



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Τομέας Οργάνωσης και Διοίκησης**

**ΤΣΑΠΑΡΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΥΡΑΝΤΟΧΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΤΗ  
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕ ΤΗ  
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Γεώργιος Σταυρουλάκης**

**Χανιά 2012**

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2012 στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γ.Ε. Σταυρουλάκη.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ.Σταυρουλάκη Γεώργιο, Καθηγητή και Πρόεδρο του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συνεργασία και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της εργασίας μου.

Τον κ.Δροσόπουλο Γεώργιο, ερευνητικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε και την άριστη συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

## Περιεχόμενα

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Περιεχόμενα.....                                                          | 4   |
| Εισαγωγή.....                                                             | 6   |
| Κεφάλαιο 1 .....                                                          | 8   |
| Πεπερασμένα Στοιχεία.....                                                 | 8   |
| 1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων .....                            | 8   |
| 1.2 Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων .....                            | 9   |
| 1.3 Θερμομηχανική Ανάλυση.....                                            | 9   |
| Κεφάλαιο 2 .....                                                          | 11  |
| Πυράντοχα Υλικά και Πυράντοχες Επικαλύψεις.....                           | 11  |
| Εισαγωγή.....                                                             | 11  |
| 2.2 Σκυρόδεμα.....                                                        | 14  |
| 2.3 Γυψοσανίδα.....                                                       | 16  |
| 2.4 Θερμικές Ιδιότητες Υλικών.....                                        | 17  |
| Κεφάλαιο 3 .....                                                          | 20  |
| Παρουσίαση της κατασκευής και μοντελοποίηση σεναρίων .....                | 20  |
| 3.1 Παρουσίαση της κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση.....       | 20  |
| 3.2 Απεικόνιση διακριτοποιημένης κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία ..... | 24  |
| 3.3 Μοντελοποίηση Μηχανικού Προβλήματος .....                             | 25  |
| 3.4 Μοντελοποίηση θερμικού Προβλήματος.....                               | 28  |
| 3.5 Μοντελοποίηση Θερμομηχανικού Προβλήματος.....                         | 33  |
| 3.6 Σενάρια Επίλυσης.....                                                 | 35  |
| Κεφάλαιο 4 .....                                                          | 38  |
| Αποτελέσματα Ανάλυσης.....                                                | 38  |
| 4.1 Αποτελέσματα Μηχανικής Ανάλυσης –Σενάριο 1 .....                      | 38  |
| 4.2 Θερμική Ανάλυση(σκυρόδεμα)- Σενάριο2.....                             | 44  |
| 4.3 Θερμομηχανική Ανάλυση (σκυρόδεμα) –Σενάριο 3 .....                    | 47  |
| 4.4 Θερμομηχανική ανάλυση με διαφορετικό step - Σενάριο 4.....            | 51  |
| 4.5 Θερμική Ανάλυση (γυψοσανίδα)- Σενάριο 5 .....                         | 57  |
| 4.6 Θερμομηχανική Ανάλυση (γυψοσανίδα) - Σενάριο 6 .....                  | 61  |
| 4.7 Θερμομηχανική Ανάλυση με διαφορετικό step- Σενάριο 7 .....            | 66  |
| 4.8 Θερμική Ανάλυση (σκυρόδεμα)– Σενάριο 8 .....                          | 73  |
| 4.9 Θερμομηχανική Ανάλυση (σκυρόδεμα) -Σενάριο 9 .....                    | 77  |
| 4.10 Θερμομηχανική Ανάλυση (διαφορετικό step)- Σενάριο 10.....            | 81  |
| 4.11 Θερμική Ανάλυση (γυψοσανίδα) - Σενάριο 11.....                       | 87  |
| 4.12 Θερμομηχανική ανάλυση (γυψοσανίδα) -Σενάριο 12.....                  | 91  |
| 4.13 Θερμομηχανική Ανάλυση (διαφορετικό step)- Σενάριο 13.....            | 95  |
| 4.14 Θερμική Ανάλυση (σκυρόδεμα) - Σενάριο 14.....                        | 101 |
| 4.15 Θερμομηχανική Ανάλυση (σκυρόδεμα) –Σενάριο 15 .....                  | 102 |
| 4.16 Θερμική Ανάλυση (γυψοσανίδα) – Σενάριο 16.....                       | 108 |
| 4.17 Θερμομηχανική ανάλυση (γυψοσανίδα) -Σενάριο 17.....                  | 109 |
| Κεφάλαιο 5 .....                                                          | 115 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Διαγράμματα Φόρτισης - Μετατόπισης.....                       | 115 |
| Εισαγωγή.....                                                 | 115 |
| 5.1 Διαγράμματα Φόρτιση-Μετατόπιση για ελαφρύ σκυρόδεμα ..... | 115 |
| 5.2 Διαγράμματα Φόρτιση-Μετατόπιση για γυψοσανίδα.....        | 118 |
| 5.3 Σύγκριση σεναρίων σκυρόδεμα-γυψοσανίδα .....              | 120 |
| Συμπεράσματα .....                                            | 122 |
| Βιβλιογραφία .....                                            | 124 |

## Εισαγωγή

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για κάθε μηχανικό. Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών και της υπολογιστικής ισχύς η μέθοδος έγινε πιο γρήγορη, πιο ακριβής και το φάσμα χρήσης πιο ευρύ. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και την ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, υπόγειας ροής και άλλων προβλημάτων ροής.

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η μηχανική και θερμική ανάλυση μεταλλικού φορέα, ο οποίος θα είναι επικαλυμμένος με δύο διαφορετικά πυράντοχα υλικά, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με κατάλληλο λογισμικό σε H/Y. Επίσης θα παρουσιαστεί και ο συνδυασμός μηχανικής και θερμικής ανάλυσης.

Στόχος είναι να προσομοιωθεί η συμπεριφορά των πυράντοχων υλικών σε συνθήκες μηχανικής φόρτισης και την επενέργεια της θερμότητας χωριστά κάθε φορά. Έπειτα αυτά τα δύο θα εξεταστούν παράλληλα. Μέσω αυτής της διαδικασίας θα γίνει διερεύνηση της αντοχής των υλικών και συνολικά της κατασκευής από μηχανικές φορτίσεις και φωτιά. Ειδικότερα το κατά πόσο επηρεάζεται η αντοχή της κατασκευής μας από την επενέργεια φωτιάς, που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια πρόωρη αστοχία – κατάρρευση της κατασκευής μας διότι δεν θα μπορεί να αντέξει τις ίδιες φορτίσεις που θα ήταν πιθανώς να αντέξει απουσίας των θερμικών φορτίων, όπως επίσης γίνεται και διερεύνηση της συμπεριφοράς της κατασκευής στην περιοχή της σύνδεσης.

Το πρόβλημα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς των πυράντοχων υλικών και συνολικά της κατασκευής μας, επιλύθηκε για τρία βασικά σενάρια συνδυασμού Θερμικών – Μηχανικών φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόσαμε στο ίδιο step τα θερμικά αποτελέσματα με το μηχανικό φορτίο, σε επόμενο σενάριο έχουμε επιβολή των θερμικών αποτελεσμάτων και του μηχανικού φορτίου σε ξεχωριστό step, με τα θερμικά αποτελέσματα να εφαρμόζονται πρώτα και τη μηχανική φόρτιση να ακολουθεί. Επίσης σε ένα από τα τελευταία σενάρια της ανάλυσής μας έχουμε εναλλαγή θερμικών και μηχανικών φορτίων, δηλαδή σε πρώτο βήμα ασκείται θερμικό φορτίο, στο αμέσως επόμενο μηχανικό φορτίο, έπειτα ξανά θερμικό φορτίο

και η ανάλυση ολοκληρώνεται επίσης με μία ακόμη μηχανική φόρτιση. Τα σενάρια που χρησιμοποιήσαμε αναλύονται εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Τα αποτελέσματα των σεναρίων αυτών συγκρίνονται με την καθαρά Μηχανική ανάλυση για κάθε πυράντοχο υλικό, αλλά συγκρίσεις γίνονται επίσης και μεταξύ των δύο υλικών, ως προς την συμπεριφορά της διεπιφάνειας, ως προς τη παραμόρφωση του φορέα κατά την αστοχία και κυρίως ως προς τη μορφή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης.

Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται τα είδη των πυράντοχων υλικών και παρουσιάζονται λεπτομερώς τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε και οι ιδιότητές τους. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά η κατασκευή μας, οι μοντελοποιήσεις που έγιναν στο λογισμικό μας καθώς και τα σενάρια που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εργασία. Τέλος στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των επιλύσεων, στο κεφάλαιο 5 τα διαγράμματα φόρτισης – μετατόπισης για όλα τα σενάρια μας και έπειτα ακολουθούν τα συμπεράσματά μας.

# Κεφάλαιο 1

## Πεπερασμένα Στοιχεία

---

### 1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Είναι μία αριθμητική μέθοδος, προσεγγιστικής επίλυσης προβλημάτων μίας συνεχούς δομής, αυθαίρετης γεωμετρίας, συνθηκών φόρτισης και οριακών συνθηκών. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η τμηματοποίηση ενός συνεχούς χώρου σε ένα σύνολο διακριτών υποχώρων.

Η ανάλυση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, επιτυγχάνεται με τη χρήση Η/Υ, όπου και επιλύονται συστήματα διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά της δομής. Πρώτο βήμα της ανάλυσης και μελέτης της δομής είναι η τμηματοποίηση της δομής σε πεπερασμένο αριθμό τμημάτων, δηλαδή σε πεπερασμένα στοιχεία. Η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου και του πλήθους των στοιχείων, είναι η σημαντικότερη ενέργεια του μηχανικού σε αυτό το βήμα της ανάλυσης. Όσο μεγαλύτερο το πλήθος κόμβων και στοιχείων τόσο ακριβέστερη αλλά και δαπανηρή θα είναι η επίλυση.

Η σύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους, επιτυγχάνεται μέσω των κόμβων, οι οποίοι αποτελούν συγκεκριμένα σημεία της γεωμετρίας των στοιχείων. Το σύνολο των στοιχείων και των κόμβων αποτελεί το πλέγμα της δομής και η όλη διαδικασία της τμηματοποίησης, ονομάζεται πλεγματοποίηση.

Σε όλες τις κατασκευές, ο κάθε κόμβος να χαρακτηρίζεται από κάποιες δυνατές μετατοπίσεις, οι οποίες αποτελούν τους βαθμούς ελευθερίας του κόμβου. Κατά τη δισδιάστατη ανάλυση μίας κατασκευής, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να μετατοπίζεται κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$  ενώ στην περίπτωση μίας τρισδιάστατης κατασκευής, ο κάθε κόμβος δύναται να μετατοπιστεί κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Έτσι, για παράδειγμα, στις τρισδιάστατες κατασκευές, κάθε κόμβος έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας, στις διδιάστατες, δύο, και στα δικτυώματα έναν βαθμό ελευθερίας. Η γνώση του συνόλου των κόμβων και των βαθμών ελευθερίας του κάθε κόμβου, καθιστά δυνατό τον υπολογισμό του συνόλου των δυνατών μετατοπίσεων της κατασκευής και οποιοσδήποτε τρόπος στήριξης της κατασκευής, δεσμεύει κάποιους βαθμούς ελευθερίας.

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο, διατηρεί τις ίδιες ελαστικές ιδιότητες με την αρχική δομή. Έτσι, εξετάζεται η ελαστική συμπεριφορά της δομής, κατά τμήμα, μέσω των στοιχείων, τα οποία έχουν πεπερασμένο μέγεθος και απλούστερη μορφή, άρα και περιγράφονται από απλούστερες συναρτήσεις. Γνωρίζοντας λοιπόν τις μετατοπίσεις

των κόμβων, μπορούν να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις κάθε σημείου του στοιχείου. Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και μετά των τάσεων. Εάν  $n$  είναι το πλήθος των κόμβων και  $k$  ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας κάθε κόμβου, με εφαρμογή των Ενεργειακών Θεωρημάτων (Αρχή Δυνατών Έργων), καταλήγουμε σε ένα σύστημα  $k \times n$  εξισώσεων με  $k \times n$  αγνώστους (άγνωστες μετατοπίσεις).

## 1.2 Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει (π.χ. ελαστική ανάλυση, πρόβλημα δυναμικού). Έπειτα, ακολουθεί ο καθορισμός του προβλήματος σε στατικό (static analysis) ή δυναμικό πρόβλημα (dynamic analysis). Ένα στατικό πρόβλημα δεν είναι χρονικά εξαρτώμενο, σε αντίθεση με ένα δυναμικό πρόβλημα, το οποίο είναι χρονικά εξαρτώμενο. Μία άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη γραμμικό (nonlinear). Γραμμικό καλείται το πρόβλημα στο οποίο αν διπλασιαστεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων), διπλασιάζεται και το μέγεθος του αποτελέσματος. Αντίθετα, μη γραμμικό καλείται το πρόβλημα το οποίο δεν περιγράφεται από την αναλογία που προαναφέρθηκε [9].

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η μητρική διατύπωση του προβλήματος είναι της μορφής:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \{f\}$$

Τα πιο συνηθισμένα είδη στοιχείων είναι τα δικτυώματα (truss elements), δοκοί (beam elements), στοιχεία επίπεδης ένστασης (plane stress), στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain), στοιχεία πλακών, στοιχεία κελυφών (shell) και γενικά τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements).

## 1.3 Θερμομηχανική Ανάλυση

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

Ενδεικτικά διατυπώνεται παράδειγμα θερμομηχανικής ανάλυσης (thermomechanical analysis): Απλός γραμμικός μεταλλικός φορέας φορτίζεται στατικά, με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο αυτού. Εάν εφαρμοσθεί στο υλικό κατάλληλος νόμος υλικού, τότε είναι δυνατή η εύρεση της φέρουσας ικανότητας του φορέα, δηλαδή της μέγιστης δύναμης την οποία μπορεί αυτός να αναλάβει πριν την κατάρρευση. Στην οριακή όπως ονομάζεται κατάσταση του φορέα, διακρίνονται στη μάζα αυτού τάσεις, μετατοπίσεις-παραμορφώσεις και γενικά όλα τα μηχανικά χαρακτηριστικά τη στιγμή λίγο πριν την κατάρρευση. Όταν λόγω φωτιάς αυξηθεί η θερμοκρασία του χώρου πλησίον του φορέα, τότε η μηχανική συμπεριφορά αυτού αναμένεται να μεταβληθεί. Η παράλληλη δράση της συγκεντρωμένης δύναμης και της θερμότητας (διαμέσου της αύξησης της θερμοκρασίας), αναμένεται να μεταβάλλει χαρακτηριστικά αυτού όπως η μέγιστη δύναμη πριν την κατάρρευση, οι αντίστοιχες μετατοπίσεις, τάσεις, κ.ο.κ. Αυτή τη μεταβολή προσπαθεί να καταγράψει η θερμομηχανική ανάλυση (τουλάχιστον σε μακροσκοπική θεώρηση, υπάρχει προφανώς και η θεώρηση σε επίπεδο μικροδομής όπου μελετώνται οι μεταβολές στους καταστατικούς νόμους του υλικού λόγω της επίδρασης της θερμότητας).

Η θερμομηχανική ανάλυση στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυσή μας διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

***Uncoupled heat transfer analysis:*** Πρόκειται για πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας, το οποίο αποσκοπεί μόνο στη μελέτη της μετάδοσης θερμότητας και διάχυσης θερμοκρασίας σε έναν φορέα, χωρίς να λαμβάνει καθόλου υπ' όψη τα κλασικά μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας, νόμος διαρροής – πλαστικοποίησης υλικού κ.ο.κ.). Ο φορέας μορφώνεται αποκλειστικά «σε όρους θερμοκρασίας»: θερμομηχανικές ιδιότητες υλικού, θερμοκρασιακό φορτίο, θερμοκρασιακές συνοριακές συνθήκες, δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων θερμοκρασίας, θερμομηχανική επίλυση.

***Sequentially coupled thermal-stress analysis:*** Στην περίπτωση αυτή μελετάται η επίδραση της θερμοκρασιακής μεταβολής στη μηχανική συμπεριφορά του φορέα. Κατά τα όσα αναφέρονται στο βοήθημα του προγράμματος, η λογική είναι πρώτα να λυθεί το καθαρό πρόβλημα θερμότητας και στη συνέχεια η επίδραση αυτού στο μηχανικό πρόβλημα. Σημειώνεται ότι εδώ δεν περιλαμβάνεται το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η περίπτωση επίδρασης των μηχανικών χαρακτηριστικών στη θερμοκρασία (π.χ. ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εξαιτίας των δυνάμεων τριβής σε σύστημα πέδησης αυτοκινήτων, όπου η επαφή-τριβή των τμημάτων των φρένων θα αυξήσει τη θερμοκρασία).

***Fully coupled thermal-stress analysis:*** Εδώ περιλαμβάνεται και το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή μελετάται και η επίδραση της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών στη θερμοκρασία.

## Κεφάλαιο 2

### Πυράντοχα Υλικά και Πυράντοχες Επικαλύψεις

---

#### Εισαγωγή

Η πυροπροστασία διακρίνεται σε δύο είδη: στην Ενεργητική και Παθητική. Η Ενεργή Πυροπροστασία είναι αναπόσπαστο μέρος της πυροπροστασίας. Χαρακτηρίζεται από στοιχεία και συστήματα, τα οποία απαιτούν ένα συγκεκριμένο ποσό κίνησης και ανταπόκρισης προκειμένου να λειτουργήσουν, σε αντίθεση με την παθητική πυροπροστασία. Οι κατηγορίες της Ενεργητικής πυροπροστασίας είναι: α) η καταστολή πυρκαγιάς όπου η φωτιά μπορεί να ελεγχθεί ή να σβήσει είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα β) συστήματα ψεκασμού φωτιάς τα οποία είναι συνδεδεμένα με μια πηγή νερού γ) οι ανιχνευτές φωτιάς όπου η φωτιά ανιχνεύεται από καπνό, φλόγα ή θερμότητα δ) Υποξαιμική πρόληψη των πυρκαγιών αέρα (Hypoxic air fire prevention) όπου η φωτιά μπορεί να προληφθεί με υποξικό αέρα, όπου η πρόληψη της πυρκαγιάς γίνεται με την μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου προκειμένου να αποφευχθεί η ανάφλεξη ή η εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Η Παθητική πυροπροστασία επιχειρεί τον έλεγχο της φωτιάς ή την επιβράδυνση της εξάπλωσης της και περιλαμβάνει επιστρώσεις και firestops, καθώς και τη χρήση εγγενώς επιβραδυντικών υλικών φωτιάς.

*Πυράντοχα* είναι τα υλικά που είναι ανθεκτικά στη φωτιά και έχουν σχεδιαστεί για αντίσταση σε φωτιά και αντοχή σε θερμότητα. Παραδοσιακά (Edward D. Weil, 2011) οι πυράντοχες επικαλύψεις είναι τσιμεντόχρωμα με βάση το τσιμέντο Portland, οξυχλωριούχο μαγνήσιο (magnesium oxychloride), τσιμέντο, βερμικουλίτη, γύψο, και άλλα μεταλλεύματα. Ινώδη υλικά πληρώσεως, συμπληρωματικά συνδετικά, και πρόσθετα ελέγχου πυκνότητας και ελέγχου ροής συνήθως αναμιγνύονται τυπικά με νερό και εφαρμόζονται με ψεκασμό κατά την κατασκευή του χάλυβα σε πάχος μισής ίντσας ή περισσότερο. Τα Underwriters Laboratories FireResistance Directory τα αποκαλούν Spray Fire Resistant Materials (SFRMs). Μερικές από αυτές τις επιστρώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα εύφλεκτο υπόστρωμα υπό τη χρήση κυλίνδρων και / ή ενός κινούμενου ιμάντα. Αυτές οι επικαλύψεις μπορεί να παρέχουν πυροπροστασία από μισή ώρα μέχρι πολλές ώρες μέσω της απελευθέρωσης νερού και της αποτελεσματικής θερμομόνωσης. Είναι χαμηλού κόστους και εύκολες στην εφαρμογή και μερικές είναι και ανθεκτικές στην έκθεση σε καιρικές συνθήκες. Ωστόσο λόγω του βάρους, του πάχους και της χαμηλής αισθητικής τους, είναι περιορισμένες σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Οι κατασκευαστές κτιρίων τις αποφεύγουν για οπτικά εκτεθειμένο χάλυβα. Επίσης οι επικαλύψεις αυτές μπορεί να αποσπαστούν σε μια βίαιη φωτιά.

Μία άλλη βασική ταξινόμηση των πυράντοχων επικαλύψεων βασίζεται στην επιθυμητή απόδοσή τους και συγκεκριμένα: (1) εκείνες που αυξάνουν την αντίσταση στη φωτιά και ορίζονται ως ASTM E119 για τα κτίρια ή ως ASTM E1529 για

πυρκαγιές υδρογονανθράκων και είναι μετρημένα από την άποψη του χρόνου, δηλαδή, 1 ώρα, 2 ώρες, κλπ., και (2) εκείνοι που μειώνουν την εξάπλωση της φλόγας στο υπόστρωμα όπως το ξύλο, όπως μετράται από το δείκτη εξάπλωσης της φλόγας ASTM E84 στις ΗΠΑ.

Συνήθως, προστατευτικές επικαλύψεις (ή επιβραδυντικές) κατά κυτταρικού τύπου πυρκαγιών εφαρμόζονται σε λεπτά στρώματα μέχρι και πάχους 1,5 mm. Αυτές οι επικαλύψεις δεν είναι πολύ ανθεκτικές σε καιρικές συνθήκες. Έτσι για εξωτερικές εφαρμογές μια τελική επίστρωση είναι απαραίτητη. Επιστρώσεις για την προστασία φωτιάς υδρογονανθράκων είναι δύο συστατικών (συνήθως εποξική) συστήματα που εφαρμόζονται χωρίς διαλύτες σε 8-10mm ανά στρώση. Η χαλύβδινη επιφάνεια θα πρέπει να προετοιμάζεται με αμμοβολή, και έπειτα μια αντισκωριακή επίστρωση θα πρέπει να εφαρμόζεται. Μετά την εφαρμογή του πυράντοχου καλύμματος, μία τελική επίστρωση (για παράδειγμα, ένα ακρυλικό πολυσιλοξανίου-acrylic polysiloxane-τελείωμα) μπορεί να εφαρμοστεί. Μια σωστή επίστρωση του καλύμματος αυτού είναι κατάλληλη για υπεράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, και είναι αρκετά ανθεκτική στους υδρογονάνθρακες και το θαλασσινό νερό.

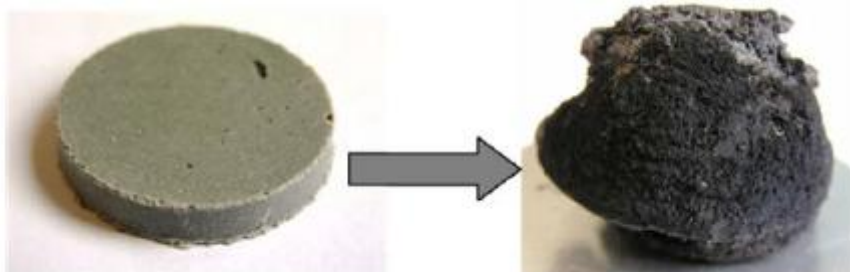
Για παράδειγμα ο χάλυβας (M. Jimenez, S. Duquesne , S. Bourbigot, 2006) είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείτε για την κατασκευή κτιρίων, αυτοκινήτων, γεφυρών και διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο σε άλλους τομείς. Πρόκειται για μη εύφλεκτο υλικό, το οποίο εμφανίζει καλή ολκιμότητα αλλά αρχίζει να χάνει τις δομικές του ιδιότητες μεταξύ στους 470°C και 500 °C. Επομένως λόγω της αποτυχίας σε χαμηλές θερμοκρασίες η προστασία των μεταλλικών υλικών ενάντια στη φωτιά έχει γίνει ένα σημαντικό ζήτημα, στην κατασκευαστική βιομηχανία. Πράγματι η πρόληψη της κατάρρευσης της κατασκευής ενός κτιρίου η οποία μπορεί να συμβεί εάν τα φέροντα στοιχεία του χάλυβα φτάσουν σε θερμοκρασία πάνω από 500 °C, είναι μέγιστης σημασίας για την εξασφάλιση της ασφαλούς εκκένωσης των προσώπων από το κτίριο, και είναι πρωταρχική απαίτηση των κανονισμών οικοδόμησης σε πολλές χώρες.

Η χρήση πυράντοχων επικαλύψεων είναι μια από τις πιο εύκολες, πιο παλιές και ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους να προστατευτεί ένα υπόστρωμα από πυρκαγιά. Πράγματι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα: δεν τροποποιεί τις εγγενείς ιδιότητες του υλικού (π.χ. τις μηχανικές ιδιότητες), είναι εύκολα επεξεργάσιμα και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων μεταλλικών υλικών , πολυμερή , υφάσματα και το ξύλο.

## **2.1 Διογκωτικές επικαλύψεις (intumescent coatings)**

Οι διογκωτικές επικαλύψεις (*intumescent coatings*) εκτελούνται κάτω από ακραίες συνθήκες και μπορεί να διατηρήσουν την ακεραιότητα του χάλυβα μια έως τρεις ώρες όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου είναι άνω των 1100 ° C (M. Jimenez, S. Duquesne , S. Bourbigot, 2006). Όταν η θερμοκρασία της επικάλυψης φτάσει σε μια κρίσιμη θερμοκρασία, η επιφάνεια αρχίζει να λιώνει και μετατρέπεται σε ένα παχύρρευστο υγρό. Ταυτόχρονα οι αντιδράσεις έχουν αρχίσει και

απελευθερώνονται αδρανή αέρια με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Αυτά τα αέρια παγιδεύονται μέσα στο παχύρευστο υγρό (δημιουργία φυσαλίδων). Το αποτέλεσμα είναι η επέκταση ή η άφριση της επικάλυψης, μερικές φορές έως και αρκετές φορές περισσότερο από το αρχικό πάχος της, για να διαμορφώσει ένα προστατευτικό ανθρακούχο κάλυμμα (Εικ. 2.1.1), που λειτουργεί ως φράγμα μεταξύ της φωτιάς και του υποστρώματος.



**Εικόνα 2.1.1:** Διόγκωση της επικάλυψης

Η σύσταση των πυράντοχων επικαλύψεων πρέπει να είναι προσαρμοσμένες στα πλαίσια των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους, για να αποτελούν μια αποτελεσματική προστατευτική επίστρωση.

Οι εποξειδικές επιστρώσεις διόγκωσης (Epoxy intumescent coatings) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία πλοίων από πυρκαγιά, την καθυστέρηση της ανόδου της θερμοκρασίας και την επακόλουθη αποτυχία του κελύφους του σκάφους.

**Πίνακας 2.1:** Διογκωτικές εποξικές επικαλύψεις χαμηλής πυκνότητας

| Συστατικό                                                                                     | Βάρος (lbs) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Τμήμα Α</b>                                                                                |             |
| Epoxy resin (Dow DER 331)                                                                     | 1702.8      |
| Triaryl phosphate                                                                             | 438.3       |
| Black pigment                                                                                 | 4.5         |
| Antifoaming siloxane surfactant                                                               | 0.45        |
| Amorphous hydrophobic fumed silica                                                            | 67.5        |
| Fire-retardant mix (64% APP (Exolit 422) και 36% THEIC)                                       | 675         |
| Boric acid                                                                                    | 1521.4      |
| Expanded perlite                                                                              | 45          |
| Amorphous mineral fiber (Inorphil)                                                            | 22.5        |
| High-surface area Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> fiber (HSA fiber, Unifrax) | 22.5        |
| <b>Τμήμα Β</b>                                                                                |             |
| Amidoamine curing agent                                                                       | 2554        |
| Wetting agent                                                                                 | 10          |
| Antifoaming surfactant                                                                        | 0.4         |
| Milled limestone                                                                              | 401.2       |
| Fire-retardant mix (64% APP (Exolit 422) και 36% THEIC)                                       | 461.6       |
| Rutile TiO <sub>2</sub> pigment                                                               | 76.8        |

|                                                                                               |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Perlite                                                                                       | 224   |
| Amorphous mineral fiber (Inorphil)                                                            | 148.4 |
| High-surface area Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> fiber (HSA fiber, Unifrax) | 123.6 |

Επίσης έχει παρουσιαστεί από τον Green J. 2005, ότι ακόμη και συμβατικά χρώματα μπορούν να περιορίσουν την εξάπλωση φωτιάς, σε σχέση με ένα άβαφο υπόστρωμα, αλλά σε ποιο απαιτητικές καταστάσεις όπως σε πλοία, προτιμούνται επιστρώσεις με χαμηλό δείκτη εξάπλωσης. Στα πλοία για παράδειγμα, η βαφή επανειλημμένα εφαρμόζεται για να αποφευχθεί η διάβρωση, και πυράντοχες επικαλύψεις χρησιμοποιώντας αλογόνο (halogen). Τα συστατικά του αλογόνου μπορεί να είναι χλωριούχο βινυλίου (vinyl chloride), συμπολυμερές οξικού βινυλίου (vinyl acetate copolymer), χλωροπαραφίνη (chloroparaffin), ή γλώριο που περιέχει αλκυδικό (alkyd).

Εκτός από τις βαφές υπάρχουν και πολλά άλλα μέσα για την προστασία του χάλυβα, τα οποία καλούνται παθητικά πυράντοχα υλικά, δηλαδή συστήματα μόνωσης σχεδιασμένα για να μειώνουν τη μεταφορά θερμότητας από τη φωτιά στη κατασκευή που προστατεύεται. Αυτά μπορεί να είναι για παράδειγμα πάνελ (γυψοσανίδες, πετροβάμβακας, πάνελ ενισχυμένα με γυαλί, πέτρα), σκυρόδεμα απλό ή ενισχυμένο. Στην κατασκευή μας τα υλικά της θερμικής μας ενίσχυσης είναι το σκυρόδεμα και συγκεκριμένα **ελαφροσκυρόδεμα** καθώς και η **γυψοσανίδα** (με τη γεωμετρία της να παραμένει ίδια και στις δύο περιπτώσεις). Γενικά υπάρχουν πολλά υλικά για αντοχή σε φωτιά που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε, τα οποία όμως δεν είναι εύκολο να προσομοιώσουμε στο πρόγραμμά μας πως επιδρούν στην συμπεριφορά της σύνδεσης σε φωτιά.

## 2.2 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα δεν καίγεται, έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, ενώ παρουσιάζει ενδόθερμες αντιδράσεις στον τσιμεντοπολτό. Κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζεται το φαινόμενο της **αποφλοίωσης** του σκυροδέματος λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της αύξησης της πίεσης των πόρων που προκαλείται από τους υδρατμούς και της θερμικής διαστολής των αδρανών.

Σε ό,τι αφορά τα **ειδικά σκυροδέματα** αναφέρεται ότι:

1. Το **ελαφροσκυρόδεμα** σε γενικές γραμμές παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από το σύνθητες σκυρόδεμα.
2. Τα σκυροδέματα **υψηλής αντοχής** παρουσιάζουν εντονότερη αποφλοίωση, και μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της αντοχής έναντι των συνήθων σκυροδεμάτων.

3. Το **προεντεταμένο** σκυρόδεμα είναι πιο ευάλωτο λόγω:
- Της μεγαλύτερης ευαισθησίας των χαλύβων προέντασης σε υψηλές θερμοκρασίες
  - Της απώλειας συνάφειας στις περιπτώσεις προεντεταμένης κλίνης (προκατασκευασμένα στοιχεία).
4. Στην περίπτωση των **ινωπλισμένων** σκυροδεμάτων: η αντοχή των επιφανειακών υφασμάτων έναντι πυρκαγιάς είναι πρακτικώς μηδενική, αλλά η παραμένουσα αντοχή της υπόλοιπης διατομής είναι συνήθως επαρκής.

### 2.2.1 Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος

#### *Ειδική θερμότητα*

Ειδική θερμότητα σκυροδέματος,  $cp(\theta)$ , είναι το ποσόν της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία σκυροδέματος μάζας ενός kg κατά ένα βαθμό. Η ειδική θερμότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία,  $\theta$ , αλλά και από την περιεχόμενη υγρασία “u,, ιδιαίτερα στην περιοχή των θερμοκρασιών από 100°C έως 200°C λόγω του βρασμού και εξάτμισης του ύδατος.

#### *Θερμική αγωγιμότητα*

Η θερμική αγωγιμότητα είναι μια βασική θερμική ιδιότητα για την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας δια μέσου της μάζας του σκυροδέματος που εκτίθεται σε πυρκαγιά. Η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από το πορώδες της τσιμεντοκονίας και των αδρανών, από τον τύπο και την ποσότητα των αδρανών, καθώς και από την περιεχόμενη υγρασία. Η πυκνότητα γενικώς δεν φαίνεται να επηρεάζει την αγωγιμότητα, αλλά ειδικώς στα ελαφροσκυροδέματα (λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα) η αγωγιμότητα μεταβάλλεται με την πυκνότητα. Η θερμική αγωγιμότητα σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την θερμική αγωγιμότητα σκυροδεμάτων συνήθους αντοχής.

### 2.2.2 Μηχανικές ιδιότητες

Γενικά μπορεί να λεχθεί ότι:

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες, κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς, παρατηρείται υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος.
- Μετά την επάνοδο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, μετά την πυρκαγιά, οι μηχανικές ιδιότητες δεν επανέρχονται στις αρχικές τους τιμές ή τις ανακτούν κατά μικρό ποσοστό μόνον. Κατά τους υπολογισμούς, συνιστάται να αγνοείται αυτή η ανάκτηση.

#### *Θλιπτική αντοχή*

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, κυρίως λόγω των εσωτερικών ρηγματώσεων που προκαλεί η θέρμανση του ύδατος και της ανομοιόμορφης κατανομής των θερμοκρασιών στην μάζα του

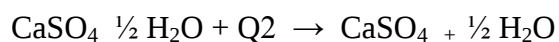
σκυροδέματος, καθώς και λόγω των φυσικοχημικών αντιδράσεων που προκαλούνται (ασβεστοποίηση). Η μείωση αυτή εξαρτάται τόσο από το είδος των αδρανών όσο και από την στάθμη της φόρτισης.

#### *Εφελκυστική αντοχή*

Γενικώς, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος δεν λαμβάνεται υπόψη απευθείας στους υπολογισμούς. Η εφελκυστική αντοχή μειώνεται περισσότερο από την θλιπτική αντοχή (επειδή είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μικρορηγματώσεις). Αν πάντως πρέπει η εφελκυστική αντοχή να ληφθεί υπόψη (π.χ. στην περίπτωση της αρχικής συνάφειας), και απουσία άλλων ακριβέστερων στοιχείων, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτή είναι σταθερή μέχρι τους 100°C και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες μειώνεται γραμμικά μέχρι τους 600°C, οπότε και μηδενίζεται

## **2.3 Γυψοσανίδα**

Συστήματα γυψοσανίδας χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως σε κτίρια, ως πυράντοχα τοιχώματα και για την παροχή παθητικής πυροπροστασίας (I. Rahmanian, Y.C. Wang, 2012). Η αντοχή τέτοιων συστημάτων σε φωτιά οφείλεται στις επιθυμητές θερμικές ιδιότητες της γυψοσανίδας ως υγροσκοπικό υλικό (δηλαδή περιέχει νερό). Όταν ο γύψος θερμαίνεται υποβάλλεται σε χημική αντίδραση αποσύνθεσης και το νερό της κρυστάλλωσης, το οποίο αποτελεί ένα σύνολο της τάξης του 21% του γύψου κατά βάρος χωρίζεται σε δύο στάδια.



Κατά την πρώτη αντίδραση, που ξεκινά σε θερμοκρασίες στην περιοχή των 100 °C, ο γύψος αφυδατώνεται σε calcium sulphate hemihydrate και το 75% του χημικά συνδυασμένου νερού απελευθερώνεται. Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας περίπου στους 200 °C, το υπόλοιπο 25% του χημικώς δεσμευμένου νερού επίσης αφαιρείται και απομένει μόνο calcium sulphate anhydrite (ασβεστόχος θεικός ανιδρύτης). Η εξάτμιση αυτού του νερού απορροφά ένα σημαντικό ποσό θερμότητας, καθυστερώντας επίσης της αύξηση της θερμοκρασίας μέσω του συστήματος γυψοσανίδας. Ο γύψος έχει επίσης πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που επιτρέπει στη μη εκτεθειμένη επιφάνεια της γυψοσανίδας να παραμείνει σε χαμηλές θερμοκρασίες

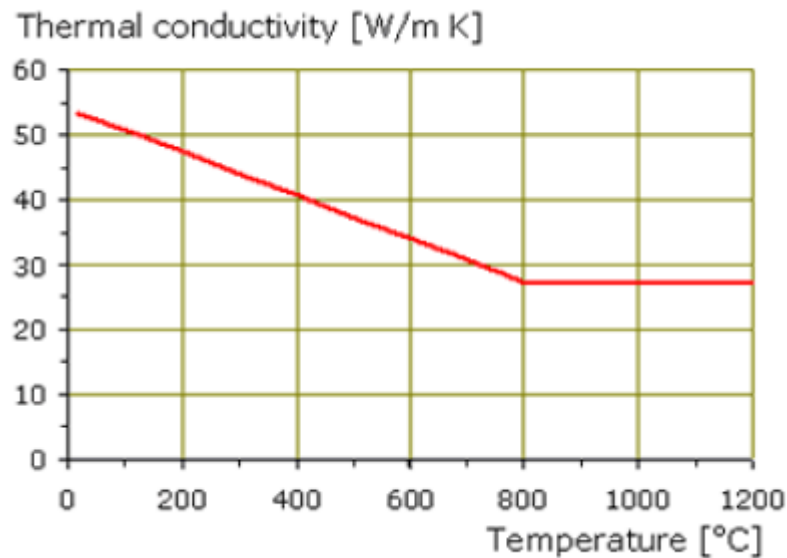
Σε γενικές γραμμές οι γυψοσανίδες είναι φτηνές, έχουν καλύτερες ιδιότητες και ο χρόνος για να εξατμιστεί το νερό είναι μεγαλύτερος (σε σχέση για παράδειγμα με calcium silicate-πυριτικό ασβέστιο). Επίσης πάνελ γυψοσανίδας μπορεί να τοποθετηθούν απευθείας σε γυμνό χάλυβα με ελάχιστη προετοιμασία και εύκολη εγκατάσταση.

## 2.4 Θερμικές Ιδιότητες Υλικών

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή μας είναι τρία: ο χάλυβας από τον οποίο αποτελούνται τα μέρη της κατασκευής μας, το σκυρόδεμα και η γυψοσανίδα τα οποία αποτέλεσαν τα υλικά της πυράντοχης ενίσχυσης.

### 2.4.1 Χάλυβας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η συσχέτιση της θερμοκρασίας με τη θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα.



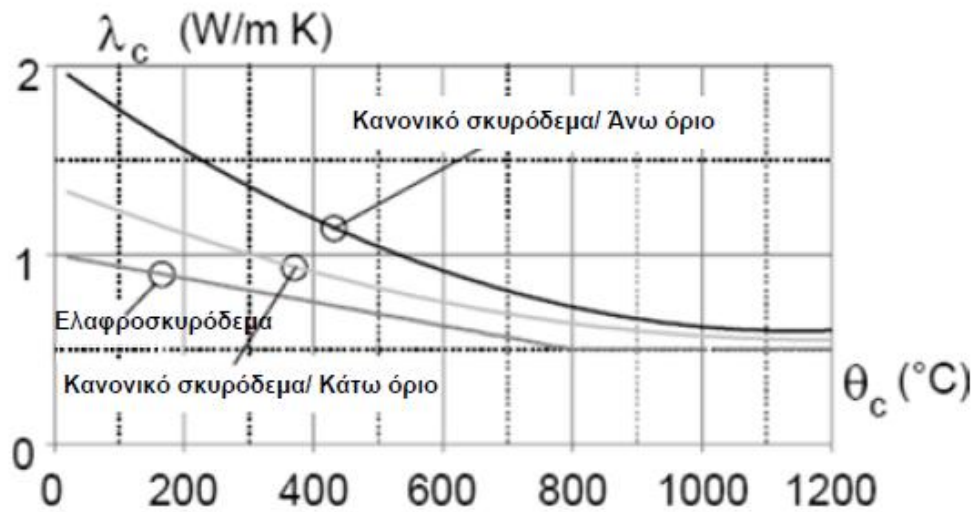
**Σχήμα 2.4.1:** Θερμική αγωγιμότητα Χάλυβα

Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μηχανικές-θερμικές ιδιότητες του χάλυβα σε σχέση με τη θερμοκρασία:

**Πίνακας 2.4.1**

| Temperature | Conductivity | Expansion |
|-------------|--------------|-----------|
| 20          | 0.053334     | 0         |
| 100         | 0.05067      | 1,25E-02  |
| 200         | 0.04734      | 1,29E-02  |
| 300         | 0.04401      | 1,33E-02  |
| 400         | 0.04068      | 1,37E-02  |
| 500         | 0.03735      | 1,41E-02  |
| 600         | 0.03402      | 1,45E-02  |
| 700         | 0.03069      | 1,49E-02  |
| 800         | 0.0273       | 1,41E-05  |
| 900         | 0.0273       | 1,34E-02  |

### 2.4.2 Ελαφροσκυρόδεμα



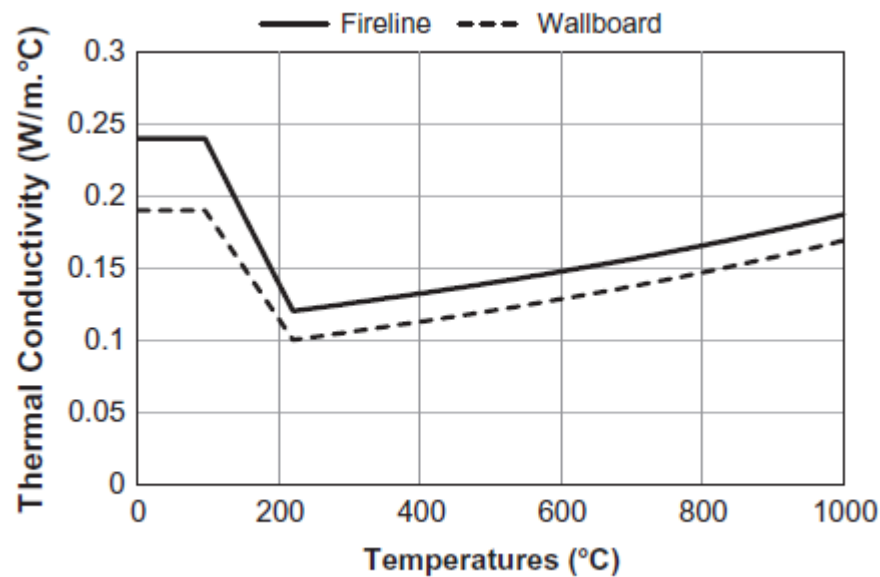
**Σχήμα 2.4.2:** Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας κανονικών σκυροδεμάτων και ελαφροσκυροδεμάτων κατά τον Ευρωκώδικα 4 (EN 1994-1-2)

Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θερμικές ιδιότητες ελαφρου σκυροδέματος σε σχέση με τη θερμοκρασία:

**Πίνακας 2.4.2**

| Temperature | Conductivity |
|-------------|--------------|
| 20          | 9.88E-04     |
| 100         | 9.38E-04     |
| 200         | 8.75E-04     |
| 300         | 8.13E-04     |
| 400         | 7.50E-04     |
| 500         | 6.88E-04     |
| 600         | 6.25E-04     |
| 700         | 5.63E-04     |
| 800         | 5.00E-04     |
| 900         | 5.00E-04     |

### 2.4.3 Γυψοσανίδα



Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θερμικές ιδιότητες της γυψοσανίδας σε σχέση με τη θερμοκρασία:

Πίνακας 2.4.3

| Temperature | Conductivity |
|-------------|--------------|
| 20          | 2,00E-01     |
| 100         | 1,83E-01     |
| 200         | 1,20E-01     |
| 300         | 1,00E-01     |
| 400         | 1,20E-01     |
| 500         | 1,23E-01     |
| 600         | 1,30E-01     |
| 700         | 1,37E-01     |
| 800         | 1,47E-01     |
| 900         | 1,60E-01     |

Να σημειωθεί πως στις αναλύσεις μας, μία βασική παραδοχή είναι πως οι μηχανικές ιδιότητες της γυψοσανίδας είναι ίδιες με του ελαφρού σκυροδέματος. Ένας από τους λόγους είναι η δυσκολία εύρεσης των μηχανικών ιδιοτήτων για γυψοσανίδα.

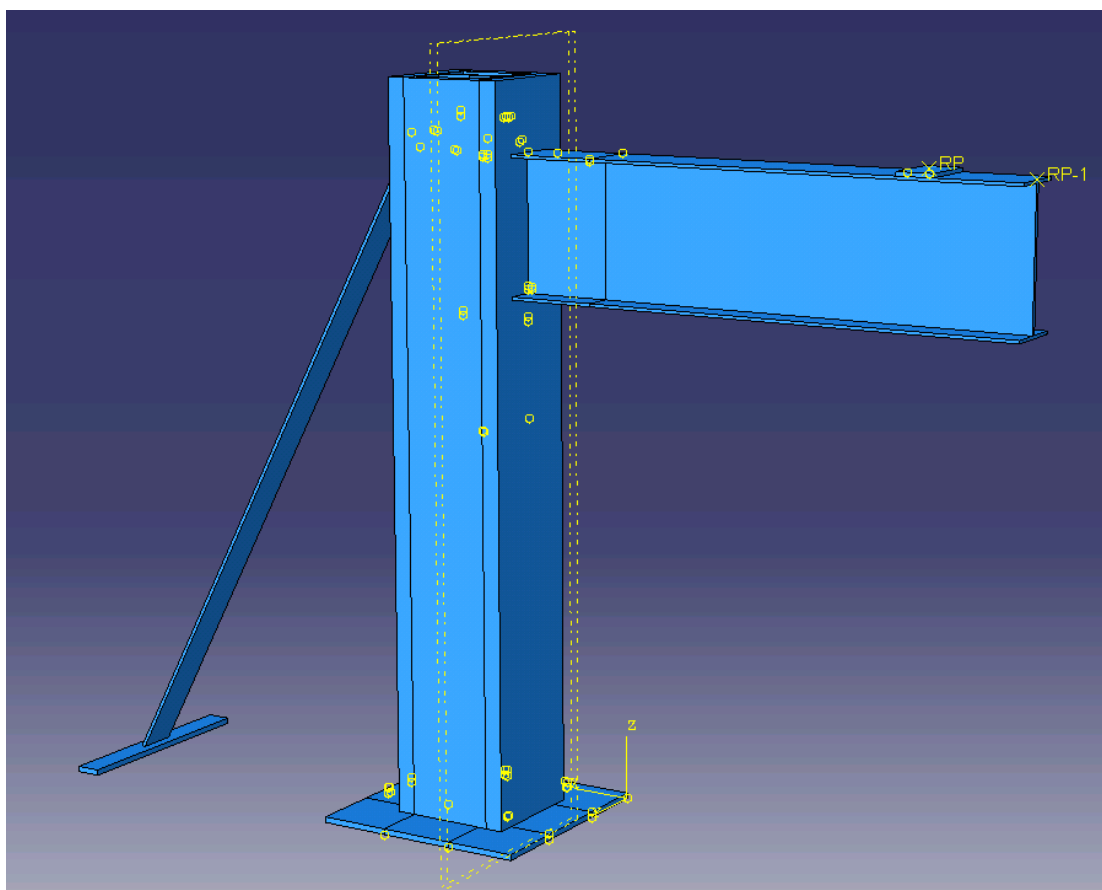
## Κεφάλαιο 3

### Παρουσίαση της κατασκευής και μοντελοποίηση σεναρίων

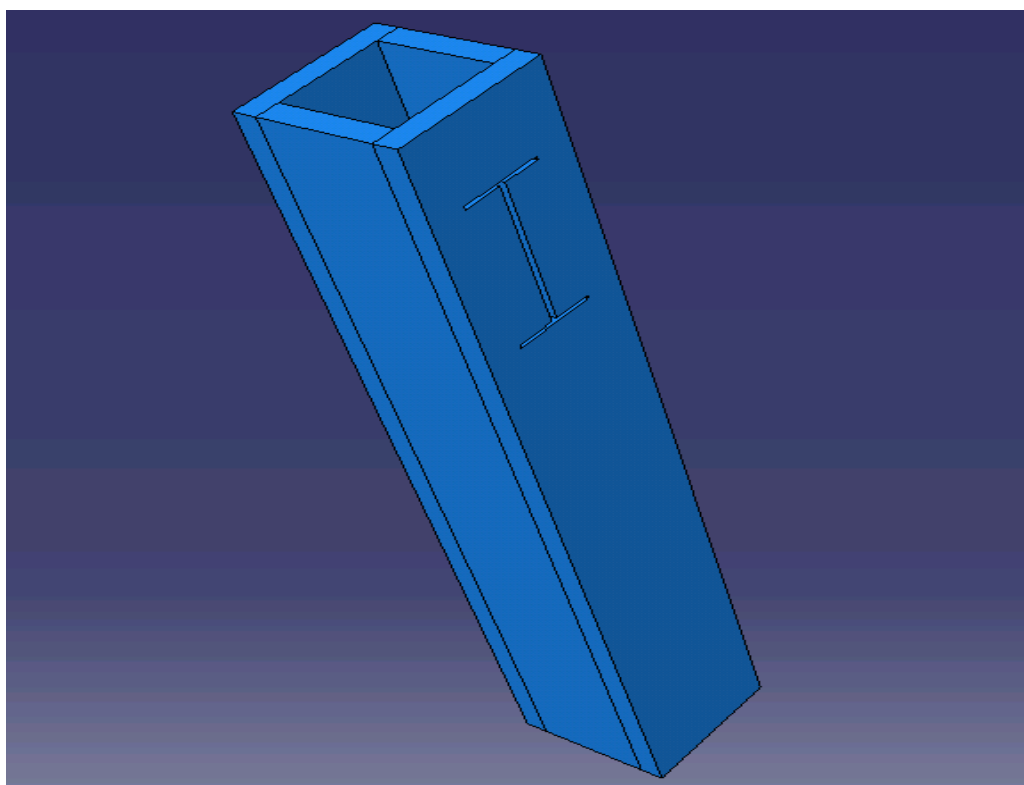
---

#### 3.1 Παρουσίαση της κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση

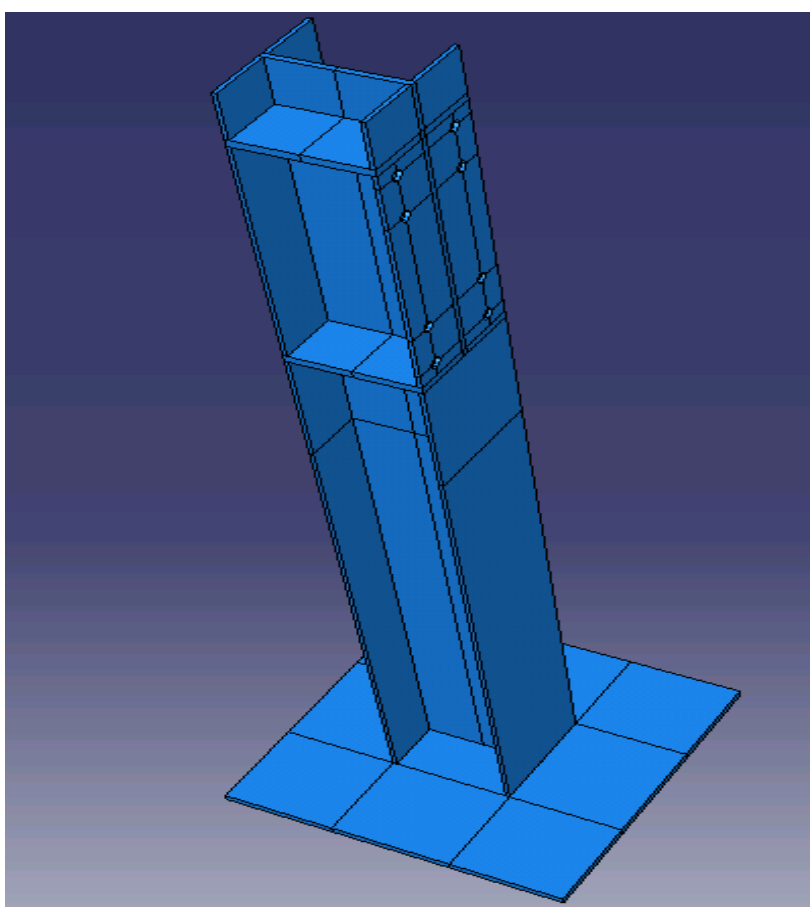
Η κατασκευή μας αποτελείτε συνολικά από 13 parts. Αυτά είναι η οριζόντια δοκός, ο κάθετος στύλος, το πυράντοχο υλικό ενίσχυσης, μια δοκός συγκράτησης και οκτώ κοχλίες που συνδέουν τα τμήματα μεταξύ τους. Τα παραπάνω τμήματα παρουσιάζονται σε τρισδιάστατη μορφή στις εικόνες που ακολουθούν.



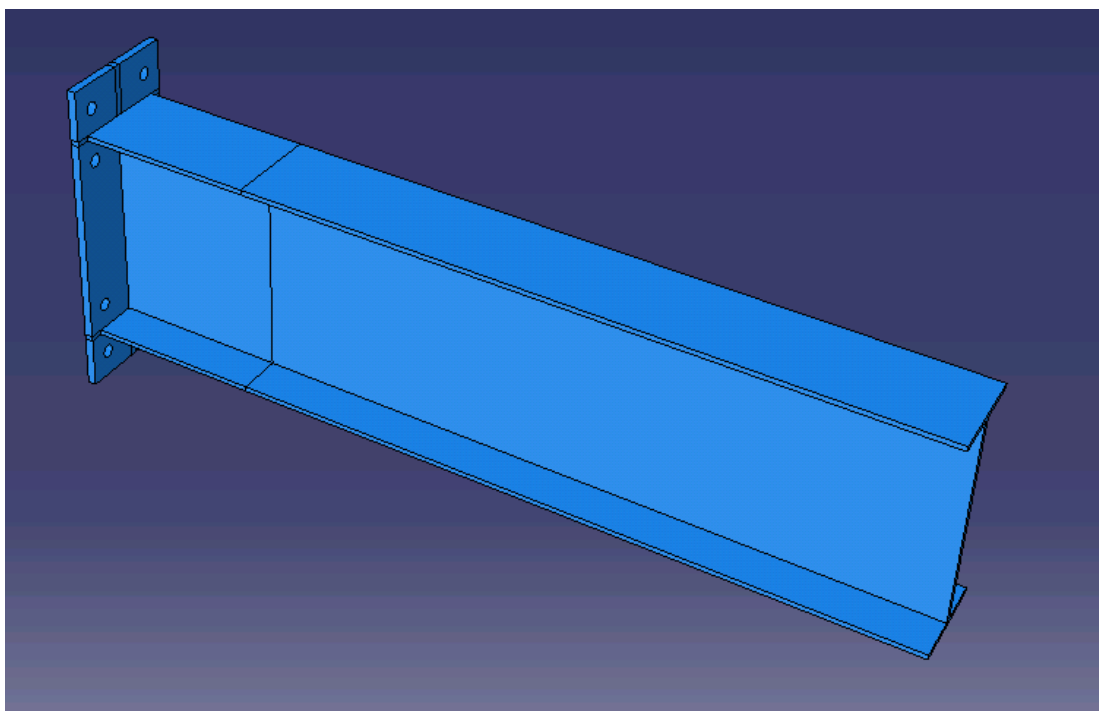
**Εικόνα 3.1.1:** Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης



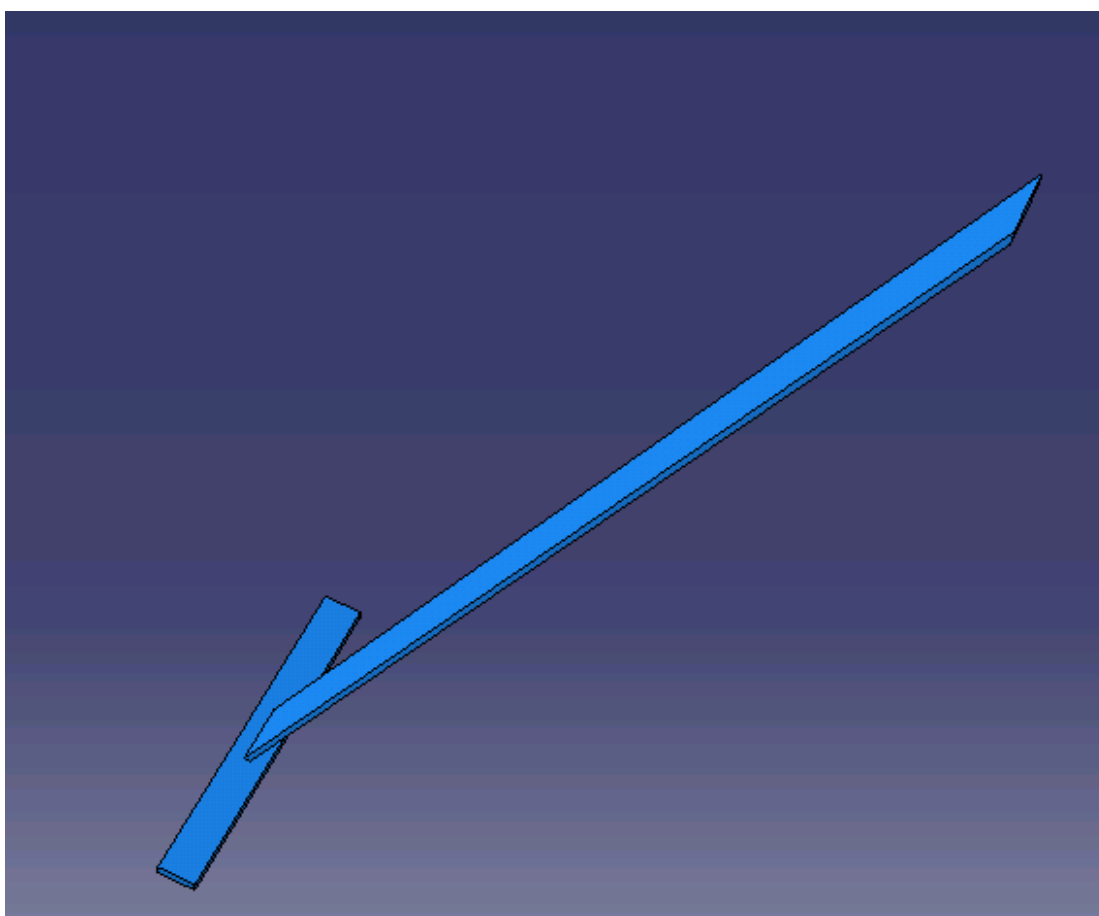
**Εικόνα 3.1.2:** Πυράντοχο υλικό ενίσχυσης



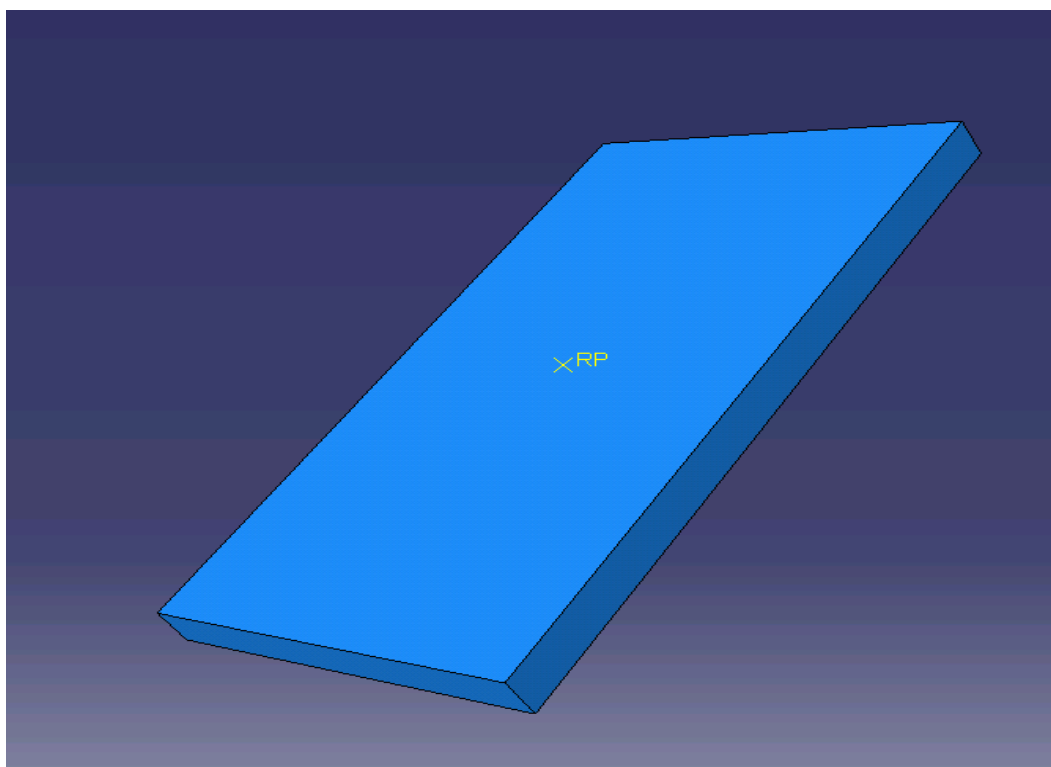
**Εικόνα 3.1.3:** Κάθετος στύλος διάταξης



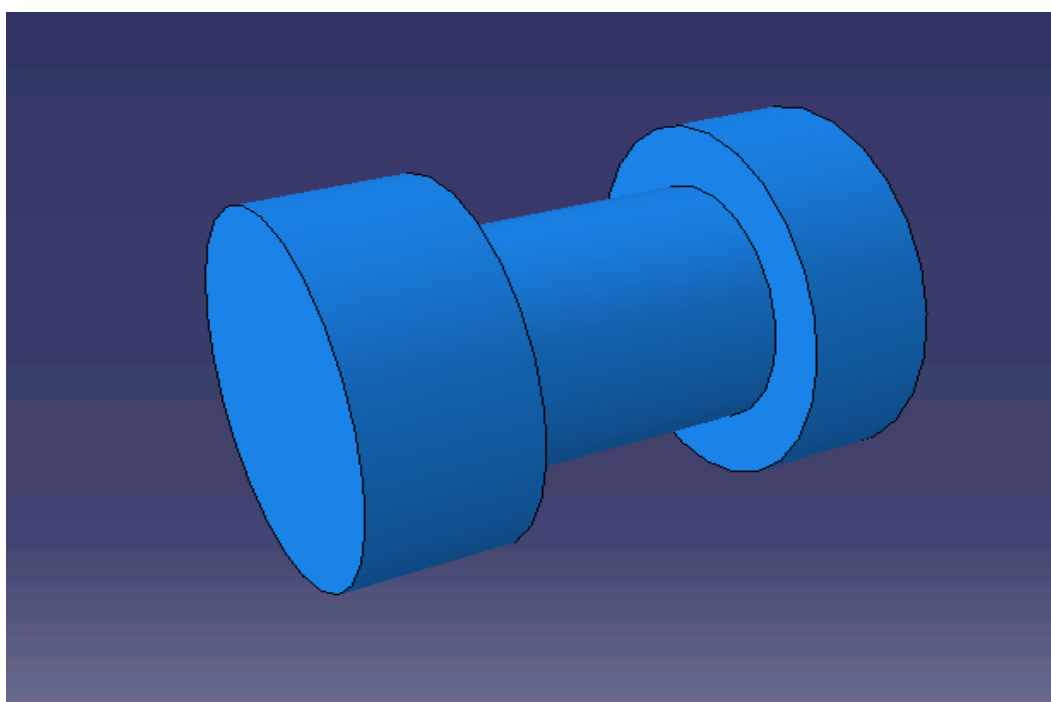
**Εικόνα 3.1.4:** Οριζόντια δοκός διάταξης



**Εικόνα 3.1.5:** Δοκός συγκράτησης



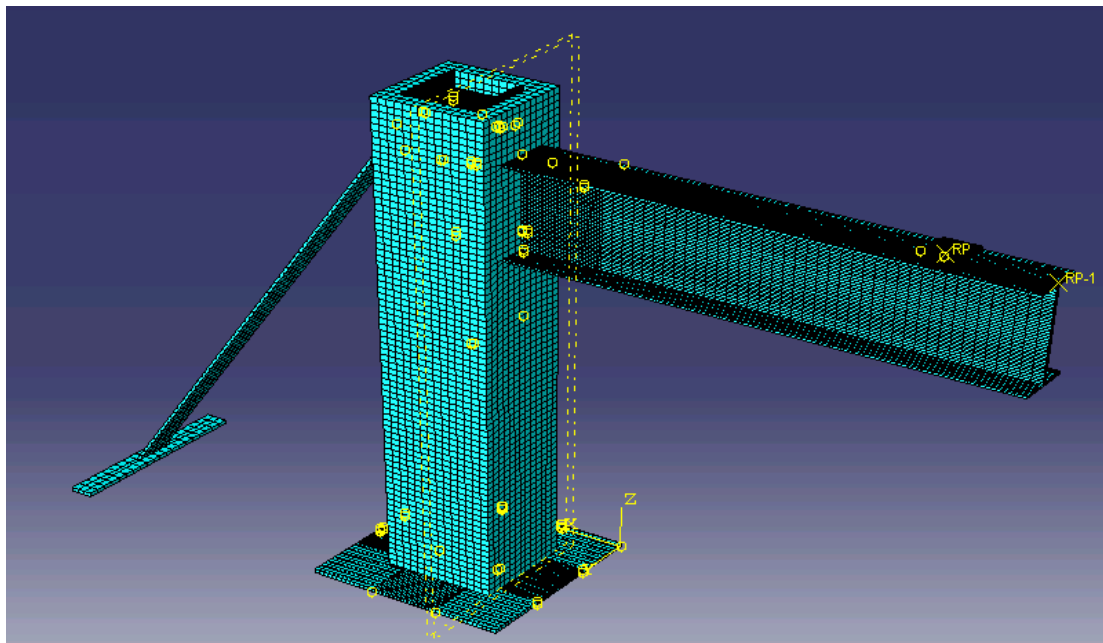
**Εικόνα 3.1.6:** *Rigid Body* (απαραμόρφωτη επιφάνεια)



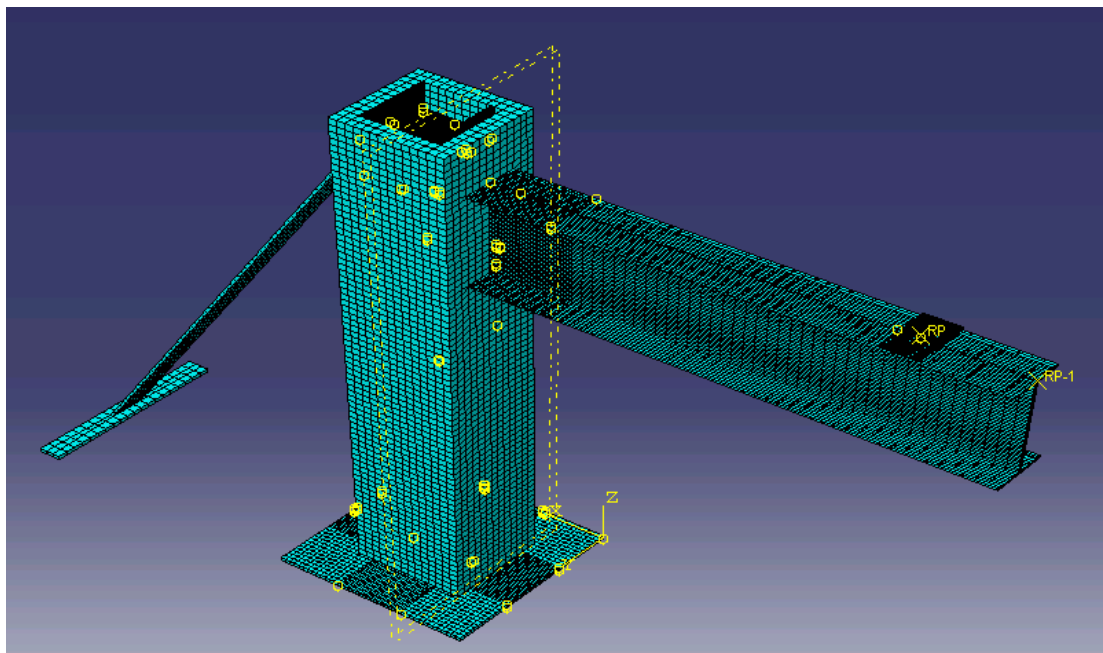
**Εικόνα 3.1.7:** *Κοχλίας διάταξης*

### 3.2 Απεικόνιση διακριτοποιημένης κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία

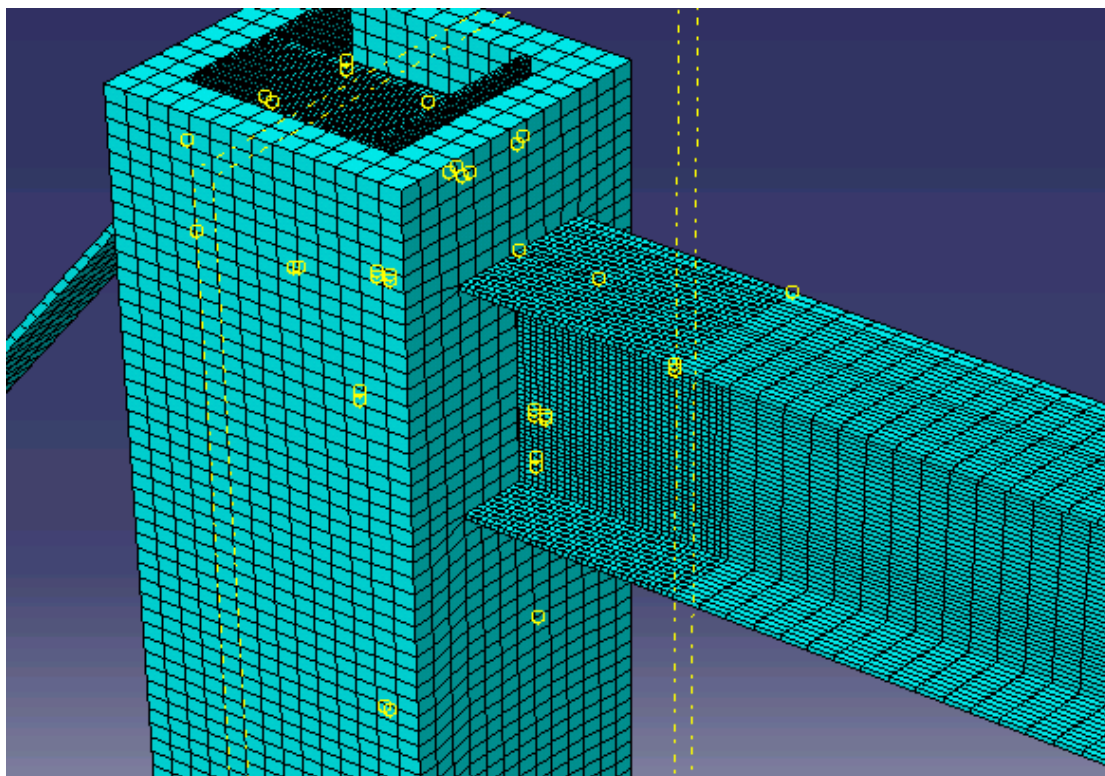
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η συναρμολογημένη διάταξη μετά από την διακριτοποίηση που έγινε με πεπερασμένα στοιχεία.



