



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του φοιτητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του
Πολυτεχνείου Κρήτης

ΟΡΦΑΝΟΥ ΟΔΥΣΣΕΑ του ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Αριθμός Μητρώου : 2011010125

Θέμα

**<<ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ>>**

Επιβλέπων

Δρ-Μηχ Γ. Σταυρουλάκης, Καθηγητής

Χανιά, Οκτώβριος 2018

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να γίνει μια εκτενής μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων πάνω σε σύνθετες μορφές τοιχοποιίας με επιβαλλόμενα φορτία. Αρχικά γίνεται γραμμική ανάλυση που μπορεί και παρέχει μια γρήγορη εκτίμηση της απόκρισης του φορέα για κάποια συγκεκριμένη στάθμη επιβαλλόμενων φορτίων. Έπειτα πραγματοποιείται μη-γραμμική ανάλυση έτσι ώστε να παρακολουθήσουμε τη συμπεριφορά του φορέα από την αρχή της επιβολής των φορτίων, μέσα από την σταδιακή τους προσαύξηση, ως την κατάρρευση. Τέλος, προσομοιώνεται ενισχυμένη μορφή τοιχοποιίας προκειμένου να συγκριθούν και να αναλυθούν τα αποτελέσματα με βάση τις αναλύσεις που έχουν προηγηθεί.

Abstract

The aim of the present study was to make a detailed study and analysis of the results on composite forms of masonry with imposed loads. Initially, a linear analysis is performed that can provide a quick estimate of carrier response for a specific load level. Non-linear analysis is then performed to monitor the behavior of the vector from the principle of loading the loads, through their incremental increment, to destruction. Finally, an enhanced wall form is simulated to compare and analyze the results based on the previous analyzes.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, επιβλέποντα σε αυτήν την διπλωματική, αρχικά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα και στη συνέχεια για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε καθώς και το χρόνο που αφιέρωσε σε μένα όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Κεφάλαιο 1 ^ο - Γενικά για την Τοιχοποιία	6
1.1) Εισαγωγή.....	6
1.2) Είδη τοιχοποιίας	7
Κεφάλαιο 2 ^ο -Γραμμικές & Μη Γραμμικές Στατικές Αναλύσεις.....	14
2.1) Γραμμική Ανάλυση.....	14
2.2) Μη Γραμμική Ανάλυση	15
Κεφάλαιο 3 ^ο - Δημιουργία Τοίχου με χρήση του προγράμματος Solidworks	16
3.1) Μηχανολογικά Σχέδια	16
3.2) Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τοίχου	24
3.3) Σημεία Φόρτισης	30
Κεφάλαιο 4ο - Αναλύσεις και Αποτελέσματα	34
4.1) Μη γραμμική ανάλυση θλιπτικής φόρτισης	34
4.2) Μη γραμμική ανάλυση διατμητικής φόρτισης	37
4.2.1) Προς μία κατεύθυνση	37
4.2.2) Προς δύο κατευθύνσεις.....	40
4.3) Μη γραμμική ανάλυση θλιπτικής και διατμητικής φόρτισης.....	43
4.3.1) Σημείο Αστοχίας του τοίχου και γραφικές αναλύσεις	46
4.3.2) Ενίσχυση Τοίχου με πλευρικά Στυλώματα	50
4.3.2.1) Σημείο Αστοχίας ενισχυμένου τοίχου με πλευρικά στυλώματα.....	54
4.3.3) Ενίσχυση Τοίχου με ισχυρότερο Κονίαμα	58
Κεφάλαιο 5 ^ο – Συμπεράσματα	61
Βιβλιογραφία.....	62

Κεφάλαιο 1^ο - Γενικά για την Τοιχοποιία

1.1) Εισαγωγή

Η τοιχοποιία είναι το αρχαιότερο υλικό. Όταν ο προϊστορικός άνθρωπος βγήκε από τις σπηλιές, με πέτρες έκτισε το πρώτο κατάλυμά του. Με εξαίρεση μερικές περιοχές του κόσμου όπου χρησιμοποιήθηκε ξυλεία για την κατασκευή κτηρίων και ναών, όλα τα δομικά έργα της ανθρωπότητας μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα όπου και ξεκίνησε η χρήση του χάλυβα και μετέπειτα του σκυροδέματος στις αρχές του 20ου αιώνα, είναι κατασκευασμένα με τοιχοποιία (κατοικίες εκκλησίες ανάκτορα γέφυρες υδραγωγεία οχυρωματικά έργα και λοιπά). Η χρήση, όμως, σύγχρονων υλικών τα μεταπολεμικά χρόνια περιόρισε τη χρήση της κυρίως στην πλήρωση του σκελετού των οικοδομικών έργων.

Για πολλά χρόνια οι κατασκευές από τοιχοποιία θεωρούνταν αντικείμενο τέχνης και εμπειρίας και όχι επιστήμης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μη συγκεντρώνει επιστημονικό ενδιαφέρον. Έρευνα για αυτό το δομικό υλικό ουσιαστικά δεν υπήρχε μέχρι τη δεκαετία του 70 διότι είχε προσανατολισθεί στο χάλυβα και το σκυρόδεμα, ενώ η τοιχοποιία εθεωρείτο παρελθόν για τις κατασκευές. Τη δεκαετία αυτή αρχίζει ένα έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την τοιχοποιία γενικότερα και ειδικότερα για την φέρουσα, που συνεχίζεται ακόμα. Η έρευνα υπαγορεύθηκε κυρίως από τις ανάγκες συντήρησης των παλαιών κατασκευών που αποτελούν μνημεία της πολιτιστικής κληρονομιάς κάθε λαού, καθώς με την πάροδο των ετών πρόχειρες συντηρήσεις και ενισχύσεις που είχαν γίνει στο παρελθόν απεδείχθησαν αναποτελεσματικές και μερικές φορές και επικίνδυνες. Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτείνεται στη μελέτη συμπεριφοράς και της βελτίωσης της τοιχοποιίας σε σύγχρονες κατασκευές. Ίσως δεν είναι τυχαίο ότι η στροφή αυτή συντελείται συγχρόνως με την ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων των οποίων οι δυνατότητες έκαναν εφικτή την έρευνα του ανισότροπου υλικού και τη μελέτη των πολύπλοκων κατασκευών από αυτό. Η γνώση που αποκτήθηκε σε συνδυασμό με τη βελτίωση των μεθόδων παραγωγής των τεχνητών λίθων σωμάτων ώστε να έχουν σταθερές και ελεγχόμενες ιδιότητες έχει ως συνέπεια τη σύνταξη κανονισμών σε πολλά κράτη όπως και στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

1.2) Είδη τοιχοποιίας

Η τοιχοποιία είναι σύνθετο υλικό και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται είναι τα τοιχοσώματα και το συνδετικό κονίαμα. Ανάλογα με το είδος των τοιχοσωμάτων από τα οποία είναι κατασκευασμένες, τη λειτουργία τους στο δόμημα αλλά και τον τρόπο δόμησης, τους οι τοιχοποιίες διακρίνονται σε κατηγορίες με κοινά χαρακτηριστικά οι οποίες αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια.

1) Αναλόγως του είδους των τοιχοσωμάτων. Η προέλευση του τοιχοσώματος, δηλαδή αν είναι φυσικό ή τεχνητό, διαχωρίζει τις τοιχοποιίες σε δύο βασικές κατηγορίες, σε τοιχοποιίες από φυσικούς λίθους (λιθοδομές) και σε τοιχοποιίες από τεχνητά τοιχοσώματα (πλινθοδομές).

- **Οι τοιχοποιίες από φυσικούς λίθους** αποτελούν το αρχαιότερο και μέχρι την ευρεία εφαρμογή του σκυροδέματος, το κυριότερο δομικό υλικό σε πολλές περιοχές της Γης. Το υλικό τους είναι λίθοι προερχόμενοι από φυσικά τις περισσότερες φορές ανθεκτικά πετρώματα, οι οποίοι κατόπιν μικρού ή μεγάλου βαθμού κατεργασίας αποκτούν κατάλληλο σχήμα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή συγκεκριμένου έργου.

Οι τοιχοποιίες από φυσικούς λίθους ανάλογα με το αν έχουν ή όχι συνδετικό κονίαμα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες.

- **Ξηρολιθοδομές** είναι η λιθοδομές που αποτελούνται από ακατέργαστους φυσικούς λίθους χωρίς τη χρήση συνθετικού κονιάματος. Λόγω της προφανούς αδυναμίας τους να αναλάβουν σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις σήμερα



χρησιμοποιούνται στη χώρα μας κυρίως για περιφράξεις αλλά και πρόχειρους χαμηλούς τοίχους αντιστήριξης. Στο παρελθόν ξερολιθιές από μεγάλους λίθους είχαν χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή πρόχειρων καταλυμάτων ιδιαίτερα στην περιοχή της Μάνης.

- **Λιθοδομές**, γενικά ονομάζονται τοιχοποιίες που αποτελούνται από φυσικούς λίθους συγκολλημένους με τη χρήση κονιάματος. Έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για την κατασκευή κάθε είδους δομήματος, όπως οικοδομές γέφυρες τοίχοι αντιστήριξης οχυρωματικά έργα κ.λπ. Υπήρχε το κατ'εξοχήν οικοδομικό υλικό για χιλιάδες χρόνια σε όλες τις περιοχές του κόσμου, με εξαίρεση τις περιοχές που βρισκόταν σε συμβολές ποταμών, π.χ. στη Μεσοποταμία όπου χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ωμοπλίνθοι. Οι λιθοδομές



χρησιμοποιούνταν μέχρι την εμφάνιση του σκυροδέματος, για κάθε είδους κατασκευή ενώ η χρήση του στα κτιριακά έργα εκτοπίστηκε από τους οπτόπλινθους όταν συστηματοποιήθηκε η παραγωγή τους, δηλαδή στα τέλη του 19^{ου} αιώνα.

- **Χυτές τοιχοποιίες**. Κατασκευάζονται από πλαστικά μείγματα πηλού, κροκάλων και σκυροδέματος τα οποία στη συνέχεια σκληρύνονται και αποτελούν ένα ενιαίο σύνολο τοίχου. Χυτές είναι και οι Ρωμαϊκές τοιχοποιίες στις οποίες για καλούπι έχουν χρησιμοποιηθεί συμπαγείς

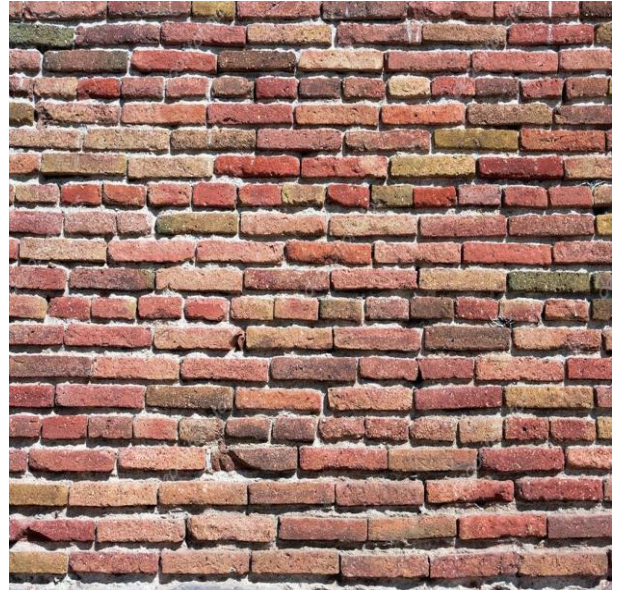
οπτόπλινθοι και αποτελούν ουσιαστικά την εξωτερική επένδυση των τοίχων. Χυτές τοιχοποιίες είναι και οι προκατασκευασμένοι τοίχοι από σκυρόδεμα που κατασκευάζονται βιομηχανικά. Το καλούπι αφαιρείται και ο προκύπτων τοίχος οπλισμένων ή όχι, είναι ένας χυτός τοίχος.

- **Τοιχοποιίες από τεχνητούς λίθους** (πλινθοδομές). Το υλικό των τοιχοσωμάτων (πλίνθων) των πλινθοδομών είναι βιοτεχνικό ή βιομηχανικό προϊόν κατασκευάζω μένω είτε επί τόπου είτε μακριά από το έργο. Το κύριο χαρακτηριστικό των τεχνητών τοιχοσωμάτων είναι το συγκεκριμένο σχήμα και οι σταθερές διαστάσεις που αυτά διατίθενται.

- **Ωμοπλινθοδομές.** Όταν το υλικό είναι ωμόπλινθοι δηλαδή άψητες “χωματόπλινθες”, υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε αρχικά στη Μεσοποταμία πριν από 12.000 χρόνια περίπου. Στην Ελλάδα, στις πεδινές περιοχές χρησιμοποιήθηκε σε οικοδομικά έργα μέχρι τα πρώτα μετεπαναστατικά χρόνια και σε αγροικίες μέχρι την εμφάνιση των τσιμεντόλιθων. Σε περιοχές της γης όπου η πέτρα είναι σπάνιο υλικό, οι ωμόπλινθοι χρησιμοποιήθηκαν σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από όση στην Ελλάδα. Ένα σημαντικό τμήμα των κτιρίων των μη ανεπτυγμένων χωρών αποτελείται από ωμόπλινθους. Η χαμηλή αντοχή τους σε ισχυρές δυνάμεις είναι η αιτία των μεγάλων καταστροφών στις περιοχές αυτές οι οποίες συνοδεύονται και από Μεγάλο αριθμό θυμάτων.



- **Οπτοπλινθοδομές**, όταν αποτελούνται από ψημένες (οπτές), πλίνθους, κοινώς τούβλα τα οποία είναι συνήθως από αργιλικό υλικό (πηλό). Κατασκευές από φέρουσα οπτοπλινθοδομή αποτελούν την πλειονότητα των κτιρίων σε πολλές περιοχές του κόσμου. Τοιχοποιίες από οπτοπλινθοδομή κατασκευάζονται σήμερα είτε ως φέρουσες είτε ως τοιχοπληρώσεις σε κατασκευές με φέροντα οργανισμό από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Στην Ελλάδα οι οπτόπλινθοι είναι σήμερα σχεδόν το αποκλειστικό υλικό πληρώσεως στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.



- **Τσιμεντοπλινθοδομές**, όταν τα λιθοσώματα είναι τσιμεντόλιθοι (τσιμεντόπλινθες), δηλαδή τεχνικά λιθοσώματα με βάση το σκυρόδεμα. Σήμερα στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή περιφράξεων αγροτικών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Λόγω της κακής θερμομονωτικής ικανότητας τους άχρηστους για κατοικία είναι απαγορευτική. Σε πολλές χώρες χρησιμοποιούνται ευρέως ειδικού τύπου τσιμεντόλιθοι



με θερμομονωτικές ιδιότητες κυρίως για την κατασκευή οπλισμένης τοιχοποιίας.

Τελευταία έχουν παραχθεί ειδικά λιθοσώματα τα οποία κυκλοφορούν στην αγορά με διαφορετικές εμπορικές ονομασίες, απαντώνται σε ποικιλία διαστάσεων και έχουν ως βάση το τσιμέντο αλλά διαθέτουν ικανοποιητικές θερμομονωτικές ικανότητες λόγω της κυψελοειδούς μορφής της δομής τους (τσιμεντόλιθοι από ελαφροβαρή αδρανή και αυτόκλειστοι κυψελωτοί τσιμεντόλιθοι). Όταν τα αδρανή είναι από κίσηρη εξασφαλίζεται αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα και οι πλίνθοι ονομάζονται κισηρόλιθοι.

2) Αναλόγως τη λειτουργία τους στο δόμημα οι τοιχοποιίες διακρίνονται σε:

- **Φέρουσες**, όταν προορίζονται να μεταφέρουν στο έδαφος κατακόρυφα και οριζόντια φορτία σε αντίθεση με αυτές που κατασκευάζονται για τη διαμόρφωση των χώρων. Σε ένα κτίριο χωρίς σκελετό φέροντες είναι οι τοίχοι που μεταφέρουν τα κατακόρυφα φορτία από τη στέγη και τα πατώματα στο έδαφος. Υπό σεισμική δράση τόσο αυτοί οι τοίχοι όσο και όσοι συνδέονται με αυτούς είναι φέροντες. Στη διεθνή βιβλιογραφία οι τοίχοι που συνεισφέρουν στην διατμητική αντίσταση των κτιρίων ονομάζονται διατμητική τοίχοι. Αλλά ακόμα και οι τοίχοι πλήρωσης των πλαισίων σε κτίρια με σκελετό υπό ορισμένες συνθήκες με τα πλαίσια είναι φέροντες υπ οριζόντια φόρτιση και σε αυτό οφείλεται η διαγώνια ρηγμάτωσή τους. Σε ένα κτίριο από φέρουσα τοιχοποιία όλα τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία πρέπει να κατασκευάζονται πριν από τα οριζόντια που στηρίζουν.

- **Πληρώσεως**, όταν δεν προορίζονται να μεταφέρουν φορτία αλλά κατασκευάζονται για να διαμορφώσουν τους χώρους σε ένα οικοδόμημα. Η μη φέροντες τοίχοι σε ένα κτίριο από φέρουσα τοιχοποιία πρέπει να κατασκευάζονται μετά την κατασκευή των πατωμάτων ή πλακών, εκτός αν λαμβάνεται μέριμνα ώστε να μην είναι δυνατή η μεταφορά φορτίων σε αυτούς.
- **Αντιστήριξης**, όταν στηρίζουν γαιώδη πρηνή. Στο σημείο αυτό πρέπει να διαχωριστούν οι παλαιότερες πραγματικές τοιχοποιίες αντιστήριξης από τις νεότερες που αποτελούν στην πραγματικότητα επένδυση τοίχων αντιστήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα και γίνονται για αισθητικούς λόγους ή για την εναρμόνιση των τοίχων με το περιβάλλον.
- **Επένδυσης**, όταν κατασκευάζονται εν επαφή με τοίχους των ανωτέρω κατηγοριών ή με στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα και χρησιμοποιούνται μόνο για διακοσμητικούς σκοπούς. Η δόμηση τους μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιμελημένη μιμούμενοι την λαξευμένη πέτρα ή λιγότερο οπότε Δίνει την εντύπωση πλάκο λιθοδομής ή να είναι από ειδικές διακοσμητικές πλίνθους.

3) **Αναλόγως του τρόπου δόμησης** μία τοιχοποιία, είτε είναι από φυσικούς είτε από τεχνητούς λίθους, διακρίνεται σε συμπαγή και σε κοίλη με πυρήνα. Σε μία κατακόρυφη τομή σε συμπαγή τοιχοποιία δεν διακρίνονται κατακόρυφες ξεχωριστές στρώσεις, ενώ στην κοίλη διακρίνονται εξωτερική και εσωτερική στρώση και ανάμεσά τους

πυρήνας, είτε κενός (δύστροπη τοιχοποιία), είτε πληρωμένος με κονίαμα(τρίστρωτη τοιχοποιία) το οποίο μπορεί να είναι κροκαλόδεμα ή σκυρόδεμα ή τσιμεντοκονίαμα. Εφόσον μία κοίλη τοιχοποιία με κενό πυρήνα χρησιμοποιείται ως φέρουσα είναι απαραίτητη η σύνδεση των κατακόρυφων στρώσεων με συνδέσμους, και κάθε μία στρώση πρέπει να έχει ελάχιστο πάχος 10 cm

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο τοίχος που θα μας απασχολήσει αποτελείται από οπτοπλινθοδομή.

Κεφάλαιο 2ο -Γραμμικές & Μη Γραμμικές Στατικές Αναλύσεις

2.1) Γραμμική Ανάλυση

Είναι η ανάλυση όπου όταν φορτία εφαρμοστούν σε ένα σώμα, το σώμα παραμορφώνεται και η επίδραση των φορτίων μεταδίδεται σε όλο το σώμα. Η γραμμική στατική ανάλυση υπολογίζει τις μετατοπίσεις, τα στελέχη, τις τάσεις και τις δυνάμεις αντίδρασης υπό την επίδραση των εφαρμοζόμενων φορτίων.

Όλα τα φορτία εφαρμόζονται αργά και σταδιακά μέχρι να φτάσουν τα πλήρη μεγέθη τους. Μετά την επίτευξη των πλήρων μεγεθών τους, τα φορτία παραμένουν σταθερά (χρονικά αμετάβλητα). Αυτή η υπόθεση μας επιτρέπει να παραμελούμε τις δυνάμεις αδρανείας και απόσβεσης λόγω αμελητέα μικρών επιταχύνσεων και ταχυτήτων.

