



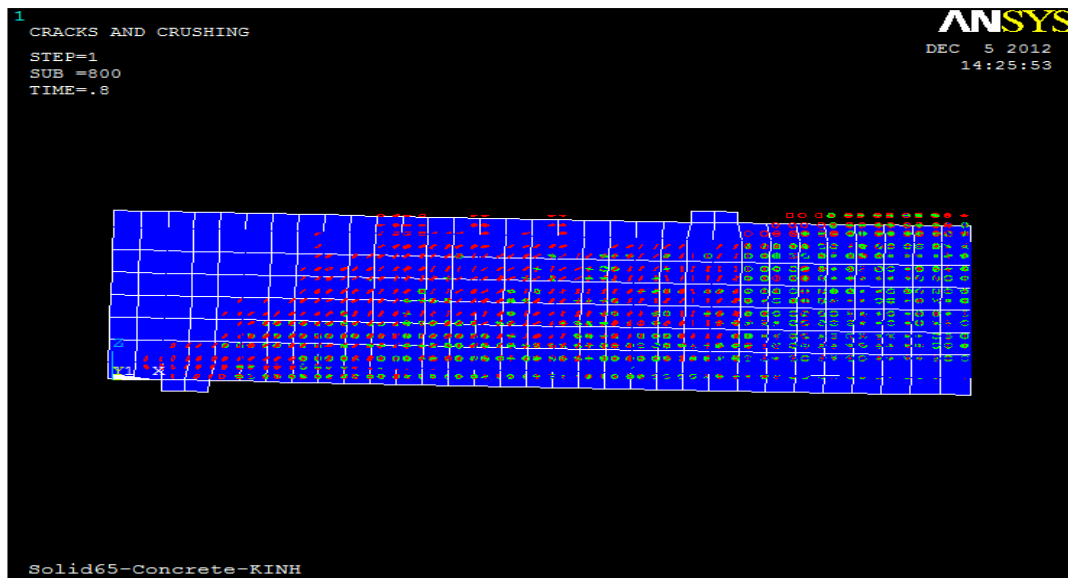
**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΠΕΙΡΑΙΑ**

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

**Διερεύνηση παραμέτρων που επηρεάζουν την σύγκλιση
λύσης υπολογισμού φορτίου αστοχίας σε καμπτόμενη δοκό
οπλισμένου σκυροδέματος με το ANSYS**



ΚΑΛΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α.Μ 36816

Επιβλέπων: ΔΗΜΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας <<Διερεύνηση παραμέτρων που επηρεάζουν την σύγκλιση λύσης υπολογισμού φορτίου αστοχίας σε καμπτόμενη δοκό οπλισμένου σκυροδέματος με το ANSYS>> πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Δομικών Έργων του ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ. Η ανάθεση του θέματος έγινε από τον υπεύθυνο του τομέα Δομοστατικού Σχεδιασμού Κο. Δημάκο Κωνσταντίνο.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν και συνέβαλαν στην περάτωση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή Κωνσταντίνο Δημάκο, όχι μόνο για την καθοριστική συμβολή του ως επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας, αλλά και για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξή του σε όλους τους τομείς καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω και τον κ. Γιώργο Μπαλακίτσα, μέλος του εργαστηρίου, για την πολύ σημαντική βοήθεια που παρείχε κατά την διάρκεια παραγωγής των δοκιμών και γενικά για την βοήθεια που πρόσφερε κατά την διαδικασία του πειραματικού μέρους.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον Κο Ρεπαπή Κωσταντίνο, μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για την πολύτιμη βοήθεια που πρόσφερε στην εγκατάσταση και λειτουργία του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

ΚΑΛΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο << Διερεύνηση παραμέτρων που επηρεάζουν την σύγκλιση λύσης υπολογισμού φορτίου αστοχίας σε καμπτόμενη δοκό οπλισμένου σκυροδέματος με το ANSYS>> έχει σαν κύριο στόχο αρχικά την μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση δοκιμών τα οποία σε πειραματική δοκιμή επιβόλης φορτίων στοχεύουν στο να αναπτύξουν αστοχία καμπτική και να εμφανίσουν την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων με παράλληλη εξάλειψη των διατμητικών τάσεων. Αφού επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, με την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS αναπτύσσεται ένα προσομοίωμα του πειραματικού μέλους. Με την διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την δοκό θα εξεταστεί εάν, το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί στο συγκεκριμένο πρόγραμμα ,παρουσιάζει σύγκλιση σε σχέση με τις πραγματικές πειραματικές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί.

ABSTRACT

The present thesis entitled < < Investigation of parameters influencing the convergence failure load calculation solution in flexural girder of reinforced concrete with ANSYS > > has as main objective initially the study, design and implementation of essays which in experimental test load imposition aims to develop failure flexed and experience the tension development trends to eliminate trends shear. After achieving the above goal, using the finite element program ANSYS develops a simulator experimental State. Investigation of parameters influencing the girder will be considered if, the model that has been created in this program, with convergence in relation to the actual experimental measurements have been carried out.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
1.ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	7
1.1 Ορισμός-Κανονισμοί Σκυροδέματος.....	7
1.1.2 Ιδιότητες Σκυροδέματος.....	7
1.2 Χάλυβας-Πλεονεκτήματα	10
1.2.1Πρότυπα Χαλύβων	11
1.2.3 Τι εισάγουν τα νέα Πρότυπα.....	12
2.ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS.....	14
2.1 Πλεονεκτήματα Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	15
2.2 Δυνατότητες	16
2.3 Κατασκευαστική ανάλυση	16
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	18
3.1 Σχεδίαση-Ανάπτυξη Πειραματικού Μέρους.....	18
3.2 Χαρακτηριστικά Δοκιμίων.....	18
3.3 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	20
3.4 ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΔΟΚΩΝ.....	24
3.5 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	25
3.6 Δοκίμο ΒV-3.....	29
3.7 ΔΟΚΙΜΙΟ ΒV-2	30
3.8 Αποτελέσματα Δοκιμής.....	33
3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	33
4.ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	34
4.1 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΝΕΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	34
4.1.1 ΔΟΚΟΣ ΒV-2FLEX	37
4.1.2 ΔΟΚΟΣ ΒV-3 FLEX.....	41
4.1.3 Εφελκυστική Αντοχή.....	44
4.1.4 Μέτρο Ελαστικότητας	45
4.2 ΔΟΚΙΜΗ ΕΥΡΕΣΗΣ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΧΑΛΥΒΑ	45
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	50

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΤΑ ANSYS.....	51
5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	51
5.1.1 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	52
5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ	54
5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ	55
5.4 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ-ΧΑΛΥΒΑ	55
5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS	56
5.5.1 Basic Menu	56
5.5.2 SOL N OPTIONS MENU	57
5.5.3 NONLINEAR MENU	58
6. ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ ANSYS.....	60
6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΤΟ ANSYS.....	60
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΤΟ ANSYS	62
6.2.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 1.....	63
6.2.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 2.....	67
6.2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 3.....	70
6.2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 4.....	73
6.2.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 5.....	75
6.2.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 6.....	78
6.2.7 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 7.....	78
6.2.8 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 8.....	78
6.2.9 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 9.....	79
7. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ	82
8. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

1.ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 Ορισμός-Κανονισμοί Σκυροδέματος

Το έτοιμο σκυρόδεμα είναι δομικό υλικό που παράγεται με την ανάμειξη αδρανών υλικών, τσιμέντου, νερού και πρόσθετων (για βελτίωση των ιδιοτήτων του κατά τη παραγωγή και χύτευση αλλά και όταν σκληρυνθεί). Με τη σημερινή του μορφή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στις αρχές του 20ου αιώνα, ενώ μετά το 1950 η χρήση του γενικεύτηκε, καθιστώντας το σήμερα το κυριότερο, παγκοσμίως, υλικό κατασκευών μαζί με το χάλυβα, ως οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι διαφορετικές ιδιότητες των πρώτων υλών που αναμινύονται στη παραγωγή του σκυροδέματος (μάζα, όγκος, φυσικοχημικά χαρακτηριστικά) ανάγουν την παραγωγή σκυροδέματος σε μία εξαιρετικά πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Οι αυστηρές διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος του 1997 (Κ.Τ.Σ. 97) 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. Εξαιτίας της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που σημειώνεται στη χώρα μας, τόσο η διαδικασία παραγωγής όσο και η τελική ενσωμάτωση του σκυροδέματος στις κατασκευές διέπονται από τον εξαιρετικά απαιτητικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ. 97), ο οποίος ισχύει σήμερα καλύπτοντας τις απαιτήσεις για σύγχρονες ασφαλείς και αντισεισμικές κατασκευές.

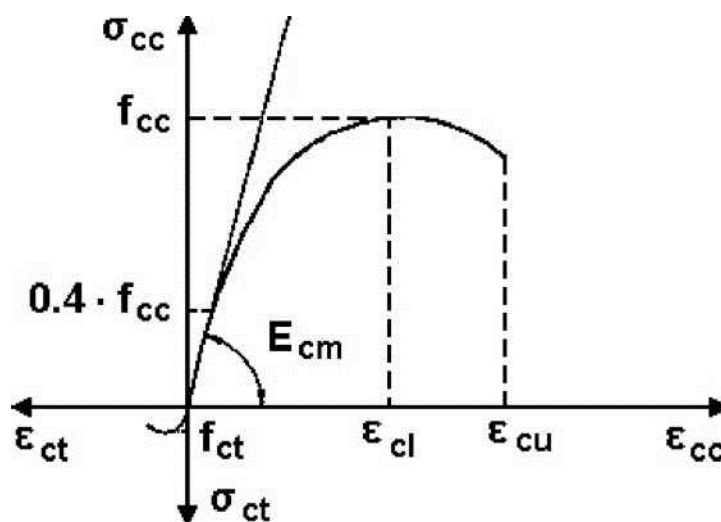
1.1.2 Ιδιότητες Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα θεωρείται το οικονομικότερο και ασφαλέστερο οικοδομικό υλικό, με εξαιρετική σχέση κόστους- παρεχόμενων ιδιοτήτων και για το λόγο αυτό είναι αναντικατάστατο. Είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού μπορεί, όταν είναι

νωπό, να λάβει οποιαδήποτε μορφή, χαρακτηρίζεται δε από ιδιαίτερες ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του είναι το πιο εύχρηστο δομικό υλικό, αλλά ταυτόχρονα με τη μικρότερη διάρκεια ζωής καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αργότερο εντός μίας ώρας και τριάντα λεπτών από τη παραγωγή του. Οι λόγοι που 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 ειδικά όταν το σκυρόδεμα σπλίζεται με χαλύβδινες ράβδους, δυνατότητα κατασκευής σε οποιοδήποτε σχήμα επιθυμούμε με σχετικά χαμηλό κόστος, αντοχή σε φωτιά και στο νερό, δεν χρειάζεται κάποια ειδική φροντίδα και κάτι που έχει αρχίσει να αναπτύσσεται τελευταία είναι η ανακύκλωση του.

Το πιο βασικό χαρακτηριστικό που μας απασχολεί στο σκυρόδεμα είναι η μειωμένη εφελκυστική αντοχή του η οποία είναι της τάξεως του ενός δωδέκατου μικρότερη της θλιπτικής του αντοχής.

Η γενική μορφή των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των συστατικών του σκυροδέματος και την ταχύτητα επιβολής των παραμορφώσεων, για συνήθεις περιπτώσεις, 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 $1.25 f_c$.

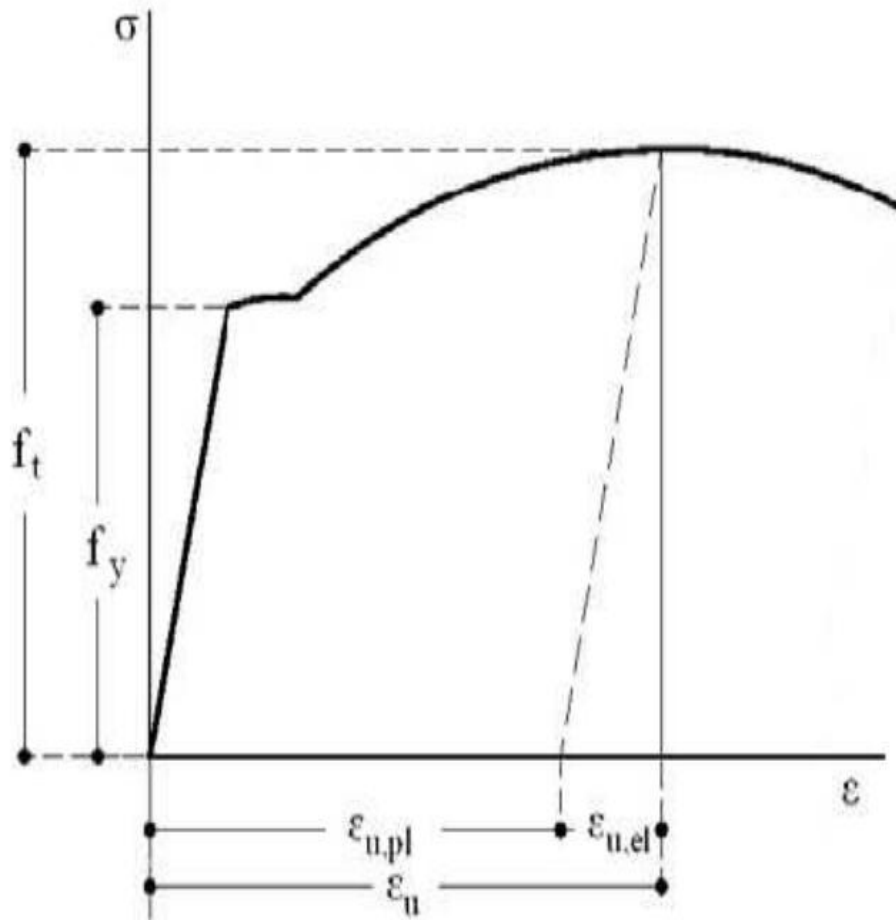
Σχετικώς, υπενθυμίζεται ότι η κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό εφελκυσμό έχει τιμή +0.02 έως +0.04%, δηλαδή περίπου ίση με την ελάχιστη τιμή της συστολής ξήρανσης. Έτσι, και μόνο η συστολή ξήρανσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε ρηγμάτωση (ακόμη και έντονη ή εκτεταμένη).

1.2 Χάλυβας-Πλεονεκτήματα

Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε τον δομικό χάλυβα ο οποίος διακρίνεται για τα εξής πλεονεκτήματα:

- Υψηλή αντοχή που συνεπάγεται ότι η κατασκευή θα έχει μικρά νεκρά φορτία, γεγονός σημαντικό για γέφυρες μεγάλου ανοίγματος, υψηλά κτίρια και κατασκευές που πρέπει να θεμελιωθούν σε ασθενή εδάφη.
- Ομοιομορφία, που σημαίνει ότι οι ιδιότητες του δεν μεταβάλλονται σημαντικά με τον χρόνο όπως συμβαίνει με το σπλισμένο σκυρόδεμα.
- Ελαστικότητα, που σημαίνει ότι συμπεριφέρεται πολύ κοντά στις παραδοχές του μελετητή μιας και ακολουθεί τον νόμο του Hook μέχρι σχετικά υψηλές τάσεις.
- Ολκιμότητα, δηλαδή η ιδιότητα του υλικού να μπορεί να υποφέρει εκτεταμένη παραμόρφωση χωρίς αστοχία κάτω από υψηλές εφελκυστικές τάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χάλυβας να διαρρέει τοπικά σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων και έτσι να προλαβαίνει πρόωρες αστοχίες, ή να υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις κάτω από υψηλά φορτία που είναι ορατή απόδειξη επικείμενης αστοχίας. Η ολκιμότητα του χάλυβα έχει μεγάλη σημασία σε κατασκευές κάτω από δυναμικές καταπονήσεις (π.χ. σεισμό) γιατί τότε ο χάλυβας έχει την ικανότητα να απορροφά μεγάλα ποσοστά ενέργειας αποτρέποντας έτσι την κατάρρευση της κατασκευής, γεγονός που δεν συμβαίνει σε ψαθυρά υλικά όπως το σκυρόδεμα.

Για τον δομικό χάλυβα το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι το εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ

1.2.1 Πρότυπα Χαλύβων

Για τους χάλυβες στην Ελλάδα υπάρχουν αυστηρά πρότυπα και αυτή την στιγμή το πιο διαδεδομένο είναι το ΕΛΟΤ1421-3. Στο Πρότυπο αυτό καθορίζονται οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησίμων χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος της τεχνικής κατηγορίας B500C, που παραδίδονται ως τελικό προϊόν με τις ακόλουθες μορφές:

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

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C είναι υψηλής ολκιμότητας (προδιαγράφονται αυστηρότερα όρια για τον λόγο εφελκυστικής αντοχής (f_t/f_y) και για την ανηγμένη παραμόρφωση - συνολική επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (ϵ^{\wedge})).

1.2.3 Τι εισάγουν τα νέα Πρότυπα

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ παλαιών και νέων Προτύπων. Τα νέα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 αφορούν αποκλειστικά τους συγκολλησίμους χάλυβες σπλισμού σκυροδέματος. (Καταργείται και τυπικά η χρήση των μη συγκολλησίμων χαλύβων.)

Για τους χάλυβες αυτούς καθιερώνονται:

- Νέες τεχνικές κατηγορίες ποιότητας B500A (χαμηλής ολκιμότητας) και B500C (υψηλής ολκιμότητας).
- Έλεγχοι και κριτήρια αξιολόγησης ανάλογα με τη μορφή που διατίθενται (ράβδοι, ρόλοι, ευθυγραμμισμένα προϊόντα, πλέγματα, δικτυώματα).
- Αυστηρότερα όρια για τις ιδιότητες σε εφελκυσμό
- Νέοι έλεγχοι και μετρήσεις όπως:
 - έλεγχος της γεωμετρίας των νευρώσεων (αντοχή συνάφειας), ο δοκιμή κόπωσης,
 - αντοχή σε διάτμηση για τις σταυρωτές σημειακές συγκολλήσεις πλεγμάτων και δικτυωμάτων.
- Διαφορετικός τρόπος εκτέλεσης δοκιμών, αλλά και μέτρησης χαρακτηριστικών:
- Η καταλληλότητα σε κάμψη θα ελέγχεται με τη δοκιμή αναδίπλωσης ανεξαρτήτως διαμέτρου,
- η ανηγμένη παραμόρφωση θα μετριέται στο μέγιστο φορτίο και όχι μετά τη

θραύση,

- οι τάσεις θα υπολογίζονται με την ονομαστική διατομή και όχι με την πραγματική,
- στη χημική σύσταση θα μετριέται και ο χαλκός.
- Συγκεκριμένο σύστημα σήμανσης για την αναγνώριση της προέλευσης (χώρα κι μονάδα παραγωγής) και της τεχνικής κατηγορία.
- Κριτήρια συμμόρφωσης για τους παραγωγούς (αρχικός, εσωτερικός και μακροχρόνιος έλεγχος).
- Έλεγχοι σε περιπτώσεις αμφισβητήσεων.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι νέες απαιτήσεις και για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και εκείνες των προηγούμενων Προτύπων.

	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_5 (%)	24	14	12	14	12	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

2. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS

Μία από τις πιο σημαντικές και πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους που εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις προβλημάτων στην ανάλυση κατασκευών που ενδιαφέρουν τον Πολιτικό Μηχανικό είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.).

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, πήρε το όνομά της από τον τρόπο θεώρησης και προσομοίωσης (μοντελοποίησης) των προς επίλυση φορέων. Με βάση τη μέθοδο αυτή, αρχικά, γίνεται υποδιαίρεση του αρχικού φορέα σε έναν ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια μικρό ή μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων. Μετά την διακριτοποίηση αυτή 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, η κατάλληλη δηλαδή επανασύνδεση των στοιχείων προς σχηματισμό του διακριτοποιημένου φορέα. 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 (εφόσον βέβαια και η μηχανική συμπεριφορά των χρησιμοποιημένων στοιχείων περιγράφεται ικανοποιητικά).

Όπως προαναφέρθηκε, η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων στη γενική περίπτωση (και ειδικά στην περίπτωση επιφανειακών φορέων) 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 μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα τα οποία και παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

2.1 Πλεονεκτήματα Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Η μεγάλη της προσαρμοστικότητα σε κάθε είδος προβλήματος
- Ο ενιαίος τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζει και τα πλέον διαφορετικά προβλήματα, γεγονός που δημιουργεί απεριόριστο σχεδόν πεδίο εφαρμογών .

Ειδικά για τις εφαρμογές που ενδιαφέρουν τον Πολιτικό Μηχανικό η ΜΠΣ πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων λόγω του ενιαίου και απλού τρόπου ανάλυσης των κατασκευών , ανεξάρτητα από τυχόν ιδιαιτερότητες στη γεωμετρία του φορέα , περίπλοκες συνοριακές συνθήκες , διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες υλικών , ειδικές φορτίσεις κτλ . Υπερτερεί επίσης και λόγω της σχετικά εύκολης φυσικής ερμηνείας των διαφόρων μεγεθών που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Η διαδικασία ανάλυσης γραμμικών, επιφανειακών και τρισδιάστατων φορέων είναι ουσιαστικά η ίδια , έτσι ώστε ο υπολογισμός φορέων

που αποτελούνται από διαφορετικά δομικά στοιχεία (π.χ. κτίριο αποτελούμενο από υποστυλώματα , επίπεδα τοιχώματα - δίσκους , δοκούς , πλάκες και ενδεχομένως και κελύφη) να μπορεί να γίνει μέσα στα πλαίσια της ίδιας μεθόδου .

Για την επίλυση του φορέα στην παρών πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται ANSYS. Στην συνέχεια ακολουθούν πληροφορίες σχετικά με το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

Το ANSYS έχει ευρεία χρήση καθώς χρησιμοποιείται από όλους τους κλάδους των μηχανικών αλλά και σε πολλούς ακόμα τομείς όπως για παράδειγμα στις τηλεπικοινωνίες.

2.2 Δυνατότητες

Συγκεκριμένα το πρόγραμμα ANSYS προσφέρει στους μηχανικούς τις εξής δυνατότητες:

- Απευθείας 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 προς επίλυση προβλήματος και τροποποίηση διάφορων κατάλληλων παραμέτρων με σκοπό την καλύτερη και γρηγορότερη δυνατή επίλυση .
- Εκτέλεση πρωτότυπων εφαρμογών σε τομείς που σε άλλες περιπτώσεις θα ήταν πολύ δύσκολο έως αδύνατο .

2.3 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 <<αυτόματα>> από το πρόγραμμα ή δηλώνονται από το χρήστη, παρατίθενται και επεξηγούνται παρακάτω:

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 .

