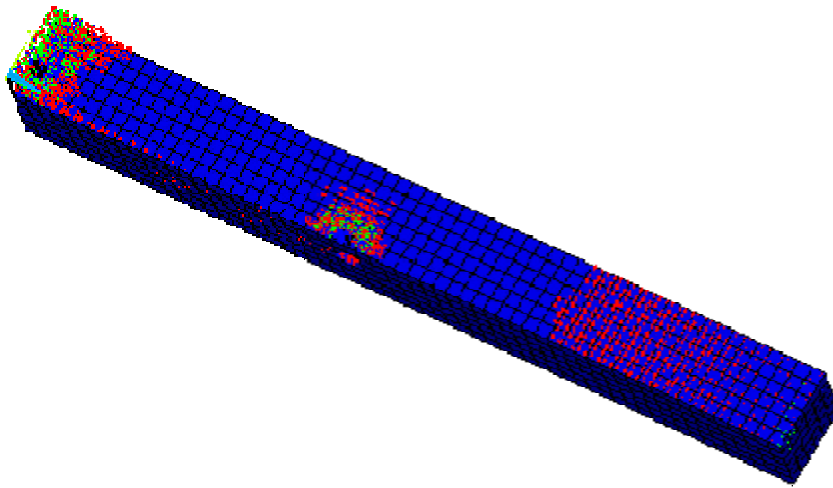


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ
(ΠΡΩΗΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΛΟΜΗΣ)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΑΟΠΛΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ**



ΚΑΠΑΤΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ
ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΡΟΣ

ΠΑΤΡΑ –2018

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:.....	6
ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	6
1.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	6
1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	6
1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	9
1.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	14
1.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ – ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΥΚΡΟΔΕΜΑ	16
1.6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:.....	19
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	19
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
2.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση κατασκευών	19
2.1.2 Πεπερασμένα στοιχεία και H/Y	20
2.2 ΣΤΑΔΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	21
2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	22
2.4 ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΩΝ.....	23
2.4.1 Πεπερασμένα στοιχεία τρισδιάστατης ελαστικότητας.....	23
2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	24
2.6 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	25
2.6.1 Κατασκευαστική ανάλυση	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:.....	27
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΟΥ ΜΕΛΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	27
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	27
3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	27
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 0.002m.....	32
3.3.1 Αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης.....	32
3.3.2 Αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης.....	35
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 0.006m.....	40

3.4.1	Αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης.....	40
3.4.2	Αποτελέσματα ελαστικής ανάλυσης.....	43
3.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ 1N ΣΤΗΝ ΑΚΡΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΛΟΥΣ	45
3.5.1	Αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης.....	46
3.5.2	Αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης.....	49
3.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΑΚΡΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΛΟΥΣ.....	52
3.7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	61
ΣΥΝΤΟΜΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		61
Βιβλιογραφία		62

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Αριθμητική προσομοίωση της ρηγματώσης άοπλων στοιχείων σκυροδέματος υπό στατικά φορτία» εκπονήθηκε από τις φοιτήτριες Αικατερίνη Καπάτου και Γεωργία Θεοδοροπούλου κατά την περίοδο 2017-2018 και χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα, το θεωρητικό και το πειραματικό. Η μελέτη για το δεύτερο μέρος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του εκπαιδευτικού λογισμικού ANSYS.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Μπάρο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εργασίας μας.

Αικατερίνη Καπάτου
Γεωργία Θεοδοροπούλου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έγινε με σκοπό την ανάδειξη και τον έλεγχο των δυνατοτήτων παροχής πιο ρεαλιστικών λύσεων σε προβλήματα μηχανικής, προσεγγίζοντας την ανελαστική συμπεριφορά των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η δυνατότητα προσομοίωσης της σταδιακής ρηγμάτωσης και αστοχίας του σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Η κατασκευαστική ανάλυση αφορά ένα υποστύλωμα διατομής 30X30 και ύψους 3 μέτρων, το οποίο θεωρείται χωρίς οπλισμό. Το υποστύλωμα αυτό, προσομοιώνεται στο ANSYS και εξετάζεται υπό διάφορες συνθήκες, όπως με επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m, με επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 1N, για χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος, κ.ά. Τα αποτελέσματα όλων των ανωτέρω αναλύσεων, καθώς και η σύγκριση αυτών, μας παρέχουν πολλά ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Πέρα από την κατασκευαστική ανάλυση, η εργασία αυτή παρουσιάζει βασικές έννοιες περί σκυροδέματος και κανονιστικού πλαισίου, καθώς επίσης εστιάζει και στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Λέξεις-Κλειδιά: προσομοίωση, ρηγμάτωση, πεπερασμένα στοιχεία, ANSYS, ανελαστική συμπεριφορά

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστριών:

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες σπουδάστριες έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Οι Σπουδάστριες:

Αικατερίνη Καπάτου

Γεωργία Θεοδωροπούλου

ABSTRACT

The present thesis aims to highlight and inspect the possibilities of providing more realistic solutions to engineering problems by approaching the inelastic behavior of materials. More specifically, the possibility of simulating the progressive cracking and concrete failure was investigated, using the ANSYS finite element analysis software.

The construction analysis concerns a 30x30 column of 3 meters, which is considered unreinforced. This column is simulated in ANSYS and tested under various conditions, such as with a displacement of 0.002m, with force equal to 1N, for a lower grade of concrete, etc. The results of all the above analyses, as well as their comparison, provide many interesting conclusions.

Apart from the structural analysis, this work presents basic concepts of the concrete and the regulatory framework, as well as it focuses on the Finite Element Method.

Key words: simulation, cracking, finite elements, ANSYS, inelastic behavior

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

1.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Σκυρόδεμα είναι το δομικό υλικό που παράγεται με την ανάμειξη των εξής αδρανών υλικών: τσιμέντο, νερό και πρόσθετα, τα οποία βοηθούν στη βελτίωση των ιδιοτήτων του κατά την παραγωγή και χύτευση, αλλά και την σκλήρυνση. Η πρώτη χρήση του με τη σημερινή του μορφή έγινε στις αρχές του 20ού αιώνα, ενώ μετά το 1950 η χρήση του γενικεύτηκε, καθιστώντας το σήμερα το κυριότερο, υλικό κατασκευών μαζί με το χάλυβα, παγκοσμίως.

Η μάζα, ο όγκος και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, αναμιγνύονται στην παραγωγή του σκυροδέματος και την ανάγουν σε μια πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Οι διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.) προβλέπουν τις ελάχιστες δοσολογίες των πρώτων υλών ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της προβλεπόμενης εφαρμογής του σκυροδέματος, όπως η εργασιμότητα, η αντοχή, η πλαστιμότητα, το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται, η απόδοση και διάρκεια ζωής της κατασκευής. Τόσο η διαδικασία παραγωγής όσο και η τελική ενσωμάτωση του σκυροδέματος στις κατασκευές διέπονται από τον απαιτητικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος με νεότερη έκδοσή του αυτή του 2016 (Κ.Τ.Σ. 2016), ο οποίος ισχύει σήμερα καλύπτοντας τις απαιτήσεις για σύγχρονες ασφαλείς και αντισεισμικές κατασκευές.

1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα θεωρείται αναντικατάστατο, εφόσον είναι από τα πλέον οικονομικά και ασφαλή οικοδομικά υλικά, με εξαιρετική σχέση κόστους - παρεχόμενων ιδιοτήτων. Είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού μπορεί να λάβει οποιαδήποτε μορφή όταν είναι νωπό, και χαρακτηρίζεται από ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του είναι ιδιαίτερα εύχρηστο δομικό υλικό, αλλά ταυτόχρονα έχει μικρή διάρκεια εργασιμότητας, καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αργότερο εντός μίας ώρας και τριάντα λεπτών από τη παραγωγή του. Παρακάτω βλέπουμε συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του συνήθους σκυροδέματος:

- Πυκνότητα - ρ : 2240 - 2400 kg / m³ (140 - 150 lb / ft³)
- Αντοχή σε θλίψη: 20 - 40 MPa (3000 - 6000 psi)
- Αντοχή στην κάμψη: 3 - 5 MPa (400 - 700 psi)
- Αντοχή εφελκυσμού - σ : 2 - 5 MPa (300 - 700 psi)
- Μέτρο ελαστικότητας - E: 14 - 41 GPa (2 - 6×10⁶ psi)

- Διαπερατότητα: 1×10^{-10} cm / sec
- Συντελεστής θερμικής διαστολής - β : 10^{-5} °C⁻¹ (5.5×10^{-6} °F⁻¹)
- Συστολή ξήρανσης: $4 - 8 \times 10^{-4}$
- Συστολή ξήρανσης οπλισμένου σκυροδέματος: $2 - 3 \times 10^{-4}$
- Λόγος Poisson: 0,20 - 0,21
- Αντοχή διατμήσεως - τ : 6 - 17 MPa
- Ειδική θερμότητα - c : 0,75 kJ / kg K (0,18 Btu / lbm oF (kcal / kg °C))

(α) Αντοχή σε θλίψη: 20 - 40 MPa (3000 - 6000 psi) για «συμβατικά σκυροδέματα.

Η αντοχή του σκυροδέματος είναι επίσης μια ιδιότητα που ποικίλλει σημαντικά για το ίδιο μείγμα σκυροδέματος, εξαρτώμενη από πολλούς παράγοντες όπως οι συνθήκες σκυροδέτησης και συντήρησης μετά από αυτήν. Επομένως, χρησιμοποιείται μία μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή, γνωστή ως χαρακτηριστική αντοχή.

Η χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται ως η τιμή της αντοχής κάτω από την οποία δεν αναμένεται να πέσει πάνω από το 5% των αποτελεσμάτων της δοκιμής θλίψης σε συμβατικά κυλινδρικά ή κυβικά δοκίμια που κατασκευάζονται και συντηρούνται σύμφωνα με τον Κανονισμό (δηλαδή υπάρχει 95% πιθανότητα να επιτευχθεί αυτή η τιμή, μόνο το 5% δεν επιτυγχάνει το ίδιο αποτέλεσμα).

Ανάλογα με τη χαρακτηριστική αντοχή ορίζονται και οι κατηγορίες σκυροδέματος που σημειώνονται στον Πίνακα 1.1.

(β) Αντοχή σκυροδέματος σε εφελκυσμό

Η εκτίμηση της αντοχής σε εφελκυσμό ή του συντελεστή ρήξης ή της αντοχής σε ρωγμές του σκυροδέματος προκύπτει από τη σχέση:

$$f_{ct} = 0,7 f_{ck} \text{ (N / mm}^2\text{)}$$

Η αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί πειραματικά με κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια στα οποία επιβάλλεται άμεσος εφελκυσμός. Συνήθως όμως μετράται έμμεσα, π.χ. μέσω κάμψης τριών σημείων σε δοκούς άοπλου σκυροδέματος.

Διαφέρει από 1/8 έως 1/12 της αντοχής σε θλίψη όπως φαίνεται και στο ακόλουθο εξιδανικευμένο διάγραμμα (Σχήμα 1.1.).

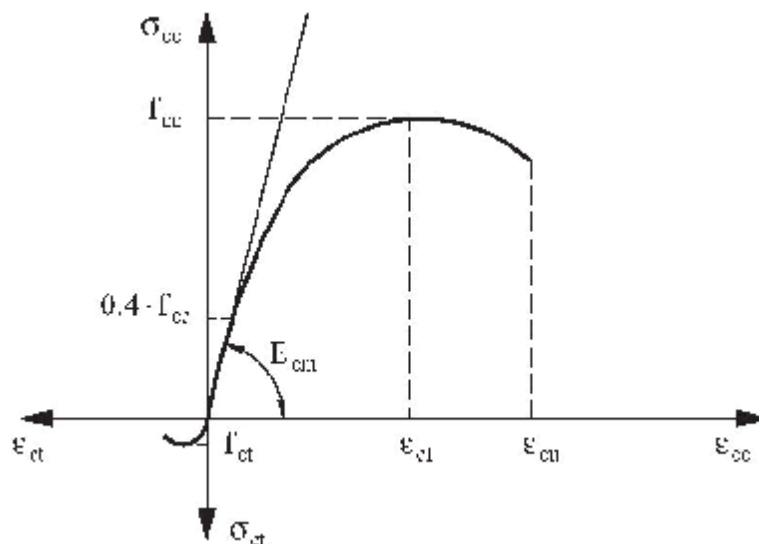
Πίνακας 1.1 Κατηγορίες σκυροδέματος [1]

Κατηγορίες Σκυροδέματος

Κατηγορία Σκυροδέματος	f_{ck} κυλίνδρου (Μpa)	f_{ck} κύβου (Μpa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55

f_{ck} Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος. Εκείνη η τιμή της αντοχής σε θλίψη κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή της αντοχής (f_{28}) ενός τυχαίου δοκιμίου.

11



Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του σκυροδέματος σε εφελκυσμό και θλίψη [2].

(γ) Ερπυσμός στο σκυρόδεμα

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται συνεχής αύξηση της παραμόρφωσης ενός φορέα συναρτήσει του χρόνου, υπό την επίδραση σταθερής τάσης και υπό σταθερή θερμοκρασία. Γενικά, ο ερπυσμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε θερμοκρασίες γύρω στους $0.4T_m$, όπου T_m είναι η απόλυτη θερμοκρασία τήξης (σε βαθμούς K).

(δ) Συρρίκνωση σκυροδέματος

Η ιδιότητα να μειώνεται ο όγκος κατά τη διαδικασία ξήρανσης και σκλήρυνσης ονομάζεται συρρίκνωση. Εξαρτάται κυρίως από τη διάρκεια της έκθεσης του μέλους στο περιβάλλον και τον τρόπο συντήρησής του μετά τη σκυροδέτηση. Αν εμποδιστεί είναι πιθανό να «παράγει» τάση εφελκυσμού στο σκυρόδεμα και συνεπώς το σκυρόδεμα αναπτύσσει ρωγμές μικρού συνήθως εύρους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Ρωγμές μικρού εύρους στην επιφάνεια μέλους από σκυρόδεμα [3].

1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι κύριου λόγοι για τους οποίους το σκυρόδεμα έχει επικρατήσει ως το κύριο υλικό δόμησης είναι τα πολλά πλεονεκτήματά του, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- υψηλή αντοχή σε θλίψη,

- σημαντική αντοχή σε εφελκυσμό όταν βέβαια το σκυρόδεμα οπλίζεται με χαλύβδινες ράβδους, με τις οποίες, όπως είναι γνωστό, συνεργάζεται πολύ αποδοτικά,
- τα συστατικά του σκυροδέματος είναι εύκολα διαθέσιμα
- δεν είναι πιθανό να διαβρωθεί ή να αποσυντεθεί όπως άλλα οικοδομικά υλικά
- σε αντίθεση με τους φυσικούς λίθους, το σκυρόδεμα είναι απαλλαγμένο από ελαττώματα και ατέλειες,
- δυνατότητα κατασκευής σε οποιοδήποτε σχήμα επιθυμούμε με σχετικά χαμηλό κόστος,
- υψηλή αντοχή σε φωτιά,
- είναι ανθεκτικό στον άνεμο, το νερό και σε παράγοντες βιολογικής φθοράς. Ως εκ τούτου, το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή καταφυγίων.
- δεν αλλοιώνεται με το πέρασμα του χρόνου.
- η χύτευση σκυροδέματος μπορεί να γίνει στο χώρο εργασίας,
- δεν χρειάζεται κάποια ειδική φροντίδα και
- υπάρχει δυνατότητα ανακύκλωσης

Κάποια από τα παραπάνω σημαντικά πλεονεκτήματα αναπτύσσονται στη συνέχεια.

(α) Το σκυρόδεμα είναι οικονομικό

Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα τσιμεντοειδή υλικά που χρησιμοποιούνται για κατασκευές, το κόστος παραγωγής του σκυροδέματος είναι πολύ χαμηλό. Και πάλι, είναι φθηνό και ευρέως διαθέσιμο σε όλο τον κόσμο σε σύγκριση με τον χάλυβα, τα πολυμερή και άλλα δομικά υλικά. Τα κυριότερα συστατικά του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο, το νερό και τα πρόσθετα. Όλα αυτά είναι εύκολα διαθέσιμα στις τοπικές αγορές με χαμηλό κόστος.

(β) Το σκυρόδεμα σκληραίνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Το σκυρόδεμα σκληραίνει και αποκτά την αντοχή του σε θερμοκρασία δωματίου ή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει επειδή το τσιμέντο είναι ανόργανο υλικό συνδεδεμένο σε χαμηλή θερμοκρασία. Έτσι, το σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και να βελτιστοποιηθεί με πρόσμιξη, εάν απαιτείται.

(γ) Δυνατότητα κατασκευής σε οποιοδήποτε σχήμα επιθυμούμε με σχετικά χαμηλό κόστος

Το φρέσκο σκυρόδεμα είναι ρευστό, σχεδόν σε υγρή κατάσταση. Το σκυρόδεμα μπορεί επομένως να «χύνεται» σε διάφορες διαμορφώσεις (καλούπια, ξυλότυποι ή μεταλλότυποι) για να σχηματίσει τα επιθυμητά σχήματα και μεγέθη στο εργοτάξιο. Μπορεί ακόμα να εγχυθεί σε ιδιαίτερα σύνθετα σχήματα και διαμορφώσεις ρυθμίζοντας

κατάλληλα το μείγμα (τα ρεολογικά χαρακτηριστικά και την εργασιμότητά του), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.

(δ) Ενεργειακή απόδοση στην παραγωγή

Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή σκυροδέματος είναι χαμηλή σε σύγκριση με τον χάλυβα. Για το απλό σκυρόδεμα απαιτούνται μόνο 450-750 kWh / τόνο ενέργειας, ενώ για το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι 800-3200 kWh / τόνο.



Σχήμα 1.3 Παράδειγμα σχημάτων και διαμορφώσεων σκυροδέματος που λαμβάνουν χώρα στο εργοτάξιο [4].

(ε) Εξαιρετική αντοχή στο νερό

Αν και τα χημικά στο νερό μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση στο σκυρόδεμα και το οπλισμένο σκυρόδεμα, σε σύγκριση με το ξύλο και το χάλυβα, το σκυρόδεμα μπορεί να αντέξει στο νερό χωρίς σοβαρή αλλοίωση. Λόγω της ιδιότητας αυτής, είναι ιδανικό για υποβρύχιες και βυθιζόμενες εφαρμογές όπως για οικοδομικές κατασκευές, αγωγούς, φράγματα, κανάλια, επενδύσεις και κατασκευές με νερό. Το καθαρό νερό δεν είναι επιβλαβές για το σκυρόδεμα και ούτε για το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα χλωρίδια και το διοξείδιο του άνθρακα προκαλούν διάβρωση.

(στ) Αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία

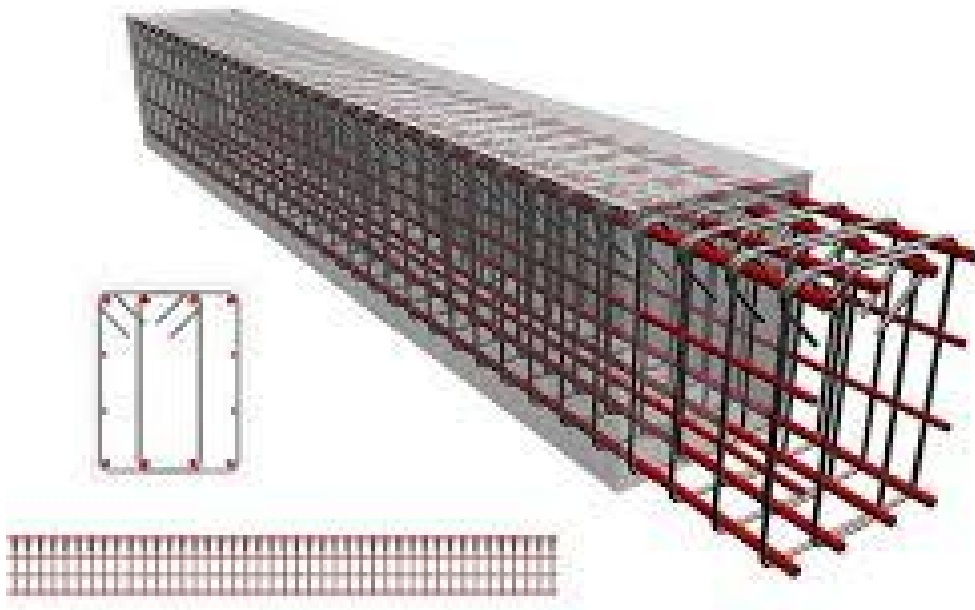
Το σκυρόδεμα μπορεί να αντέξει σε υψηλές θερμοκρασίες καλύτερα από το ξύλο και το χάλυβα. Το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο C-S-H, το οποίο είναι το κύριο συνδετικό υλικό στο σκυρόδεμα, μπορεί να αντέξει μέχρι 910 βαθμούς C. Το σκυρόδεμα είναι ένας κακός αγωγός θερμότητας που μπορεί να αποθηκεύσει σημαντική ποσότητα θερμότητας από το περιβάλλον. Το σκυρόδεμα μπορεί να αντέξει τη θερμότητα για 2-6 ώρες, παρέχοντας επαρκή χρόνο για εργασίες διάσωσης σε περίπτωση πυρκαγιάς. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με πυρίμαχο χάλυβα σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και πιθανής έκρηξης.

(ζ) Ικανότητα κατανάλωσης και ανακύκλωσης αποβλήτων

Πολλά βιομηχανικά απόβλητα μπορούν να ανακυκλωθούν ως υποκατάστατο τσιμέντου ή αδρανών υλικών. Σε αυτά περιλαμβάνονται η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία που είναι επίσης γνωστή ως GGBFS ή η σκωρία των κοκκοειδών υψικαμίνων, τα απορρίμματα, ακόμη και τα ελαστικά εδάφους. Έτσι, η παραγωγή σκυροδέματος μπορεί να μειώσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω βιομηχανικών αποβλήτων. Η χρήση αυτών των αποβλήτων βελτιώνει επίσης τις ιδιότητες του σκυροδέματος και έτσι δεν τίθεται σε κίνδυνο η ποιότητα της κατασκευής.

(η) Εφαρμογή σε οπλισμένο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα παρέχει προστασία του χάλυβα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα λόγω της ύπαρξης CH και άλλων αλκαλίων. Επιπλέον, το σκυρόδεμα συμβάλλει στην αντοχή σε θλίψη των μελών και των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως το τυπικό μέλος που εικονίζεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Τυπικό μέλος κατασκευής από Οπλισμένο Σκυρόδεμα [5]

(θ) Απαιτείται χαμηλή ή μηδενική συντήρηση

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα δεν απαιτούν επίστρωση ή βαφή για κανονικές εφαρμογές ως προστασία έναντι των καιρικών συνθηκών, σε σύγκριση με τις κατασκευές από χάλυβα ή ξύλο όπου η επικάλυψη είναι αναπόφευκτη. Η επίστρωση πρέπει να αντικατασταθεί και να αναδιοργανωθεί σε τακτική βάση, καθιστώντας το κόστος συντήρησης για το σκυρόδεμα πολύ χαμηλότερο από αυτό για το χάλυβα ή το ξύλο.

(ι) Εφαρμογή με διάφορες μεθόδους

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος είναι η ικανότητά του να χρησιμοποιείται με διαφορετικές μεθοδολογίες εφαρμογής. Το σκυρόδεμα εφαρμόζεται με το χέρι, χύνεται, αντλείται, ψεκάζεται, διοχετεύεται και χρησιμοποιείται επίσης για προηγμένες εφαρμογές, όπως η εκτόξευση σκυροδέματος σε σήραγγες (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5 Εκτόξευση σκυροδέματος σε σήραγγα [6]

(ια) Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι η ικανότητα να αντέχει στη δράση των καιρικών συνθηκών, στα χημικά και στην τριβή, διατηρώντας παράλληλα τις επιθυμητές τεχνικές του ιδιότητες.