Η σχέση μεταξύ φορτίων και επαγόμενων αποκρίσεων είναι γραμμική. Για παράδειγμα, εάν διπλασιαστούν τα φορτία, η απόκριση του μοντέλου (μετατοπίσεις, τάσεις) θα διπλασιαστεί επίσης.

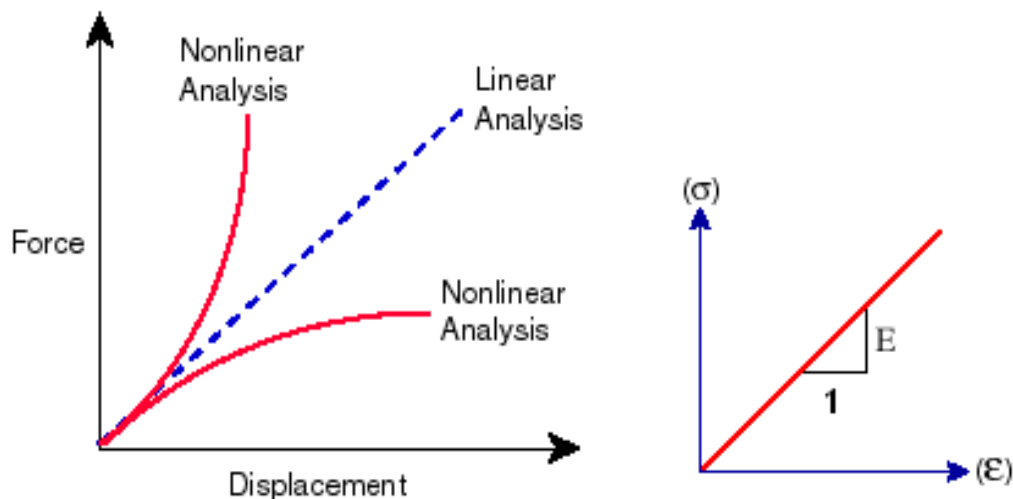
Γραμμικές αναλύσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου

- Όλα τα υλικά του μοντέλου συμμορφώνονται με το νόμο του Hooke, δηλαδή η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης.
- Οι επαγόμενες μετατοπίσεις είναι αρκετά μικρές ώστε να αγνοήσουν τη μεταβολή της ακαμψίας που προκαλείται από τη φόρτωση.
- Οι οριακές συνθήκες δεν μεταβάλλονται κατά την εφαρμογή των φορτίων. Τα φορτία πρέπει να είναι σταθερά σε μέγεθος, κατεύθυνση και κατανομή. Δεν πρέπει να αλλάζουν ενώ το μοντέλο παραμορφώνεται.

2.2) Μη Γραμμική Ανάλυση

Η πραγματοποίηση της μη γραμμικής ανάλυσης, όπως ανέφερα και παραπάνω, μπορεί να παρακολουθήσει τη συμπεριφορά του φορέα από την αρχή της επιβολής των φορτίων, μέσα απ την σταδιακή τους προσαύξηση ως την κατάρρευση. Να παρουσιάσει ακόμα, την ανακατανομή της έντασης καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης και να αναδείξει το μηχανισμό αστοχίας.

Επίσης σε περιπτώσεις υφιστάμενων κατασκευών, η μη γραμμική ανάλυση αποτελεί πολύτιμο μέσο για τον έλεγχο επάρκειας, καθώς και την αξιολόγηση της αποδοτικότητας μιας επιλεγείσας επέμβασης με στόχο την ενίσχυση της κατασκευής. Πρέπει να τονιστεί βέβαια σ αυτό το σημείο ότι μία μη γραμμική ανάλυση χρειάζεται σημαντικά περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από μια γραμμική για τον αντίστοιχο φορέα και απαιτεί από το μηχανικό βαθύτερη κατανόηση της θεωρίας της μηχανικής και στατικής, της συμπεριφοράς των υλικών και των εφαρμοζόμενων αριθμητικών μεθόδων και αλγορίθμων επίλυσης.



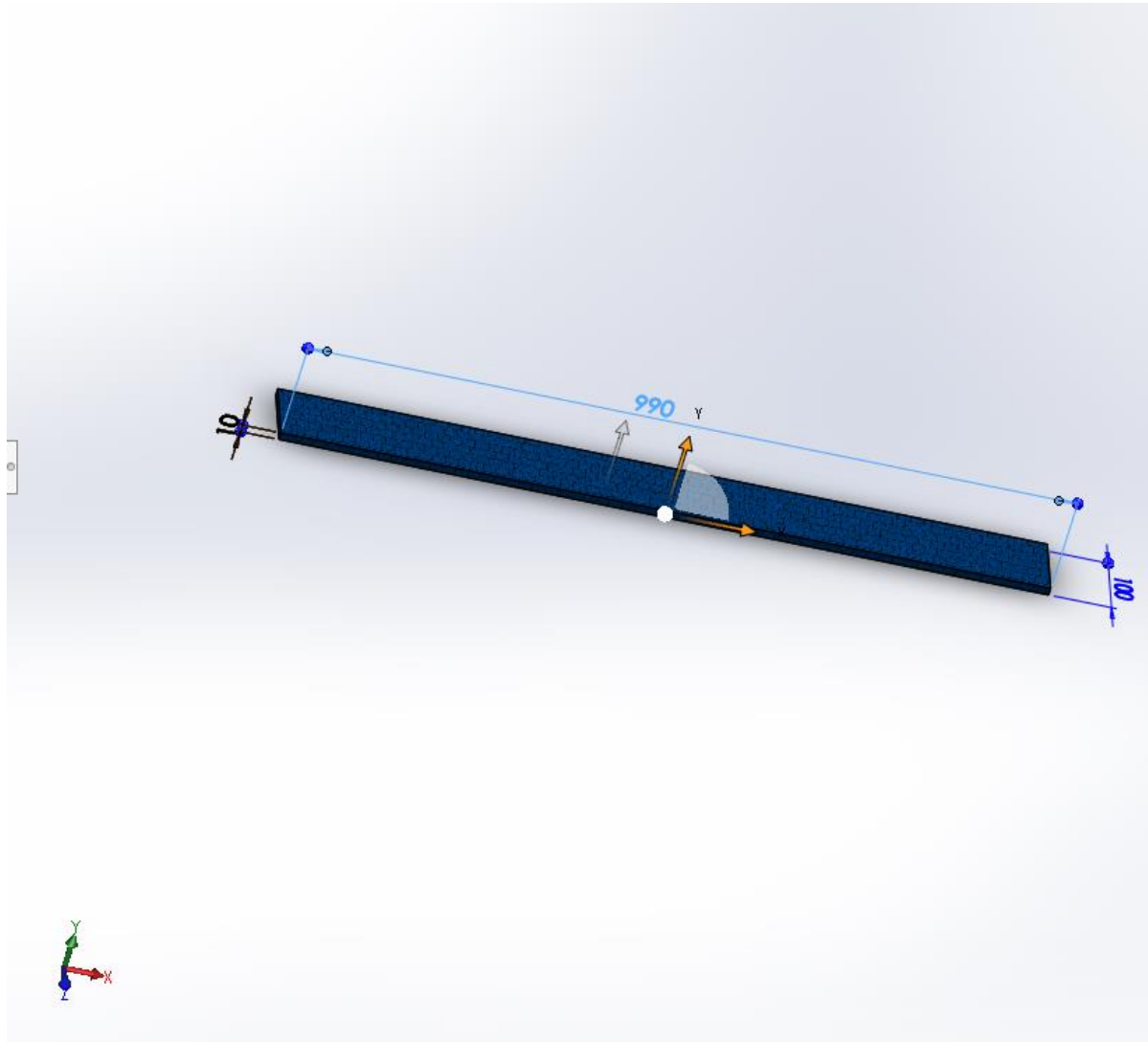
Κεφάλαιο 3ο - Δημιουργία Τοίχου με χρήση του προγράμματος Solidworks

Για την δημιουργία του μοντέλου μας και την τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματός μας έγινε χρήση του προγράμματος Solidworks. Ο τοίχος ο οποίος ο μελετάμε αποτελείται από τρία διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα κωνιάματος και τέσσερα διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα τούβλου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μέρη που χρησιμοποιήθηκαν και η διαστασιολόγηση αυτών. (σε mm)

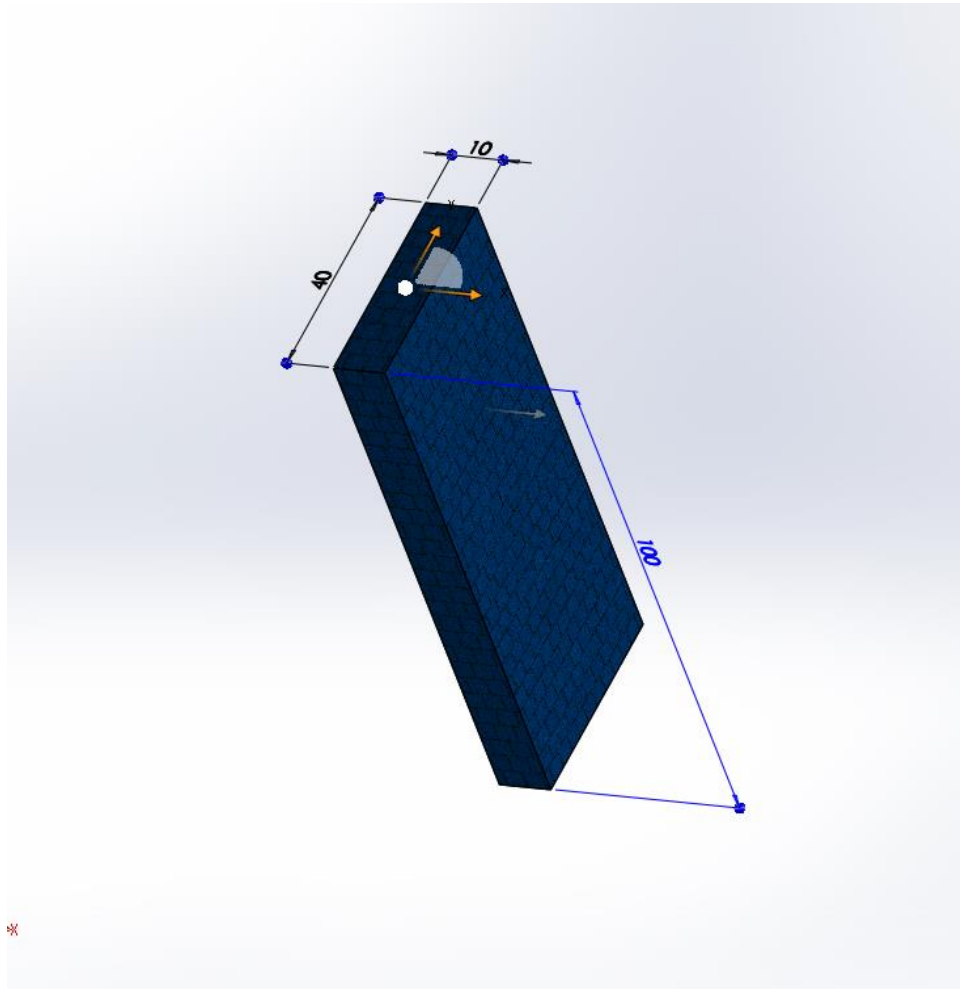
3.1) Μηχανολογικά Σχέδια

Όλα τα μέρη του τοίχου πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια των εντολών “sketch” και “extrude” του προγράμματος.

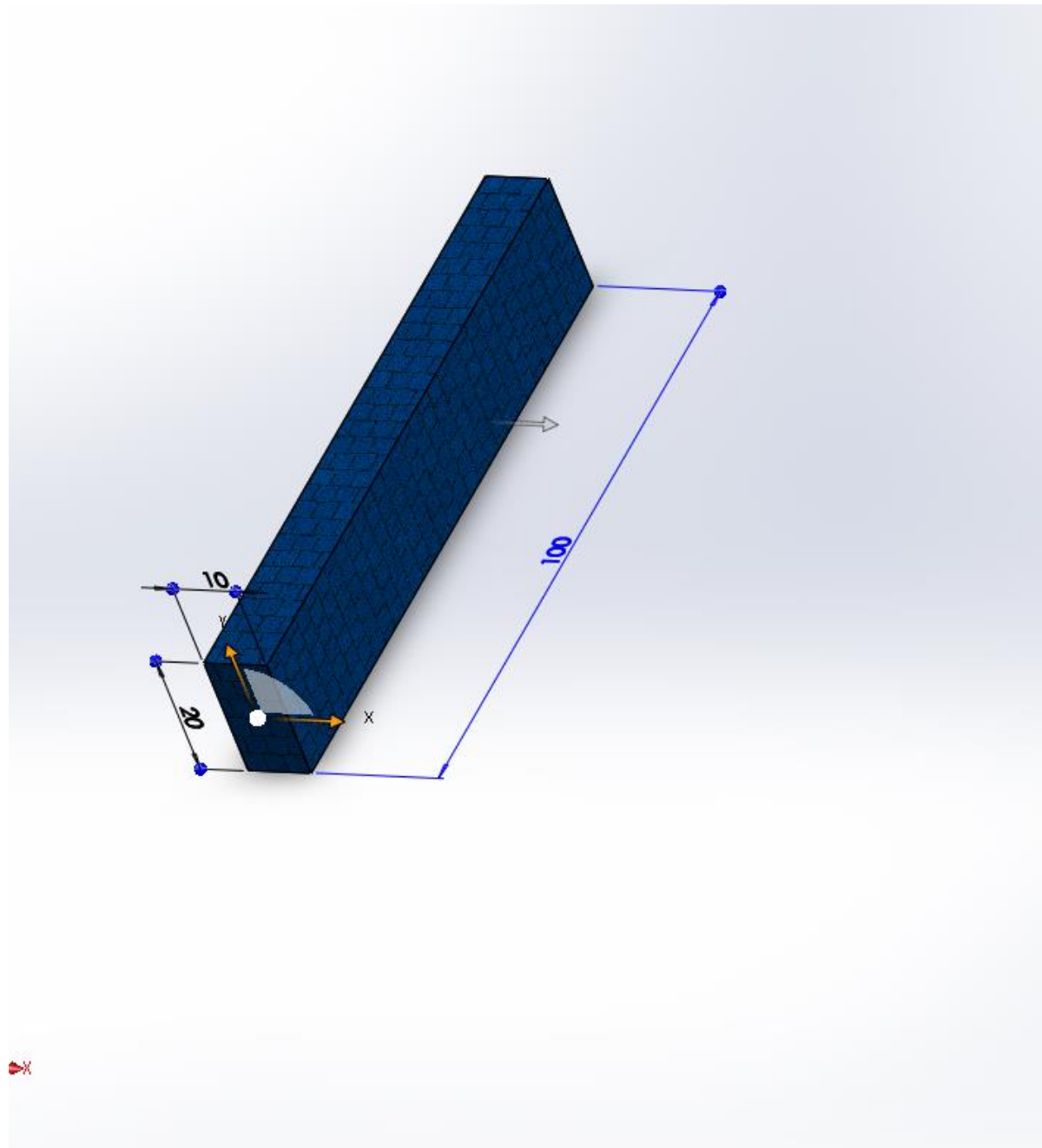
Κονίαμα α)



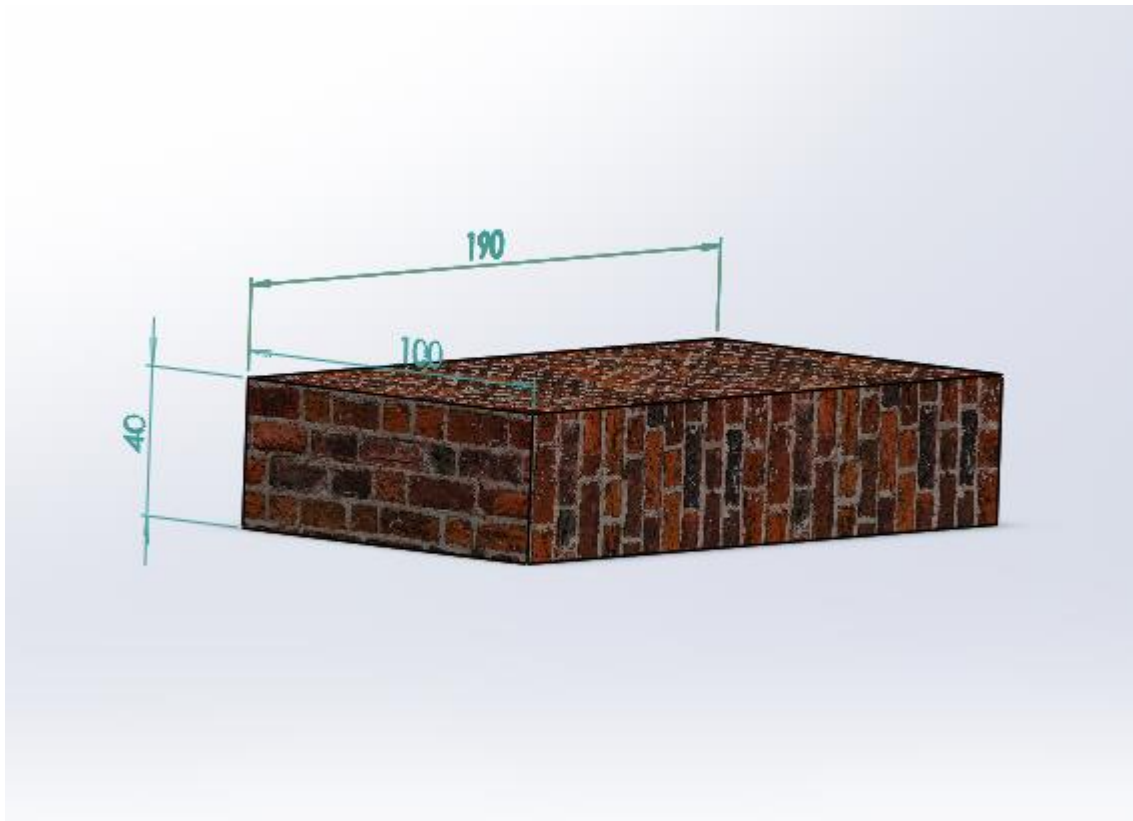
Κονίαμα β)



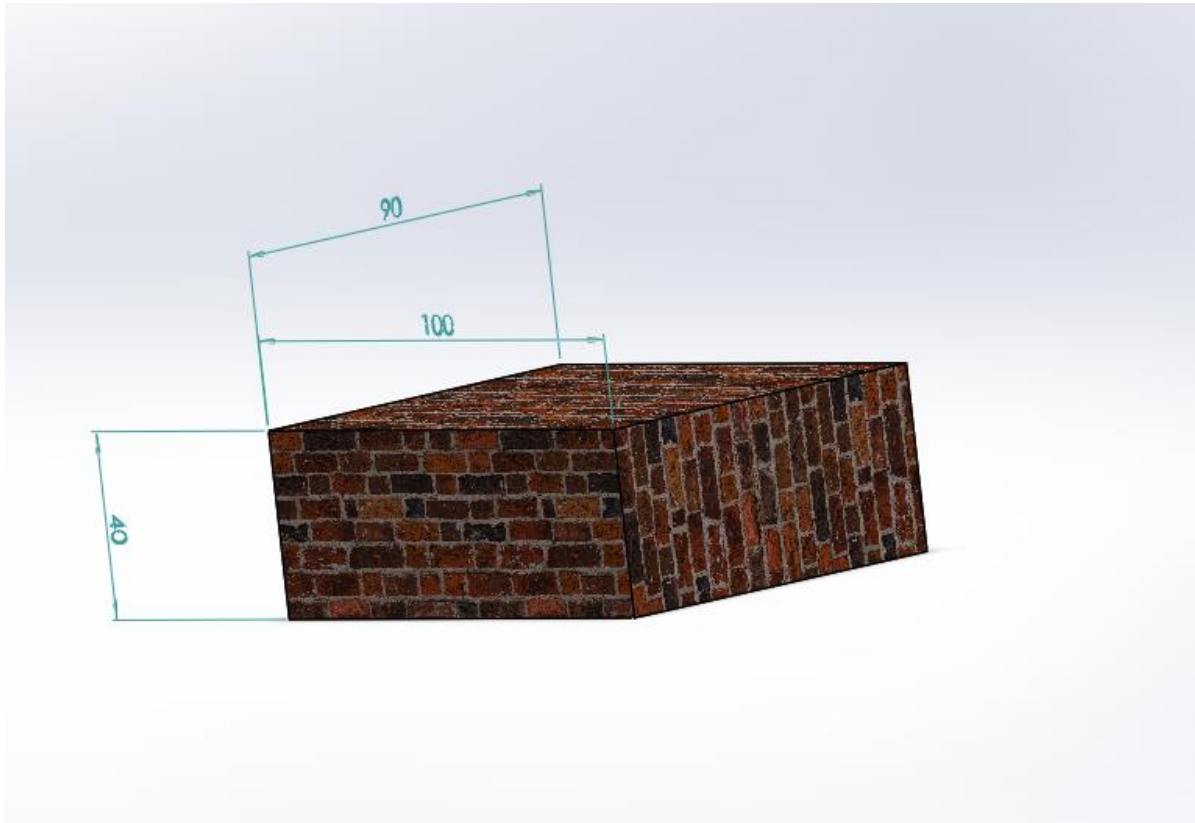
Κονίαμα γ)



