



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ: ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ
ΕΡΕΥΝΩΝ**

Προσομοίωση σεισμικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων-προσκρουστήρων σε κτίρια

Δόδουλα Ευγενία

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Σπηλιόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες.....	ix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ιστορική Μελέτη.....	1
1.3 Συμπεριφορά Όμορων Κτιρίων κατά την κρούση.....	5
1.4 ΕΑΚ 2000 και κρούση όμορων κτιρίων	6
1.5 Κρούση όμορων κτιρίων λόγω σεισμού και μέτρα ενάντια σε αυτή	8
1.6 Μελέτες σχετικά με την κρούση όμορων κτιρίων	9
2 Στοιχεία Θεωρίας	15
2.1 Κρούση όμορων κτιρίων λόγω σεισμού και χρήση ειδικών τοιχωμάτων-προσκρουστήρων ως μέτρο ενάντια σε αυτή.....	15
2.1.1 Κτίρια που χρησιμοποιούνται στη διερεύνηση	16
2.1.2 Τρία είδη στατικών συστημάτων	18
2.1.3 Μη γραμμική δυναμική απόκριση των δύο κτιρίων: επιπτώσεις της κρούσης 20	
2.1.4 Τοπική ζημία λόγω κρούσης	24
2.1.5 Προσομοίωση της κρούσης με δύναμη κρούσης	25
2.1.6 Προσομοίωμα της ανάλυσης και αποτελέσματα	27
2.2 Θεωρία Υλικών	31
2.2.1 Εισαγωγή	31
2.2.2 Γραμμικώς Ελαστικό Υλικό	32
2.2.3 Ελαστικό – Απολύτως Πλαστικό Υλικό	33
2.2.4 Ελαστικό – Γραμμικώς Κρατυνόμενο Υλικό	33
2.2.5 Υλικό Damaged Plasticity.....	35
2.2.6 Υλικό Drucker - Prager	59
2.3 Θεωρία διατύπωσης επαφής (contact formulation)	64
2.3.1 Γενικά στοιχεία.....	64
2.3.2 Ορισμός ζεύγους επαφής στο Abaqus/Standard.....	66
2.3.3 Διακριτοποίηση των επιφανειών του ζεύγους επαφής.....	68
3 Ανάλυση, Αποτελέσματα και Σχόλια.....	73

3.1	Απλοποιημένο Προσομοίωμα – Μέθοδος τριών δυνάμεων.....	73
3.1.1	Προσομοίωση Π1 – Υλικό τοιχώματος *DAMAGED PLASTICITY	73
3.1.2	Προσομοίωση Π2 – Υλικό τοιχώματος *DAMAGED PLASTICITY	109
3.1.3	Προσομοίωση Π3 – Υλικό τοιχώματος *DRUCKER PRAGER	119
3.2	Ακριβές Προχωρημένο Προσομοίωμα – Ορισμός Contact Surfaces και contact pair. 124	
	Προσομοίωση Π4 – Υλικό τοιχώματος *DAMAGED PLASTICITY	124
3.2.1	Περιγραφή προβλήματος και προσομοίωση στο πρόγραμμα Π.Σ. Abaqus. 124	
3.2.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	127
4	Συμπεράσματα	141
5	Βιβλιογραφικές Αναφορές	145
6	Παράρτημα.....	147
6.1	Παράρτημα 1 – Γενικά στοιχεία για τη χρήση του προγράμματος	147
6.1.1	Δημιουργία αρχείου εισαγωγής (input file).....	147
6.1.2	Εκτέλεση αρχείου	148
6.1.3	Περιήγηση στο Documentation του Abaqus.....	149
6.2	Παράρτημα 2 –Χρήσιμες εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας	151
6.2.1	Εντολές ορισμού κόμβων (nodes), στοιχείων(elements) και συνόλου κόμβων(node sets) και συνόλου στοιχείων(element sets).....	151
6.2.2	Εντολές ορισμού διατομών των μελών.....	157
6.2.3	Εντολές ορισμού των υλικών	159
6.2.4	Εντολές ορισμού συνοριακών συνθηκών και αρχικών συνθηκών	173
6.2.5	Εντολές ορισμού φόρτισης	175
6.2.6	Εντολές ορισμού επιφανειών	179
6.2.7	Εντολές ορισμού αποτελεσμάτων εξόδου	182
6.2.8	Λοιπές εντολές	184
6.3	Παράρτημα 3 – Αρχεία εισόδου των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας. 185	
6.3.1	Input file Προσομοίωσης Π1	185
6.3.2	Input file Προσομοίωσης Π2	189
6.3.3	Input file Προσομοίωσης Π3	193
6.3.4	Input file Προσομοίωσης Π4	197

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η σεισμική συμπεριφορά κτιρίου με τοιχώματα-προσκρουστήρες. Τα τοιχώματα-προσκρουστήρες λειτουργούν ως μέτρο για την αντιμετώπιση της κρούσης λόγω σεισμού όμορων κτιρίων και ο στόχος είναι να περιοριστεί ο κενός χώρος (σεισμικός αρμός) που προτείνει ο κανονισμός. Διευρευνάται αν τα τοιχώματα προστατεύουν το κτίριο από αστοχία-κατάρρευση. Παραγματοποιούνται τέσσερις προσομοιώσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10-2.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται όλη η ιστορική μελέτη γύρω από το φαινόμενο της κρούσης κτιρίων λόγω σεισμού. Παρουσιάζεται η συμπεριφορά, σύμφωνα με μελέτες, των όμορων κτιρίων κατά την κρούση, καθώς και όσα προβλέπει ο Κανονισμός ΕΑΚ 2000 σε αυτές τις περιπτώσεις. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα μέτρα που προτάθηκαν και μελετήθηκαν στο παρελθόν για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει παρουσιάζοντας τις μελέτες που έχουν εκπονηθεί σχετικά με την κρούση των όμορων κτιρίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα στοιχεία θεωρίας που θα πρέπει κανείς να έχει υπόψη του, για την κατανόηση του αντικειμένου. Παρουσιάζονται στοιχεία για τα τοιχώματα-προσκρουστήρες καθώς και τα δεδομένα που προέκυψαν από άλλες μελέτες και χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία. Τέλος, δίνονται στοιχεία για τη συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις καθώς και για τη διατύπωση της επαφής σύμφωνα με πρόγραμμα Abaqus.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται τα πάντα γύρω από τις προσομοιώσεις. Πιο συγκεκριμένα, για καθεμία από τις τέσσερις προσομοιώσεις γίνεται περιγραφή του προβλήματος και του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Ακολουθεί ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων κάθε ανάλυσης, εξετάζοντας τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο φορέα, καθώς και τις μετακινήσεις που σημειώνονται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία και συστάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Η εργασία κλείνει με τη βιβλιογραφία και τα παραρτήματα. Τα τελευταία θα φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την εξοικείωση ενός νέου χρήστη με το Abaqus, και την κατανόηση της προσομοίωσης του προβλήματος στο πρόγραμμα.

Abstract

Investigation of building's seismic response with the use of collision shear walls-bumpers. The collision shear walls function as a measure against the pounding of adjacent buildings due to earthquake and the goal is to minimize the seismic separation that suggest the building regulations. It is investigated whether the collision shear walls protect the building from collapse.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Σπηλιόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ο οποίος υπήρξε όχι μόνο επιβλέπων και εμπνευστής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και ο άνθρωπος που με εμπιστεύτηκε και με ενθάρρυνε σε κάθε βήμα αυτής. Η βοήθεια του ήταν συνεχής και ανεκτίμητη. Η επιστημονική του καθοδήγηση και οι συμβουλές του ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στο Γιώργο Παπαζαφειρόπουλο, Υποψήφιο Διδάκτορα στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ο οποίος με την ανιδιοτελή βοήθεια που προσέφερε, συνέβαλε στην εξοκείωση μου με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Χάρη σε αυτόν ξεπεράστηκαν τα όποια προβλήματα παρουσιάστηκαν στις αναλύσεις κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Για τις συμβουλές του σχετικά με το Abaqus, θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Μανώλη Γεωργιουδάκη.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τους Ιωάννη Καπογιάννη, Ματθαίο Αντωνίνη και Κωνσταντίνο Παναγιώτου, Υποψήφιους Διδάκτορες στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, οι οποίοι δημιούργησαν ένα πολύ ευχάριστο κλίμα στο γραφείο το χρονικό διάστημα της συνύπαρξης μας.

Εγκάρδιες ευχαριστίες στους φίλους μου, οι οποίοι βρίσκονται στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια. Οι όμορφες στιγμές που έχουμε ζήσει μαζί και η υποστήριξη τους αποτελούν σημείο αναφοράς.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους γονείς μου και τον αδερφό μου, για την υπομονή και την αγάπη τους. Η διαρκής κατανόηση και υποστήριξή τους σε κάθε βήμα της μέχρι τώρα πορείας μου είναι ανεκτίμητη.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Στη διεθνή βιβλιογραφία, ως κρούση όμορων κτιρίων (rounding of adjacent buildings) ορίζεται η βίαιη και επαναλαμβανόμενη κρούση δύο κτιρίων ή διαφορετικών τμημάτων του ίδιου κτιρίου, όταν αυτά τίθενται σε κίνηση λόγω σεισμικής διέγερσης.

Το πρόβλημα της κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα το οποίο μελετάται εδώ και τρεις δεκαετίες. Σε πολλούς σημαντικούς σεισμούς που έχουν λάβει χώρα σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει αναφερθεί ζημιά εξαιτίας της επιβαλλόμενης κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού. Οι ζημιές που έχουν καταγραφεί είναι είτε μικρής σημασίας και τοπικές, είτε μεγαλύτερης σημασίας που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην έναρξη κατάρρευσης.

1.2 Ιστορική Μελέτη

Στο σεισμό του 1964 στην Αλάσκα έλαβε χώρα πρόσκρουση μεταξύ του 14-όροφου κτιρίου του ξενοδοχείου Westward Hotel και της μικρής σε ύψος αίθουσας χορού αυτού. Κρούσης συνέβη και με όμορη 6-όροφη πτέρυγα παρά την ύπαρξη κενού 100 cm μεταξύ τους. Ειδικά στους ψηλότερους ορόφους, ολόκληρα τμήματα μεταλλικών δαπέδων αποσυνδέθηκαν από τα χαλύβδινα υποστηρίγματα τους.

Στο σεισμό του 1972 στην πόλη Managua της Νικαράγουα σημειώθηκε ολική κατάρρευση του τρίτου ορόφου του 5-όροφου ξενοδοχείου Grand Hotel, λόγω πρόσκρουσης του τελευταίου ορόφου του γειτονικού 2-όροφου κτιρίου σε αυτό.

Η πιο σημαντική δήλωση στη σύγχρονη βιβλιογραφία είναι η περίπτωση αναφερόμενης ζημιάς στην πόλη του Μέξικο κατά τη διάρκεια σεισμού το 1985. Σύμφωνα με μια πρώτη δήλωση των Rosenblueth και Meli «στο σύνολο 330 πολυώροφων κτιρίων που κατέρρευσαν ή υπέστησαν σοβαρή ζημιά, κρούση όμορων κατασκευών συνέβη στο 40% των κτιρίων, ενώ στο 15% αυτών των περιπτώσεων υπήρξε κατάρρευση». Αν και όπως διαπιστώθηκε αργότερα υπήρξε υπερεκτίμηση του προβλήματος, η παραπάνω δήλωση χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στην προσπάθεια να τονιστεί η σημασία της επιβαλλόμενης κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού. Τελικά, σύμφωνα με δήλωση του Meli «η κρούση μεταξύ όμορων κτιρίων υπήρξε κύριος παράγοντας βλάβης μόνο στο 3-4,5 του συνόλου των κτιρίων που υπέστησαν σοβαρή ζημιά ή κατάρρευση». Το ποσοστό αυτό είναι σχετικά μικρό, αν ληφθεί υπόψη ο μεγάλος συνολικός αριθμός όμορων κτιρίων που υπέστησαν κρούση. Συνεπώς, το θέμα της κρούσης μπορεί να μη θεωρηθεί

πρόβλημα και να αμεληθεί. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες με βλάβες και καταρρεύσεις λόγω του φαινομένου της κρούσης όμορων κτιρίων παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 1.1 - Μεξικό 1985 – Κρούση λόγω σεισμού όμορων κτιρίων και βλάβες



Εικόνα 1.2– Μεξικό 1985 – Βλάβες λόγω του φαινομένου



Εικόνα 1.3 – Μεξικό 1985 – Δυσμενέστερη περίπτωση κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού – κατάρρευση 8-όροφου κτιρίου



Εικόνα 1.4 – Μεξικό 1985 – Κατάρρευση του ανώτερου τμήματος 8-όροφου κτιρίου λόγω του φαινομένου



Εικόνα 1.5 – Μεξικό 1985 – Κατάρρευση του μεσαίου ορόφου του κτιρίου Hotel de Carlo στην πόλη του Μεξικό λόγω της κρούσης με τα γειτονικά σε επαφή κτίρια

Παρόμοιες καταγραφές υπήρξαν και στο σεισμό στην πόλη Κοβέ της Ιαπωνίας.



Εικόνα 1.6 - Κόμπε, Ιαπωνία - Βλάβες από την κρούση όμορων κτιρίων λόγω σεισμού

1.3 Συμπεριφορά Όμορων Κτιρίων κατά την κρούση

Σύμφωνα με μελέτες και παρατηρήσεις σχετικές με το θέμα ισχύουν τα παρακάτω:

- Η κρούση μεταξύ όμορων παρακείμενων κτιρίων (earthquake induced rounding) μπορεί να έχει τόσο δυσμενείς, όσο και ευμενείς επιδράσεις στη μέγιστη μετατόπιση-απόκριση ενός κτιρίου. Αυτό εξαρτάται από τις ιδιοπεριόδους T και τις μάζες m των συγκρουόμενων κτιρίων.

Έστω δύο κτίρια με ίδιες μάζες $m_1=m_2$. Η απόκριση του πιο δύσκαμπτου κτιρίου ενισχύεται, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση του εύκαμπτου κτιρίου.

Έτσι, πολλά κτίρια στην πόλη του Μέξικο δεν οδηγήθηκαν στην κατάρρευση, καθώς ολόκληρα οικοδομικά τετράγωνα έδρασαν ως μια μονάδα ισχυρότερη από το κάθε κτίριο ξεχωριστά. Μάλιστα το 42% των κτιρίων που υπέστησαν σοβαρές ζημιές ήταν γωνιακά και δεν είχαν την προστασία όμορων κτιρίων. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα εξωτερικά κτίρια μιας σειράς όμορων κτιρίων τείνουν να εμφανίζουν μεγαλύτερες βλάβες σε σχέση με τα ενδιάμεσα. Έτσι, η μεγάλη εγγύτητα των κτιρίων λειτουργεί σε ορισμένες περιπτώσεις θετικά. Τόσο στην περίπτωση του Μεξικό, όσο και σε αυτή της Ιαπωνίας, κτίρια μεγάλου ύψους και μικρής διατομής περιορίστηκαν από χαμηλά και δύσκαμπτα κτίρια εκατέρωθεν.

- Η κρούση μεταξύ όμορων παρακείμενων κτιρίων συνήθως προκαλεί τοπική ζημιά και βλάβη στο σημείο επαφής-κρούσης των κτιρίων. Η βλάβη αυτή μόνο υπό προϋποθέσεις μπορεί να προκαλέσει έναρξη αστοχίας και κατάρρευση. Οι περιπτώσεις στις οποίες η κρούση αποτελεί κύριο παράγοντα βλάβης και είναι αδύνατον να αμεληθεί συνοψίζονται παρακάτω:

Κρούση κτιρίων με σημαντικά διαφορετικά ύψη, μάζες και ιδιοπεριόδους είναι πιθανό να οδηγήσει σε αστοχία και έναρξη κατάρρευσης. Οι πιθανότητες αυξάνονται όταν το πιο χαμηλό εκ των δύο κτιρίων είναι ογκώδες και έχει μεγάλη δυσκαμψία.

Οι περισσότερες καταρρεύσεις και αστοχίες έχουν παρατηρηθεί όταν λόγω διαφορετικού ύψους ορόφων η πλάκα της οροφής του πιο κοντού κτιρίου χτυπά στο μέσο ενός από τους ορόφους του παρακείμενου ψηλότερου κτιρίου διατέμνοντάς τα υποστυλώματά του δεύτερου.

Οι πολύ μεγάλες καμπτικές παραμορφώσεις των κτιρίων και οι αποκλίσεις από την κατακόρυφο οφείλονται συχνά σε σχεδιαστικά λάθη, όπως μαλακός πρώτος όροφος, ή σε άλλες περιπτώσεις σχετίζονται με αστοχία των θεμελίων ή του ίδιου του εδάφους (φαινόμενα ρευστοποίησης).

Τα χαρακτηριστικά ταλάντωσης των κτιρίων και οι παραμορφώσεις σχετίζονται και με μη κανονικότητες που εμφανίζονται στα πλαίσια του κτιριακού σχεδιασμού. Σε ακανόνιστα κτίρια εμφανίζονται λόγω της σεισμικής μετακίνησης του εδάφους φαινόμενα στρέψης, τα οποία καθιστούν το πρόβλημα της κρούσης όμορων κτιρίων ιδιαιτέρως περίπλοκο.

- Η κρούση μεταξύ όμορων κτιρίων ως δυναμική φόρτιση προκαλεί μεγαλύτερες επιταχύνσεις μικρότερης διάρκειας, οπότε και οι απαιτήσεις σε σπλισμό στα δομικά στοιχεία του κτιρίου αυξάνουν.

1.4 ΕΑΚ 2000 και κρούση όμορων κτιρίων

Στον Εθνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000) στην παράγραφο «4.1.7.2. Επαφή με Γειτονικά Κτίρια» γίνεται αναφορά στην κρούση όμορων κτιρίων. Συγκεκριμένα αναφέρονται τα παρακάτω:

[1] Πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προστασίας, τόσο του υπό μελέτη όσο και του υφιστάμενου κτιρίου, από δυσμενείς συνέπειες προσκρούσεων κατά τη διάρκεια της σεισμικής απόκρισης.

Ο παρών Κανονισμός εντάσσει τη διαμόρφωση του σεισμικού αρμού στο κεφάλαιο της μείωσης των αβεβαιοτήτων σεισμικής συμπεριφοράς δίνοντας έμφαση, κυρίως, σε μέτρα αποφυγής καταστροφικών συνεπειών των προσκρούσεων των γειτονικών κτιρίων (εμβολισμός υποστυλωμάτων) και, λιγότερο, σε μέτρα περιορισμού βλαβών.

[2] Οι συνέπειες μπορεί να είναι ιδιαίτερα δυσμενείς όταν υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλωμάτων του ενός κτιρίου από πλάκες ή άλλα στοιχεία του παρακείμενου. Στην περίπτωση αυτή προστατευτικό μέτρο είναι η πρόβλεψη σεισμικού αρμού πλήρους διαχωρισμού.

[3] Αν δε γίνει ακριβέστερος υπολογισμός. Ο σεισμικός αρμός πλήρους διαχωρισμού μπορεί να έχει εύρος ίσο με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των μέγιστων σεισμικών μετακινήσεων ($\Delta=q \Delta_{ελ}$) των δύο κτιρίων στις θέσεις των επικίνδυνων υποστυλωμάτων, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης της στρόφης περί κατακόρυφο άξονα. Αν δεν είναι δυνατή ακριβέστερη

εκτίμηση των μετακινήσεων του υφιστάμενου κτιρίου, μπορούν να ληφθούν ίσες με τις αντίστοιχες του υπό μελέτη κτιρίου.

Ο σεισμικός αρμός πλήρους διαχωρισμού είναι βέβαια το ασφαλέστερο μέσο για πλήρη αποφυγή, τόσο των ενδεχόμενων καταστροφικών συνεπειών της πρόσκρουσης, όσο και της ενδεχόμενα δυσμενούς αλληλεπίδρασης στην απόκριση των κτιρίων και ασφαλώς για την ελαχιστοποίηση των πιθανών βλαβών. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο εύρος του σεισμικού αρμού πλήρους διαχωρισμού δημιουργεί σειρά άλλων δυσεπίλυτων προβλημάτων, τόσο οικοδομικών (κυρίως στεγανότητας και αισθητικής), όσο και νομικών/οικονομικών (ιδιοκτησιακές εμπλοκές, απώλεια επιφάνειας, προσαρμογή στο υφιστάμενο νομικό καθεστώς μεσοτοιχιών). Τα προβλήματα που τυχόν θα προκύψουν από το κενό μεταξύ των κτιρίων για τη δημιουργία σεισμικού αρμού επιλύονται με τις σχετικές διατάξεις του Κτιριοδομικού Κανονισμού.

[4] Σε κτίρια που βρίσκονται σε επαφή, και όταν δεν υπάρχει πιθανότητα εμβολισμού υποστυλωμάτων σε κανένα από τα δύο κτίρια, το εύρος του αντίστοιχου αρμού, εφόσον δε γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός, μπορεί να καθορίζεται με βάση το συνολικό αριθμό των υπέρ το έδαφος σε επαφή ορόφων ως εξής:

- 4 cm για επαφή μέχρι και 3 ορόφους
- 8 cm για επαφή από 4 έως 8 ορόφους
- 10 cm για επαφή σε περισσότερους από 8 ορόφους

Στους υπόγειους ορόφους δεν είναι υποχρεωτική η πρόβλεψη αντισεισμικού αρμού.

Στις περιπτώσεις που ο εμβολισμός υποστυλωμάτων αποκλείεται, λόγω ισόσταθμων πλακών, ο κανονισμός καθορίζει ελάχιστα πλάτη αρμών που, χωρίς να δημιουργηθούν ιδιαίτερες κατασκευαστικές δυσκολίες, στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση βλαβών σε σειμούς με σημαντική πιθανότητα εμφάνισης. Στην περίπτωση σειμού, με ένταση ανάλογη προς το σεισμό σχεδιασμού, θεωρείται ότι η πιθανή πρόσκρουση τέτοιων κτιρίων, μετά την εξάντληση του μεταξύ τους διακένου, δε θα έχει καταστροφικές συνέπειες και οι βλάβες, που είναι πιθανό να προκληθούν, θεωρούνται οικονομικά αποδεκτές.

1.5 Κρούση όμορων κτιρίων λόγω σεισμού και μέτρα ενάντια σε αυτή

Σήμερα, για την αντιμετώπιση των διαφόρων προβλημάτων που προκύπτουν από την κρούση των παρακείμενων κτιρίων κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, ο κανονισμός προτείνει ως μέτρο το διαχωρισμό και την τήρηση μιας ελάχιστης απόστασης μεταξύ των κτιρίων (seismic separation).

Βέβαια η λύση αυτή δεν είναι εύκολο να εφαρμοστεί. Αρχικά υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός κτιρίων που έχουν κατασκευαστεί πολύ πριν τον υπάρχοντα κανονισμό και είναι αδύνατη μια τέτοιου είδους παρέμβαση. Αλλά και όσον αφορά τις καινούριες κατασκευές, ιδιοκτήτες και μηχανικοί είναι αρνητικοί στην τήρηση μιας ελάχιστης απόστασης μεταξύ των κτιρίων για λόγους οικονομικούς, τεχνικούς και νομικούς. Έτσι, στην Ελλάδα οι απαιτήσεις του κανονισμού σχετικά με το θέμα δεν εφαρμόζονται, γεγονός που συνεπάγεται περαιτέρω προβλήματα. Όπως τονίστηκε ήδη σχετικά με το θέμα της κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού, πρόκειται για φαινόμενο που ενδέχεται να έχει και θετικές επιδράσεις, δεδομένου ότι όταν σε ένα σύνολο κτιρίων η ζημιά είναι τοπική και εντοπίζεται μόνο στο σημείο της κρούσης, τα εύκαμπτα κτίρια μπορούν να επωφεληθούν από αυτή την επαφή. Εφόσον μάλιστα στα περισσότερα κτίρια που υφίστανται κρούση, η βλάβη είναι τοπική και μόνο υπό προϋποθέσεις η κρούση οδηγεί σε έναρξη κατάρρευσης, το θέμα της κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού θεωρείται αμελητέο.

Στο παρελθόν διάφορα μέτρα ενάντια στην κρούση όμορων κτιρίων προτάθηκαν και μελετήθηκαν. Πολλά από αυτά αναφέρονται παρακάτω.

- Η χρήση ενός μαλακού υλικού ικανό να απορροφά τους κραδασμούς ως υλικό πλήρωσης στον κενό χώρο ανάμεσα στα κτίρια υπήρξε μια πιθανή λύση. Παρόλ' αυτά, και αυτή η λύση προϋποθέτει το διαχωρισμό των κτιρίων και την τήρηση μιας ελάχιστης απόστασης-κενός χώρος μεταξύ των κτιρίων.
- Η τοποθέτηση αποσβεστήρων μεταξύ των δύο κτιρίων, ώστε να έχουν κοινή απόκριση στη σεισμική δόνηση είναι ως λύση ιδιαίτερα δύσκολη και ακριβή, κυρίως όταν τα κτίρια κατασκευάζονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, και δημιουργεί ποικίλα προβλήματα αισθητικής, πρακτικής και νομικής φύσεως.
- Η χρήση ειδικών τοιχωμάτων (collision shear walls-bumpers), στα οποία θα εντοπίζεται η κρούση, αποτελεί τη μόνη πρακτική λύση ώστε να μειωθεί ο κενός χώρος που απαιτεί ο κανονισμός και μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και όταν το ένα από τα δύο κτίρια έχει ήδη κατασκευαστεί και εκτείνεται ακριβώς μέχρι και τη γραμμή ιδιοκτησίας. Τα τοιχώματα αυτά χρησιμεύουν ως δομικά στοιχεία που αυξάνουν τη σεισμική αντοχή του κτιρίου, ενώ

ταυτόχρονα δεν καταργούν την κρούση ως φαινόμενο, αλλά προστατεύουν τα κτίρια από τον πιο καταστροφικό τύπο κρούσης - όταν λόγω διαφορετικού ύψους ορόφων η πλάκα της οροφής του πιο κοντού κτιρίου χτυπά στο μέσο ενός από τους ορόφους του παρακείμενου υψηλότερου κτιρίου διατέμνοντάς τα υποστυλώματά του.

1.6 Μελέτες σχετικά με την κρούση όμορων κτιρίων

Η έντονη παρουσία του φαινομένου της κρούσης όμορων κτιρίων στο σεισμό της πόλης του Μέξικο το 1985 οδήγησε σε πολλές μελέτες σχετικές με το θέμα. Οι μελέτες [16], [20] είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα, αφού και οι δύο περιέχουν αναφορές από άλλες εργασίες επί του ίδιου θέματος. Ο Jeng επιχειρεί με μια νέα μέθοδο την εκτίμηση της μικρότερης δυνατής απόστασης μεταξύ κτιρίων ώστε να αποφευχθεί η κρούση: ως παράδειγμα αναλύονται δύο 10-όροφα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η μελέτη [20] ασχολείται με τη σεισμική απόκριση όμορων κτιρίων σε σειρά με όμοια ή διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά, κάνοντας χρήση συστημάτων SDOF υποβαλλόμενων σε διεγέρσεις της βάσης.

Αυτές και άλλες μελέτες επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα εμπειρικών ερευνών, παρέχοντας παράλληλα την ποσοτικοποιημένη πληροφορία (ανάλυση) που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη κανονισμών και σχεδιαστικών προδιαγραφών. Οι μελέτες αυτές αποτελούν καθοριστικές προσεγγίσεις του φαινομένου της κρούσης όμορων κτιρίων και κρίνεται απαραίτητο τουλάχιστον ορισμένες από αυτές να αναφερθούν.

Τα συμπεράσματα της μελέτης [7] χρησιμοποιήθηκαν στη σύνταξη του ΕΑΚ, σχετικά με τις απαιτήσεις αντισεισμικών αρμών. Στην εργασία αυτή μελετάται το πρόβλημα της κρούσης όμορων κτιρίων λόγω σεισμού στην ελαστική και ανελαστική περιοχή, με τη χρήση πολυβάθμιων συστημάτων, με βάση το μοντέλο συγκεντρωμένης μάζας και με δοκούς διάτμησης. Αυτό συνιστά σαφή βελτίωση σε σχέση με τη χρήση μονοβάθμιων συστημάτων και επιτρέπει την καλύτερη ποσοτική ανάλυση του φαινομένου της κρούσης, καθώς και τη μελέτη ευρύτερων πρακτικών προβλημάτων. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη, η κρούση όμορων κτιρίων μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την απόκριση ενός δεδομένου κτιρίου σε ένα οικοδομικό τετράγωνο, κάτι που εξαρτάται κυρίως από την ιδιοπερίοδο και τη μάζα του σε σχέση με την ιδιοπερίοδο και τη μάζα του όμορου κτιρίου (ή κτιρίων) και από το κατά πόσο οι συγκρούσεις είναι στη μία ή και στις δύο πλευρές.

Όταν οι μάζες δύο κτιρίων είναι όμοιες, ισχύει με τη μορφή κανόνα ότι ενισχύεται η απόκριση του πιο δύσκαμπτου κτιρίου λόγω κρούσης. Η ενίσχυση αυτή αυξάνει καθώς μειώνεται ο λόγος των ιδιοπεριόδων και καθώς αυξάνεται η δυσκαμψία της εν λόγω κατασκευής.

Εάν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις μάζες των συγκρουόμενων κτιρίων, τότε η κρούση μπορεί να προκαλέσει τα σοβαρότερα προβλήματα. Αυτό οφείλεται στις διαφορές της συνολικής μάζας και ιδιοπεριόδου των δύο κατασκευών, που μπορεί να λειτουργήσει σε βάρος του μικρότερου κτιρίου. Αν, παρόλ' αυτά, το τελευταίο είναι δύσκαμπτο και συμπαγές-ογκώδες, το ψηλότερο κτίριο θα εμφανίσει το « σύνδρομο του απότομου τραντάγματος», που μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μεγάλες μετατοπίσεις και απαιτήσεις πλαστικότητας στο ανώτερο τμήμα του, που εκτείνεται πάνω από το παρακείμενο κτίριο μικρότερου ύψους.

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι αποστάσεις διαχωρισμού των κτιρίων, που ορίζονται στους σύγχρονους κανονισμούς, επαρκούν γενικά για την πρόληψη της κρούσης, αν και υπάρχουν περιπτώσεις όπου η κρούση δεν μπορεί αν αποφευχθεί. Ωστόσο, αν ληφθεί υπόψη ότι το φαινόμενο και οι επιπτώσεις του περιορίζονται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των κτιρίων, ακόμη κι αν το από τους κανονισμούς υποδεικνυόμενο κενό δεν επαρκεί για να αποφευχθεί η κρούση στην περίπτωση μεγάλου σεισμού, οι συνέπειες θα είναι προφανώς λιγότερο σοβαρές.

Οι υπολογισμένες αυξήσεις των μετατοπίσεων λόγω κρούσης δεν είναι ευαίσθητες στις αλλαγές της δυσκαμψίας των στοιχείων, που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση του φαινομένου. Σε μεγαλύτερο βαθμό επηρεάζονται από την ενέργεια που εκλύεται κατά την κρούση. Όμως, εφόσον χρησιμοποιούνται τιμές απόσβεσης που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, το παραπάνω δεν έχει πρακτική σημασία.

Άρα, η μελέτη [7] οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μεγάλες αυξήσεις της απόκρισης λόγω κρούσης προκύπτουν μόνο εφόσον τα συγκρουόμενα μεταξύ τους κτίρια διαφέρουν σημαντικά ως προς το ύψος, την ιδιοπερίοδο ή τη μάζα. Αν αυτές οι διαφορές ήταν δυνατό να αποφευχθούν, τότε οι συνέπειες της κρούσης στα δομικά στοιχεία θα ήταν εφικτό να διευθετηθούν μέσω κανόνων (π.χ. ο Ελληνικός Κανονισμός απαιτεί ειδική αντιμετώπιση για υποστυλώματα από σκυρόδεμα σε πλευρές κτιρίων που υφίστανται το φαινόμενο).

Τα παραπάνω συμφωνούν και με τη μελέτη [16], η οποία καταλήγει ότι οι ιδιοπερίοδοι και ο λόγος των ιδιοπεριόδων των όμορων κτιρίων συνιστούν πλέον βασικές παραμέτρους που καθορίζουν την πιθανότητα κρούσης αυτών. Επίσης, το σημείο της κρούσης θεωρείται ότι εμφανίζεται στο υψηλότερο επίπεδο του πιο χαμηλού κτιρίου. Όμως, η μελέτη αυτή αφορά αποκλειστικά στην ελαστική

διερεύνηση του φαινομένου, χωρίς να λαμβάνει υπόψη ότι η απόκριση των κτιρίων σε μεγάλους σεισμούς είναι ανελαστική.

Στη μελέτη [17] ελέγχεται η δυναμική επαφή κατά τη διάρκεια της κρούσης δύο ή περισσότερων κτιρίων που γειτνιάζουν, ίδιου ύψους αλλά διαφορετικών δυναμικών χαρακτηριστικών, τα οποία εξετάζονται με προσομοίωση σε τρεις διαστάσεις. Οι κατασκευές προσομοιώνονται σα πολυβάθμια συστήματα με πεπερασμένα στοιχεία και χωρίς να είναι γνωστά εξ' αρχής τα στοιχεία επαφής. Οι συνθήκες των δυναμικών επαφών βασίζονται στον πολλαπλασιαστή Lagrange. Οι αριθμητικοί έλεγχοι δείχνουν την αύξηση του φορτίου που δέχεται το δύσκαμπτο κτίριο σε περίπτωση που υπάρχουν γειτονικά εύκαμπτα κτίρια ίδιου ύψους. Επίσης, παρουσιάζονται έντονες διαφοροποιήσεις στο φαινόμενο της κρούσης όταν το σύστημα αποτελείται από τρία κτίρια σε μορφή Γ, από την περίπτωση δύο απλών όμορων κτιρίων. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι το σύστημα των κτιρίων εξαρτάται από τις παραμέτρους που επηρεάζουν το φαινόμενο της κρούσης, όπως τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κτιρίων, καθώς και από τη θέση των κτιρίων εντός του εξεταζόμενου συστήματος. Επίσης, συμπεραίνεται ότι η καταπόνηση που εισάγεται στο σύστημα είναι συνήθως μειωμένη σε σχέση με το σύνολο των ενεργειών των κτιρίων ξεχωριστά, όταν δεν εμφανίζονται φαινόμενα κρούσης. Αυτό εξηγείται από την ύπαρξη διαφορετικών δυναμικών χαρακτηριστικών κάθε μεμονωμένου κτιρίου σε σχέση με αυτά του συστήματος δύο ή περισσότερων κτιρίων.

Στη μελέτη [19] ερευνάται το φαινόμενο της κρούσης σε σχέση με το επίπεδο και τις απαιτήσεις πλαστιμότητας και τη σεισμική συμπεριφορά πολυώροφων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικά ύψη. Εδικά για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στοιχεία κατανεμημένης πλαστικότητας για τη μελέτη των υποστυλωμάτων και ιδιαίτερα εκείνων που βρίσκονται στην περιοχή της κρούσης.

Εξετάζονται δύο ξεχωριστοί τύποι προβλήματος. Ο τύπος Α έχει να κάνει με συγκρούσεις που αφορούν συγκρουόμενα κτίρια με τα επίπεδα των ορόφων τους στις ίδιες στάθμες. Ο τύπος Β αναφέρεται σε συγκρούσεις κτιρίων με τα επίπεδα των ορόφων τους σε διαφορετικές στάθμες.

Εξετάζονται 72 περιπτώσεις του τύπου Α μεταξύ κατασκευών ανίσου συνολικού ύψους. Μελετάται και παρουσιάζεται με τη μορφή συντελεστών γ_{μ} η επίδραση της κρούσης στις απαιτήσεις πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων στην περιοχή επαφής των κατασκευών. Ο συντελεστής γ_{μ} αντιπροσωπεύει το λόγο των απαιτήσεων πλαστιμότητας λόγω κρούσης, που βέβαια παρουσιάζουν αύξηση, προς τις απαιτήσεις πλαστιμότητας όταν δε συμβαίνει κρούση. Από τις τιμές των συντελεστών που προκύπτουν από μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η κρούση μεταξύ κατασκευών με πλαίσιο σχεδιασμένο σύμφωνα με τους κανονισμούς EC2 και EC8 συνεπάγεται σημαντική αύξηση στις απαιτήσεις πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων στην περιοχή του φαινομένου. Βέβαια, οι απαιτήσεις αυτές δε φαίνεται να είναι κρίσιμες, δηλαδή οι απαιτούμενες τιμές πλαστιμότητας δεν ξεπερνούν τις διαθέσιμες τιμές πλαστιμότητας, για όλες τις περιπτώσεις 8-ορόφων πλαισίων τύπου DCM και DCH που εξετάζονται.
- Η κρούση 8-ορόφων πλαισίων με 4-όροφα πλαίσια με τοιχοποιίες δίνει κρίσιμες τιμές γ_{μ} μόνο στις περιπτώσεις που οι κατασκευές είναι σε επαφή (δεν υπάρχει αρμός μεταξύ τους).
- Η πρόσκρουση 8-ορόφων πλαισίων με 4-όροφα πλαίσια πλήρους ακαμψίας δίνει κρίσιμες τιμές γ_{μ} σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Εξετάζονται 36 περιπτώσεις τύπου Β μεταξύ κατασκευών με άνισα συνολικά ύψη και με τα επίπεδα των ορόφων σε διαφορετικές στάθμες. Από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων των εξεταζομένων περιπτώσεων εξάγονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι απαιτήσεις πλαστιμότητας για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της ψηλότερης κατασκευής, και ειδικά για τις εσωτερικές κατασκευές, αυξάνονται πρακτικά για τους ορόφους που βρίσκονται άνωθεν του υψηλότερου σημείου επαφής των κατασκευών.
- Η τοπική απόκριση των εξωτερικών υποστυλωμάτων της ψηλότερης κατασκευής που υφίσταται κρούση από την πλάκα του ανωτέρου δαπέδου της παρακείμενης χαμηλότερης και πιο δύσκαμπτης κατασκευής δημιουργεί μεγαλύτερες απαιτήσεις πλαστιμότητας.
- Οι απαιτήσεις πλαστιμότητας για το υποστυλώμα που υφίσταται την κρούση πρακτικά είναι ακόμα μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες για τα υπόλοιπα υποστυλώματα. Στις περιπτώσεις όπου δύο κτίρια εφάπτονται το ένα στο άλλο, αυτές οι απαιτήσεις δείχνουν να είναι κρίσιμες. Στις περιπτώσεις που υπάρχει ένα μικρό κενό της τάξεως των 2 cm μεταξύ των κτιρίων, οι απαιτήσεις πλαστιμότητας του συγκεκριμένου υποστυλώματος είναι επίσης υψηλότερες από εκείνες του ίδιου υποστυλώματος χωρίς την παρουσία του φαινομένου. Σε κάθε περίπτωση, οι απαιτήσεις πλαστιμότητας είναι χαμηλότερες από τις διαθέσιμες τιμές πλαστιμότητας και κατά συνέπεια δεν είναι κρίσιμες.
- Σε όλες τις περιπτώσεις οι διατμητικές δυνάμεις της κρίσιμης περιοχής του υποστυλώματος που υφίσταται την κρούση υπερβαίνουν την αντοχή διάτμησης. Συμπερασματικά, στις περιπτώσεις τύπου Β το υποστυλώμα που υφίσταται την κρούση είναι πάντοτε σε κρίσιμη κατάσταση λόγω διάτμησης και, επιπλέον, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι δύο

κατασκευές εφάπτονται η μία της άλλης το υποστύλωμα είναι σε κρίσιμη κατάσταση λόγω των υψηλών απαιτήσεων πλαστιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι κατά το σχεδιασμό πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα για να αντιμετωπισθούν οι αυξημένες απαιτήσεις διάτμησης και οι υψηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας.

Συνοψίζοντας, ισχύει ότι σε περιπτώσεις με μεγάλες πιθανότητες εμφάνισης του φαινομένου της κρούσης η εσκεμμένη παραμέληση ενός τέτοιου ενδεχομένου οδηγεί σε μη συντηρητικό σχεδιασμό νέων κτιρίων ή αποτίμηση υπαρχόντων. Αυτή η παρατήρηση αποκτά ιδιαίτερη σημασία στις περιπτώσεις τύπου Β.

Η μελέτη [18] περιλαμβάνει μη γραμμική ανάλυση της κρούσης λόγω σεισμού δύο κτιρίων ίδιου ύψους με σημαντική διαφοροποίηση στα δυναμικά χαρακτηριστικά τους. Οι κατασκευές προσομοιώνονται ως ανελαστικά πολυβάθμια συστήματα με συγκεντρωμένη μάζα και το μη γραμμικό ιξωδοελαστικό μοντέλο έχει ενσωματωθεί στο μοντέλο των δυνάμεων κρούσης κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων. Η μελέτη αφορά κυρίως στην τρισδιάστατη κρούση δύο τριώροφων όμορων κτιρίων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της απόκρισης των κτιρίων δείχνουν ότι η κρούση λόγω σεισμού έχει μια σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του ελαφρύτερου και πιο εύκαμπτου κτιρίου, κυρίως στην κατά μήκος διεύθυνση. Συγκεκριμένα, προκαλεί σημαντική ενίσχυση της απόκρισης. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της απόκρισης καταδεικνύουν ότι η συμπεριφορά του βαρύτερου και πιο δύσκαμπτου κτιρίου στη διαμήκη, εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση επηρεάζεται ελάχιστα από τις συγκρούσεις μεταξύ των κατασκευών.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής έρευνας αποδεικνύουν ότι η μέγιστη μετατόπιση του ελαφρύτερου και πιο εύκαμπτου κτιρίου είναι πολύ ευάλωτη και στις τρεις διευθύνσεις στην όποια αλλαγή των δομικών χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα η απόσταση μεταξύ των κτιρίων, η μάζα του ορόφου, η δυσκαμψία και η αντοχή έναντι πλαστικής παραμόρφωσης. Από την άλλη, συμπεραίνεται ότι η απόκριση του βαρύτερου και πιο δύσκαμπτου κτιρίου επηρεάζεται ελάχιστα και κυρίως στη διαμήκη διεύθυνση.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Κρούση όμορων κτιρίων λόγω σεισμού και χρήση ειδικών τοιχωμάτων-προσκρουστήρων ως μέτρο ενάντια σε αυτή

Αναφέρθηκαν ήδη μερικά από τα μέτρα που στο παρελθόν έχουν προταθεί ενάντια στην κρούση όμορων κτιρίων λόγω σεισμού. Η μόνη πρακτική λύση από αυτές που αναφέρθηκαν είναι η χρήση ειδικών τοιχωμάτων (collision shear walls-bumpers).

Η λύση αυτή αφορά στην περίπτωση όπου το θέμα της κρούσης μεταξύ των όμορων κτιρίων αποτελεί πρόβλημα αδύνατο να αμεληθεί καθότι ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ώστε η κρούση να οδηγήσει στην έναρξη κατάρρευσης. Δηλαδή, αφορά στην περίπτωση δύο όμορων κτιρίων που έχουν σημαντικά διαφορετικά ύψη, ανισοσταθμία στις πλάκες των ορόφων τους ώστε η πλάκα οροφής του ενός κτιρίου τείνει να διατμήσει τα υποστυλώματα του άλλου κτιρίου.

Τα ειδικά τοιχώματα προτείνονται ως μέτρο που θα περιορίσει τη λύση που προτείνει ο κανονισμός δηλαδή θα μειώσει τον κενό χώρο που συνίσταται να αφήνεται μεταξύ των κτιρίων.

Σα ειδικά τοιχώματα μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση που τα δύο κτίρια κατασκευάζονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους ενώ το ένα εκ των δύο προϋπάρχει και εκτείνεται ως το όριο της γραμμής ιδιοκτησίας. Αυτή η ειδική περίπτωση θα εξεταστεί.

Τα ειδικά τοιχώματα αυξάνουν τη σεισμική αντοχή, δε σταματούν την κρούση αλλά την περιορίζουν καθώς σίγουρα προστατεύουν σε ένα βαθμό τα υποστυλώματα. Εάν τα υποστυλώματα ήταν μόνα τους σίγουρα η βλάβη δεν θα ήταν τοπική. Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα τη χρήση των ειδικών τοιχωμάτων ως μέτρο ενάντια στην κρούση όμορων κτιρίων. Θα εξεταστεί σε τι βαθμό τα τοιχώματα προστατεύουν τα υποστυλώματα και το μέγεθος της βλάβης σε περίπτωση κρούσης, δηλαδή αν η βλάβη είναι τοπική και επισκευάσιμη και αν τελικά χάρη στα τοιχώματα μπορεί να αποφευχθεί η έναρξη αστοχίας και κατάρρευσης.

Η περίπτωση που θα εξεταστεί είναι η περίπτωση που εξετάζεται στη μελέτη [6]. Οι αναλύσεις στη μελέτη αυτή γίνονται με τη χρήση των προγραμμάτων ANSYS και DRAIN-2DX. Στην εργασία αυτή οι αναλύσεις θα γίνουν με την χρήση του προγράμματος ABAQUS 6.10-2, ενώ για την προσομοίωση του κτιρίου Α θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα PATRAN 2010.1.2 .

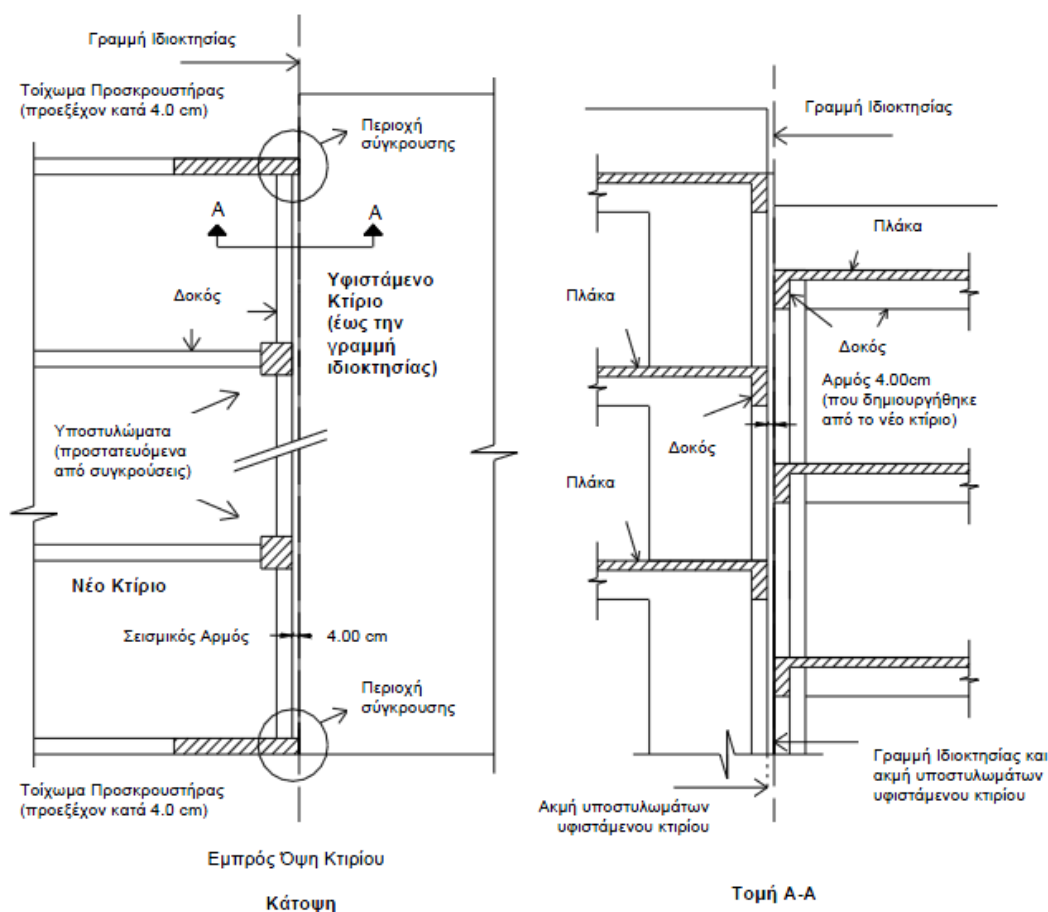
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι για την ίδια αυτή περίπτωση, λαμβάνοντας τις ίδιες παραμέτρους και κάνοντας τις ίδιες παραδοχές, να υπάρξουν συγκρίσιμα

αποτελέσματα τα οποία είτε θα επιβεβαιώσουν είτε όχι τα συμπεράσματα της προηγούμενης εργασίας, ότι δηλαδή η βλάβη στα τοιχώματα είναι τοπική και επισκευάσιμη και δεν οδηγεί σε τυχόν αστοχία. Η παρούσα εργασία διαφέρει σημαντικά ως προς το πρόγραμμα το οποίο επιλέγεται για τις αναλύσεις καθώς επιτρέπει μια πιο αξιόπιστη προσομοίωση του υλικού του τοιχώματος δηλαδή του σκυροδέματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται η περίπτωση κρούσης όμορων κτιρίων με τοιχώματα-προσκρουστήρες που εξετάζεται καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη [6].

2.1.1 Κτίρια που χρησιμοποιούνται στη διερεύνηση

Έστω δύο κτίρια, στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η κάτοψη και η τομή των δύο όμορων κτιρίων στις δύο πλευρές του ορίου της γραμμής ιδιοκτησίας.



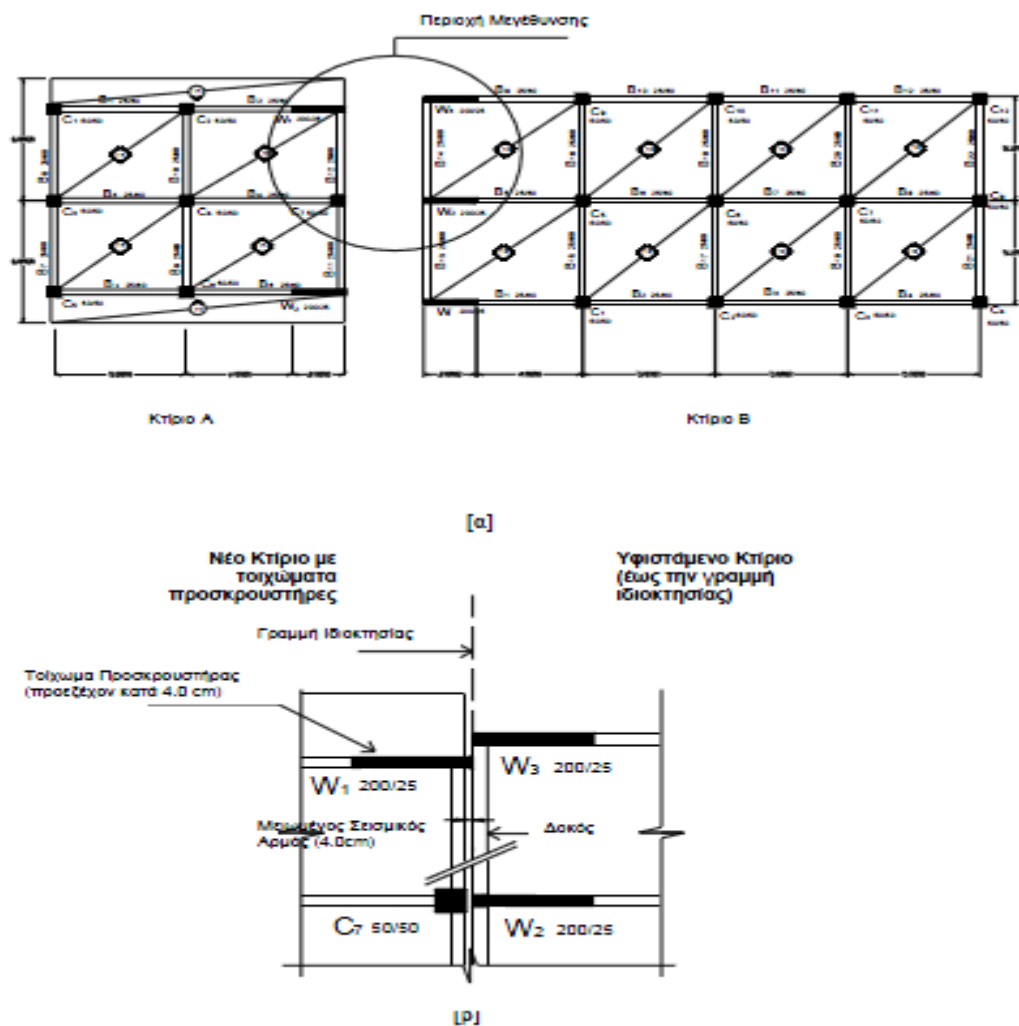
Σχήμα 2.1- Διαμόρφωση των τοιχωμάτων - προσκρουστήρων στη γραμμή ιδιοκτησίας

Το κτίριο στα δεξιά προϋπάρχει και εκτείνεται έως το όριο της γραμμής

ιδιοκτησίας χωρίς να έχει τηρηθεί η ελάχιστη απόσταση -κενός χώρος- που προβλέπει ο κανονισμός. Το κτίριο στα αριστερά είναι μια καινούρια κατασκευή, στην οποία εφαρμόζεται η λύση των ειδικών τοιχωμάτων ώστε να περιοριστεί ο ελάχιστος κενός χώρος που προβλέπει ο κανονισμός.

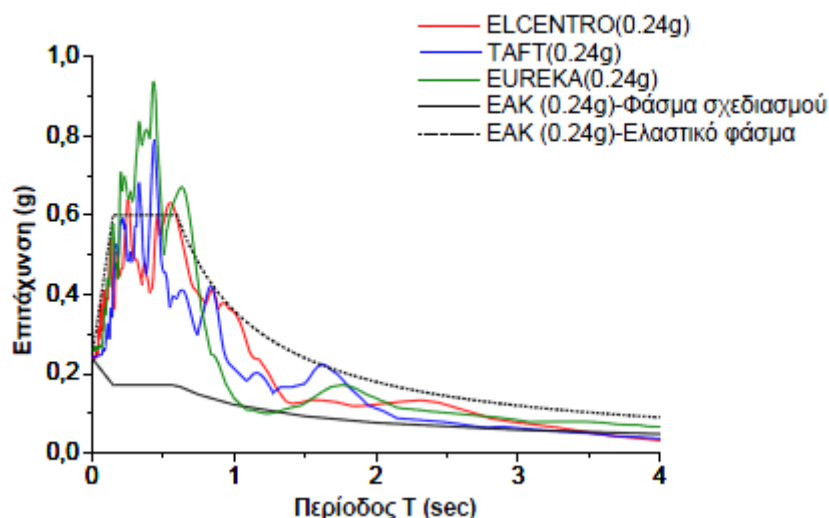
Στο κτίριο αριστερά, στη δεξιά πλευρά, τοποθετούνται δύο τοιχώματα στη διεύθυνση X που λειτουργούν ως τοιχώματα - προσκρουστήρες έναντι του κτιρίου δεξιά. Η μεγάλη πλευρά των τοιχωμάτων είναι κάθετη και εκτείνεται ως το όριο της γραμμής ιδιοκτησίας, ενώ προεξέχουν από την υπόλοιπη κατασκευή (κτίριο αριστερά) η οποία και τοποθετείται 4cm πιο μέσα σε σχέση με το όριο γραμμής ιδιοκτησίας.

Έτσι, χρησιμοποιούνται δύο ειδικά τοιχώματα στο καινούριο κτίριο στα οποία και θα συμβεί η κρούση σε περίπτωση σεισμού και τα οποία ακουμπάνε στη γραμμή ιδιοκτησίας, ενώ πράγματι ο κενός χώρος για την υπόλοιπη κατασκευή περιορίζεται στα 4 εκατοστά.



Σχήμα 2.2 - [α] Κατόψεις κτιρίων Α και Β. [β] Λεπτομέρεια περιορισμένου σεισμικού αρμού και προεξέχοντος τοιχώματος-προσκρουστήρα.

Πρόκειται για δύο κτίρια κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα και σχεδιασμένα σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό και τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος για μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση $a_{gR}=0,24g$ και συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς $\eta=3,5$. Το κτίριο στα δεξιά του σχήματος προϋπάρχει (κτίριο Β), ενώ το κτίριο στα αριστερά είναι η νέα κατασκευή (κτίριο Α). Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το ελαστικό και το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, με βάση τα οποία σχεδιάζονται τα κτίρια για τη συγκεκριμένη εδαφική επιτάχυνση και το συγκεκριμένο συντελεστή συμπεριφοράς. Τα ειδικά τοιχώματα- προσκρουστήρες υπολογίζονται ως συνήθη αντισεισμικά τοιχώματα χωρίς κάποια ιδιαίτερη πρόβλεψη. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και τα φάσματα απόκρισης τριών πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων, El Centro 1940 (NS), Taft 1952 (S69E) και Eureka 1962 (N79E), έτσι ώστε να δίνουν μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση 0,24g. Αυτές οι καταγραφές χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις των δύο κτιρίων με και χωρίς κρούση.



Σχήμα 2.3 - Σύγκριση των φασμάτων απόκρισης των οριζοντίων επιταχύνσεων των σεισμών El Centro, Taft και Eureka με το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού.

2.1.2 Τρία είδη στατικών συστημάτων

Διακρίνονται τα παρακάτω είδη στατικών συστημάτων:

- ΠΛΑΙΣΙΩΤΑ (υποστυλώματα) όπου τα οριζόντια φορτία και ο σεισμός αναλαμβάνονται από χωρικά πλαίσια (δοκοί και υποστυλώματα) των

οποίων η διατμητική αντοχή στη βάση του κτιρίου είναι $\geq 65\%$ της συνολικής.

Το κτίριο εξαιτίας των υποστυλωμάτων παρουσιάζει διατμητική συμπεριφορά (οριζόντια μετακίνηση διατομών χωρίς στροφή-σταθερή διατομή).

- **ΤΟΙΧΩΜΑΤΙΚΑ** (τοιχώματα) όπου πρόκειται για σύστημα πλάστιμων τοιχωμάτων.
Το κτίριο εξαιτίας των τοιχωμάτων παρουσιάζει καμπτική συμπεριφορά (στροφή διατομών-η διατομή δε μένει σταθερή).
- **ΔΙΠΛΑ-ΜΙΚΤΑ** (υποστυλώματα και τοιχώματα)

Τα δύο κτίρια Α και Β ανήκουν στην κατηγορία 3.

Το Κτίριο Α, η καινούρια κατασκευή, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει πέντε ορόφους και είναι σχεδόν τετράγωνο σε κάτοψη. Ο πρώτος όροφος έχει ύψος 4 m και οι υπόλοιποι 3 m. Το συνολικό ύψος του κτιρίου είναι 16 m.
- Τα υποστυλώματα είναι τετραγωνικά 0,5m x 0,5m στους δύο πρώτους ορόφους και 0,4m x 0,4m στους υπόλοιπους.
- Οι δοκοί έχουν διαστάσεις 0,6m(κρέμαση) x 0,25m.
- Το πάχος των πλακών σε όλους τους ορόφους είναι 0,15 m.
- Τα δύο ειδικά τοιχώματα έχουν συνολικό ύψος 16 m και διατομή στην κάτοψη 2 m x 0,25 m.

Το Κτίριο Β, η προϋπάρχουσα κατασκευή, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει πέντε ορόφους. Ο πρώτος όροφος έχει ύψος 3,8 m και οι υπόλοιποι όροφοι 2,8 m. Έχει μικρότερο συνολικό ύψος και είναι πιο ογκώδες (μεγαλύτερη μάζα) σε σχέση με το Κτίριο Α. Αυτό επιλέγεται σκόπιμα, ώστε η πλάκα της οροφής του στη διάρκεια ενός σεισμού να προσκρούει στο μέσο του τελευταίου ορόφου του Κτιρίου Α διατέμνοντάς τα υποστυλώματά του.
Έτσι, λόγω σημαντικής διαφοράς στο συνολικό ύψος και ανισοσταθμίας των πλακών των δύο κτιρίων, μελετάται η δυσμενέστερη περίπτωση κρούσης όμορων κτιρίων, ο πιο καταστροφικός τύπος κρούσης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατάρρευση.
- Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υποστυλωμάτων, των δοκών και των πλακών, ισχύουν τα ίδια με το Κτίριο Α.

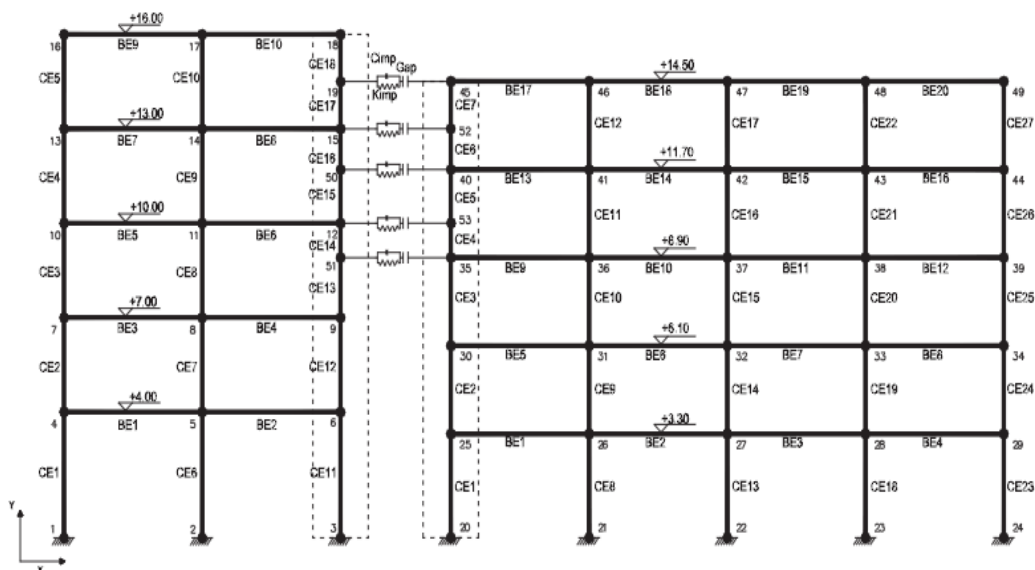
Τα δύο ειδικά τοιχώματα του κτιρίου Α φτάνουν ως το όριο της γραμμής ιδιοκτησίας, όπου φτάνει και όλο το κτίριο Β. Το υπόλοιπο κτίριο Α είναι 4cm πιο μέσα από το όριο.

Η κρούση εντοπίζεται στα ειδικά τοιχώματα, στα οποία χτυπάει η μετακινούμενη λόγω σεισμού πλάκα της οροφής του κτιρίου Β. Έτσι, χάρη στα τοιχώματα προστατεύονται τα υποστυλώματα του κτιρίου Α. Ταυτόχρονα, ακόμα και αν το κτίριο Β είχε υποστυλώματα και όχι τοιχώματα, θα προστατεύονταν και αυτά από την μετακινούμενη λόγω σεισμού πλάκα του κτιρίου Α, αυτόματα, χάρη στο κενό χώρο των 4cm.

Οι πλάκες του κτιρίου Α βρίσκονται πιο μέσα από την γραμμή ιδιοκτησίας κατά 4 cm και έτσι πριν αυτές χτυπήσουν κάποιο κατακόρυφο μέλος του κτιρίου Β, τα τοιχώματα-προσκραυστήρες του κτιρίου Α θα συγκρουστούν με τις πλάκες του Κτιρίου Β.

2.1.3 Μη γραμμική δυναμική απόκριση των δύο κτιρίων: επιπτώσεις της κρούσης

Η διερεύνηση της επίδρασης των συγκρούσεων μεταξύ των δύο κτιρίων βασίζεται σε μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις για 10 sec του σεισμού El Centro, 15 sec του σεισμού Taft και 10 sec του σεισμού Eureka. Καθένα από τα τμήματα αυτά των τριών καταγραφών περιλαμβάνει το ισχυρό μέρος της αντίστοιχης δόνησης. Αφού σε κάθε ένα από τα δύο κτίρια τα πλαίσια είναι ίδια και ο άξονας Χ αποτελεί άξονα συμμετρίας, η διερεύνησή μας αφορά στο επίπεδο, αναλύοντας μόνο ένα πλαίσιο ανά κτίριο και χρησιμοποιώντας το 1/3 της μάζας, έτσι ώστε οι ιδιοπερίοδοι των κτιρίων στην διεύθυνση Χ να παραμένουν ίδιες. Αυτές είναι $T_0=0,466\text{sec}$ για το κτίριο Α και $T_0=0,528\text{sec}$ για το κτίριο Β.



