

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ :
«ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Κονιάματα Συντήρησης και Αποκατάστασης Μνημειακών Κατασκευών

ΕΛΕΝΗ ΓΑΤΣΕΛΟΥ

Επιβλέπουσα : Σταυρουλάκη Μαρία, Επίκουρος Καθηγήτρια

ΧΑΝΙΑ, Οκτώβριος 2016

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Εφαρμοσμένες Επιστήμες και Τεχνολογία», που διοργάνωσε το πρώην Γενικό Τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Μαρία Σταυρουλάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο, για τη στήριξη και την καθοδήγησή της, αλλά κυρίως για την αμέριστη συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την κυρία Παγώνα – Νόνη Μαραβελάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, για το υλικό και για τις συμβουλές που μου παρείχε για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω επίσης στον κύριο Κωνσταντίνο Προβιδάκη, Καθηγητή του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο οποίος δέχτηκε να είναι μέλος της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην κυρία Καπριδάκη Χρύσα, Διδάκτωρ του Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς ήταν πάντα παρούσα όσες φορές χρειάστηκα τη βοήθειά της.

Περίληψη

Η συντήρηση των μνημειακών κατασκευών, δηλαδή των κατασκευών με ιδιαίτερα σημαντική ιστορική, αρχαιολογική, καλλιτεχνική, αρχιτεκτονική, οικοδομική/κατασκευαστική αξία, απαιτεί μία ολοκληρωμένη μελέτη βασισμένη στο χαρακτηρισμό των αυθεντικών δομικών υλικών (λίθοι, πλίνθοι, κονιάματα, επιχρίσματα, διακοσμητικά στοιχεία), στην μελέτη διάγνωσης της φθοράς τους καθώς και στις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές παραμέτρους ώστε να διασφαλίζεται η μακροβιότητα τους. Τα κονιάματα που εφαρμόζονται στην συντήρηση των μνημειακών κατασκευών πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις συμβατότητας με τα υπάρχοντα ιστορικά κονιάματα, απαιτήσεις αντοχών που προκύπτουν από την ανάγκη στατικής επάρκειας.

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν διάφορες συνθέσεις κονιαμάτων που παρήχθησαν στο εργαστήριο για εφαρμογή τους σε μνημειακές κατασκευές. Σε κάθε κατηγορία αναλύονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των συστατικών των κονιαμάτων, όπως επίσης και οι μηχανικές τους ιδιότητες οι οποίες προκύπτουν από δοκιμές κάμψης και θλίψης.

Αρχικά παρουσιάζονται κάποιες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν τα κονιάματα τα οποία χρησιμοποιούνται στη συντήρηση και αποκατάσταση μνημειακών κατασκευών, καθώς επίσης και οι κανόνες που διέπουν τη χρήση τους.

Στη συνέχεια, έγιναν τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων για τις διάφορες κατηγορίες δοκιμών, τα οποία προέκυψαν από δοκιμές θλίψης και κάμψης. Οι μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν από τα διαγράμματα αυτά είναι απόρροια των μηχανικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται το κονίαμα.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας μελετάται η συμπεριφορά τμήματος τοιχοποιίας το οποίο υπόκειται σε δοκιμή θλίψης (κατακόρυφο φορτίο) καθώς επίσης και σε δοκιμή διάτμησης (οριζόντιο φορτίο). Η προσομοίωση του δισδιάστατου μοντέλου επίπεδης έντασης έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την

προσομοίωση του υλικού του κονιάματος χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων από τις δοκιμές θλίψης των δοκιμίων κονιάματος.

Τέλος, μετά τα συμπεράσματα που αφορούν τα συγκεκριμένα κονιάματα που μελετήθηκαν, παρατίθενται κάποιες σκέψεις για περεταίρω διερεύνηση και συνέχιση της εργασίας αυτής.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	8
1.1 Πολιτιστική και Φυσική Κληρονομιά.....	8
1.2 Ο ρόλος των Μνημείων στην Πολιτιστική Κληρονομιά.....	13
1.3 Η συμβολή της επιστήμης στην προστασία των Μνημείων.....	14
 Κεφάλαιο 2.....	 16
2.1 Παραδοσιακά Υλικά Συντήρησης και Αποκατάστασης.....	16
2.2 Ιστορική Εξέλιξη των κονιαμάτων.....	18
2.3 Παράγοντες που οδηγούν σε παθολογίες του κονιάματος.....	22
2.3.1 Παρουσία Υγρασίας.....	22
2.3.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	23
2.3.3 Διαλυμένα άλατα.....	23
2.3.4 Βιολογική δραστηριότητα.	24
 Κεφάλαιο 3.....	 25
3.1 Κονιάματα με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο...29	
3.2 Κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο και νταμαρίσια άμμο.....	32
3.3 Κονιάματα με νταμαρίσια άμμο, πυριτική, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο.....	34

3.4	Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο.....	36
3.5	Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο.....	44
3.6	Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο.....	49
3.6.1	Καμπτική αντοχή κονιαμάτων με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο.....	54
3.7	Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία.....	56
3.8	Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο.....	64
3.9	Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο.....	68
3.10	Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία.....	71
3.11	Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία.....	75
3.12	Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία.....	82
3.13	Κονιάματα με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο.....	85
3.14	Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανوسίλικα.....	87

Κεφάλαιο 4.....91

4.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	91
4.2	Αριθμητική προσομοίωση κυβικού δοκιμίου τοιχοποιίας σε θλίψη με πεπερασμένα στοιχεία.....	93
4.2.1	Γενικά.....	93
4.2.2	Καταστατικοί νόμοι υλικών.....	97
4.2.3	Συνοριακές συνθήκες.....	103
4.2.4	Μη γραμμική ελαστοπλαστική ανάλυση.....	104
4.2.5	Μη γραμμικές αναλύσεις	105
4.3	Αριθμητικά προσομοιώματα.....	105
4.3.1	Αριθμητικό προσομοίωμα 1i.....	106
4.3.2	Αριθμητικό προσομοίωμα 1ii.....	109

4.3.3 Αριθμητικό προσομοίωμα 2i.....	113
4.3.4 Αριθμητικό προσομοίωμα 2ii.....	116
4.3.5 Αριθμητικό προσομοίωμα 3i.....	119
4.3.6 Αριθμητικό προσομοίωμα 3ii.....	122
4.3.7 Αριθμητικό προσομοίωμα 4i.....	126
4.3.8 Αριθμητικό προσομοίωμα 4ii.....	129
4.3.9 Αριθμητικό προσομοίωμα 5i.....	132
4.3.10 Αριθμητικό προσομοίωμα 5ii.....	135
4.4 Αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων και σχολιασμός.....	138
4.5 Αριθμητική προσομοίωση κυβικού δοκιμίου τοιχοποιίας σε διάτμηση με πεπερασμένα στοιχεία.....	139
Κεφάλαιο 5.....	142
5.1 Συμπεράσματα.....	142
Παράρτημα.....	149
A. Στοιχεία Δοκιμίων.....	150
B. Κατανομή της ισοδύναμης ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή θλίψης.....	156
Γ. Κατανομή της τάσης κατά τη δοκιμή θλίψης.....	171
Δ. Κατανομή της συνολικής παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή θλίψης.....	181
E. Κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή θλίψης.....	191
Βιβλιογραφία	202

Κεφάλαιο 1

1.1 Πολιτιστική και Φυσική Κληρονομιά

Η Συνθήκη για την προστασία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής και Φυσικής Κληρονομιάς υιοθετήθηκε από τη Γενική Συνέλευση της UNESCO στις 16 Νοεμβρίου 1972. Με την υπογραφή της, τα κράτη αναγνωρίζουν ότι οι χώροι που βρίσκονται στην εθνική επικράτειά τους και έχουν εγγραφεί στον Κατάλογο της Παγκόσμιας Κληρονομιάς, αποτελούν με κάθε επιφύλαξη της εθνικής κυριαρχίας και των δικαιωμάτων ιδιοκτησίας, παγκόσμια κληρονομιά «για την προστασία της οποίας είναι υπεύθυνη η διεθνής κοινότητα, που πρέπει να εργαστεί ως σύνολο για αυτό τον σκοπό».

Με το πέρασμα των χρόνων και ειδικά των τελευταίων δεκαετιών τόσο η πολιτιστική όσο και η φυσική κληρονομιά απειλούνται όλο και περισσότερο με καταστροφή. Η καταστροφή δεν είναι αποτέλεσμα μόνο των παραδοσιακών αιτιών

της φθοράς, αλλά και της αλλαγής των κοινωνικών και οικονομικών συνθηκών που επιδεινώνουν την κατάσταση.

Ως φυσική κληρονομιά ορίζονται τα εξής: φυσικά χαρακτηριστικά που αποτελούνται από φυσικούς και βιολογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι έχουν εξαιρετική παγκόσμια αξία από αισθητική και επιστημονική άποψη, γεωλογικοί και φυσιογραφικοί σχηματισμοί και επακριβώς οριοθετημένες περιοχές οι οποίες αποτελούν το φυσικό περιβάλλον ζώων και φυτών απειλούμενα από εξαφάνιση. Στη φυσική κληρονομιά ανήκουν επίσης φυσικές περιοχές, παγκόσμιας αξίας από επιστημονική άποψη σχετικά με τη διατήρηση του φυσικού τους κάλλους.

Η πολιτιστική κληρονομιά είναι η κληρονομιά των φυσικών αντικειμένων και των άυλων χαρακτηριστικών μιας ομάδας ή κοινωνίας που κληρονομούνται από τις προηγούμενες γενιές, διατηρούνται στο παρόν και είναι κατοχυρωμένες για το όφελος των μελλοντικών γενεών. Η Πολιτιστική Κληρονομιά θεωρείται ότι είναι:

- Μνημεία: αρχιτεκτονικά έργα, έργα μνημειακής γλυπτικής και ζωγραφικής, στοιχεία ή δομές αρχαιολογικής φύσης, επιγραφές, κατοικίες σπηλαίων, και συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών, τα οποία έχουν εξαιρετική παγκόσμια αξία από την άποψη της ιστορίας, της τέχνης και της επιστήμης.
- Κτιριακές ομάδες: ομάδες κτιρίων ή ξεχωριστά κτίρια τα οποία συνδέονται, λόγω της αρχιτεκτονικής τους, της ομοιογένειάς τους ή της θέσης τους στο τοπίο, και έχουν εξαιρετική παγκόσμια αξία από την άποψη της ιστορίας, της τέχνης και της επιστήμης.
- Τοποθεσίες: ανθρώπινα έργα ή τα συνδυασμένα έργα της φύσης και του ανθρώπου, καθώς και περιοχές συμπεριλαμβανομένων των αρχαιολογικών χώρων που έχουν εξαιρετική παγκόσμια αξία από ιστορική, αισθητική, εθνολογική ή ανθρωπολογική άποψη. [1]

Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη επεμβάσεων με σύγχρονα υλικά για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι επεμβάσεις σε υφιστάμενα κτίρια και μνημεία είναι μια παλιά υπόθεση όσο και η ιστορία του πολιτισμού, ενώ κάθε εποχή – από την κλασσική περίοδο μέχρι και σήμερα - είχε ένα δικό της ιδιαίτερο τρόπο αντιμετώπισης αυτού του θέματος.

Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό του προηγούμενου αιώνα ήταν η διατύπωση διαφόρων θεωριών από ειδικούς σχετικά με το πλαίσιο, τις μεθόδους και τους

στόχους που θα πρέπει να έχει μια επέμβαση. Οι θεωρίες αυτές συνέβαλαν στην ωρίμανση κάποιων απόψεων οι οποίες βοήθησαν σε σημαντικό βαθμό στη σύνταξη και την υπογραφή «χαρτών» από τη διεθνή κοινότητα, στους οποίους διατυπώνονται βασικές αρχές περί προστασίας και επεμβάσεων σε μνημεία. Έτσι λοιπόν το 1935 συντάσσεται ο «Χάρτης της Αθήνας» και το 1964 μετά από συντονισμένες ενέργειες διεθνών οργανισμών όπως η UNESCO, η ICOMOS, το Συμβούλιο της Ευρώπης κ.α. συντάσσεται και υπογράφεται από πολλά κράτη, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, ο «Χάρτης της Βενετίας».

Αρκετές από τις διατάξεις που ορίζονται στους πιο πάνω χάρτες έχουν ένα πολύ γενικό χαρακτήρα, γι' αυτό κατά καιρούς αποτέλεσαν αντικείμενο περαιτέρω επεξεργασίας και ανάλυσης. Μια από αυτές τις προσπάθειες είχε ως στόχο την ταξινόμηση και τον προσδιορισμό του αντικειμένου κάθε μεθόδου επέμβασης. Σύμφωνα λοιπόν με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι μέθοδοι επεμβάσεων διακρίνονται στις εξής:

- Επέμβαση (intervention): είναι γενικότερος όρος και αναφέρεται ή υπονοεί οποιαδήποτε από τις παρακάτω έννοιες ή εργασίες.
- Επισκευή (repairing): ορίζεται η επαναφορά δομικού στοιχείου ή κτίσματος με βλάβη στην κατάσταση προ της βλάβης. Είναι φανερό ότι το ίδιο ή ανάλογο αίτιο (π.χ. σεισμός) θα προκαλέσει κατά τεκμήριο την ίδια ή ανάλογη βλάβη. Έτσι σε περίπτωση εκτεταμένων ή σοβαρών βλαβών είναι φρόνιμο η επέμβαση να περιλαμβάνει και ενίσχυση της κατασκευής ενώ σε περιορισμένες ή μικρές βλάβες αρκεί συνήθως η επισκευή.
- Ενίσχυση (strengthening): ορίζεται το σύνολο των μέτρων αναβάθμισης των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή, δυσκαμψία) δομικού στοιχείου ή κτίσματος μέχρι ενός επιθυμητού ή απαιτητού επιπέδου (π.χ. σεισμικές δράσεις σχεδιασμού που επιβάλλουν οι τρέχοντες κανονισμοί). Σημειώνεται ότι η ενίσχυση προχωρά πέραν της επισκευής τυχόν βλαβών, είναι όμως δυνατή και η προληπτική ενίσχυση χωρίς την παρουσία βλαβών. Το επίπεδο και τα μέτρα ενίσχυσης προσδιορίζονται από ειδική μελέτη.
- Ανακατασκευή (reconstruction): ορίζεται η κατασκευή στη θέση παλιού, ενός νέου δομικού στοιχείου ή κτίσματος. Το νέο δομικό στοιχείο ή κτίσμα μπορεί να είναι

αντίγραφο ή ανάλογο του υφιστάμενου ή ακόμα και τελείως νέο. Η τελική απόφαση βασίζεται σε ιστορικούς, κοινωνικούς, χρηστικούς ή άλλους λόγους.

-Αναστήλωση (restoration): ορίζεται η επαναφορά του δομήματος στην αρχική του μορφή. Είναι όρος που χρησιμοποιείται συνήθως για επεμβάσεις σε μνημειακά κτίσματα και έχει ένα χαρακτήρα αυστηρότητας όσον αφορά το σεβασμό της ιστορικής φυσιογνωμίας του κτίσματος.

-Επανάχρηση (rehabilitation): ορίζεται η περιορισμένη συνήθως διαρρύθμιση και μετατροπή ενός κτιρίου ώστε να εξυπηρετήσει νέες, σύγχρονες χρήσεις και λειτουργίες. Αναφέρεται συνήθως σε αρχιτεκτονικού χαρακτήρα παρεμβάσεις.

-Διατήρηση (preservation): ορίζεται η διαφύλαξη της υπάρχουσας κατάστασης με μέτρα αποτροπής περαιτέρω φθορών.

-Συντήρηση (conservation): είναι γενικότερος όρος με ευρύτερη χρήση. Υπονοεί συνήθως περιορισμένου ή και πρόσκαιρου, αλλά όχι πρόχειρου, χαρακτήρα μέτρα, εν όψει τελικής ή ριζικότερης επέμβασης για την τύχη του κτίσματος.

Είναι πολύ χαρακτηριστικό το γεγονός ότι το τελικό σχήμα επέμβασης, είτε πρόκειται για παραδοσιακό κτίριο είτε πρόκειται για μνημείο ή διατηρητέο κτίριο, συνήθως περιλαμβάνει συνδυασμό διαφόρων μεθόδων επέμβασης.

Σύμφωνα με το Άρθρο 1 του Χάρτη της Βενετίας (1964) που αποτελεί τον Καταστατικό Χάρτη για τη συντήρηση και την αποκατάσταση μνημείων, τα μνημειακά έργα αποτελούν ζωντανές μαρτυρίες της μακρόχρονης παράδοσης των λαών και κοινή κληρονομιά της Ανθρωπότητας. Η συντήρηση και αποκατάσταση των μνημείων έχουν στόχο τη διατήρηση τους σαν έργα τέχνης και σαν ιστορικές μαρτυρίες (Αρθ. 3) και τη διατήρηση και ανάδειξη της αισθητικής και ιστορικής τους αξίας (Αρθ. 9). Το Άρθρο 24, Παρ. 6 του Συντάγματος του 1975 καθορίζει επίσης ότι τα μνημεία και οι παραδοσιακές περιοχές και στοιχεία τελούν υπό την προστασία του (Ελληνικού) Κράτους, το οποίο έχει την υποχρέωση της προστασίας του Πολιτιστικού Περιβάλλοντος (Παρ. 1 του ιδίου Αρθρου).

Το Άρθρο 1 του προαναφερθέντος Χάρτη της Βενετίας ορίζει ως μνημείο οποιοδήποτε αρχιτεκτονικό έργο (ακόμα και ταπεινό) το οποίο αποτελεί ιδιαίτερη μαρτυρία για τον πολιτισμό, ή είναι ενδεικτικό της ιστορικής εξέλιξης ή ενός ιστορικού γεγονότος. Η έννοια αυτή περιλαμβάνει όχι μόνο τα μνημεία της Αρχαιότητας και της Βυζαντινής εποχής αλλά και τα θεωρούμενα σαν λιγότερο

σημαντικά κτίρια της εποχής της Τουρκοκρατίας ή του 19ου αιώνα, είτε αυτά είναι μεμονωμένα, είτε ανήκουν σε οικοδομικά συμπλέγματα, σε ιστορικούς πυρήνες πόλεων, ή σε παραδοσιακούς οικισμούς και χωριά. Στις τελευταίες αυτές περιπτώσεις, ακόμα και παλιά κτίρια τα οποία θεωρούμενα επιμέρους δεν έχουν ιδιαίτερη αρχιτεκτονική ή ιστορική αξία, την αποκτούν σαν τμήματα ενός διατηρητέου μνημειακού συνόλου. Όπως μάλιστα τονίζει η Διακήρυξη του Amsterdam (1975), που αποτελεί τον εγκεκριμένο από την Επιτροπή Υπουργών του Συμβουλίου της Ευρώπης Ευρωπαϊκό Χάρτη για την Αρχιτεκτονική Κληρονομιά, η διατήρηση και η αποκατάσταση των μνημειακών συνόλων, των ιστορικών πυρήνων και των παραδοσιακών οικισμών, συντελεί στην ιστορική συνέχεια στο περιβάλλον, η οποία είναι σημαντική για τη διατήρηση ή τη δημιουργία ενός πλαισίου ζωής που επιτρέπει στον άνθρωπο να διατηρήσει την ταυτότητα του και να αναπτύξει ένα αίσθημα ασφάλειας στις απότομες αλλαγές της κοινωνίας. Επιπλέον, η διατήρηση / αποκατάσταση των ανωτέρω κτιρίων, και η απόδοση τους σε λειτουργίες που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες, συχνά είναι οικονομικά περισσότερο συμφέρουσα από την καθαίρεση και την κατασκευή νέων κτιρίων, και συμβάλλει στην εξοικονόμηση υλικών και άλλων πόρων.

Το μεγαλύτερο μέρος του κτιστού περιβάλλοντος αποτελείται από κατασκευές από λίθους, φυσικούς ή τεχνητούς. Σύμφωνα με το προαναφερθέν Άρθρο 1 του Χάρτη της Βενετίας, που ορίζει ως μνημείο οποιοδήποτε αρχιτεκτονικό έργο το οποίο αποτελεί ιδιαίτερη μαρτυρία για τον πολιτισμό, ή είναι ενδεικτικό της ιστορικής εξέλιξης ή ενός ιστορικού γεγονότος, ένα σημαντικό ποσοστό των λίθινων κατασκευών ανήκει στην κατηγορία των μνημείων. Τέλος, μεγάλο μέρος των κατασκευών από λίθους είτε συμπεριλαμβάνεται στην κατηγορία των μνημείων είτε όχι, εξακολουθούν να πληρούν τις ανάγκες για τις οποίες κατασκευάστηκαν, παρά το γεγονός ότι έχουν κτιστεί πριν πολλά χρόνια.

Τα περισσότερα κτίρια τα οποία έχουν κατασκευαστεί τους προηγούμενους αιώνες ή στην αρχή του 20ου έχουν υποστεί μείωση της αντοχής τους λόγω περιβαλλοντικών, χημικών ή σεισμικών δράσεων ή ακόμα λόγω νεότερων επεμβάσεων που επέβαλαν οι σύγχρονες συνθήκες διαβίωσης. Έτσι, για να διατηρηθούν και να συνεχίσουν να παραμένουν σε χρήση χρειάζονται αποκατάσταση ή και ενίσχυση.

Σε αρκετές περιοχές της γης, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, η κύρια αιτία των βλαβών ή της αστοχίας των κατασκευών κατά τη διάρκεια της ζωής τους, είναι η σεισμική δράση. Για το λόγο αυτό αποτελεί και την κυρίαρχη φόρτιση στο σχεδιασμό των νέων κατασκευών.

Η αποτίμηση της σεισμικής αντοχής των κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία παρουσιάζει ειδικά προβλήματα που έχουν σχέση με την περίπλοκη δομική γεωμετρία τους, με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους και με τις επεμβάσεις στο δομικό τους σύστημα κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης ζωής τους.

Η κατανόηση από τον μηχανικό της σεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία, θα τον οδηγήσει στην εκλογή των κατάλληλων μεθόδων για την ενίσχυση τους, η οποία συνήθως γίνεται εμπειρικά και όχι πάντα κατά τον, από οικονομοτεχνική άποψη, βέλτιστο τρόπο. [8,9]

Η παρασκευή κονιαμάτων που θα εφαρμοστούν σε επεμβάσεις συντήρησης μνημειακών κατασκευών βασίζεται στην κατανόηση των αρχών βάσει των οποίων σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν τα παλαιά κονιάματα. Στόχος δεν είναι η μίμηση των πρωτογενών υλικών αλλά η δημιουργία νέων συμβατών κονιαμάτων που σκοπό έχουν να προστατέψουν τα πρωτογενή υλικά των μνημείων και να ενισχύσουν τη δομή συντελώντας στη διάρκεια της κατασκευής στο χρόνο. Η μελέτη για τη δημιουργία νέων συμβατών κονιαμάτων θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή με σκοπό την επίτευξη παρόμοιων φυσικοχημικών ιδιοτήτων. Η όψη της μνημειακής κατασκευής δεν θα πρέπει να αλλοιώνεται και για αισθητικούς λόγους. Με τη χρήση κατάλληλης κονίας μπορεί κανείς να επιτύχει και το κατάλληλο χρώμα του κονιάματος, το οποίο θα ταιριάζει με το παραδοσιακό κονίαμα.

1.2 Ο ρόλος των μνημείων στην Πολιτιστική κληρονομιά

Τα μνημεία που συγκαταλέγονται στον Κατάλογο της Παγκόσμιας Κληρονομιάς επιλέγονται και εγκρίνονται βάσει της αξίας τους ως τα καλύτερα παραδείγματα της δημιουργικής ευφυΐας του ανθρώπου. Αποτελούν τεκμήρια μιας σημαντικής

ανταλλαγής ανθρώπινων αξιών και παρέχουν μια μοναδική ή τουλάχιστον εξαιρετική μαρτυρία μιας πολιτισμικής παράδοσης ή ενός πολιτισμού που ζει ακόμα ή έχει εξαφανισθεί. Είναι άμεσα συνδεδεμένα με σημαντικά στάδια της ανθρώπινης ιστορίας και για το λόγο αυτό έχουν εξέχουσα οικουμενική αξία και αποτελούν τμήμα της κοινής κληρονομιάς της ανθρωπότητας. [2]

Σύμφωνα με την σύμβαση για την προστασία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς της Ευρώπης, Σύμβαση της Γρανάδας (1985), τα μνημεία αποτελούν κατασκευές ιδιαίτερα σημαντικές λόγω του ιστορικού, αρχαιολογικού, καλλιτεχνικού, επιστημονικού, κοινωνικού ή τεχνικού τους ενδιαφέροντος, συμπεριλαμβανομένων των εγκαταστάσεων ή διακοσμητικών στοιχείων που αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα τους.

Η έννοια ενός ιστορικού μνημείου δεν καλύπτει μόνο το μεμονωμένο αρχιτεκτονικό έργο, αλλά και την αστική ή αγροτική τοποθεσία που μαρτυρεί ένα ιδιαίτερο πολιτισμό, μια ενδεικτική εξέλιξη ή ένα ιστορικό γεγονός. Αυτό ισχύει όχι μόνο για τις μεγάλες δημιουργίες, αλλά και για τα ταπεινά έργα, που με τον καιρό απέκτησαν σημασία. (Χάρτης της Βενετίας, αρθρ. 1). Γενικότερα σαν μνημείο μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε αντικείμενο, έργο, οικοδόμημα ή δομημένο σύνολο που δημιουργήθηκε έχοντας έναν ιδιαίτερο χαρακτήρα που το διαφοροποιεί και το αναδεικνύει ανάμεσα σε άλλα καθιστώντας το τεκμήριο ιστορίας.

Αν εξετάσουμε ετυμολογικά τη λέξη μνημείο προέρχεται από τη ρίζα της λέξης μνήμη και ερμηνεύεται σαν «ενθύμημα» δηλαδή κάθε τι που μας θυμίζει την ύπαρξη προγενέστερης δραστηριότητας. Με τον όρο Μνημείο, νοείται κάθε απομεινάρι πολιτισμού, φορέας ιστορικών, τεχνικών και άλλων πολύτιμων πληροφοριών τόσο της αντίστοιχης ιστορικής περιόδου, όσο και των φαινομένων που συνέβησαν στο διάστημα που μεσολάβησε από την κατασκευή και χρήση μέχρι τη σύγχρονη παρατήρηση και μελέτη. Ένα μνημείο μπορεί να έχει τις διαστάσεις ενός μεγάλου ή μικρού κτηρίου, μπορεί όμως και να είναι υπερβολικά μικρών διαστάσεων (όπως π.χ. ένας σφραγιδόλιθος) ή να εκτείνεται σε πάρα πολλά στρέμματα της επιφάνειας του εδάφους (όπως ο πολεοδομικός ιστός μιας αρχαίας πόλης, όπως ορίζεται από τους αντίστοιχους αρχαίους τοίχους της). [7]

1.3 Η Συμβολή της Επιστήμης στην Προστασία των Μνημείων

Η συμβολή της Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών είναι απαραίτητη στα πλαίσια της Διεπιστημονικής Συνεργασίας για την Προστασία των Μνημείων και των Έργων της Πολιτιστικής μας Κληρονομιάς. Τα προβλήματα εμπειρισμού και χρήσης ασύμβατων υλικών στην Προστασία των Μνημείων απαιτούν την εισαγωγή της σχετικής Τεχνογνωσίας και Καινοτομίας, ώστε να επιτευχθεί η ολοκληρωμένη διάγνωση, αλλά και η ολοκληρωμένη μελέτη προστασίας και ο έλεγχος ποιότητας των σχετικών μελετών και έργων. [3]

Η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς της Χώρας συνίσταται κυρίως: α) στον εντοπισμό, την έρευνα, την καταγραφή, την τεκμηρίωση και τη μελέτη των στοιχείων της, β) στη διατήρηση και στην αποτροπή της καταστροφής, της αλλοίωσης και γενικά κάθε άμεσης ή έμμεσης βλάβης της, γ) στην αποτροπή της παράνομης ανασκαφής, της κλοπής και της παράνομης εξαγωγής, δ) στη συντήρηση και την κατά περίπτωση αναγκαία αποκατάστασή της, ε) στη διευκόλυνση της πρόσβασης και της επικοινωνίας του κοινού με αυτήν, στ) στην ανάδειξη και την ένταξή της στη σύγχρονη κοινωνική ζωή και ζ) στην παιδεία, την αισθητική αγωγή και την ευαισθητοποίηση των πολιτών για την πολιτιστική κληρονομιά». «Ως αρχαιολογική έρευνα πεδίου νοείται η έρευνα του εδάφους, του υπεδάφους, του βυθού της θάλασσας ή του πυθμένα λιμνών ή ποταμών που έχει ως σκοπό τον εντοπισμό ή την αποκάλυψη αρχαίων μνημείων, είτε αυτή συνίσταται σε ανασκαφή, χερσαία ή ενάλια, είτε σε επιφανειακή έρευνα είτε σε επιστημονική έρευνα που διενεργείται με γεωφυσικές ή άλλες μεθόδους [4]

Μια ολοκληρωμένη μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης ιστορικών κτιρίων και συνόλων οφείλει να βασίζεται στον χαρακτηρισμό των αυθεντικών δομικών υλικών (λίθοι, πλίνθοι, κονιάματα, επιχρίσματα, διακοσμητικά στοιχεία), στην μελέτη διάγνωσης της φθοράς τους καθώς και στις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές παραμέτρους ώστε να διασφαλίζεται η μακροβιότητα των ιστορικών κατασκευών.

Τα ιστορικά δομικά υλικά έχουν παρουσιάσει εξαιρετική συμπεριφορά, ανθεκτικότητα και μακροβιότητα στο χρόνο, ώστε με το πέρασμα των αιώνων παρουσίασαν εκτεταμένη διάβρωση καθιστώντας αναγκαιότητα τη συντήρηση και

αποκατάστασή τους με σύγχρονα υλικά. Προκειμένω να διασφαλιστεί η φυσικοχημική και μηχανική συμβατότητα των υλικών αποκατάστασης με τα αυθεντικά υλικά των παραδοσιακών κτιρίων και μνημείων είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός των υλικών αποκατάστασης που θα προσομοιάζουν τα ιστορικά, βελτιώνοντας ταυτόχρονα τη συμπεριφορά τους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της σύγχρονης τεχνολογίας. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου είναι απαραίτητος ο ολοκληρωμένος χαρακτηρισμός των αυθεντικών ιστορικών υλικών. Δεδομένου ότι τα περισσότερα δομικά υλικά είναι σύνθετα συστήματα (κεραμικά, κονιάματα, επιχρίσματα κ.ά.) ο χαρακτηρισμός τους πρέπει να περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των χρησιμοποιηθέντων πρώτων υλών της τεχνολογίας παρασκευής τους και των τελικών φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους. [10]

Κεφάλαιο 2

2.1 Παραδοσιακά Υλικά Συντήρησης και Αποκατάστασης

Θεμελιώδη ρόλο στην επιτυχή σύνθεση παραδοσιακών κονιαμάτων διαδραματίζει ο τρόπος παρασκευής των υλικών. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι άριστες ιδιότητες των παραδοσιακών κονιαμάτων αποδίδονται στο αργό σβήσιμο και επίσης στην επί μακρόν κατεργασία (έως και πέντε χρόνια) και ωρίμανση του ασβέστη. Σήμερα είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί στο εμπόριο τέτοιος ασβέστης.

Οι ποζολάνες που κυκλοφορούν, δεν πληρούν απαραίτητα την προϋπόθεση της ποζολανικής λειτουργίας. Συγκεκριμένα δεν περιέχουν απαραίτητα τα άμορφα υλικά που δεσμεύουν τον ελεύθερο ασβέστη και αυξάνουν τόσο την αντοχή του κονιάματος όσο και ελαχιστοποιούν την εμφάνιση αλάτων. Συνήθως χαρακτηρίζονται από μεγάλη περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο που δρα σαν αδρανές στο κονίαμα.

Το κεραμίδι που χρησιμοποιείται για το κουρασάνι έχει υποστεί μία θερμική διαδικασία που κατά κανόνα του αφαιρεί την δυνατότητα να δημιουργεί ενώσεις

ανάλογες των ποζολανών και των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου, αντιδρώντας με τον ασβέστη.

Είναι απαραίτητο για την σύνθεση νέων κονιαμάτων χωρίς τσιμέντο, που θα εφαρμοστούν στα ιστορικά κτίρια, να γίνει έλεγχος των πρώτων υλών και εργαστηριακές δοκιμές που περιλαμβάνουν: αντοχές, διαπερατότητα σε υδρατμούς, υδατοαπορροφητικότητα και πορώδες. Μόνον έτσι θα είμαστε σε θέση να προτείνουμε ως εναλλακτική λύση του τσιμέντου, κονιάματα που πληρούν κάποιες προδιαγραφές και μπορούν να δοκιμαστούν και στα ιστορικά κτίρια. [11]

Τα κονιάματα που θα χρησιμοποιηθούν στην αναστήλωση ιστορικών κτιρίων θα πρέπει να πληρούν κάποιες προδιαγραφές που εγγυώνται την λειτουργία και τον ιστορικό χαρακτήρα του κτιρίου. Ως εκ τούτου πρέπει να μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα (αντιστρέψιμα) και να μην είναι ασύμβατα με τα δομικά υλικά της κατασκευής.

Για παράδειγμα το τσιμέντο, εκτός από τα αλκάλια που δημιουργούν τα άλατα, δεν είναι συμβατό με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία για λόγους αισθητικούς και φυσικοχημικούς. Τα δομικά υλικά των ιστορικών κτιρίων έχουν διαφορετικές αντοχές και θερμική διαστολή σε σχέση με το τσιμέντο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρωγμές και αποκολλήσεις στα σημεία που εφαρμόζεται το τσιμέντο.

Η χρήση του τσιμέντου ως συνδετικού υλικού σε τοιχοποιίες, αν και εκτεταμένη στο παρελθόν, σήμερα αναγνωρίζεται ότι προκαλεί έντονα προβλήματα φθοράς, κυρίως λόγω ασυμβατότητας με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Η ασυμβατότητα των κονιαμάτων τσιμέντου έγκειται σε κάποια γενικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν και διαφοροποιούνται από αυτά των παραδοσιακών υλικών. Συγκεκριμένα έχουν μεγάλες τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, καθιστώντας τα πολύ δυνατά και άκαμπτα σε σχέση με τα παραδοσιακά κονιάματα στις ιστορικές τοιχοποιίες. Επίσης παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή θερμικής διαστολής, γεγονός που έχει ως επακόλουθο την άσκηση μηχανικών τάσεων στα αυθεντικά υλικά, που μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στην πρόκληση ρηγματώσεων. Η μικρή τιμή πορώδους και η σχετικά πυκνή τους δομή, δυσκολεύει την 'αναπνοή' της τοιχοποιίας, δηλαδή την μεταφορά υγρασίας στους κύκλους ύγρυνσης και ξήρανσης. Αστοχία επίσης είναι πιθανό να δημιουργηθεί εξαιτίας του εκλεκτικού

προσανατολισμού των διαλυτών αλάτων (των οποίων τα τσιμεντιτικά κονιάματα είναι φορέας), στα γειτονικά ιστορικά δομικά υλικά, μέσα από την άσκηση πιέσεων κρυστάλλωσης κατά τη φάση της εξάτμισης. Τέλος η χρήση του τσιμέντου ως υλικού αποκατάστασης, μπορεί ενδεχομένως να διαταράξει τη μηχανική συμπεριφορά, στατική και δυναμική, της τοιχοποιίας. Για την αντιμετώπιση, λοιπόν, όλων αυτών των παραγόντων που προκαλούν φθορά πρέπει να γίνεται η σωστή διάγνωση με τις κατάλληλες μεθόδους. [12][47]

Τα προβλήματα ασυμβατότητας των υλικών εκδηλώνονται στη διεπιφάνεια δομικών υλικών – περιβάλλοντος, εντείνοντας και επιταχύνοντας τη φθορά των υλικών, και στη διεπιφάνεια αυθεντικών υλικών – υλικών συντήρησης, ευνοώντας την ανάπτυξη τάσεων λόγω ανισοτροπίας με παθολογικές επιπτώσεις στην κλίμακα της τοιχοποιίας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, βασικό κριτήριο για την επιλογή υλικών αποκατάστασης είναι η φυσικοχημική και αισθητική συμβατότητά τους με το υλικό του μνημείου που θα εφαρμοστεί (υπόστρωμα), αλλά και ολόκληρη την κατασκευή, ώστε σε συγκεκριμένες συνθήκες έκθεσης του δομικού συστήματος στις εσωτερικές και εξωτερικές δράσεις, να διασφαλίζεται η μέγιστη ανθεκτικότητα της κατασκευής.

2.2 Ιστορική εξέλιξη των κονιαμάτων

Η ευρεία εφαρμογή των κονιαμάτων στις κατασκευές λόγω της φύσης τους (ευμετάβλητη δομή, χρωματική προσαρμογή, ποικίλη λειτουργικότητα) καθιστά τα κονιάματα ένα από τα κύρια υλικά δόμησης. Η δομή τους μπορεί να είναι εξαιρετικά πορώδης μέχρι συμπαγής έως αδιαπέραστη και το χρώμα ποικίλο, προσαρμοσμένο στις αισθητικές ανάγκες της κατασκευής.

Η χρήση των κονιαμάτων ως υλικών δόμησης, επίχρισης, συμπλήρωσης και αντικατάστασης (προσομοίωσης) άλλων δομικών στοιχείων, καθιστά το υλικό βασικό στοιχείο στο σύγχρονο τρόπο συντήρησης και αποκατάστασης.

Το κονίαμα σε μνημεία από τοιχοποιία παίζει πρωτεύοντα ρόλο στη λειτουργία της δομής. Κατά πρώτο λόγο γεμίζει τα κενά ανάμεσα στις δομικές μονάδες και δίνει

ομοιόμορφη δομή χωρίς να υπάρχει ανάγκη ακριβούς κοψίματος και λείανσης για την προσαρμογή των υπόλοιπων στοιχείων.

Τα υλικά για την παρασκευή των κονιαμάτων που είχαν στη διάθεση τους οι παλιοί τεχνίτες ήταν πηλός, γύψος, άσβεστος, ποζολάνες, άμμος, χαλίκια, θραυστά αδρανή ή θραυστά κεραμικά, όπως επίσης άχυρα, καλάμια, ξύλα και ίνες (φυτικές και ζωικές).

Η σωστή επιλογή και ο συνδυασμός των υλικών σε συνάρτηση με την άριστη τεχνική που είχαν αναπτύξει οι προγονοί μας, έδωσαν στα κονιάματα την διάρκεια που τώρα προκαλεί θαυμασμό.

Η κονία που πρώτη χρησιμοποιήθηκε στην ιστορία της δόμησης είναι ο πηλός, ενώ η γύψος χρησιμοποιήθηκε στην Αίγυπτο κυρίως για διακόσμηση αλλά και στη δόμηση. Η χρήση της στα ελληνιστικά χρόνια σε οικοδομικά έργα και αργότερα σε εσωτερικά διακοσμητικά στοιχεία είναι ευρεία. Γενικά η γύψος χρησιμοποιήθηκε για εσωτερική επικάλυψη, για σύνδεση άλλων υλικών και για κατασκευή στοιχείων όπως κορνίζες, διαζώματα κ.λ.π.

Η βάση όλων των κονιαμάτων, ανεξάρτητα από την ιστορική περίοδο, είναι η άσβεστος η χρήση της οποίας είναι γνωστή από τα προϊστορικά χρόνια (Μεσοποταμία 2450π.Χ) . Χρησιμοποιούνταν ως δομικό υλικό αλλά κυρίως για επίχριση επιφανειών. Η παρασκευή της από πληροφορίες του Ορλάνδου γινόταν με καύση του ασβεστόλιθου σε ειδικά κυψελωτά καμίνια με καύσιμη ύλη ξύλα και σε θερμοκρασίες 850-900° C. Το προϊόν της καύσης σβήνονταν σε λάκκους με νερό και αναδεύονταν με ειδικό εργαλείο. Η χρήση της κρίνονταν κατάλληλη μετά το πέρας σημαντικού χρονικού διαστήματος ώστε η ανάμιξη της με άμμο ή μαρμαρόσκονη οδηγούσε σε μίγμα που με το χρόνο αποκτούσε αντοχή και σκληρότητα.

Πρακτικά κριτήρια που αφορούν την επιλογή του ασβεστόλιθου που θεωρούνταν κατάλληλος για παρασκευή καλής ποιότητας άσβεστου μέχρι και συμβουλές για τη φύραση δίνονται από τον Βιτρούβιο (1ος π.Χ.). Η συμβολή της άσβεστου στην ποιότητα των κονιαμάτων (ανθεκτικότητα, πλαστικότητα, συνοχή με άλλα δομικά στοιχεία) αποτελεί αντικείμενο μελέτης μέχρι σήμερα.

Οι ποζολάνες χρησιμοποιήθηκαν από πολύ νωρίς (2° π.χ. αιώνα στη Δήλο) ως συνδετική κονία λόγω των ιδιοτήτων που αναπτύσσουν όταν αντιδρούν με άσβεστο. Πρόκειται για δραστικές αργιλο-πυριτικές ενώσεις που ενώνονται με την άσβεστο

και σκληραίνουν δημιουργώντας ασβεστο-πυριτικές ή ασβεστο-αργιλικές ενώσεις παρουσία υγρασίας. Οι φυσικές ποζολάνες είναι υλικά κυρίως ηφαιστειακής προέλευσης και αποτελούνται από σωματίδια σε κρυσταλλική και υαλώδη κατάσταση.

Τεχνητές ποζολάνες (π.χ. ιπτάμενη τέφρα, σκωρίες) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σήμερα από την επιστήμη των υλικών με σκοπό τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των δομικών υλικών κατασκευής.

Το κεραμάλευρο είχε ανάλογη δράση και χρησιμοποιήθηκε με την άσβεστο για τη παρασκευή κονιαμάτων με υδραυλικό χαρακτήρα. Η χρήση του ήταν ευρεία τη Ρωμαϊκή περίοδο ιδιαίτερα σε θέσεις που απαιτούνταν στεγανότητα (δάπεδα, λουτρά, επιχρίσματα που εκτίθονταν σε υγρασία). Σε κονιάματα δόμησης του 5^{ου}-7^{ου} αιώνα συναντάται ως λεπτόκοκκο κλάσμα (filler) στην κονία. Ευρεία όμως ήταν και η χρήση των θραυστών κεραμικών ως αδρανή (το μέγεθος τους έφτανε τα 25mm σε μεγάλου πάχους αρμούς δόμησης) με ανάλογη δράση.

Τα αδρανή ήταν φυσικά υλικά που προέρχονταν από ποτάμια (συνήθως ήταν εύκολα εξορύξιμα) με διάφορες διαβαθμίσεις και διαφορετική σύσταση ή /και θραυστά αδρανή (προϊόντα θραύσης πετρωμάτων). Η άμμος, που κυρίως χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή κονιαμάτων, αποτελούνταν από λεπτόκοκκα υλικά που προέρχονταν από φυσική διάσπαση πετρωμάτων.

Στα κονιάματα συναντώνται επίσης πρόσμικτα υλικά, οργανικής κυρίως προέλευσης (πρωτεΐνες, αίμα, αυγά κ.λ.π) που προστίθονταν με σκοπό την αύξηση της πλαστικότητας, της συνοχής και της στεγανότητας του μίγματος. Η συνήθεια κάλυψης δαπέδων, τοίχων ή οροφών με κονίαμα είναι προϊστορική. Εκτός από επίχριση η κατασκευή αρχιτεκτονικών μελών σε μνημεία καθώς και η χρήση σε τοίχους που φέρουν τοιχογραφίες γινόταν με κονιάματα βάση των οποίων ήταν η άσβεστος ή η γύψος.

Αργότερα, κατά τους Ρωμαϊκούς κυρίως χρόνους χρησιμοποιήθηκε το κονίαμα για σύνδεση των υλικών δομής. Κατά τους ιστορικούς χρόνους συναντάται σε σπίτια Ελληνιστικών χρόνων της Δήλου το 2^ο π.Χ. αιώνα συνδετικό κονίαμα με χρήση ποζολάνης "ομοίας προς λεπτότατου τσιμέντου". Το ισχυρό αυτό κονίαμα χρησιμοποιήθηκε σε υδραγωγεία και όπου υπήρχε επαφή με νερό.

Η ευρεία χρήση των κονιαμάτων ως συνδετικό υλικό συναντάται στους ρωμαϊκούς χρόνους και μεταγενέστερα. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται τομή στην τεχνολογία των υλικών με την ανάπτυξη του "ρωμαϊκού σκυροδέματος". Πρόκειται για συνδυασμό ηφαιστειακής άμμου, κεραμικών και φυσικών αδρανών, ο μέγιστος κόκκος των οποίων φτάνει τα 16mm, με άσβεστο, μίγμα που έδωσε υδραυλικές ιδιότητες στο υλικό και λόγω των ιδιοτήτων αυτών βρήκε ευρεία εφαρμογή.

Πηγές πληροφορούν για τη σύσταση του κονιάματος αυτού που αποτελούνταν από 1 μέρος άσβεστου και 3 μέρη κεραμικών αδρανών κατ' όγκο.

Στα πλαίσια των εμπορικών συναλλαγών της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας η διάδοση του υλικού ήταν ευρεία και ταχεία. Η χρήση ενός τόσο ισχυρού κονιάματος οδήγησε σε νέες μορφές τοιχοποιίας. Τα χτίσματα της περιόδου αυτής χαρακτηρίζονται από μεγάλου πάχους αρμούς. Χαρακτηριστικό επίσης των κονιαμάτων αυτής της περιόδου είναι η πολύ ισχυρή συνάφεια που αναπτύσσεται μεταξύ των πλίνθων και των κονιαμάτων.

Η τεχνολογία αυτή πέρασε στο Βυζάντιο και εξελικτικά έφτασε μέχρι το 18^ο μ.Χ. αιώνα στα ασβεστο-ποζολανικά κονιάματα κάτω από διαφορετικά ονόματα (cocciopesto, opus coementicum, korasani). Το υλικό αυτό ήταν το μόνο με υδραυλικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκε όπου κρίθηκε απαραίτητο. Μετά τη Ρωμαϊκή περίοδο και εξαιτίας του περιορισμού της ελεύθερης διακίνησης γνώσης και υλικών, οι τεχνίτες αναγκάστηκαν να χρησιμοποιούν υλικά που μπορούσαν να προμηθεύονται εύκολα και ήταν οικονομικά. Παρατηρείται έτσι χαλάρωση στη δομή των κονιαμάτων και αυξάνεται η χρήση πρόσμικτων ουσιών (κυρίως οργανικών).

Εξαιρέσεις παρατηρούνται κυρίως τον 7^ο- 11^ο μ.Χ. αιώνα, περίοδος που χαρακτηρίζεται από ισχυρά κονιάματα στα οποία συμμετέχει σε σημαντική αναλογία κεραμάλευρο.

Μερικές από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα του κονιάματος είναι:

- επιλογή πρωτογενούς υλικού
- πλαστικότητα (εργασιμότητα) του μίγματος
- επεξεργασία(συμπύκνωση) του υλικού

Στην οθωμανική περίοδο τα κονιάματα ήταν βασισμένα στην άσβεστο. Φαίνεται ότι η παρουσία πηλού στην άσβεστο πρόσδιδε υδραυλικές ιδιότητες στο κονίαμα.

Τα αδρανή ήταν κυρίως λεπτόκοκκα αν και σε μερικές περιπτώσεις ο μέγιστος κόκκος έφτανε τα 32mm. Η χρήση των αδρανών και της αναλογίας τους, καθορίζονταν ανάλογα με τη χρήση του κονιάματος. Η αναλογία των λεπτόκοκκων αδρανών σε σχέση με τα χονδρόκοκκα, ήταν μία παράμετρος που διέφερε. Πιο συγκεκριμένα, σε επιχρίσματα υπάρχουν λεπτόκοκκα αδρανή με διάμετρο <4mm ενώ στα κονιάματα δόμησης τα αδρανή φτάνουν τα 32mm.

Ανεξάρτητα από την ιστορική περίοδο, ιδιαίτερη μέριμνα φαίνεται να δίνεται στην κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών αφού ισχυρά κονιάματα χαρακτηρίζονται από ομαλή κοκκομετρική καμπύλη.

Άλλη παράμετρος που επηρεάζει την τεχνολογία των κονιαμάτων είναι ο λόγος κονίας προς αδρανή αφού ο λόγος κυμαίνεται από 1:2 μέχρι 1:4 (κονία: αδρανή).
[14]

2.3 Παράγοντες που οδηγούν σε παθολογίες του κονιάματος

Η φθορά του κονιάματος με το πέρασμα του χρόνου, οφείλεται στην υποβάθμιση των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται. Η υποβάθμιση των υλικών οδηγεί σιγά σιγά σε μείωση της ποιότητας και της αντοχής του κονιάματος. Οι διεργασίες της υποβάθμισης ασκούν πίεση στα δομικά υλικά με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Η μη σύντομη επέμβαση συντήρησης, οδηγεί τόσο σε κακό αισθητικό αποτέλεσμα, όσο και σε πλήρη φθορά του κονιάματος. Όλα τα υλικά υφίστανται υποβάθμιση, άλλα βραχυπρόθεσμα και άλλα μακροπρόθεσμα. [25]

2.3.1 Παρουσία Υγρασίας

Η υγρασία είναι ένας παράγοντας που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στους τρόπους αποσύνθεσης ενός κονιάματος. Απουσία υγρασίας, θα ήταν πολύ μικρή η υποβάθμιση των κονιαμάτων. [25].

Η υγρασία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο κονίαμα με δύο τρόπους: είτε άμεσα, είτε έμμεσα, υποβοηθώντας άλλους παράγοντες που μπορεί να ευθύνονται για τη φθορά του κονιάματος. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, ο βαθμός που θα επηρεάσει η υγρασία το κονίαμα εξαρτάται από το πορώδες του κονιάματος. Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους εναποτίθεται η υγρασία στο κονίαμα: η συμπύκνωση των υδρατμών, η τριχοειδής ανύψωση και η βροχόπτωση. [26]

Η συμπύκνωση εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του κονιάματος. Η τριχοειδής δράση είναι ο κύριος παράγοντας μεταφοράς της υγρασίας στο εσωτερικό του κονιάματος, που είναι η συνέπεια της επιφανειακής τάσης. Με τη βροχόπτωση εναποτίθεται νερό (υγρασία) στην επιφάνεια των μνημειακών και γενικότερα των κατασκευών και η δράση της εξαρτάται από τους κλιματικούς παράγοντες αλλά και από το ίδιο το υλικό. [27] Η βροχή παρασύρει επίσης και μεταφέρει στα δομικά υλικά τα διαλυμένα όξινα αέρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα.

2.3.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σε πολύ μεγάλο ποσοστό, όμως όπως έχει δείξει ο Brimblecombe (1991), αποτελούσε παράγοντα υποβάθμισης της πολιτιστικής κληρονομιάς από την αρχαιότητα. [28]

Πολλές μελέτες έχουν γίνει σχετικά με ρύπους όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου, τα οποία διαλύονται στο νερό, οδηγώντας σε ένα όξινο διάλυμα το οποίο αντιδρά με τα ασβεστούχα υλικά. Σε αστικές κυρίως περιοχές η ανθρώπινη δραστηριότητα αυξάνει τα ποσοστά των οξειδίων του θείου και του αζώτου. Η καύση ορυκτών καυσίμων για παράδειγμα, όπως ο άνθρακας ή το πετρέλαιο με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο οδηγεί στην παραγωγή διοξειδίου του θείου. Το ανθρακικό ασβέστιο που υπάρχει στο κονίαμα μετασχηματίζεται σε γύψο, ο οποίος πολλές φορές είναι περισσότερο διαλυτός από το ανθρακικό ασβέστιο.

2.3.3 Διαλυμένα άλατα

Η ανάπτυξη κρυσταλλικών αλάτων εντός των πόρων του κονιάματος μπορεί να δημιουργήσει τάσεις επαρκείς ώστε να ξεπεραστεί η εφελκυστική αντοχή του κονιάματος. Τα άλατα προέρχονται άλλοτε από ανέμους που πνέουν από παραθαλάσσιες περιοχές και μεταφέρονται στην τοιχοποιία με την ανερχόμενη υγρασία και άλλοτε από την ατμοσφαιρική ρύπανση. [25]

Όπως αναφέρει ο Henriques (2004), οι βλάβες από τα άλατα οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε δύο μηχανισμούς, στην κρυστάλλωση των αλάτων από το διάλυμα και στην ενυδάτωση των αλάτων. Όλα τα άλατα είναι ικανά να προκαλέσουν βλάβες κρυστάλλωσης, ενώ οι βλάβες λόγω ενυδάτωσης προκαλούνται από άλατα τα οποία μπορεί να υπάρχουν σε περισσότερες από μία κατάσταση ενυδάτωσης όπως το θειικό νάτριο.

Οι Everett (1961) και Snethlage & Wendler συνδέουν τη φθορά που προκαλείται στο κονίαμα με το πορώδες του, ενώ οι Rossi – Manaresi & Tucci (1991) με την κατανομή του μεγέθους των πόρων. Υπάρχουν και άλλες απόψεις (Charola 2003), όπου συνδέουν το βαθμό της βλάβης με τη φύση του άλατος. Υπάρχουν επίσης μελέτες που αφορούν την κρυστάλλωση των αλάτων από πολύπλοκα ιοντικά διαλύματα υπό συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας σε ένα πορώδες σύστημα. [30], [31], [32], [33]

2.3.4 Βιολογική δραστηριότητα

Όπως αναφέρουν οι Giulia et al. (2004), η βιολογική δραστηριότητα προκαλεί με πιο αργούς ρυθμούς βλάβη από ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση ή τα άλατα στο κονίαμα. Η βιολογική δραστηριότητα, λόγω ανάπτυξης κυανοβακτηρίων, φυκιών, λειχηνών, βρύων κ.ά., σχετίζεται τόσο με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όσο και με τις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών στα οποία επιδρούν. [34]

Τα βακτήρια, εμπίπτουν σε δύο ομάδες: τα αυτότροφα βακτήρια τα οποία αντλούν άνθρακα από το διοξείδιο του άνθρακα με την ενέργειά τους να προέρχεται από το φως και τα ετερότροφα τα οποία χρησιμοποιούν οργανικές ενώσεις του υλικού για να αντλήσουν άνθρακα. Μερικοί ερευνητές έχουν σημειώσει μεγάλο αριθμό βακτηρίων σε σαθρά υλικά σε σύγκριση με μικρότερους αριθμούς σε υλικά καλής ποιότητας καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι τα βακτήρια προκαλούν την υποβάθμιση. Άλλοι ερευνητές πιστεύουν ότι το ήδη υποβαθμισμένο υλικό παρουσιάζει ένα προτιμώμενο ενδιαίτημα για τα βακτήρια. [25]

Κεφάλαιο 3

Τα κονιάματα που προορίζονται για τα διάφορα δομικά έργα, έχουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών χρήσεων, ανάλογα με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες, που εξαρτώνται από την σύνθεση και την ποσοστιαία αναλογία των πρώτων υλών αλλά και τον τρόπο παρασκευής τους. Τα σημεία ακριβώς αυτά είναι που διαφοροποιούν τα κονιάματα από τις υπόλοιπες κατηγορίες δομικών προϊόντων. Στα κονιάματα και σε μικρότερο βαθμό στα σκυροδέματα, ο μηχανικός δεν καλείται να επιλέξει από μία κατηγορία παρεμφερών έτοιμων δομικών προϊόντων αυτό που καλύπτει τις ιδιότητες του έργου του, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, συνεκτιμώντας πολλές παραμέτρους, σχεδιάζει ή επιλέγει το καταλληλότερο για την περίπτωση του.

Είναι προφανές ότι ένα υλικό όπως είναι το κονιάμα, που προορίζεται για να συνδέσει μεταξύ τους τα διάφορα στοιχεία για δημιουργία μιας ενιαίας μονολιθικής μάζας που να αντέχει σε υψηλά φορτία, είναι απαραίτητο να αναπτύσσει ικανοποιητικές αντοχές με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας. Παράλληλα με τις αντοχές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλες σημαντικές τους ιδιότητες οι οποίες καθορίζουν την ποιότητα του κονιάματος και τα πεδία εφαρμογής του. Οι επιπλέον αυτές ιδιότητες είναι η εργασιμότητα για τα νωπά κονιάματα και η πρόσφυση και η ανθεκτικότητα για τα σκληρυμένα. Οι ιδιότητες αυτές είναι σύνθετες και συντίθενται από άλλες επί μέρους που με την σειρά τους εξαρτώνται από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην αρχή και που σχετίζονται με τις πρώτες ύλες και τον τρόπο παρασκευής των κονιαμάτων. [16]

Ο βασικός διαχωρισμός των κονιαμάτων αποκατάστασης γίνεται με βάση τη φύση της ύλης των αδρανών υλικών: αερικά και υδραυλικά κονιάματα. Η κύρια διαφορά μεταξύ αερικών και υδραυλικών κονιαμάτων ασβέστη έγκειται στο ρόλο που παίζει το νερό στη σύνθεσή τους. Στα αερικά κονιάματα το H_2O διευκολύνει την ανάμειξη του μείγματος ενεργοποιώντας τον ασβέστη και στη συνέχεια συμβάλλει στην εύκολη τοποθέτηση του κονιάματος. Στα αερικά κονιάματα το νερό δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο στις αντιδράσεις οι οποίες οδηγούν στην σκλήρυνση και στην πήξη του κονιάματος. Η σκλήρυνση του αερικού κονιάματος επιτυγχάνεται με την αντίδραση του $Ca(OH)_2$ με το CO_2 της ατμόσφαιρας, προς παραγωγή $CaCO_3$.

Στα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα, η προσθήκη νερού έχει αφενός τον ίδιο ρόλο που αναφέρθηκε πιο πάνω, αλλά ο κύριος ρόλος του είναι να συμμετέχει σε χημικές αντιδράσεις με ενώσεις που περιλαμβάνονται στις πρώτες ύλες (πυριτικές, αργιλικές κ.ά.) προς σχηματισμό ενυδατωμένων ενώσεων.

Η πήξη των υδραυλικών ασβεστοκονιαμάτων οφείλεται τόσο στην ενανθράκωση του $Ca(OH)_2$ όσο και στην ενυδάτωση των ασβεστοαργιλοπυριτικών ενώσεων της υδραυλικής κονιάς. Η αντίδραση της ενανθράκωσης εξαρτάται από δύο μηχανισμούς οι οποίοι λαμβάνουν χώρα στη μάζα του κονιάματος: α) από τη διάχυση του CO_2 από τον αέρα στο πορώδες του κονιάματος και β) από την αντίδραση του διαχεόμενου CO_2 με το $Ca(OH)_2$.

Όπως είναι λογικό η ικανότητα διάχυσης του CO_2 στους πόρους του κονιάματος, εξαρτάται από την ικανότητα πλήρωσης των πόρων και κατά συνέπεια από την

ύπαρξη νερού στους πόρους, καθώς η διάχυση του CO_2 στο H_2O είναι 10000 φορές μικρότερη από ότι στον αέρα. [21] [22]

Η αντοχή ενός κονιάματος οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό στα αδρανή από τα οποία εκείνο αποτελείται. Τα αδρανή δε συμμετέχουν στις αντιδράσεις σκλήρυνσης και πήξης του κονιάματος, σε αντίθεση με τις κονίες οι οποίες αποτελούν το συνδετικό υλικό του κονιάματος.

Για την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης είναι απαραίτητο να πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια που αφορούν τις πρώτες ύλες. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποια κριτήρια τα οποία προέκυψαν από βιβλιογραφική αναζήτηση: [17] [18] [19] [20]

- Για την υδράσβεστο:
 - Χαμηλή θερμοκρασία όπτησης (έως $900\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - Έσβηση και ωρίμανση της ασβέστου για την παραγωγή κατάλληλου κολλοειδούς (λόγος νερού/ κονίας, συνθήκες και χρόνος ωρίμανσης)
 - Καθαρότητα ασβεστόλιθου σε CaCO_3 (>95%) ENV459/1
 - Ποσότητα ελεύθερου νερού <50%

- Για την υδραυλική άσβεστο:
 - Χαμηλή θερμοκρασία όπτησης (έως $950\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - Ελεύθερο Ca(OH)_2 > 8%

- Για την άμμο:
 - Υψηλή καθαρότητα
 - Απουσία διαλυτών αλάτων και ξένων προσμίξεων (<1%)
 - Επιθυμητή κατανομή κοκκομετρίας βάσει ορίων αποδοχής
 - Φυσική προέλευση

Η ανάπτυξη των τελικών αντοχών των κονιαμάτων, όπως επίσης και η σκλήρυνσή τους, είναι άμεση συνέπεια της αντίδρασης της ενανθράκωσης. Μέσω της ενανθράκωσης, το Ca(OH)_2 μετατρέπεται σε CaCO_3 , λόγω της αντίδρασης του

μεταξύ του υδροξειδίου του ασβεστίου και του αερίου διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας.

Η αντίδραση προχωράει αργά και ολοκληρώνεται όταν όλο το υδροξείδιο του ασβεστίου έχει αντιδράσει, ή όταν όλο το νερό των τριχοειδών πόρων εξατμιστεί λόγω της θερμότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια της ενανθράκωσης. Για το λόγο αυτό τα αερικά κονιάματα, αναπτύσσουν τις μέγιστες αντοχές τους με μικρότερο ρυθμό σε σύγκριση με τα υδραυλικά κονιάματα, τα οποία αναπτύσσουν αμέσως το μεγαλύτερο ποσοστό των αντοχών τους.

Η αντίδραση της ενανθράκωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Για παράδειγμα, ο ρυθμός αντίδρασης εξαρτάται σημαντικά από τη σχετική υγρασία και ως ένα βαθμό από τη θερμοκρασία. Η ποσότητα του υπάρχοντος νερού είναι επίσης σημαντική για τη διάλυση του CO₂. [23] [24]

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κατηγορίες και οι συνθέσεις των κονιαμάτων που μελετήθηκαν.

Πίνακας 1 : Κατηγορίες κονιαμάτων με τις αντίστοιχες συνθέσεις

Κατηγορία Κονιάματος	
Κονιάματα με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο	-
Κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο και νταμαρίσια άμμο	-
Κονιάματα με νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο (<5%)	-
Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο	<i>Χύτευση 1 (1m 1η Σύνθεση)</i>
	<i>Χύτευση 1' (2m 1η Σύνθεση)</i>
	<i>Χύτευση 1'' (3m - 1η Σύνθεση)</i>
	<i>Χύτευση 2 (1m - 2η Σύνθεση)</i>
	<i>Χύτευση 2' (3m - 2 σύνθεση)</i>
	<i>Χύτευση 6 (1m - Σύνθεση 3)</i>

Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο	Χύτευση 7 (1m - Σύνδεση 4)
	Χύτευση 8 (1m - Σύνδεση 6)
	Χύτευση 9 (1m - Σύνδεση 7)
	Χύτευση 10 (1m - Σύνδεση 8)
	Χύτευση 11 (1m - Σύνδεση 9)
	Χύτευση 12 (1m - Σύνδεση 10)
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο	MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)
	MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)
	Σύνδεση A4 MLN Θλίψη 1m
	Σύνδεση A12 MLN1 Θλίψη 3m
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	MLNT (a3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)
	MLNT a3mt 9 months (28_11_2012)
	MLNT a3mt 12 months (25_02_2013)
	Σύνδεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m
	Σύνδεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)
	Σύνδεση MLNT A3mt-Θλίψη 1m (04-07-2011)
Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο	A19_c12m
	Σύνδεση A9 MLP1 Θλίψη 3m
	Σύνδεση A19 MLP1 Θλίψη 1m
Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο	a21-c12m
	Σύνδεση A21 MLX1 Θλίψη 1m
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία	A18_c12m
	Σύνδεση A5 YXT2 Θλίψη 1m
	Σύνδεση A17 YXT1 Θλίψη 1m
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	Σύνδεση A1 YNT1 Θλίψη 1m
	Σύνδεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m
	Σύνδεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m
	Σύνδεση A3 YNT1 Θλίψη 1m
	Σύνδεση A20 YNT2 Θλίψη 1m
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία	Σύνδεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m
Κονιάματα με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο	Σύνδεση A6 CemN Θλίψη 1m
	Σύνδεση A7 CemN Θλίψη 1m
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικα	Σύνδεση A8-Si YPSi1 ΘΛΙΨΗ
	Σύνδεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m

Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των μηχανικών αντοχών κονιαμάτων αποκατάστασης, αποτελούμενα από διάφορες συνθέσεις, τα οποία παρασκευάστηκαν στο Πολυτεχνείο Κρήτης, στο Εργαστήριο Υλικών Πολιτιστικής Κληρονομιάς & Σύγχρονης Δόμησης, από την ερευνητική ομάδα της Αναπληρώτριας Καθηγήτριας, κυρίας Παγώνας Μαραβελάκη.

3.1 Κονιάματα με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο

Η φυσική υδραυλική άσβεστος προέρχεται από έψηση ειδικών μαργαϊκών ασβεστόλιθων που περιέχουν 5-20% άργιλο. Η έψηση γίνεται σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές του τσιμέντου, γύρω στους 1000°C. Η άσβεστος αυτή έχει υδραυλικές ιδιότητες που οφείλονται στις ενώσεις του ασβεστίου με το πυρίτιο, το αργίλιο και τον σίδηρο που αποτελούν τους υδραυλικούς παράγοντες της κονίας. Μειονεκτεί όμως σημαντικά λόγω του μεγάλου ποσοστού του ελεύθερου CaO που περισεύει. Για τον λόγο αυτόν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια στα διάφορα κονιάματα, αλλά απαιτεί ποζολάνες ώστε να δεσμευτεί το ελεύθερο CaO με το ενεργό SiO₂ που αυτές έχουν. [16]

Ο καολίνης είναι άργιλος ο οποίος έχει σχηματιστεί από υδροθερμικές κυρίως μεταβολές σε αστριούχα πετρώματα (γρανίτες, τραχείτες κ.α) και περιέχει λόγω του σχηματισμού του τις λιγότερες προσμίξεις από όλους τους αργίλους. Η ανάμιξη του καολίνη με άσβεστο και νερό δημιουργεί νέα σύνθετα ένυδρα άλατα. Ο μετακαολίνης προέρχεται από θερμική επεξεργασία καολίνη και παρουσιάζει έντονες ποζολανικές ιδιότητες ενώ με ανάμιξη σε κονιάματα δίνει μεγάλες φυσικομηχανικές αντοχές, μεγάλη ανθεκτικότητα και επιτρέπει την σκλήρυνση του κονιάματος εντός του νερού. [13][47]

Η νταμαρίσια άμμος είναι ένα υλικό το οποίο προκύπτει από τα απόβλητα των λατομείων και θεωρούνταν ένα άχρηστο υλικό, ύστερα από την εξόρυξη και την επεξεργασία των πετρωμάτων.

Άρχισε όμως σιγά σιγά να χρησιμοποιείται στις συνθέσεις των ιστορικών κονιαμάτων με σκοπό αφενός τη μείωση της ζήτησης της φυσικής άμμου και αφετέρου τη μείωση των αποβλήτων των λατομείων.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα φυσικά δεν θα ήταν χρήσιμα εάν δεν υπήρχε και η απαιτούμενη συμβατότητα του υλικού με τα ιστορικά κονιάματα. Μελέτες που έγιναν από τους Sahu A.K., Sunil Kumar και Sachan A.K, τόσο σε σκυρόδεμα όσο και σε κονίαμα αναφέρουν σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής, του συντελεστή θραύσης καθώς και της αντοχής σε εφελκυσμό, όταν το 40% της φυσικής άμμου αντικαταστάθηκε από νταμαρίσια άμμο. [43]

Για τη μελέτη των κονιαμάτων παρασκευάστηκαν σε κατάλληλες πρότυπες μήτρες πέντε δοκίμια από κονίαμα της παραπάνω σύνθεσης, διαστάσεων 50x50x50 mm, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης. Οι μηχανικές τους ιδιότητες περιγράφονται στα παρακάτω διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης.

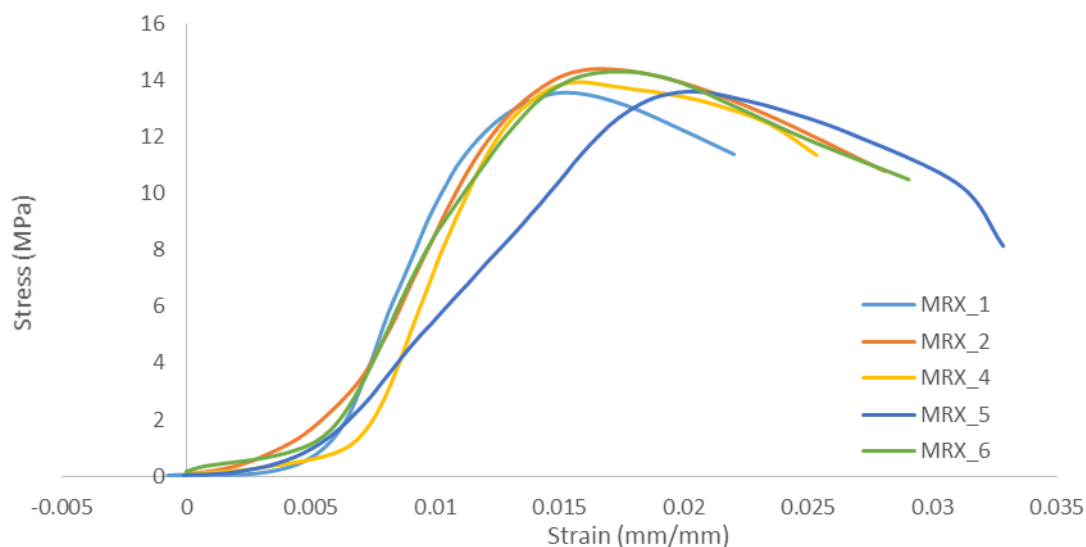
Σε κάθε διάγραμμα, αντιστοιχεί και ένας πίνακας στον οποίο καταγράφονται οι τιμές των ακόλουθων αντοχών καθώς και ο μέσος όρος αυτών: Μέγιστη Τάση (Maximum Strength), Τάση Θραύσης (Strength Limit), Μέτρο Ελαστικότητας (Elasticity Modulus) και τέλος η Δυσθραυστότητα (Toughness). Η τιμή R^2 , δείχνει πόσο αντιπροσωπευτική είναι η καμπύλη της γραμμής τάσης (trendline) συγκριτικά με την καμπύλη του διαγράμματος, Όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα η τιμή R^2 , τόσο πιο αντιπροσωπευτική είναι η γραμμή τάσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, η τιμή της μέγιστης αντοχής είναι αρκετά υψηλή και οφείλεται τόσο στις ιδιότητες του μετακαολίνη όσο και στις ιδιότητες της φυσικής υδραυλικής ασβέστου.

Η νταμαρίσια άμμος επίσης προσδίδει υψηλή θλιπτική αντοχή.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά της φυσικής υδραυλικής ασβέστου είναι η υψηλή αντοχή, ο υψηλός δείκτης ελαστικότητας καθώς και ο υψηλός δείκτης συνοχής, κάνοντας το μίγμα πιο ομοιογενές.

Στην Εικόνα 1 που ακολουθεί, φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές δυσθραυστότητας για διάφορες κατηγορίες υλικών.

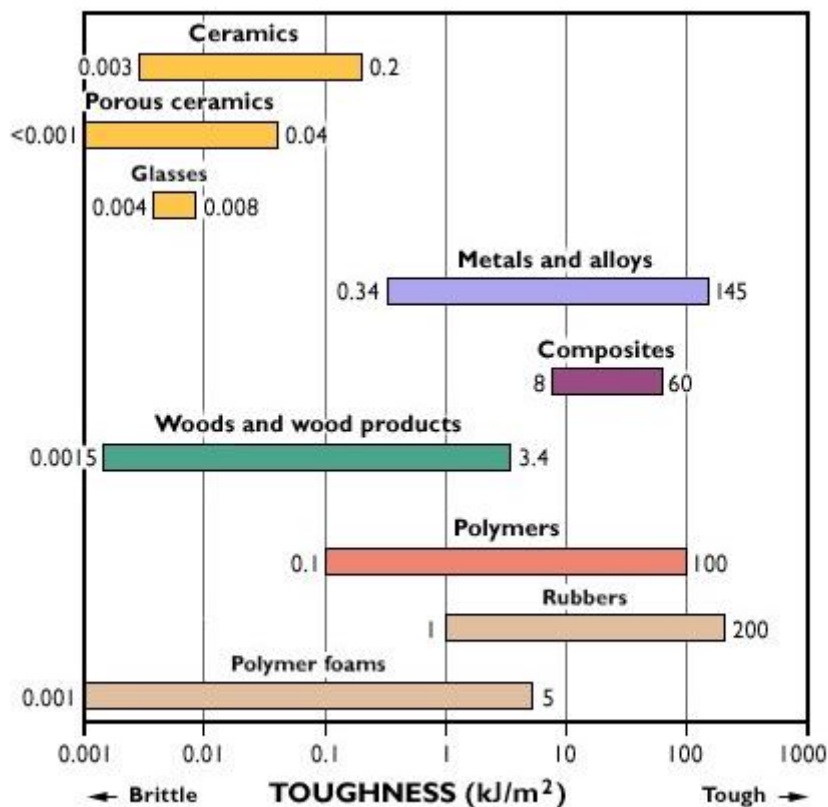


Σχήμα 1: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο

Πίνακας 2: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο

Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
Uniaxial_MRX_0001	13.554	11.384	2.463	2.708	R ² = 0.9979
Uniaxial_MRX_0002	14.394	10.788	1.853	3.345	R ² = 0.999
Uniaxial_MRX_0004	13.935	11.352	2.364	6.229	R ² = 0.9965
Uniaxial_MRX_0005	13.600	8.138	1.102	3.788	R ² = 0.9986
Uniaxial_MRX_0006	14.306	10.492	1.721	3.576	R ² = 0.998
Average	14.667	11.081	2.359		

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1, το υψηλό μέτρο ελαστικότητας οδηγεί και σε υψηλή τιμή δυσθραυστότητας για τα πέντε δοκίμια κονιάματος, σύμφωνα με την Εικόνα 1 που ακολουθεί. Όσο πιο εύθραυστο είναι ένα υλικό, τόσο μικρότερη είναι και η δυσθραυστότητά του. Στην κατηγορία των κονιαμάτων με μετακαολίνη (Σχήμα 1), παρατηρείται έντονη πλαστική συμπεριφορά, λόγω των ιδιοτήτων του μετακαολίνη που αναλύονται σε επόμενη παράγραφο. Έτσι, παρόλο που μιλάμε για κεραμικό υλικό, η δυσθραυστότητα σε αυτή την κατηγορία κονιαμάτων είναι εμφανώς αυξημένη, συγκριτικά με επόμενες κατηγορίες (π.χ. Σχήμα2, Πίνακας 3).