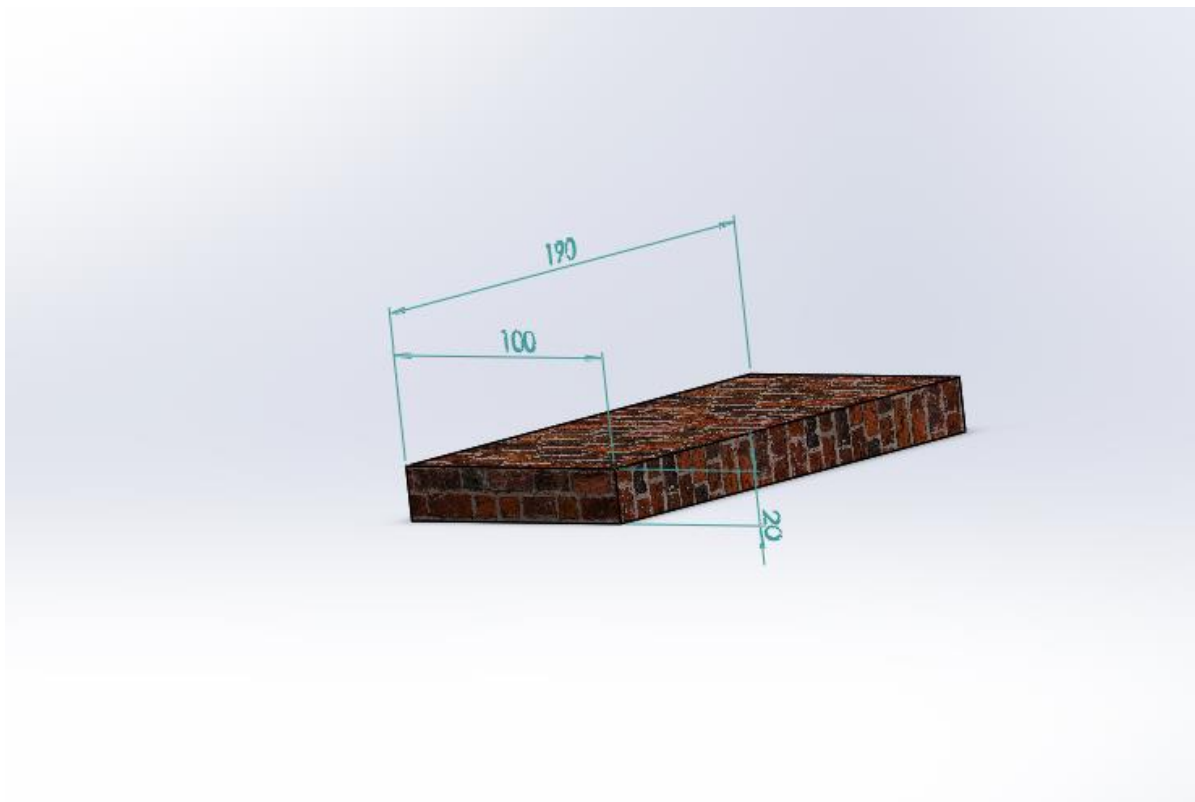
Τούβλο α)



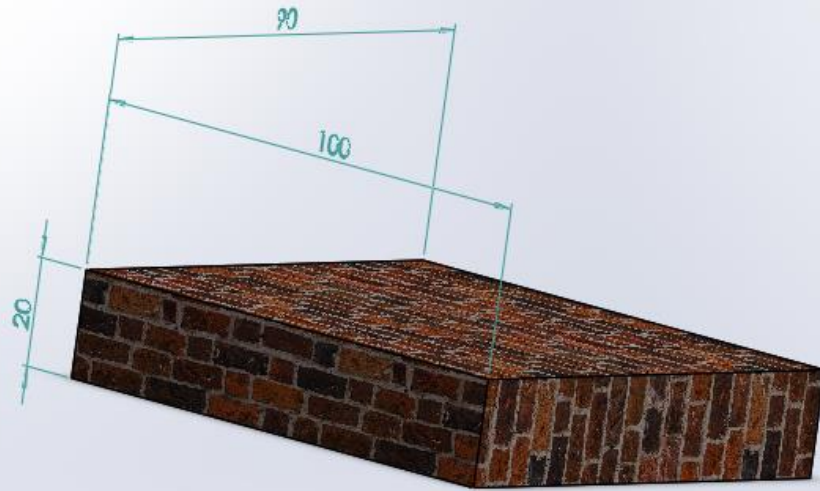
Τούβλο β)



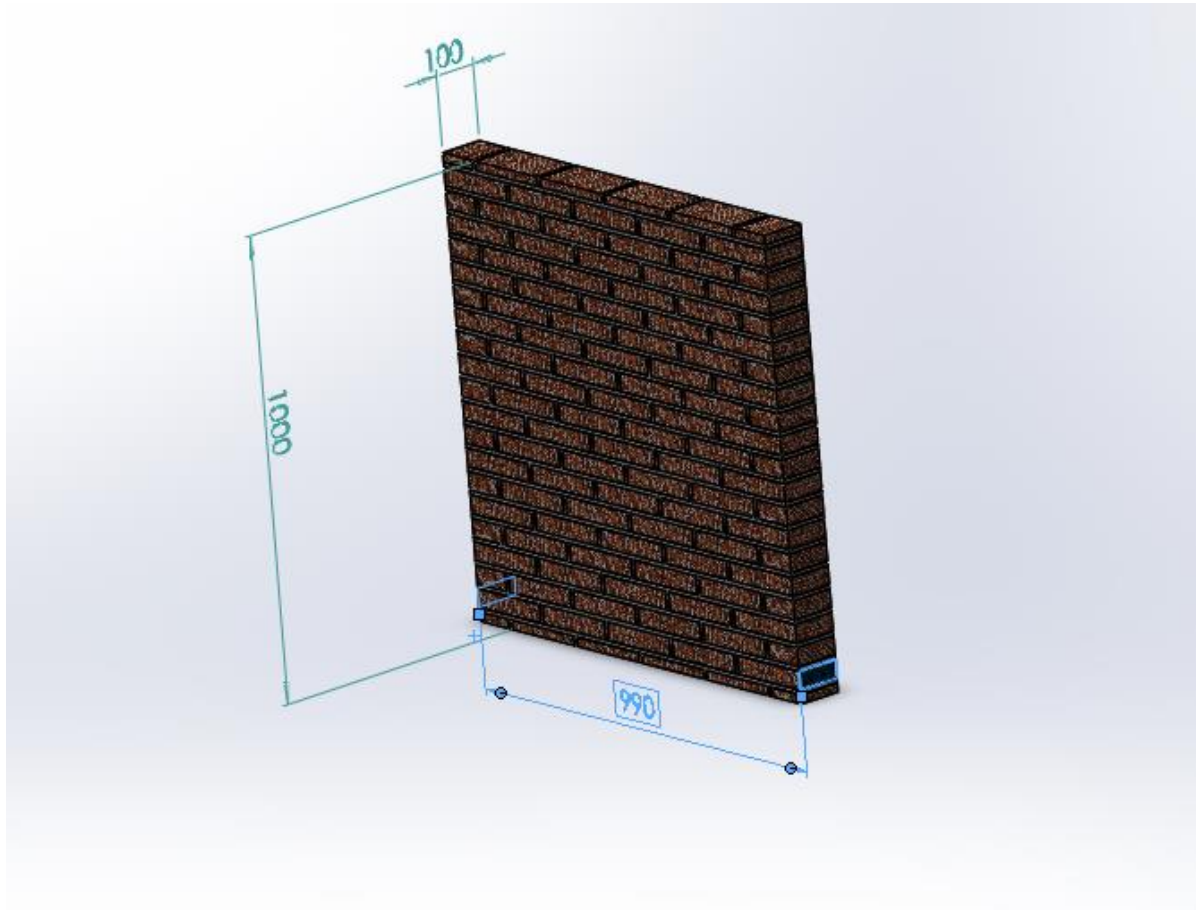
Τούβλο γ)



Τούβλο δ)



Τοίχος



3.2) Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τοίχου

Χαρακτηριστικά Τούβλου

The screenshot shows the SolidWorks Material Properties dialog box. On the left, a tree view under 'Material' shows the hierarchy: SOLIDWORKS Materials > Custom Materials > masonry > brick. The 'brick' material is selected. The main panel shows the 'Properties' tab with the following settings:

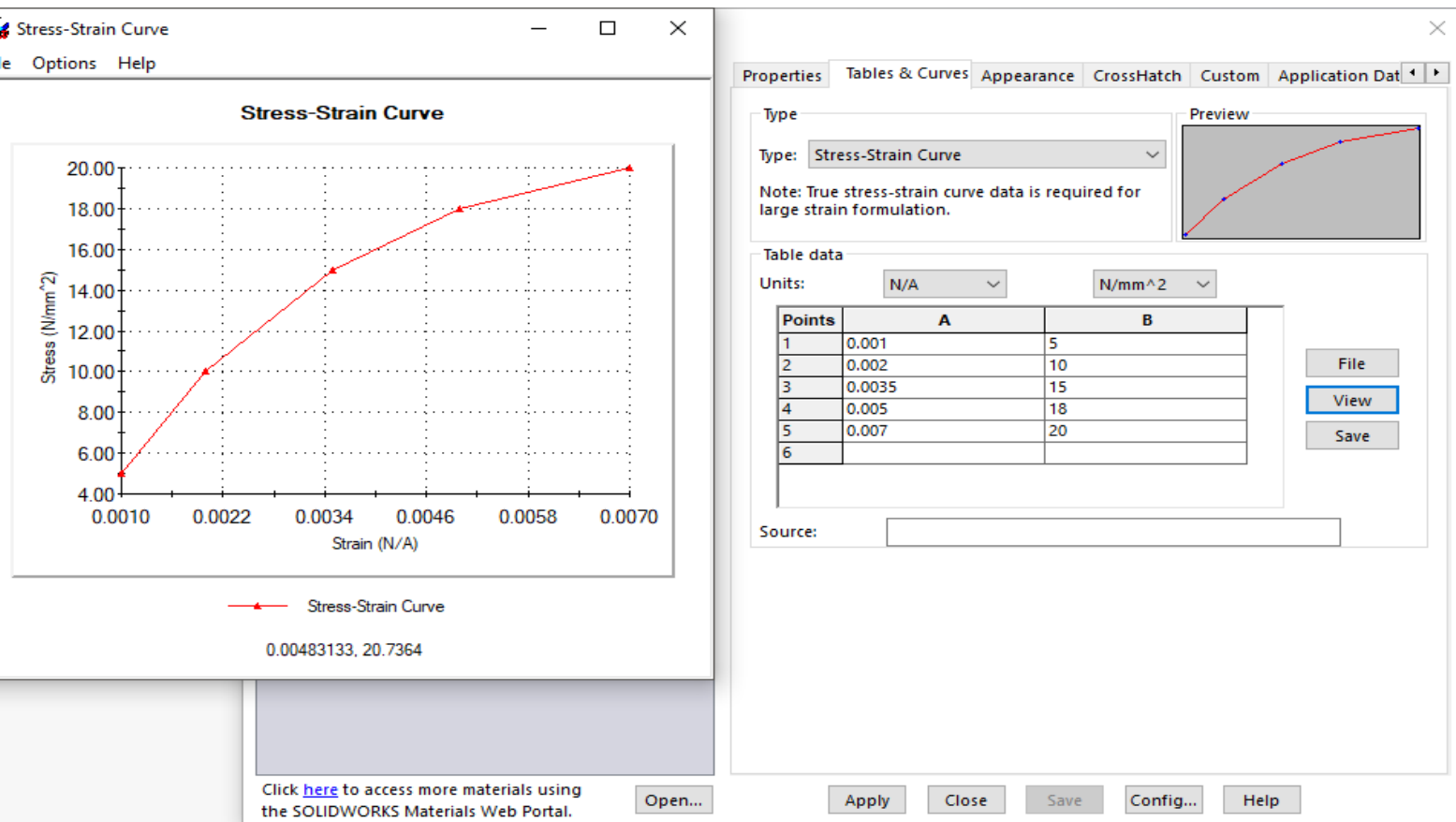
- Model Type: Nonlinear Elastic
- Units: SI - N/mm² (MPa)
- Category: masonry
- Name: brick
- Description: (empty field)
- Source: (empty field)
- Sustainability: Undefined

A 'Create stress-strain curve' button is located next to the Category field. Below the input fields is a table of material properties:

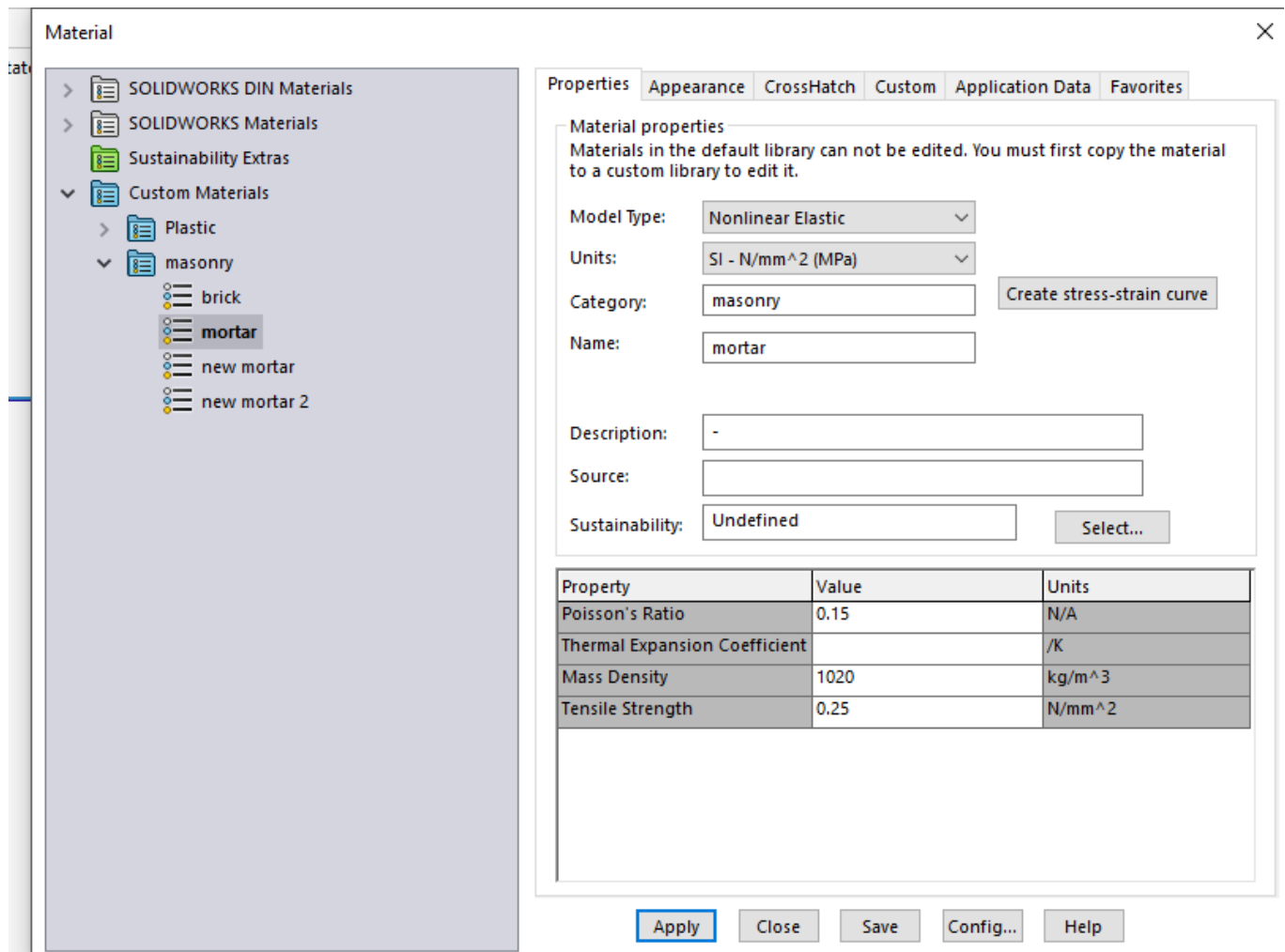
Property	Value	Units
Poisson's Ratio	0.15	N/A
Thermal Expansion Coefficient		/K
Mass Density	1020	kg/m ³
Tensile Strength	0.25	N/mm ²

At the bottom of the dialog are buttons for 'Apply', 'Close', 'Save', 'Config...', and 'Help'.

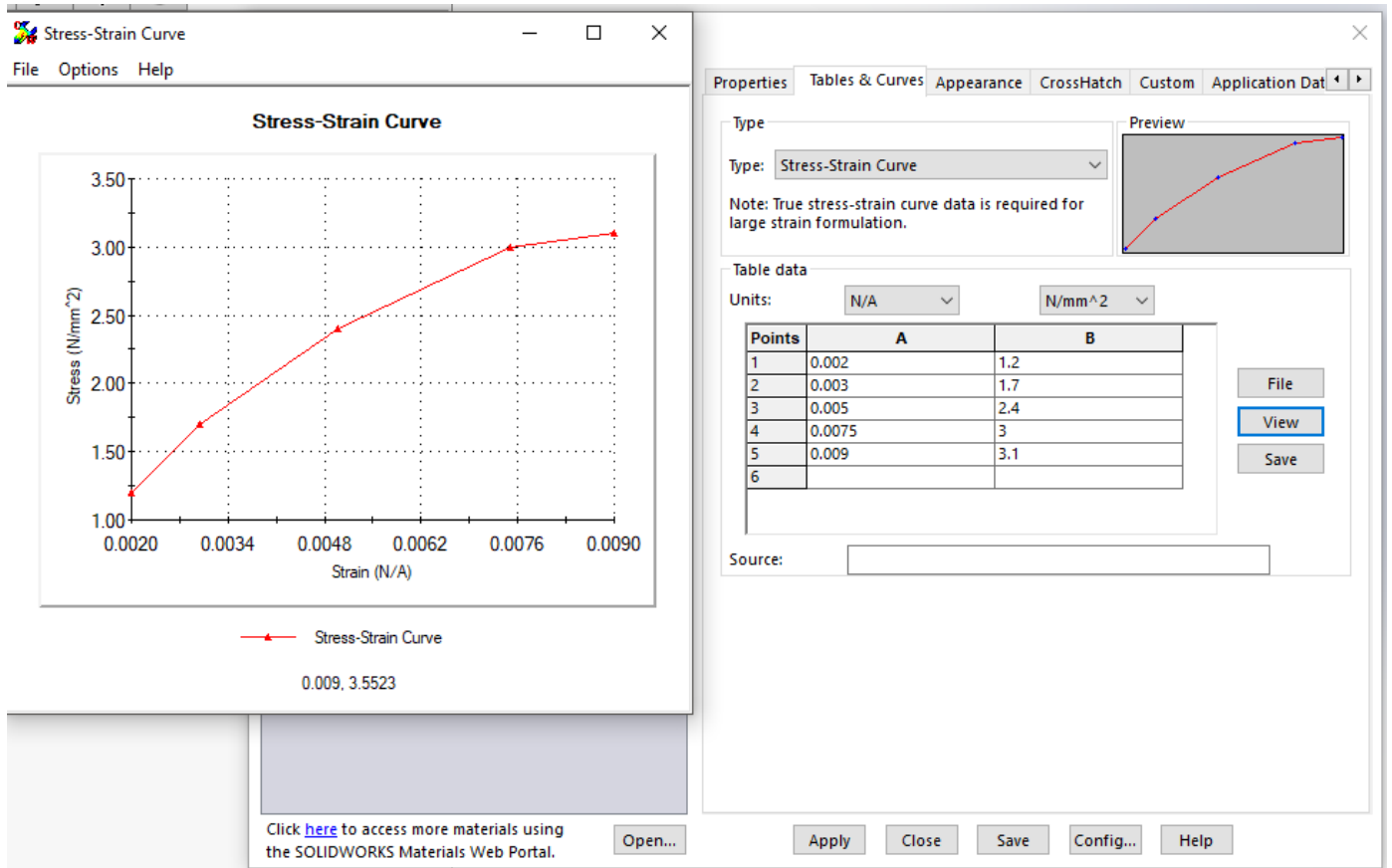
Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης τούβλου



