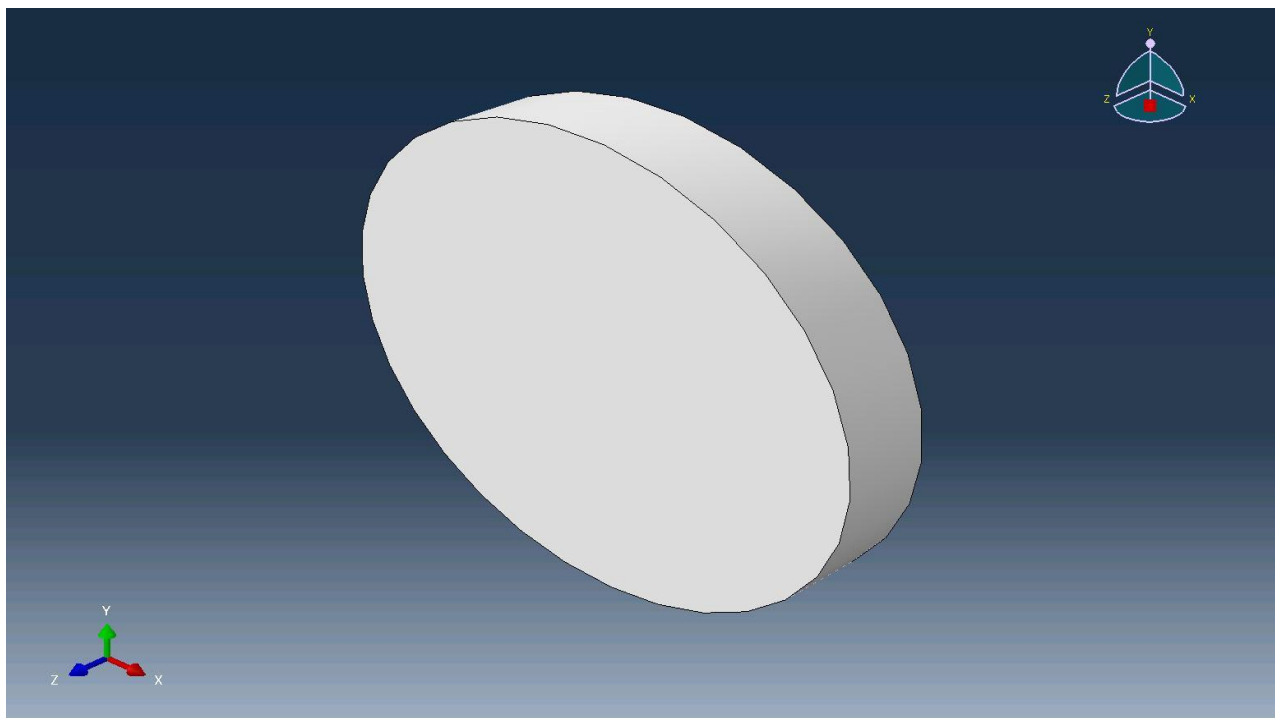
Εικόνα 2.6: Προβολή πάνω και κάτω φλάντζας για την στήριξη της δοκού



Εικόνα 2.7: Προβολή πλαϊνών κάθετων επιφανειών για την στήριξη της δοκού



Εικόνα 2.8: Προβολή κοχλία διάταξης

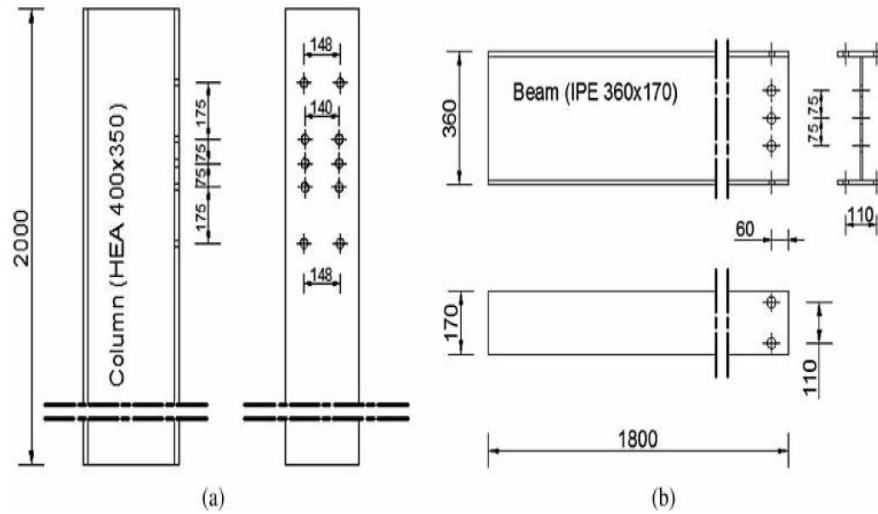


Εικόνα 2.9: Προβολή ροδέλας διάταξης

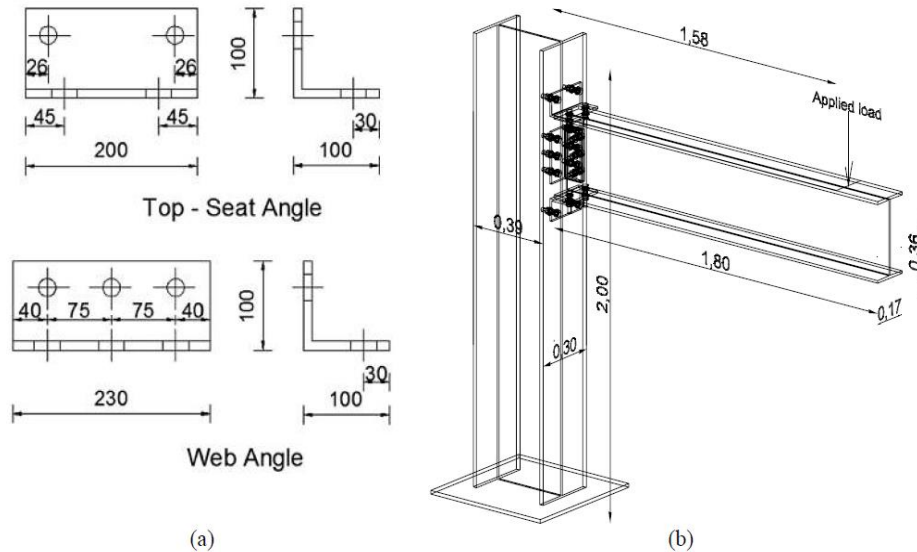


## 2.2 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΟΥ ΕΓΙΝΕ ΣΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΟΥ J.U.S.T.

### 2.2.1 Μηχανολογικό σχέδιο



Εικόνα 2.10: Γεωμετρία της ένωσης (mm): (a) στήλης, (b) δοκού



Εικόνα 2.11: Γεωμετρία της ένωσης (mm): (a) κάθετης επιφάνειας, (b) ολικής γεωμετρίας και τοποθέτησης του εξωτερικού φορτίου



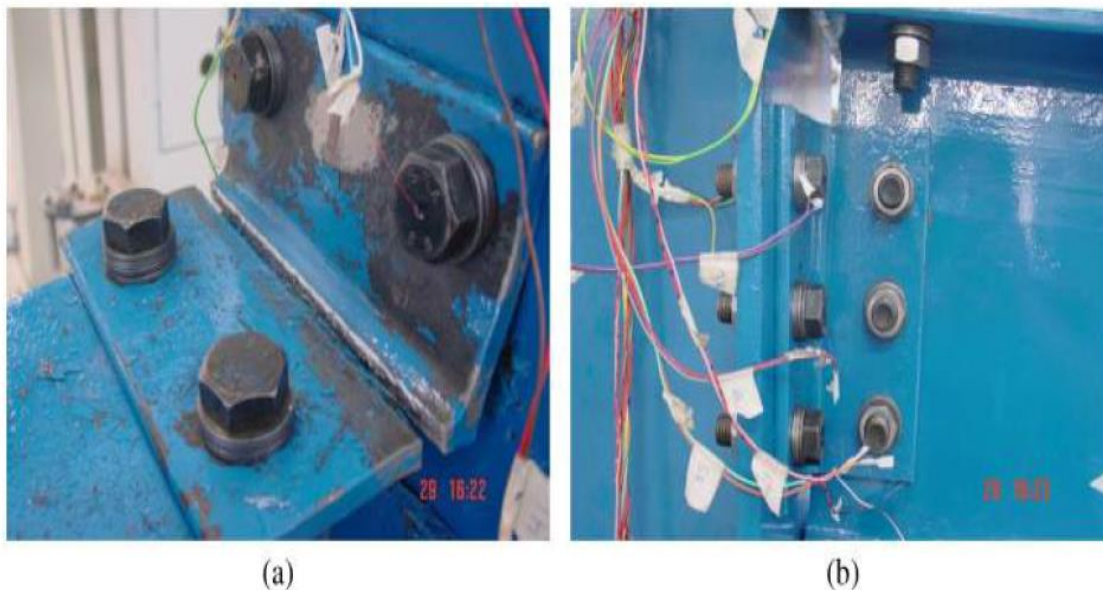
## 2.2.2 Πραγματικές εικόνες φορέα



Εικόνα 2.12: Πλήρης διάταξη κατά την διάρκεια δοκιμών



Εικόνα 2.13: Προβολή διάταξης στην ένωση κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου

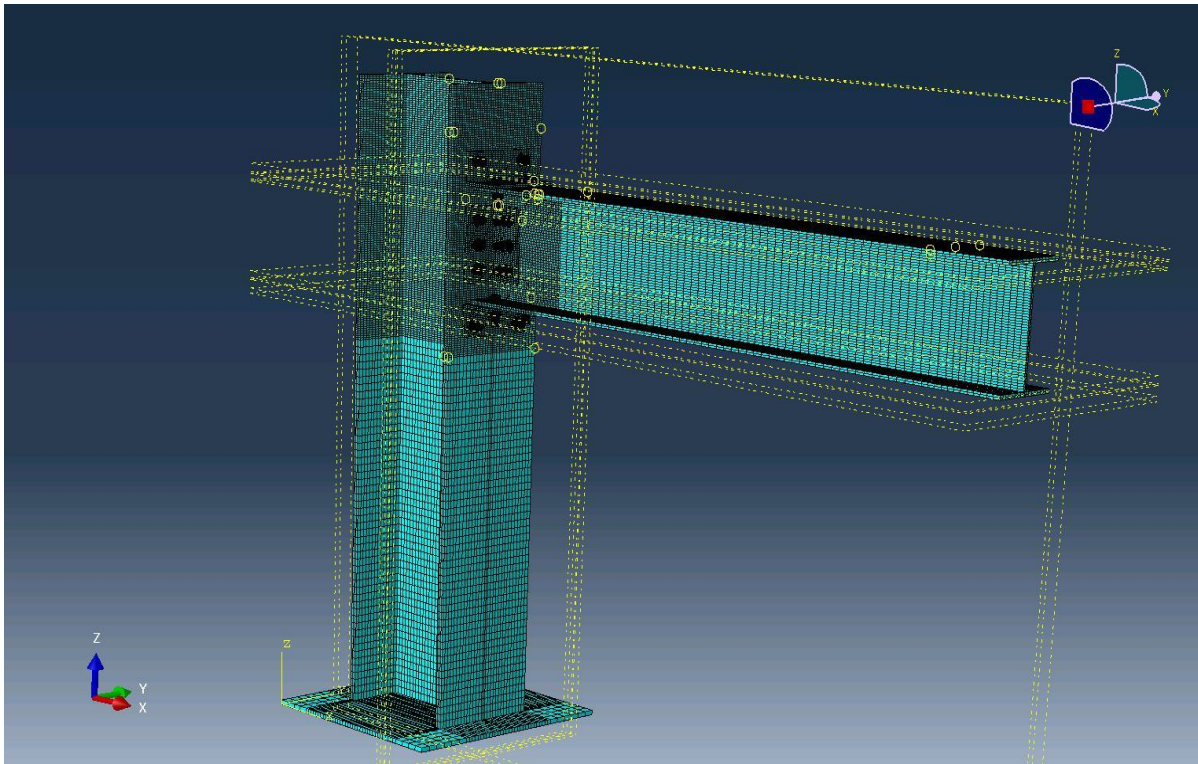


Εικόνα 2.14: Πειραματική έρευνα: (α) σφάλμα στην πάνω φλάντζα, (β) άνοιγμα στην πλαϊνή φλάντζα

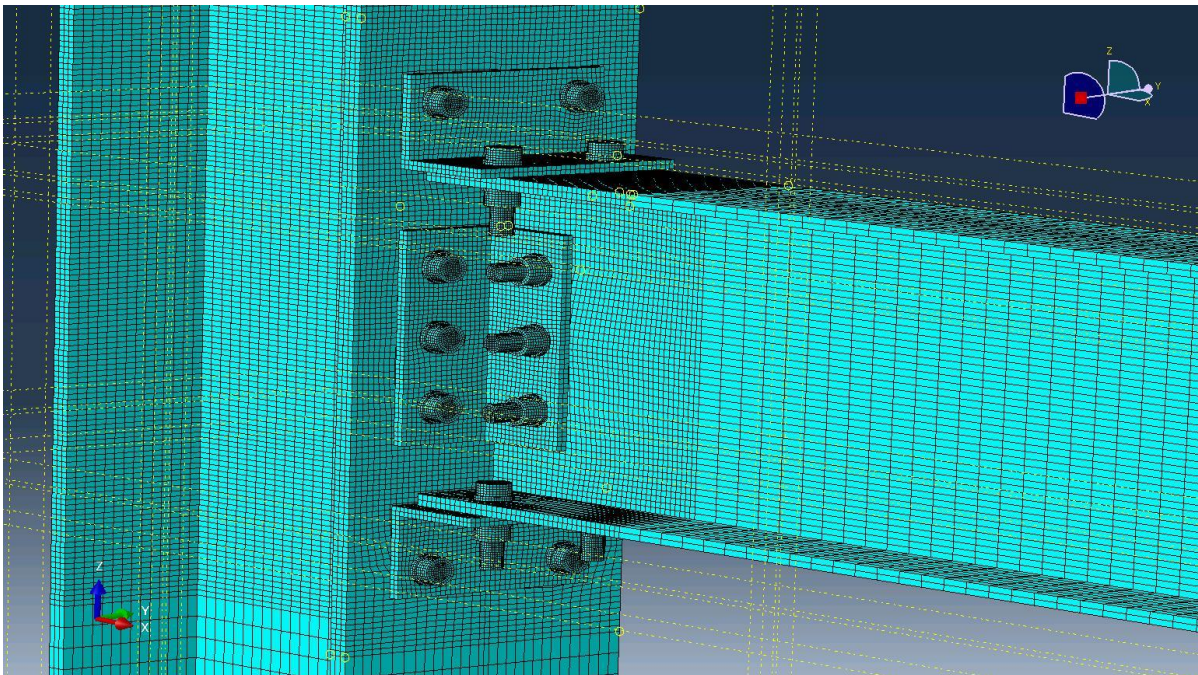
## 2.3 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (MESH)

Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέξαμε ένα τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για όλο το μοντέλο ενώ στα σημεία που έχουν ιδιαίτερη σημασία και θα αναλύσουμε (σύνδεση στύλου – δοκού) εφαρμόσαμε ένα τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων ώστε να αποτελέσματα που θα εξαχθούν να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων τόσο περισσότερη υπολογιστική δύναμη και χρόνος χρειάζεται ώστε να επιλυθεί η ανάλυση. Παρακάτω απεικονίζεται η πλήρη συναρμολογημένη διάταξη του φορέα από διάφορες γωνίες λήψης ύστερα από την διακριτοποίηση που έγινε.



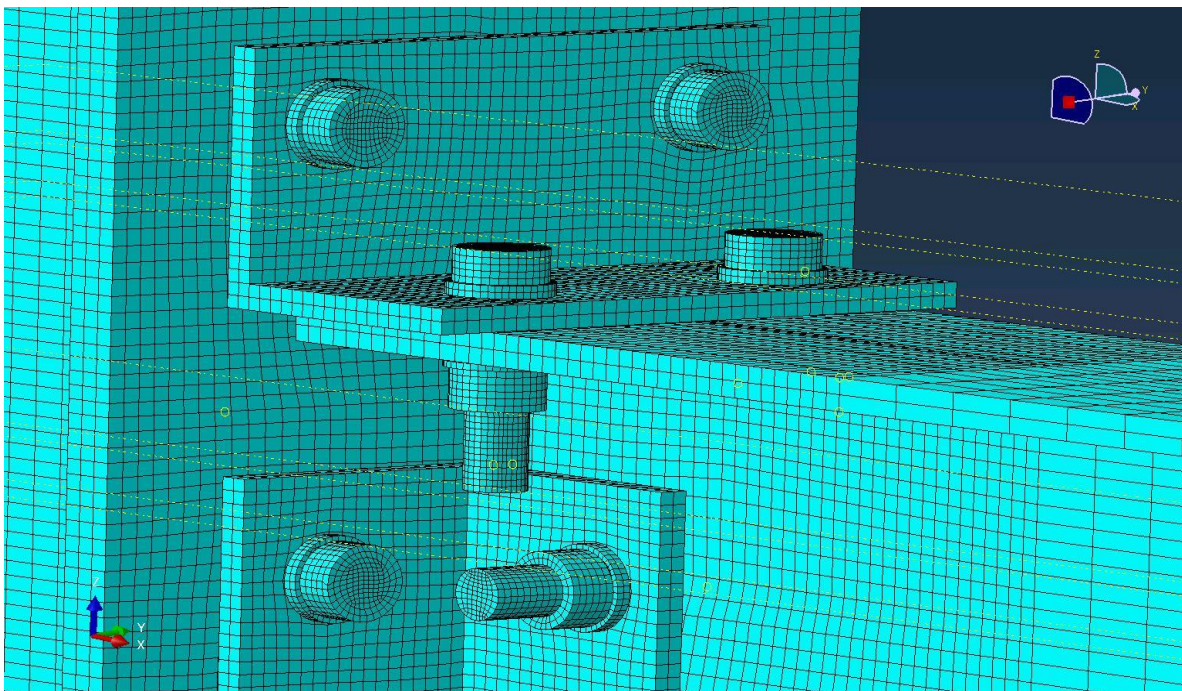


Εικόνα 2.15: Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης

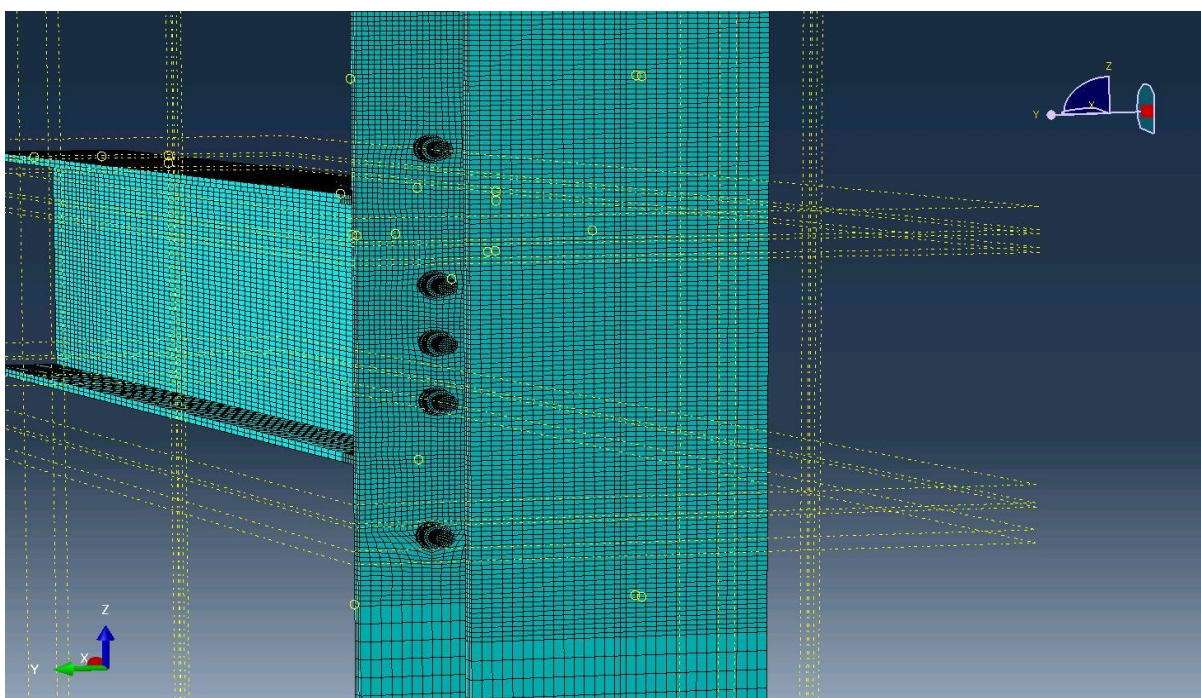


Εικόνα 2.16: Κοντινή προβολή ένωση δοκού – στύλου

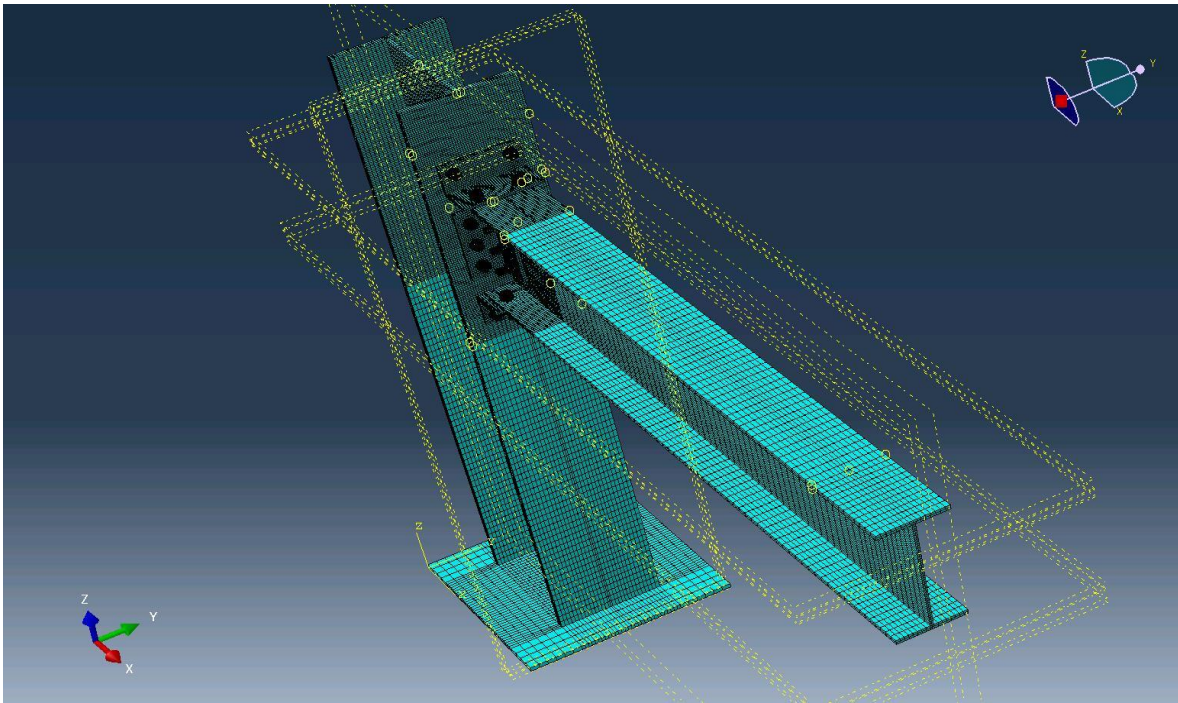




Εικόνα 2.16: Κοντινή προβολή κοχλιών και σύνδεσης στύλου – δοκού



Εικόνα 2.17: Κοντινή προβολή πίσω πλάγιας όψης



Εικόνα 2.18: Πλάγια κάτοψη μοντέλου

### **3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΛΗΦΘΕΙ ΥΠ' ΟΨΙΝ Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

---

Παρακάτω θα επεξηγηθεί ο τρόπος που έγινε η μοντελοποίηση του προβλήματος. Όπως προαναφέραμε χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο sequentially coupled heat – stress analysis, όπου αρχικά συντάξαμε μία καθαρά θερμική ανάλυση και στο επόμενο στάδιο την εισήγαμε στην καθαρά μηχανική ανάλυση για να εξάγουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την μοντελοποίηση του καθαρά θερμικού προβλήματος, ύστερα του καθαρά μηχανικού και τέλος του θερμομηχανικού.