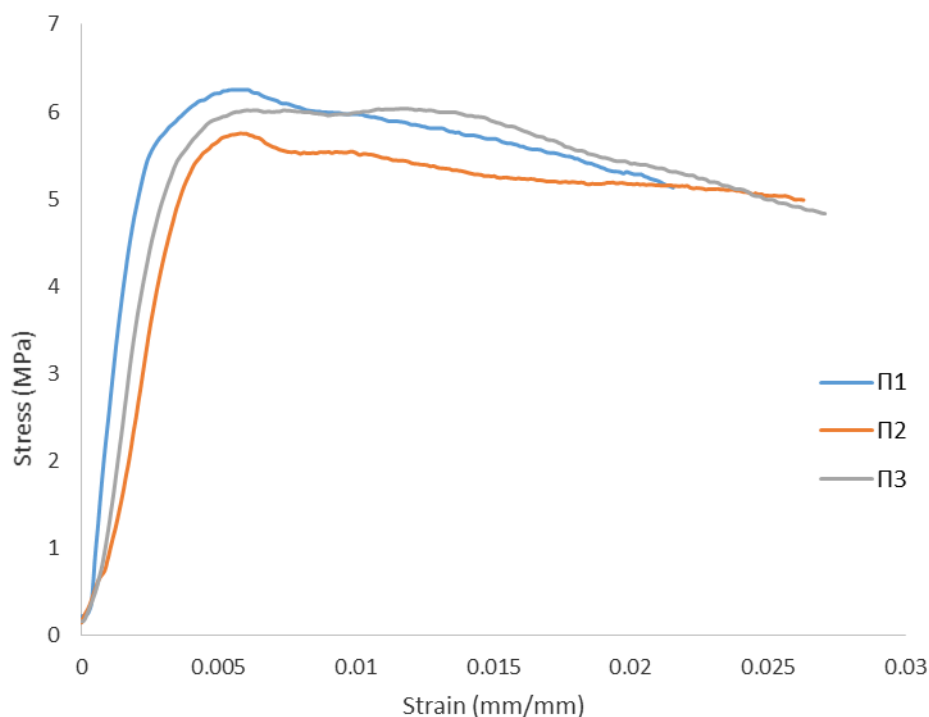


Εικόνα 1: Όρια δυσθραυστότητας ανά κατηγορία υλικού

Η τιμή της τάσης θραύσης βρίσκεται επίσης σε υψηλά επίπεδα.

3.2 Κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο και νταμαρίσια άμμο

Στην ενότητα 3.1 παρήχθησαν δοκίμια κονιάματος που περιέχουν στη σύστασή τους φυσική υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και μετακαολίνη. Για τις ανάγκες μιας ακόμη διερεύνησης παρήχθησαν τρία επιπλέον δοκίμια κονιάματος ίδιων διαστάσεων (50x50x50 mm) με τα παραπάνω, από τα οποία όμως απουσιάζει ο μετακαολίνης ως ποζολανικό πρόσμικτο.



Σχήμα 2: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο

Πίνακας 3: Στοιχεία δοκιμών με νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο

Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
Π1	6.253	5.131	2.900	0.00149	0.994
Π2	5.753	4.990	1.821	0.00004	0.974
Π3	6.034	4.834	2.053	0.00139	0.984
Average	6.013	4.985	2.258		

Τα αποτελέσματα από τα διαγράμματα των τριών δοκιμών, ύστερα από τη δοκιμή θλίψης παρουσιάζουν πτώση της μέγιστης αντοχής απουσία μετακαολίνη, και μάλιστα περισσότερο από 50%.

Το μέτρο ελαστικότητας, το οποίο εκφράζει τη συμπεριφορά του κονιάματος στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων, εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένο απουσία μετακαολίνη. Άμεση συνέπεια της χαμηλότερης μέγιστης αντοχής είναι και η χαμηλότερη τάση θραύσης σε αυτή την κατηγορία δοκιμών.

3.3 Κονιάματα με νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μολύβδο (<5%)

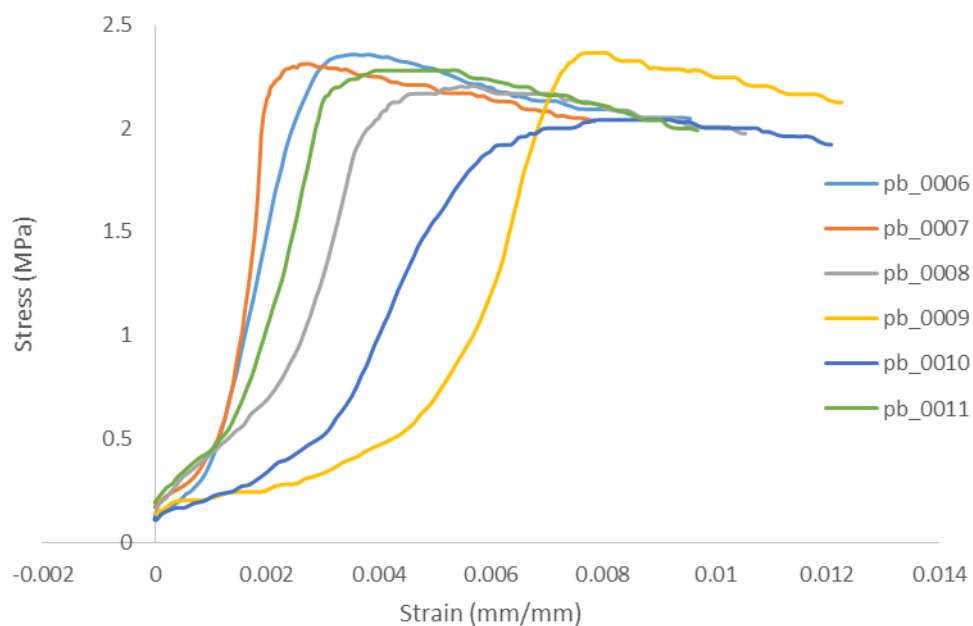
Ο μολύβδος είναι ένα εξαιρετικά πλαστικό υλικό και για αυτό μπορεί να απορροφήσει αποτελεσματικά τις τάσεις που αναπτύσσονται σε μια μνημειακή κατασκευή.

Η πυριτική άμμος επιλέγεται αρκετά συχνά στη σύνθεση κονιαμάτων για αποκατάσταση μνημειακών κατασκευών, καθώς η πολύ μικρή περιεκτικότητάς της σε υπολείμματα αργίλου την καθιστά κατάλληλη λόγω καλής πρόσφυσης με τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής.

Έξι δοκίμια της παραπάνω σύστασης, διαστάσεων 50x50x50 mm, παρήχθησαν και υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης. Τα κονιάματα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές μέγιστης αντοχής. Το μέτρο ελαστικότητας στα κονιάματα αυτά είναι μικρό σε σχέση με άλλες κατηγορίες κονιαμάτων που συναντήσαμε πιο πάνω.

Η χαμηλή τιμή που προκύπτει από το μέσο όρο των τιμών της δυσθραυστότητας για τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας, δηλώνει την ύπαρξη πόρων στο κονίαμα. Η μη συνεκτική δομή του κονιάματος έχει ως αποτέλεσμα τη μη απορρόφηση μεγάλου ποσού ενέργειας. Επίσης, λόγω της ύπαρξης ανθρακικού μολύβδου, το κονίαμα είναι πιο πλαστικό σε σύγκριση με τις προηγούμενες κατηγορίες.

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι κάθε κατηγορία κονιάματος, έχει παραχθεί για να εφαρμοστεί σε διαφορετική μνημειακή κατασκευή. Η μελέτη σύνθεσης του κονιάματος, γίνεται λαμβάνοντας πάντα υπόψη και τα υπόλοιπα στοιχεία της τοιχοποιίας. Για παράδειγμα, η σύνθεση που συναντήσαμε στην ενότητα 3.1, όπου η μέγιστη αντοχή ξεπερνά τα 14MPa, θα ήταν απολύτως ακατάλληλη να χρησιμοποιηθεί στην μνημειακή κατασκευή για την οποία παρασκευάστηκε το κονίαμα της ενότητας 3.3, με μέγιστη θλιπτική αντοχή 2.259 MPa.



Σχήμα 3: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο (<5%)

Πίνακας 4: Στοιχεία δοκιμών με δοκιμών νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο (<5%)

Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
pb_0006	2.356	2.047	1.06	0.00050	0.9949
pb_0007	2.311	2.032	1.471	0.00001	0.9523
pb_0008	2.204	1.974	0.916	0.00018	0.9855
pb_0009	2.364	2.124	0.875	0.00005	0.9816
pb_0010	2.041	1.921	0.646	0.00007	0.9965
pb_0011	2.279	1.989	0.836	0.00005	0.9831
Average	2.259	2.014	0.967		

3.4 Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο

Η υδράσβεστος παράγεται είτε σε σκόνη είτε σε ασβεστοπολτό. Προκύπτει με ελεγχόμενη προσθήκη νερού στο οξείδιο του ασβεστίου. Βιομηχανικά παρασκευάζεται σε διατάξεις διακοπτόμενης ή συνεχούς λειτουργίας, αφού προηγουμένως η άσβεστος θρυμματισθεί σε κομμάτια μικρότερα από 2cm. Επειδή όμως η αντίδραση είναι εξώθερμη και γίνεται με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας, ένα μέρος του νερού εξατμίζεται. Γι' αυτό στην βιομηχανική πράξη η σβέση γίνεται με νερό σε αναλογία 60-65%, οπότε προκύπτει η σκόνη. Μετά την παραγωγή της πρέπει πρώτα να υποβληθεί σε καθαρισμό με τον οποίον απομακρύνονται οι άσβεστοι, άψητοι και υπερψημένοι κόκκοι και στην συνέχεια να κονιοποιηθεί λεπτά και να σακκευθεί. Σε περισσότερο σύγχρονες εγκαταστάσεις, η κατεργασία γίνεται με την χρησιμοποίηση αυξημένης πίεσης οπότε η ενυδάτωση είναι συντομότερη και πληρέστερη.

Η σκόνη έχει χρώμα υπόλευκο έως λευκό και προσβάλλεται πολύ λίγο από το CO₂ της ατμόσφαιρας. Αυτό συμβαίνει καθόσον δεν υπάρχει ελεύθερο νερό για να αρχίσουν οι αντιδράσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο του μηχανισμού της ενανθράκωσης. Σε αντίθεση με τον πολτό όπου η παρουσία MgO αποτελεί δυσμενή παράγοντα για την ταχύτητα φύρασης, στην σκόνη η ύπαρξη MgO συντελεί στην αύξηση της, μικρότερης σε σχέση με τον πολτό, πλαστικότητας, λόγω της ικανότητας του MgO να συγκρατεί περισσότερο νερό.

Σε σχέση με τον ασβεστοπολτό που περιγράφεται στην συνέχεια, η σκόνη πλεονεκτεί στο ότι δεν χρειάζεται φύραση και στο γεγονός ότι αποθηκεύεται και μεταφέρεται ευκολότερα και ασφαλέστερα από ότι ο πολτός, ενώ παράλληλα δεν απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για να προστατευθεί από την προσβολή με το CO₂. Ο προσδιορισμός των αναλογιών των κονιαμάτων είναι πιο εύκολος όπως και η πρόσμιξη των συστατικών των κονιαμάτων είναι ταχύτερη και πληρέστερη. Τα κονιάματα με σκόνη τέλος εμφανίζουν μικρότερη συστολή κατά την πήξη.

Ο πολτός αντίθετα πλεονεκτεί στο ότι έχει μεγαλύτερη ικανότητα παραλαβής άμμου στα κονιάματα τα οποία, όταν κατασκευάζονται με πολτό, είναι πιο πλαστικά. Τα επιχρίσματα με πολτό έχουν μεγαλύτερη αντοχή, πρόσφυση και συνοχή. Παράλληλα ο πολτός έχει μεγαλύτερη απόδοση κατά την σβέση του. Στην υδράσβεστο τέλος υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθούν άσβεστοι, άψητοι

και υπερψημένοι κόκκοι οι οποίοι προφανώς θα έχουν δυσμενή επίπτωση στην ανθεκτικότητα των κονιαμάτων.

Ο ασβεστοπολτός είναι σβησμένη άσβεστος αναμεμειγμένη με νερό προς μία επιθυμητή συνεκτικότητα, που συνίσταται κυρίως από υδροξείδιο του ασβεστίου με ή χωρίς υδροξείδιο του μαγνησίου. Προκύπτει από το σβήσιμο των άσβηστων ασβέστων με ελεγχόμενη περίσσεια νερού ή μετά την ανάμειξη υδρασβέστου με νερό. Στην Ελλάδα, σε αντίθεση με τις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες και τις ΗΠΑ, ο ασβέστης χρησιμοποιείται με την μορφή του πολτού. Ο πολτός αποτελεί μείγμα κολλοειδούς και κρυσταλλικής μορφής του υδροξειδίου του ασβεστίου. Δεδομένου ότι πλαστικές ιδιότητες έχει μόνο η κολλοειδής μορφή, επιβάλλεται όπως το σβήσιμο (η προσθήκη του νερού δηλαδή) γίνεται με συνθήκες που ευνοούν την δημιουργία της μορφής αυτής (κολλοειδούς), η οποία έχει μεγάλο όγκο, μεγάλη πλαστικότητα και την ικανότητα να παραλάβει μεγάλη ποσότητα άμμου κατά την παρασκευή των ασβεστοκονιαμάτων.

Η ποιότητα επομένως του πολτού εξαρτάται, εκτός από την ποιότητα της ασβέστου και από τις συνθήκες σβέσης. Δεδομένου ότι το κολλοειδές υδροξείδιο του ασβεστίου σχηματίζεται με πολύ ταχύτερο ρυθμό από ότι το κρυσταλλικό, επιδιώκεται η ταχύτερη δυνατή σβέση της ασβέστου, γεγονός που επιτυγχάνεται με συνεχή ανάδευση. Το νερό της σβέσης πρέπει να είναι μαλακό και καθαρό. Το θαλασσινό νερό είναι ακατάλληλο γιατί προκαλεί εξανθήματα στις κατασκευές. Επιπλέον κατά την σβέση θα πρέπει το νερό να καλύπτει τελείως την υδράσβεστο και όπως προηγουμένως αναφέρθηκε, για την παραγωγή πολτού η ποσότητά του είναι έως και πενταπλάσια της θεωρητικώς απαιτούμενης. Η ακριβής ποσότητα αποτελεί τον βασικό παράγοντα για την επιτυχή δημιουργία πολτού. Εάν υπολείπεται, υπάρχει κίνδυνος τεμάχια της ασβέστου να μένουν ακάλυπτα και να υπερθερμανθούν, οπότε δεν σβήνονται αλλά μετατρέπονται σε σβώλους και τρίμματα αδρανούς υδρασβέστου. Εάν πλεονάζει αυτής που κανονικά απαιτείται, με την απευθείας μάλιστα προσθήκη νερού, τότε επιβραδύνεται η αντίδραση σβέσης λόγω ψύξης του συστήματος και παράγεται προϊόν κρυσταλλικού μάλλον χαρακτήρα (κοκκώδης υδράσβεστος).

Όταν ο πολτός προέρχεται από την σβέση καλής ποιότητας ασβέστου και έχουν τηρηθεί οι κανόνες της σβέσης, τότε προκύπτει η λεγόμενη παχιά υδράσβεστος.

Αυτή έχει λιπαρή υφή, μεγάλη πλαστικότητα και ικανότητα παραλαβής και συγκράτησης μεγάλης ποσότητας άμμου. Αντιθέτως υπάρχει η ισχνή υδράσβεστος που είναι αυτή με μεγάλο ποσοστό προσμίξεων ή η προερχόμενη από αντικανονικό ψήσιμο και σβήσιμο. Η ισχνή υδράσβεστος έχει τις ιδιότητες της παχιάς σε σημαντικά μικρότερο βαθμό. [16]

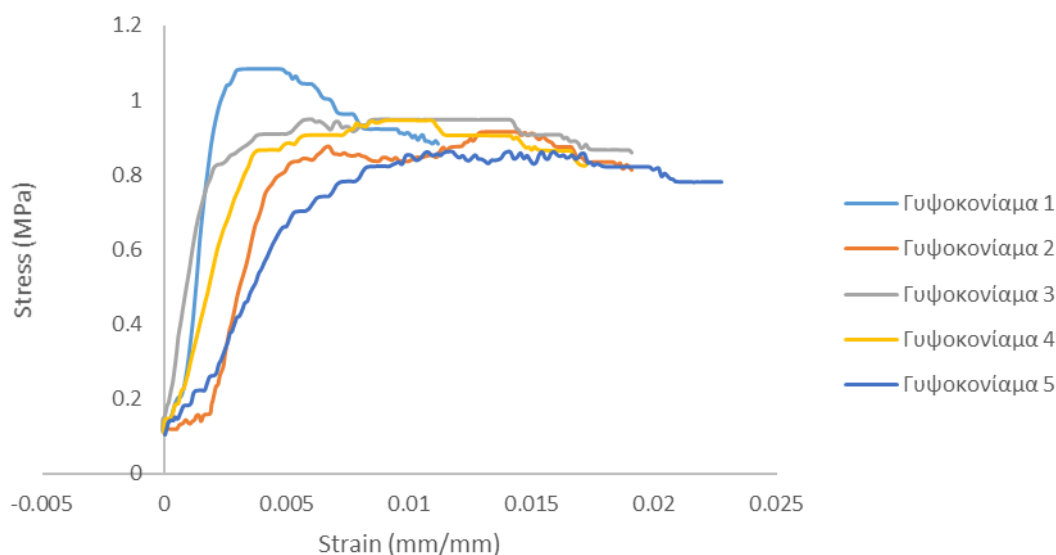
Η γύψος αποτελούσε πάντα μια επιλογή για τα κονιάματα αποκατάστασης από το παρελθόν έως σήμερα. Βασικό μειονέκτημα του υλικού αυτού είναι η χαμηλή μηχανική αντοχή. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα κονιάματα που έχουν ως κύριο συστατικό τους τη γύψο, εμφανίζουν πολύ μικρότερη αντοχή από τα κονιάματα των παραπάνω κατηγοριών.

Όλα τα δοκίμια που αναφέρονται σε αυτή την παράγραφο, υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης και οι διαστάσεις τους ήταν 50x50x50mm.

Έγιναν διάφορες χυτεύσεις κονιαμάτων για την ορθή επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Παρατηρώντας το Σχήμα 4 θα μπορούσε κανείς να πει πως η μέγιστη τιμή της αντοχής είναι πολύ κοντά με την τάση θραύσης. Αυτό σημαίνει πως τα γυψοκονιάματα από τη στιγμή που φτάνουν τη μέγιστη αντοχή τους, δεν έχουν πολλά περιθώρια απορρόφησης ενέργειας. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις έγιναν 1 μήνα μετά την παρασκευή των κονιαμάτων.

Αυτό που φαίνεται να είναι διαφορετικό από τα διαγράμματα Stress-Strain, άλλων κατηγοριών κονιαμάτων, είναι η κυματιστή μορφή που παίρνει η καμπύλη, λίγο πριν την επίτευξη της μέγιστης τάσης αλλά κυρίως μετά από αυτή και ως την τάση θραύσης. Εάν παρατηρήσει κανείς στο μικροσκόπιο την μικροδομή της γύψου, θα εντοπίσει πολλούς βελονοειδείς κρυστάλλους. Από το σημείο που εμφανίζεται το όριο διαρροής και σχεδόν σε ολόκληρη την περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς το κονίαμα αστοχεί σταδιακά, δημιουργεί πολλές μικρορωγμές σε ολόκληρη τη μάζα του, λόγω της βελονοειδούς μορφής των κρυστάλλων στη μικροδομή του. Οι κρύσταλλοι αποτελούν την αιτία έναρξης ρωγμών. Για το λόγο αυτό εμφανίζεται η κυματιστή μορφή στην πλαστική περιοχή στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης. Λόγω της πολύ γρήγορης συνένωσης των μικρορωγμών, τα κονιάματα που έχουν ως βάση τους τη γύψο δεν προλαβαίνουν να απορροφήσουν το φορτίο και αστοχούν πολύ νωρίς σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κατηγορίες κονιαμάτων.

Τα γυψοκονιάματα χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές με τη μορφή επιχρισμάτων στο εσωτερικό των μνημειακών κατασκευών, όπου δεν επηρεάζονται άμεσα από τις συνθήκες υγρασίας. Επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν όμως και σε εξωτερικές επιφάνειες, κάτω από καμάρες ή προστεγάσματα. Με κατάλληλη επεξεργασία από τον τεχνικό, είναι κατάλληλα για τη δημιουργία απολύτως λείων επιφανειών.

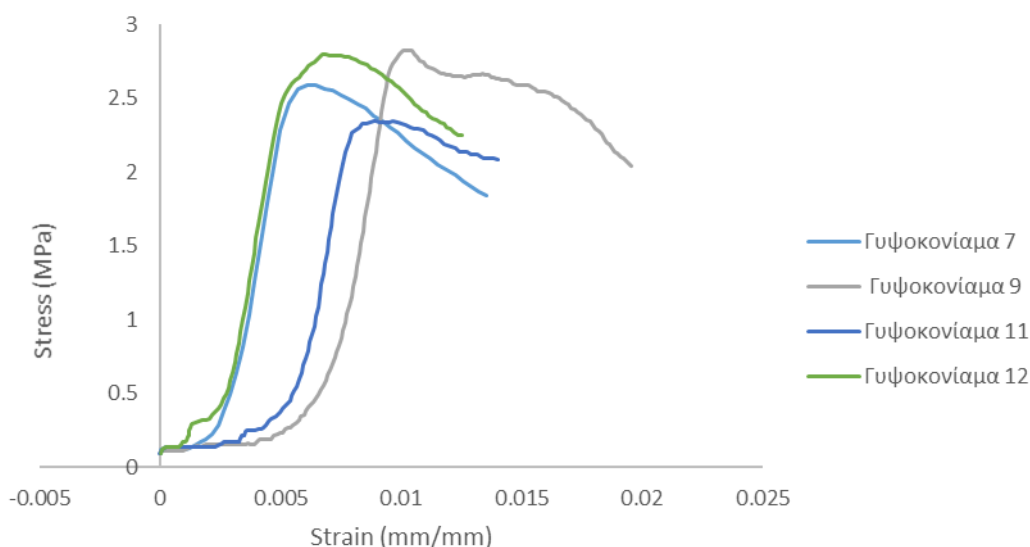


Σχήμα 4: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 1, 1m 1η Σύμβαση)

Πίνακας 5: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 1, 1m 1η Σύμβαση)

Χύτευση 1 (1m 1η Σύμβαση)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	Γυψοκονιάμα 1	1.084	0.883	0.678	0.00002	0.978
	Γυψοκονιάμα 2	0.915	0.813	0.284	0.00038	0.992
	Γυψοκονιάμα 3	0.951	0.861	0.412	0.00023	0.995
	Γυψοκονιάμα 4	0.946	0.834	0.268	0.00020	0.991
	Γυψοκονιάμα 5	0.861	0.780	0.139	0.00007	0.997
	Γυψοκονιάμα 6	0.647	0.647	0.313	0.00009	0.983
	Average	0.901	0.803	0.349		

Με το πέρασ δύο μηνών από την ημερομηνία παρασκευής των κονιαμάτων εφαρμόστηκε εκ νέου δοκιμή θλίψης σε δοκίμια ίδιας σύνθεσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τόσο η μέγιστη αντοχή όσο και η τάση θραύσης αυξάνονται σημαντικά, δίνοντας σχεδόν διπλάσιες τιμές, ενώ το μέτρο ελαστικότητας δεν αλλάζει σημαντικά. Η δυσθραυστότητα είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο επίσης δεν αλλάζει σημαντικά στις μετρήσεις που έγιναν μετά από δύο μήνες.



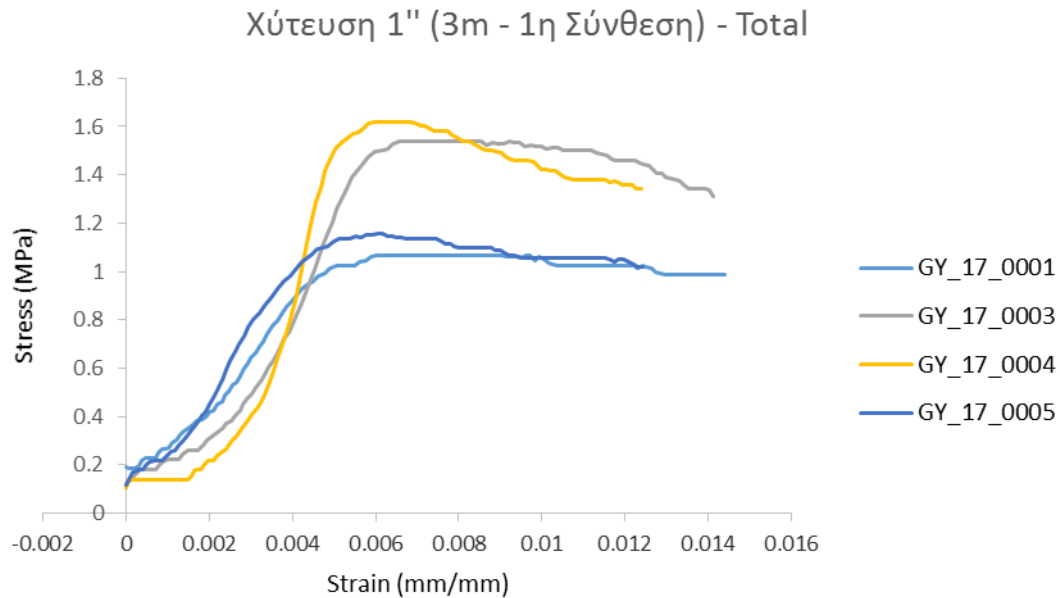
Σχήμα 5: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 1', 2m 1η Σύνθεση)

Πίνακας 6: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 1', 2m 1η Σύνθεση)

Χύτευση 1' (2m 1η Σύνθεση)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	Γυψοκονίαμα 7	2.593	1.844	0.979	0.00044	0.986
	Γυψοκονίαμα 8	1.832	1.679	0.287	0.00017	0.998
	Γυψοκονίαμα 9	2.827	2.045	0.942	0.00012	0.975
	Γυψοκονίαμα 11	2.350	2.086	0.868	0.00005	0.981
	Γυψοκονίαμα 12	2.800	2.252	1.018	0.00002	0.992
	Average	2.481	1.981	0.819		

Για την ίδια σύνθεση, μελετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο τα γυψοκονιάματα τρεις μήνες μετά την ημερομηνία παρασκευής τους. Από το Σχήμα 6 παρατηρούμε ότι οι

τιμές των αντοχών είναι μεγαλύτερες από τις τιμές αντοχών ένα μήνα μετά την παραγωγή τους. Από τις δοκιμές θλίψης που έγιναν στους δύο μήνες, παρατηρούμε σημαντική διαφορά στις τιμές των αντοχών.



Σχήμα 6: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 1", 3m - 1η Σύνθεση)

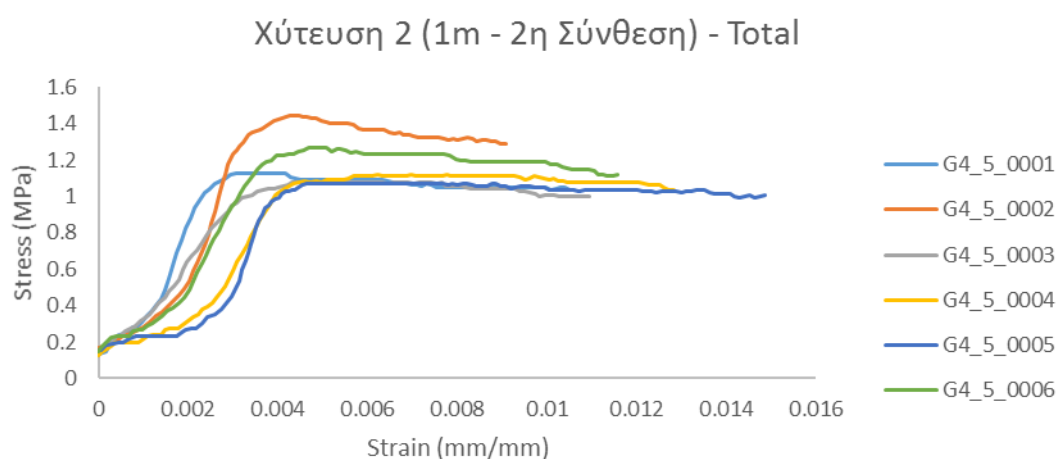
Πίνακας 7: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 1", 3m - 1η Σύνθεση)

Χύτευση 1" (3m - 1η Σύνθεση)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	GY_17_0001	1.067	0.985	0.261	0.00001	0.997
	GY_17_0002	1.086	0.995	0.004	0.00077	0.995
	GY_17_0003	1.541	1.311	0.436	0.00001	0.993
	GY_17_0004	1.619	1.340	0.733	0.00020	0.989
	GY_17_0005	1.156	1.018	0.349	0.00001	0.998
	Average	1.294	1.130	0.357		

Στα Σχήματα 7 και 8 έγιναν αντίστοιχες μετρήσεις σε κονιάματα νέας σύνθεσης, σε ένα μήνα και σε τρεις μήνες από την ημερομηνίας παραγωγής των κονιαμάτων. Οι διαστάσεις των κονιαμάτων παραμένουν οι ίδιες.

Όπως και στην πρώτη σύνθεση, έτσι και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές αντοχών αυξάνονται τον 3^ο μήνα συγκριτικά με τα αποτελέσματα από τη δοκιμή θλίψης που έγιναν 1 μήνα μετά την σύνθεση του κονιάματος.

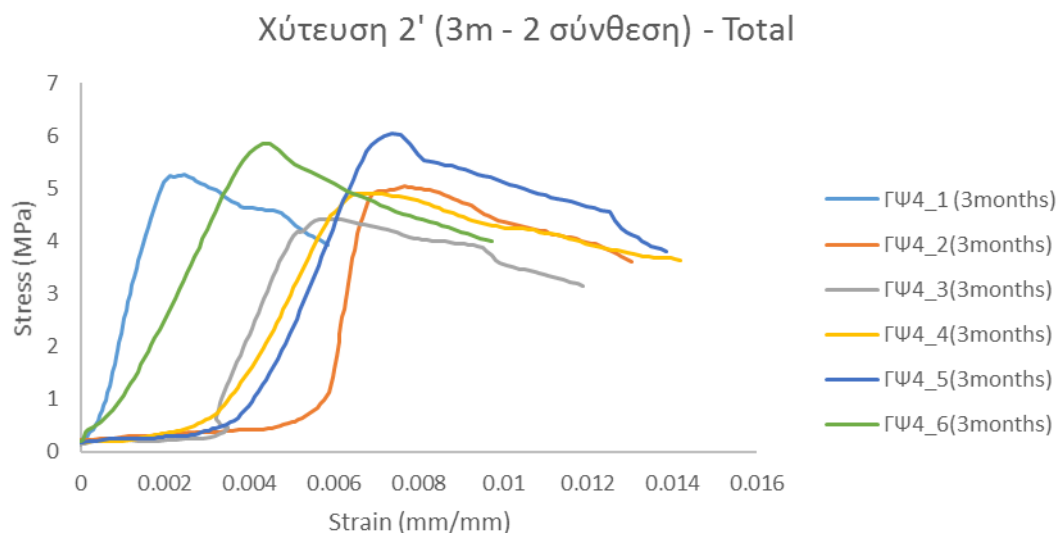
Από τους Πίνακες 8 και 9 , όπως και από τα Σχήματα 7 και 8, παρατηρούμε ότι οι παραμορφώσεις είναι αντίστοιχες με τις παραμορφώσεις της πρώτης σύνθεσης. Οι τιμές των αντοχών της 2^{ης} σύνθεσης όμως είναι σχεδόν 4πλάσιες. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή του ποσοστού των συστατικών του κονιάματος.



Σχήμα 7: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράβεστο (Χύτευση 2, 1m - 2η Σύνθεση)

Πίνακας 8: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράβεστο (Χύτευση 2, 1m - 2η Σύνθεση)

Χύτευση 2 (1m - 2η Σύνθεση)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	G4_5_0001	1.129	1.036	0.726	0.00015	0.984
	G4_5_0002	1.443	1.291	0.794	0.00004	0.983
	G4_5_0003	1.079	0.998	0.350	0.00021	0.997
	G4_5_0004	1.116	1.035	0.451	0.00007	0.985
	G4_5_0005	1.073	1.006	0.778	0.00005	0.965
	G4_5_0006	1.269	1.117	0.492	0.00033	0.991
	Average	1.185	1.080	0.599		

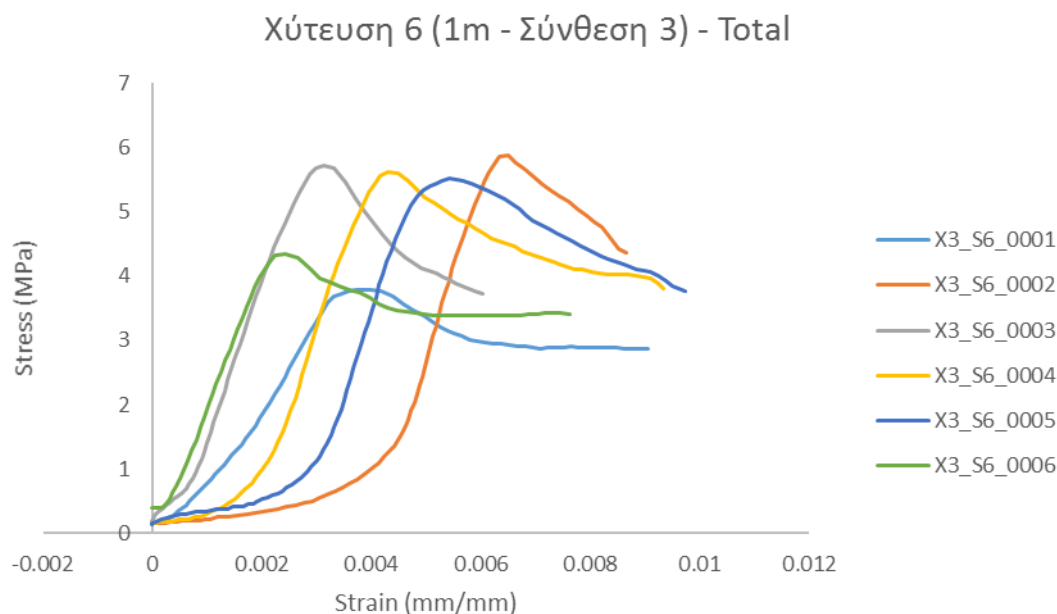


Σχήμα 8: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 2', 3m - 2 σύνθεση)

Πίνακας 9: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 2', 3m - 2 σύνθεση)

Χύτευση 2' (3m - 2 σύνθεση)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	ΓΨ4_1(3months)	5.258	3.929	3.589	0.00060	0.998
	ΓΨ4_2(3months)	5.040	3.620	4.866	0.00037	0.915
	ΓΨ4_3(3months)	4.423	3.154	1.821	0.00146	0.964
	ΓΨ4_4(3months)	4.901	3.640	1.541	0.00042	0.987
	ΓΨ4_5(3months)	3.815	3.815	1.904	0.00013	0.987
	ΓΨ4_6(3months)	5.860	4.000	1.676	0.00002	0.996
	Average	4.883	3.693	2.566		

Στο Σχήμα 9, παρουσιάζεται μία 3^η σύνθεση, όπου τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης ένα μήνα μετά τη χύτευσή τους. Οι τιμές αντοχών είναι πολύ υψηλότερες από ότι στις δύο προηγούμενες συνθέσεις. Οι τιμές των παραμορφώσεων συμπεραίνουμε ότι είναι παρόμοιες και στις 3 συνθέσεις. Αυτό σημαίνει ότι τα γυψοκονιάματα, από τη στιγμή που θα ξεπεράσουν τη μέγιστη τάση θραύσης, δεν παραμορφώνονται περεταίρω, ανεξαρτήτως τιμής μέγιστης τάσης. Οι υψηλότερες τιμές αντοχών οφείλονται και εδώ στην αλλαγή του ποσοστού των επί μέρους συστατικών.



Σχήμα 9: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 6, 1m - Σύνθεση 3)

Πίνακας 10: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο (Χύτευση 6, 1m - Σύνθεση 3)

Χύτευση 6 (1m - Σύνθεση 3)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	X3_S6_0001	3.794	2.866	1.227	0.00001	0.991
	X3_S6_0002	5.885	4.357	3.171	0.00017	0.991
	X3_S6_0003	5.728	3.725	2.520	0.00028	0.999
	X3_S6_0004	5.622	3.797	2.766	0.00002	0.988
	X3_S6_0005	5.511	3.773	2.811	0.00053	0.990
	X3_S6_0006	4.351	3.402	2.388	0.00043	0.996
	Average	5.148	3.653	2.481		

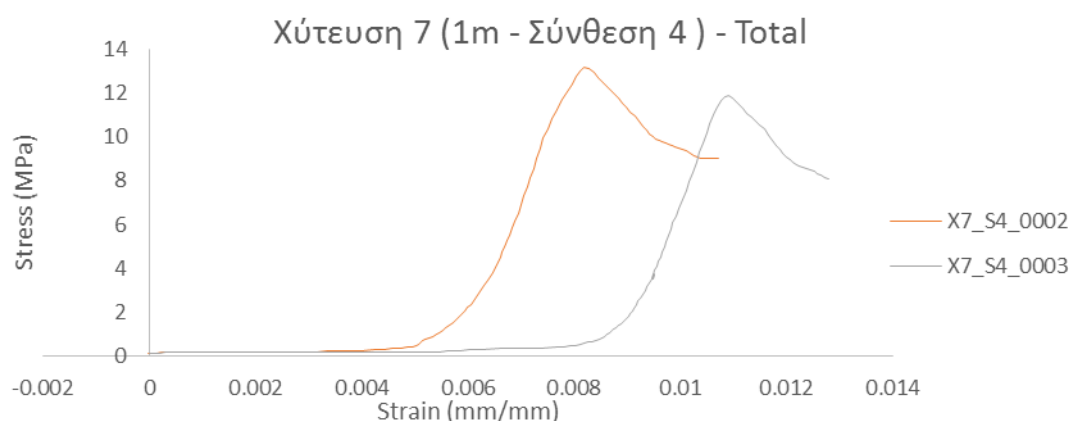
3.5 Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο

Στα Σχήματα αυτής της ενότητας έχει αντικατασταθεί η υδράσβεστος με υδραυλική άσβεστο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εντυπωσιακά. Οι τιμές των μέγιστων αντοχών και των αντοχών θραύσης εκτοξεύονται. Εύκολα συμπεραίνει

κανείς ότι η υδραυλική άσβεστος είναι αυτή που επιτρέπει την ανάπτυξη των υψηλών αντοχών, λόγω των ιδιοτήτων της όπως αυτές αναφέρονται στην ενότητα 3.1.

Στη συνέχεια ακολουθούν έξι διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές θλίψης αυτών των δοκιμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 10 έως 15. Οι δοκιμές θλίψης έγιναν ένα μήνα μετά τη χύτευση του κονιάματος. Διαφορετικά ποσοστά συστατικών έχουν και πάλι σαν αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές αντοχών.

Παρατηρούμε σε κάποιες περιπτώσεις μια διακύμανση στις τιμές των αντοχών των δοκιμών που παρήχθησαν υπό την ίδια σύνθεση και στην ίδια χύτευση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ανάμιξη του κονιάματος, στον τρόπο με τον οποίο έγινε η χύτευση στις μήτρες, στις συνθήκες παραμονής των δοκιμών στο εργαστήριο ή ακόμη και στη θέση του δοκιμίου στην πρέσα της θλίψης.



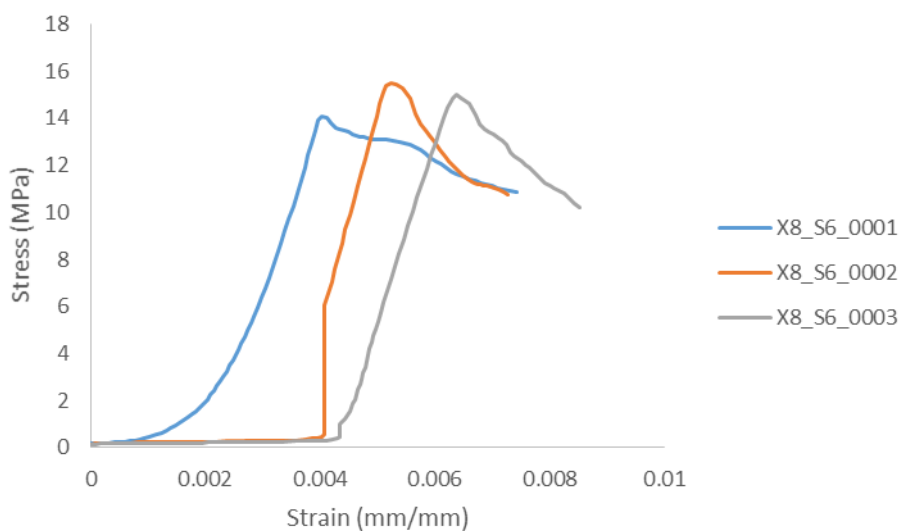
Σχήμα 10: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 7, 1m - Σύνθεση 4)

Πίνακας 11: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 7, 1m - Σύνθεση 4)

Χύτευση 7 (1m - Σύνθεση 4)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	X7_S4_0002	13.166	8.994	5.303	0.0023	0.980

	X7_S4_0003	11.908	8.063	6.019	0.0001	0.956
	Average	12.537	8.528	5.661		

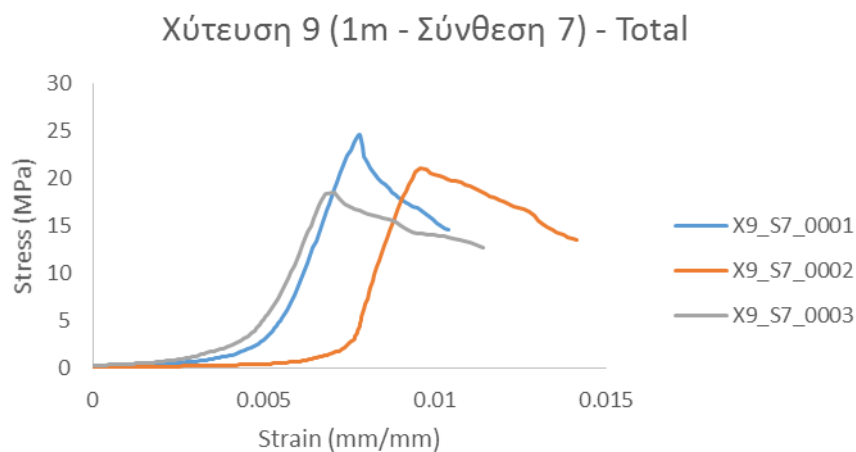
Χύτευση 8 (1m - Σύνθεση 6) - Total



Σχήμα 11: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 8, 1m - Σύνθεση 6)

Πίνακας 12: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 8, 1m - Σύνθεση 6)

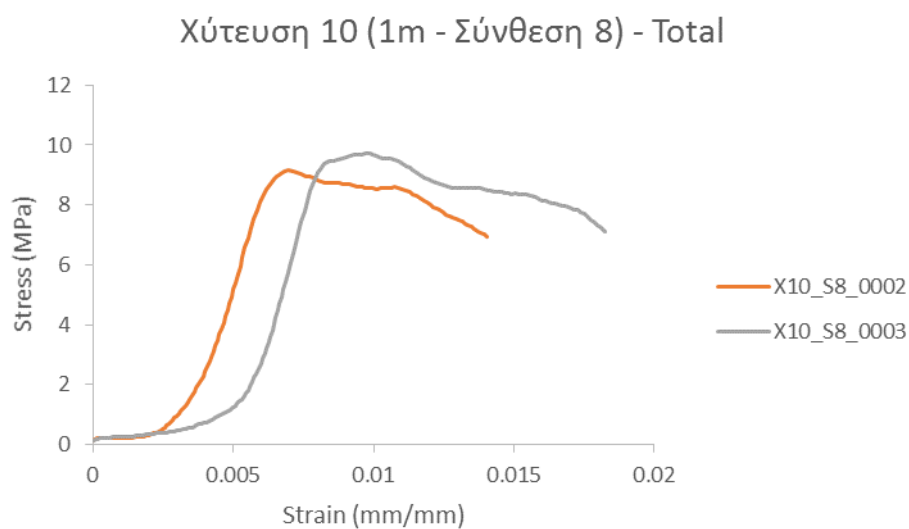
Χύτευση 8 (1m - Σύνθεση 6)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	X8_S6_0001	14.076	10.879	6.938	0.0001	0.990
	X8_S6_0002	15.471	10.757	9.978	0.0040	0.917
	X8_S6_0003	14.984	10.233	8.168	0.0020	0.989
	Average	14.844	10.623	8.361		



Σχήμα 12: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 9, 1m - Σύνθεση 7)

Πίνακας 13: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 9, 1m - Σύνθεση 7)

Χύτευση (1m - Σύνθεση 7)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	X9_S7_0001	24.537	14.548	9.863	0.0006	0.984
	X9_S7_0002	21.014	13.496	12.062	0.0076	0.959
	X9_S7_0003	18.526	12.755	6.677	0.0002	0.971
	Average	21.359	13.599	9.534		

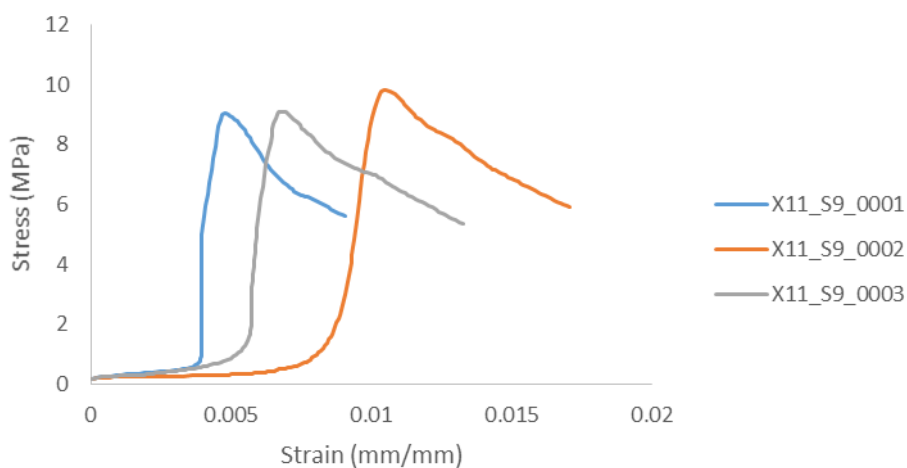


Σχήμα 13: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 10, 1m - Σύνθεση 8)

Πίνακας 14: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 10, 1m - Σύνθεση 8)

Χύτευση 10 (1m - Σύνθεση 8)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	X10_S8_0001	8.948	6.692	4.019	0.00002	0.976
	X10_S8_0002	9.159	6.944	2.840	0.00001	0.990
	X10_S8_0003	9.724	7.125	3.402	0.00144	0.983
	Average	9.277	6.920	3.420		

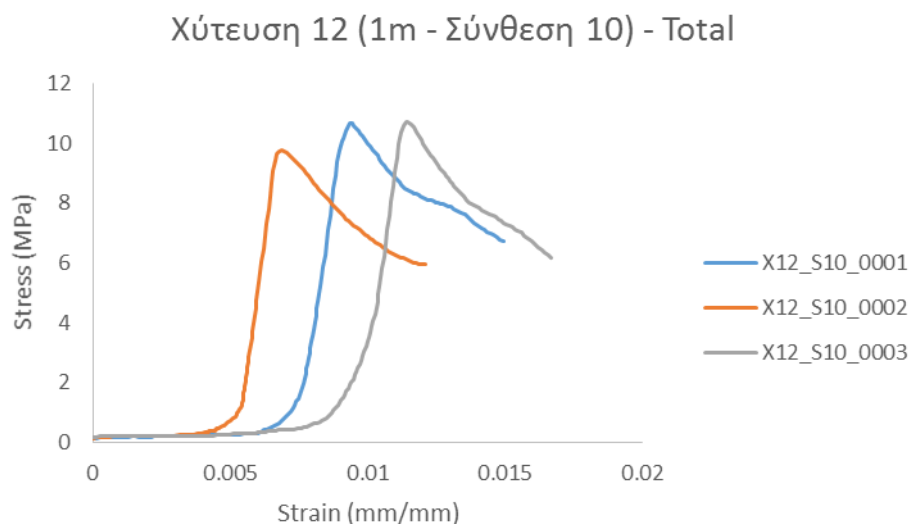
Χύτευση 11(1m-Σύνθεση 9) - Total



Σχήμα 14: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 11, 1m - Σύνθεση 9)

Πίνακας 15: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 11, 1m - Σύνθεση 9)

Χύτευση 11 (1m - Σύνθεση 9)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	X11_S9_0001	9.039	5.595	5.851	0.0032	0.817
	X11_S9_0002	9.811	5.909	5.977	0.0020	0.920
	X11_S9_0003	9.092	5.350	8.199	0.0009	0.876
	Average	9.314	5.618	6.676		



Σχήμα 15: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 12, 1m - Σύνθεση 10)

Πίνακας 16: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο (Χύτευση 12, 1m - Σύνθεση 10)

Χύτευση 12 (1m - Σύνθεση 10)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	X12_S10_0001	10.653	6.720	6.229	0.0015	0.920
	X12_S10_0002	9.775	5.932	6.584	0.0009	0.904
	X12_S10_0003	10.712	6.146	5.181	0.0020	0.941
	Average	10.380	6.266	5.998		

3.6 Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο

Ο μετακαολίνης είναι ένα άμορφο υλικό με πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια και μεγάλη περιεκτικότητα σε όξινα οξείδια ($Al_2O_3 + SiO_2 > 90\%$), γεγονός που εξηγεί την ταχεία αντίδρασή του, συνοδευόμενος από σημαντικές ποσότητες πορτλαντίτη. Στα κονιάματα υδρασβέστου – μετακαολίνη εμπλέκονται δύο αντιδράσεις. Από τη μία ο μετακαολίνης αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου που οδηγεί στη δημιουργία

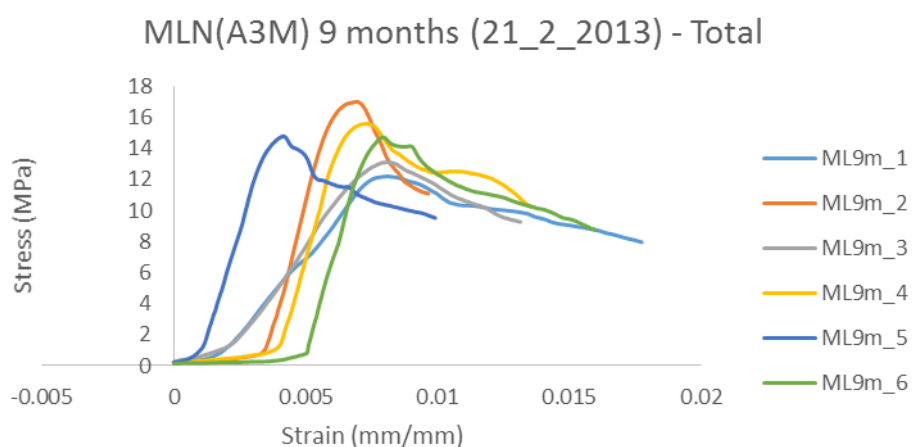
CSH gel και αρκετές ένυδρες φάσεις ασβεστοαργιλοπυριτικών ενώσεων (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} κ.ά.) $\{H:H_2O, C:CO_2, S:SiO_2, A:Al_2O_3\}$, και από την άλλη ο πορτλαντίτης αντιδρά με το ατμοσφαιρικό CO_2 προκαλώντας ενανθράκωση του κονιάματος. [35]

Ο μηχανισμός της ενανθράκωσης όπως επίσης και ο μηχανισμός της ποζολανικής αντίδρασης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και από τη σχετική υγρασία. Όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Massazza F., 1999), η υψηλή θερμοκρασία και η κορεσμένη σχετική υγρασία λειτουργούν υπέρ της ποζολανικής αντίδρασης [36], ενώ σχετική υγρασία περίπου 60% ευνοεί τον μηχανισμό ενανθράκωσης. [37]

Η μικροδομή που αναπτύσσει η σύνθεση και οι ιδιότητες που αποκτά το κονίαμα ασβεσίτη – μετακαολίνη, εξαρτάται από τον μηχανισμό που επικρατεί. Η αντοχή των υλικών που περιέχουν μετακαολίνη στη μάζα τους συνδέεται με το πορώδες που αναπτύσσεται καθώς και με την κατανομή του μεγέθους των πόρων. Η συμμετοχή του μετακαολίνη στα ασβεστοκονιάματα προκαλεί μείωση του τελικού ολικού πορώδους των κονιαμάτων.

Στους Πίνακες 17 και 18 παρουσιάζονται οι μηχανικές αντοχές που προέκυψαν ύστερα από 9 μήνες και 12 μήνες από την ημερομηνία σύνθεσης των δοκιμίων. Η σύνθεση των δοκιμίων παραμένει ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

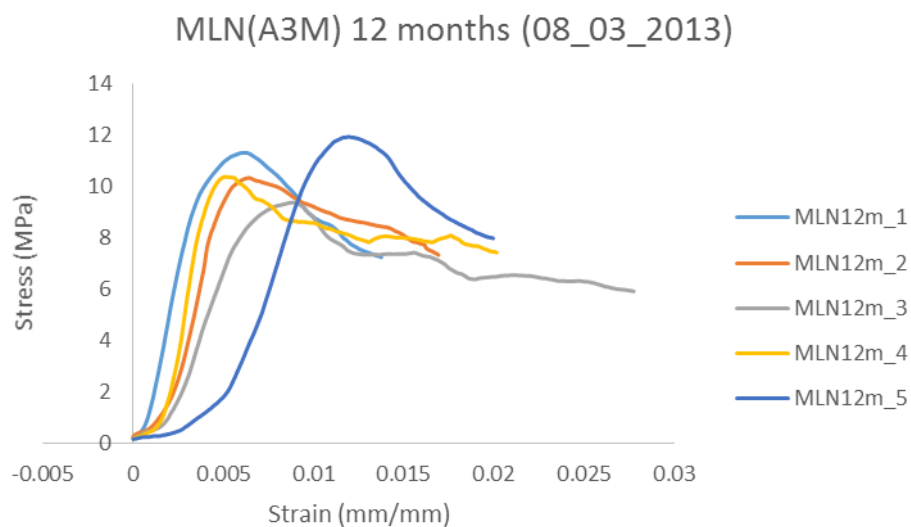
Σε σύγκριση με τα κονιάματα των προηγούμενων ενοτήτων, σε αυτή την ενότητα παρατηρούμε υψηλότερες αντοχές αλλά και μεγαλύτερες παραμορφώσεις, γεγονός που αυξάνει το εμβαδό κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης και κατά συνέπεια την τιμή της δυσθαραιυστότητας.



Σχήμα 16: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)

Πίνακας 17: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)

MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	ML9m_1	12.201	7.966	2.144	0.0023	0.991
	ML9m_2	17.001	11.080	6.234	0.0014	0.992
	ML9m_3	13.108	9.268	2.291	0.0001	0.999
	ML9m_4	15.599	10.222	5.904	0.0054	0.978
	ML9m_5	14.783	9.518	5.406	0.0017	0.991
	ML9m_6	14.714	8.723	5.752	0.0005	0.962
	Average	14.568	9.463	4.622		

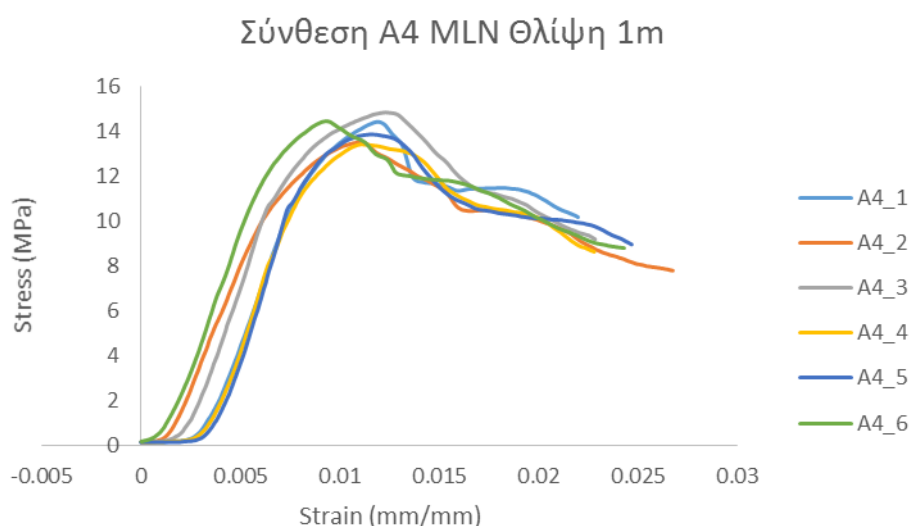


Σχήμα 17: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)

Πίνακας 18: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)

MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	MLN12m_1	11.301	7.234	3.596	0.001	0.998
	MLN12m_2	10.327	7.322	3.291	0.002	0.991
	MLN12m_3	9.356	5.913	2.254	0.007	0.983
	MLN12m_4	10.367	7.421	3.648	0.001	0.961
	MLN12m_5	11.920	7.975	1.743	0.002	0.998
	Average	10.654	7.173	2.906		

Στα Σχήματα 18 και 19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης που προέκυψαν από δύο διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων ένα μήνα και τρεις μήνες από την ημερομηνία χύτευσης των δοκιμών. Κύριο χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας κονιαμάτων αποτελούμενα από υδράσβεστο, μετακαολίνη και νταμαρίσια άμμο είναι η υψηλή μέγιστη τάση, η υψηλή τάση θραύσεως καθώς και η υψηλότερη τιμή δυσθραυστότητας σε σύγκριση με όλες τις παραπάνω κατηγορίες που συναντήσαμε έως τώρα.

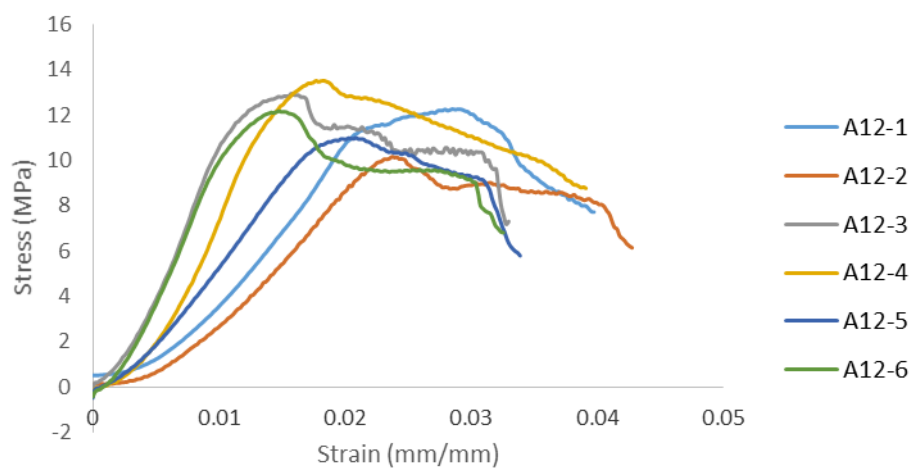


Σχήμα 18: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - Σύνθεση A4 MLN Θλίψη 1m

Πίνακας 19: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - Σύνθεση A4 MLN Θλίψη 1m

Σύνθεση A4 MLN Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A4_1	14.410	10.171	2.272	0.0010	0.996
	A4_2	13.508	7.790	2.306	0.0090	0.998
	A4_3	14.835	9.185	2.390	0.0024	0.998
	A4_4	13.409	8.629	2.374	0.0002	0.995
	A4_5	13.857	8.955	2.444	0.0006	0.990
	A4_6	14.448	8.794	2.264	0.0087	0.998
	Average	14.078	8.921	2.342		

Σύνθεση A12 MLN1 Θλίψη 3m - Total



Σχήμα 19: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - Σύνθεση A12 MLN1 Θλίψη 3m

Πίνακας 20: Στοιχεία δοκιμών με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - Σύνθεση A12 MLN1 Θλίψη 3m

Σύνθεση A12 MLN1 Θλίψη 3m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A12-1	12.259	7.713	0.659	0.0004	0.998
	A12-2	10.162	6.136	0.593	0.0023	0.995
	A12-3	12.942	7.295	1.262	0.0004	0.995
	A12-4	13.512	8.761	1.139	0.0012	0.996
	A12-5	10.992	5.785	0.725	0.0016	0.998
	A12-6	12.168	6.806	1.256	0.0007	0.994
	Average	12.006	7.083	0.939		

3.6.1 Καμπτική αντοχή κονιαμάτων με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο

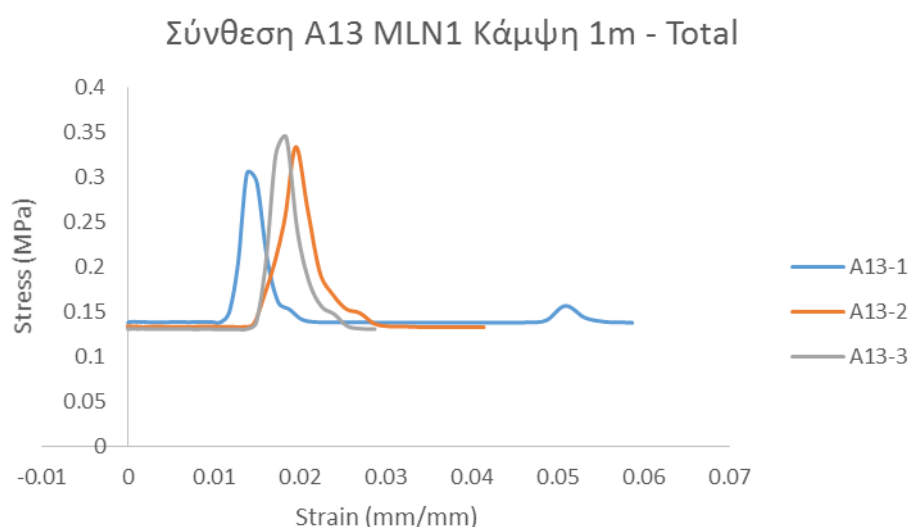
Η καμπτική αντοχή είναι μια μηχανική ιδιότητα ευάλωτη στην εσωτερική μικρορηγμάτωση. Η παρατηρηθείσα μείωση της αντοχής μπορεί πιθανώς να αποδοθεί σε μια προοδευτική μικρορηγμάτωση. Οι παράγοντες που προκαλούν μικρορηγμάτωση είναι η συστολή ξήρανσης καθώς και οι διάφορες χημικές αντιδράσεις. [41]

Μία πλήρης μελέτη σύνθεσης κονιαμάτων για ιστορικές κατασκευές απαιτεί τις περισσότερες φορές την μελέτη της συμπεριφοράς του κονιάματος όταν αυτό καταπονείται σε κάμψη τριών σημείων.

Για το λόγο αυτό παρήχθησαν 3 δοκίμια αποτελούμενα από μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο, και υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης ένα μήνα μετά τη χύτευσή τους. Οι τιμές των αντοχών που προέκυψαν από τη δοκιμή κάμψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Με την δοκιμή κάμψης μελετάμε έμμεσα την

εφελκυστική αντοχή του κονιάματος. Εφελκυστικές τάσεις ασκούνται στο μέσο της κάτω πλευράς του κονιάματος καθώς επέρχεται η θραύση του.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες τιμές ως μέγιστη επιτρεπτή εφελκυστική αντοχή του κονιάματος αποκατάστασης, οι οποίες εξαρτώνται από τη σύνθεση του κονιάματος. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 0.2MPa έως και 1.5MP. Τα τρία δοκίμια αυτής της σύνθεσης που υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης δίνουν μέσο όρο μέγιστης εφελκυστικής αντοχής 0.327MPa. [17], [45].



Σχήμα 20: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - Σύνθεση A13 MLN1 Κάμψη 1m

Πίνακας 21: Στοιχεία δοκιμίων με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο - Σύνθεση A13 MLN1 Κάμψη 1m

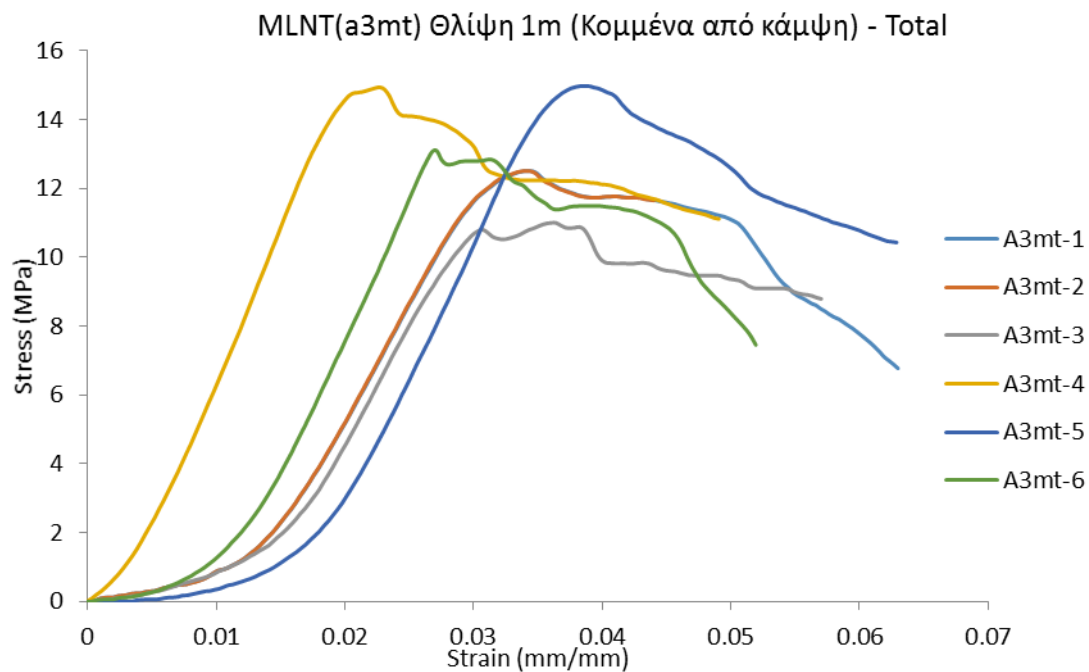
Σύνθεση A13 MLN1 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A13-1	0.304	0.137	0.097	0.00035	0.366
	A13-2	0.334	0.133	0.042	0.00011	0.646
	A13-3	0.344	0.131	0.104	0.00003	0.652
	Average	0.327	0.134	0.081		

3.7 Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία

Τα αποτελέσματα ερευνών που έχουν γίνει στον τομέα της συντήρησης και αποκατάστασης μνημειακών κατασκευών δείχνουν ότι ορισμένες ιδιότητες των υλικών συντήρησης μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά παρουσία νανοϋλικών.

Σήμερα, η εφαρμογή των νανοϋλικών και η νανοτεχνολογία υπόσχονται να βελτιώσουν τις ιδιότητες των παραδοσιακών εμπορικών προϊόντων. Ανόργανα νανοσωματίδια (όπως Ag, SiO₂, TiO₂, ZnO₂, φερρίτες και άλλα μεταλλικά οξείδια) χάρη στα μοναδικά φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά τους, όπως συνεκτικές δυνάμεις που προκύπτουν από την μεγάλη ειδική επιφάνεια, φωτοκαταλυτική δράση, καλές οπτικές ιδιότητες, υψηλό βάθος διείσδυσης και συντελεστής θερμικής διαστολής, κλπ., εμφανίζουν βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τις παραδοσιακές χημικές ενώσεις. Η διαμόρφωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη ανάμιξη του υλικού με κατάλληλα επιλεγμένα νανοσωματίδια.

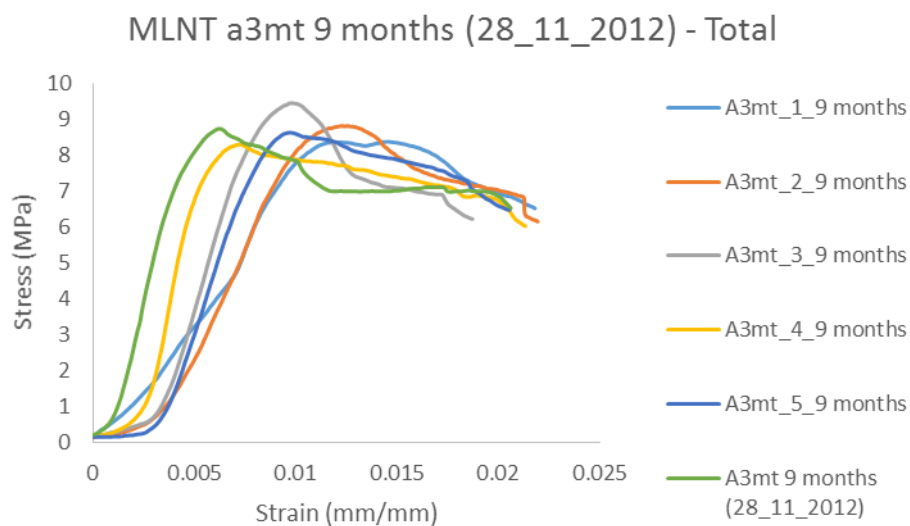
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν οι Pagona Maravelaki-Kalaitzaki et al. δείχνουν σημαντική αύξηση στη θλιπτική αντοχή κονιαμάτων με νανοτιτανία, συγκριτικά με κονιάματα χωρίς νανοτιτανία. Τα κονιάματα με μετακαολίνη και νανο-τιτανία εμφανίζουν αυξημένη καμπτική αντοχή και αυξημένο μέτρο ελαστικότητας συγκριτικά με τα κονιάματα χωρίς νανο-τιτανία. Επίσης εμφανίζεται ενισχυμένη ενανθράκωση και ενυδάτωση στα μίγματα κονιαμάτων με νανο-τιτανία. Η υδροφιλία της νανο-τιτανίας, βελτιώνει τη συγκράτηση υγρασίας στο εσωτερικό των κονιαμάτων διευκολύνοντας έτσι την διαδικασία εξέλιξης της ενανθράκωσης και της ενυδάτωσης. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να αξιοποιηθεί στη σύνθεση κονιαμάτων που εφαρμόζονται σε πορώδεις ασβεστόλιθους όπου η υγρασία ελέγχει τη ρύθμιση της πρόσφυσης και της αποδοτικότητας στο κονίαμα. Πείραμα βασισμένο στην άμεση αντοχή σε εφελκυσμό, καθώς και παρατηρήσεις δειγμάτων μέσω μικροσκοπίου SEM απέδειξαν την ικανότητα των κονιαμάτων με νανο-τιτανία να δρουν ως συγκολλητικά υλικά σε πορώδεις ασβεστόλιθους, εμποδίζοντας φαινόμενα micro – cracking στη μάζα των κονιαμάτων. [44][47][48]



Σχήμα 21: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - MLNT (a3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)

Πίνακας 22: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - MLNT (a3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)

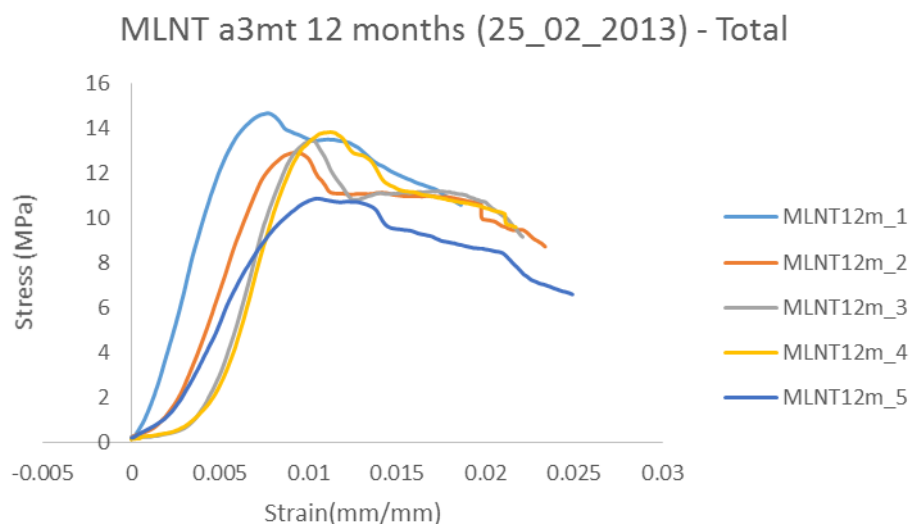
MLNT (a3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A3mt-1	12.506	6.775	0.670	0.00118	0.994
	A3mt-2	13.003	8.596	0.693	0.00009	0.999
	A3mt-3	11.005	8.795	0.618	0.01340	0.997
	A3mt-4	14.941	11.118	0.805	0.00003	0.994
	A3mt-5	14.983	10.433	0.687	0.00182	0.996
	A3mt-6	13.096	7.457	0.722	0.00238	0.994
	Average	13.256	8.862	0.699		



Σχήμα 22: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - MLNT a3mt 9 months (28_11_2012)

Πίνακας 23: Στοιχεία δοκιμίων με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - MLNT a3mt 9 months (28_11_2012)

MLNT a3mt 9 months (28_11_2012)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	A3mt_1_9 months	8.371	6.517	0.730	0.00007	0.997
	A3mt_2_9 months	8.814	6.151	1.198	0.00135	1.000
	A3mt_3_9 months	9.448	6.220	1.920	0.00459	0.997
	A3mt_4_9 months	8.291	6.024	3.028	0.00553	0.984
	A3mt_5_9 months	8.627	6.475	1.731	0.00070	0.993
	A3mt 9 months (28_11_2012)	8.731	6.527	2.535	0.00501	0.995
	Average	8.714	6.319	1.857		

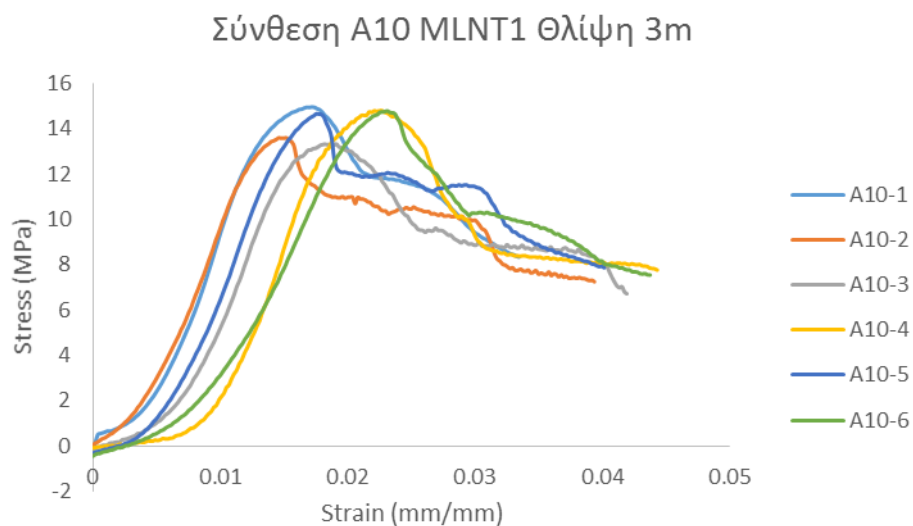


Σχήμα 23: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - MLNT a3mt 12 months (25_02_2013)

Πίνακας 24: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - MLNT a3mt 12 months (25_02_2013)

MLNT a3mt 12 months (25_02_2013)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	MLNT12m_1	14.663	10.578	2.886	0.0008	0.998
	MLNT12m_2	12.902	8.722	2.244	0.0008	0.988
	MLNT12m_3	13.435	9.158	2.650	0.0010	0.976
	MLNT12m_4	13.825	9.586	2.763	0.0036	0.994
	MLNT12m_5	10.866	6.595	1.799	0.0003	0.997
	Average	13.138	8.928	2.468		

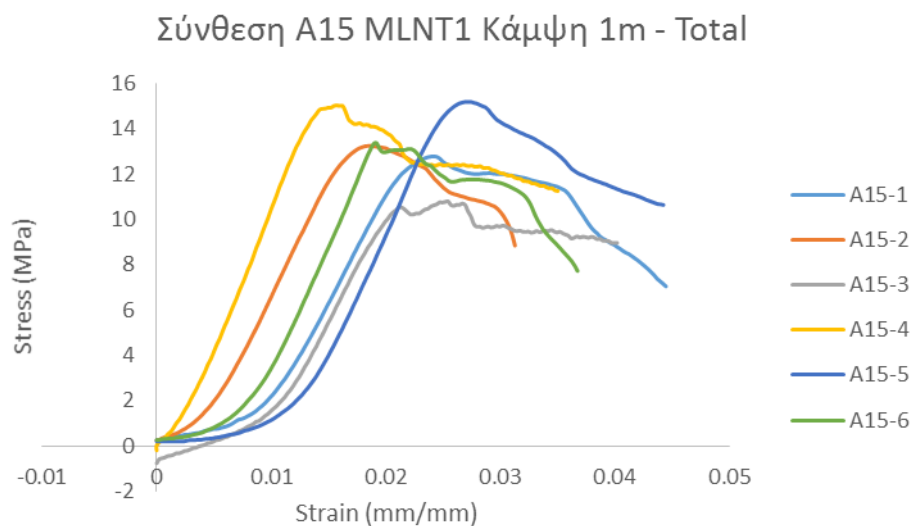
Για την παρακάτω σύνθεση παρήχθησαν έξι δοκίμια κονιάματος τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης τρεις μήνες μετά την ημερομηνία παρασκευής τους. Από τις καμπύλες του Σχήματος 24, παρατηρούμε ότι ακόμα και μετά την τάση θραύσης, το κονίαμα έχει την δυνατότητα απορρόφησης μεγάλου ποσοστού ενέργειας συγκριτικά με τις προηγούμενες κατηγορίες. Η ιδιότητα αυτή, οφείλεται τόσο στην παρουσία του μετακαολίνη ο οποίος προσφέρει πλαστικότητα στο υλικό, όσο και στην υδροφιλία της νανοτιτανίας.