- Φυσική ανθεκτικότητα: είναι ανθεκτικό στον παγετό, στη διαπερατότητα του νερού και στη θερμοκρασιακή πίεση.
- Χημική ανθεκτικότητα: είναι ανθεκτικό στην αντίδραση αλκαλίων, στην επίδραση θεικών, στην εισροή χλωριούχου και στη διάβρωση οπλισμού.

(ιβ) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό ηχομόνωσης.

Το σκυρόδεμα είναι μειώνει τους κραδασμούς και τις αναπήδησεις στις χαλύβδινες κατασκευές, γεγονός που αυξάνει την άνεση των χρηστών και αποτελεί καλύτερη επιλογή για εργαστήρια και χώρους με ευαίσθητο εξοπλισμό. Η μεταφορά ήχου και κραδασμών μειώνεται περίπου κατά 67% από χάλυβα σε σκυρόδεμα (PCA).

1.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

- Σε σύγκριση με άλλα συνδετικά υλικά, η αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος είναι σχετικά χαμηλή.

- Το σκυρόδεμα είναι λιγότερο όλκιμο.
- Το βάρος του είναι μεγάλο σε σύγκριση με τη δύναμή του.
- Το σκυρόδεμα μπορεί να περιέχει διαλυτά άλατα. Τα διαλυτά άλατα προκαλούν την εμφάνιση επιφανειακών εξανθημάτων.
- Το σκυρόδεμα είναι επιρρεπές σε ρωγμές.

(α) Ρωγμές

Οι ρωγμές παρουσιάζονται όταν οι διατάξεις σχετικά με τον περιορισμό των παραμορφώσεων δεν λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή (Σχήμα 1.6).

Η ρηγμάτωση του σκυροδέματος επηρεάζεται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Επιπλέον όγκος νερού
- Επιπλέον όγκος σκυροδέματος
- Σχήμα
- Ανόργανη σύνθεση
- Κάποιες μίξεις μπορεί να επηρεάζουν την εμφάνιση ρωγμών.

Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάστηκε η γενική μορφή των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα

Η τετμημένη της κορυφής του διαγράμματος κυμαίνεται μεταξύ -0.2% και -0.25%, η συμβατική παραμόρφωση θραύσης μεταξύ -0.35% και -0.7% και η τάση θραύσης μεταξύ $0.75 f_c$ και $1.25 f_c$, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των συστατικών του και την ταχύτητα επιβολής των παραμορφώσεων,

Η κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό εφελκυσμό έχει τιμή +0.02 έως +0.04%, δηλαδή περίπου ίση με την ελάχιστη τιμή της συστολής ξήρανσης. Έτσι, και μόνο η συστολή ξήρανσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε ρηγμάτωση.



Σχήμα 1.6 Ρηγμάτωση στοιχείου σκυροδέματος [7].

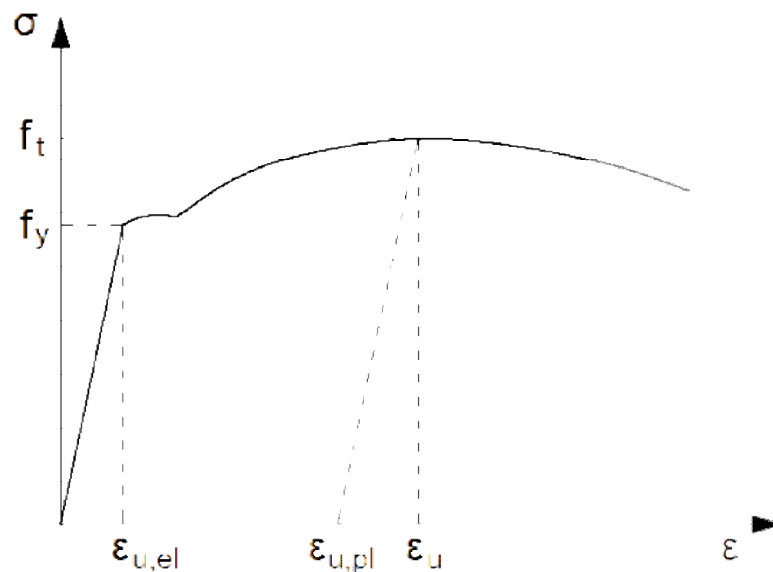
1.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ – ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΥΚΡΟΔΕΜΑ

Ο λόγος που χρησιμοποιείται ο χάλυβας στις κατασκευές, αφορά κυρίως τα παρακάτω πλεονεκτήματα του:

- Υψηλή αντοχή,
- Ομοιομορφία,
- Ελαστικότητα,
- Ολκιμότητα.

Το **οπλισμένο σκυρόδεμα** ή **μπετόν αρμέ** είναι ένα σύνθετο υλικό που προκύπτει από την ενίσχυση του σκυροδέματος με κάποιο άλλο υλικό μεγαλύτερης αντοχής που ονομάζεται οπλισμός. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιείται συνήθως ο χάλυβας σε μορφή ράβδων ή ινών και σπανιότερα ίνες γυαλιού, πολυμερών υλικών και άλλα. Στόχος είναι να συνδυαστούν οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών σε ένα νέο που θα καλύπτει τις ανάγκες της κατασκευής.

Για τον χάλυβα που χρησιμοποιείται στις ράβδους οπλισμού, ο οποίος έχει διακριτό όριο διαρροής, το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων φαίνεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού [8].

Το ΕΛΟΤ1421-3 περιλαμβάνει τα απαραίτητα πρότυπα που πρέπει να ακολουθούνται για τους χάλυβες οπλισμού της τεχνικής κατηγορίας B500C (Πίνακας 1.2), που παραδίδονται ως τελικό προϊόν με τις μορφές:

- ράβδων, ρόλων και ευθυγραμμισμένων προϊόντων,
- φύλλων ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- ηλεκτροσυγκολλημένων δικτυωμάτων.

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C είναι υψηλής ολκιμότητας.

1.6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Όπως είναι γενικά γνωστό και αναδεικνύεται και από την ανάλυση που προηγήθηκε, στις κατασκευές χρησιμοποιείται το Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Το σύνθετο αυτό υλικό μπορεί, αξιοποιώντας τις επιμέρους ιδιότητες του χάλυβα και του σκυροδέματος, να αναλάβει τόσο θλιπτικές όσο και εφελκυστικές τάσεις, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογή στις κατασκευές που δέχονται στατικά και σεισμικά φορτία.

Πίνακας 1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά χαλύβων οπλισμού [9]

	ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971					ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2, ΕΛΟΤ 1421- 3	
Χαρακτηριστικό	Τεχνική Κατηγορία					Τεχνική Κατηγορία	
	S220	S400	S500	S400s	S500s	B500A	B500C
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	220	400	500	400	500	>500	>500
Εφελκυστική αντοχή, f_t (MPa)	340	500	550	440	550	*	*
Λόγος της πραγματικής τιμής ορίου διαρροής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής	-	-	-	-	-	-	<1,25
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, f_t/f_y	-	>1,05	>1,05	>1,05	>1,05	>1,05 (>1,03 για $d < 6\text{mm}$)	>1,15 <1,35
Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_{u,k}$ (%)	-	-	-	-	-	>2,5 (>2 για $d < 6\text{mm}$)	>7,5
Επιμήκυνση μετά τη θραύση, ϵ_s (%)	24	14	12	14	12	-	-

Στην παρούσα εργασία οι αριθμητικές αναλύσεις που παρουσιάζονται αφορούν στοιχεία άοπλου σκυροδέματος. Η επιλογή αυτή έγινε για λόγους διευκόλυνσης της προσομοίωσης, καθώς και επειδή ως βασικός στόχος της εργασίας ορίστηκε η διερεύνηση μέσω προσομοιωμάτων της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος, και συγκεκριμένα της ρηγμάτωσής του, κυρίως λόγω της χαμηλής αντοχής του σε εφελκυσμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη φαινομένων στη φύση, όπως είναι η ανάλυση των φορέων στη Στατική, με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα ακολουθεί δύο βασικά στάδια: 1) τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου και 2) την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος. Η μαθηματική διατύπωση βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές γύρω από τις διαδικασίες που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο, ενώ η αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και τις δυνατότητες του υπολογιστή προκειμένου να δώσει λύση στη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος.

Παρά το γεγονός ότι η διατύπωση των κυρίαρχων εξισώσεων που διέπουν τα περισσότερα φαινόμενα στη φύση, στην πλειονότητα τους, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί εξαιρετικά δυσχερής, η εξεύρεση της ακριβούς λύσεως είναι μια επίπονη και δυσχερέστατη διαδικασία. Στις περιπτώσεις αυτές οι προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης της μαθηματικής διατύπωσης αποτελούν μια πρόσφορη εναλλακτική αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών. Από τις πλέον διαδεδομένες προσεγγιστικές μεθόδους για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής είναι οι μέθοδοι των μεταβολών, στις οποίες ανήκει η μέθοδος Rayleigh-Ritz και οι μέθοδοι των σταθμικών υπολοίπων, μία εκ των οποίων είναι κι η μέθοδος Galerkin.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ως μία ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και σταθμικών υπολοίπων η οποία όμως πλεονεκτεί σαφώς ως προς τις αρχικές διατυπώσεις των μεθόδων αυτών λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας με την οποία αντιμετωπίζει πολύπλοκες γεωμετρίες και του ευχερέστερου προγραμματισμού της στον Η/Υ. Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία.

2.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση κατασκευών

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους που εφαρμόζεται σε περιπτώσεις προβλημάτων, στα πλαίσια της ανάλυσης κατασκευών.

Πήρε το όνομά της από τον τρόπο θεώρησης και προσομοίωσης των φορέων προς επίλυση. Με βάση τη μέθοδο αυτή, αρχικά, γίνεται υποδιαίρεση του αρχικού φορέα σε ένα μικρό ή μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων. Μετά από αυτή την

διακριτοποίηση του φορέα θεωρείται κάθε τέτοιο πεπερασμένο στοιχείο ξεχωριστά και για τον λόγο αυτό αποσπάται από το σύμπλεγμα των στοιχείων του σύνθετου φορέα. Αφού μελετηθεί και καθορισθεί η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου ακολουθεί το τρίτο βήμα της διαδικασίας επίλυσης που είναι η σύνθεση του φορέα από τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία. Το ότι πρόκειται για μια προσεγγιστική μέθοδο έγκειται προφανώς στο ότι ο αρχικός συνεχής φορέας, για να μπορέσει να επιλυθεί, μετατρέπεται σε ένα ασυνεχές σύμπλεγμα πεπερασμένων στοιχείων.

Όσο περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ασυνεχούς μοντέλου υπολογισμού του αρχικού φορέα, τόσο ακριβέστερα μπορούν να θεωρηθούν γενικώς τα αποτελέσματα.

Όπως προαναφέρθηκε, η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων γενικά αποτελεί μια προσεγγιστική αριθμητική μέθοδο. Στην περίπτωση όμως φορέων που κατά την διακριτοποίηση του μηχανικού τους προσομοιώματος δεν γίνονται περαιτέρω εξιδανικεύσεις και για ακριβή μητρώα δυσκαμψίας των στοιχείων, δηλαδή μητρώα που περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά των επί μέρους στοιχείων με βάση την αναλυτική λύση της εκάστοτε διαφορικής εξίσωσης, δίνει μέσα στα πλαίσια των παραδοχών της «ακριβείς» λύσεις των προβλημάτων.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπάρχει η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Ο τρόπος επίλυσης προβλημάτων με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχεδόν ο ίδιος σε όλες τις περιοχές της επιστήμης του μηχανικού που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα για την επίλυση μιας κατασκευής σχεδιάζουμε πρώτα την κατασκευή και κατόπιν την διακριτοποιούμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή/και τετράπλευρα για αναλύσεις στις δύο διαστάσεις ή κύβους ή/και πυραμίδες για αναλύσεις στις τρεις διαστάσεις, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα που αναλύεται γράφονται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και εκφράζονται ως συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου (μέθοδος των μετατοπίσεων). Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνοριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία (θερμικά και μηχανικά) η μέθοδος καταλήγει στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι κομβικές μετατοπίσεις είναι η ζητούμενη προσεγγιστική λύση. Γνωστών των κομβικών μετατοπίσεων υπολογίζονται στα διάφορα σημεία της κατασκευής οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι αντιδράσεις των στηρίξεων.

2.1.2 Πεπερασμένα στοιχεία και Η/Υ

Με την ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων όπως των πεπερασμένων στοιχείων και με την παράλληλη αλματώδη πρόοδο που επετεύχθη στους ηλεκτρονικούς

υπολογιστές, οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα πλέον να επιλύουν γρήγορα και εύκολα δύσκολα προβλήματα της μηχανικής, που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν άλυτα. Περαιτέρω, η απαίτηση της αγοράς για χρήση των μεθόδων αυτών από τον μέσο μηχανικό οδήγησε στην ανάπτυξη εύχρηστων γραφικών περιβαλλόντων εργασίας τα οποία συνοδεύουν την ανάλυση-υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία.

Ο συνδυασμός των γραφικών με την ανάλυση-υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων προωθούν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική. Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των εμπορικών προγραμμάτων για τον Η/Υ. Τα εμπορικά προγράμματα συνήθως αποτελούνται από δύο μεγάλα τμήματα, το γραφικό περιβάλλον εργασίας (GUI), το οποίο χρησιμοποιείται πριν (pre-) και μετά την ανάλυση (post-processing) και το πρόγραμμα ανάλυσης-υπολογισμού (kernel):

- Pre-processing. Με τη χρήση του γραφικού προγράμματος η κατασκευή σχεδιάζεται και κατόπιν διακριτοποιείται στα πεπερασμένα στοιχεία.
- Post-processing. Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων, όπως είναι οι εικόνες του παραμορφωμένου σώματος, της κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων εντός του σώματος και πολλά άλλα.

Τα προγράμματα της ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την μελέτη ποικίλων προβλημάτων που μπορεί να αφορούν στη μηχανική των στερεών ή των κατασκευών, στη ροή ρευστών, στη μετάδοση θερμότητας, σε προβλήματα ακουστικής, κατεργασίας μετάλλων, ηλεκτρισμού, ηλεκτρομαγνητισμού και σε πολλές άλλες περιοχές. Όλα τα πανεπιστήμια, τα ερευνητικά ινστιτούτα, τα ερευνητικά τμήματα των βιομηχανιών και οι τεχνικές εταιρίες χρησιμοποιούν εμπορικά πακέτα λογισμικού όπως για παράδειγμα είναι τα: ANSYS, MARC, ABAQUS, NASTRAN, ADINA, SAP200 και COSMOS.

2.2 ΣΤΑΔΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική μέθοδος επιλύσεως μερικών διαφορικών εξισώσεων και ως εκ τούτου χρειάζεται κάποια κριτήρια ελέγχου της ποιότητας των αποτελεσμάτων δεδομένου ότι η ακριβής αναλυτική λύση του προβλήματος δεν είναι γνωστή.

Στην περίπτωση της αναλύσεως των κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθούνται τα εξής στάδια [10]:

- (1) Μετάβαση από το φυσικό πρόβλημα που είναι η κατασκευή στο μαθηματικό προσομοίωμα δηλαδή τον φορέα.
Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η εξιδανίκευση της κατασκευής ως προς τη μορφή και τη δομητική λειτουργία των μελών της. Ταξινομούνται τα μέλη σε ράβδους δικτύωματος ή δοκού, σε δισδιάστατα μέλη τοιχίων, δίσκων ή πλακών, σε κελύφη και σε τρισδιάστατα μέλη. Καθορίζονται οι ιδιότητες των υλικών των μελών της κατασκευής καθώς και η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση της κατασκευής (γραμμικώς ελαστικά, ελαστικά απολύτως πλαστικά, ανελαστικά, κλπ).

Προσδιορίζονται τα φορτία που φορτίζουν την κατασκευή και οι συνοριακές συνθήκες (εξιδανίκευση της θεμελίωσης, δεσμευμένες μετατοπίσεις, κλπ). Το μαθηματικό προσομοίωμα διέπεται από τις κυρίαρχες διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας και τις συνοριακές συνθήκες που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των μελών του φορέα.

- (2) Μετάβαση από το μαθηματικό προσομοίωμα στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων.

Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή των πεπερασμένων στοιχείων για την προσφορότερη προσομοίωση των μελών του φορέα. Υπολογίζονται τα μητρώα δυσκαμψίας και οι ισοδύναμες δράσεις των στοιχείων και μορφώνεται η τελική μητρική εξίσωση ισορροπίας του φορέα.

- (3) Μετάβαση από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό προσομοίωμα.

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αριθμητική επεξεργασία του προσομοιώματος των πεπερασμένων στοιχείων από τον Η/Υ. Υπολογίζεται το καθολικό μητρώο δυσκαμψίας και το καθολικό διάνυσμα των ισοδύναμων δράσεων. Ακολουθεί η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και ο υπολογισμός των τάσεων και εντατικών μεγεθών.

Σε κάθε στάδιο υπάρχει ο κίνδυνος παρείσφρησης σφαλμάτων τα οποία ανάλογα με τη σοβαρότητα τους μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την αξιοπιστία της ανάλυσης. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε: i) σφάλματα προσομοίωσης τα οποία επηρεάζονται από το βαθμό της πιστότητας του φορέα προς την κατασκευή, ii) σφάλματα διακριτοποίησης που εξαρτώνται από τον τύπο και την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, iii) σφάλματα αριθμητικά τα οποία οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια με την οποία εκτελούνται οι πράξεις από τον Η/Υ και τα οποία είναι δυνατό να αλλοιώσουν σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα.

2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

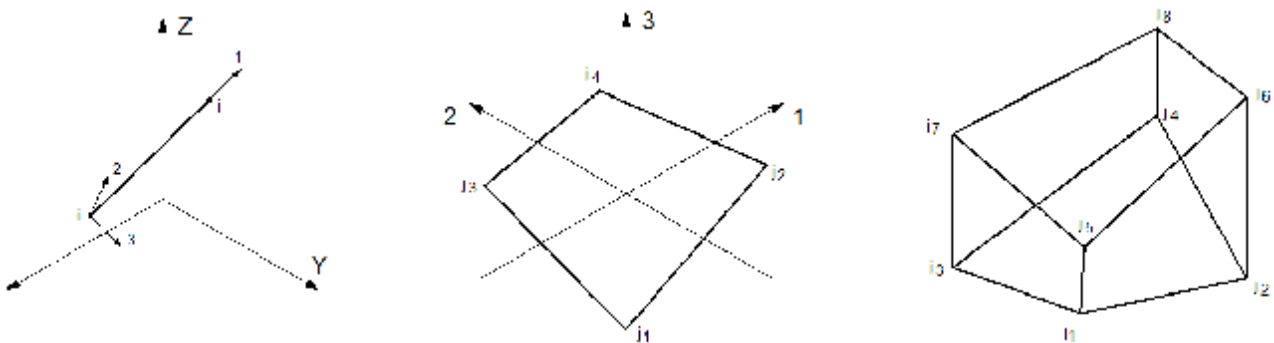
Για την προσομοίωση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία απαιτείται η κατανόηση της δομητικής συμπεριφοράς της κατασκευής για την επιλογή του κατάλληλου τύπου και πλήθους στοιχείων. Θα πρέπει να αποφευχθούν στοιχεία με κακή γεωμετρία ή μεγάλου μεγέθους, τα οποία αδυνατούν να καταγράψουν απότομες μεταβολές των εντατικών μεγεθών στην κατασκευή, καθώς επίσης θα πρέπει να αποφευχθεί η άσκοπη πύκνωση του δικτύου, η οποία απαιτεί χρόνο προετοιμασίας δεδομένων και υπολογιστικής εργασίας χωρίς να προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι απαραίτητος διότι είναι πολύ εύκολο να γίνουν λάθη κατά την προσομοίωση της κατασκευής. Αρχικά ελέγχουμε τις μετατοπίσεις και συγκρίνουμε την παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα με την αναμενόμενη λόγω της συγκεκριμένης φόρτισης και των συνθηκών στηρίξεως. Εάν τα

αποτελέσματα που έχουν προκύψει διαφέρουν σημαντικά από τα αναμενόμενα τότε θα πρέπει να υπάρχει σφάλμα στην προσομοίωση της κατασκευής. Στη συνέχεια ελέγχουμε την κατανομή των τάσεων στο φορέα. Εάν ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων που διαθέτουμε έχει τη δυνατότητα εξομάλυνσης των τάσεων στους κόμβους θα πρέπει να αποφεύγεται, τουλάχιστον κατά τον έλεγχο, αυτή η δυνατότητα διότι έτσι χάνονται πληροφορίες ως προς την επάρκεια του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Μια κατανομή τάσεων με σημαντική ασυνέχεια μεταξύ των στοιχείων είναι σε πρώτη εκτίμηση δηλωτική της ανεπάρκειας του δικτύου.

2.4 ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΩΝ

Η βασική διάκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων αφορά τις διαστάσεις στις οποίες αυτά αναπτύσσονται. Ο απλούστερος τύπος που συνήθως χρησιμοποιείται είναι τα γραμμικά στοιχεία, ακολουθούν τα επιφανειακά στοιχεία, ενώ περισσότερο σύνθετα είναι τα χωρικά στοιχεία. Η ακριβής γεωμετρία, ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου, οι ελευθερίες κίνησης σε κάθε κόμβο, αλλά και η γενικότερη συμπεριφορά των πεπερασμένων στοιχείων ποικίλουν ανάλογα με τις επιλογές που προσφέρει το κάθε λογισμικό. Η θεωρητική προσέγγιση της λειτουργίας διαφόρων τύπων στοιχείων μπορεί να βρεθεί σε μεγάλο αριθμό συγγραμμάτων. Μια ενδεικτική απεικόνιση των τύπων πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα *SAP 2000* (Computers and Structures Inc., 2010) δίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Γραμμικό, επιφανειακό και χωρικό στοιχείο στο λογισμικό SAP 2000.

[11]

2.4.1 Πεπερασμένα στοιχεία τρισδιάστατης ελαστικότητας

Η δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση φορέων των οποίων η εντατική κατάσταση αντιστοιχεί στην τρισδιάστατη ελαστικότητα μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί από τα στοιχεία της δισδιάστατης ελαστικότητας με την προσθήκη της

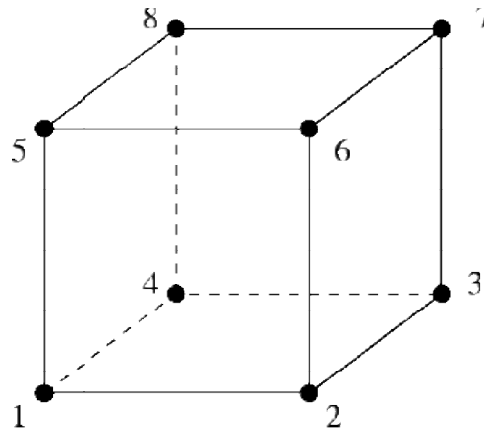
συντεταγμένης z και της αντίστοιχης μετατόπισης w . Στη μελέτη που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας απαιτήθηκε η χρήση στοιχείων τρισδιάστατης έντασης και παραμόρφωσης (στοιχείων όγκου) με βάση και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ένα εξαεδρικό ορθογωνικό στοιχείο οκτώ κόμβων, οι συναρτήσεις του οποίου δίνονται από ένα πολώνυμο της μορφής [12]:

$$j = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7zx + a_8xyz$$

Όπου $\varphi = u, v, w$. Ακολουθώντας την πάγια διαδικασία υπολογισμού των συναρτήσεων σχήματος καταλήγουμε στη σχέση η οποία ορίζει το πεδίο των μετατοπίσεων μέσω των συναρτήσεων σχήματος N_i ($i=1 \div 8$):

$$j = N_1j_1 + N_2j_2 + \dots + N_8j_2$$



Σχήμα 2.2 Εξαεδρικό ορθογωνικό στοιχείο οκτώ κόμβων [13]

2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Μεγάλη προσαρμοστικότητα σε κάθε είδους πρόβλημα
- Ενιαίος τρόπος αντιμετώπισης προβλημάτων που δημιουργεί απεριόριστο σχεδόν πεδίο εφαρμογών.

Πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων λόγω του ενιαίου και απλού τρόπου ανάλυσης των κατασκευών, ανεξάρτητα από τυχόν ιδιαιτερότητες στη γεωμετρία του φορέα, ειδικές φορτίσεις, κλπ. Η διαδικασία ανάλυσης γραμμικών, επιφανειακών και τρισδιάστατων φορέων είναι η ίδια ώστε ο υπολογισμός φορέων που αποτελούνται από διαφορετικά δομικά στοιχεία να μπορεί να γίνει μέσα στα πλαίσια της ίδιας μεθόδου.

2.6 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Για την επίλυση του φορέα στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε εκπαιδευτική έκδοση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, η οποία διατίθεται ελεύθερα από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή με περιορισμό στις διαστάσεις του προβλήματος. Η χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού είναι ευρεία και αφορά πολλούς διαφορετικούς τομείς. Μερικές από τις δυνατότητες του προγράμματος αναλύονται παρακάτω.

Το ANSYS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού. Έχει την δυνατότητα επίλυσης στατικών και δυναμικών προβλημάτων ροής ρευστών, ανάλυσης κατασκευών, μετάδοσης θερμότητας, ακουστικής, ηλεκτρισμού και ηλεκτρομαγνητισμού. Με βάση τις δυνατότητες επίλυσης και το μερίδιο που κατέχει στην αγορά θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων για πάνω από 30 έτη. Έχει χρήση σε πολλούς τομείς εφαρμοσμένης μηχανικής, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, αυτοκίνητης, ηλεκτρονικής και πυρηνικής.

Το πρόγραμμα ANSYS προσφέρει στους μηχανικούς τις δυνατότητες που αναφέρονται παρακάτω:

- Σχεδίαση μοντέλων ή μεταφορά τους στο περιβάλλον ANSYS από άλλα σχεδιαστικά πακέτα.
- Εφαρμογή ενεργών φορτίων ή άλλων συνθηκών που καθορίζουν την συμπεριφορά του μοντέλου.
- Μελέτη της φυσικής ανταπόκρισης του μοντέλου.
- Αξιολόγηση του προβλήματος και τροποποίηση διάφορων κατάλληλων παραμέτρων για την καλύτερη και γρηγορότερη δυνατή επίλυση.
- Εκτέλεση πρωτότυπων εφαρμογών.

2.6.1 Κατασκευαστική ανάλυση

Η κατασκευαστική ανάλυση είναι ίσως η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το πρόγραμμα ANSYS παρέχει επτά τύπους κατασκευαστικής ανάλυσης που επιλέγονται από το πρόγραμμα ή δηλώνονται από το χρήστη:

1. Στατική Ανάλυση: Ο στατικός υπολογισμός ενός φορέα συνίσταται στον προσδιορισμό των μεγεθών παραμόρφωσης και έντασης που αναπτύσσονται στον φορέα λόγω της δράσης εξωτερικών δυνάμεων και καταναγκασμών.
2. Modal Ανάλυση: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων μιας κατασκευής. Αποτελεί επίσης το προαπαιτούμενο στάδιο για μια πιο λεπτομερή δυναμική ανάλυση.

3. Harmonic Response Ανάλυση: Προσδιορίζει την γραμμική ανταπόκριση μιας κατασκευής λόγω της δράσης αρμονικών μεταβαλλόμενων με το χρόνο εξωτερικών φορτίων.
4. Transient Δυναμική ανάλυση: Προσδιορίζει την δυναμική ανταπόκριση μιας κατασκευής λόγω της δράσης χρονικά μεταβαλλόμενων εξωτερικών φορτίων.
5. Φασματική Ανάλυση: Προσδιορίζει την ανταπόκριση μιας κατασκευής σε τυχαία ή χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης όπως δυνάμεις σεισμού , ανέμου , θαλάσσιων κυμάτων κ.α
6. Buckling Ανάλυση: Υπολογίζει τα κρίσιμα φορτία υπό την επίδραση των οποίων επέρχεται αστάθεια στην κατασκευή.

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, για την επίλυση των προβλημάτων πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΟΥ ΜΕΛΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Στην παρούσα εργασία αναλύεται ένα υποστύλωμα διατομής 30×30, ύψους 3 μέτρων, το οποίο για εποπτικούς λόγους θεωρείται χωρίς οπλισμό. Το υποστύλωμα αυτό είναι αμφίπακτο μεταξύ των δύο διαδοχικών ορόφων και αρχικά θεωρήθηκε ότι υπόκειται σε σχετική (στατική) μετακίνηση ίση προς 2 mm. Απουσία του οπλισμού, το δομικό στοιχείο αναμένεται να ρηγματωθεί στις θέσεις όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, η οποία εν προκειμένω έχει ληφθεί ίση προς 2850 kPa, δηλαδή περίπου ίση προς το 14% της χαρακτηριστικής αντοχής του σκυροδέματος κατηγορίας C20/25. Προκειμένου να αναδειχθούν αλλά ταυτόχρονα και να ελεγχθούν οι δυνατότητες προσομοίωσης της ρηγμάτωσης ή/και της συντριβής του σκυροδέματος, η ανελαστική στατική ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά στάδια. Πηγή της παρούσης εργασίας αποτέλεσε το παράδειγμα που παρουσιάζεται στο εγχειρίδιο «Τεχνικές Προγραμματισμού και χρήσης ειδικού λογισμικού H/Y στις κατασκευές» (Αναστάσιος Σέξτος, 2001).

Ο φορέας επιλύεται στη γραμμική ελαστικότητα, με την παραδοχή του αντίστοιχου ελαστικού υλικού, και η αναπτυσσόμενη τρισδιάστατη εντατική κατάσταση μπορεί να συγκριθεί και να ελεγχθεί με απλούς θεωρητικούς υπολογισμούς, με τη χρήση των παρακάτω τύπων, γνωστών από την αντοχή υλικών:

$$V = \frac{12EJ}{l^2} (D_{AB})$$

$$M = - \frac{V}{2}$$

$$s_z = \frac{M_x}{J_z} \times y_{\max}$$

3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Για την κατασκευή του τρισδιάστατου προσομοιώματος, χρησιμοποιείται το στοιχείο σκυροδέματος (SOLID) Concrete 65. Πρόκειται για ένα στοιχείο 8 κόμβων με 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση τρισδιάστατης γεωμετρίας σκυροδέματος με ή χωρίς οπλισμό.

Το στοιχείο Concrete 65 παρέχει μέσω του αντίστοιχου μη-γραμμικού, ανελαστικού νόμου συμπεριφοράς υλικού με το οποίο αντιστοιχίζεται, τη δυνατότητα προσομοίωσης της ρηγματώσης του σκυροδέματος λόγω εφελκυσμού και της συντριβής του λόγω σύνθλιψης (cracking & crushing capabilities). Η προσομοίωση του οπλισμού είτε αγνοείται (για την περίπτωση άοπλου σκυροδέματος) είτε πραγματοποιείται εγγενώς δια μέσω των ιδιοτήτων του οπλισμού που περιλαμβάνει το στοιχείο (smeared reinforcement), είτε εισάγεται διακριτά με τη μορφή εσωτερικών ράβδων (με τη μορφή στοιχείων links) από χάλυβα (discrete reinforcement).

Το στοιχείο Concrete 65 διαθέτει επίσης δυνατότητες πλαστικής παραμόρφωσης και ερπυσμού.

Ο φορέας επιλύεται ανελαστικά με την παραδοχή νόμου υλικού όπως προβλέπει το ειδικό στοιχείο Concrete 65 του λογισμικού ANSYS και συνεκτίμηση της ρηγματώσης ή/και συντριβής του σκυροδέματος. Από την ανάλυση επιβεβαιώνονται οι θέσεις ρηγματώσης, η χρονική στιγμή έναρξης αυτών, καθώς και η ανακατανομή της εντατικής κατάστασης που οφείλεται ακριβώς στην ανελαστική συμπεριφορά του μέλους.

Λαμβάνονται οι ακόλουθες τιμές των μεταβλητών του μοντέλου των William και Warnkler που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα [14]:

$E_x =$ μέτρο ελαστικότητας = 29×10^6 kPa

PRXY = Λόγος Poisson (ν) = 0.3

Density = πυκνότητα (ρ) = 2500 kg/m³

UnTensSt = εφελκυστική αντοχή = 2850 kPa

UnCompSt = θλιπτική αντοχή = 20000 kPa

Συντελεστές για τη σχεδίαση του νόμου συμπεριφοράς του υλικού:

ShrCf-Op = 0.3

ShrCf-CI = 0.8

Συντελεστής για την έναρξη της ρηγματώσης στο προσομοίωμα:

TenCrFac = 0.6

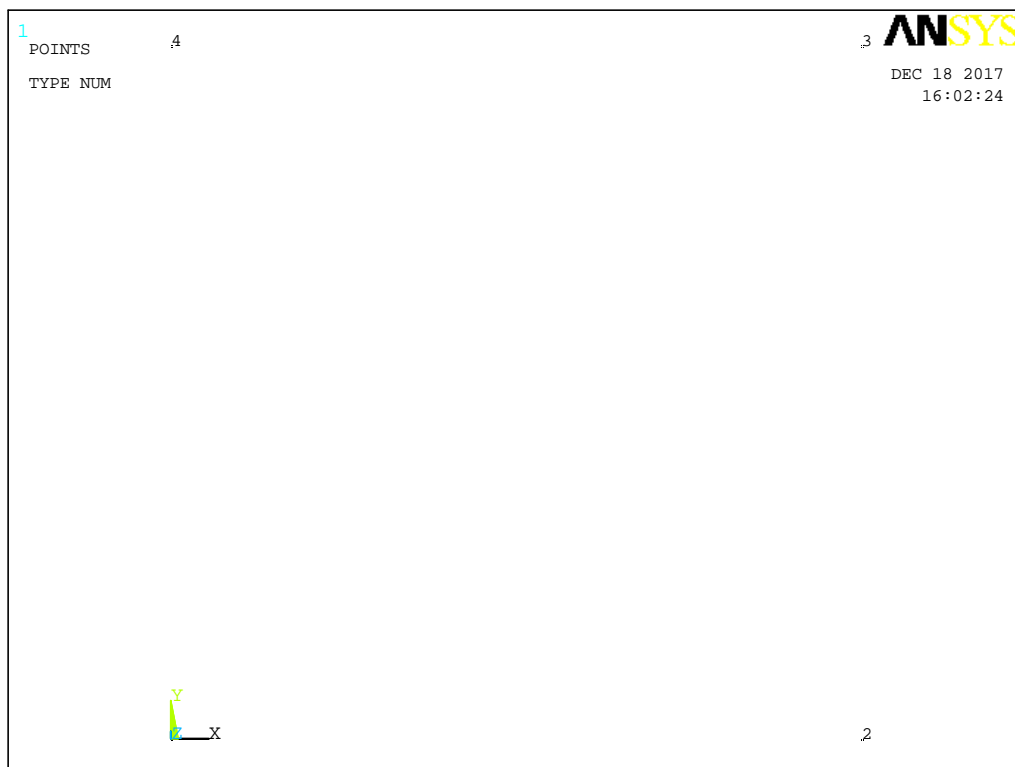
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ της ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος, εισάγεται και δεύτερο υλικό (Material 2), το οποίο διαθέτει αποκλειστικά τις ελαστικές ιδιότητες $E_x = 29 \times 10^6$ kPa και $\nu = 0.3$, καθώς και πυκνότητα 2500 kg/m³.

Στον ορισμό των γεωμετρικών σταθερών στοιχείων της ράβδου, οι παράμετροι που αφορούν τον οπλισμό καθορίζονται δια μέσου των γεωμετρικών ιδιοτήτων (real constants) και αφορούν: το υλικό του οπλισμού (MAT) που εφόσον η διατομή ήταν οπλισμένη θα ήταν χάλυβας, το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού (volume ratio, VR ίσος προς τον λόγο του όγκου του οπλισμού προς τον όγκο του στοιχείου), καθώς και τον προσανατολισμό του οπλισμού στον χώρο μέσω των δύο γωνιών, οι οποίες εμφανίζονται στο σχήμα που παρουσιάζει το σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου.

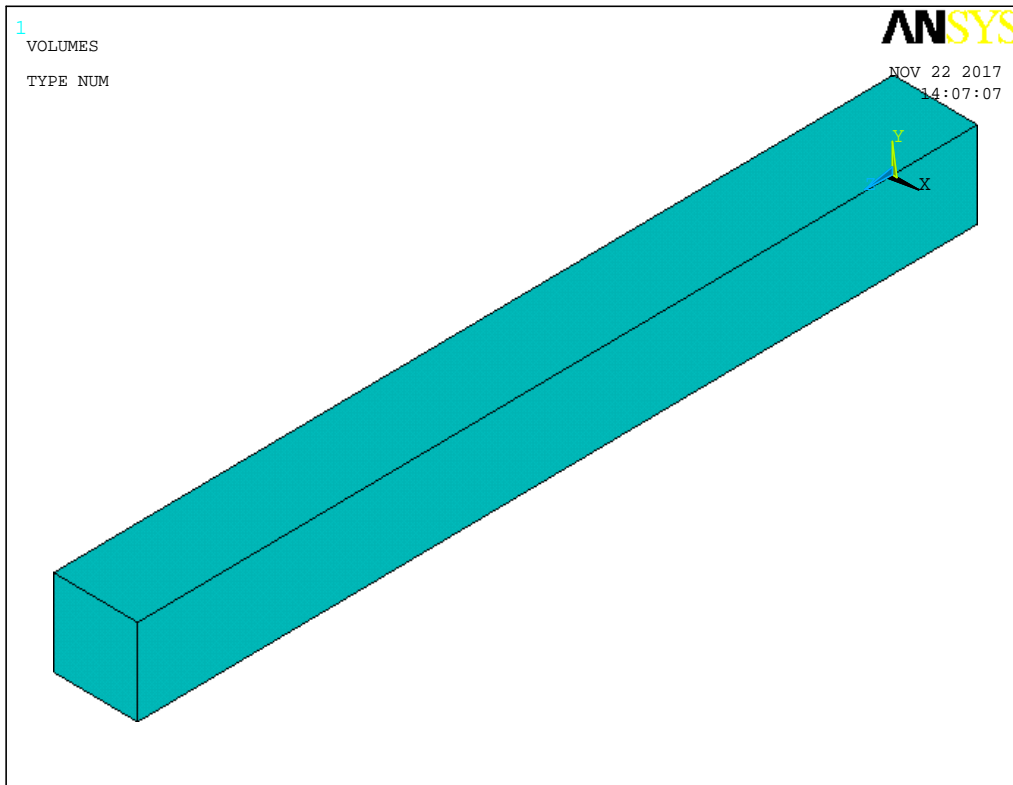
Για τη δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα που επιλύθηκε αρχικά ορίστηκαν τέσσερα σημεία αναφοράς (keypoints) για να προκύψει η διατομή του υποστυλώματος 30×30 (Σχήμα 3.1). Με οδηγό τα σημεία αυτά δημιουργήθηκε ως οντότητα επιφάνειας η διατομή του υποστυλώματος η οποία ακολούθως «επεκτάθηκε» ώστε να προκύψει ο πρισματικός όγκος (Σχήμα 3.2) που αντιπροσωπεύει το δομικό στοιχείο που αναλύεται.

Μετά την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του όγκου γίνεται η διακριτοποίηση, ο χωρισμός του, δηλαδή, σε χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (Σχήμα 3.3), όπου ορίζονται οι παράμετροι της προσομοίωσης, δηλαδή επιλέγεται το υλικό από αυτά που έχουν ήδη εισαχθεί σε προηγούμενο στάδιο της διαδικασίας, όπως περιγράφηκε παραπάνω.

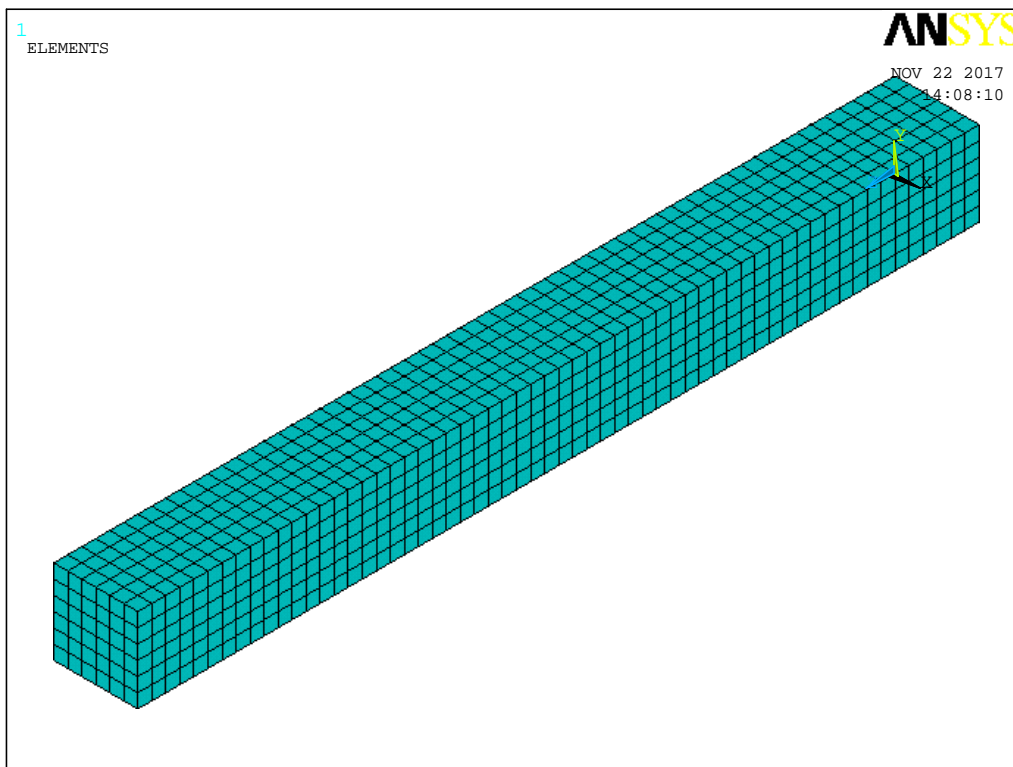
Τέλος, εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες. Για να γίνει αυτό, επιλέγονται οι κόμβοι στη βάση και την κορυφή του υποστυλώματος, εργαζόμενοι στο επίπεδο Y-Z. Οι κόμβοι της βάσης του υποστυλώματος δεσμεύονται πλήρως (ALL DOF), ενώ οι κόμβοι της κορυφής του υποστυλώματος δεσμεύονται μόνο κατά Uy, Uz δεδομένου ότι η μετακίνηση κατά Ux, ως καταναγκασμός 0.002m δεν είναι μηδενική (Σχήματα 3.4 και 3.5).



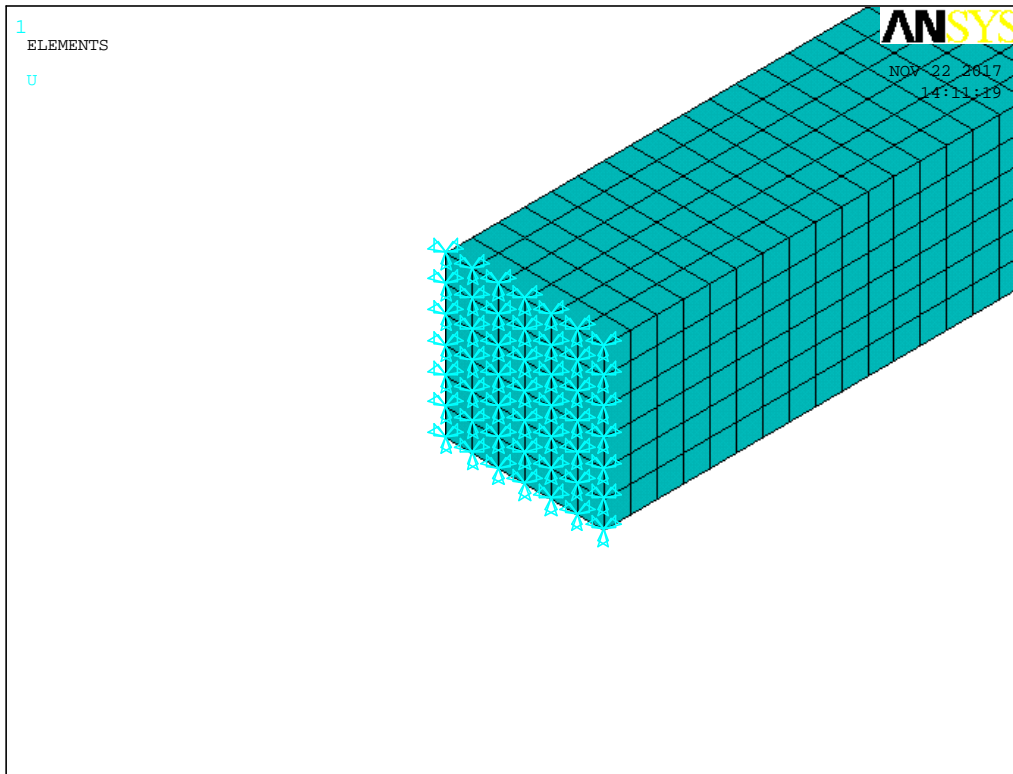
Σχήμα 3.1 Σημεία αναφοράς (keypoints) για το σχεδιασμό της διατομής του μέλους



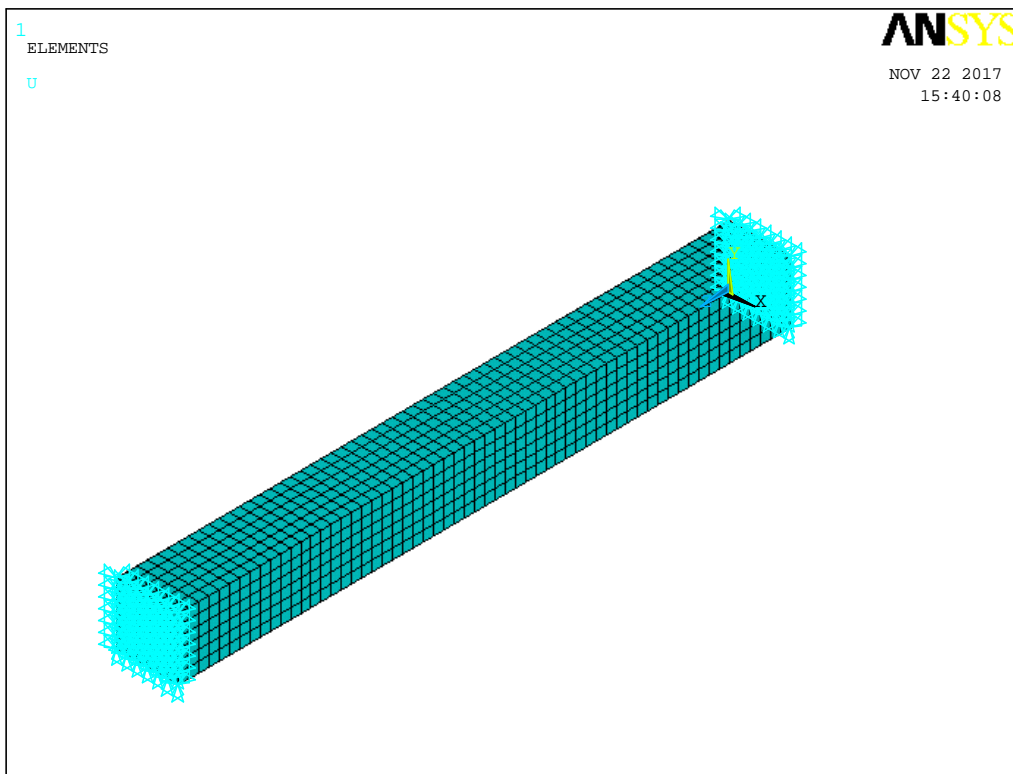
Σχήμα 3.2 Εισαγωγή των γεωμετρικών στοιχείων του υποστυλώματος.