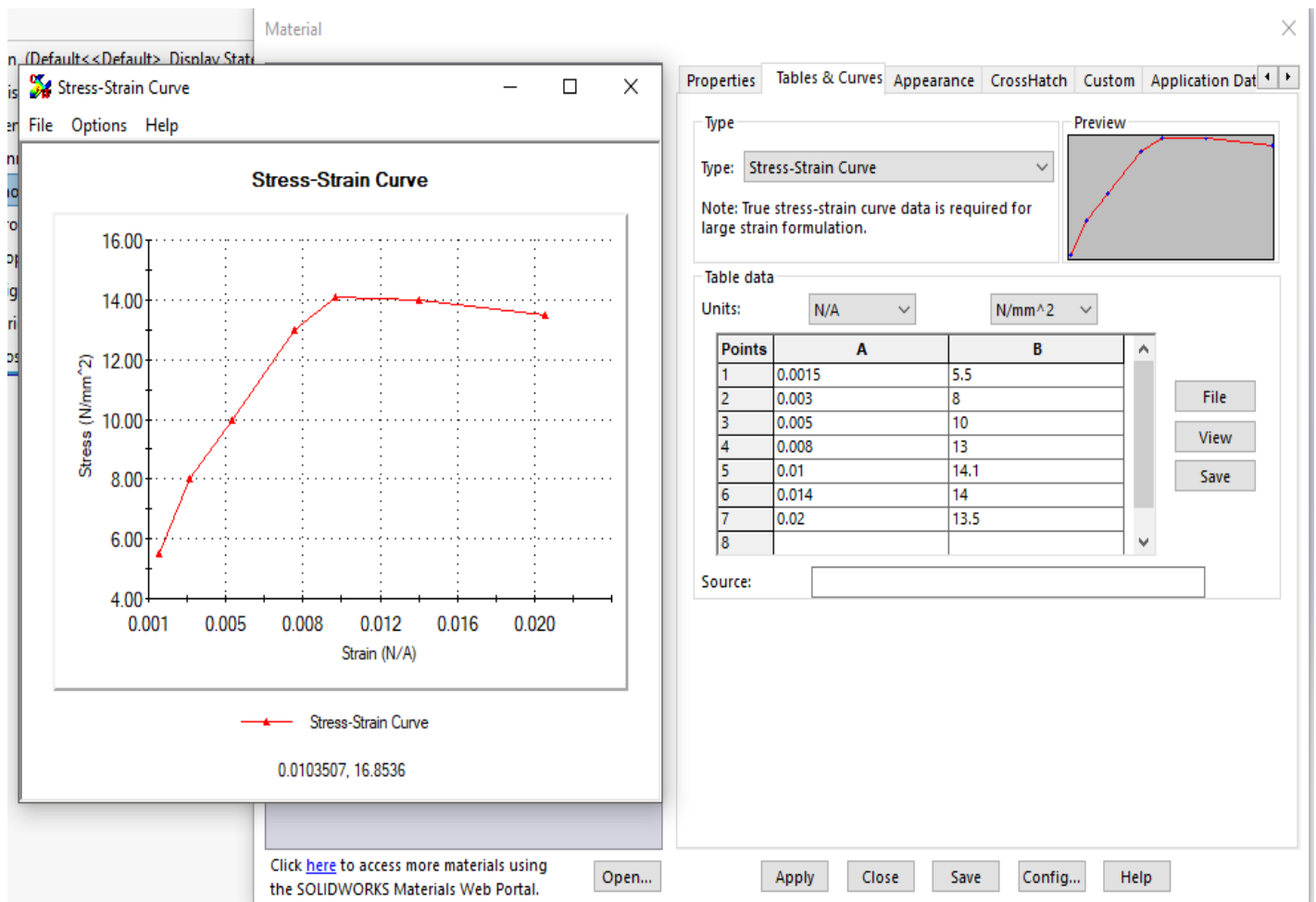
Χαρακτηριστικά Κονιάματος



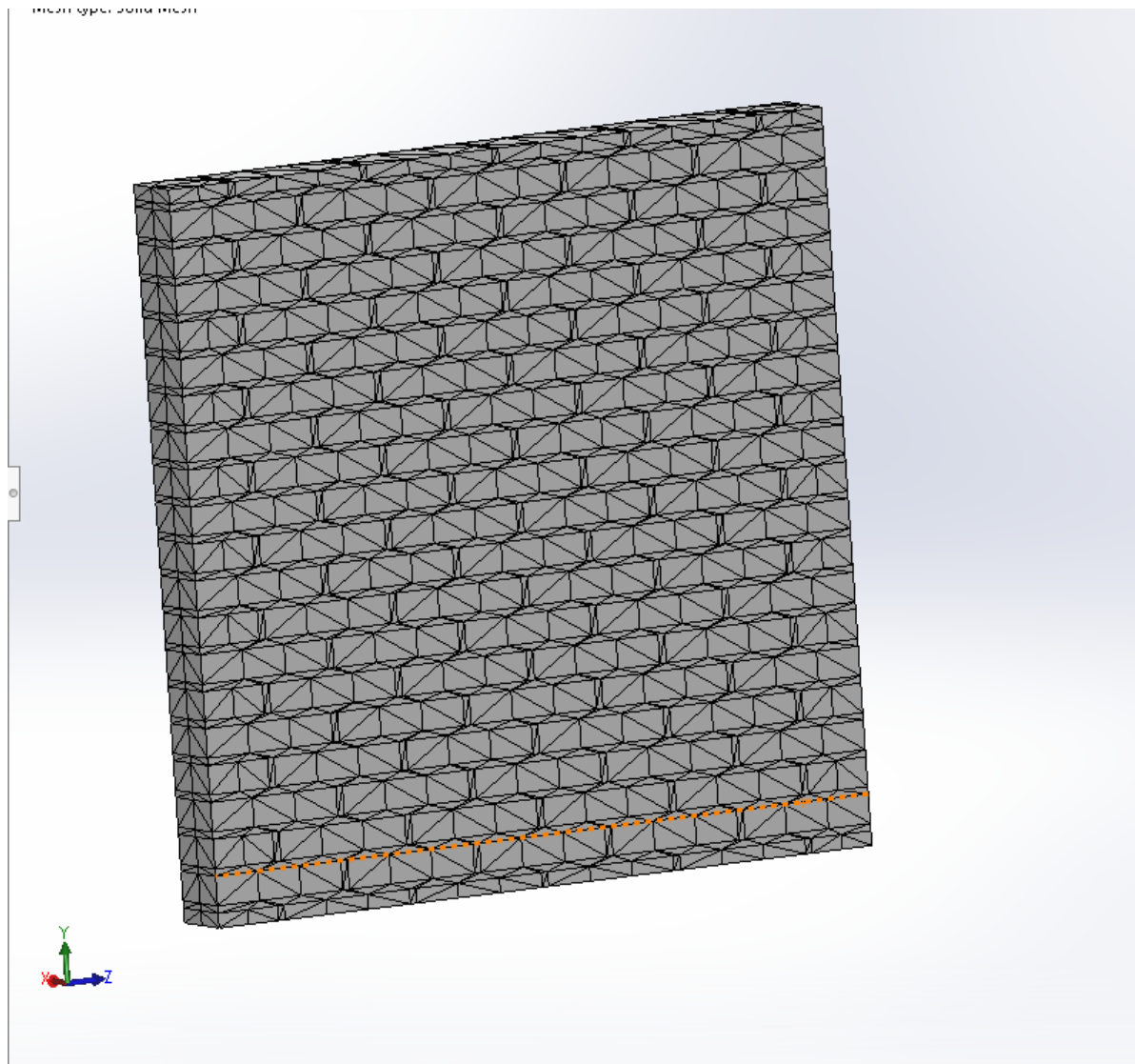
Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης κονιάματος



Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης Ενισχυμένου κονιάματος



Απεικόνιση Τοίχου μετά τη διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (meshing).

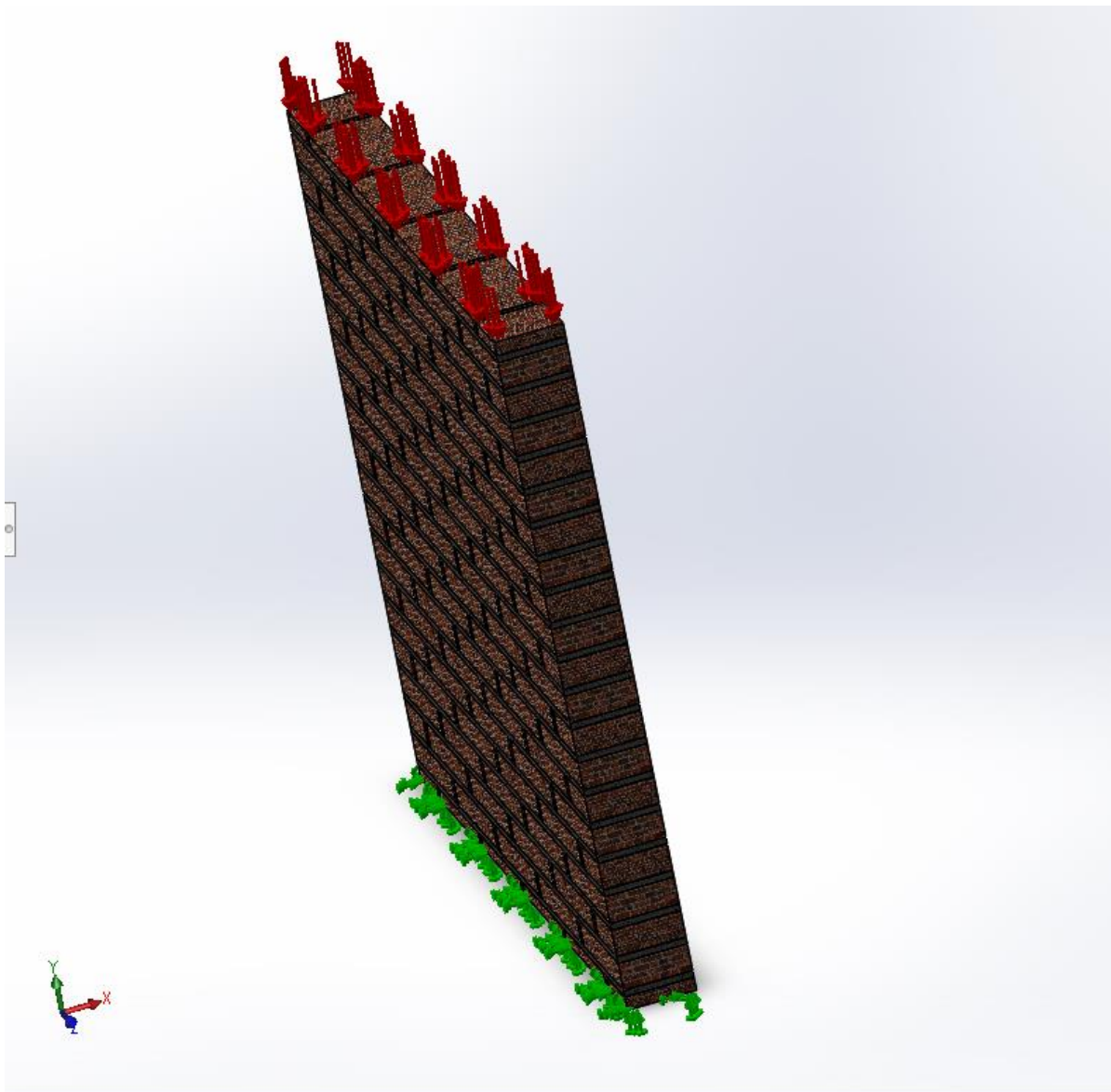


3.3) Σημεία Φόρτισης

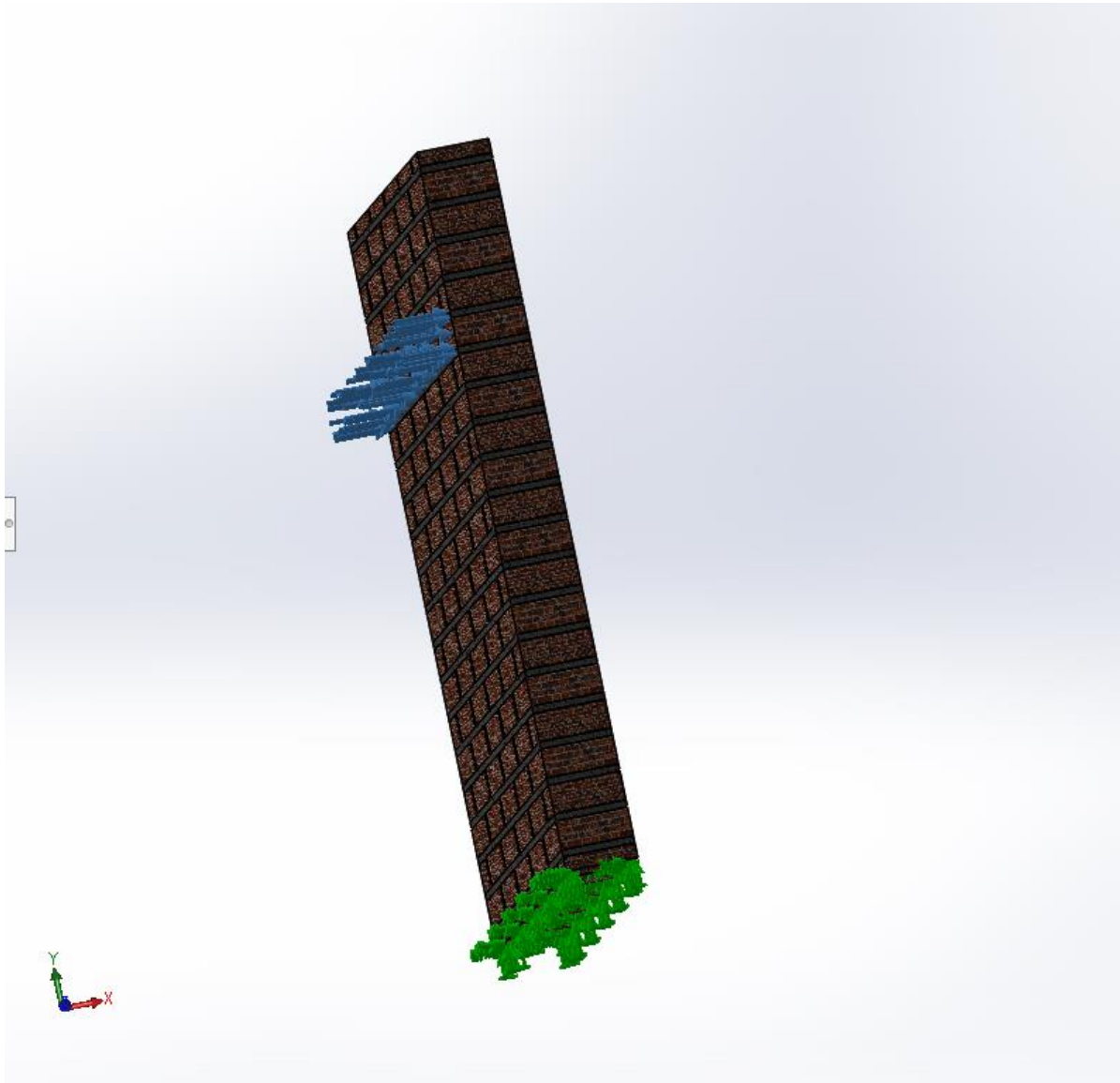
Στον τοίχο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τρία είδη φόρτισης

- Θλιπτική φόρτιση
- Διατμητική φόρτιση
 - Προς μία κατεύθυνση
 - Προς δύο κατευθύνσεις
- Συνδυασμός θλιπτικής και διατμητικής φόρτισης