Σχήμα 24: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m

Πίνακας 25: Στοιχεία δοκιμίων με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m

Σύνθεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A10-1	14.957	8.328	1.325	0.0020	0.990
	A10-2	13.595	7.242	1.207	0.0007	0.972
	A10-3	13.322	6.712	1.205	0.0012	0.983
	A10-4	14.789	7.756	1.293	0.0063	0.988
	A10-5	14.651	7.861	1.227	0.0057	0.972
	A10-6	14.781	7.539	0.902	0.0002	0.985
	Average	14.349	7.573	1.193		

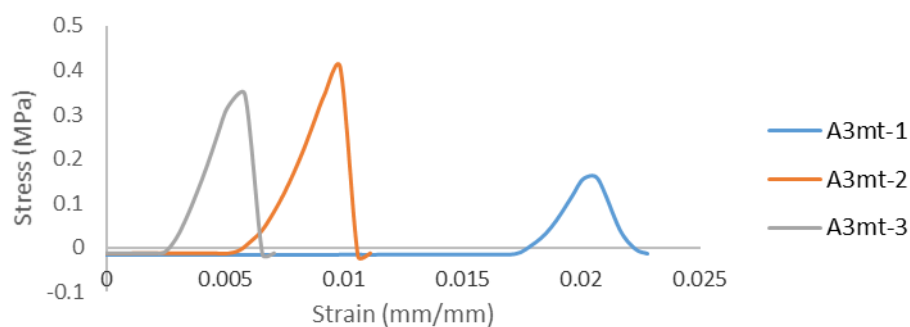


Σχήμα 25: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση A15 MLNT1 Κάμψη 1m

Πίνακας 26: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση A15 MLNT1 Κάμψη 1m

Σύνθεση A15 MLNT1 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A15-1	12.766	7.035	0.926	0.0058	0.994
	A15-2	13.238	8.830	1.003	0.0008	0.999
	A15-3	10.791	8.955	0.985	0.0011	0.997
	A15-4	15.028	11.248	1.196	0.0021	0.994
	A15-5	15.182	10.632	1.015	0.0019	0.996
	A15-6	13.354	7.715	1.056	0.0013	0.994
	Average	13.393	9.069	1.030		

Σύνθεση MLNT A3mt Κάμψη 1m (04-07-2011) - Total



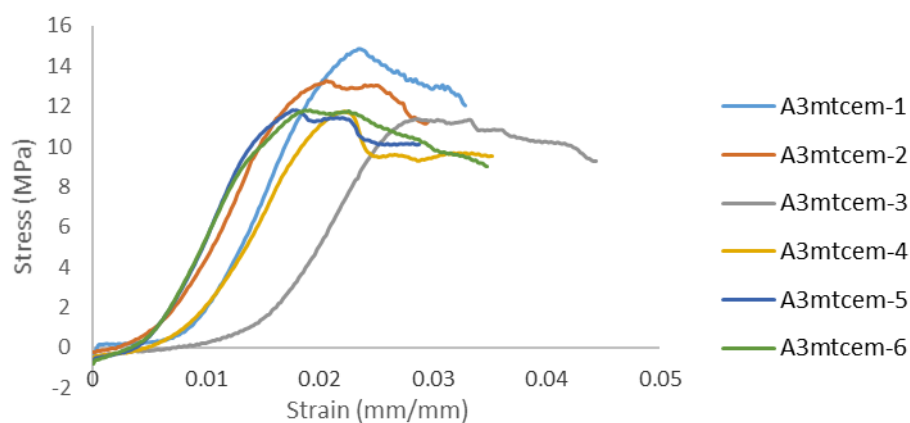
Σχήμα 26: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση MLNT A3mt Κάμψη 1m (04-07-2011)

Πίνακας 27: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση MLNT A3mt Κάμψη 1m (04-07-2011)

Σύνθεση MLNT A3mt Κάμψη 1m (04-07-2011)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A3mt-1	0.156	-0.013	0.081	0.00010	0.826
	A3mt-2	0.407	-0.013	0.128	0.00001	0.875
	A3mt-3	0.346	-0.013	0.143	0.00009	0.945
	Average	0.303	-0.013	0.117		

Στα Σχήματα 27 και 28, παρουσιάζονται δύο διαφορετικές συνθέσεις. Για τη μελέτη της κάθε σύνθεσης, παρήχθησαν έξι και τρία δοκίμια αντίστοιχα. Οι τιμές των αντοχών και των παραμορφώσεων, είναι ανάλογες των τιμών των υπολοίπων συνθέσεων.

Σύνθεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)

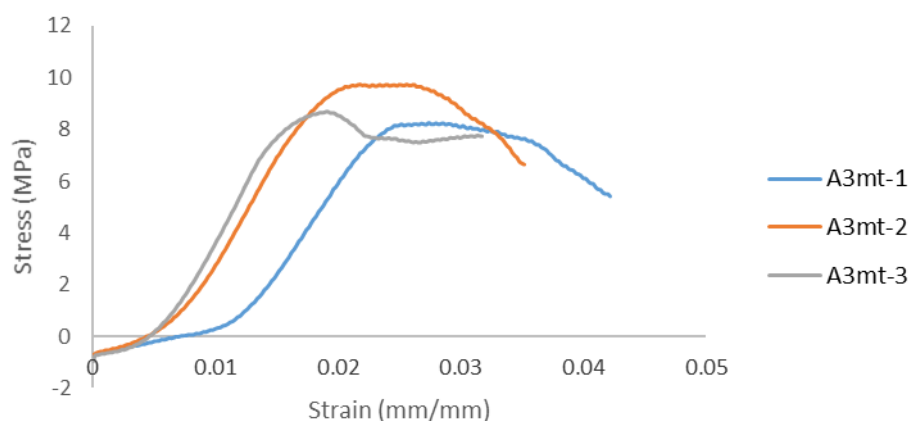


Σχήμα 27: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)

Πίνακας 28: Στοιχεία δοκιμίων με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)

Σύνθεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04- 07-2011)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A3mtcem-1	14.849	12.024	1.210	0.0004	0.999
	A3mtcem-2	13.260	11.210	1.131	0.0008	0.999
	A3mtcem-3	11.388	9.301	1.006	0.0051	0.994
	A3mtcem-4	11.777	9.536	1.071	0.0034	0.992
	A3mtcem-5	11.809	10.114	1.281	0.0026	0.999
	A3mtcem-6	11.791	8.997	1.155	0.0012	0.999
	Average	12.479	10.197	1.142		

Σύνθεση MLNT A3mt - Θλίψη 1m (04-07-2011) -
Total



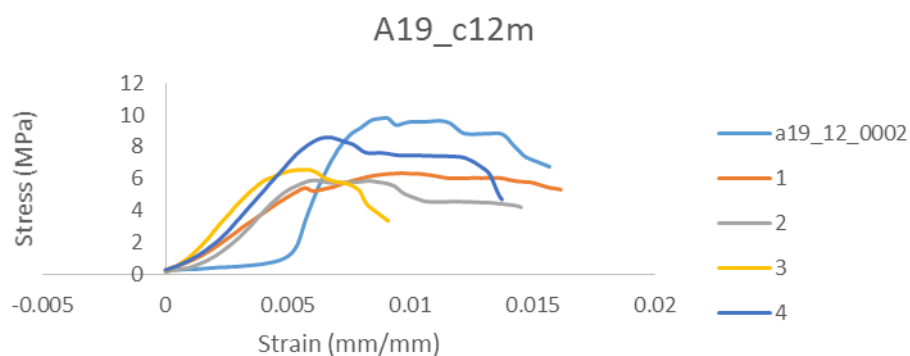
Σχήμα 28: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση MLNT A3mt-Θλίψη 1m (04-07-2011)

Πίνακας 29: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο, νανοτιτανία - Σύνθεση MLNT A3mt-Θλίψη 1m (04-07-2011)

Σύνθεση MLNT A3mt- Θλίψη 1m (04-07-2011)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A3mt-1	8.275	5.431	0.696	0.0004	0.998
	A3mt-2	9.752	6.648	0.791	0.0022	1.000
	A3mt-3	8.681	7.725	0.848	0.0003	0.999
	Average	8.903	6.601	0.778		

3.8 Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο

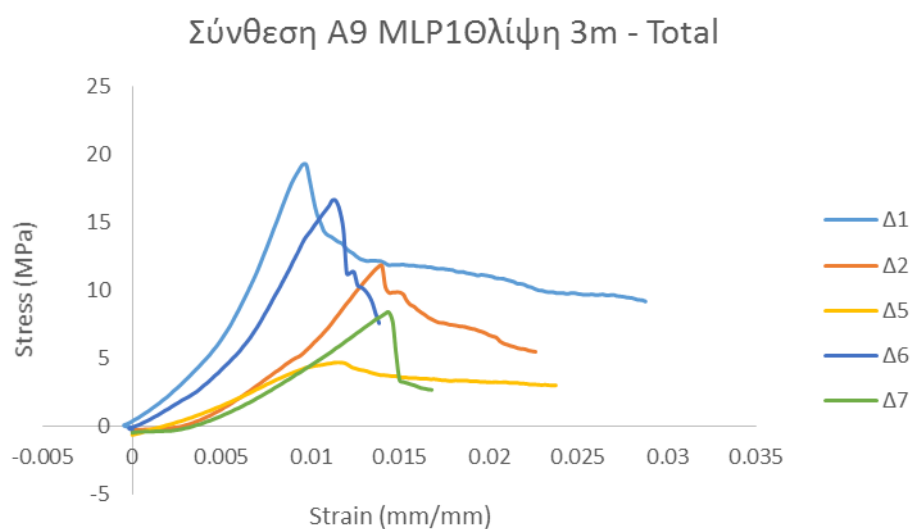
Τα κονιάματα με την παραπάνω σύσταση, εμφανίζουν αρκετά υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής, λόγω της παρουσίας του μετακαολίνη, οι ιδιότητες του οποίου αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 29: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - A19_c12m

Πίνακας 30: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - A19_c12m

A19_c12m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	a19_12_0002	9.808	6.758	4.378	0.00275	0.979
	1	6.347	5.311	1.083	0.00009	0.997
	2	5.897	4.208	1.590	0.00001	0.995
	3	6.559	3.348	1.778	0.00006	0.999
	4	8.602	4.693	1.700	0.00003	0.997
	Average	7.443	4.864	2.106		

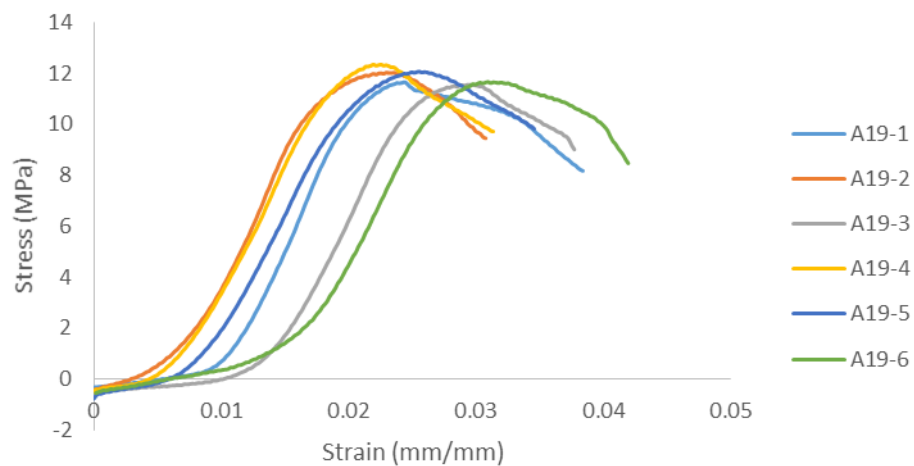


Σχήμα 30: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A9 MLP1 Θλίψη 3m

Πίνακας 31: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A9 MLP1 Θλίψη 3m

Σύνθεση A9 MLP1 Θλίψη 3m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	Δ1	19.241	9.171	2.199	0.0092	0.919
	Δ2	11.804	5.475	0.950	0.0003	0.974
	Δ5	4.688	3.001	0.559	0.0003	0.989
	Δ6	16.617	7.564	1.075	0.0012	0.987
	Δ7	8.374	2.673	0.797	0.0025	0.946
	Average	12.145	5.577	1.116		

Σύνθεση A19 MLP1 Θλίψη 1m



Σχήμα 31: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A19 MLP1 Θλίψη 1m

Πίνακας 32: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A19 MLP1 Θλίψη 1m

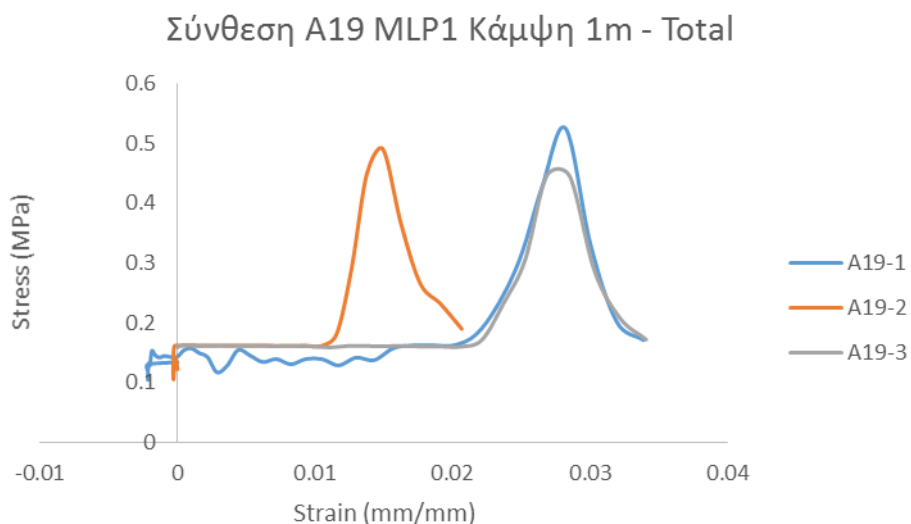
Σύνθεση A19 MLP1 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A19-1	11.654	8.169	1.104	0.0107	0.998
	A19-2	12.023	9.448	1.021	0.0023	0.999
	A19-3	11.547	9.007	0.979	0.0005	0.999
	A19-4	12.342	9.714	0.937	0.0017	1.000
	A19-5	12.070	9.821	0.956	0.0056	1.000
	A19-6	11.658	8.340	0.935	0.0001	0.996
	Average	11.882	9.083	0.989		

Για την διεξαγωγή της δοκιμής κάμψης, παρήχθησαν πρισματικά δοκίμια (δοκοί). Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής καταπόνησης, αναπτύσσονται ορθές τάσεις. Όταν με την αύξηση του φορτίου η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου φτάσει στην μέγιστη τιμή της, τότε επέρχεται η θραύση του δοκιμίου το οποίο διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στη συνέχεια τα δύο αυτά μέρη υποβάλλονται σε δοκιμή θλίψης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2: Διάταξη κάμψης (αριστερά) και θλίψης (δεξιά)

Στο Σχήμα 32 παρουσιάζονται οι καμπύλες 3 δοκιμών ίδιας σύνθεσης.



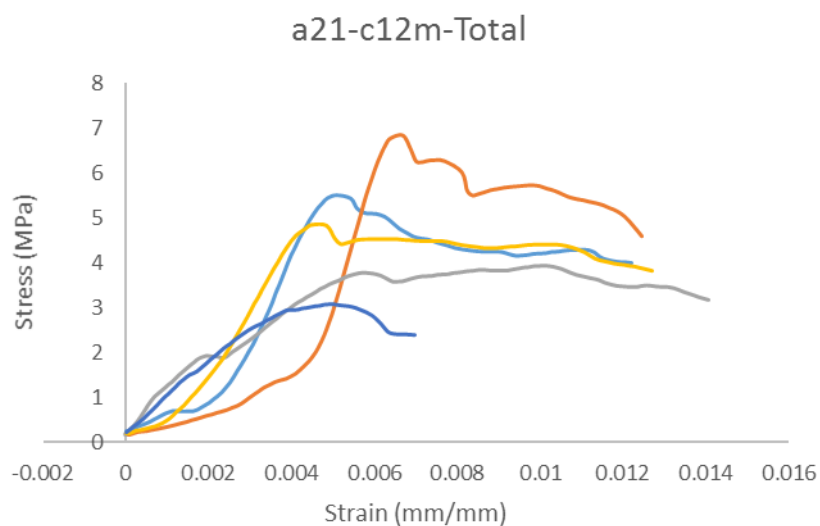
Σχήμα 32: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A19 MLP1 Κάμψη 1m

Πίνακας 33: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A19 MLP1 Κάμψη 1m

Σύνθεση A19 MLP1 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A19-1	0.525	0.171	0.075	0.00001	0.820
	A19-2	0.490	0.190	0.143	0.00002	0.869
	A19-3	0.445	0.172	0.039	0.00002	0.803
	Average	0.487	0.178	0.086		

3.9 Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο

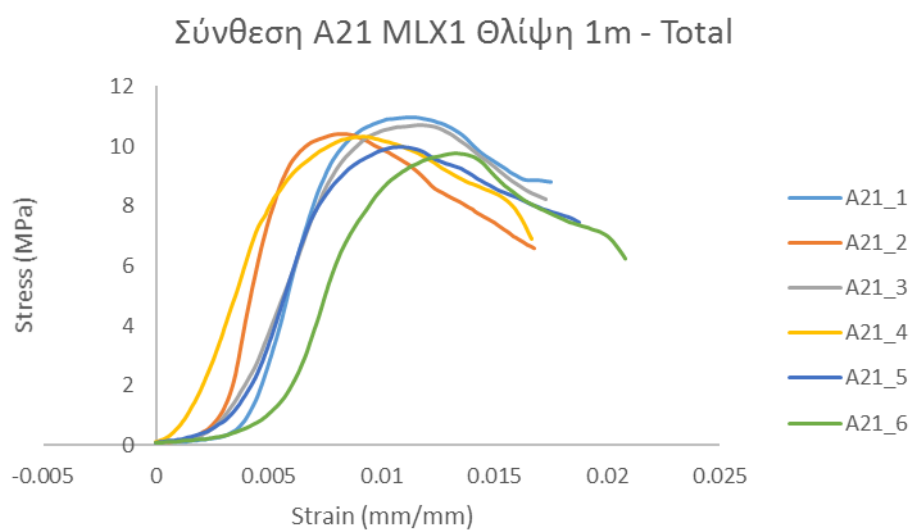
Η χαλαζιακή άμμος προέρχεται από τον χαλαζίτη που είναι ορυκτό του πυριτίου. Ο χαλαζίτης είναι το μοναδικό ορυκτό το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από πυρίτιο και οξυγόνο. Τα ιόντα του είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους και για αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλη σκληρότητα. Η προσθήκη της χαλαζιακής άμμου στη σύνθεση των κονιαμάτων αυξάνει την αντοχή τους τόσο σε θλίψη όσο και σε κάμψη, όπως φαίνεται στα Σχήματα 33, 34 και 35.



Σχήμα 33: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - a21-c12m

Πίνακας 34: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - a21-c12m

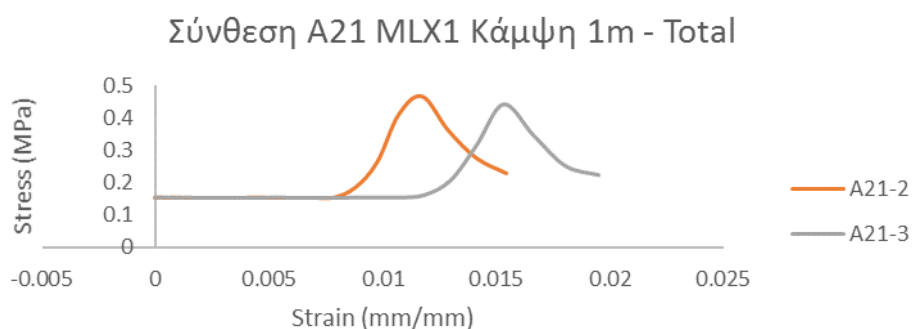
a21-c12m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	a21_12_0002	5.515	4.006	2.132	0.00038	0.993
	1	6.839	4.597	2.885	0.00343	0.962
	2	3.924	3.167	0.811	0.00016	0.989
	3	4.852	3.829	1.648	0.00039	0.989
	4	3.089	2.400	0.859	0.00002	0.999
	Average	4.844	3.600	1.667		



Σχήμα 34: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A21 MLX1 Θλίψη 1m

Πίνακας 35: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A21 MLX1 Θλίψη 1m

Σύνθεση A21 MLX1 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	A21_1	10.978	8.813	2.995	0.0014	0.995
	A21_2	10.384	6.575	3.511	0.0009	0.984
	A21_3	10.721	8.245	1.937	0.0010	0.999
	A21_4	10.328	6.914	2.258	0.0010	0.999
	A21_5	9.965	7.451	2.331	0.0015	0.995
	A21_6	9.771	6.251	2.407	0.0001	0.996
	Average	10.358	7.375	2.573		



Σχήμα 35: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A21 MLX1 Κάμψη 1m

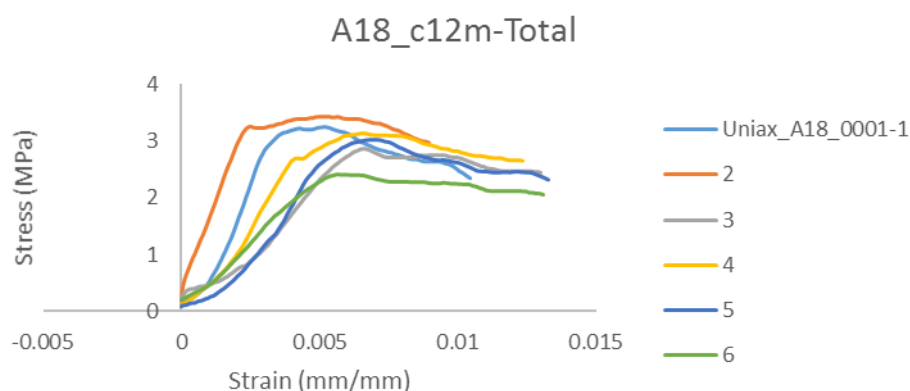
Πίνακας 36: Στοιχεία δοκιμών με μετακαολίνη, μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο - Σύνθεση A21 MLX1 Κάμψη 1m

Σύνθεση A21 MLX1 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	A21-2	0.468	0.229	0.156	0.000064	0.936
	A21-3	0.442	0.222	0.095	0.000004	0.860
	Average	0.455	0.226	0.126		

3.10 Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η χαλαζιακή άμμος, προέρχεται από τον χαλαζίτη, ο οποίος είναι ορυκτό του πυριτίου. Για το λόγο αυτό η πυριτική και η χαλαζιακή άμμος, προσδίδουν στο κονίαμα παρόμοιες ιδιότητες.

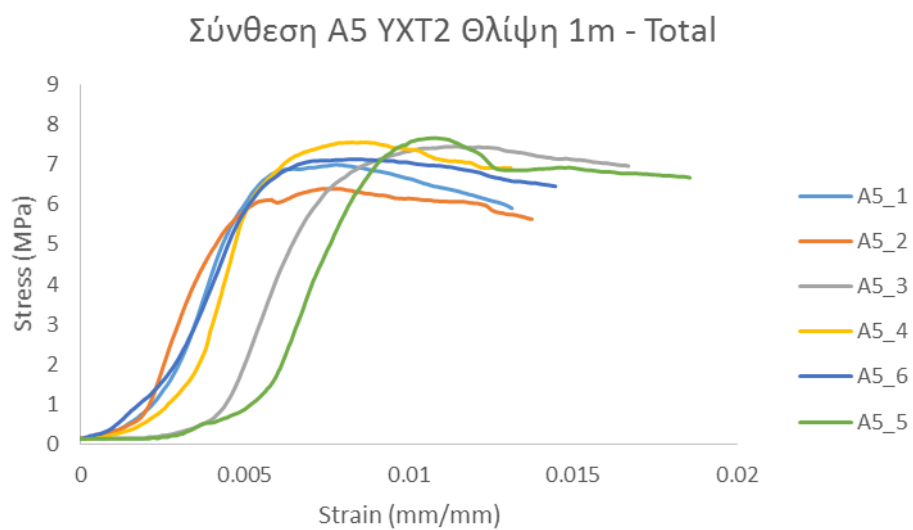
Στην επόμενη ενότητα (3.11) η χαλαζιακή άμμος έχει αντικατασταθεί από πυριτική. Παρατηρώντας κανείς τους πίνακες των αποτελεσμάτων θα διαπιστώσει ότι οι τιμές των αντοχών δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα, εφόσον τα υπόλοιπα συστατικά παραμένουν ίδια.



Σχήμα 36: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - A18_c12m

Πίνακας 37: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - A18_c12m

A18_c12m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	Uniax_A18_0001-1	3.241	2.343	1.194	0.00007	0.996
	2	3.432	2.969	1.315	0.00113	0.996
	3	2.867	2.443	0.602	0.00047	0.995
	4	3.143	2.661	0.860	0.00004	0.998
	5	3.028	2.322	0.770	0.00012	0.998
	6	2.402	2.046	0.464	0.00005	0.998
	Average	3.019	2.464	0.868		

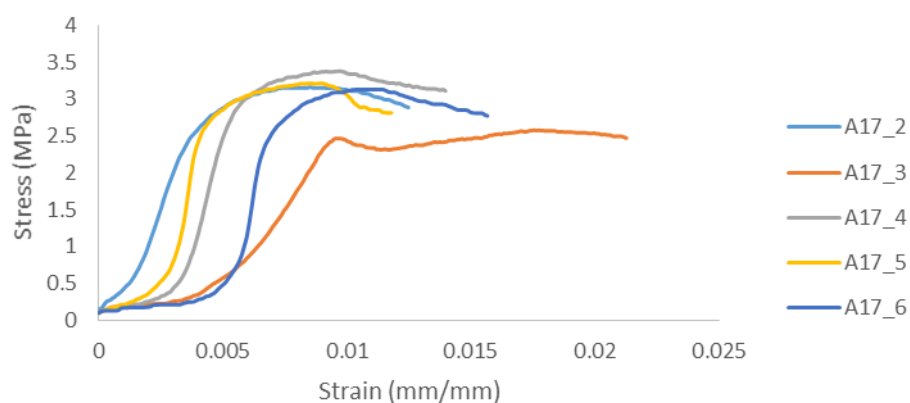


Σχήμα 37: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A5 YXT2 Θλίψη 1m

Πίνακας 38: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A5 YXT2 Θλίψη 1m

Σύνθεση A5 YXT2 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A5_1	6.996	5.900	2.278	0.0002	0.993
	A5_2	6.389	5.631	2.358	0.0008	0.994
	A5_3	7.446	6.958	2.015	0.0006	0.993
	A5_4	7.553	6.912	2.943	0.0004	0.991
	A5_5	7.653	6.668	2.077	0.0007	0.992
	A5_6	7.130	6.453	1.771	0.0001	0.996
	Average	7.195	6.420	2.240		

Σύνθεση A17 ΥΧΤ1 Θλίψη 1m - Total

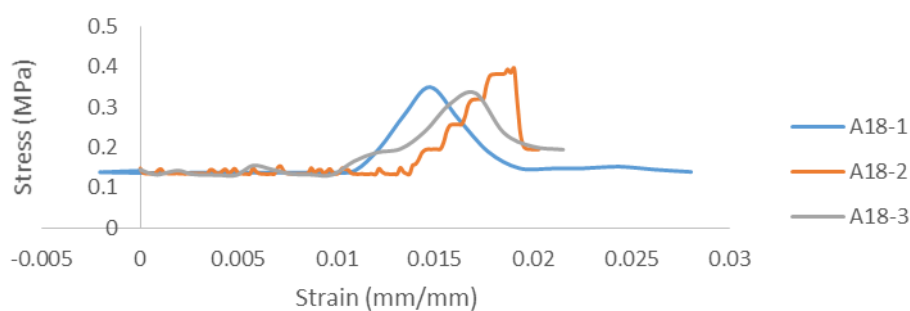


Σχήμα 38: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A17 ΥΧΤ1 Θλίψη 1m

Πίνακας 39: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A17 ΥΧΤ1 Θλίψη 1m

Σύνθεση A17 ΥΧΤ1 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	A17_2	3.161	2.886	0.998	0.00044	0.998
	A17_3	2.580	2.472	0.463	0.00009	0.979
	A17_4	3.377	3.111	1.404	0.00062	0.986
	A17_5	3.213	2.813	2.077	0.00004	0.975
	A17_6	3.130	2.773	2.045	0.00140	0.981
	Average	3.092	2.811	1.397		

Σύνθεση A18 ΥΧΤ1 Κάμψη 1m - Total

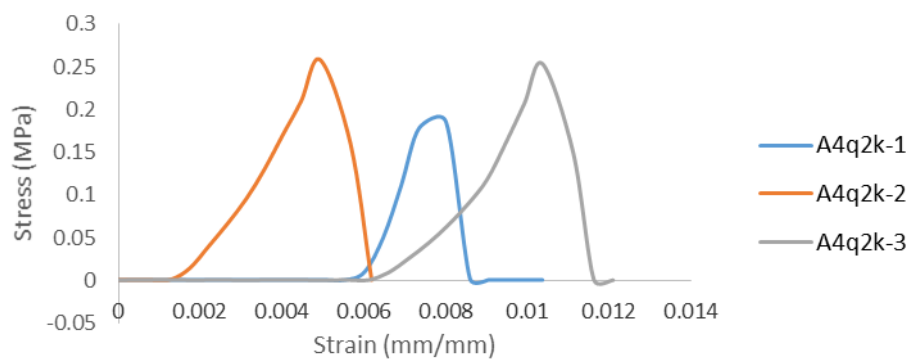


Σχήμα 39: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A18 ΥΧΤ1 Κάμψη 1m

Πίνακας 40: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A18 YXT1 Κάμψη 1m

Σύνθεση A18 YXT1 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A18-1	0.349	0.139	0.065		0.626
	A18-2	0.396	0.195			0.943
	A18-3	0.334	0.194			0.926
	Average	0.360	0.176			

Σύνθεση YXT2 A4q2k Κάμψη 1m (04-11-2011)
Total



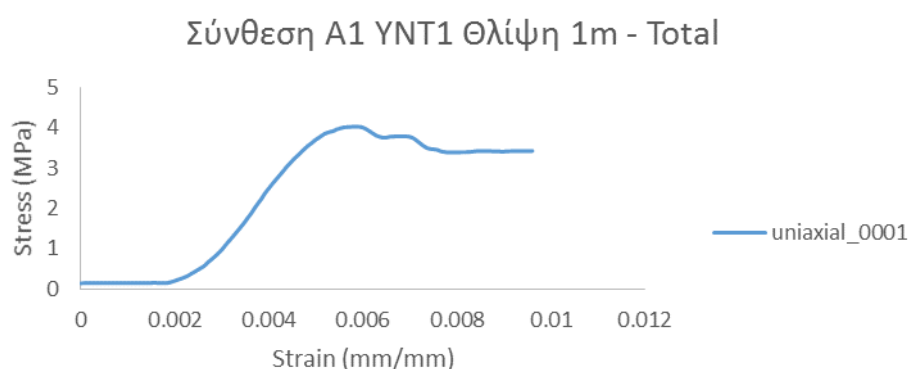
Σχήμα 40: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση YXT2 A4q2k Κάμψη 1m (04-11-2011)

Πίνακας 41: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση YXT2 A4q2k Κάμψη 1m (04-11-2011)

Σύνθεση YXT2 A4q2k Κάμψη 1m (04-11- 2011)	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A4q2k-1	0.185	0.0004	0.139	0.000020	0.700
	A4q2k-2	0.258	0.0004	0.070	0.000001	0.992
	A4q2k-3	0.254	0.0003	0.052	0.000026	0.900
	Average	0.232	0.0004	0.087		

3.11 Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία

Με σκοπό τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων κονιαμάτων της παραπάνω σύνθεσης, έγιναν διάφορες χυτεύσεις όπου κονιάματα ίδιων διαστάσεων υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης και κάμψης. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες.

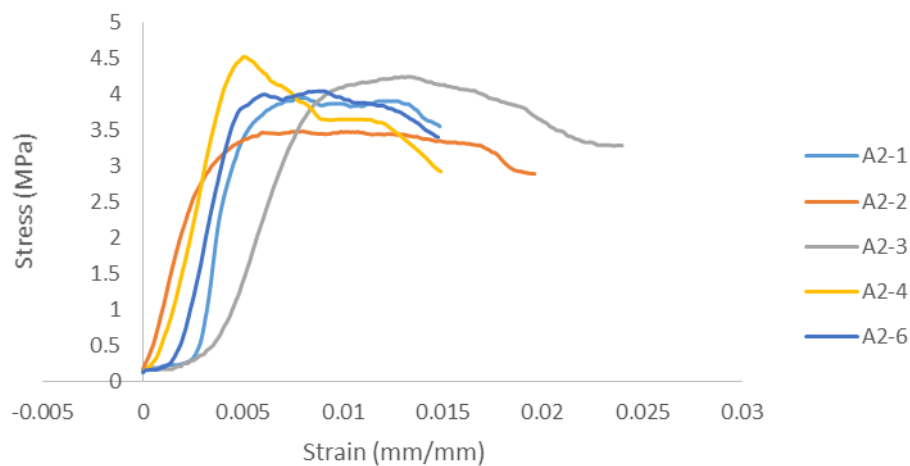


Σχήμα 41: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A1 YNT1 Θλίψη 1m

Πίνακας 42: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A1 YNT1
Θλίψη 1m

Σύνθεση A1 YNT1 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	uniaxial_0001	4.023	3.421	1.539	0.0002	0.998

Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m - Total

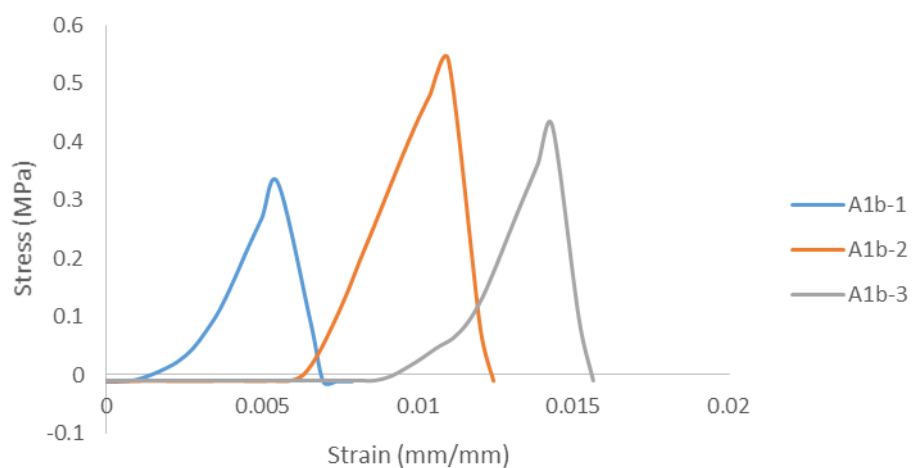


Σχήμα 42: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m

Πίνακας 43: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m

Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A2-1	3.945	3.551	1.583	0.00129	0.979
	A2-2	3.481	2.891	0.824	0.00005	0.996
	A2-3	4.244	3.285	0.837	0.00018	0.992
	A2-4	4.522	2.922	1.249	0.00078	0.996
	A2-6	4.038	3.401	1.323	0.00125	0.993
	Average	4.046	3.210	1.163		

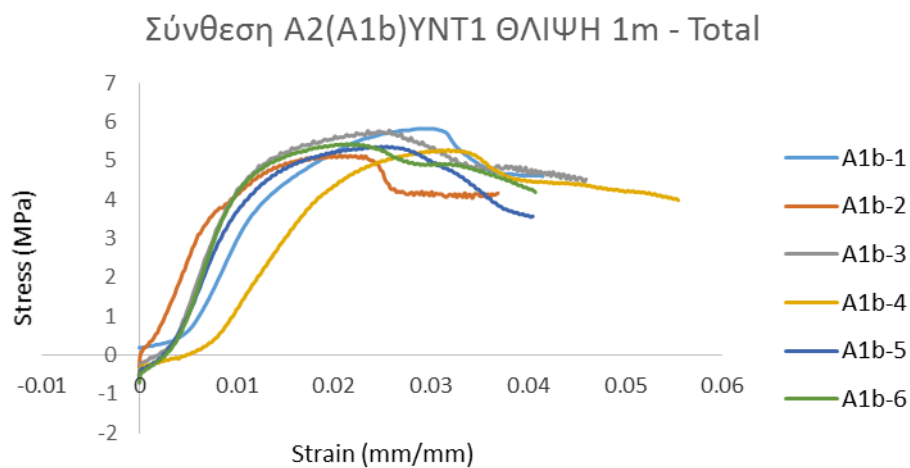
Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 ΚΑΜΨΗ 3m - Total



Σχήμα 43: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 ΚΑΜΨΗ 3m

Πίνακας 44: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 ΚΑΜΨΗ 3m

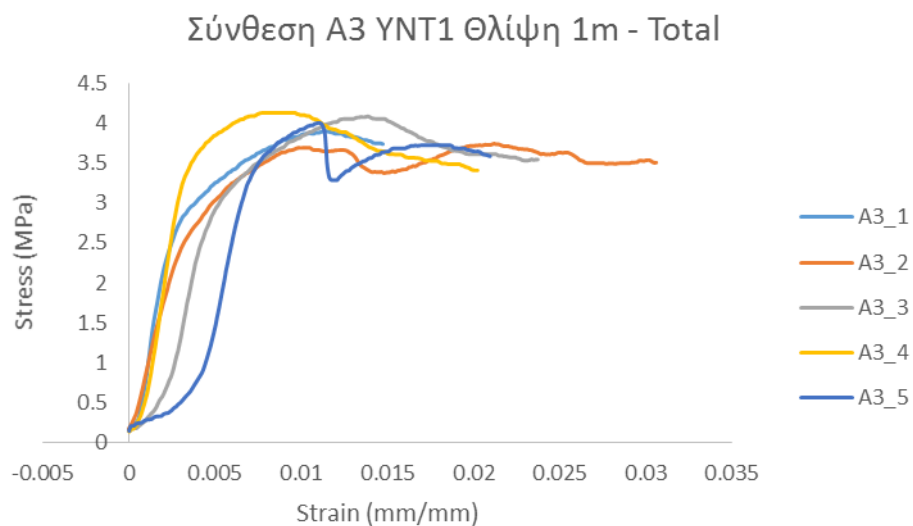
Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 ΚΑΜΨΗ 3m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m^2)	R^2
	A1b-1	0.329	0.011	0.085	0.00004	0.963
	A1b-2	0.540	0.010	0.132	0.00003	0.972
	A1b-3	0.427	0.010	0.128	0.00001	0.953
	Average	0.432	0.010	0.115		



Σχήμα 44: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m

Πίνακας 45: Στοιχεία δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m

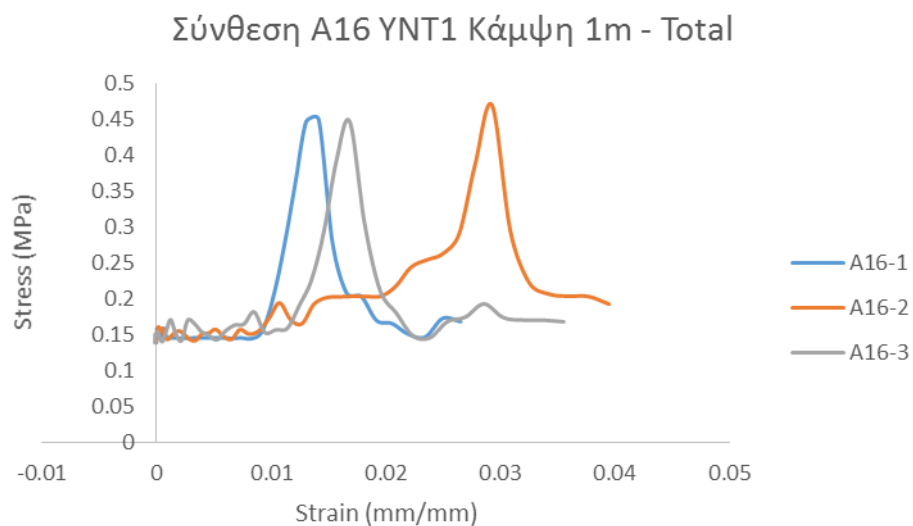
Σύνθεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A1b-1	5.824	4.599	0.513	0.00199	0.997
	A1b-2	5.153	4.169	0.619	0.00015	0.990
	A1b-3	5.785	4.533	0.701	0.00008	0.991
	A1b-4	5.285	3.985	0.371	0.00068	0.997
	A1b-5	5.370	3.575	0.613	0.00035	0.999
	A1b-6	5.440	4.194	0.737	0.00211	0.996
	Average	5.476	4.176	0.592		



Σχήμα 45: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A3 YNT1 Θλίψη 1m

Πίνακας 46: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A3 YNT1 Θλίψη 1m

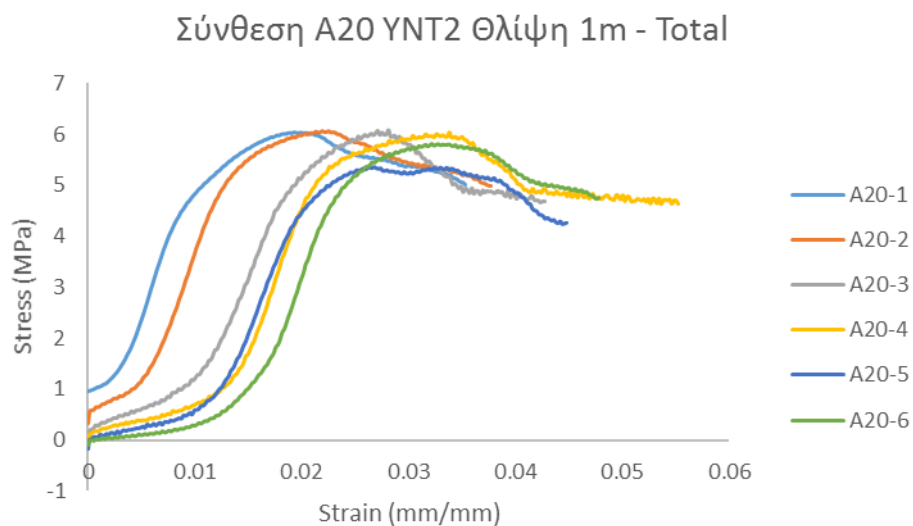
Σύνθεση A3 YNT1 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A3_1	3.901	3.738	1.371	0.00002	0.994
	A3_2	3.744	3.506	0.519	0.00069	0.994
	A3_3	4.086	3.544	1.005	0.00021	0.991
	A3_4	4.130	3.408	1.427	0.00069	0.986
	A3_5	4.004	3.585	1.021	0.00009	0.973
	Average	3.973	3.556	1.069		



Σχήμα 46: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A16 YNT1 Κάμψη 1m

Πίνακας 47: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A16 YNT1 Κάμψη 1m

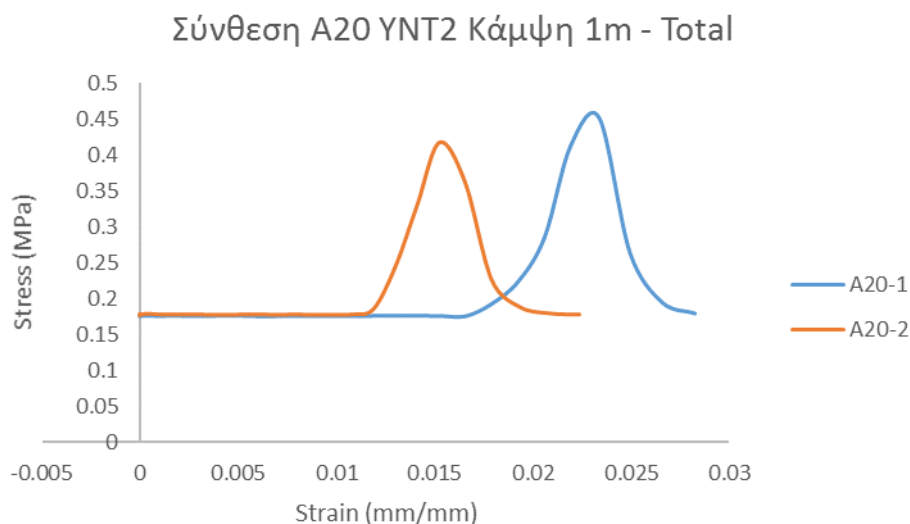
Σύνθεση A16 YNT1 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A16-1	0.450	0.168	0.090	0.0006	0.764
	A16-2	0.470	0.193	0.069	0.0003	0.801
	A16-3	0.447	0.168	0.076	0.0004	0.622
	Average	0.456	0.176	0.078		



Σχήμα 47: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A20 YNT2 Θλίψη 1m

Πίνακας 48: Στοιχεία δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A20 YNT2 Θλίψη 1m

Σύνθεση A20 YNT2 Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A20-1	6.034	5.009	0.647	0.0026	0.996
	A20-2	6.052	4.979	0.581	0.0005	0.996
	A20-3	6.079	4.682	0.484	0.0043	0.998
	A20-4	6.025	4.682	0.590	0.0024	0.990
	A20-5	5.365	4.270	0.563	0.0056	0.994
	A20-6	5.806	4.744	0.604	0.0041	0.995
	Average	5.894	4.728	0.578		



Σχήμα 48: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A20 YNT2 Κάμψη 1m

Πίνακας 49: Στοιχεία δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία - Σύνθεση A20 YNT2 Κάμψη 1m

Σύνθεση A20 YNT2 Κάμψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A20-1	0.452	0.180	0.096	0.00003	0.749
	A20-2	0.417	0.178	0.077	0.00007	0.817
	Average	0.435	0.179	0.087		

Η σύνθεση με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία, δίνει ικανοποιητικές τιμές αντοχής σε θλίψη, μικρή αντοχή σε κάμψη, μεγάλη δυσθραυστότητα και μεγάλες παραμορφώσεις, γεγονός που καθιστά το κονίαμα κατάλληλο για εφαρμογές σε αποκαταστάσεις μνημειακών κατασκευών.

3.12 Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία

Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως τον 20^ο αιώνα στις αναστηλώσεις ιστορικών μνημείων, οδηγώντας σε σοβαρές αστοχίες λόγω μη συμβατότητας με το αρχικό παραδοσιακό υλικό. Το τσιμέντο παρουσιάζει πολλά

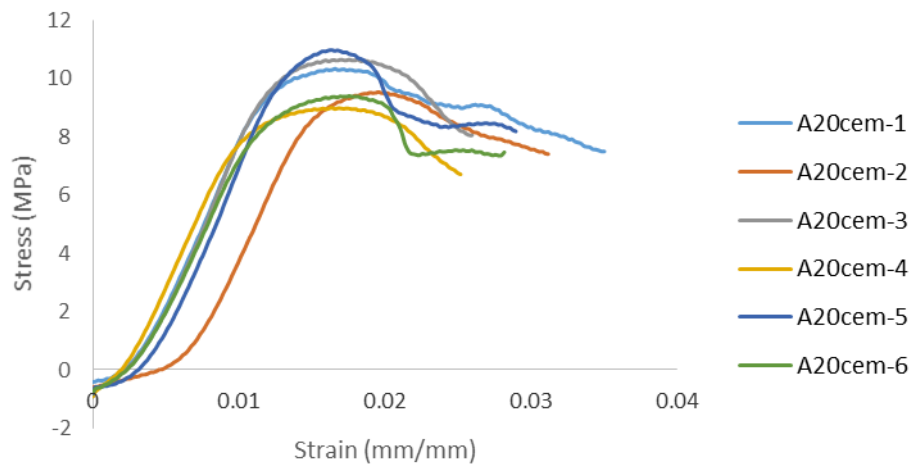
πλεονεκτήματα ως δομικό υλικό, όπως ταχεία πήξη και σκλήρυνση, υψηλή αντοχή, ανθεκτικότητα σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες κ.ά. Η χρήση του όμως σε εργασίες αποκατάστασης παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα όπως αυτά που αναφέρονται παρακάτω [38]:

- Εμφανίζει πολύ μεγάλη διαφορά στις τιμές της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ιστορικό κονίαμα. Σε συνδυασμό με τη μεγάλη σκληρότητα και ακαμψία του μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες τάσεις στα αυθεντικά υλικά σε περίπτωση μεγάλων κατακόρυφων ή οριζόντιων φορτίσεων, με συνέπεια την περαιτέρω αποσάθρωση ή την πλήρη κατάρρευση [39], [40].
- Τα ιστορικά κονιάματα παρουσιάζουν μεγάλο πορώδες ενισχύοντας έτσι την διέλευση του ατμοσφαιρικού αέρα, διαδικασία η οποία ενεργοποιεί τον μηχανισμό της ενανθράκωσης που είναι σημαντικός για την ανάπτυξη των αντοχών τους. Αντίθετα τα τσιμεντοκονιάματα παρουσιάζουν πολύ χαμηλό πορώδες με πόρους μικρής διαμέτρου.
- Τα διαλυτά άλατα που υπάρχουν στο τσιμέντο προκαλούν αποσάθρωση στο αυθεντικό υλικό μειώνοντας έτσι την μηχανική αντοχή του.
- Η διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής, τσιμέντου και παραδοσιακού υλικού, οδηγούν σε υψηλές τάσεις οι οποίες ασκούνται στα παραδοσιακά υλικά λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων συστολής- διαστολής.

Παρόλα τα μειονεκτήματα της χρήσης τσιμέντου σε εργασίες αποκατάστασης μνημειακών κατασκευών, η αντοχή και η ανθεκτικότητά του επιτρέπουν σε κάποιες περιπτώσεις τη χρήση του σε μικρές ποσότητες.

Όπως είναι φυσικό οι τιμές των αντοχών που παρουσιάζονται σε αυτή την κατηγορία κονιαμάτων είναι πολύ υψηλότερες συγκριτικά με τις προηγούμενες κατηγορίες όπου απουσιάζει το τσιμέντο ως κονία.

Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m - Total



Σχήμα 49: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία - Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m

Πίνακας 50: Στοιχεία δοκιμίων με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία - Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m

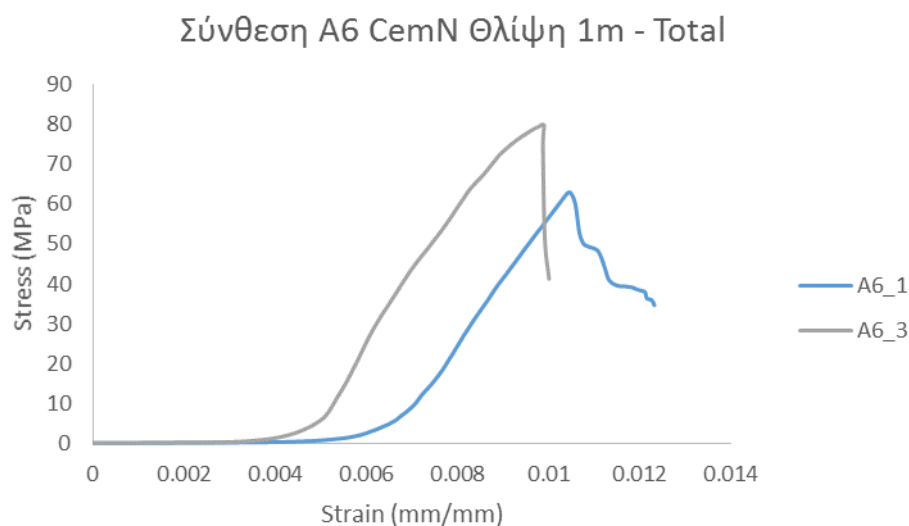
Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A20cem-1	10.337	7.496	1.168	0.0064	0.998
	A20cem-2	9.540	7.410	1.109	0.0018	0.997
	A20cem-3	10.651	8.052	1.210	0.0009	0.999
	A20cem-4	8.996	6.714	1.100	0.0002	0.999
	A20cem-5	10.981	8.189	1.215	0.0036	0.999
	A20cem-6	9.403	7.472	1.108	0.0001	0.996
	Average	9.985	7.556	1.152		

3.13 Κονιάματα με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο

Στις επόμενες δύο συνθέσεις, το τσιμέντο είναι η μοναδική κονία που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων. Συνεπώς χρησιμοποιήθηκε σε υψηλό ποσοστό δίνοντας αυτές τις πολύ υψηλές τιμές αντοχών.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.12, το τσιμέντο επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί στις ιστορικές κατασκευές μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες λόγω των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων του.

Η χρήση του ως αποκλειστική κονία στο κονίαμα συνεπάγεται ότι θα χρησιμοποιηθεί ίσως για να αποκαταστήσει μεγάλο τμήμα της μνημειακής κατασκευής το οποίο έχει πιθανόν αποκολληθεί.

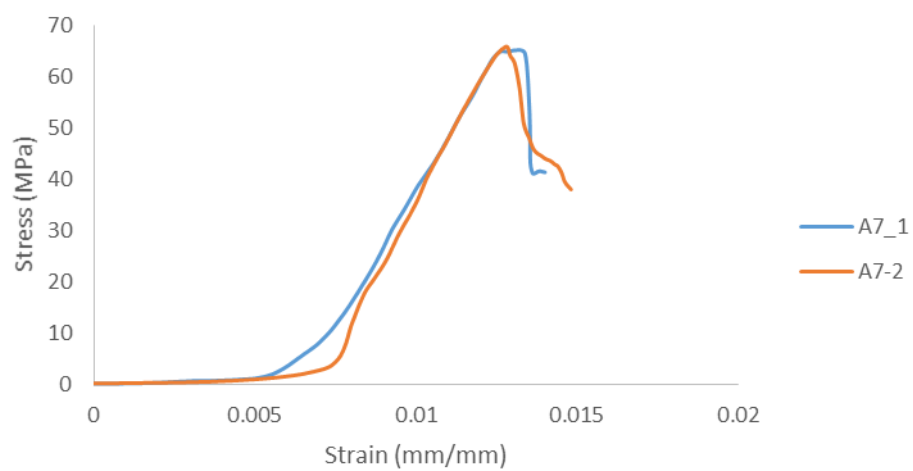


Σχήμα 50: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίων με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο - Σύνθεση A6 CemN Θλίψη 1m

Πίνακας 51: Στοιχεία δοκιμών με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο - Σύνθεση A6 CemN Θλίψη 1m

Σύνθεση A6 CemN Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A6_1	62.927	34.613	14.271	0.007	0.984
	A6_3	79.690	41.238	21.807	0.002	0.983
	Average	71.309	37.926	18.039		

Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m - Total



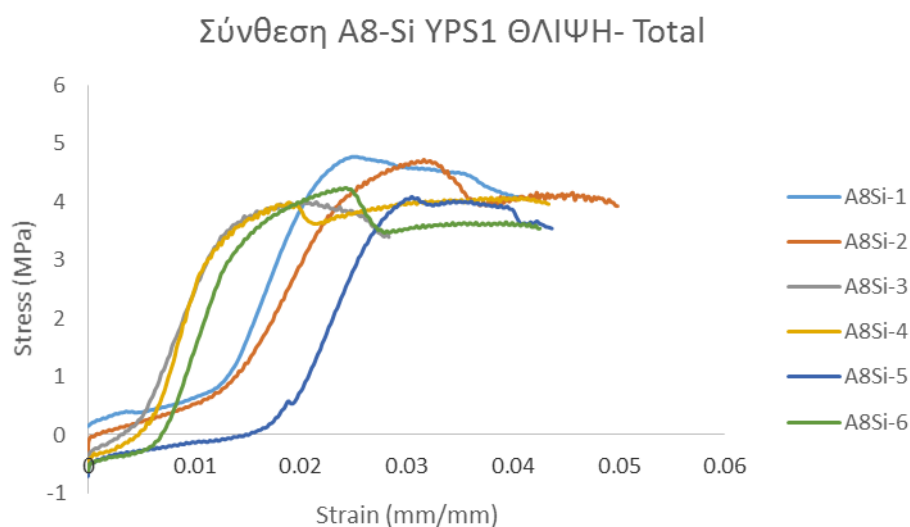
Σχήμα 51: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο - Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m

Πίνακας 52: Στοιχεία δοκιμών με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο - Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m

Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A7_1	65.078	41.350	11.998	0.0013	0.983
	A7_2	65.879	38.007	11.394	0.0055	0.989
	Average	65.479	39.679	11.696		

3.14 Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικά

Η χρήση υδρόφιλων νανοϋλικών στο κονίαμα, όπως είναι η νανοσίλικά και η νανοτιτανία, αυξάνει τη συγκράτηση υγρασίας στο εσωτερικό τους, διευκολύνοντας με αυτό τον τρόπο την ενανθράκωση καθώς και την ενυδάτωση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και την αύξηση της δυσθραυστότητας, καθώς το κονίαμα γίνεται πιο πλαστικό και αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται έως την τάση θραύσης.

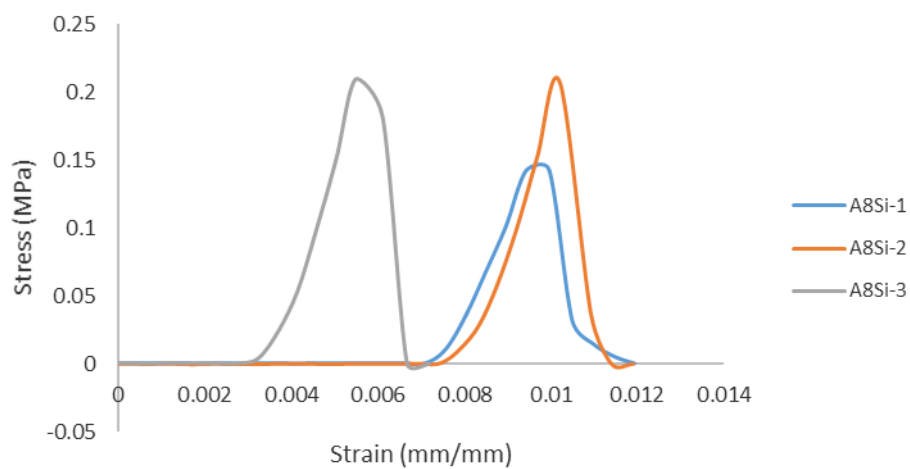


Σχήμα 52: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικά - Σύνθεση A8-Si YPS1 ΘΛΙΨΗ

Πίνακας 53: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικα - Σύνθεση A8-Si YPSi1
ΘΛΙΨΗ

Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΘΛΙΨΗ	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A8Si-1	4.771	4.084	0.389	0.0048	0.995
	A8Si-2	4.723	3.926	0.289	0.0006	0.997
	A8Si-3	4.024	3.394	0.465	0.0002	0.998
	A8Si-4	4.074	3.961	0.649	0.0026	0.992
	A8Si-5	4.086	3.541	0.433	0.0001	0.992
	A8Si-6	4.238	3.542	0.535	0.0009	0.991
	Average	4.319	3.741	0.460		

Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΚΑΜΨΗ - Total

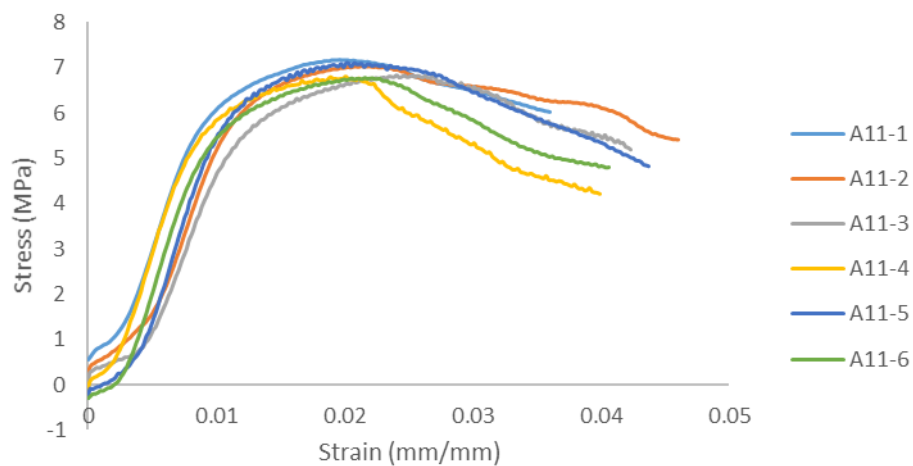


Σχήμα 53: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικα - Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΚΑΜΨΗ

Πίνακας 54: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικά - Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΚΑΜΨΗ

Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΚΑΜΨΗ	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A8Si-1	0.143	0.0003	0.070	0.000009	0.760
	A8Si-2	0.207	0.0005	0.093	0.000009	0.719
	A8Si-3	0.210	0.0004	0.109	0.000022	0.923
	Average	0.187	0.0004	0.091		

Σύνθεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m - Total



Σχήμα 54: Καμπύλες Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικά - Σύνθεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m

Πίνακας 55: Στοιχεία δοκιμών με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικά - Σύνθεση A11 YPSi1
Θλίψη 3m

Σύνθεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m	Specimens	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)	R ²
	A11-1	7.160	6.007	0.886	0.002	0.996
	A11-2	7.030	5.411	0.809	0.007	0.995
	A11-3	6.818	5.176	0.765	0.002	0.995
	A11-4	6.795	4.203	0.904	0.001	0.992
	A11-5	7.107	4.826	0.936	0.002	0.994
	A11-6	6.782	4.804	0.886	0.004	0.993
	Average	6.949	5.071	0.864		

Κεφάλαιο 4

4.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Ρέι Κλαφ, ο Βάλτερ Ριτζ, ο Μπόρις Γκαλέρκιν και άλλοι.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MSC -Marc) και δημιουργείται το μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον

δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με πρόγραμμα που αποκαλείται προ-επεξεργαστής (pre processor).

3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικών μεθόδων.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται μετ-επεξεργαστής (post processor), για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με πεπερασμένου μεγέθους στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα.

Για να γίνει χρήση μητρωικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων.

Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις.

Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το

πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους. [5,6]

4.2 Αριθμητική προσομοίωση κυβικού δοκιμίου τοιχοποιίας σε θλίψη με πεπερασμένα στοιχεία

4.2.1 Γενικά

Υπάρχουν διάφορα είδη τοιχοποιιών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ενός δομικού συστήματος. Διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της κατασκευής και τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Η τοιχοποιία είναι από τα αρχαιότερα δομικά υλικά. Είναι υλικό πολυφασικό και πολύμορφο. Τα βασικά συστατικά της είναι οι λίθοι και το συνδετικό κονίαμα. Οι λίθοι μπορεί να είναι τεχνητοί ή τεμάχια φυσικών λίθων και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία υλικών, κατεργασίας, σχημάτων και μεγεθών. Το κονίαμα παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία συνθέσεων και αντοχών αλλά μπορεί και να απουσιάζει εντελώς (ξηρολιθοδομές).

Ένας επιπλέον παράγοντας πολυμορφίας είναι και ο τύπος δόμησης (πλέξη) της τοιχοποιίας. Απαιτείται θεμελιώδης έρευνα των επί μέρους φάσεων (λίθοι – κονίαμα) και της μηχανικής "συνεργασίας" τους στο σώμα της τοιχοποιίας για την κατανόηση της συμπεριφοράς της.

Μέχρι τις αρχές του 20 ου αιώνα ο σχεδιασμός κτιρίων με φέροντα οργανισμό από τοιχοποιία ήταν σχεδόν εμπειρικός. Σε χώρες με παράδοση στη χρήση της φέρουσας τοιχοποιίας και σχετικά άσειστες (Μ. Βρετανία) εξακολουθεί ακόμη και σήμερα εκτεταμένη χρήση της φέρουσας τοιχοποιίας σε νέα κτίρια μέχρι και τεσσάρων ορόφων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται διεθνώς έντονη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για τη συντήρηση και ανάδειξη της οικιστικής πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσα στο κλίμα αυτό αναζωπυρώθηκε και η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των μνημείων και διατηρητέων κτιρίων και συνόλων είναι κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία. Παράλληλα άρχισαν

να ανακαλύπτονται ξανά τα ξεχασμένα προτερήματα της τοιχοποιίας όπως : θερμομόνωση, πυρασφάλεια, αντοχή στο χρόνο, αισθητική υπεροχή.

Τροχοπέδη στην ανάπτυξη της διεθνούς συνεργασίας για την προώθηση της έρευνας της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας είναι η πολυμορφία και πολυτυπία του ίδιου του υλικού, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη δυσκολία προτυποποίησης υλικών και μεθόδων.

Πολλές χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, σχετικά πρόσφατα απέκτησαν κανονισμό για κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία. Παρατηρείται ανομοιομορφία μεθόδων, ποικιλία ορισμών και σημαντική διασπορά τιμών μεταξύ των διαφόρων κανονισμών. Είναι χαρακτηριστικό ότι το πρώτο κείμενο Ευρωκώδικα για κατασκευές από τοιχοποιία (Ευρωκώδικας 6 κυκλοφόρησε μόλις το 1989).

Η μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας χαρακτηρίζεται από:

- α. Σχετικά υψηλή θλιπτική αντοχή.
- β. Ιδιαίτερα χαμηλή εφελκυστική αντοχή.
- γ. Σχετικά ικανοποιητική αντοχή σε διάτμηση.
- δ. Έντονα ανισότροπη συμπεριφορά.

Εκτός της θλιπτικής αντοχής, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αποτελούν και τις βασικές αδυναμίες της τοιχοποιίας. Οι αδυναμίες αυτές οφείλονται όχι μόνο στον ψαθυρό χαρακτήρα των λίθων και του κονιάματος, αλλά κυρίως στην συμπεριφορά της διεπιφάνειας επαφής ιδιαίτερα κατά μήκος των συνεχών οριζόντιων αρμών που έχουν χαρακτηριστεί ως τα "αδύνατα επίπεδα της τοιχοποιίας".

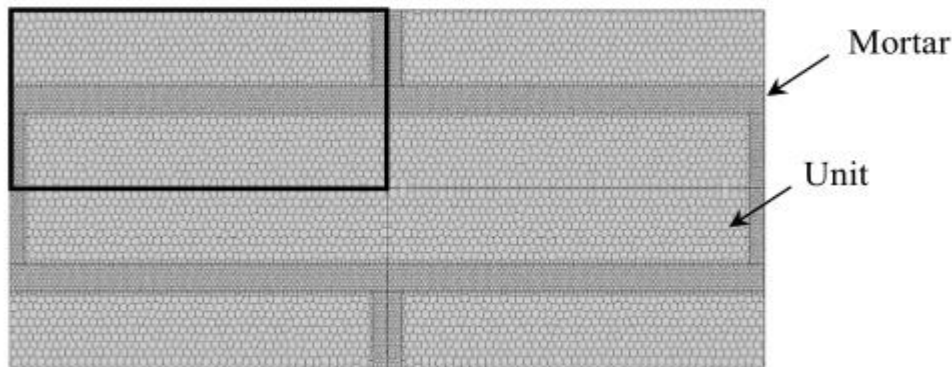
Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας είναι οι εξής:

- α. Αντοχή των λίθων
- β. Θλιπτική αντοχή του κονιάματος
- γ. Γεωμετρία δόμησης (πάχος αρμού/ύψος λίθου)
- δ. Παραμορφώσεις λίθων και κονιάματος
- ε. Ποιότητα δόμησης. [42]

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η αριθμητική προσομοίωση δοκιμών τοιχοποιίας σε ομοιόμορφη θλίψη από συγκεκριμένου τύπου συνδετικά κονιάματα με στόχο την εύρεση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών. Η σύνθεση των κονιαμάτων έγινε στο Πολυτεχνείο Κρήτης από την ερευνητική ομάδα της Αναπληρώτριας καθηγήτριας κυρίας Παγώνας Μαραβελάκη. Για το σκοπό αυτό,

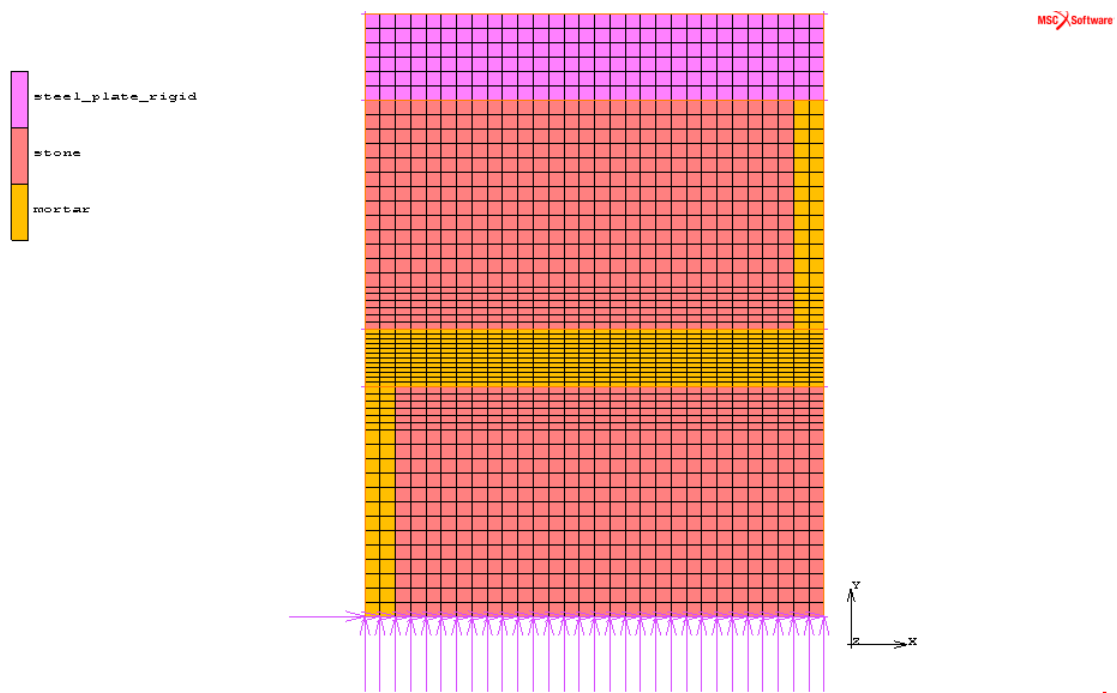
δημιουργήθηκε μια σειρά 10 δοκιμών τοιχοποιίας (η διαφορά έγκειται στην χρήση διαφορετικού συνδετικού κονιάματος) διαστάσεων 90mm (ύψος) x 80mm (μήκος) που προσομοιώνουν πρακτικά το $\frac{1}{4}$ ενός πραγματικού δοκιμίου τοιχοποιίας λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας.