Πριν περάσουμε στην περεταίρω ανάλυση και μοντελοποίηση του προβλήματος πρέπει να σημειωθεί ότι το λογισμικό ABAQUS για να είναι σε θέση να αναλύσει και να επιλύσει το πρόβλημα πρέπει να εισάγουμε σε αυτό συγκεκριμένα δεδομένα όπως:

- Material Definition: Είναι το στάδιο που εισάγουμε τις ιδιότητες των υλικών του μοντέλου.
- Sections: Είναι ο τομέας που ορίζουμε για το κάθε κομμάτι του μοντέλου, τις αντίστοιχες ιδιότητες από το Material Definition.
- Interactions: Στο συγκεκριμένο στάδιο θέτουμε τις διεπιφάνειες των κομματιών του μοντέλου και τις ιδιότητες τους.
- Assembly: Στον τομέα αυτόν γίνεται η συνδεσμολογία του φορέα καθώς και ο ορισμός των set και των επιφανειών που θα χρησιμοποιήσουμε.
- Step Definition: Σε αυτό το στάδιο εισάγουμε τα φορτία και τις συνοριακές συνθήκες του φορέα. Επίσης γίνεται η επιλογή από τον χρήστη σε ποιο βήμα της επίλυσης του μοντέλου θα εφαρμοστούν τα παραπάνω φορτία και οι συνοριακές συνθήκες.
- Mesh: Ο τομέας αυτός είναι σημαντικής σημασίας αφού επιλέγουμε τα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία θα γίνει διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία.
- Job: Στο συγκεκριμένο στάδιο θέτουμε τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος και βάζουμε το λογισμικό να τρέξει την επίλυση.

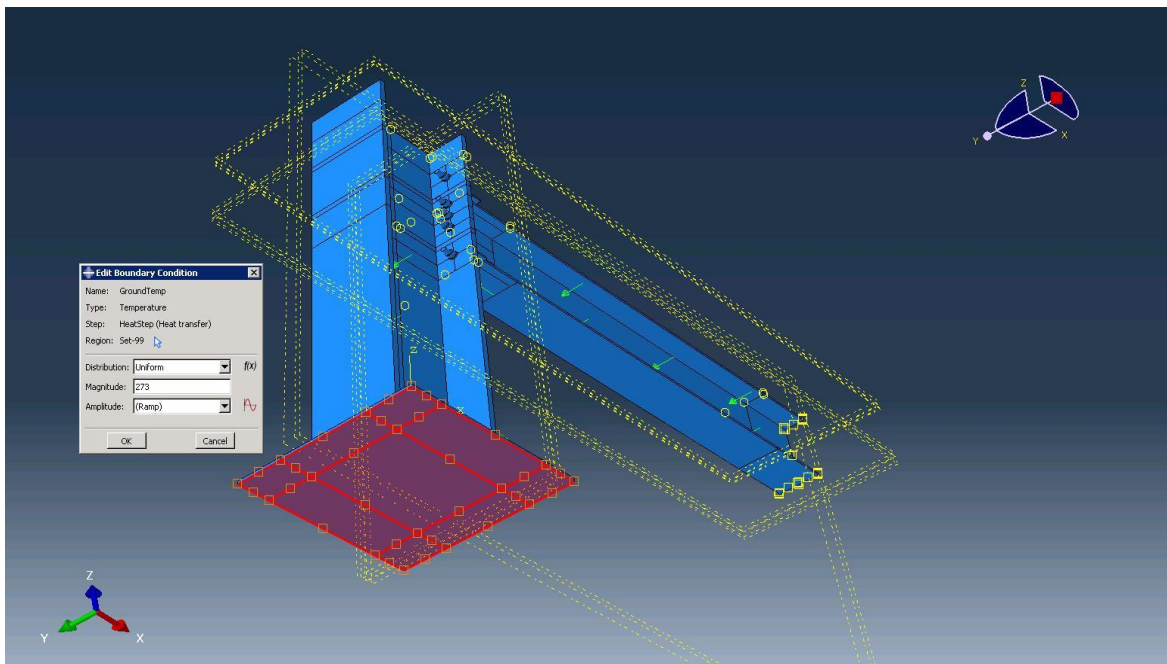


## 3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

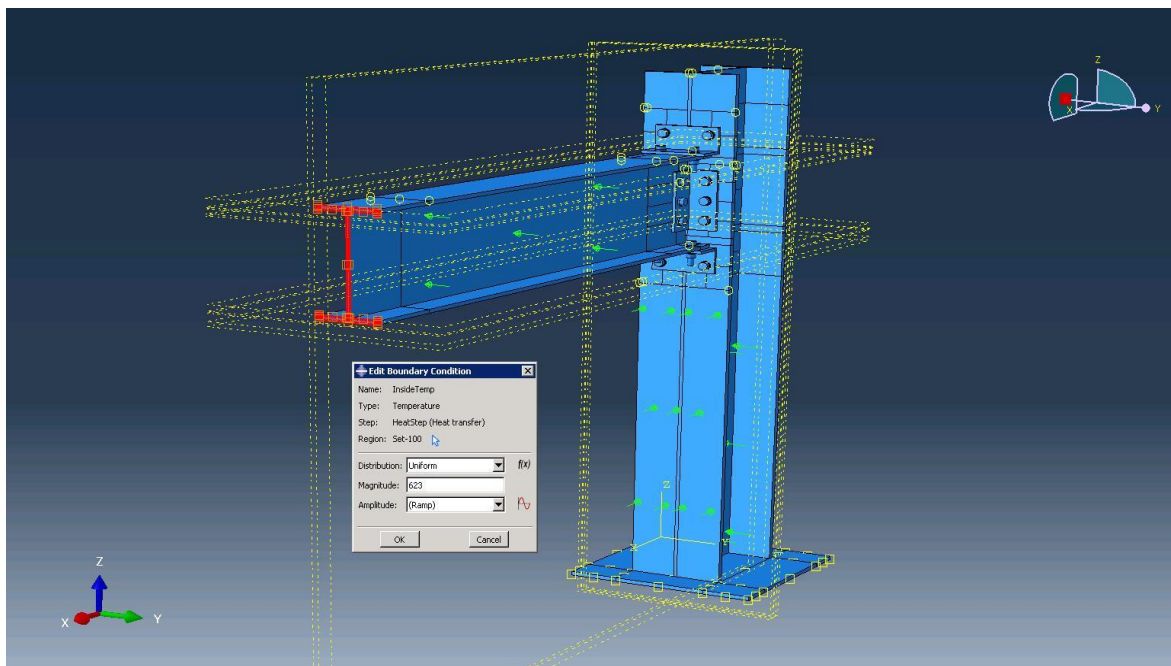
### 3.1.1 Περιγραφή θερμικής ανάλυσης

Αποφασίσαμε στην θερμική ανάλυση του φορέα να προσδώσουμε σε δύο περιοχές της συναρμολογημένης διάταξης μας σταθερές θερμοκρασίες (μία στα σημεία επαφής με το έδαφος και μία στο ελεύθερο άκρο της δοκού). Ακόμα, φορτίσαμε κάποιες βασικές επιφάνειες της δοκού και του στύλου με ένα σταθερό θερμικό φορτίο στην προσπάθεια μας η ανάλυση να προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα αλλά και για να παρατηρήσουμε την θερμοκρασιακή κατανομή στον φορέα μας μετά την επενέργεια αυτών.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο περιοχές της διάταξης όπου προσδώσαμε σταθερές θερμοκρασίες:



Εικόνα 3.1: Πρώτο set θερμοκρασιών (GroundTemp) στην βάση της κατασκευής



Εικόνα 3.2: 2ο set θερμοκρασιών (InsideTemp) στο ελεύθερο άκρο της δοκού

Στα παραπάνω set θερμοκρασιών όπως φαίνεται στην εικόνα ορίσαμε τις εξής θερμοκρασίες:

Πρώτο set (GroundTemp) ->  $273^{\circ}\text{C}$  (0 Kelvin)

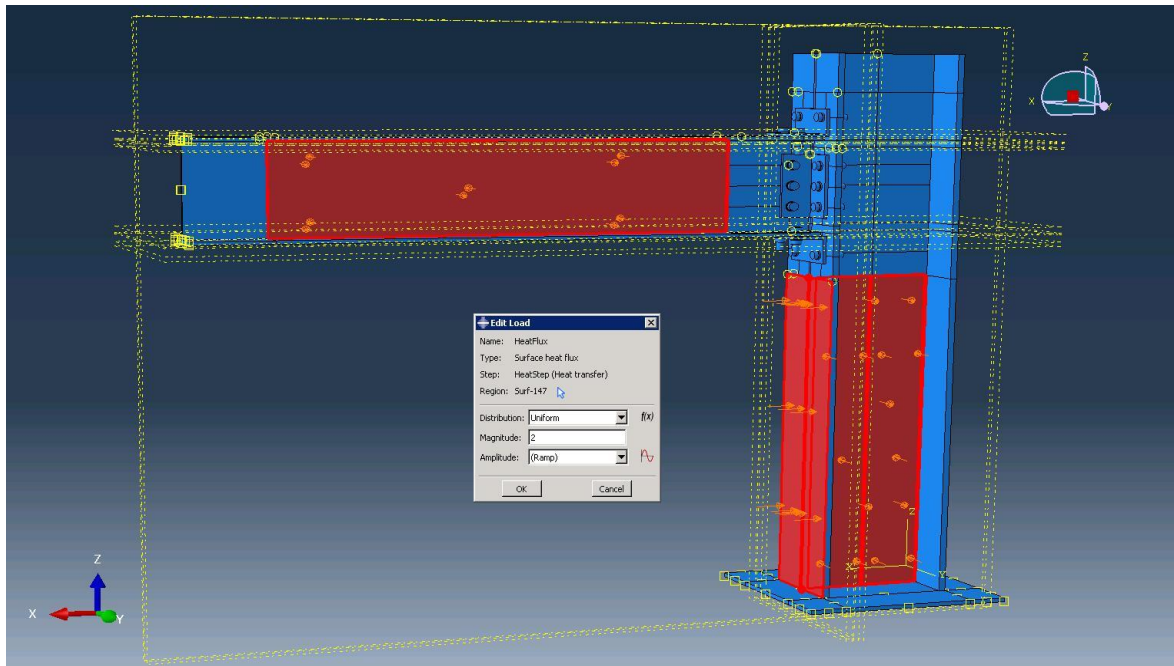
Δεύτερο set (InsideTemp) ->  $623^{\circ}\text{C}$  (350 Kelvin)

Οι παραπάνω θερμοκρασίες ορίζονται στην δημιουργία βημάτων της ανάλυσης (step definition) που ακολουθεί στη συνέχεια όπου και περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία της μοντελοποίησης που κάναμε.

Επίσης όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας αποφασίσαμε να ασκήσουμε θερμικό φορτίο (Heat Flux) μέτρου  $2 \text{ KW/m}^2$  σε συγκεκριμένες επιφάνειες πάνω στη δοκό και στο στύλο. Οι επιφάνειες αυτές, είναι οι δύο μεγάλες καθαρές επιφάνειες της δοκού μέχρι το σημείο που ασκείται το συγκεντρωμένο φορτίο και οι τρεις μεγάλες καθαρές επιφάνειες του στύλου (μπροστινή επιφάνεια και οι δύο πλάγιες). Οι λοιπές επιφάνειες θεωρήθηκαν μονωμένες. Τέλος, είναι άξιο αναφοράς ότι σύμφωνα με το λογισμικό στο οποίο εργαστήκαμε οποιαδήποτε συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον γίνεται μόνο μέσω των περιοχών όπου ορίστηκαν οι σταθερές θερμοκρασίες.



Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι επιφάνειες που αποφασίσαμε να ασκήσουμε το θερμικό φορτίο:



Εικόνα 3.3: Επιφάνειες της συναρμολογημένης διάταξης που ορίσαμε το θερμικό φορτίο

Πριν μεταβούμε στα περεταίρω βήματα που υλοποιήσαμε για την μοντελοποίηση του θερμικού προβλήματος, πρέπει να σημειωθεί ότι για την πιο ορθή προσομοίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής κάτω από την επιβολή θερμικών φορτίσεων εφαρμόσαμε τους νόμους θερμικής αγωγιμότητας σε επαφή (για την διεπιφάνεια δοκού – στύλου). Πιο συγκεκριμένα, ορίσαμε ότι το φαινόμενο της αγωγής παύει να ισχύει όταν το διακενό μεταξύ των δύο επιφανειών φτάσει και υπερβεί την τιμή των 2 χιλιοστών.

### 3.1.2 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης θερμικού προβλήματος

#### - Material Definition

Κατά την θερμική μοντελοποίηση του φορέα ορίσαμε δύο υλικά με διαφορετικές ιδιότητες από τα οποία το πρώτο το ονομάσαμε **beam\_column\_angles\_washers** το οποίο αντιστοιχούν στις ιδιότητες της δοκού, του στύλου, των κάθετων επιφανιών και των ροδελών και το δεύτερο **bolts\_material** το οποίο αντιστοιχεί στις ιδιότητες των κοχλιών. Στην συνέχεια εισήγαμε μόνο τις θερμικές τους ιδιότητες καθώς σε αυτή την ανάλυση θα ασχοληθούμε μόνο με την μετάδοση θερμότητας.

Έτσι για το υλικό **beam\_column\_angles\_washers** ορίσαμε τα ακόλουθα δύο βασικά θερμικά χαρακτηριστικά:

Thermal -> Conductivity

Δίνοντας τιμή στο Thermal Conductivity = 45 (W/ m °C)

Mechanical -> Expansion

Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha = 12 (10<sup>-6</sup>/ °C)

Αντίστοιχα για το υλικό **bolts\_material** ορίσαμε τα ακόλουθα θερμικά χαρακτηριστικά:

Thermal -> Conductivity

Δίνοντας τιμή στο Thermal Conductivity = 45 (W/ m °C)

Mechanical -> Expansion

Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha = 13 (10<sup>-6</sup>/ °C)

Εδώ αξίζει να σημειωθεί μια υπόθεση που κάναμε, ότι δηλαδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής alpha είναι ανεξάρτητος από τις αλλαγές της θερμοκρασίας και δεν επηρεάζεται από αυτές.

#### - Sections

Σε αυτό το στάδιο δημιουργήσαμε πέντε sections του τύπου solid, homogenous και τα ονομάσαμε αντίστοιχα section\_beam, section\_column, section\_angles, section\_washers και section\_Bolts. Συνεχίζοντας κάναμε assign το κάθε section στα αντίστοιχα κομμάτια (parts) της κατασκευής μας έτσι ώστε να τους επιδώσουμε τις ιδιότητες των υλικών που έχουμε δημιουργήσει (για παράδειγμα, κάναμε assign τους κοχλίες με το section bolts ώστε να επιδοθούν στους κοχλίες τα χαρακτηριστικά του υλικού που ονομάσαμε «Bolts\_material»).

#### - Interactions

Σε αυτό το σημείο ορίσαμε τις διεπιφάνειες του προβλήματος. Σημαντικότερη από αυτές όπως άλλωστε αναφέραμε θεωρήθηκε η διεπιφάνεια ένωσης στύλου – δοκού την οποία προσομοιώσαμε ορίζοντας την ως surface – to – surface contact δίνοντάς της, τις παρακάτω ιδιότητες:

Contact property option -> Thermal -> Thermal Conductance -> Επιλέγουμε use only clearance – dependency data και δίνουμε τις ακόλουθες τιμές:

Conductivity	Clearance
45	0
0	0,005

- Assembly

Σε αυτό το στάδιο δεν είχαμε καμία αλληλεπίδραση δεδομένου ότι το μοντέλο ήταν ήδη συναρμολογημένο και κλειδωμένο από προηγούμενη εργασία.

- Step Definition

Στο συγκεκριμένο σημείο ορίζονται τα φορτία που θα ασκηθούν στον φορέα μας καθώς και οι συνοριακές συνθήκες της κατασκευής μας. Στο βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε έχουμε ορίσει ένα επιπλέον step πέραν του initial (αρχικό βήμα) το οποίο και ορίζεται σαν προεπιλογή από το πρόγραμμα. Στο αρχικό step (initial) ορίσαμε την διεπιφάνεια στύλου – δοκού με θερμικά χαρακτηριστικά όπως ακριβώς αναφέρθηκε παραπάνω.

Συνεχίζοντας δημιουργήσαμε το πρώτο και μοναδικό άλλωστε step που μας χρειάστηκε κατά την θερμική ανάλυση. Ονομάσαμε το παρών step ως «Heatstep» και το δημιουργήσαμε ως εξής:

Heatstep -> General -> Επιλέξαμε Heat Transfer και στο response to steady state

Στην συνέχεια στο ίδιο βήμα ανάλυσης επιλέξαμε και ορίσαμε τις περιοχές με τις σταθερές θερμοκρασίες σαν συνοριακές συνθήκες και ορίσαμε σαν φόρτιση το θερμικό φορτίο που επιθυμήσαμε. Το ονομάσαμε HeatFlux και το δημιουργήσαμε ως εξής:

Load -> HeatFlux -> Επιλέξαμε σαν τύπο το Surface Heat Flux -> Ορίσαμε τις επιφάνειες που θα ασκηθεί το θερμικό φορτίο και τέλος δώσαμε την τιμή του στα 2 KW/ m<sup>2</sup>.

- Mesh

Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας της μοντελοποίησης γίνεται η διακριτοποίηση του φορέα μας με πεπερασμένα στοιχεία. Στην παρούσα Θερμική μοντελοποίηση αποφασίσαμε να κάνουμε χρήση των 3D brick element (DC3D8) πεπερασμένων στοιχείων τα οποία αποτελούνται από οκτώ κόμβους και είναι κατάλληλα για θερμική μοντελοποίηση θεωρώντας τα ως τα καταλληλότερα για την ανάλυση που σκοπεύαμε να κάνουμε. Σημειώνεται ότι η απαραμόρφωτη επιφάνεια (rigid body) δεν επιδεχόταν θερμικής διακριτοποίησης με αποτέλεσμα να μην το συμπεριλάβουμε στην διακριτοποίηση την οποία κάναμε γεγονός βέβαια που δεν επηρεάζει την ανάλυση μας καθώς το συγκεκριμένο κομμάτι αποτελεί απλά ένα βοηθητικό τμήμα της

κατασκευής μας και όχι κάποιο βασικό στοιχείο του οποίου την συμπεριφορά θα θέλαμε να μελετήσουμε. Καταλήγοντας, αντίστοιχα και στην Θερμική μοντελοποίηση όπως άλλωστε και στην μηχανική μοντελοποίηση δημιουργήσαμε αρχικά ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων με ενιαίο μέγεθος και στην συνέχεια κάναμε χρήση της μεθόδου τοπικής πύκνωσης του δικτύου για να βελτιώσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσής μας.

- Job

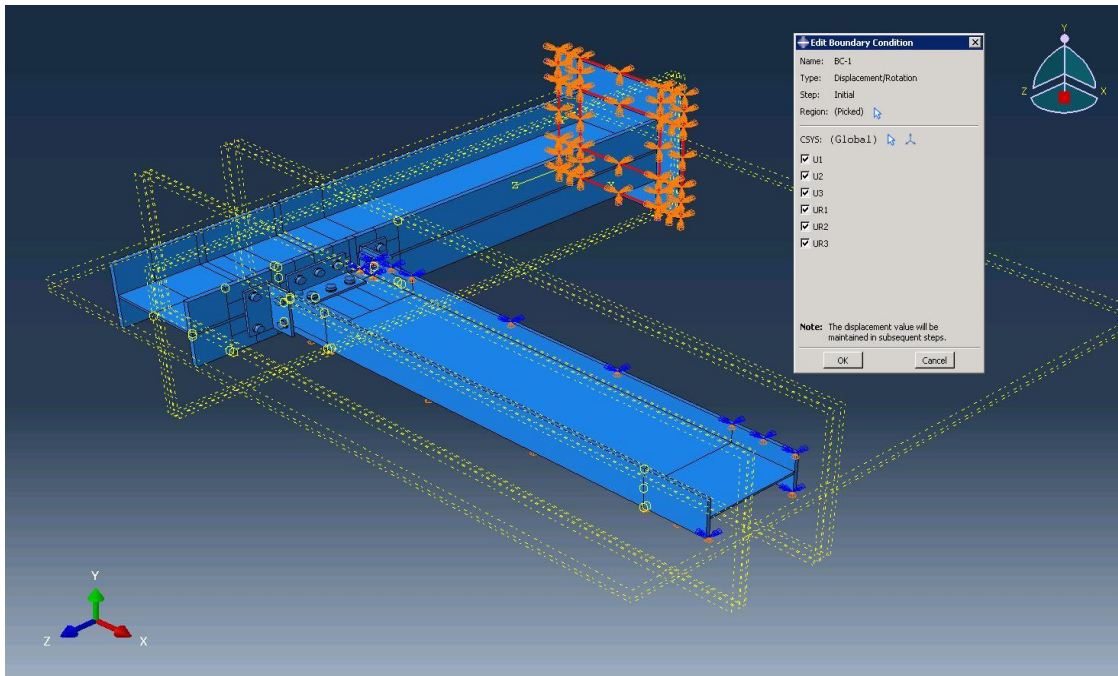
Το τελευταίο στάδιο πριν υλοποιήσουμε τις πρώτες επιλύσεις του προβλήματος είναι να ορίσουμε ξανά το job (διαδικασία επίλυσης) δίνοντας του ένα όνομα και κάνοντας accept σε όλα τα default settings του προγράμματος βάζουμε το λογισμικό να τρέξει την διαδικασία της θερμικής καθαρά επίλυσης.

## **3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

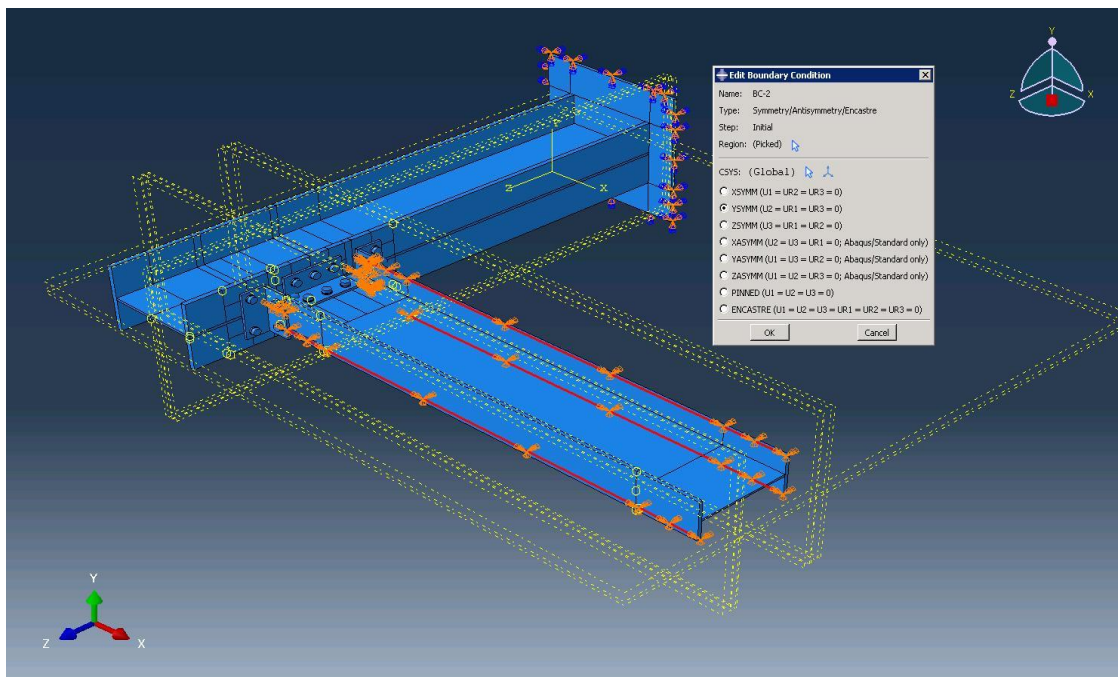
### **3.2.1 Περιγραφή μηχανικής ανάλυσης**

Στη καθαρά μηχανική ανάλυση αποφασίσαμε να θέσουμε δύο συνοριακές συνθήκες. Η πρώτη συνοριακή συνθήκη δηλώθηκε στην βάση του φορέα μας σαν displacement – rotation, ώστε να επιτρέπεται ουσιαστικά η μετατόπιση και η περιστροφή. Η δεύτερη συνοριακή συνθήκη ορίστηκε ώστε να περιορίζει την κίνηση της δοκού στον άξονα που τρέχει κάθετα στο μήκος της (δηλαδή στον άξονα Y). Ακόμα, ορίσαμε στο πρώτο step της ανάλυσης την βαρυτική δύναμη στον φορέα μας και στο δεύτερο step το συγκεντρωμένο φορτίο που ασκείται κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού.