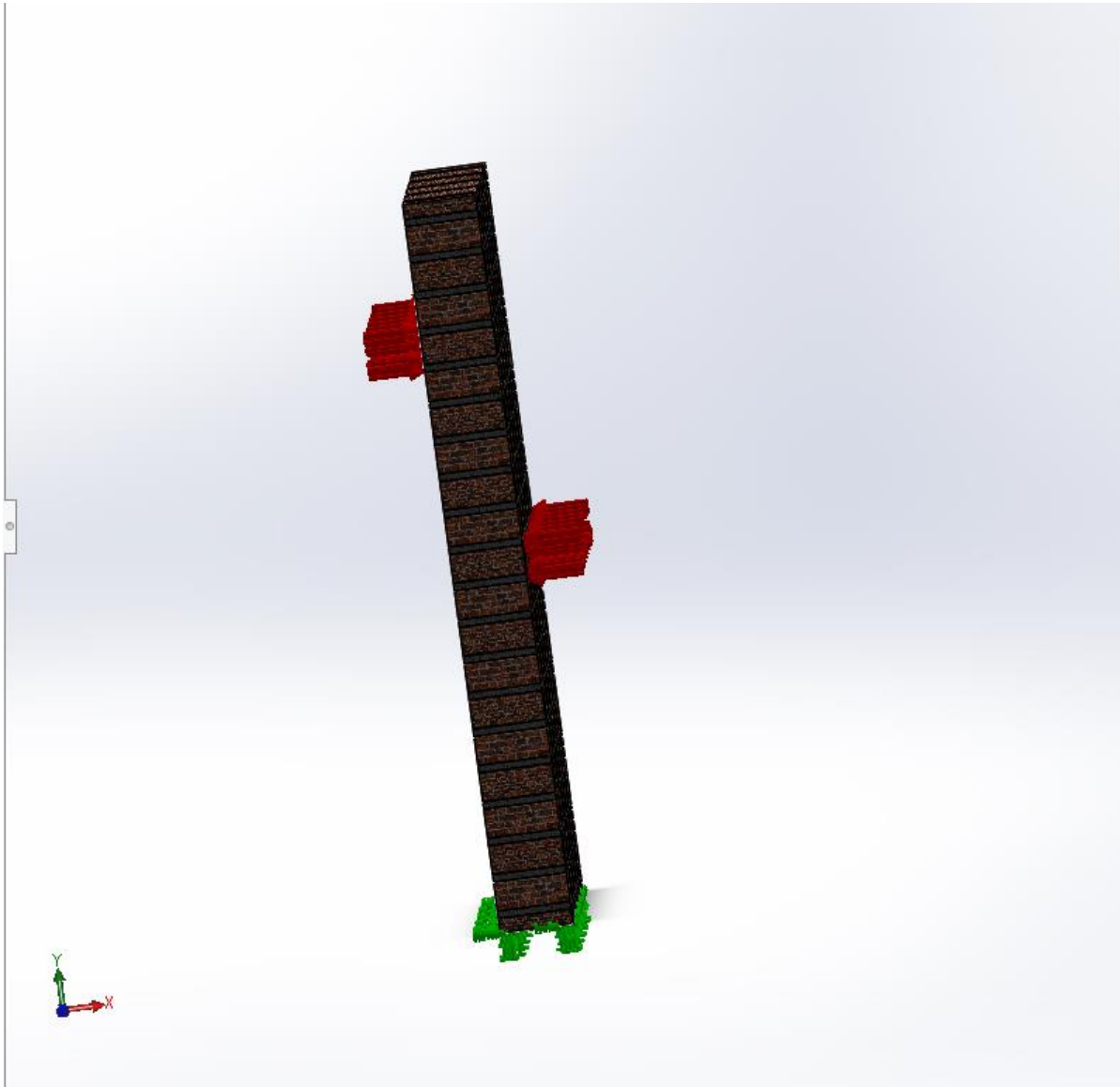
Θλιπτική



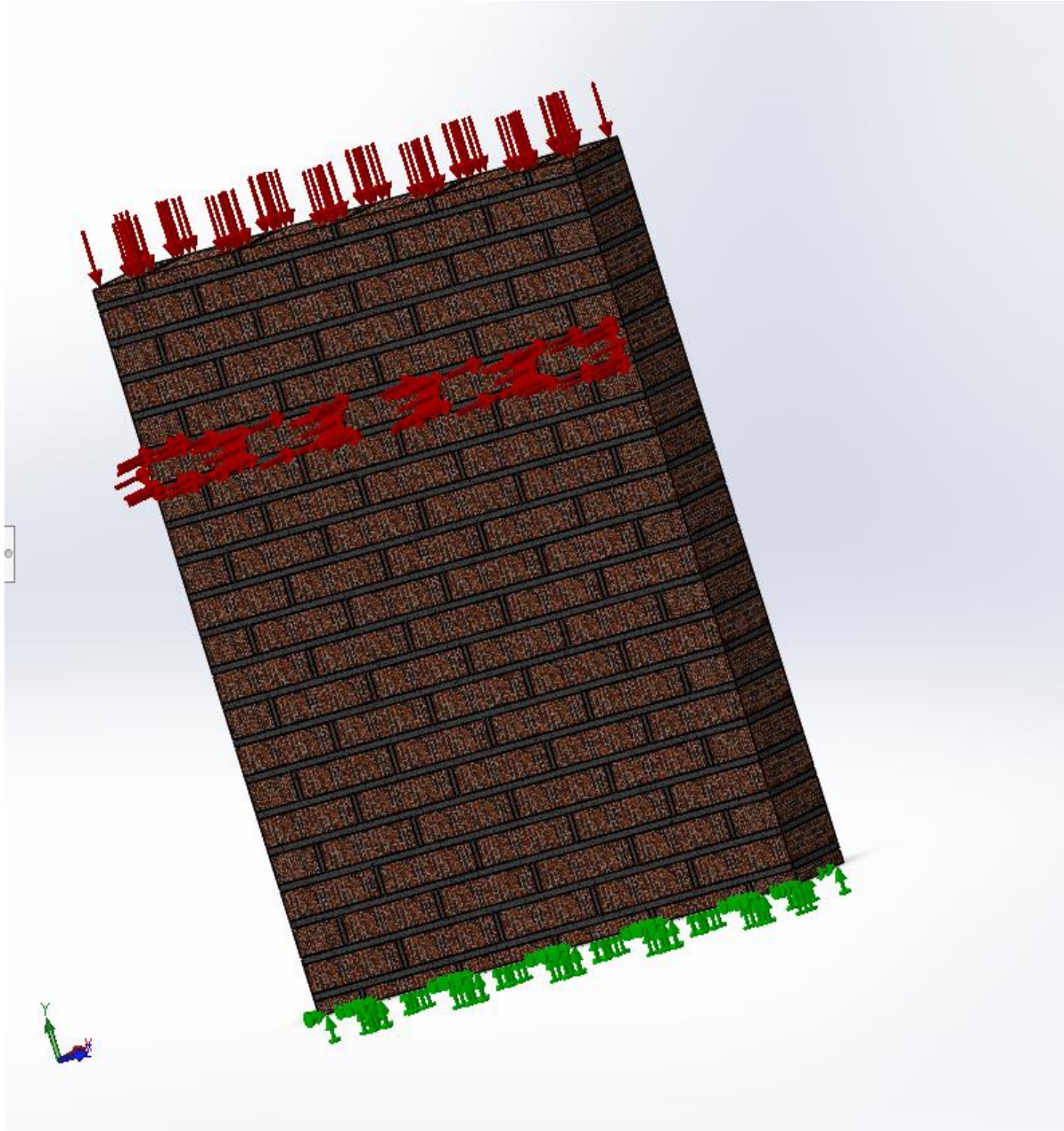
Διατμητική προς μία κατεύθυνση



Διατμητική προς δύο κατευθύνσεις



Συνδυασμός θλιπτικής και διατμητικής φόρτισης



Κεφάλαιο 4ο - Αναλύσεις και Αποτελέσματα

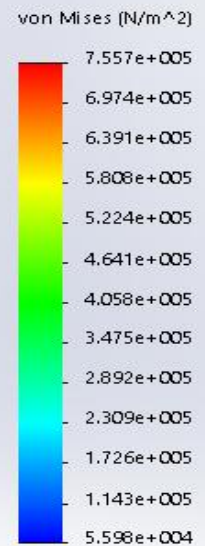
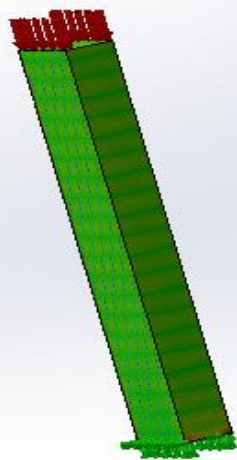
Σ' αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι πραγματοποιήθηκαν αρκετές γραμμικές στατικές αναλύσεις πριν τις Μη- γραμμικές, προκειμένου να μας βοηθήσουν να βρούμε το εύρος των πιέσεων που οδηγούν το μοντέλο μας σε αστοχία.

4.1) Μη γραμμική ανάλυση θλιπτικής φόρτισης

Η πίεση που ασκήθηκε στα σημεία φόρτισης είναι **0.475 MPa**

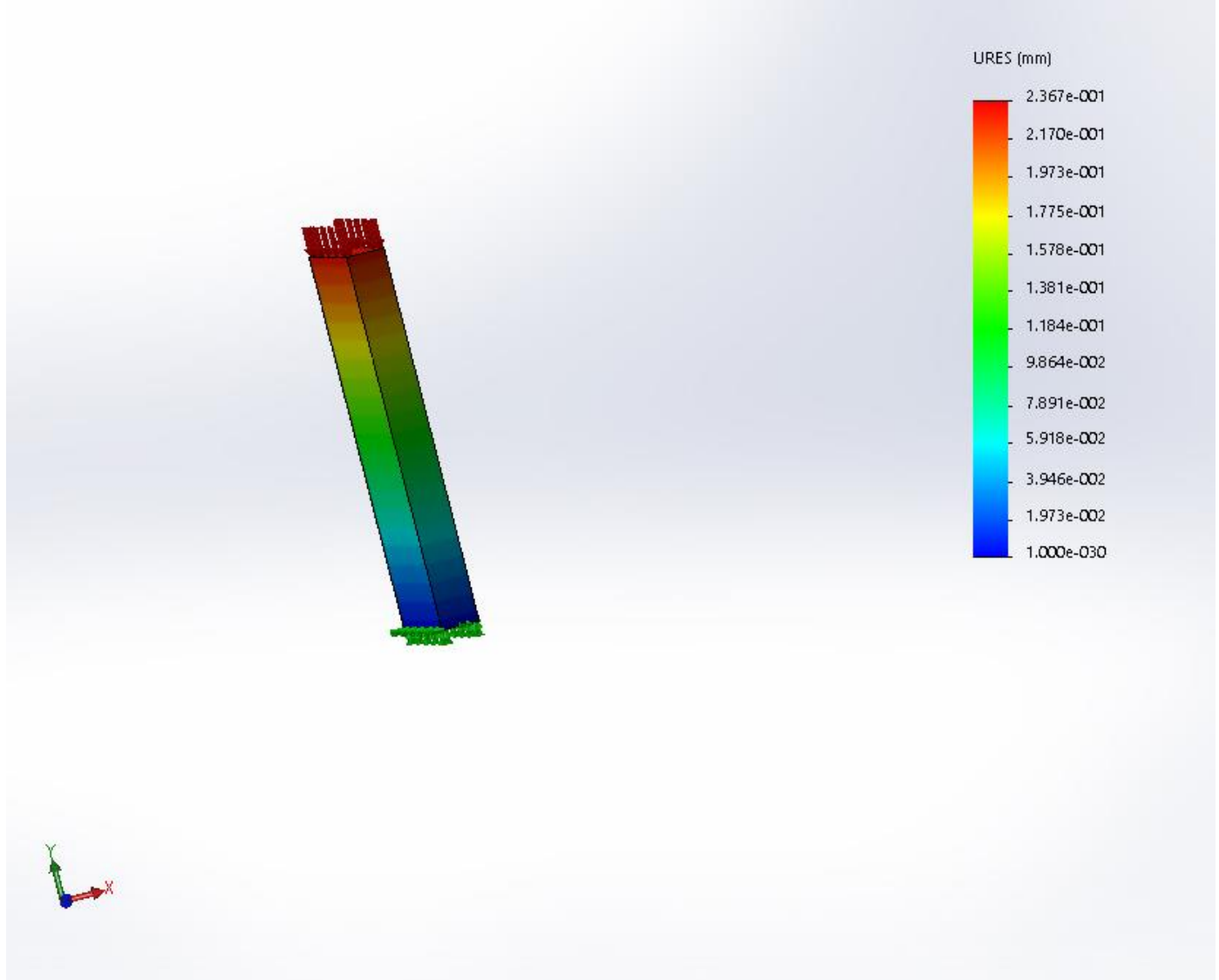
Απεικόνιση Τάσεων

Model name: box4
Study name: thlip0_475(- Default-)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



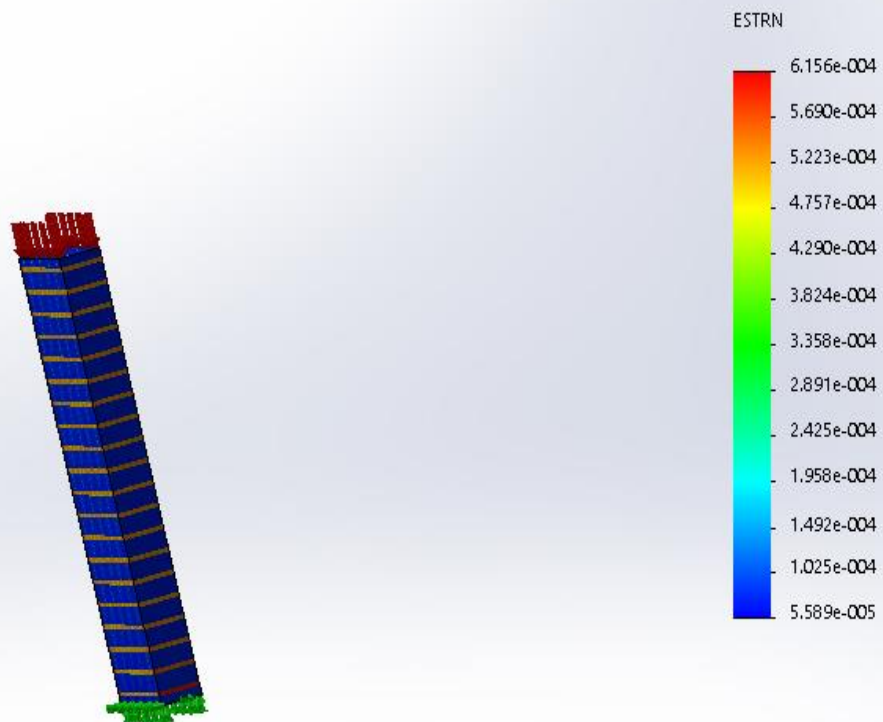
Απεικόνιση Μετατοπίσεων

Model name: box4
Study name: thlipQ_475(- Default-)
Plot type: Nonlinear Displacement Displacement1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



Απεικόνιση Παραμορφώσεων

Model name: box4
Study name: thlpQ_475(- Default-)
Plot type: Total Strain Strain1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



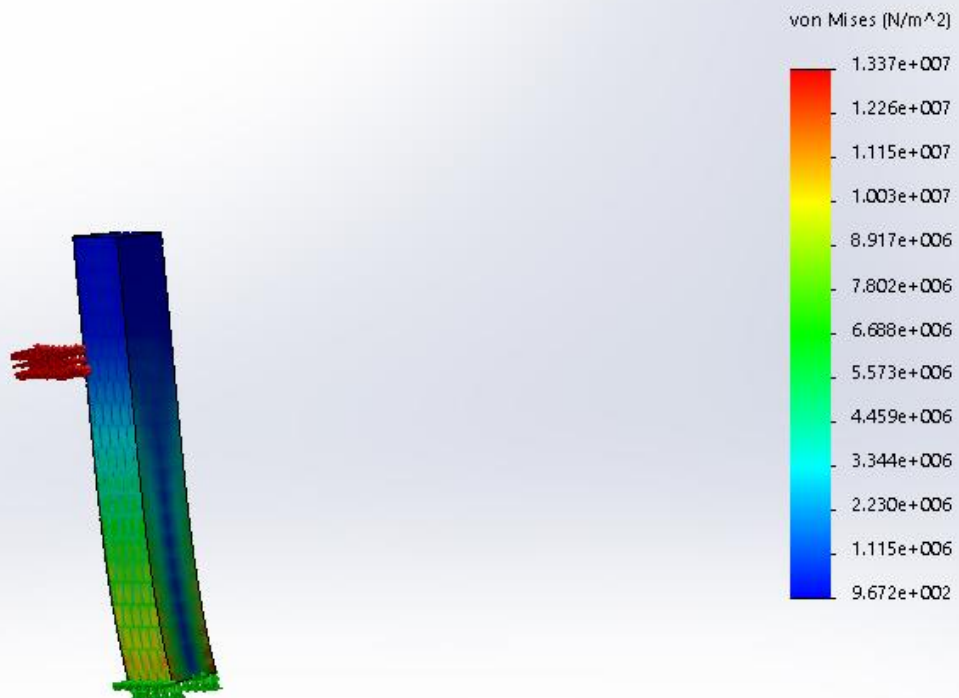
4.2) Μη γραμμική ανάλυση διατμητικής φόρτισης

4.2.1) Προς μία κατεύθυνση

Η πίεση που ασκήθηκε στα σημεία φόρτισης είναι **0.475 MPa**

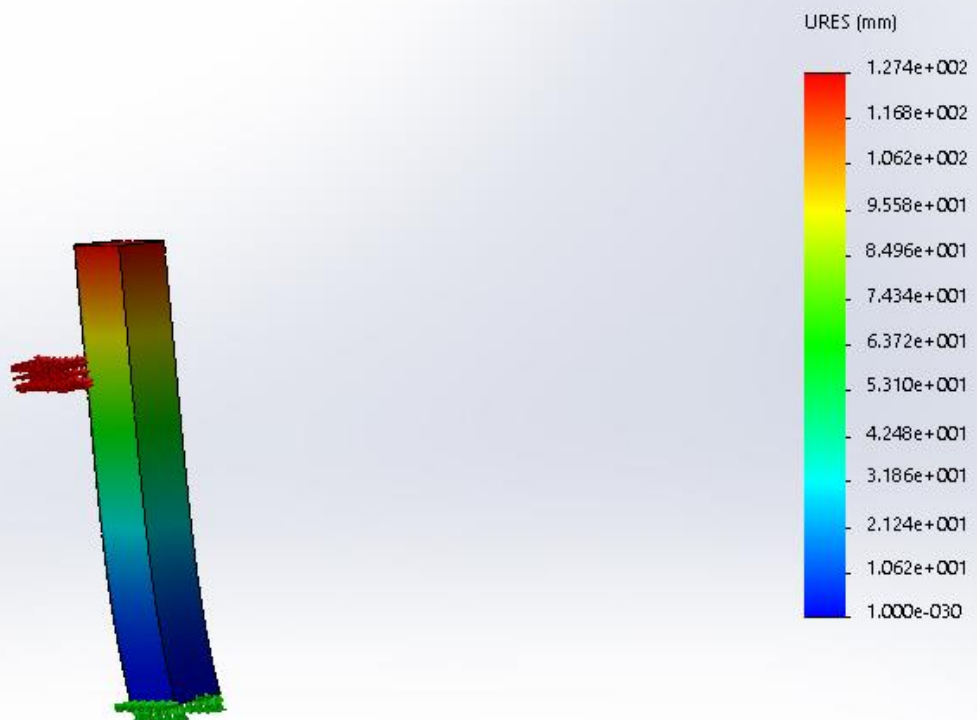
Απεικόνιση Τάσεων

Model name: box4
Study name: diatn0_475(-Default)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



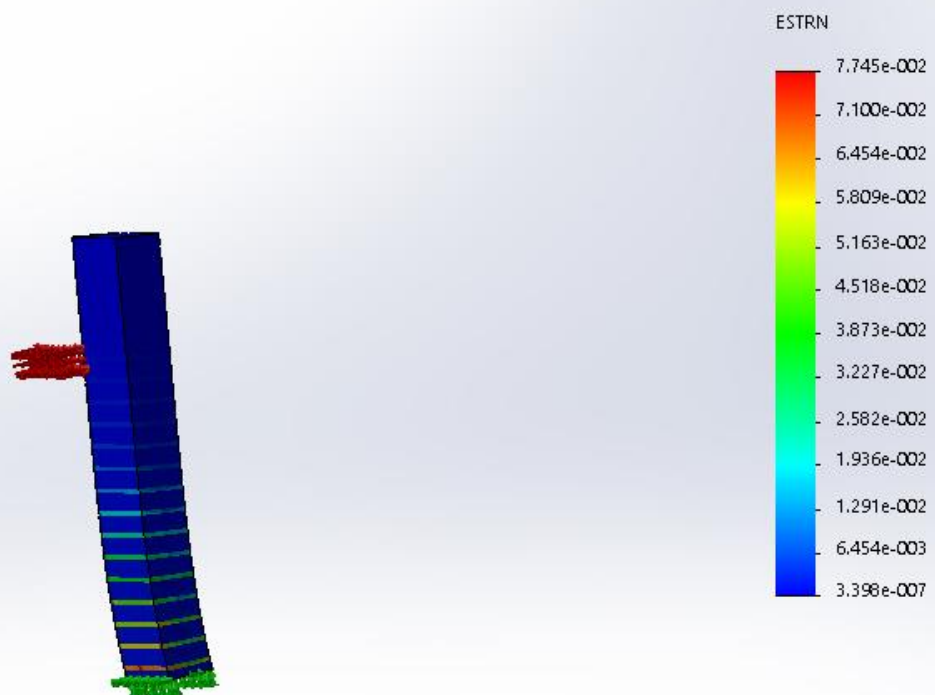
Απεικόνιση Μετατοπίσεων

Model name: box4
Study name: diatn0_475(-Default)
Plot type: Nonlinear Displacement Displacement1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



Απεικόνιση Παραμορφώσεων

Model name: box4
Study name: diamQ_475(-Default)
Plot type: Total Strain Strain1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1

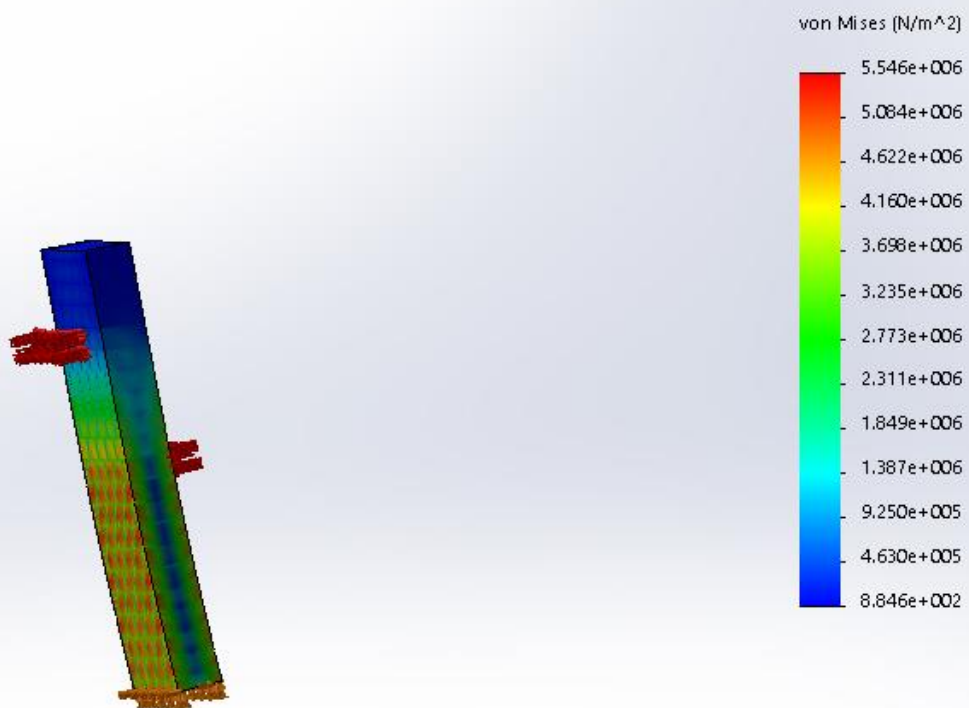


4.2.2) Προς δύο κατευθύνσεις

Η πίεση που ασκήθηκε στα σημεία φόρτισης είναι **0.475 MPa**

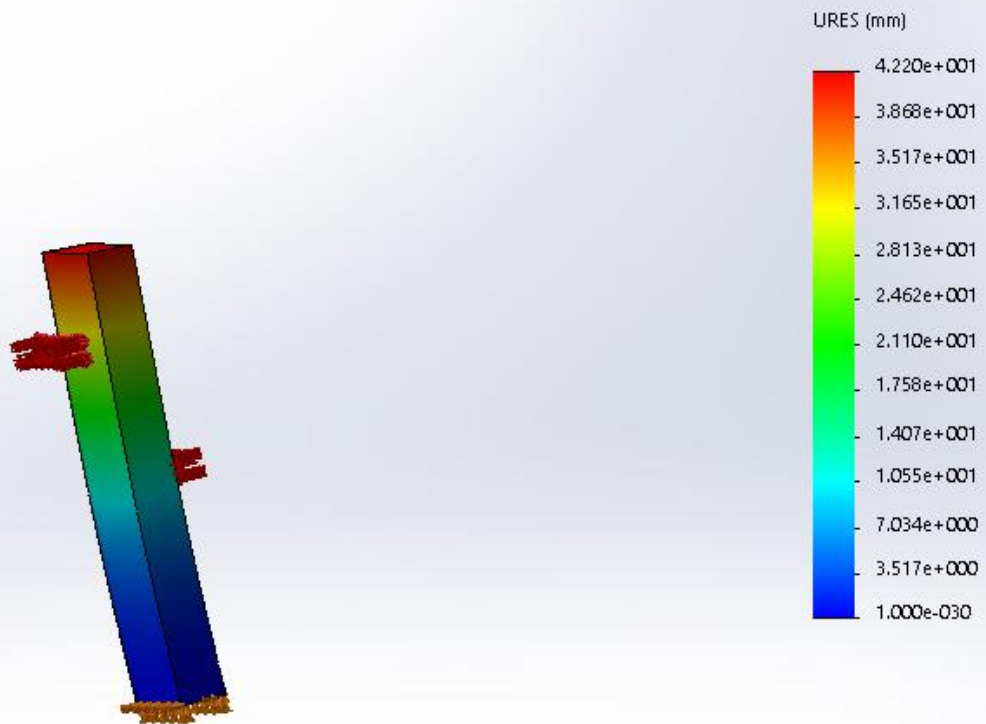
Απεικόνιση Τάσεων

Model name: box4
Study name: 2plhdiatmQ_475(-Default-)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