**Εικόνα 3.2.1:** Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης



**Εικόνα 3.2.2:** Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης



**Εικόνα 3.2.3:** Κοντινή προβολή ένωσης πυράντοχου υλικού ενίσχυσης με οριζόντια δοκό

### 3.3 Μοντελοποίηση Μηχανικού Προβλήματος

Στη μοντελοποίηση του καθαρά Μηχανικού Προβλήματος, ορίσαμε τρεις διαφορετικούς τύπους υλικών. Το πρώτο υλικό πρόκειται για το **Beams\_Columnn** και ορίστηκαν τα παρακάτω ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά.

#### Material Definition

General → Density

Δίνοντας τις τιμές, Mass Density = 7,86

Mechanical → Elasticity → Elastic

Δίνοντας τις τιμές, Young Modulus  $E = 120 \text{ GPa}$  και Poisson's Ratio = 0,3

Mechanical → Plasticity → Plastic

Δίνοντας τις παρακάτω τιμές:

| Yield Stress | Plastic Strain |
|--------------|----------------|
| 314000       | 0              |
| 420000       | 0.0565         |
| 452000       | 0.156233       |

Ομοίως ορίζονται οι ιδιότητες και στο δεύτερο υλικό που ορίστηκε ως **Bolts**.

General → Density

Δίνοντας τις τιμές, Mass Density = 7,86

Mechanical → Elasticity → Elastic

Δίνοντας τις τιμές, Young Modulus E= 120 GPa και Poisson's Ratio=0,3

Mechanical → Plasticity → Plastic

Δίνοντας τις παρακάτω τιμές:

| Yield Stress | Plastic Strain |
|--------------|----------------|
| 550000       | 0              |
| 750000       | 0.03125        |
| 800000       | 0.09333        |

Τέλος με τον ίδιο τρόπο ορίζονται οι ιδιότητες της θερμικής ενίσχυσης με το όνομα **Thermal\_Reinforcement**.

Mechanical → Elasticity → Elastic

Δίνοντας τις τιμές, Young Modulus E= 4 GPa και Poisson's Ratio=0,3

### **Section Properties Definition**

Στο στάδιο αυτό δημιουργήθηκαν τρία sections τύπου Solid-Homogenous τα οποία ονομάστηκαν αντίστοιχα section *beams\_column*, section *bolts*, section *therm\_reinforcement*, τα οποία αντιστοιχήσαμε με τα αντίστοιχα υλικά που ορίστηκαν παραπάνω. Στη συνέχεια έγινε assign του κάθε section με τα αντίστοιχα τμήματα ώστε να προσδώσουμε τις ιδιότητες των υλικών που προσδιορίσαμε. Οι κοχλίες έγιναν assign με το υλικό bolts, η πυράντοχη ενίσχυση με το υλικό Thermal\_Reinforcement και τα υπόλοιπα τμήματα με το υλικό Beams\_Column.

### **Instances**

Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε για τη συναρμολογημένη διάταξη είναι independent προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ενιαίο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και για να μην μπούμε σε διαδικασία διακριτοποίησης κάθε ενός τμήματος ξεχωριστά.

### **Interactions**

Στο σημείο αυτό ορίζονται οι διεπιφάνειες του προβλήματος, όπου ως σημαντικότερη είναι η διεπιφάνεια του κάθετου στύλου και πυράντοχης επικάλυψης αλλά και η

επιφάνεια επαφής οριζόντιας δοκού - κάθετου στύλου, οι οποίες προσομοιώθηκαν ως surface-to-surface contact.

Contact Property option → Tangential Behavior → Επιλέγουμε Isotropic και Friction coefficient → 0,4

Contact Property option → Normal Behavior → Αφήνουμε τις default constraint και στο Pressure-Overclosure → hard contact

Όλες οι υπόλοιπες διεπιφάνειες σύνδεσης των κοχλιών με τα τμήματα της κατασκευής και του κάθετου στύλου με την οριζόντια δοκό και το ένα στήριγμα, προσομοιώθηκαν σαν άρρηκτες συνδέσεις, οι οποίες δεν επιτρέπουν άνοιγμα-ολίσθησης.

### **Step Definition**

Στο στάδιο αυτό ορίζονται τα φορτία που ασκούνται και οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Στο μοντέλο μας ορίζουμε δύο επιπλέον step εκτός του initial.

### **BCs**

Στο στάδιο αυτό ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες της κατασκευής μας. Οι δύο πρώτες BC-1, BC-2, δηλώνονται στη βάση του στύλου και στη βάση της βοηθητικού δοκού, όπου επιλέγεται ο τύπος displacement-rotation (να επιτρέπουν μετατόπιση και περιστροφή). Η τρίτη συνοριακή συνθήκη BC-3 περιορίζει την κίνηση της δοκού στον άξονα Y.

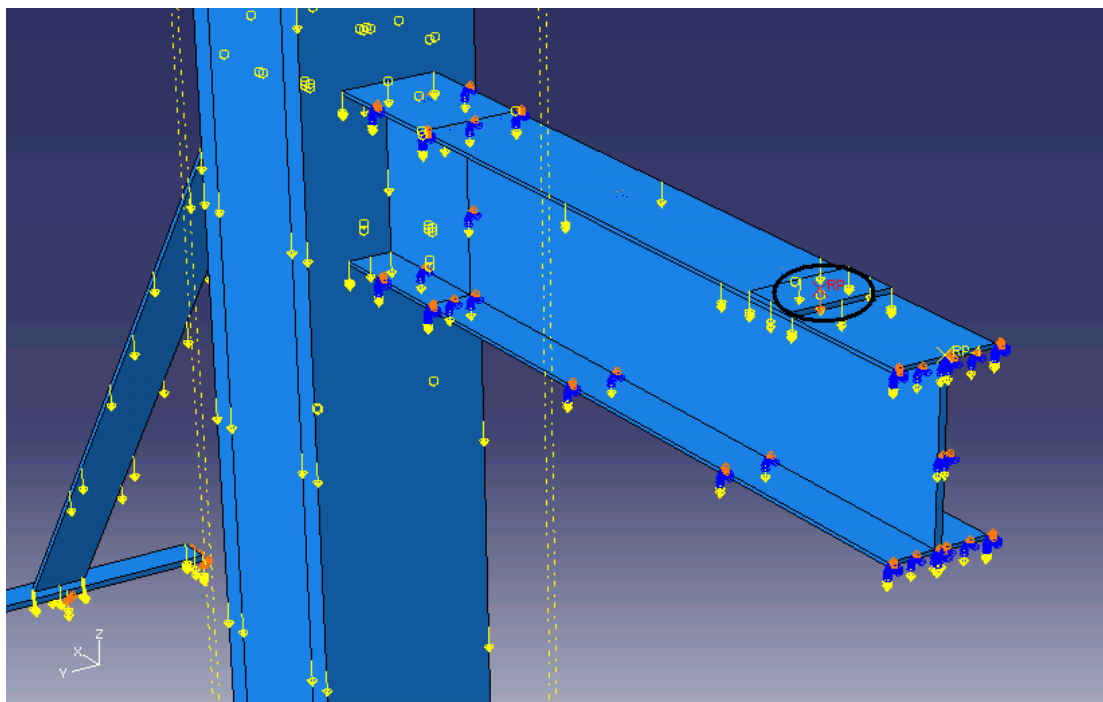
Create Boundary Condition → Symmetry, Antisymmetry, Encastre → YSUMM

### **Load**

Στο σημείο αυτό δημιουργήσαμε τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή μας. Συγκεκριμένα στο Load1 ορίζεται το βάρος της κατασκευής μας και στο Load2 το συγκεντρωμένο φορτίο που ασκείται στη δοκό.

Load1 → Type: Gravity → επιλογή εφαρμογής στο step1 → πλήρη συναρμολογημένη διάταξη → component1,2=0 και component = -9,81

Load2 → Type: Concentrated force → επιλογή εφαρμογής στο step2 → επιλογή σημείου εφαρμογής → ορισμός CF1,2 = 0 και CF3 = -200 kN



**Εικόνα 3.3.1:** Σημείο εφαρμογής συγκεντρωμένου φορτίου

### **Meshing**

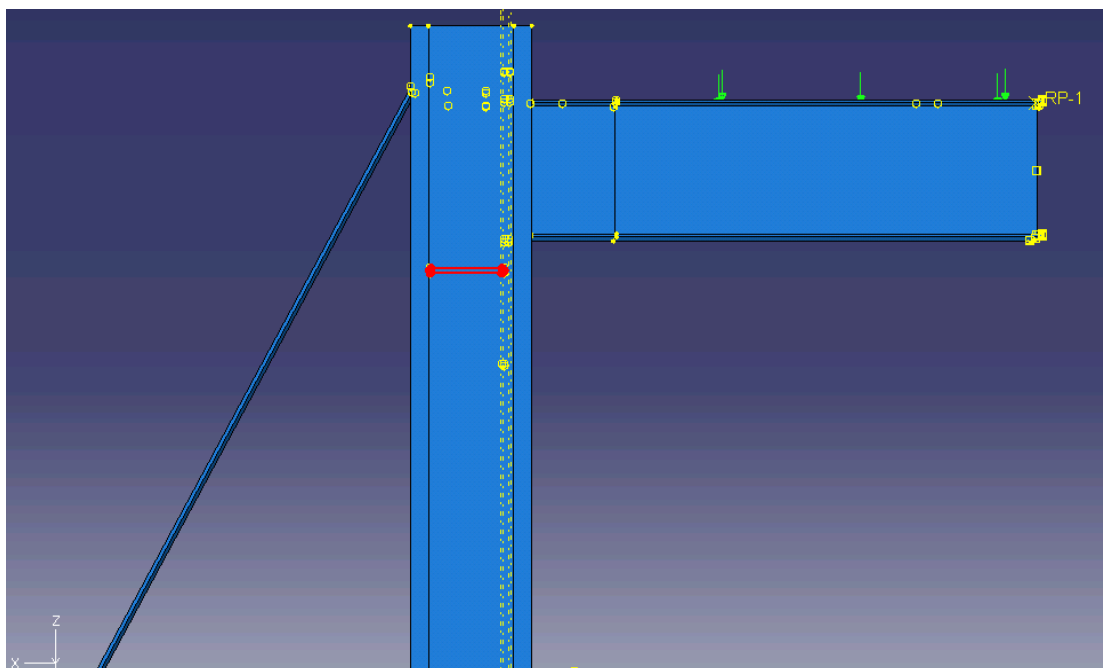
Στο στάδιο αυτό γίνεται διακριτοποίηση της κατασκευής μας, όπου έγινε η χρήση των 3D brick element, τα οποία θεωρούνται πιο κατάλληλα για την περίπτωσή μας.

### **Creation and Running the job**

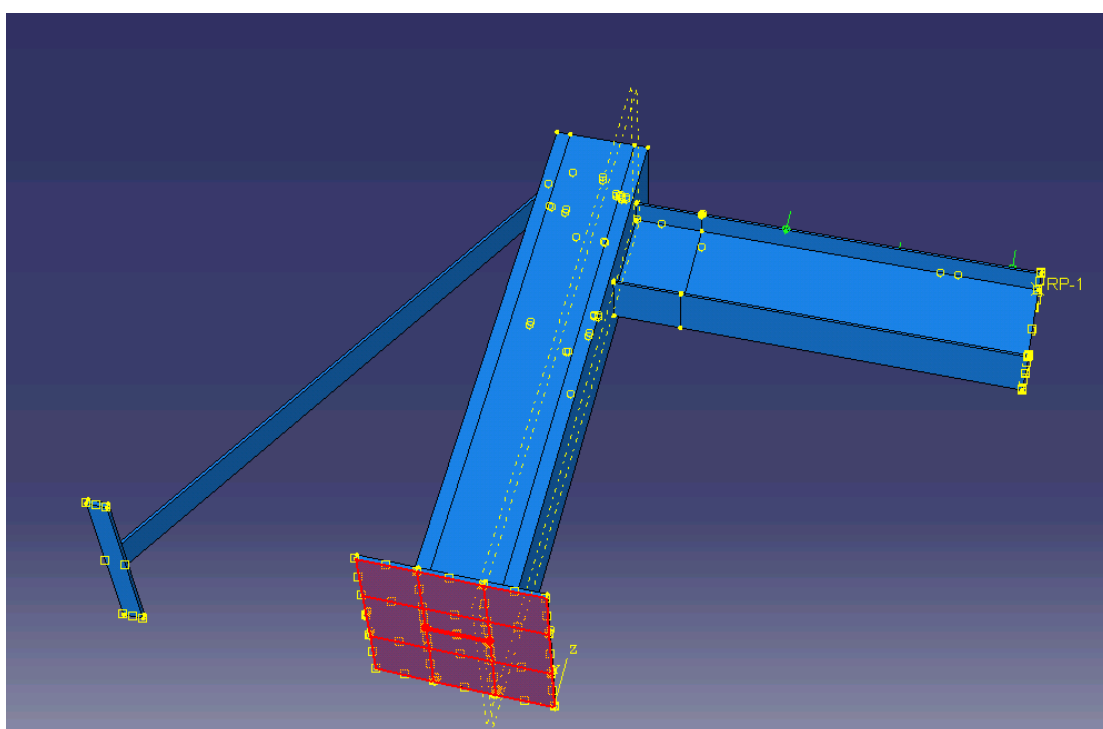
Στο τελευταίο στάδιο ορίζουμε το job και βάζουμε το λογισμικό να τρέξει.

## **3.4 Μοντελοποίηση θερμικού Προβλήματος**

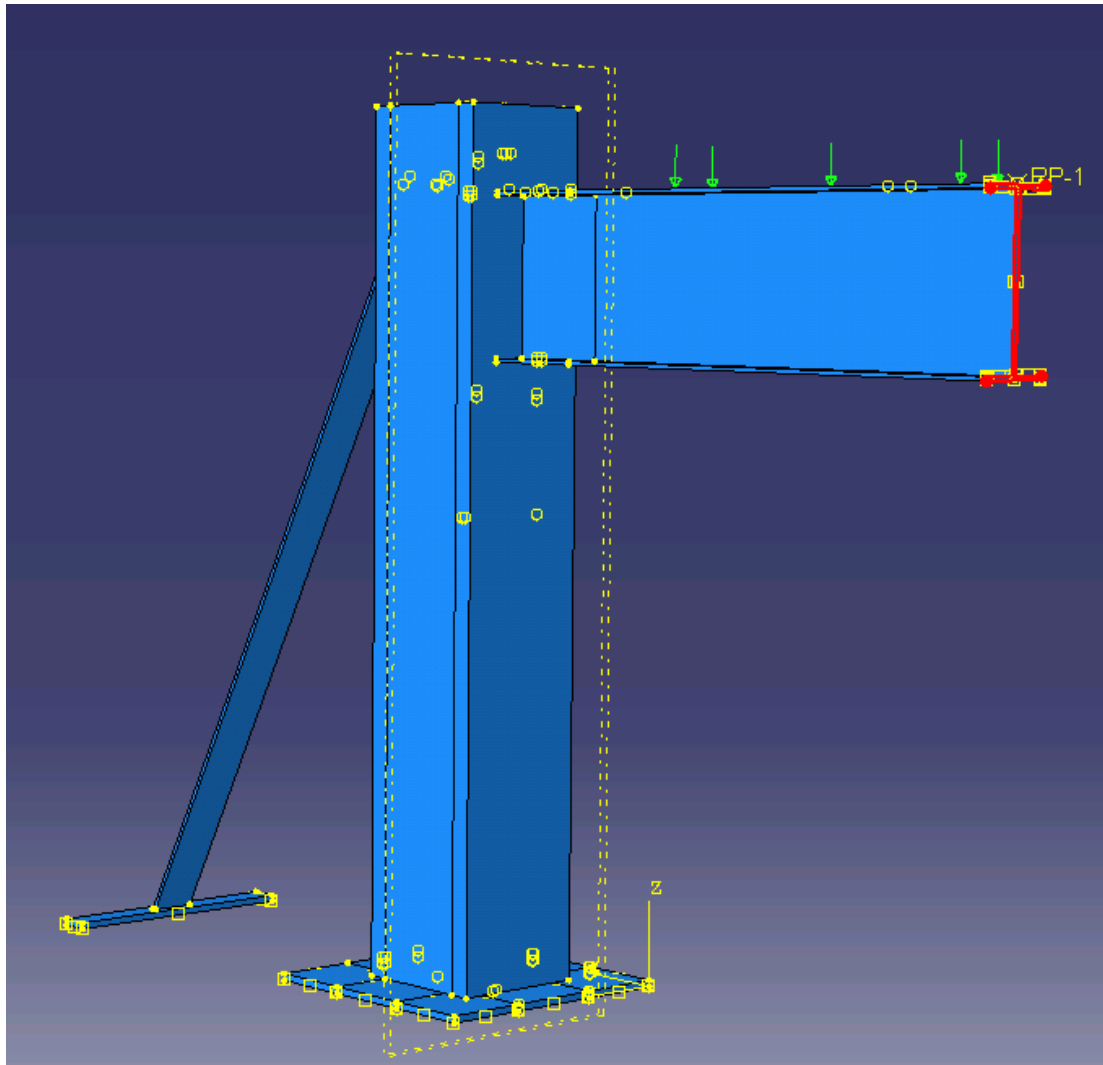
Στη θερμική μοντελοποίηση του προβλήματος, προσδώσαμε σε τρία διαφορετικά σημεία της διάταξή μας σταθερές θερμοκρασίες, καθώς και σε μια επιφάνεια της οριζόντιας δοκού, όπως φαίνεται και από τις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 3.4.1:** Πρώτο set θερμοκρασιών (CentralTemp) κοντά στην περιοχή της σύνδεσης οριζόντιας δοκού – κάθετου στύλου



**Εικόνα 3.4.2:** Δεύτερο set θερμοκρασιών (GroundTemp) στη βάση της κατασκευής



**Εικόνα 3.4.3:** Τρίτο set θερμοκρασιών (InsideTemp) στο ελεύθερο άκρο της δοκού

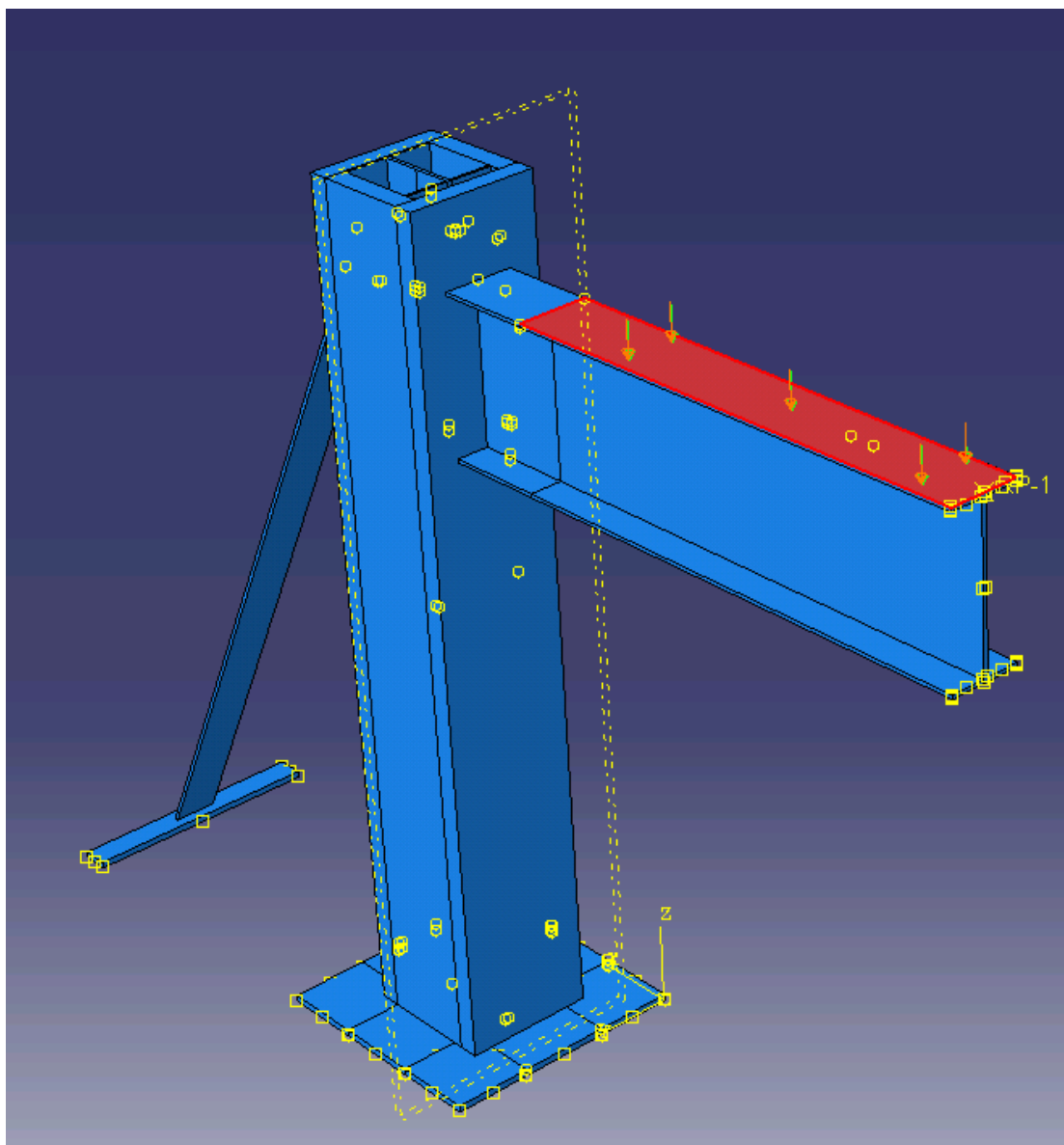
Στα παραπάνω set όπως ακριβώς αυτά φαίνονται στις εικόνες ορίσαμε τις ακόλουθες σταθερές θερμοκρασίες:

Πρώτο set (CentralTemp): 463 °C

Δεύτερο set (GroundTemp): 273 °C

Τρίτο set (InsideTemp): 623 °C

Επίσης ορίστηκε και η επιφάνεια πάνω στη δοκό πάνω στην οποία ασκείται θερμικό φορτίο  $2 \text{ KW/m}^2$ . Στα σενάρια 8 και 11 που αναλύονται παρακάτω το θερμικό φορτίο που ασκείται αυξάνεται στο  $20 \text{ KW/m}^2$  και αντίστοιχα το πρώτο set (CentralTemp) στους 600 °C και το δεύτερο set (GroundTemp) αυξάνεται στους 400 °C.



**Εικόνα 3.4.4:**Επιφάνεια συναρμολογημένης διάταξης όπου ασκείται το θερμικό φορτίο

Για το υλικό **Beams\_Column** ορίσαμε τα ακόλουθα θερμικά χαρακτηριστικά:

Thermal → Conductivity

Δίνοντας τιμή στο Thermal conductivity =  $45 \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$

Mechanical → Expansion

Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha =  $1.2 (10^{-5} / ^\circ\text{C})$

Αντίστοιχα για το υλικό **Bolts** ορίσαμε τα ακόλουθα θερμικά χαρακτηριστικά:

Thermal → Conductivity

Δίνοντας τιμή στο Thermal conductivity =  $45 \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$

Mechanical → Expansion

Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha =  $1.3 (10^{-5} / ^\circ\text{C})$

Για το υλικό **Thermal\_reinforcement** ορίσαμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Thermal → Conductivity

Δίνοντας τιμή στο Thermal conductivity = 988 (W/ m °C)

Mechanical → Expansion

Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha = 1.84 (10<sup>-7</sup> / °C)

### **Interactions**

Σε αυτό το σημείο ορίσαμε τις διεπιφάνειες του προβλήματος. Σημαντικότερη θεωρήθηκε η διεπιφάνεια ένωσης κάθετου στύλου – πυράντοχης ενίσχυσης 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 παρακάτω τιμές:

| Conductivity | Clearance |
|--------------|-----------|
| 45           | 0         |
| 0            | 0,005     |

### **Assembly**

Σε αυτό το στάδιο ορίσαμε τα προαναφερθέντα set που μας χρειάστηκαν για να ορίσουμε τις θερμοκρασίες καθώς φυσικά και τις επιφάνειες (surface) στις οποίες ασκείται το θερμικό φορτίο. Η δημιουργία των set έγινε με τον παρακάτω τρόπο:

Assembly → Sets → δίνουμε το όνομα που επιθυμούμε → επιλέγουμε τις περιοχές που θέλουμε να οριστούν στο set (δείτε αντίστοιχες εικόνες)

Αντίστοιχα δουλεύουμε και για τον ορισμό των επιφανειών:

Assembly → Surface → δίνουμε το όνομα που επιθυμούμε → επιλέγουμε τις περιοχές που θέλουμε να οριστούν στην surface (δείτε αντίστοιχες εικόνες)

### **Step Definition**

Σε αυτό το στάδιο 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.

Το step που δημιουργήσαμε ονομάζεται ThermalAnalysis και το δημιουργήσαμε ως εξής:

ThermalAnalysis → General → Επιλέγοντας Heat Transfer και στο response το steady state

### **Load Definition**

Εδώ ορίσαμε ένα από τα θερμικά φορτία της ανάλυσής μας.

Load → Heatflux → Επιλέγουμε σαν τύπο το Surface Heat Flux και ορίζουμε τις επιφάνειες που θα ασκηθεί το θερμικό φορτίο και δίνουμε την τιμή του θερμικού φορτίου στα  $2 \text{ KW/m}^2$  (Σε ένα από τα σενάρια μας το φορτίο αυτό είναι  $20 \text{ KW/m}^2$ ).

### **BCS Definition**

BCs→Temperature (επιλέγουμε την περιοχή που θα εφαρμοστεί) →Distribution Uniform →Magnitude  $463^\circ\text{C}$  →Amplitude Ramp

Ομοίως ορίζονται και οι άλλες δυο συνοριακές συνθήκες με τιμές  $623^\circ\text{C}$  και  $273^\circ\text{C}$  αντίστοιχα.

### **Meshing**

Σε αυτό το στάδιο 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.

### **Creation and running the 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 θερμικής καθαρά επίλυσης. Στη περίπτωση μας υπάρχει και η εναλλακτική της συσχέτισης της θερμοκρασίας με τις μηχανικές ιδιότητες, όπου εισάγουμε στο job ένα input αρχείο με αυξανόμενες κλιμακωτές θερμοκρασίες και τις αντίστοιχες τιμές του μέτρου ελαστικότητας για κάθε μια από αυτές. Με αυτό τον τρόπο ελέγχουμε πως μειώνεται η αντοχή του φορέα με την αύξηση των θερμοκρασιών.

## **3.5 Μοντελοποίηση Θερμομηχανικού Προβλήματος**

Στη περίπτωση του θερμομηχανικού προβλήματος η διαδικασία που ακολουθείτε είναι η εξής: πρώτα επιλύεται το καθαρά θερμικό πρόβλημα, και έπειτα τα αποτελέσματά του εισάγονται στο μηχανικό πρόβλημα όπου και γίνεται 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.

Εκτός από τις θερμικές ιδιότητες των υλικών προστίθενται και οι μηχανικές ιδιότητες. Επίσης ορίζουμε σε ποιο step επιθυμούμε να εισαχθούν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Η εισαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται ως εξής:

Load → Predefined field Manager → Create (επιλέγουμε το step στο οποίο θέλουμε να εφαρμοστεί) → Types for selected step to temperature (επιλέγουμε με προσοχή την περιοχή στην οποία θα εφαρμοστούν τα θερμικά αποτελέσματα) → εισαγωγή του αρχείου των αποτελεσμάτων.

### 3.6 Σενάρια Επίλυσης

Επιλέξαμε να πραγματοποιήσουμε 17 σενάρια και συγκεκριμένα 8 σενάρια για κάθε πυράντοχο υλικό. Ο λόγος επιλογής πολλών σεναρίων είναι για να μπορέσουμε να διερευνήσουμε την καταπόνηση που μπορεί να προκαλέσει η εκδήλωση φωτιάς (θερμικά φορτία) είτε μόνη της είτε σε συνδυασμό με σεισμό (μηχανικά φορτία), και ανάλογα με τη σειρά εκτέλεσης των γεγονότων. Εξετάζουμε το ενδεχόμενο εκδήλωσης πρώτα φωτιάς και έπειτα σεισμού αλλά και τα δύο γεγονότα ταυτόχρονα. Επίσης εξετάζεται και η συνεχής εναλλαγή των γεγονότων (σενάριο 15). Να σημειωθεί ότι τα σενάρια 8 και 11 είναι περισσότερο ακαδημαϊκά και όχι πραγματικά.

#### Σενάριο 1

Το πρώτο σενάριο είναι η μηχανική μας επίλυση, όπου στην κατασκευή μας ασκείται συγκεντρωμένο μηχανικό φορτίο στην οριζόντια δοκό μεγέθους 200 kN. Εκτός από το φορτίο των 200 kN, ασκείται και το βάρος της ίδιας της κατασκευής.

#### Σενάριο 2

Το σενάριο αυτό αποτελεί την θερμική μας ανάλυση, όπου επιβάλλεται σταθερό θερμικό φορτίο της τάξης των  $2\text{KW/m}^2$  αλλά και τον ορισμό των περιοχών σταθερής θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή το υλικό της πυράντοχης ενίσχυσης είναι ελαφρύ σκυρόδεμα.

#### Σενάριο 3

Το σενάριο αυτό αποτελεί την θερμομηχανική μας επίλυση, όπου έχουμε συνδυασμένη επιβολή θερμικών αποτελεσμάτων (που έχουν προέλθει από προηγούμενη επίλυση, σενάριο 2) (step2) και επιβολή του μηχανικού φορτίου των 200kN (step2). Επίσης και εδώ ασκείται το βάρος της κατασκευής στο step1.

Πιο αναλυτικά η ακολουθία είναι: step1→βάρος κατασκευής step2→ επιβολή θερμικών αποτελεσμάτων και φορτίο 200kN.

Το πυράντοχο υλικό ενίσχυσης και εδώ είναι το ελαφρύ σκυρόδεμα.

#### Σενάριο 4

Το σενάριο αυτό αποτελεί επίσης μια θερμομηχανική επίλυση όπου όμως το φορτίο των 200kN εφαρμόζεται σε διαφορετικό step από τα θερμικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα: step1 βάρος κατασκευής → step2 επιβολή θερμικών αποτελεσμάτων → step3 φορτίο 200kN.

Ομοίως το πυράντοχο υλικό ενίσχυσης και εδώ είναι το ελαφρύ σκυρόδεμα.

#### Σενάριο 5

Το σενάριο αυτό αποτελεί άλλη μια θερμική ανάλυση, όπου επιβάλλεται σταθερό θερμικό φορτίο της τάξης των  $2\text{KW/m}^2$  αλλά και τον ορισμό των περιοχών σταθερής θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή όμως το υλικό της πυράντοχης ενίσχυσης είναι γυψοσανίδα.

### **Σενάριο 6**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμομηχανική ανάλυση ανάλογη του σεναρίου 3, μόνο που εδώ εισάγονται τα θερμικά αποτελέσματα της θερμικής επίλυσης (σενάριο 5) με τις θερμικές ιδιότητες γυψοσανίδας.

### **Σενάριο 7**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια νέα θερμομηχανική επίλυση, όμοια με αυτή του σεναρίου 4, με τη διαφορά ότι εισάγονται τα θερμικά αποτελέσματα της θερμικής επίλυσης για γυψοσανίδα (σενάριο 5).

### **Σενάριο 8**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια νέα θερμική επίλυση με τις εξής παραλλαγές. Το φορτίο των  $2\text{KW/m}^2$  αυξάνεται σε  $20\text{KW/m}^2$ , και τα set θερμοκρασιών στη σύνδεση δοκού - στύλου και στη βάση του στύλου μετατρέπονται από  $463\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $273\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Η επίλυση αυτή πραγματοποιείται για ιδιότητες ελαφρού σκυροδέματος.

### **Σενάριο 9**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμομηχανική επίλυση (όμοια με σενάριο 3), όπου έχουμε συνδυασμένη επιβολή θερμικών αποτελεσμάτων (που έχουν προέλθει από προηγούμενη επίλυση, σενάριο 8) (step2) και επιβολή του μηχανικού φορτίου των  $200\text{kN}$  (step2).

### **Σενάριο 10**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμομηχανική επίλυση αντίστοιχη του σεναρίου 4, με εισαγωγή των θερμικών αποτελεσμάτων του σεναρίου 8 για υλικό ενίσχυσης ελαφρού σκυροδέμα

Συγκεκριμένα: step1 βάρος κατασκευής → step2 επιβολή θερμικών αποτελεσμάτων → step3 φορτίο  $200\text{kN}$ .

### **Σενάριο 11**

Το σενάριο αυτό αποτελεί άλλη μια θερμική ανάλυση όμοια με αυτή του σεναρίου 8 μόνο που γίνεται για ιδιότητες γυψοσανίδας.

### **Σενάριο 12**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμομηχανική επίλυση (όμοια με σενάριο 3), στην οποία εισάγονται τα θερμικά αποτελέσματα του σεναρίου 11. Τα θερμικά αποτελέσματα και το μηχανικό φορτίο των  $200\text{kN}$  επιβάλλονται στο ίδιο step.

### **Σενάριο 13**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμομηχανική επίλυση αντίστοιχη του σεναρίου 4, με εισαγωγή των θερμικών αποτελεσμάτων του σεναρίου 10 για υλικό ενίσχυσης γυψοσανίδα.

### **Σενάριο 14**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια νέα θερμομηχανική επίλυση για ελαφρύ σκυρόδεμα η οποία έχει τέσσερα steps. Συγκεκριμένα στο 1<sup>ο</sup> step ασκείται το μισό θερμικό φορτίο: heat flux  $1\text{KW/m}^2$  και οι μισές θερμοκρασιακές συνοριακές συνθήκες.

Στο step 3 ασκείται το υπόλοιπο θερμικό φορτίο: heat flux  $1\text{KW/m}^2$  (οπότε συνολικά  $2\text{KW/m}^2$ ) και οι ολοκληρωμένες πλέον (διπλάσιες του 1<sup>ου</sup> step) θερμοκρασιακές συνοριακές συνθήκες.

### **Σενάριο 15**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια νέα θερμομηχανική επίλυση για ελαφρύ σκυρόδεμα, όπου το θερμομηχανικό μοντέλο δημιουργήθηκε τοποθετώντας στο step 2 και 4 μηχανικά φορτία 50kN και 150kN αντίστοιχα. Τα θερμικά αποτελέσματα που εισάγονται είναι του σεναρίου 14.

Συγκεκριμένα:

step 1 → βάρος κατασκευής και επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{KW/m}^2$  → step2 μηχανικό φορτίο 50 kN → step 3 επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{KW/m}^2$  → μηχανικό φορτίο 50kN

### **Σενάριο 16**

Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμοκή ανάλυση όμοια με αυτή του σεναρίου 14 αλλά για υλικό γυψοσανίδα.

### **Σενάριο 17**

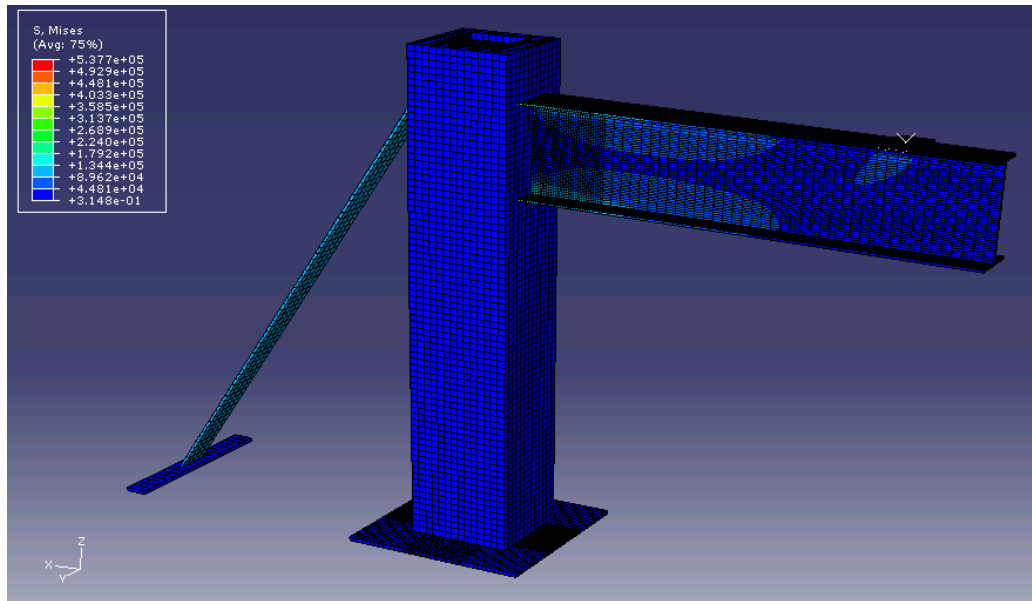
Το σενάριο αυτό αποτελεί μια θερμομηχανική επίλυση αντίστοιχη του σεναρίου 15 για υλικό γυψοσανίδα.

## Κεφάλαιο 4

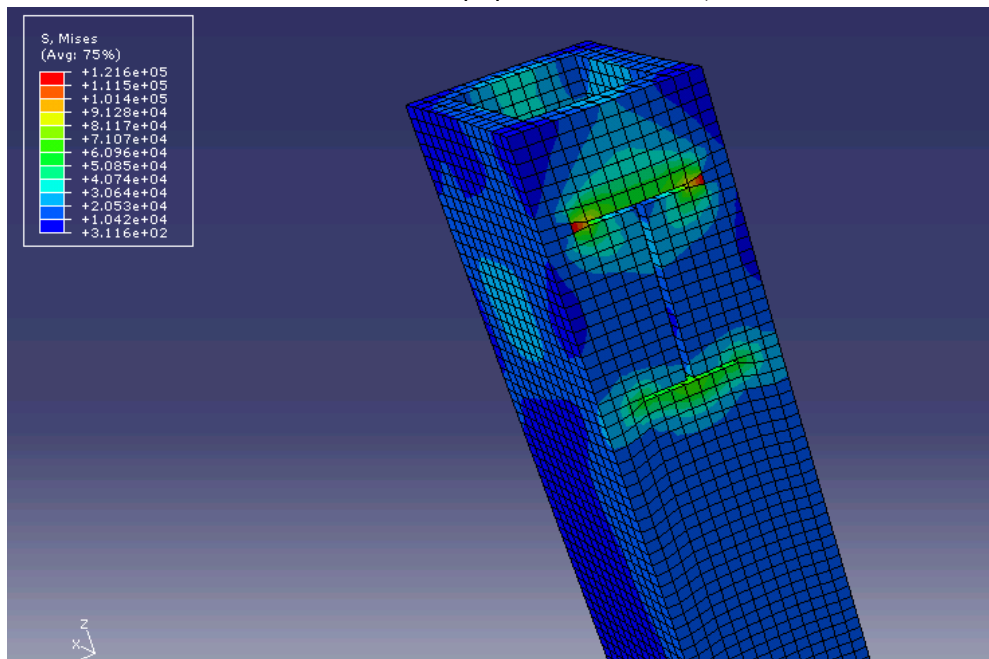
### Αποτελέσματα Ανάλυσης

#### 4.1 Αποτελέσματα Μηχανικής Ανάλυσης -Σενάριο 1

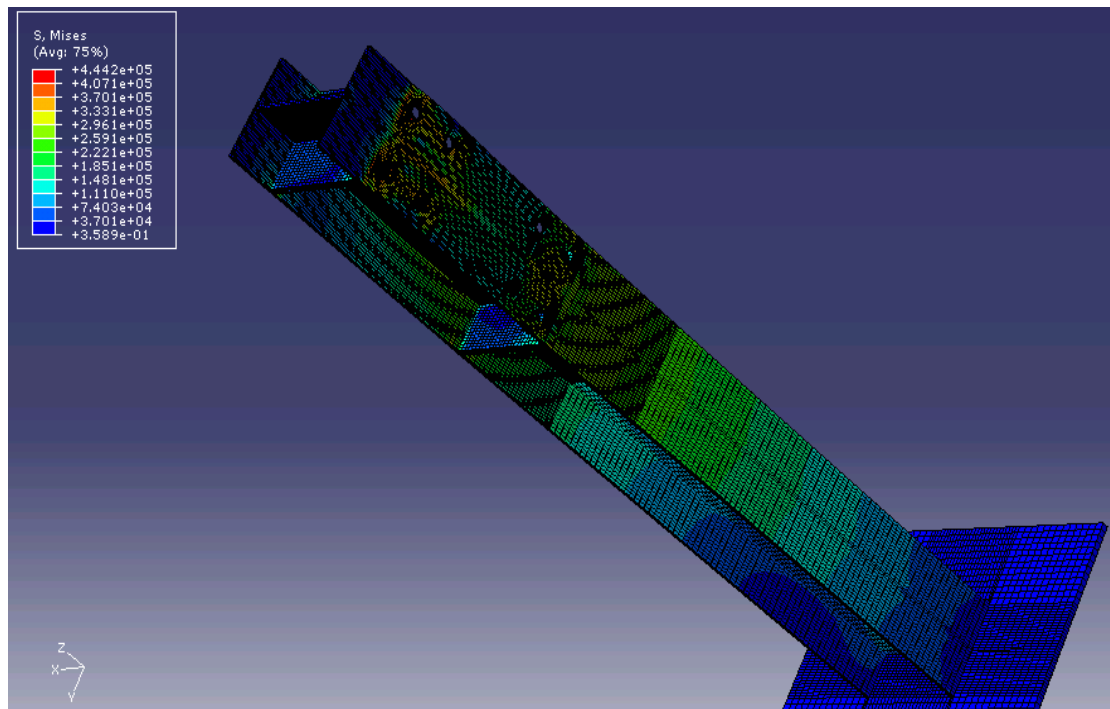
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η καταπόνηση κατά von Mises της πλήρους διάταξης αλλά και μεμονωμένα των τμημάτων που την απαρτίζουν.



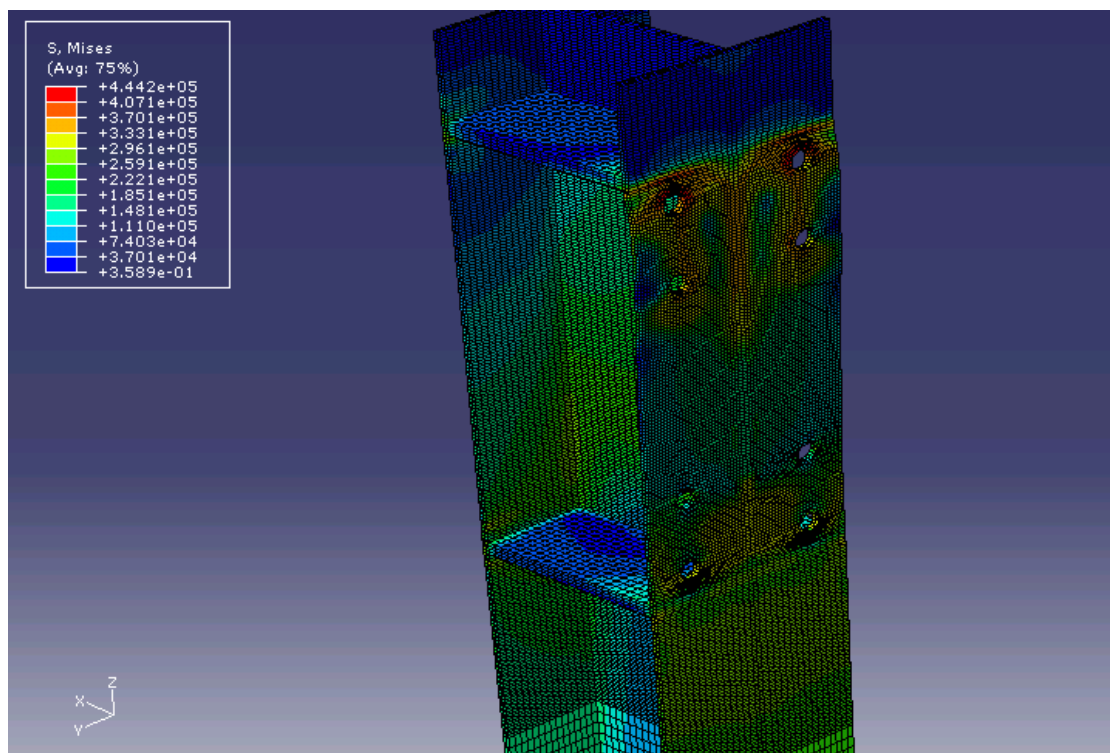
**Εικόνα 4.1.1:** Πλήρης διάταξη (Μέγιστη Καταπόνηση  $5,377 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,148 \cdot 10^{-1}$  KPa)



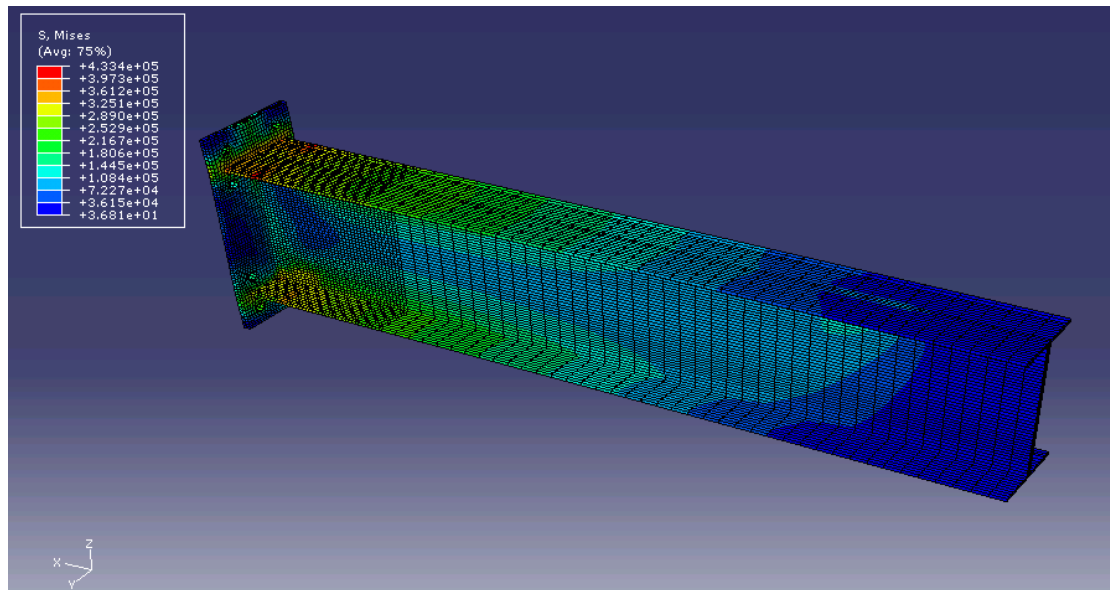
**Εικόνα 4.1.2:** Πυράντοχη επικάλυψη (Μέγιστη Καταπόνηση  $1,216 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,116 \cdot 10^2$  KPa)



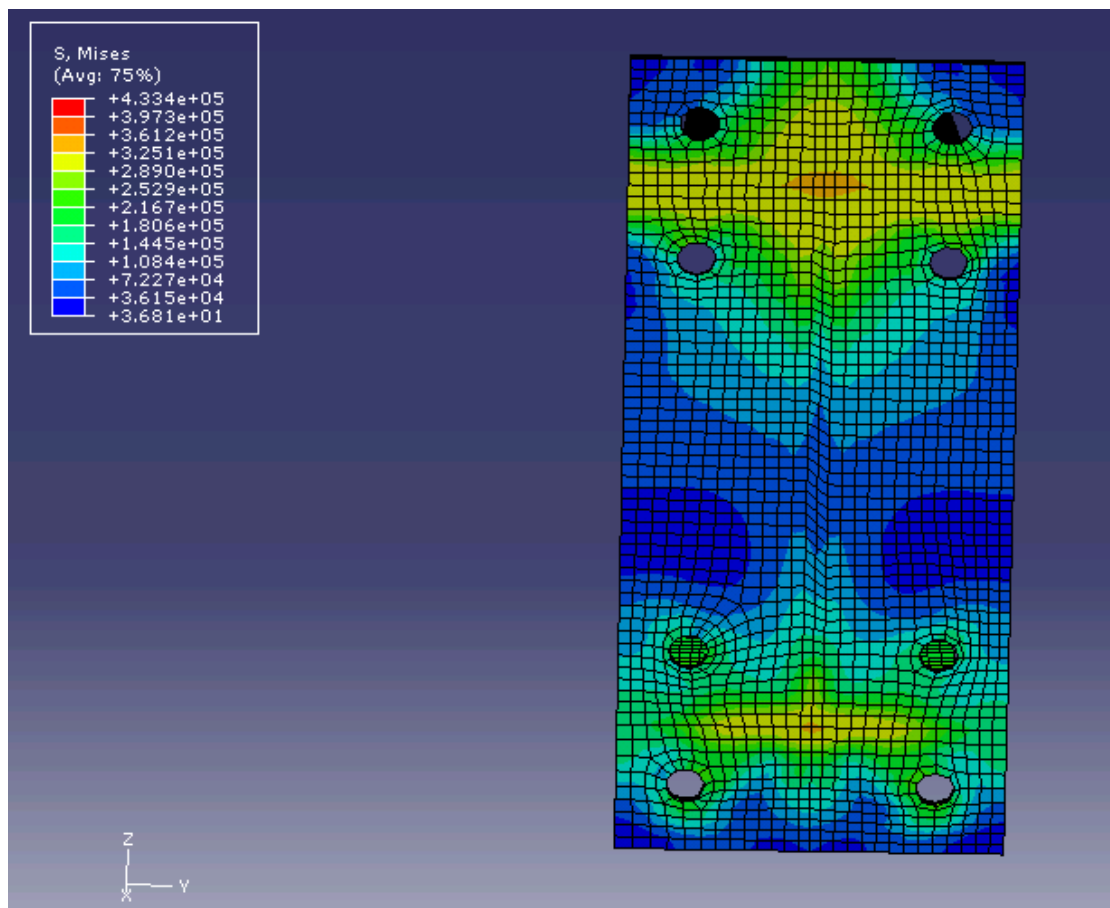
**Εικόνα 4.1.3: Κάθετος στύλος**  
*(Μέγιστη Καταπόνηση  $4,442 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,589 \cdot 10^{-1}$  KPa)*



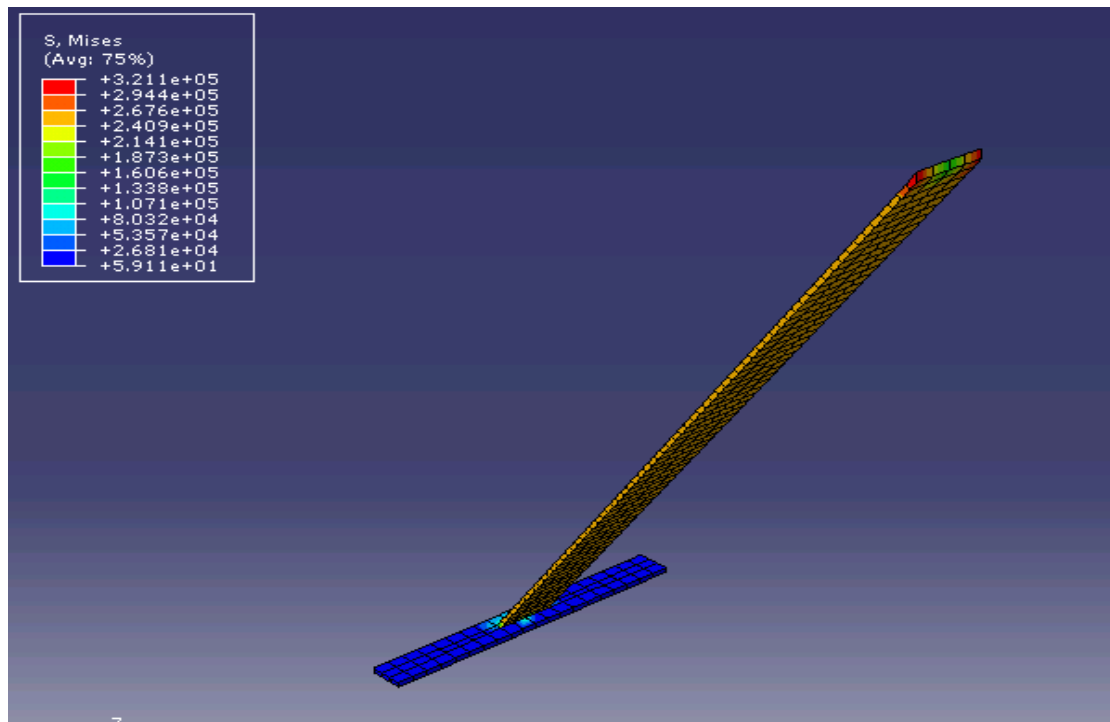
**Εικόνα 4.1.4: Κάθετος στύλος**  
*(Μέγιστη Καταπόνηση  $4,442 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,589 \cdot 10^{-1}$  KPa)*



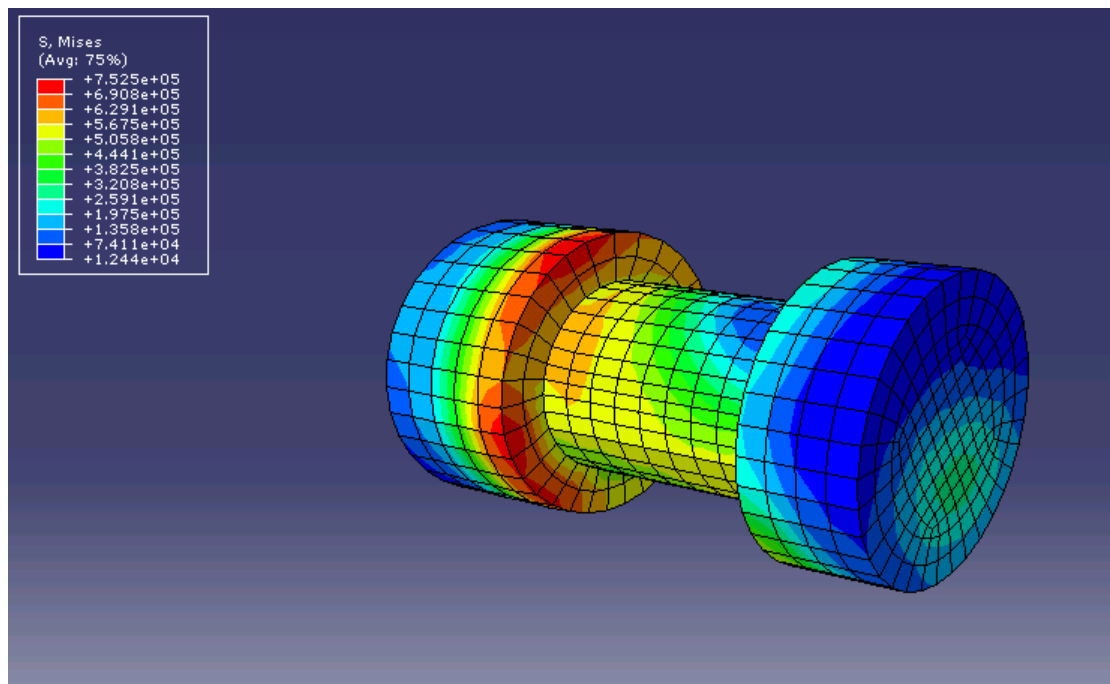
**Εικόνα 4.1.5: Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη Καταπόνηση  $4,334 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,681 \cdot 10^1$  KPa)



**Εικόνα 4.1.6: Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη Καταπόνηση  $4,334 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,681 \cdot 10^1$  KPa)

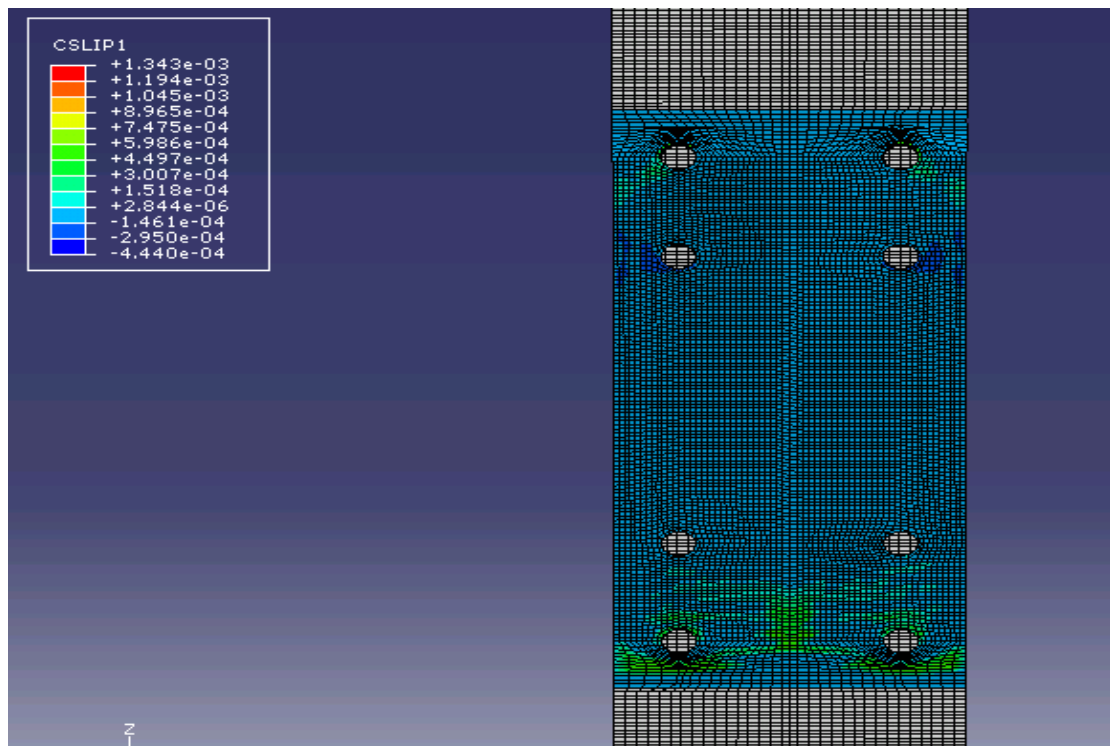


**Εικόνα 4.1.5:** Πίσω βοηθητική δοκός  
(Μέγιστη Καταπόνηση  $3,211 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $5,911 \cdot 10^1$  KPa)

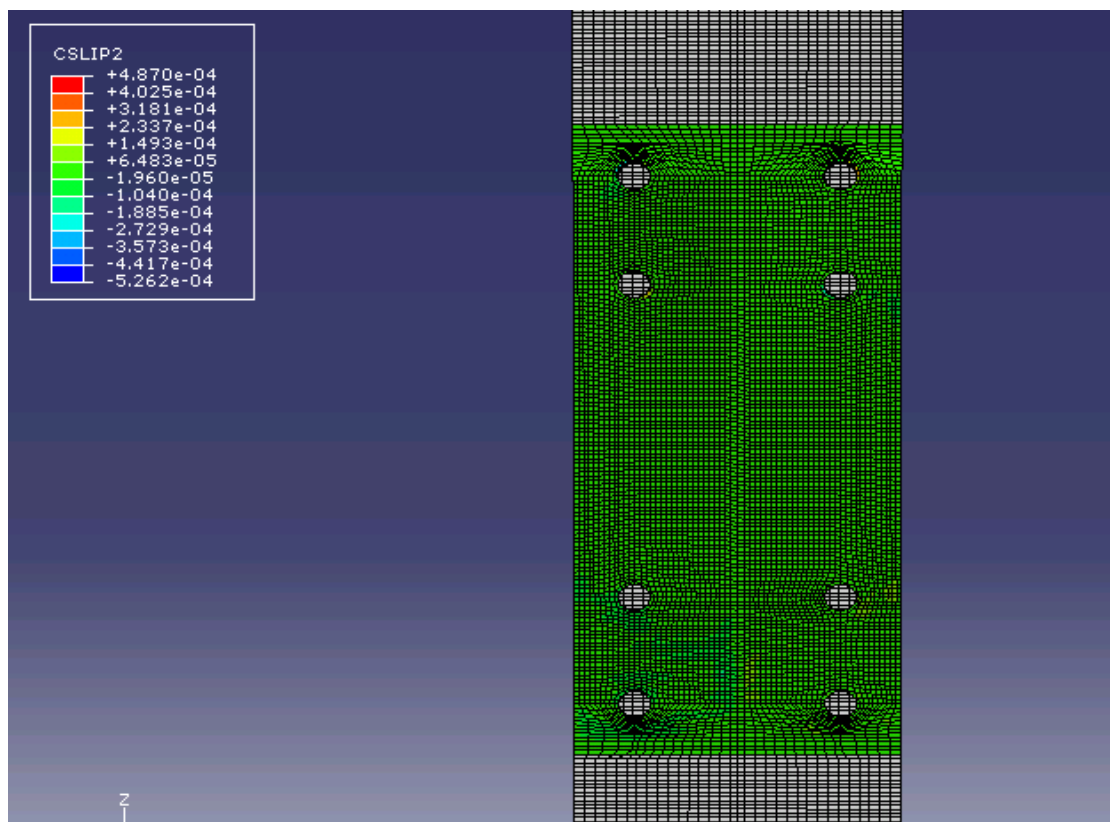


**Εικόνα 4.1.6:** Κοχλίας 2-1  
(Μέγιστη Καταπόνηση  $4,334 \cdot 10^5$  KPa και Ελάχιστη Καταπόνηση  $3,681 \cdot 10^1$  KPa)

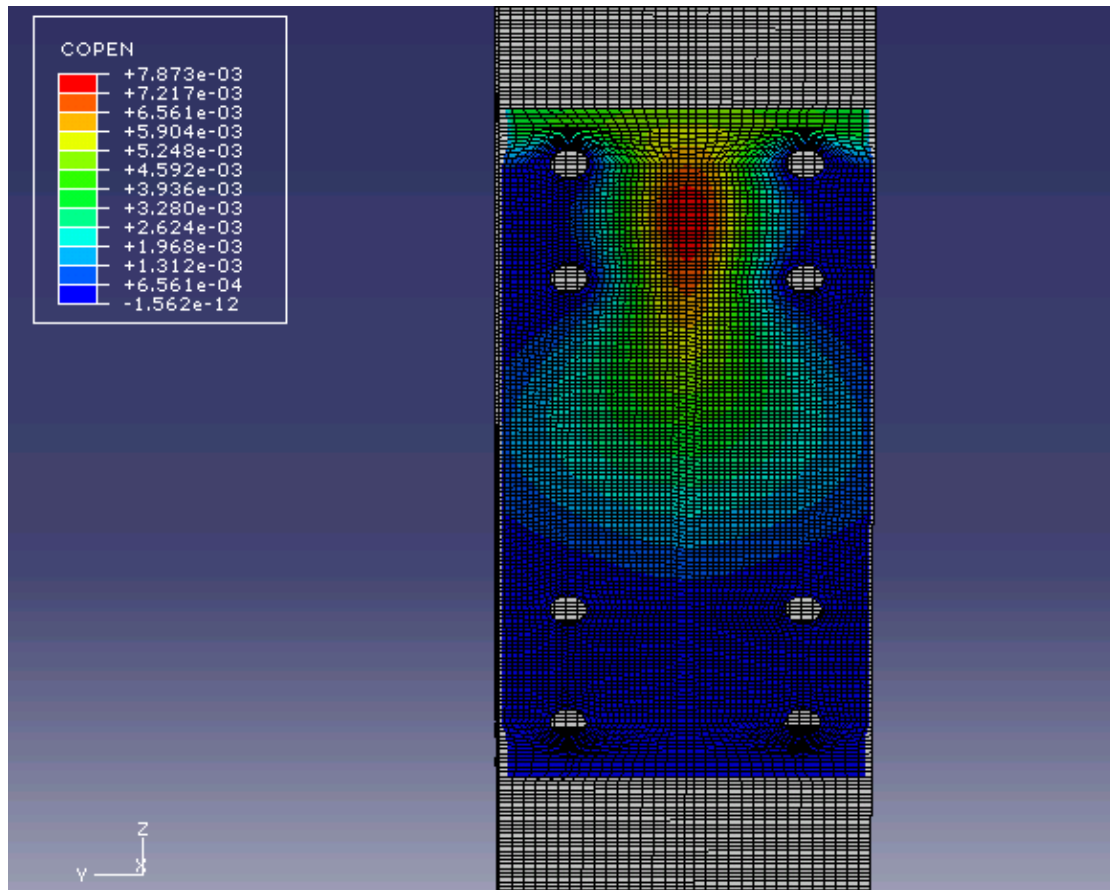
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα (Τα αποτελέσματα CSLP1,2, αφορούν την τριβή σε 2 διευθύνσεις).