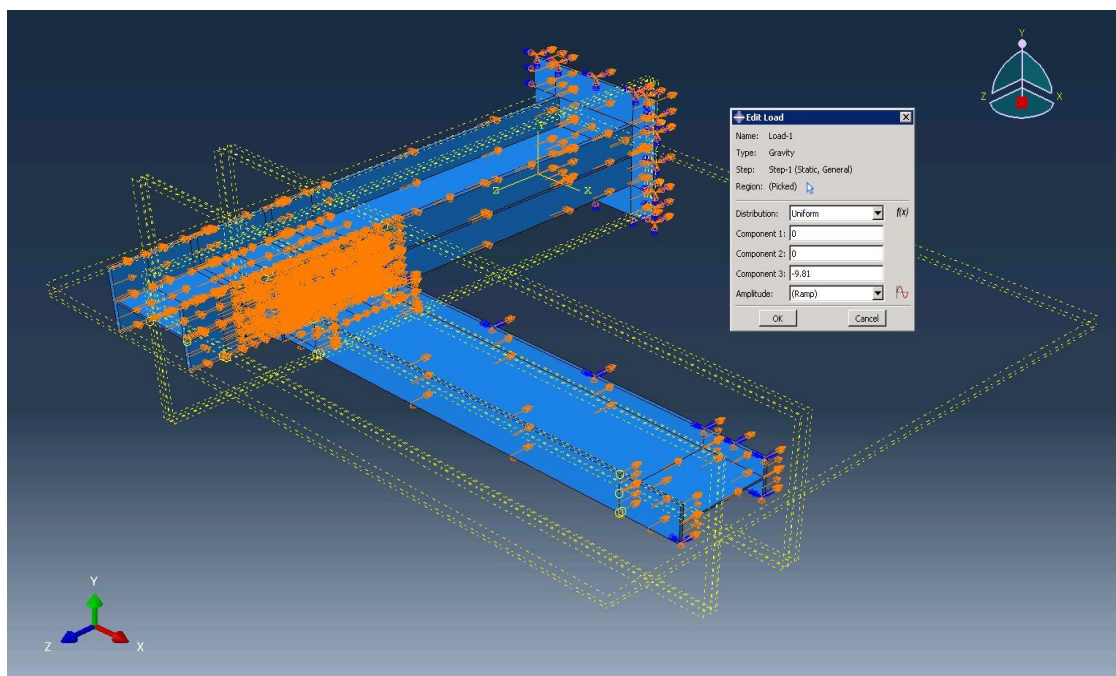
Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες που ορίσαμε αλλά και τα αντίστοιχα μέτρα και σημεία εφαρμογής των δυνάμεων που ασκούνται:



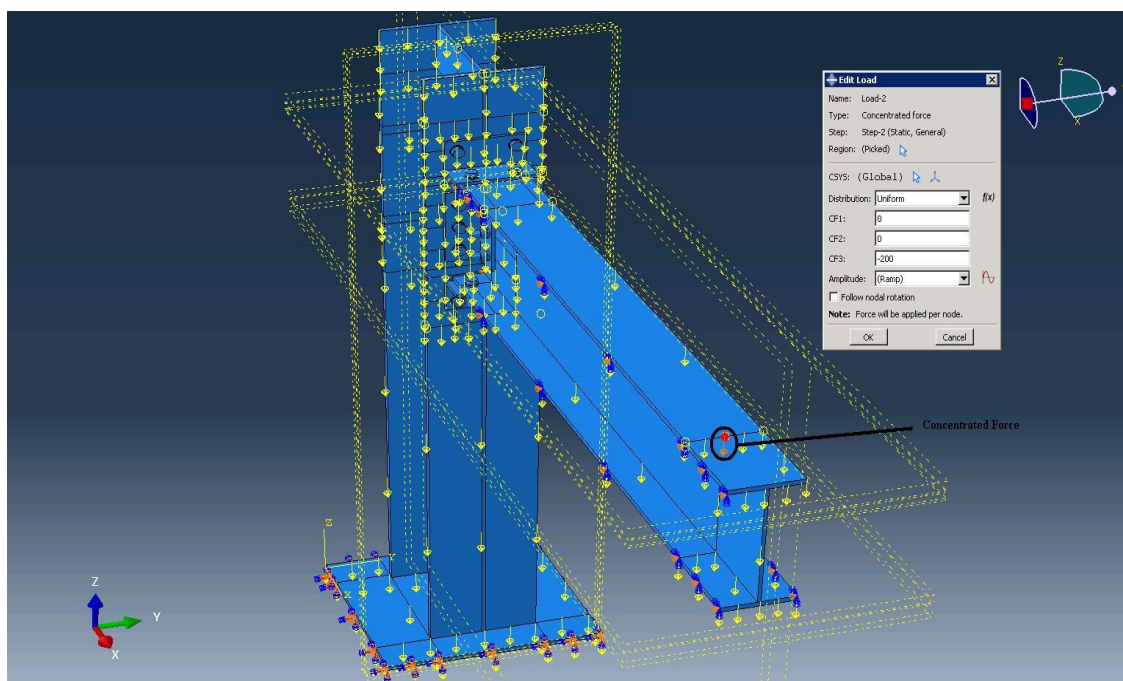
Εικόνα 3.4: Πρώτη συνοριακή συνθήκη displacement - rotation



Εικόνα 3.5: Δεύτερη συνοριακή συνθήκη – περιορισμός της κίνησης της δοκού στον Y άξονα



Εικόνα 3.6: Παρουσίαση βαρυτικής δύναμης του φορέα



Εικόνα 3.7: Παρουσίαση μέτρου και επιφάνειας επίδρασης συγκεντρωμένης δύναμης

### 3.2.2 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης μηχανικού προβλήματος

#### - Material Definition

Πρώτο βήμα της μοντελοποίησης του προβλήματός μας ήταν, όπως και στη θερμική, ο ορισμός των χαρακτηριστικών των υλικών. Το πρώτο υλικό το ονομάσαμε **beam\_column\_angles\_washers** και θέσαμε τα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά του όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

General -> Density

Δίνοντας την τιμή στο Mass Density = 7,86 g/ cm<sup>3</sup>

Mechanical -> Elasticity -> Elastic

Δίνοντας την τιμή του Young Modulus E = 250 GPa και Poisson's Ratio  $\nu = 0,3$

Mechanical -> Plasticity -> Plastic

Δίνοντας τις παρακάτω τιμές του πίνακα:

Yield Stress	Plastic Strain
300600	0
445200	0.055301
522000	0.14494

Ομοίως ορίσαμε τα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά και του δεύτερου υλικού που το ονομάσαμε **bolts\_material** και παρουσιάζονται παρακάτω:

General -> Density

Δίνοντας την τιμή στο Mass Density = 7,86 g/ cm<sup>3</sup>

Mechanical -> Elasticity -> Elastic

Δίνοντας την τιμή του Young Modulus E = 250 GPa και Poisson's Ratio  $\nu = 0,3$

Mechanical -> Plasticity -> Plastic

Δίνοντας τις παρακάτω τιμές του πίνακα:

Yield Stress	Plastic Strain
652816.67	0
778125	0.031626
880000	0.089444



- Sections

Ακολουθώντας λοιπόν την ίδια λογική όπως και στην θερμική μοντελοποίηση δημιουργήσαμε τα κατάλληλα sections έτσι ώστε να προσδώσουμε στα κομμάτια της κατασκευής μας τις αντίστοιχες ιδιότητες των υλικών που επιθυμούσαμε.

- Interactions

Σε αυτό το σημείο ορίσαμε τις διεπιφάνειες του προβλήματος. Σημαντικότερη από αυτές όπως άλλωστε αναφέραμε θεωρήθηκε η διεπιφάνεια ένωσης στύλου – δοκού την οποία προσομοιώσαμε ορίζοντας την ως surface – to – surface contact δίνοντάς της το όνομα «intProp-1» και τις παρακάτω ιδιότητες:

Contact property option -> Tangential behavior -> Επιλέγουμε isotropic και ορίζουμε την τιμή friction coefficient = 0,4.

Contact property option -> Normal behavior -> Αφήνουμε τις default του προγράμματος και επιλέγουμε hard contact στον τύπο.

- Step Definition

Στο συγκεκριμένο στάδιο είναι που θα ορίσουμε όλα τα φορτία που θα ασκηθούν στην κατασκευή μας και φυσικά τις συνοριακές συνθήκες που έχουμε. Στο βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε έχουμε ορίσει δύο επιπλέον step πέραν του initial (αρχικό βήμα) το οποίο και ορίζεται σαν προεπιλογή από το πρόγραμμα. Αρχικά κατά την δημιουργία των νέων step της επίλυσης ορίζουμε ότι η επίλυση που θα πραγματοποιηθεί έχει γεωμετρική μη γραμμικότητα (Non linear geometry επιλέγουμε on). Αυτό σημαίνει ότι αναμένουμε μεγάλες σχετικά μετατοπίσεις στο πρόβλημα, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν στην κατά στην λύση του προβλήματος. Στο αρχικό step της ανάλυσης (initial step) ορίσαμε την διεπιφάνεια μεταξύ στύλου – δοκού όπως ακριβώς αναφέραμε στην παράγραφο για τα interactions.

Στην συνέχεια ορίζουμε τις δύο συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) που υπάρχουν στην κατασκευή μας. Η πρώτη δηλώνεται στην βάση του φορέα μας επιλέγοντας σαν displacement – rotation στον τύπο τους (να επιτρέπουν δηλαδή μετατόπιση και περιστροφή). Η δεύτερη συνοριακή συνθήκη ορίστηκε σαν:

Create boundary condition -> Symmetry, Antisymmetry, Encastre -> Ysymm.

Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη περιορίζει την κίνηση της δοκού στον άξονα που τρέχει κάθετα στο μήκος της (δηλαδή στον άξονα Y). Χωρίς αυτή την συνθήκη, εμφανίζεται μη συμμετρική μετακίνηση της δοκού κατά τον άξονα Y, εξαιτίας μικροατελειών του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων πράγμα που θελήσαμε να αποφύγουμε.



Συνεχίσαμε δημιουργώντας το πρώτο step (step-1) στο οποίο και δημιουργήσαμε το φορτίο του βάρους που ασκείται στον φορέα. Ονομάσαμε το φορτίο «Load-1» και το δημιουργήσαμε με τον παρακάτω τρόπο:

Load-1 -> Type: gravity -> ορίζουμε ότι θα εφαρμοσθεί στο step-1 -> επιλέγουμε την πλήρη συναρμολογημένη διάταξη -> και ορίζουμε Component1,2 = 0 και Component 3 =  $-9,81 \text{ m/s}^2$

Στο step-2 το οποίο είναι και το τελικό κατά την μηχανική μοντελοποίηση ορίζουμε το συγκεντρωμένο φορτίο που ασκείται στην δοκό. Ονομάσαμε το φορτίο «Load1-2» και το δημιουργήσαμε με τον παρακάτω τρόπο:

Load1-2 -> Type: concentrated force -> ορίζουμε ότι θα εφαρμοσθεί στο step-2 -> επιλέγουμε το σημείο εφαρμογής της δύναμης -> και ορίζουμε CF1,2 = 0 και CF3 = -200 kN.

#### - Mesh

Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας της μοντελοποίησης γίνεται η διακριτοποίηση του φορέα μας με πεπερασμένα στοιχεία. Στην παρούσα έρευνα αποφασίσαμε να κάνουμε χρήση των 3D brick element (C3D8R) θεωρώντας τα ως τα καταλληλότερα για την ανάλυσή μας. Αρχικά διακριτοποιήσαμε τον φορέα με ένα ενιαίο μέγεθος δικτύου σε όλη την έκτασή του. Στην συνέχεια εφαρμόσαμε τοπική πύκνωση του δικτύου στην περιοχή που αναμένονται τα περισσότερα φαινόμενα μηχανικής συμπεριφοράς δηλαδή στην δική μας περίπτωση εννοούμε την περιοχή σύνδεσης δοκού – στύλου.

#### - Job

Το τελευταίο στάδιο πριν υλοποιήσουμε τις πρώτες επιλύσεις του προβλήματος είναι να ορίσουμε το job (διαδικασία επίλυσης) δίνοντας του ένα όνομα και κάνοντας accept σε όλα τα default settings του προγράμματος βάζουμε το λογισμικό να τρέξει την διαδικασία της επίλυσης.

### **3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

#### **3.3.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης ώστε της μηχανικής ανάλυσης ώστε να συνδυαστεί με την θερμική**

Η γενικότερη λογική που επικρατεί σε αυτού του είδους την ανάλυση είναι να επιλύεται αρχικά το Θερμικό πρόβλημα και στην συνέχεια τα αποτελέσματα του να εισάγονται σαν μιας μορφής προκαθορισμένο πεδίο στο Μηχανικό πρόβλημα για να ακολουθήσει η συνδυασμένη ανάλυση. Στο πρώτο βήμα γίνεται η πρόβλεψη της θερμοκρασιακής κατανομής μέσα στον φορέα υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και θερμικών φορτίων επονομαζόμενη και ως θερμική ανάλυση (thermal analysis) και στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης το οποίο ονομάζεται μηχανική ανάλυση (stress analysis) εκτιμάται η μηχανική συμπεριφορά του φορέα υπό την επίδραση στατικών και θερμικών φορτίσεων.

Για να επιτύχουμε την συνδυασμένη λειτουργία και επίλυση Θερμομηχανικών προβλημάτων πρέπει ουσιαστικά να προβούμε σε κάποιες αλλαγές στο καθαρά Μηχανικό πρόβλημα έτσι ώστε να ορίσουμε σαν επιπλέον δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα τις Θερμικής ανάλυσης. Αυτό γίνεται με τις παρακάτω τροποποιήσεις:

Αρχικά πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που έχουμε στην κατασκευή μας ορίζουμε (μέσα στο Μηχανικό πρόβλημα) και τις Θερμικές ιδιότητες των υλικών που στην δική μας περίπτωση είναι η θερμική αγωγιμότητα και η θερμική διαστολή (thermal conductivity και expansion αντίστοιχα).

Στην συνέχεια πρέπει να οριστεί σε ποιο βήμα τις ανάλυσής μας επιθυμούμε να εισαχθούν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Στην συγκεκριμένη ανάλυση εισαγάγαμε τα θερμικά αποτελέσματα στο step-2 σε συνδυασμό δηλαδή με τη επιβολή των μηχανικών φορτίων (υπενθυμίζω από τη Μηχανική ανάλυση, στο step-2 είναι που εφαρμόζεται το φορτίο των 200KN). Για να το επιτύχουμε αυτό δημιουργούμε στο step-2 ένα predefined field ως εξής:

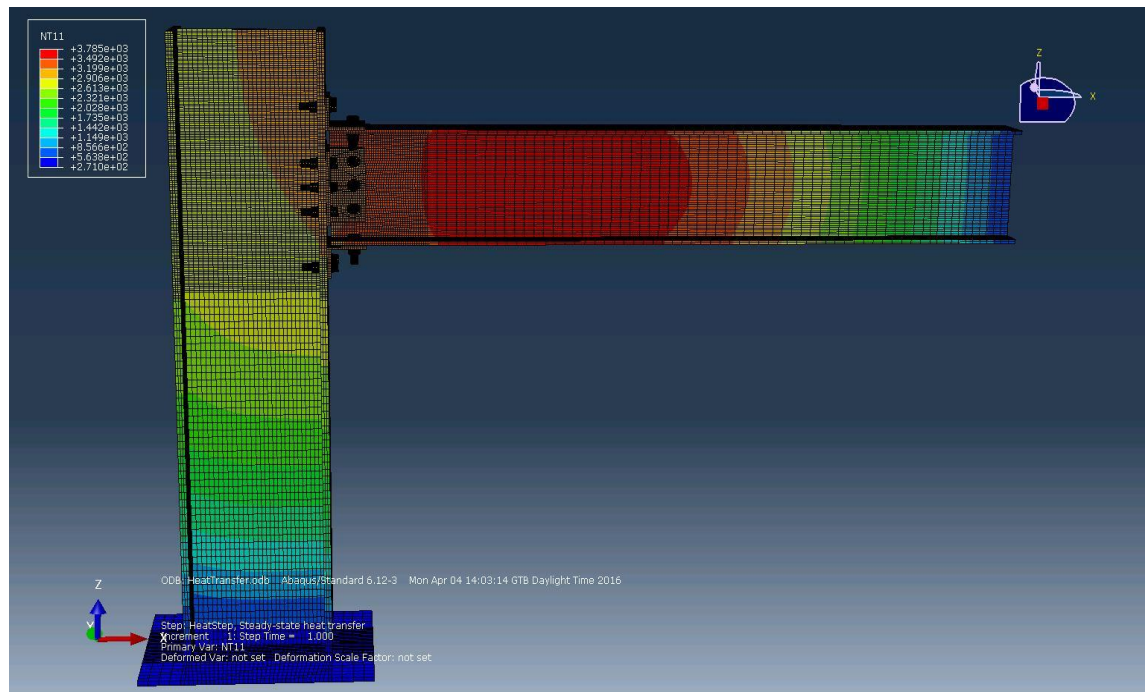
Step-2 -> Predefined field -> Επιλέγουμε το Other στην κατηγορία και το Temperature στο Types of selected step -> επιλέγουμε με προσοχή την περιοχή στην οποία θα εφαρμοστούν τα θερμικά αποτελέσματα.

Στο edit Predefined field επιλέγουμε from output results or output database file και δίνουμε στην συνέχεια το όνομα του αρχείου των αποτελεσμάτων της Θερμικής ανάλυσης. Τέλος τροποποιούμε κατάλληλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνονται και θερμικά χαρακτηριστικά και το πρόγραμμα είναι έτοιμο πλέον για να προχωρήσει στην Θερμομηχανική επίλυση.

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΛΗΦΘΕΙ ΥΠ' ΟΨΗ Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

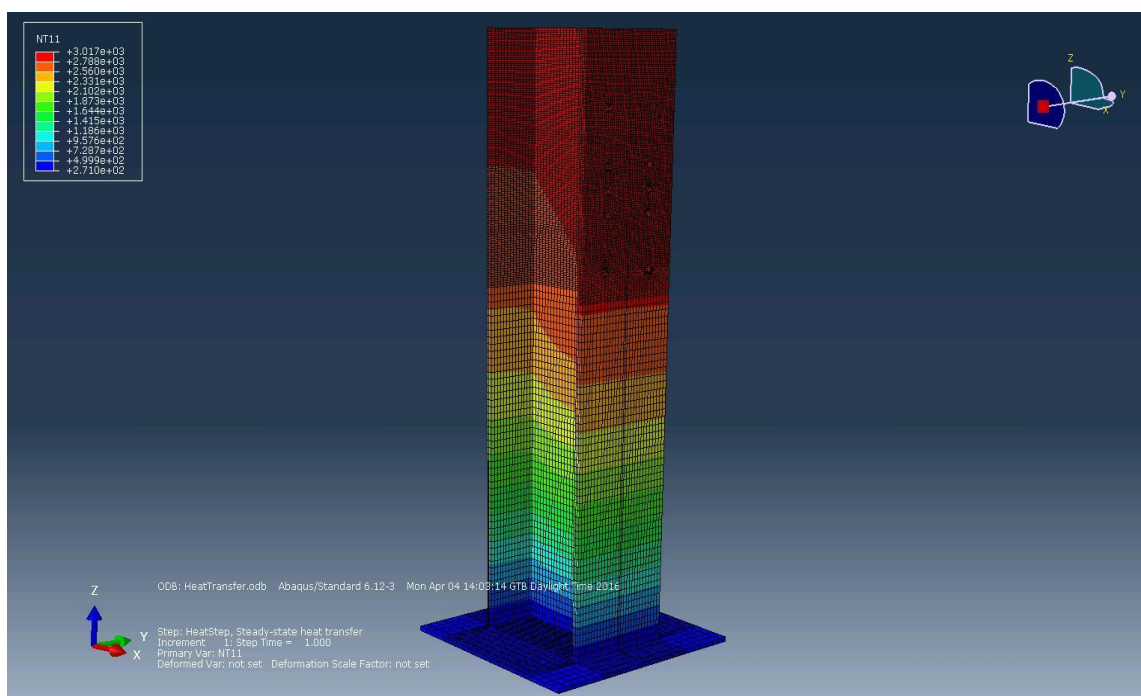
### 4.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΘΑΡΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρακάτω εικόνα γίνεται παρουσίαση των θερμικών αποτελεσμάτων στον φορέα μας:

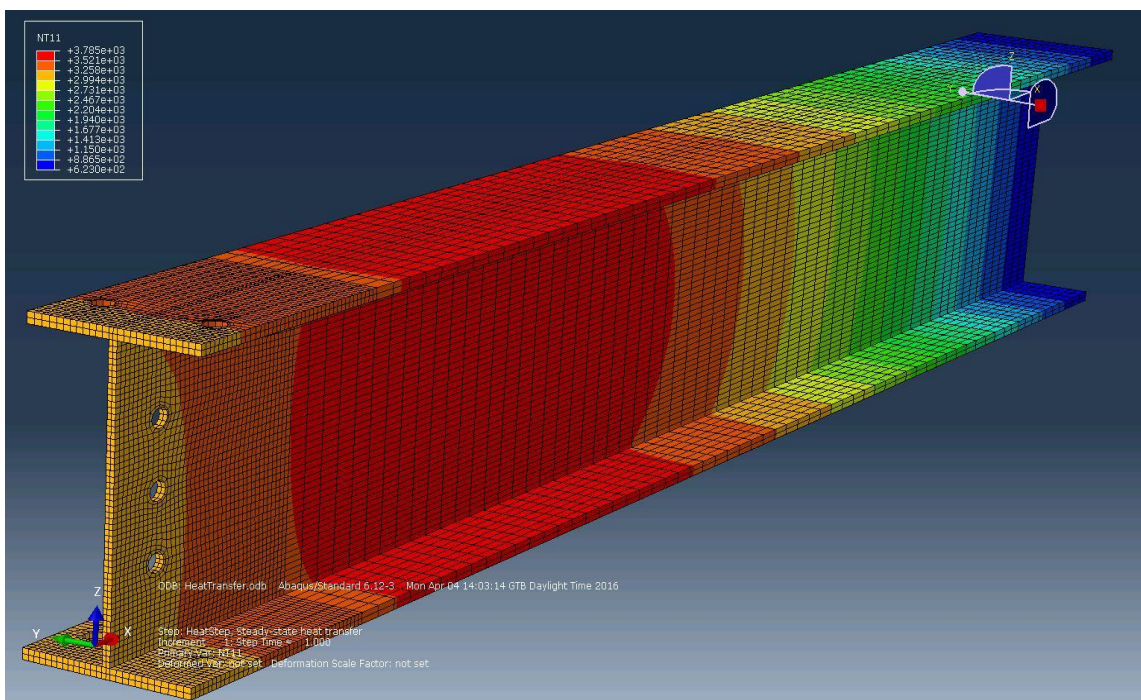


Εικόνα 4.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη (Μέγιστη θερμοκρασία 3785 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 271 °C)