Modal Ανάλυση: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων μιας κατασκευής. Αποτελεί επίσης το προαπαιτούμενο στάδιο για μια πιο λεπτομερή δυναμική ανάλυση .

Harmonic Response Ανάλυση: Προσδιορίζει την γραμμική ανταπόκριση μιας κατασκευής λόγω της δράσης αρμονικών μεταβαλλόμενων με το χρόνο εξωτερικών φορτίων .

Transient Δυναμική ανάλυση: Προσδιορίζει την δυναμική ανταπόκριση μιας κατασκευής λόγω της δράσης χρονικά μεταβαλλόμενων εξωτερικών φορτίων.

Φασματική Ανάλυση: Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της modal ανάλυσης και τα δεδομένα ενός γνωστού φάσματος απόκρισης προσδιορίζει την ανταπόκριση μιας κατασκευής σε τυχαία ή χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης όπως δυνάμεις σεισμού , ανέμου , θαλάσσιων κυμάτων κ.α

Buckling Ανάλυση: Υπολογίζει τα κρίσιμα φορτία υπό την επίδραση των οποίων επέρχεται αστάθεια στην κατασκευή.

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

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Σχεδίαση-Ανάπτυξη Πειραματικού Μέρους

Το πρώτο στάδιο της πτυχιακής ήταν η σχεδίαση και ανάπτυξη του πειραματικού μέρους. Αυτό γιατί προκειμένου να σχεδιαστεί το στατικό μας μοντέλο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS έπρεπε πρώτα να έχουν υλοποιηθεί οι εργαστηριακές μας δοκιμές. Αποφασίστηκε λοιπόν να φτιάξουμε δύο δοκίμια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την συνεχή επιτυχή ανάπτυξη του μοντέλου στο πρόγραμμα ήταν να έχουμε καθαρά καμπτική αστοχία με εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων και όχι διατμητικών.

3.2 Χαρακτηριστικά Δοκιμίων

Τα δύο δοκίμια είχαν τις ίδιες διαστάσεις, τον ίδιο οπλισμό, ήταν κατασκευασμένα με την ίδια μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος και τους εφαρμόσαμε τα ίδια φορτία. Οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου ήταν 10cm×15cm×110cm. Ο υφιστάμενος οπλισμός που τοποθετήθηκε ήταν κατηγορίας B500C υψηλής ολκιμότητας όπως ορίζουν και τα νέα πρότυπα για του χάλυβες ο οποίος ήταν ελληνικής προέλευσης και μάλιστα ήταν από το εργοστάσιο της Ελληνικής Χαλυβουργίας στην Ελευσίνα. Διαμήκης τοποθετήθηκαν συνολικά 4 ράβδοι Φ8,2 άνω και 2 κάτω, εγκάρσια τοποθετήθηκαν τσέρκια των Φ8/5 μέχρι την επιβολή των φορτίων που ήταν σε απόσταση 23,5cm από το ελεύθερο άκρο της δοκού. Στην ενδιάμεση απόσταση των δυο τσερκιών δεν τοποθετήθηκε εγκάρσιος οπλισμός. Η επικάλυψη ήταν 1,5cm και η απόσταση του πρώτου εγκάρσιου οπλισμού από το ελεύθερο άκρο ήταν 3cm. Η στήριξη βρισκόταν 5cm από το ελεύθερο άκρο και των δύο μεριών. Η σύνθεση του σκυροδέματος ήταν για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 κάθισης S2. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ακριβής σύνθεση που χρησιμοποιήσαμε για τα δύο δοκίμια.

	ΑΜΜΟΣ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΧΑΛΙΚΙ	Τ.Σ. Π.42.5	Τ.Σ. Π32.5	ΝΕΡΟ	ΣΥΝΟΛΟ
C20/25	44.69	7.85	29.65	10.46	2.62	8.07	103.33

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ(KG)

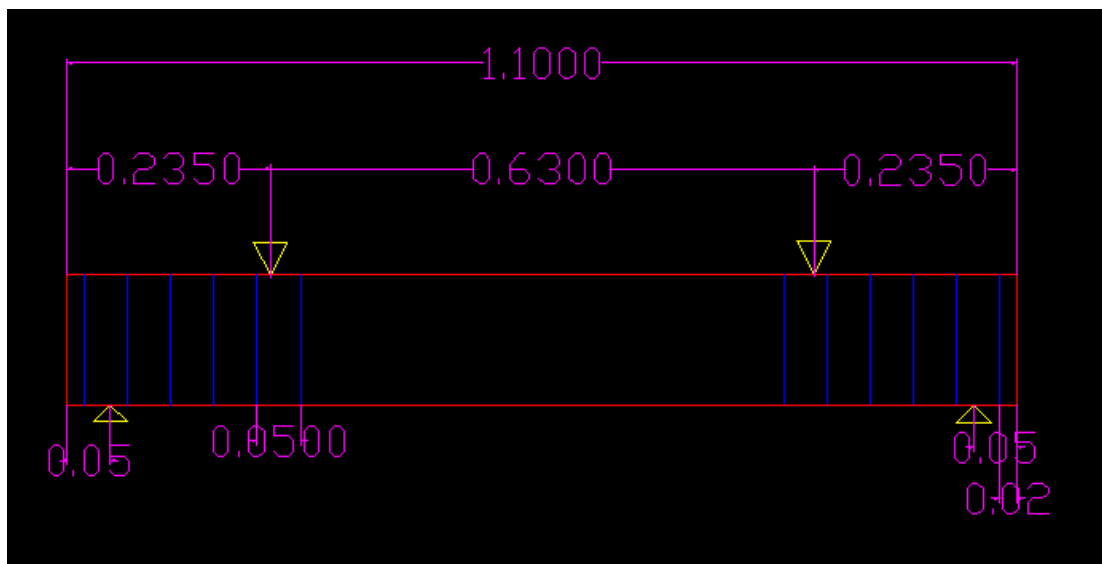
Προκειμένου να γίνει και έλεγχος της κατηγορίας του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης των δύο δοκιμών σκυροδετήσαμε και δύο πρότυπες μήτρες διαστάσεων 15cm×15cm τις οποίες θα δοκιμάζαμε σε θλίψη μετά το πέρας της ωρίμανσης του σκυροδέματος που ήταν 28 μέρες και φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

3.3 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Το πρώτο βήμα ήταν να φτιάξουμε τον μανδύα από τον χάλυβα οπλισμού έτσι όπως το είχαμε σχεδιάσει. Παρακάτω φαίνεται το σκαρήφημα της τελικής δοκού



ΣΧΕΔΙΟ 3.1 ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΠΛΙΣΜΩΝ

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία δεσίματος των κλωβών στην συνέχεια έγινε η προετοιμασία των καλούπιών. Τα καλούπια του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ξύλινα διαστάσεων 10cm x20cm. Το πρώτο που έγινε ήταν να σφίξουμε σωστά το καλούπι ώστε κατά την διάρκεια της δόνησης πάνω στην τράπεζα δόνησεως να μην ανοίξει και περιχύνεται από μέσα σκυρόδεμα και αρκετό νερό κάτι που θα μπορούμε εκτός του να χαλάσει το σχήμα της δοκού να αλλοιώσει και το λόγο νερού προς τσιμέντο. Στην φωτογραφία που ακολουθεί φαίνεται το καλούπι που χρησιμοποιήσαμε.



ΕΙΚΟΝΑ 3.2:ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σημαντικό είναι το καλούπι να καθαριστεί πριν την σκυροδέτηση και να λυπανθεί με λάδι ώστε να μην δυσκολευτούμε κατά το ξεκαλούπωμα της δοκού από αυτό.

Έχοντας την μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος μας άρχισε η ζύγιση του κάθε συστατικού ώστε να προχωρήσουμε στην ανάμειξη τους και στην συνέχεια να το σκυροδετήσουμε. Η ζύγιση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της εξής εργαστηριακής ζυγαριάς.



ΕΙΚΟΝΑ 3.3:ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΖΥΓΑΡΙΑ

Τα αδρανή και τα τσιμέντα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αγορασμένα μέσα σε συσκευασίες νάιλον και αποθηκευμένα στον χώρο του εργαστηρίου. Μετά την ολοκλήρωση της ζύγισης αρχίσαμε να προσθέτουμε τα αδρανή μέσα στον κάδο προσθέτοντας πρώτα το χαλίκι, στη συνέχεια το γαρμπίλι και μετά την άμμο με το τσιμέντο. Αφού θέσαμε σε λειτουργία την μηχανή ανάμειξης ταυτόχρονα προσθέταμε το νερό που απαιτούνταν σύμφωνα με την μελέτη σύνθεσης. Η διαδικασία της ανάμειξης διάρκειά περίπου 6 λεπτά έως ότου είναι έτοιμο το σκυρόδεμα για χρήση. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της εξής μηχανής ανάμειξης.



ΕΙΚΟΝΑ 3.4:ΜΗΧΑΝΗ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σε αυτήν την εικόνα φαίνονται και τα αδρανή μας με το τσιμέντο που είναι έτοιμα για την ανάμειξη. Ακολουθεί η σκυροδέτηση των καλουπιών αφού το σκυρόδεμα είναι έτοιμο. Με διάφορες σέσουλες παίρναμε το μείγμα από τον κάδο ανάμειξης και το τοποθετούσαμε σταδιακά σε όλο το μήκος των δύο καλουπιών τα οποία είχαμε τοποθετήσει πάνω στην τράπεζα δόνησης. Ανά διαστήματα σταματάγαμε την σκυροδέτηση και θέταμε σε λειτουργία την τράπεζα δόνησης για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να κατανεμηθούν σωστά τα αδρανή μέσα στο καλούπι. Αυτή η διαδικασία συνεχιζόταν μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία σκυροδέτησης των δύο καλουπιών. Για το τέλος αφήσαμε τις δύο πρότυπες μήτρες τις οποίες γεμίσαμε σε δύο στρώσεις. Σε κάθε στρώση προκειμένου να πετύχουμε σωστή συμπύκνωση πραγματοποιούσαμε 25 χτυπήματα με κυκλική φορά. Ακολουθεί εικόνα που δείχνει την τράπεζα δόνησης που χρησιμοποιήθηκε.



ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΤΡΑΠΕΖΑ ΔΟΝΗΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

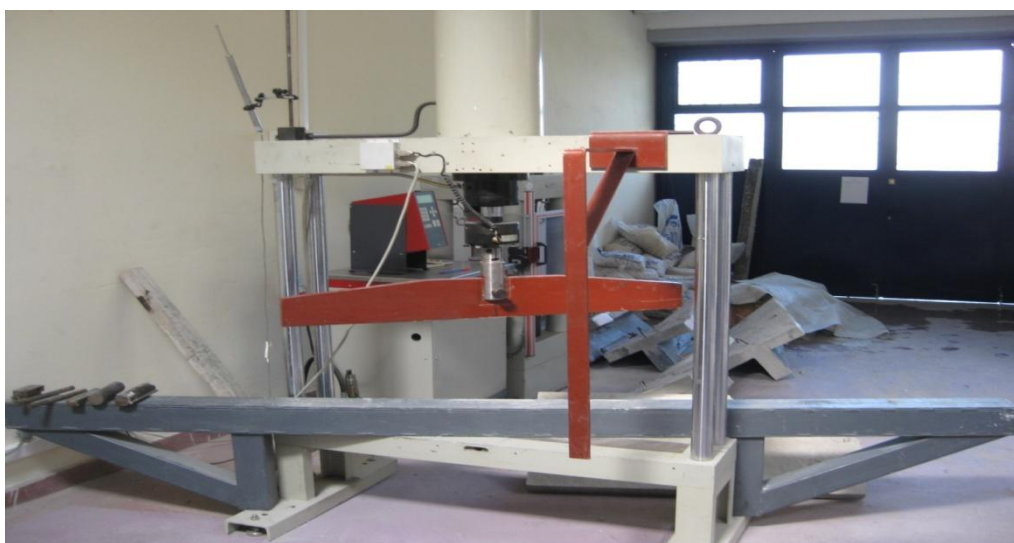
Η διαδικασία της σκυροδέτησης έφτασε στο τέλος της και προκειμένου να συνεχίσουμε την δοκιμή μας πρέπει να περιμένουμε 28 μέρες προκειμένου να ολοκληρωθεί η ωρίμανση του σκυροδέματος και να εφαρμόσουμε τα επιθυμητά φορτία στις δοκούς μας. Δυο μέρες μετά την σκυροδέτηση οι δοκοί και οι μήτρες ξεκαλουπώθηκαν και έτσι τελείωσε το πρώτο στάδιο της εργαστηριακής δοκιμής μας.

3.4 ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΔΟΚΩΝ

Για να πετύχουμε καλύτερη ωρίμανση και να αναπτυχθούν ταχύτερα οι αντοχές του σκυροδέματος των δοκών, μετά το ξεκαλούπωμα τοποθετήσαμε και τα δυο δοκίμια αλλά και τις δύο πρότυπες μήτρες σε ειδικό νιπτήρα τον οποίο γεμίσαμε νερό που κάλυψε τα δοκίμια μας. Σε αυτή την κατάσταση παρέμειναν για 28 ημέρες

3.5 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Σκοπός της εργαστηριακής δοκιμής ήταν να εφαρμόσουμε στις δύο δοκούς μας δύο φορτία έτσι ώστε να έχουμε καθαρά καμπτική αστοχία και να μην έχουμε εμφάνιση διατμητικών τάσεων παρά μόνο εφελκυστικών. Έτσι οι δύο δοκοί έπρεπε να παρουσιάσουν εκτός από ελαστική συμπεριφορά και πλαστική για να έχουμε κάποιο αποτέλεσμα και να συνεχίσουμε στο σχεδιασμό του μοντέλου αργότερα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η πραγματοποίηση της δοκιμής έγινε με την μηχανή επιβολής φορτίων που κατασκευάζεται από την εταιρεία Topi Technik. Η δοκιμή έγινε μέσα στο εργαστήριο του οπλισμένου σκυροδέματος υπό την βοήθεια του επιβλέπων καθηγητή. Η μηχανή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί παρακάτω.



ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΜΨΗΣ

Η συγκεκριμένη μηχανή υψηλής τεχνολογίας έχει πληθώρα εφαρμογών και χρησιμοποιείται σε πολλά σύγχρονα εργαστήρια αλλά και οργανισμούς για αντίστοιχες εφαρμογές. Διαθέτει σύστημα μικροεπεξεργαστή, ανοιχτού και κλειστού βρόγχου ελέγχου, με δυνατότητα μέτρησης, παρακολούθησης και αξιολόγησης στοιχείων παρόμοιων της δική μας περίπτωσης. Συνδέεται με μονάδα υπολογιστή όπου και μεταφέρει τα δεδομένα, τις μετρήσεις που έχουν γίνει και από εκεί ο χρήστης μπορεί να τα επεξεργάσει ή να τα χρησιμοποιήσει και στην συνέχεια. Ωστόσο η λειτουργία της γίνεται από την μονάδα Toní Trol που βρίσκεται δίπλα από την μηχανή και είναι αυτή που φαίνεται παρακάτω. Η μονάδα αυτή μπορεί να δώσει μέχρι 3 φορτία φόρτιση σε μια δοκό, ελέγχει την δύναμη, μετατόπιση και παραμόρφωση.



ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΜΟΝΑΔΑ ΤΟΝΙ ΤΡΟΛ

Προκειμένου να ξεκινήσει το πείραμα τοποθετούμε την πρώτη δοκό μας πάνω στο πλαίσιο φόρτισης της μηχανής έτσι ώστε να είναι ευθυγραμμισμένη σε σχέση με το κόκκινο ψαλίδι φόρτισης το οποίο φαίνεται στην εικόνα της μηχανής Toni Technick. Εν συνεχεία τοποθετήσαμε τις στηρίξεις όπως είχαμε σχεδιάσει 5cm από τα ελεύθερα άκρα της δοκού και τοποθετήσαμε τα φορτία στα σημεία που θέλουμε να εφαρμοστούν κατά την διάρκεια του πειράματος. Ένα σημαντικό βήμα είναι η τοποθέτηση του βελόμετρου πάνω στο δοκίμιο μας καθώς από αυτό μεταφέρονται όλες οι τιμές, όπως το βέλος κάμψης και το φορτίο, στον υπολογιστή και από εκεί είναι σε εμάς διαθέσιμες για ανάλυση.

Στο σημείο αυτό ήμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την δοκιμή αφού ελέγξουμε αρχικά ότι έχουμε ολοκληρώσει την τοποθέτηση του δοκιμίου και έχουμε καλιμπράρει τις ρυθμίσεις της μηχανής. Θέτουμε λοιπόν την μηχανή σε λειτουργία και αρχίζουμε να ασκούμε τα φορτία μας τα οποία αυξάνουν σταδιακά μαζί με το βέλος κάμψης. Η φόρτιση συνεχίζεται έως ότου την διακόψουμε εμείς και όχι στο σημείο που έχουμε την θραύση του δοκιμίου μας. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν εικόνες των δοκών να είναι τοποθετημένες πάνω στην μηχανή κάμψης.



ΕΙΚΟΝΑ 3.8:ΔΟΚΟΣ BV-3 ΠΡΙΝ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



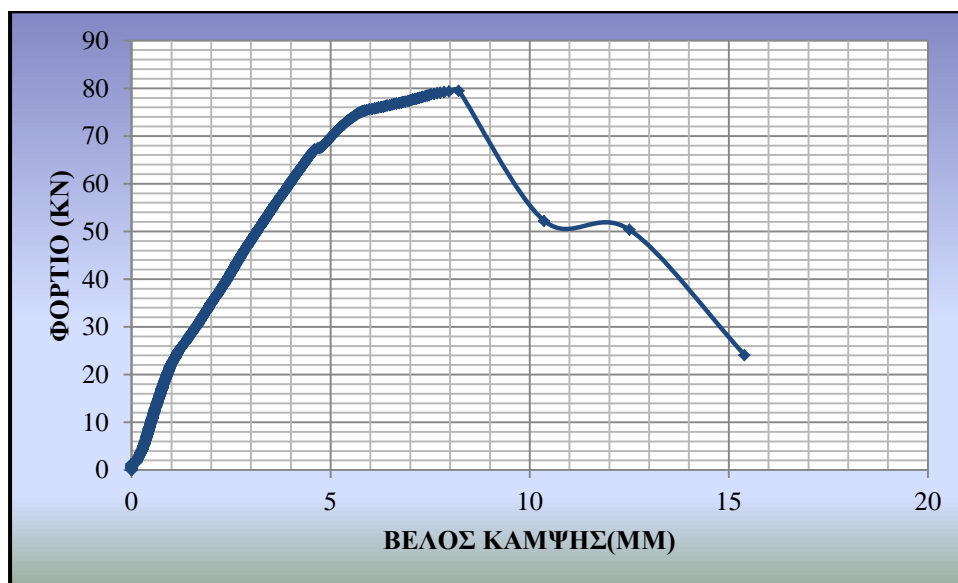
ΕΙΚΟΝΑ 3.9:ΔΟΚΟΣ BV-3 ΜΕΤΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 1



ΕΙΚΟΝΑ 3.10:ΔΟΚΟΣ BV-3 ΜΕΤΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 2

3.6 Δοκίμιο BV-3

Όπως φαίνεται στις δυο εικόνες η δοκός με το όνομα BV-3 ανέπτυξε καθαρά διατμητική συμπεριφορά και έθραυσε κοντά στην άρθρωση. Συνεπώς η συγκεκριμένη δοκός δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω μελέτη με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων καθώς βασικός στόχος ήταν να υπάρχει και πλαστική συμπεριφορά. Από το διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται επίσης ότι δεν υπάρχει πλαστική περιοχή και έχουμε διάτμηση.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.1:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ-ΦΟΡΤΙΟΥ ΔΟΚΟΥ BV-3

3.7 ΔΟΚΙΜΙΟ BV-2

Όσον αφορά την δοκό BV-2 στην αρχή της φόρτισης παρουσίασε αρχικά κάποιες ρωγμές λόγω ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων αλλά με την συνεχή αύξηση του φορτίου ξεκινούσαν να αναπτύσσονται παράλληλα διατμητικές ρωγματώσεις. Τελικά κατά την θραύση παρουσίασε μερική καμπτική αστοχία αλλά λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της διάτμησης ούτε η συγκεκριμένη δοκός μπορούσε τελικώς να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάπτυξη ώστε να έχουμε να αξιόπιστο μέτρο για να δούμε τελικώς μέσω του προγράμματος αν υπάρχει σύγκλιση με τις μετρήσεις που κάναμε πειραματικά και αν υπήρχε σε τι βαθμό. Ακολουθούν φωτογραφίες της δοκού BV-2 ώστε να κατανοηθεί η μορφή αστοχίας.



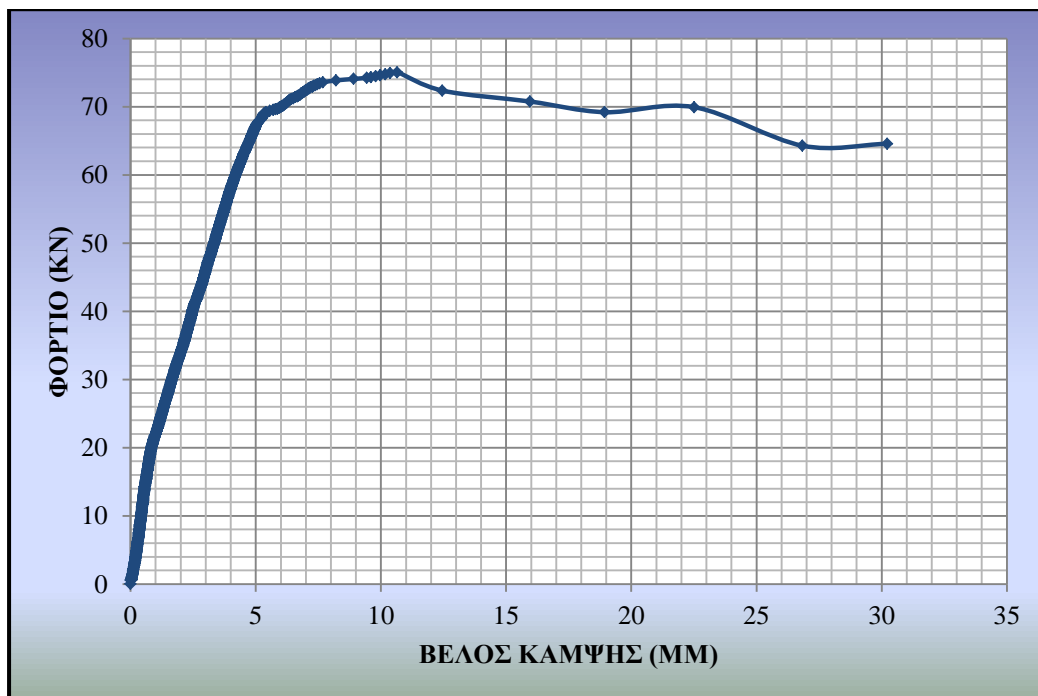
ΕΙΚΟΝΑ 3.11:ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-2 1



ΕΙΚΟΝΑ 3.12:ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-2 2



ΕΙΚΟΝΑ 3.13:ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-2 3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.2:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΜΨΗΣ-ΦΟΡΤΙΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ BV-2

3.8 Αποτελέσματα Δοκιμής

Από το διάγραμμα βέλους κάμψης-πραγματικού φορτίου της δοκού BV-2 βλέπουμε ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε βέλος κάμψης 30mm ενώ η δοκός BV-3 είχε μόνο 15mm κάτι το οποίο δικαιολογεί και την ανάπτυξη της διάτμησης.