**Εικόνα 4.1.7:**Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

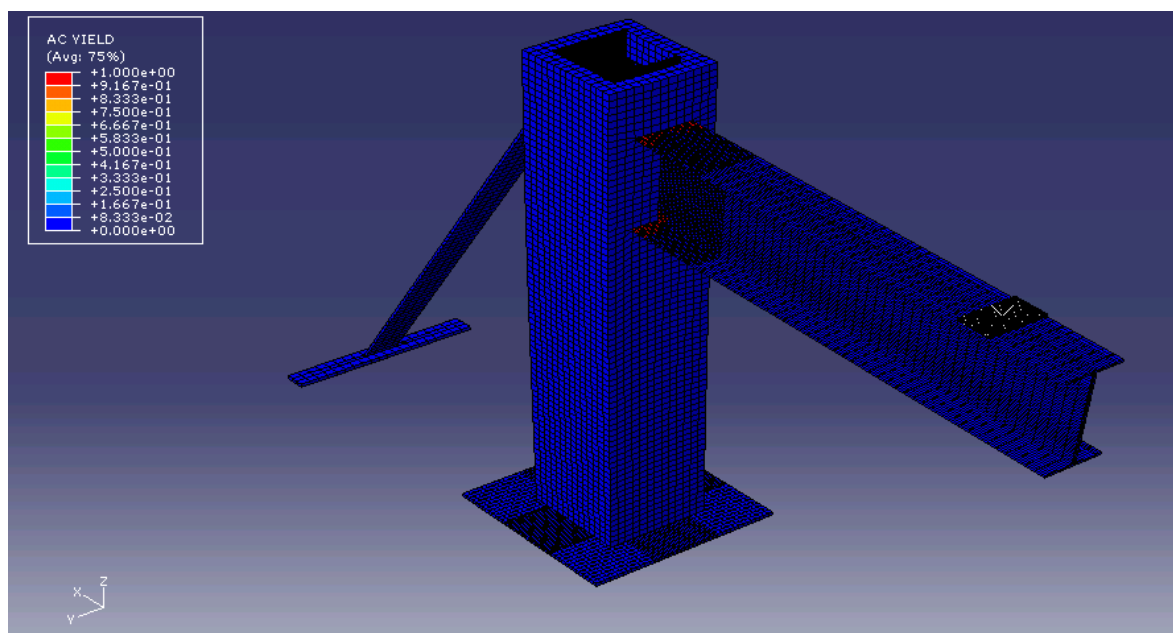


**Εικόνα 4.1.8:**Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.1.9:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

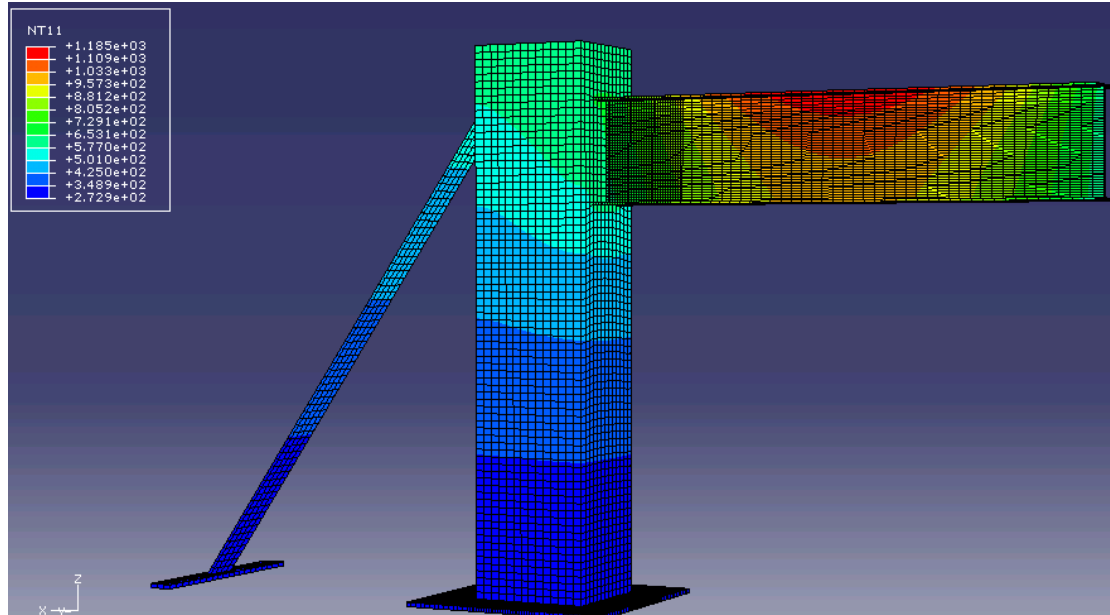
Με κόκκινη επισήμανση φαίνονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου *v.Mises*.



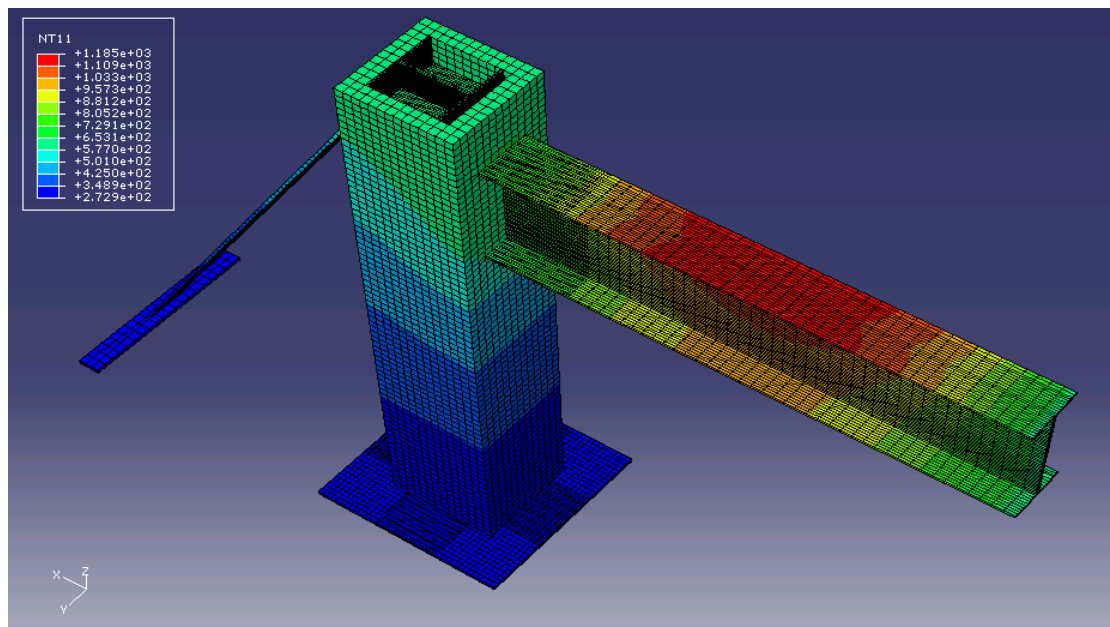
**Εικόνα 4.1.10:** Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

## 4.2 Θερμική Ανάλυση(σκυρόδεμα)- Σενάριο2

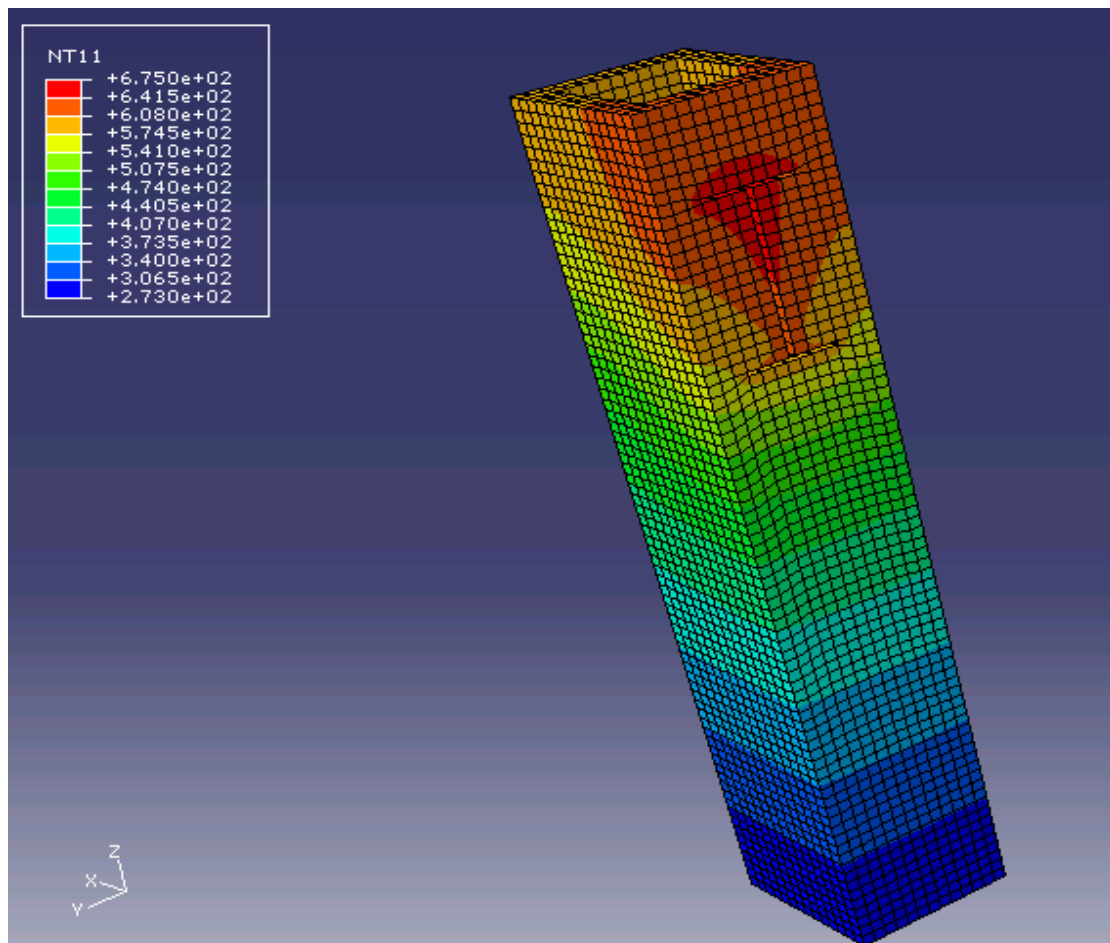
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην κατασκευή.



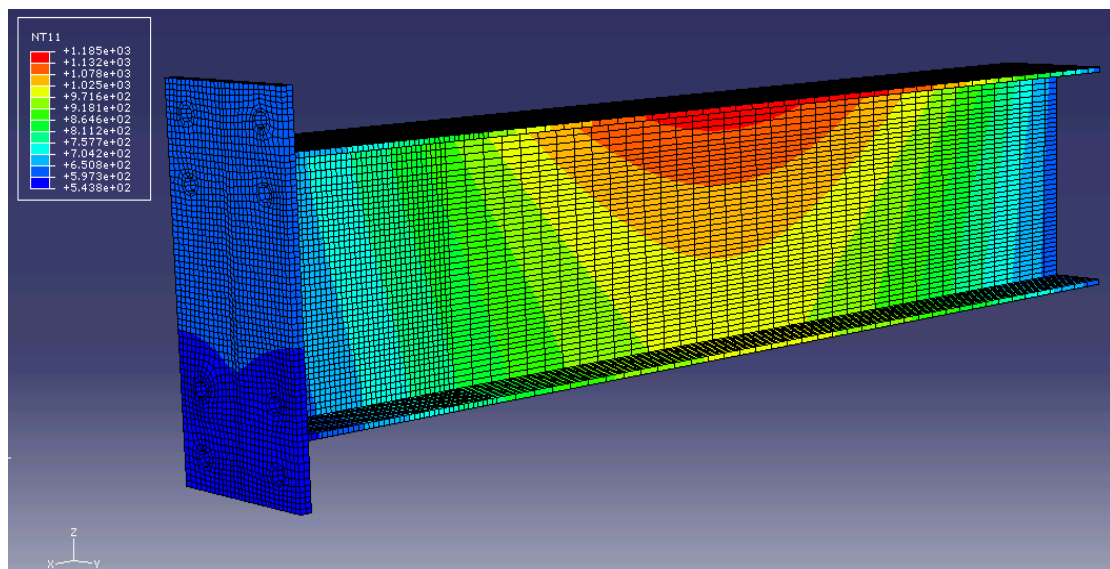
**Εικόνα 4.2.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 1.185 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 272,9 °C)



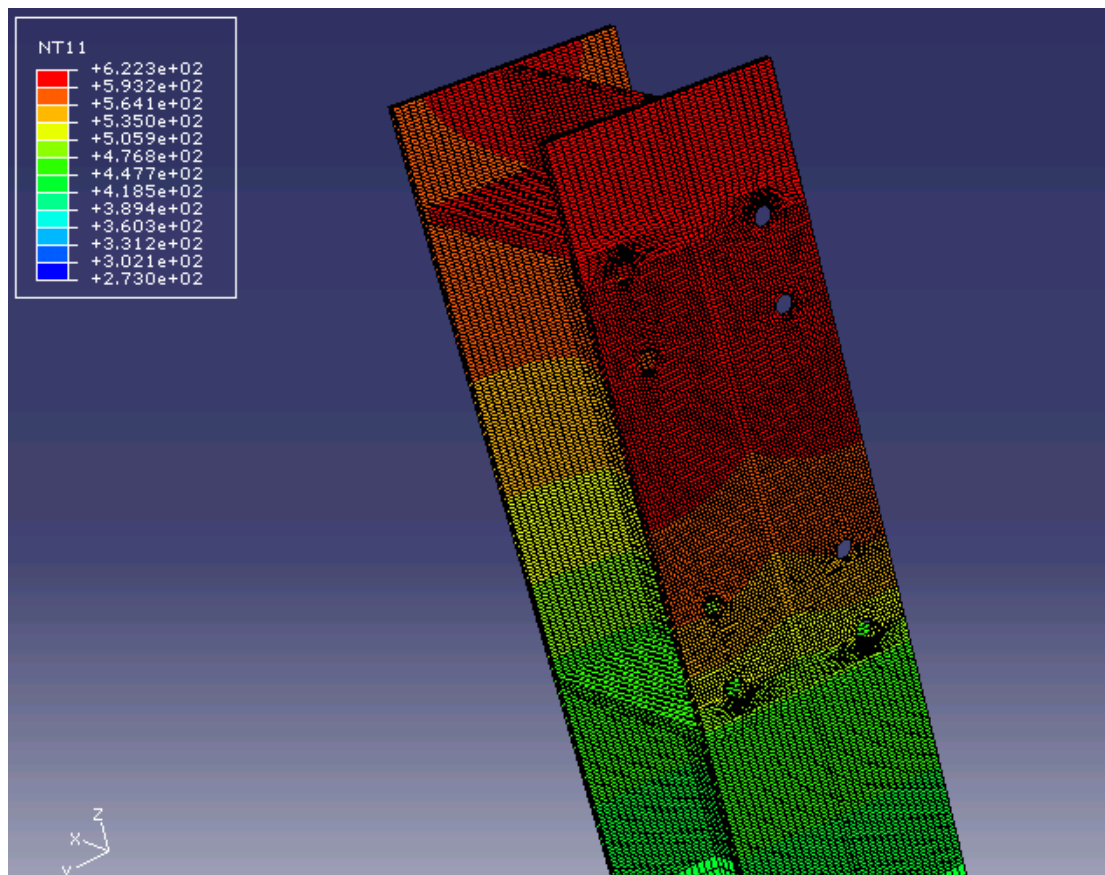
**Εικόνα 4.2.2:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 1.185 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 272,9 °C)



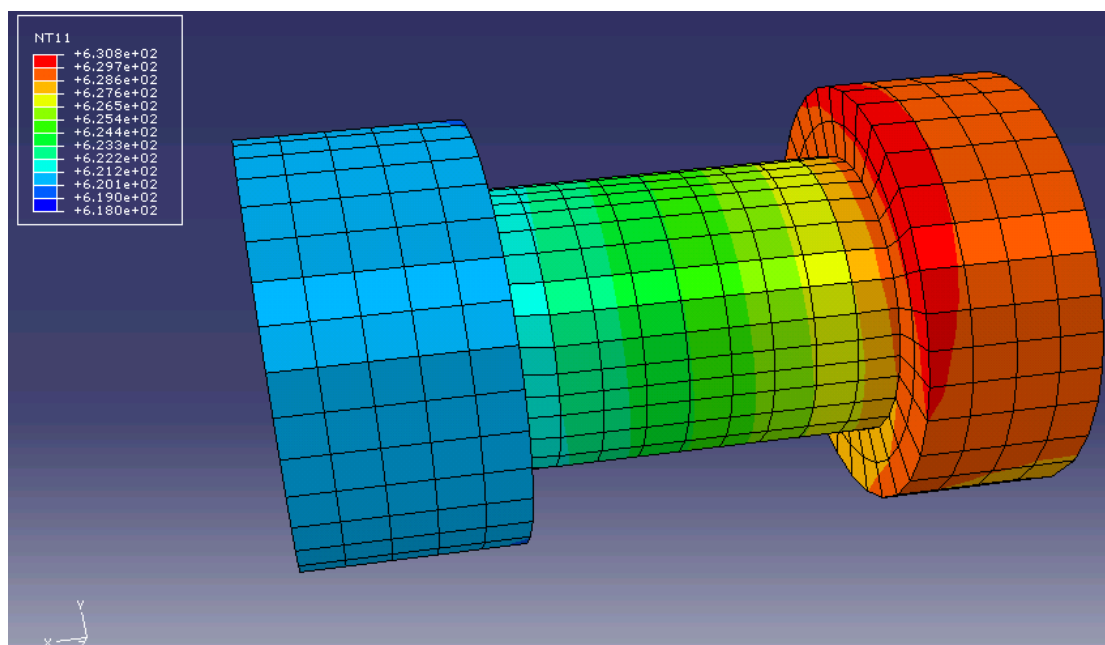
**Εικόνα 4.2.3:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην πυράντοχη ενίσχυση  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 675 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 273 °C)



**Εικόνα 4.2.4:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 1.185 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 543,8 °C)



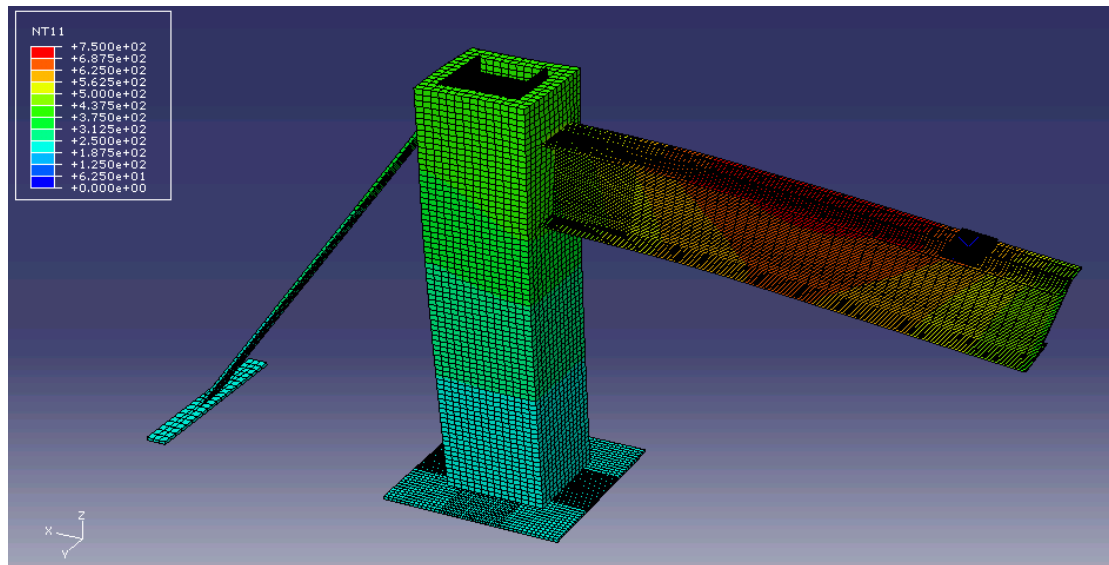
**Εικόνα 4.2.5:** Θερμοκρασιακή κατανομή στον κάθετο στύλο  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 622,3 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 273 °C)



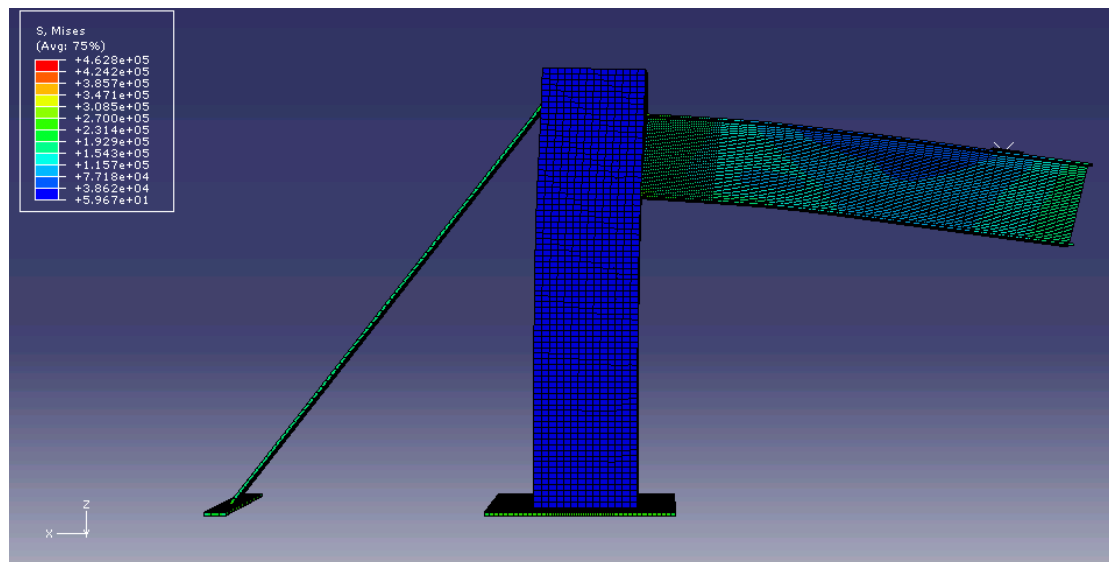
**Εικόνα 4.2.6:** Θερμοκρασιακή κατανομή στον κοχλίαδ-1  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 630,8 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 618 °C)

### 4.3 Θερμομηχανική Ανάλυση (σκυρόδεμα) –Σενάριο 3

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή κατά την αστοχία με τη μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει στους 750 . Επίσης παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises της συναρμολογημένης κατασκευής αλλά και των τμημάτων που την απαρτίζουν.

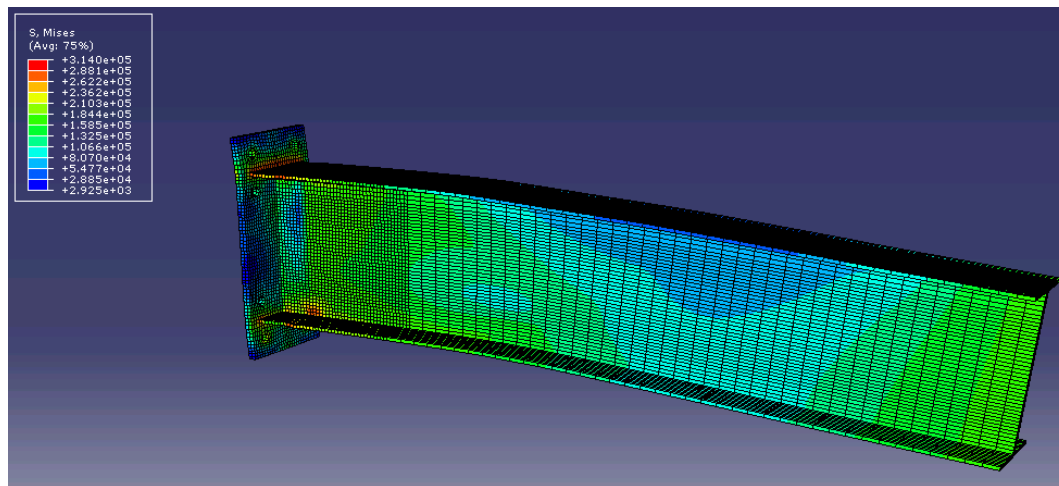


**Εικόνα 4.3.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη

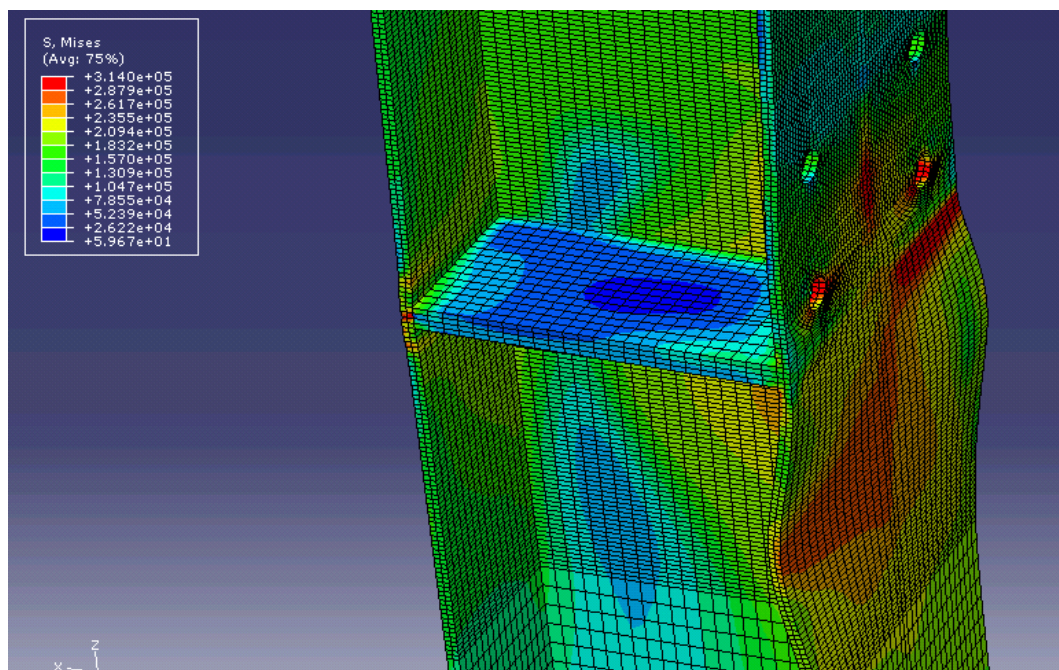


**Εικόνα 4.3.2:**Πλήρης διάταξη

(Μέγιστη καταπόνηση  $4,628 \cdot 10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $5,967 \cdot 10$  KPa)

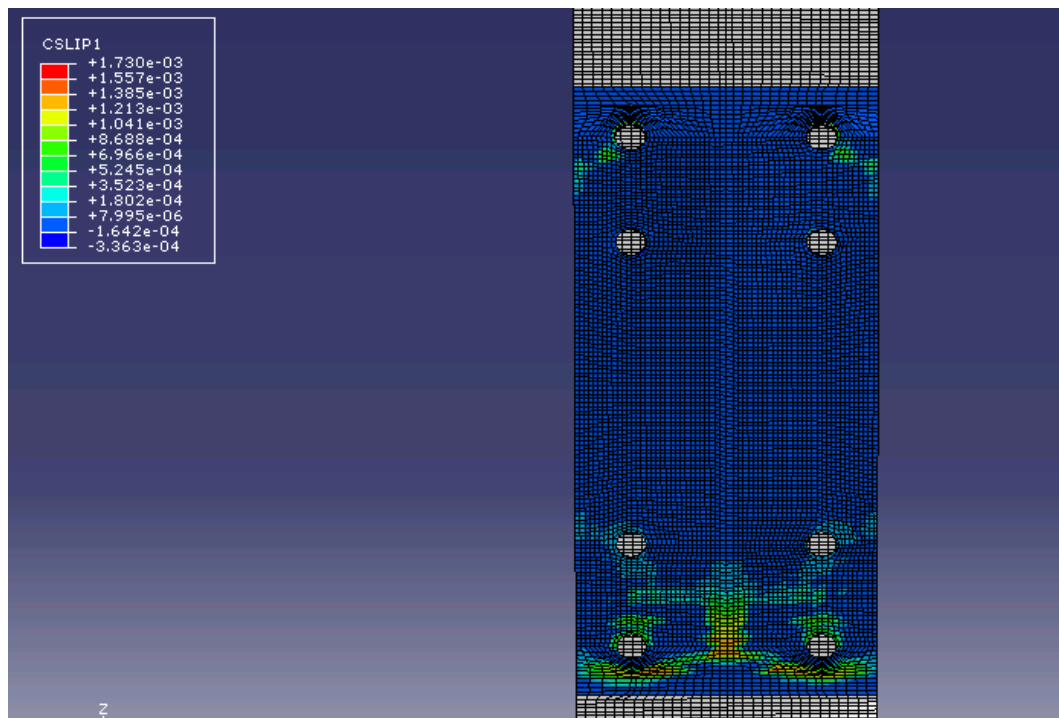


**Εικόνα 4.3.3: Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,140 \cdot 10^5 \text{ KPa}$  , ελάχιστη καταπόνηση  $2,925 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )

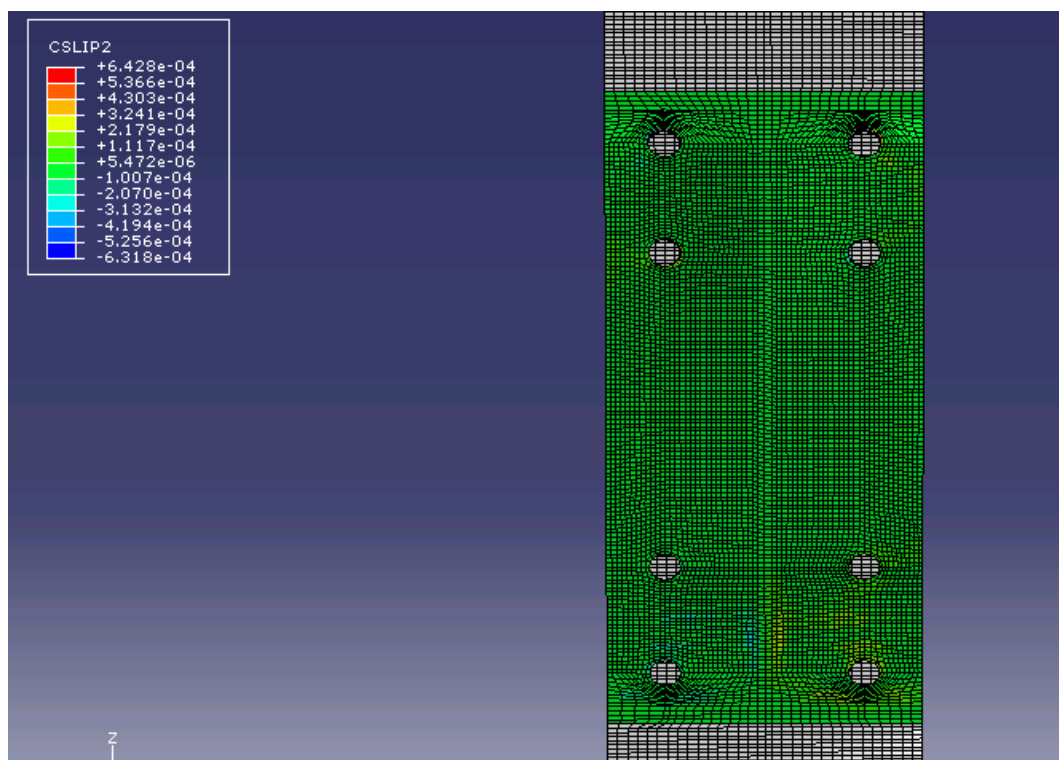


**Εικόνα 4.3.4: Κάθετος στύλος** (Μέγιστη καταπόνηση  $3,140 \cdot 10^5 \text{ KPa}$  , ελάχιστη καταπόνηση  $5,967 \cdot 10 \text{ KPa}$ )

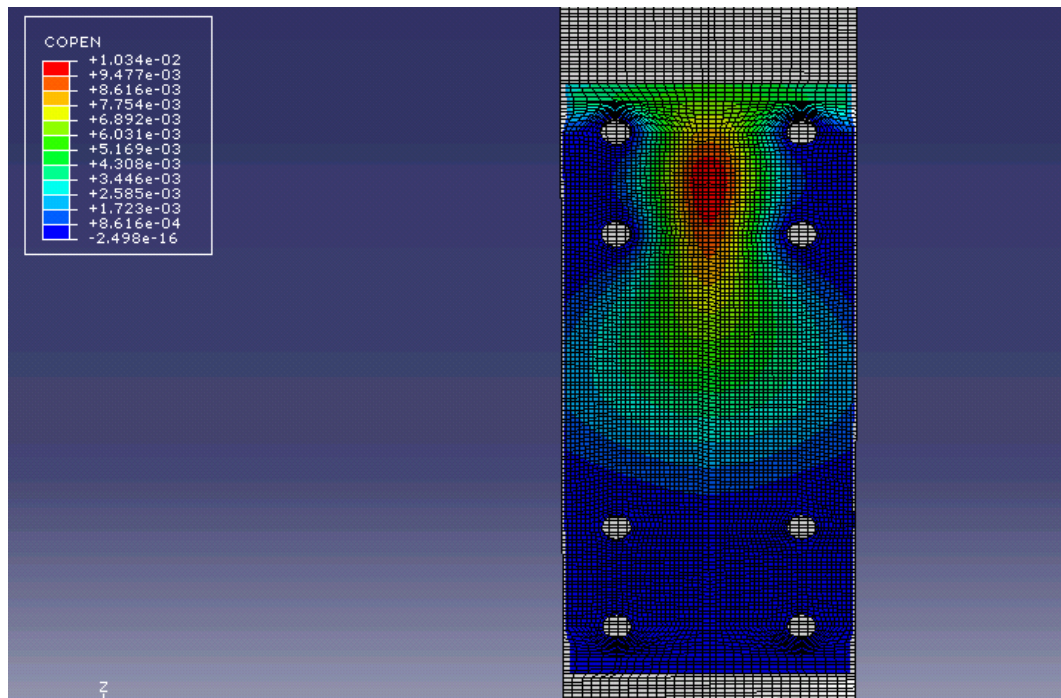
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.



**Εικόνα 4.3.5:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

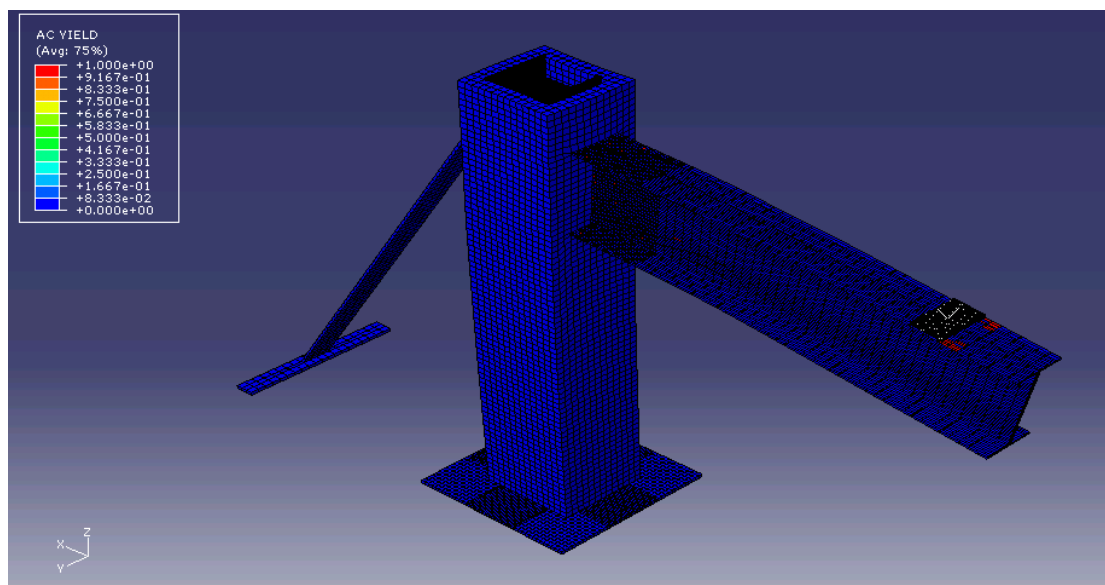


**Εικόνα 4.3.6:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα4.3.7:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

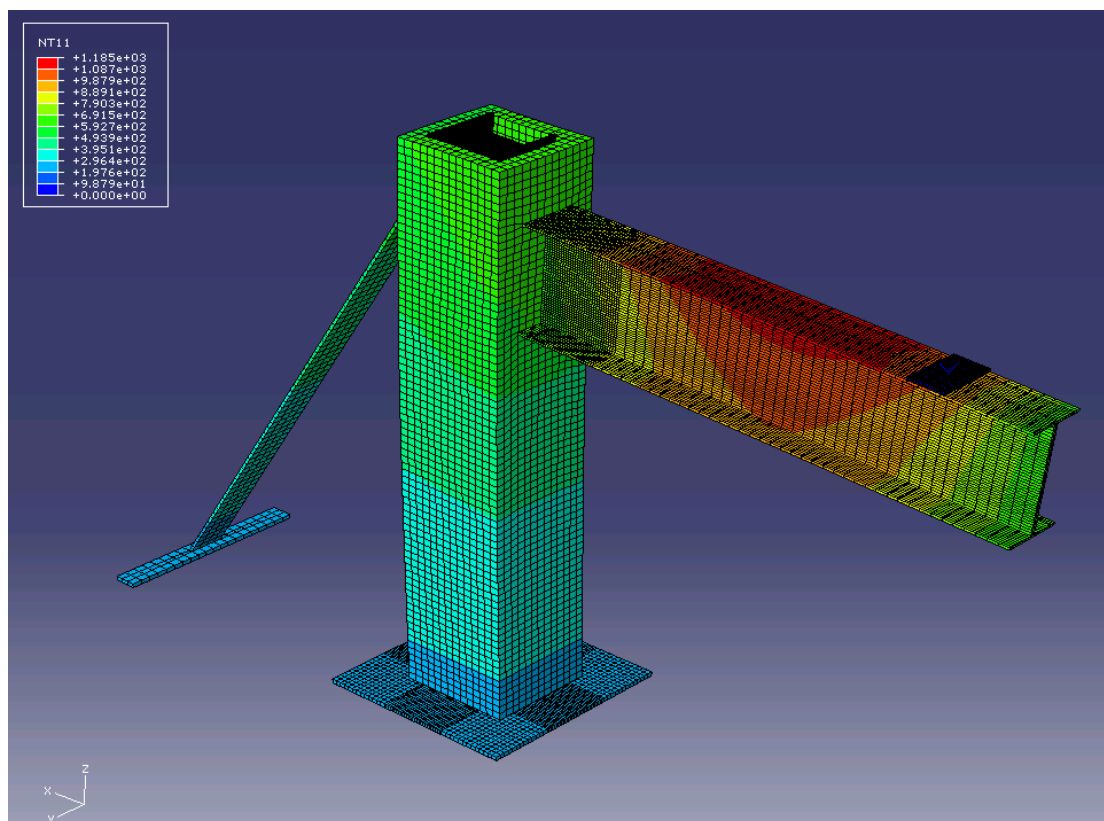
Με κόκκινη επισήμανση φαίνονται οι περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας



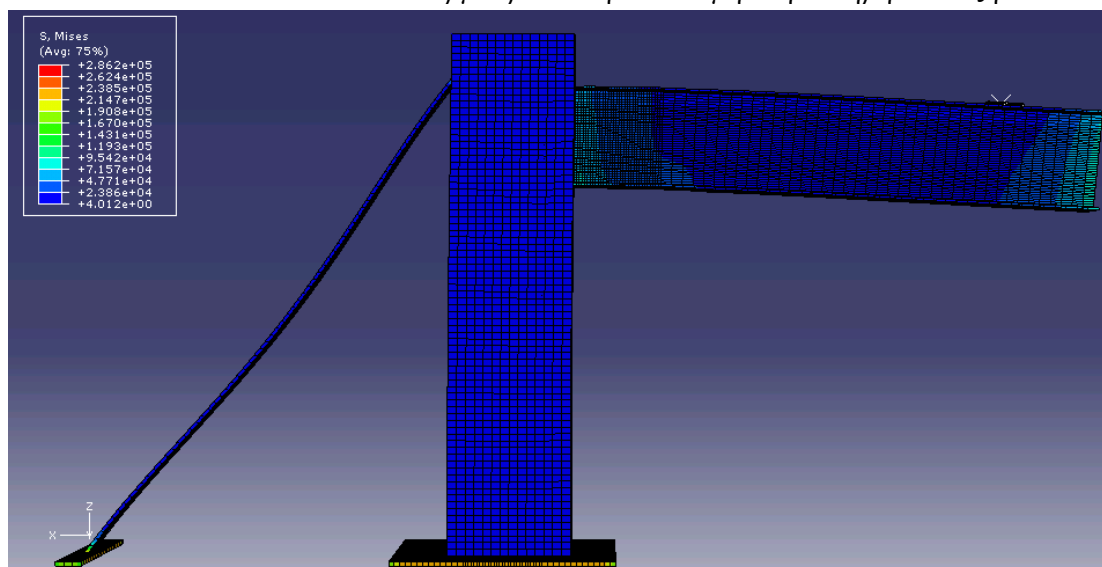
**Εικόνα4.3.8:** Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

#### 4.4 Θερμομηχανική ανάλυση με διαφορετικό step - Σενάριο 4

Στις παρακάτω εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Παρατηρείτε ότι στο συγκεκριμένο σενάριο όπου δεν έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια των θερμικών και των μηχανικών φορτίων, οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους 1185 °C περίπου και ο φορέας αστοχεί με την επίδραση των δύο φορτίσεων.

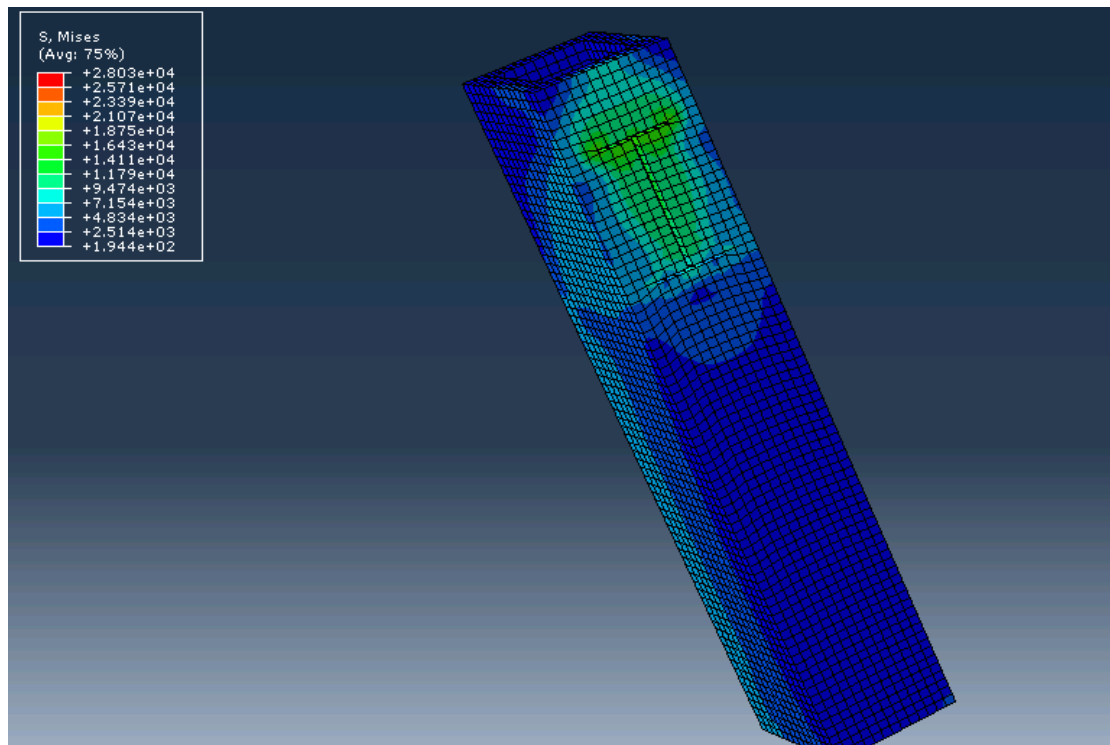


Εικόνα 4.4.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

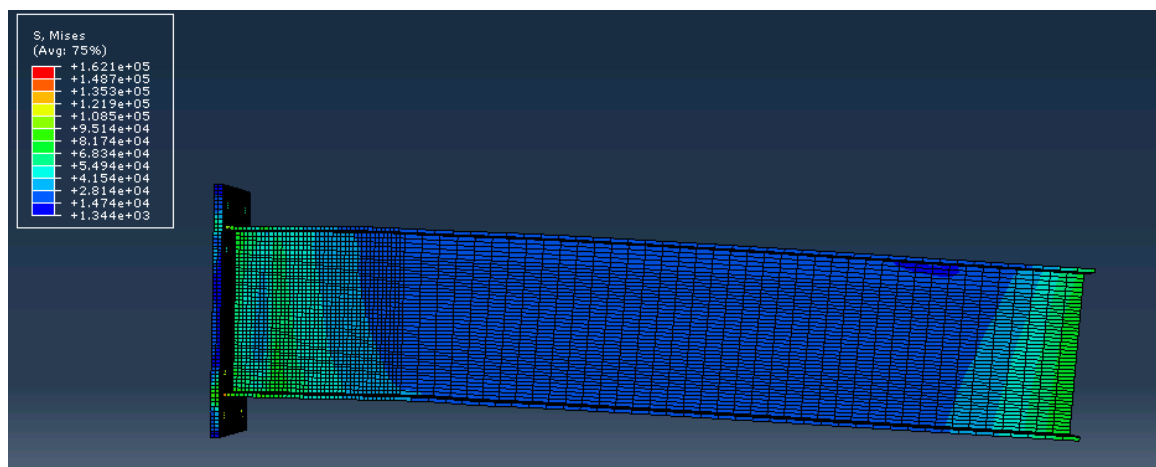


Εικόνα 4.4.2: Πλήρης διάταξη

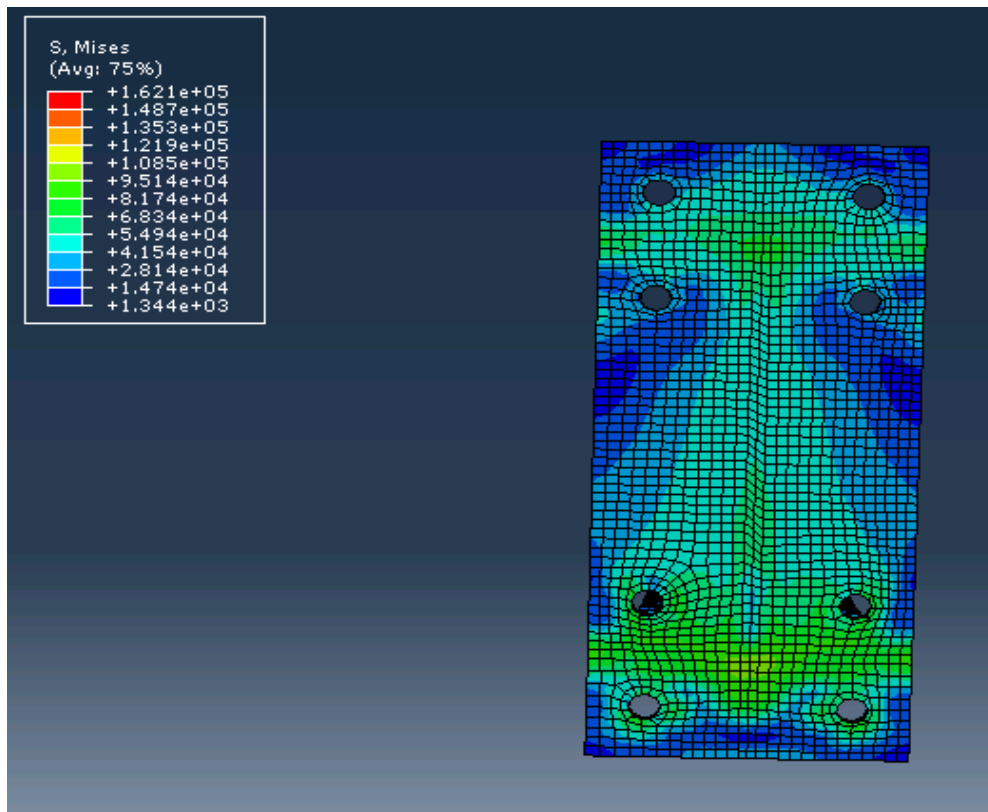
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,862 \cdot 10^5 \text{ KPa}$  , ελάχιστη καταπόνηση  $4,012 \text{ KPa}$ )



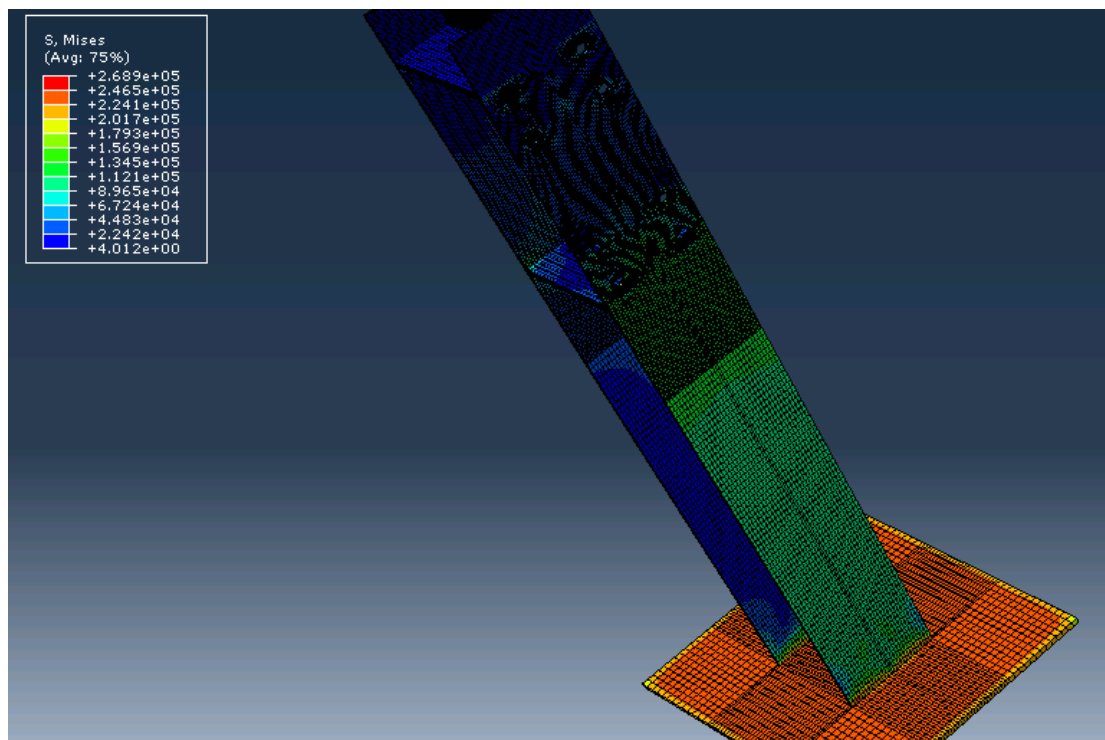
**Εικόνα 4.4.3:** Πυράντοχη επικάλυψη  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,803 \cdot 10^4$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $1,944 \cdot 10^2$  KPa)



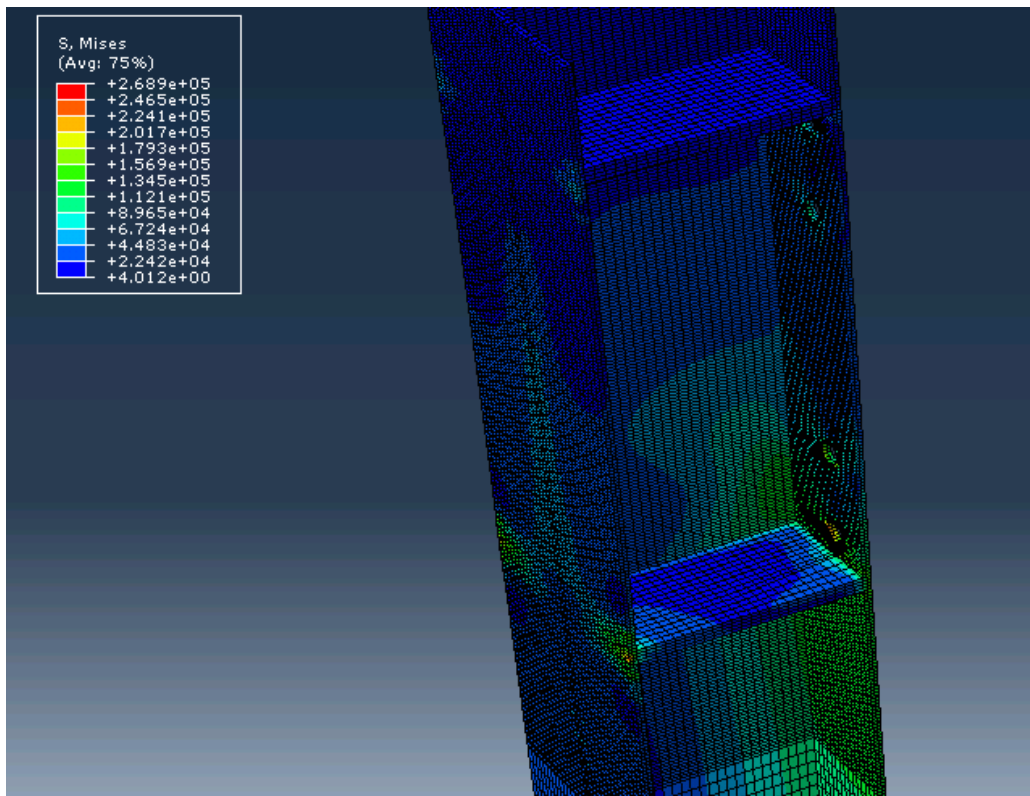
**Εικόνα 4.4.4:** Οριζόντια δοκός  
(Μέγιστη καταπόνηση  $1,621 \cdot 10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $1,344 \cdot 10^3$  KPa)



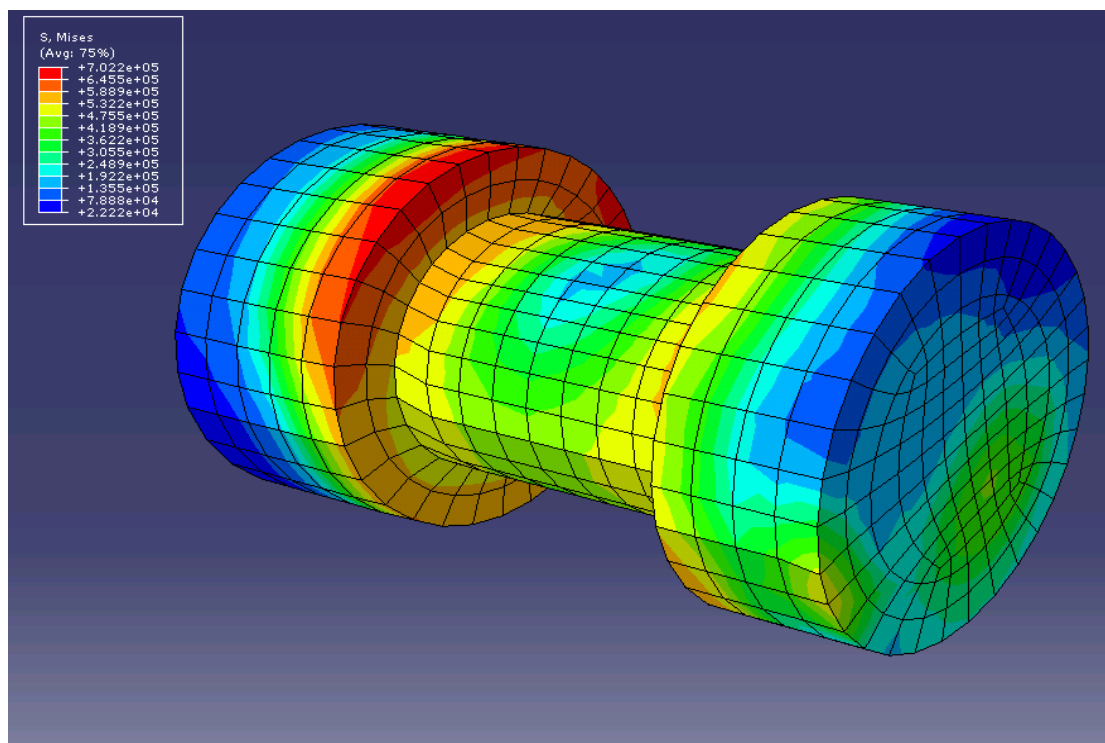
**Εικόνα 4.4.5:** Οριζόντια δοκός  
(Μέγιστη καταπόνηση  $1,621 \cdot 10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $1,344 \cdot 10^3$  KPa)



**Εικόνα 4.4.6:** Κάθετος στύλος  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,689 \cdot 10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $4,012 \cdot 10^1$  KPa)

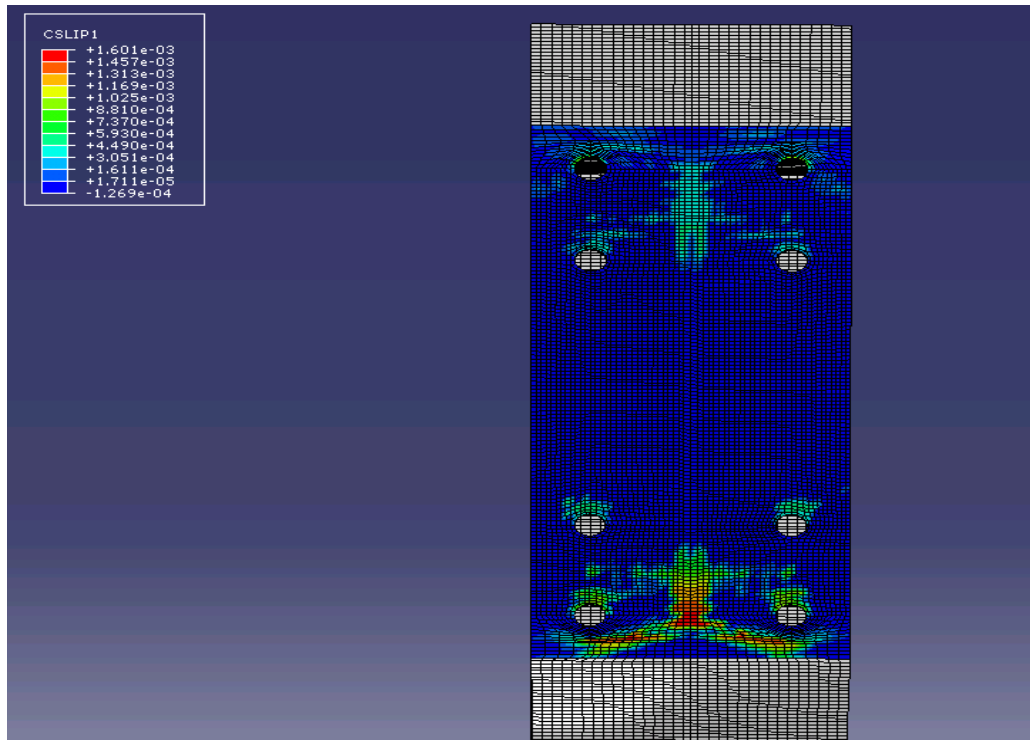


**Εικόνα 4.4.7: Κάθετος στύλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,370 \cdot 10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $5,312 \cdot 10^1$  KPa)

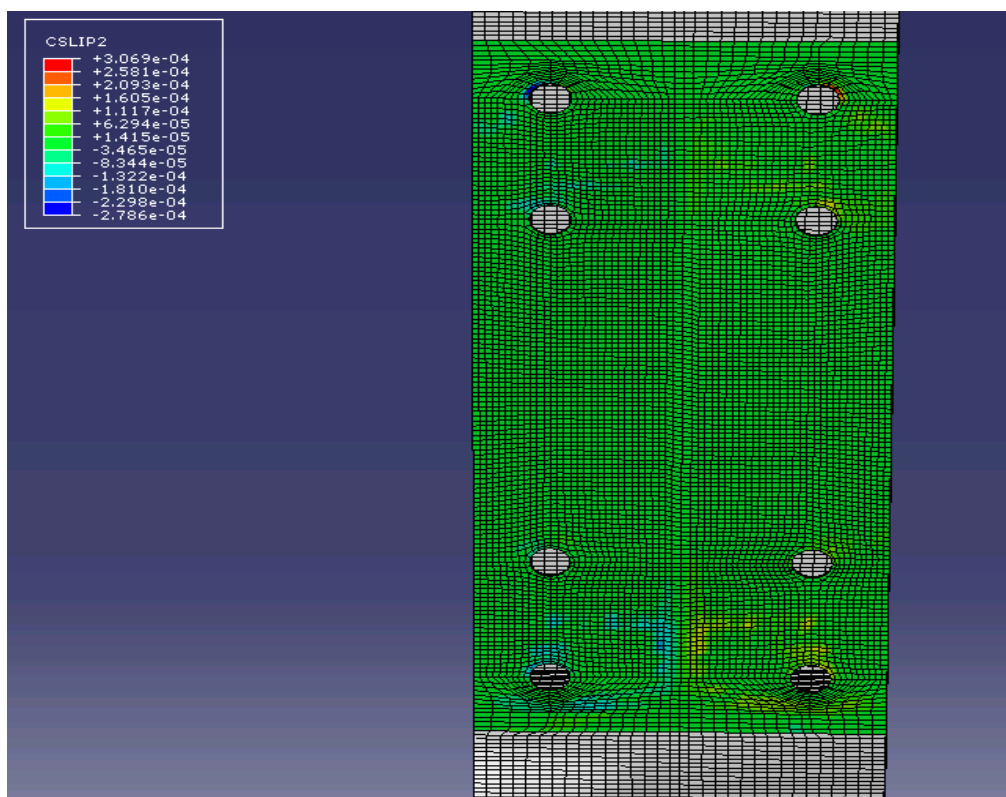


**Εικόνα 4.4.8: Κοχλίας 7-1**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $7,022 \cdot 10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $2,222 \cdot 10^4$  KPa)