Σχήμα 3.3 Διακριτοποίηση του όγκου του υποστυλώματος σε χωρικά πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 3.4 Πλήρης δέσμευση των κόμβων της βάσης.



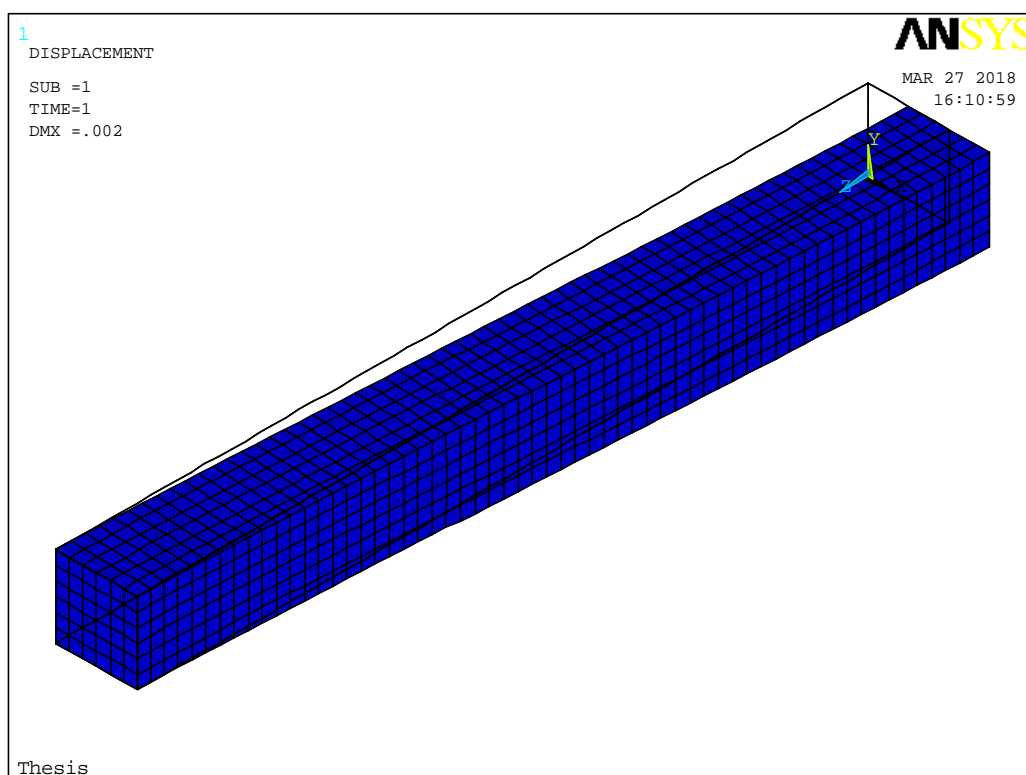
Σχήμα 3.5 Δέσμευση κατά U_y και U_z των κόμβων της κορυφής του υποστυλώματος.

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 0.002m

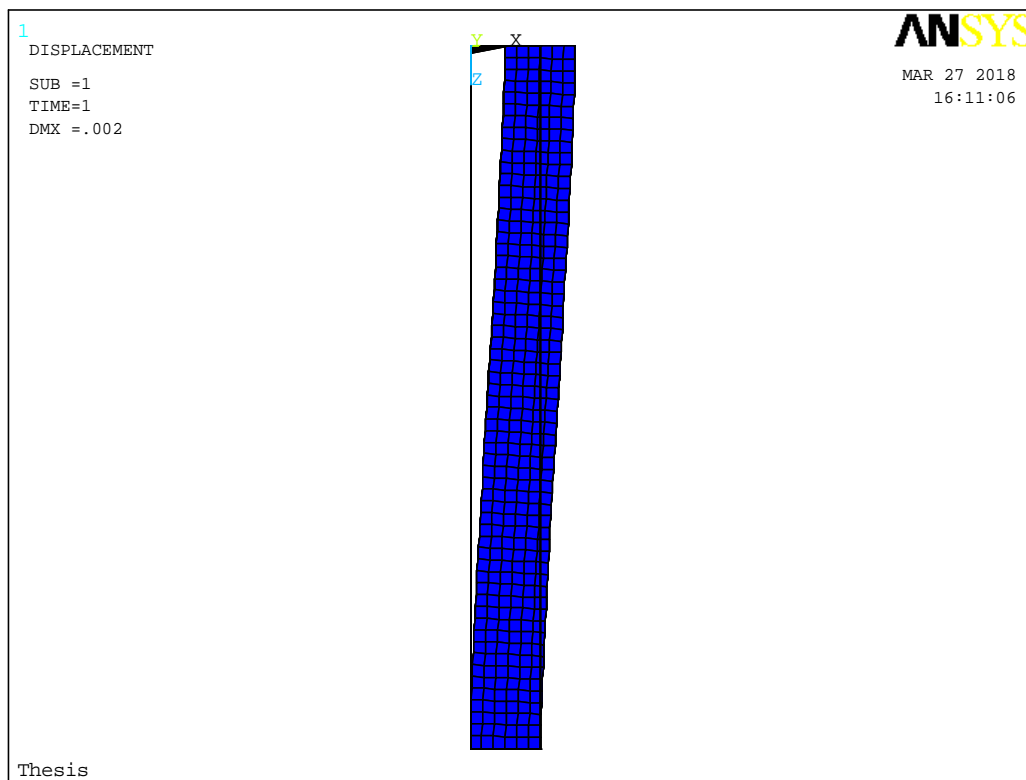
Αρχικά, ο απλός φορέας επιλύεται θεωρώντας επιβαλλόμενη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του x-άξονα ίση με $U_x=0.002m$. Η επίλυση πραγματοποιείται θεωρώντας ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στη δεύτερη περίπτωση διερευνώνται και οι δυνατότητες του λογισμικού να εντοπίσει και να απεικονίσει ορθά τις θέσεις ρηγμάτωσης.

3.3.1 Αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης.

Από τη στατική ανάλυση του φορέα, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική συμπεριφορά του υλικού, προκύπτει και απεικονίζεται στα Σχήματα 3.6 και 3.7 το παραμορφωμένο σχήμα του στοιχείου (αξονομετρική και επίπεδη απεικόνιση αντιστοίχως). Η καμπυλότητα του μέλους προσεγγίζει το μισό του βέλους κάμψης ενός αμφίπακτου στοιχείου, όπως ήταν αναμενόμενο με βάση τους περιορισμούς που επιβλήθηκαν στα άκρα και τον τρόπο που επιβλήθηκε η ένταση. Η μέγιστη μετατόπιση στο «ελεύθερο» άκρο είναι ίση με 0.002m όπως σημειώνεται στα σχήματα, ίση δηλαδή με την «εξωτερικά επιβαλλόμενη».

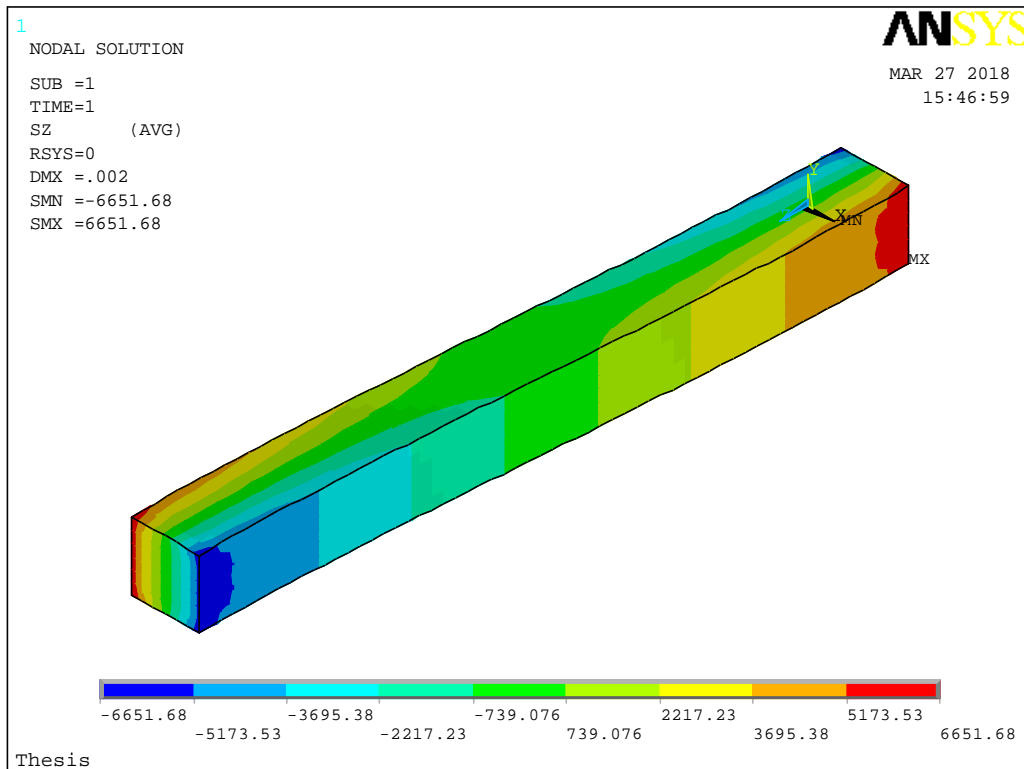


Σχήμα 3.6 Αξονομετρική απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ελαστική ανάλυση.

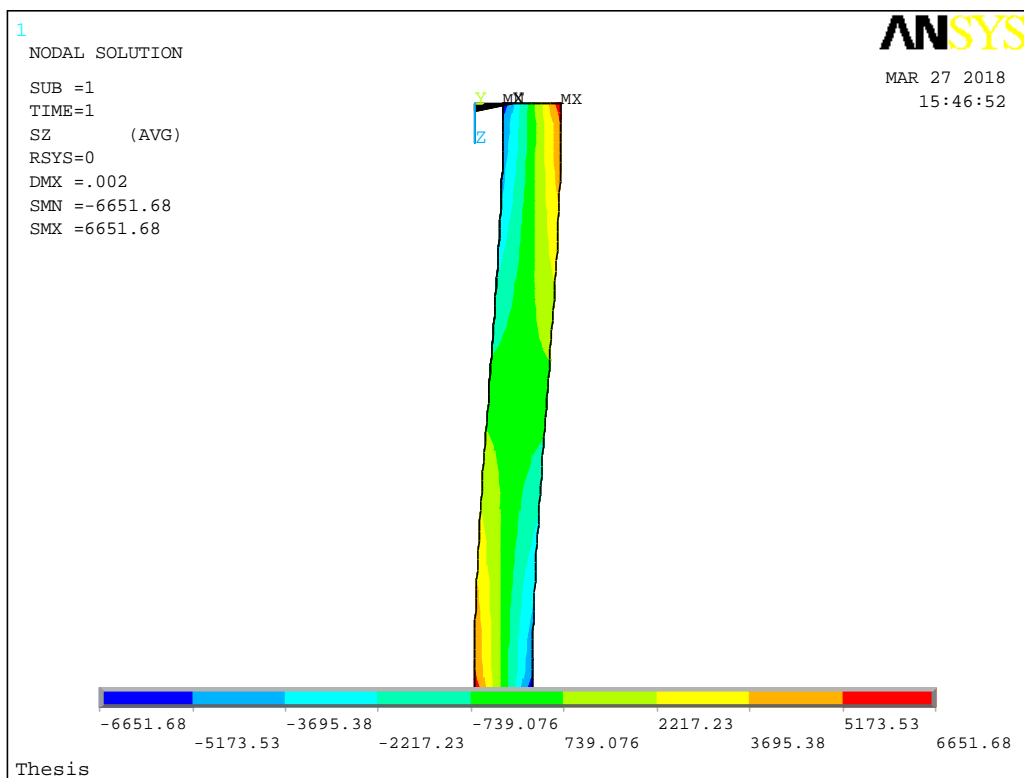


Σχήμα 3.7 Επίπεδη απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ελαστική ανάλυση.

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα μιας ανάλυσης τέτοιου είδους είναι οι κύριες τάσεις που αναπτύσσονται στο φορέα και η κατανομή τους. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται συνήθως μέσω των ισοτασικών επιφανειών (contours) που παρουσιάζονται, για την ελαστική ανάλυση που εξετάζεται, στα Σχήματα 3.8 και 3.9, σε αξονομετρική και επίπεδη απεικόνιση αντιστοίχως.



Σχήμα 3.8 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ελαστική ανάλυση.



Σχήμα 3.9 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ελαστική ανάλυση.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα, οι μέγιστες τιμές των τάσεων (εφελκυσμός, κόκκινο χρώμα) εμφανίζονται στο σημείο επιβολής της έντασης στο κάτω πέλμα και στη στήριξη στο άνω πέλμα, όπως ήταν αναμενόμενο. Στις απέναντι παρειές του μέλους συναντώνται οι ελάχιστες τιμές κυρίων τάσεων (μέγιστες θλιπτικές, μπλε χρώμα). Οι τάσεις μηδενίζονται περίπου στο μέσον του μέλους (πράσινο χρώμα). Οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων προκύπτουν προφανώς ίσες, δηλαδή $SMX = |SMN| = 6651.68 \text{ Pa}$, δεδομένου ότι η συμπεριφορά της κατασκευής είναι ελαστική. Η τιμή αυτή μπορεί να επαληθευτεί από τις κλασσικές εξισώσεις της θεωρίας της κάμψης που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

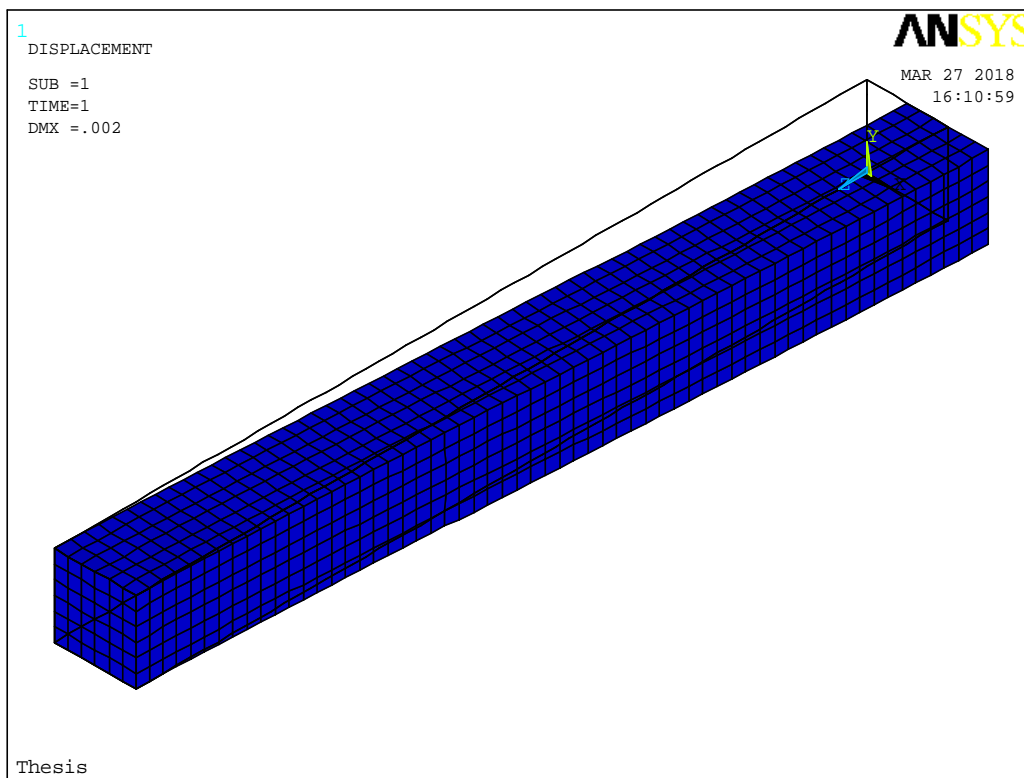
Τέλος, με δεδομένο ότι η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν ελαστική δεν υπολογίστηκε η ρηγμάτωση του υλικού του μέλους.

3.3.2 Αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης

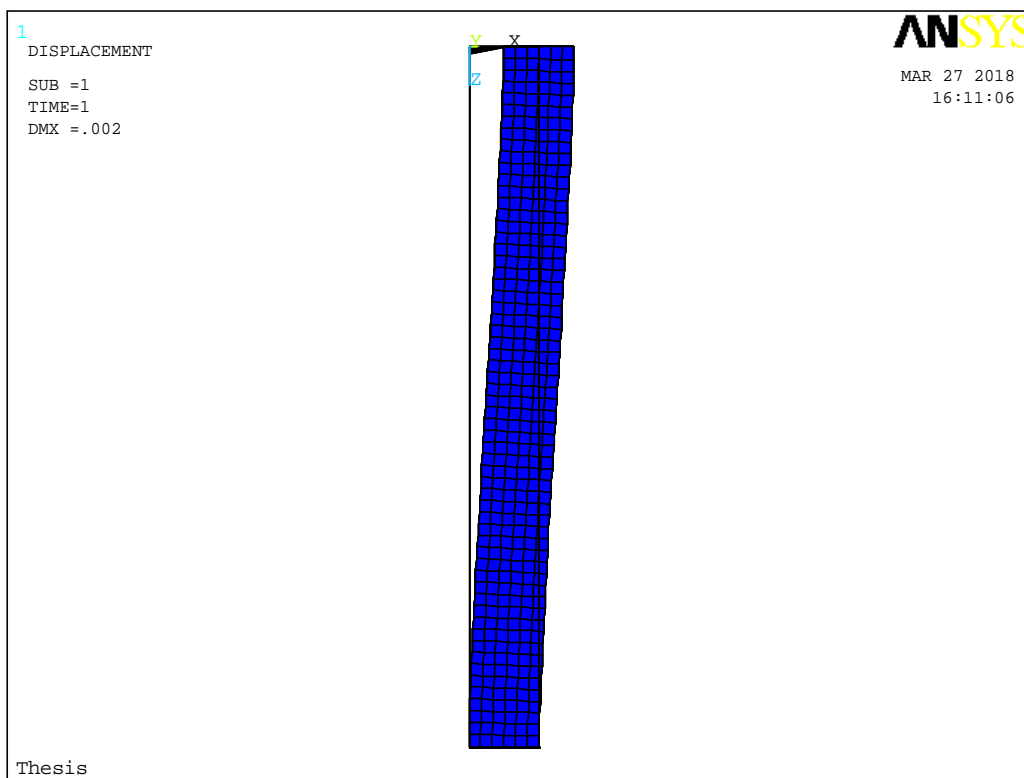
Η ίδια ανάλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος, ορίζοντας κατάλληλα τις ιδιότητες του υλικού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Το παραμορφωμένο σχήμα του μέλους παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.10 και 3.11 σε αξονομετρική και επίπεδη απεικόνιση. Συγκρίνοντας με τα Σχήματα 3.6 και 3.7 παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν εμφανείς διαφορές με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της ελαστικής ανάλυσης. Η μέγιστη μετατόπιση στο άκρο είναι προφανώς ίση με 0.002m.

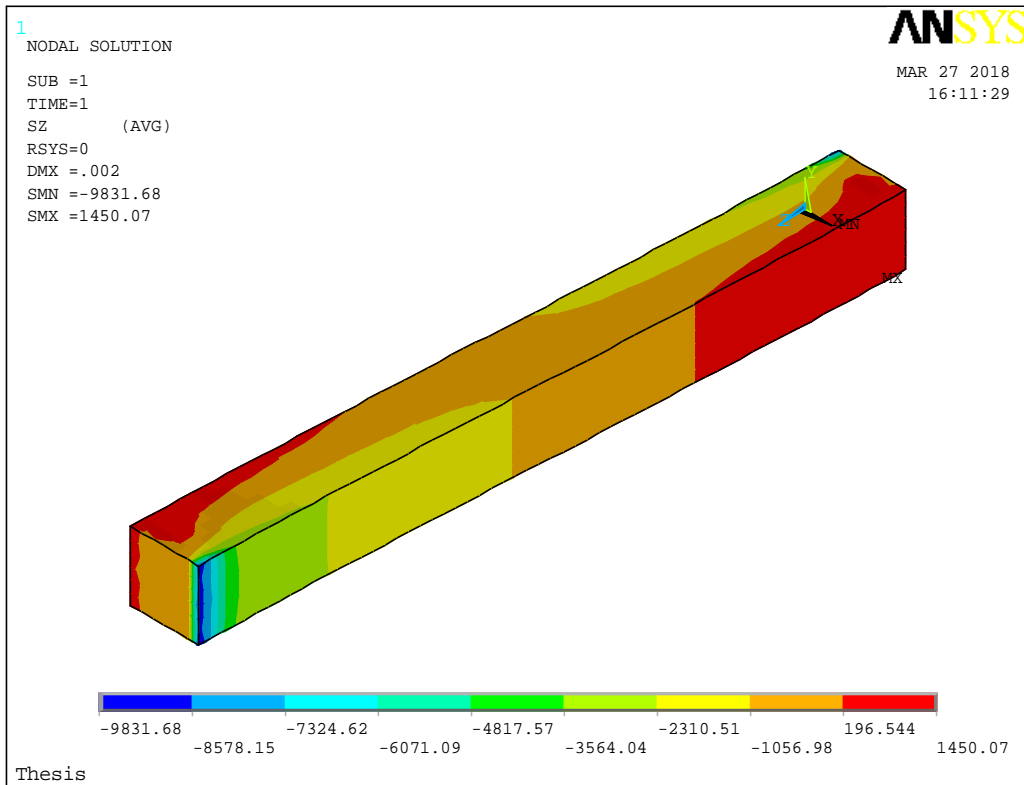
Ωστόσο, η μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού οδηγεί σε διαφοροποιήσεις στις μέγιστες τάσεις και την κατανομή τους. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 3.12 και 3.13, σε αξονομετρική και επίπεδη απεικόνιση αντιστοίχως.



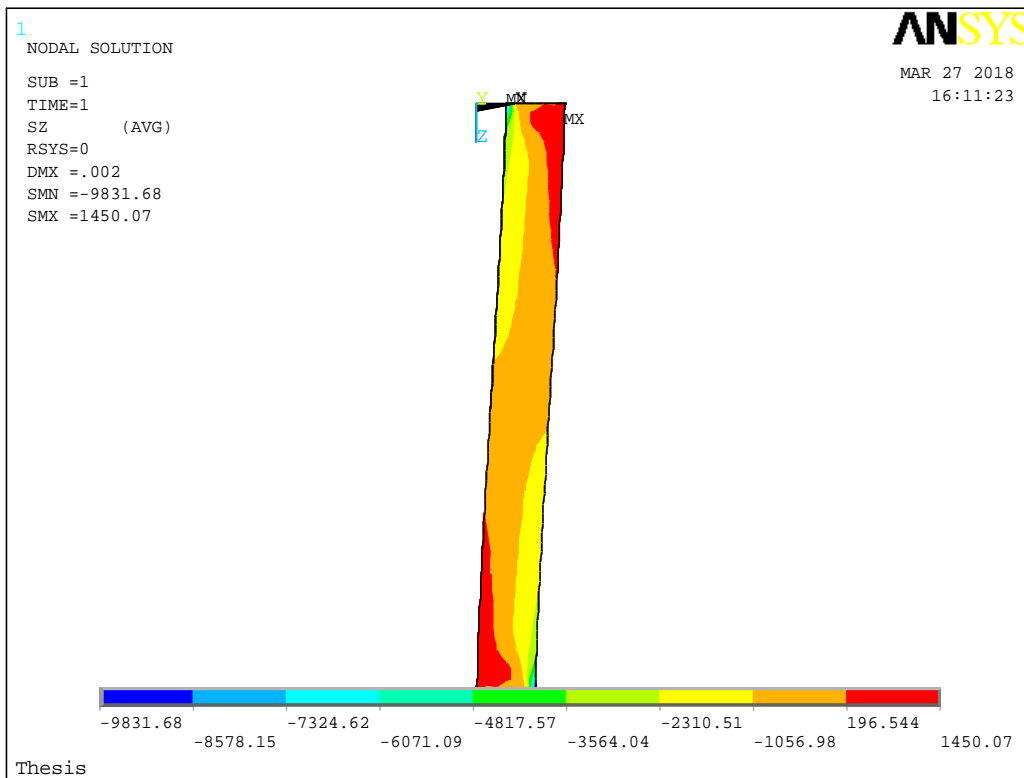
Σχήμα 3.10 Αξονομετρική απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ανελαστική ανάλυση.