Όσον αφορά τα πραγματικά μέγιστα φορτία στα οποία σχημάτισαν θραύση τα δύο δοκίμια ανέπτυξαν περίπου τα ίδια. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων η μηχανή είχε μια απόκλιση στα φορτία σε σχέση με το πρόγραμμα της μονάδας στον υπολογιστή της τάξεως των 3-4KN σε κάθε φορτίο και έτσι με αναγωγή που έγινε στη συνέχεια είχαμε τα πραγματικά φορτία τα οποία είναι αυτά που φαίνονται στα παραπάνω διαγράμματα. Η δοκός BV-2 ανέπτυξε το μέγιστο φορτίο της μετά από 7 λεπτά φόρτισης ενώ η BV-3 μετά από 8.30 λεπτά φόρτισης.

3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων που έγιναν για τα δύο δοκίμια καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι είναι αδύνατον να χρησιμοποιήσουμε τις υπάρχουσες μετρήσεις για να σχεδιάσουμε το μοντέλο μας στο πρόγραμμα ANSYS και ακόμα πιο αδύνατον να βγάλουμε στην συνέχεια κάποιο αξιόπιστο συμπέρασμα. Έτσι αποφασίστηκε ότι η πειραματική δοκιμή έπρεπε να επαναληφθεί με νέα δοκίμια τα οποία έπρεπε να παρουσιάσουν καθαρά καμπτική αστοχία. Επομένως έπρεπε αυτή τη φορά να γίνει τέτοια σχεδίαση και μελέτη ώστε να μην έχουμε πάλι τα ίδια αποτελέσματα.

4.ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΝΕΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Ψάχνοντας στην βιβλιογραφία βρέθηκε ότι για να υπερτερεί η καμπτική ροπή έναντι της τέμνουσας και έτσι να αποφευχθεί η διάτμηση πρέπει οι δοκοί μας να σχεδιαστούν έτσι ώστε να έχουν μεγάλο λόγο διάτμησης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος διάτμησης τόσο αυξάνεται η καμπτική ροπή και ταυτόχρονα μειώνεται η τέμνουσα δύναμη. Στους φορείς με μικρό λόγο διάτμησης επειδή η τέμνουσα σε σχέση με τη ροπή είναι μεγάλη, δεν μπορεί να αμεληθεί το βέλος λόγω της τέμνουσας, η εγκάρσια διατομή κατά την επιπόνηση καμπυλώνεται και το διάγραμμα παραμορφώσεων δεν είναι γραμμικό. Οι τάσεις στην εφελκυσόμενη περιοχή δεν έχουν τριγωνική κατανομή, αλλά παραμένουν περίπου σταθερές για σημαντικό μέρος της εφελκυσόμενης ζώνης. Όπως γίνεται κατανοητό οι φορείς με μεγάλο λόγο διάτμησης αναπτύσσουν μεγαλύτερες λοξές εφελκυστικές τάσεις και μικρότερες λοξές θλιπτικές τάσεις.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες όσον αφορά τον λόγο διάτμησης.

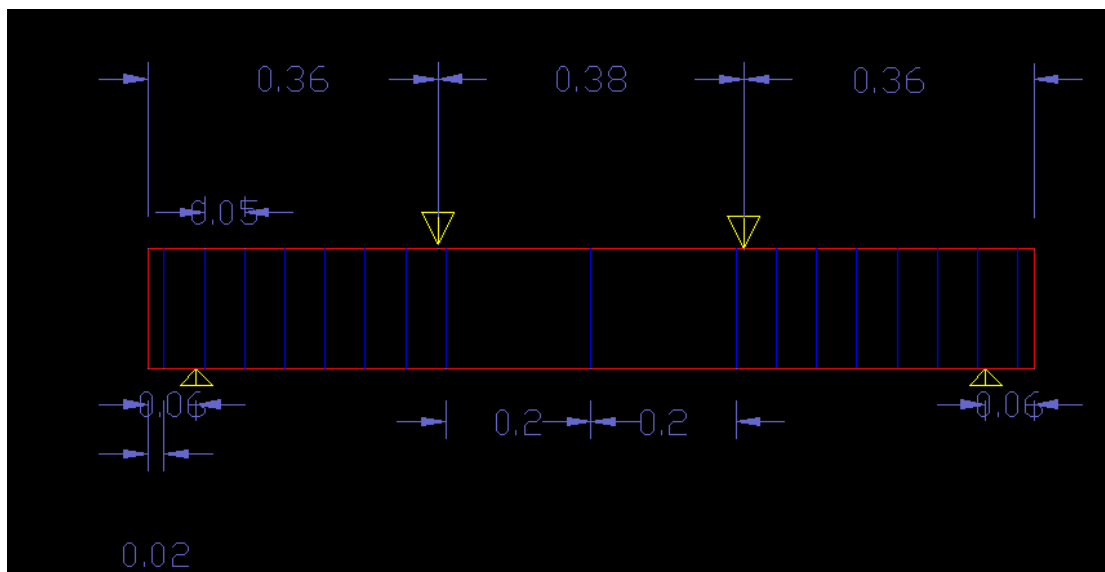
- ❖ Φορείς με μικρό λόγο διάτμησης όπου $a_s \leq 1,5$
- ❖ Φορείς με μεγάλο λόγο διάτμησης όπου $a_s \geq 2,5$
- ❖ Φορείς με ενδιάμεσο λόγο διάτμησης όπου $a_s = 2$

Στην προκειμένη περίπτωση σύμφωνα με τα παραπάνω αποφασίσαμε οι δοκοί μας να έχουν μεγάλο λόγο διάτμησης σε αντίθεση με την προηγούμενη φορά όπου ο λόγος διάτμησης αντιστοιχούσε σε 1,5 δηλαδή σε μικρό λόγο διάτμησης. Από την σχέση:

$$A_s = a/d$$

Που μας δίνει τον λόγο διάτμησης, αντικαθιστώντας για λόγο ίσον με 2,5, έχουμε ότι η φόρτιση μας πρέπει να απέχει 36cm από το κάθε ελεύθερο άκρο. Στην πρώτη εργαστηριακή δοκιμή η απόσταση φόρτισης ήταν σε απόσταση 23,5cm. Ο οπλισμός και αυτή την φορά θα παραμείνει ο ίδιος και ο διαμήκης και ο εγκάρσιος, η απόσταση μεταξύ του εγκάρσιου θα είναι ίση με 8cm και η στήριξη από το

ελεύθερο άκρο θα βρίσκεται σε απόσταση 6cm. Το βελόμετρο απέχει 8cm από το κέντρο της δοκού. Επίσης στην συγκεκριμένη δοκιμή έχει τοποθετηθεί και ένα επιπλέον τσέρκι στο κέντρο της κάθε δοκού. Η μελέτη σκυροδέματος παρέμεινε η ίδια για κατηγορία C20/25 και ο χάλυβας ήταν κατηγορίας B500C υψηλής ολκιμότητας παραγόμενος από την Χαλυβουργική. Ακολουθεί σκαρίφημα που δείχνει ακριβώς την διάταξη των οπλισμών και το σχήμα της δοκού.



ΣΧΕΔΙΟ 4.1: ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΠΛΙΣΜΩΝ

Για την παράγωγή του σκυροδέματος αλλά και τις εργασίες ολοκλήρωσης της σκυροδέτησης ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα όπως στην πρώτη εργαστηριακή δοκιμή. Με μόνη διαφορά ότι αυτή την φορά τα δοκίμια και οι 2 μήτρες που λήφθηκαν δεν τοποθετήθηκαν μέσα στον ειδικό νιπτήρα με νερό. Αντίθετα, με το που ολοκληρώθηκε η σκυροδέτηση τα καλούπια εμποτίστηκαν επιφανειακά με νερό και στην συνέχεια σκεπάστηκαν με διάφορα πανιά και από πάνω καλύφθηκαν με νάιλον. Μετά την απομάκρυνση των ξύλινων καλουπιών τα πανιά με το νάιλον επανατοποθετήθηκαν αφού αρχικά τα εμποτίσαμε με νερό. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα όταν, απαιτούνταν, τα πανιά αφαιρούνταν για να εμποτιστούν με νερό και στην συνέχεια να επανατοποθετηθούν. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβανόταν προκειμένου τα δοκίμιά μας να συγκρατήσουν της αρχική τους υγρασία και να μην παρουσιάσουν ρηγματώσεις λόγω αφυδατώσεως.

Έτσι, έπειτα το πέρας των 28 ημερών ωρίμανσης του σκυροδέματος, ήρθε η στιγμή να επαναλάβουμε την εργαστηριακή δοκιμή μας με τα νέα δοκίμια αυτή την φορά. Τα νέα δοκίμια φέρουν την ονομασία BV-2 FLEX και BV-3 FLEX. Ακολουθεί φωτογραφία που δείχνει τον οπλισμό των δοκών πριν την σκυροδέτηση.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1:ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ 1



ΕΙΚΟΝΑ 4.2:ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ 2

Η διαδικασία της εργαστηριακής δοκιμής έχει την ίδια ακολουθία όπως την πρώτη φορά και μετά την θραύση των δύο δοκών και των πρότυπων μήτρων, ακολούθησε και δοκιμή για το όριο διαρροής του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στον οπλισμό των δοκιμίων μας. Παρουσιάζονται εικόνες των δοκιμίων μας προτού αρχίσει η επιβολή των φορτίων.



ΕΙΚΟΝΑ 4.3: BV-2 FLEX ΠΡΙΝ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



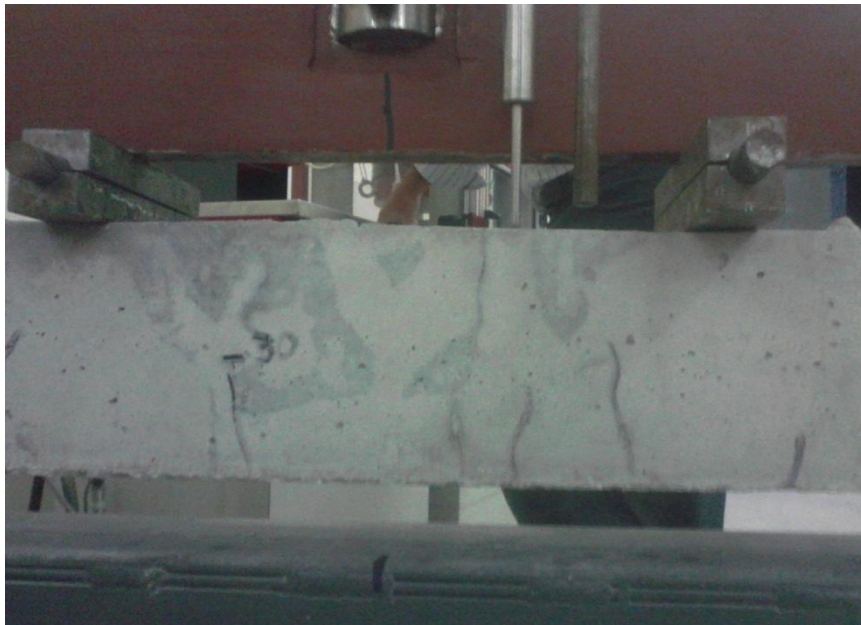
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: BV-3 FLEX ΠΡΙΝ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

4.1.1 ΔΟΚΟΣ BV-2FLEX

Η δοκός BV-2 FLEX κατά την διάρκεια των μετρήσεων άρχισε να παρουσιάζει ρηγματώσεις καμπτικού χαρακτήρα όταν η φόρτιση ήταν 30 kN και οι ρηγματώσεις αυτές ήταν καμπτικού χαρακτήρα. Η θραύση της δοκού εμφανίστηκε όταν η φόρτιση ήταν 50 kN και η αστοχία ήταν καθαρά καμπτική αυτή την φορά και στην αναμενόμενη τιμή φόρτισης που είχαμε υπολογίσει στον σχεδιασμό οπότε είχαμε το ιδανικό αποτέλεσμα για να συνεχίσουμε στην συνέχεια την ανάπτυξη στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Ακολουθούν εικόνες που απεικονίζουν την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών στην BV-2 FLEX και την τελική θραύση της.



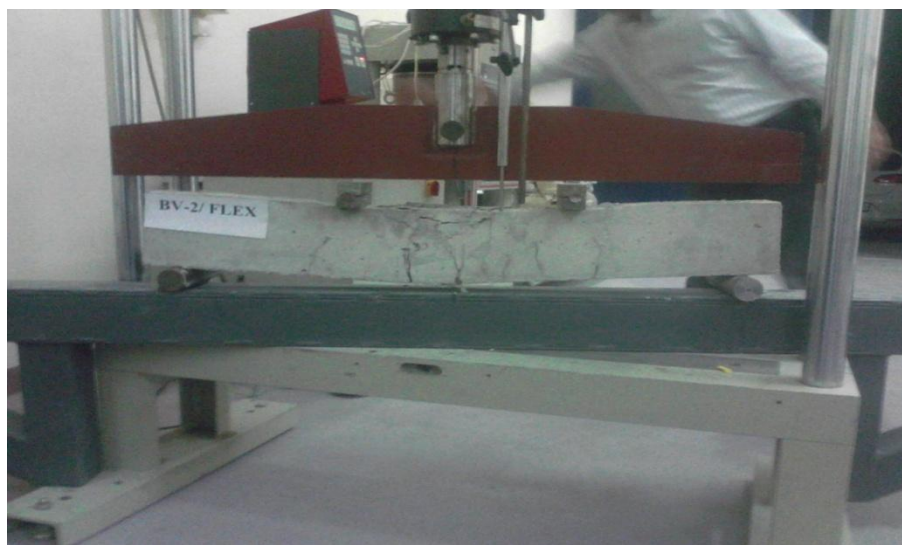
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ



ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ 1



ΕΙΚΟΝΑ 4.7:ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ 2

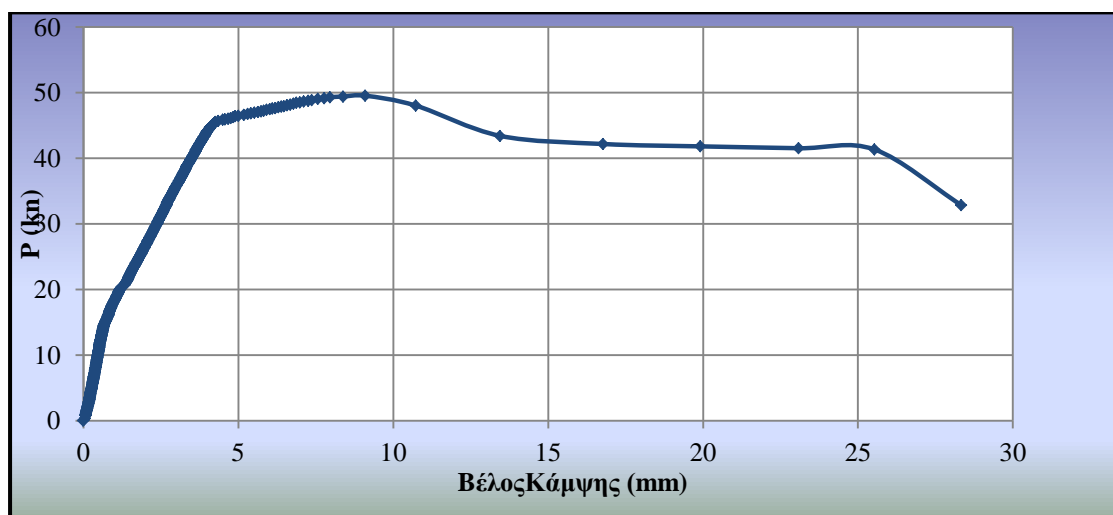


ΕΙΚΟΝΑ 4.8:ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-2 FLEX 1



ΕΙΚΟΝΑ 4.9:ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-2 FLEX 2

Στο διάγραμμα Βέλους Κάμψης(mm)-Φορτίου(kN) που μας έδωσε η δοκός βλέπουμε ότι η αστοχία του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι καμπτική και επίσης έχει αναπτύξει πλαστική συμπεριφορά κάτι το οποίο είχαμε επιδιώξει μέσω του σχεδιασμού.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ-ΦΟΡΤΙΟΥ BV-2FLEX

4.1.2 ΔΟΚΟΣ BV-3 FLEX

Έπειτα ακολούθησε η πειραματική δοκιμή για την δοκό BV-3FLEX όπου η συγκεκριμένη άρχισε να παρουσιάζει ρηγματώσεις λόγω καμπτικής συμπεριφοράς οι οποίες έκαναν την εμφάνιση τους στην μέση περίπου και σε τιμή φορτίου περί των 20 kN και πύκνωναν μετά τα 30 kN έως ότου εμφανίστηκε η ρηγμάτωση στα 47,42 kN με πλήρη καμπτική αστοχία και μηδενική εμφάνιση διατμητικών ρωγμών. Επομένως, ο σχεδιασμός των δύο δοκών μας ήταν επιτυχής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες που δείχνουν την δοκό BV-3FLEX κατά την διεξαγωγή και ολοκλήρωση του πειράματος.



ΕΙΚΟΝΑ 4.10: BV-3FLEX ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ



ΕΙΚΟΝΑ 4.11:ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΡΩΓΜΩΝ



ΕΙΚΟΝΑ 4.12:ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ



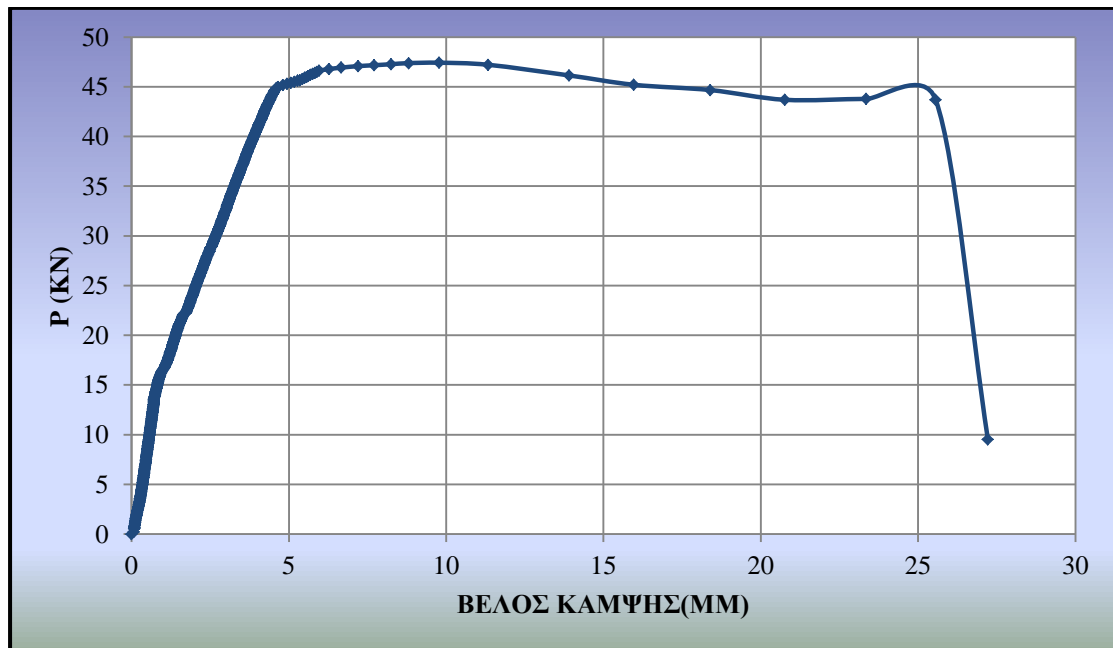
ΕΙΚΟΝΑ 4.13: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 4.14: ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-3 FLEX 1



ΕΙΚΟΝΑ 4.15:ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΚΟΥ BV-3 FLEX 2



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ-ΦΟΡΤΙΟΥ BV-3FLEX

4.1.3 Εφελκυστική Αντοχή

Αφού ολοκληρώθηκε η δοκιμή με τα δοκίμια, έπρεπε να εξακριβώσουμε την κατηγορία σκυροδέματος που χρησιμοποιήσαμε ώστε να διαπιστωθεί αν είναι σύμφωνη με την μελέτη σύνθεσης που είχαμε αναπτύξει. Η δοκιμή σε θλίψη για τις δύο μήτρες μας έδωσε τις εξής τιμές. Η μήτρα 1 ανέπτυξε αντοχή σε θλίψη 30,8 MPa και η μήτρα 2 αντοχή 32,4 MPa. Επομένως, η μέση θλιπτική αντοχή των δύο

κύβων είναι 31,6 MPa άρα το σκυροδέμα μας είναι κατηγορίας C25/30 τελικά και με αυτή την κατηγορία σκυροδέματος θα αναπτύξουμε την προσομοίωση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος 2000 έχουμε ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιήσαμε δίνεται ως εξής:

$$F_{ctm}=0.3*fck^{2/3}$$

4.1.4 Μέτρο Ελαστικότητας

Και το μέτρο ελαστικότητας από την σχέση:

$$E_{cm}=9500(fck + 8)^{1/3} , fck \text{ σε MPa}$$

Όπου

- f_{ctm} είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (MPa)
- f_{ck} είναι η αντοχή του κυλίνδρου
- E_{cm} είναι η μέση τιμή του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας.