Σχήμα 2.4 - Δισδιάστατο προσομοίωμα για την ανάλυση των συγκρούσεων μεταξύ των κτιρίων Α και Β σε πέντε σημεία επαφής

Η ανάλυση γίνεται με το πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών DRAIN-2DX, σύμφωνα με το μοντέλο των πλαστικών αρθρώσεων για τις δοκούς και τα υποστυλώματα. Για την προσομοίωση των συγκρούσεων χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία ελατηρίου-αποσβεστήρα θεωρώντας πέντε σημεία επαφής στο πάνω μέρος του κτιρίου A, γιατί στους χαμηλότερους ορόφους ο αριθμός των συγκρούσεων και η επίδρασή τους μειώνεται κατά πολύ. Η δυσκαμψία των στοιχείων προσομοίωσης της σύγκρουσης εκτιμάται από την τοπική δυσκαμψία πλάκας-δοκού ίση προς $K_{imp} = 1392096 \text{ kN/m}$ και η σταθερά του αποσβεστήρα θεωρείται ίση προς $C_{imp} = 3192 \text{ kN/m/s}$, τιμή που αντιστοιχεί σε έναν συντελεστή αποκατάστασης $r = 0,65$. Η ανελαστική απόκριση αποτιμάται με το δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής, που ορίζεται ως:

$$\mu_{\theta} = 1 + \frac{\theta_p}{\theta_y}$$

Όπου θ_p είναι η μέγιστη γωνία στροφής της πλαστικής άρθρωσης στα άκρα του μέλους (δοκός ή υποστύλωμα) και θ_y είναι μια τυπική στροφή διαρροής, ίση προς $\theta_y = M_y / 6EI$, για παραμόρφωση του μέλους υπό τη δράση δύο αντισυμμετρικών ροπών στα άκρα.

Αρχικά, τα δύο κτίρια αναλύονται σαν ανεξάρτητες κατασκευές, δηλαδή χωρίς συγκρούσεις και, στη συνέχεια, η ανάλυση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και τις συγκρούσεις Σχήμα 2.4.

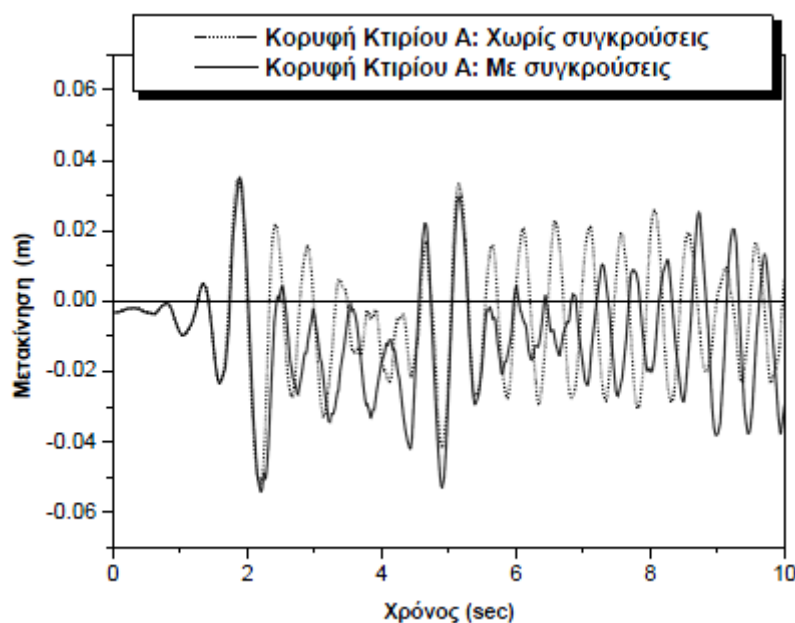
Τα Σχήματα 2.5 και 2.6 απεικονίζουν τις χρονοϊστορίες μετακινήσεων της κορυφής των κτιρίων A και B, με και χωρίς συγκρούσεις, αντιστοίχως, για διέγερση με την καταγραφή του σεισμού El Centro. Παρατηρούμε μια μικρή αύξηση της μέγιστης μετατόπισης κορυφής και των δύο κτιρίων σαν αποτέλεσμα της επίδρασης των συγκρούσεων.

Στο κτίριο A η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής χωρίς συγκρούσεις είναι 5,2cm ενώ με συγκρούσεις 5,4cm (αύξηση ~ 4%) ενώ στο κτίριο B οι αντίστοιχες μέγιστες μετατοπίσεις είναι 5.3cm και 5.4cm (αύξηση ~ 2%).

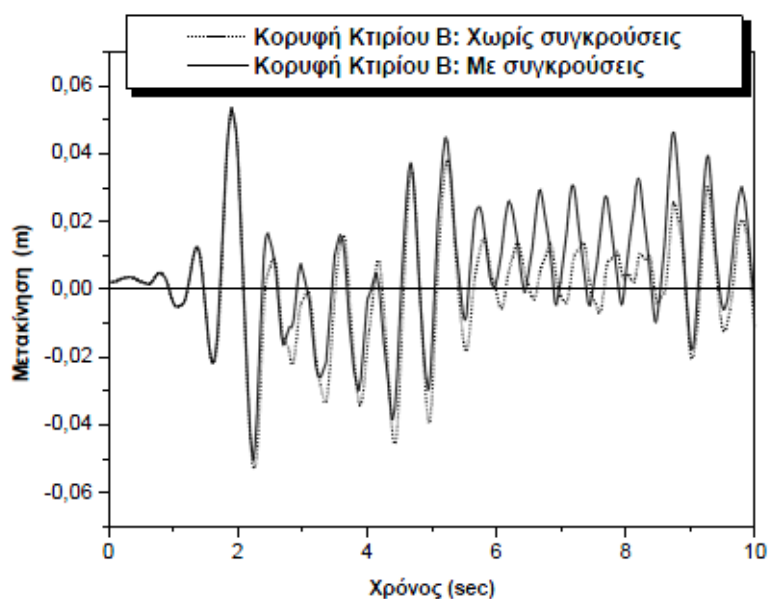
Στα Σχήματα 2.7 και 2.8 παρουσιάζεται η επίδραση των συγκρούσεων στις απαιτήσεις πλαστιμότητας των δοκών και των υποστυλωμάτων των δύο κτιρίων, καθώς και η καθ' ύψος κατανομή τους. Μόνο τα αποτελέσματα των μελών σε σημεία εκτός των περιοχών σύγκρουσης είναι αξιόπιστα για τη διερεύνησή μας γιατί η προσομοίωση των πλαισίων των κτιρίων με πρισματικά μέλη δεν αποτελεί καλή προσέγγιση της τοπικής βλάβης στα σημεία συγκρούσεων. Παρατηρείται ότι η επίδραση των συγκρούσεων στην απαίτηση πλαστιμότητας γωνιών στροφής περιορίζεται στις δοκούς των κτιρίων, δηλαδή σε μέλη που εξ αρχής σχεδιάζονται κατάλληλα, ώστε να έχουν πλάστιμη συμπεριφορά. Αυτές οι αυξήσεις είναι γενικά κάτω του ~25%, ενώ στα υποστυλώματα είναι

αμελητέες.

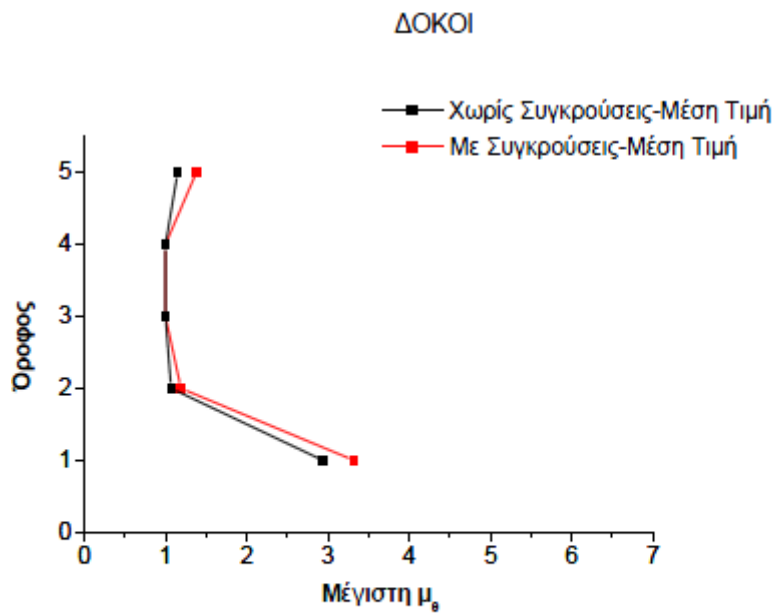
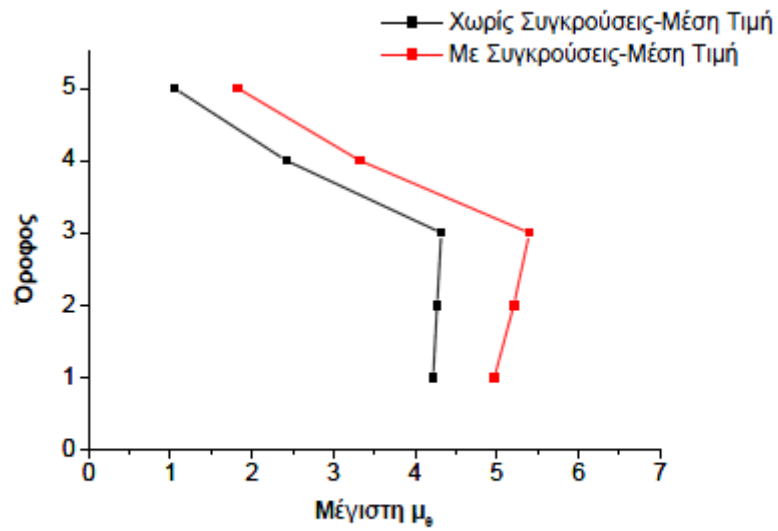
Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η αύξηση της απαίτησης πλαστιμότητας στα μέλη δεν είναι πολύ υψηλή, προκύπτει ότι μακριά από τα σημεία συγκρούσεων δεν έχω αξιόλογη επιβάρυνση και ότι το πρόβλημα εντοπίζεται τοπικά στα σημεία συγκρούσεων. Άρα, η χρήση των τοιχωμάτων-προσκραυστήρων μπορεί να είναι μια αποδεκτή λύση, υπό την προϋπόθεση ότι και η τοπική τους βλάβη είναι επίσης εντός αποδεκτών ορίων και άρα επισκευάσιμη.



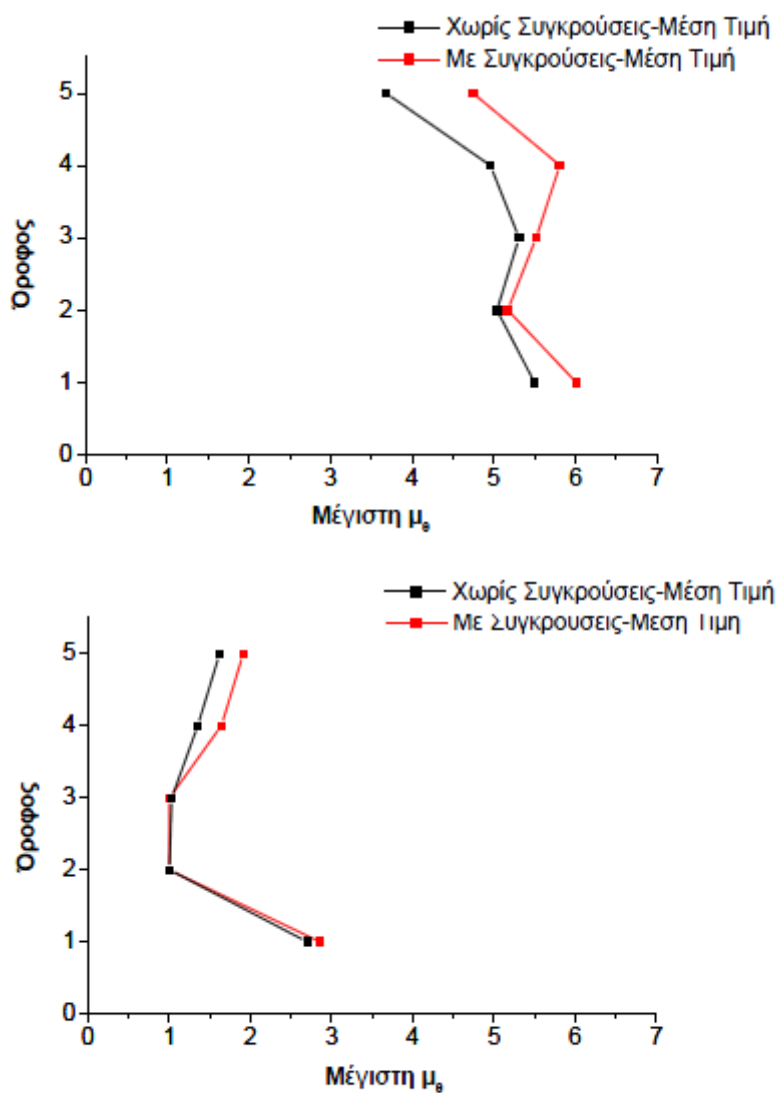
Σχήμα 2.5- Οριζόντια μετακίνηση της οροφής του κτιρίου A για το σεισμό του El Centro



Σχήμα 2.6- Οριζόντια μετακίνηση της οροφής του κτιρίου B για το σεισμό του El Centro



Σχήμα 2.7- Μέση μέγιστη τιμή του συντελεστή πλαστιμότητας γωνιών στροφής στο κτίριο Α με και χωρίς συγκρούσεις



ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

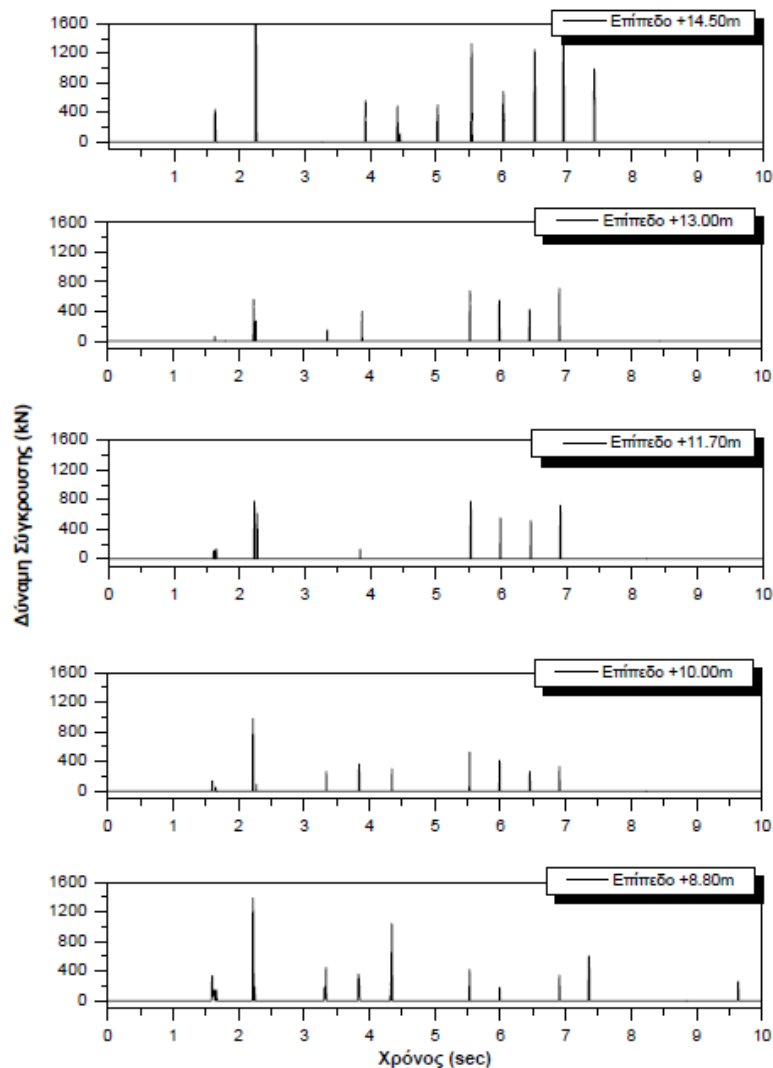
Σχήμα 2.8- Μέση μέγιστη τιμή του συντελεστή πλαστιμότητας γωνιών στροφής στο Κτίριο Β με και χωρίς συγκρούσεις

2.1.4 Τοπική ζημία λόγω κρούσης

Καθώς τα τοιχώματα-προσκραυστήρες προτείνονται ως εναλλακτική λύση αντί του σεισμικού αρμού, η τοπική τους βλάβη λόγω κρούσης πρέπει να διερευνηθεί με λεπτομέρεια για να διαπιστωθεί αν είναι εντός αποδεκτών ορίων και επισκευάσιμη. Αυτό γίνεται με χρήση του προγράμματος ανάλυσης κατασκευών ANSYS και χρήση δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων στα σημεία συγκρούσεων.

2.1.5 Προσομοίωση της κρούσης με δύναμη κρούσης

Για την ανάλυση με το λεπτομερές προσομοίωμα του προγράμματος ANSYS, εκτιμάται μια δύναμη κρούσης η οποία και εφαρμόζεται στο μέσο του ύψους του τελευταίου ορόφου του κτιρίου A. Η εκτίμηση αυτή έχει ως εξής : οι δυνάμεις κρούσης είναι μια σειρά από σχεδόν τριγωνικού σχήματος αιχμές, πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (δυναμική φόρτιση – κρούση). Η χρονική διάρκεια αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της δυσκαμψίας του στοιχείου που προσομοιώνει τη σύγκρουση, ενώ η τιμή της δύναμης αυξάνει ανάλογα με αυτήν, με αποτέλεσμα η ώθηση να παραμένει πρακτικά σταθερή. Στο Σχήμα 2.9 δίνεται η σειρά των δυνάμεων κρούσης του τελευταίου ορόφου των κτιρίων A και B κατά τη διάρκεια του σεισμού El Centro, από την οποία παρατηρούμε μια μέγιστη δύναμη της τάξης των 1600kN.

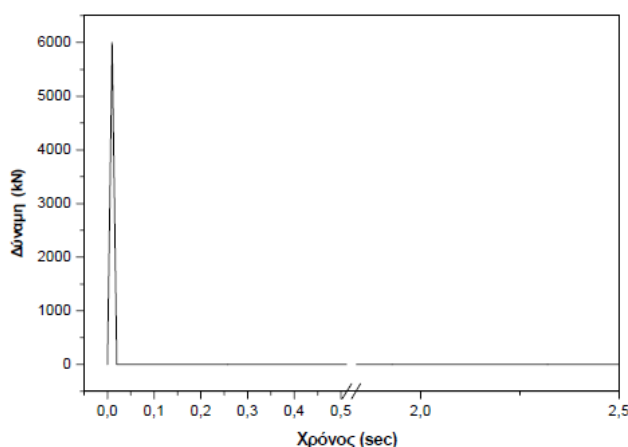


Σχήμα 2.9 - Δυνάμεις σύγκρουσης στα πέντε σημεία επαφής καθ'ύψος του τοιχώματος-προσκρουστήρα του κτιρίου A

Έστω ότι μια μάζα m κινούμενη με ταχύτητα v_0 συγκρούεται με ένα τοίχωμα και ότι μετά την σύγκρουση η ταχύτητά της γίνεται μηδέν, ισχύει για την δύναμη σύγκρουσης F_i :

$$\int_i^{\Delta t} F_i dt = mv_0(1+e)$$

όπου e , ο συντελεστής αποκατάστασης και Δt η διάρκεια κρούσης. Αν επίσης ότι η δύναμη κρούσης έχει τριγωνική μεταβολή με μέγιστη τιμή $F_{i,max}$, προκύπτει ότι $F_{i,max} = 4mv_0 / \Delta t$, όπου έχει υποτεθεί ότι το e έχει την μέγιστη τιμή του, δηλαδή $e=1,0$. Από το φάσμα σχεδιασμού του Κανονισμού και για χαρακτηριστικές τιμές των περιόδων $T=0,4sec$, $T=0,6sec$, και $T=0,8sec$, που αντιστοιχούν στις τρεις περιοχές του φάσματος, μπορεί κανείς να εκτιμήσει τυπικές τιμές για το v_0 . Για μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση ίση με $0,24g$ λαμβάνουμε $S_v = 0,375$ m/s, $0,56$ m/s και $0,6$ m/s για κάθε μία από τις τρεις ιδιοπερίοδους, αντιστοίχως. Με βάση αυτό το εύρος τιμών, που αντιπροσωπεύει υψηλές τιμές ταχυτήτων σύγκρουσης, υποθέτουμε μια τιμή $v_0=0,6m/s$ που αντιστοιχεί σε επιτάχυνση σχεδιασμού $0,24g$ για μια ιδιοπερίοδο $T=0,8sec$. Εάν επιπλέον υποθέσουμε ότι έχουμε μια πλάκα ορόφου μάζας 120 tn, συντελεστή αποκατάστασης $e=0,65$ και χρονική διάρκεια σύγκρουσης ίση με $0,02sec$, υπολογίζουμε μια μέγιστη δύναμη σύγκρουσης $F_{max}=11880$ kN. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τουλάχιστον δύο τοιχώματα-προσκρουστήρες θα δέχονται την δύναμη κρούσης η δύναμη κρούσης ανά τοίχωμα είναι ~ 6000 kN, για χρονική διάρκεια κρούσης $0,02sec$ – Σχήμα 2.10.



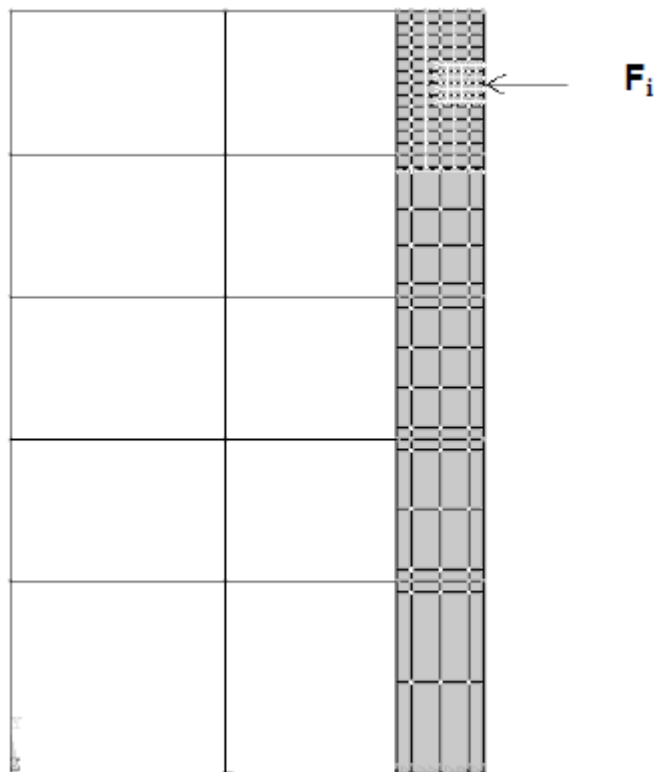
Σχήμα 2.10 - Διάγραμμα της τριγωνικής δύναμης σύγκρουσης των 6000 kN σε 0,02 sec και συνολικού χρόνου ανάλυσης 2,5 sec

Η δύναμη κρούσης που εκτιμάται παραπάνω συγκρινόμενη με τη μέγιστη δύναμη που υπολογίζεται από την ανάλυση για το σεισμό του El Centro, δηλ. ~ 1600 kN προκύπτει σχεδόν τετραπλάσια. Πρόκειται για μια σημαντική συντηρητική υπερεκτίμηση.

2.1.6 Προσομοίωμα της ανάλυσης και αποτελέσματα

Για την ανάλυση χρησιμοποιείται ένα από τα πλαίσια του κτιρίου A κατά τον άξονα X -Σχήμα 2.11. Γίνεται διακριτοποίηση του τοιχώματος με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, πιο πυκνά τοποθετημένα στην περιοχή της εφαρμογής της δύναμης κρούσης και πιο αραιά μακριά από αυτή. Στο σκυρόδεμα λαμβάνεται ως ελαστοπλαστικό υλικό με διαφορετική αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη και με εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Drucker-Prager. Συγκεκριμένα, η ποιότητα σκυροδέματος είναι C20/25 με θλιπτική αντοχή 20 MPa και εφελκυστική αντοχή 2,2 MPa. Ο οπλισμός του τοιχώματος, που αποτελείται από ράβδους χάλυβα S500 με όριο διαρροής 500 MPa, προσομοιώνεται με την βοήθεια μονοδιάστατων διγραμμικών στοιχείων με κράτυνση 3%. Ο διαμήκης οπλισμός του τοιχώματος αποτελείται από πέντε ευθείες παράλληλες προς τον άξονα του τοιχώματος, ενώ ο εγκάρσιος οπλισμός του τοιχώματος εντοπίζεται κατά μήκος των οριζοντίων γραμμών του δικτύου των πεπερασμένων στο τοίχωμα. Όλα τα υπόλοιπα μέλη του πλαισίου προσομοιώνονται σαν πρισματικά γραμμικά ελαστικά μέλη. Τα παραπάνω αφορούν στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και το πρόγραμμα ANSYS.

Γίνεται, επίσης, και ανάλυση του πλαισίου του κτιρίου A για την τριγωνική δύναμη κρούσης, με την βοήθεια του προγράμματος DRAIN-2DX. Υπολογίζονται οι τιμές των δεικτών πλαστιμότητας γωνιών στροφής των δοκών και των υποστυλωμάτων του πλαισίου. Το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για αυτή την ανάλυση είναι το ίδιο προσομοίωμα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της σεισμικής απόκρισης των δύο κτιρίων. Το τριγωνικό φορτίο εφαρμόζεται σε ένα μήκος 0,50m, με το κέντρο του να βρίσκεται στο μέσον του ύψους του τελευταίου ορόφου του τοιχώματος-προσκρουστήρα. Με χρονική διάρκεια κρούσης 0,02 sec η ανάλυση έγινε για συνολικό χρόνο 2,5 sec.



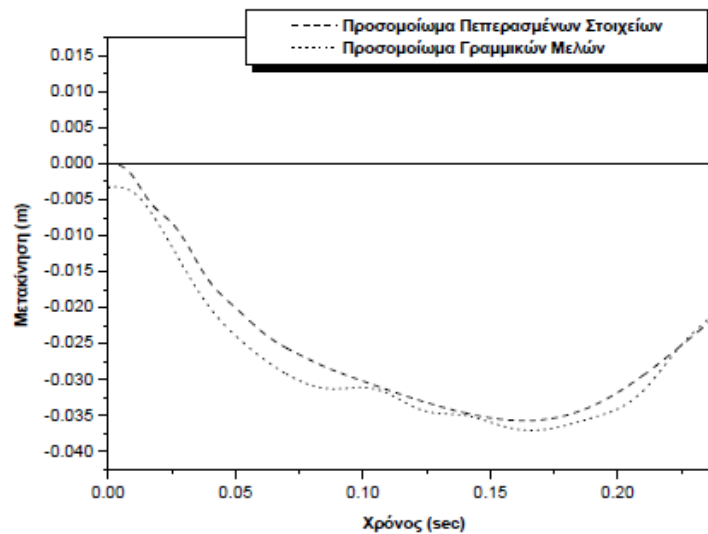
Σχήμα 2.11- Το προσομοίωμα του κτιρίου A από μοντέλο δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS)

Τα αποτελέσματα από τις δύο αναλύσεις δίνονται στα Σχήματα 2.12, 2.13 και 2.14. Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζεται η μετακίνηση του μεσαίου κόμβου της κορυφής του τοιχώματος, όπως αυτή υπολογίζεται από την ανάλυση της τριγωνικής δύναμης κρούσης με τα προγράμματα ANSYS και DRAIN-2DX. Δεν υπάρχει αξιόλογη διαφορά στα αποτελέσματα, ώστε η ανελαστική συμπεριφορά των δοκών και των υποστυλωμάτων του πλαισίου που αγνοείται στην ανάλυση του ANSYS, έχει μικρή επιρροή στην απόκριση του τοιχώματος.

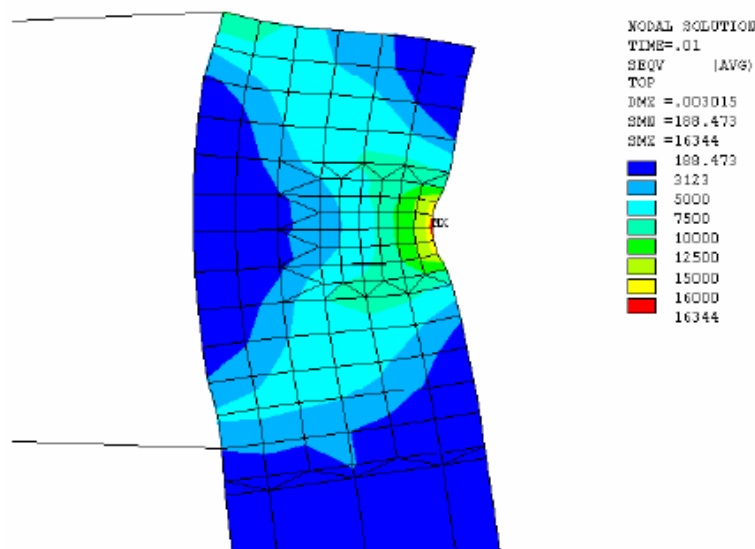
Στο Σχήμα 2.13 δίνεται η κατανομή της ισοδύναμης τάσης στο σημείο κρούσης σε χρόνο 0,01sec, δηλαδή τη χρονική στιγμή της μέγιστης δύναμης. Οι αντίστοιχοι λόγοι της ισοδύναμης τάσης προς την τάση διαρροής του κριτηρίου Drucker-Prager κυμαίνονται από 1,13 στην εφελκυσόμενη ζώνη σε 2,56 στην θλιβόμενη ζώνη του τοιχώματος, υποδεικνύοντας τοπική αστοχία του σκυροδέματος στις περιοχές μέγιστης ισοδύναμης τάσης. Διαρροή του οπλισμού υπολογίζεται και στις δύο παρειές του τοιχώματος στην περιοχή της κρούσης.

Στις περιοχές του πλαισίου που βρίσκονται μακριά από την περιοχή κρούσης, τα αποτελέσματα προκύπτουν από την ανελαστική δυναμική ανάλυση με το πρόγραμμα DRAIN-2DX, ως δείκτες πλαστιμότητας γωνιών στροφής – Σχήμα 2.14. Οι τιμές αυτές των δεικτών βρίσκονται εντός των αναμενόμενων τιμών που μπορεί να εμφανισθούν κατά την διάρκεια μιας ανελαστικής σεισμικής

ανάλυσης και είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες τιμές από την ανάλυση συγκρούσεων μεταξύ των δύο κτιρίων για το σεισμό El Centro.

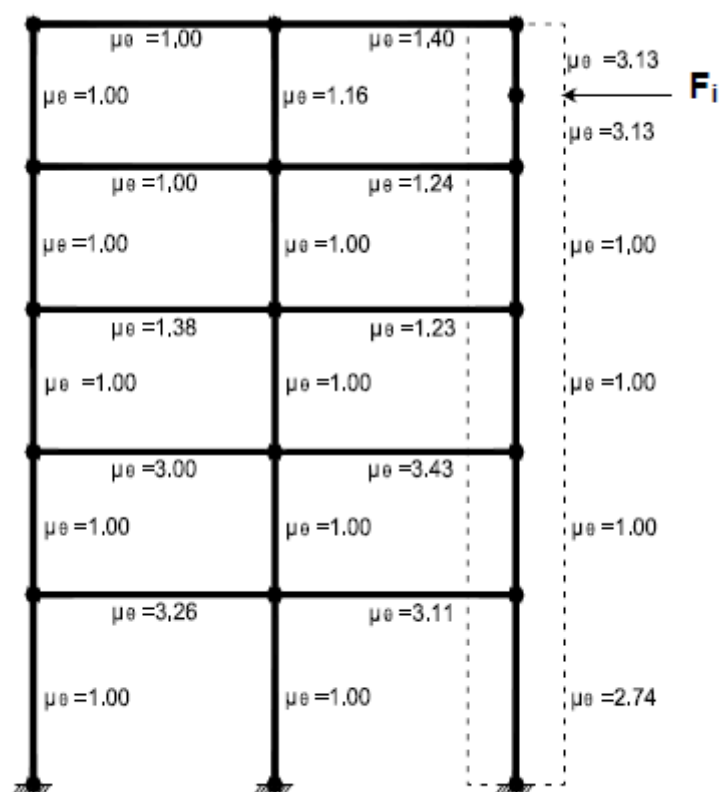


Σχήμα 2.12- Η οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του κτιρίου Α, όπως υπολογίστηκε με τα δυο διαφορετικά προσομοιώματα του ANSYS και του DRAIN-2DX



Σχήμα 2.13- Η ισοδύναμη τάση σ_e του τοιχώματος-προσκρουστήρα τη χρονική στιγμή 0.01 sec

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τα τοιχώματα-προσκρουστήρες εμφανίζουν μια περιορισμένη έκταση βλαβών στα σημεία των συγκρούσεων και μάλιστα πρόκειται για βλάβες επισκευάσιμες που δεν οδηγούν σε αστοχία.



Σχήμα 2.14-Συντελεστές πλαστιμότητας γωνιών στροφής στα μέλη του Κτιρίου Α (DRAIN-2DX)

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τη μελέτη [6] η χρήση καλά οπλισμένων αντισεισμικών τοιχωμάτων, ως ειδικών τοιχωμάτων - προσκρουστήρων, αποτελεί μια πρακτική λύση αντί του σεισμικού αρμού που οι νέοι Κανονισμοί απαιτούν μεταξύ γειτονικών κτιρίων. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας επιλογής είναι :

- Μπορεί να ελαχιστοποιήσει το εύρος του σεισμικού αρμού.
- Μπορεί να προστατέψει και τα δύο κτίρια από τη δυσμενέστερη περίπτωση κρούσης όμορων κτιρίων, τον πιο καταστροφικό τύπο κρούσης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατάρρευση δηλαδή τον εμβολισμό τους από τις γειτονικές πλάκες, ακόμα και εάν το ένα από τα δύο κτίρια είναι ήδη κατασκευασμένο μέχρι το όριο ιδιοκτησίας (δηλαδή χωρίς πρόβλεψη σεισμικού αρμού).
- Ως συνήθη στοιχεία του Φέροντος Οργανισμού, τα τοιχώματα – προσκρουστήρες φαίνεται ότι μπορούν να αντέξουν τις δυνάμεις σύγκρουσης, εμφανίζοντας τοπικού χαρακτήρα επισκευάσιμες βλάβες.
- Μακριά από τα σημεία επαφής, οι συγκρούσεις δεν θέτουν σε ουσιαστικό κίνδυνο άλλα μέλη του δομικού συστήματος των κτιρίων, άρα δεν

οδηγούν σε αστοχία της κατασκευής.

- Οι συγκρούσεις στα τοιχώματα-προσκραυστήρες δημιουργούν αιχμές υψηλών τιμών επιταχύνσεων και μικρής χρονικής διάρκειας, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στο περιεχόμενο του κτιρίου, αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα αγκύρωσής του. Τέτοια μέτρα πάντως δεν αναμένεται να διαφέρουν σημαντικά από αντίστοιχα που αφορούν την προστασία του περιεχομένου των κτιρίων σε σεισμούς όπου δεν εμφανίζεται το φαινόμενο.

Στην παρούσα εργασία, θεωρώντας την περίπτωση της μελέτης [6] και λαμβάνοντας υπόψη τα ίδια δεδομένα και παραδοχές, δημιουργούνται τέσσερις προσομοιώσεις του κτιρίου Α, οι οποίες αναλύονται με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.10-2. Στόχος της εργασίας είναι να υπάρξουν συγκρίσιμα αποτελέσματα που θα επιβεβαιώσουν τα παραπάνω συμπεράσματα, δίνοντας τους ακόμα μεγαλύτερη αξιοπιστία ή θα τα διαψεύσουν.

2.2 Θεωρία Υλικών

2.2.1 Εισαγωγή

Ορισμένες φορές γίνεται η παραδοχή ότι κάποια υλικά συμπεριφέρονται με εξιδανικευμένο τρόπο με στόχο την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων. Συνήθως, η εξιδανίκευση της συμπεριφοράς ενός υλικού βασίζεται σε δύο παραμέτρους:

- Η ελαστική και πλαστική περιοχή διαχωρίζονται απόλυτα μεταξύ τους στο όριο διαρροής.
- Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων υποτίθεται γραμμική ακόμα και στην πλαστική περιοχή.

Με βάση αυτές τις παραδοχές ορίζονται τα παρακάτω υλικά : Γραμμικώς Ελαστικό Υλικό, Ελαστικό – Απολύτως Πλαστικό Υλικό και Ελαστικό – Γραμμικώς Κρατυνόμενο Υλικό.

Πέρα από τα υλικά που αναφέρθηκαν, γίνεται χρήση και του μη – γραμμικού υλικού Damaged Plasticity Concrete για την ακριβέστερη προσομοίωση του υλικού των ειδικών τοιχωμάτων.

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

2.2.2 Γραμμικώς Ελαστικό Υλικό

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις περιπτώσεις που οι τιμές των τάσεων είναι πολύ μικρές, άρα και οι τιμές των παραμορφώσεων θα είναι μικρές, ώστε να μην υπάρχουν πλαστικές παραμορφώσεις αλλά μόνο ελαστικές. Συνήθως οι παραμορφώσεις είναι μικρότερες από 5%. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο (υλικό με μηχανικές ιδιότητες σταθερές καθ'όλες τις διευθύνσεις), ορθότροπο ή ανισότροπο. Το υλικό ουσιαστικά εργάζεται κάτω του ορίου διαρροής.

Ορισμός συμπεριφοράς γραμμικώς ελαστικού υλικού-ισότροπου

Η συνολική τάση ορίζεται από τη συνολική ελαστική παραμόρφωση μέσω της σχέσης:

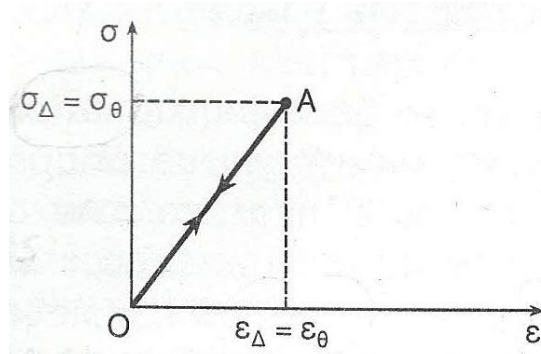
$$\sigma = D^{el} \varepsilon^{el}$$

ή

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

Άρα, αρκεί να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας του Young E και ο λόγος Poisson ν . Οι ελαστικές αυτές σταθερές χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των υλικών αυτής της κατηγορίας, η οποία και είναι αντιστρεπτή (φόρτιση=αποφόρτιση) – Σχήμα 2.15. Το μέτρο διατμήσεως G δίνεται από τη σχέση :

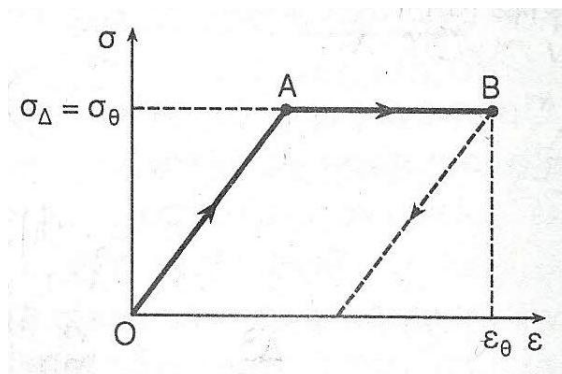
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



Σχήμα 2.15 – Συμπεριφορά Γραμμικώς Ελαστικού Υλικού

2.2.3 Ελαστικό – Απολύτως Πλαστικό Υλικό

Σε αυτή την κατηγορία υλικών το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο ευθείες: μία έως την τάση διαρροής (τμήμα OA) που αντιστοιχεί σε γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά και άλλη μία οριζόντια από το A μέχρι τη θραύση, όπου η παραμόρφωση αυξάνει, ενώ η τάση παραμένει σταθερή. Η συμπεριφορά των υλικών αυτών δεν είναι εξ ολοκλήρου αντιστρεπτή και σε αυτή την κατηγορία εξιδανικεύονται υλικά με ασθενή κράτυνση.



Σχήμα 2.16 – Συμπεριφορά Ελαστικού – Απολύτως Πλαστικού Υλικού

2.2.4 Ελαστικό – Γραμμικώς Κρατυνόμενο Υλικό

Σε αυτή την κατηγορία υλικών το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι το διάγραμμα παραμορφώσεων ενός γραμμικώς ελαστικού υλικού μέχρι το όριο διαρροής, το οποίο επιδεικνύει γραμμική κράτυνση σε μεγαλύτερες τάσεις. Στην περιοχή κράτυνσης του υλικού ισχύει κατά τη φόρτιση μια αναλογία μεταξύ

μεταβολών των τάσεων και παραμορφώσεων, με συντελεστή αναλογίας το εφαπτομενικό μέτρο:

$$E_\varepsilon = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad \text{ή} \quad d\varepsilon = \frac{d\sigma}{E_\varepsilon}$$

Κατά την κράτυνση δεν επέρχεται μόνο πλαστική παραμόρφωση, αλλά αυξάνει και η ελαστική παραμόρφωση κατά ποσό ανάλογο προς την αύξηση της τάσεως. Είναι δηλαδή:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^\pi$$

Ισχύει όμως:

$$d\varepsilon^e = \frac{d\sigma}{E} \quad \text{και} \quad d\varepsilon^\pi = \frac{d\sigma}{E_\pi}$$

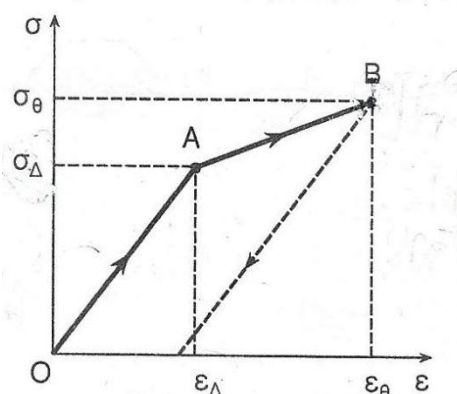
Σύμφωνα με τα παραπάνω, ισχύει:

$$d\varepsilon^\pi = d\varepsilon - d\varepsilon^e = \frac{1}{E_\pi} d\sigma$$

Δηλαδή, και η αύξηση της πλαστικής παραμορφώσεως γίνεται με ένα πλαστικό μέτρο E_π , τέτοιο ώστε $E_\pi = d\sigma / d\varepsilon^\pi$ και ισχύει

$$E_\pi = \frac{EE_\varepsilon}{E - E_\varepsilon}$$

Και εδώ η αποφόρτιση, μετά το σημείο διαρροής δεν ακολουθεί πορεία αντίστροφη προς την αρχική OA, της φορτίσεως, αλλά μία ευθεία δια του B παράλληλη στην OA. Η αποφόρτιση είναι γραμμικώς ελαστική, με το λόγο των μεταβολών των τάσεων και παραμορφώσεων ίσο με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 2.17 – Συμπεριφορά Ελαστικού – Γραμμικώς Κρατυνόμενου Υλικού

2.2.5 Υλικό Damaged Plasticity

2.2.5.1 Γενικά

Το μοντέλο υλικού Damaged Plasticity στα ελληνικά μπορεί να αποδοθεί ως μοντέλο πλαστικότητας υλικού με βλάβες. Χάριν συντομίας, το υλικό αυτό θα αναφέρεται ως Υλικό Damaged Plasticity. Το συγκεκριμένο μοντέλο :

- παρέχει δυνατότητα μοντελοποίησης σκυροδέματος και άλλων οιονεί ψαθυρών υλικών σε όλους τους τύπους των κατασκευών (δοκοί, δικτυώματα, κελύφη, και στερεά (solids),
- χρησιμοποιεί τις έννοιες της ισότροπης ελαστικότητας με βλάβες (isotropic damaged elasticity) σε συνδυασμό με την ισότροπη εφελκυστική και θλιπτική πλαστικότητα (isotropic tensile and compressive plasticity), ώστε να μπορεί να αναπαραστήσει την ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος,
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άοπλο σκυρόδεμα (plain concrete), αν και προορίζεται κυρίως για την ανάλυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα,
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ράβδους οπλισμού για να προσομοιώσει τον οπλισμό του σκυροδέματος,
- είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές στις οποίες το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε μονοτονική, κυκλική και/ή δυναμική φόρτιση υπό μικρές τάσεις περίσφιγξης (low confining pressures),
- αποτελείται από το συνδυασμό των ασυσχέτιστων (nonassociated) μεταξύ τους μεγεθών της πλαστικότητας πολυ-σκλήρυνσης (multi-hardening plasticity) και της μονοδιάστατης/βαθμωτής (ισοτροπικής) ελαστικότητας που έχει υποστεί βλάβες (scalar (isotropic) damaged elasticity) για να περιγράψει τη μη αναστρέψιμη βλάβη που συμβαίνει κατά τη διαδικασία της θραύσεως (fracturing process),
- επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν τα αποτελέσματα ανάκτησης δυσκαμψίας (stiffness recovery effects) κατά τη διάρκεια των αντιστροφών της κυκλικής φόρτισης (cyclic load reversals),
- μπορεί να οριστεί, ώστε να μεταβάλλεται από αλλαγές στο ρυθμό παραμόρφωσης (sensitive to the rate of straining),
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με μια ιξωδοπλαστική κανονικοποίηση (viscoplastic regularization) των καταστατικών εξισώσεων του Abaqus/Standard ώστε να βελτιωθεί το ποσοστό σύγκλισης (convergence rate) στο φθιτό κλάδο (softening regime),
- προϋποθέτει ότι η ελαστική συμπεριφορά του υλικού είναι ισότροπη και γραμμική.

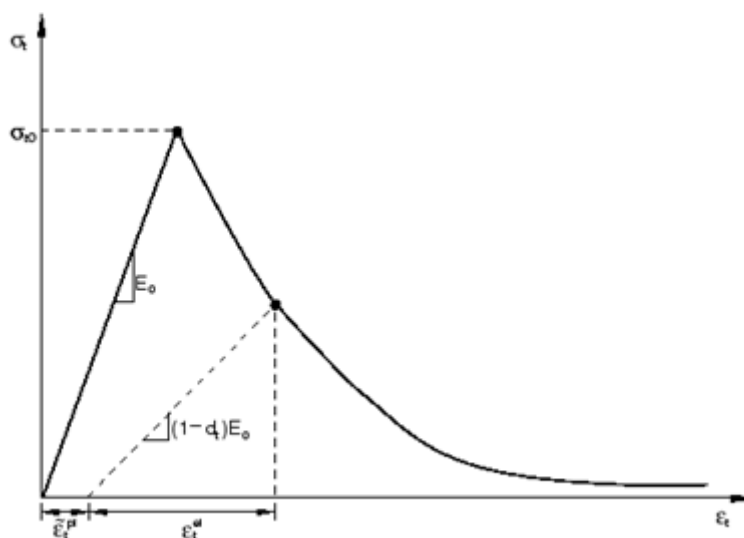
2.2.5.2 Μηχανική Συμπεριφορά

2.2.5.2.1 Γενικά

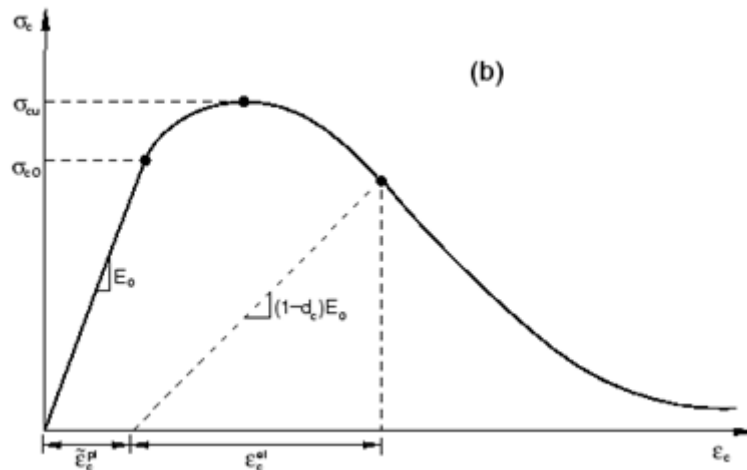
Το DAMAGED PLASTICITY είναι ένα συνεχές μοντέλο βλάβης του σκυροδέματος που βασίζεται στην πλαστικότητα (continuum, plasticity-based, damage model for concrete). Υποθέτει ότι οι δύο κύριοι μηχανισμοί αστοχίας είναι θραύση λόγω εφελκυσμού και θραύση λόγω θλίψεως του υλικού σκυροδέματος. Η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής (ή αστοχίας) ελέγχεται από δύο μεταβλητές (hardening invariables), $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ και $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$, οι οποίες συνδέονται με του μηχανισμούς αστοχίας υπό εφελκυσμό και θλίψη, αντίστοιχα. Αναφερόμαστε στα $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ και $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ ως εφελκυστική και θλιπτική ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, αντίστοιχα. Στις ακόλουθες ενότητες αναφέρονται οι βασικές παραδοχές σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

2.2.5.2.2 Συμπεριφορά υπό μονοαξονικό εφελκυσμό και μονοαξονική θλίψη

Το μοντέλο υποθέτει ότι η μονοαξονική εφελκυστική και θλιπτική απόκριση του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται από πλαστικότητα που έχει υποστεί βλάβες (damaged plasticity), όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.18, 2.19.



Σχήμα 2.18 - Απόκριση του σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση υπό εφελκυσμό



Σχήμα 2.19 - Απόκριση του σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση υπό θλίψη.

Υπό μονοαξονικό εφελκυσμό η απόκριση τάσεων-παραμορφώσεων είναι γραμμικώς ελαστική μέχρι να πάρει την τιμή της τάσεως θραύσεως, σ_{t0} . Η τάση θραύσεως αντιστοιχεί στην έναρξη δημιουργίας μικρο-ρωγμών στο υλικό του σκυροδέματος. Πέρα από την τάση αστοχίας ο σχηματισμός των μικρορωγμών παρουσιάζεται μακροσκοπικά με το φθιτό κλάδο απόκρισης του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, που επιφέρει τοπική παραμόρφωση στην κατασκευή από σκυρόδεμα. Υπό μονοαξονική θλίψη, η απόκριση είναι γραμμική μέχρι και την τιμή της πρώτης διαρροής, σ_{c0} . Στην πλαστική περιοχή (plastic regime) η απόκριση χαρακτηρίζεται συνήθως από σκλήρυνση τάσεων (stress hardening) μέχρι και τη μέγιστη τάση, σ_{cu} . Πέρα από αυτή την τιμή της τάσης, ακολουθεί ο φθιτός κλάδος (strain softening) στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων. Αυτή η μοντελοποίηση, αν και είναι απλοποιημένη, συγκεντρώνει τα κύρια χαρακτηριστικά της απόκρισης του σκυροδέματος.

Θεωρείται ότι οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων υπό μονοαξονική καταπόνηση μπορούν να μετατραπούν σε καμπύλες τάσεων-πλαστικών παραμορφώσεων. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται αυτόματα από το Abaqus σύμφωνα με τα δεδομένα τάσεων-«ανελαστικών» παραμορφώσεων, που παρέχονται από το χρήστη, όπως εξηγείται παρακάτω. Έτσι,

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \sigma_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \dot{\tilde{\varepsilon}}_t^{pl}, \theta, f_i), \\ \sigma_c &= \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \dot{\tilde{\varepsilon}}_c^{pl}, \theta, f_i),\end{aligned}$$

όπου οι συντελεστές t και c αναφέρονται σε εφελκυσμό και θλίψη, αντίστοιχα, τα $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ και $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ είναι οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, τα $\dot{\tilde{\varepsilon}}_t^{pl}$ και $\dot{\tilde{\varepsilon}}_c^{pl}$ είναι ισοδύναμοι λόγοι πλαστικών παραμορφώσεων (equivalent plastic strain rates), το θ

είναι η θερμοκρασία, και $f_i, (i = 1, 2, \dots)$ είναι άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές (field variables).

Όπως φαίνεται στα παραπάνω Σχήματα 2.18, 2.19, όταν το δοκίμιο σκυροδέματος αποφορτίζεται από οποιοδήποτε σημείο του φθιτού κλάδου του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, η απόκριση της αποφόρτισης αποδυναμώνεται: η ελαστική δυσκαμψία του υλικού φαίνεται να υποβαθμίζεται. Η υποβάθμιση αυτή χαρακτηρίζεται από δύο μεταβλητές βλάβης (damage variables), d_t και d_c , οι οποίες θεωρείται ότι είναι συναρτήσεις των πλαστικών παραμορφώσεων, της θερμοκρασίας και των μεταβλητών πεδίου (field variables) :

$$\begin{aligned} d_t &= d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i); & 0 \leq d_t \leq 1, \\ d_c &= d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i); & 0 \leq d_c \leq 1. \end{aligned}$$

Οι μεταβλητές βλάβης (damage variables) μπορούν να λάβουν τιμές από μηδέν, αντιπροσωπεύοντας έτσι το άθικτο υλικό, μέχρι και ένα, αντιπροσωπεύοντας τη συνολική απώλεια αντοχής.

Εάν E_0 είναι το μέτρο ελαστικότητας του άθικτου υλικού (δηλ. το αρχικό μέτρο ελαστικότητας), οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων υπό μονοαξονικό εφελκυσμό και μονοαξονική θλίψη είναι, αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}), \\ \sigma_c &= (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}). \end{aligned}$$

Ορίζονται οι «ενεργές» εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις συνοχής (“effective” tensile and compressive cohesion stresses), ως :

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_t &= \frac{\sigma_t}{(1 - d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}), \\ \bar{\sigma}_c &= \frac{\sigma_c}{(1 - d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}). \end{aligned}$$

Οι «ενεργές» τάσεις καθορίζουν το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής (ή αστοχίας).

2.2.5.2.3 Μονοαξονική κυκλική συμπεριφορά

Υπό τις συνθήκες μονοαξονική κυκλικής φόρτισης οι μηχανισμοί βλάβης (degradation mechanisms) είναι αρκετά περίπλοκοι, συμπεριλαμβάνοντας το άνοιγμα και το κλείσιμο των ήδη σχηματισθέντων μικρο-ρωγμών, καθώς και την αλληλεπίδρασή τους. Πειραματικά, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει κάποια ανάκτηση του μέτρου ελαστικότητας (elastic stiffness) καθώς η φόρτιση αλλάζει πρόσημο

κατά τη διάρκεια μιας κυκλικής μονοαξονικής δοκιμής. Η επίδραση ανάκτησης του μέτρου ελαστικότητας, επίσης γνωστή ως “unilateral effect”, είναι μια σημαντική πτυχή της συμπεριφοράς του σκυροδέματος υπό κυκλική φόρτιση. Το αποτέλεσμα είναι συνήθως πιο έντονο καθώς η φόρτιση αλλάζει από εφελκυσμό σε θλίψη. Έτσι οι εφελκυστικές ρωγμές θα κλείσουν, γεγονός που θα οδηγήσει στην ανάκτηση θλιπτικής δυσκαμψίας (compressive stiffness).

Το μοντέλο σκυροδέματος Damaged Plasticity θεωρεί ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας δίνεται σε όρους μιας βαθμωτής μεταβλητής (scalar degradation variable), d , ως εξής:

$$E = (1 - d)E_0,$$

όπου E_0 το αρχικό (άθικτο) μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Αυτή η έκφραση ισχύει τόσο στην περιοχή εφελκυσμού ($\sigma_{11} > 0$) όσο και στην περιοχή συμπίεσης ($\sigma_{11} < 0$) του κύκλου. Η μεταβλητή υποβάθμισης του μέτρου ελαστικότητας, d , είναι μία συνάρτηση της τάσης και των μεταβλητών μονοαξονικής βλάβης (uniaxial damage variables) d_t και d_c . Για τις συνθήκες μονοαξονικής κυκλικής φόρτισης το Abaqus υποθέτει ότι :

$$(1 - d) = (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t),$$

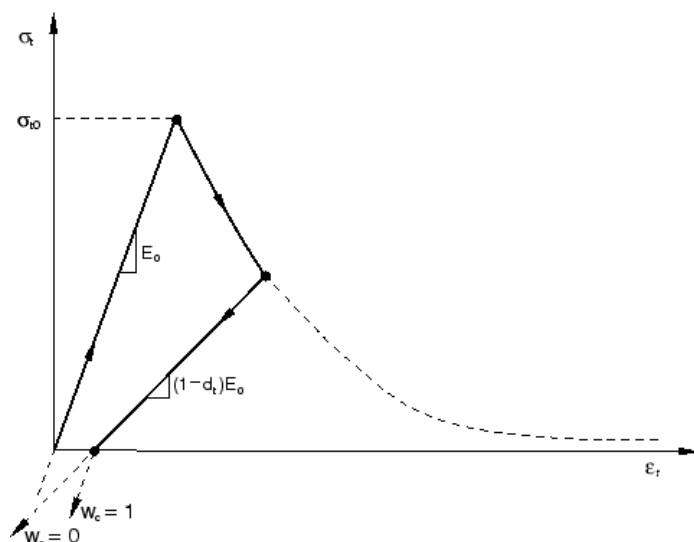
Όπου s_t και s_c είναι συναρτήσεις της τάσης, οι οποίες εισάγονται για να προσομοιώσουν τα αποτελέσματα της ανάκτησης του μέτρου ελαστικότητας, τα οποία σχετίζονται με τις αντιστροφές των τάσεων (stress reversals). Τα s_t και s_c ορίζονται ως εξής :

$$\begin{aligned} s_t &= 1 - w_t r^*(\sigma_{11}); & 0 \leq w_t \leq 1, \\ s_c &= 1 - w_c (1 - r^*(\sigma_{11})); & 0 \leq w_c \leq 1, \end{aligned}$$

όπου

$$r^*(\sigma_{11}) = H(\sigma_{11}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma_{11} > 0 \\ 0 & \text{if } \sigma_{11} < 0 \end{cases}$$

Οι συντελεστές βαρύτητας (weight factors) w_t και w_c , οι οποίοι θεωρούνται ιδιότητες του υλικού, ελέγχουν την ανάκτηση της εφελκυστικής και θλιπτικής δυσκαμψίας (tensile and compressive stiffness) κατά την αναστροφή του φορτίου. Το παραπάνω γίνεται αντιληπτό στο παράδειγμα που ακολουθεί στο Σχήμα 2.20, όπου το φορτίο μεταβάλλεται από εφελκυστικό σε θλιπτικό.



Σχήμα 2.20 - Απεικόνιση της επίδρασης της παραμέτρου w_c .

Ας υποθέσουμε ότι δεν υπήρχε προηγούμενη θλιπτική βλάβη (σύνθλιψη) στο υλικό, δηλαδή, $\bar{\varepsilon}_c^{pl} = 0$ και $d_c = 0$. Τότε :

$$(1 - d) = (1 - s_c d_t) = (1 - (1 - w_c(1 - r^*))d_t).$$

Σε εφελκυσμό ($\sigma_{11} > 0$), $r^* = 1$. Συνεπώς, $d = d_t$, όπως ήταν αναμενόμενο.

Σε θλίψη ($\sigma_{11} < 0$), $r^* = 0$, και $d = (1 - w_c)d_t$. Εάν $w_c = 1$, τότε $d = 0$. Συνεπώς, το υλικό ανακτά πλήρως το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας (compressive stiffness), το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του άθικτου υλικού, $E = E_0$. Εάν, από την άλλη πλευρά, $w_c = 0$, τότε $d = d_t$ και έτσι δεν συμβαίνει ανάκτηση. Ενδιάμεσες τιμές της παραμέτρου w_c οδηγούν σε μερική ανάκτηση.

2.2.5.2.4 Πολυαξονική συμπεριφορά

Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για το ευρύ τρισδιάστατο πολυαξονικό ο πολυαξονικής κατάσταση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (scalar damage elasticity equation):

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d)\mathbf{D}_0^{el} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}),$$

όπου \mathbf{D}_0^{el} είναι το αρχικό (άθικτο) μητρώο ελαστικότητας.

Η προηγούμενη έκφραση για τη μεταβλητή βαθμωτής υποβάθμισης της δυσκαμψίας, d , είναι γενικευμένη στην πολυαξονική περίπτωση φόρτισης (stress case), αντικαθιστώντας τη συνάρτηση (unit step function), $r^*(\sigma_{11})$ με ένα συντελεστή βαρύτητας πολυαξονικής τάσης, $r(\hat{\sigma})$, που ορίζεται ως

$$r(\hat{\sigma}) = \frac{\sum_{i=1}^3 \langle \hat{\sigma}_i \rangle}{\sum_{i=1}^3 |\hat{\sigma}_i|}; \quad 0 \leq r(\hat{\sigma}) \leq 1,$$

Όπου $\hat{\sigma}_i$ ($i = 1, 2, 3$) είναι οι συνιστώσες των κύριων τάσεων (principal stress components). Το σύμβολο Macauley ορίζεται ως εξής:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{2}(|x| + x).$$

2.2.5.3 Ενίσχυση σκυροδέματος

Στο Abaqus, ο οπλισμός σε κατασκευές σκυροδέματος τυπικά παρέχεται μέσω των ράβδων, οι οποίες είναι στοιχεία μονοδιάστατης παραμορφωσιακής θεωρίας/ράβδοι (one-dimensional strain theory elements/rods) που μπορούν να οριστούν μεμονωμένα ή ενσωματωμένα σε προσανατολισμένες επιφάνειες. Οι ράβδοι οπλισμού χρησιμοποιούνται συνήθως με μοντέλα πλαστικότητας μετάλλου (metal plasticity models) για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του υλικού οπλισμού και υπερτίθενται επί ενός πλέγματος τυποποιημένων στοιχείων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του σκυροδέματος.

Με αυτή τη μοντελοποίηση, η συμπεριφορά του σκυροδέματος θεωρείται ανεξάρτητη από αυτή του οπλισμού. Οι επιδράσεις που σχετίζονται με τη διεπαφή οπλισμού / σκυροδέματος, όπως το “bond slip” και το “dowel action”, προσομοιώθηκαν προσεγγιστικά με την εισαγωγή κάποιου “tension stiffening” στο συγκεκριμένο μοντέλο για την προσομοίωση της μεταφοράς φορτίου στις ρωγμές μέσω του οπλισμού.

Ο καθορισμός του οπλισμού είναι σημαντικό να γίνει με ακρίβεια, δεδομένου ότι μια ανάλυση ενδέχεται να μην ολοκληρωθεί επιτυχώς λόγω έλλειψης οπλισμού σε βασικές περιοχές του.

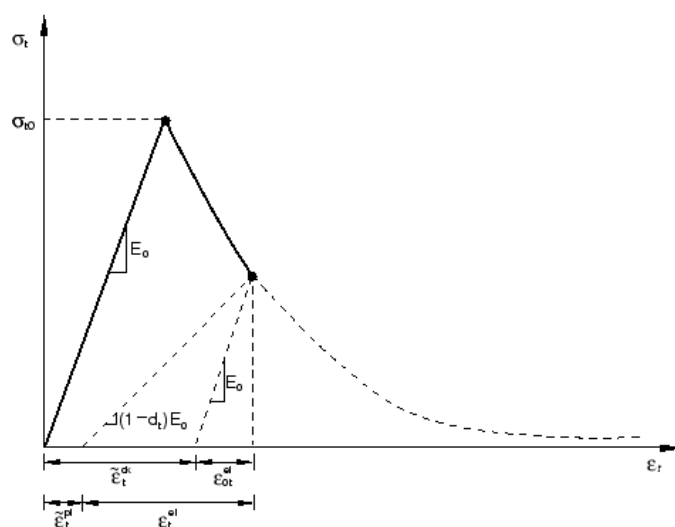
2.2.5.4 Καθορισμός της αύξησης της δυσκαμψίας του σκυροδέματος (tension stiffening)

2.2.5.4.1 Γενικά

Η συμπεριφορά μετά την αστοχία διαμορφώνεται με αύξηση δθσκαμψίας του σκυροδέματος (tension stiffening), γεγονός που επιτρέπει τον προσδιορισμό του φθιτού κλάδου της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων (strain-softening behavior) για το ρηγματωμένο σκυρόδεμα. Η συμπεριφορά αυτή επιτρέπει επίσης την απλή προσομοίωση των επιδράσεων της αλληλεπίδρασης οπλισμού-σκυροδέματος. Το tension stiffening απαιτείται στη συγκεκριμένη προσομοίωση σκυροδέματος. Μπορεί να καθοριστεί είτε από τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων μετά την αστοχία είτε εφαρμόζοντας ένα κριτήριο ρηγματώδης ενέργειας θραύσης (fracture energy cracking criterion).

2.2.5.4.2 Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων μετά την αστοχία

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα, ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς μετά τη θραύση σημαίνει γενικά τον καθορισμό της τάσης μετά τη θραύση, σα συνάρτηση της παραμόρφωσης ρηγματώδης (cracking strain), $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$. Η παραμόρφωση ρηγματώσεως (cracking strain) ορίζεται ως η συνολική παραμόρφωση μείον την ελαστική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο άθικτο υλικό, δηλαδή $\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el}$, όπου $\varepsilon_{0t}^{el} = \sigma_t / E_0$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.21. Για την αποφυγή πιθανών αριθμητικών προβλημάτων, το Abaqus επιβάλλει ένα κατώτατο όριο για την τάση μετά την αστοχία. Το όριο αυτό είναι ίσο με το ένα εκατοστό (1/100) της αρχικής τάσης αστοχίας : $\sigma_t \geq \sigma_{t0} / 100$.



Σχήμα 2.21 - Απεικόνιση του ορισμού της παραμόρφωσης ρηγματώσεως $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$, η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό των δεδομένων του tension stiffening.