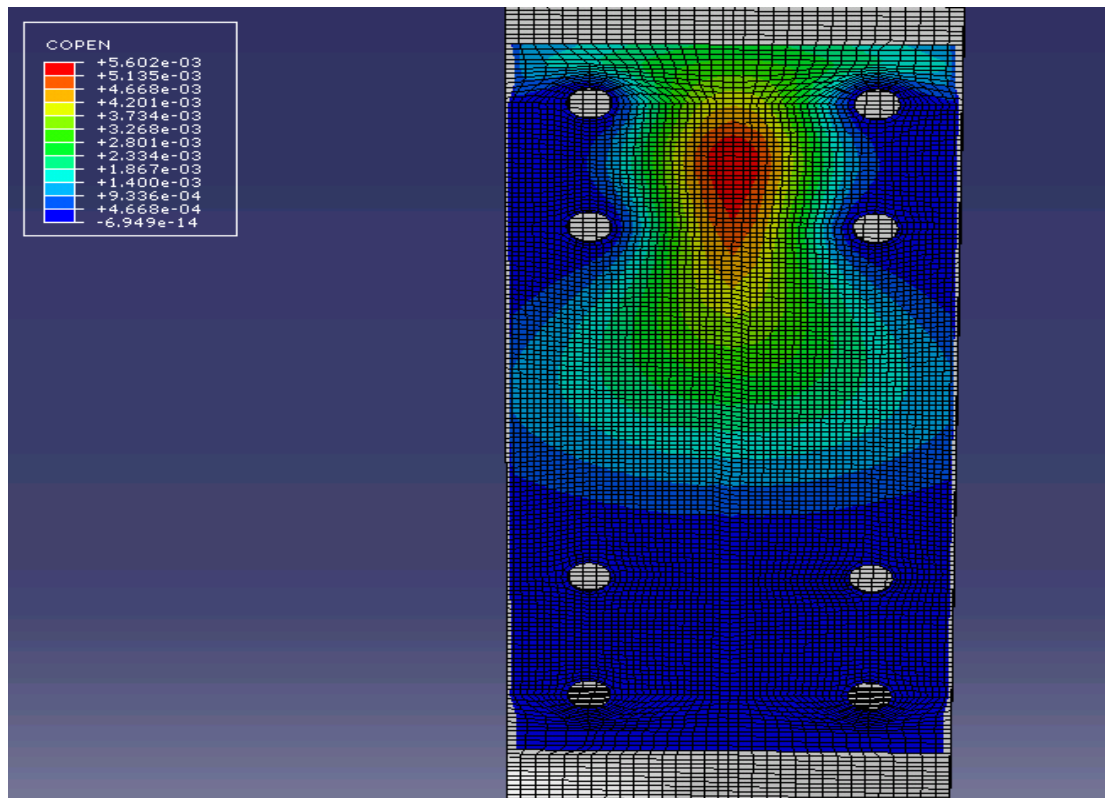
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



**Εικόνα 4.4.9:** Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

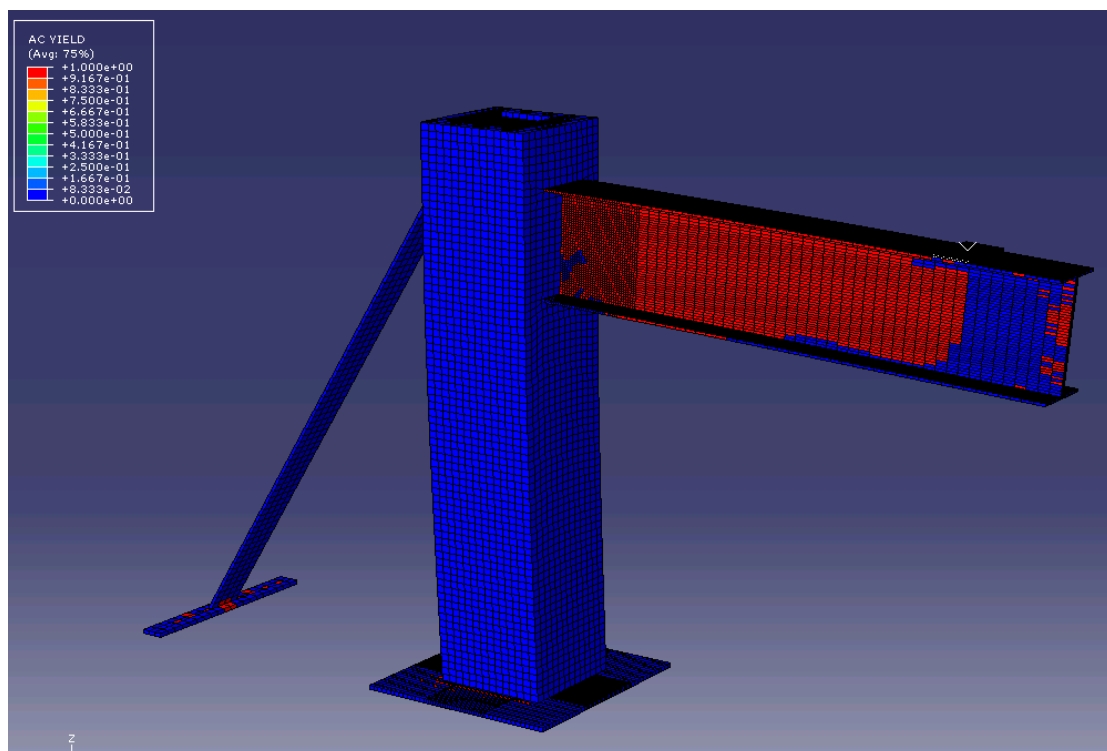


**Εικόνα 4.4.10:** Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.4.11:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

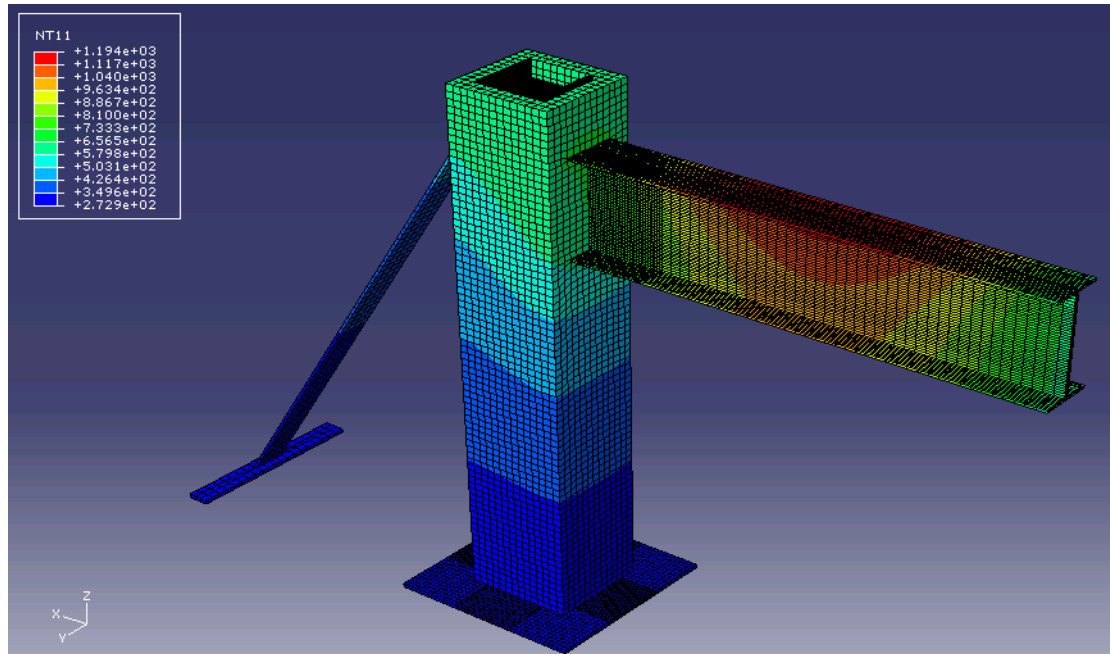
Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



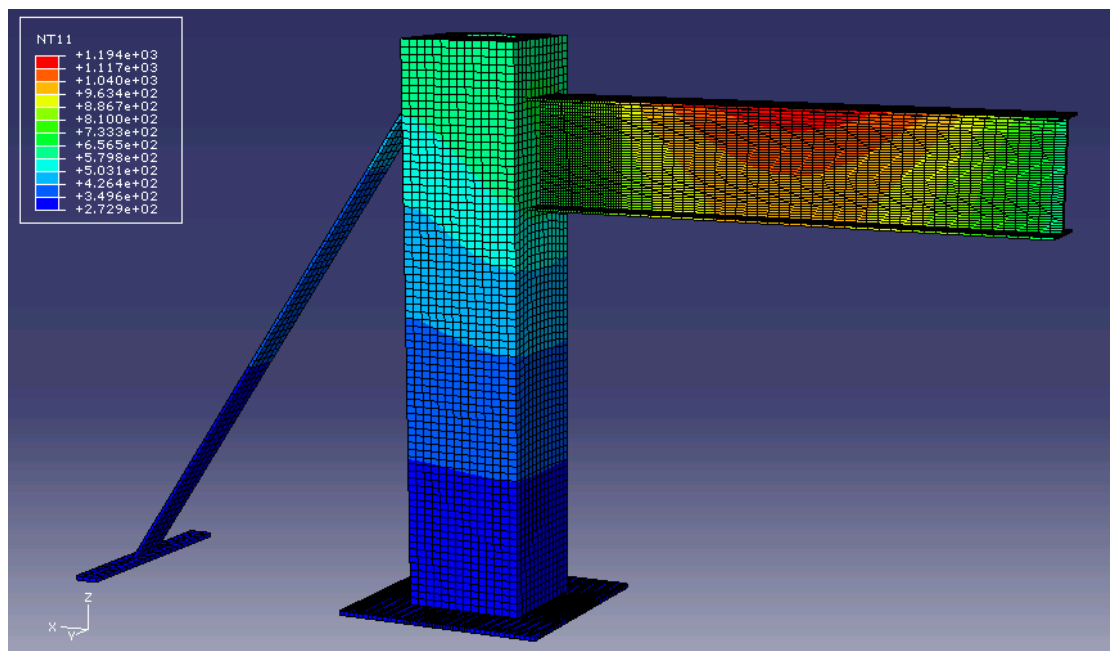
**Εικόνα4.4.12:**Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

#### 4.5 Θερμική Ανάλυση (γυψοσανίδα)- Σενάριο 5

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην κατασκευή και στα σημεία ένωσης της οριζόντιας δοκού με τη πυράντοχη επικάλυψη, αλλά και τον στύλο.

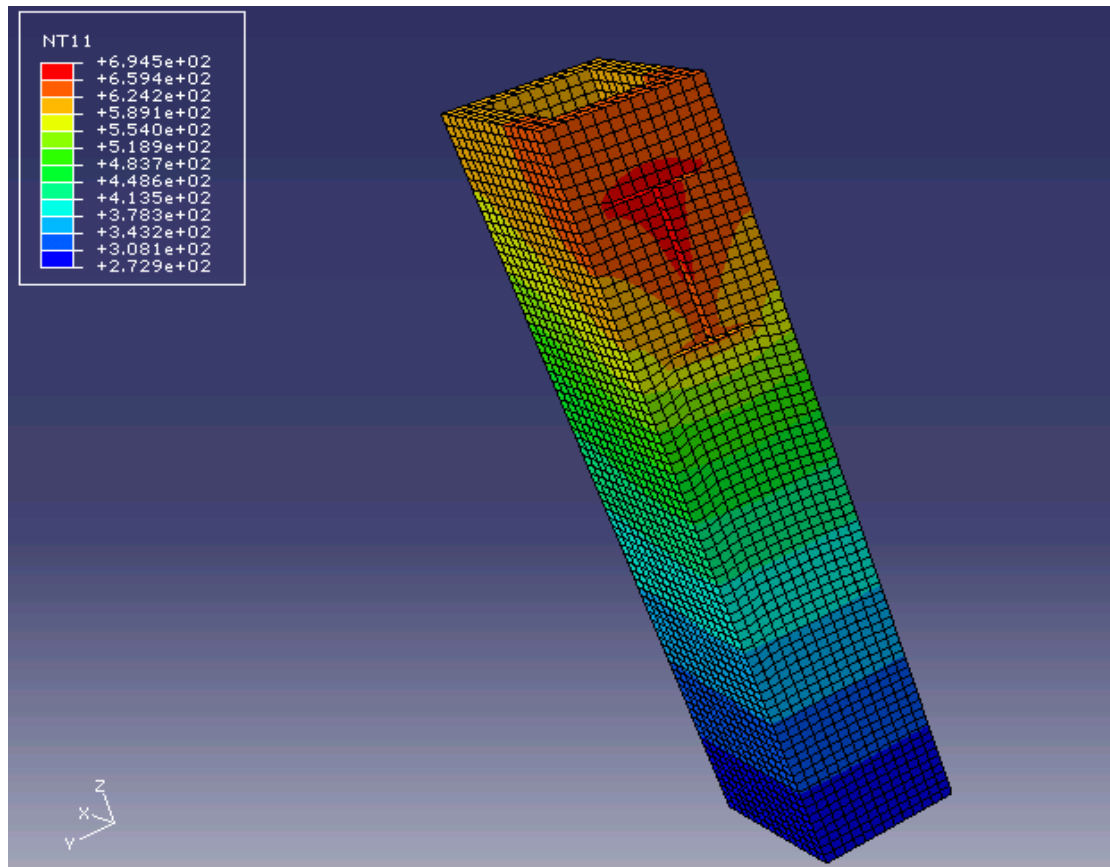


**Εικόνα 4.5.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $1.194^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )

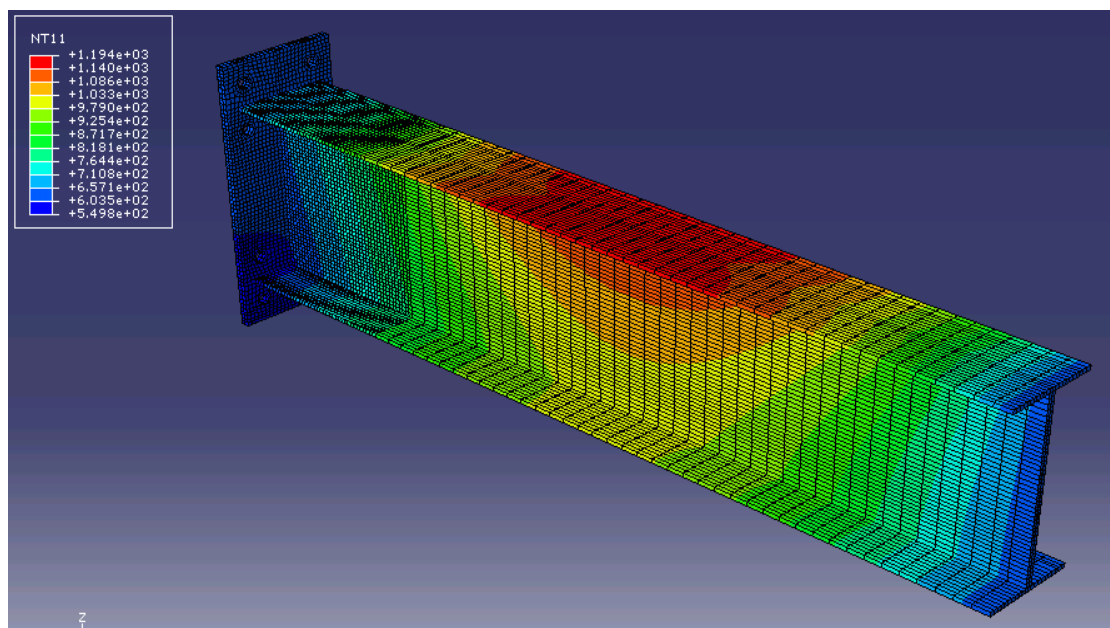


**Εικόνα 4.5.2:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $1.194^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )

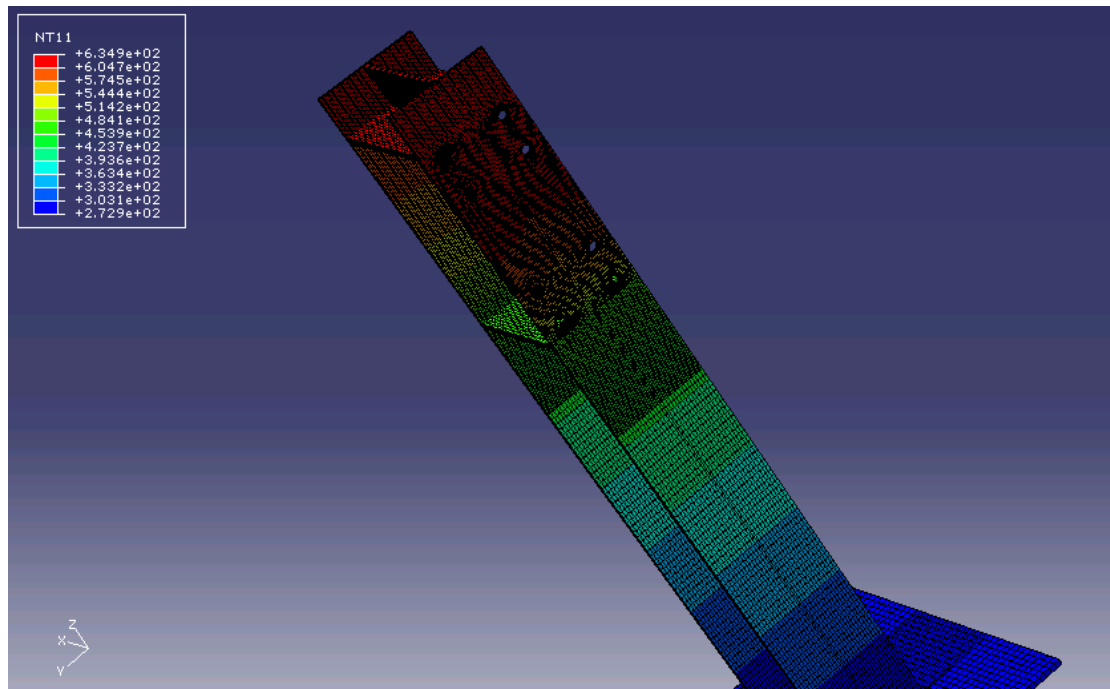
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στη πυράντοχη επικάλυψη, καθώς και στον κάθετο στύλο και τη δοκό.



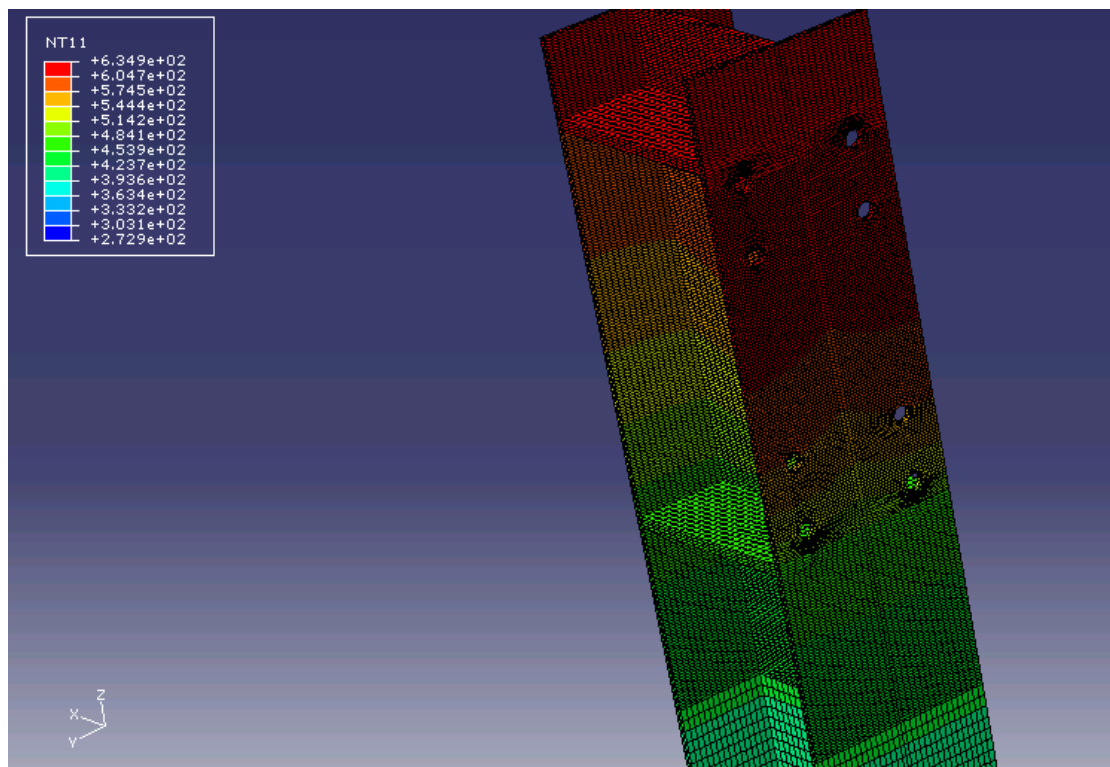
**Εικόνα 4.5.3:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη πυράντοχη επιφάνεια  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $694,5^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )



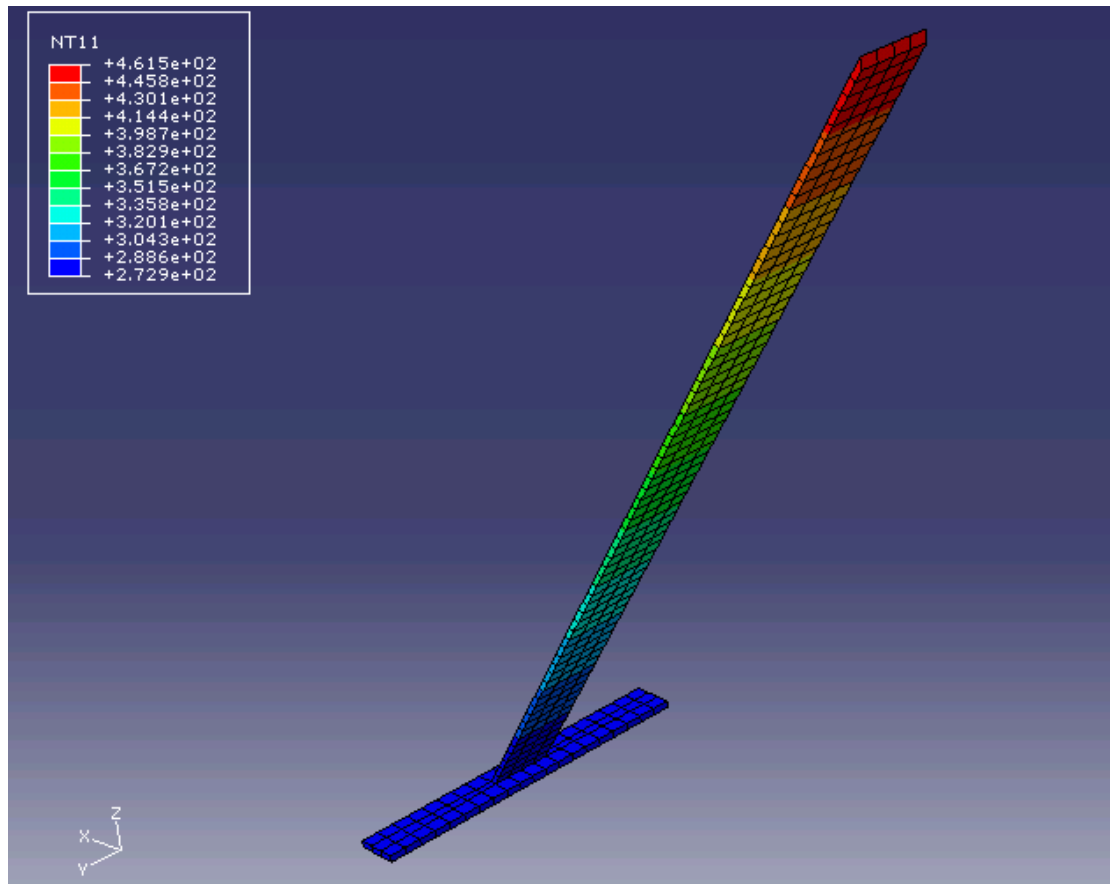
**Εικόνα 4.5.4:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη δοκό  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $1.194^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $549,8^{\circ}\text{C}$ )



**Εικόνα 4.5.5:** Θερμοκρασιακή κατανομή στο στύλο  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $634,9^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )

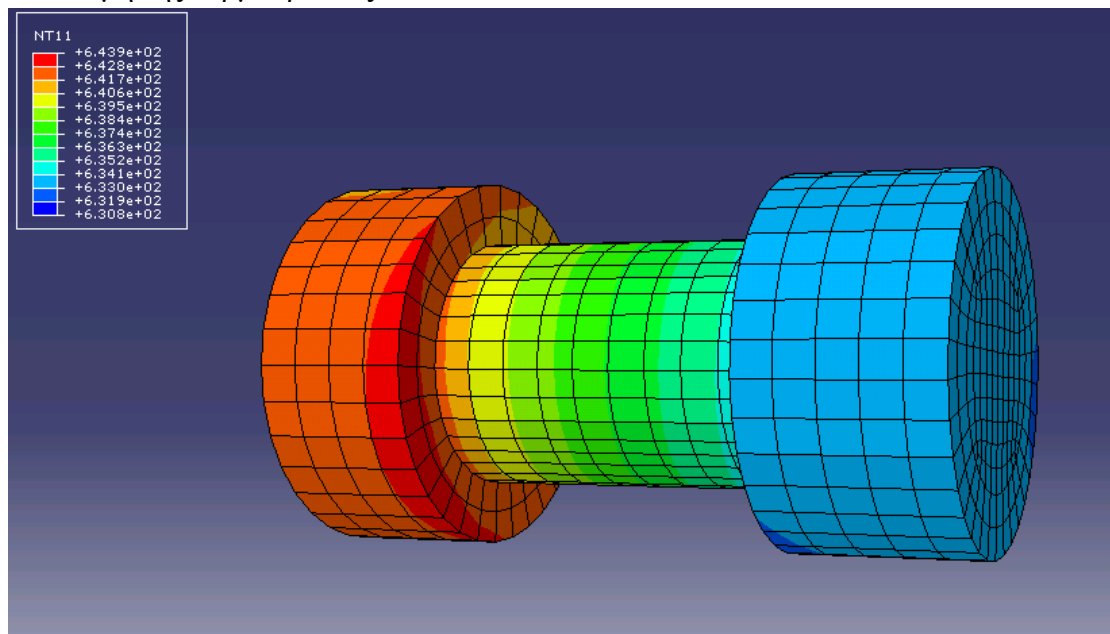


**Εικόνα 4.5.6:** Θερμοκρασιακή κατανομή στο στύλο  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $634,9^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )



**Εικόνα 4.5.7:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη βοηθητική δοκό  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $461,5^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )

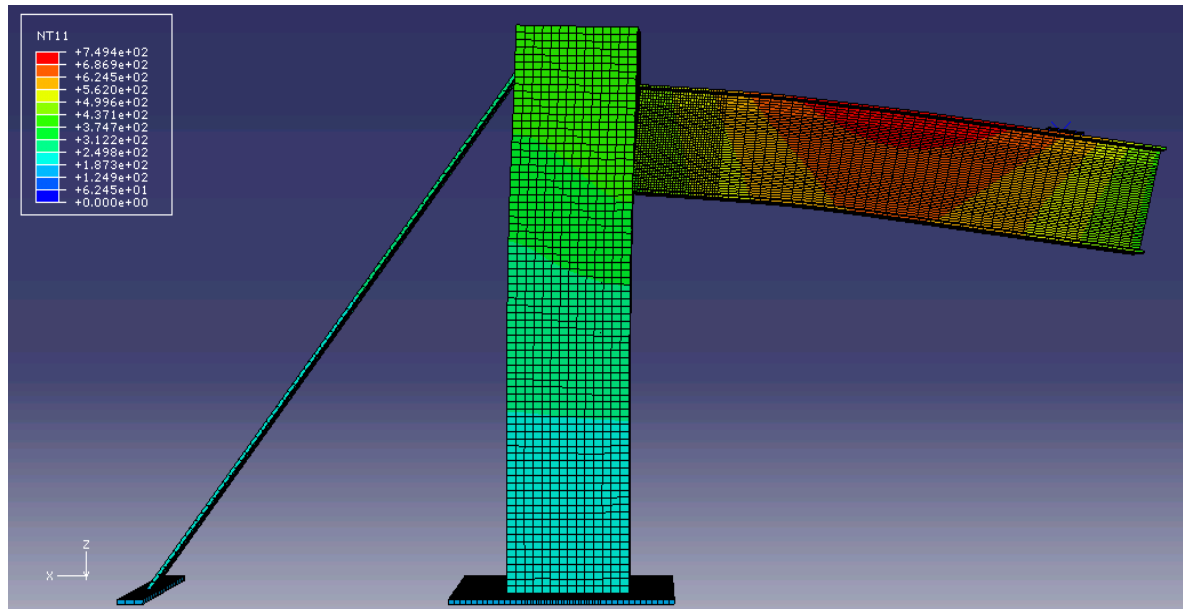
Στη συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζεται χαρακτηριστικά για έναν τυχαίο κοχλία η κατανομή της θερμοκρασίας.



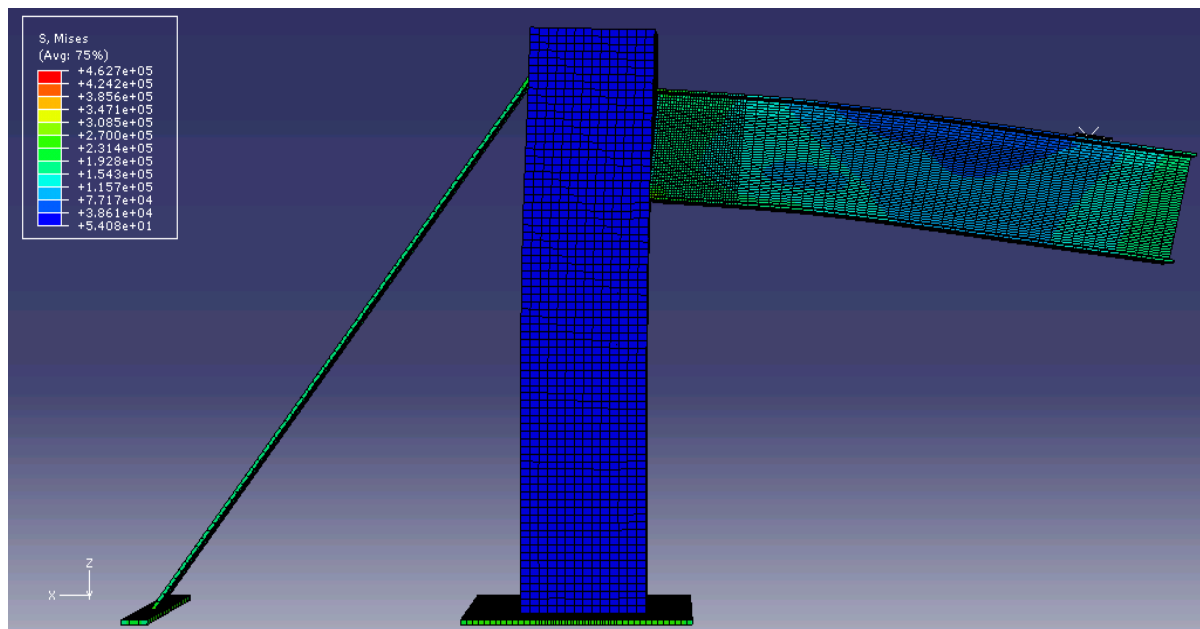
**Εικόνα 4.5.8:** Θερμοκρασιακή κατανομή στον κοχλία 8-1  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $643,9^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $630,8^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.6 Θερμομηχανική Ανάλυση (γυψοσανίδα) - Σενάριο 6

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας κατά της αστοχία. Επίσης παρουσιάζεται και η παραμόρφωση κατά von.Mises. Στο συγκεκριμένο σενάριο έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια μηχανικού και θερμικού φορτίου με τη μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει μόλις τους 749,4°C.

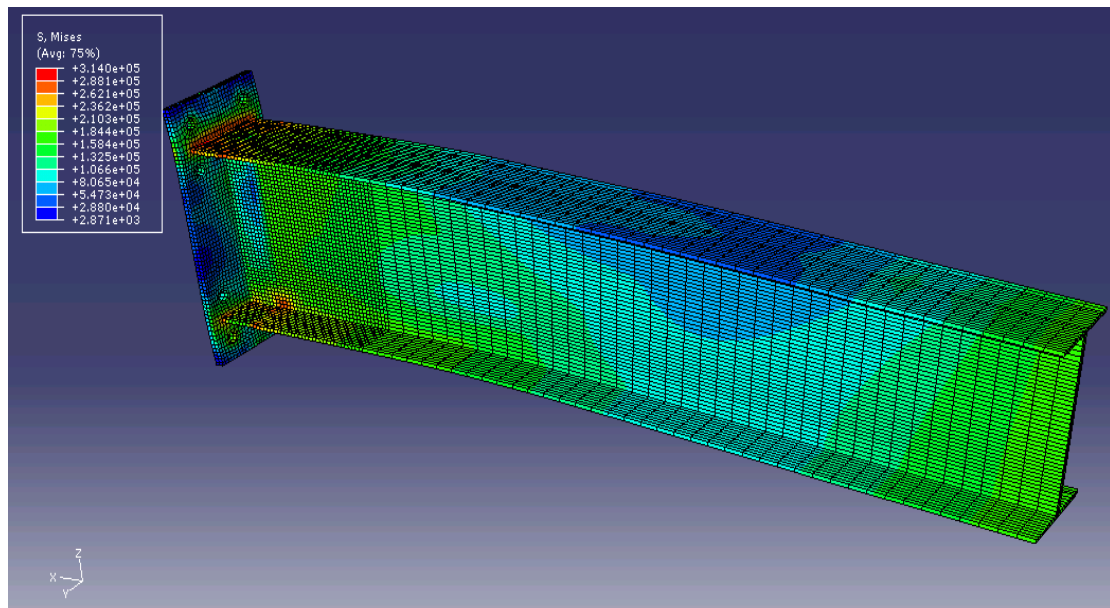


Εικόνα4.6.1 : Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη.

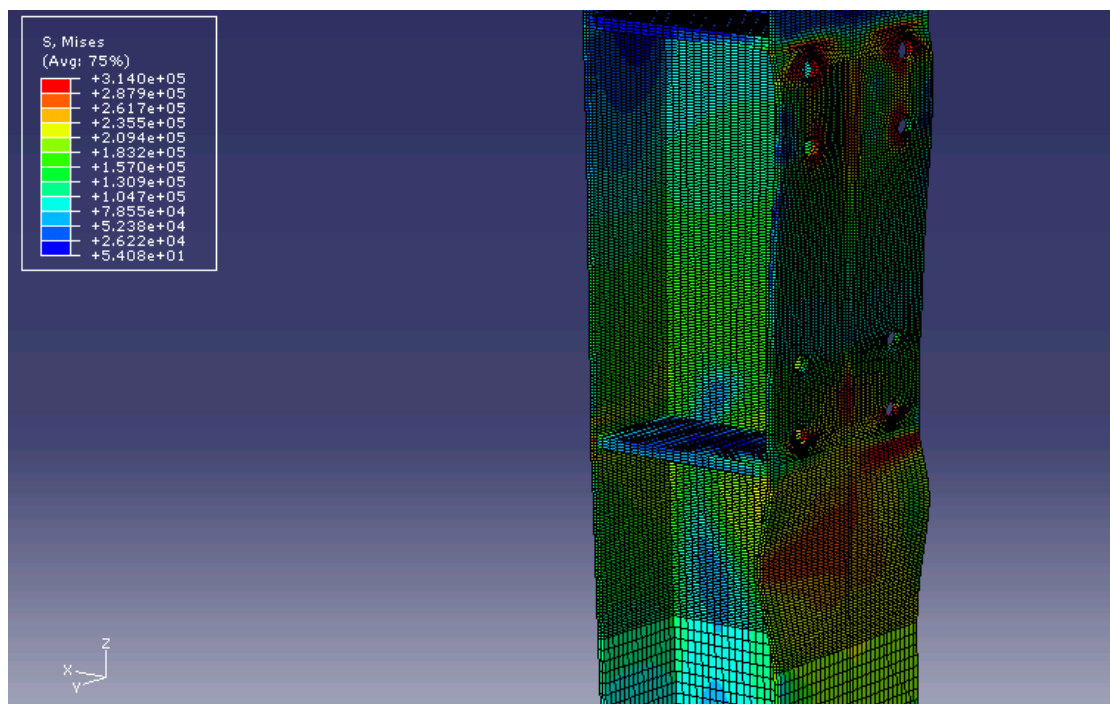


Εικόνα 4.6.2:Πλήρης διάταξη

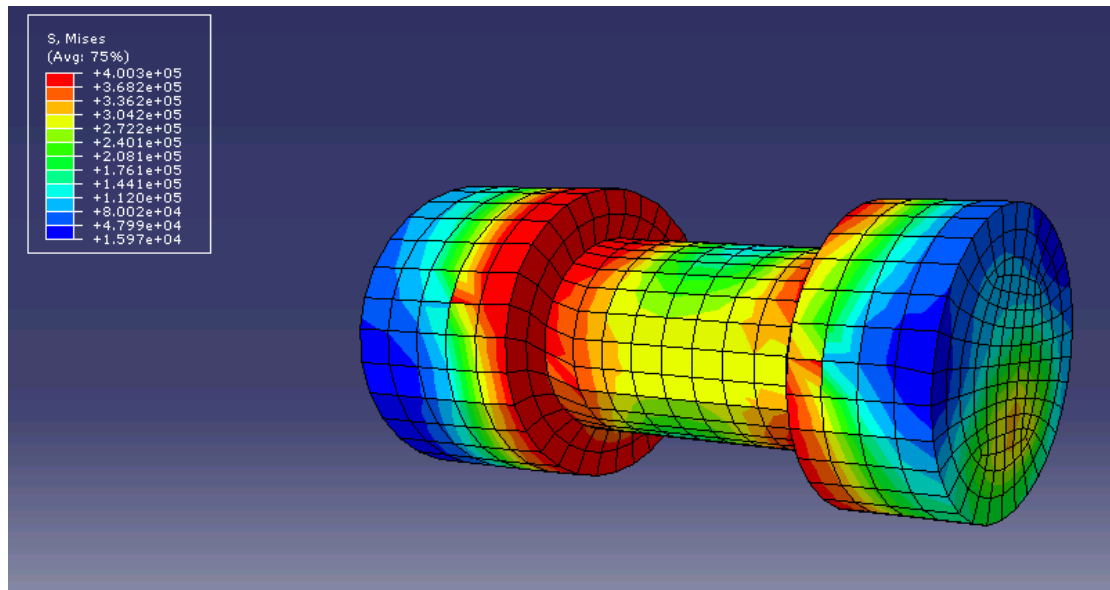
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,627 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $5,408 \cdot 10$  KPa)



**Εικόνα 4.6.3:Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,140 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,871 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )

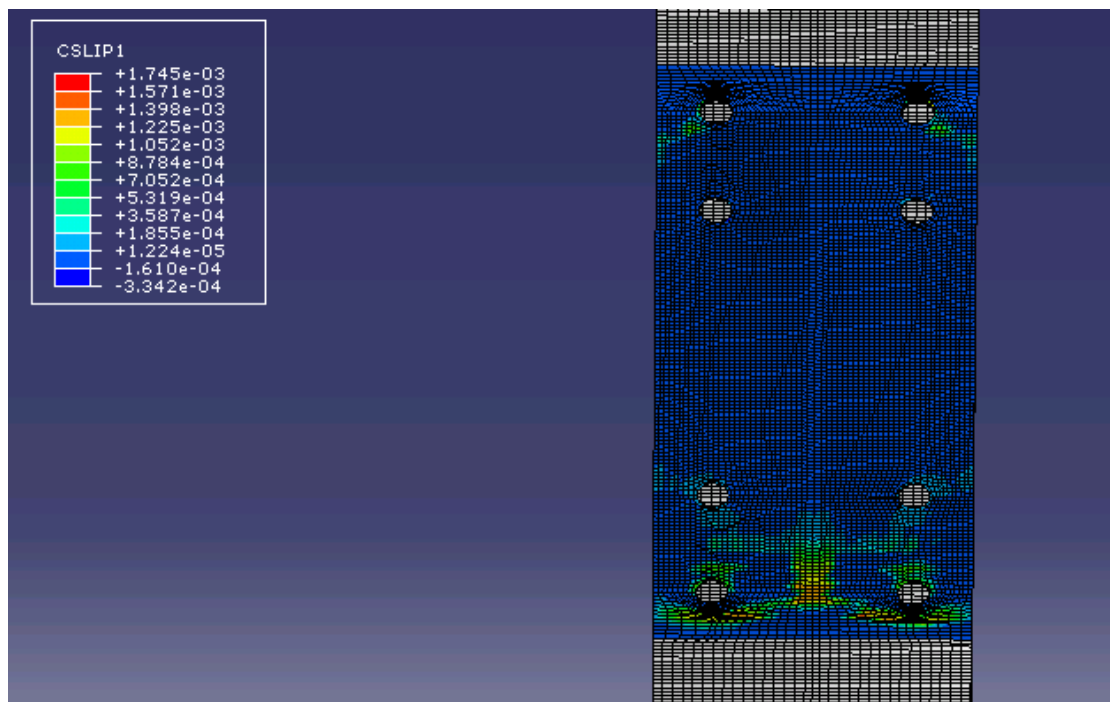


**Εικόνα 4.6.4:Κάθετος Στόλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,140 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $5,408 \text{ KPa}$ )

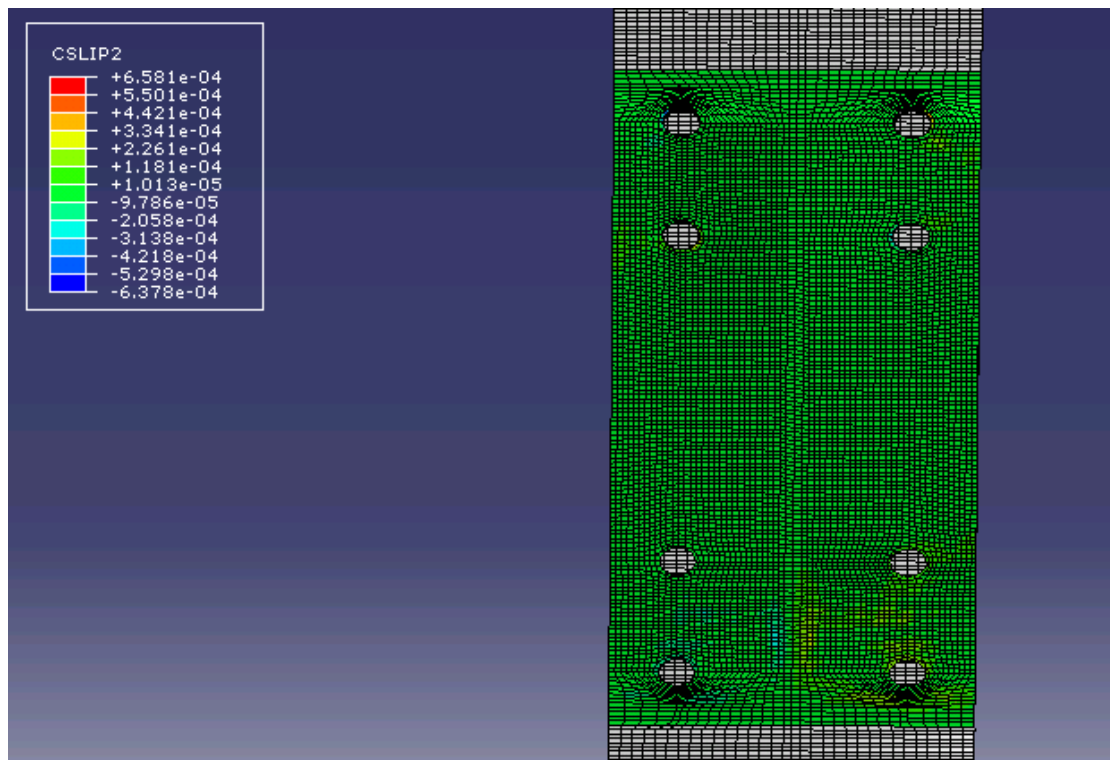


**Εικόνα 4.6.5:** Κοχλίας 2-1  
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,003 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,597 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ )

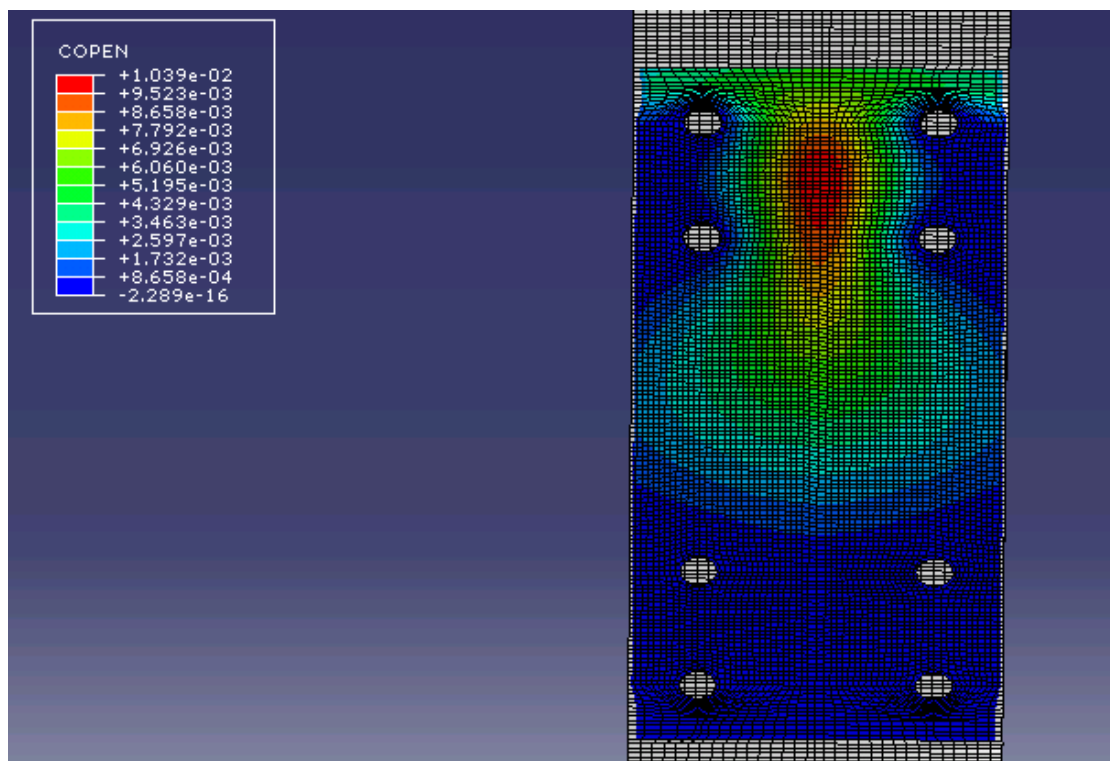
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.



**Εικόνα 4.6.6:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

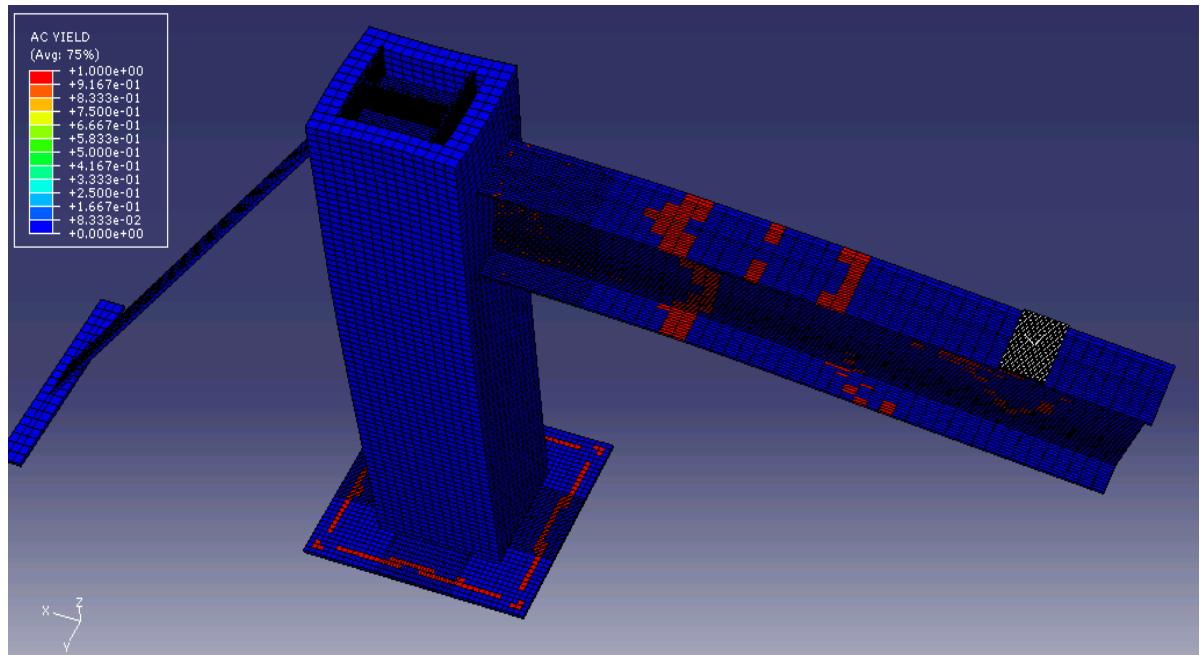


**Εικόνα4.6.7:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.6.8:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

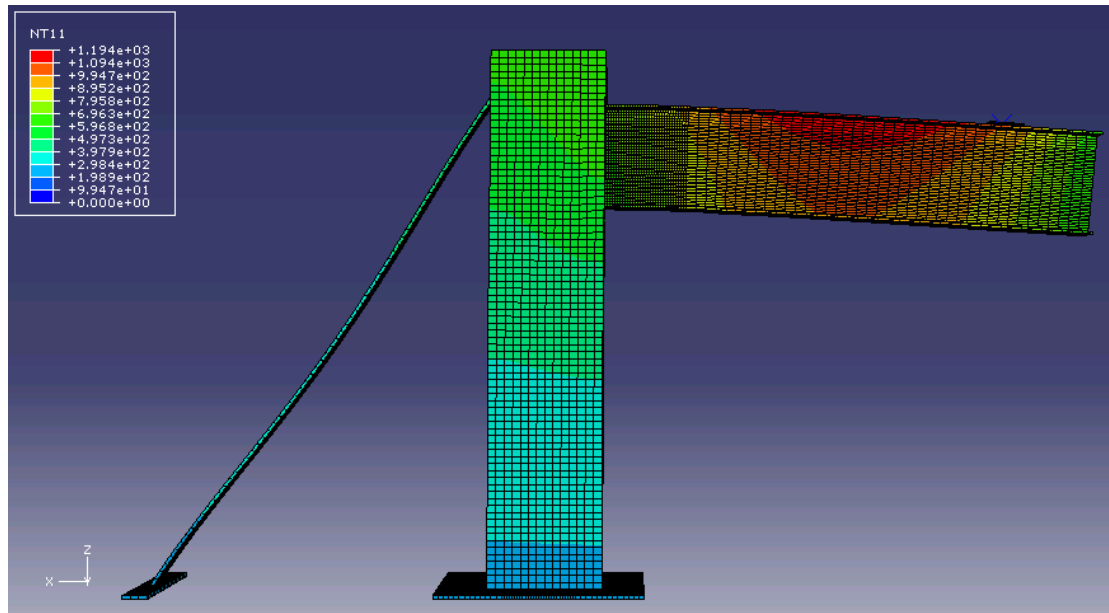
Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται με κόκκινη επισήμανση οι περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας.



**Εικόνα 4.6.9:**Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

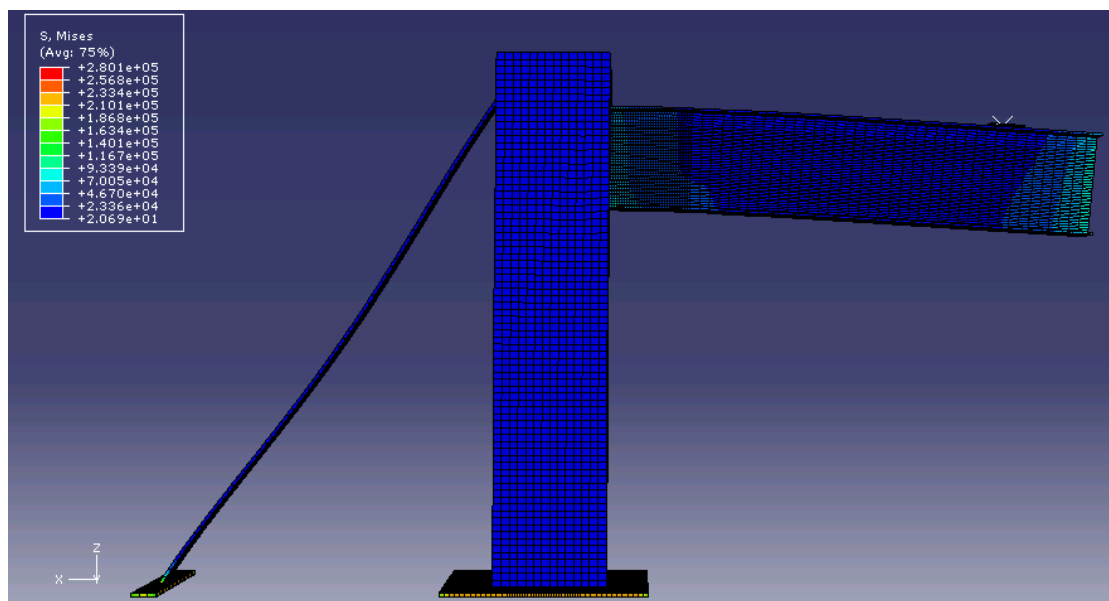
#### 4.7 Θερμομηχανική Ανάλυση με διαφορετικό step- Σενάριο 7

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας κατά της αστοχία. Στο συγκεκριμένο σενάριο έχουμε επενέργεια μηχανικού και θερμικού φορτίου σε διαφορετικά step, με τη μηχανική ανάλυση να ακολουθεί της θερμικής και με τη μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει τους 1194 °C.

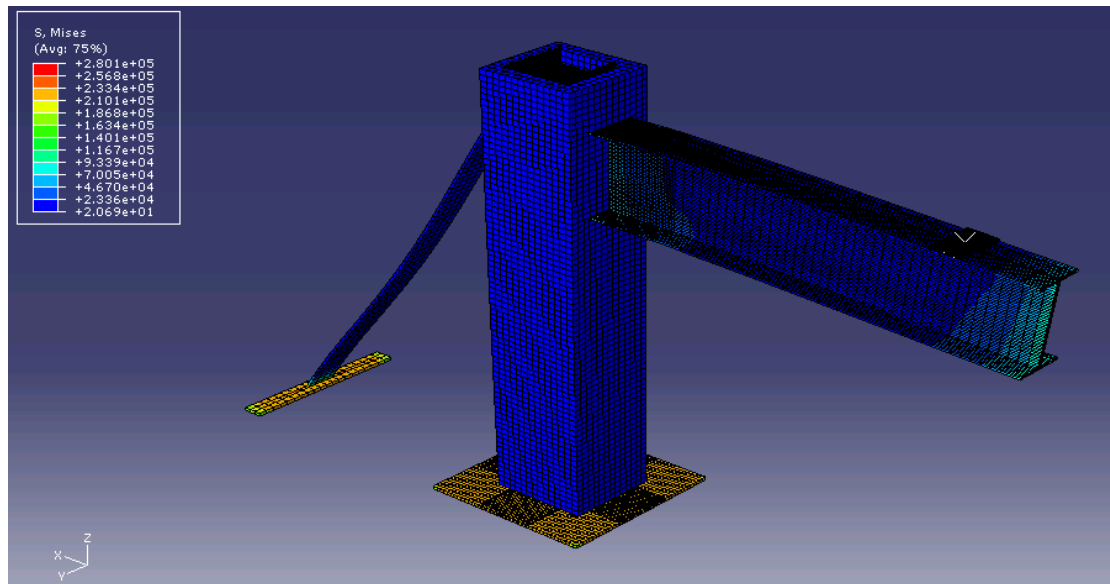


Εικόνα 4.7.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη.

Στη συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises της πλήρους διάταξης.

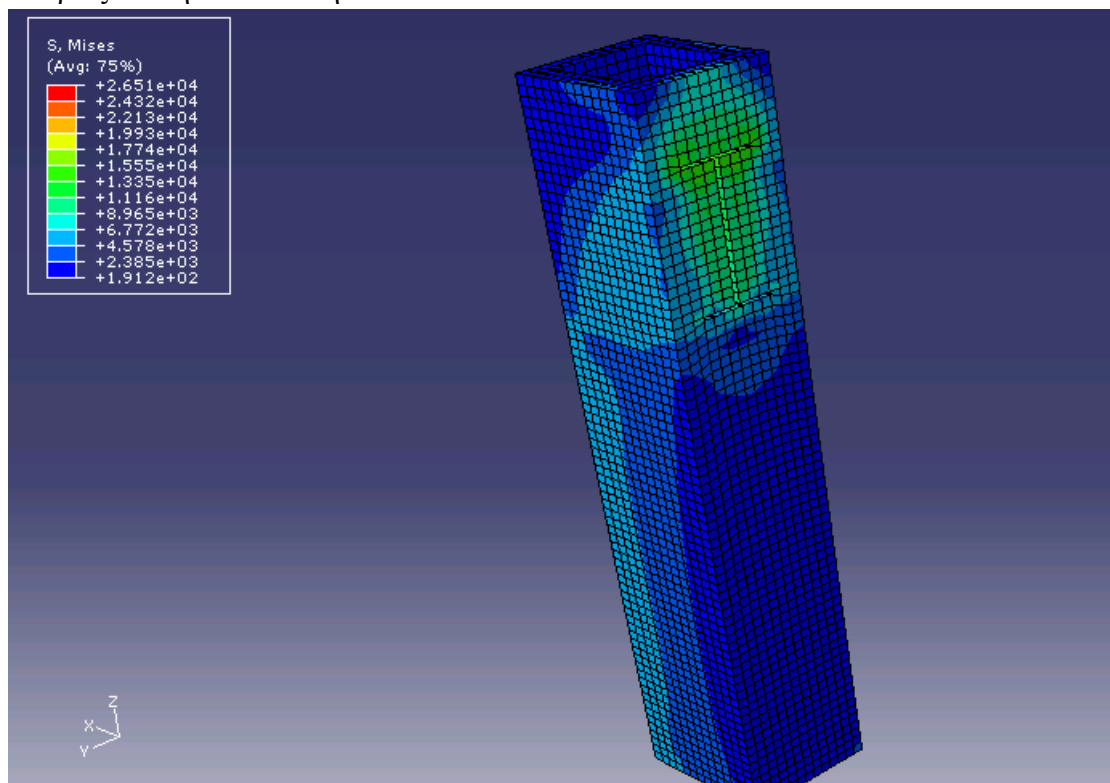


Εικόνα 4.7.2 :Πλήρης διάταξη  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,801 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,0690 \cdot 10$  KPa)

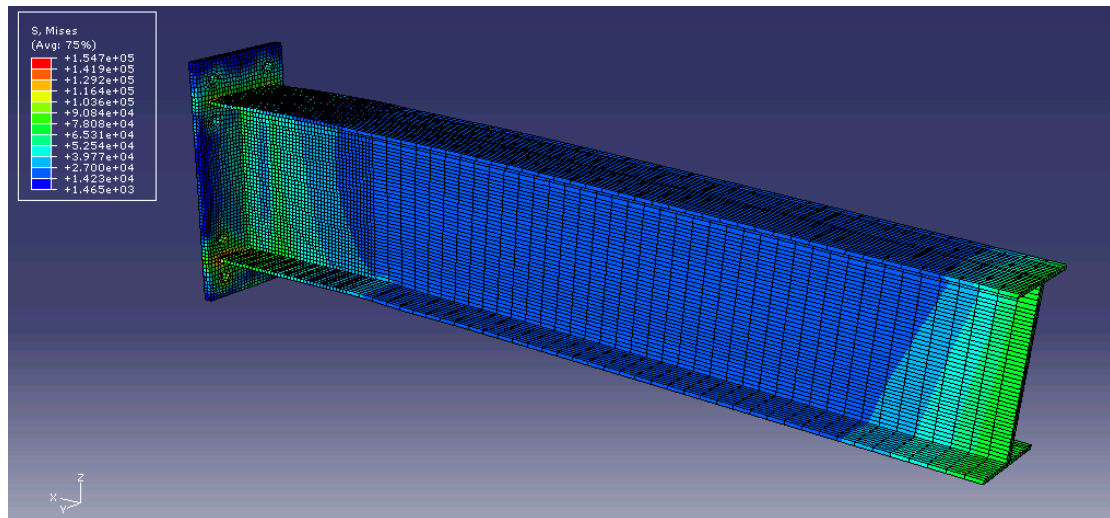


**Εικόνα 4.7.3:Πλήρης διάταξη**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,801 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,069 \cdot 10$  KPa)

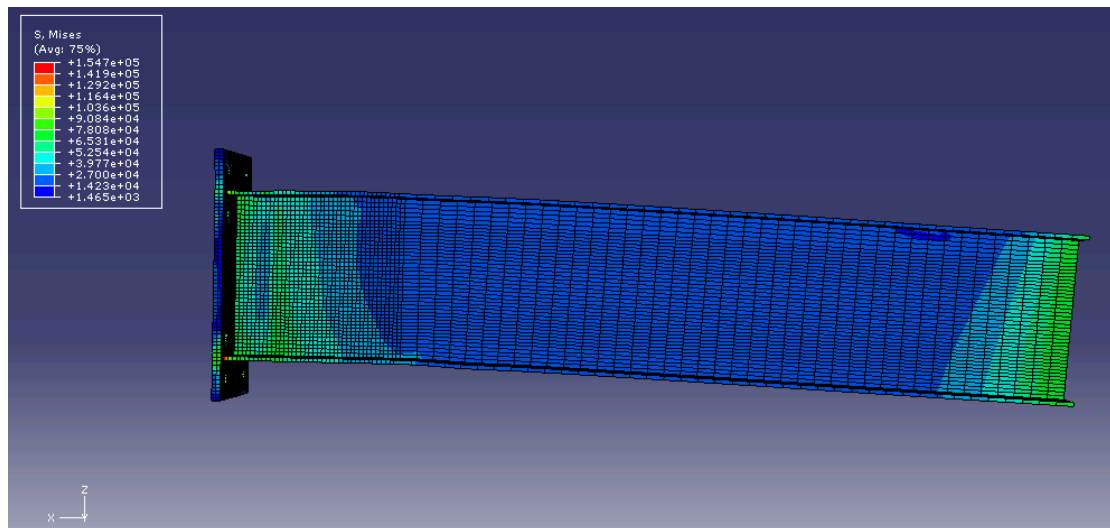
Παρακάτω παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises των τμημάτων που απαρτίζουν τη κατασκευή.



