

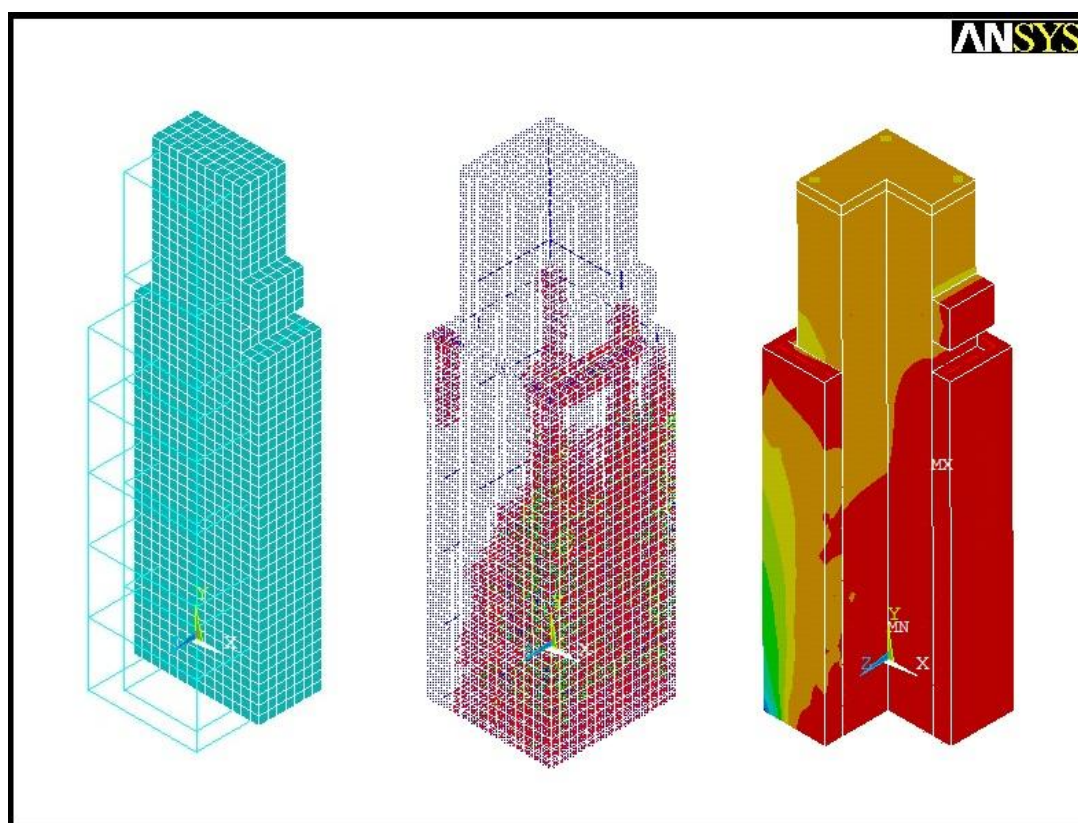


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ  
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ**

Καντιώτος Παναγιώτης



Επιβλέπων καθηγητής:

Ζέρης Χρήστος, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ  
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ**

Καντιώτος Παναγιώτης

Επιβλέπων καθηγητής:

Ζέρης Χρήστος, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 18 Ιουλίου 2012

Η εργασία αυτή αποτελεί αναζήτηση του γράφοντος πάνω στις ενισχύσεις και τις επεμβάσεις σε υποστυλώματα. Το αντικείμενο αυτό δε διδάσκεται στον προπτυχιακό κύκλο των σπουδών των Πολ. Μηχανικών στο Ε.Μ.Π. και αποτέλεσε προσωπική επιλογή μου να ασχοληθώ με αυτό το τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως είναι η κρίση μηχανικού στην αναζήτηση αυτή, ώστε να προσεγγισθούν ποιοτικά οι μηχανισμοί των ενισχύσεων. Η αντίληψη του μηχανικού θεωρώ ότι ήταν το μεγαλύτερο κέρδος μου από την πενταετή παρουσία μου στη σχολή.

Για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου που με βοήθησαν σε αυτή την κατεύθυνση.

*,σε όσους έχασα από τη ζωή μου  
τα χρόνια των σπουδών μου*

Το ενδιαφέρον μου για την τεχνολογία των ενισχύσεων επέλεξα να το μοιραστώ με έναν άνθρωπο που ποτέ δε δίστασε να μοιραστεί τις γνώσεις του με τους φοιτητές. Ο καθηγητής μας, ο κύριος Ζέρης, αποτέλεσε ο ίδιος κίνητρο για βαθύτερη αναζήτηση της γνώσης και υπόδειγμα ευγενούς ανθρώπου. Τέλος, οφείλω να επισημάνω το λόγο που με έκανε να ευχαριστιέμαι κάθε πρωινό που έφτανα στη σχολή. Ο λόγος αυτός ήταν κάποια από τα πρόσωπα που συναντούσα εκεί και χαίρομαι που περάσαμε μαζί τα χρόνια αυτά.

Παναγιώτης Καντιώτος  
pkantiotos@gmail.com

Copyright© Ζέρης Χρήστος, Καντιώτος Παναγιώτης, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ δε συνεπάγεται απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα από τη Σχολή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την προσομοίωση ενισχυμένων υποστυλωμάτων με μανδύες και τη συμπεριφορά τους υπό μονοτονική φόρτιση. Εξετάζονται οι δυνατότητες του προγράμματος Ansys στην προσομοίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Προτείνονται μέθοδοι εισαγωγής της λειτουργίας της διεπιφάνειας παλιού-νέου σκυροδέματος στην εφαρμογή των μανδύων. Η επαλήθευση του προγράμματος γίνεται με τη βοήθεια των πειραμάτων των Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005), από τα οποία ελέγχουμε ένα μη ενισχυμένο υποστυλώμα, ένα ενισχυμένο με λεία διεπιφάνεια μανδύα και ένα με οπλισμένη διεπιφάνεια. Η σύγκλιση που επιτυγχάνεται με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πολύ καλή, με μοναδική εξαίρεση τις λίγο μικρότερες τιμές μετατοπίσεων που καταγράφουμε στα προσομοιώματα.

Στη συνέχεια αναλύουμε συγκριτικά ένα μη ενισχυμένο υποστυλώμα της δεκαετίας του '60 που το ενισχύουμε στη συνέχεια με μανδύα. Καταγράφουμε τα αποτελέσματα για την απόκριση του, τη δυσκαμψία, την πλαστιμότητα και τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο σκυρόδεμα και τους οπλισμούς. Διερευνώνται διάφορες περιπτώσεις ποιότητας σκυροδέματος μανδύα αλλά και διεπιφάνειας. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο ποσοστό μονολιθικότητας που επιτυγχάνεται ανάλογα με την ποιότητα επεξεργασίας της διεπιφάνειας και της χρήσης βλήτρων. Συμπεραίνουμε ότι η ενίσχυση με μανδύες είναι ένας εξαιρετικά αποδοτικός τρόπος ενίσχυσης των υποστυλωμάτων.

Εξετάζονται επίσης, περιπτώσεις όπου διαφέρει η τιμή της αξονικής επιβαλλόμενης δύναμης του υποστυλώματος και παρουσιάζεται η συμπεριφορά τους. Αναλύονται προσομοιώματα όπου αυξάνεται η πυκνότητα των συνδετήρων του μανδύα και καταγράφουμε την επίδραση στην πλαστιμότητα και την αντοχή. Τέλος, διερευνάται η περίπτωση των κοντών υποστυλωμάτων και η χαρακτηριστική ψαθυρή αστοχία τους. Εντοπίζεται η διατμητική αστοχία και παρουσιάζονται οι τροχιές των θλιπτικών τάσεων σε περιπτώσεις κοντού ή ενδιάμεσου υποστυλώματος.

Λέξεις κλειδιά: ενισχύσεις, μανδύες, υποστυλώματα, επισκευές, επεμβάσεις, οπλισμένο σκυρόδεμα, βλάβες, βλήτρα, προσομοίωση, πεπερασμένα στοιχεία, Ansys

## ABSTRACT

This paper deals with the simulation reinforced columns with jackets and their behavior under monotonic loading. We are examining the ability of the finite elements program Ansys to simulate reinforced concrete structures. We propose methods of introducing the operation of the interface between old-new concrete of the jacket. The program's verification is made by the experiments of Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005). We examine a non-reinforced column, a reinforced one with a smooth interface and a third with rough interface and dowels. The convergence achieved between the analysis and experimental results is very good, with the exception of smaller displacements which are always found in the analysis.

We analyze a non-reinforced column of a greek construction in '60s and then we strengthen it by jackets. We record the results for the response, stiffness, ductility and the occurring stresses in the concrete and reinforcing bars. We investigate several cases of the jacket's concrete quality and interface. Special reference is made in monolithic rate achieved depending on the interface roughness and by the use of dowels. We conclude that jacketing is an extremely effective way of strengthening the columns.

We also review the way in which the value of the axial force imposed to the column influences its behavior. We analyze columns with more dense stirrups in its jacket and we record the effect on the stiffness and strength. Finally, we investigate the case of short columns and their typical brittle failure. We identify shear failure and we present the orbits of the compressive stresses in cases of short and intermediate columns.

Key words: strengthening, jackets, column, repair, reinforced concrete, damages, dowels, simulation, finite elements, Ansys

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	12
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Γενικά.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Επεμβάσεις σε υποστυλώματα.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Στόχοι της εργασίας.....</b>	<b>14</b>
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Αποτίμηση και βλάβες κατασκευών από Ο.Σ.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Μέθοδοι Επισκευών-Ενισχύσεων.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1. Γενικά.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2. Μέθοδοι Επισκευών-Ενισχύσεων υποστυλωμάτων.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Μηχανική των Επισκευών-Ενισχύσεων υποστυλωμάτων.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4. Συστάσεις ανασχεδιασμού υποστυλωμάτων.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.1. Βελτίωση μεγεθών ορθής τάσης.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2. Βελτίωση φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3. Βελτίωση τοπικής πλαστιμότητας υποστυλώματος.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5. Υλικά Επεμβάσεων.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.1. Ειδικοί τύποι σκυροδεμάτων.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2. Πολυμερικές κόλλες.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5.3. Επισκευαστικά κονιάματα.....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.4. Επικολλητά φύλλα.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6. Πειραματική διερεύνηση μανδυνών και διεπιφανειών οπλ. σκυροδέματος.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.1. Eduardo Julio, Fernando Branco και Vitor Silva.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.2. Βανδώρου.....</b>	<b>37</b>
<b>2.6.3. Βιντζηλαίου.....</b>	<b>38</b>
<b>3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ Ansys.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Γενικά.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Σκυρόδεμα.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Χάλυβας.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4. Διεπιφάνεια παλαιού-νέου σκυροδέματος.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.1. Μέθοδος επιφανειακών στοιχείων τριβής.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.2. Μέθοδος ελατηρίων.....</b>	<b>49</b>
<b>3.5. Επιπλέον παράμετροι μοντελοποίησης.....</b>	<b>53</b>

<b>4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ Ansys</b> .....	55
4.1.Εισαγωγή .....	55
4.2. Μη ενισχυμένο υποστύλωμα.....	56
4.2.1. Πείραμα S1.....	56
4.2.2. Προσομοίωση S1.....	57
4.2.3. Ανάλυση .....	58
4.2.3.1. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης .....	58
4.2.3.2. Μορφή αστοχίας υποστυλώματος .....	67
4.2.3.3. Καμπυλότητα υποστυλώματος καθ' ύψος .....	69
4.2.3.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος .....	70
4.2.3.5. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις οπλισμών .....	72
4.2.4. Συμπεράσματα.....	73
4.3. Ενισχυμένο υποστύλωμα άοπλης λείας διεπιφάνειας μανδύα .....	74
4.3.1. Πείραμα S4.....	74
4.3.2. Προσομοίωση S4.....	76
4.3.2.1. Γενικά .....	76
4.3.2.2. Προσομοίωση διεπιφάνειας.....	77
4.3.3. Ανάλυση .....	82
4.3.3.1. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης .....	82
4.3.3.2. Μορφή αστοχίας υποστυλώματος .....	84
4.3.3.3. Καμπυλότητα υποστυλώματος καθ' ύψος .....	86
4.3.3.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος .....	87
4.3.3.5. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις οπλισμών .....	90
4.3.4. Συμπεράσματα.....	90
4.4. Ενισχυμένο υποστύλωμα οπλισμένης διεπιφάνειας μανδύα .....	92
4.4.1. Πείραμα S6.....	92
4.4.2. Προσομοίωση S6.....	93
4.4.2.1. Γενικά .....	93
4.4.2.2. Προσομοίωση διεπιφάνειας.....	94
4.4.3. Ανάλυση .....	95
4.4.3.1. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης .....	95
4.4.3.2. Μορφή αστοχίας υποστυλώματος .....	98
4.4.3.3. Καμπυλότητα υποστυλώματος καθ' ύψος .....	99
4.4.3.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος .....	99
4.4.3.5. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις οπλισμών .....	102
4.4.4. Συμπεράσματα.....	103
<b>5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ</b> .....	105
5.1.Γενικά .....	105
5.2.Προσομοίωμα υποστυλώματος χωρίς ενίσχυση.....	107
5.2.1. Προσομοίωση I .....	107
5.2.1.1. Διαστάσεις .....	107
5.2.1.2. Υλικά.....	108
5.2.1.3. Στοιχεία προσομοίωσης.....	110



5.2.2. Ανάλυση.....	112
5.2.2.1. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης .....	112
5.2.2.2. Μορφή αστοχίας .....	113
5.2.2.3. Ανηγμένες παραμορφώσεις σκυροδέματος .....	116
5.2.2.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις οπλισμών .....	118
5.2.3. Συμπεράσματα.....	119
5.3. Προσομοίωμα υποστυλώματος με μονολιθική σύνδεση μανδύα.....	120
5.3.1. Προσομοιώματα M1, M2, M3 .....	120
5.3.2. Ανάλυση.....	123
5.3.2.1. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης .....	123
5.3.2.2. Μορφή αστοχίας.....	129
5.3.2.3. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος .....	131
5.3.2.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις οπλισμών .....	134
5.3.3. Συμπεράσματα .....	136
5.4. Ενισχυμένα υποστυλώματα με προσομοίωση της λειτουργία διεπιφάνειας .....	137
5.4.1. Προσομοιώματα J1 και J2 .....	137
5.4.1.1. Γενικά .....	137
5.4.1.2. Προσομοίωση διεπιφανειών .....	137
5.4.2. Ανάλυση.....	139
5.4.2.1. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης .....	139
5.4.2.2. Μορφή αστοχίας.....	141
5.4.2.3. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος .....	142
5.4.2.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις οπλισμών .....	148
5.4.2.5. Ποσοστό παραλαβής φορτίου από τον μανδύα .....	150
5.4.3. Συμπεράσματα .....	150
6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ .....	153
6.1. Γενικά.....	153
6.2. Επίδραση αξονικού φορτίου .....	154
6.2.1. Προσομοιώματα P1, P2, P3 .....	154
6.2.2. Ανάλυση.....	155
6.2.3. Συμπεράσματα .....	156
6.3. Επίδραση διατμητικού μήκους υποστυλώματος.....	156
6.3.1. Προσομοιώματα H1, H2, H3 .....	156
6.3.2. Αναλύσεις .....	157
6.3.2.1. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης .....	157
6.3.2.2. Μορφή αστοχίας.....	159
6.3.3. Συμπεράσματα .....	162
6.4. Επίδραση περίσφιγξης .....	163
6.4.1. Προσομοιώματα S1, S2 , S3 .....	163
6.4.2. Ανάλυση.....	163
6.4.3. Συμπεράσματα .....	166

<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	167
<b>7.1.</b> Προσομοίωση με το Ansys.....	167
<b>7.2.</b> Αναλυτική διερεύνηση επεμβάσεων.....	168
<b>7.3.</b> Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση .....	171
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	173

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ.2.1	Διάγραμμα διατμητικών τάσεων-ολίσθησης σε λεία διεπιφάνεια κατά ΚΑΝΕΠΕ .....	25
Σχ.2.2	Μηχανισμός βλήτρου .....	26
Σχ.2.3	Καμπύλες υπολογισμού για οπλισμένη διεπιφάνεια .....	27
Σχ.2.4	Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για πειράματα M1, M2, M6 .....	35
Σχ.2.5	Θεωρητικά και πειραματικά φορτία διαρροής πειραμάτων .....	35
Σχ.2.6	Θεωρητικά και πειραματικά μέγιστα φορτία πειραμάτων .....	36
Σχ.2.7	Τέμνουσα δυσκαμψία πειραμάτων .....	36
Σχ.2.8	Διαγράμματα διατμ. τάσεων-ολίσθησης για λεία διεπιφάνεια .....	38
Σχ.2.9	Διαγράμματα διατμ. τάσεων-ολίσθησης για φυσικώς τραχεία διεπιφάνεια .....	39
Σχ.2.10	Διαγράμματα διατμ. τάσεων-ολίσθησης για διεπιφάνεια κατόπιν αμμοβολής .....	39
Σχ.3.1	Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson .....	40
Σχ.3.2	Στοιχείο SOLID65 .....	41
Σχ.3.3	Επιφάνεια αστοχίας σκυροδέματος κατά Willam-Warnke .....	41
Σχ.3.4	Διάγραμμα σ-ε σκυροδέματος κατά Ευρωκώδικα 2 .....	42
Σχ.3.5	Διάγραμμα c1 για το σκυρόδεμα .....	43
Σχ.3.6	Διάγραμμα c2 για το σκυρόδεμα .....	43
Σχ.3.7	Διάγραμμα c3 για το σκυρόδεμα .....	44
Σχ.3.8	Διάγραμμα c4 για το σκυρόδεμα .....	45
Σχ.3.9	Στοιχείο LINK180 .....	46
Σχ.3.10	Διάγραμμα s1 για χάλυβα .....	46
Σχ.3.11	Διάγραμμα s2 για χάλυβα .....	47
Σχ.3.12	Στοιχεία CONTA174 TARGE170 .....	48
Σχ.3.13	Στοιχείο COMBIN39 .....	50
Σχ.3.14	Νόμος ελατηρίων i1, για λείες διεπιφάνειες .....	51
Σχ.3.15	Νόμος ελατηρίων i2, για τραχείες διεπιφάνειες .....	52
Σχ.3.16	Νόμος ελατηρίων i3, για οπλισμένες διεπιφάνειες .....	52
Σχ.3.17	Στοιχείο SOLID185 .....	54
Σχ.4.1	Τομή και κάτοψη υποστυλώματος S1 .....	56
Σχ.4.2	Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος S1 .....	58