Τα δεδομένα του tension stiffening δίνονται σε όρους παραμόρφωσης ρηγμάτωσης, $\bar{\varepsilon}_t^{ck}$. Όταν τα δεδομένα της αποφόρτισης είναι διαθέσιμα, τότε τα δεδομένα του tension stiffening παρέχονται στο Abaqus σε όρους, $d_t - \bar{\varepsilon}_t^{ck}$ δηλ. tensile damage curves, όπως αναφέρεται παρακάτω. Το Abaqus μετατρέπει αυτόματα τις τιμές παραμόρφωσης κατά τη ρηγμάτωσης (cracking strain values) σε τιμές πλαστικής παραμόρφωσης (plastic strain values), χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$\bar{\varepsilon}_t^{pl} = \bar{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0}.$$

Το Abaqus εκδίδει μήνυμα λάθους, εάν οι υπολογιζόμενες τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων είναι αρνητικές και/ή μειώνονται, ενώ η τάση ρηγμάτωσης αυξάνεται. Το παραπάνω συνήθως δείχνει ότι οι καμπύλες βλάβης εφελκυσμού (tensile damage curves) είναι λάθος ορισμένες. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει βλάβη εφελκυσμού ισχύει $\bar{\varepsilon}_t^{pl} = \bar{\varepsilon}_t^{ck}$.

Σε περιπτώσεις με μικρή ή καθόλου ενίσχυση, ο προσδιορισμός της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων μετά την αστοχία παρουσιάζει ευαισθησία απέναντι στη διακριτοποίηση (mesh sensitivity), με την έννοια ότι οι προβλέψεις των πεπερασμένων στοιχείων δεν συγκλίνουν σε μια μοναδική λύση καθώς η διακριτοποίηση βελτιώνεται, διότι η βελτίωση του πλέγματος της διακριτοποίηση οδηγεί σε στενότερες ζώνες ρωγμών.

Αυτό το ζήτημα παρουσιάζεται, συνήθως, όταν η αστοχία λόγω ρηγμάτωσης (cracking failure) περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές της κατασκευής και η βελτίωση του πλέγματος της διακριτοποίηση δεν έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό επιπρόσθετων ρωγμών. Εάν η αστοχία λόγω ρηγμάτωσης κατανέμεται ομοιόμορφα (είτε λόγω της επίδρασης του οπλισμού είτε λόγω της παρουσίας σταθεροποιητικού ελαστικού υλικού (stabilizing elastic material), όπως στην περίπτωση της κάμψεως πλάκας), δεν παρουσιάζεται πρόβλημα λόγω ατυχούς διακριτοποίησης.

Σε πρακτικούς υπολογισμούς για οπλισμένο σκυρόδεμα, η διακριτοποίηση συνήθως είναι τέτοια ώστε κάθε στοιχείο να περιέχει ράβδους οπλισμού. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος τείνει να μειώσει την ευαισθησία διακριτοποίησης, με την προϋπόθεση ότι ένα εύλογο ποσό του tension stiffening εισάγεται στο μοντέλο προκειμένου να προσομοιώσει αυτή την αλληλεπίδραση. Αυτό απαιτεί μία εκτίμηση του αποτελέσματος του tension stiffening, το οποίο εξαρτάται από παράγοντες όπως η πυκνότητα του οπλισμού, η ποιότητα του δεσμού μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος, το σχετικό μέγεθος των

αδρανών σκυροδέματος σε σύγκριση με τη διάμετρο των ράβδων οπλισμού (rebar), και τη διακριτοποίηση (mesh). Ένα λογικό σημείο εκκίνησης για σχετικά «βαριά» οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο έχει προσομοιωθεί από ένα αρκετά λεπτομερές κάρναβη, είναι να θεωρηθεί ότι ο φθιτός κλάδος της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων (strain softening) μετά την αστοχία, μηδενίζει γραμμικά την τάση φτάνοντας τιμή συνολικής παραμόρφωσης ίση με 10 φορές την τιμή της παραμόρφωσης στην αστοχία. Η παραμόρφωση κατά την αστοχία για τα τυποποιημένα σκυροδέματα είναι συνήθως 10^{-4} , γεγονός που υποδεικνύει ότι ένα tension stiffening, το οποίο μηδενίζει την τάση φτάνοντας τιμή συνολικής παραμόρφωσης ίση με 10^{-3} , είναι λογικό. Αυτή η παράμετρος πρέπει να βαθμονομείται για κάθε περίπτωση.

Η επιλογή των παραμέτρων του tension stiffening είναι σημαντική δεδομένου ότι, εν γένει, μεγαλύτερη τιμή tension stiffening καθιστά ευκολότερη την απόκτηση αριθμητικών λύσεων. Πολύ μικρή τιμή tension stiffening θα έχει σαν αποτέλεσμα η τοπική αστοχία λόγω ρηγμάτωσης (local cracking failure) στο σκυρόδεμα να εισάγει προσωρινά ασταθή συμπεριφορά στη συνολική απόκριση του μοντέλου. Λίγα πρακτικά σχέδια εμφανίζουν τέτοια συμπεριφορά, έτσι ώστε η παρουσία αυτού του τύπου απόκρισης στο μοντέλο ανάλυσης να υποδεικνύει συνήθως ότι το tension stiffening είναι αδικαιολόγητα χαμηλό.

Εισαγωγή tension stiffening στο input file :

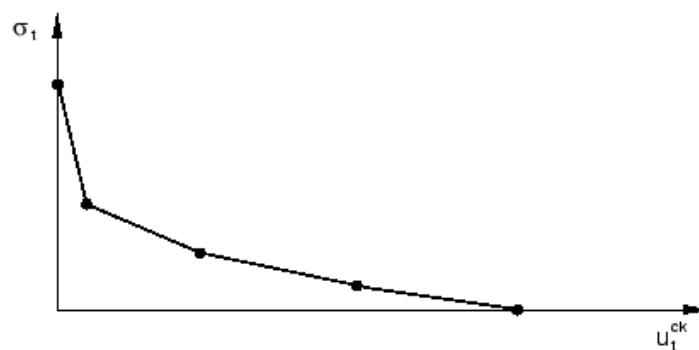
* CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE =STRAIN (προεπιλογή)

2.2.5.4.3 Κριτήριο ρηγμάτωσης ενέργειας θραύσης (Fracture energy cracking criterion)

Όταν δεν υπάρχει ενίσχυση σε σημαντικές περιοχές του μοντέλου, η προσέγγιση του tension stiffening που περιγράφεται παραπάνω θα εισαγάγει πολύ μεγάλη ευαισθησία διακριτοποίησης στα αποτελέσματα. Ωστόσο, είναι γενικά αποδεκτό ότι (1976) η πρόταση του Hillerborg όσον αφορά την ενέργεια θραύσης (Hillerborg's fracture energy proposal) κρίνεται επαρκής για την ορθή προσομοίωση πολλών πρακτικών προβλημάτων. Ο Hillerborg καθορίζει την ενέργεια που απαιτείται για να ανοίξει μια μονάδα επιφάνειας ρωγμής (a unit area crack), G_f , ως μια παράμετρο του υλικού, χρησιμοποιώντας έννοιες ψαθυρής θραύσης (brittle fracture concepts). Με την προσέγγιση αυτή η ψαθυρή συμπεριφορά του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται από μία απόκριση τάσεων-μετατοπίσεων αντί της απόκρισης τάσεων-παραμορφώσεων Υπό εφελκυσμό, ένα δοκίμιο σκυροδέματος θα

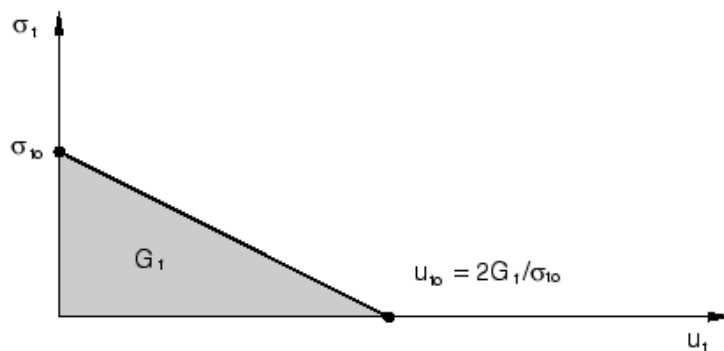
ρηγματωθεί σε κάποιο τμήμα. Αφού αυτό έχει απομακρυνθεί/αποχωριστεί επαρκώς ώστε να αφαιρεθεί το μεγαλύτερο μέρος της τάσης (έτσι ώστε η ελαστική παραμόρφωση του άθικτο τμήματος να είναι μικρή), το μήκος του θα καθοριστεί πρωταρχικά από το άνοιγμα κατά τη ρωγμή. Το άνοιγμα δεν εξαρτάται από το μήκος του δοκιμίου.

Αυτό το ρηγματωμένο μοντέλο ενέργειας θραύσης (fracture energy cracking model) μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθορίζοντας την τάση μετά την αστοχία ως μια πινακοειδή συνάρτηση της μετακίνησης στην αστοχία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22 - Καμπύλη τάσεων-μετατοπίσεων μετά την αστοχία.

Εναλλακτικά, η ενέργεια θραύσης, G_f , μπορεί να καθοριστεί απευθείας ως μια ιδιότητα του υλικού. Στην περίπτωση αυτή, ορίζεται η τάση κατά την αστοχία, σ_{10} , ως μια πινακοειδής συνάρτηση που εξαρτάται από την ενέργεια θραύσης. Αυτό το μοντέλο υποθέτει μια γραμμική απώλεια αντοχής μετά ρηγμάτωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23 - Καμπύλη τάσεων-ενέργειας θραύσης μετά την αστοχία

Η μετατόπιση κατά τη ρηγμάτωση, στην οποία μηδενίζεται η αντοχή, είναι ίση με $u_{t0} = 2G_f/\sigma_{t0}$. Οι τυπικές τιμές G_f κυμαίνονται από 40 N/m για ένα σύνηθες σκυρόδεμα κατασκευών (με θλιπτική αντοχή ίση περίπου με 20 MPa) έως 120 N/m για υψηλής αντοχής σκυροδέματα (με θλιπτική αντοχή περίπου 40 MPa).

Εάν η βλάβη σε εφελκυσμό, d_t , διευκρινίζεται, το Abaqus μετατρέπει αυτόματα τις τιμές μετατόπισης κατά τη ρηγμάτωση σε πλαστικές τιμές μετατόπισης χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$u_t^{pl} = u_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t l_0}{E_0},$$

όπου το μήκος δοκιμίου, l_0 , θεωρείται ότι είναι $l_0 = 1$.

2.2.5.4.4 Εκτέλεση

Η εκτέλεση της έννοιας τάσης-μετατόπισης σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί τον καθορισμό ενός χαρακτηριστικού μήκους που σχετίζεται με ένα σημείο ολοκλήρωσης. Το χαρακτηριστικό μήκος ρωγμής βασίζεται στη γεωμετρία στοιχείου (element geometry) και τη διατύπωση (formulation): είναι ένα τυπικό μήκος μιας γραμμής κατά μήκος ενός στοιχείου για ένα πρώτης τάξεως στοιχείο, είναι το ήμισυ του ίδιου τυπικού μήκους για ένα στοιχείο δεύτερης τάξης. Για δοκούς και δικτυώματα είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος κατά μήκος του άξονα του στοιχείου. Για μεμβράνες και κελύφη είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος στην επιφάνεια αναφοράς. Για αξονοσυμμετρικά στοιχεία είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος μόνο στο επίπεδο r-z. Για συνεκτικά στοιχεία είναι ίσο με το καταστατικό πάχος (constitutive thickness). Αυτός ο ορισμός του χαρακτηριστικού μήκους ρωγμής χρησιμοποιείται, επειδή η διεύθυνση στην οποία θα πραγματοποιηθεί η ρηγμάτωση δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Συνεπώς, τα στοιχεία με μεγάλες αναλογίες διαστάσεων (large aspect ratios) θα έχουν μάλλον διαφορετική συμπεριφορά, ανάλογα με τη διεύθυνση κατά την οποία ρηγματώνονται: κάποια ευαίσθησια διακριτοποίησης (mesh sensitivity) παραμένει εξαιτίας αυτού του γεγονότος, και έτσι συνιστώνται στοιχεία με αναλογία διαστάσεων κοντά στο ένα.

Εισαγωγή tension stiffening στο input file :

Υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι:

- Η ακόλουθη επιλογή χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η τάση μετά την αστοχία ως πινακοειδής συνάρτηση της μετατόπισης:
*CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE=DISPLACEMENT

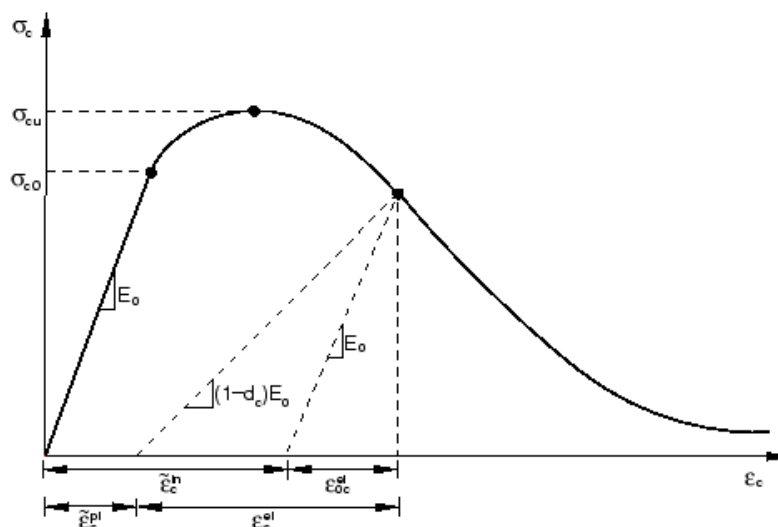
- Η ακόλουθη επιλογή χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η τάση μετά την αστοχία ως πινακοειδής συνάρτηση της ενέργειας θραύσης (energy fracture):

*CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE=GFI

2.2.5.5 Καθορισμός θλιπτικής συμπεριφοράς

Μπορείτε να ορίσετε τη συμπεριφορά του άοπλου σκυροδέματος μέσω της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων υπό μονοαξονική συμπίεση πέρα από την ελαστική περιοχή. Τα δεδομένα της θλιπτικής τάσης δίνονται ως μια πινακοειδής συνάρτηση πίνακα των ανελαστικών (ή crushing) παραμορφώσεων, $\bar{\varepsilon}_c^{in}$, και, εάν είναι επιθυμητό, του ρυθμού παραμόρφωσης (strain rate), της θερμοκρασίας και άλλων μεταβλητών. Θετικές (απόλυτες) τιμές θα πρέπει να δοθούν για τη θλιπτική τάση και τη θλιπτική παραμόρφωση. Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων μπορεί να προσδιορισθεί πέραν της μέγιστης αντοχής, στο φθιτό κλάδο της καμπύλης (strain-softening regime).

Τα δεδομένα σκλήρυνσης (hardening data) δίνονται σε όρους ανελαστικής παραμόρφωσης, $\bar{\varepsilon}_c^{in}$, αντί της πλαστικής παραμόρφωσης, $\bar{\varepsilon}_c^{pl}$. Η θλιπτική ανελαστική παραμόρφωση ορίζεται ως η συνολική παραμόρφωση μείον την ελαστική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο άθικτο υλικό, $\bar{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el}$, όπου, $\varepsilon_{0c}^{el} = \sigma_c / E_0$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24 - Ορισμός της θλιπτικής ανελαστικής (ή crushing) παραμόρφωσης, $\bar{\varepsilon}_c^{in}$, που χρησιμοποιείται για τον ορισμό της σκλήρυνσης υπό θλίψη (compression hardening data).

Τα δεδομένα αποφόρτισης παρέχονται στο Abaqus σε όρους καμπυλών βλάβης υπό θλίψη (compressive damage curves), $d_c - \bar{\varepsilon}_c^{in}$, όπως αναφέρεται παρακάτω. Το Abaqus μετατρέπει αυτόματα τις τιμές ανελαστικής παραμόρφωσης σε τιμές πλαστικής παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0}.$$

Το Abaqus εμφανίζει μήνυμα λάθους, εάν οι υπολογιζόμενες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης είναι αρνητικές και/ή μειώνονται, παρότι αυξάνεται η ανελαστική παραμόρφωση. Το παραπάνω γεγονός, συνήθως, δείχνει ότι οι καμπύλες βλάβης υπό θλίψη δεν είναι σωστά δοσμένες από το χρήστη. Εν τη απουσία βλάβης υπό θλίψη, ισχύει $\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in}$.

Εισαγωγή σκλήρυνσης υπό θλίψη (compression hardening) στο input file:

* COCONCRETE COMPRESSION HARDENING

2.2.5.6 Καθορισμός βλάβης και ανάκτησης δυσκαμψίας

2.2.5.6.1 Γενικά

Η βλάβη, d_c και/ή d_t , μπορεί να καθοριστεί σε μορφή πίνακα. Εάν η βλάβη δεν καθοριστεί, το μοντέλο συμπεριφέρεται ως ένα μοντέλο πλαστικότητας (plasticity model). Ως εκ τούτου, $\bar{\varepsilon}_t^{pl} = \bar{\varepsilon}_t^{ck}$ και $\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in}$.

Στο Abaqus οι μεταβλητές βλάβης (damage variables) αντιμετωπίζονται ως μη-μειούμενες ποσότητες του υλικού σημείου (non-decreasing material point quantities). Σε οποιαδήποτε προσαύξηση (increment) κατά την ανάλυση, η νέα τιμή κάθε μεταβλητής βλάβης (damage variable) λαμβάνεται ως η μέγιστη μεταξύ της τιμής στο τέλος της προηγούμενης προσαύξησης και της τιμής που αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση (με παρεμβολή από τους καθορισμένους από το χρήστη πίνακες δεδομένων). Δηλαδή,

$$d_t|_{t+\Delta t} = \max \left\{ d_t|_t, d_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl}|_{t+\Delta t}, \theta|_{t+\Delta t}, f_i|_{t+\Delta t}) \right\},$$

$$d_c|_{t+\Delta t} = \max \left\{ d_c|_t, d_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl}|_{t+\Delta t}, \theta|_{t+\Delta t}, f_i|_{t+\Delta t}) \right\}.$$

Η επιλογή των ιδιοτήτων βλάβης είναι σημαντική δεδομένου ότι, γενικά, η υπερβολική βλάβη μπορεί να έχει μία κρίσιμη επίδραση στο ρυθμό της σύγκλισης. Συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση τιμών μεγαλύτερων του 0.99 για τις μεταβλητές βλάβης (damage variables). (Η παραπάνω τιμή αντιστοιχεί σε μείωση της δυσκαμψίας κατά 99%.)

2.2.5.6.2 Βλάβες υπό εφελκυσμό (Tensile damage)

Μπορείτε να ορίσετε τη μεταβλητή βλάβης υπό μονοαξονικό εφελκυσμό, ως πινακοειδή συνάρτηση είτε της παραμόρφωσης κατά τη ρηγμάτωση (cracking strain) είτε της μετατόπισης κατά τη ρηγμάτωση (cracking displacement).

Εισαγωγή βλάβης υπό εφελκυσμό (tension damage) στο input file:

- Η ακόλουθη επιλογή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βλάβης υπό εφελκυσμό ως συνάρτηση της παραμόρφωσης κατά τη ρηγμάτωση (cracking strain):

*CONCRETE TENSION DAMAGE, TYPE=STRAIN (προεπιλογή)

- Η ακόλουθη επιλογή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βλάβης υπό εφελκυσμό ως συνάρτηση της μετατόπισης κατά τη ρηγμάτωση (cracking displacement):

*CONCRETE TENSION DAMAGE, TYPE=DISPLACEMENT

2.2.5.6.3 Βλάβες υπό θλίψη (Compressive damage)

Μπορείτε να ορίσετε τη μεταβλητή βλάβης υπό μονοαξονική θλίψη, d_c , ως πινακοειδή συνάρτηση της ανελαστικής (crushing) παραμόρφωσης.

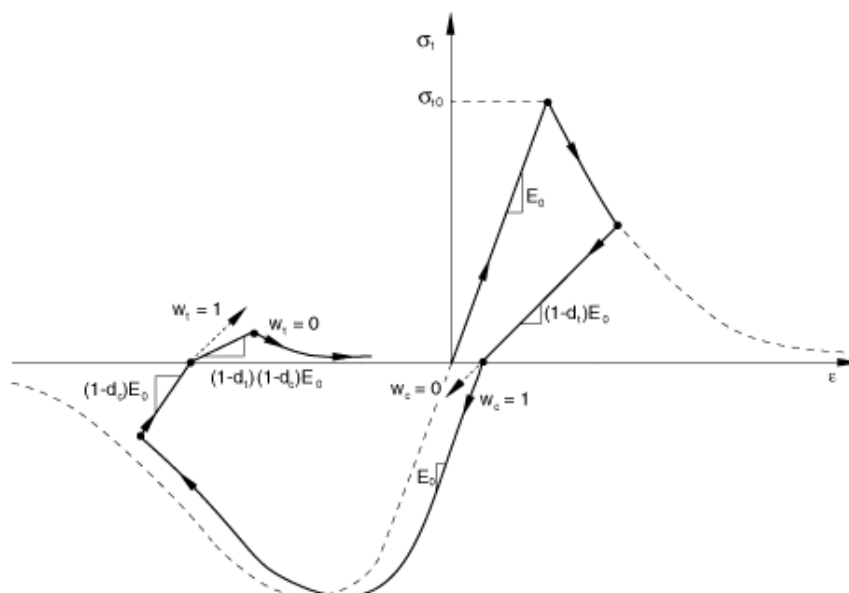
Εισαγωγή βλάβης υπό θλίψη (compression damage) στο input file:

* CONCRETE COMPRESSION DAMAGE

2.2.5.6.4 Ανάκτηση δυσκαμψίας (Stiffness recovery)

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, η ανάκτηση δυσκαμψίας είναι μια πολύ σημαντική πτυχή της μηχανικής απόκρισης του σκυροδέματος υπό κυκλική φόρτιση. Το Abaqus επιτρέπει στο χρήστη να προσδιορίσει άμεσα τους παράγοντες ανάκτησης δυσκαμψίας (stiffness recovery factors), w_t και w_c .

Η πειραματική παρατήρηση στα περισσότερα οιωνεί ψαθυρά υλικά, συμπεριλαμβανομένου του σκυροδέματος, έδειξε ότι η δυσκαμψία κατά τη θλίψη (compressive stiffness) ανακτάται κατά το κλείσιμο μιας ρωγμής, καθώς το φορτίο από εφελκυστικό γίνεται θλιπτικό. Από την άλλη πλευρά, η δυσκαμψία κατά τον εφελκυσμό (tensile stiffness) δεν ανακτάται, καθώς το φορτίο από θλιπτικό γίνεται εφελκυστικό, εφόσον έχουν ήδη αναπτυχθεί μικρο-ρωγμές. Αυτή η συμπεριφορά, που αντιστοιχεί σε $w_t = 0$ και $w_c = 1$, είναι η προεπιλεγμένη που χρησιμοποιείται από το Abaqus. Το Σχήμα 2.25 απεικονίζει ένα μονοαξονικό κύκλο φόρτισης θεωρώντας την προεπιλεγμένη συμπεριφορά ($w_t = 0$ και $w_c = 1$).



Σχήμα 2.25 - Μονοαξονικός κύκλος φόρτισης (εφελκυσμός-θλίψη-εφελκυσμός) θεωρώντας τις προεπιλεγμένες τιμές για τους παράγοντες ανάκτησης δυσκαμψίας: $w_t = 0$ και $w_c = 1$.

Εισαγωγή βλάβης υπό θλίψη (compression damage) στο input file:

- Η παρακάτω επιλογή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του παράγοντα ανάκτησης δυσκαμψίας υπό θλίψη, w_c :
*CONCRETE TENSION DAMAGE, COMPRESSION RECOVERY= w_c
- Η παρακάτω επιλογή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του παράγοντα ανάκτησης δυσκαμψίας υπό εφελκυσμό, w_t :

*CONCRETE TENSION DAMAGE, COMPRESSION RECOVERY= w_t

2.2.5.7 Ποσοστό εξάρτησης (Rate dependence)

Η ευαίσθητη σε αλλαγές συμπεριφορά (rate-sensitive behavior) των οιονεί ψαθυρών υλικών συνδέεται κυρίως με την υστέρηση (retardation effects) που έχουν οι υψηλοί ρυθμοί παραμόρφωσης (high strain rates) κατά την ανάπτυξη μικρο-ρωγμών (growth of micro-cracks). Το φαινόμενο είναι συνήθως πιο έντονο κατά τον εφελκυσμό. Καθώς ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνεται, οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων εμφανίζουν μειούμενη μη-γραμμικότητα, καθώς επίσης και μια αύξηση στην μέγιστη αντοχή. Το tension stiffening μπορεί να προσδιοριστεί ως μια πινακοειδής συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης (ή μετατόπισης) ρηγμάτωσης (cracking strain (or displacement) rate). Τα δεδομένα σκλήρυνσης υπό θλίψη (compression hardening data) καθορίζονται ως μια πινακοειδής συνάρτηση του ρυθμού ανελαστικής παραμόρφωσης (inelastic strain rate).

Εισαγωγή ποσοστού εξάρτησης στο input file:

- *CONCRETE TENSION STIFFENING
- *CONCRETE COMPRESSION HARDENING

2.2.5.8 Πλαστικότητα σκυροδέματος (Concrete plasticity)

2.2.5.8.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος, μπορεί να οριστεί το flow potential, η επιφάνεια διαρροής (yield surface) και οι παράμετροι ιξώδους (viscosity parameters).

Εισαγωγή στο input file:

* CONCRETE DAMAGED PLASTICITY

2.2.5.8.2 Αναλλοίωτες ενεργών τάσεων (Effective stress invariants)

Η ενεργός τάση ορίζεται ως:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_0^{el} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}).$$

Η πιθανή λειτουργία της «πλαστικής ροής» (plastic flow potential function) και η επιφάνεια διαρροής χρησιμοποιούν δύο αναλλοίωτες τάσεων από τον τανυστή των ενεργών τάσεων (effective stress tensor). Αυτές είναι η υδροστατική τάση (hydrostatic pressure stress),

$$\bar{p} = -\frac{1}{3}\text{trace}(\bar{\sigma}),$$

Και η ισοδύναμη ενεργός τάση κατά Mises,

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}(\bar{\mathbf{S}} : \bar{\mathbf{S}})},$$

όπου $\bar{\mathbf{S}}$ είναι το effective stress deviator, που ορίζεται ως

$$\bar{\mathbf{S}} = \bar{\sigma} + \bar{p}\mathbf{I}.$$

2.2.5.8.3 Πλαστική ροή

Το συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος θεωρεί μη συσχετισμένη πιθανή πλαστική ροή (nonassociated potential plastic flow). Το δυναμικό ροής G που χρησιμοποιείται σε αυτό το μοντέλο είναι η υπερβολική συνάρτηση Drucker-Prager:

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi,$$

όπου

- $\psi(\theta, f_i)$, είναι η γωνία διαστολικότητας (dilation angle), η οποία μετράται στο επίπεδο p-q σε υψηλή τάση περίσφιγξης (at high confining pressure),
- $\sigma_{t0}(\theta, f_i) = \sigma_t|_{\dot{\epsilon}_t^{pl}=0, \dot{\epsilon}_t^{pl}=0}$, είναι η μονοαξονική εφελκυστική τάση κατά την αστοχία, που λαμβάνεται από τα δεδομένα του tension stiffening που έχουν οριστεί από το χρήστη και
- $\epsilon(\theta, f_i)$ είναι μια παράμετρος, που αναφέρεται ως η εκκεντρικότητα, η οποία καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο η συνάρτηση προσεγγίζει την ασύμπτωτη (το flow potential τείνει σε μία ευθεία γραμμή, καθώς η εκκεντρότητα τείνει στο μηδέν).

Το δυναμικό ροής (flow potential), το οποίο είναι συνεχές και ομαλό, εξασφαλίζει ότι η κατεύθυνση της ροής ορίζεται πάντοτε μονοσήμαντα. Η συνάρτηση προσεγγίζει τη γραμμική ροή δυναμικού Drucker-Prager (the linear Drucker-Prager flow potential) ασυμπτωτικά σε υψηλή τάση περίσφιγξης (at high confining pressure

stress) και τέμνει τον άξονα υδροστατικής πίεσης στις 90° (intersects the hydrostatic pressure axis at 90°).

Η προεπιλεγμένη εκκεντρότητα ροής δυναμικού είναι $\epsilon = 0.1$, πράγμα που συνεπάγεται ότι το υλικό έχει σχεδόν την ίδια γωνία διαστολικότητας σε ένα ευρύ φάσμα τιμών τάσεων. Αύξηση της τιμής του ϵ παρέχει μεγαλύτερη καμπυλότητα στο δυναμικό ροής (flow potential), υποδηλώνοντας ότι η γωνία διαστολής αυξάνεται πιο γρήγορα, καθώς η τάση περίσφιγξης μειώνεται. Οι τιμές του ϵ που είναι σημαντικά μικρότερες από την προεπιλεγμένη τιμή μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα σύγκλισης, εάν το υλικό υποβάλλεται σε χαμηλές τάσεις περίσφιγξης, λόγω της τοπικά πολύ σφιχτής καμπυλότητας του δυναμικού ροής, όπου τέμνει τον p -άξονα.

2.2.5.8.4 Συνάρτηση διαρροής (Yield function)

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη συνάρτηση του Lubliner et. al. (1989), με τις τροποποιήσεις που προτείνονται από τους Lee και Fenves (1998) για να τεκμηριώσει τη διαφορετική εξέλιξη της αντοχής υπό εφελκυσμό και υπό θλίψη. Η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής ελέγχεται από τις μεταβλητές σκλήρυνσης (hardening variables), $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ και $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$. Σε όρους ενεργών τάσεων, η συνάρτηση διαρροής λαμβάνει τη μορφή:

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} \left(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl})\langle\hat{\sigma}_{\max}\rangle - \gamma\langle-\hat{\sigma}_{\max}\rangle \right) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = 0,$$

με

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}; \quad 0 \leq \alpha \leq 0.5,$$

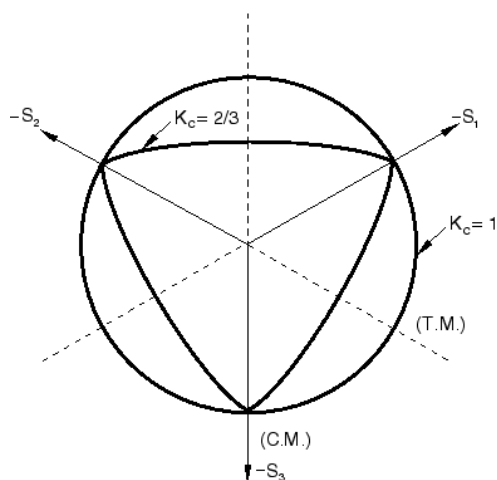
$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})}(1 - \alpha) - (1 + \alpha),$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1}.$$

Εδώ,

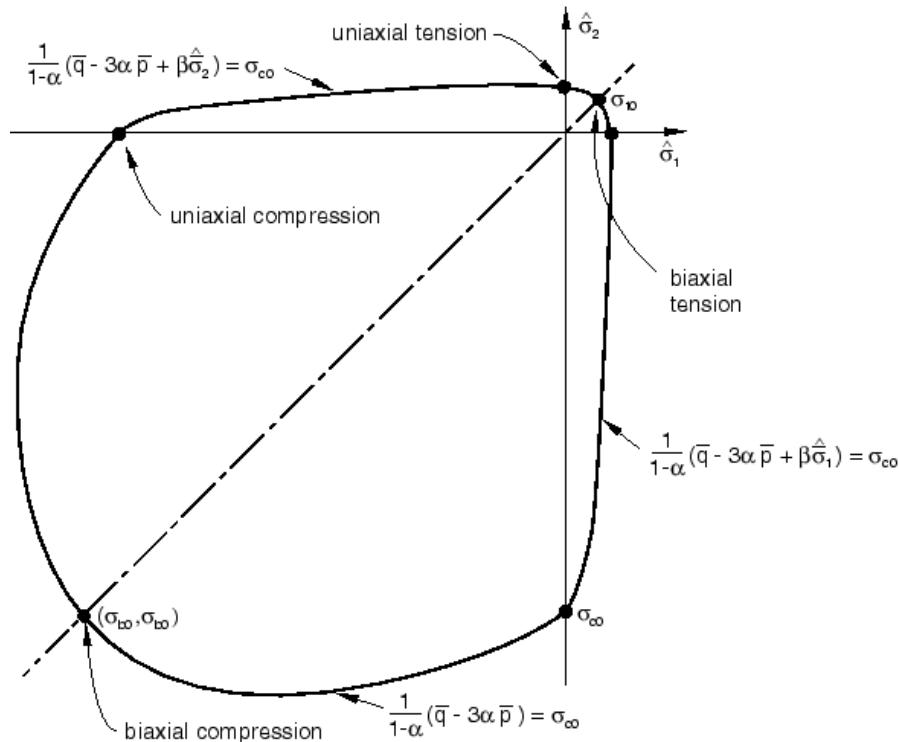
- $\hat{\sigma}_{\max}$ είναι η μέγιστη ενεργός κύρια τάση,
- σ_{b0}/σ_{c0} είναι ο λόγος της αρχικής διαξονικής θλιπτικής τάσης διαρροής (initial equibiaxial compressive yield stress) προς την αρχική μονοαξονική θλιπτική τάση διαρροής (initial uniaxial compressive yield stress). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1.16.

- K_c είναι ο λόγος της second stress invariant στο μεσημβρινό εφελκυσμού (on the tensile meridian), $q^{(TM)}$, προς αυτής στο μεσημβρινό θλίψης (compressive meridian), $q^{(CM)}$, στην αρχική διαρροή για οποιαδήποτε δεδομένη τιμή της pressure invariant p , έτσι ώστε η μέγιστη κύρια τάση να είναι αρνητική, $\hat{\sigma}_{max} < 0$ (βλέπε Σχήμα 2.26). Πρέπει να πληρείται η προϋπόθεση $0.5 < K_c \leq 1.0$ (η προεπιλεγμένη τιμή είναι $2/3$),
- $\bar{\sigma}_t(\bar{\epsilon}_t^{pl})$ είναι η ενεργός εφελκυστική τάση συνοχής (effective tensile cohesion stress) και
- $\bar{\sigma}_c(\bar{\epsilon}_c^{pl})$ είναι η ενεργός θλιπτική τάση συνοχής (effective compressive cohesion stress).
-



Σχήμα 2.26 - Επιφάνειες διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο (deviatoric plane), που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές του K_c .

Χαρακτηριστικές επιφάνειες διαρροής φαίνονται στο Σχήμα 2.26 στο αποκλίνον επίπεδο και στο Σχήμα 2.27 για συνθήκες επίπεδης έντασης.



Σχήμα 2.27 - Επιφάνεια διαρροής σε επίπεδη ένταση (Yield surface in plane stress).

2.2.5.8.5 Μη συσχετισμένη ροή

Επειδή η πλαστική ροή είναι ασυσχετίστη (Because plastic flow is nonassociated), η χρήση αυτού του μοντέλου σκυροδέματος οδηγεί σε μη συμμετρικό μητρώο δυσκαμψίας του υλικού. Ως εκ τούτου, για να προκύψει ένας αποδεκτός ρυθμός σύγκλισης στο Abaqus/Standard, ο μη συμμετρικός πίνακας αποθήκευσης (unsymmetric matrix storage) και το σύστημα επίλυσης (solution scheme) θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Το Abaqus/Standard θα ενεργοποιήσει αυτόματα το μη συμμετρικό σύστημα επίλυσης (unsymmetric solution scheme), εάν χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση το παρόν μοντέλο σκυροδέματος. Υπάρχει η δυνατότητα να απενεργοποιηθεί από το χρήστη το μη συμμετρικό σύστημα επίλυσης (unsymmetric solution scheme) για κάποιο συγκεκριμένο βήμα (step).

2.2.5.8.6 Ιξωδοπλαστική κανονικοποίησης (Viscoplastic regularization)

Μοντέλα υλικών, που παρουσιάζουν συμπεριφορά «φθιτού κλάδου» (στο αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, softening behavior) και υποβάθμιση της δυσκαμψίας (stiffness degradation), συχνά οδηγούν σε σοβαρά

προβλήματα σύγκλισης στο Abaqus/Standard. Μια συνηθισμένη τεχνική προκειμένου να ξεπεραστούν κάποια από τα προβλήματα σύγκλισης είναι η χρήση ιξωδοπλαστικής κανονικοποίησης των καταστατικών εξισώσεων, που έχει σα συνέπεια η σταθερή εφαπτομενική δυσκαμψία του φθιτού κλάδου του υλικού (softening material) να καταστεί θετική για επαρκώς μικρές προσαυξήσεις χρόνου (time increments).

Το συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος μπορεί να μοντελοποιηθεί στο Abaqus/Standard χρησιμοποιώντας την ιξωδοπλαστικότητα (viscoplasticity), επιτρέποντας να υπάρχουν τάσεις εκτός της επιφάνειας διαρροής. Χρησιμοποιείται μια γενίκευση της μοντελοποίησης Duvaut-Lions, σύμφωνα με την οποία ο ταυυστής του ρυθμού ιξωδοπλαστικής παραμόρφωσης (the viscoplastic strain rate tensor), $\dot{\epsilon}_v^{pl}$, ορίζεται ως:

$$\dot{\epsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu}(\epsilon^{pl} - \epsilon_v^{pl}).$$

Το μ είναι η παράμετρος του ιξώδους που αντιπροσωπεύει το χρόνο χαλάρωσης του ιξωδοπλαστικού συστήματος, και ϵ^{pl} είναι η πλαστική παραμόρφωση που αξιολογείται στο βασικό διάγραμμα (inviscid backbone model).

Ομοίως, ορίζεται μια μεταβλητή υποβάθμισης ιξώδους δυσκαμψίας, d_v , για το ιξωδοπλαστικό σύστημα ως:

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu}(d - d_v),$$

όπου d είναι η μεταβλητή υποβάθμισης που αξιολογείται στο ιδεατό μοντέλο κορμού. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του ιξωδοπλαστικού μοντέλου (viscoplastic model) δίνεται ως:

$$\sigma = (1 - d_v)\mathbf{D}_0^{el} : (\epsilon - \epsilon_v^{pl}).$$

Η χρήση της ιξωδοπλαστικής μοντελοποίησης (viscoplastic regularization) με μια μικρή τιμή για την παράμετρο ιξώδους (μικρή σε σύγκριση με τη χαρακτηριστική επαύξηση του χρόνου) συνήθως βοηθά στη βελτίωση του ρυθμού σύγκλισης του μοντέλου στο «φθιτό κλάδο» της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων (softening regime), χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τα αποτελέσματα. Η βασική ιδέα είναι ότι η λύση του ιξωδοπλαστικού συστήματος (viscoplastic system) ηρεμεί με εκείνη της ιδεατής υπόθεσης καθώς $t/\mu \rightarrow \infty$, όπου το t αντιπροσωπεύει το χρόνο. Μπορεί να καθοριστεί η τιμή της παραμέτρου ιξώδους στο πλαίσιο του καθορισμού της

συμπεριφοράς του συγκεκριμένου μοντέλου σκυροδέματος. Εάν η παράμετρος ιξώδους είναι διάφορη του μηδενός, τα αποτελέσματα εξόδου της πλαστικής παραμόρφωσης και της υποβάθμισης της δυσκαμψίας αναφέρονται στις ιξωδοπλαστικές τιμές, ϵ_v^{pl} και d_v . Στο Abaqus/Standard η προεπιλεγμένη τιμή της παραμέτρου ιξώδους είναι μηδέν, έτσι ώστε να μην εκτελείται ιξωδοπλαστική μοντελοποίηση (viscoplastic regularization).

2.2.5.9 Απόσβεση υλικού

Το συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κάποια απόσβεση υλικού. Αν προσδιορίζεται απόσβεση ανάλογη της δυσκαμψίας, το Abaqus υπολογίζει την τάση απόσβεσης (damping stress) με βάση την άθικτη ελαστική δυσκαμψία. Αυτό μπορεί να εισάγει μεγάλες τεχνητές δυνάμεις απόσβεσης (large artificial damping forces) σε στοιχεία τα οποία υπόκεινται σε σοβαρή βλάβη σε υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης (high strain rates).

2.2.5.10 Οπτικοποίηση των «διευθύνσεων των ρωγμών»

Σε αντίθεση με συγκεκριμένα μοντέλα που βασίζονται στην προσέγγιση smeared crack, το συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος δεν έχει την έννοια της ανάπτυξης ρωγμών στο σημείο ολοκλήρωσης του υλικού. Ωστόσο, είναι δυνατόν να εισαχθεί η έννοια μιας διεύθυνσης ενεργούς ρωγμής (effective crack direction) με σκοπό την απόκτηση γραφικής απεικόνισης των μοτίβων ρηγμάτωσης στην κατασκευή σκυροδέματος. Διαφορετικά κριτήρια μπορούν να υιοθετηθούν στο πλαίσιο της βαθμωτής βλάβης πλαστικότητας (scalar-damage plasticity) για τον καθορισμό της διεύθυνσης των ρωγμών. Ακολουθώντας τα συμπεράσματα των Lubliner et al (1989), μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ρηγμάτωση ξεκινά στα σημεία όπου η ισοδύναμη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από το μηδέν, $\bar{\epsilon}_t^{pl} > 0$, και η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση είναι θετική. Η κατεύθυνση του διανύσματος κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής υποτίθεται ότι είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύρια πλαστικής παραμόρφωσης.

2.2.5.11 Στοιχεία (Elements)

Το Abaqus προσφέρει μια ποικιλία από στοιχεία για χρήση με το συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος: δικτύωμα (truss), κέλυφος (shell), επίπεδη ένταση (plane stress), επίπεδη παραμόρφωση (plane strain), γενικευμένη επίπεδη παραμόρφωση

(generalized plane strain), αξονοσυμμετρικά (axisymmetric), και τρισδιάστατα (three-dimensional) στοιχεία.

2.2.5.12 Αποτελέσματα εξόδου (Output)

Διατίθενται οι παρακάτω μεταβλητές που αφορούν συγκεκριμένα τα σημεία του υλικού αυτού του μοντέλου σκυροδέματος:

- DAMAGEC
Μεταβλητή θλιπτικής βλάβης, d_c .
- DAMAGE
Μεταβλητή εφελκυστικής βλάβης, d_e .
- PEEQ
Ισοδύναμη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση, $\bar{\epsilon}_e^{pl}$.
- PEEQT
Ισοδύναμη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση, $\bar{\epsilon}_t^{pl}$.
- SDEG
Μεταβλητή υποβάθμισης της δυσκαμψίας, d .
- DMENER
Ενέργειας που διαχέεται ανά μονάδα όγκου λόγω της βλάβης.
- ELDMD
Συνολική ενέργεια διαχέεται στο στοιχείο λόγω της βλάβης.
- ALLDMD
Ενέργεια που διαχέεται στο σύνολο (ή σε μέρος) του μοντέλου λόγω της βλάβης. Η συνεισφορά από το ALLDMD περιλαμβάνεται στην συνολική ενέργεια παραμόρφωσης ALLIE (total strain energy).
- EDMDDEN
Ενέργεια που διαχέεται ανά μονάδα όγκου στο στοιχείο λόγω της βλάβης.
- SENER

Το ανακτήσιμο μέρος της ενέργειας ανά μονάδα όγκου.

- ELSE

Το ανακτήσιμο μέρος της ενέργειας στο στοιχείο.

- ALLSE

Το ανακτήσιμο μέρος της ενέργειας σε όλο ή μέρος του μοντέλου.

- ESEDEN

Το ανακτήσιμο μέρος της ενέργειας ανά μονάδα όγκου του στοιχείου.

\

2.2.6 Υλικό Drucker - Prager

2.2.6.1 Γενικά

Το κριτήριο διαρροής Drucker–Prager χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του κατά πόσον ένα υλικό έχει αστοχήσει πλαστικά ή κατά πόσο έχει υπερβεί το πλαστικό όριο διαρροής. Το κριτήριο εισήχθη για να ασχοληθεί με την πλαστική παραμόρφωση των εδαφών. Αυτό και πολλές παραλλαγές του έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα υλικά, όπως βράχος, σκυρόδεμα, πολυμερή, σαπούνι και άλλα υλικά, των οποίων η συμπεριφορά εξαρτάται από την πίεση στην οποία υπόκεινται.

Το κριτήριο διαρροής Drucker–Prager έχει τη μορφή:

$$\sqrt{J_2} = A + B I_1$$

όπου I_1 είναι η πρώτη μεταβλητή των διατμητικών τάσεων Cauchy και J_2 είναι η δεύτερη μεταβλητή του αποκλίνοντος τμήματος των διατμητικών τάσεων Cauchy. Οι σταθερές A , B προσδιορίζονται μέσα από πειράματα.

Το κριτήριο Drucker–Prager μπορεί να εκφραστεί σε όρους ισοδύναμης τάσης (τάση von Mises) και υδροστατικής πίεσης ως εξής:

$$\sigma_e = a + b \sigma_m$$

όπου σ_e η ισοδύναμη τάση (τάση von Mises), σ_m η υδροστατική τάση (τάση του μέσου) και a, b σταθερές σχετικές με το υλικό.

Το κριτήριο διαρροής Drucker–Prager μπορεί να εκφραστεί σε Haigh-Westergaard συντεταγμένες ως εξής:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\rho - \sqrt{3} B\xi = A$$

Η επιφάνεια αστοχίας του κριτηρίου διαρροής Drucker–Prager αποτελεί μια πιο απλή παραλλαγή της επιφάνειας αστοχίας του κριτηρίου διαρροής Mohr-Coulomb.

2.2.6.2 Εκφράσεις για τις σταθερές A και B

Το κριτήριο Drucker-Prager μπορεί να εκφραστεί σε όρους κυρίων τάσεων ως εξής:

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = A + B (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) .$$

Εάν σ_t είναι η τάση διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό τότε το κριτήριο Drucker-Prager μπορεί να γραφτεί ως εξής:

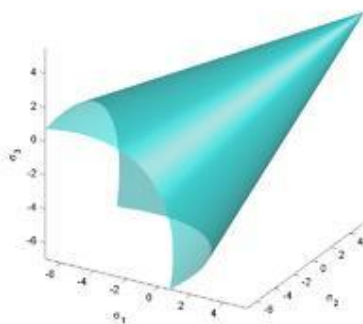
$$\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_t = A + B \sigma_t .$$

Αντίστοιχα εάν σ_c είναι η τάση διαρροής σε μονοαξονική θλίψη τότε το κριτήριο Drucker-Prager μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_c = A - B \sigma_c .$$

Επιλύοντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις προκύπτουν οι σταθερές A και B, ως εξής:

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \right) ; \quad B = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_t - \sigma_c}{\sigma_c + \sigma_t} \right) .$$



Σχήμα 2.28 – Επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager στο π-επίπεδο για $c=2$ και γωνία τριβής $\phi=20^\circ$ στους τρεις άξονες των κύριων τάσεων $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

2.2.6.3 Αναλογία τάσεων β

Στο κριτήριο διαρροής Drucker-Prager η διαφορά στις τάσεις διαρροής στο μονοαξονικό εφελκυσμό και στην μονοαξονική θλίψη εκφράζεται μέσω του λόγου τάσεων β (uniaxial asymmetry ratio):

$$\beta = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} = \frac{1 - \sqrt{3} B}{1 + \sqrt{3} B}.$$

2.2.6.4 Εκφράσεις σε όρους συνοχής c και γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ

Όπως προαναφέρθηκε, η επιφάνεια αστοχίας του κριτηρίου διαρροής Drucker-Prager αποτελεί μια πιο απλή παραλλαγή της επιφάνειας αστοχίας του κριτηρίου διαρροής Mohr-Coulomb. Συνεπώς οι σταθερές A και B μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της σταθεράς συνοχής του υλικού c (cohesion) και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού ϕ (friction angle) που περιγράφουν την επιφάνεια αστοχίας του κριτηρίου διαρροής Mohr-Coulomb.

Εάν η επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager είναι περιγεγραμμένη της επιφάνειας αστοχίας Mohr-Coulomb ισχύουν οι εξής εκφράσεις για τα A και B

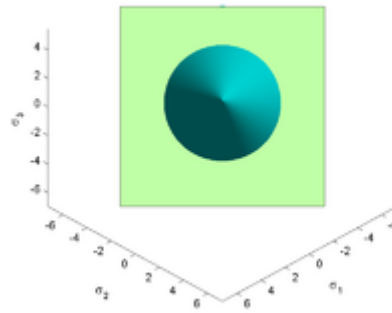
$$A = \frac{6 c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}; \quad B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$$

Εάν η επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager είναι εγγεγραμμένη της επιφάνειας αστοχίας Mohr-Coulomb ισχύουν οι εξής εκφράσεις για τα A και B

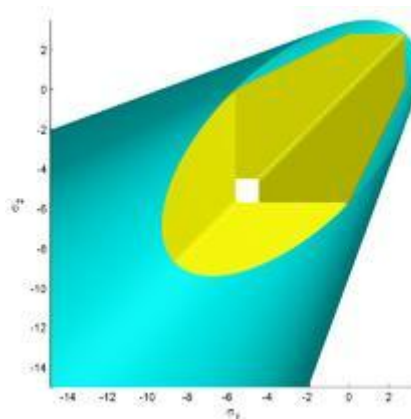
$$A = \frac{6 c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}; \quad B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$$

Ενώ, η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και η συνοχή c εκφράζονται συναρτήσει των τάσεων διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό και μονοαξονική θλίψη ως εξής:

$$\sin \phi = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad \text{και} \quad c = \frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c - \sigma_t} \tan \phi$$



Σχήμα 2.29 – Επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager στο π-επίπεδο για $c=2$ και $\phi=-20^\circ$



Σχήμα 2.30 – Επιφάνειες αστοχίας Drucker-Prager (μπλε χρώμα) και Mohr-Coulomb (κίτρινο χρώμα) στο σ_1 - σ_2 επίπεδο

2.2.6.5 Ειδικές εκφράσεις των A και B σε όρους c, ϕ

Η έκφραση του κριτηρίου διαρροής Mohr-Coulomb σε Haigh-Westergaard συντεταγμένες είναι η εξής:

$$\left[\sqrt{3} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) - \sin \phi \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \right] \rho - \sqrt{2} \sin(\phi) \xi = \sqrt{6} c \cos \phi$$

Εάν υποθέσουμε ότι η επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager είναι περιγεγραμμένη της Mohr-Coulomb, έτσι ώστε οι δύο επιφάνειες να συμπίπτουν για $\theta = \pi/3$, τότε σε αυτά τα σημεία η επιφάνεια αστοχίας Mohr-Coulomb μπορεί να εκφραστεί μέσα από την παρακάτω σχέση:

$$\left[\sqrt{3} \sin \frac{2\pi}{3} - \sin \phi \cos \frac{2\pi}{3} \right] \rho - \sqrt{2} \sin(\phi) \xi = \sqrt{6} c \cos \phi$$

ή

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\rho - \frac{2 \sin \phi}{3 + \sin \phi} \xi = \frac{\sqrt{12}c \cos \phi}{3 + \sin \phi}$$

Όπως προαναφέρθηκε, το κριτήριο διαρροής Drucker–Prager μπορεί να εκφραστεί σε Haigh-Westergaard συντεταγμένες ως εξής:

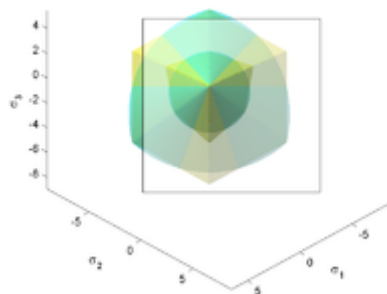
$$\frac{1}{\sqrt{2}}\rho - \sqrt{3} B\xi = A$$

Από τις δύο αμέσως προηγούμενες σχέσεις προκύπτει για τα A και B σε όρους c,φ:

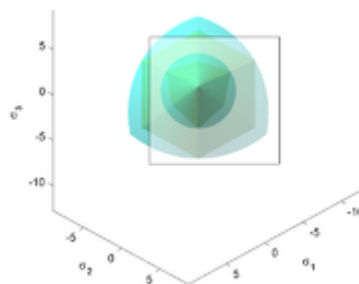
$$A = \frac{\sqrt{12}c \cos \phi}{3 + \sin \phi} = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} ; B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$$

Εάν τώρα υποθέσουμε ότι η επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager είναι εγγεγραμμένη της Mohr-Coulomb έτσι ώστε οι δύο επιφάνειες να συμπίπτουν για $\theta=0$ προκύπτει για τα A και B σε όρους c,φ:

$$A = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} ; B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$$



Σχήμα 2.31 – Επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager εγγεγραμμένη της Mohr-Coulomb στο π-επίπεδο για $c=2$ και $\phi=-20^\circ$.



Σχήμα 2.32 Επιφάνεια αστοχίας Drucker-Prager περιγεγραμμένη της Mohr-Coulomb στο π-επίπεδο για $c=2$ και $\phi=-20^\circ$.

2.2.6.6 Ισότροπο μοντέλο Drucker-Prager

Το κριτήριο διαρροής Drucker-Prager μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά ως εξής:

$$J_2 = (A + B I_1)^2 = a + b I_1 + c I_1^2 .$$

όπου για τα a , b , c σύμφωνα με το Deshrande-Fleck κριτήριο διαρροής ισχύουν οι σχέσεις:

$$a = (1 + \beta^2) \sigma_y^2 , \quad b = 0 , \quad c = -\frac{\beta^2}{3}$$

όπου β είναι παράμετρος που ορίζει το σχήμα της επιφάνειας αστοχίας και σ_y είναι η τάση διαρροής για εφελκυσμό και θλίψη.

2.3 Θεωρία διατύπωσης επαφής (contact formulation)

2.3.1 Γενικά στοιχεία

Το Abaqus παρέχει στο χρήστη τρεις διαφορετικούς τρόπους για τον ορισμό της επαφής. Στο Abaqus/Standard είναι διαθέσιμα:

- η γενική επαφή (general contact)
- το ζεύγος επαφής (contact pairs), και
- τα στοιχεία επαφής (contact elements)

Κάθε προσέγγιση παρουσιάζει προτερήματα και μειονεκτήματα.

2.3.1.1 Προσδιορισμός προσομοίωσης επαφής που ορίζεται με επιφάνειες

Για κάθε προσομοίωση επαφής που ορίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της γενικής επαφής ή του ζεύγους επαφής, πρέπει να δίνονται τα παρακάτω:

- οι ορισμοί των επιφανειών (surface definitions) των σωμάτων που ενδεχομένως να έρθουν σε επαφή
- οι επιφάνειες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (contact interactions)

- οποιαδήποτε ιδιότητα των επιφανειών που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διεπαφή και δεν ορίζεται ήδη από τις προεπιλεγμένες ιδιότητες.
- οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες επαφής των μοντέλων,
- οποιουσδήποτε αλγοριθμικούς περιορισμούς επαφής για την ανάλυση (algorithmic contact controls) κ.ά.

2.3.1.1.1 Επιφάνειες

Οι επιφάνειες μπορούν να οριστούν στην αρχή της ανάλυσης . Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες επιφανειών:

- παραμορφώσιμες και άκαμπτες επιφάνειες που ορίζονται από στοιχεία (element-based surfaces)
- παραμορφώσιμες και άκαμπτες επιφάνειες που ορίζονται από κόμβους (node-based surfaces)
- αναλυτικές άκαμπτες επιφάνειες (analytical rigid surfaces), και
- επιφάνειες υλικού κατά Euler (Eulerian material surfaces), που είναι διαθέσιμες στο Abaqus/Explicit.

2.3.1.1.2 Αλληλεπιδράσεις επιφανειών

Οι αλληλεπιδράσεις επιφανειών για τα ζεύγη επαφής καθώς και τη γενική επαφή ορίζονται προσδιορίζοντας τους συνδυασμούς επιφανειών και τις επιφάνειες ιδιοεπαφής (self-contact surfaces). Τουλάχιστον μία επιφάνεια από αυτές που αλληλεπιδρούν δεν πρέπει να προσδιορίζεται με κόμβους, καθώς επίσης, τουλάχιστον μια επιφάνεια δεν πρέπει να είναι αναλυτική άκαμπτη επιφάνεια.

2.3.1.1.3 Ιδιότητες επιφανειών

Ιδιότητες οι οποίες δεν είναι προεπιλεγμένες (όπως π.χ. το πάχος) μπορούν να προσδιοριστούν για συγκεκριμένες επιφάνειες.

2.3.1.2 Δυνατότητες που προσφέρει η προσομοίωση επαφής στο Abaqus/Standard

Παρακάτω αναφέρονται οι δυνατότητες που προσφέρουν η γενική επαφή και τα ζεύγη επαφής στο Abaqus/Standard:

- επαφή μεταξύ δύο παραμορφώσιμων σωμάτων,
- επαφή μεταξύ μιας άκαμπτης επιφάνειας και ενός παραμορφώσιμου σώματος,
- ιδιοεπαφή (self-contact) πεπερασμένης ολίσθησης ενός παραμορφώσιμου σώματος,
- επαφή μικρής ή πεπερασμένης ολίσθησης μεταξύ ενός σετ κόμβων και μιας άκαμπτης επιφάνειας,
- επαφή μεταξύ ενός σετ κόμβων και μιας παραμορφώσιμης επιφάνειας,
- προβλήματα κατά τα οποία δύο ξεχωριστές επιφάνειες πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχει σχετική μετακίνηση, κ.ά.

Τα περισσότερα προβλήματα μπορούν να προσομοιωθούν είτε με τη μέθοδο της γενικής επαφής, είτε με τα ζεύγη επαφής. Για τα υπόλοιπα προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία επαφής (contact elements), που είναι διαθέσιμα στο Abaqus/Standard.

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις το ζεύγος επαφής. Αυτό αναλύεται παρακάτω εκτενέστερα. Για περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τη γενική επαφή και τα στοιχεία επαφής, βλ. Chapter 32, του Abaqus Analysis User's Manual.

2.3.2 Ορισμός ζεύγους επαφής στο Abaqus/Standard

2.3.2.1 Εισαγωγή

Το ζεύγος επαφής στο Abaqus /Standard μπορεί να οριστεί χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος άκαμπτης και παραμορφώσιμης επιφάνειας ή μία παραμορφώσιμη επιφάνεια. Δεν είναι υποχρεωτικό να χρησιμοποιούνται επιφάνειες με ίδια διακριτοποίηση και δεν είναι δυνατόν να οριστεί μεταξύ μιας διδιάστατης και μιας τρισδιάστατης επιφάνειας.

2.3.2.2 Ορισμός ζεύγους επαφής

Απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός των δύο επιφανειών που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι επιφάνειες επαφής θα πρέπει να εκτίνονται τόσο ώστε να

συνπεριλαμβάνουν περιοχές οι οποίες ενδέχεται να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Από την άλλη πλευρά, το να συμπεριλαμβάνονται περιοχές οι οποίες δεν υπάρχει περίπτωση να αλληλεπιδράσουν αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος.

Κάθε ζεύγος επαφής αντιστοιχεί σε μια διατύπωση επαφής (contact formulation) και πρέπει να αναφέρεται σε μια ιδιότητα αλληλεπίδρασης (interaction property).

Στην περίπτωση που το ζεύγος επαφής περιέχει δύο επιφάνειες, οι δύο επιφάνειες δεν επιτρέπεται να περιλαμβάνουν κοινούς κόμβους, και, επιπλέον, πρέπει να οριστούν η κύρια επιφάνεια (master surface) και η δευτερεύουσα επιφάνεια (slave surface). Ισχύει ότι:

- Μεταξύ δύο επιφανειών η μεγαλύτερη λειτουργεί ως κύρια επιφάνεια.
- Εάν οι επιφάνειες έχουν συγκρίσιμο μέγεθος, η πιο δύσκαμπτη από τις δύο επιφάνειες πρέπει να οριστεί ως κύρια επιφάνεια.
- Εάν οι επιφάνειες έχουν συγκρίσιμο μέγεθος και δυσκαμψία, τότε η επιφάνεια με την πιο χονδροειδή διακριτοποίηση ορίζεται κύρια επιφάνεια.

Υπάρχουν τέσσερις επιλογές για τον ορισμό του ζεύγους επαφής:

- Πεπερασμένη ολίσθηση και διατύπωση επαφής κόμβου-επιφάνειας (finite-sliding, node-to-surface formulation). Εξ' ορισμού το Abaqus/Standard χρησιμοποιεί αυτή την επιλογή, εκτός κι αν οριστεί κάτι διαφορετικό.

Στο αρχείο εισαγωγής γράφεται:

```
*CONTACT PAIR, INTERACTION="όνομα επαφής"
```

```
“όνομα δευτερεύουσας επιφάνειας” , “όνομα κύριας επιφάνειας”
```

Ή εναλλακτικά

```
*CONTACT PAIR, INTERACTION="όνομα επαφής", TYPE=NODE TO SURFACE
```

```
“όνομα δευτερεύουσας επιφάνειας” , “όνομα κύριας επιφάνειας”
```

- Πεπερασμένη ολίσθηση και διατύπωση επαφής επιφάνειας-επιφάνειας (finite-sliding, surface-to-surface formulation).

Στο αρχείο εισαγωγής γράφεται:

*CONTACT PAIR, INTERACTION="όνομα επαφής", TYPE= SURFACE TO SURFACE

"όνομα δευτερεύουσας επιφάνειας" ,"όνομα κύριας επιφάνειας"

- Μικρή ολίσθηση και διατύπωση επαφής κόμβου-επιφάνειας (small-sliding, node-to-surface formulation).

Στο αρχείο εισαγωγής γράφεται:

*CONTACT PAIR, INTERACTION="όνομα επαφής", SMALL SLIDING

"όνομα δευτερεύουσας επιφάνειας" ,"όνομα κύριας επιφάνειας"

Ή εναλλακτικά

*CONTACT PAIR, INTERACTION="όνομα επαφής", SMALL SLIDING,
TYPE=NODE TO SURFACE

"όνομα δευτερεύουσας επιφάνειας" ,"όνομα κύριας επιφάνειας"

- Μικρή ολίσθηση και διατύπωση επαφής επιφάνειας-επιφάνειας (small-sliding, surface-to-surface formulation).

Στο αρχείο εισαγωγής γράφεται:

*CONTACT PAIR, INTERACTION="όνομα επαφής", SMALL SLIDING,
TYPE= SURFACE TO SURFACE

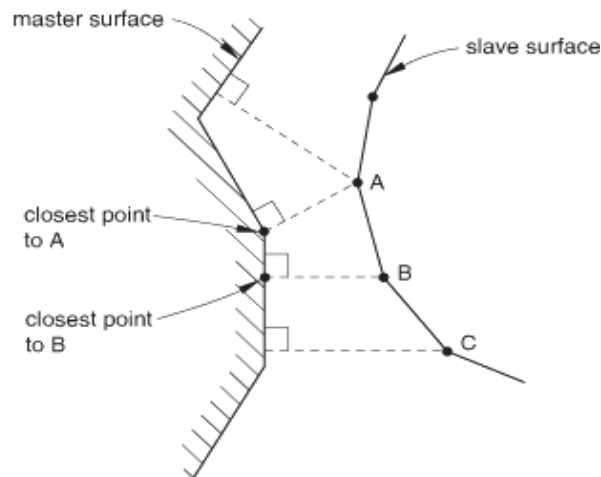
"όνομα δευτερεύουσας επιφάνειας" ,"όνομα κύριας επιφάνειας"

2.3.3 Διακριτοποίηση των επιφανειών του ζεύγους επαφής

Το Abaqus/Standard επιβάλλει περιορισμούς υπό όρους σε διάφορες περιοχές των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, ώστε να προσομοιώσει τις συνθήκες επαφής. Οι περιοχές και οι συνθήκες των περιορισμών εξαρτώνται από τη διακριτοποίηση που χρησιμοποιείται γενικά στη διατύπωση της επαφής. Το Abaqus/Standard προσφέρει δύο επιλογές.