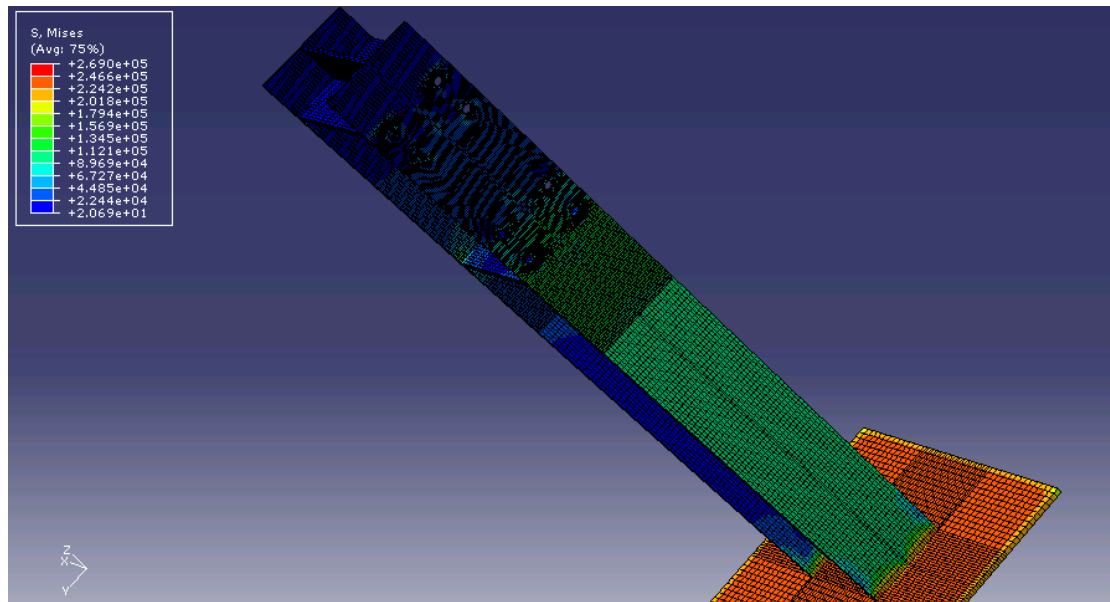
**Εικόνα 4.7.4:Πλήρης διάταξη**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,651 \cdot 10^4$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $1,912 \cdot 10^2$  KPa)



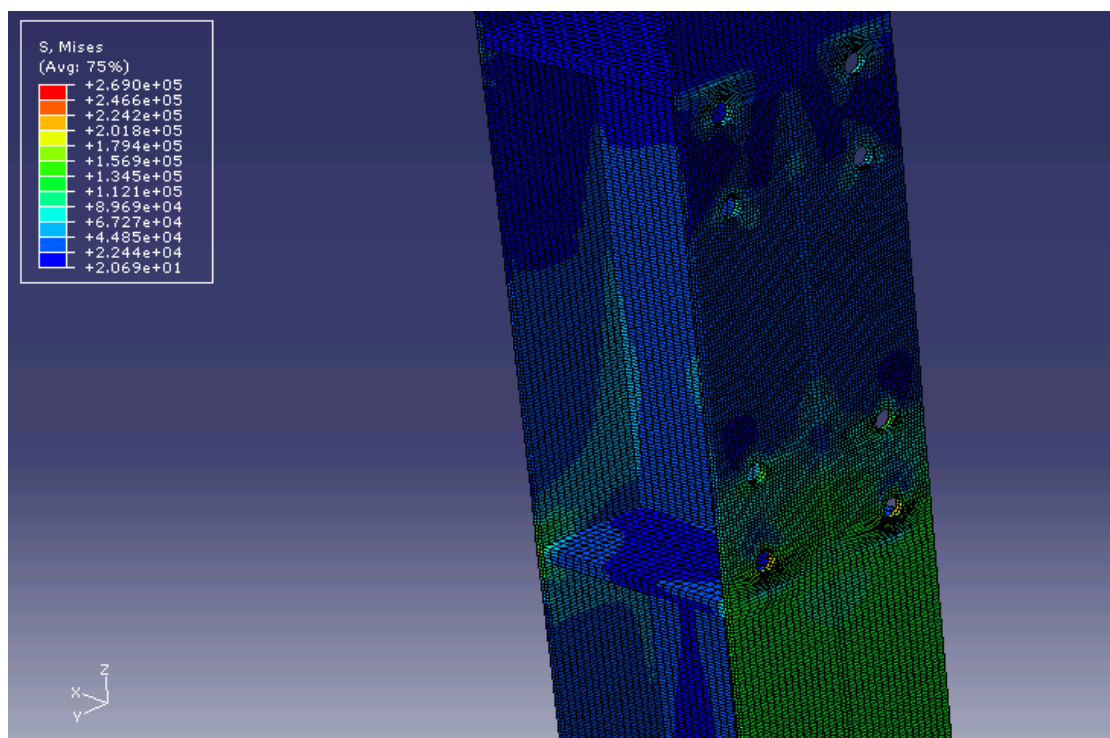
**Εικόνα 4.7.5:Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $1,547 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,465 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )



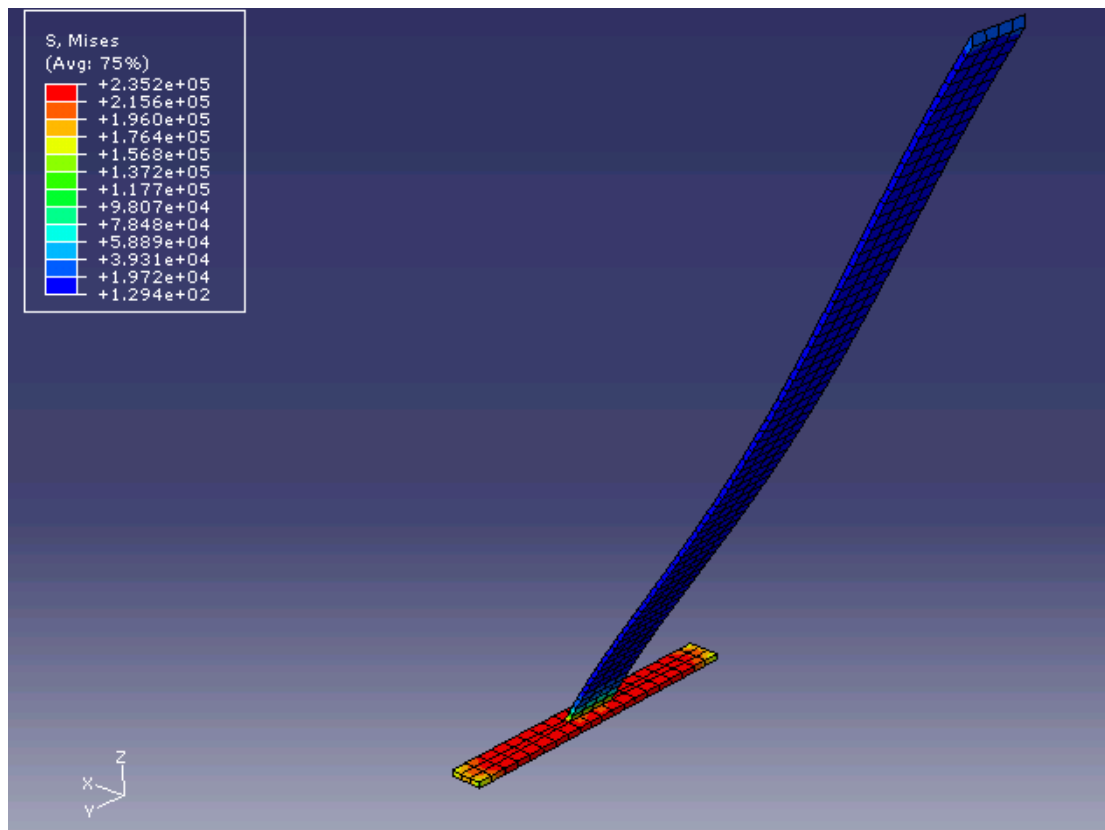
**Εικόνα 4.7.6:Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $1,547 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,465 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )



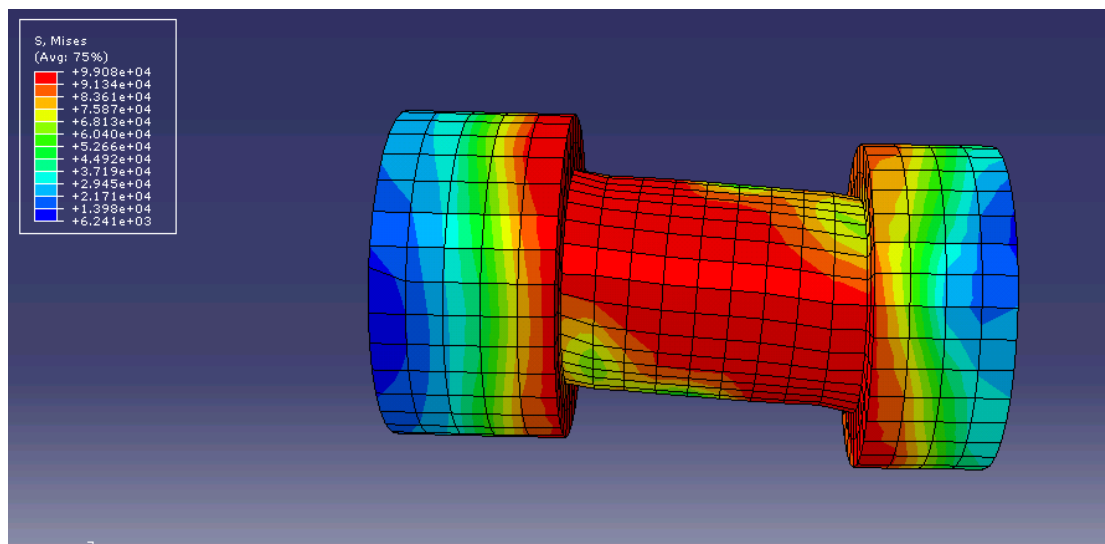
**Εικόνα 4.7.7:Κάθετος Στόλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,690 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,069 \cdot 10 \text{ KPa}$ )



**Εικόνα 4.7.8:Κάθετος Στόλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,690 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,069 \cdot 10 \text{ KPa}$ )

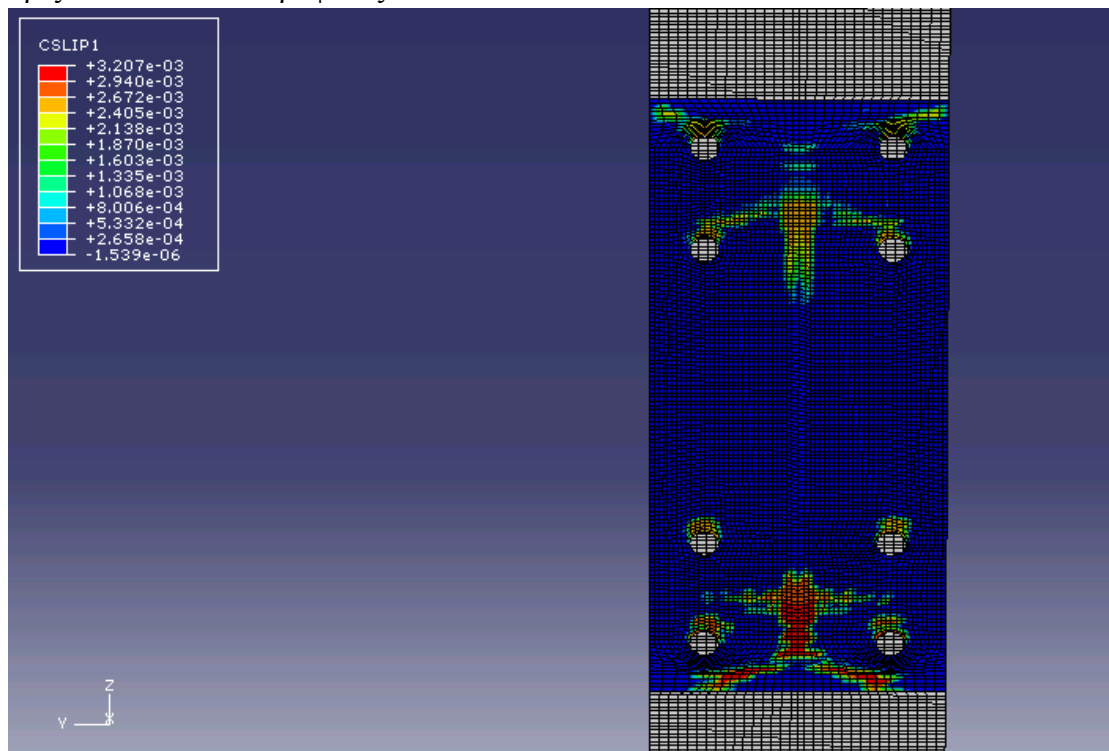


**Εικόνα 4.7.9: Βοηθητική Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,352 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,294 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ )

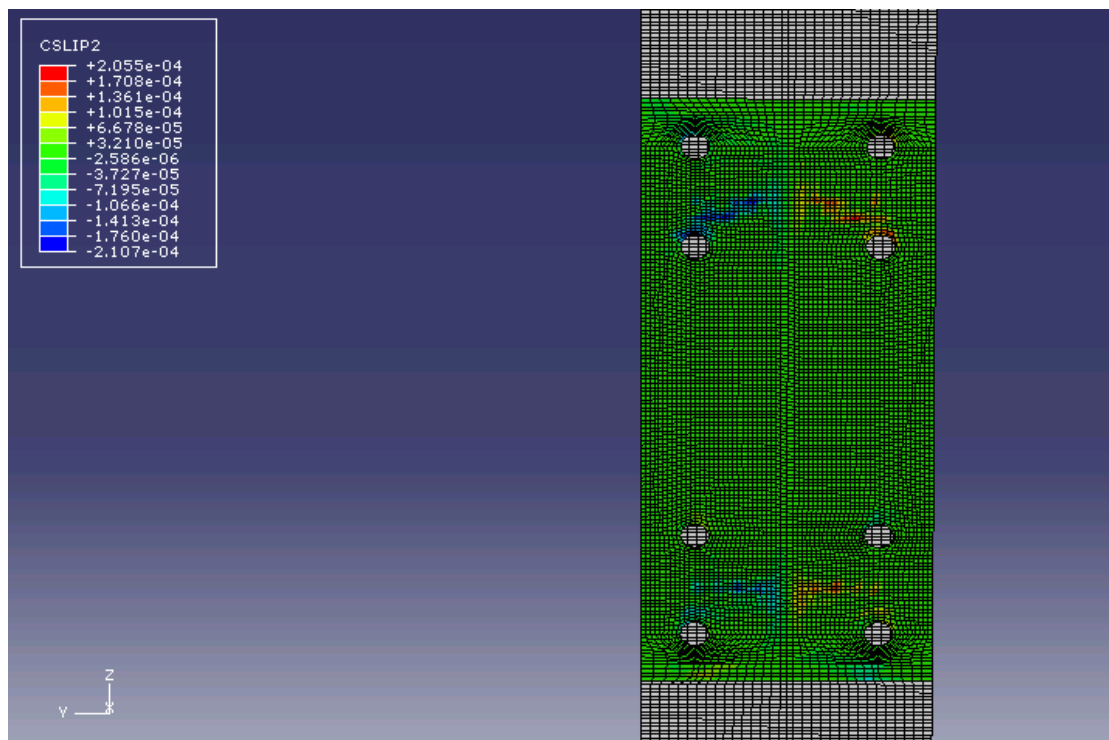


**Εικόνα 4.7.10: Κοχλίας 5-1**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $9,908 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $6,241 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )

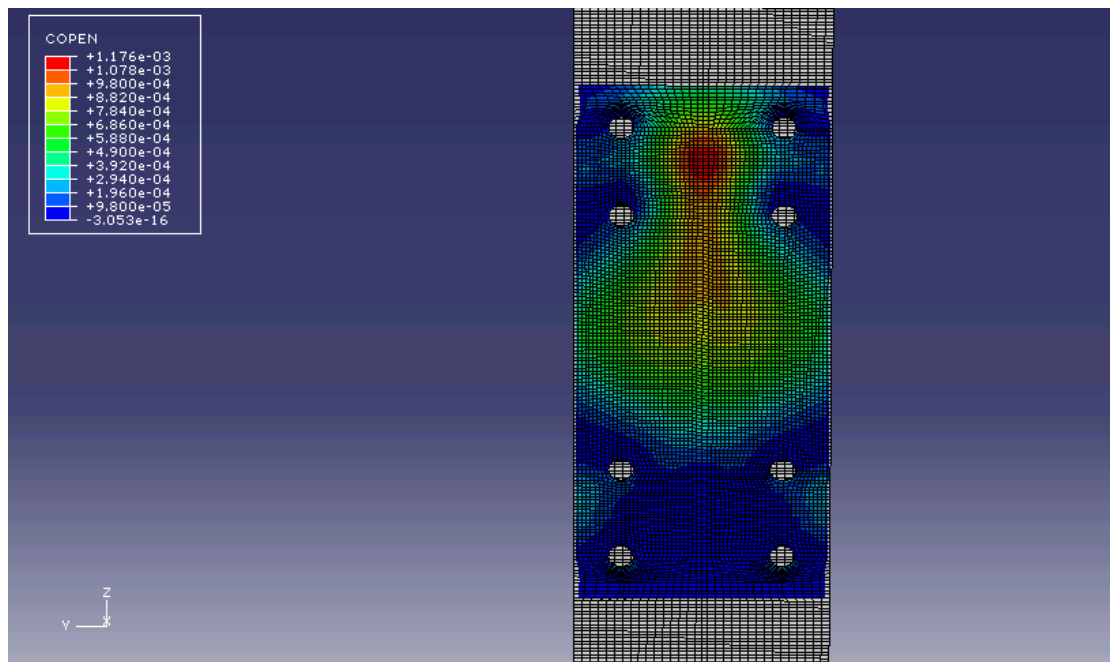
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.



**Εικόνα 4.7.11:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

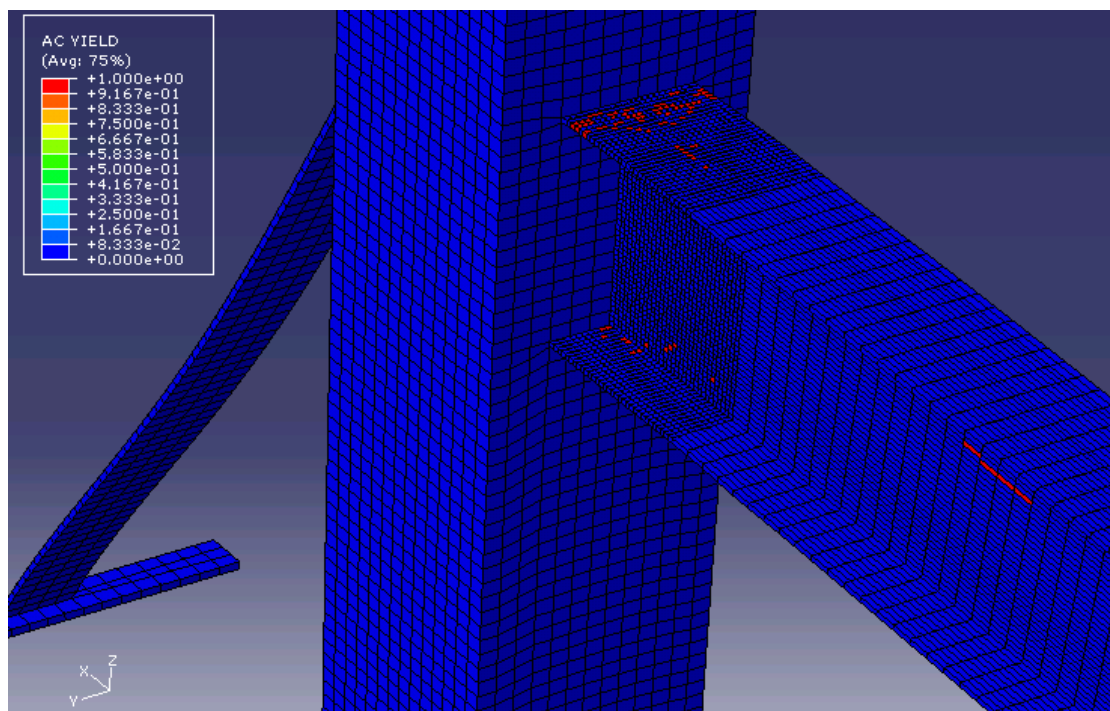


**Εικόνα 4.7.12:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.7.13:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

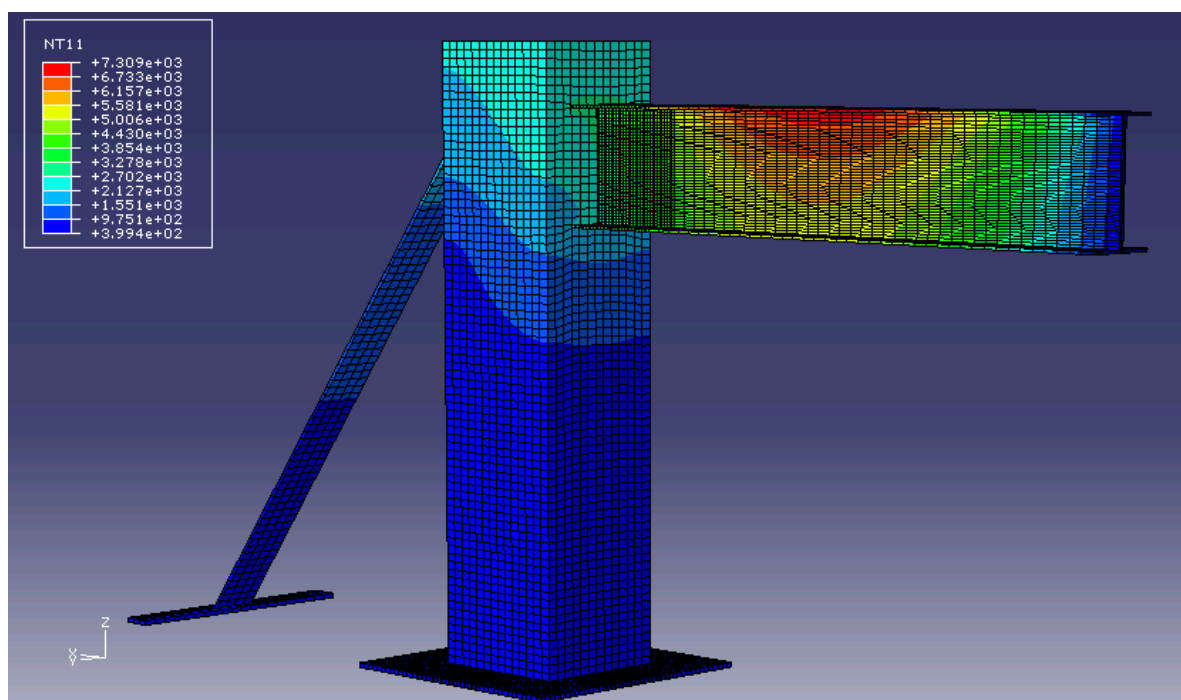
Στην συγκεκριμένη εικόνα με κόκκινη επισήμανση φαίνεται οι περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας.



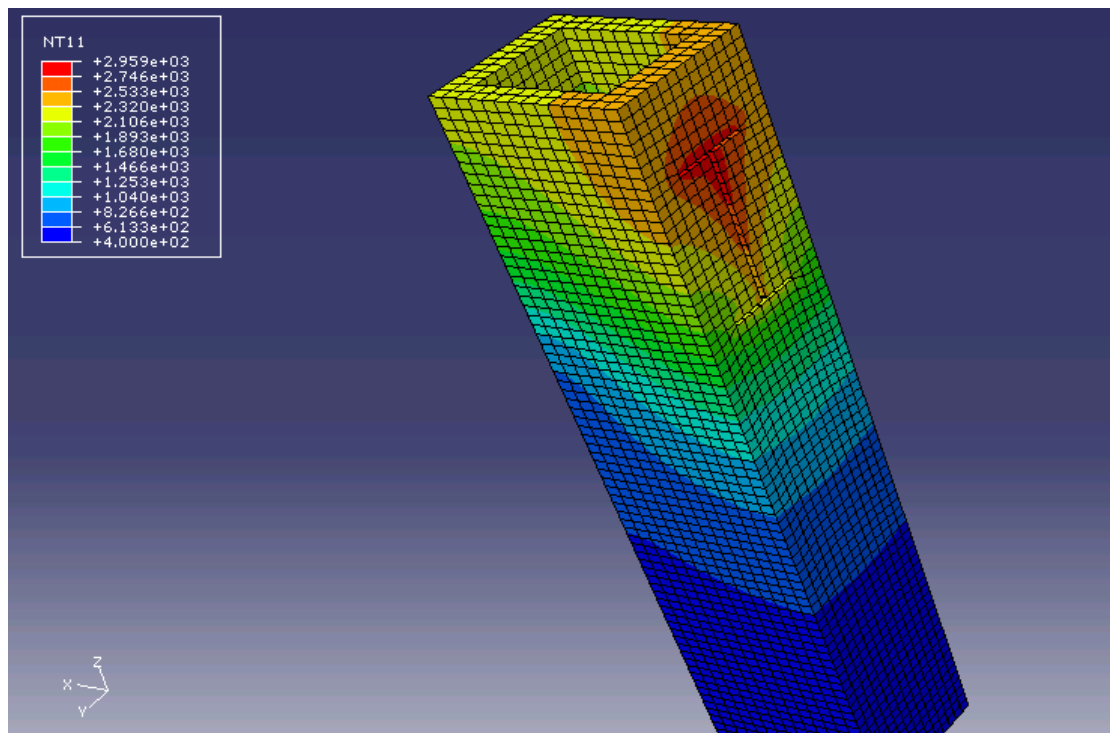
**Εικόνα 4.7.14:** Περιοχές που έχει διαρεύσει ο φορέας

#### 4.8 Θερμική Ανάλυση (σκυρόδεμα)- Σενάριο 8

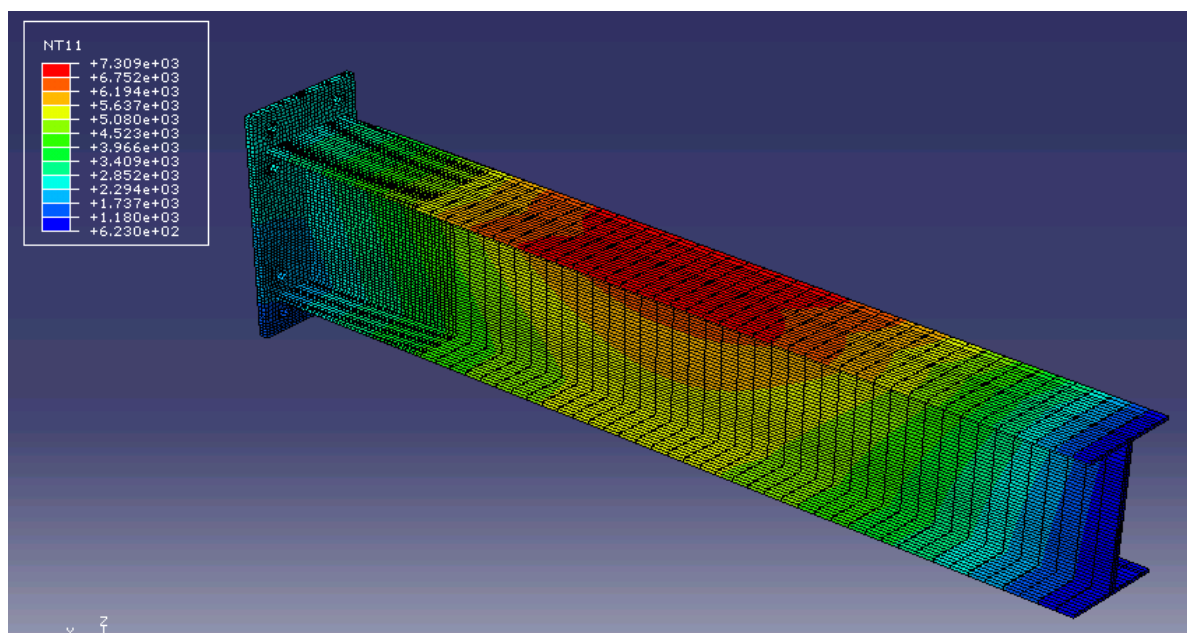
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στη συναρμολογημένη κατασκευή αλλά και στα επιμέρους τμήματα που την απαρτίζουν. Στο συγκεκριμένο σενάριο το θερμικό φορτίο είναι δεκαπλάσιο της προηγούμενης θερμικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για σκυρόδεμα, με τη μέγιστη θερμοκρασία να αγγίζει τους 7.309 °C. Επίσης διαφοροποιήθηκαν και τα σεντ θερμοκρασιών με τη θερμοκρασία στις βάσεις της κατασκευής από 273 °C να αυξάνεται σε 400 °C και στην περιοχή σύνδεσης κάθετου στύλου-οριζόντιας δοκού από 463 °C σε 600 °C.



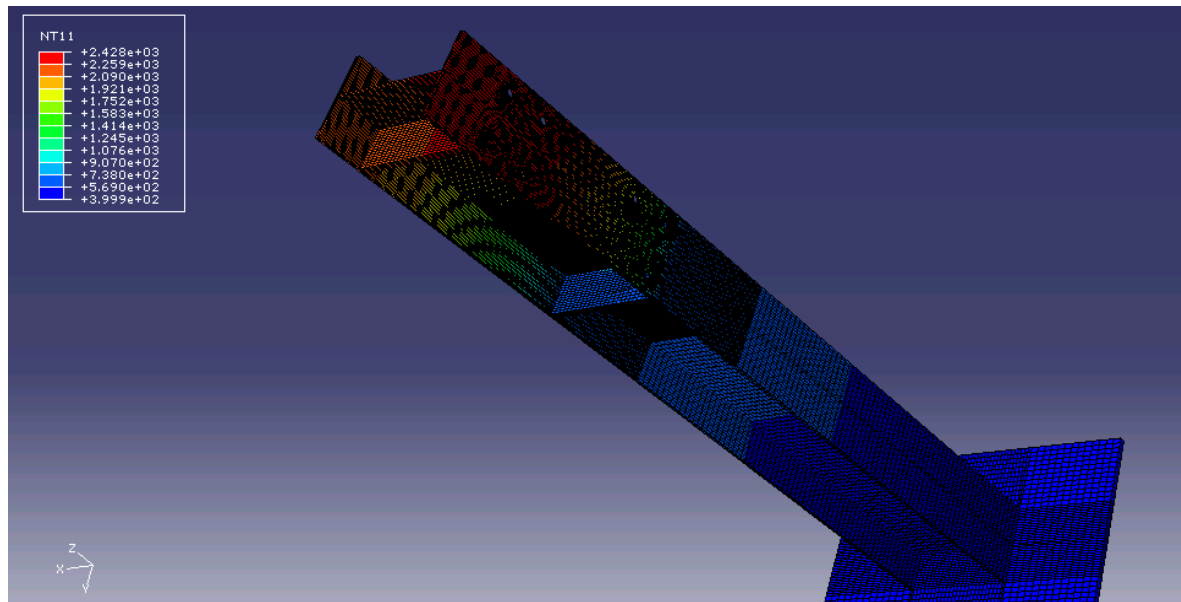
**Εικόνα 4.8.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 7.309 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 399,4 °C)



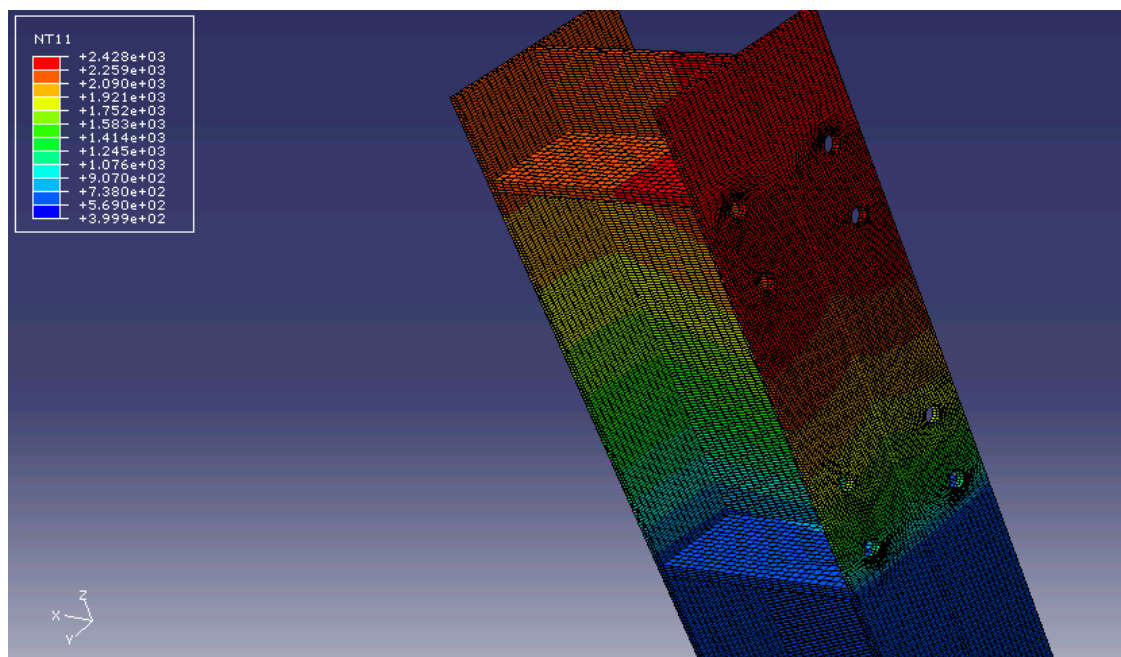
**Εικόνα 4.8.2:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη πυράντοχη επιφάνεια  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $2.959^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $400^{\circ}\text{C}$ )



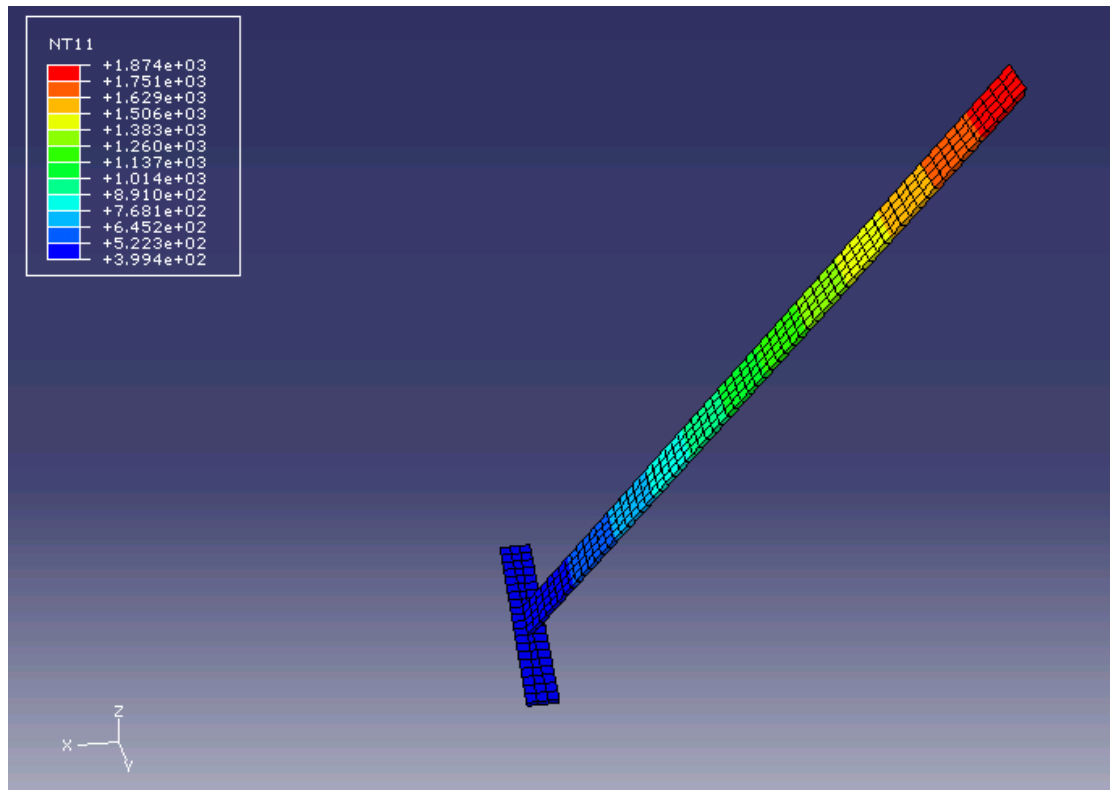
**Εικόνα 4.8.3:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη δοκό  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $7.309^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $623^{\circ}\text{C}$ )



**Εικόνα 4.8.4:** Θερμοκρασιακή κατανομή στο στύλο  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $2.428^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $399,9^{\circ}\text{C}$ )

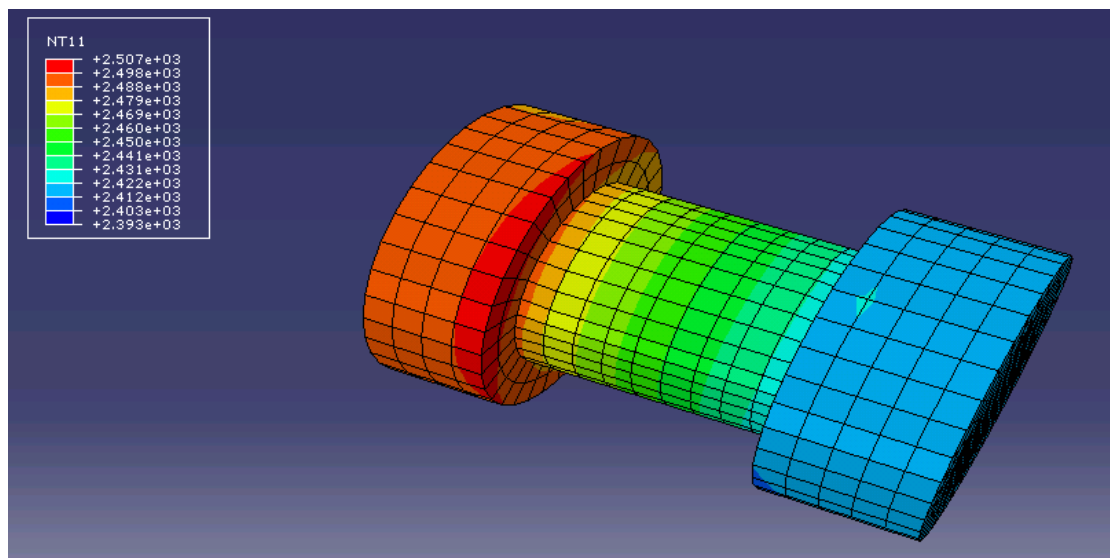


**Εικόνα 4.8.5:** Θερμοκρασιακή κατανομή στο στύλο  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $2.428^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $399,9^{\circ}\text{C}$ )



**Εικόνα 4.8.6:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη βοηθητική δοκό  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $1.874^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $399,4^{\circ}\text{C}$ )

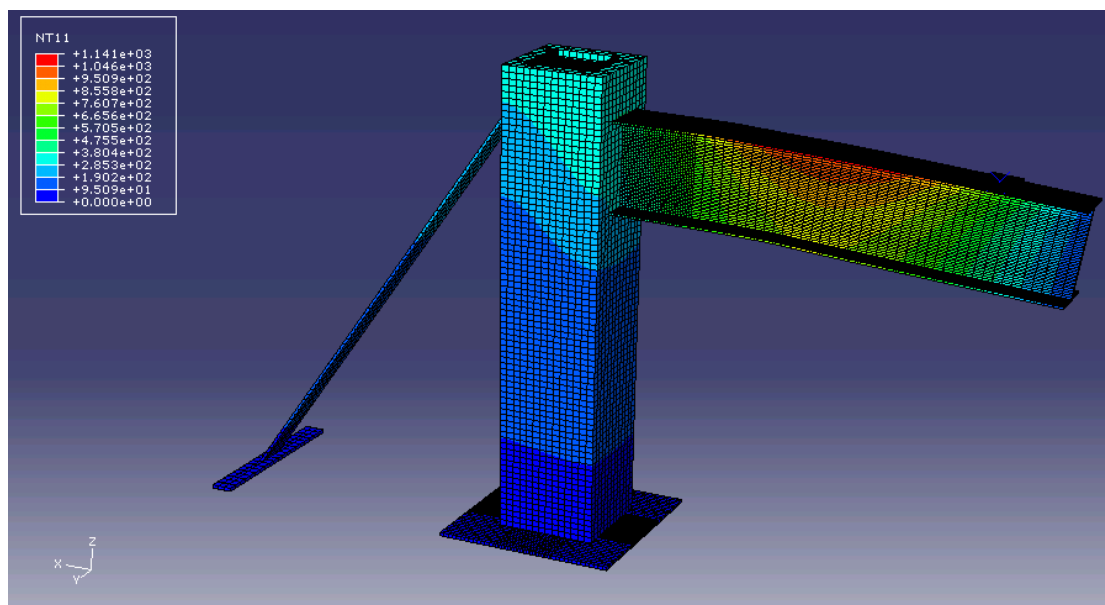
Στη συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζεται χαρακτηριστικά για έναν τυχαίο κοχλία η κατανομή της θερμοκρασίας.



**Εικόνα 4.8.7:** Θερμοκρασιακή κατανομή στον κοχλία 8-1  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $2.507^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $2.393^{\circ}\text{C}$ )

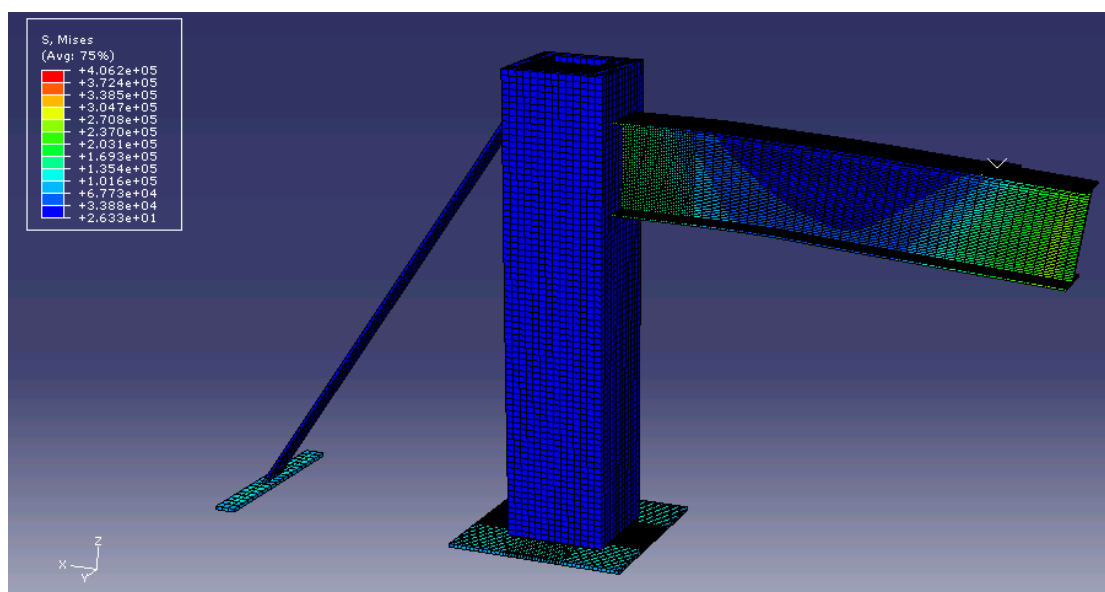
#### 4.9 Θερμομηχανική Ανάλυση (σκυρόδεμα) -Σενάριο 9

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας κατά της αστοχία. Στο συγκεκριμένο σενάριο έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια μηχανικού και θερμικού φορτίου με τη μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει τους 1.141 °C με την κατασκευή να αστοχεί υπό την επίδραση και των δύο φορτίσεων.



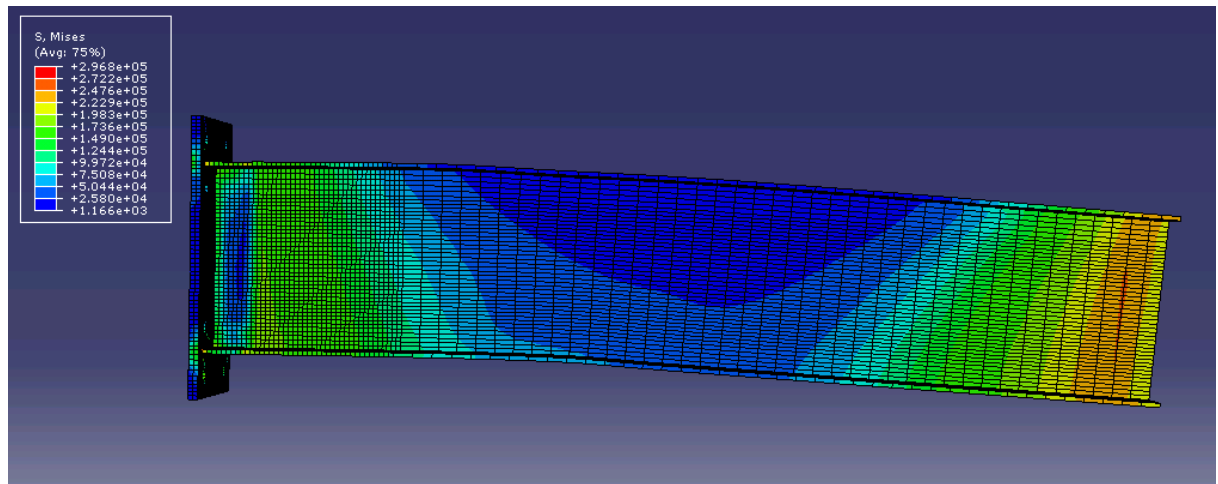
**Εικόνα 4.9.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη.

Παρακάτω παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises.

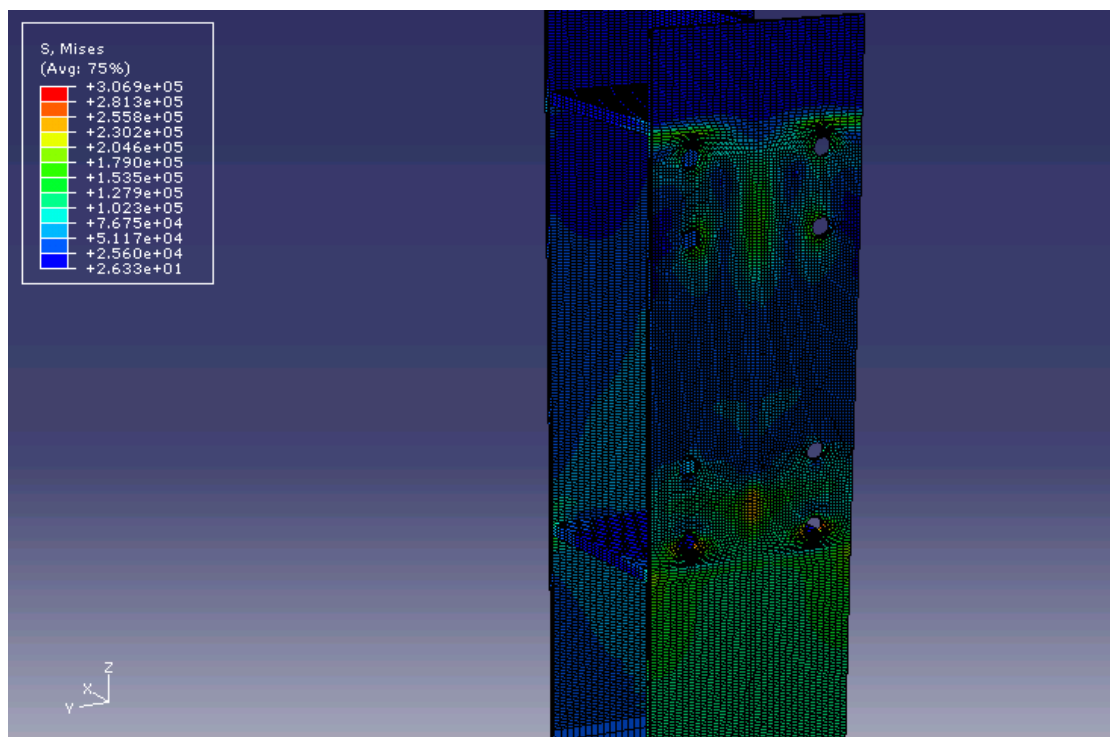


**Εικόνα 4.9.2:**Πλήρης διάταξη

(Μέγιστη καταπόνηση  $4,062 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,633 \cdot 10$  KPa)

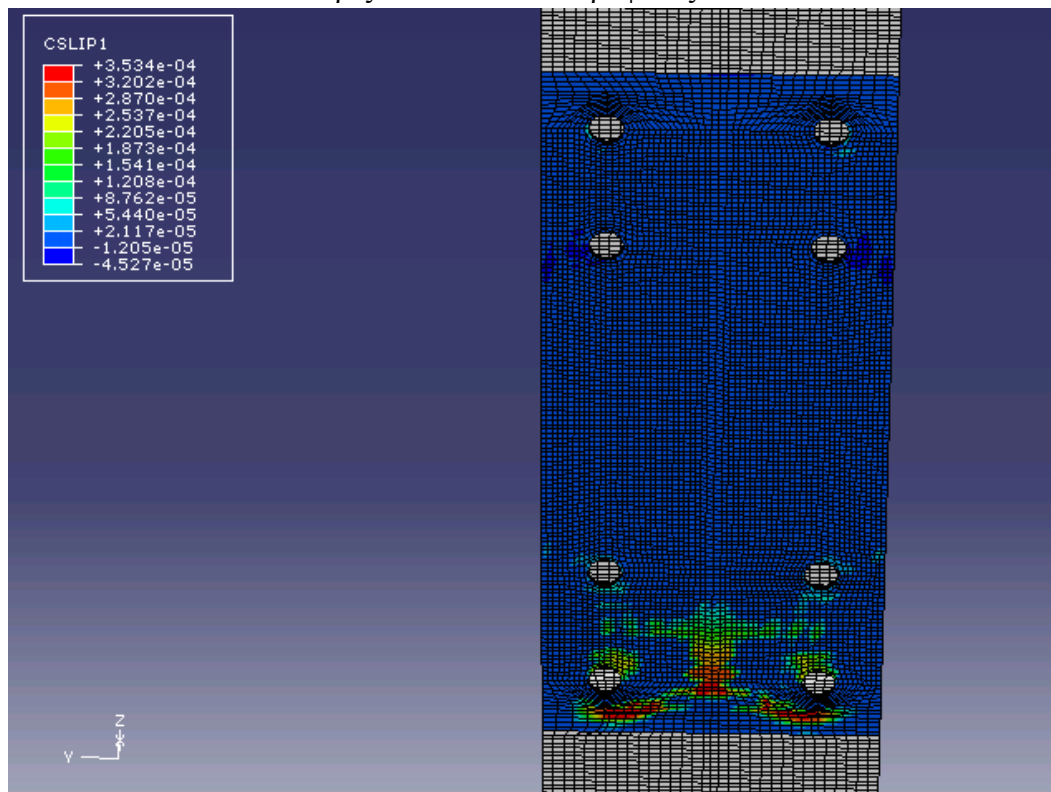


**Εικόνα 4.9.3:Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,968 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,166 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )

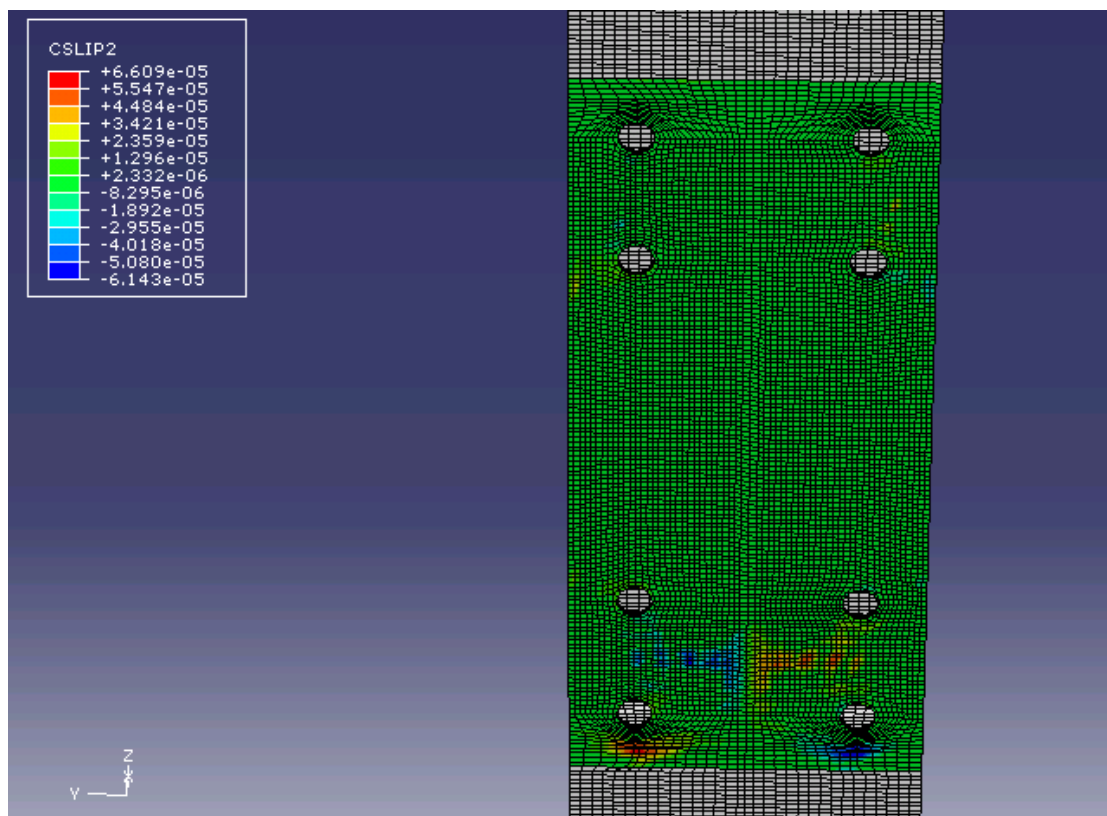


**Εικόνα 4.9.4:Κάθετος Στόλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,069 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,633 \cdot 10 \text{ KPa}$ )

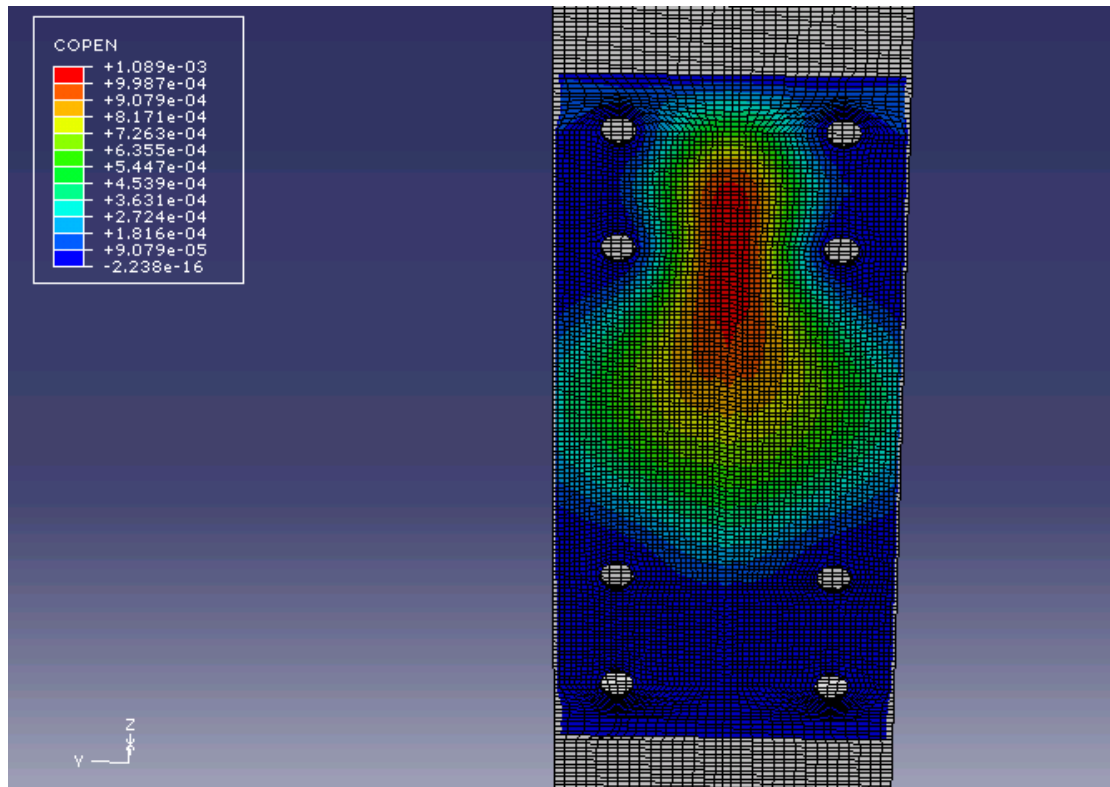
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα:



**Εικόνα 4.9.12:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

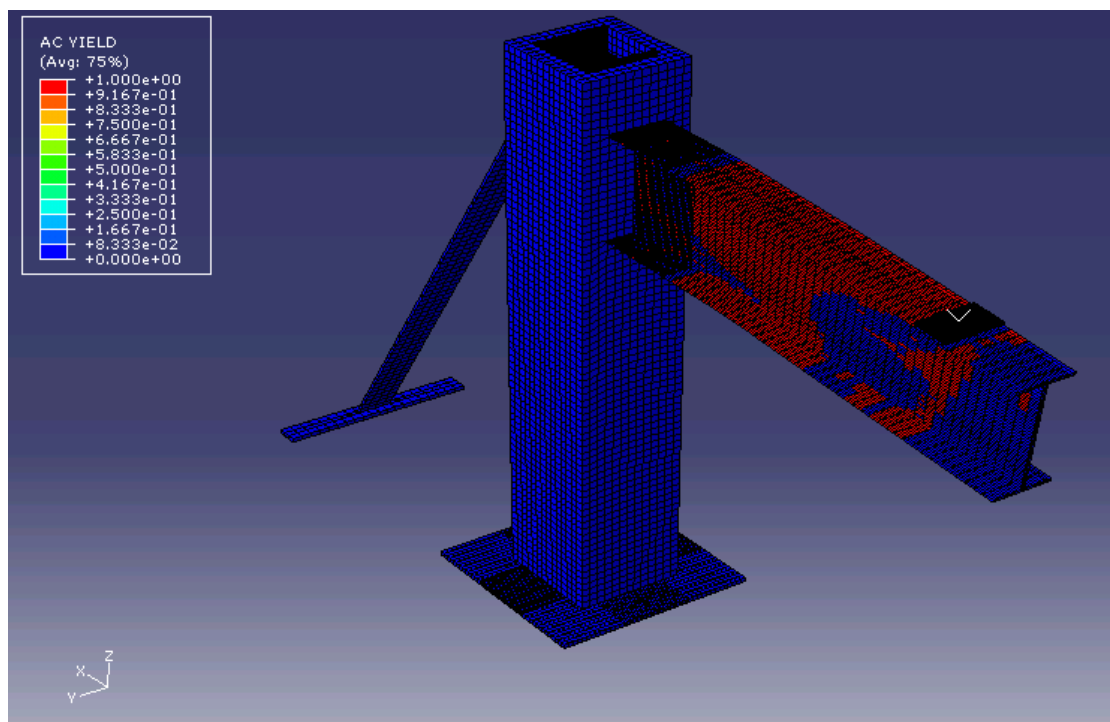


**Εικόνα 4.9.13:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.9.14:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

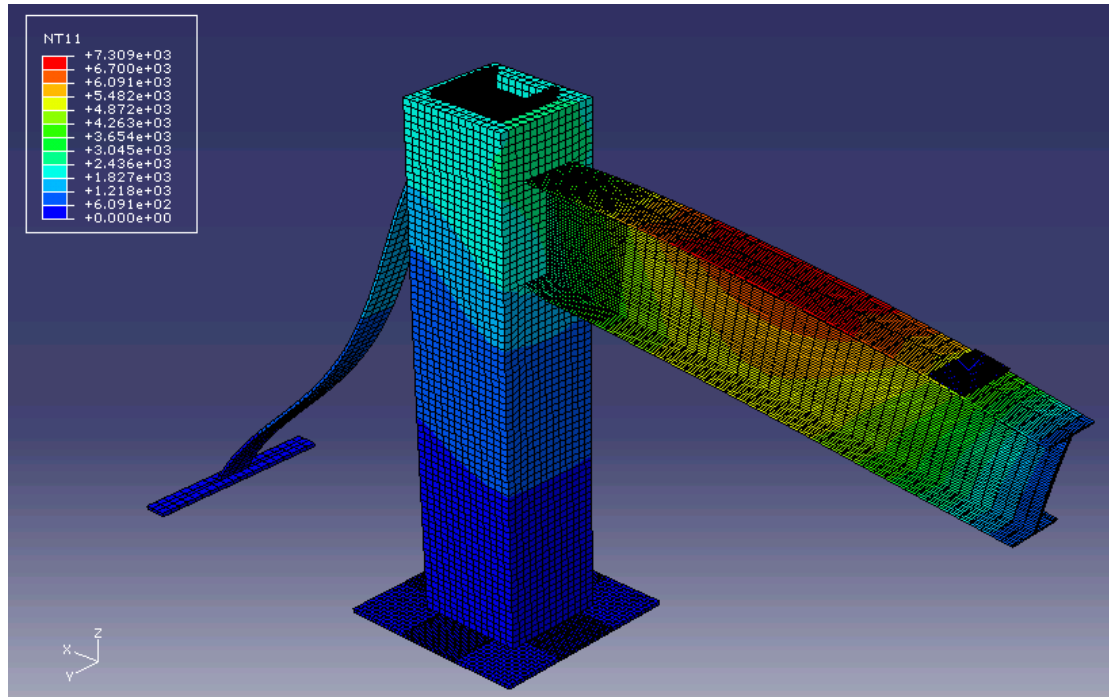
Στη παρακάτω εικόνα με κόκκινη επισήμανση φαίνονται οι περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας.



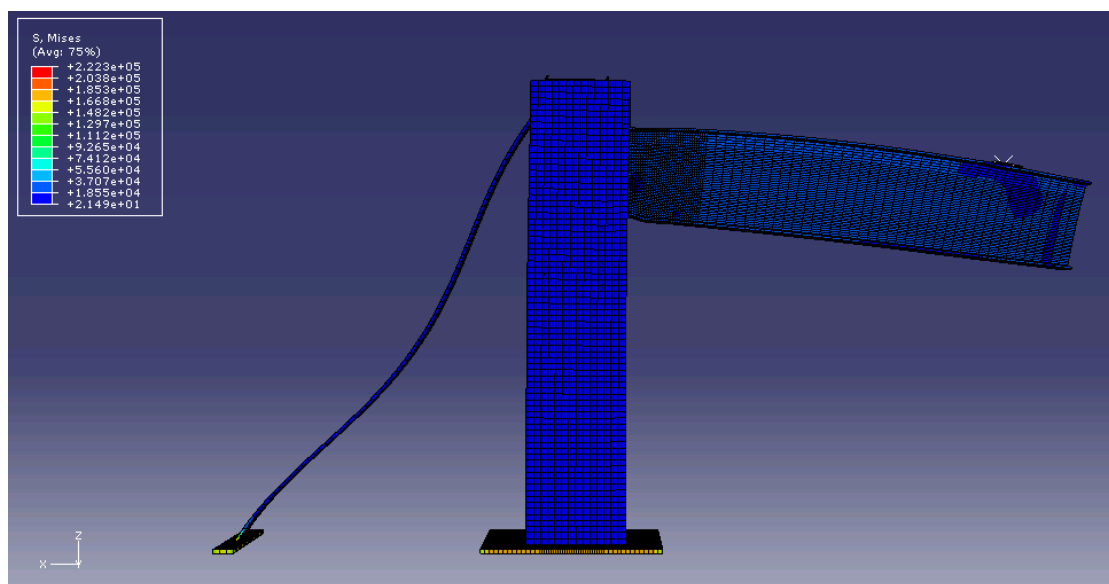
**Εικόνα 4.9.15:** Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

#### 4.10 Θερμομηχανική Ανάλυση (διαφορετικό step)- Σενάριο 10

Στη συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας, όπου έχουμε επενέργεια πρώτα του θερμικού φορτίου και του μηχανικού να ακολουθεί σε επόμενο step. Το θερμικό φορτίο είναι τα αποτελέσματα που προέκυψαν της θερμικής ανάλυσης του σεναρίου 8.