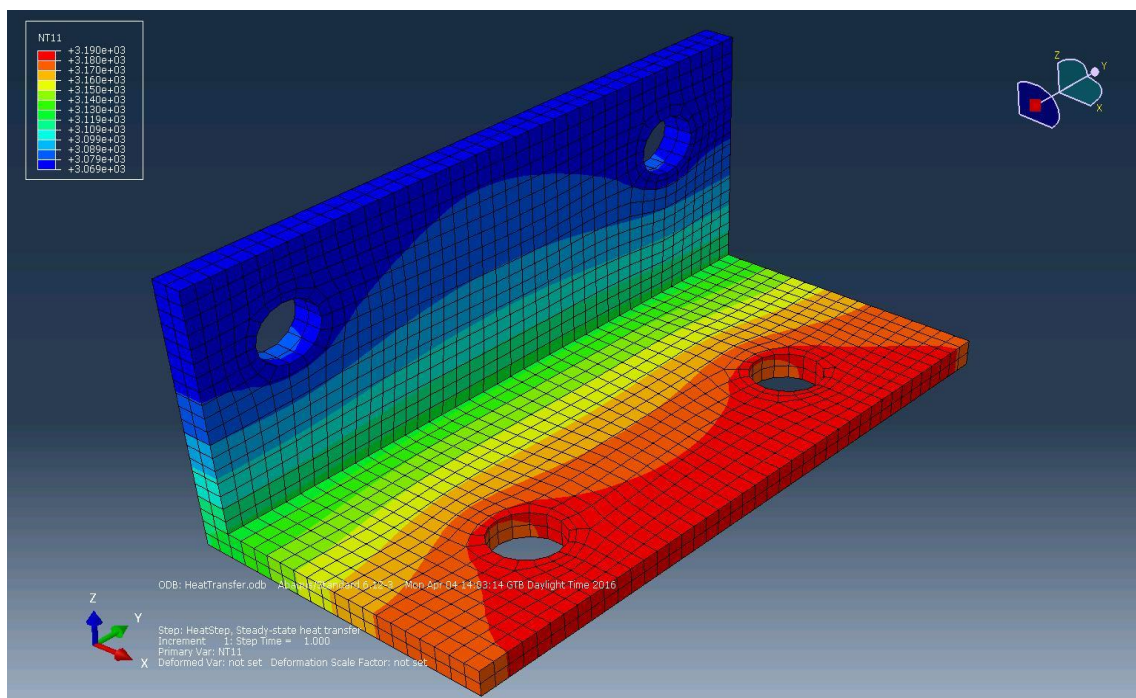
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στα επιμέρους κομμάτια της κατασκευής μας. Αξίζει να παρατηρήσουμε την θερμοκρασιακή κατανομή στις περιοχές που ενώνονται μεταξύ τους για να αντιληφθούμε ότι η θερμότητα μεταδόθηκε και διαμέσου της επαφής, όπως ακριβώς στοχεύσαμε από την μοντελοποίηση που κάναμε:



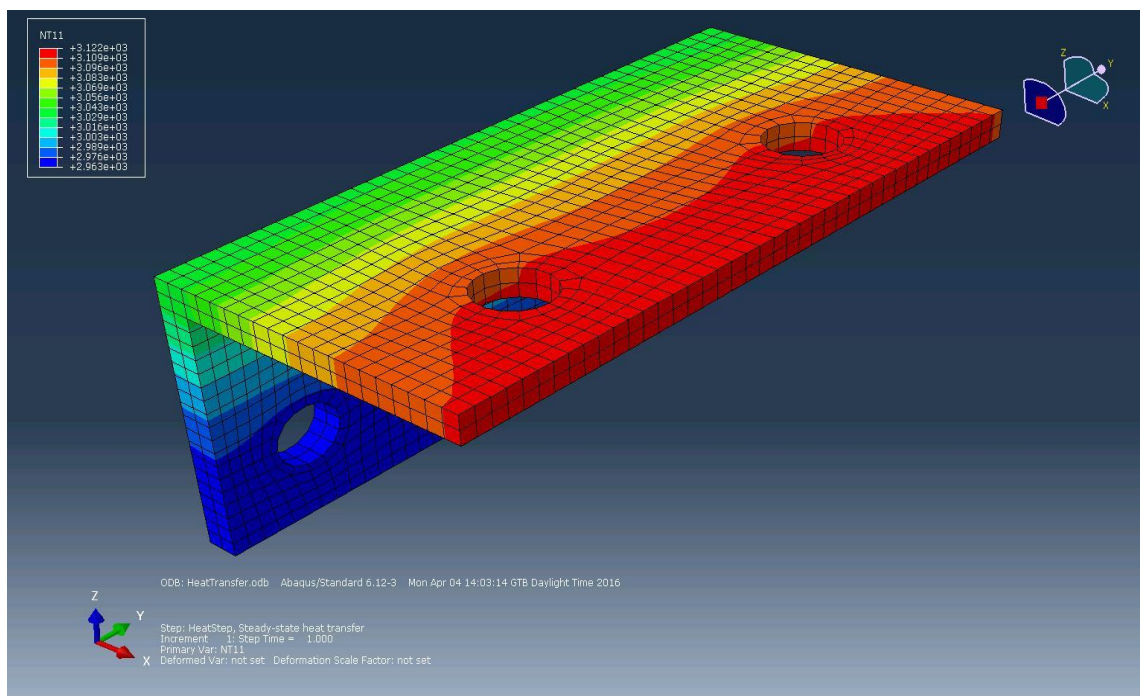
Εικόνα 4.2: Κατανομή θερμοκρασίας στον στύλο (Μέγιστη θερμοκρασία 3017 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 271 °C)



Εικόνα 4.3: Κατανομή θερμοκρασία στην δοκό (Μέγιστη θερμοκρασία 3785 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 623 °C)

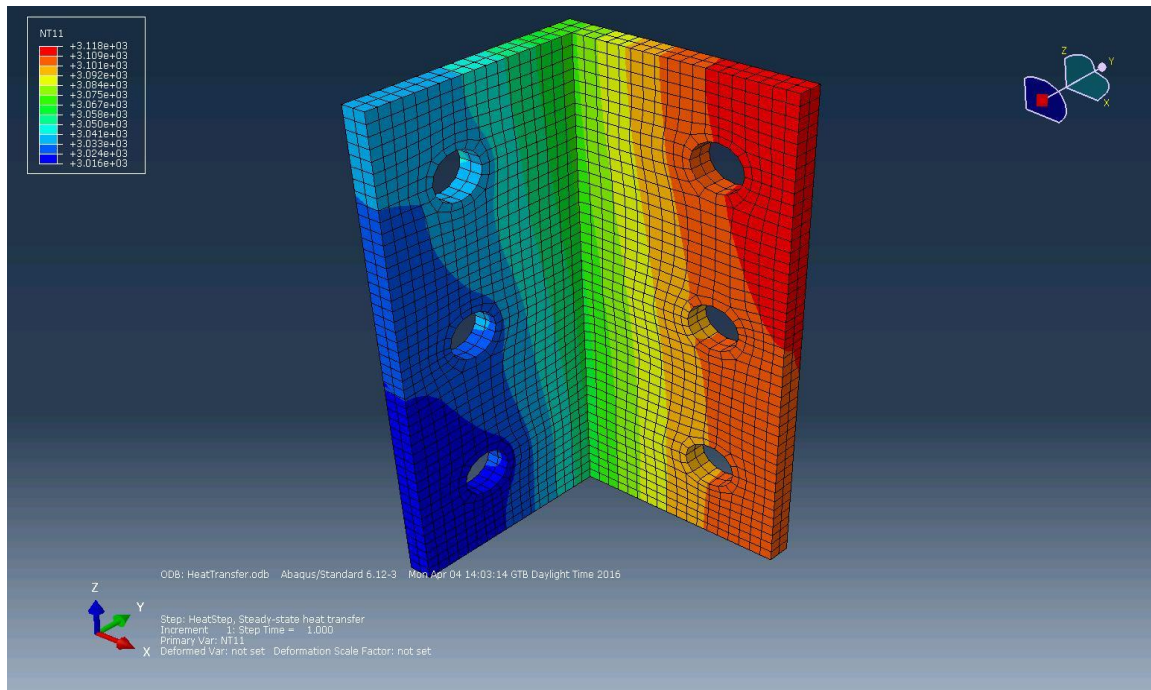


Εικόνα 4.4: Κατανομή θερμοκρασίας στη πάνω φλάντζα (Μέγιστη θερμοκρασία 3190 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 3069 °C)

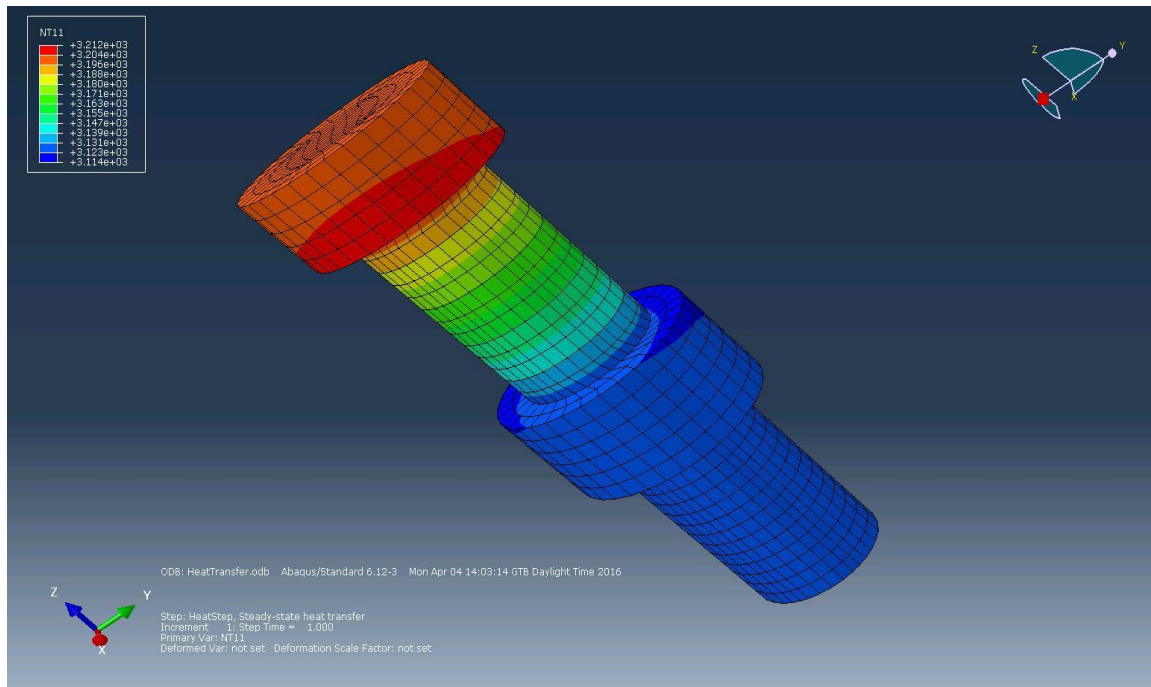


Εικόνα 4.5: Κατανομή θερμοκρασία στη κάτω φλάντζα (Μέγιστη θερμοκρασία 3122 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 2963 °C)





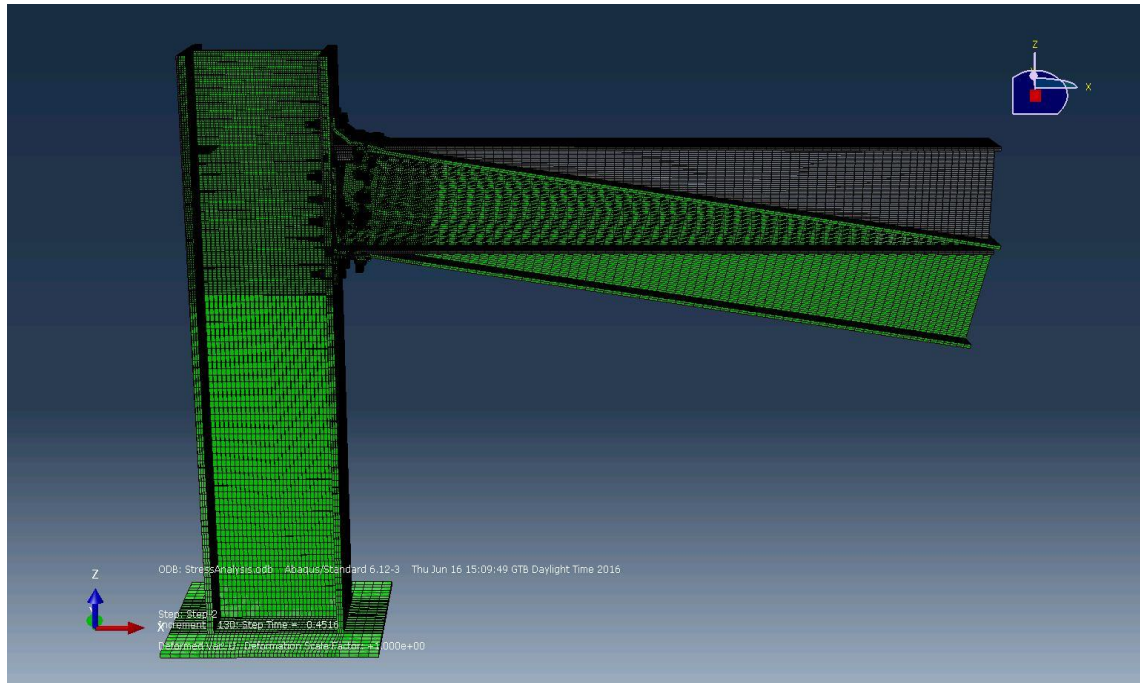
Εικόνα 4.6: Κατανομή θερμοκρασία στη πλάγια φλάντζα (Μέγιστη θερμοκρασία  $3118^{\circ}\text{C}$ , ελάχιστη θερμοκρασία  $3016^{\circ}\text{C}$ )



Εικόνα 4.7: Κατανομή θερμοκρασία ενός κοχλία της κατασκευής (Μέγιστη θερμοκρασία  $3212^{\circ}\text{C}$ , ελάχιστη θερμοκρασία  $3114^{\circ}\text{C}$ )

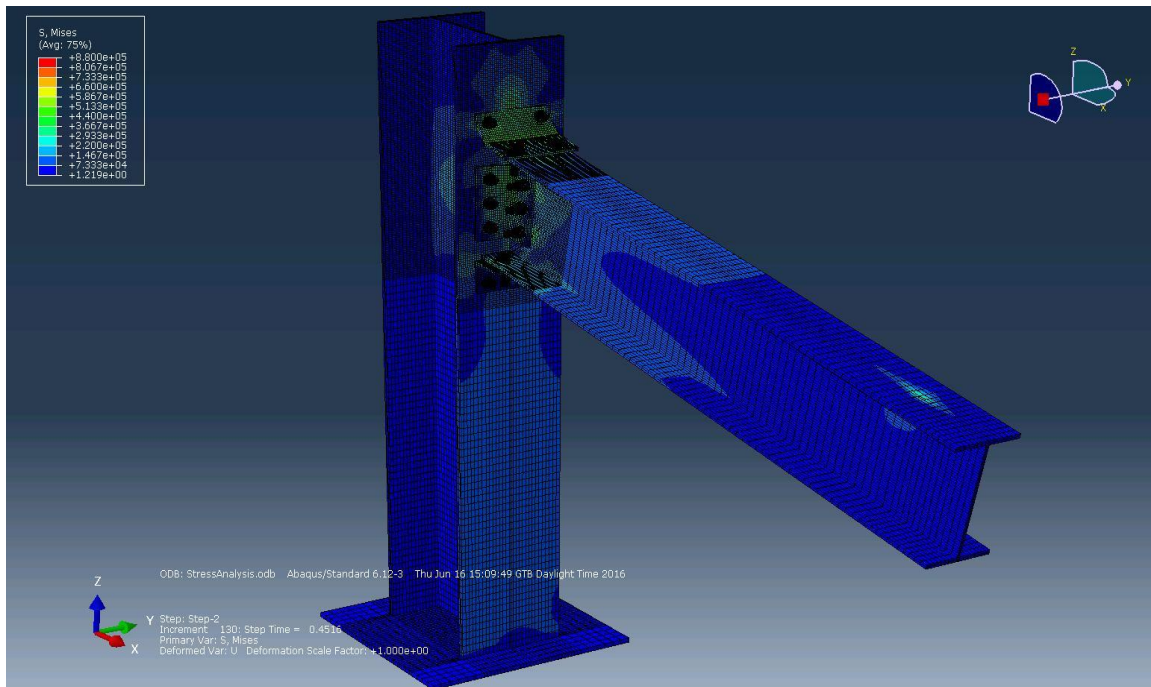
## 4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΘΑΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρακάτω εικόνα γίνεται παρουσίαση της διάταξης του φορέα πριν και μετά την επενέργεια των φορτίων. Με πράσινο χρώμα είναι η διάταξη πριν, ενώ με γκρι είναι η διάταξη μετά την φόρτιση:

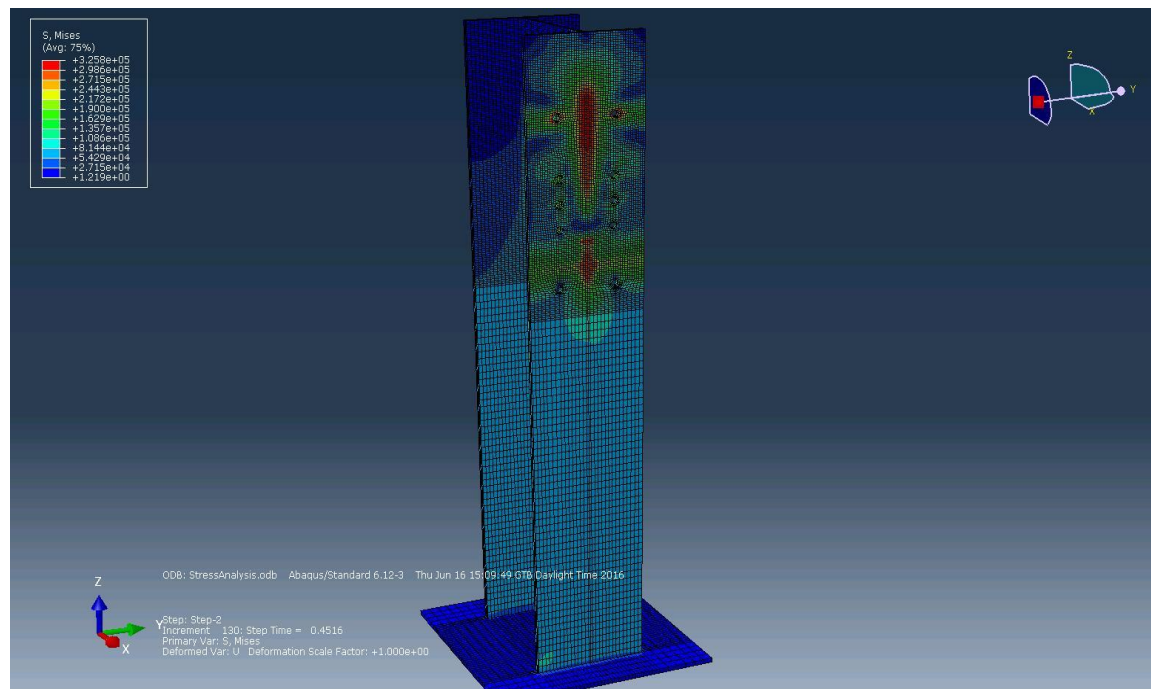


Εικόνα 4.8: Εικόνα διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Παρακάτω παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά Von Mises της πλήρους διάταξης καθώς και μεμονωμένα των επιμέρους κομματιών που την απαρτίζουν:

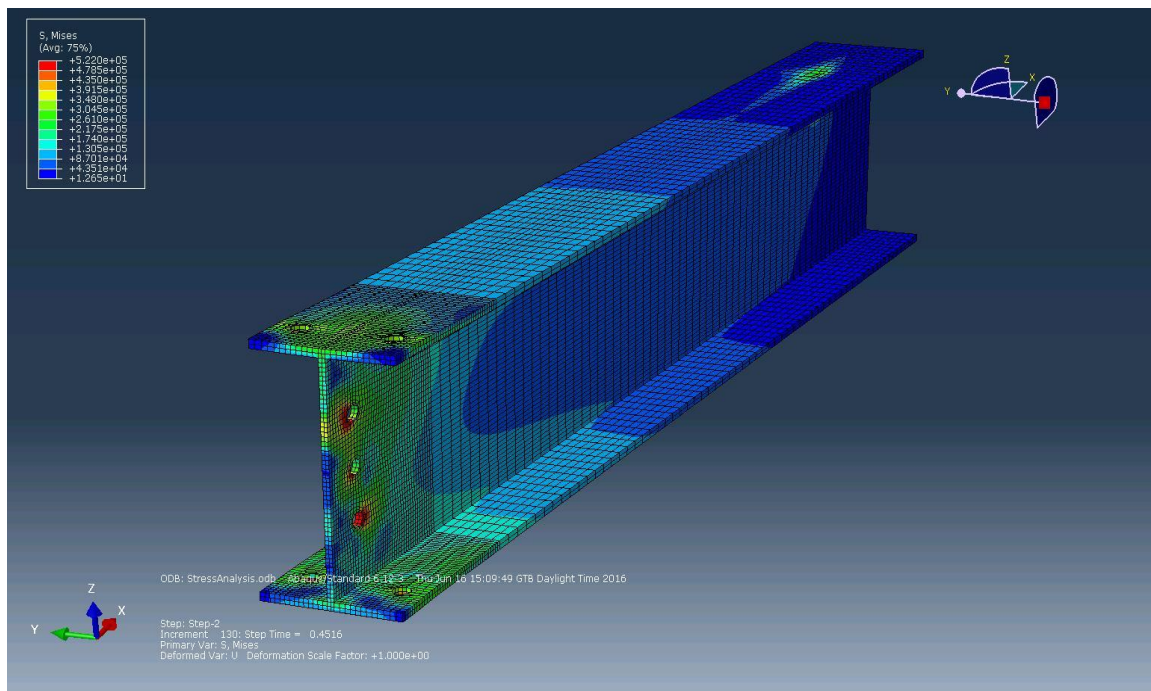


Εικόνα 4.9: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8,8 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση 1,219 KPa)

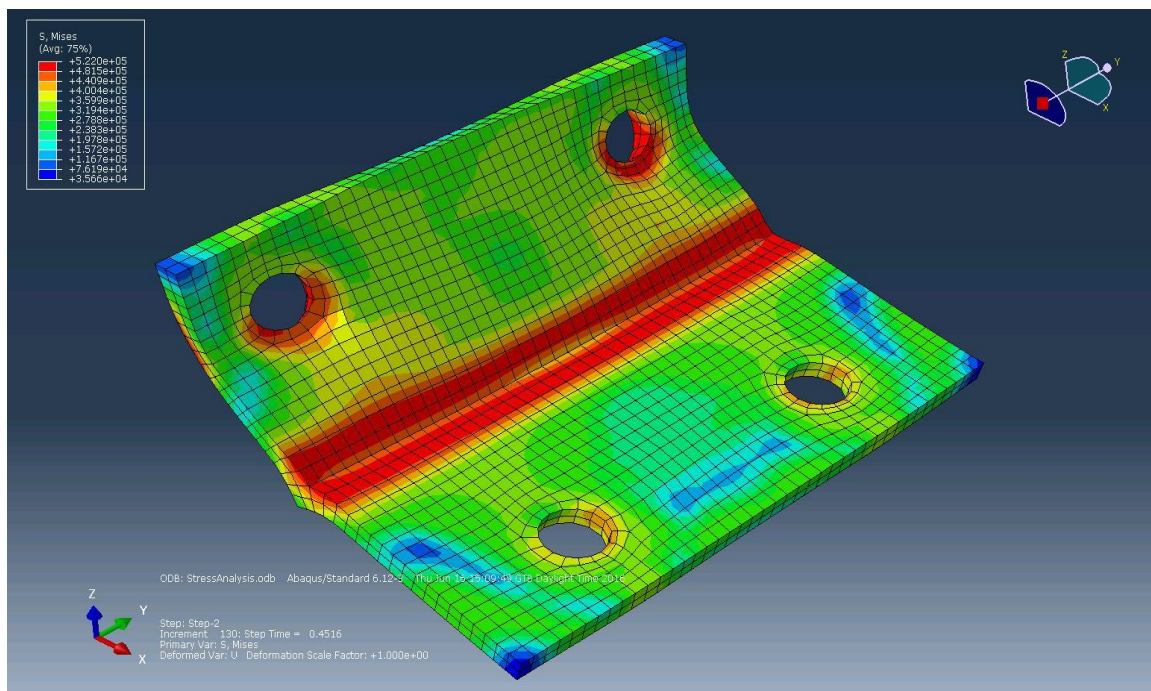


Εικόνα 4.10: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση  $3,258 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση 1,219 KPa)