Σύμφωνα με την εργασία του Hose Luis Pina – Henriques, έτσι και εδώ, το προσομοίωμα αναπαριστάται στην παρακάτω εικόνα: [46]



Εικόνα 3: Δοκίμιο τοιχοποιίας

Το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελείται από 1680, 2D πεπερασμένα τετρακομβικά στοιχεία, κατάλληλα για να προσομοιώσουν τη δοκιμή θλίψης, του μέσου επιπέδου του δοκιμίου σε κατάσταση επίπεδης έντασης. Τα δοκίμια αποτελούνται από 2 λίθους που συνδέονται μεταξύ τους με συγκεκριμένο συνδετικό κονίαμα για το οποίο γίνεται χρήση των πειραματικά μετρηθέντων ιδιοτήτων του. Στην πειραματική δοκιμή θλίψης που προσομοιώνεται αριθμητικά θεωρείται ότι το δοκίμιο εγκλωβίζεται μεταξύ 2 μεταλλικών πλακιδίων που τοποθετούνται με στόχο την ομοιόμορφη μεταφορά του θλιπτικού φορτίου από το μηχανικό έμβολο φόρτισης στο δοκίμιο τοιχοποιίας. Από τα 1680 συνολικά πεπερασμένα στοιχεία, 180 περιγράφουν τις μεταλλικές πλάκες μέσω των οποίων μεταφέρεται το θλιπτικό φορτίο, 1064 περιγράφουν το λίθο και 436 το κονίαμα. Στην εικόνα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα του δοκιμίου τοιχοποιίας που περιγράφεται ανωτέρω.



Εικόνα 4: ¼ δοκιμίου τοιχοποιίας

Στην πραγματικότητα, τα δοκίμια τοιχοποιίας που λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία δύναται να προσομοιώσουν τμήματα τοιχοποιίας παρόμοια με αυτά που απεικονίζονται στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 5, Εικόνα 6).



Εικόνα 5: Τμήμα τοιχοποιίας (α)



Εικόνα 6: Τμήμα τοιχοποιίας (β)

Και οι δύο αυτές εικόνες αποτελούν τμήματα των εργασιών συντήρησης στην εξωτερική βόρεια όψη του κτιρίου του Ναυτικού Μουσείου Κρήτης στην Ακτή Κουντουριώτη.



Εικόνα 7: Βόρεια όψη Ναυτικού Μουσείου

4.2.2 Καταστατικοί νόμοι υλικών

Για τα αριθμητικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή ότι οι λίθοι συμπεριφέρονται γραμμικώς ελαστικά και ισότροπα σύμφωνα με τον νόμο του Hooke. Το μέτρο ελαστικότητας των λίθων είναι $E=33700$ MPa ενώ ο λόγος του Poisson παίρνει την τιμή $\nu=0.16$. Για τα μεταλλικά χαλύβδινα πλακίδια λαμβάνεται μέτρο ελαστικότητας $E=210000$ MPa και λόγος Poisson $\nu=0.3$. Το πάχος των μεταλλικών πλακιδίων καθώς και η ποιότητα του χάλυβα είναι τέτοια ώστε τα μεταλλικά πλακίδια να θεωρούνται πρακτικώς απαραμόρφωτα για την φόρτιση που επιβάλλεται και ως εκ τούτου το επιβαλλόμενο φορτίο να μεταφέρεται αυτούσιο και ομοιόμορφα στο κυβικό δοκίμιο τοιχοποιίας που εξετάζεται. Για το συνδετικό υλικό του κονιάματος γίνεται χρήση διαφορετικών κονιαμάτων στα οποία θεωρείται ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για το καθένα λαμβάνεται από

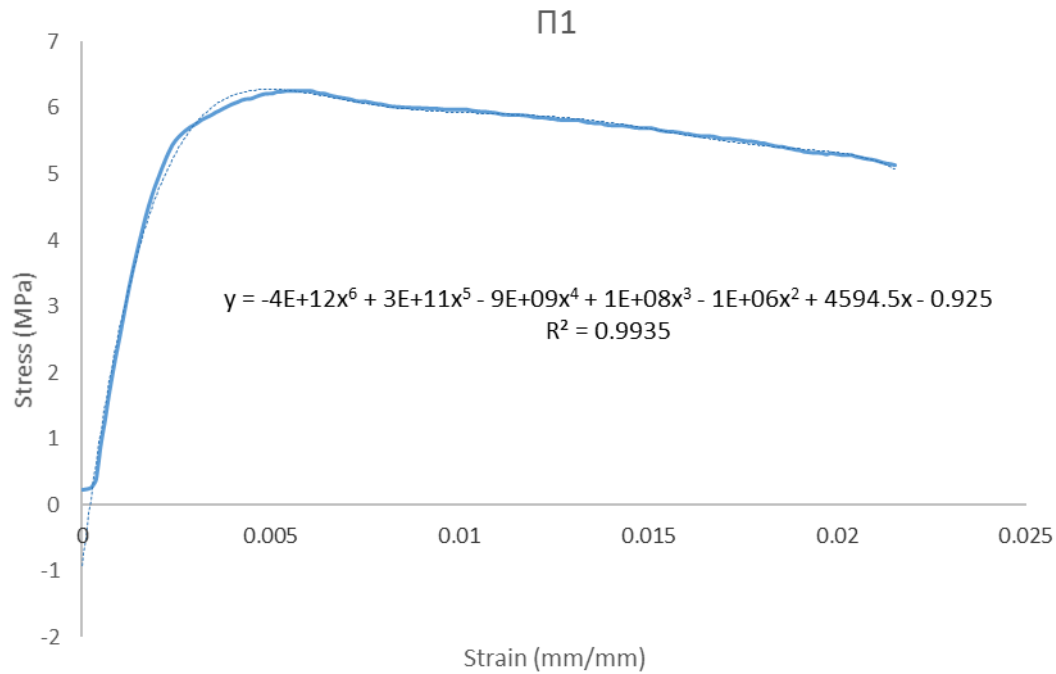
πειραματικά αποτελέσματα, όπως αυτά προέκυψαν και περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3, ενώ υιοθετείται το ελαστοπλαστικό κριτήριο διαρροής Mohr-Coulomb (linear). Στον Πίνακα 56 και τα Σχήματα 55 έως 65 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τα στοιχεία των κονιαμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Πίνακας 56 : Χαρακτηριστικά κονιαμάτων

Marc Model	Mortar	Characteristics	Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)	Toughness (KJ/m ²)
Model 1i	Π1	-	6.253	5.131	2.9	0.00149
Model 1ii	Π3	-	6.034	4.834	2.053	0.00139
Model 2i	Uniaxial_MRX_0002	-	14.394	10.788	1.853	3.345
Model 2ii	Uniaxial_MRX_0004	-	13.935	11.352	2.364	6.229
Model 3i	pb_0006	-	2.356	2.047	1.06	0.0005
Model 3ii	pb_0009	-	2.364	2.124	0.875	0.00005
Model 4i	Γυψοκονίαμα 4	Χύτευση 1 (1m 1 ^η Σύνθεση)	0.946	0.834	0.268	0.0002
Model 4ii	X12_s10_001	Χύτευση 12 (1m Σύνθεση 10)	10.653	6.72	6.229	0.015
Model 5i	ML9m_2	MLNA3M (9 months – 21.02.13)	17.001	11.08	6.234	0.0014
Model 5ii	A21_1	Σύνθεση A21 MLX Θλίψη 1m	10.978	8.813	2.995	0.0014

Μοντέλο 1i

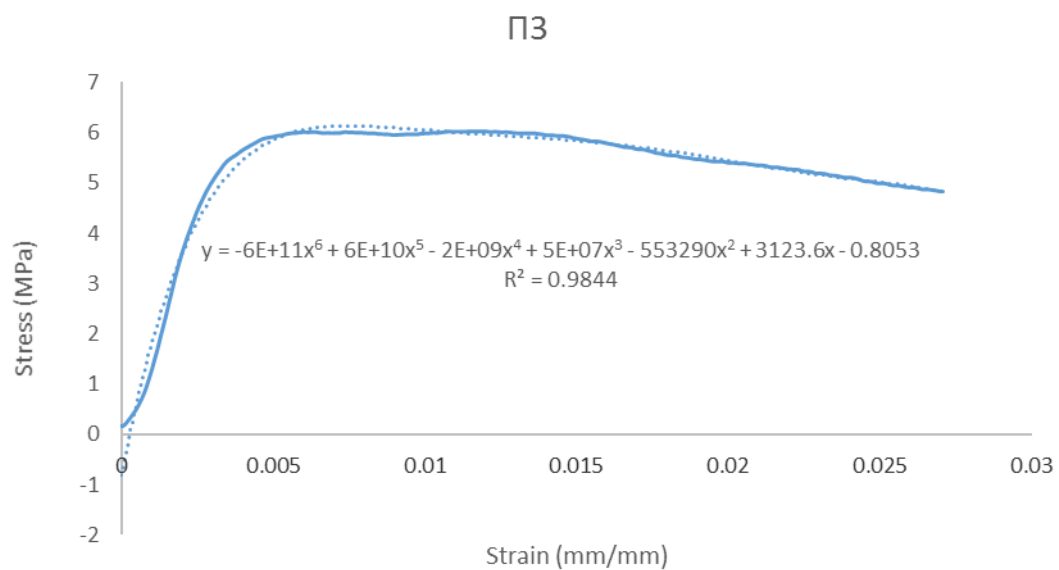
(νταμαρίσια άμμος, φυσική υδραυλική άσβεστος)



Σχήμα 55: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου Π1

Μοντέλο 1ii

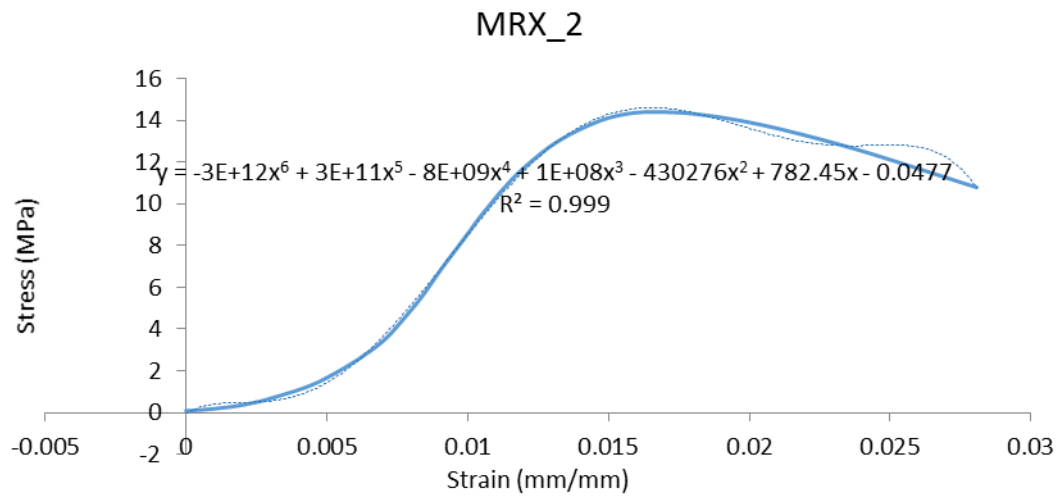
(Polyrinia) (νταμαρίσια άμμος, φυσική υδραυλική άσβεστος)



Σχήμα 56: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου Π3

Μοντέλο 2i

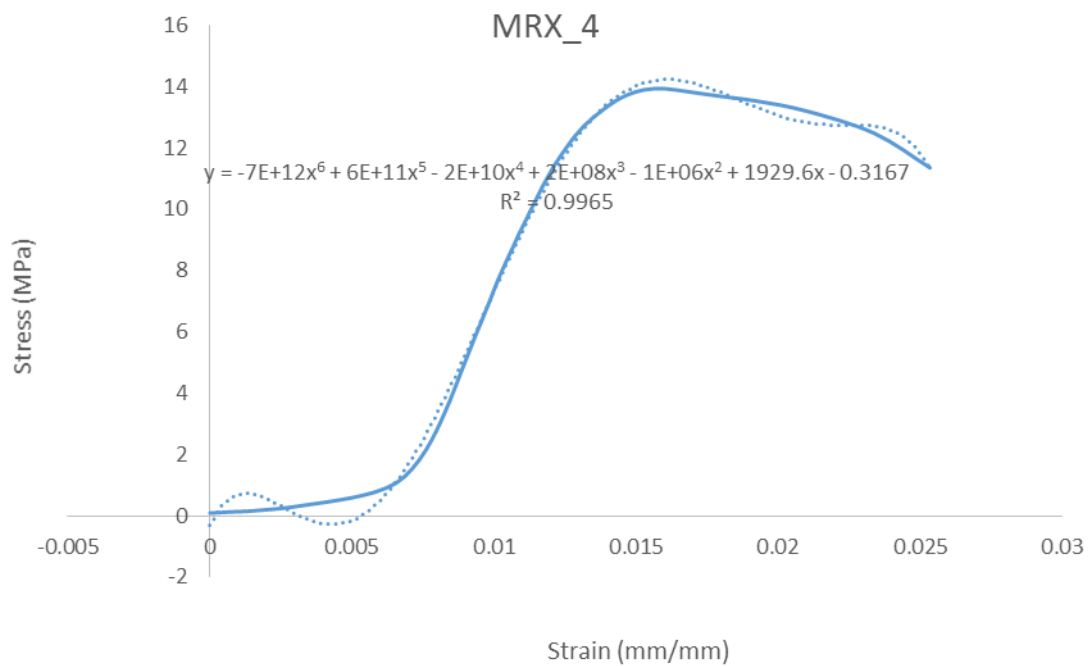
(Νταμαρίσια άμμος, NHL, μετακαολίνης)



Σχήμα 57: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου MRX_2

Μοντέλο 2ii

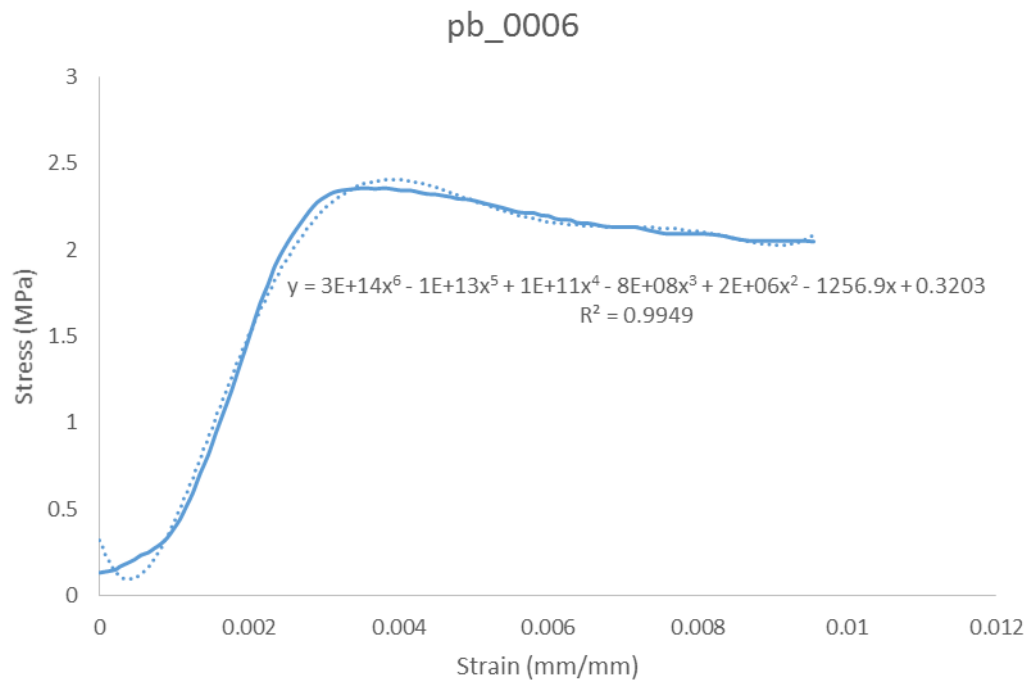
(Νταμαρίσια άμμος, NHL, μετακαολίνης)



Σχήμα 58: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου MRX_4

Μοντέλο 3i

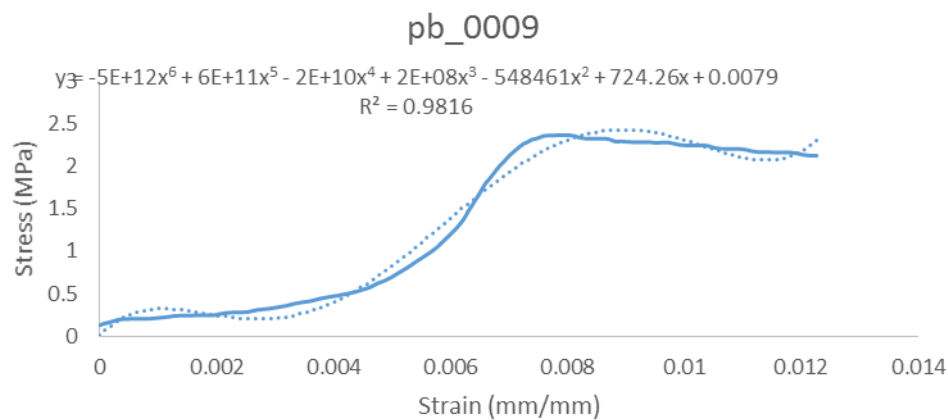
(Νταμαρίσια άμμος, πυριτική, NHL, PbCO₃<5%)



Σχήμα 59: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου pb_0006

Μοντέλο 3ii

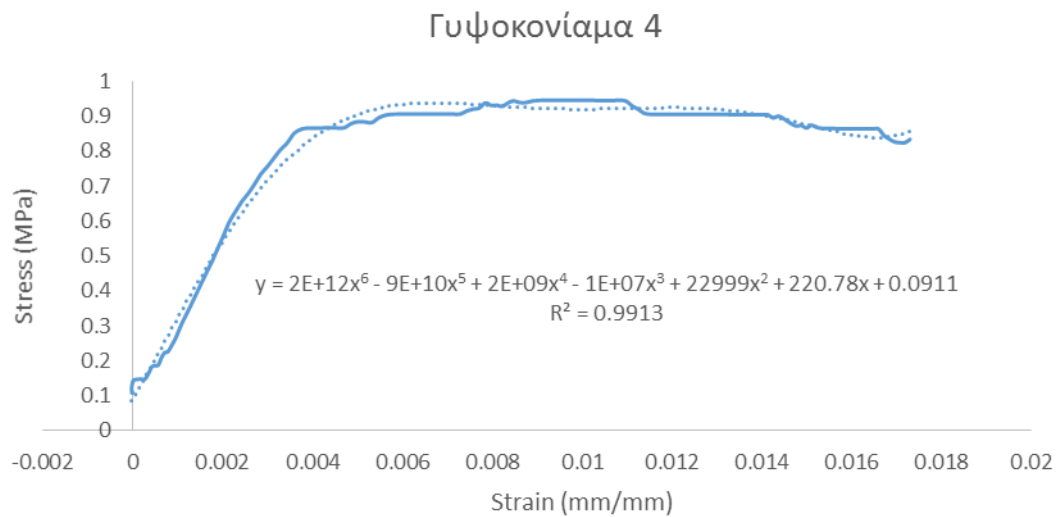
(Νταμαρίσια άμμος, πυριτική, NHL, PbCO₃<5%)



Σχήμα 60: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου pb_0009

Μοντέλο 4i

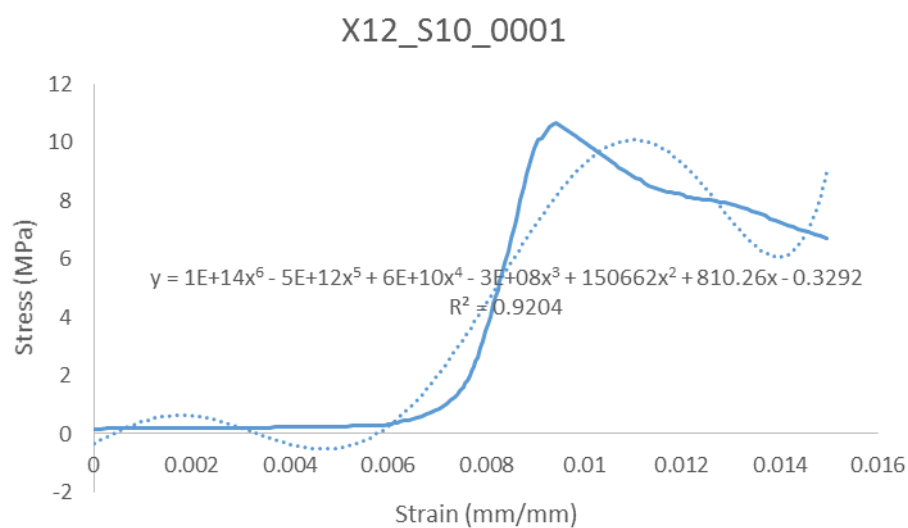
(Νταμαρίσια άμμο, γύψο, υδράσβεστο)



Σχήμα 61: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου Γυψοκονίαμα 4

Μοντέλο 4ii

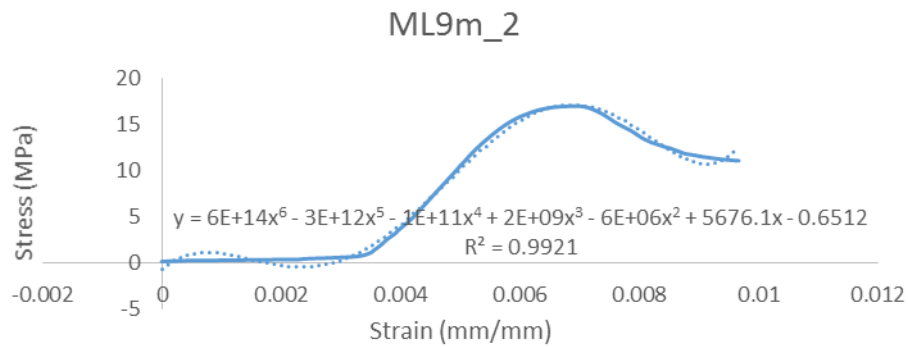
(Νταμαρίσια άμμο, γύψο, υδραυλική άσβεστο)



Σχήμα 62: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου X12_s10_001

Μοντέλο 5i

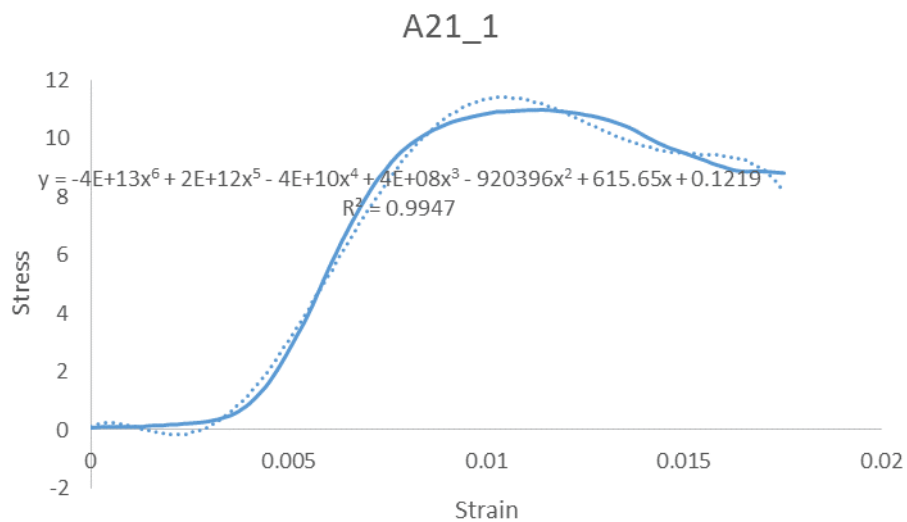
(Μετακαολίνης, υδράσβεστος, νταμαρίσια άμμος)



Σχήμα 63: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου ML9m_2

Μοντέλο 5ii

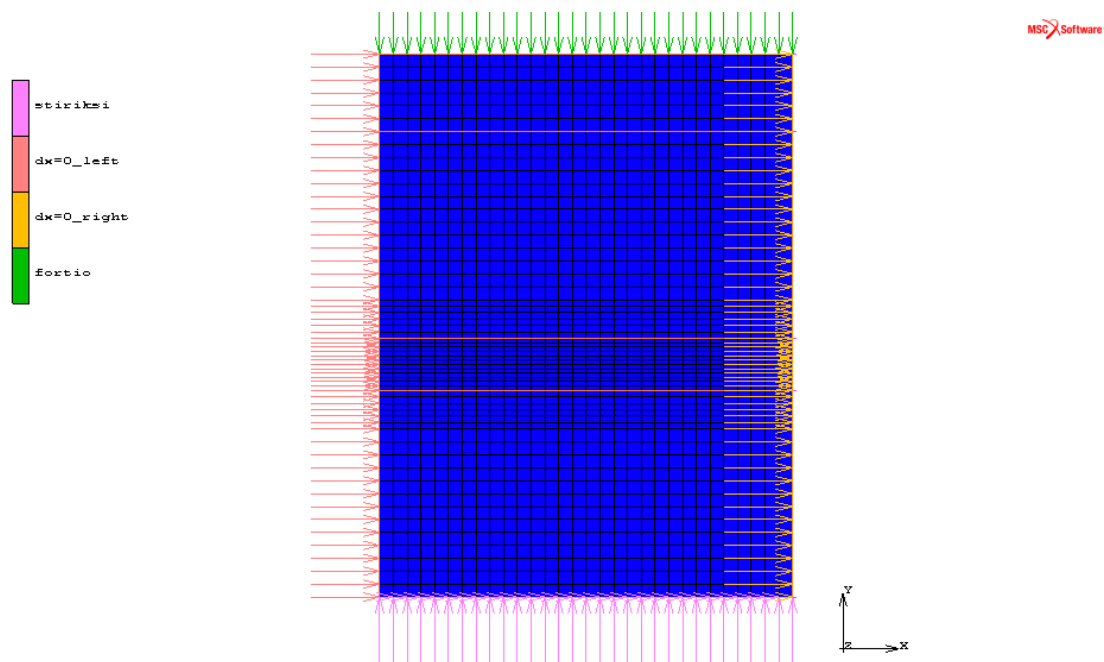
(Μετακαολίνης, υδράσβεστος, νταμαρίσια άμμος)



Σχήμα 64: Καμπύλη Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (mm/mm) δοκιμίου A21_1

4.2.3 Συνοριακές συνθήκες

Όπως ήδη τονίστηκε παραπάνω τα αριθμητικά ποσομοιώματα που δημιουργήθηκαν προσομοιώνουν μόνο το ¼ του πραγματικού δοκιμίου. Συνεπώς το διδιάστατο αριθμητικό ποσομοίωμα εφοδιάστηκε με τις κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας ($u_x=0$ στις πλευρικές κατακόρυφες επιφάνειες). Επίσης, εφαρμόστηκε θλιπτική κατακόρυφη φόρτιση στην άνω παρειά του δοκιμίου ενώ απαγορεύθηκε η κατακόρυφη και οριζόντια μετατόπιση της κάτω παρειάς του δοκιμίου. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται οι συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι λαμβάνεται υπόψη πλήρης διατμητική σύνδεση μεταξύ των λίθων και του κονιάματος με συνέπεια να μην υπάρχει δυνατότητα αποκόλλησης του κονιάματος από τον λίθο.



Εικόνα 8: Συνοριακές συνθήκες

4.2.4 Μη γραμμική ελαστοπλαστική ανάλυση

Για την εύρεση της θλιπτικής αντοχής των εξεταζόμενων δοκιμίων εφαρμόστηκε μη γραμμική ελαστοπλαστική ανάλυση. Στον φορέα επιβλήθηκε ένα αυξητικό φορτίο ενώ υιοθετήθηκε μια προχωρημένη και προσαρμοσμένη τεχνική (adaptive solution scheme) τύπου Newton-Raphson για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων του

προβλήματος. Η όλη διαδικασία εφαρμόστηκε στο πρόγραμμα μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Marc.

4.2.5 Μη γραμμικές αναλύσεις

Για τον κάθε διαφορετικό τύπο συνδετικού κονιάματος αντιστοιχεί ένα αριθμητικό προσομοίωμα δοκιμίου τοιχοποιίας που υποβλήθηκε σε κατακόρυφη θλιπτική καταπόνηση και επιλύθηκε αριθμητικώς με μη γραμμική ανάλυση (10 συνολικά διαφορετικά δοκίμια). Στις Εικόνες 9 έως 39 επιχειρείται μια συλλογή αποτελεσμάτων για την κάθε επίλυση στις οποίες παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας του δοκιμίου μέσω της καμπύλης απόκρισης κατακόρυφης θλιπτικής δύναμης-κατακόρυφης μετακίνησης, το πεδίο των τάσεων και παραμορφώσεων για συγκεκριμένα βήματα της ιστορίας της φόρτισης καθώς και η κατανομή των τάσεων κατά μήκος μια τομής του κονιάματος. Οι εικόνες έχουν ληφθεί από το τελευταίο βήμα φόρτισης (επίλυσης) του κάθε μοντέλου. Σε κάθε εικόνα αναγράφεται και το ποσοστό της φόρτισης, για το αντίστοιχο βήμα.

4.3 Αριθμητικά προσομοιώματα

Στις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου της τοιχοποιίας έχουμε εφαρμόσει φορτίο 100 kN/κόμβο στους 31 κόμβους της άνω παρειάς του δοκιμίου. Καθώς το δοκίμιο θλίβεται, προκύπτουν οι παρακάτω χρωματικοί κώδικες εντατικών μεγεθών για το τελευταίο βήμα φόρτισης (increment) στο οποίο ολοκληρώνεται η επίλυση του προσομοιώματος. Σε κάθε δοκίμιο, οι κόμβοι αποκλίνουν σταδιακά από τις αρχικές τους θέσεις από τη στιγμή εμφάνισης της τάσης διαρροής και ύστερα.

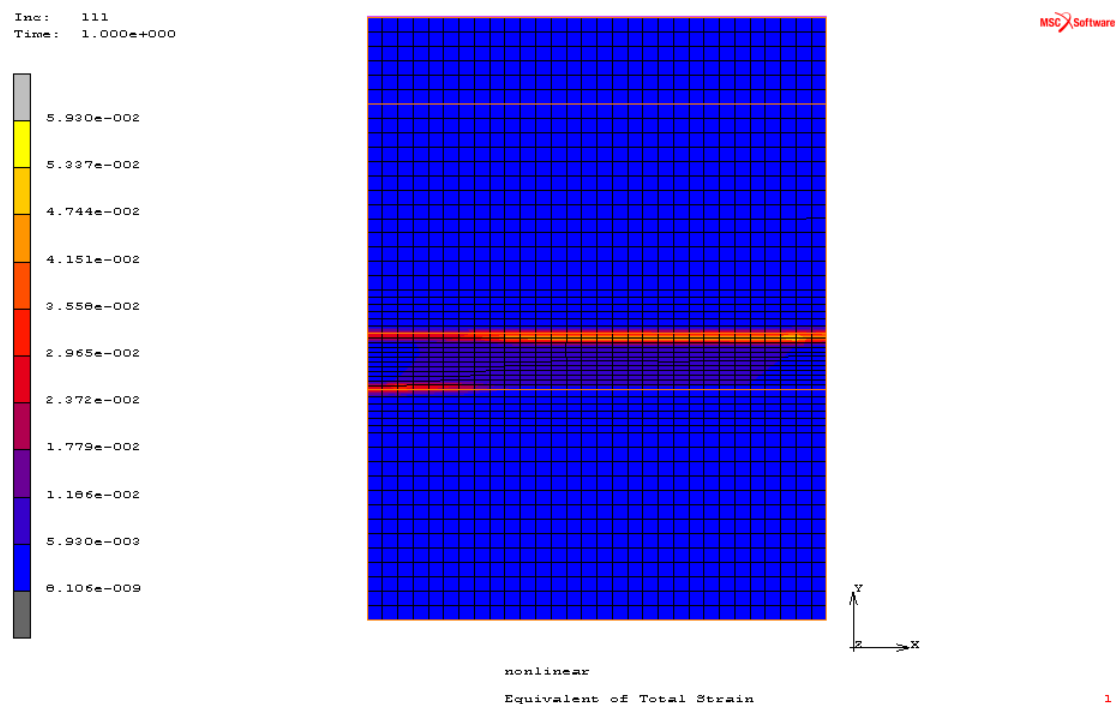
Για κάθε προσομοίωμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μοντέλων και δίνονται εικόνες της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (equivalent plastic strain) ως ένδειξη των περιοχών του κονιάματος που έχουν αρχίσει να αστοχούν, της ισοδύναμης τάσης (equivalent stress) για να δούμε τις περιοχές συγκέντρωσης τάσης από τις οποίες αρχίζει η αστοχία καθώς και της

ισοδύναμης συνολικής παραμόρφωσης (equivalent of total strain) ως μία συνολική εικόνα της συνολικής παραμόρφωσης του δοκιμίου.

Στο τέλος κάθε ενότητας παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την επίλυση του κάθε μοντέλου. Σε όλα τα διαγράμματα φόρτισης – μετακίνησης, η μέγιστη τιμή που δύναται να φτάσει η φόρτιση είναι τα 3100kN, τιμή που προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τους 31 κόμβους στην άνω παρειά του κονιάματος με 100kN, τα οποία εφαρμόζονται στον κάθε κόμβο.

4.3.1 Αριθμητικό προσομοίωμα 1i

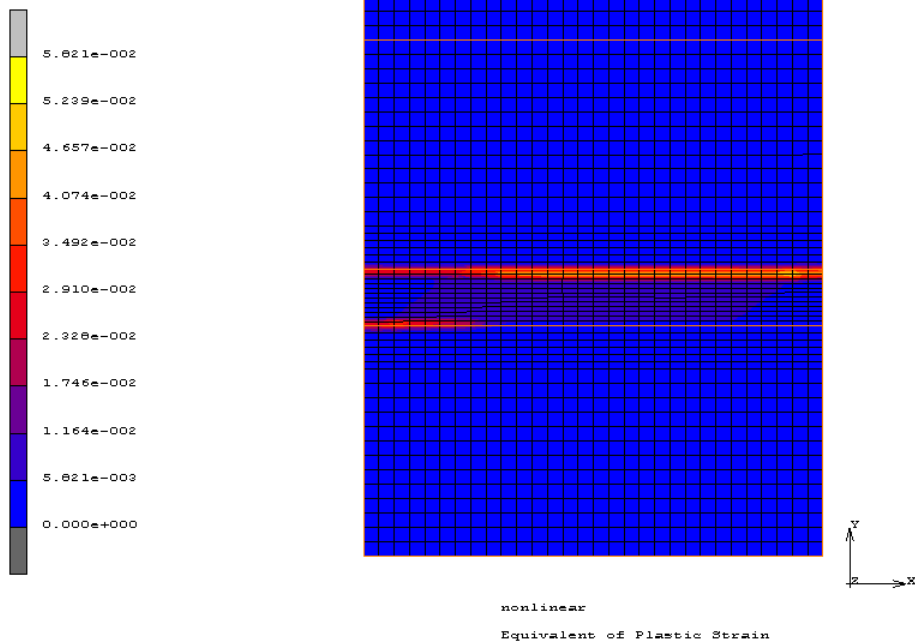
Η επίλυση του προσομοιώματος 1i, ολοκληρώθηκε σε 111 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3099 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 9: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 111 (100% της φόρτισης)

Inc: 111
Time: 1.000e+000

MSC Software

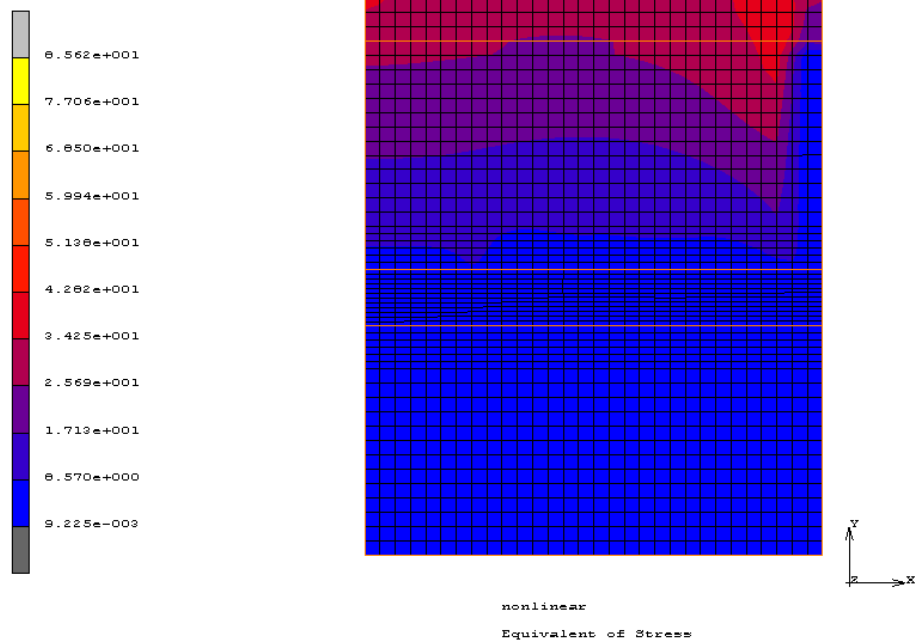


1

Εικόνα 10: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 111 (100% της φόρτισης)

Inc: 111
Time: 1.000e+000

MSC Software

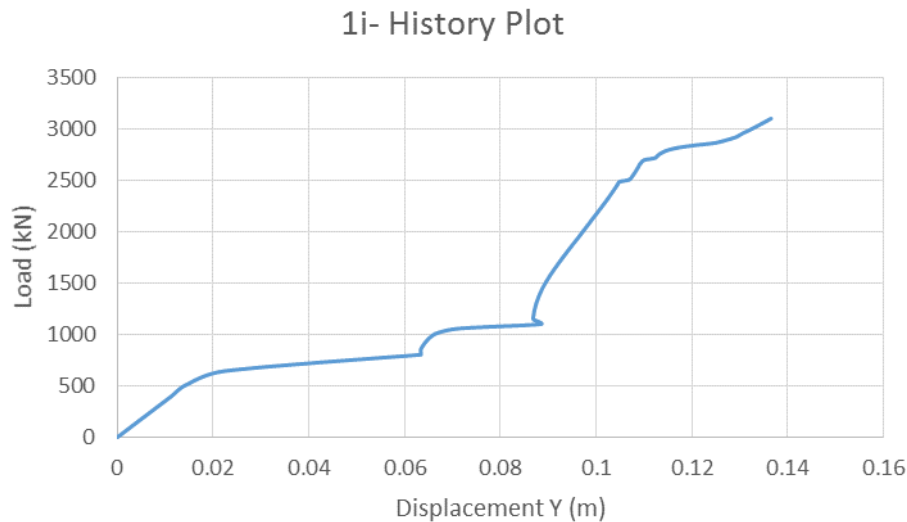


1

Εικόνα 11: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 111 (100% της φόρτισης)

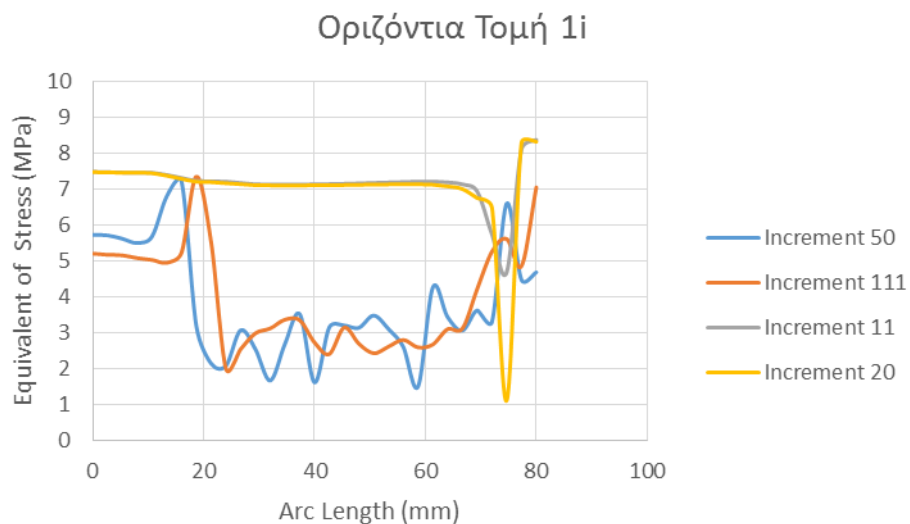
Η γραφική παράσταση του Σχήματος 66 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη

μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50) . Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 804kN για 0,06mm. Ακολουθεί μια μικρή αύξηση του φορτίου για σχεδόν σταθερή μετατόπιση και στη συνέχεια το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3099kN για μετατόπιση 0,14mm.



Σχήμα 66: Καμπύλη Φορτίου (kN) – Μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 1i

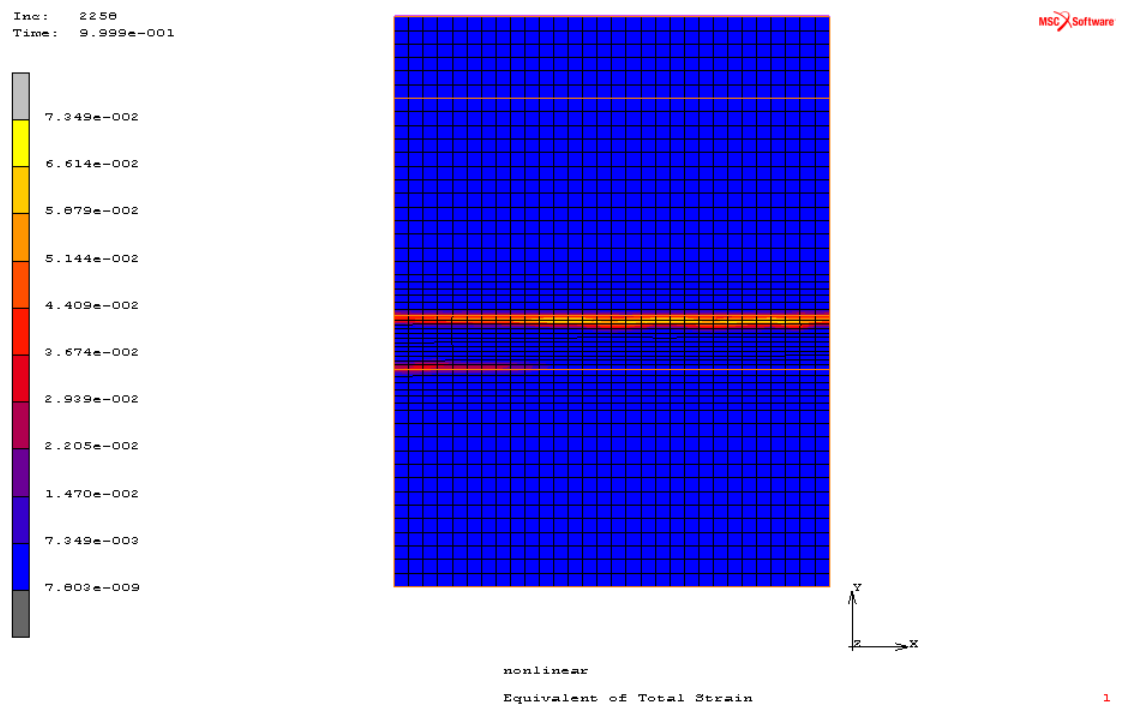
Στο Σχήμα 67, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 1i, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 11 αντιπροσωπεύει το 26% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 20 το 26%, το βήμα 50 το 55% και το βήμα 111 το 100% της συνολικής φόρτισης.



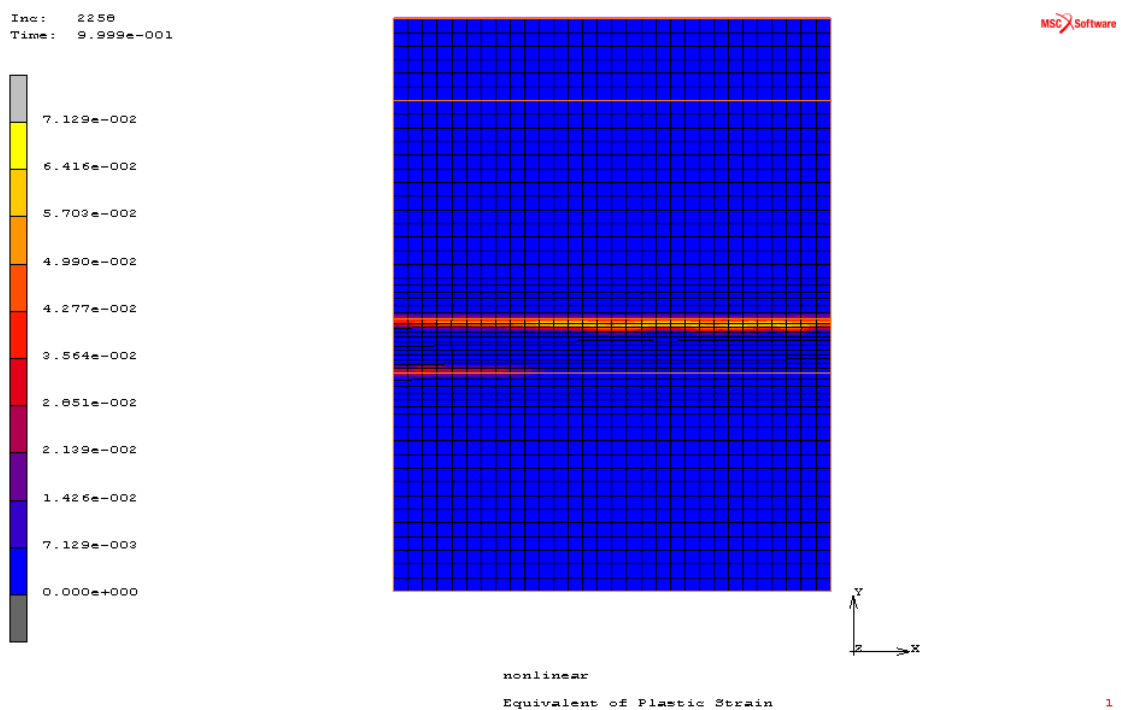
Σχήμα 67: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 1i)

4.3.2 Αριθμητικό προσομοίωμα 1ii

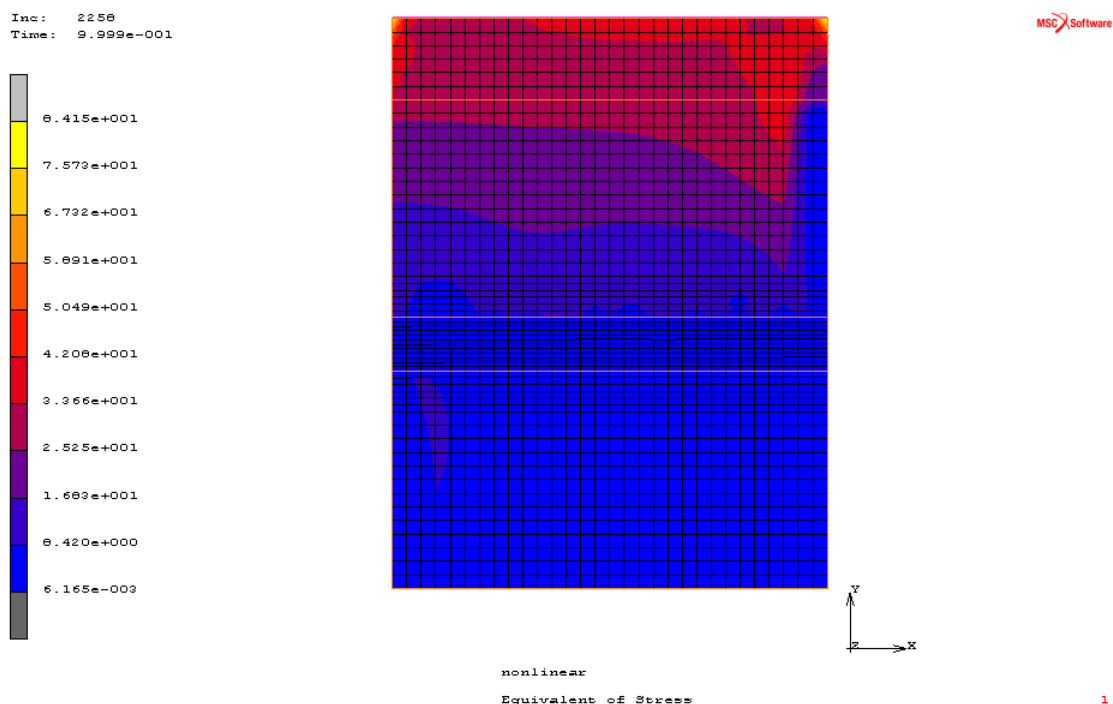
Η επίλυση του προσομοιώματος 1ii, ολοκληρώθηκε σε 2258 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3098 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 12: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 2258 (100% της φόρτισης)

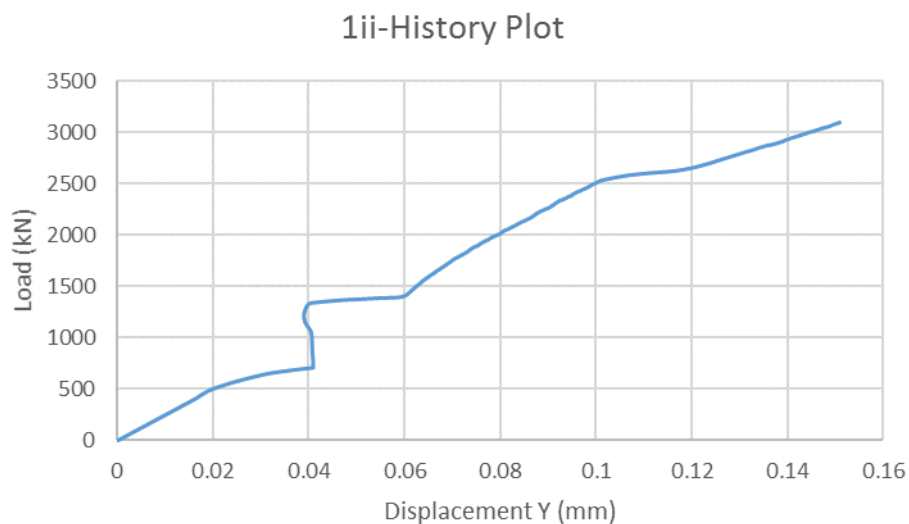


Εικόνα 13: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 2258 (100% της φόρτισης)



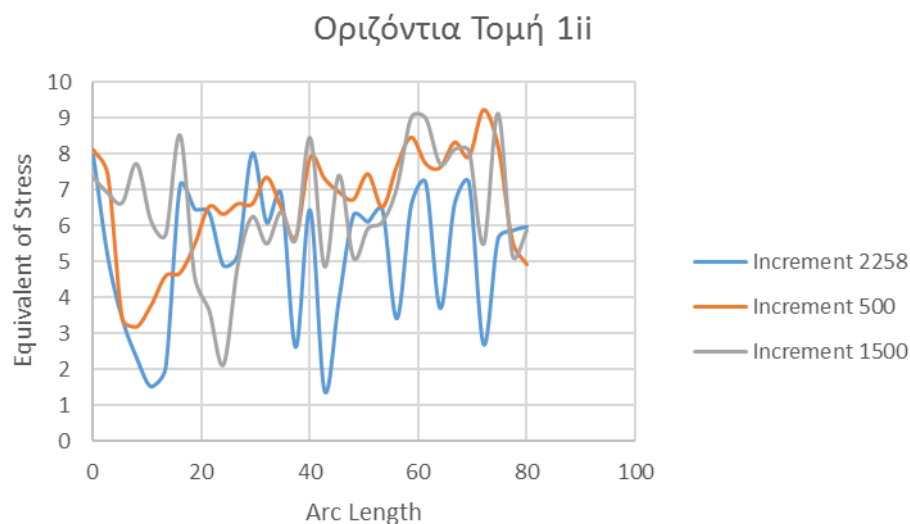
Εικόνα 14: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 2258 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 68 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (history plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50). Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 710kN για 0,04mm. Ακολουθεί μια μικρή αύξηση του φορτίου για σχεδόν σταθερή μετατόπιση και στη συνέχεια το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3098kN για μετατόπιση 0,15mm.



Σχήμα 68: Καμπύλη Φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 1ii

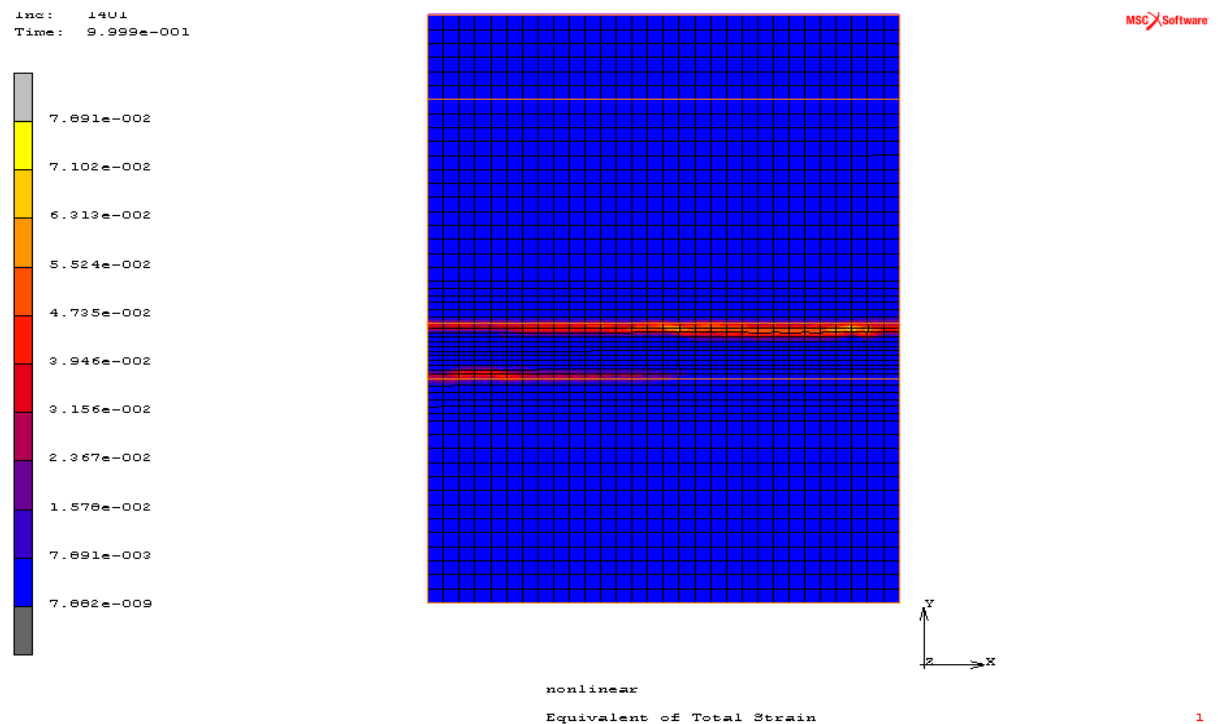
Στο Σχήμα 69, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 1ii, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 500 αντιπροσωπεύει το 69% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 1500 το 91% και το βήμα 2258 το 100% της συνολικής φόρτισης.



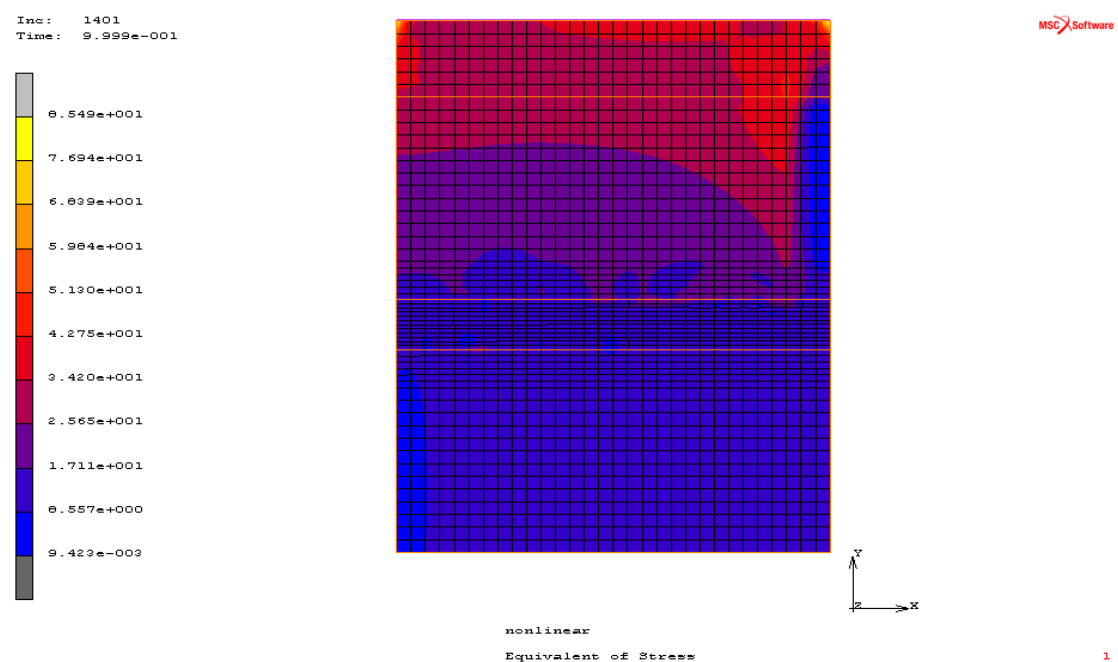
Σχήμα 69: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 1ii)

4.3.3 Αριθμητικό προσομοίωμα 2i

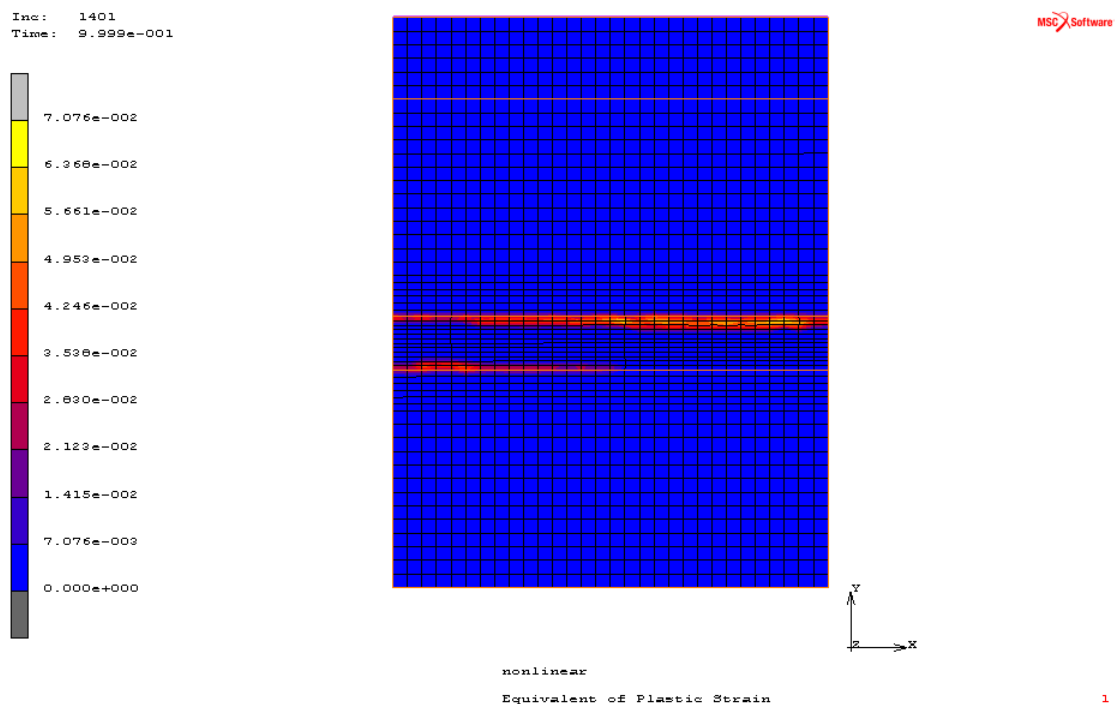
Η επίλυση του προσομοιώματος 2i, ολοκληρώθηκε σε 1401 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3098 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 15: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 1401 (100% της φόρτισης)

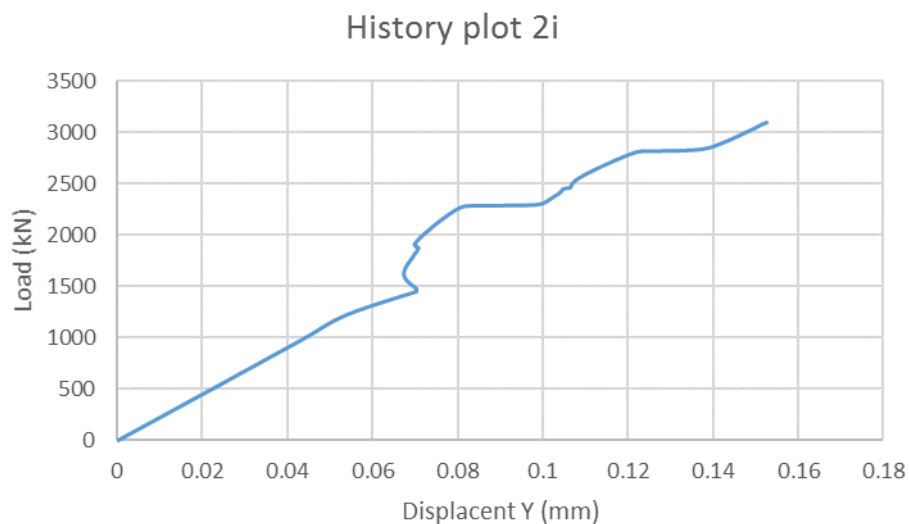


Εικόνα 16: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 1401 (100% της φόρτισης)



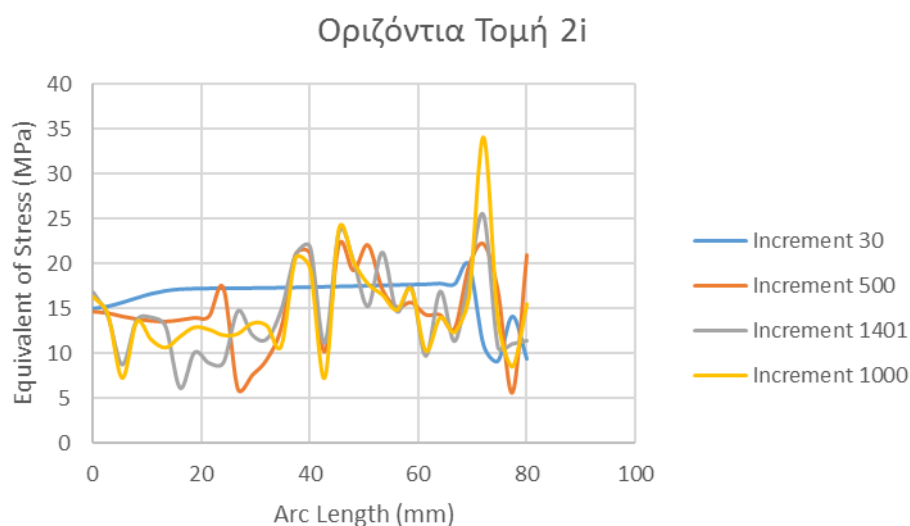
Εικόνα 17: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 1401 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 70 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50) . Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή η έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 1452kN για 0,07mm. Στη συνέχεια ενώ το φορτίο αυξάνεται, η μετατόπιση μειώνεται μέχρι να αρχίσει και πάλι την ανοδική πορεία μετά τα 0,068mm. Η μείωση της μετατόπισης με ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου, συμβαίνει διότι στο μοντέλο ύστερα από την αστοχία του κονιάματος, οι κόμβοι μετατοπίζονται με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν ένα πιο συμπαγές υλικό στο σημείο επαφής τους. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3098kN για μετατόπιση 0,15mm.



Σχήμα 70: Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 2i

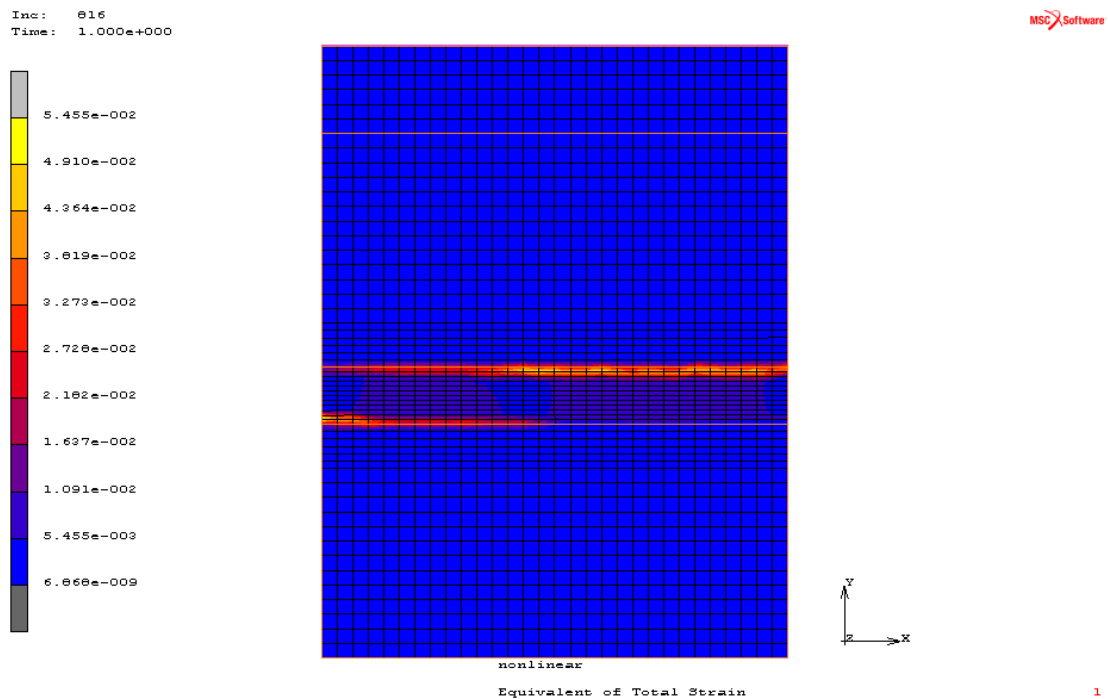
Στο Σχήμα 71, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 2i, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 30 αντιπροσωπεύει το 48% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 500 το 68%, το βήμα 1000 το 87% και το βήμα 1401 το 100% της συνολικής φόρτισης.



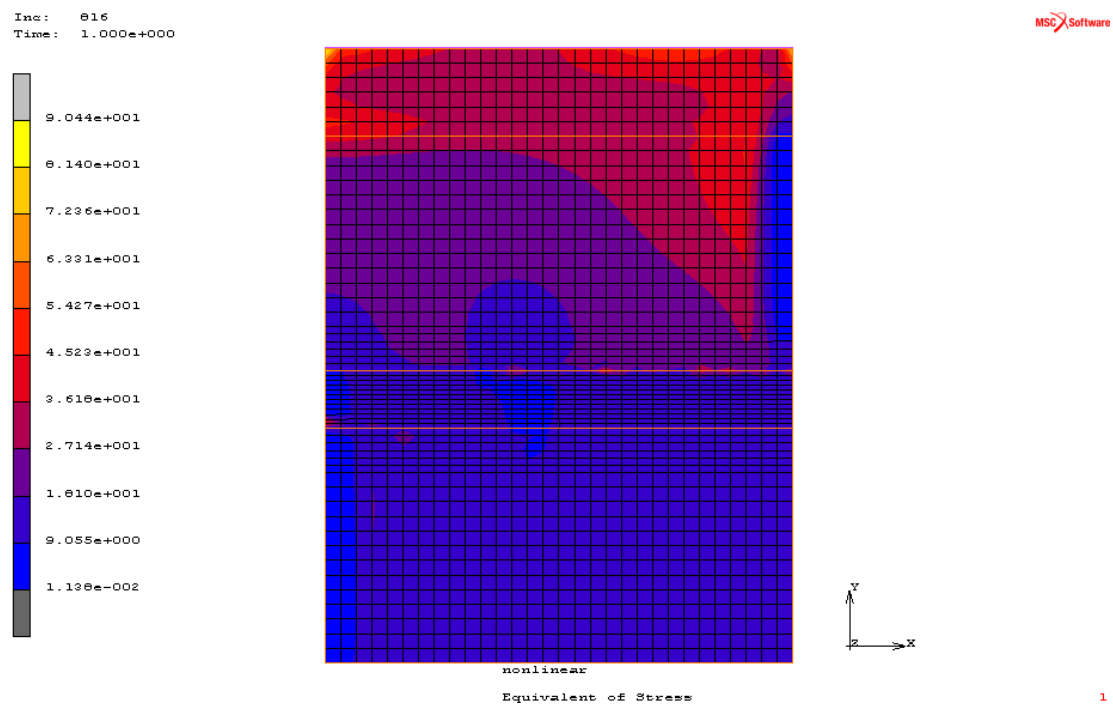
Σχήμα 71: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρεία του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 2i)

4.3.4 Αριθμητικό προσομοίωμα 2ii

Η επίλυση του προσομοιώματος 2ii, ολοκληρώθηκε σε 816 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3098 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



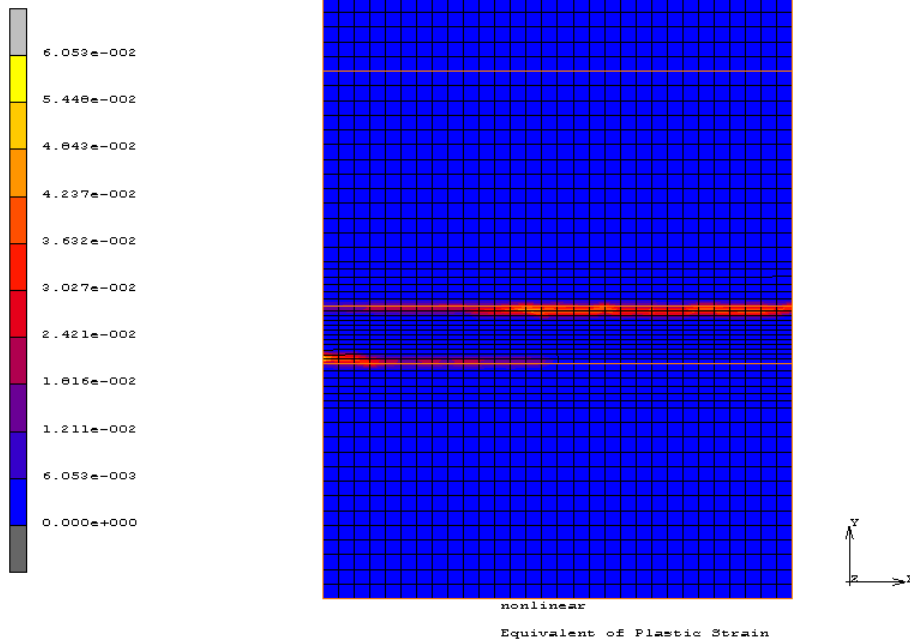
Εικόνα 18: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 816 (100% της φόρτισης)



Εικόνα 19: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 816 (100% της φόρτισης)

Inc: 816
Time: 1.000e+000

MSC Software



1

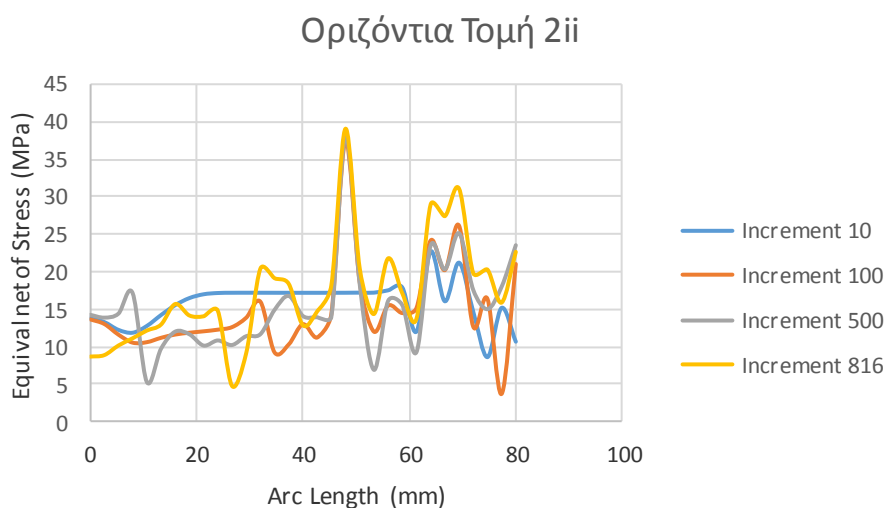
Εικόνα 20: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 816 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 72 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50) . Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 1502kN για 0,065mm. Στη συνέχεια ενώ το φορτίο αυξάνεται, η μετατόπιση μειώνεται μέχρι να αρχίσει και πάλι την ανοδική πορεία μετά τα 0,060mm. Η μείωση της μετατόπισης με ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου, συμβαίνει διότι στο μοντέλο ύστερα από την αστοχία του κονιάματος, οι κόμβοι μετατοπίζονται με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν ένα πιο συμπαγές υλικό στο σημείο επαφής τους. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3099kN για μετατόπιση 0,12mm.