Σχ.4.3	Νόμος σκυροδέματος $c_1$ υποστυλώματος $S_1$ .....	59
Σχ.4.4	Νόμοι χάλυβα $s_1$ και $s_2$ υποστυλώματος $S_1$ .....	59
Σχ.4.5	Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης $S_1$ για τύπους υλικών $c_1,s_1$ και $c_1,s_2$ .....	60
Σχ.4.6	Νόμοι σκυροδέματος $c_2$ και χάλυβα $s_2$ υποστυλώματος $S_1$ .....	61
Σχ.4.7	Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος $S_1$ για τύπους υλικών $c_2,s_2$ .....	62
Σχ.4.8	Νόμοι σκυροδέματος $c_3$ και χάλυβα $s_2$ υποστυλώματος $S_1$ .....	63
Σχ.4.9	Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος $S_1$ για τύπους υλικών $c_3,s_2$ .....	63
Σχ.4.10	Νόμοι σκυροδέματος $c_4$ και χάλυβα $s_2$ υποστυλώματος $S_1$ .....	64
Σχ.4.11	Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος $S_1$ για τύπους υλικών $c_4,s_2$ .....	65
Σχ.4.12	Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων $S_1$ .....	66
Σχ.4.13	Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος $S_1$ .....	68
Σχ.4.14	Καμπυλότητα $S_1$ καθ' ύψος στη διαρροή .....	69
Σχ.4.15	Καμπυλότητα $S_1$ καθ' ύψος στο μέγιστο φορτίο.....	70
Σχ.4.16	Εφελκυστικές κύριες τάσεις σε τομή του $S_1$ .....	71
Σχ.4.17	Κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις σε τομή του $S_1$ .....	72
Σχ.4.18	Δύναμη εφελκόμενων ράβδων του $S_1$ .....	73
Σχ.4.19	Κάτοψη και τομή υποστυλώματος $S_4$ .....	76
Σχ.4.20	Νόμος σκυροδέματος $c_2$ για υποστυλώμα $S_4$ .....	77
Σχ.4.21	Νόμος χάλυβα $s_2$ για υποστυλώμα $S_4$ .....	77
Σχ.4.22	Κατανομή ορθών τάσεων στις κάθετες στη φόρτιση διεπιφάνειες .....	78
Σχ.4.23	Νόμος $i_1$ για λεία διεπιφάνεια υποστυλώματος $S_4$ .....	80
Σχ.4.24	Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος $S_4$ .....	81
Σχ.4.25	Πεπερασμένα στοιχεία οπλισμών υποστυλώματος $S_4$ .....	81
Σχ.4.26	Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος $S_4$ .....	82
Σχ.4.27	Συγκριτικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης $S_1$ και $S_4$ .....	83
Σχ.4.28	Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος $S_4$ σε αρχικό στάδιο.....	85
Σχ.4.29	Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος $S_4$ σε προχωρημένο στάδιο.....	86
Σχ.4.30	Καμπυλότητα υποστυλώματος $S_4$ καθ' ύψος.....	87
Σχ.4.31	Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας σε αρχικό στάδιο .....	88

Σχ.4.32 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας σε προχωρημένο στάδιο .....	88
Σχ.4.33 Αμηγμένες παραμορφώσεις στη βάση για μέγιστο φορτίο .....	89
Σχ.4.34 Δύναμη εφελκόμενων ράβδων υποστυλώματος S4.....	90
Σχ.4.35 Εργαστηριακή διάταξη επιβολής φορτίων.....	93
Σχ.4.36 Νόμος i3 για οπλισμένη διεπιφάνεια υποστυλώματος S6 .....	95
Σχ.4.37 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος S6 .....	96
Σχ.4.38 Συγκριτικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης S1,S4,S6.....	97
Σχ.4.39 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος S6.....	98
Σχ.4.40 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας υποστυλώματος S6 .....	99
Σχ.4.41 Οριζόντιες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας υποστυλώματος S6.....	100
Σχ.4.42 Ορθές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος S6.....	100
Σχ.4.43 Οριζόντιες διατμητικές τάσεις πλαινής διεπιφάνειας υποστυλώματος S6.....	101
Σχ.4.44 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας υποστυλώματος S6....	101
Σχ.4.45 Δύναμη διαμήκων οπλισμών υποστυλώματος S6.....	102
Σχ.5.1 Κάτοψη και τομή υποστυλώματος I.....	107
Σχ.5.2 Όγκοι υποστυλώματος I .....	108
Σχ.5.3 Νόμος σκυροδέματος c4 και χάλυβα s2 υποστυλώματος I.....	109
Σχ.5.4 Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος I .....	111
Σχ.5.5 Οπλισμοί υποστυλώματος I .....	111
Σχ.5.6 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος I .....	112
Σχ.5.7 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος I .....	114
Σχ.5.8 Υπολογισμός γωνίας στροφής υποστυλώματος καθ' ύψος .....	115
Σχ.5.9 Γωνία στροφής υποστυλώματος .....	116
Σχ.5.10 Κατακόρυφες παραμορφώσεις υποστυλώματος I .....	117
Σχ.5.11 Κύριες τάσεις υποστυλώματος I.....	117
Σχ.5.12 Δύναμη διαμήκων ράβδων υποστυλώματος I.....	118
Σχ.5.13 Τάσεις συνδετήρων υποστυλώματος I.....	119

Σχ.5.14 Κάτοψη και τομή υποστυλώματος M .....	121
Σχ.5.15 Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος M .....	122
Σχ.5.16 Πεπερασμένα στοιχεία οπλισμών υποστυλώματος M .....	123
Σχ.5.17 Νόμοι υλικών $c_4$ και $s_2$ υποστυλώματος M .....	124
Σχ.5.18 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος M1 .....	124
Σχ.5.19 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος M2 .....	126
Σχ.5.20 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος M3 .....	127
Σχ.5.21 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων I και M1, M2, M3 .....	128
Σχ.5.22 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος M1 σε αρχικό στάδιο .....	130
Σχ.5.23 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος M1 σε προχωρημένο στάδιο .....	131
Σχ.5.24 Κατακόρυφες ορθές τάσεις υποστυλώματος M1 .....	132
Σχ.5.25 Ορθές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος M1 .....	133
Σχ.5.26 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος M1 .....	133
Σχ.5.27 Δύναμη διαμήκων οπλισμών υποστυλώματος M1 .....	134
Σχ.5.28 Τάσεις εσωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος M1 .....	135
Σχ.5.29 Τάσεις εξωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος M1 .....	135
Σχ.5.30 Νόμος ελατηρίων $i_1$ υποστυλώματος J1 .....	138
Σχ.5.31 Νόμος ελατηρίων $i_3$ υποστυλώματος J2 .....	139
Σχ.5.32 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων I, M1, J1, J2 .....	140
Σχ.5.33 Σταδιακές εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος J2 .....	141
Σχ.5.34 Κατακόρυφες ορθές τάσεις υποστυλώματος J2 .....	142
Σχ.5.35 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος J2 .....	143
Σχ.5.36 Διατμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας υποστυλώματος J2 .....	144
Σχ.5.37 Διατμητικές τάσεις εφελκυστικής διεπιφάνειας υποστυλώματος J2 .....	145
Σχ.5.38 Διατμητικές τάσεις πλευρικής διεπιφάνειας υποστυλώματος J2 .....	146
Σχ.5.39 Διατμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας καθ' ύψος .....	147
Σχ.5.40 Διατμητικές τάσεις εφελκυστικής διεπιφάνειας καθ' ύψος .....	148

<b>Σχ.5.41</b> Τάσεις εσωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος J2 .....	149
<b>Σχ.5.42</b> Τάσεις εξωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος J2.....	149
<b>Σχ.6.1</b> Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης προσομοιωμάτων P .....	155
<b>Σχ.6.2</b> Προσομοιώματα H1, H2, H3 στο Ansys.....	157
<b>Σχ.6.3</b> Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης προσομοιωμάτων H1, H2, H3 .....	158
<b>Σχ.6.4</b> Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος H1 .....	159
<b>Σχ.6.5</b> Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος H2 .....	160
<b>Σχ.6.6</b> Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος H3.....	160
<b>Σχ.6.7</b> Τροχιές κύριων θλιπτικών τάσεων υποστυλώματος H3 .....	161
<b>Σχ.6.8</b> Τροχιές κύριων θλιπτικών τάσεων υποστυλώματος H1 .....	162
<b>Σχ.6.9</b> Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων N1, S1 .....	163
<b>Σχ.6.10</b> Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων N2, S2 .....	164
<b>Σχ.6.11</b> Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων N3, S3 .....	164





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πιν.2.1	Στάθμες επιτελεστικότητας .....	17
Πιν.2.2	Κατηγορίες επεμβάσεων σε υποστυλώματα .....	23
Πιν.4.1	Δεδομένα εισαγωγής μοντέλου f1, για λεία διεπιφάνεια .....	80
Πιν.4.2	Δεδομένα εισαγωγής μοντέλου f3, για οπλισμένη διεπιφάνεια.....	94
Πιν.5.1	Υλικά υποστυλώματος Ι.....	110
Πιν.5.2	Αποτελέσματα υποστυλώματος Ι.....	113
Πιν.5.3	Υλικά υποστυλώματος Μ1 .....	124
Πιν.5.4	Αποτελέσματα υποστυλώματος Μ1 .....	125
Πιν.5.5	Υλικά υποστυλώματος Μ2 .....	125
Πιν.5.6	Αποτελέσματα υποστυλώματος Μ2 .....	126
Πιν.5.7	Υλικά υποστυλώματος Μ3 .....	127
Πιν.5.8	Αποτελέσματα υποστυλώματος Μ3 .....	127
Πιν.5.9	Αποτελέσματα υποστυλωμάτων Ι και Μ1, Μ2, Μ3 .....	129
Πιν.5.10	Δυσκαμφίεις υποστυλωμάτων Ι και Μ1, Μ2, Μ3.....	129
Πιν.5.11	Αποτελέσματα υποστυλωμάτων Ι και Μ1, J1, J2 .....	140
Πιν.6.1	Αποτελέσματα προσομοιωμάτων Ρ .....	155
Πιν.6.2	Αποτελέσματα προσομοιωμάτων Η1, Η2, Η3 .....	158

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικ.2.1</b> Θραύση γωνιακού υποστυλώματος εξαιτίας έλλειψης συνδετήρων (Ροβήλος, 2001) .....	18
<b>Εικ.2.2</b> Ρηγμάτωση γωνιακού υποστυλώματος στη βάση του εξαιτίας έλλειψης συνδετήρων (Ροβήλος, 2001) .....	19
<b>Εικ.2.3</b> Τυπική μορφή θραύσης κοντών υποστυλωμάτων (Ροβήλος, 2001).....	20
<b>Εικ.2.4</b> Χαλάρωση οπλισμού κοντού υποστυλώματος εξαιτίας ελλειπούς περίσφιγξης (Ροβήλος, 2001).....	21
<b>Εικ.4.1</b> Εργαστηριακή διάταξη φόρτισης (Julio, Branco, Silva, 2005).....	75
<b>Εικ.4.2</b> Ρωγμή στη βάση του υποστυλώματος (Julio, Branco, Silva, 2005) .....	84
<b>Εικ.5.1</b> Εργαστηριακή διάταξη επιβολής στηρίξεων και φορτίσεων (Βανδώρος, 2005) .....	106

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενικά

Η ανάγκη ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών είναι δεδομένη για πολλούς λόγους. Η συνεχής αύξηση των κανονιστικών απαιτήσεων σχεδιασμού καθιστά συνεχώς τις παλαιότερες κατασκευές εκτός των τρεχόντων αποδεκτών ορίων. Ειδικότερα για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα η αίσθηση ασφάλειας και στιβαρότητας που εμπνέουν στους ανθρώπους υποκρίπτει συχνά την ανάγκη για βελτίωση των χαρακτηριστικών της κατασκευής. Άλλωστε πέρα από τους κανονισμούς που συνεχώς γίνονται αυστηρότεροι και την κόπωση των κατασκευών στην πάροδο της ζωής τους, η ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών συνεχώς βελτιώνεται και μας βοηθά στην ενίσχυση των παλαιότερων κατασκευών. Στα κτηριακά έργα στην Ελλάδα είναι γνωστό ότι το μεγαλύτερο μέρος τους είναι κατασκευασμένο μέχρι τη δεκαετία του '80 με τους κανονισμούς και τα υλικά της εποχής. Οι πρώτοι κανονισμοί ήταν ο κανονισμός ΟΣ του 1954 και ο ΑΣ'59 με σχεδιασμό επιτρεπομένων τάσεων, ενώ μόλις το '85 είχαμε τα πρόσθετα άρθρα. Οι νεότερες κατασκευές από το '90 και μετά σχεδιάζονται με τον ΝΕΚΩΣ'91 και ΝΕΑΚ με παράλληλη χρήση μέχρι το '95 και από το 2000 και μετά με τους ΕΚΩΣ και ΕΑΚ. Τα περισσότερα κτήρια λοιπόν, που σχεδιάστηκαν με τους παλαιότερους κανονισμούς πρέπει να ενισχυθούν ώστε να μπορούν να καλύπτουν τις απαιτήσεις των κανονισμών που πλέον είναι οι Ευρωκώδικες. Όσον αφορά πάντως τις ενισχύσεις των κτηρίων, το μέρος 8.3 του Ευρωκώδικα ουσιαστικά παραπέμπει μέσω του προσαρτήματος του στον ΚΑΝΕΠΕ. Ο ΚΑΝΕΠΕ αποτέλεσε το απαύγασμα της προσπάθειας και των ερευνών των ελλήνων μηχανικών για να καλυφθεί η ανάγκη αυτή των επεμβάσεων και ενισχύσεων.

Η πορεία αναζήτησης της βέλτιστης μεθόδου επέμβασης- ενίσχυσης σε μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα ξεκινά από την αποτίμηση της υφιστάμενης κατασκευής. Με τη συλλογή των στοιχείων, την ανάλυσή τους και τον έλεγχο των οριακών καταστάσεων πρέπει να φτάσουμε σ' ένα ικανοποιητικό επίπεδο αξιοπιστίας των δεδομένων ώστε να προχωρήσουμε στην πρώτη σύλληψη των επεμβάσεων. Η επίγνωση της προϋπάρχουσας κατάστασης (αποτίμηση) αποτελεί προϋπόθεση για το σωστό επανυπολογισμό και ανασχεδιασμό της κατασκευής.

Οι επιλογές επεμβάσεων ποικίλουν και μπορούμε να καταλήξουμε σε ενέργεια μικρότερης ή μεγαλύτερης παρέμβασης. Μπορούμε να δοκιμάσουμε επισκευή ή ενίσχυση της κρίσιμης περιοχής αλλά και λύσεις προσθήκης νέων φερόντων στοιχείων (τοιχώματα, σιδηρά πλαίσια), γεμίσματα τοιχωμάτων του πλαισιακού φορέα (εμφάτνωση) είτε επίσης αποσβεστήρες και μονωτήρες. Η εργασία αυτή περιορίζεται στο να αναλύσει την τοπική επέμβαση των στοιχείων και ειδικότερα υποστυλωμάτων με κάποιες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα θα επικεντρωθούμε στην ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.2. Επεμβάσεις σε υποστυλώματα

Τα υποστυλώματα αποτελούν τα στοιχεία του κτηρίου, τα οποία πρώτα απ' όλα ενισχύουμε. Οι λόγοι είναι αρκετοί. Αρχικά η υποδιαστασιολόγηση τους σε σχέση με τους σύγχρονους κανονισμούς με χαρακτηριστικότερη την έλλειψη συνδετήρων εντοπίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις. Στη συνέχεια συναντάμε συχνά στις παλαιότερες κατασκευές ειδικές-ιδιαίτερες περιπτώσεις υποστυλωμάτων και καταπονήσεων όπως οι τύποι pilotis και τα κοντά υποστυλώματα όπου και στις δύο περιπτώσεις, για άλλο λόγο στην καθεμία, έχουμε συγκέντρωση τάσεων που καταπονεί ιδιαίτερα τις κολώνες. Η κυριότερη πάντως αιτία για την ιδιαίτερη προσοχή που χρίζουν τα υποστυλώματα είναι η ίδια η σημασία τους για τον ικανοτικό σχεδιασμό που εισήχθηκε στον ΝΕΚΩΣ του '91.