Σχήμα 3.11 Επίπεδη απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ανελαστική ανάλυση.



Σχήμα 3.12 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ανελαστική ανάλυση.



Σχήμα 3.13 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m – ανελαστική ανάλυση.

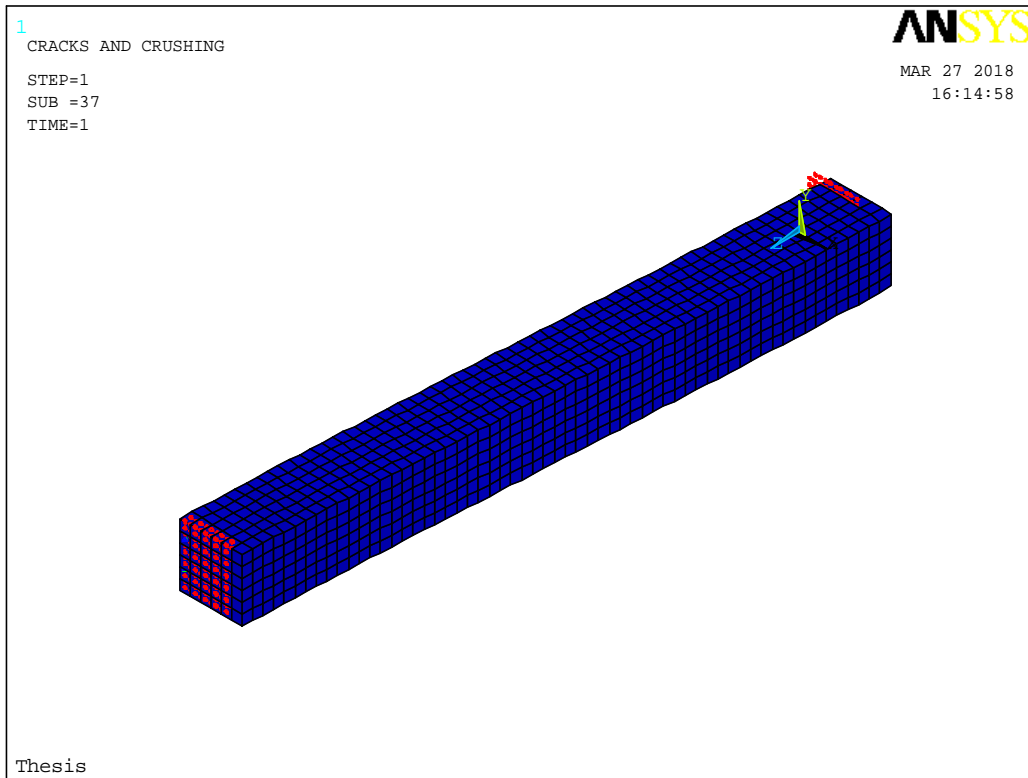
Δεδομένου ότι στο μοντέλο έχει εισαχθεί η μικρή εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, είναι αδύνατον να αναπτυχθούν οι τιμές των εφελκυστικών τάσεων που υπολογίστηκαν κατά την ελαστική λύση. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση σε αυτή την περίπτωση προέκυψε ίση με 1450.07 Pa, τιμή κοντά στην εφελκυστική αντοχή του υλικού. Η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού σε κάποια διατομή οδηγεί σε ρηγμάτωση. Η ρηγμάτωση και η αδυναμία παραλαβής περαιτέρω εφελκυστικών τάσεων στις εφελκυσόμενες ίνες σε μία διατομή οδηγεί σε αύξηση των τάσεων στη γειτονική της και σταδιακή επέκταση της αστοχίας του μέλους. Η εικόνα αυτή μεταφράζεται σε μεγαλύτερες ζώνες μέγιστων εφελκυστικών τάσεων (κόκκινο χρώμα) στα προηγούμενα Σχήματα 3.12 και 3.13. Επιπλέον οι τάσεις ανακατανέμονται στις κρίσιμες διατομές όπου παρατηρείται η αστοχία, και προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία, επιβαρύνουν σημαντικά τις διατομές και σε θλίψη. Στην περίπτωση αυτή οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις προκύπτουν ίσες με 9831.68 Pa. Για διευκόλυνση της σύγκρισης μεταξύ των δύο αναλύσεων, οι μέγιστες τιμές των τάσεων και της μετατόπισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m

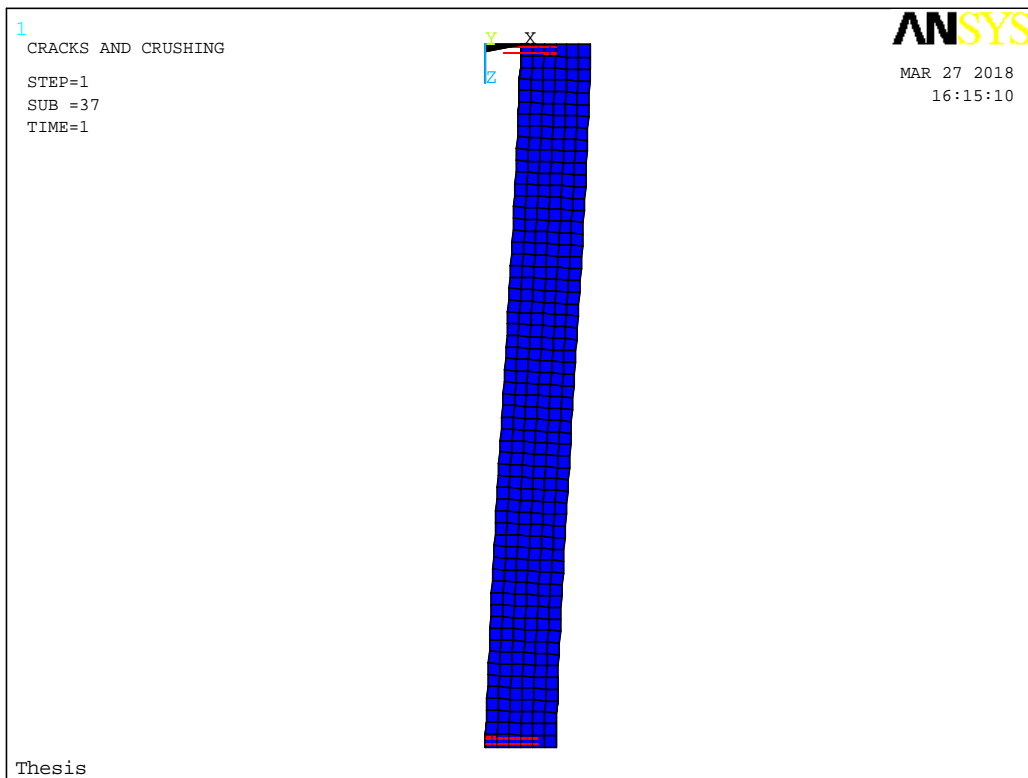
	Ελαστική	Ανελαστική
SMN (Pa)	-6651.68	-9831.68
SMX (Pa)	+6651.68	1450.07
DMX (m)	0.002	0.002

Όταν έχουν εισαχθεί τα κατάλληλα δεδομένα και πραγματοποιείται ανελαστική ανάλυση, το πρόγραμμα ANSYS έχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των θέσεων ρηγμάτωσης. Τέτοια αποτελέσματα για το υπό μελέτη μέλος παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.14 έως 3.16. Παρατηρείται ότι η ρηγμάτωση εντοπίζεται στις κρίσιμες διατομές του μέλους, στις θέσεις των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων.

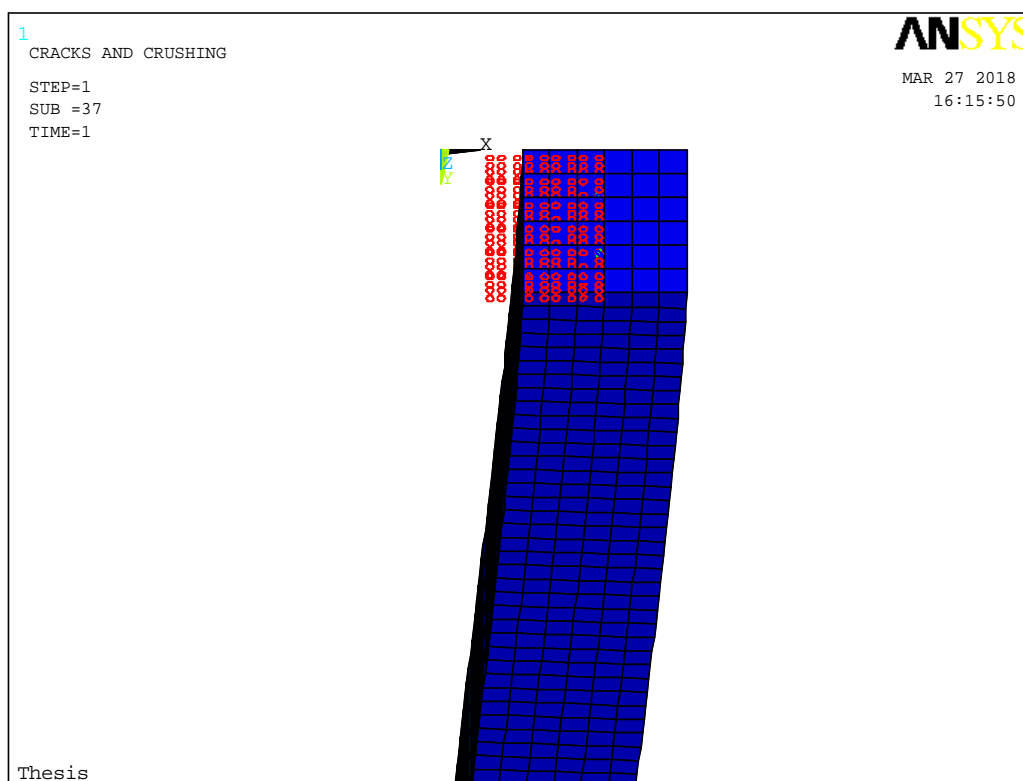
Από την εικόνα αυτή, ένα ενδιαφέρον ζήτημα που προκύπτει είναι να μελετηθεί με χρήση του μοντέλου αυτού πως θα εξελιχθεί η ρηγμάτωση του στοιχείου εάν αυξηθεί περισσότερο η εξωτερικά επιβαλλόμενη ένταση. Η μελέτη αυτή αποτελεί αντικείμενο της επόμενης παραγράφου.



Σχήμα 3.14 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m.



Σχήμα 3.15 Επίπεδη προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m.



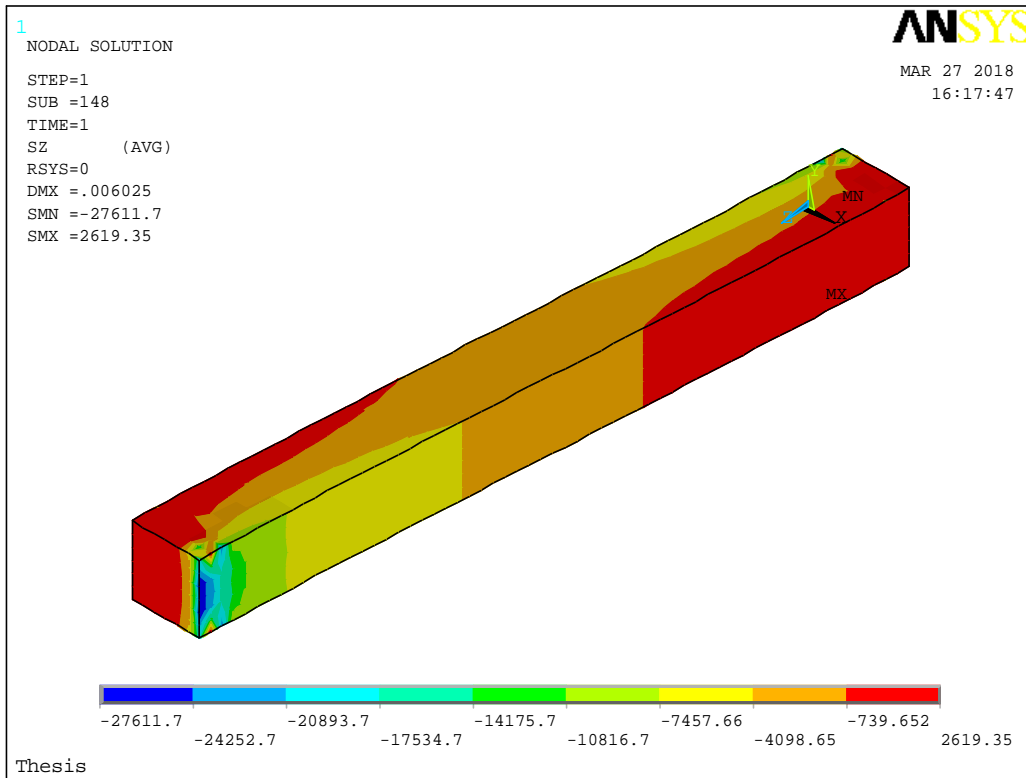
Σχήμα 3.16 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης στο «ελεύθερο» άκρο για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.002m.

3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 0.006m

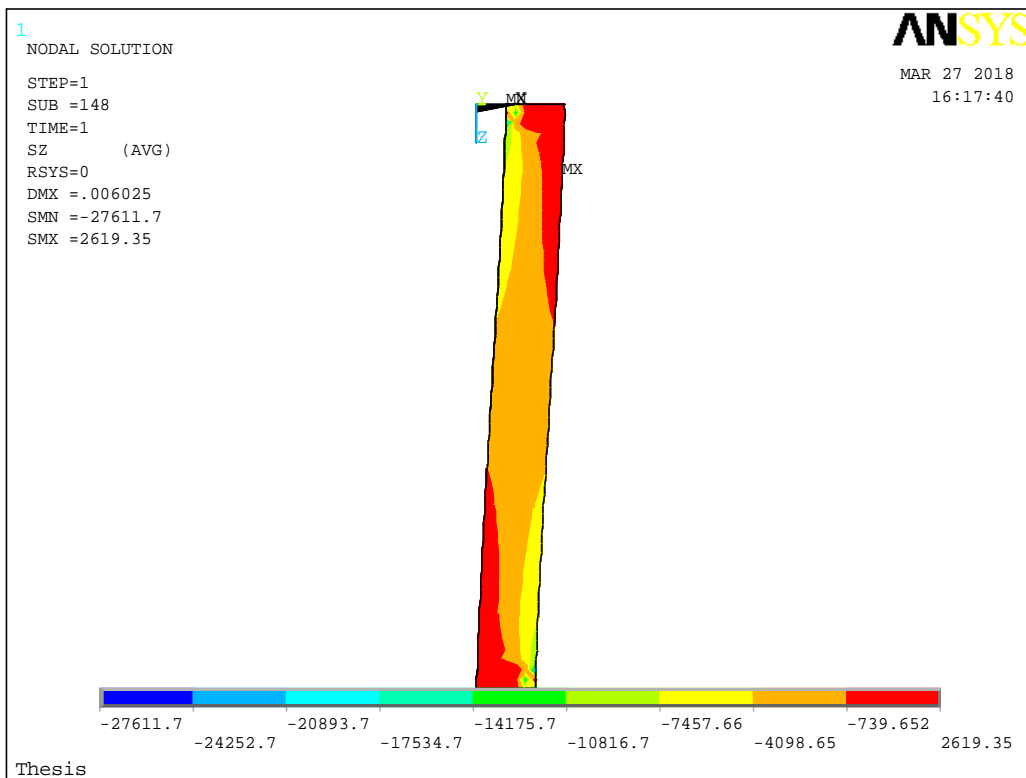
Χάριν της σύγκρισης, λοιπόν, ο φορέας επιλύεται εκ νέου θεωρώντας επιβαλλόμενη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του x-άξονα ίση με $U_x=0.006m$. Η επίλυση πραγματοποιείται θεωρώντας ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με την προηγούμενη επίλυση.

3.4.1 Αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης

Από την ανάλυση του φορέα και λαμβάνοντας υπόψιν την ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, προκύπτει και απεικονίζεται στα Σχήματα 3.17 και 3.18 η κατανομή των τάσεων στο παραμορφωμένο σχήμα του στοιχείου (αξονομετρική και επίπεδη απεικόνιση αντιστοίχως). Η καμπυλότητα του μέλους προσεγγίζει το μισό του βέλους κάμψης ενός αμφίπακτου στοιχείου. Η μέγιστη μετατόπιση στο «ελεύθερο» άκρο είναι ίση με 0.006025m όπως σημειώνεται στα σχήματα, ελάχιστα διαφοροποιημένη δηλαδή με την «εξωτερικά επιβαλλόμενη». Η διαφορά αυτή σχετίζεται με την αριθμητική σύγκλιση της ανάλυσης.



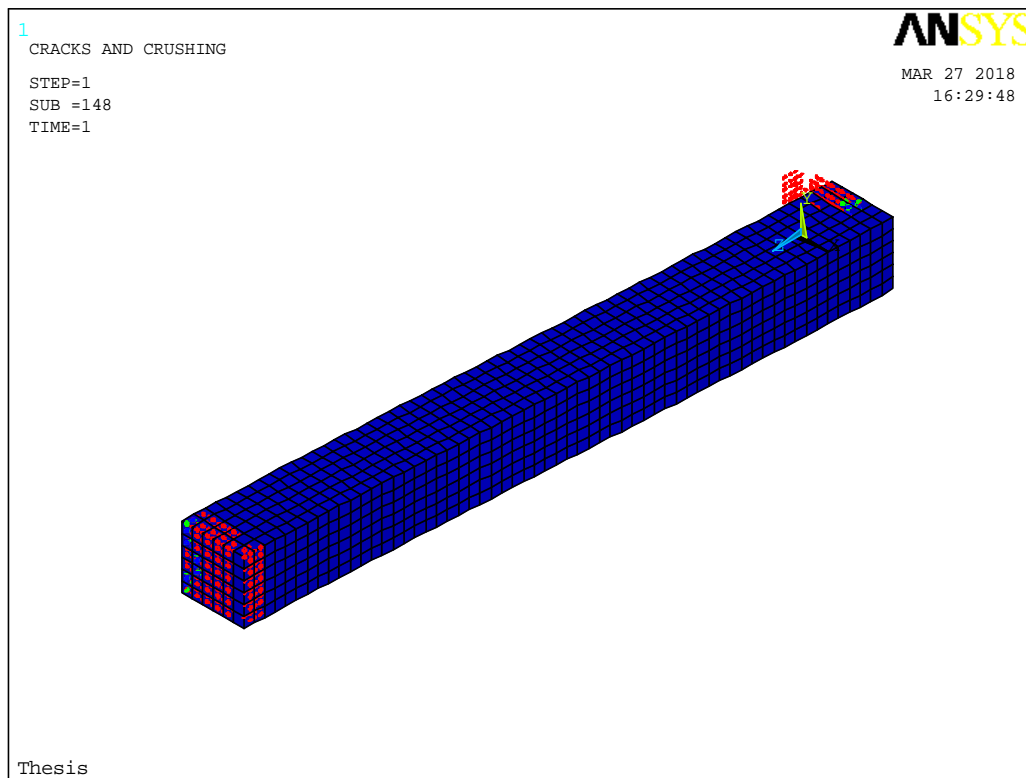
Σχήμα 3.17 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m – ανελαστική ανάλυση.



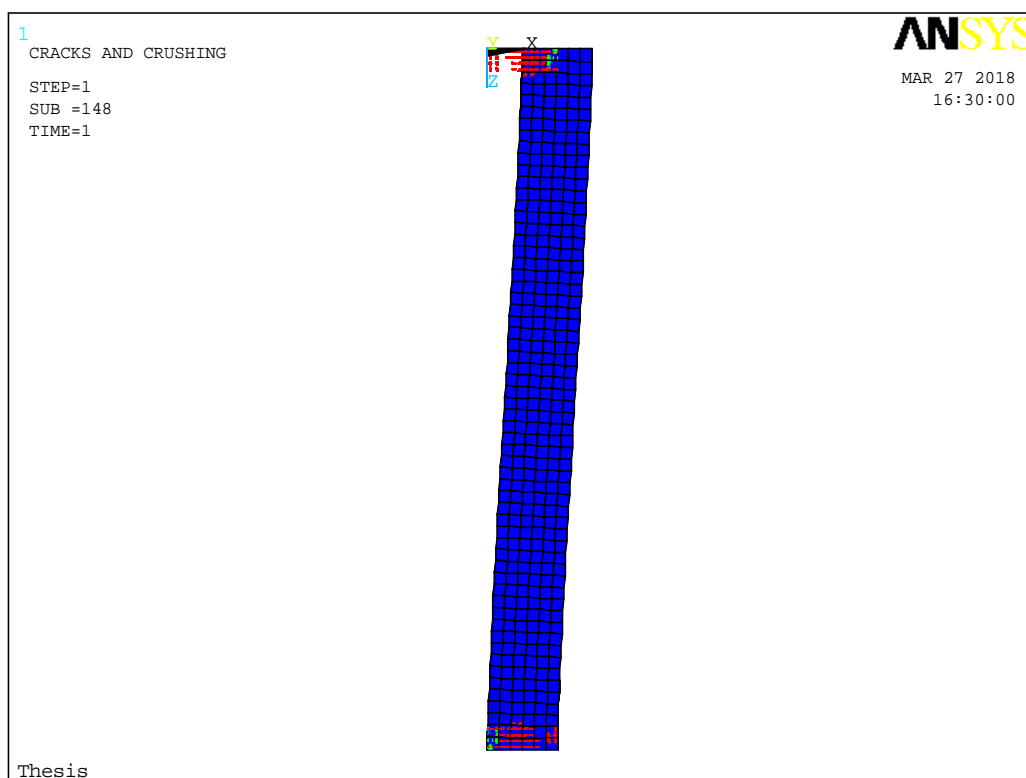
Σχήμα 3.18 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m – ανελαστική ανάλυση.

Συγκριτικά με την προηγούμενη ανάλυση, παρατηρείται ότι προκύπτουν πλέον τάσεις εφελκυστικές κοντά στα όρια της αστοχίας ($>2600 \text{ Pa}$). Λόγω ανακατανομής της έντασης που οφείλεται στην ανελαστική συμπεριφορά της δοκού «επεκτάθηκε» η ζώνη εφελκυστικών τάσεων κοντά στο όριο της ρηγμάτωσης σε μεγάλο τμήμα της δοκού. Παράλληλα, λόγω ακριβώς της εικόνας αυτής αυξήθηκαν πολύ και οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις στις κρίσιμες περιοχές του μέλους.

Η διαφοροποίηση στην εντατική κατάσταση συνεπάγεται προφανώς και διαφορετική εικόνα της ρηγμάτωσης. Αρχικά η ρηγμάτωση παρατηρούνταν στην ακραία διατομή μόνο, ενώ τώρα έχει επεκταθεί και σε γειτονικές. Επίσης, πλέον παρατηρείται και ρηγμάτωση στη θλιβόμενη ζώνη, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.19 και 3.20, γιατί ξεπεράστηκε λόγω ανακατανομών και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 3.19 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m.