Επομένως από τις παραπάνω σχέσεις η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιήσαμε ισούται με 2,6 MPa και το μέτρο ελαστικότητας με 30,5 GPa. Ο λόγος Poisson θα ληφθεί ίσος με 0.2. Αυτά τα χαρακτηριστικά θα ληφθούν υπόψη στην προσομοίωση του σκυροδέματος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

4.2 ΔΟΚΙΜΗ ΕΥΡΕΣΗΣ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται όπως είναι γνωστό είναι κυκλικής διατομής και αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να διαπιστώσουμε εάν όντως ο χάλυβας που χρησιμοποιήσαμε για τον οπλισμό των δοκιμιών μας είναι υψηλής ολκιμότητας. Επομένως, η δοκιμή γίνεται για να εξετάσουμε το πραγματικό όριο διαρροής του χάλυβα. Σύμφωνα με το Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων 2008, το απόλυτο ελάχιστο όριο διαρροής για κατηγορία χάλυβα B500C ισούται με $485 \text{ MPa} = f_y$. Το μέτρο ελαστικότητας ισούται με $E_s = 200 \text{ GPa}$. Η εργαστηριακή δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της μηχανής εφελκυσμού χάλυβα GALDABINI SUN 25 η οποία φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



ΕΙΚΟΝΑ 4.16: ΜΗΧΑΝΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Για την ανάγκη της δοκιμής χρησιμοποιήσαμε ένα κομμάτι χάλυβα από αυτά που είχαν τοποθετηθεί για τον σπλισμό των δοκιμίων το οποίο έχει ολικό μήκος 400 mm ενώ το καθαρό του μήκος αφού τοποθετήθηκε ανάμεσα στις μέγγκενες ήταν 271 mm. Παρατίθενται φωτογραφίες που απεικονίζουν την δοκιμή.



ΕΙΚΟΝΑ 4.17:ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

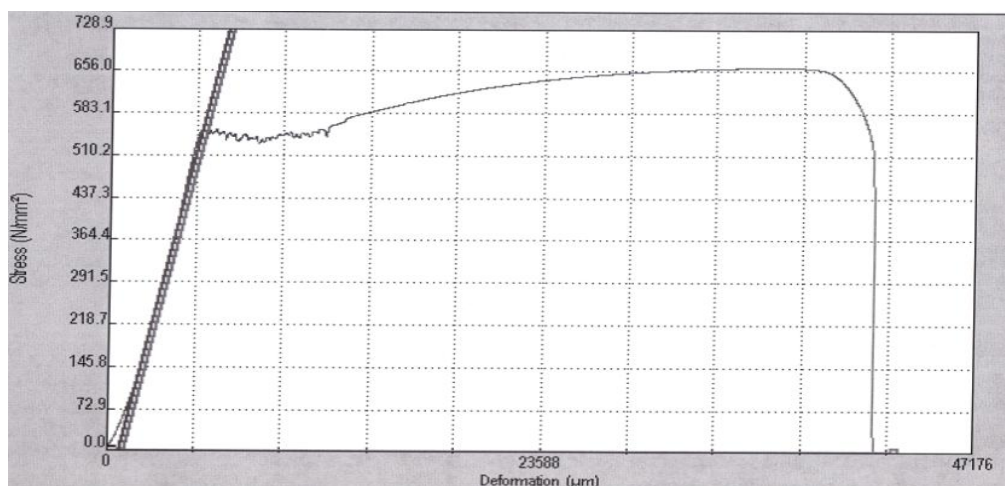


ΕΙΚΟΝΑ 4.18:ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΛΑΙΜΟΥ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ



ΕΙΚΟΝΑ 4.19:ΘΡΑΥΞΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Όταν ο χάλυβας διέρρευσε η τιμή για το όριο διαρροής που μας δόθηκε από την μηχανή ήταν 661 MPa που σαφώς είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο όριο που επιβάλλει ο κανονισμός τεχνολογίας χαλύβων για κατηγορία B500C. Άρα ο χάλυβας πληρεί τις προδιαγραφές που είχαν τεθεί στο σχεδιασμό. Ακολουθεί το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το χάλυβα της δοκιμής το οποίο μας απέδωσε η μηχανή εφελκυσμού.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

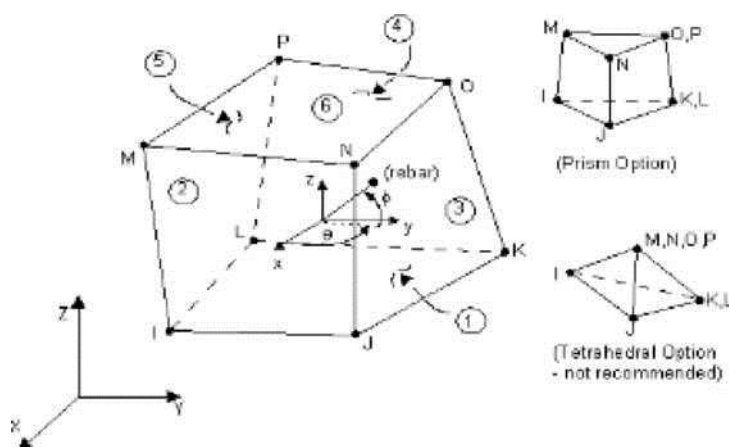
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Με το πέρας της ολοκλήρωσης των τμημάτων της εργαστηριακής δοκιμής που αναλύθηκε παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι έγινε σωστός σχεδιασμός διαστασιολόγησης, οπλισμού και αντοχής των δοκιμών μας και τα αποτελέσματα που πήραμε ήταν τα ιδανικά για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στην μοντελοποίηση των δοκιμών μας στο πρόγραμμα ANSYS και έτσι ήμασταν σε θέση στην συνέχεια να κάνουμε την επίλυση στο πρόγραμμα και τελικά να μπορέσουμε να δούμε αν υπάρχει μέσω διαφόρων παραμέτρων, που θα διερευνούσαμε, σύγκλιση λύσης του φορτίου αστοχίας σε καμπύμενη δοκό οπλισμένου σκυροδέματος. Ο κύριος στόχος δηλαδή του πειραματικού μέρους ήταν να επιτύχουμε καμπτική αστοχία στα δοκίμια που είχαμε αναπτύξει και αυτό τελικά έγινε με πλήρη επιτυχία. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι εάν δεν είχε προβλεφθεί η σημασία του λόγου διάτμησης από το στάδιο του σχεδιασμού τα αποτελέσματα πιθανώς να παρουσίαζαν την ίδια συμπεριφορά με την αρχική εργαστηριακή δοκιμή. Επομένως, το μεγάλο πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί ήταν η αποφυγή του φαινομένου της διάτμησης το οποίο θα θεωρούνταν μοιραίο για την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας καθώς θα έπρεπε να υπάρξει και σχεδιασμός για νέα δοκίμια για ακόμα μια φορά κάτι το οποίο θα απαιτούσε μεγάλο χρονικό διάστημα που θα ξεπέρναγε το επιτρεπτό όριο διεκπεραίωσης της εργασίας.

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΤΑ ANSYS

5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το στοιχείο **SOLID 65** (Σχήμα 3.3) χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την διακριτοποίηση τρισδιάστατων στοιχείων σκυροδέματος. Έχει την δυνατότητα να περιλαμβάνει ράβδους οπλισμού σε τρεις τυχαίες διαφορετικές διευθύνσεις. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ρηγμάτωσης του σκυροδέματος (cracking) λόγω εφελκυστικών και αντίστοιχα θραύσης (crushing) λόγω θλιπτικών φορτίων. Η συμπεριφορά των υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα) μπορεί να είναι μη γραμμική. Για το σκυρόδεμα μπορούν επιπλέον να ληφθούν υπόψη, εκτός από την ρηγμάτωση και την θραύση, και οι πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και οι παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού. Ο χάλυβας μπορεί να παραλαμβάνει αξονικά φορτία (θλιπτικά ή εφελκυστικά), όχι όμως διατμητικά και να παραμορφώνεται πλαστικά.



ΕΙΚΟΝΑ 5.1:ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ SOLID 65

Στην περίπτωση μας στην προσομοίωση του σκυροδέματος με το στοιχείο **SOLID 65** χρησιμοποιήσαμε και το κριτήριο Newton-Raphson το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά. Μέσω του συγκεκριμένου κριτηρίου το μητρώο δυσκαμψίας του

μοντέλου μας ενημερώνεται σε κάθε επανάληψη ισορροπίας. Έτσι εάν εντοπιστούν αποκλίσεις, στις τάσεις μας σε κάθε επανάληψη, το πρόγραμμα απορρίπτει την συγκεκριμένη επανάληψη και επανακινεί την λύση χρησιμοποιώντας ένα σταθμισμένο συνδυασμό του μητρώου τέμνουσας και εφαπτομένης. Όταν οι επαναλήψεις ολοκληρωθούν και έχουμε ένα σχέδιο σύγκλισης τότε το κριτήριο συνεχίζει με το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας. Το μητρώο δυσκαμψίας μέσω του Newton-Raphson ενημερώνει σε κάθε υποστάδιο το μητρώο δυσκαμψίας κάτι το οποίο δεν συναντάται σε άλλες μορφές ανάλυσης. Με την παραπάνω μέθοδο το πρόγραμμα δημιουργεί τις ρωγμές με κατάλληλη διαμόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας. Επομένως το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται έχει την δυνατότητα σχηματισμού ρωγμών με διαμόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας του στοιχείου και όχι σχηματισμό διακριτών ρωγμών.

Για την συμπεριφορά του υλικού από σκυρόδεμα έχουμε διαλέξει την επιλογή Multilinear Elastic Analysis. Αυτή η επιλογή περιγράφει μια συντηρητική απόκριση όπου κατά την διάρκεια της εκφόρτωσης ακολουθεί το ίδιο μονοπάτι τάσεων-παραμορφώσεων που είχε σχηματίσει κατά την διάρκεια της φόρτισης. Έτσι αυτή η επιλογή, για σχετικά μεγάλα βήματα φόρτισης, μπορεί να είναι κατάλληλη για μοντέλα που ενσωματώνουν αυτό το είδος της γραμμικότητας υλικού. Η συγκεκριμένη επιλογή συνεργάζεται με τους πίνακες MELAS και με το κριτήριο Newton-Raphson. Η φόρμα εισόδου είναι παρόμοια με αυτή που απαιτείται για την Multilinear Isotropic Hardening.

5.1.1 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ένα επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου στοιχείου που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση του σκυροδέματος είναι ότι μπορεί να προβλέψει την αστοχία είτε σε εφελκυσμό είτε σε θλίψη. Στις αναλύσεις που διεξάγουμε καθορίζουμε ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο αριθμό βημάτων στα οποία εφαρμόζεται η δύναμη-μετατόπιση. Αν η σύγκλιση γίνεται ομαλά η δύναμη που εφαρμόζεται θα αυξάνεται μέχρι το μέγιστο που μπορεί.

Αν η σύγκλιση γίνεται δύσκολα η δύναμη που εφαρμόζεται μειώνεται στο ελάχιστο που μπορεί.

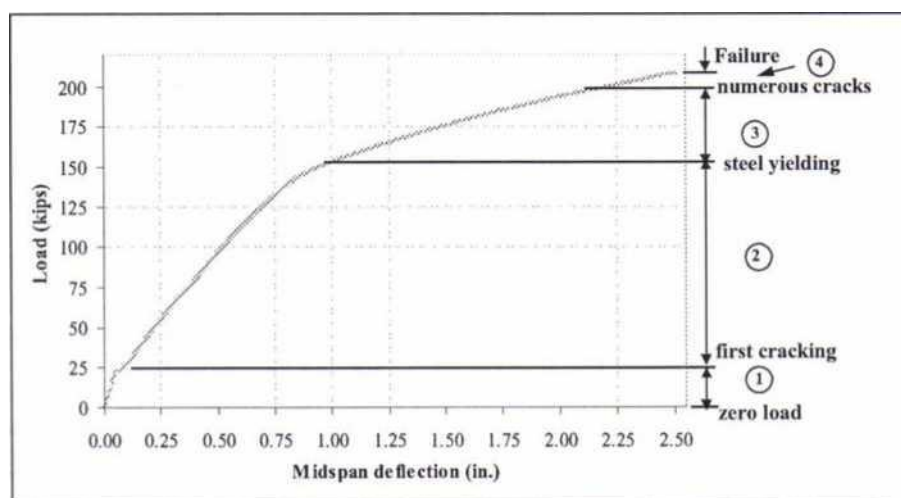
Η ιστορία φόρτισης μπορεί να χωριστεί σε 4 κλάδους ανάλογα με την δυσκολία της σύγκλισης (σχήμα):

ΚΛΑΔΟΣ 1 : Γραμμικός κλάδος : Η εφαρμοζόμενη δύναμη μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.

ΚΛΑΔΟΣ 2 : Αρχίζουν οι ρηγματώσεις : Μικρότερη εφαρμοζόμενη δύναμη.

ΚΛΑΔΟΣ 3 : Αρχίζει και η διαρροή του χάλυβα : Ακόμα μικρότερη εφαρμοζόμενη δύναμη.

ΚΛΑΔΟΣ 4 : Μεγάλος αριθμός ρωγμών : Μια μικρή εφαρμοζόμενη δύναμη αδυνατεί να συγκλίνει



ΕΙΚΟΝΑ 5.2:ΣΤΑΔΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ

Για την προσομοίωση του διαμήκης αλλά και του εγκάρσιου σπλισμού μας χρησιμοποιούμε ξεχωριστό στοιχείο από αυτό που χρησιμοποιήσαμε για το σκυρόδεμα αφού οι ιδιότητες του χάλυβα, οι αντοχές αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες του είναι τελείως διαφορετικές. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε το λεγόμενο στοιχείο **LINK 8** του προγράμματος ANSYS.

Γενικά το στοιχείο **LINK 8** χρησιμοποιείται για την διακριτοποίηση γραμμικών στοιχείων που παραλαμβάνουν μόνο αξονικά φορτία, όπως μέλη δικτυωμάτων, ράβδοι, καλώδια, στοιχεία μηχανών κ.α. Έχει την δυνατότητα να δέχεται πλαστικές παραμορφώσεις, καθώς και παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, ερπυσμού και άλλων παραγόντων. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιβολής δύναμης προέντασης ή αντίστοιχα αρχικής παραμόρφωσης. Το στοιχείο ορίζεται από δύο κόμβους, το εμβαδό διατομής του, την αρχική παραμόρφωση και τις ιδιότητες του υλικού το οποίο αντιπροσωπεύει. Οι ιδιότητες αυτές είναι το μέτρο ελαστικότητας, η πυκνότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής και ο λόγος Poisson.

Μετά την επίλυση ενός προβλήματος τα αποτελέσματα που μπορούμε να πάρουμε για το στοιχείο αυτό είναι τα ακόλουθα: η αξονική τάση, η αξονική ελαστική παραμόρφωση, η αξονική πλαστική παραμόρφωση, η αξονική αρχική παραμόρφωση, η ισοδύναμη τάση από το διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης, η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, η ερπυστική παραμόρφωση και οι παραμορφώσεις λόγω διόγκωσης.

5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Ως ελαστικό χάλυβα εννοούμε στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία τον χάλυβα που έχει χρησιμοποιηθεί για την έδραση των στηρίξεων και την πλάκα έδρασης του επιβαλλόμενου φορτίου από την μηχανή στο δοκίμιο. Για την ανάπτυξη αυτών των στοιχείων στο ANSYS χρησιμοποιήσαμε διαφορετικό στοιχείο από το **LINK 8** καθώς υπάρχουν διαφορές μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο αυτών υλικών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε το **SOLID 45**. Το **SOLID45** χρησιμοποιείται για την 3-D μοντελοποίηση των στερεών δομών. Το στοιχείο ορίζεται από οκτώ κόμβους που έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Το στοιχείο αυτό έχει τις εξής ιδιότητες. Πλαστικότητα, ερπυσμός, οίδημα, τάση δυσκαμψίας, μεγάλη παραμόρφωση, και μεγάλες δυνατότητες σε ένταση. Μια μειωμένη δυνατότητα ένταξης με έλεγχο κλεψύδρα είναι διαθέσιμη.

5.4 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ-ΧΑΛΥΒΑ

Στην συγκεκριμένη πτυχιακή έχουμε κάνει την παραδοχή για την ανάπτυξη του μοντέλου μας ότι η συνάφεια μεταξύ του χάλυβα σπλισμού και του σκυροδέματος είναι πλήρης. Αυτό ισχύει για απλοποιημένες αναλύσεις κατασκευών και αφού στην συγκεκριμένη περίπτωση αναλύουμε το $\frac{1}{4}$ της δοκού μπορούμε να την εφαρμόσουμε αυτή την παραδοχή. Έτσι, δεχόμαστε ότι η τάση που υπάρχει μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος είναι αμελητέα. Στην πραγματικότητα όμως στις ρηγματωμένες περιοχές υπάρχει μεγάλη μεταφορά τάσεων.

Πρέπει να τονιστεί ότι το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να εξετάσει την συμπεριφορά των στοιχείων από σπλισμένο σκυρόδεμα μέχρι την επιβολή του μέγιστης τιμής του φορτίου ανεξάρτητα από την μέθοδο ανάλυσης που έχουμε επιλέξει. Αυτό ωστόσο δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να συγκρίνουμε εάν τελικά υπάρχει σύγκλιση μεταξύ του φορτίου που θα μας υπολογίσει το πρόγραμμα με το φορτίο που είχαμε από την διεξαγωγή του πειραματικού μέρους.

Επίσης σύμφωνα με την βιβλιογραφία φαίνεται να υπάρχει σχετικά καλή πρόβλεψη της καμπύλης δύναμης - μετατόπισης ενώ προβλήματα εμφανίζονται σε ορισμένες περιπτώσεις στην πρόβλεψη του μεγίστου φορτίου.

5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν οι ιδιότητες των παραμέτρων που θα επιλέγουμε στις διάφορες μας δοκιμές. Πηγαίνοντας στο **SOLUTION MENU→ANALYSIS TYPE→SOL N CONTROLS** εμφανίζεται ένα πλαίσιο επιλογών.

5.5.1 Basic Menu

Στο μενού **BASIC** μπορούσε να διαλέξουμε δύο επιλογές ανάλυσης. Είτε την small Displacement Static είτε την Large. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στην Large περιλαμβάνονται και οι επιπτώσεις των μεγάλων εκτροπών στα αποτελέσματα της λύσης. Ωστόσο αυτή η επιλογή δεν ενδείκνυται για όλα τα SOLIDS. Στην επιλογή TIME AT END OF LOADSTEP μας δίνει την δυνατότητα στο τέλος του κάθε σταδίου φόρτισης ποιο θα είναι το διάστημα που θα περάσει μέχρι να ξεκινήσει να ασκείται ο επόμενος κύκλος φόρτισης. Έτσι εάν βάλουμε μικρή τιμή στην συγκεκριμένη επιλογή η σταδιακή επισκόπηση των αλλαγών θα είναι πιο ακριβής ενώ μια μεγαλύτερη τιμή θα δώσει λιγότερες αναγνώσεις και καθώς θα μεταβάλλεται από βήμα σε βήμα θα υπάρχει μεγαλύτερη αλλαγή. Η ποιο συνήθης τιμή που δίνεται είναι το 1, ωστόσο στις δοκιμές μας θα βάλουμε και άλλες τιμές για να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης. Η επιλογή Automatic time stepping επιτρέπει στο πρόγραμμα να καθορίσει το κατάλληλο σημείο για να αλλάξει τα βήματα της φόρτισης. Έτσι μειώνοντας το μέγεθος του βήματος εξασφαλίζει συνήθως καλύτερη ακρίβεια αλλά απαιτείται περισσότερος χρόνος. Με την λειτουργία αυτή καθορίζεται η κατάλληλη ισορροπία επίλυσης. Επίσης, η λειτουργία ενεργοποιεί το χαρακτηριστικό διχοτόμησης που θα επιτρέψει την ανάκτηση της σύγκλισης, αν αποτύχει. Η επιλογή Frequency μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε ποια βήματα να καταγραφθούν.

5.5.2 SOL N OPTIONS MENU

Στο μενού **SOL N' OPTIONS** μπορούμε να διαλέξουμε τους λύτες εξίσωσης. Το προτιμότερο είναι η πρώτη επιλογή που το πρόγραμμα επιλέγει με ποιον τρόπο θα λειτουργήσει. Ωστόσο, θα αναφέρουμε τους άλλους δύο. Ο *sparse direct* λύτης είναι διαθέσιμος στην Στατική Ανάλυση, Harmonic Response ανάλυση, Φασματική Ανάλυση, Buckling Ανάλυση, Transient Δυναμική ανάλυση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γραμμική ή μη γραμμική ανάλυση όπου οι μήτρες αορίστου συναντώνται συχνά. Για την εφαρμογή του απαιτείται μεγαλύτερη μνήμη κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα όταν υπάρχει περιορισμένη μνήμη και έτσι επιβραδύνεται σημαντικά η απόδοση του. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία στις περισσότερες περιπτώσεις το πρόγραμμα επιλέγει τον *sparse direct*. Ο συγκεκριμένος λύτης βασίζεται σε μια άμεση εξάλειψη των εξισώσεων, σε αντίθεση με τους επαναληπτικούς λύτες, όπου η λύση επιτυγχάνεται μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία που βελτιώνει διαδοχικά μια αρχική υπόθεση για μια λύση που είναι μέσα σε ένα αποδεκτό όριο της ακριβούς λύσης. Ο άμεσος λύτης επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει το κόστος της παραγοντοποίησης της μήτρας και το μέγεθος του παράγοντα χρησιμοποιώντας εξελιγμένες μεθόδους αναδιάταξης εξίσωσης. Αντίθετα, οι επαναληπτικοί λύτες (Pre-Condition CG) δεν απαιτούν παραγοντοποίηση πίνακα και συνήθως προχωράει προς την λύση χρησιμοποιώντας μια σειρά από πολύ αραιή μήτρα-διάνυσμα σε συνδυασμό με ένα βήμα προεπεξεργασίας τα οποία απαιτούν λιγότερη μνήμη και χρόνο από την άμεση παραγοντοποίηση. Ωστόσο, η σύγκλιση των επαναληπτικών μεθόδων δεν είναι εξασφαλισμένη και ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτείται για να επιτευχθεί μία αποδεκτή λύση μπορεί να είναι τόσο μεγάλος ώστε οι άμεσες μέθοδοι να είναι ταχύτερες σε ορισμένες περιπτώσεις.