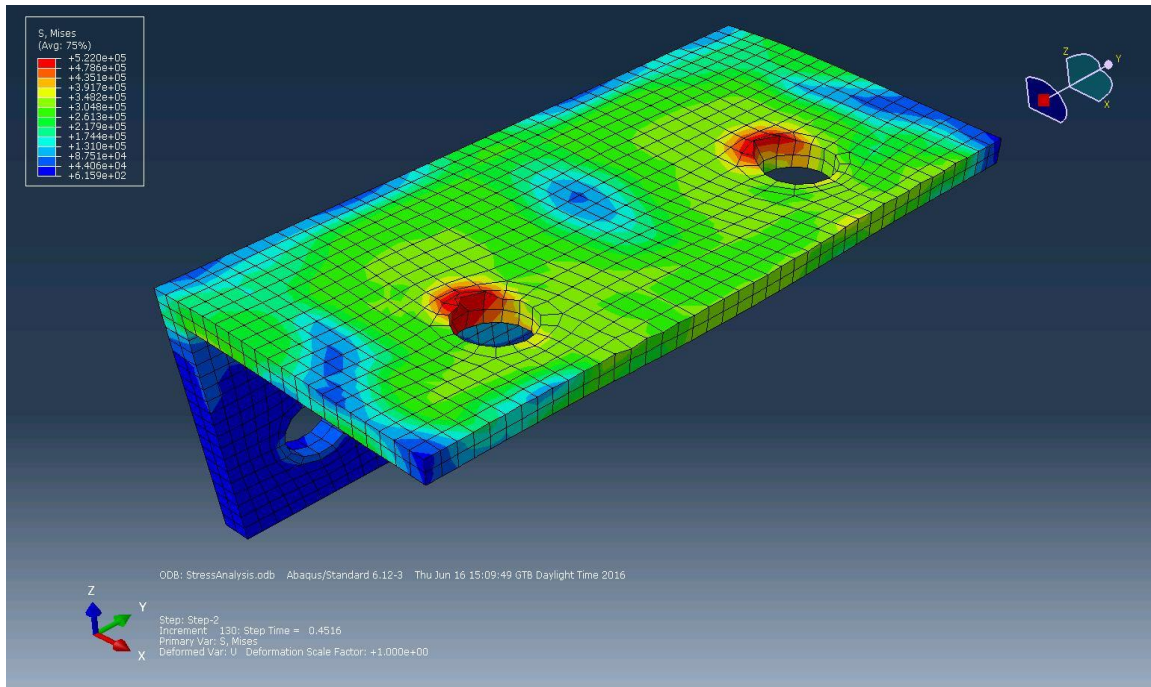




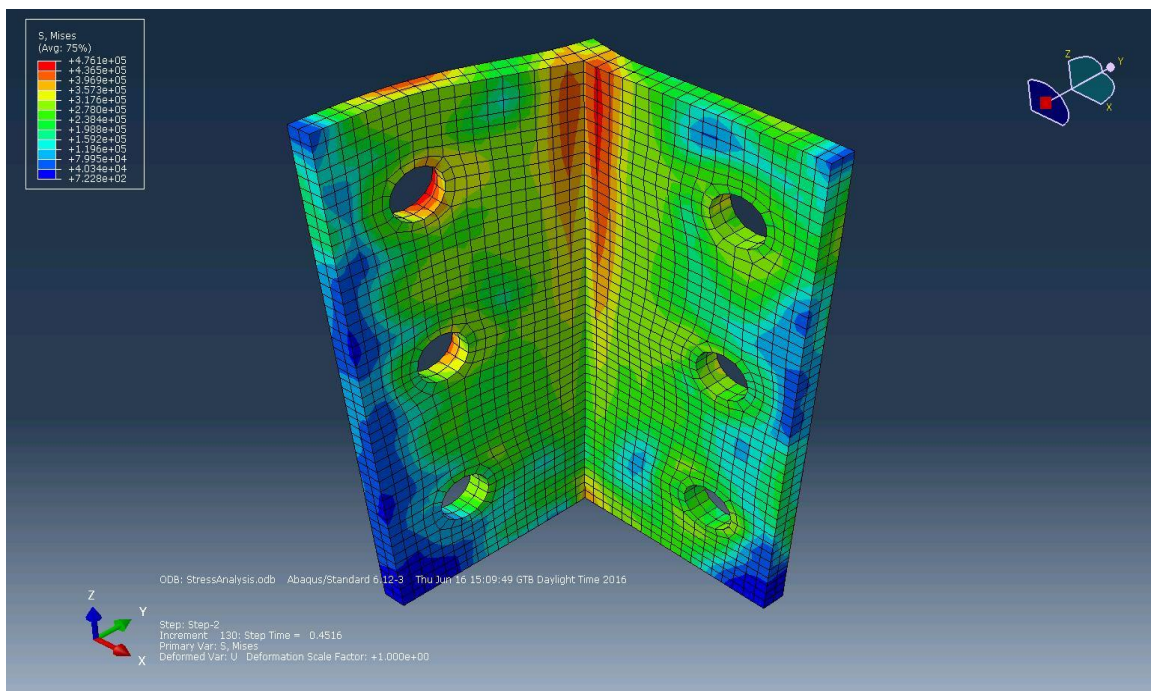
Εικόνα 4.11: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση  $5,220 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,265 \cdot 10^1$  KPa)



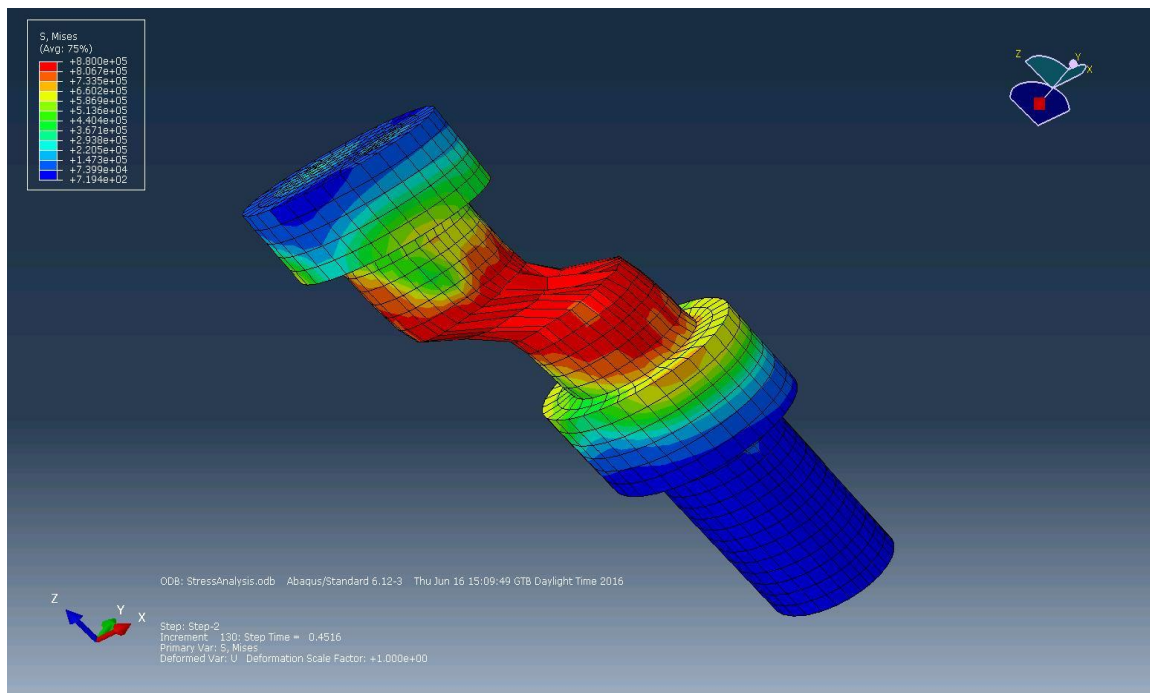
Εικόνα 4.12: Πάνω φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $5,220 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $3,566 \cdot 10^4$  KPa)



Εικόνα 4.13: Κάτω φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $5,220 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $6,159 \cdot 10^2$  KPa)

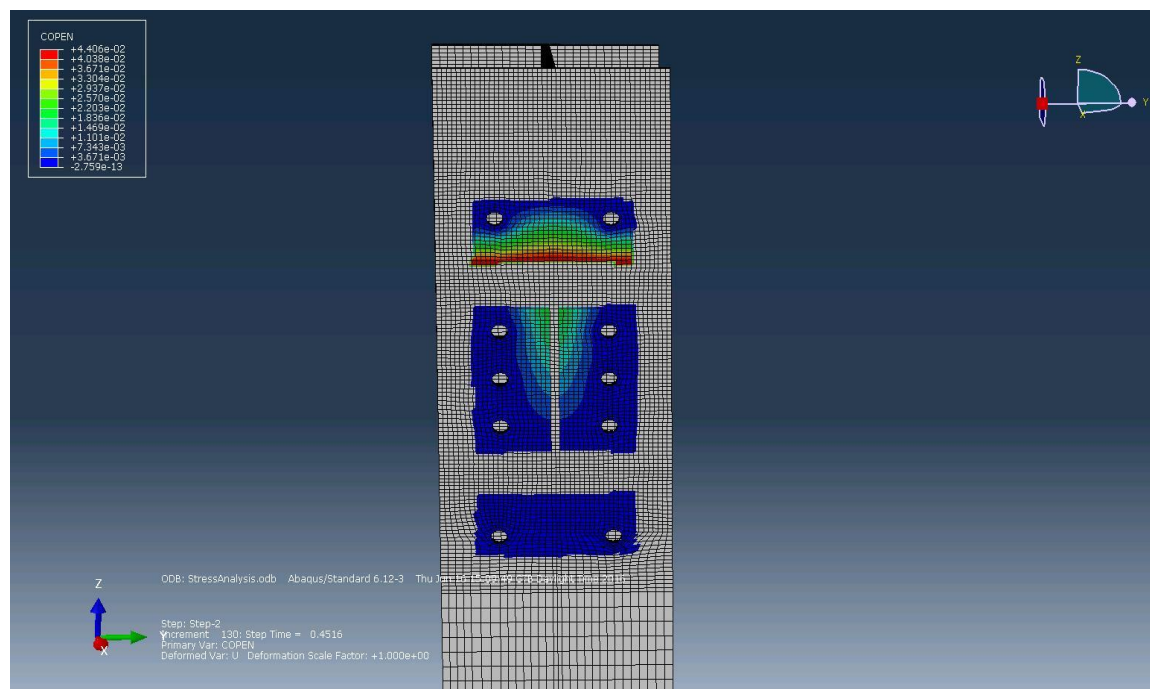


Εικόνα 4.14: Πλάγια φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $4,761 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $7,228 \cdot 10^2$  KPa)



Εικόνα 4.15: Κοιλίας διάταξης (Μέγιστη καταπόνηση  $8,800 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $7,194 \cdot 10^2$  KPa)

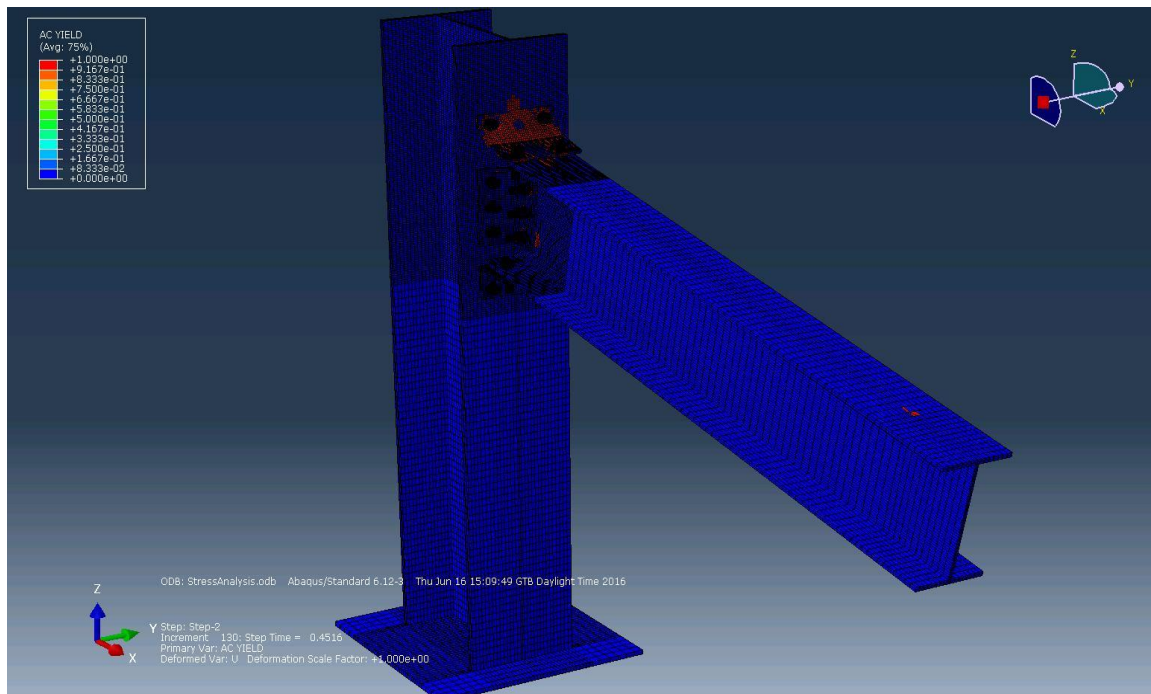
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας δοκού – στύλου:



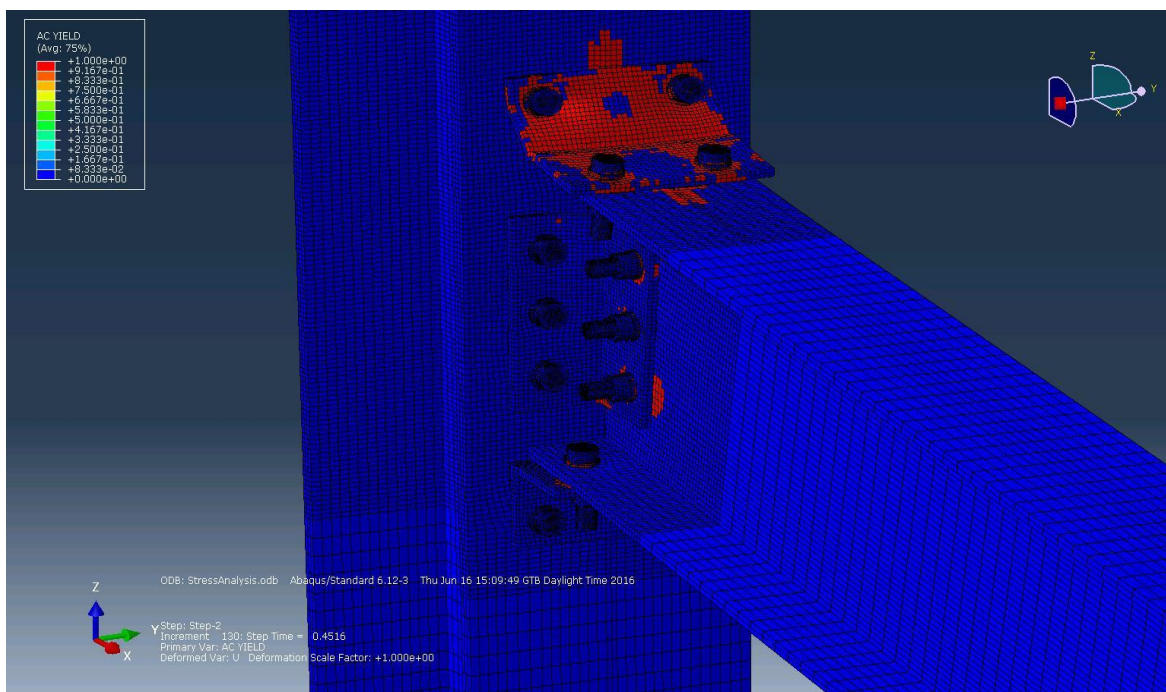
Εικόνα 4.16: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας



Στις παρακάτω δύο εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου Von Mises:



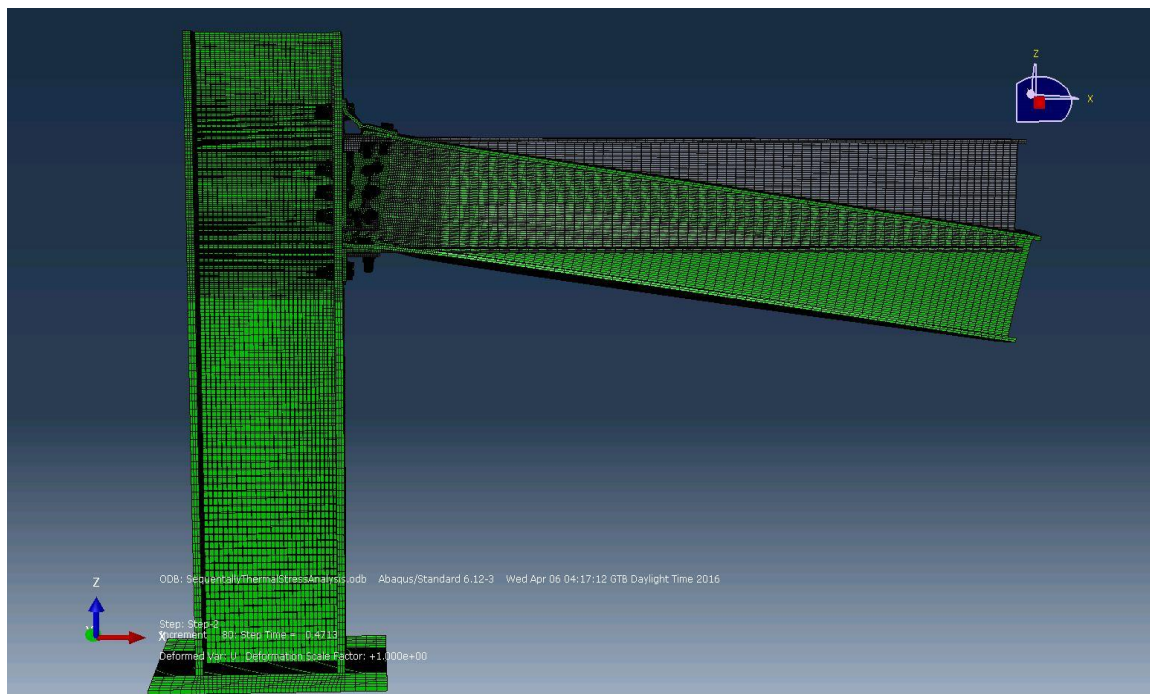
Εικόνα 4.17: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 4.18: Κοντινή προβολή στην ένωση όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

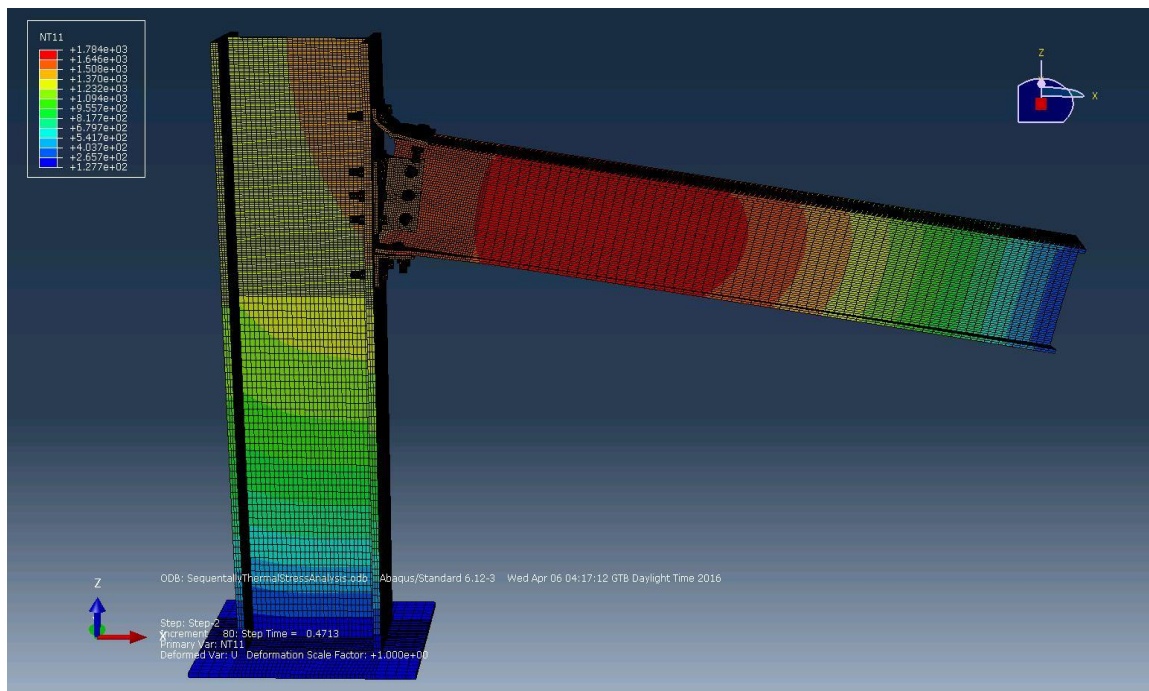
### 4.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ – ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Όπως προαναφέραμε αφού τρέξαμε ξεχωριστά τις δύο αναλύσεις, ύστερα, προσθέσαμε τα δεδομένα – αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης στη μηχανική σαν προκαθορισμένο πεδίο (predefined field) στο step-2 όπου επίσης ασκείται και η συγκεντρωμένη δύναμη στον φορέα μας. Στην παρακάτω εικόνα θα γίνει παρουσίαση της διάταξης του φορέα πριν και μετά την επενέργεια των φορτίων. Με πράσινο χρώμα είναι η διάταξη πριν, ενώ με γκρι είναι η διάταξη μετά την φόρτιση:



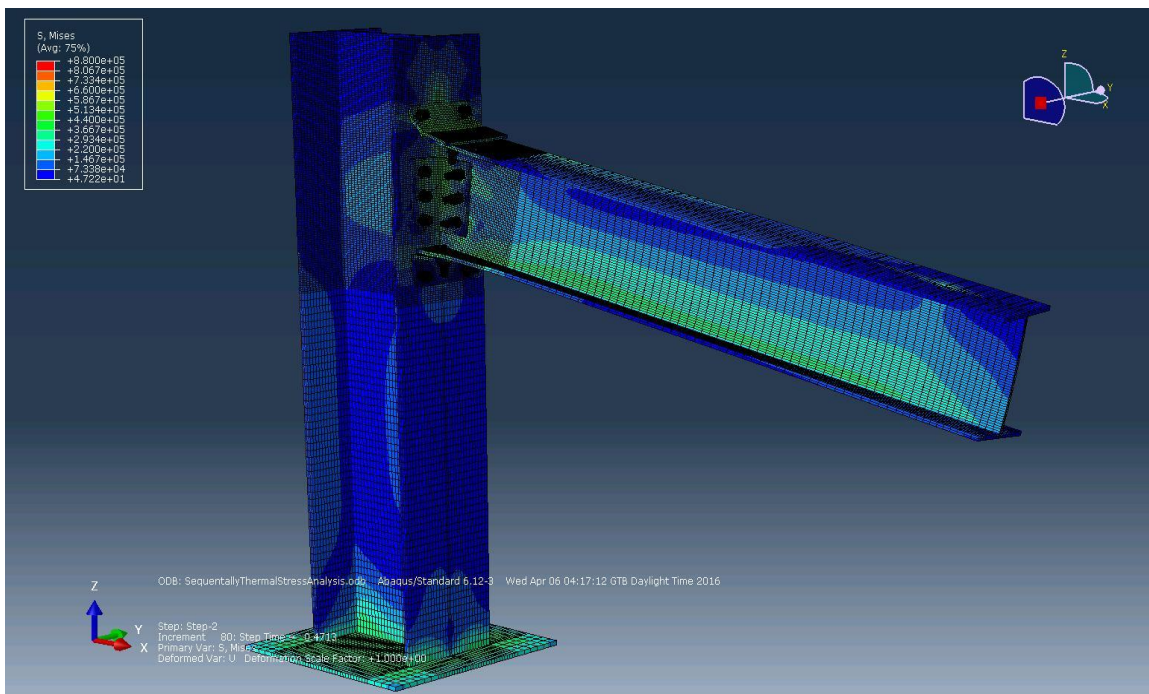
Εικόνα 4.19: Εικόνα διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στην συγκεκριμένη ανάλυση έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια των θερμικών και μηχανικών φορτίων και οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους 1784°C.