Σχήμα 72: Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 2ii

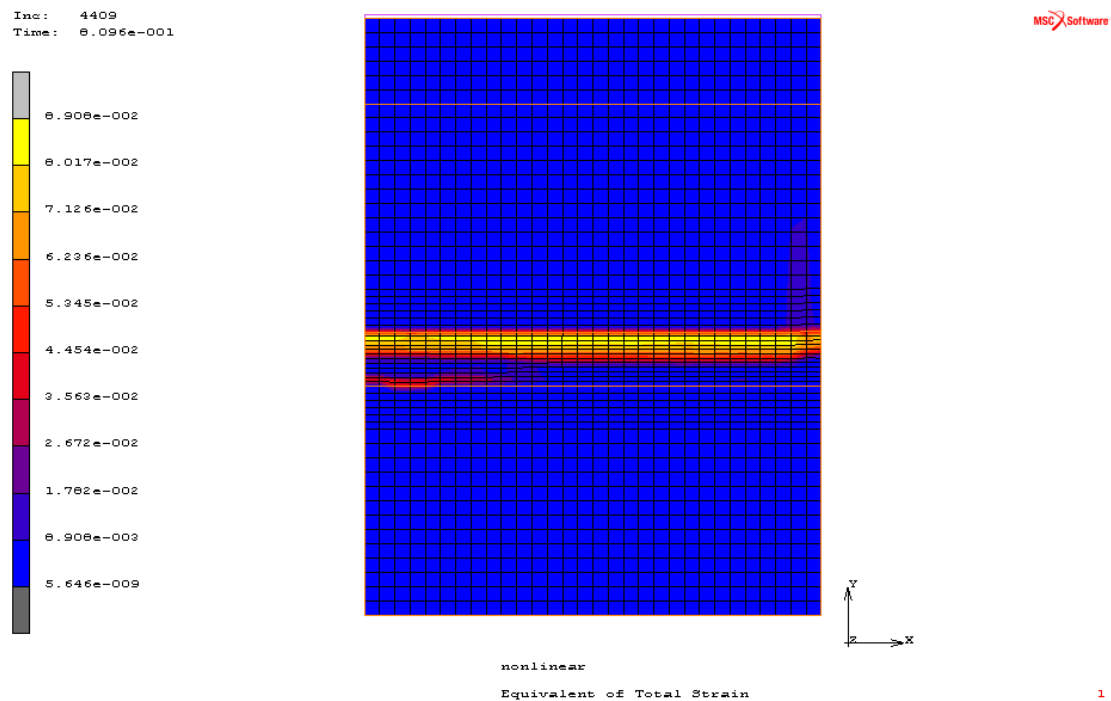
Στο Σχήμα 73, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 2ii, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Lenth), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent fo Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 10 αντιπροσωπεύει το 26% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 100 το 57%, το βήμα 500 το 83% και το βήμα 1401 το 100% της συνολικής φόρτισης.



Σχήμα 73: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 2ii)

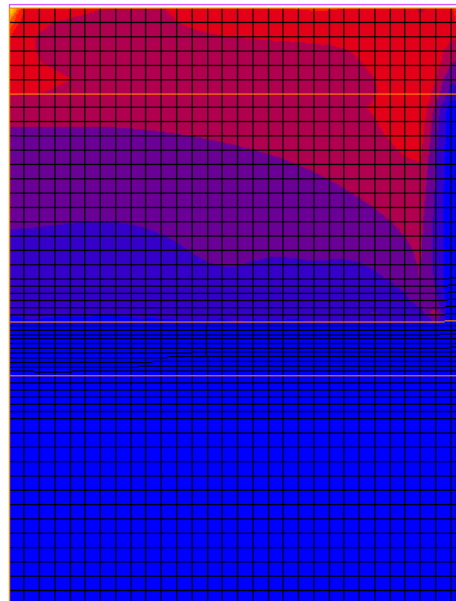
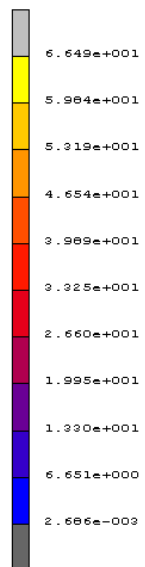
4.3.5 Αριθμητικό προσομοίωμα 3i

Η επίλυση του προσομοιώματος 3i, ολοκληρώθηκε σε 4409 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 2506 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 21: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 4409 (100% της φόρτισης)

Inc: 4409
Time: 8.096e-001



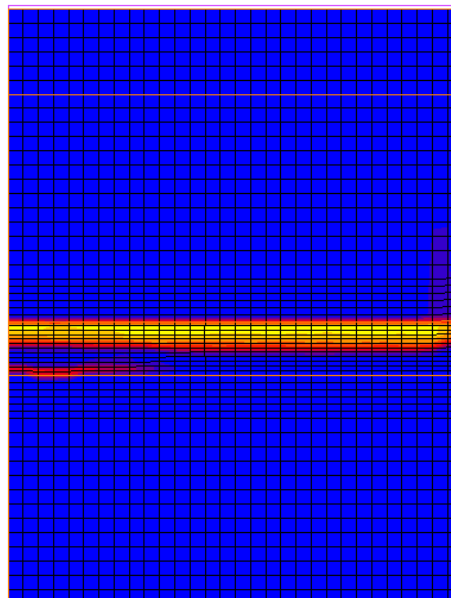
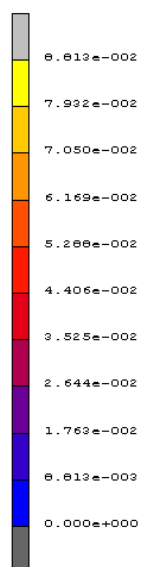
nonlinear
Equivalent of Stress

MSC Software

1

Εικόνα 22: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 4409 (100% της φόρτισης)

Inc: 4409
Time: 8.096e-001



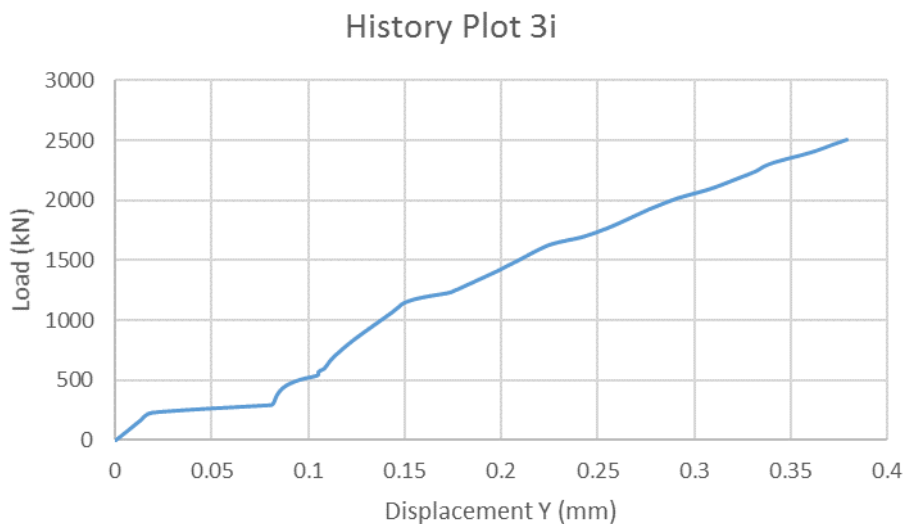
nonlinear
Equivalent of Plastic Strain

MSC Software

1

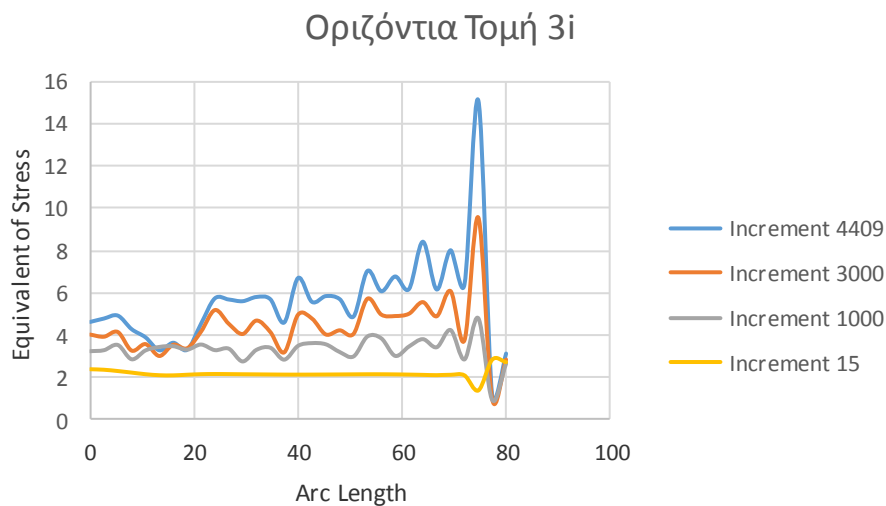
Εικόνα 23: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 4409 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 74 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50) . Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 294kN για 0,08mm. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 2506kN για μετατόπιση 0,38mm.



Σχήμα 74: Καμπύλη φορτίου (kN) μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 3i

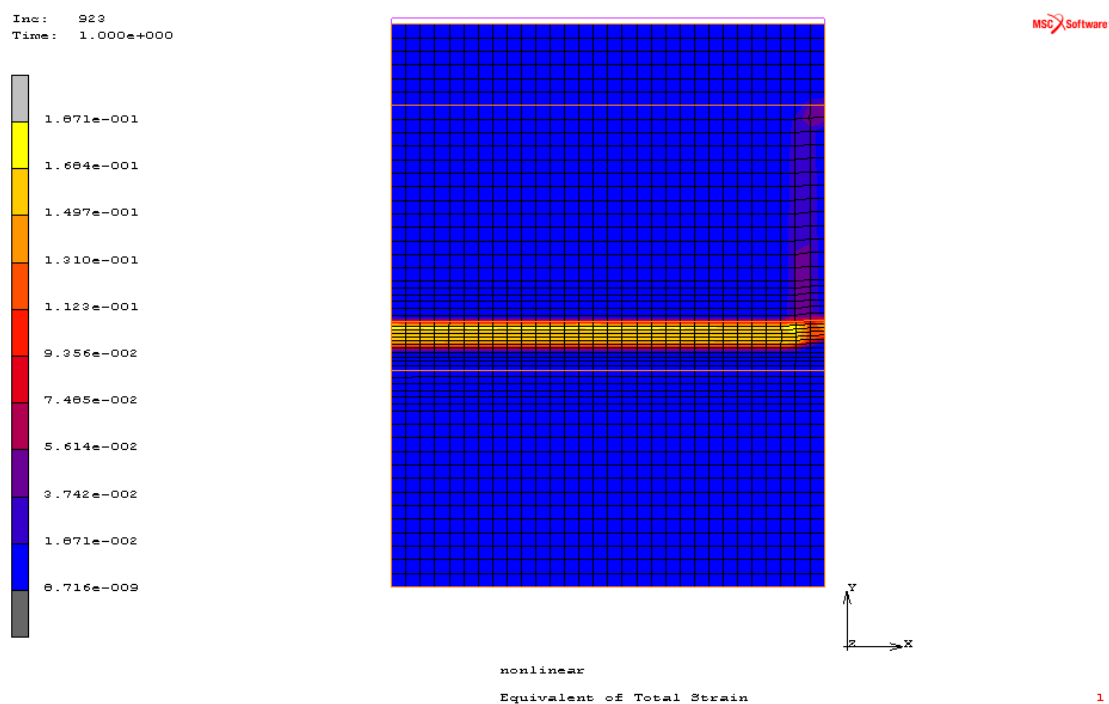
Στο Σχήμα 75, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 3i, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 15 αντιπροσωπεύει το 12% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 1000 το 90%, το βήμα 3000 το 96% και το βήμα 4409 το 100% της συνολικής φόρτισης.



Σχήμα 75: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 3i)

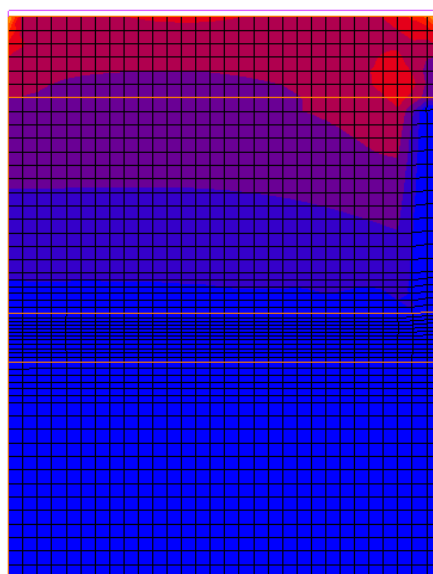
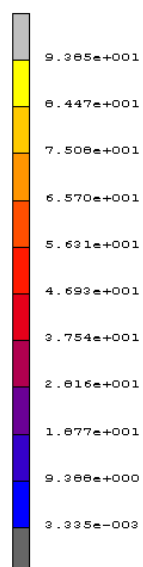
4.3.6 Αριθμητικό προσομοίωμα 3ii

Η επίλυση του προσομοιώματος 3ii, ολοκληρώθηκε σε 923 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3088 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 24: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 923 (100% της φόρτισης)

Inc: 923
Time: 1.000e+000



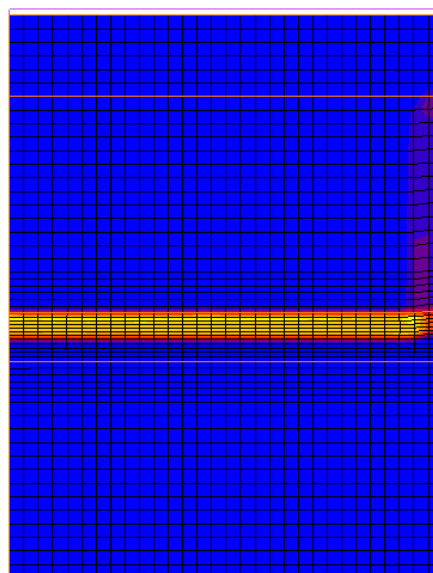
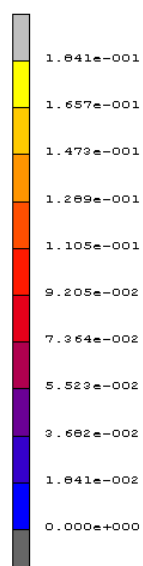
nonlinear
Equivalent of Stress

MSC Software

1

Εικόνα 25: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 923 (100% της φόρτισης)

Inc: 923
Time: 1.000e+000

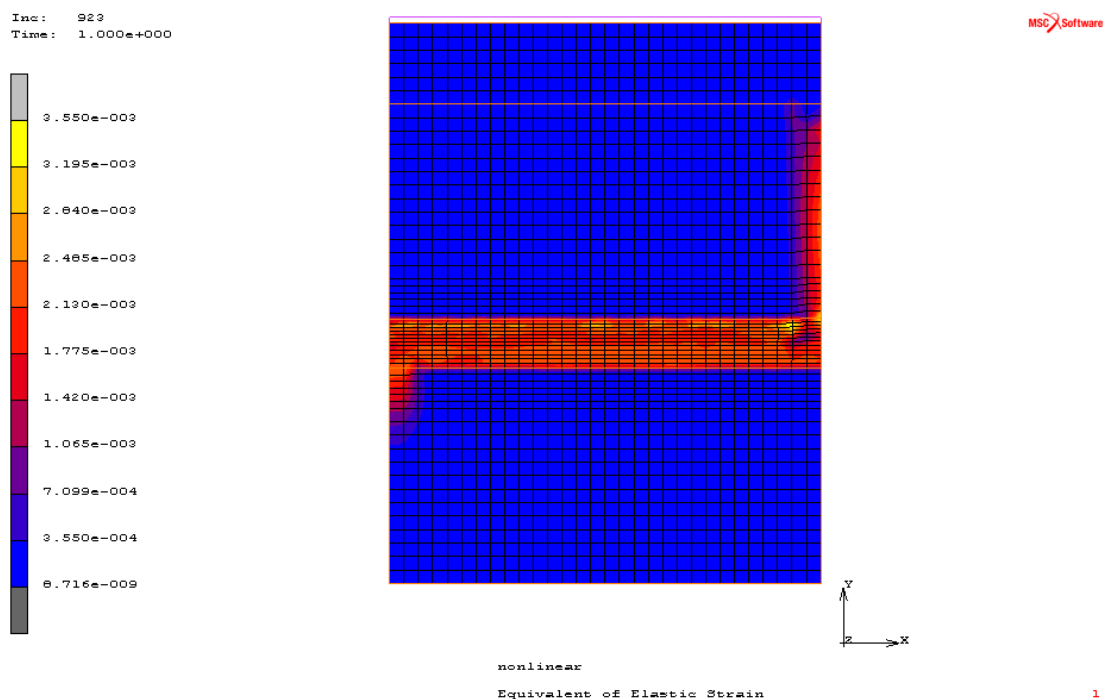


nonlinear
Equivalent of Plastic Strain

MSC Software

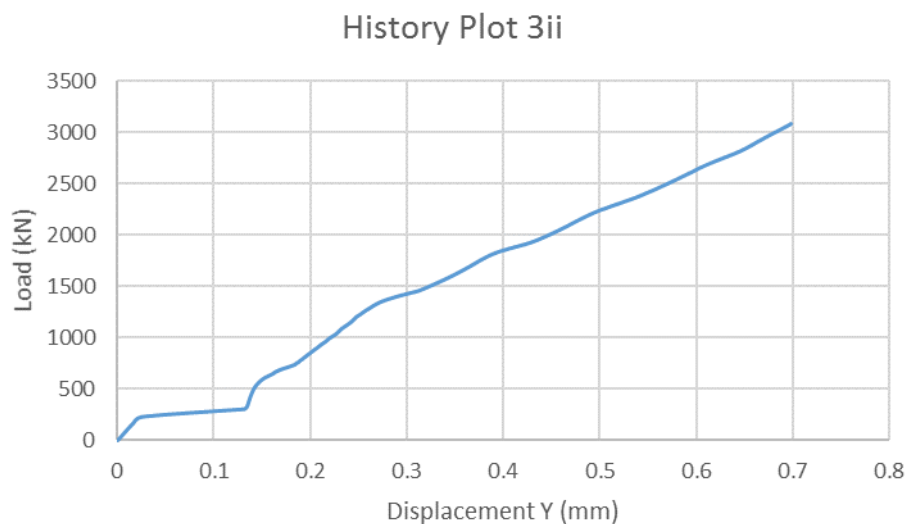
1

Εικόνα 26: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 923 (100% της φόρτισης)



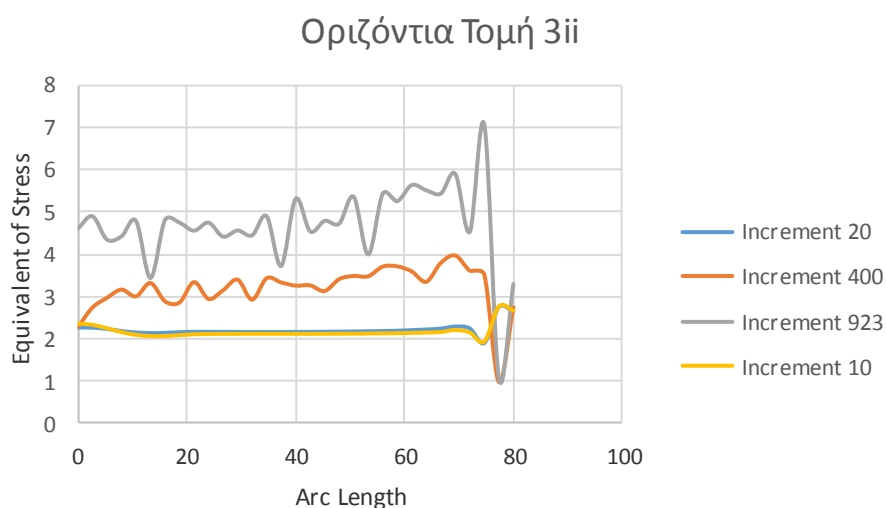
Εικόνα 27: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 923 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 76 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50). Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων του κονιάματος επέρχεται στα 307kN για 0,13mm. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3088kN για μετατόπιση 0,70mm.



Σχήμα 76: Καμπύλη φορτίου (kN) - μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 3ii

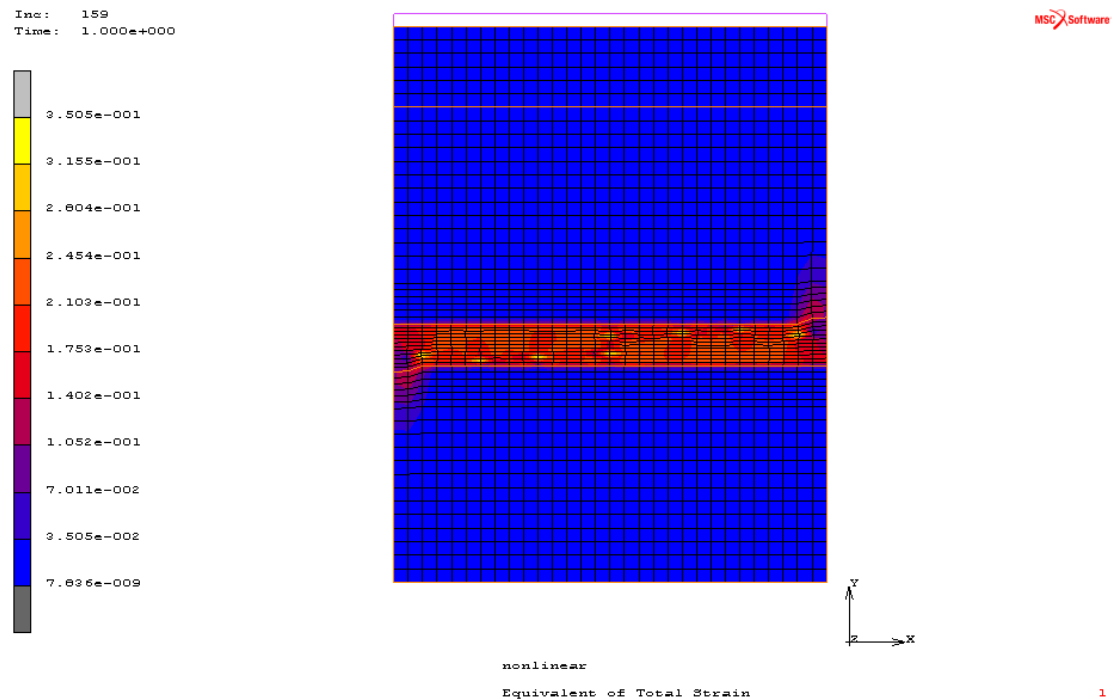
Στο Σχήμα 77, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 3ii, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 10 αντιπροσωπεύει το 10% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 20 το 11%, το βήμα 400 το 74% και το βήμα 923 το 100% της συνολικής φόρτισης.



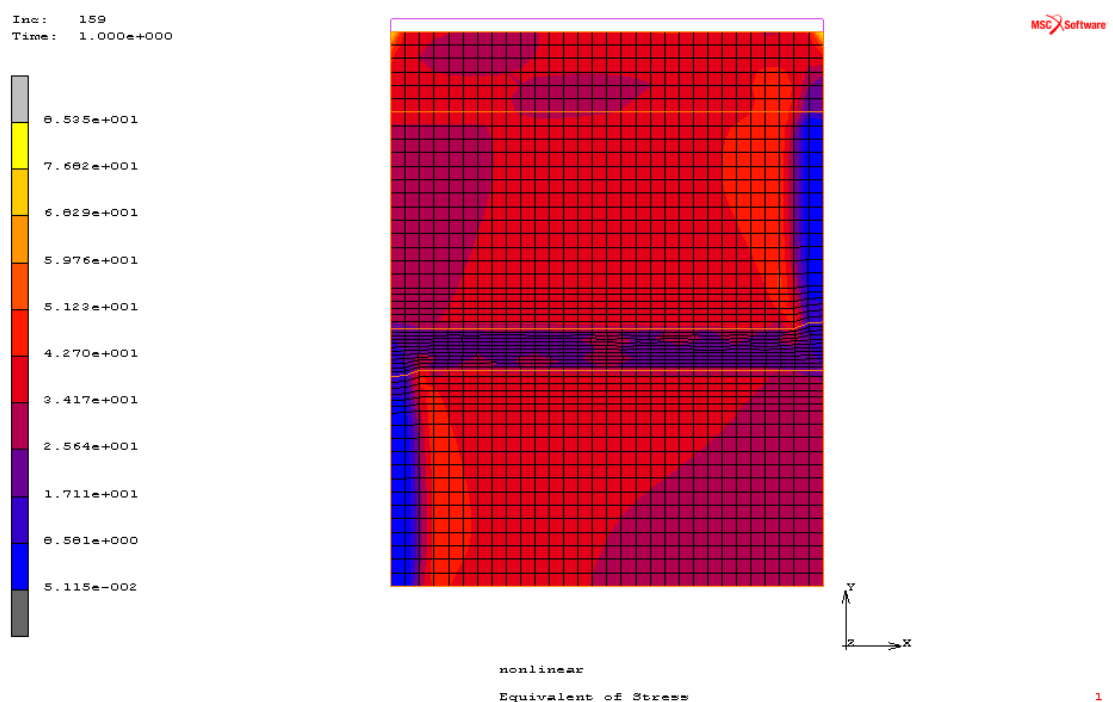
Σχήμα 77: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 3ii)

4.3.7 Αριθμητικό προσομοίωμα 4i

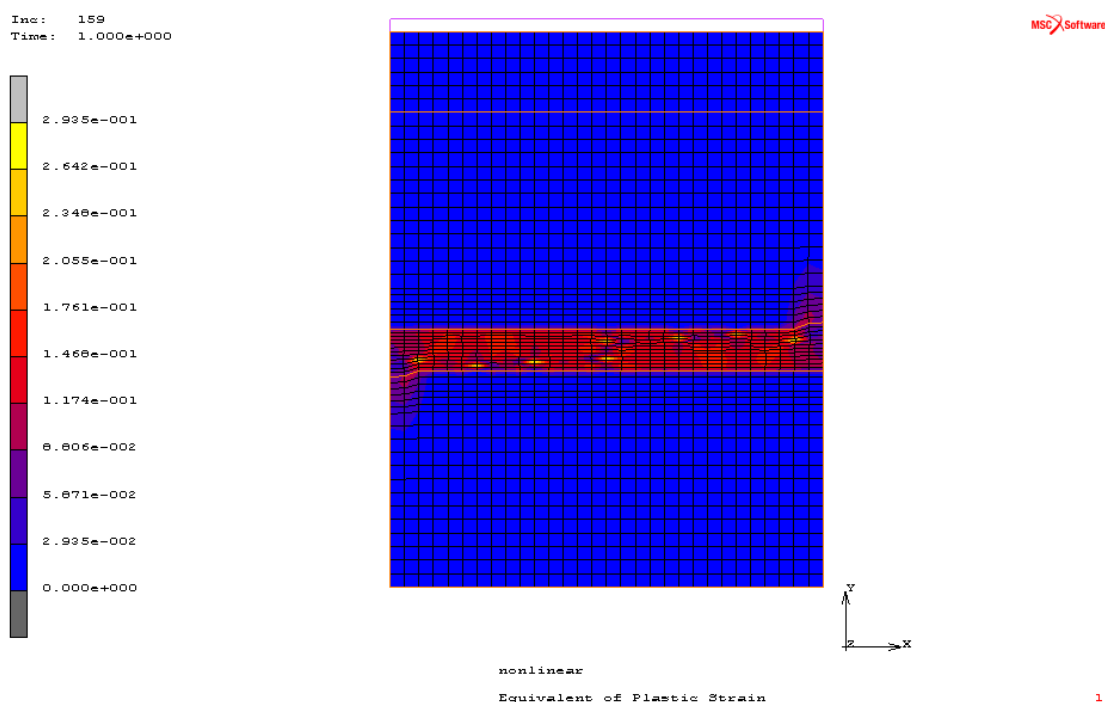
Η επίλυση του προσομοιώματος 4i, ολοκληρώθηκε σε 159 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3066 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 28: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 159 (100% της φόρτισης)

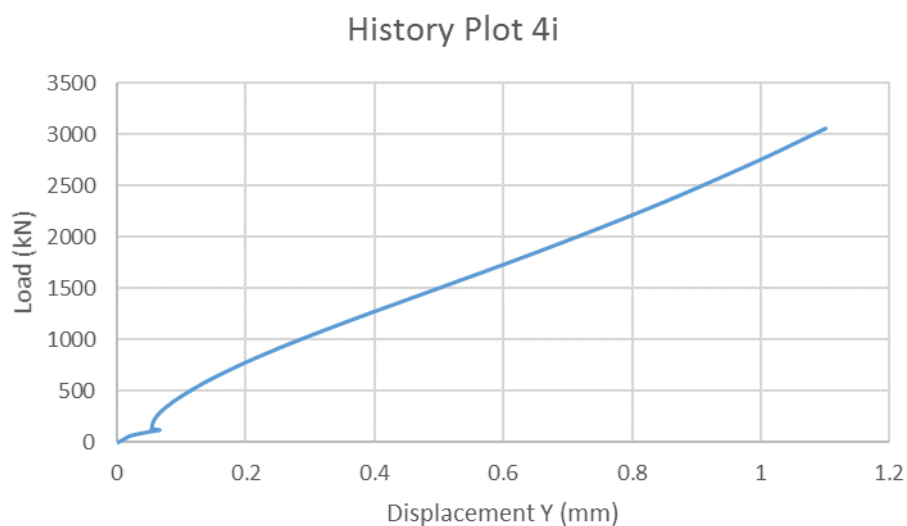


Εικόνα 29: Equivalent of Stress– Βήμα φόρτισης 159 (100% της φόρτισης)



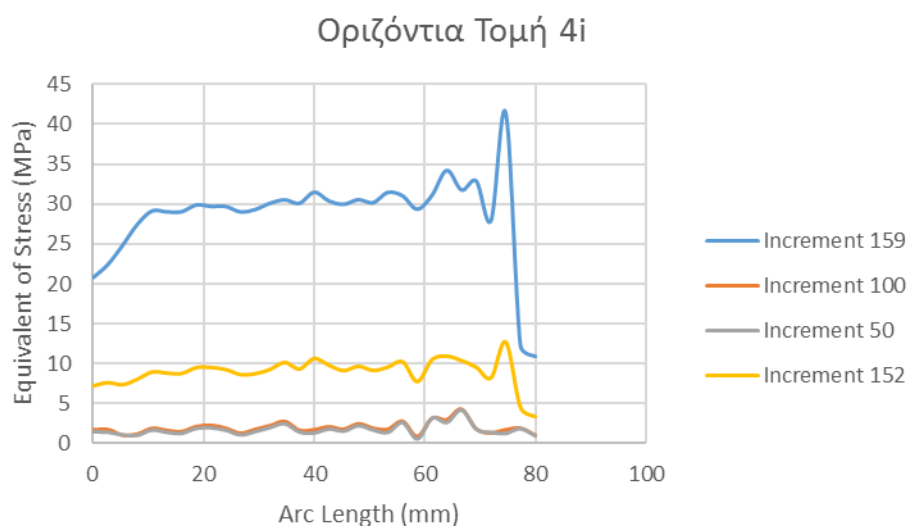
Εικόνα 30: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 159 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 78 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50) . Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 122kN για 0,07mm. Στη συνέχεια ενώ το φορτίο αυξάνεται, η μετατόπιση μειώνεται μέχρι να αρχίσει και πάλι την ανοδική πορεία μετά τα 0,05mm. Η μείωση της μετατόπισης με ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου, συμβαίνει διότι στο μοντέλο ύστερα από την αστοχία του κονιάματος, οι κόμβοι μετατοπίζονται με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν ένα πιο συμπαγές υλικό στο σημείο επαφής τους. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3066kN για μετατόπιση 1,1mm.



Σχήμα 78: Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 4i

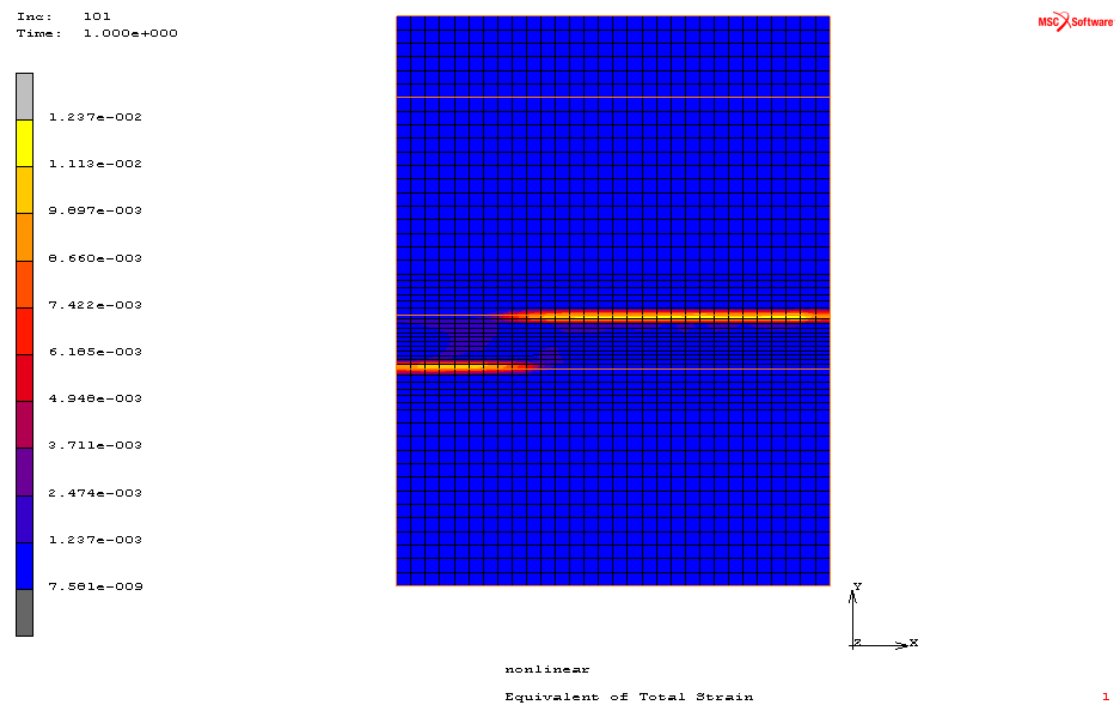
Στο Σχήμα 79, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 4i, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 50 αντιπροσωπεύει το 5% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 100 το 8%, το βήμα 152 το 38% και το βήμα 159 το 100% της συνολικής φόρτισης.



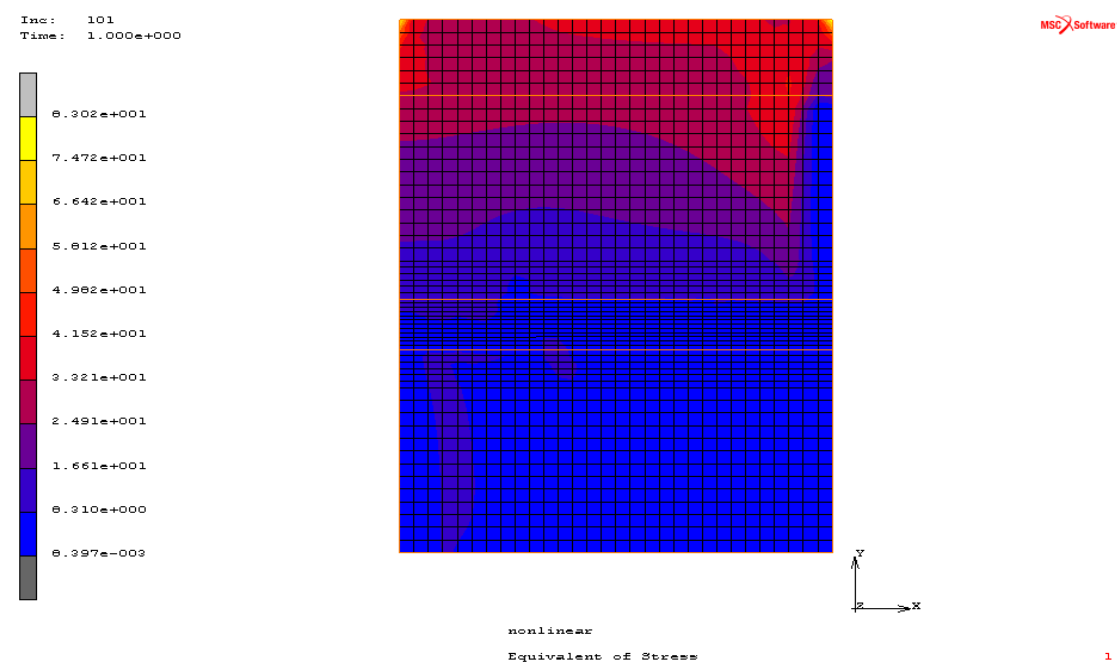
Σχήμα 79: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 4i)

4.3.8 Αριθμητικό προσομοίωμα 4ii

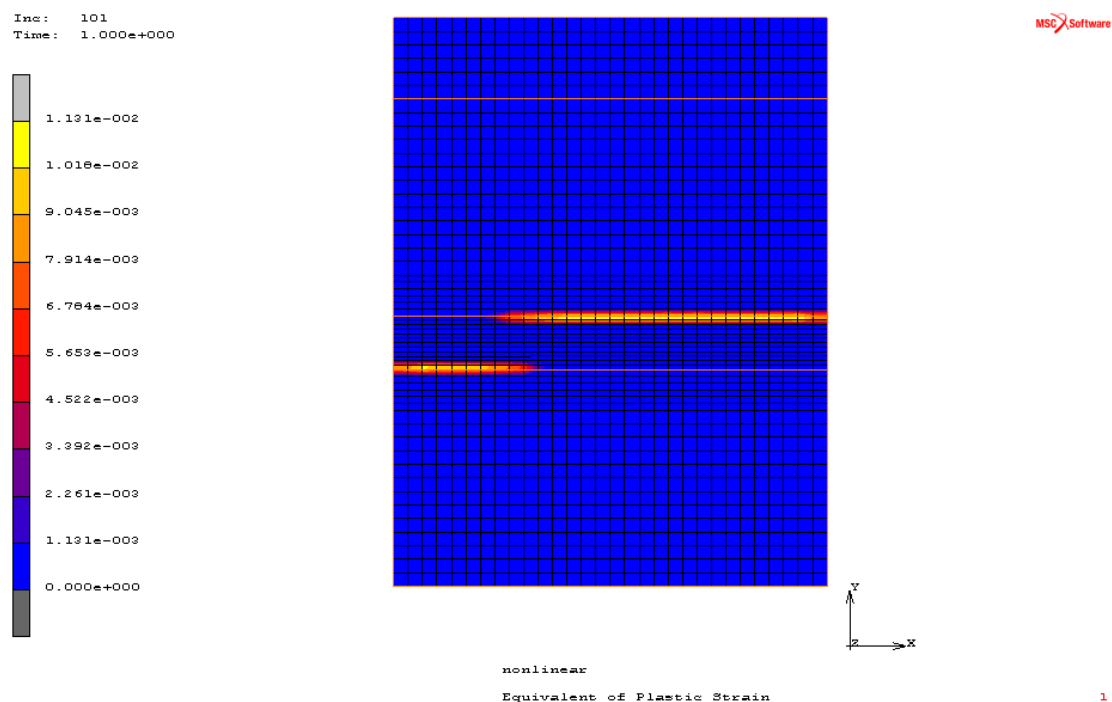
Η επίλυση του προσομοιώματος 4ii, ολοκληρώθηκε σε 101 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3100 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 31: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 101 (100% της φόρτισης)

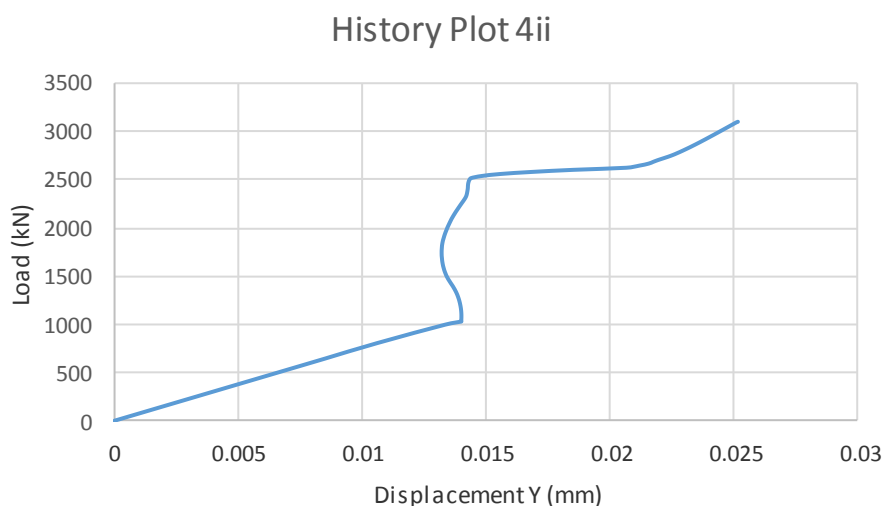


Εικόνα 32: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 101 (100% της φόρτισης)



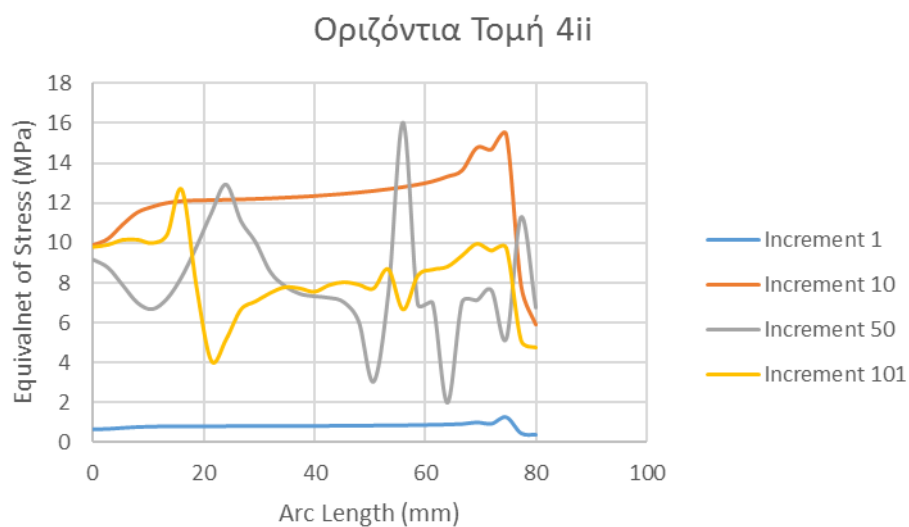
Εικόνα 33: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 101 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 80 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50). Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 1028kN για 0,014mm. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3100kN για μετατόπιση 0,025mm.



Σχήμα 80: Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 4ii

Στο Σχήμα 81, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 4ii, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 1 αντιπροσωπεύει το 1% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 10 το 26%, το βήμα 50 το 66% και το βήμα 101 το 100% της συνολικής φόρτισης.



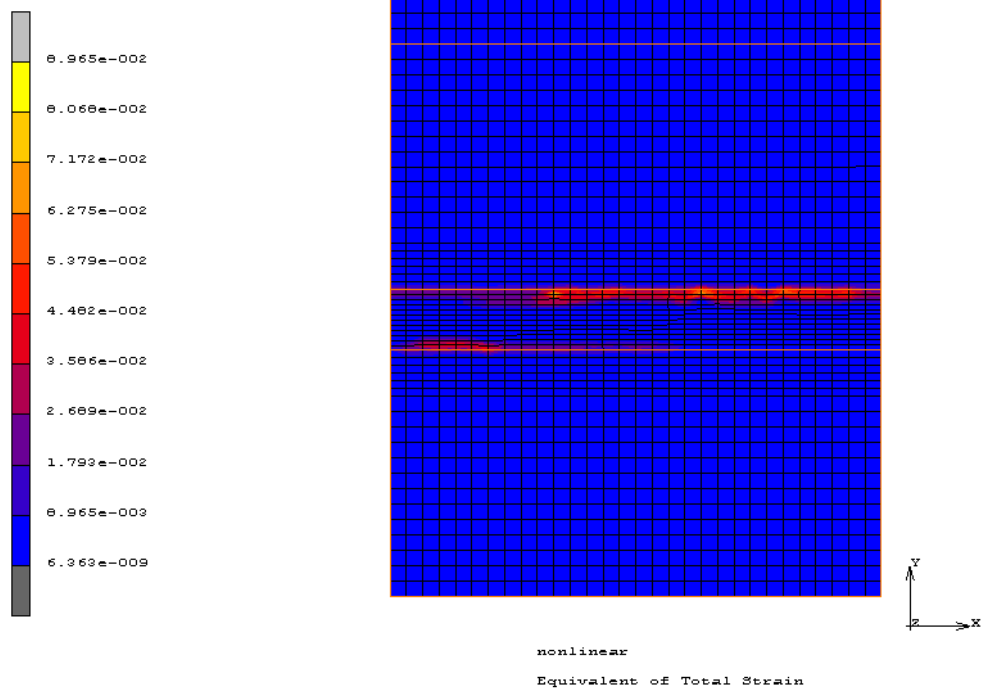
Σχήμα 81: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 4ii)

4.3.9 Αριθμητικό προσομοίωμα 5i

Η επίλυση του προσομοιώματος 5i, ολοκληρώθηκε σε 1234 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3098 kN στο συγκεκριμένο βήμα.

Inc: 1234
Time: 1.000e+000

MSC Software

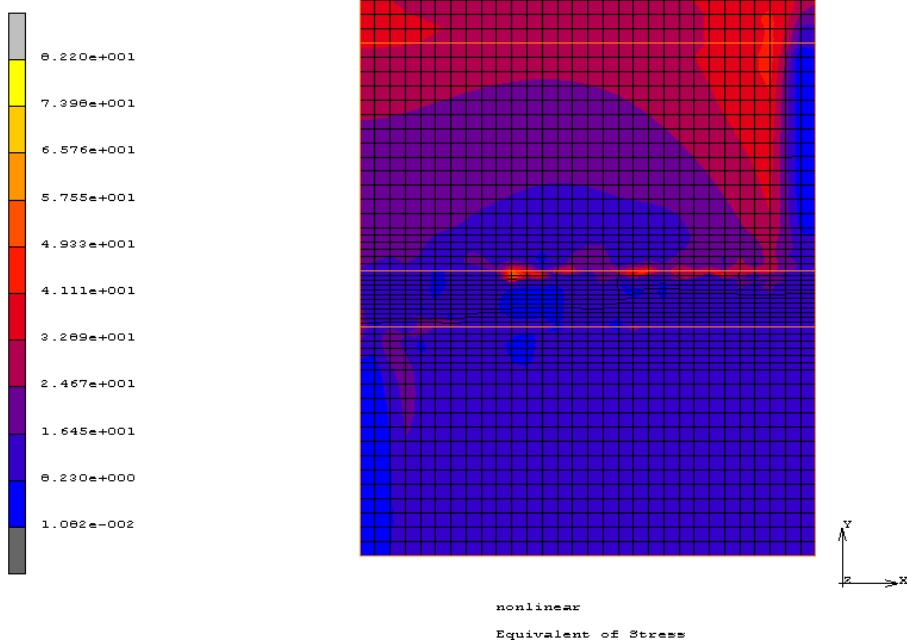


1

Εικόνα 34: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 1234 (100% της φόρτισης)

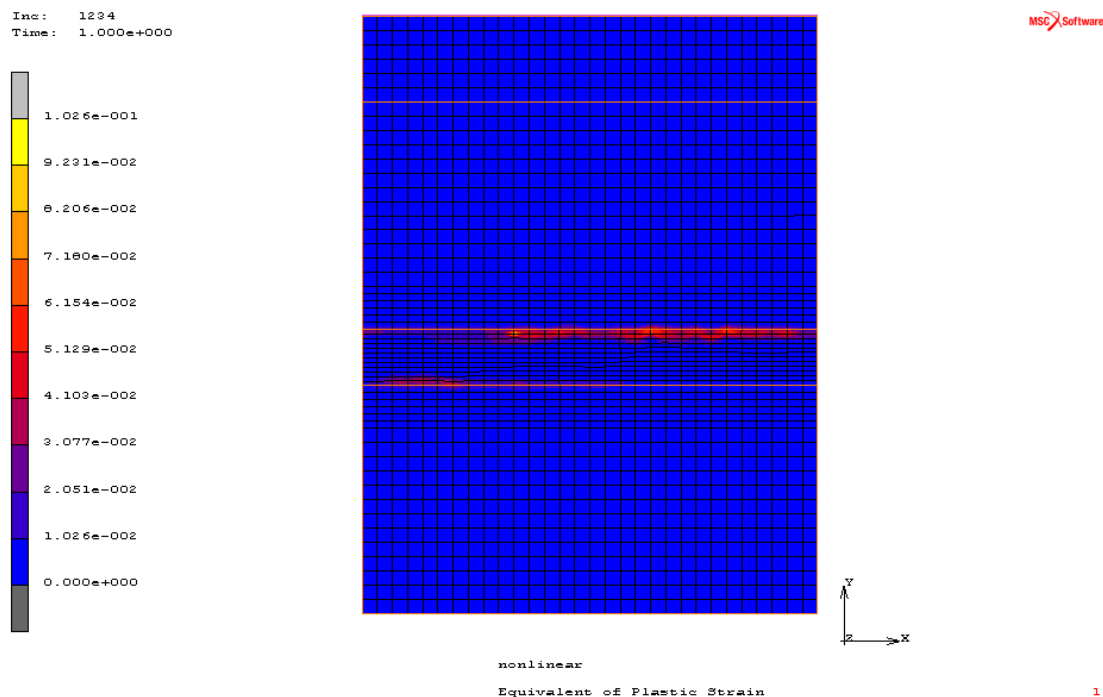
Inc: 1234
Time: 1.000e+000

MSC Software



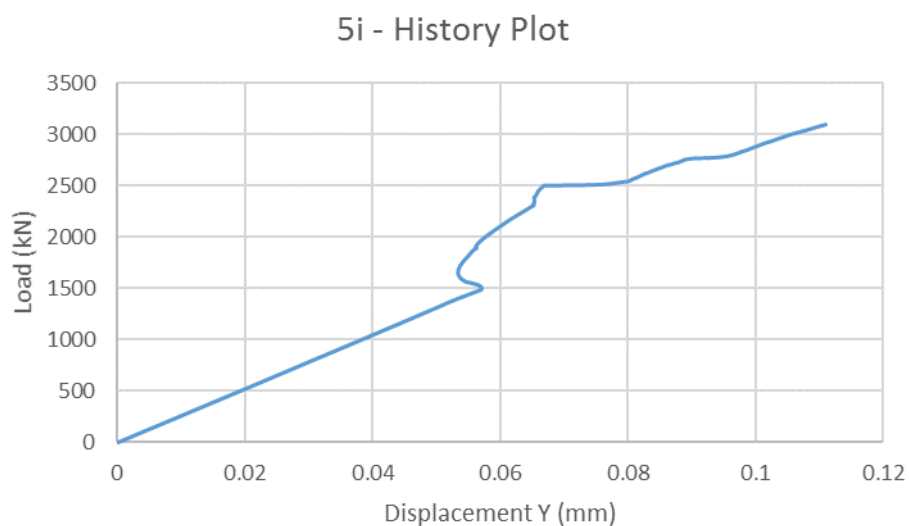
1

Εικόνα 35: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 1234 (100% της φόρτισης)



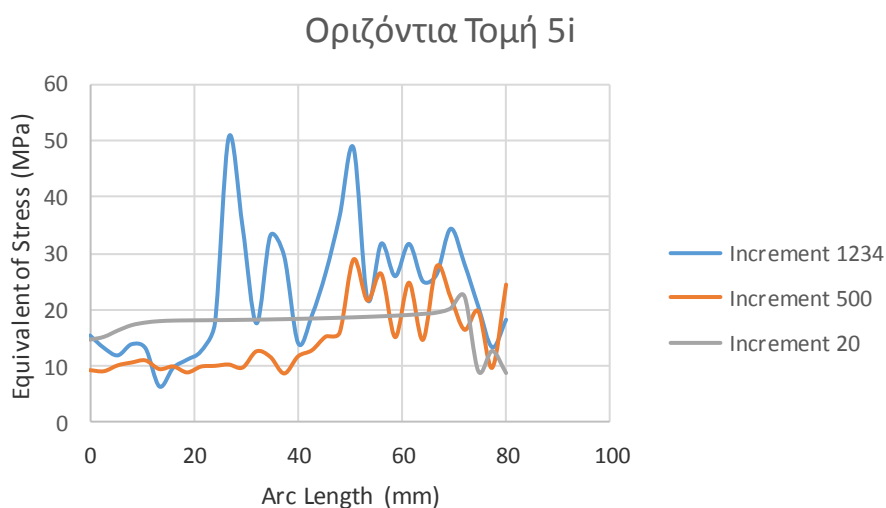
Εικόνα 36: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 1234 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 82 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50). Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή η έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 1489kN για 0,06mm. Στη συνέχεια ενώ το φορτίο αυξάνεται, η μετατόπιση μειώνεται μέχρι να αρχίσει και πάλι την ανοδική πορεία μετά τα 0,05mm. Η μείωση της μετατόπισης με ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου, συμβαίνει διότι στο μοντέλο ύστερα από την αστοχία του κονιάματος, οι κόμβοι μετατοπίζονται με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν ένα πιο συμπαγές υλικό στο σημείο επαφής τους. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3098kN για μετατόπιση 0,11mm.



Σχήμα 82: Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 5i

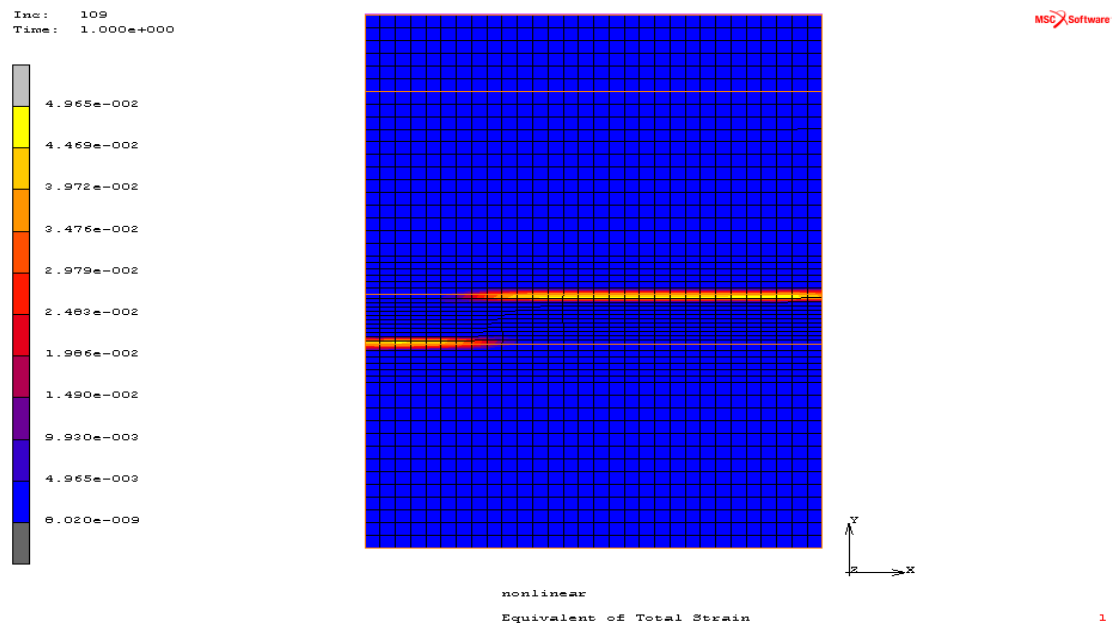
Στο Σχήμα 83, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 5i, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης (increments). Το βήμα 20 αντιπροσωπεύει το 48% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 500 το 74% και το βήμα 1234 το 100% της συνολικής φόρτισης.



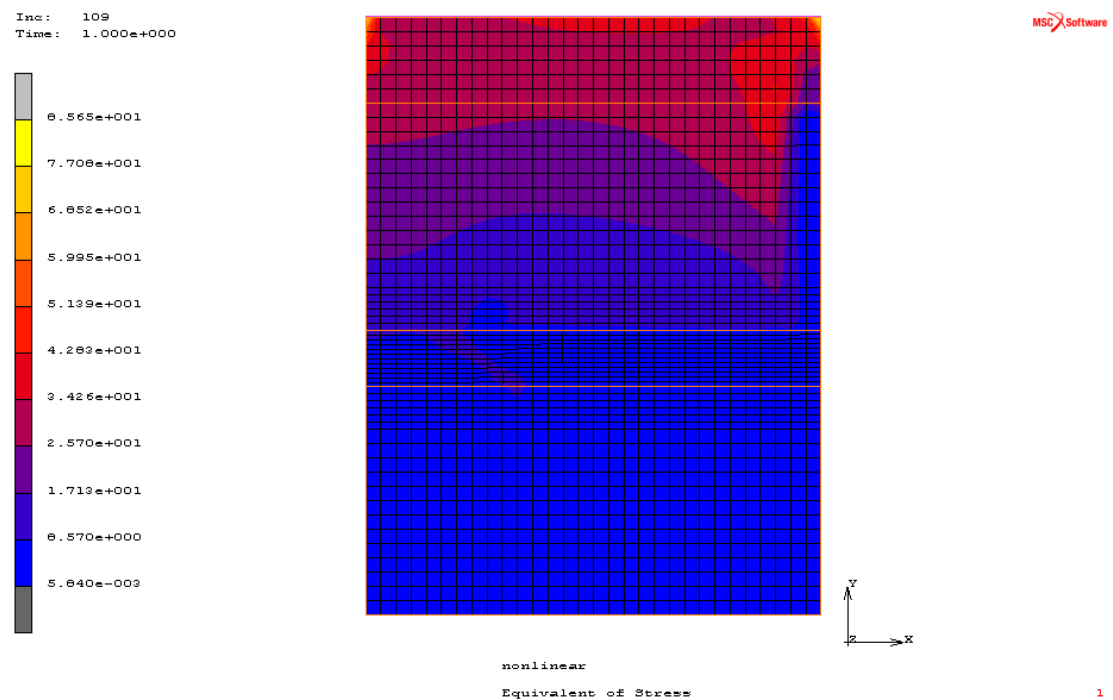
Σχήμα 83: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 5i)

4.3.10 Αριθμητικό προσομοίωμα 5ii

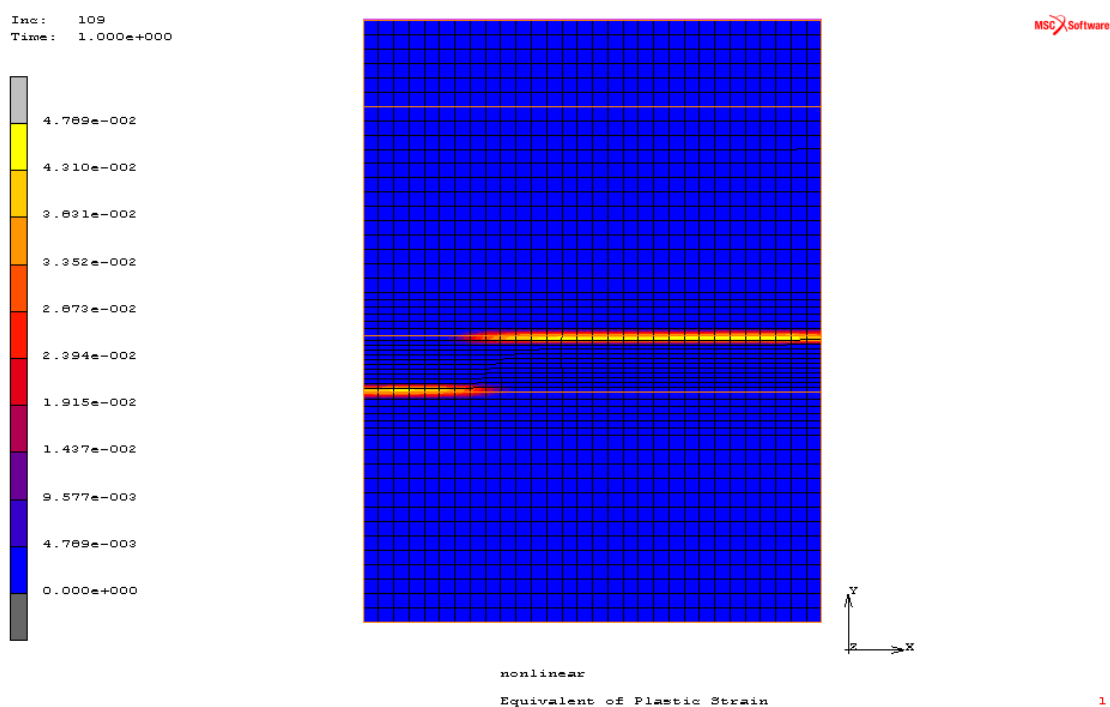
Η επίλυση του προσομοιώματος 5ii, ολοκληρώθηκε σε 109 βήματα φόρτισης (increments), φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 3099 kN στο συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 37: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 109 (100% της φόρτισης)

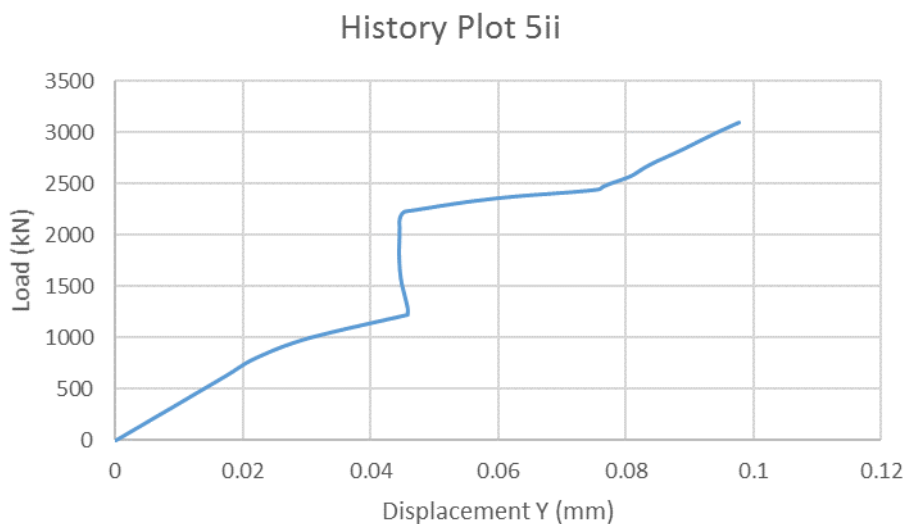


Εικόνα 38: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 109 (100% της φόρτισης)



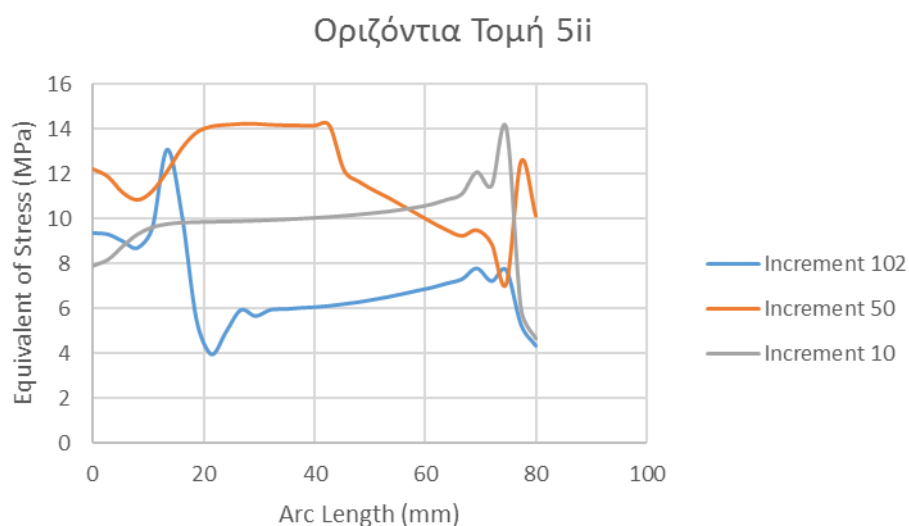
Εικόνα 39: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 109 (100% της φόρτισης)

Η γραφική παράσταση του Σχήματος 84 αναπαριστά την ιστορία φόρτισης (History Plot) του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) σε kN, σε σχέση με την κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) του τελευταίου κόμβου της άνω παρειάς του κονιάματος (σημείο 80,50) . Η αστοχία του κονιάματος, δηλαδή ή έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται στα 1226kN για 0,045mm. Στη συνέχεια ενώ το φορτίο αυξάνεται, η μετατόπιση μειώνεται μέχρι να αρχίσει και πάλι την ανοδική πορεία μετά τα 0,044mm. Η μείωση της μετατόπισης με ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου, συμβαίνει διότι στο μοντέλο ύστερα από την αστοχία του κονιάματος, οι κόμβοι μετατοπίζονται με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν ένα πιο συμπαγές υλικό στο σημείο επαφής τους. Έπειτα το φορτίο μεταφέρεται στους λίθους μέχρι την τελική θραύση στα 3099kN για μετατόπιση 0,1mm.



Σχήμα 84: Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) προσομοιώματος 4ii

Στο Σχήμα 85, παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του προσομοιώματος 5ii, κατά μήκος της άνω παρειάς του κονιάματος (Arc Length), η οποία αναπαριστά την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Equivalent of Stress) για διάφορα βήματα φόρτισης. Το βήμα 10 αντιπροσωπεύει το 26% της συνολικής φόρτισης, το βήμα 50 το 58% και το βήμα 102 το 86% της συνολικής φόρτισης.



Σχήμα 85: Κατανομή της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων στην άνω παρειά του κονιάματος για διάφορα βήματα φόρτισης (προσομοίωμα 5ii)

4.4 Αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων και σχολιασμός

Από την καμπύλη δύναμης-μετακίνησης που περιγράφει την συνολική απόκριση των δοκιμίων καθώς και από την πλειονότητα των εικόνων που περιγράφουν τα πεδία τάσεων και παραμορφώσεων φαίνεται ότι αρχικώς η απόκριση του δοκιμίου είναι γραμμικά ελαστική. Στη συνέχεια, η συμπεριφορά του δοκιμίου κυριαρχείται από μια μείωση της δυσκαμψίας του που οφείλεται στην προοδευτική πλαστικοποίηση του συνδετικού κονιάματος. Η πλαστικοποίηση του κονιάματος έχει ως αποτέλεσμα την δυσανάλογη αύξηση της μετακίνησης και των πλαστικών παραμορφώσεων συγκριτικά με την δυνατότητα ανάληψης φορτίου. Σε κάποια από τα δοκίμια βέβαια παρατηρείται μια σημαντική κράτυνση (προσομοιώματα 3i και 3ii) , δηλαδή η αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων συνοδεύεται και από αύξηση της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου έναντι θλίψης.

Στην περίπτωση των προσομοιωμάτων 3i και 3ii, ο συνδυασμός της φυσικής υδραυλικής ασβέστου με μικρή ποσότητα ανθρακικού μολύβδου, κάνει το κονίαμα πιο ελαστικό προσφέροντας μεγαλύτερη δυνατότητα ανάληψης φορτίου και μεγάλες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό παρατηρείται μεγάλη περιοχή κράτυνσης.

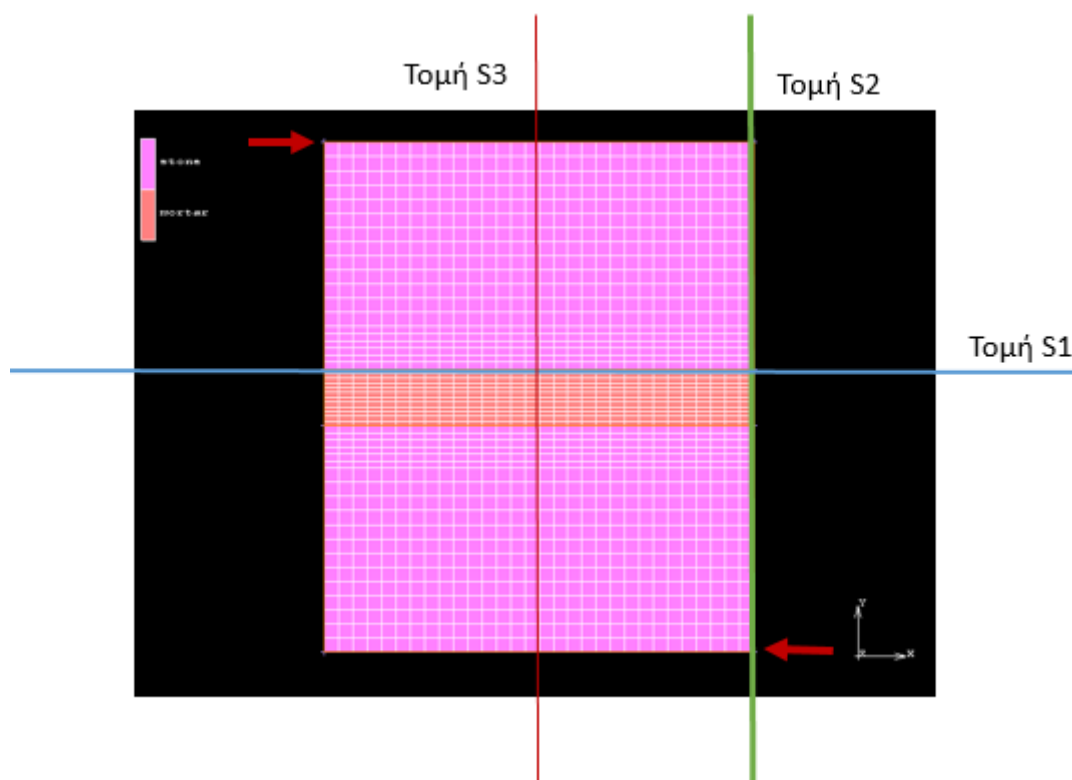
Μετά την αστοχία του κονιάματος, που οριοθετεί και την μέγιστη φέρουσα θλιπτική ικανότητα του δοκιμίου της τοιχοποιίας, παρατηρείται μια αύξηση της δυσκαμψίας και φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου που οφείλεται στο γεγονός ότι το επιβαλλόμενο φορτίο αναλαμβάνεται τώρα από τους λίθους που με βάση τον νόμο του Hooke που υιοθετήθηκε για αυτούς, έχουν απεριόριστη ελαστική αντοχή. Η μη γραμμική καμπύλη που παρατηρείται σε κάποια από τα δοκίμια (προσομοιώματα 1i, 1ii, 2i, 2ii, 4i, 4ii, 5i και 5ii) μετά την αστοχία του κονιάματος (ενώ θα αναμενόταν η δυσκαμψία του φορέα να είναι γραμμική όμοια με την δυσκαμψία των λίθων) οφείλεται στην επιρροή του φθίνοντα κλάδου της αντοχής του κονιάματος που εμφανίζεται μετά την εξάντληση της αντοχής του. Στα δοκίμια που δεν παρατηρείται τέτοια καμπύλη (προσομοίωμα 3i και 3ii), το κονίαμα έχει

αστοχήσει ακαριαία και η αστοχία του κυριαρχείται από κατακόρυφη πτώση αντοχής (και όχι προοδευτική όπως στις άλλες περιπτώσεις).

4.5 Αριθμητική προσομοίωση κυβικού δοκιμίου τοιχοποιίας σε διάτμηση με πεπερασμένα στοιχεία

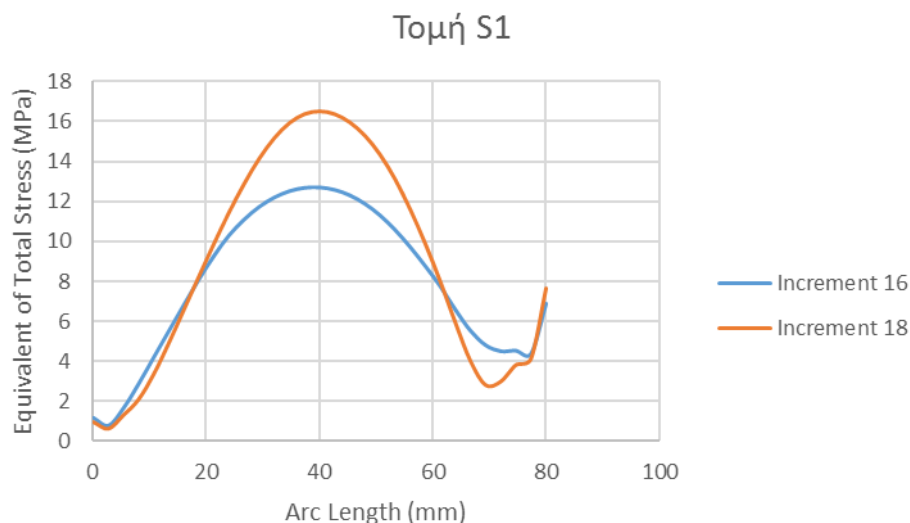
Η αντοχή σε διάτμηση της τοιχοποιίας είναι η αντοχή που εμφανίζει η τοιχοποιία, καθώς εφαρμόζεται σε αυτή, δύναμη παράλληλη προς τη διεπιφάνεια κονιάματος και δομικού στοιχείου. Η αντοχή σε διάτμηση πρέπει να κυμαίνεται από 0,2 έως 1,0 N/mm².

Στη συνέχεια ακολουθεί η προσομοίωση ενός δοκιμίου τοιχοποιίας σε διάτμηση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιβλήθηκε επιβεβλημένη μετακίνηση $\Delta\chi_1 = 5\text{mm}$ βαθμιαία με το χρόνο στους κόμβους της άνω παρειάς του δοκιμίου και $\Delta\chi_2 = 5\text{mm}$ στους κόμβους της κάτω παρειάς. Η μετακίνηση εφαρμόστηκε εντός επιπέδου κατά τον x (οριζόντιο άξονα) σε δύο σημεία του δοκιμίου, στην ίδια διεύθυνση αλλά προς διαφορετική κατεύθυνση όπως φαίνεται στην Εικόνα 40.