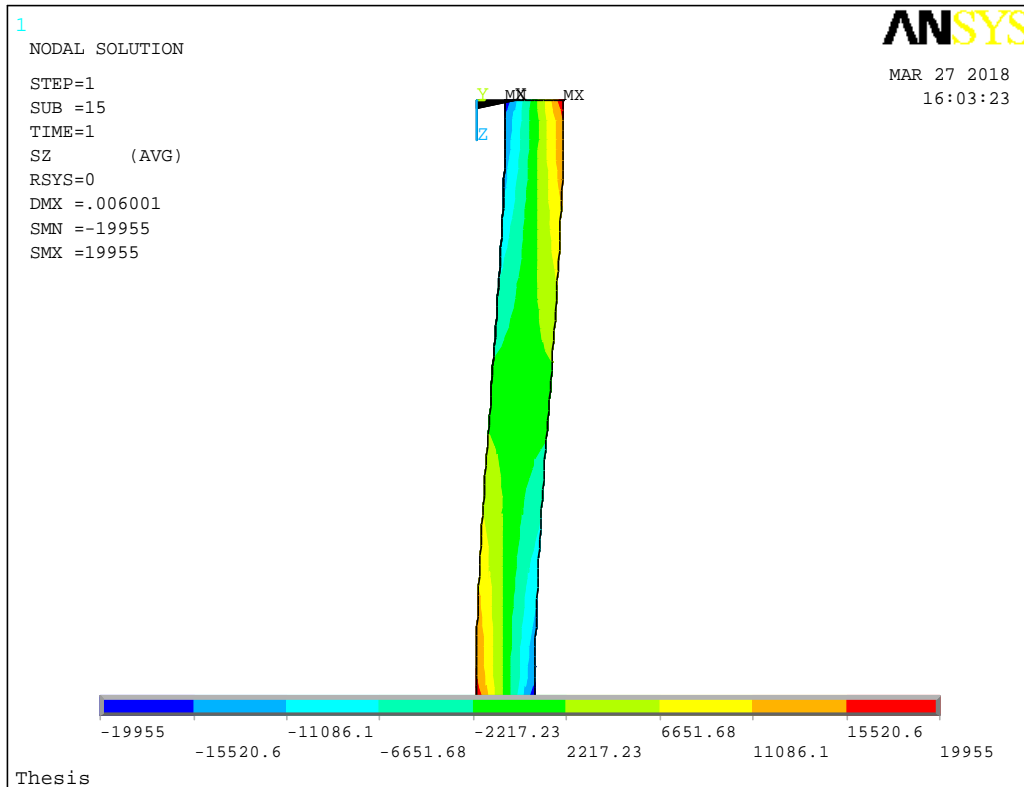


Σχήμα 3.20 Επίπεδη προβολή των θέσεων ρηγματώσης για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m.

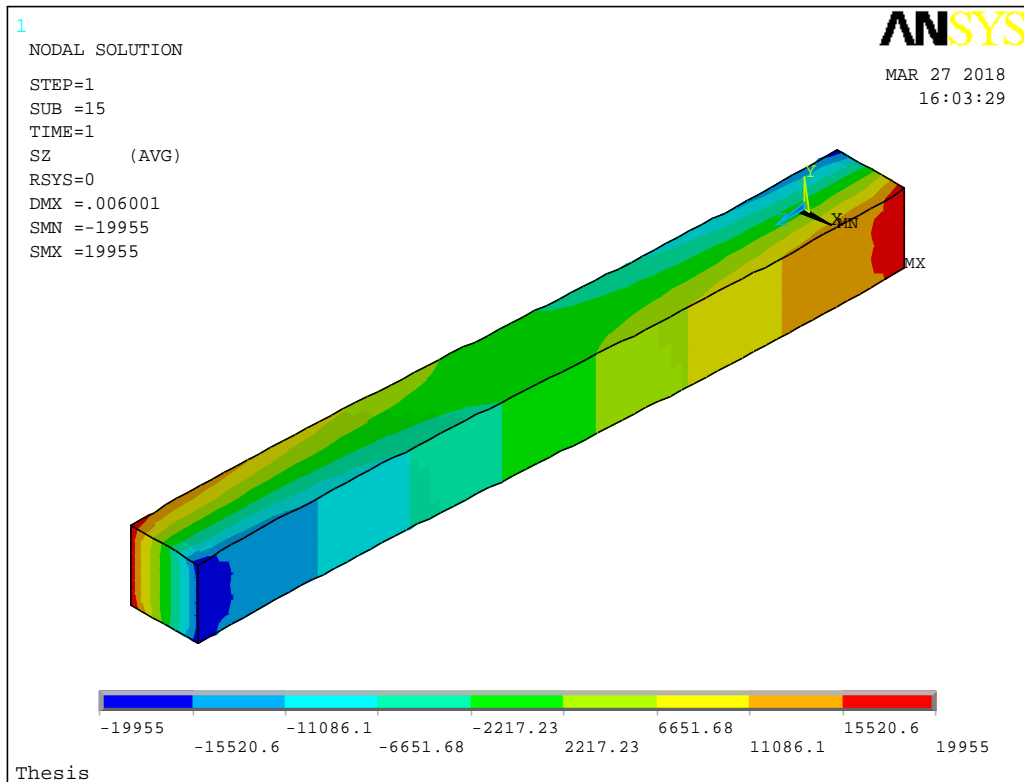
3.4.2 Αποτελέσματα ελαστικής ανάλυσης

Όπως σχολιάστηκε παραπάνω, η αύξηση της έντασης οδηγεί σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων. Προφανώς αυτό δεν ισχύει όταν η ανάλυση είναι ελαστική. Η ελαστική θεώρηση της συμπεριφοράς του μέλους συνεπάγεται ότι η αύξηση της επιβαλλόμενης έντασης οδηγεί σε αναλογική αύξηση των εσωτερικών εντατικών μεγεθών. Αυτό αποτυπώνεται στα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήματα 3.21 και 3.22). Παρατηρείται ότι η κατανομή των τάσεων είναι όμοια με την αρχική ελαστική ανάλυση, όπου απλά έχουν τριπλασιαστεί οι τιμές των τάσεων (λόγω αντίστοιχου τριπλασιασμού της επιβαλλόμενης μετατόπισης).

Τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m συνοψίζονται για λόγους σύγκρισης στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.21 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m – ελαστική ανάλυση.



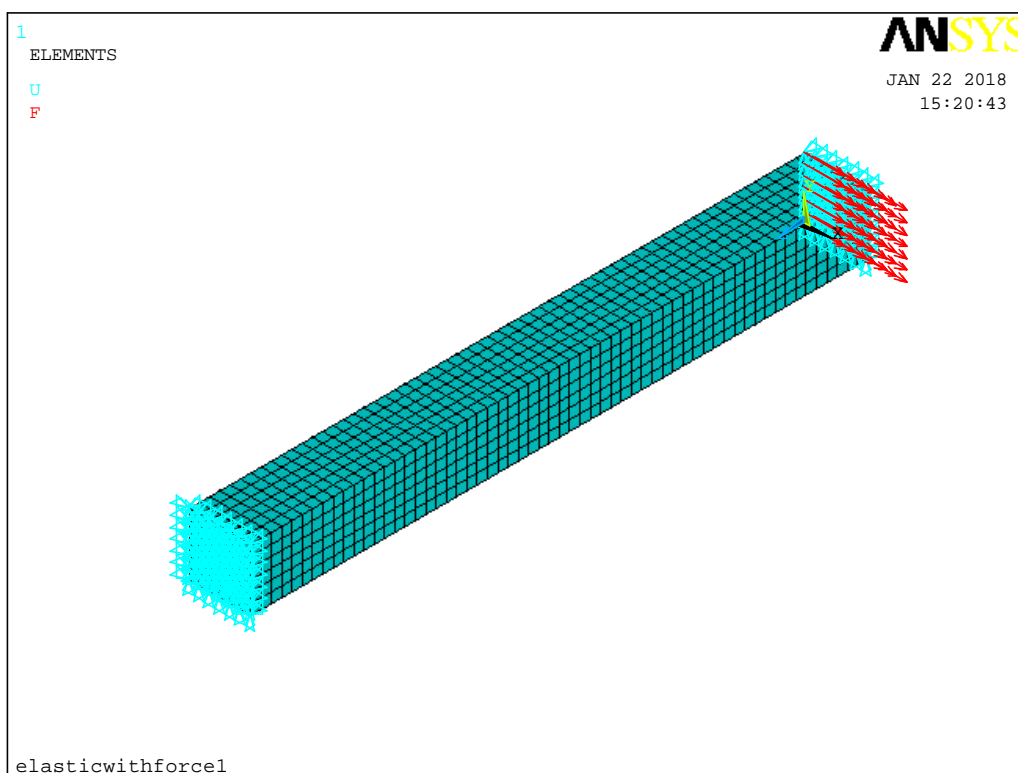
Σχήμα 3.22 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m – ελαστική ανάλυση.

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για επιβαλλόμενη μετατόπιση 0.006m

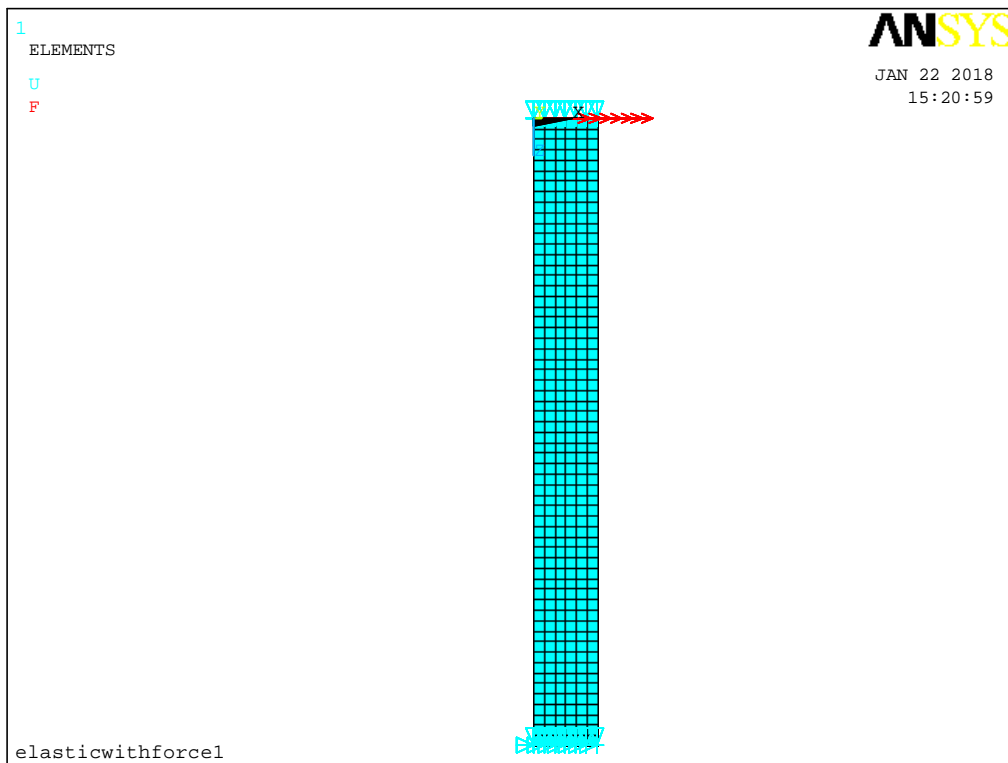
	Ελαστική	Ανελαστική
SMN (Pa)	-19955	-27611.7
SMX (Pa)	+19955	2619.35
DMX (m)	0.006	0.006

3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ 1N ΣΤΗΝ ΑΚΡΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΛΟΥΣ

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις θεωρώντας επιβαλλόμενη δύναμη στην ακραία διατομή του μέλους ίση με 1N (Σχήματα 3.23 και 3.24). Η επίλυση πραγματοποιείται θεωρώντας ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων για ίση εξωτερική ένταση εκφραζόμενη πλέον ως δύναμη. Είναι δηλαδή δυνατόν από τις αναλύσεις αυτές να συγκριθούν οι «πραγματικές» μετατοπίσεις της ανελαστικής κατασκευής με τις θεωρητικές που προκύπτουν από τη συνήθη ελαστική υπόθεση.



Σχήμα 3.23 Επιβαλλόμενη δύναμη στην ακραία διατομή του μέλους – αξονομετρική προβολή.

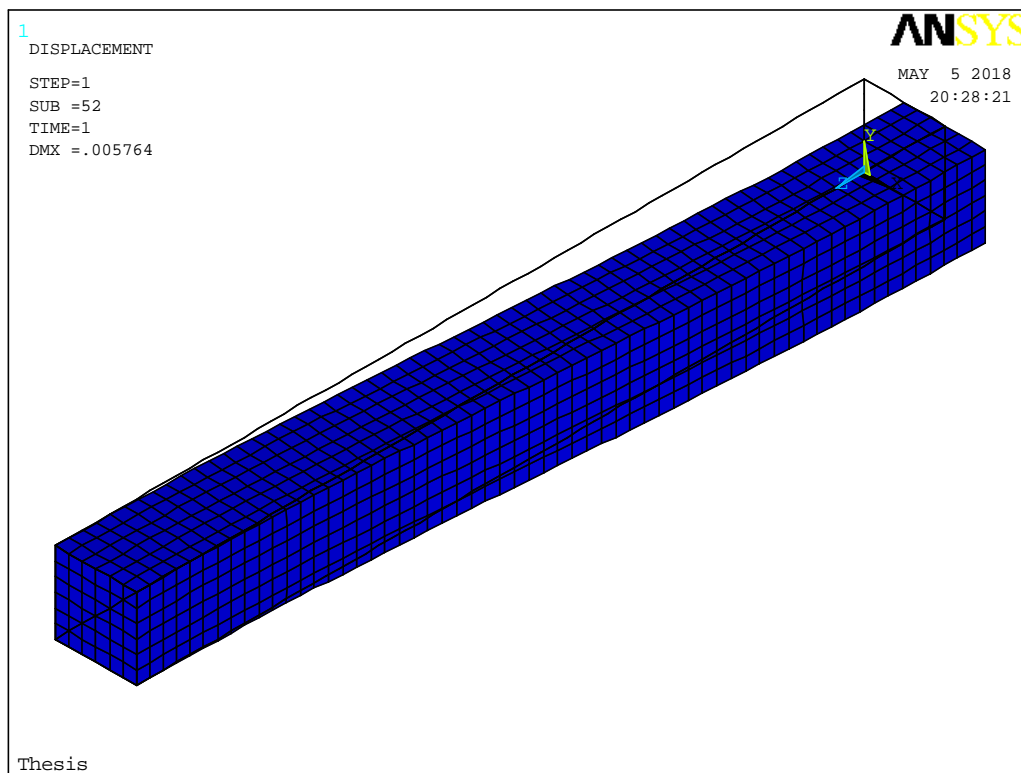


Σχήμα 3.24 Επιβαλλόμενη δύναμη στην ακραία διατομή του μέλους – επίπεδη προβολή.

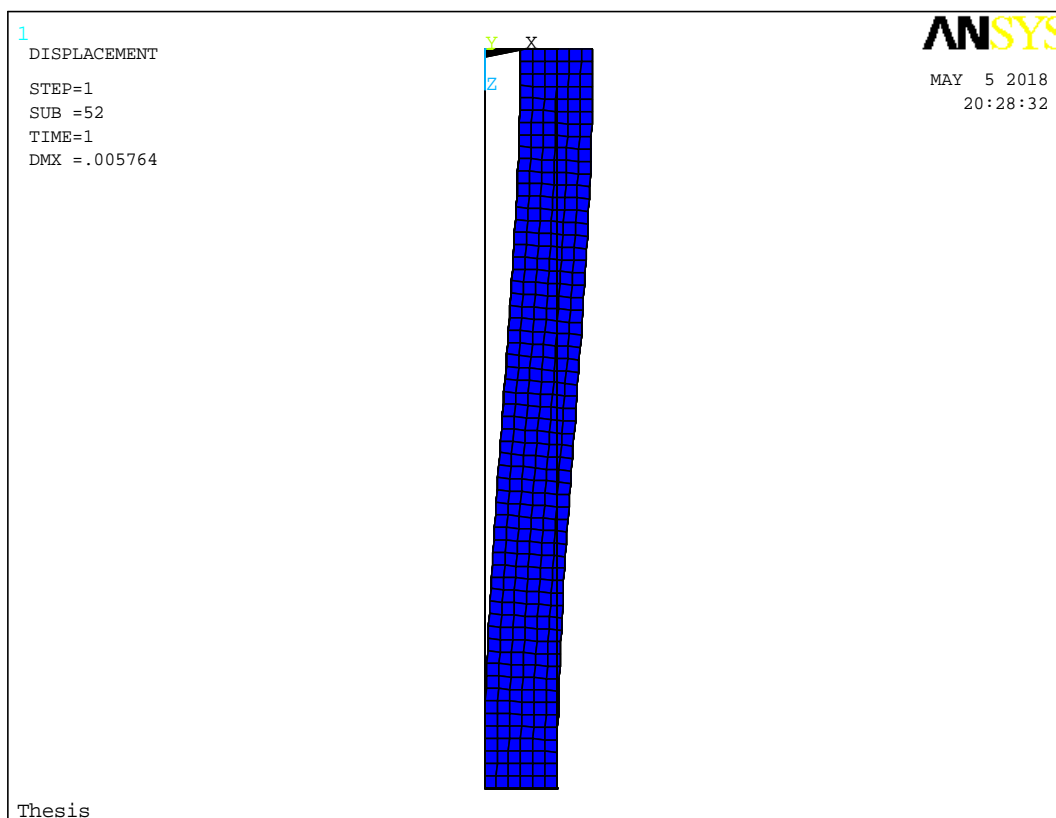
3.5.1 Αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης.

Από τη στατική ανάλυση του φορέα, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική συμπεριφορά του υλικού, προκύπτει και απεικονίζεται στα Σχήματα 3.25 και 3.26 το παραμορφωμένο σχήμα του στοιχείου (αξονομετρική και επίπεδη απεικόνιση αντιστοίχως). Παρατηρείται ότι, θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά, η επιβαλλόμενη δύναμη οδηγεί σε μετατόπιση στο άκρο μικρότερη από 0.006m που εξετάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

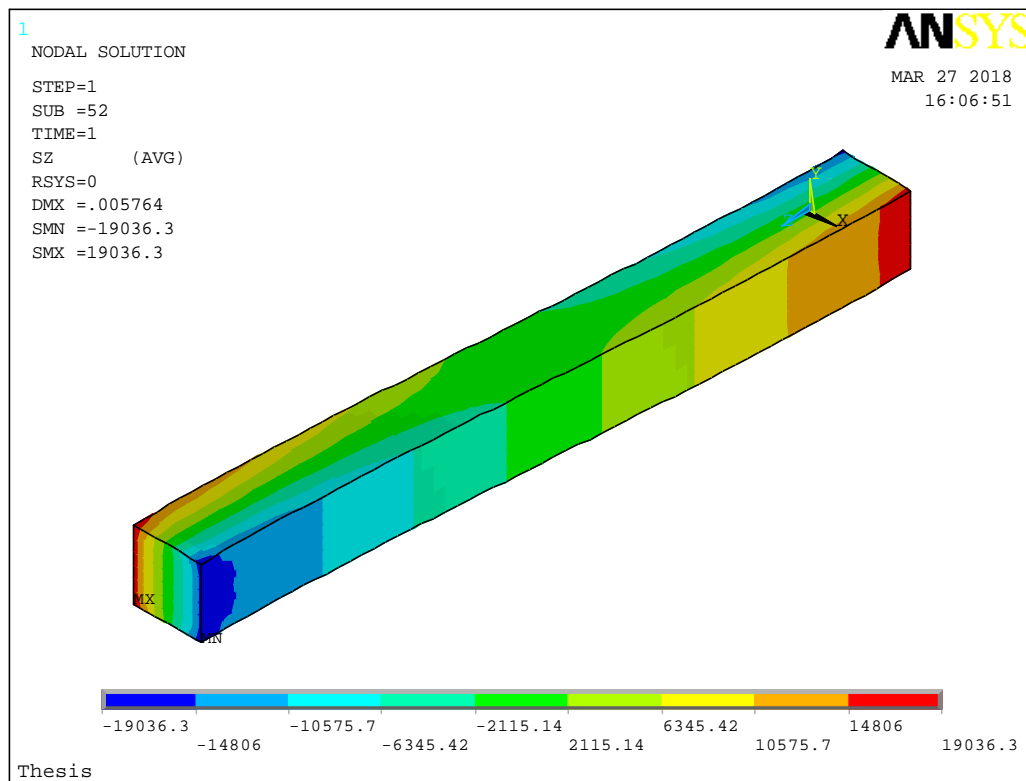
Οι κατανομές των τάσεων προκύπτουν, όπως ήταν αναμενόμενο, όμοιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις (Σχήματα 3.27 και 3.28). Οι μέγιστες τιμές των θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων υπολογίστηκαν λίγο μειωμένες σε σχέση με τις μέγιστες που προέκυψαν για τον ελαστικό φορέα με μετατόπιση στο άκρο ίση με 0.006 m.



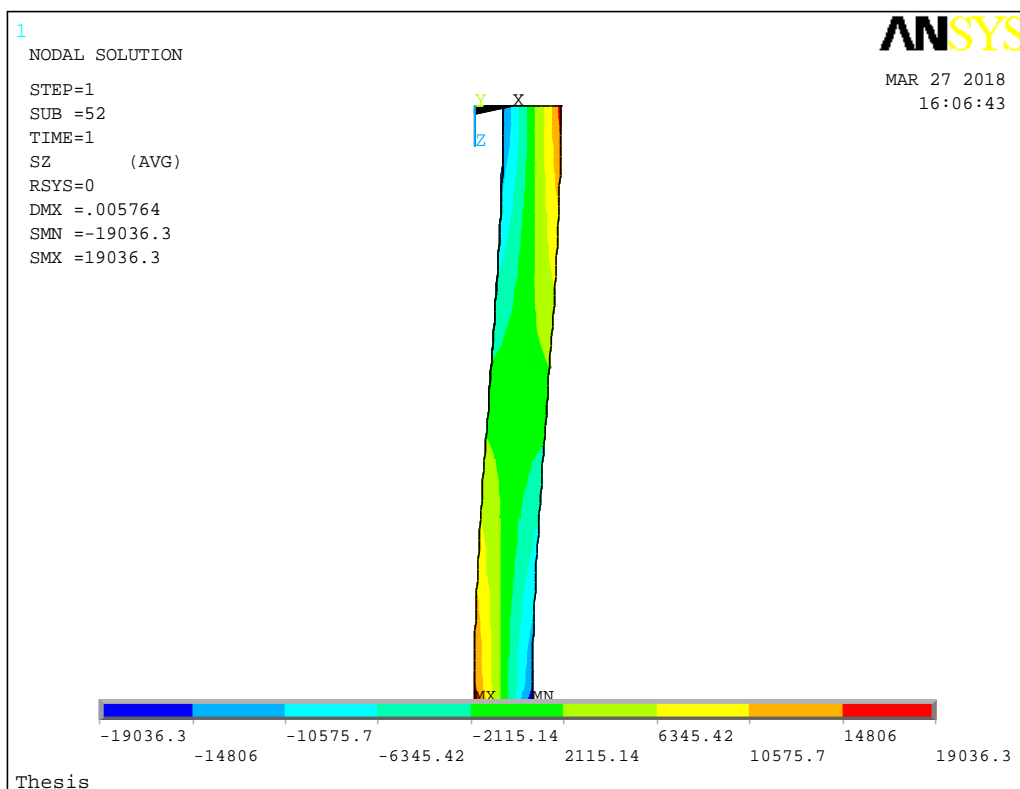
Σχήμα 3.25 Αξονομετρική απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη δύναμη 1N – ελαστική ανάλυση



Σχήμα 3.26 Επίπεδη απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη δύναμη 1N – ελαστική ανάλυση.