Σε όλα τα επιμέρους στοιχεία ενός κτηριακού έργου, μπορεί να χρειαστεί επισκευή ώστε να αποκατασταθούν τα αρχικά χαρακτηριστικά του μετά από κάποια μορφής καταπόνηση και βλάβη. Ακόμη πιο αναγκαία είναι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων με στόχο τη βελτίωση της απόκρισης τους σε μια επόμενη φόρτιση. Στην εργασία αυτή δε θα ασχοληθούμε με την επισκευή που μπορεί να είναι από μικρής έκτασης όπως ρητινενέσεις ή επισκευαστικά κονιάματα, είτε για σοβαρότερες βλάβες καθαίρεση και αποκατάσταση της περιοχής βλάβης. Το κομμάτι της ενίσχυσης μετά την αποκατάσταση χρησιμοποιεί τις ίδιες μεθόδους με την ενίσχυση των μη βλαμμένων υποστυλωμάτων. Ακριβώς αυτές τις μεθόδους εξετάζει η παρούσα εργασία, την ενίσχυση υποστυλωμάτων χωρίς πρότερη βλάβη.

Οι τεχνικές ενίσχυσης υποστυλωμάτων χωρίζονται σε τεχνικές όπου αυξάνεται η διατομή του στοιχείου και σε αυτές που δεν αυξάνεται. Η βελτίωση των χαρακτηριστικών της κολώνας στην πρώτη περίπτωση γίνεται με κατασκευή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλές παραμέτρους που αναλύονται στη συνέχεια και ιδιαίτερα λεπτά κατασκευαστικά-τεχνικά σημεία που καθορίζουν το βαθμό επιτυχίας της ενίσχυσης. Η μέθοδος χωρίς αύξηση της διατομής στηρίζεται στην εξωτερική περίσφιξη που μπορεί να προσφέρουν επικολητά ελάσματα ή λωρίδες FRP είτε προεντεταμένα τέτοια στοιχεία, δεν θα ασχοληθούμε όμως με αυτά.

### 1.3. Στόχοι της εργασίας

Η εργασία αυτή προσεγγίζει τα θέματα της ενίσχυσης με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος μέσω αναλύσεων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ansys. Η ανάλυση που γίνεται απαιτεί υψηλό υπόβαθρο γνώσης των μηχανισμών του σκυροδέματος στη συνεργασία του με άλλο σκυρόδεμα ή και με ράβδους οπλισμού, βλήτρα. Αναγκαία είναι η αντίληψη μηχανικού με την οποία πρέπει να προσεγγίζουμε τα πειράματα και την προσομοίωσή τους στο πρόγραμμα Ansys. Η σωστή προσομοίωση και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων με βάση τα φαινόμενα της μηχανικής των υλικών είναι απαραίτητα για την ορθότερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται η βαθμονόμηση του προγράμματος Ansys προσπαθώντας να προσεγγίσουμε τα πειραματικά αποτελέσματα μιας σειράς υποστυλωμάτων των Eduardo Julio, Fernando Branco και Victor Silva (2005) από το University of Coimbra, Portugal. Στην προσπάθεια αυτή εξετάζονται όλα τα υλικά, τα

στοιχεία μοντελοποίησης και η μέθοδος παραμετροποίησης της ανάλυσης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο Ansys προσεγγίζουν πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα, όπως φαίνεται στα επόμενα κεφάλαια, με βάση τις παραδοχές που γίνονται.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον τρόπο προσομοίωσης της διεπιφάνειας μεταξύ υποστυλώματος και μανδύα. Ελέγχονται δύο μέθοδοι ενώ χρησιμοποιούνται τόσο πειραματικά αποτελέσματα όσο και κανονιστικά δεδομένα για την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των πειραμάτων. Ακολουθώντας την πορεία αυτή των αναλύσεων είμαστε σε θέση να εξετάζουμε περιπτώσεις μανδύα με λεία ή τραχεία διεπιφάνεια αλλά και διεπιφάνεια οπλισμένη με βλήτρα.

Έχοντας τη δυνατότητα να προσεγγίσουμε σε ικανοποιητικό βαθμό τη φυσική λειτουργία ενός υποστυλώματος με μανδύα διεξάγουμε σειρά αναλύσεων για δυνατές ενισχύσεις και εξετάζουμε τα αντίστοιχα ποιοτικά αλλά και ποσοτικά συμπεράσματα για υποστυλώματα συνήθη στον ελλαδικό χώρο. Ελέγχονται τα μεγέθη των παραλαμβανόμενων φορτίων, τα μεγέθη της δυσκαμψίας και πλαστιμότητας. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα και τους οπλισμούς συγκρίνονται μεταξύ τους για τις διάφορες περιπτώσεις.

Στη συνέχεια διερευνούμε την επίδραση παραμέτρων όπως το μέγεθος της αξονικής θλίψης ή το διατμητικό ύψος του υποστυλώματος. Εξάγουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των μοντέλων μας. Αναλύουμε επίσης υποστυλώματα με πιο πυκνό διατμητικό οπλισμό μανδύα. Σε όλες τις περιπτώσεις μεταχειριζόμαστε τις δυνατότητες του προγράμματος Ansys κατάλληλα, ώστε να πάρουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα που θα πλησιάσει όσο το δυνατόν περισσότερο την πειραματική συμπεριφορά.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 2.1. Αποτίμηση και βλάβες κατασκευών από Ο.Σ.

Το πρώτο στάδιο κάθε ενέργειας που αποσκοπεί στην ενίσχυση ή την αποτίμηση μιας κατασκευής από σκυρόδεμα είναι η αποτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης. Γίνεται μια αρχική αναλυτική αποτίμηση υπολογίζοντας τις δράσεις, τις δυσκαμψίες και τις αντιστάσεις που διαφέρουν από τη φάση κατασκευής μέχρι τη στιγμή της επέμβασης. Οι αντοχές υλικών αλλάζουν στην πάροδο του χρόνου, οι δυσκαμψίες ενδέχεται να έχουν μεταβληθεί λόγω μηχανικών βλαβών, περιβαλλοντικής έκθεσης ή φυσικοχημικής επιρροής. Χρήσιμο έως απαραίτητο είναι να γίνεται ανάλυση πριν την επέμβαση με κάποια γενική ή προσεγγιστική μη γραμμική μέθοδο. Για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρχει υψηλή στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων για την κατασκευή. Η αξιοπιστία αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην αποτίμηση των υφιστάμενων δομημάτων και στη διαμόρφωση στρατηγικών επέμβασης.

Η αποτίμηση υφιστάμενων δομημάτων αρχίζει από τη συλλογή των δεδομένων, ακολουθεί η ανάλυση και τέλος ο έλεγχος οριακών καταστάσεων. Ο σκοπός της αποτίμησης αυτής είναι η εκτίμηση της διαθέσιμης φέρουσας ικανότητας και ο έλεγχος ικανοποίησης των ελάχιστων απαιτήσεων του ισχύοντος κανονισμού. Η διαδικασία της αποτίμησης διαφοροποιείται ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι βλαβών στο προς αποτίμηση κτήριο. Στη δεύτερη περίπτωση πρώτα γίνεται συνεκτίμησης των βλαβών και, στη συνέχεια, αν κριθεί ότι απαιτείται επέμβαση εξετάζουμε αν μόνο η αποκατάσταση-επισκευή των βλαβών επαρκεί για την επίτευξη του στόχου ανασχεδιασμού ή χρειάζεται επιπλέον ενίσχυση.

Απώτερος στόχος της αποτίμησης της υφιστάμενης κατασκευής είναι η ικανοποίηση κάποιας «στάθμης επιτελεστικότητας» για κάποια δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Η γενικώς αποδεκτή τεχνική διάρκεια ζωής για τα συνήθους σπουδαιότητας κτήρια είναι 50 έτη ανεξαρτήτως από την εικαζόμενη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του κτίσματος. Για τα φέροντα στοιχεία του οργανισμού όπως τα υποστυλώματα, ο ΕΑΚ2000 προέβλεπε στόχο Β1 κατά τον πίνακα. Η πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 έτη έχει πιθανότητα υπέρβασης 475έτη.

	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Άμεση χρήση μετά τον σεισμό	Προστασία ζωής	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης
10%	A1	B1	Γ1
50%	A2	B2	Γ2

**Πιν.2.1** Στάθμες επιτελεστικότητας

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Οι βλάβες που παρουσιάζονται στα διάφορα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής μετά από ένα σεισμό, όπως ορίσθηκε με απόφαση του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων μετά το σεισμό του '99, χωρίζονται στα παρακάτω επίπεδα. Διακρίνονται σε βλάβες τοπικού χαρακτήρα στον Φ.Ο. από ελαφρές ή και σοβαρότερες σε δοκούς, πλάκες και υποστυλώματα. Ιδίως στα κατακόρυφα στοιχεία η παρουσία ομάδας τριχοειδών ρωγμών οιασδήποτε κατεύθυνσης χρήζει επέμβασης. Για τις πιο εμφανείς βλάβες όπως παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες η ανάγκη επισκευής είναι προφανής.



**Εικ.2.1** Θραύση γωνιακού υποστυλώματος εξαιτίας έλλειψης συνδετήρων (Ροβήλος, 2001)



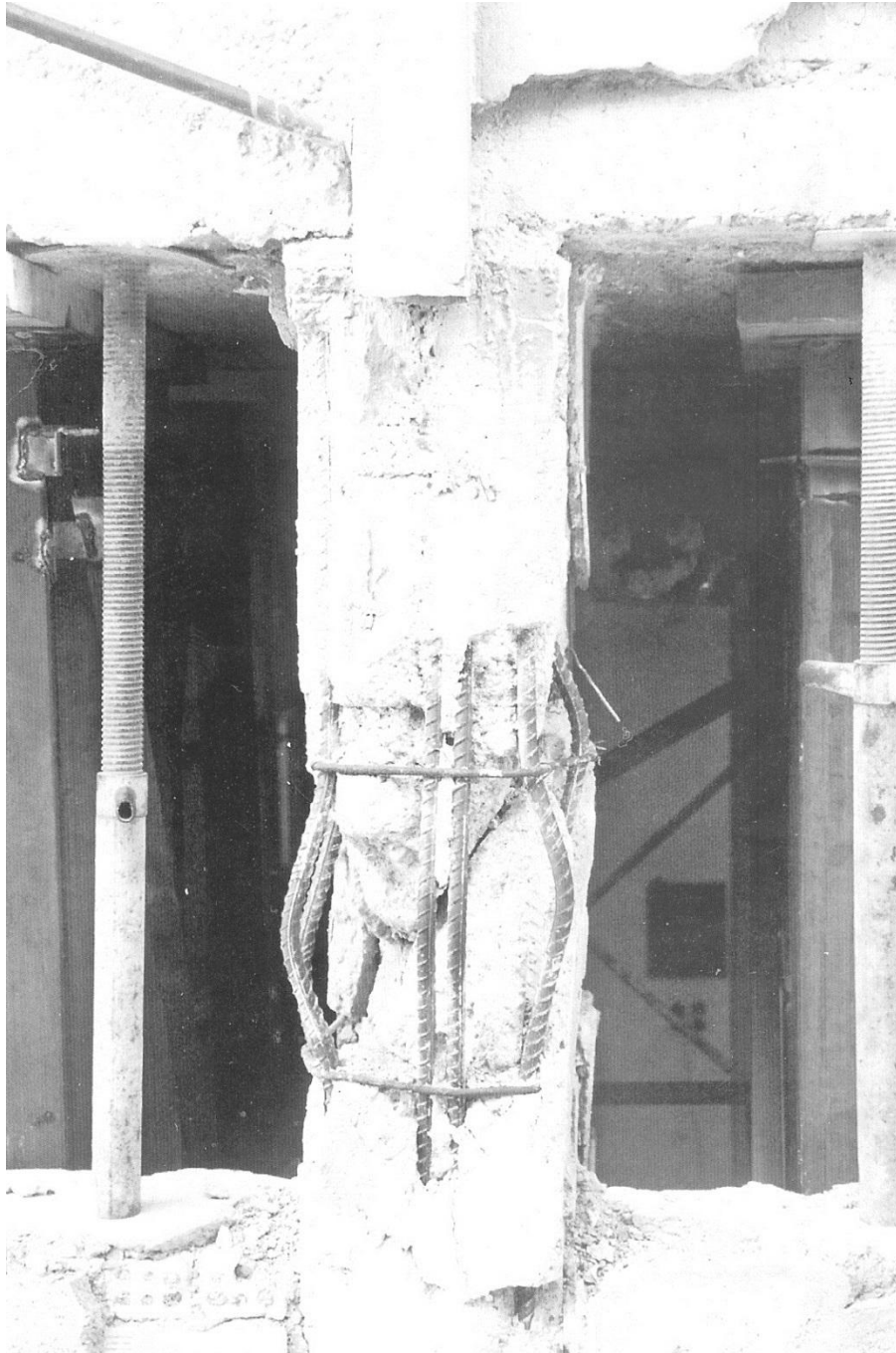


**Εικ.2.2** Ρηγμάτωση γωνιακού υποστυλώματος στη βάση του εξαιτίας έλλειψης συνδετήρων (Ροβήλος, 2001)

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ



**Εικ.2.3** Τυπική μορφή θραύσης κοντών υποστυλωμάτων (Ροβήλος, 2001)



**Εικ.2.4** Χαλάρωση οπλισμού κοντού υποστυλώματος εξαιτίας ελλιπούς περίσφιγξης  
(Ροβήλος, 2001)

Επόμενη κατηγορία βλάβης, η οποία δε σχετίζεται με την παρούσα εργασία είναι οι βλάβες στον οργανισμό πλήρωσης της οικοδομής και οι βλάβες γενικού χαρακτήρα. Οι βλάβες αυτές αφορούν τη σύνθεση και το σχεδιασμό του φορέα, προβλήματα θεμελίωσης και άλλα χονδροειδή σφάλματα.

Εμείς θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την παθολογία των υποστυλωμάτων που στην πλειοψηφία τους τη συναντάμε μετά από κάποιο σεισμό, αλλά και στην ανάγκη

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

ενίσχυσης κατασκευών σχεδιασμένων με παλαιότερους κανονισμούς, Η σεισμική παθολογία των υποστυλωμάτων χωρίζεται σε βλάβες από ανακυκλιζόμενη καμπτοδιάτμηση με ενδεχόμενη εναλλαγή αξονικής και σε βλάβες από ανακυκλιζόμενη τέμνουσα με ισχυρή αξονική σύνθλιψη.

Η πρώτη μορφή εκδηλώνεται με αστοχία στην κεφαλή και στον πόδα του υποστυλώματος. Παρουσιάζεται σε υποστυλώματα μέσης έως μεγάλης λυγηρότητας  $a=L/2h>3,5$ . Η μορφή αυτής της βλάβης είναι ιδιαίτερα συχνή. Βασικές αιτίες αυτής της μορφής βλάβης είναι η χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος, οι αραιοί συνδετήρες (μικρή περισφιγξη), η ύπαρξη ισχυρών ζυγωμάτων που οδηγεί σε νωρίτερη αστοχία των στύλων.

Η δεύτερη μορφή βλάβης έχει διατμητικό χαρακτήρα και εκδηλώνεται με χιαστί ρήγματα στην ασθενέστερη ζώνη του υποστυλώματος. Παρουσιάζεται σε υποστυλώματα μέσης έως μικρής λυγηρότητας  $a=L/2h<3,5$ . Χαρακτηρίζεται από την εκρηκτική διατμητική αστοχία των κοντών υποστυλωμάτων που μπορεί να οδηγήσει και σε απότομη κατάρρευση του κτηρίου. Η συχνότητα αυτής της βλάβης είναι μικρότερη, ενώ εμφανίζεται κυρίως σε υποστυλώματα ισογείου όπου εξαιτίας των μεγάλων διαστάσεων διατομής η λυγηρότητα είναι μικρή καθώς και στα φύσει ή θέσει κοντά υποστυλώματα.

Αντίστοιχη παθολογία εντοπίζουμε και στις μονοτονικές φορτίσεις, γι' αυτό και στην εργασία αυτή θα εξεταστούν μόνο μονοτονικές φορτίσεις υποστυλωμάτων μοντελοποιημένων στο Ansys. Η προσωρινή υποστύλωση είναι μια από τις πρώτες ενέργειες του μηχανικού στην περίπτωση σοβαρής βλάβης των υποστυλωμάτων.