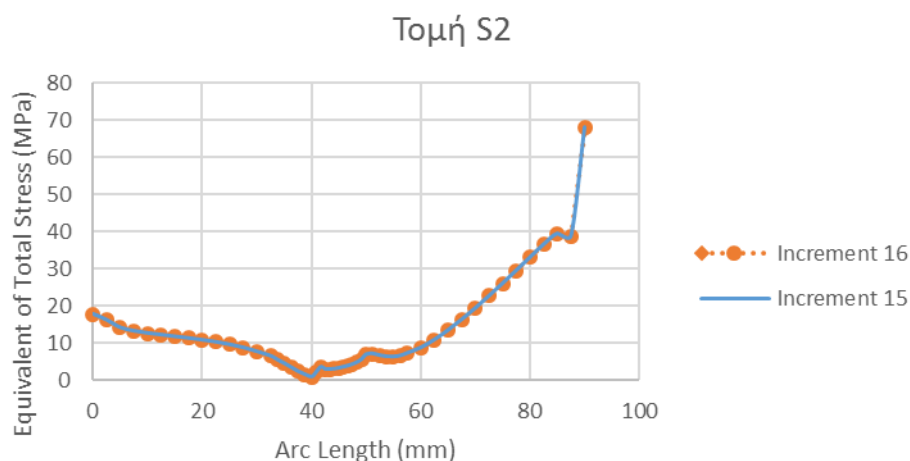
Εικόνα 40: Τομές καθ' ύψος και κατά μήκος του προσομοιώματος

Κάνοντας τρεις τομές S1, S2 και S3 στο δοκίμιο προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα. Κατά μήκος (Arc Length) της τομής S1, η ισοδύναμη συνολική τάση (Equivalent of Total Stress), εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της ακριβώς στο μέσο της απόστασης του δοκιμίου τοιχοποιίας, στην άνω παρειά του κονιάματος, στο σημείο (40,50). Το βήμα (increment) 16 αντιστοιχεί στο 75% της συνολικής επιβεβλημένης μετακίνησης και το βήμα 18 στο 80%.



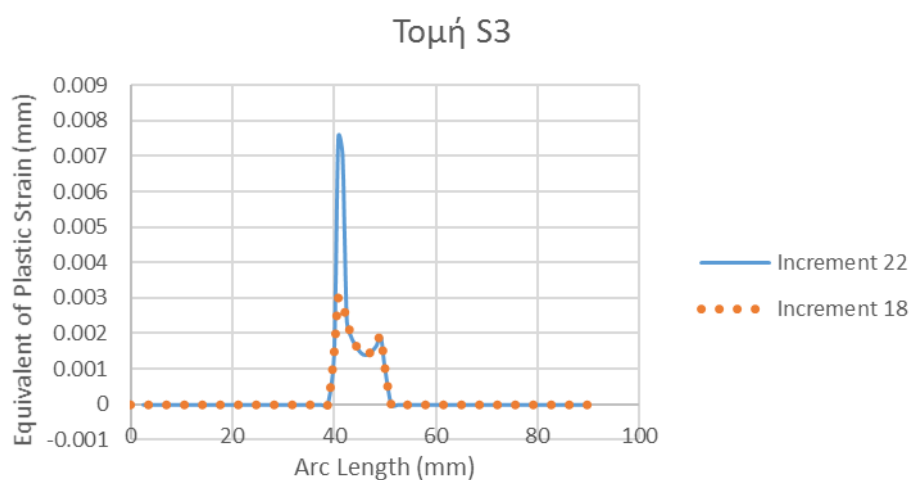
Σχήμα 86: Καμπύλες κατανομής της τάσης (MPa) κατά μήκος (mm) των κόμβων της άνω παρειάς του κονιάματος (οριζόντια τομή S1), για δύο βήματα φόρτισης

Κατά μήκος (Arc Length) της τομής S2, παρατηρείται μία σταδιακή μείωση της ισοδύναμης συνολικής τάσης (Equivalent of Total Stress), η οποία μηδενίζεται στο σημείο (80,50) και αυξάνεται συνεχώς έως το σημείο (80,90) στην πάνω παρειά του δοκιμίου. Αυτή η συμπεριφορά είναι λογική καθώς το θλιπτικό φορτίο εφαρμόζεται στην άνω παρειά του δοκιμίου. Το βήμα (increment) 15 αντιστοιχεί στο 73% της συνολικής επιβεβλημένης μετακίνησης και το βήμα 16 στο 75%.



Σχήμα 87: Καμπύλες κατανομής της τάσης (MPa) καθ' ύψος (mm) των κόμβων του προσομοιώματος (κάθετη τομή S2), για δύο βήματα φόρτισης

Κατά μήκος (Arc Length) της τομής S3, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα η κατανομή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων (Equivalent of Plastic Strain). Για $x \in [0,40]$, δεν εμφανίζονται παραμορφώσεις, καθώς αυτή περιοχή αναφέρεται στο λίθο τον οποίο έχουμε θεωρήσει ελαστικό απαραμόρφωτο υλικό. Για $x \in [0,50]$, όπου περιγράφεται το κονίαμα, εμφανίζονται παραμορφώσεις ενώ για $x \in [50,90]$ οι παραμορφώσεις είναι μηδενικές καθώς το διάστημα αυτό αναφέρεται στο λίθο. Το βήμα (increment) 18 αντιστοιχεί στο 80% της συνολικής επιβεβλημένης μετακίνησης και το βήμα 22 στο 100%.



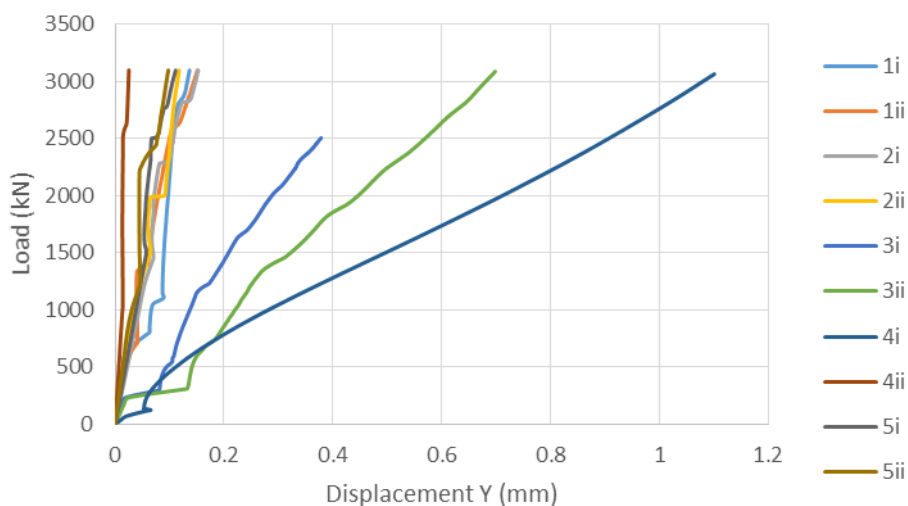
Σχήμα 88: Καμπύλες κατανομής της πλαστικής παραμόρφωσης (mm) καθ' ύψος (mm) των κόμβων του προσομοιώματος (κάθετη τομή S3), για δύο βήματα φόρτισης

Κεφάλαιο 5

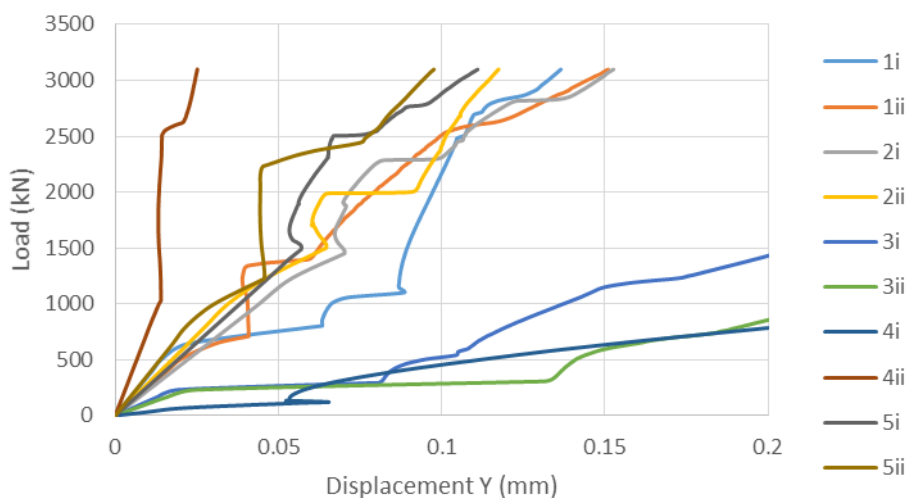
5.1 Συμπεράσματα

Στα συγκριτικά διαγράμματα που ακολουθούν (Σχ. 89(α),(β)) αναπαρίσταται η κατακόρυφη μετατόπιση (Displacement y) των κόμβων στην άνω παρειά των δοκιμών της τοιχοποιίας συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου (Load) - (3100kN).

Για καλύτερη αναπαράσταση των πειραματικών αποτελεσμάτων, στο Σχ.89(β) παρουσιάζεται τμήμα του αρχικού σχήματος (Σχ.89(α)), με εστίαση στην περιοχή μετατοπίσεων από 0mm έως 0.2mm.



Σχήμα 89 (α): Συγκριτικές καμπύλες φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm), (μέγιστη τιμή άξονα x: 1.2mm)



Σχήμα 89 (β): Συγκριτικές καμπύλες φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm)-(μέγιστη τιμή άξονα x: 0.2mm)

Η άνω παρειά του δοκιμίου στην οποία ασκείται το θλιπτικό φορτίο αποτελείται από 31 κόμβους. Στον κάθε κόμβο ασκείται θλιπτικό φορτίο 100 kN. Για αυτό το λόγο η φόρτιση του δοκιμίου τερματίζει περίπου στα 3100 kN για όλα τα δοκίμια, εκτός από το δοκίμιο 3i όπου η μέγιστη τιμή της φόρτισης είναι τα 2506kN.

Τα κονιάματα αποκατάστασης, δεν δύνανται να αναλάβουν μεγάλες παραμορφώσεις. Στον Πίνακα 57 παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης κατακόρυφης παραμόρφωσης τη στιγμή της θραύσης καθώς και το φορτίο για το οποίο αστοχεί το κονίαμα στην τοιχοποιία.

Πίνακας 57: Συγκριτικές τιμές παραμόρφωσης θραύσης (mm) και φορτίου θραύσης (kN)

	1i	1ii	2i	2ii	3i	3ii	4i	4ii	5i	5ii
Fracture Strain (mm)	0.063	0.041	0.070	0.065	0.081	0.13	0.055	0.014	0.057	0.046
Fracture Load (kN)	809.13	710.21	1451.66	1502.34	302.38	313.33	111.94	1028.21	1499.64	1226.26

Τόσο στη δοκιμή θλίψης όσο και στη δοκιμή διάτμησης, οι πλαστικές παραμορφώσεις εξαρτώνται πάντα από τη σύνθεση του κονιάματος.

Στον Πίνακα 58 παρατίθενται οι συνθέσεις των κονιαμάτων, ο μέσος όρος της μέγιστης αντοχής και της τάσης θραύσης καθώς και ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας για δοκίμια της ίδιας κατηγορίας.

Ακόμη και σε δοκίμια της ίδιας κατηγορίας, παρατηρείται απόκλιση στις τιμές των αντοχών. Η διαφορά έγκειται στα διαφορετικά ποσοστά των συστατικών της κάθε σύνθεσης.

Σύμφωνα με τις τιμές των αντοχών που προέκυψαν από τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης, μπορούμε να πούμε πως οι παρακάτω συνθέσεις είναι κατάλληλες για χρήση σε αρμολόγηση: κονιάματα που περιέχουν

- α) μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλικά άσβεστο,
- β) Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο,

1. Χύτευση 7 (1m - Σύνθεση 4)

2. Χύτευση 8 (1m - Σύνθεση 6)
 3. Χύτευση 9 (1m - Σύνθεση 7)
 4. Χύτευση 12 (1m - Σύνθεση 10)
- γ) Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο
1. MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)
 2. MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)
 3. Σύνθεση A4 MLN Θλίψη 1m
 4. Σύνθεση A12 MLN1 Θλίψη 3m
- δ) Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία
1. MLNT (a3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)
 2. MLNT a3mt 12 months (25_02_2013)
 3. Σύνθεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m
 4. Σύνθεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)
 5. Σύνθεση A9 MLP1 Θλίψη 3m
 6. Σύνθεση A19 MLP1 Θλίψη 1m
 7. Σύνθεση A21 MLX1 Θλίψη 1m
- ε) Κονιάματα με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο
1. Σύνθεση A6 CemN Θλίψη 1m
 2. Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m
- Οι συνθέσεις που αναφέρονται στη συνέχεια είναι πιο κατάλληλες για χρήση σε επιχρίσματα: κονιάματα που περιέχουν
- α) Κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο και νταμαρίσια άμμο
- β) Κονιάματα με νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο (<5%)
- γ) Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο
1. Χύτευση 1 (1m 1η Σύνθεση)
 2. Χύτευση 1' (2m 1η Σύνθεση)
 3. Χύτευση 1'' (3m - 1η Σύνθεση)
 4. Χύτευση 2 (1m - 2η Σύνθεση)
 5. Χύτευση 2' (3m - 2 σύνθεση)
 6. Χύτευση 6 (1m - Σύνθεση 3)
- δ) Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο

1. Χύτευση 10 (1m - Σύνθεση 8)
 2. Χύτευση 11 (1m - Σύνθεση 9)
- ε) Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία
- στ) Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο
- ζ) Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο
- η) Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία
1. A18_c12m
 2. Σύνθεση A5 YXT2 Θλίψη 1m
 3. Σύνθεση A17 YXT1 Θλίψη 1m
- θ) Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία
1. Σύνθεση A1 YNT1 Θλίψη 1m
 2. Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m
 3. Σύνθεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m
 4. Σύνθεση A3 YNT1 Θλίψη 1m
 5. Σύνθεση A20 YNT2 Θλίψη 1m
- ι) Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία
1. Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m
- κ) Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικά
1. Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΘΛΙΨΗ
 2. Σύνθεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m

Πίνακας 58: Συγκριτικές τιμές αντοχών των κονιαμάτων

Κατηγορία Κονιάματος		Μέσος Όρος		
		Maximum Strength (Mpa)	Strength Limit (Mpa)	Elasticity Modulus (Gpa)
Κονιάματα με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο		14.667	11.081	2.359
Κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο και νταμαρίσια άμμο		6.013	4.985	2.258

Κονιάματα με νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο (<5%)		2.259	2.014	0.967
Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο	Χύτευση 1 (1m 1η Σύνδεση)	0.901	0.803	0.349
	Χύτευση 1' (2m 1η Σύνδεση)	2.481	1.981	0.819
	Χύτευση 1'' (3m - 1η Σύνδεση)	1.294	1.13	0.357
	Χύτευση 2 (1m - 2η Σύνδεση)	1.185	1.08	0.599
	Χύτευση 2' (3m - 2 σύνδεση)	4.883	3.693	2.566
	Χύτευση 6 (1m - Σύνδεση 3)	5.148	3.653	2.481
Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο	Χύτευση 7 (1m - Σύνδεση 4)	12.537	8.528	5.661
	Χύτευση 8 (1m - Σύνδεση 6)	14.844	10.623	8.361
	Χύτευση 9 (1m - Σύνδεση 7)	21.359	13.599	9.534
	Χύτευση 10 (1m - Σύνδεση 8)	9.277	6.92	3.42
	Χύτευση 11 (1m - Σύνδεση 9)	9.314	5.618	6.676
	Χύτευση 12 (1m - Σύνδεση 10)	10.38	6.266	5.998
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο	MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)	14.568	9.463	4.622
	MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)	10.654	7.173	2.906
	Σύνδεση A4 MLN Θλίψη 1m	14.078	8.921	2.342
	Σύνδεση A12 MLN1 Θλίψη 3m	12.006	7.083	0.939
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	MLNT (α3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)	13.256	8.862	0.699
	MLNT α3mt 9 months (28_11_2012)	8.714	6.319	1.857
	MLNT α3mt 12 months (25_02_2013)	13.138	8.928	2.468
	Σύνδεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m	14.349	7.573	1.193
	Σύνδεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)	12.479	10.197	1.142
	Σύνδεση MLNT A3mt-Θλίψη 1m (04-07-2011)	8.903	6.601	0.778
Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο	A19_c12m	7.443	4.864	2.106
	Σύνδεση A9 MLP1 Θλίψη 3m	12.145	5.577	1.116
	Σύνδεση A19 MLP1 Θλίψη 1m	11.882	9.083	0.989

Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο	<i>a21-c12m</i>	4.844	3.6	1.667
	<i>Σύνθεση A21 MLX1 Θλίψη 1m</i>	10.358	7.375	2.573
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία	<i>A18_c12m</i>	3.019	2.464	0.868
	<i>Σύνθεση A5 YXT2 Θλίψη 1m</i>	7.195	6.42	2.24
	<i>Σύνθεση A17 YXT1 Θλίψη 1m</i>	3.092	2.811	1.397
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία		4.023	3.421	1.539
	<i>Σύνθεση A1 YNT1 Θλίψη 1m</i>			
	<i>Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m</i>	4.046	3.21	1.163
	<i>Σύνθεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m</i>	5.476	4.176	0.592
	<i>Σύνθεση A3 YNT1 Θλίψη 1m</i>	3.973	3.556	1.069
	<i>Σύνθεση A20 YNT2 Θλίψη 1m</i>	5.894	4.728	0.578
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία	<i>Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m</i>	9.985	7.556	1.152
Κονιάματα με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο		71.309	37.926	18.039
	<i>Σύνθεση A6 CemN Θλίψη 1m</i>			
	<i>Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m</i>	65.479	39.679	11.696
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικα	<i>Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΘΛΙΨΗ</i>	4.319	3.741	0.46
	<i>Σύνθεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m</i>	6.949	5.071	0.864

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πειραματικό μέρος αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, θα μπορούσαν να αποτελέσουν έναυσμα για περεταίρω διερεύνηση. Τρισδιάστατα προσομοιώματα θα έδιναν ίσως πιο ακριβή αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας υπό θλιπτική καταπόνηση. Επίσης, θα μπορούσαν οι συνθέσεις των κονιαμάτων που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία, να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη σύνθεση δοκιμίων τοιχοποιίας όμοια με αυτά που προσομοιώνονται στο πρόγραμμα Marc – Mentat, έτσι ώστε να υπάρχει μια σύγκριση των τιμών των αντοχών μεταξύ του

πειράματος στο εργαστήριο και του αντίστοιχου προσομοιώματος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Στην εργασία αυτή θεωρήθηκε ο λίθος ως ελαστικό υλικό με σκοπό αποκλειστικά τη μελέτη της συμπεριφοράς του κονιάματος. Θα είχε ενδιαφέρον μία νέα διερεύνηση όπου ο λίθος θα αποτελούσε μη ελαστικό υλικό, έτσι ώστε να αποτυπώνεται και σε αυτό το υλικό η κατανομή της τάσης κατά τη δοκιμή διάτμησης και θλίψης.

Τέλος ενδιαφέρον θα είχε και η χρήση διαφορετικών νανοϋλικών στα κονιάματα με χαμηλές μηχανικές αντοχές.

Παράρτημα

A. Στοιχεία Δοκιμών

Στους Πίνακες 59 και 60 που ακολουθούν, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι κατηγορίες των κονιαμάτων που μελετήθηκαν, οι συνθέσεις που έγιναν για τη Παρασκευή των δοκιμών καθώς και τα ονόματα των δοκιμών που αντιστοιχούν σε κάθε μελέτη σύνθεσης.

Πίνακας 59: Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών που μελετήθηκαν υπό δοκιμή θλίψης

Κατηγορία Κονιάματος	Σύνθεση / Χύτευση	Ονομασία Δοκιμίου
Κονιάματα με μετακαολίνη, νταμαρίσια άμμο και φυσική υδραυλική άσβεστο	-	Uniaxial_MRX_0001
		Uniaxial_MRX_0002
		Uniaxial_MRX_0003
		Uniaxial_MRX_0004
		Uniaxial_MRX_0005
		Uniaxial_MRX_0006
Κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο και νταμαρίσια άμμο	-	Π1
		Π2
		Π3
Κονιάματα με νταμαρίσια άμμο, πυριτική άμμο, φυσική υδραυλική άσβεστο και ανθρακικό μόλυβδο (<5%)	-	pb_0006
		pb_0007
		pb_0008
		pb_0009
		pb_0010
		pb_0011
Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδράσβεστο	Χύτευση 1 (1m 1η Σύνθεση)	Γυψοκονίαμα 1
		Γυψοκονίαμα 2
		Γυψοκονίαμα 3
		Γυψοκονίαμα 4
		Γυψοκονίαμα 5
		Γυψοκονίαμα 6
	Χύτευση 1' (2m 1η Σύνθεση)	Γυψοκονίαμα 7
		Γυψοκονίαμα 8

		Γυψοκονίαμα 9
		Γυψοκονίαμα 11
		Γυψοκονίαμα 12
	Χύτευση 1" (3m - 1η Σύνθεση)	GY_17_0001
		GY_17_0002
		GY_17_0003
		GY_17_0004
		GY_17_0005
	Χύτευση 2 (1m - 2η Σύνθεση)	G4_5_0001
		G4_5_0002
		G4_5_0003
		G4_5_0004
		G4_5_0005
	Χύτευση 2' (3m - 2 σύνθεση)	G4_5_0006
		ΓΨ4_1(3months)
		ΓΨ4_2(3months)
		ΓΨ4_3(3months)
		ΓΨ4_4(3months)
	Χύτευση 6 (1m - Σύνθεση 3)	ΓΨ4_5(3months)
		ΓΨ4_6(3months)
		X3_S6_0001
		X3_S6_0002
		X3_S6_0003
Κονιάματα με γύψο, νταμαρίσια άμμο και υδραυλική άσβεστο	Χύτευση 7 (1m - Σύνθεση 4)	X3_S6_0004
		X3_S6_0005
	Χύτευση 8 (1m - Σύνθεση 6)	X3_S6_0006
		X7_S4_0002
		X7_S4_0003
	Χύτευση 9 (1m - Σύνθεση 7)	X8_S6_0001
		X8_S6_0002
		X8_S6_0003
	Χύτευση 10 (1m - Σύνθεση 8)	X9_S7_0001
		X9_S7_0002
		X9_S7_0003
	Χύτευση 11 (1m - Σύνθεση 9)	X10_S8_0001
		X10_S8_0002
		X10_S8_0003
	Χύτευση 12 (1m - Σύνθεση 10)	X11_S9_0001
		X11_S9_0002
		X11_S9_0003
		X12_S10_0001
		X12_S10_0002

		X12_S10_0003
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο	MLN (A3M) 9 months (21_02_2013)	ML9m_1
		ML9m_2
		ML9m_3
		ML9m_4
		ML9m_5
		ML9m_6
	MLN (A3M) 12 months (08_03_2013)	MLN12m_1
		MLN12m_2
		MLN12m_3
		MLN12m_4
		MLN12m_5
	Σύνθεση A4 MLN Θλίψη 1m	A4_1
		A4_2
		A4_3
		A4_4
		A4_5
		A4_6
	Σύνθεση A12 MLN1 Θλίψη 3m	A12-1
		A12-2
		A12-3
		A12-4
		A12-5
		A12-6
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	MLNT (a3mt) Θλίψη 1m (Κομμένα απο κάμψη)	A3mt-1
		A3mt-2
		A3mt-3
		A3mt-4
		A3mt-5
		A3mt-6
	MLNT a3mt 9 months (28_11_2012)	A3mt_1_9 months
		A3mt_2_9 months
		A3mt_3_9 months
		A3mt_4_9 months
		A3mt_5_9 months
		A3mt_9 months (28_11_2012)
	MLNT a3mt 12 months (25_02_2013)	MLNT12m_1
		MLNT12m_2
		MLNT12m_3
		MLNT12m_4

	Σύνθεση A10 MLNT1 Θλίψη 3m	MLNT12m_5
		A10-1
		A10-2
		A10-3
		A10-4
		A10-5
		A10-6
	Σύνθεση MLNT A3mt-cem Θλίψη 1m (04-07-2011)	A3mtcem-1
		A3mtcem-2
		A3mtcem-3
		A3mtcem-4
		A3mtcem-5
		A3mtcem-6
	Σύνθεση MLNT A3mt-Θλίψη 1m (04-07-2011)	A3mt-1
		A3mt-2
		A3mt-3
Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο	A19_c12m	a19_12_0002
		1
		2
		3
		4
	Σύνθεση A9 MLP1 Θλίψη 3m	Δ1
		Δ2
		Δ5
		Δ6
		Δ7
	Σύνθεση A19 MLP1 Θλίψη 1m	A19-1
		A19-2
		A19-3
		A19-4
		A19-5
		A19-6
Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο	a21-c12m	a21_12_0002
		1
		2
		3
		4
	Σύνθεση A21 MLX1 Θλίψη 1m	A21_1
		A21_2
		A21_3
		A21_4

		A21_5
		A21_6
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία	A18_c12m	Uniax_A18_0001-1
		2
		3
		4
		5
		6
	Σύνθεση A5 YXT2 Θλίψη 1m	A5_1
		A5_2
		A5_3
		A5_4
		A5_5
		A5_6
	Σύνθεση A17 YXT1 Θλίψη 1m	A17_2
		A17_3
		A17_4
		A17_5
		A17_6
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	Σύνθεση A1 YNT1 Θλίψη 1m	uniaxial_0001
	Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 Θλίψη 1m	A2-1
		A2-2
		A2-3
		A2-4
		A2-6
	Σύνθεση A2(A1b)YNT1 ΘΛΙΨΗ 1m	A1b-1
		A1b-2
		A1b-3
		A1b-4
		A1b-5
		A1b-6
	Σύνθεση A3 YNT1 Θλίψη 1m	A3_1
		A3_2
		A3_3
		A3_4
		A3_5
	Σύνθεση A20 YNT2 Θλίψη 1m	A20-1
		A20-2
		A20-3
		A20-4
		A20-5

		A20-6
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο, τσιμέντο και νανοτιτανία	Σύνθεση A20-cem YNT2Cem Θλίψη 1m	A20cem-1
		A20cem-2
		A20cem-3
		A20cem-4
		A20cem-5
		A20cem-6
Κονιάματα με τσιμέντο και νταμαρίσια άμμο	Σύνθεση A6 CemN Θλίψη 1m	A6_1
		A6_3
	Σύνθεση A7 CemN Θλίψη 1m	A7_1
		A7_2
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικα	Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΘΛΙΨΗ	A8Si-1
		A8Si-2
		A8Si-3
		A8Si-4
		A8Si-5
		A8Si-6
	Σύνθεση A11 YPSi1 Θλίψη 3m	A11-1
		A11-2
		A11-3
		A11-4
		A11-5
		A11-6

Πίνακας 60: Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών που μελετήθηκαν υπό δοκιμή κάμψης

Κατηγορία Κονιάματος	Σύνθεση / Χύτευση	Ονομασία Δοκιμίου
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο και νταμαρίσια άμμο	Σύνθεση A13 MLN1 Κάμψη 1m	A13-1
		A13-2
		A13-3
Κονιάματα με μετακαολίνη, υδράσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	Σύνθεση A15 MLNT1 Κάμψη 1m	A15-1
		A15-2
		A15-3
		A15-4
		A15-5
		A15-6

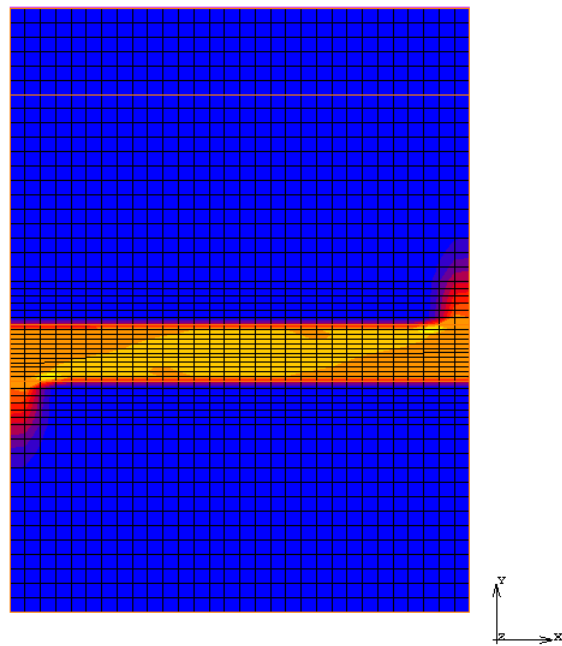
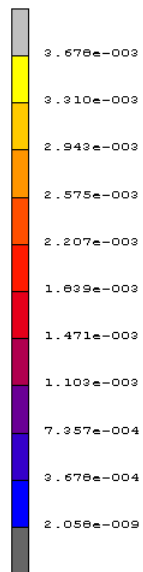
	Σύνθεση MLNT A3mt Κάμψη 1m (04-07-2011)	A3mt-1
		A3mt-2
		A3mt-3
Κονιάματα με μετακαολίνη, πυριτική άμμο και υδράσβεστο	Σύνθεση A19 MLP1 Κάμψη 1m	A19-1
		A19-2
		A19-3
Κονιάματα με μετακαολίνη, χαλαζιακή άμμο και υδράσβεστο	Σύνθεση A21 MLX1 Κάμψη 1m	A21-2
		A21-3
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, χαλαζιακή άμμο και νανοτιτανία	Σύνθεση A18 YXT1 Κάμψη 1m	A18-1
		A18-2
		A18-3
	Σύνθεση YXT2 A4q2k Κάμψη 1m (04-11-2011)	A4q2k-1
		A4q2k-2
		A4q2k-3
Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, νταμαρίσια άμμο και νανοτιτανία	Σύνθεση A2 (A1b) YNT1 ΚΑΜΨΗ 3m	A1b-1
		A1b-2
		A1b-3
	Σύνθεση A16 YNT1 Κάμψη 1m	A16-1
		A16-2
		A16-3
	Σύνθεση A20 YNT2 Κάμψη 1m	A20-1
		A20-2
	Κονιάματα με υδραυλική άσβεστο, πυριτική άμμο και νανοσίλικα	Σύνθεση A8-Si YPSi1 ΚΑΜΨΗ
A8Si-2		
A8Si-3		

B. Κατανομή της ισοδύναμης ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή θλίψης

Στις Εικόνες 41 έως 69 παρουσιάζεται η κατανομή της ισοδύναμης ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης, στα μοντέλα που μελετήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων MSC-Marc, σε διάφορα βήματα φόρτισης. Σε κάθε εικόνα, αναφέρεται και το ποσοστό της φόρτισης στο τρέχον βήμα.

Αριθμητικό προσομοίωμα 1i

Inc: 10
Time: 2.596e-001

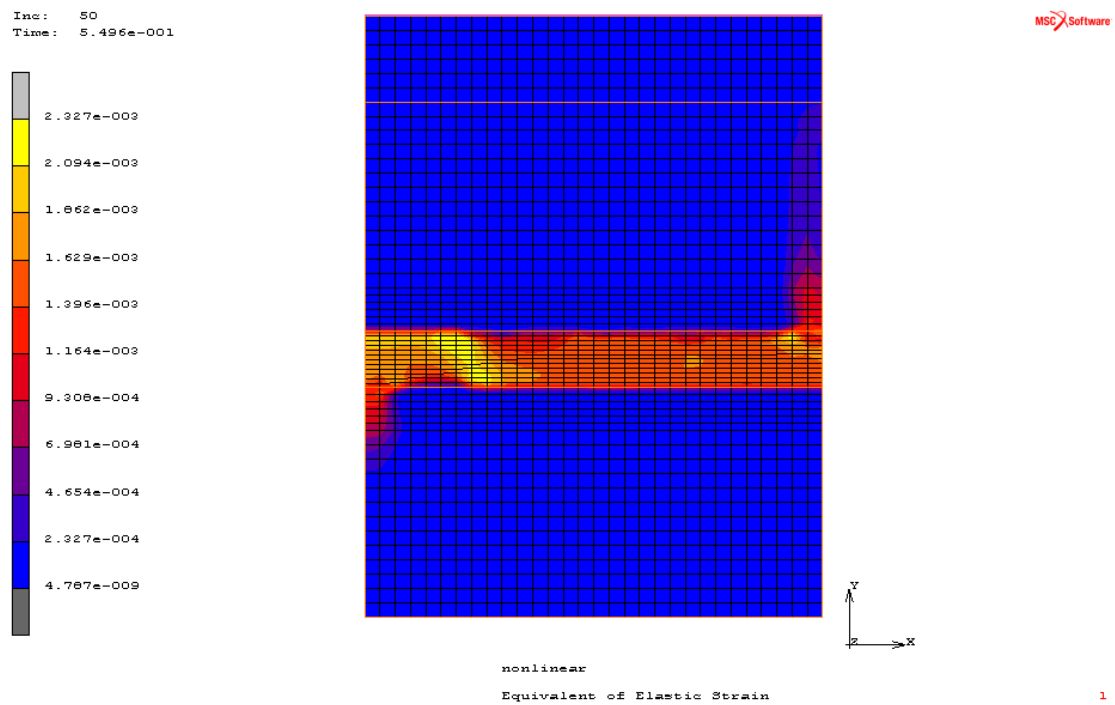


MSC Software

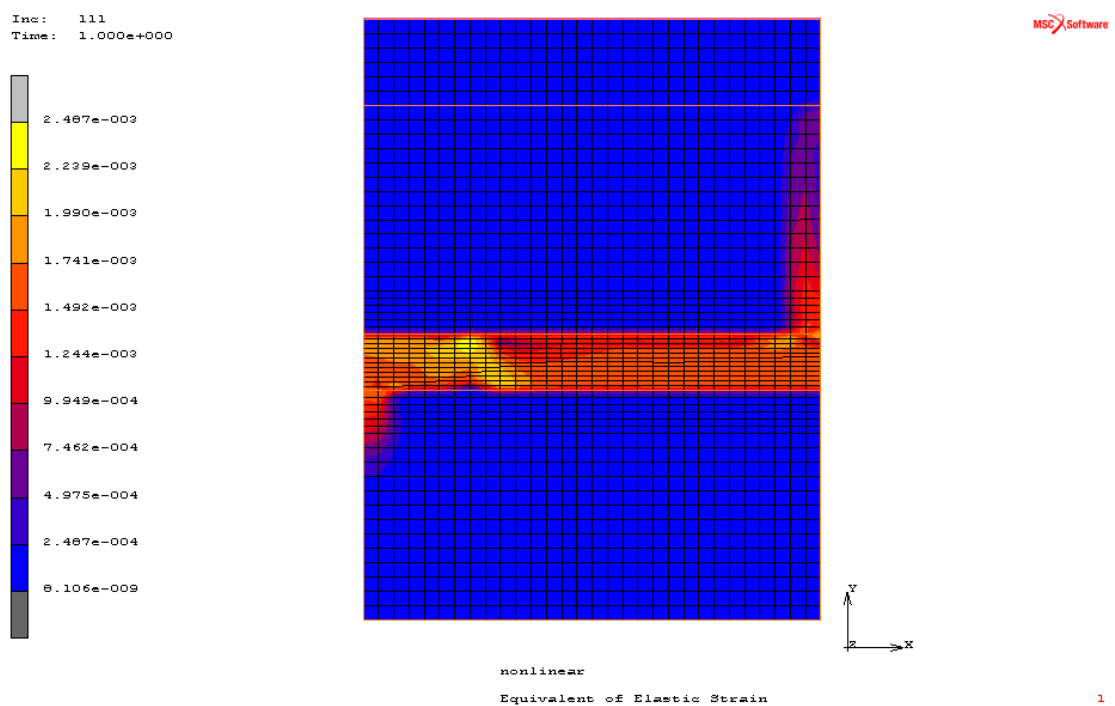
nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

1

Εικόνα 41: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

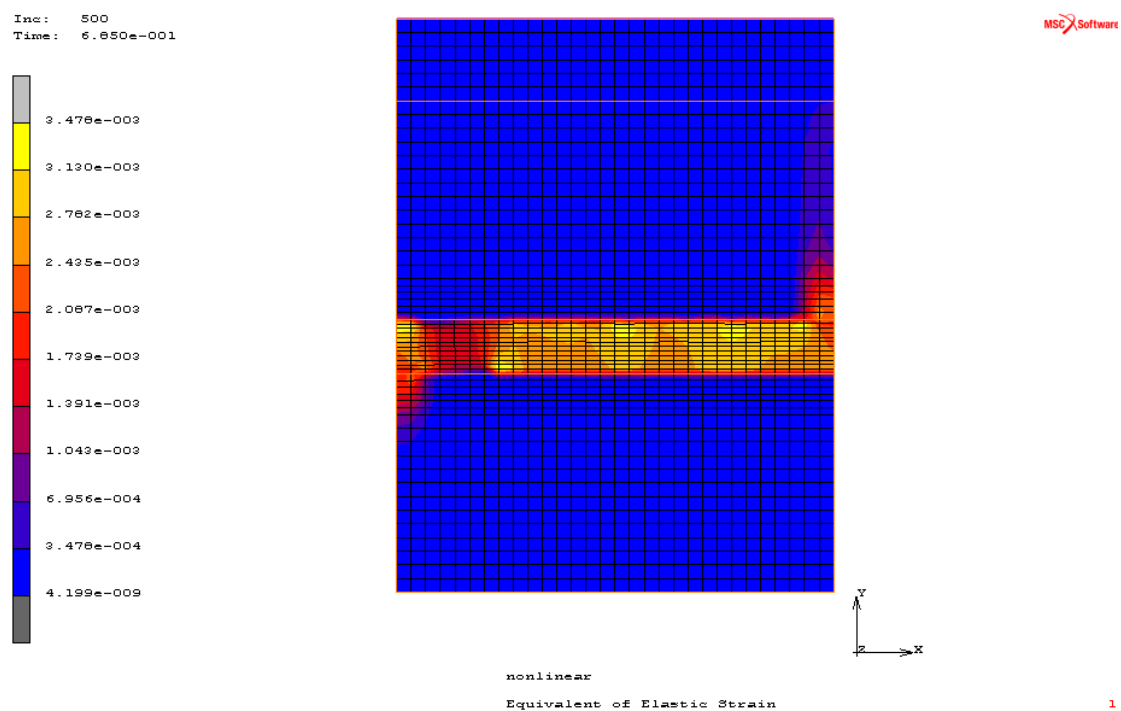


Εικόνα 42: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (55% της φόρτισης)

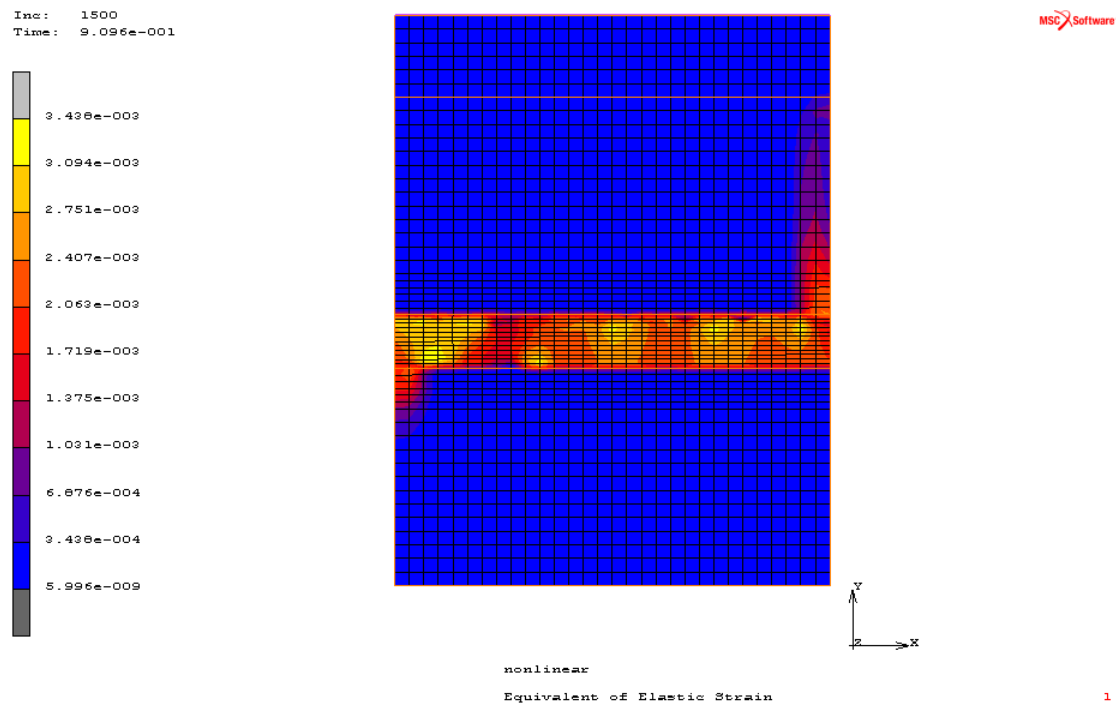


Εικόνα 43: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 111 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 1ii



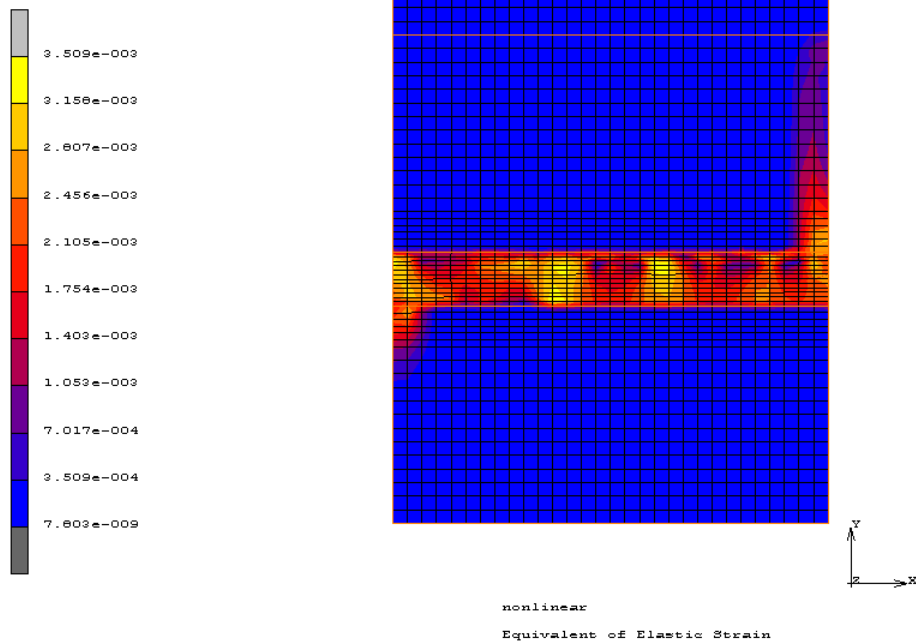
Εικόνα 44: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 500 (69% της φόρτισης)



Εικόνα 45: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 1500 (91% της φόρτισης)

Inc: 2258
Time: 9.999e-001

MSC Software



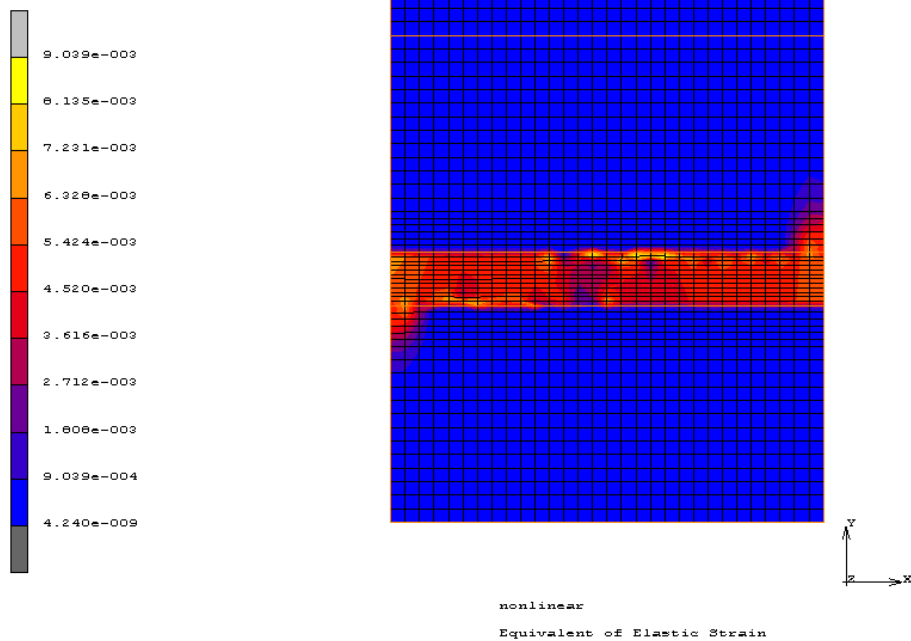
1

Εικόνα 46: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 2258 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσοιωμα 2i

Inc: 200
Time: 5.867e-001

MSC Software

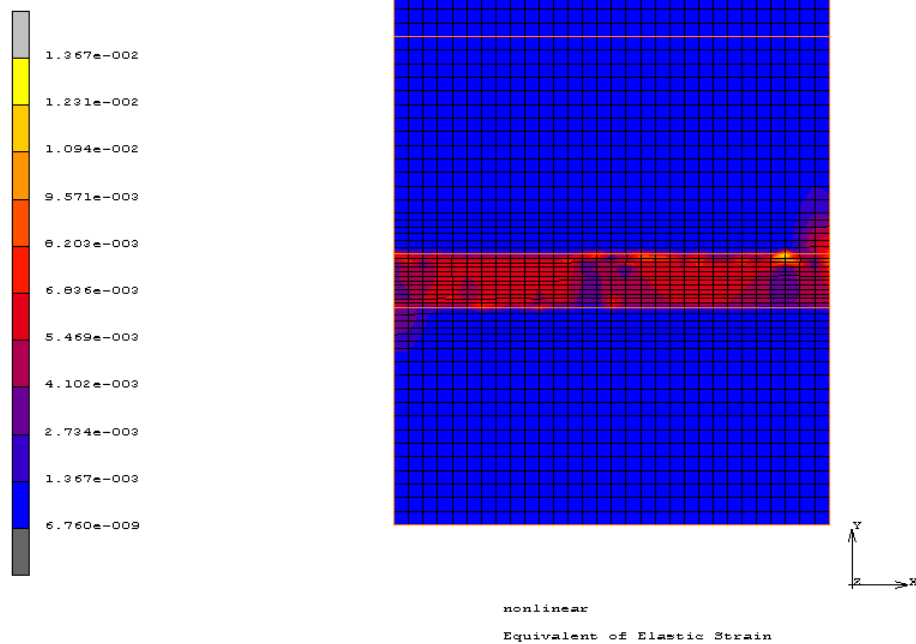


1

Εικόνα 47: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 200 (59% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 8.731e-001

MSC Software

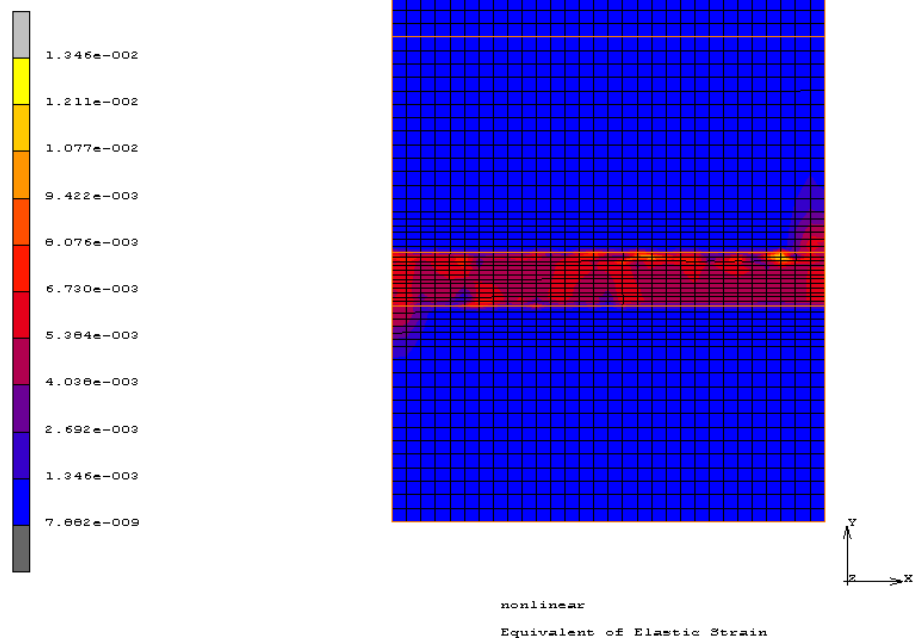


1

Εικόνα 48: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 1000 (87% της φόρτισης)

Inc: 1401
Time: 9.999e-001

MSC Software



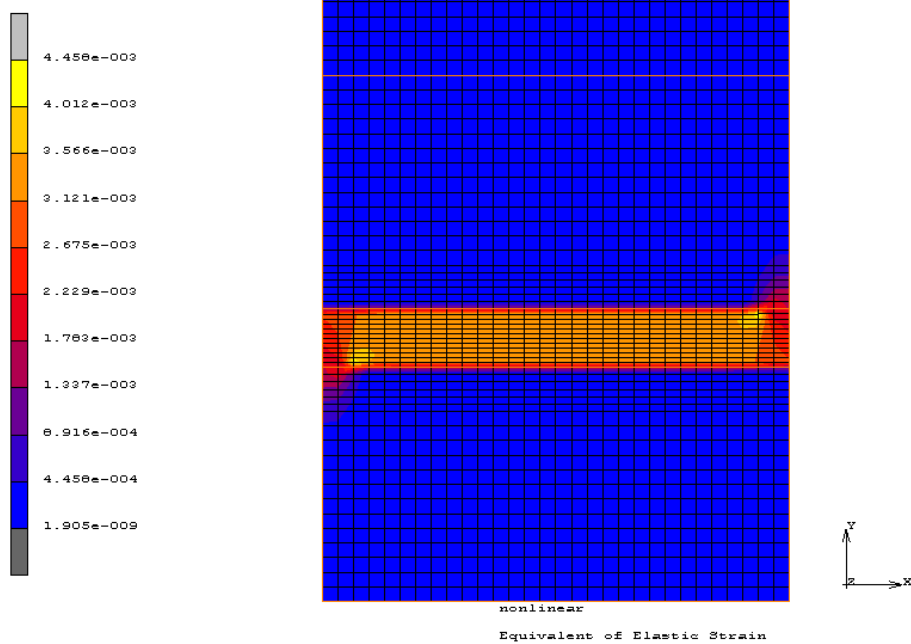
1

Εικόνα 49: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 1401 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 2ii

Inc: 10
Time: 2.596e-001

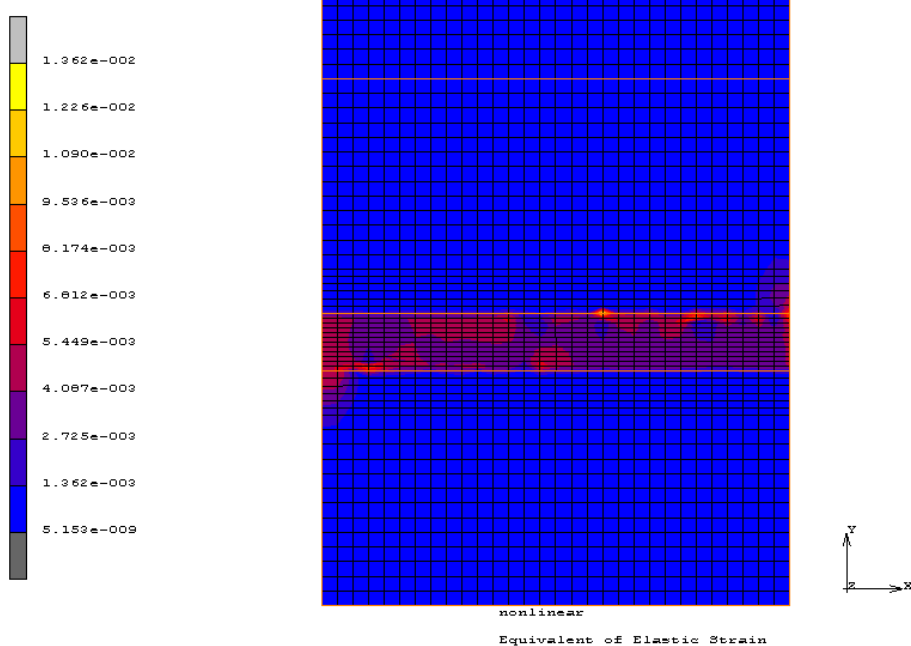
MSC Software



Εικόνα 50: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

Inc: 100
Time: 5.717e-001

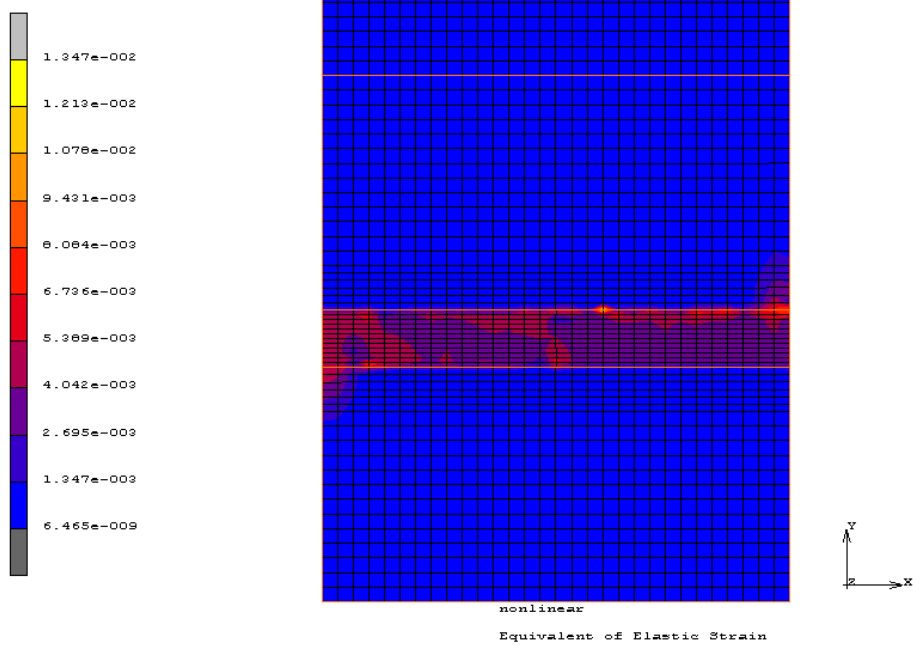
MSC Software



Εικόνα 51: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 100 (57% της φόρτισης)

Inc: 500
Time: 6.229e-001

MSC Software

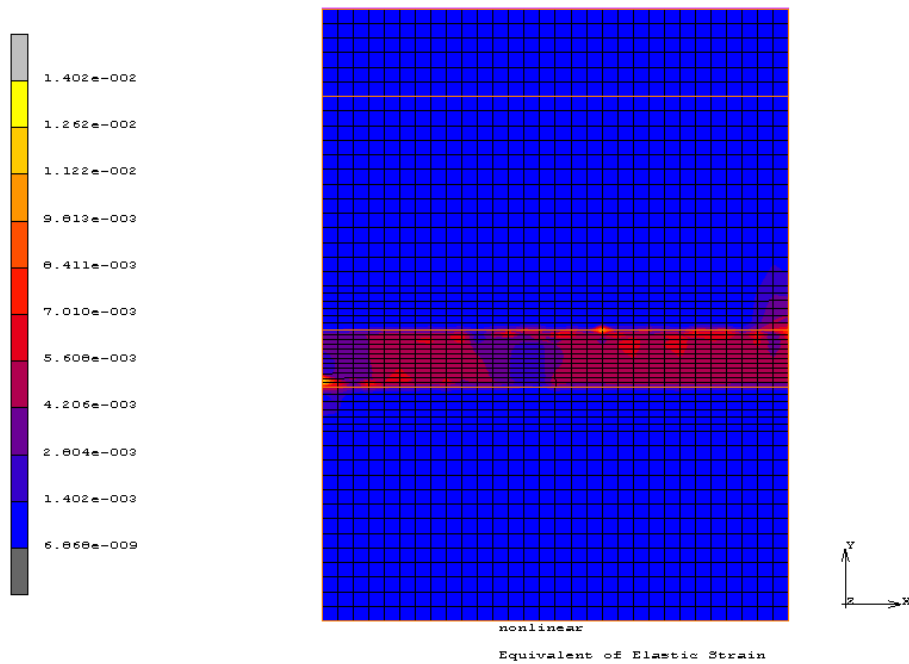


1

Εικόνα 52: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 500 (83% της φόρτισης)

Inc: 816
Time: 1.000e+000

MSC Software



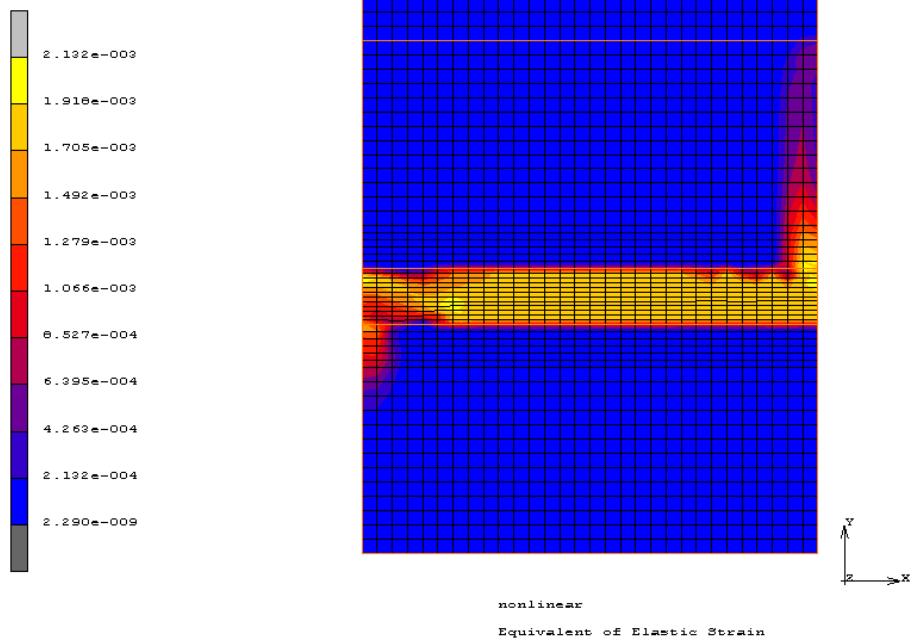
1

Εικόνα 53: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 816 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3i

Inc: 100
Time: 3.207e-001

MSC Software

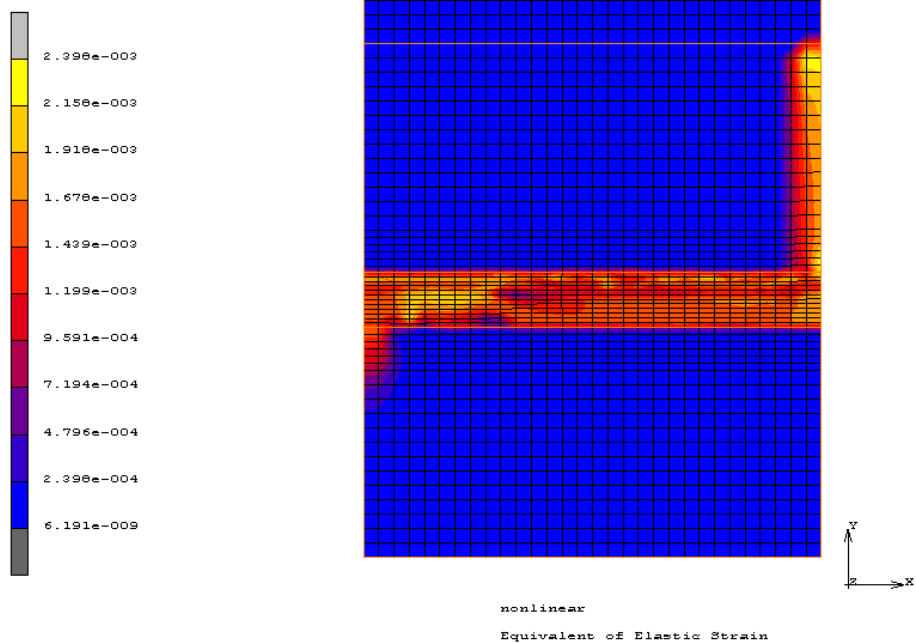


1

Εικόνα 54: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 100 (41% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 7.259e-001

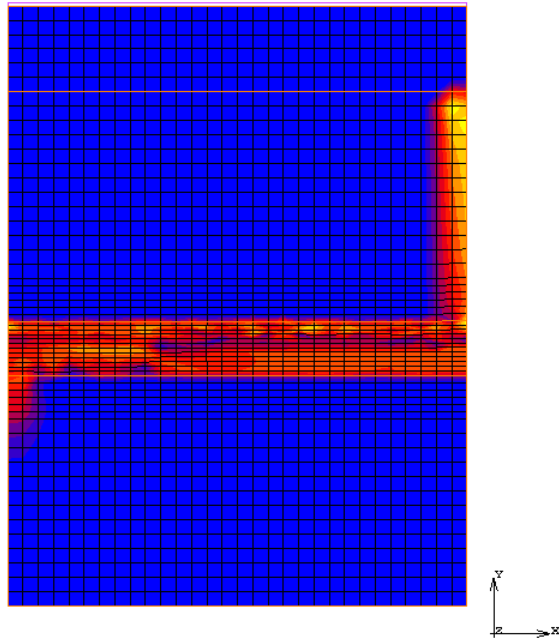
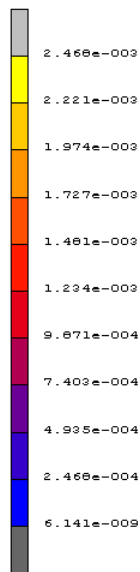
MSC Software



1

Εικόνα 55: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 1000 (90% της φόρτισης)

Inc: 3000
Time: 7.766e-001



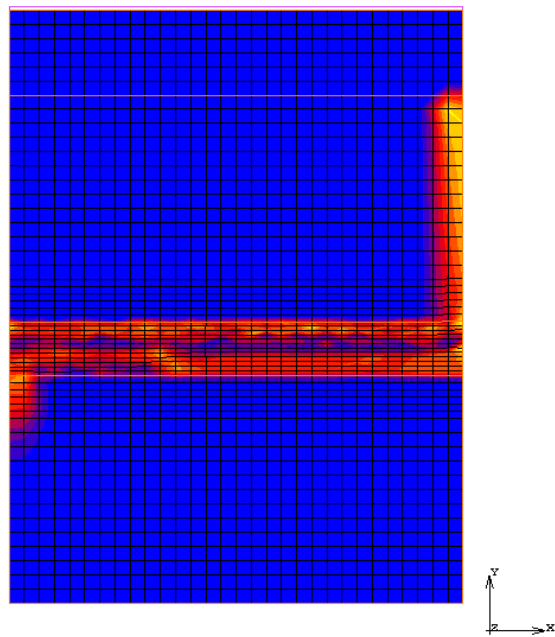
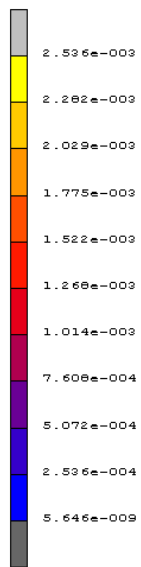
MSC Software

nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

1

Εικόνα 56: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 3000 (96% της φόρτισης)

Inc: 4409
Time: 8.096e-001



MSC Software

nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

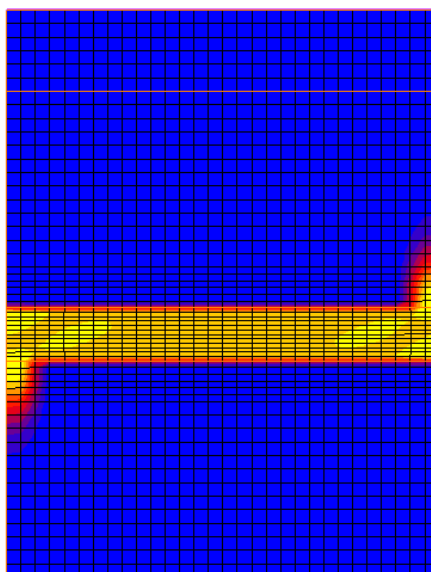
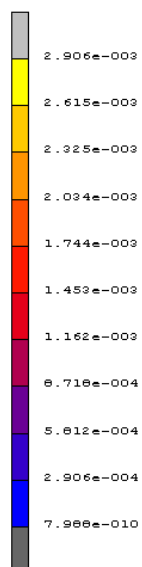
1

Εικόνα 57: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 4409 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3ii

Inc: 10
Time: 9.976e-002

MSC Software



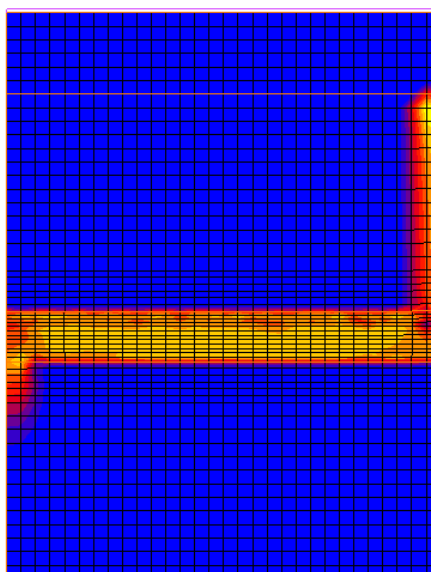
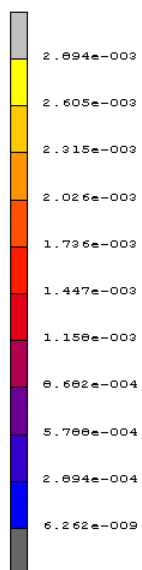
nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

1

Εικόνα 58: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (10% της φόρτισης)

Inc: 400
Time: 7.261e-001

MSC Software



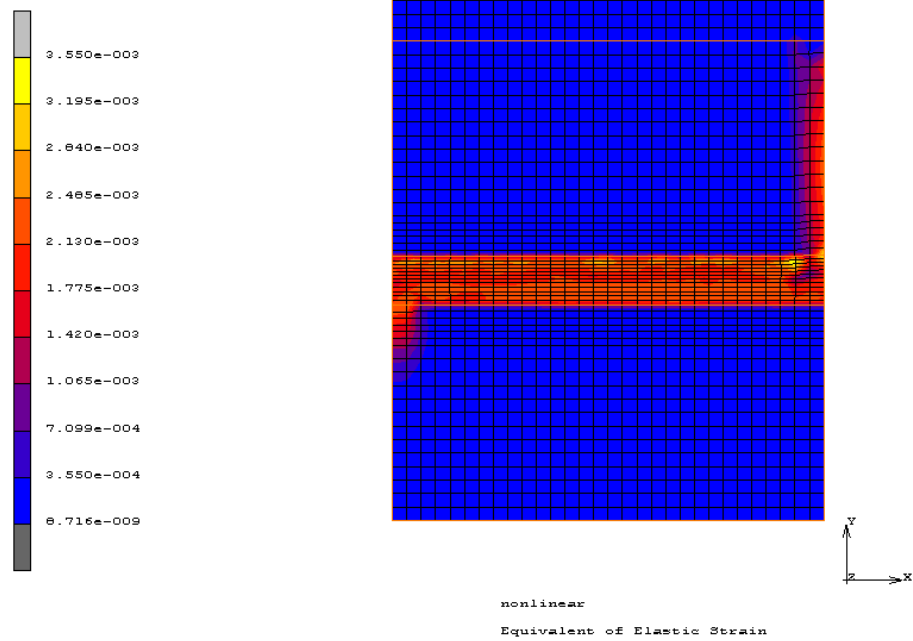
nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

1

Εικόνα 59: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 400 (74% της φόρτισης)

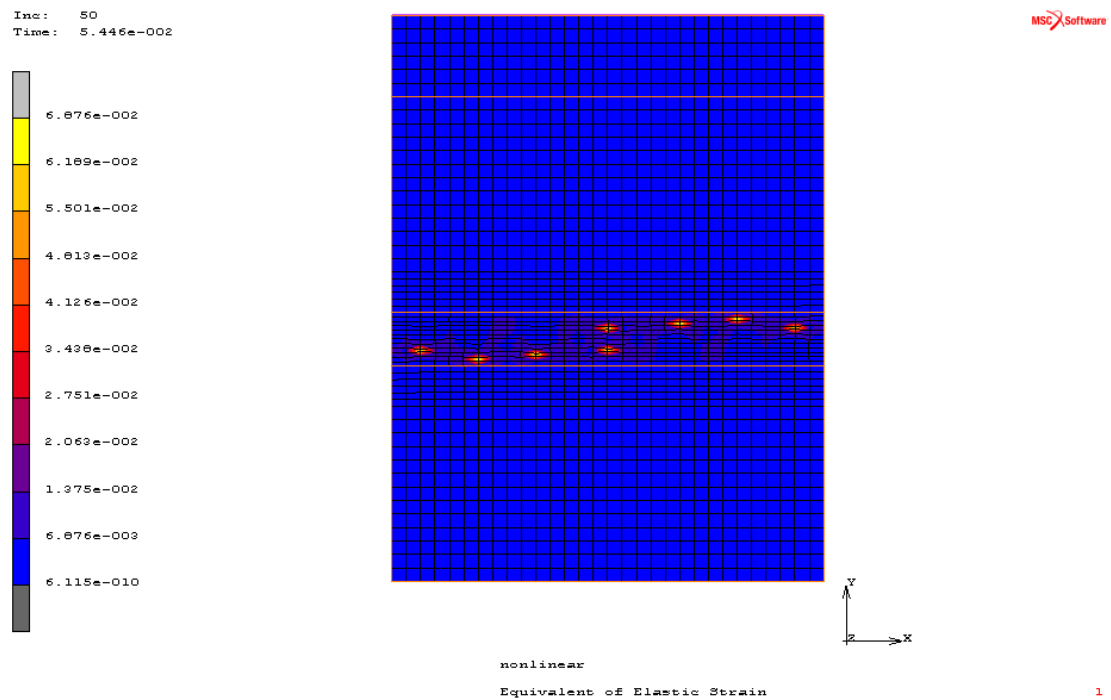
Inc: 923
Time: 1.000e+000

MSC Software

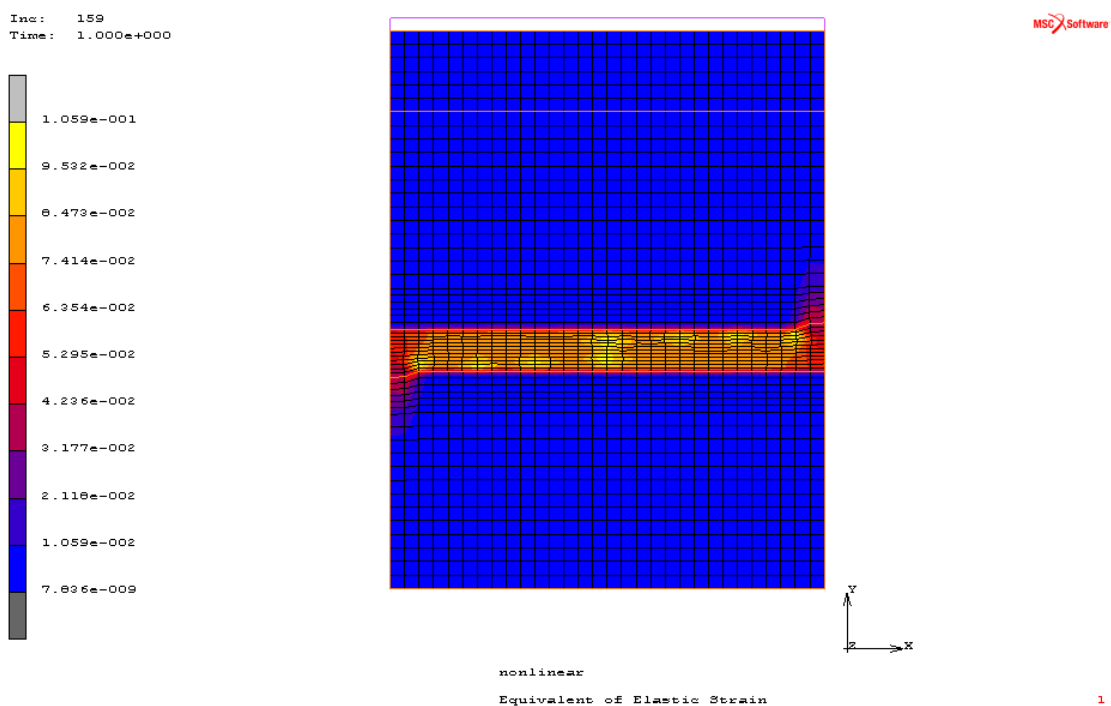


Εικόνα 60: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 923 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4i



Εικόνα 61: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (5% της φόρτισης)

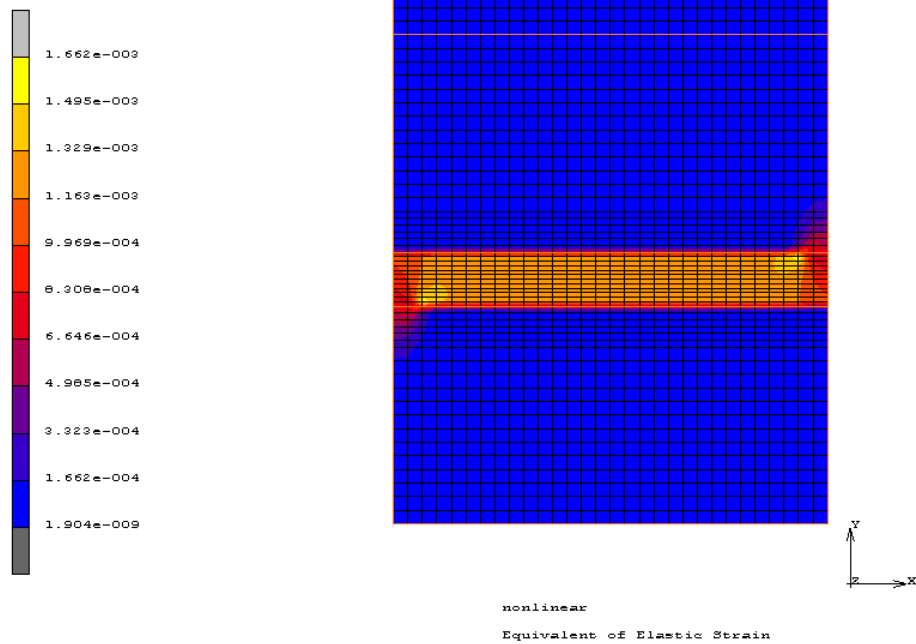


Εικόνα 62: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 159 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4ii