Σχήμα 3.27 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη δύναμη 1N – ελαστική ανάλυση.



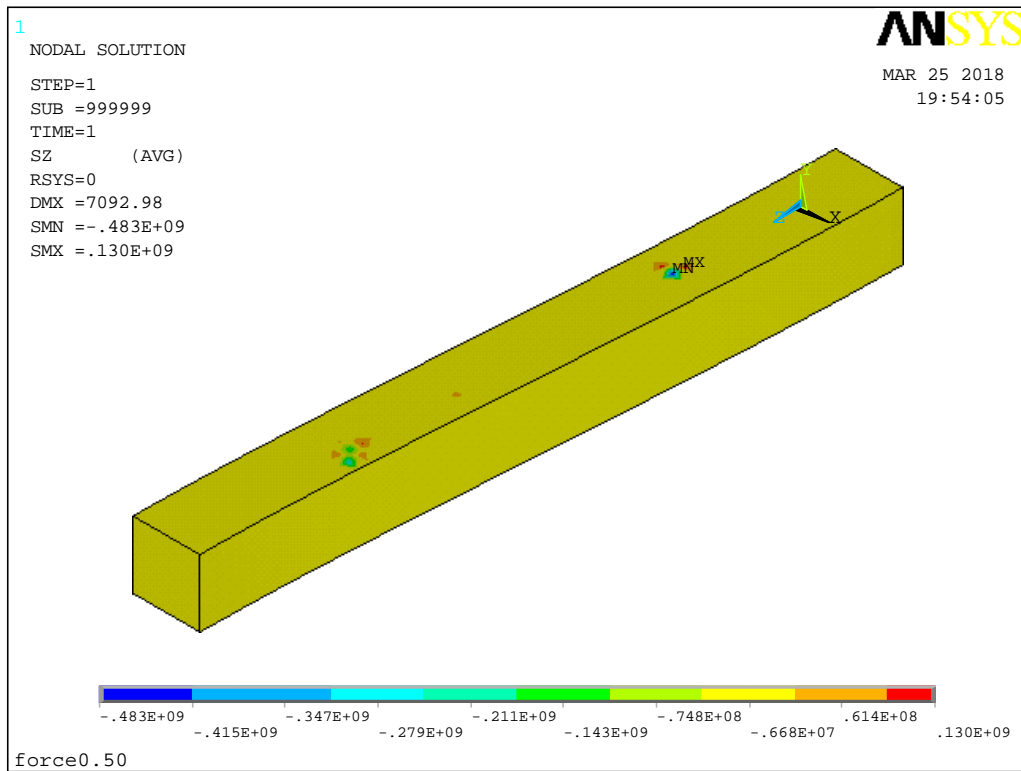
Σχήμα 3.28 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη δύναμη 1N – ελαστική ανάλυση.

3.5.2 Αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης.

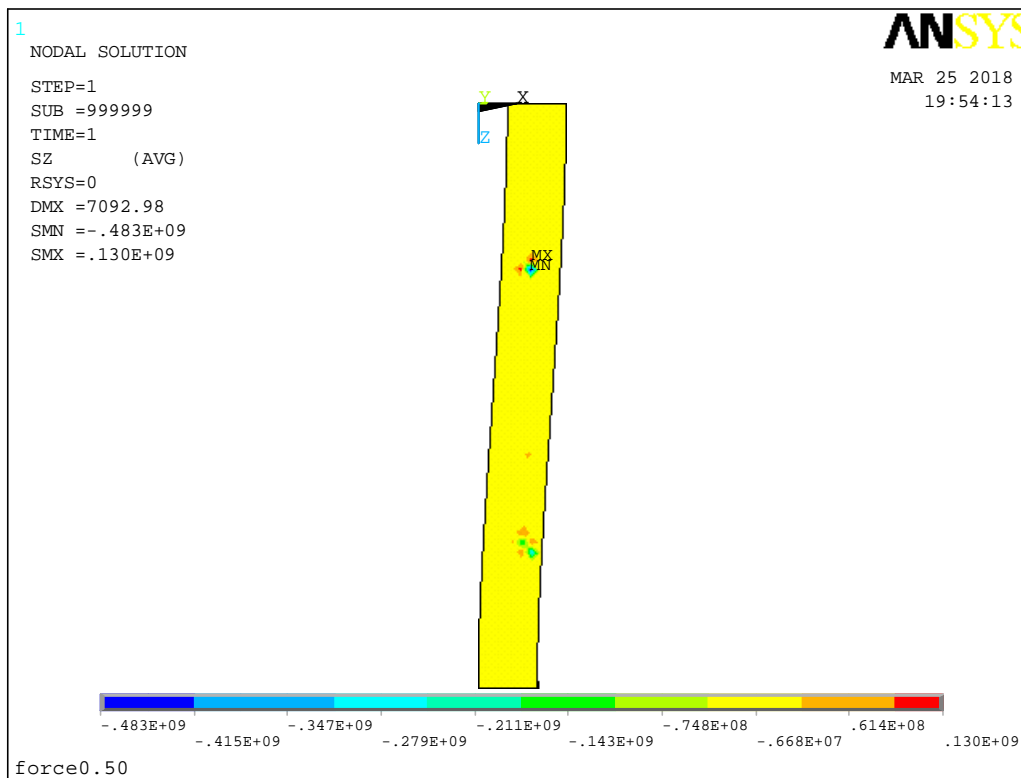
Στην ανελαστική ανάλυση του προσομοιώματος θεωρώντας δύναμη στο ελεύθερο άκρο αποτυπώνεται πολύ χαρακτηριστικά η διαφορά από την αντίστοιχη ελαστική καθώς και οι δυνατότητες που έχει ένα σύγχρονο λογισμικό να εντοπίσει και να προειδοποιήσει το μηχανικό για την πιθανή αστοχία της κατασκευής.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε πρόωμη αστοχία του μοντέλου πριν να ολοκληρωθεί η επιβολή της δύναμης. Άρα τα αποτελέσματα, π.χ. τιμές τάσεων όπως φαίνονται στα Σχήματα 3.29 και 3.30 και στον Πίνακα 3.3 δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα (είναι αριθμητικά μόνο) γιατί στην πραγματικότητα θα είχε παρατηρηθεί θραύση και κατάρρευση του μέλους.

Αυτό αποτυπώνεται πολύ χαρακτηριστικά στα διαγράμματα που εικονίζεται η ρηγμάτωση (Σχήματα 3.31 και 3.32), η οποία εκτείνεται σε όλο το μήκος του μέλους, γεγονός που πρακτικά αποδεικνύει την αστοχία της κατασκευής πριν ολοκληρωθεί η επιβολή της δύναμης.



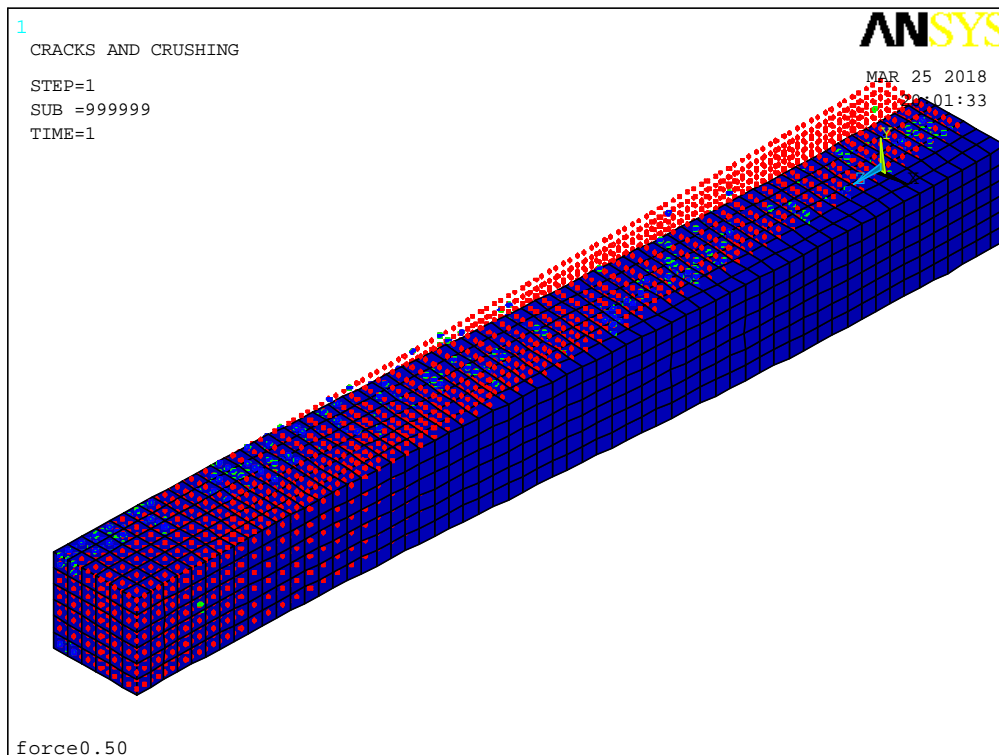
Σχήμα 3.29 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη δύναμη 1N – ανελαστική ανάλυση.



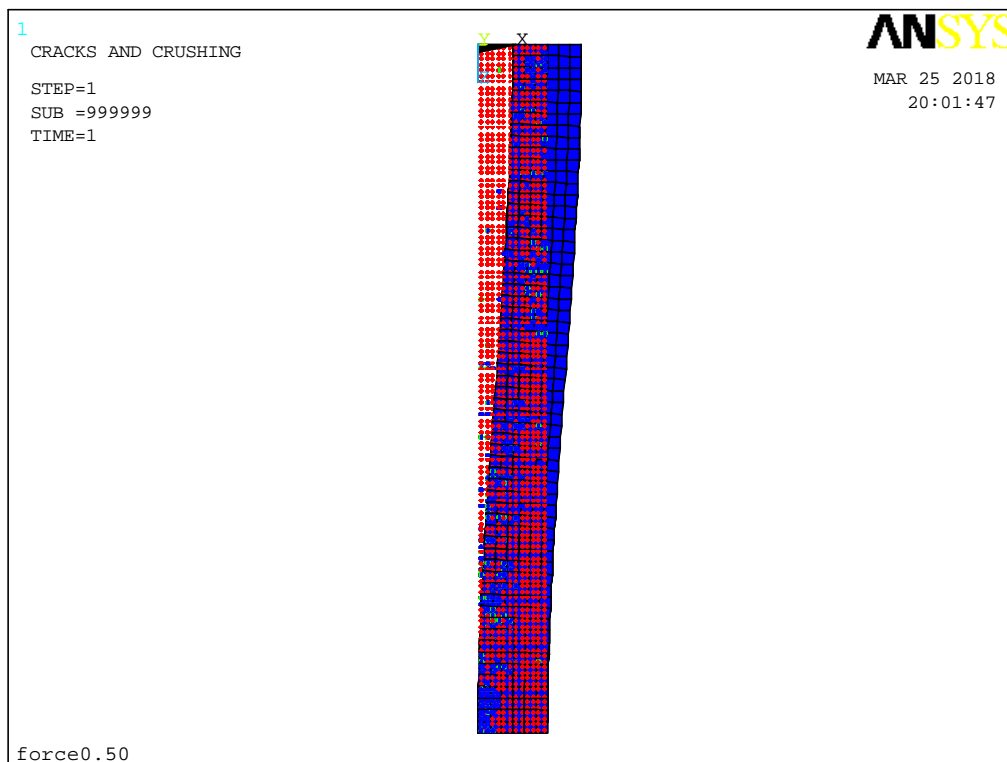
Σχήμα 3.30 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη δύναμη 1N – ανελαστική ανάλυση.

Πίνακας 3.3 Αποτελέσματα αναλύσεων για επιβαλλόμενη δύναμη 1N

	Ελαστική	Ανελαστική (πλασματικά)
SMN (Pa)	-19036.3	-.483E+09
SMX (Pa)	+19036.3	.130E+09
DMX (m)	0.005764	7092.98



Σχήμα 3.31 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη δύναμη 1N.

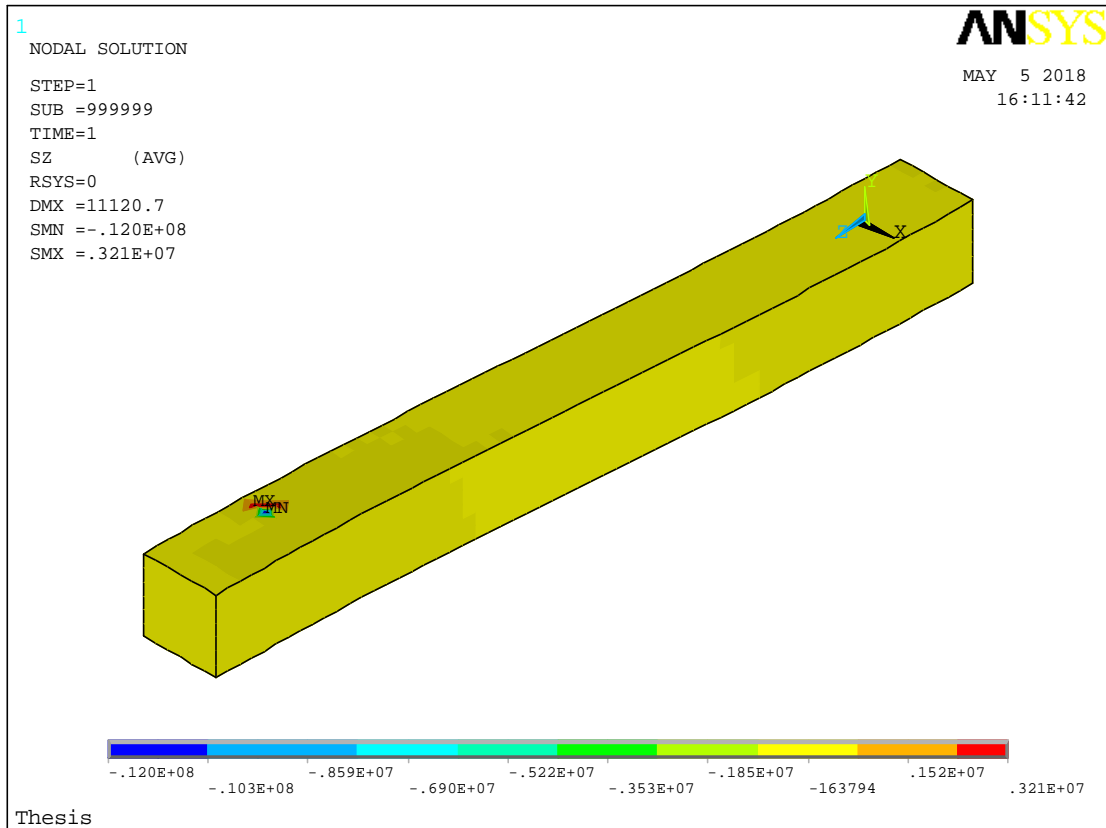


Σχήμα 3.32 Επίπεδη προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη δύναμη 1N.

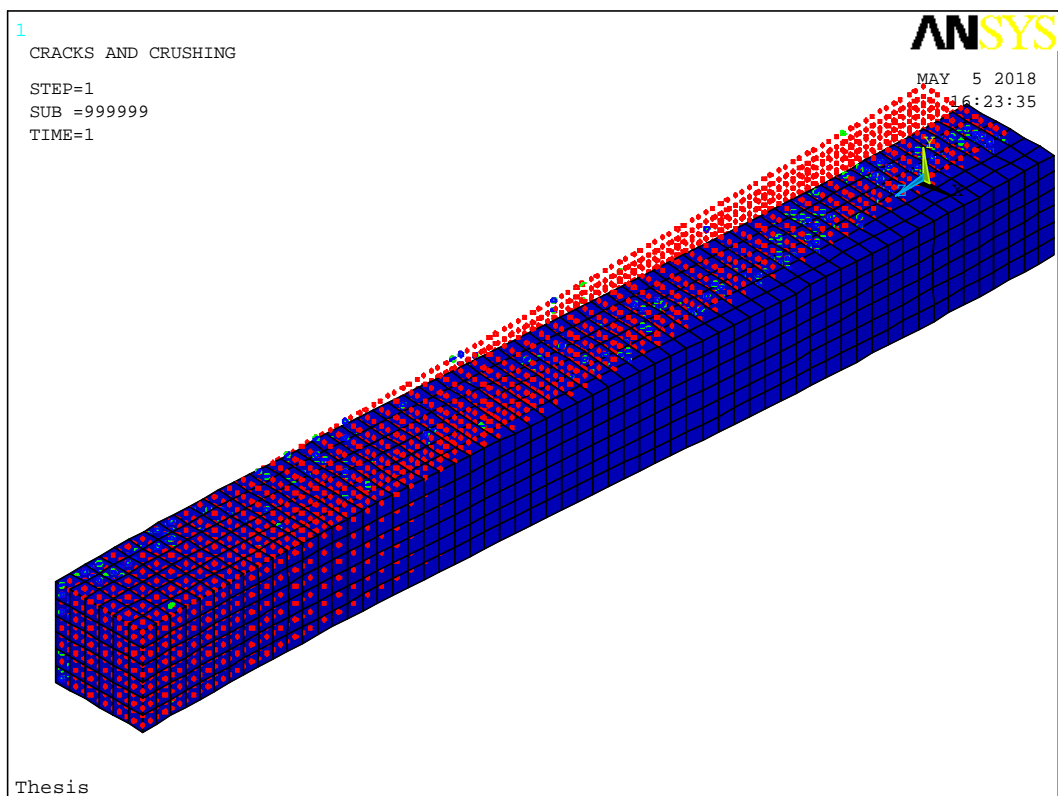
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΑΚΡΑΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΛΟΥΣ

Λόγω της πρόωρης αστοχίας που καταγράφηκε από την ανελαστική ανάλυση του μοντέλου με επιβαλλόμενη δύναμη 1N στην ακραία επιφάνειά του, έγινε, για σύγκριση των αποτελεσμάτων, νέα ανάλυση για μειωμένη αρχικά κατά 50% και ακολούθως κατά 65% την εξωτερική φόρτιση στο ελεύθερο άκρο (0.5N και 0.35N αντιστοίχως).

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.33 και 3.34, η μείωση της δύναμης κατά 50% οδηγεί ξανά σε πρόωμη αστοχία του μοντέλου και πλασματικά αποτελέσματα για τις τάσεις (Σχήμα 3.33). Η ρηγμάτωση (Σχήμα 3.34) εκτείνεται και στην περίπτωση αυτή σε όλο το μήκος του στοιχείου, μορφή ενδεικτική της αστοχίας της κατασκευής.



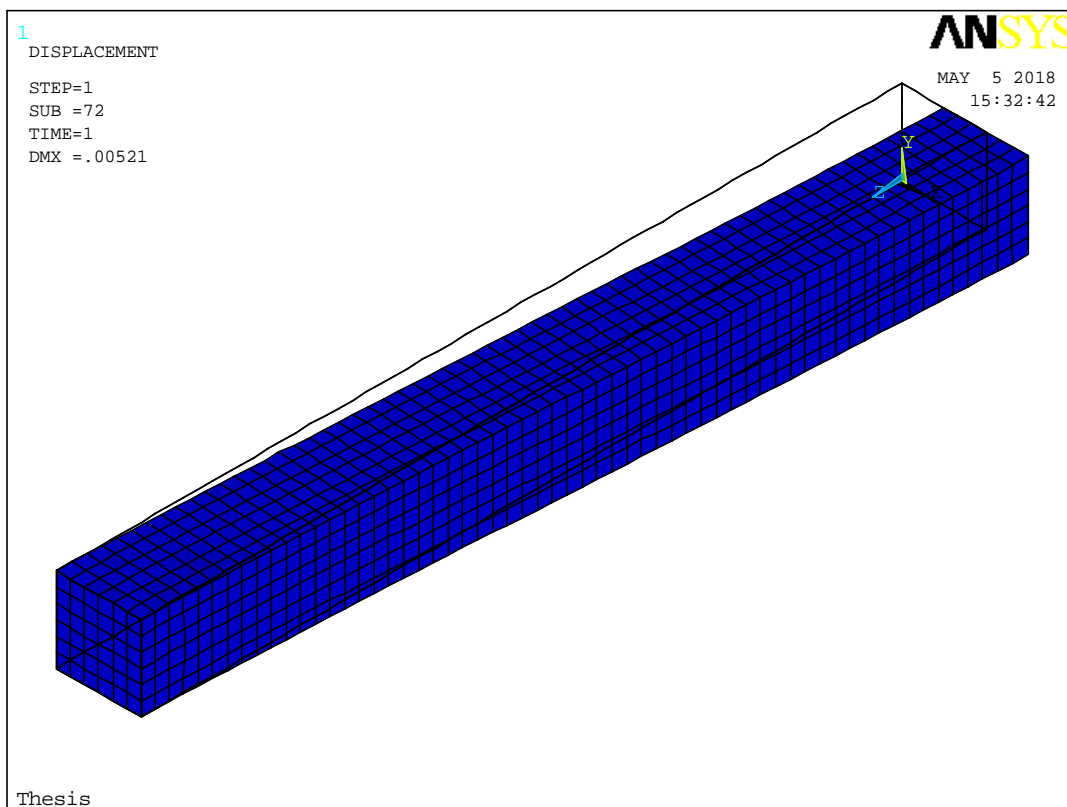
Σχήμα 3.33 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη δύναμη 0.5N.



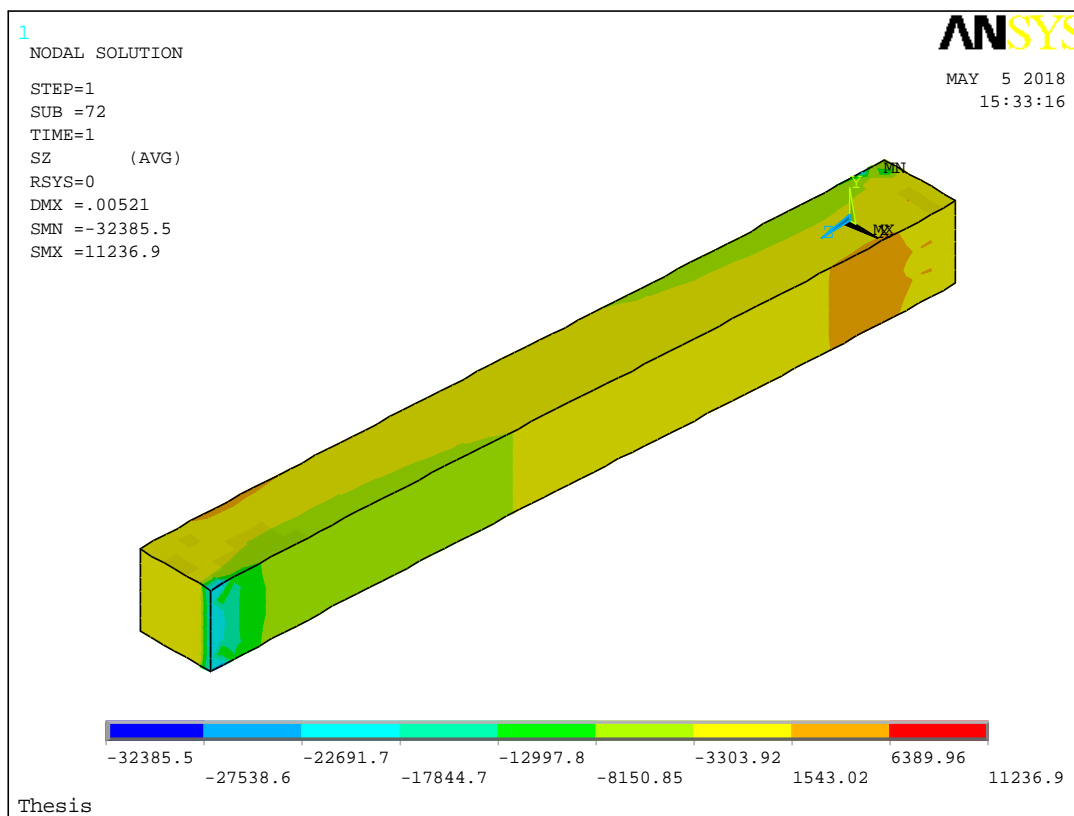
Σχήμα 3.34 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη δύναμη 0.5N.

