

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ



Διπλωματική εργασία

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

NON-LINEAR ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL CONCRETE PRINTED MEMBERS

ΙΣΙΔΩΡΑ ΣΙΜΑΤΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΑΒΒΑΣ Π. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

This research has been supported by the ADDOPTML project: “ADDitively Manufactured OPTimized Structures by means of Machine Learning” (No: 101007595) belonging to the Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) Research and Innovation Staff Exchange (RISE) H2020-MSCA-RISE-2020.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, κύριο Σάββα Τριανταφύλλου, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της συγκεκριμένης μελέτης και την πολύτιμη καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της. Επίσης, τον ευχαριστώ πολύ για τη στήριξη, τον χρόνο που μου διέθετε και την άμεση ανταπόκρισή του σε όποιο πρόβλημα προέκυπτε.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΑΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ισιδώρα Σιμάτου

Επιβλέπων: Σάββας Π. Τριανταφύλλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση μελών σκυροδέματος που κατασκευάζονται με τρισδιάστατη εκτύπωση (3DCP). Πιο συγκεκριμένα εστιάζεται στις διαδικασίες προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατα εκτυπωμένου σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού και της προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκών σκυροδέματος, για τον προσδιορισμό της αντοχής τους.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική διερεύνηση ως προς τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, ενώ συλλέχθηκαν πειραματικές μελέτες των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας των εκτυπωμένων μελών και των μεθόδων προσομοίωσής τους. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση των ιδιοτήτων συνεκτικής επιφάνειας και εφαρμόστηκαν σε δύο ομάδες πειραμάτων, ώστε να προσδιορισθεί η αντοχή τους. Προς την κατεύθυνση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης Abaqus CAE.

ABSTRACT

NON-LINEAR ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL CONCRETE PRINTED MEMBERS

Isidora Simatou

Supervisor: Savvas P. Triantafyllou, Professor NTUA

Athens, October 2021

The aim of the present Diploma Thesis is the analysis of 3D Printed Concrete members and more specifically, it focuses on the procedures for simulating the nonlinear behaviour of 3D printed concrete at material level and the simulation of the nonlinear behaviour of 3D Printed concrete beams, to determine their strength.

For this purpose, an extensive bibliographic investigation was carried out regarding the technologies used, while experimental studies of the interface properties of the printed members and their simulation methods were collected. The experimental data were used to calibrate the cohesive properties of the interfaces and applied to two sets of experiments in order to determine their strength. The Abaqus FEA was used for this purpose.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	16
2.1 Τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος	16
2.1.1 Μέθοδος με βάση την εξώθηση (extrusion-based technique)	16
2.1.2 Μέθοδος με βάση την σκόνη (Powder-based technique)	21
2.1.3 Παραδείγματα τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών.....	25
2.2 Πειραματικές μελέτες ιδιοτήτων της διεπιφάνειας τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών από σκυρόδεμα	29
2.2.1 Σκληρυμένες ιδιότητες εκτύπωσης σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (Le et al., 2012).....	29
2.2.2 Σκληρυμένες ιδιότητες τρισδιάστατα εκτυπωμένου σκυροδέματος: η επίδραση των παραμέτρων διεργασίας στην σύνδεση των στρώσεων (Wolfs et al., 2019a)	37
2.2.3 Πειραματική μελέτη σχετικά με την ιδιότητα συγκόλλησης επιπέδων τρισδιάστατων υλικών εκτύπωσης (Jie et al., 2019).....	43
2.2.4 Ενίσχυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στρώσεων με τροποποιημένο πολυμερές κονίαμα (Wang et al., 2020)	47
3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	52
3.1 Μέθοδος συνεκτικών επιφανειών	52
3.1.1 Καταστατικός νόμος συνεκτικότητας σε όρους τανυστή τάσεων – σχετικής μετατόπισης	52
3.1.2 Ελαστική σταθερά επιβολής ποινής.....	54
3.1.3 Κριτήριο έναρξης αστοχίας μικτού τύπου.....	55
3.1.4 Εφαπτομενική συμπεριφορά επιφανειών αλληλεπίδρασης	56
3.1.5 Μοντελοποίηση της βλάβης	56
3.1.6 Συμπεριφορά των διεπιφανειών κατά την κάθετη διεύθυνση	58
3.2 Προσομοίωση με σύνθετα πολυστρωματικά φύλλα χρησιμοποιώντας συνεκτικές επιφάνειες	60
4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΛΙΚΟΥ	63
4.1 Καμπτική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (Wolfs et al., 2019a)	63
4.1.1 Μοντελοποίηση δοκιμών	63
4.1.2 Αποτελέσματα.....	70
5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ	77
5.1 Διαδικασία και αποτελέσματα πειράματος	77

5.1.1	Ρύθμιση δοκιμών και έλεγχος.....	77
5.1.2	Αποτελέσματα δοκιμών.....	83
5.2	Προσομοίωση δοκών.....	88
5.2.1	Αποτελέσματα Ομάδας 1.....	92
5.2.2	Αποτελέσματα Ομάδας 2.....	98
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
6.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων	104
6.2	Συμπεράσματα	105
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 2.1-1: ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΞΩΘΗΣΗ	16
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CC (HTTP://CONTOURCRAFTING.COM/)17	
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΜΕΣΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΣΤΗ ΣΕΛΗΝΗ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΆΡΗ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΙΚΙΣΜΟ.....	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-4. ΠΑΓΚΟ ΜΟΡΦΗΣ ΤΟΙΧΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CONCRETE PRINTING (LIM ET AL., 2012).....	19
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-5. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΝΤΛΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΣΕ ΦΟΡΤΗΓΟ (KRAUSE ET AL., 2018).....	20
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-6. ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΣΚΟΝΗ.....	21
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-7.ΣΧΗΜΑ ΕΚΤΥΠΩΤΗ D-SHAPE (CESARETTI ET AL., 2014)	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-8. RADIOLARIA ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ D-SHAPE.....	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-9.ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ BLOOM ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ EMERGING OBJECTS (MATTHEW MILLMAN PHOTOGRAPHY)	24
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-10. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΕΣ (Α) ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (Β) ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (C) ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (D) ΚΑΤΟΨΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. (PANDA & TAN, 2018).....	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-11. ΣΠΙΤΙΑ 400 Τ.Μ. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ICON’S VULCAN II.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-12. ΣΠΙΤΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ ΤΗΝ APIS COR ΣΕ ΛΙΓΟΤΕΡΟ ΑΠΟ 24 Η.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-13: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CC ΓΙΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	27
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-14: ΣΥΝΘΕΤΟ ΖΕΥΚΤΟ ΠΟΥ ΣΤΗΡΙΖΕΙ ΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΠΑΙΔΙΚΗΣ ΧΑΡΑΣ ΣΤΟ AIX EN PROVENCE.....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-15. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 3DCP	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-1. ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ	30
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΟΠΗΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΙΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΓΙΑ ΕΝΝΕΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΥΒΟΥ 100 MM ΠΟΥ ΕΞΑΓΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΛΑΚΑ 350x350x120.....	32
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΕΝΑΝ ΚΑΜΠΥΛΟ ΠΑΓΚΟ	32
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-4: ΚΟΜΜΕΝΕΣ ΔΟΚΟΙ ΑΠΟ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΓΙΑ Α)ΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ I ΚΑΙ II ΚΑΙ Β) ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ III.	33

ΕΙΚΟΝΑ 2.2-5. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΚΕΝΟ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-6. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΥΟ ΧΡΟΝΙΚΑ ΚΕΝΑ	36
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-7. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ 3D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ, ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗΣ Α) ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ Ι, Β) ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΙ, Γ) ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΙΙ.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ, ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ, ΘΛΙΨΗΣ.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ (ΔΕΞΙΑ).....	41
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-10. ΜΟΤΙΒΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-11. ΜΟΤΙΒΑ ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-12: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΟΥΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΓΙΑ ΧΡΟΝΙΚΟ ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑ 15S ΚΑΙ 24H.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-13. ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-14. ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-15. ΔΟΚΙΜΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-16. ΔΟΚΙΜΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 2.2-17. (Α) ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (Β) ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 3.1-1. ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΑΣΗΣ-ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΥΠΟΥ 1.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 3.1-2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ – ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	57
ΕΙΚΟΝΑ 3.1-3: ΕΜΒΑΔΟΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ – ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ ΙΣΟ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	58
ΕΙΚΟΝΑ 3.1-4 ΣΧΕΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΔΙΕΠΑΦΗΣ.....	59
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-1. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	60
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-1: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ 3 ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	64

ΕΙΚΟΝΑ 4.1-2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	65
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ 1 ΚΑΙ 2 (Ι).	66
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ 1 ΚΑΙ 2 (ΙΙ).	67
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-6: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	68
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-7: ΤΕΛΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	69
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-8: ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ....	69
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-9: ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	70
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-10: ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΑΡΕΞΗΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ	70
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-11: ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1	71
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-12: ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2	71
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-13: ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 3	71
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-14: ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 1	72
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-15: ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 2	72
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-16: ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 3.....	72
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-17: ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 1	73
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-18: ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 2	73
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-19: ΤΑΣΕΙΣ S11(Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 3	73
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-20: ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 1	74
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-21: ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 2	74
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-22: ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 3	74
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-23: ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 1	75
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-24: ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 2.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-25: ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 3.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-26: ΆΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 1	76
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-27: ΆΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 2	76
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-28: ΆΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ 3	76
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΗ ΟΜΑΔΑΣ 1.....	78

ΕΙΚΟΝΑ 5.1-2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΗ ΟΜΑΔΑΣ 2.....	79
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-3. ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ: (Α) ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΗ ΟΠΛΙΣΗ Μ24 10.9 ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 1 (Ρ), (Β) ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΟΠΛΙΣΗ Ø26 Β500Β ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 2 (S), (C) ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΚΑΛΩΔΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 2 (W).....	81
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-4. ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 1 ΜΕ ΝΗΜΑ ΠΛΑΤΟΥΣ 50 ΜΜ. Η ΓΚΡΙ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ ΤΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ (1), ΚΑΙ Η ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (2)	81
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-5. ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 2 ΜΕ ΝΗΜΑ ΠΛΑΤΟΥΣ 30 ΜΜ. Η ΓΚΡΙ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ ΤΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ (1), ΚΑΙ Η ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (2)	82
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-6. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΝΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 2: (Α) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΝΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΑΙΝΙΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΦΥΛΛΟ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ 0.3% ΙΝΕΣ, (Β) ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ, (C) ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ 0.3% ΟΠΛΙΣΗ ΙΝΩΝ	83
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΩΝ ΟΜΑΔΑΣ 1.	83
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-8.ΜΟΤΙΒΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ (99% F _{MAX}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 1.	84
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-9. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΔΟΚΩΝ ΟΜΑΔΑΣ 2.....	85
ΕΙΚΟΝΑ 5.1-10. ΜΟΤΙΒΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ (99% F _{MAX}) ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΜΑΔΑ 2.	86
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-1. ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-2. ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ	90
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-3. ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ	90
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-4. ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	91
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-5.ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1200 ΜΜ	91
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-6.ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1800 ΜΜ	91
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-7.ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ	92
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-8.ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ.....	92
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-9.ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ.....	92
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-10.ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ.....	93
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-11.ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ	93
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-12.ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ	93

ΕΙΚΟΝΑ 5.2-13. ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-14. ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-15. ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-16. ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-17. ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-18. ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-19. ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ.....	96
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-20. ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ.....	96
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-21. ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ.....	96
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-22. ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 500 ΜΜ.....	97
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-23. ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1000 ΜΜ.....	97
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-24. ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1500 ΜΜ.....	97
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-25. ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-26. ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1200 ΜΜ.....	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-27. ΕΙΚΟΝΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1800 ΜΜ.....	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-28. ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	99
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-29. ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1200 ΜΜ.....	99
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-30. ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1800 ΜΜ.....	99
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-31. ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-32. ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1200 ΜΜ.....	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-33. ΤΑΣΕΙΣ S11 (Σ_{xx}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1800 ΜΜ.....	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-34. ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	101
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-35. ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1200 ΜΜ.....	101
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-36. ΤΑΣΕΙΣ S22 (Σ_{yy}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1800 ΜΜ.....	101
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-37. ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	102
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-38. ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	102
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-39. ΤΑΣΕΙΣ S33 (Σ_{zz}) ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	102
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-40. ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 600 ΜΜ.....	103
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-41. ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1200 ΜΜ.....	103
ΕΙΚΟΝΑ 5.2-42. ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 1800 ΜΜ.....	103

ΕΙΚΟΝΑ 6.1-1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΔΟΚΩΝ	104
ΕΙΚΟΝΑ 6.1-2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΔΟΚΩΝ.....	105

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2-1. Η ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ CEM I 52.5, ΠΗΛΤΙΚΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2-2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2-3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2-4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2-5. ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΜΑΖΑΣ - ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΤΟΥ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1-1: ΤΙΜΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΚΑΜΨΗΣ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1-1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ. PS: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ, ISR: ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΟΠΛΙΣΗΣ ΕΝΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1-1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (WOLFS ET AL.,2019) ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	104

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κατασκευαστικός τομέας είναι μια πολύ δραστήρια βιομηχανία, υπεύθυνη για το 35% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, το 38% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, το 12% της παγκόσμιας χρήσης πόσιμου νερού και το 40% της παραγωγής στερεών αποβλήτων στις ανεπτυγμένες χώρες (UNEP,2020). Οι Agustí Juan και Habert (2017) απέδειξαν ότι μπορούν να επιτευχθούν περίπου 50% μειώσεις στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ψηφιακών κατασκευών σκυροδέματος σε σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευές. Ο κατάλληλος αυτοματισμός στον κατασκευαστικό τομέα μέσω των τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών από σκυρόδεμα (3DCP), έχει πολλά οφέλη, συμπεριλαμβανομένου των μειώσεων κόστους, χρόνου και εργασίας, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την παραγωγικότητα και βελτιώνει την ποιότητα κατασκευής. Επιπλέον, το 3DCP εξαλείφει τον γεωμετρικό περιορισμό των κατασκευών και επιτρέπει την δημιουργία πολύπλοκων σχημάτων. Η προσθετική κατασκευή έχει ήδη βρει εφαρμογή σε διάφορα παραδείγματα (πχ. πενταώροφο κτίριο στη Suzhou της Κίνας, από την Winsun, κάστρο στη Μινεσότα των Η.Π.Α. από την Total Kustom), ενώ όλο και περισσότερες ερευνητικές ομάδες μελετάνε τις δυνατότητες εφαρμογής που μπορεί να βρει στο μέλλον αυτή η τεχνολογία. Μάλιστα, σύμφωνα με την νέα έκθεση ανάλυσης SmarTech, "Opportunities in Additive Manufacturing Software Markets 2020", τα έσοδα από λογισμικά προσθετικής κατασκευής θα φτάσουν τα 3,7 δισεκατομμύρια δολάρια το 2027 σε σύγκριση με περίπου 460 εκατομμύρια δολάρια το 2020.

Τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση με σκυρόδεμα, όπως στην ταχύτητα, στο κόστος, στην ποιότητα κατασκευής, στην πολυπλοκότητα των σχημάτων, αποτέλεσαν έμπνευση για την μελέτη των μεθόδων προσομοίωσης της τεχνολογίας αυτής. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να αξιολογηθούν κατά πόσο είναι αξιόπιστες και πετυχημένες οι διαδικασίες προσομοίωσης συνεκτικών επιφανειών τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών από σκυρόδεμα.

Προς της κατεύθυνση αυτή, θέτονται ορισμένοι ερευνητικοί στόχοι; Αρχικό στόχο αποτελεί η εκτενής βιβλιογραφική διερεύνηση των τεχνολογιών και των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης κατασκευών από σκυρόδεμα. Έπειτα, στο κομμάτι της βιβλιογραφίας επιδιώκεται η μελέτη πειραματικών δεδομένων των ιδιοτήτων τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών από σκυρόδεμα και μεθόδων προσομοίωσης πολυστρωματικών υλικών. Μέσω αυτών των δεδομένων ερευνάται η διαδικασία προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατα

εκτυπωμένου σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού και η προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκών σκυροδέματος.

Έτσι, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τεχνολογίες και μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης και μέθοδοι προσομοίωσης με συνεκτικές επιφάνειες. Μέσω των πειραματικών δεδομένων γίνεται βαθμονόμηση των ιδιοτήτων συνεκτικών επιφανειών. Έπειτα, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτής της βαθμονόμησης, γίνεται παραμετρική ανάλυση μιας ομάδας πειραμάτων, με στόχο να βρεθεί η αντοχή τους. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης Abaqus και έγινε διερεύνηση του υλικού και της συμπεριφοράς τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκών σκυροδέματος.

Αναλύεται διεξοδικά η σειρά εργασιών που συνίσταται να ακολουθηθεί, τόσο στο πεδίο όσο και στη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων, με αφορμή την εμπειρία που αποκτήθηκε από την συγκεκριμένη εφαρμογή

Αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναλυτική βιβλιογραφική διερεύνηση. Γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών από σκυρόδεμα, οι οποίες διαχωρίζονται με βάση την μέθοδο παραγωγής. Επιπλέον, συλλέγονται και μελετώνται πειράματα προσδιορισμού των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας των στρώσεων εκτυπωμένων δοκιμίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται οι μέθοδοι και οι διαδικασίες προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς δοκών 3DCP σε επίπεδο υλικού, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται προσομοίωση πειραμάτων ταυτοποίησης υλικού που ερευνήθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο στο λογισμικό Abaqus. Μέσω της βαθμονόμησης των αποτελεσμάτων που δίνει η προσομοίωση, δίνεται μια πολύ καλή προσέγγιση των ιδιοτήτων συνεκτικής διεπιφάνειας μεταξύ των εκτυπωμένων στρωμάτων.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο διενεργούνται μη γραμμικές αναλύσεις δοκών που εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του υλικού που βρέθηκε στο τρίτο κεφάλαιο.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη.

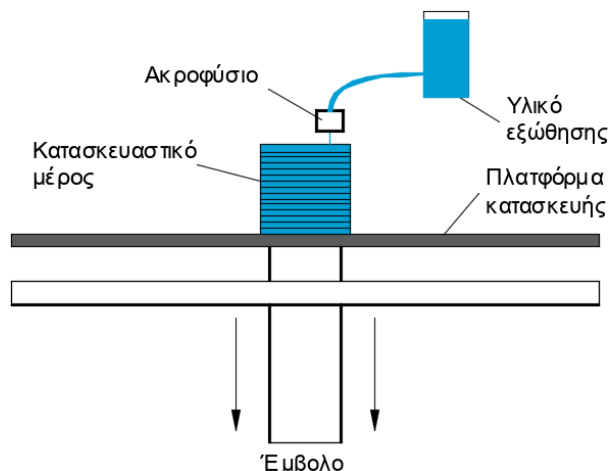
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1 Τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης σκυροδέματος

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών από σκυρόδεμα, με σκοπό να υιοθετήσουν την προσθετική κατασκευή, οι οποίες βασίζονται κυρίως σε δύο τεχνικές: μια με βάση την εξώθηση (extrusion-based) και μια με βάση την σκόνη (powder-based), οι οποίες και αναλύονται παρακάτω. Μια ακόμα τεχνική που έδειξε ότι έχει καλές προοπτικές (Rael et al., 2015) και θα αναλυθεί στο μέλλον, εκτυπώνει πρώτα ένα λεπτό στρώμα ξηρής σκόνης τσιμέντου και στη συνέχεια ψεκάζει νερό πάνω σε αυτό στρώση με στρώση για να σκληρύνει τη δομή.

2.1.1 Μέθοδος με βάση την εξώθηση (extrusion-based technique)

Η μέθοδος με βάση την εξώθηση εξάγει το τσιμεντοειδές υλικό από ένα ακροφύσιο, που είναι τοποθετημένο σε έναν σκελετό, γερανό ή ρομποτικό βραχίονα έξι αξόνων, για να εκτυπώσει την κατασκευή στρώση με στρώση. Αυτή η τεχνική στοχεύει σε κατασκευές που πραγματοποιούνται στο εργοτάξιο, όπως δομικά στοιχεία μεγάλης κλίμακας με πολύπλοκες γεωμετρίες.

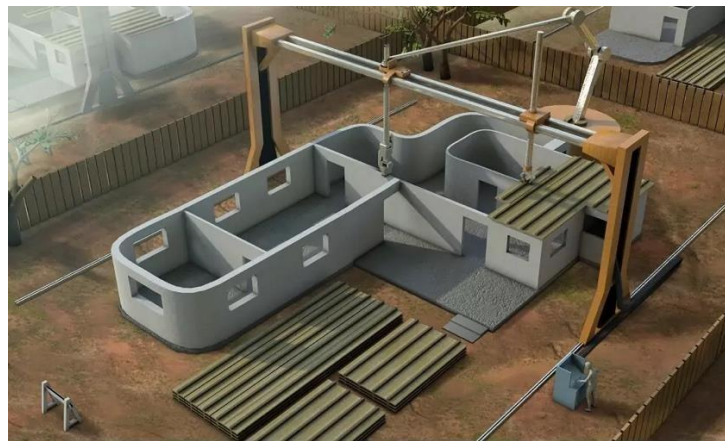


Εικόνα 2.1-1: Σχεδιάγραμμα της τεχνικής με βάση την εξώθηση

Κάποιες βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική είναι η τεχνολογία κατασκευής περιγράμματος (Contour Crafting – CC), η τεχνολογία εκτύπωσης σκυροδέματος (Concrete Printing), η CONPrint3D και η τεχνολογία 3DCP κατασκευών μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιεί σκυρόδεμα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης.

i. Τεχνολογία κατασκευής περιγράμματος (Contour Crafting)

Η τεχνολογία κατασκευής περιγράμματος (CC), που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνιας στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένα ρομποτικά συστήματα για γρήγορη κατασκευή δομών, εισάγοντας δεδομένα από μοντέλα CAD. Η CC εξωθεί δύο στρώσεις τσιμεντοειδούς μείγματος, για να χτίσει έναν κάθετο ξυλότυπο από σκυρόδεμα. Μεταξύ των στρώσεων τοποθετούνται επί παραγγελία δέσμες οπλισμού, ενώ το μηχάνημα εξωθεί συνεχώς τα στρώματα. Στην κεφαλή εκτύπωσης είναι προσαρτημένα πτερύγια τύπου σπάτουλας, ώστε να δημιουργούν ομαλές εξωθημένες επιφάνειες. Όταν η κατασκευή του ξυλότυπου ολοκληρωθεί, το σκυρόδεμα στην συνέχεια χύνεται χειροκίνητα από ύψος 13 cm και μια δεύτερη παρτίδα χύνεται πάνω από την πρώτη μετά από μια ώρα. Η καθυστέρηση μιας ώρας γίνεται με σκοπό τον έλεγχο της πλευρικής πίεσης του σκυροδέματος επιτρέποντάς το να σκληρύνει μερικώς. Η εφαρμογή της τεχνολογίας περιγράμματος στον κατασκευαστικό κλάδο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Khoshnevis, 2004), όπου ένα σύστημα γερανογέφυρας για την μεταφορά του ακροφυσίου, κινείται σε δύο παράλληλες λωρίδες εγκατεστημένες στο εργοτάξιο.



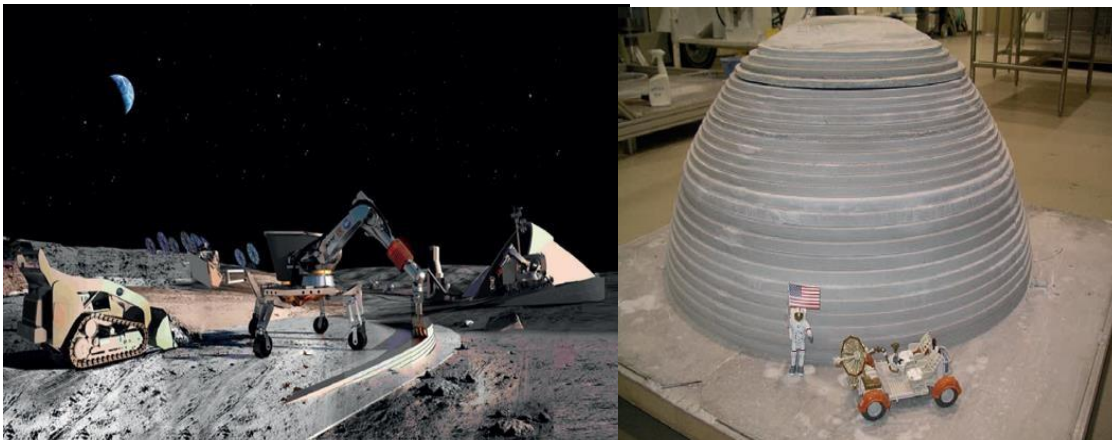
Εικόνα 2.1-2 Κατασκευή κτιρίου με την τεχνολογία CC (<http://contourcrafting.com/>)

Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας περιγράμματος είναι η ανώτερη ποιότητα φινιρίσματος και η σημαντικά βελτιωμένη ταχύτητα κατασκευής. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ενοποίησης με άλλες μεθόδους ρομποτικής για την εγκατάσταση εσωτερικών εξαρτημάτων, όπως σωλήνες, ηλεκτρικούς αγωγούς και οπλισμό.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η τεχνολογία (Gosselin et al., 2016) είναι ο περιορισμός στην κατακόρυφη εξώθηση, αποδίδοντας έτσι 2.5D τεχνολογίες (κάθετη επέκταση

ενός επίπεδου σχήματος), ενώ το αρχικό σύστημα με ξυλότυπο που κατασκευάζεται μπορεί να γίνει πολύπλοκο να εφαρμοστεί στην παραγωγή, ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα του αντικειμένου που θα εκτυπωθεί. Επιπλέον, η διακοπόμενη διαδοχική χύτευση σκυροδέματος εντός του ξυλότυπου, εξαιτίας της υδροστατικής πίεσης και των ασθενών μηχανικών ιδιοτήτων του εξωθούμενου σκυροδέματος, μπορεί να οδηγήσει σε εξασθενημένες ζώνες διεπιφανειών μεταξύ των στρώσεων.

Η τεχνολογία Contour Crafting έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει ασφαλείς, αξιόπιστες και οικονομικά προσιτές σεληνιακές και αρειανές δομές, βιότοπους, εργαστήρια και άλλες εγκαταστάσεις πριν από την άφιξη των ανθρώπων. Η NASA ξεκίνησε το «3D Printed Habitat Challenge» εξετάζοντας τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σπιτιών στο διάστημα, όπως στη Σελήνη ή στον Άρη. Αναπτύσσονται ειδικά συστήματα κατασκευής CC που εκμεταλλεύονται επιτόπιους πόρους και μπορούν να χρησιμοποιήσουν, για παράδειγμα, σεληνιακό ρηγόλιθο ως δομικό υλικό. Αυτές οι δομές μπορεί να περιλαμβάνουν ενσωματωμένα δίκτυα θωράκισης ακτινοβολίας, υδραυλικών εγκαταστάσεων, ηλεκτρικών και αισθητήρων.



Εικόνα 2.1-3. Κατασκευή άμεσων υποδομών στη Σελήνη και στον Άρη για μελλοντικό αποικισμό

ii. Τεχνολογία εκτύπωσης σκυροδέματος (Concrete Printing)

Η τεχνολογία εκτύπωσης σκυροδέματος Concrete Printing αναπτύχθηκε από μια ομάδα του Πανεπιστημίου Loughborough στην Μεγάλη Βρετανία και είναι σε κάποιο βαθμό παρόμοια με την τεχνολογία κατασκευής περιγράμματος. Ωστόσο, η τεχνολογία εκτύπωσης σκυροδέματος έχει αναπτυχθεί για να διατηρήσει την ελευθερία στις τρεις διαστάσεις και έχει μικρότερη ανάλυση

απόθεσης, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερο έλεγχο εσωτερικών και εξωτερικών γεωμετριών. Επιπλέον, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ένα υψηλής απόδοσης ενισχυμένο με ίνες λεπτόκοκκο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα να διαθέτει ανώτερες ιδιότητες από αυτές που παρατηρούνται στην τεχνολογία CC. Απαιτεί ωστόσο ένα δεύτερο υλικό για πρόσθετη στήριξη για τη δημιουργία προεξοχών και άλλων δυνατοτήτων ελεύθερης μορφής, με αποτέλεσμα να χρειάζονται επιπλέον συντήρηση, καθαρισμός και έλεγχος.

Οι Gosselin et al. (2016) αναφέρουν τα παρακάτω μειονεκτήματα αναφορικά με την τεχνολογία CP: (1) Η αντιστάθμιση που απαιτείται για τη διατήρηση της ακρίβειας των διαστάσεων καθιστά την διαδικασία αρκετά αργή σε σχέση με την προβλεπόμενη βιομηχανική εφαρμογή, (2) αν και η τεχνολογία είχε αρχικά ως στόχο τη δημιουργία τρισδιάστατων τοπολογιών, η χρήση δεύτερου υλικού για την υποστήριξη προεξοχών μειώνει την αποδοτικότητα και την ευελιξία της διαδικασίας, ενώ αυξάνει το κόστος του υλικού και (3) οι διαστάσεις και οι δυνατότητες όσον αφορά το σχήμα της κατασκευής περιορίζονται από τις διαστάσεις του πλαισίου εκτύπωσης.

Ένας πάγκος μορφής τοίχου σχεδιάστηκε (Lim et al., 2012) και εκτυπώθηκε για να απεικονίσει την κατασκευαστική σκοπιμότητα της διαδικασίας. Το αποτύπωμα είναι 2 m επί 0.9 m και το ύψος είναι 0.8 m. Αποτελείται από 128 στρώσεις με μέσο χρόνο εκτύπωσης 20 λεπτά/στρώση. Το πίσω μέρος του τοίχου έχει ένα τετράγωνο κύμα τοποθετημένο πάνω στην επιφάνεια, το μήκος του οποίου αλλάζει για να δείξει την ικανότητα της διαδικασίας να παράγει μοναδικά στοιχεία. Το μπροστινό έχει λεία επιφάνεια με ενσωματωμένο κάθισμα. Ο πάγκος περιλαμβάνει 12 κενά, διαφορετικού μεγέθους και σχήματος, που ελαχιστοποιούν το βάρος και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν ακουστική δομή, θερμική μόνωση ή/ και αγωγός για κτιριακές υπηρεσίες.



Εικόνα 2.1-4. Πάγκο μορφής τοίχου με την τεχνολογία Concrete Printing (Lim et al., 2012)

iii. Τεχνολογία CONPrint3D

Οι τεχνολογίες κατασκευής περιγράμματος και εκτύπωσης σκυροδέματος που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ παρουσιάζουν πολλά τεχνολογικά πλεονεκτήματα, υπόκεινται σε ορισμένους εγγενείς περιορισμούς, όπως είναι η ανάγκη χρήσης νέων και προηγμένων μηχανών, μικρά μεγέθη ορυκτών αδρανών και περιορισμένο μέγεθος εκτυπωμένων στοιχείων (το μέγεθος του εκτυπωτή πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος του στοιχείου που εκτυπώνεται). Για αυτό μια νέα προσέγγιση κατασκευής τρισδιάστατα εκτυπωμένων στοιχείων από σκυρόδεμα στο εργοτάξιο με το όνομα CONPrint3D παρουσιάστηκε από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Δρέσδης στη Γερμανία.

Ως μηχανική πλατφόρμα, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη αντλία σκυροδέματος με φορτηγό με πρόσθετη τεχνολογία ελέγχου και νέα κεφαλή εκτύπωσης, που εξασφαλίζουν τη συνεχή εξώθηση του σκυροδέματος και τη γεωμετρική ακρίβεια στο εργοτάξιο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1.5. Η βάση της διαδικασίας ελέγχου είναι ένας σχεδιασμός που βασίζεται σε BIM. Οι βασικές αρχές της διαδικασίας CONPrint3D είναι (Krause et al., 2018): 1. Η εκτέλεση πραγματοποιείται απευθείας στο εργοτάξιο (επί τόπου κατασκευή σκυροδέματος), 2. Η βάση του μηχανήματος αντιπροσωπεύει μια μηχανή κατασκευής που είναι εγκατεστημένη στην αγορά: την αντλία σκυροδέματος με φορτηγό, 3. Για τη διαδικασία χρησιμοποιούνται σκυροδέματα με μέγιστο μέγεθος κόκκων έως 16 mm και σύνθεση και ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος μέσα στις υπάρχουσες προδιαγραφές, 4. Δημιουργούνται μονολιθικές, πλήρως γεμισμένες κατασκευές από σκυρόδεμα με κοφτερές γωνίες και ίσια τοιχώματα.

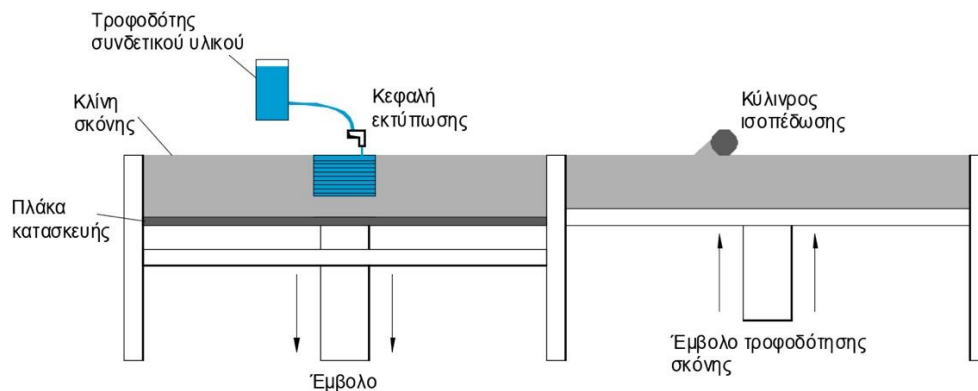


Εικόνα 2.1-5. Τροποποιημένη αντλία σκυροδέματος τοποθετημένη σε φορτηγό (Krause et al., 2018)

2.1.2 Μέθοδος με βάση την σκόνη (Powder-based technique)

Η μέθοδος με βάση την σκόνη είναι άλλη μια τυπική διαδικασία προσθετικής κατασκευής, που δημιουργεί δομές με πολύπλοκες γεωμετρίες. Στην αρχή, ένας κύλινδρος προσαρτημένος μαζί με μια κεφαλή εκτύπωσης, απλώνει ένα στρώμα σκόνης (πάχους περίπου 3 mm) για να καλύψει τη βάση της πλάκας κατασκευής. Στη συνέχεια ανάλογα με τη ρύθμιση του πάχους της στρώσης του εκτυπωτή, ένα λεπτό στρώμα σκόνης (περίπου 0.1 mm) απλώνεται από τον κύλινδρο επίστρωσης παντού στην επιφάνεια της κλίνης σκόνης. Κάθε φορά που μια στρώση ολοκληρώνεται, σταγονίδια συνδετικού υλικού εφαρμόζονται επιλεκτικά στο στρώμα σκόνης από την κεφαλή της εκτύπωσης, προκαλώντας την δέσμευση των σωματιδίων μεταξύ τους. Στο τέλος η ασύνδετη σκόνη αφαιρείται χρησιμοποιώντας φυσητήρα αέρα, ενώ μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί για αυτή την διαδικασία. Στο σχήμα 2.1.6. απεικονίζεται η διαδικασία λειτουργίας της τεχνικής με βάση την σκόνη.

Αυτή η τεχνική είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται εκτός εργοταξίου, σχεδιασμένη για την κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων. Οι Xia και Sanjayan (2016) υποστηρίζουν ότι η τεχνική με βάση την σκόνη είναι κατάλληλη για δομικά στοιχεία μικρής κλίμακας, όπως είναι τα πάνελ, μόνιμα καλούπια και εσωτερικές κατασκευές που μπορούν να συναρμολογηθούν επί τόπου.



Εικόνα 2.1-6. Σχεδιάγραμμα της τεχνικής με βάση την σκόνη

Κάποιες βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική είναι η τεχνολογία D-shape, η τεχνολογία αναδύομενων αντικειμένων (Emerging Objects) και η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιώντας γεωπολυμερές.

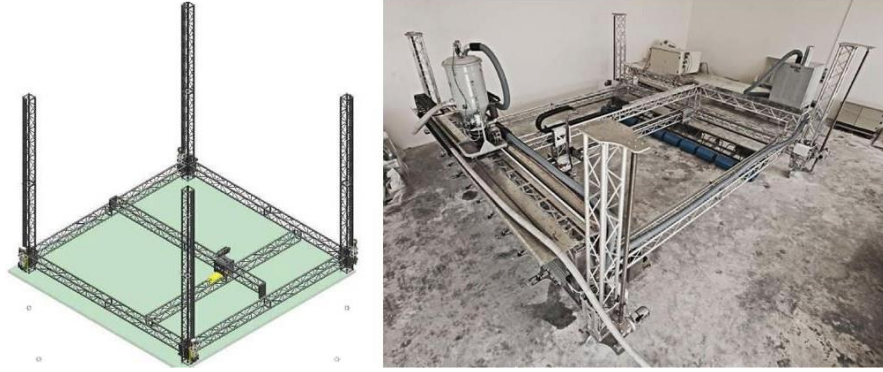
Τα σπίτια 400 ft² (37.16 m²), 3D τυπωμένα με τον εκτυπωτή Vulcan II της Icon, διαθέτουν ένα υπνοδωμάτιο, ένα μπάνιο, πλήρως εξοπλισμένη κουζίνα, σαλόνι και μια μεγάλη βεράντα. Μια σειρά τρισδιάστατων τυπωμένων σπιτιών θα είναι σύντομα ένα μέρος για τους πρώην άστεγους να αποκαλούν το σπίτι τους στο Community First! Village, μια από τις πιο καινοτόμες κοινότητες στον κόσμο.

i. Τεχνολογία D-shape

Η τεχνολογία D-shape είναι ένα τρισδιάστατο σύστημα εκτύπωσης με βάση την σκόνη που παράγει δομικές μονάδες. Αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε από τον Ιταλό μηχανικό Enrico Dini. Ως κατασκευαστικό και συνδετικό υλικό χρησιμοποιούνται η άμμος και το τσιμέντο Sorel (τσιμέντο οξυχλωριούχου μαγνησίου) αντίστοιχα.

Η κατασκευαστική διαδικασία (Cesaretti et al., 2014) αρχικά ξεκινάει με την μοντελοποίηση της κατασκευής σε ένα 3D CAD λογισμικό, η οποία ενσωματώνεται σε ένα κέλυφος. Στη συνέχεια το τρισδιάστατο μοντέλο πρέπει να διαχωριστεί με τη χρήση οριζόντιων επιπέδων (ή τμημάτων), τα οποία απέχουν ένα σταθερό βήμα. Τα επιτευχθέντα 2D σχέδια αποστέλλονται διαδοχικά στη μηχανή σε σειρά από κάτω προς τα πάνω. Ένα ομοιόμορφο στρώμα κοκκώδους υλικού, πάχους που αντιστοιχεί στο προκαθορισμένο βήμα, εναποτίθεται στη μηχανή. Το κοκκώδες υλικό πρέπει να αναμιγνύεται προκαταρκτικά με κονιοποιημένο μεταλλικό οξείδιο, το οποίο αντιδρά αργότερα με το υγρό σύνδεσης. Οι κεφαλές ψεκασμού κινούνται οριζόντια και μια προκαθορισμένη ποσότητα υγρού ψεκάζεται σε εκείνα τα σημεία του στρώματος που πρέπει να δεσμευτούν, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται χημική αντίδραση μεταξύ του μεταλλικού οξειδίου και του υγρού άλατος. Μόλις ολοκληρωθεί η στρώση τοποθετείται στη συνέχεια ένα δεύτερο ομοιόμορφο στρώμα κοκκώδους υλικού πάνω στο πρώτο και ταυτόχρονα οι στρώσεις πρεσάρονται από το μηχάνημα. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση του μοντέλου. Στο τέλος το κέλυφος συγκράτησης πρέπει να αφαιρεθεί για να εμφανιστεί η δομή της κατασκευής.