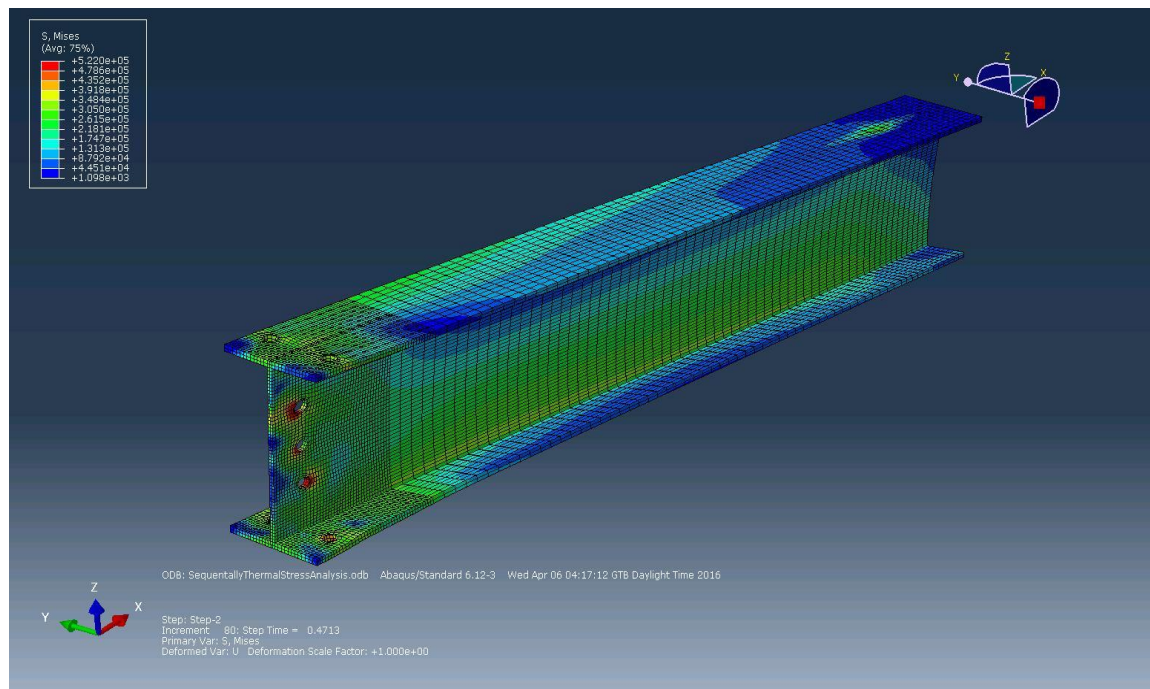
Εικόνα 4.20: Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη

Παρακάτω παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά Von Mises της πλήρους διάταξης καθώς και μεμονωμένα των επιμέρους κομματιών που την απαρτίζουν:

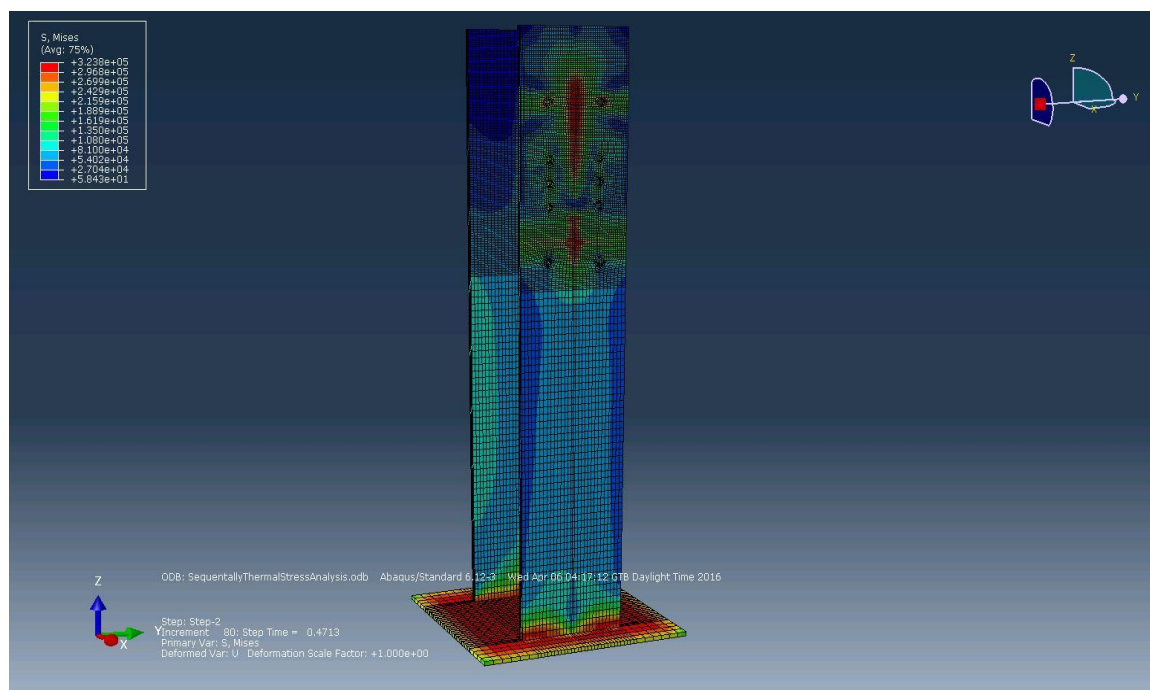


Εικόνα 4.21: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8,8 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $4,722 \cdot 10^1$  KPa)

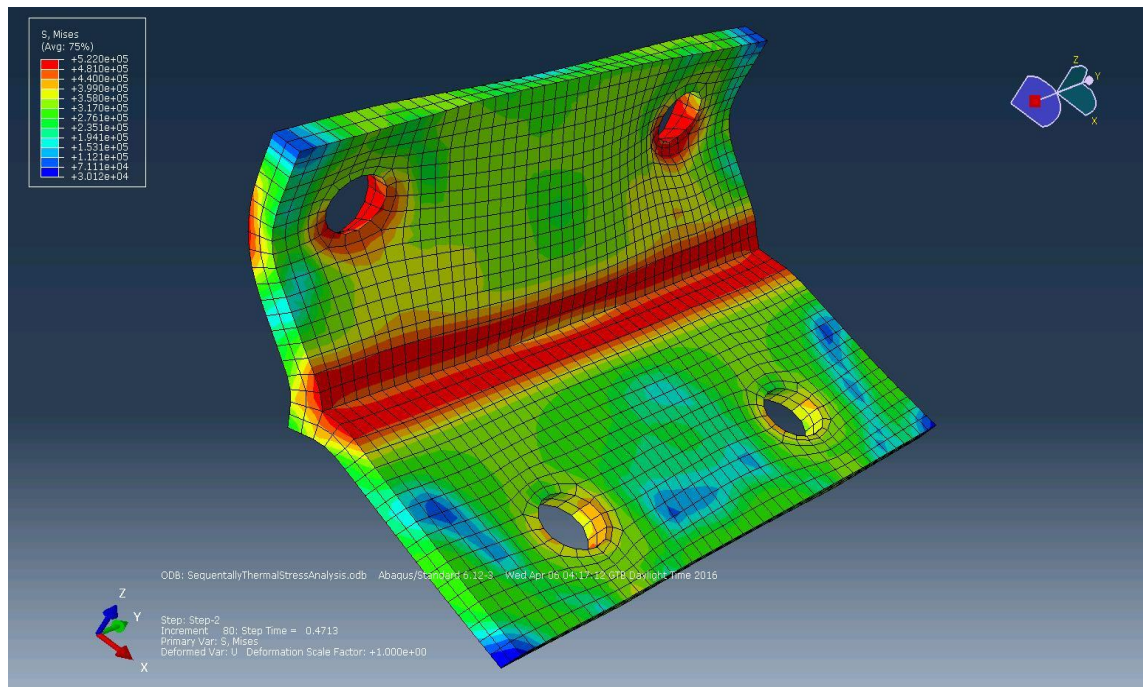




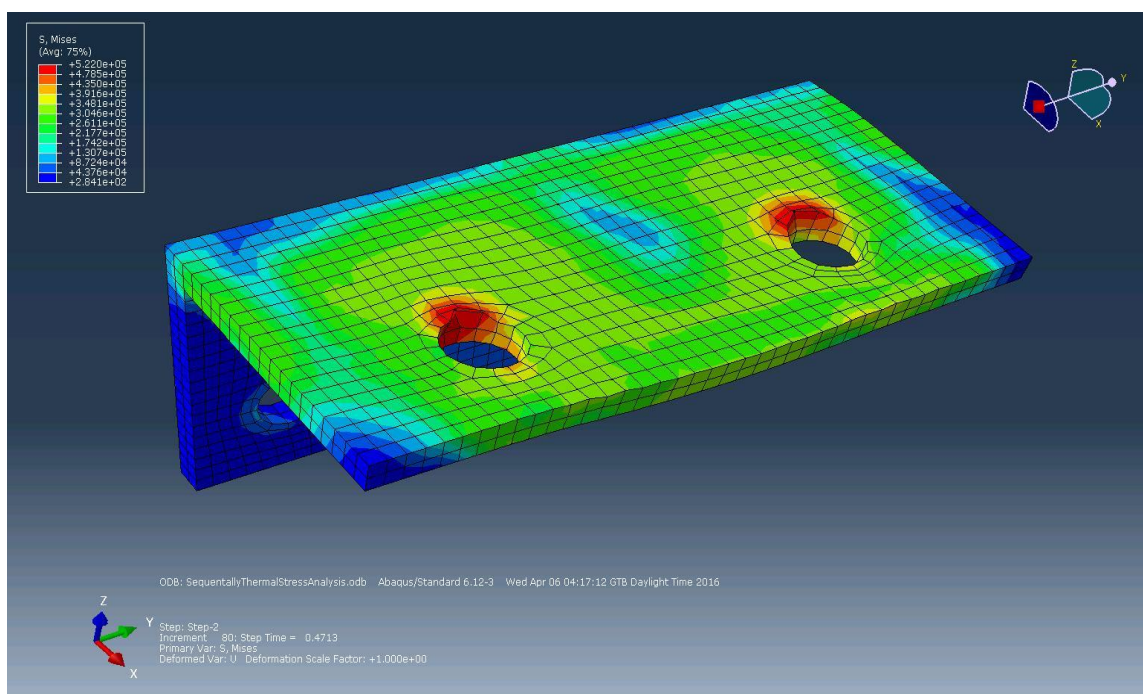
Εικόνα 4.22: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση  $5,220 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,098 \cdot 10^3$  KPa)



Εικόνα 4.23: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση  $3,238 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $5,843 \cdot 10^1$  KPa)

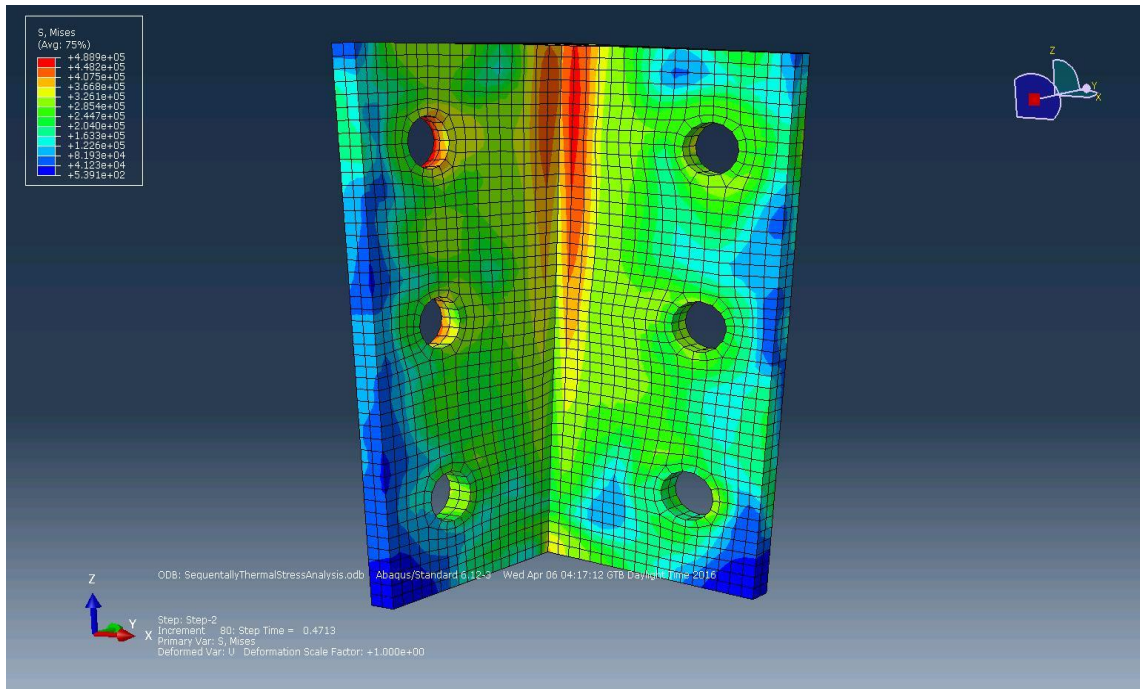


Εικόνα 4.24: Πάνω φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $5,220 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $3,012 \cdot 10^4$  KPa)

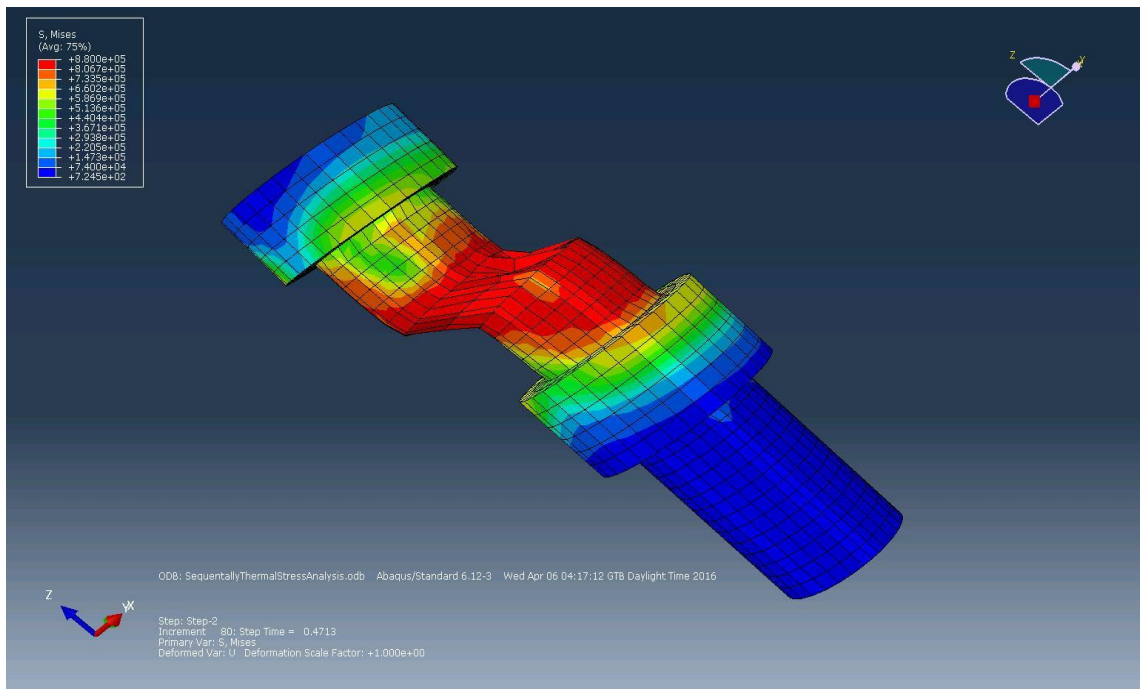


Εικόνα 5.25: Κάτω φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $5,220 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,841 \cdot 10^2$  KPa)



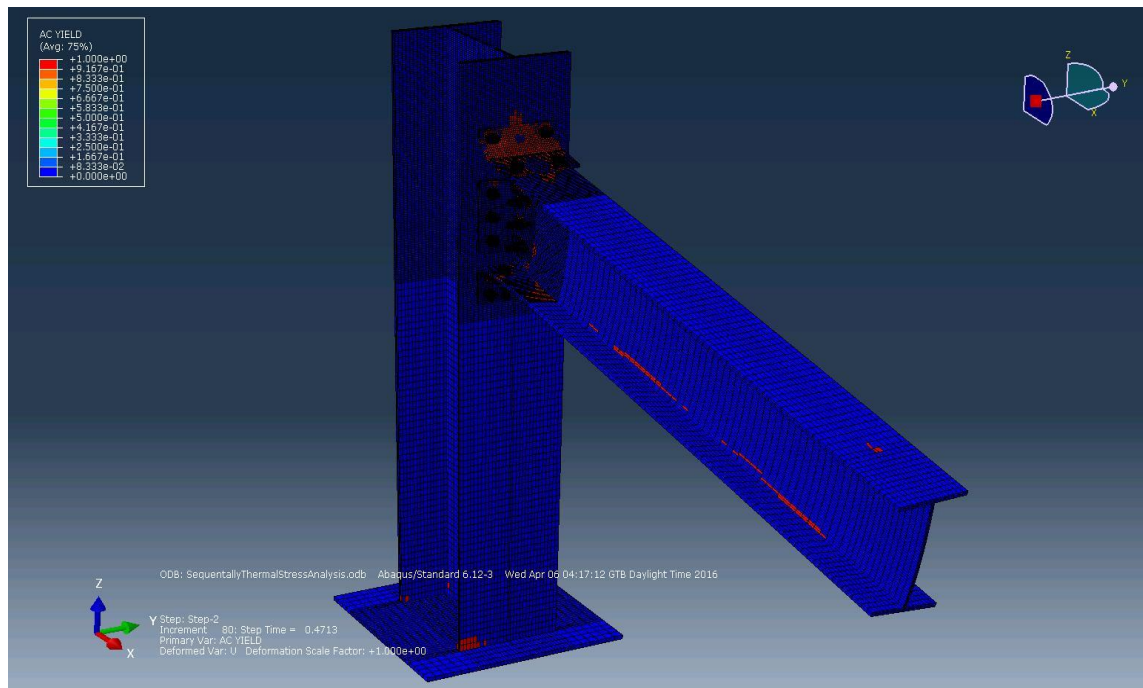


Εικόνα 4.26: Πλάγια φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $4,889 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $5,391 \cdot 10^2$  KPa)

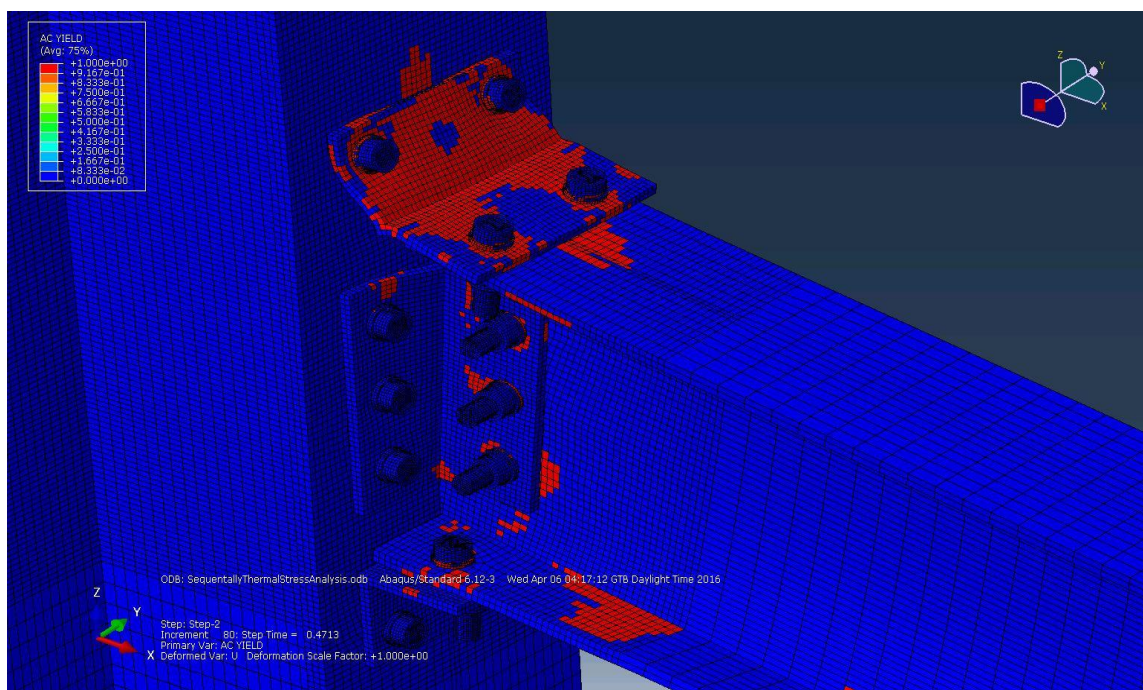


Εικόνα 6.27: Ενδεικτικός κοχλίας διάταξης (Μέγιστη καταπόνηση  $8,800 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $7,245 \cdot 10^2$  KPa)

Στις δύο παρακάτω εικόνες, με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου Von Mises:

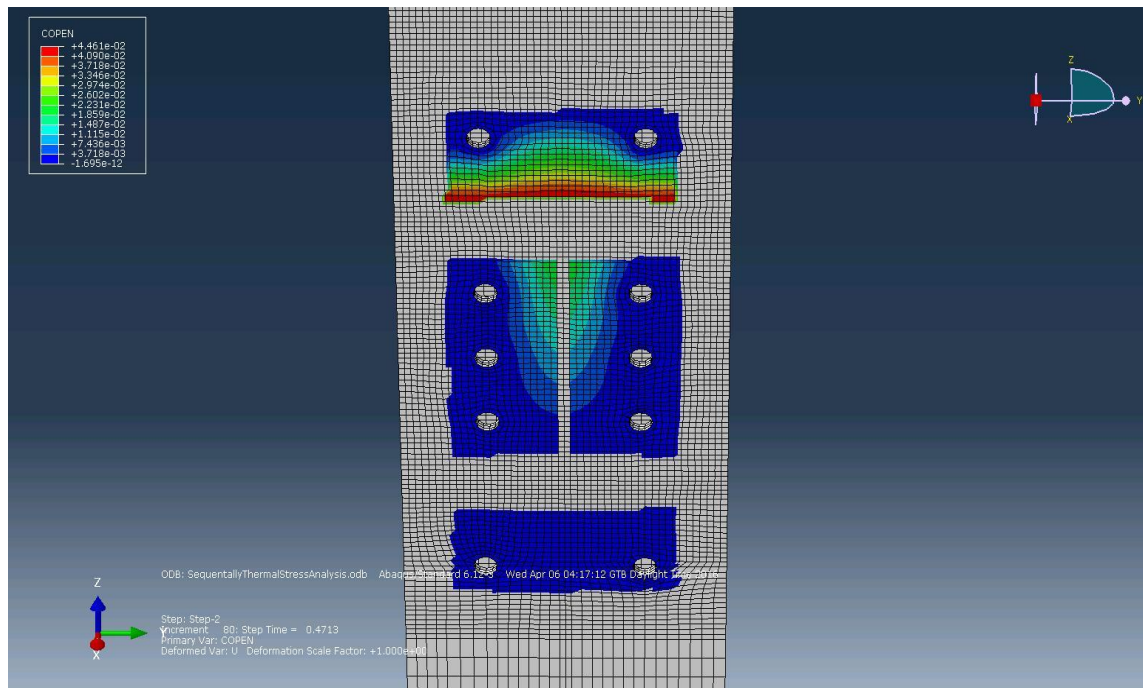


Εικόνα 4.28: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 2.29: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας (κοντινή προβολή ένωσης δοκού – στύλου)

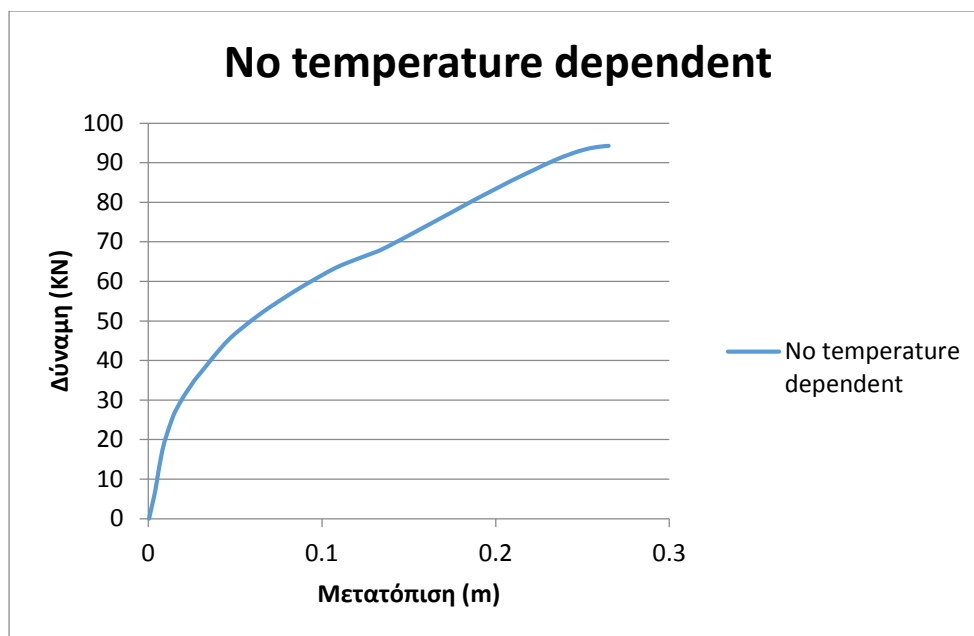
Τέλος στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας δοκού – στύλου:



Εικόνα 4.30: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

#### 4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης όπως αυτό προέκυψε ύστερα από την διεκπεραίωση της sequentially thermal – stress analysis που κάναμε. Αξίζει να αναφερθεί ότι αφού δεν έχουμε δηλώσει ότι δεν υπάρχει εξάρτηση μηχανικών ιδιοτήτων με την αύξηση της θερμοκρασίας, η θερμοκρασία δεν παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης για την περίπτωση που λαμβάνουμε υπ’ όψιν την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία με αυτή που δεν υπάρχει ώστε να εξάγουμε περεταίρω συμπεράσματα για την μεταλλική κατασκευή.



Εικόνα 7: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για την περίπτωση που δεν υπάρχει εξάρτηση μηχανικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία

## 5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

---

### 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Για να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα ώστε να υπάρχει μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του φορέα από την θερμοκρασία ακολουθήσαμε ακριβώς τα ίδια βήματα που πραγματοποιήσαμε και στην ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου και επιπρόσθετα εισήγαμε στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών δεδομένες τιμές θερμοκρασίας για το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας, τον λόγο Poisson, την τάση διαρροής και την πλαστική παραμόρφωση. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε περιγράφεται πιο αναλυτικά παρακάτω.

Για την δοκό, τον στύλο, τις φλάντζες και τις ροδέλες του φορέα,

Materials -> beam\_column\_angles\_washers -> Elastic -> Ενεργοποιήσαμε το Use temperature-dependent data -> και προσθέσαμε τα εξής δεδομένα:

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Temp
150000000	0.3	20
150000000	0.3	100
138000000	0.3	200
126000000	0.3	300
114000000	0.3	400
102000000	0.3	500
57400000	0.3	600
25800000	0.3	700
15200000	0.3	800
9200000	0.3	900

Materials -> beam\_column\_angles\_washers -> Plastic -> Ενεργοποιήσαμε το Use temperature-dependent data -> και προσθέσαμε τα εξής δεδομένα:

<b>Yield Stress</b>	<b>Plastic Strain</b>	<b>Temp</b>
300600	0	20
445200	0.055301	20
522000	0.14494	20
300600	0	100
445200	0.055301	100
522000	0.14494	100
245000	0	200
300600	0.017682593	200
300600	0.135092593	200
183500	0	300
300600	0.015629167	300
300600	0.135092593	300
120500	0	400
300600	0.015127127	400
300600	0.134168543	400
98500	0	500
241000	0.015484162	500
241000	0.1352628951	500
63500	0	600
147500	0.015074729	600
147500	0.134954729	600
32500	0	700
78500	0.0148311957	700
78500	0.1343119557	700
16750	0	800
31500	0.015641357	800
31500	0.135641357	800
11500	0	900
17500	0.016851403	900
17500	0.136851403	900

Αντίστοιχα για τους κοχλίες του φορέα,

Materials -> bolts\_material -> Elastic -> Ενεργοποιήσαμε το Use temperature-dependent data -> και προσθέσαμε τα εξής δεδομένα:

<b>Young's Modulus</b>	<b>Poisson's Ratio</b>	<b>Temp</b>
150000000	0.3	20
150000000	0.3	100
138000000	0.3	200
126000000	0.3	300
114000000	0.3	400
102000000	0.3	500
57400000	0.3	600
25800000	0.3	700
15200000	0.3	800
9200000	0.3	900

Materials -> bolts\_material -> Plastic -> Ενεργοποιήσαμε το Use temperature-dependent data -> και προσθέσαμε τα εξής δεδομένα:



<b>Yield Stress</b>	<b>Plastic Strain</b>	<b>Temp</b>
300600	0	20
445200	0.055301	20
522000	0.14494	20
300600	0	100
445200	0.055301	100
522000	0.14494	100
245000	0	200
300600	0.017682593	200
300600	0.135092593	200
183500	0	300
300600	0.015629167	300
300600	0.135092593	300
120500	0	400
300600	0.015127127	400
300600	0.134168543	400
98500	0	500
241000	0.015484162	500
241000	0.1352628951	500
63500	0	600
147500	0.015074729	600
147500	0.134954729	600
32500	0	700
78500	0.0148311957	700
78500	0.1343119557	700
16750	0	800
31500	0.015641357	800
31500	0.135641357	800
11500	0	900
17500	0.016851403	900
17500	0.136851403	900

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω τιμές που δώσαμε, αν και κανονικά πρέπει να προέρχονται από Ευροκώδικες, στο πλαίσιο της εργασίας μας αρκεστήκαμε σε μία προσέγγιση κατά εκτίμηση.

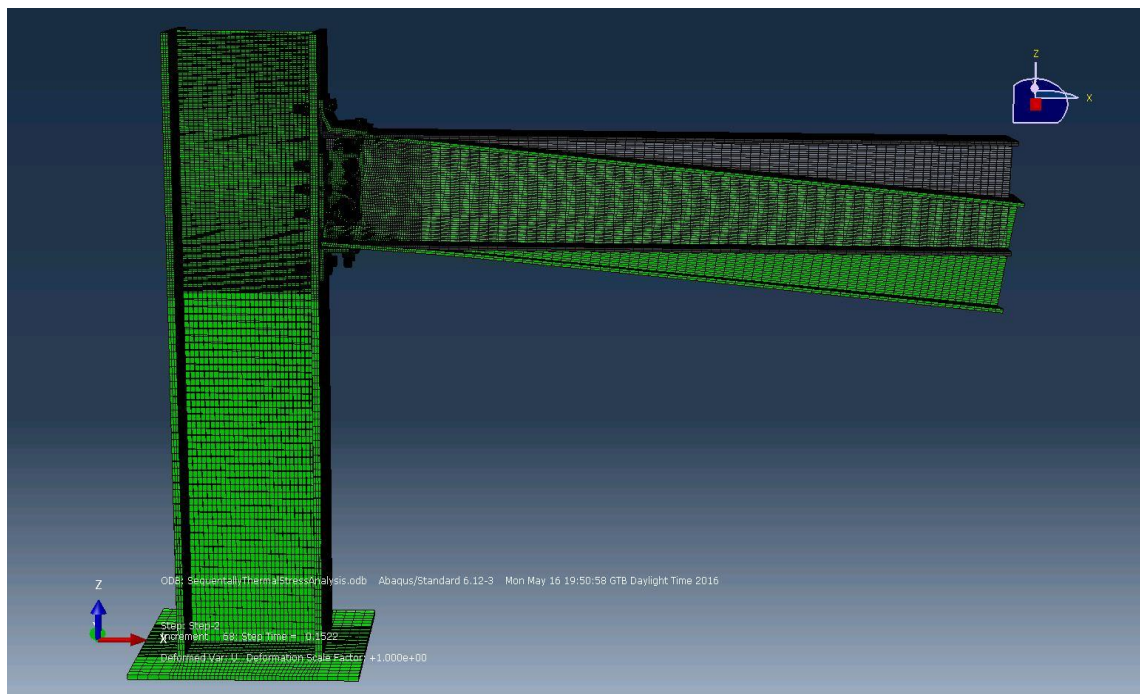
## 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

### 6.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΘΑΡΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στις συγκεκριμένες δύο αναλύσεις δεν προβήκαμε σε κάποια αλλαγή στα δεδομένα μας δεδομένου ότι μόνο στο αρχείο της sequentially thermal – stress analysis προσθέσαμε την εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων του φορέα μας από την θερμοκρασία. Συνεπώς, τα καθαρά θερμικά και μηχανικά αποτελέσματα ταυτίζονται με αυτά της προηγούμενης ανάλυσης και μπορούν να βρεθούν στα κεφάλαια 4.1 και 4.2.

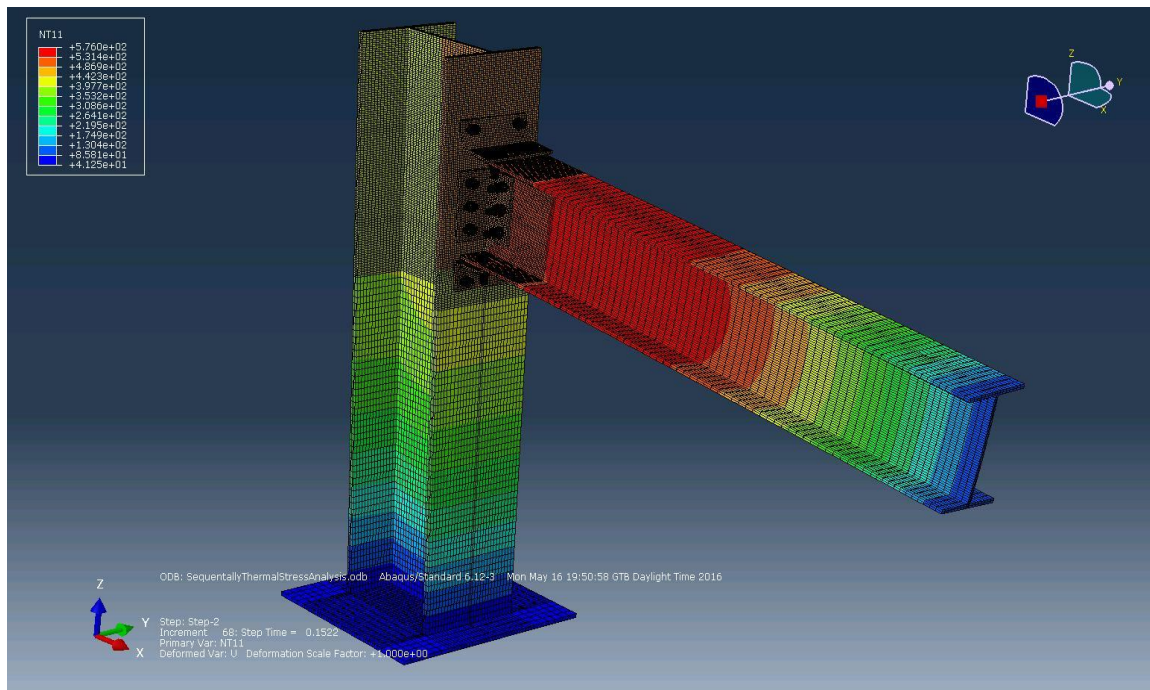
### 6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ – ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται η μετατόπιση του φορέα μας πριν και μετά την άσκηση των φορτίων:



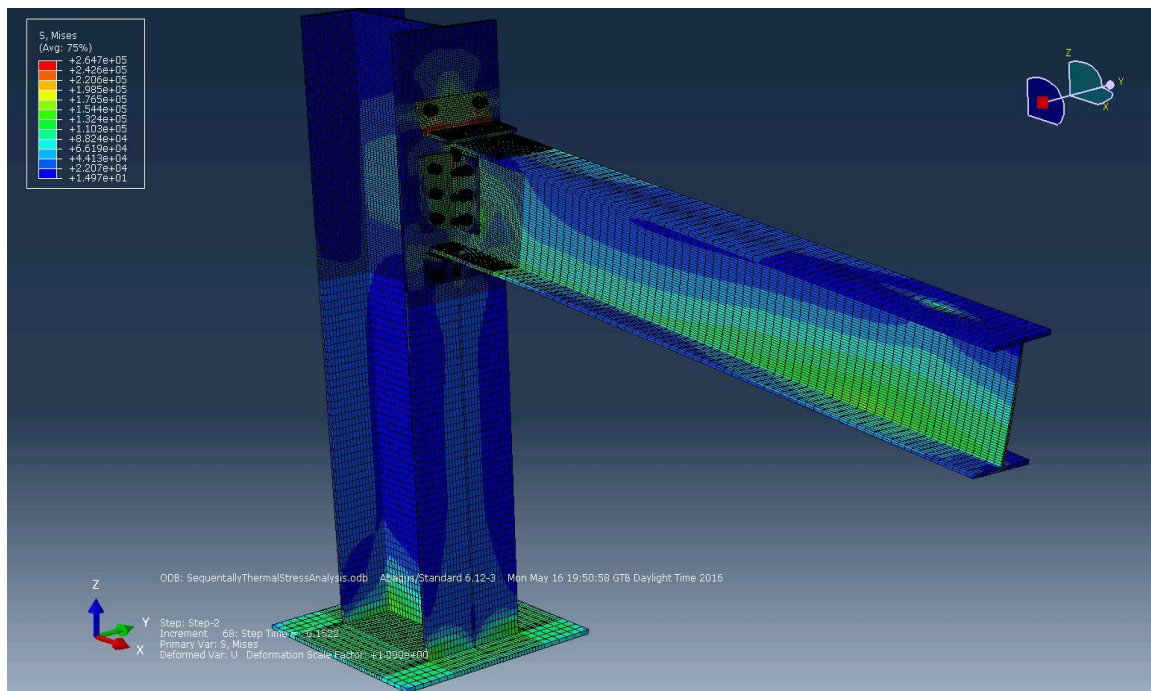
Εικόνα 6.1: Εικόνα διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στην συγκεκριμένη ανάλυση έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια των θερμικών και μηχανικών φορτίων και οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους  $576^{\circ}\text{C}$ .

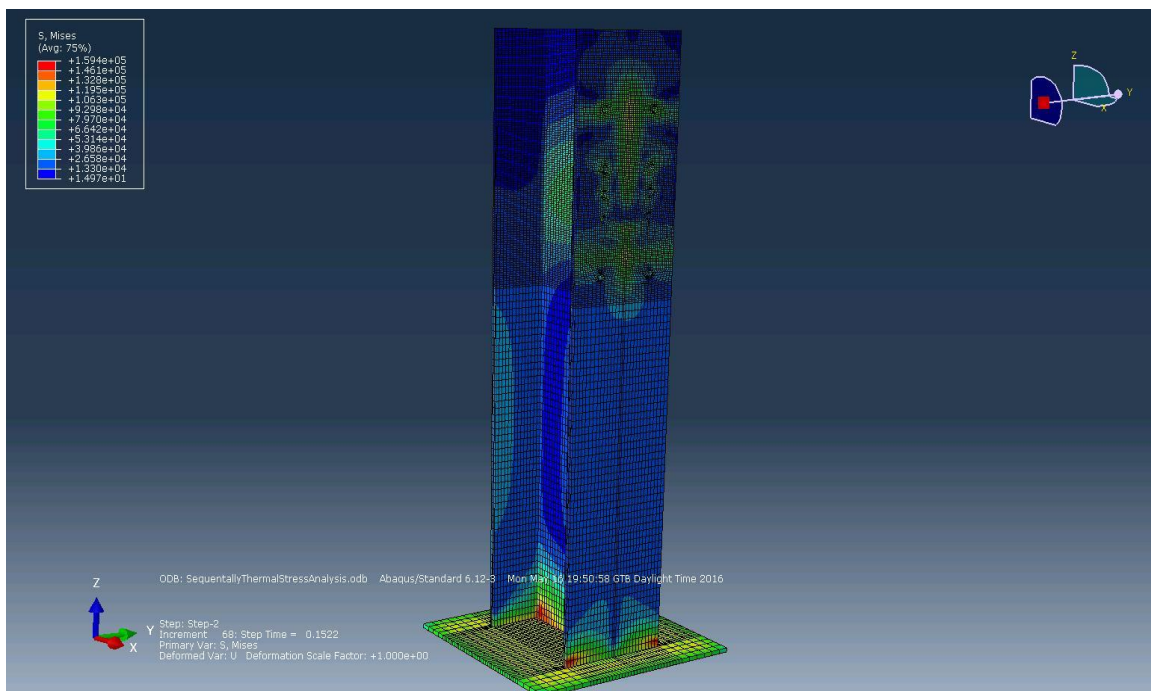


Εικόνα 6.2: Θερμοκρασιακή διανομή στον φορέα μας

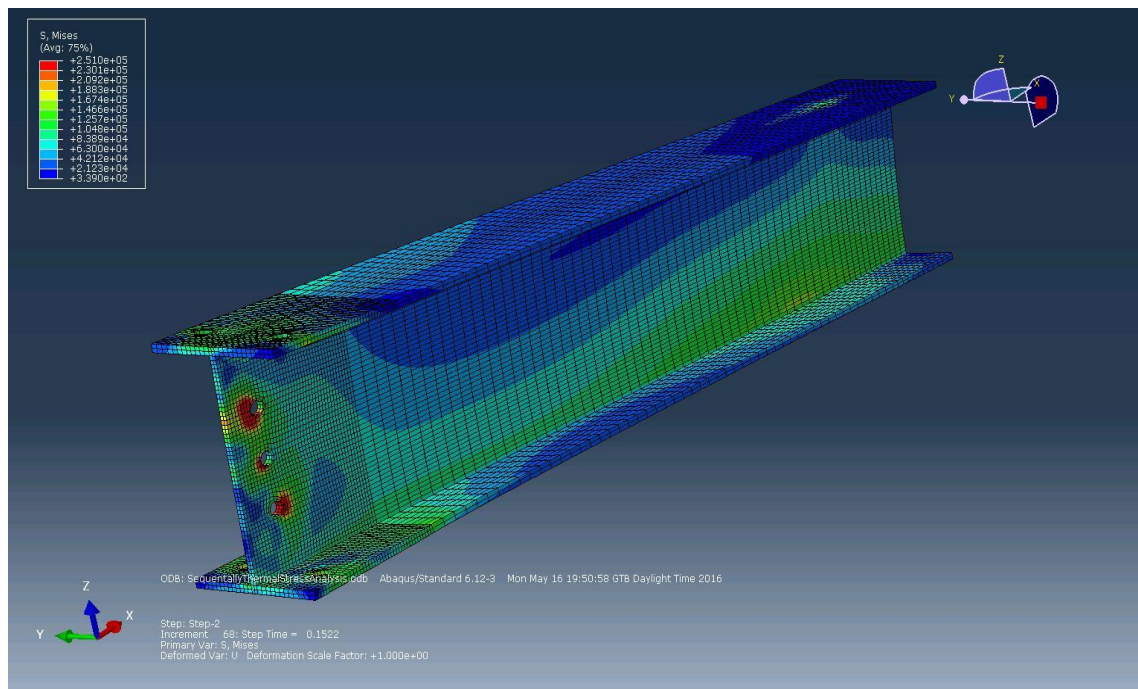
Παρακάτω παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά Von Mises της πλήρους διάταξης καθώς και μεμονωμένα των επιμέρους κομματιών που την απαρτίζουν:



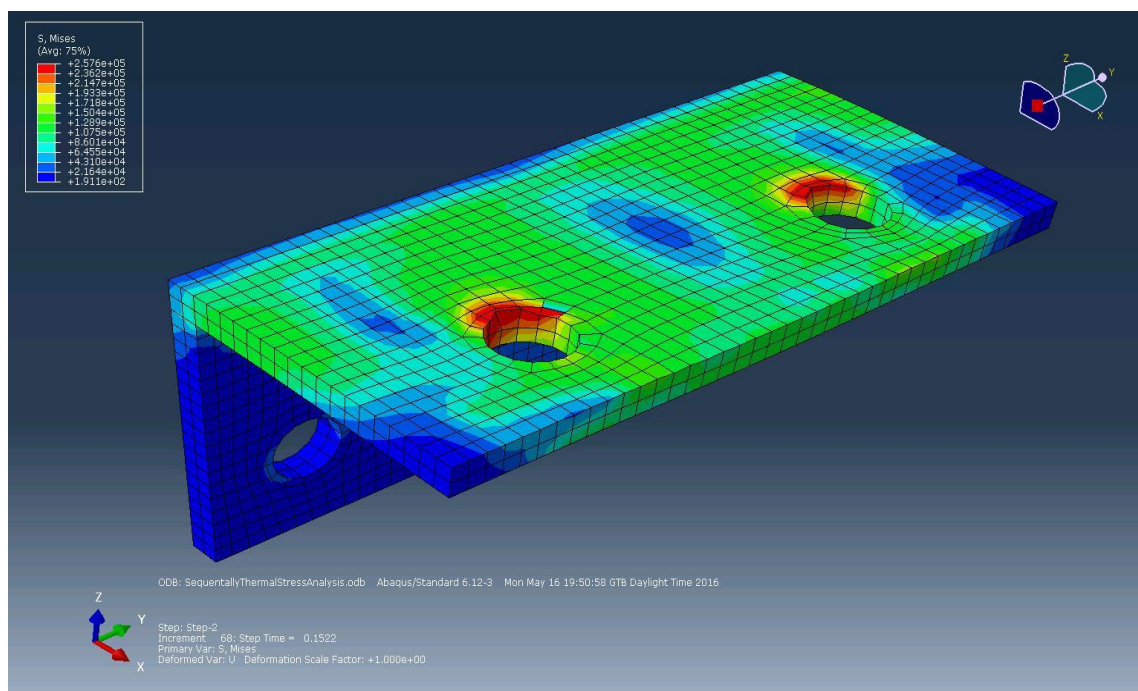
Εικόνα 6.3: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $2,467 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,497 \cdot 10^1$  KPa)



Εικόνα 6.4: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση  $1,954 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,497 \cdot 10^1$  KPa)

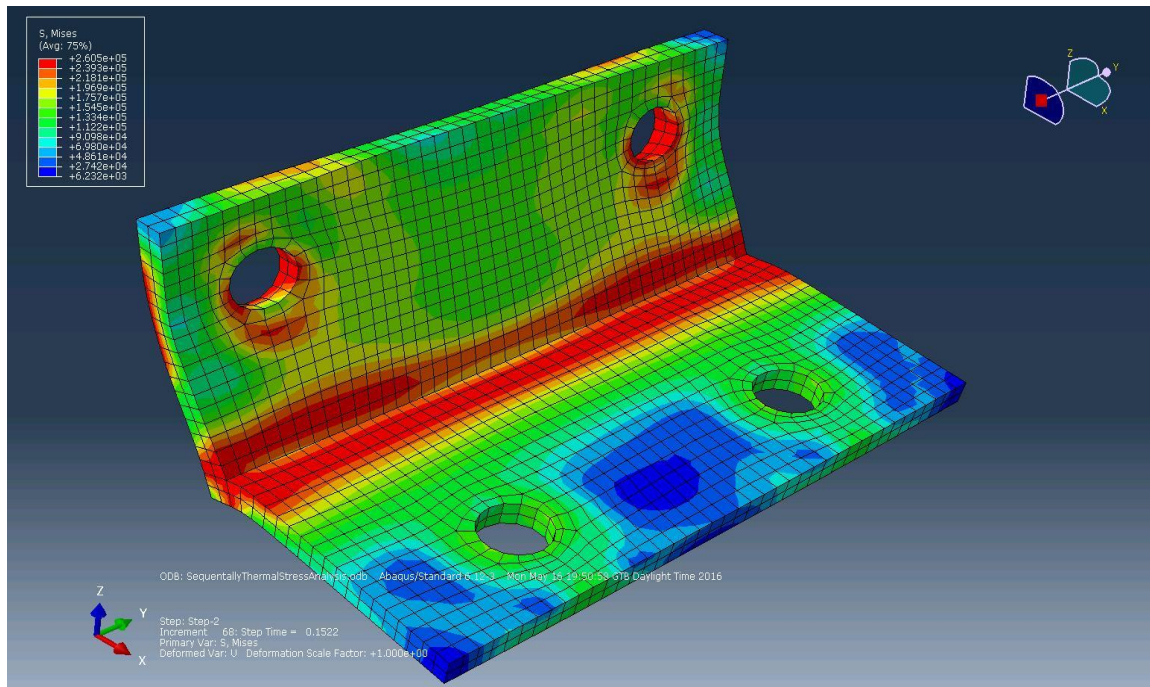


Εικόνα 6.5: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση  $2,510 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $3,390 \cdot 10^2$  KPa)

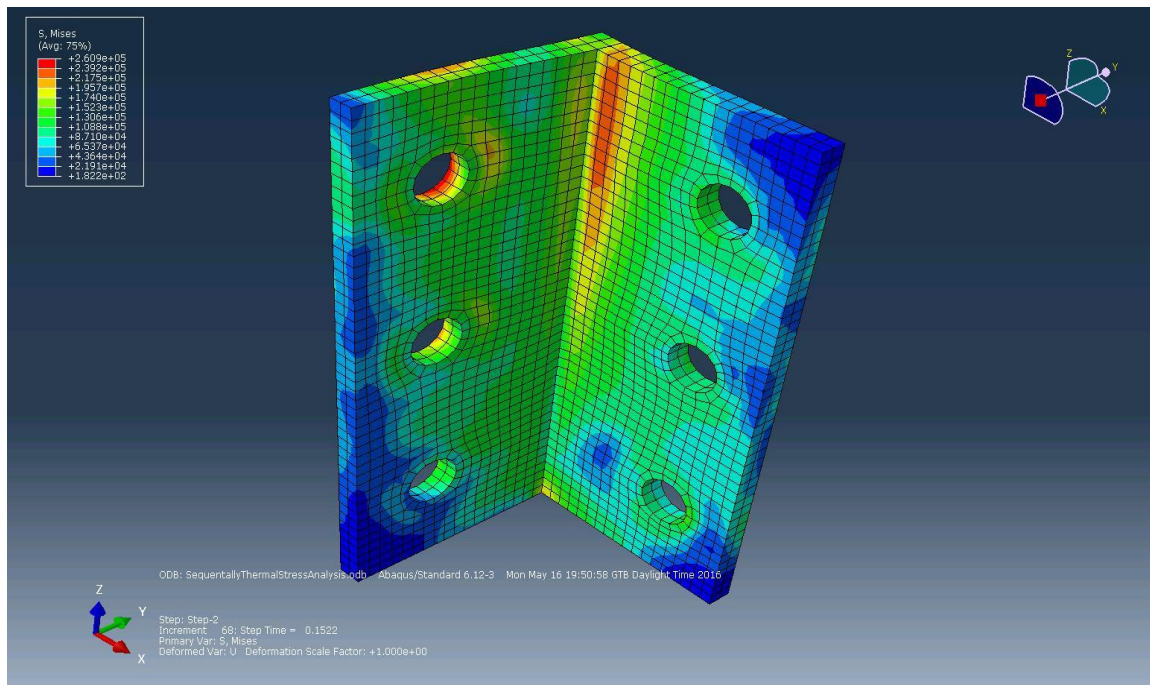


Εικόνα 6.6: Κάτω φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $2,576 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,911 \cdot 10^2$  KPa)

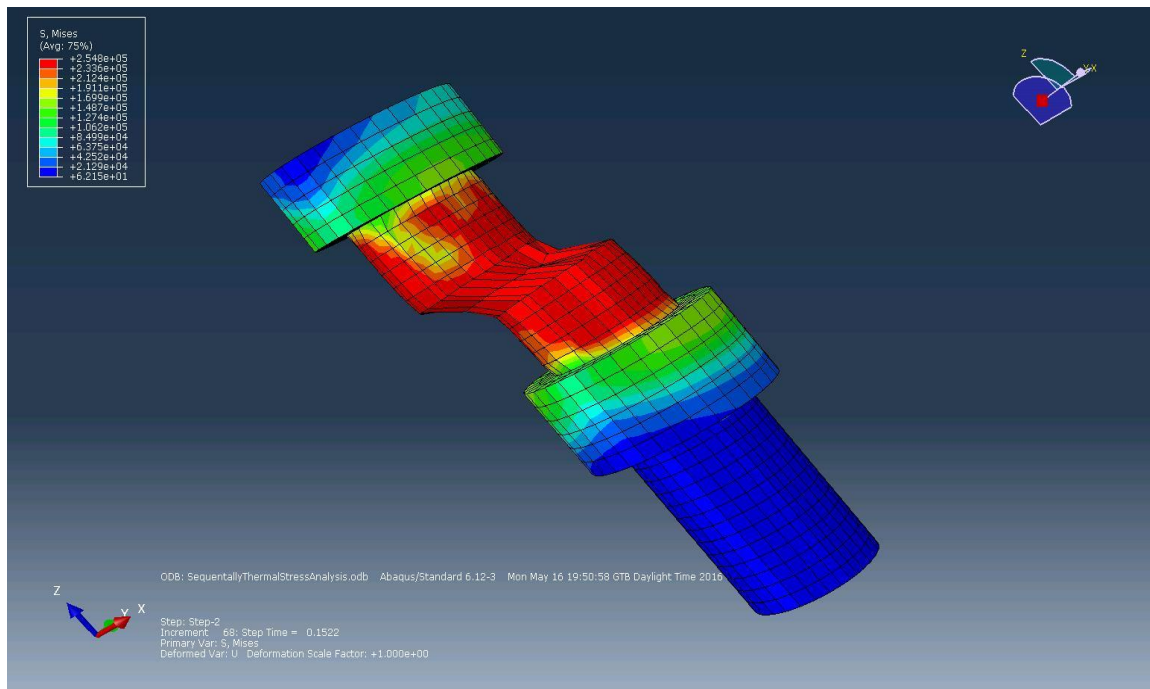




Εικόνα 6.7: Πάνω φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $2,605 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $6,232 \cdot 10^3$  KPa)

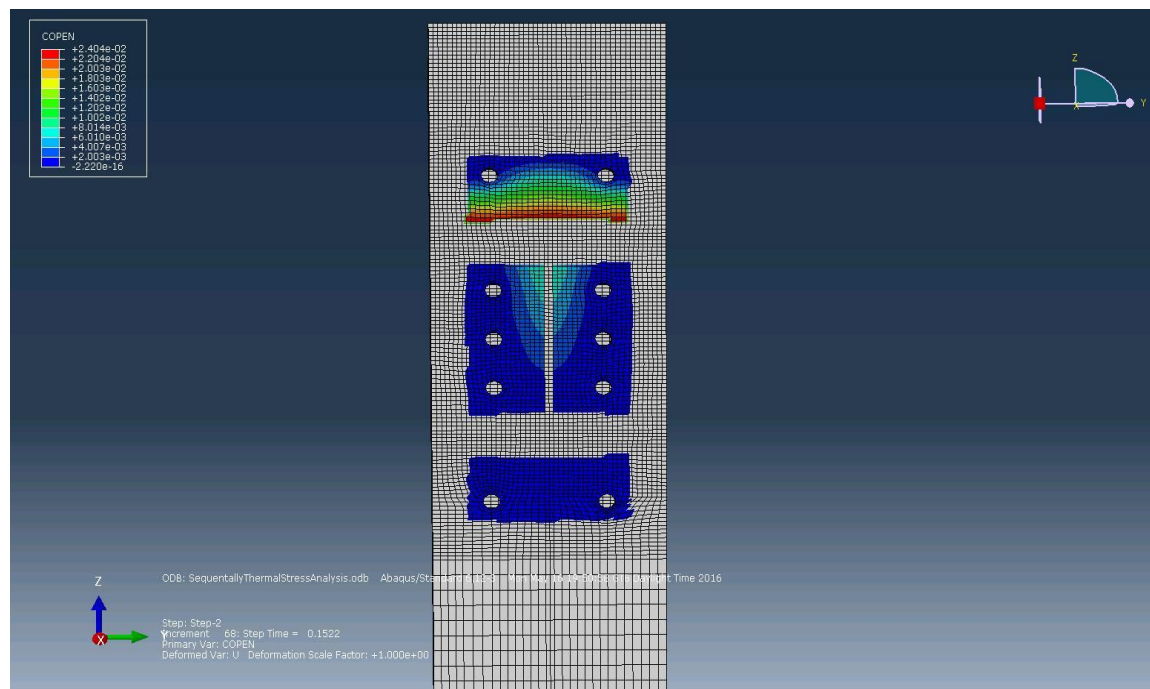


Εικόνα 6.8: Πλάγια φλάντζα (Μέγιστη καταπόνηση  $2,609 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,822 \cdot 10^2$  KPa)



Εικόνα 6.9: Κοχλίας διάταξης (Μέγιστη καταπόνηση  $2,548 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $6,215 \cdot 10^1$  KPa)

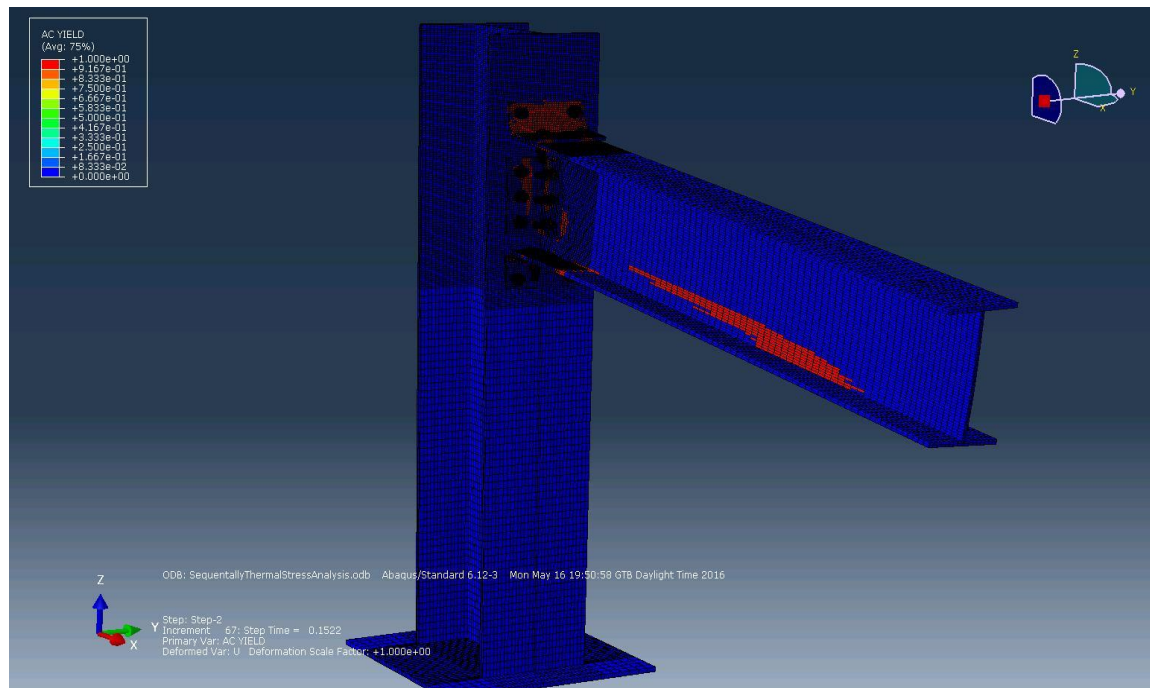
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας δοκού – στύλου:



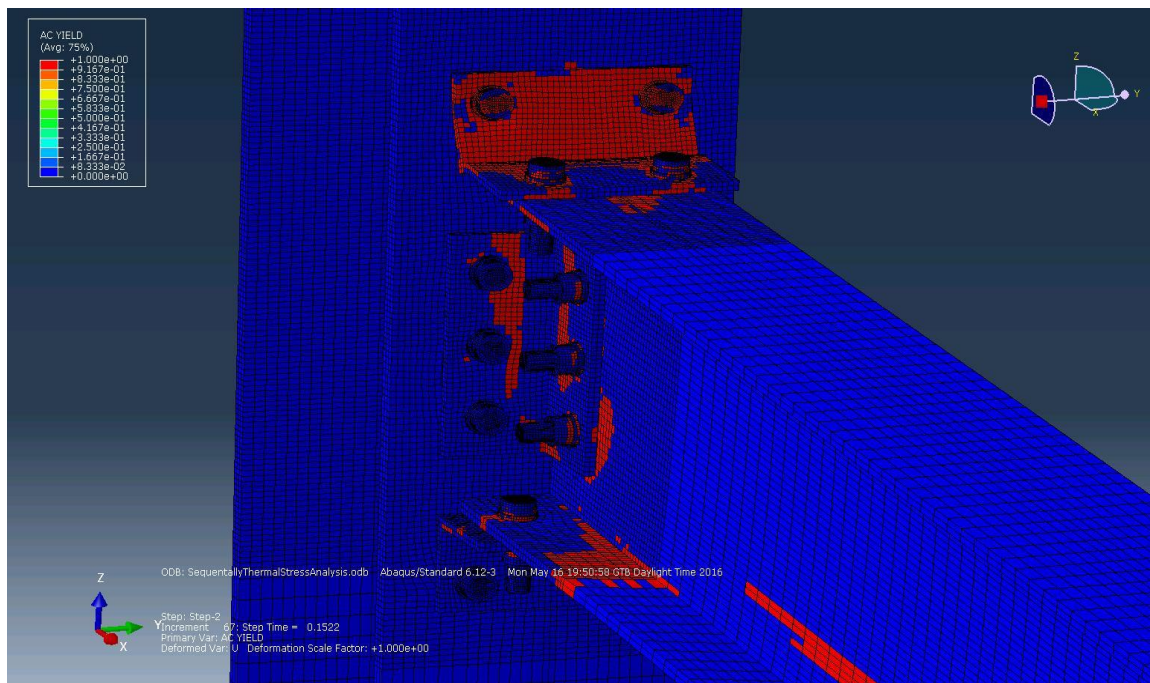
Εικόνα 6.10: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας



Στις δύο παρακάτω εικόνες, με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου Von Mises:



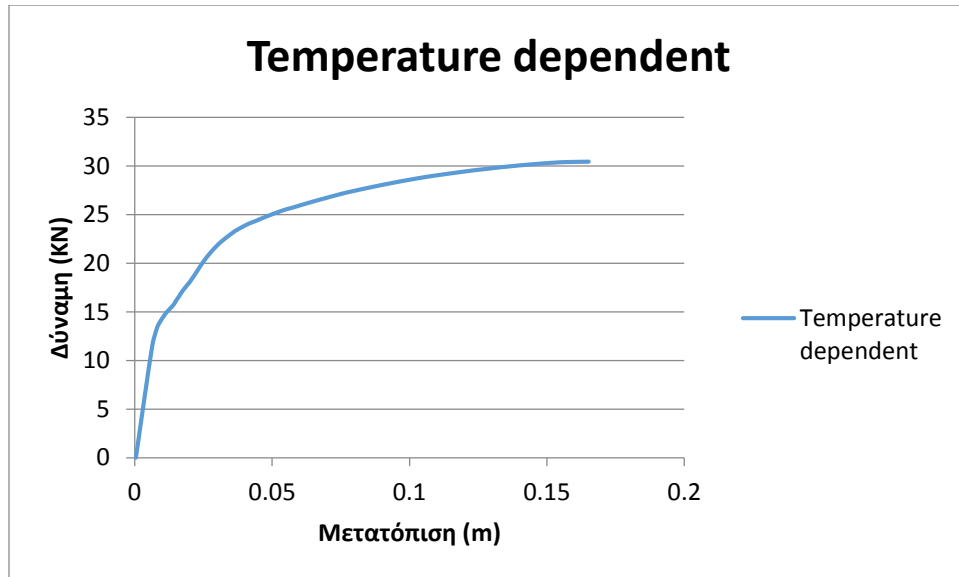
Εικόνα 6.11: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 6.12: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας (κοντινή προβολή ένωσης δοκού – στύλου)

### 6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης όπως αυτό προέκυψε ύστερα από την ολοκλήρωση της ανάλυσης και τις κατάλληλες τροποποιήσεις:

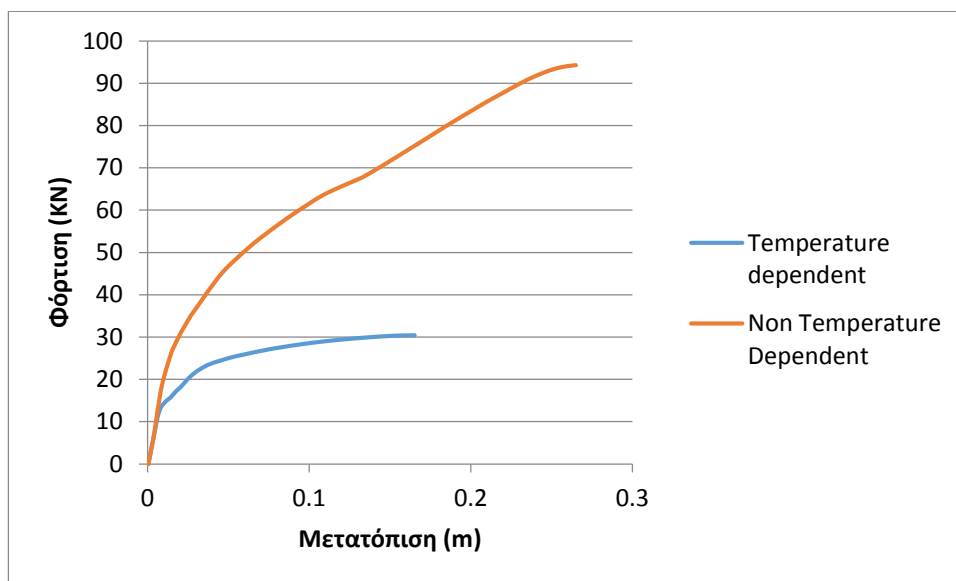


Εικόνα 6.13: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για την ανάλυση με εξάρτηση μηχανικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία

## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Είναι λογικό και αναμενόμενο ότι στην αρχική ανάλυση που δεν λαμβάνουμε υπ' όψιν την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων με την θερμοκρασία λόγω της φωτιάς που αναπτύσσεται στο μοντέλο μας, η θερμοκρασία επηρεάζει σε μικρό βαθμό την μηχανική μελέτη που κάναμε. Δεδομένου, όμως, ότι θέλουμε να μελετήσουμε και την επίπτωση που έχει η αύξηση της θερμοκρασίας στον φορέα μας, παρακάτω παρουσιάζεται σε κοινό διάγραμμα, τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης όπως αυτά προέκυψαν από τις δύο αναλύσεις που κάναμε:



Εικόνα 7.1: Κοινό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης των δύο αναλύσεων που διεξήγαμε

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι σαφές ότι στην ανάλυση που λαμβάνουμε υπ' όψιν την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία, έχουν μειωθεί αρκετά το μέτρο ελαστικότητας αλλά και η τάση διαρροής στην κατασκευή μας άρα και το αντίστοιχο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης παίρνει χαμηλότερες τιμές. Ακόμα, καταλαβαίνουμε ότι επειδή η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην δεύτερη ανάλυση, ο φορέας μετατοπίζεται σημαντικά για αρκετά μικρότερο φορτίο λόγω της μειωμένης αντοχής της κατασκευής. Τέλος, παρατηρούμε ότι ο φορέας μας αστοχεί πρόωρα στην δεύτερη ανάλυση πριν προλάβουμε οι θερμοκρασίες να λάβουν την μέγιστη τιμή τους.

## 7.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΩΣΗΣ ΣΤΥΛΟΥ – ΔΟΚΟΥ

Από τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων παρατηρούμε ότι υπάρχει έντονη παραμόρφωση στην περιοχή της ένωσης του στύλου με την δοκό. Πιο συγκεκριμένα η πάνω φλάντζα μαζί με τους κοχλίες που την στερεώνουν παρουσιάζουν έντονη πλαστικοποίηση και διαρροή γεγονός που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά όλης της σύνδεσης.

Ακόμα παρατηρούμε ότι η διαρροή στην επάνω φλάντζα που παίζει σημαντικό ρόλο, ξεκίνησε να εμφανίζεται στους 312,1 °C για την πρώτη ανάλυση που δεν λαμβάνουμε υπ' όψιν την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία, ενώ στην δεύτερη ανάλυση που λαμβάνουμε υπ' όψιν την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία εμφανίζεται στους 210,9 °C. Η παραπάνω παρατήρηση είναι φυσικό επακόλουθο των μειωμένων μηχανικών ιδιοτήτων του μοντέλου μας.

## 7.3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ανάλυση που πραγματοποιήσαμε στην συγκεκριμένη εργασία προσεγγίσαμε την μηχανική απόκριση των κοχλιωτών συνδέσμων μεταλλικής κατασκευής ασκώντας σε αυτή μηχανικά και θερμικά φορτία, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά και την θερμική εξάρτηση των επιμέρους υλικών. Καταλήγοντας, μπορούμε να αναφέρουμε ότι με κάποιες τροποποιήσεις το μοντέλο της εργασίας μας θα μπορούσε να γίνει πιο ρεαλιστικό αλλά και να προκύψουν ακριβέστερα αποτελέσματα.

Μερικές τροποποιήσεις που θα βοηθούσαν σε αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζονται παρακάτω:

- Διεξάγοντας μία νέα ανάλυση θερμομηχανικού τύπου όμως αυτή τη φορά κάνοντας χρήση πυρίμαχων υλικών σαν επικάλυψη σε διάφορα σημαντικά σημεία της κατασκευής, όπως η πάνω φλάντζα, διερευνώντας το κατά πόσο συμβάλουν και ωφελούν την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής μας.
- Αλλάζοντας τον χρόνο (step) στον οποίο ασκούνται τα μηχανικά και τα θερμικά φορτία κατά την διάρκεια της ανάλυσης, εξετάζοντας τις επιπτώσεις που έχουν οι αλλαγές αυτές στην αντοχή της κατασκευής μας.
- Προσομοιώνοντας την συμπεριφορά του φορέα μας όταν αυτός είναι πλέον συνδεδεμένος και με τα υπόλοιπα κομμάτια της μεταλλικής κατασκευής. Αυτό το σενάριο θα μας έδινε την δυνατότητα να εκτιμήσουμε την συνολική συμπεριφορά όλης της κατασκευής αναλύοντας ένα πολλαπλά πιο σύνθετο πρόβλημα μεταλλικών συνδέσεων, λαμβάνοντας υπ' όψιν γεγονότα όπως η αποκόλληση γειτονικών τμημάτων της σύνδεσης.

## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Chandrupatla T.R., Belegundu A.D., *“Introduction to Finite Elements in Engineering”*, 3rd ed. Pearson education, 2002.
- [2] Hu Y., Davison B., Burgess, I., Plank R., *“Component Modeling of Flexible End – plate Connections in Fire”*, International Journal of Steel Structures 9 (2009) 1-15.
- [3] Abdalla, K., Drosopoulos, G., and Stavroulakis, G. "Failure Behavior of a Top and Seat Angle Bolted Steel Connection with Double Web Angles." J. Struct. Eng., Volume 141, Issue 7 (July 2015)
- [4] Ανδρέας Καλογερόπουλος, "Θερμομηχανική ανάλυση κοχλιωτού συνδέσμου μεταλλικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2011.
- [5] Lawson R.M., *“Behaviour of steel beam-to-column connections in fire”*, The Structural Engineer 68 (1990).
- [6] Paul A., Tipler; Gene Mosca. *“Physics for Scientists and Engineers, Volume I”* (6th ed.). New York, NY: Worth Publishers. pp. 666–670 (2008).
- [7] Zaharia R., Pintea D. *“Fire after Earthquake Analysis of Steel Moment Resisting Frames”*. International Journal of Steel Structures, 9:4 (2009) 275-284.