### 2.2. Μέθοδοι Επισκευών-Ενισχύσεων

#### 2.2.1. Γενικά

Με βάση τα συμπεράσματα της αποτίμησης καθώς και τη φύση των βλαβών που τυχόν έχει, λαμβάνουμε την απόφαση επέμβασης με στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων του αντισεισμικού σχεδιασμού. Τα γενικά κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγονται οι επεμβάσεις είναι ποικίλα, όπως: το κόστος, τόσο το αρχικό όσο και το μελλοντικό, η διαθέσιμη ποιότητα εργασίας, η διαθεσιμότητα του κατάλληλου ποιοτικού ελέγχου, η χρήση του κτηρίου, η αισθητική, η διατήρηση της αρχιτεκτονικής των ιστορικών κτηρίων αλλά και η διάρκεια εκτέλεσης της εργασίας. Τα τεχνικά κριτήρια που περιορίζουν τις επιλογές μας είναι η αποκατάσταση όλων των διαπιστωμένων σοβαρών σφαλμάτων στον αρχικό φορέα ή σε πρωτεύοντα στοιχεία του, άρση της ακανονικότητας των κτηρίων, που φορτίζει δυσανάλογα περιοχές του κτηρίου, ο έλεγχος των κρίσιμων περιοχών, η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας αλλά και η ανθεκτικότητα των παλαιών και των νέων στοιχείων.

Ορισμένες από τις στρατηγικές τεχνικού και διαχειριστικού χαρακτήρα είναι η αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας του κτηρίου, η ικανότητα παραμόρφωσης των μελών, η διόρθωση κρίσιμων ανεπαρκειών και μη-κανονικοτήτων, η μείωση των σεισμικών απαιτήσεων αλλά και πιο έντονες παρεμβάσεις με μερική ή ολική καθαίρεση. Για να επιτευχθούν αυτοί οι άξονες γενικής επέμβασης πρέπει να επιλέξουμε τους κατάλληλους

τρόπους μέσω συγκεκριμένων επεμβάσεων στους φορείς μας. Για παράδειγμα η αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας μπορεί να γίνει τόσο με επιλεκτική ενίσχυση δομικών στοιχείων είτε συνολική είτε ακόμα και προσθήκη εξ ολοκλήρου νέων στοιχείων. Η αύξηση της μεταλαστικής ικανότητας παραμόρφωσης που αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τις κατασκευές μας από οπλισμένο σκυρόδεμα που υπόκεινται σε σεισμικές φορτίσεις επιτυγχάνεται με περίσφιξη των υφιστάμενων μελών. Πάνω σ' αυτού του τύπου τις επεμβάσεις θα κάνουμε την αναζήτησή μας στην παρούσα εργασία.

Οι επεμβάσεις στα υποστυλώματα είναι η πιο συχνή πρακτική στον αντισεισμικό ανασχεδιασμό μιας υφιστάμενης κατασκευής. Για την βέλτιστη επιλογή πρέπει να υπάρξει πρώτα η σύλληψη και ο προκαταρκτικός σχεδιασμός της επέμβασης, στη συνέχεια η ανάλυση και τέλος ο έλεγχος των οριακών καταστάσεων. Στα θέματα αυτά πάντως, δεν υπάρχει ακόμα διεθνώς αναγνωρισμένος κώδικας και η βιβλιογραφία είναι σχετικά περιορισμένη για το μέγεθος και τη σημασία της ανάγκης αυτής. Και στον Ευρωκώδικα 8 άλλωστε προτείνονται διορθωτικοί συντελεστές για τη δυσκαμψία και την αντοχή που στηρίζονται είτε σε αναλυτικές είτε σε ημιεμπειρικές μεθόδους.

Στον παρακάτω πίνακα χωρίζονται οι κατηγορίες των επεμβάσεων που μπορούμε να εφαρμόσουμε στα υποστυλώματα.

ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ	
ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ
·ρητινενέσεις/ επισκευαστικά κονιάματα	·περίσφιξη
·τοπικές αποκαταστάσεις	·ινοπλισμένα πολυμερή
	·μεταλλικός κλωβός
	·μανδύες από οπλ.σκυρόδεμα

**Πιν.2.2** Κατηγορίες επεμβάσεων σε υποστυλώματα

### 2.2.2. Μέθοδοι Επισκευών-Ενισχύσεων υποστυλωμάτων

Η εργασία αυτή εστιάζει αποκλειστικά στην ενίσχυση με μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η τεχνική αυτή είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων, όπως αναφέρει και ο Δρίτσος (1997). Συνήθως εφαρμόζεται σε περιπτώσεις υποστυλωμάτων με σοβαρές βλάβες ή όταν διαπιστώνεται ιδιαίτερη ανεπάρκεια της αντοχής τους. Η τεχνική περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής του υποστυλώματος με νέο σκυρόδεμα και νέους εγκάρσιους και διαμήκεις οπλισμούς περιμετρικά του αρχικού στοιχείου ενώ μπορεί να εκτείνεται σε όλο το μήκος του (ολικός μανδύας) , που είναι και το συνηθέστερο, ή σε μέρος αυτού (τοπικός μανδύας). Ο μανδύας μπορεί να είναι είτε από έγχυτο, είτε από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή και άλλα τσιμέντα ειδικών συνθέσεων, τσιμεντοκονοιόματα και αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα. Λόγω της ευρύτερης εφαρμογής των έγχυτων μανδύων έχει επικρατήσει ο όρος μανδύες για τους έγχυτους.

Η διαδικασία εφαρμογής του μανδύα είναι ιδιαίτερης σπουδαιότητας για την βέλτιστη λειτουργία του ενισχυμένου υποστυλώματος. Η τήρηση των προβλεπόμενων

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

τεχνικών πιστοποιεί την ποιότητα των υλικών και της επιθυμητής συνεργασίας τους. Οι μανδύες από έγχυτο σκυρόδεμα έχουν πάχος μεγαλύτερο από 8cm, σε αντιδιαστολή με αυτούς από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που δεν ξεπερνούν τα 10cm.

### 2.3 Μηχανική των Επισκευών-Ενισχύσεων υποστυλωμάτων

Η μεταφορά δυνάμεων από το αρχικό υποστυλώμα στον μανδύα και αντίστροφα είναι ο καθοριστικότερος παράγοντας της συλλειτουργίας των σκυροδεμάτων που έχουν εγχυθεί σε διαφορετικούς χρόνους. Για το σκοπό αυτό ο μηχανισμός παλαιού-νέου σκυροδέματος χρήζει ιδιαίτερης εξέτασης. Η ασυνέχεια του ενισχυμένου υποστυλώματος στη διεπιφάνεια αυτή λειτουργεί ωςάν μια ρωγμή όπου αναπτύσσεται τριβή κατά μήκος και κάθετα αυτής αλλά και αντίσταση βλήτρου των εγκάρσιων οπλισμών. Με αυτούς τους μηχανισμούς διατίθεται σημαντική διατμητική αντοχή κατά μήκος της διεπιφάνειας αλλά καταναλώνεται και ενέργεια σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Οι εργασίες των Βιτζηλαίου (1987), Τάσιου (2009) αποτελούν τις πληρέστερες ερευνητικές δουλειές πάνω στο αντικείμενο αυτό. Τα προσομοιώματα στα οποία κατέληξαν εισήχθηκαν εν τέλει και στον ΚΑΝΕΠΕ, ενώ και νεότερες πειραματικές εργασίες όπως των Παλιεράκη, Βιτζηλαίου, Ζέρης (2012) προσθέτουν βιβλιογραφική πληρότητα.

Η απλούστερη περίπτωση είναι αυτή της άοπλης διεπιφάνειας παλιού-νέου σκυροδέματος. Ο μανδύας είτε εγχύεται σε νέο εξωτερικό καλούπι είτε χρησιμοποιούμε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ (2009) στην περίπτωση λείας διεπιφάνειας ο συντελεστής τριβής λαμβάνεται σταθερός και ίσος με  $\mu=0,40$ . Έτσι η μέγιστη αντίσταση λόγω τριβής  $\tau_{fud}$  υπολογίζεται:

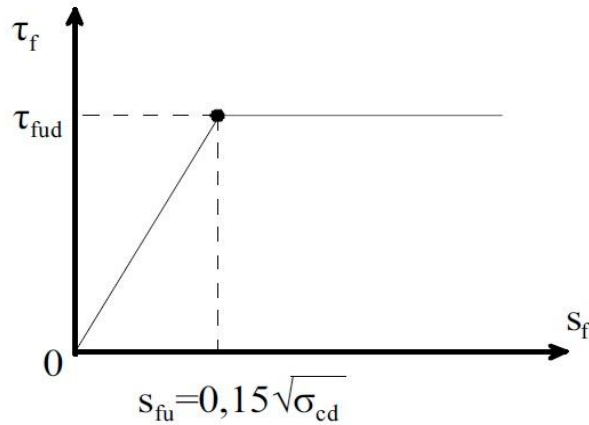
$$\tau_{fud}=0,4\sigma_{cd} \quad (1)$$

όπου  $\sigma_{cd}$ : ορθή τάση αναπτυσσόμενη κάθετα στη διεπιφάνεια

Η τιμή αυτή της μέγιστης διατμητικής αντίστασης αναπτύσσεται σε ολίσθηση ίση με

$$s_{fu}=0,15\sqrt{\sigma_{cd}} \quad (2)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε το προσομοίωμα που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για λείες διεπιφάνειες.



**Σχ.2.1** Διάγραμμα διατμ. τάσεων-ολίσθησης σε λεία διεπιφάνεια κατά ΚΑΝΕΠΕ

Η πιο συνήθης περίπτωση είναι αυτή της τραχείας διεπιφάνειας. Είναι λογικό αλλά έχει αποδειχθεί και στις εργασίες των Πορτογάλων Eduardo, Branco και Silva (2005) ότι η τραχύτητα μεταξύ παλιού-νέου σκυροδέματος δίνει καλύτερη συνεργασία του μανδύα με το αρχικό υποστύλωμα άρα καλύτερη απόκριση στη μονοτονική φόρτιση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η εκτράχυνση της επιφάνειας του παλιού σκυροδέματος με κρουστική σφύρα. Έτσι καθαιρούμε την επίστρωση του τσιμεντοπολτού που σχηματίζει λεία επιφάνεια και εμφανίζονται τα αδρανή που προκαλούν τραχύτερη επιφάνεια. Για τις επιφάνειες αυτές κατά τον ΚΑΝΕΠΕ (2009) η μέγιστη διατμητική τάση λόγω τριβής είναι

$$\tau_{fud} = 0,4(f_{cd}^2 \sigma_{cd})^{1/3} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

όπου  $\sigma_{cd}$ : ορθή τάση αναπτυσσόμενη κάθετα στη διεπιφάνεια

$f_{cd}$ : θλιπτική αντοχή ασθενέστερου σκυροδέματος

Η τιμή της μέγιστης ολίσθησης ορίζεται μεταξύ 1mm και 2mm. Πειραματικά όμως σε σειρά εργασιών η τιμή αυτή εντοπίζεται σε τιμές μικρότερες του 1mm. Οι σχέσεις που ορίζουν την καμπύλη τ-s είναι

$$\frac{s_f}{s_{fu}} \leq 0,5 \rightarrow \left( \frac{\tau}{\tau_{fud}} \right) = 1,14 \sqrt[3]{(s_f / s_{fu})} \text{ [mm, MPa]} \quad (4\alpha)$$

$$\frac{s_f}{s_{fu}} > 0,5 \rightarrow \left( \frac{\tau}{\tau_{fud}} \right) = 0,81 + 0,19 \frac{s_f}{s_{fu}} \text{ [mm, MPa]} \quad (4\beta)$$

όπου  $\tau$ : διατμητική τάση

$\tau_{fud}$ : μέγιστη διατμητική τάση

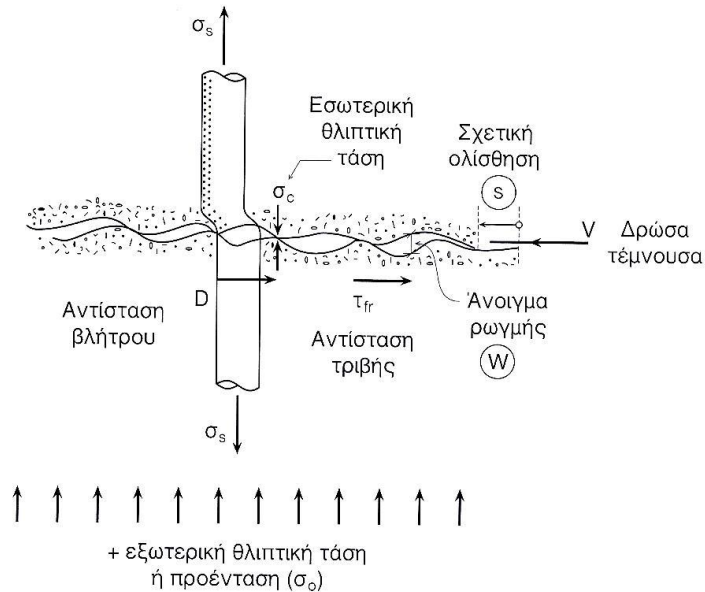
$s_f$ : ολίσθηση

$s_{fu}$ : ελάχιστη ολίσθηση όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη διατμητική τάση

Η παρουσία εγκάρσιου οπλισμού-βλήτρου στη διεπιφάνεια παλαιού-νέου σκυροδέματος μας δίνει και ποιοτικά την αίσθηση ότι αυτό ενισχύει τη συνοχή αλλά και την τριβή. Πιο αναλυτικά οι μηχανισμοί που εμφανίζονται είναι η ανάπτυξη τριβής λόγω

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

λειτουργίας σφικτήρα του οπλισμού, η μεταφορά δυνάμεων μέσω βλήτρου, η εξόλκευση των ράβδων αυτών και κυρίως η δράση βλήτρου.



**Σχ.2.2** Μηχανισμός βλήτρου

Ο μηχανισμός της αναπτυσσόμενης τριβής ξεκινά από τη σχετική ολίσθηση στη διεπιφάνεια. Άμεση συνέπεια είναι η αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής το οποίο με τη σειρά του επιστρατεύει την εφελκυστική αντίσταση του βλήτρου. Η εξισορρόπηση των εσωτερικών τάσεων από νέες θλιπτικές τάσεις στο σκυρόδεμα οι οποίες συμμετέχουν στη διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας. Αυτές οι θλιπτικές τάσεις πολλαπλασιαζόμενες με το συντελεστή τριβής  $\mu$  δίνουν την  $\tau_{fr}$ , η οποία αποτελεί τη συμμετοχή του μηχανισμού στη μεταφορά τέμνουσας. Αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται λειτουργία σφικτήρα του οπλισμού. Η μέγιστη διατμητική αντίσταση στη διεπιφάνεια σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται κατά τον ΚΑΝΕΠΕ (2009) μέσω της γενικής σχέσης

$$\tau_{FRd} = \mu(\rho f_{yd} + \sigma_{cd}) \leq 0,3f_{cd} \quad (5)$$

όπου  $\mu$  : συντελεστής τριβής που αντιστοιχεί σε  $\sigma_{ολ} = \rho f_{yd} + \sigma_{cd}$

$\rho$  : ποσοστό οπλισμού καθέτου στη διεπιφάνεια

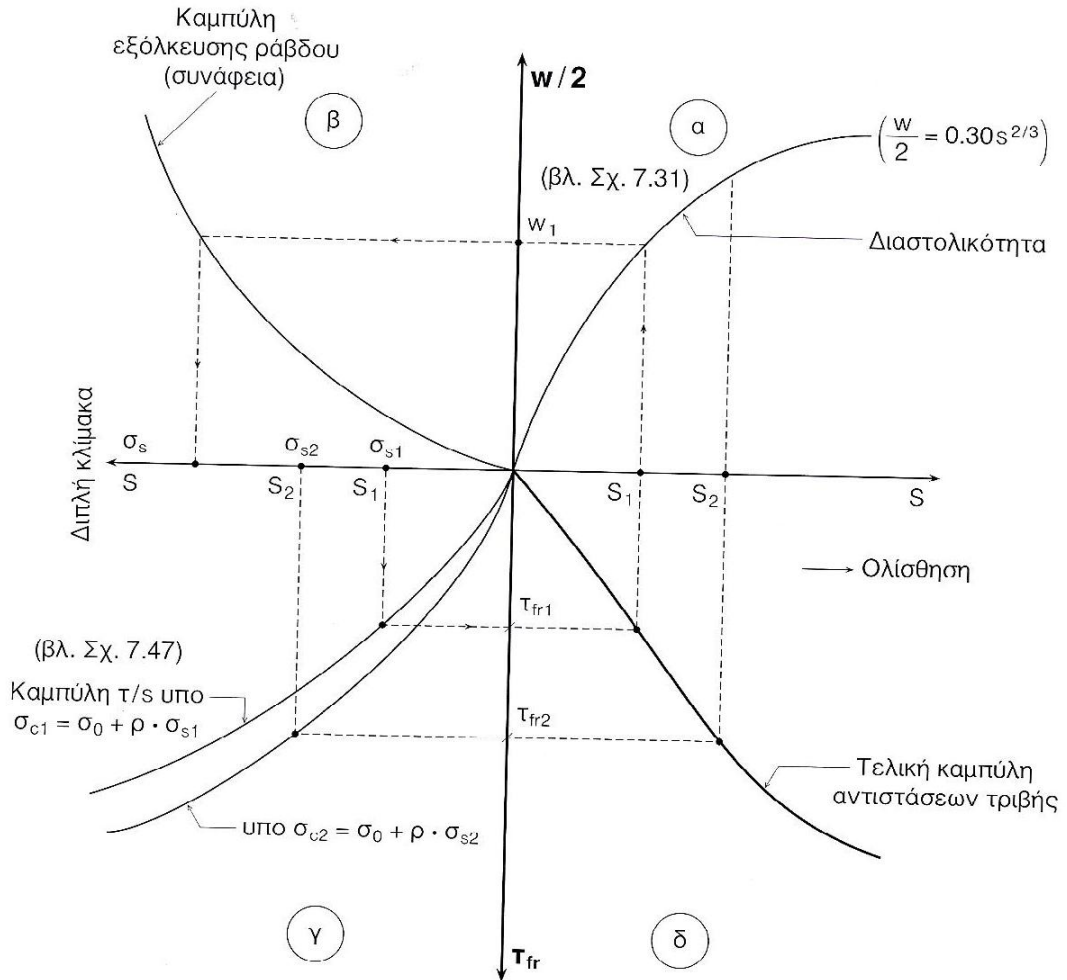
$f_{yd}$ : τάση διαρροής οπλισμών

Ειδικότερα για τραχεία διεπιφάνεια και για σχετικά μεγάλες ολισθήσεις  $s=2\text{mm}$  θεωρείται ότι ο καλά αγκυρωμένος οπλισμός υπό ορθή γωνία με τη διεπιφάνεια μπορεί να αναπτύξει τάση ίση με τη διαρροή του. Τότε, για μονοτονική ένταση, έχουμε

$$\tau_{fid} = 0,4(f_{cd}^2[\sigma_{cd} + \rho f_{yd}])^{1/3} \leq 0,3f_{cd} \quad (9)$$

Η αναλυτικότερη μέθοδος εξαγωγής της καμπύλης αντίστασης τριβής της οπλισμένης διεπιφάνειας όπως αναφέρει ο Τάσιος (2009) παρουσιάζεται παρακάτω αναλυτικότερα.





