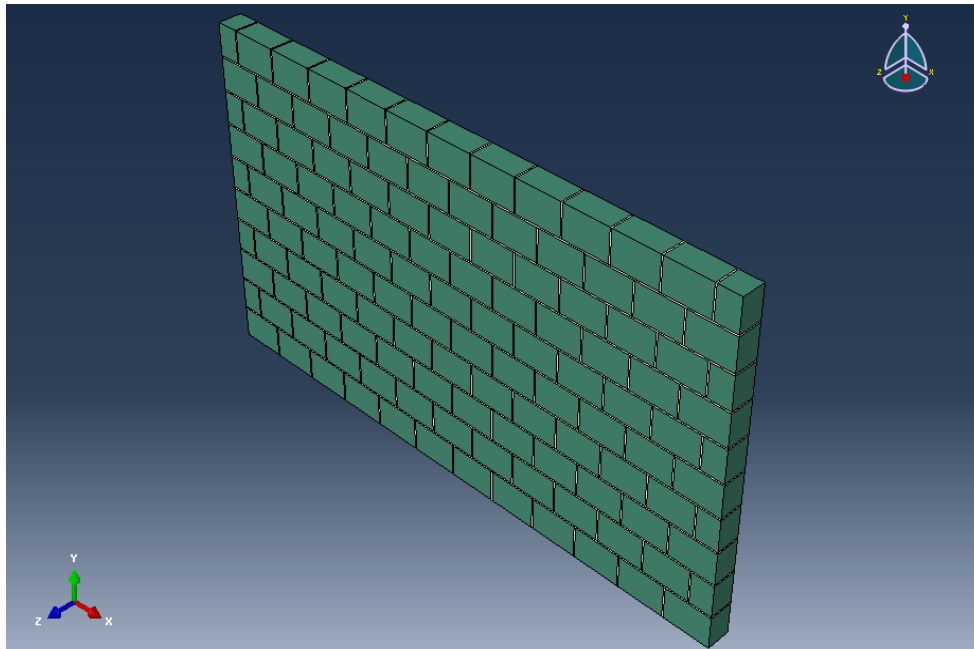




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ "ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ"
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**"ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ"**



ΓΙΑΣΜΙΝ ΣΑΚΙΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΑΚΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.
ΑΘΗΝΑ**

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
ADERS "MSc IN ANALYSIS AND DESIGN
OF EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURES"
DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING
LABORATORY OF EARTHQUAKE ENGINEERING**

POSTGRADUATE THESIS

**"MODELLING OF MASONRY STRUCTURES AT ULTIMATE LIMIT
STATE UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS"**

GIASMIN SAKIB

SUPERVISOR INSTRUCTOR

**CONSTANTINE SPYRAKOS
PROFESSOR N.T.U.A
ATHENS**

OCTOBER 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της λήψης του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, στην κατεύθυνση του Αντισεισμικού Σχεδιασμού Κατασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση διαφόρων μεθόδων προσομοίωσης κατασκευών από τοιχοποιία και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

Επιβλέπων της εργασίας διατέλεσε ο Καθηγητής και διευθυντής του Εργαστηρίου Αντισεισμικών Κατασκευών κύριος Κωνσταντίνος Σπυράκος τον οποίο και θα ήθελα να ευχαριστήσω για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέρον θέματος. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Χαρίλαο Μανιατάκη τόσο για την επιστημονική του καθοδήγησή, όσο και για τις διδακτικές του συμβουλές και την έμπρακτη βοήθειά του στη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν διάφοροι τρόποι προσομοίωσης της τοιχοποιίας. Σκοπός της εργασίας είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την επιτυχή προσομοίωση της τοιχοποιίας σε οριακή κατάσταση αστοχίας υπό στατικά και δυναμικά φορτία. Αναλύονται οι διάφοροι μέθοδοι προσομοίωσης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η Εκτεταμένη Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων (Extended Finite Element Method XFEM) που υπάρχει στο Abaqus. Η μέθοδος XFEM είναι μία αριθμητική μέθοδος που ενισχύει την κλασική μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων εμπλουτίζοντας το χώρο των λύσεων με ασυνεχείς συναρτήσεις για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Διευκολύνει την επίλυση προβλημάτων με τοπικά χαρακτηριστικά, που δεν μπορούν εύκολα να λυθούν με τεχνικές βελτίωσης του δικτύου.

Η προσομοίωση και μελέτη των ρωγμών ήταν από τις πρώτες εφαρμογές που μελετήθηκαν με αυτή τη μέθοδο. Στη βασική της διατύπωση οι ασυνεχείς συναρτήσεις σχήματος προστίθενται στις κλασικές πολυωνυμικές συναρτήσεις για τα στοιχεία τα οποία διασταυρώνονται με τη ρωγμή για να συμπεριλάβουν τις μετακινήσεις του ανοίγματος. Με αυτό το τρόπο το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων παραμένει αμετάβλητο και δεν χρειάζεται να ανανεωθεί για να ακολουθήσει τη διάδοση της ρωγμής. Η μέθοδος αυτή, όπως περιγράφεται εκτενέστερα στην εργασία, έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μοντέλα ενός συνεχούς υλικού. Στην περίπτωση της μικρο-προσομοίωσης της τοιχοποιίας όμως δεν κατάφερε να παρακολουθήσει το άνοιγμα των πολλών ρωγμών που συμβαίνουν ταυτόχρονα.

Το δεύτερο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε και που μας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας ήταν το απλοποιημένο μικρο-προσομοίωμα. Το προσομοίωμα αφορά σε ένα δοκίμιο τοιχοποιίας από οπτόπλινθους και κονίαμα και πρόκειται να υποβληθεί σε στατική δοκιμή θλίψης στο εργαστήριο αντισεισμικών κατασκευών του Ε.Μ.Π. σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο EN 1052-1. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το

καταστατικό προσομοίωμα συνεχούς υλικού με βλάβες (concrete damaged plasticity) του Abaqus το οποίο θεωρείται κατάλληλο για προσομοίωση ψαθυρών υλικών όπως είναι η τοιχοποιία. Επίσης για να προσομοιωθούν οι ιδιότητες του αρμού χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής βασισμένα στην επιφάνεια (surface-based contact elements). Τα στοιχεία αυτά έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην τελική προσομοίωση αφού αντιπροσωπεύουν τις ανελαστικές ιδιότητες του αρμού της τοιχοποιίας και είναι αυτά που συνδέουν τους λίθους μεταξύ τους.

Οι πλίνθοι προσομοιώθηκαν με τρισδιάστατα γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία 8 κόμβων (C3DR8). Για τα στοιχεία επαφής χρησιμοποιήθηκε ο τύπος Γενικής επαφής (General Contact). Η ανάλυση έγινε με τη μέθοδο της ρητής ολοκλήρωσης (Explicit Dynamic Analysis). Η δυναμική μέθοδος ρητής ολοκλήρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση στατικών προβλημάτων υπό την προϋπόθεση ότι η κινηματική ενέργεια παραμένει μικρή συγκρινόμενη με την εσωτερική ενέργεια του συστήματος κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Η τελευταία προσομοίωση αφορά ένα δοκίμιο τοιχοποιίας το οποίο πρόκειται να υποβληθεί σε σεισμικές διεγέρσεις με άκαμπτη σύνδεση στη βάση και χωρίς την παρουσία σεισμικής μόνωσης στη σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου αντισεισμικής τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Το δοκίμιο αυτό αποτελείται από τριστρωτη φέρουσα τοιχοποιία με κονίαμα οι εξωτερικές στρώσεις του οποίου είναι από λαξευμένα πωρολιθικά λιθοσώματα. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν η μέθοδος της μακρο-προσομοίωσης. Η τοιχοποιία θεωρήθηκε ως ομοιογενές υλικό και προσομοιώθηκε με το concrete damaged plasticity μοντέλο του Abaqus. Οι αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιώντας τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της τοιχοποιίας στο τελευταίο μοντέλο ήταν τα τρισδιάστατα εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία 8 κόμβων (C3DR8) και τα τρισδιάστατα τροποποιημένα τετράεδρα στοιχεία 10 κόμβων (C3D10M). Μετά τη διεξαγωγή των αναλύσεων γίνεται και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων

που χρησιμοποιήθηκαν. Η μέθοδος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος της ρητής ολοκλήρωσης (Explicit Dynamic Analysis).

ABSTRACT

In this Master's thesis several methods of modeling for unreinforced masonry have been applied and assessed regarding their applicability. The main scope of this research is the development of a successful model for the analysis of unreinforced masonry structures subjected to static and dynamic loads. Different methods of modeling available in literature where applies. The advantages and disadvantages of different methods are also assessed. The Abaqus Software is used to perform the analyses included in this thesis.

The extended finite element method (XFEM) that is available in Abaqus initially used. XFEM was developed to ease difficulties in solving problems with localized features that are not efficiently resolved by mesh refinement. One of the initial applications was the modelling of fractures in a material. In this original implementation, discontinuous basis functions are added to standard polynomial basis functions for nodes that belonged to elements that are intersected by a crack to provide a basis that included crack opening displacements. A key advantage of XFEM is that in such problems the finite element mesh does not need to be updated to track the crack path.

Subsequent research has illustrated the more general use of the method for problems involving singularities, material interfaces, regular meshing of micro structural features such as voids, and other problems where a localized feature can be described by an appropriate set of basis functions. This method, as extensively described in this thesis, has given satisfactory results for continuum models with one material. In the case of masonry didn't manage to successfully observe the opening of many cracks that simultaneously occurred and the analyses wasn't completed.

The next method was followed gave us satisfactory results for the behavior of masonry. The simplified micro modeling that has been used next concerned a masonry wall that is consisted of from bricks and mortar that will be submitted to

static compression tests at laboratory for earthquake engineering at N.T.U.A. according to the international pattern EN 1052-1. In this case the mortar joints and brick masonry units were smeared into one homogeneous material using concrete damaged plasticity model which is available in Abaqus and suitable for brittle materials like masonry. Also in order to simulate the properties of the joints surface-based contact elements have been used. The definition of these elements contributed to the final simulation of masonry as they represent the non linear properties of mortar joints and the bond between the units.

The last simulation regards two three leaf masonry walls, with rigid connection at base, that it is about to be submitted to seismic loadings at the earthquake simulator of laboratory for earthquake engineering at N.T.U.A. The walls are consisted of carved limestone blocks and mortar. The macro-modeling procedure was followed in this simulation. The masonry considered as a homogeneous material using the concrete damaged plasticity model of Abaqus. Time history analysis was conducted using artificial accelerograms according to EC8.

The finite elements that were used in order to model the three leaf masonry walls were the 8-node linear cubic shaped 3D brick elements (C3D8R) and the 10-node modified quadratic tetrahedron (C3D10M). After the conduct of the analyses a comparison of the results is made between the two different types of finite elements we have used for the simulation. The type of analysis we used is the Explicit Dynamic Analysis.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ	13
1.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.....	14
1.1.1 ΜΙΚΡΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ (Detailed Analysis).....	15
1.1.2 ΜΕΣΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ (Semi-Detailed Analysis)	15
1.1.3 ΜΑΚΡΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ (Global Analysis).....	16
1.2 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ	17
1.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	18
1.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	18
1.4.1 Διατμητική Ολίσθηση.....	18
1.4.2 Διατμητική Αστοχία.....	19
1.4.3 Καμπτική Αστοχία.....	19
2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	21
2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	21
2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΩΝ	21
2.3 ΤΥΠΟΙ ΤΟΙΧΩΝ	22
2.4 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ($f_{wc,k}$)	25
2.4.1 Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας	26
2.4.2 Ευρωκώδικας 6 (EC6)	26
2.4.3 Εμπειρική Σχέση για την αντοχή της τοιχοποιίας (Tassios and Chronopoulos, 1986)	28
2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ (f_{vk})	29
2.6 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ (f_{wt}).....	30
2.6.1 Για Οριζόντιο Εφελκυσμό ($\theta = 0^\circ$)	30
2.6.2 Για Κατακόρυφο Εφελκυσμό ($\theta = 90^\circ$)	31
2.6.3 Για Εφελκυσμό υπό τυχαία γωνία.....	31
2.7 ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	32

2.8 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	34
3. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ABAQUS	37
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ABAQUS/CAE	39
3.1.1 Προεπεξεργασία (preprocessing) Abaqus/CAE.....	39
3.1.2 Προσομοίωση - Simulation (Abaqus/Standard ήAbaqus/Explicit).....	39
3.1.3 Μετεπεξεργασία (Postprocessing – Abaqus/CAE)	40
3.2 ΞΕΚΙΝΩΝΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ABAQUS/CAE.....	40
3.2.1 Περιγραφή των παραθύρων Abaqus/CAE	40
3.3 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ABAQUS	43
3.3.1 Σύγκριση άμεσων (explicit) και έμμεσων (implicit) μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων	44
3.4 ΠΡΟΤΕΡΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ	46
3.4.1 Δυναμική ανάλυση με ρητή ολοκλήρωση (Dynamic Explicit Analysis).....	46
3.4.2 Όριο ευστάθειας και χρονική διακριτοποίηση της άμεσης μεθόδου	48
3.4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το όριο ευστάθειας.....	49
4. ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (XFEM)	50
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	50
4.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	51
4.2.1 Διέπουσες Εξισώσεις.....	51
4.2.2 Ασθενής μορφή	52
4.3 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ	53
4.4 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	55
4.5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ.....	56
4.5.1 Συναρτήσεις άλματος.....	56
4.5.2 Ασυμπτωτικές συναρτήσεις	57
4.6 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ.....	58
4.7 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΗΤΡΩΟΥ ΔΥΑΣΚΑΜΨΙΑΣ.....	59
4.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΤΟ ABAQUS.....	60
4.9 ΠΟΡΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ XFEM	61
4.9.1 Πρώτο μοντέλο XFEM.....	63
4.9.2 Συμπεράσματα ανάλυσης XFEM.....	66
5. ΥΛΙΚΟ DAMAGED PLASTICITY	67
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	67
5.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ.....	68

5.2.1 Γενικά.....	68
5.2.2 Συμπεριφορά υπό μονοαξονικό εφελκυσμό και μονοαξονική θλίψη	68
5.2.3 Μονοαξονική κυκλική συμπεριφορά.....	70
5.2.4 Πολυαξονική συμπεριφορά	72
5.3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ (tension stiffening)	72
5.3.1 Γενικά.....	72
5.3.2 Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων μετά την αστοχία	73
5.3.3 Κριτήριο ρηγματώσης ενέργειας θραύσης (Fracture energy cracking criterion) ..	75
5.3.4 Εκτέλεση	76
5.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ	77
5.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ.....	78
5.5.1 Βλάβες υπό εφελκυσμό (Tensile damage).....	78
5.5.2 Βλάβες υπό θλίψη (Compressive damage).....	79
5.5.3 Ανάκτηση δυσκαμψίας (Stiffness recovery)	79
5.5.4 Ποσοστό εξάρτησης (Rate dependence).....	80
5.6 ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (CONCRETE PLASTICITY)	80
5.6.1 Γενικά.....	80
5.6.2 Αναλλοίωτες ενεργών τάσεων (Effective stress invariants).....	80
5.6.3 Πλαστική ροή.....	81
5.6.4 Συνάρτηση διαρροής (Yield function)	81
5.6.5 Μη συσχετισμένη ροή.....	83
5.6.6 Ιξωδοπλαστική κανονικοποίησης (Viscoplastic regularization).....	83
5.6.7 Απόσβεση υλικού	84
5.6.8 Οπτικοποίηση των «διευθύνσεων των ρωγμών»	85
5.6.9 Αποτελέσματα εξόδου (Output)	85
6. ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ (CONTACT FORMULATION)	86
6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	86
6.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ.....	87
6.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ.....	87
6.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	88
6.5 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΟ ABAQUS/STANDARD	88
6.5.1 Συμπεριφορά κάθετα στις επιφάνειες (Normal behavior)	89
6.5.2 Ολίσθηση των επιφανειών (sliding of the surfaces)	89

6.5.3 Μοντέλα τριβής (friction models)	90
6.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΟ ABAQUS.....	91
6.6.1 Εντολές ορισμού επιφανειών στο Abaqus.....	92
7. ΔΟΚΙΜΕΣ.....	94
7.1 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ	94
7.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΠΛΗ ΣΤΗΡΙΞΗ.....	96
7.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΘΛΙΨΗΣ	97
7.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΤΑΣΗ.....	98
7.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΟ ΛΙΘΩΝ ΣΕ ΕΠΑΦΗ.....	100
8. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΙΚΡΟ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	101
8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	102
8.1.1 Εντολή *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY	102
8.1.2 Εντολή *CONCRETE TENSION STIFFENING	103
8.1.3 Εντολή *CONCRETE COMPRESSION HARDENING	104
8.1.4 Εντολή *CONCRETE TENSION DAMAGE	105
8.1.5 Εντολή *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE	106
8.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΠΑΦΗΣ	107
8.2.1 Tangential Contact behavior	107
8.2.2 Normal Contact behavior	109
8.2.3 Cohesive Contact behavior.....	109
8.2.4 Cohesion damage	111
8.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ.....	113
8.4 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	113
8.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	114
8.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	118
8.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	121
9. ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.....	122
9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	123
9.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	125
9.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΡΙΣΤΡΩΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	126
9.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑΣ.....	130
9.4.1 Σεισμικό Φάσμα Σχεδιασμού	131
9.4.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης	133
9.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ	134

9.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑΣ.....	137
9.6.1 Σύγκριση των δύο διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων.....	138
9.6.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων Χρονοϊστορίας Σεισμικού Προσομοιώματος Τοιχοποιίας.....	143
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	153
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	154
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ..	159

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα	Σελίδα
1.1: Προσομοιώματα.....	13
1.2: Διαδικασία επιλογής μεθόδου προσομοίωσης.....	17
2.1: Εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της γωνίας θ	32
2.2: Αδιαστατοποιημένη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων τοιχοποιίας σε θλίψη.....	32
2.3: Γενική μορφή διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για τοιχοποιία κατά EC6.....	33
2.4: Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για το σχεδιασμό κατασκευών από τοιχοποιία.....	33
2.5: Καμπτική θραύση τοιχοποιίας.....	35
4.1: Ρηγματωμένο στερεό σώμα.....	52
4.2: Αναπαράσταση της συνάρτησης άλματος.....	56
4.3: Αναπαράσταση ασυμπτωτικών συναρτήσεων εμπλουτισμού.....	58
4.4: Πραγματοποίηση εμπλουτισμού σε ένα δισδιάστατο κάρναβο.....	59
5.1: Απόκριση του σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση υπό εφελκυσμό.....	68
5.2: Απόκριση του σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση υπό θλίψη.....	69
5.3: Απεικόνιση της επίδρασης της παραμέτρου w_c	71
5.4: Απεικόνιση του ορισμού της παραμόρφωσης ρηγματώσεως $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$, η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό των δεδομένων του tension stiffening.....	73
5.5: Καμπύλη τάσεων μετατοπίσεων μετά την αστοχία.....	75

5.6: Καμπύλη τάσης-ενέργειας θραύσης μετά την αστοχία.....	76
5.7: Ορισμός της θλιπτικής ανελαστικής (ή crushing) παραμόρφωσης, $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$, που χρησιμοποιείται για τον ορισμό της κράτυνσης υπό θλίψη (compression hardening data..	77
5.8: Μονοαξονικός κύκλος φόρτισης (εφελκυσμός-θλίψη-εφελκυσμός) θεωρώντας τις προεπιλεγμένες τιμές για τους παράγοντες ανάκτησης δυσκαμψίας: $w_t = 0$ και $w_c = 1$...	79
5.9: Επιφάνειες διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο (deviatoric plane), που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές του K_c	82
5.10: Επιφάνεια διαρροής σε επίπεδη ένταση (Yield surface in plane stress).....	83
6.1: Πίεση επαφής- Διάκενο Σχέση για "σκληρή" επαφή (hard contact).....	89
6.2: Συμπεριφορά τριβής.....	90
8.1: Καμπύλη σ_t - ε^{ck} υλικού τοιχοποιίας προσομοιώματος.....	103
8.2: Καμπύλη σ_c - ε_c^{in} υλικού τοιχοποιίας προσομοιώματος μετά την διαρροή.....	104
8.3: Τυπική απόκριση έλξης-αποκόλλησης (traction-separation)σε ένα μοντέλο συνοχής.	111
8.4: Δοκιμή θλίψης σε τοιχοποιία μίας στρώσης: δοκίμιο 8.1.C – T1M5 – 1.....	117
8.5: Διάγραμμα σ - ε σε ένα σημείο.....	120
8.6: Διάγραμμα Δύναμη-μετατόπισης σε ένα σημείο.....	121
9.1: Δοκίμιο τρίστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 11 – στάθμη +2.31: (α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.....	125
9.2: Επίδραση αντοχής κονιάματος στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μονόστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς και κονίαμα γενικής εφαρμογής – EK6.....	126
9.3: Επίδραση αντοχής κονιάματος στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μονόστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς [Tassios & Chronopoulos 1986].....	127
9.4: Επίδραση αντοχής κονιάματος στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μονόστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς [Tassios 2010].....	127
9.5: Επίδραση αντοχής κονιάματος ενδιάμεσης στρώσης στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή τρίστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς [Tassios 2004].....	129

9.6: Οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.....	131
9.7: Κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού.....	131
9.8: Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.....	132
9.9: Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με το κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού.....	133
9.10: Συμπεριφορά σε θλίψη τοιχοποιίας.....	135
9.11: Συμπεριφορά σε εφελκυσμό τοιχοποιίας.....	135
9.12: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή ανάμεσα στα δυο προσομοιώματα (Διεύθυνση x).....	144
9.13: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή ανάμεσα στα δυο προσομοιώματα (Διεύθυνση z)	147
9.14: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις.....	149
9.15: Σύγκριση χρονοϊστορίας επιτάχυνσης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις.....	149
9.16: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις.....	151
9.17: Σύγκριση χρονοϊστορίας επιτάχυνσης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις.....	151

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας	Σελίδα
2.1: Γεωμετρικές απαιτήσεις για την ομαδοποίηση των λιθοσωμάτων ((Πίν.3.1, Eurocode 6, 2005).....	23
2.2: Τιμές του συντελεστή K για τοιχοποιίες με κονίαμα γενικής εφαρμογής, λεπτής στρώσεως και ελαφροκονίαμα (Πίν.3.3, Eurocode 6, 2005).....	27
2.3: Τιμές της αρχικής αντοχής σε διαρροή της τοιχοποιίας f_{vko} (Πίνακας 3.4 Eurocode 6, 2005).....	29

2.4: Τιμές καμπτικής αντοχής για επίπεδο αστοχίας παράλληλα στους αρμούς.....	36
2.5: Τιμές καμπτικής αντοχής για επίπεδο αστοχίας κάθετα στους αρμούς.....	36
3.1: Τετραγωνική ταχύτητα σύγκλισης.....	45
8.1: Μηχανικές ιδιότητες τοιχοποιίας.....	102
8.2: Ιδιότητες υλικού μετά τη θραύση.....	102
8.3: Ιδιότητες σκλήρυνσης υλικού υπό θλίψη.....	104
8.4: Τιμές βλάβης της δυσκαμψίας σε θλίψη και εφελκυσμό (Concrete compression damage-Concrete tension damage).....	106
8.5: Ορισμός Συντελεστών δυσκαμψίας στην επαφή.....	109
8.6: Γενικές Επιλογές Ανάλυσης (Element Type).....	114
8.7: Χαρακτηριστικά οπτόπλινθων.....	115
8.8: Μηχανικά χαρακτηριστικά κονιάματος M5.....	116

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα	Σελίδα
1.1: Στρατηγικές προσομοίωσης: (a) micro modeling, (b)simplified micro-modeling and (c) macro-modeling.....	14
1.2: Τμήμα Τοιχοποιίας σε θλιπτική καταπόνηση και τμήμα συστήματος για λεπτομερή ανάλυση.....	15
1.3: Παραδείγματα Μέσο-ανάλυσης.....	16
1.4: Τυπικό παράδειγμα σύγχρονης τοιχοποιίας.....	17
1.5: Διάφοροι τύποι τοιχοποιίας (από Ε. Βιντζηλαίου-"Σημειώσεις διάλεξης στην Ανώτερη Μηχανική της τοιχοποιίας").....	18
1.6: Συνήθης μορφή αστοχίας διατμητικής ολίσθησης.....	19

1.7: Συνήθης μορφή διατμητικής αστοχίας.....	19
1.8: Συνήθης μορφή καμπτικής αστοχίας.....	20
1.9: Μηχανισμοί αστοχίας για εκτός επιπέδου οριζόντια φόρτιση.....	20
1.10: Μηχανισμοί αστοχίας τοιχοποιίας: (a) αποκόλληση του αρμού, (b) ολίσθηση αρμού, (c) θραύση λιθοσώματος και αρμού, (d) σύνθλιψη, (e) διαγώνια ρηγμάτωση.....	21
3.1: Βήματα Ανάλυσης στο Abaqus.....	39
3.2: Model Tree Abaqus.....	41
3.3: Δομή του εμπορικού πακέτου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία Abaqus.....	43
4.1: Παραδείγματα μοντελοποίησης ρωγμών στο Abaqus με τη μέθοδο XFEM.....	51
4.2: Ορισμός συναρτήσεων επιπέδων καθώς και του πολικού συστήματος συντεταγμένων.....	54
4.3: Απεικόνιση κατακρύφρων και επαπτόμενων συντεταγμένων για μια λεία ρωγμή.....	57
4.4: Ορισμός τιμών αντοχής υλικού (MaxDamage).....	62
4.5: Ορισμός ενέργειας θραύσης υλικού.....	62
4.6: Ορισμός περιοχών που μπορούν να σχηματιστούν ρωγμές.....	63
4.7: Γεωμετρία τοίχου που προσομοιώθηκε με την XFEM (διαστάσεις σε mm).....	63
4.8: Μηχανικές ιδιότητες προσομοιώματος XFEM.....	63
4.9: Επιβολή Φορτίων.....	64
4.10: Άνοιγμα ρωγμών.....	64
4.11: Ταυτόχρονο άνοιγμα πολλών ρωγμών (προτελευταίο βήμα ανάλυσης).....	65
4.12: Τελευταίο βήμα ανάλυσης.....	65
4.13: Εικόνα αστοχίας πειράματος που προσομοιώθηκε.....	66
4.14: Αποτελέσματα XFEM κάμψης δοκού τριών σημείων.....	66
7.1: Προσομοίωση δοκιμής θλίψης.....	94

7.2: Αποτελέσματα damages.....	94
7.3: Αποτελέσματα damaget.....	95
7.4: Αποτελέσματα τάσεων Mises κατά την αστοχία.....	95
7.5: Προσομοίωμα με απλή στήριξη στις δύο πλευρές.....	96
7.6: Προσομοίωμα με απλή στήριξη σε όλες τις πλευρές.....	96
7.7: Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης πρώτου δοκιμίου.....	96
7.8: Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης δεύτερου δοκιμίου.....	97
7.9: Προσομοίωση διαγώνιας θλίψης.....	97
7.10: Αποτελέσματα τάσεων σ_2 κατά την αστοχία.....	97
7.11: Προσομοίωση με οριζόντια και κατακόρυφη φόρτιση.....	98
7.12: Αποτελέσματα βλάβης λόγω θλίψης κατά την αστοχία.....	98
7.13: Αποτελέσματα βλάβης λόγω εφελκυσμού κατά την αστοχία.....	99
7.14: Δύο λίθοι που βρίσκονται σε επαφή.....	99
7.15: Αποτελέσματα damages.....	100
7.16: Αποτελέσματα damaget.....	100
8.1: Ορισμός συμπεριφοράς τριβής της επαφής στο Abaqus.....	108
8.2: Ορισμός ιδιοτήτων Cohesive behavior.....	110
8.3: Απεικόνιση K_{nn} , K_{tt}	110
8.4: Εισαγωγή μέγιστων τιμών πίεσης στο Abaqus.....	112
8.5: Αποτελέσματα damages στην αστοχία δοκιμίου.....	118
8.6: Αποτελέσματα damaget στην αστοχία δοκιμίου.....	118
8.7: Αποτελέσματα τάσεων S22 στην αστοχία δοκιμίου.....	118
8.8: Αποτελέσματα τάσεων Mises στην αστοχία δοκιμίου.....	119

8.9: Αποτελέσματα πλαστικών παραμορφώσεων στην αστοχία δοκιμίου.....	119
8.10: Αποτελέσματα παραμορφώσεων στην αστοχία δοκιμίου.....	119
8.11: Αποτελέσματα τάσεων στις επαφές στην αστοχία δοκιμίου.....	120
9.1: Απεικόνιση τρίστρωτης τοιχοποιίας από ημιλαξευτούς λίθους σε τομή, όψη και αξονομετρικό.....	123
9.2: Τάσεις και παραμορφώσεις των εξωτερικών στρώσεων και του υλικού πληρώσεως σε μια τρίστρωτη τοιχοποιία που υποβάλλεται σε θλίψη.....	124
9.3: Ελαστικές Ιδιότητες χάλυβα και ξύλου.....	134
9.4: Ελαστικές ιδιότητες τοιχοποιίας.....	134
9.5: Τελική προσομοίωση σεισμικού δοκιμίου στο Abaqus.....	136
9.6: Επιβολή σεισμικού φορτίου κατά χ.....	136
9.7: Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία: (α) Εξάεδρα 8 κόμβων, (β) Τετράεδρα 10 κόμβων.....	137
9.8: Λεπτομερές μικρο-προσομοίωμα τοιχοποιίας.....	138
9.9: Αποτελέσματα τάσεων μικρο-προσομοιώματος.....	138
9.10: Αποτελέσματα βλάβης Damages μικρο-προσομοιώματος.....	139
9.11: Αποτελέσματα βλάβης Damaget μικρο-προσομοιώματος.....	139
9.12: Προσομοίωση μακρο-προσομοιώματος.....	140
9.13: Αποτελέσματα damages μακρο-προσομοιώματος (C3DR8).....	140
9.14: Αποτελέσματα damaget μακρο-προσομοιώματος (C3DR8).....	141
9.15: Αποτελέσματα damages μακρο-προσομοιώματος (C3D10M).....	141
9.16: Αποτελέσματα damaget μακρο-προσομοιώματος (C3D10M).....	142
9.17: (α) Σεισμικό προσομοίωμα στοιχείων (C3DR8), (β) Σεισμικό προσομοίωμα στοιχείων (C3D10M).....	142
9.18: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	143

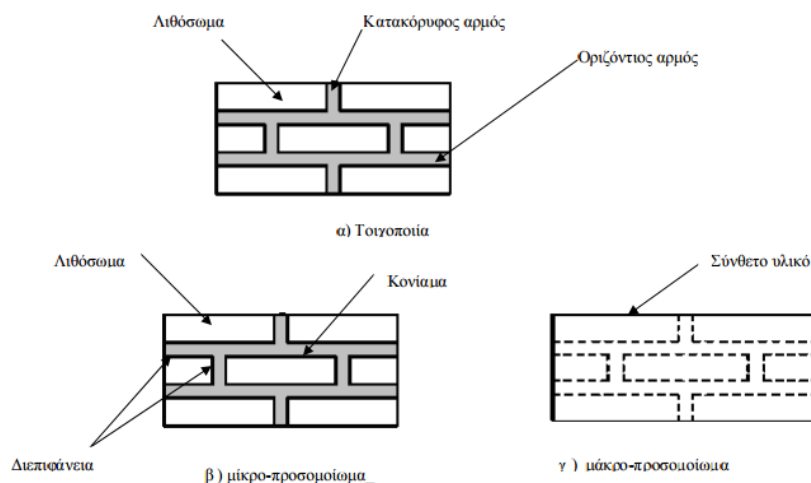
9.19: Αποτελέσματα μέγιστης μετατόπισης κατά x προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	143
9.20: Αποτελέσματα μέγιστης damaget προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	143
9.21: Αποτελέσματα damages προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	144
9.22: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	145
9.23: Αποτελέσματα μέγιστης μετατόπισης κατά z προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	145
9.24: Αποτελέσματα damages προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	146
9.25: Αποτελέσματα damaget προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M.....	146
9.26: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g.....	147
9.27: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω θλίψης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g.....	148
9.28: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω εφελκυσμού στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g.....	148
9.29: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g.....	151
9.30: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω εφελκυσμού στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g.....	151
9.31: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω θλίψης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g.....	151

1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Μια πρώτη προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας έγινε κατά τα τέλη της δεκαετίας του 70. Τα προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν στηρίζονται στα αντίστοιχα προσομοιώματα περιγραφής της συμπεριφοράς του σκυροδέματος άοπλου ή οπλισμένου. Μέχρι και σήμερα όλες οι προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης της τοιχοποιίας ακολουθούν την εξέλιξη των προσομοιωμάτων των ψαθυρών υλικών και κυρίως αυτών που αφορούν το σκυρόδεμα λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις ιδιαιτερότητες της τοιχοποιίας. Για την προσομοίωση ενός ρηγματωμένου μέσου υπάρχουν δυο μέθοδοι (για τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία):

α) η μέθοδος των διακριτών ρωγμών, όπου οι ρωγμές αποτελούν μια γεωμετρική ασυνέχεια και

β) η μέθοδος των κατανεμημένων ρωγμών όπου κάθε ρωγμή αποτελείται από πολλές μικροασυνέχειες οι οποίες διαχέονται σε μια ζώνη (το υλικό θεωρείται ως συνεχές μέσο). Οι δύο αυτές μέθοδοι οδηγούν στην μικρο-προσομοίωση και στην μάκρο-προσομοίωση αντίστοιχα.



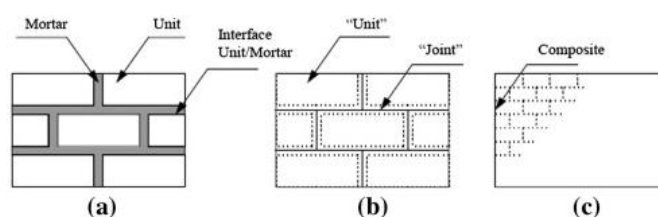
Σχήμα 1.1: Προσομοιώματα

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1 β κάθε επιμέρους υλικό της τοιχοποιίας (λιθόσωμα, αρμός κονιάματος, διεπιφάνεια αρμού-λιθοσώματος) περιγράφεται με διαφορετικό πεπερασμένο στοιχείο. Οι διεπιφάνειες λιθοσώματος-αρμού, θέσεις όπου σχηματίζονται οι ρωγμές, περιγράφονται με στοιχεία επαφής, ενώ τα λιθοσώματα και οι αρμοί κονιάματος περιγράφονται με συνεχή στοιχεία παραμορφώσιμα ή μη. Συχνά για υπολογιστικούς λόγους, το μικρο-προσομοίωμα απλοποιείται, με τη συμπεριφορά του αρμού και της διεπιφάνειας λιθοσώματος – αρμού να περιγράφονται από το ίδιο στοιχείο. Η μέθοδος των διακριτών ρωγμών επιτρέπει τη φυσική προσομοίωση κάθε ρωγμής και είναι κατάλληλη για την περιγραφή τοπικών φαινομένων. Βασική αδυναμία της μεθόδου, στην οποία οφείλεται και το μικρο-προσομοίωμα, είναι ότι η θέση των ρωγμών πρέπει να είναι γνωστή από την αρχή της ανάλυσης και η μορφή της να είναι τέτοια, ώστε να ακολουθεί το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο του εξεταζόμενου φορέα. Με τη

δεύτερη μέθοδο των κατανεμημένων ρωγμών η τοιχοποιία Σχήμα 1.1 α προσομοιάζεται ως ένα ομογενοποιημένο σύνθετο ισότροπο ή ανισότροπο υλικό, το οποίο περιγράφεται από ένα τύπο πεπερασμένου στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 γ. Η προσομοίωση αυτή ονομάζεται μάκρο-προσομοίωση και η συμπεριφορά της τοιχοποιίας περιγράφεται από ένα υλικό το οποίο προκύπτει εφόσον έχουν ληφθεί υπόψη τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών που τη συνθέτουν, ενώ η εμφάνιση μιας ρωγμής οδηγεί στη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού χωρίς την τροποποίηση του αρχικού δικτύου διακριτοποίησης του εξεταζόμενου φορέα. Οι λόγοι αυτοί καθιστούν τη μέθοδο των κατανεμημένων ρωγμών πολύ δημοφιλή, με αποτέλεσμα να αποτελεί τη βασική μέθοδο ανάλυσης φορέων τοιχοποιίας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιείτε το μάκρο-προσομοίωμα δίνοντας ενιαίες ιδιότητες στο υλικό που περιγράφει τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας.

1.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Η τοιχοποιία ως στοιχείο δόμησης είναι πολύ ιδιαίτερη και η προσομοίωση της απαιτεί μεγάλη προσοχή. Βασικό είναι το γεγονός ότι δεν είναι ένα ομογενές υλικό. Αποτελείται από λίθους και κονίαμα τα οποία παρουσιάζουν ανισότροπα χαρακτηριστικά. Λόγω λοιπόν της μικρογεωμετρίας της η μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη. Κατά την προσομοίωση του φορέα από τοιχοποιία γίνονται κάποιες απλοποιήσεις το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από το πόσο ακριβής θέλουμε να είναι η ανάλυση και από την σπουδαιότητα της κατασκευής. Για το λόγο αυτό υπάρχουν τρία επίπεδα ανάλυσης:

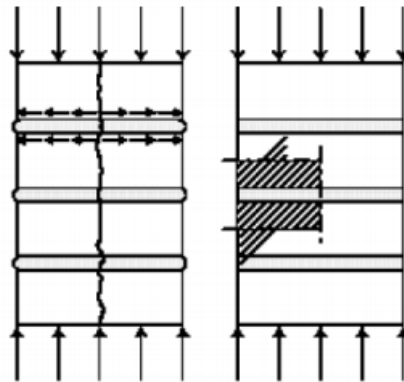


Εικόνα 1.1: Στρατηγικές προσομοίωσης: (a) micro modeling, (b)simplified micro-modeling and (c) macro-modeling

1.1.1 ΜΙΚΡΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ (Detailed Analysis)

Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για μικρά τμήματα του συστήματος λιθοσώματος-αρμού της κατασκευής που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω έντονα ανομοιογενούς τάσης-παραμόρφωσης. Κύριος σκοπός αυτής της μεθόδου ανάλυσης είναι να προσομοιώσει λεπτομερώς την τοιχοποιία μέσα από τις γνωστές ιδιότητες του κάθε στοιχείου της και της μεταξύ τους διεπαφής. Τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα πρέπει να αντληθούν από εργαστηριακά πειράματα των στοιχείων που την αποτελούν και μικρών δοκιμών της τοιχοποιίας.

Τα μικρο-προσομοιώματα, είναι πιθανώς, τα καλύτερα εργαλεία που υπάρχουν στη διάθεσή μας για να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας. Το πλεονέκτημα της χρήσης τέτοιων προσομοιωμάτων είναι ότι όλοι οι διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας μπορούν να ληφθούν υπόψη.



Εικόνα 1.2: Τμήμα Τοιχοποιίας σε θλιπτική καταπόνηση και τμήμα συστήματος για λεπτομερή ανάλυση

Εδώ λαμβάνονται υπόψη το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και προαιρετικά οι ανελαστικές ιδιότητες του λιθοσώματος και κονιάματος έτσι ώστε να είναι δυνατή η λεπτομερής μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος.

Σε αυτή τη μέθοδο τα λιθοσώματα και το κονίαμα προσομοιώνονται με συνεχή στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα με μη συνεχή επιφάνειες επαφής αντιπροσωπεύοντας πιθανούς τρόπους αστοχίας.

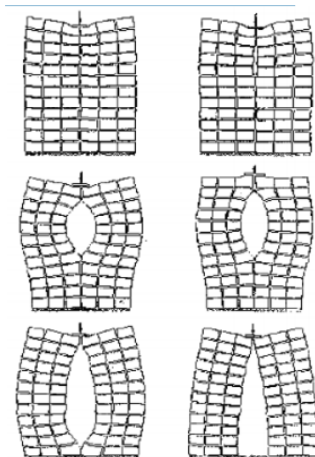
1.1.2 ΜΕΣΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ (Semi-Detailed Analysis)

Στην μέσο-ανάλυση τα λιθοσώματα της τοιχοποιίας αποτελούν γραμμικά-ελαστικά συνεχή στοιχεία τα οποία συνδέονται με μη γραμμικά ασυνεχή στοιχεία (interface elements) τους αρμούς. Οι αρμοί αποτελούν και τα πιθανά σημεία δημιουργίας ρηγματώσεων όταν υπάρξει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής.

Η τοιχοποιία μπορεί σε αυτή την περίπτωση να θεωρηθεί ως ένα σύνολο ελαστικών λιθοσωμάτων συνδεδεμένα μεταξύ τους με γραμμές-αρμούς οι οποίοι δύναται να

αστοχήσουν. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μειώνεται διότι δεν λαμβάνεται η επίδραση του λόγου Poisson του κονιάματος των αρμών ο οποίος είναι μεγαλύτερος του λιθοσώματος.

Τα λιθοσώματα προσομοιώνονται σαν συνεχή στοιχεία και οι αρμοί με μη συνεχή στοιχεία επαφής.



Εικόνα 1.3: Παραδείγματα Μέσο-ανάλυσης

1.1.3 ΜΑΚΡΟ-ΑΝΑΛΥΣΗ (Global Analysis)

Στην μακροανάλυση δεν γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των λιθοσωμάτων και των αρμών και η αλληλεπίδραση μεταξύ των λιθοσωμάτων και του κονιάματος είναι γενικά αμελητέα για την καθολική συμπεριφορά του κτιρίου. Αντιθέτως το υλικό αντιμετωπίζεται σαν ανισότροπο σύνθετο υλικό λαμβάνοντας υπόψη μέσες παραμορφώσεις και τάσεις τοιχοποιίας. Δεν απαιτείται σε αυτές τις περιπτώσεις η λεπτομερής μελέτη των επιμέρους στοιχείων και δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα σημεία όπου έχουμε συγκέντρωση τάσεων και τα οποία είναι τα πιθανά σημεία δημιουργίας ρηγματώσεων. Ένα ολοκληρωμένο μακρομοντέλο τοιχοποιίας πρέπει να περιέχει ένα ορθότροπο υλικό με διαφορετική αντοχή σε θλίψη και σε εφελκυσμό όπως επίσης και διαφορετική ανελαστική συμπεριφορά κατά μήκος των αξόνων του.

Συνοψίζοντας, στις παραπάνω περιπτώσεις γίνεται κατηγοριοποίηση ανάλογα με την παραδοχή προσομοίωσης των αρμών.

1. Οι αρμοί προσομοιώνονται ως συνεχή στοιχεία (continuum elements)
2. Οι αρμοί προσομοιώνονται ως ασυνεχή στοιχεία (discontinuum elements)
3. Οι αρμοί δεν διακριτοποιούνται (smeared out).

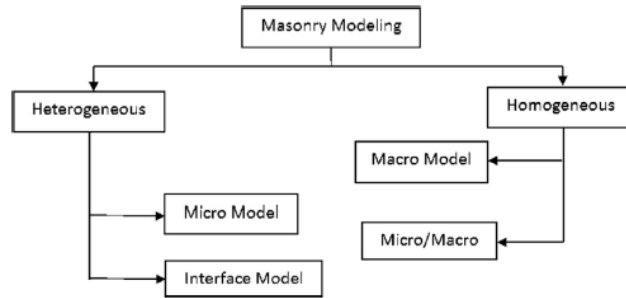


Fig. 1. Modeling strategies of masonry.

Σχήμα 1.2: Διαδικασία επιλογής μεθόδου προσομοίωσης

1.2 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Στην εποχή μας, η τοιχοποιία είναι ακόμη ένα από τα δημοφιλέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές μικρών οικιστικών μονάδων. Διαθέτει πολύ καλή θερμική αδράνεια, χαμηλή τιμή και ευρεία διαθεσιμότητα, τα οποία και την κάνουν να επιλέγεται συχνά ως δομικό υλικό για κατοικίες.

Η τοιχοποιία συχνά συνδυάζεται με άλλα δομικά υλικά (όπως οπλισμένο σκυρόδεμα ή ξύλο) με σκοπό να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά της. Δυαδικά συστήματα, όπως είναι η διαζωματική τοιχοποιία, είναι πολύ δημοφιλή σε περιοχές σεισμικού κινδύνου, ενώ η άοπλη τοιχοποιία είναι διαδεδομένη σε μη σεισμικές περιοχές.

Σχετικά πρόσφατα, η εφεύρεση τσιμεντοκονιαμάτων σήμαινε ότι η μοντέρνα τοιχοποιία έχει βελτιώσει δραματικά τις μηχανικές της ιδιότητες. Η μοντέρνα τοιχοποιία αποτελείται από διάφορα υλικά, και εξαρτάται από τον ρόλο που θα παίξει το στοιχείο της τοιχοποιίας στην κατασκευή.

Μπορούμε να έχουμε δομικά στοιχεία, εξωτερικούς τοίχους, εσωτερικούς διαχωριστικούς τοίχους κ.τ.λ.

Συνήθως, η μοντέρνα τοιχοποιία είναι οπλισμένη με οριζόντια στοιχεία χάλυβα (σε σεισμογενείς περιοχές) ή εμφανίζει ένα πυρήνα σκυροδέματος.



Εικόνα 1.4: Τυπικό παράδειγμα σύγχρονης τοιχοποιίας

1.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Η τοιχοποιία είναι ένα μη ομογενές, ανισότροπο και ψαθυρό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εκτιμηθεί.

Σε όλες τις ερευνητικές εργασίες, η τοιχοποιία προσομοιώνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μια από τις υποθέσεις που επιστρατεύονται σε αυτή τη μέθοδο είναι ότι οι ιδιότητές της είναι σταθερές καθ' όλον το πάχος της.

Αυτό είναι, βεβαίως, μια απλουστευτική υπόθεση και ο μελετητής πρέπει να λάβει υπόψη ότι η τοιχοποιία είναι ένα υλικό του οποίου οι ιδιότητες ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό κατά μήκος του όγκου της.



Εικόνα 1.5: Διάφοροι τύποι τοιχοποιίας (από Ε. Βιντζηλαίου-"Σημειώσεις διάλεξης στην Ανώτερη Μηχανική της τοιχοποιίας")

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 1.5-ε, η τοιχοποιία σαν υλικό δόμησης, είναι από τη φύση του ένα πολύ ευμετάβλητο υλικό. Είναι εμφανές επίσης, χωρίς καμία ανάλυση, ότι οι μηχανικές ιδιότητες δεν μπορεί να είναι οι ίδιες κατά μήκος του όγκου της.

Οι μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας εξαρτώνται από τη χαρακτηριστική αντοχή των λιθοσωμάτων και του κονιάματος, την κατασκευαστική τεχνική, και την αποσάρθρωση των υλικών καθώς και από πολλές άλλες παραμέτρους.

Έτσι, η πραγματική αντοχή μιας ιστορικής τοιχοποιίας είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί.

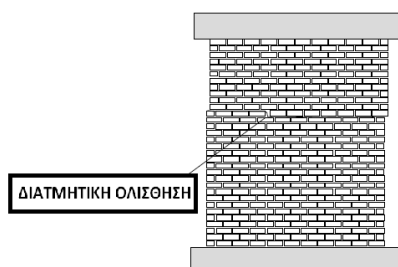
1.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Ο μηχανισμός αστοχίας ενός φέροντος τοίχου που υπόκειται σε οριζόντια φόρτιση σε συνδυασμό με κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο μπορεί να αστοχήσει εντός επιπέδου με τους εξής τρόπους: διατμητική ολίσθηση, διατμητική αστοχία και εντός επιπέδου καμπτική αστοχία.

1.4.1 Διατμητική Ολίσθηση

Κατά την διατμητική ολίσθηση η αστοχία πραγματοποιείται με σχετική ολίσθηση των τοιχοσωμάτων κατά μήκος των οριζόντιων αρμών, οι ρωγμές που εμφανίζονται είναι παράλληλες σε αυτούς ενώ δεν υπάρχει αστοχία των τοιχοσωμάτων. Ο μηχανισμός

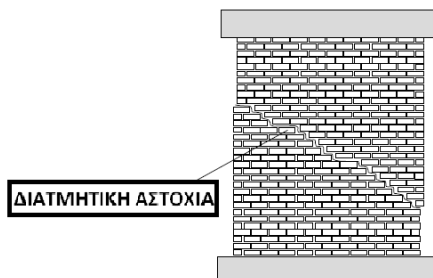
εμφανίζεται όταν η τιμή του θλιπτικού φορτίου είναι σχετικά μικρή, εάν το κονίαμα είναι χαμηλής ποιότητας είτε αν ο συντελεστής τριβής έχει χαμηλές τιμές. Η διατμητική τάση εμφανίζει σχετικά μεγάλα μεγέθη σε σχέση με τις ορθές τάσεις και η αύξηση της διατμητικής αντοχής είναι ανάλογη του μεγέθους της θλιπτικής



Εικόνα 1.6: Συνήθης μορφή αστοχίας διατμητικής ολίσθησης

1.4.2 Διατμητική Αστοχία

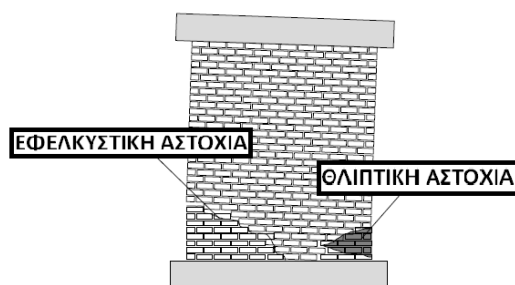
Η διατμητική αστοχία χαρακτηρίζεται από διαγώνιες ρωγμές που διαπερνούν τα τοιχοσώματα ή τους αρμούς είτε και τα δυο, ανάλογα με το μέγεθος του θλιπτικού φορτίου. Ο μηχανισμός αστοχίας οφείλεται στις κύριες εφελκυστικές τάσεις που έχουν υπερβεί την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας λόγω των αυξανόμενων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων. Η αστοχία μπορεί να συμβεί συνδυαστικά με τη διατμητική ολίσθηση. Οι τιμές των ορθών τάσεων είναι σημαντικές ενώ σημαντικής τάξης μεγέθους είναι και οι διατμητικές.



Εικόνα 1.7: Συνήθης μορφή διατμητικής αστοχίας

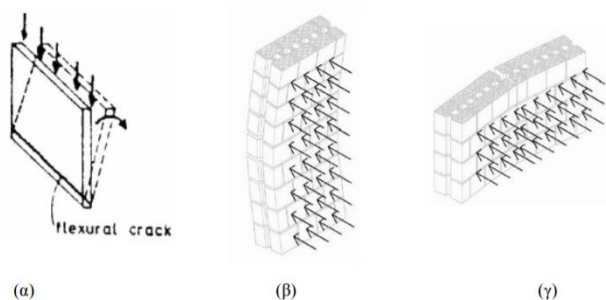
1.4.3 Καμπτική Αστοχία

Κατά την καμπτική αστοχία οι ορθές τάσεις είναι σημαντικές και η αστοχία επέρχεται στην βάση του τοίχου εξαιτίας της υπέρβασης της θλιπτικής αντοχής στο άκρο του τοίχου. Οι ρωγμές που σχηματίζονται είναι οριζόντιες στην βάση του τοίχου και τη θλιπτική αστοχία στο άκρο μπορεί να συνοδεύει και εφελκυστική αστοχία στο άλλο άκρο της βάσης. Στην περίπτωση που οι θλιπτικές τάσεις είναι αρκετά μεγάλες μπορεί να μην εμφανιστούν εφελκυστικές τάσεις στο άλλο άκρο. Αυτός ο τύπος αστοχίας μπορεί να επέλθει αν ο λόγος διάτμησης είναι μεγάλος ή η διατμητική αντίσταση του τοίχου είναι μεγάλη.