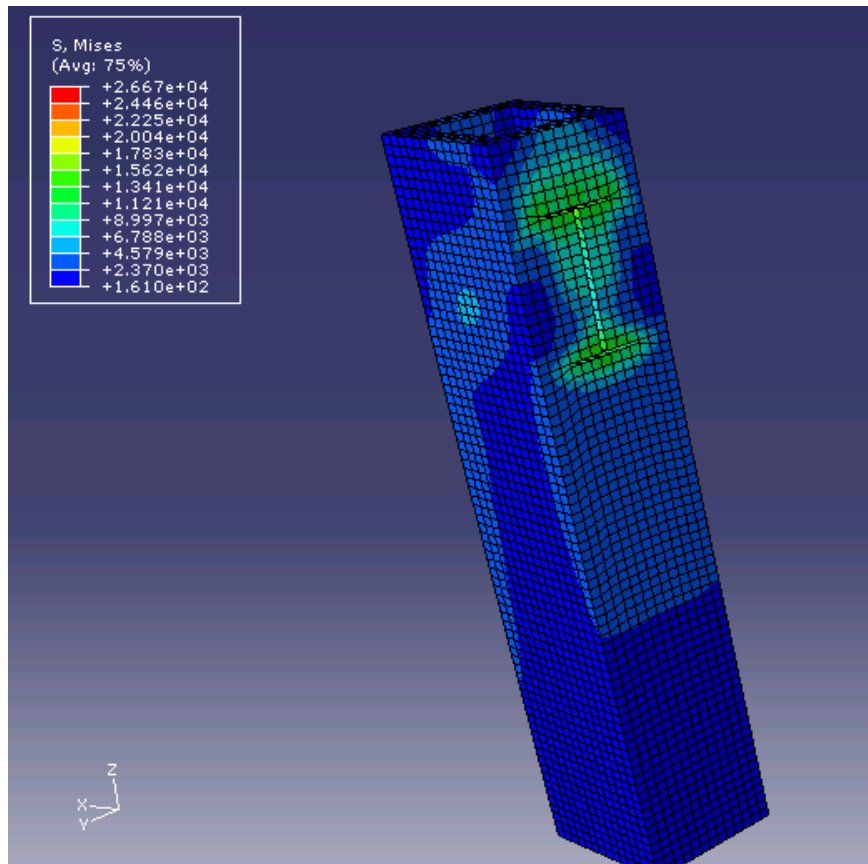


Εικόνα 4.10.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη

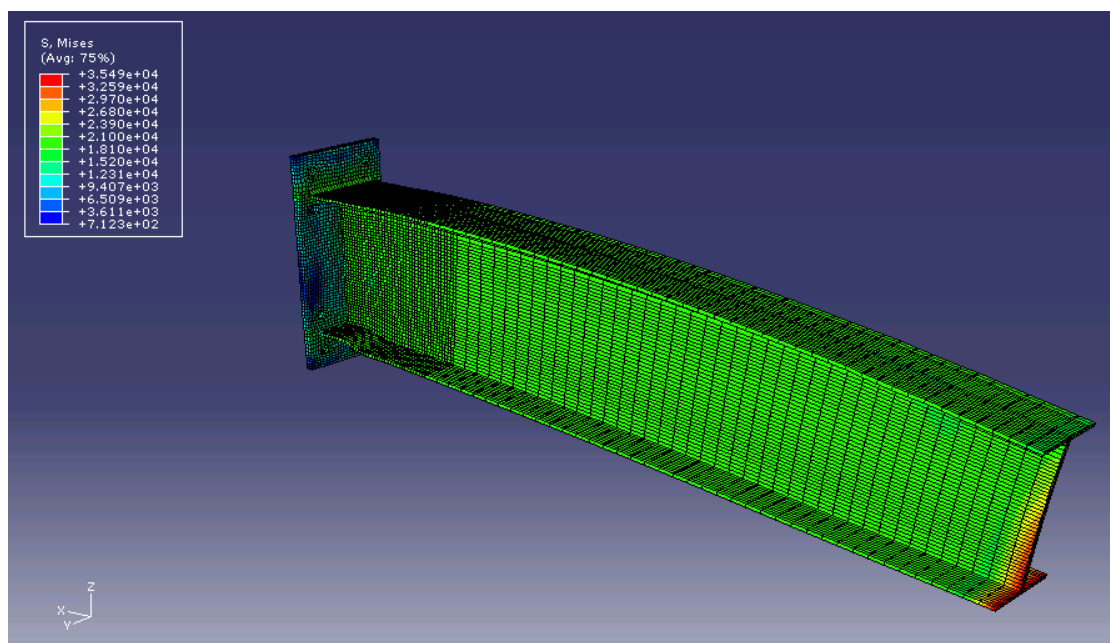


Εικόνα 4.10.2: Πλήρης διάταξη

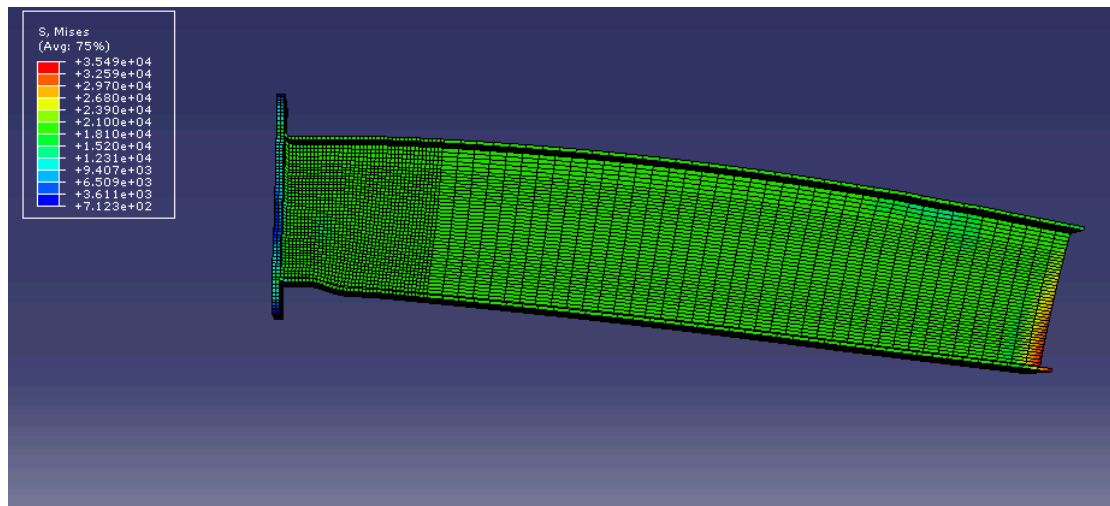
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,223 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,149 \cdot 10$  KPa)



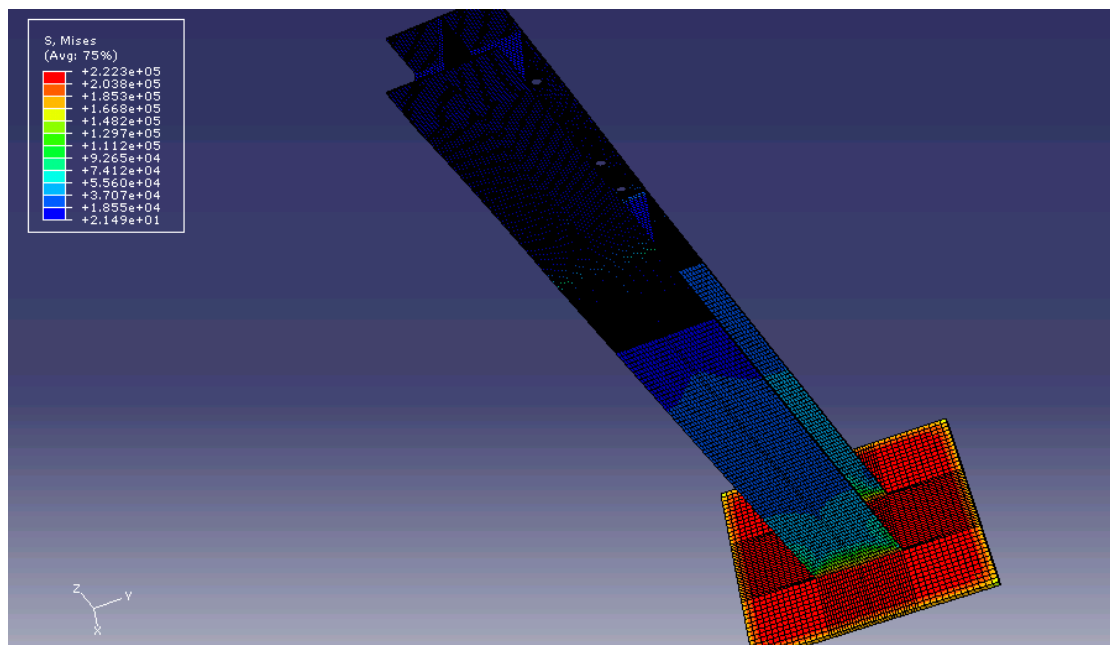
**Εικόνα 4.10.3:Θερμική Ενίσχυση**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,667 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,610 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ )



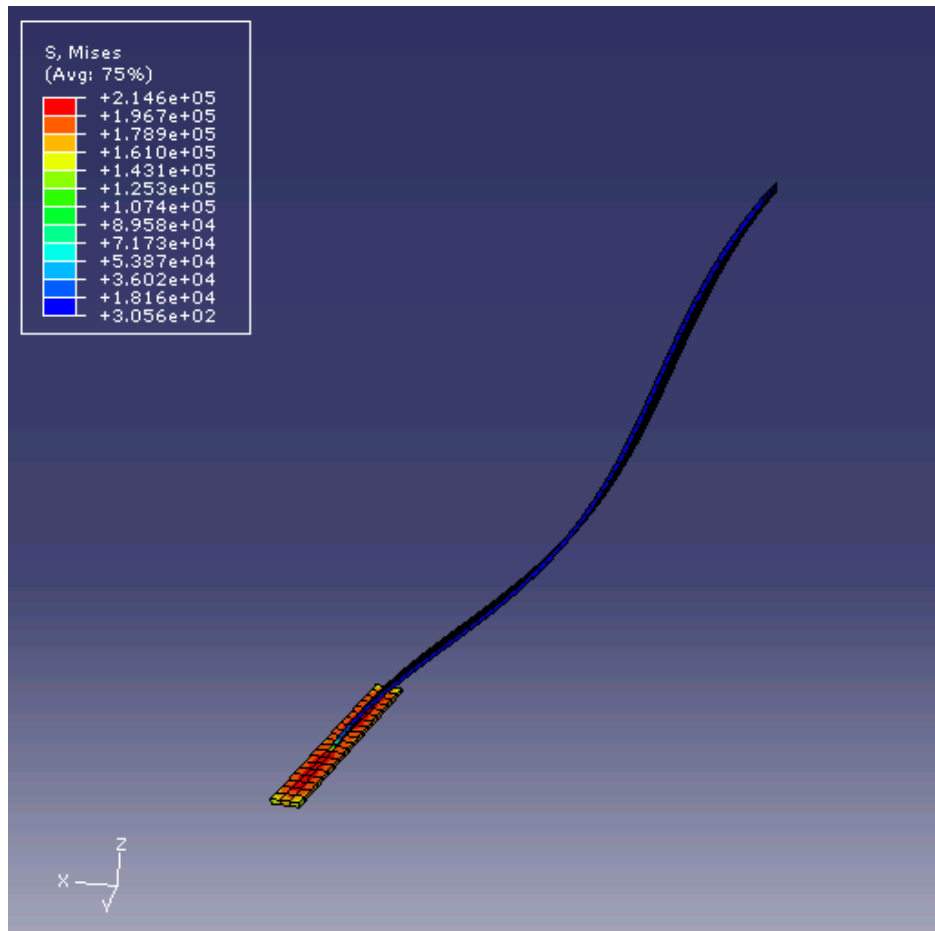
**Εικόνα 4.10.4:Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,549 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $7,123 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ )



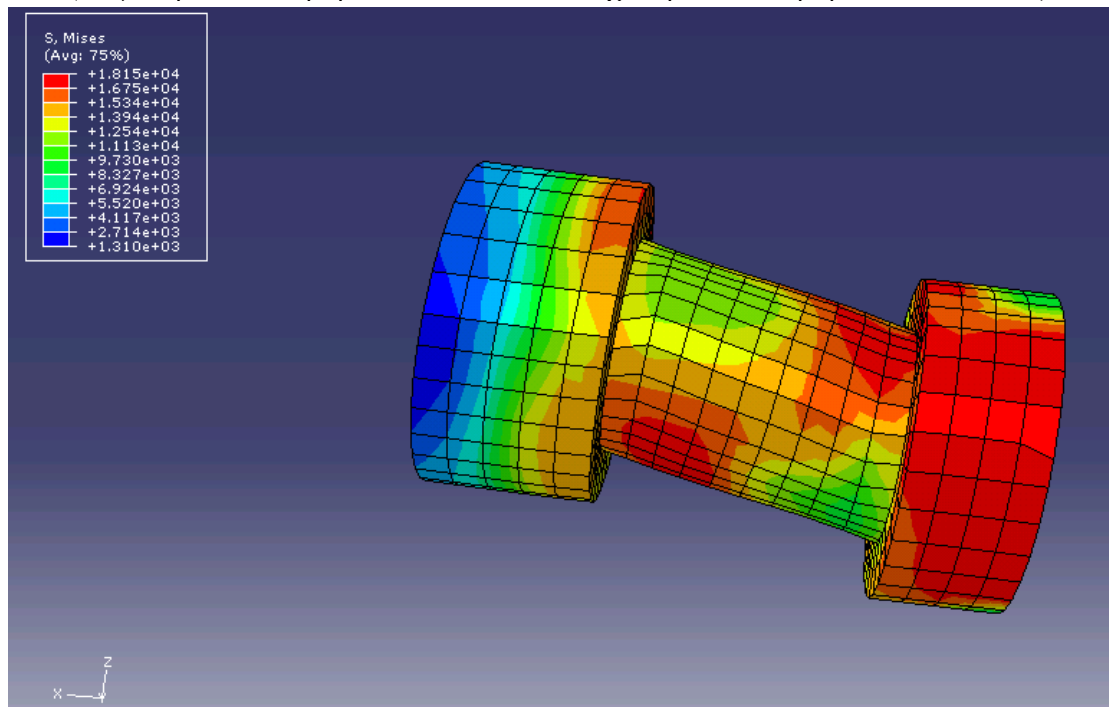
**Εικόνα 4.10.5:Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,549 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $7,123 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ )



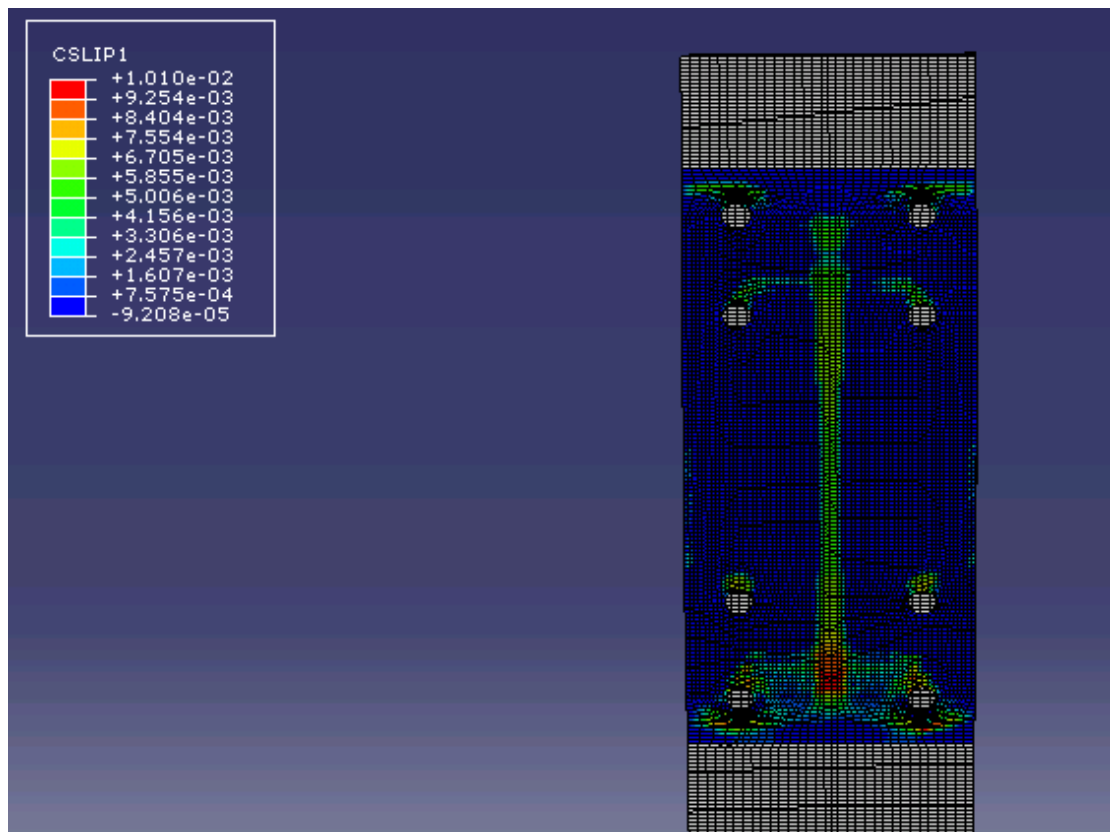
**Εικόνα 4.10.6:Κάθετος Στόλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,223 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,149 \cdot 10 \text{ KPa}$ )



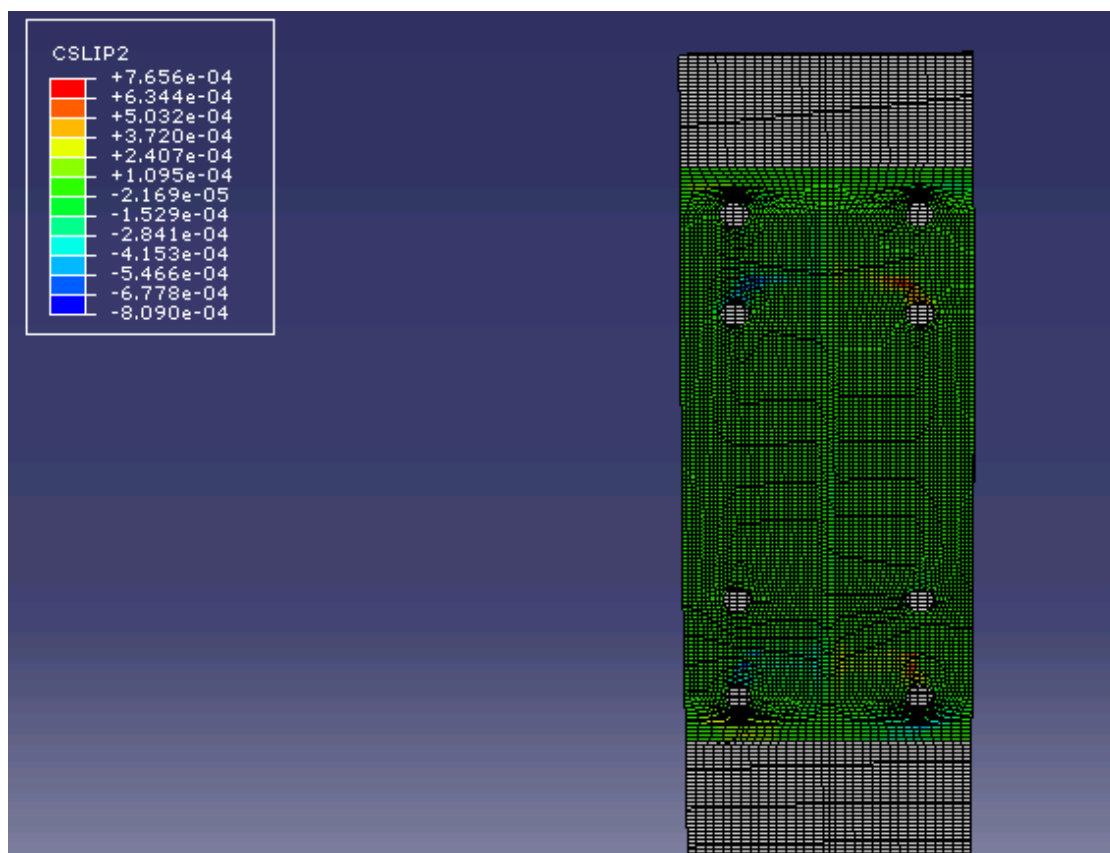
**Εικόνα 4.10.7:Βοηθητική Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,146 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $3,056 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ )



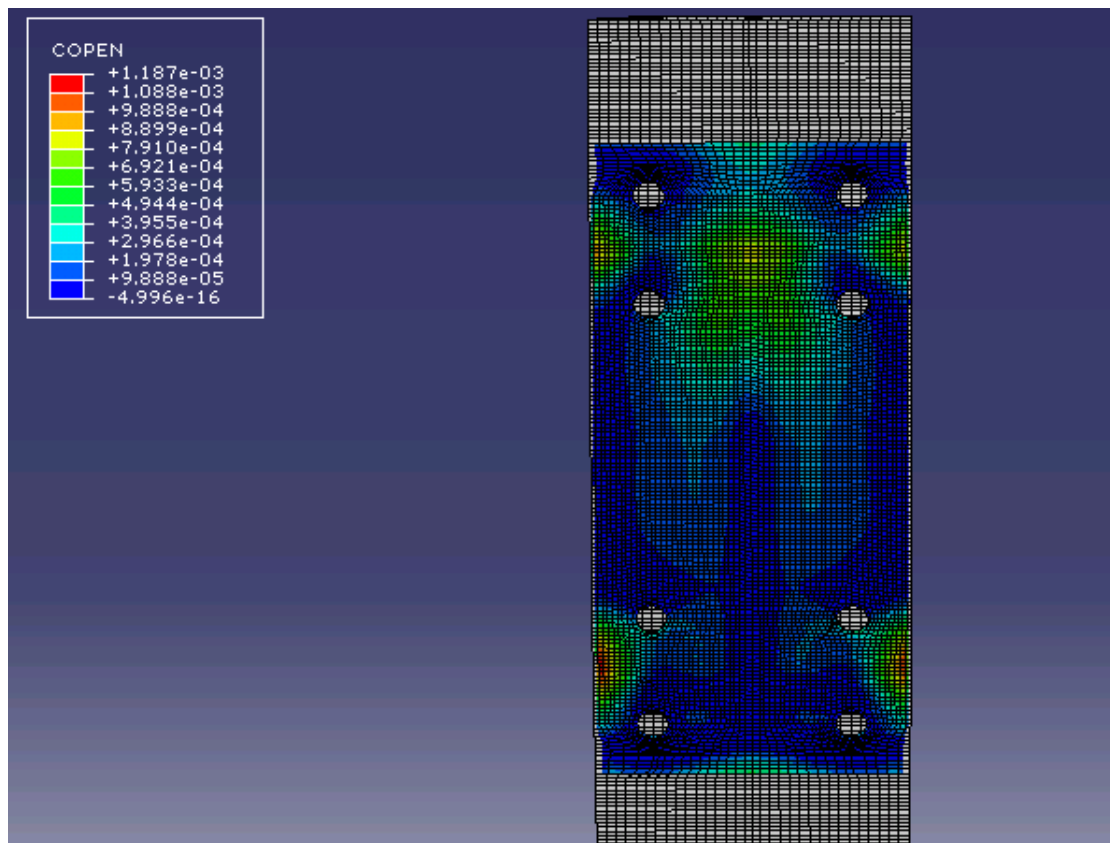
**Εικόνα 4.10.8:Κοχλίας 8-1**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $1,815 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,310 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )



**Εικόνα 4.10.9:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

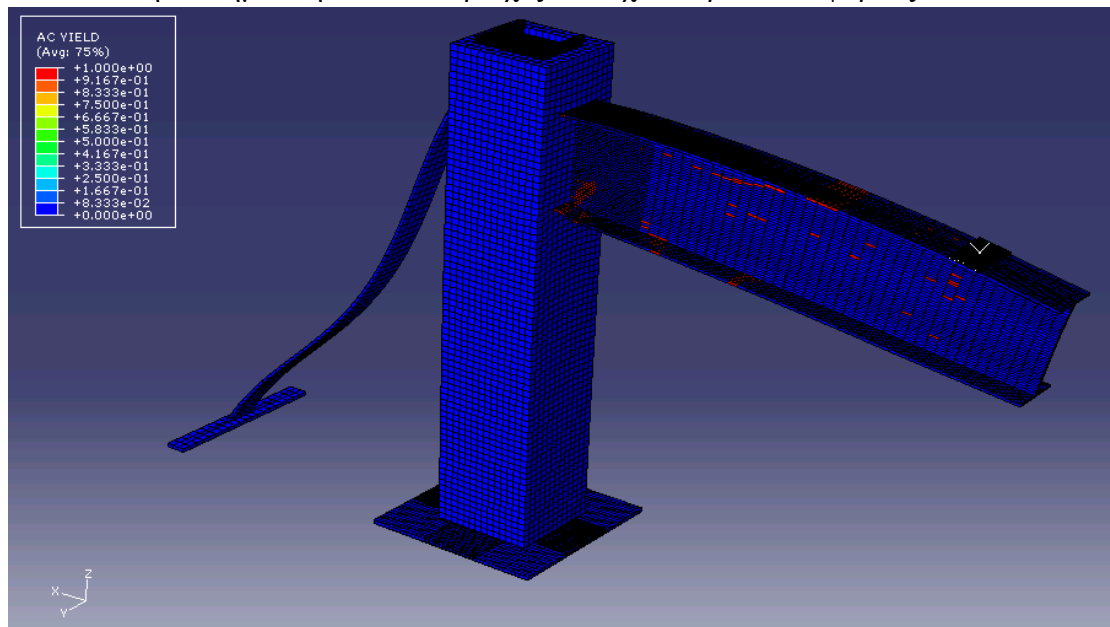


**Εικόνα 4.10.11:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.10.12:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

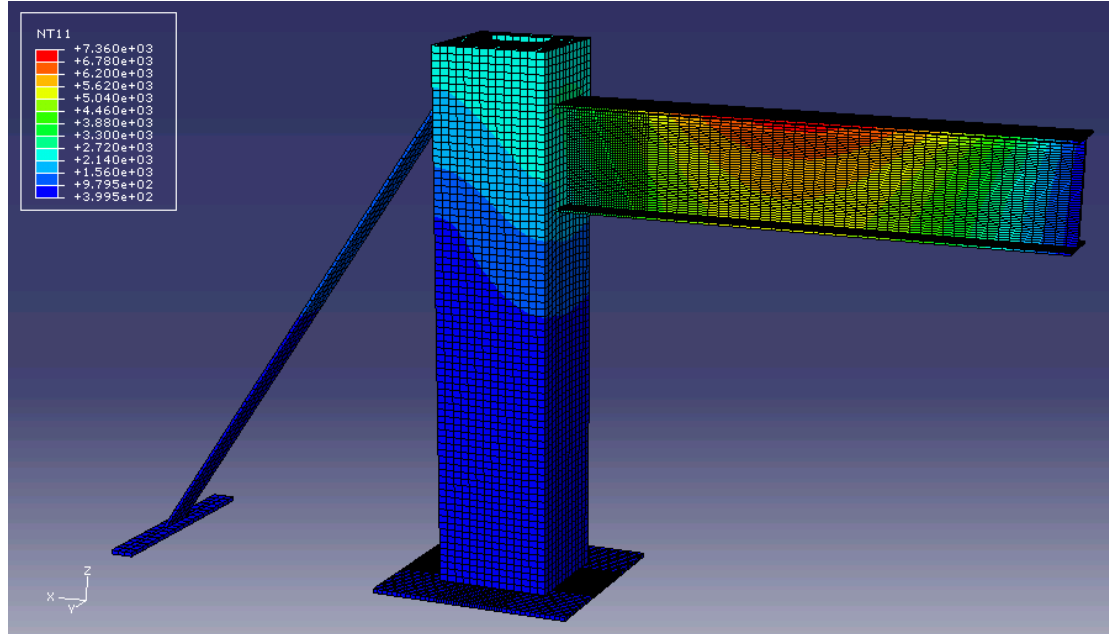
Με κόκκινη επισήμανση είναι οι περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας.



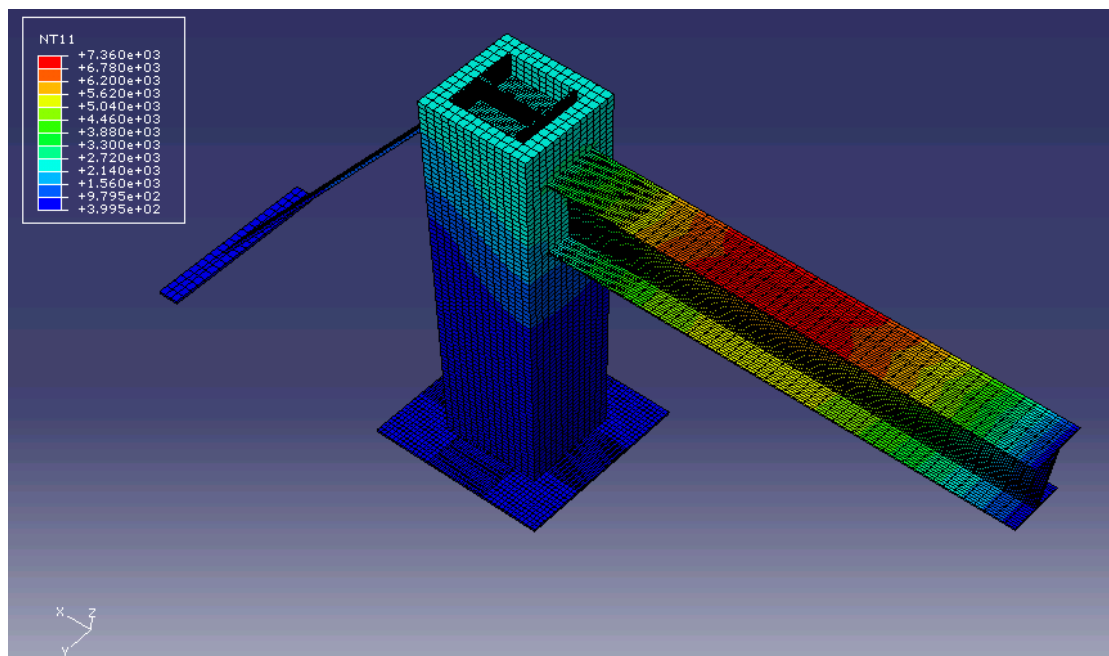
**Εικόνα 4.10.13:** Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

#### 4.11 Θερμική Ανάλυση (γυψοσανίδα) - Σενάριο 11

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην κατασκευή μας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το θερμικό φορτίο είναι δεκαπλάσιο σε σχέση με την πρώτη αντίστοιχη θερμική ανάλυση που έγινε για γυψοσανίδα καθώς επίσης διαφοροποιήθηκαν και κάποια set θερμοκρασιών.

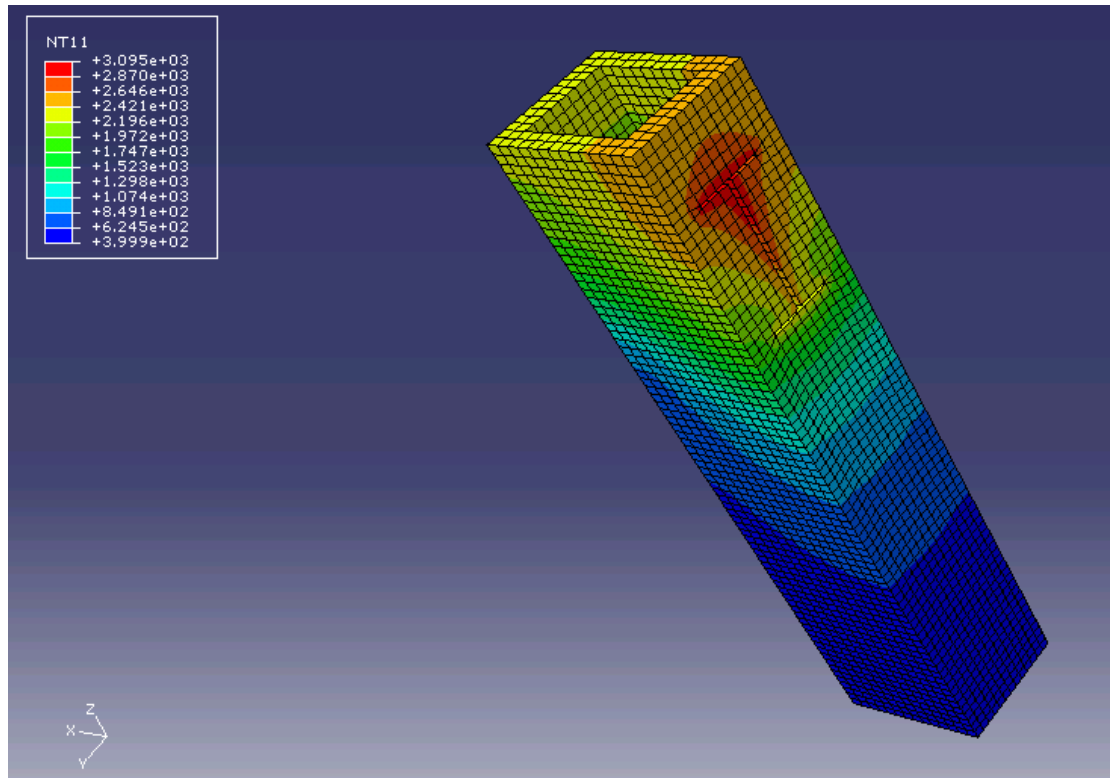


**Εικόνα 4.11.1:**Κατανομή θερμοκρασίας στη κατασκευή μας  
(Μέγιστη θερμοκρασία  $7.360^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $399,5^{\circ}\text{C}$ )

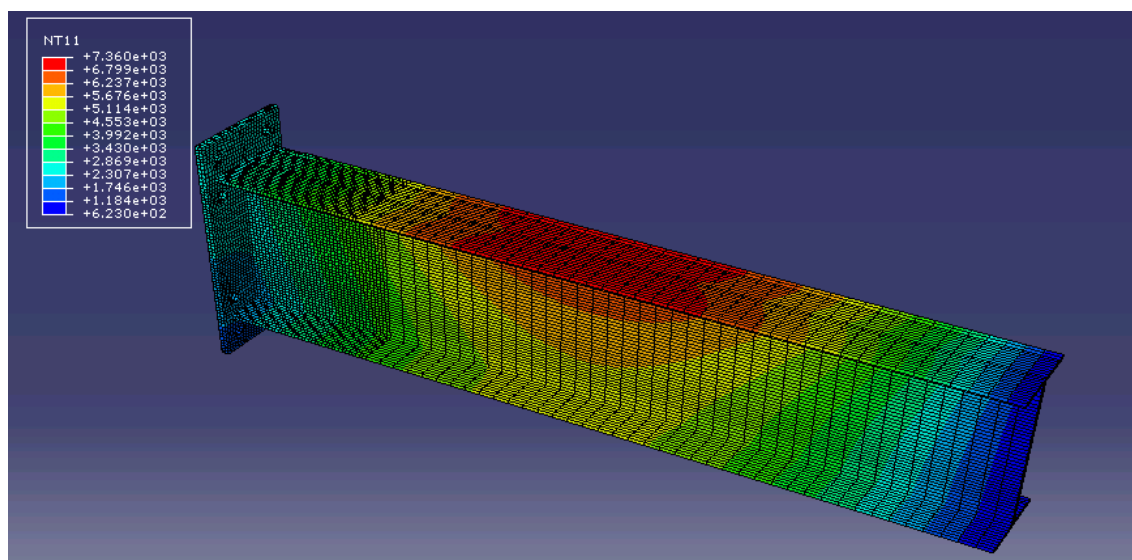


**Εικόνα 4.11.2 :**Κατανομή θερμοκρασίας στη κατασκευή μας  
(Μέγιστη θερμοκρασία  $7.360^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $399,5^{\circ}\text{C}$ )

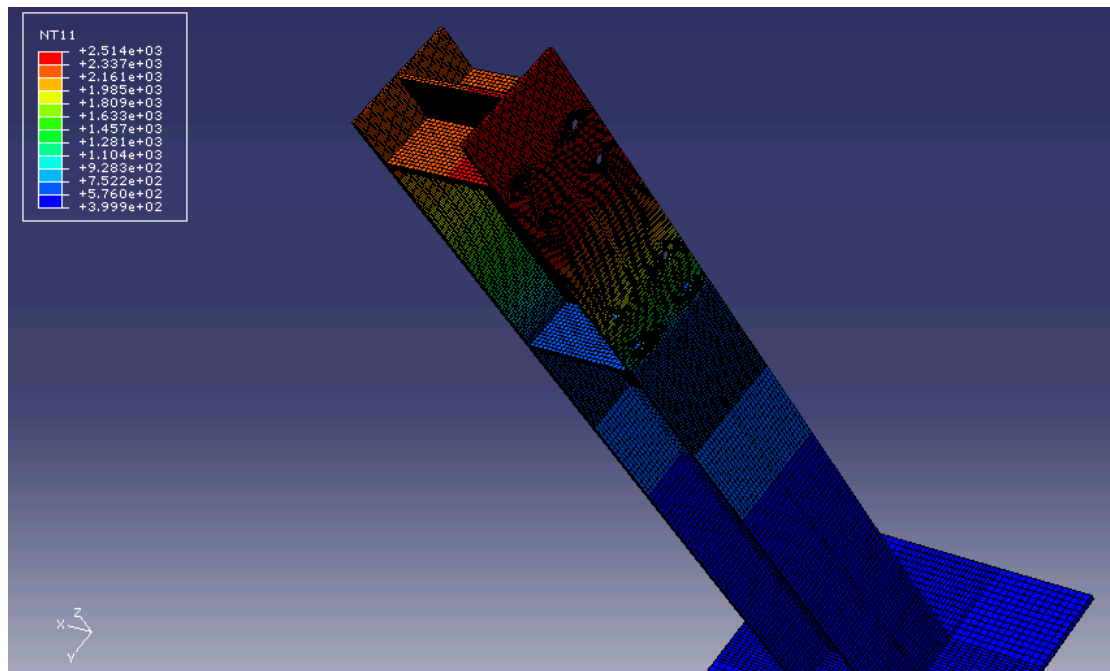
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στα διάφορα τμήματα που απαρτίζουν την κατασκευή μας.



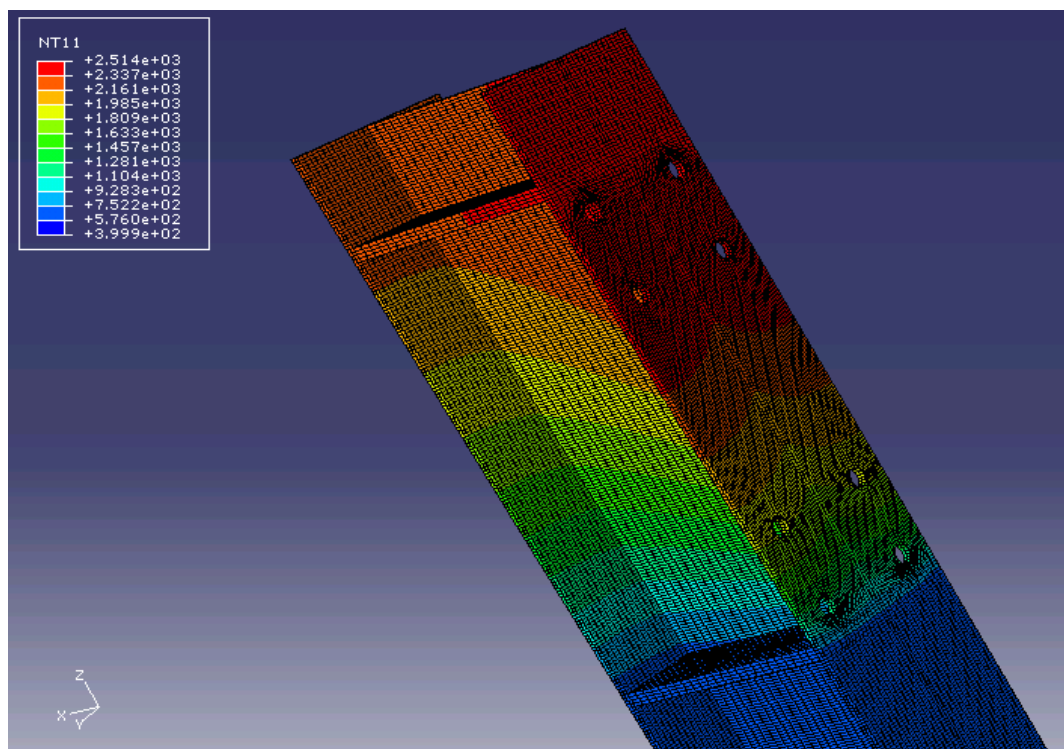
**Εικόνα 4.11.3:**Κατανομή θερμοκρασίας στη θερμική ενίσχυση  
(Μέγιστη θερμοκρασία 3.095 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 399,9 °C)



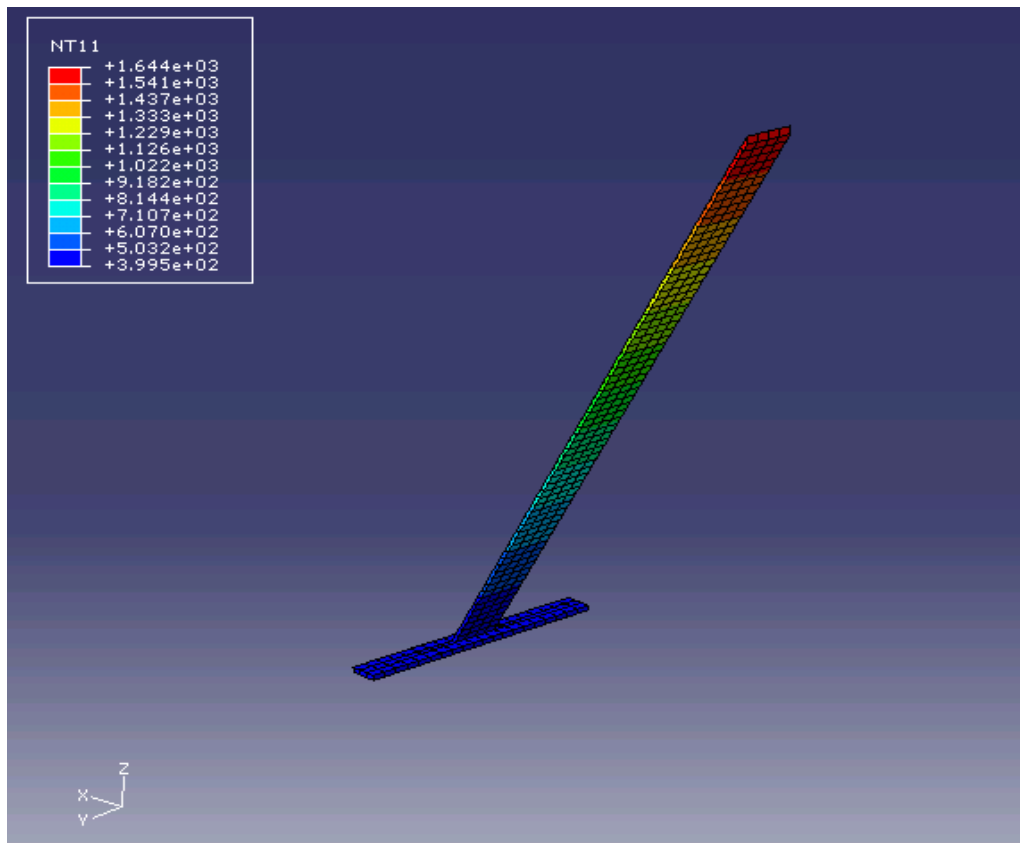
**Εικόνα 4.11.4:**Κατανομή θερμοκρασίας στην οριζόντια δοκό  
(Μέγιστη θερμοκρασία 7.360 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 623 °C)



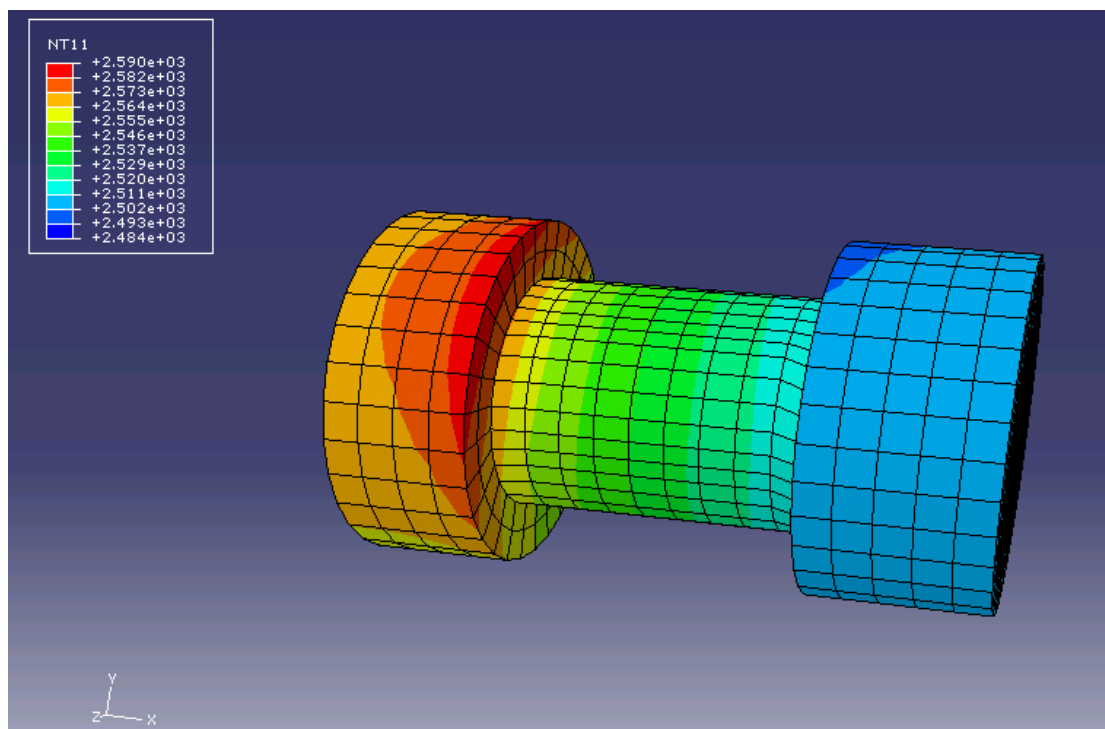
**Εικόνα 4.11.5:**Κατανομή θερμοκρασίας στο κάθετο στύλο  
(Μέγιστη θερμοκρασία 2.514 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 399,9 °C)



**Εικόνα 4.11.6:**Κατανομή θερμοκρασίας στο κάθετο στύλο  
(Μέγιστη θερμοκρασία 2.514 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 399,9 °C)



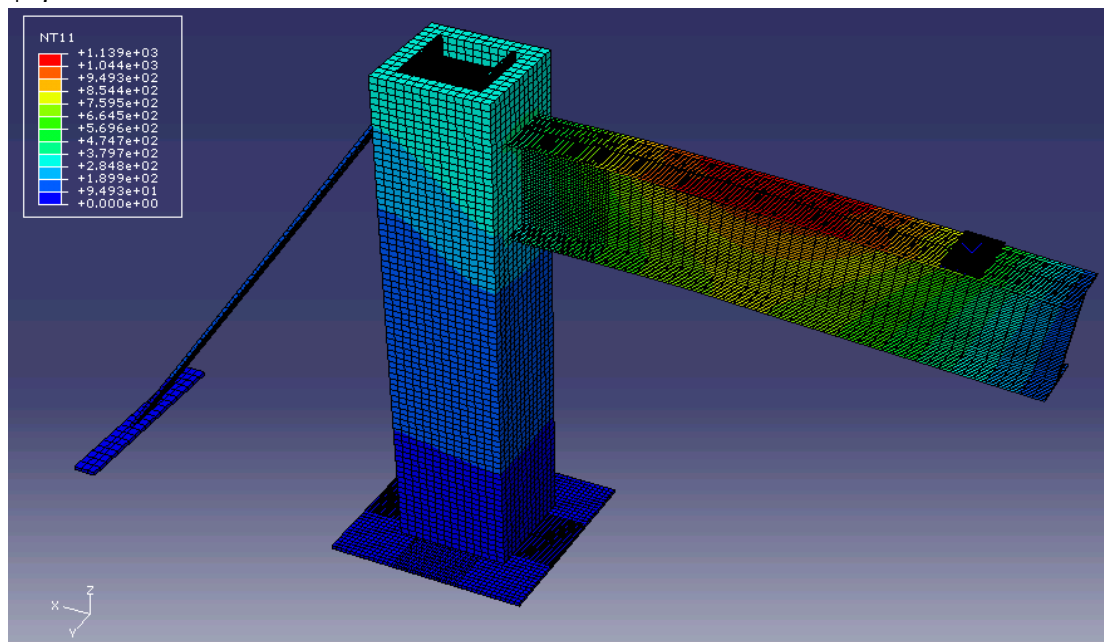
**Εικόνα 4.11.7:**Κατανομή θερμοκρασίας στη πίσω βοηθητική δοκό  
(Μέγιστη θερμοκρασία 1.644 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 399,5 °C)



**Εικόνα 4.11.8:**Κατανομή θερμοκρασίας στο κοχλία 5-1  
(Μέγιστη θερμοκρασία 2.590 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 2.484 °C)

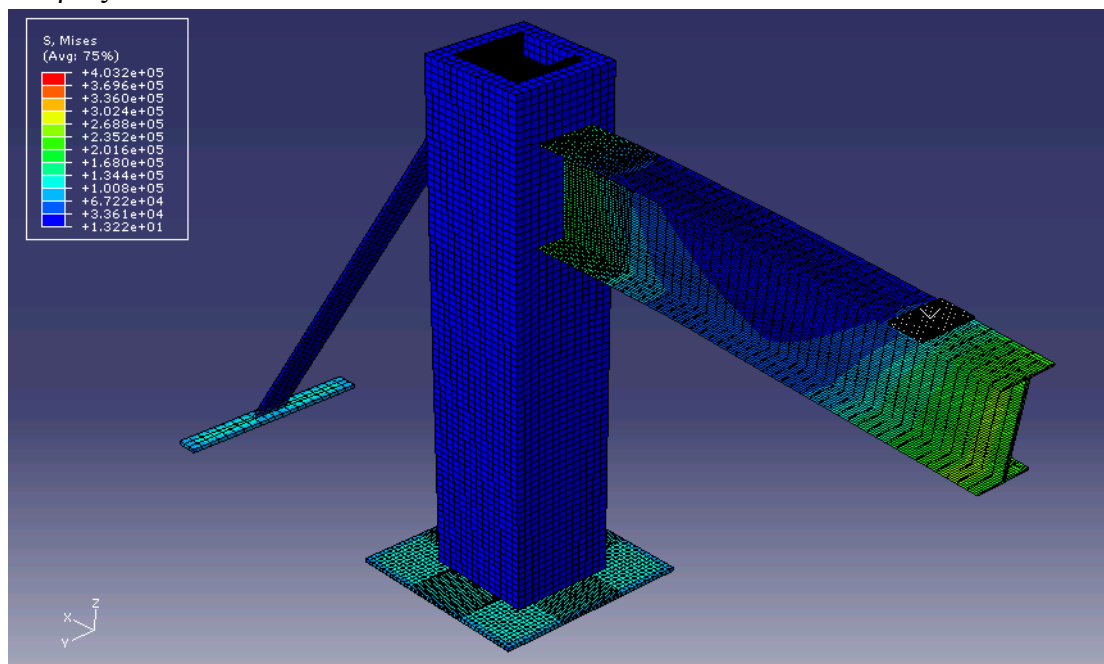
#### 4.12 Θερμομηχανική ανάλυση (γυψοσανίδα) -Σενάριο 12

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας κατά την αστοχία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε επενέργεια ταυτόχρονη των θερμικών και μηχανικών φορτίων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες φτάνουν μέχρι  $1.139\text{ }^{\circ}\text{C}$  και ο φορέας αστοχεί υπό την επίδραση και των δύο φορτίσεων.



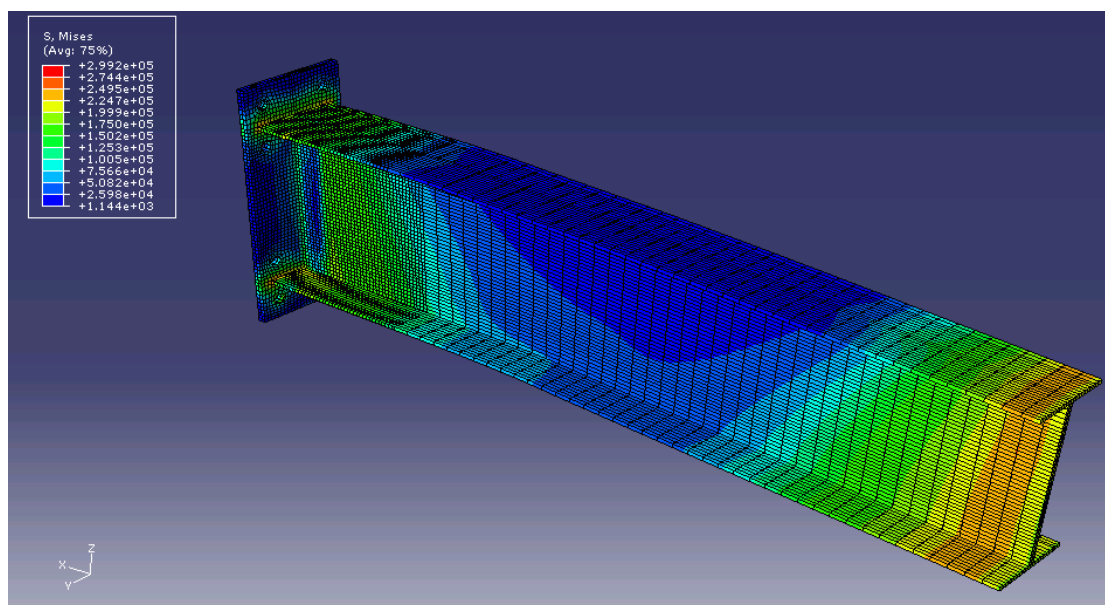
**Εικόνα 4.12.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην κατασκευή

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises της κατασκευής μας αλλά και επιλεκτικά μεμονωμένα κάποιων κομματιών που την απαρτίζουν.

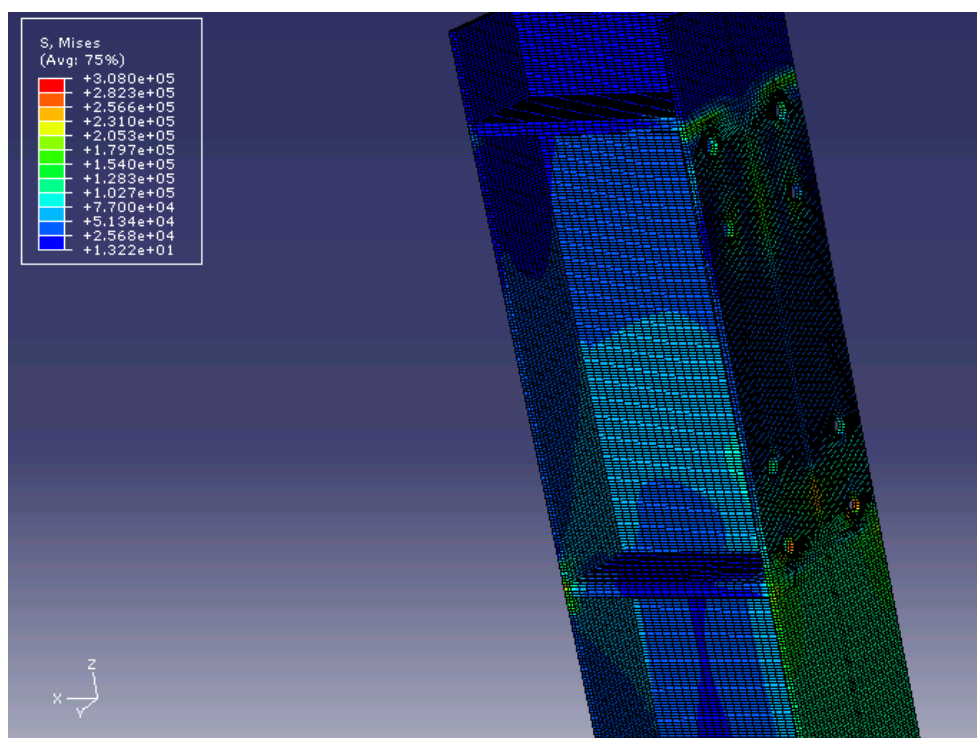


**Εικόνα 4.12.2:** Πλήρης διάταξη

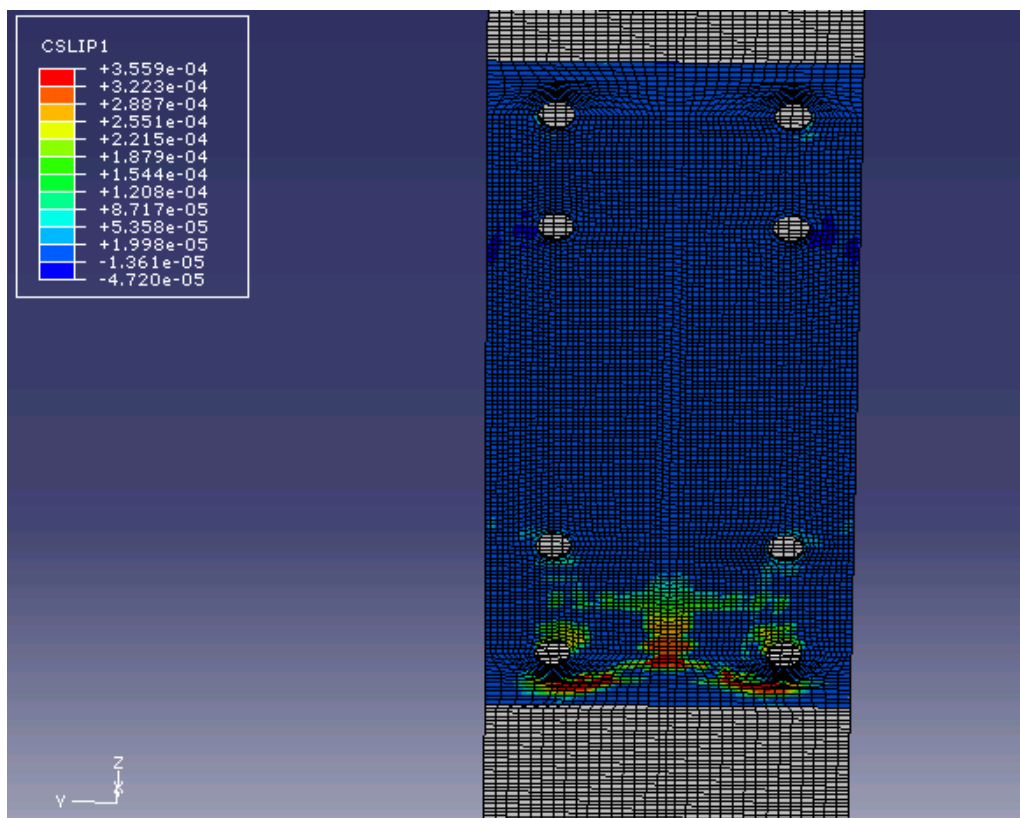
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,032 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,332 \cdot 10 \text{ KPa}$  )



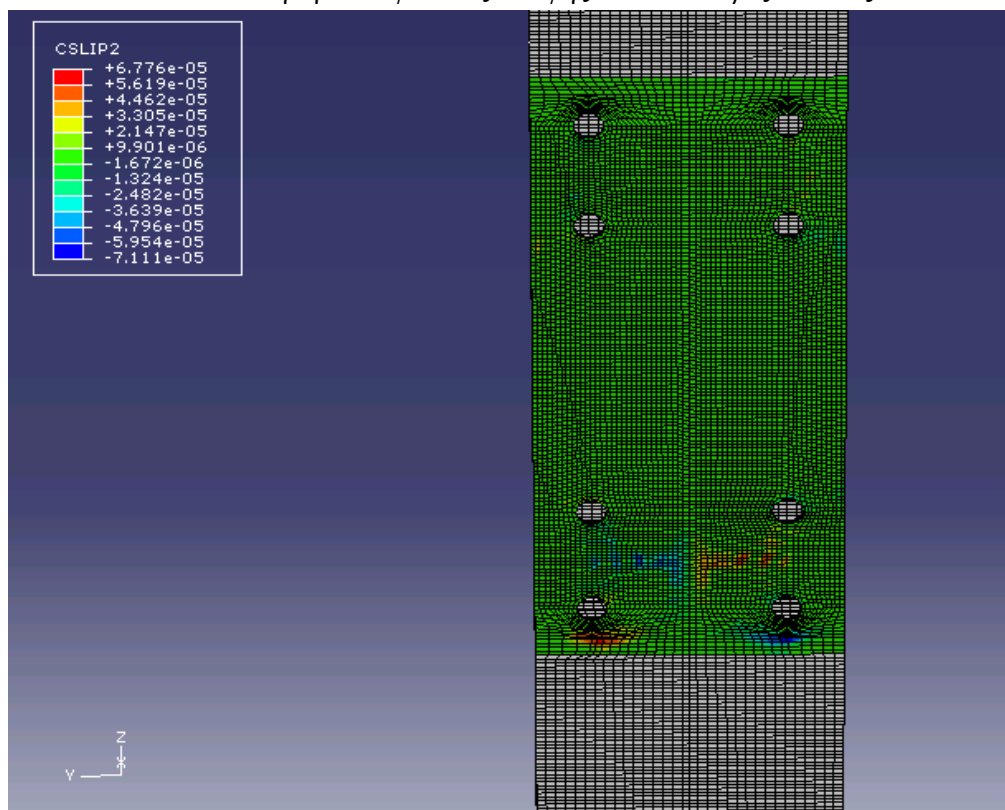
**Εικόνα 4.12.3: Οριζόντια δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,992 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,144 \cdot 10^3 \text{ KPa}$  )



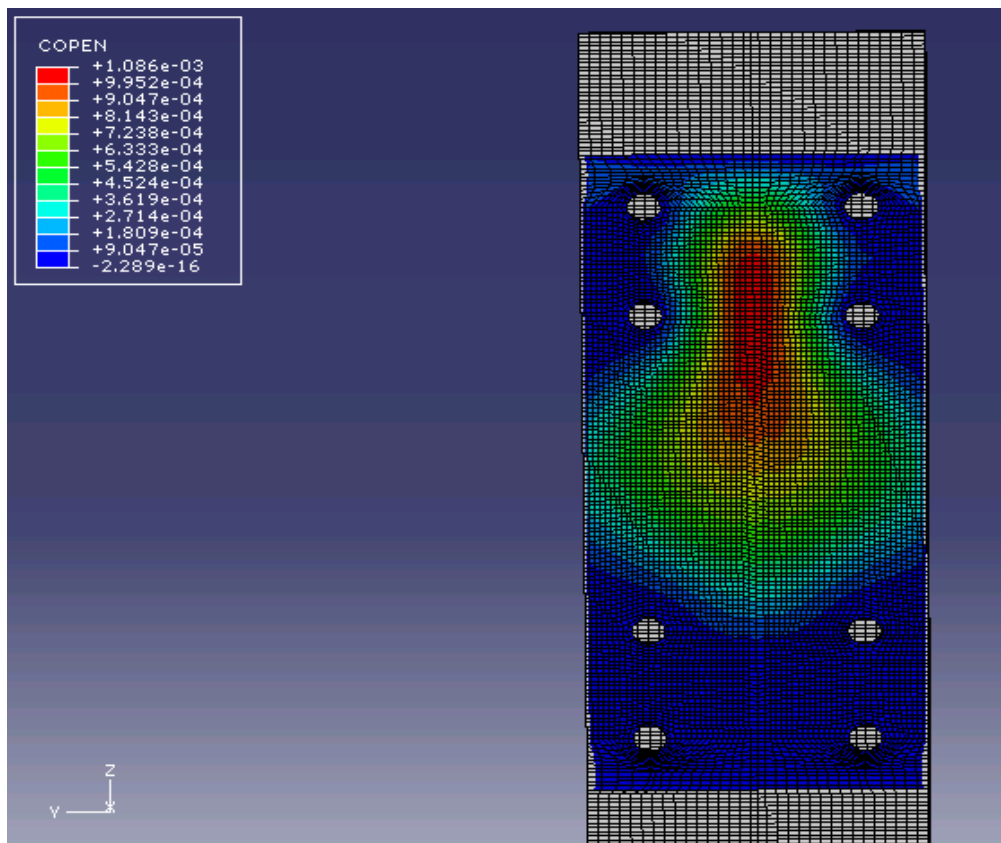
**Εικόνα 4.12.4: Κάθετος στύλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,080 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,332 \cdot 10 \text{ KPa}$  )



**4.12.5:** Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

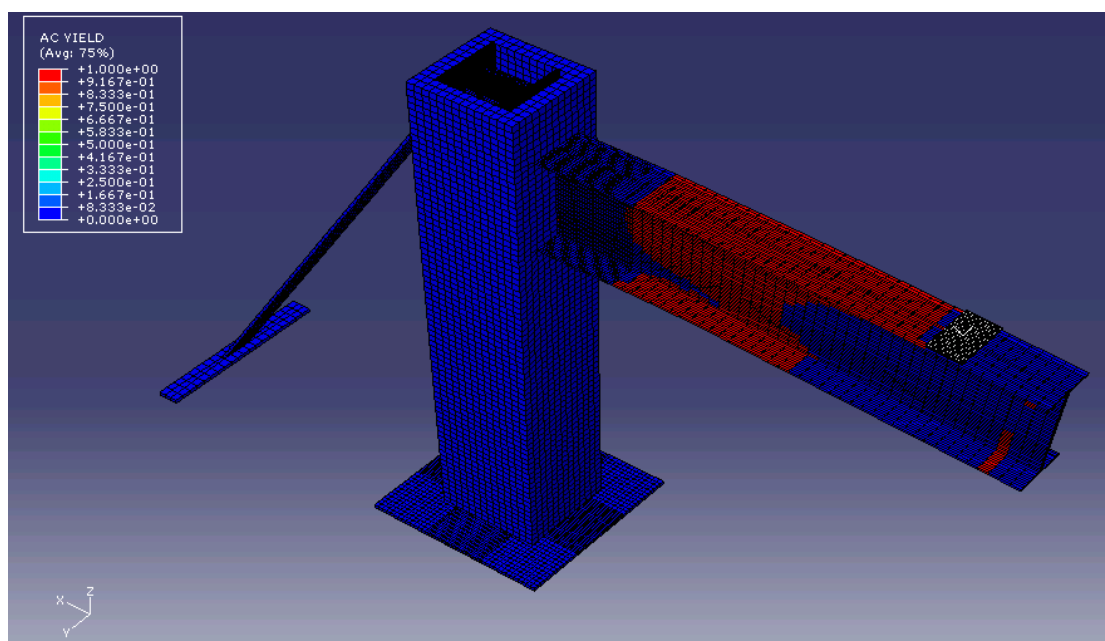


**Εικόνα 4.12.6:** Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.12.7:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

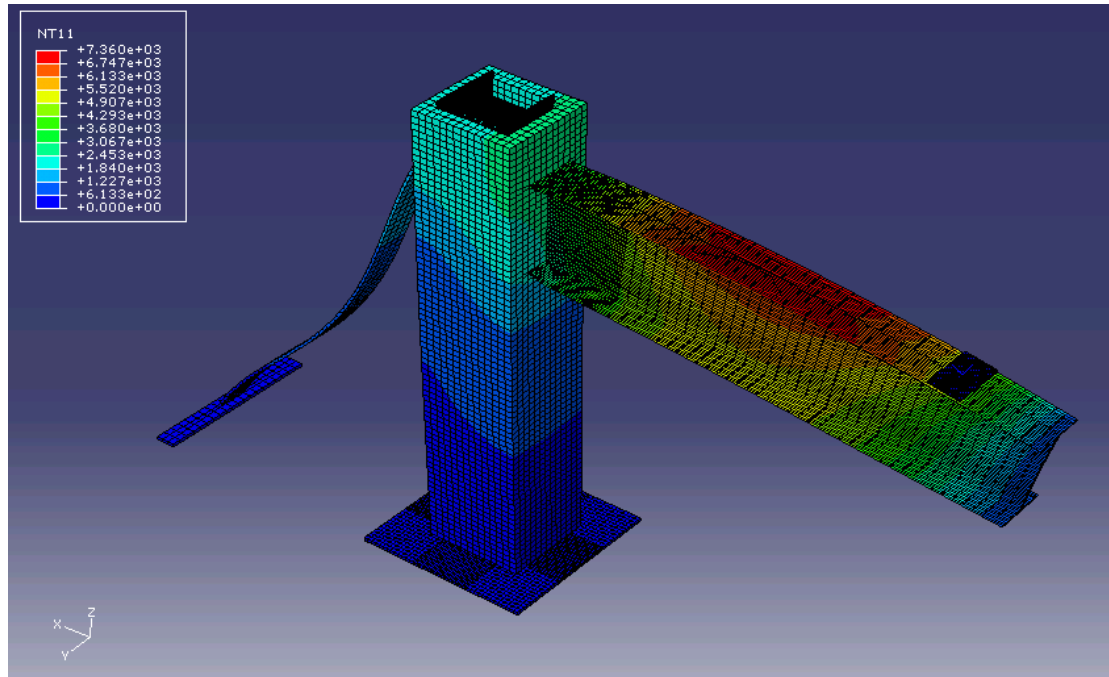
Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές που ο φορέας έχει διαρρεύσει εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου von.Mises.