Σχ.2.3 Καμπύλες υπολογισμού για οπλισμένη διεπιφάνεια

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, εάν είναι γνωστοί οι νόμοι της μεταβολής του ανοίγματος της ρωγμής συναρτήσει της ολίσθησης (α), συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος (β), καθώς και της εξελίξεως των τάσεων τριβής σε μια διεπιφάνεια υπό σταθερή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση (γ), τότε είναι δυνατόν να παραχθεί η σχέση  $\tau_{fr}-s$ , η οποία περιγράφει την συμπεριφορά μιας διατεμνόμενης οπλισμένης διεπιφάνειας. Για μια τιμή  $s_1$  της σχετικής ολίσθησης, είναι γνωστό από το διάγραμμα (α) το άνοιγμα ρωγμής  $w$  και ισούται με την μήκυνση των ράβδων που τέμνουν τη ρωγή. Έτσι, ο νόμος της συνάφειας από το διάγραμμα (β) οδηγεί στην εφελκυστική τάση  $\sigma_{s1}$  που αναπτύσσεται στις ράβδους. Η αντίστοιχη θλιπτική τάση στο σκυρόδεμα,  $\sigma_{c1}$ , βρίσκεται μέσω πολλαπλασιασμού της  $\sigma_{s1}$  με το γεωμετρικό ποσοστό  $\rho$  του οπλισμού που τέμνει τη ρωγή. Έτσι, για δεδομένη  $s_1$  από το (γ) διαβάζουμε την τάση τριβής  $\tau_{fr,1}$ , η οποία επιστρατεύεται όταν στην διεπιφάνεια επιβάλλεται ολίσθηση  $s_1$ . Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, για διάφορες τιμές  $s$ , παράγουμε το τελικό ζητούμενο διάγραμμα (δ).

Στη βιβλιογραφία, Βιντζηλαίου (1986), μπορούμε να βρούμε διαγράμματα για το διάγραμμα (α) που εκφράζει τη διαστολικότητα. Σ' αυτά τ' αποτελέσματα παρατηρείται μικρή διασπορά και οι καμπύλες που σχηματίζονται είναι της μορφής του Σχ.2.3 Οι παράμετροι όμως που ορίζουν την καμπύλη αυτή καθιστούν κάθε περίπτωση ξεχωριστή.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Για κάθε διεπιφάνεια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η γεωμετρία των δοκιμίων, ο τρόπος φόρτισης, η αντοχή του σκυροδέματος και άλλες μεταβλητές που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Στη συνέχεια μπορούμε να αναζητήσουμε και τα διαγράμματα ( $\beta$ ) στη βιβλιογραφία όπου πάλι υπάρχει σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων. Είναι αντιληπτό, λοιπόν ότι η μέθοδος αυτή που προτείνεται στον ΚΑΝΕΠΕ (2009) απαιτεί την πλήρη πειραματική διερεύνηση της προς ανάλυση διεπιφάνειας παλιού-νέου σκυροδέματος. Αυτό είναι μάλλον αδύνατο για τις περισσότερες αναλύσεις που γίνονται εκτός των ακαδημαϊκών πειραμάτων. Για το λόγο αυτό και ο Τάσιος (2009) προτείνει την υποκατάσταση του μη γραμμικού νόμου με γραμμικές προσεγγίσεις για τις ανάγκες απλών μεθόδων δομητικής ανάλυσης. Ο ΚΑΝΕΠΕ (2009) δε συνιστά στην περίπτωση ανεκτών σχετικών ολισθήσεων μικρότερων της  $s_{fu}=2\text{mm}$ , η επιστρατευόμενη διατμητική αντίσταση να υπολογίζεται βάσει των προσομοιωμάτων της τραχείας διεπιφάνειας.

Στην εργασία μας θα ακολουθήσουμε τους αναλυτικούς τύπους των Τάσιου, Βασιλοπούλου (2003) που μας δίνουν τη συνολική διατμητική τάση αθροίζοντας το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε μηχανισμού ξεχωριστά. Συλλέγοντας αρκετά πειραματικά δεδομένα προχώρησαν σε αριθμητικές αναλύσεις ώστε να εξάγουν το συντελεστή συνεισφοράς της αντίστασης τριβής και της δράσης βλήτρου. Για να φτάσουν στα τελικά συμπεράσματα μεταχειρίζονται τον τύπο της Βιντζηλαίου (1986) για τον υπολογισμό της μέγιστης αντίστασης τριβής

$$\tau_{\text{fid}} = 0,4(f_{\text{cd}}^2 \sigma_{\text{cd}})^{1/3} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Για τη χρήση του τύπου αυτού απαραίτητο είναι να γνωρίζουμε την ορθή τάση της διεπιφάνειας  $\sigma_{\text{cd}}$ , πράγμα που θα μας απασχολήσει περισσότερο στη συνέχεια όταν επιχειρήσουμε να τον εφαρμόσουμε. Στη βιβλιογραφία υπάρχει ο τύπος υπολογισμού μιας τέτοιας ορθής τάσης που υπολογίζεται ως εξής

$$\sigma_c = \frac{l_{\text{emb}} f_y A_s}{A_c l_b} \quad (11)$$

όπου  $l_c$ : απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης βλήτρου,  $l_{\text{emb}}$ : μήκος βλήτρου

$A_s$ : εμβαδόν διατομής βλήτρου,

$A_c$ : εμβαδόν διατομής σκυροδέματος

Για τη μέγιστη δράση βλήτρου χρησιμοποιείται ο τύπος του Rasmussen (1962), ο οποίος βεβαίως ισχύει για την περίπτωση επαρκούς επικάλυψης των οπλισμών.

$$\tau_d = (1.3 n d_b^2 \sqrt{f_c f_y}) / A_c \quad (12)$$

Όπου  $n$ : πλήθος βλήτρων και  $d_b$ : διάμετρος βλήτρου

Τα αποτελέσματα της εργασίας των Τάσιου, Βασιλοπούλου (2003) δίνουν για ολισθήσεις μικρότερες των 0,4mm, συντελεστή συνεισφοράς μηχανισμού τριβής 40% και μηχανισμού βλήτρου 70%. Για μεγάλες τιμές ολισθήσεων τα ποσοστά αλλάζουν σε 80% συνεισφορά τριβής και 70% βλήτρου. Για τις περιπτώσεις δε μηδενικών εξωτερικών ορθών τάσεων ή σκυροδεμάτων αντοχής μεγαλύτερης των 40MPa συνίστανται 70% συνεισφορά από το μηχανισμό τριβής και 60% από το μηχανισμό βλήτρου. Το μεγάλο ερωτηματικό πάντως παραμένει για ποια ολίσθηση επιτυγχάνεται αυτή η μέγιστη τιμή. Ανατρέχοντας

στη βιβλιογραφία, μέσα από σειρά πειραματικών διερευνήσεων όπως Παλιεράκη, Βιντζηλαίου, Ζέρης (2012) και Πανταζοπούλου (2005) παρατηρούμε ότι η τιμή αυτή της ολίσθησης κυμαίνεται μεταξύ 0,1mm και 1mm.

## 2.4 Συστάσεις ανασχεδιασμού υποστυλωμάτων

### 2.4.1 Βελτίωση μεγεθών ορθής τάσης

Ανασχεδιάζουμε τα υποστυλώματα με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων των κανονισμών που αλλάζουν και καθιστούν τις παλαιότερες κατασκευές εκτός αποδεκτών ορίων. Στην περίπτωση τοπικών βλαβών απαιτείται τοπική αποκατάσταση της βλαμμένης περιοχής υπό την αναγκαία προϋπόθεση να εφαρμόζονται οι απαιτήσεις των εν ισχύει Τεχνικών Προδιαγραφών. Η επόμενη σύσταση ανασχεδιασμού του υποστυλώματος αφορά την αποκατάσταση ανεπαρκών μηκών παράθεσης οπλισμού. Το φαινόμενο αυτό είναι από τα πλέον συνήθη στις εργασίες ενίσχυσης καθώς τόσο στη βάση όσο και σε ενδιάμεσο ύψος αποκατάστασης της συνέχειας συστηματικά οι παλαιότερες κατασκευές υστερούν. Στόχος της άρσης αυτής της τρωτότητας είναι η βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς δυνάμεων μέσα από τις ράβδους. Οι τρόποι που μπορεί να επιτευχθεί αυτό είναι είτε με ηλεκτροσυγκόλληση των ράβδων, είτε με εφαρμογή εξωτερικής περίσφιγξης στο στοιχείο. Στην παρούσα εργασία θα υλοποιήσουμε πλήρη συνάφεια μεταξύ οπλισμών και σκυροδέματος κατά συνέπεια δε θα μπορέσουμε να εξετάσουμε αυτές τις παραμέτρους. Άλλωστε στις τεχνικές χρησιμοποιούνται ελάσματα και ινοπλισμένα υφάσματα, ενώ εμείς θα εξετάσουμε μόνο τους μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.

Παρόμοιας λογικής είναι και η χρήση των ελασμάτων αυτών για την ενίσχυση της εφελκυσμένης ζώνης του υποστυλώματος έναντι ορθής τάσης. Η αύξηση της καμπτικής αντίστασης μπορεί να επιτευχθεί και με νέο οπλισμό στο εφελκυσμένο πέλμα, ενσωματωμένο πλήρως σε νέα στρώση σκυροδέματος, τον μανδύα. Ο ΚΑΝΕΠΕ (2009) προτείνει μια προσεγγιστική διαδικασία υπολογισμού της αντοχής του ενισχυμένου υποστυλώματος με χρήση συντελεστών μονολιθικότητας. Για τα υποστυλώματα προτείνονται τιμές γύρω στο 0,85. Οι επαλήθευση αυτών των τιμών θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια μέσα από τις συγκριτικές αναλύσεις. Ταυτόχρονα πρέπει να ελέγχεται η αγκύρωση των διαμήκων οπλισμών ώστε να μπορούμε να επικαλεστούμε την πλήρη δυνατότητά τους να παραλάβουν φορτίο. Τέλος, σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ (2009) προτείνεται ένα ελάχιστο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού στη διεπιφάνεια ώστε να εξασφαλισθεί η επιθυμητή διατμητική αντοχή. Η τιμή αυτή δίνεται από τη σχέση

$$\rho_{\delta} = \frac{A_{sd}}{A_{c\delta}} \geq 0.18 f_{ctm} / f_{yk} \quad (13)$$

όπου  $A_{sd}$ : το εμβαδόν του εγκάρσιου οπλισμού

$A_{cd}$ : το εμβαδόν της διεπιφάνειας

Αντίστοιχα μπορούμε να ενισχύσουμε και τη θλιβόμενη ζώνη του υποστυλώματος με μανδύα. Η προσφορά του σκυροδέματος στην περίπτωση αυτή είναι προφανής, ενώ αποφεύγονται και άλλα προβλήματα που σχετίζονται με το λυγισμό στις τεχνικές των

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

ελασμάτων και την πυρκαγιά. Ο τρόπος ελέγχου της διεπιφάνειας γίνεται θεωρώντας τη διατομή μονολιθική στην περίπτωση που ικανοποιείται η σχέση

$$\tau = \frac{V_{sd} S_y}{I b} \quad (14)$$

Όπου  $I$ : ροπή αδρανείας της διατομής

$S_y$ : στατική ροπή προστιθέμενου τμήματος

$b$ : πλάτος διατομής στη διεπιφάνεια

Στην περίπτωση δε που ο μανδύας επεκτείνεται και στον κόμβο και στις αμέσως μετά από αυτόν κρίσιμες περιοχές, τότε ξαναγίνεται ικανοτικός έλεγχος.

Η μονολιθικότητα της εφαρμογής του μανδύα είναι το ζητούμενο σε αυτήν την τεχνολογία. Η επίτευξη της ελέγχεται με πειράματα αλλά και με υπολογιστικά προσομοιώματα. Στον κανονισμό όμως ορίζονται οι προϋποθέσεις που κατ' αυτόν καθίσταται η συνεργασία αρχικού υποστυλώματος και μανδύα πλήρης ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά των δυνάμεων από και προς τον μανδύα.

### 2.4.2. Βελτίωση φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας

Η συνήθης ευπάθεια των υφισταμένων υποστυλωμάτων είναι η έλλειψη συνδετήρων. Αυτό επιτείνει την ανεπάρκεια του στοιχείου σε τέμνουσα λόγω λοξής θλίψης. Η προτεινόμενη λύση είναι η περίσφιγξη με νέες στρώσεις σκυροδέματος, κατά προτίμηση σε μορφή μανδύα. Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος γίνεται σύμφωνα με τον τύπο :

$$V_{sd} \leq \frac{1}{\gamma_{Rd}} (V_{Rd,r} + V_{RM}) \quad (15)$$

όπου  $V_{sd}$ : δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού

$V_{Rd,r}$ : η απομένουσα αντίσταση τέμνουσας του αρχικού δοκιμίου

$V_{RM}$ : η αντίσταση  $V_{Rd2}$  των πρόσθετων στρώσεων

Για την ανεπάρκεια του οπλισμού διατμήσεως η ενίσχυση μπορεί να γίνει είτε με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, είτε με εξωτερικά στοιχεία χάλυβα, ελάσματα είτε ινοπλισμένα πολυμερή. Στην εργασία μας περιοριζόμαστε στην πρώτη περίπτωση των οπλισμένων μανδύων. Οι συνδετήρες στις επιπλέον στρώσεις μανδύα αποσκοπούν στην ανάληψη της διάτμησης που το αρχικό υποστυλώμα δεν μπορούσε να παραλάβει. Ο ΚΑΝΕΠΕ (2009) συνυπολογίζει τις τέμνουσες που παραλαμβάνει τόσο το σκυρόδεμα όσο και οι συνδετήρες του αρχικού στοιχείου. Σε κάθε περίπτωση πάντως πρέπει να έχει εξασφαλισθεί η καλή αγκύρωση όλων των νέων οπλισμών ώστε να προσφέρουν πλήρως στους παραπάνω μηχανισμούς.

### 2.4.3. Βελτίωση τοπικής πλαστιμότητας υποστυλώματος

Η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας ραβδόμορφων στοιχείων επιτυγχάνεται με την επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης κατά τα προηγούμενα, που στην περίπτωση μας περιοριζόμαστε στους μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Στην τεχνολογία των μανδύων σημαντική παράμετρος είναι η αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος ώστε να μπορέσει να υπάρξει πλήρης μεταφορά των φορτίων. Η επεξεργασία της διεπιφάνειας είναι ο πρώτος τρόπος βελτίωσης, ενώ μπορεί να γίνει και χρήση βλήτρων.

Κανονιστικά ο επιθυμητός δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  επιτυγχάνεται με αντίστοιχο απαιτούμενο μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού περίσφιγξης. Όταν ο στόχος ανασχεδιασμού εκφράζεται σε όρους καθολικού δείκτη συμπεριφοράς  $q$ , ελέγχεται η ικανότητα όλων των μελών να επιδείξουν τοπική συμπεριφορά κατά τους δείκτες  $m$  του ΚΑΝΕΠΕ (2009). Η απαιτούμενη πλαστιμότητα μας οδηγεί στον υπολογισμό και της απαιτούμενης τιμής αστοχίας του περισφιγμένου υποστυλώματος μέσα από τους θεωρητικούς τύπους υπολογισμού της πλαστιμότητας.