Inc: 10
Time: 2.596e-001

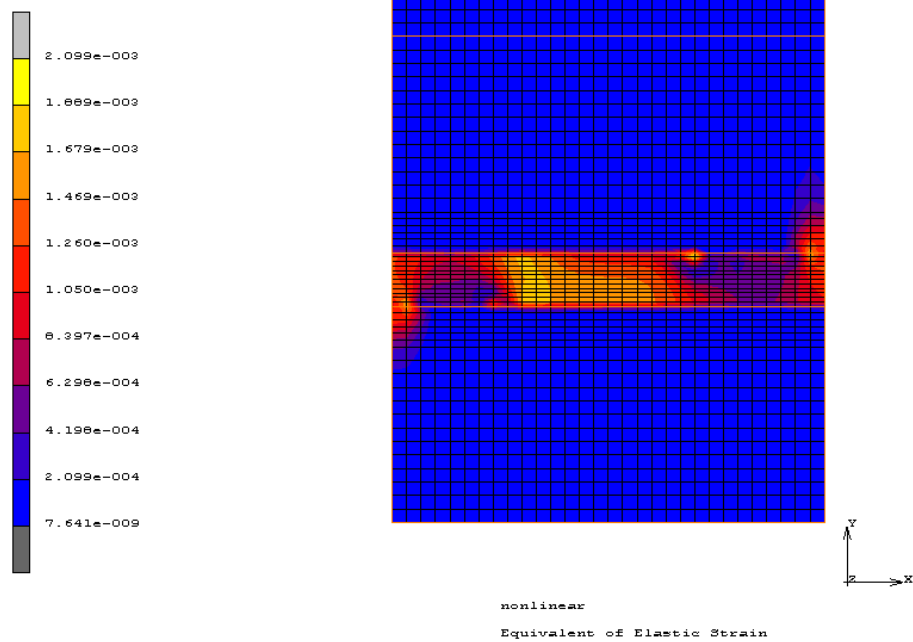
MSC Software



Εικόνα 63: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

Inc: 50
Time: 6.627e-001

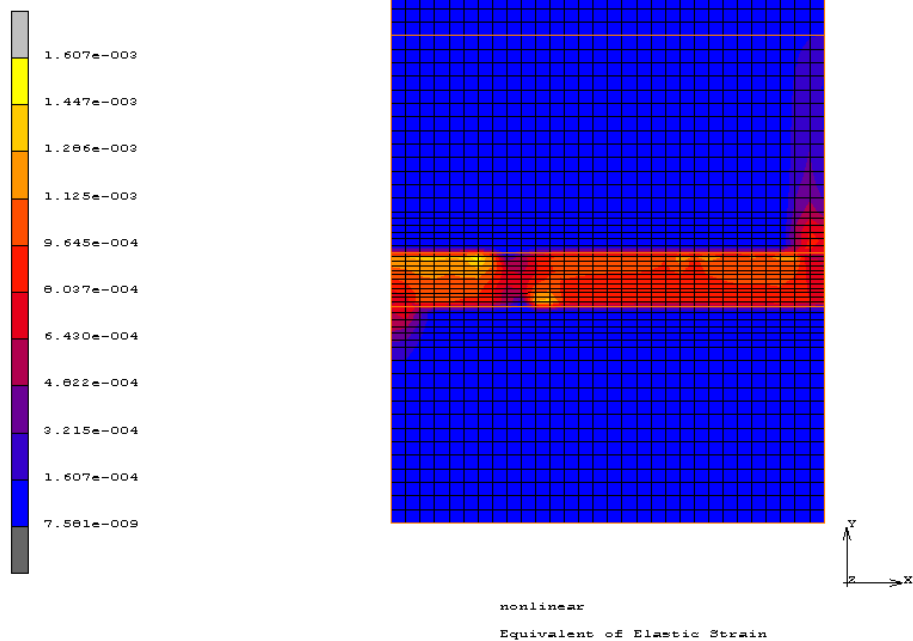
MSC Software



Εικόνα 64: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (66% της φόρτισης)

Inc: 101
Time: 1.000e+000

MSC Software



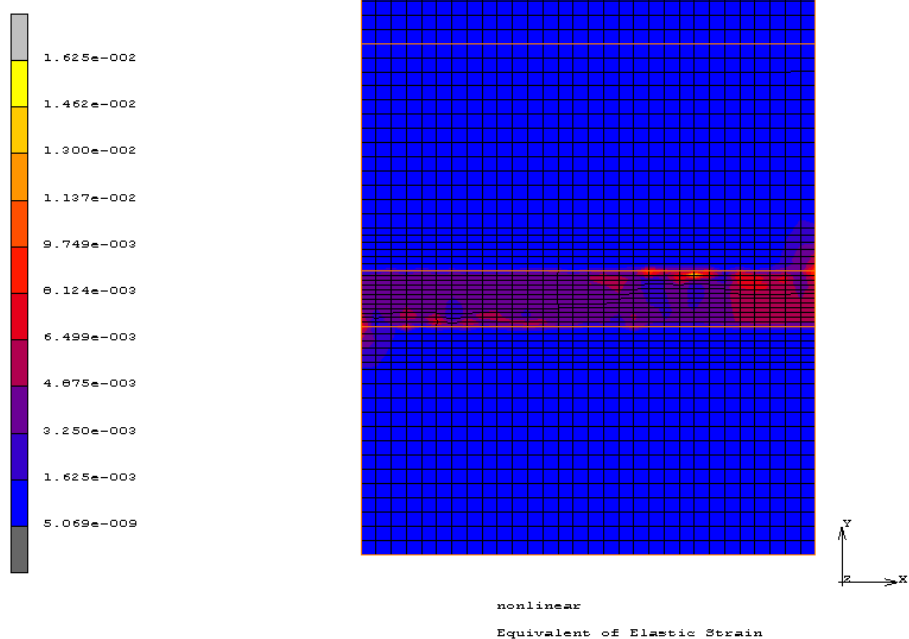
1

Εικόνα 65: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 101 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5i

Inc: 500
Time: 7.386e-001

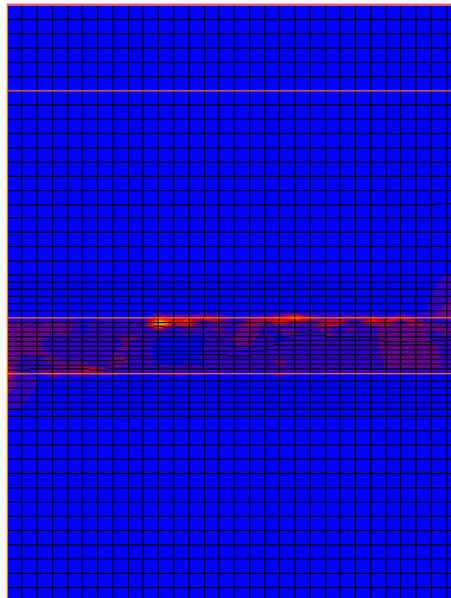
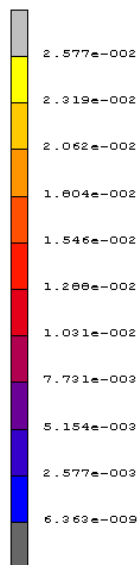
MSC Software



1

Εικόνα 66: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 500 (74% της φόρτισης)

Inc: 1234
Time: 1.000e+000



MSC Software

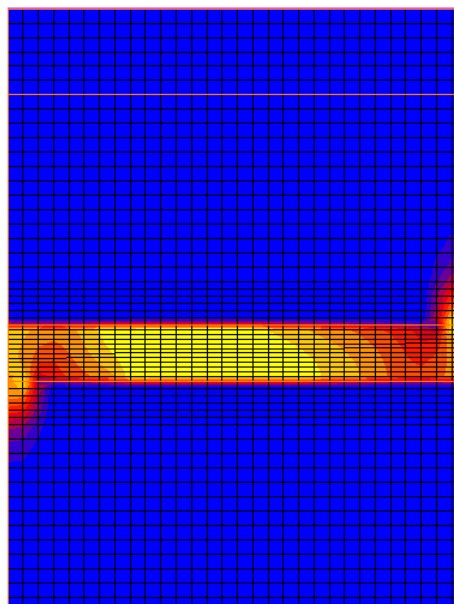
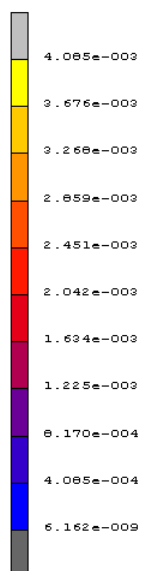
nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

1

Εικόνα 67: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 1234 (100% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5ii

Inc: 50
Time: 5.845e-001

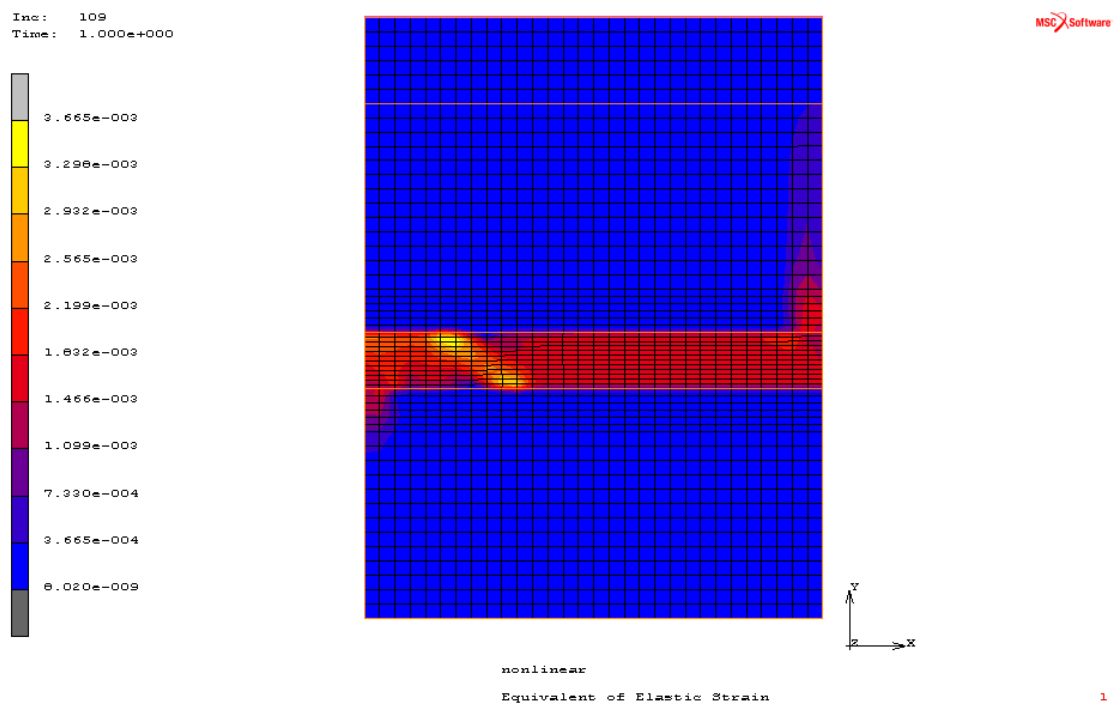


MSC Software

nonlinear
Equivalent of Elastic Strain

1

Εικόνα 68: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (58% της φόρτισης)

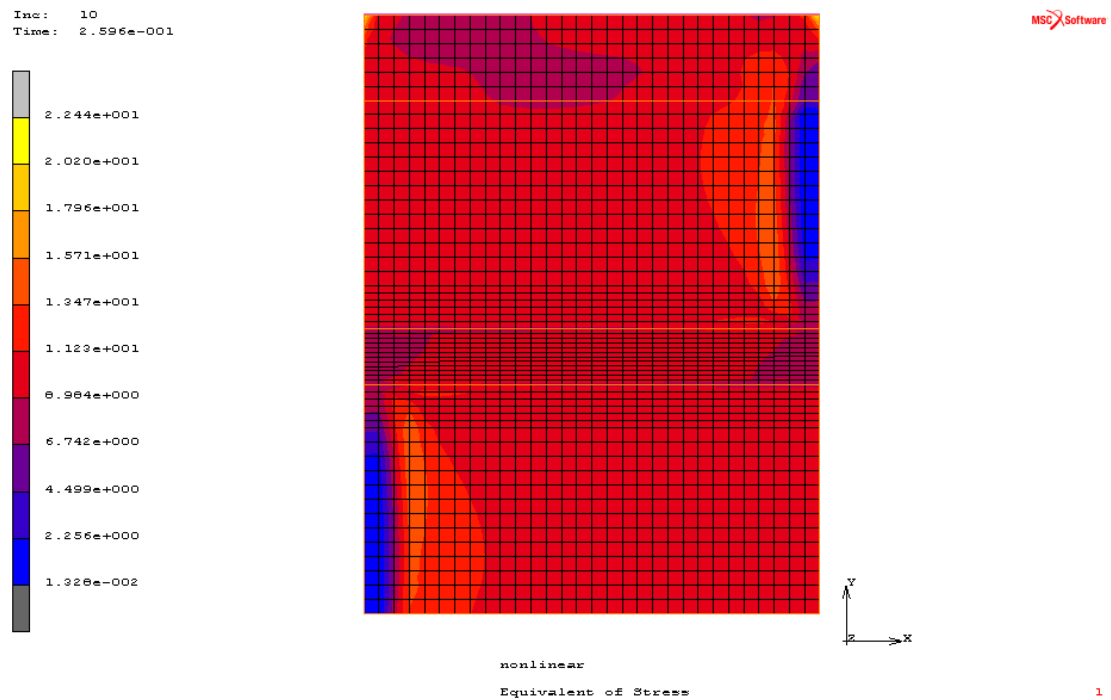


Εικόνα 69: Equivalent of Elastic Strain – Βήμα φόρτισης 109 (100% της φόρτισης)

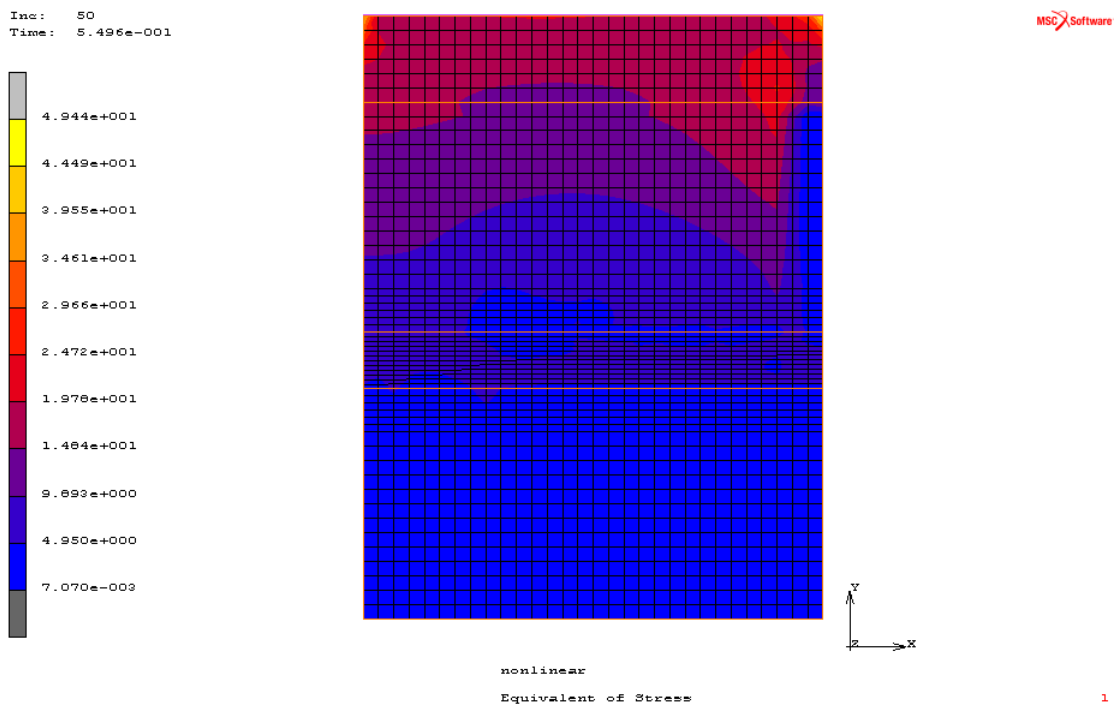
Γ. Κατανομή της τάσης κατά τη δοκιμή θλίψης

Στις Εικόνες 70 έως 88 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της τάσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης, στα μοντέλα που μελετήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων MSC-Marc, σε διάφορα βήματα φόρτισης. Σε κάθε εικόνα, αναφέρεται και το ποσοστό της φόρτισης στο τρέχον βήμα.

Αριθμητικό προσομοίωμα 1i

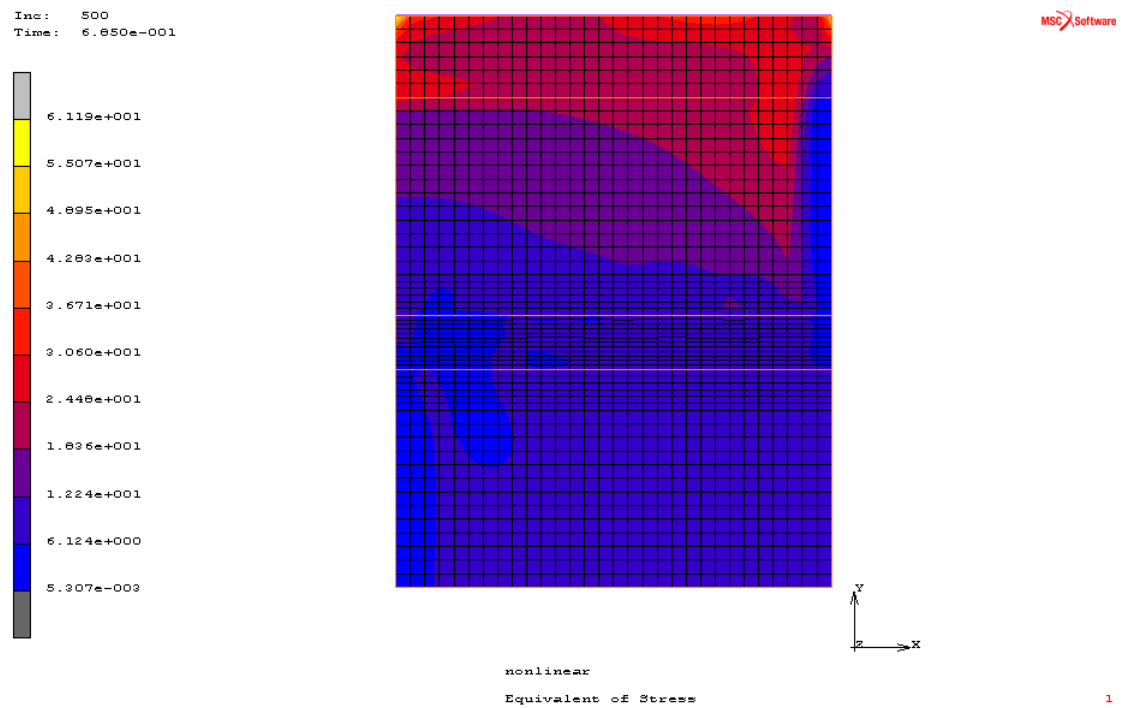


Εικόνα 70: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

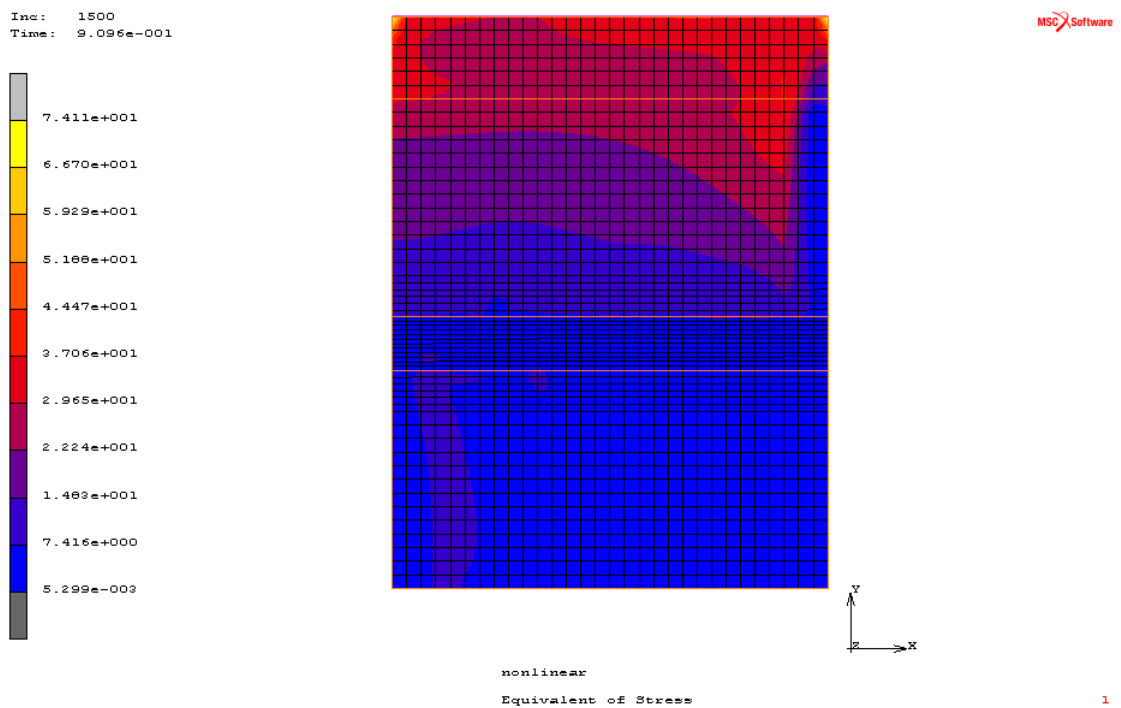


Εικόνα 71: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 50 (55% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 1ii



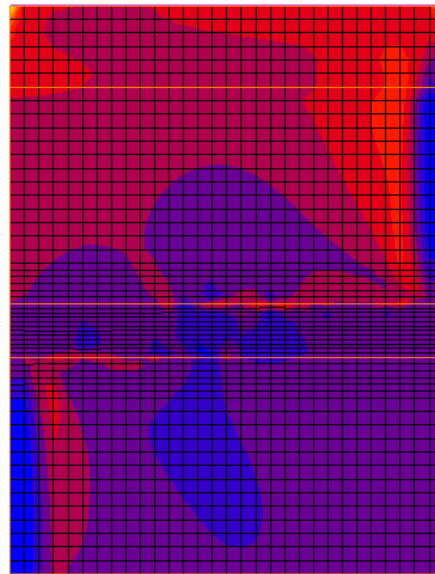
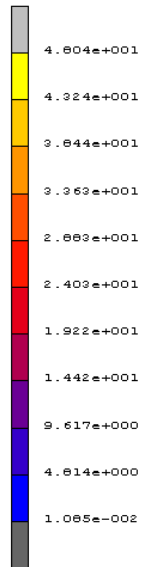
Εικόνα 72: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 500 (69% της φόρτισης)



Εικόνα 73: Equivalent of Stress– Βήμα φόρτισης 1500 (91% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 2i

Inc: 200
Time: 5.867e-001



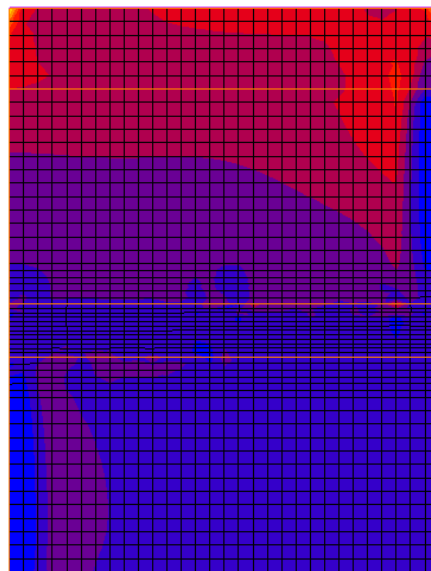
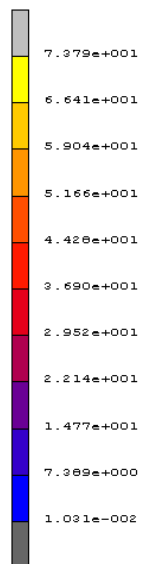
MSC Software

nonlinear
Equivalent of Stress

1

Εικόνα 74: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 200 (59% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 8.731e-001



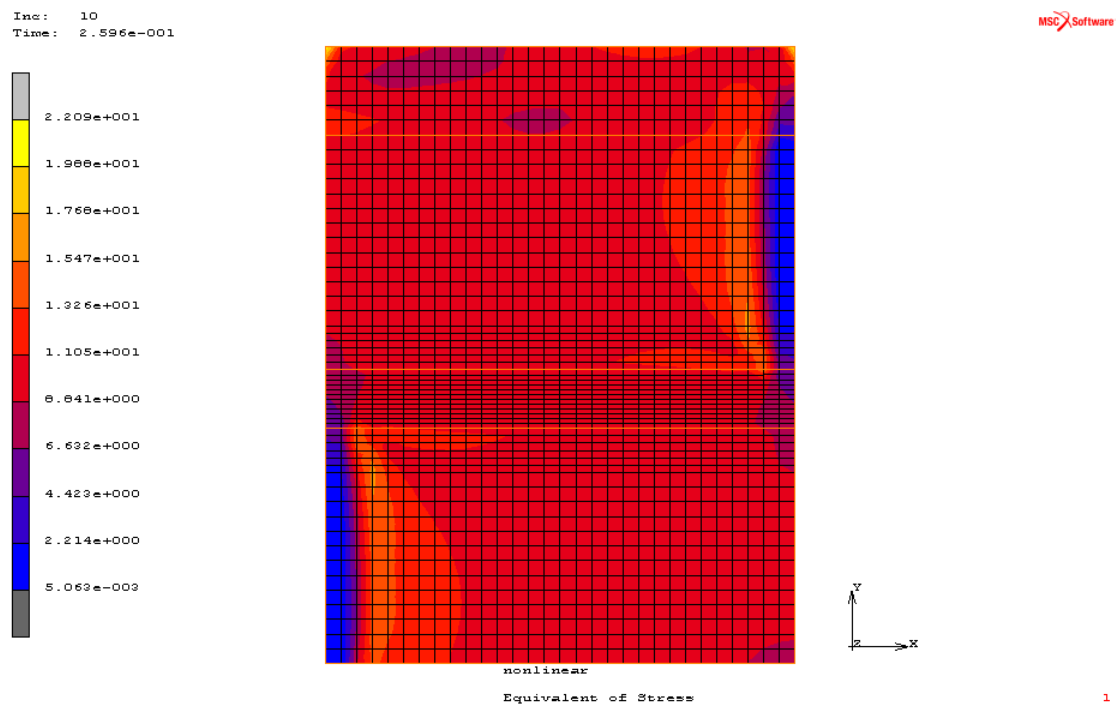
MSC Software

nonlinear
Equivalent of Stress

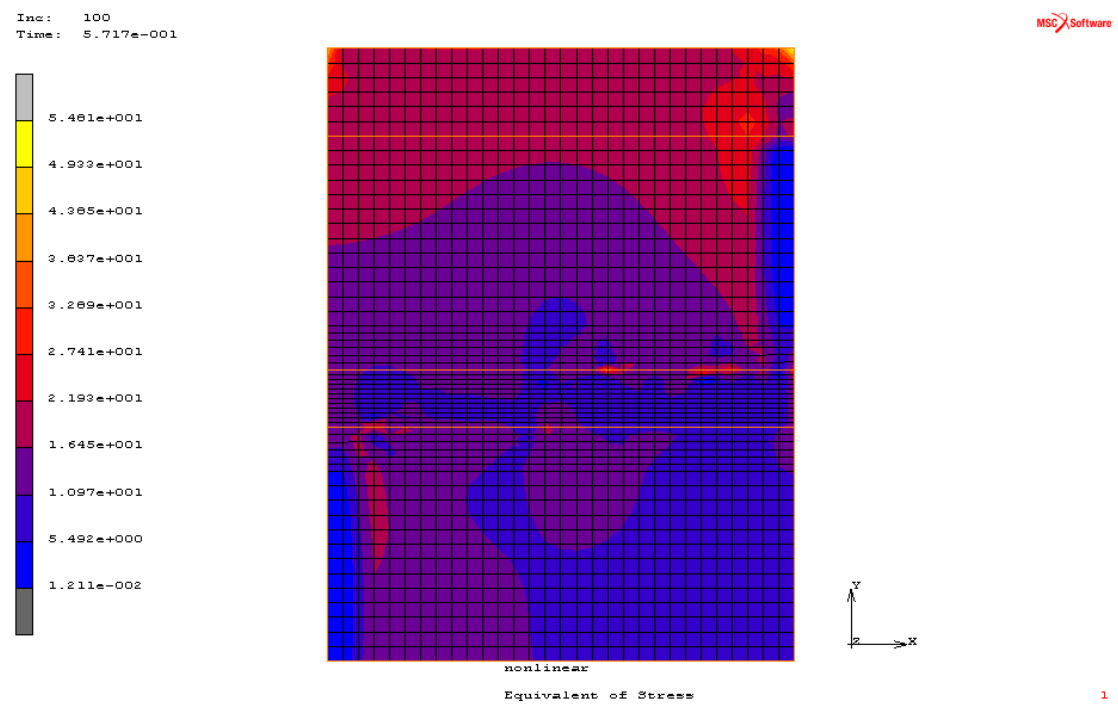
1

Εικόνα 75: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 1000 (87% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 2ii



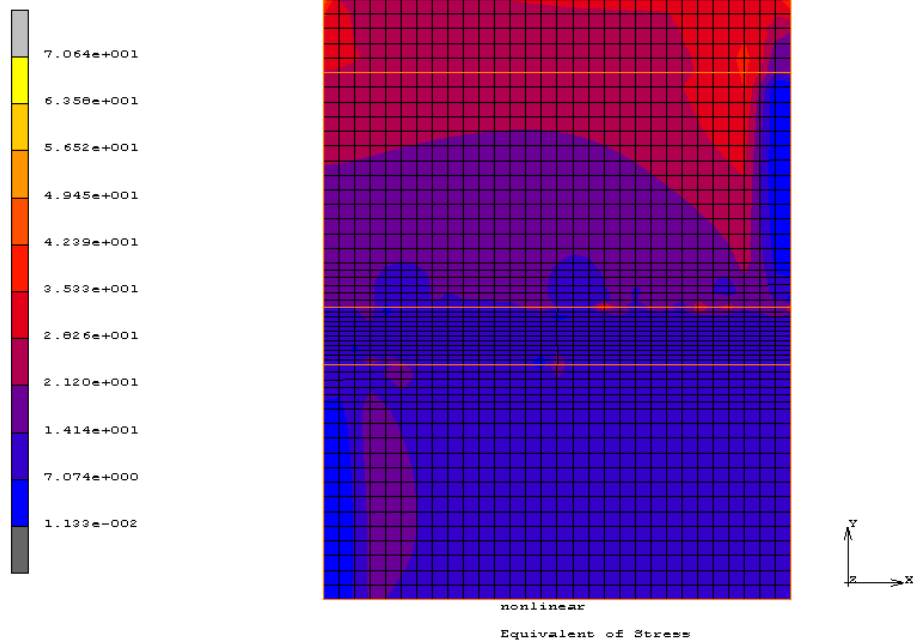
Εικόνα 76: Equivalent of Stress– Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)



Εικόνα 77: Equivalent of Stress– Βήμα φόρτισης 100 (57% της φόρτισης)

Inc: 500
Time: 8.229e-001

MSC Software



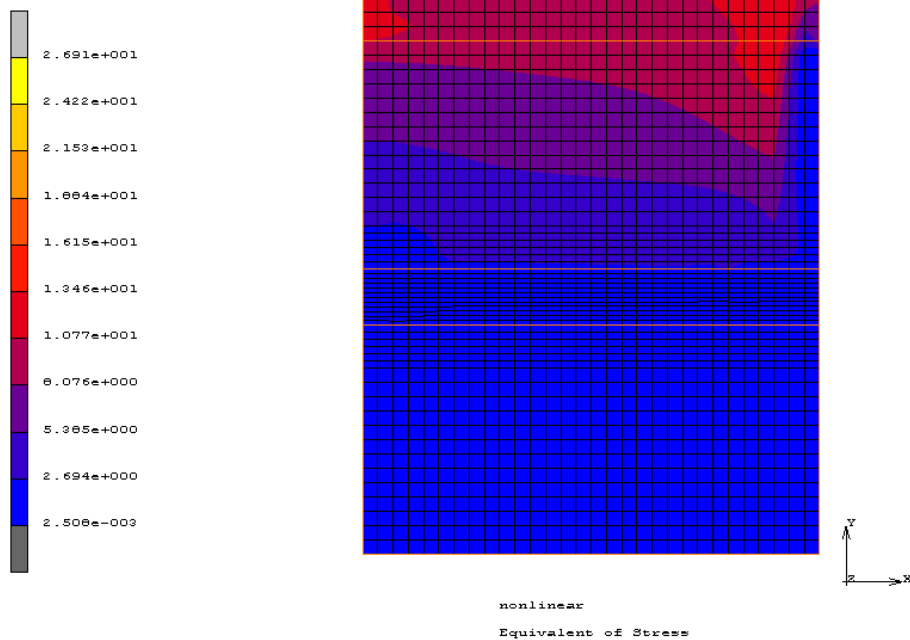
1

Εικόνα 78: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 500 (83% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3i

Inc: 100
Time: 2.207e-001

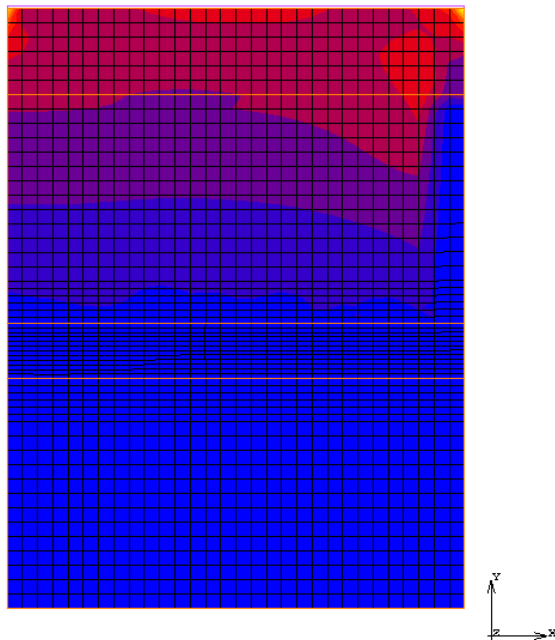
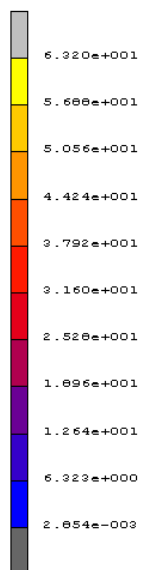
MSC Software



1

Εικόνα 79: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 100 (41% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 7.259e-001



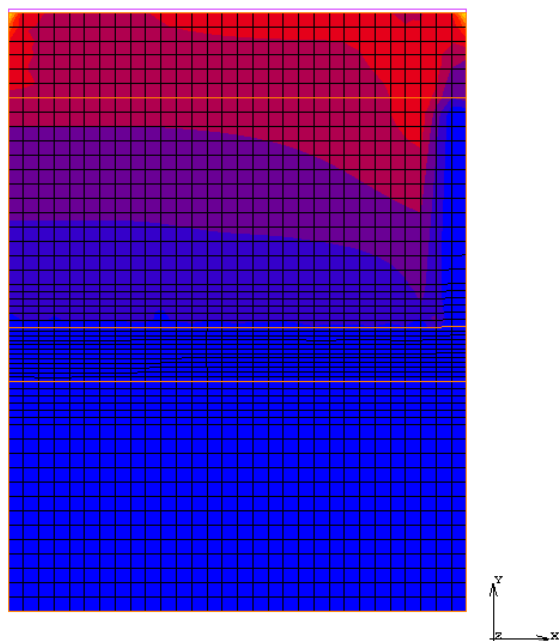
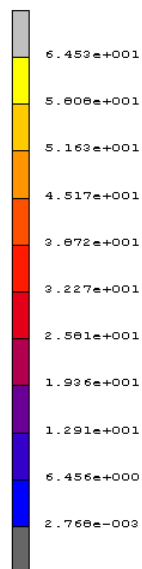
MSC Software

nonlinear
Equivalent of Stress

1

Εικόνα 80: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 1000 (90% της φόρτισης)

Inc: 3000
Time: 7.766e-001



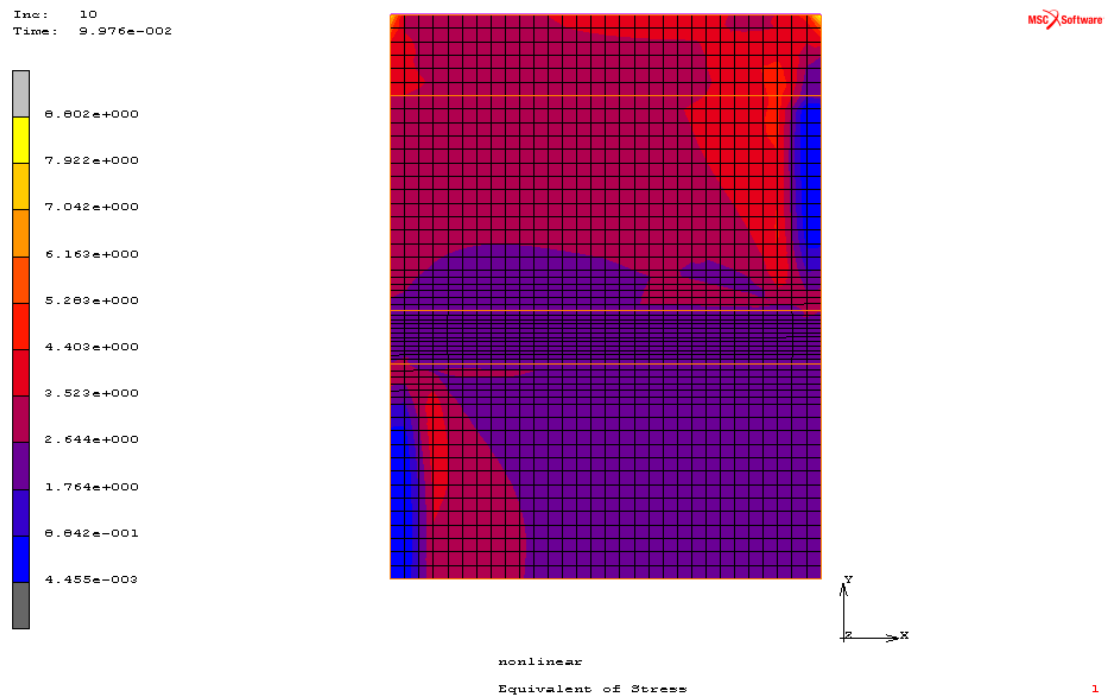
MSC Software

nonlinear
Equivalent of Stress

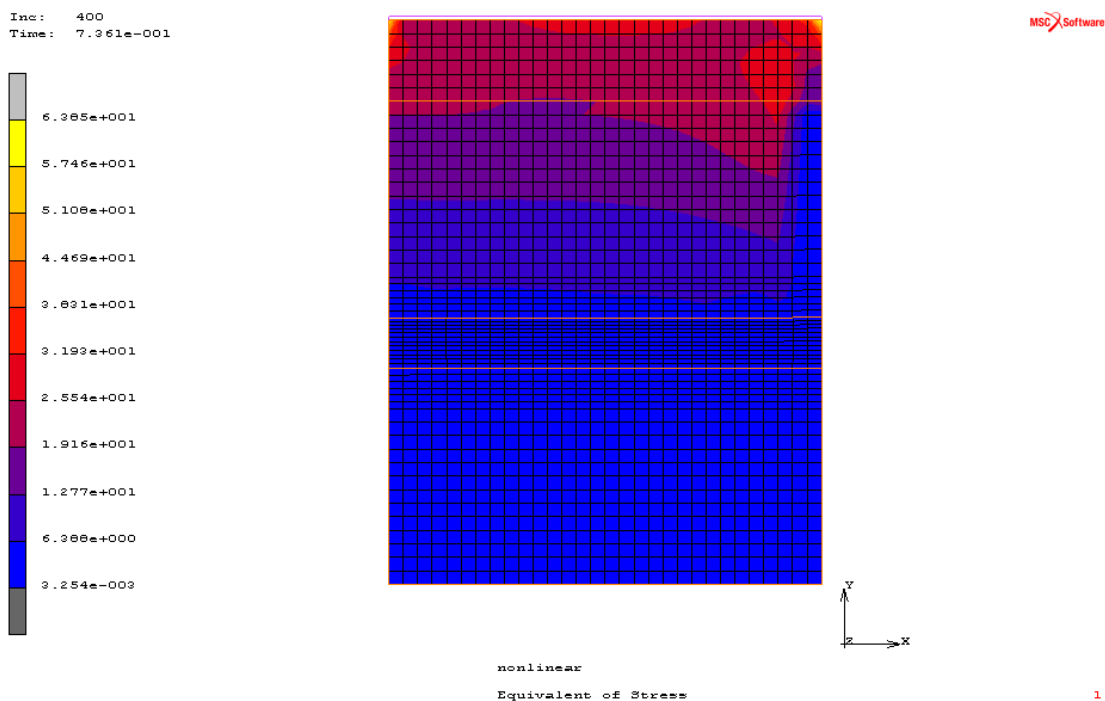
1

Εικόνα 81: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 3000 (96% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3ii

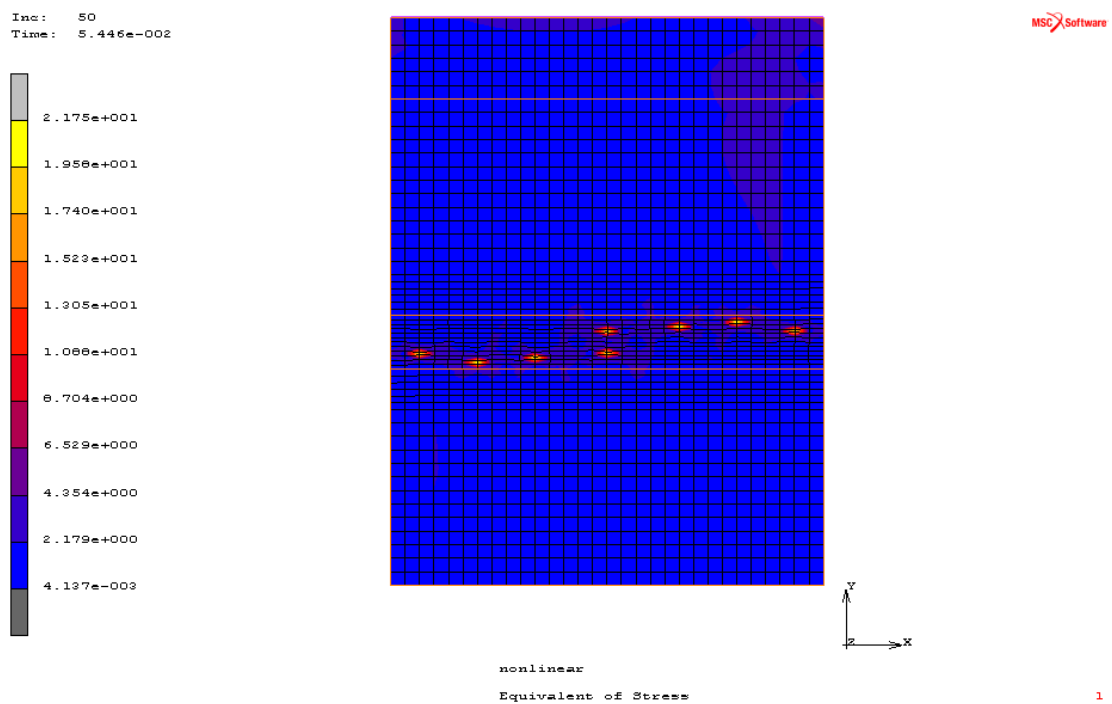


Εικόνα 82: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 10 (10% της φόρτισης)



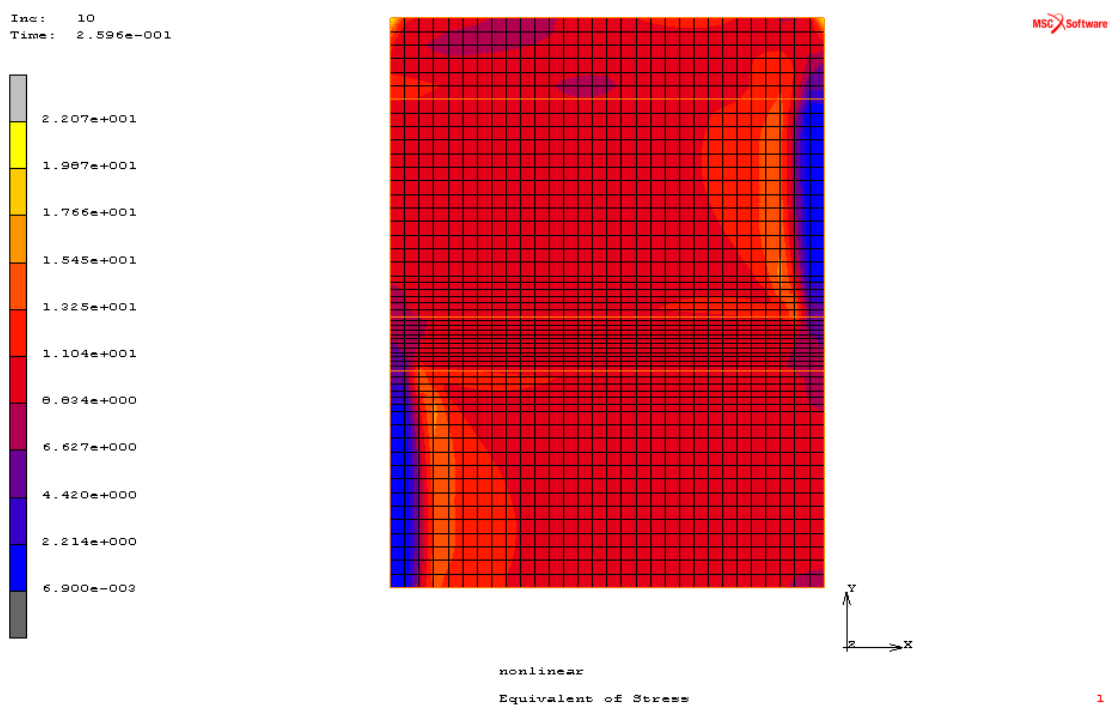
Εικόνα 83: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 400 (74% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4i



Εικόνα 84: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 50 (5% της φόρτισης)

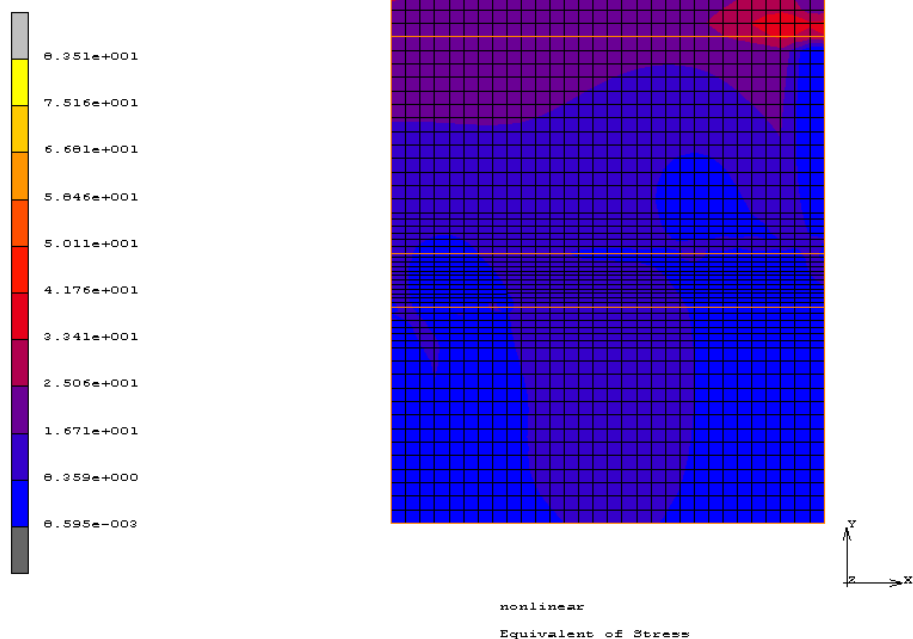
Αριθμητικό προσομοίωμα 4ii



Εικόνα 85: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

Inc: 50
Time: 6.627e-001

MSC Software



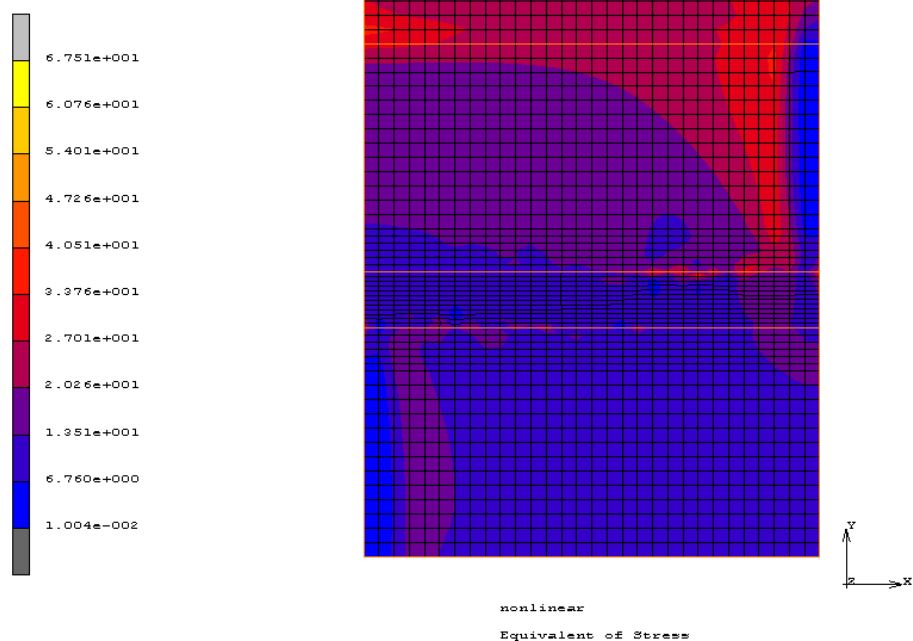
1

Εικόνα 86: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 50 (66% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5i

Inc: 500
Time: 7.386e-001

MSC Software



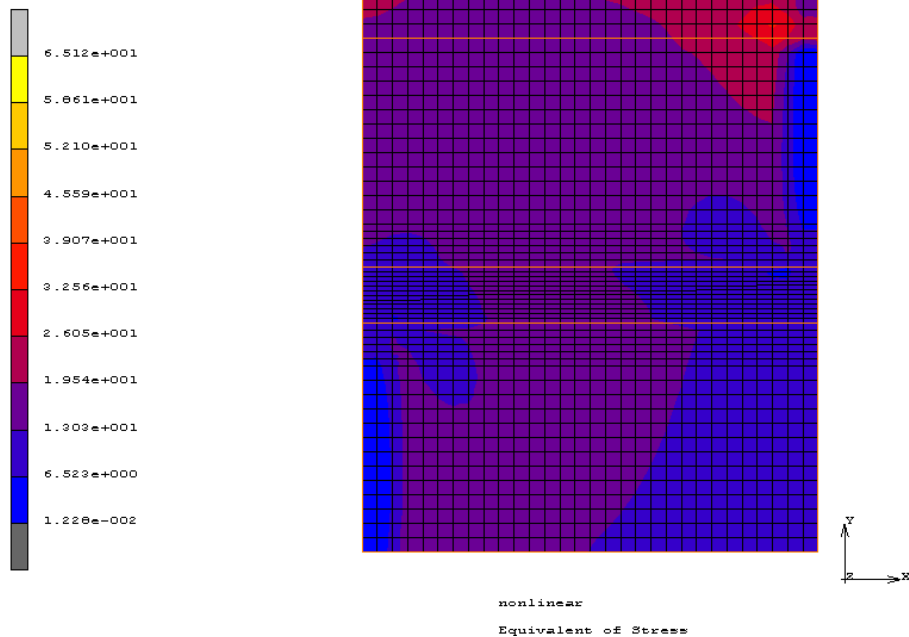
1

Εικόνα 87: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 500 (74% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5ii

Inc: 50
Time: 5.645e-001

MSC Software



1

Εικόνα 88: Equivalent of Stress – Βήμα φόρτισης 50 (58% της φόρτισης)

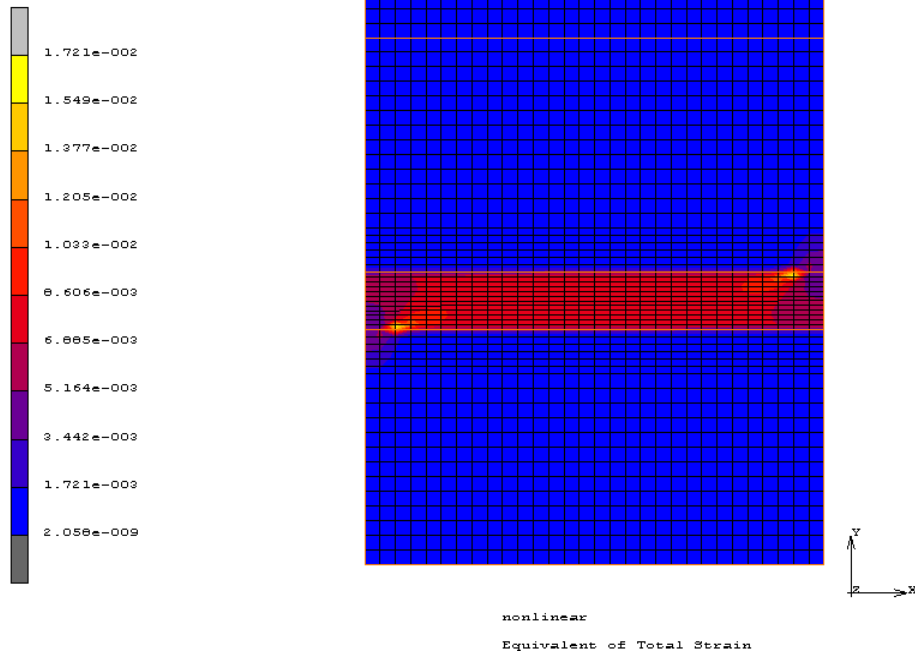
Δ. Κατανομή της συνολικής παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή θλίψης

Στις Εικόνες 89 έως που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της συνολικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης, στα μοντέλα που μελετήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων MSC-Marc, σε διάφορα βήματα φόρτισης. Σε κάθε εικόνα, αναφέρεται και το ποσοστό της φόρτισης στο τρέχον βήμα.

Αριθμητικό προσομοίωμα 1i

inc: 10
Time: 2.596e-001

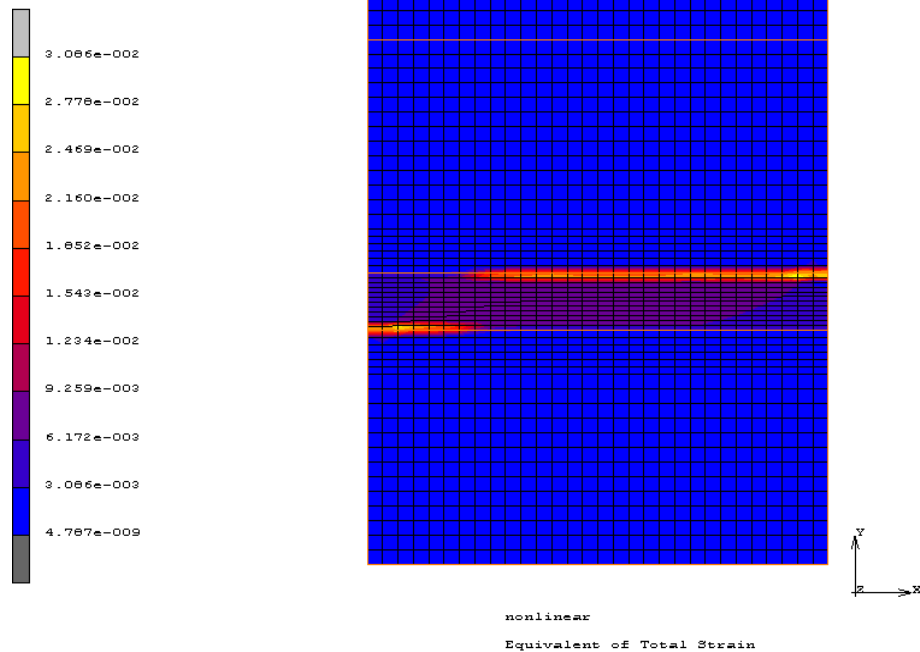
MSC Software



Εικόνα 89: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

inc: 50
Time: 5.496e-001

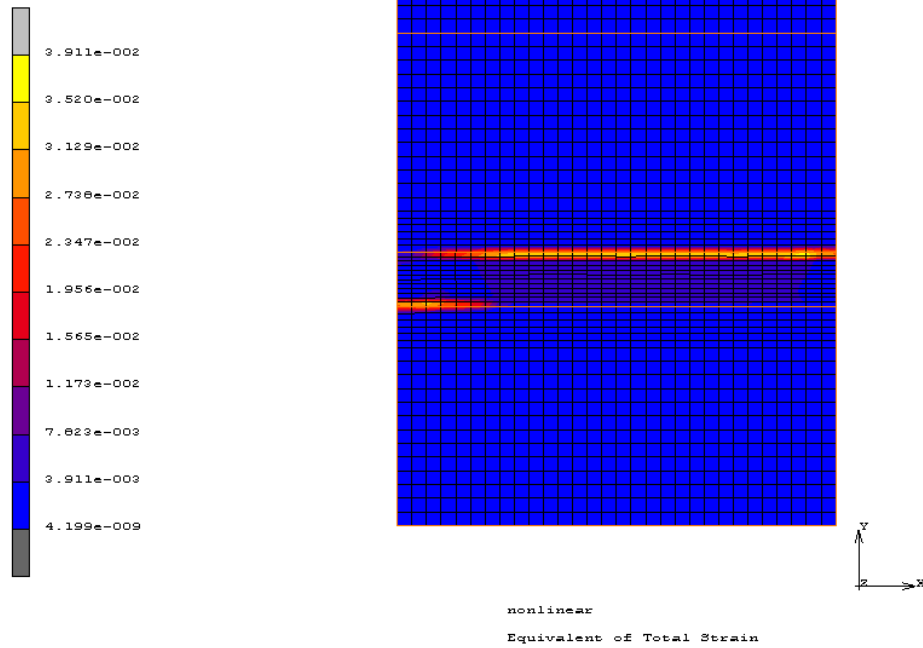
MSC Software



Εικόνα 90: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 50 (55% της φόρτισης)

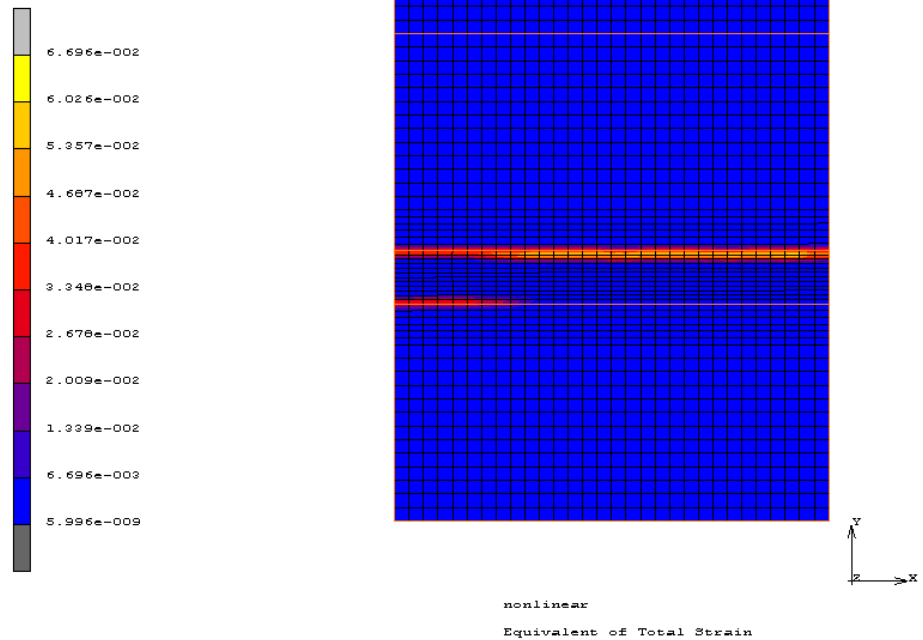
Αριθμητικό προσομοίωμα 1ii

Inc: 500
Time: 6.850e-001



Εικόνα 91: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 500 (69% της φόρτισης)

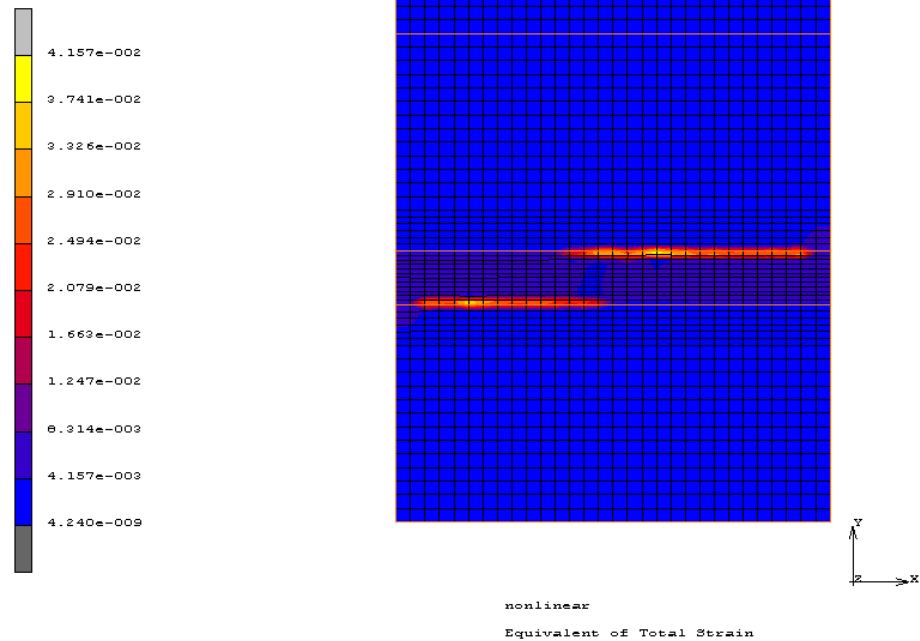
Inc: 1500
Time: 9.096e-001



Εικόνα 92: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 1500 (91% της φόρτισης)

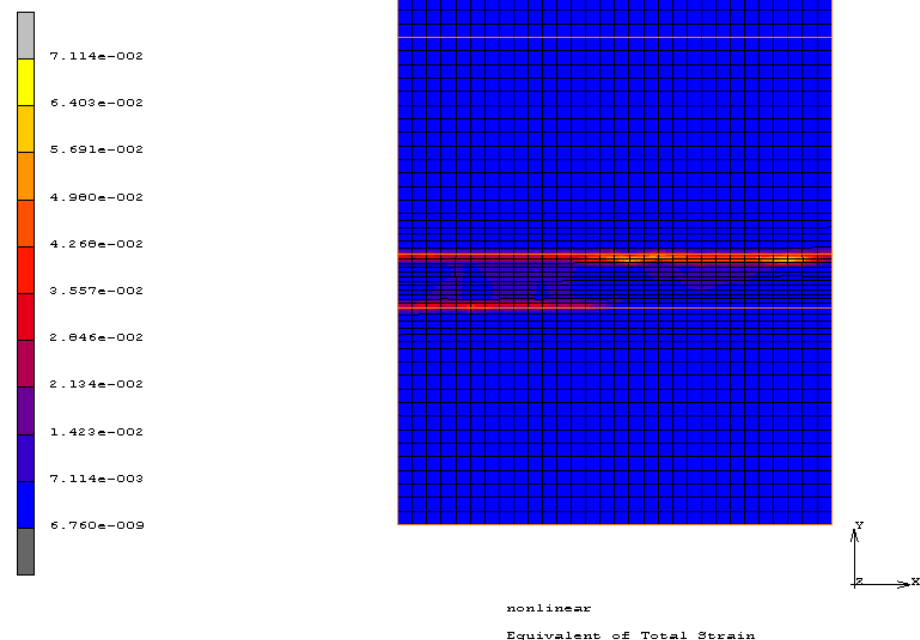
Αριθμητικό προσομοίωμα 2i

Inc: 200
Time: 5.867e-001



Εικόνα 93: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 200 (59% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 8.731e-001

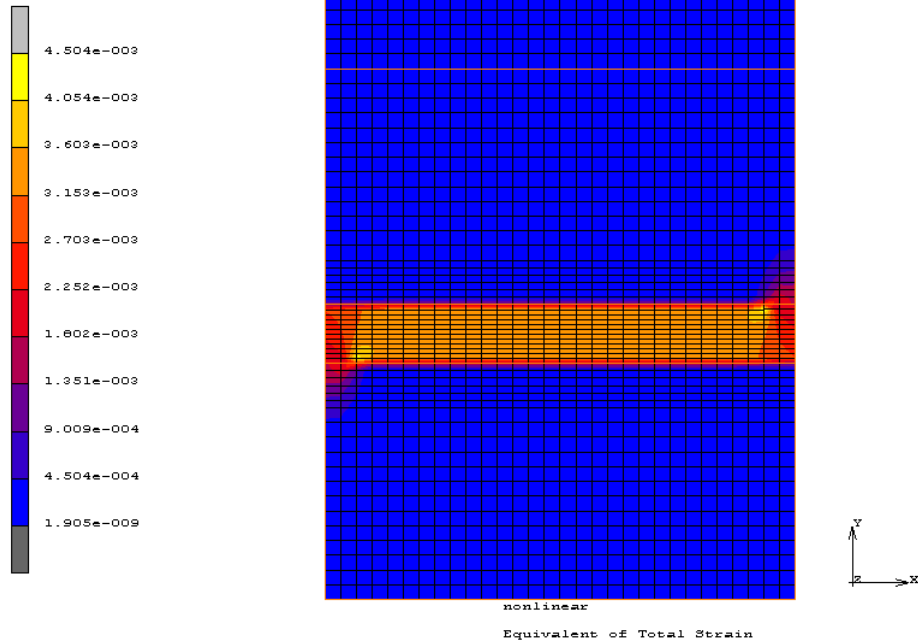


Εικόνα 94: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 1000 (87% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 2ii

Inc: 10
Time: 2.596e-001

MSC Software

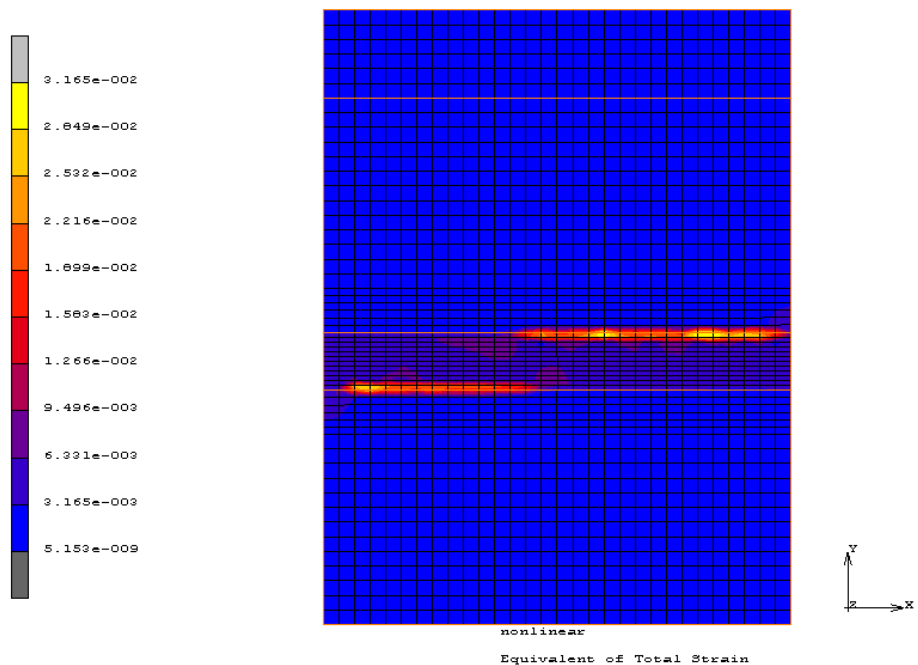


1

Εικόνα 95: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

Inc: 100
Time: 5.717e-001

MSC Software

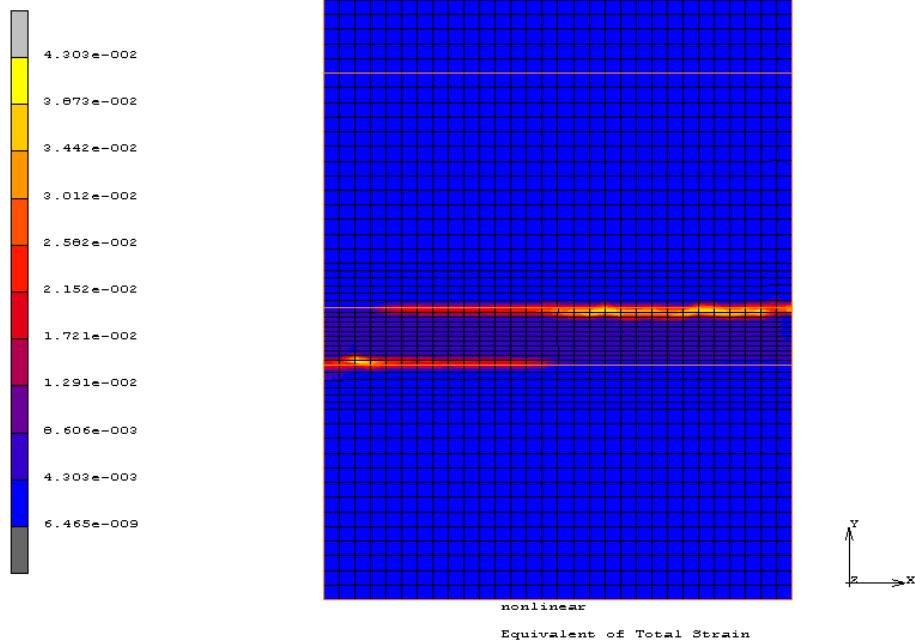


1

Εικόνα 96: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 100 (57% της φόρτισης)

Inc: 500
Time: 8.339e-001

MSC Software



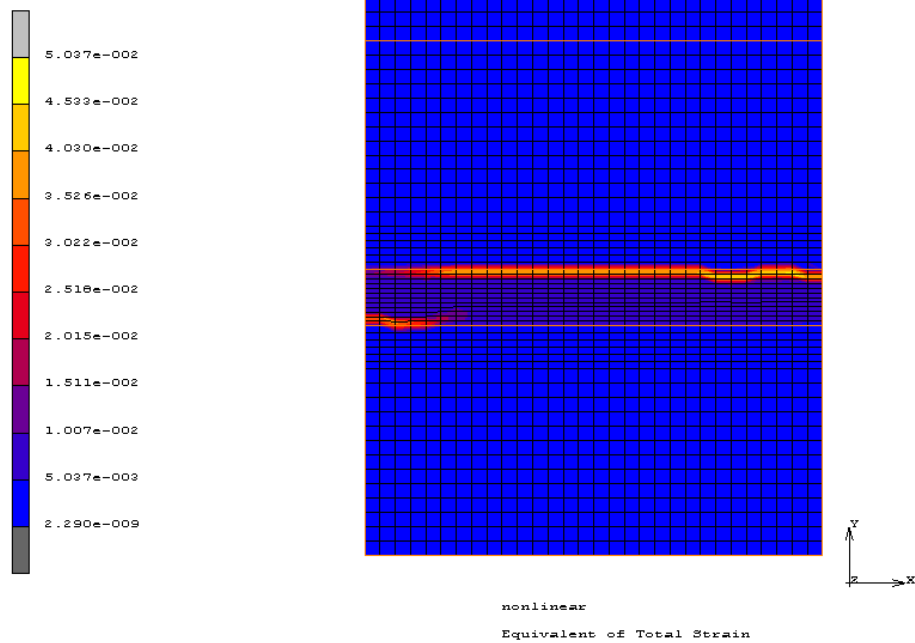
1

Εικόνα 97: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 500 (83% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3i