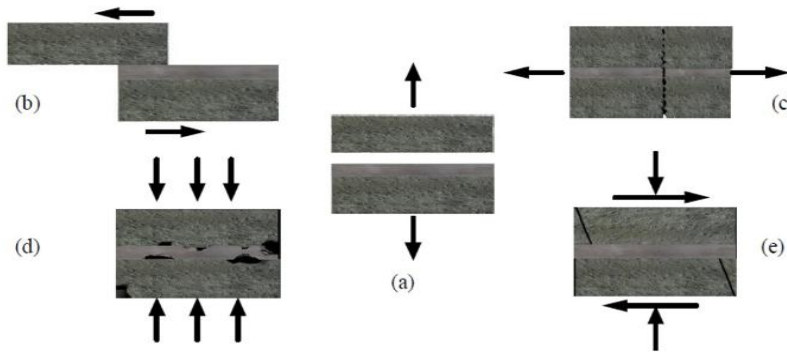
Εικόνα 1.8: Συνήθης μορφή καμπτικής αστοχίας

Κατά τη φόρτιση στην εγκάρσια διεύθυνση η συμπεριφορά της τοιχοποιίας είναι καμπτική. Ο τρόπος αστοχίας διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες στήριξης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας και την αντοχή τοιχοσωμάτων και κονιάματος. Στην περίπτωση μεμονωμένου τοίχου με ελεύθερες τις τρεις πλευρές, η οριζόντια φόρτιση προκαλεί οριζόντια ρηγμάτωση στην εφελκυστική παρειά της βάση όταν οι εφελκυστικές τάσεις λόγω κάμψης ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή (εικόνα 1.9α). Όταν υπάρχει στήριξη στις τέσσερις πλευρές εμφανίζονται δύο τρόποι αστοχίας ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε τοίχους με μεγάλο ύψος όπου η αστοχία επέρχεται παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς και οφείλεται στην εφελκυστική αστοχία της διεπιφάνειας κονιάματος και οπτόπλινθων (εικόνα 1.9β). Αν το κονίαμα είναι υψηλής αντοχής ή οι οπτόπλινθοι χαμηλής εφελκυστικής αντοχής, η αστοχία ενδέχεται να συμπεριλάβει και τους οπτόπλινθους. Ο δεύτερος τρόπος αστοχίας αναφέρεται σε τοίχους με μεγάλο μήκος και η αστοχία αφορά το επίπεδο που είναι κάθετο στους οριζόντιους αρμούς. Τότε οι κατακόρυφες εφελκυστικές ρωγμές μπορεί να είναι κάθετες διαπερνώντας τους οπτόπλινθους είτε τεθλασμένες κατά την αστοχία της διεπιφάνειας κονιάματος – τοιχοσωμάτων (εικόνα 1.9γ).



Εικόνα 1.9: Μηχανισμοί αστοχίας για εκτός επιπέδου οριζόντια φόρτιση

Όλοι οι βασικοί μηχανισμοί αστοχίας που χαρακτηρίζουν την τοιχοποιία παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.10.



Εικόνα 1.10: Μηχανισμοί αστοχίας τοιχοποιίας: (a) αποκόλληση του αρμού, (b) ολίσθηση αρμού, (c) θραύση λιθοσώματος και αρμού, (d) σύνθλιψη, (e) διαγώνια ρωγμή

2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Ορισμός τοιχοποιίας: Μία σύνθεση λιθοσωμάτων τοποθετημένων κατά καθορισμένη διάταξη και συνδεδεμένων μεταξύ τους με κονίαμα(EC6).

2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

(1) Χαρακτηριστική αντοχή της τοιχοποιίας: Η τιμή της αντοχής για την οποία ισχύει ότι το ποσοστό 5% των μετρήσεων αντοχής της τοιχοποιίας δίνουν τιμές υπολειπόμενες αυτής. Σημείωση: Η τιμή μπορεί να ληφθεί από τα αποτελέσματα ειδικών δοκιμών ή από την αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων ή άλλων καθορισμένων τιμών.

(2) Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας: Η αντοχή της τοιχοποιίας σε θλίψη απαλλαγμένη από την επιρροή της τριβής στις πλάκες φορτίσεως, απ' τη λυγηρότητα ή από την εκκεντρότητα του φορτίου.

(3) Διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας: Η αντοχή της τοιχοποιίας υποβαλλόμενης σε τέμνουσες δυνάμεις.

(4) Καμπτική αντοχή της τοιχοποιίας: Η αντοχή της τοιχοποιίας σε καθαρή κάμψη.

(5) Αντοχή συναφείας: Η ανά μονάδα επιφανείας αντοχή συναφείας, μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος ή κονιάματος, όταν ο οπλισμός υποβάλλεται σε εφελκυστικές ή σε θλιπτικές δυνάμεις.

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΩΝ

(1) Λιθόσωμα: Ένα στοιχείο κατάλληλα διαμορφωμένο, ώστε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τοιχοποιίας.

(2) Λιθοσώματα Ομάδας 1, 2, 3 και 4: Διάκριση των λιθοσωμάτων σε ομάδες ανάλογα με το ποσοστό, το μέγεθος και τη διεύθυνση των κενών, όταν τα λιθοσώματα βρίσκονται στην οριστική τους θέση στην τοιχοποιία.

(3) Οριζόντιες όψεις: Η επάνω και η κάτω όψεις ενός λιθοσώματος, όπως αυτό είναι ενσωματωμένο στην τοιχοποιία.

(4) Εγκοπή: Μία εσοχή, διαμορφούμενη κατά την παραγωγή, σε μια ή και στις δύο οριζόντιες όψεις του λιθοσώματος.

(5) Κενό: Ένα διαμορφωμένο κενό σε λιθόσωμα, διαμπερές ή τυφλό.

(6) Λαβή: Κενό διαμορφούμενο σε λιθόσωμα, ώστε να επιτρέπει την ευκολότερη μεταφορά του με το ένα ή με τα δύο χέρια ή από μηχανή.

(7) Τοίχωμα: Το συμπαγές υλικό μεταξύ διαδοχικών κενών λιθοσώματος.

(8) Κέλυφος: Το συμπαγές υλικό της περιμέτρου ενός λιθοσώματος μεταξύ μίας όψεως και ενός κενού.

(9) Μικτή διατομή: Το εμβαδόν της διατομής του λιθοσώματος χωρίς την αφαίρεση οπών, κενών και εσοχών.

(10) Θλιπτική αντοχή λιθοσώματος: Η μέση θλιπτική αντοχή ενός καθορισμένου πλήθους λιθοσωμάτων.

(11) Ανηγγμένη θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων: Η θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων ανηγμένη στη θλιπτική αντοχή ενός ξηρού ισοδύναμου λιθοσώματος διαστάσεων όψεως 100X100mm.

(12) Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή λιθοσώματος: Η τιμή θλιπτικής αντοχής η οποία έχει πιθανότητα 95% να υποσκελισθεί από τις θλιπτικές αντοχές καθορισμένου πλήθους λιθοσωμάτων.

2.3 ΤΥΠΟΙ ΤΟΙΧΩΝ

(1) Φέρων τοίχος: Τοίχος ο οποίος έχει μελετηθεί ώστε να φέρει επιβαλλόμενα φορτία πέραν του ιδίου βάρους του.

(2) Μονόστρωτος τοίχος: Τοίχος χωρίς κοιλότητα ή συνεχή κατακόρυφο αρμό μέσα στο επίπεδό του.

(3) Κοίλος τοίχος: Τοίχος αποτελούμενος από δύο παράλληλους μονόστρωτους τοίχους, κατάλληλα συνδεδεμένους μεταξύ τους μέσω συνδέσμων ή μέσω οριζόντιου σπλισμού και του οποίου η μία ή και οι δύο στρώσεις φέρουν κατακόρυφα φορτία. Ο χώρος μεταξύ των δύο τοίχων παραμένει ως συνεχές κενό ή πληρούται ή γεμίζει μόνον εν μέρει με μη φέρον θερμομονωτικό υλικό.

(4) Δίστρωτος τοίχος: Τοίχος αποτελούμενος από δύο παράλληλους τοίχους με τον μεταξύ διαμήκη αρμό (πάχους 25mm) πλήρως γεμισμένο με κονίαμα. Οι δύο τοίχοι είναι κατάλληλα συνδεδεμένοι με συνδέσμους, ώστε να δρουν από κοινού για την ανάληψη φορτίων.

(5) Κοίλος τοίχος με πλήρωση: Τοίχος αποτελούμενος από δύο παράλληλους τοίχους με το μεταξύ τους κενό ($\geq 50\text{mm}$) πλήρως γεμισμένο με σκυρόδεμα. Οι δύο τοίχοι συνδέονται κατάλληλα με συνδέσμους ή με οριζόντιο σπλισμό, ώστε να δρουν από κοινού για την ανάληψη φορτίων.

(6) Τοίχος όψεως: Τοίχος από λιθοσώματα όψεως, ο οποίος συνδέεται με τον φέροντα τοίχο και συμμετέχει στην ανάληψη φορτίων.

(7) Τοίχος από σκαφοειδή λιθοσώματα: Τοίχος στον οποίο τα λιθοσώματα συνδέονται μεταξύ τους μέσω δύο λωρίδων κονιάματος γενικής εφαρμογής κατά μήκος των εξωτερικών οριζόντιων όψεων των σκαφοειδών λιθοσωμάτων.

(8) Πέτασμα όψεως: Τοίχος αποτελούμενος από λιθοσώματα όψεως, χωρίς σύνδεση με τον φέροντα τοίχο και, επομένως, χωρίς συμμετοχή στην ανάληψη φορτίων.

(9) Διατμητικό τοίχωμα: Τοίχος φέρων οριζόντιες δυνάμεις εντός του επιπέδου του.

(10) Τοίχος δυσκαμψίας: Τοίχος κατασκευαζόμενος καθέτως προς άλλο τοίχο με σκοπό τη συμμετοχή του στην ανάληψη οριζόντιων δυνάμεων ή την αποφυγή λυγισμού, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του κτιρίου.

(11) Μη φέρων τοίχος: Τοίχος ο οποίος δεν έχει υπολογισθεί ώστε να φέρει δυνάμεις και ο οποίος μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς βλάβη για την ακεραιότητα του δομήματος. Εμάς θα μας απασχολήσει η πρώτη κατηγορία, ο φέρων τοίχος και για αυτό τον λόγο παραθέτουμε παρακάτω και τον τρόπο κατηγοριοποίησης των λιθοσωμάτων σε ομάδες.

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικές απαιτήσεις για την ομαδοποίηση των λιθοσωμάτων ((Πίν.3.1, Eurocode 6, 2005)

Ομάδα λιθοσώματος					
	Ομάδα 1 (ανεξάρτητη)	Μονάδες	Ομάδα 2	Ομάδα 3	Ομάδα 4

	υλικού)						οπές	
Όγκος όλων των κενών (ως ποσοστό % του μικτού όγκου)	≤25	Άργιλος	> 25 , ≤ 55		≥ 25 , ≤ 70		>25 , ≤70	
		πυριτικό ασβέστιο	> 25 , ≤ 55		Δεν χρησιμοποιείται		Δεν χρησιμοποιείται	
		Σκυρόδεμα ^b	> 25 , ≤ 60		> 25 , ≤ 70		> 25 , ≤ 50	
Όγκος ενός κενού (% του μεικτού όγκου)	≤12.5	Άργιλος	Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 2 Λαβές συνολικώς ≤ 12.5		Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 2 Λαβές συνολικώς ≤ 12.5		Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 30	
		πυριτικό ασβέστιο	Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 15 Λαβές συνολικώς ≤ 30		Δεν χρησιμοποιείται		Δεν χρησιμοποιείται	
		Σκυρόδεμα ^b	Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 30 Λαβές συνολικώς ≤ 30		Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 30 Λαβές συνολικώς ≤ 30		Καθένα από τα πολλαπλά κενά ≤ 25	
Γνωστοποιημένες τιμές του πάχους τοιχωμάτων και κελύφων (mm)	Καμία απαίτηση		τοιχώμα	κέλυφος	τοιχώμα	κέλυφος	τοιχώμα	κέλυφος
		Άργιλος	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6	≥ 6	≥ 8
		πυριτικό ασβέστιο	≥ 5	≥ 10	Δεν χρησιμοποιείται		Δεν χρησιμοποιείται	
	Σκυρόδεμα ^b	≥ 15	≥ 20	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20	
Γνωστοποιημένη τιμή σύνθετου	Καμία	Άργιλος	≥ 16		≥ 12		≥ 16	
		πυριτικό	≥ 20		Δεν		Δεν	

πάχους τοιχωμάτων και κελυφών (% του συνολικού πλάτους)	απαίτηση	ασβέστιο		χρησιμοποιείται	χρησιμοποιείται
		Σκυρόδεμα ^b	≥ 20	≥15	≥45
Σημειώσεις:					
<p>a. Σύνθετο πάχος είναι το πάχος όλων των κελυφών και των τοιχωμάτων, μετρούμενο οριζοντίως κατά την εν λόγω κατεύθυνση. Ο έλεγχος πρέπει να εκλαμβάνεται ως δοκιμή χαρακτηρισμού και απαιτείται να επαναλαμβάνεται μόνον στην περίπτωση μεγάλων τροποποιήσεων στον σχεδιασμό των διαστάσεων των λιθοσωμάτων.</p> <p>b. Στην περίπτωση κωνικών ή κυψελοειδών κενών, θα χρησιμοποιείται η μέση τιμή του πάχους των κελυφών και των τοιχωμάτων.</p>					

2.4 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ($f_{wc,k}$)

Οι τοιχοποιίες υποβάλλονται μονίμως σε θλίψη επομένως ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής τους έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται από την θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος και του κονιάματος, τον τύπο και το ύψος των λιθοσωμάτων, καθώς και από το πάχος των αρμών (Τάσιος, 1992-Βέρρας κ.ά., 2004 - ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 6, 2005).

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας είναι ιδιαίτερα δυσχερές, λόγω της ιδιαίτερης ανομοιογένειας και ανισοτροπίας που παρουσιάζει το υλικό, αλλά και εξαιτίας του γεγονότος ότι η τοιχοποιία δεν αποτελεί ένα βιομηχανικό προϊόν με προκαθορισμένες και ελεγχόμενες ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, οι μηχανικές ιδιότητες μιας πραγματικής κατασκευής από τοιχοποιία επηρεάζονται από ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων. Ιδιαίτερα όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή, οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να συνοψιστούν στους εξής:

- Η αντοχή και η γεωμετρία των λιθοσωμάτων (η αντοχή της τοιχοποιίας παρουσιάζει γρήγορη αύξηση όταν αυξάνεται η αντοχή των λιθοσωμάτων, μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ισχυρό κονίαμα)
- Η αντοχή του κονιάματος και το πάχος των οριζόντιων αρμών της τοιχοποιίας (οι ελαστικές ιδιότητες του αρμού είναι κρίσιμο χαρακτηριστικό της αντοχής της τοιχοποιίας με αποτέλεσμα, όσο αυξάνεται ο λόγος του πάχους του αρμού προς το ύψος του λιθοσώματος, τόσο περισσότερο επηρεάζεται η αντοχή της τοιχοποιίας από τις ιδιότητες του κονιάματος. Η αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας λόγω της αύξησης της αντοχής του κονιάματος είναι φανερή, δεν είναι ωστόσο γραμμική)
- Τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά των λιθοσωμάτων και του κονιάματος

- Η υδαταπορροφητικότητα των λιθοσωμάτων
- το σύστημα δομήσεως
- ορισμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες (συγκεντρωμένα φορτία, εγκοπές στο σώμα του τοίχου)
- η ποιότητα της κατασκευής (λάθος αναλογίες των συστατικών του κονιάματος, κακή αρμολόγηση, απόκλιση του τοίχου από την κατακόρυφο, κατασκευή τοιχοποιίας υπό ακραίες κλιματολογικές συνθήκες, μη κανονικός ρυθμός απορρόφησης της υγρασίας)

2.4.1 Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας έχει πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν ένα πλήθος πειραμάτων και έχουν προταθεί διάφοροι τύποι, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τους περισσότερους από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Γίνεται φανερό ότι, λόγω της επιρροής όλων αυτών των παραγόντων στα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, η πιο ασφαλής μέθοδος για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών παραμένει η πραγματοποίηση ελέγχων σε μια σειρά δοκιμών κατασκευασμένων από τα ίδια υλικά και με την ίδια ποιότητα εργασίας με τον υπό κατασκευή τοίχο. Αυτή η διαδικασία άλλωστε ακολουθήθηκε και για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των τοιχίσκων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αυτής της διατριβής.

Μεταξύ άλλων, για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{Τάσιος (1986)} : \quad f_{wc} = \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - \alpha + \beta f_{mc} \quad (\text{MPa}) \quad (2.1)$$

όπου:

- f_{bc} και f_{mc} η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος και του κονιάματος αντίστοιχα,
- α μειωτικός συντελεστής για τοιχοποιία από φυσικούς λίθους που κυμαίνεται από 0.5 για λαξευμένες πέτρες μέχρι 2.5 για κροκάλες (για τεχνητούς λίθους $\alpha=0$) και
- β συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά του κονιάματος στην αντοχή και είναι $\beta=0.5$ για λιθοδομή και $\beta=0.1$ για σπτοπλινθοδομή.

2.4.2 Ευρωκώδικας 6 (EC6)

$$f_{wc,k} = K f_b^a f_m^\beta \text{ N/mm}^2 \text{ για κονίαμα γενικής χρήσης} \quad (2.2)$$

$$f_{wc,k} = K f_b^a \text{ N/mm}^2 \text{ για κονίαμα λεπτής στρώσης} \quad (2.3)$$

όπου:

f_b : θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων

f_{mc} : θλιπτική αντοχή του κονιάματος

α : 0,70 για κονίαμα γενικής χρήσης και 0,85 για κονίαμα λεπτής στρώσης

β : 0,30

K : σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του λιθοσώματος και του κονιάματος. Οι τιμές του K δίνονται στον πίνακα 2.2.

Οι συντελεστές α, β, K έχουν προκύψει από την αξιολόγηση πειραματικών δεδομένων.

Πίνακας 2.2: Τιμές του συντελεστή K για τοιχοποιίες με κονίαμα γενικής εφαρμογής, λεπτής στρώσεως και ελαφροκονίαμα (Πίν.3.3, Eurocode 6, 2005)

Υλικό λιθοσώματος		Κονίαμα γενικής εφαρμογής	Κονίαμα λεπτής στρώσεως οριζόντιος αρμός $\geq 0,5\text{mm}$ και $\leq 3\text{mm}$)	Ελαφροκονίαμα με πυκνότητα	
				$600 \leq \rho_d \leq 800$ Kg/m^3	$800 \leq \rho_d \leq 1300$ Kg/m^3
Άργιλος	Ομάδα 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Ομάδα 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Ομάδα 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Ομάδα 4	0,35	0,35	0,20	0,25
Πυριτικό Ασβέστιο	Ομάδα 1	0,55	0,80	‡	‡
	Ομάδα 2	0,45	0,65	‡	‡
Σκυρόδεμα με αδρανή	Ομάδα 1	0,55	0,80	0,45	0,45
	Ομάδα 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Ομάδα 3	0,40	0,50	‡	‡

	Ομάδα 4	0,35	‡	‡	‡
Αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα	Ομάδα 1	0,55	0,80	0,45	0,45
Τεχνητοί λίθοι	Ομάδα 1	0,45	0,65	‡	‡
Λαξευτοί φυσικοί λίθοι	Ομάδα 1	0,45	‡	‡	‡
‡ Συνδυασμός κονιάματος/λιθοσώματος ο οποίος συνήθως δεν εφαρμόζεται. Δεν δίδεται σχετική τιμή του K.					

2.4.3 Εμπειρική Σχέση για την αντοχή της τοιχοποιίας (Tassios and Chronopoulos, 1986)

$$1) f_{wc} = \xi * \left(\left(\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - a \right) + \beta * f_{mc} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (2.4)$$

όπου:

α : συντελεστής που εκφράζει την επιρροή της μορφής του λιθοσώματος (και του τρόπου δόμηση)

$\alpha = 0$, για τεχνητούς ή λαξεμένους φυσικούς λίθους,

$\alpha = 1,5$ για ημιλαξευτούς φυσικούς λίθους (μέτρια ακανονικότητα)

$\alpha = 2,5$ για αργούς φυσικούς λίθους, κροκάλες (μεγάλη ακανονικότητα)

β : συντελεστής που εκφράζει την επιρροή του πάχους των αρμών και του όγκου του κονιάματος

$\beta = 0,5$ για λιθοδομή,

$\beta = 0,1$ για οπτοπλινθοδομή

ξ : συντελεστής που εκφράζει την επιρροή του πάχους των αρμών και του όγκου του κονιάματος

$$\xi = [1 - 0,8(\kappa - \kappa_0)^{\frac{1}{3}}] \quad \text{ή} \quad \xi = \frac{1}{[1 + 3,5(\kappa - \kappa_0)]} \quad (2.5)$$

Όπου, κ = όγκος κονιάματος / όγκος τοιχοποιίας

Και $\kappa_0 = 0,10$ για ημιλαξευτούς λίθους

0,20 για λαξευτούς λίθους

0,30 για αργούς λίθους

0,25 για πλινθοδομές

0,30 για πλινθοδομές με συμπαγείς οπτόπλινθους

0,20 για πλινθοδομές με διάτρητους οπτόπλινθους

$$2) f_{wc} = \frac{f_{bc}}{6} + \frac{\sqrt{f_{bc} * f_{mc}}}{4} - \frac{f_{mc}}{20} + 1.4 \quad (\text{MPa}) \quad (2.6)$$

2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ (f_{vk})

Η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται κυρίως από την διατμητική αντοχή που αναπτύσσεται ανάμεσα στα λιθοσώματα και στο κονίαμα f_{vko} καθώς και από την επιβαλλόμενη θλιπτική τάση σχεδιασμού που επιβάλλεται σ_d (Βέρρας κ.ά., 2004 – Τάσιος ,1992 – Eurocode 6, 2005). Σύμφωνα με τον EC6 για τις τοιχοποιίες με κονίαμα στρώσης και για πλήρως γεμισμένους αρμούς η χαρακτηριστική διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας δίνεται από την εξίσωση :

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \leq 0.065 * f_b \quad (2.7)$$

όπου:

f_{vko} : διατμητική αντοχή για μηδενική θλιπτική τάση

f_b : ανηγμένη θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων για διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου κατακόρυφα στους αρμούς

σ_d : κατακόρυφη θλιπτική τάση σχεδιασμού

Πίνακας 2.3: Τιμές της αρχικής αντοχής σε διαρροή της τοιχοποιίας f_{vko} (Πίνακας 3.4 Eurocode 6, 2005)

Υλικό λιθοσώματος	f_{vko} (N/mm ²)			
	Κονίαμα γενικής εφαρμογής, δεδομένης κατηγορίας αντοχής		Κονίαμα λεπτής στρώσεως (0,5mm≥οριζόντιος αρμός ≤3mm)	Ελαφροκονίαμα
Άργιλος	M10-M20	0,30	0,30	0,15

	M2,5-M9	0,20		
	M1-M2	0,10		
Πυριτικό ασβέστιο	M10-M20	0,20	0,40	0,15
	M2,5-M9	0,15		
	M1-M2	0,10		
Σκυρόδεμα με αδρανή	M10-M20	0,20	0,30	0,15
Αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα	M2,5-M9	0,15		
Τεχνητοί λίθοι	M1-M2	0,10		
Λαξευτοί φυσικοί λίθοι				

2.6 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ (f_{wt})

Η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται κυρίως από την εφελκυστική αντοχή των λιθοσωμάτων και του κονιάματος. Επίσης εξαρτάται από τη συνάφεια που αναπτύσσεται ανάμεσα σε λιθοσώματα και κονίαμα. Τέλος, εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας f_{vk} , από τον τύπο και το ύψος των λιθοσωμάτων καθώς και από το πάχος των αρμών (Τάσιος, 1992 – Βέρρας κ.ά., 2004). Ακολουθούν οι σχέσεις για οπτοπλινθοδομή.

Για αργολιθοδομή, θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος :

$$0,0085 * f_{wc,k} - 0,10 \quad (\text{Καραντώνη, 2004}) \quad (2.8)$$

2.6.1 Για Οριζόντιο Εφελκυσμό ($\theta = 0^\circ$)

1) Όταν η ρωγμή λόγω εφελκυσμού διαπερνά μόνο τους αρμούς, τότε η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας δίνεται από την εξίσωση:

$$f_{wt}^0 = \frac{1}{\gamma_{Rd}} * \frac{[\lambda * f_{mt} * (2 * f_b + t_m) + f_{wv} * l_b]}{2 * t_b + t_m} \leq 2 * \lambda * f_{mt} \quad (2.9)$$

2) Όταν η ρωγή λόγω εφελκυσμού διαπερνά και τα λιθοσώματα , εκτός από το κονίαμα , τότε η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας δίνεται από την εξίσωση :

$$f_{wt}^0 = \frac{1}{\gamma_{Rd}} * \frac{[\lambda * f_{mt} * (f_b + 2 * t_m) + f_b * l_{bt}]}{2 * t_b + 2 * t_m} \leq 2 * \lambda * f_{mt} \quad (2.10)$$

όπου:

f_{wv} : η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας

$1/\gamma_{Rd} \sim 0.80$: ο συντελεστής μέσω του οποίου λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες κατά την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος και της διατμητικής αντοχής της τοιχοποιίας.

$\lambda = 0,70 - 0,90$: Συντελεστής , οι τιμές του οποίου κυμαίνονται ανάλογα με τις συνθήκες συντήρησης της τοιχοποιίας,

f_{bt} : η εφελκυστική αντοχή των λιθοσωμάτων

f_{mt} : η εφελκυστική αντοχή του κονιάματος , που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Τάσιος ,1992 – Βέρρας κ.α., 2004) :

$$f_{mt} = \frac{1}{4} * f_{mc}^{0.5} \quad (2.11)$$

2.6.2 Για Κατακόρυφο Εφελκυσμό ($\theta = 90^\circ$)

Όταν πρόκειται για κατακόρυφο εφελκυσμό , τότε η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας δίνεται από την εξίσωση :

$$f_{wt}^{90} = \lambda * f_{mt} \quad (2.12)$$

όπου:

$\lambda = 0,70 - 0,90$: συντελεστής , οι τιμές του οποίου κυμαίνονται ανάλογα με τις συνθήκες συντήρησης της τοιχοποιίας.

Μέσα από αυτή την εξίσωση ουσιαστικά εκφράζεται το μέγεθος της αντοχής συνάφειας ανάμεσα στο κονίαμα και στα λιθοσώματα. Έτσι η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας δίνεται σαν συνάρτηση της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος.

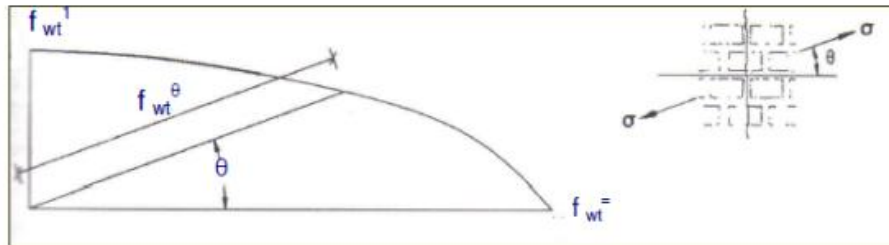
2.6.3 Για Εφελκυσμό υπό τυχαία γωνία

Η εφελκυστική αντοχή δεν αποτελεί σταθερά της τοιχοποιίας , αφού εξαρτάται από τη γωνία υπό την οποία ασκείται ο εφελκυσμός. Επομένως για να υπολογιστεί η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπό τυχαία γωνία , πρέπει να γίνει:

1) Υπολογισμός της τιμής του οριζόντιου εφελκυσμού , μέγιστη εφελκυστική αντοχή f_{wt}^0 .

2) Υπολογισμός της τιμής του κατακόρυφου εφελκυσμού , ελάχιστη εφελκυστική αντοχή f_{wt}^{90} .

3) Δημιουργία μιας καμπύλης συσχετισμού τους. Η καμπύλη αυτή είναι έλλειψη και μέσω αυτής υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή υπό οποιαδήποτε γωνία θ .



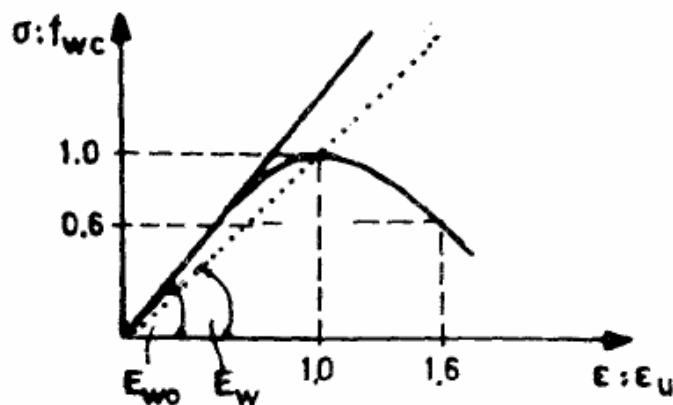
Σχήμα 2.1: Εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της γωνίας θ

2.7 ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων σ - ϵ υπό αδιάστατη μορφή, μπορεί να εκφραστεί από την παραβολή:

$$\frac{\sigma}{f_{wc}} = 2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_u} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_u} \right)^2 \quad (2.13)$$

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η καμπύλη που έχει προκύψει από την επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων (Hendry 1981) για οριακή παραμόρφωση $\epsilon_u=2.5-3.5\%$



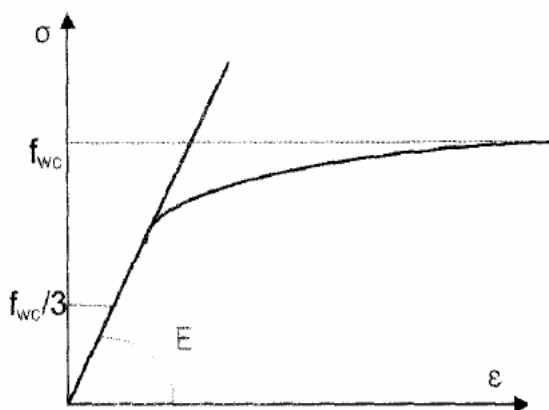
Σχήμα 2.2: Αδιαστατοποιημένη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων τοιχοποιίας σε θλίψη

Κατά το παρελθόν έχουν προταθεί διάφοροι τύποι οι οποίοι συνδέουν το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας με τη θλιπτική αντοχή αυτής, καθώς και τιμές για τον συντελεστή Poisson ν , τη συστολή ξήρανσης ϵ_s και το συντελεστή ερπυσμού ϕ της

τοιχοποιίας (Wesche/1974, Hendry/1981, Mauerwerk Kalender/1982, CIB/1958, Chuxian/1984-Κινέζικος κανονισμός).

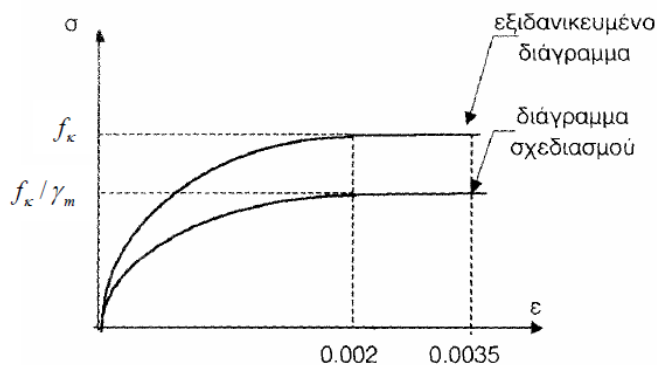
Σύμφωνα με τον EC6, το στιγμιαίο μέτρο ελαστικότητας E_w της τοιχοποιίας δίδεται:

$$E_w = 1000f_k \quad (2.14)$$



Σχήμα 2.3: Γενική μορφή διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για τοιχοποιία κατά EC6

Το ακόλουθο σχήμα είναι μία προσεγγιστική καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό τοίχων, ανεξαρτήτως του είδους των τοιχοσωμάτων και προτείνεται από τον EC6 για φόρτιση κάθετα στους αρμούς. Για τοιχοσώματα των ομάδων 3 και 4, που έχουν μεγάλο ποσοστό οπών, μπορεί να συμβεί ψαθυρή αστοχία της τοιχοποιίας, οπότε το οριζόντιο τμήμα της καμπύλης δε θα ισχύει.



Σχήμα 2.4: Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για το σχεδιασμό κατασκευών από τοιχοποιία

Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι Αμερικανικοί κανονισμοί ACI 530/ASCE5/TMS 402 όπου προτείνεται να συσχετίζεται το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας με τη θλιπτική αντοχή των τοιχοσωμάτων και τον τύπο του κονιάματος.

Για το συντελεστή Poisson ν , με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της σχετικής βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι αυτός κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.10 έως 0.40. Από την εμπειρική σχέση (Tassios and Chronopoulos, 1986) είναι:

$$\nu = 0.5 - 0.1 * \sqrt[4]{f_{wc}} \quad (2.15)$$

Το μέτρο διάτμησης της τοιχοποιίας είναι συνάρτηση των δύο παραπάνω μεγεθών και δίνεται από τη σχέση (Τάσιος, 1992 – CIB, 1958) :

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} \quad (2.16)$$

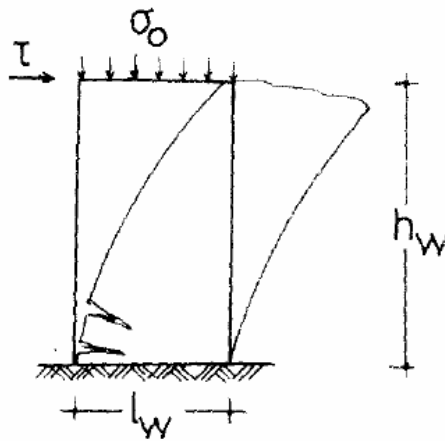
Όταν δεν διατίθεται ακριβέστερη τιμή, το μέτρο διατμήσεως, G , μπορεί να λαμβάνεται ίσο με το 40% του μέτρου ελαστικότητας, E , σύμφωνα πάντα με τον EC6, όπως φαίνεται από τη σχέση:

$$G = 0.40E_w \quad (2.17)$$

και η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε τιμή του συντελεστή Poisson $\nu=0.25$.

2.8 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας εξαρτάται από τη συνεργασία κονιάματος και τοιχοσωμάτων, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από ένα πλήθος άλλων παραγόντων, όπως τη σύνθεση του κονιάματος, το είδος των τοιχοσωμάτων, αλλά και την υδατοαπορροφητικότητα, τη συστολή των υλικών, το βαθμό και τη μεταβολή της ενυδάτωσης, την πυκνότητα των υλικών ενυδάτωσης, το πορώδες, τη χημική συνεργασία και το εργάσιμο.



Σχήμα 2.5: Καμπτική θραύση τοιχοποιίας

Εφελκόμενες περιοχές στην τοιχοποιία δημιουργούνται είτε λόγω έκκεντρων κατακόρυφων φορτίων είτε λόγω οριζόντιων φορτίων εγκάρσια στο επίπεδο του τοίχου (άνεμος, ωθήσεις γαιών, σεισμός), είτε σε καμπτόμενα στοιχεία όπως είναι τα ανώφλια. Για τους λόγους αυτούς, όσον αφορά στο σχεδιασμό κατασκευών από τοιχοποιία, μας ενδιαφέρει περισσότερο ο προσδιορισμός της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής.

Διακρίνουμε δύο είδη καμπτικής εφελκυστικής αντοχής, για κάμψη κάθετα και για κάμψη παράλληλα στους αρμούς της τοιχοποιίας. Όπως έχει προκύψει από δοκιμές, η καμπτική αντοχή για κάμψη παράλληλα στους αρμούς είναι δύο έως πέντε φορές μεγαλύτερη εκείνης για κάμψη κάθετα στους αρμούς. Ο λόγος των δύο αντοχών αποτελεί ένα μέτρο της ανισοτροπίας του υλικού και επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων όπως:

- Την αντοχή των τοιχοσωμάτων (ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση εφελκυσμού παράλληλα στους αρμούς, όπου η ρωγμή διαπερνά τα τοιχοσώματα).
- Την πλήρωση των οπών με κονίαμα (αυξάνεται σημαντικά η εφελκυστική αντοχή κάθετα στους αρμούς και περιορίζεται σημαντικά η ανισοτροπία του υλικού).
- Το ποσοστό των οπών (οι οπές των τοιχοσωμάτων μειώνουν την αντοχή της τοιχοποιίας στην περίπτωση κάμψης κάθετα στους αρμούς)
- Το λόγο των πλευρών των τοιχοσωμάτων (σημαντικός παράγοντας στην περίπτωση συμπαγών τοιχοσωμάτων).
- Την ύπαρξη κατακόρυφης θλιπτικής τάσης

Σύμφωνα με τον EC6, λαμβάνονται υπόψη δύο περιπτώσεις κάμψης, για αστοχία παράλληλα και κάθετα στους αρμούς διάστρωσης (Σχ. 2.2). Πρόκειται δηλαδή για την εφελκυστική αντοχή από κάμψη της τοιχοποιίας. Ο σχετικός έλεγχος γίνεται μέσω συγκρίσεως της εφελκυστικής τάσεως η οποία αναπτύσσεται λόγω αξονικής δυνάμεως και

ροπής στην ακραία εφελκόμενη ίνα της διατομής με την αντίστοιχη καμπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Στην περίπτωση όπου δε διεξάγονται δοκιμές ή δεν υπάρχουν διαθέσιμα έτοιμα πειραματικά αποτελέσματα, οι τιμές των χαρακτηριστικών καμπτικών αντοχών f_{xk1} και f_{xk2} μπορούν να λαμβάνονται αντίστοιχα από τους πίνακες 2.3 και 2.4 ή από αυτούς των Εθνικών κειμένων εφαρμογής, εφόσον όμως πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

Το κονίαμα λεπτής στρώσης και το ελαφροβαρές είναι τουλάχιστον Μ5.

Οι τιμές της f_{xk1} αναφέρονται στην τοιχοποιία, ανεξαρτήτως του αν οι κατακόρυφοι αρμοί πληρούνται με κονίαμα, ενώ οι τιμές της f_{xk2} ισχύουν μόνο για τοιχοποιία με μη πληρωμένους τους κατακόρυφους αρμούς.

Πίνακας 2.4: Τιμές καμπτικής αντοχής για επίπεδο αστοχίας παράλληλα στους αρμούς

Τοιχόσωμα	f_{xk1} (MPa)			
	Κονίαμα γενικής χρήσης		Κονίαμα λεπτής στρώσης	Ελαφροβαρές κονίαμα
	$f_m < 5\text{MPa}$	$f_m \geq 5\text{MPa}$		
Αργιλικό	0.10	0.10	0.15	0.10
Ασβεστοπυριτικό	0.05	0.10	0.20	Δε χρησιμοποιείται
Τσιμεντόλιθος	0.05	0.10	0.20	Δε χρησιμοποιείται
Αυτόκλειστο κυψελωτό	0.05	0.10	0.15	0.10
Βιομηχανική πέτρα	0.05	0.10	Δε χρησιμοποιείται	Δε χρησιμοποιείται
Λαξεμένη φυσική πέτρα	0.05	0.10	Δε χρησιμοποιείται	Δε χρησιμοποιείται

Πίνακας 2.5: Τιμές καμπτικής αντοχής για επίπεδο αστοχίας κάθετα στους αρμούς

Τοιχόσωμα	f_{xk1} (MPa)			
	Κονίαμα γενικής χρήσης		Κονίαμα λεπτής στρώσης	Ελαφροβαρές κονίαμα
	$f_m < 5\text{MPa}$	$f_m \geq 5\text{MPa}$		

Αργιλικό	0.20	0.40	0.15	0.10
Ασβεστοπυριτικό	0.20	0.40	0.30	Δε χρησιμοποιείται
Τσιμεντόλιθος	0.20	0.40	Δε χρησιμοποιείται	Δε χρησιμοποιείται
Αυτόκλειστο κυψελωτό	0.20	0.20	0.30	0.15
Βιομηχανική πέτρα	0.20	0.40	Δε χρησιμοποιείται	Δε χρησιμοποιείται
Λαξεμένη φυσική πέτρα	0.20	0.40	Δε χρησιμοποιείται	Δε χρησιμοποιείται

Ο Τάσιος (1986) προτείνει τις ακόλουθες σχέσεις για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής f_{wt} τοιχοποιίας χαμηλής αντοχής:

Η εφελκυστική αντοχή για οριζόντια ρηγμάτωση (προέρχεται είτε από την αντίσταση σε ολίσθηση μεταξύ του κονιάματος και του λιθοσώματος είτε από την εφελκυστική αντοχή του λιθοσώματος), δηλαδή για επίπεδο αστοχίας παράλληλα στους αρμούς υπολογίζεται:

$$f_{wt} = \lambda \frac{f_{mc}}{10} \quad (2.18)$$

Η εφελκυστική αντοχή για ρηγμάτωση κάθετα στους αρμούς (ο κατακόρυφος εφελκυσμός οδηγεί σε αποσύνδεση του κονιάματος) υπολογίζεται:

$$f_{wt} = 2\lambda \frac{f_{mc}}{10} \quad (2.19)$$

όπου:

f_{mc} η θλιπτική αντοχή του κονιάματος

λ παίρνει την τιμή 0.9 για κονίαμα MI (τσιμέντο : άσβεστος : άμμος 0 : 1 : 3-4)

και την τιμή 0.7 για κονίαμα MII (0.5-0.75 : 1 : 4-5)

3. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ABAQUS

Το Abaqus είναι μια ομάδα προγραμμάτων που μοντελοποιούν και αναλύουν πάσης φύσεως διατάξεις στον τομέα της μηχανικής, βασισμένο στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Είναι διαθέσιμο στην αγορά από την εταιρία DassaultSystèmes, μέρος των λογισμικών SIMULIA ProductLife-cycleManagement (PLM). Το πρόγραμμα αυτό, μεταξύ άλλων, έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Περιέχει εκτεταμένη βιβλιοθήκη με στοιχεία τα οποία μπορούν να μοντελοποιήσουν πρακτικά οποιαδήποτε γεωμετρία.
- Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής γεωμετρίας από πολλά διαφορετικά πακέτα λογισμικού CAD.
- Δυνατότητα χρήσης αρκετών διαφορετικών μοντέλων υλικών για μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πιο τυπικών από αυτά, όπως μέταλλα, ελαστικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα και γεωτεχνικά υλικά όπως είδη εδαφών και βράχος.
- Είναι σχεδιασμένο ως εργαλείο μοντελοποίησης γενικής χρήσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέραν προβλημάτων τάσης/παραμόρφωσης. Μπορεί να μοντελοποιήσει προβλήματα σε τομείς όπως μεταφορά θερμότητας, διάχυσημάζας, θερμική διαχείριση σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ακουστική, πιεζοηλεκτρική ανάλυση και προβλήματα γεωλογίας.
- Παρέχει μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για μοντελοποίηση γραμμικών και μη γραμμικών εφαρμογών. Προβλήματα με πολλά μέλη μοντελοποιούνται με το να συσχετιστεί η γεωμετρία ορίζοντας κάθε μέλος με το αντίστοιχο υλικό και διευκρινίζοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μελών. Στη μη γραμμική ανάλυση, το Abaqus επιλέγει αυτόματα τα κατάλληλα επαυξητικά βήματα ανάλυσης και ανοχής για κάθε φορτίο και τα προσαρμόζει συνεχώς κατά την πορεία της ανάλυσης για να επιβεβαιώνει ότι επιτυγχάνεται μια ακριβής επίλυση.
- Δυνατότητα στατικής και δυναμικής ανάλυσης.

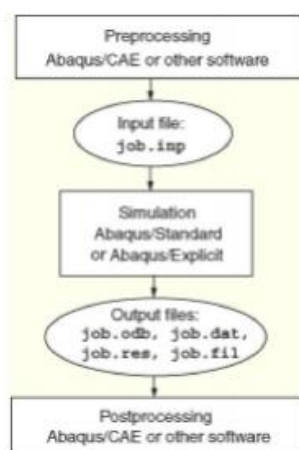
Το Abaqus σε σχέση με το ANSYS έχει πολύ καλή απόκριση σε μη-γραμμικά και περίπλοκα γεωμετρικά προβλήματα. Για την ακρίβεια, δημιουργήθηκε με σκοπό την επίλυση μη-γραμμικών προβλημάτων. Χρησιμοποιείται περισσότερο στον ακαδημαϊκό τομέα διότι υπάρχει η ευκολία στο να δημιουργήσει ο χρήστης υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως στην συγκεκριμένη εφαρμογή με το ψεκασμό πλάσματος μπορούμε να δημιουργήσουμε υλικά με κράμα κεραμικών. Τα άλλα προγράμματα χρησιμοποιούνται περισσότερο στη βιομηχανία, διότι έχουν συγκεκριμένα υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως μέταλλα. Επίσης στο Abaqus υπάρχει η ρουτίνα UEL. Το Abaqus λειτουργεί με στιγμές (instances), δηλαδή το που βρίσκεται το κάθε κομμάτι της διάταξης σε δεδομένη στιγμή, οπότε με αυτό τον τρόπο μπορούν να γίνουν διαφορετικά βήματα ανάλυσης σε κάθε πρόβλημα.

Η Simulia παρέχει πολύ καλή υποστήριξη στους χρήστες σε σχέση με τα άλλα προγράμματα, ενώ υπάρχουν ολοκληρωμένα εγχειρίδια τα οποία επιτρέπουν στο χρήστη πρόσβαση σε οποιαδήποτε πληροφορία ψάχνει. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ενσωμάτωσης κι άλλων προγραμμάτων όπως την πλατφόρμα CATIA για εφαρμογές PLM, αλλάζοντας ουσιαστικά τον τρόπο σχεδίασης, ανάπτυξης και κατασκευής χρησιμοποιώντας τα πακέτα αυτά. Το Abaqus επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργεί το πρόγραμμα (script) μέσω της γλώσσας Python για δημιουργία μοντέλων. Το Python είναι γλώσσα προγραμματισμού ευρείας χρήσης και ανεξάρτητη. Οτιδήποτε μπορεί να δημιουργηθεί στο Abaqus/CAE χρησιμοποιώντας GUI (graphicuserinterface), μπορεί επίσης να δημιουργηθεί γράφοντας κώδικα. Επιπλέον το Abaqus επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργεί κώδικα

γραμμένο στο C++ για γρήγορη επεξεργασία σε δεύτερο στάδιο. Μειονεκτήματα: υστερεί στο ότι δεν είναι τόσο φιλικό στο χρήστη. Χρειάζεται αρκετά βαθιά κατανόηση μη-γραμμικής ανάλυσης. Τα υλικά πρέπει να ορίζονται πλήρως όσον αφορά τις ιδιότητες τους, κάτι που καθιστά το ABAQUS λιγότερο εύχρηστο για τη βιομηχανία.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ABAQUS/CAE

Μια ολοκληρωμένη ανάλυση στο Abaqus συνήθως περιέχει τρία διαφορετικά στάδια: προεπεξεργασία (preprocessing), προσομοίωση (simulation) και μετεπεξεργασία (postprocessing). Τα τρία αυτά στάδια συνδέονται μεταξύ τους με αρχεία όπως φαίνεται πιο κάτω:



Εικόνα 3.1: Βήματα Ανάλυσης στο Abaqus

3.1.1 Προεπεξεργασία (preprocessing) Abaqus/CAE

Σε αυτό το στάδιο πρέπει να οριστεί το μοντέλο και το φυσικό πρόβλημα και να δημιουργηθεί αρχείο εισόδου Abaqus. Το μοντέλο συνήθως δημιουργείται γραφικά χρησιμοποιώντας το Abaqus/CAE ή άλλο προεπεξεργαστή, παρόλο που το αρχείο εισόδου Abaqus για μια απλή ανάλυση μπορεί να δημιουργηθεί άμεσα χρησιμοποιώντας εντολές προγραμματισμού.

3.1.2 Προσομοίωση - Simulation (Abaqus/Standard ή Abaqus/Explicit)

Η προσομοίωση, η οποία συνήθως εκτελείται ως διαδικασία που τρέχει στο φόντο, είναι το στάδιο στο οποίο το Abaqus/Standard ή Abaqus/Explicit επιλύει το αριθμητικό πρόβλημα που ορίστηκε στα παραδείγματα μοντέλων εξόδου για ανάλυση τάσεων και περιλαμβάνει παραμορφώσεις και τάσεις οποίες είναι αποθηκευμένες στα αρχεία binary, έτοιμα για μετέπειτα επεξεργασία. Μπορεί να χρειαστεί από δευτερόλεπτα μέχρι μέρες για

να ολοκληρωθεί μια ανάλυση, ανάλογα από το πόσο σύνθετο είναι ένα πρόβλημα και τη ταχύτητα του επεξεργαστή που χρησιμοποιείται.

3.1.3 Μετεπεξεργασία (Postprocessing – Abaqus/CAE)

Μπορούν να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα όταν η ανάλυση έχει ολοκληρωθεί και οι παραμορφώσεις και τάσεις, ή άλλες βασικές μεταβλητές έχουν υπολογιστεί. Η εκτίμηση γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας το module Visualization (οπτικοποίηση) του Abaqus/CAE ή άλλου προεπεξεργαστή. Το module Visualization, το οποίο διαβάζει το ουδέτερο αρχείο εξόδου binary, έχει ποικιλία επιλογών για το πως εμφανίζονται τα αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένου του χρώματος που γίνονται τα διαγράμματα X – Y, τα παραμορφωμένα σχήματα και τα animations.

Το Abaqus/CAE (CompleteAbaqusEnvironment) παρέχει απλό και ολοκληρωμένο περιβάλλον για δημιουργία μοντέλων, για κατάθεση και επίβλεψη εργασιών Abaqus, και εκτίμηση αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις Abaqus. Το Abaqus/CAE χωρίζεται σε module, όπου κάθε ένα από αυτά ορίζει μια λογική όψη της διαδικασίας μοντελοποίησης. Για παράδειγμα, ορισμός της γεωμετρίας, ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών και δημιουργία του πλέγματος. Μετακινώντας από μονάδα σε μονάδα (module), κτίζεται το μοντέλο. Όταν αυτό έχει ολοκληρωθεί, το Abaqus/CAE δημιουργεί αρχείο εισόδου το οποίο δίδεται στο προϊόν Abaqus analysis. Το αρχείο εισόδου μπορεί να δημιουργηθεί από το χρήστη, όπως περιγράφεται πιο κάτω.

3.2 ΞΕΚΙΝΩΝΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ABAQUS/CAE

Για να ανοίξει το πρόγραμμα επιλέγουμε το Start (έναρξη) >Programs (Προγράμματα) >Abaqus SE>Abaqus/CAE. Όταν ανοίγει το Abaqus/CAE, έχουμε το παράθυρο Start Session και τις ακόλουθες επιλογές:

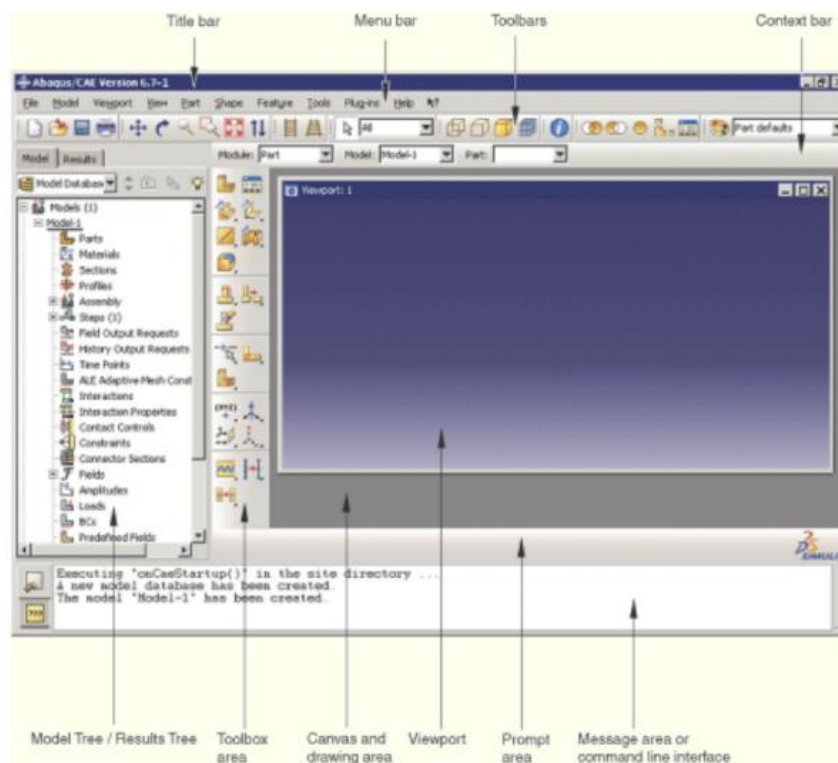
- Create Model Database για δημιουργία νέας ανάλυσης.
- Open Database για άνοιγμα αποθηκευμένου μοντέλου ή output database file (odb).
- RunScript επιτρέπει να τρέξουμε αρχείο που περιέχει εντολές Abaqus/CAE.
- Start Tutorial για να συμβουλευθούμε αρχεία στο διαδίκτυο.