### 2.5. Υλικά Επεμβάσεων

Η επιλογή της κατάλληλης λύσης για την επισκευή ή την ενίσχυση μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα προϋποθέτει ότι ο μηχανικός γνωρίζει καλά τα υλικά και τις τεχνικές που διατίθενται για τέτοιου είδους επεμβάσεις. Τα παραδοσιακά υλικά της οικοδομής είναι από μόνα τους ανεπαρκή να δώσουν λύση και απαιτούνται νέα υλικά σε συνδυασμό με τροποποιημένα παραδοσιακά υλικά. Απαραίτητη είναι η εφαρμογή των Εθνικών Προτύπων Τεχνικών Προδιαγραφών ΠΕΤΕΠ-ΕΤΕΠ (2009) για την εφαρμογή όλων των υλικών αυτών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ομαδοποιούνται σε ειδικούς τύπους σκυροδέματος, πολυμερικές κόλλες, επισκευαστικά κονιάματα, επισκευαστικά κονιάματα, επικολητά φύλλα και ινοπλισμένα πολυμερή (FRP).

#### 2.5.1. Ειδικοί τύποι σκυροδέματος

*Έγχυτο σκυρόδεμα σταθερού όγκου (μη συρρικνούμενου)*

Το έγχυτο αυτό σκυρόδεμα με προσθήκη ειδικών προσθέτων προκαλεί σταδιακή αύξηση του όγκου του, το οποίο εξισορροπεί τη συστολή ξήρανσης και εφαρμόζεται με καλούπι στις εργασίες επέμβασης. Το πλεονέκτημά του είναι ότι παρεμποδίζει τη ρηγμάτωσή του τόσο στην ελεύθερη επιφάνειά του όσο και στη διεπιφάνεια με το παλαιότερο σκυρόδεμα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζει καλύτερη πρόσφυση, ενώ καταγράφονται και αυξημένες τιμές αντοχής σε επιφανειακή φθορά και δράση χημικών.

*Σκυρόδεμα με πολυμερή*

Στο σκυρόδεμα αυτό αντικαθίσταται το τσιμέντο ως συστατικό με κάποιο πολυμερές είτε μερικώς αντικαθίσταται το νερό με υδατοδιαλυτό πολυμερές (latex), είτε

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

εμποτισμένο συμβατικό σκυρόδεμα σε πολυμερές. Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματά του είναι οι πολύ υψηλότερες αντοχές του, η σκλήρυνση γίνεται πολύ γρηγορότερα, επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση, και υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας.

### *Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα*

Η τεχνολογία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι από τις πιο συνήθεις. Το σκυρόδεμα αυτό (shotcrete ή gunite) είναι σκυρόδεμα λεπτής διαβάθμισης αδρανών που σκυροδοτείται με εκτόξευση. Κύρια πλεονεκτήματα που το έχουν καθιερώσει είναι η υψηλή θλιπτική αντοχή χάρη στην υψηλή συμπύκνωση που επιτυγχάνεται με την ταχύτητα εκτόξευσης. Τυπικές τιμές είναι τα 50MPa , αλλά και τιμές τις τάξεως των 80MPa βρίσκονται στα συνήθη πλαίσια εφαρμογής στο εξωτερικό. Επόμενο κέρδος είναι η καλύτερη πρόσφυση με το υλικό βάσης. Επίσης, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει τη δυνατότητα να αυτοστηρίζεται και να μην απαιτείται ξυλότυπος . Τέλος, τεχνικά διευκολύνεται η χρήση του χάρη στην κινητή εγκατάσταση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις πιο δυσπρόσιτες θέσεις.

Όπως για όλες τις τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν, έτσι και για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα απόλυτη ανάγκη είναι η τήρηση των οδηγιών εφαρμογής του. Οι διαδικασίες ανάμιξης διακρίνονται σε ξηρή και υγρή. Η σύνθεση του μείγματος καθορίζει τις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα του υλικού που παρουσιάσαμε πιο πάνω. Τέλος, η διεύρυνση της τεχνολογίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο (Τριανταφύλλου,1998). Η προσθήκη ινών βοηθά στον περιορισμό της ρηγματώσης αλλά και στην αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία και μειώνει την απώλεια υλικού κατά την εφαρμογή.

### **2.5.2. Πολυμερικές κόλλες**

Οι πολυμερικές κόλλες είναι συγκολλητικά υλικά που δημιουργούνται από την επί τόπου ανάμιξη των δύο συστατικών. Το πρώτο είναι το πολυμερές που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και το δεύτερο είναι ο σκληρυντής. Η ανάμιξή τους σ' ένα ομοιογενές υλικό δημιουργεί ένα ισχυρό συγκολλητικό υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος της ευρείας εφαρμογής των πολυμερικών κολλών στις επισκευές και ενισχύσεις. Η χρήση τους δεν απαιτεί τροποποίηση των επιφανειών αλλά μόνο κατάλληλη προετοιμασία τους. Επίσης, αποτελεί αδιαπέρατο φράγμα υγρασίας η επιφάνεια που δημιουργούν. Ιδιαίτερη προσοχή από την άλλη χρειάζεται στον προγραμματισμό των εργασιών λόγω της παραμέτρου εργασιμότητας της κόλλας και της υγιεινής του προσωπικού από τη τοξικότητά της.

Οι κύριες χρήσεις των πολυμερικών κολλών είναι η επισκευή των ρωγμών στο σκυρόδεμα, η αγκύρωση ράβδων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα, η συγκόλληση σκληρυμένων σκυροδεμάτων, αλλά και άλλων υλικών στο σκυρόδεμα. Διαδεδομένα και ενδεδειγμένα πολυμερή είναι οι εποξειδικές και οι πολυεστερικές ρητίνες. Η ονομασία πάντως που έχει επικρατήσει για τις κόλλες αυτές είναι η ρητίνη, υπονοώντας τη ρητινοειδή κόλλα.

**2.5.3. Επισκευαστικά κονιάματα**

Τα επισκευαστικά κονιάματα χρησιμοποιούνται στις εργασίες όπου το απαιτούμενο πάχος είναι μικρό και ταυτόχρονα απαιτείται πολύ καλή πρόσφυση. Οι τύποι των κονιαμάτων αυτών είναι αυτά με βάση το τσιμέντο και εκείνα με βάση κάποιο πολυμερές.

Τα κονιάματα με πολυμερή, που συνήθως λέγονται ρητινοκονιάματα, αντικαθιστούν το τσιμέντο με πολυμερές ή το νερό με υδατοδιαλυτό πολυμερές. Από την άλλη αυτά με βάση το τσιμέντο βρίσκονται έτοιμα σε σακιά στη αγορά με προδιαγεγραμμένη σύσταση, ήδη αναμειγμένα με μικρόκοκκα αδρανή. Τα πλεονεκτήματα όλων αυτών των κονιαμάτων είναι οι υψηλές αντοχές, η ταχεία ανάπτυξη αντοχής, η μεγάλη ρευστότητα και η εξουδετέρωση της συστολής ξήρανσης.

**2.5.4. Επικολητά φύλλα χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)**

Η χρήση επικολητών φύλλων από χάλυβα ή ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) για την ενίσχυση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι πλέον μια πολύ δημοφιλής τεχνική λόγω της ευκολίας εφαρμογής της. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι η χρήση των χαλύβδινων ελασμάτων. Σήμερα όμως τα πολλά πλεονεκτήματα των φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή τα καθιστούν την κορωνίδα της έρευνας και της εφαρμογής. Στην εργασία αυτή πάντως, δε θ' ασχοληθούμε με τα FRP αλλά επικεντρωνόμαστε στις τεχνικές των μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

*Επικολητά φύλλα χάλυβα*

Τα χαλύβδινα ελάσματα επικολώνται στην εξωτερική επιφάνεια δομικών στοιχείων με αρχικό στόχο τη συμπλήρωση του ελλείμματος του προϋπάρχοντος οπλισμού. Τα ελάσματα εφαρμόζονται με βλήτρωση. Το επόμενο μεγάλο κέρδος της εφαρμογής αυτής είναι η επίτευξη της περίσφιγξης. Συνήθως τα ελάσματα είναι πάχους 1-1,5mm με όριο διαρροής 240-400MPa. Το μεγάλο μειονέκτημα της είναι η ευκολία διάβρωσης, που υπονοεί το μεγάλο κόστος συντήρησης.

*Φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή*

Η χρήση φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή ΙΟΠ (Fiber Reinforced Polymers) αποτελεί σήμερα την πλέον σύγχρονη τεχνική στον τομέα της ενίσχυσης των κατασκευών. Είναι σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με «θερμοσκληρυνόμενη» ρητίνη. Τα πλεονεκτήματά τους αφορούν την υψηλή αντοχή, τα μεγάλα μήκη εφαρμογής που δεν είναι ευαίσθητα σε διάβρωση, η απλότητα της εφαρμογής και η ταχύτητα στο χρόνο. Τα μειονεκτήματα της τεχνικής αφορούν κυρίως το υψηλό κόστος της κατασκευής, η χαμηλή αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες και η αμφισβητούμενη ανθεκτικότητα στο χρόνο και στην ηλιακή ακτινοβολία.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 2.6. Πειραματική διερεύνηση μανδύων και διεπιφανειών οπλ. σκυροδέματος

#### 2.6.1. Eduardo Julio, Fernando Branco και Vitor Silva

Οι Πορτογάλοι ερευνητές Eduardo Julio, Fernando Branco και Vitor Silva από το University of Coimbra έχουν ασχοληθεί συστηματικά με την επίδραση της διεπιφάνειας στη συμπεριφορά ενισχυμένων υποστυλωμάτων με μανδύα. Οι εργασίες του ξεκινούν το 2003 με πειράματα σε μικρά δοκίμια της επιρροής της τραχύτητας, των βλήτρων και της αμμοβολής στη λειτουργία της διεπιφάνειας. Συμπεραίνουν ότι η αμμοβολή είναι η καλύτερη μορφή εκτράχυνσης, ενώ επιπρόσθετη χρήση ρητίνης δεν προσφέρει σημαντικά. Επίσης, διαπιστώνουν την απόδοση των βλήτρων στην παραλαβή διατμητικών φορτίων στη διεπιφάνεια αλλά κρίνουν πως η βλήτρωση δεν αποτρέπει την αποκόλληση των παρειών του σκυροδέματος.

Μετά από αυτήν την εισαγωγική έρευνα προχωρούν σε σειρά πειραμάτων σε υποστυλώματα. Η πρώτη σειρά πειραμάτων (2005) εξετάζεται υπό μονοτονική φόρτιση, ενώ στη συνέχεια (2008) εκτελούν τα ίδια πειράματα σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Εμείς στη συνέχεια ασχολούμαστε και επαληθεύουμε τα πειράματα που έχουν κάνει υπό μονοτονική φόρτιση. Στην εργασία τους εξέτασαν επτά υποστυλώματα, το κάθε ένα με διαφορετική επεξεργασία της διεπιφάνειας.

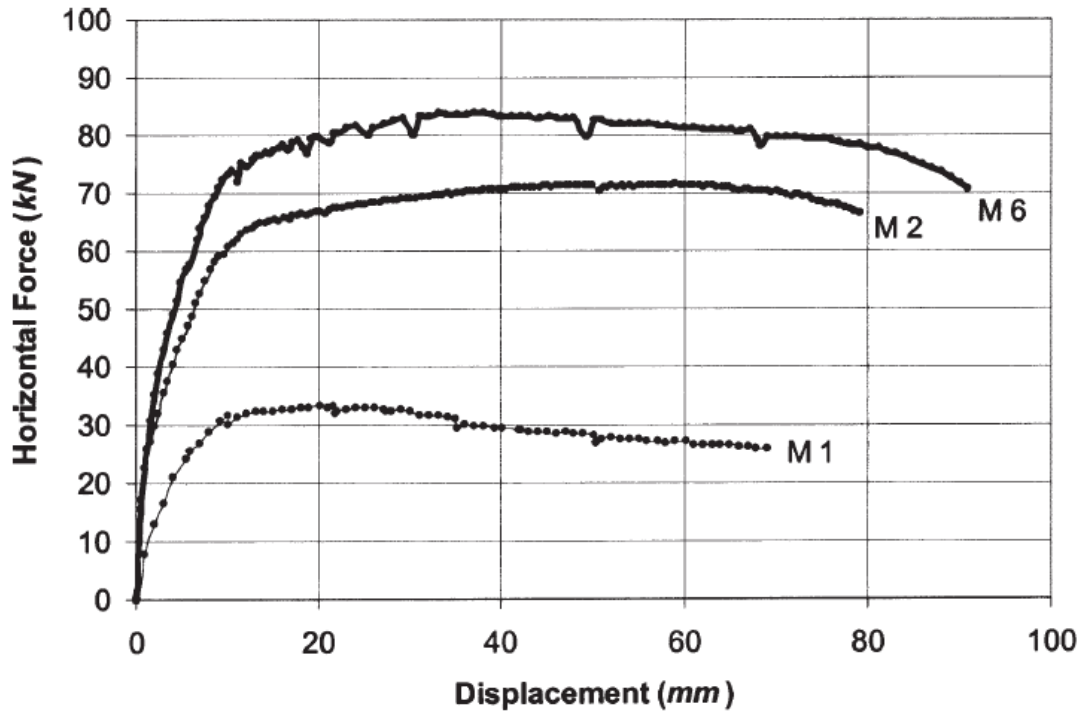
Πρόκειται για μισά υποστυλώματα κατασκευασμένα σε μορφή προβόλου ύψους 1,35m και διατομής 200x200. Τα υποστυλώματα αυτά μετά την πάροδο 28 ημερών ενισχύονται με μανδύα κατόπιν ιδιαίτερης επεξεργασίας κάθε φορά. Ο μανδύας που τοποθετείται είναι πάχους 3,5cm και φτάνει μέχρι το ύψος των 0,9m. Οι ποιότητες των υλικών είναι C35 για την αρχική κολώνα και C80 για το μανδύα. Όλοι οι χάλυβες των οπλισμών είναι S400. Πληρέστερη παρουσίαση των πειραμάτων γίνεται στο κεφάλαιο 4 όπου κάνουμε και την επαλήθευσή τους.

Τα 7 υποστυλώματα που κατασκευάζουν είναι τα εξής:

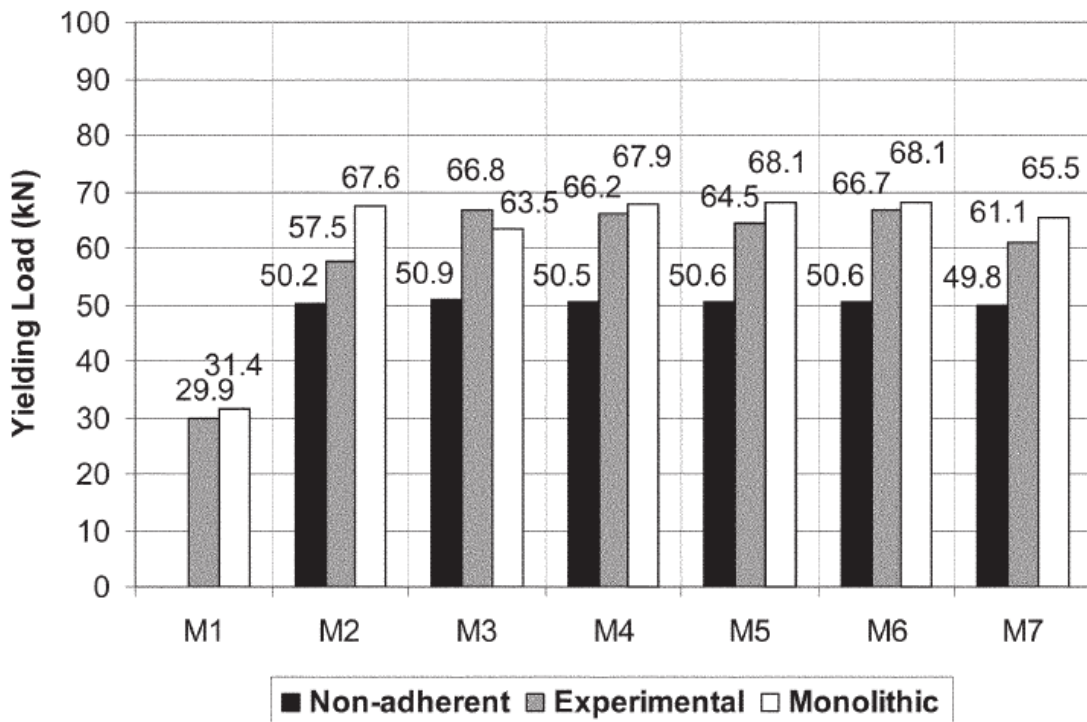
- Μη ενισχυμένο υποστυλώμα (S1)
- Ενισχυμένο υποστυλώμα με μανδύα χωρίς συνάφεια στη διεπιφάνεια
- Ενισχυμένο υποστυλώμα με μανδύα μονολιθικά συνδεδεμένο
- Ενισχυμένο υποστυλώμα με λεία διεπιφάνεια (S4)
- Ενισχυμένο υποστυλώμα με τραχεία διεπιφάνεια
- Ενισχυμένο υποστυλώμα με οπλισμένη διεπιφάνεια (S6)
- Υποστυλώμα φορτισμένο με μανδύα τοποθετημένο εκ των υστέρων

Κάποια από τα αποτελέσματα που εξήγαγαν παρουσιάζονται στους πίνακες παρακάτω, ενώ επαλήθευσή τους γίνεται στις προσομοιώσεις που κάναμε για την εργασία αυτή. Ο συμβολισμός στα σχήματα όπως το έχουν ορίσει οι ερευνητές αρχίζει από M1 μέχρι M7. Εμείς στο κεφάλαιο 4 αλλάζουμε την ονομασία των δοκιμίων σε S2, S4, S6.