Το μηχάνημα εκτύπωσης είναι ένα είδος γιγαντιαίου σχεδιαστή, με κεφαλή ψεκασμού που κινείται κατά μήκος δύο πλαισίων στο επίπεδο x-y και ψεκάζει επιλεκτικά σε προκαθορισμένες περιοχές του στρώματος σκόνης. Ένα σύνολο τεσσάρων βηματικών κινητήρων μετακινεί το πλαίσιο στον άξονα z. Ο πυρήνας του συστήματος είναι η κεφαλή της εκτύπωσης, η οποία λειτουργεί επίσης ως διασκορπιστής στερεού υλικού στην αρχή της διαδικασίας εκτύπωσης.



Εικόνα 2.1-7. Σχήμα εκτυπωτή D-shape (Cesaretti et al., 2014)

Με εκτυπωτές D-shape έχουν παραχθεί πάνω από 1000 τμήματα από το 2008. Το πρώτο αντικείμενο ήταν το Radiolaria, που μετρά $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$. Εκτυπώθηκε σε μια εβδομάδα εφαρμόζοντας μια διαδικασία ενεργοποίησης συνδεδεμένων συστατικών. Κάθε στρώση είχε πάχος 5 mm και αποτελούταν από άμμο και οξείδιο μαγνησίου και η υγρή ενεργοποιητική ουσία ήταν εξαένυδρο χλωριούχο μαγνήσιο διαλυμένο σε νερό.



Εικόνα 2.1-8. Radiolaria με την τεχνολογία D-shape

Οι Lim et al. (2012) αναφέρουν μερικά μειονεκτήματα της διαδικασίας αυτής όπως είναι η ανάπτυξη τραχιάς επιφάνειας και ο περιορισμός των διαστάσεων της εκτύπωσης από το πλαίσιο εκτύπωσης και η μαζική τοποθέτηση υλικού. Επιπλέον, είναι μια αργή διαδικασία που απαιτεί μαζική τοποθέτηση υλικού με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η αφαίρεση του αχρησιμοποίητου υλικού μετά το τέλος της εκτύπωσης.

ii. Τεχνολογία αναδυόμενων αντικειμένων (Emerging Objects)

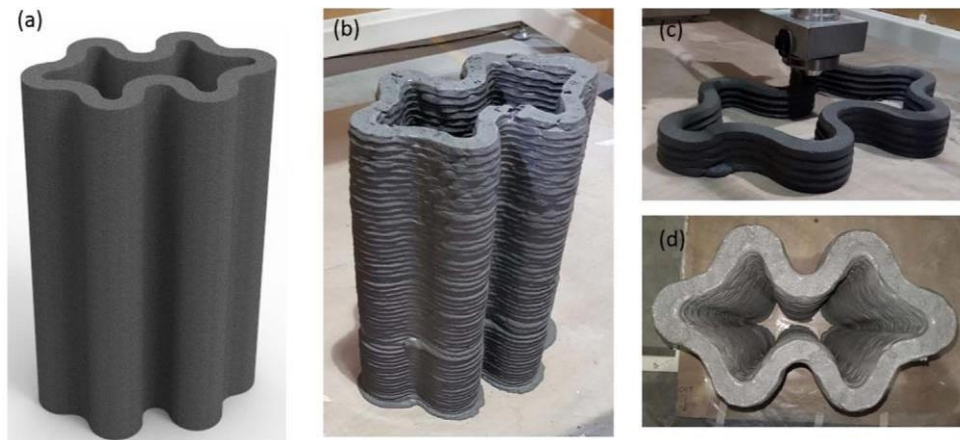
Η τεχνολογία αναδυόμενων αντικειμένων (Emerging Objects) κάνει χρήση της τεχνικής για να σκληρύνει επιλεκτικά ένα σύνθετο σκεύασμα τσιμέντου με απόθεση ενός δεσμευτικού παράγοντα. Παράδειγμα αυτής της τεχνολογίας είναι η κατασκευή του Bloom, ενός μικρού ναού ύψους 2.74 m με ένα αποτύπωμα που μετρά περίπου 3.66 m επί 3.66 m και αποτελείται από 840 τρισδιάστατα τυπωμένα μπλοκ. Κάθε τεμάχιο εκτυπώνεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από 11 εκτυπωτές με ιδιόκτητο σύνθετο τσιμέντο που αποτελείται κυρίως από συνηθισμένο τσιμέντο Portland χωρίς οξείδιο σιδήρου. Τα μπλοκ συγκρατούνται στη θέση τους χρησιμοποιώντας ανοξείδωτο ατσάλι και συναρμολογούνται σε 16 μεγάλα, ελαφριά προκατασκευασμένα πάνελ, τα οποία θα μπορούσαν να συναρμολογηθούν σε λίγες ώρες.



Εικόνα 2.1-9.Κατασκευή του Bloom με την τεχνολογία Emerging Objects (Matthew Millman Photography)

iii. Τρισδιάστατη εκτύπωση με χρήση γεωπολυμερούς

Η τεχνική με βάση την σκόνη έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει δομικά συστατικά με φιλές λεπτομέρειες και πολύπλοκα σχήματα, που έχουν μεγάλη ζήτηση στον κατασκευαστικό κλάδο και απαιτούν ακριβούς ξυλότυπους με τα διαθέσιμα συστήματα κατασκευής. Με την τεχνική αυτή μπορούν να παραχθούν στιβαρά και ανθεκτικά εξαρτήματα σε λογική ταχύτητα για την ικανοποίηση αυτής της βιομηχανικής ζήτησης. Το πολύ περιορισμένο, όμως, πεδίο των υλικών εκτύπωσης με βάση το τσιμέντο, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εμπορικά διαθέσιμους εκτυπωτές, εμποδίζει την απόδοση αυτής της τεχνικής στο μέγιστο δυναμικό εφαρμογής της. Ο περιορισμός αυτός ξεπεράστηκε με την ανάπτυξη μιας καινοτόμας μεθοδολογίας, που υιοθετεί την χρήση υλικού με βάση το γεωπολυμερές (Xia & Sanjayan, 2016).



Εικόνα 2.1-10. Τρισδιάστατη εκτύπωση με γεωπολυμερές (a) Ψηφιακό μοντέλο (b) εκτυπωμένο μοντέλο (c) μοντέλο κατά τη διάρκεια εκτύπωσης (d) κάτοψη μοντέλου. (Panda & Tan, 2018)

Το γεωπολυμερές, γνωστό και ως ανόργανο πολυμερές, είναι ένας τύπος αλκαλικού αργιλοπυριτικού τσιμέντου, ο οποίος δρα ως συνδετικός παράγοντας στο σκυρόδεμα. Κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας 80% λιγότερο CO₂ συγκριτικά με το παραδοσιακό τσιμέντο Portland (Duxson et al., 2007), ενώ μπορεί να διαμορφωθεί, ώστε να επαναχρησιμοποιεί πληθώρα βιομηχανικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών. Εξαιτίας της υψηλής θλιπτικής αντοχής του, της εξαιρετικής αντίστασης σε επιθέσεις θεικού άλατος, της καλής αντοχής σε οξεία, του χαμηλού ερπυσμού και άλλων χημικών ιδιοτήτων έχει προσελκύσει σημαντική προσοχή. Επιπλέον, η αξιοποίηση των βιομηχανικά παραγόμενων προϊόντων του γεωπολυμερούς όπως η σκωρία και η άμμος θεωρείται ευεργετική, καθώς η διάθεση τέτοιων προϊόντων ήταν πάντα ένα παγκόσμιο ζήτημα.

2.1.3 Παραδείγματα τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών

Μια σειρά τρισδιάστατα τυπωμένων σπιτιών θα είναι σύντομα ένα μέρος για τους πρώην άστεγους να αποκαλούν το σπίτι τους στο Community First! Village στο Ωστιν, Τέξας, μια από τις πιο καινοτόμες κοινότητες στον κόσμο. Τα σπίτια 400 τετραγωνικών ποδιών, 3D τυπωμένα με τον εκτυπωτή Vulcan II της Icon, διαθέτουν ένα υπνοδωμάτιο, ένα μπάνιο, πλήρως εξοπλισμένη κουζίνα, σαλόνι και μια μεγάλη βεράντα. Στην ίδια κατεύθυνση κινούνται και άλλες εταιρίες, όπως η CC Corp η οποία σε συνεργασία με την εταιρία σχεδιασμού HDR και τον υποστηρικτικό πάροχο υπηρεσιών Volunteers of America Los Angeles στοχεύει στην κατασκευή μονάδων στέγασης ατόμων χαμηλού εισοδήματος στην περιοχή.



Εικόνα 2.1-11. Σπίτια 400 τ.μ. κατασκευασμένα με τον Icon's Vulcan II

Ένα παράδειγμα της ταχύτητας με την οποία μπορεί να κατασκευαστεί ένα κτίριο με τρισδιάστατη εκτύπωση σκυροδέματος είναι αυτό το σπίτι του σχήματος που εκτυπώθηκε στη Μόσχα σε λιγότερο από 24 ώρες της εταιρίας Aris cor. Ο εκτυπωτής μεταφέρθηκε επί τόπου, όπου δημιούργησε τους τσιμεντένιους τοίχους και τα εσωτερικά τοιχώματα ως μια ενιαία δομή και στο τέλος μια ομάδα εργατών ολοκλήρωσε το σπίτι προσθέτοντας τη στέγη, τα παράθυρα και ό,τι άλλο χρειαζόταν στο εσωτερικό του.



Εικόνα 2.1-12. Σπίτι κατασκευασμένο από την Aris cor σε λιγότερο από 24 h

Για την καταπολέμηση της τρέχουσας επιδημίας, μετά από ένα μήνα καινοτομίας, έρευνας και ανάπτυξης, η Winsun ξεκίνησε τρισδιάστατα τυπωμένα προκατασκευασμένα κτίρια κατά της επιδημίας, συμπεριλαμβανομένων έξυπνων σημείων ελέγχου απολύμανσης μέτρησης θερμοκρασίας, έξυπνων στάσεων λεωφορείων απολύμανσης μέτρησης θερμοκρασίας και σπιτιών απομόνωσης αρνητικής πίεσης. Κάθε ένα από τα προκατασκευασμένα κτίρια ενσωματώνεται σε μία μόνο μονάδα και μπορεί να τεθεί σε λειτουργία μετά την ανύψωση.



α) Τρισδιάστατες μονάδες ελέγχου απολύμανσης



β) Τρισδιάστατο τυπωμένο σπίτι απομόνωσης



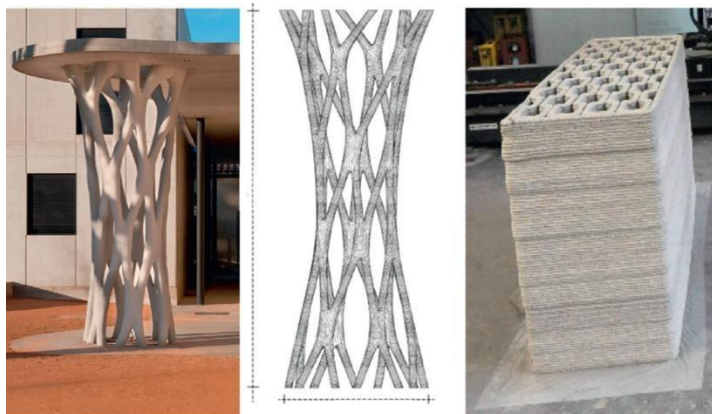
γ) Τρισδιάστατα τυπωμένα στάση λεωφορείου

Έχει προταθεί μια παραλλαγή της τεχνολογίας CC για αυτόνομη κατασκευή ψηλών πύργων σκυροδέματος, πχ. ανεμογεννητριών, πυλώνες γεφυρών, πύργους νερού, σιλό, καμινάδες κ.λπ. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σύνολο συντονισμένων ρομπότ κάθετης αναρρίχησης που φέρουν ένα ειδικό σύστημα συναρμολόγησης ακροφυσίων και ελέγχου κίνησης Contour Crafting. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της νέας προσέγγισης είναι η πλήρως αυτόνομη λειτουργία, η χρήση σκυροδέματος που εξαλείφει τις εργοστασιακές εργασίες σε χαλύβδινα τμήματα και τη δύσκολη μεταφορά, η ασφαλής λειτουργία λόγω της εξάλειψης ανθρώπινων εργασιών σε επικίνδυνα υψόμετρα και θυελλώδη κατάσταση, το χαμηλό κόστος μεταφοράς και η δυνατότητα κατασκευής πολύ ψηλότερων πύργων.



Εικόνα 2.1-13: Τεχνολογία CC για αυτοματοποιημένη κατασκευή ανεμογεννήτριας.

Δεδομένου ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει τη δυνατότητα της κατάθεσης του υλικού όπου είναι πραγματικά απαραίτητο, σύμφωνα με την αρχή «η μορφή ακολουθεί τη δύναμη», μπορούν να παραχθούν τοπολογικά βελτιστοποιημένες δομές υψηλής γεωμετρικής ευκαμψίας με την τρισδιάστατη εκτύπωση, που είναι καλά φέρουσα αλλά όχι ογκώδης. Ένα σύνθετο ζευκτό σε σχήμα 4 μέτρων ύψους που υποστηρίζει την οροφή μιας παιδικής χαράς σε ένα σχολείο στο Aix en Provence της Γαλλίας είναι ένα τέτοιο παράδειγμα.



Εικόνα 2.1-14: Σύνθετο ζευκτό που στηρίζει την οροφή παιδικής χαράς στο Aix en Provence

Το 2017 σχεδιάστηκε και χτίστηκε η πρώτη πεζογέφυρα στον κόσμο ανοίγματος 12 m και πλάτους 1.75 m από το Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) (Σχήμα 2.1-15 (α)). Κατασκευάστηκε από 8 ξεχωριστά στοιχεία, καθένα από τα οποία εκτυπώθηκε με το σύστημα D-Shape. Ομοίως, το 2017 οι Salet et al. κατασκεύασαν μια γέφυρα με την τεχνολογία εκτύπωσης περιγράμματος CC χωρίζοντας την γέφυρα σε έξι στοιχεία και εκτυπώνοντάς τα χωριστά.



(α) Κατασκευή με τεχνολογία D-Shape



(β) Κατασκευή με τεχνολογία CC

Εικόνα 2.1-15. Κατασκευές γεφυρών μικρών ανοιγμάτων με τεχνολογίες 3DCP.

2.2 Πειραματικές μελέτες ιδιοτήτων της διεπιφάνειας τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών από σκυρόδεμα

2.2.1 Σκληρυμένες ιδιότητες εκτύπωσης σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (Le et al., 2012).

Αρχικά, μελετάται το επιστημονικό άρθρο (Le et al., 2012) το οποίο παρουσιάζει τις σκληρυμένες ιδιότητες ενός υψηλής απόδοσης ενισχυμένου με ίνες λεπτού αδρανούς σκυροδέματος, που εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου για την κατασκευή δομικών στοιχείων στρώμα με στρώμα.

i. Δοκίμια

Όλα τα δοκίμια ελέγχου χυτεύτηκαν σε καλούπια σε αντιστοιχία με τα πρότυπα BS EN. Πραγματοποιήθηκαν τα εξής: έλεγχος θλιπτικής αντοχής σε χαλύβδινο κυβικό καλούπι 100 mm (BS EN 12390-3:2009), έλεγχος καμπτικής αντοχής σε χαλύβδινο καλούπι 100 x 100 x 500 mm (BS EN 12390-5:2009), έλεγχος εφελκυστική αντοχής σε πυρήνα κυβικού καλουπιού 150 mm (BS EN 14488-4:2005), έλεγχος συρρίκνωσης σε χαλύβδινο καλούπι 75 x 75 x 220 mm (BS EN 12617-4:2002).

Τα εκτυπωμένα δοκίμια κατασκευάστηκαν με πριόνισμα και κοπή από τυπωμένα στοιχεία συμπεριλαμβανομένου πλακών 350 x 350 x 120 mm, 500 x 350 x 120 mm, ένα δοκιμαστικό καμπύλου σχήματος πάγκο 2000/1000/63 mm (μήκος/ πλάτος/ πάχος) και δοκούς 500 x 100 x 200 mm.

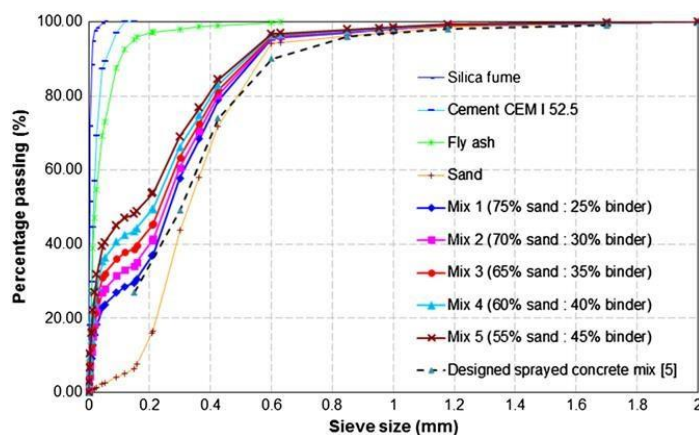
ii. Υλικά

Ο σχεδιασμός του μείγματος στόχευε στην ικανοποίηση των απαιτήσεων τόσο των φρέσκων όσο και των σκληρυμένων καταστάσεων. Η φρέσκια κατάσταση περιλαμβάνει την ικανότητα εκτύπωσης, την εργασιμότητα και την οικοδομησιμότητα. Η σκληρυμένη περιλαμβάνει αντοχές σε θλίψη και κάμψη τόσο των χυτών όσο και των τυπωμένων δειγμάτων. Το μείγμα σχεδιασμού στοχεύει σε θλιπτική αντοχή πάνω από 100 MPa και καμπτική αντοχή πάνω από 10 MPa στις 28 μέρες για τα συμβατικά κατασκευασμένα δοκίμια. Επιλέχθηκαν μέγιστο μέγεθος κόκκου άμμου 2mm, εξαιτίας της μικρής διαμέτρου ακροφυσίου (9 mm), τσιμέντο CEM I 52.5, πτητική τέφρα σύμφωνα με τον BS EN450 και μη πυκνοποιημένος πυριτικός καπνός τα οποία σχημάτισαν το συνδυαστικό συστατικό με τη χημική σύνθεση που φαίνεται στον πίνακα:

Component	Average percentage by weight (%)		
	Cement CEM I 52.5	Fly ash	Silica fume
SiO ₂	19.4–21.5	45–51	90–97
Al ₂ O ₃	4.1–4.9	27–32	
Fe ₂ O ₃	2.7–2.9	7–11	
CaO	61.9–64.0	1–5	
MgO	1.1–1.2	1–4	
SO ₃	3.0–3.2	0.3–1.3	
K ₂ O	0.6–0.7	1–5	
Na ₂ O	0.2	0.8–1.7	
TiO ₂		0.8–1.1	
Cl	0.04–0.05	0.05–0.15	
Loss of ignition	2.3–4.1		<3.0

Πίνακας 2.2-1. Η χημική σύσταση των CEM I 52.5, πτητικής τέφρας

Οι διαβαθμίσεις των υλικών μετρήθηκαν με μηχανή Mastersizer 2000 και συνδυάστηκαν σε διάφορες αναλογίες ώστε να σχηματίσουν ομαλές καμπύλες ταξινόμησης πιθανών μιγμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 2.2-1. Διαβάθμιση σωματιδίων πρώτων υλών και πιθανών μιγμάτων

Η διαδικασία βελτιστοποίησης είχε σαν αποτέλεσμα ένα μείγμα με αναλογία 60/40 άμμου/συνδετικού, που περιλαμβάνει 70% τσιμέντο, 20% πτητική τέφρα και 10% καπνού πυριτίου, και επιπλέον 1.2 kg/m³ ίνες πολυπροπυλενίου. Ο λόγος νερού/συνδετικό ήταν 0.26 και επομένως ο λόγος νερό/τσιμέντο ήταν 0.37. Το μείγμα απαιτεί 1% υπερπλαστικοποιητή και 0.5% επιβραδυντή για την επίτευξη βέλτιστης εργασιμότητας με αντοχή σε διάτμηση 0.55 kPa, βέλτιστου χρόνου ανοίγματος έως 100 λεπτά και δυνατότητας δημιουργίας μεγάλου αριθμού στρωμάτων με διάφορες ομάδες νημάτων.

iii. Πειραματικές διαδικασίες και αποτελέσματα

α) Πυκνότητα

Η πυκνότητα υπολογίστηκε για τα χυτά δείγματα με βάση τον BS EN12390-7:2009, ενώ για το εκτυπωμένο σκυρόδεμα πριονίστηκαν κυβικά δοκίμια 100 mm από εκτυπωμένες πλάκες 350 x 350 x 120 mm και 500 x 350 x 120 mm. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν με πυρήνες διαμέτρου 58 mm στη διερεύνηση της αντοχής εξόλκευσης.

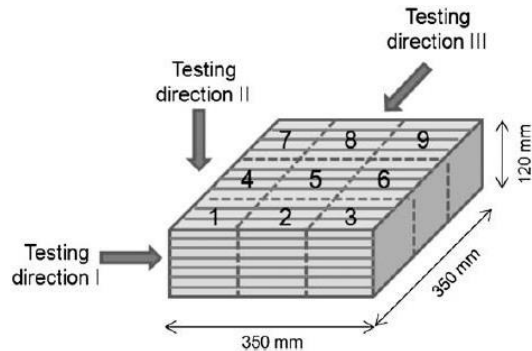
Η μέση πυκνότητα του βέλτιστου μείγματος για τα χυτά δοκίμια ήταν 2250 kg/m³, ενώ για τα τυπωμένα δείγματα ήταν λίγο υψηλότερη στα 2350 kg/m³. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο ότι η χοάνη σκυροδέματος δονήθηκε απαλά πριν από την παράδοση του νωπού σκυροδέματος και το σύστημα σωλήνων και αντλιών παρείχε επίσης μια μικρή πίεση κατά τη διάρκεια της εξώθησης. Αν και αυτό το υψηλής απόδοσης εκτυπωμένο σκυρόδεμα έχει μόνο άμμο σαν αδρανές, έχει πυκνότητα πολύ υψηλότερη από εκείνη των συνηθισμένων κονιαμάτων (1800 kg/m³) και των ψεκασμένων κονιαμάτων (1800 - 2000 kg/m³ κατά μέσο όρο), που αποδίδεται επίσης στην ταξινόμηση και την ομογένεια που οδηγούν σε υψηλές αντοχές και χαμηλή συρρίκνωση.

β) Θλιπτική αντοχή

Χυτά κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm σκληρύνθηκαν σε δεξαμενή νερού στους 20° C και ελέγχθηκαν στις 1,7 και 28 μέρες για την παρακολούθηση της ανάπτυξης αντοχής με τον χρόνο. Η θλιπτική αντοχή στις 28 μέρες προέκυψε τυπικά 107 MPa, αλλά μεταβαλλόταν με τις προσμείξεις και τις διάφορες δοσολογίες. Η προσθήκη υπερπλαστικοποιητή φάνηκε να καθυστερεί την σκλήρυνση του σκυροδέματος σε νεαρή ηλικία. Ωστόσο, όπως ήταν αναμενόμενο στις 7 και στις 28 μέρες τα δοκίμια με 1-2% υπερπλαστικοποιητή είχαν υψηλότερη αντοχή σε σύγκριση με αυτά που διέθεταν 0.5% υπερπλαστικοποιητή, ενώ χωρίς την παρουσία του το φρέσκο σκυρόδεμα έγινε δύσκαμπτο και δεν μπορούσε στη συνέχεια να εκτυπωθεί. Η προσθήκη ποσότητας επιβραδυντή πάνω από 1% μείωσε σημαντικά την θλιπτική αντοχή σε μικρές ηλικίες, δηλαδή στις 1 και 7 ημέρες, αλλά στις 28 μέρες έδειξε να μην υπάρχει επίδραση και οι αντοχές όλων των μειγμάτων ήταν περίπου 100 MPa. Ο επιταχυντής αύξησε σημαντικά την αντοχή σε μια μέρα: κατά 70% για ποσοστό 3-5% και κατά 40% για 1%. Ωστόσο, στις 7 ημέρες αυτή η βελτίωση είχε εξαφανιστεί και στις 28 οι αντοχές των δειγμάτων με επιταχυντή 3-5% ήταν μικρότερες από αυτές των δειγμάτων με 1%.

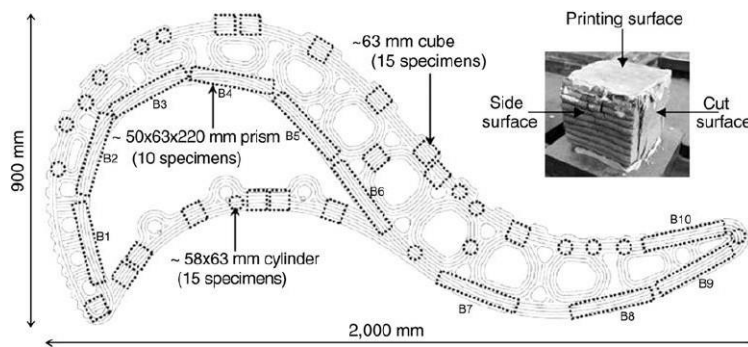
Για τα εκτυπωμένα στοιχεία, εννέα κύβοι (100 mm) εξήχθησαν από την πλάκα 350 x 350 x 120 mm, και φορτίστηκαν σε μια από τις τρεις διευθύνσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα: διεύθυνση I για τα δοκίμια 1-3, διεύθυνση II για τα 4-6 και διεύθυνση III για τα 7-9 σύμφωνα με τον BS

EN12390-3:2009. Ομοίως άλλοι εννιά εξήχθησαν από τρεις πλάκες 500 x 350 x 120 mm και ελέγχθηκαν στις ίδιες διευθύνσεις I, II και III.



Εικόνα 2.2-2. Διάγραμμα κοπής και οδηγίες δοκιμής για εννέα δείγματα κύβου 100 mm που εξάγονται από την πλάκα 350x350x120

Επιπλέον, δεκαπέντε πυρήνες διαμέτρου 58 mm, δέκα πρίσματα πλάτους x μήκους 50 x 220 mm και δεκαπέντε κύβοι 63 mm εξήχθησαν από μια δοκιμαστική εκτύπωση πάχους 63 mm ενός καμπύλου στοιχείου για να μετρηθεί η απόδοση του εκτυπωμένου σκυροδέματος υπό θλιπτικό και καμπτικό φορτίο. Όλα τα κυλινδρικά κομμάτια ελέγχθηκαν κάθετα στην επιφάνεια εκτύπωσης, ενώ όλα τα κυβικά δοκίμια ελέγχθηκαν σε 3 προσανατολισμούς: 3 κάθετα σε μια επιφάνεια κοπής (επιφάνεια φόρτισης I), 9 κάθετα στην επιφάνεια εκτύπωσης (επιφάνεια φόρτισης II) και 3 κάθετα σε μια πλευρική επιφάνεια (επιφάνεια φόρτισης III), όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν 0.4 N/mm².



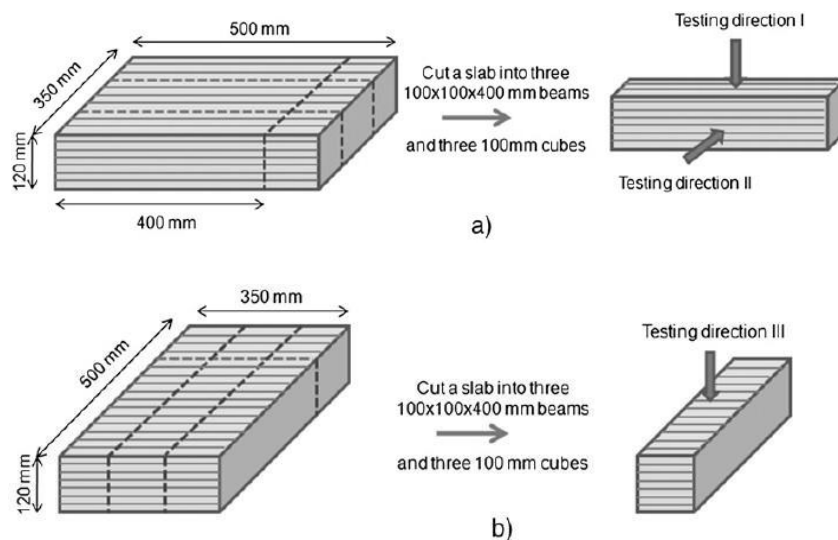
Εικόνα 2.2-3. Διάγραμμα που δείχνει τις θέσεις εξαγωγής τυπωμένων δειγμάτων από έναν καμπύλο πάγκο

Οι μέσες θλιπτικές αντοχές του εκτυπωμένου σκυροδέματος για τα κυβικά δοκίμια που κόπηκαν από την πλάκα 350 x 350 x 120 mm, συγκριτικά με αυτές του χυτού σκυροδέματος ήταν

ίδιες κατά τις διευθύνσεις I και II (102 MPa) και 15% μικρότερες κατά τη διεύθυνση III (91 MPa). Τα κυβικά δοκίμια που κόπηκαν από τις πλάκες 500 x 350 x 120 mm είχαν αντοχή 97 MPa στην διεύθυνση I και 93 MPa στις διευθύνσεις II και III, δηλαδή 9% και 13% χαμηλότερες αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι μια σωστά εκτελούμενη διαδικασία εξώθησης εισάγει μια σχετικά μικρή ανισοτροπία σε όρους θλιπτικής αντοχής, αν και φαίνεται ότι η φόρτιση στο επίπεδο των στρωμάτων (διευθύνσεις II και III) μπορεί να παρουσιάσει μια μικρή μείωση, που σχετίζεται πιθανώς με τη διάτμηση λόγω της τριβής μεταξύ των πλακών. Ωστόσο, η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων που εξήχθησαν από το καμπύλο εκτυπωμένο σχήμα, παρουσίασε μείωση εξαιτίας των κενών που εμφανίστηκαν μεταξύ των νημάτων με τιμές που κυμαίνονταν μεταξύ 75 έως 83 MPa (30% μείωση).

γ) Καμπτική αντοχή

Η καμπτική αντοχή μετρήθηκε επίσης και στις δυο καταστάσεις. Πλάκες 100 x 100 x 500 mm, που σκυροδετήθηκαν σε καλούπια, αφαιρέθηκαν μετά από μια μέρα και στη συνέχεια σκληρύνθηκαν σε δεξαμενή νερού σε θερμοκρασία 20° C έως και 28 μέρες. Για τα εκτυπωμένα δοκίμια, εκτυπώθηκαν τρεις πλάκες 500 x 350 x 120 mm και σκληρύνθηκαν κάτω από υγρή λινάτσα και μετά από 28 μέρες αφαιρέθηκαν τρεις δοκοί 100 x 100 x 400 mm και τρεις κύβοι 100 mm από κάθε πλάκα. Οι πλάκες 1 και 2 εκτυπώθηκαν και κόπηκαν όπως απεικονίζεται στο σχήμα (a) και η 3 όπως απεικονίζεται στο (b). Τα δοκίμια που εξήχθησαν από τις πλάκες 1,2 και 3 ελέγχθηκαν στις διευθύνσεις I, II και III αντίστοιχα.



Εικόνα 2.2-4: Κομμένες δοκοί από εκτυπωμένα δοκίμια και έλεγχος σε κάμψη για α) τις διευθύνσεις I και II και β) την διεύθυνση III.

Όλα τα δοκίμια δοκού εξετάστηκαν κάτω από κάμψη 4 σημείων με ένα άνοιγμα 300 mm σύμφωνα με τον BS EN 12390-5:2009. Δέκα επιπλέον δείγματα 50 x 63 x 220 mm κόπηκαν από το δοκιμαστικό εκτυπωμένο στοιχείο για να γίνει αντιληπτή η ανισοτροπία.

Η μέση καμπτική αντοχή των χυτών δοκιμίων ήταν 11 MPa, σύμφωνη με άλλες μελέτες σκυροδέματος υψηλής αντοχής (Bhanjaa et al., 2005), (Neville, 1995). Η καμπτική αντοχή των εκτυπωμένων δειγμάτων διέφερε ανάλογα με τον προσανατολισμό της δοκιμής. Τα δοκίμια που εξήχθησαν από τις πλάκες διαστάσεων 500 x 350 x 120 mm παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή στις διευθύνσεις I και II (16 και 13 MPa) σε σχέση με αυτές του χυτού σκυροδέματος, η οποία μετρήθηκε από την κεντρική κάτω περιοχή των δειγμάτων δοκού όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση εφελκυσμού. Στην διεύθυνση III, όμως, η αντοχή παρουσίασε αρκετά μικρότερη τιμή (7 MPa), λόγω της ανισοτροπίας που προκύπτει από την διαδικασία εκτύπωσης. Τέλος, η καμπτική αντοχή των δοκών που εξήχθησαν από το καμπύλο στοιχείο ήταν ελαφρώς υψηλότερες από αυτό του ελέγχου με μέση τιμή 12 MPa των 5 δοκών που φορτίστηκαν στη διεύθυνση I και 13 MPa των δοκών που φορτίστηκαν στη διεύθυνση II.

Η τάση που αναπτύσσεται στη διατομή του μέσου ισούται με:

$$\tau = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

, όπου:

h το ύψος του δοκιμίου, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 100 mm

I ροπή αδρανείας του δοκιμίου, δηλαδή $I = b \cdot h^3/12 = 8333333 \text{ mm}^4$

M ροπή που αναπτύσσεται στη διατομή

Για $\tau = 13 \text{ MPa}$ κατά τη διεύθυνση II, προκύπτει ροπή:

$$M = \frac{\tau \cdot I \cdot 2}{h} = 2500000 \text{ Nmm} = 250 \text{ kNcm}$$

Η δύναμη που αντιστοιχεί σε αυτή την ροπή αστοχίας ισούται με:

$$M = g \cdot 15^2/2 - F \cdot 10 \Rightarrow$$

$$F = 25 \text{ kN}$$

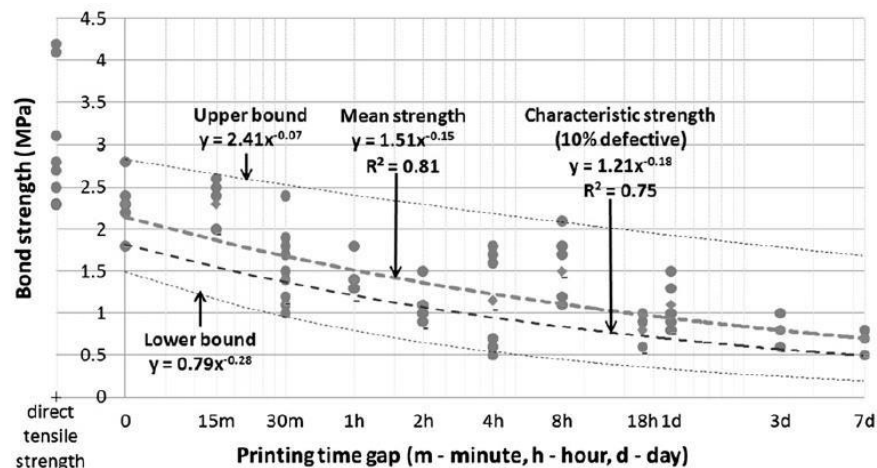
δ) Δοκιμή εξόλκευσης

Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων, που επηρεάζει την δομική απόδοση, ειδικά όταν η διαδικασία σταματάει προσωρινά μεταξύ των

στρώσεων. Η επίδραση αυτής της χρονικής καθυστέρησης διερευνήθηκε με μια δοκιμή άμεσης τάσης σε κυλινδρικά δείγματα.

Αρχικά, εκτυπώθηκε δοκός διαστάσεων 100 x 100 x 500 mm και έπειτα από ένα χρονικό κενό ένα άλλο δείγμα 100 x 100 x 500 mm εκτυπώθηκε από πάνω. Τα δοκίμια στην συνέχεια καλύφθηκαν με υγρή λινάτσα και πλαστικό φύλλο επικάλυψης για μια μέρα πριν μεταφερθούν σε εργαστήριο αποθήκευσης όπου διατηρήθηκαν σε αυτή την κατάσταση για 28 μέρες. Ακόμα, λήφθηκαν έξι κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 58 mm επί 120 mm ύψος από τον πυρήνα κάθε δοκού και ελέγχθηκαν με τον BS EN 14488-4:2005 + A1:2008. Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν 11 ομάδες στοιχείων με μεταβλητό χρονικό κενό μεταξύ του παλαιότερου και του νεότερου κομματιού.

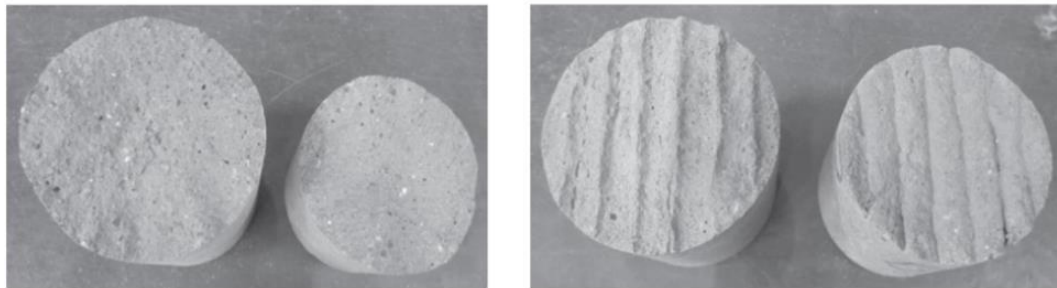
Συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με την άμεση αντοχή εφελκυσμού παρόμοιων δειγμάτων και τη διαδικασία δοκιμής όπως στο σχήμα:



Εικόνα 2.2-5. Διακύμανση της αντοχής εφελκυσμού ανάλογα με το χρονικό κενό και σύγκριση με την άμεση αντοχή σε εφελκυσμό

Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά μεταβλητά με συντελεστές που κυμαίνονταν από 5 έως 30%, γεγονός που αναμενόταν δεδομένης της φύσης της διαδικασίας εξώθησης σε στρώσεις και γενικότερων συζητήσεων σχετικά με τη μέτρηση της άμεσης αντοχής σε εφελκυσμό (Neville, 1995) και την δοκιμή εξόλκευσης σκυροδέματος (Austin et al., 1995). Πιστεύεται ότι τέτοια δείγματα επηρεάζονται σοβαρότερα από τη μη ομοιόμορφη συρρίκνωση σε σύγκριση με άλλους τύπους δοκιμών.

Τα δοκίμια με χρονικό κενό μεταξύ 0 και 15 λεπτών αστόχησαν στο υλικό και η δύναμη του δεσμού δεν μπορούσε να προσδιοριστεί, αλλά ήταν υψηλότερη από τις τιμές που μετρήθηκαν. Όλα τα δείγματα με χρονικό κενό άνω των 15 λεπτών αστόχησαν στην διεπιφάνεια μεταξύ των νεότερων και των παλαιότερων τμημάτων. Μεταξύ ενός τριαντάλεπτου και ενός εφτά ημερών κενό, οι μέσες αντοχές σύνδεσης ήταν 53% και 77% μικρότερες από το δείγμα ελέγχου, αλλά ξεπέρασαν με άνεση της προτεινόμενη ελάχιστη αντοχή δεσμού 0.8 MPa. Η μείωση αυτή με την αύξηση του χρονικού κενού οφείλεται στη μείωση της πρόσφυσης μεταξύ των πλακών.