2.3.3.1 Διακριτοποίηση επαφής τύπου κόμβου-επιφάνειας

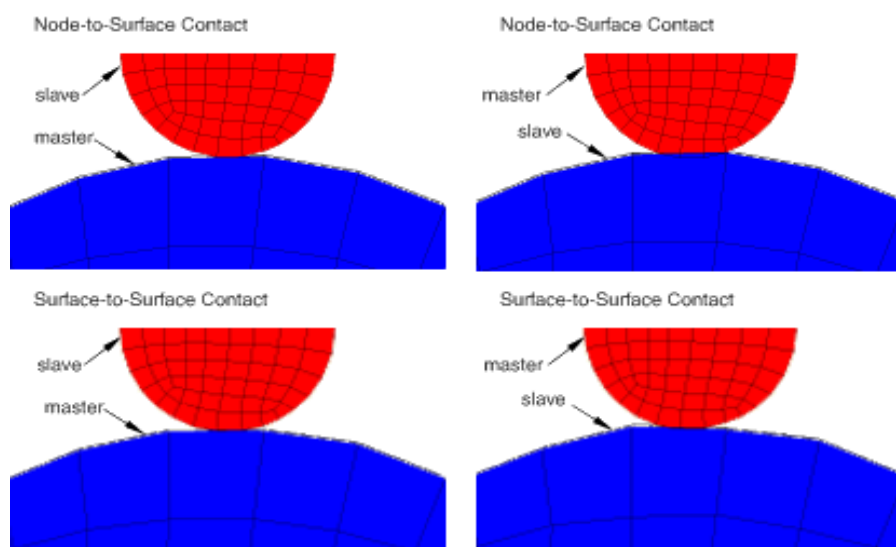
Σε αυτή την περίπτωση, κάθε κόμβος στη δευτερεύουσα επιφάνεια αλληλεπιδρά με ένα σημείο προβολής στην κύρια επιφάνεια της απέναντι μεριάς της διεπαφής. Έτσι, κάθε συνθήκη επαφής περιλαμβάνει έναν κόμβο στη δευτερεύουσα επιφάνεια και ένα σετ κόμβων στην κύρια επιφάνεια, από το οποίο οι τιμές παρεμβάλλονται στο σημείο προβολής (βλ Σχήμα 2.33).



Σχήμα 2.33 – Διακριτοποίηση επαφής τύπου κόμβου-επιφάνειας.

Η διακριτοποίηση αυτού του τύπου έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Οι κόμβοι στη δευτερεύουσα επιφάνεια (slave nodes) περιορίζονται, ώστε να μη μπορούν να διεισδύουν στην κύρια επιφάνεια. Όμως, οι κόμβοι της κύριας επιφάνειας μπορούν να διεισδύουν στη δευτερεύουσα επιφάνεια



Σχήμα 2.34 – Σύγκριση διακριτοποίησης επαφής τύπου κόμβου-επιφάνειας (πάνω) και επιφάνειας-επιφάνειας (κάτω) για δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

- Η διεύθυνση της επαφής ορίζεται από το διάνυσμα που είναι κάθετο στην κύρια επιφάνεια.
- Η μόνη πληροφορία που απαιτείται για τη δευτερεύουσα επιφάνεια είναι η τοποθεσία και η επιφάνεια που σχετίζεται με κάθε κόμβο. Έτσι, η δευτερεύουσα επιφάνεια μπορεί να οριστεί ως σελτ κόμβων, δηλ μια επιφάνεια που ορίζεται από κόμβους.
- Είναι διαθέσιμη ακόμα και όταν δεν χρησιμοποιείται στο ζευγός επαφής επιφάνεια που ορίζεται από κόμβους.

2.3.3.2 Διακριτοποίηση επαφής τύπου επιφάνειας-επιφάνειας

Σε αυτού του τύπου τη διακριτοποίηση λαμβάνεται υπόψη το σχήμα και των δύο επιφανειών στην περιοχή της επαφής. Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά της:

- Επιβάλλονται συνθήκες επαφής στις περιοχές κοντά στους κόμβους των δευτερευόντων επιφανειών (slave nodes), και όχι σε μεμονωμένους κόμβους.
- Η διεύθυνση της επαφής βασίζεται σε ένα διάνυσμα, που θεωρείται το μέσο των διανυσμάτων που είναι κάθετα στη δευτερεύουσα επιφάνεια στην περιοχή που περιβάλλει τον κόμβο της δευτερεύουσας επιφάνειας.
- Δεν εφαρμόζεται αν στο ζεύγος επαφής ανήκει επιφάνεια που ορίζεται από κόμβους.

2.3.3.3 Επιλογή τύπου διακριτοποίησης

Γενικά, η διακριτοποίηση τύπου επιφάνειας-επιφάνειας παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα τάσεων, σε σχέση με τον άλλο τύπο διακριτοποίησης, εάν η γεωμετρία της επιφάνειας είναι λογικά καλώς αναπαραριστόμενη από τις επιφάνειες επαφής. Επίσης, επηρεάζεται λιγότερο από τον ορισμό της κύριας και της δευτερεύουσας επιφάνειας, σε σχέση με τη διακριτοποίηση κόμβου-επιφάνειας.

Η διακριτοποίηση επιφάνειας-επιφάνειας περιλαμβάνει περισσότερους κόμβους ανά δέσμευση και έτσι είναι πιθανόν να αυξηθεί το υπολογιστικό κόστος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το επιπλέον κόστος είναι μικρό. Υπάρχουν περιπτώσεις

που το κόστος μπορεί να αυξηθεί. Οι παράγοντες που οδηγούν σε υψηλό υπολογιστικό κόστος είναι:

- Ένα μεγάλο μέρος του μοντέλου συμμετέχει στην επαφή.
- Η κύρια επιφάνεια είναι καλύτερα διακριτοποιημένη από τη δευτερεύουσα.
- Πολλαπλές στρώσεις κελύφων συμμετέχουν στην επαφή, έτσι ώστε η κύρια επιφάνεια ενός ζεύγους επαφής να λειτουργεί ως δευτερεύουσα επιφάνεια ενός άλλου ζεύγους επαφής.

Συνοψίζοντας, η διακριτοποίηση επιφάνειας-επιφάνειας προορίζεται για κοινές περιπτώσεις, στις οποίες τα διανύσματα, που βρίσκονται κάθετα στις επιφάνειες, είναι κατά προσέγγιση αντίρροπα. Η διατύπωση κόμβου-επιφάνειας είναι καλό να χρησιμοποιείται σε προβλήματα επαφής που περιλαμβάνονται ακμές ή γωνίες, αν τα αντίστοιχα διανύσματα που είναι κάθετα στην κύρια και τη δευτερεύουσα επιφάνεια δεν είναι κατά προσέγγιση αντίρροπα στην περιοχή της επαφής.

3 Ανάλυση, Αποτελέσματα και Σχόλια

3.1 Απλοποιημένο Προσομοίωμα – Μέθοδος τριών δυνάμεων

3.1.1 Προσομοίωση Π1 – Υλικό τοιχώματος *DAMAGED PLASTICITY

3.1.1.1 Περιγραφή προβλήματος και προσομοίωση στο πρόγραμμα Π.Σ. Abaqus

Προσομοιώνεται το ένα από τα δύο γειτονικά κτίρια (κτίριο Α) το οποίο είναι σχεδιασμένο με ειδικά τοιχώματα – προσκρουστήρες. Οι δοκοί, τα υποστυλώματα και ο οπλισμός προσομοιώνονται με διδιάστατα στοιχεία δοκού (B21 elements), τα οποία έχουν ενεργούς βαθμούς ελευθερίας τη μεταφορική κίνηση κατά τους άξονες Χ, Υ και τη στροφή περί τον άξονα Ζ (βαθμοί ελευθερίας 1, 2, 6). Το τοίχωμα προσομοιώνεται με διδιάστατα τετρακομβικά στοιχεία επίπεδης έντασης (CPS4 elements) με ενεργούς βαθμούς ελευθερίας τη μεταφορική κίνηση κατά τους άξονες Χ,Υ (βαθμοί ελευθερίας 1, 2). Πραγματοποιείται πυκνή διακριτοποίηση στο τοίχωμα, με αποτέλεσμα αυτό να αποτελείται συνολικά από 1344 στοιχεία.

Η κατασκευή είναι πακτωμένη στη βάση της. Οι συνοριακές συνθήκες ορίζονται με την εντολή *BOUNDARIES δεσμεύοντας όλους τους ενεργούς βαθμούς ελευθερίας.

Το υλικό των δοκών και των υποστυλωμάτων είναι σκυρόδεμα. Γίνεται η παραδοχή ότι το υλικό των μελών αυτών είναι απολύτως γραμμικό (*MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC). Μια παραδοχή που ελάχιστα επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Το μέτρο ελαστικότητας είναι 29000 MPa ,ο λόγος Poisson 0,30. και η πυκνότητα 2,5 Mg/m³.

```
** LINEAR_ELASTIC
*MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC
*ELASTIC, TYPE=ISO
    29.E+6,    0.3
*DENSITY
2.5,
```

Για τον οπλισμό (διαμήκη και εγκάρσιο) χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S500 (*MATERIAL, NAME=STEEL). Ο νόμος υλικού που διέπει το χάλυβα είναι:

Τάση – σ (kPa)	Παραμόρφωση - ϵ
0,00	0,00
500000	0,0025
500000,3	0,0100

Το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 200000 MPa, ο λόγος Poisson 0,30 και η πυκνότητα 7,85 Mg/m³.

```

** STEEL
*MATERIAL, NAME=STEEL
*ELASTIC, TYPE=ISO
    2.E+8,    0.3
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
    500000.,    0.
    500000.3,    0.01
*DENSITY
7.85,
    
```

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι στα ζεύγη τάσεων-παραμορφώσεων που δίνονται στην εντολή *PLASTIC, HARDENING ISOTROPIC εισάγονται οι πλαστικές τιμές παραμορφώσεων.

Τέλος, όσον αφορά το τοίχωμα, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του το μοντέλο σκυροδέματος *DAMAGED PLASTICITY. Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του δόθηκαν η γωνία διαστολικότητας (*CONCRETE DAMAGED PLASTICITY), χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης σ - ϵ σε εφελκυσμό και θλίψη (*CONCRETE TENSION STIFFENING και *CONCRETE COMPRESSION HARDENING, αντίστοιχα), η υποβάθμιση της δυσκαμψίας (postcracking damage or stiffness degradation properties) σε εφελκυσμό και θλίψη (*CONCRETE TENSION DAMAGE και *CONCRETE COMPRESSIVE DAMAGE), το αρχικό μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson (*ELASTIC), καθώς και η πυκνότητα του άοπλου σκυροδέματος .

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο νόμος υλικού για σκυρόδεμα C20/25 είναι:

Τάση - σ (kPa)	Παραμόρφωση - ϵ
-22,00	-0,001233
-2200,00	-0,000112
0,00	0,000000
5265,99	0,000222
17140,47	0,001083
19656,10	0,001740
20000,03	0,002219
19116,45	0,003355
17749,51	0,004438
17394,99	0,004719

Η γωνία διαστολικότητας ισούται με $53,3^\circ$. Κατά την αποφόρτιση από εφελκυστική εντατική κατάσταση η δυσκαμψία σχεδόν μηδενίζεται, αντίθετα κατά την αποφόρτιση από θλιπτική εντατική κατάσταση δε μεταβάλλεται. Το μέτρο ελαστικότητας ισούται με 29000 MPa, ο λόγος Poisson με 0,30 και η πυκνότητα με $2,5 \text{ Mg/m}^3$.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχετική αλληλουχία εντολών που πρέπει να εισαχθούν για τον ορισμό του υλικού.

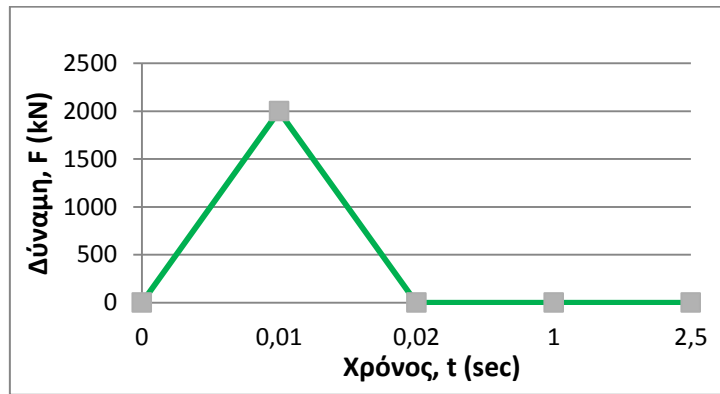
```

** DAMAGED PLASTICITY
*MATERIAL, NAME=DP
*CONCRETE DAMAGED PLASTICITY
53.3
*CONCRETE COMPRESSION HARDENING
 5265.99, 0.0
17140.47, 0.0004919
19656.10, 0.0010622
20000.03, 0.0015293
19116.45, 0.0026958
17749.51, 0.0038259
17394.99, 0.0041192
*CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE=STRAIN
 2200.00, 0.0
 22.00, 0.001232
*CONCRETE TENSION DAMAGE, TYPE=STRAIN
0. ,0.
0.99177 ,0.001232
*ELASTIC
29.E+6, 0.30
*DENSITY
2.5,
    
```

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι στα ζεύγη τάσεων-παραμορφώσεων που δίνονται στις εντολές *CONCRETE COMPRESSION HARDENING, *CONCRETE TENSION STIFFENING και *CONCRETE TENSION DAMAGE εισάγονται οι ανελαστικές τιμές παραμορφώσεων.

Η προσομοίωση της κρούσης γίνεται με την παραδοχή των δυνάμεων. Η δύναμη των 6000 kN κατανέμεται σε μια περιοχή 0,25 m καθ' ύψος, όσο είναι κατά προσέγγιση το πάχος της πλάκας ορόφου του γειτονικού κτιρίου που προσκρούει στο τοίχωμα κατά τη διάρκεια του σεισμού (κτίριο Β). Έτσι προκύπτουν τρεις δυνάμεις των 2000 kN η καθεμία. Οι δυνάμεις ασκούνται στους κόμβους 640, 75 και 645 του ανωτέρου ορόφου του κτιρίου (NSET= DISTRIBUTED_FORCE) με διεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα Χ. Η τιμή της δύναμης σε συνάρτηση με το χρόνο δίνεται παρακάτω:

Χρόνος – t (sec)	Δύναμη – F (kN)
0.00	0
0.01	2000
0.02	0
2.5	0



Σχήμα 3.1 – Διάγραμμα δύναμης (F) – Χρόνου (t)

Η φόρτιση είναι δυναμική και διαρκεί 2,5 sec. Το χρονικό βήμα μεταβάλλεται. Αρχικό βήμα ορίστηκε η τιμή 0,00001 sec. Ως ελάχιστο βήμα ορίστηκε η τιμή 0,0000000000000001, ενώ ο μέγιστος αριθμός βημάτων είναι 70000. Λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα του φορέα.

```
*AMPLITUDE, NAME=FORCE4, DEFINITION=TABULAR
    0., 0., 0.01, 2000., 0.02, 0., 1., 0., 2.5, 0.
*STEP, INC=70000, NLGEOM=YES
*DYNAMIC
0.00001, 2.5, 0.0000000000000001
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
,,,,,8,
**
*CLOAD, AMPLITUDE=FORCE4
DISTRIBUTED_FORCE, 1, -1.
```

3.1.1.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

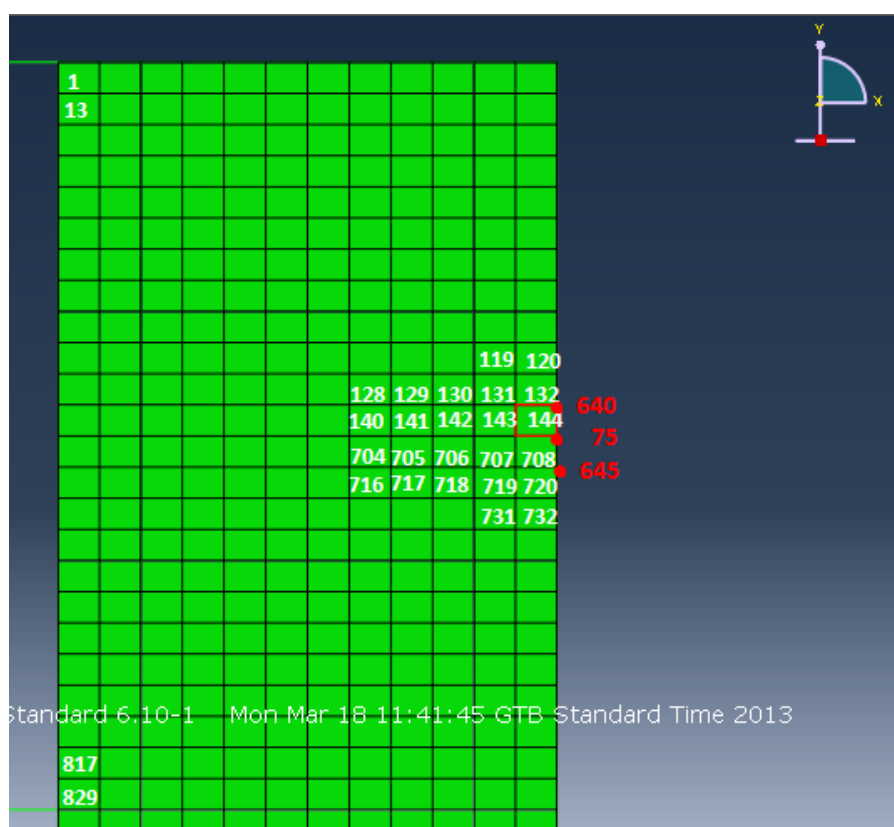
Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων κάθε ανάλυσης θα γίνει αξιολογώντας τις τάσεις, τις παραμορφώσεις, καθώς και τη μετακίνηση του φορέα κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

3.1.1.2.1 Σχολιασμός τάσεων

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο φορέα, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέλιξη των ελάχιστων κύριων τάσεων του τοιχώματος συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρούνται τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων που ξεπερνούν τη θλιπτική

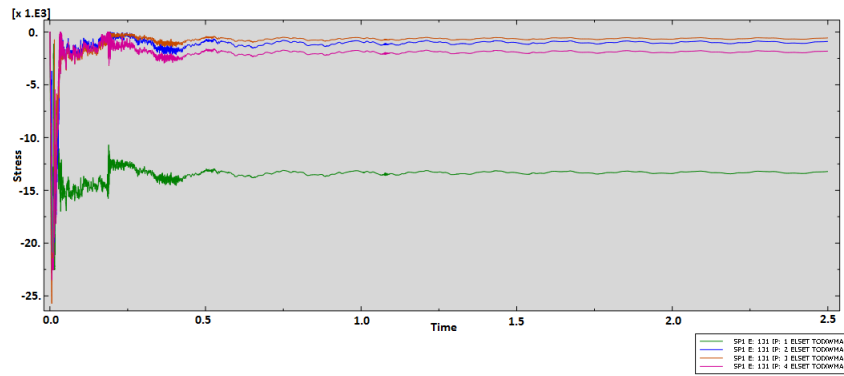
αντοχή του σκυροδέματος υπό μονοαξονική φόρτιση (20 MPa). Το παραπάνω είναι αναμενόμενο, αφού η αντοχή του σκυροδέματος υπό σύνθετη καταπόνηση διαφέρει αρκετά από αυτή που παρατηρείται υπό απλή μονοαξονική καταπόνηση. Ισχύει ότι υπό διαξονική καταπόνηση, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος φτάνει τιμές κατά 10-20% υψηλότερες της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη. Έτσι, για σκυρόδεμα C20/25, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ 22 και 24 MPa.

Η εξετασθείσα περιοχή είναι το τοίχωμα στο ύψος του πέμπτου ορόφου. Πιο συγκεκριμένα θα παρατηρηθεί η χρονοϊστορία των ελάχιστων κύριων τάσεων στα στοιχεία κοντά στην περιοχή της φόρτισης (στοιχεία 131, 132, 143, 144, 707, 708, 719, 720).

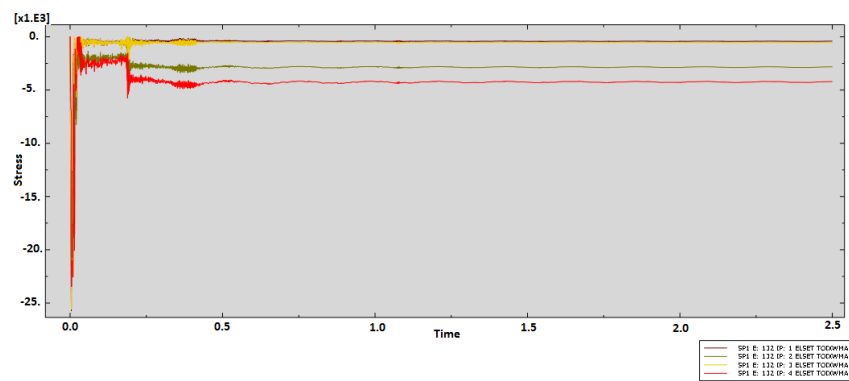


Σχήμα 3.2 - Διακριτοποίηση φορέα (κόμβοι και στοιχεία) στην περιοχή κοντά στη φόρτιση.

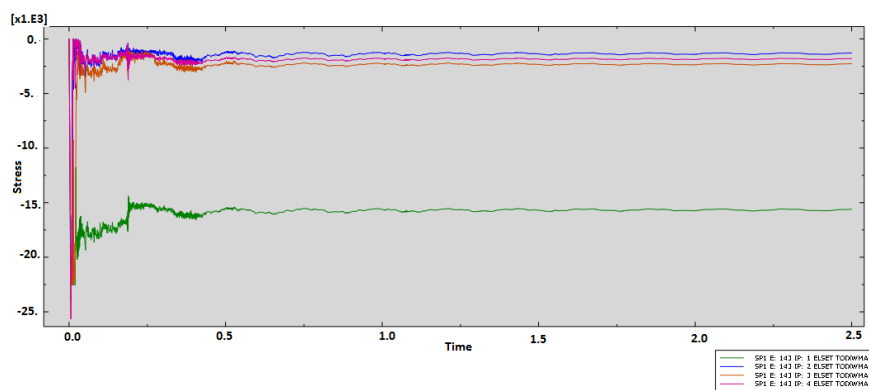
Παρακάτω δίνεται η χρονοϊστορία των ελάχιστων κύριων τάσεων των στοιχείων αυτών. Στα Σχήματα 3.3 έως 3.10 αναπαριστώνται οι ελάχιστες κύριες τάσεις σε καθένα από τα τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης κάθε στοιχείου.



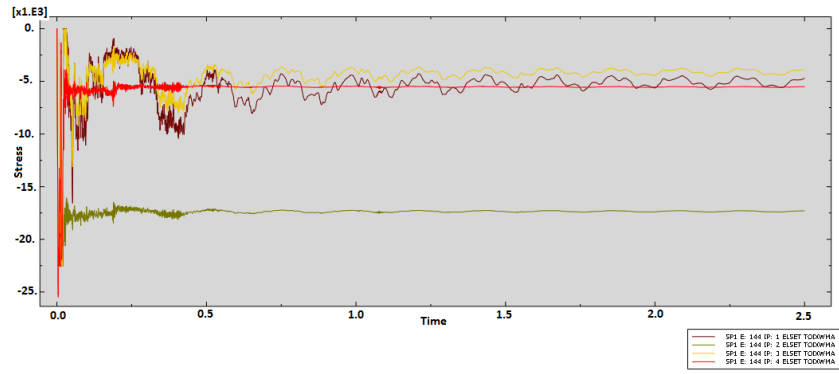
Σχήμα 3.3 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 131



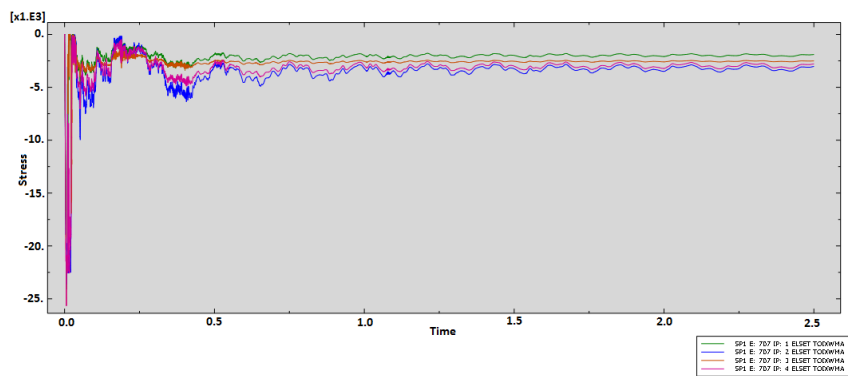
Σχήμα 3.4 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 132



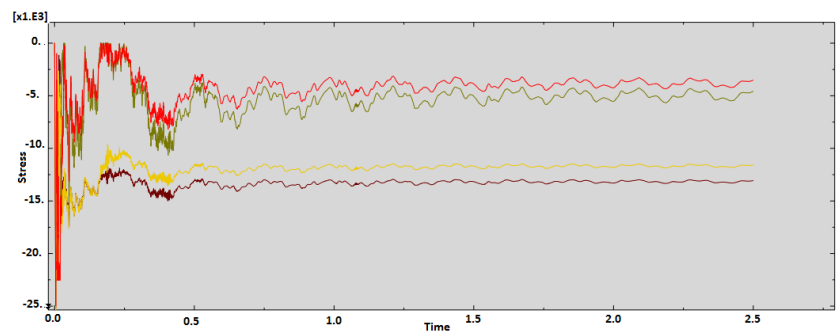
Σχήμα 3.5 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 143



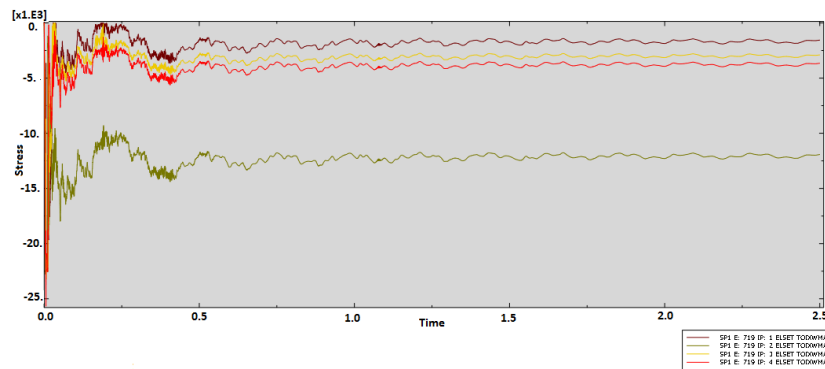
Σχήμα 3.6- Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 144



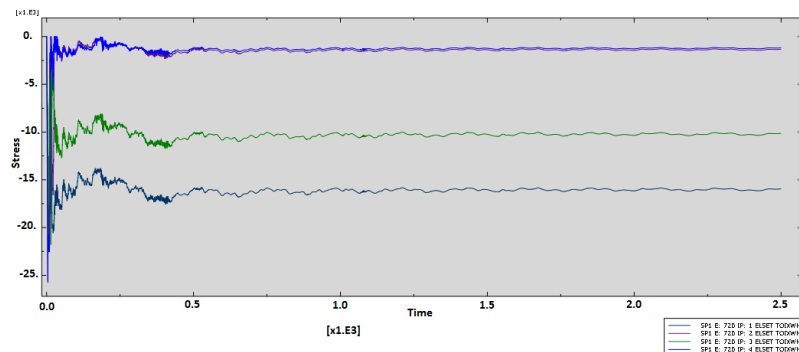
Σχήμα 3.7 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 707



Σχήμα 3.8 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 708

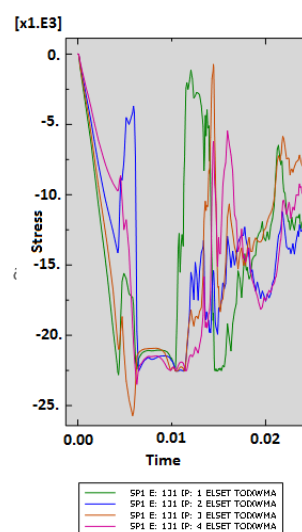


Σχήμα 3.9 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 719

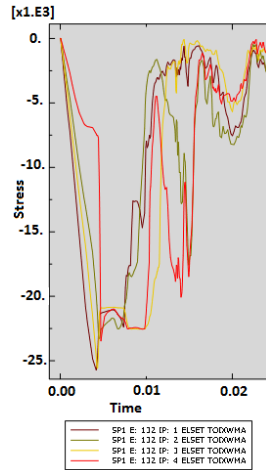


Σχήμα 3.10- Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 720

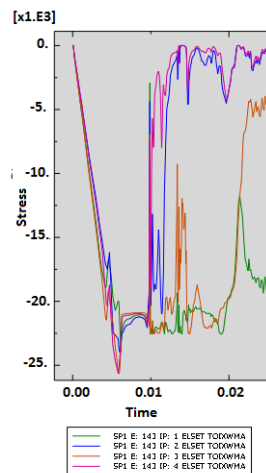
Παρατηρείται ότι οι ελάχιστες κύριες τάσεις εμφανίζουν (κατά απόλυτη τιμή) τη μέγιστη τιμή τους τα πρώτα 0,02 sec της φόρτισης. Για αυτό το λόγο, θεωρείται σκόπιμη η απεικόνιση των παραπάνω χρονοϊστοριών, δίνοντας έμφαση αυτή τη φορά στο χρονικό διάστημα 0-0,02 sec (Σχήματα 3.11 έως 3.18).



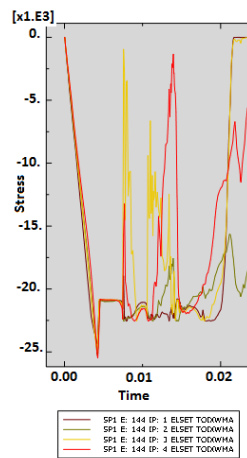
Σχήμα 3.11 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 131



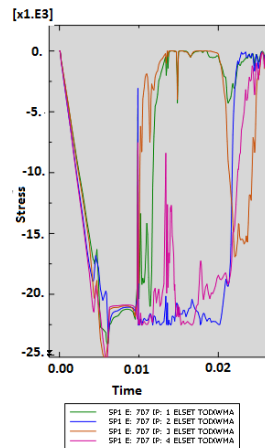
Σχήμα 3.12 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 132



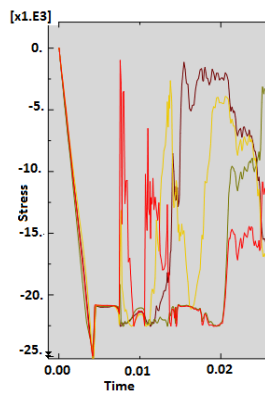
Σχήμα 3.13 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 143



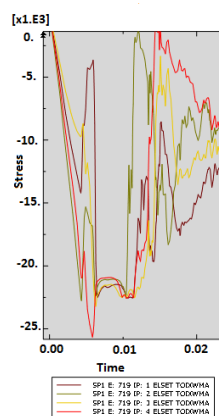
Σχήμα 3.14 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 144



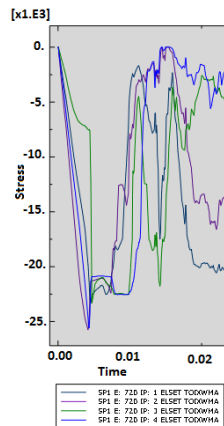
Σχήμα 3.15 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 707



Σχήμα 3.16 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 708



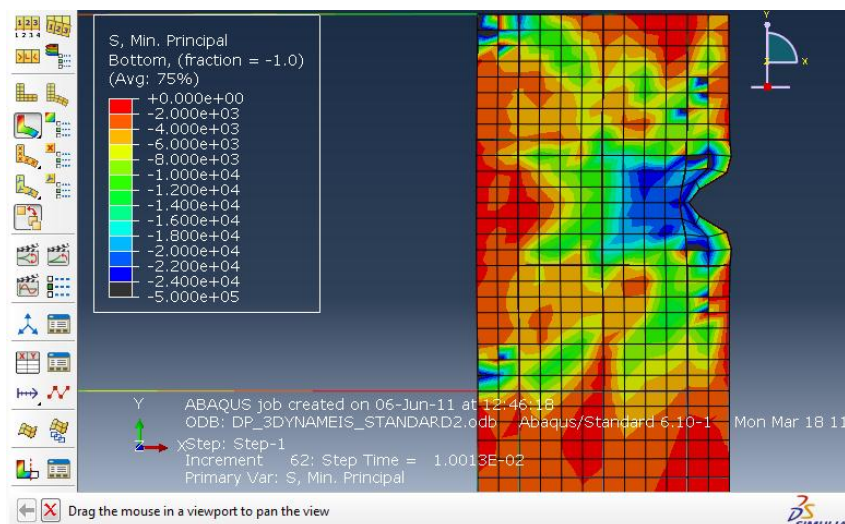
Σχήμα 3.17 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 719



Σχήμα 3.18 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec του στοιχείου 720

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για την περιοχή κοντά στη φόρτιση οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις αναπτύσσονται στο 0,01 sec, τη χρονική στιγμή που επιβάλλεται η μέγιστη τιμή της δύναμης.

Παρακάτω δίνεται το Σχήμα 3.19 που δείχνει την παραμορφωμένη εικόνα του τοιχώματος καθώς και την κατανομή των ελάχιστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος του υπό μελέτη Κτιρίου Α. Το υπόμνημα στα αριστερά του ίδιου σχήματος δείχνει τις τιμές των τάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε χρωματική απόχρωση.



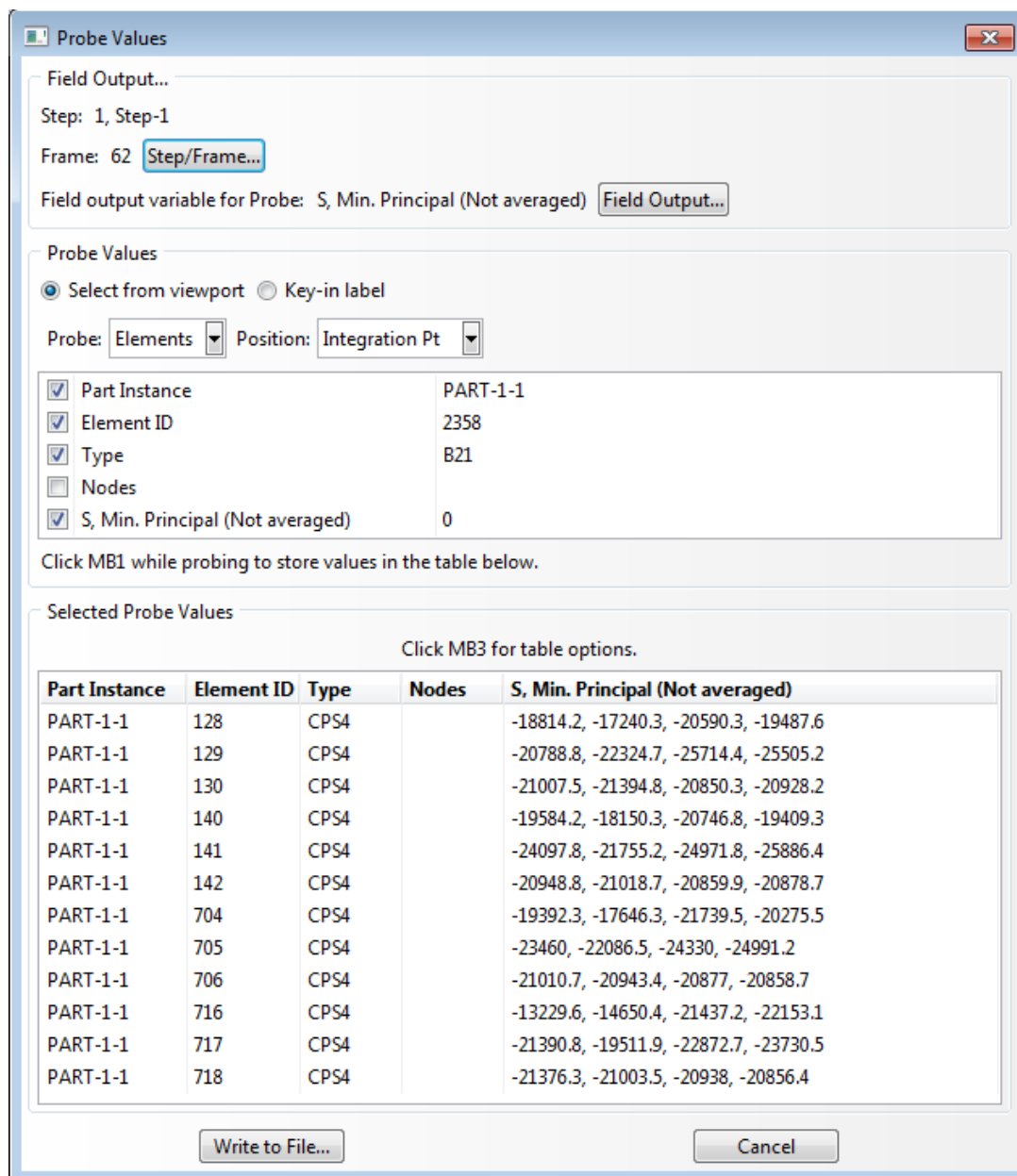
Σχήμα 3.19 – Ελάχιστες κύριες τάσεις τη χρονική στιγμή 0,01 sec στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος

Παρατηρούμε ότι σε αυτή τη χρονική στιγμή υψηλές τιμές θλιπτικών τάσεων αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στη φόρτιση (στοιχεία 119, 120, 131, 132, 143, 144, 707, 708, 719, 720, 731, 732), καθώς επίσης σε κάποια στοιχεία στο εσωτερικό του τοιχώματος (στοιχεία 128, 129, 130, 140, 141, 142, 704, 705, 706, 716, 717, 718) και στις συνδέσεις της πλάκας οροφής του 4^{ου} και του 5^{ου} ορόφου με το τοίχωμα (στοιχεία 1, 13, 817, 829). Επιλέγεται να παρουσιαστούν εικόνες από την ανάλυση στο Abaqus, οι οποίες δείχνουν τις ακριβείς τιμές των τάσεων σε αυτά τα στοιχεία.

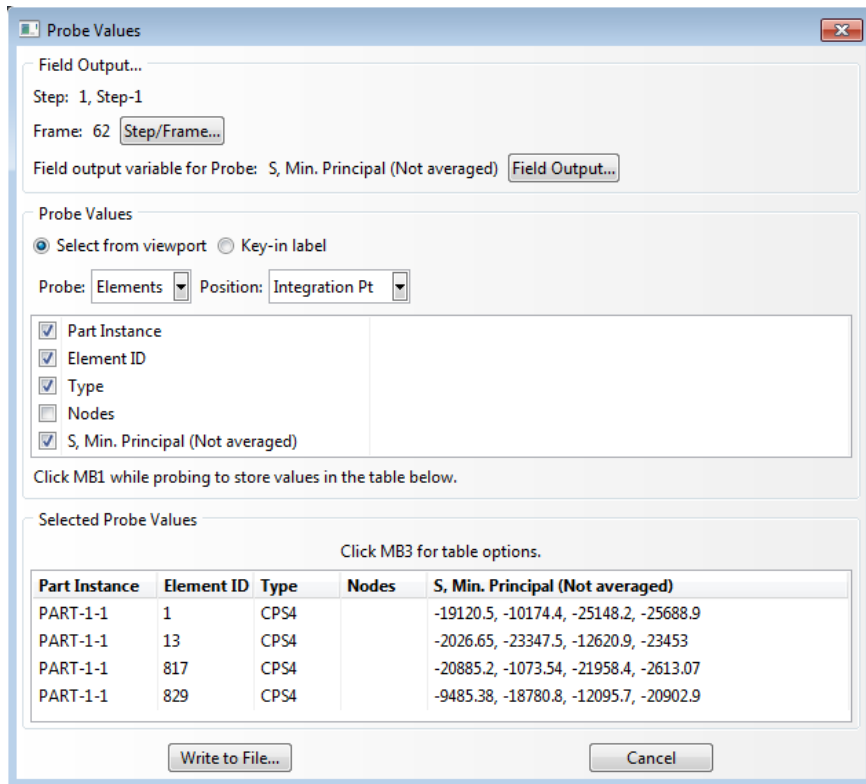
The screenshot shows the 'Probe Values' dialog box. The 'Field Output...' section is set to 'Step: 1, Step-1' and 'Frame: 62'. The 'Field output variable for Probe' is 'S, Min. Principal (Not averaged)'. The 'Probe Values' section has 'Select from viewport' selected, with 'Probe' set to 'Elements' and 'Position' set to 'Integration Pt'. The 'Selected Probe Values' table is as follows:

Part Instance	Element ID	Type	Nodes	S, Min. Principal (Not averaged)
PART-1-1	119	CPS4		-7433.31, -22405, -8092.18, -22222.2
PART-1-1	120	CPS4		-8806.24, -4378.39, -20376.3, -20905.8
PART-1-1	131	CPS4		-21662, -21813.3, -22347.6, -22393.8
PART-1-1	132	CPS4		-7943.51, -3779.05, -22293.1, -20957.3
PART-1-1	143	CPS4		-22268, -20328.6, -22108.2, -18893.3
PART-1-1	144	CPS4		-21069.1, -21414.3, -21348.5, -21608.1
PART-1-1	707	CPS4		-20363.9, -22278.6, -19094.9, -22096.2
PART-1-1	708	CPS4		-21413.7, -21066.7, -21609.3, -21348.2
PART-1-1	719	CPS4		-21830.9, -21651, -22426.7, -22354.4
PART-1-1	720	CPS4		-4002.71, -7866.36, -21088.3, -22267
PART-1-1	731	CPS4		-22461.1, -8945.13, -22218.4, -8605.37
PART-1-1	732	CPS4		-4583.12, -7824.06, -21081.9, -20333

Σχήμα 3.20 – Τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στην περιοχή κοντά στη φόρτιση.

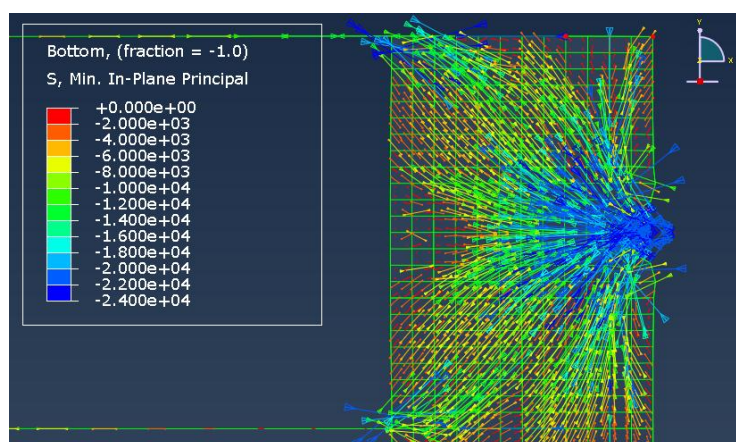


Σχήμα 3.21 - Τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στο εσωτερικό του τοιχώματος στο ύψος που ασκούνται οι τρεις δυνάμεις.



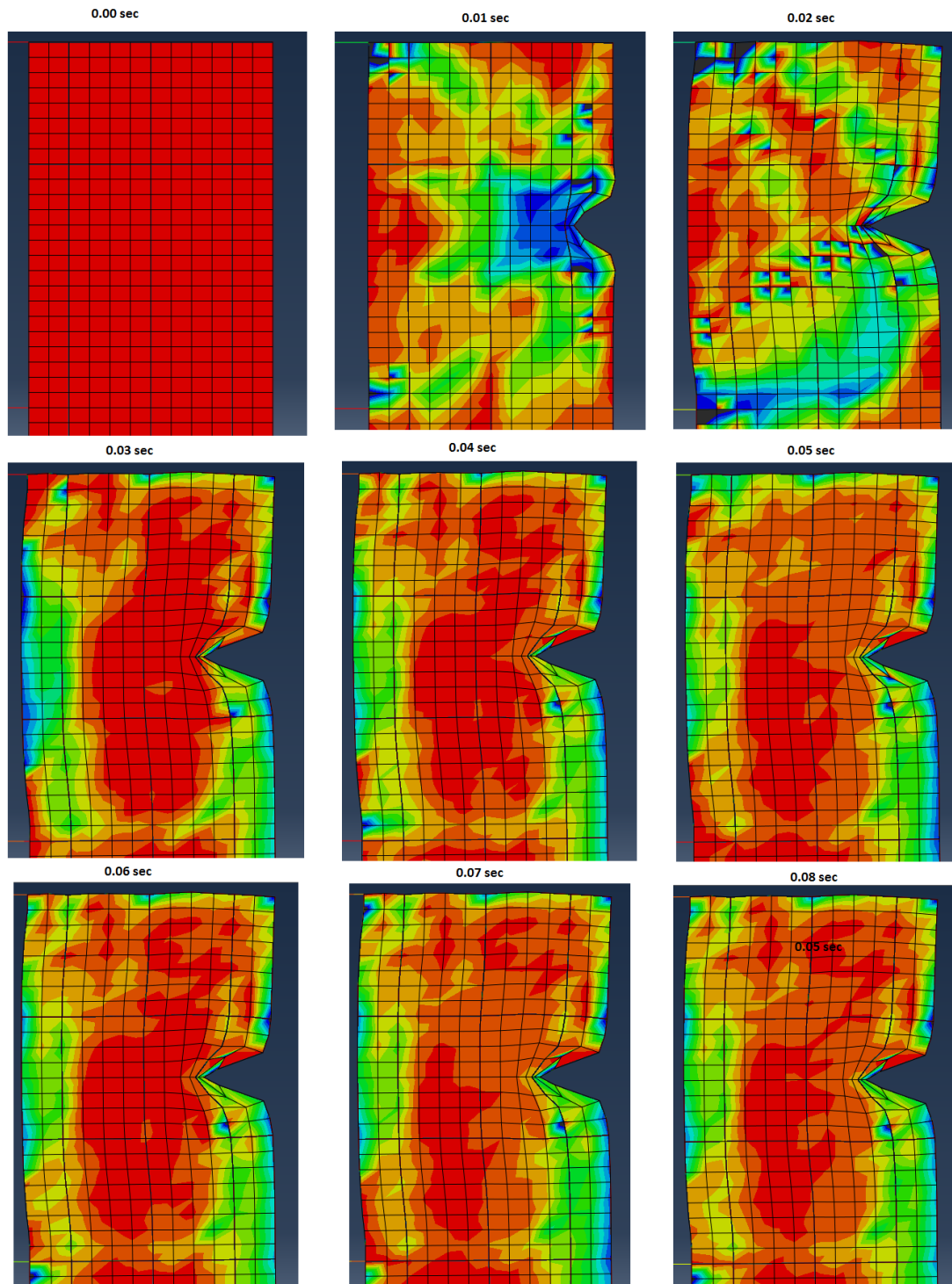
Σχήμα 3.22 - Τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στις συνδέσεις δοκού του 4^{ου} και 5^{ου} ορόφου με το τοίχωμα.

Μια άλλη οπτική των ελάχιστων κύριων τάσεων (S , Min Principal) δίνεται στο Σχήμα 3.23, όπου απεικονίζεται το ίδιο μέγεθος διανυσματικά. Στις περιοχές που διανύσματα πυκνώνουν και η χρωματική τους απόχρωση πλησιάζει την κατώτερη μπλε τιμή του υπομήματος, οι τάσεις που αναπτύσσονται πλησιάζουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

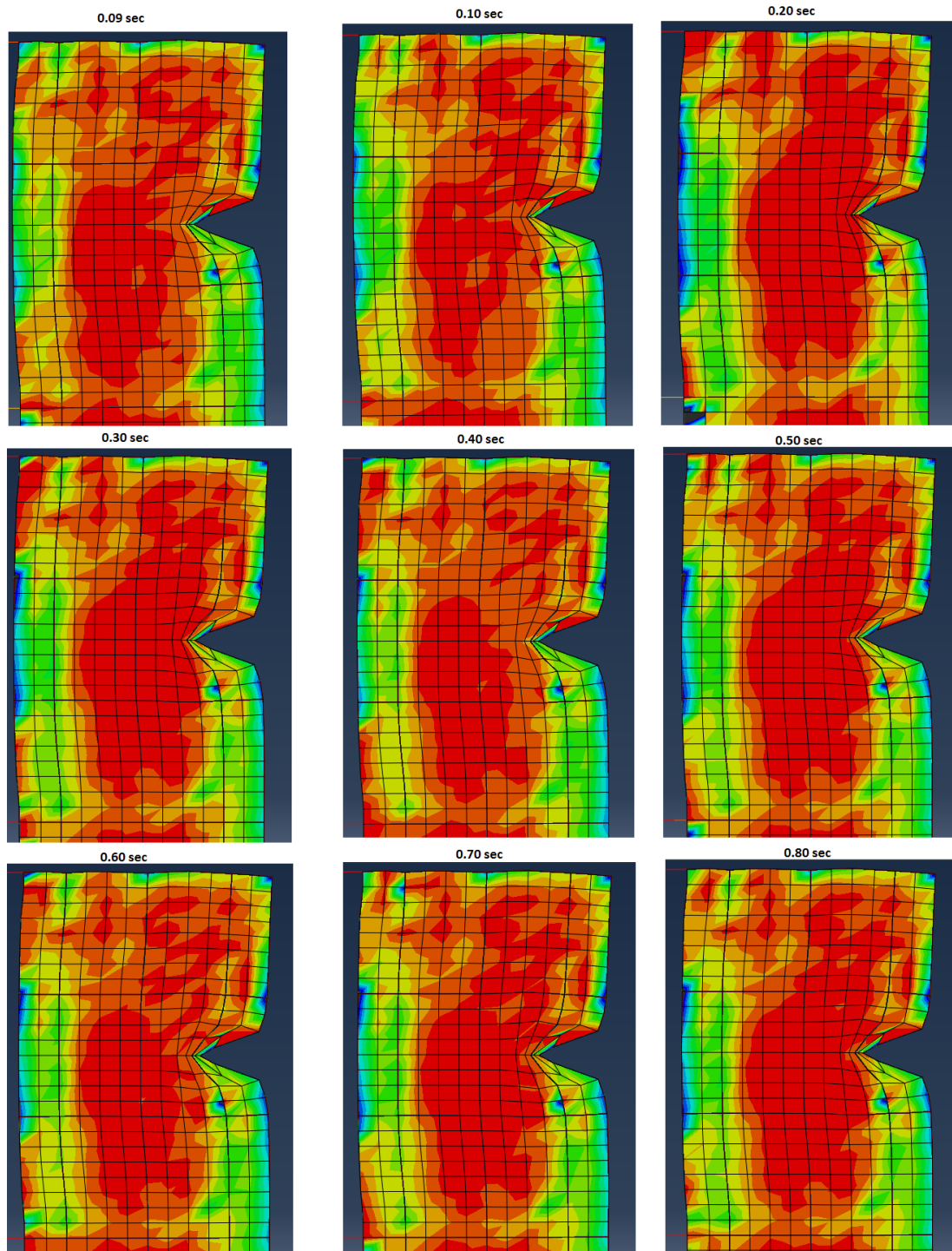


Σχήμα 3.23 - Διανύσματα ελάχιστων κύριων τάσεων στο τοίχωμα του πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

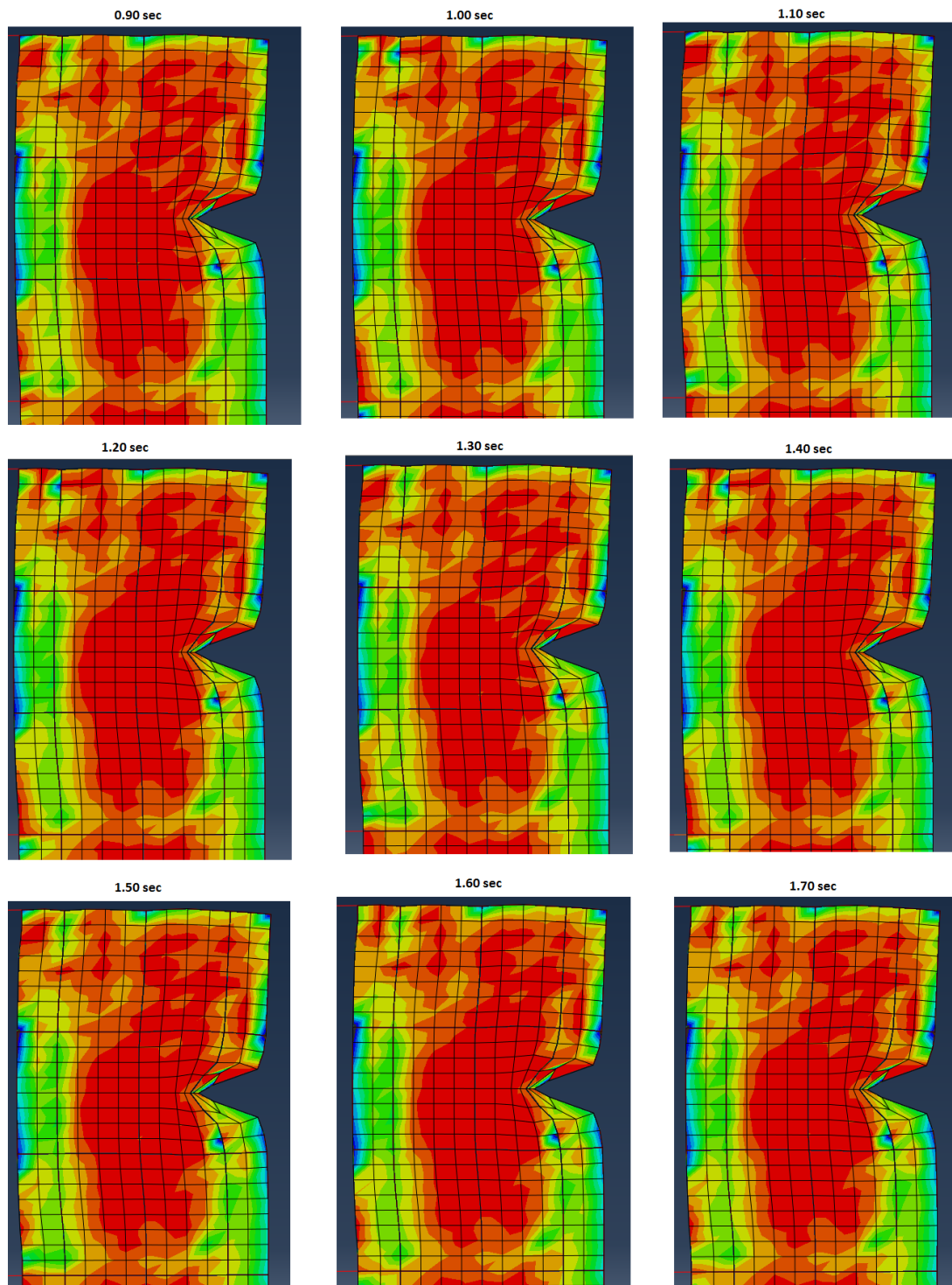
Ακολουθούν τα Σχήματα 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 που απεικονίζουν τις τάσεις του 5^{ου} ορόφου.



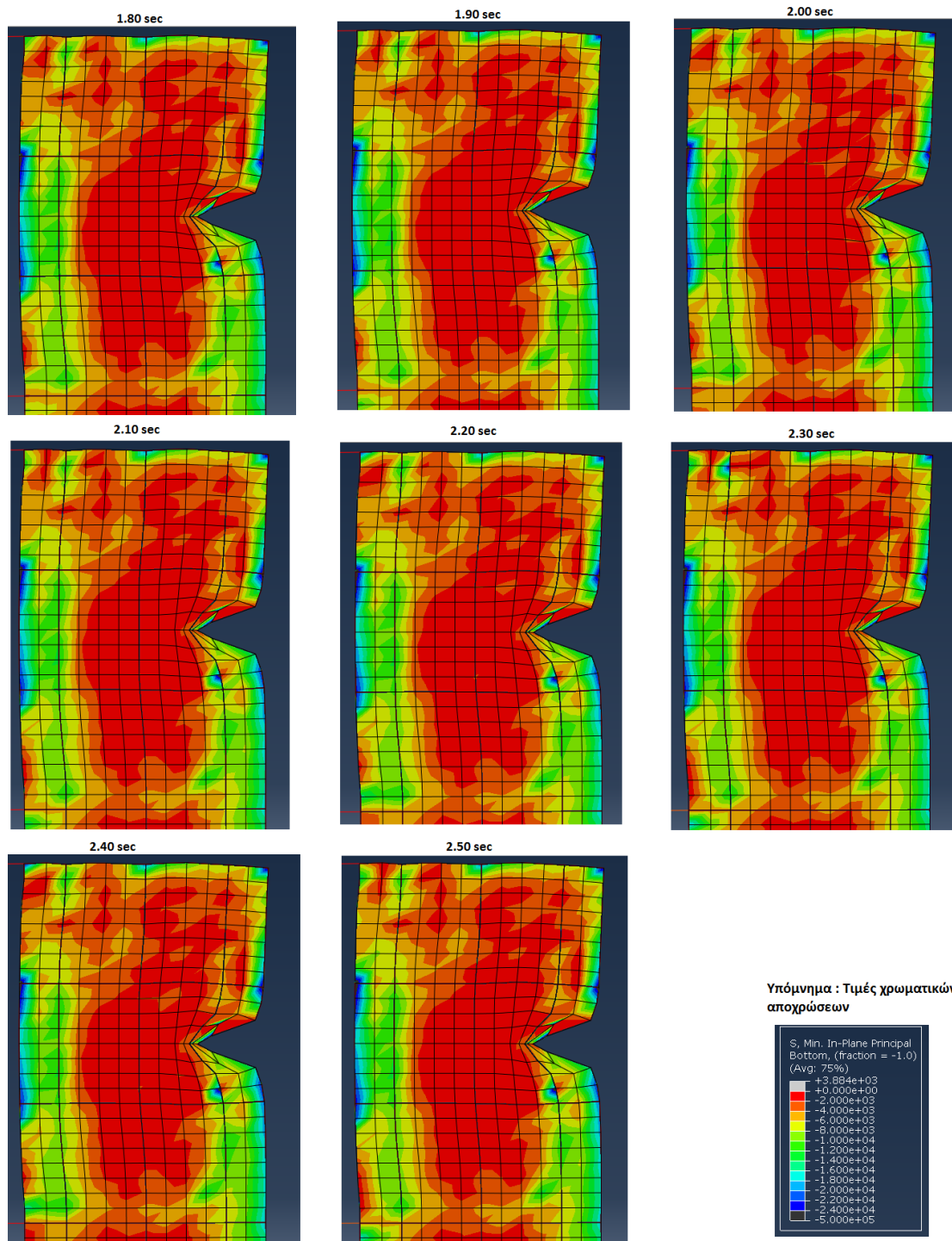
Σχήμα 3.24 - Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για χρονικές στιγμές 0, 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,07, 0,08 sec.



Σχήμα 3.25 - Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για χρονικές στιγμές 0,09, 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,60, 0,70, 0,80 sec.



Σχήμα 3.26 - Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για χρονικές στιγμές 0,90, 1,00, 1,10, 1,20, 1,30, 1,40, 1,50, 1,60, 1,70 sec.



Σχήμα 3.27 - Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για χρονικές στιγμές 1,80, 1,90, 2,00, 2,10, 2,20, 2,30, 2,40, 2,50 sec.

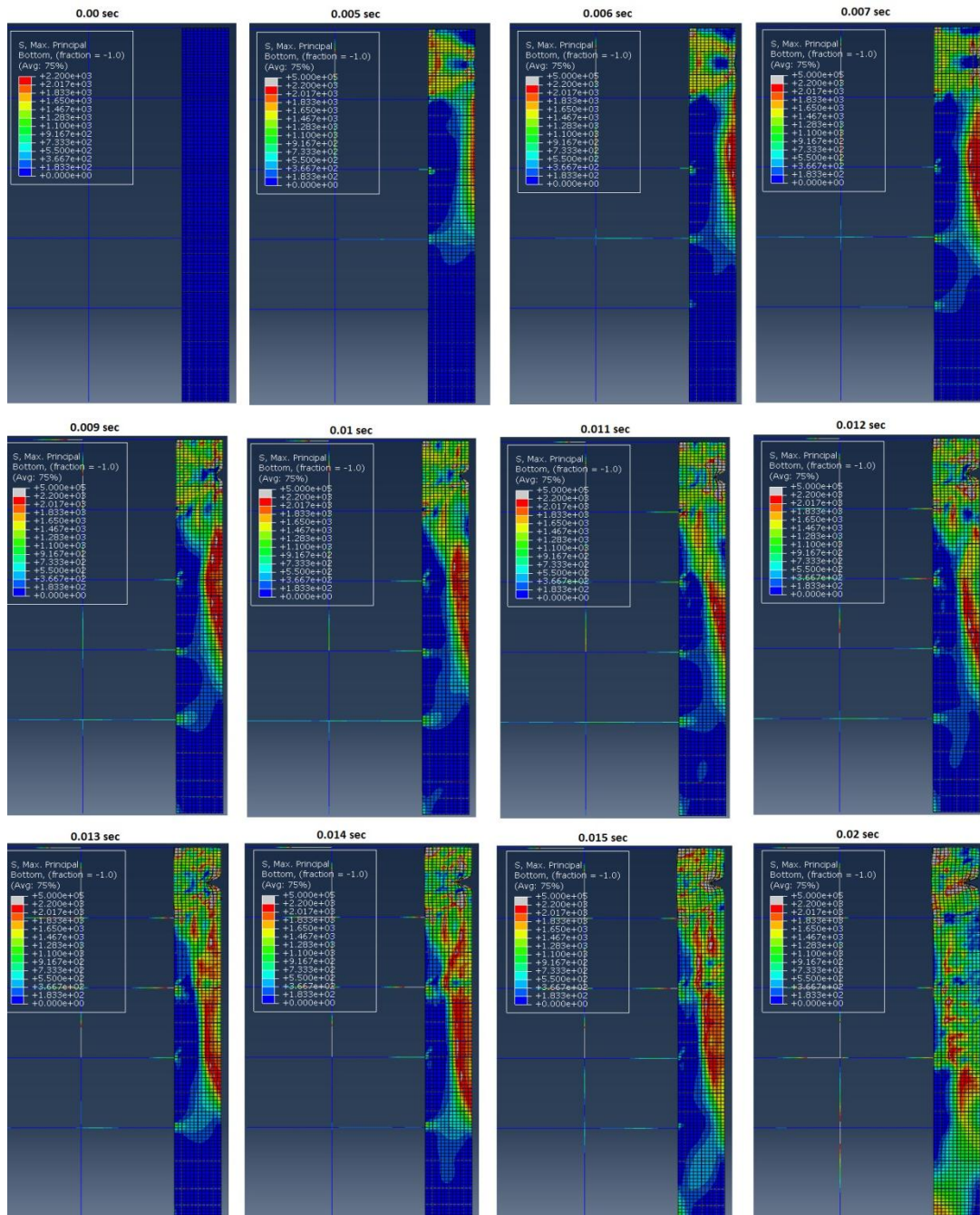
Τα παραπάνω σχήματα απεικονίζουν τις κύριες θλιπτικές τάσεις του πέμπτου ορόφου του τοιχώματος συναρτήσει του χρόνου, καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα εξής γεγονότα:

- Μέχρι και τη χρονική στιγμή 0,02 sec παρατηρούνται χαμηλές θλιπτικές τάσεις στην αριστερή παρειά του τοιχώματος στον πέμπτο όροφο. Από τη χρονική στιγμή 0,03 sec και μετά, οι τάσεις στην περιοχή αυτή αυξάνονται. Μάλιστα, η αύξηση είναι τέτοια, που σε ένα αρκετά μεγάλο μέρος της ανάλυσης κυριαρχούν τάσεις με τιμή κοντά στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.
- Από τη χρονική στιγμή 0,7 sec και έπειτα, η εικόνα των ελάχιστων θλιπτικών τάσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος δείχνει να παραμένει αμετάβλητη και οι τιμές των τάσεων να μη μεταβάλλονται ιδιαίτερα.

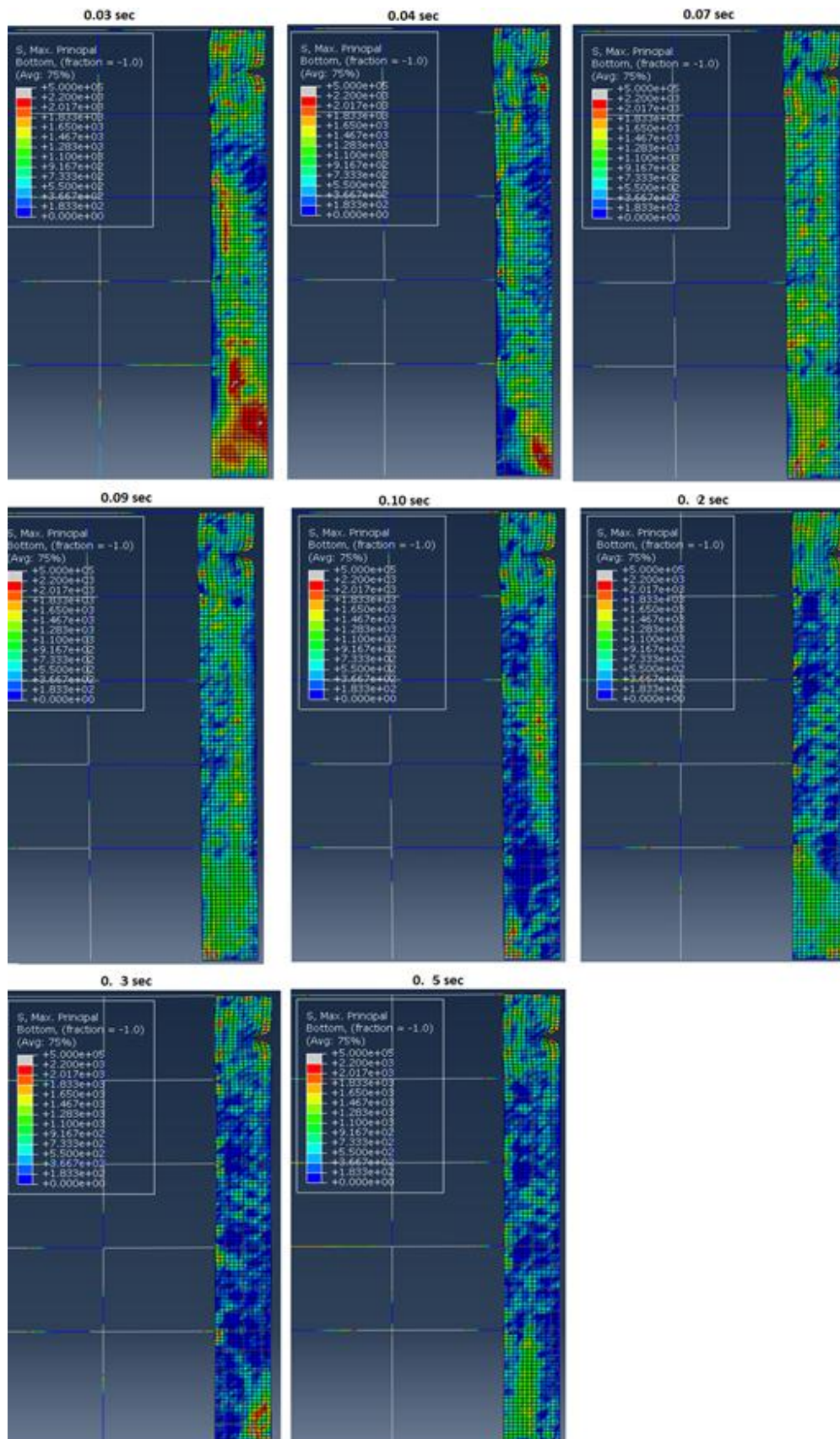
Όσον αφορά τις μέγιστες κύριες τάσεις, παρατηρούμε ότι σε καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης υπάρχουν στοιχεία στα οποία αναπτύσσεται μέγιστη κύρια τάση μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, δηλ 2200 kPa.