Η PCG λύτης με τη διατύπωση της μήτρας του στοιχείου. Αντί της παραγοντοποίησης στην παγκόσμια μήτρα, η PCG συγκεντρώνει τα παγκόσμια μητρώα δυσκαμψίας και υπολογίζει την DOF λύση με την επανάληψη της σύγκλισης ξεκινώντας από μια αρχική λύση για όλα τα DOF'S. Ο συγκεκριμένος λύτης χρησιμοποιεί ένα ιδιόκτητο προρρυθμιστήρα που είναι τα υλικά και το εξαρτώμενο

στοιχείο. Η συγκεκριμένη λύση σύμφωνα με την βιβλιογραφία συνήθως είναι 4 έως 10 φορές γρηγορότερη από της μεθόδους άμεσης λύσης για δομικά στοιχεία στερεών και πάνω από 10 φορές γρηγορότερη για κελυφωτά στοιχεία. Στις περισσότερες στατικές αναλύσεις και μη γραμμικές αποδίδει καλά αν και η συγκεκριμένη λύτης χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση μετακινήσεων-στροφών σε δομικές αναλύσεις και σε θερμικές αναλύσεις. Η λύση αυτή μπορεί επίσης να συνεργαστεί με το κριτήριο Newton-Raphson, όπου μέσω του κριτηρίου αυτού εάν χάσει επαφή σε ένα υποστάδιο, θα λάβει εντολή για να εκτελέσει μια διχοτόμηση.

5.5.3 NONLINEAR MENU

Στο μενού **NONLINEAR** έχουμε την δυνατότητα να θέσουμε ένα μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ισορροπίας που θα εκτελούνται σε κάθε υπό-βήμα προκειμένου να καταλήξουμε σε μια λύση που να υπάρχει σύγκλιση. Η Επιλογή **LINE SEARCH** αποτελεί ένα εργαλείο σύγκλισης-ενίσχυσης το οποίο πολλαπλασιάζει την αύξηση της μετατόπισης μέσω ενός προγράμματος-παράγοντα κλίμακας, που έχει μια τιμή μεταξύ 0 και 1, όταν εντοπίσει δύσκαμπτη συμπεριφορά. Η επιλογή Pro. Chosen ανάλογα με το πρόβλημα επιλέγει αν πρέπει να θέσει ON ή OFF την Line Search και μπορεί και να την εναλλάσσει κατά την διάρκεια των βημάτων. Όταν υπάρχει επιβαλλόμενη μετατόπιση, ένα τρέξιμο δεν μπορεί να συγκλίνει έως ότου μια από τις επαναλήψεις να παρουσιάσει γραμμή αναζήτησης με τιμή ίση με 1.

Η επιλογή **DOF Solution Predictor** ενεργοποιείται αυτόματα από το πρόγραμμα εάν δεν είναι παρών το στοιχείο **SOLID 65**. Επίσης εάν το βήμα του χρόνου στο τρέχον υποστάδιο είναι πολύ μειωμένο τότε η επιλογή αυτή απενεργοποιείται αυτόματα. Το πρόγραμμα μας παρέχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσουμε την επιλογή αυτή μετά την πρώτη επανάληψη ισορροπίας του κάθε υποβήματος ξεχωριστά και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς επιταχύνει την σύγκλιση.

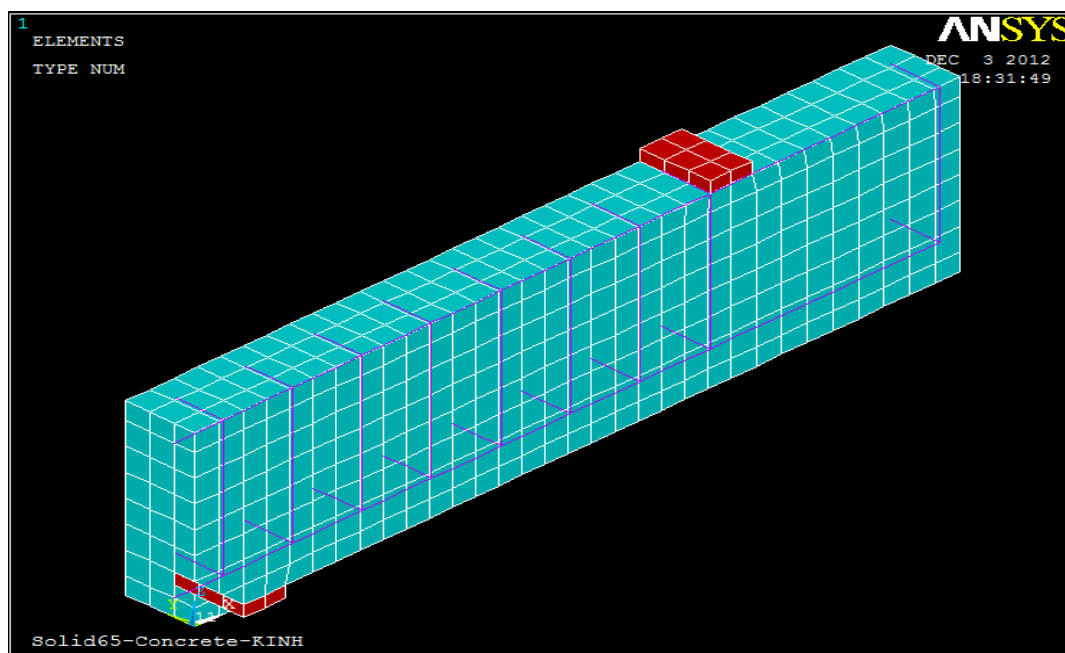
Στο συγκεκριμένο μενού υπάρχει και η επιλογή **VT SPEED UP**. Η επιλογή αυτή διαλέγει έναν προηγμένο διορθωτικό-προγνωστικό αλγόριθμο ο οποίος είναι βασισμένος σε μεταβολική τεχνολογία για τη μείωση του συνολικού αριθμού των επαναλήψεων. Η επιλογή αυτή εφαρμόζεται στις αναλύσεις που περιλαμβάνουν μεγάλη απόκλιση όπως σε περιπτώσεις μη γραμμικού ερπυσμού. Πλαστικές και μη γραμμικές αναλύσεις ανεξάρτητα από το βαθμό επαφής τους δεν παρουσιάζουν καμία βελτίωση στα ποσοστά σύγκλισης. Ωστόσο εάν κάποιος θέλει να πραγματοποιήσει αλλαγές στις παραμέτρους εισόδου μετά την επίλυση τότε μπορεί να επιλέξει αυτή την λειτουργία και για μη γραμμικές αναλύσεις.

Το πρόγραμμα εκτελεί επαναλήψεις ισορροπίας έως ότου ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης ή μέχρι να επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ισορροπίας που θα έχουμε επιλέξει προηγουμένως. Ο αυτόματος έλεγχος λύσης του προγράμματος έχει σαν προεπιλογή να χρησιμοποιεί τον κανόνα της δύναμης ονομαζόμενο ως **L2 NORM** και ανοχή (TOLER) ίση με 0.5% μια ρύθμιση κατάλληλη για πληθώρα περιπτώσεων. Από προεπιλογή το πρόγραμμα ελέγχει για δυνατότητα σύγκλισης, και όταν η περιστροφή των βαθμών ελευθερίας είναι ενεργή, συγκρίνοντας την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των ανισόροπων δυνάμεων με το γινόμενο των τιμών που έχουν τεθεί στις αξίες VALUE και TOLER. Εκτός από τον κανόνα **L2NORM** το πρόγραμμα μας παρέχει και άλλους δύο διαφορετικούς κανόνες διανύσματος που μπορούμε να εφαρμόσουμε για τον έλεγχο σύγκλισης. Ο κανόνας **L1NORM** συγκρίνει το κριτήριο σύγκλισης έναντι του αθροίσματος των απόλυτων τιμών των δυνάμεων ανισορροπίας για όλα τα DOFs. Η **INFINITE NORM** ή αλλιώς άπειρα κανόνας επαναλαμβάνει για κάθε DOF του μοντέλου επίλυσης ξεχωριστό έλεγχο.

6. ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ ANSYS

6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΤΟ ANSYS

Η ανάπτυξη του μοντέλου του δοκιμίου μας έγινε με χρήση κώδικα ώστε να μπορούμε κατά την διάρκεια της αλλαγής των παραμέτρων των δοκιμών σύγκλισης να αλλάζουμε τα δεδομένα μας ποιο εύκολα και έτσι η ανάλυση να μας επιφέρει τα αντίστοιχα αποτελέσματα κάθε φορά. Για τις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν έχει αναπτυχθεί το $\frac{1}{4}$ της δοκού έτσι ώστε να μειωθεί δραστικά ο χρόνος επίλυσης της από το πρόγραμμα. Λόγω συμμετρίας της δοκού τα αποτελέσματα θα είναι πλήρως αξιόπιστα όσον αφορά την γεωμετρία του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήσαμε το στοιχείο SOLID65, για τον χάλυβα το LINK8 και θεωρήσαμε ότι υπάρχει πλήρης συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος.



ΕΙΚΟΝΑ 6.1:ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

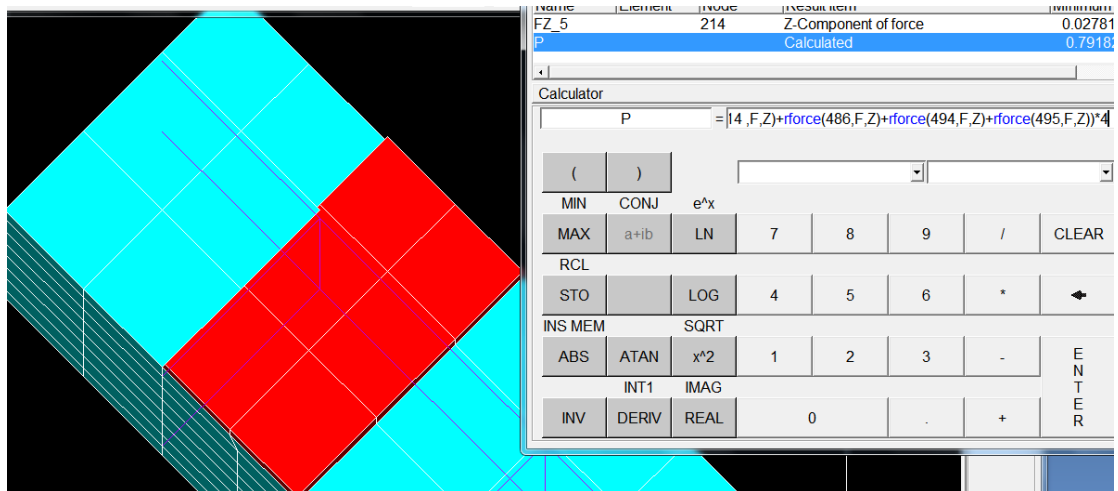
Τα στοιχεία του σκυροδέματος αλλά και των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν έχουν αναλυθεί στην ενότητα του Πειραματικού Μέρους αναλυτικά όπως και οι αποστάσεις των στηρίξεων, των φορτίων. Να σημειωθεί ότι λόγω επίλυσης του $\frac{1}{4}$ της δοκού το φορτίο που δέχεται η πλάκα άσκησης του ισούται με 14 kN λόγω της συμμετρίας της δοκού. Οι πλάκες στήριξης και επιβολής του φορτίου είναι από ελαστικό χάλυβα γι αυτό και για την προσομοίωση τους έχει χρησιμοποιηθεί το στοιχείο **SOLID45**. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν 21 δοκιμές επίλυσης με την χρήση του κώδικα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των επιλύσεων 9 δοκιμών λόγω παρεμφερής συμπεριφοράς των οποίων θα υπολογίσουμε την μετατόπιση και έτσι τελικά θα έχουμε σαν αποτέλεσμα το διάγραμμα φορτίου-χρόνου που είναι και το βασικό μας ζητούμενο. Στις υπόλοιπες μετρήσεις έχουν υπολογιστεί τα μέγιστα φορτία και το βέλος κάμψης και τα αποτελέσματα αυτά στο αρχείο με τους πίνακες των παραμέτρων. Αφού παρουσιαστούν τα διαγράμματα αυτά για κάθε δοκιμή θα δούμε εάν υπάρχει σύγκλιση του μέγιστου φορτίου της ανάλυσης με το μέγιστο φορτίο της πειραματικής δοκιμής. Έτσι θα μπορέσουμε να καταλάβουμε ποιες είναι τελικά οι παράμετροι που μας βοηθούν στο να υπάρχει καλύτερη σύγκλιση στον υπολογισμό του φορτίου αστοχίας για καμπτώμενη δοκό οπλισμένου σκυροδέματος.

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΤΟ ANSYS

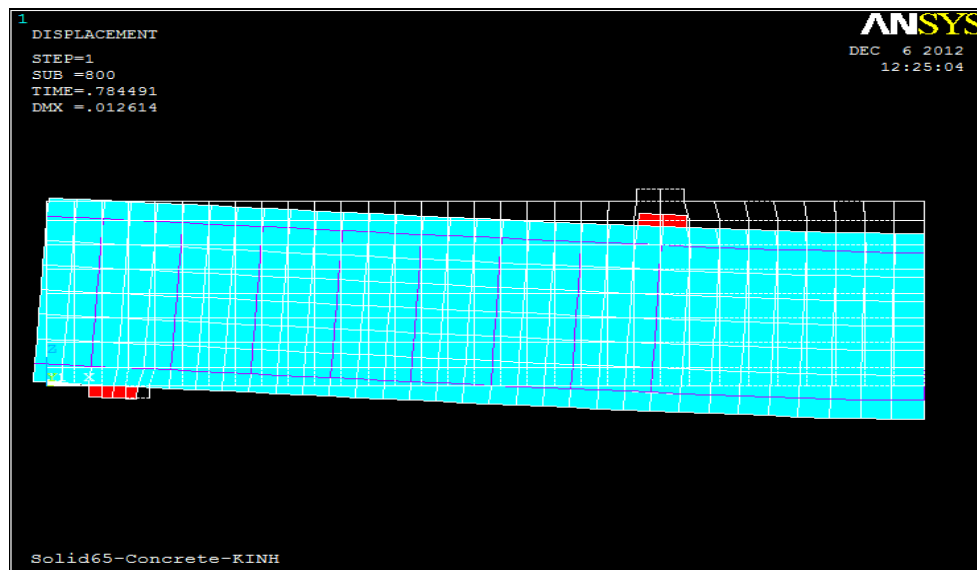
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι δοκιμές που έγιναν για την επίλυση του δοκιμίου στο ANSYS με διαφορετικές παραμέτρους επίλυσης στην κάθε δοκιμή. Αφού σχηματίζαμε την δοκό στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του κώδικα στην συνέχεια από το **SOLUTION→ANALYSIS TYPE→SOL N CONTROLS** αλλάζοντας τις παραμέτρους κάθε φορά επιλύναμε την δοκό. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρατίθονται αναλυτικά οι παράμετροι που έχουν τεθεί για κάθε δοκιμή. Οι δοκιμές έγιναν σε περιβάλλον Windows7 32 bit.

6.2.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 1

Αφού η λύση της δοκού ολοκληρώθηκε επιτυχώς με της παραμέτρους που είχαν τεθεί βρέθηκε η αντίδραση κατά τον άξονα Z στην πλάκα στήριξης που ισούται με το φορτίο μας.

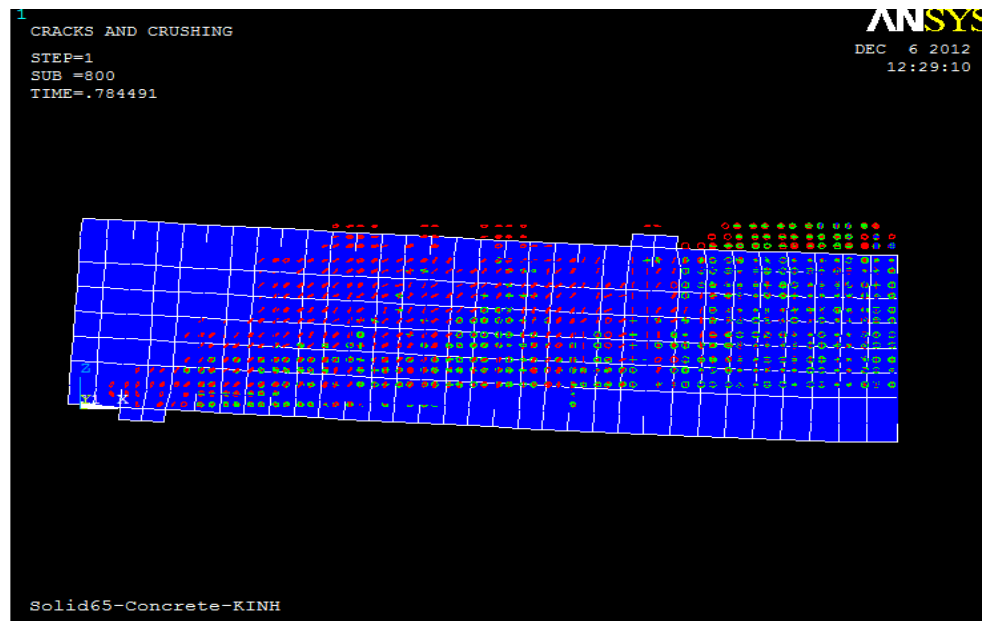


ΕΙΚΟΝΑ 6.2:ΕΥΡΕΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗΝ ΣΤΗΡΙΞΗ



ΕΙΚΟΝΑ 6.3:ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η αρχική θέση του δοκιμίου μας και επίσης παρουσιάζεται και η τελική της παραμορφωμένη θέση έτσι ώστε να γίνεται οπτικά κατανοητό το μέγεθος της μετατόπισης στο μέσον της δοκού, εκεί δηλαδή που θα υπολογίσουμε το βέλος κάμψης.



ΕΙΚΟΝΑ 6.4:ΑΠΕΙΚΩΝΙΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	0.001	1	☑
FZ_2		495	Z-Component of force	0.0347513	1.83148	○
FZ_3		494	Z-Component of force	0.0699826	3.48679	○
FZ_4		486	Z-Component of force	0.0654027	3.38908	○
FZ_5		214	Z-Component of force	0.0278196	1.97996	○
P			Calculated	0.791825	42.7492	☑

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1:ΕΥΡΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ(KN)

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι τιμές των φορτίων που παραλαμβάνει ο κάθε κόμβος από τους τέσσερις της πλάκας στήριξης. Αφού έχουμε την τιμή του φορτίου για κάθε κόμβο με την εξής σχέση βρίσκουμε το συνολικό φορτίο για κάθε μας δοκιμή.

$$P=(rforce(214,F,Z)+rforce(486,F,Z)+rforce(494,F,Z)+rforce(495,F,Z))*4$$

Σχέση εύρεσης μέγιστου φορτίου

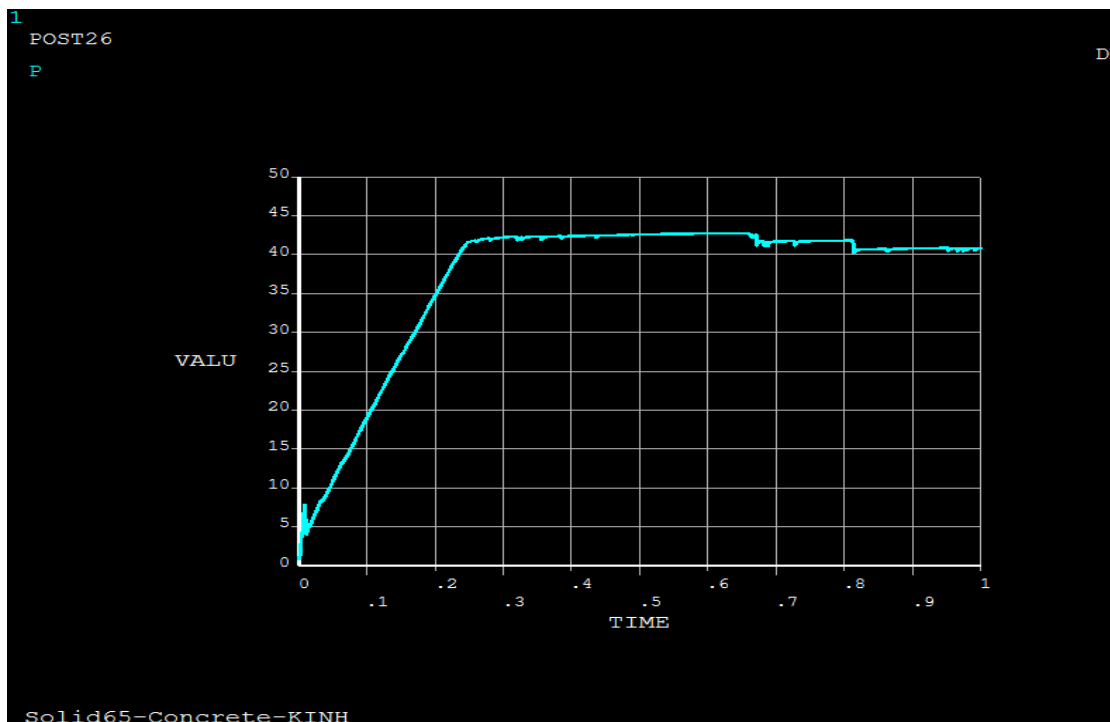
Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
	Time	0.001	1	○
495	Z-Component of force	0.0347513	1.83148	○
494	Z-Component of force	0.0699826	3.48679	○
486	Z-Component of force	0.0654027	3.38908	○
214	Z-Component of force	0.0278196	1.97996	○
	Calculated	0.791825	42.7492	○
971	Z-Component of displacement	-0.0156582	-1.36339e-005	○
970	Z-Component of displacement	-0.0155094	-1.36159e-005	○
980	Z-Component of displacement	-0.0153001	-1.35998e-005	○
981	Z-Component of displacement	-0.0152614	-1.35944e-005	○
	Calculated	1.3611e-005	0.0154323	●

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2:ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ U(M)

Από τον πίνακα φαίνεται για τον κάθε κόμβο στο μέσο της δοκού (971, 970, 980, 981) η μετατόπιση και στο τέλος με την εξής σχέση υπολογίζουμε την συνολική μετατόπιση.