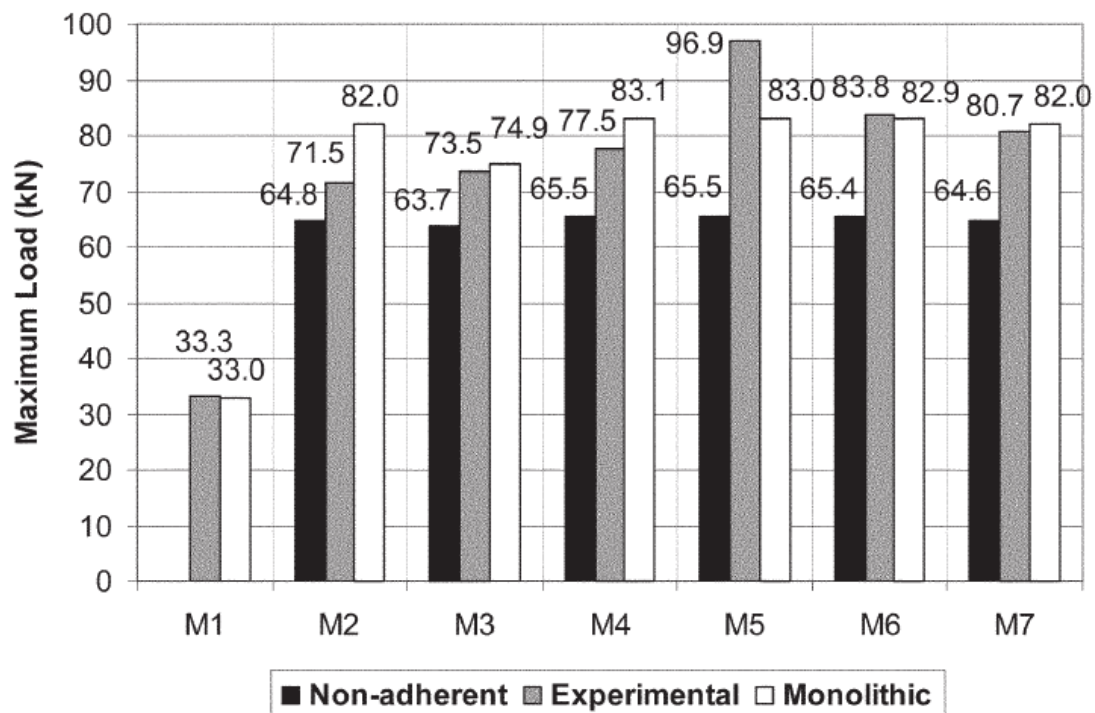


Σχ.2.4 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για πειράματα M1, M2, M6

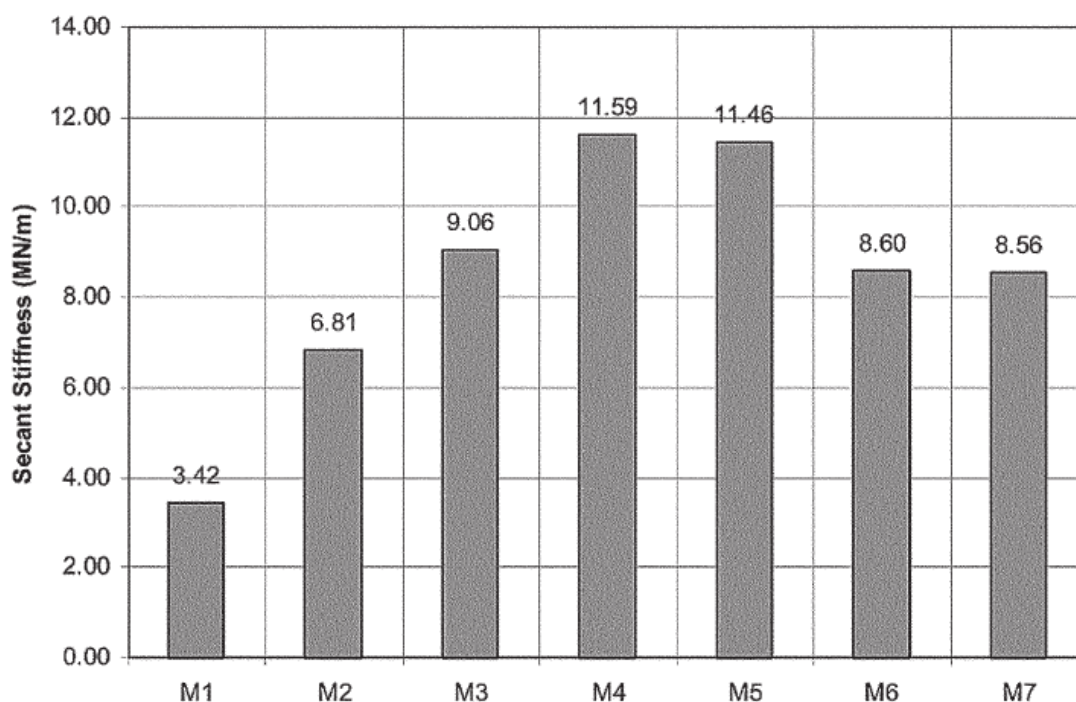


Σχ.2.5 Θεωρητικά και πειραματικά φορτία διαρροής πειραμάτων

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ



Σχ.2.6 Θεωρητικά και πειραματικά μέγιστα φορτία πειραμάτων



Σχ.2.7 Τέμνουσα δυσκαμψία πειραμάτων

Συμπερασματικά παρατήρησαν ότι όλα τα υποστυλώματα συμπεριφέρθηκαν μονολοθικά, δηλαδή πολύ κοντά σε αυτό που θα παίρναμε αν δεν υπήρχε ολίσθηση στη διεπιφάνεια και χωρίς να εμφανιστεί αποκόλληση του μανδύα. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το M2 όπου ο μανδύας δεν έχει καμία συνάφεια με το υποστυλωμα και παρατηρείται η αποκόλληση. Η αντίσταση και η δυσκαμψία των ενισχυμένων

υποστυλωμάτων είναι αισθητά μεγαλύτερη του αρχικού. Επίσης, η συνεισφορά του μανδύα στην παραλαβή του οριζόντιου φορτίου αντιστοιχεί στο 86-90%.Επισημαίνουν τέλος, ότι είτε τοποθετηθεί ο μανδύας ενώ το υποστύλωμα είναι φορτισμένο είτε αφόρτιστο, δεν έχει κάποια διαφορά.

### 2.6.2. Διδακτορική διατριβή Βανδώρου

Η διδακτορική διατριβή του Κωνσταντίνου Βανδώρου που έγινε μαζί με τον καθηγητή Δρίτσο στο Πανεπιστήμιο της Πατρας (2005) εξετάζει σειρά δοκιμών υποστυλωμάτων ενισχυμένα με μανδύες. Διερευνάται η συμπεριφορά τους υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ενώ εξετάζονται αρκετοί εναλλακτικοί τρόποι κατασκευής του μανδύα. Στα πειράματα οι επιφάνειες είναι άλλοτε λείες άλλοτε εκτραχυμένες και σε κάποιες περιπτώσεις και με διατμητικούς συνδέσμους. Εξετάζεται η ηλεκτροσυγκόλληση των άκρων των συνδετήρων, η κατασκευή έγχυτου και εκτοξευόμενου μανδύα. Τέλος, ελέγχεται και η περίπτωση ενίσχυσης με μανδύα σε υποστύλωμα που βρίσκεται υπό φορτίο.

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η εξακρίβωση των συντελεστών μονολιθικότητας, δηλαδή βλέπουμε με βάση τα μεγέθη αντοχής πόσο κοντά στο αντίστοιχο ιδεατό μονολιθικό δοκίμιο πλησιάζουμε. Με αφορμή και αυτήν την εργασία εμείς θα αναλύσουμε στο Ansys σειρά πειραμάτων όπου θα εξετάσουμε παραμέτρους όπως το μέγεθος της αξονικής δύναμης και το διατμητικό μήκος του υποστυλώματος.

Ο Βανδώρος διαπιστώνει ότι ακόμα και στη χειρότερη εφαρμογή του μανδύα η βελτίωση της αντοχής, της παραμορφωσιμότητας, της απορρόφησης ενέργειας και η αύξηση της δυσκαμψίας είναι μεγάλη. Επιπλέον, διαπιστώνει ότι η μετελαστική συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκιμών επηρεάζεται από την ποιότητα της διεπιφάνειας. Όσο καλύτερης ποιότητας είναι η διεπιφάνεια τόσο πιο πλάσσιμη συμπεριφορά έδωσαν. Διαπίστωσε ότι η ηλεκτροσυγκόλληση των άκρων των συνδετήρων προσφέρει ιδιαίτερα στις ανακυκλίσεις. Στο δοκίμιο όπου τοποθετήθηκε ο μανδύας σε φορτισμένο υποστύλωμα παρατηρήθηκε αρχική δυσκαμψία πολύ μικρότερη των υπόλοιπων ενισχυμένων, αλλά τελική αντοχή δοκιμίου υψηλότερη ακόμα και από το ιδεατό μονολιθικό. Η συμπεριφορά αυτού του δοκιμίου υπήρξε πολύ ενδιαφέρουσα, ενώ δεν συμφωνεί απόλυτα με τα πειράματα των Eduardo Julio, Fernando Branco και Vitor Silva (2005).

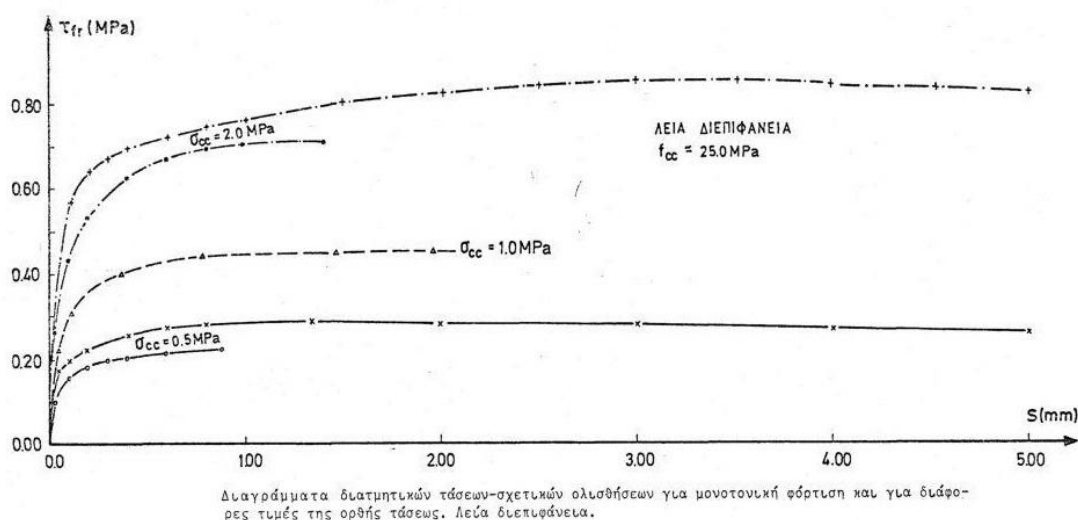
Τέλος, με βάση τα πειράματα αυτά προτείνονται τιμές μονολιθικότητας. Για το φορτίο στη διαρροή ( $k_{Fy}$ ) κυμαίνονται μεταξύ 0,71-1,13, για την παραμόρφωση στη διαρροή ( $k_{\delta y}$ ) 0,84-1,85 και για την παραμόρφωση στην αστοχία ( $k_{\delta u}$ ) 0,70-1,39. Τα διαστήματα αυτά καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις διεπιφανειών. Αν εξετάσουμε κάθε μια από αυτές ξεχωριστά, μπορούμε να περιορίσουμε τα διαστήματα πολύ περισσότερο. Για τη καλύτερη των περιπτώσεων όπου έχουμε εκτράχυνση της διεπιφάνειας και χρήση βλήτρων τα αντίστοιχα διαστήματα γίνονται 0,90-0,94, 1,15-1,85 και 0,71-0,83.

### 2.6.3. Διδακτορική διατριβή Βιντζηλαίου

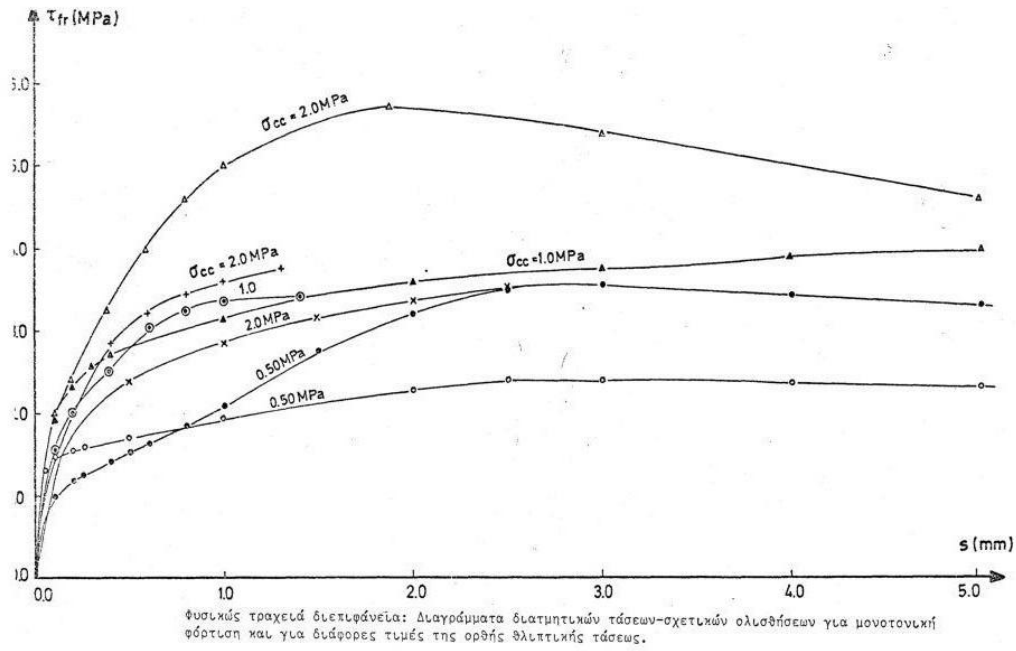
Η διδακτορική διατριβή της Καθηγήτριας Ελισάβετ Βιντζηλαίου εκπονήθηκε στο ΕΜΠ το 1986 υπό την επίβλεψη του καθ. Θ. Τάσιου με τίτλο «Θεμελιώδεις μηχανισμοί μεταφοράς δυνάμεων σε διεπιφάνειες ωπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις». Η εργασία αυτή αποτέλεσε τον πυρήνα του ΚΑΝΕΠΕ για το πολύ κρίσιμο θέμα του καθορισμού της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας υφιστάμενου-νέου σκυροδέματος.

Στην εργασία αυτή μέσα από συστηματική και πληρέστατη σειρά πειραμάτων γίνεται προσπάθεια να διερευνηθούν οι μηχανισμοί τριβής, βλήτρου αλλά και η αλληλεπίδρασή τους. Η εργασία εξετάζει τόσο τη μονοτονική όσο και την ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για τους σκοπούς της εργασίας μας θα παρουσιάσουμε μόνο τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν για μονοτονική φόρτιση σε λεία, τραχεία και οπλισμένη διεπιφάνεια. Ο συνδυασμός των μηχανισμών τριβής και δράσης βλήτρου και το ποσοστό συμμετοχής του κάθε ενός διερευνάται. Οι παράμετροι που το επηρεάζουν είναι το μέγεθος της επιβαλλόμενης διατμητικής μετατοπίσεως αλλά και η αλληλεπίδραση των ίδιων των μηχανισμών. Η έρευνα προσπαθεί να διαχωρίσει τους δύο αυτούς μηχανισμούς. Εμείς για τις ανάγκες της εργασίας μας στην περίπτωση της οπλισμένης διεπιφάνειας θα αναζητήσουμε τα πειράματα που καταγράφουν και τους δύο μηχανισμούς να αναπτύσσονται ταυτόχρονα.