3.2.1 Περιγραφή των παραθύρων Abaqus/CAE

Η αλληλεπίδραση με το Abaqus/CAE γίνεται μέσω του κυρίως παραθύρου. Τα μέρη του είναι τα ακόλουθα:

- **Title Bar (Γραμμή τίτλου):** Δείχνει την έκδοση Abaqus/CAE που χρησιμοποιείται και το όνομα του τρέχοντος αρχείου.

- **Menu bar (Μενού):** Περιέχει όλα τα διαθέσιμα μενού, τα οποία παρέχουν πρόσβαση σε όλες τις δυνατότητες του προγράμματος. Διαφορετικά μενού εμφανίζονται, ανάλογα με το πιο module έχει επιλεγεί στο contextbar.
- **Toolbars:** Παρέχουν γρήγορη πρόσβαση σε επιλογές, οι οποίες είναι επίσης διαθέσιμες στα μενού.
- **Context bar:** Το Abaqus/CAE χωρίζεται σε ομάδες με μονάδες module, όπου κάθε ένα από αυτά επιτρέπει στο χρήστη να δουλέψει σε ένα τομέα του μοντέλου, ενώ η λίστα module την μετακίνηση μεταξύ αυτών των module. Οι υπόλοιπες επιλογές σε στο Contextbar είναι μια λειτουργία του module στην οποία εργαζόμαστε. Για παράδειγμα το Contextbar επιτρέπει να επανέλθει ένα κομμάτι της διάταξης κατά τη διαδικασία δημιουργίας της γεωμετρίας του μοντέλου.
- **Model tree:** Παρέχει γραφικά τη γενική εικόνα του μοντέλου και των αντικειμένων που περιέχει όπως μέλη της διάταξης, υλικά, βήματα, φορτία, και εντολές εξόδου. Επιπλέον, το ModelTree παρέχει ένα εύχρηστο εργαλείο για μετακίνηση μεταξύ των module και για διαχείριση αντικειμένων. Αν το αρχείο του μοντέλου περιέχει περισσότερα από ένα μοντέλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ModelTree για μετακίνηση μεταξύ των μοντέλων. Όταν αποκτήσει οικειότητα ο χρήστης με το modeltree μπορεί να πραγματοποιήσει μέσω αυτού τις περισσότερες ενέργειες που υπάρχουν στο κυρίως μενού, και module toolboxes.



Εικόνα 3.2: Model Tree Abaqus

Results Tree: Παρέχει γραφικά τη γενική εικόνα των αρχείων εξόδου και άλλων συγκεκριμένων δεδομένων για κάθε ανάλυση, όπως διαγράμματα X-Y. Αν υπάρχουν


περισσότερα από ένα αρχεία εξόδου ανοικτά, με το Results Tree μπορούμε να μετακινηθούμε μεταξύ αυτών. Εξοικείωση με το Results Tree επιτρέπει την εκτέλεση των περισσότερων ενεργειών του Visualization module, το οποίο βρίσκεται στο main menu bar και το toolbox.

Toolbox area: Εισέρχοντας σε module, το Toolbox area δείχνει εργαλεία του Toolbox που είναι κατάλληλα για το συγκεκριμένο module. Το Toolbox επιτρέπει γρήγορη πρόσβαση σε πολλές από τις λειτουργίες module, οι οποίες είναι επίσης διαθέσιμες στο menu bar.

Canvas and drawing area: Μπορεί να γίνει αντιληπτό ως ένας χώρος όπου βάζουμε τα παράθυρα και viewports.

Viewport: τα viewports είναι παράθυρα στον κανβά όπου το Abaqus/CAE δείχνει το μοντέλο.

Prompt area: δείχνει οδηγίες για να ακολουθηθούν κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας. Για παράδειγμα, ζητά να επιλεγεί η γεωμετρία όταν δημιουργούνται ζεύγη (Set).

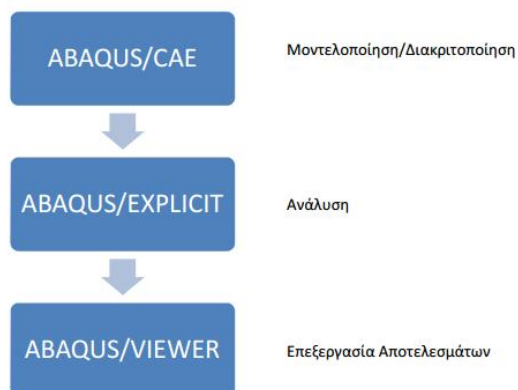
Message area: το Abaqus/CAE εμφανίζει πληροφορίες και προειδοποιήσεις στην περιοχή message area. Για να αλλάξει το μέγεθος της, τραβάμε την άνω άκρη. Για να εμφανιστούν πληροφορίες οι οποίες είναι εκτός οθόνης πατάμε τα πάνω ή κάτω τόξα (scroll) στα δεξιά του παραθύρου. Η περιοχή αυτή εμφανίζεται προεπιλεγμένα, αλλά χρησιμοποιεί τον ίδιο χώρο που χρησιμοποιείται και από το command line interface. Αν έχει χρησιμοποιηθεί προηγουμένως το command line interface, πρέπει να επιλέξουμε το κουμπί  στην κάτω αριστερά γωνία του κυρίως παραθύρου για να ενεργοποιηθεί η περιοχή μηνυμάτων. Σημείωση: Αν νέα μηνύματα προστεθούν στη γραμμή αυτή ενώ η γραμμή command line είναι ενεργή, το Abaqus/CAE αλλάζει σε κόκκινο το χρώμα του φόντου που περικλείει τη γραμμή μηνυμάτων. Όταν επιλέγουμε τη γραμμή μηνυμάτων, το φόντο επανέρχεται στο φυσιολογικό του χρώμα.

Command line interface: μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη γραμμή αυτή για να πληκτρολογήσουμε εντολές Python και να εκτιμήσουμε μαθηματικές εκφράσεις χρησιμοποιώντας το μεταφραστή Python που είναι ενσωματωμένος στο Abaqus/CAE. Τα interface module πρωτεύοντα (>>>) and δευτερεύοντα (...) δείχνουν πότε πρέπει να διορθωθούν οι εντολές για να γίνουν συμβατές με το συντακτικό Python. Η γραμμή εντολών command line είναι προεπιλεγμένα κρυμμένη, αλλά χρησιμοποιεί το ίδιο χώρο που χρησιμοποιείται και από την περιοχή μηνυμάτων message area. Πατώντας το κουμπί στην κάτω αριστερή γωνία του κυρίως παραθύρου αλλάζει από περιοχή μηνυμάτων σε γραμμή εντολών. Ένα ολοκληρωμένο μοντέλο περιέχει όλα όσα χρειάζεται το Abaqus για να ξεκινήσει την ανάλυση. Το Abaqus/CAE χρησιμοποιεί αρχείο μοντέλου για να αποθηκεύει τα μοντέλα.

Όταν ξεκινά το Abaqus/CAE, το παράθυρο Start Session επιτρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο κενό αρχείο μοντέλου. Για να γίνει η αποθήκευση πατάμε File>Save από το κυρίως μενού.

3.3 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ABAQUS

Το εμπορικό πακέτο ABAQUS αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο μηχανικής προσομοίωσης, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρέχοντας τη δυνατότητα επίλυσης μεγάλου εύρους απλών γραμμικών προβλημάτων καθώς επίσης και πολύπλοκων μη γραμμικών προβλημάτων. Η εκτενής βιβλιοθήκη στοιχείων και υλικών που διαθέτει καθιστά αρκετά εύκολη τη μοντελοποίηση και διακριτοποίηση οποιασδήποτε γεωμετρίας και υλικού. Στις περισσότερες αναλύσεις, οι απαιτήσεις του προγράμματος σε δεδομένα εισαγωγής, από το χρήστη, είναι η γεωμετρία, η συμπεριφορά του επιλεγμένου υλικού, οι οριακές συνθήκες και τα εφαρμοζόμενα φορτία. Στην περίπτωση όπου αναλύεται ένα δυναμικό πρόβλημα το ABAQUS υπολογίζει αυτόματα τη χρονική διαμέριση, κάνοντας συγχρόνως συνεχείς προσαρμογές κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια και αποδοτικότητα στη λύση. Με αυτό τον τρόπο η επέμβαση του χρήστη, στον έλεγχο της λύσης, καθίσταται σπανίως απαραίτητη (όχι όμως και απαγορευτική). Το προαναφερθέν πακέτο προγραμμάτων αποτελείται από τις εξής τρεις δομές, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα (Εικόνα 3.3), με τη σειρά χρήσης τους



Διάγραμμα 2-1 : Δομή του εμπορικού πακέτου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ABAQUS.

Εικόνα 3.3: Δομή του εμπορικού πακέτου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία Abaqus

Το ABAQUS/CAE πρόκειται για ένα διαδραστικό σχεδιαστικό πρόγραμμα (προεπεξεργαστής/preprocessor) που επιτρέπει τη σχεδίαση ή ακόμα και την εισαγωγή γεωμετρίας μοντέλων, από άλλα σχεδιαστικά προγράμματα, καθώς και τη διακριτοποίηση της με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με τη χρήση αυτού του προγράμματος καθορίζονται επίσης οι ιδιότητες του υλικού, τα φορτία, το είδος των στοιχείων καθώς και οι οριακές συνθήκες. Μετά το πέρας της μοντελοποίησης, που πραγματοποιείται σε αυτό το πρώτο στάδιο της μελέτης, οποιουδήποτε προβλήματος, ο προεπεξεργαστής γράφει ένα αρχείο δεδομένων για τον επιλύτη, ABAQUS/EXPLICIT.

Το ABAQUS/EXPLICIT πρόκειται για μια αυτοτελή λογισμική μονάδα που χρησιμοποιεί άμεσες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, για αυτό ακριβώς καθίσταται κατάλληλη για ανάλυση μη μόνιμων δυναμικών φαινομένων, όπως προσκρούσεις ή κρουστικά προβλήματα καθώς επίσης είναι πολύ αποδοτική στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων που περιλαμβάνουν εναλλαγή συνθηκών επαφής.

Το ABAQUS/VIEWER πρόκειται για ένα εργαλείο επεξεργασίας δεδομένων, που προκύπτουν από την ανάλυση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Διαθέτει ένα διαδραστικό γραφικό περιβάλλον, με πληθώρα εργαλείων και επιλογών που βοηθούν το χρήστη στη εξαγωγή, μελέτη και επεξεργασία των δεδομένων και αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

3.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ένα πρόβλημα καλείται μη γραμμικό, όταν το μητρώο δυσκαμψίας μεταβάλλεται με την παραμόρφωση της κατασκευής. Η εξίσωση που εκφράζει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου και των μετατοπίσεων είναι η ακόλουθη:

$$f = k(U)U \quad (3.1)$$

όπου το μητρώο δυσκαμψίας είναι πλέον μια συνάρτηση εξαρτώμενη από τις μετατοπίσεις. Επιγραμματικά, η μη γραμμικότητα μπορεί να προέρχεται:

(α) από την καταστατική συμπεριφορά του υλικού

(β) από την μεταβολή των συνοριακών συνθηκών (π.χ. πρόβλημα επαφής)

(γ) από τη γεωμετρία της κατασκευής (θεωρία μεγάλων στροφών και παραμορφώσεων).

3.3.1 Σύγκριση άμεσων (explicit) και έμμεσων (implicit) μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων

Και στις δύο μεθόδους χρονικής ολοκλήρωσης, το ισοζύγιο ορίζεται σε σχέση με τις εξωτερικές εφαρμοζόμενες δυνάμεις, \mathbf{P} , τις εσωτερικές δυνάμεις των στοιχείων, \mathbf{I} , και τις κομβικές επιταχύνσεις

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (3.2)$$

όπου το \mathbf{M} είναι το μητρώο μάζας. Και οι δύο μέθοδοι λύνουν ως προς τις κομβικές επιταχύνσεις και χρησιμοποιούν του ίδιους υπολογισμούς στοιχείων για να προσδιορίσουν τις εσωτερικές δυνάμεις. Η ουσιαστική διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο τρόπο υπολογισμού των κομβικών επιταχύνσεων. Στην έμμεση μέθοδο μία ομάδα γραμμικών εξισώσεων λύνεται με κάποια απευθείας μέθοδο επίλυσης. Το υπολογιστικό κόστος (κυρίως μνήμης) της επίλυσης αυτό των εξισώσεων είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με το σχετικά χαμηλότερο κόστος των κομβικών υπολογισμών με την άμεση μέθοδο.

Αρχικά στην παραπάνω εξίσωση αντικαθίστανται οι επιταχύνσεις συναρτήσει των μετατοπίσεων στην ίδια χρονική στιγμή, ολοκληρώνοντας με την μέθοδο Newmark. Έτσι προκύπτει ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων με αγνώστους τις μετατοπίσεις. Για την επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton. Η Newton αναζητά να ικανοποιήσει το δυναμικό ισοζύγιο στο τέλος κάθε χρονικού βήματος $\mathbf{t} + \Delta\mathbf{t}$ και υπολογίζει τις μετατοπίσεις σε αυτό το χρόνο. Το χρονικό βήμα, $\Delta\mathbf{t}$, μπορεί να είναι σχετικά μεγάλο σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιείται στην άμεση μέθοδο, διότι στην έμμεση

μέθοδο είναι απόλυτα σταθερό (unconditionally stable). Σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα κάθε βήμα, συνήθως, απαιτεί τόσες επαναλήψεις όσες απαιτούνται ώστε να μειωθούν οι υπολειπόμενες δράσεις εντός επιθυμητών ορίων. Κάθε επανάληψη της Newton επιλύει για μία διόρθωση, \mathbf{c}_j , των στοιχειωδών μετατοπίσεων, $\Delta \mathbf{u}_j$. Έτσι κάθε επανάληψη απαιτεί τη ταυτόχρονη επίλυση μιας ομάδας εξισώσεων,

$$\hat{\mathbf{K}}_j \mathbf{c}_j = \mathbf{P}_j - \mathbf{I}_j - \mathbf{M}_j \ddot{\mathbf{u}}_j, \quad (3.3)$$

που είναι μία υπολογιστικά ακριβή διαδικασία για μεγάλα μοντέλα. Το μητρώο δυσκαμψίας, $\hat{\mathbf{K}}_j$, αποτελεί ένα γραμμικό συνδυασμό του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας και του μητρώου μάζας, για κάθε επανάληψη. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου αρκετές ποσότητες - υπολειπόμενες δράσεις, διορθώσεις μετατοπίσεων, κτλ. - βρεθούν εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Για μια λεία μη γραμμική απόκριση η μέθοδος Newton παρουσιάζει τετραγωνική ταχύτητα σύγκλισης, όπως διαφαίνεται και παρακάτω :

Πίνακας 3.1: Τετραγωνική ταχύτητα σύγκλισης

Επαναλήψεις	Σχετικό Σφάλμα
1	1
2	10^{-2}
3	10^{-4}
.	.
.	.
.	.

Βέβαια, εάν το μοντέλο περιέχει πολλές ασυνεχείς διεργασίες, όπως επαφές σωμάτων και τριβή, η τετραγωνική σύγκλιση είναι πιθανόν να μην επιτευχθεί και μεγάλος αριθμός επαναλήψεων να απαιτηθεί. Αυτό καθιστά αρκετά πιθανή τη μείωση στο χρονικό βήμα, προκειμένου να ικανοποιηθεί το ισοζύγιο (Hibbitt et al, 1996).

Έτσι λοιπόν, ενώ στην έμμεση ανάλυση πρέπει να γίνουν πολλές επαναλήψεις για να προσδιοριστεί η λύση σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα, στη άμεση ανάλυση η λύση προσδιορίζεται χωρίς επαναλήψεις, αλλά προοδεύοντας άμεσα τη κινηματική κατάσταση από το προηγούμενο χρονικό βήμα στο επόμενο. Στην άμεση μέθοδο δεν απαιτείται τριγωνοποίηση των μητρώων για την επίλυση συστημάτων, όντας διαγώνια, κάτι που την καθιστά ταχύτερη και την «απελευθερώνει» από προβλήματα αντιστροφής μητρώων, επιτρέποντας, κατά συνέπεια, ένα μοντέλο να είναι υποστατικό. Οπότε μια ολόκληρη κατασκευή ή μέρος αυτής μπορεί να είναι τελείως ελεύθερη και να πραγματοποιεί κίνηση στερεού σώματος. Ακόμα και όταν μία στατική ανάλυση απαιτεί μεγάλο αριθμό χρονικών βημάτων, χρησιμοποιώντας την άμεση μέθοδο, αυτή μπορεί να είναι πιο αποδοτική από ότι η ανάλυση με έμμεση μέθοδο που θα απαιτούσε πολλές επεξεργαστικά ακριβές επαναλήψεις. Υπογραμμίζοντας την αποδοτικότητα της μεθόδου, αναφέρεται ότι στη περίπτωση όπου η ανάλυση ενός προβλήματος με τις δύο μεθόδους, έχει συγκρίσιμο

υπολογιστικό κόστος, τα πραγματικά χρησιμοποιούμενα αποθέματα μνήμης και σκληρού δίσκου είναι μικρότερα στην άμεση μέθοδο, καθιστώντας την ελκυστικότερη.

3.4 ΠΡΟΤΕΡΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ

Η άμεση μέθοδος είναι κυρίως κατάλληλη για την επίλυση μη-γραμμικών δυναμικών προβλημάτων, που απαιτούν πολύ μικρή χρονική διαμέριση προκειμένου να μελετηθούν υψίσουχνα φαινόμενα. Εάν η διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου είναι μικρή, μπορεί να επιτευχθεί λύση αποδοτικά (από χρονικά υπολογιστική μεριά).

Προβλήματα που εμφανίζουν επαφή τμημάτων της κατασκευής ή άλλης μορφής μεταβατικών συνθηκών (συνοριακών ή/και φορτίσεων) έχουν ήδη διατυπωθεί αλγοριθμικά στην άμεση μέθοδο και μπορούν να εφαρμοστούν σε κομβικό επίπεδο, χωρίς να απαιτούνται επαναλήψεις. Οι κομβικές επιταχύνσεις μπορούν προσαρμοστούν ώστε να ικανοποιούν το ισοζύγιο των εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια τη επαφής.

Το πιο σημαντικό προτέρημα της άμεσης μεθόδου είναι η έλλειψη του καθολικού μητρώου επαφτομενικής δυσκαμψίας (global tangent stiffness matrix), που απαιτείται στη έμμεσες μεθόδους. Ενώ επαναλήψεις και όρια σύγκλησης δεν απαιτούνται, εφόσον η κατάσταση του μοντέλου εξελίσσεται άμεσα.

3.4.1 Δυναμική ανάλυση με ρητή ολοκλήρωση (Dynamic Explicit Analysis)

Το ABAQUS/Explicit χρησιμοποιεί τον κανόνα κεντρικών διαφορών προκειμένου να ολοκληρώσει τις εξισώσεις κίνησης, άμεσα, ως προς το χρόνο, χρησιμοποιώντας τις κινηματικές συνθήκες τους ενός βήματος για να υπολογίσει τις κινηματικές συνθήκες του επόμενου. Στην αρχή κάθε χρονικού βήματος το πρόγραμμα επιλύει ως προς το δυναμικό ισοζύγιο, το οποίο δηλώνει ότι το κομβικό μητρώο της μάζας, \mathbf{M} , πολλαπλασιαζόμενο επί τις κομβικές επιταχύνσεις, ισούται με τις συνολικές κομβικές δυνάμεις (τη διαφορά, δηλαδή, των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων, \mathbf{P} , με των εσωτερικών δυνάμεων των στοιχείων, \mathbf{I}):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (3.4)$$

Οι επιταχύνσεις στην έναρξη του χρονικού βήματος t υπολογίζονται ως εξής :

$$\ddot{\mathbf{u}}|_{(t)} = (\mathbf{M}^{-1})\mathbf{P} - \mathbf{I}|_{(t)} \quad (3.5)$$

Εφόσον, στην άμεση μεθοδολογία πάντα χρησιμοποιούνται διαγώνια μητρώα μάζας, η επίλυση ως προς τις επιταχύνσεις είναι επουσιώδης · δεν υπάρχουν εξισώσεις προς ταυτόχρονη επίλυση. Η επιτάχυνση οποιοδήποτε κόμβου καθορίζεται πλήρως από τη μάζα του και την καθαρή δύναμη που ασκείται πάνω του, καθιστώντας έτσι τους κομβικούς υπολογισμούς, υπολογιστικά φθηνούς.

Οι επιταχύνσεις ολοκληρώνονται ως προς το χρόνο, χρησιμοποιώντας το κανόνα των κεντρικών διαφορών, ο οποίος υπολογίζει την αλλαγή στην ταχύτητα, υποθέτοντας ότι η επιτάχυνση είναι σταθερή. Η αλλαγή αυτή στην ταχύτητα προστίθεται στην ταχύτητα στη μέση του προηγούμενου βήματος, ώστε να προσδιοριστούν οι ταχύτητες στη μέση του τρέχοντος βήματος :

$$\dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)}}{2} \ddot{u}|_{(t)} \quad (3.6)$$

Οι ταχύτητες ολοκληρώνονται ως προς χρόνο και προστίθενται στις μετατοπίσεις στην αρχή κάθε χρονικού βήματος (t), ώστε να προσδιοριστούν οι μετατοπίσεις στο τέλος κάθε χρονικού βήματος (t+Δt)

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (3.7)$$

Έτσι, ικανοποιώντας το δυναμικό ισοζύγιο στην αρχή κάθε χρονικού βήματος προκύπτουν οι επιταχύνσεις. Γνωρίζοντας τις επιταχύνσεις, οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις προκύπτουν άμεσα (explicitly) μέσω του χρόνου. Ο όρος άμεσα αναφέρεται στο γεγονός ότι η κατάσταση στο τέλος κάθε χρονικού βήματος βασίζεται μόνο στις μετατοπίσεις, στις ταχύτητες και στις επιταχύνσεις στην αρχή του βήματος. Αυτή η μέθοδος ολοκληρώνει ακριβώς σταθερές επιταχύνσεις. Προκειμένου η μέθοδος να παράγει ακριβή αποτελέσματα, τα χρονικά βήματα πρέπει να είναι αρκετά μικρά, έτσι ώστε οι επιταχύνσεις να σχεδόν σταθερές σε ένα χρονικά βήμα. Εφόσον το χρονικό βήμα είναι μικρό, τυπικά, η ανάλυση απαιτεί πολλές χιλιάδες χρονικά βήματα. Ευτυχώς, όπως προαναφέρθηκε, κάθε βήμα είναι υπολογιστικά φθηνό, διότι δεν υπάρχουν εξισώσεις προς ταυτόχρονη λύση. Το μεγαλύτερο υπολογιστικό έξοδο έγκειται στους υπολογισμούς των στοιχείων προκειμένου να προσδιοριστούν οι εσωτερικές δυνάμεις των στοιχείων που δρουν στους κόμβους. Οι υπολογισμοί των στοιχείων, συμπεριλαμβάνουν το προσδιορισμό των παραμορφώσεων των στοιχείων και εφαρμόζοντας τις καταστατικές παραμέτρους του υλικού το προσδιορισμό των τάσεων και κατ' επέκταση, τις εσωτερικές δυνάμεις.

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη και περιληπτική παρουσίαση του αλγόριθμου της άμεσης μεθόδου:

1. Κομβικοί υπολογισμοί.

α. Δυναμικό ισοζύγιο.

$$\ddot{u}|_{(t)} = M^{-1}(P_{(t)} - I_{(t)}) \quad (3.8)$$

β. Άμεση ολοκλήρωση ως προς το χρόνο

$$\dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)}}{2} \ddot{u}|_{(t)} \quad (3.9)$$

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (3.10)$$

2. Υπολογισμοί στα σημεία ολοκλήρωσης των στοιχείων :

α. Υπολογισμός των παραμορφώσεων, σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης.

β. Υπολογισμός των τάσεων, σ , από τις καταστατικές εξισώσεις

$$\sigma_{(t+\Delta t)} = f(\sigma_{(t)}, d\varepsilon) \quad (3.11)$$

γ. Συγκέντρωση κομβικών εσωτερικών δυνάμεων, $I_{(t+\Delta t)}$.

3. Εναλλαγή $t+\Delta t$ σε t και επιστροφή στο 1ο βήμα.

3.4.2 Όριο ευστάθειας και χρονική διακριτοποίηση της άμεσης μεθόδου

Με την άμεση μέθοδο, το μοντέλο εξελίσσεται διαμέσου ενός χρονικού βήματος, Δt , που βασίζεται στη κατάσταση του μοντέλου στην έναρξη του βήματος τη χρονική στιγμή t . Εάν το χρονικό βήμα γίνει μεγαλύτερο από το μέγιστο συνολικό χρόνο, τότε θεωρείται ότι το βήμα έχει υπερβεί το όριο ευστάθειας. Ένα πιθανό αίτιο που μπορεί να προκαλέσει αυτή την υπέρβαση, είναι μία αριθμητική αστάθεια, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια εκτός ορίων λύση. Γενικά δεν είναι πιθανό να μπορεί να προσδιοριστεί το όριο ευστάθειας επακριβώς, οπότε αντί αυτού πραγματοποιούνται συντηρητικές εκτιμήσεις. Το όριο ευστάθειας επηρεάζει σημαντικά την αξιοπιστία και την ακρίβεια, οπότε πρέπει να προσδιορίζεται με συνέπεια και συντηρητικά. Για λόγους υπολογιστικής αποδοτικότητας το ABAQUS/Explicit επιλέγει το χρονικό βήμα όσο το δυνατόν κοντά στο όριο ευστάθειας χωρίς να το υπερβαίνει.

Το όριο ευστάθειας ορίζεται σε αντιστοιχία προς την υψηλότερη συχνότητα του συστήματος (ω_{\max}). Η μαθηματική έκφραση του ορίου ευστάθειας, χωρίς απόσβεση, ορίζεται ως εξής :

$$\Delta t_{\max} = \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (3.12)$$

ενώ συμπεριλαμβανομένης της απόσβεσης,

$$\Delta t_{\max} = \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \zeta^2} - \zeta) \quad (3.13)$$

Όπου το ζ είναι το κλάσμα της κρίσιμης απόσβεσης της ιδιομορφής με τη μέγιστη συχνότητα. Ίσως αντίθετα με τη διαίσθηση του μηχανικού, η απόσβεση πάντα μειώνει το όριο ευστάθειας. Η πραγματική υψηλότερη συχνότητα στο σύστημα βασίζεται σε ένα πολύπλοκο σύστημα αλληλεπιδρώντων παραγόντων, και είναι υπολογιστικά ανέφικτο να προσδιοριστεί η ακριβής της τιμή. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται μια απλή, συντηρητική και αποδοτική εκτίμηση. Αντί να ερευνάται ολόκληρο το μοντέλο, εκτιμάται η υψηλότερη συχνότητα καθενός στοιχείου του μοντέλου ξεχωριστά. Μπορεί να δειχθεί ότι η υψηλότερη συχνότητα στοιχείου, που προσδιορίζεται από μια στοιχείο προς στοιχείο (element-by-element) προσέγγιση, είναι πάντα μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα του συνολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Βάσει της στοιχείο προς στοιχείο προσέγγισης, το όριο ευστάθειας μπορεί να επαναπροσδιοριστεί χρησιμοποιώντας το

μήκος στοιχείου, L_e , και την ταχύτητα μετάδοσης του κύματος (wave speed) του συνεχούς μέσου, c_d :

$$\Delta t_{\max} = \frac{L_e}{c_d} \quad (3.14)$$

Για τους περισσότερους τύπους στοιχείων – ένα παραμορφωμένο τετραεδρικό στοιχείο, για παράδειγμα – η παραπάνω εξίσωση είναι μόνο μία εκτίμηση του πραγματικού, στοιχείο προς στοιχείο, προσδιορισμένου ορίου ευστάθειας, διότι δεν είναι ξεκάθαρο πως θα προσδιοριστεί το μήκος στοιχείου. Ως μία προσέγγιση, η μικρότερη απόσταση στοιχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά η προκύπτουσα εκτίμηση δεν είναι πάντα συντηρητική. Όσο πιο μικρή είναι αυτή η απόσταση, τόσο μικρότερο είναι το όριο ευστάθειας. Η ταχύτητα κύματος είναι ιδιότητα του υλικού :

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.15)$$

όπου το E , είναι το μέτρο ελαστικότητας κατά Young και ρ η πυκνότητα. Όσο πιο άκαμπτο είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του κύματος, καταλήγοντας σε χαμηλότερο όριο ευστάθειας. Όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα του υλικού, τόσο υψηλότερο το όριο ευστάθειας.

Με τον απλοποιημένο αυτό ορισμό του ορίου ευστάθειας που χρησιμοποιεί το ABAQUS/Explicit παρέχεται μια διαισθητική κατανόηση. Το όριο ευστάθειας είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα κύμα παραμόρφωσης να διανύσει την απόσταση που ορίζεται από το χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου. Εάν είναι γνωστό το μέγεθος της διάστασης του μικρότερου στοιχείου και την ταχύτητα κύματος στο συνεχές μέσο, μπορεί να εκτιμηθεί το όριο ευστάθειας. Για παράδειγμα, εάν η διάσταση του μικρότερου στοιχείου είναι 5 mm και η ταχύτητα κύματος 5000 m/s, το ευσταθές χρονικό βήμα είναι 1×10^{-6} s.

3.4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το όριο ευστάθειας

1. Επίδραση της συμπεριφοράς του υλικού στο όριο ευστάθειας

Το υλικό ενός μοντέλου επηρεάζει το όριο ευστάθειας, όπως προαναφέρθηκε, μέσω της ταχύτητας του κύματος. Σε ένα υλικό με γραμμική συμπεριφορά η ταχύτητα κύματος είναι σταθερή, οπότε οι μόνες αλλαγές στο όριο ευστάθειας κατά τη διάρκεια της ανάλυσης προκύπτουν από τις αλλαγές στη διάσταση του μικρότερου στοιχείου κατά την ανάλυση. Σε ένα υλικό με μη γραμμική συμπεριφορά, όπως η πλαστική συμπεριφορά ενός μετάλλου, η ταχύτητα κύματος αλλάζει καθώς το υλικό διαρρέει και η ακαμψία του υλικού αλλάζει. Το ABAQUS/Explicit εποπτεύει τις ταχύτητες κύματος του μοντέλου κατά τη διάρκεια της ανάλυσης και χρησιμοποιεί την κατάσταση του υλικού σε κάθε στοιχείο για εκτιμήσεις ευστάθειας. Μετά τη διαρροή, η ακαμψία μειώνεται, ελαττώνοντας την ταχύτητα κύματος και κατά συνέπεια αυξάνεται το όριο ευστάθειας (Hibbitt et al, 1996).

2. Επίδραση του πλέγματος στο όριο ευστάθειας

Εφόσον το όριο ευστάθειας είναι προσεγγιστικά ανάλογο της μικρότερης διάστασης στοιχείου, είναι ευνοϊκό να διατηρηθεί το μέγεθος του στοιχείου όσο μεγάλο γίνεται.

Δυστυχώς όμως για μία ακριβή ανάλυση είναι απαραίτητο συχνά η χρήση πιο πυκνού πλέγματος. Για να αποκτηθεί, λοιπόν, το μέγιστο δυνατό όριο ευστάθειας και ταυτόχρονα να χρησιμοποιείται το απαιτούμενης πυκνότητας πλέγμα, η καλύτερη προσέγγιση είναι η διατήρηση όσο μεγαλύτερης ομοιομορφίας στο πλέγμα είναι δυνατή. Αφού το όριο ευστάθειας εξαρτάται από τη διάσταση του μικρότερου στοιχείου στο μοντέλο, ακόμη και ένα μόνο μικρό ή διαστρεβλωμένου σχήματος στοιχείο μπορεί να μειώσει το όριο ευστάθειας δραστικά. Το ABAQUS/Explicit παρέχει τη δυνατότητα εύρεσης των δέκα στοιχείων με το χαμηλότερο όριο ευστάθειας. Όταν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα όρια ευστάθειας των στοιχείων αυτών με εκείνα του υπόλοιπου πλέγματος της κατασκευής, η διαδικασία της επαναδιακριτοποίησης της κατασκευής με μεγαλύτερη ομοιογένεια στοιχείων καθίσταται άξια ενασχόλησης (Hibbitt et al, 1996).

4. ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (XFEM)

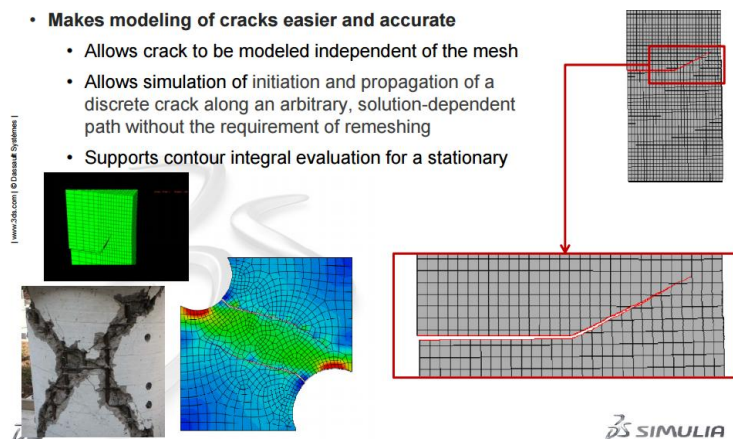
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση και η εξέλιξη της ρωγμής χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων είναι δύσκολη εξαιτίας της τοπολογίας της περιοχής που αλλάζει συνεχώς. Η διευρυμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (extended finite element method XFEM) έχει προσομοιώσει επιτυχώς ρωγμές επειδή η διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από τη γεωμετρία της ρωγμής, και γενικά η περιοχή της ρωγμής δεν χρειάζεται να διακριτοποιηθεί ξανά όσο η ρωγμή εξελίσσεται.

Η XFEM είναι μία αριθμητική μέθοδος που ενισχύει την κλασική μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων εμπλουτίζοντας το χώρο των λύσεων με ασυνεχείς συναρτήσεις για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Παρουσιάστηκε από τον Ted Belytschko το 1999 για την επίλυση προβλημάτων με τοπικά χαρακτηριστικά, που δεν μπορούν εύκολα να λυθούν με τεχνικές βελτίωσης του δικτύου (mesh refinement).

Η προσομοίωση και μελέτη των ρωγμών ήταν από τις πρώτες εφαρμογές που μελετήθηκαν με αυτή τη μέθοδο. Στη βασική της διατύπωση οι ασυνεχείς συναρτήσεις σχήματος (discontinuous basis functions) προστίθενται στις κλασικές πολυωνυμικές συναρτήσεις για τα στοιχεία τα οποία διασταυρώνονται με τη ρωγμή για να συμπεριλάβουν τις μετακινήσεις του ανοίγματος. Με αυτό το τρόπο το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων παραμένει αμετάβλητο και δεν χρειάζεται να ανανεωθεί για να ακολουθήσει τη διάδοση της ρωγμής.

Μεταγενέστερες έρευνες απέδειξαν ότι η μέθοδος μπορεί να γενικευτεί για προβλήματα που περιλαμβάνουν μοναδικότητες (singularities), σε διεπιφάνειες υλικών και σε υλικά με κενά. Η μέθοδος αυτή έχει περιληφθεί και σε εμπορικούς κώδικες όπως επίσης και στο Abaqus.



Εικόνα 4.1: Παραδείγματα μοντελοποίησης ρωγμών στο Abaqus με τη μέθοδο XFEM

Είναι μια επέκταση της συμβατικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων βασισμένη στην έννοια του καταμερισμού της μονάδας.

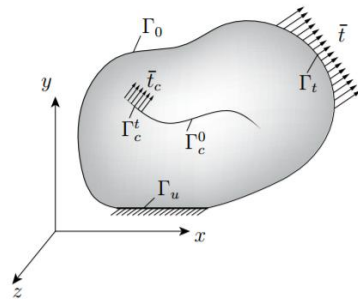
Επιτρέπει την παρουσία ασυνεχειών σε ένα στοιχείο εμπλουτίζοντας τους βαθμούς ελευθερίας με ειδικές συναρτήσεις μετατόπισης.

4.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά όλες οι εξισώσεις του προβλήματος ελαστοστατικής για το τρισδιάστατο ρηγματωμένο στερεό μέσο.

4.2.1 Διέπουσες Εξισώσεις

Έστω ένα ρηγματωμένο τρισδιάστατο σώμα με όρια Γ αποτελούμενο από τα μέρη Γ_0, Γ_u όπου οι μετακινήσεις \bar{u} επιβάλλονται ως συνοριακές συνθήκες τύπου Dirichlet, Γ_t όπου οι επιφανειακές τάσεις \bar{t} επιβάλλονται ως συνοριακές συνθήκες τύπου Neumann και την επιφάνεια της ρωγμής Γ_c όπου $\Gamma = \Gamma_0 \cup \Gamma_u \cup \Gamma_t \cup \Gamma_c$ και $\Gamma_c = \Gamma_c^t \cup \Gamma_c^0$ σύμφωνα με το Σχήμα 4.1. Θα πρέπει να τονιστεί ότι στην γενική περίπτωση, επιφανειακές τάσεις \bar{t}_c επιβάλλονται και σε μέρος της επιφάνειας της ρωγμής (Γ_c^t). Οι εξισώσεις ισορροπίας καθώς και οι συνοριακές συνθήκες διατυπώνονται ως εξής:



Σχήμα 4.1: Ρηγματωμένο στερεό σώμα

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad \text{στο } \Omega \quad (4.1)$$

$$u = \bar{u} \quad \text{στο } \Gamma_u \quad (4.2)$$

$$\sigma \cdot n = \bar{t} \quad \text{στο } \Gamma_t \quad (4.3)$$

$$\sigma \cdot n = 0 \quad \text{στο } \Gamma_c^0 \quad (4.4)$$

$$\sigma \cdot n = \bar{t}_c \quad \text{στο } \Gamma_c^t \quad (4.5)$$

όπου σ είναι ο τανυστής τάσης Cauchy, n είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του σώματος, b είναι η δύναμη ανά μονάδα όγκου η οποία ασκείται καθολικά στο σώμα, u είναι το πεδίο μετακινήσεων και ∇ είναι ο διαφορικός τελεστής βαθμίδας. Σύμφωνα με τις εξισώσεις συμβιβαστού για μικρές παραμορφώσεις, οι τροπές ϵ ορίζονται ως η συμμετρική βαθμίδα του πεδίου μετακινήσεων u :

$$\epsilon = \nabla_s u \quad (4.6)$$

Τέλος, οι καταστατικές εξισώσεις δίνονται από τον νόμο του Hooke:

$$\sigma = D : \epsilon \quad (4.7)$$

όπου D είναι ο τανυστής του Hooke.

4.2.2 Ασθενής μορφή

Για την κλασική διατύπωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητη η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας σε ασθενή μορφή: Ζητείται $u \in U$ ώστε $\forall u \in U$

$$\int_{\Omega} \sigma(u) : \epsilon(u) d\Omega = \int_{\Omega} b \cdot u d\Omega + \int_{\Gamma_t} \bar{t} \cdot u d\Gamma + \int_{\Gamma_c^t} \bar{t}_c \cdot u d\Gamma_c \quad (4.8)$$

όπου :

$$U = \{u | u \in (H^1(\Omega))^3, u = \bar{u} \text{ στο } \Gamma_u\} \quad (4.9)$$

και

$$V = \{v | v \in (H^1(\Omega))^3, v = 0 \text{ στο } \Gamma_u\} \quad (4.10)$$

Οι συναρτήσεις του χώρου $H^1(\Omega)$ είναι ασυνεχείς στην επιφάνεια της ρωγμής. Αξιοποιώντας τις καταστατικές εξισώσεις, η ασθενής μορφή των εξισώσεων ισορροπίας διατυπώνεται ως:

Ζητείται $u \in U$ ώστε $\forall v \in V$

$$\int_{\Omega} \epsilon(u): D: \epsilon(u) d\Omega = \int_{\Omega} b \cdot u d\Omega + \int_{\Gamma_t} \bar{t} \cdot u d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \bar{t}_c \cdot u d\Gamma_c \quad (4.11)$$

4.3 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ

Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων εμπλουτισμού στην εκτεταμένη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητη η γεωμετρική αναπαράσταση των ασυνεχειών. Οι δυνατοί τρόποι αναπαράστασης επιφανειών μπορούν γενικά να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- "Άμεσους" τρόπους αναπαράστασης. Σε αυτή την κατηγορία η ασυνέχεια περιγράφεται από κάποιου είδους παραμετρική καμπύλη ή επιφάνεια όπου κάθε τιμή των παραμέτρων αντιστοιχεί σε ένα γεωμετρικό σημείο της ασυνέχειας.
- "Έμμεσους" τρόπους αναπαράστασης. Σε αυτή την κατηγορία η αναπαράσταση γίνεται με τη μορφή βαθμωτών συναρτήσεων οι οποίες για κάθε δοσμένο γεωμετρικό σημείο δίνουν ως αποτέλεσμα την απόσταση του σημείου από την επιφάνεια της ασυνέχειας. Έτσι η ισοϋψής καμπύλη ή επιφάνεια με τιμή μηδέν ταυτίζεται με την επιφάνεια της ασυνέχειας.

Η μέθοδος συνόλων επιπέδων, η οποία εντάσσεται στη δεύτερη κατηγορία, έχει επικρατήσει ως τρόπος αναπαράστασης ασυνεχειών λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων που προσφέρει τόσο στον υπολογισμό των συναρτήσεων εμπλουτισμού όσο και στον καθορισμό των κόμβων και στοιχείων όπου απαιτείται εμπλουτισμός.

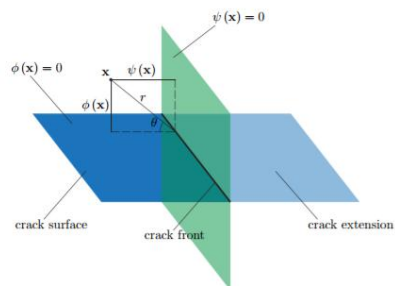
Για την αναπαράσταση ρωγμών απαιτείται ο ορισμός δύο συναρτήσεων συνόλων επιπέδων. Στη συνέχεια της διατριβής οι συναρτήσεις αυτές συμβολίζονται ως ϕ και ψ και για ένα δοσμένο γεω-μετρικό σημείο x ορίζονται ως εξής:

- $\phi(x)$ είναι η προσημασμένη απόσταση από την επιφάνεια της ρωγμής η οποία ορίζεται ως:

$$\phi(x) = \min_{x \in \Gamma_c} \|x - \bar{x}\| \text{sign}(n^+ \cdot (x - \bar{x})) \quad (4.12)$$

όπου n^+ είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια της ρωγμής και $\text{sign}()$ είναι η συνάρτηση προσήμου:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{για } x > 0 \\ -1 & \text{για } x < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$



Εικόνα 4.2: Ορισμός συναρτήσεων επιπέδων καθώς και του πολικού συστήματος συντεταγμένων

- $\psi(x)$ είναι μία συνάρτηση προσημασμένης απόστασης ώστε $\nabla\phi \cdot \nabla\psi = 0$ και η ακμή της ρωγμής να ορίζεται από τις σχέσεις $\phi(x) = 0$ και $\psi(x) = 0$. Οι συναρτήσεις $\phi(x)$ και $\psi(x)$ παίρνουν τιμές και πέρα από την ακμή της ρωγμής ορίζοντας έτσι την προέκταση της ρωγμής.

Κατά κανόνα οι συναρτήσεις συνόλων επιπέδων υπολογίζονται μόνο στους κόμβους ενώ στο εσωτερικό των στοιχείων προσεγγίζονται με τις συναρτήσεις σχήματος. Έτσι αν N_i είναι οι συναρτήσεις βάσης που αντιστοιχούν στους κόμβους I και ϕ_i, ψ_i είναι οι τιμές των συναρτήσεων προσημασμένης απόστασης στους κόμβους αυτούς, τότε οι τιμές των συναρτήσεων αυτών στο εσωτερικό των στοιχείων δίνονται από τη σχέση:

$$\phi = \sum_I N_I(x)\phi_I \quad (4.14)$$

$$\psi = \sum_I N_I(x)\psi_I \quad (4.15)$$

Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων εμπλουτισμού είναι απαραίτητος ο ορισμός ενός πολικού συστήματος συντεταγμένων. Το σύστημα αυτό ορίζεται σε ένα επίπεδο κάθετο στην ακμή της ρωγμής και οι συντεταγμένες του μπορούν να προκύψουν, με βάση τις συναρτήσεις συνόλων επιπέδων από τις σχέσεις:

$$r = \sqrt{\phi^2 + \psi^2} \quad (4.16)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\phi}{\psi}\right) \quad (4.17)$$

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζονται οι συντεταγμένες του πολικού αυτού συστήματος καθώς και οι συναρτήσεις συνόλων επιπέδων για την απλή περίπτωση μιας επίπεδης τρισδιάστατης ρωγμής. Στα προβλήματα διάδοσης ρωγμών απαιτείται, εκτός από την αναπαράσταση της ρωγμής στην αρχική της κατάσταση, η αναπαράσταση της ρωγμής σε κάθε βήμα της διάδοσης. Αυτό στη μέθοδο συνόλων επιπέδων επιτυγχάνεται με την αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως σύνθετη καθώς κατά την επίλυση χάνονται ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες των συναρτήσεων προσημασμένης απόστασης με αποτέλεσμα να απαιτούνται επιπλέον βήματα για την αποκατάσταση αυτών των ιδιοτήτων. Επίσης, η διαδικασία αυτή συνήθως λαμβάνει χώρα σε μία περιοχή γύρω από τη ρωγμή και όχι στο σύνολο του στερεού σώματος ώστε να ελαχιστοποιηθεί το υπολογιστικό κόστος. Για την αποφυγή των

παραπάνω δυσκολιών έχουν προταθεί μέθοδοι οι οποίες παρακάμπτουν τη λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Δύο από αυτές τις μεθόδους είναι η μέθοδος διανυσματικών συνόλων επιπέδων καθώς και η μέθοδος που περιλαμβάνει την αναπαράσταση της ρωγμής με έναν "ύβριδικό" "άμεσο" και "έμμεσο" τρόπο. Οι δύο παραπάνω μέθοδοι επιχειρούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα που παρέχονται από τις έμμεσες μεθόδους αναπαράστασης με την απλότητα των άμεσων μεθόδων οι οποίες χρησιμοποιούνταν σε παλαιότερες εφαρμογές της εκτεταμένης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

4.4 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην Εισαγωγή του κεφαλαίου, ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της εκτεταμένης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αλλά και άλλων παρεμφερών μεθόδων είναι η πραγματοποίηση του εμπλουτισμού αξιοποιώντας την ιδιότητα του καταμερισμού της μονάδας.

Έστω ένα σύνολο συναρτήσεων $N_I^*(x)$, ορισμένων σε μία περιοχή Ω , ώστε να πληρείται η σχέση:

$$\sum_{\forall I} N_I^*(x) = 1 \quad (4.18)$$

Τότε η ιδιότητα του καταμερισμού της μονάδας έγκειται στο γεγονός ότι οποιαδήποτε συνάρτηση $\Psi(x)$ μπορεί να αναπαρασταθεί από το γινόμενο της με το άθροισμα των συναρτήσεων (καταμερισμό της μονάδας) $N_I^*(x)$. Αν επιπλέον εισαχθούν οι παράμετροι b_I , τότε δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής της συναρτήσεως αυτής μέσω της μεταβολής των επιπρόσθετων παραμέτρων:

$$\sum_{\forall I} N_I^*(x) \psi(x) b_I \quad (4.19)$$

Αν θεωρήσουμε επιπλέον έναν κάρναβο πεπερασμένων στοιχείων τότε η εμπλουτισμένη προσέγγιση των μετακινήσεων παίρνει τη μορφή:

$$u(x) = \sum_{\forall I} \underbrace{N_I(x) u_I(x)}_{\text{προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων}} + \sum_{\forall I} \underbrace{N_I^*(x) \psi(x) b_I}_{\text{εμπλουτισμένο μέρος}} \quad (4.20)$$

όπου $N_I(x)$ είναι οι συναρτήσεις σχήματος των πεπερασμένων στοιχείων που αντιστοιχούν στους κόμβους I και u_I είναι οι αντίστοιχοι "κλασικοί" βαθμοί ελευθερίας. Στη Σχέση 4.20:

- Το πρώτο μέρος ταυτίζεται με την προσέγγιση της κλασικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.
- Το δεύτερο, εμπλουτισμένο μέρος δίνει στη μέθοδο τη δυνατότητα αναπαράστασης της συναρτήσεως εμπλουτισμού $\psi(x)$ αλλά και τη δυνατότητα προσαρμογής της μέσω των παραμέτρων b_I οι οποίες αποτελούν τους εμπλουτισμένους βαθμούς ελευθερίας.

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα αφενός να είναι δυνατή η ενσωμάτωση στην προσέγγιση ιδιοτήτων γνωστών αναλυτικών λύσεων για συγκεκριμένα προβλήματα και αφετέρου την παροχή πρόσθετης ευελιξίας εφόσον λόγω του γεγονότος ότι η αναλυτική

λύση προσαρμόζεται πλέον στο εκάστοτε πρόβλημα, δεν απαιτείται η λύση αυτή να είναι ακριβής. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι συναρτήσεις σχήματος πεπερασμένων στοιχείων Lagrange πληρούν εξ ορισμού την ιδιότητα του καταμερισμού της μονάδας. Έτσι, παρά το γεγονός ότι δεν τίθεται γενικά κάποιος περιορισμός ως προς τον ορισμό των συναρτήσεων $N_I^*(x)$, έχει επικρατήσει η ταύτισή τους με τις συναρτήσεις σχήματος των πεπερασμένων στοιχείων:

$$N_I^*(x) \equiv N_I(x) \quad (4.21)$$

Ένα χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί την εκτεταμένη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων από άλλες παρόμοιες μεθόδους είναι το γεγονός ότι ο εμπλουτισμός εφαρμόζεται τοπικά σε ένα μέρος του καννάβου. Επομένως, στην εκτεταμένη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων το σύνολο κόμβων I του δεύτερου μέρους της Σχέσης 4.20 διαφοροποιείται ώστε να αφορά ένα υποσύνολο των κόμβων του καννάβου.

Συνοψίζοντας λοιπόν η μέθοδος κατατάσσεται ως εξής:

- Οι συναρτήσεις βάσης αναφέρονται στον κάνναβο πεπερασμένων στοιχείων.
- Ο εμπλουτισμός πραγματοποιείται εξωγενώς εφόσον οι συναρτήσεις βάσης παραμένουν ανεπηρέαστες και το εμπλουτισμένο μέρος απλά προστίθεται στην προσέγγιση.
- Ο εμπλουτισμός πραγματοποιείται τοπικά εφόσον αφορά ένα υποσύνολο των κόμβων και το αντίστοιχο τμήμα του στερεού.

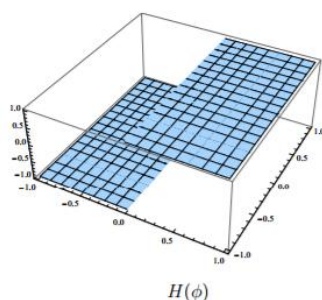
4.5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Στη συνέχεια οι συναρτήσεις εμπλουτισμού $\Psi(x)$ εξειδικεύονται για την περίπτωση του ρηγματωμένου στερεού.

4.5.1 Συναρτήσεις άλματος

Στο μεγαλύτερο μέρος της ρωγμής οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις εμπλουτισμού είναι οι λεγόμενες συναρτήσεις άλματος οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά τροποποιημένες συναρτήσεις βήματος Heaviside:

$$H(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{για } \varphi > 0 \\ -1 & \text{για } \varphi < 0 \end{cases} \quad (4.22)$$



Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση της συνάρτησης άλματος

Να τονισθεί ότι οι συναρτήσεις αυτές έχουν ως μεταβλητή τη συνάρτηση ϕ ώστε να λαμβάνουν τιμή 1 στη μία πλευρά της ρωγμής και -1 στην αντίθετη πλευρά. Οι συναρτήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό κόμβων οι οποίοι ανήκουν τουλάχιστον σε ένα στοιχείο το οποίο τέμνεται και χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη από τη ρωγμή.

Το σύνολο των στοιχείων στα οποία ανήκει ένας κόμβος θα αναφέρεται στο εξής και ως κομβικό υποστήριγμα. Οι συναρτήσεις αυτές, καθιστούν δυνατή την προσομοίωση της ασυνέχειας στις μετακινήσεις χωρίς να απαιτείται προσαρμογή του καννάβου και αποτελούν ένα ακόμα στοιχείο το οποίο διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη μέθοδο.

4.5.2 Ασυμπτωτικές συναρτήσεις

Στα στοιχεία που περιέχουν την ακμή της ρωγμής, χρησιμοποιούνται ως συναρτήσεις εμπλουτισμού οι οποίες προκύπτουν από την αναλυτική λύση του προβλήματος της γραμμικής ρωγμής σε άπειρο στερεό μέσο. Πιο συγκεκριμένα, η έκφραση των μετακινήσεων της παραπάνω λύσης προκύπτει ως σειρά, ο πρώτος όρος της οποίας παίρνει τη μορφή:

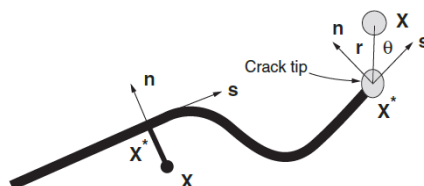
$$u_1 = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k - 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{r/2\pi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k + 1 + 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (4.23)$$

$$u_2 = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k + 1 - 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] - \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{r/2\pi} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k - 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (4.24)$$

όπου k είναι η σταθερά Kolosov η οποία σχετίζεται με τον λόγο Poisson ν με τη σχέση:

$$k = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{για επίπεδη παραμόρφωση} \\ \frac{3-\nu}{1+\nu} & \text{για επίπεδη ένταση} \end{cases} \quad (4.25)$$

G είναι το μέτρο διάτμησης και K_I , K_{II} είναι οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων. Οι μετακινήσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν από τη βάση:

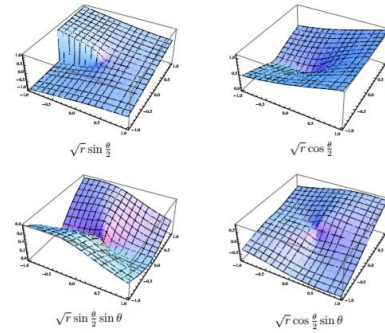


Εικόνα 4.3: Απεικόνιση κατακύρφων και εφαπτόμενων συντεταγμένων για μια λεία ρωγμή

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται η ασυμπτωτική συνάρτηση στο άκρο της ρωγμής σε ένα ισότροπο ελαστικό υλικό. Η $F_j(x)$ δίνεται από τη σχέση:

$$F_j(x) \equiv F_j(r, \vartheta) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\vartheta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\vartheta}{2}, \sqrt{r} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \vartheta, \sqrt{r} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \vartheta \right] \quad (4.26)$$

Οι συναρτήσεις της βάσης αυτής, οι οποίες αναπαρίστανται στο Σχήμα 4.3, χρησιμοποιούνται ως συναρτήσεις εμπλουτισμού. Επισημαίνεται ότι οι συναρτήσεις αυτές ορίζονται στο πολικό σύστημα συντεταγμένων του υποκεφαλαίου 4.1 και κατά συνέπεια για τον υπολογισμό τους είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των συναρτήσεων συνόλων επιπέδων.



Σχήμα 4.3: Αναπαράσταση ασυμπτωτικών συναρτήσεων εμπλουτισμού

4.6 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

Η προσέγγιση μετακινήσεων της εκτεταμένης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για προβλήματα ρωγμών είναι:

$$u(x) = \underbrace{\sum_{\forall I} N_I(x) u_I(x)}_{\text{ασυνεχ \acute{e}s \acute{m}\acute{e}r\omicron}s} + \underbrace{\sum_{J \in N^j} N_J(x) H(\varphi) b_J + \sum_{T \in N^t} \sum_j N_T(x) F_j(r, \vartheta) c_{Tj}}_{\text{ασυνεχ \acute{e}s \acute{m}\acute{e}r\omicron}s} \quad (4.27)$$

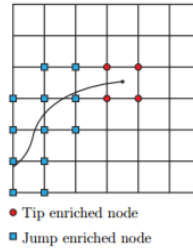
Στην παραπάνω έκφραση υπεισέρχονται τα εξής σύνολα κόμβων:

- N είναι το σύνολο όλων των κόμβων του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων.
- N^j είναι το σύνολο κόμβων στο οποίο πραγματοποιείται εμπλουτισμός με συναρτήσεις άλματος. Το σύνολο αυτό περιέχει όλους τους κόμβους των οποίων το κομβικό υποστήριγμα τέμνεται και χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη από τη ρωγμή.
- N^t είναι το σύνολο των κόμβων στο οποίο πραγματοποιείται εμπλουτισμός με ασυμπτωτικές συναρτήσεις. Το σύνολο αυτό περιέχει όλους τους κόμβους των οποίων το κομβικό υποστήριγμα περιέχει την ακμή της ρωγμής και κατά συνέπεια τέμνεται αλλά δεν χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη από τη ρωγμή.

Από τη Σχέση 4.27 γίνεται αντιληπτό ότι η προσέγγιση των μετακινήσεων χωρίζεται σε δύο μέρη:

- Το συνεχές το οποίο αναφέρεται στο σύνολο του εξεταζόμενου στερεού σώματος.
- Το ασυνεχές ή εμπλουτισμένο μέρος το οποίο αναφέρεται σε ένα μέρος του στερεού όπως αυτό ορίζεται από τα σύνολα κόμβων N^j και N^t και τα αντίστοιχα κομβικά υποστηρίγματα.

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η πραγματοποίηση εμπλουτισμού σε έναν δισδιάστατο κάναβο ο οποίος περιέχει καμπύλη ρωγμή.



Σχήμα 4.4: Πραγματοποίηση εμπλουτισμού σε ένα δισδιάστατο κάναβο

4.7 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΗΤΡΩΟΥ ΔΥΑΣΚΑΜΨΙΑΣ

Εισάγοντας τις μετακινήσεις της Σχέσης 4.27 στην ασθενή μορφή των εξισώσεων ισορροπίας προκύπτει το διακριτοποιημένο σύστημα εξισώσεων της μεθόδου το οποίο λαμβάνει τη γνωστή μορφή:

$$Kd = f \quad (4.28)$$

$$\begin{bmatrix} K^{uu} & K^{ua} & K^{ub} \\ K^{au} & K^{aa} & K^{ab} \\ K^{bu} & K^{ba} & K^{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d^u \\ d^a \\ d^b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^u \\ f^a \\ f^b \end{Bmatrix} \quad (4.29)$$

όπου τα στοιχεία των μητρών ορίζονται ως εξής:

$$K_{ij}^{kl} = \int_{\Omega} (B_i^k)^T C B_j^l d\Omega, \quad k, l = u, a, b \quad (4.30)$$

όπου C είναι ο τανυστής του Hooke σε μητρική μορφή ενώ τα στοιχεία των διανυσμάτων φόρτισης ορίζονται ως:

$$f_i^u = \int_{\Omega} N_i b d\Omega + \int_{\Gamma_t} N_i \bar{t} d\Gamma \quad (4.31)$$

$$f_i^a = \int_{\Omega} N_i H b d\Omega + \int_{\Gamma_t} N_i H \bar{t} d\Gamma + \int_{\Gamma_c^t} N_i H \bar{t}_c d\Gamma_c \quad (4.32)$$

$$f_{ij}^b = \int_{\Omega} N_i F_j b d\Omega + \int_{\Gamma_t} N_i F_j \bar{t} d\Gamma + \int_{\Gamma_c^t} N_i F_j \bar{t}_c d\Gamma_c \quad (4.33)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, οι δείκτες u , a , b αναφέρονται στα τρία μέρη της προσεγγίσεως, το κλασικό (u), το εμπλουτισμένο με συναρτήσεις άλματος (a) και το εμπλουτισμένο με ασυμπτωτικές συναρτήσεις (b). Οι δείκτες I, J αναφέρονται σε κόμβους του καννάβου. Για την περίπτωση του τρισδιάστατου στερεού, σε κάθε κόμβο του συνόλου u αντιστοιχούν τρεις βαθμοί ελευθερίας, ενώ σε κάθε κόμβο του συνόλου a αντιστοιχούν τρεις επιπλέον εμπλουτισμένοι βαθμοί ελευθερίας και σε κάθε κόμβο του συνόλου b δώδεκα επιπλέον εμπλουτισμένοι βαθμοί ελευθερίας. Οι παράγωγοι των συναρτήσεων σχήματος που υπεισέρχονται στις παραπάνω σχέσεις ορίζονται ως:

$$B_I^u = \begin{bmatrix} N_{I,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{I,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{I,z} \\ N_{I,y} & N_{I,x} & 0 \\ N_{I,z} & 0 & N_{I,x} \\ 0 & N_{I,z} & N_{I,y} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$B_I^a = \begin{bmatrix} (N_I H)_{,x} & 0 & 0 \\ 0 & (N_I H)_{,y} & 0 \\ 0 & 0 & (N_I H)_{,z} \\ (N_I H)_{,y} & (N_I H)_{,x} & 0 \\ (N_I H)_{,z} & 0 & (N_I H)_{,x} \\ 0 & (N_I H)_{,z} & (N_I H)_{,y} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$B_I^b = [B_{I1}^b \quad B_{I2}^b \quad B_{I3}^b \quad B_{I4}^b] \quad (4.36)$$

$$B_{Ij}^b = \begin{bmatrix} (N_I F_j)_{,x} & 0 & 0 \\ 0 & (N_I F_j)_{,y} & 0 \\ 0 & 0 & (N_I F_j)_{,z} \\ (N_I F_j)_{,y} & (N_I F_j)_{,x} & 0 \\ (N_I F_j)_{,z} & 0 & (N_I F_j)_{,x} \\ 0 & (N_I F_j)_{,z} & (N_I F_j)_{,y} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

όπου x, y, z είναι οι τρεις χωρικές συντεταγμένες. Μερικά πλεονεκτήματα της μεθόδου που προκύπτουν από τα παραπάνω είναι ότι ο αριθμός των εμπλουτισμένων βαθμών ελευθερίας είναι περιορισμένος εφόσον αναφέρεται σε ένα υποσύνολο των κόμβων του καννάβου. Επιπλέον, το γεγονός ότι οι συναρτήσεις εμπλουτισμού πολλαπλασιάζονται με τις συναρτήσεις σχήματος έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται η αραϊή δομή του μητρώου δυσκαμψίας.

4.8 ΟΡΙΣΜΟΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΤΟ ABAQUS

Πρέπει να ορισθεί το εμπλουτισμένο χαρακτηριστικό και οι ιδιότητές του. Μια ή πολλαπλές προϋπάρχουσες ρωγμές μπορούν να συσχετισθούν με το εμπλουτισμένο χαρακτηριστικό. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης μια ή περισσότερες ρωγμές μπορούν να ορισθούν ως αρχικές σε ένα εμπλουτισμένο χαρακτηριστικό χωρίς καμία αρχική ατέλεια. Παρόλα αυτά, πολλαπλές ρωγμές μπορούν να συμπεριληφθούν σε

ένα ενιαίο εμπλουτισμένο χαρακτηριστικό μόνο όταν το κριτήριο της εκκίνησης της βλάβης ικανοποιείται σε πολλαπλά στοιχεία στο ίδιο χρονικό βήμα. Διαφορετικά, επιπλέον ρωγμές δεν θα συμπεριληφθούν μέχρι όλες οι προϋπάρχουσες σε ένα εμπλουτισμένο χαρακτηριστικό να έχουν διαδοθεί μέσα από το όριο του δοθέντος εμπλουτισμένου στοιχείου. Οι εμπλουτισμένοι βαθμοί ελευθερίας είναι ενεργοί μόνο όταν ένα στοιχείο τέμνεται από μια ρωγμή.

Μπορεί να επιλεγεί να προσομοιωθεί μια αυθαίρετη στάσιμη ρωγμή ή μια διακριτή διάδοση ρωγμής μέσα από ένα αυθαίρετο, εξαρτώμενο από τη λύση, μονοπάτι. Το προηγούμενο προϋποθέτει ότι τα στοιχεία γύρω από τα άκρα της ρωγμής εσωτερικά είναι εμπλουτισμένα με τη συνάρτηση άλματος κατά μήκος των επιφανειών. Το τελευταίο συνάγει ότι η διάδοση της ρωγμής προσομοιώνεται με είτε με τη μέθοδο τμημάτων συνοχής είτε με τη προσέγγιση της γραμμικής ελαστικής της θραυστομηχανικής σε συνδυασμό με "άφαντους" κόμβους. Ωστόσο, οι επιλογές αλληλοαναιρούνται και δεν μπορούν να ορισθούν ταυτόχρονα σε ένα προσομοίωμα.

Εντολές:

*ENRICHMENT, TYPE=PROPAGATION CRACK

Use the following option to specify an analysis with stationary cracks:

*ENRICHMENT, TYPE=STATIONARY CRACK

Abaqus/CAE Usage: Use the following input to specify a crack propagation analysis:

Interaction module: crack editor: toggle on **Allow crack growth**

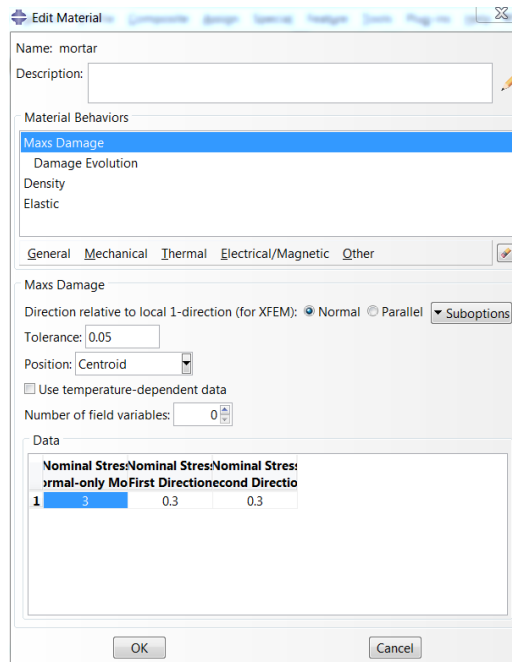
Use the following input to specify an analysis with stationary cracks:

Interaction module: crack editor: toggle off **Allow crack growth**

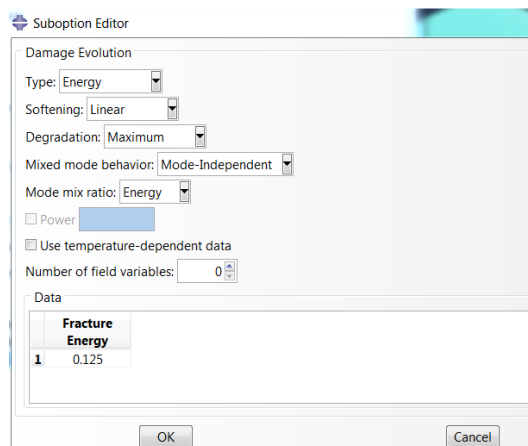
4.9 ΠΟΡΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ XFEM

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση με τη μέθοδο XFEM στην εργασία.

Αφού ορίστηκαν τα Part δημιουργήθηκε το υλικό και δόθηκαν σε αυτό οι ιδιότητες του μέτρου ελαστικότητας E , του δείκτη Poisson ν και η πυκνότητα της μάζας. Τέλος δίνουμε τις τιμές της αντοχής σε ορθή τάση θλίψης, και τη διατμητική αντοχή του υλικού στις 2 διευθύνσεις καθώς και η ενέργεια θραύσης μέσω του damage for traction separation laws-MaxsDamage όπως φαίνεται στις Εικόνα 4.4-4.5.



Εικόνα 4.4: Ορισμός τιμών αντοχής υλικού (MaxsDamage)

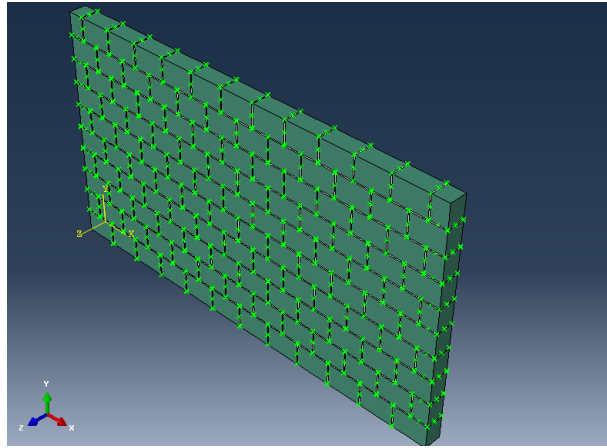


Εικόνα 4.5: Ορισμός ενέργειας θραύσης υλικού

Ακολούθως φτιάχνουμε τη διατομή και την αντιστοιχίζουμε στο part. Επόμενο βήμα είναι να φτιάξουμε το τοιχάκι με τη βοήθεια του assembly. Επίσης ορίζουμε το step της ανάλυσης και στη συνέχεια μένοντας στο module Step επιλέγουμε από πάνω την επιλογή Other → General Solution Controls → Edit → Step-1(Το Step που φτιάξαμε) → Continue

Στην καρτέλα που άνοιξε επιλέγουμε το Specify και στην επιλογή Time Incrementation κλικάρουμε το Discontinues Analysis. Επιλέγουμε από το Module το Interaction το crack βρίσκεται στο special.

Special → Crack → Create → XFEM → Continue επιλέγουμε όλο το Instance θα βγάλει x σε όλο το instance. Αυτό μας δείχνει τις περιοχές που έχουν οριστεί στις οποίες μπορούν να εμφανιστούν ρωγμές.

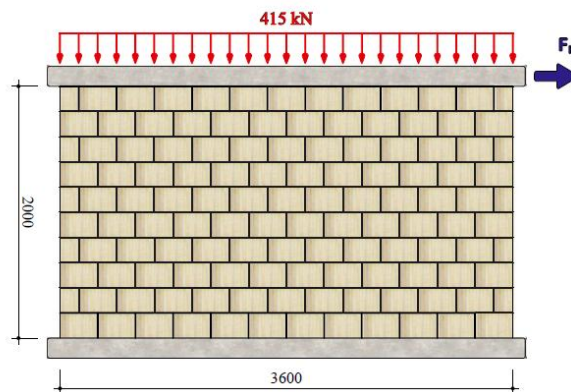


Εικόνα 4.6: Ορισμός περιοχών που μπορούν να σχηματιστούν ρωγμές

4.9.1 Πρώτο μοντέλο XFEM

Προσομοιώθηκε ο τοίχος με ξεχωριστά τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία για τα λιθοσώματα και για το κονίαμα. Δεν προσομοιώθηκαν οι αρμοί της τοιχοποιίας με στοιχεία επαφής. Επιβλήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη τάση στην πάνω επιφάνεια του τοίχου. Η εικόνα της αστοχίας φαίνεται παρακάτω.

Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ένας τοίχος από τη βιβλιογραφία η γεωμετρία του οποίου και τα μηχανικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 4.7: Γεωμετρία τοίχου που προσομοιώθηκε με την XFEM (διαστάσεις σε mm)

Table I. Material properties.

Material	E (Gpa)	ν (-)	ρ (kg/m ³)
Brick	14.0	0.15	940

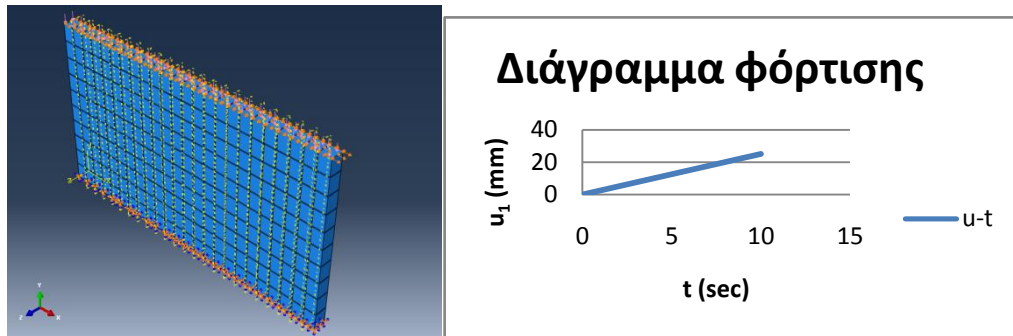
Table II. Cohesive properties for interface elements.

Interface	$\sigma_{c,I}$ (MPa)	$G_{c,I}$ (J/m ²)	$\sigma_{c,II}$ (MPa)	$G_{c,II}$ (J/m ²)	μ
Brick-mortar	0.2 0.3 0.4	75 125 200	$\sigma_{c,I}$	$6 \cdot G_{c,I}$	0.77

Those in bold are assumed values for the shear test.

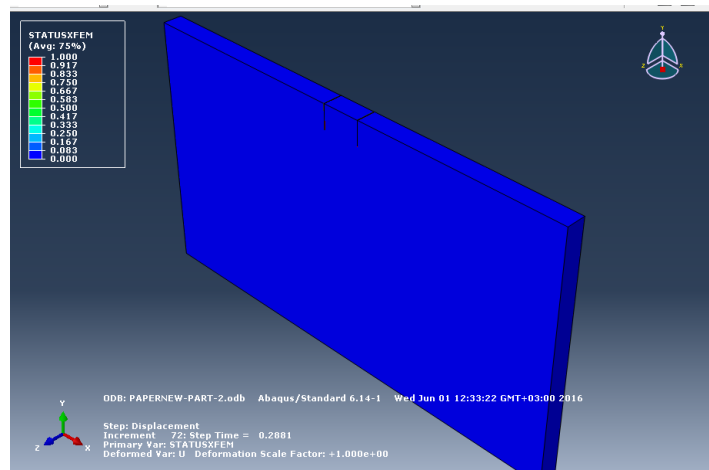
Εικόνα 4.8: Μηχανικές ιδιότητες προσομοιώματος XFEM

Τα φορτία που έχουν επιβληθεί είναι μια κατακόρυφη ομοιόμορφα κατανεμημένη τάση 0.768 MPa στην πάνω επιφάνεια του τοίχου και μία οριζόντια μετακίνηση 0.25 mm χρονικά μεταβαλλόμενη στους κόμβους την άνω επιφάνειας όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9.

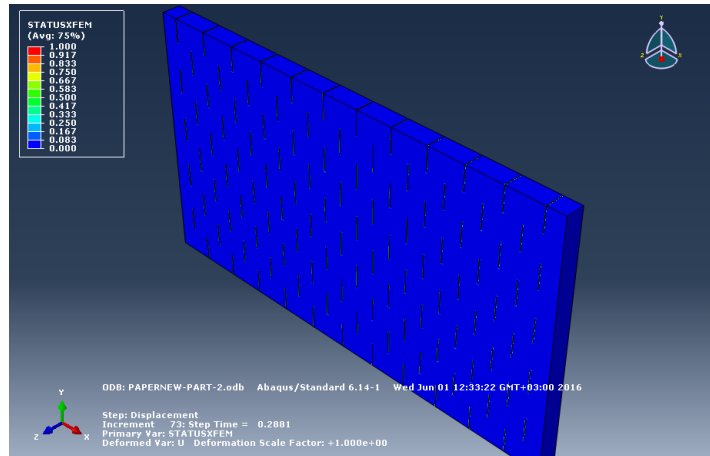


Εικόνα 4.9: Επιβολή Φορτίων-Διάγραμμα οριζόντιας φόρτισης

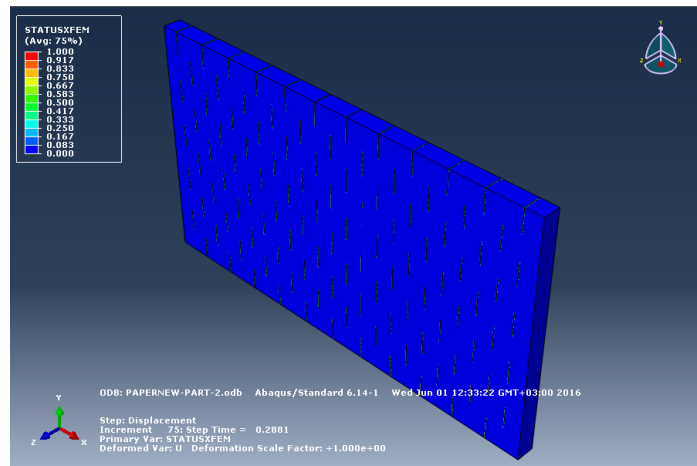
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται παρακάτω στις Εικόνες 4.10-4.12. Όπως φαίνεται και στις Εικόνες εμφανίζονται δύο ρωγμές ταυτόχρονα στο πάνω μέρος του τοίχου σε δύο αρμούς. Η ανάλυση δυσκολεύεται να προχωρήσει και τερματίζεται όπου στα δύο τελευταία βήματα βλέπουμε να έχουν ανοίξει ταυτόχρονα πολλές ρωγμές.



Εικόνα 4.10: Άνοιγμα ρωγμών



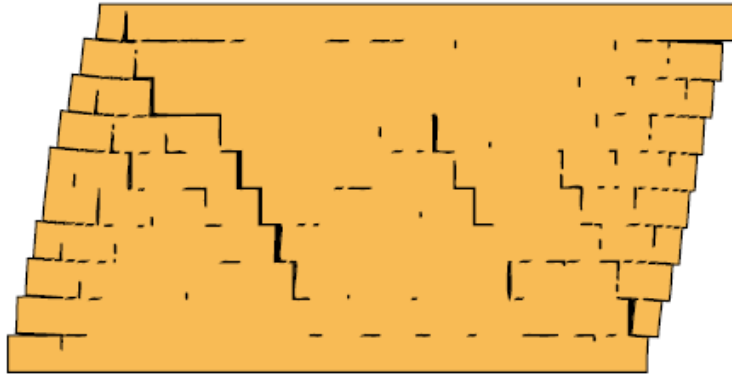
Εικόνα 4.11: Ταυτόχρονο άνοιγμα πολλών ρωγμών (προτελευταίο βήμα ανάλυσης)



Εικόνα 4.12: Τελευταίο βήμα ανάλυσης

Στη συνέχεια ορίσθηκαν οι θέσεις των αρχικών ρωγμών όπως αυτές προέκυψαν για να βοηθηθεί η ανάλυση. Το αποτέλεσμα όμως ήταν το ίδιο οι αρχικές ρωγμές συνεχίστηκαν μέχρι κάποιο σημείο αλλά η ανάλυση δεν ολοκληρώθηκε. Και σε αυτή τη περίπτωση η αστοχία εμφανίστηκε ξαφνικά σε ένα βήμα όπου και άνοιξαν όλες οι ρωγμές ταυτόχρονα.

Στην εικόνα 4.13 βλέπουμε την επιδιωκόμενη εικόνα αστοχίας που προσπαθήσαμε να εξάγουμε με την εφαρμογή της μεθόδου στο πείραμα της βιβλιογραφίας που προσομοιώσαμε.

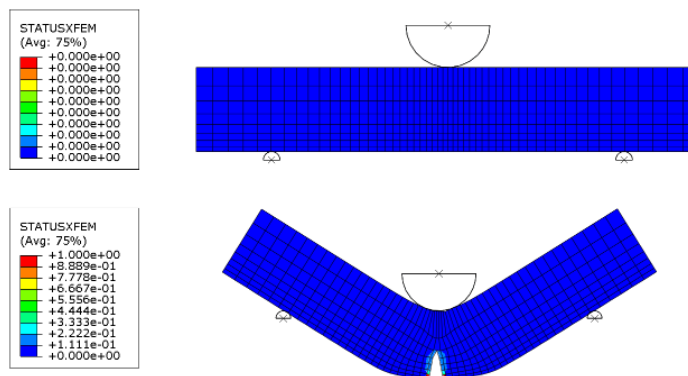


Εικόνα 4.13: Εικόνα αστοχίας πειράματος που προσομοιώθηκε

4.9.2 Συμπεράσματα ανάλυσης XFEM

Όπως παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα της ανάλυσης το μοντέλο δείχνει αδυναμία να συνεχίσει την εξέλιξη της αρχικής ρωγμής που ανοίγει στον τοίχο.

Στην βιβλιογραφία βλέπουμε ότι αυτή η μέθοδος επιτυγχάνει να εντοπίσει το άνοιγμα μιας ρωγμής και την εξέλιξή του σε ένα απλό δισδιάστατο μοντέλο δοκού που υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων όπως φαίνεται στη παρακάτω Εικόνα 4.14.



Εικόνα 4.14: Αποτελέσματα XFEM κάμψης δοκού τριών σημείων

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η μέθοδος παρουσιάζει αδυναμία να παρακολουθήσει το άνοιγμα και την εξέλιξη των πολλών ταυτόχρονων ρωγμών που συμβαίνουν στο προσομοίωμά μας καθώς και το άνοιγμα καινούργιων σε διαφορετικά σημεία γι αυτό μας δίνει αυτή την εικόνα στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Μια βελτίωση που θα μπορούσε να γίνει είναι η εισαγωγή στοιχείων επαφής στο μοντέλο που θα λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες των αρμών της τοιχοποιίας καθώς και τον μηχανισμό ολίσθησης.

5. ΥΛΙΚΟ DAMAGED PLASTICITY

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

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-σκληρυνσης (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.

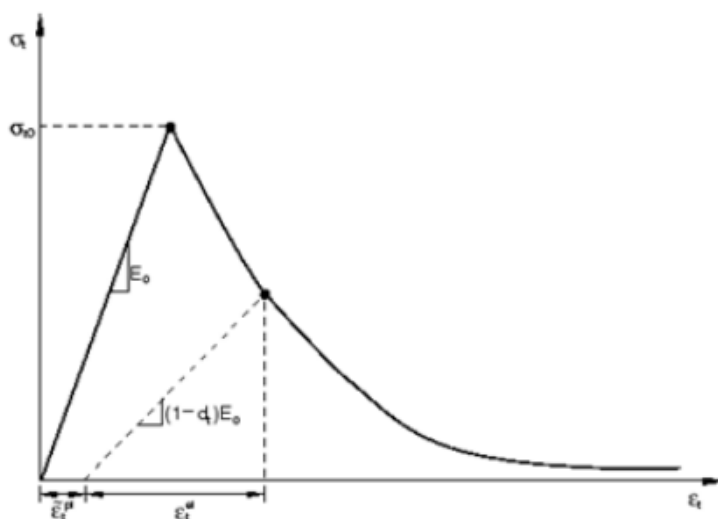
5.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

5.2.1 Γενικά

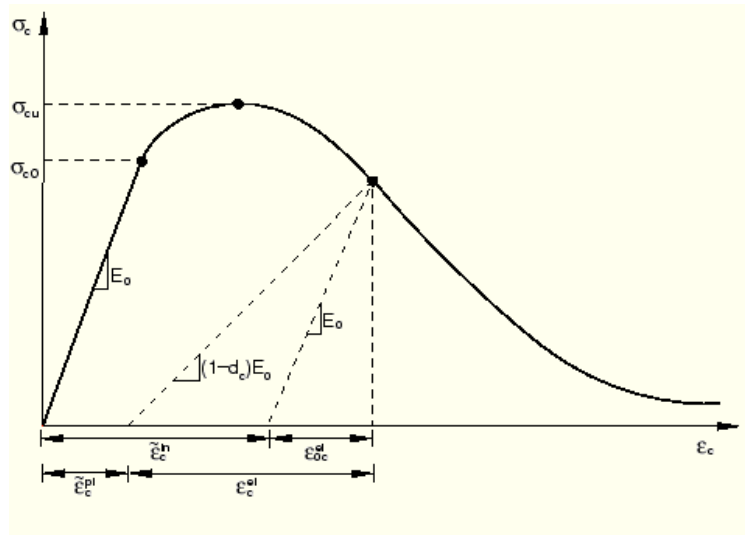
Το DAMAGED PLASTICITY είναι ένα συνεχές μοντέλο βλάβης του σκυροδέματος που βασίζεται στην πλαστικότητα (continuum, plasticity-based, damage model for concrete). Υποθέτει ότι οι δύο κύριοι μηχανισμοί αστοχίας είναι θραύση λόγω εφελκυσμού και θραύση λόγω θλίψεως του υλικού σκυροδέματος. Η εξέλιξη της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

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 βλάβης (damaged plasticity), όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.1, 5.2.



Σχήμα 5.1: Απόκριση του σκυροδέματος σε μονοαξονική φόρτιση υπό εφελκυσμό



Σχήμα 5.2: 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,

$$\sigma_t = \sigma(\dot{\xi}_t^{pl}, \dot{\xi}_t^{pl}, \theta, f_i) \quad (5.1)$$

$$\sigma_c = \sigma(\dot{\xi}_c^{pl}, \dot{\xi}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad (5.2)$$

όπου οι συντελεστές t και c αναφέρονται σε εφελκυσμό και θλίψη, αντίστοιχα, τα $\dot{\xi}_t^{pl}$ και $\dot{\xi}_c^{pl}$ είναι οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, τα $\dot{\xi}_t^{pl}$ και $\dot{\xi}_c^{pl}$ 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 5.1, 5.2, 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) :

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i), \quad 0 \leq d_t \leq 1 \quad (5.3)$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i), \quad 0 \leq d_c \leq 1 \quad (5.4)$$

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:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (5.5)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (5.6)$$

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

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (5.7)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (5.8)$$

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

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:

$$E = (1 - d)E_0 \quad (5.9)$$

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_c και d_t . Για τις συνθήκες μονοαξονικής κυκλικής φόρτισης το Abaqus υποθέτει ότι :

$$(1 - d) = (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t) \quad (5.10)$$

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 :

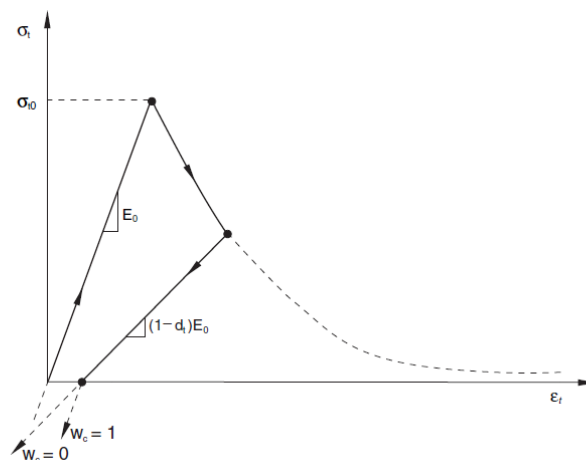
$$s_t = 1 - w_t r * (\sigma_{11}), 0 \leq w_t \leq 1 \quad (5.11)$$

$$s_c = 1 - w_c (1 - r * (\sigma_{11})), 0 \leq w_c \leq 1 \quad (5.12)$$

όπου:

$$r * (\sigma_{11}) = H(\sigma_{11}) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \sigma_{11} > 0 \\ 0 & \text{αν } \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

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 5.3, όπου το φορτίο μεταβάλλεται από εφελκυστικό σε θλιπτικό.



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση της επίδρασης της παραμέτρου w_c

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

$$(1 - d) = (1 - s_c d_t) = (1 - (1 - w_c(1 - r^*))d_t) \quad (5.14)$$

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 ανακάτ 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.

5.2.4 Πολυαξονική συμπεριφορά

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

$$\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (5.15)$$

όπου 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

$$r(\hat{\sigma}) = \frac{\sum_{i=1}^3 \langle \hat{\sigma}_i \rangle}{\sum_{i=1}^3 |\hat{\sigma}_i|} : 0 \leq r(\hat{\sigma}) \leq 1 \quad (5.16)$$

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

$$\langle x \rangle = \frac{1}{2} (|x| + x) \quad (5.17)$$

5.3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ (tension stiffening)

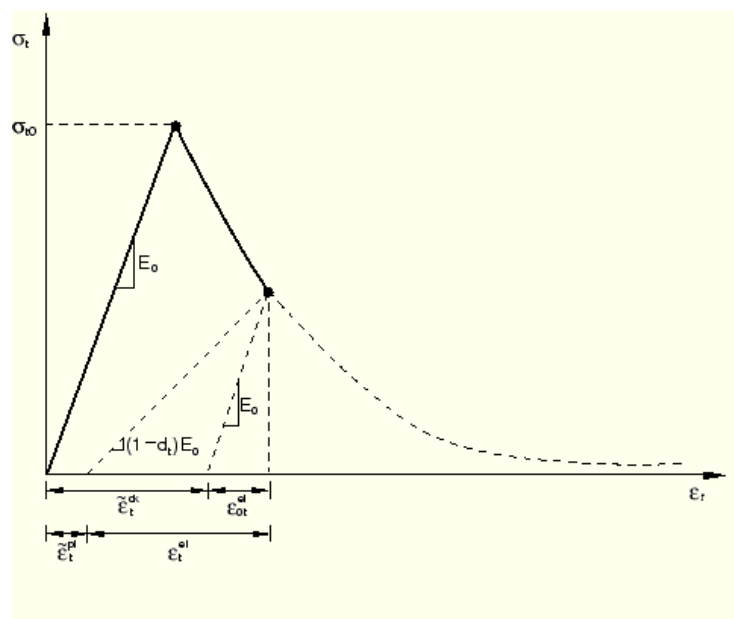
5.3.1 Γενικά

Η συμπεριφορά μετά την αστοχία διαμορφώνεται με αύξηση δυσκαμψίας του σκυροδέματος (tension stiffening), γεγονός που επιτρέπει τον προσδιορισμό του φθιτού κλάδου της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεις (strain-softening behavior) για το ρηγματωμένο σκυρόδεμα. Η συμπεριφορά αυτή επιτρέπει επίσης την απλή προσομοίωση των επιδράσεων της αλληλεπίδρασης σπλισμού-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 ρηγματώδους ενέργειας θραύσης (fracture energy cracking criterion).

5.3.2 Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων μετά την αστοχία

Στο σπλισμένο σκυρόδεμα, ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς μετά τη θραύση σημαίνει γενικά τον καθορισμό της τάσης μετά τη θραύση, σα συνάρτηση της παραμόρφωσης ρηγματώδους (cracking strain), $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$. Η παραμόρφωση ρηγματώσεως (cracking strain) ορίζεται ως η συνολική παραμόρφωση μείον την ελαστική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο άθικτο υλικό, δηλαδή $\tilde{\epsilon}_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_{0t}^{el}$, όπου $\epsilon_{0t}^{el} = \sigma_t / E_0$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. 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 5.4: Απεικόνιση του ορισμού της παραμόρφωσης ρηγματώσεως $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$, η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό των δεδομένων του tension stiffening

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

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (5.18)$$

Το Abaqus εκδίδει μήνυμα λάθους, εάν οι υπολογιζόμενες τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων είναι αρνητικές και/ή μειώνονται, ενώ η τάση ρηγματώσεως αυξάνεται. Το παραπάνω συνήθως δείχνει ότι οι καμπύλες βλάβης εφελκυσμού (tensile damage curves)

είναι λάθος ορισμένες. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει βλάβη εφελκυσμού ισχύει $\xi_t^{pl} = \xi_t^{ck}$.

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 σπλισμού είτε λόγω της παρουσίας σταθεροποιητικού ελαστικού υλικού (stabilizing elastic material), όπως στην περίπτωση της κάμψης πλάκας), δεν παρουσιάζεται πρόβλημα λόγω ατυχούς διακριτοποίησης. Σε πρακτικούς υπολογισμούς για σπλισμένο σκυρόδεμα, η διακριτοποίηση συνήθως είναι τέτοια ώστε κάθε στοιχείο να περιέχει ράβδους σπλισμού. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ράβδων σπλισμού 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 σπλισμού, η ποιότητα του δεσμού μεταξύ του σπλισμού και του σκυροδέματος, το σχετικό μέγεθος των αδρανών σκυροδέματος σε σύγκριση με τη διάμετρο των ράβδων σπλισμού (rebar), και τη διακριτοποίηση (mesh). Ένα λογικό σημείο εκκίνησης για σχετικά «βαριά» σπλισμένο 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.

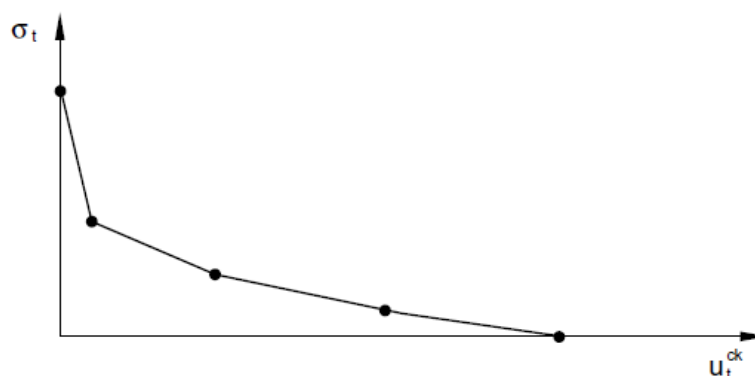
Εισαγωγή tension stiffening στο input file :

* CONCRETE TENSION STIFFENING, TYPE =STRAIN (προεπιλογή)

5.3.3 Κριτήριο ρηγμάτωσης ενέργειας θραύσης (Fracture energy cracking criterion)

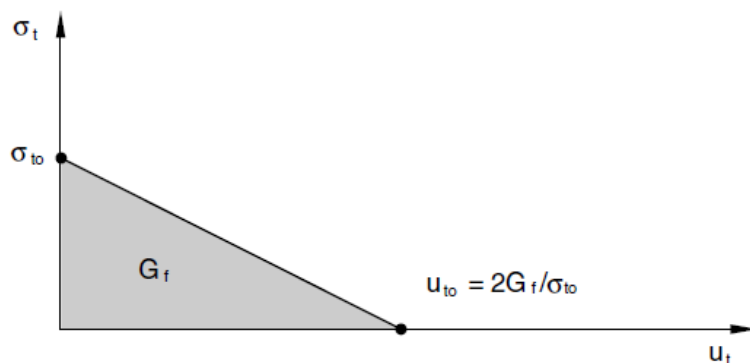
Όταν δεν υπάρχει ενίσχυση σε σημαντικές περιοχές του μοντέλου, η προσέγγιση του tension stiffening που περιγράφεται παραπάνω θα εισαγάγει πολύ μεγάλη ευαισθησία διακριτοποίησης στα αποτελέσματα. Ωστόσο, είναι γενικά αποδεκτό ότι (1976) η πρόταση του Hillerborg όσον αφορά την ενέργεια θραύσης (Hillerborg's 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 ρωγή. 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 5.5.



Σχήμα 5.5: 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_{t0} , ως μια πινακοειδής συνάρτηση που εξαρτάται από την ενέργεια θραύσης. Αυτό το μοντέλο υποθέτει μια γραμμική απώλεια αντοχής μετά ρηγμάτωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Καμπύλη τάσης-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 σύννηθες 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:

$$u_t^{pl} = u_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t l_0}{E_0} \quad (5.19)$$

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

5.3.4 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 ευαισθησία διακριτοποίησης (mesh sensitivity) παραμένει εξαιτίας αυτού του γεγονότος, και έτσι συνιστώνται στοιχεία με αναλογία διαστάσεων κοντά στο ένα.

Εισαγωγή tension stiffening στο input file :

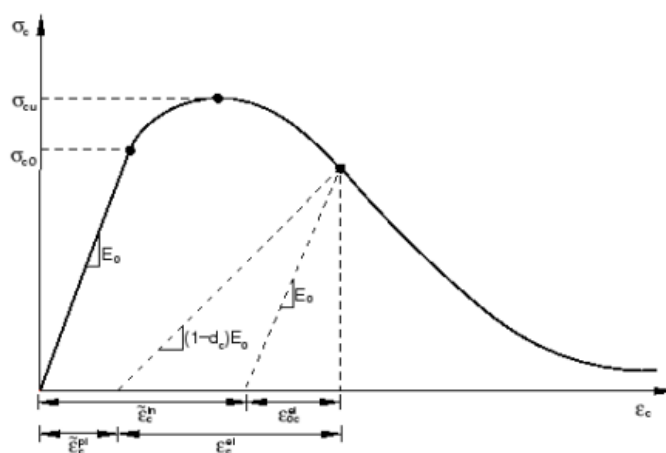
Υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι:

- 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

5.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

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, ε_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, ε_c^{in} , αντί της πλαστικής παραμόρφωσης, $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$. Η θλιπτική ανελαστική παραμόρφωση ορίζεται ως η συνολική παραμόρφωση μείον την ελαστική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο άθικτο υλικό, $\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el}$, όπου, $\varepsilon_{0c}^{el} = \sigma_c / E_0$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Ορισμός της θλιπτικής ανελαστικής (ή crushing) παραμόρφωσης, $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$, που χρησιμοποιείται για τον ορισμό της κράτυνσης υπό θλίψη (compression hardening data)

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

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5.20)$$

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 $\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in}$.

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

* COCONCRETE COMPRESSION HARDENING

5.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Η βλάβη, d_c και 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, $\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ και $\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in}$. 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,

$$d_t|_{t+\Delta t} = \max \{d_t|_t, d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}|_{t+\Delta t}, \theta|_{t+\Delta t}, f_i|_{t+\Delta t})\} \quad (5.21)$$

$$d_c|_{t+\Delta t} = \max \{d_c|_t, d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}|_{t+\Delta t}, \theta|_{t+\Delta t}, f_i|_{t+\Delta t})\} \quad (5.22)$$

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%.)

5.5.1 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

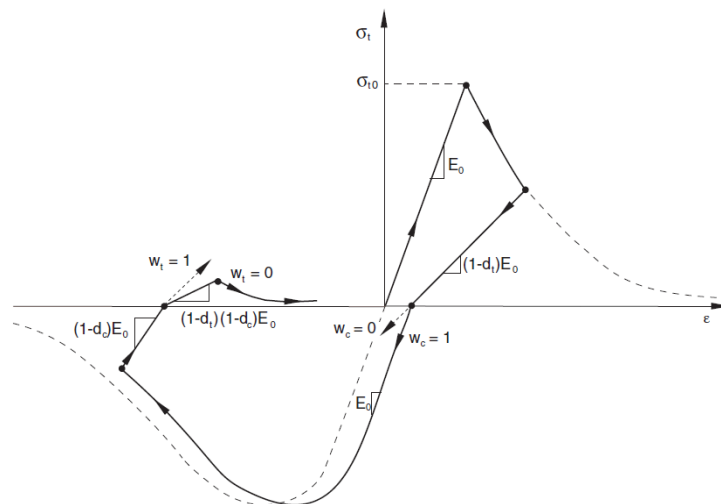
5.5.2 Βλάβες υπό θλίψη (Compressive damage)

Μπορείτε να ορίσετε τη μεταβλητή βλάβης υπό μονοαξονική θλίψη, , ως πινακοειδή συνάρτηση της ανελαστικής (crushing) παραμόρφωσης. Εισαγωγή βλάβης υπό θλίψη (compression damage) στο input file:

* CONCRETE COMPRESSION DAMAGE

5.5.3 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 5.8 απεικονίζει ένα μονοαξονικό κύκλο φόρτισης θεωρώντας την προεπιλεγμένη συμπεριφορά ($w_t = 0$ και $w_c = 1$).



Σχήμα 5.8: 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

5.5.4 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

5.6 ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (CONCRETE PLASTICITY)

5.6.1 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

5.6.2 Αναλλοίωτες ενεργών τάσεων (Effective stress invariants)

Η ενεργός τάση ορίζεται ως:

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_{pl}) \quad (5.23)$$

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),

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{trace}(\bar{\sigma}) \quad (5.24)$$

Και η ισοδύναμη ενεργός τάση κατά Mises,

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{S} : \bar{S})} \quad (5.25)$$

όπου S είναι το effective stress deviator, που ορίζεται ως

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p}I \quad (5.26)$$

5.6.3 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:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (5.27)$$

όπου:

- $\psi(\theta, f_i)$, είναι η γωνία διαστολικότητας (dilation angle), η οποία μετράται στο επίπεδο p - q σε υψηλή τάση περισφίγξης (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 περισφίγξης (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, πράγμα που συνεπάγεται ότι το υλικό έχει σχεδόν την ίδια γωνία διαστολικότητας σε ένα ευρύ φάσμα τιμών τάσεων. Αύξηση της τιμής του παρέχει μεγαλύτερη καμπυλότητα στο δυναμικό ροής (flow potential), υποδηλώνοντας ότι η γωνία διαστολής αυξάνεται πιο γρήγορα, καθώς η τάση περισφίγξης μειώνεται. Οι τιμές του που είναι σημαντικά μικρότερες από την προεπιλεγμένη τιμή μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα σύγκλισης, εάν το υλικό υποβάλλεται σε χαμηλές τάσεις περισφίγξης, λόγω της τοπικά πολύ σφικτής καμπυλότητας του δυναμικού ροής, όπου τέμνει τον p -άξονα.

5.6.4 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), $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ και $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$. Σε όρους ενεργών τάσεων, η συνάρτηση διαρροής λαμβάνει τη μορφή:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}^{pl})(\hat{\sigma}_{max})) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (5.28)$$

με

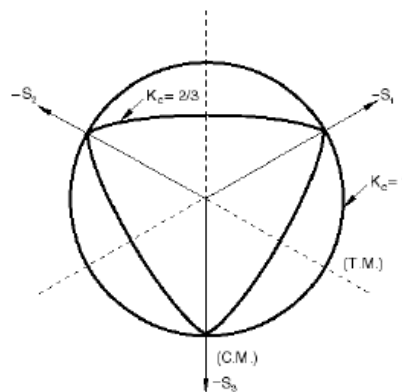
$$\alpha = \frac{\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)^{-1} - 1}{2\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)^{-1} - 1}; 0 \leq \alpha \leq 0.50 \quad (5.29)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (5.30)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c-1} \quad (5.31)$$

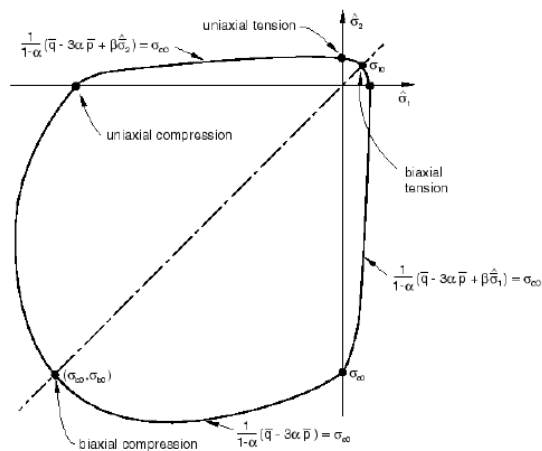
Εδώ,

- $\hat{\sigma}_{max}$ είναι η μέγιστη ενεργός κύρια τάση,
- $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ 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 5.9). Πρέπει να πληρείται η προϋπόθεση $0.50 \leq K_c \leq 1.0$ (η προεπιλεγμένη τιμή είναι 2/3),
- $\bar{\sigma}_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl})$ είναι η ενεργός εφελκυστική τάση συνοχής (effective tensile cohesion stress) και
- $\bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl})$ είναι η ενεργός θλιπτική τάση συνοχής (effective compressive cohesion stress).