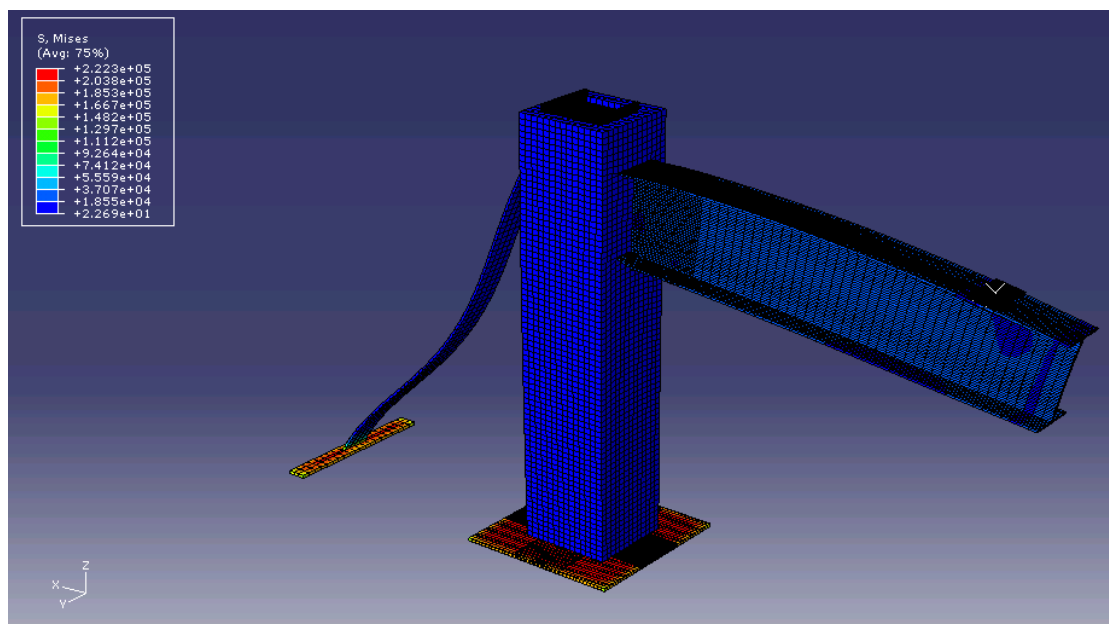
**Εικόνα 4.12.8:** Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

#### 4.13 Θερμομηχανική Ανάλυση (διαφορετικό step)- Σενάριο 13

Στη συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας, όπου έχουμε επενέργεια πρώτα του θερμικού φορτίου και του μηχανικού να ακολουθεί σε επόμενο step. Το θερμικό φορτίο είναι τα αποτελέσματα που προέκυψαν της θερμικής ανάλυσης του σεναρίου 11. Η μέγιστη θερμοκρασία στη κατασκευή φτάνει τους 7.360 °C.

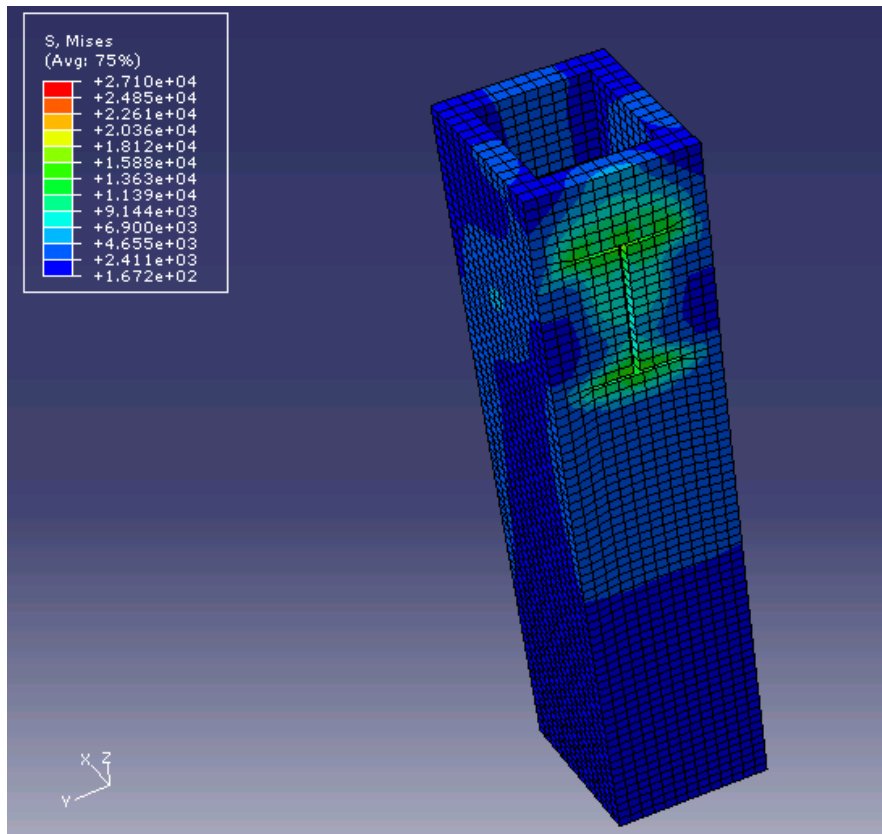


Εικόνα 4.13.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στην κατασκευή

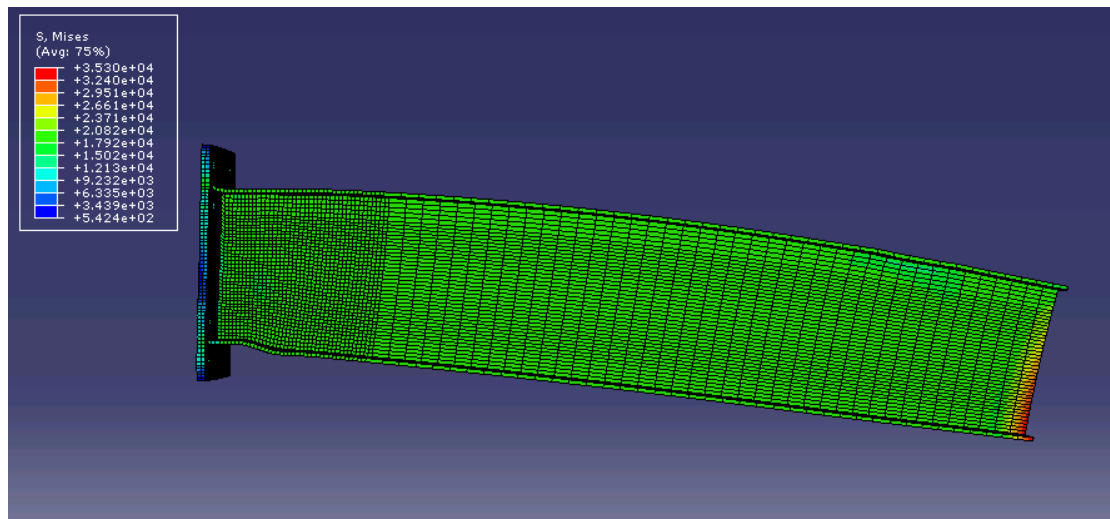


Εικόνα 4.13.2: Πλήρης διάταξη

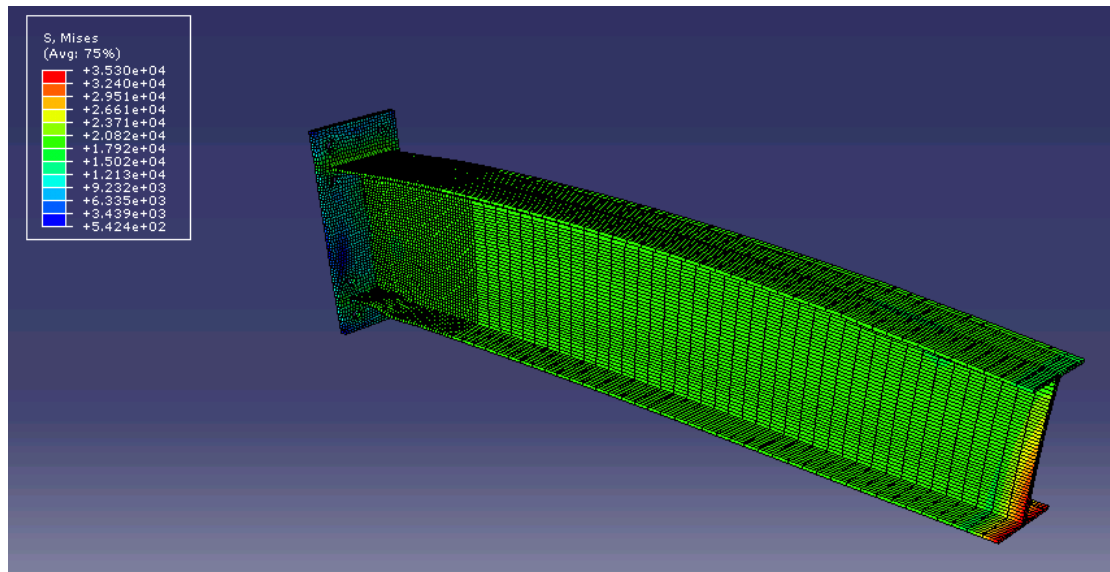
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,223 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,269 \cdot 10$  KPa )



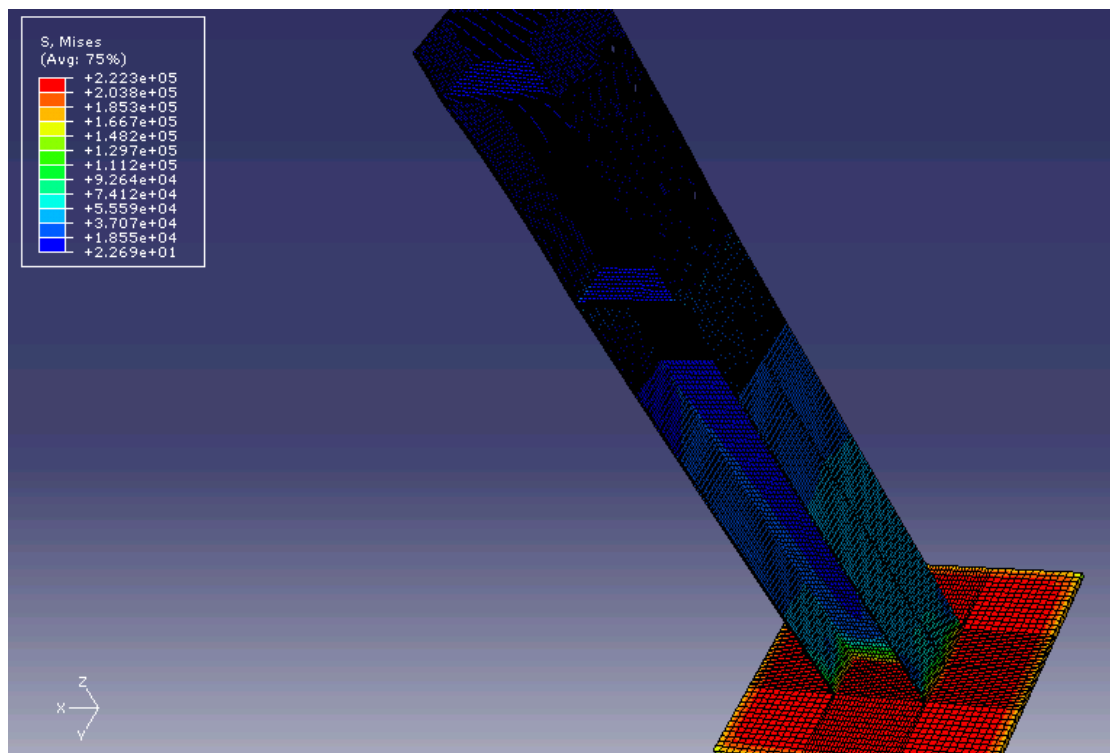
**Εικόνα 4.13.3:** Πυράντοχη επικάλυψη  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,710 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,672 \cdot 10^2 \text{ KPa}$  )



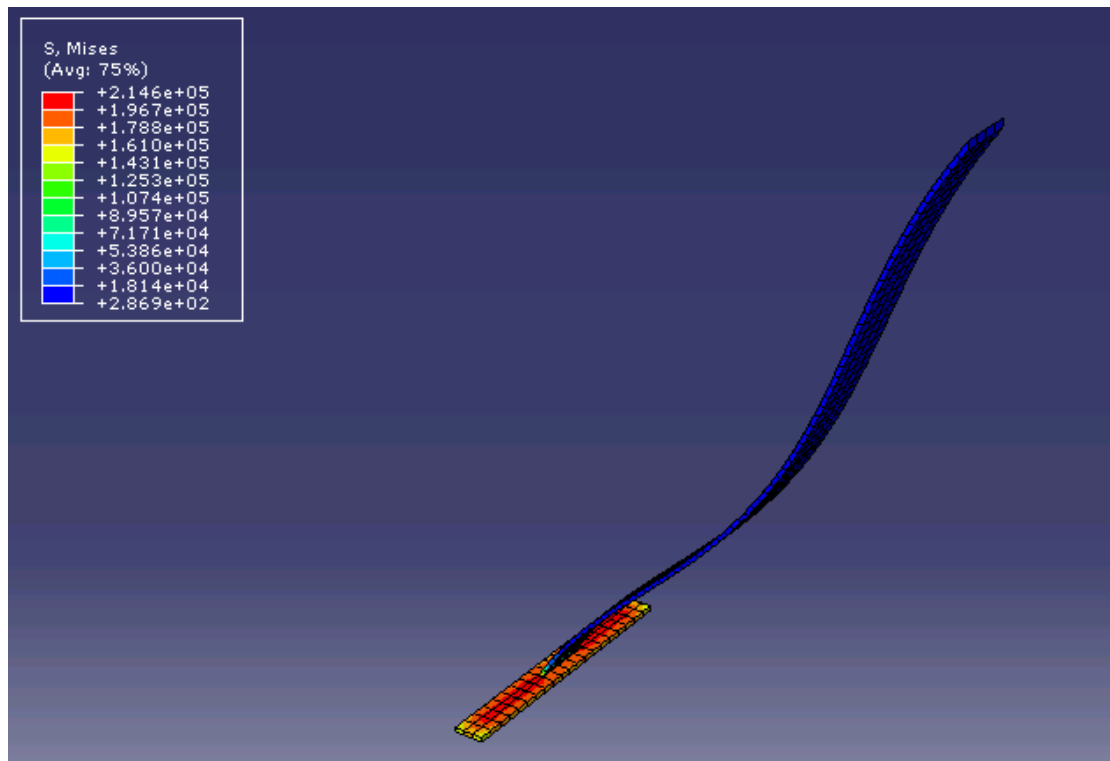
**Εικόνα 4.13.4:** Οριζόντια δοκός  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,530 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $5,424 \cdot 10^2 \text{ KPa}$  )



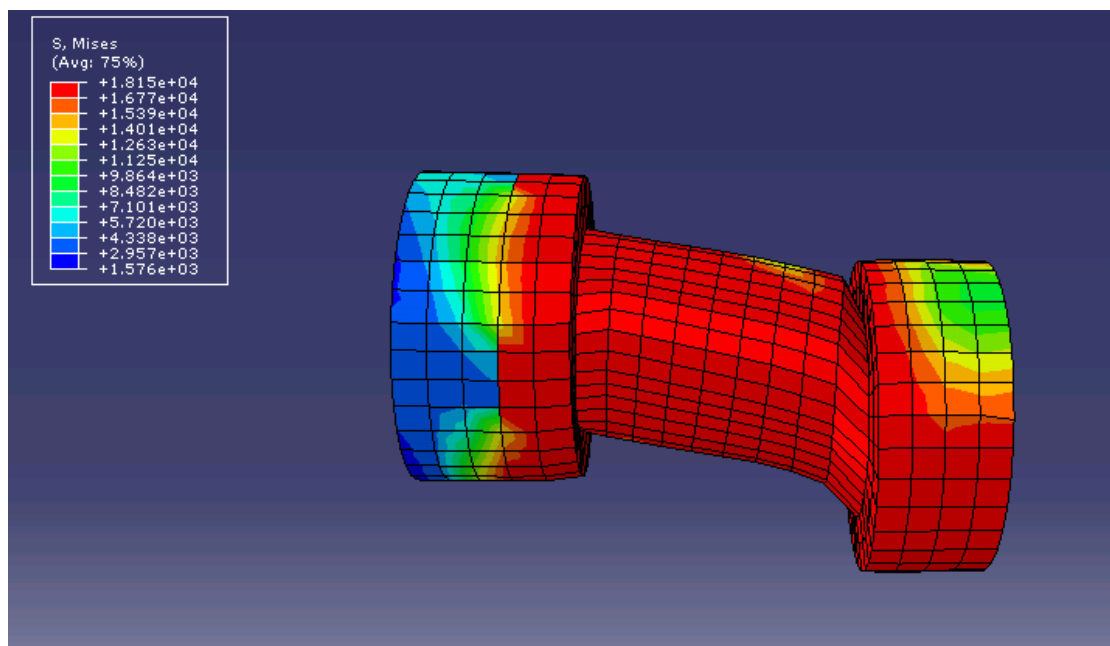
**Εικόνα 4.13.5: Οριζόντια δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,530 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $5,424 \cdot 10^2 \text{ KPa}$  )



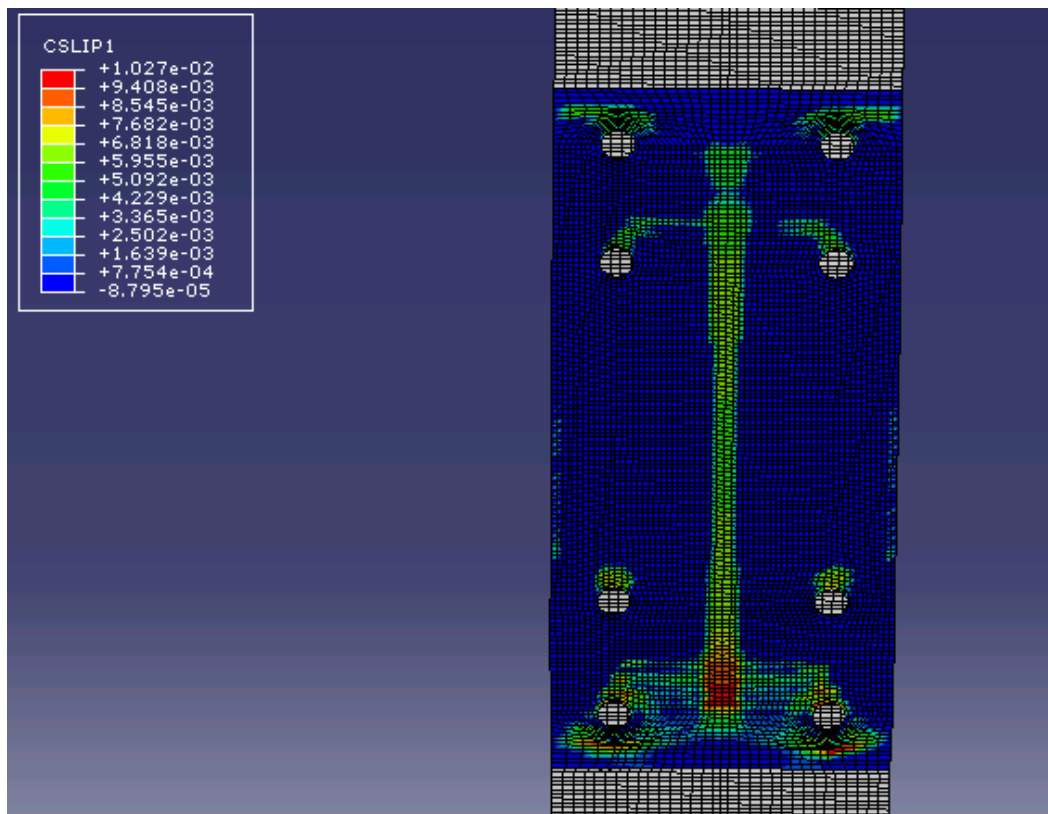
**Εικόνα 4.13.6: Κάθετος στύλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,223 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,269 \cdot 10 \text{ KPa}$  )



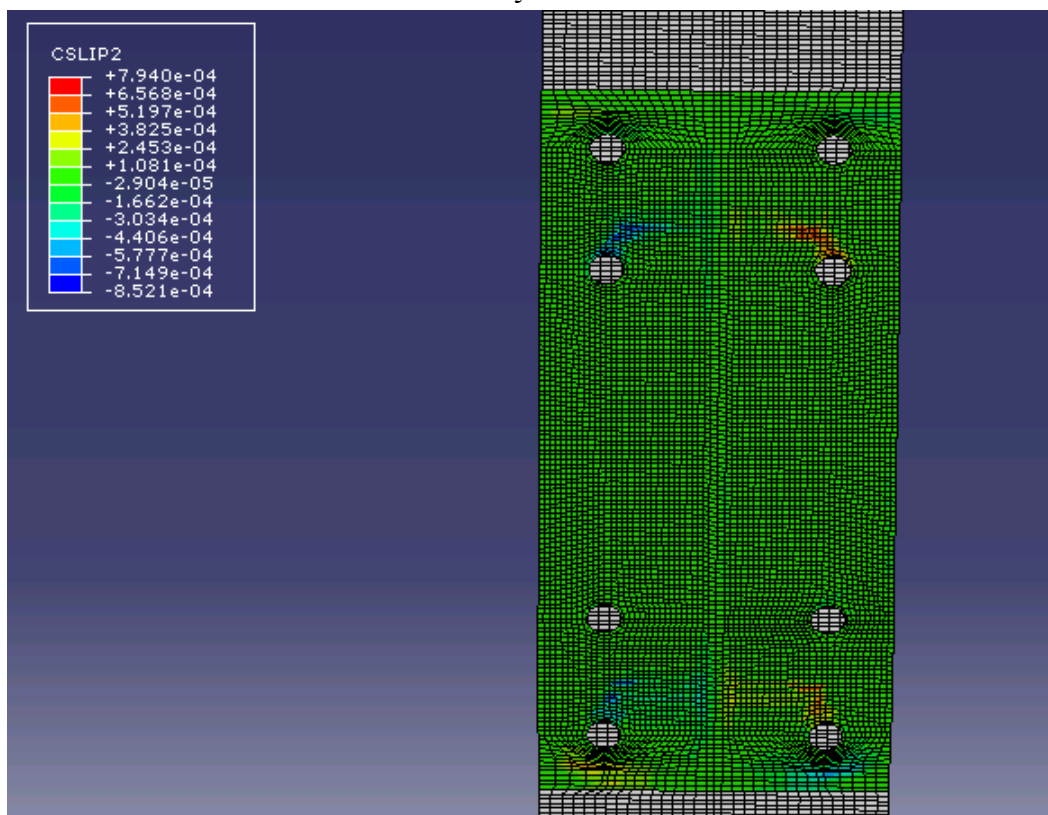
**Εικόνα 4.13.7:** Βοηθητική δοκός  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,146 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,869 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ )



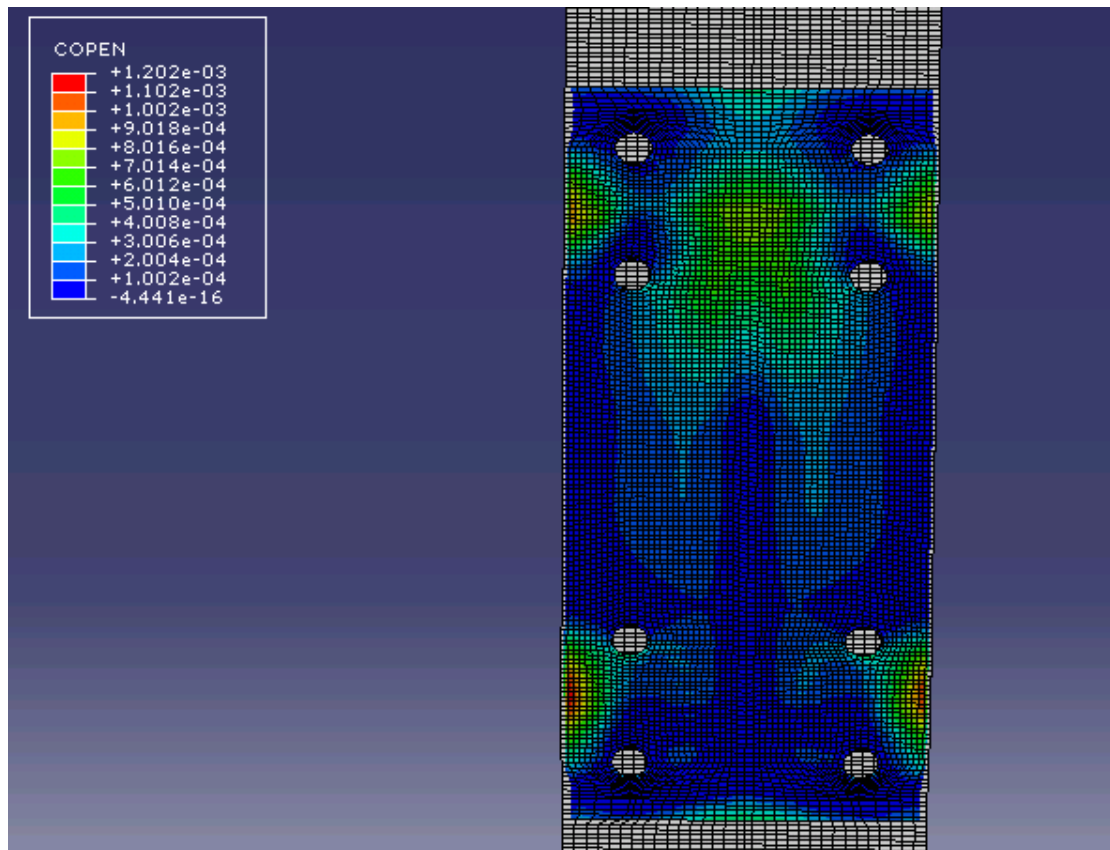
**Εικόνα 4.13.8:** Κοχλίας 8-1  
(Μέγιστη καταπόνηση  $1,815 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,576 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )



**Εικόνα 4.13.9:** Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

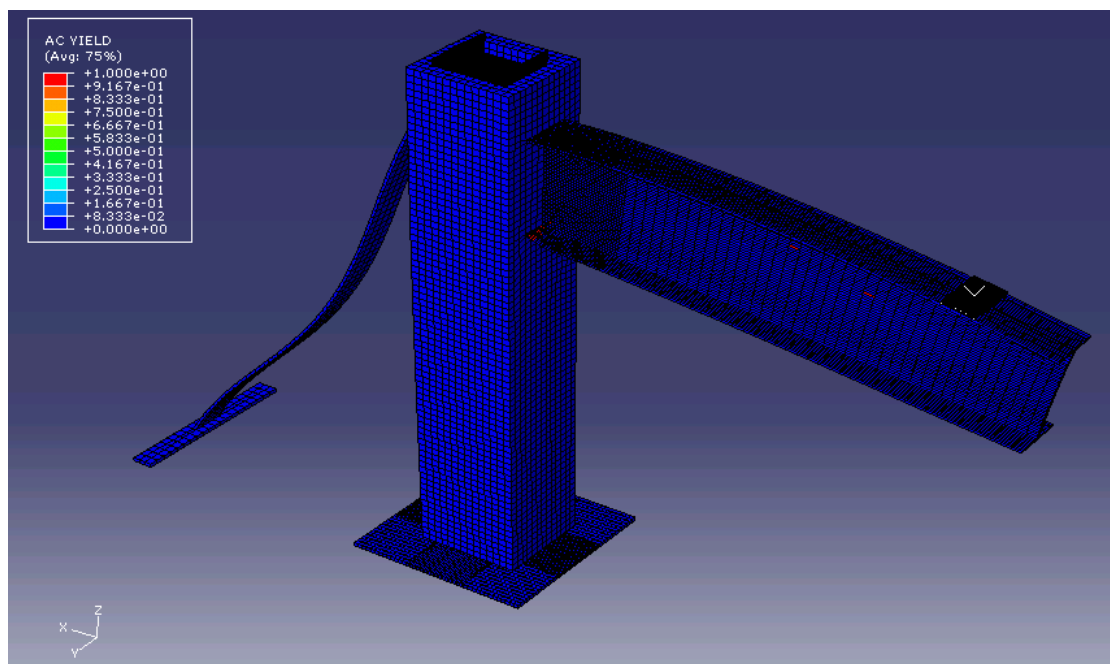


**Εικόνα 4.13.10:** Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.13.11:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

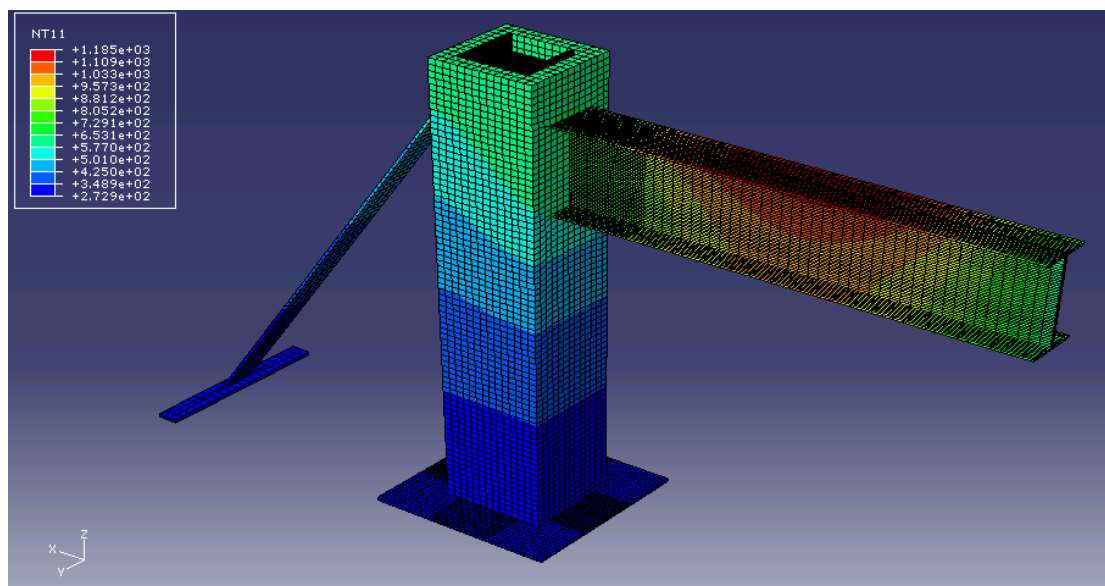
Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές που ο φορέας έχει διαρρεύσει εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου von.Mises.



**Εικόνα 4.13.12:**Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

#### 4.14 Θερμική Ανάλυση (σκυρόδεμα) - Σενάριο 14

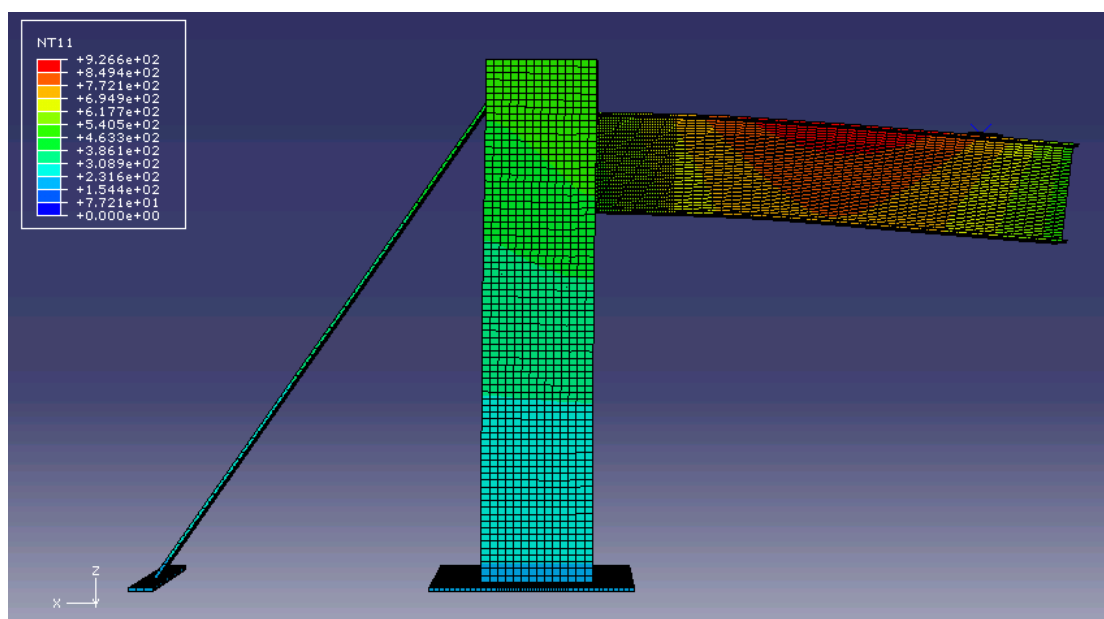
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην κατασκευή και στα σημεία ένωσης της οριζόντιας δοκού με τη πυράντοχη επικάλυψη, αλλά και τον στύλο για πυράντοχο υλικό σκυρόδεμα. Να σημειωθεί πως α αποτελέσματα της συγκεκριμένης θερμικής ανάλυσης δεν διαφοροποιούνται από αυτής του σεναρίου 2 (άσκηση θερμικού φορτίου 2 στο ίδιο step) καθώς η θερμική ανάλυση είναι γραμμική και ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στη κατασκευή μας με τη μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη κατασκευή μας να είναι  $1.185^{\circ}\text{C}$ .



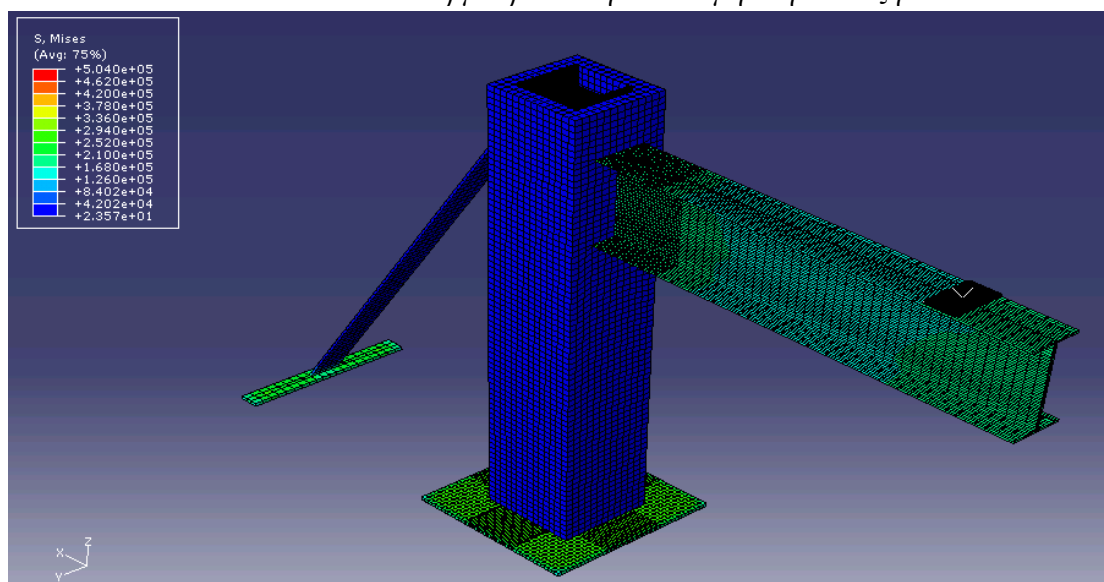
**Εικόνα 4.14.1:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία  $1.185^{\circ}\text{C}$  και ελάχιστη θερμοκρασία  $272,9^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.15 Θερμομηχανική Ανάλυση (σκυρόδεμα) -Σενάριο 15

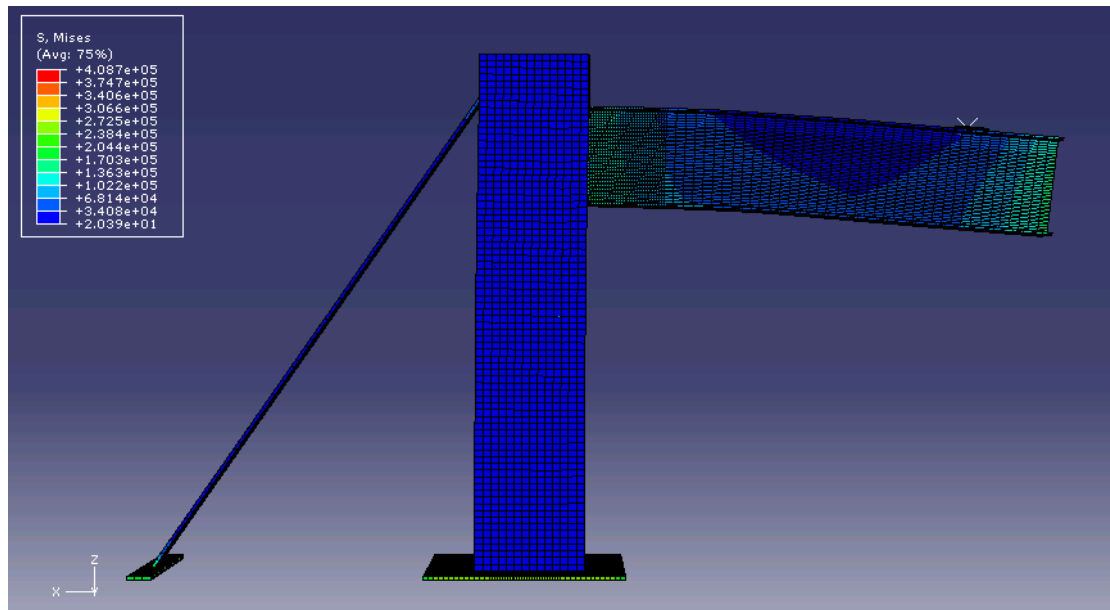
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στην κατασκευή μας κατά της αστοχία. Στη συγκεκριμένη επίλυση έχουμε τέσσερα διαφορετικά step, με τη μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει στους 926,6 οC. Στην εικόνα 4.15.2 παρουσιάζεται η διάταξη μετά την ολοκλήρωση του step2 (step 1 επίδραση του θερμικού φορτίου) όπου έχουμε άσκηση μηχανικού φορτίου 50kN (step 2).Ομοίως στην εικόνα 4.15.3 παρουσιάζεται η μέγιστη και ελάχιστη καταπόνηση μετά και την ολοκλήρωση και του step 3(άσκηση του υπόλοιπου θερμικού φορτίου τάξης  $1\text{kW/m}^2$ ), όπου και ολοκληρώνεται η ανάλυσή μας.



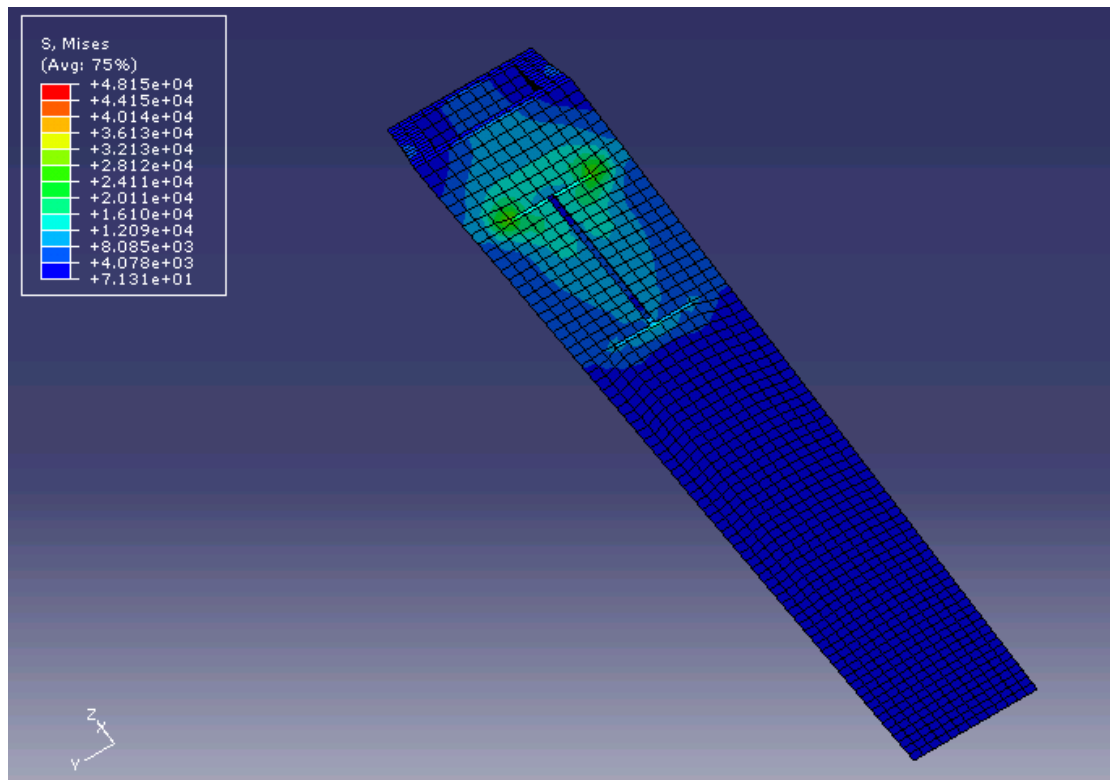
Εικόνα 4.15.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη.



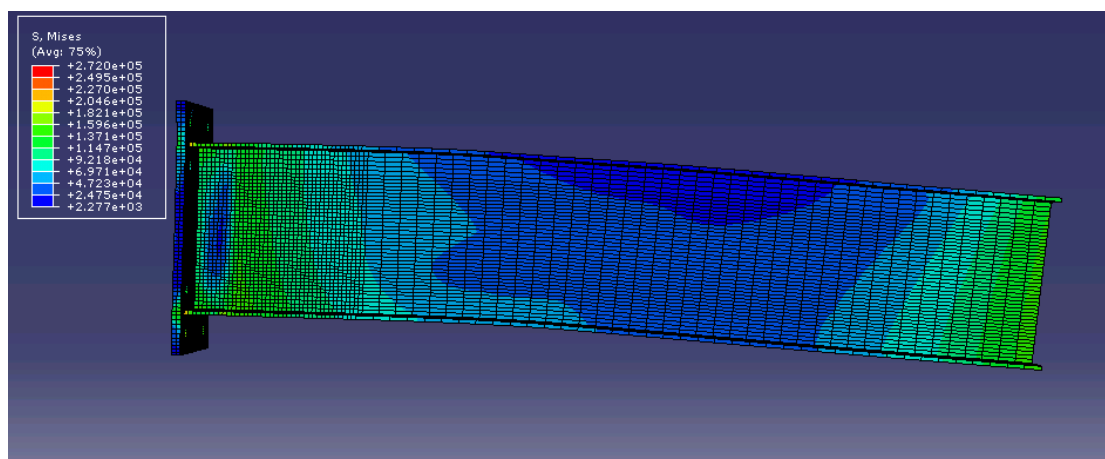
Εικόνα 4.15.2:Πλήρης διάταξη μετά και την ολοκλήρωση του step 2  
(Μέγιστη καταπόνηση  $5,040 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,357 \cdot 10 \text{ KPa}$ )



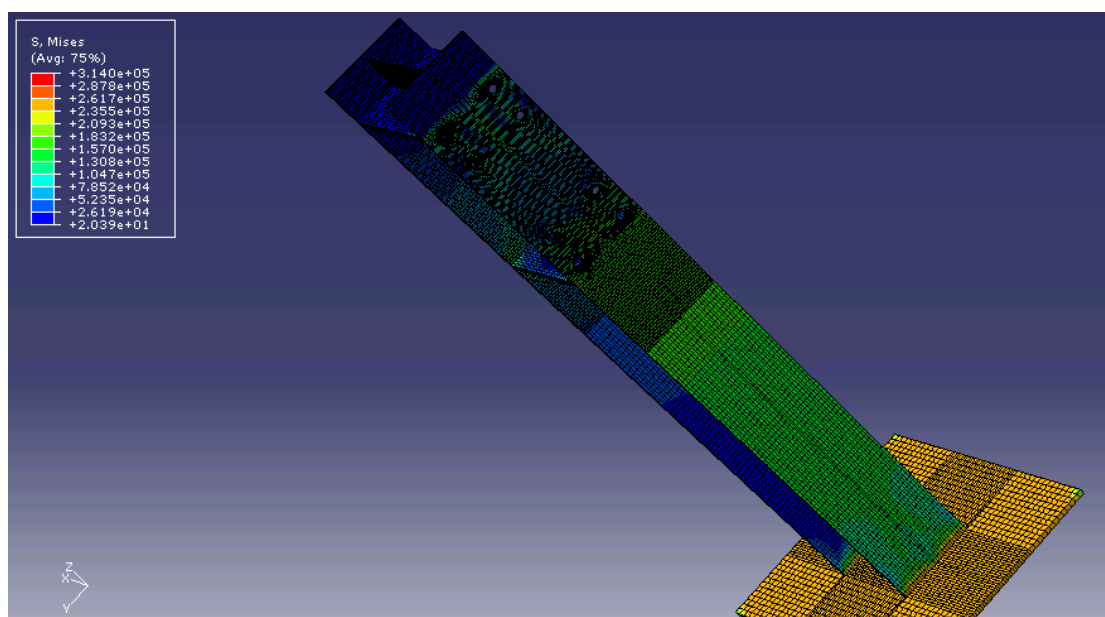
**Εικόνα 4.15.3:** Πλήρης διάταξη μετά και την ολοκλήρωση του step 3  
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,087 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,039 \cdot 10$  KPa)



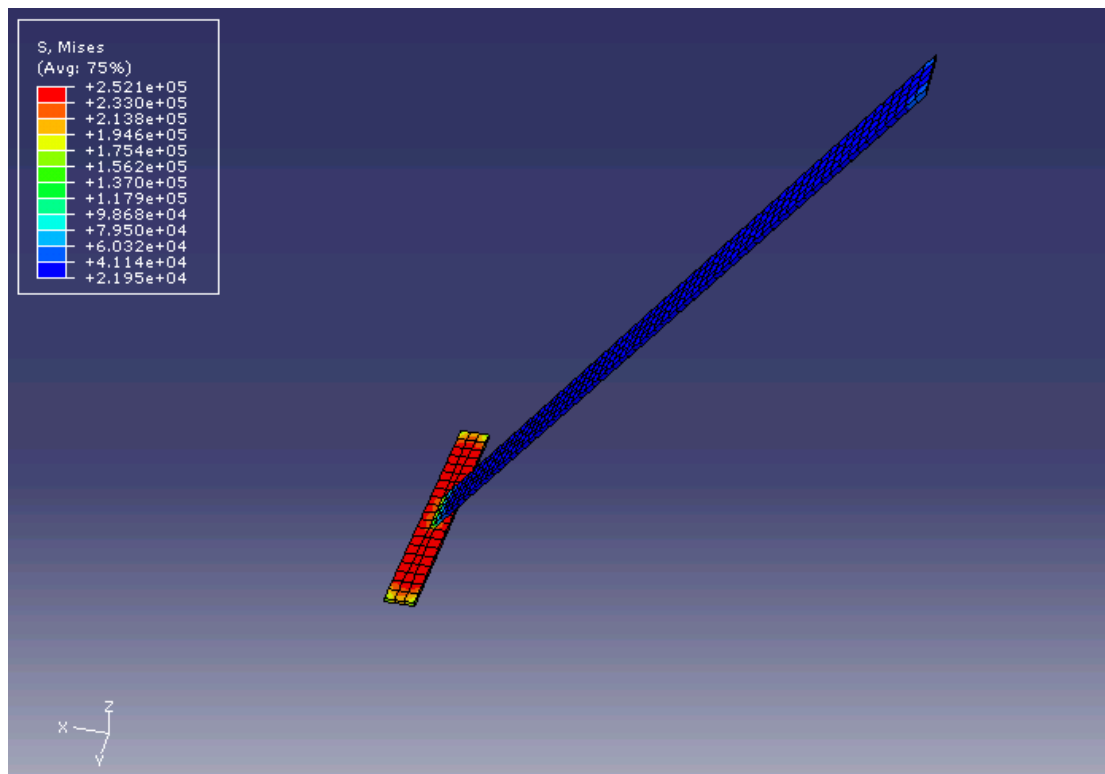
**Εικόνα 4.15.3:** Κάθετος στύλος  
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,815 \cdot 10^4$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $7,131 \cdot 10^1$  KPa)



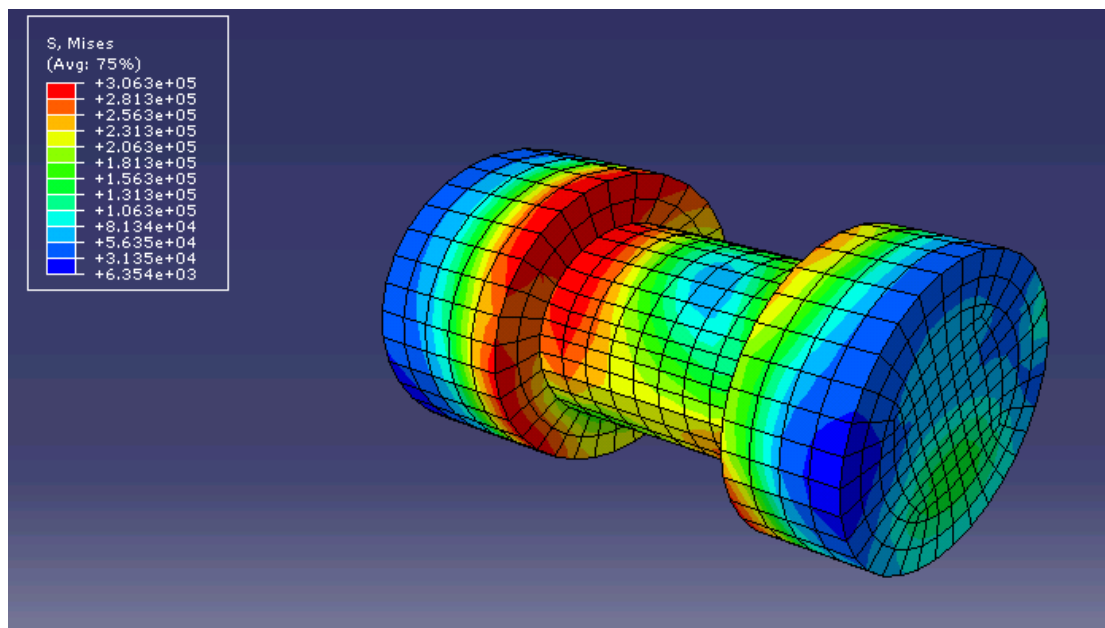
**Εικόνα 4.15.4 :Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,720 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,277 \cdot 10^3$  KPa)



**Εικόνα 4.15.5:Κάθετος Στύλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,140 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,039 \cdot 10$  KPa)

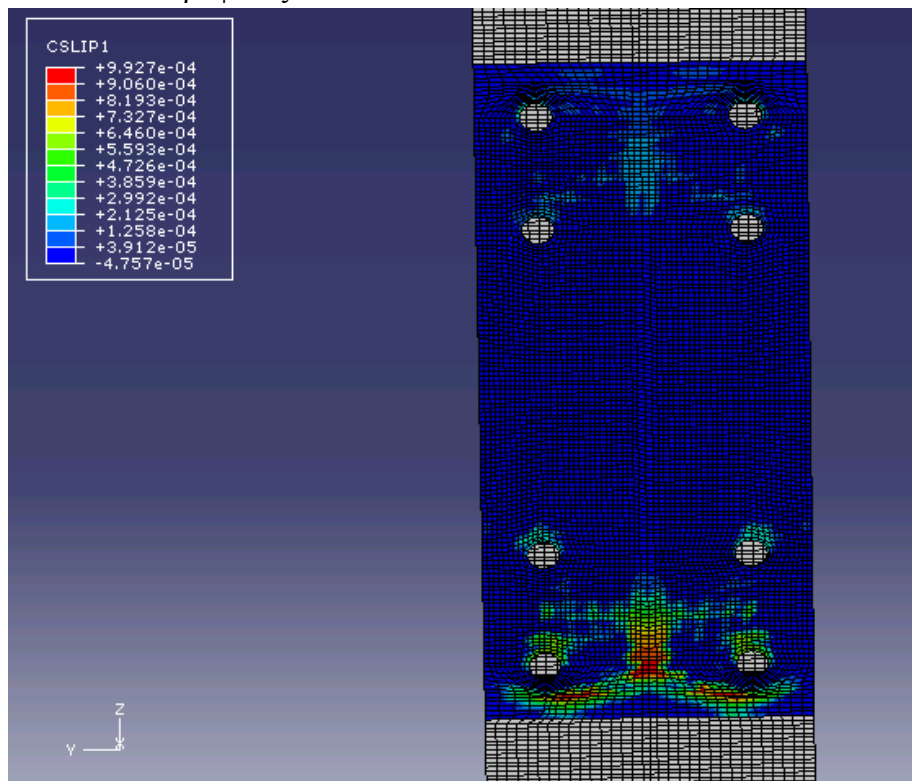


**Εικόνα 4.15.6 :Βοηθητική Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,521 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,195 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ )

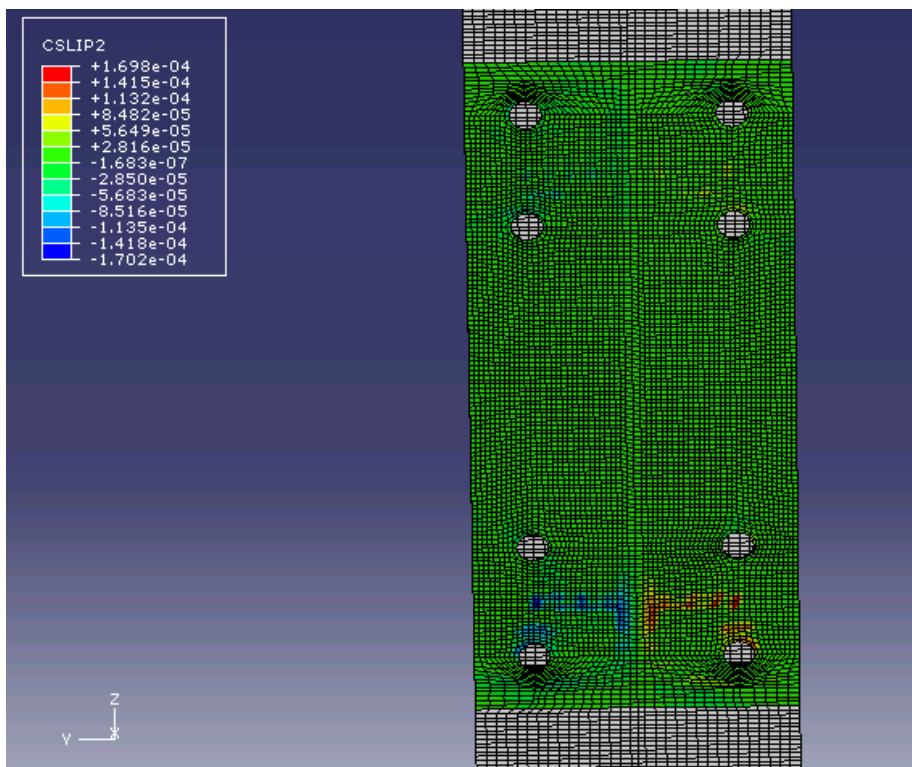


**Εικόνα 4.15.7:Κοχλίας 8-1**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,063 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $6,354 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )

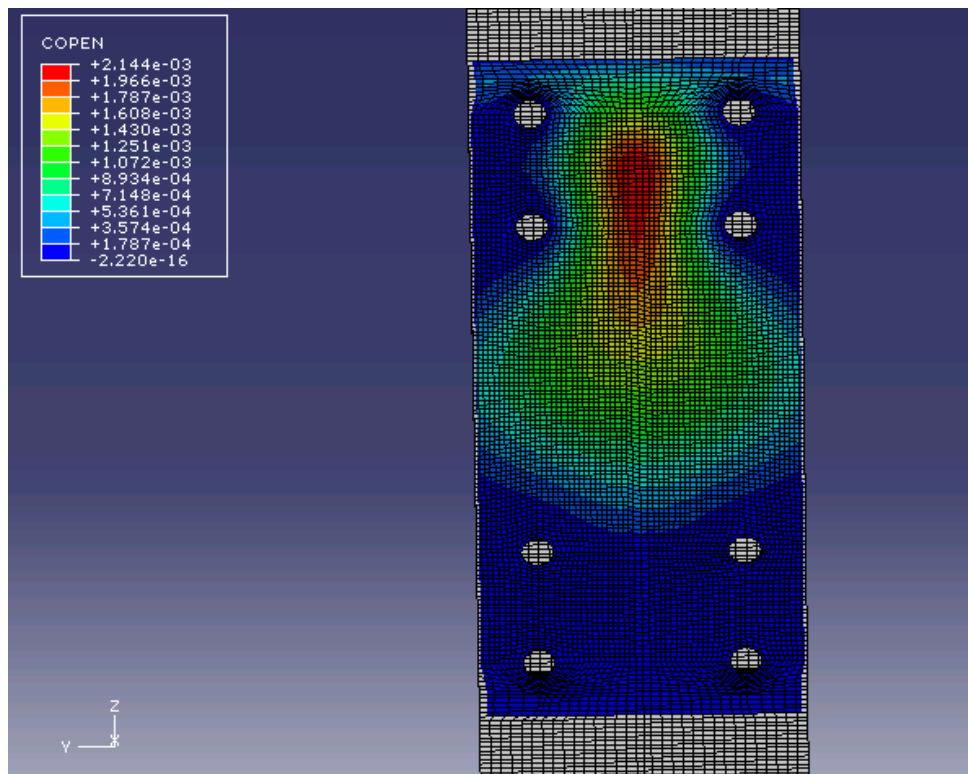
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα



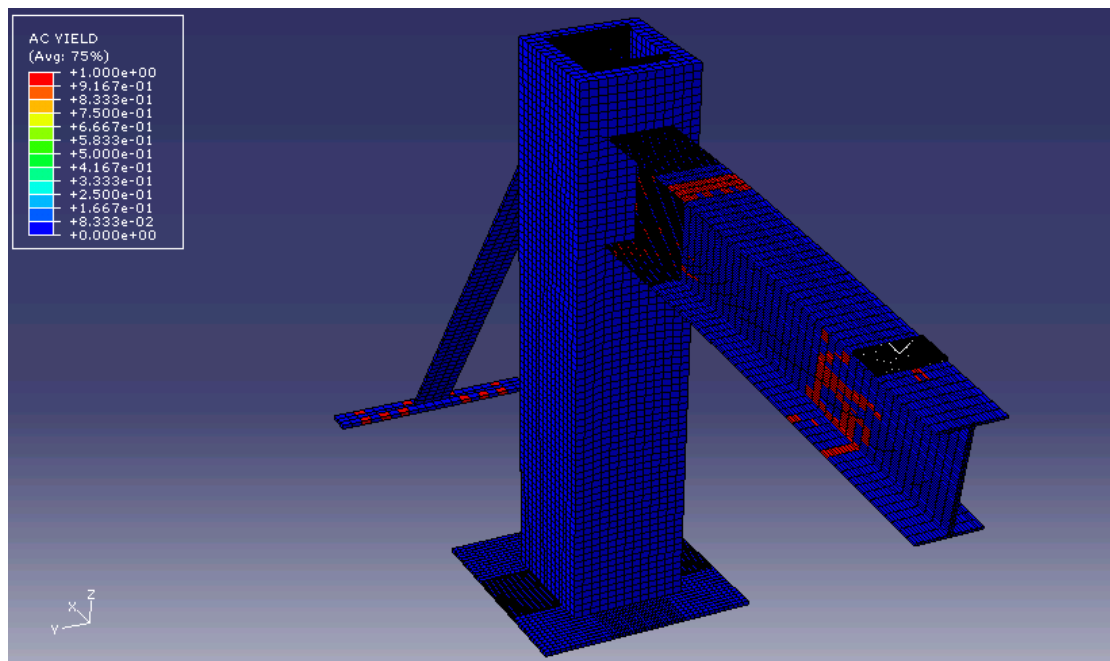
**Εικόνα 4.15.8:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



**Εικόνα 4.15.9:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



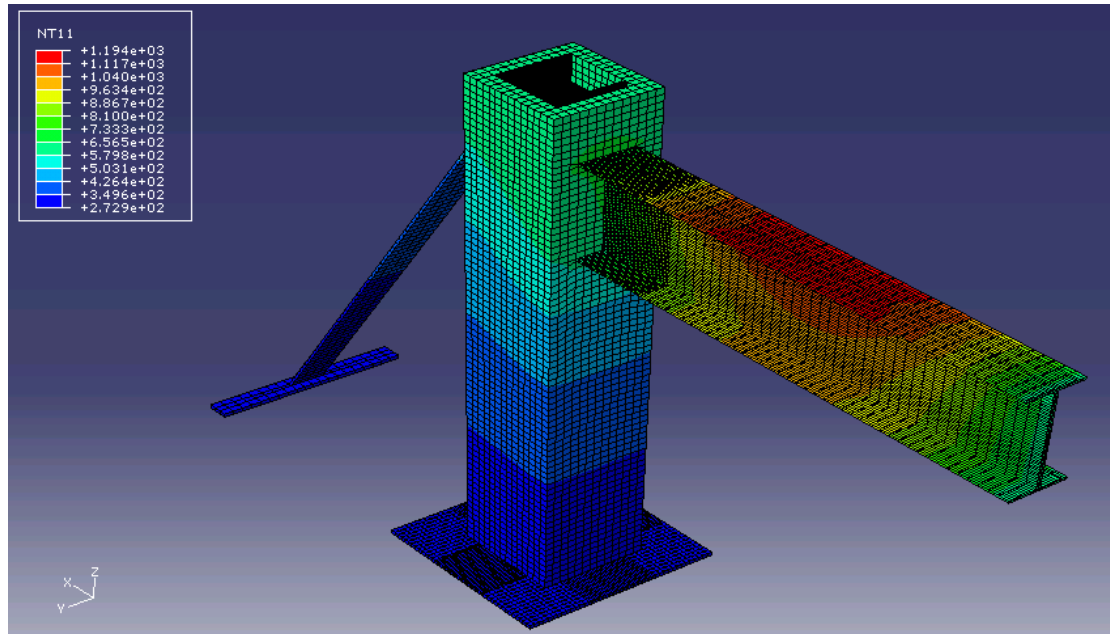
**Εικόνα 4.15.10:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας



**Εικόνα 4.15.11:** Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

#### 4.16 Θερμική Ανάλυση (γυψοσανίδα) – Σενάριο 16

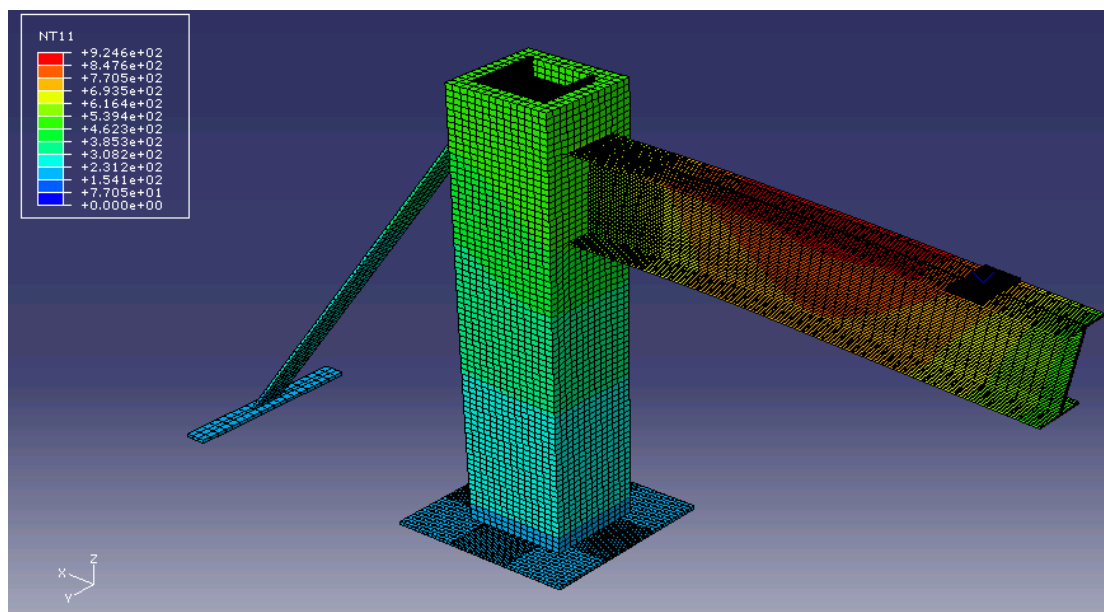
Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην κατασκευή μας με πυράντοχη επικάλυψη γυψοσανίδα. Ομοίως και εδώ (όπως και στο σενάριο 14) τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης θερμικής ανάλυσης δεν διαφοροποιούνται από αυτής του σεναρίου 5 καθώς η θερμική ανάλυση είναι γραμμική και ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η συνολική κατασκευή.