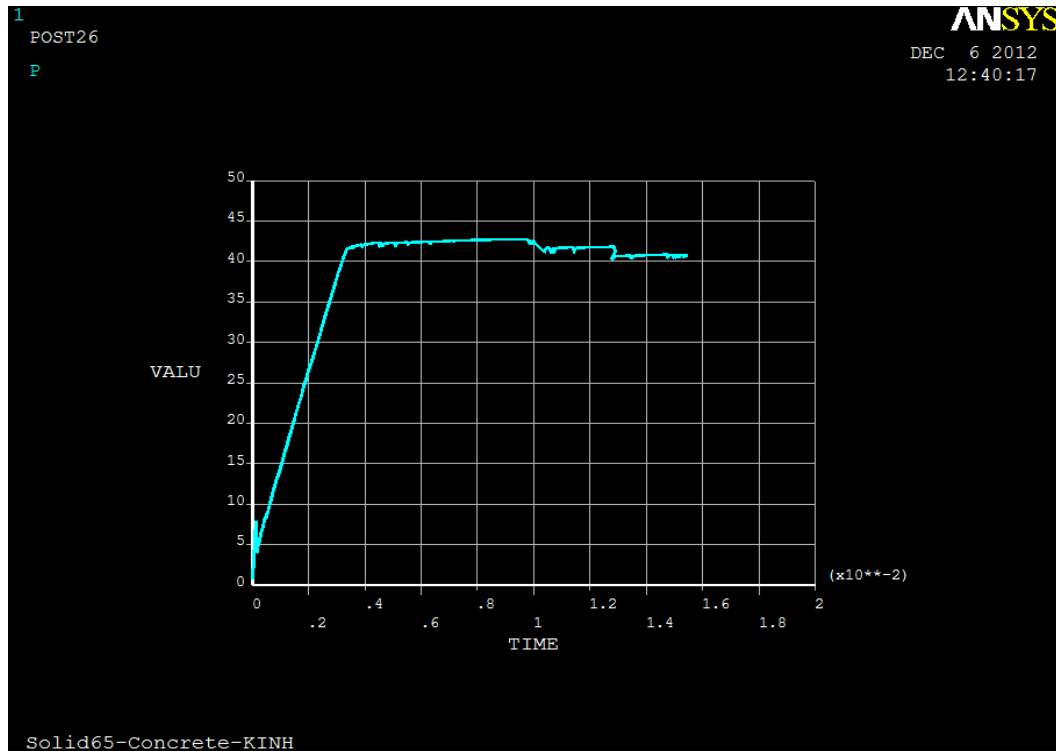
$$U = (\text{nsol}(971, U, Z) + \text{nsol}(970, U, Z) + \text{nsol}(980, U, Z) + \text{nsol}(981, U, Z)) / 4$$

Σχέση Υπολογισμού Μετατόπισης



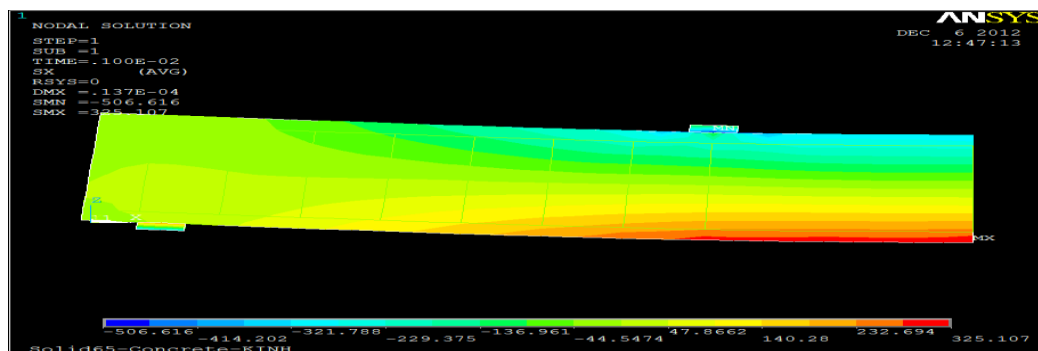
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΧΡΟΝΟΥ

Αφού έχουμε υπολογίσει το μέγιστο φορτίο P και το βέλος κάμψης από τους πίνακες που έχουν παρατεθεί παραπάνω μπορούμε να κάνουμε το διάγραμμα Φορτίου P (kN) - Βέλους Κάμψης (m) το οποίο απεικονίζεται αμέσως παρακάτω.



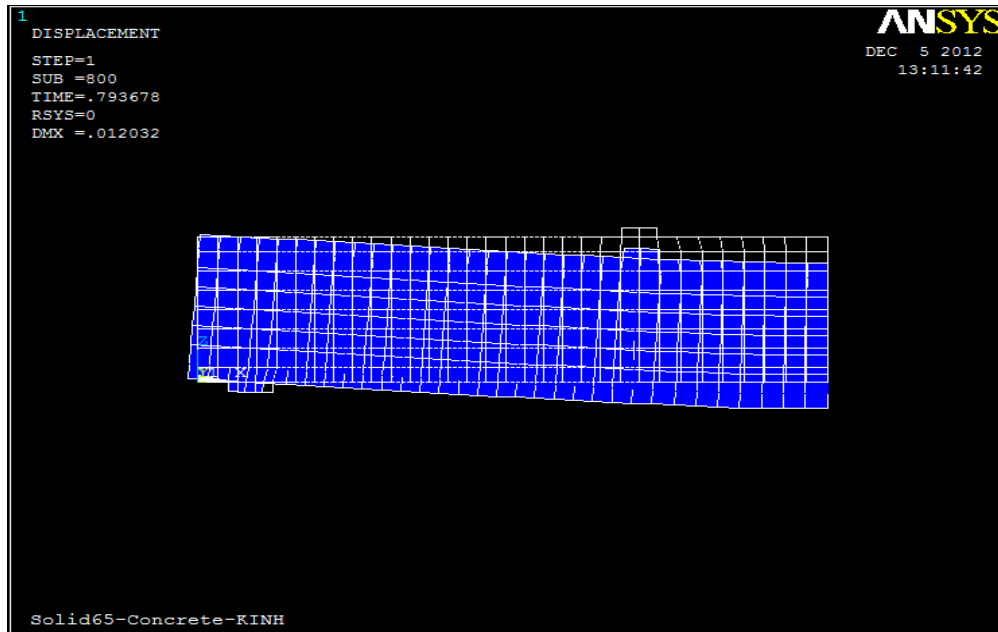
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.2:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P-U

Με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS έχουμε επίσης την δυνατότητα να δούμε την τάση της δοκού σε όλο το μήκος της αφού λόγω συμμετρίας ότι ισχύει για το μοντέλο μας θα ισχύει και για την υπόλοιπη δοκό.



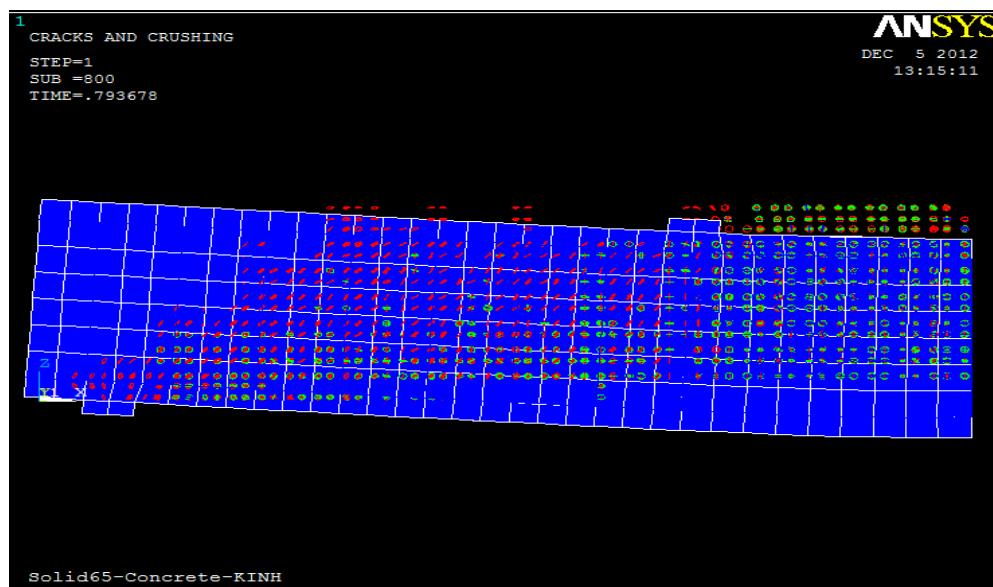
ΕΙΚΟΝΑ 6.5:ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟΝ Χ ΑΞΟΝΑ

6.2.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 2



ΕΙΚΟΝΑ 6.6:ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η παραμόρφωση του δοκιμίου για την δοκιμή 2. Το πρόγραμμα έχει επίσης την δυνατότητα να μας παρουσιάζει τις ρωγμές που εμφανίστηκαν. Αυτό φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



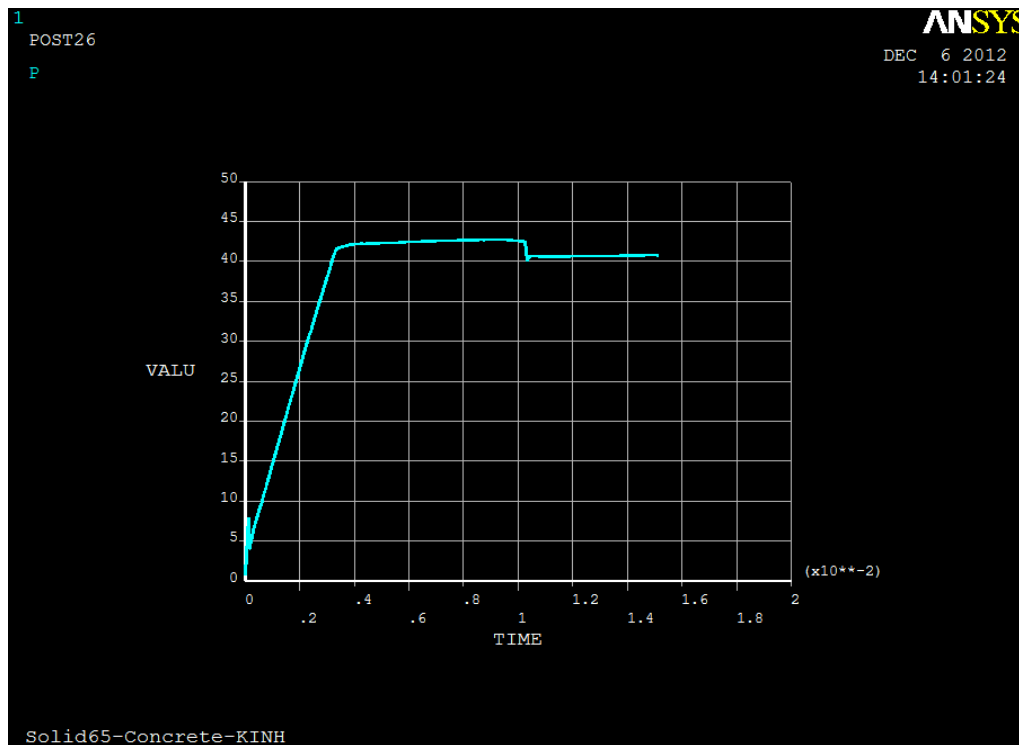
ΕΙΚΟΝΑ 6.7:ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	0.001	1	<input checked="" type="radio"/>
FZ_2		495	Z-Component of force	0.0347513	1.80013	<input type="radio"/>
FZ_3		494	Z-Component of force	0.0699826	3.44696	<input type="radio"/>
FZ_4		486	Z-Component of force	0.0654027	3.43003	<input type="radio"/>
FZ_5		214	Z-Component of force	0.0278196	2.00314	<input type="radio"/>
P			Calculated	0.791825	42.7206	<input checked="" type="radio"/>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3:ΕΥΡΕΣΗ P(KN)

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
971			Z-Component of displacement	-0.015252	-1.36339e-005	<input type="radio"/>
970			Z-Component of displacement	-0.0151493	-1.36159e-005	<input type="radio"/>
980			Z-Component of displacement	-0.0150113	-1.35998e-005	<input type="radio"/>
981			Z-Component of displacement	-0.0149835	-1.35944e-005	<input type="radio"/>
			Calculated	1.3611e-005	0.015099	<input checked="" type="radio"/>

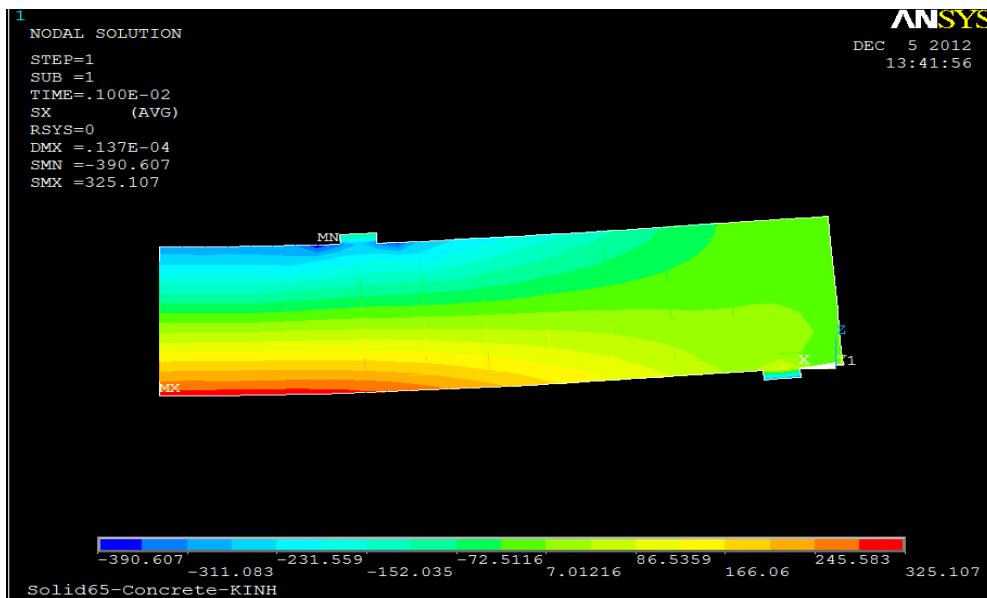
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4:ΕΥΡΕΣΗ U



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.3:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ-ΦΟΡΤΙΟΥ

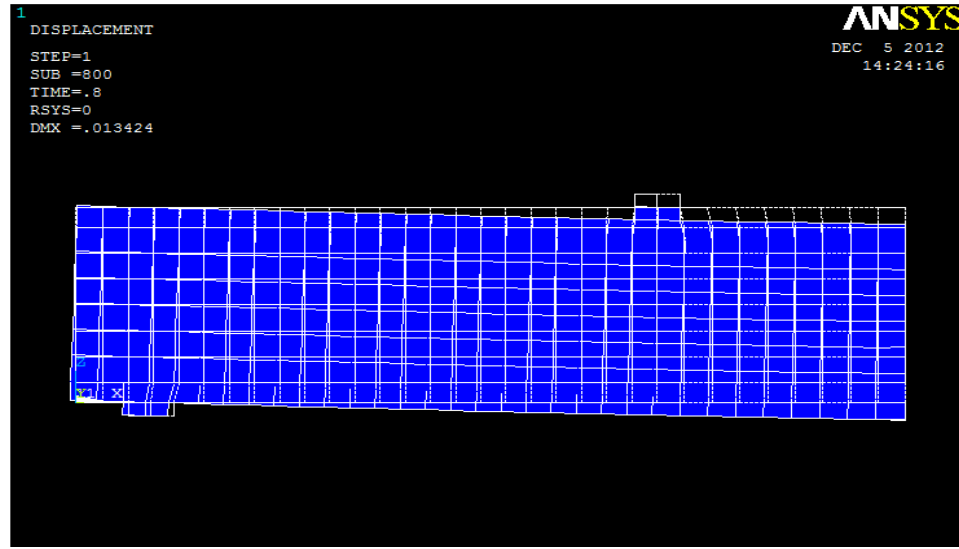
Στο παραπάνω διάγραμμα έχει υπολογιστεί η μετατόπιση στους 4 κόμβους στην μέση της ολόκληρης δοκού και με τους σωστούς υπολογισμούς με την βοήθεια του ANSYS έχει διατυπωθεί η ολική μετατόπιση που όπως φαίνεται από το διάγραμμα ισούται με 15 mm. Με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS έχουμε επίσης την δυνατότητα να δούμε την τάση της δοκού σε όλο το μήκος της αφού

λόγω συμμετρίας ότι ισχύει για το μοντέλο μας θα ισχύει και για την υπόλοιπη δοκό. Παρουσιάζεται εικόνα που απεικονίζει την τάση για την δοκιμή 2.

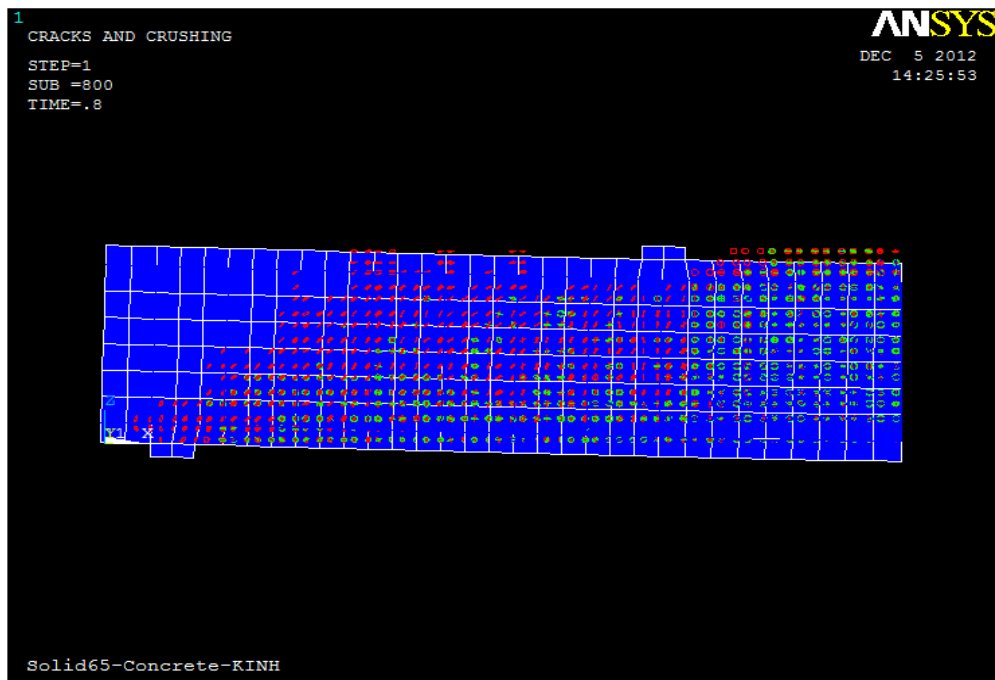


ΕΙΚΟΝΑ 6.8:ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΔΟΚΟΥ

6.2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 3



ΕΙΚΟΝΑ 6.9:ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΟΥ ΣΤΗΝ ΔΟΚΙΜΗ 3



ΕΙΚΟΝΑ 6.10:ΑΠΕΙΚΩΝΙΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ

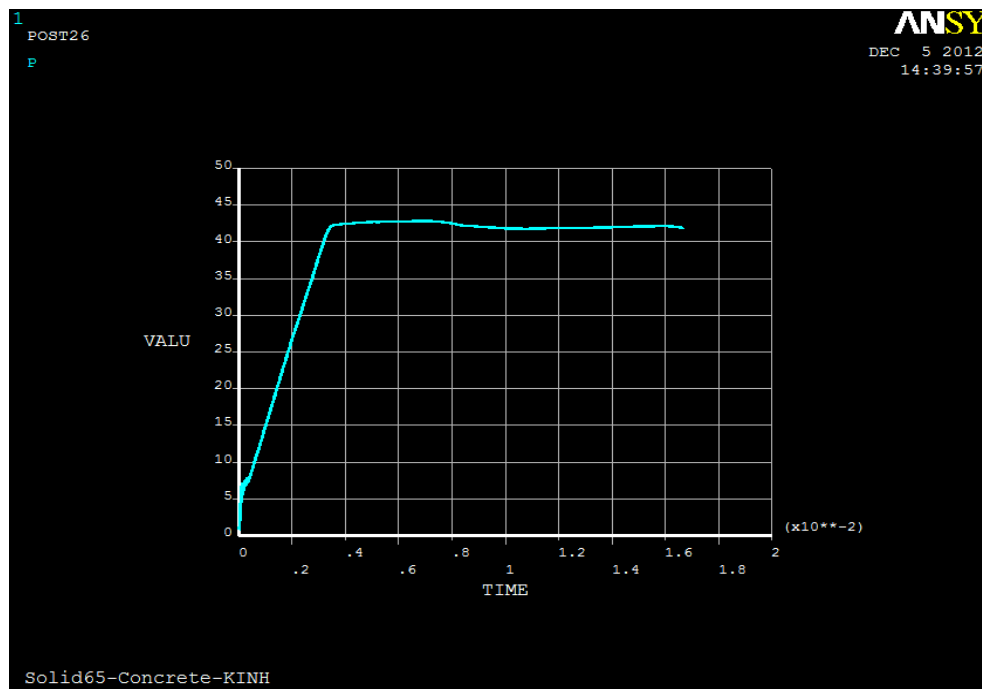
Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum
TIME			Time	0.001	1
FZ_2		495	Z-Component of force	0.0347082	1.80003
FZ_3		494	Z-Component of force	0.0698966	3.50011
FZ_4		486	Z-Component of force	0.0653229	3.42368
FZ_5		214	Z-Component of force	0.0277828	1.99403
P			Calculated	0.790842	42.8646

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5:ΕΥΡΕΣΗ P(KN)

971	Z-Component of displacement	-0.0168284	-1.36339e-005	○
970	Z-Component of displacement	-0.0169912	-1.36159e-005	○
980	Z-Component of displacement	-0.0163951	-1.35998e-005	○
981	Z-Component of displacement	-0.0163077	-1.35944e-005	○
	Calculated	1.3611e-005	0.0166306	●

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6:ΕΥΡΕΣΗ U

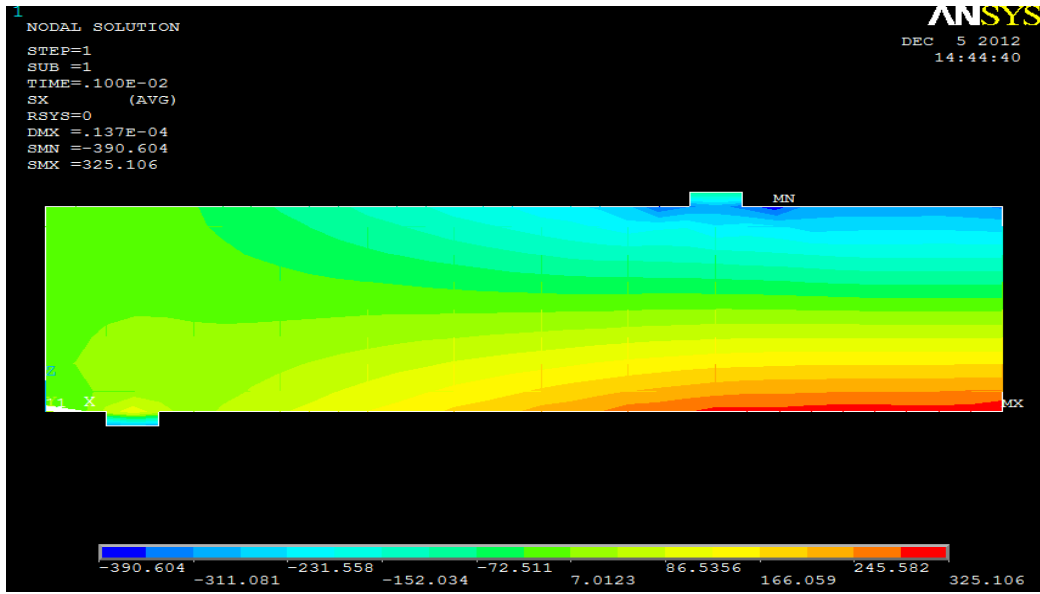
Το διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης που προέκυψε από τα αποτελέσματα των παραμέτρων της συγκεκριμένης δοκιμής είναι το εξής.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.4:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ

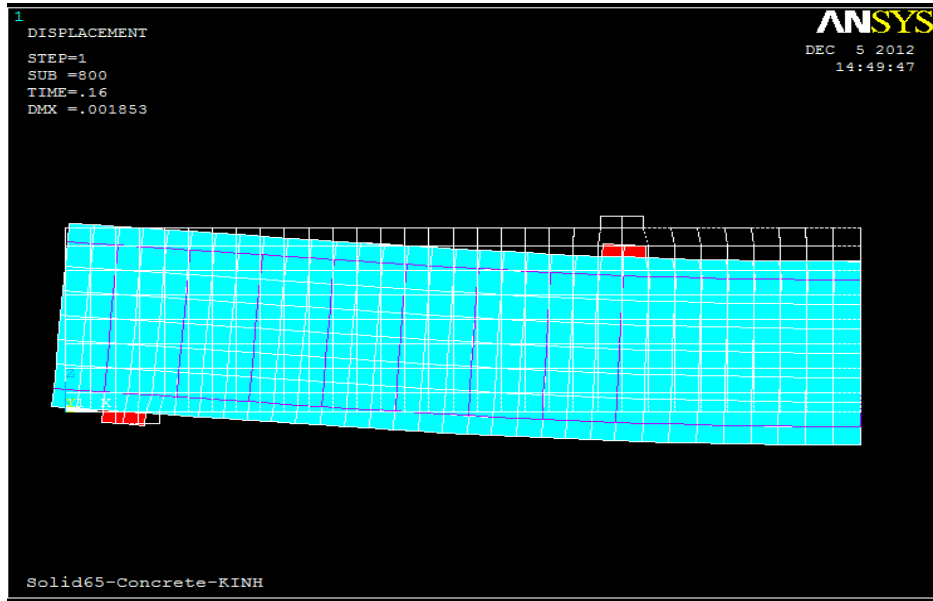
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα και τους πίνακες η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι 42,86 kN σύμφωνα με τους υπολογισμούς με το πρόγραμμα και η μέγιστη μετατόπιση ισούται με 0.1663 m.