Απεικόνιση Μετατοπίσεων

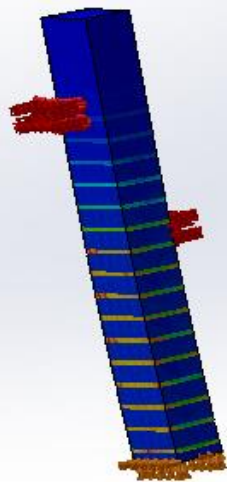
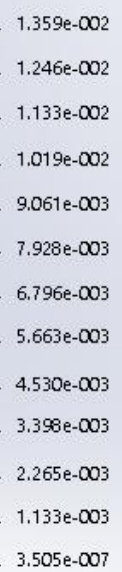
Model name: box4
Study name: 2plhdiatm0_475(-Default-)
Plot type: Nonlinear Displacement Displacement1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



Απεικόνιση Παραμορφώσεων

Model name: box4
Study name: 2plhdiatm0_475(-Default-)
Plot type: Total Strain Strain1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1

ESTRN



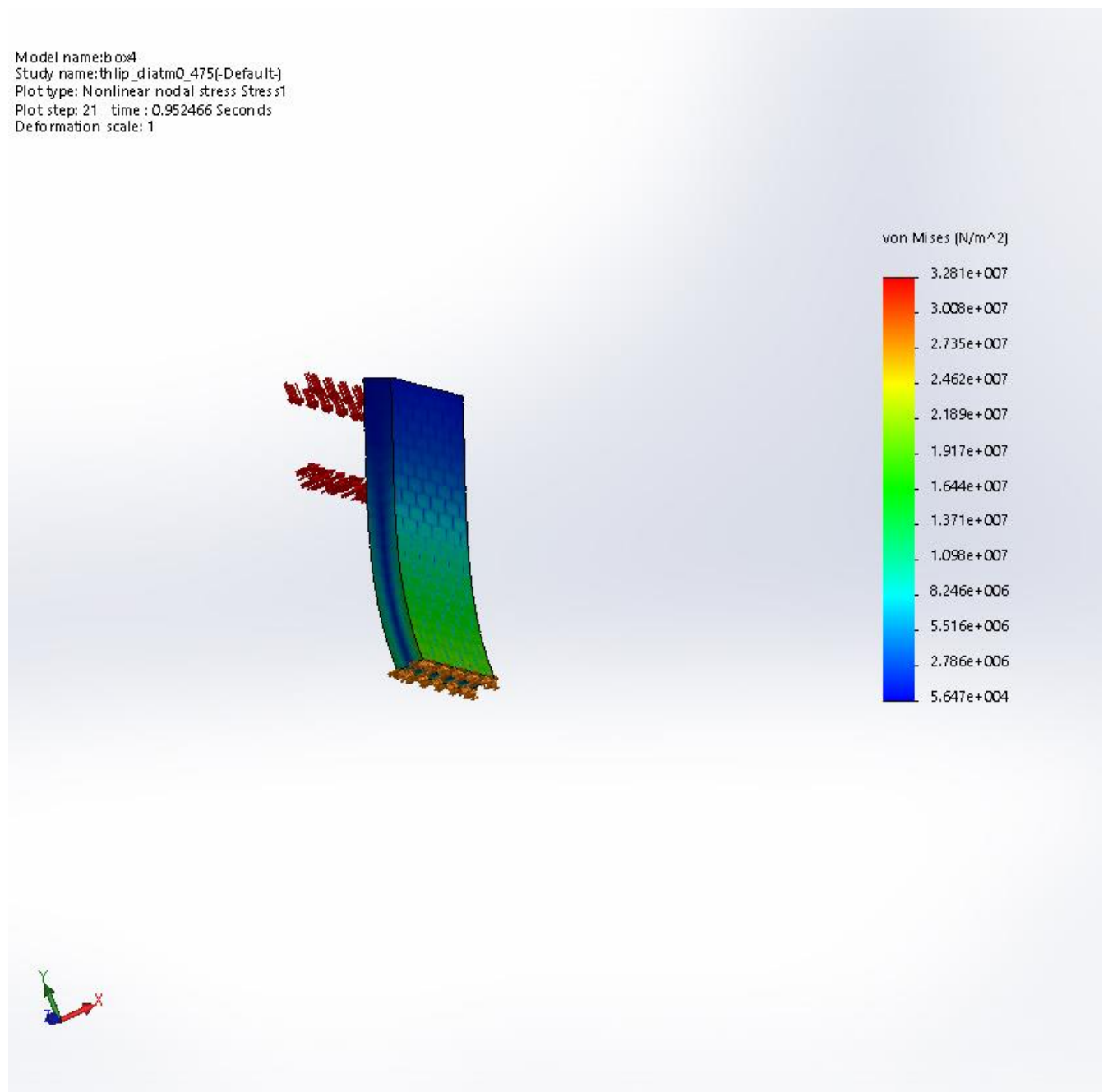
4.3) Μη γραμμική ανάλυση θλιπτικής και διατμητικής φόρτισης

Η πίεση που ασκήθηκε στα σημεία φόρτισης είναι **0.475 MPa**, όμοια με τις προηγούμενες αναλύσεις.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, όμως, παρατηρήθηκε αστοχία του μοντέλου μας λίγο πριν την ολοκλήρωση της.

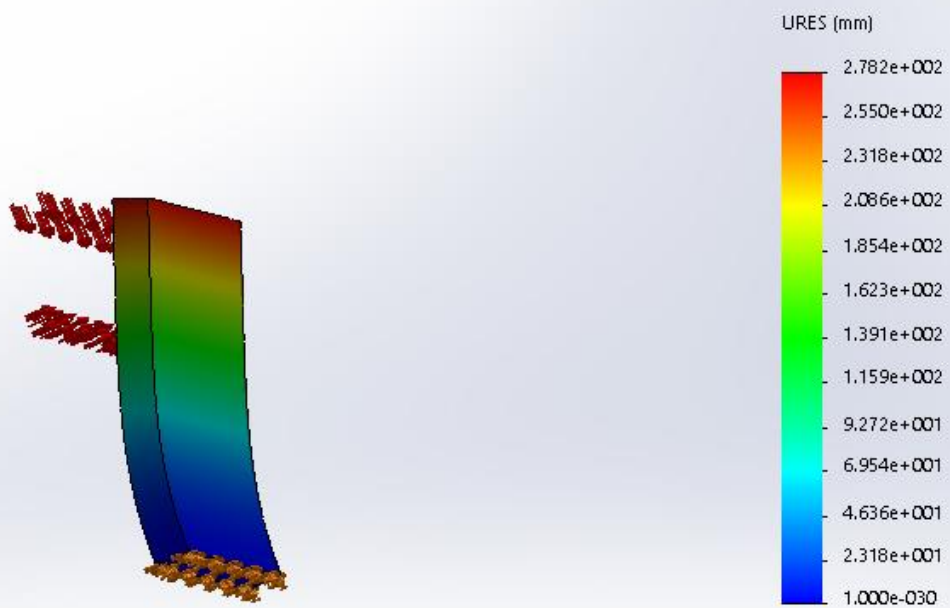
Απεικόνιση Τάσεων

Model name: box4
Study name: thlip_diatm0_475(-Default-)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 21 time : 0.952466 Seconds
Deformation scale: 1



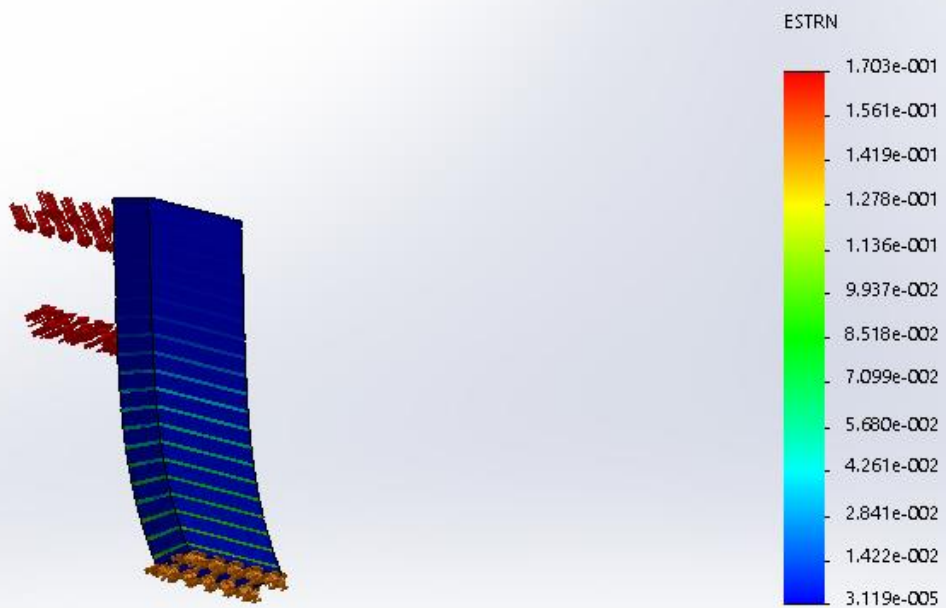
Απεικόνιση Μετατοπίσεων

Model name: box4
Study name: thlip_diatm0_475(-Default-)
Plot type: Nonlinear Displacement Displacement1
Plot step: 21 time : 0.952466 Seconds
Deformation scale: 1

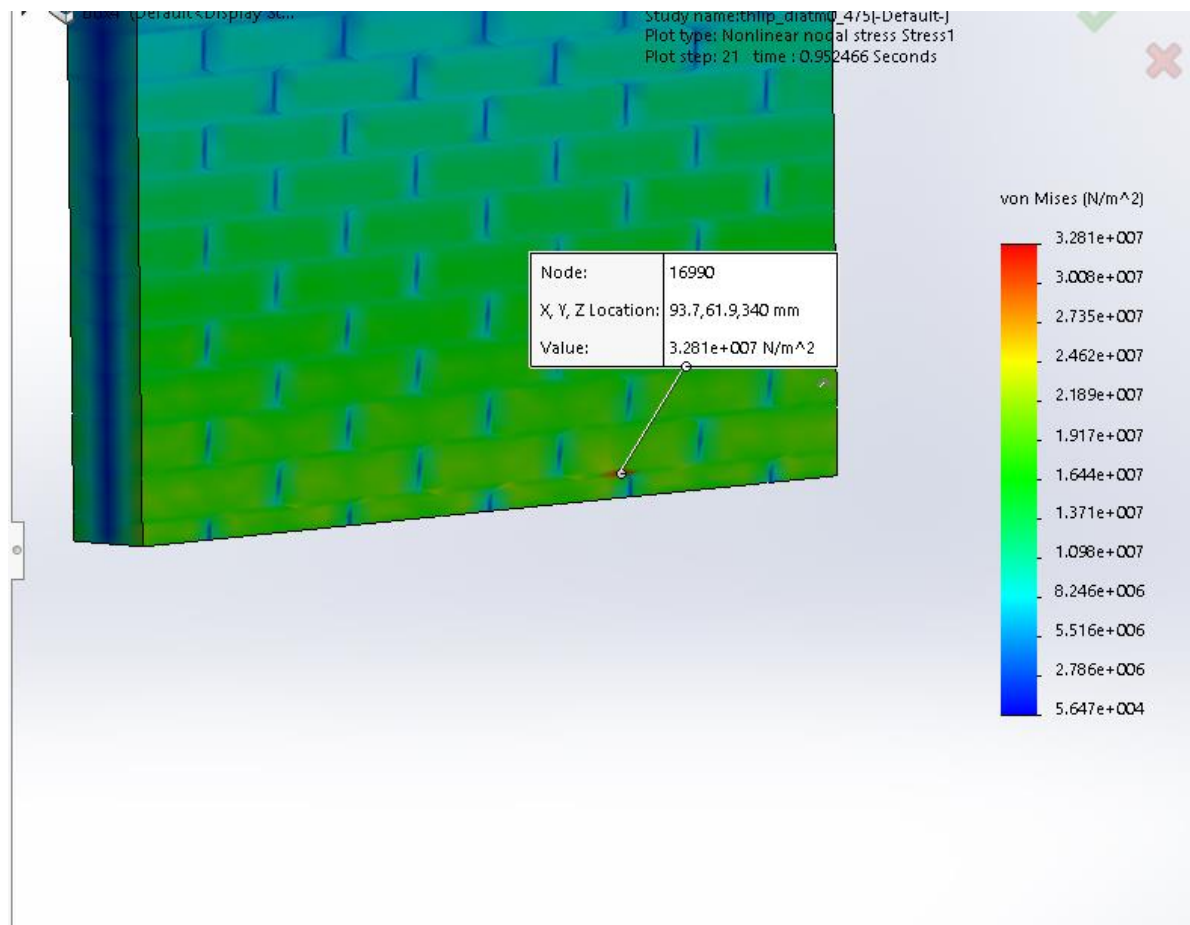


Απεικόνιση Παραμορφώσεων

Model name: box4
Study name: thlip_diatm0_475(-Default-)
Plot type: Total Strain Strain1
Plot step: 21 time : 0.952466 Seconds
Deformation scale: 1

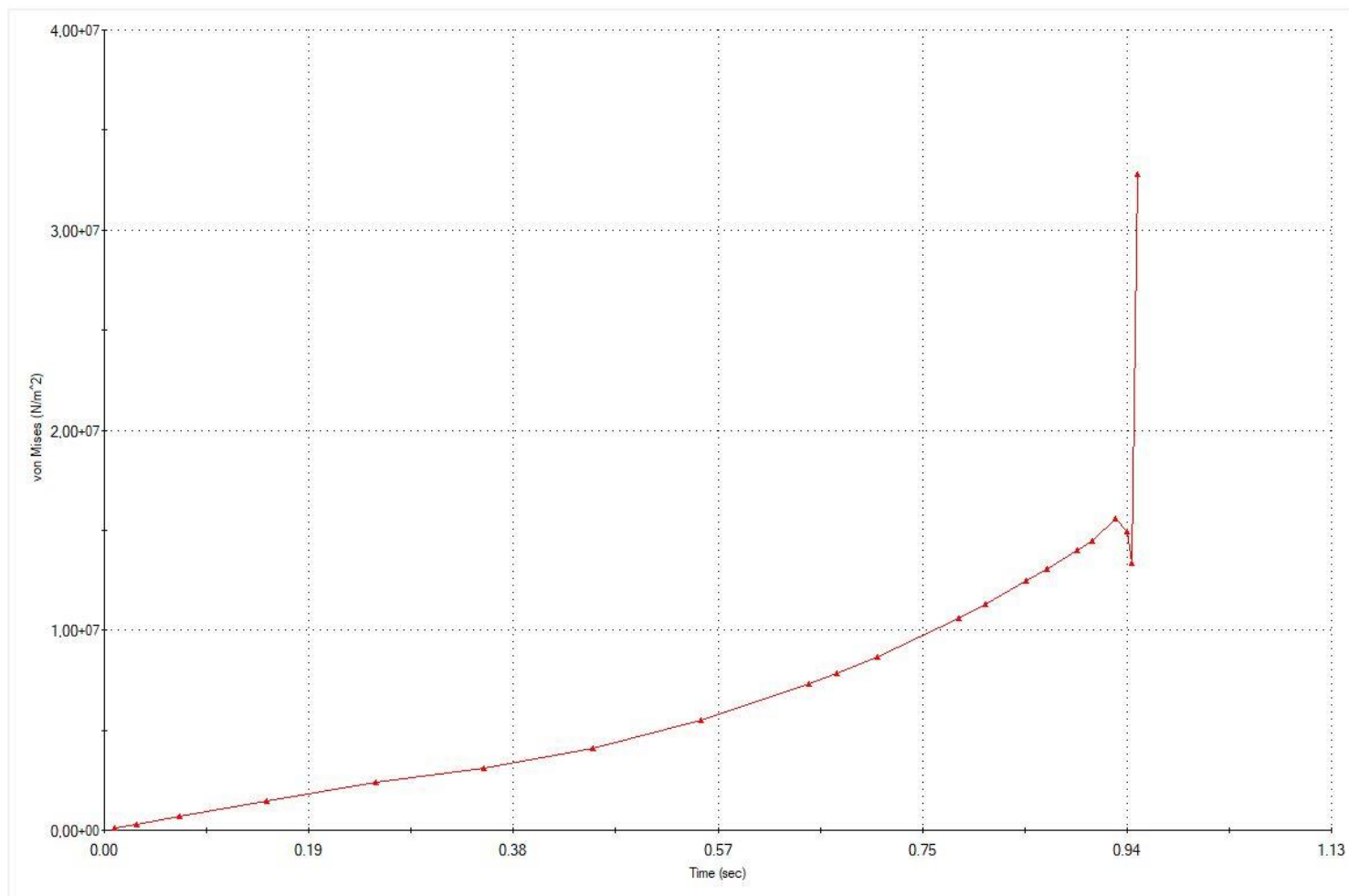


4.3.1) Σημείο Αστοχίας του τοίχου και γραφικές αναλύσεις



Γραφική Απεικόνιση Τάσης- Χρόνου για το συγκεκριμένο σημείο

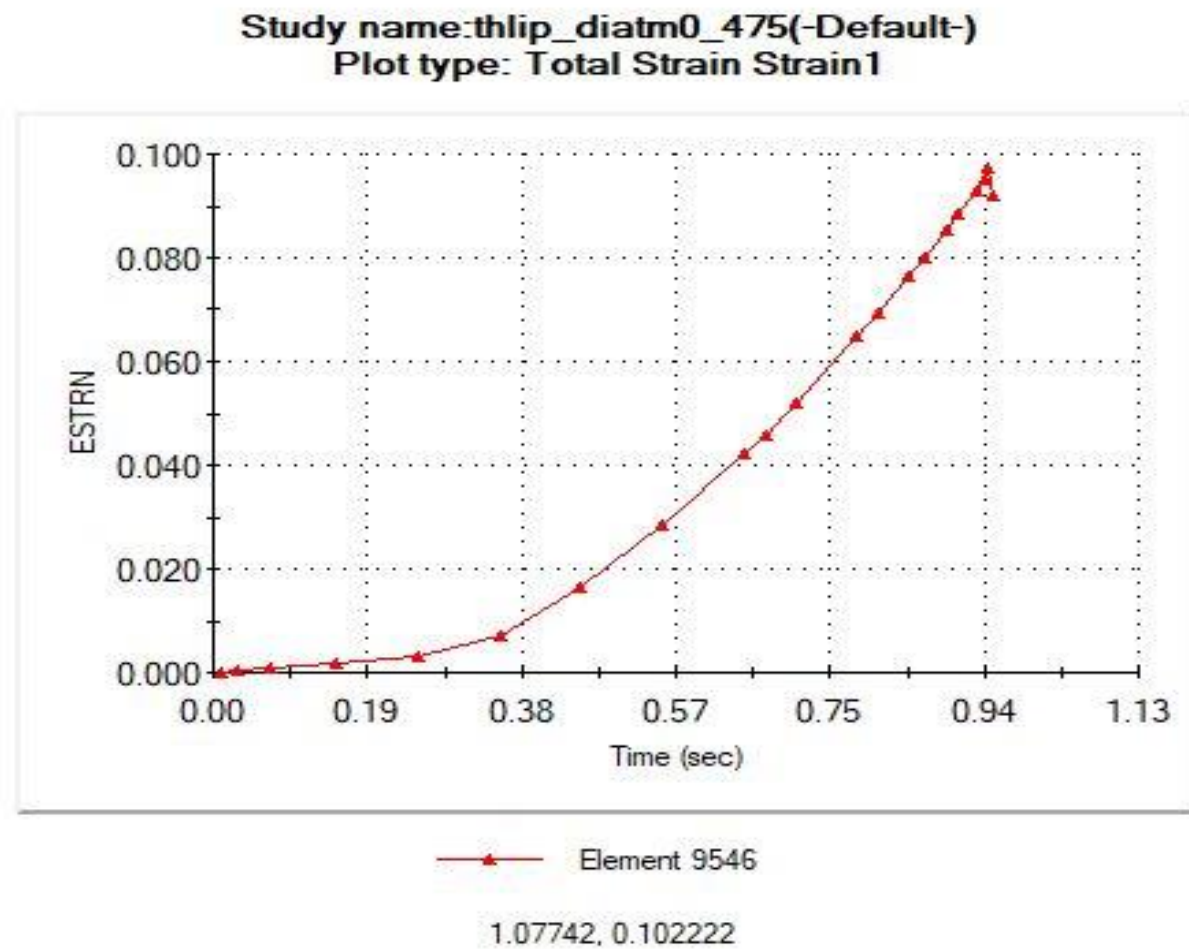
Study name: thlip_diatm0_475(-Default-)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1