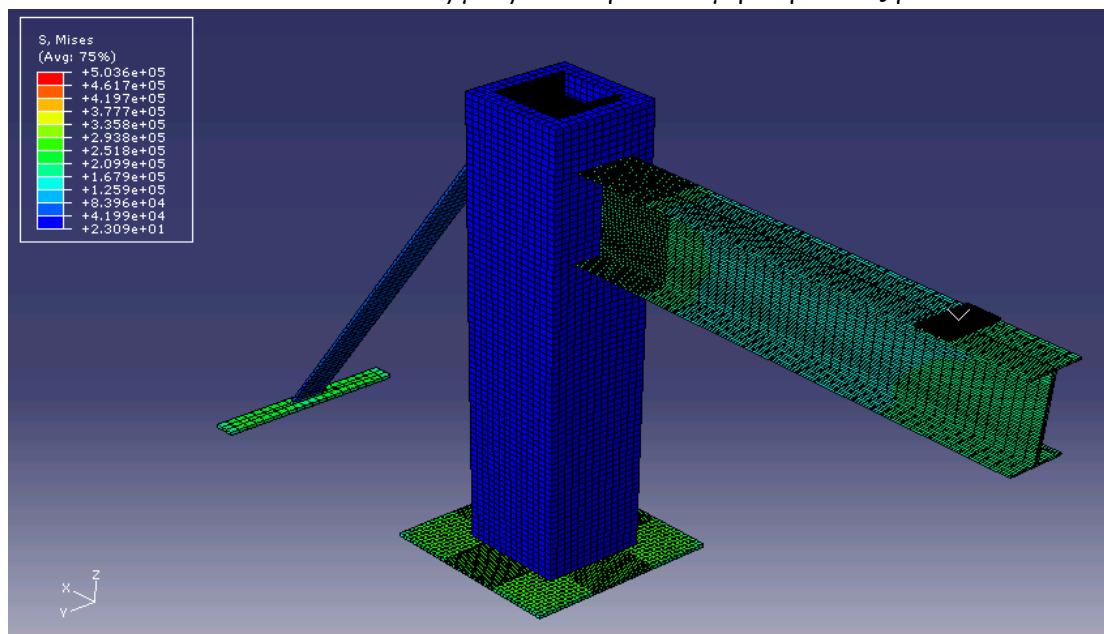
**Εικόνα 39:** Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη  
(Μέγιστη Θερμοκρασία 1.194 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 272,9 °C)

#### 4.17 Θερμομηχανική ανάλυση (γυψοσανίδα) -Σενάριο 17

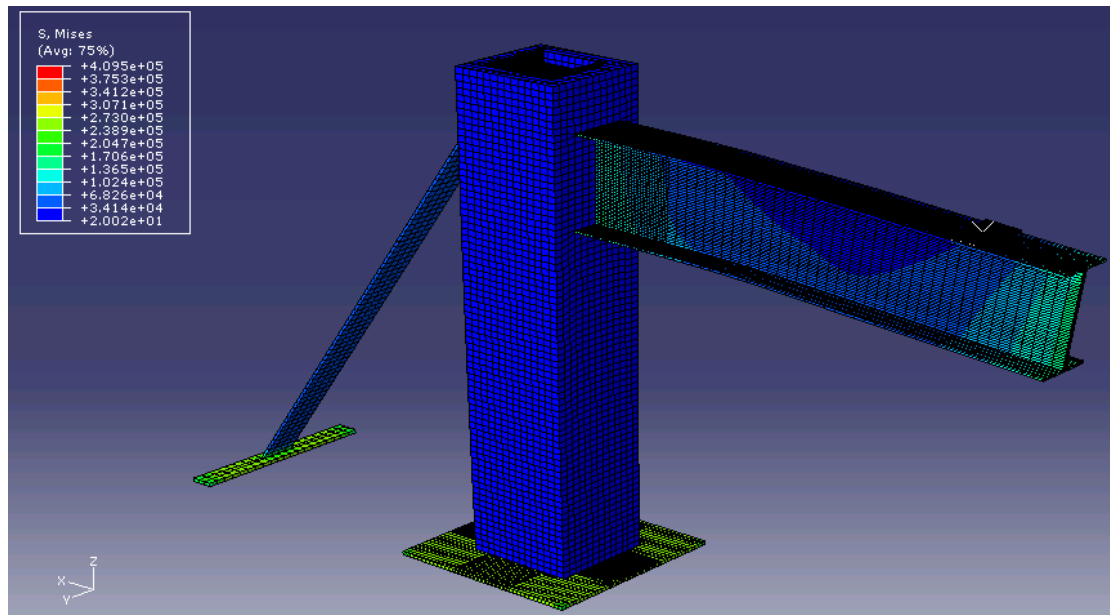
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η θερμομηχανική ανάλυση με τέσσερα διαφορετικά step. Η μέγιστη θερμοκρασία στη κατασκευή αγγίζει τους 924,6 °C. Στην εικόνα 4.17.2 παρουσιάζεται η καταπόνηση μετά και την ολοκλήρωση του δεύτερου step δηλαδή μετά την επίδραση του θερμικού φορτίου (step 1) και του μηχανικού 50kN (step 2). Ομοίως στην εικόνα 4.17.3 παρουσιάζεται η μέγιστη και ελάχιστη καταπόνηση μετά και την ολοκλήρωση και του step 3 (άσκηση του υπόλοιπου θερμικού φορτίου τάξης  $1\text{kW/m}^2$ ), όπου και ολοκληρώνεται η ανάλυσή μας.



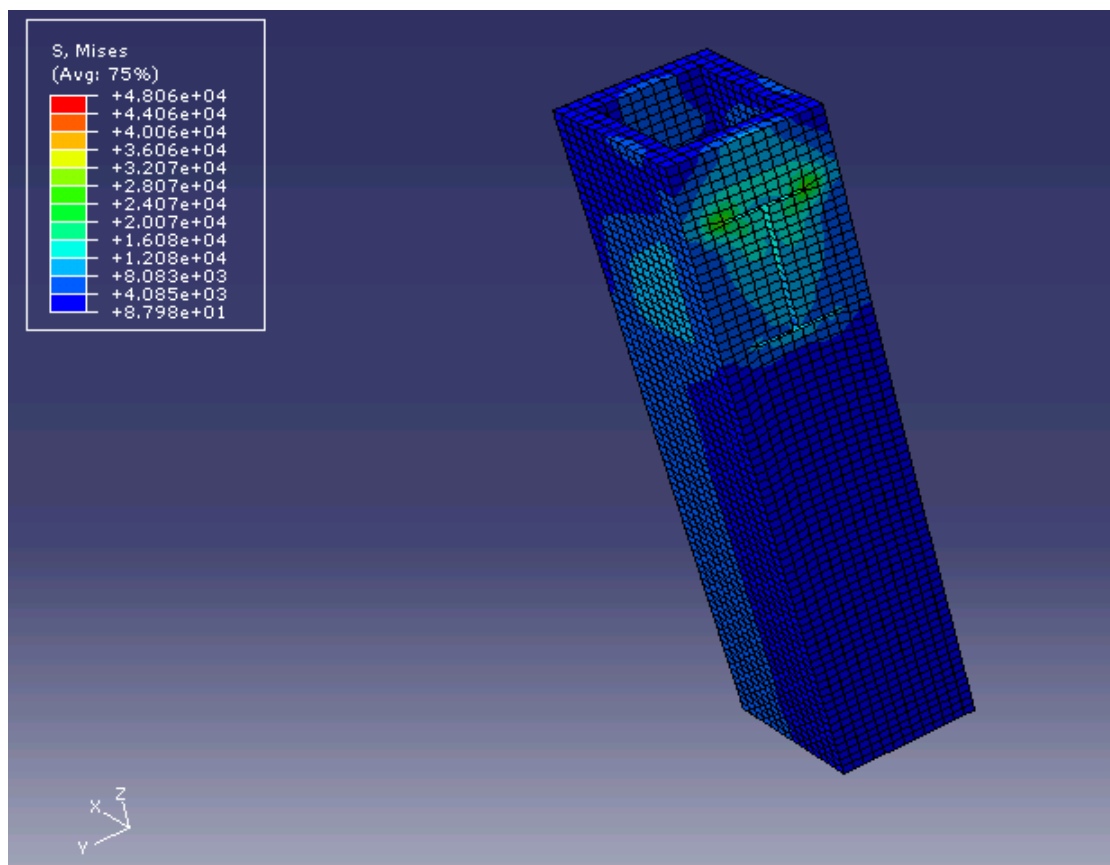
Εικόνα 4.17.1: Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη.



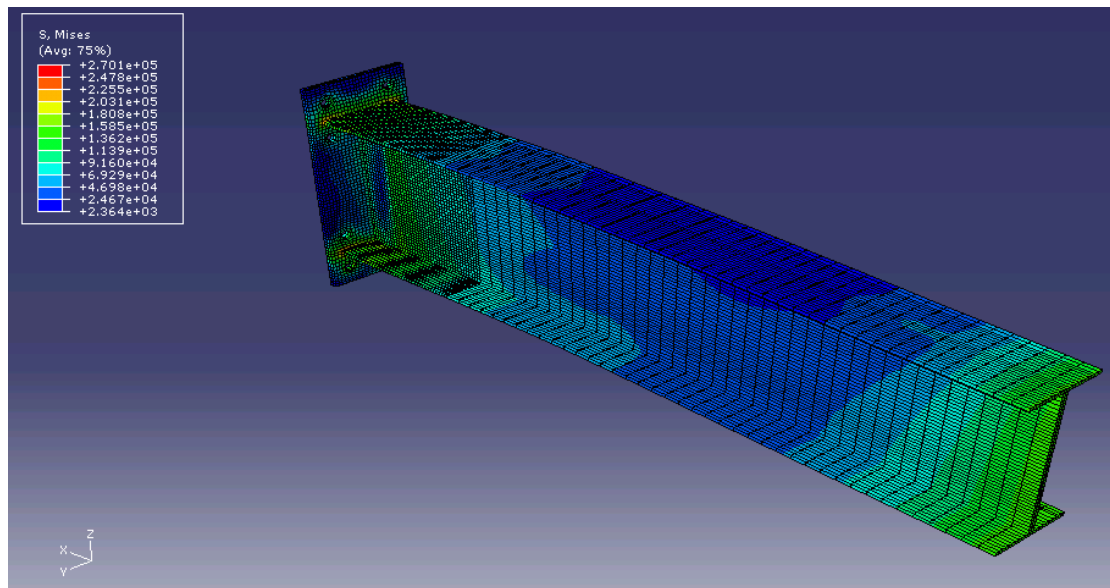
Εικόνα 4.17.2: Πλήρη διάταξη μετά και την ολοκλήρωση του step 2  
(Μέγιστη καταπόνηση  $5,036 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $2,309 \cdot 10 \text{ KPa}$  )



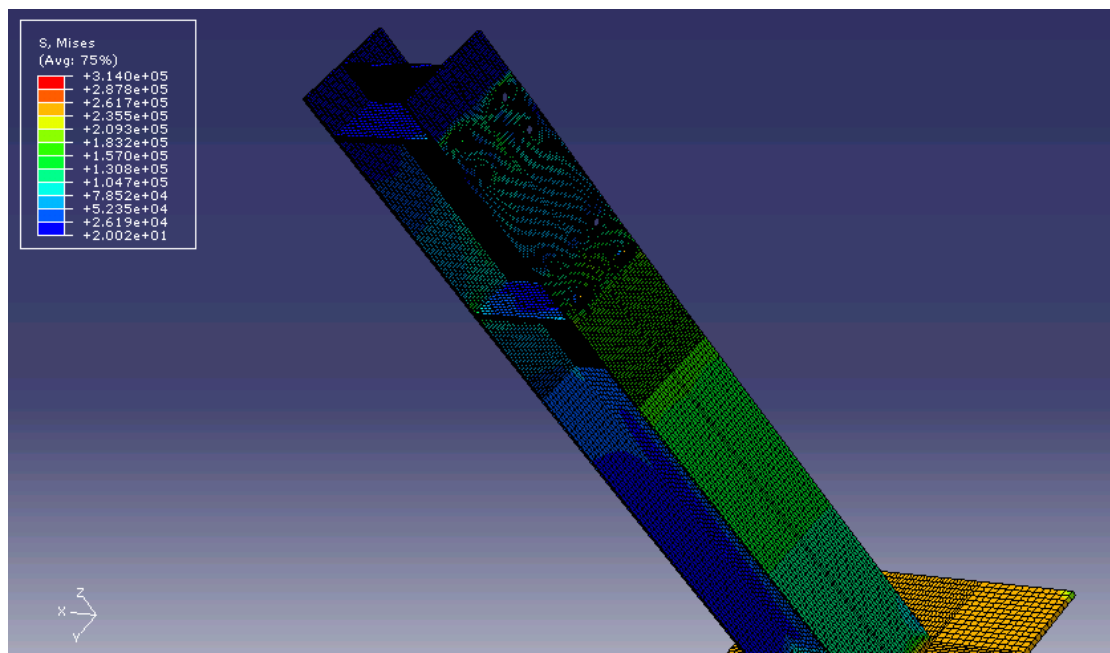
**Εικόνα 4.17.3:**Πλήρης διάταξη μετά και την ολοκλήρωση του step 3  
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,095 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,002 \cdot 10$  KPa)



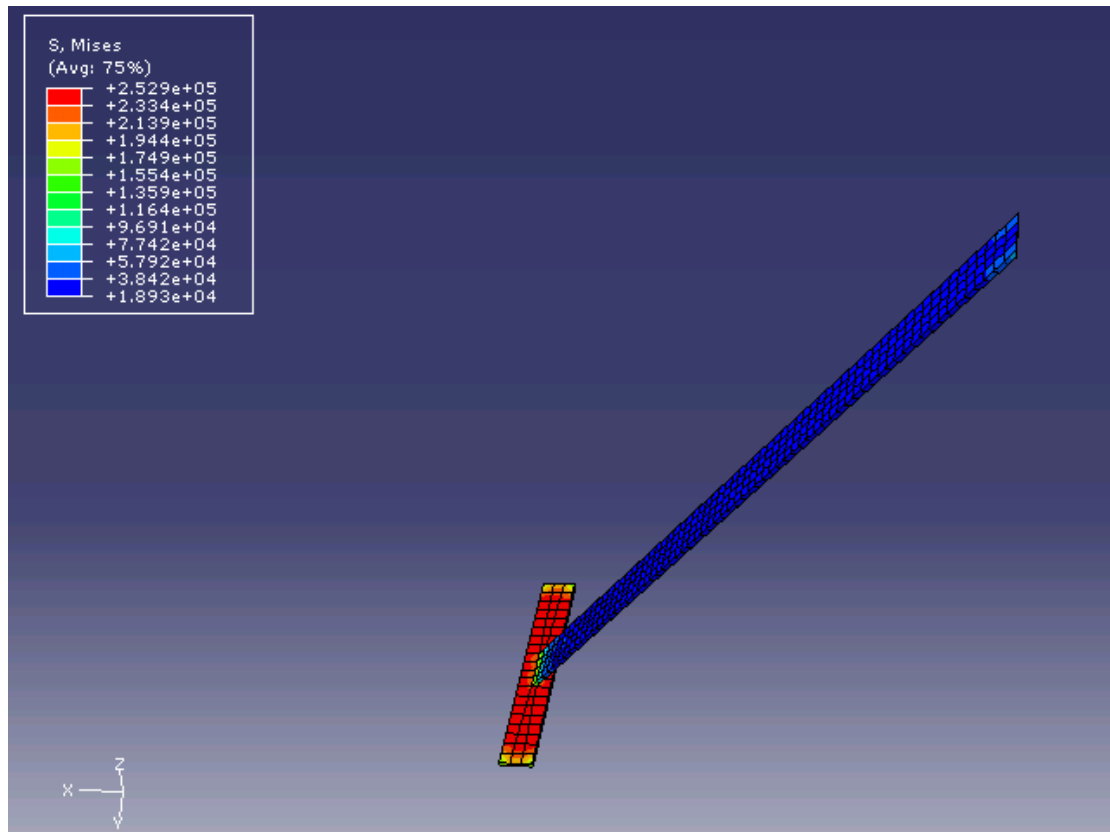
**Εικόνα 4.17.3:**Κάθετος στύλος  
(Μέγιστη καταπόνηση  $4,806 \cdot 10^4$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $8,798 \cdot 10^1$  KPa)



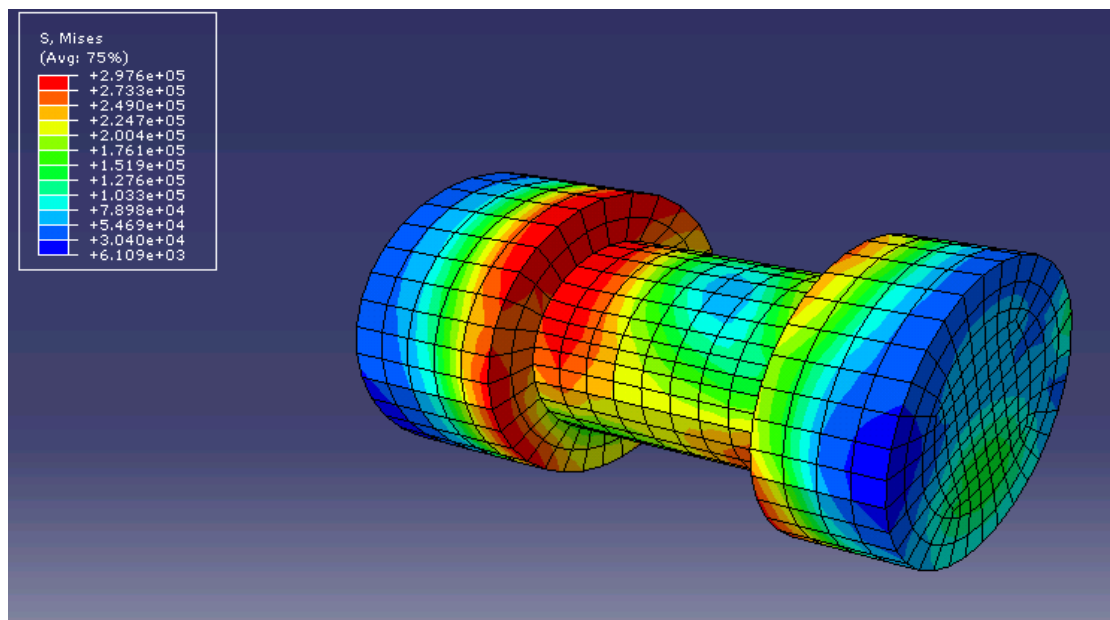
**Εικόνα 4.17.4 :Οριζόντια Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,701 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,364 \cdot 10^3$  KPa)



**Εικόνα 4.17.5:Κάθετος Στύλος**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $3,140 \cdot 10^5$  KPa, ελάχιστη καταπόνηση  $2,002 \cdot 10$  KPa)

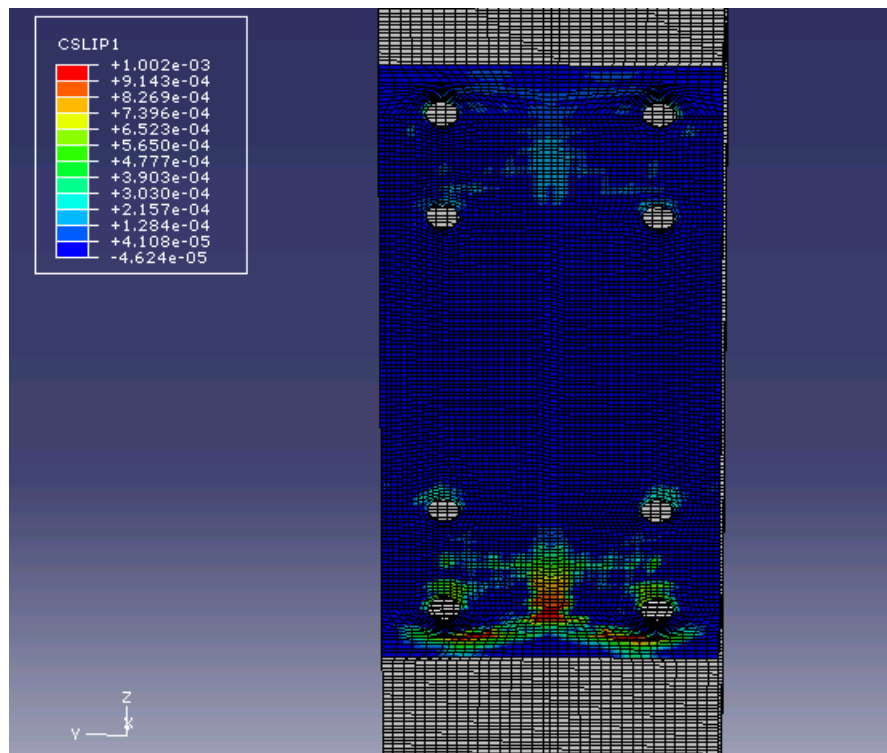


**Εικόνα 4.15.6 :Βοηθητική Δοκός**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,529 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,893 \cdot 10^4 \text{ KPa}$ )

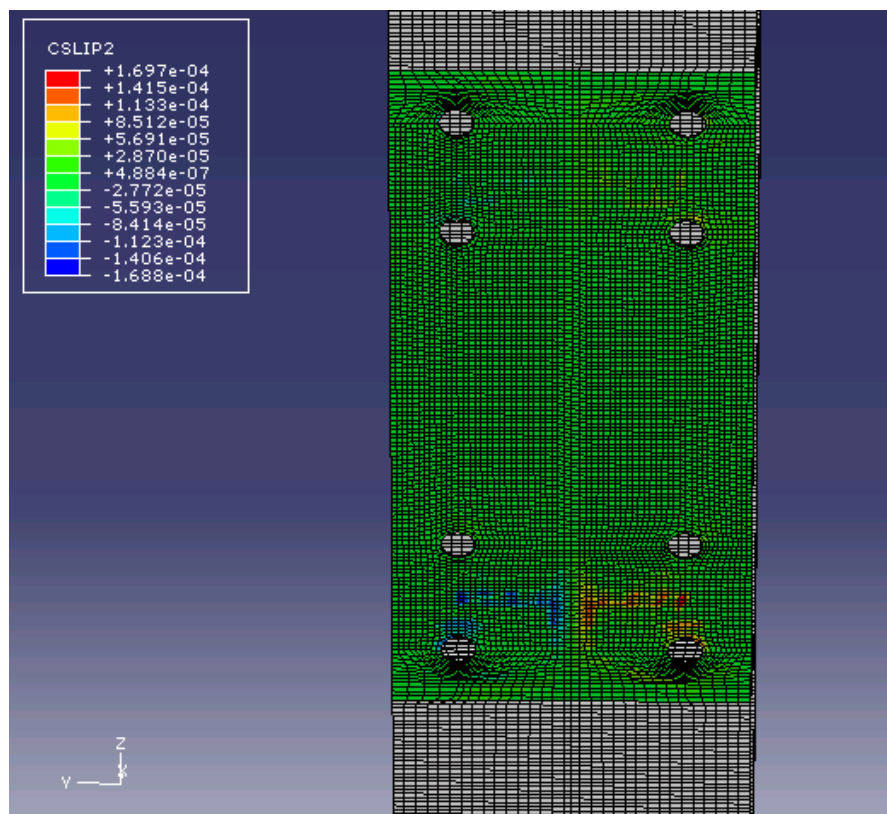


**Εικόνα 4.17.7:Κοχλίας 7-1**  
(Μέγιστη καταπόνηση  $2,976 \cdot 10^5 \text{ KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $6,109 \cdot 10^3 \text{ KPa}$ )

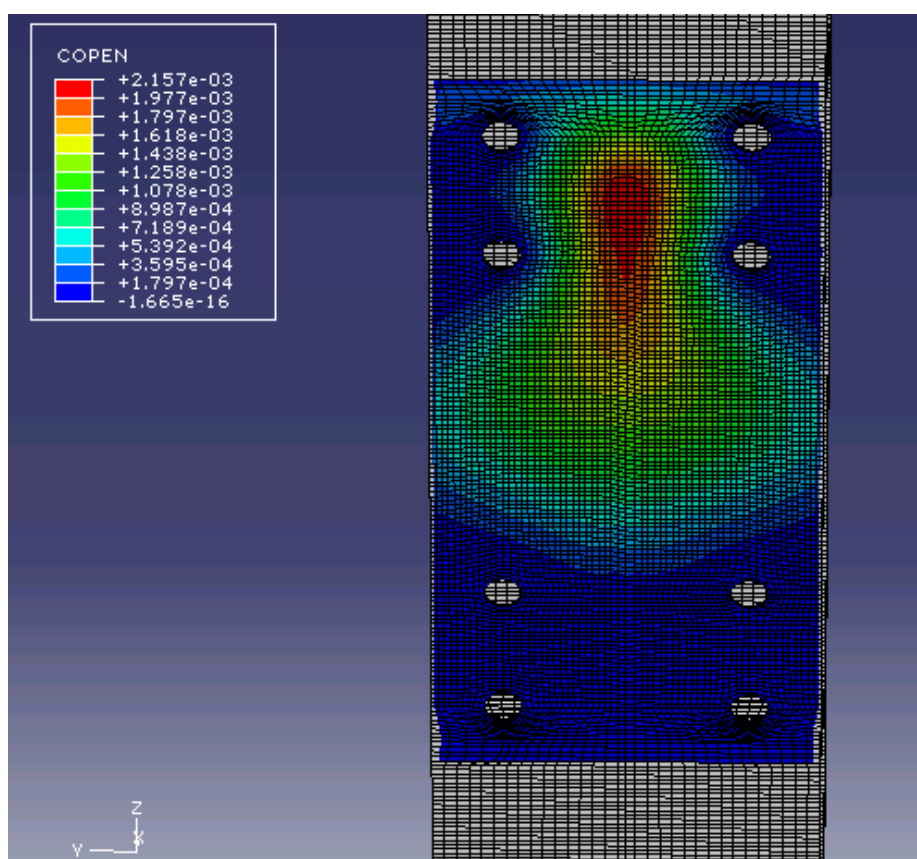
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.



**Εικόνα 4.17.8:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα

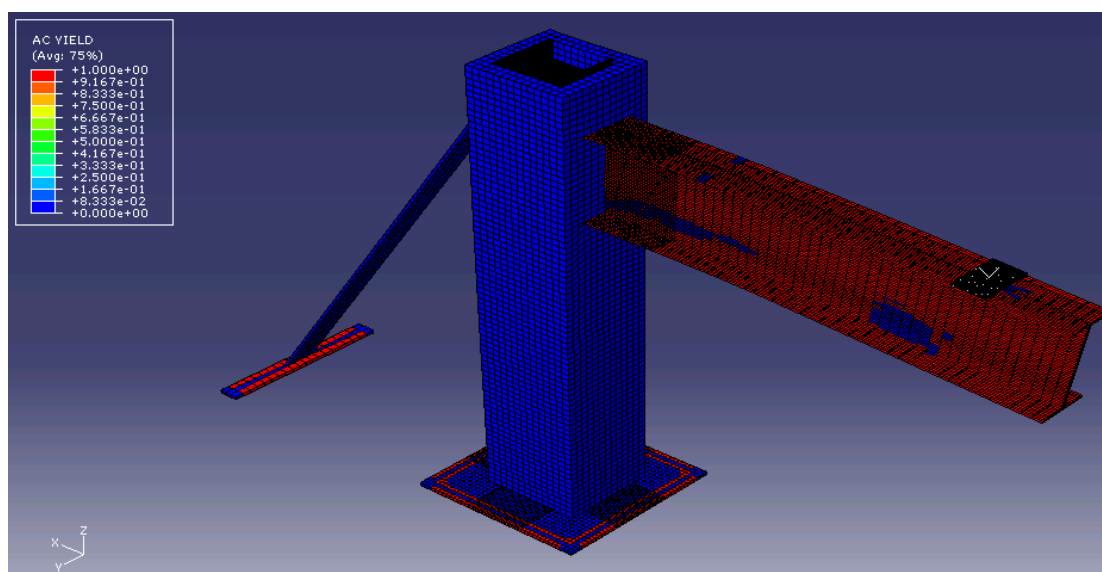


**Εικόνα 4.17.9:** Ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



**Εικόνα 4.17.10:** Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στην εικόνα που ακολουθεί με κόκκινη επισήμανση είναι οι περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας.



**Εικόνα 4.17.11:**Περιοχές που έχει διαρρεύσει ο φορέας

## Κεφάλαιο 5

### Διαγράμματα Φόρτισης - Μετατόπισης

---

#### Εισαγωγή

Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω σεναρίων διαμορφώνουμε τις γραφικές παραστάσεις φορτίου μετατόπισης προκειμένου να προβούμε σε συγκρίσεις. Για κάθε σενάριο θερμομηχανικής ανάλυσης παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα φόρτισης-μετατόπισης καθώς επίσης και της καθαρά μηχανικής ανάλυσης (άσκηση μηχανικού φορτίου 200kN). Με τον τρόπο αυτό γίνονται διάφορες συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των σεναρίων για το ίδιο υλικό πυράντοχης ενίσχυσης αλλά και μεταξύ των δύο, δηλαδή ίδιων σεναρίων που πραγματοποιήθηκαν για ελαφρύ σκυρόδεμα και γυψοσανίδα.

#### 5.1 Διαγράμματα Φόρτιση-Μετατόπιση για ελαφρύ σκυρόδεμα

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζονται όλα τα σενάρια που έχουν επιλυθεί για υλικό ενίσχυσης ελαφρύ σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα:

*Σενάριο 1:* επιβολή μόνο μηχανικού φορτίου 200kN.

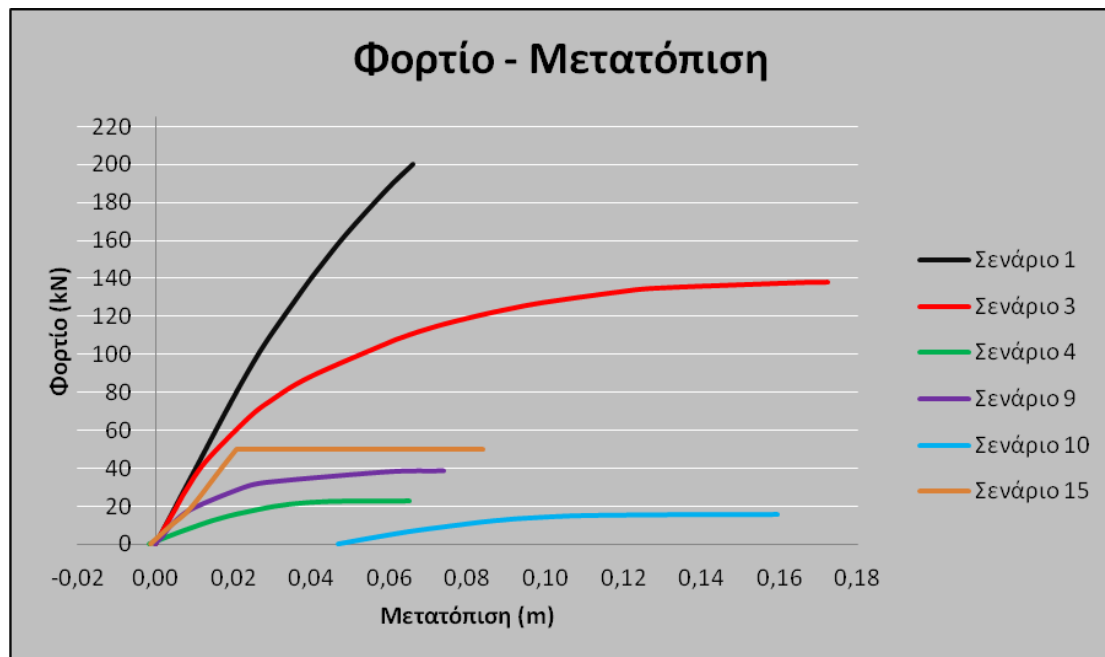
*Σενάριο 3:* Θερμομηχανική ανάλυση με ταυτόχρονη επιβολή μηχανικού και θερμικού φορτίου στο ίδιο step (step2) μετά την επιβολή του ίδιου βάρους του φορέα (step1) .

*Σενάριο 4:* Θερμομηχανική ανάλυση όπου επιβάλλεται θερμική φόρτιση σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ίδιου βάρους του φορέα και αμέσως πριν την επιβολή της μηχανικής φόρτισης σε αυτόν, με φορτίο των 200 kN.

*Σενάριο 9:* Είναι αντίστοιχο του σεναρίου 3, μόνο που αλλάζει το θερμικό φορτίο (συγκεκριμένα δεκαπλασιάζεται και διαφοροποιούνται δύο σερ θερμοκρασιών).

*Σενάριο 10:* Είναι αντίστοιχο του σεναρίου 4, μόνο που επίσης αλλάζει το θερμικό φορτίο (συγκεκριμένα δεκαπλασιάζεται και διαφοροποιούνται δύο σερ θερμοκρασιών).

*Σενάριο 15:* Θερμομηχανική ανάλυση όπου στο step 1 έχουμε επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$ , στο step 2 μηχανικό φορτίο της τάξης 50 kN, step 3 επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  και step 4 το υπόλοιπο μηχανικό φορτίο της τάξης 150 kN. Το τελευταίο step δεν πραγματοποιείται λόγω αστοχίας της κατασκευής στο step 3.



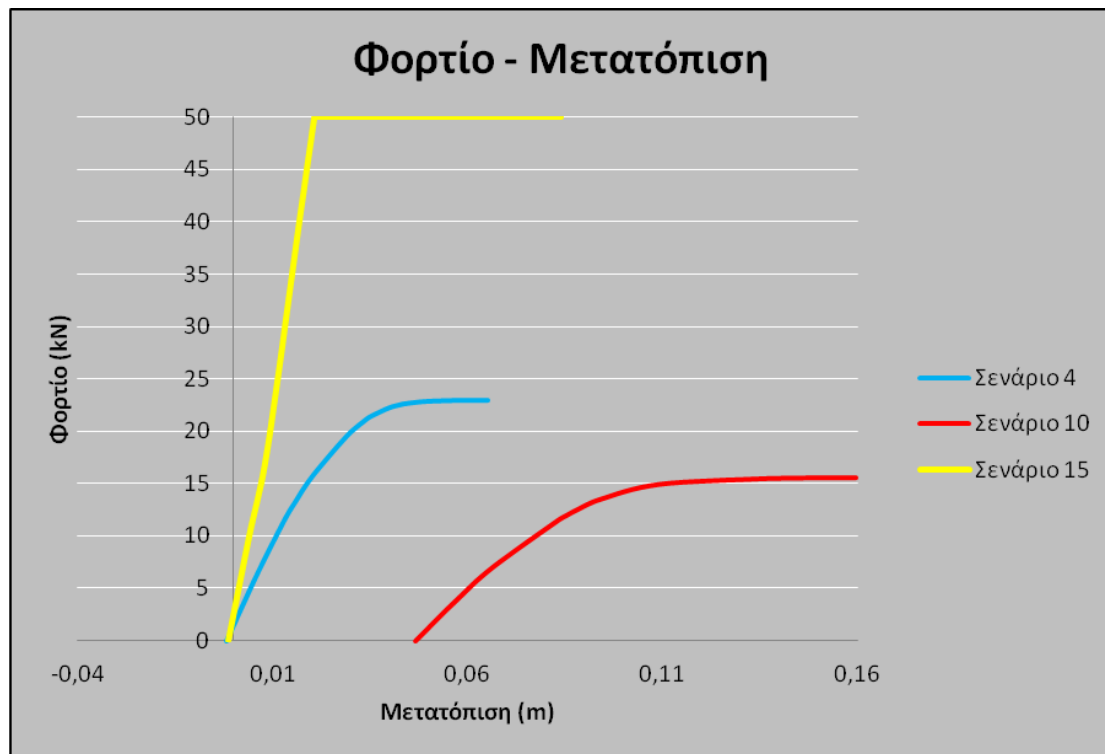
**Διάγραμμα 5.1.1:** Διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για όλα τα σενάρια υλικού ελαφρύ σκυρόδεμα

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι επιλύσεις του σεναρίου 4,10 και 15. Γίνεται δηλαδή μια σύγκριση μεταξύ των θερμομηχανικών επιλύσεων με ίδιο μοτίβο επίλυσης (4,10) και της 15 που έχει πολλά step στην ανάλυσή της.

*Σενάριο 4:* Θερμομηχανική ανάλυση όπου επιβάλλεται θερμική φόρτιση σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ίδιου βάρους του φορέα και αμέσως πριν την επιβολή της μηχανικής φόρτισης σε αυτόν, με φορτίο των 200 kN.

*Σενάριο 10:* Είναι αντίστοιχο του σεναρίου 4, με τη διαφορά ότι αλλάζει το θερμικό φορτίο (συγκεκριμένα δεκαπλασιάζεται και διαφοροποιούνται δύο σετ θερμοκρασιών).

*Σενάριο 15:* Θερμομηχανική ανάλυση όπου στο step 1 έχουμε επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  στο step 2 μηχανικό φορτίο της τάξης 50 kN, step 3 επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  και step 4 το υπόλοιπο μηχανικό φορτίο της τάξης 150 kN. Το τελευταίο step δεν πραγματοποιείται.



**Διάγραμμα 5.1.2:** Διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για τα σενάρια 4,10,15 υλικού ελαφρύ σκυρόδεμα

Από τα παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πως η αντοχή της κατασκευής μειώνεται δραστικά όταν υπάρχει επενέργεια του θερμικού και μηχανικού φορτίου σε διαφορετικό step (σενάριο 4,10). Το φορτίο για το οποίο αστοχεί η κατασκευή μας φτάνει μόλις τα 23 kN για το σενάριο 4. Στη περίπτωση του σεναρίου 10 (όπου όμως το θερμικό φορτίο είναι δεκαπλάσιο του σεναρίου 4) η κατασκευή επιβαρύνθηκε πολύ από το θερμικό φορτίο του step 2 και το φορτίο που ανέλαβε στο step 3 φτάνει μόλις μέχρι τα 15,566 kN. Αντιθέτως στο σενάριο 3 όπου έχουμε επενέργεια ταυτόχρονα θερμικού και μηχανικού φορτίου στο ίδιο step το φορτίο που μπορεί να αναλάβει η κατασκευή φτάνει μέχρι 137,774 kN. Στο σενάριο 9, όπου είχαμε εισαγωγή πολύ μεγαλύτερου θερμικού φορτίου η κατασκευή μας αστοχεί για φορτίο 38,42 kN. Στο σενάριο 15 δίνουμε αρχικά θερμικό φορτίο, οπότε οι θερμοκρασίες φθάνουν σε κάποιο επίπεδο (τέλος step 1), στη συνέχεια δίνουμε μικρό μηχανικό φορτίο 50kN, οπότε ο φορέας το αναλαμβάνει όλο ενώ οι θερμοκρασίες παραμένουν σταθερές (τέλος step 2), στη συνέχεια δίνουμε νέο θερμικό φορτίο οπότε οι θερμοκρασίες ανεβαίνουν, ενώ το μηχανικό φορτίο μένει σταθερό (step 3, σε τέλος επίλυσης). Το step 3 δεν ολοκληρώνεται, ενώ το step 4 δεν ξεκινάει καν. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της επιβάρυνσης του φορέα από τα θερμικά-μηχανικά φορτία των προηγούμενων steps. Η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται στο σενάριο 3 0,172216m και 0,159465m στο σενάριο 10. Τέλος στο σενάριο 10 το κενό που εμφανίζεται στο διάγραμμα, πιθανώς να οφείλεται σε θερμική προένταση η οποία επιτρέπει τη μετακίνηση μετά από κάποια σχετικά μεγάλη φόρτιση.

## 5.2 Διαγράμματα Φόρτιση-Μετατόπιση για γυψοσανίδα

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζονται όλα τα σενάρια που έχουν επιλυθεί για υλικό ενίσχυσης γυψοσανίδα. Συγκεκριμένα:

Σενάριο 1: επιβολή μόνο μηχανικού φορτίου 200kN.

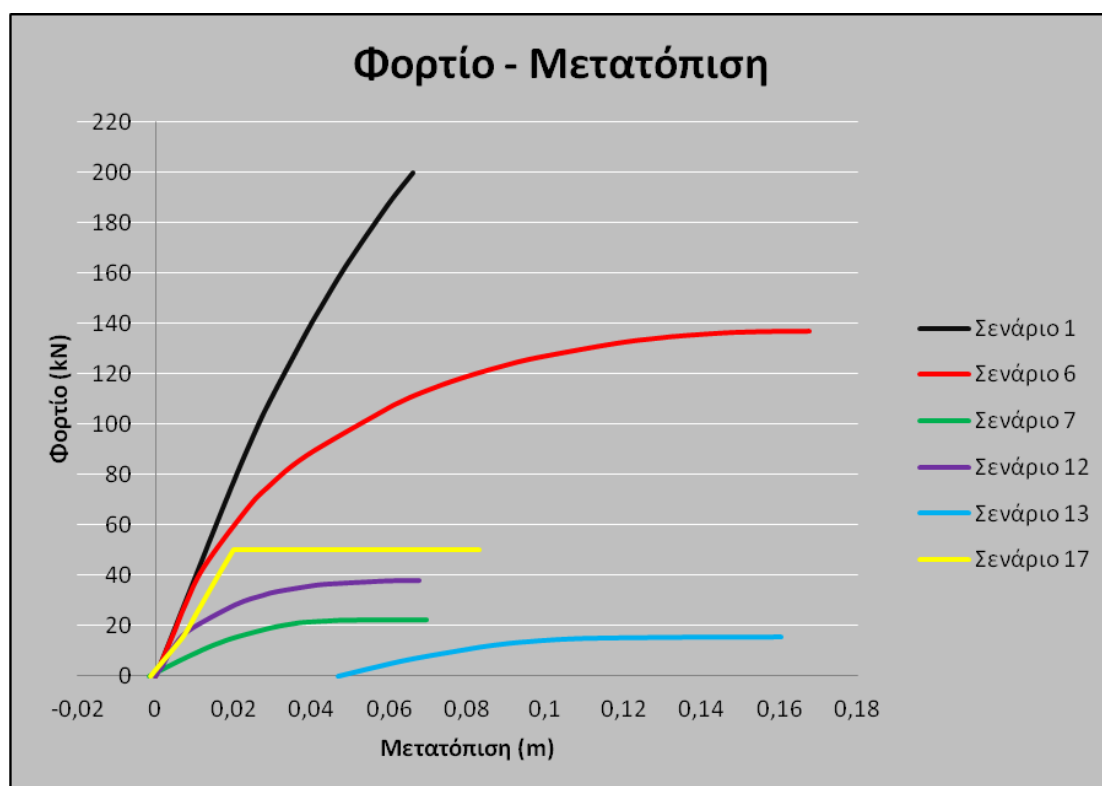
Σενάριο 6:Θερμομηχανική ανάλυση με ταυτόχρονη επιβολή μηχανικού και θερμικού φορτίου στο ίδιο step (step2) μετά την επιβολή του ίδιου βάρους του φορέα (step1) .

Σενάριο 7:Θερμομηχανική ανάλυση όπου επιβάλλεται θερμική φόρτιση σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ίδιου βάρους του φορέα και αμέσως πριν την επιβολή της μηχανικής φόρτισης σε αυτόν, με φορτίο των 200 kN.

Σενάριο 12: Είναι αντίστοιχο του σεναρίου 3,με τη διαφορά ότι αλλάζει το θερμικό φορτίο. (συγκεκριμένα δεκαπλασιάζεται και διαφοροποιούνται δύο σετ θερμοκρασιών).

Σενάριο 13: Είναι αντίστοιχο του σεναρίου 4,με τη διαφορά ότι αλλάζει το θερμικό φορτίο (συγκεκριμένα δεκαπλασιάζεται και διαφοροποιούνται δύο σετ θερμοκρασιών).

Σενάριο 17: Θερμομηχανική ανάλυση όπου στο step 1 έχουμε επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  στο step 2 μηχανικό φορτίο της τάξης 50 kN, step 3 επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  και step 4 το υπόλοιπο μηχανικό φορτίο της τάξης 150 kN.Το τελευταίο step δεν πραγματοποιείται



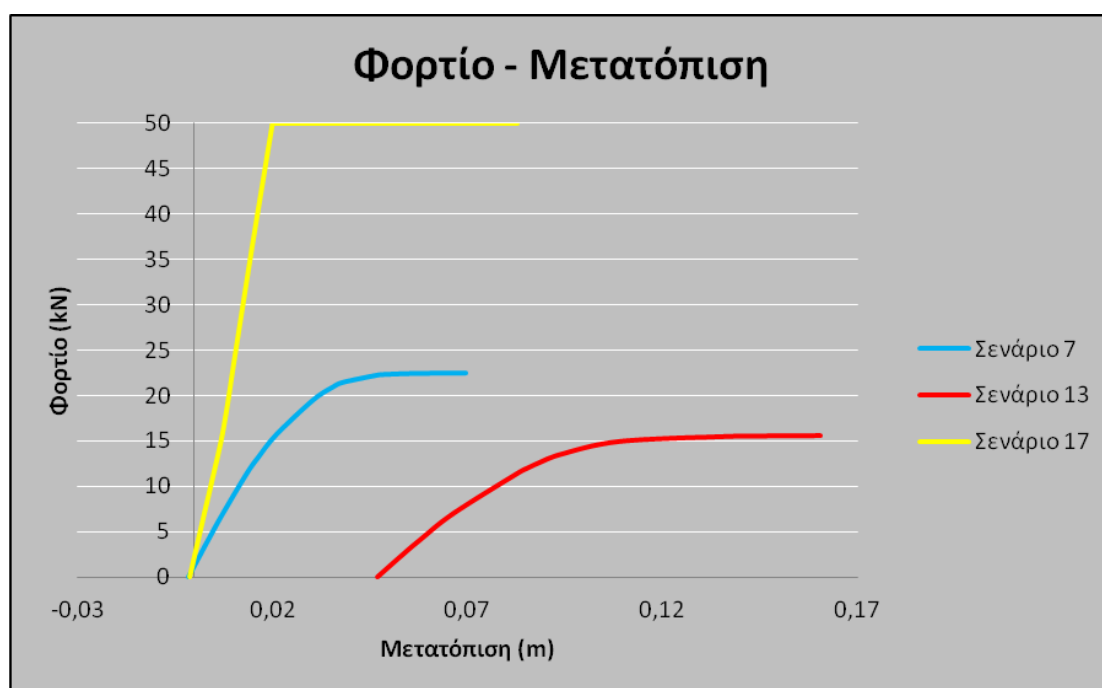
Διάγραμμα 5.2.1: Διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για όλα τα σενάρια υλικού γυψοσανίδα

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι επιλύσεις του σεναρίου 7,13 και 17.Γίνεται δηλαδή μια σύγκριση μεταξύ των θερμομηχανικών επιλύσεων με ίδιο μοτίβο επίλυσης (7,13) και της 17 που έχει πολλά step στην ανάλυσή της

*Σενάριο 7:*Θερμομηχανική ανάλυση όπου επιβάλλεται θερμική φόρτιση σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ίδιου βάρους του φορέα και αμέσως πριν την επιβολή της μηχανικής φόρτισης σε αυτόν, με φορτίο των 200 kN.

*Σενάριο 13:* Είναι αντίστοιχο του σεναρίου 4, με τη διαφορά ότι αλλάζει το θερμικό φορτίο (συγκεκριμένα δεκαπλασιάζεται και διαφοροποιούνται δύο σετ θερμοκρασιών).

*Σενάριο 17:* Θερμομηχανική ανάλυση όπου στο step 1 έχουμε επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  στο step 2 μηχανικό φορτίο της τάξης 50 kN, step 3 επιβολή θερμικού φορτίου  $1\text{kW/m}^2$  και step 4 το υπόλοιπο μηχανικό φορτίο της τάξης 150 kN.Το τελευταίο step δεν πραγματοποιείται



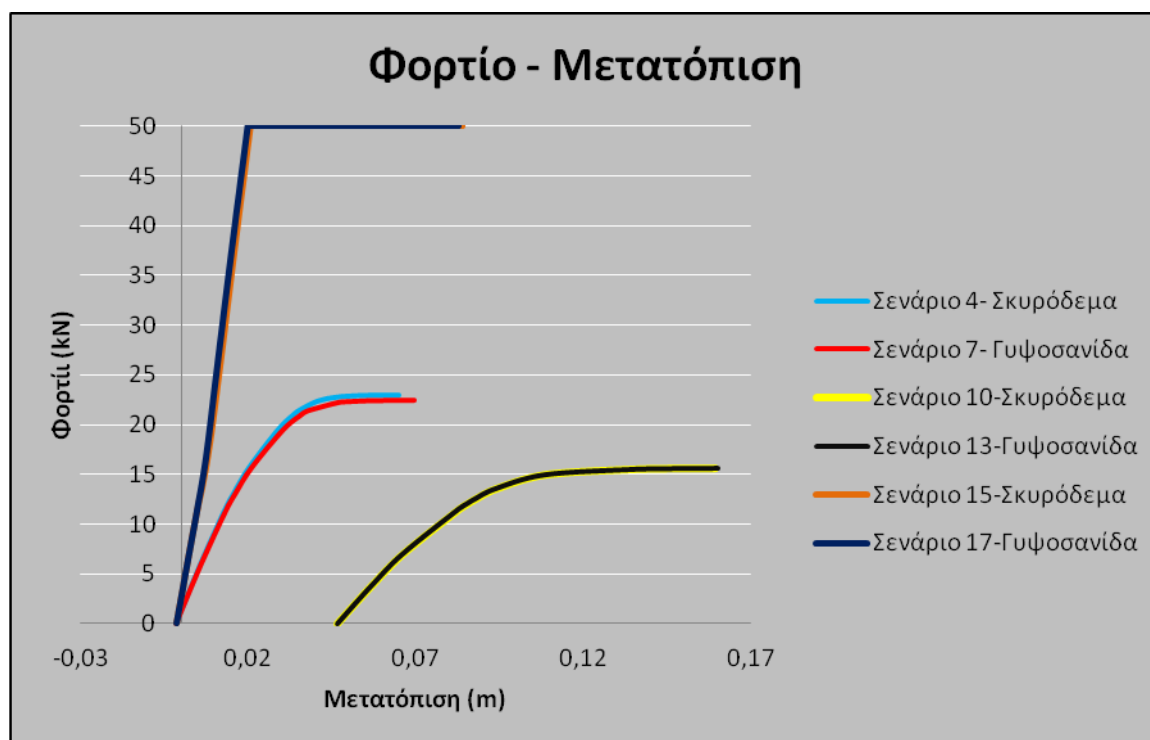
**Διάγραμμα 5.2.2:** Διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για τα σενάρια 7,13,17 υλικού γυψοσανίδα

Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα συμπεραίνουμε πως στο σενάριο 6 (ταυτόχρονη επιβολή θερμικού και μηχανικού φορτίου) η κατασκευή μας αστοχεί για φορτίο 136,894 kN. Στο σενάριο 12 που είναι αντίστοιχο του σεναρίου 6 με δεκαπλάσιο όμως θερμικό φορτίο η κατασκευή αστοχεί μόλις το φορτίο φτάσει στο 37,994 kN. Αυτή η μικρή αντοχή οφείλεται στο πολύ μεγάλο θερμικό φορτίο το οποίο μαλακώνει την κατασκευή μας και σε συνδυασμό με τη δύναμη των 200 kN καταρρέει πιο γρήγορα. Επίσης στα σενάρια 7 και 13 (όπου η επιβολή του θερμικού φορτίου προηγείται του μηχανικού) η κατασκευή αστοχεί για δύναμη 22,514 kN και

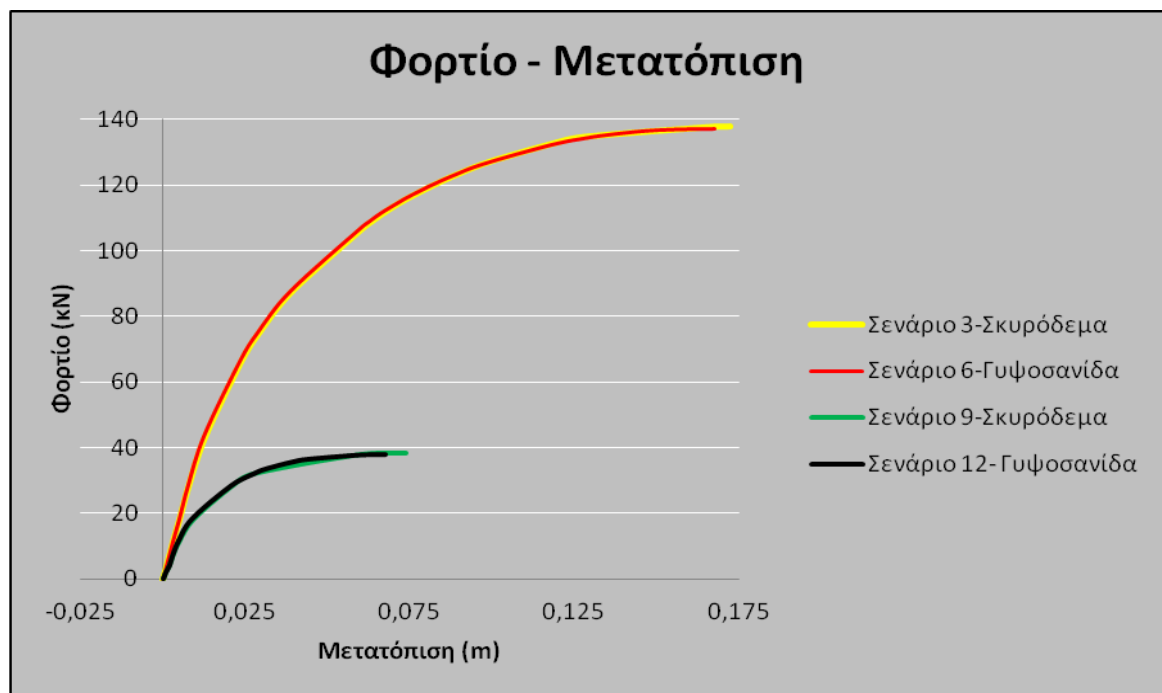
15,564 kN (στο *σενάριο 13* το θερμικό φορτίο είναι δεκαπλάσιο του 7 όπως επίσης οι θερμοκρασίες λαμβάνουν και τις μέγιστες τιμές τους, οπότε δικαιολογείτε και η αστοχία σε μικρό φορτίο). Στο *σενάριο 13* το κενό που εμφανίζεται στο διάγραμμα, πιθανώς να οφείλεται σε θερμική προένταση η οποία επιτρέπει τη μετακίνηση μετά από κάποια σχετικά μεγάλη φόρτιση. Στο *σενάριο 17* όπως ήδη έχουμε αναφέρει το step 4 δεν ξεκινά και η αστοχία επέρχεται για φορτίο 50 kN. Η μέγιστη μετατόπιση επιτυγχάνεται στο *σενάριο 6* και είναι 0,167602m.

### 5.3 Σύγκριση σεναρίων σκυρόδεμα-γυψοσανίδα

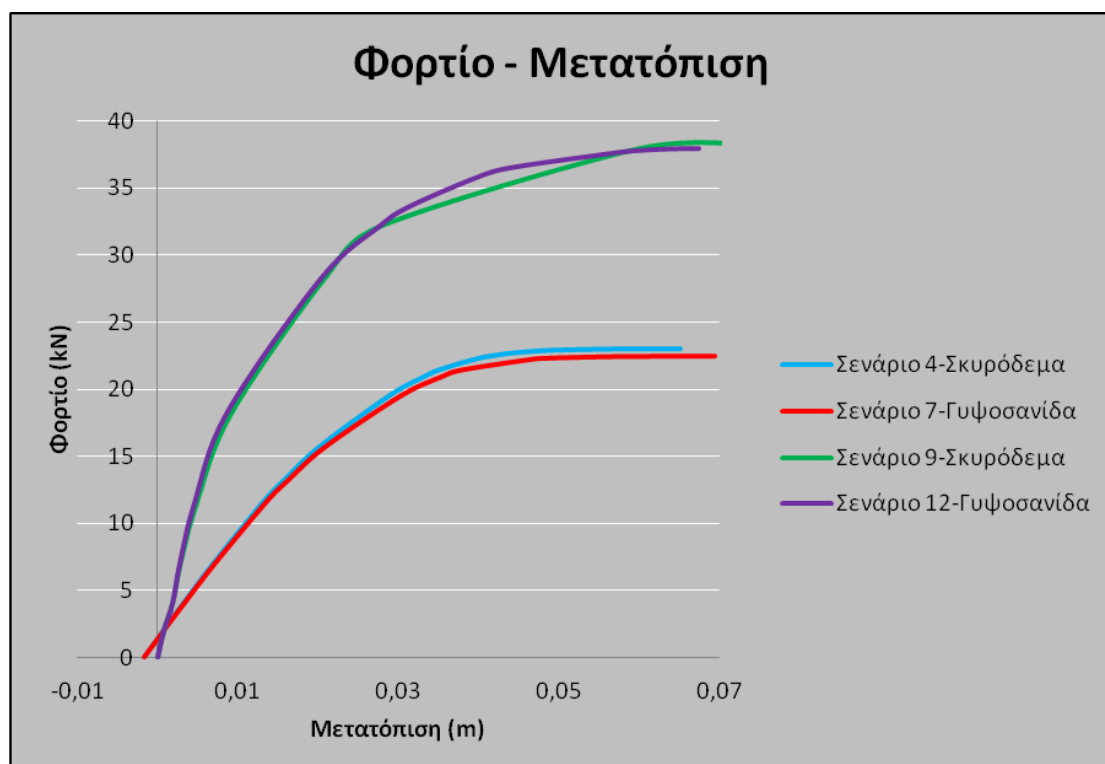
Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνονται συγκρίσεις ίδιων σεναρίων αλλά για τα δύο υλικά μας. Βλέπουμε πως οι διαφορές είναι μεν μικρές αλλά ουσιαστικές όταν πρόκειται για μια πραγματική και υψηλών απαιτήσεων-προδιαγραφών εφαρμογή.



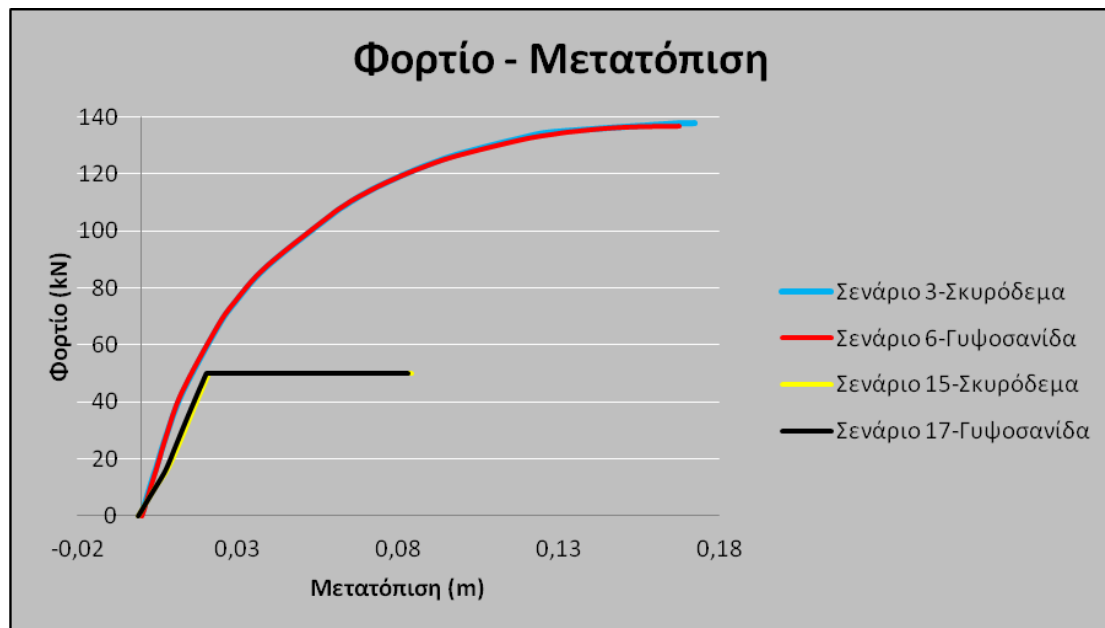
**Διάγραμμα 5.3.1:** Συγκριτικό διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για σκυρόδεμα-γυψοσανίδα



**Διάγραμμα 5.3.2:** Συγκριτικό διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για σκυρόδεμα-γυψοσανίδα



**Διάγραμμα 5.3.3 :** Συγκριτικό διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για σκυρόδεμα-γυψοσανίδα



**Διάγραμμα 5.3.4:** Συγκριτικό διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπιση για σκυρόδεμα-γυψοσανίδα

## Συμπεράσματα

Από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και τις συγκρίσεις μεταξύ τους προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Από τα δύο συγκρινόμενα πυράντοχα υλικά μεγαλύτερη αντοχή παρουσιάζει το ελαφρύ σκυρόδεμα.
2. Όταν έχουμε ταυτόχρονη άσκηση θερμικού και μηχανικού φορτίου στο ίδιο step, η κατασκευή παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την περίπτωση εφαρμογής πρώτα του θερμικού και έπειτα του μηχανικού φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι για παράδειγμα σε περίπτωση φωτιάς η μεταλλική κατασκευή υπό την άσκηση θερμικού φορτίου καταπονείται και 'μαλακώνει' το μέταλλο και όταν αργότερα ασκείται το μηχανικό φορτίο (π.χ. σε περίπτωση σεισμού) αστοχεί πολύ γρήγορα.
3. Όταν έχουμε παράλληλη άσκηση και θερμικού και μηχανικού φορτίου η μετατοπίσεις που παρατηρούνται είναι αρκετά μεγάλες και στα δύο υλικά, σε σχέση με την άσκηση θερμικού και μηχανικού φορτίου σε διαφορετικό step, όπου οι μετατοπίσεις είναι πολύ μικρότερες.
4. Επίσης η αστοχία της κατασκευής επέρχεται ακόμη πιο νωρίς όταν το θερμικό φορτίο δεκαπλασιάζεται. Απολύτως αναμενόμενο καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται αγγίζουν τους 7.360 °C σε ένα από τα σενάρια μας.

5. Στη περίπτωση της θερμικής ανάλυσης όπου δεκαπλασιάστηκε το θερμικό φορτίο και τα αποτελέσματα εισήχθηκαν σε θερμομηχανική ανάλυση με παράλληλη άσκηση θερμικών και μηχανικών φορτίσεων η αντοχή του φορέα είναι αισθητά μεγαλύτερη σε σχέση με τη θερμομηχανική ανάλυση όπου έχουμε εισαγωγή θερμικών αποτελεσμάτων (σεναρίου 2 ή 5 αντίστοιχα, με θερμικό φορτίο μόλις  $2\text{KW/m}^2$ ) σε διαφορετικό step όπου προηγείται η θερμική και ακολουθεί η μηχανική φόρτιση. Δηλαδή συμπεραίνουμε ότι παρόλη την αύξηση του θερμικού φορτίου η καταπόνηση εξαρτάται καθαρά από τη σειρά άσκησης των φορτίων.

## Βιβλιογραφία

### Ξένη Βιβλιογραφία

1. Andreas Kalogeropoulos, Georgios A. Drosopoulos , Georgios E. Stavroulakis «*Thermal–stress analysis of a three-dimensional end-plate steel joint*» Construction and Building Materials 29 (2012) 619–626
2. Bardell, K. H.«Spray-applied fire resistive coatings for steel building columns» NRC Publications Archive (NPARC)
3. Edward D. Weil, 2011 «*Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings - A State-of-the-Art Review*», Journal of Fire Sciences.
4. I. Rahmanian, Y.C. Wang, 2012 «*A combined experimental and numerical method for extracting temperature-dependent thermal conductivity of gypsum boards*» Construction and Building Materials 26 (2012) 707–722, Elsevier
5. K. S. Al-Jabri', T. Lennon<sup>3</sup>, I. W. Burgess' and R. J. Plank «Behaviour of Steel and Composite Beam-column Connections in Fire» Construct. Steel Res. Vol. 46, Nos. 1-3, pp. 308-309, paper number 180, 1998, Elsevier Science
6. Lawson R.M., “Behaviour of steel beam-to-column connections in fire”, *The Structural Engineer* 68 (1990).
7. Lien K.H., Chiou Y.J., Wang R.Z., Hsiao P.A., Nonlinear behaviour of steel structures considering the cooling phase of a fire, *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009).
8. Michael G. Goode «Fire Protection of Structural Steel in High-Rise Buildings» NIST GCR 04-872
9. M. Jimenez, S. Duquesne , S. Bourbigot 2006 «Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action» *Thermochimica Acta* 449 (2006) 16–26, Elsevier

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Π.Γιαννόπουλος, 2004 «*Σχεδιασμός Φορέων από σκυρόδεμα με βάση τον Ευρωκώδικα 2, Μέρος 1-1 Γενικοί κανόνες για κτίρια* » ,(EN 1992-1-1)
2. Καλογερόπουλος Ανδρέας, 2011 «*Θερμομηχανική ανάλυση κοχλιωτού συνδέσμου μεταλλικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων*» διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
3. Πρακτικός Οδηγός για την αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και τις δομητικές επισκευές μετά από πυρκαγιά, σε μικρά κτίρια από σκυρόδεμα και από τοιχοποιία: *Κεφάλαιο 3 «Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στις ιδιότητες των υλικών»* Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος