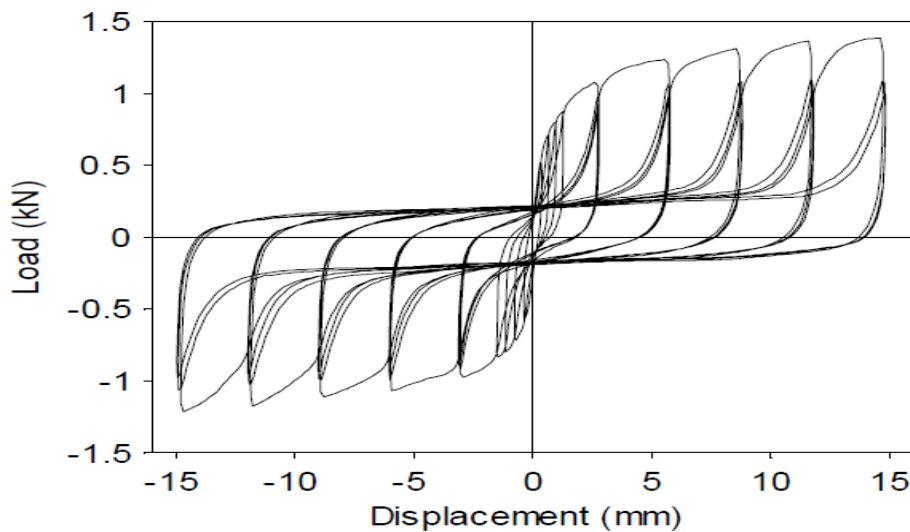




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΠΜΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΞΥΛΙΝΩΝ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΟΥΖΑΚΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΕΠ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2015



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
Περιεχόμενα εικόνων.....	4
Περίληψη .....	9
1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ .....	11
1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	11
1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ.....	12
1.4 ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	13
2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	29
2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ WILSON .....	29
2.1.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SB1 ΚΑΤΑ WILSON(ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SAR2000) ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΣΤΟ ABAQUS .....	31
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ(WILSON) ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ .....	34
2.2.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΞΥΛΙΝΟ ΠΑΤΩΜΑ.....	43
2.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ .....	46
2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ ΜΕ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	52
3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΞΥΛΙΝΟΥ ΠΑΤΩΜΑΤΟΣ .....	57
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΚΑΡΦΙΟΥ-ΣΑΝΙΔΑΣ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ).....	57
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΚΑΡΦΙΟΥ- ΣΑΝΙΔΑΣ.....	57
3.3 ΤΥΠΟΙ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ .....	61
4. ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	63
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	63
4.2 ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (PHM) .....	65
4.3 ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ.....	85
4.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ FORTRAN.....	89
4.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ .....	93

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WILSON.....	97
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	109
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	111

### Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1-1 Φορέας από τοιχοποιία.....	13
Εικόνα 1-2 Κατανομή μάζας στους ορόφους του κτιρίου.....	15
Εικόνα 1-3 Σημεία ελέγχου .....	15
Εικόνα 1-4 Διαγράμματα V(KN)-D(m).....	16
Εικόνα 1-5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ V-d για διάφορα σημεία ελέγχου .....	17
Εικόνα 1-6 Τροποποιημένα διαγράμματα SA/SD .....	18
Εικόνα 1-7 Διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής υλικού .....	18
Εικόνα 1-8 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής υλικού .....	19
Εικόνα 1-9 Διάγραμμα διατμητικής αντοχής υλικού .....	19
Εικόνα 1-10 Πυκνότητα τοιχοποιίας.....	19
Εικόνα 1-11 Μεταβλητές υπορουτίνας .....	20
Εικόνα 1-12 Χαρακτηριστικά υλικού για την υπορουτίνα .....	20
Εικόνα 1-13 Διάγραμμα V-d (Τέμνουσα Βάσης - Μετακίνηση σημείου ελέγχου) .....	22
Εικόνα 1-14 Χρονοϊστορία.....	22
Εικόνα 1-15 Διάγραμμα V-d με στατική ανάλυση / με ανάλυση χρονοϊστορίας.....	23
Εικόνα 1-16 Αναλύσεις χρονοϊστορίας για EC8 -0.12G και 0.08G .....	24
Εικόνα 1-17 Αναλύσεις χρονοϊστορίας για EC8-0.12G και ΕΔΕΣΣΑ 0.12G.....	24
Εικόνα 1-18 Διαγράμματα V-D στατική ανελαστική ανάλυση με φασματικές μετακινήσεις / με ανάλυση χρονοϊστορίας.....	25
Εικόνα 1-19 Διαγράμματα V-D με στατική ανάλυση με φασματικές μετακινήσεις για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση (αργός ρυθμός) .....	26
Εικόνα 1-20 Έντονες ρηγματώσεις πριν και μετά τη μέγιστη τέμνουσα .....	27
Εικόνα 1-21 Σχετική μετακίνηση σημείου ελέγχου.....	27
Εικόνα 2-1 Προσομοίωση διαφράγματος Wilson [10].....	30
Εικόνα 2-2 Αρχικές δεσμεύσεις για την προσομοίωση της σύνδεσης του καρφιού $U1=0$ , $R2=0$ και $R3=0$ .....	31
Εικόνα 2-3 Πειραματική διάταξη SBA-1 [10].....	32
Εικόνα 2-4 Αριθμητικό προσομοίωμα SBA-1 SAP2000 [10].....	32
Εικόνα 2-5 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης από πείραμα και προσομοίωση Wilson [10].....	33
Εικόνα 2-6 Προσομοίωμα ξύλινου πατώματος τύπου SBA-1 κατά Wilson στο Abaqus .....	33
Εικόνα 2-7 Συγκριτικό διάγραμμα Wilson με προσομοίωμα SAP 2000 (Δασκαλάκη Έρνα-Βαρβάρα) και προσομοίωμα Abaqus.....	34

Εικόνα 2-8 Φορέας από τοιχοποιία.....	35
Εικόνα 2-9 Διατομή ξύλινης δοκού .....	35
Εικόνα 2-10 Τοποθέτηση ξύλινων δοκών.....	35
Εικόνα 2-11 Χαλύβδινη διατομή .....	36
Εικόνα 2-12 Θέση χαλύβδινων δοκών.....	36
Εικόνα 2-13 Διατομή σανίδας.....	37
Εικόνα 2-14 Ξύλινο πάτωμα .....	37
Εικόνα 2-15 Άκαμπτα στοιχεία .....	38
Εικόνα 2-16 Ελατήριο κατά τη $x$ διεύθυνση.....	38
Εικόνα 2-17 Ελατήριο κατά τη $y$ διεύθυνση.....	39
Εικόνα 2-18 Δέσμευση κατακόρυφης μετακίνησης άκρων καρφιού .....	39
Εικόνα 2-19 Δέσμευση στροφής ως προς τον $x$ άξονα των άκρων καρφιού.....	40
Εικόνα 2-20 Δέσμευση στροφής ως προς τον $z$ άξονα των άκρων καρφιού .....	40
Εικόνα 2-21 Εξάρτηση σημείου αναφοράς με τη δοκό κατά τη διεύθυνση $x$ .....	41
Εικόνα 2-22 Εξάρτηση σημείου αναφοράς με τη δοκό DOF2 & DOF3 .....	41
Εικόνα 2-23 Ελατήριο διεύθυνση $z$ .....	42
Εικόνα 2-24 Δέσμευση σημείου αναφοράς(RP-2) με άνω άκρο καρφιού .....	42
Εικόνα 2-25 Εξάρτηση σημείου αναφοράς(RP-2) με τη δοκό κατά τη διεύθυνση $z$ ..	43
Εικόνα 2-26 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	44
Εικόνα 2-27 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	45
Εικόνα 2-28 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	45
Εικόνα 2-29 8 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	46
Εικόνα 2-30 Φορέας χωρίς διάφραγμα.....	46
Εικόνα 2-31 (α) 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή φορέα χωρίς διάφραγμα (β) 4 <sup>η</sup> Ιδιομορφή φορέα χωρίς διάφραγμα (γ) 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή φορέα με διάφραγμα.....	48
Εικόνα 2-32 Ιδιομορφή κατά $x$ (αριστερά) φορέα χωρίς διάφραγμα (δεξιά) με το ξύλινο πάτωμα.....	48
Εικόνα 2-33 Φορέας από τοιχοποιία με πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα .....	49
Εικόνα 2-34 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	50
Εικόνα 2-35 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	51
Εικόνα 2-36 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή .....	51
Εικόνα 2-37 V-d ισοδύναμης στατικής ανάλυσης και ανάλυσης με χρονοϊστορία για το κτίριο με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος. ....	53
Εικόνα 2-38 Φορέας από τοιχοποιία με κενό στην πλάκα σκυροδέματος στο μεσοπάτωμα.....	53
Εικόνα 2-39 V-d ισοδύναμης στατικής ανάλυσης και ανάλυσης με χρονοϊστορία για το κτίριο με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος. ....	54
Εικόνα 2-40 Αναλύσεις χρονοϊστορίας για EC8-0.12G, ΕΔΕΣΣΑ 0.12G και FRULLI .....	54
Εικόνα 2-41 Μετακινήσεις φορέα με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος.....	55
Εικόνα 3-1 Συμπεριφορά σύνδεσης καρφιού-σανίδας-δοκού[10].....	57

Εικόνα 3-2 Σύνδεση καρφίου-σανίδας-δοκού[10] .....	58
Εικόνα 3-3 Σχηματικές όψεις σύνδεσης καρφίου-σανίδας-δοκού[10].....	58
Εικόνα 3-4 Καρφιά πειραματικών δοκιμίων[10] .....	59
Εικόνα 3-5 Πειραματική διάταξη[10] .....	59
Εικόνα 3-6 Μορφή φόρτισης[10] .....	60
Εικόνα 3-7 Σχέση δύναμης-μετατόπισης σύνδεσης καρφίου(μέσες τιμές, μέγιστες/ελάχιστες)[10] .....	60
Εικόνα 3-8 Σχηματική κάτοψη ξύλινου πατώματος τύπου SBA-1- Εικόνα από τα πειράματα [10] .....	61
Εικόνα 3-9 Σχηματική κάτοψη ξύλινου πατώματος τύπου SBT-1[10] .....	62
Εικόνα 4-1 Clough model .....	64
Εικόνα 4-2 Bouc Wen model.....	64
Εικόνα 4-3 Takeda with slip .....	64
Εικόνα 4-4 Takeda διγραμμική με υποβάθμιση της δυσκαμψίας .....	65
Εικόνα 4-5 Διγραμμικό μοντέλο (bilinear).....	66
Εικόνα 4-6 Τριγραμμικό μοντέλο (Trilinear).....	67
Εικόνα 4-7 Προσανατολισμένο στο σημείο διαρροής (Yielded) .....	67
Εικόνα 4-8 Προσανατολισμένο στο μέγιστο σημείο (Vertex).....	67
Εικόνα 4-9 Πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο (PHM) .....	68
Εικόνα 4-10 Πιθανές διαδρομές κλάδων Α .....	79
Εικόνα 4-11 Πιθανές διαδρομές κλάδων Β .....	80
Εικόνα 4-12 Πιθανές διαδρομές κλάδων Γ .....	81
Εικόνα 4-13 Νόμος Park με σταθερό σημείο περιστροφής (pivot) .....	82
Εικόνα 4-14 Σχηματική απεικόνιση της υποβάθμιση της αντοχής .....	83
Εικόνα 4-15 Σχηματική απεικόνιση σημείου «στόχου» και ολίσθησης .....	84
Εικόνα 4-16 Ολίσθηση ( $\gamma=0.5$ ) .....	84
Εικόνα 4-17 Λογικό διάγραμμα έναρξης υπορουτίνας.....	86
Εικόνα 4-18 Λογικό διάγραμμα ελέγχου 1 (συνέχεια προηγούμενης σελίδας) .....	87
Εικόνα 4-19 Λογικό διάγραμμα ελέγχου 2 (συνέχεια προηγούμενης σελίδας) .....	88
Εικόνα 4-20 Λογικό διάγραμμα ελέγχου 3 (συνέχεια προηγούμενης σελίδας) .....	89
Εικόνα 4-21 Διγραμμικό μοντέλο (Bilinear).....	90
Εικόνα 4-22 Προσανατολισμένο ως προς τη διαρροή (yielded oriented) .....	90
Εικόνα 4-23 Προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο (vertex oriented).....	91
Εικόνα 4-24 Υποβάθμιση της δυσκαμψίας (stiffness degradation) .....	91
Εικόνα 4-25 Υποβάθμιση της αντοχής (strength degradation).....	92
Εικόνα 4-26 Ολίσθηση (slip or pinching) .....	92
Εικόνα 4-27 Επιλογή του επιθυμητού μοντέλου-ή συνδυασμού αυτών εάν είναι εφικτό.....	92
Εικόνα 4-28 Παράθυρο διαλόγου έναρξης της ρουτίνας.....	93
Εικόνα 4-29 Διγραμμικό μοντέλο από κώδικα Fortran .....	93

Εικόνα 4-30 Μοντέλο προσανατολισμένο ως προς τη διαρροή από το κώδικα Fortran .....	94
Εικόνα 4-31 Μοντέλο προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο σημείο από κώδικα Fortran .....	94
Εικόνα 4-32 Μοντέλο με απομείωση δυσκαμψίας.....	95
Εικόνα 4-33 Μοντέλο με απομείωση αντοχής.....	95
Εικόνα 4-34 Μοντέλο ολίσθησης ή «τσιμπήματος» από κώδικα Fortran .....	96
Εικόνα 5-1 Μοντέλο από κώδικα Fortran και αντίστοιχο πειρατικό διάγραμμα Wilson .....	97
Εικόνα 5-2 Αριθμητικό προσομοίωμα σύνδεσης καρφίου-δοκών .....	98
Εικόνα 5-3 Μορφή επιβολής μετακίνησης [10] .....	98
Εικόνα 5-4 Αποτελέσματα F-d από Abaqus και αντίστοιχο πειρατικό διάγραμμα Wilson .....	99
Εικόνα 5-5 Μορφή αριθμητικού προσομοιώματος SBA-1 (Abaqus) .....	99
Εικόνα 5-6 (α)Διάγραμμα Δύναμης-μετακίνησης πειραμάτων Wilson(μέσες-μέγιστες/ελάχιστες) (β)προσέγγιση τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα βασισμένες στις μέσες τιμές κατά Wilson.....	100
Εικόνα 5-7 Αποτελέσματα ανάλυσης σε μονοτονική φόρτιση(mean values) .....	100
Εικόνα 5-8 Αποτελέσματα ανάλυσης σε μονοτονική φόρτιση( upper values).....	101
Εικόνα 5-9 Προσέγγιση τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα βασισμένες στο ημι-άθροισμα των μέσων και μέγιστων τιμών κατά Wilson.....	101
Εικόνα 5-10 Αποτελέσματα ανάλυσης σε μονοτονική φόρτιση( (upper+mean)/2).102	
Εικόνα 5-11 Χρονοιστορία φόρτισης για το προσομοίωμα SBA-1 [10] .....	102
Εικόνα 5-12 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης για το πειραματικό μοντέλο SBA-1 [10].....	103
Εικόνα 5-13 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης για το πειραματικό μοντέλο SBA-1 και το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα στο Abaqus .....	104
Εικόνα 5-14 Αριθμητικό προσομοίωμα τύπου SBT-1 .....	105
Εικόνα 5-15 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης για το πειραματικό μοντέλο SBT-1 και το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα στο Abaqus(μονοτονική φόρτιση).....	105
Εικόνα 5-16 Παραμορφώσεις πειραμάτων και αριθμητικών προσομοιωμάτων SBA-1, SBT-1 .....	106
Εικόνα 5-17 Διάγραμμα F-d ξύλινου πατώματος τύπου SBT-1 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και αριθμητικού προσομοιώματος Abaqus.....	107





## Περίληψη

Σε συνέχεια της διπλωματικής εργασίας «ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ» μελετήθηκε στην παρούσα εργασία η συνεισφορά της διαφραγματικής λειτουργίας στη γενική συμπεριφορά ενός φορέα από τοιχοποιία. Αρχικά προστέθηκε στο αρχικό φορέα (χωρίς διάφραγμα) πλάκα σκυροδέματος ώστε να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της συνεισφοράς ενός σχετικά δύσκαμπτου διαφράγματος. Στη συνέχεια δόθηκε έμφαση στη σωστή προσομοίωση ενός ξύλινου πατώματος το οποίο συναντάται πιο συχνά σε κτίρια από τοιχοποιία. Βασιζόμενοι στα πειραματικά αποτελέσματα τόσο της μεμονωμένης σύνδεσης καρφί-δοκός-σανίδα όσο και ολοκληρωμένων ξύλινων πατωμάτων τα οποία έγιναν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Aaron Wilson έγινε μία λεπτομερής προσέγγιση της συμπεριφοράς αυτού του είδους διαφράγματος. Κύριο μέλημα ήταν η προσομοίωση της συμπεριφοράς της σύνδεσης αυτής σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση με στόχο να γίνει μία όσο το δυνατό αντιπροσωπευτικότερη με την πραγματικότητα ανάλυση της απόκρισης ενός ξύλινου πατώματος σε ενδεχόμενο σεισμό. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν τα διάφορα υστερητικά μοντέλα προσομοίωσης μη γραμμικής συμπεριφοράς τα οποία εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία. Επιλέχθηκε το πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο PHM. Στο μοντέλο αυτό γίνεται χρήση νόμων απομείωσης της αντοχής, της δυσκαμψίας αλλά και της χαρακτηριστικής «ολίσθησης» οι οποίες παρατηρούνται στη συμπεριφορά της υπό εξέταση σύνδεσης. Κατασκευάστηκε κώδικας σε γλώσσα Fortran ο οποίος τροποποιήθηκε ανάλογα ώστε να συνεργάζεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αναλύθηκαν με τη χρήση της παραπάνω υπορουτίνας η σύνδεση καρφί-δοκός-σανίδα και ελέγχθησαν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά του Wilson. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν αντίστοιχα αριθμητικά προσομοιώματα ξύλινων πατωμάτων τα οποία έλεγξε πειραματικά ο Wilson σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στα προσομοιώματα αυτά προσαρμόστηκε η παραπάνω υπορουτίνα ώστε να γίνει ο έλεγχος με τα πειραματικά αποτελέσματα.



# 1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ

## 1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μέχρι την εμφάνιση και τη χρήση του χάλυβα περίπου στα μέσα του 19ου αιώνα και του σκυροδέματος στις αρχές του 20ου αιώνα η τοιχοποιία αποτελούσε το μοναδικό ως τότε δομικό υλικό για την κατασκευή όλων των έργων σε όλο τον κόσμο. Εξαιρέση αποτελούσαν κάποιες περιοχές όπου χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για την κατασκευή κτιρίων το ξύλο.

Σε χώρες με παράδοση στη χρήση της φέρουσας τοιχοποιίας και όπου δεν υπάρχει έντονη σεισμικότητα όπως η Μ.Βρετανία εξακολουθούν ακόμη και σήμερα να κατασκευάζουν νέα κτίρια μέχρι και τεσσάρων (4) ορόφων με τη χρήση φέρουσας τοιχοποιίας.

Τα βασικά συστατικά της είναι οι πλίνθοι και το συνδετικό κονίαμα. Οι πλίνθοι μπορεί να είναι τεχνητές ή τεμάχια φυσικών λίθων. Το κονίαμα παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία συνθέσεων και αντοχών αλλά μπορεί και να απουσιάζει εντελώς (ξηρολιθοδομές). Ένας επί πλέον παράγοντας πολυμορφίας είναι και ο τύπος δόμησης (πλέξη) της τοιχοποιίας.

Διεθνώς τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον για τη συντήρηση και ανάδειξη της οικιστικής πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσα σε αυτό το παγκόσμιο ρεύμα δόθηκε έμφαση στην έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των μνημείων και διατηρητέων κτιρίων και συνόλων είναι κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία. Ταυτόχρονα με την προσπάθεια αυτή αναδείχθηκαν και τα ξεχασμένα μέχρι πρότινος πλεονεκτήματα που παρέχει η τοιχοποιία στις κατασκευές όπως η θερμομόνωση και η πυρασφάλεια αλλά και η αντοχή στο χρόνο σε συνδυασμό με το καλαίσθητο αποτέλεσμα. Δυσκολίες όμως σε αυτό το εγχείρημα υπάρχουν πολλές μιας και η πολυμορφία και πολυτυπία του ίδιου του υλικού δεν βοηθά στην προώθηση της έρευνας της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας με αποτέλεσμα τη μεγάλη δυσκολία προτυποποίησης υλικών και μεθόδων.

Η τοιχοποιία έχει σχετικά χαμηλές αντοχές και εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη αύξησης των διατομών και του κόστους του φέροντα οργανισμού και περιορίζει τον αριθμό των ορόφων ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα. Είναι ένα υλικό πολυφασικό, πολύμορφο και "απείθαρχο". Πολλές χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, σχετικά πρόσφατα απέκτησαν κανονισμό για κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρατηρείται ανομοιομορφία μεταξύ των διάφορων μεθόδων, ποικιλία ορισμών και σημαντική διασπορά τιμών μεταξύ των διάφορων κανονισμών. Είναι χαρακτηριστικό ότι το πρώτο κείμενο Ευρωκώδικα για κατασκευές από τοιχοποιία [Ευρωκώδικας 6] κυκλοφόρησε μόλις το 1989.

Γενικά, κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία είτε βρίσκονται στον Ελλαδικό χώρο ή σε κάποιο άλλο μέρος παρουσιάζουν υψηλή τρωτότητα σε κάθε μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους σεισμό. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας όπως:

- Η ψαθυρότητα της άοπλης τοιχοποιίας.
- Η ανεπαρκής διαφραγματική λειτουργία πατωμάτων και στεγών.

- Η ανεπαρκής σύνδεση οριζόντιων και κατακόρυφων στοιχείων του φέροντα οργανισμού.
- Η παντελής απουσία ή η μη τήρηση της μελέτης όταν αυτή υπάρχει.
- Οι κάθε είδους κακοτεχνίες.
- Οι κατά καιρούς επεμβάσεις τροποποιήσεις και προσθήκες.
- Η κακή συντήρηση και η γήρανση των υλικών.

## 1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας «ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ» μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ιδιομορφικής ανελαστικής στατικής ανάλυσης. Κύριος σκοπός ήταν να ελεγχθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής είναι ακριβή και αξιόπιστα. Δοκιμάστηκαν διάφορες κατανομές φόρτισης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την ανάλυση με χρονοιστορία.

Η ανελαστική στατική μέθοδος αποτελεί ένα διαδομένο εργαλείο για την εκτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς ενός φορέα και τον προσδιορισμό των «αδύναμων» σημείων της κατασκευής (Krawinkler&Seneviratna, 1998), (Isakovicetal., 2003). Βασικός περιορισμός της μεθόδου είναι ότι επιλέγεται η θεμελιώδης ιδιομορφή της κατασκευής ως κυρίαρχη στη συνολική απόκρισή της.

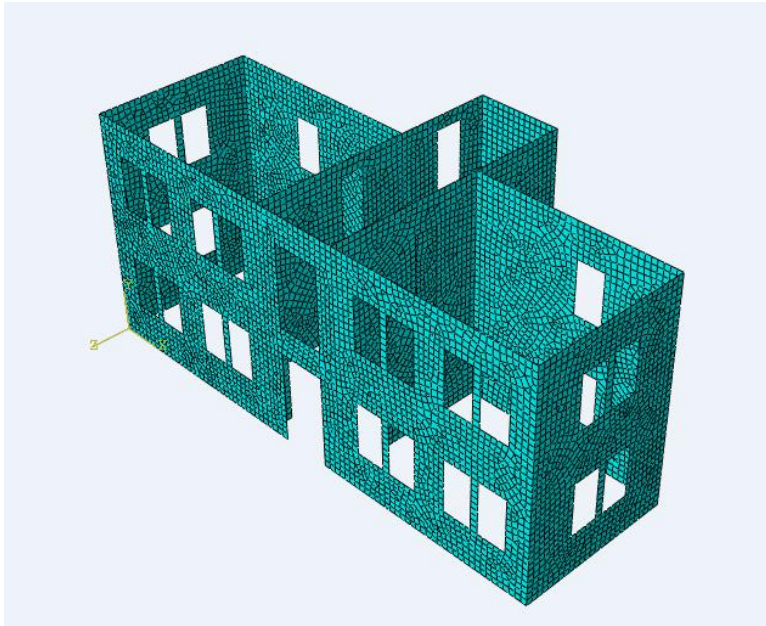
Για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια στα επίπεδα εκείνα της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, έγινε προσπάθεια επέκταση της «κλασικής» ανελαστικής στατικής ανάλυσης ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών στην τελική απόκριση του φορέα. Στην εργασία αυτή θα χαραχθούν οι ανεξάρτητες καμπύλες αντίστασης για κάθε ιδιομορφική φόρτιση και τα τελικά μεγέθη απόκρισης θα υπολογιστούν μέσω κατάλληλου συνδυαστικού κανόνα επαλληλίας[6,7].

Η βελτίωση των ανελαστικών στατικών μεθόδων αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στόχο γιατί είναι ευκολότερες στην εφαρμογή από τις ανελαστικές αναλύσεις της χρονοϊστορίας (time-history), μιας και δεν απαιτούν επιλογή κατάλληλων ομάδων επιταχυνσιο-γραφημάτων, ορισμό υστερητικών κανόνων κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, κλπ. Επίσης ο χρόνος που απαιτείται για την διεξαγωγή των στατικών αναλύσεων είναι αισθητά μικρότερος από ότι για τις αναλύσεις χρονοϊστορίας.

Στη συνέχεια θα γίνει μία σύντομη περιγραφή του φορέα που μελετήθηκε και που θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία.

## 1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ

Ο φορέας είναι μία κατοικία από τοιχοποιία διαστάσεων 20.93m x 6.60m x 9.45m, η μορφή του οποίου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1-1 Φορέας από τοιχοποιία

Τα χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας όπως αυτά ορίστηκαν στο πρόγραμμα είναι τα εξής:

Πυκνότητα τοιχοποιίας: 1.9Mgr

Μέτρο ελαστικότητας: 1GPa

Λόγος Poisson: 0.3

Το πάχος της τοιχοποιίας θεωρήθηκε ομοιόμορφο και ίσο με 0.5m.

Η διακριτοποίηση του φορέα έγινε ενιαία και ίση με 0.25m.

#### 1.4 ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΒΗΜΑ 1<sup>ο</sup>: Υπολογίζονται οι φυσικές ιδιοπερίοδοι  $T_n$  και οι ιδιομορφές  $\varphi_n$  για τη γραμμική ελαστική μετακίνηση του κτιρίου. Θα πρέπει να ληφθεί το 90% της μάζας που συμμετέχει.

ΒΗΜΑ 2<sup>ο</sup>: Η επιλογή ενός κατάλληλου σημείου ελέγχου (monitoring point) είναι πολύ βασικό και άξιο προσεκτικής μελέτης. Στα πλαίσιακά κτίρια λαμβάνεται πάντα στην οροφή του κτιρίου. Σε μία κατασκευή όμως όπως η παρούσα όπου η μάζα δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκεντρώνεται στο επίπεδο κάθε ορόφου θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος όσο το δυνατόν αξιόπιστος για το καθορισμό του σημείου ελέγχου. Θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος ο οποίος προτάθηκε από τον κ.Α.Κάππο για τον προσδιορισμό του σημείου ελέγχου σε μία γέφυρα[7].

$$x_n^* = \frac{\sum_{j=1}^N x_j m_j \varphi_{jn}}{\sum_{j=1}^N m_j \varphi_{jn}} \quad (1.3.1)$$

ΒΗΜΑ 3<sup>ο</sup>: Θα εφαρμοστούν στον φορέα ανεξάρτητες ανελαστικές αναλύσεις για κάθε σημαντική ιδιομορφή. Το διάνυσμα της επιβαλλόμενης μετακίνησης θα εκτιμηθεί από τις ελαστικές ιδιομορφικές μετακινήσεις για κάθε περίπτωση που εξετάζεται από τη σχέση 5.3.2.

$$s_n^* = \varphi_n \quad (1.3.2)$$

Όπου

$m$  είναι το μητρώο της μάζας του φορέα

$\varphi_n$  είναι το μητρώο των ιδιομορφικών μετακινήσεων που αντιστοιχεί στη  $n$ -στή ιδιομορφή.

ΒΗΜΑ 4<sup>ο</sup>: Σχεδιασμός ιδιομορφικών καμπύλων αντίστασης της κατασκευής σε όρους τέμνουσας βάσης προς τη μετακίνηση του σημείου ελέγχου που υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση στο προηγούμενο βήμα. Η μορφή της καμπύλης δίνει μία πρώτη εικόνα της απόκρισης του φορέα.

ΒΗΜΑ 5<sup>ο</sup>: Γίνεται μετατροπή των καμπύλων αντίστασης του φορέα σε διγραμμικοποιημένες καμπύλες για τον προσδιορισμό των συμβατικών ορίων αστοχίας του φορέα.

ΒΗΜΑ 6<sup>ο</sup>: Οι διγραμμικές καμπύλες αντίστασης σε όρους  $V_b - u_{cn}$  μετατρέπονται σε καμπύλες αντίστασης του Ισοδύναμου Μονοβάθμιου Συστήματος σε όρους  $S_a - S_d$  μέσω των σχέσεων (1.3.3) και (1.3.4) για να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της στοχευμένης μετακίνησης για μια συγκεκριμένη στάθμη σεισμικής διέγερσης.

$$S_a = \frac{V_{bn}}{M_n^*} \quad (1.3.3)$$

$$S_d = \frac{u_{cn}}{\Gamma_n \varphi_{cn}} \quad (1.3.4)$$

Όπου

$\varphi_{cn}$  είναι η τιμή της  $\varphi_n$  στο σημείο ελέγχου  $c$ .

$M_n^* = L_n \Gamma_n$  είναι η δρώσα ιδιομορφική μάζα

$$L_n = \varphi_n^T * m * 1$$

$$\Gamma_n = L_n / M_n$$

$M_n = \varphi_n^T m \varphi_n$  είναι η γενικευμένη μάζα στη  $n$ -στή ιδιομορφή.

ΒΗΜΑ 7<sup>ο</sup>: Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης για κάθε σημαντική ιδιομορφή η οποία θα αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα με ιδιοπερίοδο ίση με την περίοδο της αντίστοιχης ιδιομορφής του φορέα.

Η αναγωγή της στοχευόμενης μετακίνησης της  $n$ -στης ιδιομορφής που αναφέρεται στη μετακίνηση ενός Ισοδύναμου Μονοβάθμιου Συστήματος, σε στοχευόμενη μετακίνηση ενός σημείου ελέγχου του πραγματικού φορέα γίνεται με τη σχέση (5.3.5)[13].

$$u_{cn} = S_{dn} \Gamma_n \varphi_{cn} \quad (1.3.5)$$

$S_{dn}$  είναι η στοχευμένη μετακίνηση του Ισοδύναμου Μονοβάθμιου Συστήματος.

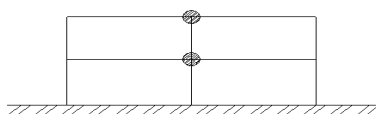
**ΒΗΜΑ 7ο :** Για κάθε ανεξάρτητη ανελαστική στατική ανάλυση, υπολογίζονται τα μεγέθη απόκρισης στο σημείο ελέγχου του φορέα το οποίο φθάνει την τιμή της αντίστοιχης στοχευόμενης μετακίνησης  $u_{cn}$ .

Τα τελικά μεγέθη απόκρισης για τη ζητούμενη κάθε φορά σεισμική διέγερση υπολογίζονται με επαλληλία των ιδιομορφικών μεγεθών με κατάλληλο συνδυαστικό (στατιστικό) κανόνα (π.χ. με τον κανόνα απλής τετραγωνικής επαλληλίας (SRSS) ή με τον κανόνα της πλήρους τετραγωνικής επαλληλίας (CQC))[7].

#### ➤ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της παραπάνω ανάλυσης είναι η εύρεση του σημείου ελέγχου.

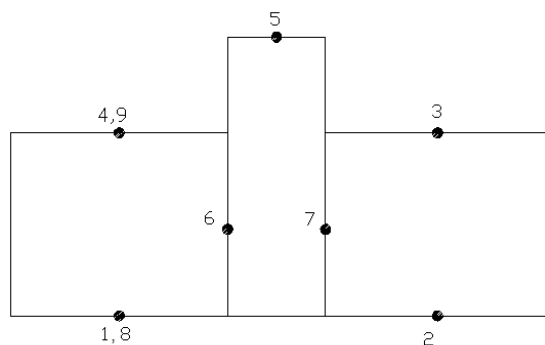
Αρχικά γίνεται η παραδοχή της κατανομής της μάζας στους ορόφους.



Εικόνα 1-2 Κατανομή μάζας στους ορόφους του κτιρίου

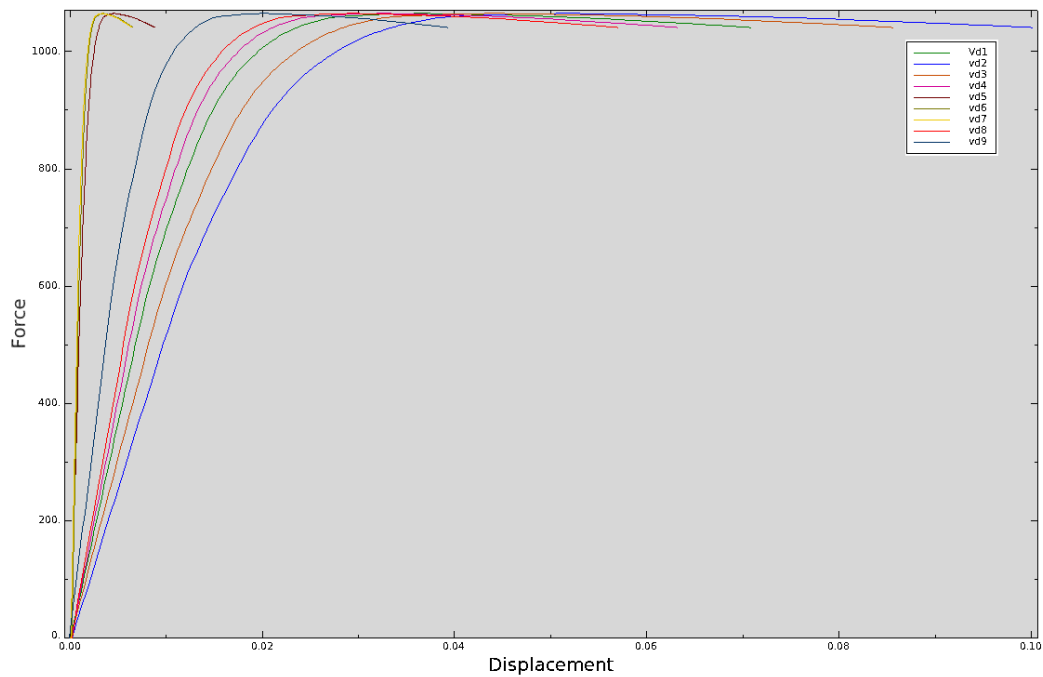
Για την επιλογή του κατάλληλου σημείου ελέγχου επιβλήθηκαν ιδιομορφικές μετακινήσεις στο φορέα και κατασκευάστηκε για κάθε περίπτωση το διάγραμμα  $V$ (τέμνουσα βάσης)-μετακίνηση σημείου ελέγχου.

Ως σημεία ελέγχου επιλέχθηκαν τα παρακάτω:



Εικόνα 1-3 Σημεία ελέγχου

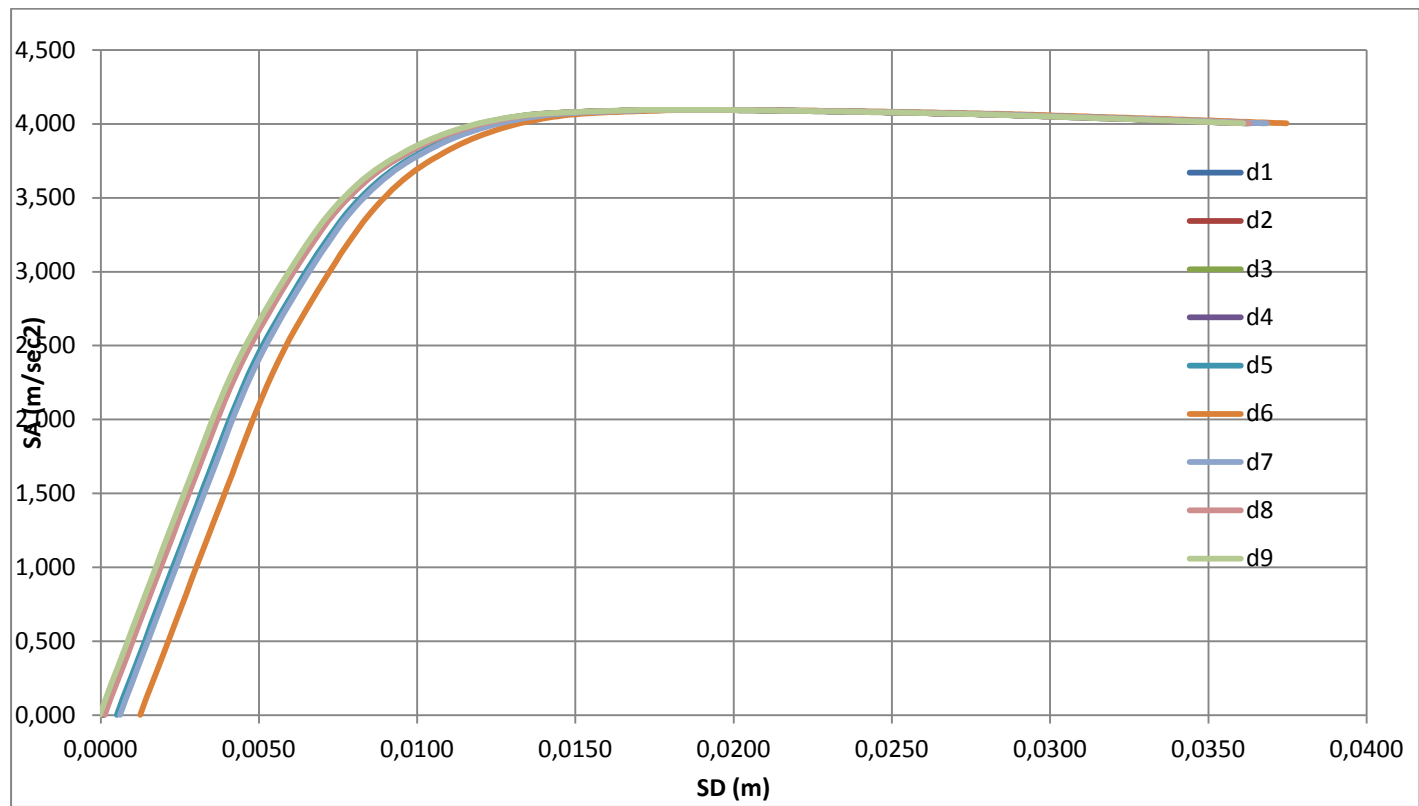
Τα σημεία 1-5 είναι στην κορυφή του κτιρίου(9.45m), τα σημεία 6 (monitoring point),7 είναι στη στάθμη 6.40m και 8,9 είναι στη στάθμη του ορόφου (4.90m).



Εικόνα 1-4 Διαγράμματα V(KN)-D(m)

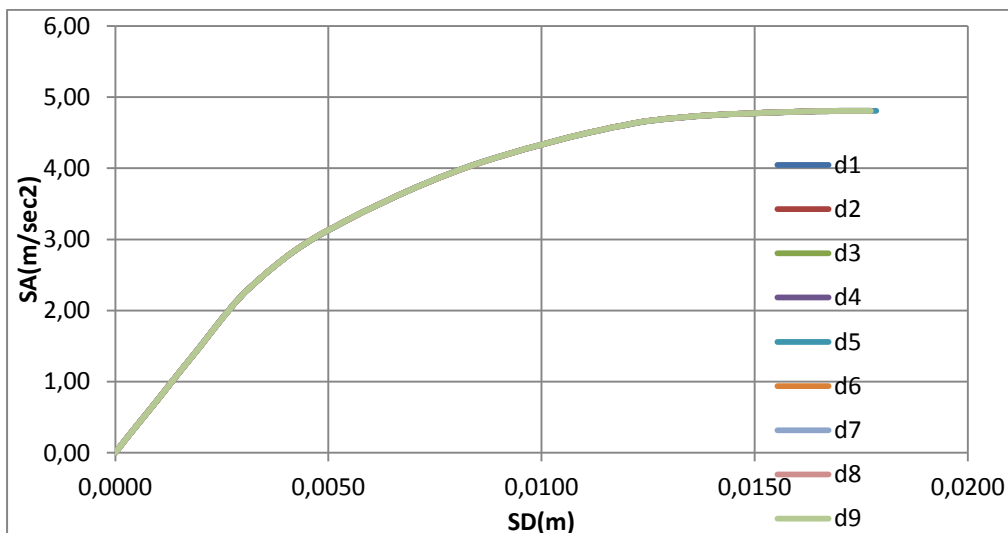
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα SA-SD με χρήση των τύπων που δόθηκαν παραπάνω.





Εικόνα 1-5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ V-d για διάφορα σημεία ελέγχου

Αφαιρώντας από την απόκριση του φορέα τη συμμετοχή των φορτίων βαρύτητας προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα στο οποίο όλες οι καμπύλες συμπίπτουν.



Εικόνα 1-6 Τροποποιημένα διαγράμματα SA/SD

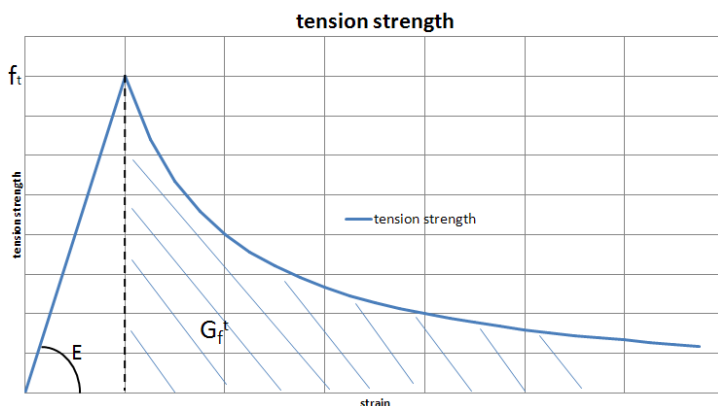
Συνεπώς στην ανάλυση Pushover δεν επηρεάζει σημαντικά η επιλογή του σημείου ελέγχου.

➤ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ V-D ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ

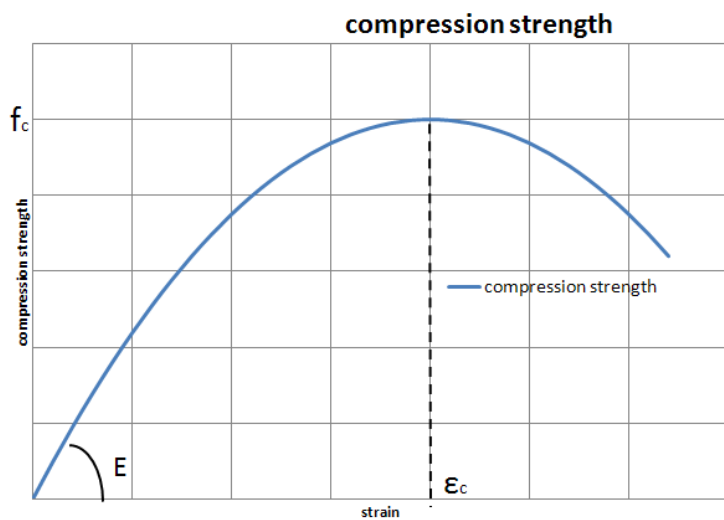
Για την εφαρμογή της pushover επιλέχθηκε η 1<sup>η</sup> κύρια ιδιομορφή κατά x. Στη συνέχεια επιβλήθηκαν οι ιδιομορφικές μετακινήσεις στους αντίστοιχους κόμβους του προσομιώματος του φορέα.

Για την περιγραφή των υλικών αλλά και την απομείωση των αντοχών της τοιχοποιίας κατά τη διάρκεια της ανάλυσης λόγω των επερχόμενων ρηγματώσεων χρησιμοποιήθηκε υπορουτίνα που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο αντισεισμικής τεχνολογίας ΕΜΠ.

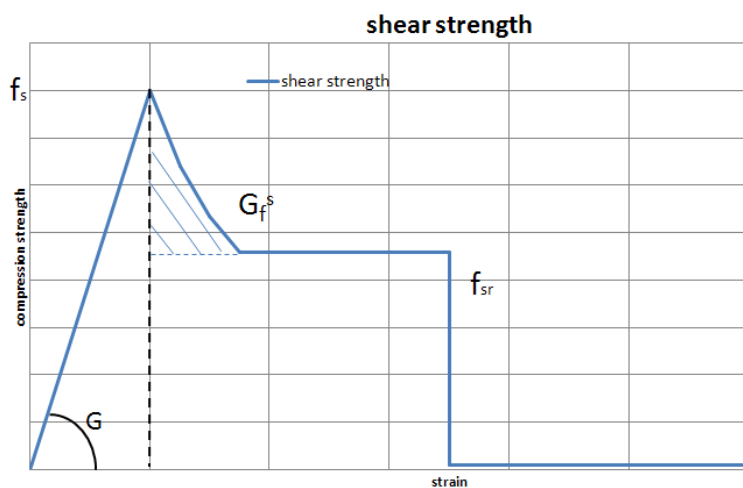
Τα διαγράμματα της εφελκυστικής, θλιπτικής και διατμητικής αντοχής με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην υπορουτίνα δίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 1-7 Διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής υλικού

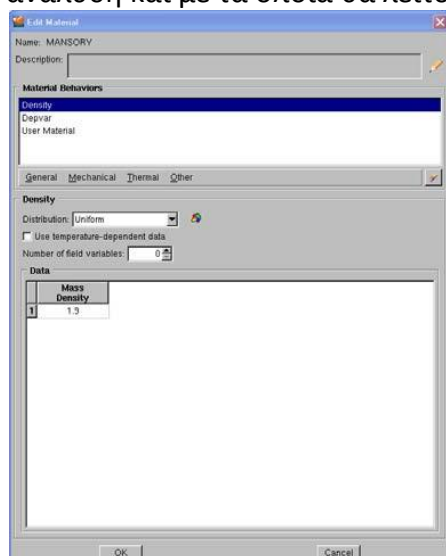


Εικόνα 1-8 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής υλικού



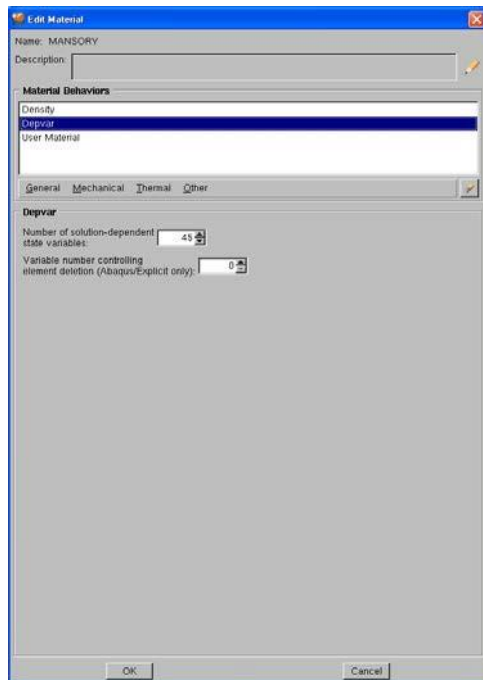
Εικόνα 1-9 Διάγραμμα διατμητικής αντοχής υλικού

Ορίζουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού με βάση τα οποία θα γίνει η ανελαστική ανάλυση και με τα οποία θα λειτουργήσει η υπορουτίνα.



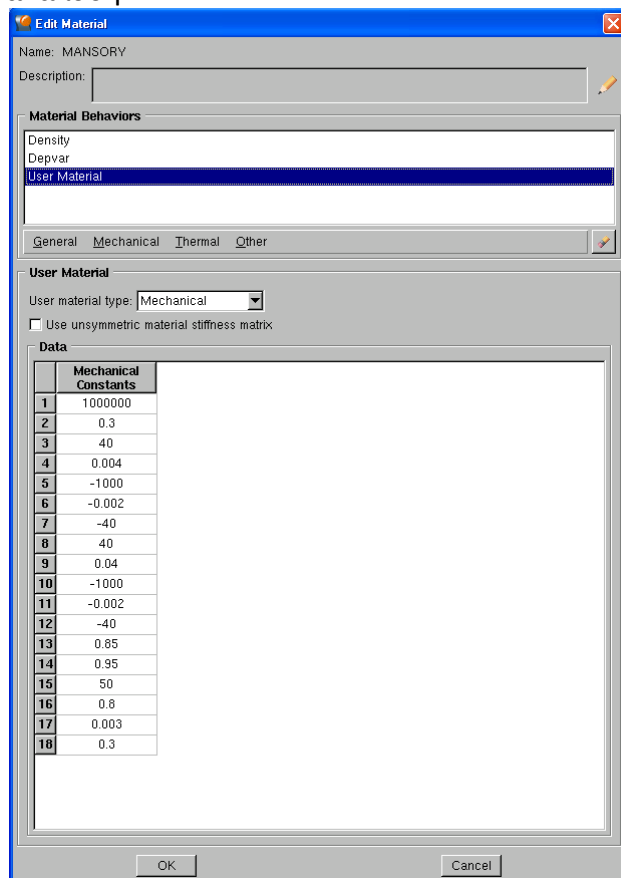
Εικόνα 1-10 Πυκνότητα τοιχοποιίας

Ορίζονται οι 45 εξαρτημένες μεταβλητές που χρησιμοποιεί η υπορουτίνα.



Εικόνα 1-11 Μεταβλητές υπορουτίνας

Τέλος δίνονται τα χαρακτηριστικά του υλικού στα οποία βασίζεται η ανελαστική ανάλυση.



Εικόνα 1-12 Χαρακτηριστικά υλικού για την υπορουτίνα

Μέτρο ελαστικότητας :1GPa

Λόγος Poisson:0.3

Για την διεύθυνση 1 οι παράμετροι της εφελκυστικής αντοχής είναι:

$f_{t01}=40\text{kPa}$

$G_{t1} =0.004$

Για την διεύθυνση 1 οι παράμετροι της θλιπτικής αντοχής είναι:

$f_{cp1}=-1\text{MPa}$

$e_{cp1}=-0.002$

Η θλιπτική τάση στην οποία κλείνει η ρωγμή κατά τη διεύθυνση 1

$f_{pivot1}=-40\text{kPa}$

Για την διεύθυνση 2 οι παράμετροι της εφελκυστικής αντοχής είναι:

$f_{t02}=40\text{kPa}$

$G_{t2} =0.04$

Για την διεύθυνση 1 οι παράμετροι της θλιπτικής αντοχής είναι:

$f_{cp2}=-1\text{MPa}$

$e_{cp2}=-0.002$

Η θλιπτική τάση στην οποία κλείνει η ρωγμή κατά τη διεύθυνση 2

$f_{pivot2}=-40\text{kPa}$

Παράμετροι αποφόρτισης

$a_t=0.85$

$a_c=0.95$

Διατμητική τάση διαρροής

$f_{s0}=50\text{kPa}$

$a_s=0.8$

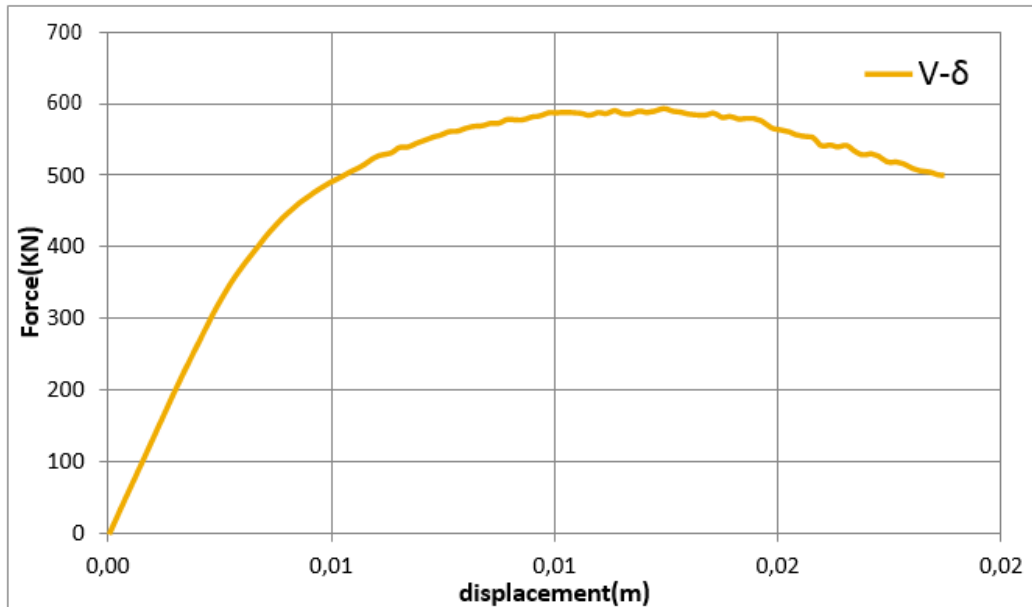
$G_s=0.003$

$c_{sr}=0.3$

Στη συνέχεια, στο πρώτο βήμα της ανάλυσης θα επιβληθούν τα κατακόρυφα φορτία – ίδιο βάρος του φορέα. Τέλος, στο επόμενο βήμα γίνεται η επιβολή των ιδιομορφικών μετακινήσεων σε κάθε κόμβο του φορέα.

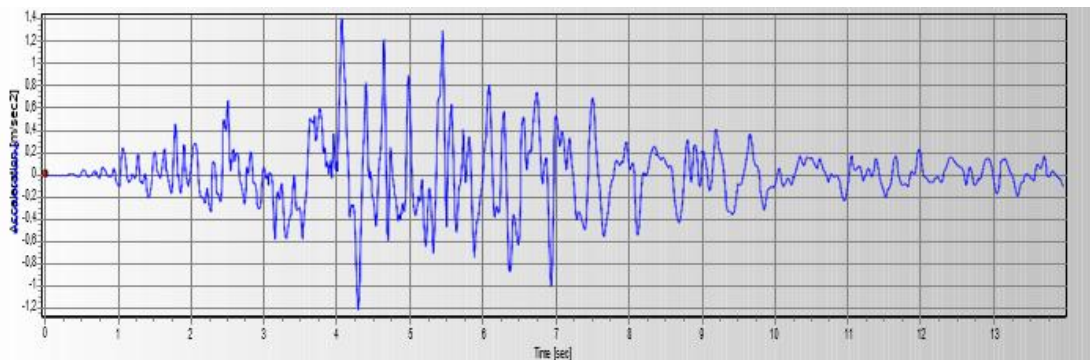
#### ➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Επιλύοντας τον φορέα με βάση τα παραπάνω βήματα προέκυψε το διάγραμμα της τέμνουσας βάσης –μετακίνησης σημείου ελέγχου το οποίο δίνεται στην εικόνα 1.13.



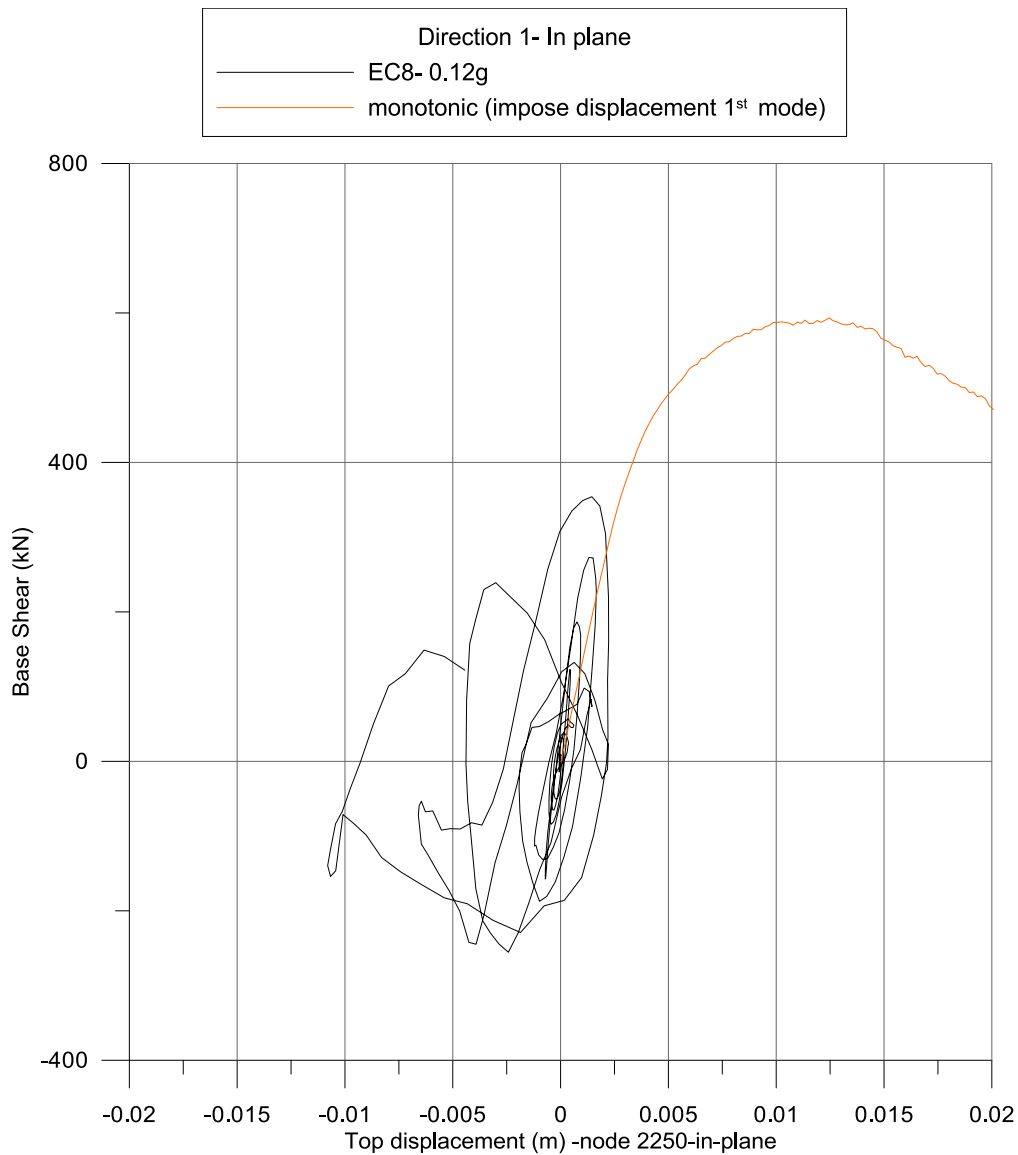
Εικόνα 1-13 Διάγραμμα V-d (Τέμνουσα Βάσης - Μετακίνηση σημείου ελέγχου)

Για την αξιολόγηση της μεθόδου η οποία περιεγράφηκε παραπάνω κρίθηκε αναγκαίο να συγκριθούν τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από την στατική ανελαστική ανάλυση (1<sup>η</sup> ιδιομορφή) με εκείνα τα οποία θα προκύψουν από την ανάλυση του φορέα με χρονοϊστορία η οποία δίδεται στην εικόνα 1.14.



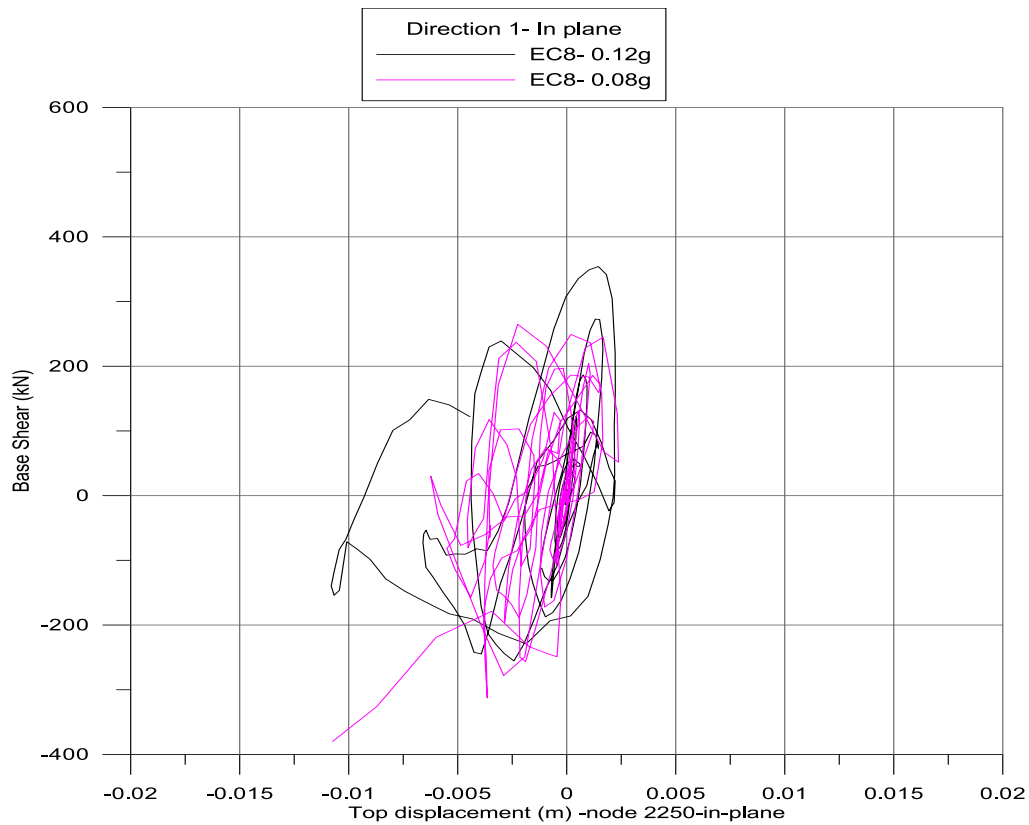
Εικόνα 1-14 Χρονοϊστορία

Για την σύγκριση δίνεται το παρακάτω διάγραμμα της V-d (Τέμνουσα -Μετακίνηση) για την ανάλυση με χρονοϊστορία και τη στατική ανελαστική ιδιομορφική ανάλυση.

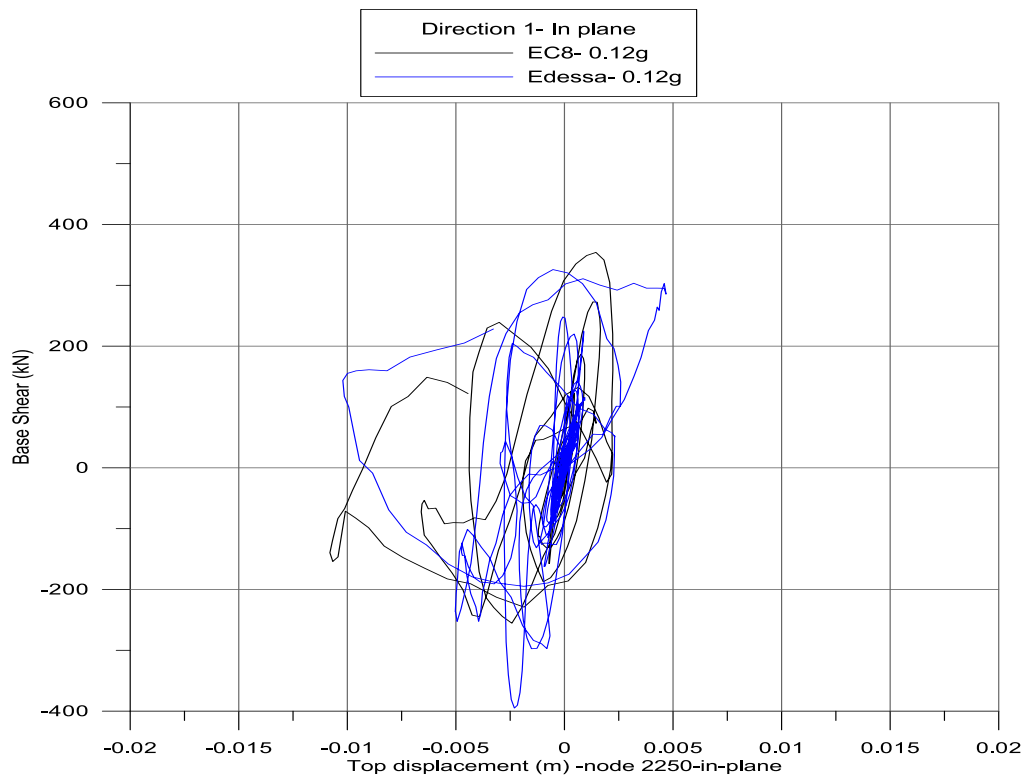


Εικόνα 1-15 Διάγραμμα V-d με στατική ανάλυση / με ανάλυση χρονοϊστορίας

Είναι εμφανές ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στην μέγιστη τέμνουσα αντοχής μεταξύ των δύο αναλύσεων καθώς και στην κλίση των ελαστικών τους κλάδων. Για να αποκλειστεί η περίπτωση ότι οι παραπάνω διαφορές οφείλονται στην επιλογή του σεισμού έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων από αναλύσεις με χρονοϊστορία για διάφορους σεισμούς.



Εικόνα 1-16 Αναλύσεις χρονοϊστορίας για EC8 -0.12G και 0.08G



Εικόνα 1-17 Αναλύσεις χρονοϊστορίας για EC8-0.12G και ΕΔΕΣΣΑ 0.12G

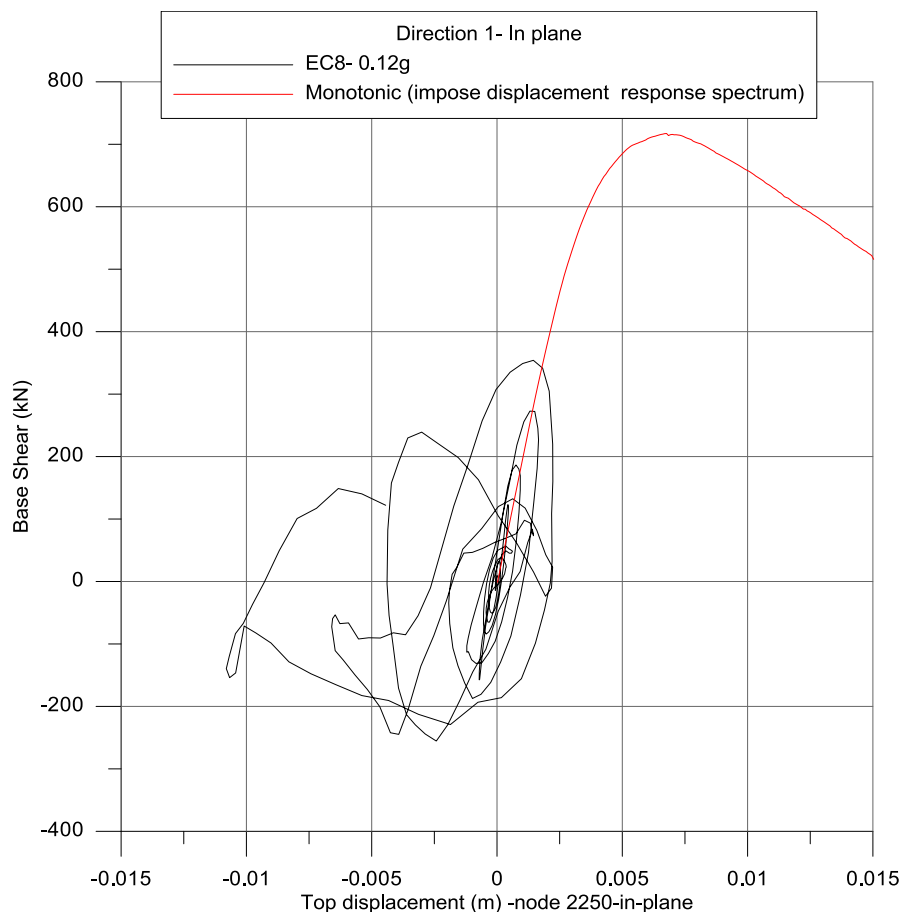
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι είναι σχετικά μικρές οι διαφορές τους και δεν μεταβάλλεται αισθητά η μέγιστη τέμνουσα βάσης.



Καταλήξαμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η επιβολή των μετακινήσεων από την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή στη στατική ανελαστική ανάλυση δεν προσεγγίζει την πραγματική. Αυτό οφείλεται στο ότι το ποσοστό της συμμετέχουσας μάζας της πρώτης ιδιομορφής δεν είναι αρκετά μεγάλο και απέχει από το 90% της ενεργής μάζας του κτιρίου. Για το λόγο αυτό έγινε η αναζήτηση μιας καταλληλότερης κατανομής φορτίου το οποίο θα λαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό συμμετέχουσας μάζας.

Στη συνέχεια έγινε φασματική ανάλυση με ελαστικό φάσμα σεισμού 0.12g για να προσεγγιστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η βασική χρονοϊστορία που χρησιμοποιείται στις αναλύσεις. Οι μετακινήσεις που προέκυψαν επιβλήθηκαν στην στατική ανελαστική ανάλυση.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνεται η V-d για την ανάλυση με χρονοϊστορία και για την στατική ανελαστική ανάλυση.



Εικόνα 1-18 Διαγράμματα V-D στατική ανελαστική ανάλυση με φασματικές μετακινήσεις / με ανάλυση χρονοϊστορίας

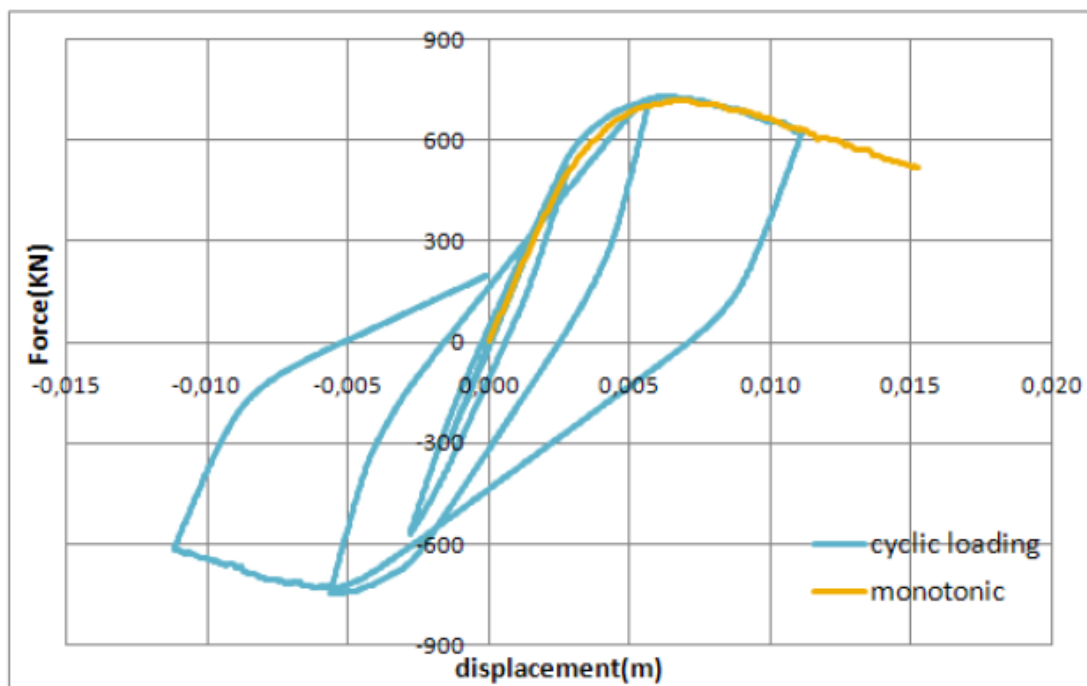
Παρατηρείται ότι υπάρχει ταύτιση του ελαστικού κλάδου των δύο αναλύσεων όμως ακόμα υπάρχει σημαντική διαφορά στην μέγιστη τέμνουσα βάσης.

Στη στατική ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλιση που υπάρχει στην χρονοϊστορία κάτι που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα καθώς ο φορέας

μετακινείται μονοτονικά προς τη μία μόνο κατεύθυνση.

Για να διαπιστωθεί η επιρροή της ανακύκλισης στην μη προσέγγιση των αποτελεσμάτων των δύο αναλύσεων προτείνεται η ανακυκλιζόμενη επιβολή των μετακινήσεων. Επιλέχθηκε αρχικά ένας αργός ρυθμός επιβολής και στην συνέχεια ένας πιο γρήγορος για να ληφθεί υπόψη η επιρροή των αδρανειακών δυνάμεων.

Το διάγραμμα που προέκυψε με την επιβολή του αργού ρυθμού δίνεται στην εικόνα 1.19. Παρόμοια μορφή έχει και το διάγραμμα που αντιστοιχεί στον γρήγορο ρυθμό



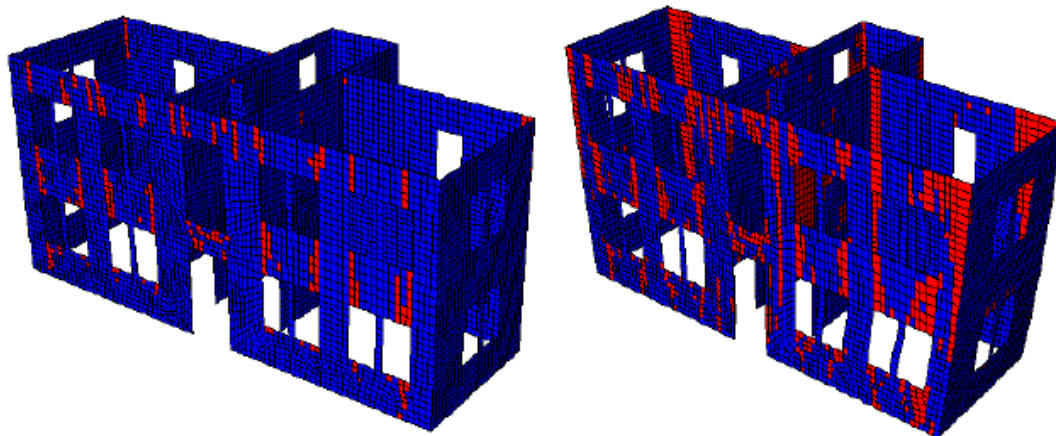
Εικόνα 1-19 Διαγράμματα V-D με στατική ανάλυση με φασματικές μετακινήσεις για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση (αργός ρυθμός)

Παρατηρείται λοιπόν παρόλο που συμπεριλήφθηκε η ανακύκλιση στην επιβολή των μετακινήσεων δεν παρατηρείται κάποια διαφορά στα διαγράμματα της τέμνουσας βάσης με την μετακίνηση του σημείου ελέγχου.

Στην συνέχεια δοκιμάστηκε η επιβολή ομοιόμορφης μετακίνησης στο φορέα. Η ανάλυση έδωσε μεγαλύτερη τέμνουσα βάσης και η κλίση της καμπύλης είναι μεγαλύτερη. Συνεπώς δεν βελτιώθηκαν τα αποτελέσματα και δεν προσεγγίστηκε ικανοποιητικά η καμπύλη της ανάλυσης με χρονοϊστορία.

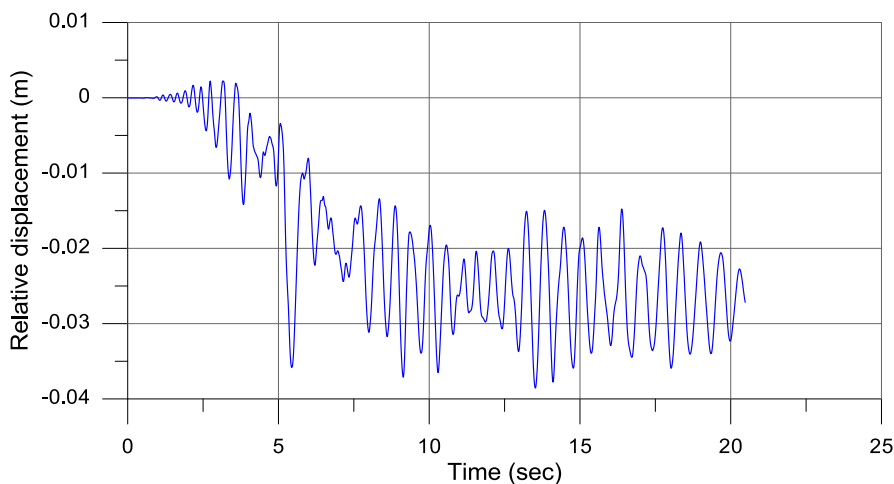
Μετά τις πολλαπλές αναλύσεις καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο αναλύσεων (ανελαστική στατική και ανελαστική με χρονοϊστορία) οφείλονται στον τρόπο φόρτισης που επιλέγεται να ακολουθηθεί στην στατική ανελαστική ανάλυση.

Η τοιχοποιία ρηγματώνεται κατά την επιβολή της φόρτισης με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι ιδιομορφές της κάτι που δεν μπορεί να προβλεφθεί ώστε να γίνει η ανάλογη μεταβολή της κατανομής των επιβαλλόμενων μετακινήσεων κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Σε αυτό το συμπέρασμα καταλήγουμε από το γεγονός ότι κατά την ανελαστική ανάλυση με χρονοϊστορία, μετά τη μέγιστη τέμνουσα βάσης οι ρηγματώσεις στις γωνίες των ακραίων τοίχων είναι τόσο έντονες ώστε να οδηγούν στην ταλάντωση των τοίχων αυτών ως μεμονωμένοι και ανεξάρτητοι πρόβολοι.



Εικόνα 1-20 Έντονες ρηγματώσεις πριν και μετά τη μέγιστη τέμνουσα

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε βλέποντας τη σχετική μετακίνηση του σημείου ελέγχου όπου υπάρχει μία αισθητή πτώση της σχετικής μετακίνησης τη χρονική στιγμή της ρηγμάτωσης (εικόνα 1.21).



Εικόνα 1-21 Σχετική μετακίνηση σημείου ελέγχου

Ολοκληρώνοντας την προπτυχιακή διπλωματική εργασία καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι είναι πολύ σημαντική η επιρροή της διαφραγματικής λειτουργίας στην συμπεριφορά του φορέα η οποία συμβάλει καταλυτικά στην αποφυγή των ρηγματώσεων στις γωνίες του κτιρίου και να υπάρχει μία ομοιόμορφη κίνηση των μελών του φορέα. Έτσι θα αποφεύγονταν οι μεμονωμένες ταλαντώσεις των τοίχων και ίσως με αυτό τον τρόπο να υπήρχε μία καλύτερη προσέγγιση των διαγραμμάτων V-δ της ανελαστικής στατικής ανάλυσης και της ιστορίας.

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει μία προσπάθεια προσομοίωσης του διαφράγματος ώστε να εξεταστεί κατά πόσο το παραπάνω συμπέρασμα ευσταθεί.



## 2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί στην ορθότερη δυνατή αριθμητική προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας ενός ξύλινου πατώματος. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε μέσα από την βιβλιογραφία το προσομοίωμα το οποίο προτάθηκε στη διδακτορική διατριβή «SEISMIC ASSESSMENT OF TIMBER FLOOR DIAPHRAGMS IN UNREINFORCED MANSORY BUILDING-AARON W.WILSON». Στην προαναφερθείσα διατριβή έχουν παρουσιαστεί πειράματα που αφορούν την σύνδεση μεταξύ ξύλινης δοκού με ξύλινο πάτωμα μέσω μεταλλικού καρφιού. Επίσης συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από αριθμητικό προσομοίωμα το οποίο προτάθηκε κατά Wilson στο Sap 2000.

Το προσομοίωμα αυτό μεταφέρθηκε όσο πιο πιστά γίνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα του Wilson αλλά και με εκείνα που προήλθαν από το SAP2000 τα οποία παραχωρήθηκαν από την διπλωματική εργασία της «Δασκαλάκη Έρνας-Βαρβάρας». Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά το προσομοίωμα Wilson και δίνεται το τελικό συγκριτικό διάγραμμα.

Το προσομοίωμα αυτό θα μεταφερθεί στο φορέα από τοιχοποιία ο οποίος παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο ώστε να εντοπιστούν οι τυχόν διαφορές με το φορέα χωρίς διάφραγμα αλλά και με άλλου είδους διαφράγματα. Η σύγκριση αρχικά θα επικεντρωθεί στις ιδιομορφές και στις συμμετέχουσες μάζες. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης θα δοθούν στο τέλος του κεφαλαίου.

### 2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ WILSON

#### Wilson

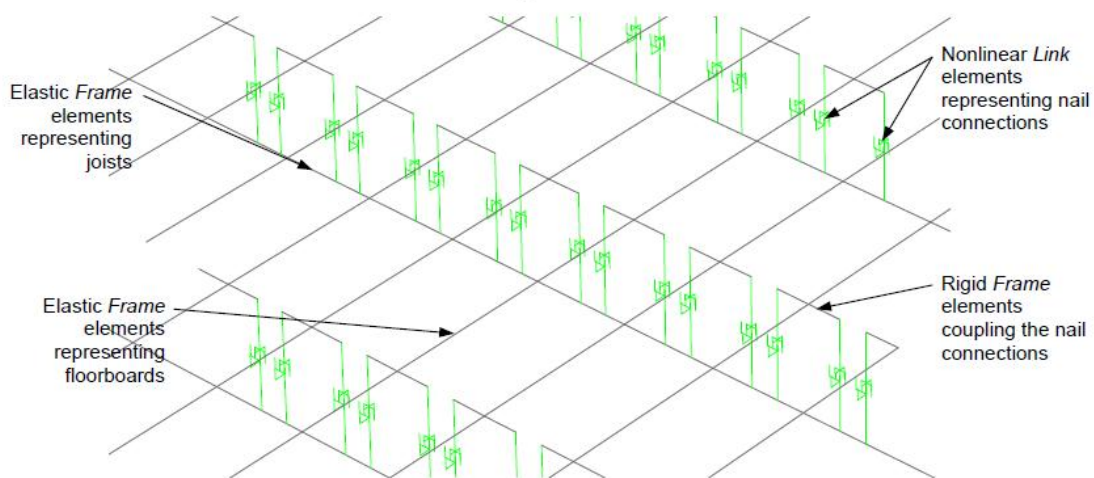
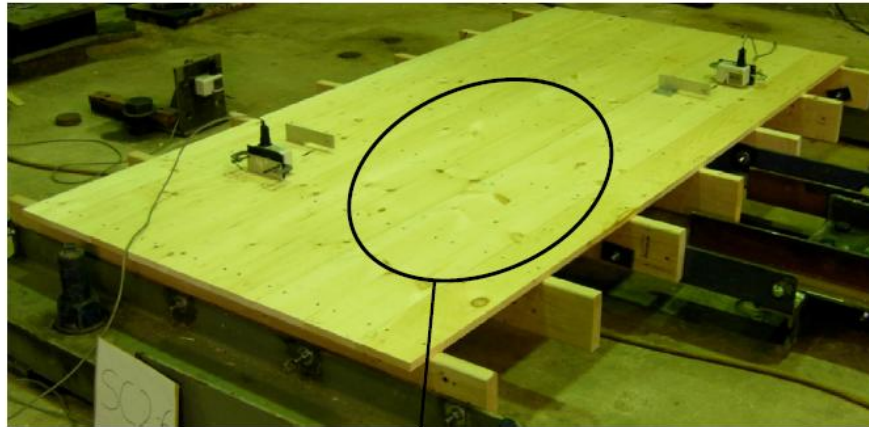
Παραδοχές προσομοίωσης διαφράγματος ξύλινου πατώματος

- Η μη γραμμικότητα οφείλεται αποκλειστικά στις συνδέσεις με τα καρφιά
- Όλα τα ξύλινα μέλη(πετσώματα, δοκοί, σύνδεσμοι εγκάρσιοι) παραμένουν γραμμικά ελαστικά.
- Μη μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ των ξύλινων στοιχείων

Τις παραπάνω παραδοχές ενισχύουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τα βασικά στοιχεία της προσομοίωσης του Wilson είναι :

- Οι δοκοί, οι ξύλινες τάβλες και οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι θα προσομοιωθούν ως ελαστικά στοιχεία δοκού με βάση τους κεντροβαρικούς άξονες τους.
- Η σύνδεση μεταξύ των σανίδων (τάβλες) και των δοκών προσομοιώνεται με έναν ζεύγος μη γραμμικών στοιχείων σύνδεσης-ζεύξης τα οποία αντιστοιχούν στα καρφιά. Τα δύο καρφιά θα συνδεθούν με άκαμπτα στοιχεία δοκών μήκους ίδιου με τη πραγματική απόσταση των καρφιών.
- Το διάφραγμα θα προσομοιωθεί αξιόπιστα δίνοντας τις κατάλληλες ιδιότητες στα στοιχεία.



Εικόνα 2-1 Προσομοίωση διαφράγματος Wilson [10]

Βέβαια τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν και από άλλους ερευνητές όπως ο Loo ο οποίος χρησιμοποίησε αυτό τον τρόπο προσομοίωσης για τον ξύλινο διατημητικό τοίχο που μελέτησε στο SAP2000.

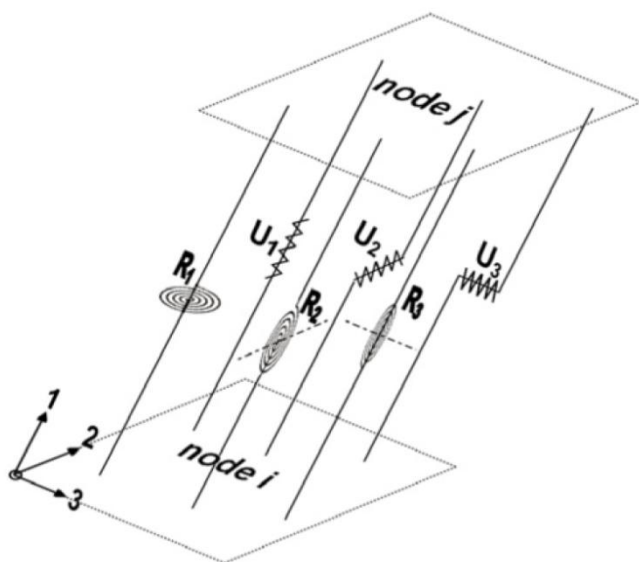
Επίσης ο Peralta (2003) χρησιμοποίησε παρόμοια προσέγγιση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Όμως υπήρχε αδυναμία στην ακριβή προσομοίωση της διαφραγματικής συμπεριφοράς στις 2 κύριες διευθύνσεις φόρτισης ( παράλληλα και κάθετα στις δοκούς ). Ουσιαστικά χρησιμοποίησε ενιαία

στοιχεία κελύφους για να προσομοιώσει το πέτσωμα το οποίο συνέδεσε με τις δοκούς με μη γραμμικά ζευγάρια ελατηρίων προσανατολισμένα σε κάθε κύρια διεύθυνση. Τα ελατήρια όμως μπορούν να τοποθετηθούν σε κόμβους (Abaqus). Αυτό σημαίνει ότι το κενό μεταξύ τους αυξανόταν κατά 40%. Η αύξηση αυτή δίνει μεγαλύτερη ροπή ζεύγους και κατά συνέπεια υπερεκτιμούταν η αντίσταση στην στροφή της σανίδας-πετσώματος κατά τη φόρτιση. Η σχέση φορτίου-ολισθησης των μη γραμμικών ελατηρίων αποτελούνταν από δύο τμήματα.

- Μονοτονική απόκριση (McLain 1975) ,
- Υστερητική τροχιά (Park et al 1987).

### 2.1.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SB1 ΚΑΤΑ WILSON(ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SAP2000) ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΣΤΟ ABAQUS

Σύμφωνα με το προσομοίωμα του Wilson για να κατασκευαστεί η σύνδεση της σανίδας με τη δοκό στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων δεσμεύονται η κατακόρυφη μετακίνηση και οι δυο στροφές (με διανύσματα ροπής) κάθετα στον άξονα του καρφιού, οι δεσμεύσεις αυτές παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί ( $U_1=0, R_2=0$  και  $R_3=0$ )



Εικόνα 2-2 Αρχικές δεσμεύσεις για την προσομοίωση της σύνδεσης του καρφιού  $U_1=0, R_2=0$  και  $R_3=0$

Επίσης οι δυο εγκάρσιες μετακινήσεις στον άξονα του καρφιού ( $U_2$  και  $U_3$ ) προσομοιώνονται με χρήση μετακινησιακού ελατηρίου κατάλληλης δυσκαμψίας. Όσο για τη στροφή ως προς τον κατακόρυφο άξονα( $R_1$ ) είναι ελεύθερη.

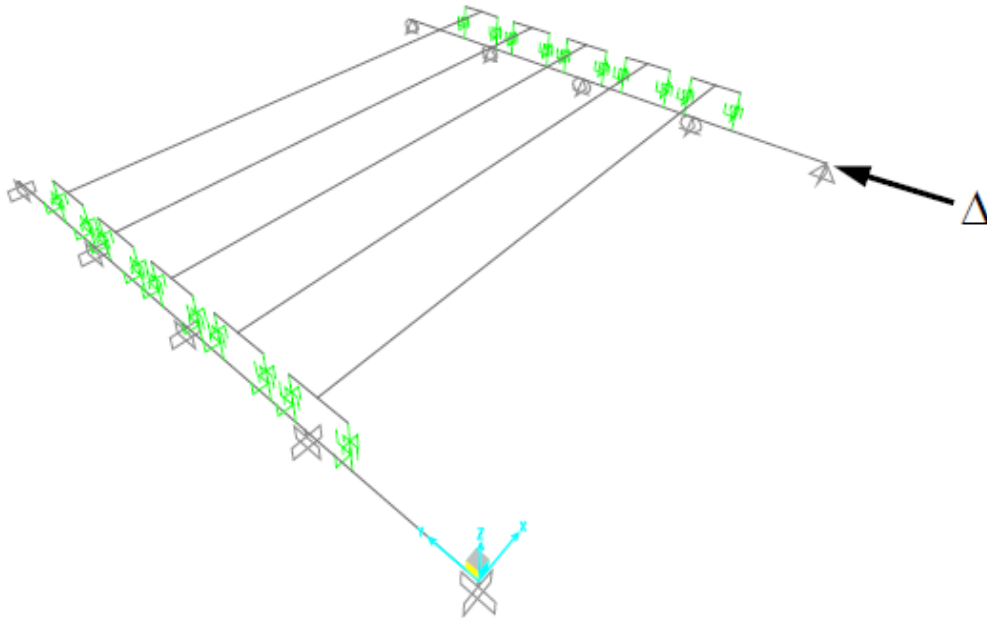


Επιλέχθηκε η πειραματική διάταξη κωδικό όνομα SBA-1 όπως δίνεται στην εικόνα 2.3



Εικόνα 2-3 Πειραματική διάταξη SBA-1 [10]

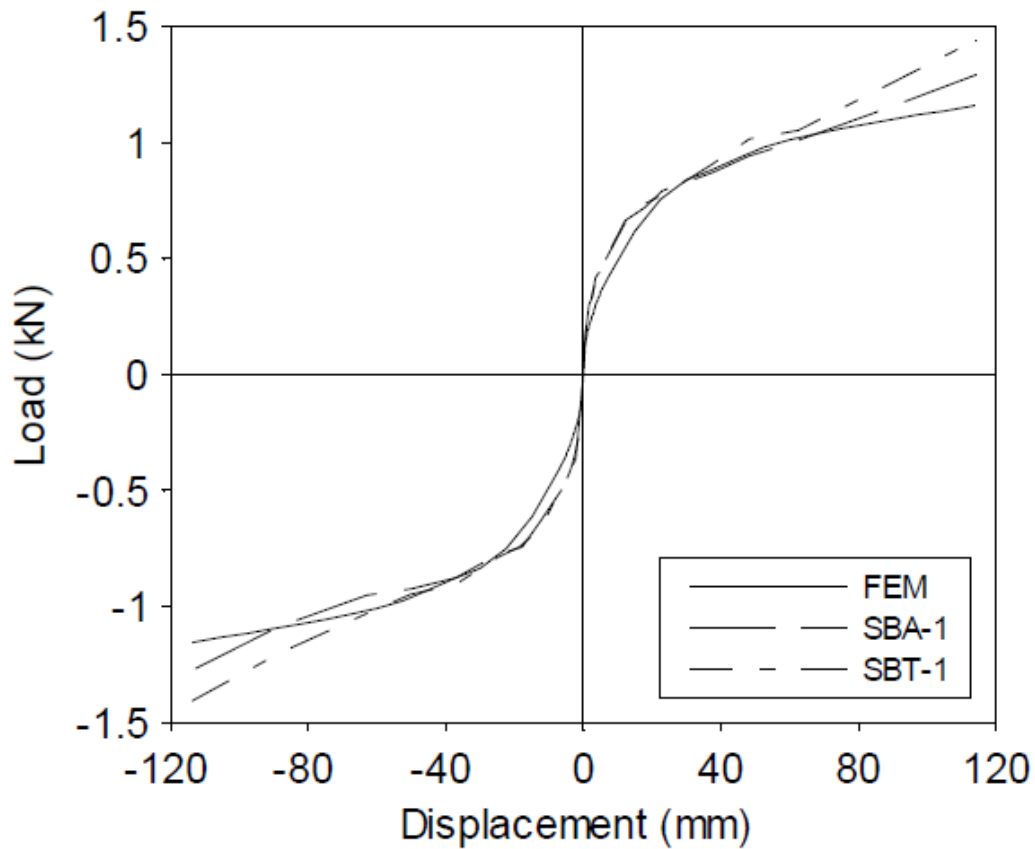
Το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2-4 Αριθμητικό προσομοίωμα SBA-1 SAP2000 [10]

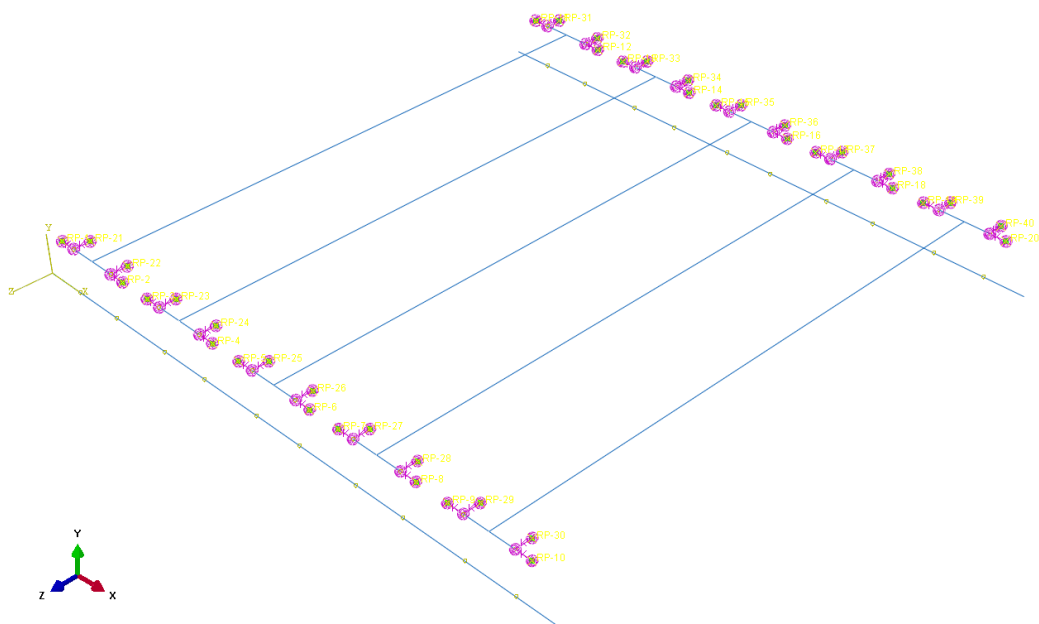
Τα αποτελέσματα από τα πειράματα αλλά και το αριθμητικό προσομοίωμα Wilson δίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 2.5





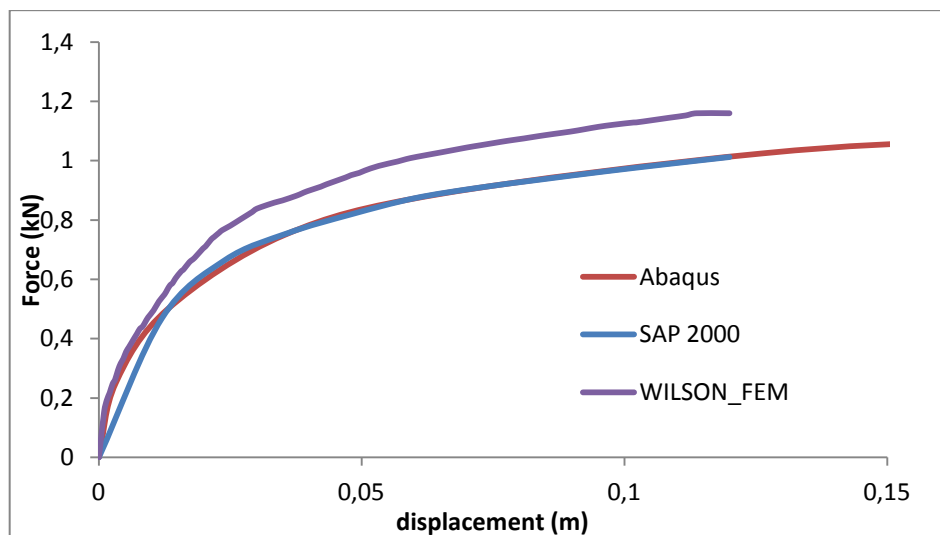
Εικόνα 2-5 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης από πείραμα και προσομοίωση Wilson [10]

Ακολουθώντας τις παραπάνω παραδοχές κατασκευάστηκε προσομοίωμα εφάμιλλο του Wilson στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.



Εικόνα 2-6 Προσομοίωμα ξύλινου πατώματος τύπου SBA-1 κατά Wilson στο Abaqus

Στη συνέχεια δίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης μετατόπισης για το μοντέλο SBA-1 κατά Wilson, το προσομοίωμα SAP 2000 (Δασκαλάκη Έρνα-Βαρβάρα) και το προσομοίωμα Abaqus.

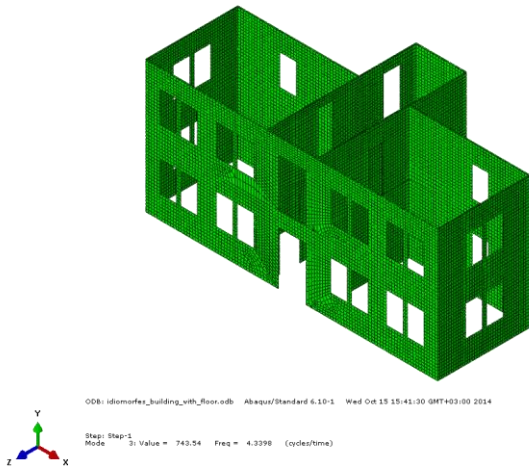


Εικόνα 2-7 Συγκριτικό διάγραμμα Wilson με προσομοίωμα SAP 2000 (Δασκαλάκη Έρνα-Βαρβάρα) και προσομοίωμα Abaqus

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του Abaqus αρχικά συμπίπτουν με του WILSON\_FEM αλλά στη συνέχεια αποκλίνουν κατά 12% ποσοστό το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί αποδεκτό. Όμως μετά τον ελαστικό κλάδο συμπίπτει με το διάγραμμα που προέκυψε από το SAP2000.

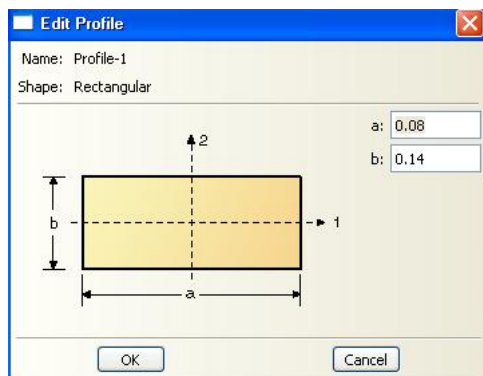
## 2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ(WILSON) ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ

Το κτίριο το οποίο μελετήθηκε στην διπλωματικής εργασία «ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ- ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ» χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για περαιτέρω έρευνα.



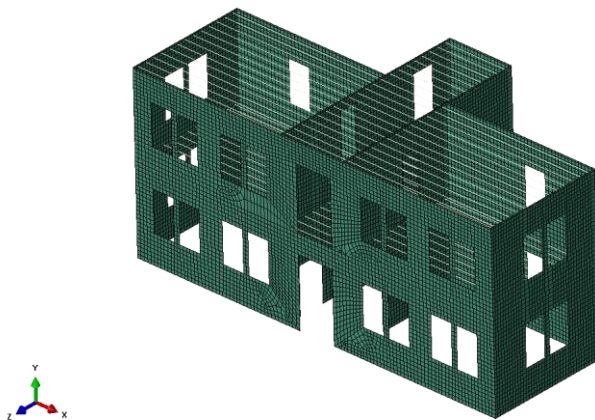
**Εικόνα 2-8 Φορέας από τοιχοποιία**

Στο φορέα αρχικά προστέθηκαν στο επίπεδο του ισογείου και του ορόφου ξύλινες δοκοί διαστάσεων 8x14cm ανά 0.50m.



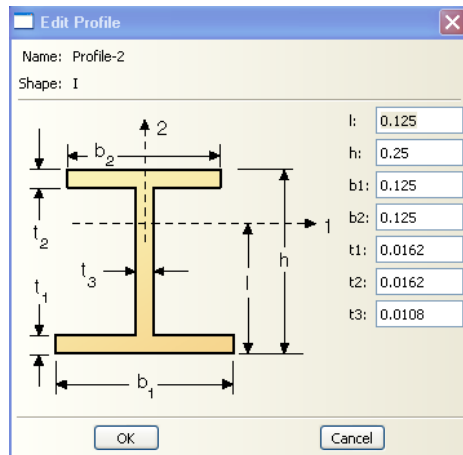
**Εικόνα 2-9 Διατομή ξύλινης δοκού**

Η διάταξη των δοκών δίνεται στην παρακάτω εικόνα:

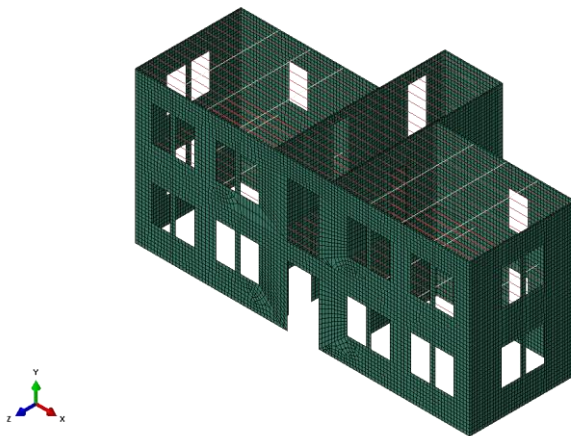


**Εικόνα 2-10 Τοποθέτηση ξύλινων δοκών**

Οι ξύλινες δοκοί στηρίζονται στην τοιχοποιία και επί εγκάρσιων μεταλλικών δοκών η διατομή των οποίων φαίνεται στην εικόνα 3

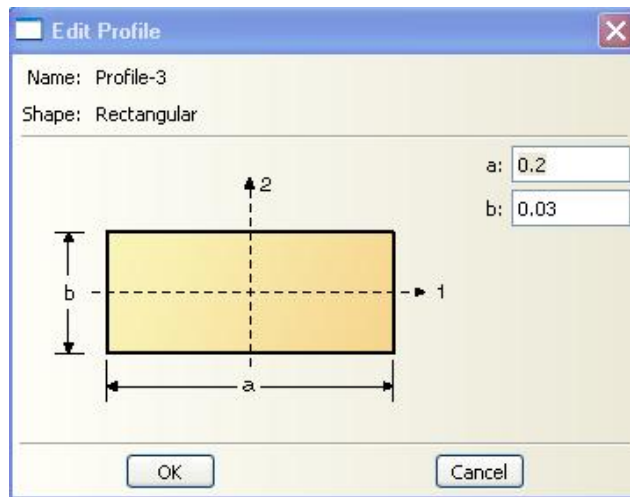


Εικόνα 2-11 Χαλύβδινη διατομή

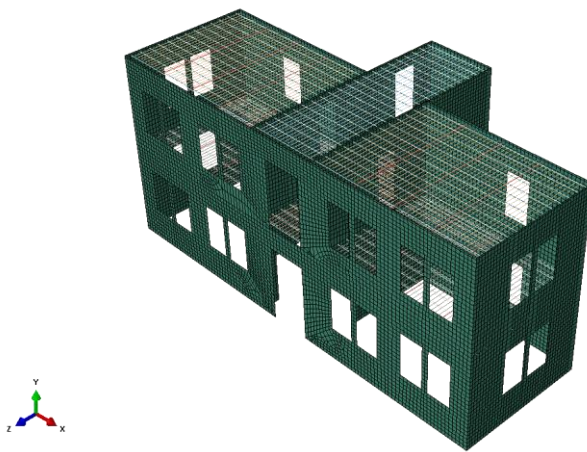


Εικόνα 2-12 Θέση χαλύβδινων δοκών

Επί τω δοκών εδράζονται σανίδες πάχους 3cm και πλάτους 20cm



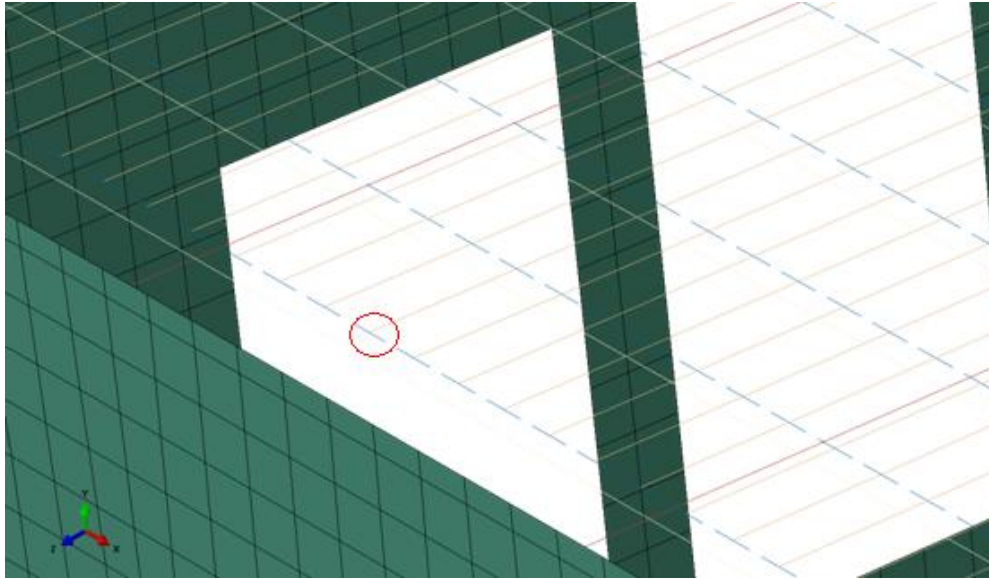
Εικόνα 2-13 Διατομή σανίδας



Εικόνα 2-14 Ξύλινο πάτωμα

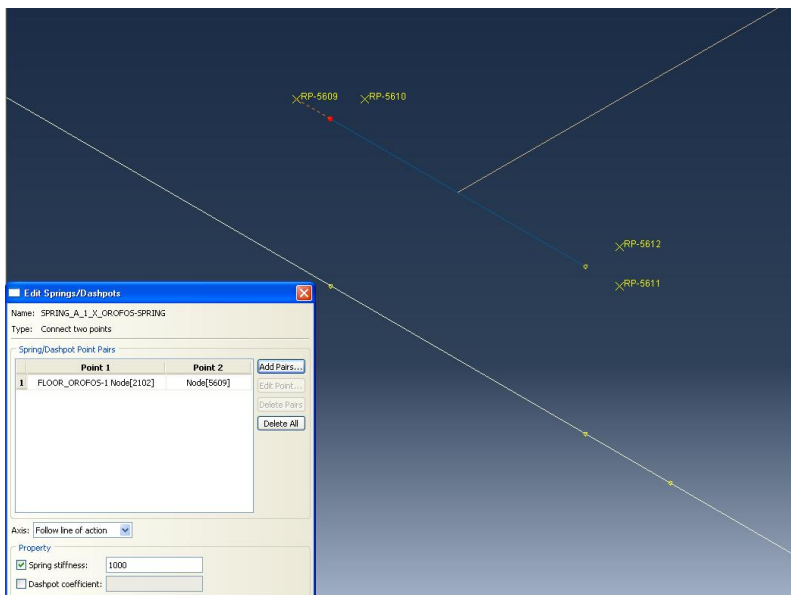
Οι σανίδες συνδέονται πάνω στις ξύλινες δοκούς μέσω καρφιών. Δύο καρφιά ανά 0.50m. Η προσομοίωση τους έγινε ως εξής:

Δημιουργήθηκαν άκαμπτα στοιχεία (rigid bodies) όπως φαίνεται στην εικόνα 15. Οι άκρες του είναι οι κορυφές των καρφιών οι οποίες απέχουν 0.15m. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε τη συγχρονισμένη κίνηση των καρφιών λόγω του ότι οι σανίδες προσομοιώθηκαν ως γραμμικά στοιχεία.



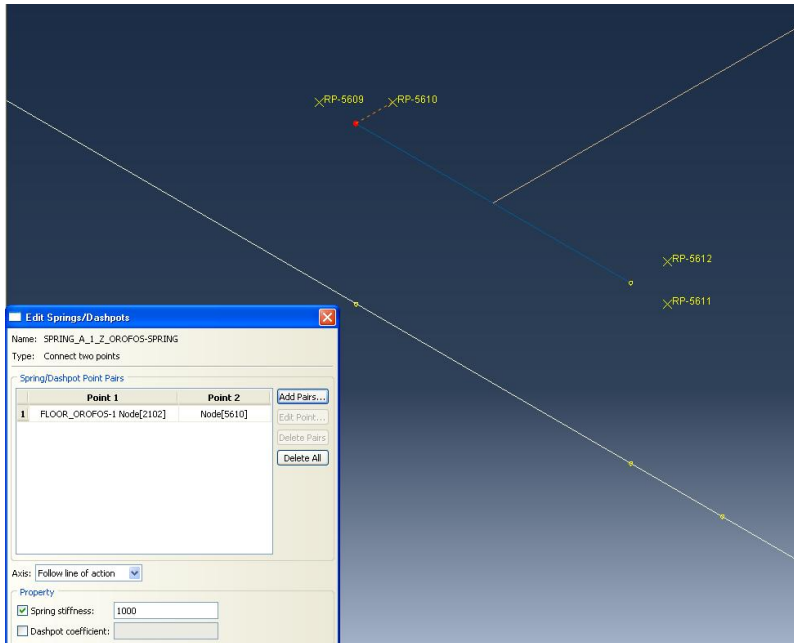
Εικόνα 2-15 Άκαμπτα στοιχεία

Οι μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση  $x$  και  $z$  (παράλληλα και κάθετα στη ξύλινη δοκό) εξαρτώνται από ένα ζεύγος ελατηρίων. Πιο συγκεκριμένα, η κορυφή του καρφιού εξαρτήθηκε από ένα σημείο αναφοράς (RP –Reference Point) κατά τη  $x$  και ένα κατά τη  $z$ , όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



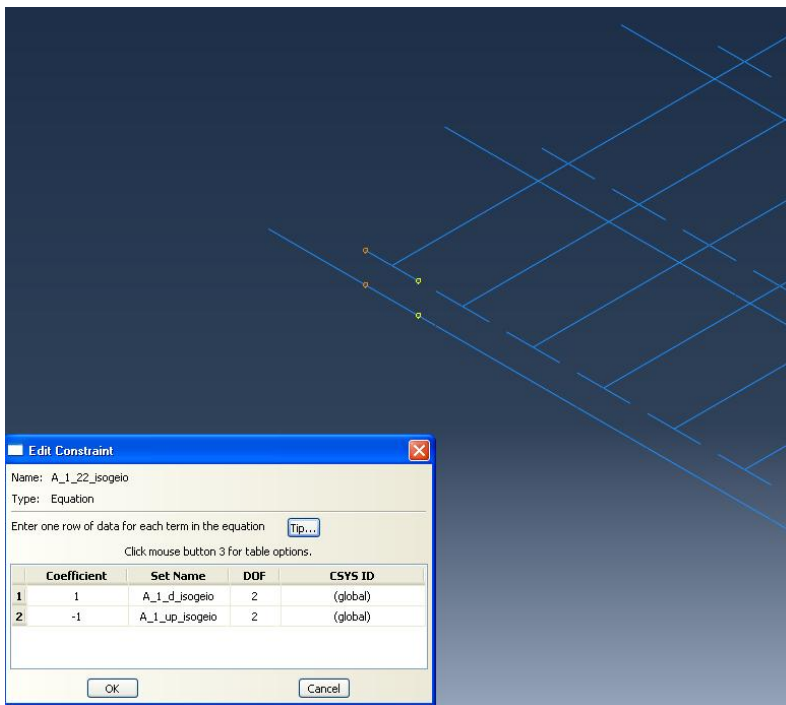
Εικόνα 2-16 Ελατήριο κατά τη  $x$  διεύθυνση

Ως σταθερά του ελατηρίου επιλέχτηκε η ελαστική δυσκαμψία του καρφιού  $K=1000\text{kN/m}$ . Αρχικά η συμπεριφορά του θεωρήθηκε γραμμική ελαστική.

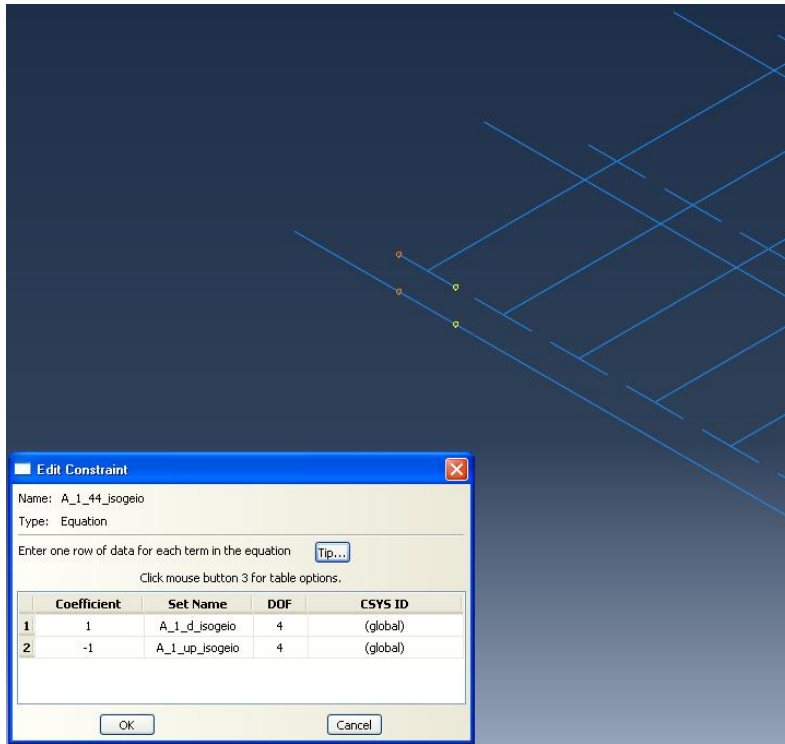


Εικόνα 2-17 Ελατήριο κατά τη γ διεύθυνση

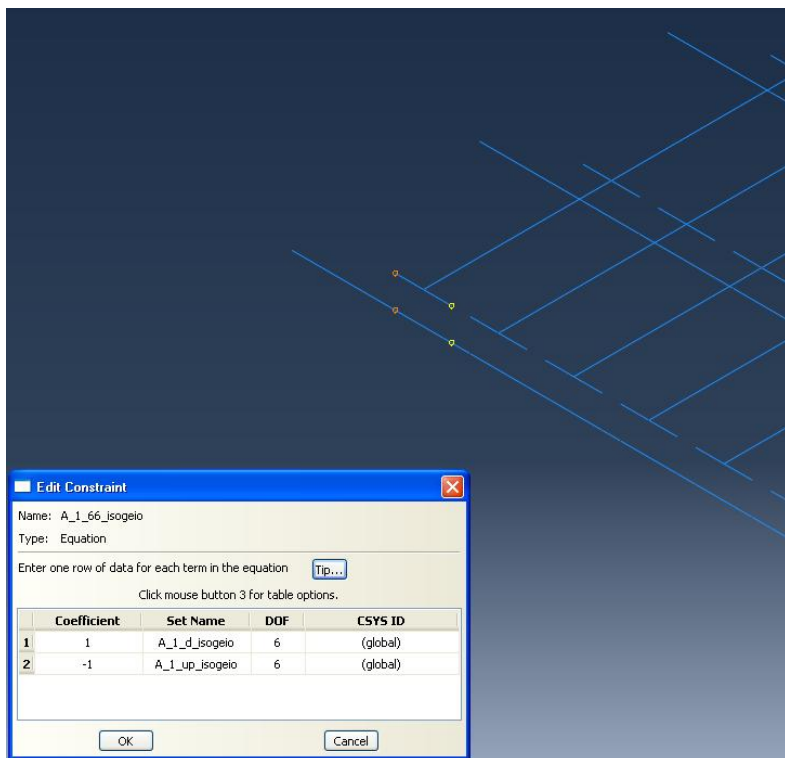
Για την προσομοίωση του καρφιού χρησιμοποιήθηκε η εντολή equation μέσω της οποίας συνδέονται τα δύο άκρα του καρφιού (το άκρο του άκαμπτου στοιχείου και αντίστοιχου κόμβου της δοκού). Για την ακριβέστερη απεικόνιση της συμπεριφοράς των δύο άκρων δεσμεύτηκαν οι αναγκαίοι βαθμοί ελευθερίας, η κατακόρυφη μετακίνηση (DOF 2) στροφή ως προς τον χάρξονα (DOF 4) και η στροφή ως προς τον άξονα z (DOF 6) (εικόνες 18, 19, 20) .



Εικόνα 2-18 Δέσμευση κατακόρυφης μετακίνησης άκρων καρφιού



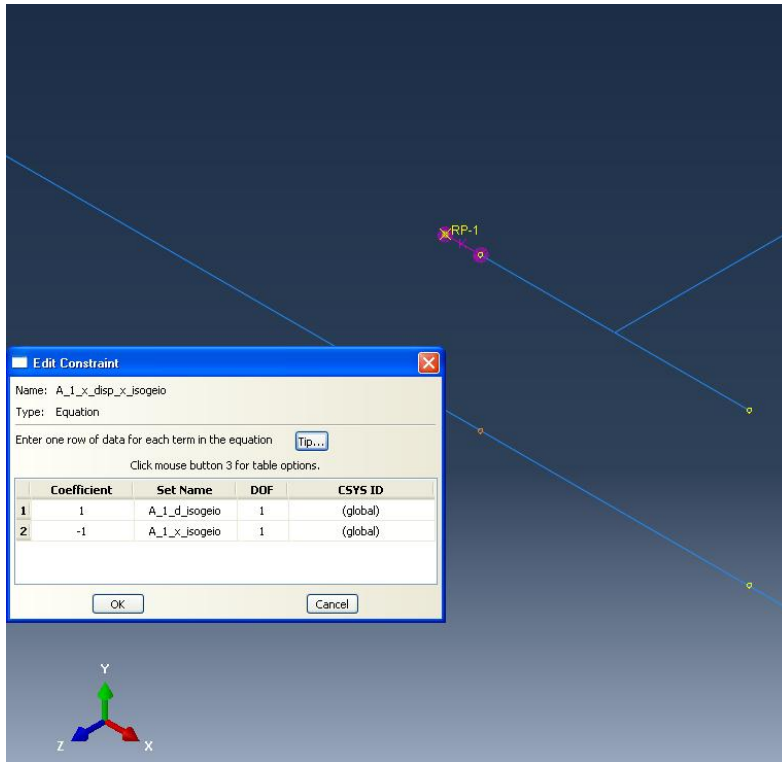
Εικόνα 2-19 Δέσμευση στροφής ως προς τον x άξονα των άκρων καρφιού



Εικόνα 2-20 Δέσμευση στροφής ως προς τον z άξονα των άκρων καρφιού

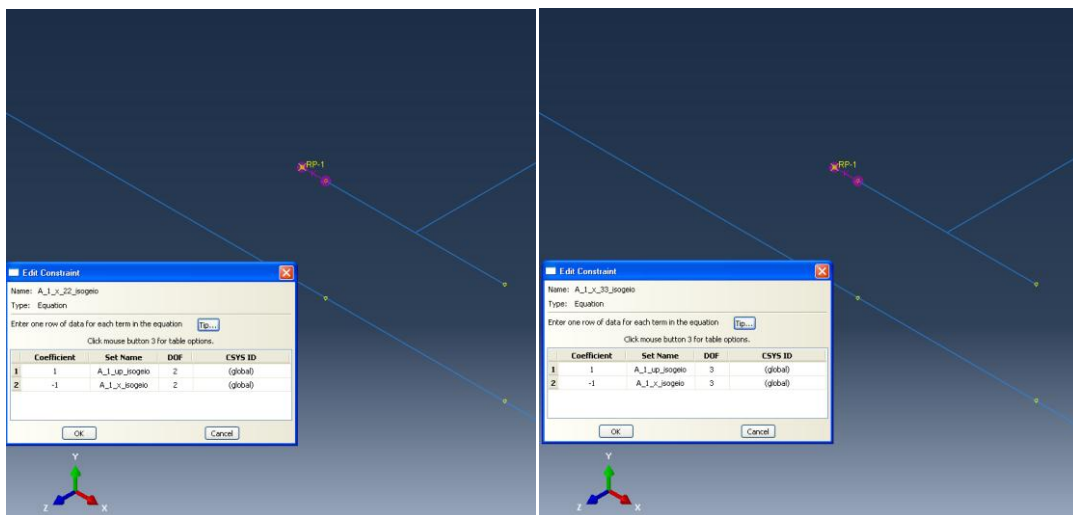
Για την ενεργοποίηση του ελατήριου (μεταφορά μετακίνησης από τις σανίδες στις δοκούς) είναι απαραίτητο να ταυτιστεί η μετακίνηση κατά x (DOF 1) του σημείου αναφοράς (άκρο ελατηρίου) με τον αντίστοιχο κόμβο της δοκού (κάτω άκρο του καρφιού).





Εικόνα 2-21 Εξάρτηση σημείου αναφοράς με τη δοκό κατά τη διεύθυνση x

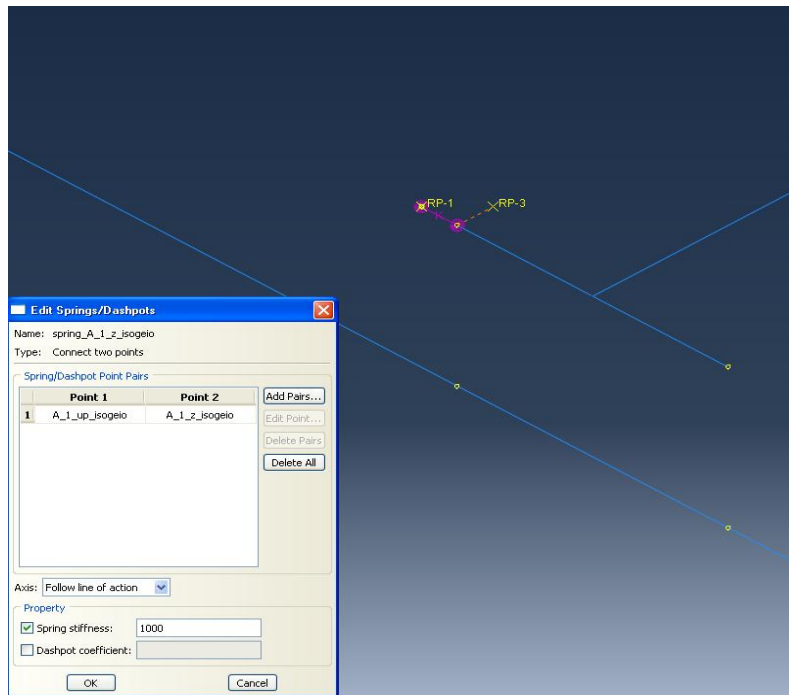
Για τους άλλους δυο βαθμούς ελευθερίας (μετακίνηση κατά z και κατά y) επιλέχτηκε το σημείο αναφοράς να παρακολουθεί τη μετακίνηση του άνω άκρου του καρφιού.



Εικόνα 2-22 Εξάρτηση σημείου αναφοράς με τη δοκό DOF2 & DOF3

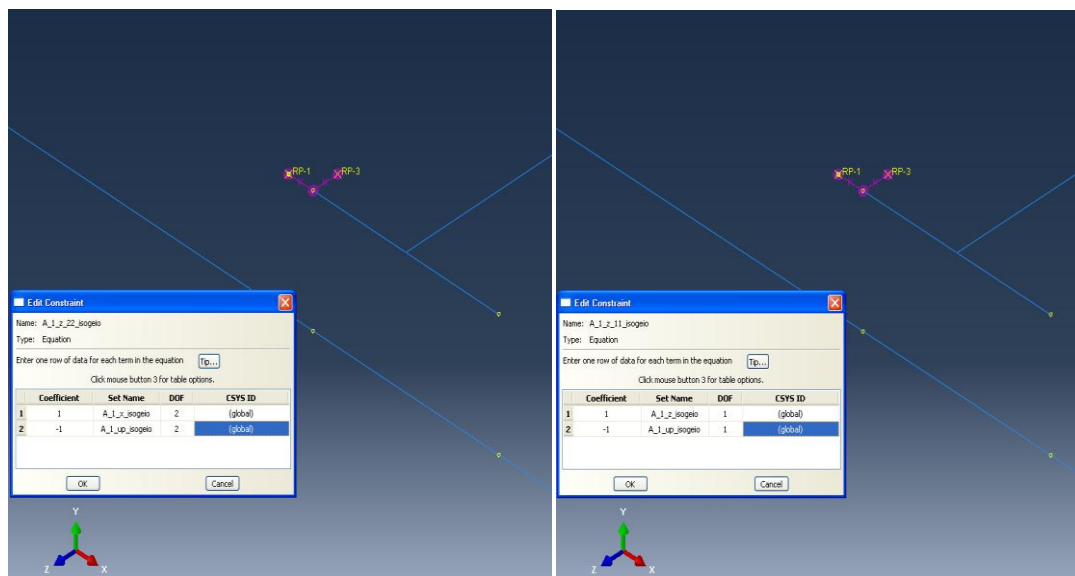
Η χρήση των ελατήριων έχει σαν σκοπό την προσομοίωση της εγκάρσιας δυσκαμψία των καρφιών, διεύθυνση x και z. Όπως έγινε για τη διεύθυνση x, θα επαναληφθεί η ίδια διαδικασία και για τη διεύθυνση z.

Προστέθηκε ένα δεύτερο σημείο αναφοράς (RP-2) το οποίο συνδέθηκε με την κορυφή του καρφιού με ελατήριο δυσκαμψίας  $K=1000\text{kN/m}$  (εικόνα 23).



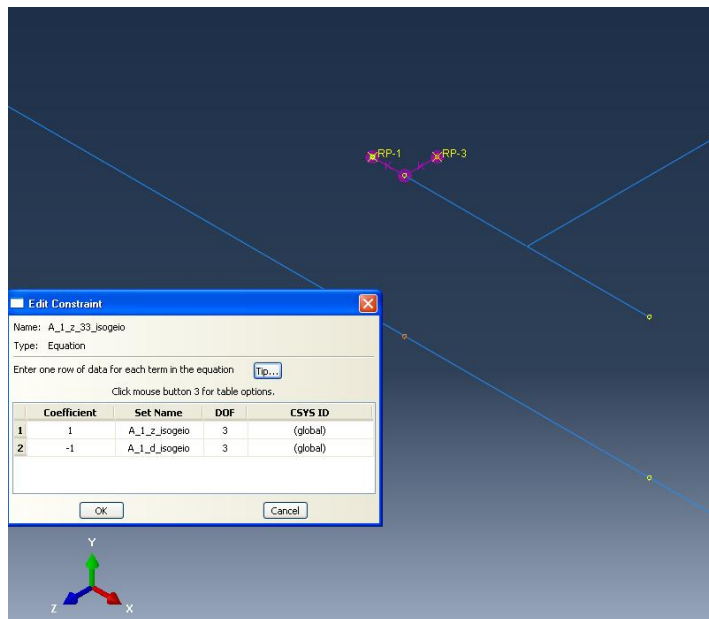
Εικόνα 2-23 Ελατήριο διεύθυνση z

Στη συνέχεια δεσμεύτηκε η κατακόρυφη και η οριζόντια κατά x μετακίνηση του σημείου αναφοράς (RP-2) με εκείνη του πάνω άκρου του καρφιού.



Εικόνα 2-24 Δέσμευση σημείου αναφοράς(RP-2)με άνω άκρο καρφιού

Ενώ η μετακίνηση κατά τον άξονα του ελατηρίου εξαρτήθηκε από τη δοκό(κάτω άκρο καρφιού).



Εικόνα 2-25 Εξάρτηση σημείου αναφοράς(RP-2) με τη δοκό κατά τη διεύθυνση z

### 2.2.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΕΥΛΙΝΟ ΠΑΤΩΜΑ

Μετά την ιδιομορφική ανάλυση του φορέα προέκυψαν τα παρακάτω ποσοστά συμμετέχουσας μάζας για κάθε ιδιομορφή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

MODE	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION	Z-ROTATION
1	0.33	0.00	7.36	347.88	6641.20	16.51
2	0.01	0.01	305.39	13985.00	40629.00	4.13
3	315.97	0.00	0.00	0.09	1137.20	15145.00
4	10.39	0.00	7.43	185.81	4016.00	460.37
5	1.80	0.01	35.62	69.67	1414.00	87.70
6	12.40	0.02	2.10	1111.50	587.07	518.59
7	10.44	0.02	1.86	38.30	1167.90	492.64
8	74.19	0.07	0.72	65.92	5642.30	4016.30
9	0.10	0.02	50.99	2636.80	6279.80	12.00
10	0.08	0.00	2.27	6.20	109.48	4.55
<b>TOTAL</b>	425.70	0.15	413.73	18447.00	67624.00	20758.00

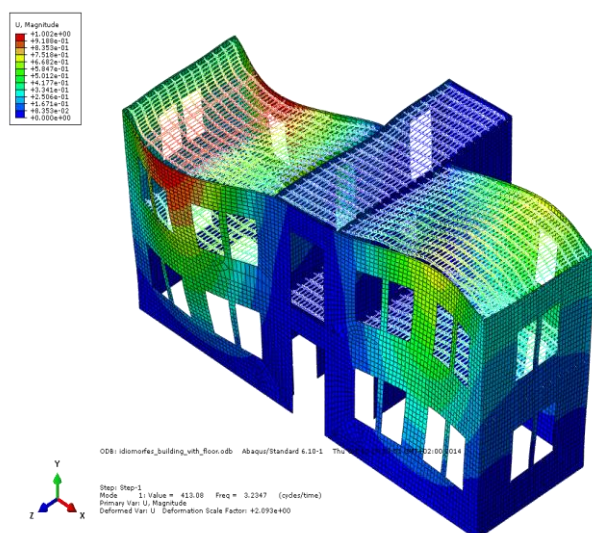
Οι περίοδοι των 10 πρώτων ιδιομορφών είναι οι εξής:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2**

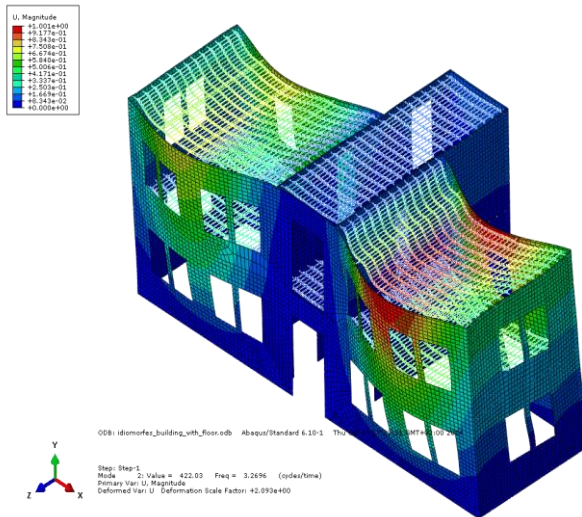
MODE	T (sec)
1	0.309
2	0.306
3	0.256
4	0.185
5	0.183
6	0.181
7	0.178
8	0.176
9	0.159
10	0.154

Παρατηρείται ότι η 2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup> και η 8<sup>η</sup> έχουν μεγαλύτερα ποσοστά συμμετέχουσας μάζας.

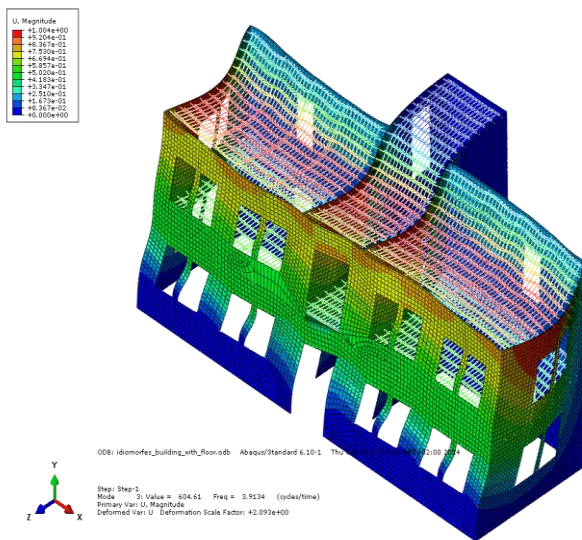
Η απεικόνιση των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών δίνεται στις παρακάτω εικόνες.



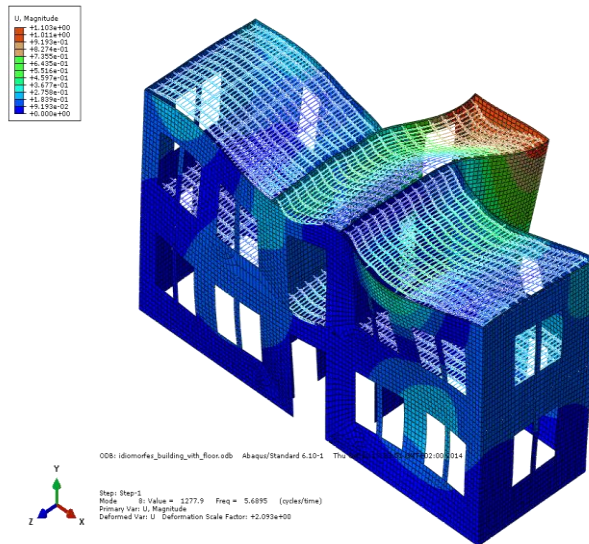
**Εικόνα 2-26 1<sup>η</sup> ιδιομορφή**



Εικόνα 2-27 2<sup>η</sup> Ίδιομορφή



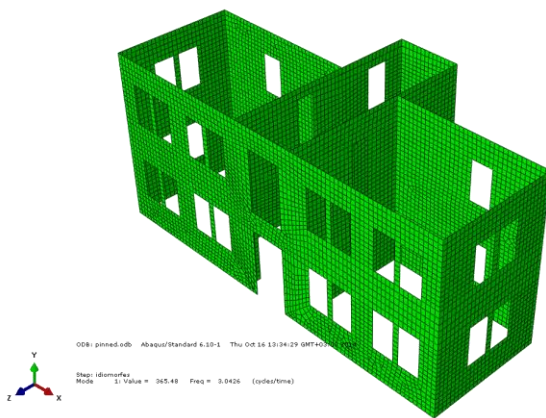
Εικόνα 2-28 3<sup>η</sup> Ίδιομορφή



Εικόνα 2-29 8<sup>η</sup> Ιδιομορφή

## 2.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιώματος του κτιρίου χωρίς κάποιο διάφραγμα (εικόνα 2-30).



Εικόνα 2-30 Φορέας χωρίς διάφραγμα

Τα ποσοστά συμμετέχουσας μάζας των 10 πρώτων ιδιομορφών για τον συγκεκριμένο φορέα δίνονται στον πίνακα 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

MODE	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION	Z-ROTATION
1	1.43	0.00	0.01	0.01	56.93	69.33
2	6.60	0.00	1.12	62.20	0.44	308.41
3	0.37	0.00	141.47	6575.30	2712.30	14.20
4	1.15	0.00	127.62	5858.60	39280.00	66.63

5	255.47	0.00	0.01	0.10	373.60	12053.00
6	0.22	0.00	0.00	9.36	0.09	14.46
7	0.01	0.00	10.15	6.87	900.90	0.10
8	0.24	0.00	0.59	4.70	574.56	0.70
9	0.01	0.01	0.81	41.80	321.41	6.07
10	102.92	0.01	0.41	33.74	1774.50	5238.20
<b>TOTAL</b>	368.43	0.03668	282.2	12593	45995	17771

Ενώ οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι είναι :

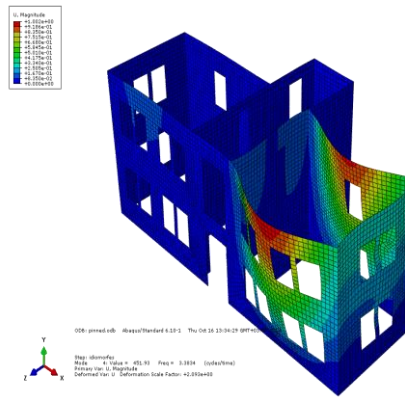
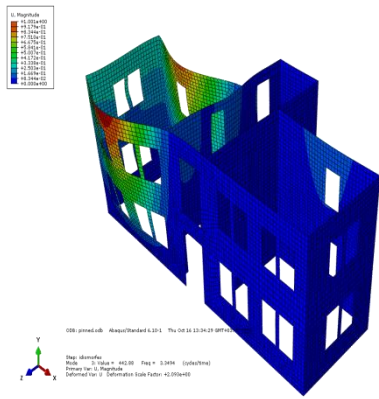
**ΠΙΝΑΚΑΣ 4**

MODE	T
1	0.363
2	0.355
3	0.330
4	0.327
5	0.266
6	0.221
7	0.209
8	0.207
9	0.200
10	0.193

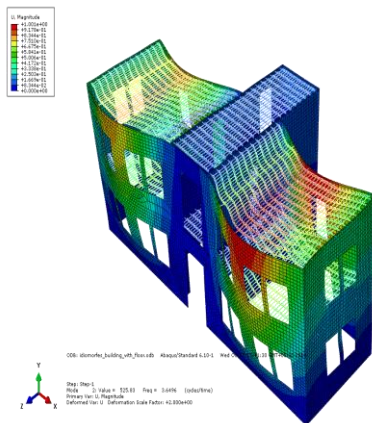
Παρατηρήσεις:

1. Ο φορέας με το ξύλινο πάτωμα είναι περισσότερο δύσκαμπτος(μικρότερες ιδιοπερίοδοι).
2. Ο φορέας με το ξύλινο πάτωμα ενεργοποιεί μεγαλύτερα ποσοστά ενεργούς μάζας . Η πρώτη κατά τη z διεύθυνση ιδιομορφή έχει διπλάσια συμμετέχουσα μάζα με την αντίστοιχη του φορέα χωρίς διάφραγμα.
3. Επίσης παρατηρώντας την παρακάτω εικόνα, η οποία περιλαμβάνει την 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> ιδιομορφή του φορέα χωρίς διάφραγμα και τη 2<sup>η</sup> ιδιομορφή του φορέα με το ξύλινο πάτωμα, φαίνεται ότι ενώ αρχικά τα δύο φαινόμενα του κτιρίου ενεργοποιούνται σε διαφορετική ιδιομορφή στον φορέα με το διάφραγμα «επαλληλίζονται».





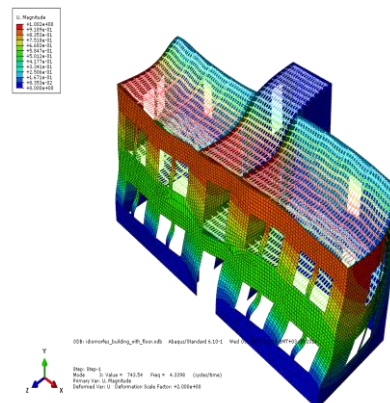
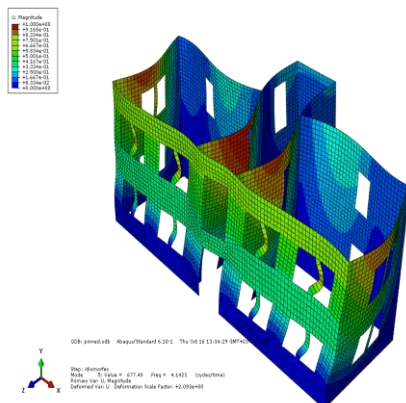
(α)(β)



(γ)

Εικόνα 2-31 (α) 3<sup>η</sup> ιδιομορφή φορέα χωρίς διάφραγμα (β) 4<sup>η</sup> ιδιομορφή φορέα χωρίς διάφραγμα (γ) 2<sup>η</sup> ιδιομορφή φορέα με διάφραγμα

4. Τέλος οι αντίστοιχες ιδιομορφές του φορέα κατά τη x διεύθυνση εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες λόγω του ότι το κτίριο είναι εκ των πραγμάτων είναι πιο δύσκαμπτο κατά τη διεύθυνση αυτή.

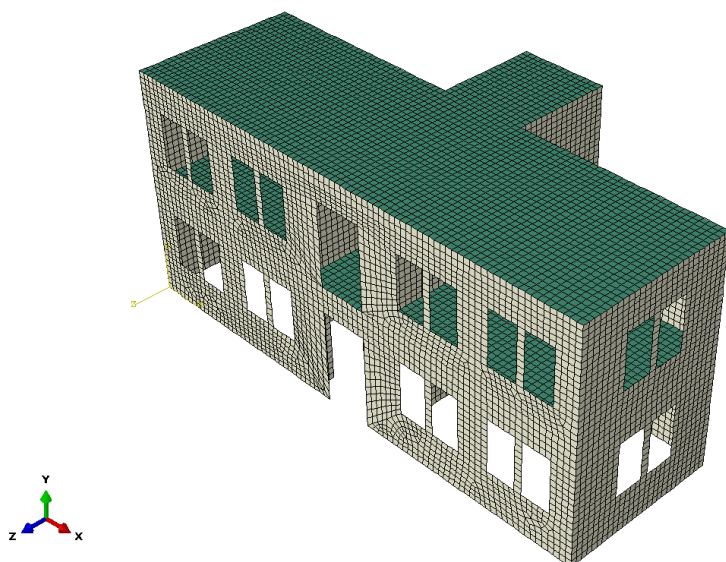


Εικόνα 2-32 Ιδιομορφή κατά x (αριστερά) φορέα χωρίς διάφραγμα (δεξιά) με το ξύλινο πάτωμα



Επίσης παρατηρείται καλύτερη απόκριση στις εκτός επιπέδου μετακινήσεις στο φορέα με το ξύλινο πάτωμα.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε προσομοίωνα με διάφραγμα του οποίου τα χαρακτηριστικά προσέγγιζαν εκείνα ενός συμβατικού σκυροδέματος με ανάλογα απομειωμένη μάζα ώστε να είναι ισοδύναμη με εκείνη του ξύλινου πατώματος.



Εικόνα 2-33 Φορέας από τοιχοποιία με πλάκα από σπλισμένο σκυρόδεμα

Μετά την ιδιομορφική ανάλυση του φορέα προέκυψαν τα παρακάτω ποσοστά συμμετέχουσας μάζας για κάθε ιδιομορφή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

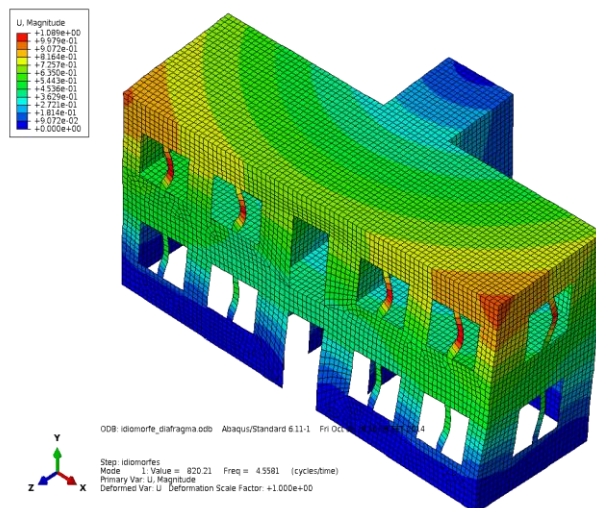
MODE	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION	Z-ROTATION
1	250.17	0.00	0.59	25.04	2329.00	11851.00
2	1.27	0.15	493.66	23160.00	57139.00	136.13
3	243.02	0.00	0.37	41.02	30009.00	12051.00
4	0.12	0.00	0.00	0.03	1.06	4.86
5	0.36	0.00	0.00	0.01	4.65	12.60
6	0.08	0.00	0.00	0.10	0.24	1.41
7	1.01	0.00	0.00	0.06	7.93	7.96
8	0.07	0.00	0.00	0.04	4.07	4.19
9	0.17	0.00	0.00	0.02	11.62	15.74
10	0.02	0.00	0.07	2.27	42.23	13.36
<b>TOTAL</b>	<b>496.31</b>	<b>0.15</b>	<b>495.33</b>	<b>23252.00</b>	<b>89672.00</b>	<b>24134.00</b>

Οι περίοδοι των 10 πρώτων ιδιομορφών είναι :

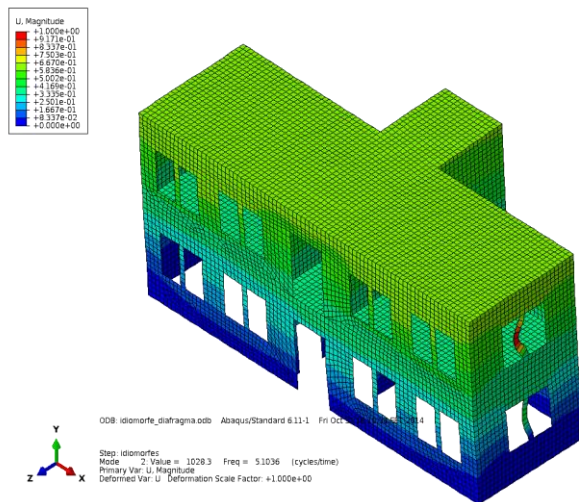
ΠΙΝΑΚΑΣ 6

MODE	T (sec)
1	0.22
2	0.20
3	0.17
4	0.13
5	0.13
6	0.13
7	0.13
8	0.13
9	0.13
10	0.13

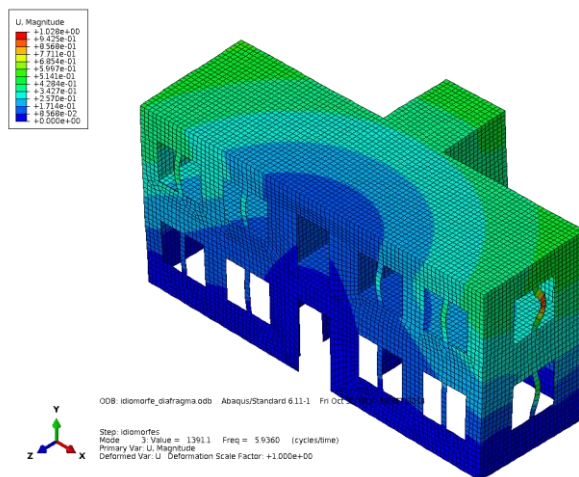
Ενώ σχηματικά οι τρεις πρώτες κύριες ιδιομορφές δίνονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 2-34 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή



Εικόνα 2-35 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή



Εικόνα 2-36 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή

Παρατηρήσεις:

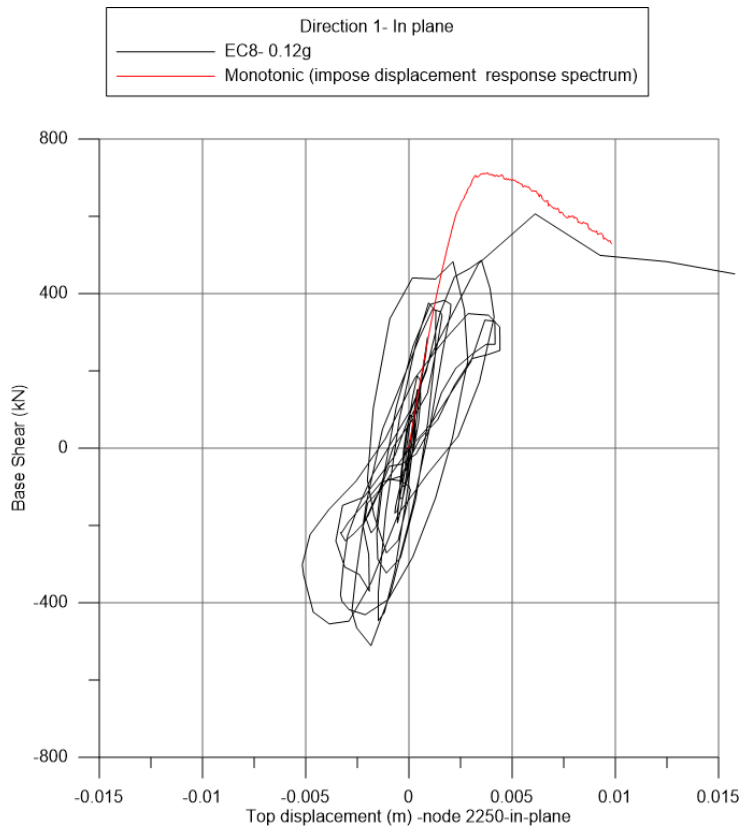
1. Παρατηρούμε ότι ο φορέας με το πάτωμα από σκυρόδεμα είναι σαφέστερα πιο δύσκαμπτο από τα άλλα δύο προσομοιώματα (προσομοίωμα με ξύλινο πάτωμα, προσομοίωμα χωρίς διάφραγμα) το οποίο ήταν αναμενόμενο. Ο φορέας κινείται ομοιόμορφα καθ' ύψος.
2. Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές έχουν ποσοστό συμμετέχουσας μάζας κοντά στο 80% της συνολικής.
3. Η πρώτη ιδιοπερίοδος είναι αρκετά μικρότερη από τις αντίστοιχες των δύο άλλων προσομοιωμάτων

MODE	Ιδιοπερίοδοι		
	ξύλινο διάφραγμα	χωρίς διάφραγμα	πλακά σκυροδέματος
1	0.309	0.363	0.22
2	0.306	0.355	0.20
3	0.256	0.33	0.17
4	0.185	0.327	0.13
5	0.183	0.266	0.13
6	0.181	0.221	0.13
7	0.178	0.209	0.13
8	0.176	0.207	0.13
9	0.159	0.2	0.13
10	0.154	0.193	0.13

### 2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΪΙΑ ΜΕ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το παραπάνω κτίριο το οποίο φέρει διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος αναλύθηκε με ισοδύναμη στατική ανάλυση (pushover) και με ανάλυση χρονοϊστορίας. Στην ισοδύναμη στατική ανάλυση η κατανομή φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από την φασματική ανάλυση του κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιομορφές των οποίων το άθροισμα των ενεργών μαζών ξεπερνούσε το 90% της ενεργούς μάζας του κτιρίου. Η ανάλυση του φορέα με χρονοϊστορία βασίστηκε σε τεχνητό επιταχυνσιογράφημα του οποίου το φάσμα αντιστοιχεί σε εκείνο του EC8 για 0.12g.

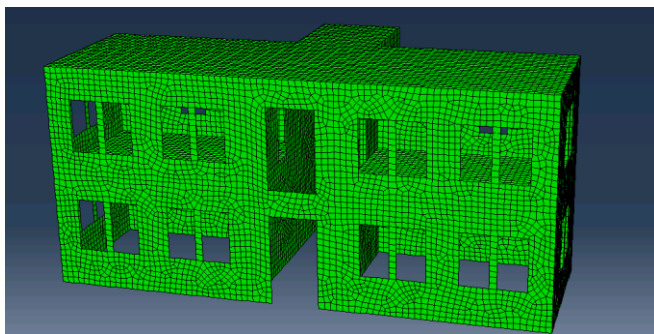
Από τις δύο αναλύσεις λαμβάνεται η τέμνουσα βάσης του κτιρίου και η μετακίνηση του σημείου ελέγχου (monitoring point) το οποίο βρίσκεται στην κορυφή του κτιρίου και ανήκει σε τοίχο ο οποίος είναι παράλληλος στη διεύθυνση του σεισμού που επιβλήθηκε (διεύθυνση κατά x). Τα διαγράμματα V(τέμνουσα βάσης) –d (μετακίνηση σημείου ελέγχου) για τις δύο αναλύσεις δίνονται στην εικόνα 2-37.



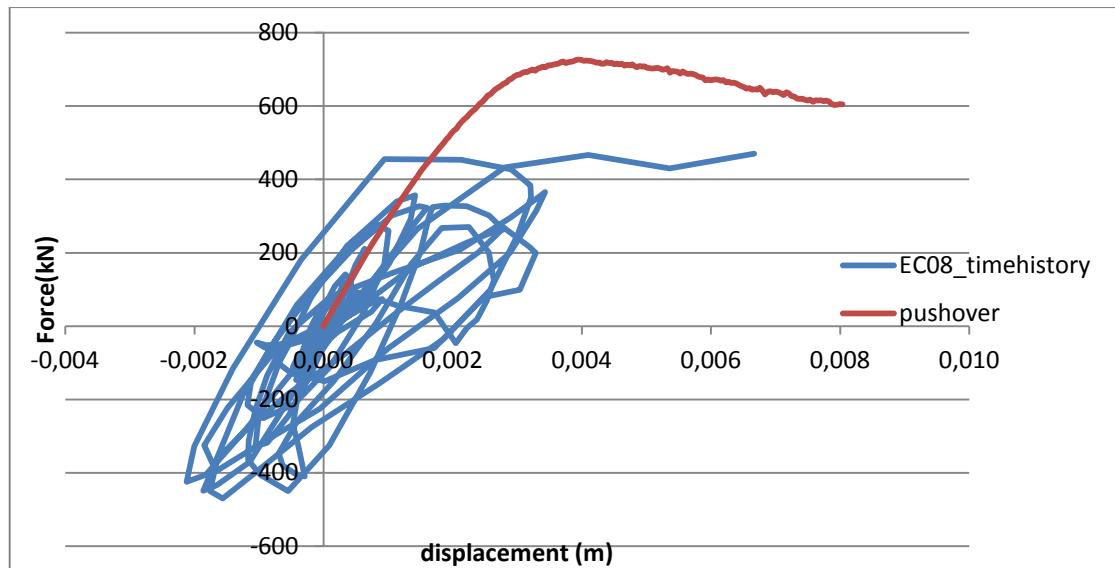
Εικόνα 2-37 V-d ισοδύναμη στατικής ανάλυσης και ανάλυσης με χρονοϊστορία για το κτίριο με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση του ελαστικού κλάδου μεταξύ των δύο αναλύσεων. Επίσης υπάρχει καλύτερη προσέγγιση της μέγιστης τέμνουσας σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα για το κτίριο χωρίς διάφραγμα (κεφ 1).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το παραπάνω διάγραμμα αφορά φορέα με συνεχή πλάκα σκυροδέματος. Για να μελετηθεί η επιρροή ύπαρξης κενού στην πλάκα, να διακόπτεται δηλαδή η συνέχεια της, έγινε μια δεύτερη ανάλυση για αυτή την περίπτωση διαφράγματος (εικόνα 2-38). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής δίνονται στην εικόνα 2-39.



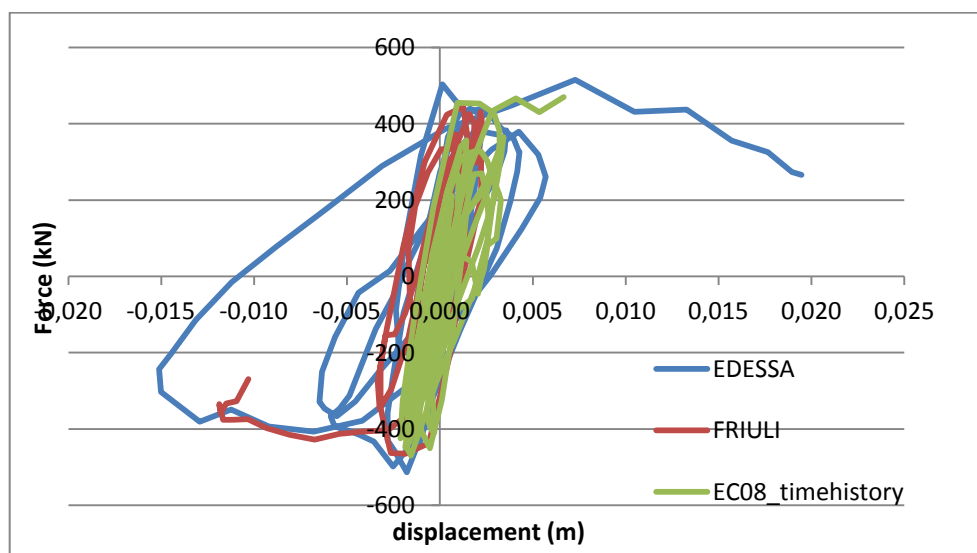
Εικόνα 2-38 Φορέας από τοιχοποιία με κενό στην πλάκα σκυροδέματος στο μεσοπάτωμα



Εικόνα 2-39 V-d ισοδύναμης στατικής ανάλυσης και ανάλυσης με χρονοϊστορία για το κτίριο με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος.

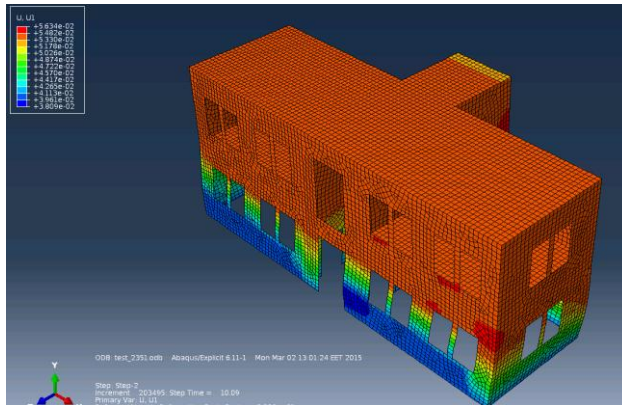
Παρατηρούμε ότι η διαφορά στη τέμνουσα βάσης μεταξύ των διαγραμμάτων στην περίπτωση που το διάφραγμα έχει κενό είναι μεγαλύτερη εκείνης που αντιστοιχεί στον φορέα με συνεχές διάφραγμα.

Δοκιμάστηκαν και άλλοι σεισμοί (Friuli και Έδεσσα) ώστε να δειχθεί ότι η μέγιστη τέμνουσα βάσης δε διαφέρει από εκείνη που προέκυψε από τον τεχνικό επιταχυνσιογράφημα που αντιστοιχεί στο φάσμα του Ευρωκώδικα 8.



Εικόνα 2-40 Αναλύσεις χρονοϊστορίας για EC8-0.12G, ΕΔΕΣΣΑ 0.12G και FRIULI 0.12G

Οι μετακινήσεις του φορέα οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 2-41 δείχνουν ότι ο φορέας με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος είναι ομοιόμορφες καθ' ύψος



Εικόνα 2-41 Μετακινήσεις φορέα με διάφραγμα από πλάκα σκυροδέματος

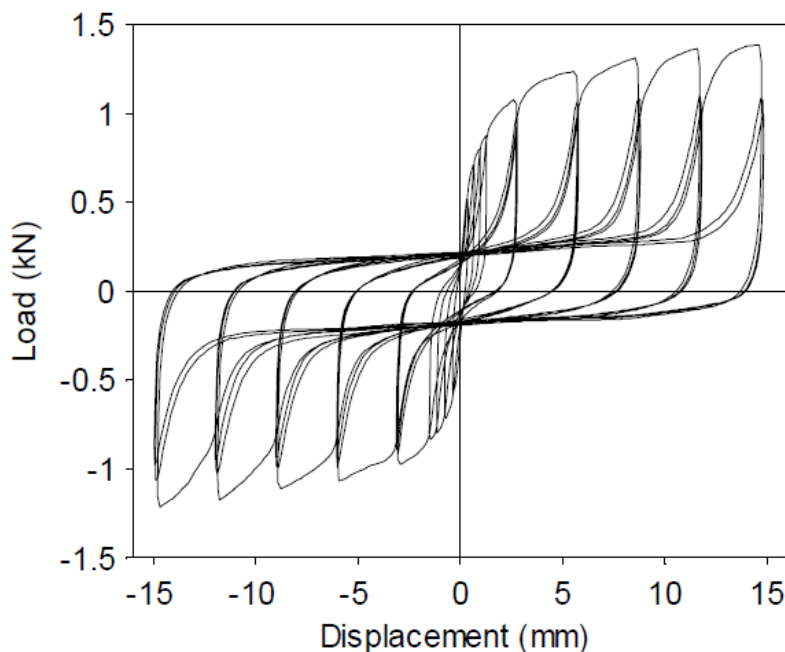




### 3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΞΥΛΙΝΟΥ ΠΑΤΩΜΑΤΟΣ

#### 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΚΑΡΦΙΟΥ-ΣΑΝΙΔΑΣ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ)

Για τη δυσκαμψία των ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του ξύλινου πατώματος χρησιμοποιήθηκαν τιμές οι οποίες προήλθαν από πειραματικά αποτελέσματα τα οποία εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τα πειραματικά δεδομένα της σύνδεσης μεταξύ δοκού-καρφιού-σανίδων τα οποία δίνονται στη διδακτορική διατριβή του Aaron W. Wilson με τίτλο “Seismic Assessment of Timber Floor Diaphragms in Unreinforced Masonry Building” έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της απόκρισης της σύνδεσης αυτής σε όρους δύναμης μετακίνησης (F-d).



Εικόνα 3-1 Συμπεριφορά σύνδεσης καρφιού-σανίδας-δοκού[10]

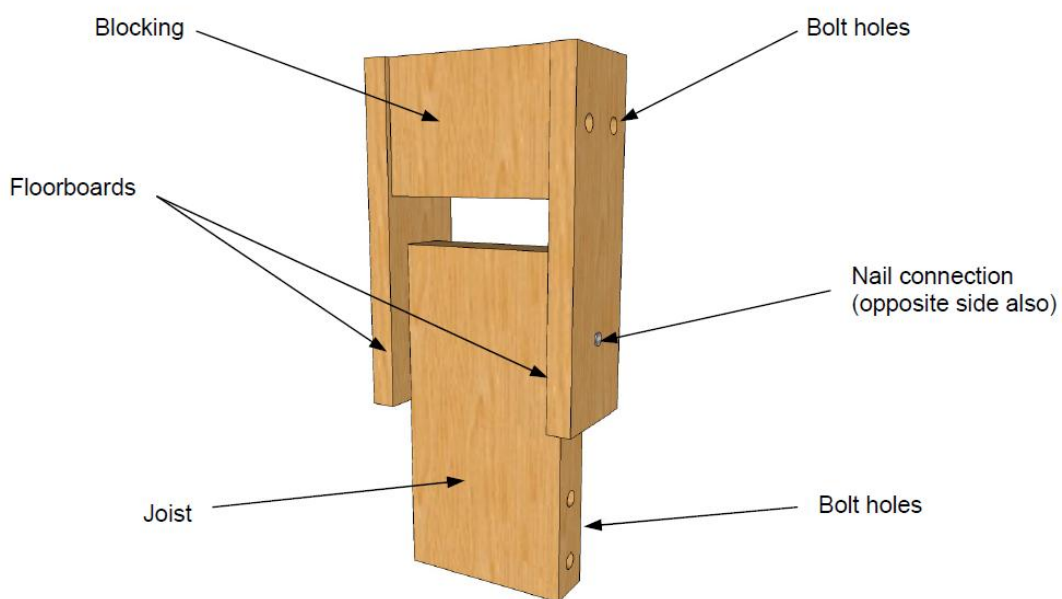
#### 3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΚΑΡΦΙΟΥ- ΣΑΝΙΔΑΣ

Κατά την προσομοίωση του φορέα υπήρξε η ανάγκη κατασκευής ενός μοντέλου το οποίο θα περιελάμβανε την ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για το σκοπό αυτό έπρεπε να τροποποιηθεί η προσέγγιση που είχε γίνει αρχικά για τη σύνδεση της δοκού-καρφιού- σανίδας με τη χρήση ελατηρίου(Κεφάλαιο 2) η οποία μπορούσε να περιγράψει επαρκώς μόνο τη μονοτονική φόρτιση.

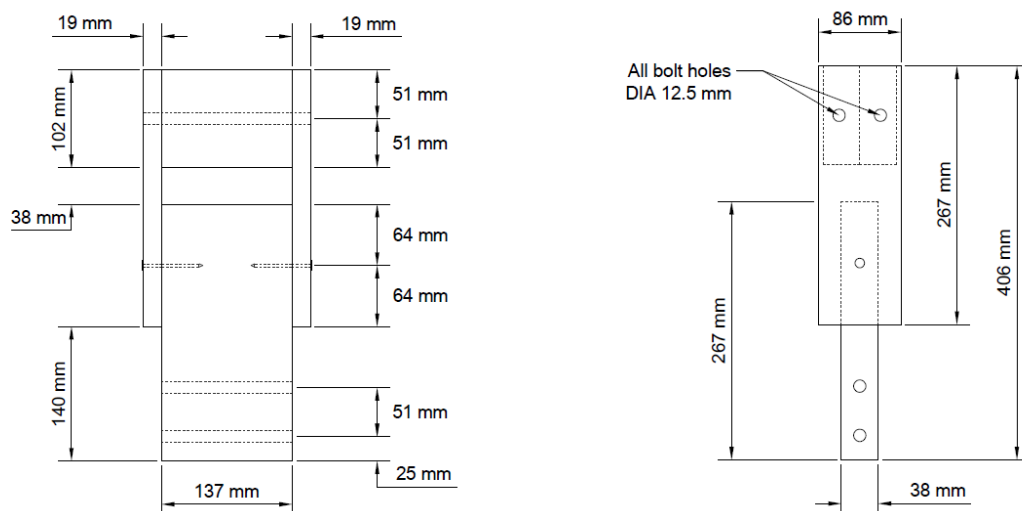
Συνεπώς θεωρήθηκε αναγκαία η ανάπτυξη υπορουτίνας στο Abaqus η οποία θα περιέγραφε λεπτομερώς τη συμπεριφορά της προαναφερόμενης σύνδεσης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η υπορουτίνα θα έδινε τη δυνατότητα να εισαχθούν συγκεκριμένες ιδιότητες, επιλεγμένες από τον χρήστη. Για τον προσδιορισμό των

χαρακτηριστικών αυτών έγινε χρήση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και δεδομένων από τη διδακτορική διατριβή του Aaron Wilson.

Στο πλαίσιο της παραπάνω εργασίας κατασκευάστηκαν 6 πειραματικά δοκίμια τα οποία αποτελούνταν από σανίδες λευκού πεύκου (Eastern White pine) διαστάσεων 19mmx89mm και δοκούς από ανάμιξη δύο τμημάτων, Δυτικού Hemlock και ελάτου (Amabilis Fir) 38mmx140mm. Τα καρφιά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση ήταν μήκους 64mm και διαμέτρου 3,33mm. Η διάταξη των παραπάνω περιγράφεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 3-2 Σύνδεση καρφιού-σανίδας-δοκού[10]



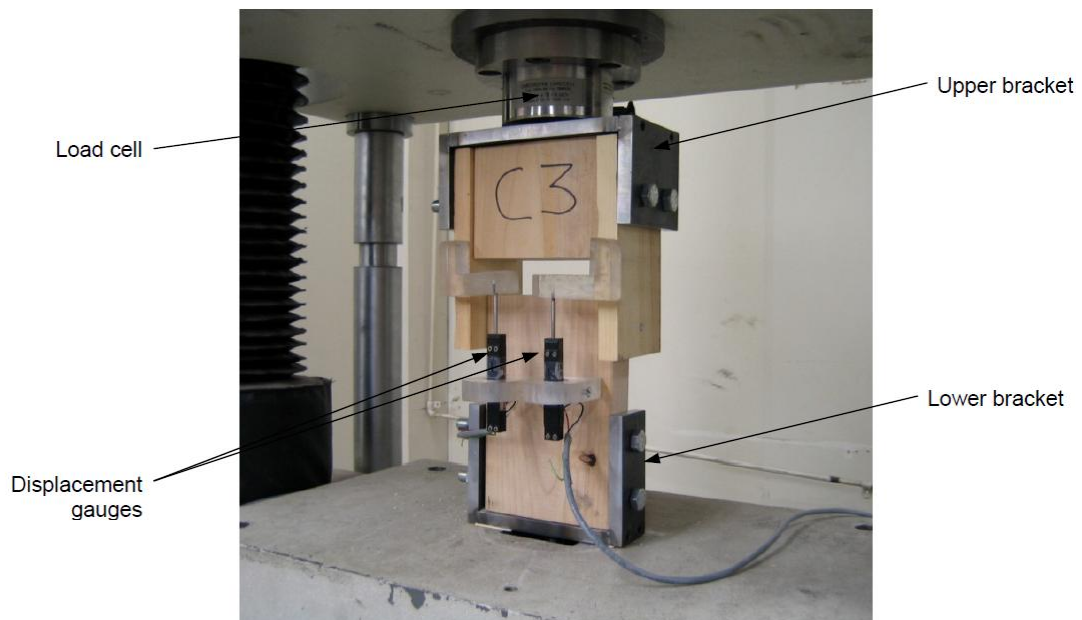
Εικόνα 3-3 Σχηματικές όψεις σύνδεσης καρφιού-σανίδας-δοκού[10]

Δείγματα από τα καρφιά που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στην εικόνα 3-4.



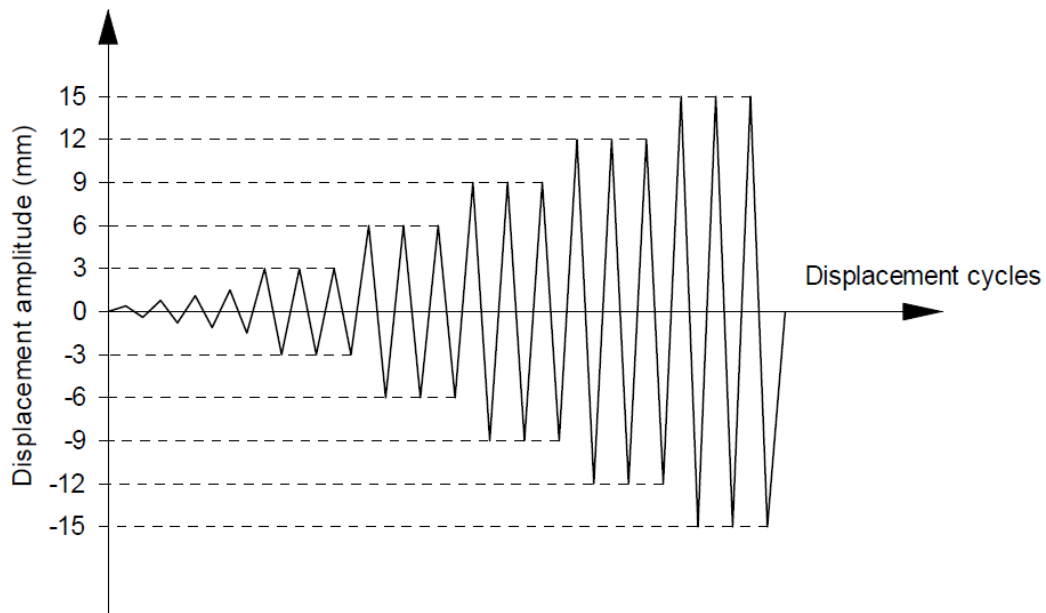
Εικόνα 3-4 Καρφιά πειραματικών δοκιμών[10]

Τα πειράματα έγιναν στο πανεπιστήμιο του Drexel και η πειραματική διάταξη ήταν η ακόλουθη.



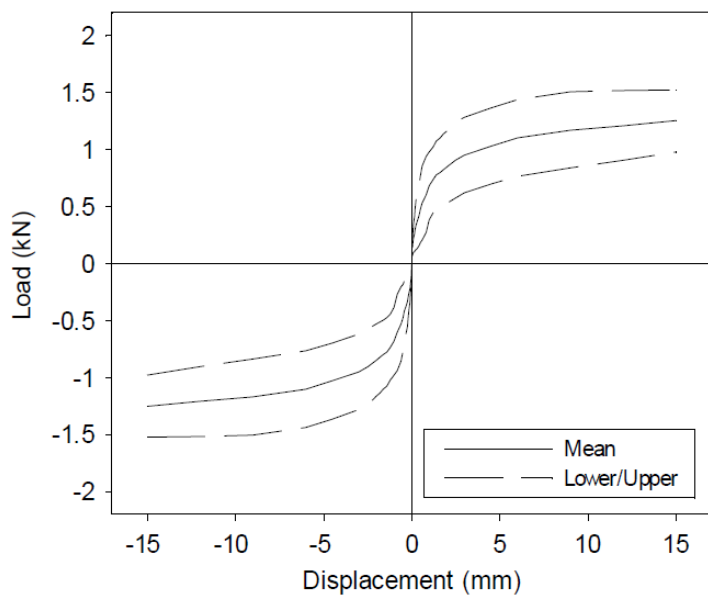
Εικόνα 3-5 Πειραματική διάταξη[10]

Στα πειράματα αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη της συμπεριφοράς της σύνδεσης έγινε με επιβολή μετακίνησης της οποίας η μορφή ήταν ανακυκλιζόμενη αυξανόμενης έντασης (εικόνα 3-6).



Εικόνα 3-6 Μορφή φόρτισης[10]

Από τα πειράματα, δεν προέκυπτε μονοσήμαντα η απόκριση της σύνδεσης, λόγω της διασποράς των αποτελεσμάτων. Κατά συνέπεια έγινε χρήση της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων για να προκύψει μία κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτική σχέση Δύναμης-μετακίνησης. Η σχέση αυτή δίνεται στην εικόνα 3-7.



Εικόνα 3-7 Σχέση δύναμης-μετατόπισης σύνδεσης καρφιού(μέσες τιμές, μέγιστες/ελάχιστες)[10]

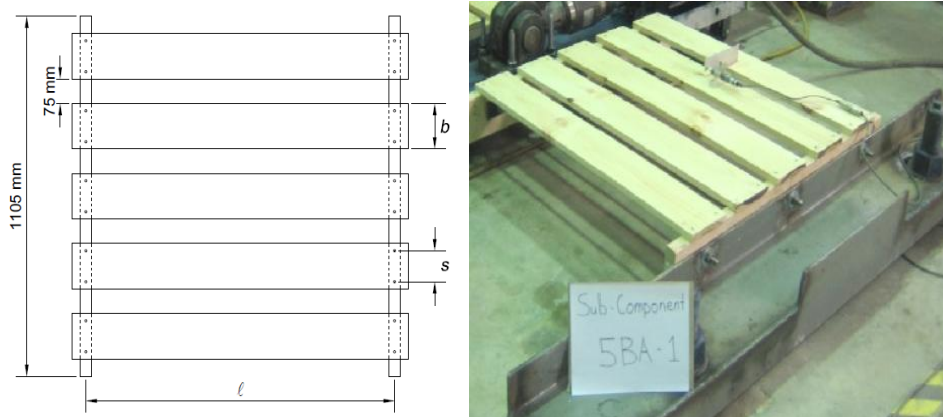
Βάσει του παραπάνω διαγράμματος θα προσδιοριστούν οι αναγκαίες παράμετροι συμπεριφοράς του καρφιού (κεφάλαιο 5).

### 3.3 ΤΥΠΟΙ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Είναι σημαντικό κατά την μελέτη της διαφραγματικής λειτουργίας ενός ξύλινου πατώματος να ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις τριβής οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των σανίδων. Πιθανολογείται ότι μη αναμενόμενες συμπεριφορές πατωμάτων σε γραμμικά οριζόντια φορτία οφείλονται στις δυνάμεις αυτές. Για λόγους πληρότητας, στην παρούσα εργασία θα εξετασθούν δύο τύποι πατωμάτων. Το πρώτο (SBT-1) με τις ξύλινες σανίδες να εφάπτονται και το δεύτερο (SBA-1) στο οποίο οι ξύλινες σανίδες να απέχουν μεταξύ τους κατά 75mm. Επιλέχθηκαν οι παραπάνω τύποι διαφραγμάτων λόγω του ότι υπάρχουν ήδη πειραματικά αποτελέσματα από τη διδακτορική διατριβή του Aaron Wilson.

#### 3.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ SBA-1 & SBT-1

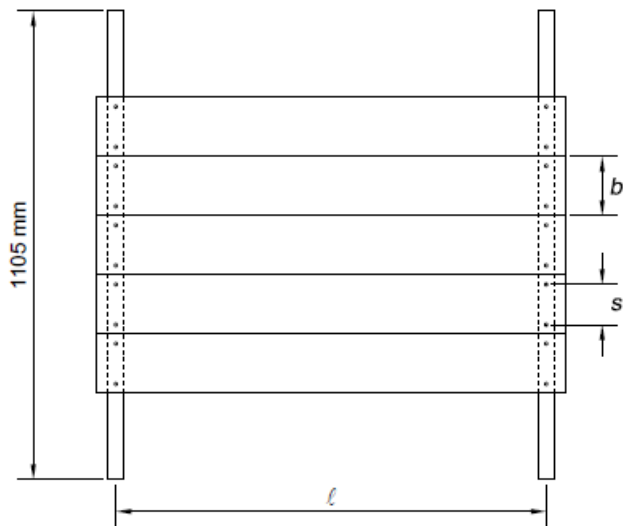
Οι σανίδες στο πάτωμα τύπου SBA-1 τοποθετούνται όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 3.8.



Εικόνα 3-8 Σχηματική κάτοψη ξύλινου πατώματος τύπου SBA-1- Εικόνα από τα πειράματα [10]

Το συνολικό μήκος του δοκιμίου είναι 1105mm ενώ το πλάτος 1015mm. Το πλάτος των σανίδων είναι 140mm, η απόσταση του ζεύγους των καρφιών είναι 95mm ενώ όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η απόσταση των σανίδων μεταξύ τους είναι 75mm. Το ξύλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το λευκό πεύκο (White Pine) ενώ τα καρφιά ήταν διαμέτρου 3.33mm και μήκους 64mm.

Ο δεύτερος τύπος διαφράγματος που δοκιμάστηκε περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 3-9.



Εικόνα 3-9 Σχηματική κάτοψη ξύλινου πατώματος τύπου SBT-1[10]

Οι σανίδες έχουν τοποθετηθεί χωρίς κάποιο κενό μεταξύ τους ενώ όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις είναι κοινές με το SBA-1. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του SBT-1 είναι ακριβώς ίδια με εκείνα του SBA-1.

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει μία προσπάθεια προσομοίωσης των παραπάνω δοκιμών και θα συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με εκείνα που θα προκύψουν από την αριθμητική προσομοίωση. Για το σκοπό αυτό είναι σημαντικό να γίνει μία εκτενέστερη αναφορά στα υστερητικά μοντέλα τα οποία ευρέως χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς των εκάστοτε εξεταζόμενων στοιχείων.

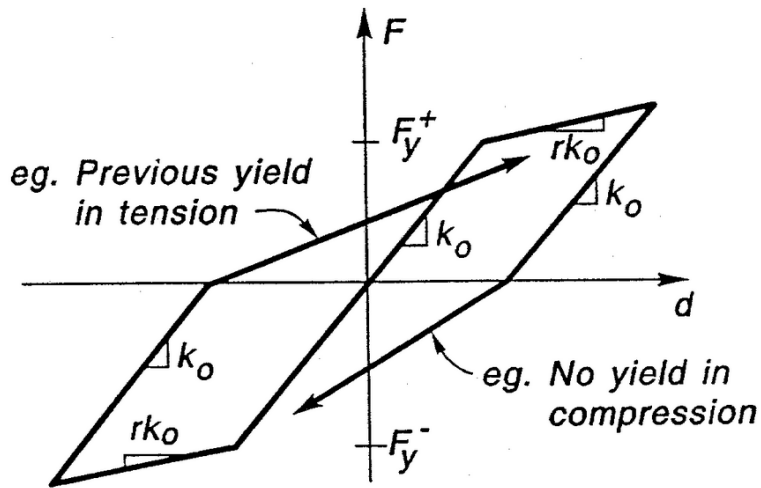
## 4. ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

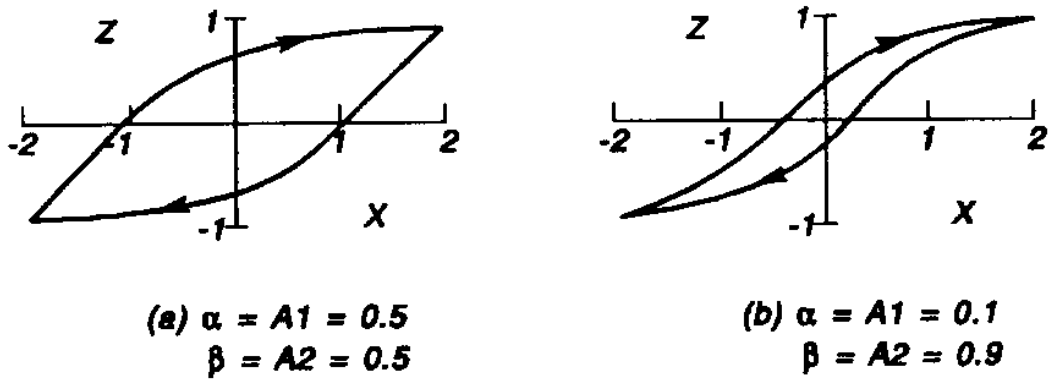
[Hysteretic Models for Cyclic Behavior of Deteriorating Inelastic Structures- M.V. Sivaselvan and A.M Reinhorn- University at Buffalo, State University of New York. November 5, 1999]

Ένα σημαντικό μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο παρατηρείται σε δομικά συστήματα τα οποία έχουν ένα είδος “μνήμης” σε προγενέστερες φορτίσεις είναι η υστέρηση. Λόγω της επίδρασης ενός ισχυρού σεισμού οι κατασκευές υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση όπου συνήθως παρουσιάζουν υστερητική συμπεριφορά. Τα μέλη και οι συνδέσεις σε μία κατασκευή σχεδιάζονται ώστε να αποσβένουν ενέργεια μέσω της υστέρησης ώστε να αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι των σεισμικών καταπονήσεων (Mazzolani and Piluso 1996, Priestley and Calvi, 1996, Bruneau et al 1998). Έκτοτε για το σκοπό αυτό έχουν κατασκευαστεί διάφορες συσκευές αποσβεστήρων. Η απόσβεση ενέργειας στις κατασκευές επιτυγχάνεται μέσω διάφορων μηχανισμών όπως η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, η τριβή μεταξύ διεπιφανειών κτλ. Όμως όταν υπάρχει επαναλαμβανόμενη κυκλική παραμόρφωση υπάρχει μια μη αναστρέψιμη υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού η οποία είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη στη ανάλυση και σχεδιασμό των δομικών συστημάτων. Για να γίνει μία πιο σχολαστική ανάλυση έναντι της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής είναι αναγκαίο να στραφούμε στη ανάλυση τρωτότητας αλλά και σε προσεγγίσεις οι οποίες βασίζονται στην πραγματική ικανότητα των μελών της κατασκευής. Συνεπώς θα πρέπει να ποσοτικοποιηθεί το επίπεδο της ζημιάς στην οποία οδηγήθηκε η κατασκευή λόγω ενός συγκεκριμένου σεισμικού γεγονότος. Είναι λοιπόν υψίστης σημασίας να μελετηθεί η συμπεριφορά μετά την έναρξη της ρηγμάτωσης του υλικού. Για αυτό το λόγο πρέπει να γίνουν πολλές αναλύσεις ώστε να συσχετιστούν τα στάδια της ζημιάς με τα επίπεδα της σεισμικής εδαφικής κίνησης.

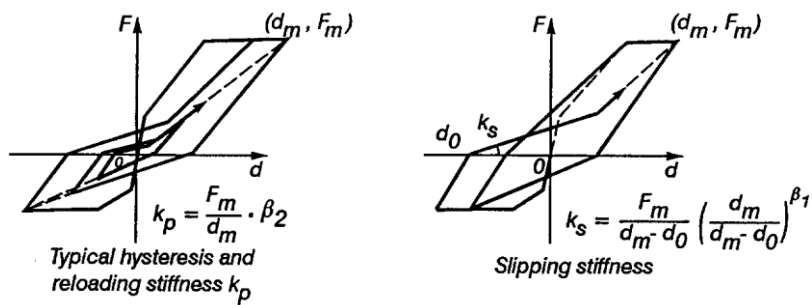
Έχουν αναπτυχθεί διάφορα υστερητικά μοντέλα τα οποία μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κυρίως τύπους, το πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο (Polygonal Hysteretic Models PHM) και το ομαλό υστερητικό μοντέλο (Smooth Hysteretic Model-SHM). Το Clough μοντέλο (Clough 1966) (εικόνα 4-1), το Takeda μοντέλο (Takeda et al, 1970) (εικόνες 4-3, 4-4) και τον τρι-παραμετρικό μοντέλο Park (Park et al, 1987) είναι μερικά παραδείγματα του πολυγωνικού υστερητικού μοντέλου. Ενώ μερικά παραδείγματα του SHM μοντέλου είναι το Bouc-Wen μοντέλο (Bouc 1967, Wen 1976) (εικόνα 4-2) και το Ozdemir μοντέλο (Ozdemir 1976).



Εικόνα 4-1 Clough model

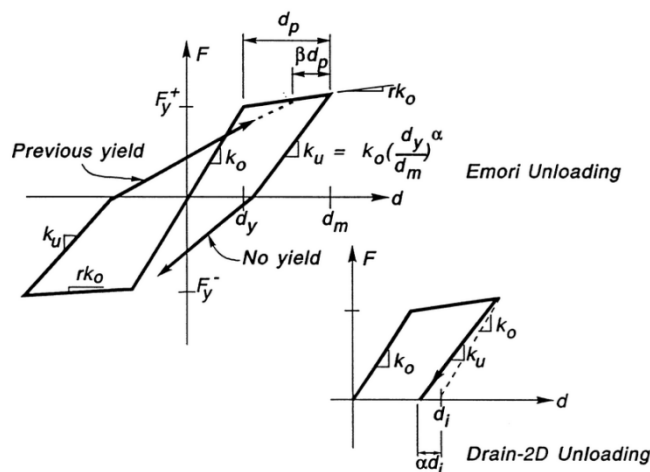


Εικόνα 4-2 Bouc Wen model



Εικόνα 4-3 Takeda with slip





Εικόνα 4-4 Takeda διγραμμική με υποβάθμιση της δυσκαμψίας

Επίσης το 1989 ο Thyagarajan πρότεινε ένα μοντέλο διακριτών στοιχείων για την περιγραφή της υστερητικής συμπεριφοράς το οποίο βασιζόταν σε αυτό του Iwan (1966). Αυτό είναι ένα πολυγωνικό μοντέλο το οποίο αποκτά ομαλή συμπεριφορά όταν αυξάνεται το πλήθος των στοιχείων και τείνει στο άπειρο. Όλα τα παραπάνω μοντέλα μπορεί να διαφέρουν ως προς τις διάφορες παραδοχές και προσεγγίσεις όμως βασίζονται στην ίδια κεντρική λογική. Κατανοώντας πως λειτουργούν μπορούμε να κατασκευάσουμε ανάλογα την περίπτωση που έχουμε το αντίστοιχο υστερητικό μοντέλο το οποίο ανταποκρίνεται στα φυσικά χαρακτηριστικά κάθε μεμονωμένης περίπτωσης.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή των διάφορων βασικών υστερητικών μοντέλων που υπάρχουν. Το κύριο μέλημα στην μόρφωση των μοντέλων αυτών είναι η υποβάθμιση την αντοχής και της δυσκαμψίας αλλά και των χαρακτηριστικών ολίσθησης ή «τσιμπήματος». Επίσης θα γίνει μια προσπάθεια κατασκευής ενός μοντέλου το οποίο θα περιγράφει την συμπεριφορά της σύνδεσης μεταξύ δυο ξύλινων μελών μέσω ενός μεταλλικού καρφιού. Τέλος θα αναπτυχθεί υπορουτίνα με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Fortran η οποία συνεργαζόμενη με το πρόγραμμα Abaqus θα προσομοιώσει όσο γίνεται πιο πιστά τη συμπεριφορά της σύνδεσης των ξύλινων σανίδων και των δοκών. Στόχος των παραπάνω είναι να περιγραφεί με αξιοπιστία (όσο το δυνατόν γίνεται) η διαφραγματική λειτουργία του ξύλινου πατώματος ώστε να συγκριθεί με αυτή πατώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα.

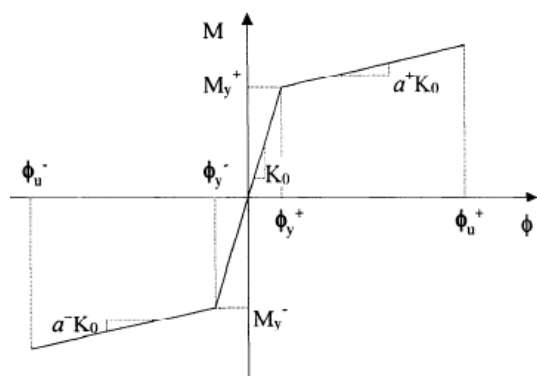
## 4.2 ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (PHM)

Το πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο αναφέρεται σε μοντέλα με γραμμική ή πολυγραμμική συμπεριφορά μερικά παραδείγματα PHM είναι το διγραμμικό μοντέλο, διπλό διγραμμικό μοντέλο, μοντέλο προσανατολισμένο στο σημείο διαρροής, μοντέλο προσανατολισμένο στο μέγιστο σημείο, μοντέλο ολίσθησης κτλ

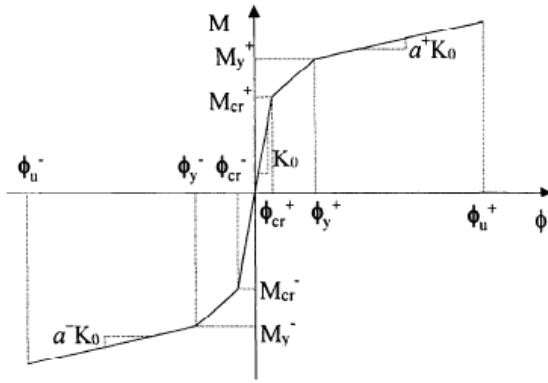
Αυτού του είδους τα προσωμοιώματα βασίζονται σε πραγματικές συμπεριφορές των στοιχείων της κατασκευής – χαρακτηριστικά όπως η αρχική ελαστική συμπεριφορά, η ρηγμάτωση, η διαρροή, η υποβάθμιση ακαμψίας και αντοχής, άνοιγμα και κλείσιμο των ρωγμών κτλ. Συνεπώς, επιλέγονται οι κατάλληλοι παράμετροι για να αποδώσουν αντιπροσωπευτικά τις πραγματικές φυσικές ιδιότητες. Υπάρχουν κανόνες που ορίζουν συγκεκριμένα διακριτά σημεία και καθορίζουν την μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο (Branches).

Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα που αντιπροσωπεύουν αυτή τη συμπεριφορά όπως ο Clough 1966, Fukada 1969, Takeda 1970, Aoyama 1971, Mutoetal 1973, Tani and Nomura 1973, Atalay and Penzien 1975, Kustu and Bouwkamp 1975, Takayanagi 1977, Nakata et al 1978. Το πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο που θα περιγραφεί παρακάτω είναι βασισμένο στο τριπαραμετρικό μοντέλο του Park (Park et al 1987). Θα δοθεί μια σειρά από σημεία και κλάδους τα οποία θα δίνουν τη πορεία, ανάλογα τη περίπτωση που θα λαμβάνει χώρα κάθε φορά, περιλαμβάνοντας βέβαια τις διάφορες μορφές υποβάθμισης. Η παραπάνω τροποποίηση έγινε ώστε το προσομοίωμα να βασίζεται στις κύριες καμπύλες (backbone curves) οι οποίες καθορίζονται από το υλικό και τις ιδιότητες της κατασκευής. Η επιθυμητή κυκλική συμπεριφορά αντιπροσωπεύεται από σημεία και κλάδους τα οποία είναι συναρτήσεις των παραμέτρων της backbone και των στιγμιαίων δυνάμεων και μετακινήσεων. Μέσω ενός λογικού διαγράμματος θα γίνονται οι αλλαγές από κλάδο σε κλάδο και θα καθορίζονται τα σημεία αλλαγής της κλίσης ώστε να αποδοθεί η συμπεριφορά του υλικού ή της σύνδεσης.

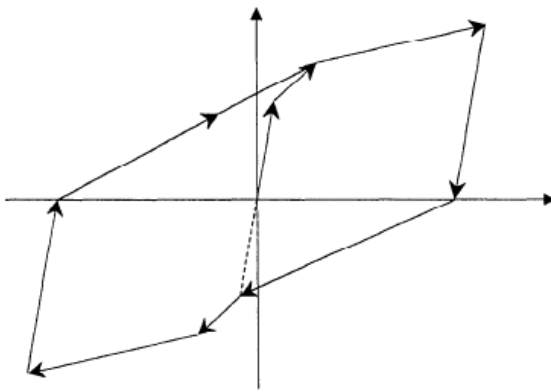
Το πολυγραμμικό υστερητικό μοντέλο ουσιαστικά έχει δυο μορφές κυρίων καμπυλών την διγραμμική και την τριγραμμική των οποίων τα σημεία καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά της ρηγμάτωσης και της διαρροής. Γενικά, μπορούν να υπάρξουν δυο κύρια είδη κυκλικής συμπεριφοράς το ένα προσανατολισμένο ως προς την διαρροή με ολίσθηση και το άλλο προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο σημείο (εικόνες 4.5 -4.8).



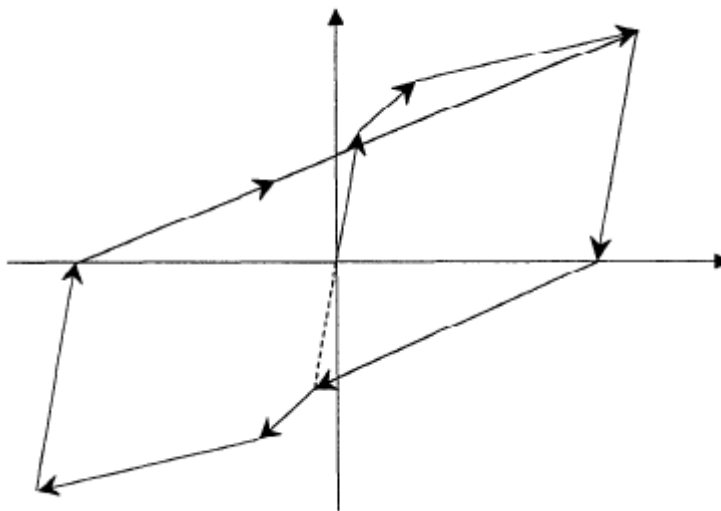
Εικόνα 4-5 Διγραμμικό μοντέλο (bilinear)



Εικόνα 4-6 Τριγραμμικό μοντέλο (Trilinear)

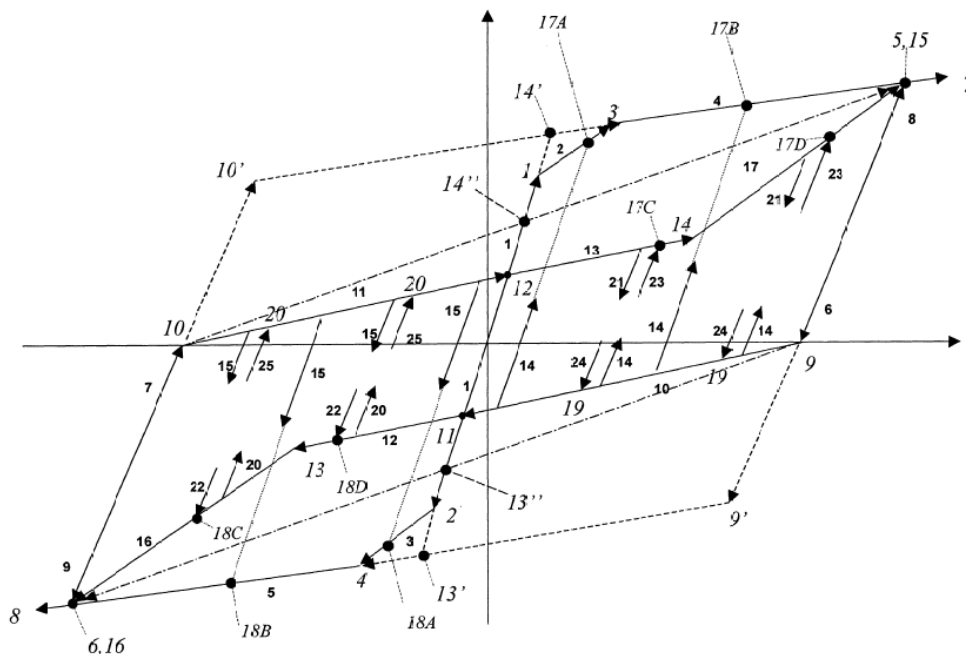


Εικόνα 4-7 Προσανατολισμένο στο σημείο διαρροής (Yielded)



Εικόνα 4-8 Προσανατολισμένο στο μέγιστο σημείο (Vertex)

Ένα ενδεικτικό διάγραμμα του πολυγωνικού υστερητικού μοντέλου δίνεται στην εικόνα 4.9



Εικόνα 4-9 Πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο (PHM)

Στο παραπάνω διάγραμμα τα σημεία τα οποία αντιστοιχούν στη καμπύλη με παύλες αντιπροσωπεύουν τη διγραμμική συμπεριφορά ενώ εκείνα με τις παύλες και τις τέλειες αντιστοιχούν στο μοντέλο που είναι προσανατολισμένο στο μέγιστο σημείο (vertex oriented). Τέλος οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στο προσομοίωμα που είναι προσανατολισμένο στο σημείο διαρροής. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω ακολουθούν τους ίδιους νόμους αλλαγής κλάδων. Η επιθυμητή υστέρηση αποδίδεται από ένα σύνολο μεταβλητών που αποτελούν τη βάση δεδομένων. Η βάση αυτή αναλύεται στον πίνακα 4.1. Το σύνολο των σημείων καθορισμού της καμπύλης προκύπτουν από αυτές τις μεταβλητές οι οποίες αν είναι γνωστές εξ αρχής μπορούν με μια σειρά συναρτήσεων να υπολογιστούν όπως δίδεται στο πίνακα 4.2. Οι γραμμές μεταξύ αυτών των σημείων καλούνται κλάδοι (branches) και ο κάθε ένας ανάλογα με μία συνθήκη μπορεί να οδηγήσει στους επόμενους πιθανούς κλάδους (πίνακας 4.3). Οι πιθανές διαδρομές για κάθε ένα κλάδο δίνονται αναλυτικά παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα στο κέντρο είναι ο τρέχον κλάδος και περιμετρικά οι προηγούμενοι και οι επόμενοι κλάδοι (εικόνες 4.10-4.12). Τέλος πολύ σημαντικό είναι να προσδιοριστούν τα σημεία έναρξης και τέλους του κάθε κλάδου (πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.1 Μεταβλητές

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ
$F_{cur}$	Η τρέχουσα δύναμη της διατομής
$\delta_{cur}$	Η τρέχουσα μετακίνηση της διατομής
$\Delta F$	Στοιχειώδεις δύναμη
$EI$	Κλίση του τρέχοντα κλάδου
$F_{max}^+$	Η μέγιστη θετική δύναμη που έχει φτάσει η διατομή
$\delta_{max}^+$	Η μέγιστη θετική μετατόπιση που έχει φτάσει η διατομή
$F_{max}^-$	Η μέγιστη αρνητική δύναμη που έχει φτάσει η διατομή
$\delta_{max}^-$	Η μέγιστη αρνητική μετατόπιση που έχει φτάσει η διατομή
$F_y^+$	Τρέχουσα (με υποβάθμιση) τιμή της θετικής δύναμης διαρροής
$F_y^-$	Τρέχουσα (με υποβάθμιση) τιμή της αρνητικής δύναμης διαρροής
$F_{vertex}^+$	Η δύναμη του τρέχοντα σημείου κορυφής στα θετικά
$\delta_{vertex}^+$	Η μετακίνηση του τρέχοντα σημείου κορυφής στα θετικά
$F_{vertex}^-$	Η δύναμη του τρέχοντα σημείου κορυφής στα αρνητικά
$\delta_{vertex}^-$	Η μετακίνηση του τρέχοντα σημείου κορυφής στα αρνητικά
$F_{cr}^+$	Η θετική δύναμη ρηγμάτωσης
$F_{cr}^-$	Η αρνητική δύναμη ρηγμάτωσης
$K_0$	Αρχική ελαστική κλίση
$F_y^+$	Η αρχική θετική δύναμη διαρροής
$\delta_y^-$	Η αρχική θετική μετακίνηση διαρροής
$F_y^+$	Η αρχική αρνητική δύναμη διαρροής
$\delta_y^-$	Η αρχική αρνητική μετακίνηση διαρροής
$\delta_u^+$	Η μέγιστη θετική μετακίνηση
$\delta_u^-$	Η μέγιστη αρνητική μετακίνηση
$\alpha^+$	Η θετική μετελαστική κλίση ως ποσοστό της ελαστικής κλίσης
$\alpha^+$	Η αρνητική μετελαστική κλίση ως ποσοστό της ελαστικής κλίσης
$\alpha$	παράμετρος υποβάθμισης της δυσκαμψίας
$\beta$	παράμετρος υποβάθμισης της αντοχής
$\gamma$	παράμετρος ολίσθησης (ή τσιμπήματος)

Πίνακας 4.2

ΣΗΜΕΙΟ		ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ		
		$\delta$	F	Άλλοι παράμετροι
1		$F_{cr}^+/K_0$	$F_{cr}^+$	-
2		$F_{cr}^-/K_0$	$F_{cr}^-$	-
3		$\delta_{y0}^+$	$F_y^+$	-
4		$\delta_{y0}^-$	$F_y^-$	-
5		$\delta_{max}^+$	$F_{max}^+$	-
6		$\delta_{max}^-$	$F_{max}^-$	-
7		$\delta_u^+$	$F_y^+ + K_{sh}^+(\delta_u^+ - \delta_{y0}^+)$	$K_{sh}^+ = \alpha^+ K_0$
8		$\delta_u^-$	$F_y^- + K_{sh}^-(\delta_u^- - \delta_{y0}^-)$	$K_{sh}^- = \alpha^- K_0$
9	9'	Το σημείο τομής : • της ευθείας που ενώνει τα σημεία 4 και 8 • της ευθείας που περνά από το σημείο $(F_{vertex}^+, \delta_{vertex}^+)$ και έχει κλίση $R_K^+ K_0$		$R_K^+ = \frac{F_{vertex}^+ + \alpha^+ F_y^+}{K_0 * \delta_{vertex}^+ + \alpha^+ F_y^+}$
	9'	$\delta_{vertex}^+ - \frac{F_{vertex}^+}{R_K^+ * K_0}$	0	
10	10	Το σημείο τομής : • της ευθείας που ενώνει τα σημεία 4 και 8 • της ευθείας που περνά από το σημείο $(M_{vertex}^-, \phi_{vertex}^-)$ και έχει κλίση $R_K^- K_0$		$R_K^- = \frac{F_{vertex}^- + \alpha^- F_y^-}{K_0 * \delta_{vertex}^- + \alpha^- F_y^-}$
	10'	$\delta_{vertex}^- - \frac{F_{vertex}^-}{R_K^- * K_0}$	0	

ΣΗΜΕΙΟ	ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ			
	δ	F	Άλλοι παράμετροι	
11	Το σημείο τομής : • της ευθείας που ενώνει τα σημεία 9 και 13 • του κλάδου 1		-	
12	Το σημείο τομής : • της ευθείας που ενώνει τα σημεία 10 και 14 • του κλάδου 1		-	
13		$WF \cdot \delta_{\gamma\gamma}^- + (1-WF) \cdot \delta_{\gamma u}^-$	$\gamma \cdot F_{\gamma}^-$	$R_{K,max}^+ = \frac{F_{max}^+ + a \cdot F_{\gamma}^+}{K_0 \cdot \delta_{max}^+ + a \cdot F_{\gamma}^+}$ $\delta_{\gamma u}^+ = \delta_{max}^- \cdot \frac{F_{max}^- - \gamma \cdot F_{\gamma}^-}{R_{K,max}^- \cdot K_0}$ $\delta_{\gamma}^- = \frac{F_{\gamma}^-}{K_0}$ $\delta_{\gamma\gamma}^- = \gamma \cdot \delta_{\gamma}^-$ <p>Συντελεστής Βαρύτητας, WF=γ</p>
		Εάν $F_{max}^- > F_{\gamma}^-$ και $F < F_{cr}^-$ τότε:		
	13	$F_{cr}^- / K_0$	$F_{cr}^-$	
	13'	Το σημείο τομής : • της ευθείας που ενώνει τα σημεία 8 και 4 • του κλάδου 1		-
	13''	Εάν $\delta_{vertex}^- > F_{\gamma}^- / K_0$ τότε το ίδιο με το σημείο 2  Διαφορετικά το σημείο τομής : • της ευθείας που ενώνει το σημείο 8 και ( $\delta_{vertex}^-$ , $F_{vertex}^-$ ) • του κλάδου 1		-

ΣΗΜΕΙΟ		ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ		
		δ	F	Άλλοι παράμετροι
14	14	$WF*\delta_{yy}^+ + (1-WF)*\delta_{yu}^+$	$\gamma * F_y^+$	$R_{K,max}^- = \frac{F_{max}^- + a * F_y^-}{K_0 * \delta_{max}^- + \alpha * F_y^-}$ $\delta_{yu}^+ = \delta_{max}^+ \frac{F_{max}^+ - \gamma * F_y^+}{R_{K,max}^+ * K_0}$ $\delta_y^+ = \frac{F_y^+}{K_n}$ $\delta_{\gamma y}^+ = \gamma * \delta_y^+$ <p>Συντελεστής Βαρύτητας, WF=γ</p>
		Εάν $F_{max}^+ < F_y^+$ και $F > F_{cr}^+$ τότε:		
		$F_{cr}^+ / K_0$	$F_{cr}^+$	
	14'	<p>Το σημείο τομής :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 7 και 3</li> <li>του κλάδου 1</li> </ul>		-
14''	<p>Εάν <math>\delta_{vertex}^+ &lt; F_y^+ / K_0</math> τότε το ίδιο με το σημείο 1</p>		-	
	<p>Διαφορετικά το σημείο τομής :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει το σημείο 10 και <math>(\delta_{vertex}^+, F_{vertex}^+)</math></li> <li>του κλάδου 1</li> </ul>		-	
15	$\delta_{max}^+$	$F_{max}^+$	-	
16	$\delta_{max}^-$	$F_{max}^-$	-	
17	A	<p>Το σημείο τομής :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 1 και 3</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^+ K_0</math></li> </ul>		$R_K^+ = \frac{F_{cur} + a * F_y^+}{K_0 * \delta_{cur} + \alpha * F_y^+}$
	B	<p>Το σημείο τομής :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 3 και 5</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^+ K_0</math></li> </ul>		
	C	<p>Το σημείο τομής :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 10 και 14</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^+ K_0</math></li> </ul>		
	D	<p>Το σημείο τομής :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 14 και 15</li> </ul>		



	<ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^+K_0</math></li> </ul>	
--	---	--

ΣΗΜΕΙΟ		ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ		
		$\delta$	F	Άλλοι παράμετροι
18	A	Το σημείο τομής : <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 2 και 4</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^-K_0</math></li> </ul>		$R_K^- = \frac{F_{cur}^- + a * F_y^-}{K_0 * \delta_{cur}^- + a * F_y^-}$
	B	Το σημείο τομής : <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 4 και 6</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^-K_0</math></li> </ul>		
	C	Το σημείο τομής : <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 9 και 13</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^-K_0</math></li> </ul>		
	D	Το σημείο τομής : <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 13 και 16</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^-K_0</math></li> </ul>		
19		Το σημείο τομής : <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 9 και 11</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^+K_0</math></li> </ul>		$R_K^+ = \frac{F_{cur}^+ + a * F_y^+}{K_0 * \delta_{cur}^+ + a * F_y^+}$
20		Το σημείο τομής : <ul style="list-style-type: none"> <li>της ευθείας που ενώνει τα σημεία 10 και 12</li> <li>της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο και έχει κλίση <math>R_K^-K_0</math></li> </ul>		$R_K^- = \frac{F_{cur}^- + a * F_y^-}{K_0 * \delta_{cur}^- + a * F_y^-}$
21		$\delta_{current}$	$F_{current}$	-

Πίνακας 4.3

ΤΡΕΧΟΝ ΚΛΑΔΟΣ	ΕΠΟΜΕΝΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	ΣΥΝΘΗΚΗ
		ΕΛΕΝΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
1	1	$\Delta\delta^*(\delta_{end}^1 - \delta_{start}^1) < 0 \Rightarrow$ έχουμε αλλαγή φόρτισης Επίσης αντάλλαξε τις τιμές της αρχής και του τέλους του κλάδου 1
	2	$\Delta\delta^*(\delta_{end}^1 - \delta_{start}^1) > 0$ $\Delta\delta > 0$
	3	$\Delta\delta^*(\delta_{end}^1 - \delta_{start}^1) > 0$ $\Delta\delta < 0$
2	4	$\Delta\delta > 0$
	6	$\Delta\delta < 0, F_{cur} \geq F_{max}^+$
	21	$\Delta\delta < 0, F_{cur} < F_{max}^+$
3	5	$\Delta\delta < 0$
	7	$\Delta\delta > 0, F_{cur} < F_{max}^-$
	20	$\Delta\delta > 0, F_{cur} \geq F_{max}^-$
4	6	$F_{cur} > F_{max}^+$
	21	$F_{cur} < F_{max}^+$
5	7	$F_{cur} < F_{max}^-$
	20	$F_{cur} > F_{max}^-$
6	8	$\Delta\delta > 0$
	10	$\Delta\delta < 0$
7	9	$\Delta\delta < 0$
	11	$\Delta\delta > 0$
8	2	$\delta_{start}^2 < \delta_{end}^8 < \delta_{end}^2$ το τέλος του κλάδου 8 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 2
	4	αλλιώς
9	3	$\delta_{start}^3 > \delta_{end}^9 > \delta_{end}^3$ το τέλος του κλάδου 9 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 3
	5	αλλιώς
10	1	$\Delta\delta < 0$ και $F_{max}^- > F_y^-$ η διατομή δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά
	12	$\Delta\delta < 0$ και $F_{max}^- < F_y^-$
	14	$\Delta\delta > 0$
11	1	$\Delta\delta > 0$ και $F_{max}^+ < F_y^+$ η διατομή δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά
	13	$\Delta\delta > 0$ και $F_{max}^+ > F_y^+$
	15	$\Delta\delta < 0$
12	16	$\Delta\delta < 0$
	20	$\Delta\delta > 0$
13	17	$\Delta\delta > 0$

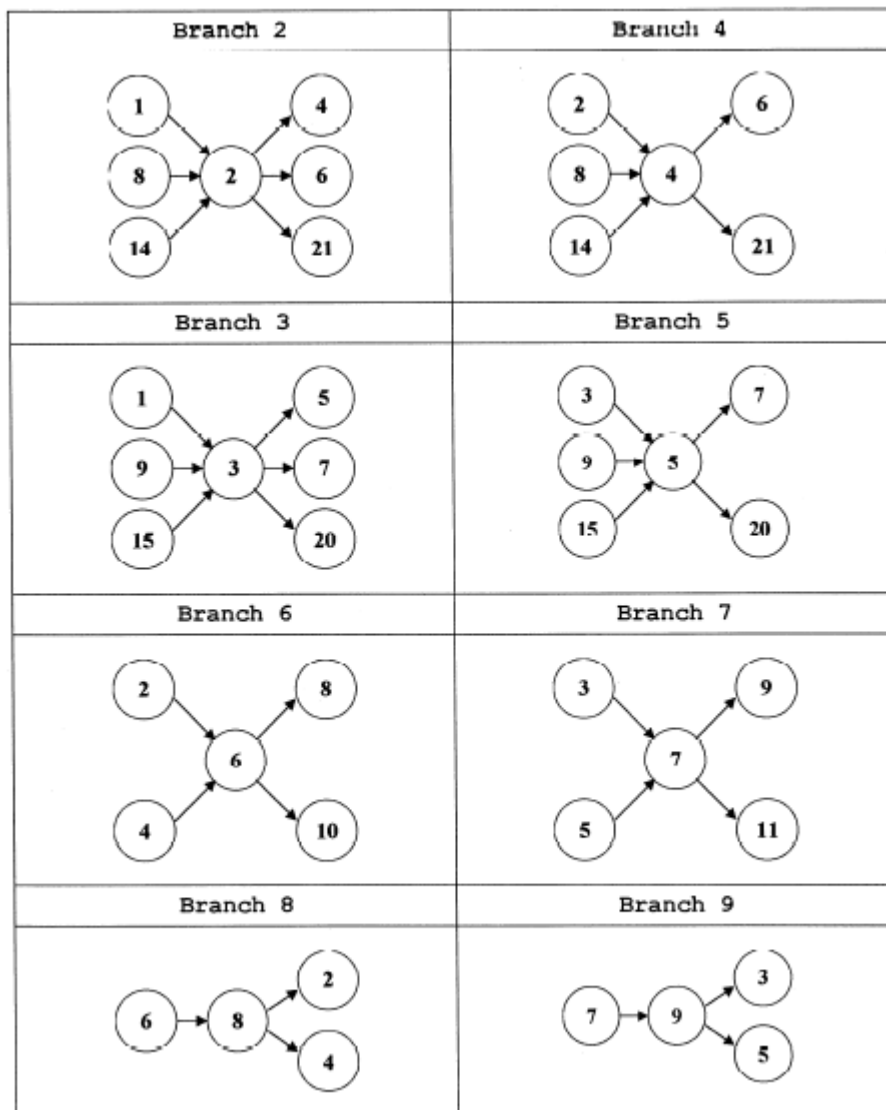
	21	$\Delta\delta < 0$
--	----	--------------------

ΤΡΕΧΟΝ ΚΛΑΔΟΣ	ΕΠΟΜΕΝΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	ΣΥΝΘΗΚΗ
		ΕΛΕΝΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
14	2	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- < F_y^- \Rightarrow$ έχει διαρρεύσει στα αρνητικά $F_{\max}^+ < F_y^+ \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά Ή $\Delta\delta > 0, F_{\max}^- > F_y^- \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά $\delta_{\text{start}}^2 < \delta_{\text{end}}^{14} < \delta_{\text{end}}^2$ το τέλος του κλάδου 14 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 2
	4	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- > F_y^-$ δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $\delta_{\text{end}}^{14} > \delta_{\text{end}}^2$ το τέλος του κλάδου 14 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 4
	13	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $\delta_{\text{start}}^{13} < \delta_{\text{end}}^{14} < \delta_{\text{end}}^{13}$ το τέλος του κλάδου 14 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 13
	17	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $\delta_{\text{end}}^{14} > \delta_{\text{end}}^{13}$ το τέλος του κλάδου 14 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 17
	24	$\Delta\delta < 0$

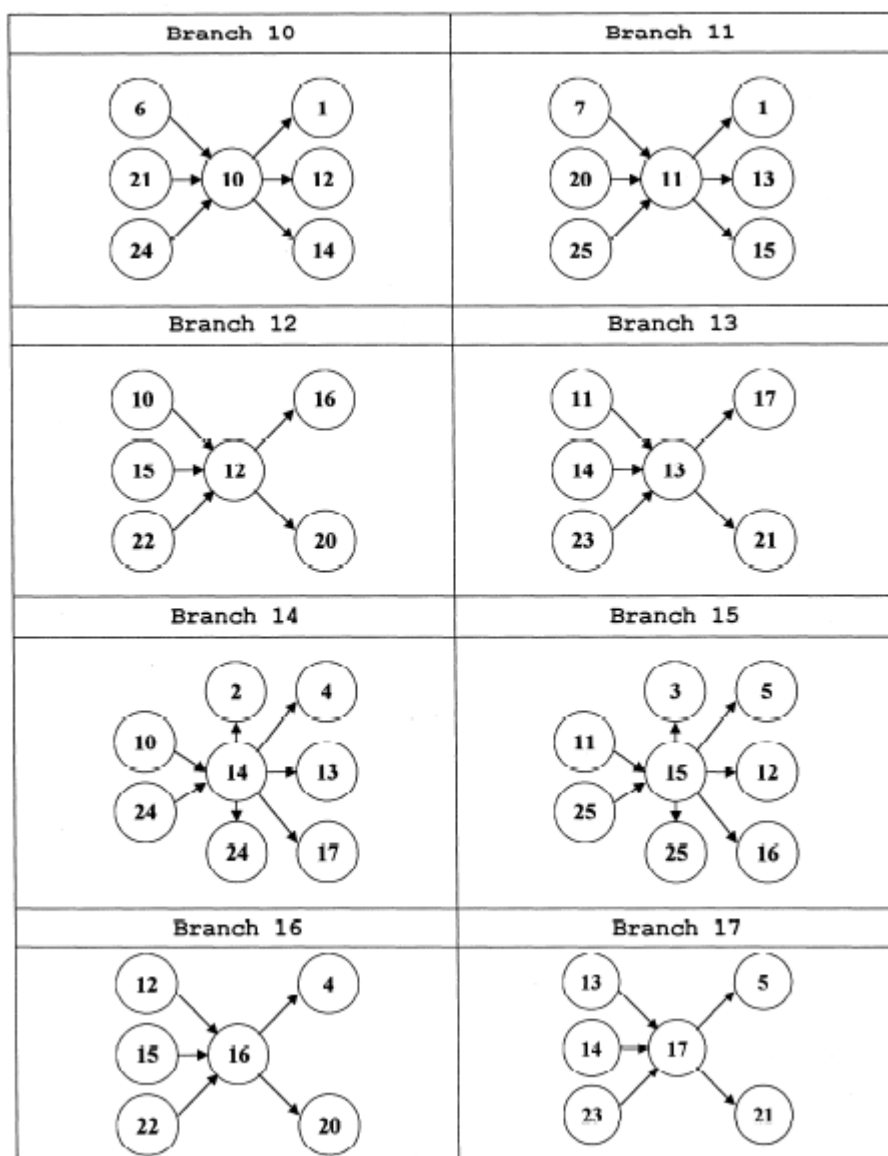
ΤΡΕΧΟΝ ΚΛΑΔΟΣ	ΕΠΟΜΕΝΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	ΣΥΝΘΗΚΗ
		ΕΛΕΝΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
15	3	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ > F_y^+ \Rightarrow$ έχει διαρρεύσει στα θετικά $F_{\max}^- > F_y^- \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά Ή $\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ < F_y^+ \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά $\delta_{\text{start}}^3 > \delta_{\text{end}}^{15} > \delta_{\text{end}}^3$ το τέλος του κλάδου 15 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 3
	5	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ < F_y^+$ δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά, $\delta_{\text{end}}^{15} < \delta_{\text{end}}^3$ το τέλος του κλάδου 15 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 5
	12	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $\delta_{\text{start}}^{12} > \delta_{\text{end}}^{15} > \delta_{\text{end}}^{12}$ το τέλος του κλάδου 15 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 12
	16	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $\delta_{\text{end}}^{15} < \delta_{\text{end}}^{12}$ το τέλος του κλάδου 15 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 16
	25	$\Delta\delta > 0$

ΤΡΕΧΟΝ ΚΛΑΔΟΣ	ΕΠΟΜΕΝΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	ΣΥΝΘΗΚΗ
		ΕΛΕΝΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
22	3	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ > F_y^+ \Rightarrow$ έχει διαρρεύσει στα θετικά $F_{\max}^- > F_y^- \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά Ή $\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ < F_y^+ \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά $\delta_{\text{start}}^3 > \delta_{\text{end}}^{22} > \delta_{\text{end}}^3$ το τέλος του κλάδου 22 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 3
	5	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ < F_y^+$ δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά, $\delta_{\text{end}}^{22} < \delta_{\text{end}}^3$ το τέλος του κλάδου 22 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 5
	12	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $\delta_{\text{start}}^{12} > \delta_{\text{end}}^{22} > \delta_{\text{end}}^{12}$ το τέλος του κλάδου 22 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 12
	16	$\Delta\delta < 0, F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $\delta_{\text{end}}^{22} < \delta_{\text{end}}^{12}$ το τέλος του κλάδου 22 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 16
	20	$\Delta\delta > 0$

ΤΡΕΧΟΝ ΚΛΑΔΟΣ	ΕΠΟΜΕΝΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	ΣΥΝΘΗΚΗ
		ΕΛΕΝΧΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
23	2	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- < F_y^- \Rightarrow$ έχει διαρρεύσει στα αρνητικά $F_{\max}^+ < F_y^+ \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα θετικά Ή $\Delta\delta > 0, F_{\max}^- > F_y^- \Rightarrow$ δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά $\delta_{\text{start}}^2 < \delta_{\text{end}}^{23} < \delta_{\text{end}}^2$ το τέλος του κλάδου 23 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 2
	4	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- > F_y^-$ δεν έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $\delta_{\text{end}}^{23} > \delta_{\text{end}}^2$ το τέλος του κλάδου 23 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 4
	13	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $\delta_{\text{start}}^{13} < \delta_{\text{end}}^{23} < \delta_{\text{end}}^{13}$ το τέλος του κλάδου 23 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 13
	17	$\Delta\delta > 0, F_{\max}^- < F_y^-$ Έχει διαρρεύσει στα αρνητικά, $F_{\max}^+ > F_y^+$ Έχει διαρρεύσει στα θετικά, $\delta_{\text{end}}^{23} > \delta_{\text{end}}^{13}$ το τέλος του κλάδου 23 να βρίσκεται πάνω στο κλάδο 17
	21	$\Delta\delta < 0$
16	4	$\Delta\delta < 0$
	20	$\Delta\delta > 0$
17	5	$\Delta\delta > 0$
	21	$\Delta\delta < 0$
20	11	$\Delta\delta > 0$
	22	$\Delta\delta < 0$
21	10	$\Delta\delta < 0$
	23	$\Delta\delta > 0$
24	10	$\Delta\delta < 0$
	14	$\Delta\delta > 0$
25	11	$\Delta\delta > 0$
	15	$\Delta\delta < 0$

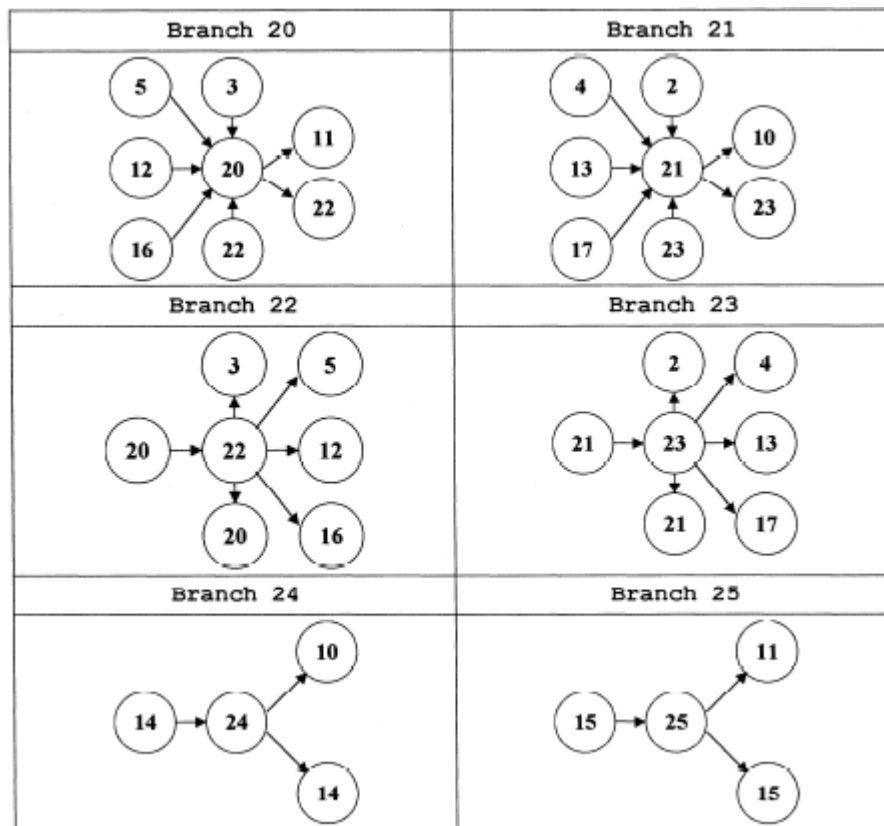


Εικόνα 4-10 Πιθανές διαδρομές κλάδων Α



Εικόνα 4-11 Πιθανές διαδρομές κλάδων Β





Εικόνα 4-12 Πιθανές διαδρομές κλάδων Γ

Πίνακας 4.4 Πίνακας σημείων έναρξης και λήξης κάθε κλάδου

Branch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	20	21	22	23	24	25
Start Pt	1	1	2	3	4	5	6	9	10	9	10	11	12	21	21	13	14	21	21	21	21	21	21
End Pt	2	3	4	7	8	9	10	5	6	11	12	13	14	17	18	16	15	10	9	18	17	19	20

Το πολυγωνικό υστερητικό μοντέλο μπορεί να ελέγχεται με τρεις τρόπους.

A. Βάση της δύναμης: Δηλαδή δίνεται μία μικρή δύναμη εφαρμόζεται και το μοντέλο θα δώσει το αντίστοιχο ζεύγος δύναμης-μετακίνησης.

B. Οιονεί δύναμη: Δίνεται η μικρή δύναμη όμως η αντίστοιχη μετακίνηση υπολογίζεται μέσω της ακαμψίας του τρέχοντα κλάδου. Αυτή η μετακίνηση εφαρμόζεται στο μοντέλο και επιστρέφει τη διαφορά της δύναμης που έφτασε με αυτή που έπρεπε να φτάσει.

Γ. Βάση της μετακίνησης: Δίνεται μία μικρή μετακίνηση και το μοντέλο δίνει την αντίστοιχη μετακίνηση και δύναμη.

Η περίπτωση που μελετάται εδώ είναι η τελευταία, εκείνη η οποία βασίζεται στη μετακίνηση.

Η υποβάθμιση είτε είναι στην δυσκαμψία (stiffness degradation) είτε στην αντοχή (strength degradation) είναι πού σημαντικό στοιχείο του υστερητικού μοντέλου.

Έχει αποδειχθεί ότι το μοντέλο του Park 1987 βασισμένο στο νόμο ενός σταθερού σημείου περιστροφής δίνει με ακρίβεια την υποβάθμιση της δυσκαμψίας. Με βάση το νόμο αυτό οι κλάδοι αλλαγής φόρτισης συγκλίνουν στο σημείο περιστροφής. Το σημείο αυτό βρίσκεται στον ελαστικό κλάδο με τιμή  $\alpha * M_y$  όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 4.13. Συνεπώς ο συντελεστής της υποβάθμισης της δυσκαμψίας θα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_K^+ = \frac{F_{cur} + a * F_y}{K_0 * \delta_{cur} + a * F_y}$$

Όπου,

$F_{cur}$  : η τρέχουσα δύναμη

$\delta_{cur}$  : η τρέχουσα μετατόπιση

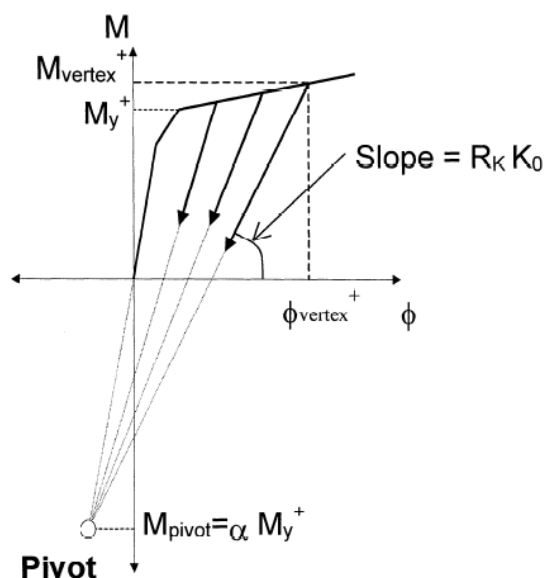
$K_0$  : η αρχική ελαστική δυσκαμψία

$F_y = F_y^+$  εάν είναι δεξιά του ελαστικού κλάδου

$F_y = F_y^-$  εάν είναι αριστερά του ελαστικού κλάδου

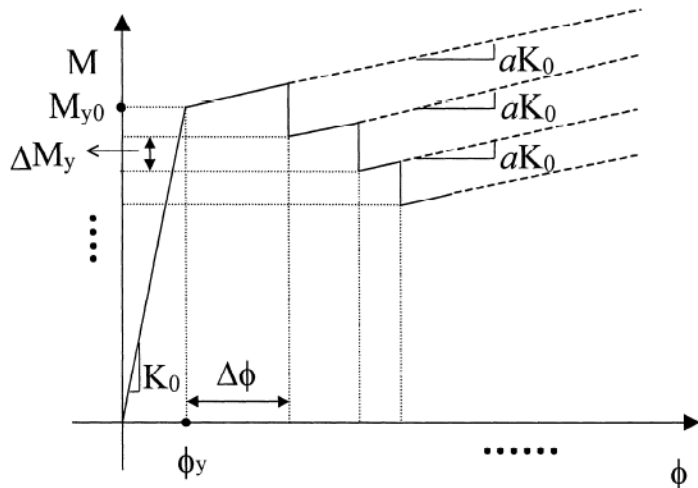
Συνεπώς η τρέχουσα ελαστική δυσκαμψία τροποποιείται ως εξής

$$K_{cur} = R_K * K_0$$



Εικόνα 4-13 Νόμος Park με σταθερό σημείο περιστροφής (pivot)

Πέραν της υποβάθμισης της δυσκαμψίας υπάρχει και η υποβάθμιση της αντοχής η οποία επιτυγχάνεται μειώνοντας την ικανότητα της κύριας καμπύλης όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11.



Εικόνα 4-14 Σχηματική απεικόνιση της υποβάθμιση της αντοχής

Πιο συγκεκριμένα, υποβαθμίζεται με συγκεκριμένο νόμο η δύναμη διαρροής όπως δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$F_y^{+/-} = F_{y0}^{+/-} \left[ 1 - \left( \frac{\delta_{max}^{+/-}}{\delta_u^{+/-}} \right)^{\frac{1}{\beta_1}} \right] \left[ 1 - \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} \frac{H}{H_{ult}} \right]$$

Όπου,

$F_y^{+/-}$ : η δύναμη διαρροής

$F_{y0}^{+/-}$ : η αρχική δύναμη διαρροής

$\delta_{max}^{+/-}$ : η μέγιστη μετακίνηση που έχει φτάσει η διατομή

$\delta_u^{+/-}$ : η μέγιστη δυνατή μετατόπιση (ultimate)

$\beta_1$ : παράμετρος υποβάθμισης της αντοχής βάση της πλαστιμότητας

$\beta_2$ : παράμετρος υποβάθμισης της αντοχής βάση της ενέργειας

$H_{ult}$ : είναι η υστερητική ενέργεια που απορροφάται κατά τη μονοτονική φόρτιση μέχρι την μέγιστη δυνατή μετακίνηση

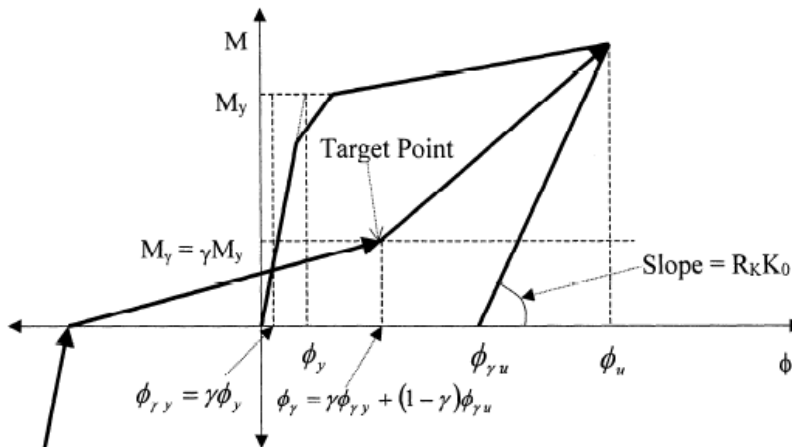
$H$ : η υστερητική ενέργεια

Ο δεύτερος όρος της παραπάνω εξίσωσης αντιστοιχεί στην υποβάθμιση της αντοχής λόγω της αύξησης της παραμόρφωσης ενώ ο τρίτος στην μείωση της αντοχής λόγω της υστερητικής ενέργειας η οποία έχει απορροφηθεί.

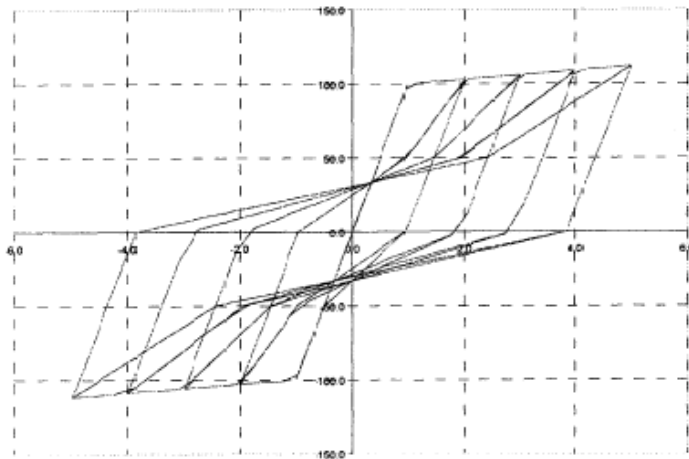
Τέλος, η στοιχειώδη υστερητική ενέργεια δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Delta H = \left( \frac{F + (F + \Delta F)}{2} \right) \left( \Delta \delta - \frac{\Delta F}{R_K K_0} \right)$$

Όταν υπάρχει κλείσιμο ρωγμής, ολίσθηση συνδέσμου κτλ τότε η συγκεκριμένη συμπεριφορά προσομοιώνεται αντίστοιχα στο μοντέλο. Η ολίσθηση μορφώνεται ορίζοντας το σημείο «στόχος» του κλάδου φόρτισης ως το σημείο κλεισίματος της ρωγμής. Η αντίστοιχη δύναμη είναι ένα ποσοστό της δύναμης διαρροής ( $F = \gamma F_y$ ,  $\gamma$  παράμετρος ολίσθησης) και η αντίστοιχη μετακίνηση ως μια μέση τιμή της μετακίνησης διαρροής και της μέγιστης μετακίνησης (εικόνα 4.15).



Εικόνα 4-15 Σχηματική απεικόνιση σημείου «στόχου» και ολίσθησης



Εικόνα 4-16 Ολίσθηση ( $\gamma=0.5$ )

Πίνακας 4.5 Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων πολυγωνικού υστερητικού μοντέλου

	ΗΠΙΟ	ΜΕΣΑΙΟ	ΑΥΣΤΗΡΟ
$\alpha_1$	15	10	4
$\beta_1$	0.00	0.30	0.60
$\beta_2$	0.00	0.15	0.30

### 4.3 ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ

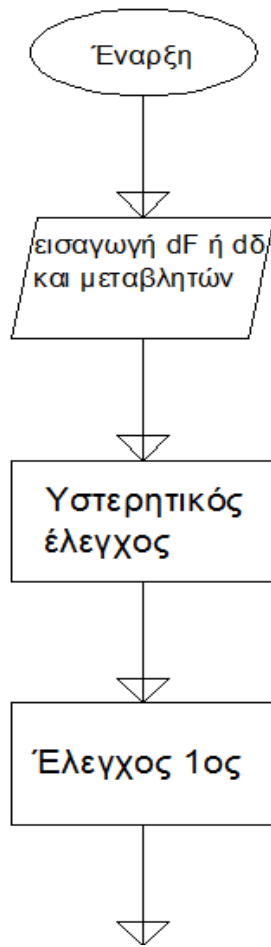
Παραπάνω ορίστηκαν οι παράμετροι και οι μεταβλητές του πολυγωνικού υστερητικού μοντέλου αλλά και η λογική που διέπει την κατασκευή του. Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί το λογικό διάγραμμα στο οποίο βασίζεται η υπορουτίνα.

Στην υπορουτίνα εισάγεται η βάση δεδομένων και γίνεται ο έλεγχος υστέρησης ο οποίος περιλαμβάνει:

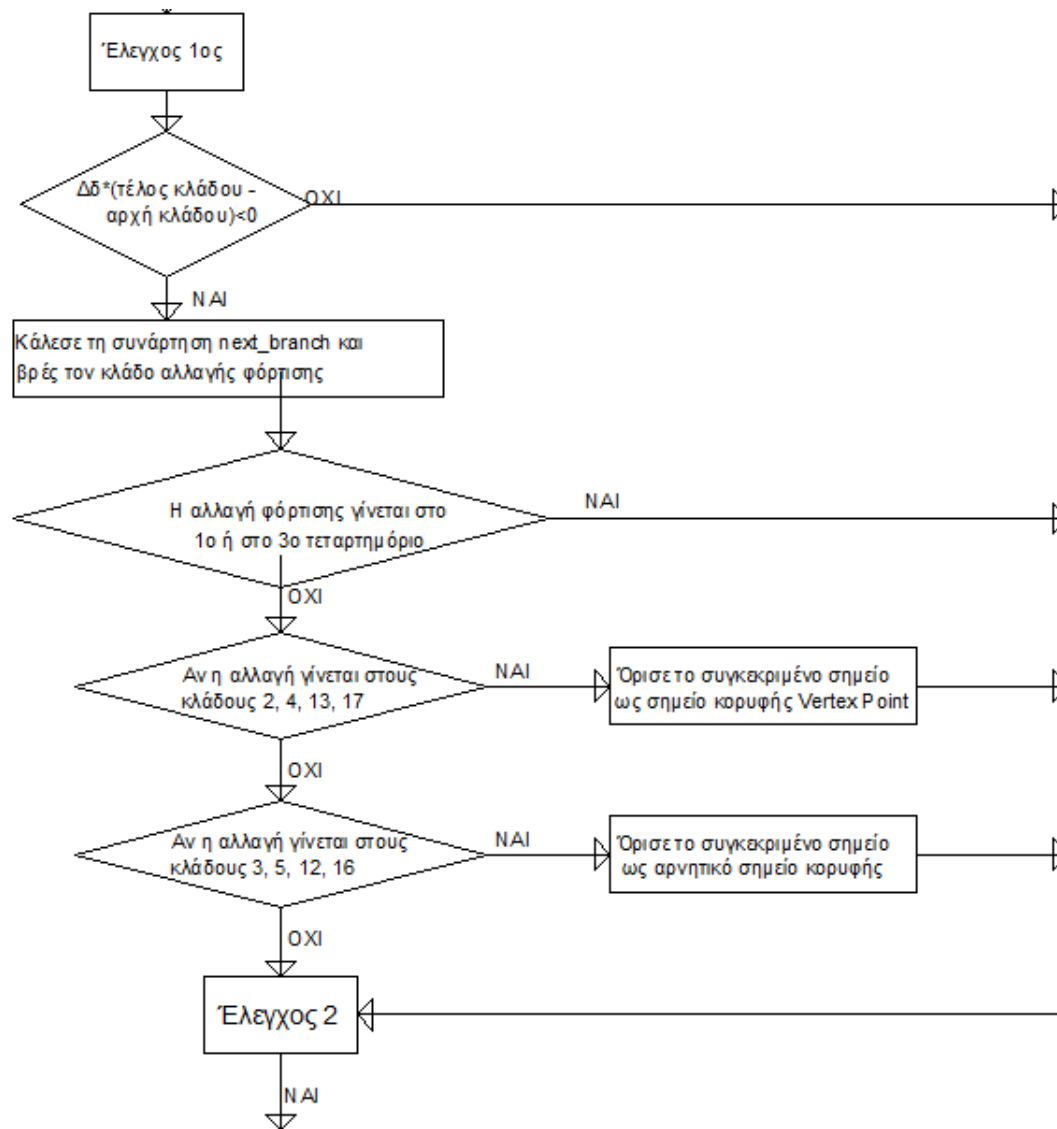
Έλεγχος 1: Σε αυτή την ρουτίνα όταν γίνεται αλλαγή στη φορά της φόρτισης γίνεται αλλαγή του τρέχοντα κλάδου.

Έλεγχος 2: Η υπορουτίνα αυτή βρίσκει τη στοχευμένη μετακίνηση προσθέτοντας το  $\Delta d$  στη τρέχουσα μετακίνηση και εάν αυτή βρίσκεται εντός ορίων του τρέχοντα κλάδου συνεχίζει και υπολογίζει την δύναμη, διαφορετικά μέσω της συνάρτησης «επόμενος βρόγχος» βρίσκει τον επόμενο κλάδο και επαναλαμβάνει τον έλεγχο.

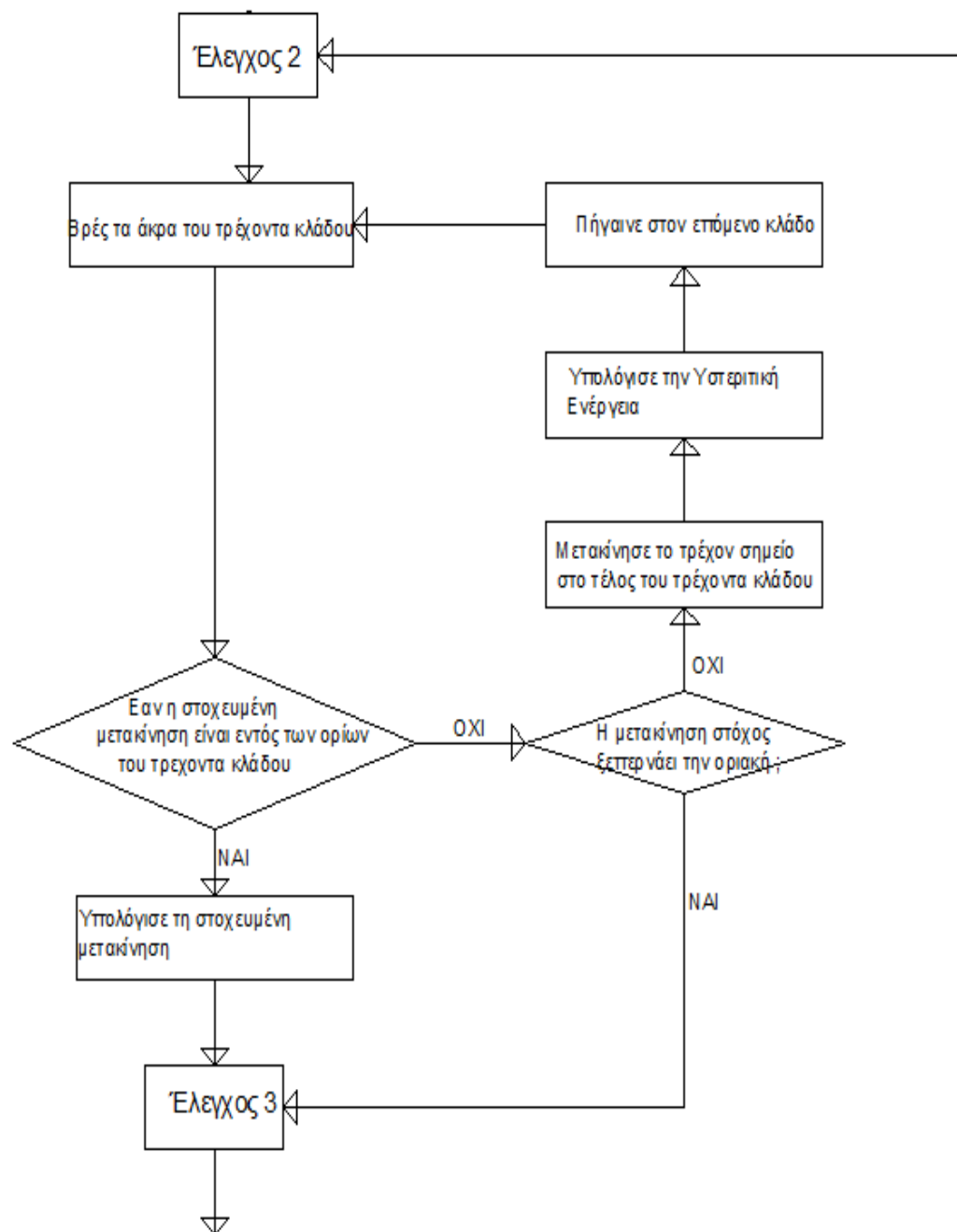
Έλεγχος 3: Μέσω του ελέγχου αυτού εάν έχουμε υπέρβαση της μέγιστης μετακίνησης (είτε θετικής είτε αρνητικής) τότε ορίζεται η μετακίνηση και δύναμη που προκύπτουν από έλεγχο 2 ως τα μέγιστα θετικά και αρνητικά σημεία αντίστοιχα. Στη συνέχεια γίνεται η υποβάθμιση την αντοχής εάν απαιτείται.



Εικόνα 4-17 Λογικό διάγραμμα έναρξης υπορουτίνας

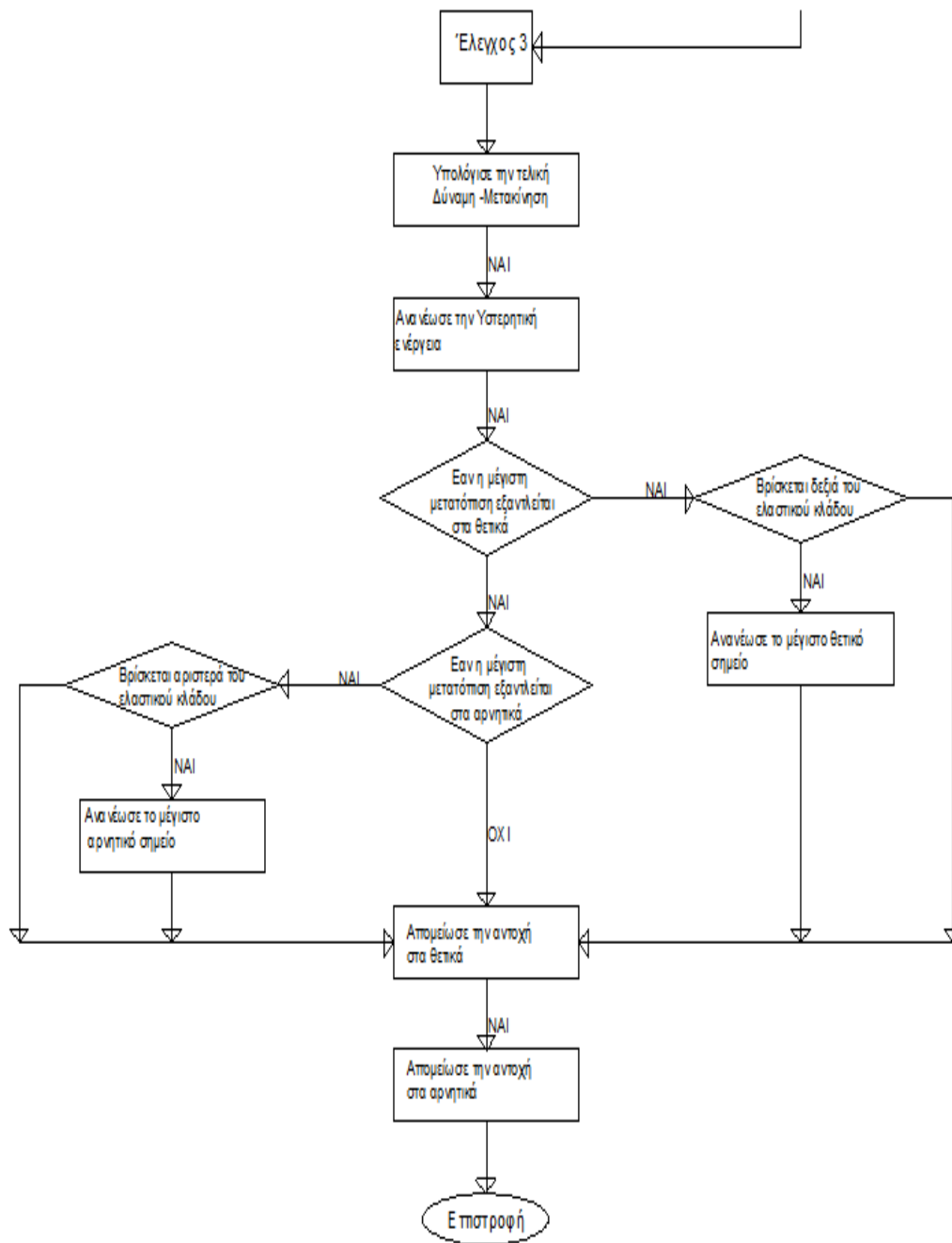


Εικόνα 4-18 Λογικό διάγραμμα ελέγχου 1 (συνέχεια προηγούμενης σελίδας)



Εικόνα 4-19 Λογικό διάγραμμα ελέγχου 2 (συνέχεια προηγούμενης σελίδας)



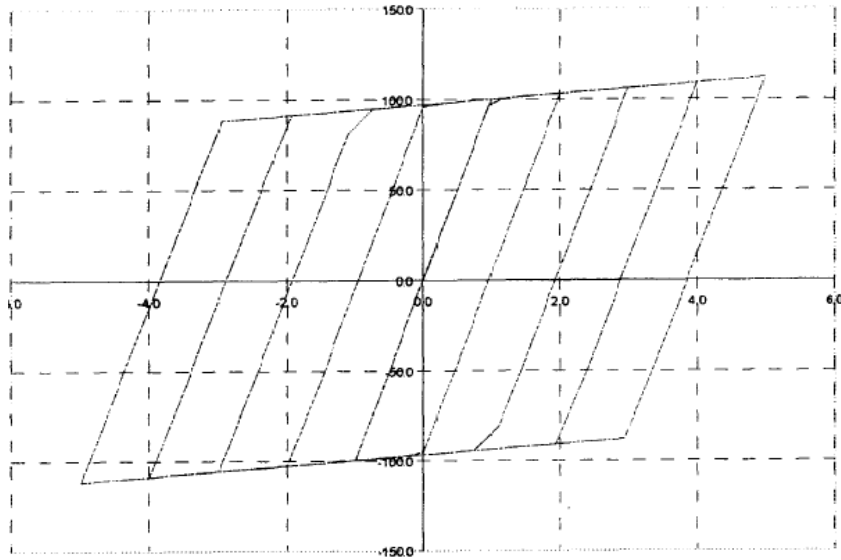


Εικόνα 4-20 Λογικό διάγραμμα ελέγχου 3 (συνέχεια προηγούμενης σελίδας)

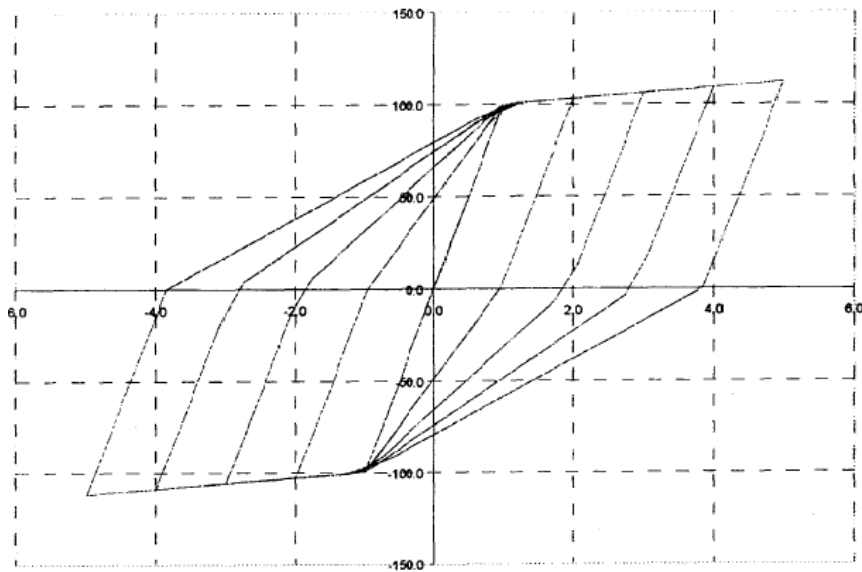
#### 4.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ FORTRAN

Αναπτύχθηκε υπορουτίνα σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran η οποία εξετάζει ταυτόχρονα έξι περιπτώσεις υστερητικής συμπεριφοράς. Διαβάζοντας έξι τιμές όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις η υπορουτίνα αποκρίνεται ανάλογα (εικόνα 4.27-4.28). Οι περιπτώσεις οι οποίες εξετάζονται είναι το διγραμμικό μοντέλο (Bilinear) (εικόνα 4.21), το προσανατολισμένο ως προς τη διαρροή (yielded oriented) (εικόνα 4.22), προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο (vertex oriented) (εικόνα 4.23), με υποβάθμιση της δυσκαμψίας (stiffness

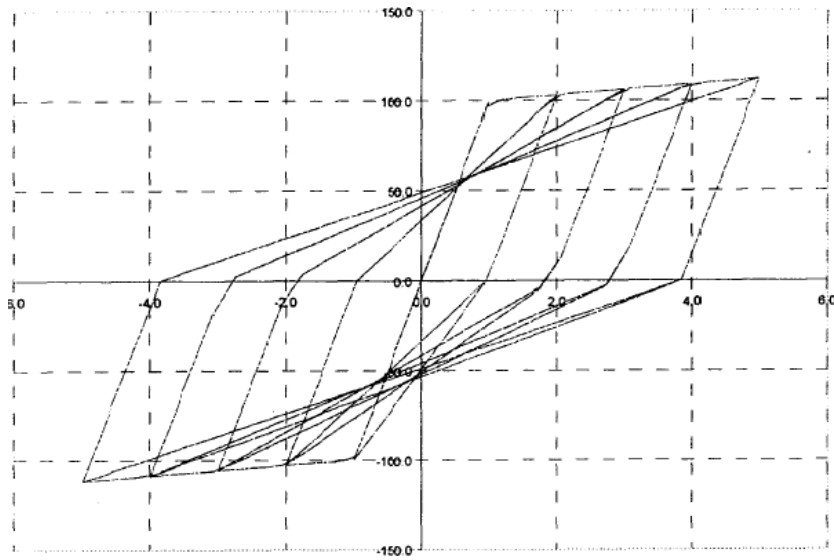
degradation) (εικόνα 4.24), υποβάθμιση της αντοχής (strength degradation) (εικόνα 4.25) και εκείνο της ολίσθησης (slip or pinching) (εικόνα 4.26).



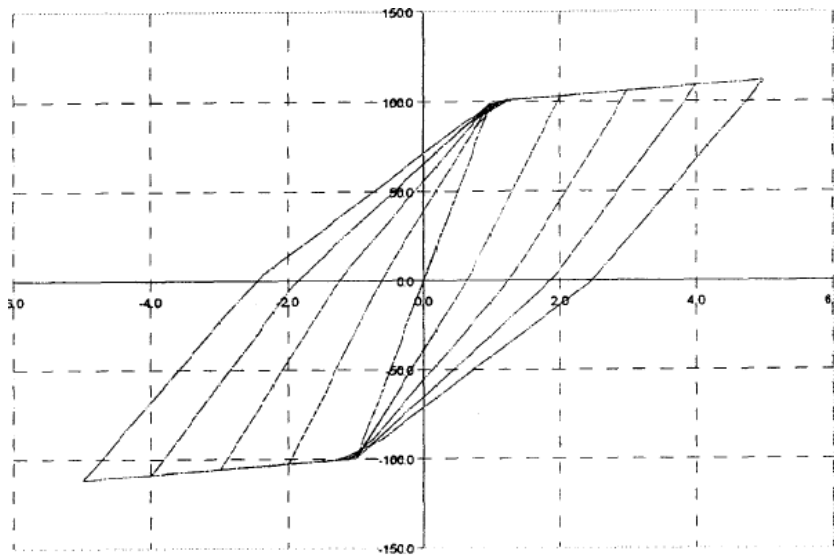
Εικόνα 4-21 Διγραμμικό μοντέλο (Bilinear)



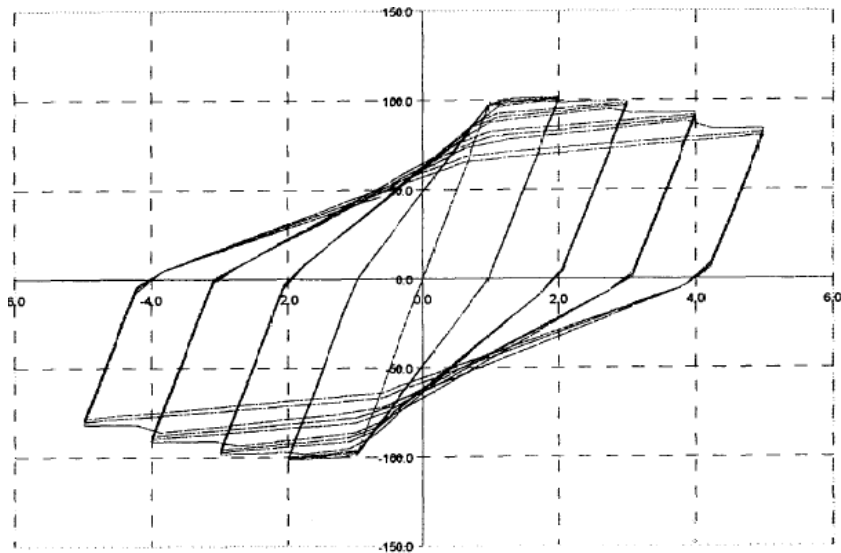
Εικόνα 4-22 Προσανατολισμένο ως προς τη διαρροή (yielded oriented)



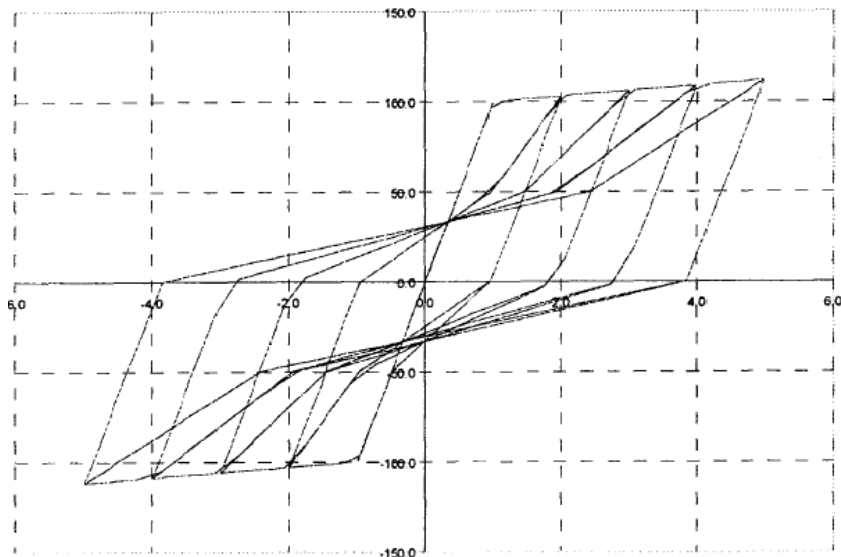
Εικόνα 4-23 Προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο (vertex oriented)



Εικόνα 4-24 Υποβάθμιση της δυσκαμψίας (stiffness degradation)



Εικόνα 4-25 Υποβάθμιση της αντοχής (strength degradation)



Εικόνα 4-26 Ολίσθηση (slip or pinching)

```

19      open(unit=13,file='C:\Fortran\files\DPMS\model.txt')
20      read(13,*)bilinear, yield_oriented, vertex_oriented,
21      & stiffness_degradation, strength_degradation, pinching
22      close(13)
23      print*, 'MODEL BEHAVIOR'

```

Εικόνα 4-27 Επιλογή του επιθυμητού μοντέλου-ή συνδυασμού αυτών εάν είναι εφικτό

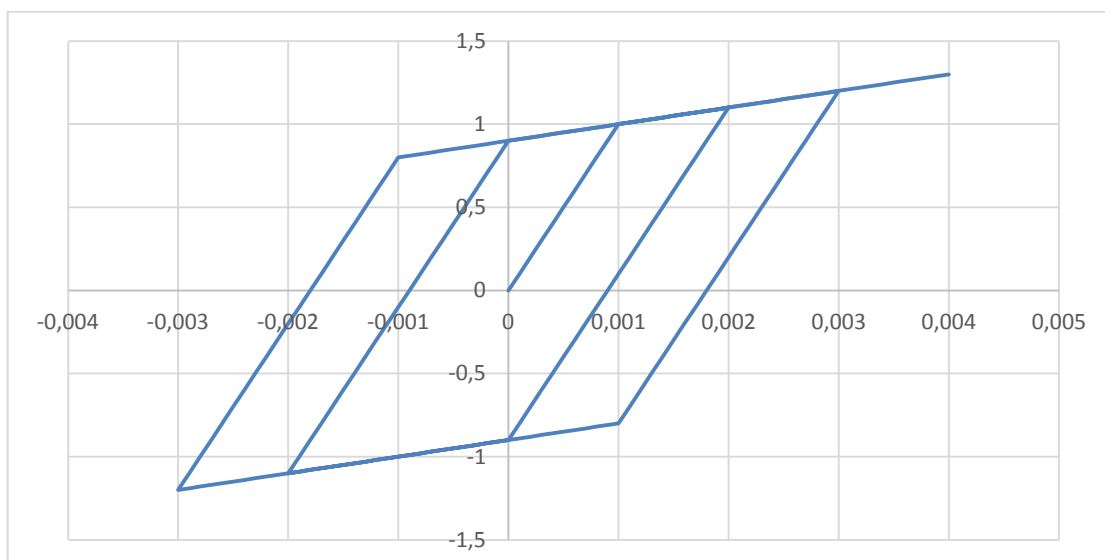
```
MODEL BEHAVIOR
bilinear is:           OFF
yield_oriented is:    OFF
vertex_oriented is:   OFF
stiffness_degradation is: OFF
strength_degradation is: OFF
pinching is:          ON
Your data are:
K0= 1000.0000
Fy= 1.0000000
K1= 100.00000
K2= -100.00000
du= 1.49999997E-02
give the number of input displacements
```

Εικόνα 4-28 Παράθυρο διαλόγου έναρξης της ρουτίνας

#### 4.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

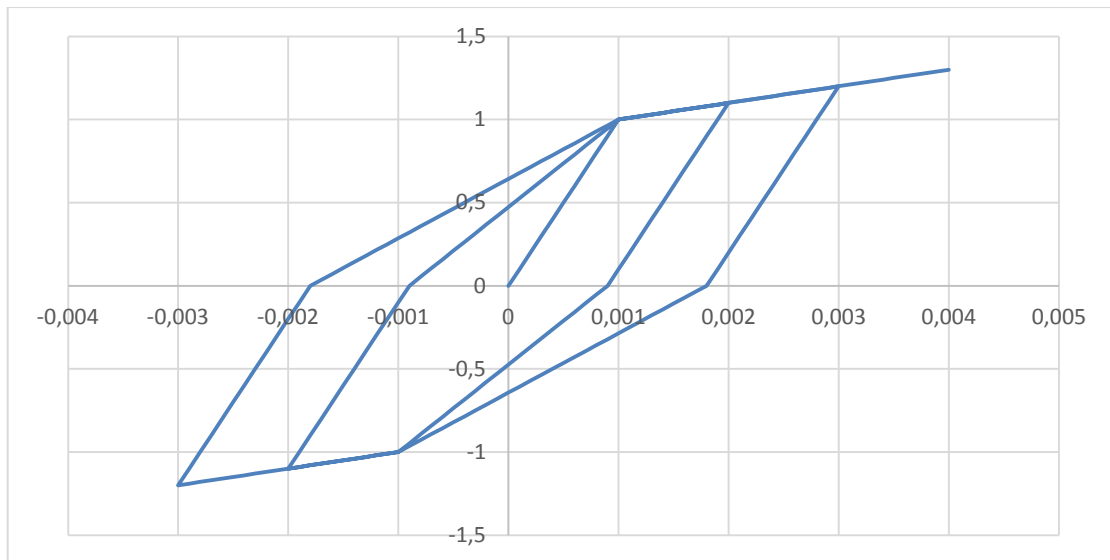
Για λόγους πληρότητας επιλέγοντας ενδεικτικές τιμές θα παραχθούν τα παραπάνω διαγράμματα ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή μορφή του κάθε υστερητικού μοντέλου και η ορθή λειτουργία του κώδικα.

Αρχικά έγινε η διαμόρφωση του διγραμμικού μοντέλου το οποίο δίνεται στη εικόνα που ακολουθεί. Το βήμα που επιλέχθηκε είναι της τάξης των 0.0015m.



Εικόνα 4-29 Διγραμμικό μοντέλο από κώδικα Fortran

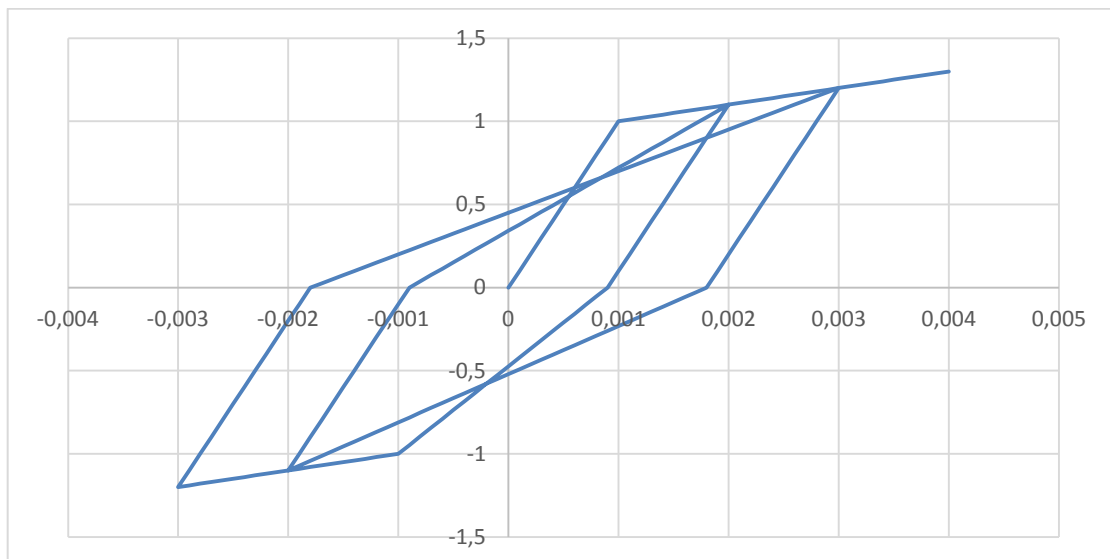
Ακολούθως διαμορφώθηκε το μοντέλο το οποίο είναι προσανατολισμένο ως προς την διαρροή



Εικόνα 4-30 Μοντέλο προσανατολισμένο ως προς τη διαρροή από το κώδικα Fortran

Συγκρίνοντας το παραπάνω διάγραμμα με το αντίστοιχο της εικόνας 4.22 παρατηρείται η ανταποκρίνεται επαρκώς.

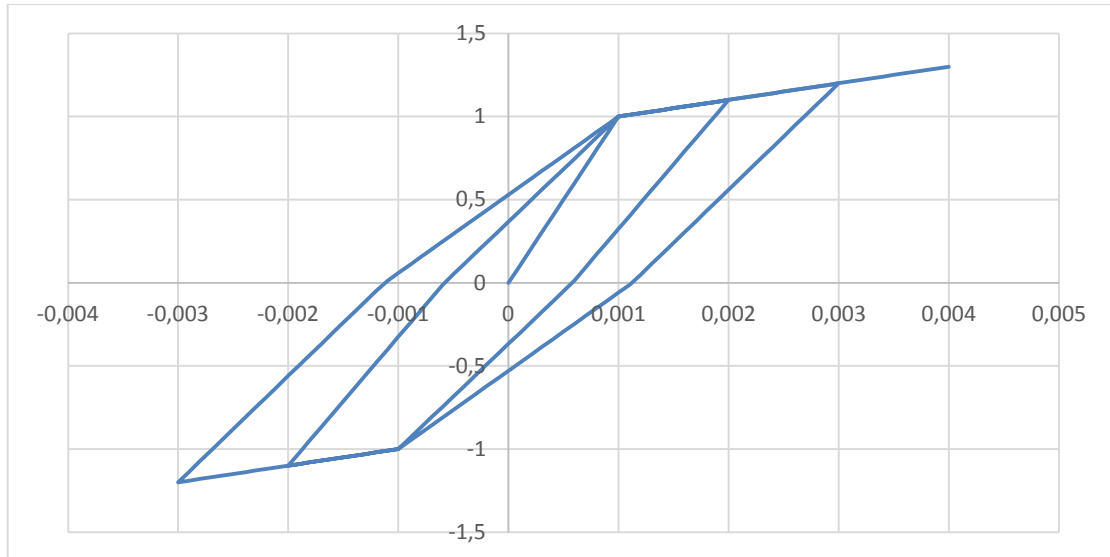
Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για το τρίτο μοντέλο το οποίο είναι προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο σημείο



Εικόνα 4-31 Μοντέλο προσανατολισμένο ως προς το μέγιστο σημείο από κώδικα Fortran

Ομοίως με τα προηγούμενα το διάγραμμα που προέκυψε από την Fortran προσεγγίζει ικανοποιητικά το διάγραμμα της εικόνας 4.23.

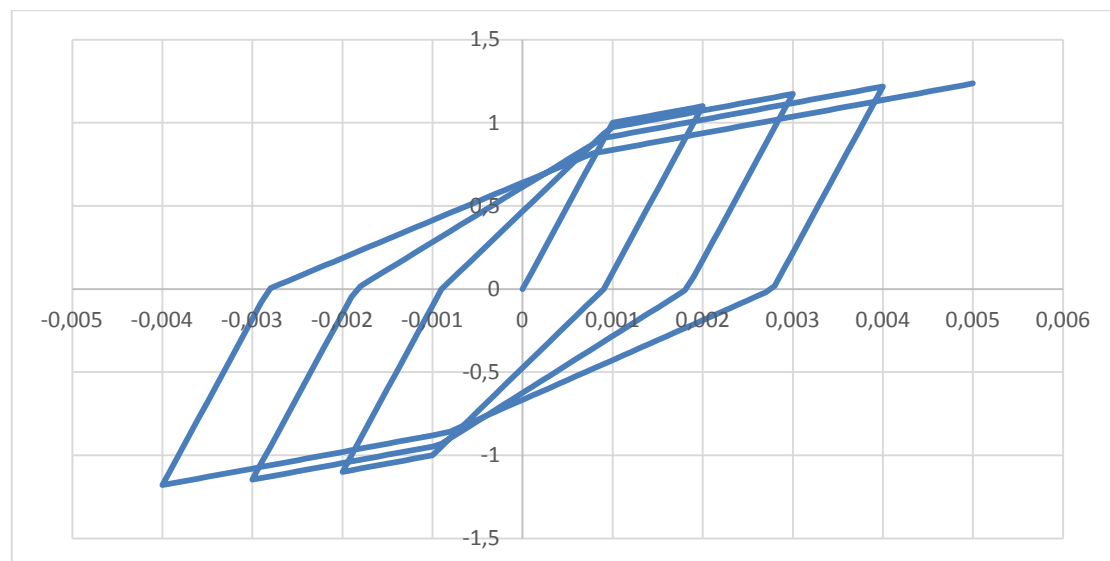
Στη συνέχεια έγινε το διάγραμμα του μοντέλου με υποβάθμιση της δυσκαμψίας .



Εικόνα 4-32 Μοντέλο με απομείωση δυσκαμψίας

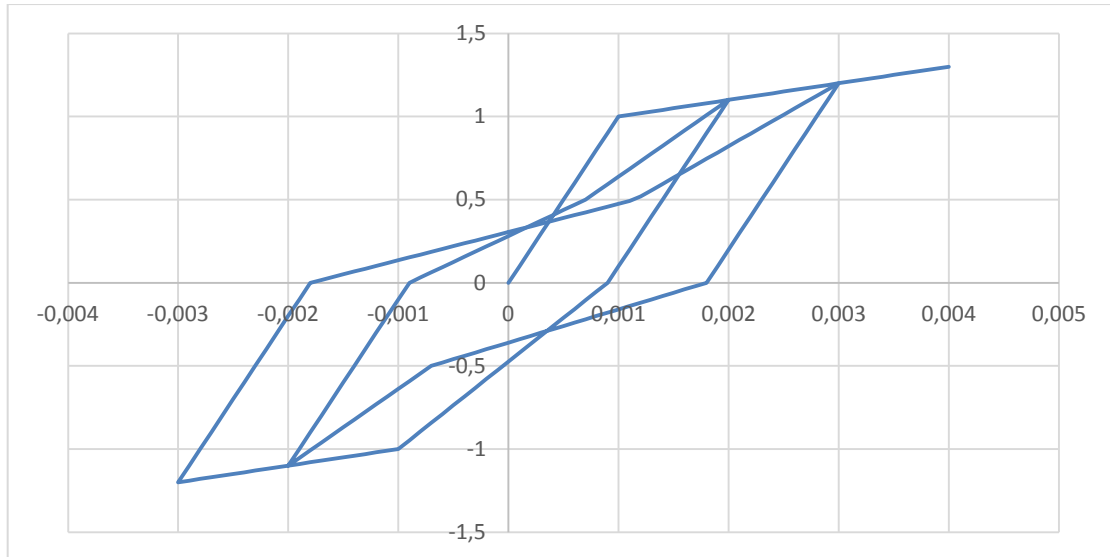
Το μοντέλο αποκρίνεται επαρκώς.

Το επόμενο μοντέλο το οποίο μελετήθηκε είναι εκείνο με την υποβάθμιση της αντοχής και το διάγραμμα του δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4-33 Μοντέλο με απομείωση αντοχής

Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώνεται με το μοντέλο της ολίσθησης ή «τσιμπήματος»



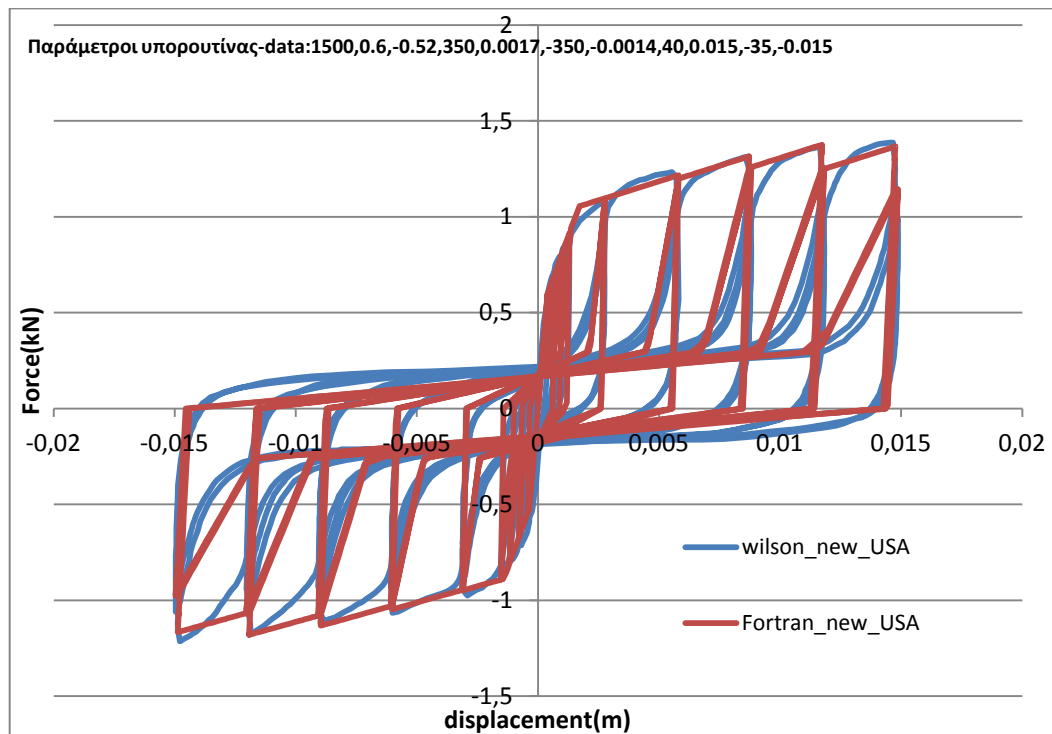
Εικόνα 4-34 Μοντέλο ολίσθησης ή «τσιμπήματος» από κώδικα Fortran

Ομοίως με όλα τα παραπάνω μοντέλα ο κώδικας δίνει ικανοποιητικά τη μορφή του διαγράμματος ολίσθησης.



## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WILSON

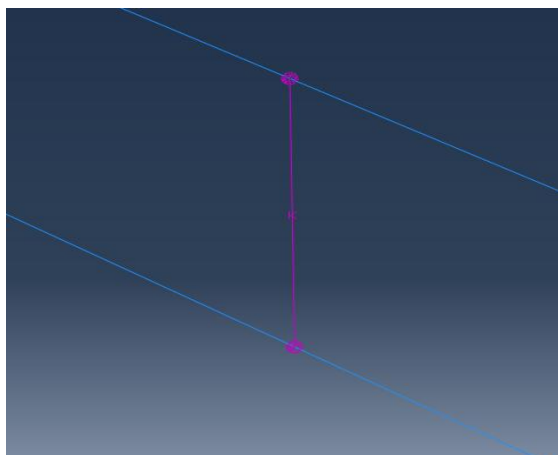
Έχοντας διαμορφώσει τον κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN θα προσδιοριστούν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilson για τη συμπεριφορά της σύνδεσης ξύλινων μελών μέσω μεταλλικού καρφιού οι κατάλληλες παράμετροι οι οποίες θα δοθούν στον κώδικα ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Για την απλή σύνδεση καρφί-δοκός-σανίδα χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές Δύναμη-μετακίνησης οι οποίες προέκυψαν από τα πειράματα του Wilson (συνεχής γραμμή-διάγραμμα εικόνας 5-6 α). Με βάση τις τιμές αυτές επιλέχθηκαν οι μεταβλητές που απαιτεί ο κώδικας ώστε να περιγράψει την υστερητική συμπεριφορά της σύνδεσης-καρφιού. Για να ελεγχθεί η λειτουργία του κώδικα εξήχθησαν τα αποτελέσματα και συγκρίθηκαν με τα πειραματικά (εικόνα 5-1).



Εικόνα 5-1 Μοντέλο από κώδικα Fortran και αντίστοιχο πειραματικό διάγραμμα Wilson

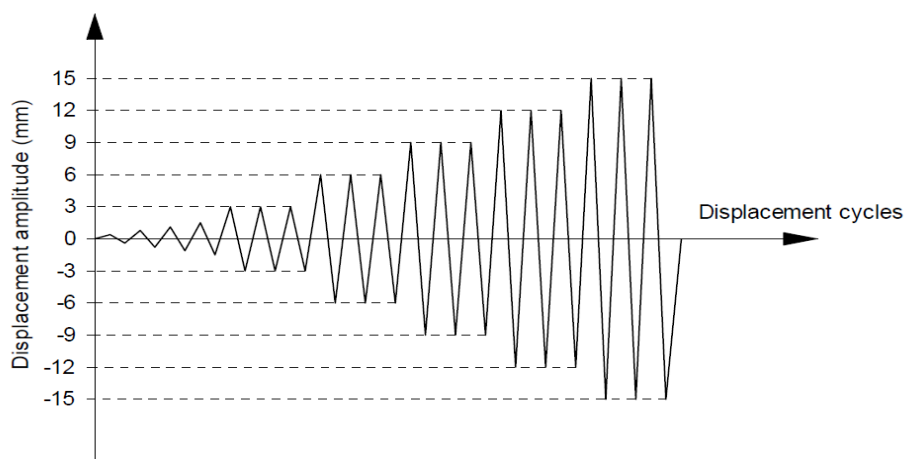
Παρατηρώντας το προαναφερθέν συγκριτικό διάγραμμα (εικόνα 5-1) μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητική η προσέγγιση του κώδικα μιας και η πιστή προσομοίωση της πραγματικότητας είναι αντικειμενικά δύσκολο εγχείρημα.

Στη συνέχεια, για να ελεγχθεί η αξιοπιστία της υπορουτίνας αλλά και η σωστή συνεργασία της με το Abaqus κατασκευάστηκε ένα απλό αριθμητικό προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από δύο γραμμικά στοιχεία με τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις των ξύλινων δοκών και ένα καρφί με τα χαρακτηριστικά εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα του κεφ 3.2.



Εικόνα 5-2 Αριθμητικό προσομοίωμα σύνδεσης καρφιού-δοκών

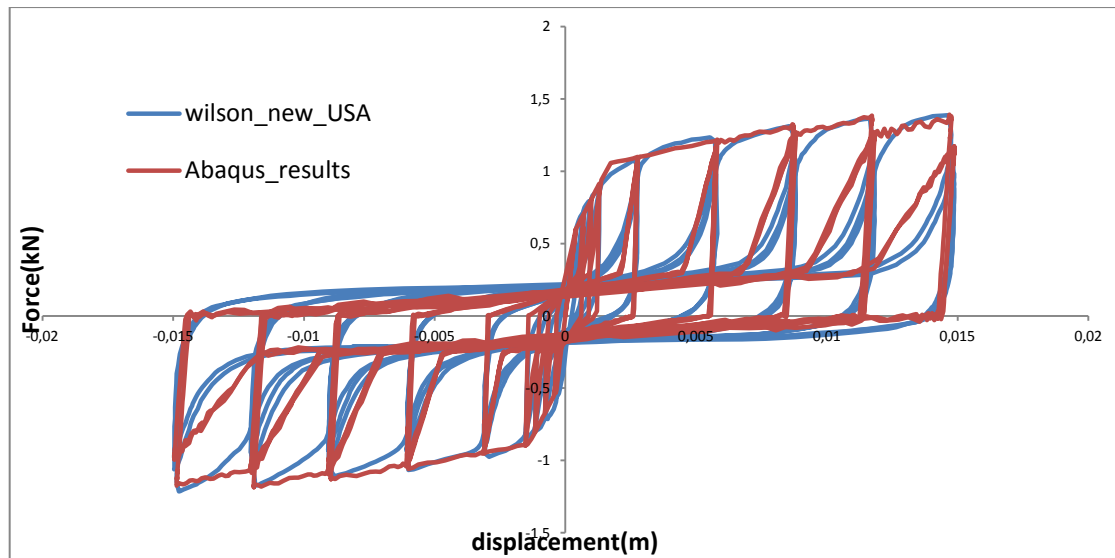
Στην παραπάνω σύνδεση επιβλήθηκε μετακίνηση αντίστοιχη εκείνης που εφαρμόστηκε κατά το πείραμα. Οι συνοριακές συνθήκες οι οποίες εφαρμόστηκαν στο προσομοίωμα ήταν η μία ράβδος να είναι πακτωμένη και η άλλη να δεσμεύεται μετακινησιακά εκτός της διεύθυνσης στην οποία εφαρμόζεται η μετακίνηση. Ο ρυθμός επιβολής της φόρτισης δίνεται στην εικόνα 5-3.



Εικόνα 5-3 Μορφή επιβολής μετακίνησης [10]

Επιβλήθηκε μετακίνηση υπό επαναλαμβανόμενος κύκλος των τριών επαναλήψεων μέχρι το μέγιστο κάθε φορά πλάτος του οποίου οι τιμές σταδιακά αυξανόταν. Οι τιμές αυτές ήταν οι εξής: 3mm, 6mm, 9mm, 15mm.

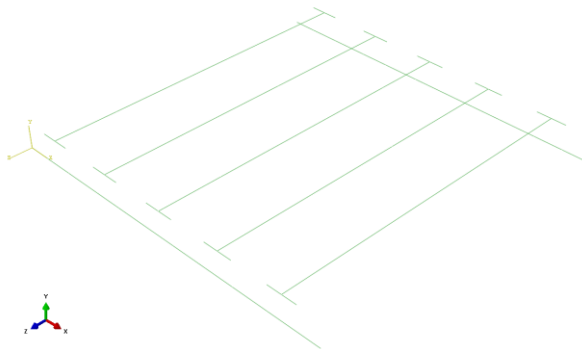
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής και των πειραματικών αποτελεσμάτων δίνονται στην εικόνα 5-4.



Εικόνα 5-4 Αποτελέσματα F-d από Abaqus και αντίστοιχο πειρατικό διάγραμμα Wilson

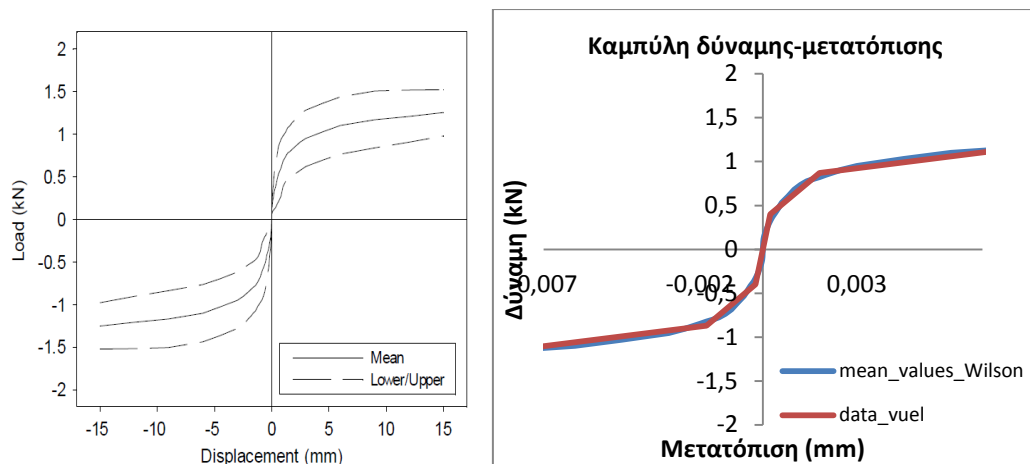
Τα παραπάνω διαγράμματα έχουν ικανοποιητική προσέγγιση. Οι ταλαντώσεις οι οποίες παρατηρούνται οφείλονται στο ρυθμό επιβολής της φόρτισης κάτι το οποίο είναι καθαρά υπολογιστικό και μπορεί να εξαλειφθεί με μείωση της ταχύτητας επιβολής της φόρτισης.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το αριθμητικό προσομοίωμα του πειραματικού δοκιμίου τύπου SBA-1 όπως αυτό περιγράφηκε στο κεφ 3.3. Ενδεικτική εικόνα από το αριθμητικό προσομοίωμα δίνεται στην εικόνα 5-5.

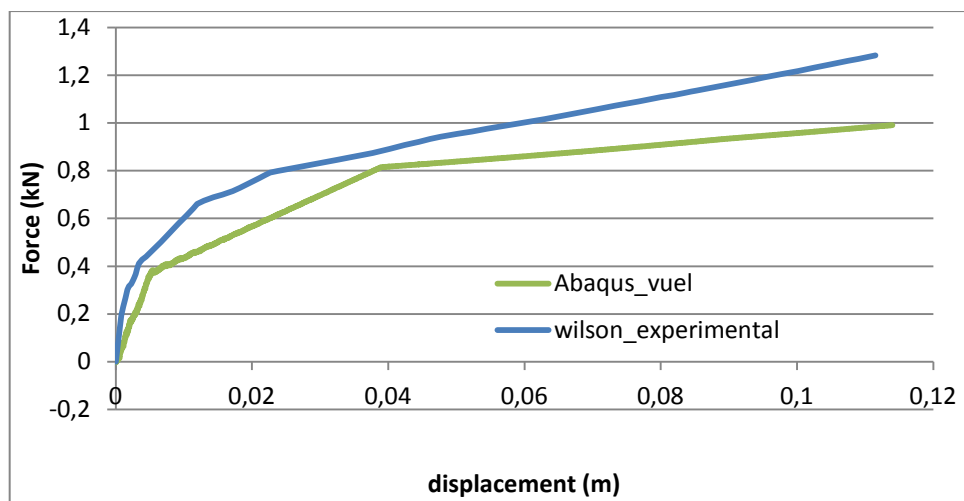


Εικόνα 5-5 Μορφή αριθμητικού προσομοιώματος SBA-1 (Abaqus)

Για τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης αρχικά χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές (συνεχής γραμμή-εικόνα 5-6α) του διαγράμματος Δύναμης-μετατόπισης από τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilson. Επιλύοντας σε μονοτονική φόρτιση το προσομοίωμα προέκυψε το διάγραμμα Δύναμης-μετατόπισης της εικόνας 5-7.

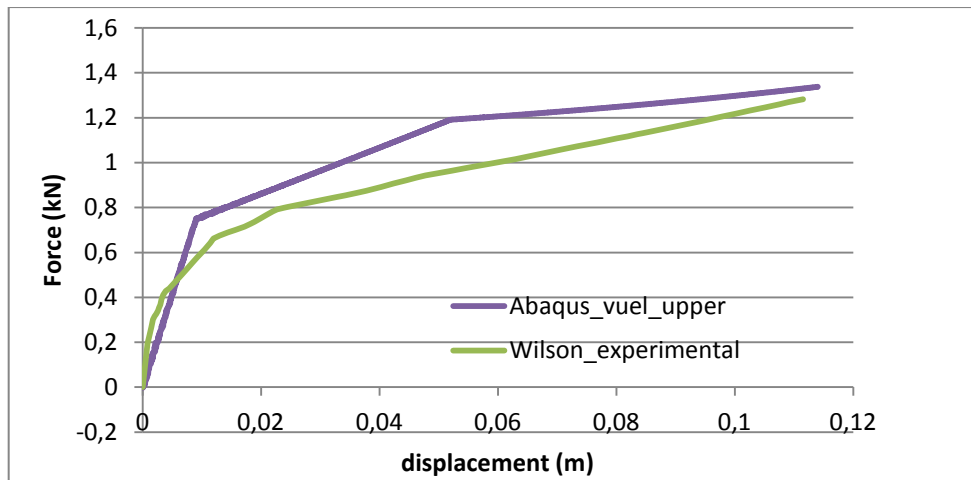


Εικόνα 5-6 (α)Διάγραμμα Δύναμης-μετακίνησης πειραμάτων Wilson(μέσες-μέγιστες/ελάχιστες) (β)προσέγγιση τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα βασισμένες στις μέσες τιμές κατά Wilson



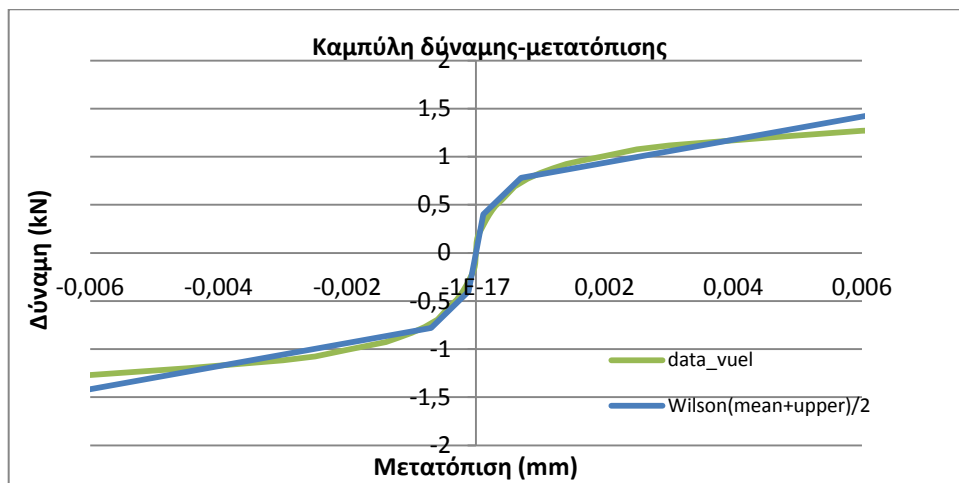
Εικόνα 5-7 Αποτελέσματα ανάλυσης σε μονοτονική φόρτιση(mean values)

Τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά από τα πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό δοκιμάστηκαν οι μέγιστες τιμές από τα δεδομένα των πειραμάτων (διακεκομμένη γραμμή-εικόνα 5-6 α). Όμως και σε αυτή την περίπτωση υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.



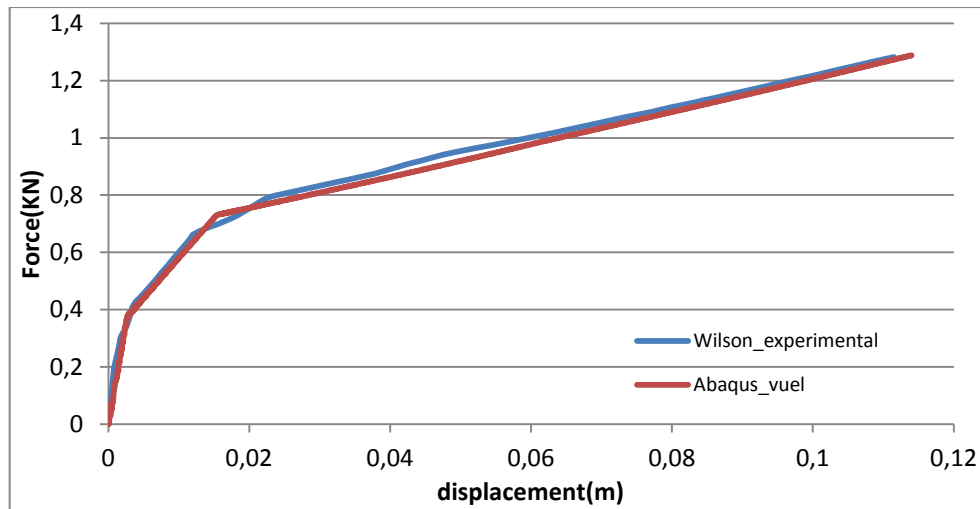
Εικόνα 5-8 Αποτελέσματα ανάλυσης σε μονοτονική φόρτιση( upper values)

Λόγω της διαφοράς αυτής έγινε και τρίτη ανάλυση η οποία βασίστηκε στο μέσο όρων των παραπάνω δύο διαγραμμάτων (συνεχή και διακεκομμένη γραμμή-εικόνα 5-6 α) εικόνα 5-9.



Εικόνα 5-9 Προσέγγιση τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα βασισμένες στο ημι-άθροισμα των μέσων και μέγιστων τιμών κατά Wilson

Τα αποτελέσματα σε μονοτονική φόρτιση δίνονται στην εικόνα 5-10.

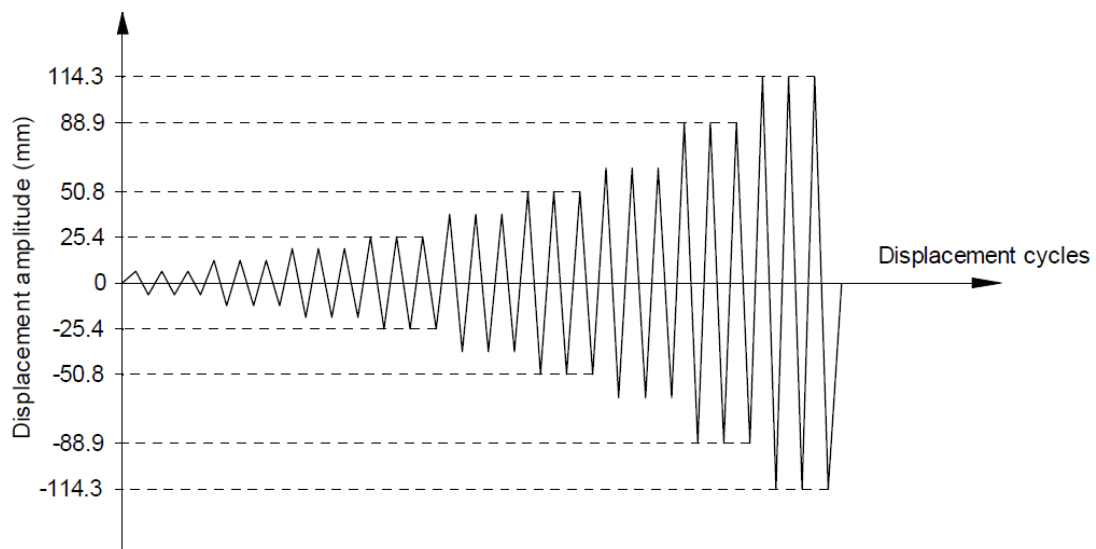


Εικόνα 5-10 Αποτελέσματα ανάλυσης σε μονοτονική φόρτιση( (upper+mean)/2)

Σαφέστατα τα αποτελέσματα προσεγγίζουν πολύ καλά τα πειραματικά. Συνεπώς με αυτά τα δεδομένα θα γίνει και η ανάλυση με ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

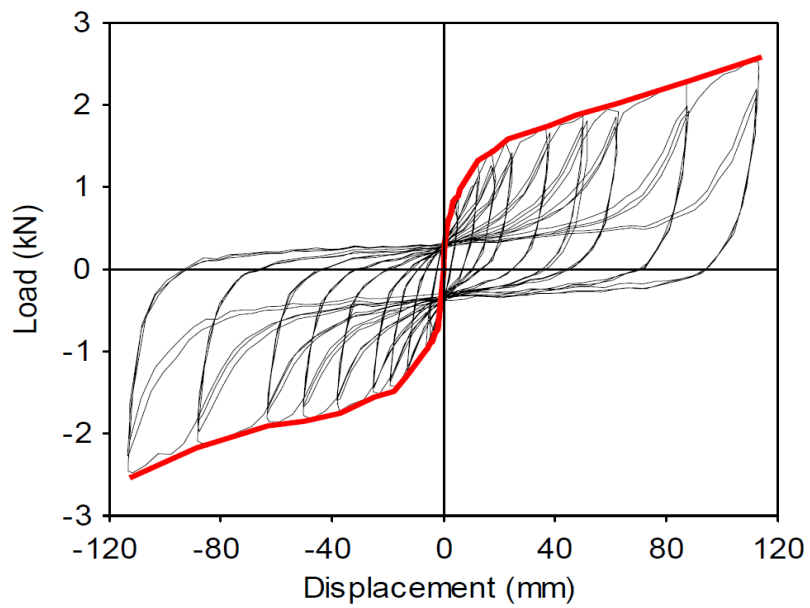
Στη συνέχεια δίνεται η πιστή αντιγραφή του διαγράμματος Δύναμη- μετατόπιση πειράματος(σύνδεση καρφί-δοκός-σανίδα/κεφ 3.2) και συγκρίνεται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Ο ρυθμός φόρτισης κατά την πειραματική διαδικασία ήταν σταθερός στα 20mm/min. Επιβλήθηκε μετακίνηση υπό επαναλαμβανόμενος κύκλος των τριών επαναλήψεων μέχρι το μέγιστο κάθε φορά πλάτος του οποίου οι τιμές σταδιακά αυξανόταν. Οι τιμές αυτές ήταν οι εξής: 6.44mm, 12.7mm, 19.1mm, 24.4mm, 38.1mm, 50.8mm, 63.5mm, 88.9, 114.3mm όπως φαίνεται στην εικόνα 5-11.



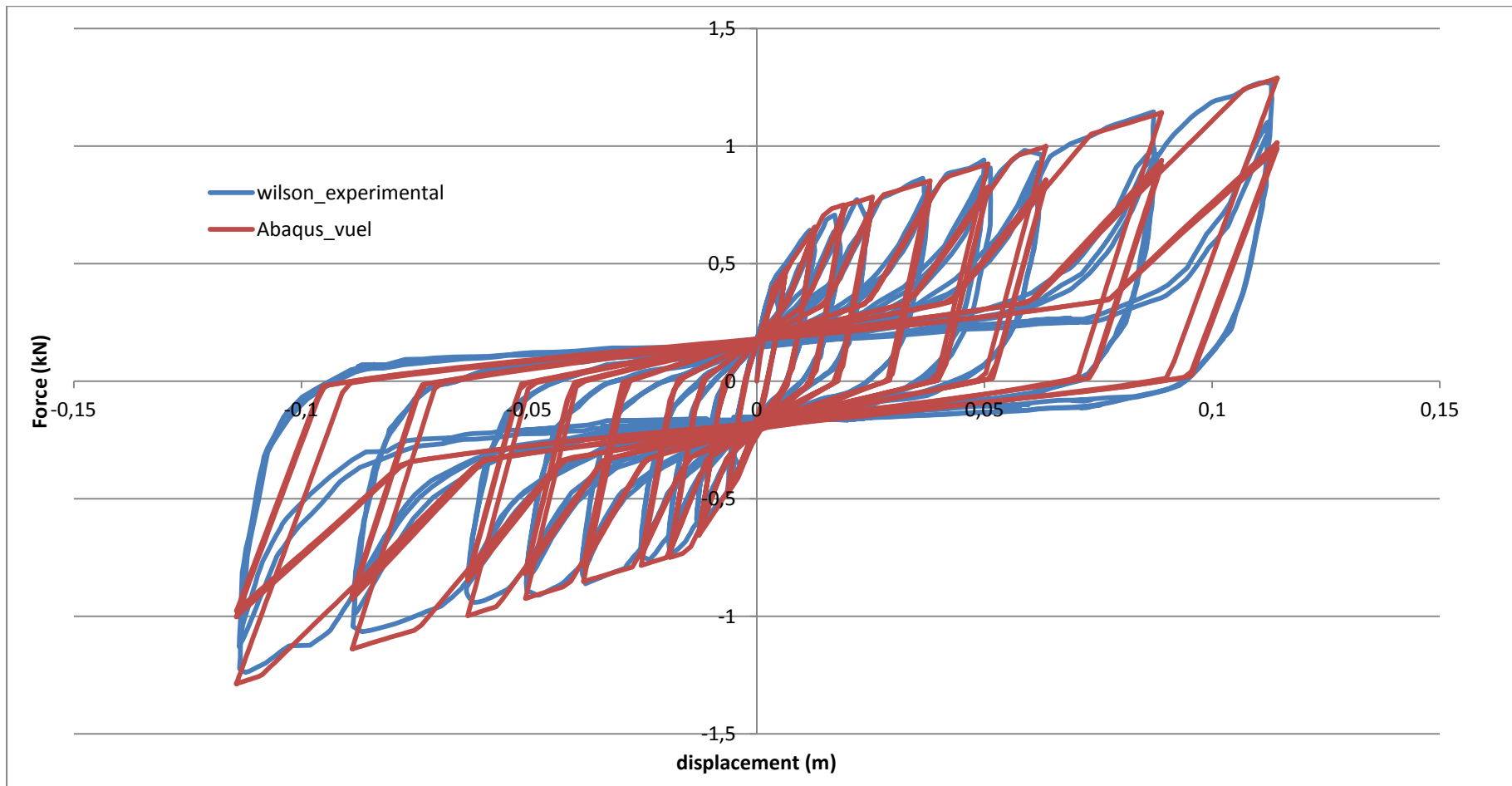
Εικόνα 5-11 Χρονοιστορία φόρτισης για το προσομοίωμα SBA-1 [10]

Τα αποτελέσματα του αντίστοιχου πειράματος δίνονται στην εικόνα 5.12



Εικόνα 5-12 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης για το πειραματικό μοντέλο SBA-1 [10]

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από το αριθμητικό προσομοίωμα το οποίο περιγράφηκε παραπάνω συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά. Οι παράμετροι που ελήφθησαν βασίστηκαν στο διάγραμμα της εικόνας 3-7, κεφ 3.2.

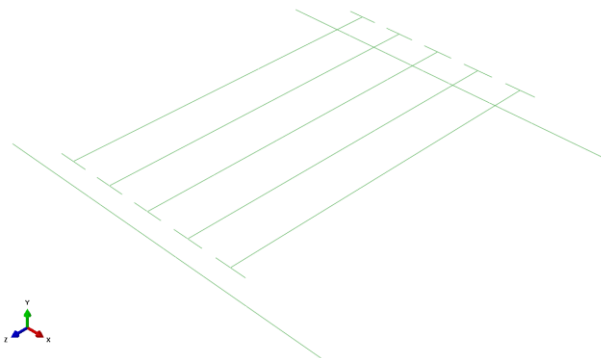


Εικόνα 5-13 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης για το πειραματικό μοντέλο SBA-1 και το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα στο Abaqus



Το παραπάνω διάγραμμα προέκυψε μετά από διάφορες δοκιμές για να μπορέσει να είναι όσο το δυνατόν κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αποτελεί την καλύτερη δυνατή προσέγγιση η οποία επετεύχθη καθώς το ποσοστό σφάλματος δεν ξεπερνά το 10%.

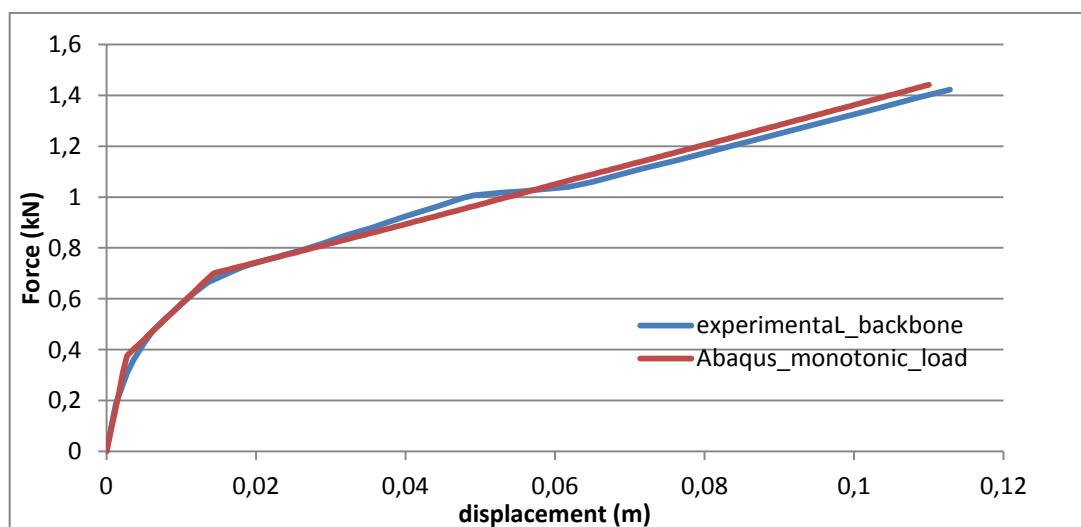
Ομοίως κατασκευάστηκε το αριθμητικό προσομοίωμα τύπου SBT-1 του οποίου οι σανίδες εφάπτονταν. Η μορφή του προσομοιώματος δίνεται στην εικόνα 5-14.



Εικόνα 5-14 Αριθμητικό προσομοίωμα τύπου SBT-1

Οι διαστάσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πατώματος προσομοιώθηκαν πιστά όπως αυτά περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφ. 3.3. Ο ρυθμός φόρτισης για τη συγκεκριμένη ανάλυση ήταν όμοιος με την πειραματική διαδικασία (20mm/min).

Για την αξιόπιστη προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων τιμών από το αριθμητικό προσομοίωμα έγιναν διάφορες επιλύσεις του προσομοιώματος σε μονοτονική φόρτιση. Η τελική επίλυση η οποία καθόρισε και τις παραμέτρους της υπορουτίνας δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

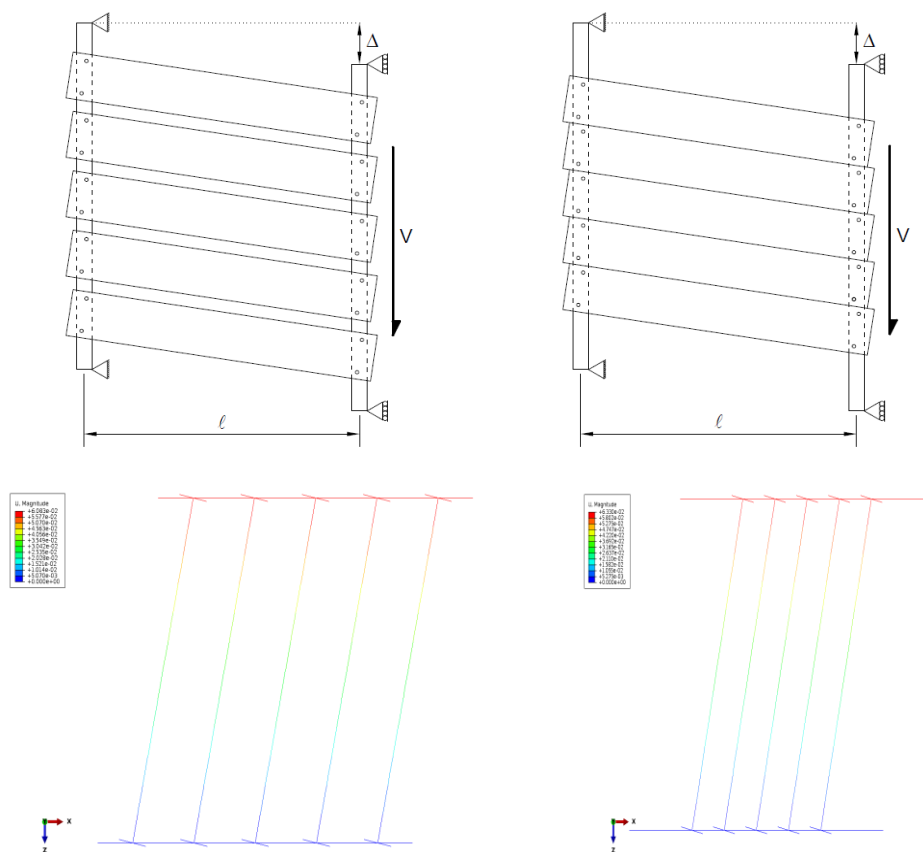


Εικόνα 5-15 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης για το πειραματικό μοντέλο SBT-1 και το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα στο Abaqus(μονοτονική φόρτιση)

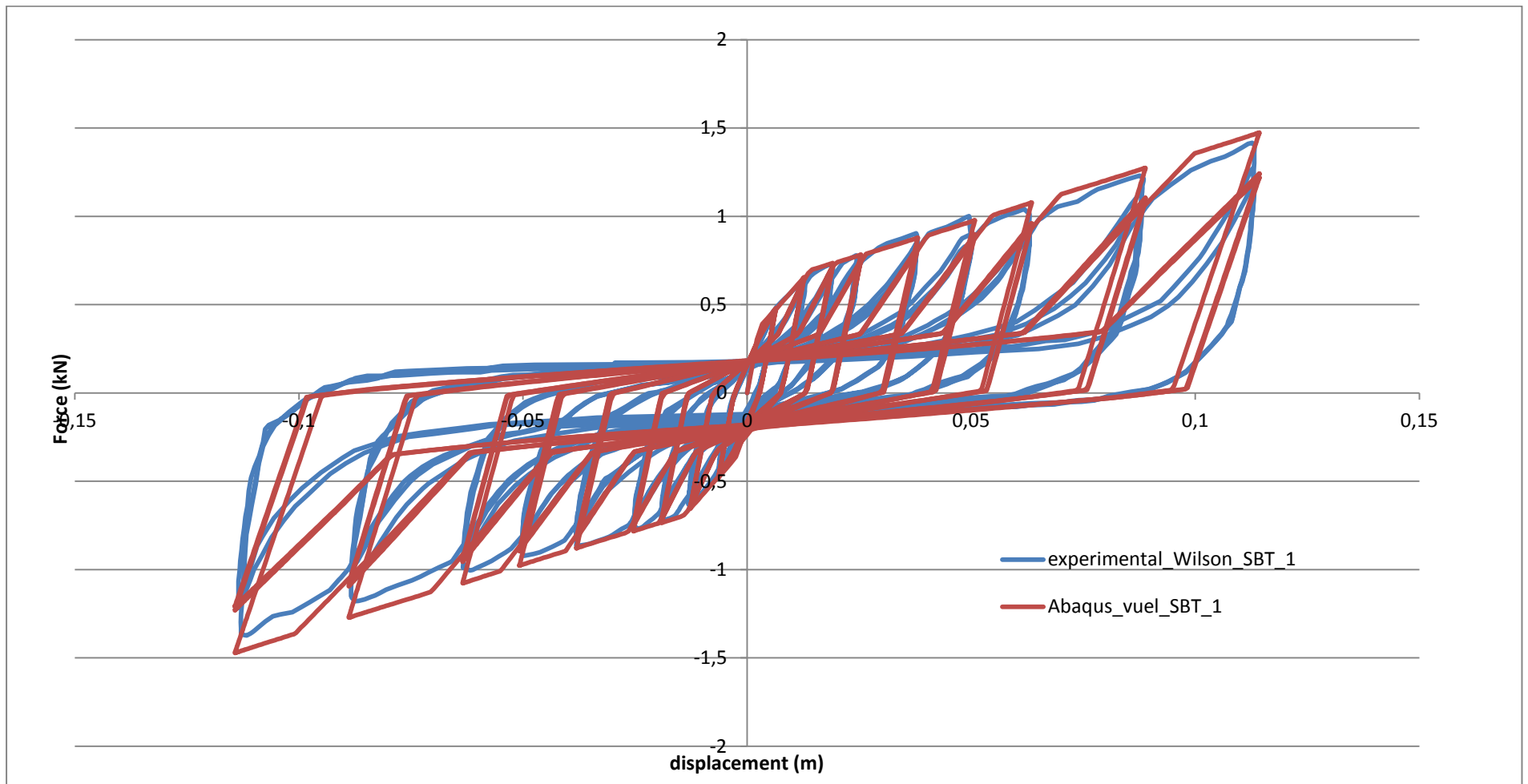
Στη συνέχεια επιλύθηκε το αριθμητικό προσομοίωμα του SBT-1 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ρυθμού 20mm/min η μορφή του οποίου ήταν όπως εκείνη του SBA-1 (εικόνα 5-11) και το διάγραμμα που προέκυψε δίνεται στην εικόνα 5-17.

Στους 7 πρώτους κύκλους τα αποτελέσματα από την αριθμητική προσομοίωση προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά. Όμως σε μεγάλες δυνάμεις και μετακινήσεις υπάρχουν αρκετά μεγάλες αποκλίσεις. Ενδεχομένως μπορεί αυτό να οφείλεται στις δυνάμεις τριβής λόγω του ότι οι σανίδες είναι ενωμένες κάτι το οποίο δεν έχει ληφθεί υπόψη στο προσομοίωμα με τη χρήση των στοιχείων επαφής (contact element). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης της υπορουτίνας ώστε να ληφθεί υπόψη και αυτή η παράμετρος προσθέτοντας ένα επιπλέον κλάδο κατά την αποφόρτιση.

Τέλος οι παραμορφωσιακές συμπεριφορές των αριθμητικών προσομοιωμάτων SBA-1 και SBT-1 έχουν την ίδια μορφή των πειραματικών όπως φαίνεται σχηματικά στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5-16 Παραμορφώσεις πειραμάτων και αριθμητικών προσομοιωμάτων SBA-1, SBT-1



Εικόνα 5-17 Διάγραμμα F-d ξύλινου πατώματος τύπου SBT-1 σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και αριθμητικού προσομοιώματος Abaqus



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία αξίζει να τονιστεί ότι ένας σημαντικός παράγοντας στις αναλύσεις τις οποίες έγιναν ήταν ο υπολογιστικός χρόνος. Τα αριθμητικά προσομοιώματα, οι διαστάσεις των οποίων ήταν ίδιες με εκείνες των πειραματικών δοκιμών, ήταν μικρές αναλογικά με τα πατώματα που συναντώνται σε πραγματικές κατασκευές. Παρόλα αυτά η ανάλυση τους διαρκούσε αρκετές ώρες κάτι που δυσκόλευε την παραμετρική μελέτη για τον καθορισμό των αναγκαίων μεταβλητών της υπορουτίνας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των πολυγωνικών υστερητικών μοντέλων δυσχέραινε την προσέγγιση των διαγραμμάτων. Συγκεκριμένα η περιβάλλουσα καμπύλη των V-d έγινε με χρήση τριών κλάδων με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η βέλτιστη προσομοίωση.

Επίσης τα διαγράμματα V-d των προσομοιωμάτων των SBA-1 και SBT-1 στους τελευταίους κύκλους της φόρτισης έχουν σημαντικότερη απόκλιση από ότι στους αρχικούς.

Τέλος, όσον αφορά το φορέα από τοιχοποιία ο οποίος μελετήθηκε με ισοδύναμη στατική ανάλυση και με ανάλυση χρονοϊστορίας παρουσίασε μείωση των ζημιών στις γωνίες των τοίχων με τη χρήση διαφράγματος από σκυρόδεμα ενώ η μέγιστη τέμνουσα βάση προσεγγίζεται καλύτερα από ότι όταν ο φορέας στερούνταν διαφράγματος. Παρόλα αυτά η διαφορά παραμένει αξιόλογη.

Λαμβάνοντας υπόψη τις αδυναμίες των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν οδηγούμαστε στο συμπέρασμα της επιλογής ομαλών (smooth hysteretic model) τελικά καμπυλών για την προσέγγιση της περιβάλλουσας καμπύλης των V-d κάτι σαφέστατα πολύπλοκότερο και υπολογιστικά δυσκολότερο. Επίσης θα ήταν χρήσιμο να ληφθεί υπόψη η επιρροή της τριβής μεταξύ των σανίδων για να μελετηθεί η επιρροή της στη συμπεριφορά των πατωμάτων. Συνεπώς θα μπορούσε να ληφθεί η επιρροή αυτή είτε μέσω της υπορουτίνας κάνοντας ανάλογες τροποποιήσεις ή τοποθετώντας στο αριθμητικό προσομοίωμα στοιχεία επαφής που θα περιγράφουν την τριβή μεταξύ των σανίδων.

Τέλος για να ολοκληρωθεί η μελέτη της επιρροής της διαφραγματικής λειτουργίας του ξύλινου πατώματος στο φορέα από τοιχοποιία θα ήταν χρήσιμο να εφαρμοστεί η υπορουτίνα στον αριθμητικό προσομοίωμα του κτιρίου τοποθετώντας στους ορόφους ξύλινα πατώματα. Σαφώς και υπολογιστικά θα ήταν δύσκολο αλλά τα αποτελέσματα θα έδιναν μία συνολική εικόνα για το κατά πόσο η ισοδύναμη στατική ανάλυση μπορεί να περιγράψει και να δώσει την συνολική συμπεριφορά του κτιρίου αξιόπιστα.



## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASTM C270, SPECIFICATION OF MORTARS AND MASONRY UNITS
- [2] BSI 1985 BS5628, CODE OF PRACTICE FOR USE OF MASONRY PART 1:THE STRUCTURAL USE OF UNREINFORCED MASONRY
- [3]ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ- ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ-ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ ΟΛΓΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΜΑΥΡΟΥΛΗ
- [4] ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ – ΤΣΩΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΑ
- [5]ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΛΙΑΡΑΚΟΣ Β. ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ.
- [6] MODAL PUSHOVER ANALYSIS AS A MEAN FOR THE SEISMIC ASSESSEMENT OF BRIDGE STRUCTURE-KARPOS –PARASKEVA-SEXTOS
- [7]ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΙ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ-ΘΕΜΕΛΙΝΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ, ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΑΠΠΟΣ
- [8] EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND NUMERICAL SIMULATION OF ANUNREINFORCED MASONRY STRUCTURE WITH FLEXIBLE DIAPHRAGMS-Tianyi Yi
- [9] ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΑΟ ΛΙΘΟΣΩΜΑΤΑ ΠΥΡΙΤΙΚΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ – ΟΛΥΜΠΙΣΙΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ
- [10] SEISMIC ASSESSMENT OF TIMBER FLOOR DIAPHRAGMS IN UNREINFORCED MASONRY BUILDING-AARON W.WILSON (THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY MARCH 2012)
- [11] HYSTERETIC MODELS FOR CYCLIC BEHAVIOR OF DETERIORATING INELASTIC STRUCTURES-M.VSIASELVAN AND A.M.REINHORN (BUFFALO NEW YORK 1999)