(α) 15 λεπτά κενό

(β) 4 ώρες κενό

Εικόνα 2.2-6. Λειτουργία αστοχίας δειγμάτων για δυο χρονικά κενά

ε) Μέτρηση κενών

Τα κενά που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης μεταξύ των νημάτων μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις σκληρυμένες ιδιότητες και επομένως ο υπολογισμός τους είναι σημαντικός. Η μέτρηση των κενών πραγματοποιήθηκε σε τρεις ομάδες δειγμάτων: σε καλούπια, σε κακής εκτύπωσης και σε καλής εκτύπωσης, με επιφάνεια $90 \times 90 \text{ mm}^2$ το καθένα. Οι επιφάνειες καθαρίστηκαν και ψεκάστηκαν με μαύρο χρώμα και όταν στέγνωσαν ένα λευκό χρώμα εφαρμόστηκε, ώστε να αποκαλύψει τα κενά που διατηρούσαν το μαύρο χρώμα. Στη συνέχεια σαρώθηκε η επιφάνεια και η εικόνα μεταφέρθηκε στο “Image Tool”, στο οποίο μετρήθηκε ο αριθμός των κενών και η επιφάνειά τους, για τα κενά με μέγεθος 0.2 – 4.0 mm.

Κατά τον υπολογισμό μετρήθηκαν 3.8% κενά σε δείγματα χυτού υλικού, 4.8% σε κακώς τυπωμένο σκυρόδεμα και μόνο 1.0% στο καλά τυπωμένο σκυρόδεμα και πυκνότητες 2250, 2260 και 2350 kg/m^3 αντίστοιχα. Η κατανομή των κενών σε τρεις ομάδες σκυροδέματος έδειξε ότι η περιοχή των μικρών κενών (0.2 – 1.6 mm) στο χυτό υλικό ήταν πολύ μεγαλύτερη από εκείνη τόσο του κακά όσο και του καλά εκτυπωμένου σκυροδέματος. Το πρώτο είχε πιο μεγάλα κενά (1.6 – 4.0 mm) σε σχέση με το χυτό, τα οποία βρίσκονταν κυρίως μεταξύ των εκτυπωμένων νημάτων. Μόλις αυτά εξαλείφθηκαν με τον σωστό έλεγχο της διαδρομής εκτύπωσης και της ρεολογίας

σκυροδέματος, η πυκνότητα αυξήθηκε, όπως φαίνεται στο καλά τυπωμένο σκυρόδεμα, το οποίο είχε μικρότερη περιοχή για διαβάθμιση κενών μεταξύ 0.2 – 4.0 mm.

στ) Συστολή ξήρανσης

Καθώς η διαδικασία εκτύπωσης κατασκευάζεται χωρίς ξυλότυπο, η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η συστολή ξηράνσεως, λόγω της εξάτμισης του νερού και κατά συνέπεια να αυξάνεται ο κίνδυνος ρηγμάτωσης. Χυτά δοκάρια 75 x 75 x 229 mm που συμμορφώνονται με τον BS EN 12617-4:2002 παρακολουθήθηκαν για έξι μήνες σε τρεις συνθήκες σκλήρυνσης: βυθισμένα σε νερό, καλυμμένα με υγρή λινάτσα και πλαστικό φύλο επικάλυψης και σε κλιματικό θάλαμο (20 ° C και σχετική υγρασία 60%), με πέντε δοκίμια σε κάθε ομάδα.

Όπως αναμενόταν, το σκυρόδεμα που σκληρύνθηκε με νερό συρρικνώθηκε λιγότερο. Η βέλτιστη διαβάθμιση των σωματιδίων, η χαμηλή αναλογία νερού/ συνδετικό και η προσθήκη πτητικής τέφρας, φάνηκε να βοηθούν στη μείωση της συρρίκνωσης του εκτυπωτικού σκυροδέματος υψηλής απόδοσης. Αυτό είναι ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα για μια διαδικασία κατασκευής χωρίς ξυλότυπο, όπου εκτίθεται η πλήρης επιφάνεια των εξαρτημάτων.

2.2.2 Σκληρυνμένες ιδιότητες τρισδιάστατα εκτυπωμένου σκυροδέματος: η επίδραση των παραμέτρων διεργασίας στην σύνδεση των στρώσεων (Wolfs et al., 2019a)

Αυτή η εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης πάνω στην σχέση μεταξύ των παραμέτρων της διαδικασίας 3DCP και της αντοχής σύνδεσης του εκτυπωμένου σκυροδέματος.

i. Δοκίμια

Όλα τα δοκίμια λήφθηκαν από ορθογωνικά δείγματα, εκτυπωμένα σε στρώσεις πλάτους 50 mm και ύψους 9.5 mm. Μετά την εκτύπωση τα δείγματα αποθηκευτήκαν για 24 ώρες κάτω από πλαστικά φύλλα. Σε ηλικία μιας μέρας τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από την κλίνη εκτύπωσης, πριονίστηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις και εξομαλύνθηκαν οι επιφάνειες φόρτισης και στήριξης, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση μέγιστων τάσεων, λόγω της υψής των επιφανειών. Μετά την κοπή τα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε νερό, για να διατηρήσουν όλα το ίδιο ιστορικό σκλήρυνσης μέχρι τη δοκιμή σε ηλικία 7 ημερών.

ii. Πρόγραμμα δοκιμών και μελέτες παραμέτρων

Παράμετροι διαδικασίας:

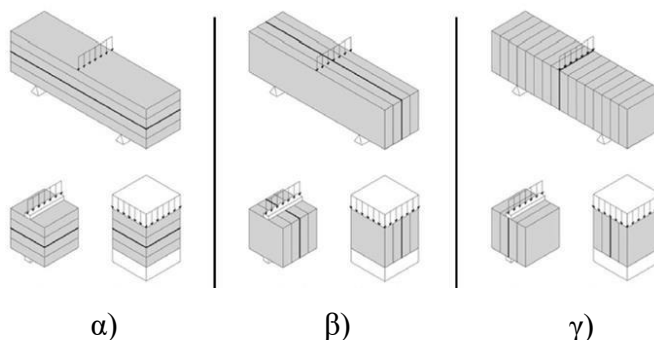
Μεσοδιάστημα μεταξύ στρώσεων: 15 s, 1 h, 4 h, 7 h, 24 h

Ύψος ακροφυσίου: 8.0 mm, 9.5 mm, 11 mm

Επιφανειακή ενυδάτωση: καλυμμένο, ακάλυπτο

Μηχανικές ιδιότητες: θλιπτική αντοχή, καμπτική αντοχή, δοκιμή αποκόλλησης

Διευθύνσεις φόρτισης:



Εικόνα 2.2-7. Προσανατολισμός φόρτισης για τον έλεγχο 3D εκτυπωμένων στρωμάτων σε δοκιμές κάμψης, εφελκυσμού και θλίψης α) Διεύθυνση I, β) Διεύθυνση II, γ) Διεύθυνση III

Η πρώτη παραμετρική μελέτη αφορούσε την επίδραση της διεύθυνσης φόρτισης σε σχέση με τον προσανατολισμό της στρώσης. Εκτυπωμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε έλεγχο θλιπτικής αντοχής, καμπτικής αντοχής, αντοχής αποκόλλησης, σε τρεις κάθετους προσανατολισμούς, που σχετίζονται, όπως αναφέρθηκε, με την διαδικασία εκτύπωσης, με χρονική απόσταση 15 s μεταξύ διαδοχικών στρώσεων και ύψος ακροφυσίου στα 9.5 mm.

Σε δεύτερη μελέτη, ελέγχθηκε ο αντίκτυπος του χρονικού κενού στην εκτύπωση μεταξύ των στρώσεων, υπό πλήρη υγρασία κατά τη διεύθυνση III. Όλα τα δείγματα είχαν μια κρίσιμη διεπιφάνεια, όπου ο χρόνος αυξανόταν σε 1 h, 4 h, 7 h και 24 h για έλεγχο κάμψης, και σε 4 h και 24 h για έλεγχο αποκόλλησης. Οι δοκιμές μετάδοσης υπερήχων κυμάτων δείχνουν ότι το χρονικό κενό 1 h είναι λίγο πριν από τον αρχικά καθορισμένο χρόνο (όταν επιταχύνονται οι αντιδράσεις ενυδάτωσης), οι 4 h είναι στην ανώτερη τιμή της επιτάχυνσης των αντιδράσεων, οι 7 h όταν οι αντιδράσεις έχουν επιβραδυνθεί και οι 24 h αφού οι αντιδράσεις έχουν επιβραδυνθεί σημαντικά και ο βαθμός ενυδάτωσης αυξάνεται σταθερά.

Ελέγχθηκε η επίδραση του ύψους ακροφυσίου στην εφελκυστική αντοχή της διεύθυνσης III (κάθετη στην επιφάνεια διεπαφής) με δοκιμές στα 8, 9.5 και 11 mm. Αυτή η παράμετρος

αναμενόταν να επηρεάσει την σύνδεση μεταξύ των στρώσεων, με βάση παρατηρήσεις από τους Salet et al (2018) για διάφορους σχεδιασμούς ακροφυσίου και από τους Panda et al. (2018) για διάφορα ύψη ακροφυσίου.

Η τέταρτη και τελευταία παράμετρος που ελέγχθηκε ήταν η επιρροή της υγρασίας των επιφανειών στην εφελκυστική αντοχή των δοκιμών κατά τη διεύθυνση III. Τα δείγματα με χρονικό κενό μεταξύ 4h και 24 h αφέθηκαν ακάλυπτα κατά το μεσοδιάστημα εναπόθεσης διαδοχικών στρώσεων. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά εκτυπωμένων δοκιμών που είχαν πλήρως καλυφθεί κατά τη διάρκεια εκτύπωσης. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία ήταν περίπου σταθερά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με μέση τιμή 24° C και 32% αντίστοιχα.

iii. Έλεγχος κάμψης:

Έλεγχος κάμψης τριών σημείων πραγματοποιήθηκε σε πρισματικά δοκίμια 40 x 40 x 160 mm και φορτίστηκαν με τιμή 50 N/s μέχρι την αστοχία σύμφωνα με τον NEN-EN 196-1, για να προσδιοριστεί η εφελκυστική αντοχή. Το άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων είναι ίσο με 100 mm και το φορτίο εφαρμόζεται στο μέσο. Κατά την αστοχία, το φορτίο F_f καταγράφεται και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής f_f :

$$f_f = \frac{3 F_f \times l}{2 b^3}$$

,όπου:

l η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων, εδώ ίση με 100 mm

b πλευρά διατομής, εδώ ίση με 40 mm.

iv. Έλεγχος διάσπασης:

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε κυβικά δοκίμια ακμής 40 mm (NEN-EN 12390-6) με φορτίο 125.7 N/s. Κατά την αστοχία, το φορτίο F_s καταγράφηκε και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό δοκιμή αποκόλλησης f_s :

$$f_s = \frac{2 \times F_s}{\pi \times L \times d}$$

,όπου:

L μήκος γραμμής επαφής δοκιμίου, εδώ ίσο με 40 mm

d καθορισμένες διαστάσεις διατομής, εδώ ίσες με 40 mm.

Προσοχή δόθηκε στην τοποθέτηση των δοκιμίων, έτσι ώστε η κρίσιμη διεπιφάνεια να βρίσκεται ακριβώς στη γραμμή του φορτίου, παρόλο που αναλύσεις γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ότι ακόμα και αν η διεπιφάνεια απείχε αρκετά χιλιοστά από το κέντρο, το μέγιστο φορτίο εφελκυσμού που ενεργεί πάνω του θα παραμείνει περίπου ίσο και θα ενεργεί σε μια σχεδόν όμοια περιοχή της διεπιφάνειας.

v. Έλεγχος θλίψης:

Κυβικά δοκίμια 40 x 40 x 40 mm χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο θλιπτικής αντοχής σύμφωνα με τον NEN-EN 12390-3 και με ρυθμό φόρτισης 960 N/s. Η θλιπτική αντοχή f_c υπολογίστηκε με βάση το φορτίο F_c που μετρήθηκε κατά την αστοχία και έχει τιμή ίση με:

$$f_c = \frac{F_c}{A_c}$$

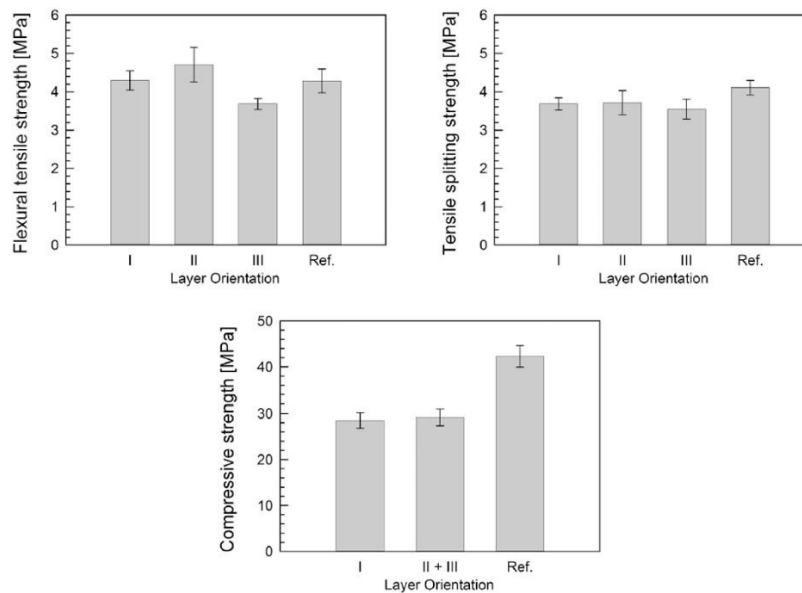
,όπου:

A_c είναι το εμβαδόν διατομής του δοκιμίου, σε αυτή την περίπτωση ίσο με 1600 mm²

vi. Αποτελέσματα

Προσανατολισμός στρώσεων:

Παρακάτω φαίνονται οι μέσες τιμές για τις τρεις δοκιμές ελέγχου, για τρεις προσανατολισμούς, μαζί με την σύγκριση με συμβατικά δοκίμια.

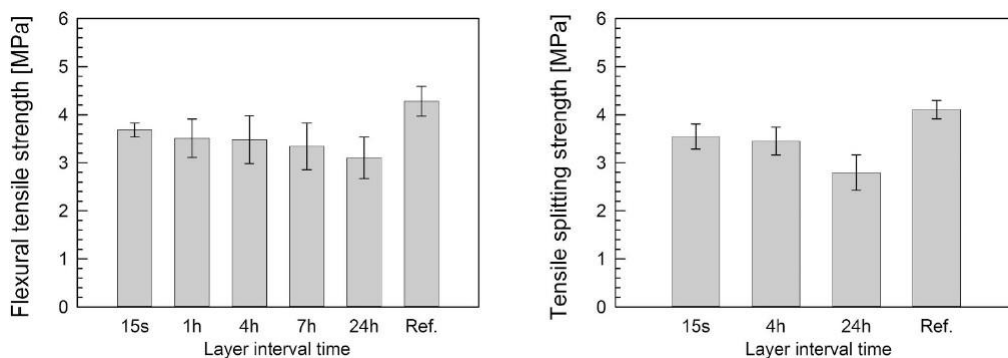


Εικόνα 2.2-8. Αποτελέσματα ελέγχου επίδρασης προσανατολισμού στρώσεων για δοκιμές κάμψης, αποκόλλησης, θλίψης

Παρατηρούμε ότι για τις δοκιμές σε θλίψη, οι προσανατολισμοί II και III έχουν συνδυαστεί σε μια σειρά 14 δειγμάτων, καθώς είναι ίδιες σε όρους φόρτισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει επιρροή στον έλεγχο σε θλίψη και στην δοκιμή διάσπασης από τον προσανατολισμό φόρτισης. Στον έλεγχο κάμψης, η διεύθυνση III ήταν λίγο ασθενέστερη από τις άλλες δυο διευθύνσεις, με μείωση 14% συγκριτικά με την διεύθυνση I. Αυτή η μείωση είναι μικρή σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Le et al. (2012) και Panda et al. (2017), οι οποίοι κατέγραψαν διαφορά μεγαλύτερη από 50%. Τέλος, μόνο η θλιπτική αντοχή των εκτυπωμένων δοκιμίων σημειώθηκε μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικά κατασκευασμένων δοκιμίων.

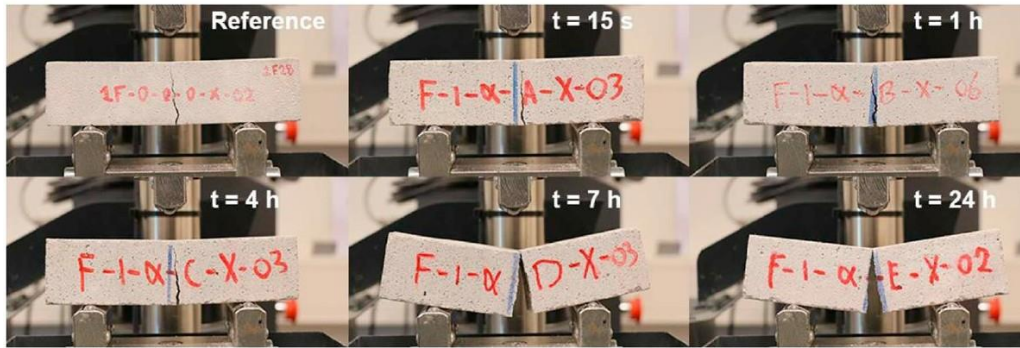
Χρονικό μεσοδιάστημα εκτύπωσης:

Όπως αναμενόταν η αντοχή μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος. Στους ελέγχους σε κάμψη, μείωση 16% μετρήθηκε για χρονικό κενό 24 h συγκριτικά με τα 15 s. Ομοίως, στη δοκιμή διάσπασης παρατηρήθηκε μείωση 21%. Για μικρότερα χρονικά κενά παρατηρείται μικρή μείωση, υποδεικνύοντας ότι ακόμα και αν η διαδικασία εκτύπωση καθυστερήσει για ένα συγκεκριμένο διάστημα, οι αντοχές παραμένουν περίπου ίσες, με κατάλληλη επικάλυψη κατά αυτό το διάστημα.



Εικόνα 2.2-9. Αποτελέσματα ελέγχου επίδρασης μεσοδιαστήματος εκτύπωσης για καμπτική αντοχή (αριστερά) και αποκόλλησης (δεξιά).

Η επίδραση της χρονικής καθυστέρησης δεν παρατηρείται μόνο στην μείωση αντοχής, αλλά και στον τρόπο αστοχίας. Οι σχετικά μικρές χρονικές καθυστερήσεις παρουσίασαν ρηγμάτωση που ξεκινά στο χαμηλότερο τμήμα του δείγματος και διαδίδεται μέσω των δειγμάτων. Οι υψηλότεροι χρόνοι, όμως, είχαν μια πιο διακριτή ρωγμή που βρισκόταν στην διεπιφάνεια των στρωμάτων.



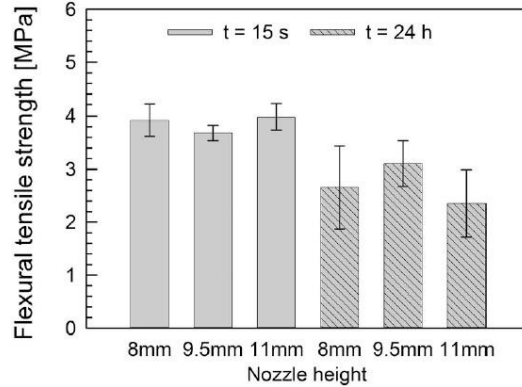
Εικόνα 2.2-10. Μοτίβα αστοχίας καμπτικών δοκιμών για διάφορα χρονικά μεσοδιαστήματα εκτύπωσης.



Εικόνα 2.2-11. Μοτίβα αστοχία σε δοκιμές αποκόλλησης για διάφορα χρονικά μεσοδιαστήματα εκτύπωσης.

Ύψος ακροφυσίου:

Σε κανέναν από τους δύο ελέγχους για 5 s και 24 h δεν μπορούν να εξαχθούν καθαρά συμπεράσματα για την επίδραση του ύψους στην αντοχή του δοκιμίου. Στην πραγματικότητα τα αποτελέσματα φαίνεται να γίνονται πιο διάσπαρτα καθώς το ύψος αποκλίνει από την προεπιλεγμένη, προτιμώμενη ρύθμιση, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην ανεξέλεγκτη τοποθέτηση των στρωμάτων, όπου η πίεση και η επιφάνεια επαφής μεταβάλλονται. Τα αποτελέσματα δεν είναι σε συμφωνία με την έρευνα των Panda et al. (2017), οι οποίοι κατέγραψαν μείωση άνω του 30% για αυξανόμενα ύψη ακροφυσίου. Βέβαια, αυτά τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικό μείγμα σημαντικά υψηλότερης αρχικής αντοχής. Όμοια συμπεράσματα προκύπτουν από την έρευνα Roussel & Cussingh (2008), κατά την οποία η επίδραση του ύψους και του σχεδιασμού του ακροφυσίου μπορεί πράγματι να είναι πιο έντονη για υλικό με υψηλότερη αρχική τιμή αντοχής και ρυθμό δόμησης.



Εικόνα 2.2-12: επίδραση ύψους ακροφυσίου για χρονικό μεσοδιάστημα 15s και 24h

Αφυδάτωση:

Τα ακάλυπτα δοκίμια παρουσίασαν μια αρκετά πιο ομαλή επιφάνεια ρηγμάτωσης, μαζί με υψηλότερο κενό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα καλυμμένα δείγματα για τους ίδιους χρόνους μεσοδιαστήματος. Μετρήθηκε μείωση 51% και 26% για χρονική καθυστέρηση 4 h και 24 h αντίστοιχα. Παραδόξως, η μείωση είναι ισχυρότερη όσο μικρότερος είναι ο χρόνος μεσοδιαστήματος, αποκαλύπτοντας την επίδραση άλλων εξωτερικών περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα τη ροή αέρα στις εγκαταστάσεις του τρισδιάστατου εκτυπωτή, η οποία δεν ήταν υπό έλεγχο για αυτό το πείραμα.

Εντούτοις, η σημαντική αυτή μείωση στην αντοχή επισημαίνει την ανάγκη για μια ελεγχόμενη διαδικασία εκτύπωσης, καθώς μεγάλες μειώσεις μπορεί να προκληθούν ακόμα και μετά τις 4 h. Από όλες τις παραμέτρους που μελετήθηκαν, η αφυδάτωση με μεγαλύτερους χρόνους μεσοδιαστήματος αποδείχθηκε ότι είχε την πιο εμφανή ποσοτικά επίδραση στην καμπτική αντοχή.

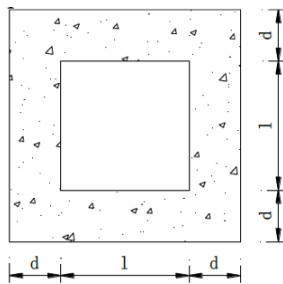
2.2.3 Πειραματική μελέτη σχετικά με την ιδιότητα συγκόλλησης επιπέδων τρισδιάστατων υλικών εκτύπωσης (Jie et al., 2019).

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το πείραμα είναι κατασκευασμένα από απορρίμματα οικοδομικών υλικών, τα οποία σχηματίζονται με την προσθήκη τσιμέντου, ιών και οργανικών συγκολλητικών στα θρυμματισμένα και αλεσμένα απορρίμματα του κτιρίου.

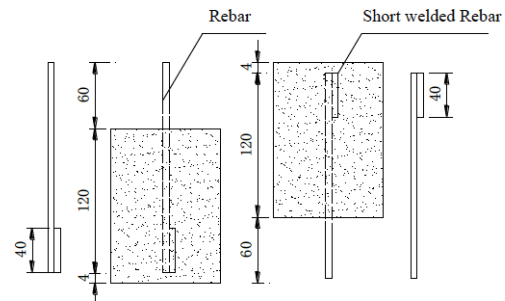
i. Δοκιμή εξόλκευσης

Τα δοκίμια αποτελούνταν από ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο κέλυφος, μια πλαστική σανίδα, άνω και κάτω τμήματα πυρήνα σκυροδέματος και ράβδο οπλισμού. Επιπλέον εφαρμόστηκε

λιπαντικό στις άνω και κάτω επιφάνειες της πλαστικής σανίδας, ώστε να αποφευχθεί η σύνδεση μεταξύ των άνω και κάτω τμημάτων του πυρήνα. (L1 - L3)



(α) Τρισδιάστατα εκτυπωμένο κέλυφος



(β) Πυρήνας

Εικόνα 2.2-13. Σχεδιάγραμμα του δοκιμίου

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή εξόλκευσης ράβδου, ασκώντας εφελκυστική φόρτιση μέσω μηχανής δοκιμής υδραυλικού υλικού, με ρυθμό φόρτισης 0.02 MPa/s έως την αστοχία και καταγράφηκε η μέγιστη τάση του στοιχείου στα 0.01 kN. Κατά τη διαδικασία αυτή, το κέντρο του άξονα του δοκιμίου υπόκειται στη δύναμη.

ii. Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση του δεσμού μεταξύ των στρώσεων

Το δοκίμιο αποτελούταν από ένα τρισδιάστατο ορθογωνικό κέλυφος, το οποίο ενεματώθηκε με σκυρόδεμα. Αποτελούταν από τρεις στρώσεις πυρήνα σκυροδέματος, μεταξύ των οποίων εισάγονται στρώματα αέρα, ώστε να αποφευχθεί η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων και να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει σκυρόδεμα στην επιφάνεια διάτμησης (J1 - J3).

Ο έλεγχος διατμητικής συνάφειας μεταξύ των στρώσεων πραγματοποιήθηκε με την 20t γενική μηχανή δοκιμών. Αρχικά, φορτίστηκε το δοκίμιο με 0.5 kN για να ελεγχθεί εάν το μηχάνημα λειτουργεί σωστά και αν το δείγμα βρίσκεται στο κέντρο. Έπειτα, εφόσον δεν προέκυψαν ζητήματα, έγινε αποφόρτιση και στη συνέχεια επαναβαθμίστηκαν τα όργανα στο επίσημο στάδιο της δοκιμής, όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελέγχου φόρτισης με ταχύτητα φόρτισης 0.05 kN/s υπό ομοιόμορφο φορτίο.

Specimen No.	Specimen peripheral dimension (mm ³)	Printing width (mm)	Printing thickness (mm)
L1	180×180×280	30	18
L2	180×180×280	30	18
L3	180×180×280	30	18
J1	200×200×270	30	18
J2	200×200×270	30	18
J3	200×200×270	30	18

Πίνακας 2.2-2. Παράμετροι δοκιμίου

iii. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας

α) εφελκυστική τάση

$$\sigma = \frac{F}{(2d+l)^2 - l^2}$$

,όπου

F η μέγιστη εφελκυστική δύναμη όπως υπολογίστηκε από τον έλεγχο αντοχής εφελκυστικού δεσμού.

Αστοχία αναμενόμενη στην διεπιφάνεια. Ο πυρήνας δεν αντέχει τον εφελκυσμό λόγω της ύπαρξης πλαστικής πλάκας και το εξωτερικό φορτίο μεταφέρεται στο τρισδιάστατα εκτυπωμένο κέλυφος μέσω της σύνδεσής του με τον πυρήνα.

β) θλιπτική τάση

$$\sigma = F / A$$

,όπου:

F: η δύναμη που εφαρμόζεται από τον γρύλο τη στιγμή που παρουσιάζει μείωση και είναι εμφανής μια σχετική μετακίνηση προς τα τμήματα δεξιά και αριστερά

A: επιφάνεια επαφής του ενδιάμεσου τρισδιάστατα εκτυπωμένου πρότυπου στρώματος

iv. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Από τον έλεγχο εφελκυσμού των 3 δοκιμίων όλες οι αστοχίες παρατηρήθηκαν μεταξύ των εκτυπωμένων στρώσεων. Ρηγμάτωση διαπιστώνεται όταν η ακμή του 3D εκτυπωμένου κελύφους φτάσει την μέγιστη εφελκυστική τάση f_i και η αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό μεταξύ των στρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί δημιουργώντας την εξίσωση ισορροπίας της ροπής και δύναμης κάμψης.

Τα δοκίμια του ελέγχου διάτμησης διέθεταν δυο στρώσεις ταινίας στρώματος αέρα, για να αποτρέψουν την σύνδεση μεταξύ των τμημάτων σκυροδέματος. Η αναμενόμενη αστοχία ήταν

στην περιοχή αυτών των στρωμάτων. Ωστόσο, παρατηρήθηκε αστοχία λόγω κάμψης και όχι λόγω διάτμησης στο μέσο του ανοίγματος.

Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους:

- (1) Η 3D εκτύπωση έχει μια διαδικασία παύσης, κατά την οποία τον υλικό συμυκνώνεται γρήγορα και η δύναμη σύνδεσης μεταξύ της νέας στρώσης και της παλιάς εξαφανίζεται όταν η νέα στρώση εκτυπώνεται. Η δύναμη αυτή είναι ισχυρότερη όταν γίνεται εκτύπωση των στρώσεων χωρίς παύση.
- (2) Εξαιτίας της διαδικασίας 3D εκτύπωσης η αστοχία λόγω διάτμησης είναι κυματιστή παρά επίπεδη. Η δύναμη διάτμησης αυξάνεται λόγω της δύναμης αλληλοσύνδεσης μεταξύ των στρωμάτων.
- (3) Για κατασκευαστικούς λόγους, το κοίλο τμήμα του εσωτερικού σκυροδέματος είναι μια καμπύλη επιφάνεια, στην οποία συμβαίνει η αστοχία διάτμησης και η εσωτερική δύναμη ασφάλισης που υπάρχει βελτιώνει περαιτέρω την αντοχή διάτμησης.
- (4) Το δείγμα αποσυνδέεται μετά την αστοχία και διαπιστώνεται ότι στο κέλυφος υπάρχει ένα σαφές ίχνος στρώματος, εκτός από την επιφάνεια παύσης στο μεσαίο άνοιγμα, και το άλλο τμήμα είναι ολόκληρο με ισχυρή δύναμη μεταξύ των στρωμάτων. Επομένως, το δείγμα είναι εύκολο να σπάσει από την επιφάνεια παύσης και μπορεί να προκληθεί καμπτική αστοχία.

Specimen No.	Failure load (kN)	Bond tensile strength (N/mm ²)	Average value (N/mm ²)
L1	22.04	0.82	0.74
L2	16.20	0.64	
L3	20.81	0.76	

Πίνακας 2.2-3. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυστικής αντοχής

Specimen No.	Failure load (kN)	Bending tensile strength (N/mm ²)	Average value (N/mm ²)
J1	40.54	1.22	0.88
J2	22.58	0.79	
J3	19.23	0.64	

Πίνακας 2.2-4. Αποτελέσματα δοκιμών καμπτικής αντοχής

v. Συμπεράσματα

- Κατά τον έλεγχο αντοχής εφελκυστικού δεσμού των δοκιμών διαπιστώνεται ότι η ρηγμάτωση πραγματοποιείται μεταξύ των στρώσεων και η αξονική αντοχή σε εφελκυσμό είναι 0.74 N/mm²

- Δεν παρατηρείται αστοχία σε διάτμηση κατά τον έλεγχο διατμητικής αντοχής, αλλά αστοχία σε κάμψη με μέση τιμή 0.88 N/mm²
- Λόγω της διαδικασίας 3D εκτύπωσης η διατομή που προκύπτει είναι άνιση και κυματιστή. Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης η τιμή της αντοχής του δοκιμίου έχει απόκλιση λόγω της δυσαναλογίας της δύναμης σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων που προκαλείται λόγω της παύσης.

2.2.4 Ενίσχυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στρώσεων με τροποποιημένο πολυμερές κονίαμα (Wang et al., 2020)

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η ενίσχυση της συνεκτικότητας μεταξύ των στρώσεων με την ενσωμάτωση τροποποιημένων πολυμερών κονιαμάτων, ώστε να είναι εφικτή η επανέναρξη της εκτύπωσης μετά από καθυστερήσεις/ διακοπές με ελάχιστες συνέπειες.

i. Υλικό

Με βάση προηγούμενες δοκιμές, το τσιμέντο υψηλής περιεκτικότητας σε HB CSA και το τσιμέντο Portland P.O 52.5 αναμειγνύθηκαν σε συγκεκριμένο ποσοστό, με στόχο την ανάπτυξη πρώιμης ακαμψίας και αντίστασης συρρίκνωσης. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε καπνός διοξειδίου του πυριτίου (SF), για να βελτιώσει την συμπεριφορά κατακράτησης νερού, πυριτική άμμος (SS) γωνιακής μορφής, για τη βελτίωση των αυτοφερόμενων συμπεριφορών του υλικού μέσω μηχανικής απόφραξης, και σκόνη πυριτίου (SP), για να γεμίσει τις μικρορωγμές και αυξηθεί η πυκνότητα του υλικού. Τέλος, μια μικρή ποσότητα αργίλου και υπερπλαστικού υψηλής απόδοσης υιοθετήθηκε για τη βελτιστοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων.

HB-CSA	OPC	SS	SP	SF	Water	Clay	Superplasticizer
0.15	0.85	1.50	0.10	0.15	0.35	1.24%	0.45%

Πίνακας 2.2-5. Αναλογία μάζας - πρώτων υλών του εκτυπωμένου σκυροδέματος.

Σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιήθηκε διάμετρος ακροφυσίου 15 mm που εκτυπώνει με ταχύτητα 80 mm/s στρώσεις πάχους 6 mm.

ii. Πειραματικές μέθοδοι

α) Προετοιμασία τροποποιημένων κονιαμάτων πολυμερούς:

Προετοιμάστηκαν δύο τροποποιημένα τσιμεντοκονιάματα πολυμερούς, ένα με βάση την εποξική ρητίνη και ένα με βάση το χλωροπρένιο λατέξ, για να δοκιμάσουν την ενίσχυση της συνεκτικότητας ενδιάμεσων στρωμάτων με διαφορετικά διαστήματα κενού στην εκτύπωση. Ο

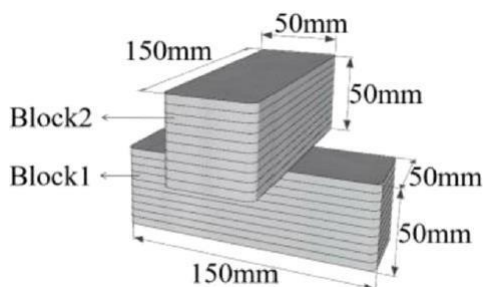
πειραματικός σχεδιασμός φαίνεται στο σχήμα. Επινοήθηκαν τρεις λόγοι μάζας εποξικού λατέξ προς τσιμέντο (0%, 8% και 16%) και τρεις λόγοι χλωροπρενίου λατέξ προς τσιμέντο (0%, 10% και 15%) και οι ποσότητές τους μετρήθηκαν με στερεή μάζα.

Mixture preparation for interlayer strengthening materials.

NO.	Time interval	Polymer based	Dosage (%)	Printing raw material(g)	Water (g)
CM60	60 min	–	0	0	0
60EP8	60 min	epoxy resin	8	1000	141
60EP16	60 min	epoxy resin	16	1000	130
60CR10	60 min	chloroprene latex	10	1000	159
60CR15	60 min	chloroprene latex	15	1000	152
CM120	120 min	–	0	0	0
120EP8	120 min	epoxy resin	8	1000	141
120EP16	120 min	epoxy resin	16	1000	130
120CR10	120 min	chloroprene latex	10	1000	159
120CR15	120 min	chloroprene latex	15	1000	152

β) Διαδικασία μηχανικών δοκιμών:

Τα δοκίμια εκτυπώθηκαν με την μέθοδο της εξώθησης από έναν αυτοσχέδιο τρισδιάστατο εκτυπωτή και περιλάμβαναν δυο τεμάχια 150 x 50 x 50 mm που τοποθετήθηκαν διασταυρούμενα. Το εκτυπωμένο υλικό τοποθετήθηκε, αφού αναμειχθηκε ομοιόμορφα, σε ένα δοχείο διατήρησης υλικού εξοπλισμένο στον εκτυπωτή και μια λεπίδα εξώθησε το υλικό στο ακροφύσιο της εκτύπωσης. Η διαδρομή εκτύπωσης σχεδιάστηκε ως ομογραφική διαδρομή. Μετά την εκτύπωση της πρώτης στρώσης, το ακροφύσιο του εκτυπωτή ανυψώθηκε κατά 6 mm (πάχος στρώσης) και η δεύτερη στρώση εκτυπώθηκε αμέσως.



Εικόνα 2.2-14. Διαστάσεις διασταυρούμενου δείγματος

Το πρώτο τεμάχιο ολοκληρώθηκε όταν η 9 στρώση έφτασε το επιθυμητό ύψος των 50 mm για την εξέταση της παραμόρφωσης κατάρρευσης. Μετά από ανάπαυση για 60 και 120 λεπτά,

λεπτό τσιμεντοκονίαμα πολυμερούς επικαλύπτει την πάνω επιφάνεια του τεμαχίου 1 και στη συνέχεια εκτυπώνεται το δεύτερο στην κορυφή του πρώτου με παρόμοιο πάχος και διαδρομή.

Μετά την κατασκευή πλαστική ταινία κάλυψε τα δοκίμια και ψεκάστηκε νερό κάθε 3-6 h για να αποτρέψει ρηγματώσεις λόγω συρρίκνωσης. Ύστερα από 24 h τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε δωμάτιο συντήρησης θερμοκρασίας $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ και σχετική υγρασία 98% και υποβλήθηκαν σε δοκιμές έπειτα από 14 ημέρες συντήρησης.

γ) Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό:

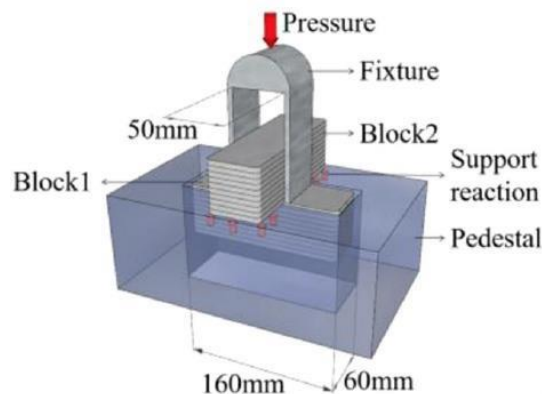
Στο σχήμα 2.2.15 φαίνεται η μέθοδος με την οποία προσδιορίστηκε η εφελκυστική αντοχή στην διεπιφάνεια των στρώσεων. Η μεταλλική βάση στηρίζει το άνω τεμάχιο και ένα προσάρτημα σχήματος U (ελαφρώς ευρύτερο από το δείγμα) εκτείνεται στο μπλοκ 2 και έρχεται σε επαφή με τις ανώτερες επιφάνειες του 1. Η φόρτιση πραγματοποιήθηκε κάθετα στην επιφάνεια διεπαφής, προκαλώντας εφελκυστικές τάσεις. Το κρίσιμο μέγεθος φορτίου P_c που χώρισε τα δυο τεμάχια, προσδιόρισε την αντοχή εφελκυσμού της διεπιφάνειας:

$$\sigma_t = \frac{P_c}{A}$$

, όπου:

P_c το κρίσιμο φορτίο αρχικής αποκόλλησης

A η διασταυρούμενη περιοχή.