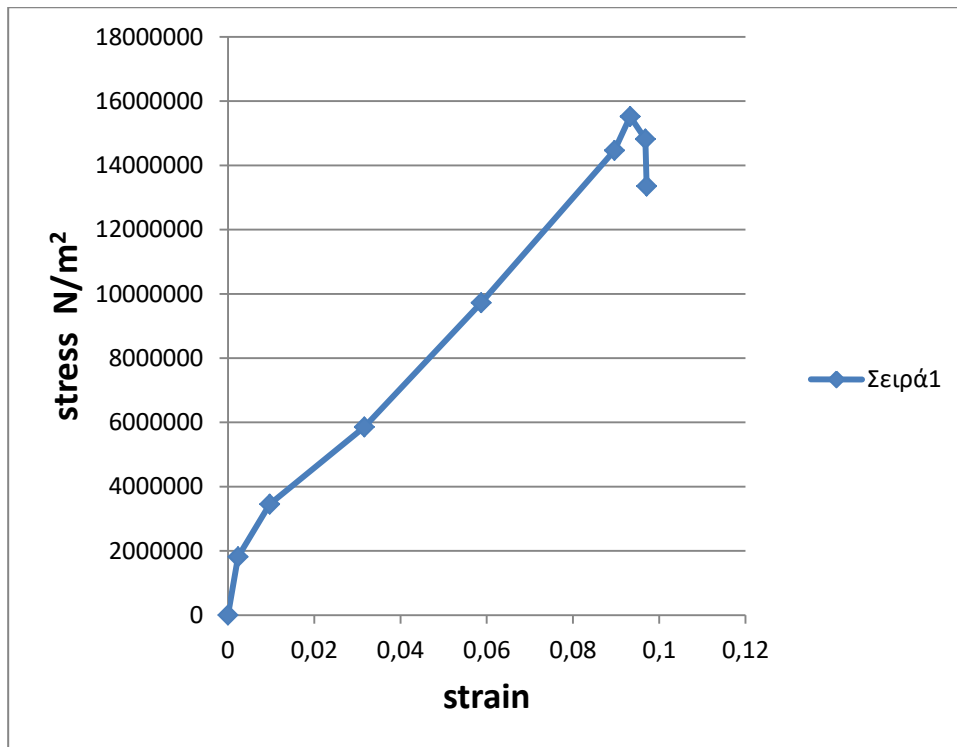
Node 16990

0.546457, 3.68e+007

Γραφική Απεικόνιση Παραμόρφωσης-Χρόνου για το συγκεκριμένο σημείο

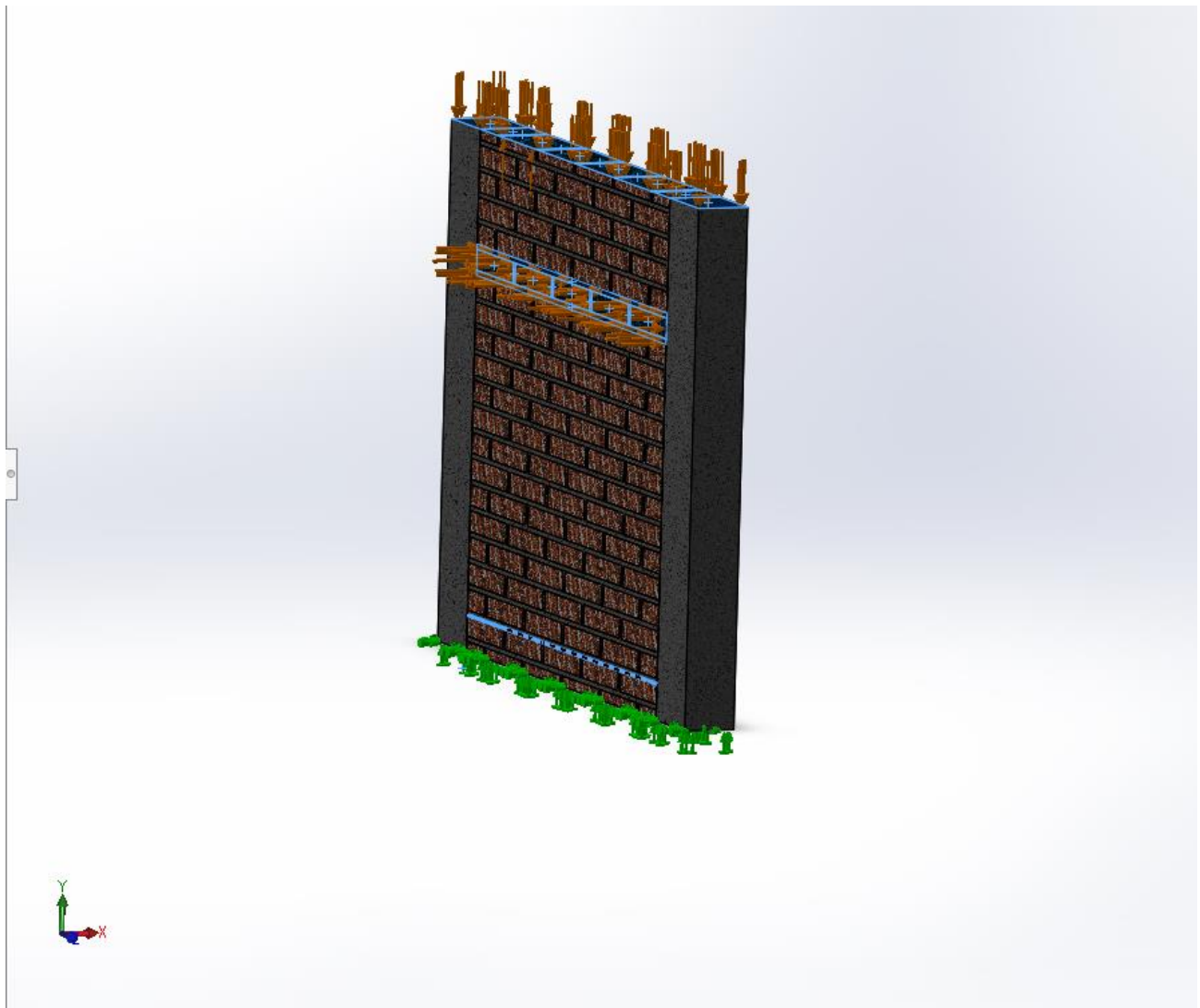


Με τη βοήθεια των παραπάνω συναρτήσεων και του υπολογιστικού φύλλου excel αποτύπωσα τη γραφική παράσταση **Τάσης-Παραμόρφωσης** για το συγκεκριμένο σημείο, για να έχουμε μία καλύτερη εικόνα του προβλήματος.



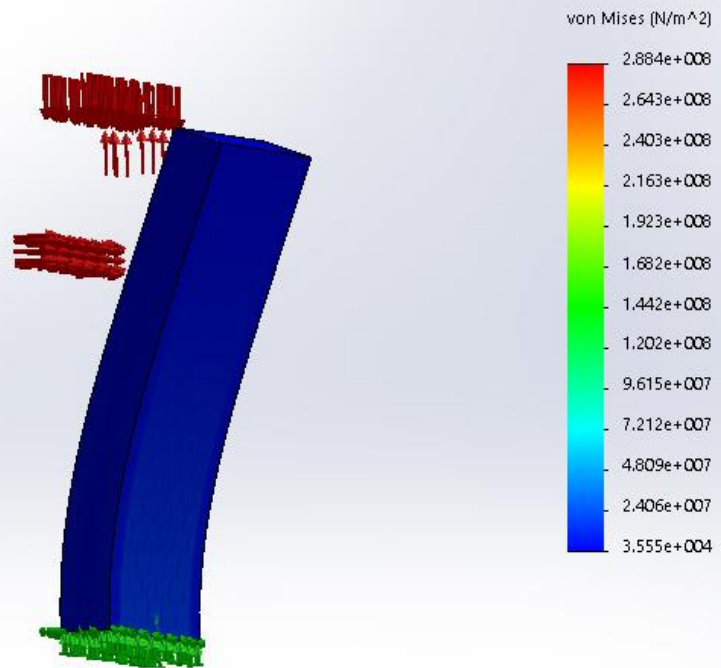
4.3.2) Ενίσχυση Τοίχου με πλευρικά Στυλώματα

Με σκοπό να αποτρέψουμε την παραπάνω αστοχία του τοίχου τοποθετήσαμε πλευρικά στυλώματα από κονίαμα και πραγματοποιήσαμε ξανά την ίδια ανάλυση με τις ίδιες φορτίσεις. Παρ'όλα αυτά ούτε σε αυτή την περίπτωση περατώθηκε η ανάλυση. Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης



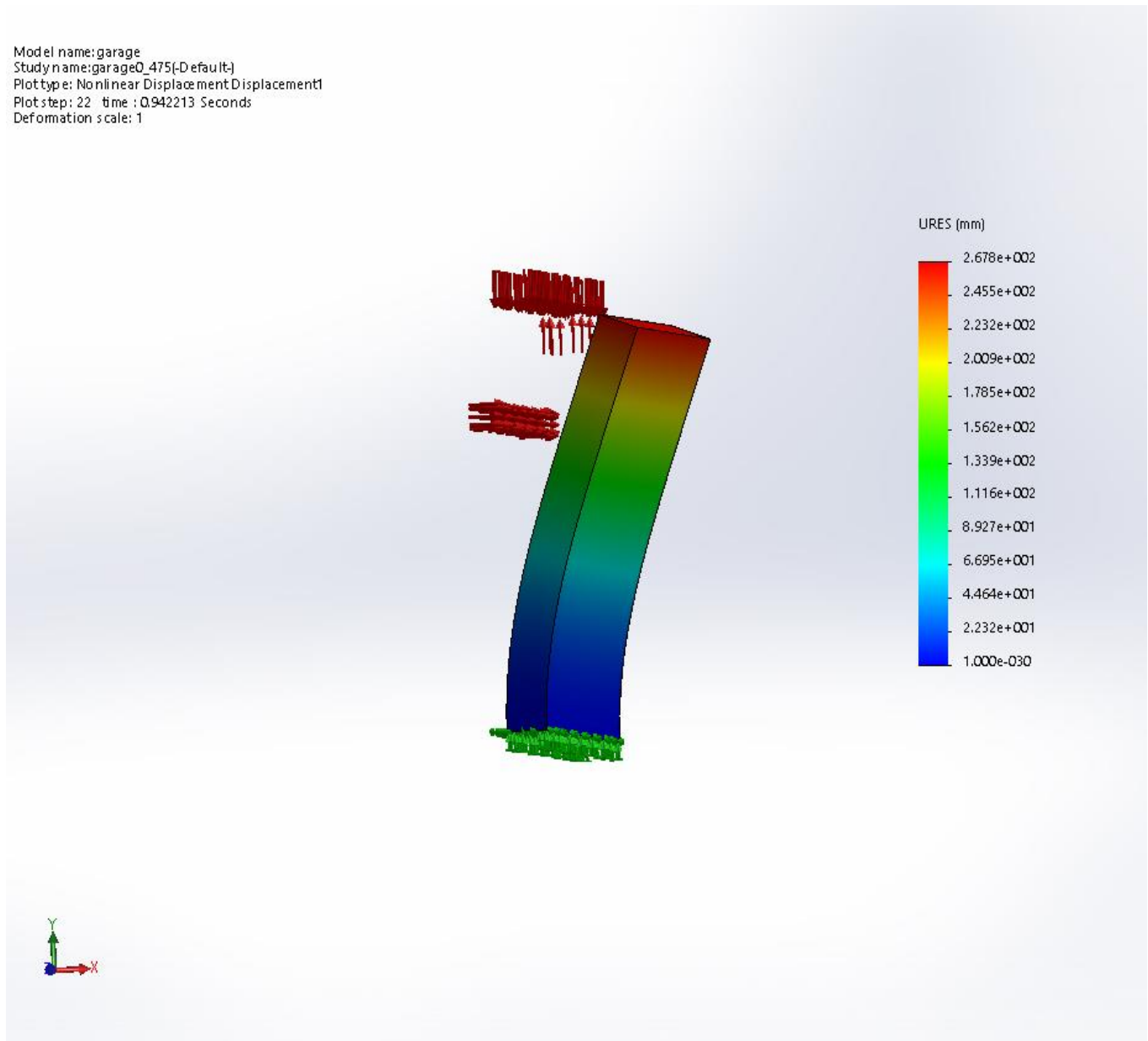
Απεικόνιση Τάσεων

Model name: garage
Study name: garageQ_475(Default)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 22 time : 0.942213 Seconds
Deformation scale: 1



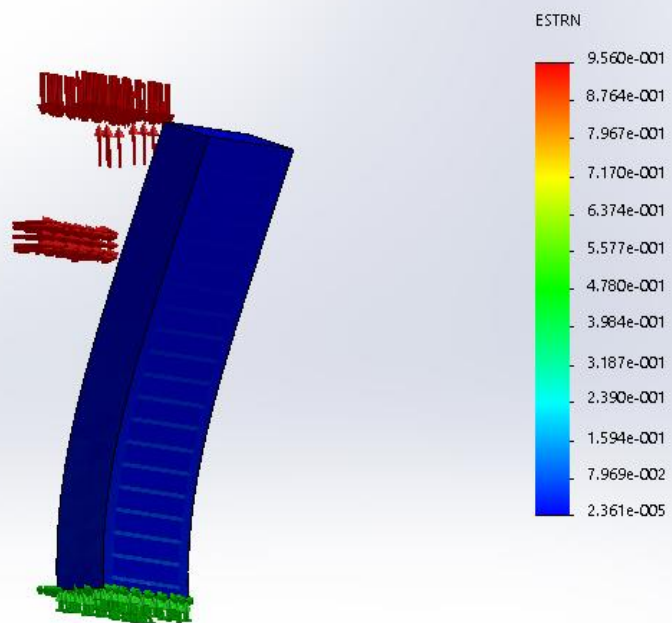
Απεικόνιση Μετατοπίσεων

Model name: garage
Study name: garage0_475(-Default)
Plot type: Nonlinear Displacement/Displacement1
Plot step: 22 time : 0.942213 Seconds
Deformation scale: 1