Σχήμα 5.9: Επιφάνειες διαρροής στο αποκλίνον επίπεδο (deviatoric plane), που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές του K_c

Χαρακτηριστικές επιφάνειες διαρροής φαίνονται στο Σχήμα 5.9 στο αποκλίνον επίπεδο και στο Σχήμα 5.10 για συνθήκες επίπεδης έντασης.



Σχήμα 5.10: Επιφάνεια διαρροής σε επίπεδη ένταση (Yield surface in plane stress)

5.6.5 Μη συσχετισμένη ροή

Επειδή η πλαστική ροή είναι ασυσχέτιστη (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).

5.6.6 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 προσαιξήσεις 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 τανυστής του ρυθμού ιξωδοπλαστικής παραμόρφωσης (the viscoplastic strain rate tensor), $\dot{\varepsilon}_v^{pl}$, ορίζεται ως:

$$\dot{\varepsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu} (\varepsilon^{pl} - \varepsilon_v^{pl}) \quad (5.32)$$

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:

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu} (d - d_v) \quad (5.33)$$

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

$$\sigma = (1 - d_v) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_v^{pl}) \quad (5.34)$$

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).

5.6.7 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).

5.6.8 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 υλικό. 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, $\tilde{\varepsilon}_t^{pl} > 0$, 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.

5.6.9 Αποτελέσματα εξόδου (Output)

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

- DAMAGED
Μεταβλητή θλιπτικής βλάβης, d_c .
- DAMAGET
Μεταβλητή εφελκυστικής βλάβης, d_t .
- PEEQ
Ισοδύναμη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση, $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$.
- PEEQT
Ισοδύναμη εφελκυστική πλαστική παραμόρφωση, $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$.
- 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.

6. ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ (CONTACT FORMULATION)

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Πολλά από τα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός εμπεριέχουν την επαφή ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα σώματα όταν εφάπτονται το ένα στο άλλο. Σε αυτά τα προβλήματα μία δύναμη ομαλή στις δύο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή δρά στα δύο σώματα όταν αυτές έρχονται σε επαφή. Αν υπάρχει τριβή μεταξύ των επιφανειών, μπορεί να αναπτυχθούν διατμητικές δυνάμεις που αντιστέκονται στην ολίσθηση των σωμάτων. Κύριος στόχος της προσομοίωσης της επαφής είναι να ταυτοποιηθούν οι περιοχές των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και να υπολογισθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω αυτής της επαφής.

Σε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οι συνθήκες της επαφής είναι μια ειδική κατηγορία μη γραμμικού περιορισμού, που επιτρέπει δυνάμεις να μεταφέρονται από το ένα κομμάτι του μοντέλου στο άλλο. Ο περιορισμός είναι μη γραμμικός γιατί εφαρμόζεται μόνο όταν οι δυο επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή. Ενώ όταν απομακρύνονται κανένας περιορισμός δεν επιβάλλεται. Η ανάλυση πρέπει να μπορεί να εντοπίσει πότε οι δύο επιφάνειες είναι σε επαφή και επομένως και τους περιορισμούς που επιβάλλει η επαφή. Ομοίως, η ανάλυση πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίζει πότε οι επιφάνειες απομακρύνονται ώστε να αφαιρεί από αυτές τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν.

Οι προσομοιώσεις επαφής στο Abaqus/Standard μπορούν να είναι βασισμένες στις επιφάνειες επαφής ή στα μέλη που βρίσκονται σε επαφή. Στο Abaqus/Explicit μπορούν μόνο να προσομοιωθούν βασισμένες στις επιφάνειες. Οι τελευταίες μπορούν να υλοποιήσουν είτε τον γενικό αλγόριθμο επαφής (general contact algorithm) ή τον αλγόριθμο ζεύγους επαφής (contact pair algorithm). Ο general contact αλγόριθμος επιτρέπει μια υψηλά αυτοματοποιημένο ορισμό της επαφής, όπου η επαφή βασίζεται σε

έναν αυτομάτως παραγόμενο συμπεριλαμβανομένων όλων των ορισμών καθορισμό της επαφής. Αντιστρόφως, ο contact pair αλγόριθμος απαιτεί από το χρήστη να ταιριάζει ρητώς τα ζεύγη των επιφανειών που μπορούν ενδεχομένως να έρθουν σε επαφή. Και οι δύο αλγόριθμοι απαιτούν τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της επαφής μεταξύ των επιφανειών (π.χ. της τριβής).

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.

6.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

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,
- οποιουδήποτε αλγοριθμικούς περιορισμούς επαφής για την ανάλυση (algorithmic contact controls) κ.ά.

6.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΣ

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

6.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Οι αλληλεπιδράσεις επιφανειών για τα ζεύγη επαφής καθώς και τη γενική επαφή ορίζονται προσδιορίζοντας τους συνδυασμούς επιφανειών και τις επιφάνειες ιδιο- επαφής (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.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή αποτελείται από δύο συνιστώσες: τη κάθετη (normal) και την εφαπτομενική (tangential) προς τις επιφάνειες. Η εφαπτομενική συμπεριφορά περιέχει την σχετική μετακίνηση (ολίσθηση) των επιφανειών και ενδεχομένως και διατμητικές τάσεις λόγω τριβής. Κάθε αλληλεπίδραση επαφής μπορεί να αναφέρεται σε μια ιδιότητα επαφής που καθορίζει ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης μεταξύ των επαπτόμενων επιφανειών. Υπάρχουν αρκετά μοντέλα επαπτόμενων επιφανειών διαθέσιμα στο Abaqus.

6.5 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΟ ABAQUS/STANDARD

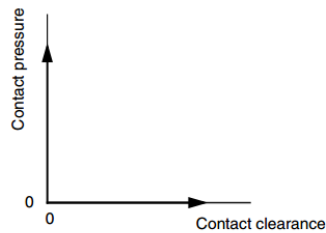
Παρακάτω αναφέρονται οι δυνατότητες που προσφέρουν η γενική επαφή και τα ζεύγη επαφής στο Abaqus/Standard:

- 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 η γενική επαφή (general contact). Αυτό αναλύεται παρακάτω εκτενέστερα.

6.5.1 Συμπεριφορά κάθετα στις επιφάνειες (Normal behavior)

Η απόσταση που χωρίζει δύο επιφάνειες αποκαλείται διάκενο. Ο περιορισμός της επαφής εφαρμόζεται στο Abaqus όταν το διάκενο μεταξύ δύο επιφανειών γίνεται μηδενικό. Δεν υπάρχει όριο στον σχηματισμό της επαφής στο μέγεθος της πίεσης της επαφής που μπορεί να μεταφερθεί ανάμεσα στις επιφάνειες. Οι επιφάνειες απομακρύνονται όταν η πίεση ανάμεσά τους γίνει μηδέν ή αρνητική, και ο περιορισμός απομακρύνεται. Αυτή η συμπεριφορά αναφέρεται και ως "σκληρή" επαφή, και είναι η προεπιλεγμένη συμπεριφορά επαφής στο πρόγραμμα και συνοψίζεται στη σχέση πίεση επαφής-διάκενο που απεικονίζεται στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Πίεση επαφής- Διάκενο Σχέση για "σκληρή" επαφή (hard contact)

Από προεπιλογή η σκληρή επαφή εφαρμόζεται απευθείας όταν χρησιμοποιούνται ζεύγη επαφής στο Abaqus/Standard. Η δραματική αλλαγή στην πίεση της επαφής που συμβαίνει όταν η κατάσταση της επαφής αλλάζει από ανοιχτή (θετικό διάκενο) σε κλειστό (μηδενικό διάκενο) μερικές φορές δυσκολεύει τις προσομοιώσεις των επαφών να ολοκληρωθούν στο Abaqus/Standard, το ίδιο δεν ισχύει στο Abaqus/Explicit από τη στιγμή που η επανάληψη δεν απαιτείται για τις explicit μεθόδους. Εναλλακτικές μέθοδοι επιβολής (π.χ. penalty) είναι διαθέσιμες για ζεύγη επαφής, όπως αναφέρεται στο "Contact constraint enforcement methods in Abaqus/Standard", ενότητα 36.1.2 του Abaqus Analysis User's Manual.

6.5.2 Ολίσθηση των επιφανειών (sliding of the surfaces)

Επιπλέον για να καθορίσει πότε μια επαφή έχει συμβεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο, μια ανάλυση στο Abaqus πρέπει επίσης να υπολογίσει την σχετική ολίσθηση δύο επιφανειών. Αυτό μπορεί να είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία, έτσι το Abaqus κάνει μια διάκριση μεταξύ των αναλύσεων πότε το μέγεθος της αλίσθησης είναι μικρό και εκείνων που το μέγεθος της ολίσθησης μπορεί να είναι πεπερασμένο. Έχει πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος να προσομοιωθούν προβλήματα όταν η ολίσθηση μεταξύ των επιφανειών είναι μικρή. Αυτό που συνιστά τη μικρή ολίσθηση "small sliding" είναι συχνά δύσκολο να καθορισθεί, αλλά μια γενική κατευθυντήρια γραμμή που μπορεί να ακολουθηθεί είναι ότι τα προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια προσέγγιση της "μικρής ολίσθησης" αν ένα σημείο που εφάπτεται μια επιφάνεια δεν ολισθαίνει

περισσότερο από ένα μικρό όριο της τυπικής διάστασης ενός στοιχείου. Η μικρή ολίσθηση δεν είναι διαθέσιμη για προβλήματα γενικής επαφής (general contact).

6.5.3 Μοντέλα τριβής (friction models)

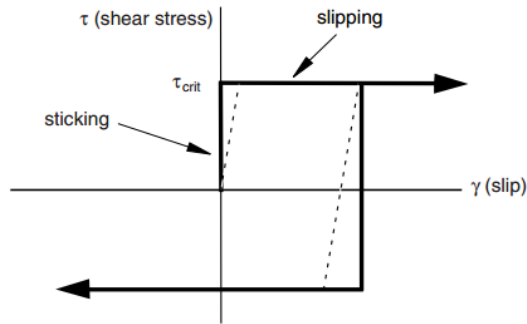
Όταν οι επιφάνειες είναι σε επαφή, τότε συνήθως μεταφέρουν διατμητικές δυνάμεις καθώς επίσης και κάθετες δυνάμεις κατά μήκος της διεπαφής τους. Έτσι, η ανάλυση μπορεί να χρειαστεί να λάβει υπόψη δυνάμεις τριβής, οι οποίες αντιστέκονται στην σχετική ολίσθηση των επιφανειών. Το μοντέλο της τριβής κατά τον Coulomb είναι ένα κοινό μοντέλο τριβής που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αλληλεπίδραση των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζει την συμπεριφορά της τριβής ανάμεσα σε δύο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή χρησιμοποιώντας τον συντελεστή τριβής μ .

Η προεπιλεγμένη τιμή του συντελεστή τριβής είναι μηδέν. Η εφαπτομενική κίνηση είναι μηδέν μέχρι η επιφάνεια έλξης φτάσει μια κρίσιμη τιμή διατμητικής τάσης, η οποία εξαρτάται από την κάθετη τάση της επαφής, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\tau_{crit} = \mu p$$

όπου μ ο συντελεστής τριβής και p είναι η πίεση της επαφής μεταξύ των δύο επιφανειών. Αυτή η εξίσωση δίνει την οριακή διατμητική τάση για τις επιφάνειες επαφής. η επαφής δεν θα ολισθήσουν (ολίσθηση σχετική μεταξύ τους) μέχρι η διατμητική τάση ανάμεσα στις διεπιφάνειές τους να γίνουν ίσες με την οριακή διατμητική τάση τριβής μp . Η τριβή Coulomb μπορεί να ορισθεί με μ ή τ_{crit} . Στο Σχήμα 6.2 συνοψίζεται η συμπεριφορά του μοντέλου τριβής Coulomb: υπάρχει μηδενική σχετική κίνηση (ολίσθηση) των επιφανειών όταν είναι προσκολλημένες (η διατμητικές τάσεις είναι κάτω από μp . Προαιρετικά, ένα όριο τάσης τριβής μπορούν να καθορισθούν αν και οι δύο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή είναι βασισμένες σε στοιχεία επιφανειών.

Στο Abaqus/Standard η ασυνέχεια μεταξύ των δύο σταδίων (προσκόλληση ή ολίσθηση) μπορούν να καταλήξουν σε προβλήματα σύγκλισης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Πρέπει να συμπεριληφθεί η τριβή στις προσομοιώσεις στο Abaqus/Standard μόνο όταν έχει σημαντική επιρροή στην απόκριση του μοντέλου. Αν η προσομοίωση της επαφής όταν με τη τριβή αντιμετωπίζονται προβλήματα σύγκλισης, μία από τις πρώτες τροποποιήσεις που πρέπει να δοκιμαστούν στη διάγνωση της δυσκολίας είναι να ξανατρέξει η ανάλυση χωρίς τη τριβή. Γενικά, η τριβή δεν παρουσιάζει επιπρόσθετες υπολογιστικές δυσκολίες στο Abaqus/Explicit.



Σχήμα 6.2: Συμπεριφορά τριβής

Η προσομοίωση της ιδανικής συμπεριφοράς τριβής μπορεί να είναι πολύ δύσκολη, έτσι από προεπιλογή στις περισσότερες περιπτώσεις, το Abaqus χρησιμοποιεί μια διατύπωση με μια επιτρεπτή ελαστική ολίσθηση, που φαίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 6.2. Η "ελαστική ολίσθηση" είναι ένα μικρό ποσοστό της σχετικής κίνησης μεταξύ των επιφανειών η οποία συμβαίνει όταν οι επιφάνειες πρέπει να βρίσκονται σε επαφή. Το Abaqus αυτόματα επιλέγει την δυσκαμψία (η κλίση της διακεκομμένης γραμμής) έτσι ώστε αυτή η επιτρεπόμενη "ελαστική ολίσθηση" να είναι ένα πολύ μικρό κλάσμα του χαρακτηριστικού μήκους του στοιχείου.

6.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΟ ABAQUS

Το πρώτο βήμα στον ορισμό ζεύγους επαφής (και προαιρετικά γενικής επαφής) στο Abaqus/Standard είναι να καθοριστούν οι επιφάνειες των σωμάτων που θα μπορούσαν υποθετικά να έρθουν σε επαφή. Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν οι επιφάνειες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αυτές είναι οι αλληλεπιδράσεις επαφής. Το τελικό βήμα είναι να οριστούν οι μηχανικές ιδιότητες που καθορίζουν την συμπεριφορά των επιφανειών όταν αυτές βρίσκονται σε επαφή.

Στην παρούσα εργασία ορίσθηκαν αρχικά οι ιδιότητες των επιφανειών. Δημιουργήθηκαν για αυτό το λόγο δύο διαφορετικές ιδιότητες επαφής (contact properties).

- Η πρώτη περιείχε την εφαπτομενική συμπεριφορά (tangential behavior) και τη συμπεριφορά κάθετα στην επιφάνεια (normal behavior)
- και η δεύτερη περιείχε την βλάβη (damage) και την συμπεριφορά της συνοχής (cohesive behavior)

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.

6.6.1 Εντολές ορισμού επιφανειών στο Abaqus

- **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 καταναμημένα 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.

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.

Οι γραμμές αυτές μπορούν να επαναλαμβάνονται όσο συχνά χρειάζεται για τον ορισμό επιφανειών.

- **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):

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.

- **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).

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:

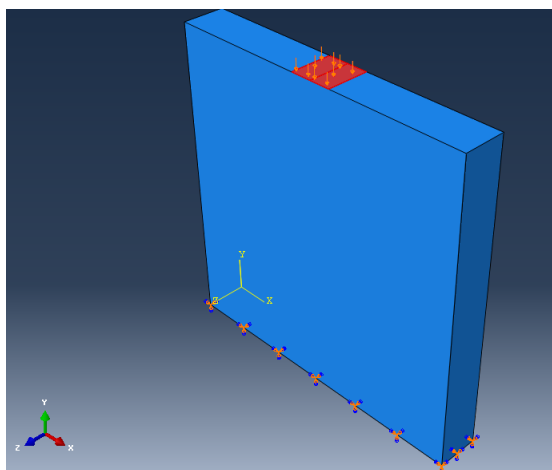
1. Το όνομα της δευτερεύουσας επιφάνειας (slave surface).
2. Το όνομα της κύριας επιφάνειας (master surface). Αν δεν οριστεί κάποια επιφάνεια σε αυτό το πεδίο ή η επιφάνεια που θα οριστεί είναι ίδια με το όνομα της δευτερεύουσας επιφάνειας, τότε το Abaqus/Standard θεωρεί ότι ορίζεται self-contact.
3. Προαιρετικό όνομα προσανατολισμού για τον ορισμό της διεύθυνσης της εφαπτομενικής ολίσθησης στην δευτερεύουσας επιφάνειας (slave surface).
4. Προαιρετικό όνομα προσανατολισμού για τον ορισμό της διεύθυνσης της εφαπτομενικής ολίσθησης στην κύριας επιφάνειας (master surface).

7. ΔΟΚΙΜΕΣ

Πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμές προσομοίωσης σε απλά προσομοιώματα ώστε να ελεγχθεί αν το υλικό (concrete damaged plasticity) και η μέθοδος προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε βγάζουν λογικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό έγιναν απλές προσομοιώσεις ενός λιθοσώματος με διάφορες φορτίσεις και είδη στηρίξεων καθώς και μια προσομοίωση δύο λιθοσωμάτων που συνδέονται με στοιχείο επαφής.

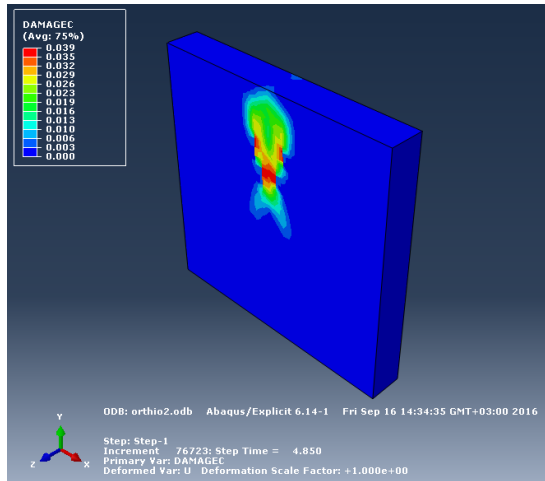
7.1 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

Για την προσομοίωση της δοκιμής θλίψης της τοιχοποιίας, χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα στοιχεία (C3D8R). Προσομοιώθηκε ένα λιθόσωμα λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των λίθων και του κονιάματος για τον υπολογισμό των μηχανικών του χαρακτηριστικών, το ύψος του στοιχείου ορίστηκε ως το πάχος ενός αρμού κονιάματος συν ενός σπτόπλινθου. Η κατακόρυφη δράση επιβλήθηκε ως κατανεμημένη δύναμη σε ένα μέρος της άνω επιφάνειας του λιθοσώματος. Η βάση του δοκιμίου θεωρήθηκε πακτωμένη.

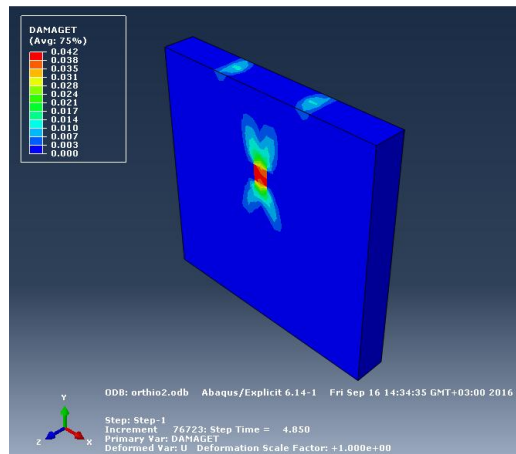


Εικόνα 7.1: Προσομοίωση δοκιμής θλίψης

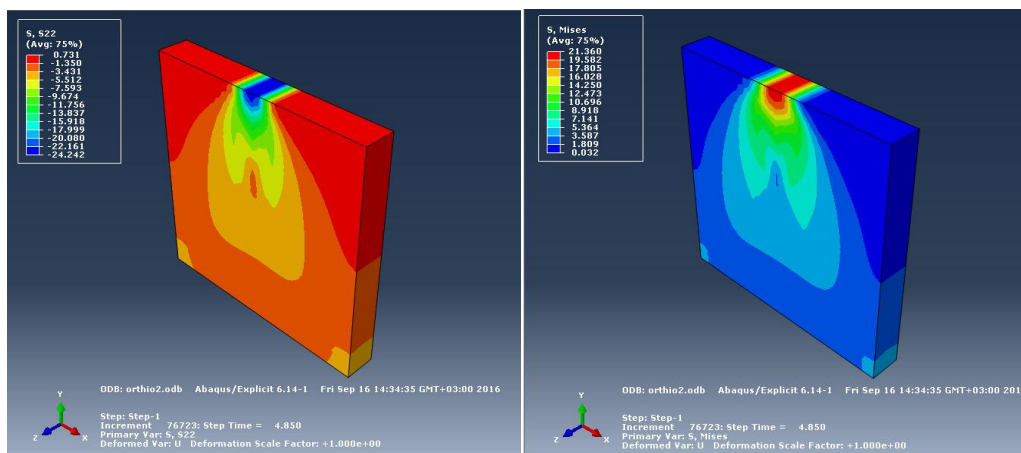
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στην Εικόνα 7.2-7.4 παρουσιάζονται οι βλάβες damages και damaget καθώς και οι τάσεις Mises και σ_{22} . Το μοντέλο του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Concrete damaged plasticity.



Εικόνα 7.2: Αποτελέσματα damages



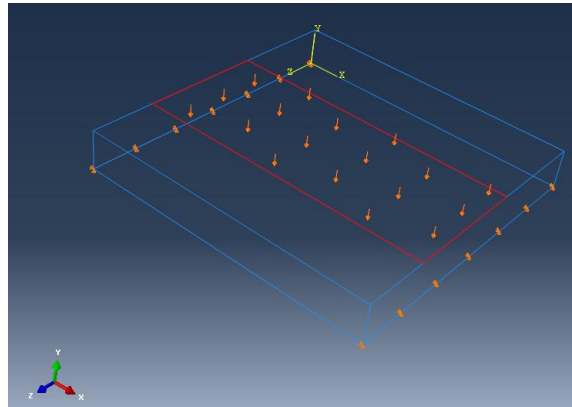
Εικόνα 7.3: Αποτελέσματα damaget



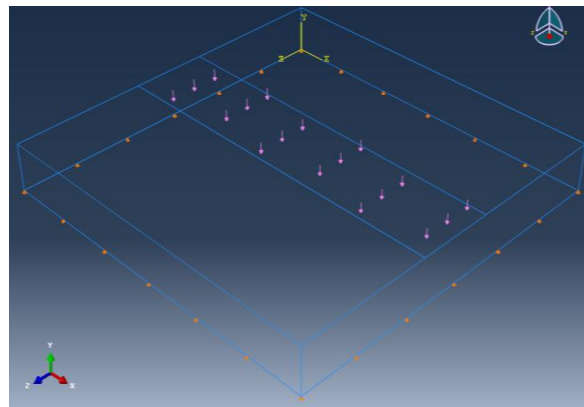
Εικόνα 7.4: Αποτελέσματα τάσεων κατά την αστοχία

7.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΠΛΗ ΣΤΗΡΙΞΗ

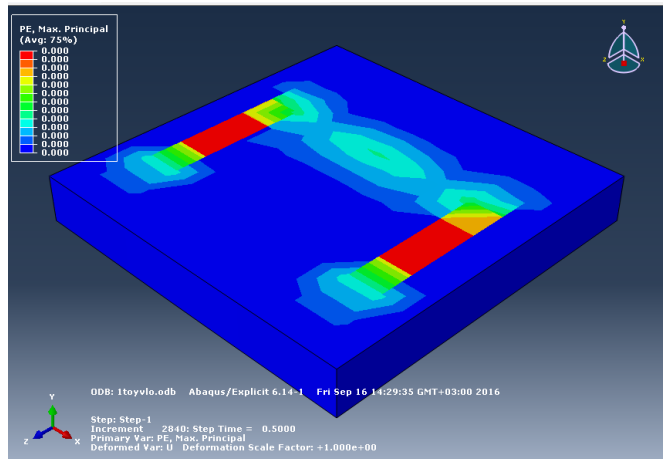
Δημιουργήθηκαν για αυτό το σκοπό δύο προσομοιώματα με κατακόρυφο επιφανειακό φορτίο σε ένα μέρος της πάνω επιφάνειας και απλή στήριξη. Στο πρώτο επιβλήθηκε απλή στήριξη στις δύο απέναντι πλευρές του λίθου ενώ στο δεύτερο σε όλες τις πλευρές.



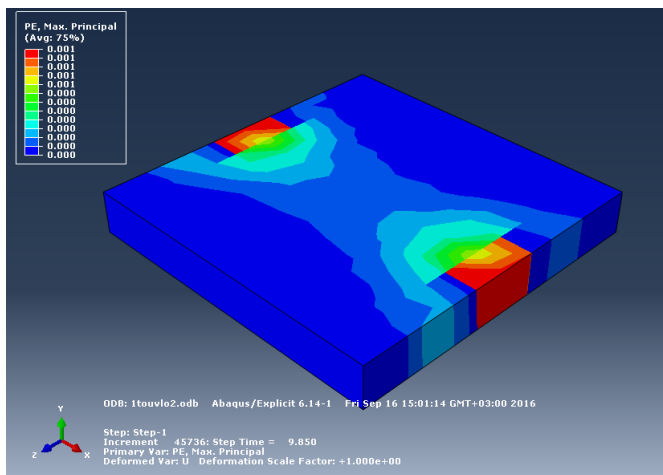
Εικόνα 7.5: Προσομοίωμα με απλή στήριξη στις δύο πλευρές



Εικόνα 7.6: Προσομοίωμα με απλή στήριξη σε όλες τις πλευρές



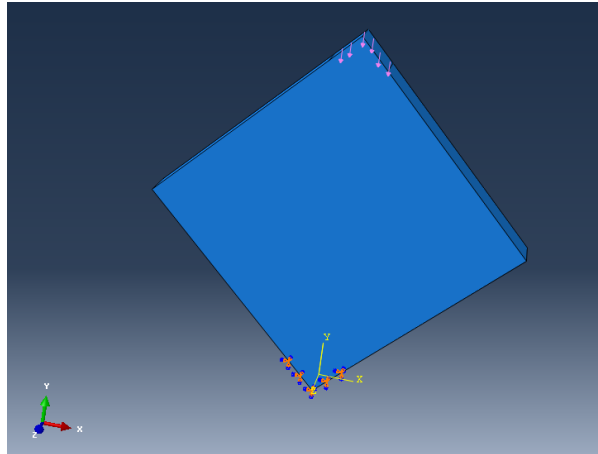
Εικόνα 7.7: Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης πρώτου δοκιμίου



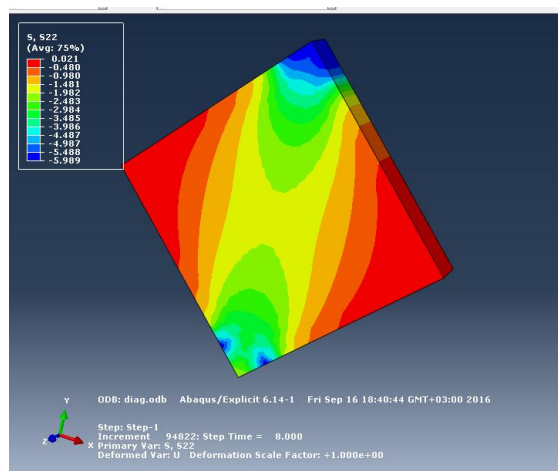
Εικόνα 7.8: Αποτελέσματα πλαστικής παραμόρφωσης δεύτερου δοκιμίου

7.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΘΛΙΨΗΣ

Το προσομοίωμα και εδώ έχει ακριβώς τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά χαρακτηριστικά με τα προηγούμενα δύο και προσομοιώθηκε με τον ίδιο τύπο πεπερασμένων στοιχείων όπως και τα προηγούμενα.



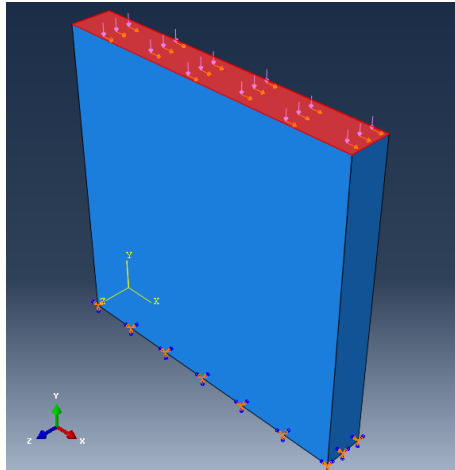
Εικόνα 7.9: Προσομοίωση διαγώνιας θλίψης



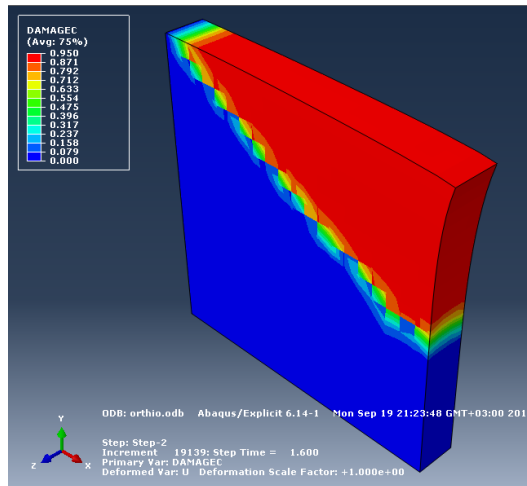
Εικόνα 7.10: Αποτελέσματα τάσεων σ_2 κατά την αστοχία

7.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΤΑΣΗ

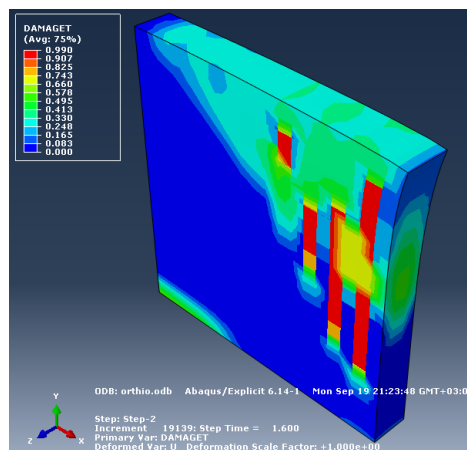
Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση ενός λίθου που υποβάλλεται σε θλίψη και σε σταδιακά αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση και πακτωμένο στη βάση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Εικόνα 7.11: Προσομοίωση με οριζόντια και κατακόρυφη φόρτιση



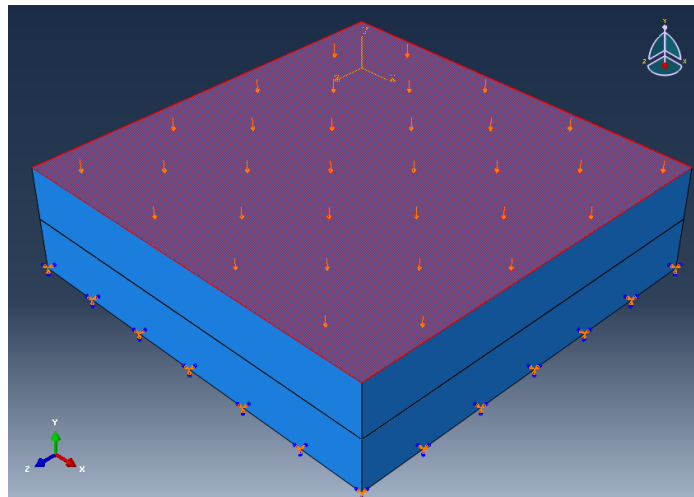
Εικόνα 7.12: Αποτελέσματα βλάβης λόγω θλίψης κατά την αστοχία



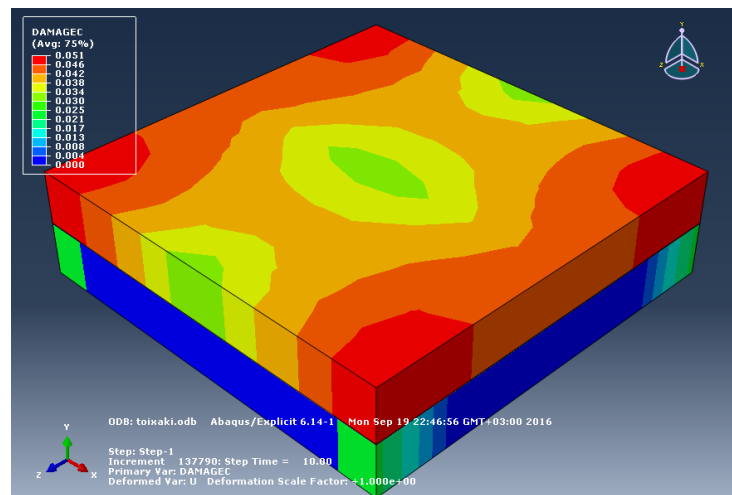
Εικόνα 7.13: Αποτελέσματα βλάβης λόγω εφελκυσμού κατά την αστοχία

7.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΟ ΛΙΘΩΝ ΣΕ ΕΠΑΦΗ

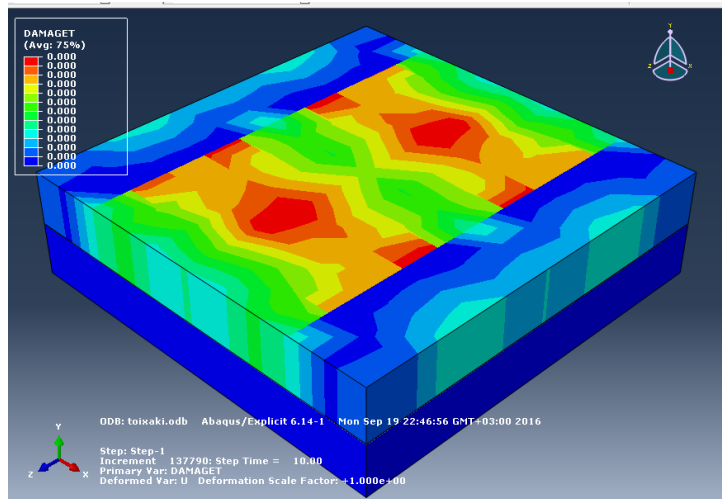
Στο τελευταίο προσομοίωμα έχουμε δύο λίθους συνδεδεμένους με κονίαμα. Τα λιθώματα προσομοιώθηκαν με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Ο αρμός που τους συνδέει προσομοιώθηκε με στοιχείο επαφής (general contact).



Εικόνα 7.14: Δύο λίθοι που βρίσκονται σε επαφή



Εικόνα 7.15: Αποτελέσματα damagec



Εικόνα 7.16: Αποτελέσματα damaget

8. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΙΚΡΟ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο μια λεπτομερής προσομοίωση τοιχοποιίας είναι πολύ χρήσιμη. Η αστοχία σε ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να συμβεί στους λίθους, στο κονίαμα ή στη διεπιφάνειά τους. Ρηγμάτωση ή θραύση μπορεί να συμβεί στο λίθο ή και στη διεπιφάνεια αρμού-κονιάματος και δύο μορφές αστοχίας είναι πιθανές:

- εφελκυστική αστοχία, η οποία οδηγεί στο άνοιγμα των αρμών και
- διατμητικές αστοχίες εντός και εκτός επιπέδου, οι οποίες δημιουργούν ολίσθηση των αρμών με τριβή

Παρόλα τα πολλά πλεονεκτήματα του μακρο-προσομοιώματος, όπου η τοιχοποιία θεωρείται ομοιογενές υλικό, όπως είναι το μικρό υπολογιστικό κόστος, αυτοί οι μηχανισμοί αστοχίας δεν μπορούν να προβλεφθούν.

Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες του λεπτομερούς προσομοιώματος είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων (π.χ. των λίθων) οι οποίες στην πραγματικότητα καθορίζονται από τις ιδιότητες του κονιάματος. Το κονίαμα συνήθως είναι μια μίξη από τσιμέντο, άβεστο και άμμο σε διαφορετικές αναλογίες. Αυτές οι ιδιότητες του κονιάματος καθορίζουν την αντοχή των αρμών μεταξύ των λίθων και μπορούν να προσομοιωθούν με διαφορετικές ιδιότητες για τους κατακόρυφους και οριζόντιους αρμούς.

Στη παρούσα εργασία έγινε η επιλογή να ορισθούν ιδιότητες επαφής μεταξύ των λίθων αντί να πραγματοποιηθεί λεπτομερής μικρο-προσομοίωση, στην οποία το κονίαμα θα αποτελούταν επίσης από πεπερασμένα στοιχεία. Το πάχος των αρμών κονιάματος θεωρήθηκε μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις των λίθων. Αυτή η υπόθεση οδηγεί στο πρόβλημα του τρόπου που θα ορισθεί η επαφή.

Στο Abaqus μερικά μοντέλα επαφής ανάμεσά τους και η επαφή μεταξύ επιφανειών μπορούν να ορισθούν.

Παρακάτω περιγράφονται όλες οι λεπτομέρειες που αφορούν την προσομοίωση καθώς και όλες οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν με τα αντίστοιχα δεδομένα που λήφθηκαν υπόψη.

8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, είναι το concrete damaged plasticity.

8.1.1 Εντολή *CONCRETE DAMAGED PLASTICITY

Μέσω αυτής της εντολής ορίζονται οι εξής παράμετροι του συγκεκριμένου μοντέλου υλικού: 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.

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

- Πρώτη γραμμή:

1. Γωνία διασταλτικότητας, ψ , στο ρ - 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 υπόψη στο Abaqus/Explicit. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 0.0.

Πίνακας 8.1: Μηχανικές ιδιότητες τοιχοποιίας

	Ελαστικότητα		Πλαστικότητα				
Πυκνότητα μάζας (kg/m^3)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Δείκτης Poisson ν	Γωνία διασταλτικότητας ψ ($^{\circ}$)	Εκκεντρότητα ϵ	f_{b0}/f_c	K	μ
26.717	9000	0.2	34	0.1	1.16	0.67	0.001

8.1.2 Εντολή *CONCRETE TENSION STIFFENING

Μέσω της εντολής *CONCRETE TENSION STIFFENING ορίζονται οι ιδιότητες του υλικού 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).

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), $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$.
3. Ρυθμός απευθείας παραμόρφωσης ρηγμάτωσης (Direct cracking strain rate), $\dot{\tilde{\epsilon}}_t^{ck}$.
4. Θερμοκρασία.
5. Πρώτη μεταβλητή
6. Δεύτερη μεταβλητή.
7. Κλπ., μέχρι τέσσερις μεταβλητές.

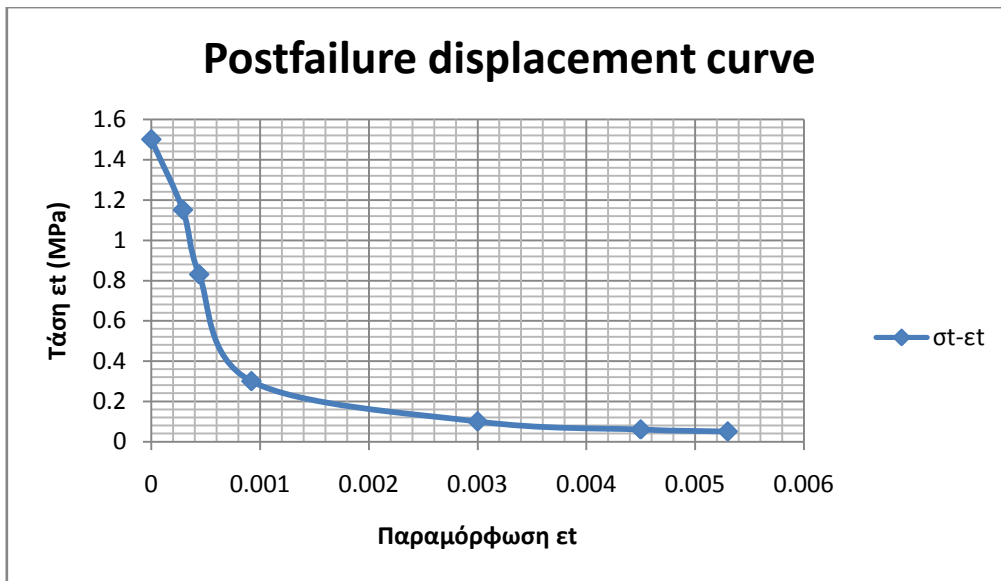
Το πρώτο σημείο, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας, πρέπει να έχει παραμόρφωση ρηγμάτωσης ίση με 0.0 και τάση αστοχίας ίση με σ_{t0} .

Πίνακας 8.2: Ιδιότητες υλικού μετά τη θραύση

TENSILE BEHAVIOR	
Yield Stress (MPa)	Cracking Strain
1.5	0
1.15	0.00029
0.83	0.00044
0.3	0.00092
0.1	0.003
0.06	0.0045
0.05	0.0053

*Οι τιμές αυτές προκύπτουν από πείραμα διαγώνιου εφελκυσμού δύο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα μετατρέποντας τις τάσεις στην οριζόντια διεύθυνση με τη σχέση 0.707P/A.

Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων οι τιμές λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία



Σχήμα 8.1: Καμπύλη $\sigma_t-\varepsilon^{ck}$ υλικού τοιχοποιίας προσομοιώματος

8.1.3 Εντολή *CONCRETE COMPRESSION HARDENING

Μέσω της *CONCRETE COMPRESSION HARDENING εντολής ορίζεται η σκλήρυνση του υλικού 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.

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), ε_c^{in} .
3. Ρυθμός ανελαστικής παραμόρφωσης (σύνθλιψης) (Inelastic (crushing) strain rate), $\dot{\varepsilon}_c^{in}$.
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} .

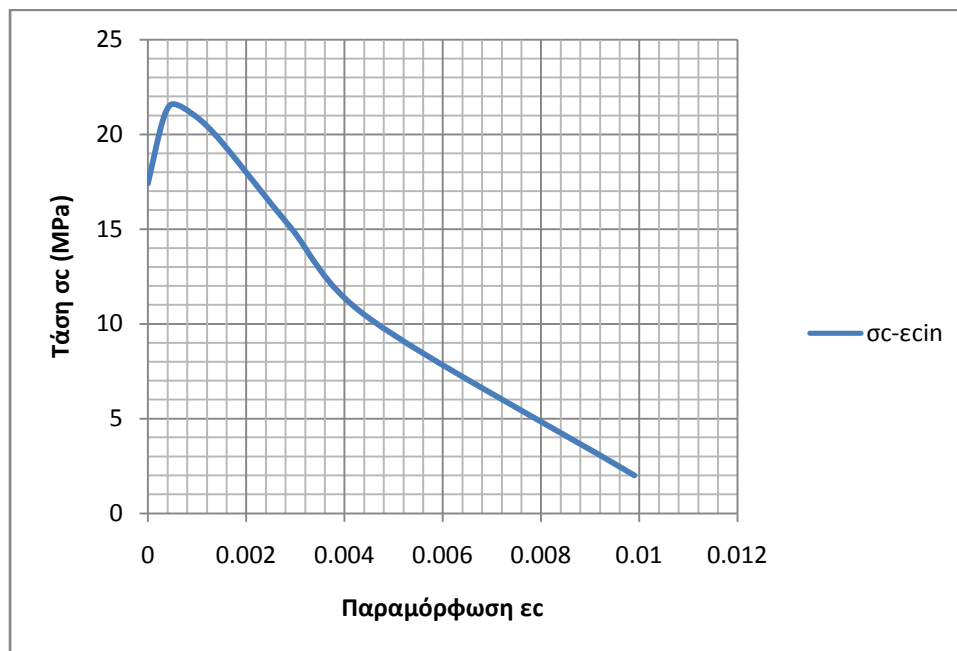
Πίνακας 8.3: Ιδιότητες σκλήρυνσης υλικού υπό θλίψη

COMPRESSIVE BEHAVIOR	
Yield Stress (MPa)	Inelastic Strain
17.4	0
20.7	0.0003

21.6	0.0005
20.9	0.0010
19.6	0.0015
15.1	0.0029
10.3	0.0045
2.0	0.0099

*Οι τιμές αυτές προκύπτουν από πείραμα αξονικής θλίψης δυο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα.

Λόγω έλλειψης δεδομένων οι τιμές λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία



Σχήμα 8.2: Καμπύλη $\sigma_c - \varepsilon_c^{in}$ υλικού τοιχοποιίας προσομοιώματος μετά την διαρροή

8.1.4 Εντολή *CONCRETE TENSION DAMAGE

Μέσω της εντολής *CONCRETE TENSION DAMAGE 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.

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.

8.1.5 Εντολή *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE

Μέσω της εντολής *CONCRETE COMPRESSION DAMAGE 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.

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), $\tilde{\epsilon}_c^{in}$.
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.

Για να δούμε την συμπεριφορά της βλάβης στο μοντέλο του υλικού πρέπει να πραγματοποιηθεί πείραμα ανακύκλισης για να έχουμε αυτές τις παραμέτρους d_c και d_t . Λόγω έλλειψης δεδομένων η περιγραφή της συμπεριφοράς της βλάβης βασίσθηκε στις τιμές που φαίνονται στο Πίνακα 8.4, οι οποίες έχουν προκύψει από συστάσεις του Abaqus για ψαθυρά υλικά.

Πίνακας 8.4: Τιμές βλάβης της δυσκαμψίας σε θλίψη και εφελκυσμό (Concrete compression damage-Concrete tension damage)

Δείκτης βλάβης d_c	Παραμόρφωση ϵ_c	Δείκτης βλάβης d_t	Παραμόρφωση ϵ_t
0	0	0	0
0.5	0.0027	0.9	0.1
0.97	0.1	-	-

8.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΠΑΦΗΣ

8.2.1 Tangential Contact behavior

Διατμητικές και κατακόρυφες δυνάμεις μεταφέρονται ανάμεσα στις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή κατά μήκος της διεπιφάνειάς τους. Η σχέση μεταξύ των τάσεων που αναπτύσσονται περιγράφεται από ένα μοντέλο τριβής, γενικά, από μια κλασική ιστροπική διατύπωση Coulomb. Οι επιφάνειες μπορούν να μεταφέρουν διατμητικές τάσεις έως ένα μέγεθος κατά μήκος της διεπιφάνειάς τους πριν αρχίσει η σχετική ολίσθηση ανάμεσά τους.

Αυτή η κρίσιμη διατμητική τάση καθορίζεται σαν ένα κλάσμα της πίεσης της επαφής ανάμεσα στις επιφάνειες

$$\tau = \mu \cdot p \quad (8.1)$$

όπου:

μ είναι ο συντελεστής τριβής, ο οποίος θεωρείται ότι είναι ο ίδιος σε όλες τις διευθύνσεις (ισότροπη συμπεριφορά)

Για ένα χωρικό μοντέλο μπορούν υπάρχουν δύο ορθογωνικές συνιστώσες διατμητικής τάσης (τ_1 και τ_2), οι οποίες ενεργούν στις διευθύνσεις ολίσθησης για τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή. Αυτές οι δύο συνιστώσες διατμητικής τάσης συνδυάζονται σε μια ισοδύναμη τάση ολίσθησης (σχετική μετατόπιση μεταξύ των επιφανειών):

$$\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (8.2)$$

Οι δυο συνιστώσες ταχύτητας της ολίσθησης επίσης συνδυάζονται σε ένα ισοδύναμο ποσοστό ολίσθησης (ή ταχύτητα ολίσθησης). Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δυναμική εξέλιξη της μέσης ελαστικής τριβής:

$$\dot{\gamma}_{eq} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2} \quad (8.3)$$

Οι υπολογισμοί της ολίσθησης ορίζουν μια επιφάνεια στο χώρο διατμητικής τάσης πίεσης επαφής κατά μήκος του οποίου υπάρχει ένα σημείο μετάβασης από την προσκόλληση στην ολίσθηση. Η συμπεριφορά της τριβής ορίζεται από μια συνάρτηση του

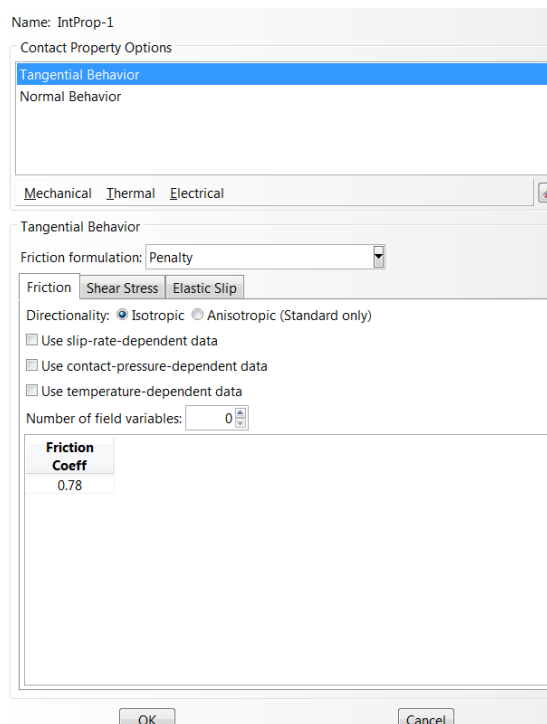
ισοδύναμου ποσοστού ολίσθησης και τάσης επαφής. Ο συντελεστής τριβής μπορεί να ορισθεί σαν ένα ποσοστό ολίσθησης εξαρτώμενο, επίσης εξαρτώμενο από την τάση της επαφής, από τη θερμοκρασία και άλλες μεταβλητές.

$$\mu = \mu(\dot{\gamma}_{eq}, p, \theta, f^{\alpha}) \quad (8.4)$$

Είναι επίσης πιθανό να ορισθεί ένα όριο τάσης, έτσι ώστε η ολίσθηση να συμβεί αν το μέγεθος της ισοδύναμης διατμητικής τάσης φθάσει αυτή τη τιμή. Αυτό το όριο εισάγεται όταν η τιμή της τάσης της επαφής γίνει πολύ μεγάλη, προκαλώντας τη θεωρία Coulomb να παρέχει μια κρίσιμη τιμή διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια που υπερβαίνει τη τάση διαρροής του υλικού κάτω από την επιφάνεια επαφής. Μια λογική μέγιστη τιμή διατμητικής τάσης είναι:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (8.5)$$

όπου σ_y είναι η τάση διαρροής Mises του γειτονικού υλικού της επιφάνειας



Εικόνα 8.1: Ορισμός συμπεριφοράς τριβής της επαφής στο Abaqus

Οι ιδιότητες αυτές που καθορίζουν τη συμπεριφορά τριβής θα πρέπει να λαμβάνονται από πειραματικά δεδομένα. Θα πρέπει να γίνουν πειράματα διάτμησης σε μια μονάδα τοιχοποιίας αποτελούμενης από δύο λίθους με κονίαμα ενδιάμεσα, από τα οποία εξασφαλίζουμε τη σχέση διατμητικής τάσης- σχετικής διατμητικής μετατόπισης όπως επίσης και τη σχέση ανάμεσα σε ορθές και διατμητικές τάσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλοί τύποι κονιάματος και θα πρέπει οι ιδιότητές τους να ορισθούν από την κατασκευαστική διαδικασία που χρησιμοποιείται.

Στην παρούσα εργασία ελλείπει πειραματικών δεδομένων θεωρήθηκε συντελεστής τριβής $\mu=0.78$ ίδιος και στις δύο διευθύνσεις.

8.2.2 Normal Contact behavior

Η κατακόρυφη συμπεριφορά της επαφής προσομοιώνεται από μια σχέση pressure-overclosure. Η σκληρή επαφή όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην οποία η αποκόλληση των επιφανειών επιτρέπεται, ορίστηκε.

8.2.3 Cohesive Contact behavior

Η συμπεριφορά της συνοχής περιγράφεται σαν ένας νόμος έλξης-αποκόλλησης μεταξύ των επιφανειών. Για να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά του κονιάματος, η συνοχή περιορίζεται στο μοντέλο στις περιοχές των επιφανειών που είναι αρχικώς σε επαφή, ώστε οι νέες επαφές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης να μη δέχονται δυνάμεις συνοχής.

Το μοντέλο υποθέτει ένα ελαστικό νόμο έλξης-αποκόλλησης πριν τη βλάβη και αστοχία του δεσμού που χαρακτηρίζεται από προοδευτική μείωση της δυσκαμψίας της συνοχής, προερχόμενη από τη διαδικασία της βλάβης. Το Abaqus επιβάλλει αυτή τη συμπεριφορά της επαφής μόνο για αλληλεπιδράσεις κόμβου-επιφάνειας.

Στη κατακόρυφη διεύθυνση των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή, η σχέση pressure-overclosure ορίζει τη θλιπτική συμπεριφορά δεν αλληλεπιδρά με αυτή που έχει συνοχή, από τη στιγμή που η πρώτη σχέση περιγράφει την επαφή μόνο όταν οι επιφάνειες είναι κλειστές, και η συμπεριφορά της συνοχής συμβάλλει όταν οι επιφάνειες αποχωρίζονται.

Στη διεύθυνση διατμήσεως, το μοντέλο συνοχής είναι ενεργό και το μοντέλο τριβής είναι αδρανές και οι ολισθήσεις θεωρούνται ελαστικές και ο δεσμός συνοχής τους αντιστέκεται, παράγοντας διατμητικές τάσεις. Όταν η συμπεριφορά της συνοχής καταστρέφεται, το μοντέλο τριβής ενεργοποιείται και συμβάλλει στις διατμητικές τάσεις σε αναλογία στη μείωση του ελαστικού συντελεστή δυσκαμψίας. Όταν η συμπεριφορά συνοχής έχει καταστραφεί πλήρως, η διατμητική τάση οφείλεται μόνο στο μοντέλο τριβής.

Το μοντέλο υποθέτει αρχικώς γραμμική ελαστική συμπεριφορά που ακολουθείται από την έναρξη και την εξέλιξη της βλάβης. Το ελαστικό μητρώο που συνδέει τις κατακόρυφες και διατμητικές τάσεις με τις κατακόρυφες και διατμητικές αποκολλήσεις κατά μήκος της διεπιφάνειας καθορίζει το μοντέλο:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (8.6)$$

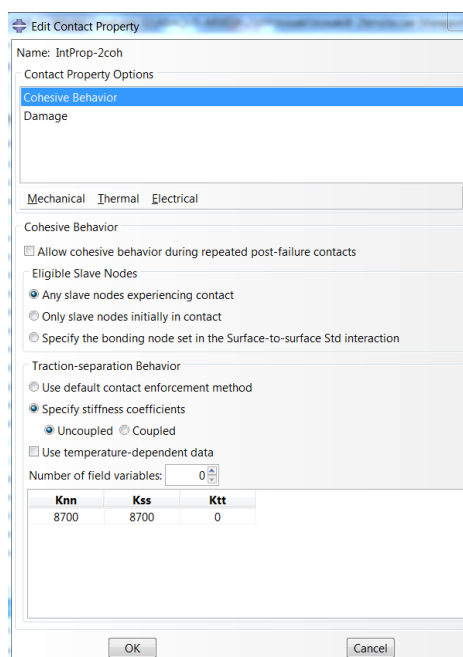
όπου t είναι το διάνυσμα ονομαστικών τάσεων έλξης και δ , οι αντίστοιχες αποκολλήσεις. Με n συμβολίζεται η κατακόρυφη διεύθυνση και με s και t οι δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

Χρησιμοποιήθηκε uncoupled traction separation και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 8.5

Πίνακας 8.5: Ορισμός Συντελεστών δυσκαμψίας στην επαφή

Stiffness coefficients N/mm	
K_{nn}	8700
K_{ss}	8700
K_{tt}	0

Αυτές οι τιμές προκύπτουν από τη μέγιστες τιμές της έλξης σε κάθε διεύθυνση, που αντιστοιχούν στη συνοχή και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις s και t καθώς και στην αντοχή σε εφελκυσμό στη κατακόρυφη διεύθυνση n της επιφάνειας. Για το κονιάμα, η αντοχή σε εφελκυσμό θεωρείται 0.1 MPa.

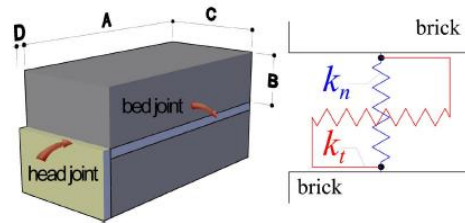


Εικόνα 8.2: Ορισμός ιδιοτήτων Cohesive behavior

*Μετρώντας την οριζόντια επιμήκυνση στο πείραμα διαγώνιου εφελκυσμού, η οποία αντιστοιχεί στο 10% της μέγιστης αντοχής, βρίσκουμε την τιμή που χρησιμοποιούμε ως πλαστική παραμόρφωση για έναρξη της βλάβης. Με αυτή τη τιμή και την αντοχή του κονιάματος σε θλίψη βρίσκουμε το διάγραμμα έλξης-αποκόλλησης όπως φαίνεται

παρακάτω (Σχήμα 8.3). Στη συνέχεια από την κλίση του διαγράμματος βρίσκουμε την τιμή K_{nn} την οποία θεωρούμε ίση με τις K_{ss} , K_{tt} .

Αν δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα οι συντελεστές δυσκαμψίας μπορούν να υπολογισθούν από τις ακόλουθες σχέσεις 8.7-8.8.



Εικόνα 8.3: Απεικόνιση K_{nn} , K_{tt}

$$K_{nn} = \frac{E_u E_m}{h_m (E_u - E_m)} \quad (8.7)$$

$$K_{ss} = K_{tt} = \frac{G_u G_m}{h_m (G_u - G_m)} \quad (8.8)$$

όπου:

- E_u το μέτρο ελαστικότητας του λιθοσώματος
- E_m το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος
- G_u το μέτρο διάτμησης του λιθοσώματος
- G_m το μέτρο διάτμησης του κονιάματος
- h_m το πάχος του αρμού

8.2.4 Cohesion damage

Ο υποβιβασμός της ατοχίας του δεσμού προσομοιώνεται με τη βοήθεια ενός κριτηρίου έναρξης της βλάβης και από ένα νόμο εξέλιξης της βλάβης. Όταν δεν προσδιορίζεται νόμος εξέλιξης της βλάβης, το κριτήριο έναρξης της βλάβης αξιολογείται για σκοπούς παραγωγής αποτελεσμάτων μόνο.

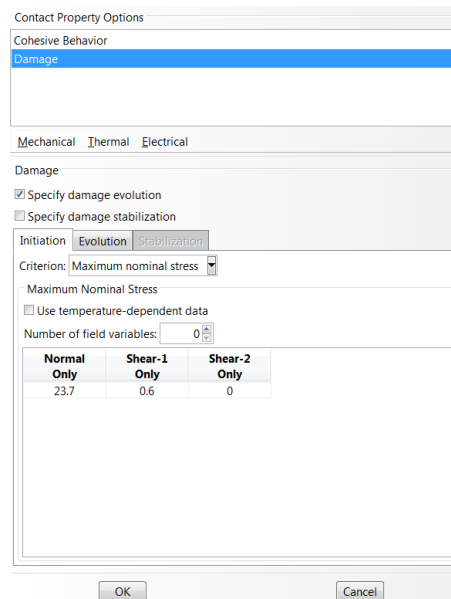


Σχήμα 8.3: Τυπική απόκριση έλξης-αποκόλλησης (traction-separation) σε ένα μοντέλο συνοχής

Η έναρξη της υποβάθμισης της απόκρισης της συνοχής θεωρείται ότι συμβαίνει όταν το κριτήριο μέγιστης τάσης επιτυγχάνεται:

$$\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (8.9)$$

όπου οι μέγιστες τιμές της πίεσης στην επαφή θεωρήθηκαν $t_n=23.7$ MPa $t_s=0.6$ MPa και $t_t=0$ MPa.



Εικόνα 8.4: Εισαγωγή μέγιστων τιμών πίεσης στο Abaqus

*Οι παραπάνω τιμές λαμβάνονται από:

- t_n είναι η αντοχή του κονιάματος σε θλίψη (τη λαμβάνουμε από τις προδιαγραφές του κονιάματος)
- t_s είναι η αντοχή σε διάτμηση (τη λαμβάνουμε από τεστ διάτμησης δύο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα)
- t_t είναι η αντοχή σε διάτμηση στην άλλη οριζόντια διεύθυνση από αυτή που πήραμε το t_s (και αυτή τη λαμβάνουμε από τεστ διάτμησης δύο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα)

Το φορτίο που επιβλήθηκε είναι θλιπτική τάση 20MPa ομοιόμορφα κατανεμημένο στην πάνω επιφάνεια του τοίχου το οποίο είναι σταδιακά αυξανόμενο και επιβάλλεται σε 10 βήματα.

8.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ

Για την εφαρμογή αυτού του τρόπου προσομοίωσης απαιτούνται κάποια πειράματα όπως προαναφέρθηκε τόσο για ορισμό των ιδιοτήτων του υλικού *concrete damaged plasticity* όσο και για τον ορισμό των ιδιοτήτων της επαφής μεταξύ λιθώματος και αρμού. Συνοψίζοντας τα εργαστηριακά τεστ που πρέπει να πραγματοποιηθούν για αυτό το σκοπό είναι τα παρακάτω:

- Τεστ θλίψης δυο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα (καμπύλη $\sigma_c-\epsilon_c$)
- Τεστ λοξού εφελκυσμού δυο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα (καμπύλη $\sigma_t-\epsilon_t$)
- Τεστ φόρτισης-αποφόρτισης δύο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα (κλάδος αποφόρτισης-δείκτες βλάβης d_c-d_t)
- Τεστ διάτμησης δύο λίθων συνδεδεμένων με κονίαμα (για τις ιδιότητες του στοιχείου της επαφής)
- Τεστ εφελκυσμού κονιάματος (για τις ιδιότητες της αντοχής του κονιάματος που χρησιμοποιούνται στα στοιχεία επαφής)

8.4 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

- **Dynamic Explicit**

Χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση *Dynamic Explicit*. Η *Dynamic Explicit* είναι ένα μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση εξισώσεων μέσα στο χρόνο. Η μέθοδος ολοκλήρωσης αυτή είναι επίσης γνωστή και ως μέθοδος της κεντρικής διαφοράς. Έχει σχεδιαστεί για να λύνει προβλήματα μεγάλης ασυνέχειας. Μια *explicit* ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων κάνει την προσαυξητική διαδικασία στο τέλος του κάθε βήματος όπου ενημερώνει το μητρώο δυσκαμψίας βασιζόμενο στις γεωμετρικές αλλαγές και στις αλλαγές του υλικού. Τότε ένα καινούριο μητρώο δυσκαμψίας κατασκευάζεται και η επόμενη αύξηση του φορτίου (ή της μετατόπισης) εφαρμόζεται στο σύστημα.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση στατικών προβλημάτων υπό την προϋπόθεση ότι η κινηματική ενέργεια παραμένει μικρή συγκρινόμενη με την εσωτερική ενέργεια του συστήματος κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη αύξηση του χρόνου επιβολής της φόρτισης. Τεχνικές όπως η διαβάθμιση της μάζας (*mass scaling*) ή επιβολή της φόρτισης μέσω ομαλής (χωρίς απότομες μεταβολές) καμπύλης (*smoothing amplitude curves*), προτείνονται επίσης όταν η δυναμική ανάλυση ρητής ολοκλήρωσης χρησιμοποιείται για την επίλυση στατικών προβλημάτων.

- **Incrementation in the steps**

Προσαύξηση στα *steps*

Η προσαύξηση του χρονικού βήματος επιλέχθηκε αυτόματα από το πρόγραμμα εξαρτώμενη από την υπολογιστική ικανότητα. Η χρονική περίοδος της ανάλυσης επιλέχθηκε να είναι 10s.

- **Element Type**

Τρισδιάστατα γραμμικά και στερεά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση του μοντέλου. Ο τύπος του στοιχείου που χρησιμοποιήθηκε είναι το C3D8R (γραμμικό στοιχείο οκτώ κόμβων με μειωμένη ολοκλήρωση και έλεγχο hourglass). Οι αναφερόμενοι έλεγχοι του στοιχείου που αναφέρθηκε συνοψίζονται στον Πίνακα 8.6 όπως εισήχθησαν στο Abaqus.

Πίνακας 8.6: Γενικές Επιλογές Ανάλυσης (Element Type)

Reduced Integration	No hybrid formulation, no incompatible modes
Hourglass Stiffness	By default: an additional artificial stiffness is added to the element
Viscosity	By default, a small value for viscosity parameter is used to improve the rate of convergence of the model in the softening regime without compromising results.
Kinematic split	Average strain
Second order accuracy	No
Distortion Control	By default. It prevents the elements from exceeding the deformation ratio
Element deletion and maximum degradation	By default, the elements where the failure criterion is locally reached, are removed from the calculation

8.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παρακάτω περιγράφονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά ενός δοκιμίου από φέρουσα τοιχοποιία από αυτά που πρόκειται να υποβληθούν σε στατικές δοκιμές θλίψης στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αυτά τα δοκίμια τοιχοποιίας κατασκευάστηκαν για τη διενέργεια στατικών δοκιμών σε θλίψη σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο EN 1052-1. Σκοπός αυτών των πειραμάτων είναι ο εμπλουτισμός της γνώσης μας σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας και την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως οι μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών, ήτοι του κονιάματος και των λίθων, αλλά και του πάχους του αρμού.

Η κατασκευή δοκιμών που επιλέχθηκε είναι από συμπαγείς οπτόπλινθους, οι οποίοι απαντώνται στην κατασκευή πολλών μνημειακών κτισμάτων όπως είναι οι ναοί και οι οχυρώσεις της βυζαντινής περιόδου. Θα κατασκευαστούν συνολικά 12 δοκίμια. Τα έξι από αυτά έχουν διάσταση (μήκος × ύψος × πλάτος) 61cm × 94cm × 30cm και τα υπόλοιπα έξι 64cm × 92cm × 30cm. Θα εξεταστούν δύο εναλλακτικές ποιότητες κονιάματος με θλιπτική αντοχή $f_m=5\text{MPa}$ και $f_m=10\text{MPa}$ καθώς και δύο πάχη αρμού $t_{bj}=1\text{cm}$ και $t_{bj}=4\text{cm}$.

Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιούνται συμπαγείς δηλαδή χωρίς οπές οπτόπλινθοι διαστάσεων 30cm × 30cm × 4cm.

Τα χαρακτηριστικά των οπτόπλινθων παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 8.6.

Πίνακας 8.7 Χαρακτηριστικά οπτόπλινθων

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά- Παράλληλες επιφάνειες	T2, R2	T2, R2	EN 772-16
Επιπεδότητα των πλευρών έδρασης	Βάση l1,l2: 221 Βάση s1: 1.2 Βάση s2: 0.3	Βάση l1,l2: ±2% Βάση s1: ±2% Βάση s2: ±2%	EN 772-20
Πυκνότητα (Καθαρή- Μικτή)	Καθαρή 2063 ± 0,9% Μικτή 2078 ± 0,8%	Καθαρή 2063 ± 0,9% Μικτή 2078 ± 0,8%	EN 772-13
Αντοχή στη θλίψη (kN)	81, Κατηγορία II	>80KN	EN 772-1
Ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα	<0.7W/mK	<0.7W/mK	EN 1745
Αντίσταση στη ψύξη	Απώλεια βάρους<0.5%	Απώλεια βάρους<0.5%	EN 772-18
Συγκέντρωση ενεργών υδατοδιαλυτών αλάτων	Κατηγορία S2	K+<0.0015% Na+<0.00012% Mg++<0.0015%	EN 772-5
Υδατοαπορρόφηση	<12%	<12%	EN 772-7
Αρχικός ρυθμός υδατοαπορρόφησης	<1%	<1%	EN 772-11

Χρησιμοποιείται έτοιμο κονίαμα με βάση τη φυσική υδραυλική άσβεστο με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 8.8

Πίνακας 8.8 Μηχανικά χαρακτηριστικά κονιάματος M5

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-12	τουλάχιστον 6 MPa
Ειδικό βάρος νωπού κονιάματος πριν τη σκλήρυνση σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-6,	1940 ± 50 Kg/m ³
Θερμοκρασία εφαρμογής	+2 έως +35 °
Διαπερατότητα υδρατμών κατά EN 1015-19	μ<18

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται αναλυτικά το δοκίμιο 8.1.C που αναλύθηκε στην εργασία.

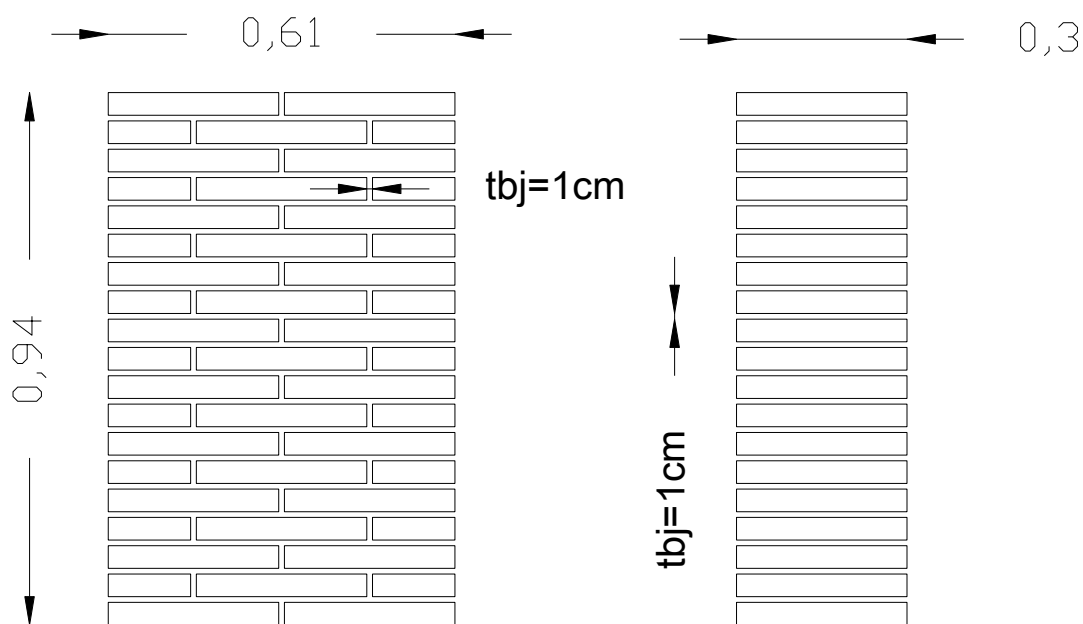
8.1.A Δοκιμή θλίψης σε τοιχοποιία μίας στρώσης κατά EN 1052-1/
8.1.A Compression Test in one-leaf masonry wallet - EN 1052-1

Όνομα/ NAME

8.1.C – T1M5 – 1

α/α – No.

1



Όψη

/ Front view

Πλάγια όψη

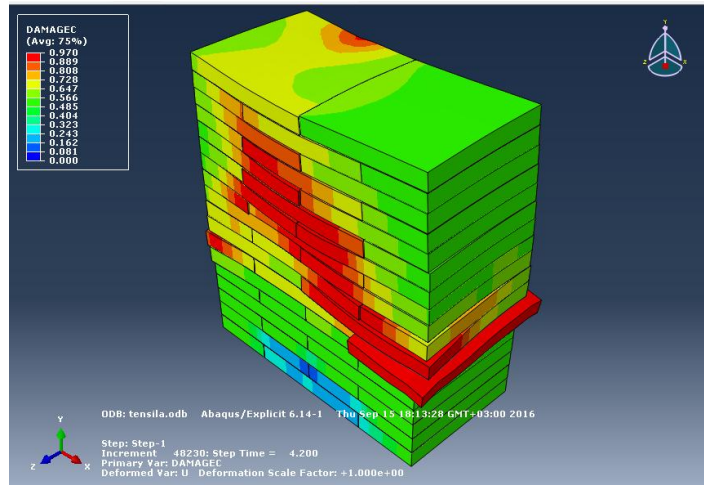
/ Side view

Είδος λίθου/ Unit type:	Πλίνθος / brick
Διαστάσεις πλίνθου/ Unit dimensions:	30cm × 30cm × 4cm
Πάχος αρμού t_{bj} / joint thickness t_{bj}:	1 cm
Είδος Κονιάματος/ Mortar:	M5-Tectoria PMP

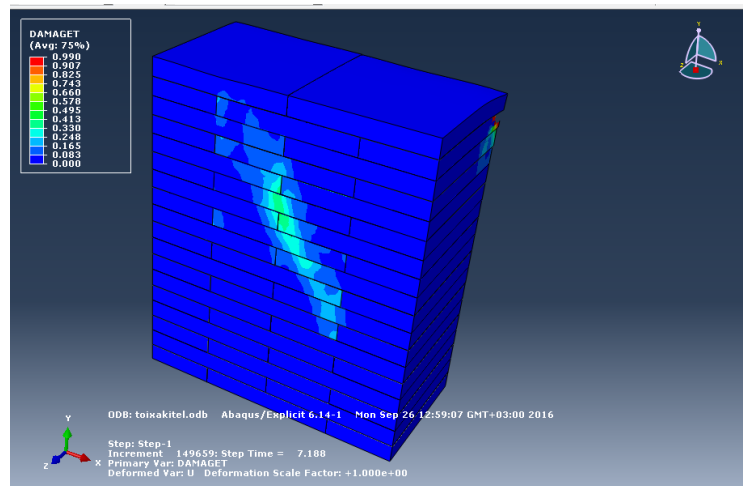
Σχήμα 8.4: Δοκιμή θλίψης σε τοιχοποιία μίας στρώσης: δοκίμιο 8.1.C – T1M5 – 1

8.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

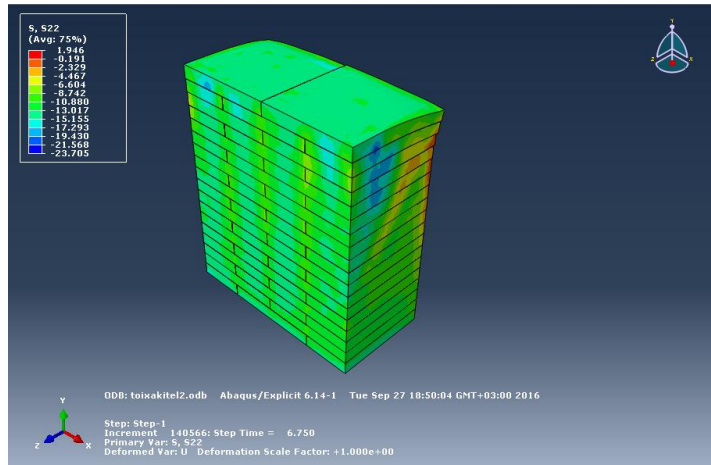
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Στις Εικόνες 8.5-8.6 βλέπουμε την αστοχία σε θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα.



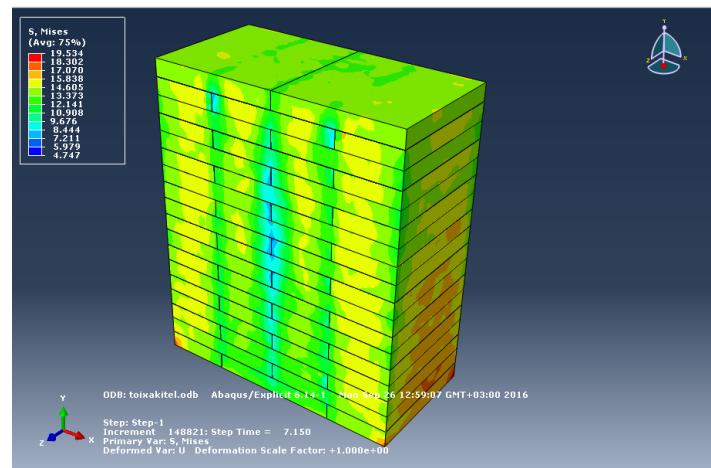
Εικόνα 8.5: Αποτελέσματα damagec στην αστοχία δοκιμίου



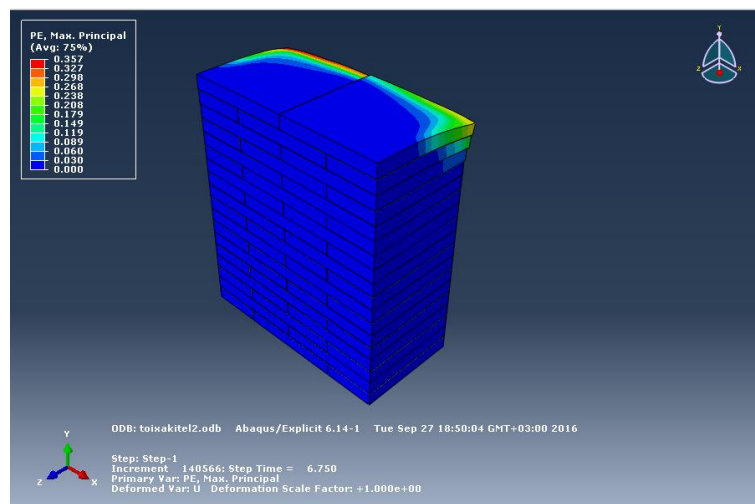
Εικόνα 8.6: Αποτελέσματα damaget στην αστοχία δοκιμίου



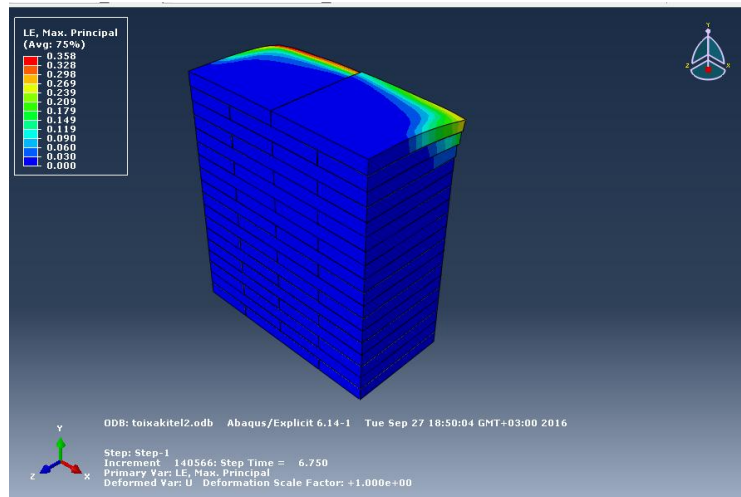
Εικόνα 8.7: Αποτελέσματα τάσεων S22 στην αστοχία δοκιμίου



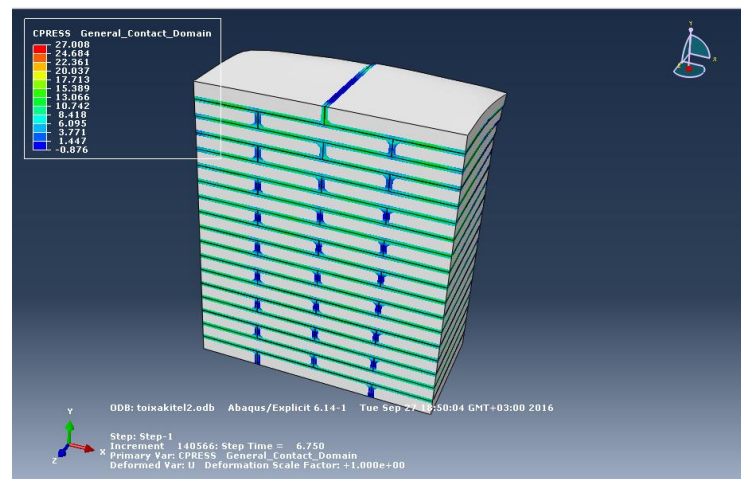
Εικόνα 8.8: Αποτελέσματα τάσεων Mises στην αστοχία δοκιμίου



Εικόνα 8.9: Αποτελέσματα πλαστικών παραμορφώσεων στην αστοχία δοκιμίου

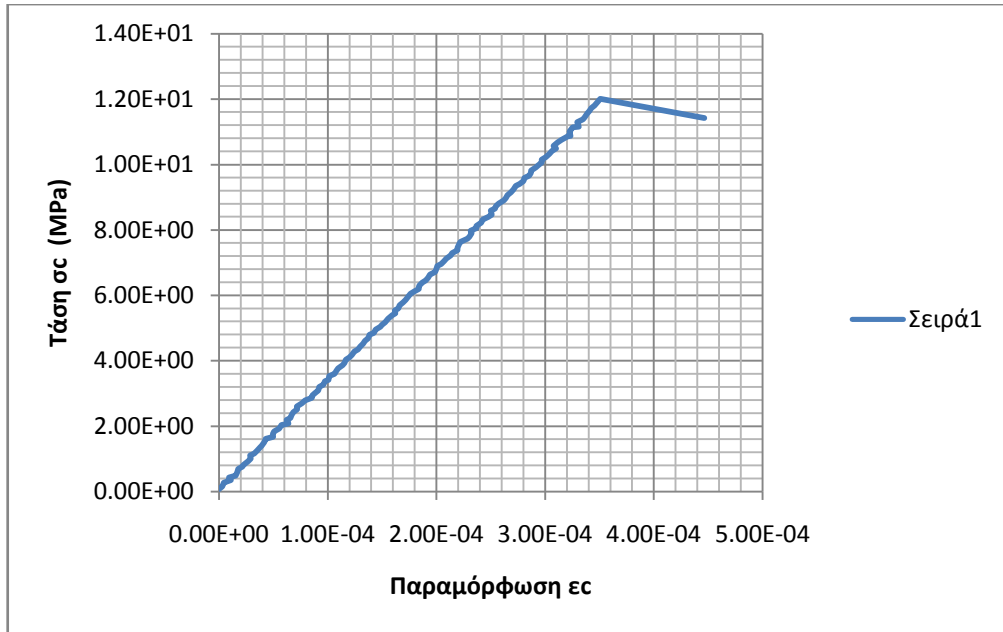


Εικόνα 8.10: Αποτελέσματα παραμορφώσεων στην αστοχία δοκιμίου

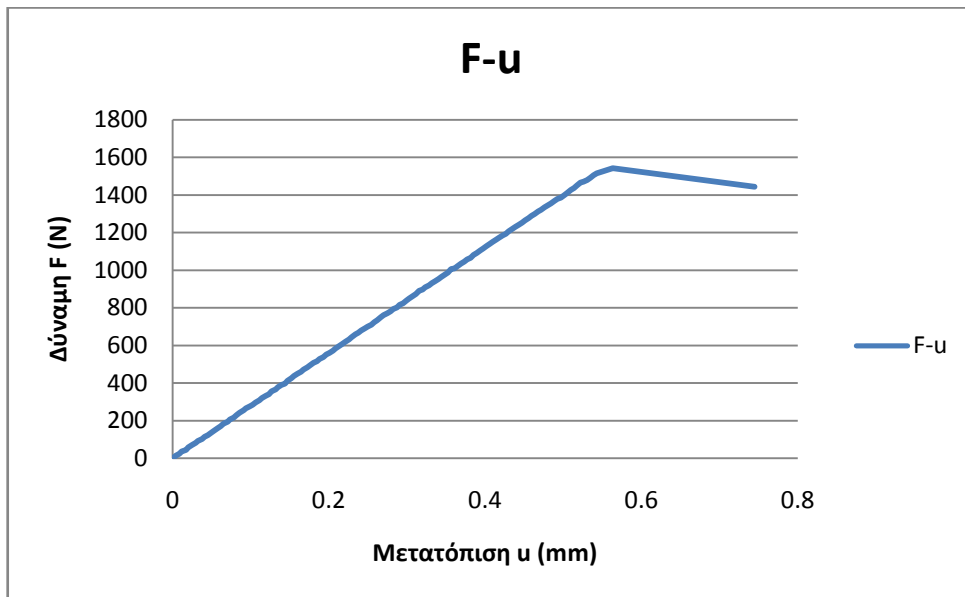


Εικόνα 8.11: Αποτελέσματα τάσεων στις επαφές στην αστοχία δοκιμίου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης και δύναμης μετατόπισης σε ένα στοιχείο όπως προέκυψαν από την ανάλυση.



Σχήμα 8.5: Διάγραμμα σ-ε σε ένα σημείο



Σχήμα 8.6: Διάγραμμα Δύναμη-μετατόπισης σε ένα σημείο

8.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης αποδεικνύεται ότι η απόκριση που προβλέφθηκε από την ανάλυση είναι σε γενικές γραμμές σύμφωνη με τη συμπεριφορά και τις αντοχές που υποθέσαμε, τις οποίες αν είχαμε πειραματικά δεδομένα θα τις λαμβάναμε από εργαστηριακά τεστ.

9. ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Σημαντική συνεισφορά στην κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς μνημειακών κατασκευών πραγματοποιείται με τη διεξαγωγή πειραμάτων σε δοκίμια σε φυσικές διαστάσεις ή υπό κλίμακα.

Τέτοιου είδους πειράματα επιτρέπουν την προσομοίωση της σεισμικής δράσης επιλέγοντας τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την σεισμική κίνηση. Τα δοκίμια κατασκευάζονται για να προσομοιώσουν, στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό, την πραγματική κατασκευή και να διευκολύνουν τη μελέτη συγκεκριμένων παραμέτρων. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός αντίστοιχων πειραμάτων στη βιβλιογραφία που συνδέονται με ιστορικές κατασκευές [π.χ. Benedetti et al., 1998; Terčelj et al., 1976; Turnšek et al., 1978; Yi et al. 2006] εξαιτίας των αρκετών δυσκολιών εφαρμογής.

Αφετέρου, ο έλεγχος των μεγάλης κλίμακας μοντέλων είναι συχνά μη εφικτός εξαιτίας του μεγάλου κόστους και απόδοσης χαρακτηριστικών τέτοιων πειραμάτων, τα οποία περιορίζονται στις στατικές δοκιμές και δυστυχώς συχνά εκτελούνται χωρίς να είναι μέρος μιας ολοκληρωμένης ερευνητικής προσπάθειας [Jha et al., 2006; Tomaževič et al., 1996; Mendes & Lourenço, 2009]. Μια επιπρόσθετη δυσκολία έγκειται στην αναπαραγωγή των ιστορικών υλικών και την εφαρμογή των κατασκευαστικών μεθόδων τα οποία βασίζονται συχνά σε εμπειρικές τεχνικές και μεθόδους που έχουν χαθεί με το πέρασμα των χρόνων.

Εναλλακτικά, συνήθως κατασκευάζονται και δοκιμάζονται πειραματικά χαρακτηριστικά τμήματα της πραγματικής κατασκευής. Τα δοκίμια αυτά πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά της κατασκευαστικής τεχνικής και να αντιπροσωπεύουν πιθανές μορφές αστοχίας της κατασκευής. Επιπλέον πρέπει να εγγυάται η ορθή προσομοίωση των υλικών, των δράσεων και των συνθηκών στήριξης ενώ εφαρμόζονται κατάλληλοι νόμοι αναγωγής (scaling laws) σε περίπτωση δοκιμών υπό κλίμακα [Jha et al. 2006].

Ο εντοπισμός πιθανών μορφών αστοχίας ενός μνημείου ή ιστορικού κτιρίου απαιτεί την κατανόηση της στατικής του συμπεριφοράς [Mistler et al., 2006]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εστιάζοντας στα αρμόδια υποσύνολα της κατασκευής βασιζόμενοι είτε στην μέθοδο των μακροστοιχείων ή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή χρησιμοποιώντας γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις, ενώ αγνοούνται τυχόν δευτερεύοντα στοιχεία τα οποία δεν είναι κρίσιμα για τη συνολική απόκριση [Brencich et al., 1998, Bal et al., 2007; Sadan et al., 2007, Psycharis et al. 2010].

Η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη για την εκτέλεση λεπτομερών αναλύσεων, συμπεριλαμβανομένης της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης και της δυναμικής ανάλυσης ιστορίας [Beskos et al. 2001, Augenti & Parisi, 2009; Galasco et al., 2004]. Η αξιοπιστία των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το πλήθος και την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται μέσω των μετρήσεων στο πεδίο (field measurements), των πειραματικών μετρήσεων και των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών [Spyrakos and Raftoyiannis 1997, Binda and Saisi 2009]. Επιπλέον, τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τις υπολογιστικές ικανότητες των προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται και τους καταστατικούς νόμους που εφαρμόζονται για τη συμπεριφορά

της τοιχοποιίας. Η πολύπλοκη συμπεριφορά της τοιχοποιίας, η υψηλά ανισότροπη φύση της και η διασπορά των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση, ειδικά κατά την αστοχία.

Κοινή πρακτική στην περιγραφή της αστοχίας είναι η εφαρμογή διάφορων συναρτήσεων βασισμένων στην κατανομή των τάσεων, έτσι, η εισαγωγή επιπρόσθετων υπολογιστικών προβλημάτων στη διαδικασία της ανάλυσης ιστορικών κατασκευών είναι απαραίτητη, ιδιαίτερα στην περίπτωση της μη γραμμικής ανάλυσης. Η επιτυχημένη ανάπτυξη ενός αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου που ενσωματώνει με λεπτομέρεια τη γεωμετρία, τα μηχανικά και δομικά χαρακτηριστικά μιας ιστορικής κατασκευής μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τον τύπο, το μέγεθος και την τοποθεσία της βλάβης. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται από μια τέτοια ανάλυση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ένα ντετερμινιστικό τρόπο ή εναλλακτικά, ακολουθώντας μια πιθανολογική προσέγγιση στην οποία παραμετρικές αναλύσεις μπορούν να διεξαχθούν για ένα εύρος τιμών κρίσιμων παραμέτρων. Η στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οδηγεί στην ανάπτυξη των καμπύλων τρωτότητας που συσχετίζουν την εκτιμώμενη βλάβη με τη σεισμική ένταση βασισμένη σε ένα δεδομένο τύπο πιθανότητας [Syrmakezis et al. 2008, Syrmakezis and Kosta 2009].

Κύριος στόχος της ανάλυσης ενός μνημείου ή ενός ιστορικού κτιρίου είναι η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου με σκοπό να προτείνει ειδικά μέτρα παρέμβασης για την αποτελεσματική σεισμική αναβάθμιση και προστασία τέτοιων κατασκευών [Lagomarsino & Podesta, 2004 I & II].

9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου από φέρουσα τοιχοποιία που πρόκειται να υποβληθεί σε δοκιμή στη σεισμική τράπεζα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

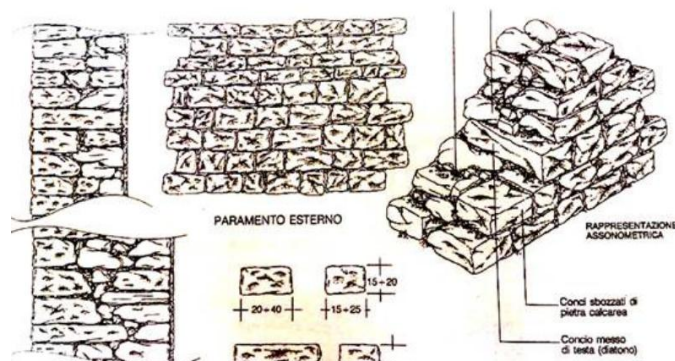
Το δοκίμιο αποτελείται από τρίστρωτη φέρουσα τοιχοποιία. Οι εξωτερικές στρώσεις της δομούνται με λαξευμένα πωρολιθικά λιθοσώματα με διαστάσεις 30 cm x 30 cm x 20cm και κονίαμα θλιπτικής αντοχής 1~2 MPa ώστε να προσομοιώνεται μια υφιστάμενη λιθοδομή. Η εσωτερική στρώση δομείται με τεμάχια θραυστού πωρόλιθου ελάχιστης διάστασης τουλάχιστον 5 cm και μέγιστης διάστασης μέχρι 15 cm και το ίδιο κονίαμα σε μεγαλύτερη όμως κατά όγκο αναλογία ώστε να υλοποιείται τελικά μια εσωτερική στρώση χαμηλότερης ποιότητας.

Τόσο οι εξωτερικές στρώσεις όσο και η εσωτερική έχουν το ίδιο πάχος, ίσο με 20 cm, ώστε οι τρίστρωτη τοιχοποιία να έχει συνολικό πάχος ίσο με 60cm. Για να εξασφαλιστεί η συνεργασία των τριών στρώσεων μεταξύ τους αλλά και των δύο τοίχων του δοκιμίου, στο μισό του ύψους αλλά και στην οροφή των τοίχων τοποθετούνται ξύλινα διαζώματα (ξυλοδεσιές). Τα διαζώματα υλοποιούνται με ξύλινες δοκούς διαστάσεων 70mm x 140mm x 3000mm πλαναρισμένης σουηδικής πεύκης.

Στην οροφή του δοκιμίου τοποθετείται διάφραγμα από ξύλινες απλάνιστες τάβλες ελάτης διαστάσεων 100mm x 22mm x 4000mm οι οποίες καρφώνονται σε δύο διευθύνσεις.

Σκοπός της κατασκευής του διαφράγματος είναι να εξασφαλίσει την κοινή μετακίνηση της κορυφής των δύο τοίχων του δοκιμίου και να επιτρέψει την τοποθέτηση πρόσθετης μάζας.

Η χρησιμοποιούμενη ξυλεία είναι ποιότητας C16. Η υλοποίηση των ξυλοδεσιών και του διαφράγματος παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 9.1: Απεικόνιση τρίστρωτης τοιχοποιίας από ημιλαξευτούς λίθους σε τομή, όψη και αξονομετρικό

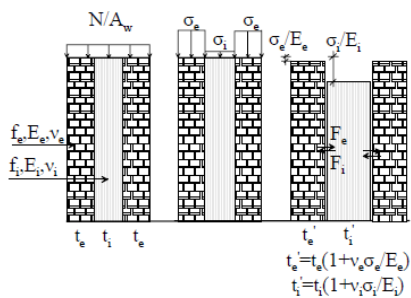
Τόσο για την κατασκευή όσο και για μεταφορά του δοκιμίου αλλά και για την άκαμπτη τοποθέτησή του στη σεισμική τράπεζα χρησιμοποιείται βάση αποτελούμενη από χαλύβδινες διατομές HEB 300.

Στην τρίστρωτη τοιχοποιία που υποβάλλεται σε θλίψη, στο εφαρμόζων φορτίο αντιστέκονται κυρίως οι εξωτερικές στρώσεις (Εικόνα 9.2). Στην πραγματικότητα, η τιμή της θλιπτικής αντοχής (όπως επίσης και του μέτρου ελαστικότητας) του υλικού πληρώσεως είναι χαμηλότερες από αυτές των εξωτερικών στρώσεων. Όπως έχει αποδεδειχθεί πειραματικά οι εξωτερικές στρώσεις αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο. Επίσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι στρώσεις αναπτύσσουν διαφορετικές παραμορφώσεις:

(α) Ο δεσμός ανάμεσα στις στρώσεις της τοιχοποιίας και του υλικού πληρώσεως μπορεί να σπάσει

και

(β) Οι εξωτερικές στρώσεις υποβάλλονται σε οριζόντιες (εκτός επιπέδου) παραμορφώσεις εξαιτίας της πλευρικής διόγκωσης του υλικού πληρώσεως

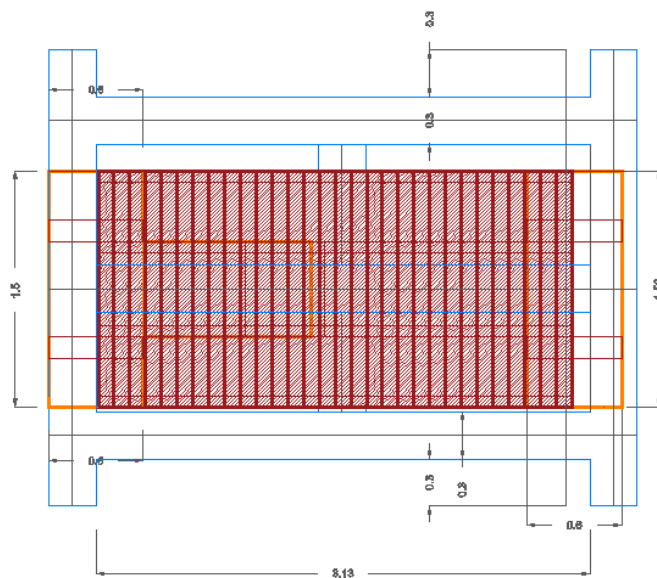


Εικόνα 9.2: Τάσεις και παραμορφώσεις των εξωτερικών στρώσεων και του υλικού πληρώσεως σε μια τρίστρωτη τοιχοποιία που υποβάλλεται σε θλίψη

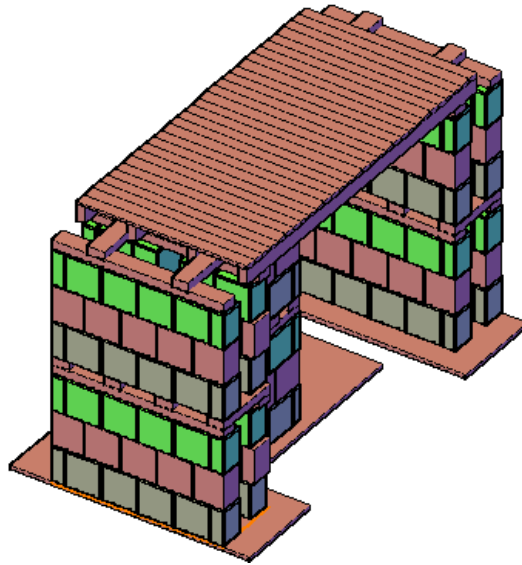
9.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται όλα τα σχέδια αναλυτικά για την κατασκευή της τοιχοποιίας ανά στάθμη.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η γεωμετρία του δοκιμίου στην τελευταία στάθμη.



(α)



(β)

Σχήμα 9.1: Δοκίμιο τριστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 11 – στάθμη +2.31:
(α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.

9.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΡΙΣΤΡΩΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

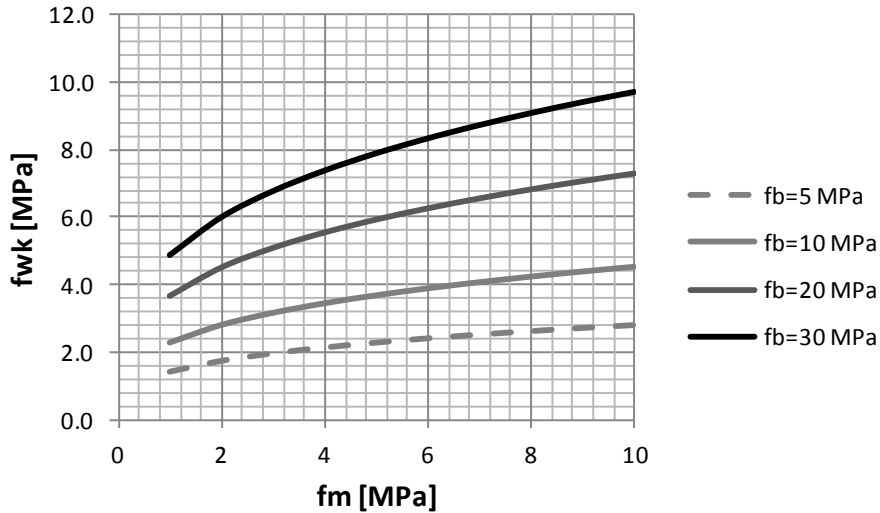
Υπολογισμός αντοχής τοιχοποιίας μιας στρώσης.

- Σχέση (3.2) Ευρωκώδικα 6 [CEN 2005]. Στην περίπτωση μας έχουμε δύο λιθοσώματα τα οποία θα έχουν και διαφορετική αντοχή.

$$f_k = K f_b^{0.7} f_m^{0.3} \quad (9.1)$$

$K=0.45$ από Πίνακα 2.2

$$\text{Άρα } f_k = 0.45 * 10^{0.7} * 2^{0.3} = 2.78 \text{ MPa}$$



Σχήμα 9.2: Επίδραση αντοχής κονιάματος στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μονόστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς και κονίαμα γενικής εφαρμογής – ΕΚ6.

- Εμπειρική σχέση Tassios & Chronopoulos [1986]

$$f_{wk} = \left(\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} + k_1 f_{mc} - k_2 \right) \div \left[1 + 3.50 \left(\frac{V_m}{V_w} - 0.30 \right) \right] \quad (9.2)$$

όπου: $k_1=0.20$ και $k_2=0.0$ για λαξευμένα λιθοσώματα

V_m/V_w είναι ο λόγος όγκου κονιάματος και όγκου τοιχοποιίας

$f_{bc}=10\text{MPa}$

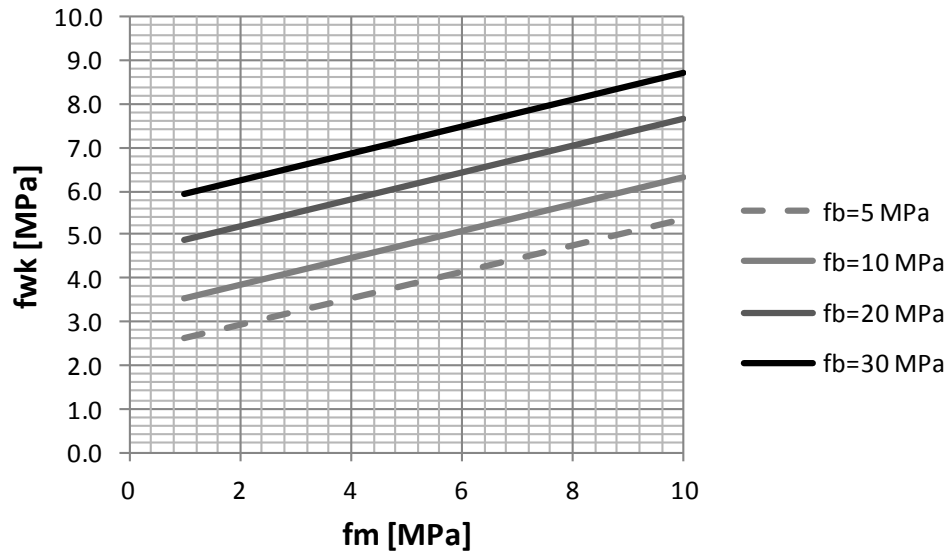
$f_{mc}=2\text{MPa}$

Ο συνολικός όγκος της τοιχοποιίας είναι $V_w = 1.06 \times 1.06 \times 0.20 = 0.22472 \text{ m}^3$

Ο όγκος των λίθων είναι $V_b = 11 \times (0.3 \times 0.15 \times 0.04) + 4 \times (0.11 \times 0.15 \times 0.04) + 8 \times (0.3 \times 0.3 \times 0.2) + 2 \times (0.11 \times 0.3 \times 0.2) = 0.17964 \text{ m}^3$

Επομένως $V_m/V_w = (0.22472 - 0.17964) / 0.22472 = 0.20 < 0.30$, τοποθετείται 0.30

Άρα $f_{wk} = 2.51 \text{ MPa}$



Σχήμα 9.3: Επίδραση αντοχής κονιάματος στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μονόστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς [Tassios & Chronopoulos 1986].

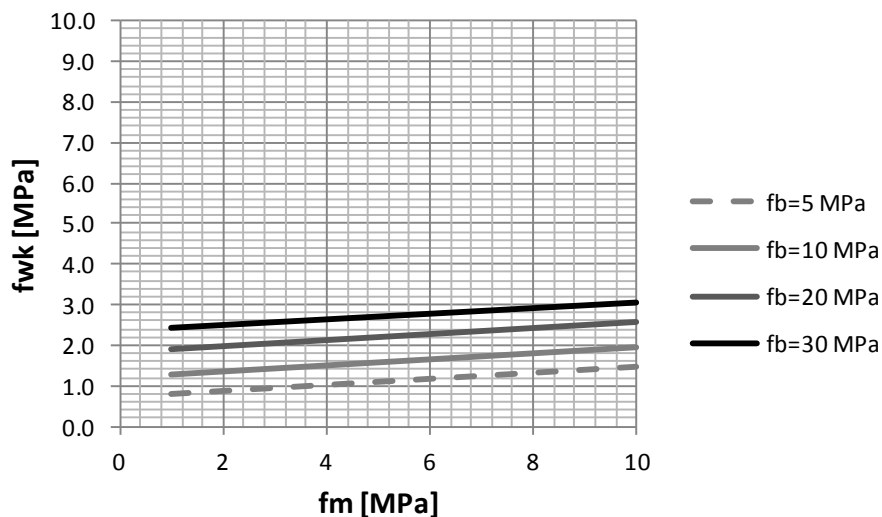
- Εμπειρική σχέση Tassios [2010] για ιστορικές τοιχοποιίες χαμηλής αντοχής

$$f_{wk} = \left(\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} + \lambda \cdot f_{mc} - f_0 \right) \div \left[1 + 3.50 \left(\frac{V_m}{V_w} - k_0 \right) \right] \quad (9.3)$$

όπου $\lambda=0.1$ για πολύ λείους λίθους, $f_0=0.5$ για λαξευμένους λίθους, $k_0=0.30$

$V_m/V_w = 0.2 < 0.3$ τοποθετείται 0.30

Άρα: $f_{wk}=1.81$ MPa



Σχήμα 9.4: Επίδραση αντοχής κονιάματος στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μονόστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς [Tassios 2010].

- Οι Βιντζηλαίου και Τάσιος [1995] θεωρούν ότι η μεσαία στρώση στην τρίστρωτη δεν παραλαμβάνει δύναμη και τελικά η θλιπτική αντοχή της τρίστρωτης είναι στην περίπτωση μας τα 2/3 της θλιπτικής αντοχής της εξωτερικής στρώσης με βάση την κατ' όγκο αναλογία

$$f_{wc,0} = \left(\frac{V_{ext}}{V_w}\right) \cdot f_{ext,c} = \frac{2}{3} \cdot f_{ext,c} \quad (9.4)$$

Άρα $f_{wc,0} = 2/3 \cdot (2.78) = 1.85 \text{ MPa}$

- Ο Tassios [2004] προτείνει:

$$f_{wc} = (2 \cdot \lambda_e \cdot \delta \cdot f_{wc,e} + \lambda_i \cdot f_{wc,i}) \div (1 + 2 \cdot \delta) \quad (9.5)$$

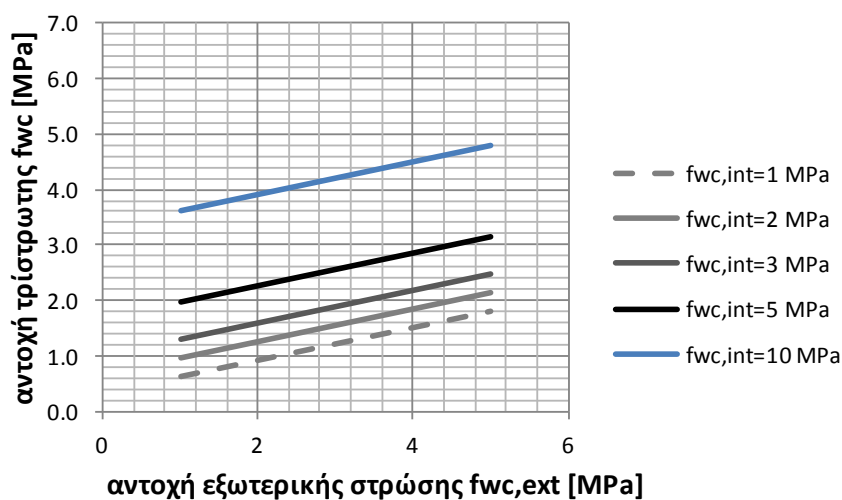
$$\zeta_e = \frac{E_{we}}{f_{wc,e}} = 500$$

$$\lambda_e = 1 - 0.06 \cdot \zeta_e \cdot t_e \cdot h_w^{-4/3} = 0.44$$

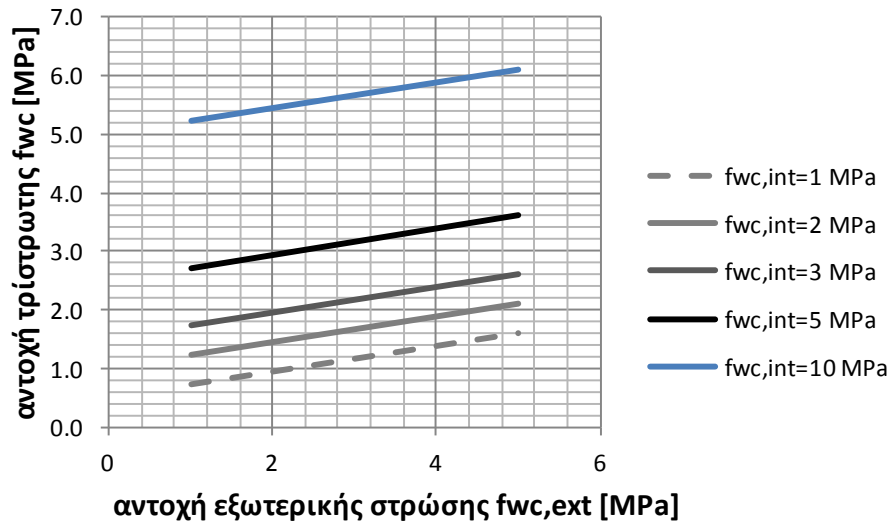
$$\lambda_i \approx 1.00$$

Άρα: $f_{wc} = (2 \cdot 0.44 \cdot \delta \cdot f_{wc,e} + 1.00 \cdot f_{wc,i}) \div (1 + 2 \cdot \delta) = (2 \cdot 0.44 \cdot 1 \cdot 2.78 + 1.00 \cdot 2.78) \div (1 + 2 \cdot 1) = 1.74 \text{ MPa}$

όπου δ είναι ο λόγος του πάχους εξωτερικής και εσωτερικής στρώσης, ($\delta=1.0$ για ίσο πάχος εξωτερικών και εσωτερικής στρώσης)



$$\delta=1$$



$$\delta=0.5$$

Σχήμα 9.5: Επίδραση αντοχής κονιάματος ενδιάμεσης στρώσης στη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή τρίστρωτης τοιχοποιίας από λαξευτούς φυσικούς [Tassios 2004].

9.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑΣ

Για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης επιλέγεται πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Στην Παράγραφο §3.2.3.1.2 του Ευρωκώδικα 8 επιτρέπεται η προσομοίωση της σεισμικής δράσης με χρήση τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων, τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Τα τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα θα παράγονται ώστε να είναι συμβατά με τα φάσματα ελαστικής ανάλυσης που προτείνονται από τον κανονισμό για 5% ιξώδη απόσβεση.
- Η διάρκεια των επιταχυνσιογραφήματων θα είναι συμβατή με το μέγεθος και τα άλλα σχετικά χαρακτηριστικά του σεισμικού γεγονότος που υπεισέρχεται ουσιαστικά στον καθορισμό του a_g .
- Όταν δεν είναι διαθέσιμα στοιχεία για συγκεκριμένη περιοχή, η ελάχιστη διάρκεια T_s του στάσιμου μέρους των επιταχυνσιογραφήματων πρέπει να είναι ίση με 10sec.
- Η ομάδα των τεχνητών επιταχυνσιογραφήματων πρέπει να τηρεί τους ακόλουθους κανόνες:

α) πρέπει κατ' ελάχιστον να χρησιμοποιούνται τρία επιταχυνσιογραφήματα,

β) η μέση τιμή της επιτάχυνσης φασματικής απόκρισης μηδενικής περιόδου (που υπολογίζεται από τις μεμονωμένες χρονοϊστορίες) δεν θα είναι μικρότερη από την τιμή $a_g \cdot S$ για την θέση που εξετάζεται,

γ) στην περιοχή περιόδων μεταξύ $0.2T_1$ και $2T_1$, όπου T_1 είναι η θεμελιώδης περίοδος του φορέα στην διεύθυνση όπου θα εφαρμοστεί το επιταχυνσιογράφημα, καμία τιμή του μέσου ελαστικού φάσματος απόσβεσης 5%, που υπολογίζεται από όλες τις χρονιότητες, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της αντίστοιχης τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης, με απόσβεση 5%.

9.4.1 Σεισμικό Φάσμα Σχεδιασμού

Εφαρμόζεται το φάσμα σχεδιασμού Τύπου Ι του Ευρωκώδικα 8, ΕΚ-8, [CEN 2004] το οποίο ισχύει κατά τις περιπτώσεις όπου θεωρείται ότι οι σεισμοί που συμβάλλουν περισσότερο στη σεισμική επικινδυνότητα έχουν μέγεθος κύματος επιφανείας, M_s , μεγαλύτερο από 5.5.

Το φάσμα σχεδιασμού Τύπου Ι θεωρείται κατάλληλο για την Ελλάδα. Για τις οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής δράσης, το ελαστικό φάσμα απόκρισης $S_e(T)$ καθορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις (Παράγραφος § 3.2.2.2-1(P), ΕΚ-8 [CEN 2004]):

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1)\right] \quad (1) \quad (9.5)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T}\right] \quad (3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right] \quad (4)$$

όπου:

$S_e(T)$ είναι το ελαστικό φάσμα απόκρισης

T είναι η περίοδος ταλάντωσης της κατασκευής

α_g είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας Α ($\alpha_g = \gamma_I \times a_{gR}$);

T_B είναι η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_C είναι η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

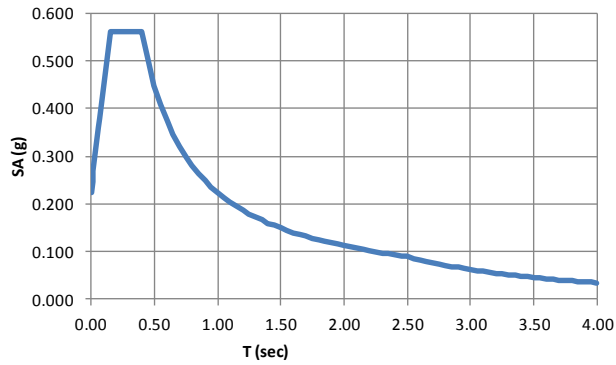
T_D είναι η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος

S είναι ο συντελεστής εδάφους

η είναι ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης, με τιμή αναφοράς $\eta = 1$ για 5% ιξώδη απόσβεση

Εξετάζεται η περίπτωση μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς σε έδαφος τύπου Α $a_{gR}=0.16g$.

Οι χαρακτηριστικές περίοδοι για την κατηγορία εδάφους Α είναι (Πίνακας 3.2 ΕΚ-8): $T_B = 0.15$ sec, $T_C = 0.40$ sec και $T_D = 2.0$ sec. Επιλέγεται η μέγιστη τιμή για το συντελεστή σπουδαιότητας ($\gamma_I=1.40$) και το οριζόντιο φάσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.6.



Σχήμα 9.6: Οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού

Αντίστοιχα, η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης προσομοιώνεται από ένα φάσμα ελαστικής απόκρισης $S_{ve}(T)$, το οποίο ορίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις (§ 3.2.2.3-1(P), ΕΚ-8):

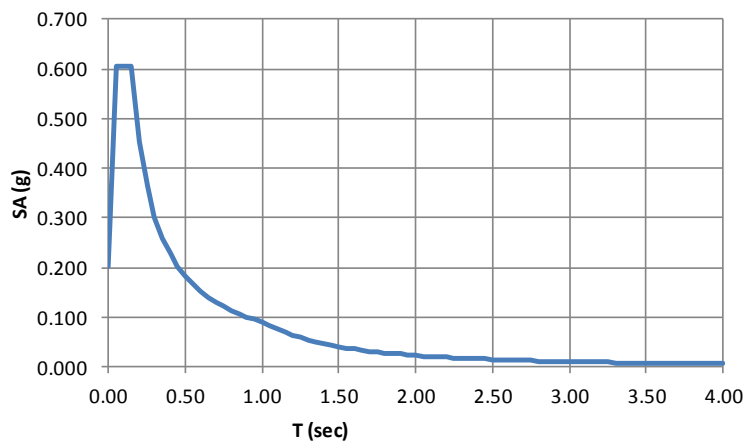
$$0 \leq T \leq T_B: S_{ve}(T) = \alpha_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right] \quad (9.6)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_{ve}(T) = \alpha_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \quad (6)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_{ve}(T) = \alpha_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (7)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_{ve}(T) = \alpha_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (8)$$

Για φάσματα Τύπου Ι η επιτάχυνση α_{vg} δίνεται από τη σχέση $\alpha_{vg} = 0.9 \times a_g$ ενώ οι χαρακτηριστικές περιόδους του φάσματος της κατακόρυφης κίνησης για έδαφος κατηγορίας Α είναι (Πίνακας 3.4 ΕΚ-8): $T_B = 0.05 \text{ sec}$, $T_C = 0.15 \text{ sec}$ και $T_D = 1.0 \text{ sec}$. Το φάσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.7.



Σχήμα 9.7: Κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού

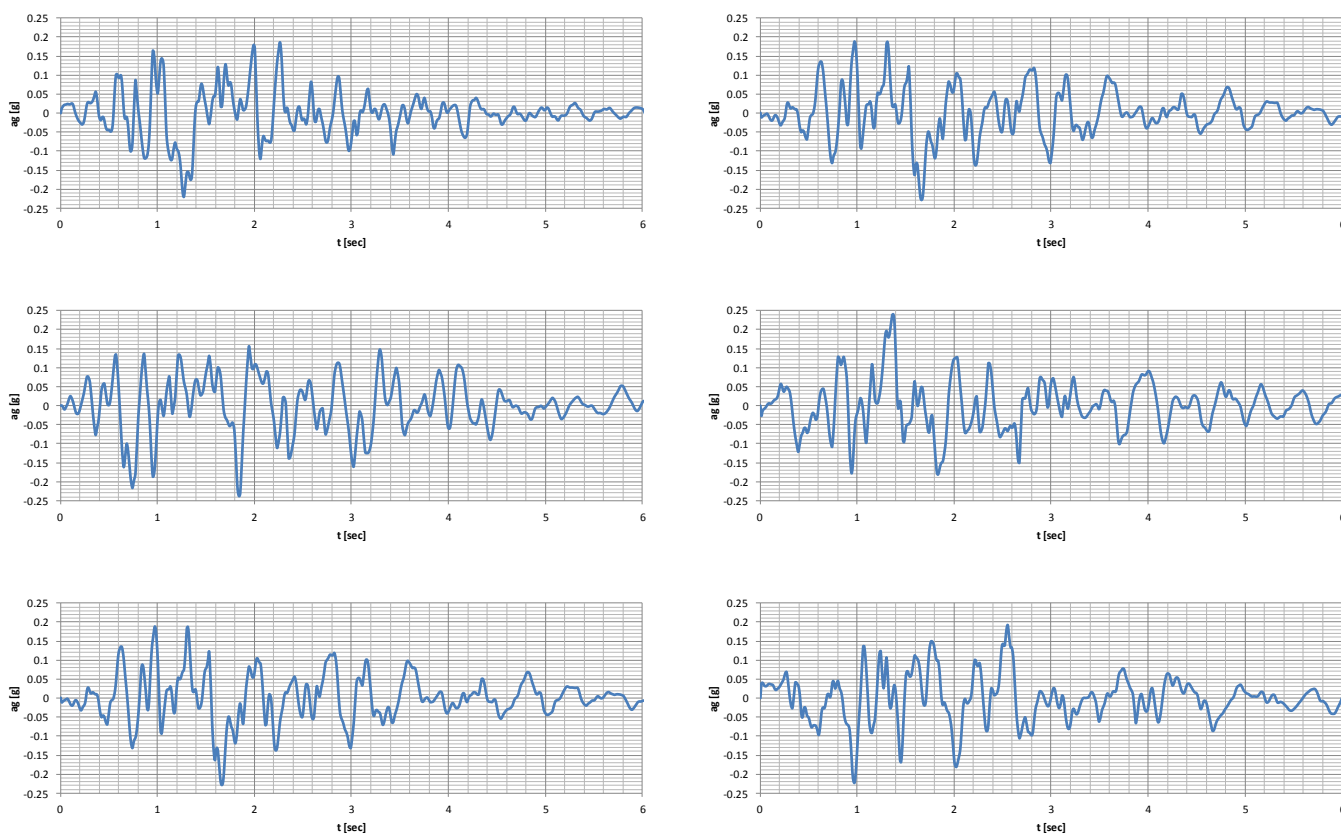
Το οριζόντιο και κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού χρησιμοποιείται για την κατασκευή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στις δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων.

9.4.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης

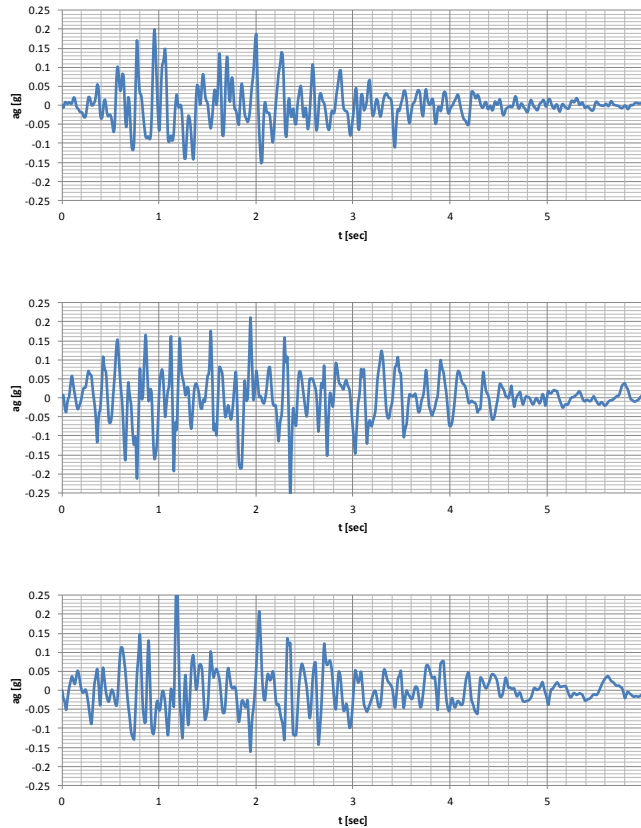
Σύμφωνα με την Παράγραφο §3.2.3.1.1(2)Ρ του Ευρωκώδικα 8: «Όταν απαιτείται χωρικό προσομοίωμα του φορέα, η σεισμική κίνηση θα αποτελείται από τρία επιταχυνσιογραφήματα που δρουν ταυτόχρονα. Το ίδιο επιταχυνσιογράφημα δεν μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις».

Επίσης σύμφωνα με την Παράγραφο § 4.3.3.5.1 του Ευρωκώδικα 8: «Όταν χρησιμοποιείται μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας και χωρικό προσομοίωμα του φορέα, θα χρησιμοποιούνται συγχρόνως επιταχυνσιογραφήματα και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις».

Επομένως εφόσον χρησιμοποιείται χωρικό προσομοίωμα του φορέα, σε κάθε μία από τις τρεις σεισμικές αναλύσεις εφαρμόζονται ταυτόχρονα τρία τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, διαφορετικά κάθε φορά, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις τρεις συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Στο Σχήμα 9.8 παρουσιάζονται οι έξι χρονοϊστορίες της οριζόντιας σεισμικής κίνησης και στο Σχήμα 9.9 παρουσιάζονται οι τρεις χρονοϊστορίες της κατακόρυφης σεισμικής κίνησης.



Σχήμα 9.8: Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.

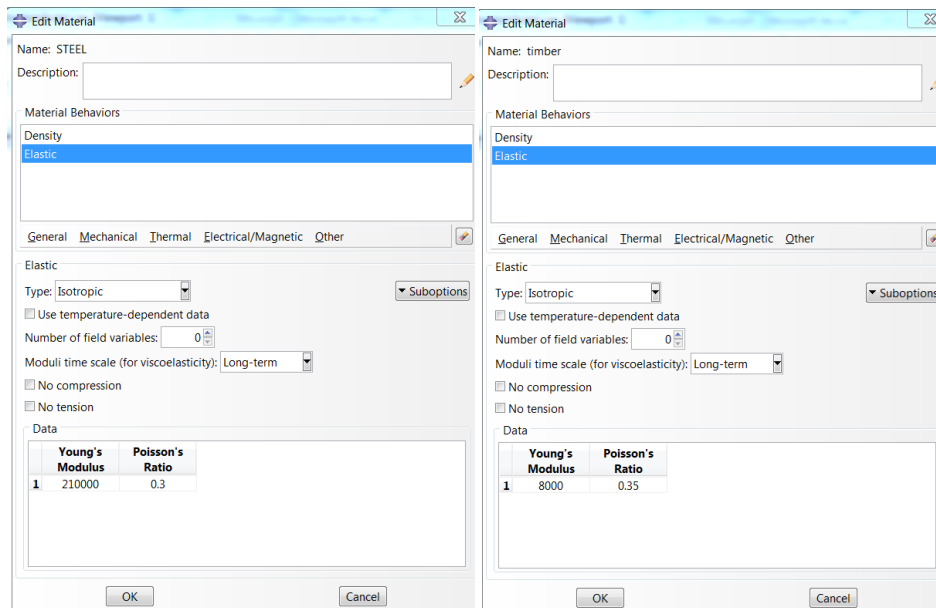


Σχήμα 9.9: Τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με το κατακόρυφο φάσμα σχεδιασμού.

9.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

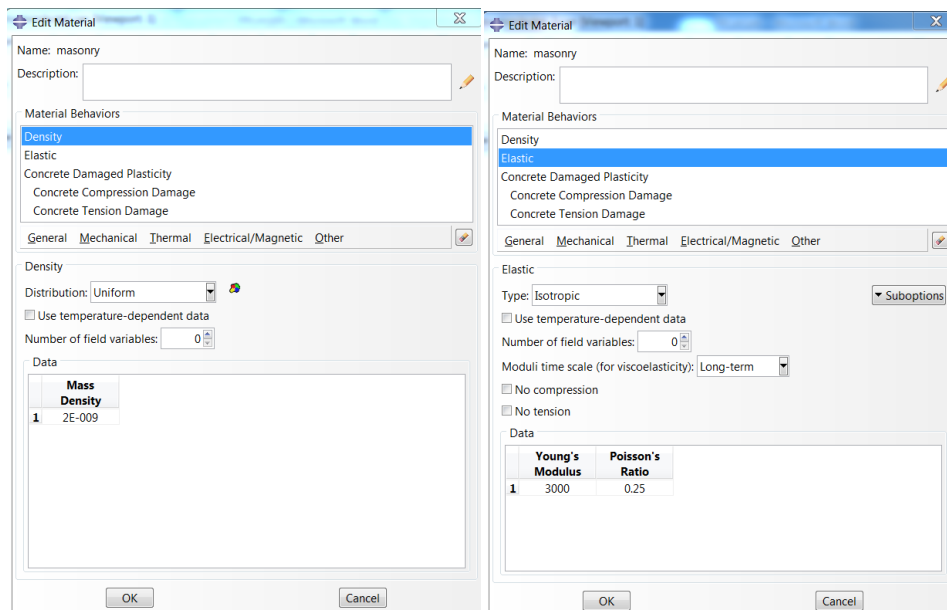
Όπως προαναφέρθηκε η λεπτομερής προσομοίωση της τοιχοποιίας σε μεγάλης κλίμακας μοντέλα σύνθετης γεωμετρίας δεν συνίσταται διότι αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό ακολουθήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο η μακροσκοπική μέθοδος προσομοίωσης. Η τοιχοποιία θεωρήθηκε ομοιογενές υλικό και δεν χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία για τη προσομοίωση των αρμών της.

Για όλα τα διαφορετικά στοιχεία (χάλυβας, ξύλο και τοιχοποιία) χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία 8 κόμβων C3DR8. Το ξύλο και ο χάλυβας θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικά υλικά με τις αντίστοιχες ξεχωριστές ιδιότητες τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.3. Για την προσομοίωση του υλικού της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του υλικού Concrete damaged plasticity.



Εικόνα 9.3: Ελαστικές ιδιότητες χάλυβα και ξύλου

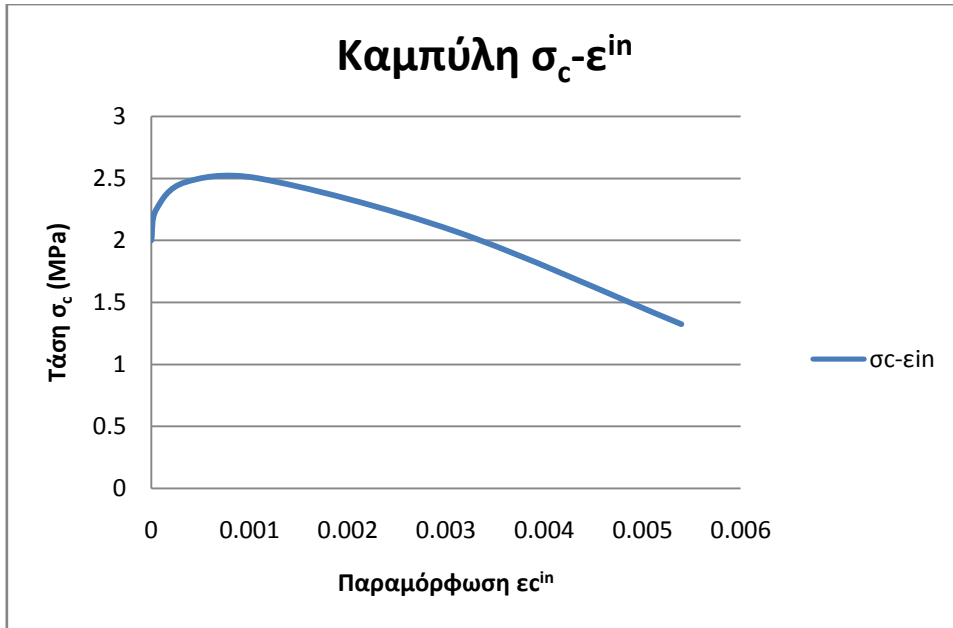
Για την προσομοίωση των ιδιοτήτων της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε το υλικό Concrete Damaged Plasticity που χρησιμοποιήσαμε και στην προσομοίωση του προηγούμενου κεφαλαίου.



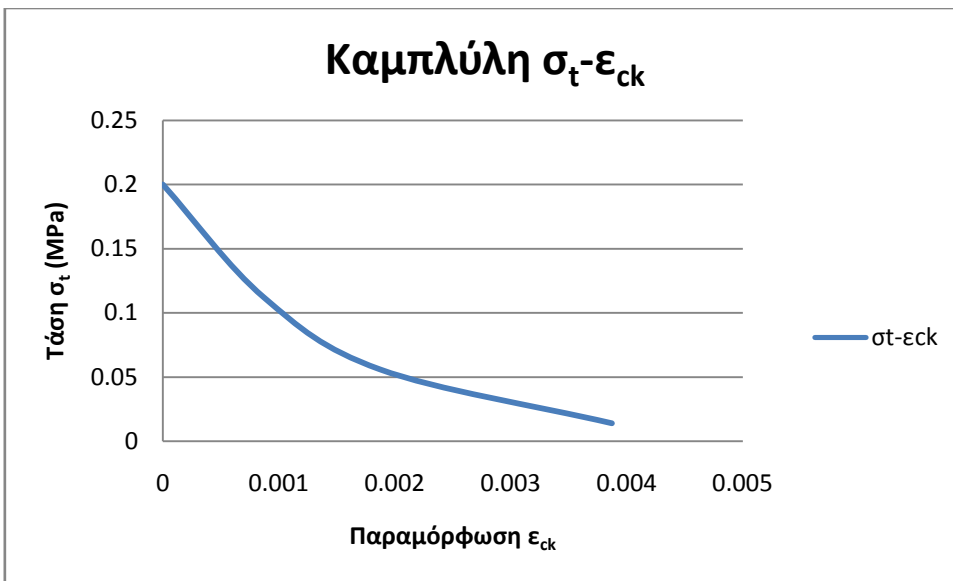
Εικόνα 9.4: Ελαστικές ιδιότητες τοιχοποιίας

Δεν χρησιμοποιήθηκαν εδώ στοιχεία επαφής λόγω μεγάλου υπολογιστικού κόστους.

Οι καμπύλες σ - ϵ που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό του υλικού concrete damaged plasticity λόγω απουσίας πειραματικών δεδομένων λήφθηκαν από πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία για τοιχοποιία παρόμοιας αντοχής και γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τη δική μας και παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



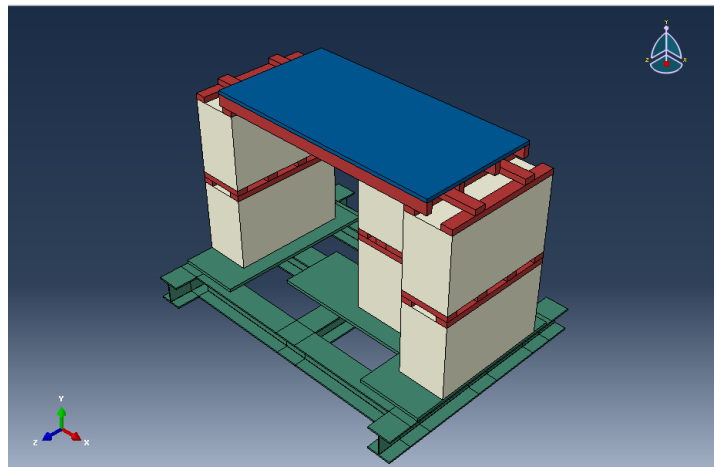
Σχήμα 9.10: Συμπεριφορά σε θλίψη τοιχοποιίας



Σχήμα 9.11: Συμπεριφορά σε εφελκυσμό τοιχοποιίας

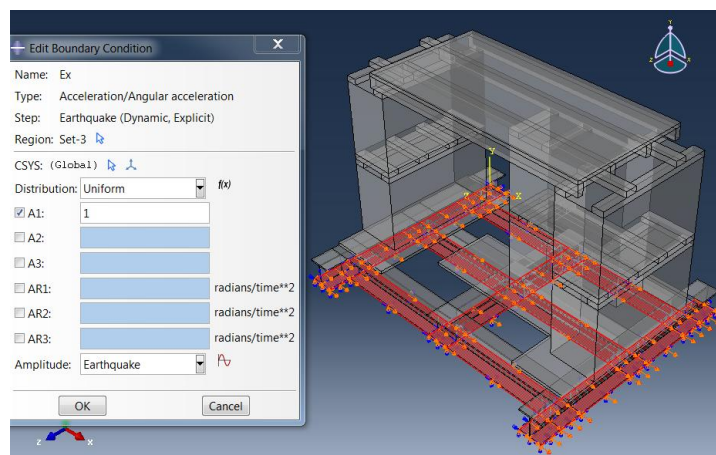
Στην τελευταία επιφάνεια δόθηκε η μάζα δύο αντίστοιχων ορόφων. Αυτό πραγματοποιήθηκε δημιουργώντας ένα επιπλέον υλικό με τις ιδιότητες του ξύλου αλλάζοντας τη πυκνότητα της μάζας από τις ιδιότητες του υλικού. Αυτό γίνεται γιατί σε μια δυναμική ανάλυση τοιχοποιίας η μάζα της είναι κατανομημένη σε όλο το ύψος και αυτό δημιουργεί προβλήματα στην ανάλυση.

Παρακάτω στην Εικόνα 9.5 φαίνεται η τελική προσομοίωση του σεισμικού δοκιμίου στο Abaqus.



Εικόνα 9.5: Τελική προσομοίωση σεισμικού δοκιμίου στο Abaqus

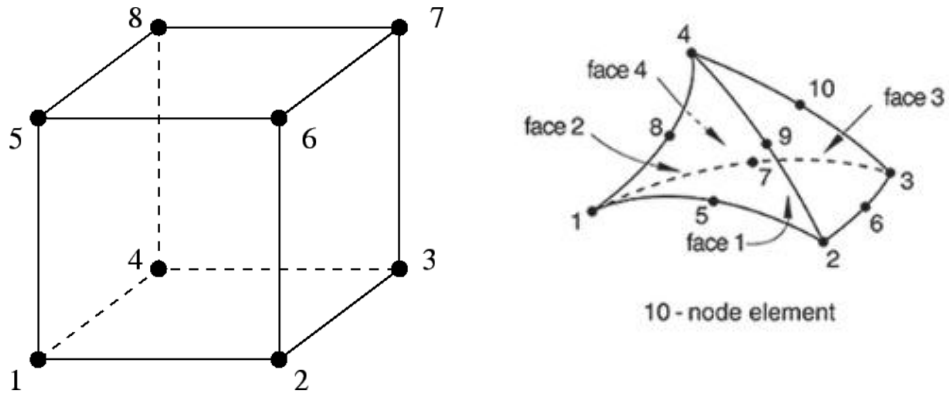
Το σεισμικό φορτίο προσομοιώνεται σαν επιτάχυνση, η οποία επιβλήθηκε στους κόμβους της βάσης στον αντίστοιχο βαθμό ελευθερίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.6. (acceleration/angular acceleration) με το ρυθμό του σεισμού που εφαρμόζεται.



Εικόνα 9.6: Επιβολή σεισμικού φορτίου κατά x

9.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑΣ

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν δυο προσομοιώματα τα οποία αποτελούνταν από διαφορετικού τύπου πεπερασμένα στοιχεία. Το πρώτο προσομοίωμα αποτελούνταν από τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία 8 κόμβων (C3DR8) ενώ το δεύτερο από τρισδιάστατα τροποποιημένα τετράεδρα πεπερασμένα στοιχεία 10 κόμβων (C3D10M).



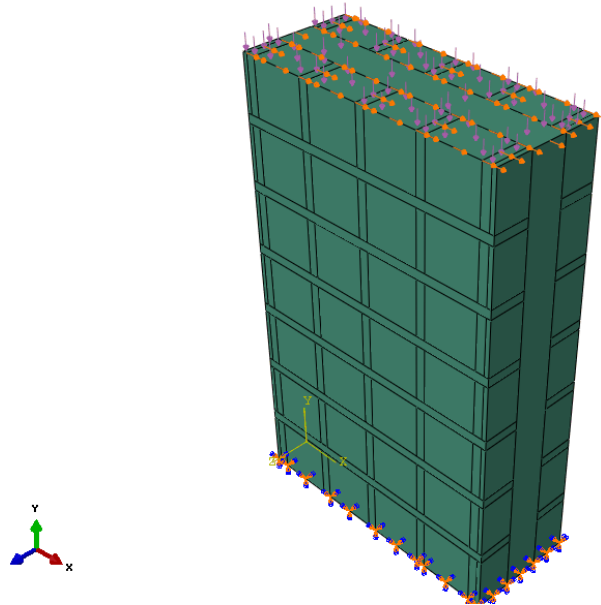
Εικόνα 9.7: Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία: (α) Εξάεδρα 8 κόμβων, (β) Τετράεδρα 10 κόμβων

9.6.1 Σύγκριση των δύο διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων

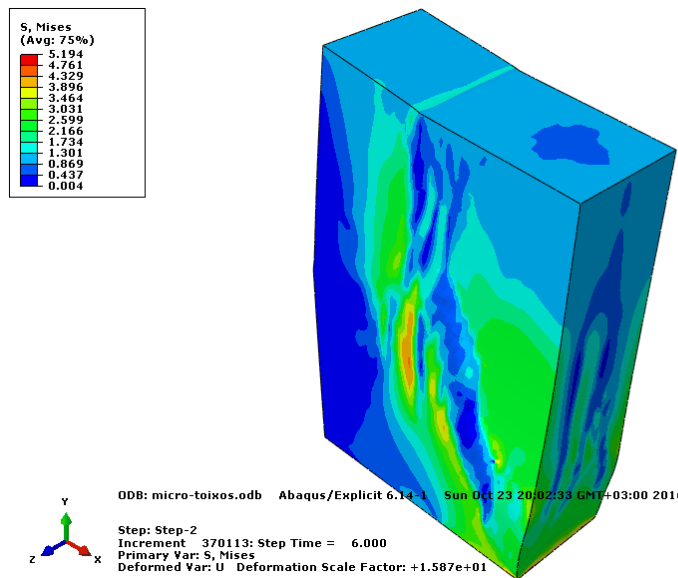
Αρχικά προσομοιώθηκε ο ένας τοίχος του δοκιμίου με τη μέθοδο της απλοποιημένης μικρο-προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο με τα τρισδιάστατα εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία και θεωρούνται γενικά πιο αξιόπιστα. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε ο ίδιος τοίχος με τη μέθοδο της μακρο-προσομοίωσης, θεωρώντας την τοιχοποιία ως ένα ομοιογενές υλικό, και με τους δυο τύπους πεπερασμένων στοιχείων.

Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τους διαφορετικούς τύπους πεπερασμένων στοιχείων και η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του κάθε προσομοιώματος με το μικρο-προσομοίωμα που θεωρείται το πιο ακριβές.

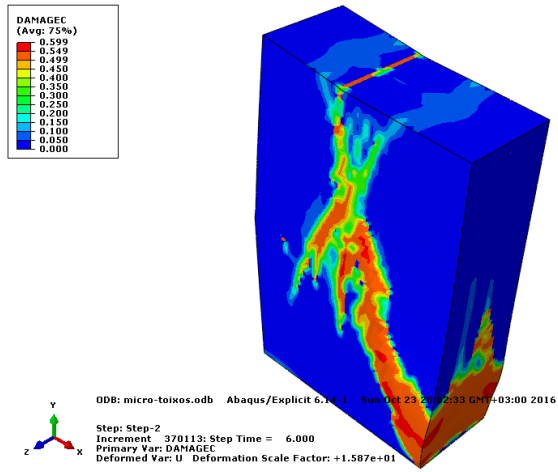
Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το υλικό CDP και επιβλήθηκε αρχική θλιπτική τάση στην τοιχοποιία ίση με 1 MPa. Στη συνέχεια η πλευρική φόρτιση προσομοιώθηκε με μετατόπιση της πάνω επιφάνειας του τοίχου κατά τη διεύθυνση x σταδιακά αυξανόμενης συνολικής διάρκειας 10 sec.



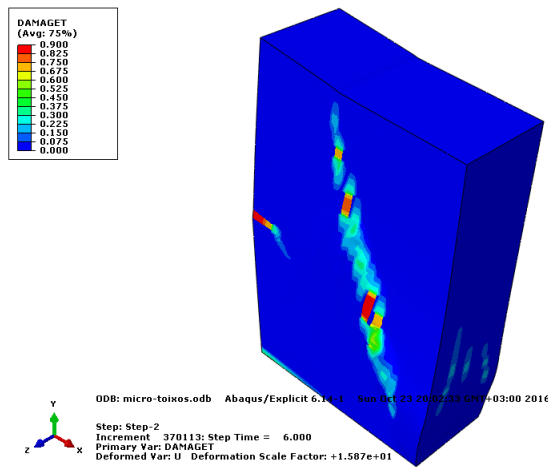
Εικόνα 9.8: Λεπτομερές μικρο-προσομίωμα τοιχοποιίας



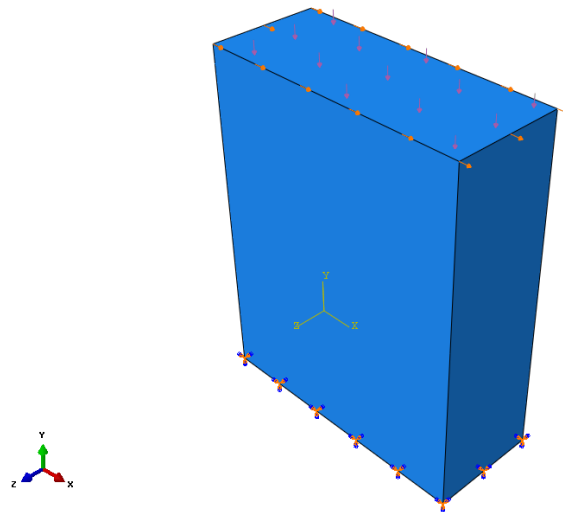
Εικόνα 9.9: Αποτελέσματα τάσεων μικρο-προσομιώματος



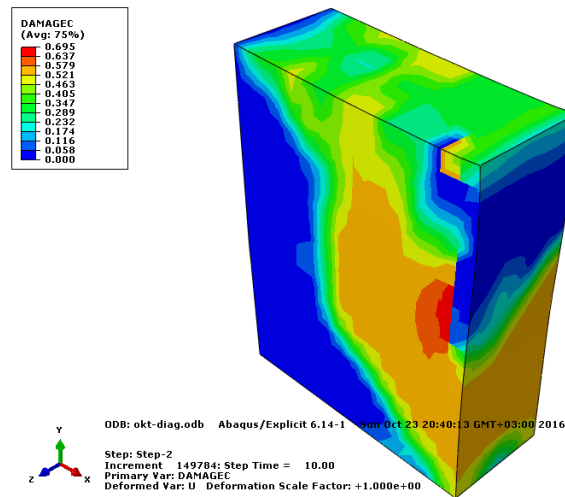
Εικόνα 9.10: Αποτελέσματα βλάβης Damages μικρο-προσομιώματος



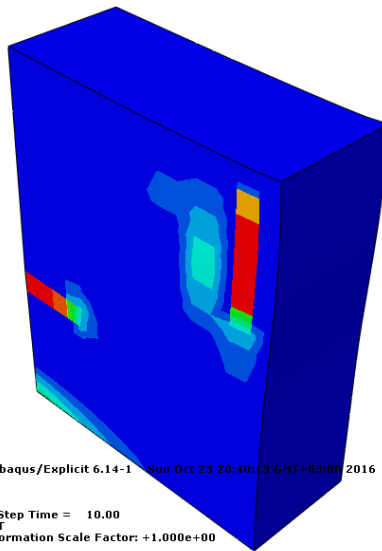
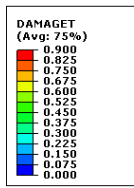
Εικόνα 9.11: Αποτελέσματα βλάβης Damaget μικρο-προσομιώματος



Εικόνα 9.12: Προσομοίωση μακρο-προσομοιώματος



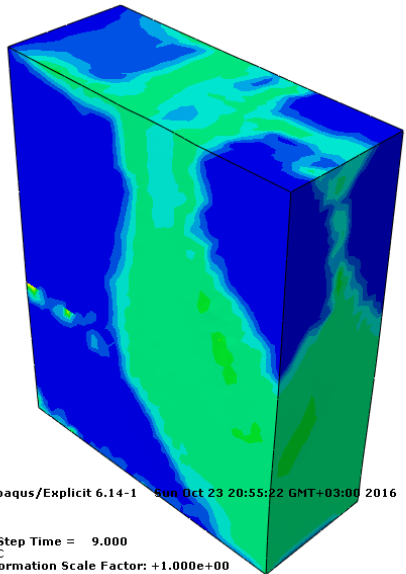
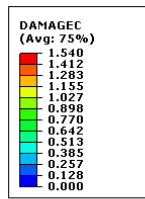
Εικόνα 9.13: Αποτελέσματα damages μακρο-προσομοιώματος (C3DR8)



ODB: okt-diag.odb Abaqus/Explicit 6.14-1 Sun Oct 23 20:40:13 GMT+03:00 2016

Step: Step-2
 Increment: 149784; Step Time = 10.00
 Primary Var: DAMAGE
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

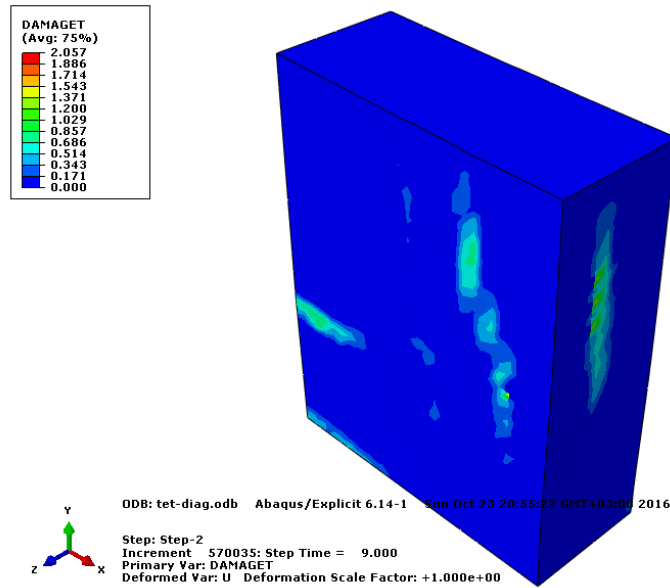
Εικόνα 9.14: Αποτελέσματα damaget μακρο-προσομοιώματος (C3DR8)



ODB: tet-diag.odb Abaqus/Explicit 6.14-1 Sun Oct 23 20:55:22 GMT+03:00 2016

Step: Step-2
 Increment: 570035; Step Time = 9.000
 Primary Var: DAMAGEC
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Εικόνα 9.15: Αποτελέσματα damagec μακρο-προσομοιώματος (C3D10M)

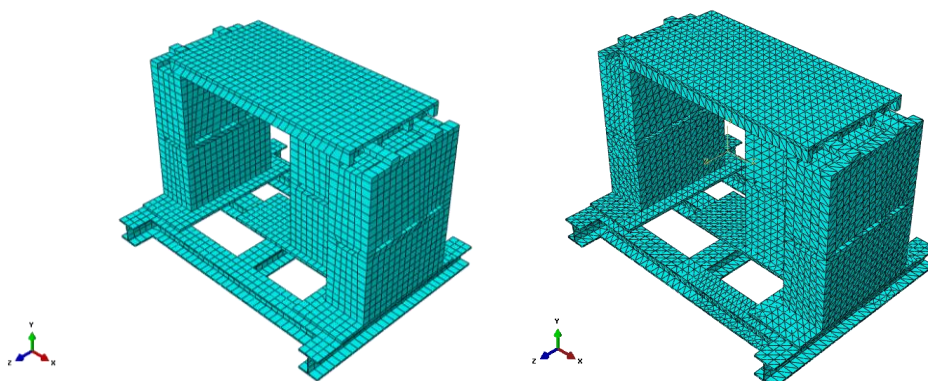


Εικόνα 9.16: Αποτελέσματα *damaget* μακρο-προσομοιώματος (C3D10M)

Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι τα δύο στοιχεία μας δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματά τους είναι παρόμοια με αυτά της μικρο-προσομοίωσης που θεωρείται και πιο ακριβής.

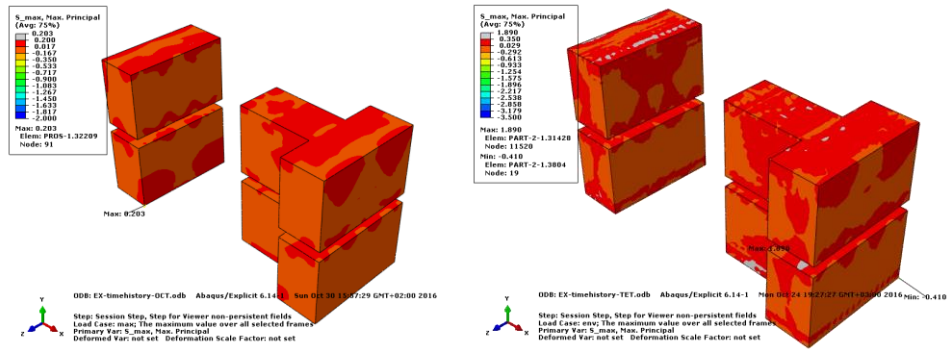
9.6.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων Χρονοϊστορίας Σεισμικού Προσομοιώματος Τοιχοποιίας

Οι αναλύσεις χρονοϊστορίας που πραγματοποιήθηκαν ήταν στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά προσομοιώματα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Στο πρώτο χρησιμοποιήθηκαν τα εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία (C3DR8) και στο δεύτερο τα τετράεδρα στοιχεία (C3D10M).

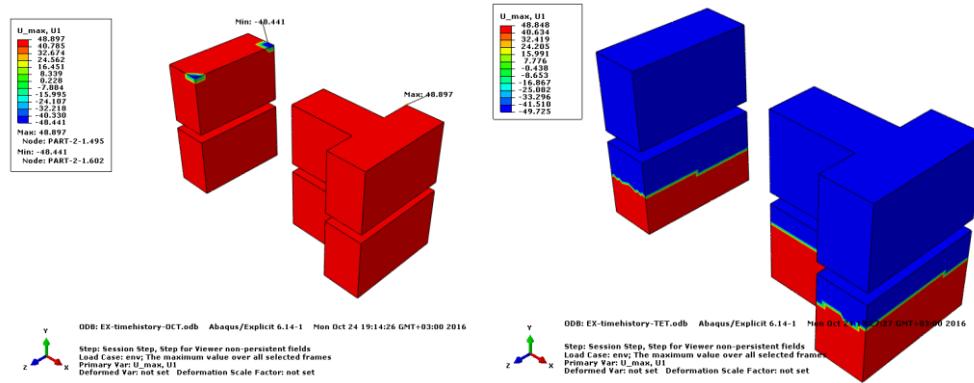


Εικόνα 9.17: (α) Σεισμικό προσομοίωμα στοιχείων (C3DR8), (β) Σεισμικό προσομοίωμα στοιχείων (C3D10M)

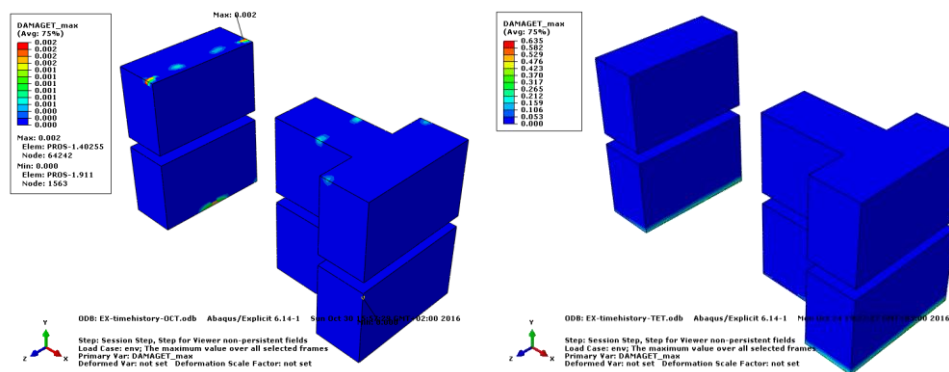
(A) Αποτελέσματα ανάλυσης χρονιοιστορίας διεύθυνσης σεισμού x-x'



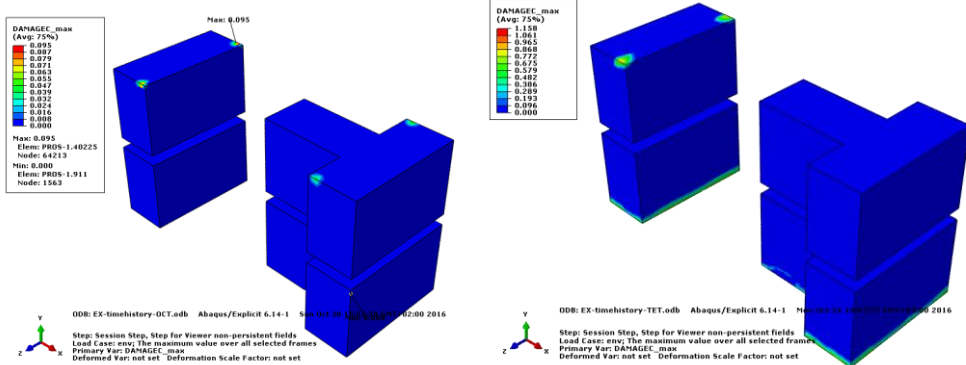
Εικόνα 9.18: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης προσομιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M



Εικόνα 9.19: Αποτελέσματα μέγιστης μετατόπισης κατά x προσομιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M



Εικόνα 9.20: Αποτελέσματα μέγιστης damage προσομιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M

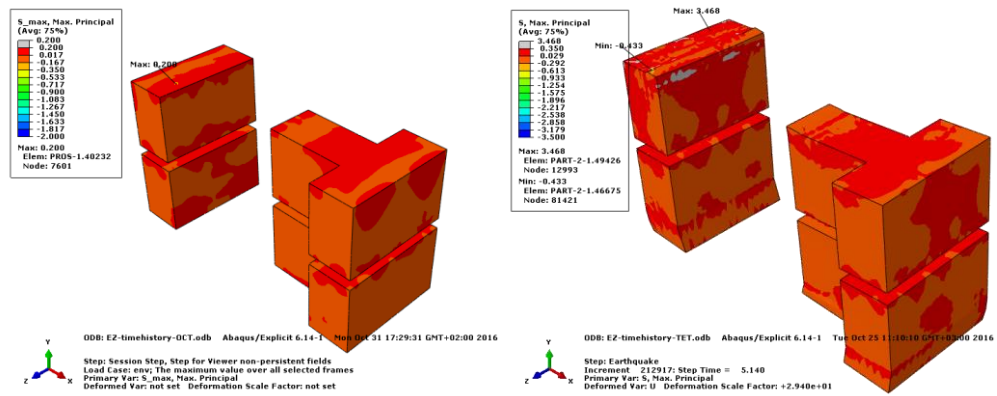


Εικόνα 9.21: Αποτελέσματα damages προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M

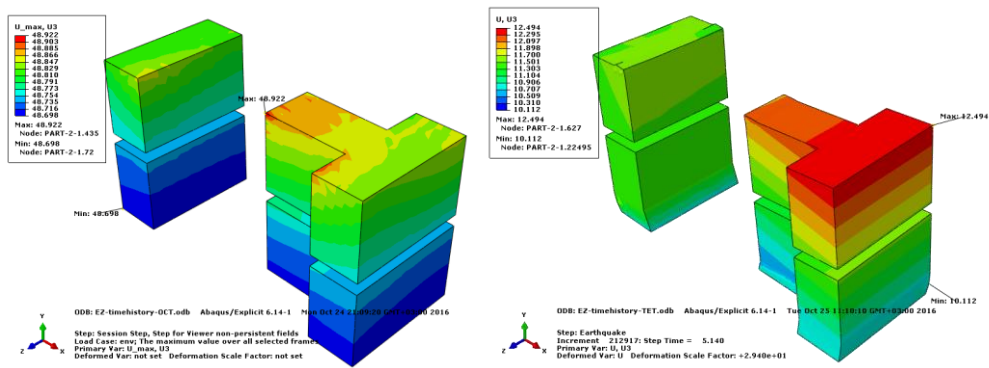


Σχήμα 9.12: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή ανάμεσα στα δύο προσομοιώματα (Διεύθυνση x)

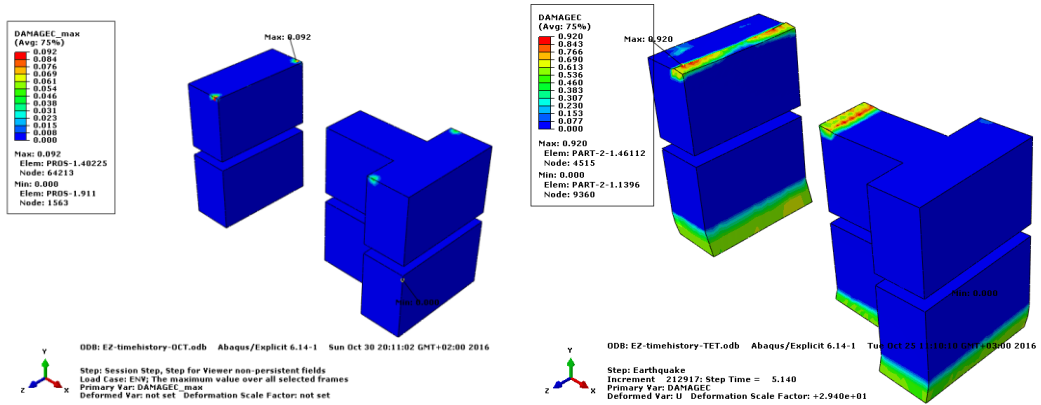
(B) Αποτελέσματα ανάλυσης χρονιότητας διεύθυνσης σεισμού z-z'



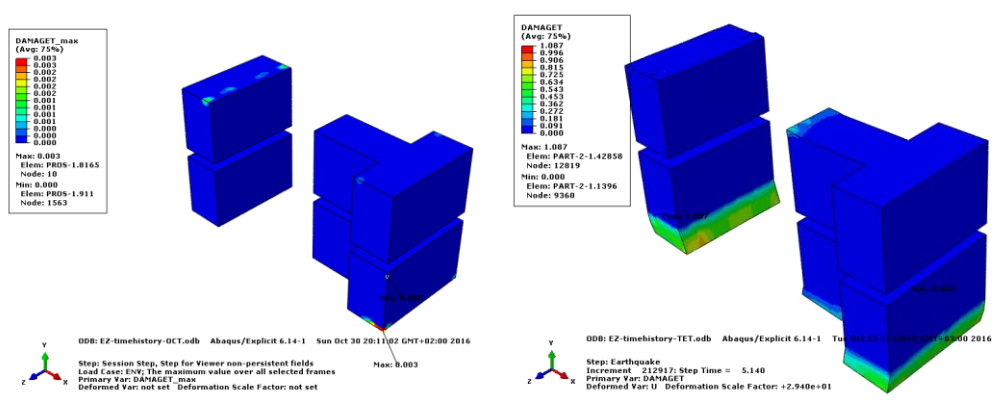
Εικόνα 9.22: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης προσομιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M



Εικόνα 9.23: Αποτελέσματα μέγιστης μετατόπισης κατά z προσομιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M



Εικόνα 9.24: Αποτελέσματα damagec προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M



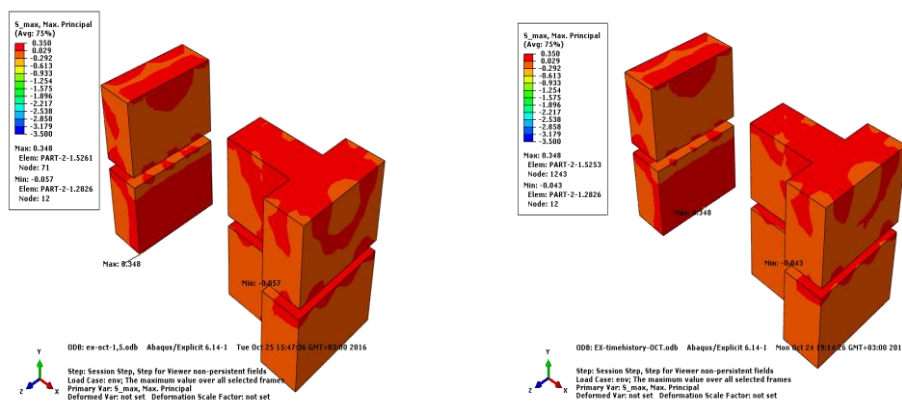
Εικόνα 9.25: Αποτελέσματα damaget προσομοιώματος (α) Στοιχεία C3DR8, (β) Στοιχεία C3D10M



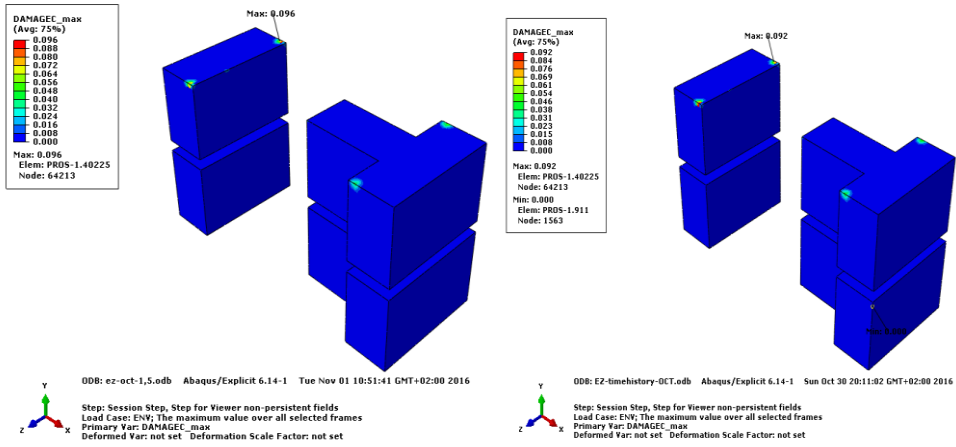
Σχήμα 9.13: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή ανάμεσα στα δύο προσομοιώματα (Διεύθυνση z)

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για σεισμική επιτάχυνση 0.36g χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα οκτάεδρα πεπερασμένα στοιχεία και παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα αυτών με τις προηγούμενες που είχαμε υποθέσει επιτάχυνση 0.24g.

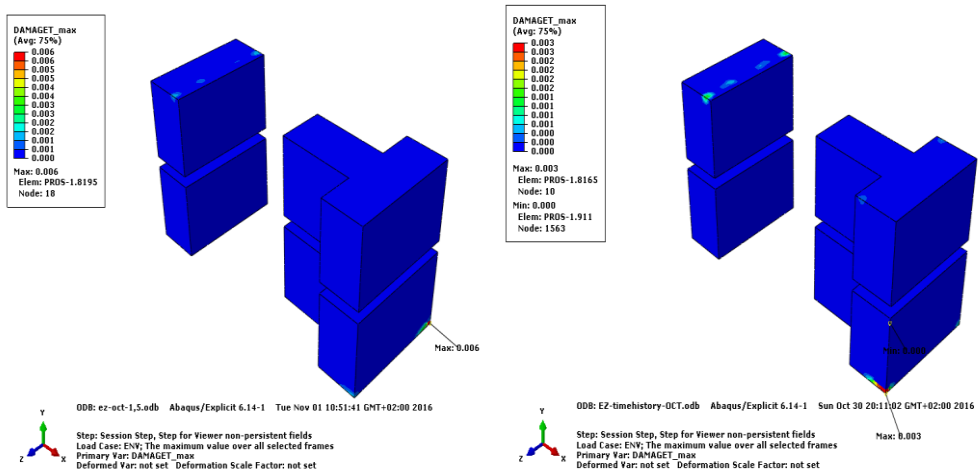
(1) Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοϊστορίας διεύθυνσης σεισμού x-x'



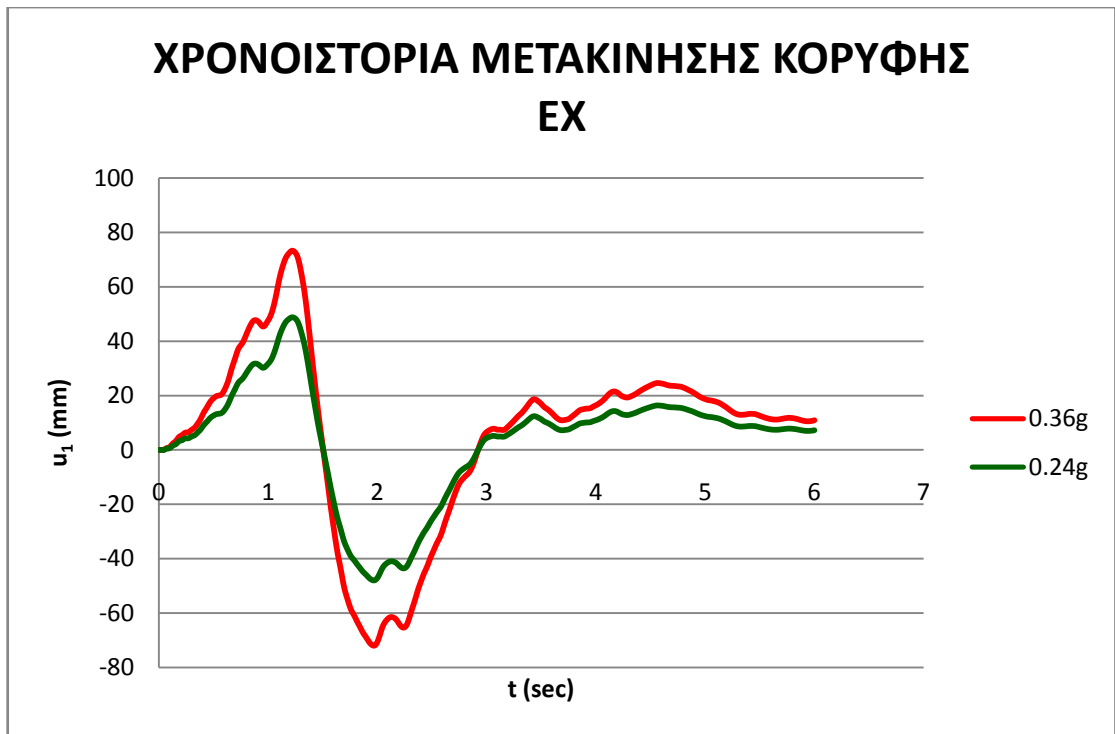
Εικόνα 9.26: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g



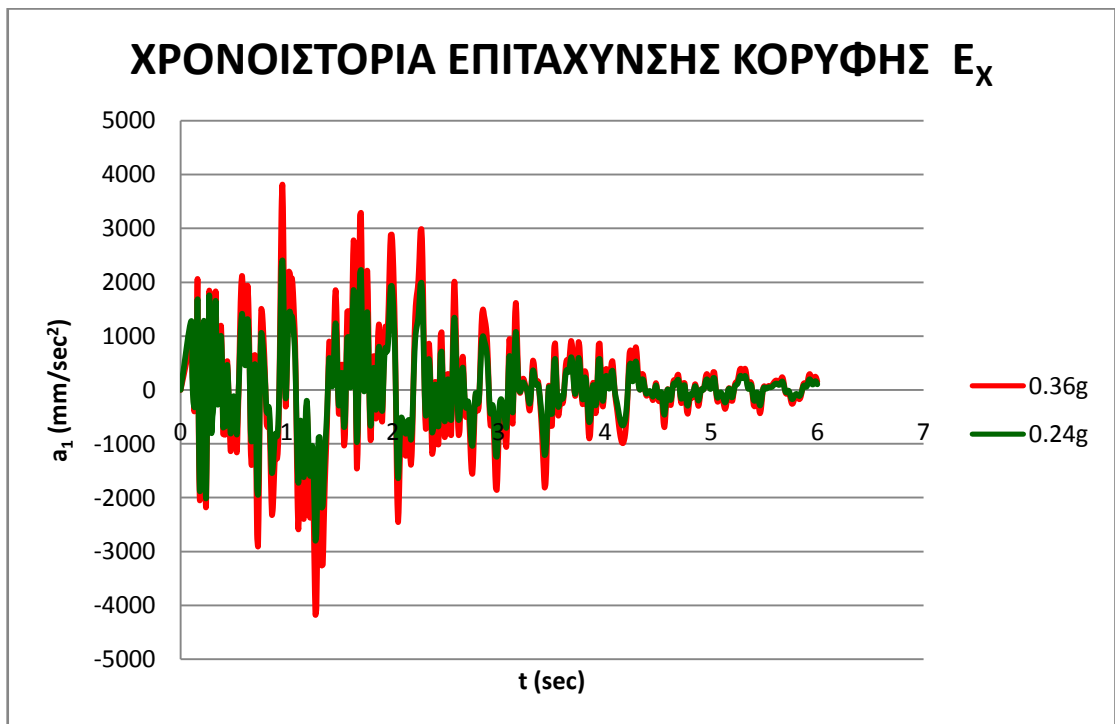
Εικόνα 9.27: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω θλίψης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g



Εικόνα 9.28: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω εφελκυσμού στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g

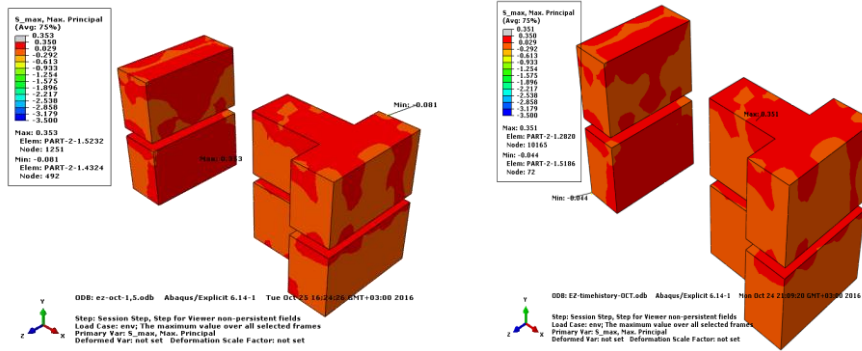


Σχήμα 9.14: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις

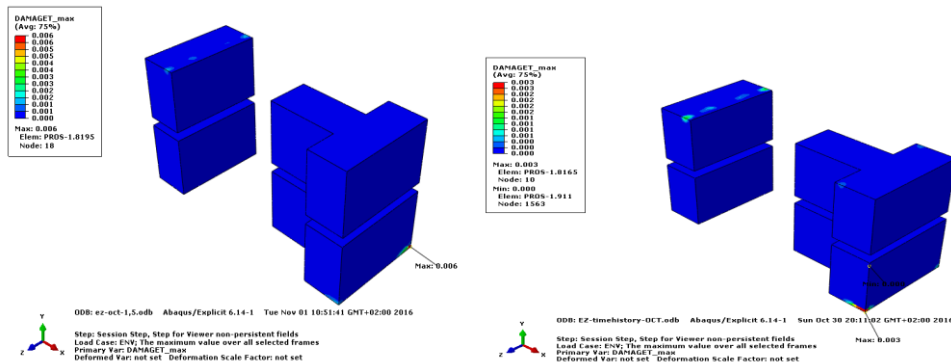


Σχήμα 9.15: Σύγκριση χρονοϊστορίας επιτάχυνσης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις

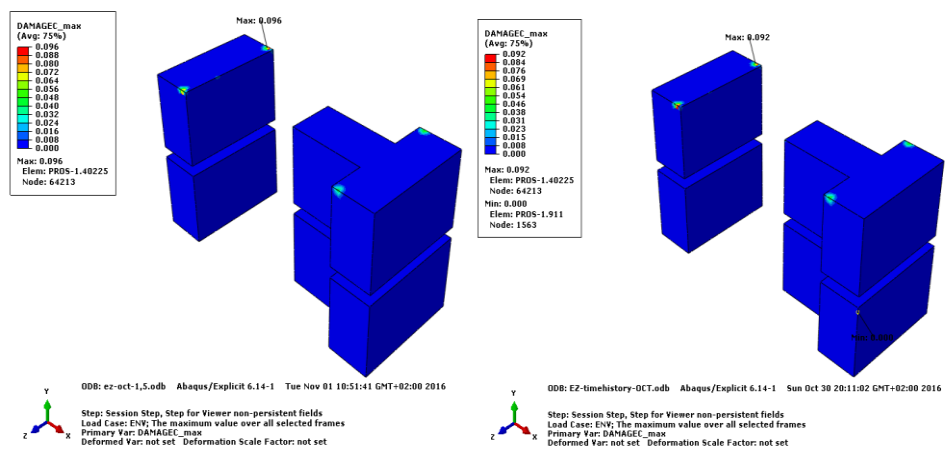
(2) Αποτελέσματα ανάλυσης χρονιοιστορίας διεύθυνσης σεισμού z-z'



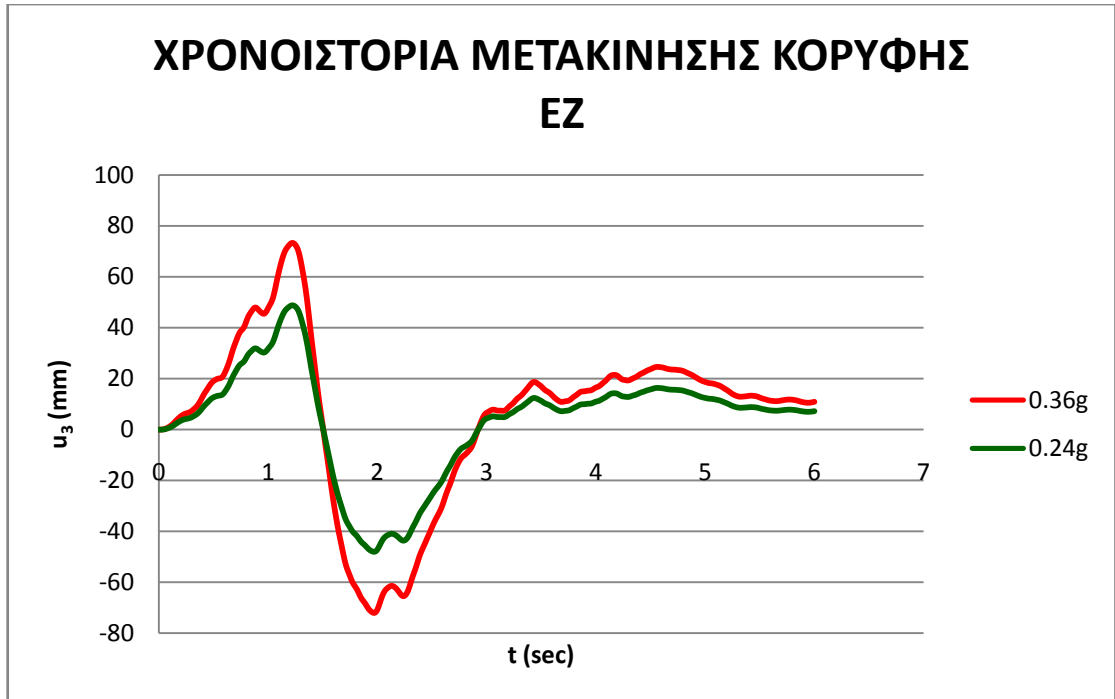
Εικόνα 9.29: Αποτελέσματα μέγιστης τάσης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g



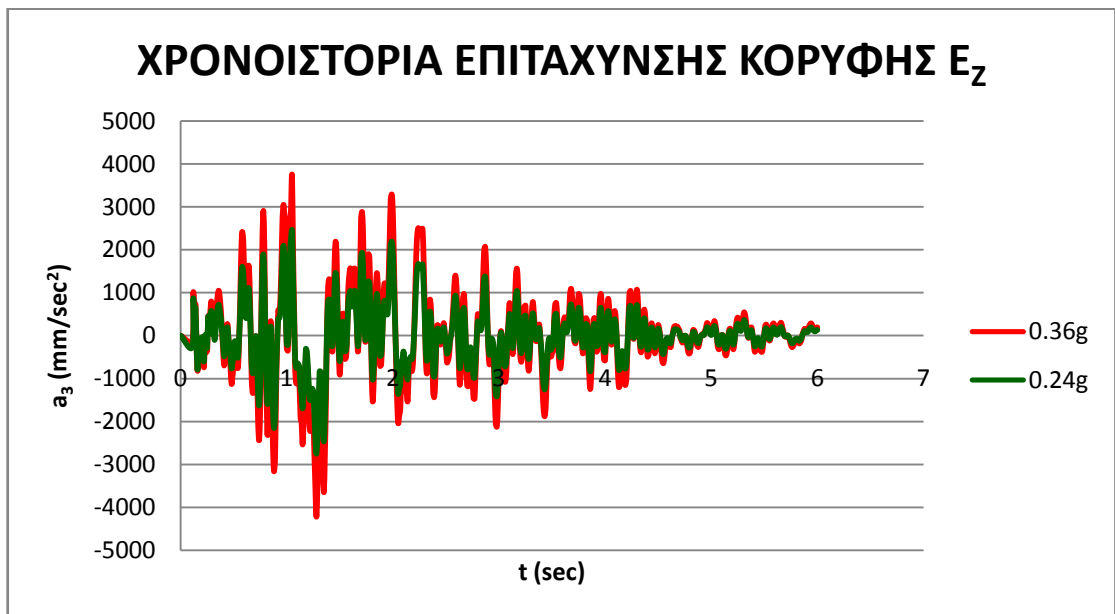
Εικόνα 9.30: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω εφελκυσμού στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g



Εικόνα 9.31: Αποτελέσματα μέγιστης βλάβης λόγω θλίψης στοιχείων C3DR8: (α) 0.36g, (β) 0.24g



Σχήμα 9.16: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετακίνησης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις



Σχήμα 9.17: Σύγκριση χρονοϊστορίας επιτάχυνσης σε ένα σημείο στην κορυφή για τις διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η παρούσα εργασία είχε ως αντικείμενο την προσομοίωση κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία με απώτερο σκοπό τη βαθμονόμηση μιας σειράς στατικών και δυναμικών δοκιμών.
- Διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν και αποτιμήθηκαν με χρήση δεδομένων από τη βιβλιογραφία.
- Η αξιόπιστη προσομοίωση στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας απαιτεί τον προσδιορισμό σημαντικών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές οφείλουν να προκύπτουν από αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές.
- Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εκτεταμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων XFEM σε ένα πείραμα τοιχοποιίας που λήφθηκε από τη βιβλιογραφία, η οποία είναι σε θέση να εντοπίσει τη θέση έναρξης της ρηγματώσης στο μοντέλο και της εξέλιξης αυτής, όμως δεν κατάφερε να επιτύχει αριθμητική σύγκλιση εξαιτίας του ανοίγματος πολλών ταυτόχρονων ρωγμών.
- Το καταστατικό προσομοίωμα CDP σε συνδυασμό με την απλοποιημένη μικρο-προσομοίωση οδηγεί σε αναμενόμενες μορφές βλάβης με μικρότερο υπολογιστικό κόστος σε σύγκριση με την XFEM.
- Το καταστατικό προσομοίωμα CDP σε συνδυασμό με τη μακρο-προσομοίωση είναι μια χρηστική μέθοδος ανάλυσης για μεγαλύτερης κλίμακας προσομοιώματα απαιτείται όμως περαιτέρω διερεύνηση της αξιοπιστίας τους με χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Η δυναμική μέθοδος ρητής ολοκλήρωσης ενδείκνυται για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικότητας του υλικού. Μπορεί να εφαρμοσθεί και στην περίπτωση των στατικών προβλημάτων με την κατάλληλη αύξηση του χρόνου επιβολής του φορτίου. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτεί τη μόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας και την εκτέλεση επαναλήψεων αλλά επιβάλλει τη φόρτιση σε πολύ μικρά επαυξηντικά βήματα.
- Ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζει τα αποτελέσματα και είναι μια παράμετρος που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Spyrakos, C.C. (1995). *Finite Element Modeling in Engineering Practice*. Pittsburg, PA, USA: Algor Publishing Division.
- [2] Spyrakos, C.C. (2004). Strengthening of structures for seismic loads. Athens: Technical Chamber of Greece. (in Greek)
- [3] Spyrakos, C.C., & Raftoyiannis, J. (1997). *Linear and Nonlinear Finite Element Analysis*. Pittsburg, PA, USA: Algor Publishing Division.
- [4] Spyrakos, C.C., & Maniatakis, C.A. (2006). Retrofitting of a Historic Masonry Building. In *Proceedings of the 10th National and 4th International scientific meeting on Planning, Design, Construction and Renewal in the construction industry iNDiS 2006* (pp. 535-544). Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Institute for Civil Engineering.
- [5] Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A., & Taflambas, J. (2008). Evaluation of near source seismic records based on damage potential parameters: Case study: Greece. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 738-753.
- [6] Spyrakos, C.C., Kiriakopoulos, P.D., & Smyrou, E. (2011). Seismic Strengthening of the Historic Church of Sts Helen and Constantine in Piraeus. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering COMPDYN 2011*. Corfu, Greece; ECCOMAS.
- [7] Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A., Smyrou, E., & Psycharis, I.N. (2012). FRP Strengthened Brick-Infilled RC Frames: An Approach for their Proper Consideration in Design. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 6(Suppl 1-M19), 306-324.
- [8] Spyrakos, C.C., Francioso, A., Kiriakopoulos, P.D., & Papoutsellis, S. (2013). Seismic evaluation of the historic church of St. Nicholas in Piraeus before and after interventions. In *Proceeding of the 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering COMPDYN 2013* (pp. 3015-3029). Kos, Greece; ECCOMAS.
- [9] Spyrakos, C.C., Toulaitos, P., Patsilivas, D., Pelekis, G., Xampesis, A., & Maniatakis, C.A. (2013b). Seismic analysis and retrofit of a historic masonry building. In Syngellakis, S. (Ed.), *Retrofitting of Heritage Structures - Design and evaluation of strengthening techniques* (pp. 65-74). Southampton, UK: Wessex Institute of Technology Press.
- [10] Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A., & Taflambas J. (2015). Critical evaluation of near field seismic records in Greece. In Syngellakis, S. (Ed.), *Earthquake Ground Motion - Input Definition for Aseismic Design* (pp. 1-10). Southampton, UK: Wessex Institute of Technology Press.

- [11] C.C. Spyrakos, Seismic Risk of Historic Structures and Monuments: A need for a unified policy, in: Proceedings of COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, 2015.
- [12] C.C. Spyrakos, F. Pugi, C.A. Maniatakis, A. Francioso, Evaluation of the Dynamic Response for a Historic Byzantine crossed-dome church through Block joint and Kinematic analysis, in: Proceedings of COMPDYN 2015, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, (2015).
- [13] Τρ. Καραντώνη (2004) "Κατασκευές από τοιχοποιία, σχεδιασμός και επισκευές". Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [14] P. B. Lourenço (1994) "Analysis of masonry structures with interface elements theory and applications", Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering
- [15] Λουτσία Καραπίττα (2011) "Ανάπτυξη και πειραματική βαθμονόμηση καταστατικού προσομοιώματος άοπλης τοιχοποιίας υπό σεισμική καταπόνηση", Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Αντισεισμική Τεχνολογίας Ε.Μ.Π.
- [16] M. Bolhassani, AA. Hamid, A. C.W. Lau, FL. Moon (2015) "Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages", Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA, United States
- [17] M. Bolhassani, AA. Hamid, FL. Moon (2015) "Enhancement of lateral in-plane capacity of partially grouted concrete masonry shear walls", Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA, United States
- [18] P. B. Lourenco, J.G. Rots "Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro modeling", Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft Netherlands
- [19] M. Angelillo‡, Paulo B. Lourenço and Gabriele Milani † "Masonry behavior and modelling", Department of Civil Eng., University of Salerno Italy, Department of Civil Eng. Univeristy of Minho Portugaul, Department of Struct. Eng. Geotech. Politecnico di Milano Italy
- [20] Ghassan K. Al-Chaar and Armin Mehrabi 2008 "Constitutive Models for Nonlinear Finite Element Analysis of Masonry Prisms and Infill Walls", Construction Engineering Research Laboratory U.S. Army Engineer Research and Development Center 2902 Newmark Drive Champaign, IL 61822
- [21] June 2015 France "International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure"
- [22] D. Addessi, S. Marfia, E. Sacco* and J. Toti " Modeling Approaches for Masonry Structures" The Open Civil Engineering Journal, 2014, 8, 288-300

- [23] Tomasz Łodygowski and Piotr W. Sielicki " The behavior of masonry walls subjected to unusual dynamic loading", Institute of Structural Engineering (ISE), Poznan University of Technology ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznan, Poland
- [24] Nitin Kumar, Amirtham Rajagopal, Manoj Pandey 2014 " Plasticity based approach for failure modelling of unreinforced masonry" Article in Engineering Structures, December 2014
- [25] Giulia Grecchi "Material and structural behavior of Masonry: Simulation with a commercial code" University of Pavia 2009-2010
- [26] Shahid Nazir "Studies on the failure of unreinforced masonry shear walls", School of Civil Engineering and Built Environment Science and Engineering Faculty Queensland University of Technology, Australia 2015
- [27] P. B. Lourenço (1996) "Computational Strategies for masonry structures", Thesis Delft University
- [28] P. B. Lourenço (2007) "Structural masonry analysis: Recent developments and prospects", University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal
- [29] Amjad J. Aref, Kiarash M. Dolatshahi (2013) " A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures", journal Computers and Structures
- [30] Dassault Systèmes (2013) " Solving Contact Problems with Abaqus"
- [31] A. Bernardini, C. Modena and M.R. Valluzzi " Load transfer mechanisms in masonry: Friction along a crack within a brick" Scientific reports, Materials and Structures, Vol. 31, January-February 1998, pp 42-48
- [32] P. B. Lourenço (1997) "Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures", Article in Journal of Engineering Mechanics
- [33] Ingo Scheider, Wolfgang Brocks (2003) "Application of interface elements for material separation to shell structures", ABAQUS Users' Conference
- [34] Carlo Citto (2008) "Two-dimensional interface model applied to masonry structures" Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering
- [35] M. Angelillo, L. Cardamone and A. Fortunato (2010) "A numerical model for masonry-like structures", Journal of Mechanics of Materials and Structures
- [36] B. Blackard, B. Kim, C. Citto, K. Willam & S. Mettupalayam (2004) "Failure issues of brick masonry", CEAE Department, University of Colorado-Boulder, Boulder, Colorado
- [37] J. Ruzicka, M. Spaniel, A. Prantl, J. Dzigan, J. Kuzelka, M. Moravec "Identification of Ductile Damage Parameters in the Abaqus", Article March 2013 Research Gate

- [38] A. Caballero, I. Carol and C. M. Lopez "A meso-level approach to the 3D numerical analysis of cracking and fracture of concrete materials", Article in *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* · December 2006
- [39] B. Vandoren, K. DE Proft, A. Simone† and L. J. Sluys† "Modelling crack initiation and propagation in masonry using the partition of unity Method", VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures
- [40] Tomasz Jankowiak, Tomasz Lodygowski (2005) "Identification of parameters of concrete damaged plasticity constitutive model", Poznan University of Technology, Institute of Structural Engineering (ISE) ul.Piotrowo 5, 60-975 Poznan, Poland
- [41] Laura Sendra Gonzalez (2010) " Numerical Analysis of the out-of-plane behavior of unreinforced masonry walls", Polytechnic University of Catalonia
- [42] S. Hashemi Rafsanjani, P.B. Lourenço, N. Peixinho "Dynamic interface model for masonry walls subjected to high strain rate out-of-plane loads", Article in *International Journal of Impact Engineering* · January 2014
- [43] Ευγενία Δόδουλα (2013) "Προσομοίωση σεισμικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων-προσκρουστήρων σε κτίρια", Τμήμα πολιτικών μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών Ε.Μ.Π
- [44] Elizabeth Vintzileou " Grouting of three-leaf masonry: Experimental results and prediction of mechanical properties" Article · January 2007 Research Gate
- [45] Zhen-zhong Du "Extended Finite Element Method (XFEM) in Abaqus", Technology Director, Mechanics, R&D at DASSAULT SYSTEMES SIMULIA- Dassault Systemes
- [46] Abaqus 6.4-1. Theory Manual. Hibbit, Karlson and Sorenson, INC.; 2003.
- [47] Oliveira, DV., Lourenco, PB. (2004) "Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behavior of interface elements", *Computer and Structures*, 82, p.1451-1461.
- [48] Syrmakzsis, K., Asteris, PG. (2001) "Masonry failure criterion under biaxial stress state", *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 13(1), p.58-64.
- [49] Kotronis, P., Mazars, J., Davenne, L. (2003) "The equivalent reinforced concrete model for simulating the behavior of walls under dynamic shear loading", *Engineering Fracture Mechanics*, 70, p.1085-1097.
- [50] Leonardo Snozzi and Jean-François Molinari† "A cohesive element model for mixed mode loading with frictional contact capability", *International journal for numerical methods in engineering Int. J. Numer. Meth. Engng* 2013; 93:510–526, Published online 31 July 2012 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/nme.4398

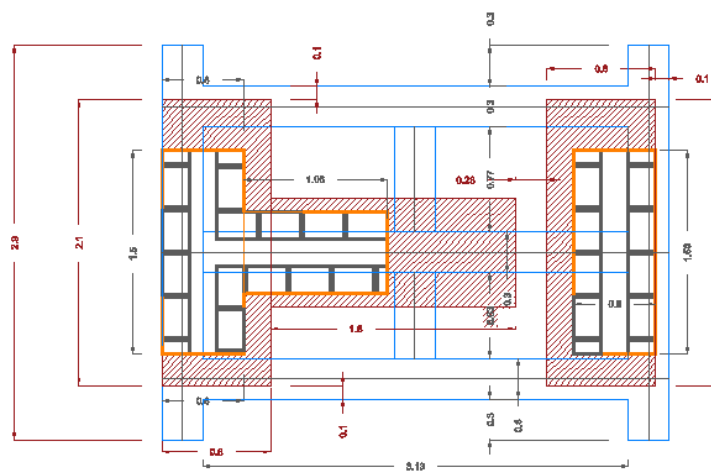
[51] Stanisław Stupkiewicz, Zenon Mróz (2001) "Modelling of friction and dilatancy effects at brittle interfaces fo monotonic and cycling loading", Journal of theoretical and applied mechanics 3, 39

[52] Stavridis A, Shing PB. "Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames.", J Struct Eng 2010;136(3):285–96.

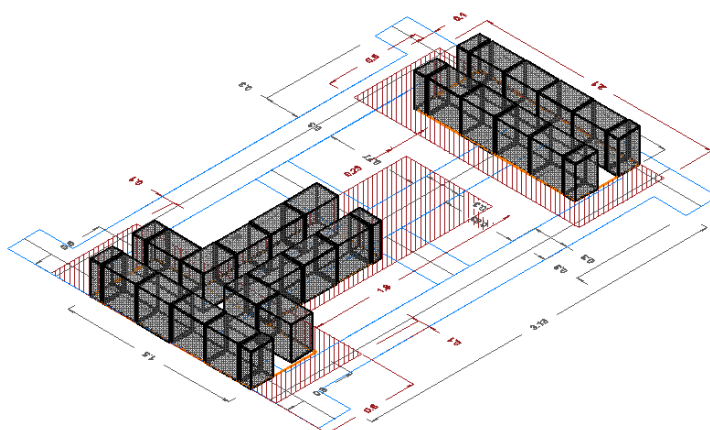
[53] Koutromanos I, Stavridis A, Shing PB, Willam K. Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. Comput Struct 2011;89(11):1026–37.

[54] Κωνσταντίνος Αγάθος "ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΡΩΓΜΕΣ", Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη 2015 Α.Π.Θ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

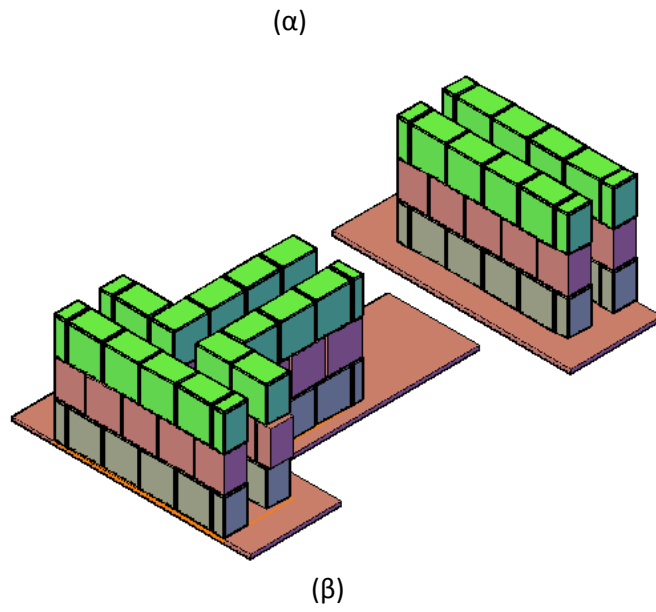


(α)

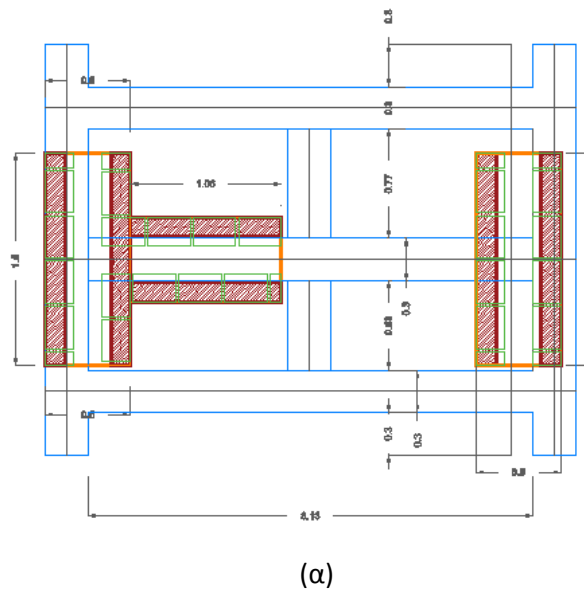


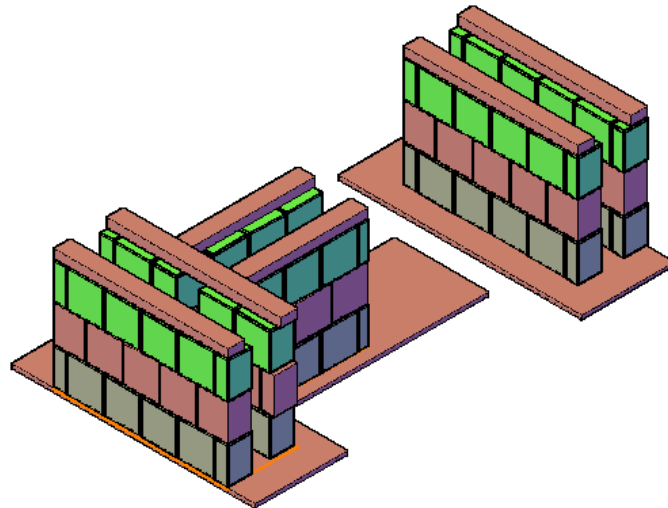
(β)

Σχήμα Α.1: Δοκίμιο τριστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 1 – στάθμη +0.02:
(α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.



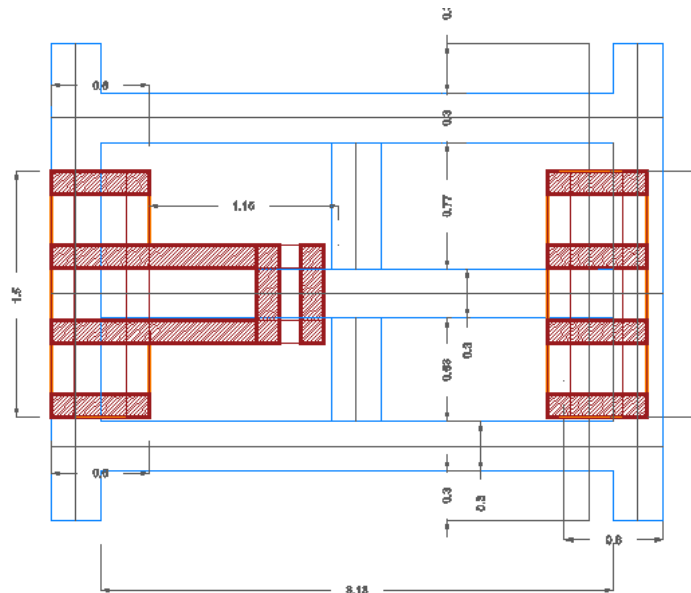
Σχήμα Α.3: Δοκίμιο τρίστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 3 – στάθμη +0.66:
 (α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.



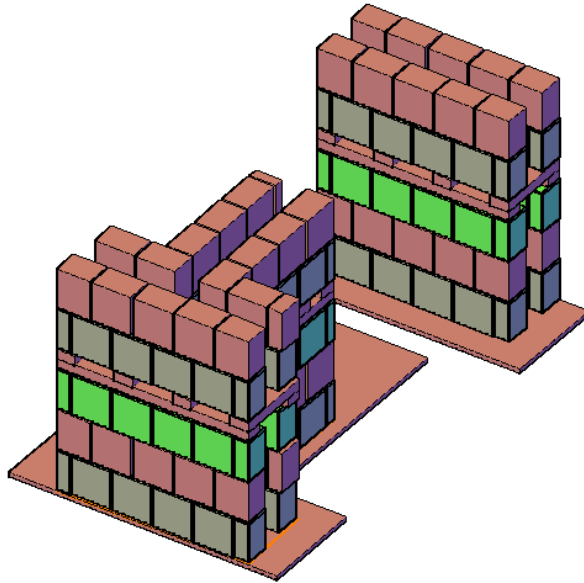


(β)

Σχήμα Α.4: Δοκίμιο τριστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 4 – στάθμη +0.98:
(α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.

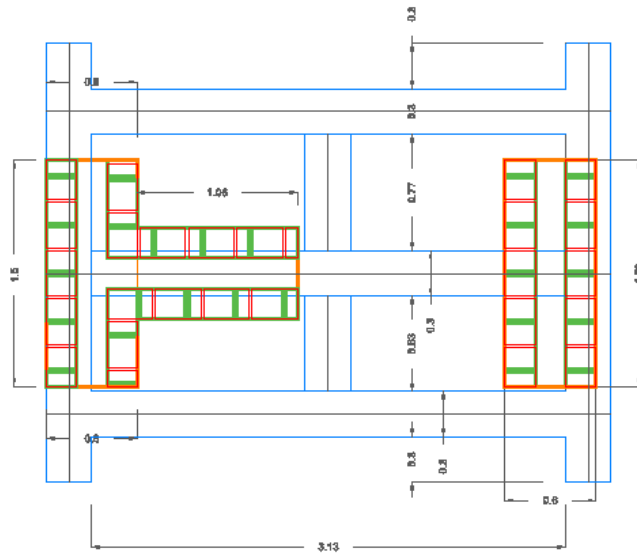


(α)

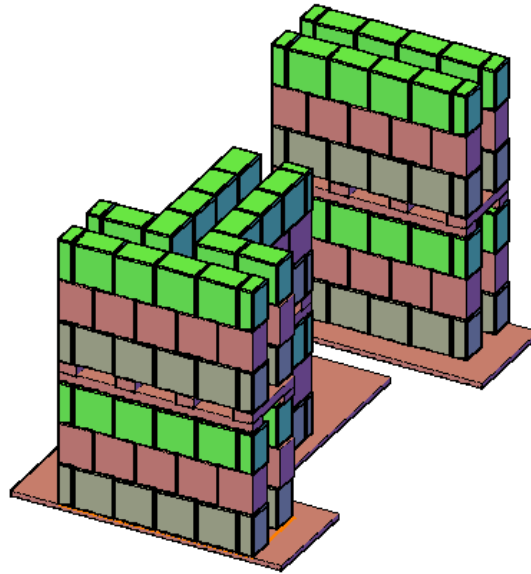


(β)

Σχήμα Α.7: Δοκίμιο τρίστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 7 – στάθμη +1.46:
 (α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.

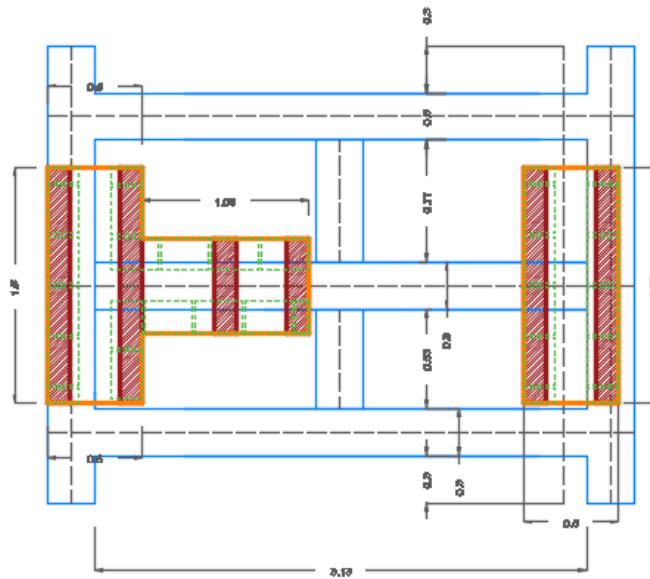


(α)

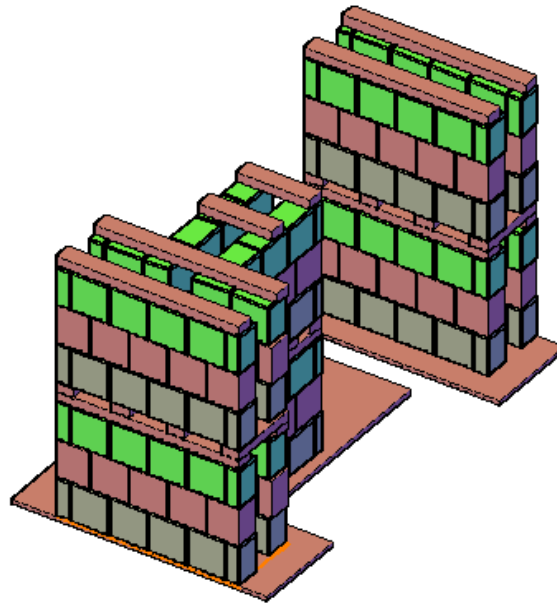


(β)

Σχήμα Α.8: Δοκίμιο τρίστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 8 – στάθμη +1.78:
 (α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.

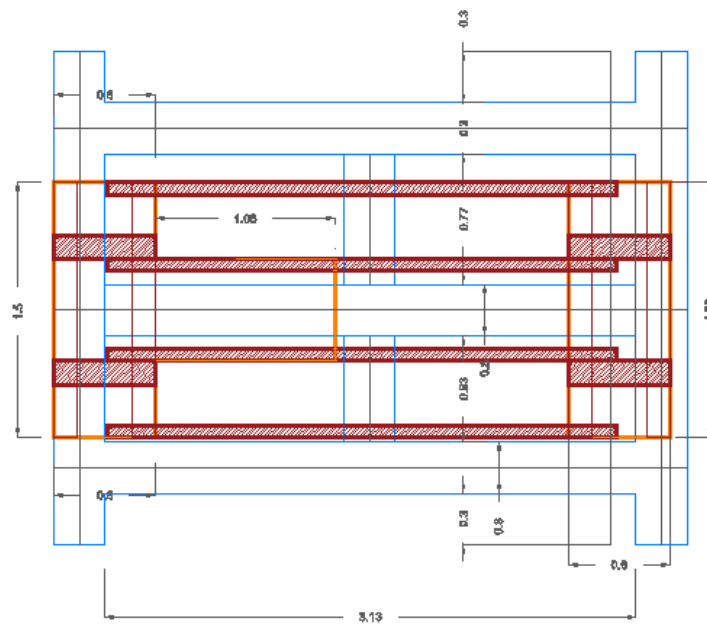


(α)

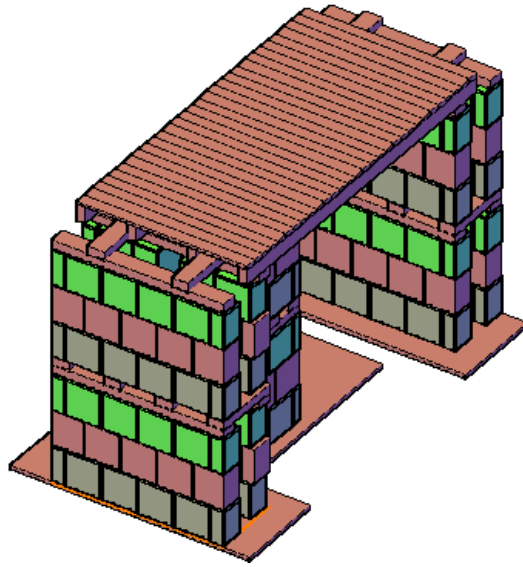


(β)

Σχήμα Α.9: Δοκίμιο τρίστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 9 – στάθμη +2.10:
(α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.



(α)



(β)

Σχήμα A.11: Δοκίμιο τρίστρωτης φέρουσας τοιχοποιίας. Στρώση 11 – στάθμη +2.31: (α) κάτοψη, (β) αξονομετρική απεικόνιση.