Εικόνα 2.2-15. Δοκιμή ελέγχου εφελκυστικής αντοχής

δ) Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση

Στην εικόνα 2.2.16 φαίνεται η δοκιμή ελέγχου για τον προσδιορισμού διατμητικής αντοχής στις διεπιφάνειες. Το άνω κομμάτι στηρίζεται από την μεταλλική βάση, ενώ το κάτω τμήμα εισήχθη στην αυλάκωση της βάσης. Ένα εξωτερικό φορτίο εφαρμόσθηκε στην κορυφή του

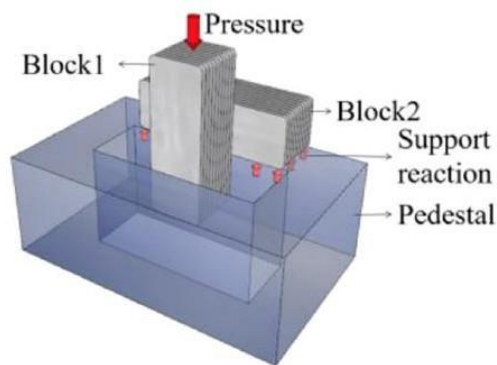
τεμαχίου 1, το οποίο είναι παράλληλο στην διεπιφάνεια μέτρησης, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικής τάσης. Η διατμητική αντοχή μπορεί να καθορισθεί ως η τάση που μετράται την στιγμή που αστοχεί η ραγίζει η διεπαφή. Η διατμητική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$r = \frac{P_c}{A}$$

, όπου:

P_c το κρίσιμο φορτίο αρχικής αποκόλλησης

A η διασταυρούμενη περιοχή.



Εικόνα 2.2-16. Δοκιμή ελέγχου διατμητικής αντοχής

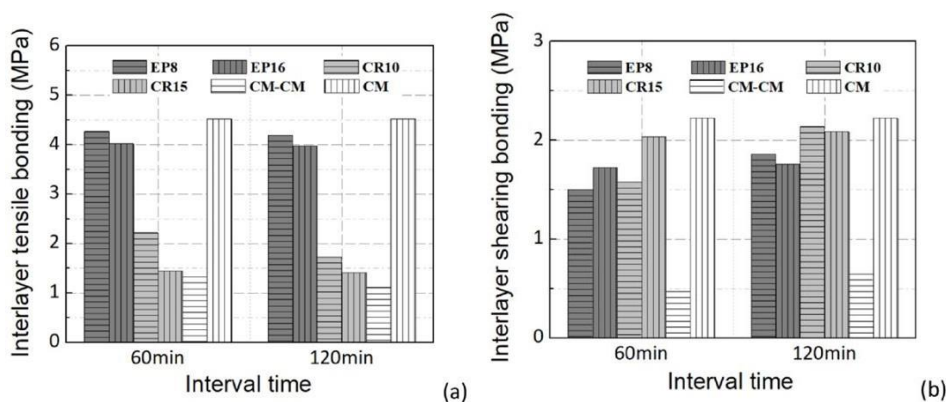
iii. Επίδραση κονιάματος πολυμερούς στις ιδιότητες της διεπιφάνειας

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορεί να διαπιστωθεί ότι τα εκτυπωμένα δείγματα χωρίς το πολυμερές κονίαμα (CM – CM), παρουσιάζουν σαφώς χαμηλότερες επιδόσεις συνδεσιμότητας από εκείνες των συμβατικά εκτυπωμένων δειγμάτων (CM), γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη χρήσης συνδετικού υλικού.

Για χρονικό διάστημα 60 min, η αντοχή σε εφελκυσμό των δοκιμίων με περιεκτικότητα σε εποξική ρητίνη 8% (EP8) αυξήθηκε σημαντικά κατά 222.20% σε σύγκριση με τα δείγματα χωρίς υλικό, μόνο 5.48% μικρότερο από των συμβατικών δοκιμίων (CM). Αντίστοιχα με εποξική ρητίνη 16% (EP16) αυξήθηκε 203.55% συγκριτικά με τα CM – CM και μειώθηκε μόνο 10.95% σε σχέση με τα CM. Σε αντίθεση, η επίδραση του κονιάματος με βάση το χλωροπρένιο λατέξ δεν ήταν τόσο ισχυρή. Με περιεκτικότητα 10% (CR10) η αντοχή αυξήθηκε κατά 67.46%, ενώ με 15% (CR15) είχαμε πολύ μικρή αύξηση κατά 9.02% από τα CM – CM και μείωση κατά 68.02% από τα CM. Για χρονικό κενό 120 min, οδηγούμαστε σε παρόμοια συμπεράσματα για τις επιδράσεις που έχουν στις αντοχές τα δυο πολυμερή. Γενικά η εφελκυστική αντοχή της σύνδεσης μειώνεται με

αυξανόμενα χρονικά κενά. Το κονίαμα με βάση την ρητίνη αποδίδει καλύτερα από το κονίαμα με βάση το χλωροπρένιο λατέξ και η εφαρμογή του EP8 μπορεί σχεδόν να εξαλείψει πλήρως την εξασθένηση της αντοχής συνδεσιμότητας.

Για χρονικό διάστημα 60 min, η αντοχή σε διάτμηση των δοκιμών ενισχυμένων με EP8 και EP16 αυξήθηκε σημαντικά κατά 219.94% και 268.00% από το CM – CM και ήταν 32.5% και 22.3% μικρότερη από εκείνη του CM αντίστοιχα. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, το χλωροπρένιο λατέξ (CR10) είχε 236.6% μεγαλύτερη αντοχή από τα δοκίμια χωρίς συνδετικό πολυμερές και 29% μικρότερη από τα συμβατικά δοκίμια, ενώ το CR15 είχε 334.3% και 8.3% αντίστοιχα. Το διάστημα των 120 λεπτών παρουσίασε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των 60 λεπτών. Εντούτοις, η διατμητική δύναμη στα 120 λεπτά ήταν μεγαλύτερη από αυτή των 60.



Εικόνα 2.2-17. (α) Εφελκυστική αντοχή (β) Διατμητική αντοχή εκτυπωμένου σκυροδέματος ενισχυμένου με διαφορετικά κατασκευασμένα κονιάματα πολυμερούς

Με βάση τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, το τροποποιημένο κονίαμα πολυμερούς μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις διεπιφανειακές ιδιότητες σε εφελκυσμό των εκτυπωμένων υλικών και ειδικότερα το κονίαμα με βάση την εποξική ρητίνη απέδωσε πολύ καλύτερα από τα δείγματα με βάση το λατέξ χλωροπρενίου, με βέλτιστο μείγμα το EP8. Συγχρόνως, η αντοχή συγκόλλησης σε εφελκυσμό του υλικού εκτύπωσης, ήταν γενικά υψηλότερη σε διάστημα 60 λεπτών από την αντίστοιχη των 120 λεπτών, ανεξάρτητα από το αν προστέθηκε ή όχι το τροποποιημένο τσιμεντοκονίαμα πολυμερούς. Την ίδια στιγμή, η διατμητική αντοχή σύνδεσης αυξήθηκε ελαφρώς για μεγαλύτερα διαστήματα, το οποίο μπορεί να οφείλεται στην βελτίωση της φυσικής επαφής των τραχιών επιφανειών των σκληρυμένων υλικών.

3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Το Simulia Abaqus CAE (Complete Abaqus Environment) είναι μια εφαρμογή λογισμικού που χρησιμοποιείται τόσο για την μοντελοποίηση όσο και για την ανάλυση μελών και κατασκευών και για την απεικόνιση του αποτελέσματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το Abaqus/Standard είναι ένας αναλυτής πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού, ενώ το Abaqus/Explicit είναι ένας ειδικός αναλυτής πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί σαφές σχέδιο ολοκλήρωσης για την επίλυση μη γραμμικών συστημάτων με πολλές πολύπλοκες επαφές υπό μεταβατικά φορτία. Για αυτό το λόγο επιλέγεται η χρήση του λογισμικού αυτού για την προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς εκτυπωμένων επιφανειών.

3.1 Μέθοδος συνεκτικών επιφανειών

Για την προσομοίωση της εκκίνησης και της διάδοσης της αποκόλλησης στο Abaqus χρησιμοποιείται μοντέλο συνεκτικής ζώνης. Ένα στρώμα συνεκτικών στοιχείων εισάγεται μεταξύ δυο γειτονικών σύνθετων ελασμάτων στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω αναφέρονται οι πτυχές που σχετίζονται με τη χρήση αυτού του μοντέλου συνεκτικής ζώνης.

3.1.1 Καταστατικός νόμος συνεκτικότητας σε όρους τανυστή τάσεων – σχετικής μετατόπισης

Η έκφραση συνεκτικών στοιχείων ορίζεται συνήθως ως καταστατικός νόμος συνεκτικότητας σε όρους τανυστή τάσεων – σχετικής μετατόπισης. Ο νόμος συνεκτικής σύστασης αποτελείται από δυο μέρη, με το πρώτο να χαρακτηρίζει την απόκριση του συνεκτικού στρώματος πριν την έναρξη της αποκόλλησης και το άλλο να περιγράφει τη διαδικασία διάδοσης της αποκόλλησης. Πριν από την έναρξη της αποκόλλησης, ένας γραμμικός ελαστικός νόμος μετατόπισης σχετιζόμενος με την τάση συνήθως ορίζεται για να συγκρατεί τις δύο επιφάνειες των σύνθετων στρωμάτων, πάνω και κάτω από την κόλλα.

Μετά την έναρξη της απόσχισης, η συμπεριφορά της διεπιφάνειας ελέγχεται από έναν νόμο απομείωσης αντοχής για τη διάδοσή της. Η συμπεριφορά αυτή διέπεται από παραμέτρους βλάβης των οποίων οι τιμές καθορίζονται με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τη συγκεκριμένη μορφή του εφαρμοστέου νόμου. Αρκετές λειτουργικές μορφές συνεκτικών σχέσεων, όπως οι

διγραμμικοί, τραπεζοειδείς, τέλειοι πλαστικοί, πολυωνυμικοί και εκθετικοί νόμοι, έχουν προταθεί για μοντέλα συνεκτικής ζώνης.

Οι νόμοι πρόσφυσης - σχετικής μετατόπισης με γραμμικούς και εκθετικούς νόμους είναι διαθέσιμοι στο Abaqus και, από υπολογιστική άποψη, αυτός με τον εκθετικό νόμο απομείωσης αντοχής θεωρείται ότι είναι καλύτερος, λόγω της ομαλότητάς του καθώς έχει μόνο ένα σημείο κορυφής, ενώ το διγραμμικό έχει δύο.

Ο μονός ελαστικός καταστατικός νόμος συνεκτικότητας σε όρους τανυστή τάσεων – σχετικής μετατόπισης μπορεί να γραφτεί ως:

$$\begin{pmatrix} \sigma_z \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_z & 0 & 0 \\ 0 & K_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_z \\ u_{zx} \\ u_{zy} \end{pmatrix}$$

,όπου ο άξονας z υποδηλώνει την κατεύθυνση του πάχους και αντιστοιχεί στην αστοχία 1 και οι άξονες x και y εκτείνονται στο μεσαίο επίπεδο της στρώσης διεπαφής και αντιστοιχούν στις αστοχίες 1 και 2 αντίστοιχα.

Οι δυσκαμψίες επιβάρυνσης προσδιορίζονται ως:

$$K_i = \begin{cases} K_i^0 & u_i \leq u_i^0 \\ (1 - d_i)K_i^0 & u_i^0 \leq u_i \leq u_i^f; \quad i = z, zx, zy \\ 0 & u_i \geq u_i^f \end{cases}$$

, όπου K_i^0 η αρχική δυσκαμψία

u_i^0 και u_i^f η σχετική μετατόπιση κάθε μεμονωμένης λειτουργίας φόρτισης στην αρχή της αποκόλλησης και στο σημείο που συμβαίνει πλήρως η αποκόλληση.

d_i είναι η μεταβλητή βλάβης που διέπει τον νόμο για την εξέλιξη της απόσχισης.

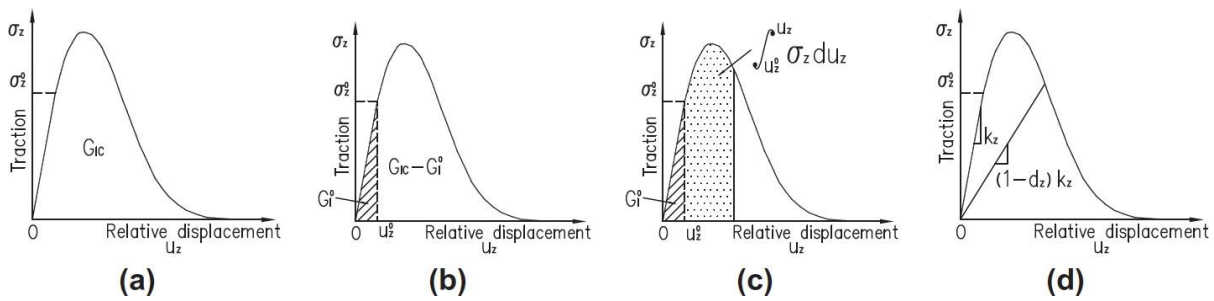
Για τους νόμους απομείωσης αντοχής με βάση την ενέργεια (είτε γραμμικούς είτε εκθετικούς), το Abaqus εξασφαλίζει ότι η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσεων – σχετικών μετατοπίσεων είναι ίση με την ενέργεια βλάβης που προσδιορίστηκε. Ο νόμος εξέλιξης της παραμέτρου βλάβης d_i , σε αυτή την περίπτωση, εκφράζεται ως:

$$d_z = \int_{u_z^0}^{u_z} \frac{\sigma_z du_z}{G_{Ic} - G_I^0}; \quad d_{zx} = \int_{u_{zx}^0}^{u_{zx}} \frac{\tau_{zx} du_{zx}}{G_{IIIc} - G_{II}^0}; \quad d_{zy} = \int_{u_{zy}^0}^{u_{zy}} \frac{\tau_{zy} du_{zy}}{G_{IIIc} - G_{III}^0}$$

,όπου G_{Ic} , G_{IIc} , G_{IIIc} είναι οι κρίσιμες ενέργειες ρηγμάτωσης για τους τρεις τύπους αστοχίας, αντίστοιχα.

G_I^0 , G_{II}^0 και G_{III}^0 είναι οι ελαστικές ενέργειες κατά την έναρξη της αποκόλλησης κάτω από τα φορτία μόνιμης λειτουργίας I, II και III αντίστοιχα. Σε αυτόν τον εκθετικό νόμο απομείωσης αντοχής με βάση την ενέργεια, η τάση ενδέχεται να μην μειωθεί αμέσως μετά την έναρξη της απόσχισης σε αντίθεση με τον εκθετικό νόμο απομείωσης με βάση τον εκτοπισμό.

Ο γραμμικός νόμος απομείωσης αντοχής για τη διάδοσή της με βάση την ενέργεια απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.1. για φόρτιση στον τύπο I (Τα διαγράμματα στους άλλους τύπους είναι παρόμοια).



Εικόνα 3.1-1. Γραμμικός νόμος τάσης-σχετικής μετατόπισης με βάση την ενέργεια για φόρτιση τύπου I.

3.1.2 Ελαστική σταθερά επιβολής ποινής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο γραμμικός ελαστικός νόμος τάσης - σχετικής παραμόρφωσης ορίζεται για το στρώμα διασύνδεσης πριν από την έναρξη της αποκόλλησης, παρά το γεγονός ότι, φυσικά, δεν πρέπει να εμφανιστούν παραμορφώσεις στα συνεκτικά στοιχεία σε αυτό το στάδιο.

Αν και οι ανεπιθύμητες ελαστικές παραμορφώσεις στη διεπαφή δεν μπορούν να αποφευχθούν, ως συνέπεια της διαμόρφωσης των συνεκτικών στοιχείων που απαιτεί πεπερασμένες δυσκαμψίες, μπορούν να κατασταλούν σε μεγάλο βαθμό, καθορίζοντας υψηλές τιμές ακαμψίας επιβάρυνσης. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ισχυρή σύνδεση μεταξύ των δύο σύνθετων επιφανειών πριν από την έναρξη της αποκόλλησης.

Έχουν αναφερθεί διάφορες μέθοδοι για τον καθορισμό των παραμέτρων δυσκαμψίας. Μερικές σταθερές τιμές έχουν εφαρμοστεί για την προσομοίωση σύνθετων υλικών, πχ. 10^6 , 10^7

και 10^8 N/mm³. Οι Zou et al. (2002) πρότειναν ότι μια λογική τιμή για την τιμή αυτή θα μπορούσε να είναι 10^4 – 10^7 mm⁻¹ φορές της διάτμησης μεταξύ των φύλλων και των αντοχών εφελκυσμού, ενώ οι άλλοι ερευνητές υπέθεσαν ότι ήταν συνάρτηση των ιδιοτήτων των διεπιφανειακών υλικών.

3.1.3 Κριτήριο έναρξης αστοχίας μικτού τύπου.

Σε δομικές εφαρμογές σύνθετων υλικών, καθώς η ανάπτυξη της απόσχισης συμβαίνει συχνά υπό μικτή φόρτιση, είναι συνήθως επιθυμητός ένας νόμος τάσης – σχετικής μετατόπισης συνεκτικών στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι επιθυμητά η έναρξη και η διάδοση της σχισμής μικτού τύπου.

Υπό φόρτιση μικτής λειτουργίας, μπορεί να εμφανιστεί έναρξη αποκόλλησης προτού κάποιος από τους τύπους αστοχίας φτάσει στα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα τάσης. Ένα κριτήριο ονομαστικής τάσης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της έναρξης της απόσχισης μεικτής λειτουργίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η θλιπτική κύρια τάση δεν συμβάλλει κανονικά στην έναρξη της αποκόλλησης, το τετραγωνικό κριτήριο ονομαστικής τάσης εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\langle\sigma_z\rangle}{\sigma_z^0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zx}}{\tau_{zx}^0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zy}}{\tau_{zy}^0}\right)^2 = 1$$

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί στοιχεία συνεχούς κελύφους για τα σύνθετα πλέγματα και συνεκτικά στοιχεία για τα στρώματα διεπαφής. Τα φύλλα διαμορφώνονται με στοίβαγμα αυτών των στοιχείων σύμφωνα με τις καθορισμένες ακολουθίες στοίβαξης. Κάθε μεμονωμένη στρώση προσομοιώνεται με ένα στρώμα στοιχείων στην κατεύθυνση του πάχους. Το συνδυασμένο ελαστοπλαστικό μοντέλο βλάβης χρησιμοποιείται για τη σύλληψη των διαφόρων μηχανισμών βλάβης του επιπέδου και των πλαστικών παραμορφώσεων των σύνθετων στρωμάτων και το μοντέλο συνεκτικής ζώνης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αποκόλλησης που συμβαίνει στα συνεκτικά στρώματα. Η μέθοδος αυτή εξηγείται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3.2.

Η συνεκτική συμπεριφορά της διεπιφάνειας ορίζεται ως μέρος μιας ιδιότητας της επιφανειακής αλληλεπίδρασης και περιλαμβάνει χαρακτηριστικά δυσκαμψίας που σχετίζονται με τη συνδεδεμένη διεπιφάνεια και χαρακτηριστικά που διέπουν οποιαδήποτε αστοχία συνεκτικότητας. Τα K_{nn} , K_{ss} , K_{tt} αναφέρονται στην δυσκαμψία της συνεκτικής επιφάνειας κατά την μια κάθετη και τις δυο οριζόντιες διευθύνσεις. Η γραμμική ελαστική συμπεριφορά της τάσης – αποκόλλησης μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\delta.$$

3.1.4 Εφαπτομενική συμπεριφορά επιφανειών αλληλεπίδρασης

Το Abaqus θεωρεί από προεπιλογή ότι δεν υπάρχει τριβή μεταξύ των συνδεδεμένων τμημάτων. Για αυτό χρειάζεται να οριστούν ιδιότητες τριβής εισάγοντας εφαπτομενική συμπεριφορά (Tangential behaviour). Στο μοντέλο προεπιλογής μέσω της μεθόδου επιβολής ποινής (Penalty) προσδιορίζεται η σταθερά τριβής απευθείας σαν:

$$\mu = \mu(\gamma_{eq}, \bar{p}, \bar{\theta}, \bar{f})$$

,όπου

γ_{eq} είναι το ισοδύναμο μέτρο ολίσθησης,

\bar{p} είναι η πίεση επαφής,

$\bar{\theta} = 1/2 (\theta_A + \theta_B)$ είναι η μέση θερμοκρασία στο σημείο επαφής και

$\bar{f} = 1/2 (f_A + f_B)$ είναι η μέση προκαθορισμένη μεταβλητή πεδίου στα σημεία A και B στις επιφάνειες. Το σημείο A είναι ένας κόμβος στην εξαρτώμενη επιφάνεια (slave surface) και το B αντιστοιχεί στο πλησιέστερο σημείο στην απέναντι κύρια επιφάνεια (master surface).

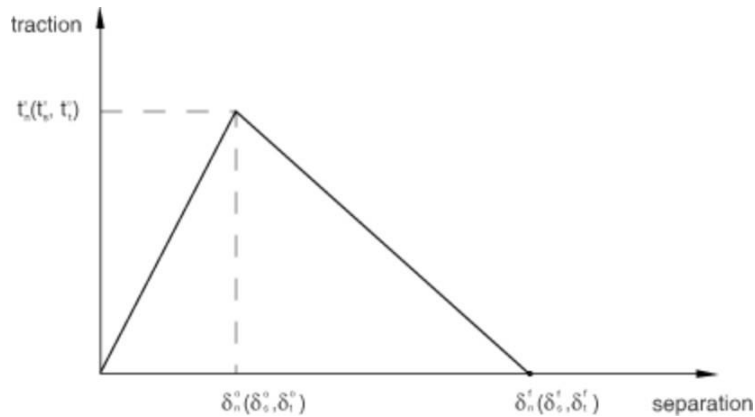
Η θερμοκρασία και οι μεταβλητές πεδίου παρεμβάλλονται κατά μήκος της επιφάνειας στη θέση B. Εάν η κύρια επιφάνεια αποτελείται από ένα άκαμπτο σώμα, χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές θερμοκρασίας και πεδίου στον κόμβο αναφοράς. Ο συντελεστής τριβής μπορεί να εξαρτάται από το ρυθμό ολίσθησης, την πίεση επαφής, τη θερμοκρασία και τις μεταβλητές πεδίου. Από προεπιλογή, θεωρείται ότι οι συντελεστές τριβής δεν εξαρτώνται από μεταβλητές πεδίου.

3.1.5 Μοντελοποίηση της βλάβης

Μια άλλη παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί, για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των επιφανειών στα τρισδιάστατα εκτυπωμένα στοιχεία, είναι η μοντελοποίηση της βλάβης (Damage), μέσω της οποίας γίνεται προσομοίωση της αποκόλλησης και τελικά της αστοχίας της σύνδεσης μεταξύ των συνεκτικών επιφανειών. Ο μηχανισμός αστοχίας αποτελείται από δυο μέρη: ένα κριτήριο έναρξης βλάβης και έναν νόμο εξέλιξης βλάβης.

Η αρχική απόκριση θεωρείται ότι είναι γραμμική όπως περιγράφεται ανωτέρω. Ωστόσο, τη στιγμή που ένα κριτήριο έναρξης αστοχίας ικανοποιείται, μπορεί να συμβεί αστοχία με βάση έναν ορισμένο από τον χρήστη νόμο εξέλιξης βλάβης.

Στο σχήμα φαίνεται η απόκριση τάσης – αποκόλλησης με μηχανισμό αστοχίας. Το κριτήριο έναρξης βλάβης καθορίζεται με αντίστοιχη εξέλιξη βλάβης, αλλιώς το Abaqus το αξιολογεί για σκοπούς εξαγωγής αποτελεσμάτων μόνο και δεν παρουσιάζει επίδραση στην απόκριση των συνεκτικών επιφανειών (δηλαδή δεν συμβαίνει αστοχία). Επιπλέον, οι συνεκτικές επιφάνειες δεν υφίστανται βλάβη υπό καθαρή θλίψη.



Εικόνα 3.1-2: Διάγραμμα τάσης – αποκόλλησης διεπιφάνειας

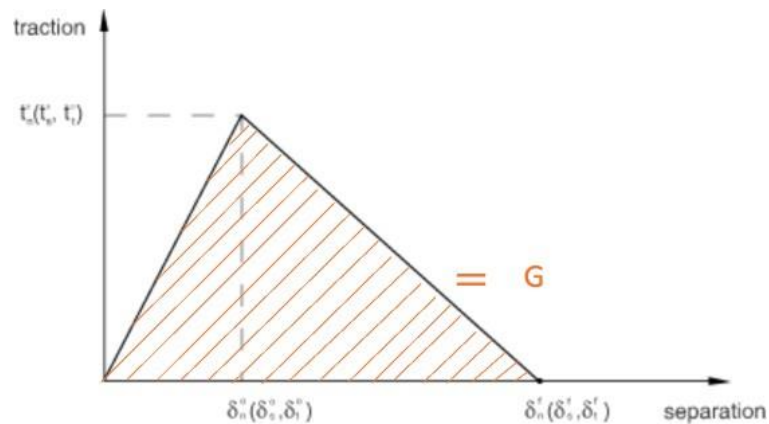
Η αστοχία της απόκρισης τάσης – αποκόλλησης για συνεκτικές επιφάνειες καθορίζεται από τα ίδια γενικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται για συμβατικά υλικά, με εξαίρεση το γεγονός ότι η συμπεριφορά βλάβης προσδιορίζεται σαν ένα κομμάτι των ιδιοτήτων για τις επιφάνειες. Οι συνεκτικές επιφάνειες μπορούν να έχουν μόνο ένα κριτήριο έναρξης βλάβης και μόνο ένα νόμο εξέλιξής της.

Η έναρξη της βλάβης (Damage Initiation) αναφέρεται στην έναρξη της αποκόλλησης των συνεκτικών επιφανειών σε ένα σημείο επαφής. Η αποκόλληση ξεκινάει όταν οι τάσεις επαφής και/ή η απόσταση των επιφανειών λόγω διάσπασης ικανοποιούν ένα συγκεκριμένο κριτήριο έναρξης που προσδιορίζεται από τον χρήστη. Τιμή 1 ή υψηλότερη υποδηλώνει ότι το κριτήριο έναρξης έχει συναντηθεί. Τα t_n^0 , t_s^0 , t_t^0 αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες τιμές των τάσεων επαφής, όταν η διάσπαση είναι είτε καθαρά κάθετη στην διεπιφάνεια, είτε καθαρά στην πρώτη ή στην δεύτερη διευθύνσεις διάτμησης αντίστοιχα. Με τα στοιχεία \diamond συμβολίζεται ότι μια καθαρά θλιπτική τάση ή μετατόπιση δεν μπορεί να αποτελέσει παράγοντα έναρξης βλάβης.

Η βλάβη θεωρείται ότι ξεκινάει όταν ο μέγιστος λόγος των τάσεων επαφής, όπως ορίζεται στην έκφραση παρακάτω, φτάσει την τιμή 1. Το κριτήριο ορίζεται από την εντολή μέγιστης κανονικής τάσης (maximum nominal stress) και περιγράφεται ως:

$$\max\left\{\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0}\right\} = 1$$

Η εξέλιξη της βλάβης, στα προσομοιώματα του πειράματος, καθορίζεται από την ενέργεια που διαχέεται σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας αστοχίας και αποκαλείται ενέργεια θραύσης. Η ενέργεια θραύσης ισούται με την περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσης – αποκόλλησης, έτσι ώστε μείωση της ενέργειας G οδηγεί σε μείωση στην τιμή έναρξης αποκόλλησης.

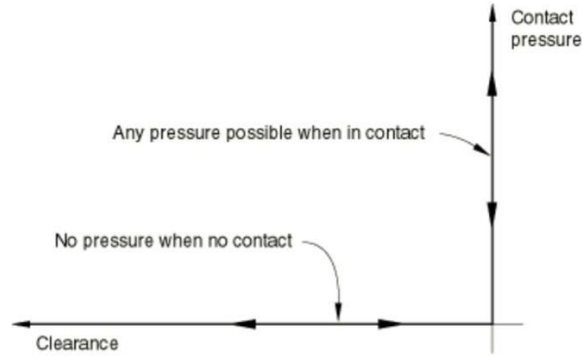


Εικόνα 3.1-3: Εμβαδόν κάτω από το διάγραμμα τάσης – αποκόλλησης ίσο με την ενέργεια θραύσης

3.1.6 Συμπεριφορά των διεπιφανειών κατά την κάθετη διεύθυνση

Σημαντικό είναι να οριστεί συμπεριφορά κατά την κάθετη διεύθυνση (Normal Behavior), ώστε κατά την κάθετη διεύθυνση της διεπαφής να μην εισχωρεί το ένα στρώμα στο άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πολύ ισχυρών ελατηρίων στους απέναντι κόμβους των στοιχείων.

Χρησιμοποιείται η σχέση σκληρής επιφάνειας (Hard contact) το διάγραμμα της οποίας φαίνεται στο σχήμα 3.4.1, αν και η συνθήκη μηδενικής διείσδυσης μπορεί ή δεν μπορεί να επιβληθεί αυστηρά ανάλογα με τη μέθοδο επιβολής περιορισμών που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 3.1-4 Σχέση πίεσης επαφής – απόστασης επιφανειών διεπαφής

Όταν οι επιφάνειες είναι σε επαφή, οποιαδήποτε τιμή πίεσης επαφής μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ τους. Οι επιφάνειες χωρίζονται εάν η πίεση μηδενιστεί και οι χωρισμένες επιφάνειες έρχονται σε επαφή όταν το διάκενο μειωθεί στο μηδέν.

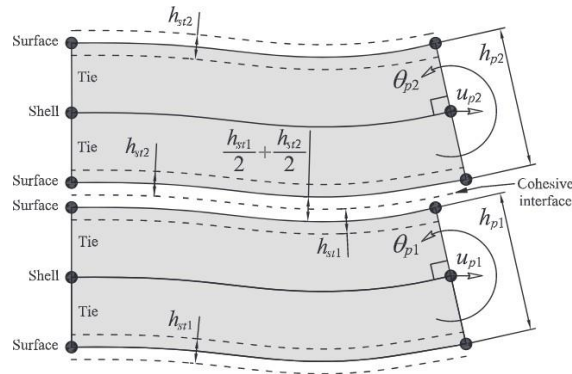
Υπάρχουν δύο μέθοδοι επίλυσης του παραπάνω προβλήματος: μια αναλυτική με τη μέθοδο πολλαπλασιαστών Lagrange και μια προσεγγιστική, με τη μέθοδο πολλαπλασιαστών ποινής.

Η μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange είναι αναλυτική και όχι προσεγγιστική και επομένως οι κινηματικοί περιορισμοί θα ικανοποιούνται ακριβώς και όχι κατά προσέγγιση. Επίσης, δεν γίνεται επέμβαση στο μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί μια φορά και να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε προβλήματα επαφής (π.χ. τριβής) όπου η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται συνεχώς και επομένως οι κινηματικοί περιορισμοί μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Ο αριθμός, ωστόσο, των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν αυξάνεται κατά τον αριθμό των κινηματικών περιορισμών. Αυτό συνεπάγεται αυξημένο υπολογιστικό κόστος, όταν οι περιορισμοί είναι πολλοί.

Η μέθοδος επιβολής ποινής προσεγγίζει την συμπεριφορά σκληρής επαφής. Με αυτή τη μέθοδο η δύναμη επαφής είναι ανάλογη με την απόσταση διείσδυσης, οπότε θα συμβεί κάποιος βαθμός διείσδυσης. Σε αντίθεση με τη μέθοδο Lagrange, οι συντελεστές ποινής δεν αυξάνουν τον αριθμό των αγνώστων και επομένως δεν επιβαρύνουν την υπολογιστική διαδικασία. Η εφαρμογή της μεθόδου είναι απλή και δεν απαιτεί σημαντικές αλλαγές σε έναν υφιστάμενο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η επιλογή, όμως, των παραμέτρων είναι «προσωπική υπόθεση». Η επιλογή των συντελεστών ποινής αλλάζει τη δυσκαμψία του συστήματος. Επομένως, πολύ μεγάλες τιμές ενδέχεται να οδηγήσουν σε κακώς ορισμένα μητρώα δυσκαμψίας και σε επακόλουθα αριθμητικά σφάλματα.

3.2 Προσομοίωση με σύνθετα πολυστρωματικά φύλλα χρησιμοποιώντας συνεκτικές επιφάνειες

Μια άλλη μέθοδος προσομοίωσης για την μη γραμμική ανάλυση τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών, είναι η μέθοδος προσομοίωσης με σύνθετα πολυστρωματικά φύλλα, με τη χρήση συνεκτικών επιφανειών. Η εικόνα 5.1.1 απεικονίζει την στρατηγική που ακολουθείται, όπου κάθε στρώση περιγράφεται στην κατεύθυνση του πάχους χρησιμοποιώντας ένα συμβατικό στοιχείο κελύφους που βρίσκεται στο μεσαίο επίπεδο και στοιχεία επιφάνειας στην κάτω και στην πάνω όψη της στρώσης. Αυτά τα στοιχεία επιφάνειας συνδέονται με τα στοιχεία κελύφους μέσω άκαμπτων συνδετήρων (Tie constraints), οι οποίοι μεταφέρουν την κινηματική από τα στοιχεία κελύφους στα στοιχεία επιφάνειας. Τα επιφανειακά στοιχεία μπορούν να νοηθούν απλά ως φύλλα κόμβων που κινούνται σύμφωνα με τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές των στοιχείων του κελύφους χωρίς να αποθηκεύουν ελαστική ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, η αποκόλληση μεταξύ των πλακών μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας συνεκτικές επιφάνειες (cohesive surfaces), οι οποίες περιγράφουν τη μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ δύο επιφανειών μέσω ενός αλγορίθμου επαφής.



Εικόνα 3.2-1. Στρατηγική μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων βασισμένη στη χρήση συμβατικών στοιχείων κελύφους.

Ο καθορισμός των επιφανειακών στοιχείων και των άκαμπτων, είναι απαραίτητος όταν χρησιμοποιούνται τα συμβατικά στοιχεία κελύφους, που βρίσκονται στο μεσαίο επίπεδο, και συνεκτικές επιφανειακές αλληλεπιδράσεις. Στην πραγματικότητα, οι συνεκτικές επιφάνειες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν απευθείας με τη συσχέτιση των αντίστοιχων επιφανειών των στοιχείων του κελύφους. Ωστόσο, ανιχνεύθηκαν συνεκτικές επιφάνειες που δεν λειτουργούν σωστά λόγω κακής περιγραφής της κινηματικής του κελύφους στις διεπαφές κατά την

αποκόλληση, δηλαδή οι μετατοπίσεις στις άνω και κάτω επιφάνειες του κελύφους δεν προβλέπονται καλά.

Τα στοιχεία επιφάνειας ορίζονται με ένα εικονικό πάχος h_{st} (βλέπε Εικ. 5.1.1), γνωστό από το Abaqus ως Surface Thickness. Αυτό το πάχος (δηλαδή το πάχος που θεωρεί το Abaqus για επαφή με άλλα στοιχεία), για τα στοιχεία κελύφους αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο πάχος στρώσης h_p , που έχει οριστεί στο τμήμα του κελύφους. Για τη σωστή πρόβλεψη επαφής μεταξύ των επιφανειακών στοιχείων, πρέπει να οριστεί ένα επιλεγμένο από το χρήστη πάχος επιφάνειας για αυτά τα στοιχεία: $h_{st} = \alpha h_p$, όπου α είναι ένα μικρό ποσοστό του πάχους του κελύφους (συνήθως $\approx 0,01$). Κατά συνέπεια, τα συμβατικά στοιχεία κελύφους θα πρέπει να μοντελοποιούνται φυσικά στις αντίστοιχες θέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του h_{st} των στοιχείων της επιφάνειας, ώστε να διασφαλίζεται η επαφή στις πραγματικές φυσικές θέσεις ή να υποθέτουμε επαφή σε ελαφρώς διαφορετικές θέσεις.

Το κύριο πλεονέκτημα της στρατηγικής που παρουσιάζεται εδώ, είναι η εξάλειψη του επιζήμιου αποτελέσματος του πάχους πεπερασμένων στοιχείων στον χρόνο υπολογιστικής ανάλυσης, το οποίο εμφανίζεται όταν χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα στερεά στοιχεία ή συνεχόμενα στοιχεία κελύφους. Ο αλγόριθμος ρητής ολοκλήρωσης χρησιμοποιεί τη σταθερή χρονική αύξηση t_{st} , η οποία μπορεί απλά να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας τη συνθήκη που περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta t_{st} \leq \frac{l_{min}}{c} = \frac{l_{min}}{\sqrt{E/\rho}}$$

,όπου l_{min} είναι το ελάχιστο μήκος ενός κρίσιμου πεπερασμένου στοιχείου του πλέγματος και c είναι η ταχύτητα του ηχητικού κύματος που διαδίδεται μέσω του υλικού, που υπολογίζεται από το μέτρο Young του E και της πυκνότητας ρ .

Συνήθως, τα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά έχουν μικρό πάχος στρώσης και εάν πρέπει να προβλεφθεί η αποκόλληση, κάθε στρώση μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας ένα μονό διαμέσου του πάχους πεπερασμένο στοιχείο με μικρό πάχος. Χρησιμοποιώντας τη στρατηγική που περιγράφηκε, το πάχος των στρωμάτων δεν επηρεάζει τη σταθερή χρονική αύξηση, επομένως είναι πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με τις συμβατικές προσομοιώσεις, που βασίζονται σε τρισδιάστατα στοιχεία στερεού ή συνεχόμενου κελύφους. Επομένως, η προτεινόμενη λύση είναι χρήσιμη όταν το μοντελοποιημένο πάχος στρώσης είναι μικρότερο από τις διαστάσεις πεπερασμένου στοιχείου στο επίπεδο. Ομοίως, η χρήση συνεκτικών επιφανειών αποφεύγει τη

χρήση διεπιφανειακών στοιχείων, που συχνά ορίζονται με τη χρήση τρισδιάστατων στερεών στοιχείων με πολύ μικρό πάχος (π.χ. González et al., 2012), αποδίδοντας έτσι σε μικρές σταθερές χρονικές αυξήσεις

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΛΙΚΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται προσομοίωση των πειραμάτων ταυτοποίησης παραμέτρων υλικού με μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Για την μοντελοποίηση και ανάλυση των δοκιμών επιλέγεται η χρήση του προγράμματος Simulia Abaqus CAE.