Αντίθετα, η ανάλυση με θεώρηση δύναμης ίσης με 0.35N/κόμβο ολοκληρώθηκε κανονικά. Μάλιστα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.35, αν και η δύναμη ήταν μειωμένη κατά 65%, η μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο είναι συγκρίσιμη με αυτή που δίνει η ελαστική λύση για δύναμη ίση με 1N. Το γεγονός αυτό φανερώνει την αξία των λεπτομερών προσεγγίσεων και των ανελαστικών αναλύσεων, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ακριβέστερη προσομοίωση της πραγματικότητας. Οι ελαστικές λύσεις από την άλλη δεν είναι ρεαλιστικές όταν οι καταστάσεις φόρτισης είναι οριακές και κοντά στην αστοχία των μελών.

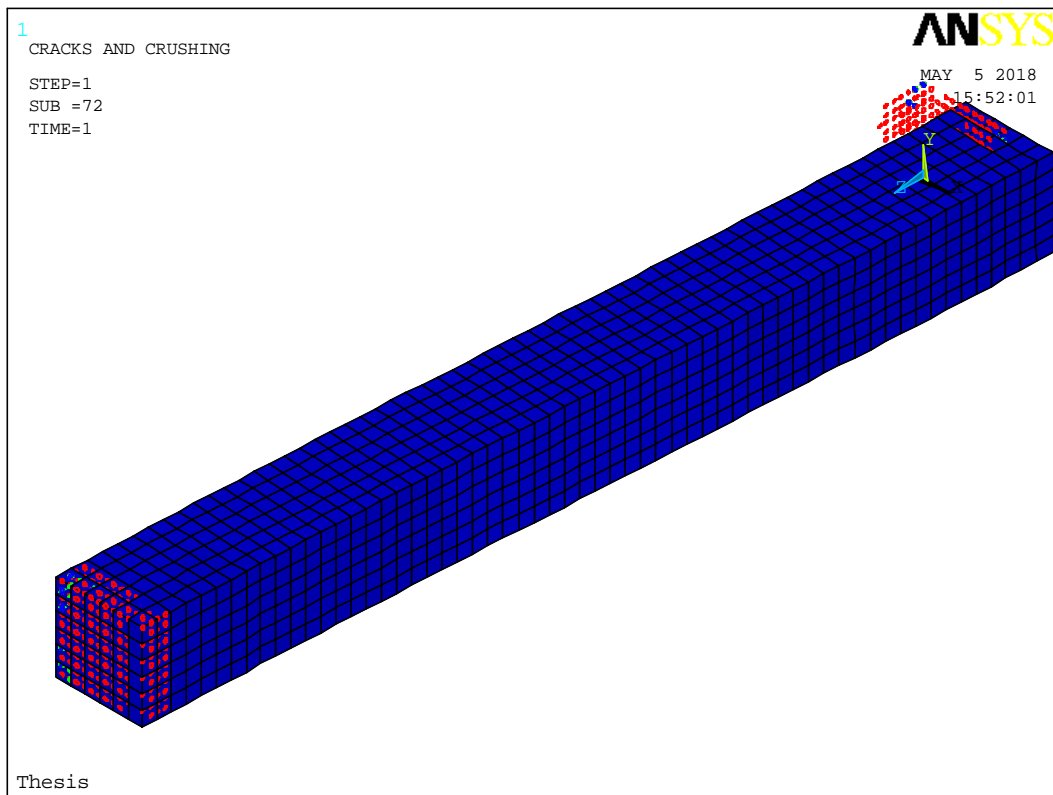
Στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζονται οι ισοτασικές επιφάνειες για την περίπτωση της ανελαστικής ανάλυσης με τη μικρότερη τιμή της δύναμης. Προφανώς αυτές διαφέρουν από τις ελαστικές λύσεις. Η ρηγμάτωση (Σχήμα 3.37) εντοπίζεται όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις στις θέσεις των κυρίων τάσεων. Για την ευκολότερη αξιολόγησή τους, τα κύρια αποτελέσματα των αναλύσεων που σχολιάστηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.



Σχήμα 3.35 Αξονομετρική απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους για επιβαλλόμενη δύναμη 0.35N



Σχήμα 3.36 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος για επιβαλλόμενη δύναμη 0.35N



Σχήμα 3.37 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης για επιβαλλόμενη δύναμη 0.35N

Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα αναλύσεων για μειωμένη επιβαλλόμενη δύναμη

	$F_x = 0.5N/κόμβο$	$F_x = 0.35N/κόμβο$
SMN (Pa)	-	-32385.5
SMX (Pa)	-	11236.9
DMX (m)	-	.00521

3.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Αλλάζοντας τις τιμές των μεταβλητών του μοντέλου των William & Warnkler, ο φορέας επιλύεται για χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι:

$E_x =$ μέτρο ελαστικότητας = 26×10^6 kPa

PRXY = Λόγος Poisson (ν) = 0.3

Density = πυκνότητα (ρ) = 2500 kg/m^3

UnTensSt = εφελκυστική αντοχή = 1905 kPa

UnCompSt = θλιπτική αντοχή = 16000 kPa

Συντελεστές για τη σχεδίαση του νόμου συμπεριφοράς του υλικού:

ShrCf-Op = 0.3

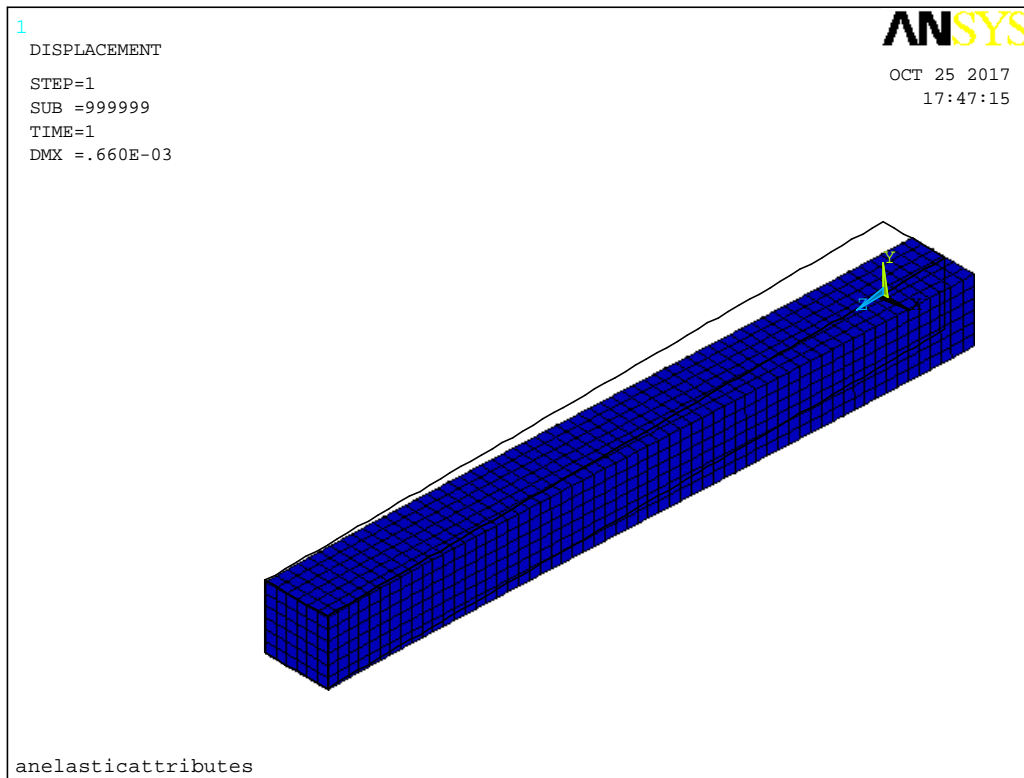
ShrCf-CI = 0.8

Συντελεστής για την έναρξη της ρηγμάτωσης στο προσομοίωμα:

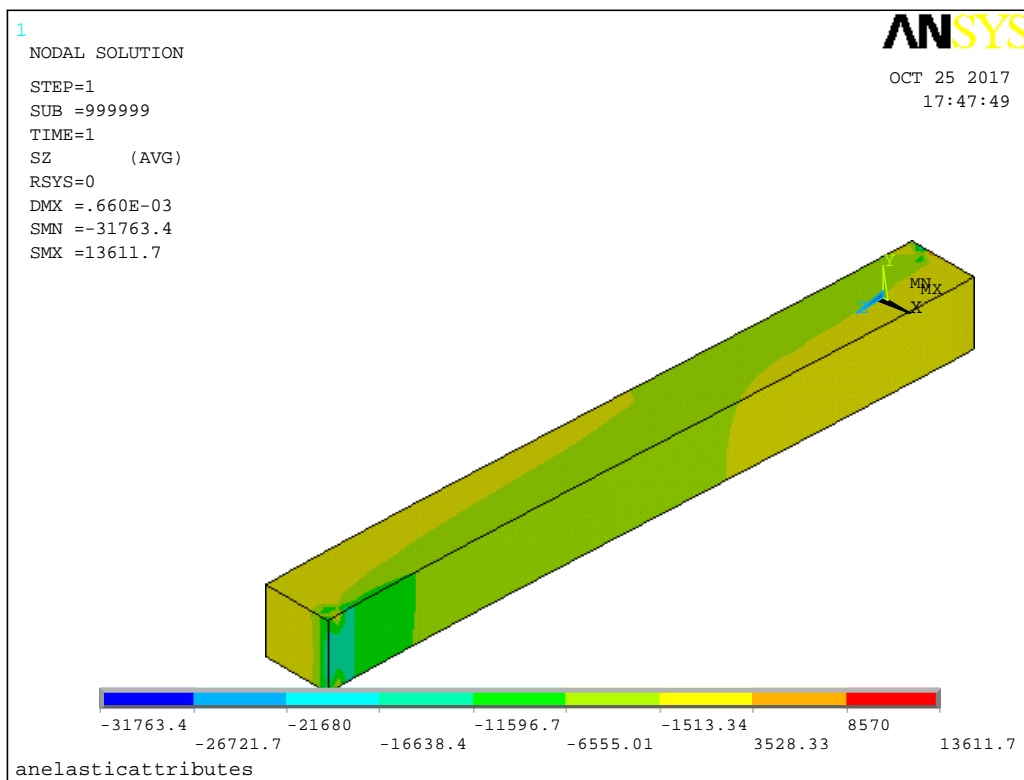
TenCrFac = 0.6

Στόχος ήταν η επιβολή μετατόπισης 0.002m στο ελεύθερο άκρο. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.38, η κατασκευή, λόγω της μειωμένης εφελκυστικής αντοχής τους σκυροδέματος, οδηγείται σε αστοχία για μικρότερη τιμή της μετατόπισης.

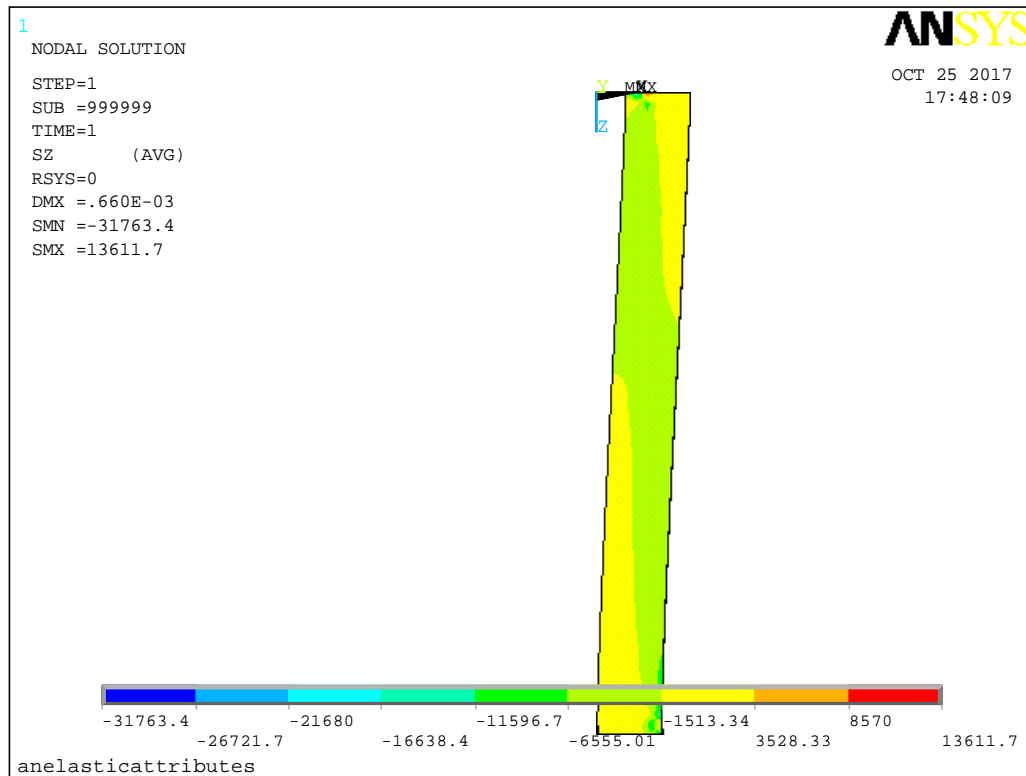
Οι κατανομές των τάσεων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.39 και 3.40 επιβεβαιώνουν ότι οι εφελκυστικές τάσεις ξεπερνούν την τάση ρηγμάτωσης σε μεγάλο τμήμα του μέλους. Για το λόγο αυτό και η ρηγμάτωση δεν περιορίζεται στις ακραίες περιοχές (Σχήμα 3.41 και 3.42), όπως άλλωστε συνέβη και σε προηγούμενες περιπτώσεις αστοχίας που εξετάστηκαν. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5.



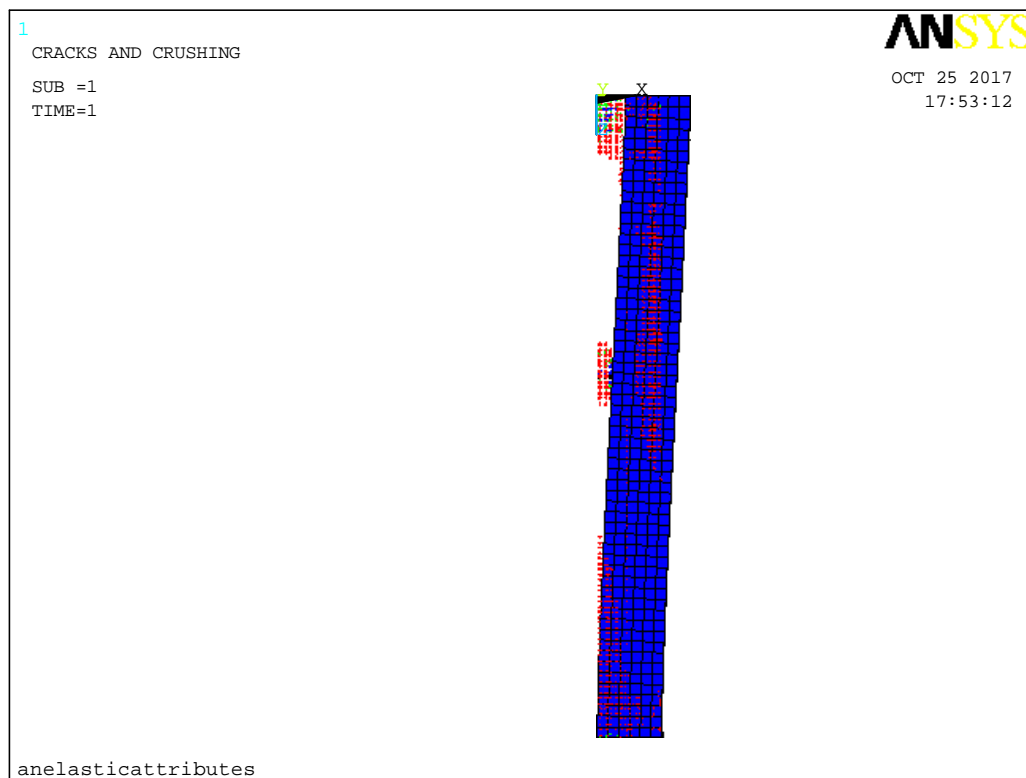
Σχήμα 3.38 Αξονομετρική απεικόνιση του παραμορφωμένου μέλους από την ανάλυση με χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος.



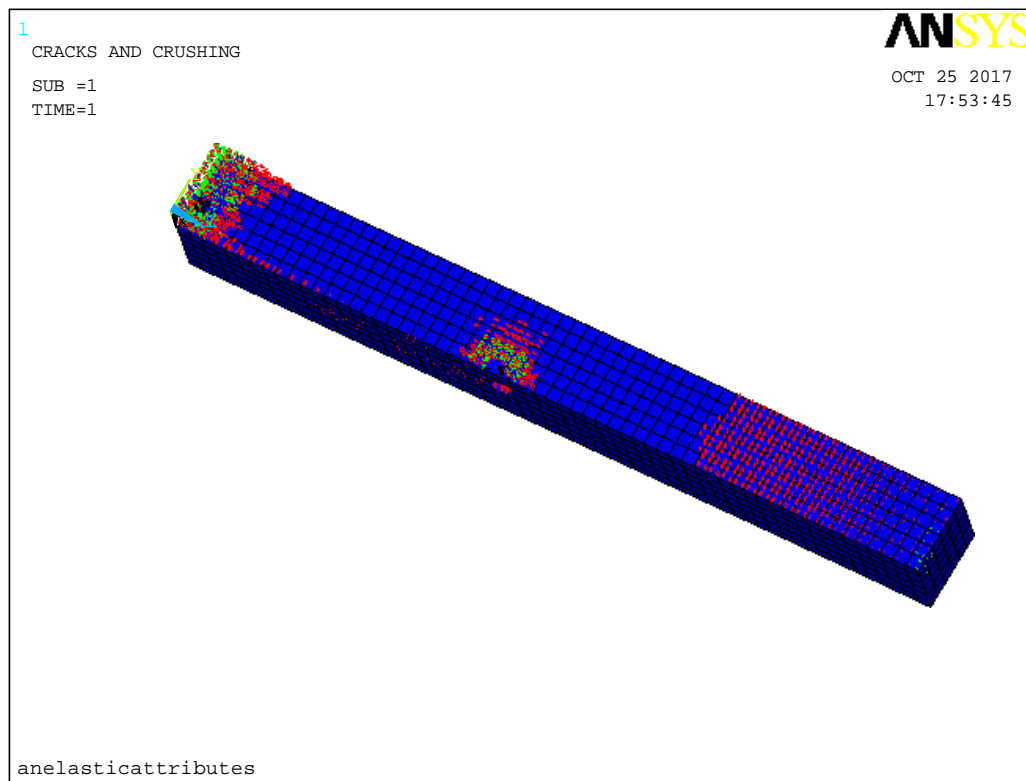
Σχήμα 3.39 Αξονομετρική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος από την ανάλυση με χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος.



Σχήμα 3.40 Επίπεδη απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στο μέλος από την ανάλυση με χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος.



Σχήμα 3.41 Επίπεδη προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης από την ανάλυση με χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος.



Σχήμα 3.39 Αξονομετρική προβολή των θέσεων ρηγμάτωσης από την ανάλυση με χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος.

Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα ανελαστικής ανάλυσης για χαμηλότερη κατηγορία σκυροδέματος.

	Ελαστική	Ανελαστική (αστοχία – πλασματικά)
SMN (Pa)	-	-31763.4
SMX (Pa)	-	13611.7
DMX (m)	-	0.660E-03

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΣΥΝΤΟΜΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων που παρέχουν τα σύγχρονα λογισμικά για να παρέχουν πιο ρεαλιστικές λύσεις σε προβλήματα μηχανικής, προσεγγίζοντας την ανελαστική συμπεριφορά των υλικών. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η δυνατότητα απεικόνισης της σταδιακής ρηγμάτωσης και αστοχίας του σκυροδέματος με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Αν και αναλύθηκε μια απλή κατασκευή, δηλαδή ένα άοπλο στοιχείο τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 30×30cm προέκυψαν πολλά ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Οι «κλασικές» ελαστικές θεωρήσεις διαφέρουν πολύ από την «πραγματική» συμπεριφορά, όταν οι εξωτερικές δράσεις σε μία κατασκευή δημιουργούν οριακές καταστάσεις κοντά στην αστοχία της. Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η πρόοδος των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει τη δημιουργία προσομοιωμάτων που λαμβάνουν υπόψιν τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία καταφέρνουν να απεικονίσουν τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος λόγω της χαμηλής εφελκυστικής αντοχής του και τη σταδιακή αστοχία του δομικού μέλους.

Ωστόσο, τα ανελαστικά προσομοιώματα είναι πιο δύσχρηστα από τα ελαστικά και δεν προσφέρονται για εκτεταμένες εφαρμογές. Επίσης σε περιπτώσεις όπου παρατηρούνται αστοχίες είναι πιθανόν να δώσουν πλασματικά αποτελέσματα (χωρίς φυσικό νόημα). Οπότε, ο μηχανικός που θα εκτελέσει ανελαστικές αναλύσεις πρέπει να είναι ιδιαίτερα εξοικειωμένος με τη Στατική και την Αντοχή των Υλικών ώστε να αποφύγει σφάλματα. Γενικά, για τον έλεγχο των σφαλμάτων απαιτείται και η επαλήθευση ενδεικτικών αποτελεσμάτων (κυρίως από ελαστικές λύσεις) «με το χέρι», χρησιμοποιώντας γνωστούς τύπους της μηχανικής, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν απέδειξαν και τη σημασία του σωστού οπλισμού του σκυροδέματος με χαλύβδινες ράβδους. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι άοπλοι φορείς που εξετάστηκαν αστόχησαν σε αρκετές περιπτώσεις για αρκετά μικρές τιμές εξωτερικών δράσεων.

Βιβλιογραφία

- [1] Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206 (<https://bit.ly/2rorljf>)
- [2] Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος – Δεδομένα για το Σκυρόδεμα σελ. 61 (<https://bit.ly/2rorKSN>)
- [3] Concrete Shrinkage | Types, Factors Affecting and Where Concrete Shrinkage Occurs (<https://bit.ly/2w1E2ki>)
- [4] Καλούπια για σκυρόδεμα (<https://bit.ly/2ripVqm>)
- [5] Unsolved-Engineering (<https://bit.ly/2wfie9Z>)
- [6] Ενισχύσεις Κατασκευών (<https://bit.ly/2rmXQPA>)
- [7] Επισκευές κτιρίων (<https://bit.ly/2FOLAfe>)
- [8] Ανελαστική Στατική Ανάλυση (<https://bit.ly/2KDEr1f>)
- [9] Τα νέα Πρότυπα του ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3), Γεωργία Αγναντιάρη, Χημικός Μηχανικός, Εργαστήριο Μετάλλων ΚΕΔΕ (<https://bit.ly/2FLXmXw>)
- [10] Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Μ. Παπαδρακάκης. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001
- [11] Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων – Βασικές έννοιες, Κίρτας Εμμανουήλ, Παναγόπουλος Γεώργιος
- [12] Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Μ. Παπαδρακάκης. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001, Κεφάλαιο 5
- [13] Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Μ. Παπαδρακάκης. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001, Κεφάλαιο 5
- [14] ΒΙΒΛΙΟ
- [15] Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, Π.Α. Κακαβάς, Πάτρα 2016
- [16] «Τεχνικές προγραμματισμού και χρήσης ειδικού λογισμικού Η/Υ στις κατασκευές» Αναστάσιος Σέξτος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2001.