- Οι περιοχές όπου έχουμε υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι εκτενέστερες μέχρι και το 0,02 sec. Στοιχεία στα οποία έχει σημειωθεί υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής απαντώνται στο τοίχωμα του πέμπτου ορόφου. Μάλιστα υψηλές τάσεις σημειώνονται και στα στοιχεία της δεξιάς παρειάς του τοιχώματος στον 4^ο και 3^ο όροφο, ενώ, καθώς περνάει ο χρόνος, πλήττονται και τα στοιχεία της δεξιάς παρειάς του τοιχώματος του 2^{ου} ορόφου. Βλ. Σχήμα 3.28.
- Στο χρονικό διάστημα 0,03-0,50 sec φαίνεται να περιορίζονται στην περιοχή του πέμπτου ορόφου και του ισογείου καθώς επίσης και στις συνδέσεις των δοκών με το τοίχωμα. Βλ. Σχήμα 3.29.
- Από τη χρονική στιγμή 0,60 sec μέχρι και το τέλος της ανάλυσης, μεγάλες τιμές κύριων εφελκυστικών τάσεων απαντώνται στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος, καθώς και στις περιοχές σύνδεσης των δοκών με το τοίχωμα. Βλ. Σχήμα 3.30.
-

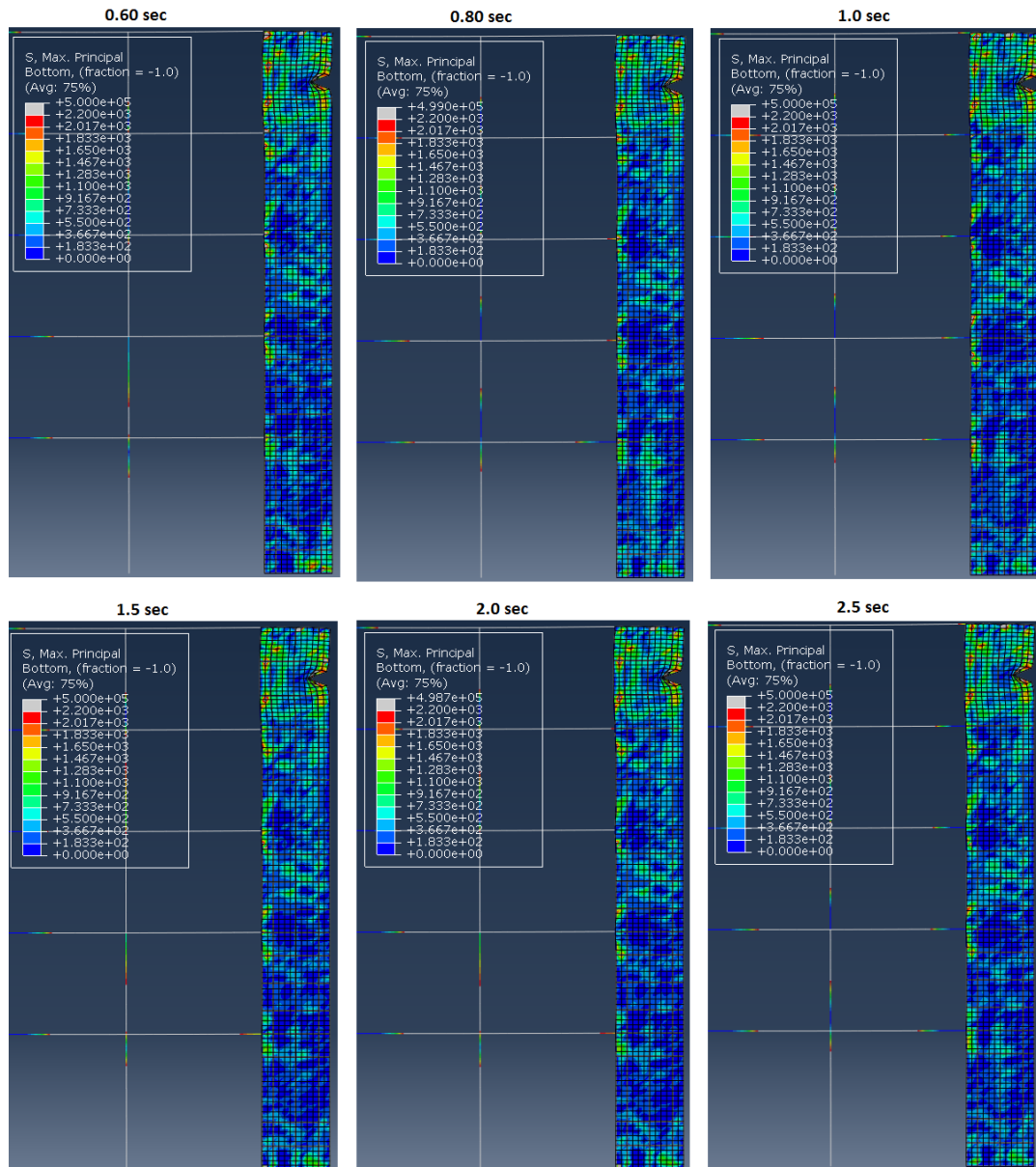
Ακολουθούν σχήματα που απεικονίζουν τη χρονοϊστορία των μέγιστων κύριων τάσεων.



Σχήμα 3.28 – Τιμές μέγιστων κύριων τάσεων (εφελκυστικές τάσεις) στο τοίχωμα για το χρονικό διάστημα 0-0,02 sec.



Σχήμα 3.29 – Τιμές μέγιστων κύριων τάσεων (εφελκυστικές τάσεις) στο τοίχωμα για το χρονικό διάστημα 0,02-0,5 sec.

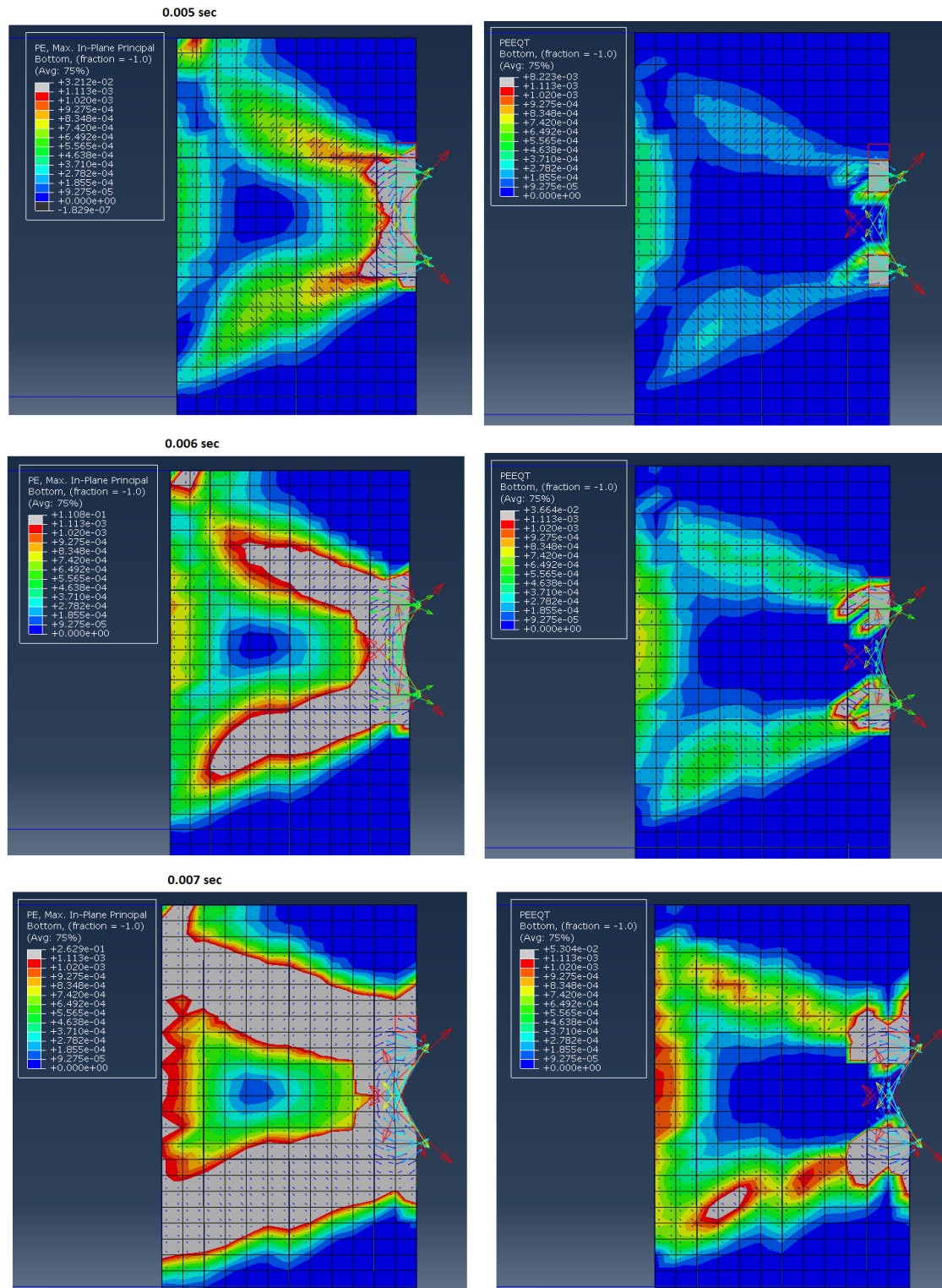


Σχήμα 3.30 – Τιμές μέγιστων κύριων τάσεων (εφελκυστικές τάσεις) στο τοίχωμα για το χρονικό διάστημα 0,6-2,5 sec.

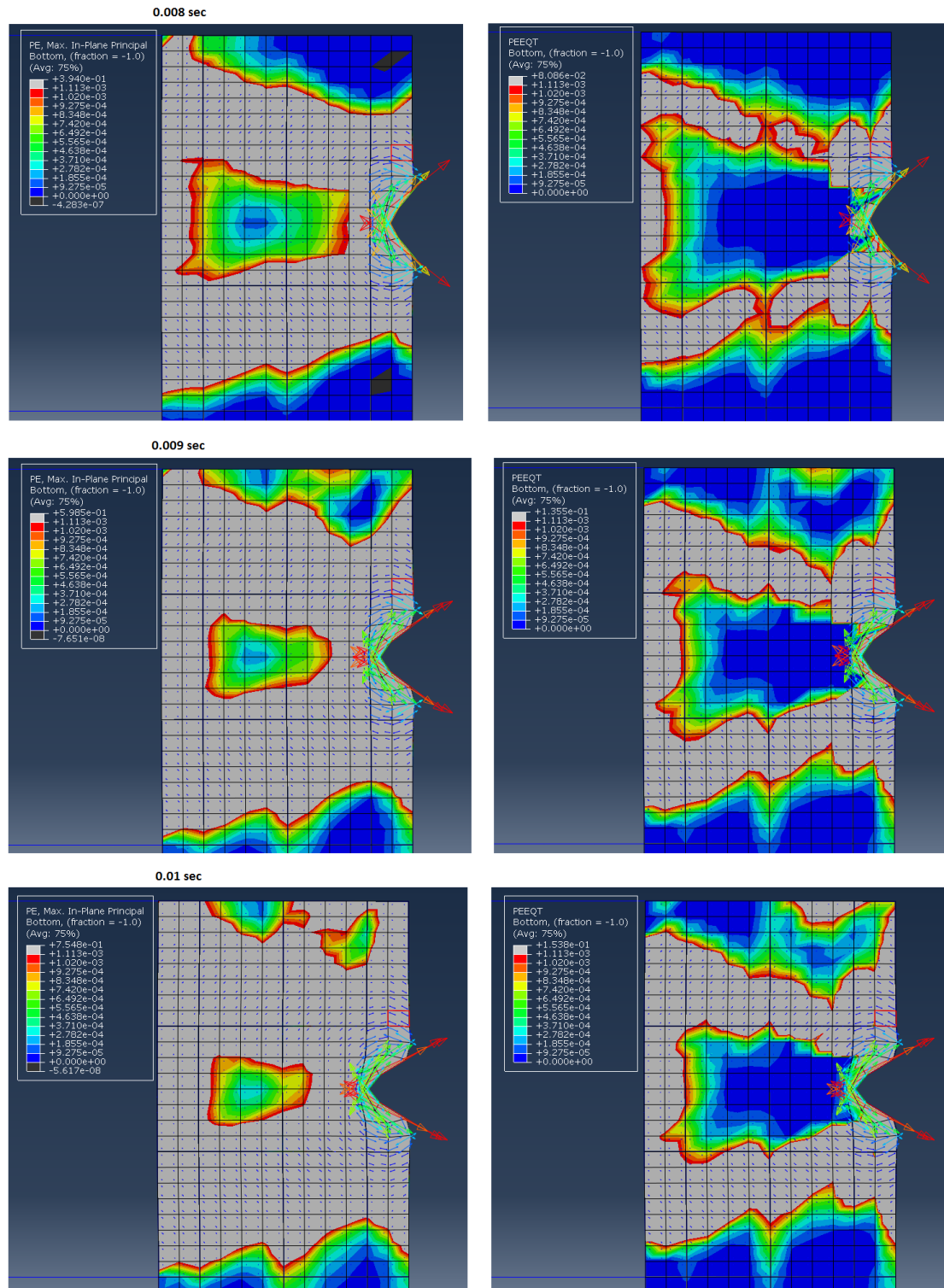
3.1.1.2.2 Σχολιασμός παραμορφώσεων

Σύμφωνα με το Abaqus Analysis User's Manual, για την οπτικοποίηση της διεύθυνσης των ρωγμών μπορεί να υιοθετηθεί το κριτήριο του Lubiner et al. Σύμφωνα με το κριτήριο, η ρηγματώση ξεκινά στα σημεία όπου η ισοδύναμη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση (PEEQT) είναι μεγαλύτερη από το μηδέν και η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση (PE, Max Principal) είναι θετική. Η κατεύθυνση του διανύσματος κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής υποτίθεται ότι είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύρια πλαστικής παραμόρφωσης. Στα

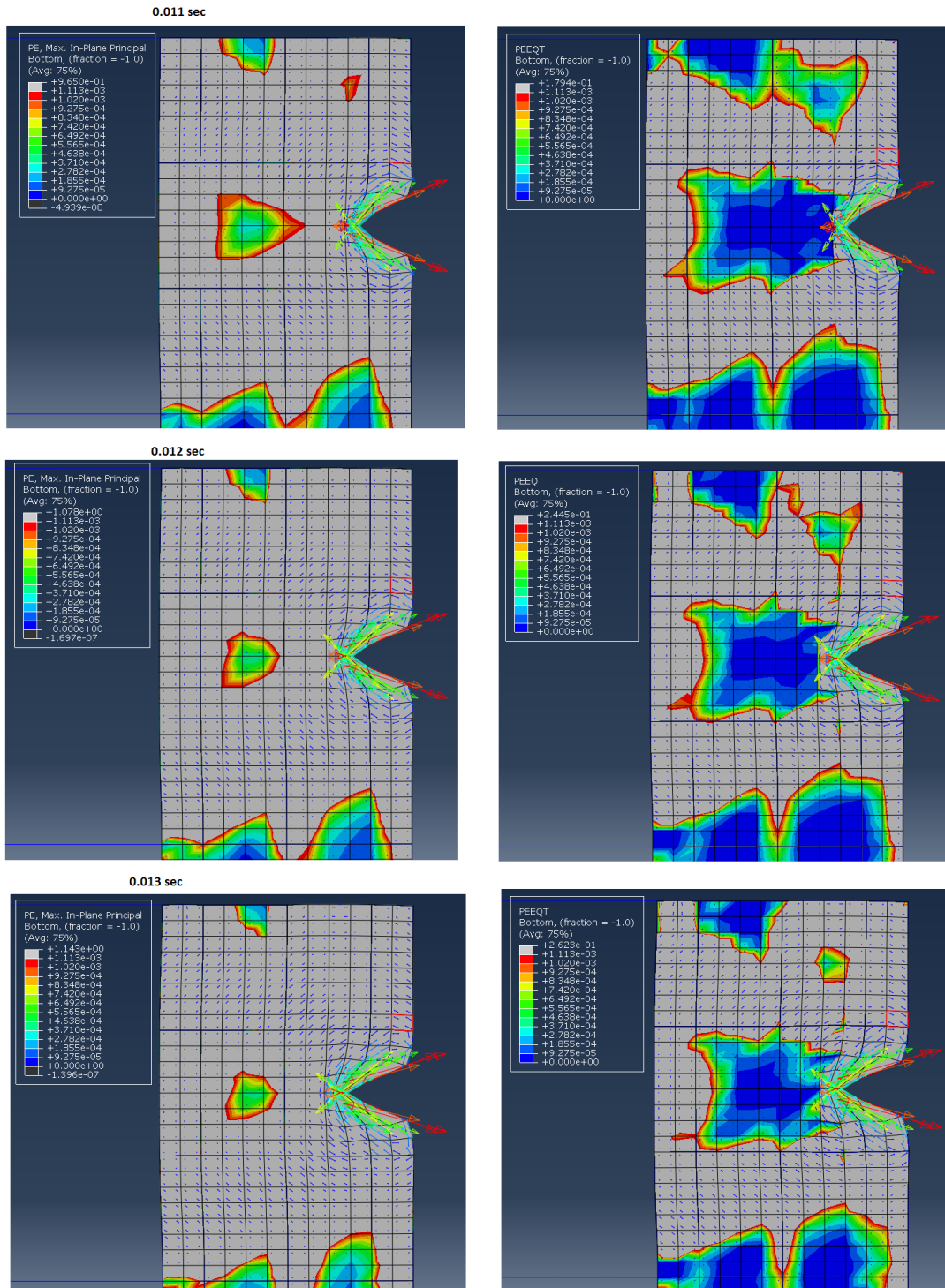
ακόλουθα σχήματα απεικονίζονται οι μέγιστες κύριες πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και οι ισοδύναμες τιμές τους για διάφορες χρονικές στιγμές.



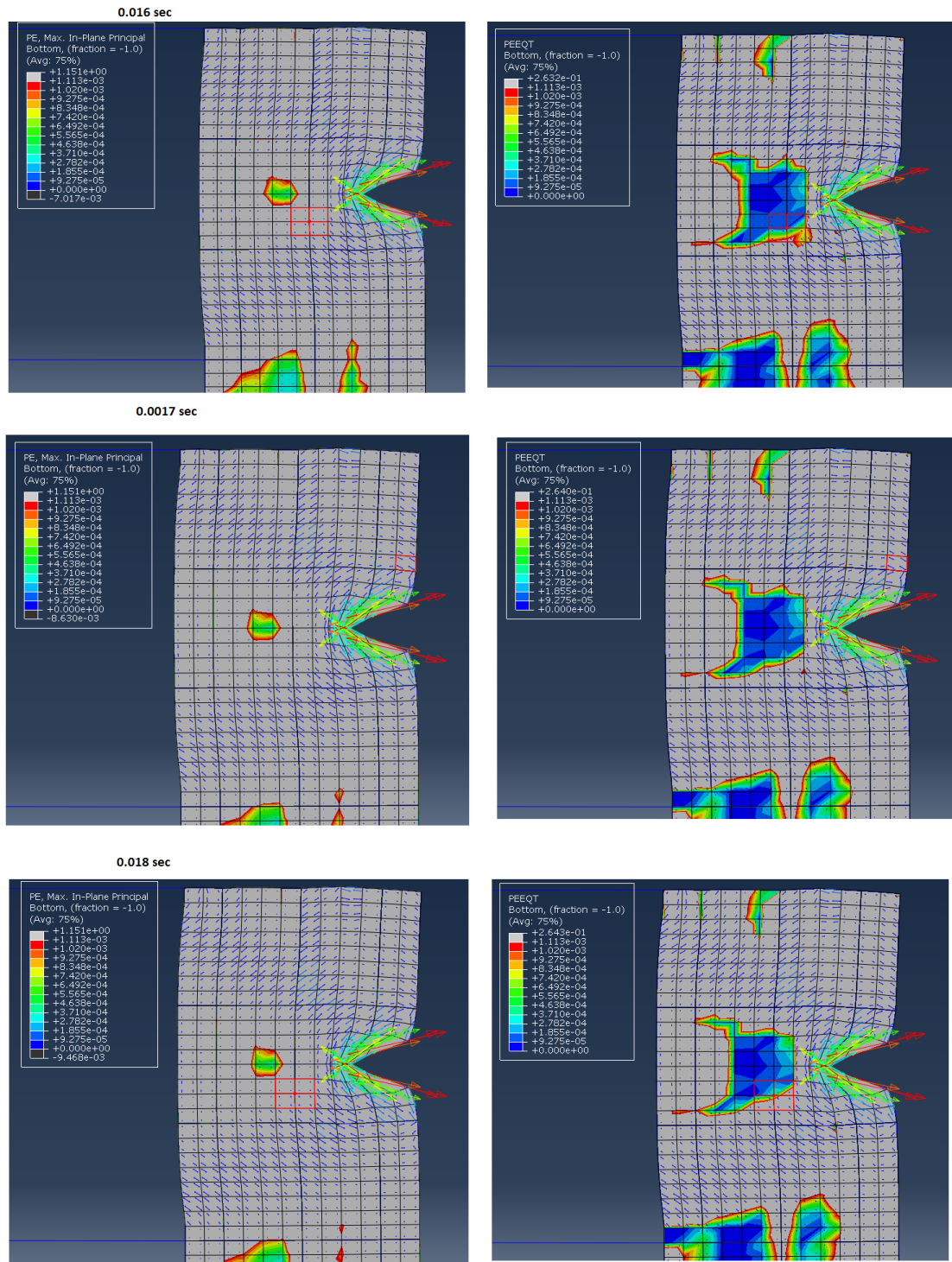
Σχήμα 3.31 – Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,005, 0,006, 0,007 sec.



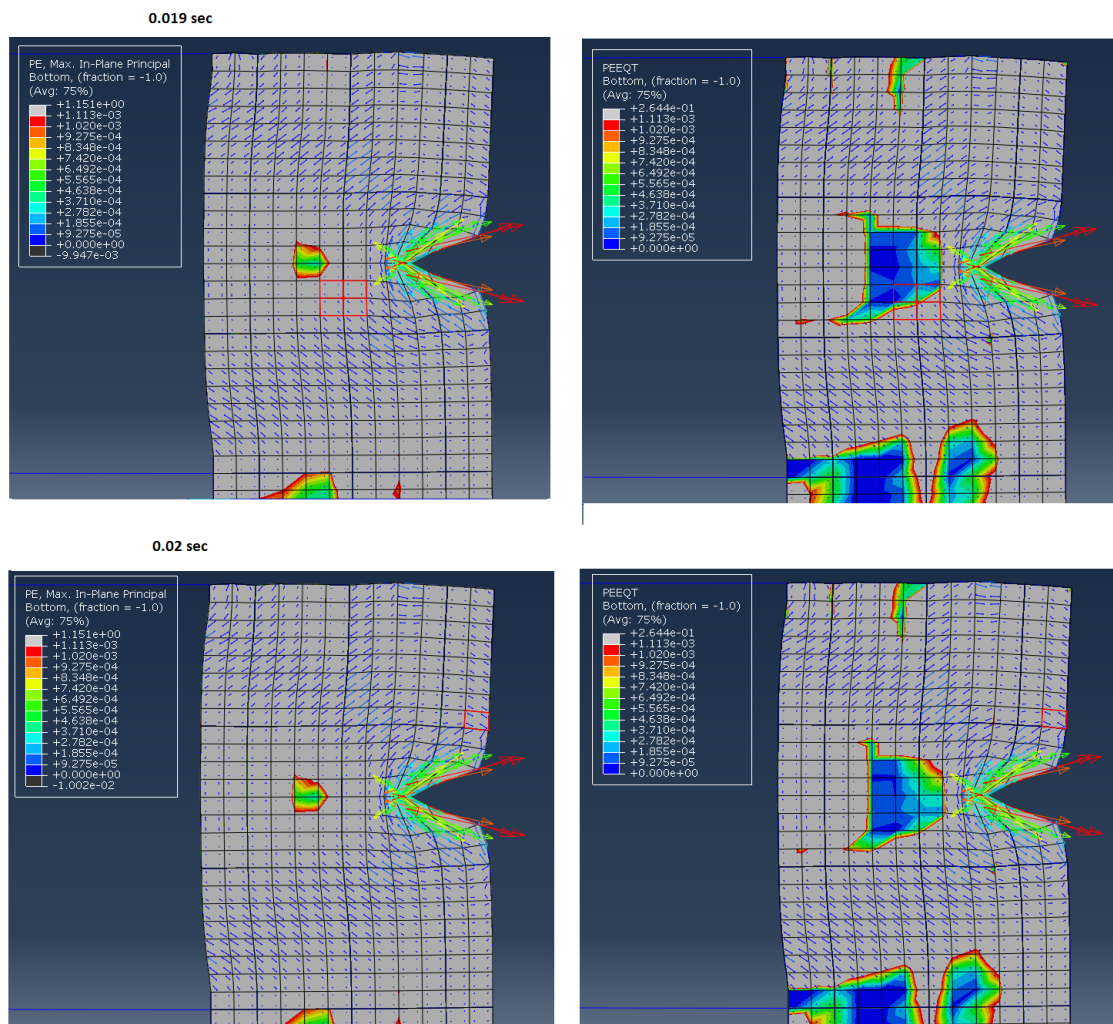
Σχήμα 3.32 – Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,008, 0,009, 0,010 sec.



Σχήμα 3.33 – Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,011, 0,012, 0,013 sec.



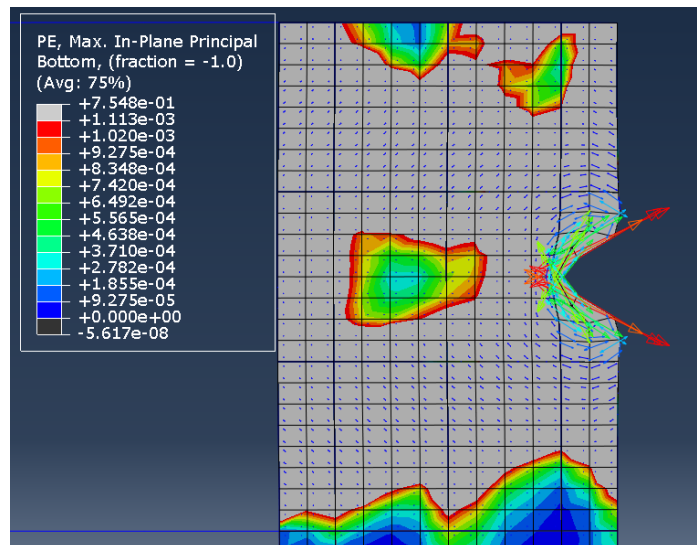
Σχήμα 3.34 - Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,016, 0,017, 0,018 sec.



Σχήμα 3.35 - Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,019, 0,020 sec.

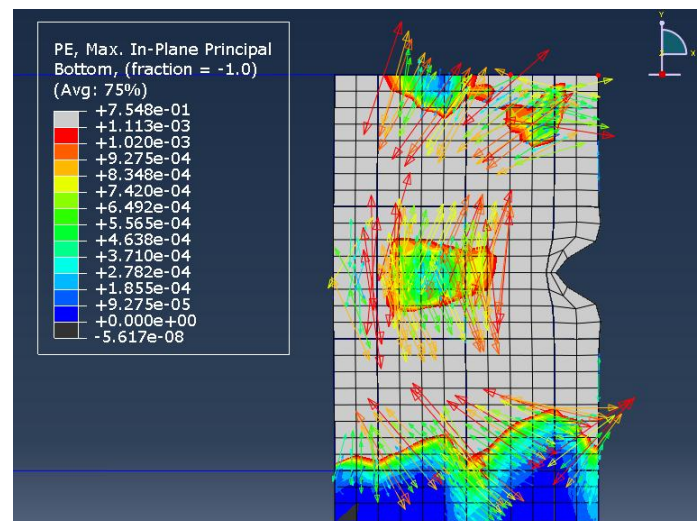
Παραπάνω απεικονίζονται τα μεγέθη PE, Max Principal και PEEQT για χαρακτηριστικές χρονικές τιμές, μέχρι και τη χρονική στιγμή 0,02 sec. Παρατηρούμε ότι ο πέμπτος όροφος του τοιχώματος ρηγματώνεται πλήρως, αφού τόσο η μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση, όσο και η ισοδύναμη εφελκυστική κύρια πλαστική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερες του μηδενός.

Τα βέλη αναπαριστούν τη διεύθυνση των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων. Στη διεύθυνση κάθετα σε αυτά αναπτύσσονται οι ρωγμές. Στην περιοχή που τα βέλη είναι μεγαλύτερα παρατηρούνται έντονες ρωγμές. Μικρότερου εύρους ρωγμές παρατηρούνται στις περιοχές όπου τα εν λόγω βέλη είναι μικρότερου μεγέθους και έχουν χρώμα που πλησιάζει την ελάχιστη τιμή στην κλίμακα του υπομνήματος. Επιλέγεται να παρουσιαστεί η εικόνα του τοιχώματος (Σχήμα 3.36) τη χρονική στιγμή 0,01 sec, που ασκείται η μέγιστη τιμή της δύναμης F.



Σχήμα 3.36 – Τιμές PE, Max Principal και διανύσματα αυτών στον 5^ο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

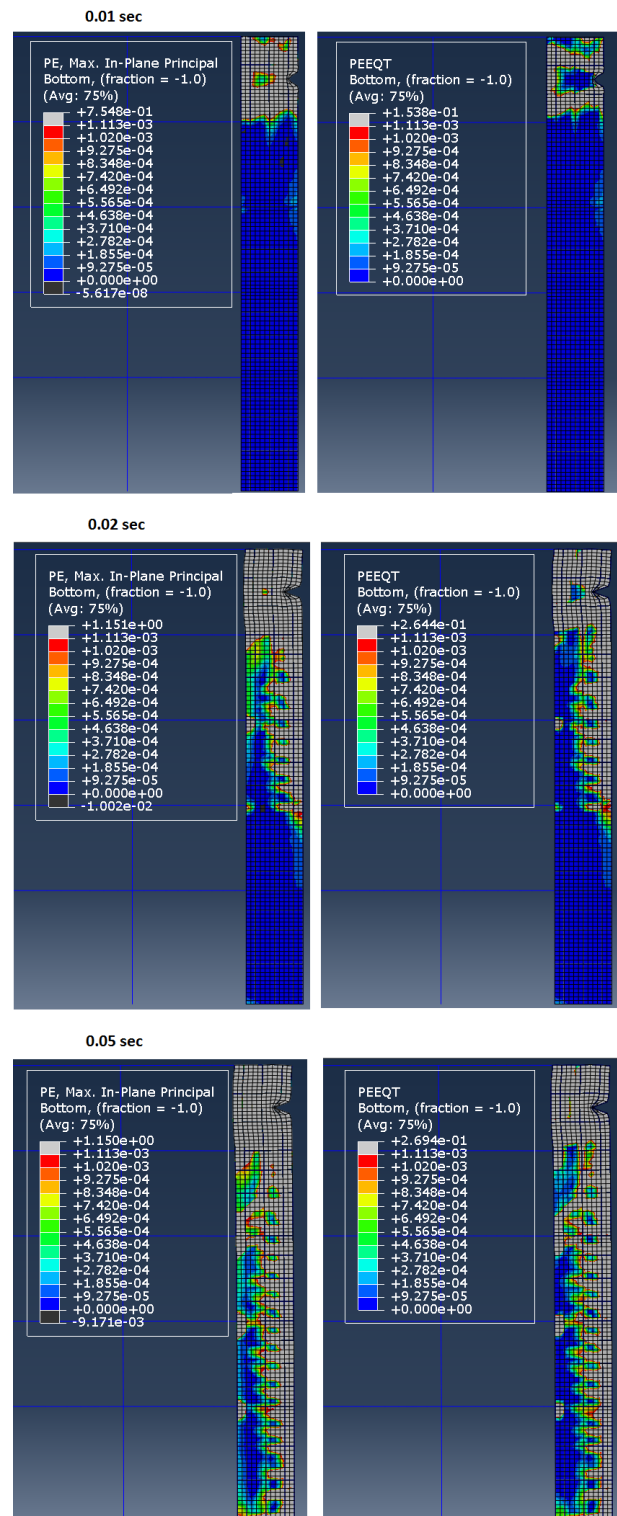
Έντονες ρωγμές αναπτύσσονται στην περιοχή πλησίον της φόρτισης. Ρωγμές ελαφρώς εξασθενημένες εμφανίζονται σε μια ζώνη, η οποία ορίζεται από την περιοχή κοντά στη φόρτιση και τις περιοχές σύνδεσης δοκού 4^{ου} και δοκού 5^{ου} ορόφου με το τοίχωμα (γκρι ζώνη του Σχήματος 3.36). Μικρότερου εύρους ρωγμές, συγκριτικά με τις προηγούμενες, εμφανίζονται σε όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του 5^{ου} ορόφου του τοιχώματος.



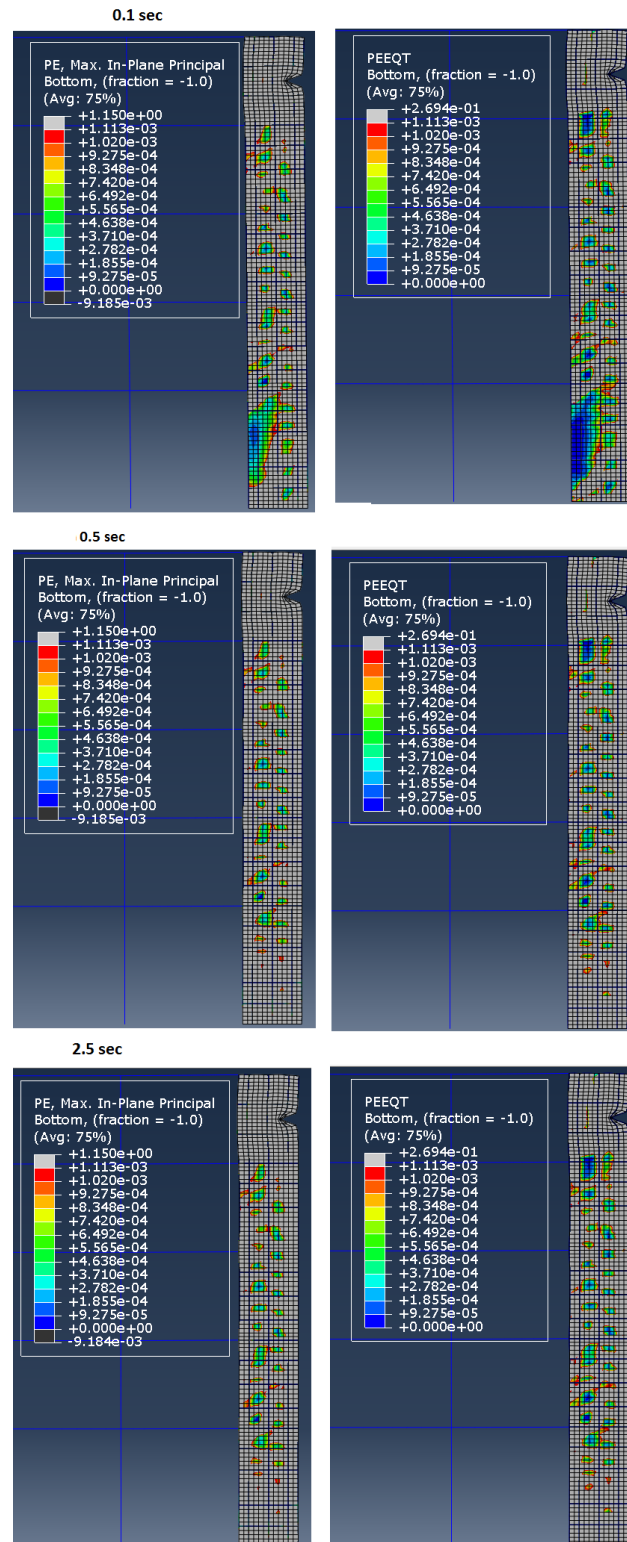
Σχήμα 3.37– Τιμές PE, Max Principal και διανύσματα αυτών στον 5ο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

Για την ευκρινέστερη παρουσίαση των ρωγμών, που αναφέρθηκαν, επιλέγεται από τις ρυθμίσεις του Abaqus να μην εμφανίζονται οι μεγαλύτερου εύρους ρωγμές (αυτές δηλαδή που βρίσκονται στην γκρι ζώνη). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η

καλύτερη απεικόνιση των μικρότερου εύρους ρωγμών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.37. Υπενθυμίζεται ότι η διεύθυνση των ρωγμών είναι κάθετη στα διανύσματα των μέγιστων πλαστικών κύριων παραμορφώσεων.



Σχήμα 3.38 - Τιμές PE, Max Principal και PEEQT του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,01, 0,02, 0,05 sec.



Σχήμα 3.39- Τιμές PE, Max Principal και PEEQT του τοιχώματος για τις χρονικές στιγμές 0,1, 0,5, 2, 5 sec.

Τα Σχήματα 3.38, 3.39 δίνουν πλήρη εποπτεία της κατάστασης σε ολόκληρο το φορέα κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Παρατηρείται ότι όλο το τοίχωμα έχει ρηγματωθεί. Αναπτύσσονται δε μεγάλες τιμές μέγιστων κύριων πλαστικών

παραμορφώσεων, που ξεπερνάνε κατά πολύ την πλαστική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο σημείο θραύσης του σκυροδέματος σε εφελκυσμό (0,001113).

3.1.1.2.3 Σχολιασμός μετακινήσεων

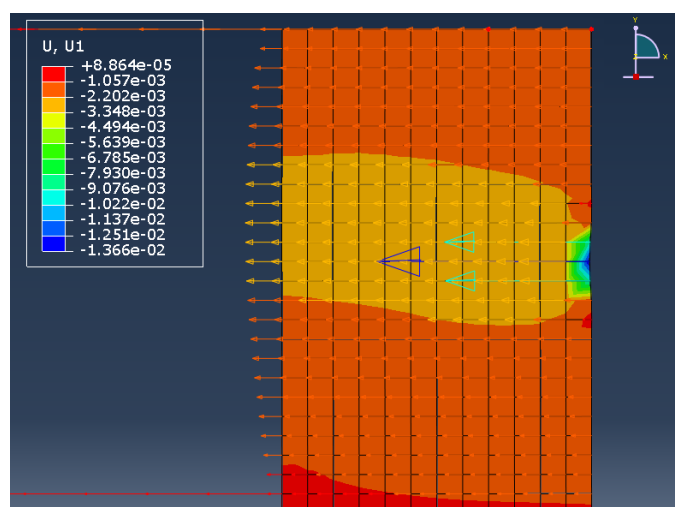
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή, και κυρίως η μετατόπιση κατά τη διεύθυνση 1 (άξονας X) στην οποία εφαρμόζονται οι τρεις δυνάμεις F.

Ολόκληρος ο φορέας μετατοπίζεται κατά τη διεύθυνση 1 από τη στιγμή που ασκούνται οι δυνάμεις. Η μετακίνηση είναι πιο έντονη στον 5^ο όροφο του τοιχώματος, όπου ασκούνται οι F, και λιγότερο έντονη στον υπόλοιπο φορέα.

- Χρονική στιγμή 0,005 sec

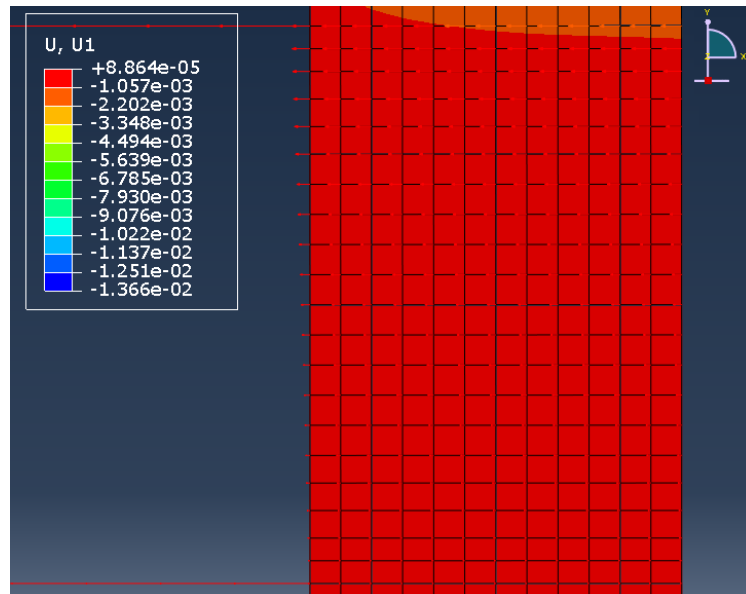
Ήδη τη χρονική στιγμή 0,005 sec ο φορέας έχει σημειώσει αξιόλογη μετατόπιση με τα στοιχεία κοντά στη φόρτιση (elements 144, 708) να μετατοπίζονται πάνω από 1cm. Η μετατόπιση των υπόλοιπων στοιχείων του πάνω ορόφου είναι της τάξης χιλιοστού, ενώ μικρότερη είναι η μετακίνηση των κόμβων του τέταρτου ορόφου. Ακολουθούν εικόνες του φορέα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Στο Σχήμα 3.40 είναι ορατές οι τιμές των μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση 1 (U1) των κόμβων των στοιχείων του πέμπτου ορόφου, συνδυάζοντας τη χρωματική απόχρωση σε κάθε στοιχείου με τις τιμές που δίνονται στο υπόμνημα αριστερά. Επίσης, τα βέλη αναπαριστούν τη διεύθυνση των μετατοπίσεων στους κόμβους κάθε στοιχείου.



Σχήμα 3.40 – Τιμές και διευθύνσεις μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση X (U1) πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,005 sec.

Όλοι οι κόμβοι του πέμπτου ορόφου του τοιχώματος μετατοπίζονται προς τα αρνητικά του άξονα Χ, όπως είναι εμφανές (Σχήμα 3.40). Το ίδιο συμβαίνει και στον τέταρτο όροφο, με σαφώς μικρότερες τιμές μετακινήσεων (Σχήμα 3.41). Ωστόσο, στον τρίτο και δεύτερο όροφο σημειώνονται πολύ μικρές μετακινήσεις προς τα δεξιά, δηλαδή τα θετικά του άξονα Χ. Ο πρώτος όροφος παραμένει αμετακίνητος.

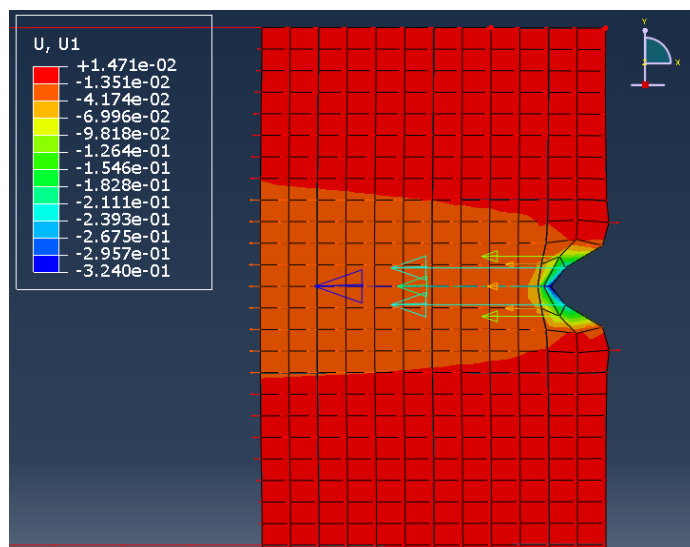


Σχήμα 3.41 – Τιμές και διευθύνσεις μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση Χ (U1) τέταρτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,005 sec..

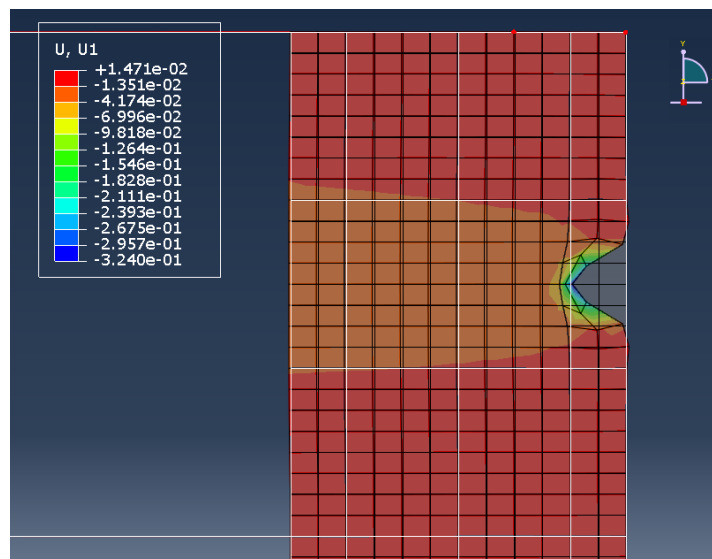
- Χρονική στιγμή 0,01 sec

Καθώς η δύναμη αυξάνεται είναι αναμενόμενο να αυξάνεται και η μετακίνηση των κόμβων του τοιχώματος. Έτσι τη χρονική στιγμή που ασκείται η μέγιστη τιμή της δύναμης F , οι μετακινήσεις στην περιοχή κοντά στη φόρτιση είναι της τάξεως δεκάτου του μέτρου. Ο κόμβος 75 έχει τη μέγιστη μετακίνηση κατά τα αρνητικά του άξονα Χ και ίση περίπου με 30 εκατοστά (βαθύ μπλε απόχρωση στο Σχήμα 3.42). Εξίσου μεγάλες μετατοπίσεις, της τάξεως δεκάτου του μέτρου, παρουσιάζουν οι κόμβοι των στοιχείων 132, 143, 144, 707, 708, 720 που βρίσκονται πλησίον των κόμβων επιβολής των τριών δυνάμεων. Οι υπόλοιποι κόμβοι του πέμπτου ορόφου μετατοπίζονται λιγότερο (μετακίνηση της τάξεως εκατοστού του μέτρου, βλ. πορτοκαλί και ελαφρώς κόκκινες αποχρώσεις), με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα Χ. Στους υπόλοιπους ορόφους σημειώνονται μικρότερες κατά Χ μετακινήσεις. Για την καλύτερη εποπτεία των μετακινήσεων U1 στον πέμπτο όροφο

παρατίθεται το Σχήμα 3.43, στο οποίο απεικονίζεται ο απαραμόρφωτος (λευκό χρώμα) και ο παραμορφωμένος φορέας.



Σχήμα 3.42 – Τιμές και διευθύνσεις μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση Χ (U1) πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec..

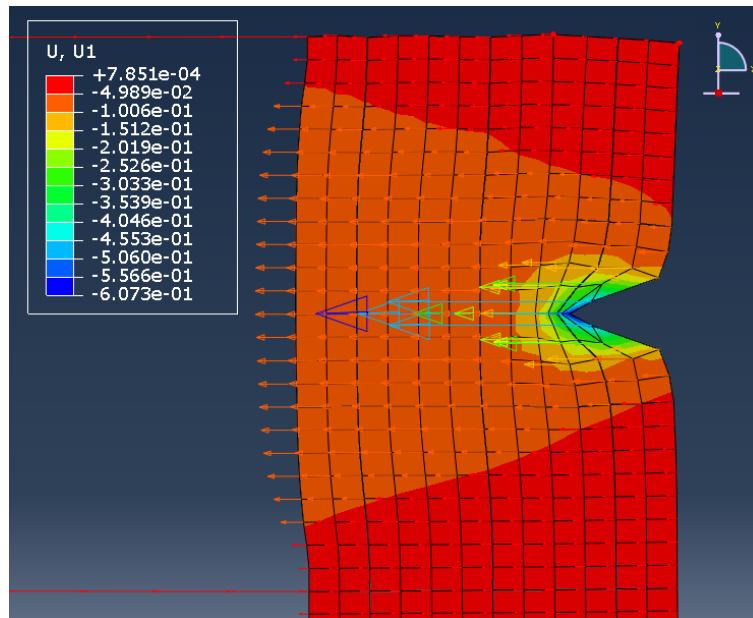


Σχήμα 3.43 – Απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) και παραμορφωμένος φορέας τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

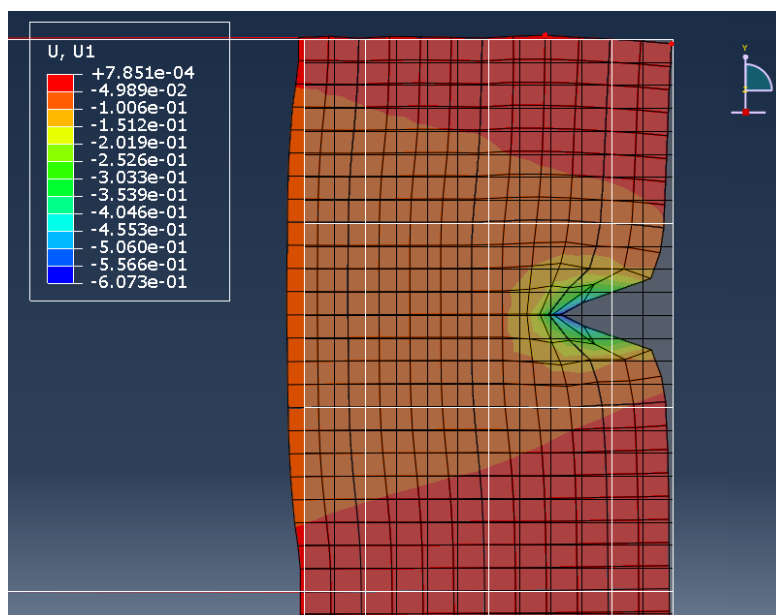
- Χρονική στιγμή 0,02 sec

Τη χρονική στιγμή 0,02 sec η δύναμη παύει να ασκείται. Οι κόμβοι κοντά στην περιοχή της φόρτισης παρουσιάζουν υπερβολικά μεγάλη μετακίνηση, περίπου 60

εκατοστά. Τέτοιες τιμές μετακινήσεων δεν είναι αποδεκτές και συνεπάγονται μη συνεργασία χάλυβα σκυροδέματος. Το τοίχωμα έχει καταστραφεί ολοσχερώς. Ακολουθούν τα Σχήματα 3.44 και 3.45 από τα οποία γίνεται εύληπτο το μέγεθος των μετακινήσεων.



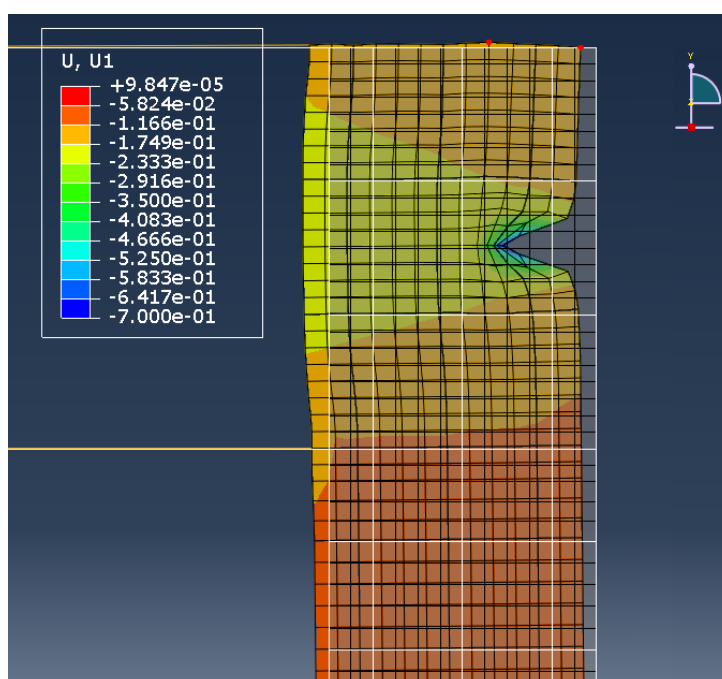
Σχήμα 3.44 – Τιμές και διευθύνσεις μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση Χ (U1) πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,02 sec.



Σχήμα 3.45 – Απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) και παραμορφωμένος φορέας τη χρονική στιγμή 0,02 sec.

- Χρονικό διάστημα μεταξύ 0,02 και 2,5 sec

Σε αυτό το χρονικό διάστημα η δύναμη F έχει μηδενική τιμή. Παρατηρούνται πολύ μεγάλες μετακινήσεις στη διεύθυνση του άξονα X , οι οποίες φτάνουν μέχρι και τα 70 εκατοστά στον πέμπτο όροφο τη χρονική στιγμή 0,1077 sec. Μικρότερες, αλλά εξίσου καταστροφικές είναι οι μετακινήσεις που καταγράφονται στους κατώτερους ορόφους. Στο Σχήμα 3.46 που ακολουθεί φαίνεται η μετακίνηση του φορέα τη χρονική στιγμή 0,1077 sec σε σχέση με την αρχική απαραμόρφωτη κατάστασή του.



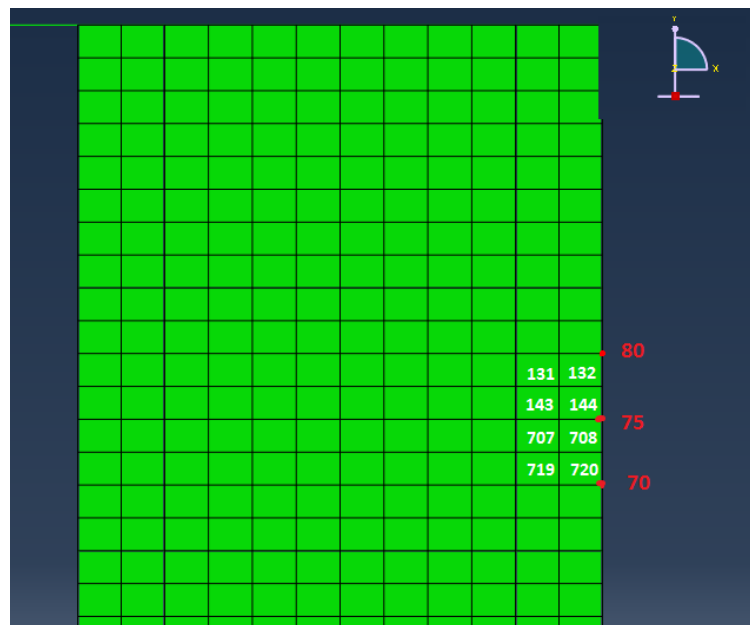
Σχήμα 3.46– Απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) και παραμορφωμένος φορέας τη χρονική στιγμή 0,1077 sec.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει ότι η προσομοίωση του φαινομένου της κρούσης με τις τρεις δυνάμεις δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα μέχρι και τη χρονική στιγμή 0,01 sec. Από εκείνη τη χρονική στιγμή και ύστερα, οι τιμές των τάσεων, των εφελκυστικών παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων αυξάνονται τόσο, ώστε να μην είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη. Περισσότερα σχόλια για την Προσομοίωση P1, καθώς και η σύγκρισή της με τις υπόλοιπες προσομοιώσεις ακολουθούν στο Κεφάλαιο 4.

3.1.2 Προσομοίωση Π2 – Υλικό τοιχώματος *DAMAGED PLASTICITY

3.1.2.1 Περιγραφή προβλήματος και προσομοίωση στο πρόγραμμα Π.Σ. Abaqus

Η προσομοίωση αυτή διαφέρει από την Προσομοίωση Π1 στο εύρος της περιοχής που ασκείται η μεταβαλλόμενη στο χρόνο δύναμη F . Στην προηγούμενη ανάλυση, οι τρεις δυνάμεις απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με 0,125 m, έτσι ώστε η δύο ακραίες δυνάμεις να απέχουν μεταξύ τους απόσταση 0,25 m. Στην παρούσα προσομοίωση, η απόσταση των δύο ακραίων δυνάμεων είναι 0,50 m, ώστε οι δυνάμεις ανά δύο απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με 0,25 m. Η δύναμη F ασκείται στους κόμβους 80, 75, 70. Παρακάτω δίνεται το Σχήμα 3.47 στο οποίο απεικονίζεται η περιοχή της φόρτισης. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης παραμένουν αμετάβλητα.



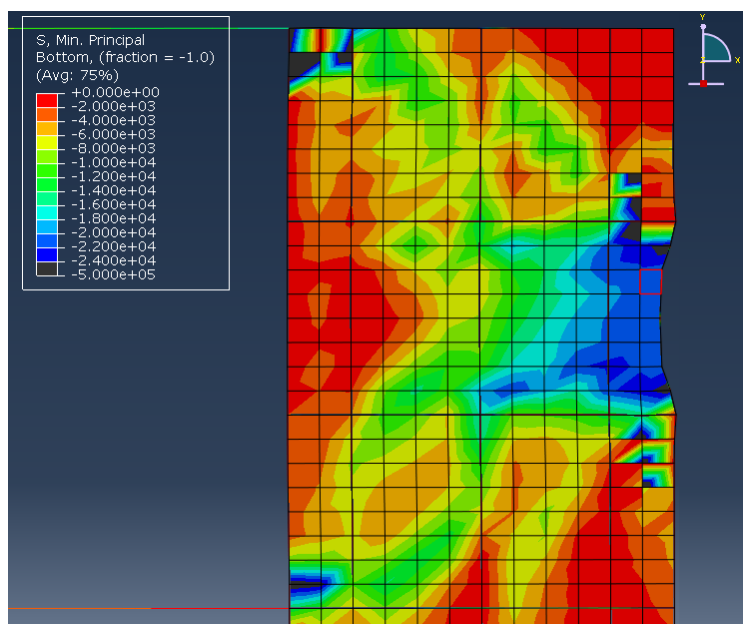
Σχήμα 3.47- Διακριτοποίηση φορέα (κόμβοι και στοιχεία) στην περιοχή κοντά στη φόρτιση.

3.1.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

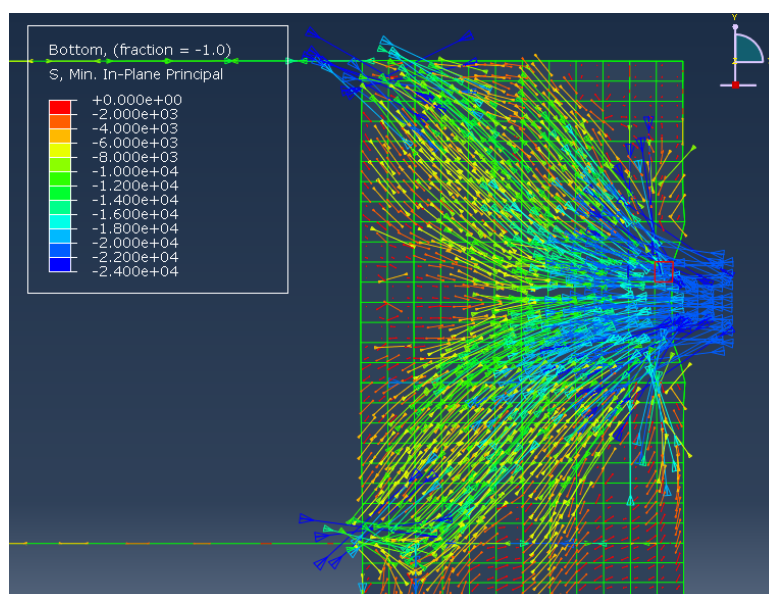
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής παρουσιάζουν ομοιότητες και διαφορές με αυτά της Προσομοίωσης Π1. Διαφορές παρατηρούνται στο εύρος επιρροής της δύναμης όπως αυτό είναι αναμενόμενο. Ενδεικτικά, ακολουθούν αποτελέσματα της παρούσας προσομοίωσης για τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

3.1.2.2.1 Σχολιασμός τάσεων

Στα Σχήματα 3.48, 3.49 που ακολουθούν απεικονίζονται οι ελάχιστες κύριες τάσεις στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec. Υψηλές τιμές των ελάχιστων κύριων τάσεων στον όροφο αυτό αναπτύσσονται στην περιοχή της κρούσης, καθώς και στις συνδέσεις των δοκών με το τοίχιμα.



Σχήμα 3.48 – Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων στο τοίχιμα του πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec.



Σχήμα 3.49 - Διανύσματα ελάχιστων κύριων τάσεων στο τοίχιμα του πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

Μια άλλη οπτική των ελάχιστων κύριων τάσεων (S, Min Principal) δίνεται στο Σχήμα 3.49, όπου απεικονίζεται το ίδιο μέγεθος διανυσματικά. Στις περιοχές που διανύσματα πυκνώνουν και η χρωματική τους απόχρωση πλησιάζει την κατώτερη μπλε τιμή του υπομνήματος, οι τάσεις που αναπτύσσονται πλησιάζουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Επιλέγεται να παρουσιαστούν εικόνες από την ανάλυση στο Abaqus, οι οποίες δείχνουν τις ακριβείς τιμές των τάσεων στα στοιχεία του τοιχώματος που αναπτύσσουν υψηλές τιμές S, Min Principal (Σχήματα 3.50, 3.51, 3.52).

Field Output...

Step: 1, Step-1

Frame: 51

Field output variable for Probe: S, Min. Principal (Not averaged)

Probe Values

Select from viewport Key-in label

Probe: Elements Position: Integration Pt

Part Instance

Element ID

Type

Nodes

S, Min. Principal (Not averaged)

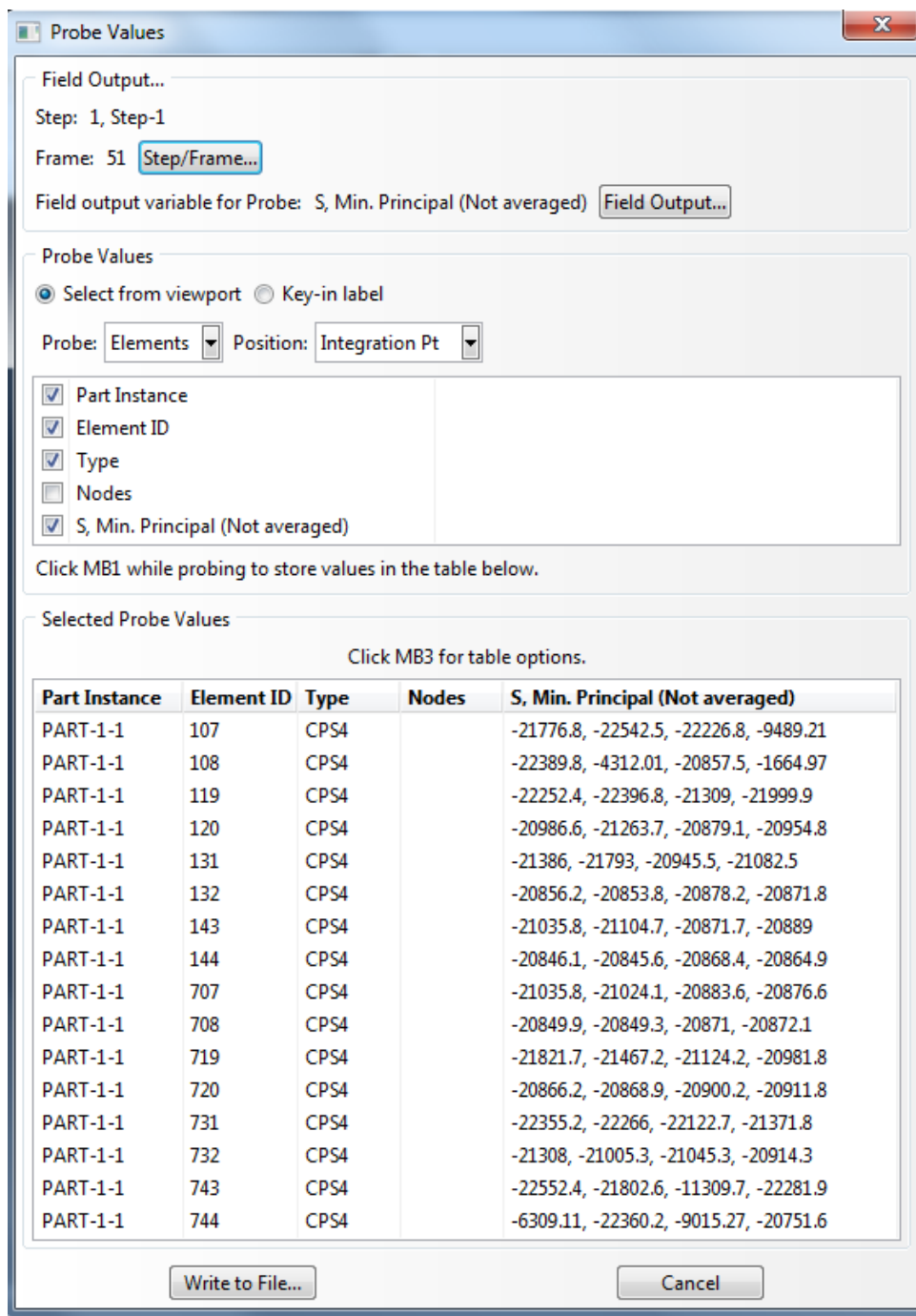
Click MB1 while probing to store values in the table below.

Selected Probe Values

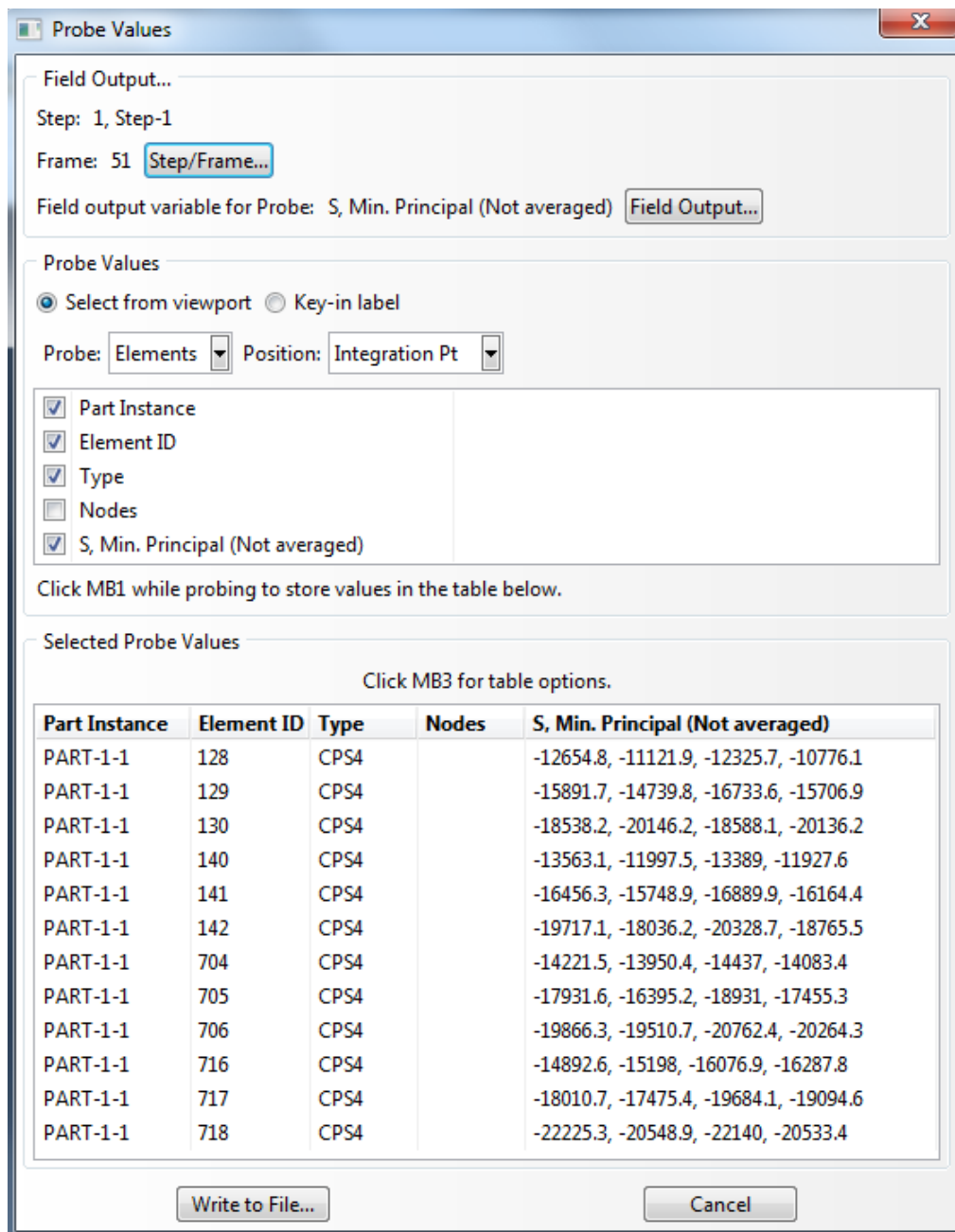
Click MB3 for table options.

Part Instance	Element ID	Type	Nodes	S, Min. Principal (Not averaged)
PART-1-1	1	CPS4		-3416.06, -4393.36, -22251.2, -22519.6
PART-1-1	2	CPS4		-22509.5, -22535.9, -1031.59, -2629.28
PART-1-1	13	CPS4		-2653.43, -22008.9, -21305.5, -22396.4
PART-1-1	14	CPS4		-7265.35, -21747, -1117.47, -11541.2
PART-1-1	25	CPS4		-673.281, -9689.69, -1972.68, -19329.1
PART-1-1	817	CPS4		-22649.4, -2301.47, -22725.2, -7254.58
PART-1-1	818	CPS4		-11107.1, -2108.31, -18505.6, -5673.37
PART-1-1	829	CPS4		-12328.6, -22434.1, -14826, -22444.4
PART-1-1	830	CPS4		-5941.71, -11717.1, -7801.09, -13873.9

Σχήμα 3.50 - Τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στις συνδέσεις δοκού του 4ου και 5ου ορόφου με το τοίχωμα.

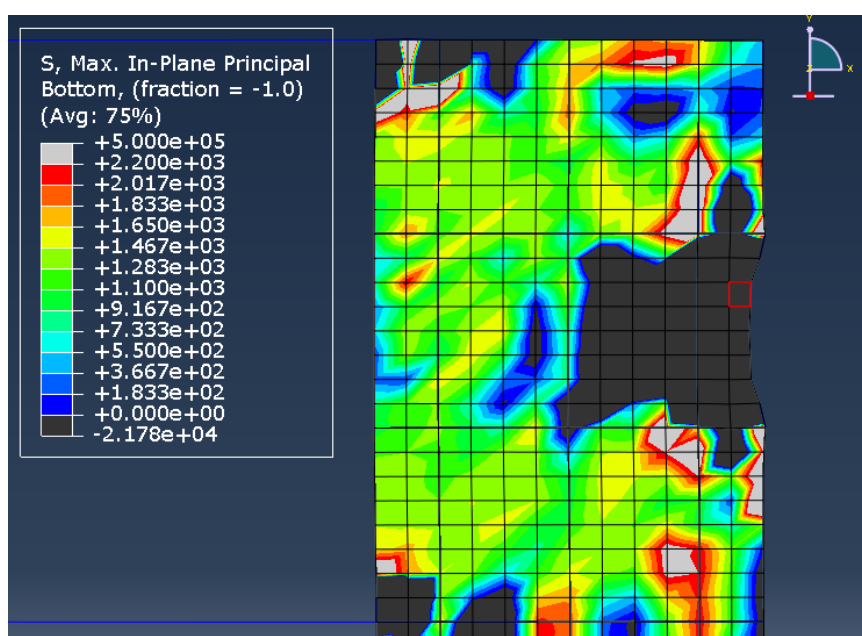


Σχήμα 3.51 – Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στην περιοχή κοντά στη φόρτιση.



Σχήμα 3.52- Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στο εσωτερικό του τοιχώματος στο ύψος που ασκούνται οι τρεις δυνάμεις.

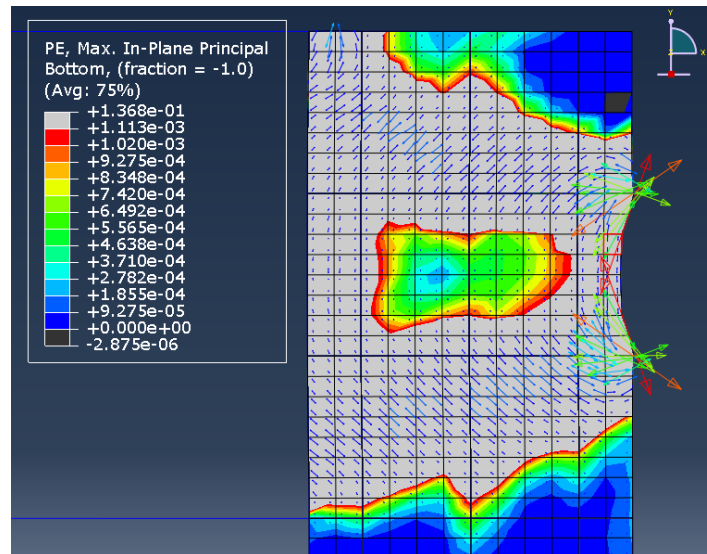
Όσον αφορά τις μέγιστες κύριες τάσεις, παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές (απόχρωση γκρι-σομόν) πλησίον της περιοχής φόρτισης και των συνδέσεων των δοκών του 4^{ου} και 5^{ου} ορόφου με το τοίχωμα, όπου οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (2200 kPa), τη χρονική στιγμή 0,01 sec. Την ίδια χρονική στιγμή, στην περιοχή της φόρτισης και των συνδέσεων οι μέγιστες κύριες τάσεις είναι θλιπτικές (τάσεις μικρότερες του μηδενός, απόχρωση γκρι σκούρο). Μάλιστα συνδυάζοντας τα Σχήματα 3.48 και 3.53, παρατηρούμε ότι τα στοιχεία με γκρι σκούρο απόχρωση στο Σχήμα 3.53, που βρίσκονται στην περιοχή της φόρτισης, υποβάλλονται σε διαξονική συμπίεση τη δεδομένη χρονική στιγμή. Τα υπόλοιπα στοιχεία του τοιχώματος αναπτύσσουν μέγιστη κύρια τάση η οποία είναι εφελκυστική και μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος.



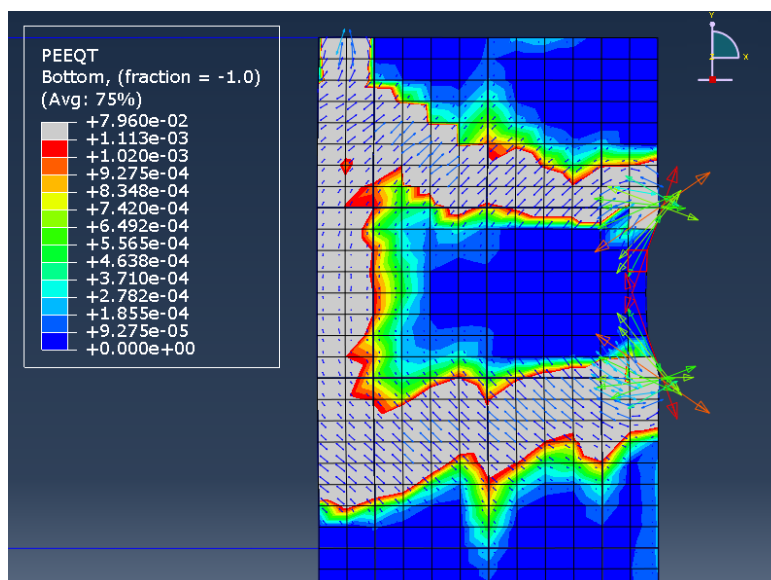
Σχήμα 3.53 – Τιμές μέγιστων κύριων παραμορφώσεων στο τοίχωμα του πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

3.1.2.2.2 Σχολιασμός παραμορφώσεων

Όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση, μας ενδιαφέρουν οι τιμές την μέγιστης πλαστικής κύριας παραμόρφωσης (PE, Max Principal) και της ισοδύναμης πλαστικής κύριας παραμόρφωσης υπό εφελκυσμό (PEEQT). Στα Σχήματα 3.54 και 3.55 που ακολουθούν είναι ορατές οι τιμές των μεγεθών αυτών. Σχεδόν ολόκληρο το τοίχωμα του πέμπτου ορόφου (με εξαίρεση μια μικρή περιοχή, μαύρο χρώμα) έχει ρηγματωθεί μέχρι και αυτή τη χρονική στιγμή.



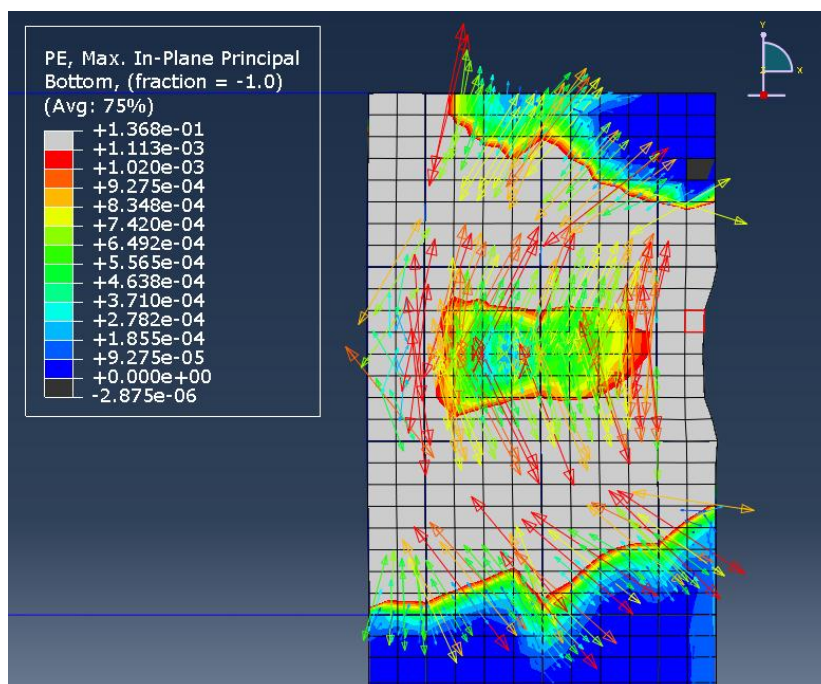
Σχήμα 3.54 - Τιμές PE, Max Principal και διανύσματα αυτών στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec.



Σχήμα 3.55 - Τιμές PEEQT και των διανυσμάτων των PE, Max Principal στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

Έντονες ρωγμές αναπτύσσονται στην περιοχή των δύο ακραίων δυνάμεων. Ρωγμές ελαφρώς εξασθενημένες εμφανίζονται σε μια ζώνη, η οποία περιλαμβάνει την αριστερή παρειά του τοιχώματος και τις ευθείες που ορίζονται από τα σημεία επιβολής των δύο ακραίων δυνάμεων και τα σημεία σύνδεσης των δοκών του 4^{ου} και 5^{ου} ορόφου με το τοίχωμα (γκρι ζώνη του Σχήματος 3.55). Μικρότερου εύρους ρωγμές, συγκριτικά με τις προηγούμενες, εμφανίζονται σε όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του 5^{ου} ορόφου του τοιχώματος.

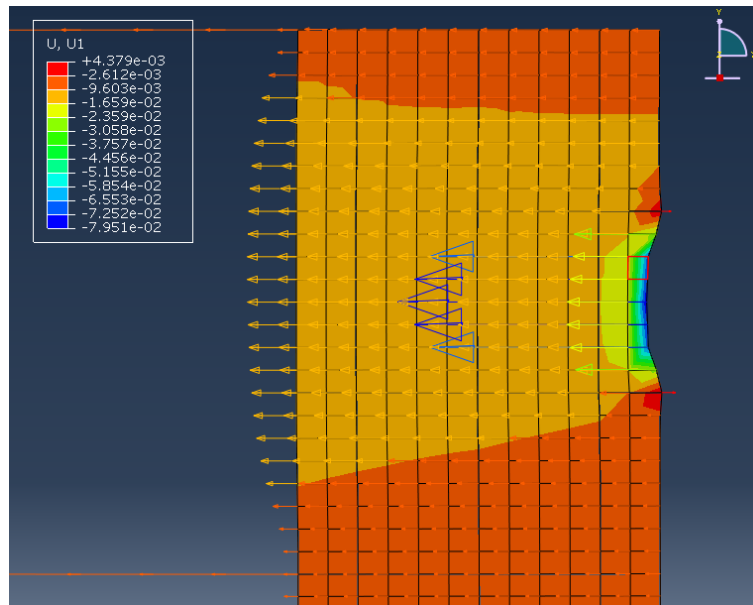
Για την ευκρινέστερη παρουσίαση των ρωγμών που αναφέρθηκαν τελευταία, επιλέγεται από τις ρυθμίσεις του Abaqus να μην εμφανίζονται οι μεγαλύτερου εύρους ρωγμές (αυτές δηλαδή που βρίσκονται στην γκρι ζώνη). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η καλύτερη απεικόνιση των μικρότερου εύρους ρωγμών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.56. Υπενθυμίζεται ότι η διεύθυνση των ρωγμών είναι κάθετη στα διανύσματα των μέγιστων πλαστικών κύριων παραμορφώσεων.



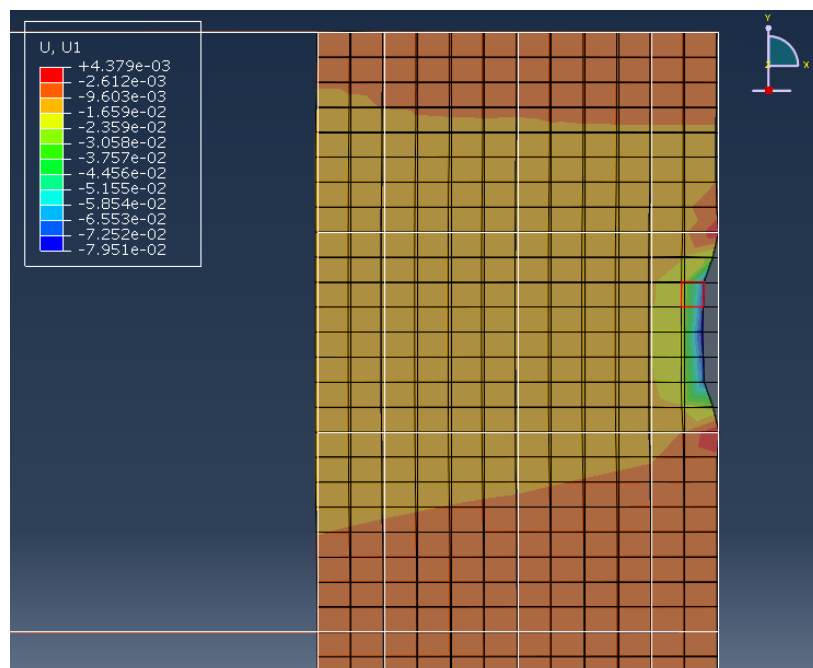
Σχήμα 3.56 - Τιμές PE, Max Principal και διανύσματα αυτών στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec δίνοντας έμφαση στις ρωγμές που αναπτύσσονται στις μη γκρι επιφάνειες.

3.1.2.2.3 Σχολιασμός μετακινήσεων

Η μετακίνηση κατά τη διεύθυνση X των στοιχείων στην περιοχή της κρούσης τη χρονική στιγμή 0,01 sec είναι περίπου 8 εκατοστά (Σχήμα 3.57). Στην Προσομοίωση Π2 τα αποτελέσματα είναι αρκετά ευμενέστερα συγκριτικά με αυτά της Προσομοίωσης Π1. Στο Σχήμα 3.58 απεικονίζονται μαζί η απαραμόρφωτη και η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα για $t=0,01$ sec, ώστε να γίνει ευκολότερα αντιληπτή η μετακίνηση.



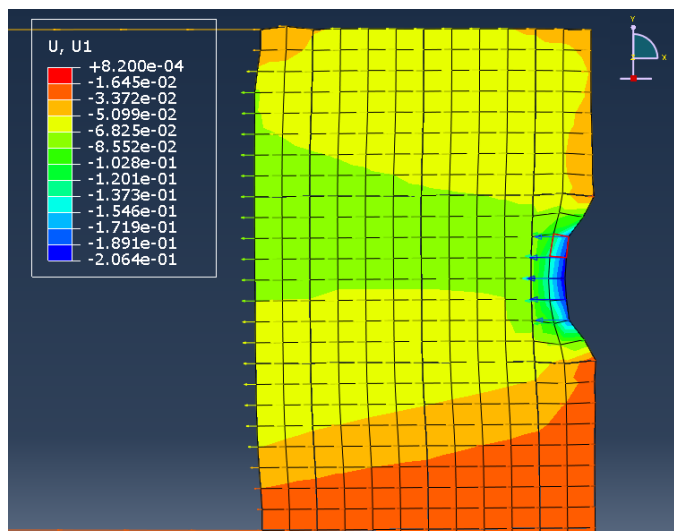
Σχήμα 3.57 – Τιμές και διευθύνσεις μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση Χ (U1) πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec.



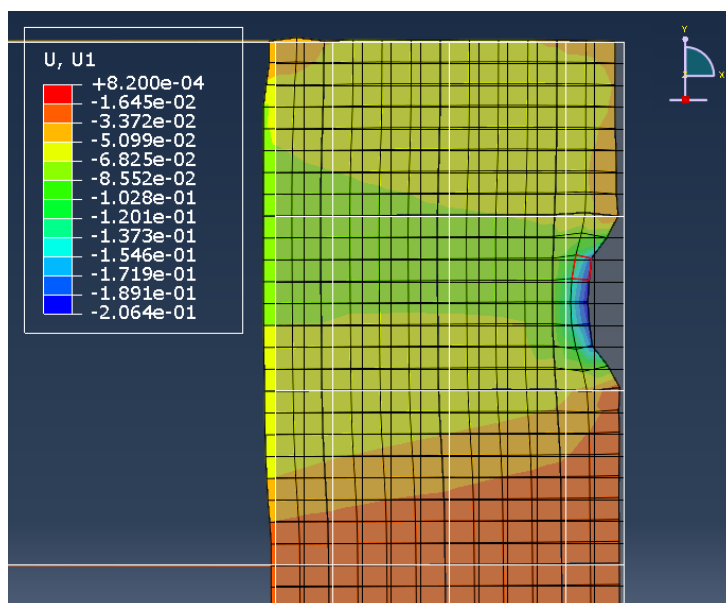
Σχήμα 3.58 - Απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) και παραμορφωμένος φορέας τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

Εφόσον οι μετατοπίσεις είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με την Προσομοίωση Π1 για τη χρονική στιγμή 0,01 sec, ενώ οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι συγκρίσιμες με αυτές της Προσομοίωσης Π1, σκόπιμη κρίνεται η διερεύνηση της μετακίνησης του πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,02 sec.

Η μέγιστη μετακίνηση που σημειώνεται αντιστοιχεί στα στοιχεία που βρίσκονται κοντά στις δυνάμεις F και η τιμή αγγίζει τα 20 εκατοστά. Η παραπάνω μετατόπιση να μεν υποτριπλάσια από την αντίστοιχη της Προσομοίωσης Π1, ωστόσο επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης.



Σχήμα 3.59 – Τιμές και διευθύνσεις μετακινήσεων κατά τη διεύθυνση X (U1) πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,02 sec.



Σχήμα 3.60 – Απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) και παραμορφωμένος φορέας τη χρονική στιγμή 0,02 sec.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται, ότι στην Προσομοίωση Π2, παρότι η απόσταση των δύο ακραίων δυνάμεων που ασκούνται στο τοίχωμα διπλασιάζεται (0,50 m), τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι το ίδιο καταστροφικά για την κατασκευή ήδη από τη χρονική στιγμή 0,01 sec. Τα παραπάνω σαφώς ισχύουν προσομοιώνοντας το

φαινόμενο της κρούσης με το μοντέλο των τριών δυνάμεων και χρησιμοποιώντας το μοντέλο Damaged Plasticity για την προσομοίωση του σκυροδέματος του τοιχώματος. Ακολουθεί η Προσομοίωση Π3, η οποία εξετάζει το ίδιο φαινόμενο, χρησιμοποιώντας όμως άλλο μοντέλο για την προσομοίωση του σκυροδέματος του τοιχώματος.

3.1.3 Προσομοίωση Π3 – Υλικό τοιχώματος *DRUCKER PRAGER

3.1.3.1 Περιγραφή προβλήματος και προσομοίωση στο πρόγραμμα Π.Σ. Abaqus

Η προσομοίωση Π3 είναι πανομοιότυπη με την προσομοίωση Π1. Η διαφορά των δύο προσομοιώσεων έγκειται στο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του σκυροδέματος του τοιχώματος. Χρησιμοποιείται το μοντέλο *DRUCKER PRAGER.

Ο νόμος του υλικού είναι:

Τάση $-\sigma$ (kPa)	Παραμόρφωση - ϵ
0,00	0,00
20000,00	0,00069
20000,00	0,0035

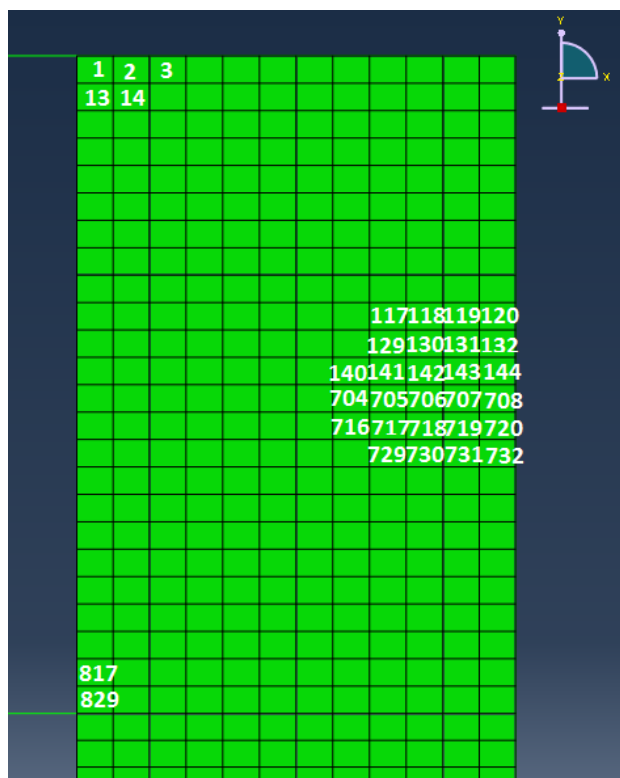
Η γωνία τριβής ισούται με τη γωνία διαστολικότητας και η τιμή τους είναι $53,3^\circ$, και ο λόγος K ορίζεται ίσος με 0,80. Το μέτρο ελαστικότητας ισούται 29000 MPa, ο λόγος Poisson ίσος με 0,30 και η πυκνότητα με $2,5 \text{ Mg/m}^3$.

```
** DRUCKER PRAGER (DR_PR)
*MATERIAL, NAME=DR_PR
*ELASTIC, TYPE=ISO
  29.E+6, 0.3
*DRUCKER PRAGER
  53.3, 0.8, 53.3
*DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE=COMPRESSION
  20000., 0.
  20000., 0.0035
*DENSITY
2.5
```

Σημειώνεται ότι στην εντολή *DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE+COMPRESSION στα ζεύγη τάσεων παραμορφώσεων οι τιμές των παραμορφώσεων που δίνονται είναι ανελαστικές.

3.1.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

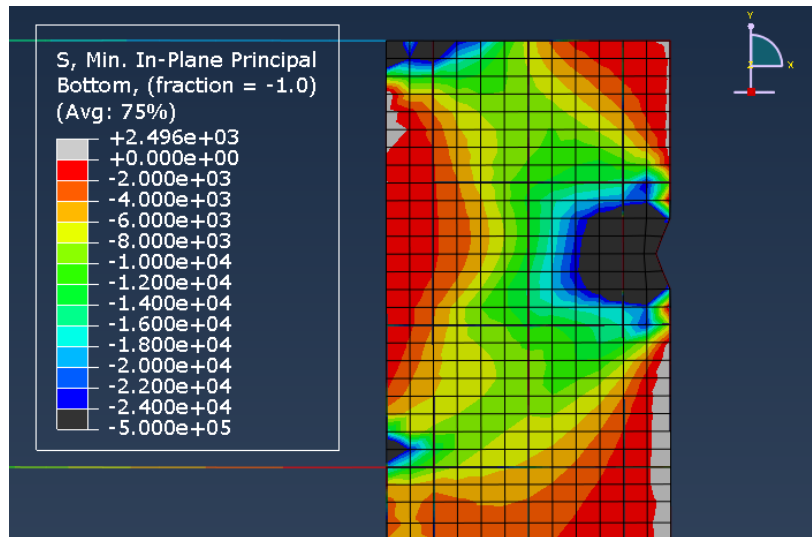
Εξετάζεται το πώς αποκρίθηκε ο φορέας και πιο συγκεκριμένα το τοίχωμα του πέμπτου ορόφου τη χρονική στιγμή 0,01 sec. Παρακάτω παρατίθενται χαρακτηριστικές εικόνες του φορέα και σχόλια για τις τιμές διαφόρων μεγεθών που αναπτύσσονται σε επιλεγμένα στοιχεία. Η διακριτοποίηση του πέμπτου ορόφου του φορέα φαίνεται στο Σχήμα 3.60.



Σχήμα 3.61 – Διακριτοποίηση πέμπτου ορόφου του τοιχώματος

3.1.3.2.1 Σχολιασμός τάσεων

Εξετάζοντας τις ελάχιστες κύριες τάσεις τη χρονική στιγμή 0,01 sec, παρατηρούμε ότι τα στοιχεία στην περιοχή της φόρτισης αναπτύσσουν τιμές αυτού του μεγέθους που ξεπερνούν κατά πολύ τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής παρατηρείται επίσης στις συνδέσεις των δοκών του τέταρτου και του πέμπτου ορόφου με το τοίχωμα. Οι περιοχές αυτές είναι χρωματισμένες με σκούρο γκρι χρώμα στο Σχήμα 3.62.

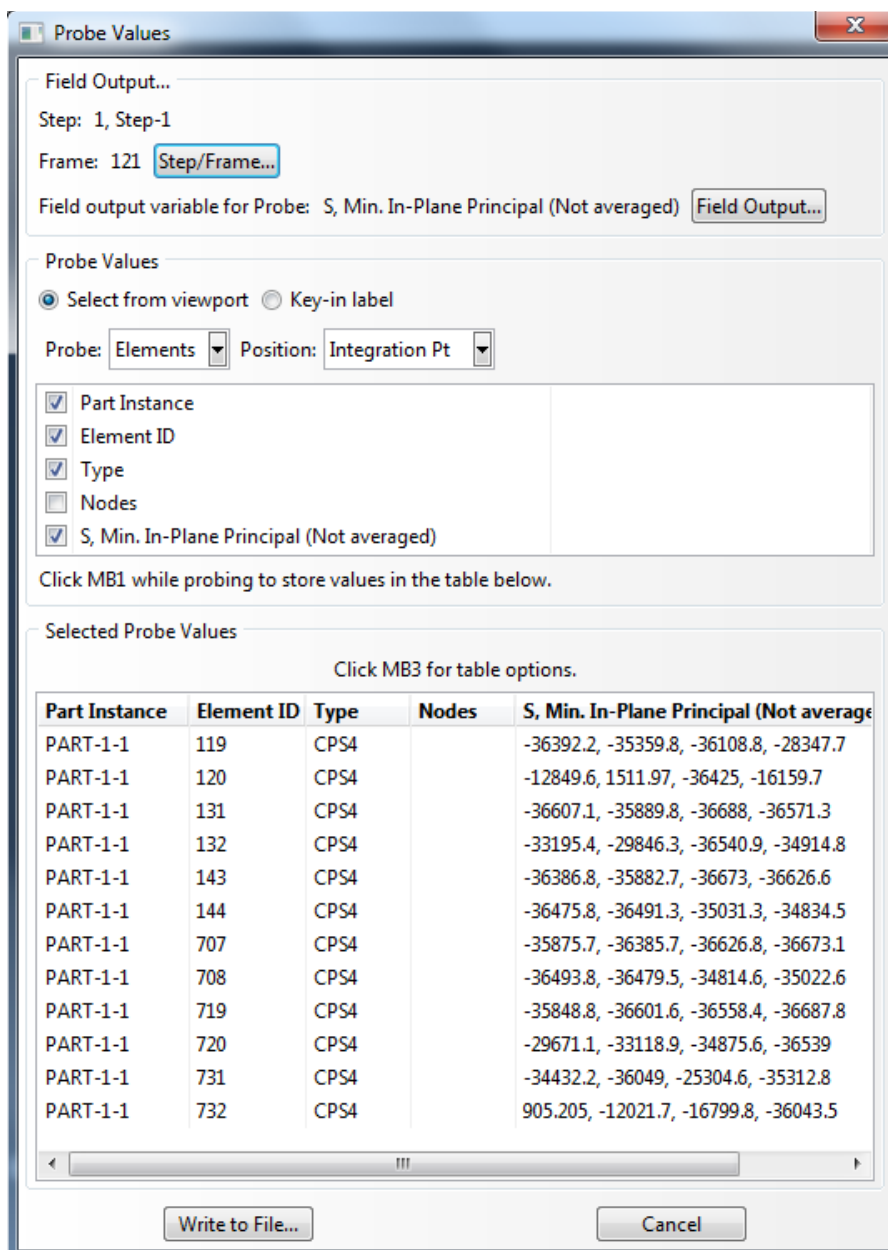


Σχήμα 3.62 – Τιμές ελάχιστων κύριων παραμορφώσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

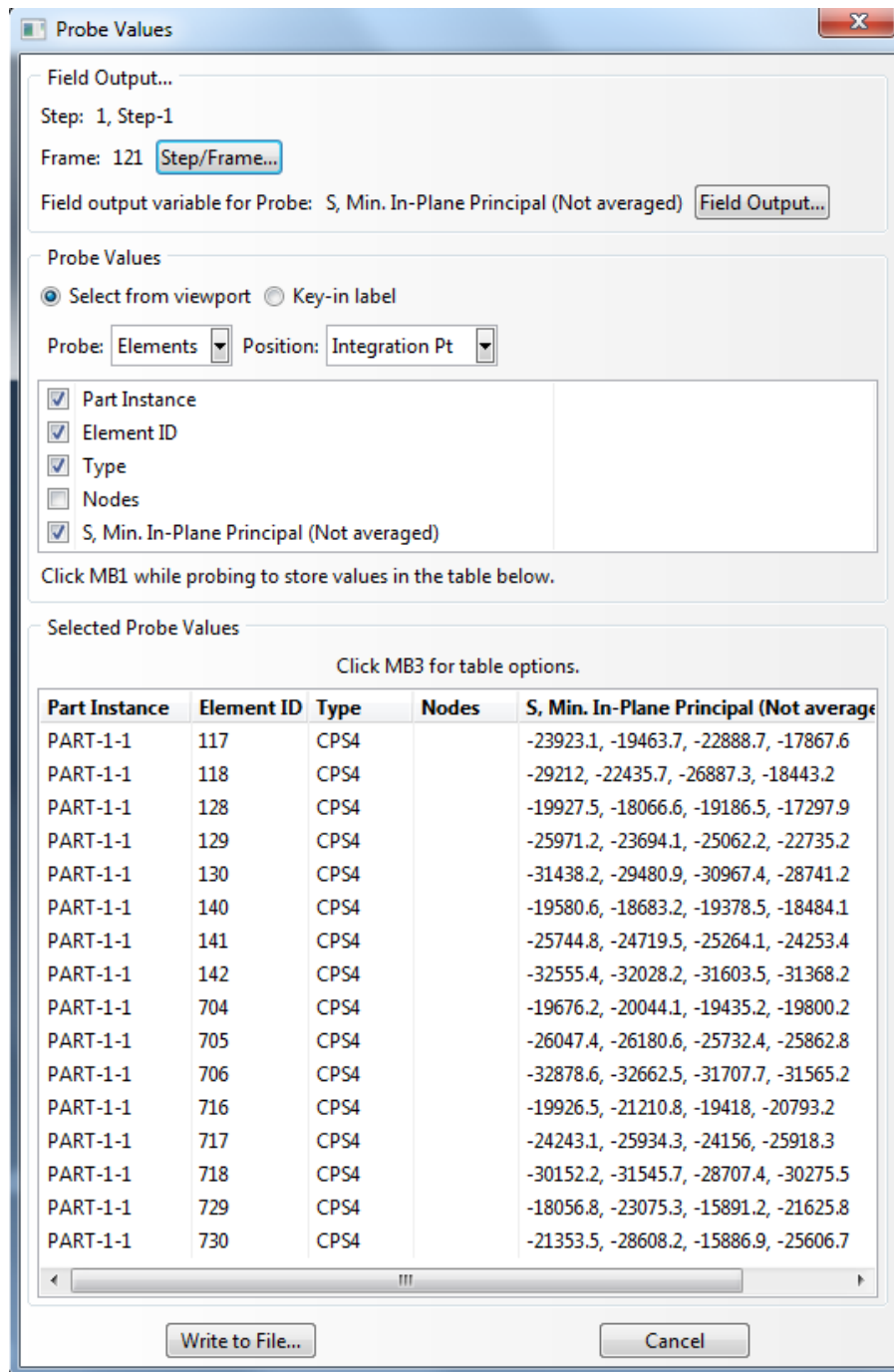
Στα Σχήματα 3.63, 3.64 και 3.65 που ακολουθούν φαίνονται οι τιμές των μέγιστων κύριων τάσεων επιλεγμένων στοιχείων.

Part Instance	Element ID	Type	Nodes	S, Min. In-Plane Principal (Not average)
PART-1-1	1	CPS4		-23481.1, -24980.5, -35294.2, -34465.8
PART-1-1	2	CPS4		-27237.9, -30799.1, -13621.7, -17174.8
PART-1-1	3	CPS4		-18653.5, -26014.1, -18900.5, -25810.7
PART-1-1	13	CPS4		-14599.1, -32524.7, -21653.8, -33039.9
PART-1-1	14	CPS4		-16523.5, -29810.5, -16030.7, -26288.5
PART-1-1	817	CPS4		-23551.4, -8002.09, -31646.3, -21406
PART-1-1	829	CPS4		-16410.7, -28508.4, -20305.8, -30710.1

Σχήμα 3.63 - Τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στις συνδέσεις δοκού του 4ου και 5ου ορόφου με το τοίχωμα.

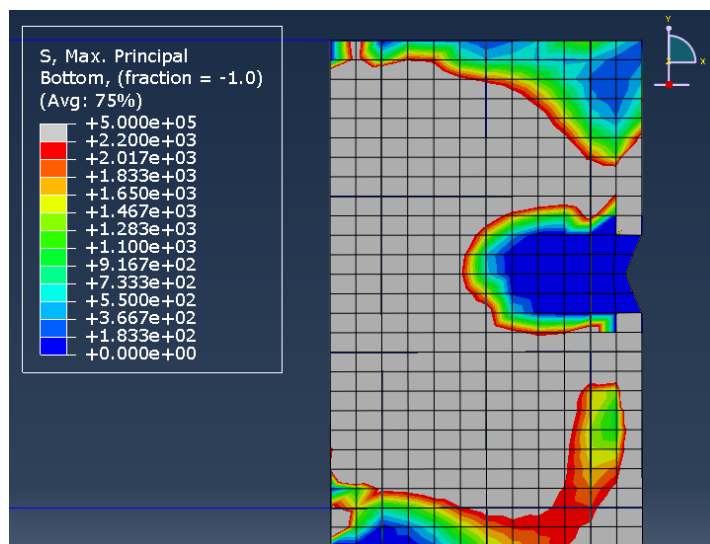


Σχήμα 3.64 – Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στην περιοχή κοντά στη φόρτιση.



Σχήμα 3.65 - Τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων τη χρονική στιγμή 0,01 sec στο εσωτερικό του τοιχώματος στο ύψος που ασκούνται οι τρεις δυνάμεις.

Όσον αφορά τις μέγιστες κύριες τάσεις παρατίθεται το Σχήμα 3.66, στο οποίο φαίνονται οι τιμές των μέγιστων κύριων τάσεων στον πέμπτο όροφο τη χρονική στιγμή 0,01 sec. Με γκρι χρώμα συμβολίζονται τα στοιχεία στα οποία παρατηρείται υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.



Σχήμα 3.66 – Τιμές μέγιστων κύριων τάσεων στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,01 sec.

Οι κύριες τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν κατά πολύ την αντοχή του σκυροδέματος.

Η Προσομοίωση Π3 δε θα αναλυθεί περαιτέρω.

3.2 Ακριβές Προχωρημένο Προσομοίωμα – Ορισμός Contact Surfaces και contact pair.

Προσομοίωση Π4 – Υλικό τοιχώματος *DAMAGED PLASTICITY

3.2.1 Περιγραφή προβλήματος και προσομοίωση στο πρόγραμμα Π.Σ. Abaqus

Η προσομοίωση Π4 είναι πανομοιότυπη με την προσομοίωση Π1. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται η κρούση. Η μέθοδος των τριών δυνάμεων εγκαταλείπεται. Η πλάκα ορόφου του γειτονικού κτιρίου Β (ELSET=PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET) προσομοιώνεται με δύο στοιχεία δοκού B21. Το

υλικό της πλάκας θεωρείται απολύτως ελαστικό (*MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC2) με άπειρη δυσκαμψία ($E=29.E+12$ MPa), λόγο Poisson ίσο με 0,30 και πυκνότητα ίση με $2,5 \text{ Mg/m}^3$.

```
** LINEAR_ELASTIC2
*MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC2
*ELASTIC, TYPE=ISO
    29.E+12,    0.3
*DENSITY
2.5,
```

Η συνολική μάζα της πλάκας του κτιρίου Β θεωρείται ότι είναι 120 tn. Εφόσον το κτίριο Α έχει δύο τοιχώματα προσκρουστήρες, σε κάθε τοίχωμα προσκρούει μάζα ίση με 60 tn. Γίνεται η παραδοχή συγκεντρωμένων μαζών στους κόμβους 1704, 1705, 1706 (NSET=RIGID_NSET). Έτσι, σε καθέναν από αυτούς τους κόμβους βρίσκεται συγκεντρωμένη μάζα ίση με 20 tn.

```
** ΠΛΑΚΑ ΚΤΙΡΙΟΥ Β
*NODE
    1704,    11.001,    14.5
    1705,    11.001,    14.625
    1706,    11.001,    14.375
*NSET, NSET=RIGID_NSET
1704, 1705, 1706
*ELEMENT, TYPE=B21 ,
ELSET=PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET
    2697,    1706,    1704
    2698,    1704,    1705
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=MASS_ELSET
2699, 1705
2700, 1705
2701, 1706
*MASS, ELSET=MASS_ELSET
20
```

Δεδομένου ότι στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψιν η δυσμενέστερη περίπτωση, η οριζόντια ταχύτητα πρόσκρουσης της πλάκας του κτιρίου Β στο τοίχωμα του κτιρίου Α είναι $0,60 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του οριζόντιου άξονα Χ. Έτσι ορίζονται οι αρχικές συνθήκες για την κρούση. Όσον αφορά της συνοριακές συνθήκες, προκειμένου να είναι δυνατή η κίνηση μόνο κατά τον άξονα Χ, περιορίζεται η κίνηση της πλάκας του κτιρίου Β κατά τους λοιπούς ενεργούς

βαθμούς ελευθερίας 2, 6 (μεταφορική κίνηση κατά τον άξονα Y και στροφική κίνηση περί τον άξονα Z).

```

** INITIAL CONDITIONS AND BOUNDARY CONDITIONS
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=VELOCITY
1704, 1, -0.60
1705, 1, -0.60
1706, 1, -0.60
*BOUNDARY
1704, 2,,0
1704, 6,,0
1705, 2,,0
1705, 6,,0
1706, 2,,0
1706, 6,,0
    
```

Απαραίτητος είναι ο ορισμός των επιφανειών που πρόκειται να έρθουν σε επαφή (contact surfaces). Ορίζεται η επιφάνεια επαφής PERIOXIKROYISIS_KTIRIOY_A, η οποία αποτελείται από τα faces S1 των στοιχείων 132, 144, 708, 720, 732 του τοιχώματος (element-based surface). Επιπρόσθετα, ορίζεται η επιφάνεια επαφής PLAKA_KTIRIOY_B, η οποία αποτελείται από το SPOS των στοιχείων της πλάκας του κτιρίου B.

```

** SURFACES
*SURFACE, NAME=PLAKA_KTIRIOY_B, TYPE=ELEMENT
PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET, SPOS
*SURFACE, NAME=PERIOXI_KROYISIS_KTIRIOY_A, TYPE=ELEMENT
132, S1
144, S1
708, S1
720, S1
732, S1
    
```

Οι επιφάνειες ορίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα διανύσματα που είναι κάθετα σε αυτές (εντοπίζονται με τον κανόνα του δεξιού χεριού) να έχουν αντίθετες κατευθύνσεις και να «δείχνουν» προς την επιφάνεια αλληλεπίδρασης τους. Ορίζεται επιφάνεια αλληλεπίδρασης (*SURFACE INTERACION, NAME=ΕΡΙΦΑΝΕΙΑ_KROYSHS) και ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι επιφάνειες. Μεταξύ της γενικής επαφής (general contact) και της επαφής ζεύγους (contact pair), επιλέχθηκε η δεύτερη, εφόσον γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις επιφάνειες που πρόκειται να έρθουν αλληλεπιδράσουν. Από τις δύο επιφάνειες που ορίζονται στο ζεύγος επαφής, η μία είναι η κύρια επιφάνεια (master surface) και η άλλη η δευτερεύουσα (slave surface). Μεταξύ των δύο «στοιχείων» που έρχονται σε επαφή, η κύρια επιφάνεια ανήκει στο πιο δύσκαμπτο. Έτσι, στην

παρούσα ανάλυση master surface είναι η PLAKA_KTIRIOY_B και slave surface η PERIOXI_KROYSIS_KTIRIOY_A. Πρώτα ορίζεται η slave surface και δεύτερη η master surface, όπως φαίνεται παρακάτω

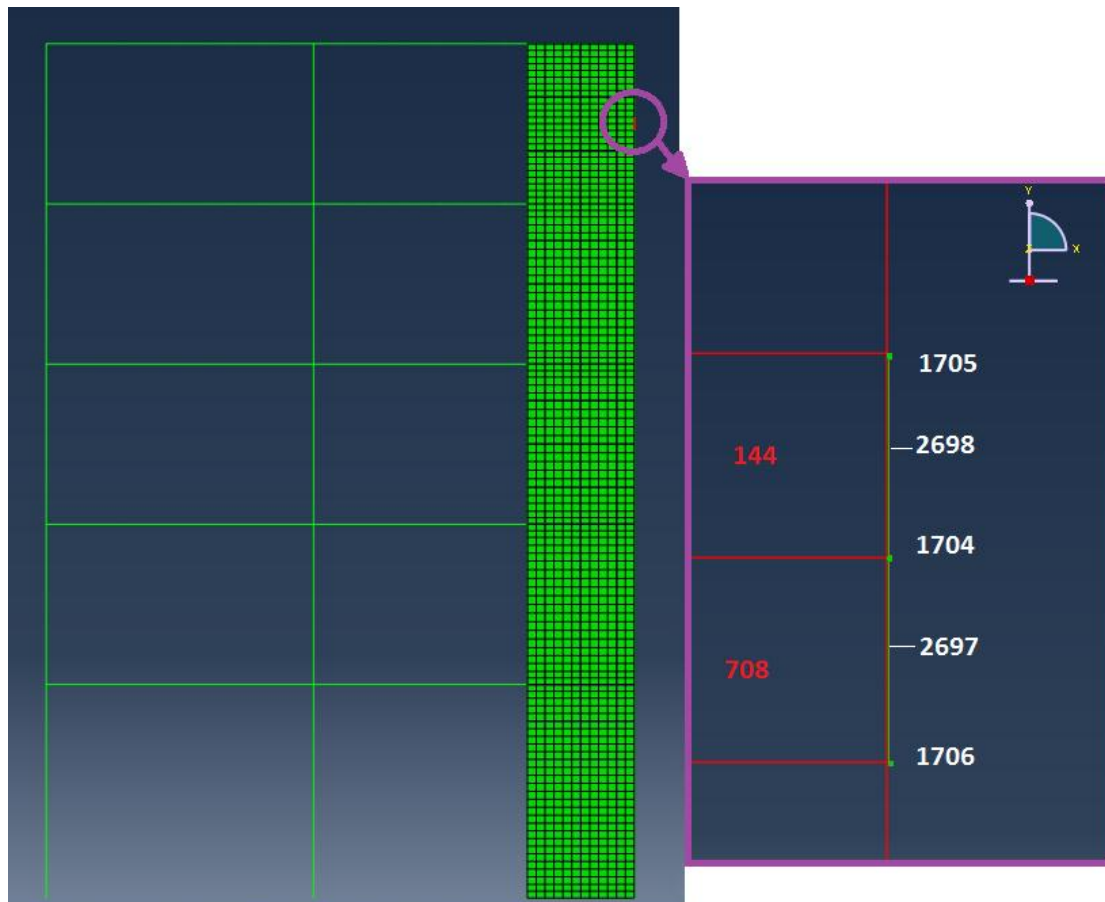
```

** CONTACT DEFINITIONS
*SURFACE INTERACTION, NAME=EPIFANEIA_KROYSIS
*CONTACT PAIR, INTERACTION= EPIFANEIA_KROYSIS, TYPE=SURFACE TO SURFACE
PERIOXI_KROYSIS_KTIRIOY_A , PLAKA_KTIRIOY_B

```

3.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Η Προσομοίωση Π4 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το φαινόμενο της κρούσης, συγκρινόμενη τη Μέθοδο των τριών Δυνάμεων. Παρακάτω θα σχολιαστούν ενδελεχώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ακολουθεί το Σχήμα 3.67 στο οποίο απεικονίζεται ο φορέας (αριστερά) και η περιοχή της κρούσης σε μεγέθυνση (δεξιά) Πιο συγκεκριμένα δεξιά φαίνονται οι κόμβοι 1705, 1704, 1706, καθώς και τα στοιχεία 2698,2697 που προσομοιώνουν την πλάκα του Κτιρίου Β. Στο υψος των στοιχείων 2698, 2697 βρίσκονται τα στοιχεία 144, 708 του τοιχώματος του Κτιρίου Α, αντίστοιχα.



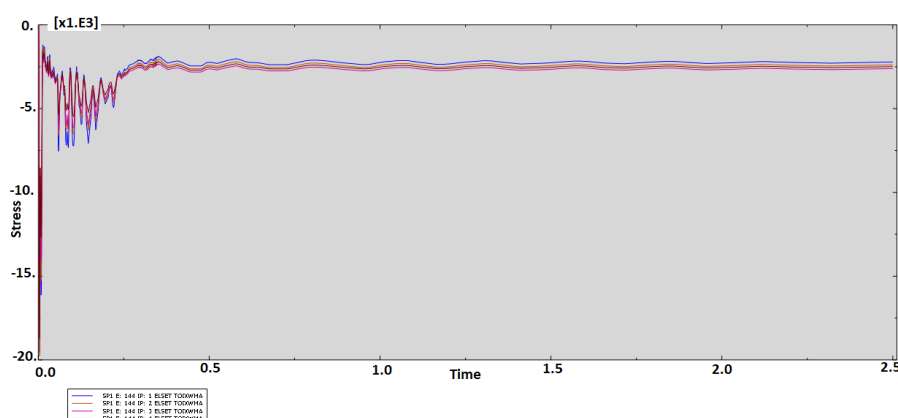
Σχήμα 3.67 – Φορέας και περιοχή κρούσης

3.2.2.1 Σχολιασμός τάσεων

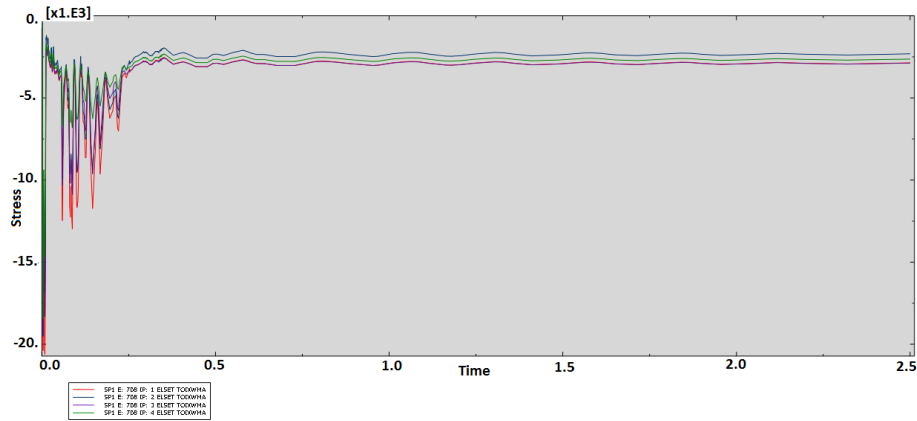
Στις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των τριών Δυνάμεων, έπειτα από προσεκτική διερεύνηση, επιλέχτηκε η χρονική στιγμή $t=0,01$ sec για την εκτενή μελέτη των τιμών των τάσεων, παραμορφώσεων και μετακινήσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή. Εύλογη κατά μια έννοια ήταν αυτή η επιλογή, εφόσον τη δεδομένη χρονική στιγμή ασκείται στο φορέα η μέγιστη τιμή της δύναμης F . Στην περίπτωση της Προσομοίωσης Π4, τα πράγματα είναι διαφορετικά. Είναι αντιληπτό ότι σε κλάσματα του δευτερολέπτου αναπτύσσονται οι μέγιστες τιμές των μεγεθών τάσεις, παραμορφώσεις και μετακινήσεις. Η ακριβής χρονική στιγμή που τα μεγέθη αναπτύσσουν τη μέγιστη τιμή τους δεν είναι εξ' αρχής γνωστή. Η απόσταση των δύο κατασκευών είναι μηδενική. Όμως, στο Abaqus εισάγεται απόσταση των δύο κατασκευών ίση με ένα χιλιοστό του μέτρου, ώστε να καταστεί δυνατή η πραγματοποίηση της ανάλυσης. Με δεδομένη την απόσταση και την αρχική ταχύτητα προκύπτει ότι οι 2 κατασκευές θα έρθουν για πρώτη φορά σε επαφή τη χρονική στιγμή:

$$\frac{0,001}{0,60} = 0,00167 \text{ sec.}$$

Η χρονική στιγμή, που αναζητείται, είναι πλησίον του 0,00167 sec. Από τη χρονοϊστορία των ελάχιστων κύριων θλιπτικών τάσεων των δυσμενέστερων σημείων της προσομοίωσης, θα προκύψει η ζητούμενη χρονική στιγμή. Τα Σχήματα 3.68, 3.69, που ακολουθούν, απεικονίζουν τις χρονοϊστορίες των στοιχείων που βρίσκονται στην περιοχή της κρούσης (στοιχεία 144, 708).

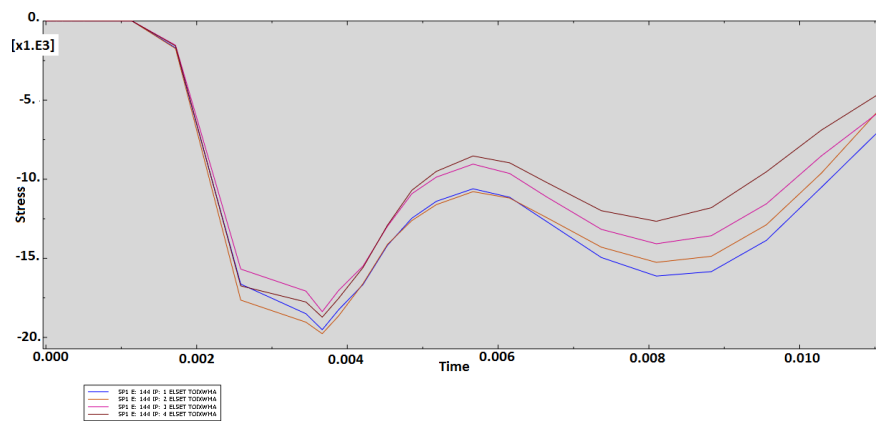


Σχήμα 3.68 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 144

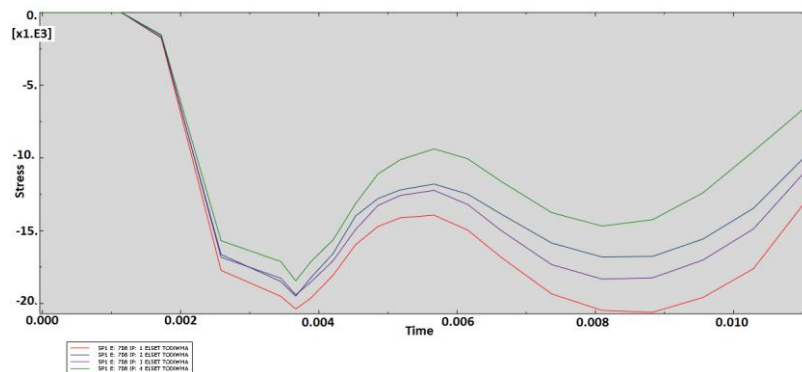


Σχήμα 3.69 - Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων του στοιχείου 144

Παρατηρείται ότι οι ελάχιστες κύριες τάσεις εμφανίζουν (κατά απόλυτη τιμή) τη μέγιστη τιμή τους τα πρώτα 0,01 sec της φόρτισης. Για αυτό το λόγο, θεωρείται σκόπιμη η απεικόνιση των παραπάνω χρονοϊστορίες, δίνοντας έμφαση αυτή τη φορά στο χρονικό διάστημα 0-0,011 sec.

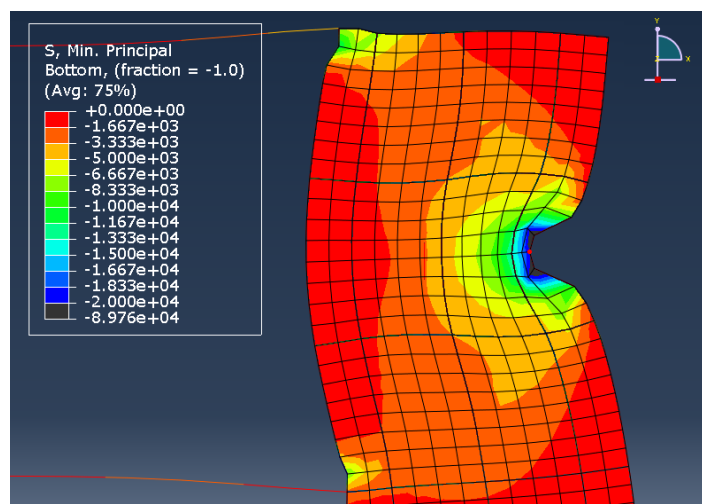


Σχήμα 3.70 – Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,011 sec του στοιχείου 144

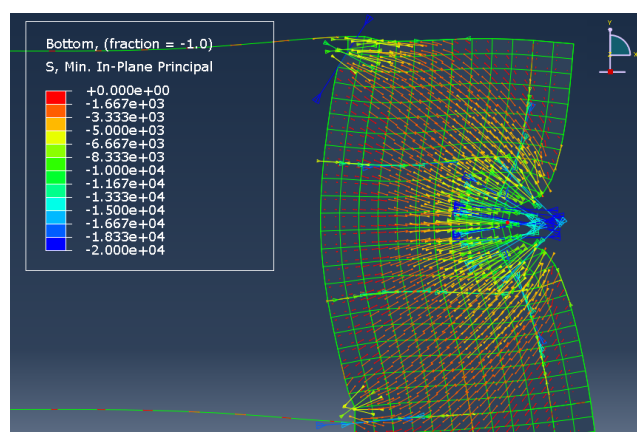


Σχήμα 3.71– Χρονοϊστορία ελάχιστων κύριων τάσεων για το χρονικό διάστημα 0-0,011 sec του στοιχείου 708.

Πράγματι, μέχρι και το 0,00114 sec, η κατασκευή παραμένει ανεπηρέαστη. Από εκείνη τη χρονική στιγμή και ύστερα, παρατηρείται αύξηση των τάσεων. Από τις ανωτέρω χρονοϊστορίες συμπεραίνεται ότι η δυσμενέστερη χρονική στιγμή της ανάλυσης είναι $t=0,0037$ sec. Για τη δεδομένη χρονική στιγμή παρατίθενται τα Σχήματα 3.72 και 3.73 τα οποία απεικονίζουν τις ελάχιστες κύριες τάσεις του πέμπτου ορόφου.



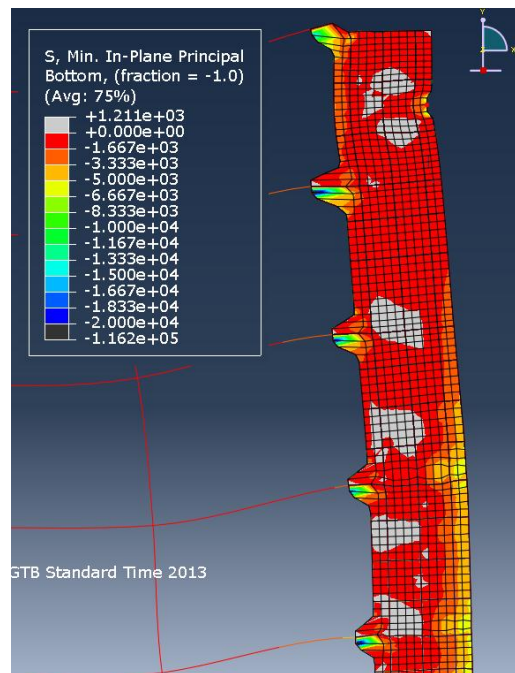
Σχήμα 3.72 – Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων του πέμπτου ορόφου του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,0037 sec.



Σχήμα 3.73 – Διανύσματα ελάχιστων κύριων τάσεων του πέμπτου ορόφου του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,0037 sec.

Οι τιμές των ελάχιστων κύριων τάσεων εμφανίζουν τη μεγαλύτερη τιμή στην περιοχή της κρούσης, αγγίζοντας τα 20000 kPa. Στο Σχήμα 3.73, αναπαριστάται η ίδια εικόνα με διανύσματα. Εκεί όπου τα διανύσματα είναι πιο πυκνά και έχουν χρώμα που πλησιάζει τη σκούρα μπλε απόχρωση του υπομνήματος, οι S, Min Principal παρουσιάζουν μέγιστο.

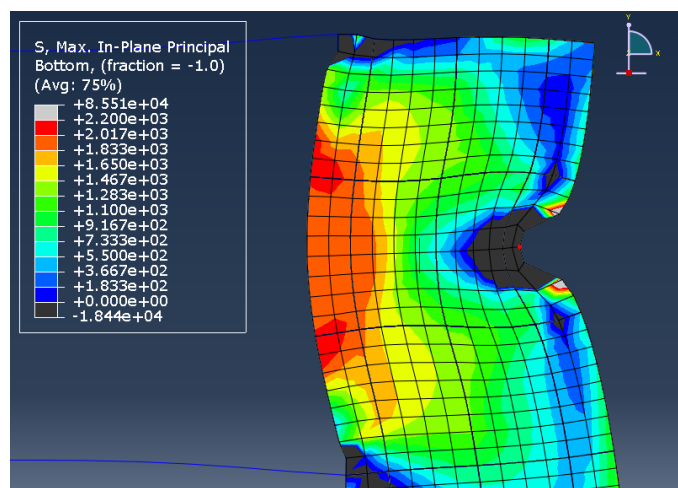
Όμως, πέρα από τη χρονική στιγμή 0,0037 sec, μεγάλες τιμές ελαχίστων κύριων τάσεων εμφανίζονται στις συνδέσεις των δοκών με το τοίχωμα σε μεταγενέστερες χρονικές στιγμές. Αυξημένες τιμές τάσεων παρατηρούνται λίγο πριν τον αποχωρισμό της πλάκας του Κτιρίου Β από το τοίχωμα του Κτιρίου Α, καθώς επίσης, και, στη συνέχεια, όταν το τοίχωμα εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση.



Σχήμα 3.74– Τιμές ελάχιστων κύριων τάσεων του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,3039 sec.

Στο Σχήμα 3.74 φαίνεται ο φορέας τη χρονική στιγμή 0,3039 sec. Το σκούρο μπλε χρώμα στα στοιχεία των συνδέσεων δοκού-τοιχώματος, φανερώνει τις υψηλές τιμές $S, \text{Min Principal}$ που έχουν αναπτυχθεί.

Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές των κυρίων τάσεων, στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος, οι τιμές που λαμβάνουν τη χρονική στιγμή 0,0037 sec οπτικοποιούνται στο Σχήμα 3.75. Παρατηρείται ότι στην περιοχή της κρούσης καθώς και στις συνδέσεις των δοκών του 4^{ου} και 5^{ου} ορόφου με το τοίχωμα και οι μέγιστες κύριες τάσεις είναι θλιπτικές. Τα στοιχεία σε αυτές τις περιοχές καταπονούνται υπό διαξονική συμπίεση (βλ. Σχήματα 3.72 και 3.75).



Σχήμα 3.75 – Τιμές μέγιστων κύριων τάσεων του πέμπτου ορόφου του τοιχώματος τη χρονική στιγμή 0,0037 sec.

Να σημειωθεί ότι ο φορέας στην πραγματικότητα δε σημειώνει τη δεδομένη χρονική στιγμή τόσο μεγάλη μετακίνηση, όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα. Οι μετακινήσεις έχουν πολλαπλασιαστεί με ένα μεγεθυντικό παράγοντα (741,836) ώστε να είναι εύληπτα τα αποτελέσματα. Σε καμία περίπτωση, η εικόνα του παραμορφωμένου φορέα στις παραπάνω εικόνες δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική εικόνα. Οι ακριβείς μετακινήσεις του φορέα θα σχολιαστούν εκτενώς στην παράγραφο 3.2.1.2.3.

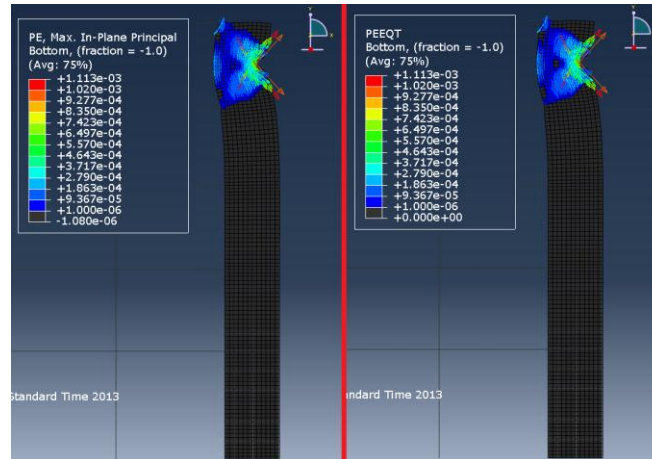
3.2.2.2 Σχολιασμός παραμορφώσεων

Εξετάζονται οι μέγιστες κύριες πλαστικές παραμορφώσεις. Παρατηρείται ότι καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης οι μέγιστες τιμές των PE, Max Principal που αναπτύσσονται είναι αξιόλογες και οδηγούν σε αστοχία. Σε καμία περίπτωση, όμως, δεν πλησιάζουν τις αντίστοιχες τιμές που συναντήθηκαν στην Προσομοίωση P1, οι οποίες ήταν εξαιρετικά μεγάλες και στερούν την αξιοπιστία στα αποτελέσματα της P1 από τη χρονική στιγμή 0,01 sec και ύστερα. Παρακάτω δίνονται σχηματικά οι τιμές των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων και των ισοδύναμων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων υπό εφελκυσμό σε διάφορες χρονικές στιγμές. Υπενθυμίζεται ότι οι ρωγμές εμφανίζονται στις περιοχές όπου τα μεγέθη PE, Max Principal και PEEQT είναι μεγαλύτερα του μηδενός.

- Χρονική στιγμή t=0,0037 sec

Αρχικά εξετάζεται η χρονική στιγμή 0,0037 sec, στην οποία παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές ελαχίστων κύριων ταχυτήτων. Παρατηρείται ότι τα δύο υπό εξέταση μεγέθη έχουν τιμή μεγαλύτερη του μηδενός στον πέμπτο όροφο του τοιχώματος.

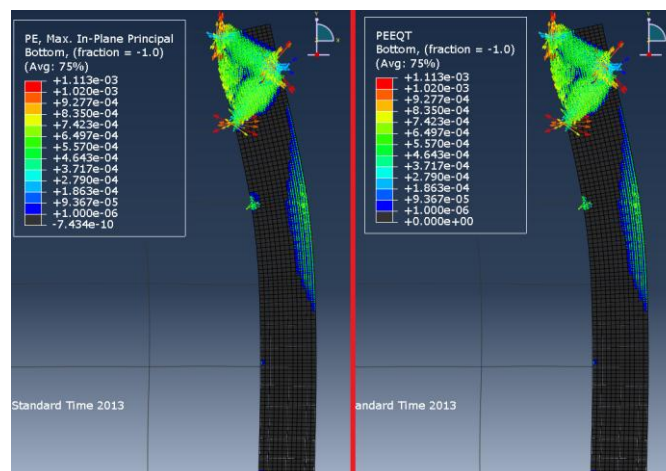
Στο Σχήμα 3.76 απεικονίζονται και τα διανύσματα των μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων. Οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στη διεύθυνση των διανυσμάτων. Μεγαλύτερου εύρους ρωγμές απαντώνται στις περιοχές που τα βέλη έχουν χρώμα που πλησιάζει το κόκκινο χρώμα του υπομνήματος.



Σχήμα 3.76 - Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στο τοίχωμα για τη χρονική στιγμή 0,0037 sec.

- Χρονική στιγμή $t=0,0126$ sec

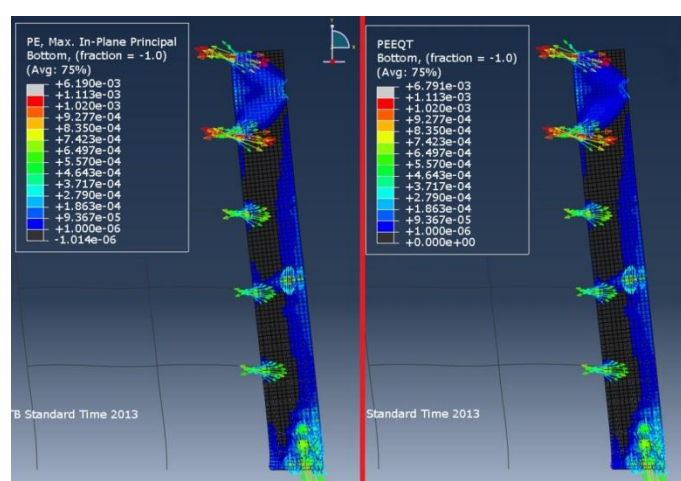
Οι τιμές των μεγεθών PE, Max Principal και PEEQT παρουσιάζουν σημαντική αύξηση. Διανύσματα μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων απαντώνται και πάλι στον πέμπτο όροφο, η τιμή τους όμως είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με προγενέστερες χρονικές στιγμές. Επιπλέον, διανύσματα, άρα και ρωγμές, εμφανίζονται στη δεξιά παρειά του τοιχώματος στον τρίτο όροφο καθώς και στα στοιχεία στο κάτω μέρος του τέταρτου ορόφου. Τέλος, ρωγμές δημιουργήθηκαν και στη σύνδεση της δοκού του 3^{ου} ορόφου με το τοίχωμα (βλ. Σχήμα 3.77).



Σχήμα 3.77 - Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στο τοίχωμα για τη χρονική στιγμή 0,0126 sec.

- Χρονική στιγμή $t=0,051$ sec

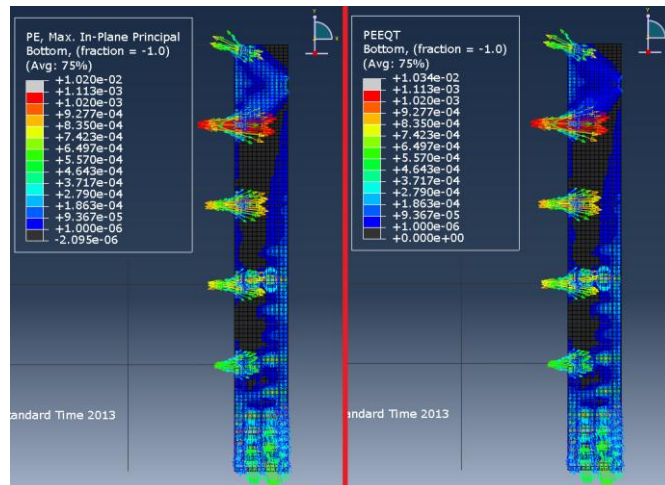
Τη δεδομένη χρονική στιγμή οι τιμές των ζητούμενων μεγεθών συνεχίζουν να σημειώνουν αύξηση. Διανύσματα μεγίστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων (PE, Max Principal) συναντώνται λιγότερο στην περιοχή της κρούσης, αλλά πιο έντονα στις περιοχές σύνδεσης δοκού-τοιχώματος όλων των ορόφων, καθώς επίσης και στη δεξιά παρειά της βάσης του τοιχώματος. Παρατηρούμε δε ότι οι ρωγμές που είχαν αναπτυχθεί κατά τη χρονική στιγμή 0,0126 sec στις συνδέσεις δοκού-τοιχώματος του 3^{ου}, 4^{ου} και 5^{ου} ορόφου, έχουν κλείσει, ενώ νέες ρωγμές έχουν ανοίξει στην κάθετη σε αυτές διεύθυνση. Το σκυρόδεμα στις περιοχές αυτές είναι ρηγματωμένο. Στο Σχήμα 3.78 απεικονίζονται οι τιμές των παραμορφώσεων καθώς και η διεύθυνση των διανυσμάτων τους.



Σχήμα 3.78 - Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στο τοίχωμα για τη χρονική στιγμή 0,051 sec.

- Χρονική στιγμή $t=2,5$ sec

Πριν ολοκληρωθεί η ανάλυση, είναι εμφανής η ρηγμάτωση του τοιχώματος. Παρατίθενται στο Σχήμα 3.79 οι τελικές τιμές των υπό εξέταση μεγεθών. Η ρηγμάτωση στο τοίχωμα είναι εκτενής, ώστε η βλάβη κάθε άλλο παρά τοπική να θεωρηθεί.



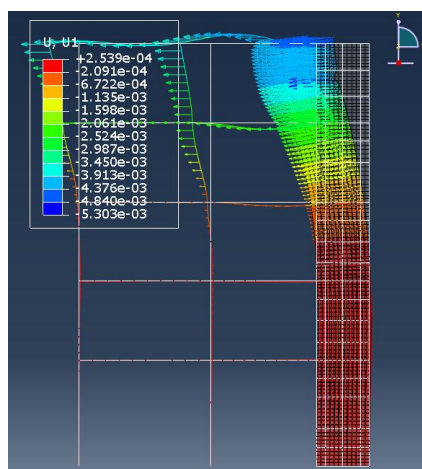
Σχήμα 3.79 - Τιμές PE, Max Principal, διανύσματα αυτών και PEEQT στο τοίχωμα για τη χρονική στιγμή 2,5 sec.

3.2.2.3 Σχολιασμός μετακινήσεων

Εξετάζονται οι μετακινήσεις που σημειώνονται κατά τη διάρκεια της κρούσης. Παρατίθενται κάποιες εικόνες για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου. Προκειμένου να είναι οι εύληπτες και ορατές οι μετακινήσεις, πολλαπλασιάζονται σε κάθε προσαύξηση χρόνου με ένα συντελεστή μεγέθυνσης, ο οποίος επιλέγεται αυτόματα από το πρόγραμμα και είναι διαφορετικός σε κάθε προσαύξηση.

- Χρονική στιγμή $t=1.0289E-2$ sec

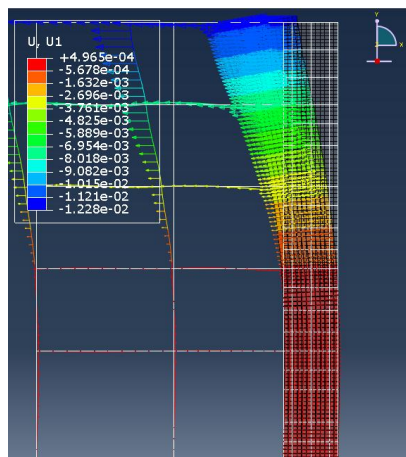
Τη δεδομένη χρονική στιγμή μετακίνηση 0,5 cm εμφανίζει ο πέμπτος όροφος. Ενώ πολύ μικρότερη και μηδενική σημειώνεται στους παρακάτω. Το υπόμνημα αναφέρει το διάστημα κάθε χρωματικής απόχρωσης (Σχήμα 3.80).



Σχήμα 3.80 – Τιμές οριζόντιων μετακινήσεων, διανύσματα αυτών και απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) τη χρονική στιγμή 1,0289 E-2 sec.

- Χρονική στιγμή $t=2,003 \text{ E-2 sec}$

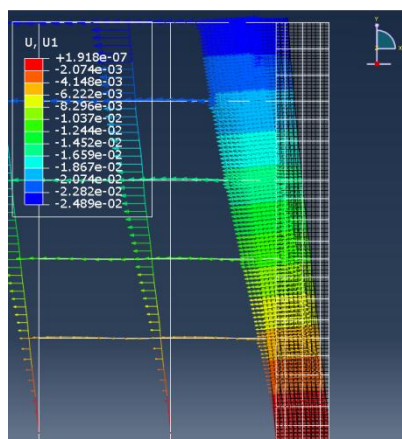
Εδώ παρατηρούνται μεγαλύτερες μετακινήσεις, τις τάξεως του εκατοστού στον πέμπτο όροφο, ενώ μετακινήσεις τάξεως χιλιοστού σημειώνονται στον τέταρτο και τρίτο όροφο (Σχήμα 3.81).



Σχήμα 3.81 – Τιμές οριζόντιων μετακινήσεων, διανύσματα αυτών και απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) τη χρονική στιγμή $2,003 \text{ E-2 sec}$.

- Χρονική στιγμή $t=5,7799 \text{ E-2 sec}$

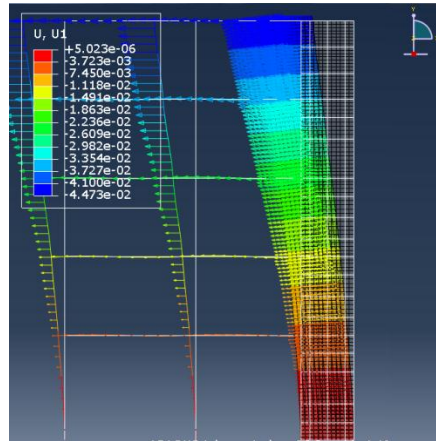
Η κρούση πλέον επηρεάζει ολόκληρο το τοίχωμα. Το κύμα έχει διαδοθεί μέχρι τη βάση του τοιχώματος όπου παρατηρούνται μετακινήσεις της τάξεως του χιλιοστού. Στον πέμπτο όροφο, όπου λαμβάνει χώρα η κρούση, η μετακίνηση αγγίζει τα 2,5 εκατοστά (Σχήμα 3.82).



Σχήμα 3.82 – Τιμές οριζόντιων μετακινήσεων, διανύσματα αυτών και απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) τη χρονική στιγμή $5,7799 \text{ E-2 sec}$.

- Χρονική στιγμή $t=0,1463$ sec

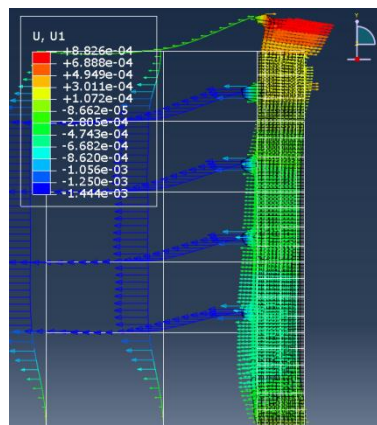
Αυτή τη χρονική στιγμή παρατηρείται και η μέγιστη μετακίνηση. Το τοίχωμα μαζί με την πλάκα του Κτιρίου Β, τα οποία κινούνται σα συσσωμάτωμα, έχουν φτάσει στην ακραία θέση και απέχουν από τη θέση ισορροπίας απόσταση ίση με περίπου 4-4,5 εκατοστά, κοντά στην περιοχή της κρούσης (Σχήμα 3.83).



Σχήμα 3.83 – Τιμές οριζόντιων μετακινήσεων, διανύσματα αυτών και απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) τη χρονική στιγμή 0,1463 sec.

- Χρονική στιγμή $t=0,3128$ sec

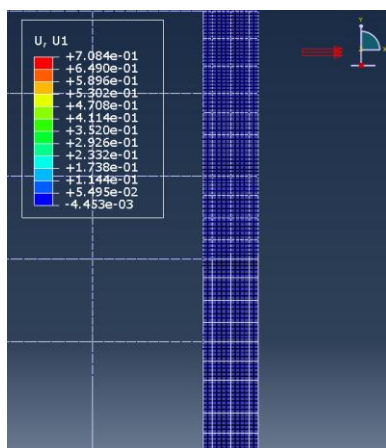
Τη χρονική στιγμή 0,3128 sec το τοίχωμα και η πλάκα του Κτιρίου Β περνάνε από την αρχική θέση ισορροπίας και από αυτό το σημείο και ύστερα εκτελούν ανεξάρτητη κίνηση. Παύουν πλέον να λειτουργούν σα συσσωμάτωμα. Η πλάκα του Κτιρίου Β, κινείται προς τα δεξιά, ενώ το τοίχωμα συνεχίζει την ταλάντωση, μόνο του πλέον. Το τοίχωμα εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση (Σχήμα 3.84).



Σχήμα 3.84 - Τιμές οριζόντιων μετακινήσεων, διανύσματα αυτών και απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) τη χρονική στιγμή 0,3128 sec.

- Χρονική στιγμή $t=2,5$ sec

Εδώ ολοκληρώνεται η φόρτιση. Το τοίχωμα του Κτιρίου Α, αφού έχει εκτελέσει κάποιες ταλαντώσεις, τελικά ακινητοποιείται σε θέση πλησίον της αρχικής θέσης ισορροπίας (Σχήμα 3.85).



Σχήμα 3.85 – Τιμές οριζόντιων μετακινήσεων, διανύσματα αυτών και απαραμόρφωτος φορέας (λευκό χρώμα) τη χρονική στιγμή 2,50 sec.

Με μια προσεκτική ματιά στο αρχείο αποτελεσμάτων (odb) παρατηρούνται τα παρακάτω:

- Μέχρι και τη χρονική στιγμή 0,1463 sec το Κτίριο Α και η πλάκα του Κτιρίου Β κινούνται μαζί (συσσωμάτωμα) προς τα δεξιά.
- Από 0,1463 sec και έπειτα, σα συσσωμάτωμα πάλι οι δύο κατασκευές απομακρύνονται από την ακραία θέση πλησιάζοντας την αρχική θέση που κατείχαν πριν την κρούση (κίνηση προς τα δεξιά). Η διεπαφή των δύο κατασκευών και η κίνησή τους προς τα δεξιά συνεχίζεται μέχρι $t=0,3128$ sec.
- Από $t=0,3128$ sec μέχρι και το τέλος της ανάλυσης, οι δύο κατασκευές κινούνται πλέον ανεξάρτητα.
 1. Η πλάκα του κτιρίου Β κινείται προς τα δεξιά.
 2. Ο πέμπτος όροφος του Κτιρίου Α' εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση. Τη χρονική στιγμή ακινητοποιείται στην αρχική του θέση έχοντας εκτελέσει τουλάχιστον πέντε πλήρεις ταλαντώσεις.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής είναι αρκετά ρεαλιστικά. Στην περίπτωση της Προσομοίωσης Π4 εμφανίζονται λογικές τιμές παραμορφώσεων. Φυσικά και αυτή η ρηγματώση δείχνει ότι το τοίχωμα ρηγματώνεται, ωστόσο οι μέγιστες κύριες πλαστικές παραμορφώσεις έχουν λογική τιμή. Οι παραμορφώσεις, σε συνδυασμό

με τις μετακινήσεις, δίνουν λογικά συμπεράσματα. Η μέγιστη μετακίνηση του φορέα είναι 4 εκατοστά, γεγονός που έρχεται να διαψεύσει τα αποτελέσματα των προηγούμενων αναλύσεων Π1, Π2. Σύμφωνα με αυτές, οι μετακινήσεις του τοιχώματος είναι τόσο μεγάλες, ώστε πλέον το τοίχωμα λειτουργούσε να αποτελείται μόνο από τον χαλύβδινο κλωβό των οπλισμών. Παραπάνω σχόλια ακολουθούν στο Κεφάλαιο 4.

4 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, η Προσομοίωση Π4 κρίνεται και η πιο αξιόπιστη.

Στην πρώτη Προσομοίωση, οι τιμές των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων ήταν αδικαιολόγητα αυξημένες. Η τάξη μεγέθους των παραπάνω μεγεθών ήταν πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή που ορίστηκε για το σκυρόδεμα της κατασκευής και από όσα επιτάσσει η λογική. Πιο συγκεκριμένα, σε πολλά στοιχεία οι τάσεις ξεπερνούν την αντοχή του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη και εφελκυσμό. Βέβαια, μια μικρή υπέρβαση της τάξεως του 10-20% δικαιολογείται, εφόσον είναι γνωστό ότι υπό διαξονική καταπόνηση αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος. Ωστόσο, η υπέρβαση που εν τέλει παρατηρήθηκε ξεπερνάει το παραπάνω όριο. Οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν ήταν ιδιαίτερα μεγάλες. Γεγονός που κατέστησε την Προσομοίωση Π1, από την αρχή ήδη, μη αξιόπιστη, από κάποια χρονική στιγμή και ύστερα. Από τη χρονική στιγμή 0,01 sec παρατηρείται τιμή μέγιστων κύριων πλαστικών παραμορφώσεων ίση με 0,75, ενώ η ανάλυση ολοκληρώνεται και εντοπίζονται στοιχεία με μέγιστη κύρια πλαστική παραμόρφωση ίση με 1,15. Τέλος, όσον αφορά τις μετακινήσεις κατά την οριζόντια διεύθυνση, και πάλι οι τιμές που προκύπτουν από την ανάλυση είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Μετακίνηση 30 εκατοστών παρατηρείται τη χρονική στιγμή 0,01 sec, που ασκείται και η μέγιστη τιμή της δύναμης, ενώ, εν συνεχεία, απαντάται μέγιστη μετακίνηση ίση με 60 εκατοστά τη χρονική στιγμή 0,02 sec. Είναι προφανές ότι αυτές οι τιμές δεν είναι αποδεκτές. Το τοίχωμα από σκυρόδεμα δεν μπορεί να λειτουργήσει ορθά. Τέτοιες μεγάλες μετακινήσεις δείχνουν ότι έχει χαθεί η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, και ότι πλέον αυτό που έχει μείνει είναι ο χαλύβδινος κλωβός του οπλισμού.

Στη δεύτερη Προσομοίωση τα αποτελέσματα είναι πιο ευμενή σε σχέση με την Π1. Αυτό είναι λογικό, διότι η δύναμη πλέον ασκείται σε μεγαλύτερο εύρος (ύψος 0,50 m, αντί 0,25 m). Οι τάσεις και σε αυτή την περίπτωση πλησιάζουν την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό, όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση. Τα στοιχεία που ξεπερνούν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος βρίσκονται πλησίον της δεξιάς παρειάς του τοιχώματος και εκτείνονται σε ύψος ενός περίπου μέτρου. Όσον αφορά τις μέγιστες κύριες τάσεις, υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, υπάρχει σε ορισμένα σημεία στο εσωτερικό του τοιχώματος κοντά στην περιοχή της φόρτισης, καθώς επίσης και στις συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία κοντά στην περιοχή που ασκούνται οι τρεις δυνάμεις καταπονούνται σε διαξονική θλίψη. Οι μέγιστες κύριες πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται τη χρονική στιγμή

0,01 sec στον πέμπτο όροφο είναι μικρότερες από αυτές της προηγούμενης προσομοίωσης. Συνεπώς, και οι ρωγμές που αναπτύσσονται σε αυτή την περίπτωση είναι μικρότερου εύρους. Φυσικά, στην Προσομοίωση αυτή, όπως και στην Π1, οι ρωγμές που αναπτύσσονται έχουν μεγάλο εύρος, γεγονός που καθιστά το τοίχωμα ρηγματωμένο και τη βλάβη, κάθε άλλο παρά τοπική και επισκευάσιμη. Τέλος, με μετακινήσεις οκτώ και είκοσι εκατοστά τις χρονικές στιγμές 0,01 και 0,02 sec, αντίστοιχα, και με μέγιστη μετακίνηση ίση με τριάντα εκατοστά τη χρονική στιγμή 0,1022 sec, είναι βέβαιο ότι το τοίχωμα δεν έχει την επιθυμητή συμπεριφορά έναντι του φαινομένου..

Στην τρίτη Προσομοίωση, οι τιμές των τάσεων εμφανίζουν ιδιαίτερα μεγάλες τιμές. Πιο συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή που ασκείται η μέγιστη τιμή της δύναμης, οι ελάχιστες κύριες τάσεις στα στοιχεία σε μια εκτενή περιοχή κοντά στη φόρτιση ξεπερνούν κατά πολύ τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Οι μέγιστες κύριες τάσεις την ίδια χρονική στιγμή στη μεγαλύτερη περιοχή του πέμπτου ορόφου ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Τα παραπάνω καθιστούν την προσομοίωση του σκυροδέματος με το μοντέλο Drucker-Prager αναξιόπιστη. Γι' αυτό το λόγο δε θεωρείται σκόπιμο να εξετασθεί περαιτέρω η συγκεκριμένη ανάλυση.

Η τέταρτη Προσομοίωση, που έχει χρησιμοποιηθεί το ακριβές προσομοίωμα της κρούσης, είναι η πιο ρεαλιστική, εφόσον προσομοιώνεται το φαινόμενο της κρούσης με τον πλέον ακριβέστερο τρόπο . Η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή των ελάχιστων κύριων τάσεων αγγίζει και εδώ τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, χωρίς όμως να παρατηρείται υπέρβαση της. Οι μεγάλες τιμές στις ελάχιστες κύριες τάσεις σημειώνονται στην περιοχή της κρούσης, καθώς και στις συνδέσεις των δοκών με το τοίχωμα. Όσον αφορά τις μέγιστες κύριες τάσεις, παρατηρείται μικρή υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος σε περιορισμένα στοιχεία. Οι μέγιστες κύριες πλαστικές παραμορφώσεις λαμβάνουν μεγάλες τιμές, γεγονός που συνεπάγεται τη ρηγμάτωση του τοιχώματος. Ιδιαίτερα μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις σημειώνονται στην περιοχή της κρούσης, στις συνδέσεις δοκών και τοιχώματος καθώς και στη βάση του τοιχώματος. Η ανάπτυξη υψηλών παραμορφώσεων στη βάση του τοιχώματος είναι αποτέλεσμα της ανάκλασης του κύματος. Οι υψηλές πλαστικές παραμορφώσεις, σηματοδοτούν την έναρξη της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Το εύρος των ρωγμών που αναπτύσσονται δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, της τάξεως του χιλιοστών. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μετακινήσεις του τοιχώματος κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι μικρές (παρατηρείται μέγιστη μετακίνηση τέσσερα εκατοστά), οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το τοίχωμα ναι μεν ρηγματώνεται, όμως, το εύρος των ρωγμών δεν ξεπερνά τα αποδεκτά όρια. Η βλάβη σε καμία περίπτωση δεν είναι τοπική, αφού τέτοιες ρωγμές παρατηρούνται σε μεγάλη έκταση του τοιχώματος.

Ως προς την αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοίωσης του φαινομένου της κρούσης, η προσέγγιση του ακριβούς προσομοιώματος της κρούσης είναι ακκριβέστερη και δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Η μέθοδος των τριών δυνάμεων, αν και αποτελεί απλούστερη προσέγγιση του φαινομένου της κρούσης όμορων κτιρίων, είναι μια ακριβής μέθοδος που δίνει αναξιόπιστα αποτελέσματα.

5 Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. ΕΚΩΣ 2000 ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 2000 ΣΙΔΕΝΟΡ
2. ΕΑΚ 2000 ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ 2000 ΣΙΔΕΝΟΡ
3. Πρασινάκης, Ι. Ν. και Σ. Μ. Κουρκουλής, 1999. *Πειραματική Αντοχή Υλικών*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
4. Παπαδρακάκης, Μ., 2001. *Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
5. Wai-Fah Chen, 2007. *Plasticity in Reinforced Concrete*, J. Ross Publishing Classics, USA.
6. Anagnostopoulos, S.A. and C.E. Karamaneas, 2008. Use of collision shear walls to minimize seismic separation and to protect adjacent buildings from collapse due to earthquake-induced pounding, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Volume 37, Issue 12, pp. 1371–1388
7. Anagnostopoulos, S.A. and K.V. Spiliopoulos, 1992. An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 21, Issue 4, pp. 289–302
8. Wikipedia, the free encyclopedia, *Drucker-Prager yield criterion*.
9. Πετρόπουλος, Α.Χ., 2008. Μελέτη της πρόσκρουσης γειτονικών κτιρίων Ο/Σ με χρήση δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης, Θεσσαλονίκη.
10. Παναγιώτου, Κ., 2007. Αλγόριθμοι ελαστοπλαστικής ανάλυσης και εφαρμογές τους, Αθήνα.
11. Abaqus/CAE User's Manual, Abaqus 6.10-2, Documentation Simulia.
12. Abaqus Analysis User's Manual, Abaqus 6.10-2, Documentation Simulia.
13. Abaqus Theory Manual, Abaqus 6.10-2, Documentation Simulia.
14. Abaqus Keywords Reference Manual, Abaqus 6.10-2, Documentation Simulia.
15. Abaqus Example Problems Manual, Abaqus 6.10-2, Documentation Simulia.
16. Lin, J. H. and C. C. Weng, 2001. Spectral analysis on pounding probability of adjacent buildings, *Engineering Structures*, Volume 23, Issue 7, pp. 768–778.
17. Papadrakakis, M., C. Apostolopoulou, A. Zacharopoulos and S. Bitzarakis, 1996. Three Dimensional Simulation of Structural Pounding During Earthquakes, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol 122, No 5, pp. 423-431.
18. Jankowski, R., 2008. Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties, *Engineering Structures*, Volume 30, Issue 10, pp. 2818–2829.
19. Karayannis, C. G. and M.J. Favvata, 2005. Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights,

- Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Volume 34, Issue 1, pp. 1–20.
20. Athanassiadou, C. J., G.C. Penelis and A.J. Kappos, 1994. Seismic Response of Adjacent Buildings with Similar or Different Dynamic Characteristics. *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 2, pp. 293-317.

6 Παράρτημα

6.1 Παράρτημα 1 – Γενικά στοιχεία για τη χρήση του προγράμματος

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus 6.10-2. Παρουσιάζονται μερικά βασικά στοιχεία για τη χρήση του, με σκοπό να διευκολύνουν όσους επιθυμούν να ασχοληθούν μελλοντικά με αυτό.

6.1.1 Δημιουργία αρχείου εισαγωγής (input file)

Τα αρχεία δημιουργούνται σε ένα φάκελο ο οποίος έχει επιλεγεί κατά την εγκατάσταση του προγράμματος. Ο φάκελος αυτός είναι συνήθως ο C:\Temp. Η εκτέλεση των αρχείων εισαγωγής (input files, .inp), αλλά και η δημιουργία όλων των υπόλοιπων αρχείων (.dat, .sta, .msg, .odb, .prt, κτλ,) γίνεται μέσα σε αυτό το φάκελο.

Τα input files (.inp) δημιουργούνται ως εξής: ο χρήστης δημιουργεί ένα αρχείο Notepad μέσα στο φάκελο Temp. Στη συνέχεια, το αποθηκεύει συμπληρώνοντας στο πεδίο File name το «όνομα αρχείου».inp” και στο πεδίο Save as Type “All Files”.

Στα input files μπορούν να υπάρχουν τρία είδη γραμμών: οι γραμμές που περιέχουν τις εντολές, οι γραμμές που περιέχουν τα δεδομένα και οι γραμμές που περιέχουν σχόλια. Πιο αναλυτικά:

- Οι γραμμές εντολών (keyword lines) περιέχουν τις εντολές του προγράμματος και συνήθως περιέχουν παραμέτρους. Αυτές εμφανίζονται ως λέξεις ή φράσεις και χωρίζονται μεταξύ τους με κόμματα. Οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν καλύτερα την εντολή. Για τις παραμέτρους είναι δυνατόν να ορίζονται ή όχι τιμές. Υπάρχουν κάποιες παράμετροι των οποίων η χρήση είναι υποχρεωτική (required parameters), και άλλες των οποίων η χρήση είναι προαιρετική (optional parameters).
- Οι γραμμές δεδομένων (data lines) περιέχουν αριθμητικά ή αλφαριθμητικά δεδομένα και ακολουθούν τις περισσότερες γραμμές εντολών.
- Οποιαδήποτε γραμμή ξεκινά με 2 αστερίσκους (**) είναι γραμμή σχολίων (comment line). Οι γραμμές αυτές μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε μέσα στο input file. Δεν υπάρχει περιορισμός για το πόσες τέτοιες γραμμές

μπορούν αν τοποθετηθούν σε κάθε αρχείο ή που αυτές θα βρίσκονται. Το πρόγραμμα τις αγνοεί. Τοποθετούνται μόνο προς διευκόλυνση του χρήστη.

6.1.1.1 Γραμμές εντολών (Keyword lines)

Παρακάτω αναφέρονται κάποιοι βασικοί κανόνες που πρέπει να τηρούνται κατά τη δημιουργία των γραμμών εντολών. Περισσότεροι κανόνες υπάρχουν στο “1.2.1 Input Syntax Rules” του Abaqus Analysis User’s Manual στο Documentation του προγράμματος.

- Ο πρώτος μη-κενός χαρακτήρας κάθε γραμμής εντολών πρέπει να είναι ένας αστερίσκος (*).
- Αν η εντολή ακολουθείται από κάποιο παράμετρο, τότε πρέπει αμέσως μετά από την πρώτη να μπαίνει κόμμα (,).
- Οι παράμετροι πρέπει να χωρίζονται μεταξύ τους με κόμματα (,).
- Τα κενά σε μια γραμμή εντολών αγνοούνται.
- Μια γραμμή δεν μπορεί να περιέχει πάνω από 256 χαρακτήρες συμπεριλαμβανομένων και των κενών.

6.1.1.2 Γραμμές δεδομένων (data lines)

Οι γραμμές δεδομένων χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή δεδομένων που δίνονται πιο εύκολα σε μορφή λίστας παρά ως παράμετροι σε μία εντολή. Κάποιοι βασικοί κανόνες για τη σωστή δημιουργία αυτών των γραμμών είναι:

- Δεν μπορούν σε μία γραμμή να περιέχονται πάνω από 256 χαρακτήρες, συμπεριλαμβανομένων των κενών.
- Όλα τα δεδομένα πρέπει να χωρίζονται από κόμματα. Ένα κενό πεδίο δεδομένων ορίζεται αφήνοντάς το κενό τοποθετώντας τα κόμματα στη σωστή θέση. Το πρόγραμμα θα θεωρήσει ότι οι τιμές σε αυτά τα πεδία είναι ίσες είτε με το μηδέν είτε με κάποιες προεπιλεγμένες τιμές.
- Μια γραμμή πρέπει να περιέχει μόνο τον αριθμό των πεδίων που απαιτείται.

6.1.2 Εκτέλεση αρχείου

Το αρχείο εκτελείται ως εξής. Από το φάκελο του προγράμματος ανοίγουμε το Abaqus Command το οποίο λειτουργεί σε σύστημα DOS. Όταν αυτό ανοίξει εμφανίζεται η εντολή που οδηγεί στο φάκελο C:\Temp.

Συμπληρώνεται δίπλα σε αυτό το όνομα του input file, ώστε τελικά να προκύψει το εξής:

C:\Temp> abaqus job="όνομα αρχείου".inp interactive

Εάν το αρχείο υπάρχει στο φάκελο Temp τότε εκτελείται. Με την εντολή interactive ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ενημερώνεται για τις ενδιαμέσες διαδικασίες που πραγματοποιεί το πρόγραμμα κατά την ανάλυση, καθώς και για το αν η ανάλυση ολοκληρώθηκε επιτυχώς ή σταμάτησε λόγω κάποιων λαθών που παρουσιάστηκαν (errors). Ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στα αρχεία .dat και .msg για να δει ποια είναι τα errors που παρουσιάστηκαν.

Τα αρχεία που δημιουργούνται από το πρόγραμμα όταν ολοκληρωθεί μία ανάλυση είναι τα παρακάτω:

Αρχείο .dat	Αρχείο γραπτών δεδομένων που διαβάζεται με Notepad
Αρχείο .fil	
Αρχείο .msg	Αρχείο αποθήκευσης των αριθμητικών υπολογισμών των επαναληπτικών διαδικασιών. Σε αυτό εμφανίζονται και τυχόν προβλήματα αδυναμίας σύγκλισης. Το αρχείο αυτό ανοίγει με Notepad
Αρχείο .odb	Αρχείο στο οποίο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Ο χρήστης μπορεί να δει σε αυτό το φορέα σε απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη κατάσταση καθώς και τα αποτελέσματα, τα οποία έχει ζητήσει μέσω των output εντολών στο input file, σε μορφή διαγραμμάτων και διανυσμάτων.
Αρχείο .prt	
Αρχείο .sta	Αρχείο στο οποίο φαίνονται τα increments.
Εφαρμογή MS-DOS	

6.1.3 Περιήγηση στο Documentation του Abaqus

Πριν την εγκατάσταση του προγράμματος απαραίτητη είναι η εγκατάσταση του Documentation. Αυτό θα φανεί εξαιρετικά χρήσιμο στο χρήστη, αφού μπορεί να ανατρέξει στα διαφορετικά κεφάλαια βρίσκοντας χρήσιμα στοιχεία. Το Documentation λειτουργεί σε περιβάλλον web explorer (Chrome, Mozilla Firefox, Internet Explorer κτλ), ως μηχανή εύρεσης, με διαφορετικά κεφάλαια. Βάζοντας λέξη ή φράσεις στο πεδίο της αναζήτησης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει οι συγκεκριμένες λέξεις ή φράσεις πόσες φορές και σε ποια κεφάλαια αναφέρονται (δίπλα από το όνομα κάθε κεφαλαίου εμφανίζεται ένας κόκκινος αριθμός που υποδεικνύει πόσες αναφορές γίνονται σε κάθε κεφάλαιο).

Τα βασικότερα κεφάλαια στα οποία μπορεί να περιηγηθεί ο χρήστης είναι τα παρακάτω:

- **Abaqus/CAE User's Manual:** Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του περιβάλλοντος Abaqus/CAE. Είναι σημαντικό ο χρήστης να συμβουλευτεί το κεφάλαιο αυτό αν πρόκειται να δημιουργήσει το φορέα μέσω του περιβάλλοντος αυτού (και όχι μέσω input file).
- **Abaqus Analysis User's Manual:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται όλες οι δυνατότητες του προγράμματος. Το κεφάλαιο αυτό είναι ένα από τα πιο χρήσιμα για το χρήστη, αφού ο χρήστης παίρνει πληροφορίες για τις επιλογές κάθε εντολής. Σε αυτό συνδέονται τα θεωρητικά στοιχεία με τις εντολές του προγράμματος, χωρίς όμως ο χρήστης να εμβαθύνει στις θεωρίες και τις εντολές του προγράμματος.
- **Abaqus Example Problems Manual:** Στο κεφάλαιο αυτό είναι διαθέσιμα παραδείγματα καθώς και τα input files τους.
- **Abaqus Keywords Reference Manual:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κανόνες εισαγωγής και όλες οι πιθανές παράμετροι κάθε εντολής. Το κεφάλαιο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για το χρήστη που συντάσσει input files για τις αναλύσεις.
- **Abaqus Theory Manual:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση όλης της θεωρίας στην οποία βασίζονται οι εντολές και οι επαναληπτικές μέθοδοι του Abaqus.

Modeling and Visualization
[Abaqus/CAE User's Manual](#)

Analysis
[Abaqus Analysis User's Manual](#)

Examples
[Abaqus Example Problems Manual](#)
[Abaqus Benchmarks Manual](#)

Tutorials
[Getting Started with Abaqus: Interactive Edition](#)
[Getting Started with Abaqus: Keywords Edition](#)

Information
[Using Abaqus Online Documentation](#)

Installation and Licensing
[Abaqus Installation and Licensing Guide](#)

Reference
[Abaqus Keywords Reference Manual](#)
[Abaqus Theory Manual](#)
[Abaqus Verification Manual](#)
[Abaqus User Subroutines Reference Manual](#)
[Abaqus Glossary Manual](#)

Programming
[Abaqus Scripting User's Manual](#)
[Abaqus Scripting Reference Manual](#)
[Abaqus GUI Toolkit User's Manual](#)
[Abaqus GUI Toolkit Reference Manual](#)

Interfaces
[Abaqus Interface for MSC ADAMS User's Manual](#)
[Abaqus Interface for Moldflow User's Manual](#)

Abaqus 6.10 Update Information
[Abaqus Release Notes](#)

Σχήμα 6.1 – Documentation του Abaqus 6.10-2 σε Internet Explorer

6.2 Παράρτημα 2 –Χρήσιμες εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας

6.2.1 Εντολές ορισμού κόμβων (nodes), στοιχείων(elements) και συνόλου κόμβων(node sets) και συνόλου στοιχείων(element sets)

6.2.1.1 *NODE

6.2.1.2 Με αυτή την εντολή ορίζονται οι κόμβοι απευθείας προσδιορίζοντας τις συντεταγμένες τους. Η εντολή αυτή είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

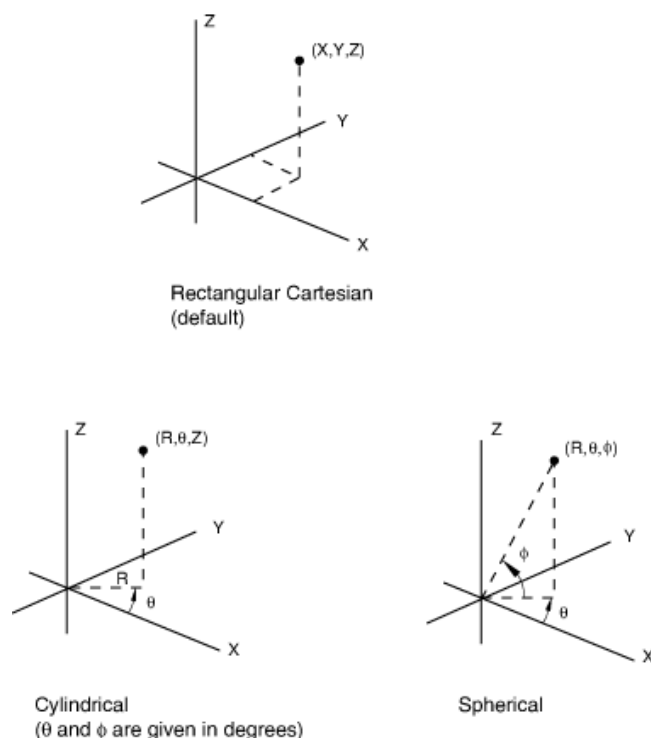
Στην εντολή *NODE υπάρχουν οι ακόλουθες προαιρετικές παράμετροι:

- INPUT. Ορίστε αυτή την παράμετρο ίση με το όνομα του αρχείου εισαγωγής που περιέχει τις γραμμές δεδομένων για αυτή την εντολή. Αν η παράμετρος παραλειφθεί, θεωρείται ότι τα δεδομένα ακολουθούν στην επόμενη γραμμή.
- NSET. Ορίστε αυτή την παράμετρο ίση με το όνομα του σετ κόμβων (node set) στο οποίο θα ανήκουν οι συγκεκριμένοι κόμβοι.
- SYSTEM.
SYSTEM=R (προεπιλεγμένη τιμή) για να οριστούν οι συντεταγμένες σε ένα ορθογωνικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.
SYSTEM=C για να οριστούν οι συντεταγμένες σε ένα κυλινδρικό σύστημα.
SYSTEM=S για να οριστούν οι συντεταγμένες σε ένα σφαιρικό σύστημα, βλ. Σχήμα 5.1.

Γραμμές δεδομένων για τον καθορισμό των κόμβων :

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός κόμβου
 2. Πρώτη συντεταγμένη κόμβου
 3. Δεύτερη συντεταγμένη κόμβου
 4. Τρίτη συντεταγμένη κόμβου
 5. Στα επόμενα τρία πεδία μπορούν να συμπληρωθούν το συνημίτονο του κάθετου διανύσματος στην πρώτη, δεύτερη και τρίτη διεύθυνση.

Οι γραμμές αυτές επαναλαμβάνονται για τον ορισμό όλων των κόμβων.



Σχήμα 6.2 – Συστήματα συντεταγμένων

6.2.1.3 *NSET

Με την εντολή αυτή ενσωματώνονται οι κόμβοι σε ένα σύνολο κόμβων (node set). Η εντολή είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και το Abaqus/CAE

Απαραίτητη παράμετρος για τον ορισμό της εντολής είναι:

NSET. Ορίστε την παράμετρο αυτή ίση με το όνομα του συνόλου κόμβων στο οποίο θα ενσωματωθούν οι κόμβοι.

Προαιρετικές παράμετροι για τον ορισμό της εντολής είναι:

ELSET. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ίση με το όνομα ενός συνόλου στοιχείων (element set) που έχει οριστεί προηγουμένως.

Οι παράμετροι ELSET και GENERATE είναι αμοιβαία αποκλειόμενοι.

GENERATE. Όταν αυτή η παράμετρος συμπεριλαμβάνεται, σε κάθε γραμμή πρέπει να δίνεται ο πρώτος κόμβος, n_1 , ο τελευταίος κόμβος, n_2 , και το βήμα στον αριθμό των κόμβων μεταξύ των κόμβων, i . Τότε όλοι οι κόμβοι μεταξύ των n_1 και n_2 θα προστεθούν στο σετ κόμβων. Το i πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός.

Γραμμές δεδομένων, όταν η παράμετρος GENERATE παραλείπεται:

- Πρώτη γραμμή:

Λίστα των κόμβων ή ονόματα των σετ κόμβων που θα συμπεριληφθούν στο συγκεκριμένο σετ κόμβων. Μόνο σετ κόμβων τα οποία έχουν ήδη οριστεί μπορούν να συμπεριληφθούν σε ένα σετ κόμβων.

Η γραμμή αυτή μπορεί να γραφτεί όσες φορές χρειάζεται και δεν επιτρέπεται να έχει πάνω από 16 δεδομένα.

6.2.1.4 *NGEN

Με αυτή την εντολή δημιουργούνται κόμβοι με κάποιο συγκεκριμένο βήμα που ορίζεται από το χρήστη. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE

Προαιρετικά, με την εντολή αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες παράμετροι:

LINE.

LINE=P, για τη δημιουργία των νέων κόμβων πάνω σε μια παραβολή. Σε αυτή την παράμετρο ο χρήστης πρέπει να καθορίσει ένα επιπλέον σημείο, το σημείο ανάμεσα στα δύο ακραία σημεία.

LINE=C, για τη δημιουργία των νέων κόμβων πάνω σε κυκλικό τόξο. Σε αυτή την περίπτωση ο χρήστης πρέπει να ορίσει ένα επιπλέον σημείο, το οποίο είναι το κέντρο του κύκλου.

Εάν η παράμετρος αυτή παραλειφθεί, τότε οι νέοι κόμβοι θα δημιουργηθούν πάνω σε μία ευθεία γραμμή. | this parameter is omitted, the nodes will be generated along a straight line.

NSET. Η παράμετρος αυτή μπορεί να οριστεί ίση με το όνομα ενός σετ κόμβων, στο οποίο οι νέοι κόμβοι θα ανήκουν. Οι δύο ακραίοι κόμβοι πρέπει να ανήκουν στο σετ κόμβων.

SYSTEM

SYSTEM=RC (προεπιλεγμένη τιμή), για τον ορισμό του επιπλέον κόμβου στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

SYSTEM=C, για τον ορισμό του επιπλέον κόμβου σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.

Set SYSTEM=S, για τον ορισμό του επιπλέον κόμβου σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό της εντολής *NGEN

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός του πρώτου ακραίου κόμβου (πρέπει οι συντεταγμένες του να έχουν ήδη οριστεί).
 2. Αριθμός του άλλου ακραίου κόμβου (πρέπει οι συντεταγμένες του να έχουν ήδη οριστεί).
 3. Βήμα μεταξύ των αριθμού των κόμβων κατά μήκος της γραμμής. Η προεπιλεγμένη τιμή βήματος είναι 1.
 4. Αριθμός του τρίτου κόμβου που δίνει το επιπλέον σημείο (όταν αυτό απαιτείται)
 5. Πρώτη συντεταγμένη του επιπλέον σημείου (αν απαιτείται)
 6. Δεύτερη συντεταγμένη του επιπλέον σημείου (αν απαιτείται)
 7. Τρίτη συντεταγμένη του επιπλέον σημείου (αν απαιτείται)

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναληφθούν όσες φορές είναι απαραίτητο.

6.2.1.5 NFILL

Η εντολή αυτή δημιουργεί κόμβους σε μια περιοχή μεταξύ δύο ορίων. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Προαιρετικά, με τη *NFILL μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες παράμετροι:

NSET. Η παράμετρος αυτή πρέπει να ορίζεται ίση με το όνομα του σετ κόμβων στο οποίο οι κόμβοι που δημιουργούνται με αυτή τη διαδικασία (συμπεριλαμβανομένων και των κόμβων των ορίων) θα ανήκουν.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό της εντολής *NFILL

- Πρώτη γραμμή:
 1. Όνομα του σετ κόμβων που ορίζει το πρώτο σύνορο της περιοχής.
 2. Όνομα του σετ κόμβων που ορίζει το δεύτερο σύνορο της περιοχής.
 3. Αριθμός των διαστημάτων (intervals) σε κάθε γραμμών μεταξύ των συνοριακών κόμβων.
 4. Βήμα στον αριθμό των κόμβων. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 1.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται.

6.2.1.6 *ELEMENT

Με τη χρήση της εντολής *ELEMENT γίνεται άμεσα ο προσδιορισμός των στοιχείων δίνοντας τους κόμβους τους. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus*/CAE.

Απαραίτητες για το σωστό ορισμό της εντολής είναι οι παρακάτω παράμετροι:

TYPE. Η παράμετρος αυτή πρέπει να τίθεται ίση με τον τύπο του στοιχείου (βλ. Part VI, “Elements,” of the Abaqus Analysis User's Manual). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία C3D8 και CPS4.

Παράμετροι που μπορούν να οριστούν προαιρετικά στην εντολή *ELEMENT είναι:

ELSET. Η παράμετρος πρέπει να τίθεται ίση με το όνομα του σετ στοιχείων (element set) στο οποίο τα στοιχεία που ορίζονται θα ανήκουν.

INPUT. Η παράμετρος πρέπει να τίθεται ίση με το όνομα του αρχείου εισαγωγής (input file) που θα περιέχει τα δεδομένα για αυτή την εντολή. Αν η παράμετρος παραλείπεται, τότε το πρόγραμμα θεωρεί ότι τα δεδομένα ακολουθούν τη γραμμή εντολών.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό της εντολής:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός στοιχείου.
 2. Αριθμός πρώτου κόμβου για τον ορισμό του στοιχείου
 3. Αριθμός δεύτερου κόμβου για τον ορισμό του στοιχείου.
 4. Κτλ. Μέχρι και 15 αριθμούς κόμβων σε αυτή τη γραμμή.

Η σειρά των κόμβων για κάθε τύπο στοιχείου (element's connectivity) δίνεται στο Part VI, “Elements,” of the Abaqus Analysis User's Manual.

- Επόμενες γραμμές (χρειάζονται μόνο αν η προηγούμενη γραμμή τελειώνει με κόμμα):
 1. Αριθμοί των κόμβων που ορίζουν το στοιχείο.

Οι παραπάνω γραμμές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται, να περιέχουν το ανωτέρω 16-ψήφιος τιμές ανά γραμμή (μέγιστο όριο 80 χαρακτήρες).

6.2.1.7 *ELSET

Με την εντολή αυτή αντιστοιχίζονται στοιχεία σε ένα σετ στοιχείων. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE

Απαραίτητη για το σωστό ορισμό αυτής της εντολής είναι η παρακάτω παράμετρος:

ELSET. Η παράμετρος αυτή πρέπει να είναι ίση με το όνομα του σετ στοιχείων στο οποίο τα στοιχεία θα αντιστοιχηθούν.

Προαιρετικές παράμετροι για την εντολή *ELSETQ:

GENERATE. Αν περιλαμβάνεται αυτή η παράμετρος, κάθε γραμμή δεδομένων πρέπει να έχει το πρώτο στοιχείο, e_1 , το τελευταίο στοιχείο, e_2 , και το βήμα στην αρίθμηση των στοιχείων μεταξύ των δύο ακραίων στοιχείων, i .

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό της εντολής, όταν η παράμετρος GENERATE παραλείπεται:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Λίστα των στοιχείων ή ονόματα των σετ στοιχείων που θα αντιστοιχηθούν σε αυτό το σετ στοιχείων. Μόνο σετ στοιχείων που έχουν ήδη οριστεί μπορούν να οριστούν σε άλλο σετ στοιχείων.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναληφθούν όσο συχνά χρειάζεται. Μέχρι και 16 πεδία επιτρέπεται να εισάγονται σε κάθε γραμμή.

6.2.1.8 *ELGEN

Με την εντολή αυτή δημιουργούνται νέα στοιχεία (elements) με σταθερό βήμα. Η εντολή αυτή είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Προαιρετική παράμετροι για την εντολή *ELGEN:

ELSET. Η παράμετρος πρέπει να οριστεί ίση με το όνομα του σετ στοιχείων στο οποίο τα στοιχεία που θα δημιουργηθούν, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού στοιχείου (master element), θα αντιστοιχηθούν.

Γραμμές δεδομένων για τη δημιουργία στοιχείων με σταθερό βήμα:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός αρχικού στοιχείου (master element)

2. Αριθμός των στοιχείων που θα δημιουργηθούν στην πρώτη σειρά, συμπεριλαμβανομένου και του αρχικού στοιχείου.
3. Βήμα στους αριθμούς των κόμβων των αντίστοιχων κόμβων από στοιχείο σε στοιχείο στην ίδια σειρά. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 1.
4. Βήμα στον αριθμό των στοιχείων στην ίδια σειρά. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 1.

Αν είναι απαραίτητο, μπορεί η σειρά στοιχείων που έχει δημιουργηθεί να αντιγραφεί ώστε να δημιουργήσει μια στρώση στοιχείων.

5. Αριθμός γραμμών που θα οριστούν, συμπεριλαμβανομένης της αρχικής σειράς (master row). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 1.
6. Βήμα στον αριθμό των κόμβων των αντίστοιχων κόμβων από σειρά σε σειρά.
7. Βήμα στον αριθμό των στοιχείων των αντίστοιχων στοιχείων από σειρά σε σειρά.

Αν είναι απαραίτητο, μπορεί ης τρώση στοιχείων που έχει δημιουργηθεί να αντιγραφεί ώστε να δημιουργηθεί ένα μπλοκ στοιχείων.

8. Αριθμός στρώσεων που θα οριστούν, συμπεριλαμβανομένης της αρχικής στρώσης (master layer). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 1.
9. Βήμα στους αριθμούς των κόμβων των αντίστοιχων κόμβων από στρώση σε στρώση.
10. Βήμα στους αριθμούς των στοιχείων των αντίστοιχων στοιχείων από στρώση σε στρώση

Οι γραμμές αυτές μπορεί να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται. Κάθε γραμμή δημιουργεί $N1 \times N2 \times N3$ στοιχεία, όπου $N1$ είναι ο αριθμός των στοιχείων σε μία σειρά, $N2$ ο αριθμός των σειρών σε μια στρώση και $N3$ ο αριθμός των στρώσεων.

6.2.2 Εντολές ορισμού διατομών των μελών

6.2.2.1 *SOLID SECTION

Με την εντολή αυτή ορίζονται οι ιδιότητες του στοιχείου για στερεά (συνεχή), άπειρα, ακουστικά (πεπερασμένα και μη) και δικτυωτά στοιχεία. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE

Απαραίτητες παράμετροι για το σωστό ορισμό της εντολής είναι:

COMPOSITE. Η παράμετρος αυτή εφαρμόζεται μόνο σε αναλύσεις στο Abaqus/Standard. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με τρισδιάστατα στερεά στοιχεία που έχουν ενεργούς μόνο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας. Η παράμετρος πρέπει να συμπεριληφθεί αν το στερεό είναι κατασκευασμένο από διάφορες στρώσεις υλικού.

Οι παράμετροι COMPOSITE και MATERIAL είναι αμοιβαία αποκλειόμενοι.

ELSET. Η παράμετρος πρέπει να οριστεί ίση με το όνομα του σετ στοιχείων που περιέχει τα στοιχεία για τα οποία ορίζεται η συμπεριφορά του υλικού.

MATERIAL. Η παράμετρος πρέπει να οριστεί ίση με το όνομα του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για τα συγκεκριμένα στοιχεία.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό ομογενών στερεών στοιχείων, μη πεπερασμένων στοιχείων, ακουστικών στοιχείων ή δικτυωτών στοιχείων:

- Πρώτη γραμμή:

Μπορεί να εισαχθεί οποιαδήποτε χαρακτηριστική τιμή απαιτείται. Η προεπιλεγμένη τιμή για το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ίσο με 1. Βλ. στο Part VI, "Elements," of the Abaqus Analysis User's Manual του τύπου του στοιχείου που χρησιμοποιείται στην ανάλυση, ώστε να εντοπιστούν τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζεται να οριστούν.

6.2.2.2 *BEAM SECTION

Η εντολή χρησιμοποιείται για τον ορισμό της διατομής ενός στοιχείου δοκού, όταν απαιτείται αριθμητική ολοκλήρωση πάνω στη διατομή (συνήθως λόγω της μη γραμμικότητας του υλικού στη διατομή). Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Απαραίτητες παράμετροι για την εντολή αυτή:

ELSET. Η παράμετρος πρέπει να οριστεί ίση με το όνομα του σετ στοιχείων, για τα οποία ορίζεται η διατομή.

MATERIAL. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ίση με το όνομα του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη διατομή.

SECTION. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ίση με το όνομα του τύπου της διατομής (βλ. "Beam cross-section library," Section 26.3.9 του Abaqus Analysis User's Manual). Για

τα στοιχεία δοκού είναι διαθέσιμες οι εξής διατομές :ARBITRARY, BOX, CIRC, HEX, I, L, PIPE, RECT, TRAPEZOID, ELBOW.

Προαιρετικές παράμετροι για την εντολή *BEAM SECTION:

POISSON. Η παράμετρος τίθεται ίση με το λόγο Poisson της διατομής, ώστε να παρέχεται ομοιόμορφη παραμόρφωση στη διατομή λόγω της παραμόρφωσης κατά τον άξονα της δοκού. Ο λόγος πρέπει να είναι μεταξύ του -1 και του 0.5. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 0. Τιμή ίση με 0,5 θα ενισχύσει την ασυμπίεστη συμπεριφορά του στοιχείου.

Γραμμές δεδομένων για BOX, CIRC, HEX, I, L, PIPE, RECT, και TRAPEZOID διατομές:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής της δοκού. Οι τιμές πρέπει να δίνονται όπως ορίζονται στο “Beam cross-section library,” Section 26.3.9 του Abaqus Analysis User's Manual, για το συγκεκριμένη διατομή του στοιχείου δοκού..

Κτλ.

- Δεύτερη γραμμή (προαιρετική)
- Τρίτη γραμμή (προαιρετική)

6.2.3 Εντολές ορισμού των υλικών

6.2.3.1 Εντολές για το Drucker-Prager

6.2.3.1.1 *DRUCKER PRAGER

Μέσω αυτής της εντολής ορίζεται στο γενικευμένο μοντέλο πλαστικότητας Drucker-Prager.

Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την εντολή *DRUCKER PRAGER HARDENING και, ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται, μπορεί προαιρετικά να χρησιμοποιηθεί η εντολή *DRUCKER PRAGER CREEP.

Η εντολή αυτή είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Στην εντολή *DRUCKER PRAGER υπάρχουν οι ακόλουθες προαιρετικές παράμετροι:

- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον ορισμό της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι η συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior) εξαρτάται μόνο από την παραμόρφωση κατά τη ρηγμάτωση (cracking strain), το ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate) και , πιθανόν, από τη θερμοκρασία (temperature).
- ECCENTRICITY («ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑ»). Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται με τις εντολές SHEAR CRITERION=HYPERBOLIC ή SHEAR CRITERION=EXPONENT FORM.
- SHEAR CRITERION

SHEAR CRITERION=LINEAR (προεπιλεγμένη τιμή) για να οριστεί το γραμμικό κριτήριο διαρροής.

SHEAR CRITERION=HYPERBOLIC για να οριστεί το υπερβολικό κριτήριο διαρροής

SHEAR CRITERION=EXPONENT FORM για να οριστεί το εκθετικό κριτήριο διαρροής
- TEST DATA. Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται μόνο με την εντολή SHEAR CRITERION=EXPONENT FORM.

Γραμμές δεδομένων για τον καθορισμό του γραμμικού μοντέλου πλαστικότητας Drucker-Prager (SHEAR CRITERION=LINEAR):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Γωνία τριβής υλικού, β , στο επίπεδο p-t. Η γωνία πρέπει να δίνεται σε μοίρες.
 2. K, ο λόγος αυτός παίρνει τιμές μεταξύ $0.778 \leq K \leq 1.0$. Αν το πεδίο μείνει κενό ή έχει την τιμή μηδέν, τότε χρησιμοποιείται η προεπιλεγμένη τιμή 1.0.
 3. Γωνία διαστολικότητας, ψ , στο επίπεδο p-t. Η γωνία πρέπει να δίνεται σε μοίρες.
 4. Θερμοκρασία.
 5. Πρώτη μεταβλητή πεδίου.
 6. Δεύτερη μεταβλητή πεδίου.
 7. Κτλ μέχρι τέσσερις μεταβλητές πεδίου.
- Επόμενες γραμμές (μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από τέσσερα):
 1. Πέμπτη μεταβλητή πεδίου Fifth field variable.

2. Κτλ μέχρι οκτώ μεταβλητές πεδίου ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση των παραμέτρων του υλικού (material parameters) από τη θερμοκρασία και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.3.1.2 *DRUCKER PRAGER HARDENING

Μέσω αυτής της εντολής ορίζεται η σκλήρυνση για τα μοντέλα πλαστικότητας Drucker-Prager. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των δεδομένων σκλήρυνσης για ελαστο-πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούν ένα από τα γενικευμένα κριτήρια που ορίζεται στην εντολή Drucker-Prager.

Χρησιμοποιείται πάντα με την εντολή *DRUCKER PRAGER, ενώ μπορεί προαιρετικά και ανάλογα με την περίπτωση να χρησιμοποιηθεί με την εντολή *DRUCKER PRAGER CREEP.

Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Στην εντολή *DRUCKER PRAGER υπάρχουν οι ακόλουθες προαιρετικές παράμετροι:

- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον ορισμό της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι η συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior) εξαρτάται μόνο από την παραμόρφωση κατά τη ρηγμάτωση (cracking strain), το ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate) και , πιθανόν, από τη θερμοκρασία (temperature).
- RATE. Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με το λόγο ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, $\bar{\epsilon}^{pl}$, για την οποία η καμπύλη σκλήρυνσης εφαρμόζεται.
- TYPE

TYPE=COMPRESSION (προεπιλεγμένη τιμή), για τον ορισμό της συμπεριφοράς σκλήρυνσης δίνοντας το όριο διαρροής σε μονοαξονική θλίψη, σ_e , σα συνάρτηση της μονοαξονικής θλιπτικής πλαστικής παραμόρφωσης, $\bar{\epsilon}^{pl} = |\epsilon_{11}^{pl}|$.

TYPE=TENSION, για τον ορισμό της συμπεριφοράς σκλήρυνσης δίνοντας το όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό, σ_t , σα συνάρτηση της μονοαξονικής εφελκυστικής πλαστικής παραμόρφωσης, $\bar{\varepsilon}^{pl} = \varepsilon_{11}^{pl}$.

TYPE=SHEAR, για τον ορισμό της συμπεριφοράς σκλήρυνσης δίνοντας τη συνεκτικότητα, $d = \frac{\sqrt{3}}{2}\tau(1 + \frac{1}{K})$, σα συνάρτηση της ισοδύναμης διατμητικής πλαστικής παραμόρφωσης, $\bar{\varepsilon}^{pl} = \gamma^{pl}/\sqrt{3}$, όπου τ είναι η διατμητική τάση διαρροής, K ο λόγος της τάσης δυναμικού σε τριαξονικό εφελκυσμό διά την τάση δυναμικού σε τριαξονική θλίψη, και γ^{pl} είναι η διατμητική πλαστική παραμόρφωση.

Γραμμές δεδομένων για τον καθορισμό του γραμμικού μοντέλου πλαστικότητας Drucker-Prager (SHEAR CRITERION=LINEAR):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Όριο διαρροής
 2. Απόλυτη τιμή της αντίστοιχης πλαστικής παραμόρφωσης. (Η πρώτη τιμή που εισάγεται πρέπει να είναι πάντα ίση με μηδέν).
 3. Θερμοκρασία.
 4. Πρώτη μεταβλητή πεδίου
 5. Δεύτερη μεταβλητή πεδίου
 6. Κτλ. Μέχρι και πέντε μεταβλητές πεδίου.
- Επόμενες γραμμές (μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από πέντε):
 1. Έκτη μεταβλητή πεδίου Fifth field variable.
 2. Κτλ μέχρι οκτώ μεταβλητές πεδίου ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση των παραμέτρων του υλικού (material parameters) από τη θερμοκρασία και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.3.2 Εντολές για το Damaged Plasticity Concrete

6.2.3.2.1 *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY

Μέσω αυτής της εντολής ορίζονται οι εξής παράμετροι του συγκεκριμένου μοντέλου σκυροδέματος: η ροή δυναμικού (flow potential), η επιφάνεια διαρροής (yield surface) και το ιξώδες (viscosity).

Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις επιλογές *CONCRETE TENSION STIFFENING και *CONCRETE COMPRESSION HARDENING. Οι επιλογές *CONCRETE TENSION DAMAGE και/ή *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE μπορούν

προαιρετικά να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της βλάβης της δυσκαμψίας σε εφελκυσμό και/ή θλίψη (tensile and/or compression stiffness degradation damage).

Η εντολή *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit και Abaqus / CAE.

Στην εντολή *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY υπάρχει η εξής προαιρετική παράμετρος:

- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον ορισμό των παραμέτρων του υλικού (material parameters), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι οι παράμετροι του υλικού εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία (temperature).

Γραμμές δεδομένων για τον καθορισμό των παραμέτρων που έχουν προαναφερθεί (ροή δυναμικού, επιφάνεια διαρροής και ιξώδες):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Γωνία διαστολής, ψ , στο p-q επίπεδο. Η τιμή πρέπει να δοθεί σε μοίρες ($^{\circ}$).
 2. Flow potential eccentricity, ϵ . Η εκκεντρότητα είναι ένας μικρός θετικός αριθμός που καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο η «υπερβολική» ροή δυναμικού προσεγγίζει την ασύμπτωτή της. Αν αυτό το πεδίο παραμείνει κενό ή εισαχθεί τιμή ίση με 0.0, χρησιμοποιείται η προεπιλεγμένη τιμή $\epsilon = 0.1$.
 3. σ_{b0}/σ_{c0} . είναι ο λόγος της αρχικής διαξονικής θλιπτικής τάσης διαρροής (initial equibiaxial compressive yield stress) προς την αρχική μονοαξονική θλιπτική τάση διαρροής (initial uniaxial compressive yield stress). Αν αυτό το πεδίο παραμείνει κενό ή εισαχθεί τιμή ίση με 0.0, χρησιμοποιείται η προεπιλεγμένη τιμή 1.16.
 4. K_c , πρέπει να πληρείται η προϋπόθεση $0.5 < K_c \leq 1.0$. Αν αυτό το πεδίο παραμείνει κενό ή εισαχθεί τιμή ίση με 0.0, χρησιμοποιείται η προεπιλεγμένη τιμή $2/3$.
 5. Η παράμετρος ιξώδους, μ , χρησιμοποιείται για την ιξωδοπλαστική μοντελοποίηση των καταστατικών καταστατικές εξισώσεων του σκυροδέματος στις αναλύσεις στο Abaqus/Standard. Αυτή η παράμετρος δε λαμβάνεται υπόψιν στο Abaqus/Explicit. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 0.0.

6. Θερμοκρασία.
 7. Πρώτη μεταβλητή.
 8. Δεύτερη μεταβλητή
- Επόμενες γραμμές (μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από δύο):
 1. Τρίτο μεταβλητή.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση των παραμέτρων του υλικού (material parameters) από τη θερμοκρασία και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.3.2.2 *CONCRETE TENSION STIFFENING

Μέσω αυτής της εντολής ορίζονται οι ιδιότητες του σκυροδέματος για αυτό το μοντέλο μετά τη θραύση (postcracking behavior).

Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις επιλογές *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY και *CONCRETE COMPRESSION HARDENING. Οι επιλογές *CONCRETE TENSION DAMAGE και/ή *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουν τη βλάβη της δυσκαμψίας σε εφελκυσμό και/ή θλίψη (tensile and/or compressive stiffness degradation damage).

Η εντολή *CONCRETE TENSION STIFFENING είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit και Abaqus / CAE.

Στην εντολή *CONCRETE TENSION STIFFENING υπάρχουν οι ακόλουθες προαιρετικές παράμετροι:

- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον ορισμό της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι η συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior) εξαρτάται μόνο από την παραμόρφωση κατά τη ρηγμάτωση (cracking strain), το ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate) και , πιθανόν, από τη θερμοκρασία (temperature).
- TYPE (ΤΥΠΟΣ)

Για TYPE=STRAIN (προεπιλογή) ορίζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior) εισάγοντας τη σχέση τάση (μετά την ρηγμάτωση)-παραμόρφωση (μετά τη ρηγμάτωση) (postfailure stress/cracking-strain relationship).

Για TYPE=DISPLACEMENT ορίζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση εισάγοντας τη σχέση τη σχέση τάση (μετά τη ρηγμάτωση)-μετατόπιση (μετά τη ρηγμάτωση) (postfailure stress/cracking-displacement relationship).

Για TYPE= GFI ορίζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση εισάγοντας την τάση αστοχίας (failure stress), σ_{10} και την ενέργεια θραύσης (fracture energy), G_f .

Γραμμές δεδομένων, εάν χρησιμοποιείται η παράμετρος TYPE = STRAIN (προεπιλογή):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Παραμένουσα απευθείας τάση μετά τη ρηγμάτωση (Remaining direct stress after cracking), σ_t .
 2. Απευθείας παραμόρφωση κατά τη ρηγμάτωση (Direct cracking strain), ε_t^{ck} .
 3. Ρυθμός απευθείας παραμόρφωσης ρηγμάτωσης (Direct cracking strain rate), $\dot{\varepsilon}_t^{ck}$.
 4. Θερμοκρασία.
 5. Πρώτη μεταβλητή
 6. Δεύτερη μεταβλητή.
 7. Κλπ., μέχρι τέσσερις μεταβλητές.

Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει παραμόρφωση ρηγμάτωσης ίση με 0.0 και τάση αστοχίας ίση με σ_{10} .

- Επόμενες γραμμές (απαιτούνται μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από τέσσερα):
 1. Πέμπτη μεταβλητή τομέα.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές πεδίου ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση

(postcracking behavior) από τη θερμοκρασία και τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

Γραμμές δεδομένων, εάν χρησιμοποιείται η παράμετρος TYPE = DISPLACEMENT :

- Πρώτη γραμμή:
 1. Παραμένουσα απευθείας τάση μετά τη ρηγμάτωση (Remaining direct stress after cracking), σ_t .
 2. Απευθείας μετατόπιση κατά τη ρηγμάτωση (Direct cracking displacement), u_t^{ck} .
 3. Ρυθμός απευθείας μετατόπισης ρηγμάτωσης (Direct cracking displacement rate), \dot{u}_t^{ck} .
 4. Θερμοκρασία.
 5. Πρώτη μεταβλητή.
 6. Δεύτερη μεταβλητή.
 7. Κλπ., μέχρι τέσσερις μεταβλητές.

Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει μετατόπιση ρηγμάτωσης ίση με 0.0 και τάση ίση με την τάση αστοχίας.

- Οι επόμενες γραμμές (απαιτείται μόνο αν η παράμετρος ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ έχει αξία μεγαλύτερη από τέσσερις):
 1. Πέμπτη μεταβλητή.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior) από τη θερμοκρασία και τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

Γραμμές δεδομένων, εάν χρησιμοποιείται η παράμετρος TYPE = GFI :

- Πρώτη γραμμή:
 1. Τάση αστοχίας (Failure stress), σ_{10} .
 2. Ενέργεια θραύσης (Fracture energy), G_f .

3. Ρυθμός απευθείας μετατόπισης ρηγμάτωσης (Direct cracking displacement rate), \dot{u}_t^{ck} .
 4. Θερμοκρασία.
 5. Πρώτη μεταβλητή τομέα.
 6. Δεύτερη μεταβλητή τομέα.
 7. Κλπ., μέχρι τέσσερις μεταβλητές πεδίου.
- Οι επόμενες γραμμές (απαιτούνται μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από τέσσερα):
 1. Πέμπτη μεταβλητή τομέα.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές πεδίου ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της συμπεριφοράς μετά τη ρηγμάτωση (postcracking behavior) από τη θερμοκρασία και τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.3.2.3 *CONCRETE COMPRESSION HARDENING

Μέσω αυτής της εντολής ορίζεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος υπό θλίψη (hardening in compression).

Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις επιλογές *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY και *CONCRETE TENSION STIFFENING. Οι επιλογές *CONCRETE TENSION DAMAGE και/ή *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE μπορούν προαιρετικά να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουν τη βλάβη της δυσκαμψίας σε εφελκυσμό και/ή θλίψη (tensile and/or compressive stiffness degradation damage).

Η εντολή * CONCRETE COMPRESSION HARDENING είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit και Abaqus / CAE.

Στην εντολή * CONCRETE COMPRESSION HARDENING υπάρχουν η εξής προαιρετική παράμετρος:

- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον

ορισμό της θλιπτικής τάσης διαρροής (compressive yield stress), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι η θλιπτική τάση διαρροής (compressive yield stress) εξαρτάται μόνο από την ανελαστική παραμόρφωση (inelastic strain), το ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate) και , πιθανόν, από τη θερμοκρασία (temperature).

Γραμμές δεδομένων, για τον ορισμό του compressive hardening :

- Πρώτη γραμμή:
 1. Τάση διαρροής υπό θλίψη (Yield stress in compression), σ_c .
 2. Ανελαστική παραμόρφωση (σύνθλιψης) (Inelastic (crushing) strain), $\tilde{\epsilon}_c^{in}$.
 3. Ρυθμός ανελαστικής παραμόρφωσης (σύνθλιψης) (Inelastic (crushing) strain rate), $\dot{\tilde{\epsilon}}_c^{in}$.
 4. Θερμοκρασία.
 5. Πρώτη μεταβλητή.
 6. Δεύτερη μεταβλητή.
 7. Κλπ., μέχρι τέσσερις μεταβλητές.

Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει παραμόρφωση σύνθλιψης ίση με 0,0 και τάση ίση με την αρχική τάση διαρροής, σ_{c0} .
- Επόμενες γραμμές (απαιτούνται μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από τέσσερα):
 1. Πέμπτη μεταβλητή τομέα.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της τάσης διαρροής υπό θλίψη (compressive yield stress) από την παραμόρφωση σύνθλιψης (crushing strain), το ρυθμό παραμόρφωσης σύνθλιψης (crushing strain rate) και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.3.2.4 *CONCRETE TENSION DAMAGE

Μέσω αυτής της εντολής ορίζονται οι ιδιότητες της βλάβης μετά τη ρηγμάτωση (postcracking damage properties) στο συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος.

Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις επιλογές *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY, *CONCRETE TENSION STIFFENING, και *CONCRETE COMPRESSION HARDENING. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η επιλογή *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE για να διευκρινίσει τη βλάβη της δυσκαμψίας σε θλίψη (compressive stiffness degradation damage).

Η εντολή *CONCRETE TENSION DAMAGE είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit και Abaqus / CAE.

Στην εντολή *CONCRETE TENSION DAMAGE υπάρχουν οι ακόλουθες προαιρετικές παράμετροι:

- COMPRESSION RECOVERY («ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ»). Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον παράγοντα ανάκτησης δυσκαμψίας, w_c , ο οποίος προσδιορίζει την ποσότητα της θλιπτικής δυσκαμψίας που ανακτάται καθώς η φόρτιση αλλάζει από εφελκυσμό δε θλίψη. Εάν $w_c = 1$, το υλικό ανακτά πλήρως την συμπίεστική δυσκαμψία. Εάν $w_c = 0$, δεν συμβαίνει ανάκτηση δυσκαμψίας. Ενδιάμεσες τιμές του w_c ($0 \leq w_c \leq 1$) οδηγούν σε μερική ανάκτηση της συμπίεστικής ακαμψίας. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1.0, τιμή που αντιστοιχεί στην υπόθεση ότι όταν οι ρωγμές κλείνουν η θλιπτική δυσκαμψία δεν επηρεάζεται από τη βλάβη υπό εφελκυσμό.
- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον ορισμό της βλάβης υπό εφελκυσμό (tension damage), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι η συμπεριφορά βλάβης κατά τον εφελκυσμό (tension damage behavior) εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία (temperature).
- TYPE («ΤΥΠΟΣ»)

Για TYPE = STRAIN (προεπιλογή) ορίζεται η μεταβλητή εφελκυστικής βλάβης (tensile damage variable) ως συνάρτηση της παραμόρφωσης ρηγμάτωσης (cracking strain).

Για TYPE = DISPLACEMENT ορίζεται η μεταβλητή εφελκυστικής βλάβης (tensile damage variable) ως συνάρτηση της μετατόπισης ρηγμάτωσης (cracking displacement).

Γραμμές δεδομένων εάν η βλάβη εφελκυσμού (tensile damage) ορίζεται ως συνάρτηση της παραμόρφωσης ρηγμάτωσης (TYPE = STRAIN):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Μεταβλητή εφελκυστικής βλάβης (tensile damage variable), d_t .
 2. Άμεση παραμόρφωση κατά τη ρηγμάτωση (direct cracking strain), $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$.
 3. Θερμοκρασία.
 4. Πρώτη μεταβλητή.
 5. Δεύτερη μεταβλητή.
 6. Κλπ., έως πέντε μεταβλητές.

Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει παραμόρφωση ρηγμάτωσης ίση με 0,0 και τιμή βλάβης εφελκυσμού ίση με 0,0.
- Επόμενες γραμμές (απαιτούνται μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από πέντε):
 1. Έκτη μεταβλητή.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της συμπεριφοράς της εφελκυστικής βλάβης (tensile damage behavior) από την παραμόρφωση ρηγμάτωσης (cracking strain), τη θερμοκρασία και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

Γραμμές δεδομένων εάν η βλάβη υπό εφελκυσμό (tensile damage) ορίζεται ως συνάρτηση της μετατόπισης ρηγμάτωσης (TYPE = DISPLACEMENT):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Μεταβλητή εφελκυστικής βλάβης (tensile damage variable), d_t .
 2. Άμεση μετατόπιση ρηγμάτωσης (direct cracking displacement), u_t^{ck} .
 3. Θερμοκρασία.
 4. Πρώτη μεταβλητή πεδίου.
 5. Δεύτερη μεταβλητή πεδίου.
 6. Κλπ., έως πέντε μεταβλητές πεδίου.

Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει μετατόπιση ρηγμάτωσης (cracking displacement) ίση με 0.0 και τιμή εφελκυστικής βλάβης (tensile damage value) ίση με 0.0.

- Επόμενες γραμμές (απαιτούνται μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από πέντε):
 1. Έκτη μεταβλητή.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της συμπεριφοράς της εφελκυστικής βλάβης (tensile damage behavior) από τη μετατόπιση ρηγμάτωσης (cracking displacement), τη θερμοκρασία και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.3.2.5 *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE

Μέσω αυτής της εντολής ορίζονται οι ιδιότητες της θλιπτικής βλάβης (compression damage properties) στο συγκεκριμένο μοντέλο σκυροδέματος.

Χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις ιδιότητες της θλιπτικής βλάβης ή της υποβάθμισης της δυσκαμψίας (compression damage or stiffness degradation properties). Πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις επιλογές *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY, *CONCRETE TENSION STIFFENING και *CONCRETE COMPRESSION HARDENING. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επιλογή *CONCRETE TENSION DAMAGE για να διευκρινίσει τη βλάβη σε εφελκυσμό της υποβάθμισης της δυσκαμψίας (tensile stiffness degradation damage).

Η εντολή * CONCRETE COMPRESSION DAMAGE είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit και Abaqus / CAE.

Στην εντολή * CONCRETE COMPRESSION DAMAGE υπάρχουν οι ακόλουθες προαιρετικές παράμετροι:

- DEPENDENCIES («ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ»). Η παράμετρος αυτή πρέπει να οριστεί ίση με τον αριθμό των παραμέτρων εξάρτησης που περιλαμβάνονται στον ορισμό της βλάβης υπό θλίψη (compression damage), και είναι διαφορετικές από τη θερμοκρασία. Εάν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, υποτίθεται ότι η συμπεριφορά βλάβης υπό θλίψη (compression damage behavior) εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία (temperature).

- TENSION RECOVERY («ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΑΣΗΣ»). Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του παράγοντα ανάκτησης δυσκαμψίας w_t , ο οποίος προσδιορίζει την ποσότητα της δυσκαμψίας εφελκυσμού που ανακτάται καθώς η φόρτιση αλλάζει από θλίψη σε εφελκυσμό. Εάν $w_t = 1$, το υλικό ανακτά πλήρως την δυσκαμψία εφελκυσμού. Εάν $w_t = 0$, δε συμβαίνει ανάκτηση δυσκαμψίας. Ενδιάμεσες τιμές του w_t ($0 \leq w_t \leq 1$) οδηγούν σε μερική ανάκτηση της δυσκαμψίας εφελκυσμού. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 0,0.

Γραμμές δεδομένων για τον καθορισμό της βλάβης υπό συμπίεση (compression damage):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Μεταβλητή βλάβης υπό θλίψη (compressive damage variable), d_c .
 2. Ανελαστική παραμόρφωση (σύνθλιψης) (inelastic (crushing) strain), ξ_c^{in} .
 3. Θερμοκρασία.
 4. Πρώτη μεταβλητή.
 5. Δεύτερη μεταβλητή.
 6. Κλπ., έως πέντε μεταβλητές.

Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει παραμόρφωση σύνθλιψης (crushing strain) ίση με 0.0 και τιμή βλάβης υπό θλίψη (compressive damage value) ίση με 0.0.

- Επόμενες γραμμές (απαιτούνται μόνο αν η παράμετρος DEPENDENCIES έχει τιμή μεγαλύτερη από πέντε):
 1. Έκτη μεταβλητή.
 2. Κλπ, έως οκτώ μεταβλητές ανά γραμμή.

Το σύνολο των γραμμών δεδομένων μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά είναι απαραίτητο για να οριστεί η εξάρτηση της συμπεριφοράς της θλιπτικής βλάβης (compressive damage behavior) από την παραμόρφωση σύνθλιψης (crushing strain), τη θερμοκρασία και από τις άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές.

6.2.4 Εντολές ορισμού συνοριακών συνθηκών και αρχικών συνθηκών

6.2.4.1 *BOUNDARY

Με την εντολή αυτή ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για να εισάγει συνοριακές συνθήκες σε κόμβους. Υπάρχει στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Δεν χρησιμοποιούνται παράμετροι όταν ορίζονται “fixed boundary conditions” ως model data.

Προαιρετικές παράμετροι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν με την εντολή (μόνο ως history data):

AMPLITUDE. Η παράμετρος αυτή είναι σχετική μόνο όταν κάποιες από τις μεταβλητές έχουν μη μηδενικές τιμές. Πρέπει να ορίζεται ίση με το όνομα της καμπύλης του μεγέθους (amplitude curve) που ορίζει το μέγεθος των καθορισμένων συνοριακών συνθηκών. Αν η παράμετρος παραλειφθεί στο Abaqus/Standard, είτε το μέγεθος αναφοράς επιβάλλεται γραμμικά κατά τη διάρκεια του βήματος (RAMP function) είτε επιβάλλεται αμέσως στην αρχή του βήματος και στη συνέχεια διατηρείται σταθερό (STEP function). Η εντολή RAMP και STEP εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου AMPLITUDE της εντολής *STEP. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. “procedures overview,” Section 6.1.1 του Abaqus Analysis User’s Manual.

FIXED. Η παράμετρος αυτή εφαρμόζεται στο Abaqus/Standard και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις παραμέτρους TYPE και USER. Με αυτή, οι τιμές των μεταβλητών που καθορίζονται από την επιλογή *BOUNDARY παραμένουν σταθερές και ίσες με τις αρχικές τιμές κατά την έναρξη του βήματος. Εάν αυτή η παράμετρος χρησιμοποιηθεί, αμελούνται όλα τα μεγέθη που δίνονται στις γραμμές δεδομένων (data lines)

OP

OP=MOD (προεπιλεγμένη τιμή), για τη μεταβολή των ήδη υπαρχόντων συνοριακών συνθηκών ή για την προσθήκη συνοριακών συνθηκών σε βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι δεν ήταν περιορισμένοι.

OP=NEW, για την αφαίρεση όλων των συνοριακών συνθηκών που ήταν μέχρι εκείνο το σημείο σε ισχύ. Για την αφαίρεση συγκεκριμένων συνοριακών συνθηκών μόνο, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η OP=NEW και να ξαναοριστούν οι συνοριακές συνθήκες που θα ισχύουν.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό συνοριακών συνθηκών με μηδενικές τιμές, χρησιμοποιώντας το “type” format (μόνο για model data):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός κόμβου ή όνομα σετ κόμβων.
 2. Όνομα που καθορίζει των τύπο των συνοριακών συνθηκών που θα επιβληθούν (βλ. “Boundary conditions in Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit,” Section 30.3.1 του Abaqus Analysis User’s Manual. Μόνο ένας τύπος συνοριακών συνθηκών μπορεί να χρησιμοποιείται ανά γραμμή.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται για τον προσδιορισμό των “fixed” συνοριακών συνθηκών σε διαφορετικούς κόμβους και βαθμούς ελευθερίας.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό συνοριακών συνθηκών χρησιμοποιώντας το “direct” format:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός κόμβου ή όνομα σετ κόμβων στα οποία θα επιβληθούν οι συνοριακές συνθήκες.
 2. Πρώτος βαθμός ελευθερίας που θα δεσμευτεί. Για τον ορισμό των βαθμών ελευθερίας βλ. “Conventions,” Section 1.2.2 του Abaqus
 3. Τελευταίος βαθμός ελευθερίας που θα δεσμευτεί. Το πεδίο αυτό μπορεί να μείνει κενό, αν μόνο ένας βαθμός ελευθερίας πρόκειται να περιοριστεί.

Τα παρακάτω δεδομένα είναι απαραίτητα μόνο όταν μη μηδενικές συνοριακές συνθήκες επιβάλλονται ως history data. Οποιοδήποτε μέγεθος δίνεται στο ακόλουθο πεδίο θα αγνοείται, όταν οι συνοριακές συνθήκες δίνονται ως model data.

4. Πραγματικό μέγεθος της μεταβλητής (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση κτλ). Αυτό το μέγεθος θα τροποποιείται, αν η επιλογή AMPLITUDE είναι ενεργοποιημένη. Αν το μέγεθος που συμπληρώνεται σε αυτό το πεδίο είναι στροφή, τότε πρέπει να δίνει σε ακτίνια (rad).

Οι παραπάνω γραμμές επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών σε διαφορετικούς κόμβους και βαθμούς ελευθερίας.

6.2.4.2 *INITIAL CONDITIONS

Η εντολή χρησιμοποιείται για τον ορισμό αρχικών συνθηκών σε μία ανάλυση. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Παράμετροι οι οποίες πρέπει να χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά με την εντολή *BOUNDARIES:

TYPE. Η παράμετρος ισούται με το είδος των αρχικών συνθηκών που θα επιβληθούν στην ανάλυση. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η επιλογή TYPE=VELOCITY και αυτή θα εξηγηθεί παρακάτω. Για τις υπόλοιπες επιλογές βλ. "INITIAL CONDITIONS" του Abaqus Keyword's Reference Manual.

TYPE=VELOCITY, για να οριστούν αρχικές ταχύτητες στην ανάλυση. Οι αρχικές ταχύτητες πρέπει πάντα να ορίζονται στο καθολικό σύστημα αξόνων.

Γραμμές δεδομένων για την επιλογή TYPE=VELOCITY

- Πρώτη γραμμή:
 1. Όνομα σετ κόμβων ή αριθμός κόμβου.
 2. Βαθμός ελευθερίας.
 3. Τιμή αρχικής ταχύτητας.

Οι γραμμές αυτές μπορεί να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό της αρχικής ταχύτητας σε διάφορους κόμβους και βαθμούς ελευθερίας.

6.2.5 Εντολές ορισμού φόρτισης

6.2.5.1 *AMPLITUDE

Με την εντολή αυτή ορίζεται η καμπύλη φόρτισης (amplitude curve). Επιτρέπει σε αυθαίρετο χρόνο (ή συχνότητα, αν πρόκειται για ανάλυση στο Abaqus/Standard) να δίνονται μεταβολές στις τιμές του φορτίου, της μετατόπισης, και άλλων ορισμένων μεταβλητών κατά τη διάρκεια ενός βήματος. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Παράμετρος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί υποχρεωτικά με την εντολή: NAME. Η παράμετρος ορίζεται ίση με ένα όνομα, το οποίο θα χρησιμοποιείται κάθε φορά που θα γίνεται αναφορά στη συγκεκριμένη καμπύλη (amplitude curve).

Παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά:

DEFINITION

DEFINITION=TABULAR (προεπιλεγμένη τιμή), για τον προσδιορισμό φόρτισης-χρόνου/συχνότητας (amplitude-time ή amplitude-frequency) σε πινακοειδή μορφή.

DEFINITION=EQUALLY SPACED, PERIODIC, MODULATED, DECAY, SMOOTH STEP, SOLUTION DEPENDENT, or BUBBLE, για τον ορισμό της εντολής σύμφωνα με το "Amplitude curves," Section 30.1.2 του Abaqus Analysis User's Manual.

DEFINITION=USER, για τον ορισμό της εντολής από το χρήστη χρησιμοποιώντας υπορουτίνες (user subroutines UAMP και VUAMP).

Γραμμές δεδομένων για την επιλογή DEFINITION=TABULAR με τέσσερα σημεία δεδομένων (οκτώ πεδία) σε κάθε γραμμή:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Χρόνος ή συχνότητα.
 2. Τιμή μεγέθους φόρτισης (σχετική ή απόλυτη) στο πρώτο σημείο.
 3. Χρόνος ή συχνότητα.
 4. Τιμή μεγέθους (σχετική ή απόλυτη) στο δεύτερο σημείο
 5. Κτλ, μέχρι και τέσσερα ζευγάρια σε κάθε γραμμή.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται. Σε κάθε γραμμή (εκτός από την τελευταία) πρέπει να υπάρχουν ακριβώς τέσσερα ζεύγη χρόνου/μεγέθους ή συχνότητας/μεγέθους.

Γραμμές δεδομένων για την επιλογή DEFINITION=TABULAR με ένα ζεύγος δεδομένων (δύο πεδία) ανά γραμμή:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Χρόνος ή συχνότητα
 2. Τιμή μεγέθους φόρτισης (σχετική ή απόλυτη) στο πρώτο σημείο.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται. Σε κάθε γραμμή πρέπει να υπάρχει ακριβώς ένα ζεύγος δεδομένων χρόνου/μεγέθους και συχνότητας/μεγέθους.

6.2.5.2 *CLOAD

Με την εντολή ορίζονται συγκεντρωμένες δυνάμεις και ροπές σε οποιοδήποτε κόμβο του μοντέλου. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Παράμετροι οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτή την εντολή:

AMPLITUDE. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ίση με το όνομα της φόρτισης (amplitude curve), που ορίζει τη μεταβολή του μεγέθους κατά τη διάρκεια του βήματος. Αν αυτή η παράμετρος παραλειφθεί, το μέγεθος αναφοράς εφαρμόζεται αμέσως στην αρχή του βήματος ή γραμμικά κατά τη διάρκεια του βήματος, ανάλογα με την τιμή που ορίζεται στην παράμετρο AMPLITUDE της εντολής *STEP. “Procedures: overview,” Section 6.1.1 του Abaqus Analysis User’s Manual.

Γραμμές δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό συγκεντρωμένων φορτίων σε συγκεκριμένους βαθμούς ελευθερίας:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός κόμβου ή όνομα σετ κόμβων.
 2. Βαθμός ελευθερίας.
 3. Μέγεθος αναφοράς για το φορτίο.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό των συγκεντρωμένων φορτίων.

6.2.5.3 *DLOAD

Με την εντολή αυτή εφαρμόζονται κατανεμημένα φορτία. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό όλων των κατανεμημένων φορτίων. Τα παρακάτω ισχύουν για τις περισσότερες συνήθεις περιπτώσεις. Για ειδικές περιπτώσεις βλ. *DLOAD στο Abaqus Keywords Reference Manual.

- Πρώτη γραμμή:
 1. Αριθμός στοιχείου (element) ή όνομα σετ στοιχείων (element set).
 2. Όνομα τύπου κατανεμημένου φορτίου (distributed load type label), βλ. Part VI, “Elements,” του Abaqus Analysis User’s Manual)
 3. Μέγεθος φορτίου αναφοράς (reference loads magnitude), το οποίο μπορεί να μεταβληθεί με τη χρήση της επιλογής *AMPLITUDE. Για μη ομοιόμορφα φορτία, το μέγεθος πρέπει να ορίζεται από υπορουτίνα χρήστη DLOAD για το Abaqus/Standard.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό συγκεντρωμένων φορτίων σε διαφορετικά στοιχεία ή σετ στοιχείων.

6.2.5.4 *DYNAMIC

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει απευθείας ολοκλήρωση μιας δυναμικής απόκρισης τάσης/μετακίνησης (stress/displacement) σε αναλύσεις στο Abaqus/Standard και συνήθως χρησιμοποιείται σε μη γραμμικές περιπτώσεις. Χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει μια δυναμική ανάλυση τάσης/μετακίνησης (stress/displacement), χρησιμοποιώντας ανώτερη ολοκλήρωση (explicit integration) στο Abaqus/Explicit. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Παρακάτω θα αναφερθούν γραμμές δεδομένων για την εντολή στο Abaqus/Standard:

- Πρώτη γραμμή (και μοναδική):
 1. Προτεινόμενη αρχική προσαύξηση χρόνου (time increment). Για την απλή ολοκλήρωση (implicit integration), το time increment αυτό θα χρησιμοποιηθεί καθ' όλη τη διάρκεια του βήματος (step), εκτός και αν υπάρξει επίδραση επαφής ή συμβούν ελευθερώσεις ή χρησιμοποιηθεί αυτόματο σύστημα προσαύξησης χρόνου (automatic time incrementation scheme)
 2. Χρονική περίοδος του βήματος (step).
 3. Ελάχιστη επιτρεπόμενη χρονική προσαύξηση (minimum time increment allowed). Εάν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί χρονική προσαύξηση μικρότερη αυτής της τιμής, η ανάλυση τερματίζεται. Εάν αυτό το πεδίο έχει τιμή ίση με 0, ορίζεται η προεπιλεγμένη τιμή που είναι το ελάχιστο μεταξύ των παρακάτω τιμών: α) της προτεινόμενης αρχικής προσαύξησης χρόνου και του β) 10^{-5} φορές τη χρονική περίοδο του βήματος.
 4. Μέγιστη επιτρεπόμενη χρονική προσαύξηση (maximum time increment allowed).

6.2.5.5 *STEP

Με την εντολή αυτή ορίζεται και ξεκινάει ένα βήμα. Πρέπει να ακολουθείται από μια επιλογή ορισμού διαδικασίας. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Τα παρακάτω αναφέρονται στην εντολή *STEP, όταν χρησιμοποιείται σε αναλύσεις στο Abaqus/Standard.

Παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά με την εντολή *STEP:

INC. Η παράμετρος πρέπει να ορίζεται ίση με το μέγιστο αριθμό προσαυξήσεων (increments) σε ένα βήμα (step). Η τιμή αποτελεί άνω όριο του πλήθους των προσαυξήσεων. Η προεπιλεγμένη τιμή για την παράμετρο είναι 100.

NLGEOM. Εάν παραληφθεί η παράμετρος ή τεθεί NLGEOM=NO, τότε πραγματοποιείται γραμμική γεωμετρική ανάλυση κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου βήματος. Εάν τεθεί NLGEOM=YES, τότε η πραγματοποιείται γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση. Μόλις η επιλογή NLGEOM τεθεί σε λειτουργία, τότε θα είναι ενεργοποιημένη κατά τη διάρκεια όλων των βημάτων που πρόκειται να ακολουθήσουν στην ανάλυση.

Γραμμές δεδομένων (προαιρετικές):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Υπότιτλος για αυτό το βήμα.

Ο υπότιτλος μπορεί να καταλαμβάνει πολλές γραμμές, όμως μόνο οι πρώτοι 80 χαρακτήρες της πρώτης γραμμής θα σωθούν και θα τυπωθούν ως υπότιτλος.

6.2.6 Εντολές ορισμού επιφανειών

6.2.6.1 *SURFACE

Με την εντολή αυτή ορίζεται μία επιφάνεια ή μία περιοχή ενός μοντέλου. Ορίζονται επιφάνειες για προσομοιώσεις επαφής, περιορισμούς δεσμού, συνδετήρες κτλ, καθώς και περιοχές για κατανεμημένα επιφανειακά φορτία κτλ.

Παράμετροι που χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά για το σωστό ορισμό της εντολής:

NAME. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ίση με το όνομα που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια κάθε φορά που θα αναφέρεται αυτή η επιφάνεια.

Παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά με την εντολή *SURFACE:

TYPE

TYPE=ELEMENT (προεπιλεγμένη τιμή), για τον ορισμό μιας ελεύθερης επιφάνειας για τα στοιχεία που ορίζονται ή για τον ορισμό μιας επιφάνειας στα στοιχεία χρησιμοποιώντας τις όψεις του στοιχείου (element face identifiers).

TYPE=NODE, για τον ορισμό μιας επιφάνειας ορίζοντας μια λίστα από κόμβους ή το όνομα σετ κόμβων.

Υπάρχουν διαθέσιμοι και άλλοι τύποι για τον ορισμό επιφανειών βλ. Abaqus Keywords Reference Manual.

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό μιας επιφάνειας χρησιμοποιώντας στοιχεία ή σετ στοιχείων, όταν η επιλογή TYPE=ELEMENTS χρησιμοποιείται:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Όνομα σετ στοιχείων ή αριθμός στοιχείου. Element set name or element number.
 2. Αριθμός όψης (face) ή ακμής (edge) του στοιχείου. Για τον ορισμό τους βλ. “Element-based surface definition,” Section 2.3.2 του Abaqus Analysis User’s Manual.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό επιφανειών.

6.2.6.2 *SURFACE INTERACTION

Με την εντολή αυτή ορίζονται οι ιδιότητες της επιφάνειας επαφής. Οι ιδιότητες θα διέπουν οποιαδήποτε αλληλεπίδραση επαφής που αναφέρει τη συγκεκριμένη επιφάνεια επαφής. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Παράμετροι που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για το σωστό ορισμό της εντολής:

NAME. Η παράμετρος ορίζεται ίση με ένα όνομα, το οποίο χρησιμοποιείται για να αναφερθεί ο χρήστης στις ιδιότητες αυτής της επιφάνειας επαφής. Το όνομα θα χρησιμοποιηθεί στην επιλογή INTERACTION της εντολής *CONTACT PAIR (για αναλύσεις στο Abaqus/Standard) ή στη γραμμή δεδομένων της εντολής *CONTACT PROPERTY ASSIGNMENT για να αντιστοιχηθούν οι ιδιότητες αυτής της επιφάνειας Προαιρετική γραμμή δεδομένων για διδιάστατα μοντέλα στο Abaqus/Standard ή για ζεύγη επαφής (contact pairs) που περιλαμβάνουν επιφάνειες, οι οποίες ορίζονται από κόμβους (node-based surfaces) στο Abaqus/Standard.(Τα παραπάνω αναφέρονται στις περιπτώσεις που η παράμετρος USER παραλείπεται):

- Πρώτη γραμμή (και μοναδική):
 1. Πάχος εκτός επιπέδου της επιφάνειας ή εμβαδόν διατομής για κάθε κόμβο για τις περιπτώσεις που οι επιφάνειες ορίζονται από κόμβους (node-based surfaces). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1.

6.2.6.3 *CONTACT PAIR

Με την εντολή αυτή ορίζονται οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Τα παρακάτω αναφέρονται στον ορισμό της εντολής *CONTACT PAIR στο Abaqus/Standard.

Η παρακάτω παράμετρος είναι απαραίτητη για το σωστό ορισμό της εντολής:

INTERACTION. Η παράμετρος αυτή πρέπει να είναι ίση με το όνομα που έχει δοθεί στην εντολή *SURFACE INTERACTION και έχει να κάνει με το ζεύγος επαφή (contact pair) που ορίζεται.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά ορισμένες παράμετροι σε συνδυασμό με την εντολή. Παρακάτω αναφέρεται μόνο μία (η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία). Για τις υπόλοιπες βλ. Abaqus Keywords Reference Manual:

TYPE

TYPE=NODE TO SURFACE (προεπιλεγμένη τιμή)

TYPE=SURFACE TO SURFACE

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό των επιφανειών και των σετ κόμβων που αποτελούν τα ζευγάρια επαφής (contact pairs):

- Πρώτη γραμμή:
 1. Το όνομα της δευτερεύουσας επιφάνειας (slave surface).
 2. Το όνομα της κύριας επιφάνειας (master surface). Αν δεν οριστεί κάποια επιφάνεια σε αυτό το πεδίο ή η επιφάνεια που θα οριστεί είναι ίδια με το όνομα της δευτερεύουσας επιφάνειας, τότε το Abaqus/Standard θεωρεί ότι ορίζεται self-contact.
 3. Προαιρετικό όνομα προσανατολισμού για τον ορισμό της διεύθυνσης της εφαπτομενικής ολίσθησης στις δευτερεύουσας επιφάνειας (slave surface).
 4. Προαιρετικό όνομα προσανατολισμού για τον ορισμό της διεύθυνσης της εφαπτομενικής ολίσθησης στις κυρίας επιφάνειας (master surface).

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναληφθούν όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό όλων των επιφανειών ή σετ κόμβων που σχηματίζουν

6.2.7 Εντολές ορισμού αποτελεσμάτων εξόδου

***OUTPUT**

Με την εντολή αυτή ορίζονται από το χρήστη τα μεγέθη για τα οποία επιθυμεί να του βγάλει αποτελέσματα το πρόγραμμα. Οι εντολές *CONTACT OUTPUT, *ELEMENT OUTPUT, *ENERGY OUTPUT, *INCREMENTATION OUTPUT, *MODAL OUTPUT, *NODE OUTPUT, και/ή *RADIATION OUTPUT μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτή την εντολή. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Τα παρακάτω αναφέρονται σε αναλύσεις στο Abaqus/Standard:

Απαιτείται η χρήση μιας από τις παρακάτω μεταξύ τους αποκλειόμενες εντολές:

DIAGNOSTICS. Τίθεται DIAGNOSTICS=YES (προεπιλεγμένη τιμή) για να επισημανθεί ότι λεπτομερείς διαγνωστικές πληροφορίες πρέπει να γραφτούν στο αρχείο αποτελεσμάτων (ODB αρχείο) που δημιουργείται από το πρόγραμμα. Εάν οριστεί DIAGNOSTICS=NO, τότε δε συμβαίνει το παραπάνω.

FIELD. Με την παράμετρο αυτή επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα των μεγεθών που ζητούνται μέσω της εντολής *OUTPUT θα γραφτούν στο αρχείο αποτελεσμάτων εξόδου σε μορφή field-type output.

HISTORY. Με την εντολή αυτή επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα των μεγεθών που ζητούνται μέσω της εντολής *OUTPUT θα γραφτούν στο αρχείο αποτελεσμάτων εξόδου σε μορφή χρονοϊστορίας.

Παράμετροι οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά με την εντολή *OUTPUT:

FREQUENCY. Η παράμετρος ορίζεται ίση με τη συχνότητα εξόδου των αποτελεσμάτων, σε προσαυξήσεις. Τα αποτελέσματα θα γράφονται στο αρχείο ODB στην τελευταία προσαύξηση κάποιου βήματος. Εάν οριστεί FREQUENCY=0, τότε δε θα γραφτούν αποτελέσματα στο αρχείο ODB για το συγκεκριμένο μέγεθος. Αν η παράμετρος παραληφθεί, τότε θα γράφονται αποτελέσματα στο αρχείο ODB για κάθε προσαύξηση της ανάλυσης για όλους τους τύπους, πλην των *DYNAMIC και *MODAL DYNAMIC, κατά τις οποίες αποτελέσματα θα γράφονται κάθε 10 προσαυξήσεις.

Οι παράμετροι FREQUENCY, NUMBER INTERVAL, TIME INTERVAL, και TIME POINTS είναι μεταξύ τους αποκλειόμενες.

NAME. Η παράμετρος ορίζεται ίση με το όνομα που σχετίζεται με τον ορισμό του συγκεκριμένου output.

NUMBER INTERVAL. Η παράμετρος ορίζεται ίση με τον αριθμό των χρονικών διαστημάτων (intervals) κατά τη διάρκεια του βήματος κατά το οποίο το ODB γράφεται. Εάν η παράμετρος αυτή καθώς και οι FREQUENCY, TIME INTERVAL, και TIME POINTS παραλειφθούν, τότε αποτελέσματα γράφονται στο ODB σε κάθε χρονική προσαύξηση της ανάλυσης για όλους τους τύπους διαδικασιών, πλην των *DYNAMIC και *MODAL DYNAMIC, κατά τις οποίες αποτελέσματα γράφονται ανά 10 προσαυξήσεις (increments).

TIME MARKS

TIME MARKS=YES (προεπιλεγμένη τιμή), για να γράφονται τα αποτελέσματα στους ακριβείς χρόνους που ορίζονται από τις παραμέτρους NUMBER INTERVAL, TIME INTERVAL, ή TIME POINTS.

TIME MARKS=NO, για να γράφονται τα αποτελέσματα στο ODB στην προσαύξηση αμέσως μετά τους χρόνους που ορίζονται από τις παραμέτρους NUMBER INTERVAL, TIME INTERVAL, ή TIME POINTS.

TIME POINTS

Η παρακάτω παράμετρος είναι προαιρετική και έγκυρη μόνο αν χρησιμοποιείται η παράμετρος FIELD ή HISTORY:

VARIABLE.

VARIABLE=ALL, για να επισημανθεί ότι όλες οι μεταβλητές που ορίζονται στη συγκεκριμένη διαδικασία και στον τύπο του υλικού πρέπει να γραφτούν στο αρχείο ODB.

VARIABLE=PRESELECT, για να επισημανθεί ότι οι προεπιλεγμένες μεταβλητές εξόδου για το συγκεκριμένο τύπο διαδικασίας πρέπει να γραφτούν στο ODB. Εάν ο χρήστης επιθυμεί να λάβει παραπάνω αποτελέσματα, τότε αυτά μπορεί να οριστούν με τις επιλογές αποτελεσμάτων εξόδου που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την εντολή *OUTPUT. Εάν αυτή η παράμετρος παραληφθεί, μόνο οι μεταβλητές που έχουν ζητηθεί μέσω των μεμονωμένων επιλογών output θα γραφτούν στο αρχείο ODB.

Η συμπεριφορά των μεταβλητών που συμπεριλαμβάνονται στην επιλογή VARIABLE=ALL ή την VARIABLE=PRESELECT, δεν μπορούν να ελεγχθούν από τις

παραμέτρους ή τις γραμμές δεδομένων των μεμονωμένων επιλογών output. Για να λάβει ο χρήστης τα επιθυμητά αποτελέσματα από μια συγκεκριμένη μεταβλητή μέσω μιας μεμονωμένης επιλογής output, η συγκεκριμένη μεταβλητή πρέπει να συγκαταλέγεται στη λίστα των μεταβλητών που έχουν οριστεί στις μεμονωμένες εντολές output.

6.2.8 Λοιπές εντολές

6.2.8.1 *MPC

Με αυτή την εντολή επιβάλλονται δεσμεύσεις μεταξύ διαφορετικών βαθμών ελευθερίας στο μοντέλο ορίζονται τα multi-point constraints. Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus Explicit και στο Abaqus/CAE.

Γραμμές δεδομένων για τον προσδιορισμό των multi-point constraints:

- Πρώτη γραμμή:
 1. Τύπος MPC σύμφωνα με το “General multi-point constraints,” Section 31.2.2 του Abaqus Analysis User's Manual.
 2. Αριθμοί κόμβων ή σεντ κόμβων που συσχετίζονται με τη δέσμευση.

Οι πρώτοι 15 κόμβοι ή σεντ κόμβων ενός MPC πρέπει να εισάγονται στην πρώτη γραμμή. Αν το MPC περιέχει πάνω από 15 κόμβους, ο χρήστης πρέπει να πληκτρολογήσει 0 στην επόμενη γραμμή για να υποδείξει ότι είναι συνέχεια της προηγούμενης γραμμής και στη συνέχεια να συνεχίζει να εισάγει τους υπόλοιπους κόμβους στη γραμμή. Δεν υπάρχει περιορισμός στις γραμμές. Ακριβώς 15 κόμβοι ή σεντ κόμβων πρέπει να δίνονται σε κάθε γραμμή, εκτός από την τελευταία.

6.2.8.2 *MASS

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για τον ορισμό των τιμών συγκεντρωμένης μάζας που έχει να κάνει με τα στοιχεία μάζας (MASS elements). Είναι διαθέσιμη στο Abaqus/Standard, στο Abaqus/Explicit και στο Abaqus/CAE.

Απαραίτητη είναι η χρήση της παρακάτω εντολής:

ELSET. Η παράμετρος αυτή πρέπει να τίθεται ίση με το όνομα του σεντ στοιχείων που περιέχουν στοιχεία μάζας (MASS elements), για τα οποία δίνεται η τιμή.

Προαιρετικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εντολές:

ALPHA

COMPOSITE

Γραμμές δεδομένων για τον ορισμό του μεγέθους μάζας:

- Πρώτη γραμμή (και μοναδική):
 1. Μέγεθος μάζας. Πρέπει να ορίζεται μάζα και όχι βάρος σε αυτό το πεδίο.

Το πρόγραμμα δε χρησιμοποιεί συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης, οπότε ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τις κατάλληλες τιμές ώστε να υπάρχει συνέπεια.

6.3 Παράρτημα 3 – Αρχεία εισόδου των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας

6.3.1 Input file Προσομοίωσης Π1

```
*NODE
      1,          11.,          0.
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_PANW_3_0
      169,      227,      229
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_KATW
      149,      206,      207
[....]
*ELEMENT, TYPE=CPS4 , ELSET=TOIXWMA
      1,      426,      425,      101,      611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS
      1897,      101,      611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS
      2457,      1,      1703
[....]
*NSET, NSET=CLAMPED
      206, 305, 5, 537, 4, 1025, 1138, 1251, 3,
1364, 1477, 1590, 2, 1703, 1
*NSET, NSET=DISTRIBUTED_FORCE
      75, 640, 645
**
** -----
** CROSS SECTIONS
**
```

```

** DOKOI
*BEAM SECTION, ELSET=DOKOI, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
    0.25,    0.6,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** STYLOI_PANW_3
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_PANW_3_0, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
    0.4,    0.4,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** STYLOI_KATW
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_KATW, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
    0.5,    0.5,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** TOIXWMA
*SOLID SECTION, ELSET=TOIXWMA, MATERIAL=DP
0.25
**
** OPLISMOS_DIAMHKHS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
    0.022,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** OPLISMOS_EGKARSIOS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
    0.01,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** -----
** MULTI-POINT CONSTRAINTS
**
** MPC_ID=1
*MPC
BEAM ,    101,    611
**
** MPC_ID=2
*MPC
BEAM ,    41,    671
BEAM,    671,    666
**
** MPC_ID=3
*MPC
BEAM ,    106,    736
BEAM,    736,    741
**
** MPC_ID=4
*MPC
BEAM ,    141,    806
BEAM,    806,    811

```

```

**
** MPC_ID=5
**MPC
BEAM ,      40,      876
BEAM,      876,      881
**
** -----
** MATERIALS
**
** LINEAR_ELASTIC
**MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC
**ELASTIC, TYPE=ISO
      29.E+6,      0.3
**DENSITY
2.5,
**
** STEEL
**MATERIAL, NAME=STEEL
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
      2.E+8,      0.3
**PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
      500000.,      0.
      500000.3,      0.01
**DENSITY
7.85,
**
** DAMAGED PLASTICITY
**MATERIAL, NAME=DP
**CONCRETE DAMAGED PLASTICITY
53.3
**CONCRETE COMPRESSION HARDENING
      5265.99,      0.0
      17140.47,      0.0004919
      19656.10,      0.0010622
      20000.03,      0.0015293
      19116.45,      0.0026958
      17749.51,      0.0038259
      17394.99,      0.0041192
**CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE=STRAIN
      2200.00,      0.0
      22.00,      0.001232
**CONCRETE TENSION DAMAGE, TYPE=STRAIN
      0. ,0.
      0.99177 ,0.001232
**ELASTIC
      29.E+6, 0.30
**DENSITY
      2.5,
**
** -----
** BOUNDARY CONDITIONS
** CLAMPED
**BOUNDARY
CLAMPED, 1,,      0.

```

```

CLAMPED, 2,, 0.
CLAMPED, 3,, 0.
CLAMPED, 4,, 0.
CLAMPED, 5,, 0.
CLAMPED, 6,, 0.
**
** -----
** ΦΟΡΤΙΣΗ
**
** AMPLITUDE, NAME=FORCE4, DEFINITION=TABULAR
**          0., 0., 0.01, 2000.,
0.02, 0., 1., 0.,
**          2.5, 0.
** STEP, INC=70000, NLGEOM=YES
** DYNAMIC
**          0.00001, 2.5, 0.0000000000000001
** CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
**          ,,,,,,8,
**
** CLOAD, AMPLITUDE=FORCE4
DISTRIBUTED_FORCE, 1, -1.
**
** -----
** OUTPUT REQUESTS
**
** NODE PRINT, FREQ=1
U,
RF,
CF,
**
** EL PRINT, POS=INTEG, FREQ=1
S,
E,
SP,
EP,
SF,
**
** EL PRINT, POS=NODES, FREQ=0
**
** EL PRINT, POS=CENTR, FREQ=0
**
** EL PRINT, POS=AVERAGE, FREQ=0
**
** ENERGY PRINT, FREQ=0
**
** PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
** OUTPUT, FIELD, FREQ=1
** NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS

```

```

**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
S,
E,
SP,
EP,
PEP,
SF,
STATUS,
PE,
PEEQT
**
*OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=1
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=TOIXWMA
S,
SP,
EP,
PEP,
PEEQT,
STATUS
*END STEP

```

6.3.2 Input file Προσομοίωσης Π2

```

*NODE
      1,          11.,          0.
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_PANW_3_0
      169,        227,        229
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_KATW
      149,        206,        207
[....]
*ELEMENT, TYPE=CPS4 , ELSET=TOIXWMA
      1,         426,        425,        101,        611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS
      1897,       101,        611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS
      2457,        1,        1703
[....]
*NSET, NSET=CLAMPED
      206, 305, 5, 537, 4, 1025, 1138, 1251, 3,
1364, 1477, 1590, 2, 1703, 1
*NSET, NSET=DISTRIBUTED_FORCE
      75, 80, 70
**
** -----

```

```

** CROSS SECTIONS
**
** DOKOI
*BEAM SECTION, ELSET=DOKOI, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
      0.25,      0.6,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** STYLOI_PANW_3
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_PANW_3_0, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
      0.4,      0.4,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** STYLOI_KATW
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_KATW, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
      0.5,      0.5,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** TOIXWMA
*SOLID SECTION, ELSET=TOIXWMA, MATERIAL=DP
0.25
**
** OPLISMOS_DIAMHKHS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
      0.022,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** OPLISMOS_EGKARSIOS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
      0.01,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** -----
** MULTI-POINT CONSTRAINTS
**
** MPC_ID=1
*MPC
BEAM ,      101,      611
**
** MPC_ID=2
*MPC
BEAM ,      41,      671
BEAM,      671,      666
**
** MPC_ID=3
*MPC
BEAM ,      106,      736
BEAM,      736,      741
**
** MPC_ID=4
*MPC

```



```

BEAM ,      141,      806
BEAM,       806,      811
**
** MPC_ID=5
**MPC
BEAM ,      40,      876
BEAM,       876,      881
**
** -----
** MATERIALS
**
** LINEAR_ELASTIC
**MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC
**ELASTIC, TYPE=ISO
      29.E+6,      0.3
**DENSITY
2.5,
**
** STEEL
**MATERIAL, NAME=STEEL
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
      2.E+8,      0.3
**PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
      500000.,      0.
      500000.3,      0.01
**DENSITY
7.85,
**
** DAMAGED PLASTICITY
**MATERIAL, NAME=DP
**CONCRETE DAMAGED PLASTICITY
53.3
**CONCRETE COMPRESSION HARDENING
      5265.99,      0.0
      17140.47,      0.0004919
      19656.10,      0.0010622
      20000.03,      0.0015293
      19116.45,      0.0026958
      17749.51,      0.0038259
      17394.99,      0.0041192
**CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE=STRAIN
      2200.00,      0.0
      22.00,      0.001232
**CONCRETE TENSION DAMAGE, TYPE=STRAIN
      0. ,0.
      0.99177 ,0.001232
**ELASTIC
      29.E+6, 0.30
**DENSITY
2.5,
**
** -----
** BOUNDARY CONDITIONS
** CLAMPED

```

```

*BOUNDARY
CLAMPED, 1,, 0.
CLAMPED, 2,, 0.
CLAMPED, 3,, 0.
CLAMPED, 4,, 0.
CLAMPED, 5,, 0.
CLAMPED, 6,, 0.
**
** -----
** ΦΟΡΤΙΣΗ
**
*AMPLITUDE, NAME=FORCE4, DEFINITION=TABULAR
0., 0., 0.01, 2000.,
0.02, 0., 1., 0.,
2.5, 0.
*STEP, INC=70000, NLGEOM=YES
*DYNAMIC
0.00001, 2.5, 0.0000000000000001
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
,,,,,,8,
**
*CLOAD, AMPLITUDE=FORCE4
DISTRIBUTED_FORCE, 1, -1.
**
** -----
** OUTPUT REQUESTS
**
*NODE PRINT, FREQ=1
U,
RF,
CF,
**
*EL PRINT, POS=INTEG, FREQ=1
S,
E,
SP,
EP,
SF,
**
*EL PRINT, POS=NODES, FREQ=0
**
*EL PRINT, POS=CENTR, FREQ=0
**
*EL PRINT, POS=AVERAGE, FREQ=0
**
*ENERGY PRINT, FREQ=0
**
*PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,

```

```

**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
S,
E,
SP,
EP,
PEP,
SF,
STATUS,
PE,
PEEQT
**
*OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=1
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=TOIXWMA
S,
SP,
EP,
PEP,
STATUS
*END STEP

```

6.3.3 Input file Προσομοίωσης Π3

```

*NODE
      1,          11.,          0.
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_PANW_3_0
      169,       227,       229
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_KATW
      149,       206,       207
[....]
*ELEMENT, TYPE=CPS4 , ELSET=TOIXWMA
      1,        426,       425,       101,       611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS
      1897,      101,       611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS
      2457,       1,       1703
[....]
*NSET, NSET=CLAMPED
      206, 305, 5, 537, 4, 1025, 1138, 1251, 3,
1364, 1477, 1590, 2, 1703, 1
*NSET, NSET=DISTRIBUTED_FORCE
      75, 640, 645
**
** -----
** CROSS SECTIONS
**

```

```

** DOKOI
*BEAM SECTION, ELSET=DOKOI, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
    0.25,    0.6,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** STYLOI_PANW_3
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_PANW_3_0, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
    0.4,    0.4,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** STYLOI_KATW
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_KATW, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
    0.5,    0.5,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** TOIXWMA
*SOLID SECTION, ELSET=TOIXWMA, MATERIAL=Dr_Pr
0.25
**
** OPLISMOS_DIAMHKHS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
    0.022,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** OPLISMOS_EGKARSIOS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
    0.01,
    0.0,    0.0,    -1.0
**
** -----
** MULTI-POINT CONSTRAINTS
**
** MPC_ID=1
*MPC
BEAM ,    101,    611
**
** MPC_ID=2
*MPC
BEAM ,    41,    671
BEAM,    671,    666
**
** MPC_ID=3
*MPC
BEAM ,    106,    736
BEAM,    736,    741
**
** MPC_ID=4
*MPC
BEAM ,    141,    806
BEAM,    806,    811

```

```

**
** MPC_ID=5
**MPC
BEAM ,      40,      876
BEAM,      876,      881
**
** -----
** MATERIALS
**
** LINEAR_ELASTIC
**MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC
**ELASTIC, TYPE=ISO
      29.E+6,      0.3
**DENSITY
2.5,
**
** STEEL
**MATERIAL, NAME=STEEL
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
      2.E+8,      0.3
**PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
      500000.,      0.
      500000.3,      0.01
**DENSITY
7.85,
**
** DRUCKER PRAGER
**MATERIAL, NAME=Dr_Pr
**DRUCKER PRAGER
      53.3,      0.8,      53.3
**DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE=COMPRESSION
      20000.,      0.
      20000.,      0.0035
**ELASTIC
29.E+6, 0.30
**DENSITY
2.5,
**
** -----
** BOUNDARY CONDITIONS
** CLAMPED
**BOUNDARY
CLAMPED, 1,,      0.
CLAMPED, 2,,      0.
CLAMPED, 3,,      0.
CLAMPED, 4,,      0.
CLAMPED, 5,,      0.
CLAMPED, 6,,      0.
**
** -----
** ΦΟΡΤΙΣΗ
**
**AMPLITUDE, NAME=FORCE4, DEFINITION=TABULAR

```

```

0.02,      0.,      0.,      0.01,      2000.,
           2.5,      0.,      1.,      0.,
*STEP, INC=70000, NLGEOM=YES
*DYNAMIC
0.00001,      2.5,      0.0000000000000001
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
,,,,,,8,
**
*CLOAD, AMPLITUDE=FORCE4
DISTRIBUTED_FORCE, 1,      -1.
**
** -----
** OUTPUT REQUESTS
**
*NODE PRINT, FREQ=1
U,
RF,
CF,
**
*EL PRINT, POS=INTEG, FREQ=1
S,
E,
SP,
EP,
SF,
**
*EL PRINT, POS=NODES, FREQ=0
**
*EL PRINT, POS=CENTR, FREQ=0
**
*EL PRINT, POS=AVERAGE, FREQ=0
**
*ENERGY PRINT, FREQ=0
**
*PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
S,
E,
SP,
EP,
PEP,
SF,
STATUS,

```

```

PE,
PEEQT
**
*OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=1
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=TOIXWMA
S,
SP,
EP,
PEP,
STATUS
*END STEP

```

6.3.4 Input file Προσομοίωσης Π4

```

*NODE
      1,          11.,          0.
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_PANW_3_0
      169,        227,        229
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=STYLOI_KATW
      149,        206,        207
[....]
*ELEMENT, TYPE=CPS4 , ELSET=TOIXWMA
      1,          426,        425,        101,        611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS
      1897,        101,        611
[....]
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS
      2457,        1,        1703
[....]
*NSET, NSET=CLAMPED
      206, 305, 5, 537, 4, 1025, 1138, 1251, 3,
1364, 1477, 1590, 2, 1703, 1
*NSET, NSET=NSET_KROYSIS_KTIRIOY_A
      75, 645
**
** -----
** CROSS SECTIONS
**
** DOKOI
*BEAM SECTION, ELSET=DOKOI, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
      0.25,        0.6,
      0.0,        0.0,        -1.0
**
** STYLOI_PANW_3
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_PANW_3_0, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
      0.4,        0.4,
      0.0,        0.0,        -1.0
**

```

```

** STYLOI_KATW
*BEAM SECTION, ELSET=STYLOI_KATW, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC, POISSON=0.3
      0.5,      0.5,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** TOIXWMA
*SOLID SECTION, ELSET=TOIXWMA, MATERIAL=DP
0.25
**
** OPLISMOS_DIAMHKHS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_DIAMHKHS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
      0.022,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** OPLISMOS_EGKARSIOS
*BEAM SECTION, ELSET=OPLISMOS_EGKARSIOS, SECTION=CIRC,
MATERIAL=STEEL, POISSON=0.
      0.01,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** PLAKA_KTIRIOY_B
*BEAM SECTION, ELSET=PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET, SECTION=RECT,
MATERIAL=LINEAR_ELASTIC2
      0.25,      0.6,
      0.0,      0.0,      -1.0
**
** -----
** MULTI-POINT CONSTRAINTS
**
** MPC_ID=1
*MPC
BEAM ,      101,      611
**
** MPC_ID=2
*MPC
BEAM ,      41,      671
BEAM,      671,      666
**
** MPC_ID=3
*MPC
BEAM ,      106,      736
BEAM,      736,      741
**
** MPC_ID=4
*MPC
BEAM ,      141,      806
BEAM,      806,      811
**
** MPC_ID=5
*MPC
BEAM ,      40,      876
BEAM,      876,      881
**

```



```

** -----
** MATERIALS
**
** LINEAR_ELASTIC
**MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC
**ELASTIC, TYPE=ISO
      29.E+6,          0.3
**DENSITY
2.5,
**
** LINEAR_ELASTIC2
**MATERIAL, NAME=LINEAR_ELASTIC2
**ELASTIC, TYPE=ISO
      29.E+12,        0.3
**DENSITY
2.5,
**
** STEEL
**MATERIAL, NAME=STEEL
**ELASTIC, TYPE=ISO
      2.E+8,          0.3
**PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
      500000.,        0.
      500000.3,      0.01
**DENSITY
7.85,
**
** DAMAGED PLASTICITY
**MATERIAL, NAME=DP
**CONCRETE DAMAGED PLASTICITY
53.3
**CONCRETE COMPRESSION HARDENING
      5265.99,      0.0
      17140.47,    0.0004919
      19656.10,    0.0010622
      20000.03,    0.0015293
      19116.45,    0.0026958
      17749.51,    0.0038259
      17394.99,    0.0041192
**CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE=STRAIN
      2200.00,      0.0
      22.00,       0.001232
**CONCRETE TENSION DAMAGE, TYPE=STRAIN
0., 0.
0.99177, 0.001232
**ELASTIC
29.E+6, 0.30
**DENSITY
2.5,
** -----
** ΠΛΑΚΑ ΚΤΙΠΙΟΥ Β
**
**NODE
      1704,          11.001,      14.5

```

```

1705,          11.001,          14.625
1706,          11.001,          14.375
*NSET, NSET=RIGID_NSET
1704, 1705, 1706
*ELEMENT, TYPE=B21 , ELSET=PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET
  2697,      1706,      1704
  2698,      1704,      1705
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=MASS_ELSET
2699, 1705
2700, 1705
2701, 1706
*MASS, ELSET=MASS_ELSET
20
** η συνολική μάζα των 120tn=120000kg μοιράζεται στα 2
** τοιχώματα-προσκρουστήρες.
** Σε κάθε τοίχωμα προσκρούει μάζα 60tn=60000kg, η οποία
** ισοδυναμεί με 60 kN s^2/m=60 tn
**
** -----
** INITIAL CONDITIONS AND BOUNDARY CONDITIONS
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=VELOCITY
1704, 1, -0.60
1705, 1, -0.60
1706, 1, -0.60
**
** BOUNDARY CONDITIONS (CLAMPED)
*BOUNDARY
CLAMPED, 1,,          0.
CLAMPED, 2,,          0.
CLAMPED, 3,,          0.
CLAMPED, 4,,          0.
CLAMPED, 5,,          0.
CLAMPED, 6,,          0.
1704, 2,,0
1704, 6,,0
1705, 2,,0
1705, 6,,0
1706, 2,,0
1706, 6,,0
**
** -----
** SURFACES
*SURFACE, NAME=PLAKA_KTIRIOY_B, TYPE=ELEMENT
PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET, SPOS
**RIGID BODY, REF NODE=754, POSITION=INPUT,
ELSET=PLAKA_KTIRIOY_B_ELSET
**0.25
**
*SURFACE, NAME=PERIOXI_KROYISIS_KTIRIOY_A, TYPE=ELEMENT
132, S1
144, S1
708, S1
720, S1
732, S1

```

```
**
** -----
** CONTACT DEFINITIONS
**
** SURFACE INTERACTION, NAME=EPIFANEIA_KROYSIS
0.25
** CONTACT PAIR, INTERACTION= EPIFANEIA_KROYSIS, TYPE=SURFACE TO
SURFACE
PERIOXI_KROYSIS_KTIRIOY_A , PLAKA_KTIRIOY_B
**
** -----
** STEP, INC=70000
** DYNAMIC
0.00001,          2.5,          0.0000000000000001
**
** -----
**
** OUTPUT REQUESTS
**
** NODE PRINT, FREQ=1
U,
RF,
CF,
**
** EL PRINT, POS=INTEG, FREQ=1
S,
E,
SP,
EP,
SF,
**
** EL PRINT, POS=NODES, FREQ=0
**
** EL PRINT, POS=CENTR, FREQ=0
**
** EL PRINT, POS=AVERAGE, FREQ=0
**
** ENERGY PRINT, FREQ=0
**
** PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
** OUTPUT, FIELD, FREQ=1
** NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
** OUTPUT, FIELD, FREQ=1
** ELEMENT OUTPUT
S,
E,
SP,
```

```
EP,  
PEP,  
SF,  
STATUS,  
PE,  
PEEQT  
**  
*OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=1  
*ELEMENT OUTPUT, ELSET=TOIXWMA  
S,  
SP,  
EP,  
PEP,  
STATUS,  
PE,  
PEEQT  
*END STEP
```