4.1 Καμπτική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (Wolfs et al., 2019a)

Με βάση τον τύπο και τις εφελκυστικές αντοχές που προκύπτουν από το πείραμα, υπολογίζονται τα φορτία αστοχίας ανάλογα με την διεύθυνση φόρτισης:

	Διεύθυνση I	Διεύθυνση II	Διεύθυνση III
Καμπτική αντοχή (MPa)	4.3	4.6	3.2
Φορτίο αστοχίας (kN)	1.83	1.96	1.29

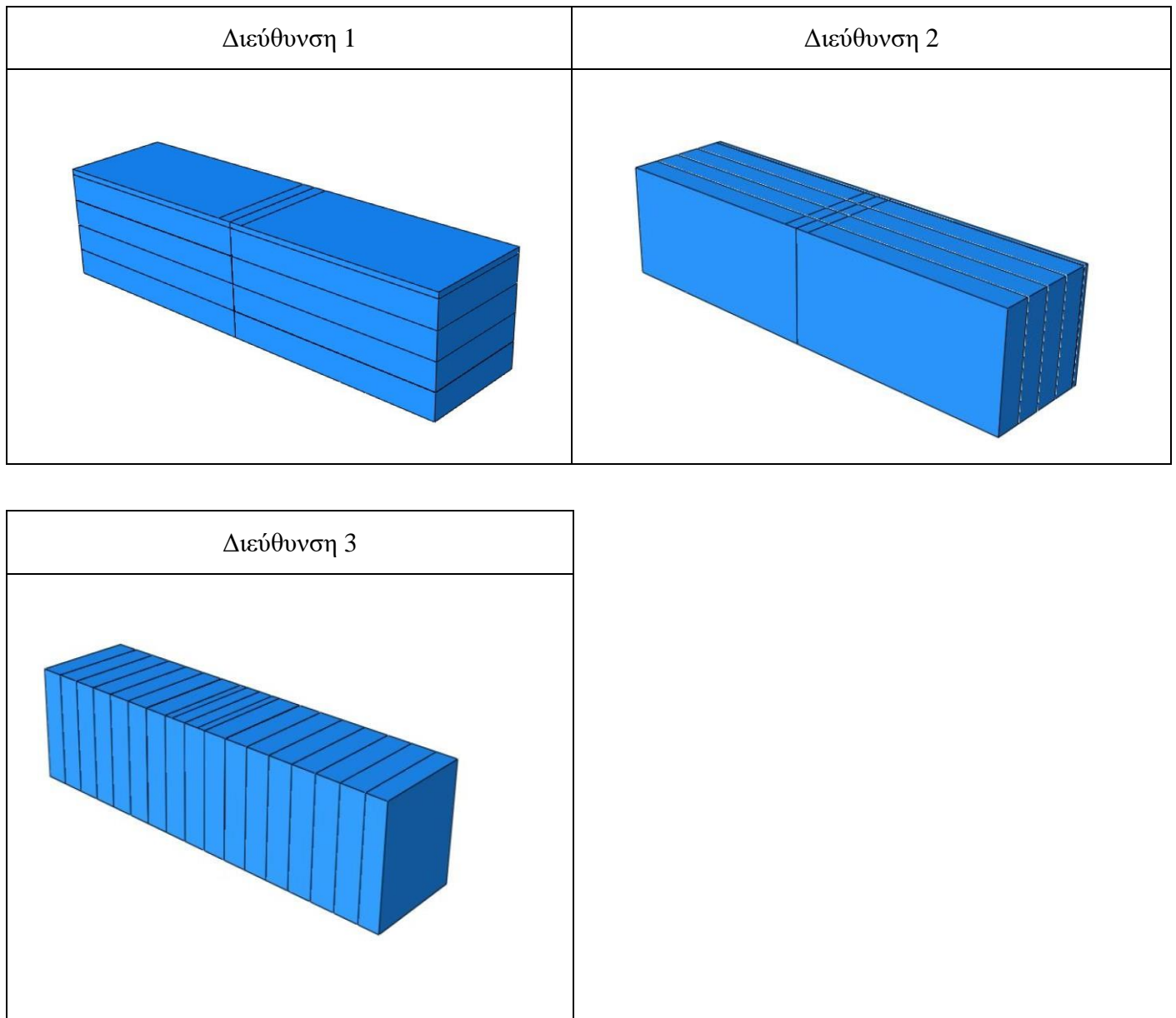
Πίνακας 4.1-1: Τιμές φορτίων αστοχίας λόγω κάμψης στις τρεις διευθύνσεις

4.1.1 Μοντελοποίηση δοκιμών

Προσομοιάστηκε και ελέγχθηκε η καμπτική αντοχή υπό τριαξονική φόρτιση των τριών δοκιμών, όπως παράχθηκαν από τους Le et al (2012), στις τρεις διευθύνσεις φόρτισης.

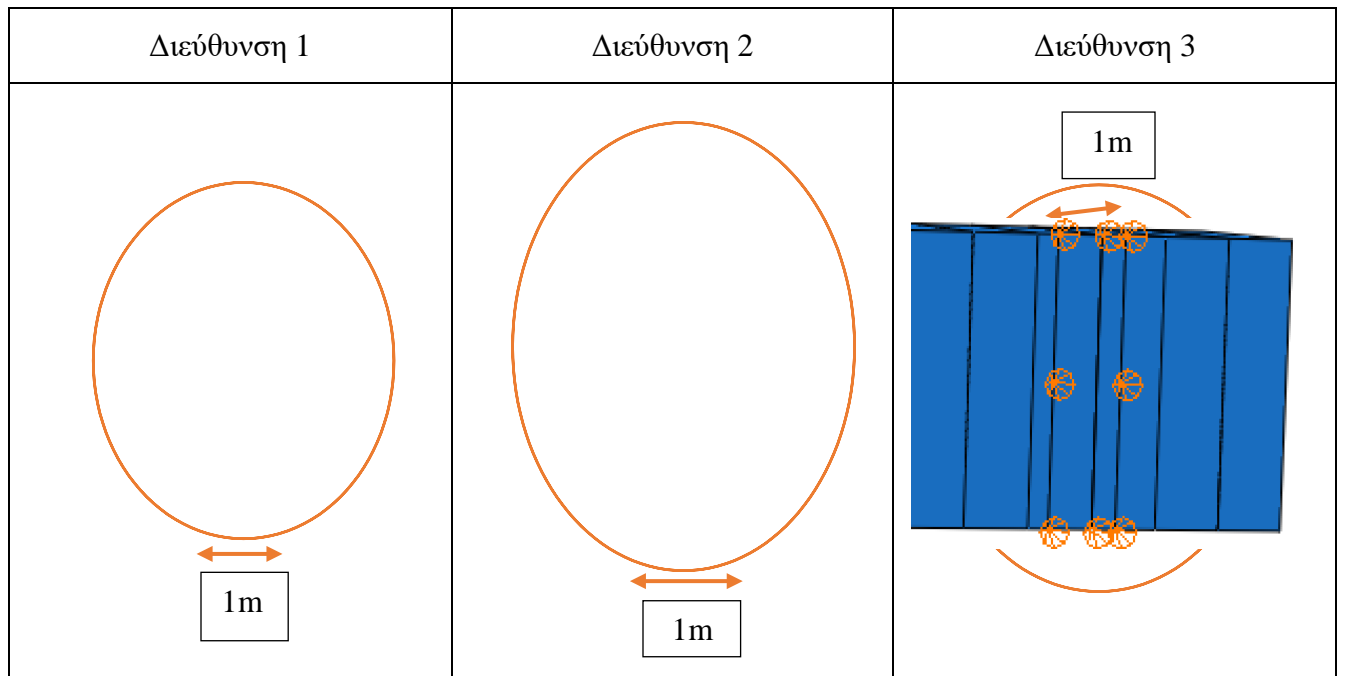
Για την προσομοίωση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν συμπαγή στοιχεία με εξώθηση (Solid extrude elements) με ομοιογενές υλικό.

Τα δοκίμια κόπηκαν σε δοκούς διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm από ορθογωνικά δείγματα που είχαν εκτυπωθεί σε στρώσεις πλάτους 50 mm και ύψους 9.5 mm. Έτσι για τις διευθύνσεις 1 και 2 δημιουργήθηκαν ένα τμήματα διαστάσεων 40 x 9.6 x 80 mm που αντιγράφηκε οχτώ φορές και ένα τμήμα 40 x 2.0 x 80 mm που αντιγράφηκε δυο φορές, ενώ για την διεύθυνση 3 δημιουργήθηκαν ένα τμήμα 40 x 40 x 8 mm και ένα τμήμα 40 x 40 x 9.5 mm που αντιγράφηκε 16 φορές.



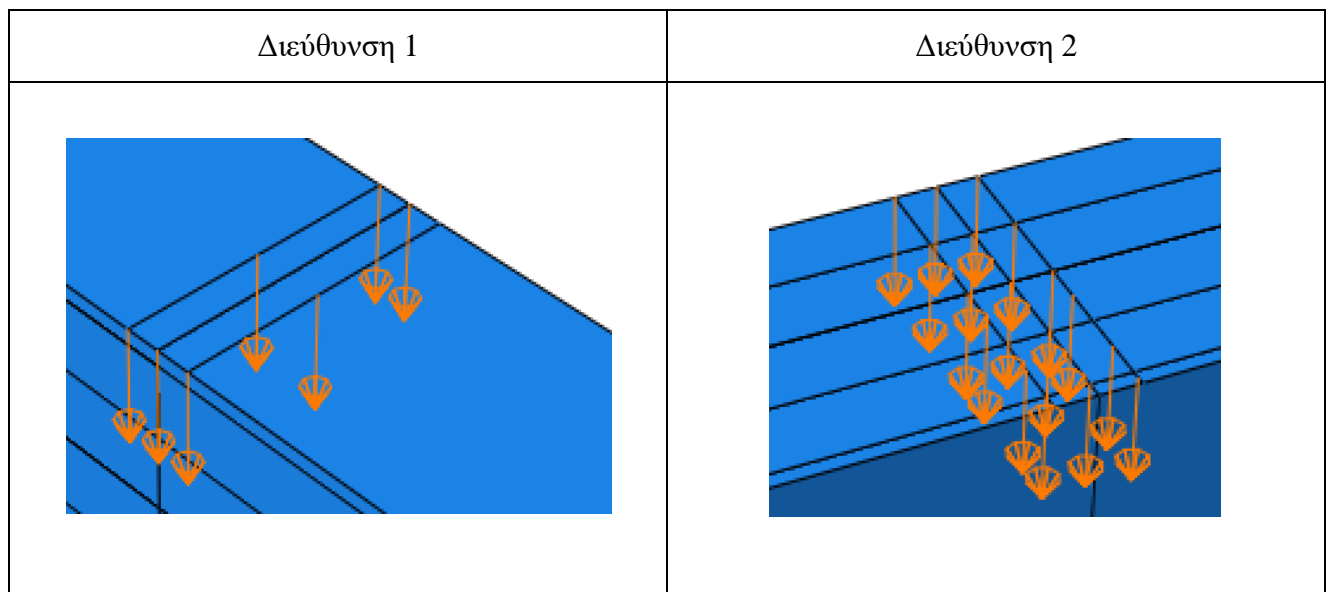
Εικόνα 4.1-1: Μοντελοποίηση των δοκιμίων για τις 3 διευθύνσεις φόρτισης

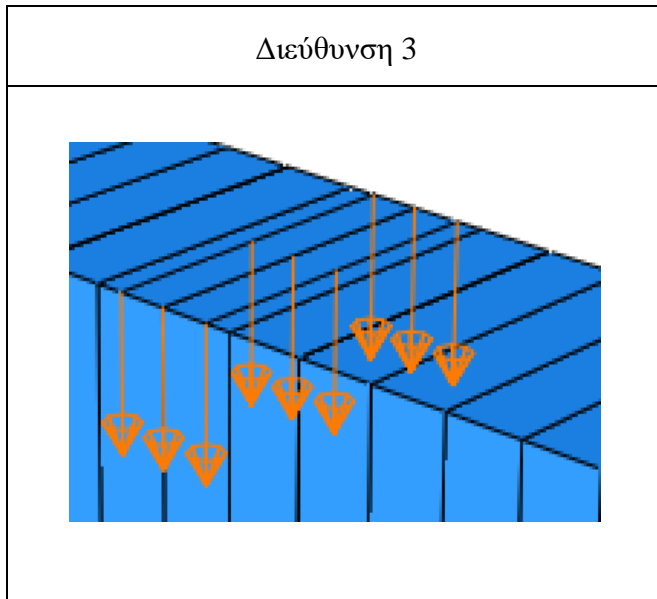
Για την προσομοίωση των στηρίξεων εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες άρθρωσης ($U1 = U2 = U3 = 0$) και κύλισης (δέσμευση στον κατακόρυφο άξονα ανά περίπτωση) σε πλάτος 1m, για την ομαλότερη κατανομή της έντασης.



Εικόνα 4.1-2: Προσομοίωση στηρίξεων των τριών δοκιμίων

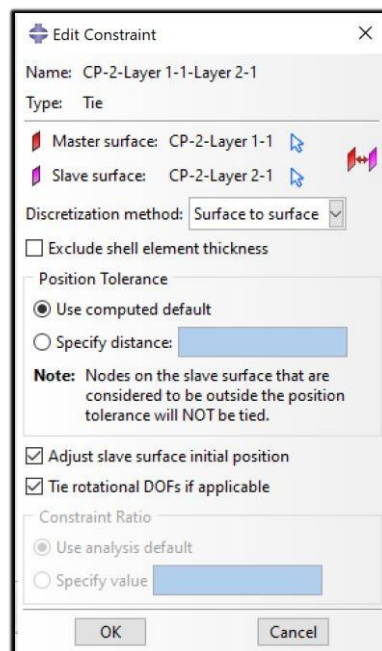
Επιπλέον, εφαρμόστηκε επιβαλλόμενη μετακίνηση 0.03 cm κατά τον κατακόρυφο άξονα (yy για τις διευθύνσεις 1 και 3 και zz για τη διεύθυνση 2), η οποία προσομοιάστηκε επιφανειακά σε μια λωρίδα πλάτους 1m, ώστε να μην εμφανίζονται συγκεντρώσεις τάσεων.



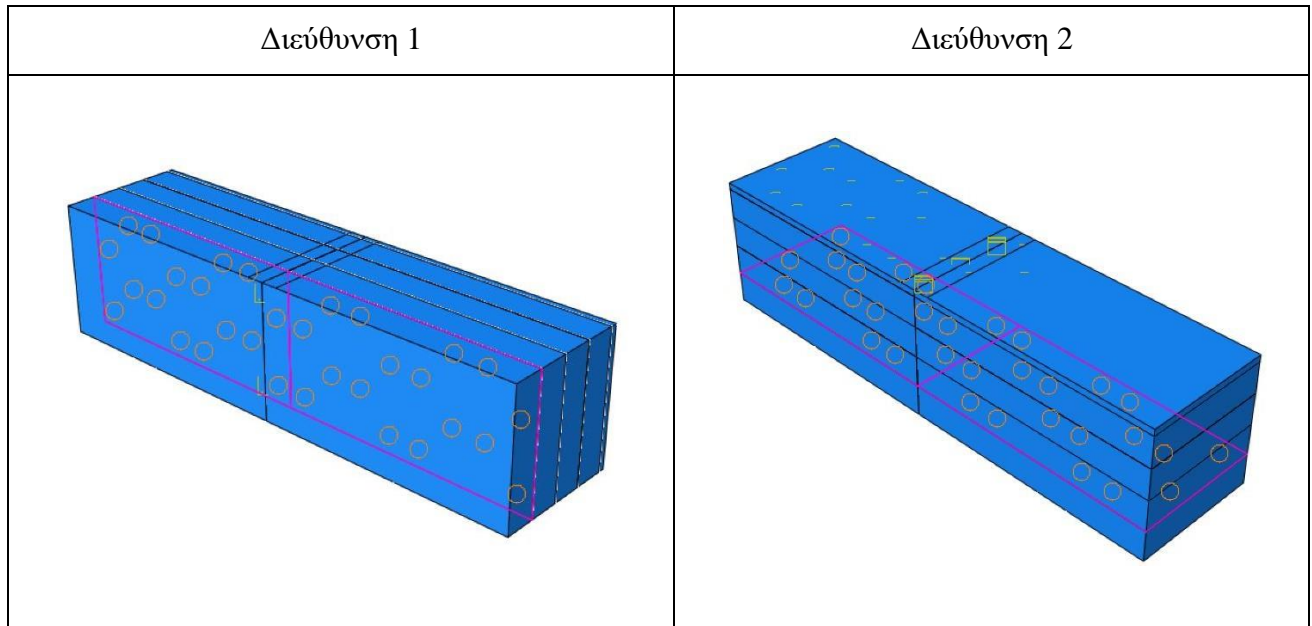


Εικόνα 4.1-3: Προσομοίωση φόρτισης των τριών δοκιμών

Στα προσομοιώματα 1 και 2, που αναφέρονται στις διευθύνσεις 1 και 2 αντίστοιχα, μεταξύ των στρώσεων εφαρμόστηκαν οχτώ συνολικά περιορισμοί σύνδεσης (Tie constraints) με μέθοδο διακριτοποίησης επιφάνειας με επιφάνεια (Surface to surface).

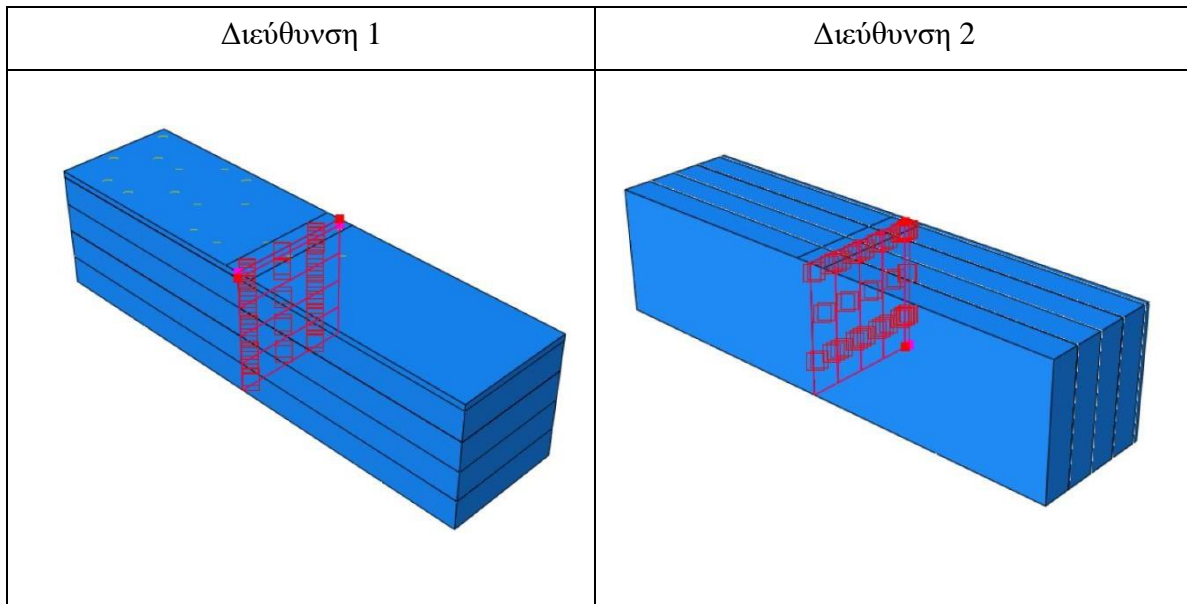


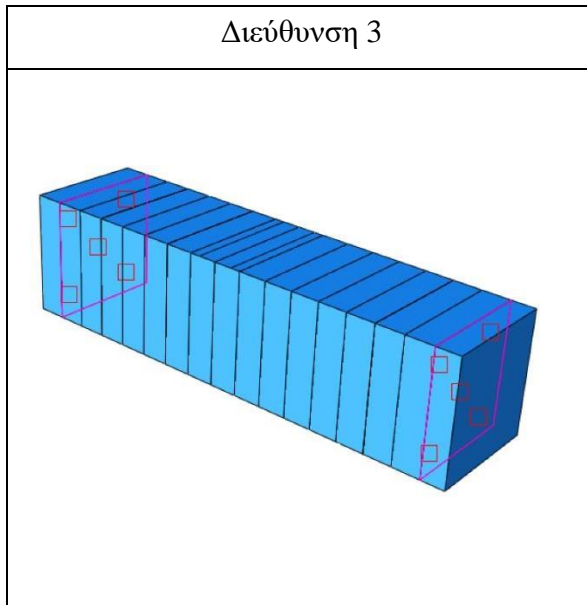
Εικόνα 4.1-4: Εφαρμογή περιορισμών σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων για τις διευθύνσεις 1 και 2 (i).



Εικόνα 4.1-5: Εφαρμογή περιορισμών σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων για τις διευθύνσεις 1 και 2 (ii).

Για την κατακόρυφη σύνδεση των στρώσεων στο μέσο της δοκού εισήχθησαν ιδιότητες αλληλεπίδρασης (Interaction Properties) (σύνολο πέντε στον αριθμό). Ιδιότητες αλληλεπίδρασης εφαρμόστηκαν επίσης μεταξύ των στρώσεων στην διεύθυνση 3 (16 συνολικά στον αριθμό).



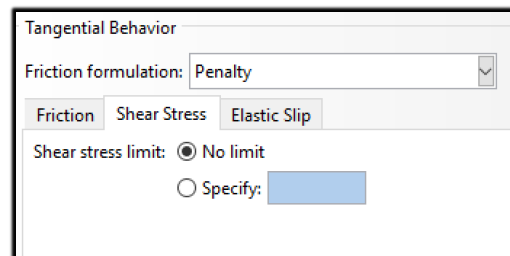
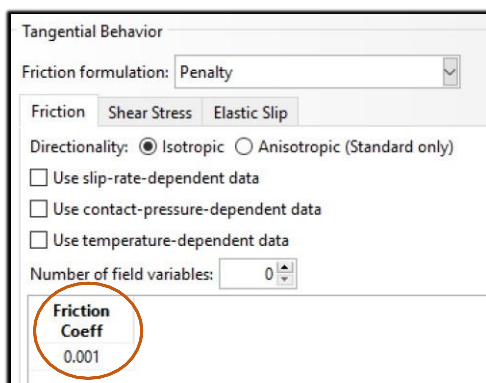


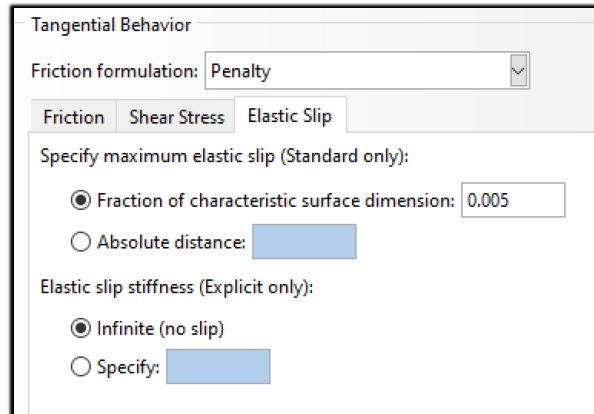
Εικόνα 4.1-6: Εφαρμογή ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης για τις τρεις διευθύνσεις

Οι ιδιότητες που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στρώσεων είναι:

- Εφαπτομενική συμπεριφορά (Tangential Behavior):

Σχετικά με την εφαπτομενική συμπεριφορά των διεπαφών ορίζεται τελικά συντελεστής τριβής 0.001, ενώ δεν ορίζεται όριο για την διατμητική τάση. Επιπλέον, εισάγεται το κλάσμα χαρακτηριστικής επιφανειακής διάστασης, για μέγιστη τιμή ελαστικής ολίσθησης, ίσο με 0.005 και απεριόριστη δυσκαμψία ελαστικής ολίσθησης, ώστε να μην ολισθαίνει.

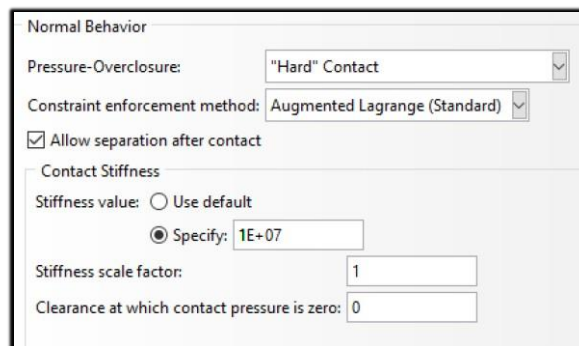




Εικόνα 4.1-7: Τελικές τιμές παραμέτρων ορισμού εφαπτομενικής συμπεριφοράς μεταξύ των στρώσεων

- Κανονική συμπεριφορά (Normal Behavior):

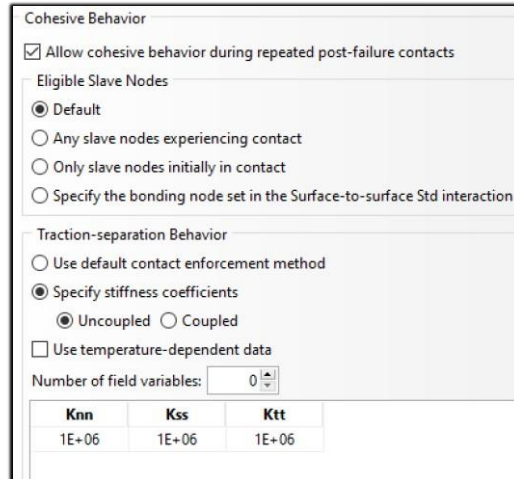
Στη συνέχεια ορίζεται συμπεριφορά, κατά την κάθετη διεύθυνση της διεπαφής, με σκληρή επαφή, ώστε να μην εισχωρεί η μια στρώση στην άλλη μέσω πολύ σκληρών ελατηρίων που τοποθετούνται σε απέναντι κόμβους. Για την επιβολή περιορισμών επαφής επιλέγεται η επαυξημένη Lagrange (συνήθης), επιτρέποντας την αποκόλληση μετά την επαφή, με τιμή δυσκαμψίας επαφής των ελατηρίων ίση με $1E+07$.



Εικόνα 4.1-8: Ορισμός κανονικής συμπεριφοράς για την αλληλεπίδραση των στρώσεων.

- Συνεκτική συμπεριφορά (Cohesive Behavior):

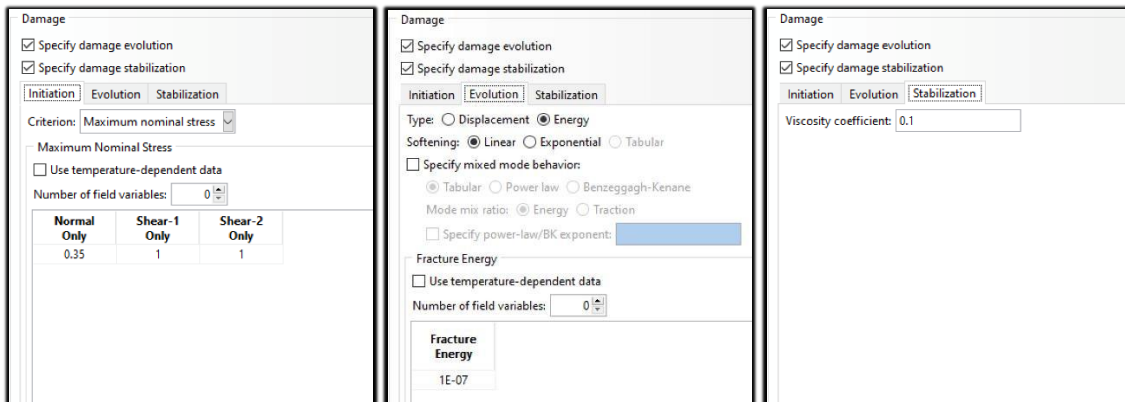
Για την προσομοίωση της εκκίνησης και της διάδοσης της αποκόλλησης στο Abaqus χρησιμοποιείται μοντέλο συνεκτικής ζώνης και εισάγεται ένα στρώμα συνεκτικών στοιχείων μεταξύ γειτονικών σύνθετων ελασμάτων. Για το πείραμα αυτό επιτράπηκε συνεκτική συμπεριφορά έπειτα από επαναλαμβανόμενες αποτυχίες επαφής, ενώ επιλέγονται οι προεπιλεγμένοι εξαρτώμενοι κόμβοι. Οι τιμές της δυσκαμψίας των ελατηρίων κατά την κάθετη και τις δυο παράλληλες διευθύνσεις καθορίζονται στην τιμή $1E+06$ για την διεύθυνση 1.



Εικόνα 4.1-9: Ορισμός ιδιοτήτων στρώματος συνεκτικής ζώνης

- Βλάβη (Damage):

Με βάση τα πειράματα προέκυψε τιμή μέγιστης εφελκυστικής τάσης ίση με περίπου 4 MPa. Από τη μορφή αστοχίας, όπως προέκυψε από το πείραμα (Εικ. 2-2-10, 2-2-11), συμπεραίνουμε ότι η διάτμηση δεν επιδρά στην αντοχή των δοκιμίων για τον έλεγχο κάμψης. Επιλέγεται γραμμική συμπεριφορά για τον νόμο διάδοσης της αποκόλλησης με ενέργεια θραύσης $G = 1E-07$.



α)

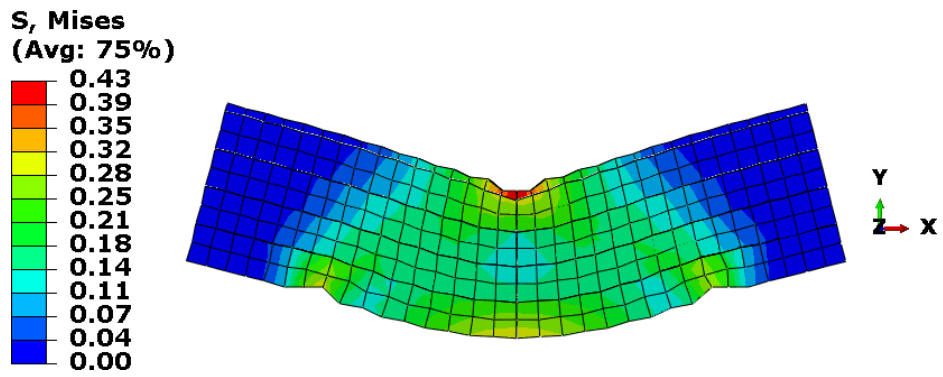
β)

γ)

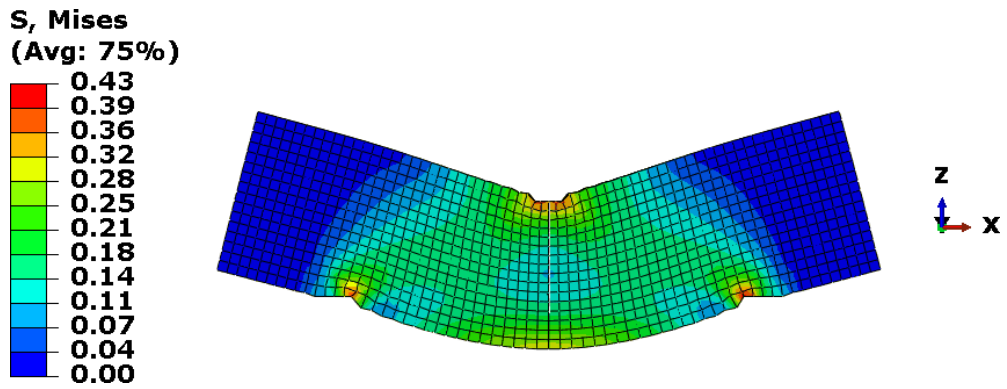
Εικόνα 4.1-10: Ορισμός ιδιοτήτων έναρξης και εξέλιξης της αποκόλλησης.

4.1.2 Αποτελέσματα

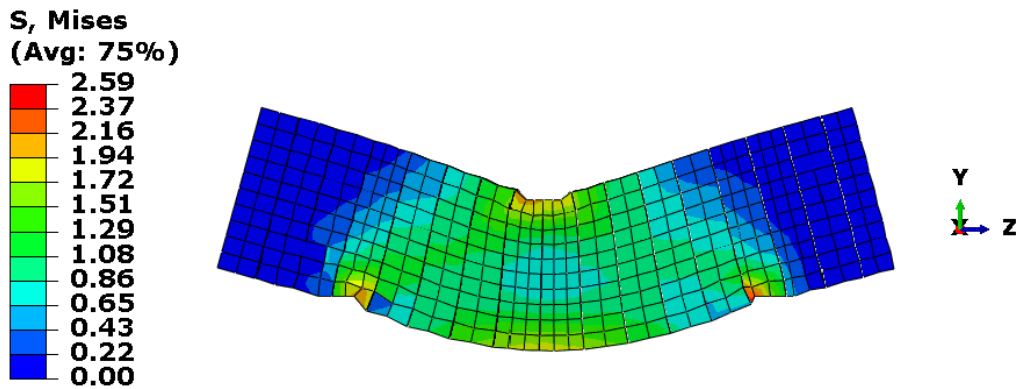
α) Παραμορφώσεις



Εικόνα 4.1-11: Εικόνα παραμορφώσεως του δοκιμίου 1

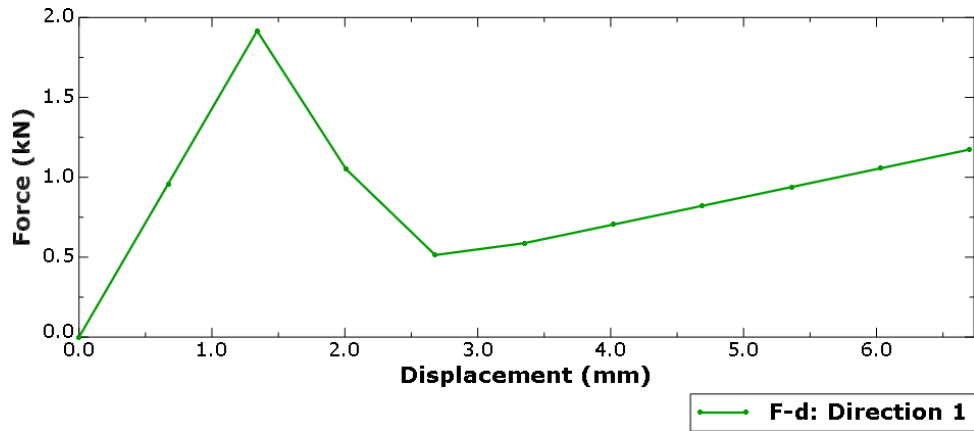


Εικόνα 4.1-12: Εικόνα παραμορφώσεως του δοκιμίου 2

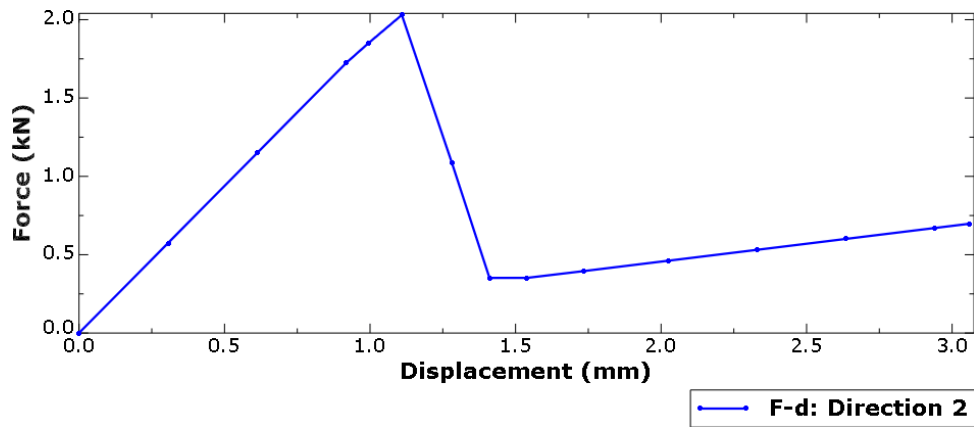


Εικόνα 4.1-13: Εικόνα παραμορφώσεως του δοκιμίου 3

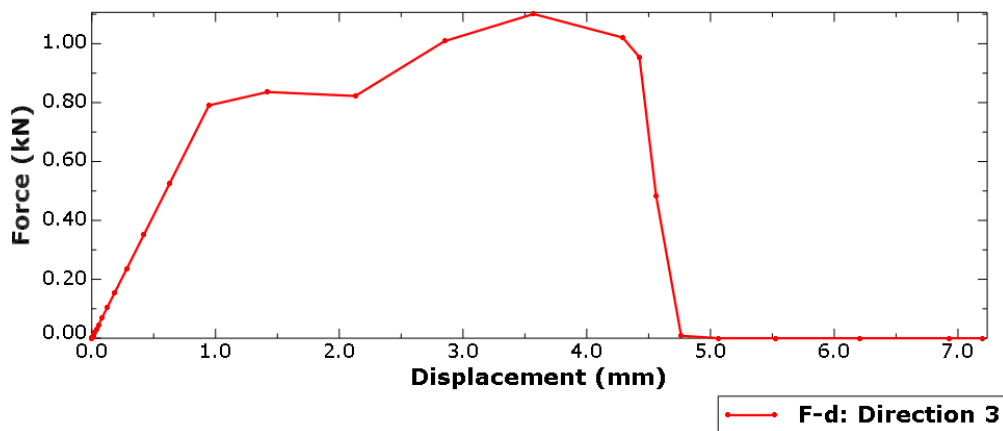
β) Καμπύλη δύναμης μετατόπισης



Εικόνα 4.1-14: Καμπύλη δύναμης - μετατόπισης για την διεύθυνση 1

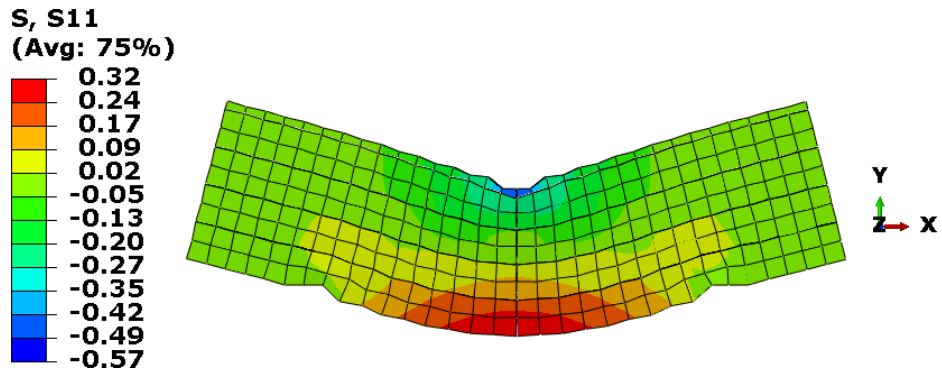


Εικόνα 4.1-15: Καμπύλη δύναμης - μετατόπισης για την διεύθυνση 2

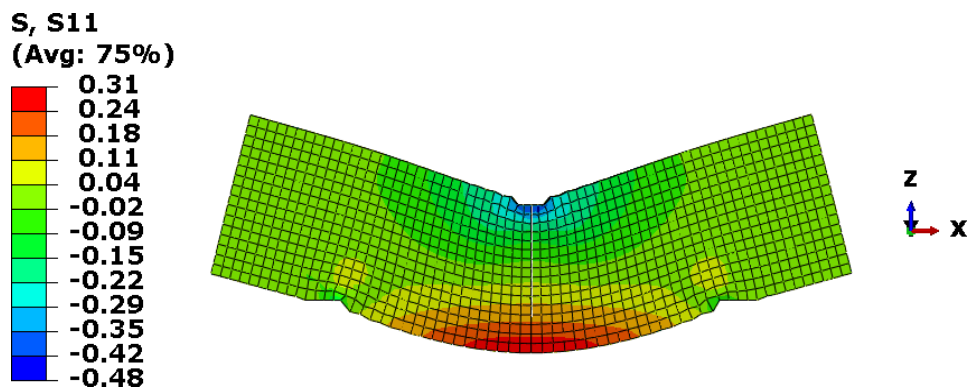


Εικόνα 4.1-16: Καμπύλη δύναμης - μετατόπισης για την διεύθυνση 3

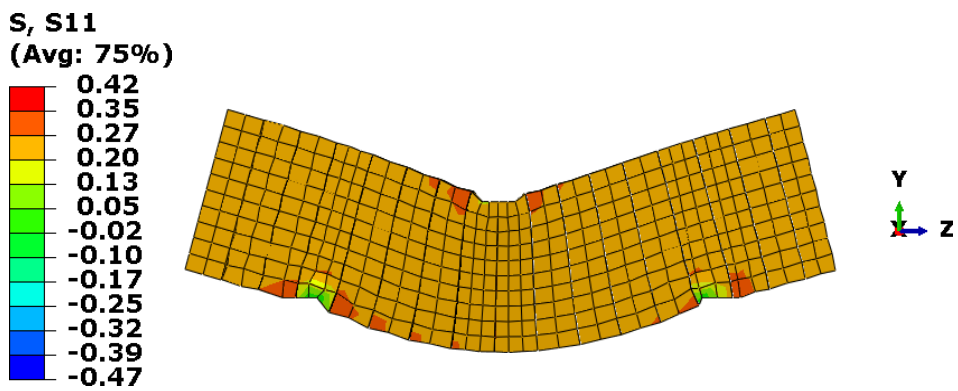
γ) Μέγιστες τάσεις



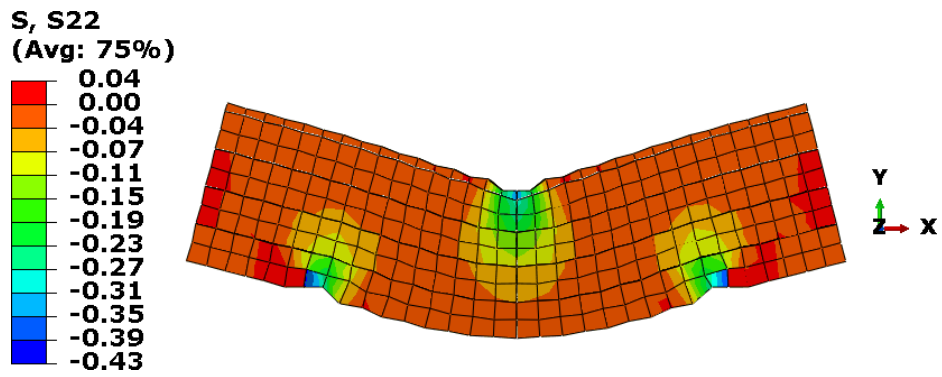
Εικόνα 4.1-17: Τάσεις S11 (σ_{xx}) για την διεύθυνση 1



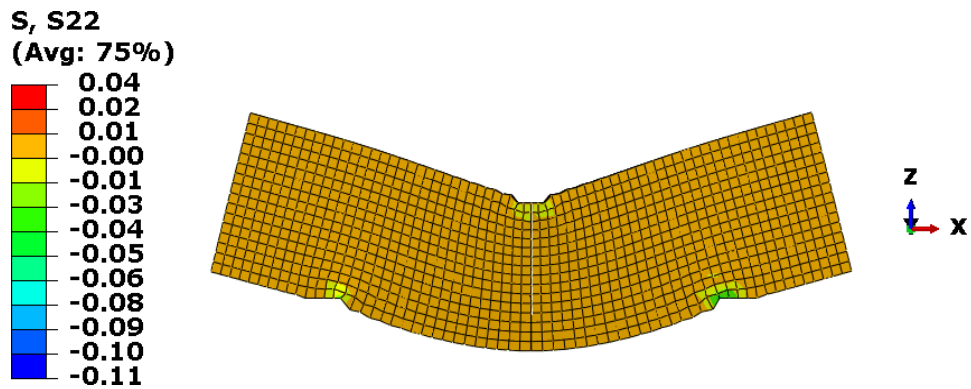
Εικόνα 4.1-18: Τάσεις S11 (σ_{xx}) για την διεύθυνση 2



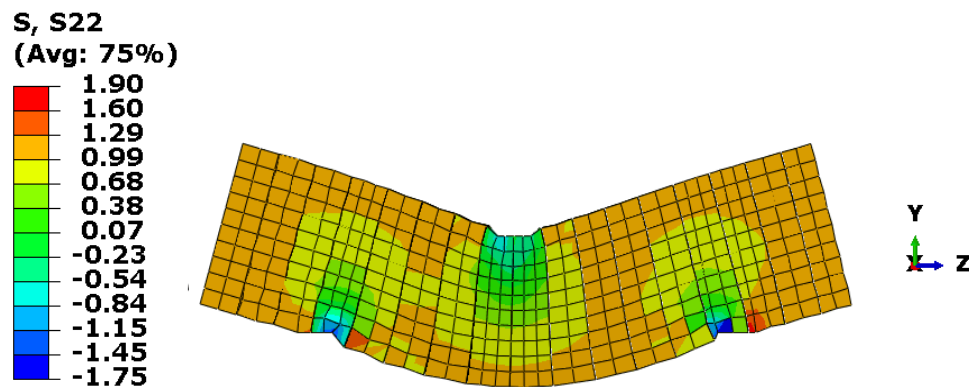
Εικόνα 4.1-19: Τάσεις S11(σ_{xx}) για την διεύθυνση 3



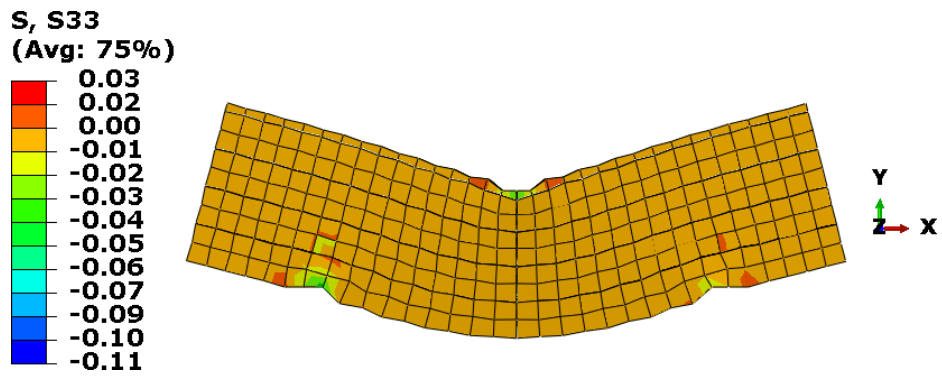
Εικόνα 4.1-20: Τάσεις S22 (σ_{yy}) για την διεύθυνση 1



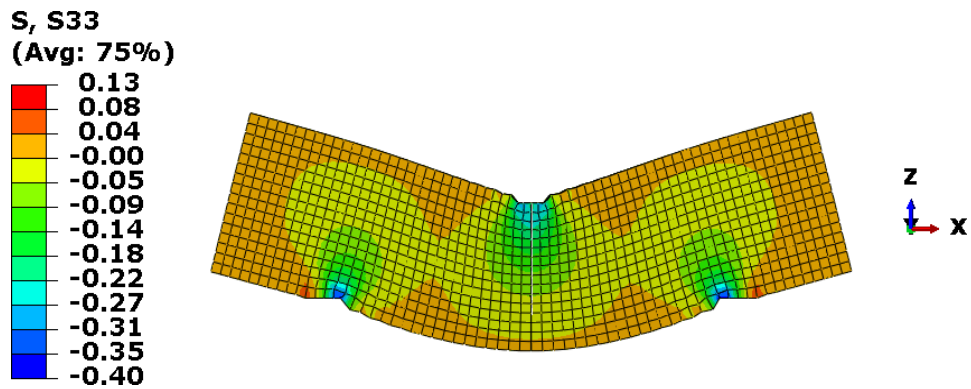
Εικόνα 4.1-21: Τάσεις S22 (σ_{yy}) για την διεύθυνση 2



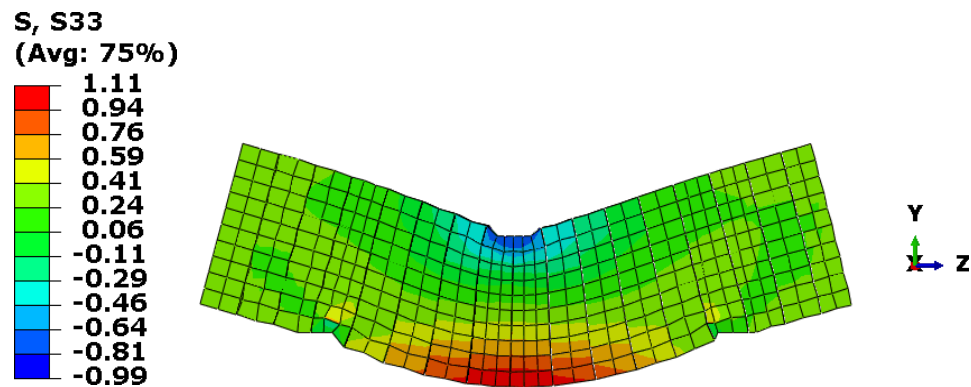
Εικόνα 4.1-22: Τάσεις S22 (σ_{yy}) για την διεύθυνση 3



Εικόνα 4.1-23: Τάσεις S33 (σ_{zz}) για την διεύθυνση 1

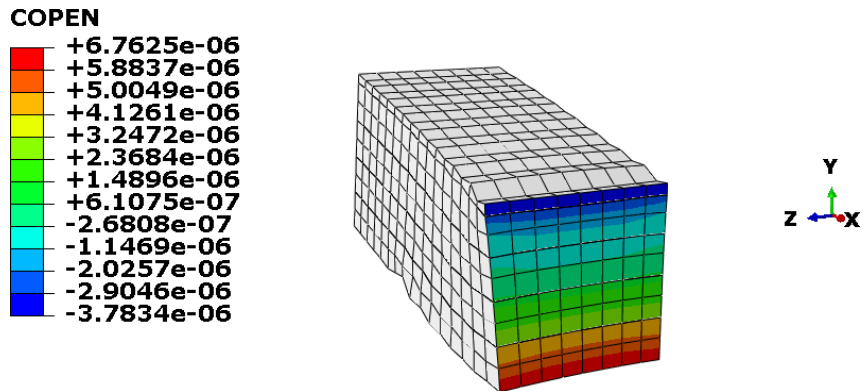


Εικόνα 4.1-24: Τάσεις S33 (σ_{zz}) για την διεύθυνση 2

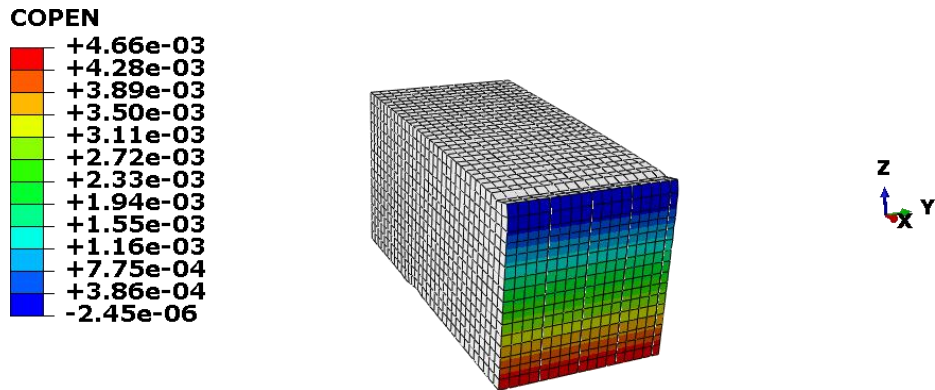


Εικόνα 4.1-25: Τάσεις S33 (σ_{zz}) για την διεύθυνση 3

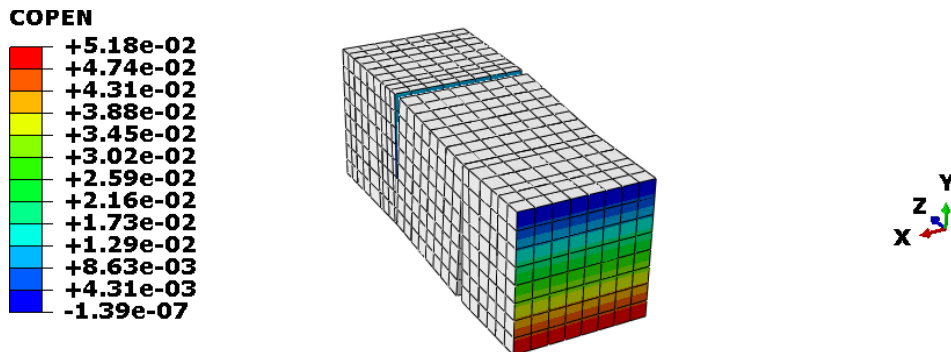
δ) Άνοιγμα ρωγμής



Εικόνα 4.1-26: Άνοιγμα ρωγμής για την διεύθυνση 1



Εικόνα 4.1-27: Άνοιγμα ρωγμής για την διεύθυνση 2



Εικόνα 4.1-28: Άνοιγμα ρωγμής για την διεύθυνση 3

5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται και γίνεται προσομοίωση του πειράματος ελέγχου δομικής συμπεριφοράς τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκών σκυροδέματος με διάφορες στρατηγικές ενίσχυσης (Gebhard et al., 2021), κάνοντας χρήση των βαθμονομημένων ιδιοτήτων συνεκτικής επιφάνειας (Cohesive Properties), ώστε να προσδιοριστεί η αντοχή τους.

5.1 Διαδικασία και αποτελέσματα πειράματος

5.1.1 Ρύθμιση δοκιμίων και έλεγχος

Το πείραμα περιλάμβανε εννέα δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δείγματα δοκού με και χωρίς ενίσχυση μεταξύ των στρώσεων. Τέσσερις προεντεταμένοι δοκοί είχαν μη δεσμευμένο διαμήκη οπλισμό και αναφέρονται ως Ομάδα 1 και στις άλλες πέντε χρησιμοποιήθηκε παθητικά συνδεδεμένος διαμήκης οπλισμός (Ομάδα 2).

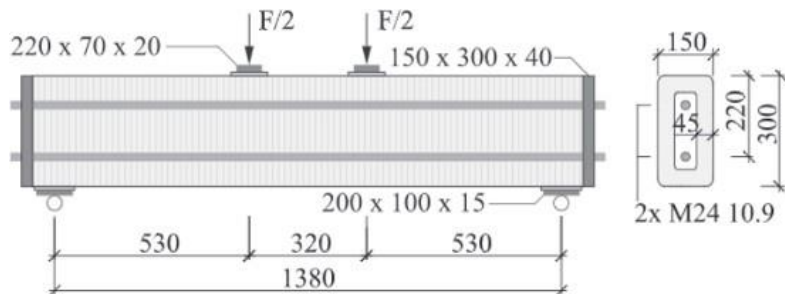
Οι τέσσερις δοκοί της σειράς 1 εκτυπώθηκαν σαν κοίλη διατομή με πλάτος 150 mm και ύψος 300 mm. Η διατομή παρήχθη με ένα μονό νήμα με πλάτος εκτύπωσης περίπου 45 mm και ύψος στρώσεως 5 mm. Για αυτή την ομάδα το πλάτος εκτύπωσης ήταν ίσο με το πλάτος του κορμού. Κατά την εκτύπωση της ομάδας 1 παρήχθησαν τέσσερις δοκοί μισού μήκους, δύο από τις οποίες οπλίστηκαν με ευθυγραμμισμένες ίνες μεταξύ των στρώσεων ποσότητας περίπου 0.3%, ενώ οι άλλες παράχθηκαν χωρίς οπλισμό. Για όλα τα δοκίμια, ο οπλισμός προστέθηκε χειροκίνητα μεταξύ των στρώσεων. Παρά το ότι οι ίνες συγκεντρώνονται στα ενδιάμεσα στρώματα, οι καταγραφόμενες δοσολογίες ινών αναφέρονται στη μέση δοσολογία ανά όγκο σκυροδέματος.

Μετά την εκτύπωση οι δύο άκρες των δοκιμίων κόπηκαν στο επιθυμητό μήκος, εξασφαλίζοντας μια επίπεδη και ομαλή επιφάνεια για την σύνδεση των κομματιών και την προσάρτηση των χαλύβδινων αγκυρώσεων. Οι δύο μισές δοκοί συναρμολογήθηκαν με κόλλα για να σχηματίσουν μια δοκό μήκους 1.5 m. Στρώματα κονιάματος ρίχτηκαν στις περιοχές εφαρμογής της φόρτισης και των στηριγμάτων για να διασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή φορτίου στην τραχιά εκτυπωμένη επιφάνεια. Επιπλέον, δημιουργήθηκε μια ομαλή επιφάνεια με τη χρήση γύψου και βάφτηκε λευκή στην μια πλευρά της, για να επιτρέψει την εμφάνιση στιγμάτων για τις μετρήσεις συσχέτισης ψηφιακής εικόνας. Ο διαμήκης οπλισμός αποτελούταν από δυο σπειροειδείς ράβδους τύπου M24 10.9, οι οποίες εισήχθησαν στο κενό της διατομής και αγκυρώθηκαν πίσω από

χαλύβδινες πλάκες, που κάλυπταν ολόκληρη τη διατομή. Κάθε ράβδος προέντασης αποτελούταν από δυο στοιχεία ενός μέτρου συνδεδεμένα με έναν προσαρμοσμένο συνδετήρα.

Για τις δυο πρώτες δοκούς εφαρμόστηκε μια σταθερή προένταση -9.3 MPa , ενώ για τις άλλες δύο η δύναμη προέντασης προσαρμόστηκε για να επιτευχθούν οι τιμές -3 MPa στην κορυφή και -12 MPa κάτω (μέση θλιπτική τάση -7.5 MPa).

Οι στηρίξεις τοποθετούνται στα $0.04L$ από τα άκρα και οι φορτίσεις στα $0.4L$ από τα άκρα.



Εικόνα 5.1-1. Γεωμετρία και όπλιση Ομάδας 1.

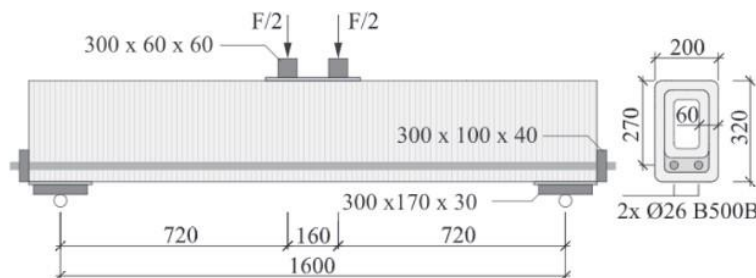
Για την ομάδα 2 παράχθηκαν πέντε δοκοί διατομής ύψους 320 mm και πλάτους 200 mm. Η διατομή εκτυπώθηκε από δύο παρακείμενα νήματα με ύψος 5 mm και πλάτος περίπου 30 mm, οδηγώντας σε πλάτος ιστού περίπου 60 mm. Αυτό επέτρεψε στην διατομή να αποτελείται από δυο κενά, ένα για την αποθήκευση υλικού και ένα για την τοποθέτηση διαμήκους οπλισμού. Οι δοκοί παράχθηκαν σε ζευγάρια, ένα με όπλιση στην διεπιφάνεια και ένα χωρίς όπλιση. Μεταξύ των δοκών με διεπιφανειακή όπλιση, η μια περιλάμβανε χαλύβδινο καλώδιο γύρω από τη διατομή, που αποτελούνταν από 19 συρματόσχοινα υψηλής αντοχής, τύπου 1x19 με επιφάνεια 0.6 mm^2 . Οι άλλες δυο ενισχύθηκαν με ονομαστική ποσότητα ινών (ρ_{nom}) 0.3% και 0.6% γύρω από τη διατομή. Οι ίνες παρασκευάστηκαν για ονομαστικό πλάτος ιστού 50 mm. Ωστόσο το πραγματικό πλάτος έπρεπε να αυξηθεί κατά την εκτύπωση για να επιτευχθεί η σωστή σύνδεση μεταξύ των δύο παρακείμενων νημάτων. Ο οπλισμός τοποθετήθηκε πάλι χειροκίνητα μεταξύ των στρώσεων.

Σε αντίθεση με την Ομάδα 1, οι δοκοί της Ομάδας 2 παράχθηκαν με μια κίνηση, χωρίς την ανάγκη κόλλας. Κατά την διάρκεια εκτύπωσης του βήματος 23, η παραγωγή δεν μπορούσε να ολοκληρωθεί και μόνο δυο μισές δοκοί, μια με και μια χωρίς οπλισμό, εκτυπώθηκαν. Αυτές κολλήθηκαν μεταξύ τους όπως στην Ομάδα 1 και το κομμάτι χωρίς την ενίσχυση οπλίστηκε εξωτερικά και προεντάθηκε για να διασφαλιστεί η αστοχία στην πλευρά με την εσωτερική όπλιση.

Στρώσεις κονιάματος, καθώς και λεπτή στρώση γύψου εφαρμόστηκαν και σε αυτή την περίπτωση.

Σχετικά με τον διαμήκη οπλισμό, τοποθετήθηκαν δυο συμβατικές ράβδοι οπλισμού (B500B), διαμέτρου 26 mm και νήματα στις δυο άκρες στο κάτω κενό και αγκυρώθηκαν με δυο μεταλλικές πλάκες 300 x 100 x 40. Αυτές οι ράβδοι δεν ήταν προεντεταμένες, αλλά το κενό ενεματώθηκε 14 μέρες πριν την δοκιμή για να επιτευχθεί σύνδεση μεταξύ του οπλισμού και του περιβαλλόμενου σκυροδέματος.

Οι στηρίξεις τοποθετούνται στα 0.06L από τα άκρα και οι φορτίσεις στα 0.46L από τα άκρα.



Εικόνα 5.1-2. Γεωμετρία και όπλιση Ομάδας 2.

i. Υλικά

Η διαδικασία 3DCP που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη βασίζεται στη μέθοδο set on demand, στην οποία ένας επιταχυντής ενεργοποιεί ένα κονίαμα OPC (συμβατικού σκυροδέματος Portland), μέσω ενεργής ανάμιξης που πραγματοποιείται μέσα στο εργαλείο εξώθησης. Ως αποτέλεσμα, το εξωθούμενο νήμα αρχίζει να σκληραίνει αφού αποβληθεί από το εργαλείο και τοποθετηθεί κατά μήκος της διαδρομής εκτύπωσης. Το πρώτο σετ εφαρμογής της μεθοδολογίας καταγράφηκε στο έργο Smart Dynamic Cast στο ETH Zurich (Lloret - Fritschi et al., 2017) και αργότερα εκτυπώθηκε τρισδιάστατα από το Xtree (Gosselin et al., 2016).

Η σύνθεση του επιβραδυντή που αναπτύχθηκε στο ETH Zurich έχει χρόνο ανοίγματος 6 ώρες. Περιείχε ασβεστολιθική θρυμματισμένη άμμο με κατανομή μεγέθους κόκκων μεταξύ 0 και 2 mm, OPC σε αναλογία νερού προς τσιμέντου 0.4 και πρόσθετα για την επιθυμητή ρεολογική συμπεριφορά. Ο επιταχυντής περιείχε πάστα CAC (Τσιμέντο Αργιλικού Ασβεστίου), με 0.1% γλυκονικό νάτριο, σταθεροποιημένο με 0.1% εμπορική πολυαιθυλενογλυκόλη και με αναλογία νερού προς τσιμέντο 0.27. Η ποσότητα του επιταχυντή καθορίζει την αρχική τάση απόδοσης και τον ρυθμό σκλήρυνσης του νήματος, οδηγώντας σε εξάρτηση της ποσότητας του επιταχυντή ανάλογα με τον χρόνο εκτύπωσης μιας στρώσης.

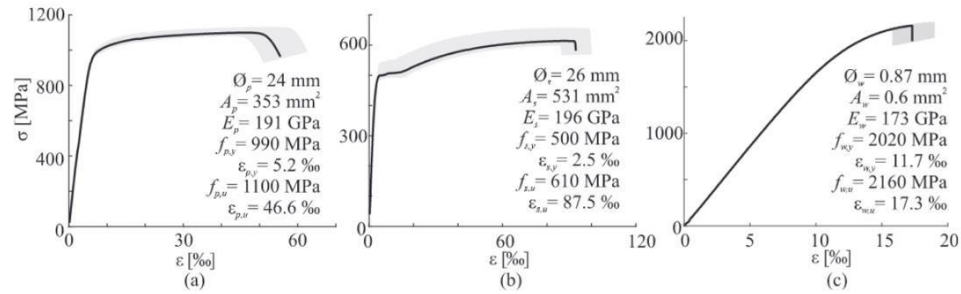
Όλες οι δοκοί εκτυπώθηκαν με την ίδια σύνθεση σκυροδέματος. Ωστόσο, η ποσότητα επιταχυντή ποίκιλλε για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη εκτύπωση για τα διαφορετικά μήκη μιας στρώσης με λόγο CAC προς OPC ίσο με 4.0% και 4.6% για τις Ομάδες 1 και 2 αντίστοιχα. Η αντοχή του σκυροδέματος μετρήθηκε στην ηλικία των δοκιμών, ενώ η θλιπτική αντοχή προσδιορίστηκε σε τυπικούς θλιβόμενους κυλίνδρους διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm. Η εφελκυστική αντοχή προσδιορίστηκε με βάση δοκιμές διπλής διάτρησης σε κυλίνδρους διαμέτρου και ύψους 150 mm. Οι κύλινδροι γεμίστηκαν με επιταχυνόμενο εκτυπωμένο υλικό χωρίς συμπίεση.

	Beam	Codification	PS	Glued	b_{web} [mm]	σ_{cP} [MPa]	ISR	ρ_{nom} [%]	ρ_{web} [%]	Age [days]	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]
Series 1	111	B-111-NR	11	Yes	42	-9.3	-	-	-	28	73.2	2.4
	112	B-112-F03		Yes	43	-9.3	Fibres	0.30	0.38	31		
	121	B-121-NR	12	Yes	50	-7.5	-	-	-	29	70.4	2.5
Series 2	122	B-122-F03		Yes	52	-7.5	Fibres	0.30	0.31	29		
	211	B-211-NR	21	No	62	-	-	-	-	28	66.9	2.2
	212	B-212-C01		No	60	-	Cables	0.10	0.10	28		
	221	B-221-NR	22	No	56	-	-	-	-	28	71.9	2.3
	222	B-222-F03		No	58	-	Fibres	0.30	0.26	28		
	231	B-231-F06	23	Yes	62	-	Fibres	0.60	0.49	50	63.8	2.2

Πίνακας 5.1-1. Βασικές ιδιότητες δοκιμών ελέγχου. PS: Διαδικασία εκτύπωσης, ISR: Τύπος εγκάρσιας όπλισης ενδοστρωμάτων.

Για την ενεμάτωση των κενών χρησιμοποιήθηκε η ίδια σύσταση σκυροδέματος και για τις δυο ομάδες, αλλά χωρίς επιταχυντή για την ομάδα 2. Η αντοχή του ενεμάτων στις 14 μέρες δεν διέφερε σημαντικά από αυτή του εκτυπωμένου σκυροδέματος (η θλιπτική αντοχή ήταν 7 με 18% μικρότερη).

Στο σχήμα 5.2.3. απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά της καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης των διαφορετικών οπλίσεων. Για κάθε όπλιση ελέγχθηκαν τουλάχιστον τρία δοκίμια σε άμεση θλίψη μέχρι την αστοχία. Η τάση διαρροής προσδιορίστηκε ως το σημείο με πλαστική παραμόρφωση 0.002. Το σύστημα προέντασης έχει τάση διαρροής 990 MPa, αλλά όχι καλά προσδιορισμένο πλατό διαρροής, ενώ οι συμβατικές ράβδοι είχαν καλά προσδιορισμένη τη διαρροή στα 500 MPa. Και τα δυο παρουσίασαν, όμως, έντονη ολκιμότητα. Οι μαύρες γραμμές δείχνουν τα μέσα αποτελέσματα ενώ τα γκρι γεμίσματα υποδεικνύουν το εύρος των αποτελεσμάτων.

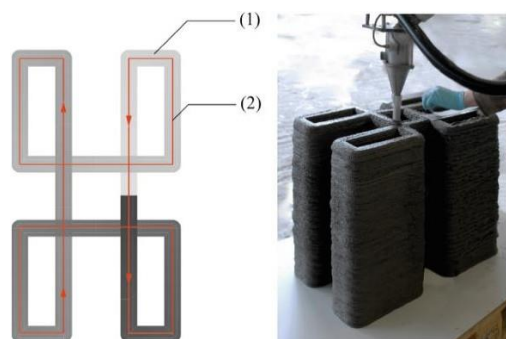


Εικόνα 5.1-3. Σχέση τάσης - παραμόρφωσης: (a) Προεντεταμένη όπλιση M24 10.9 για την Ομάδα 1 (p), (b) Παθητική όπλιση Ø26 B500B για την Ομάδα 2 (s), (c) Ενίσχυση με καλώδια για την Ομάδα 2 (w).

Οι δοκοί ελέγχθηκαν σε κάμψη τριών σημείων ανοίγματος 500 mm με εγκοπή 25 mm στο μέσο. Τα εκτυπωμένα δοκίμια δεν ταίριαζαν με τις διαστάσεις που προσδιορίζονται στον EN 14651 ακριβώς, με αποτέλεσμα το ρ_{eff} να ποικίλλει και πάλι ελαφρώς, αφού οι ίνες προετοιμάστηκαν για την ονομαστική γεωμετρία. Στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εξετάστηκε η πραγματική γεωμετρία.

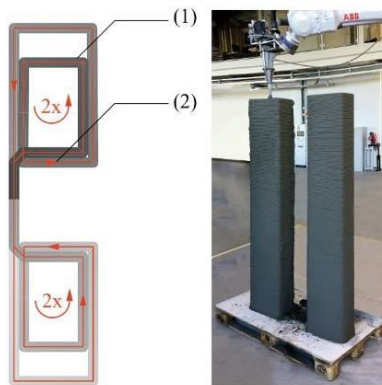
ii. Παραγωγή

Οι δοκοί εκτυπώθηκαν στο Εργαστήριο Ρομποτικής Κατασκευής του ETH Zurich. Ο σχεδιασμός των διαδρομών εκτύπωσης για τις δοκούς ξεκίνησε από ένα στρώμα και η στοχευόμενη γεωμετρία επιτεύχθηκε με ύψος στρώσεις 5 mm. Στην ομάδα 1, μέσω της εκτύπωσης συνδέθηκαν οι τέσσερις ανεξάρτητες δοκοί σε ένα περίγραμμα με χρονικό κενό 23 s μεταξύ διαδοχικών στρώσεων.



Εικόνα 5.1-4. Διαδρομή εκτύπωσης και πρωτότυπα για την Ομάδα 1 με νήμα πλάτους 50 mm. Η γκρι διαβάθμιση κατά μήκος της διαδρομής εκτύπωσης αντιστοιχεί στην ηλικία του νήματος (1), και η κόκκινη γραμμή δείχνει την τροχιά εκτύπωσης (2).

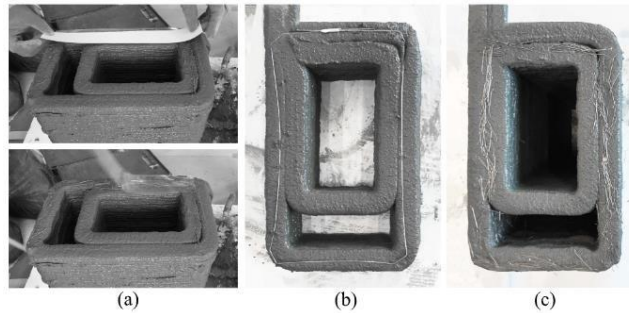
Στην ομάδα 2, το ρομπότ εκτύπωσε δυο στρώσεις μιας δοκού και στη συνέχεια μεταβιβάστηκε σε δεύτερη δοκό για να εκτυπώσει τα αντίστοιχα στρώματα, όπως φαίνεται στο σχήμα, με χρονικό κενό 13 s μεταξύ διαδοχικών στρώσεων και 28 s για την τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού χειροκίνητα.



Εικόνα 5.1-5. Διαδρομή εκτύπωσης και πρωτότυπα για την Ομάδα 2 με νήμα πλάτους 30 mm. Η γκρι διαβάθμιση κατά μήκος της διαδρομής εκτύπωσης αντιστοιχεί στην ηλικία του νήματος (1), και η κόκκινη γραμμή δείχνει την τροχιά εκτύπωσης (2).

iii. Τοποθέτηση ενδιάμεσου εγκάρσιου οπλισμού

Κατά την εκτύπωση, ο ενδιάμεσος εγκάρσιος οπλισμός τοποθετούταν χειροκίνητα στην κορυφή κάθε δεύτερης στρώσης, η σύνδεση του οποίου με το σκυρόδεμα επιτυγχάνεται λόγω της αρχικά πολύ ρευστής κατάστασης του εξωθούμενου υλικού. Πριν την παραγωγή τα καλώδια κόπηκαν στο επιθυμητό μήκος και καμπυλώθηκαν. Αφού τοποθετήθηκε το καλώδιο πάνω την στρώση, εφαρμόστηκε ελαφριά πίεση για να αποτραπεί η αποκόλλησή του. Για την Ομάδα 1 οπλίστηκαν μόνο οι κορμοί και για την Ομάδα 2 οι κορμοί και οι φλάντζες, Η διαδικασία τοποθεσίας των ινών φαίνεται στο σχήμα:

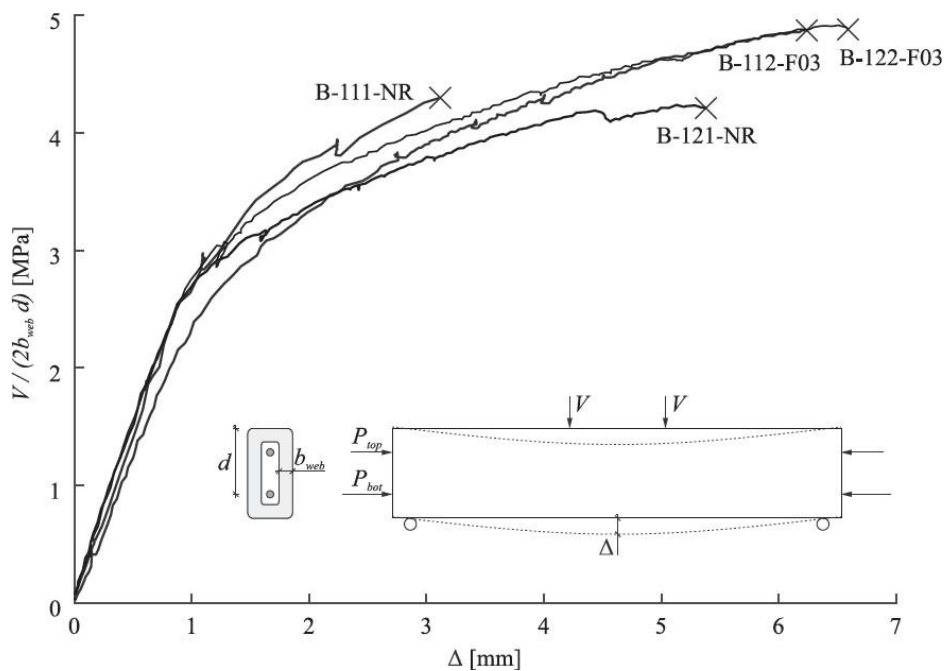


Εικόνα 5.1-6. Τοποθέτηση νημάτων και τελική διατομή για την Ομάδα 2: (a) Τοποθέτηση νημάτων με μαγνητική ταινία και πλαστικό φύλλο στον κορμό της δοκού με 0.3% ίνες, (b) Διατομή με ενίσχυση καλωδίων, (c) Διατομή με 0.3% όπλιση ινών.

5.1.2 Αποτελέσματα δοκιμών

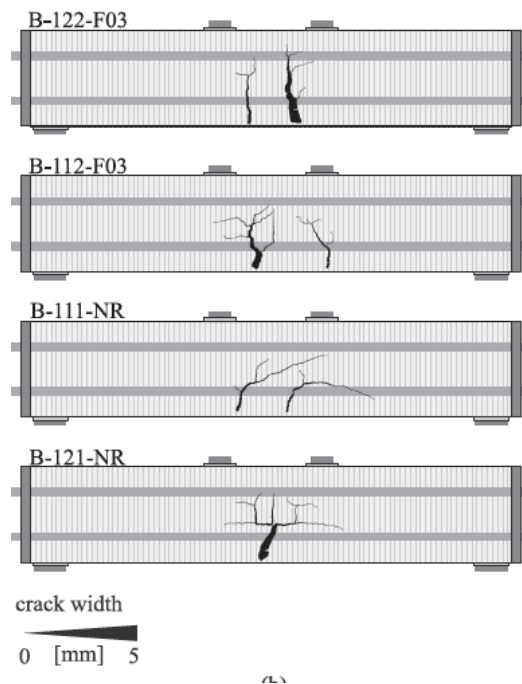
Ομάδα 1: Δοκοί με ασύνδετη προεντεταμένη όπλιση

Στο σχήμα φαίνεται η συμπεριφορά δύναμης παραμόρφωσης της 1ης σειράς δοκών, τα μοτίβα ρωγμών και τα σχετιζόμενα ανοίγματα ρωγμών. Η εφαρμοζόμενη διατμητική δύναμη κανονικοποιήθηκε με το στατικό βάθος και το πλάτος κορμού.



Εικόνα 5.1-7. Διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης δοκών Ομάδας 1.

Όλες οι δοκοί συμπεριφέρθηκαν παρόμοια με μια σχεδόν αρχικά μη ρηγματωμένη φάση, ακολουθούμενη από το σχηματισμό μιας ή δυο καμπτικών ρωγμών, στις οποίες συγκεντρώθηκαν όλες οι παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να μη σχηματιστούν άλλες, και μια σταδιακή μείωση της ακαμψίας μέχρι την αστοχία των δοκών σε κάμψη, λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος. Ενώ η αστοχία των δοκών ήταν εκρηκτική, οδηγώντας σε ξαφνική ολική κατάρρευση της δοκού, η συνολική δομή των δειγμάτων που περιείχαν ενίσχυση παρέμεινε ανέπαφη. Παρόλο που οι ίνες δεν μπορούσαν να ενεργοποιηθούν λόγω απουσίας ρωγμών διάτμησης, ήταν ακόμα σε θέση να ελέγξουν τις μικρορωγμές, γεγονός που πιθανώς είναι η αιτία για την παρατηρούμενη αύξηση της αντοχής διάτμησης περίπου 15% σε σχέση με τις δοκούς χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση.



Εικόνα 5.1-8.Μοτίβα ρηγάτωσης ακριβώς πριν από την αστοχία (99% F_{max}) για την Ομάδα 1.

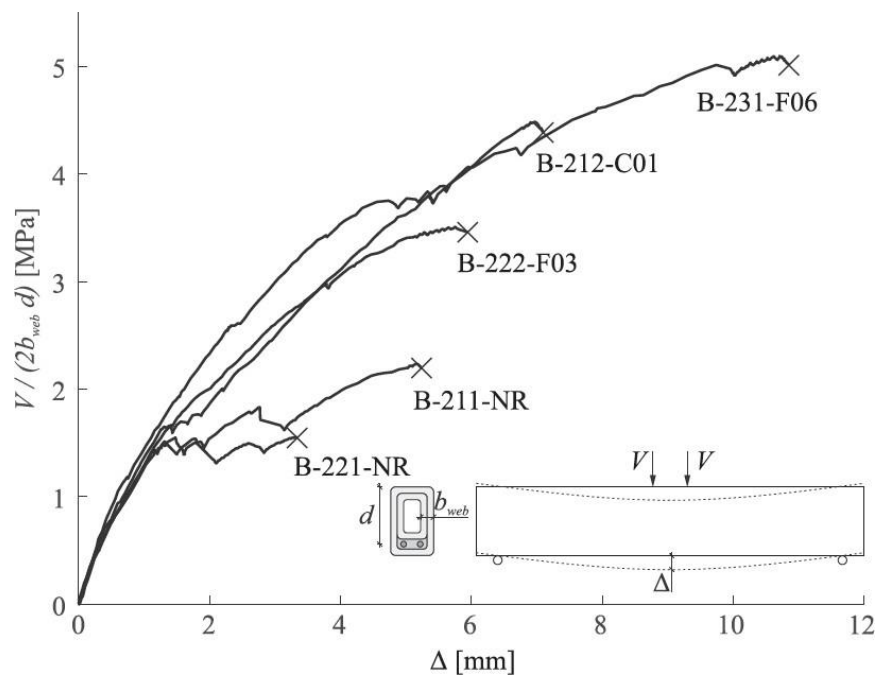
Ομάδα 2: Δοκοί με συνδεδεμένη προεντεταμένη όπλιση

Οι δοκοί παρουσίασαν σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την όπλιση που χρησιμοποιήθηκε. Όλες ανέπτυξαν πολλαπλές καμπτικές ρωγμές πριν την πρώτη διατμητική ρωγμή.

Η δοκός με ίνες 0.3% είχε τη χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα. Μετά τον σχηματισμό διατμητικών ρωγμών, οι ίνες γεφύρωσαν τη ρωγμή και η δύναμη μπορούσε να αυξηθεί περαιτέρω, ενώ η ακαμψία μειωνόταν προοδευτικά λόγω της απομάκρυνσης των ινών μέχρι την αστοχία. Η δοκός με διπλάσια ποσότητα ινών συμπεριφέρθηκε παρόμοια, αλλά έφτασε μόνο 55% υψηλότερο

μέγιστο φορτίο, γεγονός που οφείλεται στην μείωση του δεσμού μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος με την αύξηση της πυκνότητας ινών στην διεπαφή. Δεν παρατηρήθηκε ρήξη ινών στις κρίσιμες ρωγμές, επιβεβαιώνοντας ότι η αστοχία οφείλεται στην απομάκρυνση των ινών.

Η δοκός που ενισχύθηκε με καλώδια, αστόχησε επίσης με εύθραυστο τρόπο, καθώς όλα τα καλώδια στην κρίσιμη ρωγή έσπασαν ταυτόχρονα. Σε αυτή την περίπτωση η ακαμψία παρέμεινε αρκετά σταθερή από τον σχηματισμό της πρώτης διατμητικής ρωγμής μέχρι την αστοχία, όπως παρατηρείται συνήθως σε παρόμοιες δοκιμές με συμβατικό χάλυβα οπλισμού. Παρά το χαμηλότερο ποσοστό οπλισμού (0.1%), η αντοχή του ήταν μεταξύ εκείνων των δειγμάτων με ίνες.

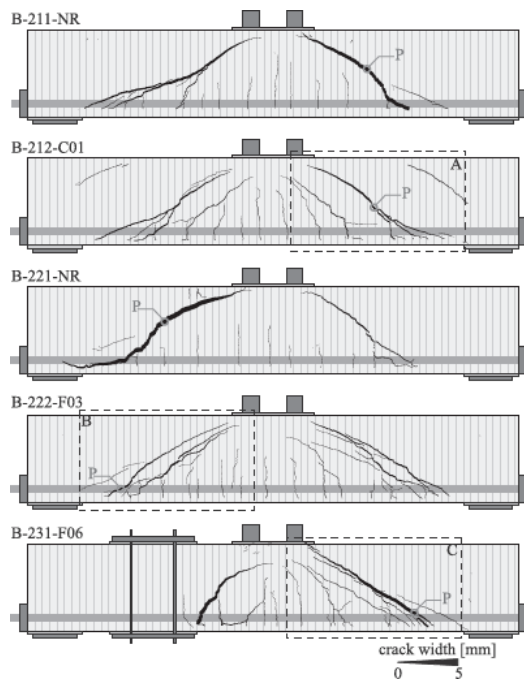


Εικόνα 5.1-9. Διάγραμμα δύναμης - παραμορφώσεως δοκών Ομάδας 2.

Η επίδραση των εκτυπωμένων στρώσεων στη μορφή ρηγμάτωσης ταίριαζε με αυτή των συμβατικών μονολιθικών δοκών. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να υποδηλώνει ότι η πιθανή μείωση της αντοχής εφελκυσμού του σκυροδέματος μεταξύ των τυπωμένων στρωμάτων είναι κοντά ή ακόμα και χαμηλότερη από την εγγενή διασπορά της αντοχής εφελκυσμού για αυτή την εγκατάσταση εκτύπωσης.

Ο σχηματισμός των ρωγμών διάτμησης φαινόταν να εξαρτάται πλήρως από την στρωμάτωση. Τα δυο δείγματα χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση ανέπτυξαν ξαφνικά μεμονωμένες διαγώνιες ρωγμές

με μεγάλα ανοίγματα. Στα άλλα δείγματα διαμορφώθηκαν επίσης διαγώνιες ρωγμές αλλά το άνοιγμα ήταν ελεγχόμενο. Ενώ οι ενισχυμένες με ίνες δοκοί ανέπτυξαν πολλαπλές διαγώνιες ρωγμές, η ενισχυμένη με καλώδιο παρουσίασε μόνο μια που διακλαδίστηκε σε περισσότερες στο κάτω μισό του δοκιμίου. Επιπλέον οι ρωγμές ήταν ευρύτερες από τις αντίστοιχες της Ομάδας 1.



Εικόνα 5.1-10. Μοτίβα ρηγάτωσης ακριβώς πριν από την αστοχία (99% F_{max}) για την Ομάδα 2.

Οι μηχανισμοί αστοχία των σύνθετων υλικών είναι περίπλοκοι (Chen et al., 2014), λόγω της ανομοιογενούς δομής τους η οποία αποτελείται από συστατικά που έχουν σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες και παραμένουν διακριτά στην τελική σύνθεση ενός φύλλου. Κατά τη φόρτιση ελαττώματα, όπως θραύση ινών, αποσύνδεση ινών/ μήτρας που εμφανίζονται σε ένα ενισχυτικό πλέγμα δεν προκαλούν την άμεση κατάρρευση ενός φύλλου. Αυτά τα ελαττώματα συσσωρεύονται σταδιακά εντός των φύλλων και οδηγούν σε προοδευτική υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού, ενώ πολλά εμφανίζουν σημαντική μη γραμμικότητα ή πλαστικότητα πριν από την κατάρρευση των κατασκευών. Η αποκόλληση που συμβαίνει πριν από την κατάρρευση ενός φύλλου και αναπτύσσεται στην εγκοπή της ζώνης βλάβης ενός σύνθετου φύλλου έχει ως αποτέλεσμα την αποσύνδεση του ενισχυτικού πλέγματος στο φύλλο.

Οι αποσυνδεδεμένες πλάκες είναι ελεύθερες να αστοχήσουν από τη λειτουργία θραύσης που παρέχει την μικρότερη αντίσταση ανεξάρτητα από τα άλλα πλέγματα. Τα φύλλα που εμφανίζονται

εντελώς αποσυνδεδεμένα έχουν χαμηλές αντοχές εγκοπής. Καθώς οι μηχανικές αποκρίσεις των σύνθετων ελασμάτων είναι αρκετά περίπλοκες, καθίσταται απαραίτητη η προϋπόθεση για την ακριβή πρόβλεψή τους, ώστε να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά αυτά τα υλικά. Θα πρέπει να υιοθετηθεί η προοδευτική ανάλυση αστοχίας που λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις των αστοχιών εντός επιπέδου των σύνθετων φύλλων με ενισχυτικά πλέγματα και την αποκόλληση των στρώσεων.

Η ενσωμάτωση μοντέλων προοδευτικής ζημιάς στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη για να επιτραπεί η επίδραση διαφόρων τύπων ζημιών στην αντοχή των σύνθετων φύλλων.

Επίσης, η εξέταση των συνεπειών των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της απόσχισης και των αστοχιών εντός επιπέδου στα τελικά φορτία αστοχίας και τη συνολική δομική απόκριση απαιτεί να ενσωματωθούν αυτά τα μοντέλα, ώστε να είναι δυνατή η πλήρης πρόβλεψη ή κατανόηση της αστοχίας τους. Ωστόσο, λίγες έρευνες έχουν εξηγήσει τέτοιες αλληλεπιδράσεις, αφού οι περισσότερες απλώς εξετάζουν είτε την αστοχία στο επίπεδο είτε την αστοχία λόγω αποκόλλησης. Οι δεύτερες είναι κατάλληλες μόνο όταν η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της αστοχίας στο επίπεδο είναι αρκετά μικρή σε σύγκριση με εκείνη που απαιτείται για τη διάδοση της αποκόλλησης. Διαφορετικά θα πρέπει να συμπληρωθούν από ένα μοντέλο βλάβης για σύνθετα στρώματα.

Από τα πολλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την προοδευτική ανάλυση βλάβης σύνθετων υλικών, τα μοντέλα που βασίζονται σε CDM (Common Data Model) έχουν αποδειχθεί ότι είναι τα πιο ακριβή για την πρόβλεψη των αντοχών.

Οι Camanho et al. (2007) εφάρμοσαν το μοντέλο ελαστικής βλάβης του Abaqus για να προβλέψουν την αντοχή στην αστοχία και τις επιδράσεις μεγέθους σε εγκοπές από ανθρακικά / εποξικά φύλλα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ήταν η πιο ακριβής μέθοδος για την πρόβλεψη της τελευταίας στα σύνθετα σε σύγκριση με μοντέλα που χρησιμοποιούν μηχανική γραμμικής ελαστικής θραύσης ή το κριτήριο σημείου στρες. Επίσης, οι Maa και Cheng (2002) ανέφεραν ότι το τροποποιημένο μοντέλο Principal Damage Model (PDM) παρείχε εύλογη ακρίβεια στην πρόβλεψη της ικανότητας μεταφοράς φορτίων των εγκοπών.

Το συνδυασμένο μοντέλο ελαστοπλαστικής βλάβης που πρότειναν οι Chen et al. (2012) αποδείχθηκε ότι είναι η πιο ακριβής μέθοδος για την εκτίμηση των εγκοπών αντοχής / φορτίων σύνθετων ελασμάτων σε σύγκριση με τα μοντέλα προοδευτικής βλάβης που πρότειναν οι Chang

και Chang (1987) και Tan (1991). Παρείχε επίσης παρόμοια ακρίβεια με το τροποποιημένο PDM στην πρόβλεψη των φορτίων αστοχίας των εγκοπών σύνθετων πλακών. Ωστόσο, προάγει το τροποποιημένο PDM στο οποίο οι παράμετροι του μοντέλου υλικού θα μπορούσαν να ληφθούν από δοκιμές που έγιναν σε ενισχυμένα πλέγματα μονής κατεύθυνσης και όχι από μια αντίστροφη ανάλυση ενός από τα σύνθετα ελαστικά φύλλα με συγκεκριμένη διάταξη, που να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις για τα υπόλοιπα φύλλα που αναλύθηκαν.

Τόσο το συνδυασμένο μοντέλο ελαστοπλαστικής βλάβης Chen et al. (2012) όσο και το μοντέλο Maa και Cheng (2002) είναι μοντέλα ελαστοπλαστικής βλάβης που λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις στην πλαστικότητα που ενδέχεται να παρουσιάζονται στα σύνθετα υλικά. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Camanho et al. (2007) είναι ένα ελαστικό μοντέλο ζημιάς που δεν έχει σχεδιαστεί για να περιλαμβάνει τέτοιες επιδράσεις και είναι πιο κατάλληλο για την αναπαράσταση σύνθετων υλικών που δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις μετά την εκφόρτωση και παρουσιάζουν σχεδόν εύθραυστη συμπεριφορά ρηγμάτωσης. Ωστόσο, σε αυτές τις μελέτες, δεν εξετάστηκε η αποκόλληση που μπορεί να έχει συμβεί στις διεπιφάνειες.

Τα κράματα μνήμης σχήματος έχουν μοναδική ιδιότητα απόσβεσης, λόγω της εσωτερικής απόσβεσης της μαρτενσιτικής φάσης. Η υψηλή εγγενής απόσβεση μιας τέτοιας μαρτενσιτικής φάσης έχει συνδεθεί με τις κινήσεις των ατόμων και των ελαττωμάτων και με τον υπό πίεση προσανατολισμό των δίδυμων παραλλαγών μαρτενσίτη

Από πρακτική άποψη, αυτός ο εγγενής μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας, σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, προσφέρει μια ελκυστική προοπτική για τη χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος ως παθητικών αποσβεστήρων για μηχανικές δονήσεις χαμηλού πλάτους σε αυτοκίνητα, αεροδιαστημικά, σιδηροδρομικά και άλλες δυναμικές εφαρμογές.

5.2 Προσομοίωση δοκών

Τα δοκίμια του πειράματος (Gebhard et al., 2021) μοντελοποιήθηκαν στο περιβάλλον Abaqus CAE, για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της καμπτικής αντοχής τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών.

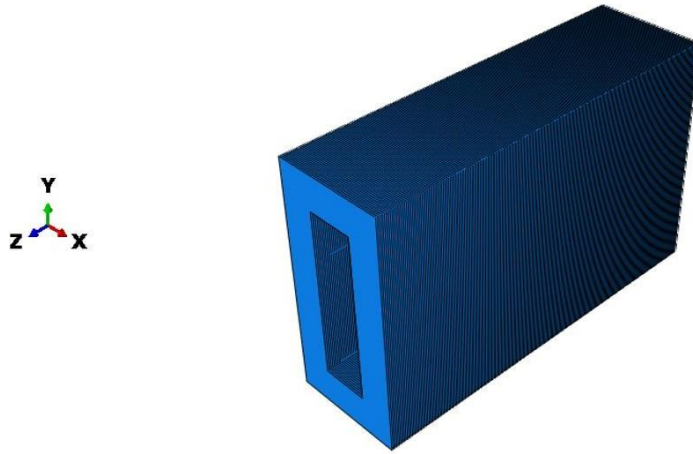
Για την προσομοίωση των μοντέλων εφαρμόστηκε η μέθοδος προσομοίωσης με σύνθετα πολυστρωματικά φύλλα χρησιμοποιώντας συνεκτικές επιφάνειες, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.3. Έτσι, στην κατεύθυνση του πάχους δημιουργούνται στρώσεις, κάθε μια από τις οποίες

αποτελείται από ένα συμβατικό στοιχείο κελύφους (Shell Part), που βρίσκεται στο μεσαίο επίπεδο και στοιχεία επιφάνειας στην άνω και κάτω όψη της στρώσεως (Surf Part).

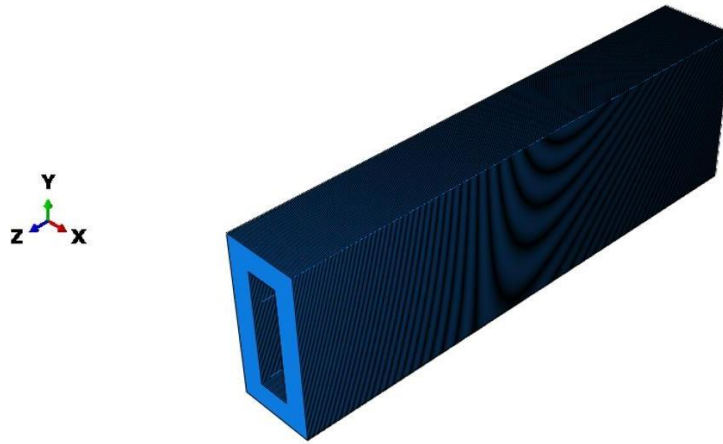
Για την μόρφωση των δοκιμίων, αρχικά σχεδιάστηκαν οι διατομές των επιφανειών και των κελυφών με Shell Element – Planar Type. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν στο Assembly δύο στρώσεις, κάθε μια από τις οποίες αποτελούνταν από δύο επιφάνειες Surf Parts και ένα κέλυφος Shell Parts. Οι διατομές τοποθετήθηκαν σε απόσταση μεταξύ τους, ώστε η κάθε στρώση να έχει συνολικό πάχος 5 mm. Τα στοιχεία επιφάνειας (Surf) συνδέθηκαν με τα στοιχεία κελύφους (Shell) μέσω άκαμπτων συνδετήρων (Tie constraints), ενώ οι στρώσεις μεταξύ τους συνδέθηκαν χρησιμοποιώντας συνεκτικές επιφάνειες (Cohesive surfaces). Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της σύνδεσης συνεκτικών επιφανειών, λήφθηκαν υπόψη οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν κατά τον έλεγχο του πειράματος (Le et al., 2012), όπως φαίνονται στις Εικόνες 5.2-7 έως 4.1-10.

Αναπτύχθηκε ένα Script στη γλώσσα προγραμματισμού Python, το οποίο παράγει αυτόματα σύνθετα πολυστρωματικά φύλλα με συνεκτικές επιφάνειες σε όποιο μήκος θέλουμε. Επομένως, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για τις δύο ομάδες εκτύπωσης για τρία διαφορετικά μήκη δοκού.

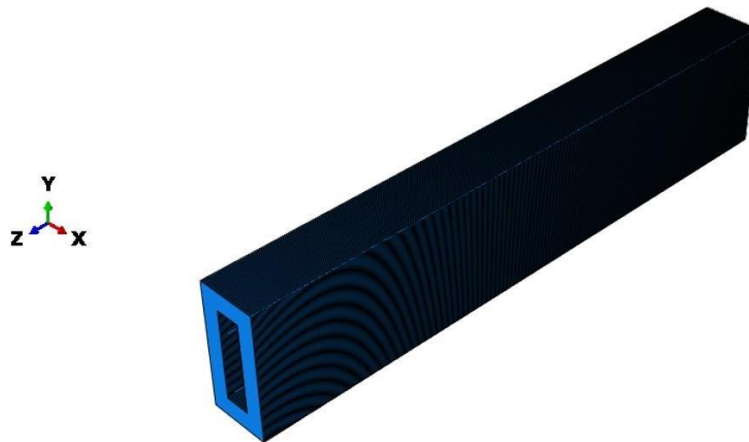
Για την Ομάδα 1 πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για μήκη δοκιμίου ίσα με τα $L/3$, $2L/3$ και L του πραγματοποιούμενου πειράματος, δηλαδή 500, 1000, 1500 mm αντίστοιχα.



Εικόνα 5.2-1. Δοκός συνολικού μήκους 500 mm.

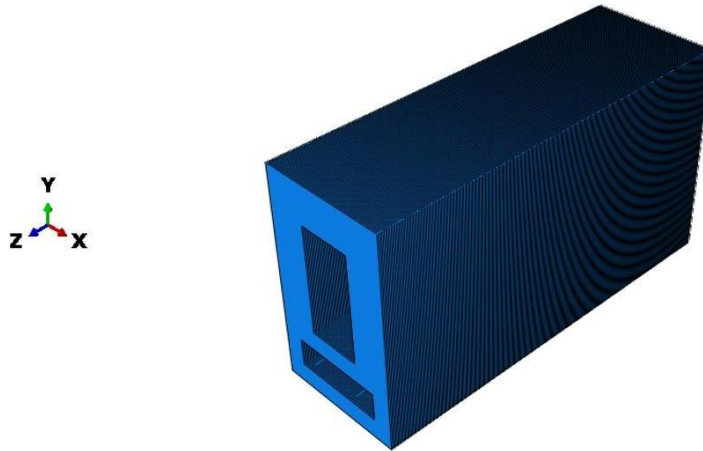


Εικόνα 5.2-2. Δοκός συνολικού μήκους 1000 mm.

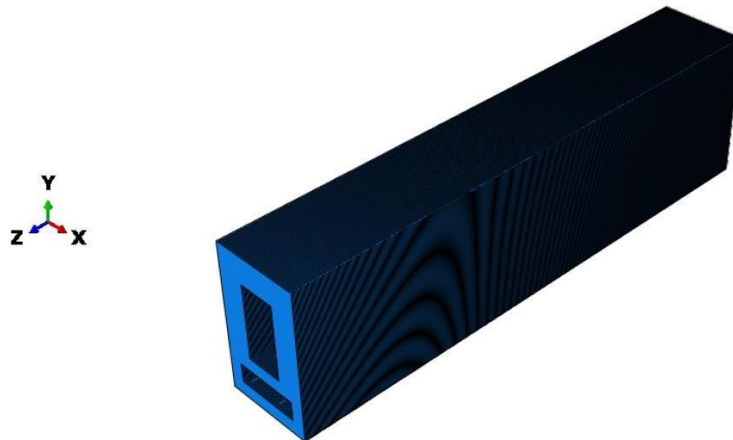


Εικόνα 5.2-3. Δοκός συνολικού μήκους 1500 mm

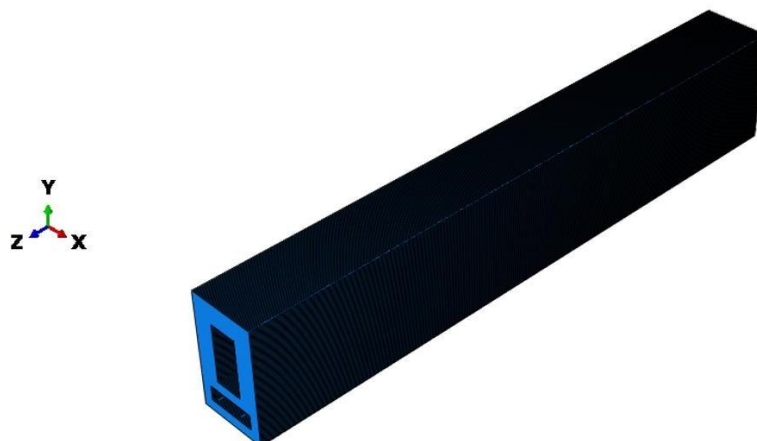
Ομοίως για την Ομάδα 2 πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για μήκη δοκιμίου ίσα με 600, 1200, 1800 mm αντίστοιχα.



Εικόνα 5.2-4. Δοκός συνολικού μήκους 600 mm.



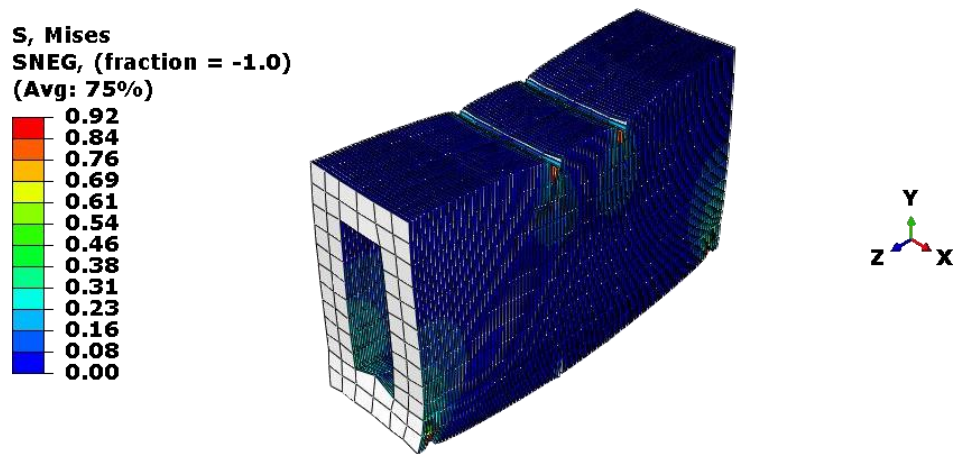
Εικόνα 5.2-5. Δοκός συνολικού μήκους 1200 mm.



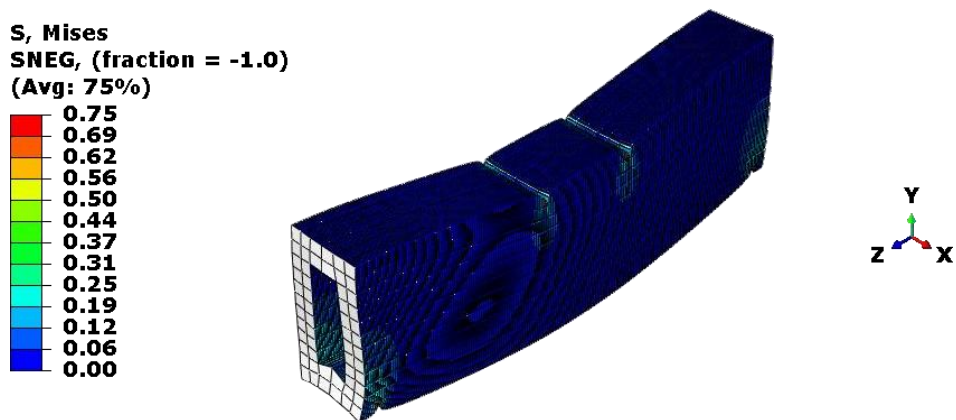
Εικόνα 5.2-6. Δοκός συνολικού μήκους 1800 mm.

5.2.1 Αποτελέσματα Ομάδας 1

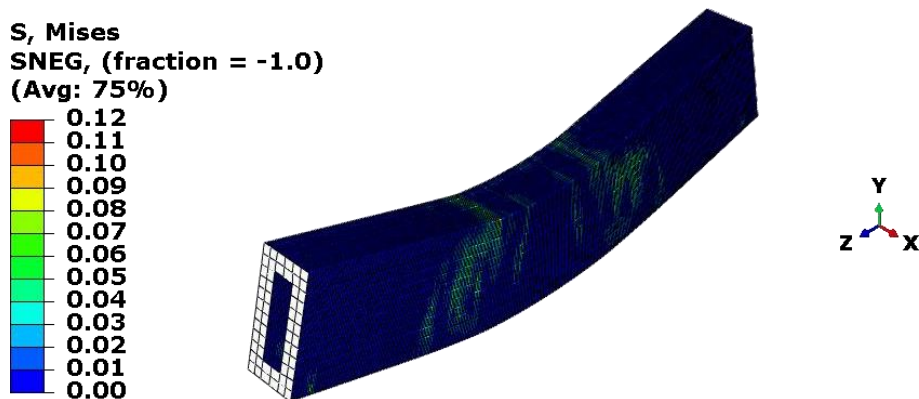
α) Παραμορφώσεις



Εικόνα 5.2-7.Εικόνα παραμορφώσεως για τη δοκό συνολικού μήκους 500 mm.

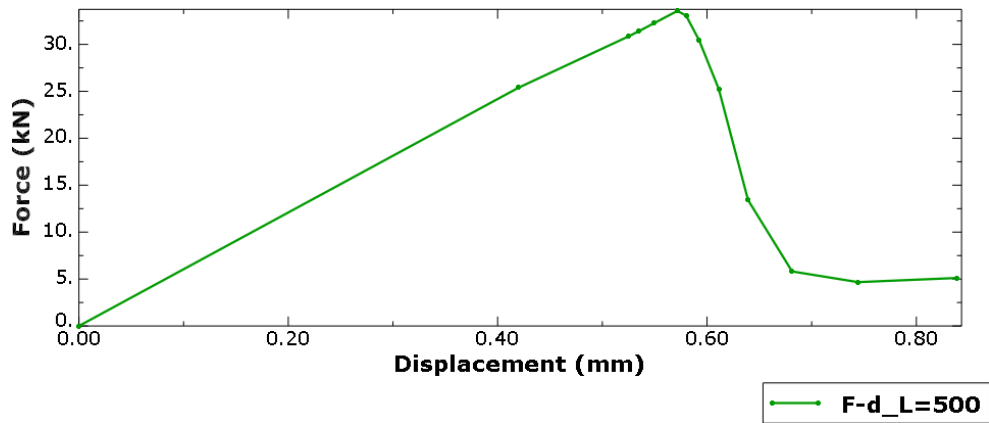


Εικόνα 5.2-8.Εικόνα παραμορφώσεως για τη δοκό συνολικού μήκους 1000 mm.

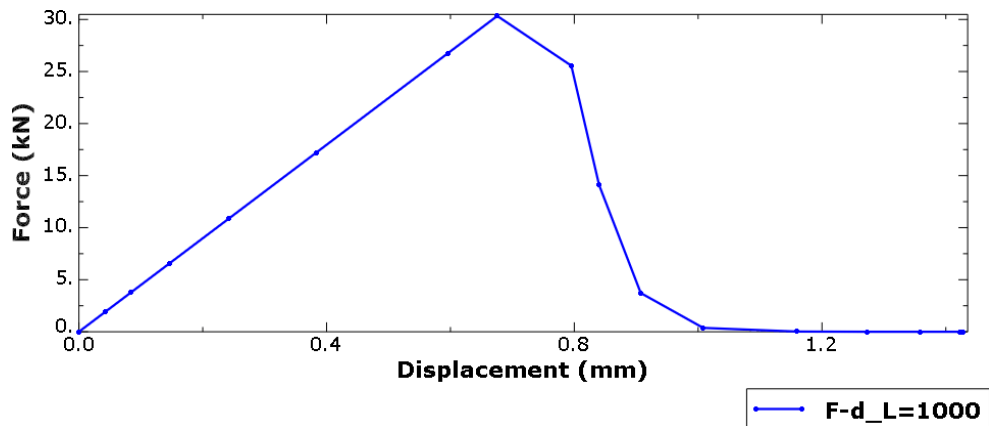


Εικόνα 5.2-9.Εικόνα παραμορφώσεως για τη δοκό συνολικού μήκους 1500 mm.

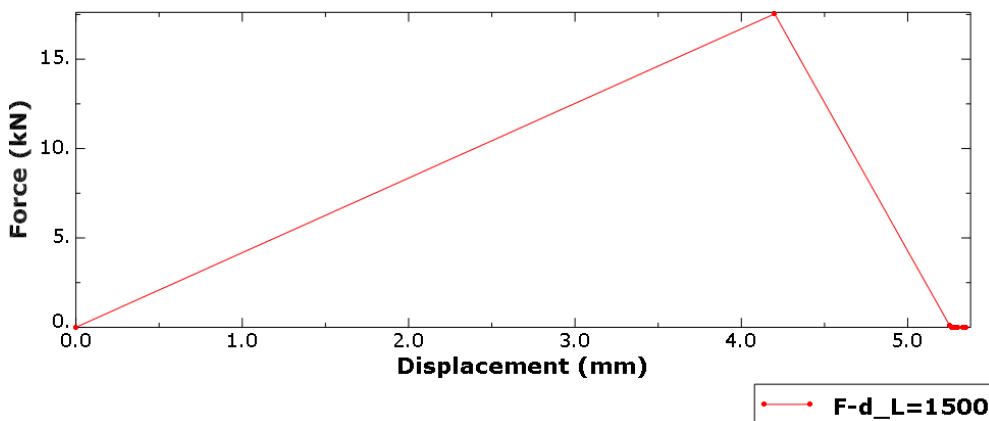
β) Καμπύλη δύναμης μετατόπισης



Εικόνα 5.2-10. Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκού συνολικού μήκους 500 mm.

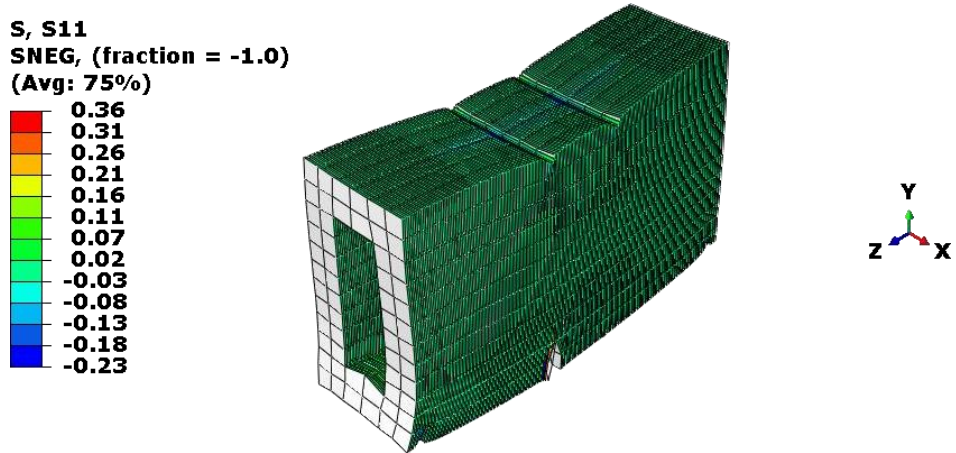


Εικόνα 5.2-11. Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκού συνολικού μήκους 1000 mm.

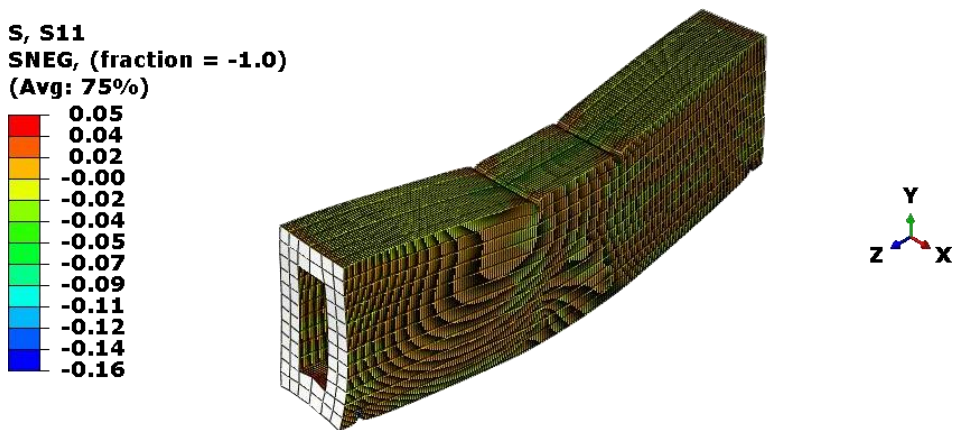


Εικόνα 5.2-12. Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκού συνολικού μήκους 1500 mm.

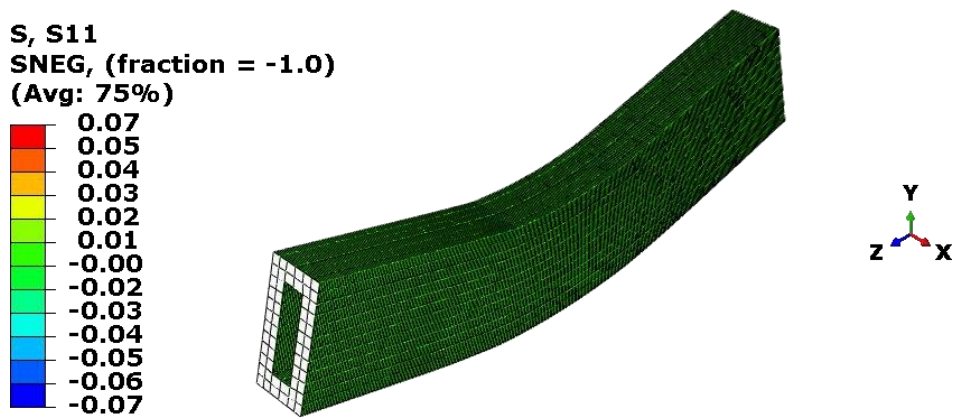
γ) Μέγιστες τάσεις



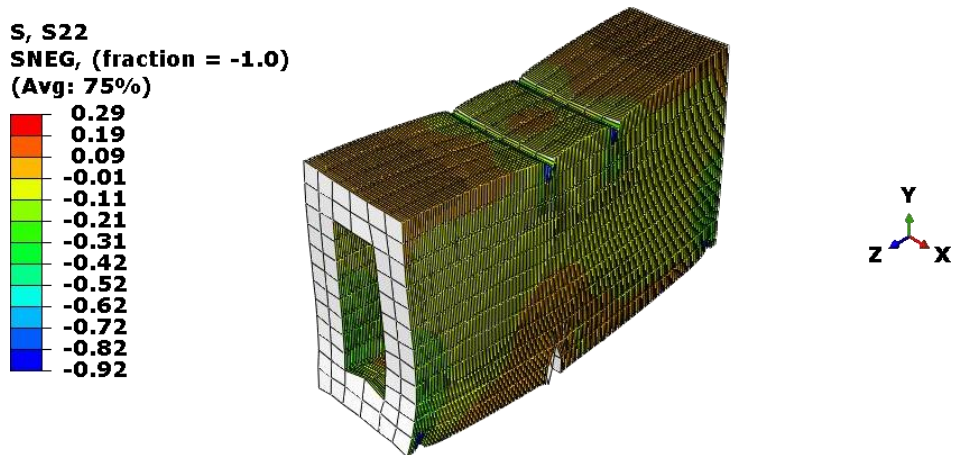
Εικόνα 5.2-13. Τάσεις S11 (σ_{xx}) για τη δοκό συνολικού μήκους 500 mm.



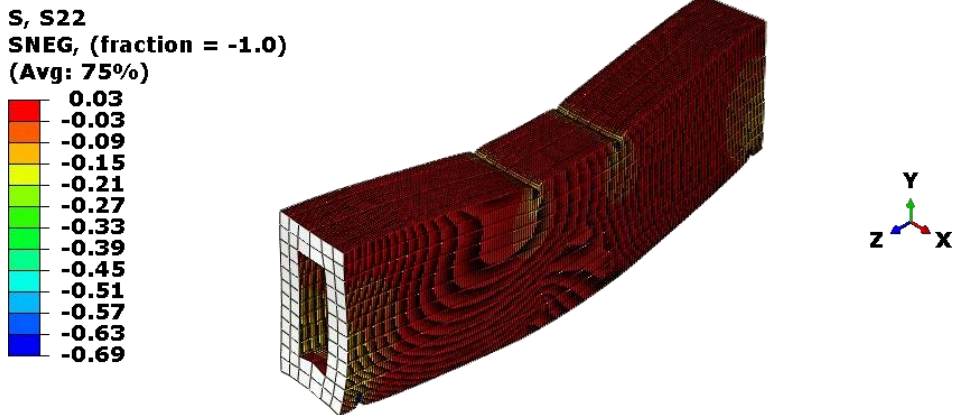
Εικόνα 5.2-14. Τάσεις S11 (σ_{xx}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1000 mm.



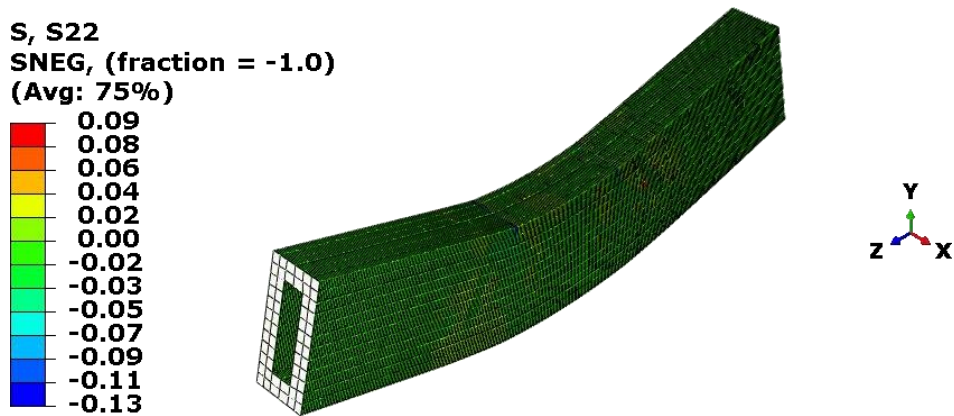
Εικόνα 5.2-15. Τάσεις S11 (σ_{xx}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1500 mm.



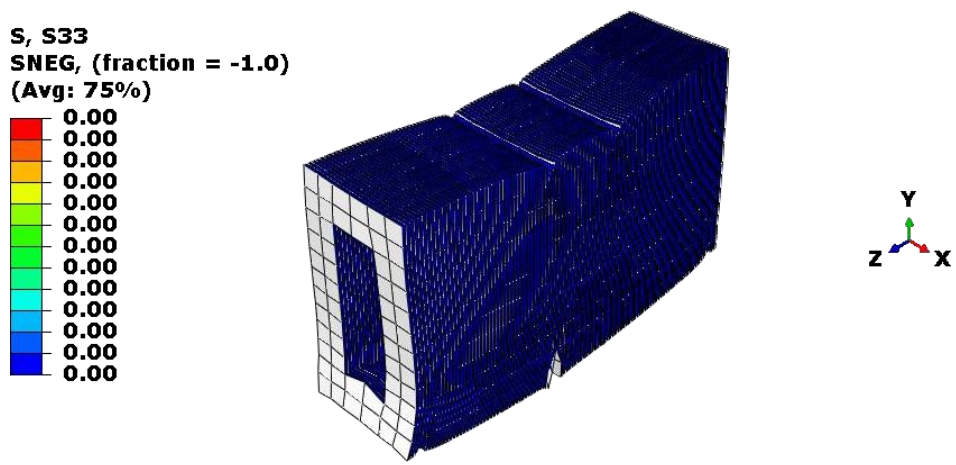
Εικόνα 5.2-16. Τάσεις S22 (σ_{yy}) για τη δοκό συνολικού μήκους 500 mm.



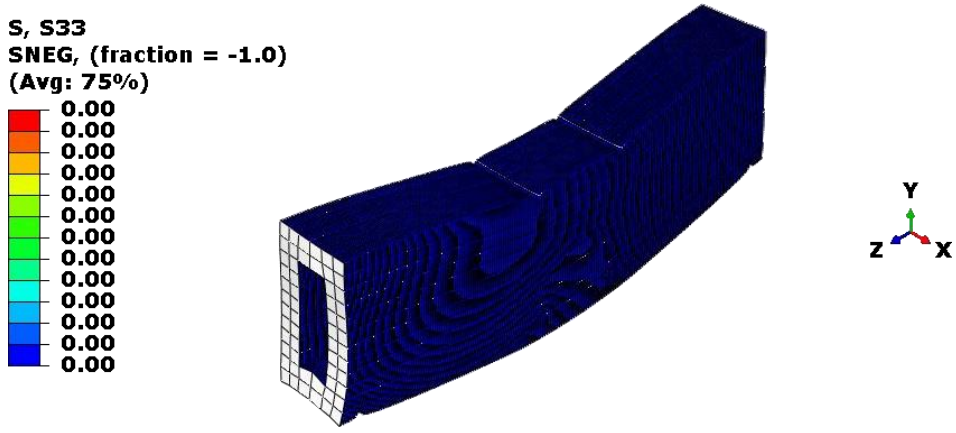
Εικόνα 5.2-17. Τάσεις S22 (σ_{yy}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1000 mm.



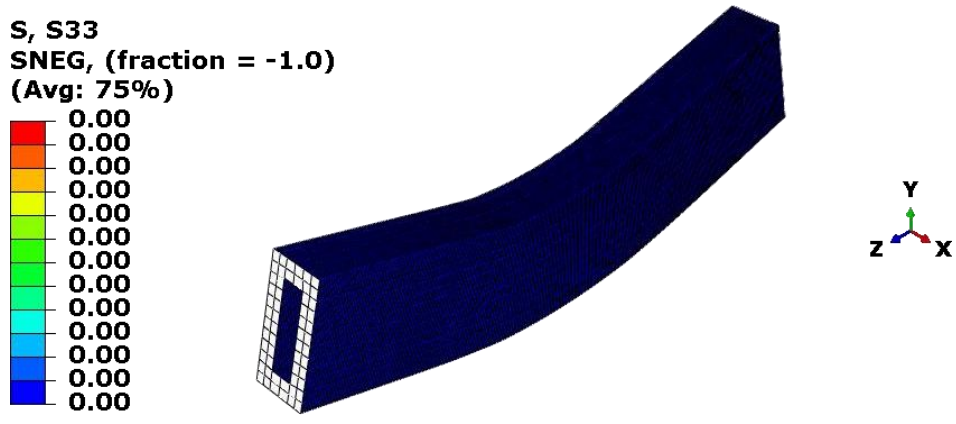
Εικόνα 5.2-18. Τάσεις S22 (σ_{yy}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1500 mm.



Εικόνα 5.2-19. Τάσεις S33 (σ_{zz}) για τη δοκό συνολικού μήκους 500 mm.

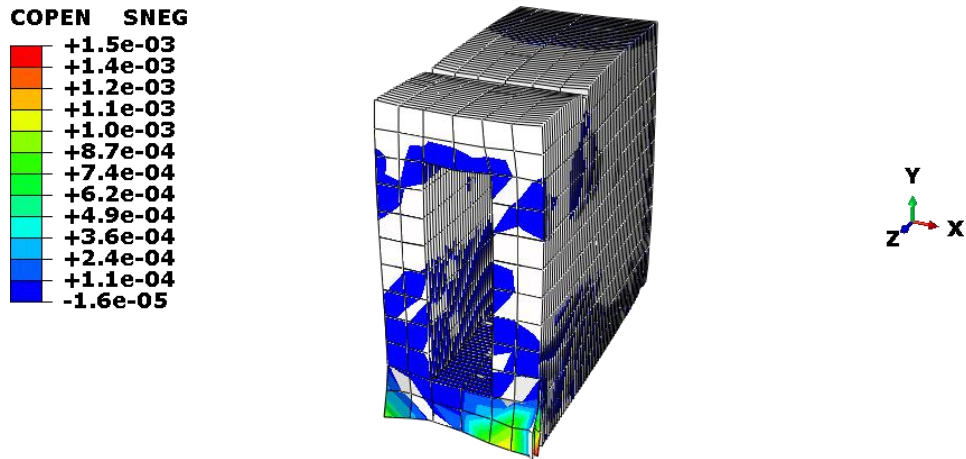


Εικόνα 5.2-20. Τάσεις S33 (σ_{zz}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1000 mm.

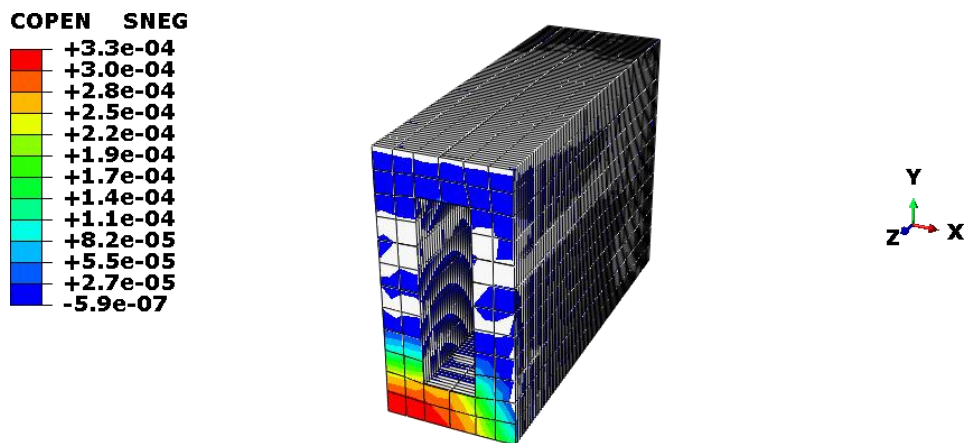


Εικόνα 5.2-21. Τάσεις S33 (σ_{zz}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1500 mm.

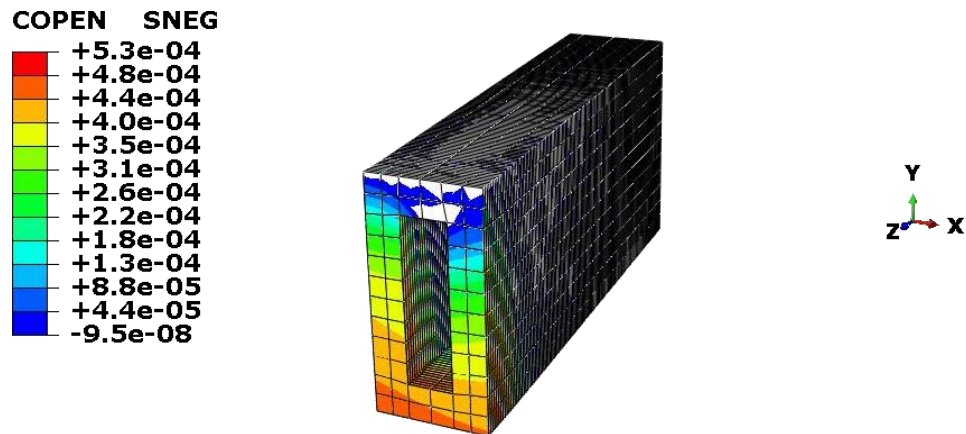
δ) Άνοιγμα ρωγμής



Εικόνα 5.2-22. Άνοιγμα ρωγμής για τη δοκό συνολικού μήκους 500 mm.



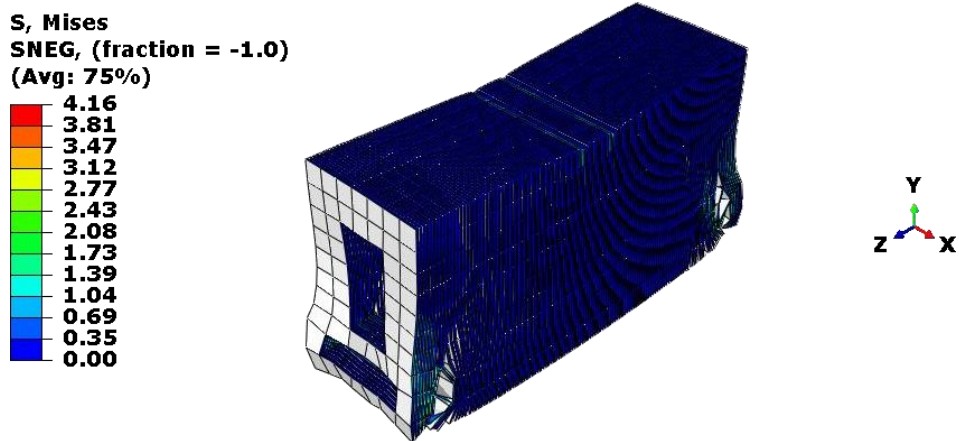
Εικόνα 5.2-23. Άνοιγμα ρωγμής για τη δοκό συνολικού μήκους 1000 mm.



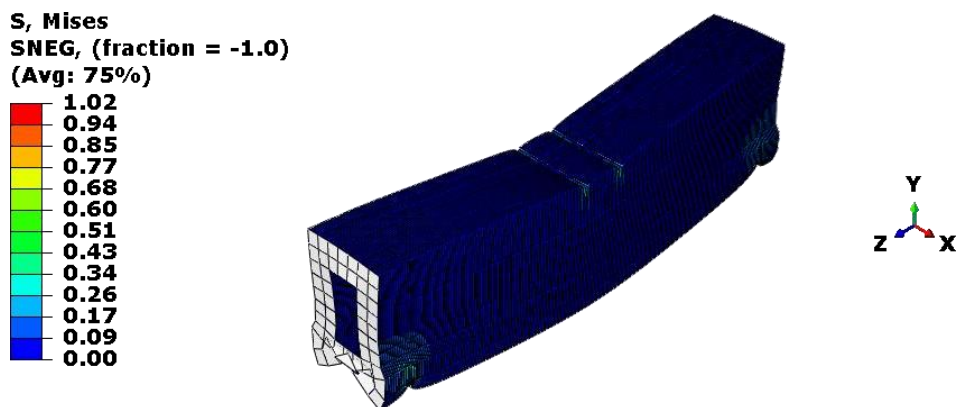
Εικόνα 5.2-24. Άνοιγμα ρωγμής για τη δοκό συνολικού μήκους 1500 mm.

5.2.2 Αποτελέσματα Ομάδας 2

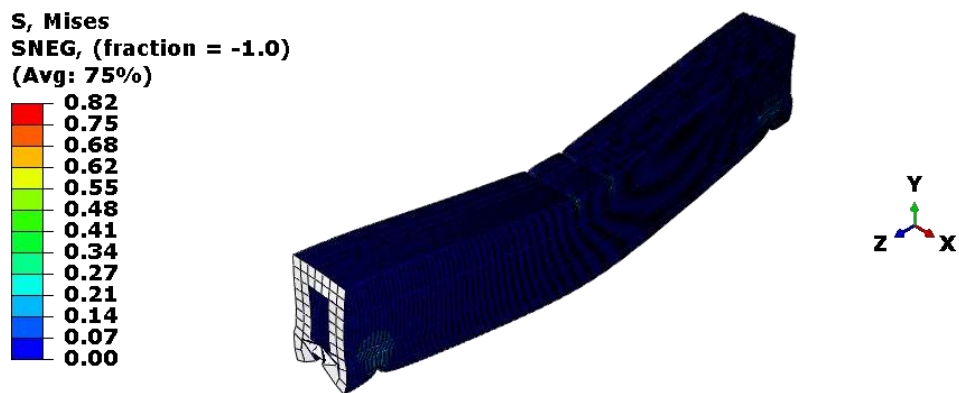
α) Παραμορφώσεις



Εικόνα 5.2-25.Εικόνα παραμορφώσεως για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.

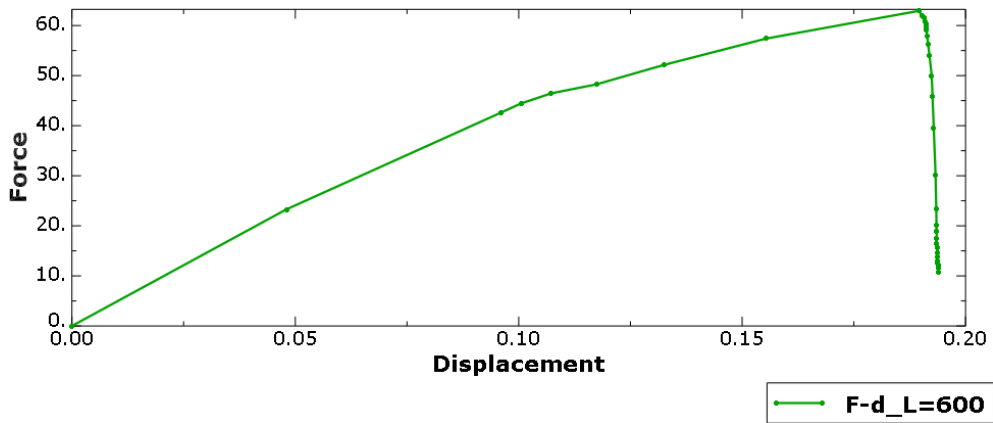


Εικόνα 5.2-26.Εικόνα παραμορφώσεως για τη δοκό συνολικού μήκους 1200 mm.

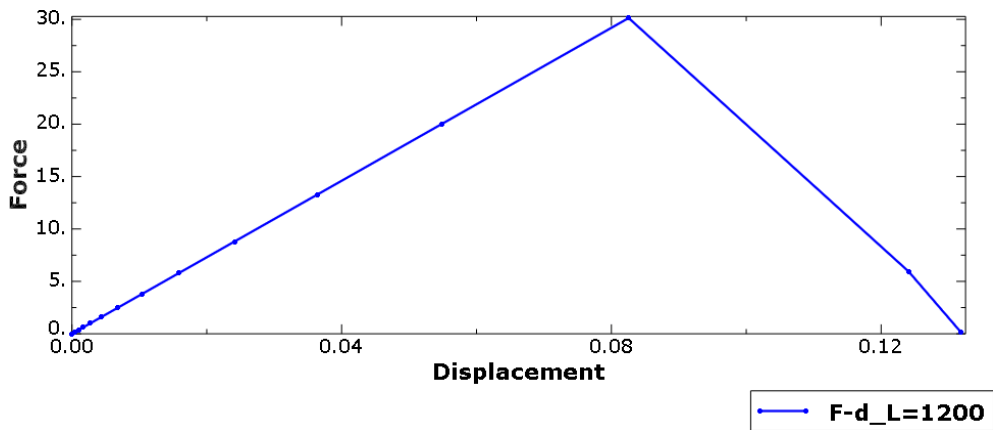


Εικόνα 5.2-27.Εικόνα παραμορφώσεως για τη δοκό συνολικού μήκους 1800 mm.

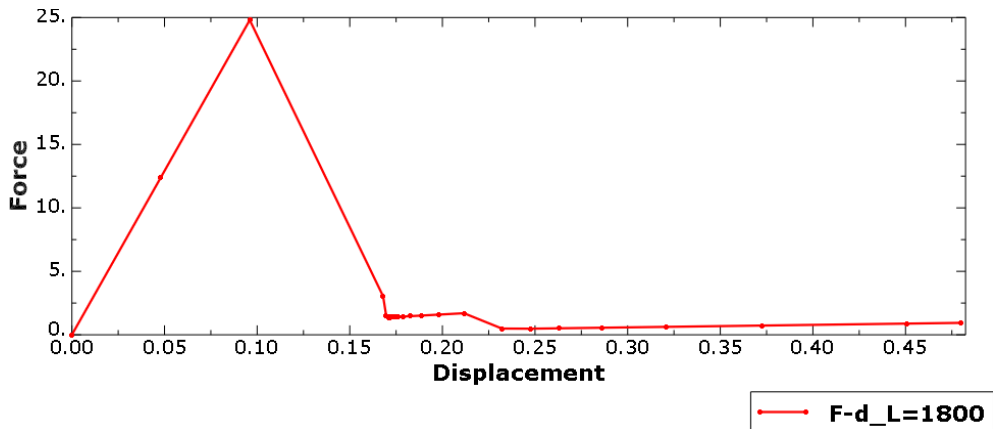
β) Καμπύλη δύναμης μετατόπισης



Εικόνα 5.2-28. Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκού συνολικού μήκους 600 mm.

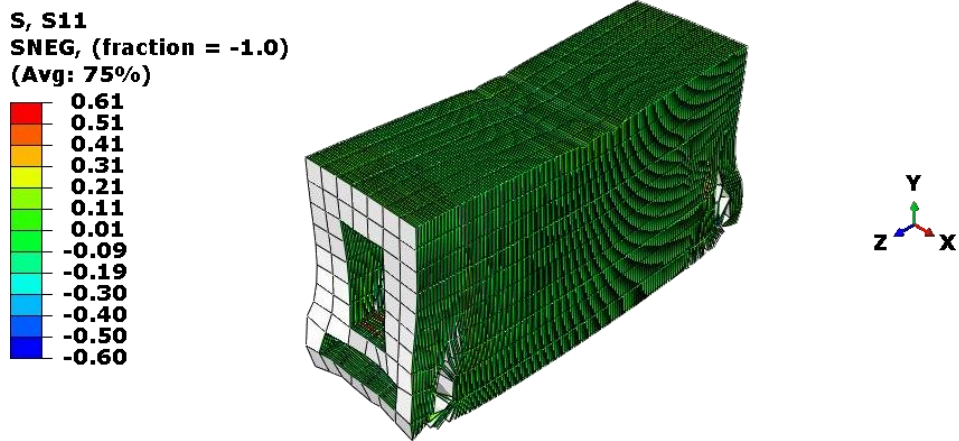


Εικόνα 5.2-29. Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκού συνολικού μήκους 1200 mm.

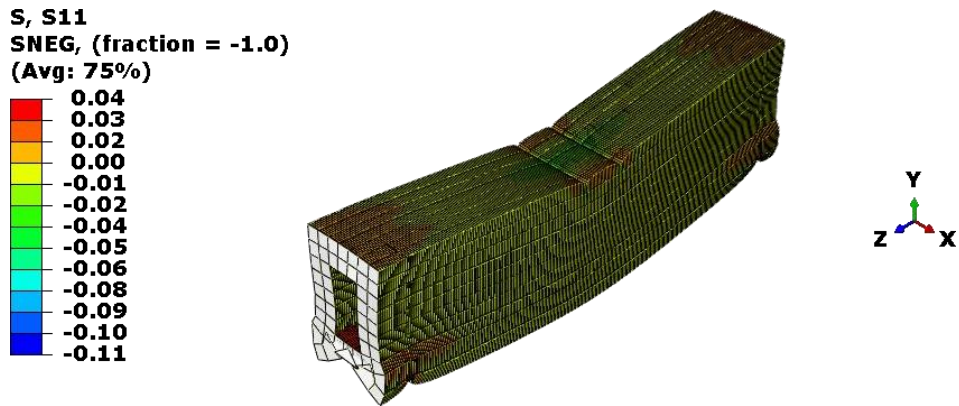


Εικόνα 5.2-30. Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκού συνολικού μήκους 1800 mm.

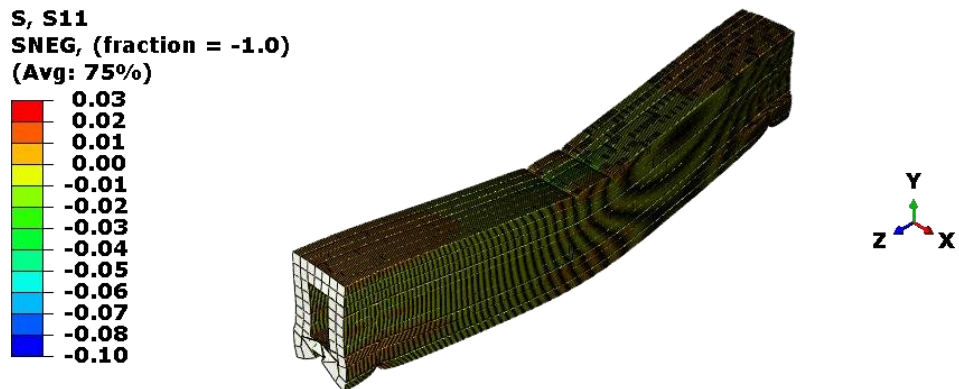
γ) Μέγιστες τάσεις



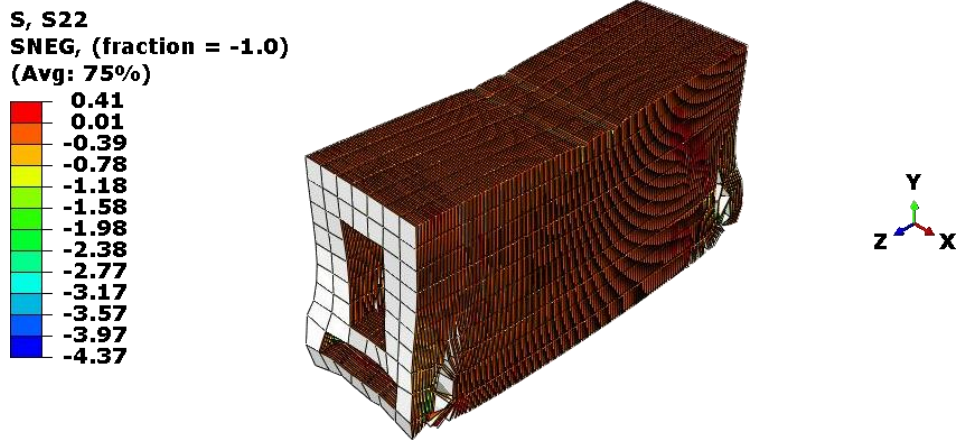
Εικόνα 5.2-31. Τάσεις S11 (σ_{xx}) για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.



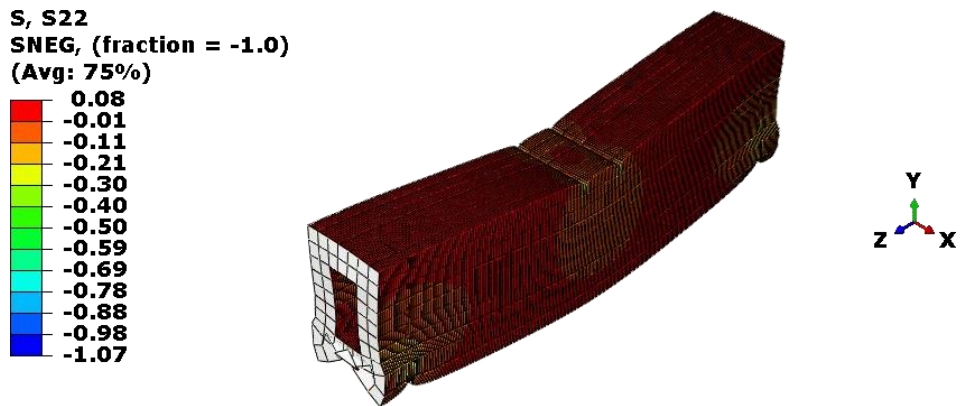
Εικόνα 5.2-32. Τάσεις S11 (σ_{xx}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1200 mm.



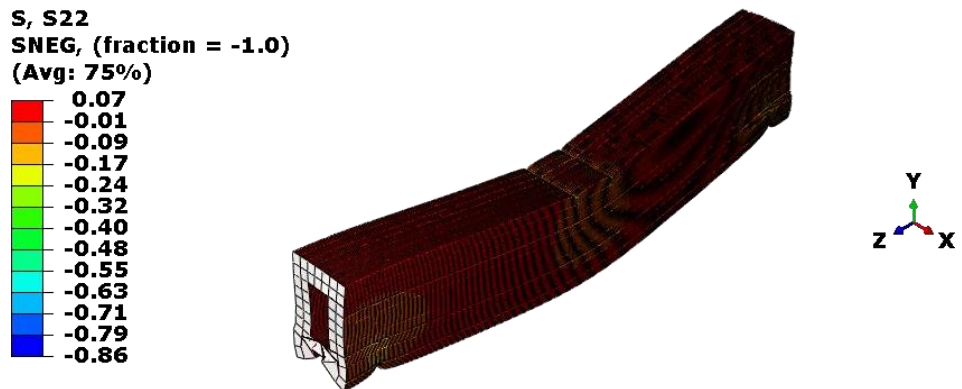
Εικόνα 5.2-33. Τάσεις S11 (σ_{xx}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1800 mm.



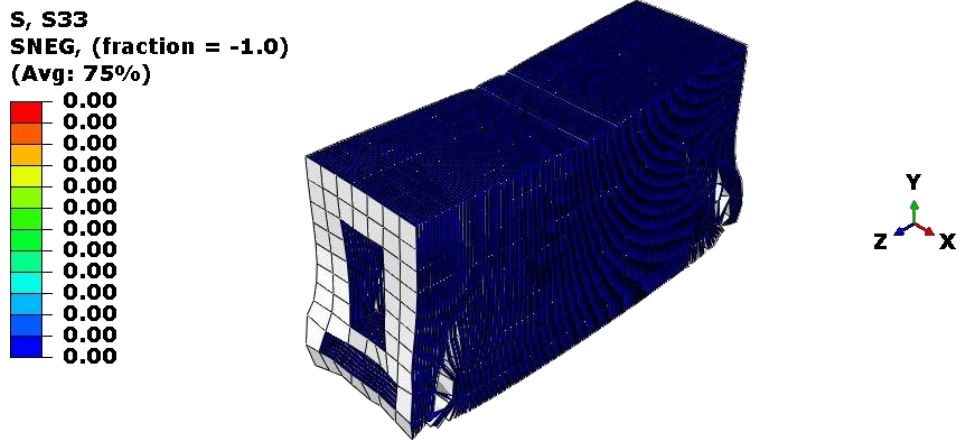
Εικόνα 5.2-34. Τάσεις S22 (σ_{yy}) για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.



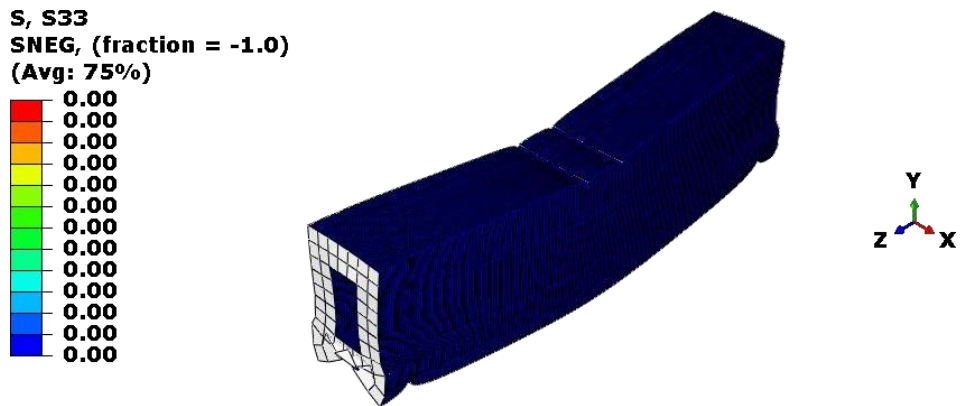
Εικόνα 5.2-35. Τάσεις S22 (σ_{yy}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1200 mm.



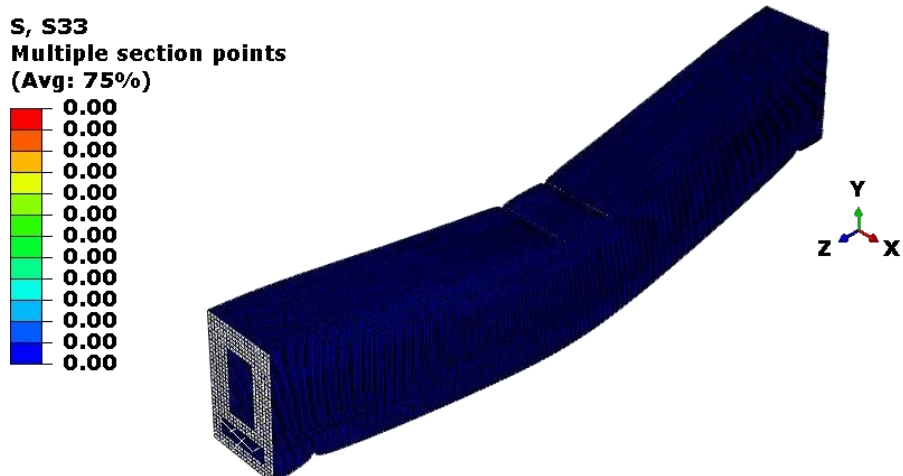
Εικόνα 5.2-36. Τάσεις S22 (σ_{yy}) για τη δοκό συνολικού μήκους 1800 mm.



Εικόνα 5.2-37. Τάσεις S33 (σ_{zz}) για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.

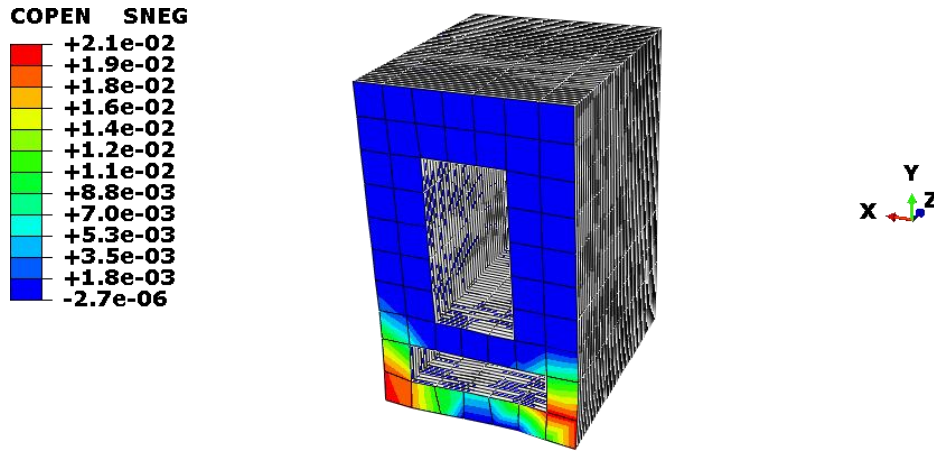


Εικόνα 5.2-38. Τάσεις S33 (σ_{zz}) για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.

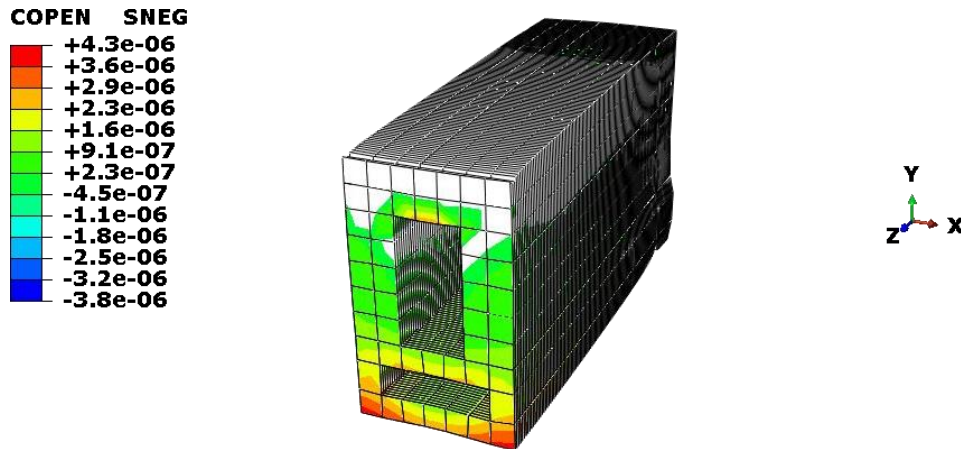


Εικόνα 5.2-39. Τάσεις S33 (σ_{zz}) για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.

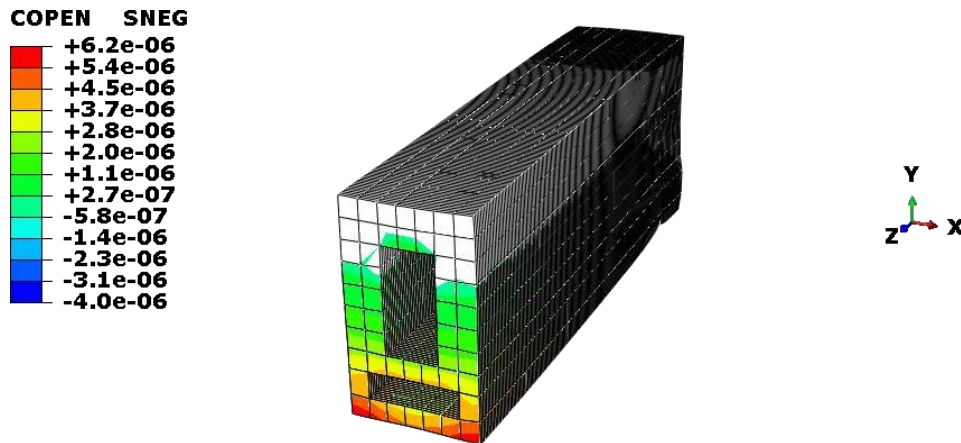
δ) Άνοιγμα ρωγμής



Εικόνα 5.2-40. Άνοιγμα ρωγμής για τη δοκό συνολικού μήκους 600 mm.



Εικόνα 5.2-41. Άνοιγμα ρωγμής για τη δοκό συνολικού μήκους 1200 mm.



Εικόνα 5.2-42. Άνοιγμα ρωγμής για τη δοκό συνολικού μήκους 1800 mm.

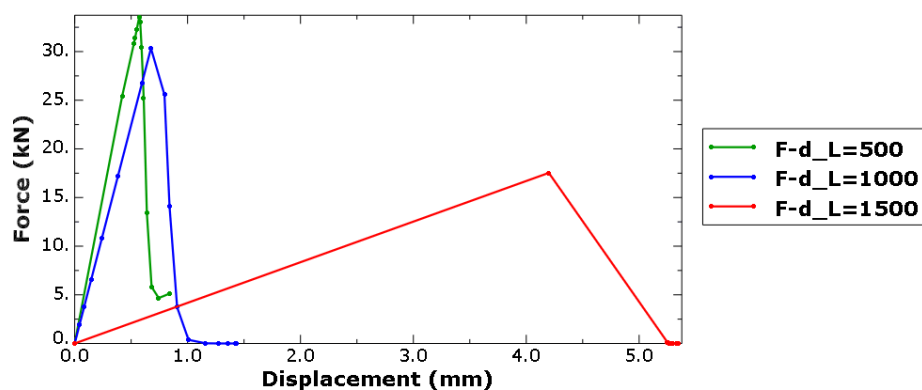
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

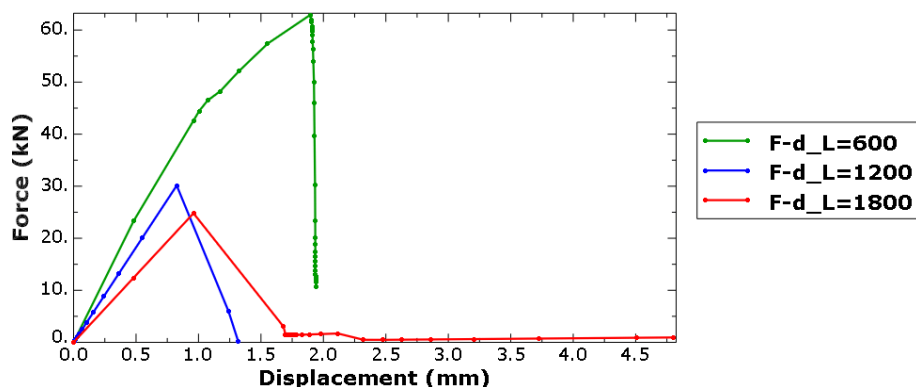
Από την ανάλυση που προέκυψε κατά τις μη γραμμικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό του υλικού, παρατηρούμε συνέπεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σχέση με αυτά του πειράματος Wolfs et al. (2019). Στον πίνακα 6.1.1, δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα:

Πίνακας 6.1-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος (Wolfs et al.,2019) και προσομοίωσης συνεκτικών επιφανειών.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών από σκυρόδεμα, ώστε να προσδιοριστούν οι αντοχές τους, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά το προηγούμενο πείραμα. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για δύο σειρές δοκών τα διαγράμματα των οποίων φαίνονται στις Εικόνες 6.1.1 και 6.1.2. Παρατηρούμε ότι οι δοκοί για όλα τα μήκη φαίνεται να αστοχούν λόγω μη γραμμικότητας υλικού.



Εικόνα 6.1-1. Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης που προέκυψαν κατά την παραμετρική ανάλυση της πρώτης σειράς δοκών.



Εικόνα 6.1-2. Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης που προέκυψαν κατά την παραμετρική ανάλυση της δεύτερης σειράς δοκών.

6.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις τρισδιάστατα εκτυπωμένων μελών από σκυρόδεμα, τα οποία λήφθηκαν από πειραματικές μελέτες ιδιοτήτων της διεπιφάνειας των στρώσεων. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί κατά πόσο πετυχημένη και αξιόπιστη είναι η διαδικασία προσομοίωσης σύνθετων πολυστρωματικών φύλλων με συνεκτικές επιφάνειες.

Από αυτή την μελέτη, προέκυψε ότι η διαδικασία προσομοίωσης συνεκτικών επιφανειών, με την οποία προσδιορίστηκε το υλικό, δίνει μια πολύ καλή προσέγγιση της αντοχής και των ιδιοτήτων του υλικού. Οι αποκλίσεις της προσομοίωσης από τα αποτελέσματα του πειράματος δεν είναι σημαντικές και είναι λογικής τάξεως. Επιπλέον, το υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης είναι μικρό και άρα αποτελεί μια διαδικασία προσομοίωσης συμφέρουσα.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκών από σκυρόδεμα του πειράματος (Gebhard et al., 2021). Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προσομοίωσης σύνθετων πολυστρωματικών φύλλων με συνεκτικές επιφάνειες. Η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για διάφορα μήκη δοκού των δύο διατομών, έδειξε ότι η μορφή αστοχίας δεν αλλάζει σημαντικά με την αύξηση του μήκους και οφείλεται σε μη γραμμικότητα υλικού. Η διαδικασία κρίνεται αξιόπιστη, ωστόσο, έχει πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος, καθώς η ταχύτητα της ανάλυσης είναι πολύ αργή.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Salet, T. A., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222-236.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209-225.
- Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2017). Current progress of 3D concrete printing technologies. In ISARC. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 34). IAARC Publications.
- Lim, S., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R., Austin, S. A., Gibb, A., & Thorpe, T. (2011). Development of a viable concrete printing process.
- Agustí-Juan, I., & Habert, G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal of cleaner production*, 142, 2780-2791.
- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., & Agusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., & Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430–450.
- Chen, J.-F., Morozov, E. V., & Shankar, K. (2014). Simulating progressive failure of composite laminates including in-ply and delamination damage effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 185–200.

- Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., & Kaufmann, W. (2021). Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures*, *240*, 112380.
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, *100*, 102–109.
- Jie, G., Jie, B., & Hongxue, J. (2019). *Experimental study on layer bonding property of 3D printing building materials*. *267*(2), 022005.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—Related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, *13*(1), 5–19.
- Krause, M., Otto, J., Bulgakov, A., & Sayfeddine, D. (2018). *Strategic optimization of 3D concrete printing using the method of CONPrint3D®*. *35*, 1–7.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, *42*(3), 558–566.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, *21*, 262–268.
- Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, *44*(9), 10258–10265.
- Schwab, M., Todt, M., Wolfahrt, M., & Pettermann, H. (2016). Failure mechanism based modelling of impact on fabric reinforced composite laminates based on shell elements. *Composites Science and Technology*, *128*, 131–137.

- Wang, L., Tian, Z., Ma, G., & Zhang, M. (2020). Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. *Cement and Concrete Composites*, *110*, 103571.
- Wolfs, R., Bos, F., & Salet, T. (2019a). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, *119*, 132–140.
- Wolfs, R., Bos, F., & Salet, T. (2019b). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, *119*, 132–140.
- Xia, M., & Sanjayan, J. (2016). Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications. *Materials & Design*, *110*, 382–390.
- LiFo (2021) <https://www.lifo.gr/now/world/zeygari-ollandon-metakomise-sto-proto-3d-ektypomeno-spiti-stin-eyropi-ektypothike-se-120/> (accessed 2 May 2021 – Πρόσβαση 2 Μαΐου 2021)