Ακολουθεί και εικόνα με την κατανομή των τάσεων στον άξονα X της δοκού.

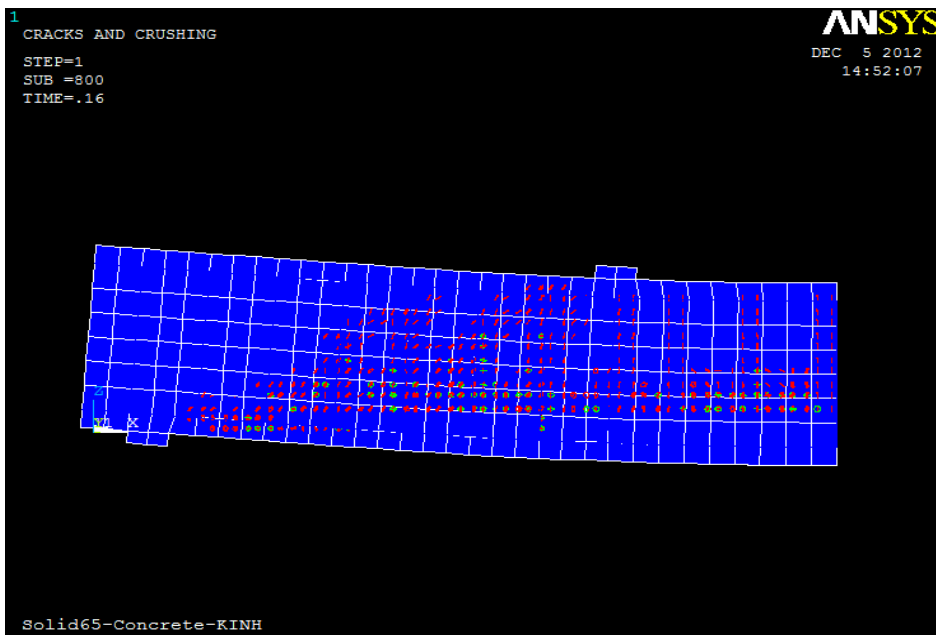


ΕΙΚΟΝΑ 6.11:ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟΝ Χ ΑΞΟΝΑ

6.2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 4



ΕΙΚΟΝΑ 6.12:ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΟΥ



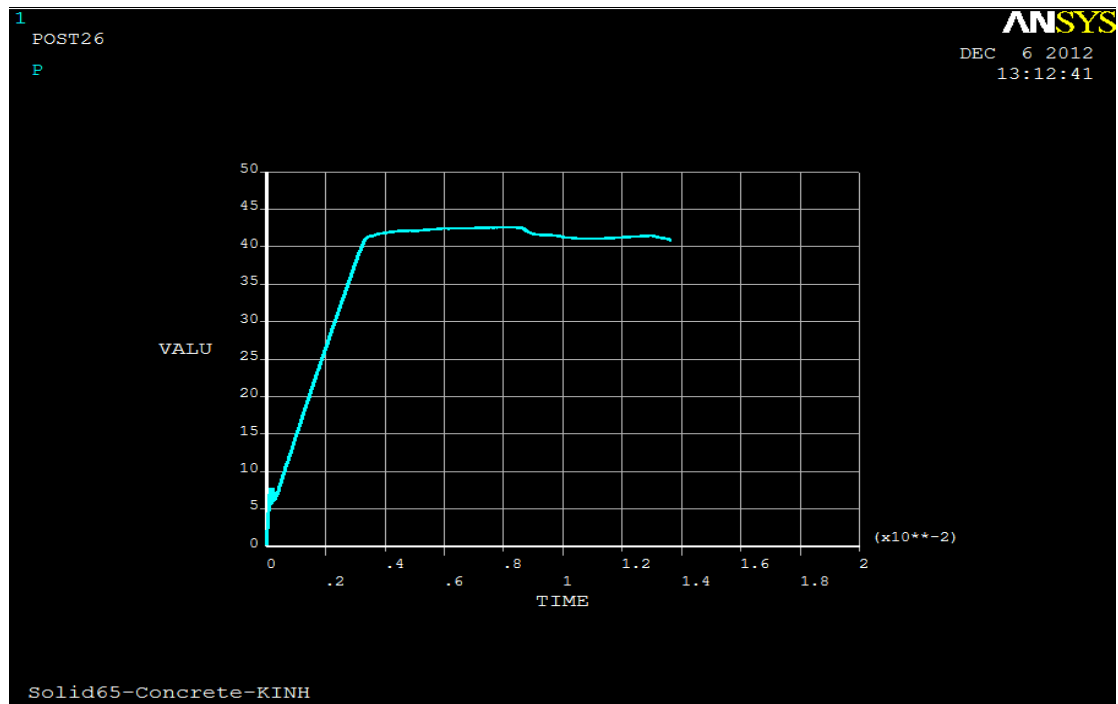
ΕΙΚΟΝΑ 6.13:ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Variable List						
Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-A
TIME			Time	0.0002	1	<input checked="" type="radio"/>
FZ_2		495	Z-Component of force	0.00579211	1.82032	<input type="radio"/>
FZ_3		494	Z-Component of force	0.0116642	3.45609	<input type="radio"/>
FZ_4		486	Z-Component of force	0.0109009	3.39176	<input type="radio"/>
FZ_5		214	Z-Component of force	0.00463679	1.98476	<input type="radio"/>
P			Calculated	0.131976	42.6118	<input checked="" type="radio"/>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7:ΕΥΡΕΣΗ P(KN)

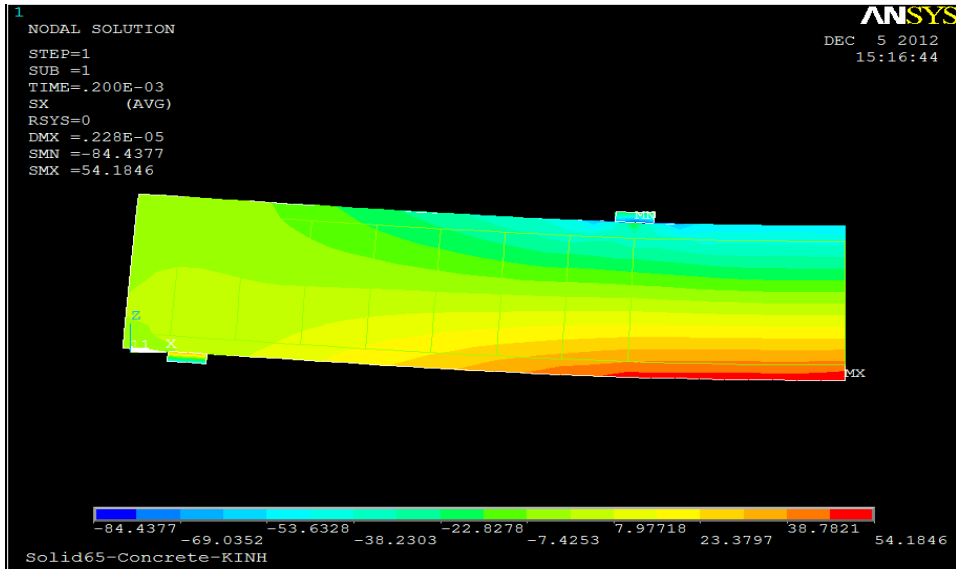
UZ_7		971	Z-Component of displacement	-0.0134662	-2.27232e-006	<input type="radio"/>
UZ_8		970	Z-Component of displacement	-0.0144353	-2.26932e-006	<input type="radio"/>
UZ_9		980	Z-Component of displacement	-0.0133037	-2.26664e-006	<input type="radio"/>
UZ_10		981	Z-Component of displacement	-0.0132424	-2.26574e-006	<input type="radio"/>
U			Calculated	2.2685e-006	0.0136119	<input checked="" type="radio"/>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8:ΕΥΡΕΣΗ U



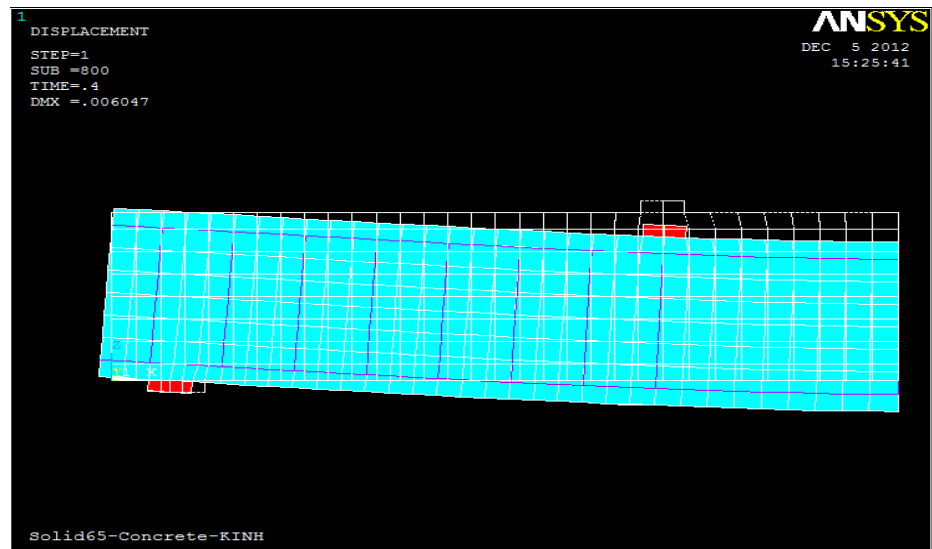
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.5:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΕΛΟΥΣ(U)-ΦΟΡΤΙΟΥ(P)

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι στην προκειμένη επίλυση του μοντέλου η μέγιστη τιμή του φορτίου υπολογίστηκε σε 42,62 kN και το μέγιστο βέλος κάμψης σε 0.01361 mm.

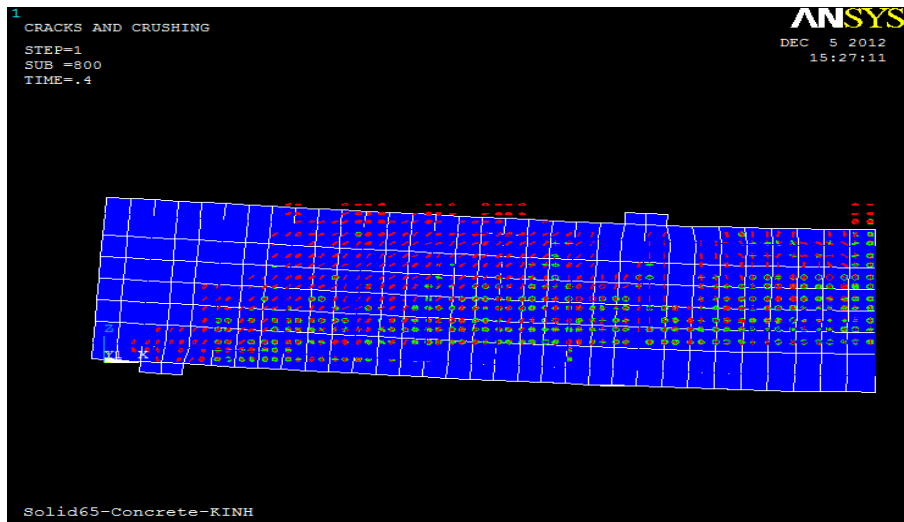


ΕΙΚΟΝΑ 6.14:ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟΝ Χ ΑΞΟΝΑ

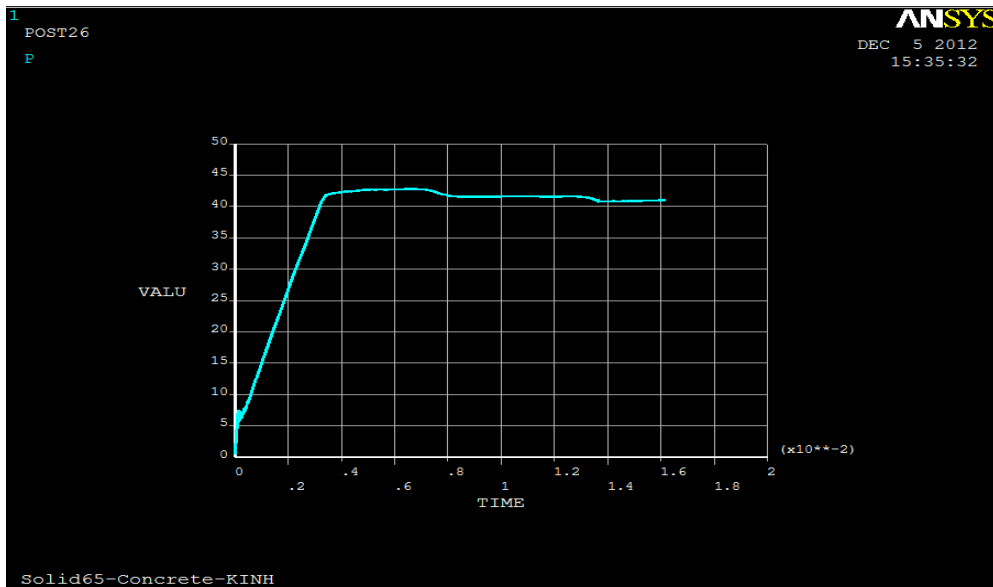
6.2.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 5



ΕΙΚΟΝΑ 6.15:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ-ΤΕΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ



ΕΙΚΟΝΑ 6.16:ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.6:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P(KN)-U

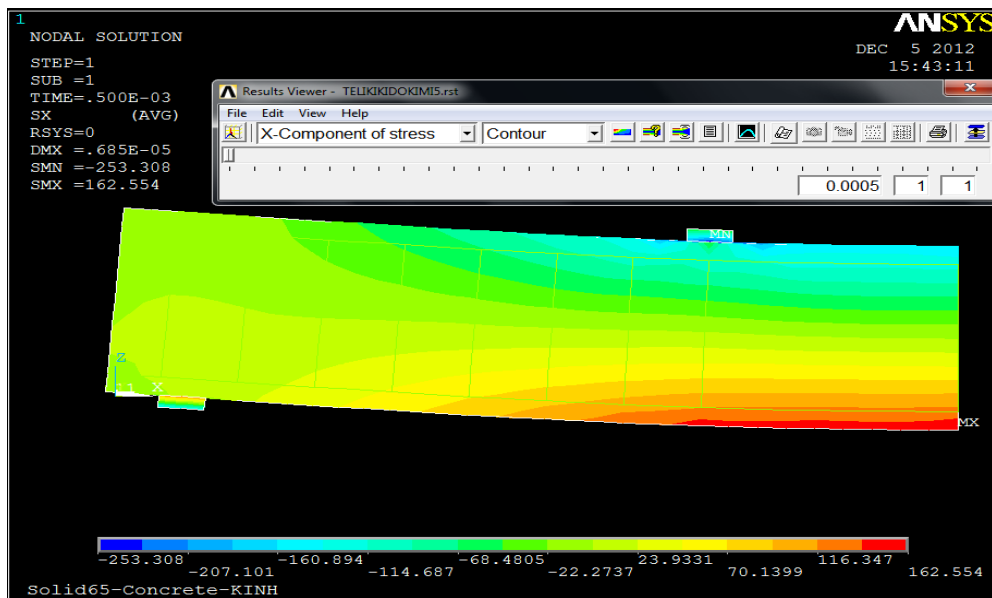
Παρουσιάζεται και ο πίνακας όπου φαίνονται πως υπολογίστηκε το φορτίο και το βέλος κάμψης.

Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
		Time	0.0005	1	
495		Z-Component of force	0.0173756	1.80515	
494		Z-Component of force	0.0349913	3.47578	
486		Z-Component of force	0.0327013	3.42791	
214		Z-Component of force	0.0139098	1.99578	
		Calculated	0.395912	42.8185	
981		Z-Component of displacement	-0.0157892	-6.7972e-006	
980		Z-Component of displacement	-0.015833	-6.79992e-006	
970		Z-Component of displacement	-0.0163639	-6.80794e-006	
971		Z-Component of displacement	-0.0166559	-6.81694e-006	
		Calculated	6.8055e-006	0.0161605	

Calculator	Formula
U	= sol(971 ,U,Z)+nsol(970,U,Z)+nsol(980,U,Z)+nsol(981,U,Z)/4

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.9:ΕΥΡΕΣΗ P-U

Από αυτόν τον πίνακα φαίνεται ότι το φορτίο στην προκειμένη δοκιμή υπολογίστηκε 42,82 kN και το βέλος κάμψης 0,016 m. Οι τιμές που αναγράφονται στην στήλη node είναι οι κόμβοι που χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί και η κατανομή των τάσεων κατά τον άξονα X της παραμορφωμένης δοκού.



ΕΙΚΟΝΑ 6.17:ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ

6.2.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 6

Με τις παραμέτρους που είχαν επιλεγεί για την λύση του μοντέλου μας στην συγκεκριμένη περίπτωση υπήρξε αδυναμία σύγκλισης στο στάδιο load step 1, sub step 108). Οι παράμετροι που είχαν επιλεγεί φαίνονται στο αρχείο που είναι όλες συγκεντρωμένες.

6.2.7 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 7

Στην συγκεκριμένη περίπτωση είχαμε πάλι αδυναμίας σύγκλισης και έτσι το μοντέλο μας δεν επιλύθηκε ώστε να προχωρήσουμε σε υπολογισμούς.