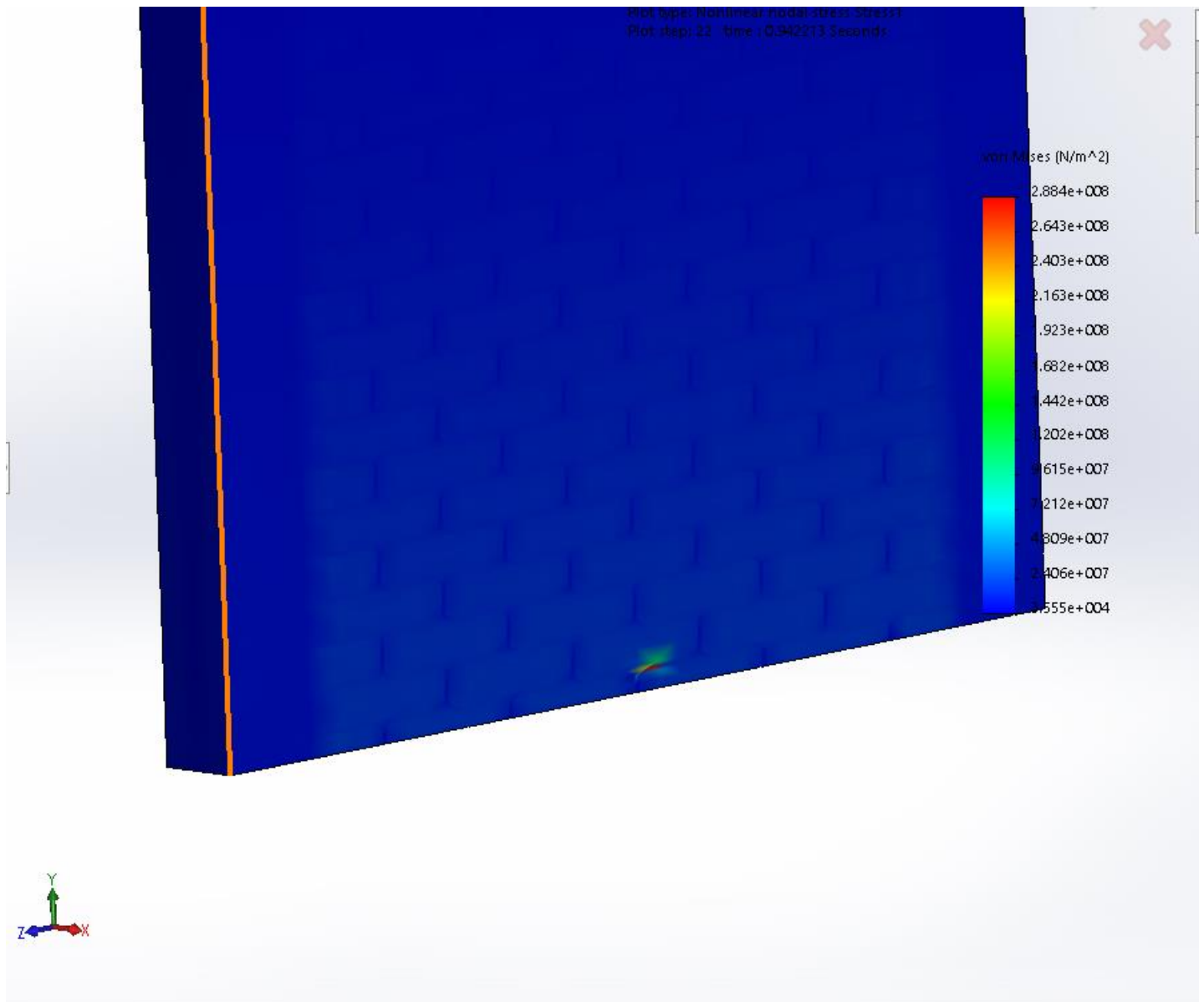


Απεικόνιση Παραμορφώσεων

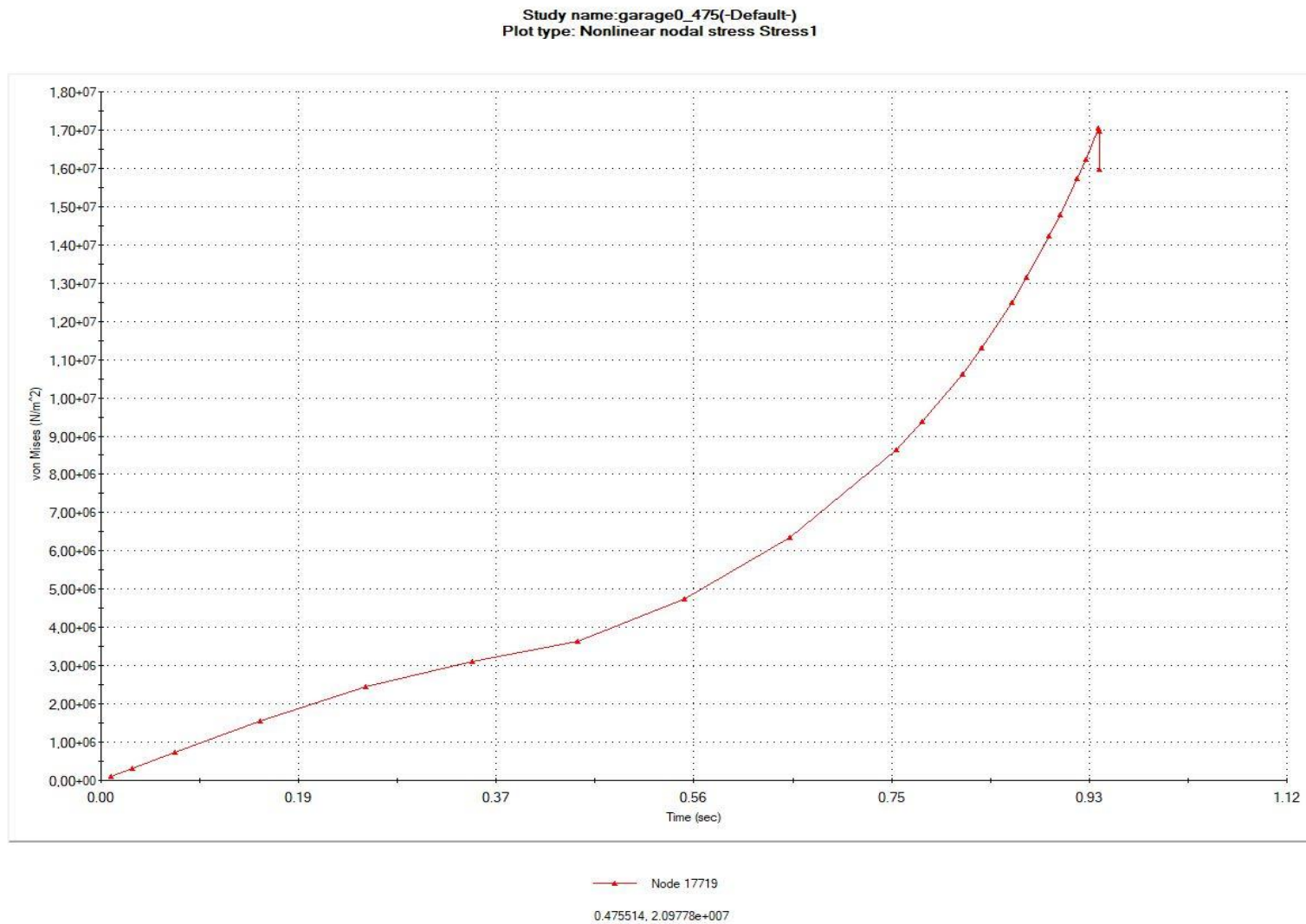
Model name: garage
Study name: garage0_475(-Default-)
Plottype: Total Strain Strain1
Plot step: 22 time : 0.942213 Seconds
Deformation scale: 1



4.3.2.1) Σημείο Αστοχίας ενισχυμένου τοίχου με πλευρικά στυλώματα.

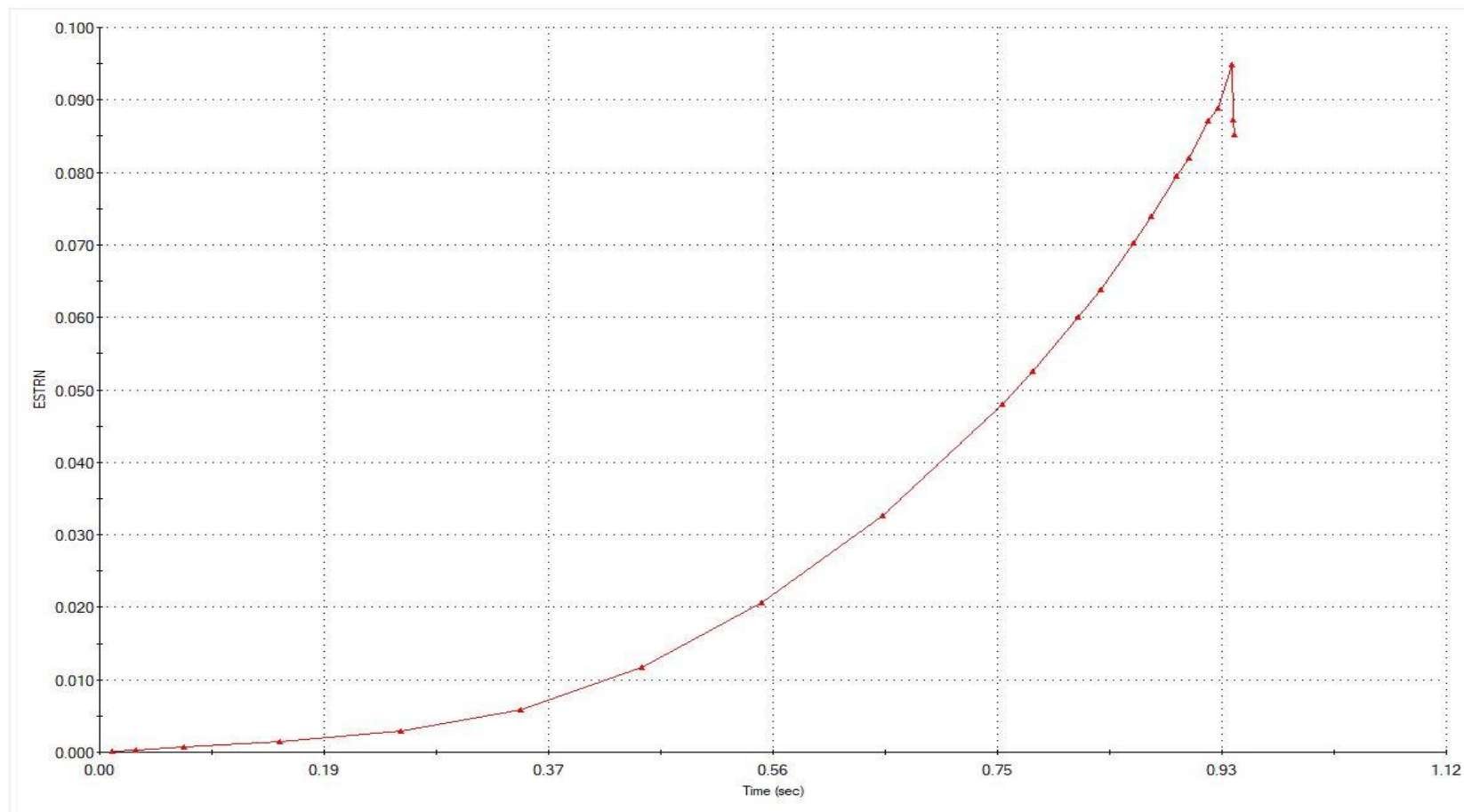


Γραφική Απεικόνιση Τάσης- Χρόνου για το συγκεκριμένο σημείο.



Γραφική Απεικόνιση Παραμόρφωσης- Χρόνου για το συγκεκριμένο σημείο.

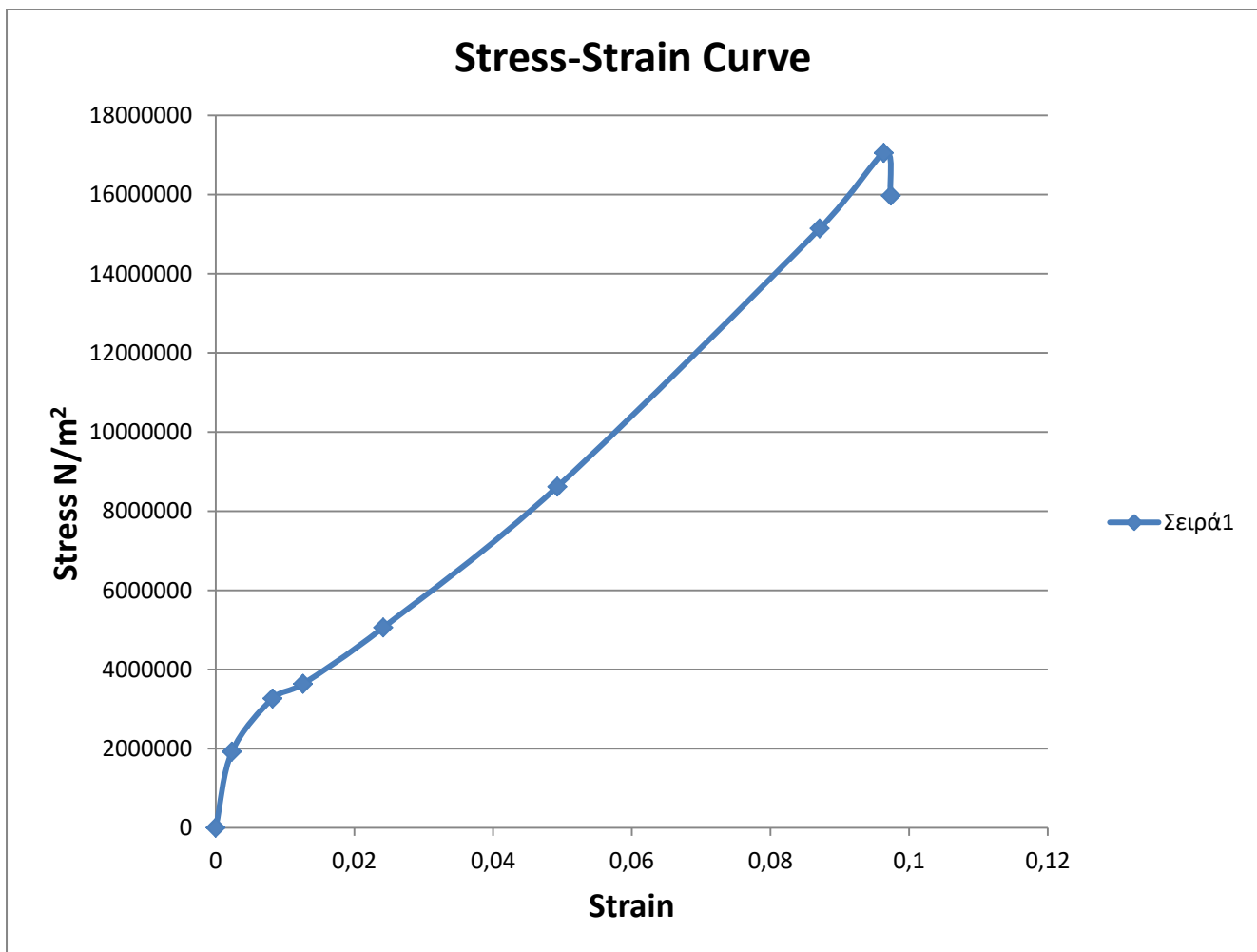
Study name: garage0_475(-Default-)
Plot type: Total Strain Strain1



Element 10051

0.90079, 0.102635

Πάλι με τη βοήθεια των παραπάνω συναρτήσεων και του υπολογιστικού φύλλου excel αποτύπωσα τη γραφική παράσταση **Τάσης-Παραμόρφωσης** για το συγκεκριμένο σημείο, για να έχουμε μία καλύτερη εικόνα του προβλήματος.

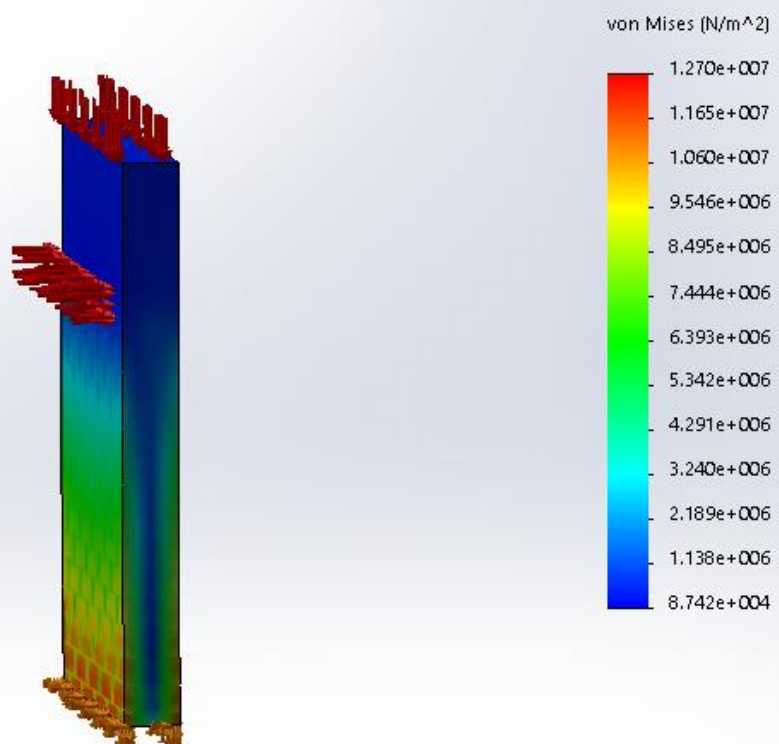


4.3.3) Ενίσχυση Τοίχου με ισχυρότερο Κονίαμα

Στην περίπτωση αυτή τοποθετήσαμε ενισχυμένο κονίαμα για να αποτρέψουμε την αστοχία του τοίχου και ασκήσαμε τις ίδιες πιέσεις (0.475 Mpa, θλιπτική και διατμητική φόρτιση ταυτόχρονα). Ακολουθούν το αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης.

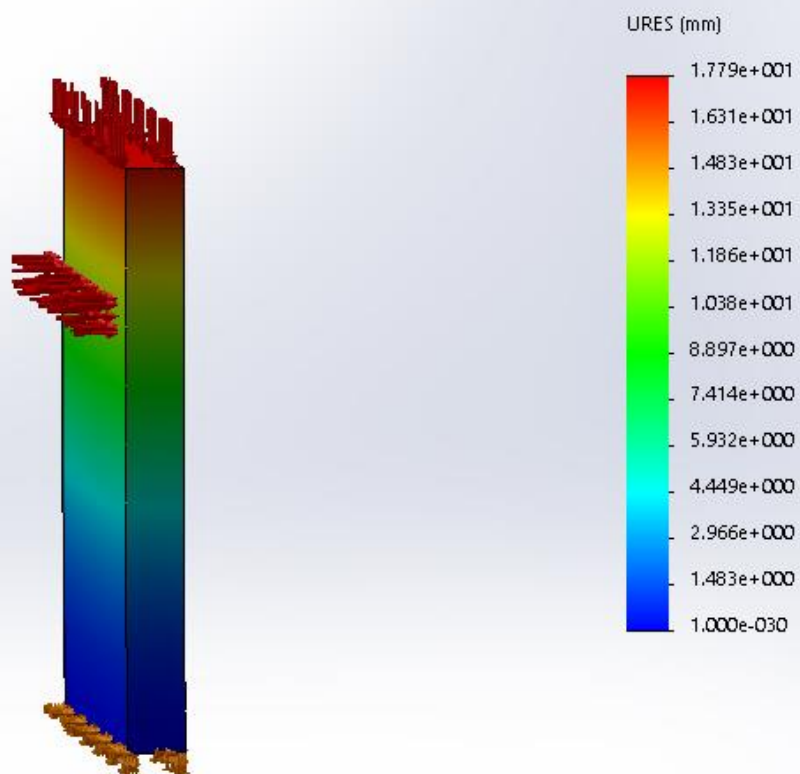
Απεικόνιση Τάσεων

Model name: box4
Study name: newmort0_475(-Default-)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



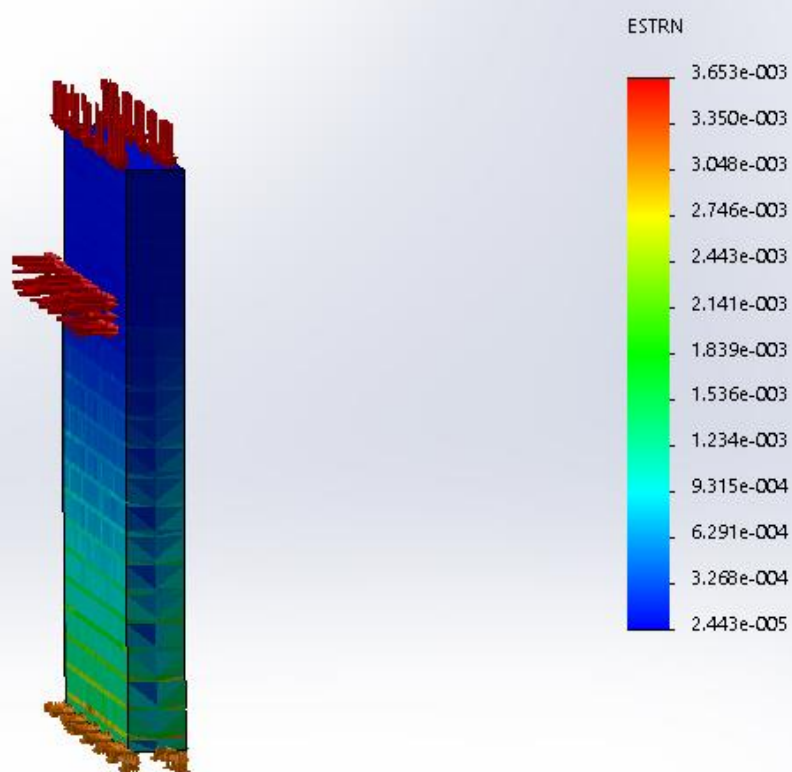
Απεικόνιση Μετατοπίσεων

Model name: box4
Study name: newmort0_475(-Default-)
Plottype: Nonlinear Displacement Displacement1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



Απεικόνιση Παραμορφώσεων

Model name: box4
Study name: newmort0_475(-Default-)
Plottype: Total Strain Strain1
Plot step: 13 time : 1 Seconds
Deformation scale: 1



Κεφάλαιο 5ο – Συμπεράσματα

Η μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων έχει τη δυνατότητα να προσφέρει αξιόπιστα προσομοιώματα, ικανά να προβλέψουν τη συμπεριφορά οποιασδήποτε κατασκευής υπό στατική φόρτιση. Όταν πρόκειται για εύκαμπτες κατασκευές ή κατασκευές όπου η αστάθεια του φορέα είναι κρίσιμη στο σχεδιασμό, τότε χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που επιλύουν τις εξισώσεις ισορροπίας του φορέα στην παραμορφωμένη γεωμετρία. Όταν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε μια κατασκευή, πριν από την οποιαδήποτε αστάθεια, ή κατά την εξέλιξη της, είναι μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του υλικού, τότε είναι αναγκαία, κατά τη προσομοίωση, η χρησιμοποίηση ειδικών αλγορίθμων, οι οποίοι να λαμβάνουν υπόψη και την ανελαστική φύση του υλικού.

Μέσω αυτής της διαδικασίας ο μελετητής αποκτά πληροφορίες που περιλαμβάνουν την αρχική δυσκαμψία και την οριακή αντοχή της κατασκευής, την πλαστικότητα που μπορεί να αναπτυχθεί, αλλά και τους κρίσιμους μηχανισμούς αστοχίας καθώς και τα ασθενή δομικά στοιχεία. Έτσι είναι δυνατή η ορθολογιστική επέμβαση σε κατάλληλες θέσεις και με στοχευμένο τρόπο, ώστε να ενισχυθεί ο φορέας, με στόχο την αύξηση της αντοχής του, ή να εξοικονομηθεί υλικό χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις στη φέρουσα κατασκευή.

Βιβλιογραφία

1. "Masonry ", Joseph H. Brisch Robert L. Nelson, Harry L. Francis
2. "Evaluation of Strengthening of Existing Masonry Structures"
3. Wikipedia
4. "Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression ", Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai , and Sudhir K. Jain,
5. Solidworks Forum
http://help.solidworks.com/2017/english/solidworks/cworks/c_nonlinear_static_analysis.htm
6. Παπαδαράκης Μ., " Μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία " , Αθήνα 1998
7. "Βασικές έννοιες επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων", Γαντές, Χαράλαμπος, ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Ε.Μ.Π.
8. "Αποτίμηση συμπεριφοράς και ενίσχυση κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία", Μαυρωνας Προκόπης, Ροδίτης Ευάγγελος, Αθήνα 2011