Inc: 100
Time: 3.307e-001

MSC Software

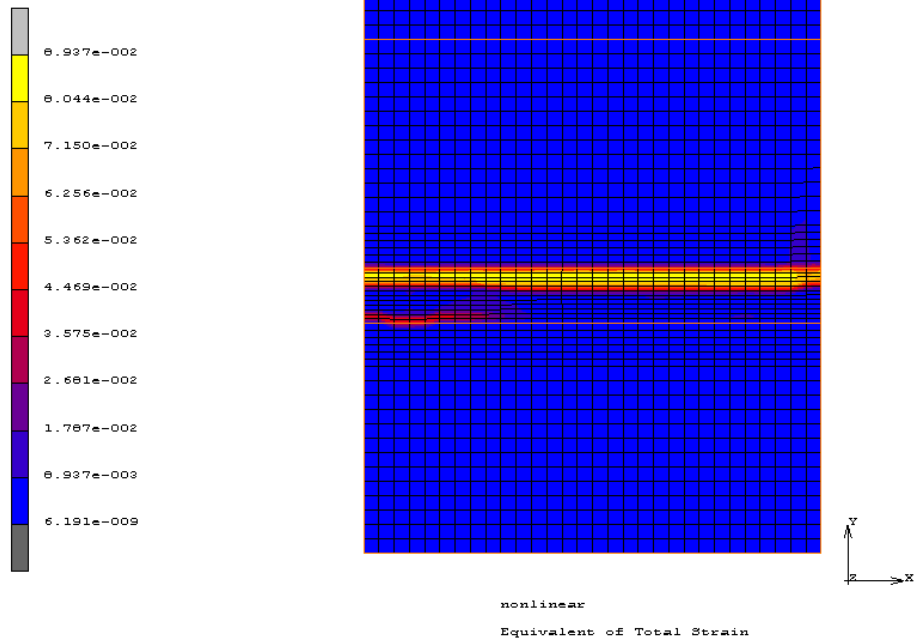


1

Εικόνα 98: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 100 (41% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 7.259e-001

MSC Software

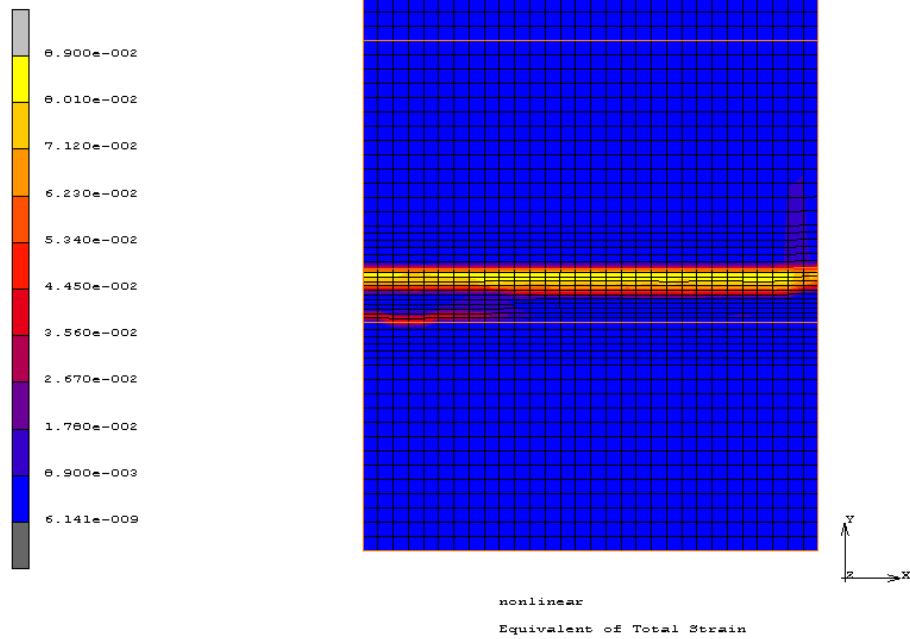


1

Εικόνα 99: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 1000 (90% της φόρτισης)

Inc: 3000
Time: 7.766e-001

MSC Software



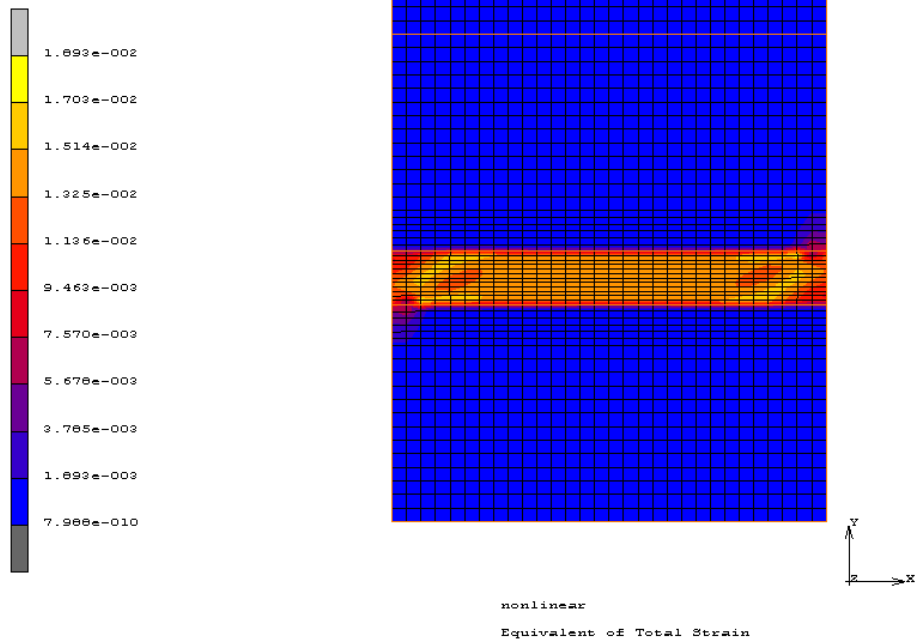
1

Εικόνα 100: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 3000 (96% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3ii

Inc: 10
Time: 9.976e-002

MSC Software

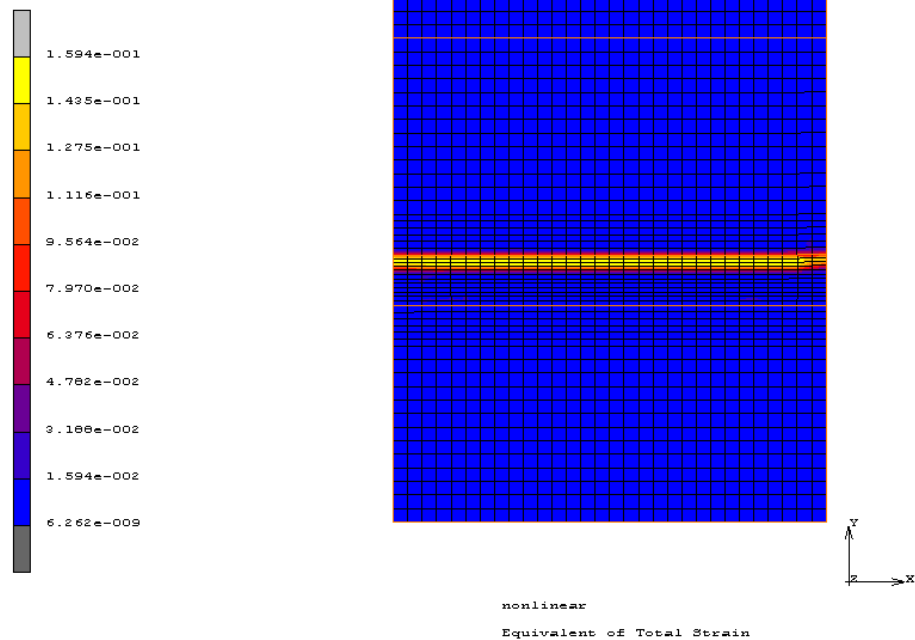


1

Εικόνα 101: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 10 (10% της φόρτισης)

Inc: 400
Time: 7.361e-001

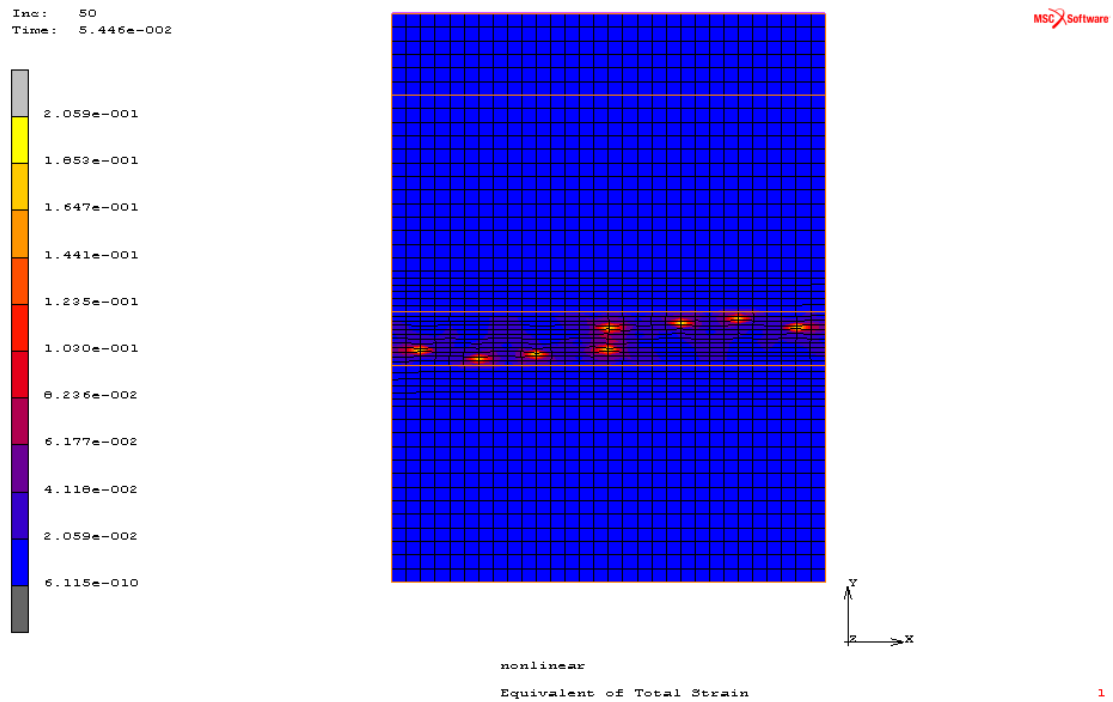
MSC Software



1

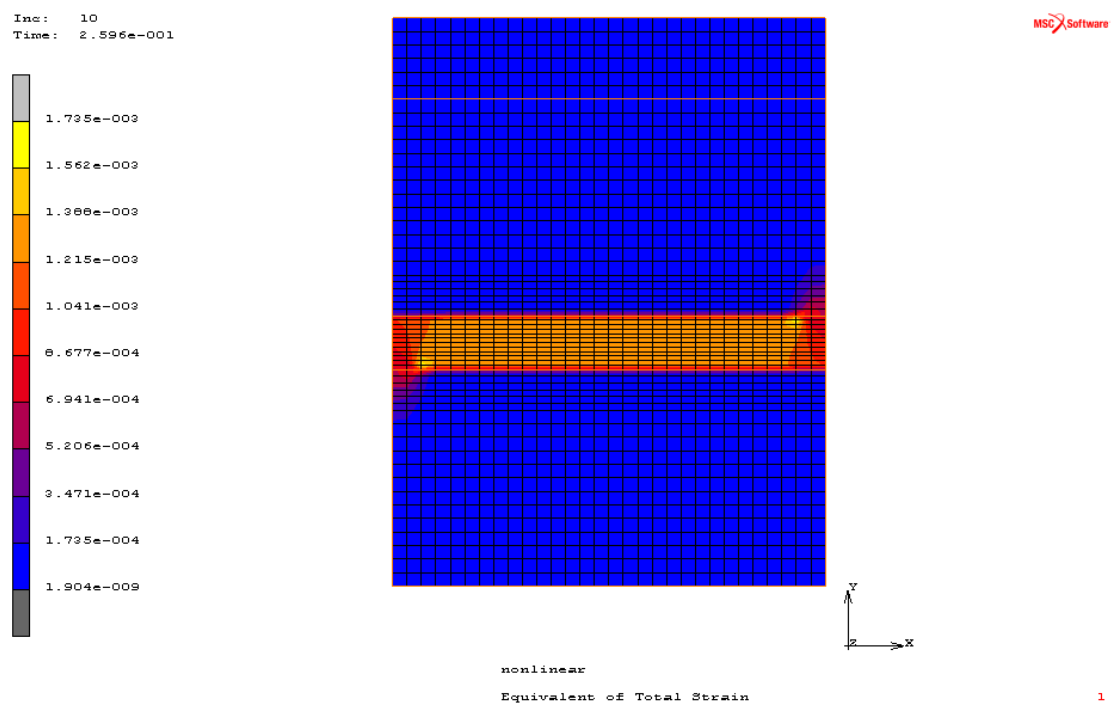
Εικόνα 102: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 400 (74% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4i

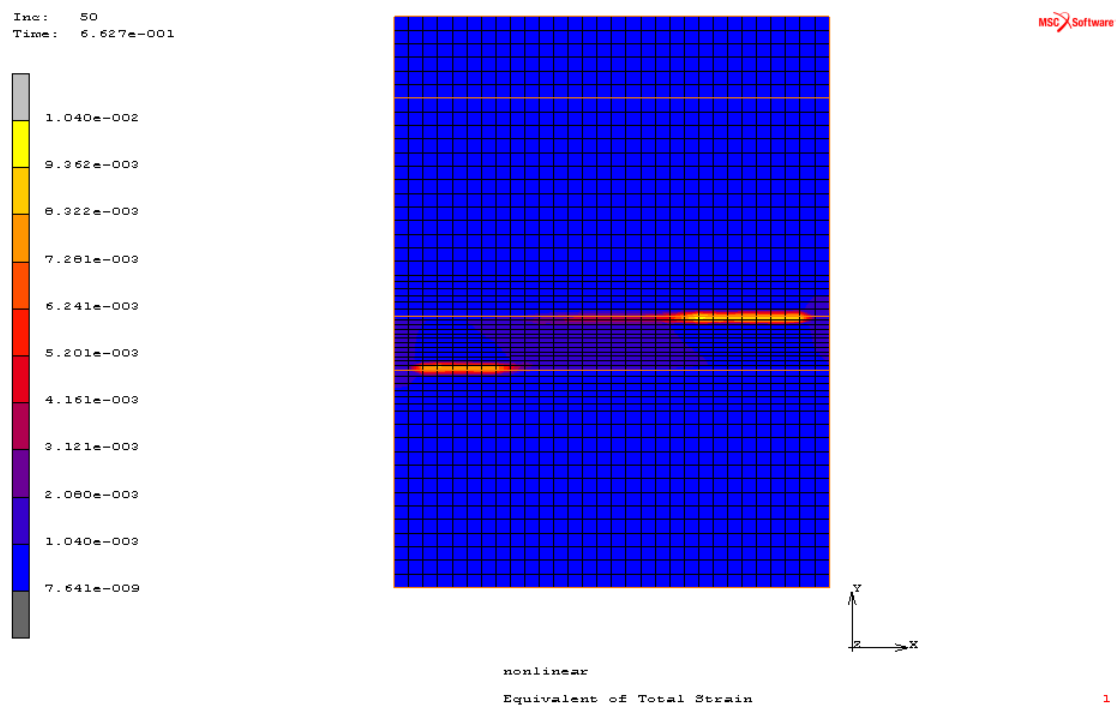


Εικόνα 103: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 50 (5% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4ii

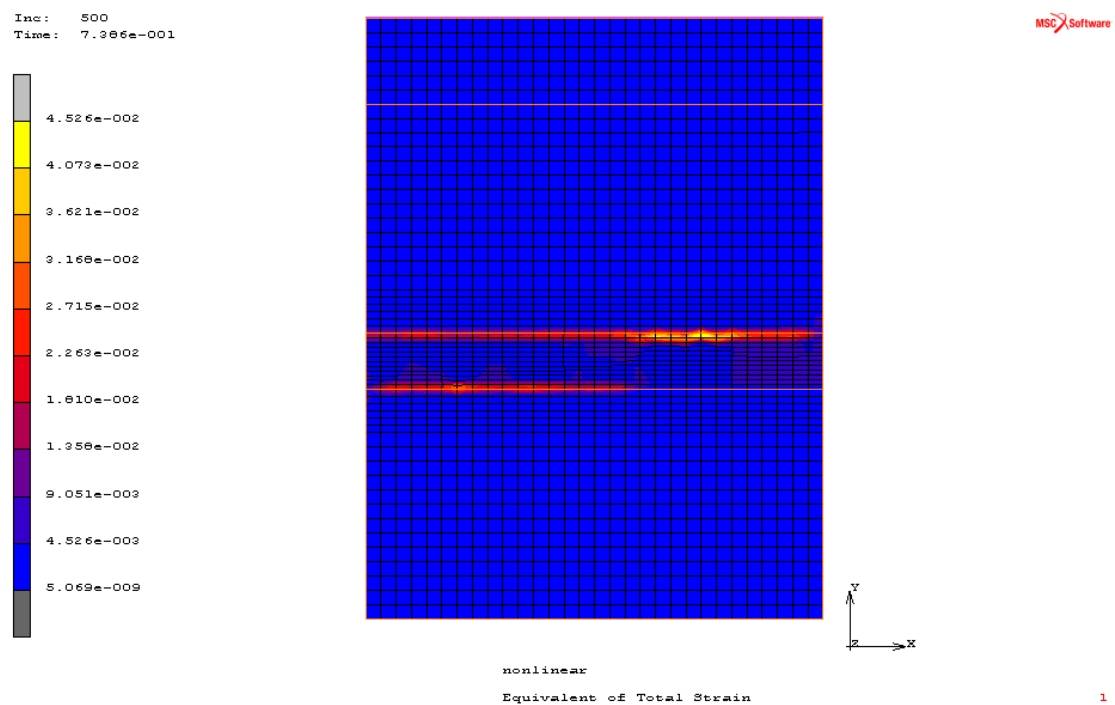


Εικόνα 105: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)



Εικόνα 106: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 50 (66% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσοιώμα 5i

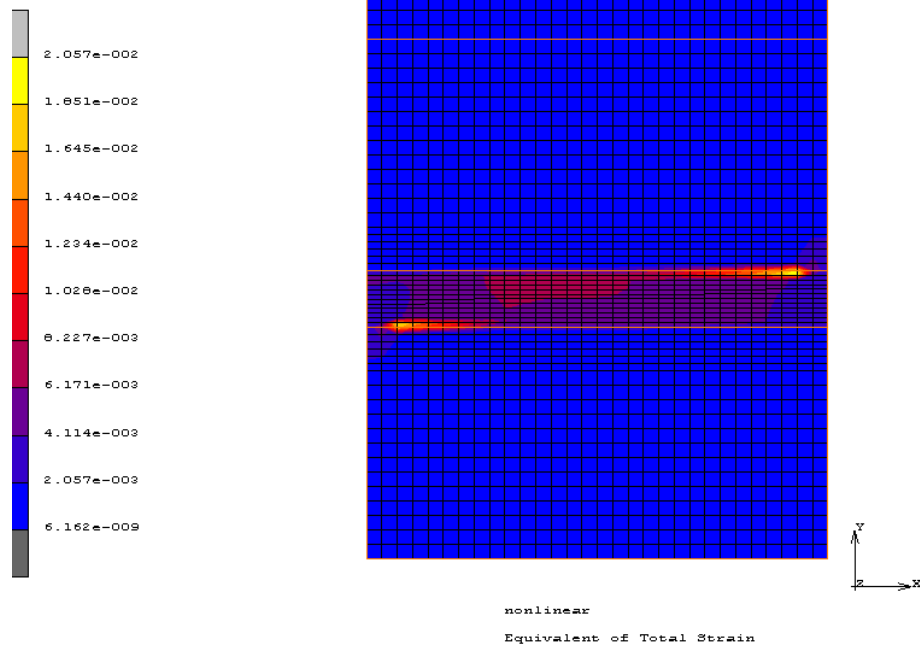


Εικόνα 107: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 500 (74% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5ii

Inc: 50
Time: 5.845e-001

MSC Software



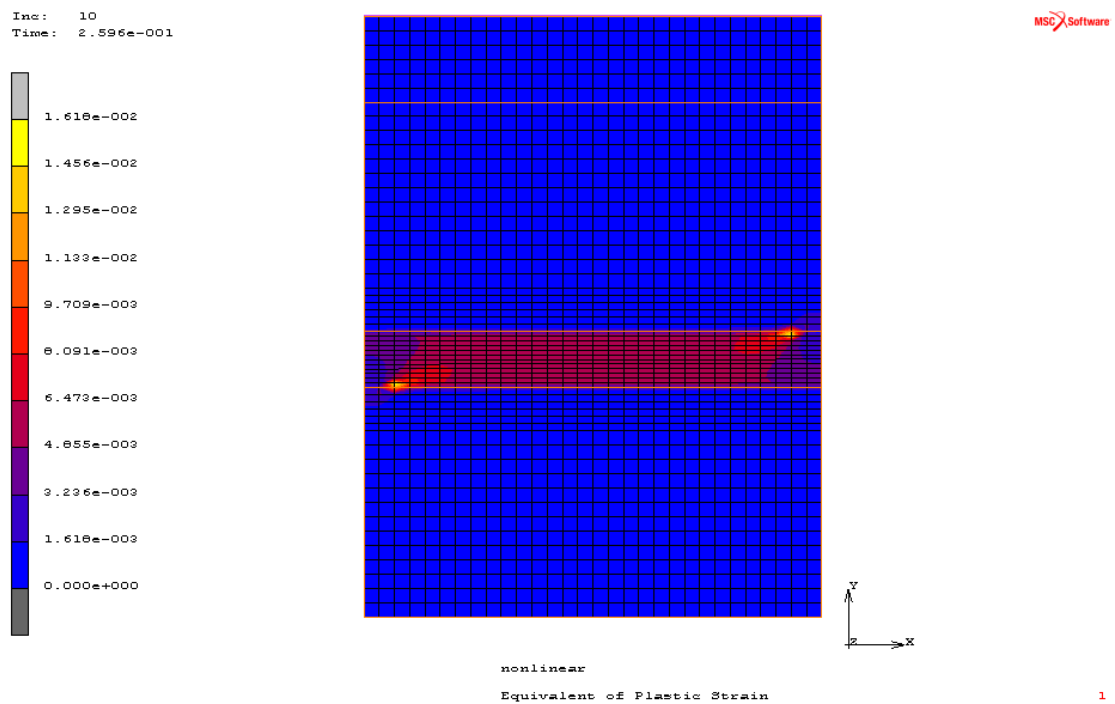
1

Εικόνα 108: Equivalent of Total Strain – Βήμα φόρτισης 50 (58% της φόρτισης)

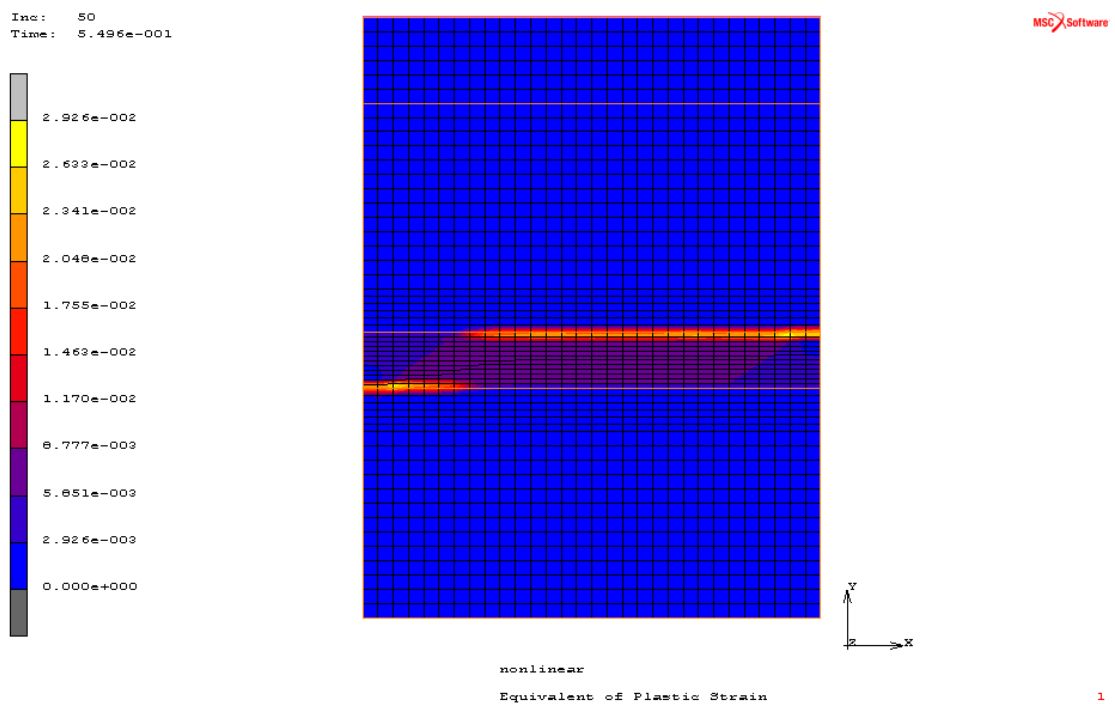
Ε. Κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή θλίψης

Στις Εικόνες 109 έως 127 παρουσιάζεται η κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης, στα μοντέλα που μελετήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων MSC-Marc, σε διάφορα βήματα φόρτισης. Σε κάθε εικόνα, αναφέρεται και το ποσοστό της φόρτισης στο τρέχον βήμα.

Αριθμητικό προσομοίωμα 1i

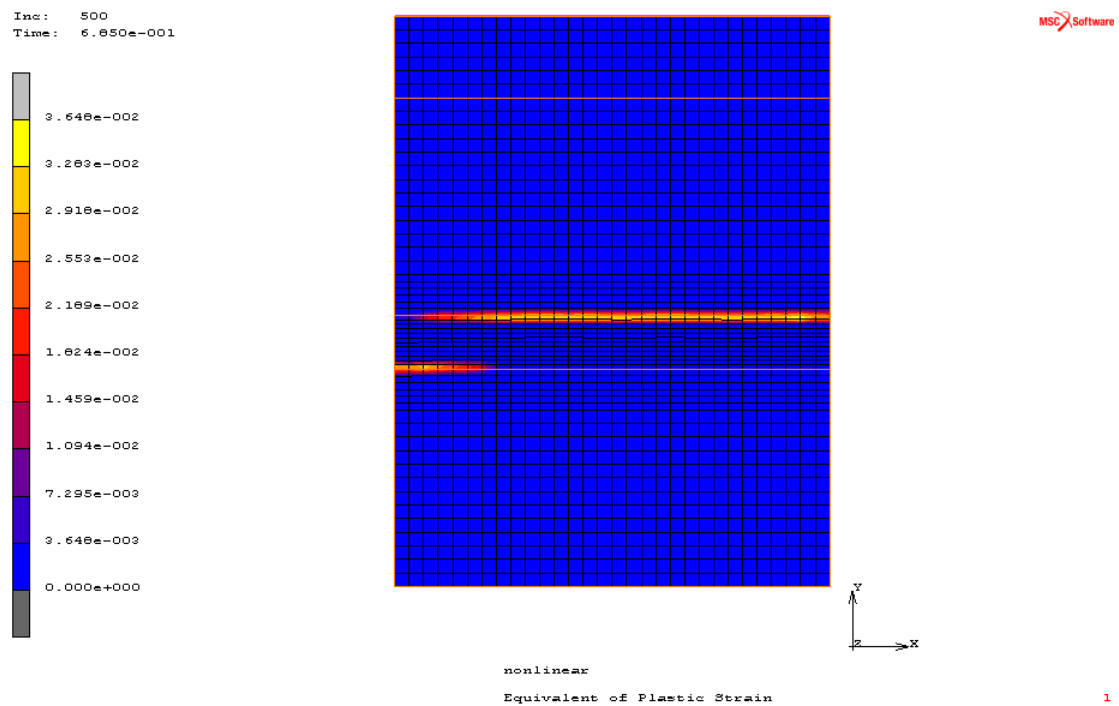


Εικόνα 109: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

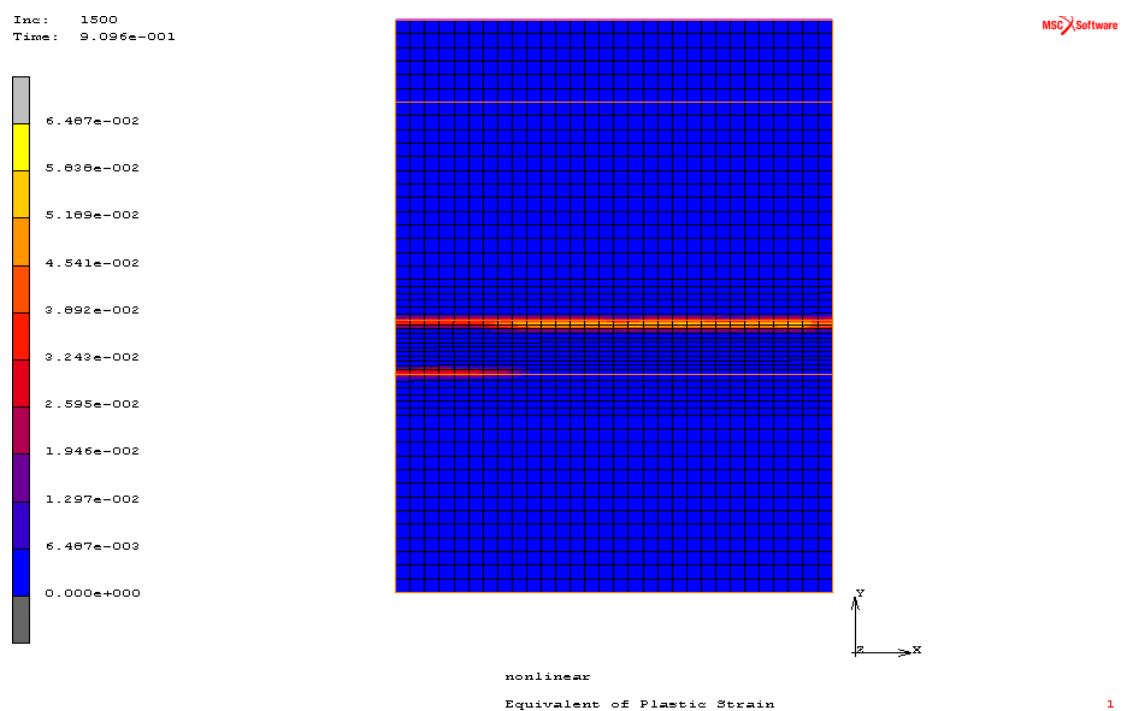


Εικόνα 110: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (55% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 1ii

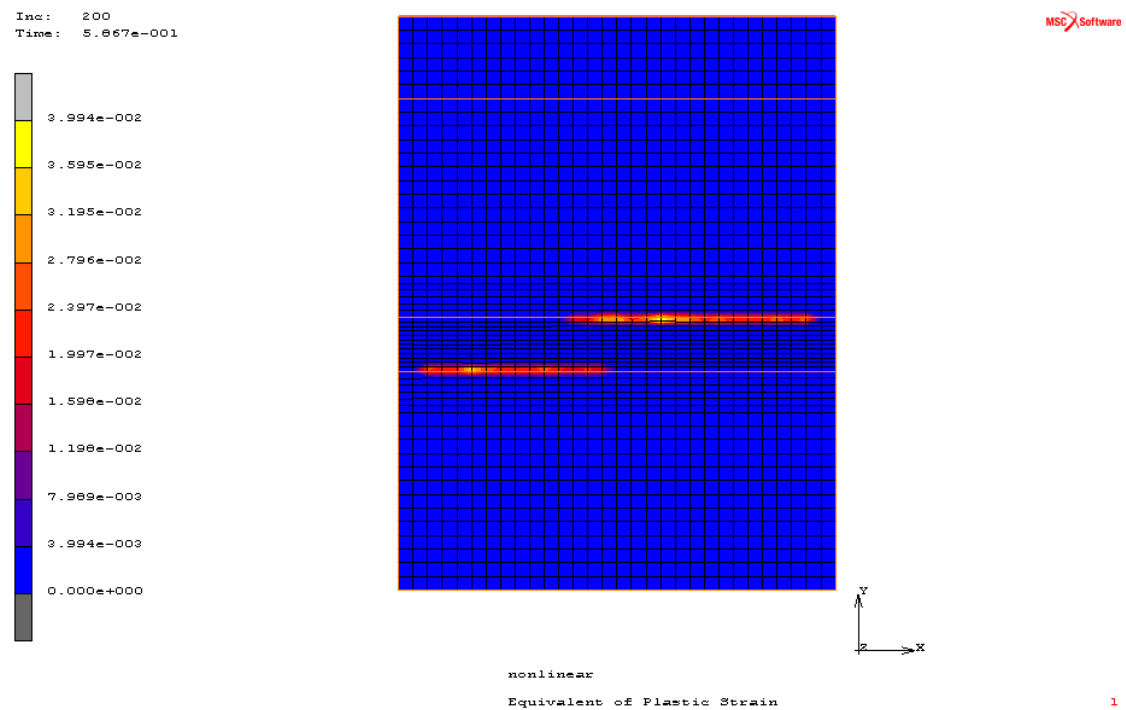


Εικόνα 111: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 500 (69% της φόρτισης)

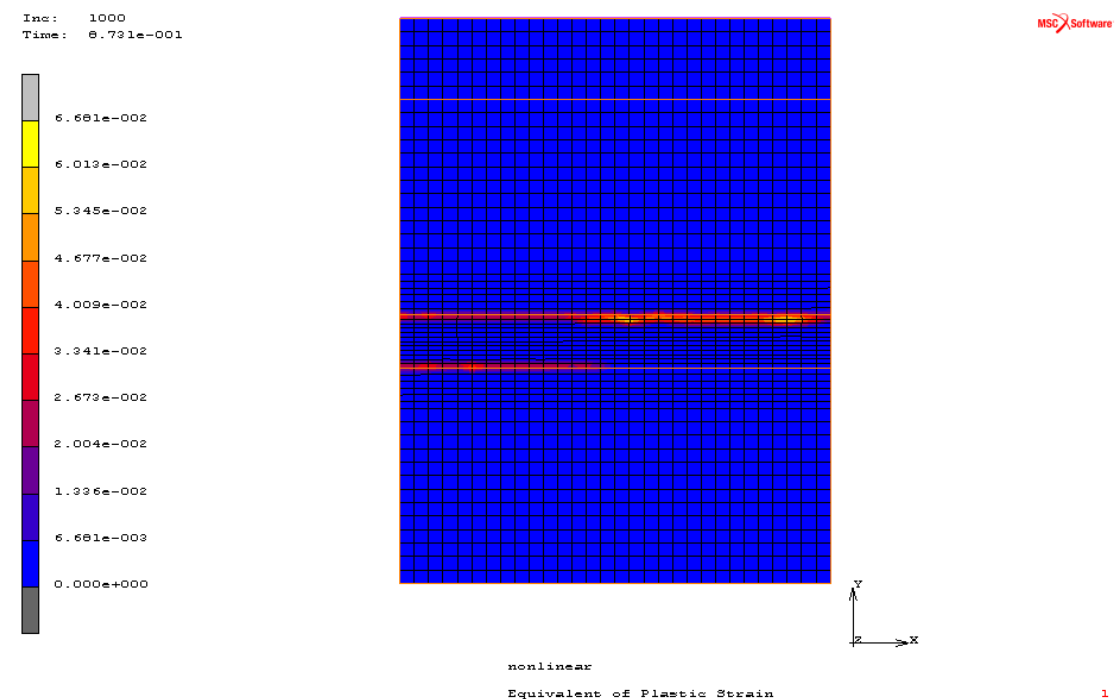


Εικόνα 112: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 1500 (91% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 2i



Εικόνα 113: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 200 (59% της φόρτισης)

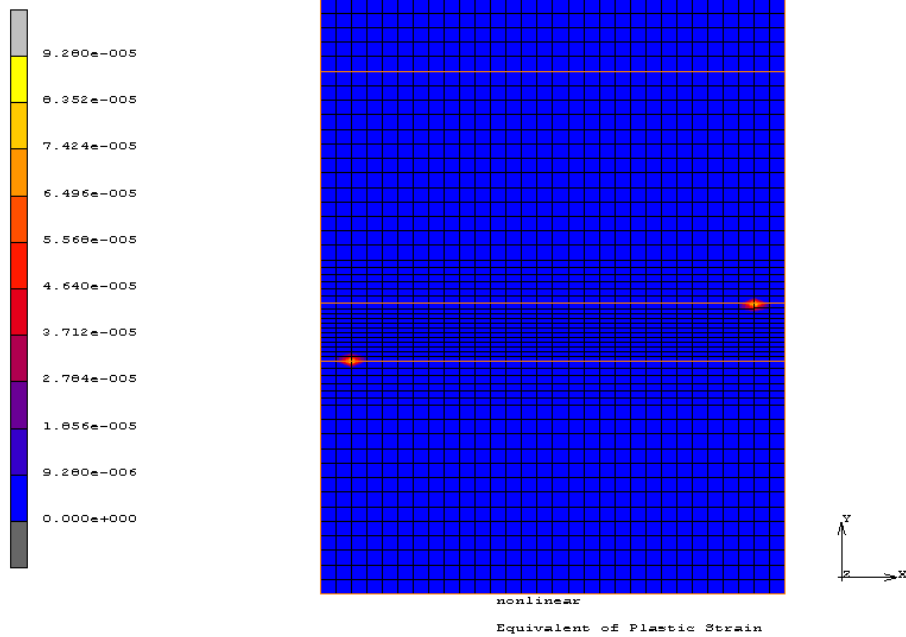


Εικόνα 114: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 1000 (87% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 2ii

Inc: 10
Time: 2.596e-001

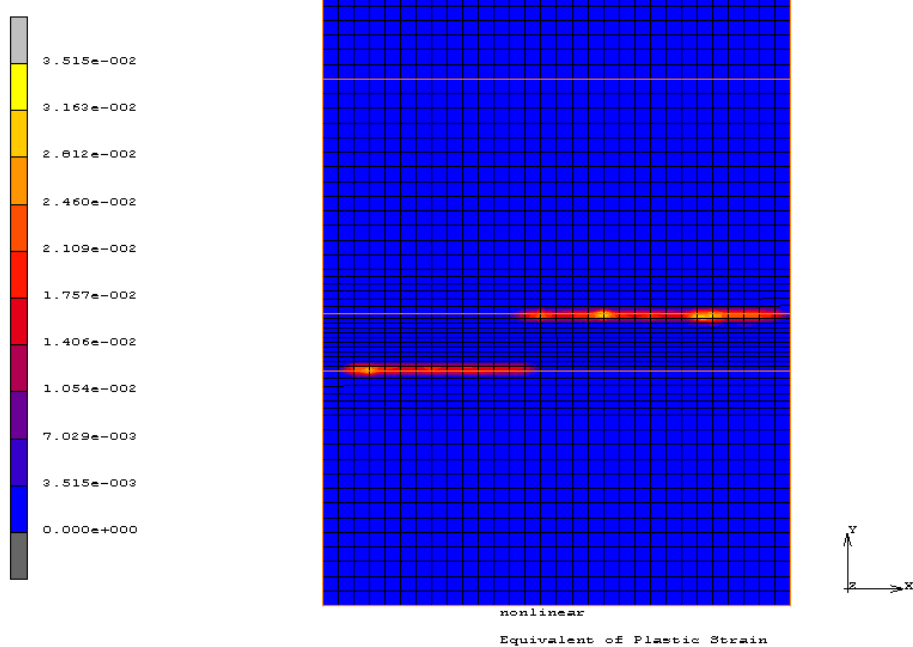
MSC Software



Εικόνα 115: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)

Inc: 100
Time: 5.717e-001

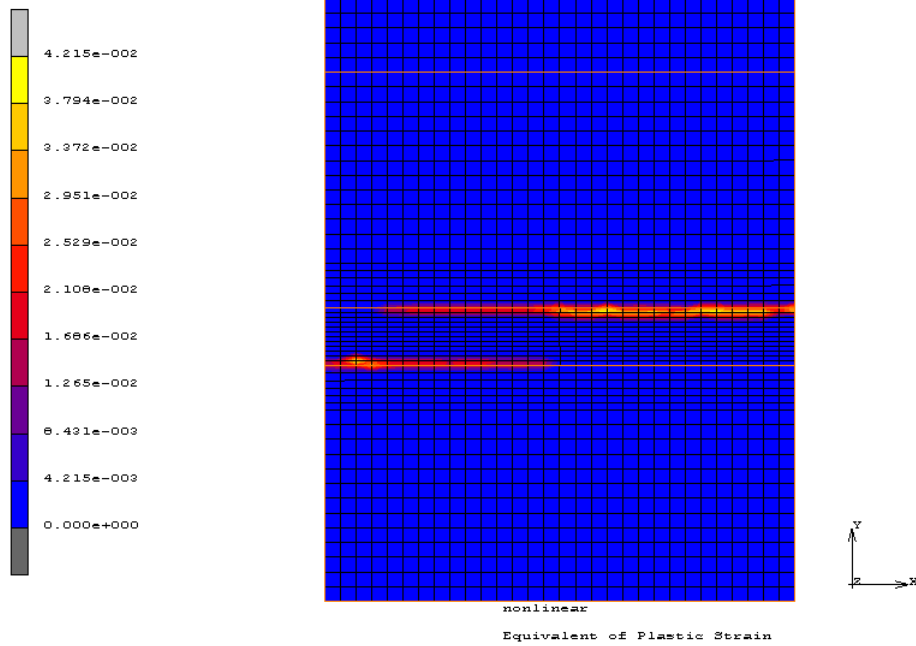
MSC Software



Εικόνα 116: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 100 (57% της φόρτισης)

Inc: 500
Time: 8.299e-001

MSC Software

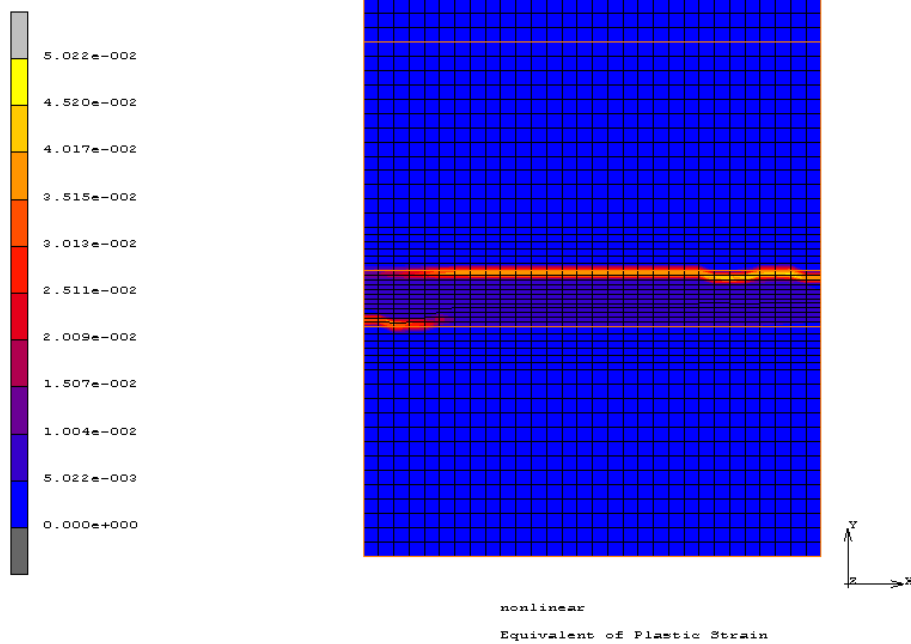


Εικόνα 117: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 500 (83% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3i

Inc: 100
Time: 2.307e-001

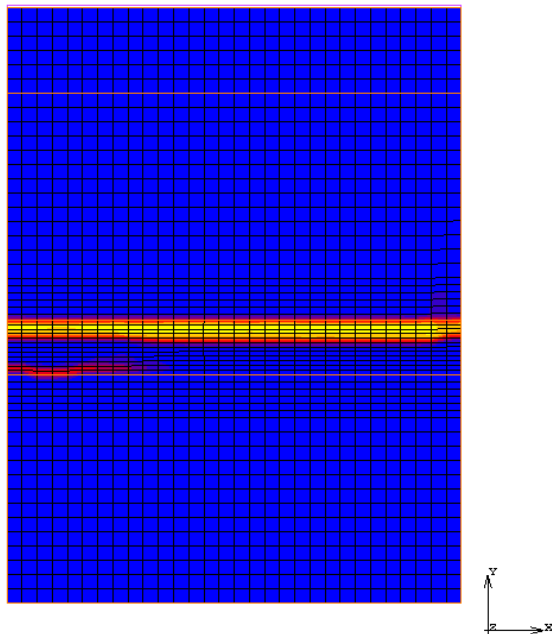
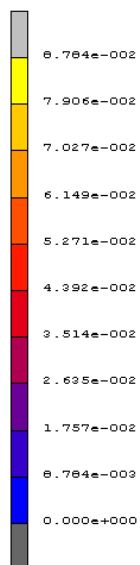
MSC Software



Εικόνα 118: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 100 (41% της φόρτισης)

Inc: 1000
Time: 7.259e-001

MSC Software



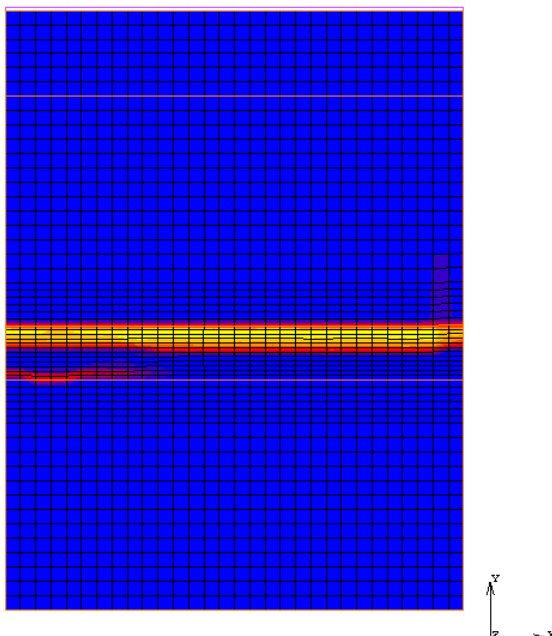
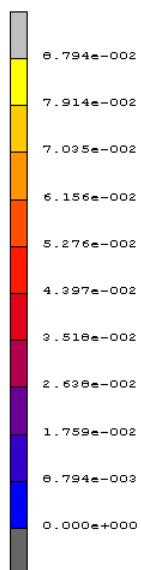
nonlinear
Equivalent of Plastic Strain

1

Εικόνα 119: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 1000 (90% της φόρτισης)

Inc: 3000
Time: 7.766e-001

MSC Software

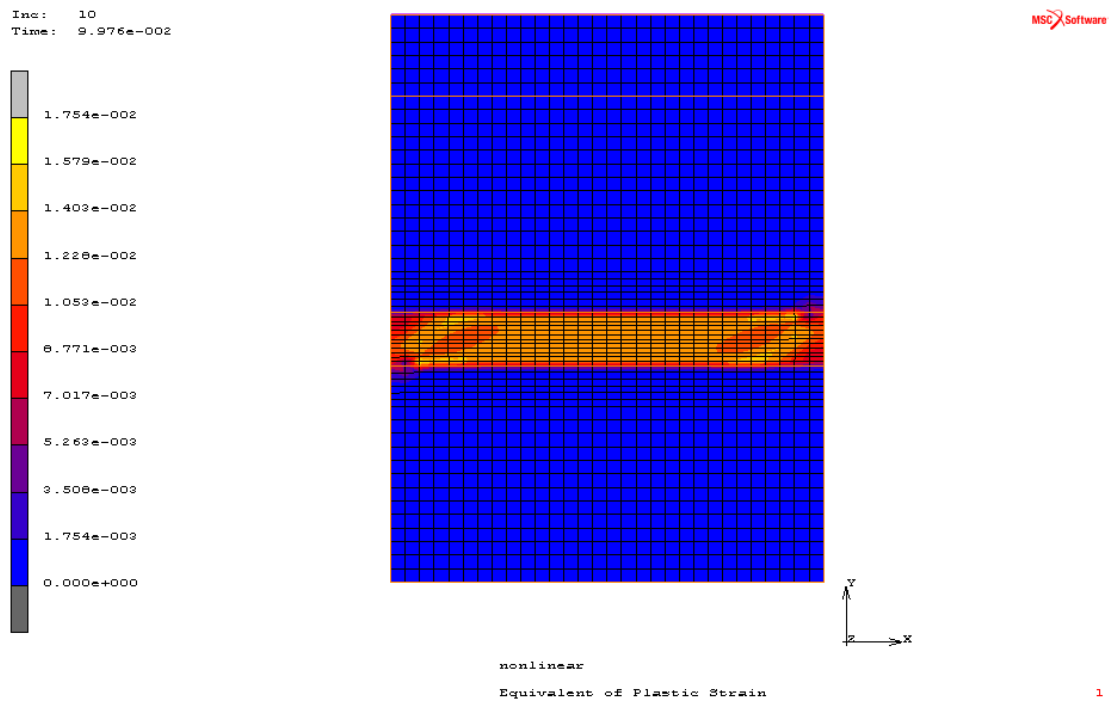


nonlinear
Equivalent of Plastic Strain

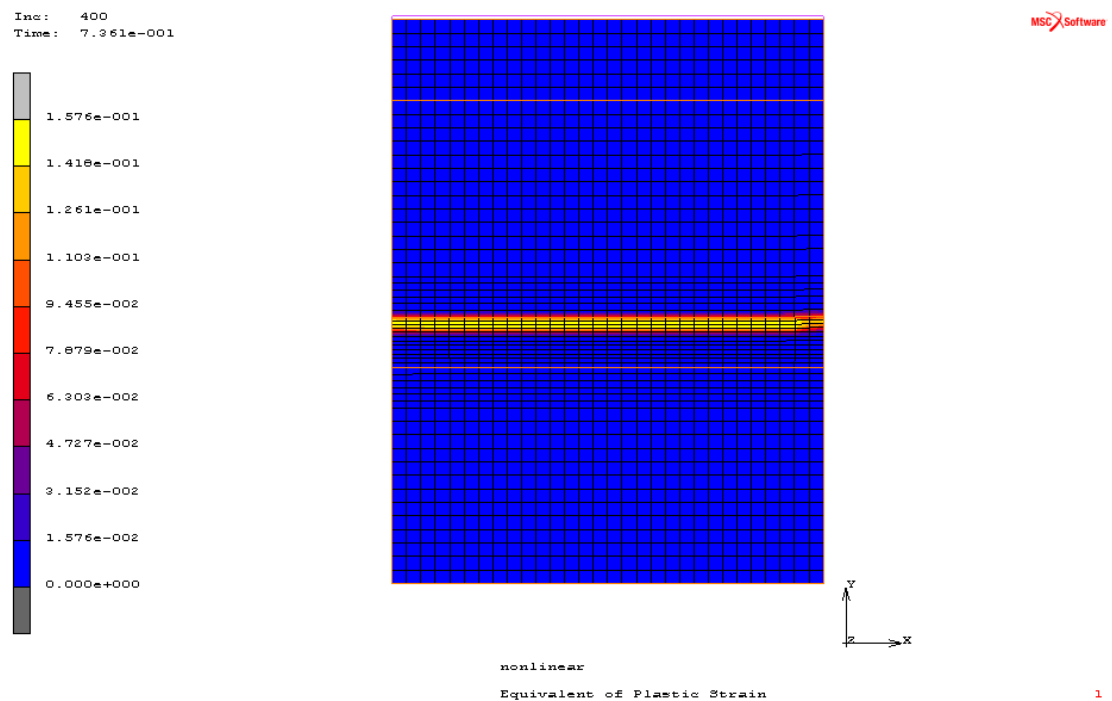
1

Εικόνα 120: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 3000 (96% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 3ii

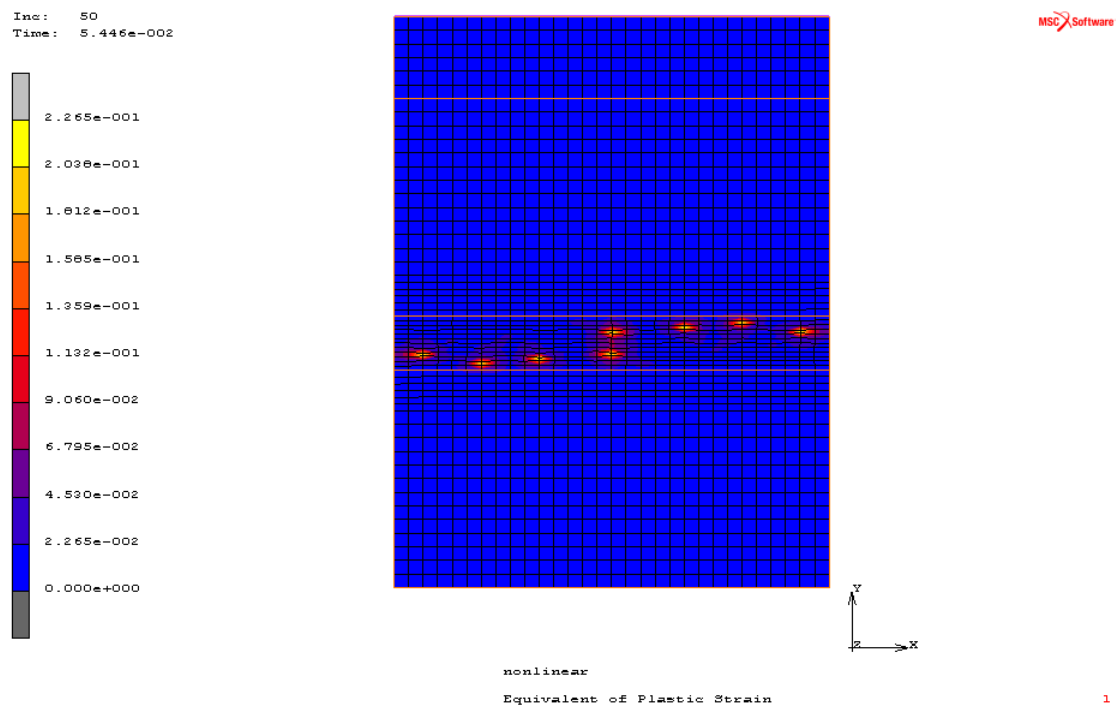


Εικόνα 121: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (10% της φόρτισης)



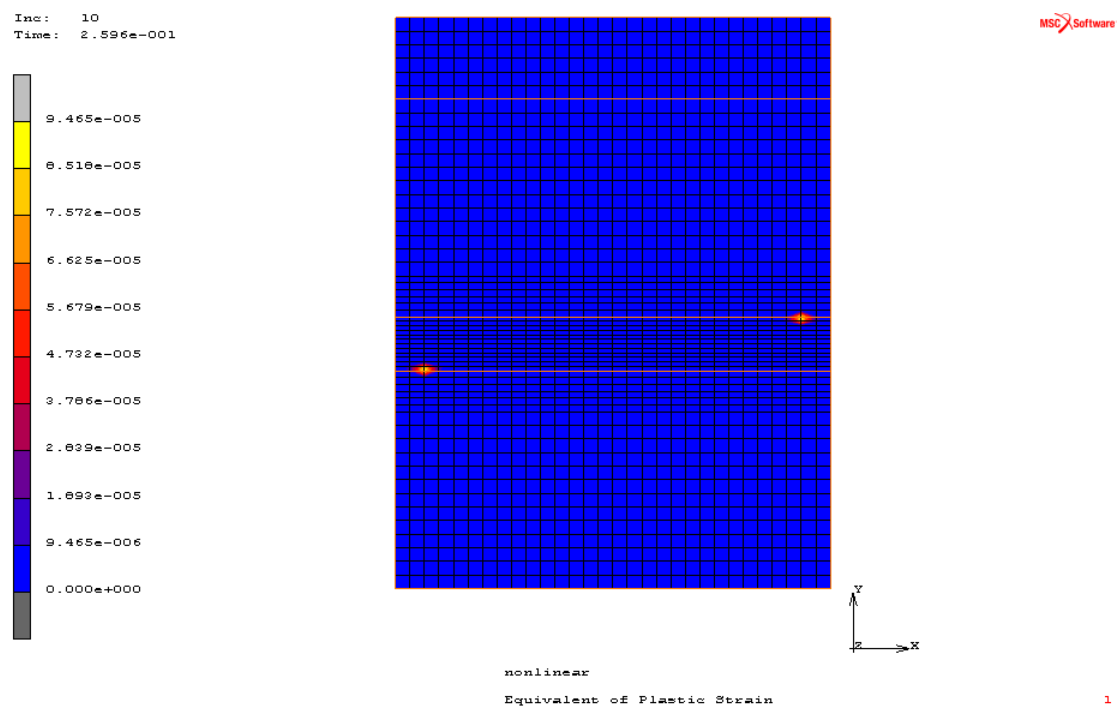
Εικόνα 122: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 400 (74% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4i

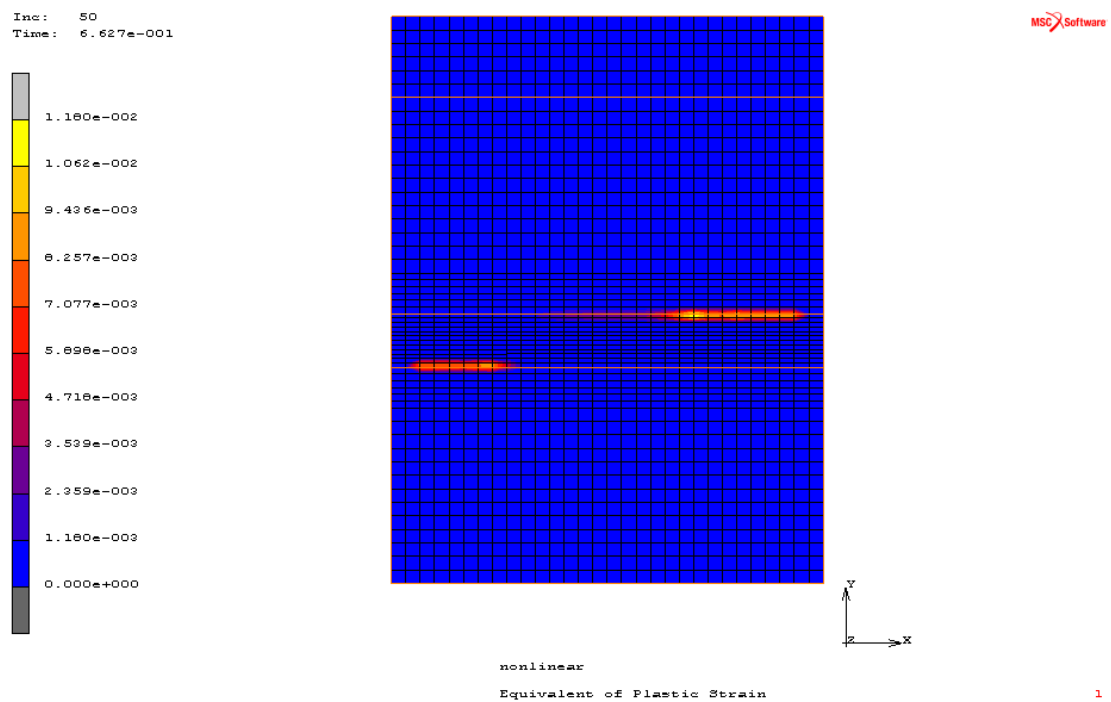


Εικόνα 123: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (5% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 4ii

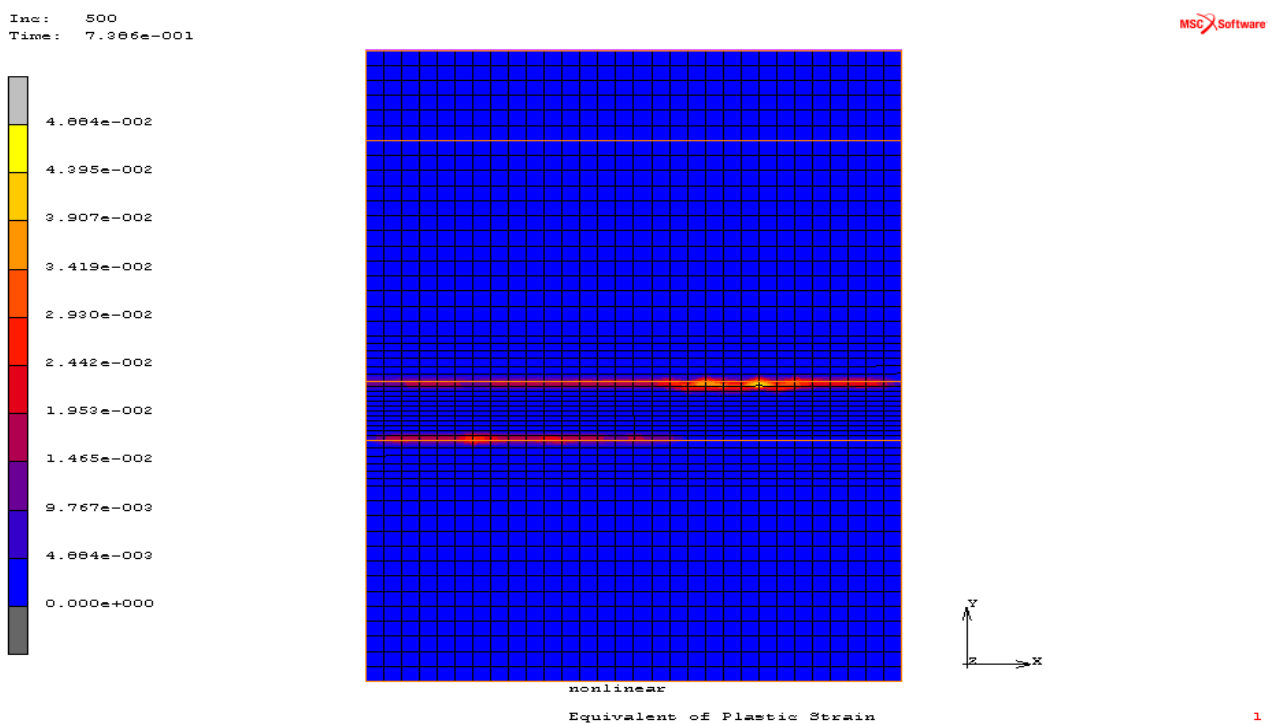


Εικόνα 124: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 10 (26% της φόρτισης)



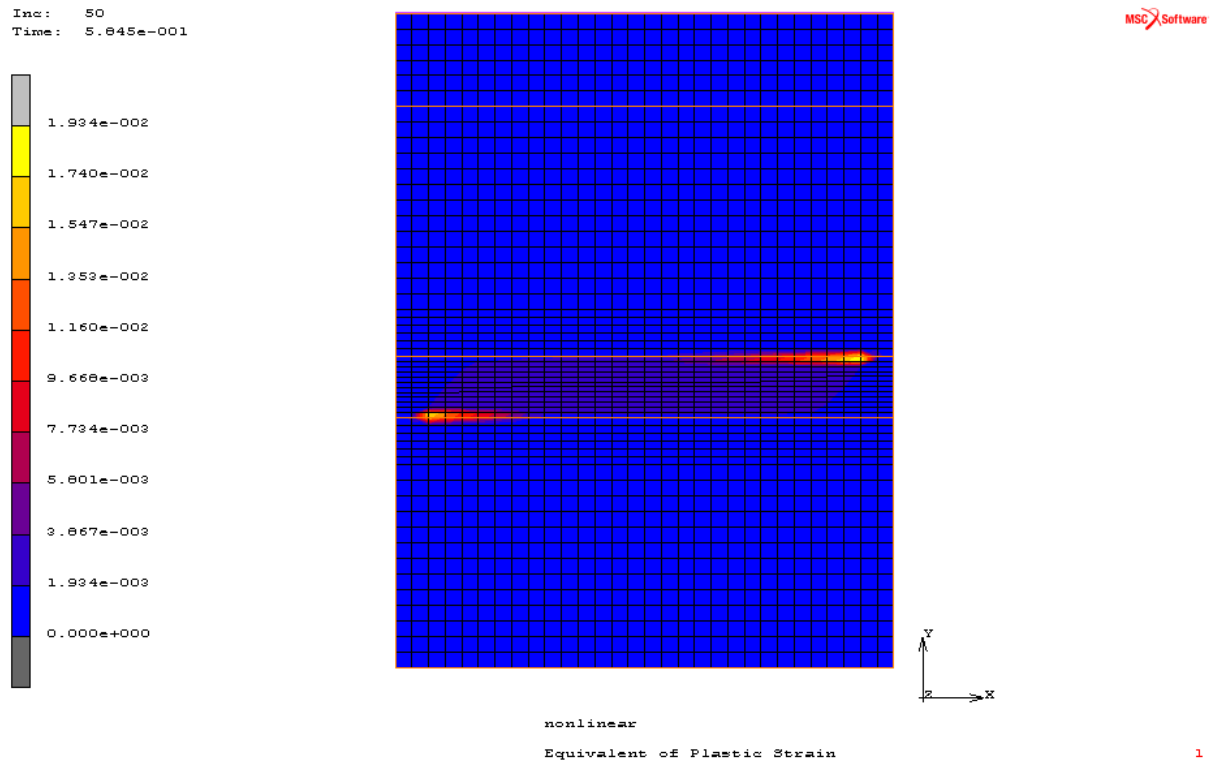
Εικόνα 125: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (66% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5i



Εικόνα 126: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 500 (74% της φόρτισης)

Αριθμητικό προσομοίωμα 5ii



Εικόνα 127: Equivalent of Plastic Strain – Βήμα φόρτισης 50 (58% της φόρτισης)

Βιβλιογραφία

[1] UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANISATION, CONVENTION CONCERNING THE PROTECTION OF THE WORLD CULTURAL AND NATURAL HERITAGE, Adopted by the General Conference at its seventeenth session, Paris, 16 November 1972

[2] http://www.unesco-hellas.gr/gr/3_5_1.htm

[3]

http://portal.tee.gr/portal/page/portal/PUBLICATIONS/book_publications/ekdoseis_2010/Hagia_Sofia

[4] ΟΔΗΓΟΣ ΠΟΛΙΤΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ, Κέντρο Πολιτισμικής Πληροφορικής, Ινστιτούτο Πληροφορικής ΙΤΕ, Επιμέλεια: Πάνος Κωνσταντόπουλος, Χρυσούλα Μπεκιάρη, Μάρτιν Ντέρ, Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Κοινωνία της Πληροφορίας», Μέτρο 1.3, Απρίλιος 2005

[5] G.Beer – J.O. Watson, Introduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers, , Wiley Publishers Since 1807

[6] Klaus – Jurgen Bathe, Finite Element Procedures

[7] Σχεδιασμός μεθοδολογίας επιστημονικής υποστήριξης στη λήψη αποφάσεων για την προστασία ιστορικών κτιρίων και μνημείων με κριτήρια αειφορίας των υλικών, Αθανασιάδης Βασίλειος, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

[8] Φ. Καραντώνη – Μαραγκού, Διδακτορική Διατριβή «Σεισμική Αντοχή Κτιρίων από Λιθοδομή και τρόποι Ενίσχυσής τους», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

[9] Μίλτων Α. Δημοσθένους, Μέθοδοι και Υλικά Αποκατάστασης και Ενίσχυσης Διατηρητέων Κτιρίων από Φέρουσα Τοιχοποιία, Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών

[10] ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ, Αντωνία Μοροπούλου, Ελένη Αγγελακοπούλου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών

- [11] ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΕ ΜΝΗΜΕΙΑ & ΚΤΙΡΙΑ: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ, Νόννη Μαραβελάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Σχολή αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Ιούνιος 2014, Χανιά
- [12] ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΣΕ ΜΝΗΜΕΙΑ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ, ΣΜΕΡΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
- [13] Χ.Δ. Θεοδωρίδης, Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός Μηχανικός, Τεχνική Υποστήριξη BASF C.C. Ελλάς Α.Ε. Συμβατά Υλικά και Μέθοδοι Συντήρησης και Αποκατάστασης Ιστορικών Κτιρίων
- [14] ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ "ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ" ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ, Μαρία Στεφανίδου, ΓΕΩΛΟΓΟΣ Α.Π.Θ Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ
- [15] <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/non-IE/toughness.html>
- [16] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMATA/ko1.htm
- [17] ÇAKMAK A.S., MOROPOULOU A., MULLEN C.A., 'Interdisciplinary Study of Dynamic Behavior and Earthquake Response of Hagia Sophia', Soil Dynamics and earthquake engineering, 14, 1995, pp.125-133
- [18] ÇAKMAK A.S., MOROPOULOU A., ERDIK M., 'Interdisciplinary research proposal for the earthquake protection of Hagia Sophia', submitted to the Council of Europe, 1995
- [19] MOROPOULOU A., BAKOLAS A., MOUNDOULAS P., ÇAKMAK A.S., 'Compatible Restoration Mortars, Preparation and Evaluation of Hagia Sophia earthquake protection', Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage, 1998
- [20] ROTA ROSSI P., 'Mortars for restoration: basic requirements and quality control', Matériaux de Constructions, 1989
- [21] Richardson M., 1998, Carbonation of Reinforced Concrete. Its Causes and Management, Citis, Dublin.
- [22] Welty J.R., Wilson R.E., Wicks C.E., 1969. Fundamental of Momentum, Heat and Mass Transfer, Wiley, New York

- [23] Shih S.M. Ho C.S., Song Y.S. Lin J.P., 1999. 'Kinetics of the reaction of Ca(OH)_2 with CO_2 at low temperature', *Ind. Eng. Chem. Res.* 38 1316-1322
- [24] Van Balen K. and Van Gemert D., 1994, 'Modeling Lime Mortar Carbonation', *Materials and Structures* 27
- [25] Price, C. (1996), *Stone Conservation, An Overview of Current Research*. The Getty Conservation Institute, U.S.A.
- [26] Camuffo D., (1995), *Science of the Total Environment*
- [27] Amoroso, G., Fassina, V. (1983), *Stone Decay and Conservation Materials Science Monographs 11*, Elsevier Science, Amsterdam.
- [28] Brimblecombe, P. (1991), *History of Air Pollution and Deterioration of Heritage*. In *Weathering and Air Pollution*
- [29] Henriques, F. (2004), *Replacement Mortars in Conservation: An Overview*, 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 973-983, Stockholm, Sweden
- [30] Everett D., (1961), *The Thermodynamics of Frost Damage to Porous Solids*. Transactions of the Faraday Society
- [31] Snethlage R., Wendler E. (1991), *Surfactants and Adherent Silicon Resins. New Protective Agents for Natural Stone*. In *materials Issues in Art and Archaeology*, 2
- [32] Rossi-Manaresi R., Tucci A (1991), *Pore Structure and the Disruptive or Cementing Effect of Salt Crystallization in Various Types of Stone*. *Studies in Conservation*
- [33] Charola A., (2004), *Stone Deterioration in Historic Building and Monuments*, 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, Sweden
- [34] Krumbein W, Urtzi, C., Diakumaku, S., Petersen, K., Warscheid, T, (1993), *Interactions of Microbes with Consolidants and Biocides used in the Conservation of Rocks and Mural Paintings*. In *Conservation of Stone and Other Materials*
- [35] Frias M, Cabrera J. Pore, (2000), *Size distribution and degree of Hydration of metakaolin – cement pastes*. *Cement Concrete Res* 2000
- [36] Massazza F. In: Hewlett Peter C, editor 1999, *Pozzolana and pozzolanic cements* Lea's 'chemistry of cement and concrete' UK: Arnold 1999
- [37] Venuat M, Alexandre J., 1977, *CERILH no 195*, 1977

- [38] Chandra S., 2003, History of Architecture and Ancient Buildings in India. Tech Books International, New Delhi
- [39] Valluzzi M.R. Binda L., Modena C., 2005, Mechanical Behavior of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing , Construction and Building Materials, Volume 19, Issue 1, February 2005
- [40] Valluzzi M.R. 2007, On the vulnerability of historical masonry structures: Analysis and mitigation, Materials and Structures
- [41] ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΡΙΠΛΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΥ - ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΖΟΛΑΝΗΣ – ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΟΖΟΛΑΝΩΝ, Ε.-Ε. Τουμπακάρη, Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης, Υπουργείο Πολιτισμού, Πολυγνώτου 10, 10555 Αθήνα, Χ.-Ε. Αδάμη, Ε. Βιντζηλαίου, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Ζωγράφου, Αθήνα
- [42] ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ, ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ, ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ – ΒΛΑΒΕΣ – ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ, 1η ΔΙΑΛΕΞΗ, Μηχανική της τοιχοποιίας – Σύνθεση φέροντος οργανισμού –Απόκριση και τυπολογία βλαβών υπό κατακόρυφα και σεισμικά φορτία, ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ Χ. Ιγνατάκης, Καθηγητής Α.Π.Θ., 2 η ΔΙΑΛΕΞΗ, Άοπλη τοιχοποιία – Ευρωκώδικας 6 και Εθνικό Κείμενο Εφαρμογής, ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ Κ. Στυλιανίδης, Καθηγητής Α.Π.Θ.
- [43] 1 K. Subramanian, 2 A. Kannan, 1 Professor And Head Of The Department, Civil Engineering, Coimbatore Institute Of Technology, Coimbatore
- 2 Research Scholar, Coimbatore Institute Of Technology, Coimbatore, An Experimental Study On Usage Of Quarry Dust As Partial Replacement For Sand In Concrete And Mortar, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(8): 955-967, 2013 ISSN 1991-8178
- [44] N. Maravelaki, E. Lionakis, C. Kapridaki, Z. Agioutantis, A. Verganelaki and V. Perdikatsis, CHARACTERIZATION OF HYDRAULIC MORTARS CONTAINING NANO-TITANIA FOR RESTORATION APPLICATIONS, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone
- Columbia University, New York, 2012

- [45] Moropoulou A., Cakmak A. S., Biscontin G., Bakolas A., Zendri E. (2002), "Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia", *Construction and Building Materials* 16, pp. 543-552
- [46] Hose Luis Pina - Henriques, *Masonry under Compression: Failure Analysis and Long-Term Effects*, October 2005
- [47] Pagona Maravelaki-Kalaitzaki, Zacharias Agioutantis, Eustratios Lionakis, Maria Stavroulaki, Vasileios Perdikatsis, "Physico-chemical and mechanical characterization of hydraulic mortars containing nano-titania for restoration applications.", *Cement & Concrete Composites*, journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp
- [48] Maravelaki-Kalaitzaki, E. Lionakis, Z. Agioutantis, C. Kapridaki, A. Verganelaki, S. Mayrigianakis, M. Stavroulaki, V. Perdikatsis, N. Kallithrakas-Kontos, *NICOM 4: 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction Physico-chemical and Mechanical Characterization of Hydraulic Mortars Containing Nano-Titania for Restoration Applications*