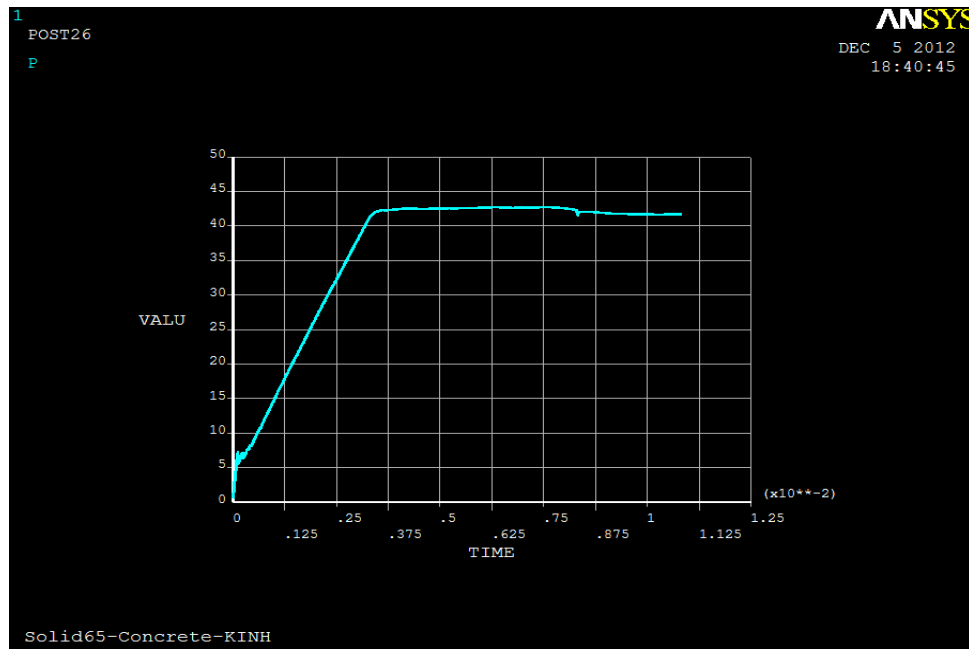
6.2.8 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 8

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-A
TIME			Time	0.001	1	<input checked="" type="radio"/>
FZ_2		495	Z-Component of force	0.0231698	1.83293	<input type="radio"/>
FZ_3		494	Z-Component of force	0.0466597	3.47136	<input type="radio"/>
FZ_4		486	Z-Component of force	0.0436061	3.38036	<input type="radio"/>
FZ_5		214	Z-Component of force	0.0185483	1.99376	<input type="radio"/>
P			Calculated	0.527936	42.7136	<input checked="" type="radio"/>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.10:ΕΥΡΕΣΗ P(KN)

	Calculated	0.527936	42.7136	<input checked="" type="radio"/>
971	Z-Component of displacement	-0.0110909	-9.08928e-006	<input type="radio"/>
970	Z-Component of displacement	-0.0109049	-9.07728e-006	<input type="radio"/>
980	Z-Component of displacement	-0.0106822	-9.06658e-006	<input type="radio"/>
981	Z-Component of displacement	-0.0106211	-9.06296e-006	<input type="radio"/>
	Calculated	9.07402e-006	0.0108248	<input checked="" type="radio"/>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.11:ΕΥΡΕΣΗ U

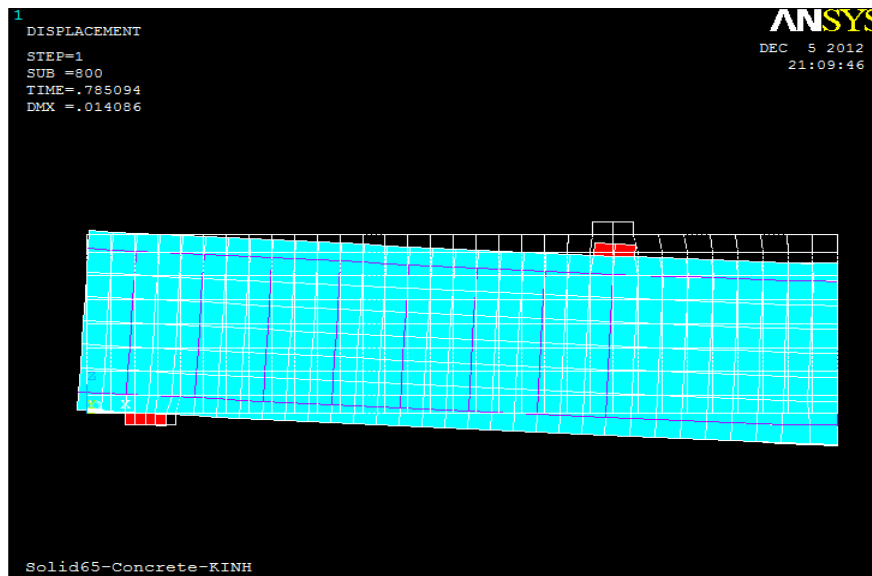


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.9:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P-U

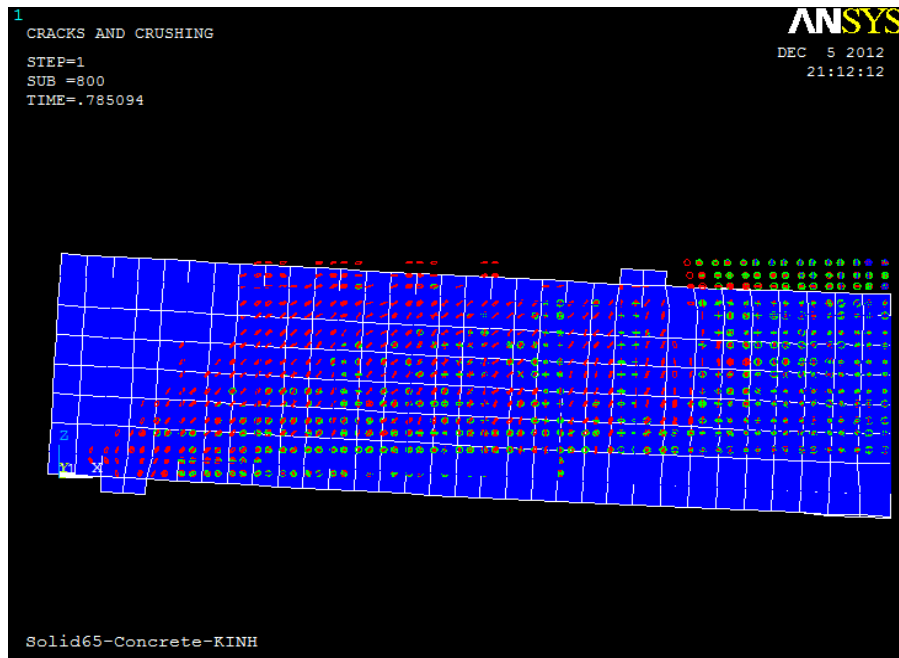
Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι 42,71 kN και το βέλος κάμψης ισούται με 0.0108 m.

6.2.9 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ 9

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η παραμόρφωση που έχει υποστεί η δοκός σε σχέση με την αρχική της θέση.



ΕΙΚΟΝΑ 6.18:ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 6.19:ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

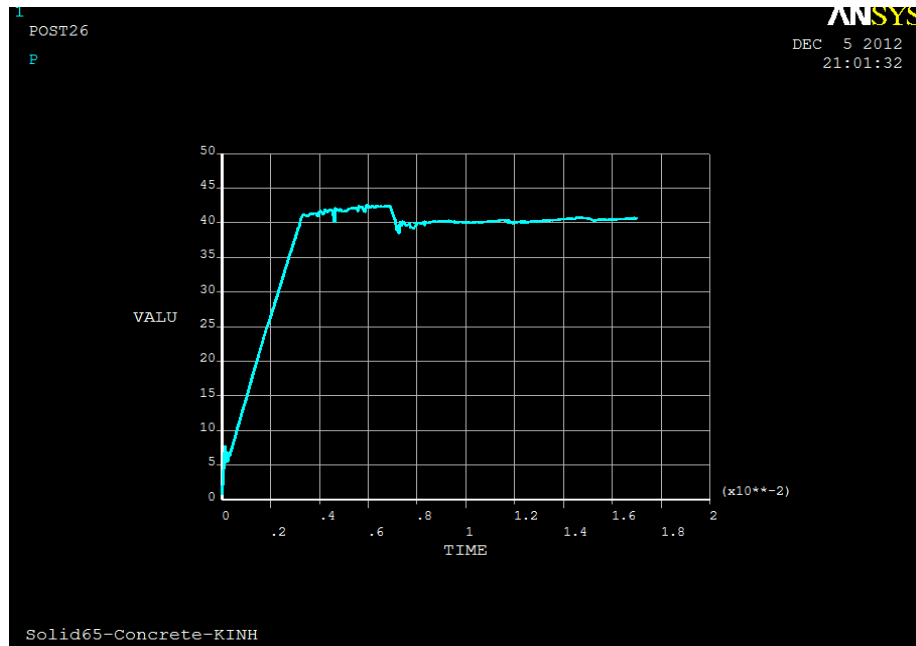
Variable List					
Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum
TIME			Time	0.001	1
FZ_2		495	Z-Component of force	0.0347513	1.72561
FZ_3		494	Z-Component of force	0.0699826	3.39761
FZ_4		486	Z-Component of force	0.0654027	3.48265
FZ_5		214	Z-Component of force	0.0278196	2.05041
P			Calculated	0.791825	42.5166

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.12:ΕΥΡΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
		Time	0.001	1	○
	495	Z-Component of force	0.0347513	1.72561	○
	494	Z-Component of force	0.0699826	3.39761	○
	486	Z-Component of force	0.0654027	3.48265	○
	214	Z-Component of force	0.0278196	2.05041	○
		Calculated	0.791825	42.5166	●
	971	Z-Component of displacement	-0.0173668	-1.36339e-005	○
	970	Z-Component of displacement	-0.0175695	-1.36159e-005	○
	980	Z-Component of displacement	-0.0171655	-1.35998e-005	○
	981	Z-Component of displacement	-0.0159752	-1.35944e-005	○
		Calculated	1.3611e-005	0.0169785	●

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.13:ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ

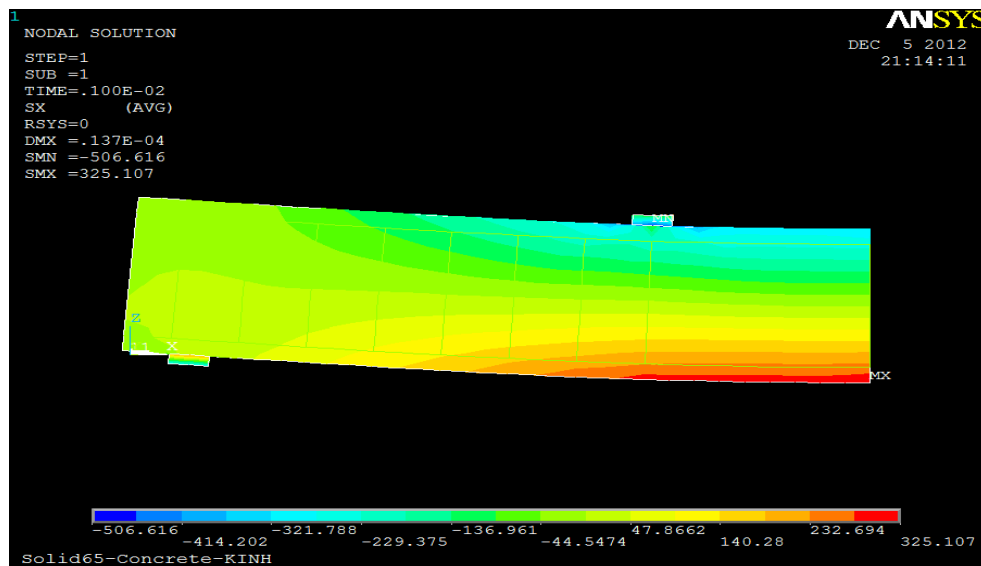
Το διάγραμμα Φορτίου (kN) - Βέλους Κάμψης (mm) είναι αυτό που απεικονίζεται στην συνέχεια.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.10:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ(KN)-ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ(M)

Από τους πίνακες υπολογισμού του μέγιστου φορτίου και του υπολογισμού του βέλους κάμψης αλλά και από το διάγραμμα βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι 42,52 kN και το βέλος κάμψης ισούται με 0,01697 m.

Στην δοκιμή αυτή η κατανομή των τάσεων απεικονίζεται στο επόμενο σχέδιο.



ΕΙΚΟΝΑ 6.20:ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟΝ Χ ΑΞΟΝΑ

7. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ

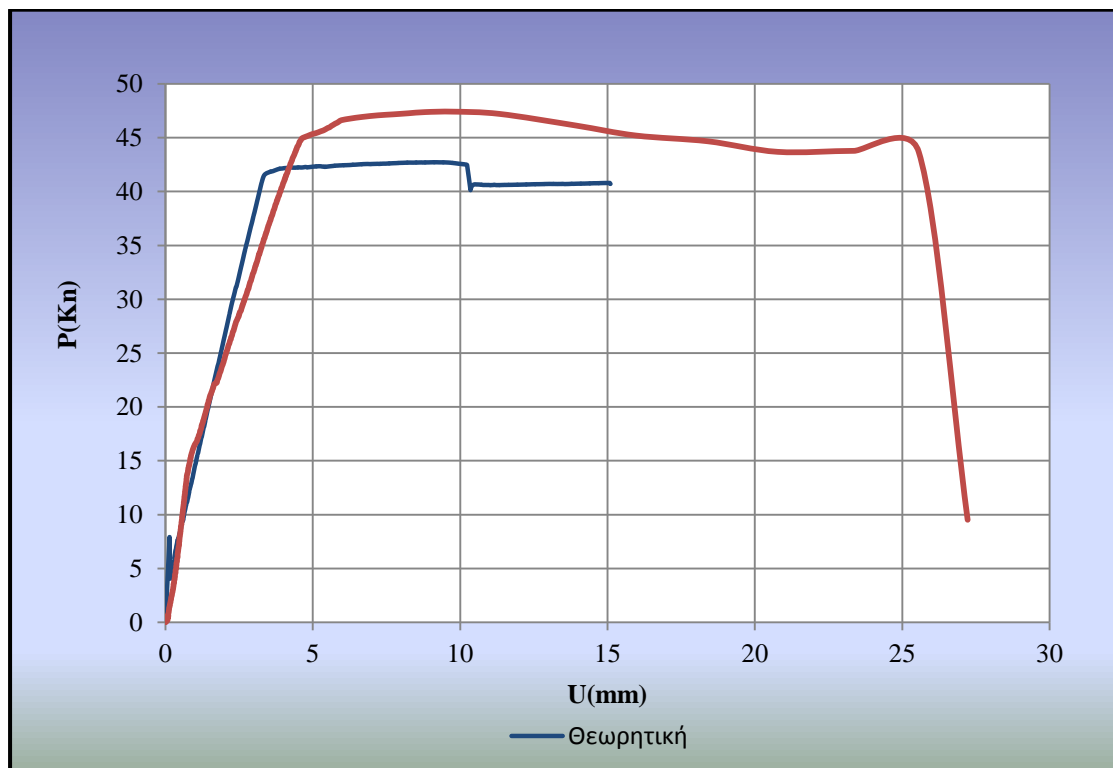
ΔΟΚΙΜΗ	BASIC						SOL N OPTIONS	NONLINEAR				SET CONVERGE CRITERIA			ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ P (kN)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ T (min)	ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ U (M)
	ANALYSIS OPTIONS	TIME AT END OF LOADSTEP	AUTOMATIC TIME STEPPING	NUMBER OF SUBSTEPS	MAX NO. OF SUBSTEPS	MIN NO. OF SUBSTEPS	EQUATION SOLVERS	LINEAR SEARCH- DOF SOLUTION PERDICTOR	MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS	VTSPEEDUP	TOLER	NORM	MINREF					
1	SMALL DISP.STATIC	1	PROG. CHOSEN	1000	10000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.05	L1NORM	-1	-0,012	42,75	18	0,01543	
2	SMALL DISP.STATIC	1	PROG. CHOSEN	1000	10000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.05	L2NORM	-1	-0,012	42,72	15	0,01509	
3	LARGE DISP.STATIC	1	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	700	ON	0.05	L2NORM	-1	-0,012	42,87	20	0,01663	
4	SMALL DISP.STATIC	1	PROG. CHOSEN	5000	10000	5000	SPARSE DIRECT	PROG.CHOSE N	500	ON	0.05	INFINITE	-1	-0,01	42,61	60	0,01361	
5	SMALL DISP.STATIC	1	PROG. CHOSEN	2000	10000	2000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	1000	ON	0.05	INFINITE	-1	-0,012	42,82	30	0,01616	
6	LARGE DISP.STATIC	1	ON	1000	5000	1000	SPARSE DIRECT	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.001	INFINITE	-1	-0,008	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	20	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	
7	LARGE DISP.STATIC	1	ON	1000	5000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.001	L2NORM	-1	-0,008	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	30	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	
8	LARGE DISP.STATIC	1	ON	1000	5000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.05	L2NORM	-1	-0,01	42,71	15	0,01082	
9	SMALL DISP.STATIC	1	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	ON-ON	1000	ON	0.05	L1NORM	-1	-0,012	42,52	32	0,01698	
10	SMALL DISP.STATIC	0,5	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.08	L2NORM	-0,5	-0,012	42,74	18	0,01494	
11	SMALL DISP.STATIC	0,5	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.08	INFINITE	-0,5	-0,012	42,73	15	0,015	
12	SMALL DISP.STATIC	0,5	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.005	L2NORM	-1,5	-0,012	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	70	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	
13	SMALL DISP.STATIC	0,5	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.1	L2NORM	-1,5	-0,012	42,74	13	0,015	
14	SMALL DISP.STATIC	0,5	ON	1000	4000	1000	SPARSE DIRECT	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.1	L2NORM	-1,5	-0,012	42,74	18	0,015	
15	SMALL DISP.STATIC	0,5	ON	1000	4000	1000	PRECONDITI ON ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	PROG.CHOSE N	500	OFF	0.1	INFINITE	-1,5	-0,012	42,72	20	0,01512	
16	SMALL DISP.STATIC	1,5	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	ON-ON	500	ON	0.08	L2NORM	-0,5	-0,012	42,37	20	0,01638	
17	LARGE DISP.STATIC	1,5	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOD EN	500	OFF	0.08	L2NORM	-0,5	-0,012	42,45	22	0,01492	
18	SMALL DISP.STATIC	0,05	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOD EN	800	OFF	0.004	L2NORM	-4	-0,012	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	38	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	
19	LARGE DISP.STATIC	0,05	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOD EN	800	OFF	0.004	INFINITE	-4	-0,012	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	36	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	
20	LARGE DISP.STATIC	0,05	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOD EN	800	OFF	0.004	L1NORM	-4	-0,012	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	20	ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ	
21	LARGE DISP.STATIC	0,05	ON	1000	4000	1000	PROG.CHODE N	PROG.CHOD EN	800	OFF	0.8	L1NORM	-1	-0,012	42,52	13	0,01562	

8. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήσαμε η ταχύτερη επίλυση παρουσιάστηκε από το πρόγραμμα για τις δοκιμές 13 και 21 οι οποίες επιλύθηκαν σε 13 λεπτά με την χρήση του κώδικα. Όπως φαίνεται από τις παραμέτρους της κάθε δοκιμής, τα αποτελέσματα που μας έδωσαν οι δύο επιλύσεις όσον αφορά το μέγιστο φορτίο και το βέλος κάμψης είναι παρεμφερή μεταξύ τους παρόλο που στην δοκιμή 21 έχουμε εφαρμόσει μικρότερο χρόνο μεταξύ των υποβημάτων κάτι το οποίο θεωρητικά θα απέφερε καλύτερη ακρίβεια. Συν του ότι στην δοκιμή 21 είχαμε ενεργή την επιλογή Large Displacement Static και περισσότερες επαναλήψεις ισορροπίας. Και οι δοκιμές 2, 8, 11 που έχουν χρόνο επίλυσης ίσο με 15 min. Μας αποδίδουν παρόμοια αποτελέσματα μεταξύ τους με την ίδια ακρίβεια παρόλο τις διαφορετικές παραμέτρους που είχαν τεθεί μεταξύ τους. Ωστόσο η δοκιμή 8 μας αποφέρει πιο γραμμικό διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης από τα άλλα δύο. Αυτό συμβαίνει λόγω το ότι στην δοκιμή αυτή έχουμε επιλέξει την Large displacement Static. Οι επόμενες δοκιμές βάση τον χρόνο επίλυσής τους είναι οι 1, 10 και 14 που και αυτές μας έχουν δώσει πανομοιότυπα αποτελέσματα με την διαφορά ότι η 1 δοκιμή παρουσίαζε κάποιες ανωμαλίες όπως φαίνεται στο διάγραμμα Φορτίου-Χρόνου κάτι το οποίο λογικά οφείλεται στο ότι η επιλογή Automatic Time Stepping είναι απενεργοποιημένη. Οι δοκιμές 6 και 7 παρουσίασαν, έπειτα από 20 και 30 λεπτά αντίστοιχα ανάλυσης, αδυναμία σύγκλισης για μετατόπιση 8mm. Βλέπουμε όμως ότι η δοκιμή 6 παρουσίαζε μεγαλύτερη ταχύτητα επίλυσης έχοντας επιλέξει τον κανόνα Infinite Norm. Η δοκιμή 12 χρειάστηκε τον περισσότερο χρόνο αλλά δεν καταφέρει να παρουσιάσει σύγκλιση. Αντίθετα η δοκιμή 13 που επιλύθηκε ταχύτερα από όλες αλλάζοντας μόνο την τιμή TOLER και αφήνοντας ίδιες τις υπόλοιπες παράμετρος μας απέφερε σύγκλιση και τα αποτελέσματα της είχαν μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με το πειραματικό μέρος. Άλλες τρεις δοκιμές που αδυνατούσαν να συγκλίνουν είναι οι 18,19,20. Αναζητώντας που οφείλεται αυτή η αδυναμία σύγκλισης για αυτές τις 4 δοκιμές βλέποντας τις παραμέτρους και συγκρίνοντάς τις με των υπόλοιπων δοκιμών γίνεται κατανοητό ότι για μικρές τιμές TOLER το πρόγραμμα αδυνατούσε να συγκλίνει. Διερευνώντας τις παραμέτρους αντιλαμβανόμαστε ότι όσο μεγαλύτερη τιμή θέτουμε για TOLER τόσο πιο γρήγορα επιλύει το πρόγραμμα το μοντέλο που έχουμε αναπτύξει.

Οι τιμές όμως που μπορούμε να βάλουμε είναι μεταξύ 0 και 1. Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα των δοκών είναι ότι με την απενεργοποίηση της επιλογής VT SPEED έχουμε μεγαλύτερη σύγκλιση του υπολογιστικού βέλους που μας δίνει το πρόγραμμα με την τιμή που είχαμε θέσει. Αυτό φαίνεται και από τις δοκιμές 16,17.

Μπορούμε να καταλήξουμε με τις επιλύσεις που κάναμε ότι στις περιπτώσεις που επιλύσαμε είχαμε μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά το φορτίο καθώς όλες οι δοκιμές μας απέδωσαν φορτίο της τάξης των 42 Kn έχοντας στις πειραματικές δοκιμές βρεί μέγιστο φορτίο 47Kn.Επομένως το αποτέλεσμα στο φορτίο είναι πολύ αξιόπιστο. Όσον αφορά το βέλος κάμψης σε όλες τις δοκιμές είχε μια διαφορά από το υπολογίσιμο της τάξης των 2-3mm οπότε και εκεί η σύγκλιση που παρουσίασε το πρόγραμμα μας έδωσε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα. Στο διάγραμμα 8.1 που ακολουθεί φαίνεται ότι τα αποτελέσματα που μας έδωσε μια δοκιμή επίλυσης με την μέθοσο πεπερασμένων στοιχείων κατά ANSYS,είναι πανομοιότυπα με αυτά της πειραματικής δοκιμής για την δοκό BV-3 FLEX.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P(kN)-U(mm)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων(ΚΤΧ) 2008

Ελληνικός Κανονισμός Τεχνολογίας Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000

Δομικά Υλικά,Αθανάσιος Τριανταφύλλου

Οπλισμένο Σκυρόδεμα,Θεοφάνης Γεωργόπουλος

ANSYS Tutorial

www.ansys.com

Finite Element Analysis Using Ansys 11

Engineering Analysis With ANSYS Software,T. Storlaski,Y. Nakasone,S. Yoshimoto

Αριθμητική Διερεύνηση της Επιφάνειας Αστοχίας του Σκυροδέματος Παρουσία

Εφελκυστικών Τάσεων,Μ.Κλούβας,Χ. Ζέρης

www.ansys.gr

www.civildem.gr

Modeling Of Reinforced Concrete Beam Using Ansys Software,Tu Nguyen

ANSYS Inc. Theory Reference

www.tonitechnik.com

www.sharcnet.ca

ANSYS 2002 Conference

www.2doworld.com/structural-engineering

Flexural Behavior Of Reinforced Press dressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis,Anthony J. Wolanski,B.S

Εκτίμηση Συμπεριφοράς Μονολιθικών Και Ενισχυμένων Δομικών Στοιχείων
Οπλισμένου Σκυροδέματος με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, Διατριβή
Διπλώματος Ειδίκευσης Ανδρέα Λαμπρόπουλου