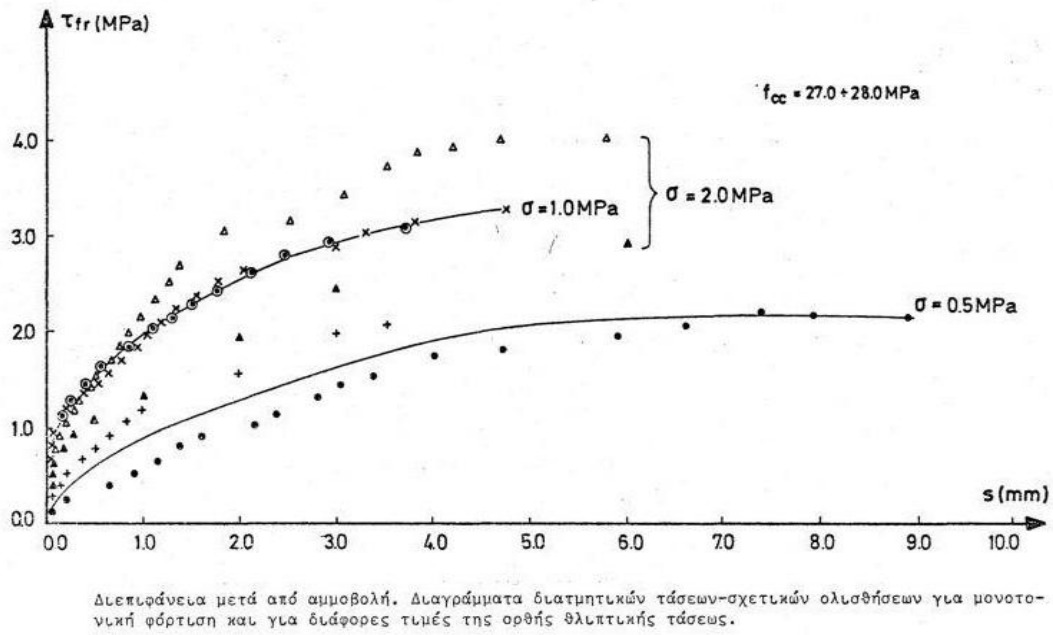
Τα διαγράμματα τ-s στα οποία κατέληξε η εργασία για λεία διεπιφάνεια πάντα σε μονοτονική φόρτιση φαίνονται πιο κάτω, ως συνάρτηση της ορθής επιβαλλόμενης τάσης. Η ορθή αυτή τάση είναι και το κριτήριό μας στη συνέχεια, όπου θα εισάγουμε στο πρόγραμμα Ansys καταστατικούς νόμους για τη διεπιφάνεια.



Σχ.2.8 Διαγράμματα διατμ. τάσεων-ολίσθησης για λεία διεπιφάνεια



Σχ.2.9 Διαγράμματα διατμ. τάσεων-ολίσθησης για φυσικώς τραχεία διεπιφάνεια



Σχ.2.10 Διαγράμματα διατμ. τάσεων-ολίσθησης για διεπιφάνεια κατόπιν αμμοβολής

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

#### 3.1. Γενικά

Το πρόγραμμα Ansys ως πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Το ακριβέστερο αποτέλεσμα το έχουμε με την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διακριτοποίηση του φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία. Στον αντίποδα, αυτό μας κοστίζει σε υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Η σχετική ευκολία μοντελοποίησης ποικιλίας προβλημάτων του μηχανικού καθιστά πλέον τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ευρύτατης χρήσης και στα έργα του πολιτικού μηχανικού.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ουσιαστικά αντιστοιχεί σε μια διαδικασία υπολογισμού της μηχανικής συμπεριφοράς κάθε στοιχείου και στη συνέχεια του υπολογισμού ολόκληρου του φορέα επανασυνδέοντας τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία του. Το πρόγραμμα Ansys επιλύει τα μη γραμμικά προβλήματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton-Raphson συνδυαζόμενη με την επιλεγόμενη μέθοδο ανάλυσης. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία επιλύει τα μη γραμμικά συστήματα χωρίζοντας το μη γραμμικό πρόβλημα σε μικρότερα επιμέρους γραμμικά. Στην περίπτωση μη σύγκλισης της λύσης, το πρόγραμμα αναπροσαρμόζει το βήμα του.

Το πρόγραμμα προσφέρει επιλογές αναλύσεων όπως Structural, Thermal, Flotran, Fluid, Electromagnetic. Εμείς επιλέγουμε για την ανάλυση που θέλουμε να κάνουμε Structural ανάλυση. Η μέθοδος επίλυσης που επιλέγεται είναι SParse Direct Equation Solver που μας προσφέρει πιο γρήγορη επίλυση προβλημάτων ανάλυσης κατασκευαστικού προβλήματος γραμμικής ή και μη γραμμικής ανάλυσης. Ενδείκνυται δε για προβλήματα όπου γίνεται χρήση στοιχείων επαφής όπως συμπεραίνει και ο Βανδώρος (2005) στην εργασία του.

Η ανάλυση που θα κάνουμε για όλα τα μοντέλα μας είναι στατική (Static Analysis) καθώς θα ασχοληθούμε μόνο με την περίπτωση μονοτονικής φόρτισης υποστυλωμάτων και όχι ανακυκλιζόμενη. Ορίζουμε σταθερές φορτίσεις σε κάθε βήμα αλλά η τιμή των δράσεων αυτών αυξάνεται σταδιακά μέσα στο βήμα μέχρι να φτάσει την επιβαλλόμενη τιμή.

Η ανάλυση μας είναι για πολλούς λόγους μη γραμμική. Αρχικά το σκυρόδεμα όπως αναλύεται και στη συνέχεια εισάγεται με πολυγραμμικό νόμο αλλά και ο χάλυβας και η μοντελοποίηση της διεπιφάνειας εισάγουν μη γραμμικότητες που δυσχεραίνουν τη σύγκλιση της λύσης και ενίοτε μπορεί να τερματίζουν την επίλυση νωρίτερα.

Η μέθοδος Newton-Raphson είναι μια επαναληπτική αριθμητική διαδικασία η οποία επιτυγχάνει την επίλυση μη γραμμικών συστημάτων. Αυτό γίνεται χωρίζοντας το μη γραμμικό σύστημα σε μικρότερα τμήματα που μπορούν να επιλυθούν γραμμικά. Στη στατική ανάλυση που θα χρησιμοποιήσουμε η εξίσωση έχει τη μορφή:

$$F=KxU \quad , \text{όπου} \quad (16)$$

F: μητρώο επιβαλλόμενης φόρτισης

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

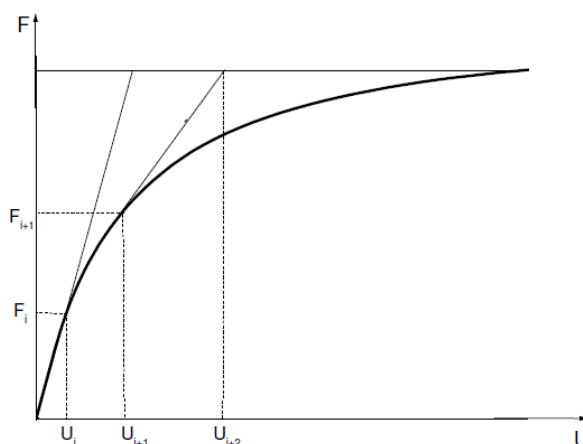
K: μητρώο δυσκαμψίας κατασκευής

U: ζητούμενο μητρώο μετακινήσεων

Με την Newton-Raphson το πρόβλημα ανάγεται σε μια επαναληπτική διαδικασία που έχει την ίδια μορφή:

$$\Delta F_i = K_i \times \Delta U_i \quad (17)$$

Αρχίζοντας από κάποιο  $U_i$  υπολογίζουμε το μητρώο δυσκαμψίας  $K_i$  και δυνάμεις  $F_i$ . Με την σειρά αυτή σε κάθε επανάληψη βρίσκουμε το  $\Delta U_i$ . Στη συνέχεια το προσθέτουμε στο  $U_i$  που είχαμε θεωρήσει και αρχίζουμε την επόμενη επανάληψη με τιμή  $U_{i+1} = U_i + \Delta U_i$ . Σχηματικά φαίνεται αυτή η διαδικασία για ένα μη γραμμικό πρόβλημα παρακάτω.



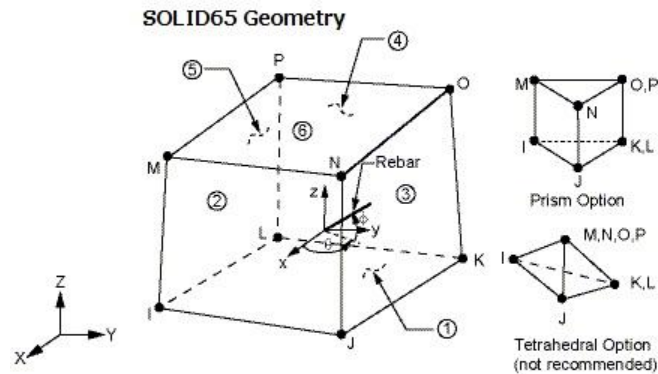
**Σχ.3.1** Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson

Στόχος των επαναλήψεων είναι η επίτευξη της σύγκλισης. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να αναπροσαρμόζει το βήμα του ώστε να επιτυγχάνει τη σύγκλιση. Τα κριτήρια σύγκλισης μπορεί να είναι οι τιμές δύναμης, μετατόπισης, στροφής ή και οποιουδήποτε άλλου εντατικού μεγέθους. Στις αναλύσεις μας κατόπιν διερεύνησης επιλέγουμε ως κριτήριο σύγκλισης το μέγεθος της δύναμης. Η ευκολία ή η δυσκολία σύγκλισης είναι κομβικής επίδρασης στην επίλυση και στην εύρεση τιμών που να επαληθεύουν τη φυσική ισορροπία των δυνάμεων του προσομοιώματος.

#### 3.2. Σκυρόδεμα

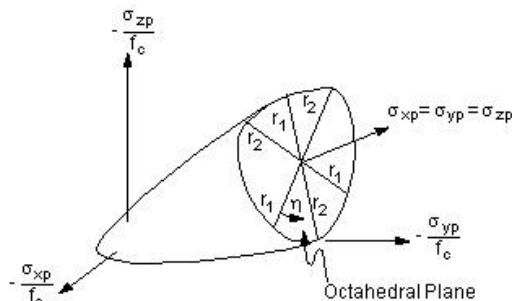
Το πρόγραμμα διαθέτει το στοιχείο SOLID65 το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη διακριτοποίηση τρισδιάστατων στοιχείων σκυροδέματος. Το στοιχείο αυτό όπως φαίνεται και στο Σχ.3.2 μπορεί να είναι τετραεδρικό, εξαεδρικό ή οκταεδρικό. Εμείς σ' όλους τους κανάβους που θα χρησιμοποιήσουμε για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούμε οκταεδρικά στοιχεία με 8 κόμβους και 3 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, ώστε να έχουμε μια τυπική διάταξη πεπερασμένων στοιχείων που θα βοηθήσει ιδιαίτερα στο σχηματισμό της διεπιφάνειας. Το στοιχείο έχει τη δυνατότητα εισαγωγής κατανεμημένου οπλισμού στις 3 κύριες διευθύνσεις του, εμείς όμως επιλέγουμε να

ορίζουμε ξεχωριστά τους σπλισμούς με διακριτά στοιχεία LINK180 όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχ.3.2 Στοιχείο SOLID65

Το στοιχείο SOLID65 υποχρεωτικά συνδυάζεται με τις ιδιότητες του υλικού (material model) CONCRETE που το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής. Το υλικό αυτό έχει ως υπόβαθρο το κριτήριο τριαξονικής αστοχίας Willam-Warnke (1975). Η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου αυτού οδηγεί το υλικό σε αστοχία είτε θλιπτική (crushing) είτε εφελκυστική (cracking). Για τον ορισμό της επιφάνειας των Willam-Warnke (1975) απαιτούνται οι παράμετροι: μονοαξονική εφελκυστική αντοχή, μονοαξονική θλιπτική αντοχή, θλιπτική αντοχή υπό διαξονική ένταση, αντοχή σε υδροστατικό πεδίο, μονοαξονική θλιπτική αντοχή σε υδροστατικό πεδίο. Στο πρόγραμμα τελικά μπορούμε να εισάγουμε μόνο τις τιμές εφελκυστικής και θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής και οι υπόλοιπες τιμές υπολογίζονται αυτόματα. Με τον τρόπο αυτό εισάγουμε το κριτήριο Willam-Warnke (1975) στο οποίο μόλις οι τάσεις του στοιχείου πιάσουν την επιφάνεια αστοχίας έχουμε μηδενισμό της τάσης στη διεύθυνση που αναπτύσσεται η τάση αυτή. Το στοιχείο SOLID65 αναπτύσσει ρωγμές διαδοχικά σε 3 επίπεδα μέχρι την ολοκληρωτική αστοχία του. Σε κάθε ανάπτυξη ρωγμής έχουμε το μηδενισμό της τάσης σε διεύθυνση κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής. Οι ρωγμές-αστοχίες αυτές αναπτύσσονται τόσο στην αστοχία σε θλίψη όσο και εφελκυσμό με την χαρακτηριστική γραφική απεικόνιση των αστοχιών στο πρόγραμμα.



3-D Failure Surface in Principal Stress Space

Σχ.3.3 Επιφάνεια αστοχίας σκυροδέματος κατά Willam-Warnke



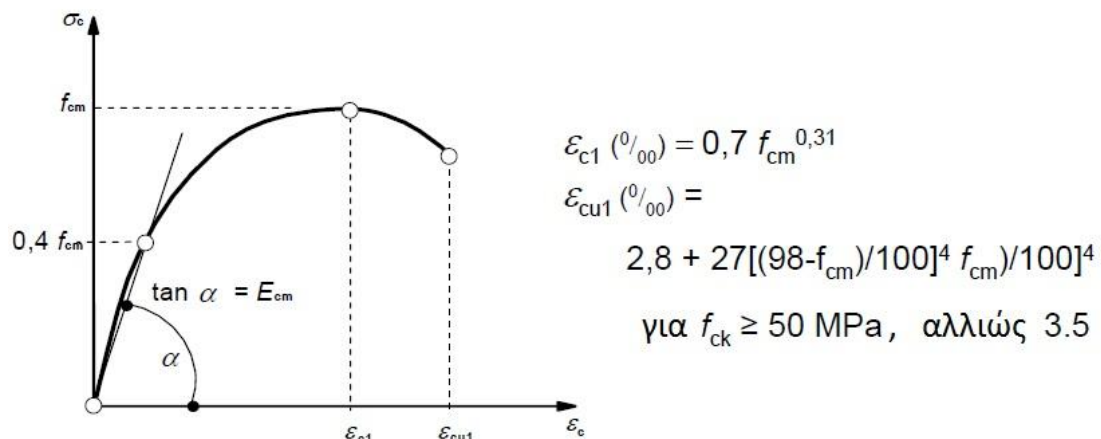
### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Στη σειρά επιλύσεων και αναλύσεων που έγιναν κρίθηκε σκόπιμη η απενεργοποίηση της δυνατότητας σύνθλιψης του σκυροδέματος, ορίζοντας  $f_c = -1$ . Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε το νωρίτερο τερματισμό της ανάλυσης λόγω της αστάθειας στην περιοχή θλίψης. Άλλωστε όλα τα δοκίμια που τρέχουμε δεν κινδυνεύουν από αστοχία σε θλίψη, αφού προηγείται η αστοχία σε εφελκυσμό του σκυροδέματος.

Στο στοιχείο CONCRETE εισάγουμε και τους συντελεστές μεταφοράς ανοιχτής ρωγμής ( $\beta_i$ ) αλλά και κλειστής ( $\beta_c$ ). Οι παράμετροι αυτοί ορίζουν το μέγεθος της διατμητικής τάσης που μεταφέρεται κατά μήκος των ρωγμών. Οι τιμές που ορίζουμε είναι  $\beta_t = 0,2$  και  $\beta_c = 0,6$ , όπως προτείνεται και στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το επόμενο που πρέπει να ορισθεί είναι το διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  του υλικού, το οποίο εισάγεται με μοντέλο πολυγραμμικό Multilinear Kinematic Hardening. Για τον εντοπισμό της βέλτιστης πολυγραμμικής καμπύλης προς εισαγωγή εξετάζονται τέσσερα μοντέλα  $c1, c2, c3, c4$ .

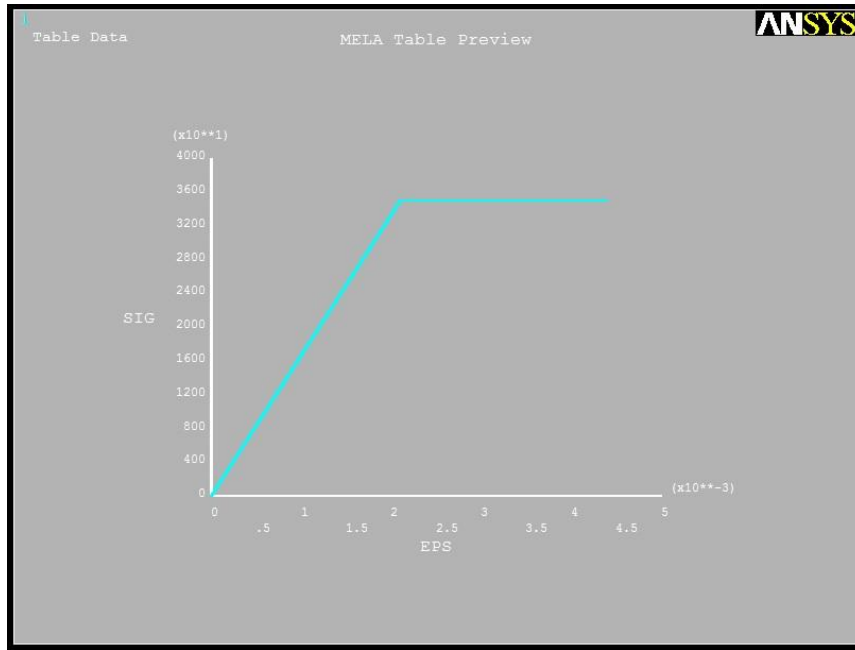
Από το νόμο του Ευρωκώδικα 2 για το σκυρόδεμα παίρνουμε την καμπύλη του Σχ. τον οποίο προσεγγίζουμε πολυγραμμικά.



**Σχ.3.4** Διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  σκυροδέματος κατά Ευρωκώδικα 2

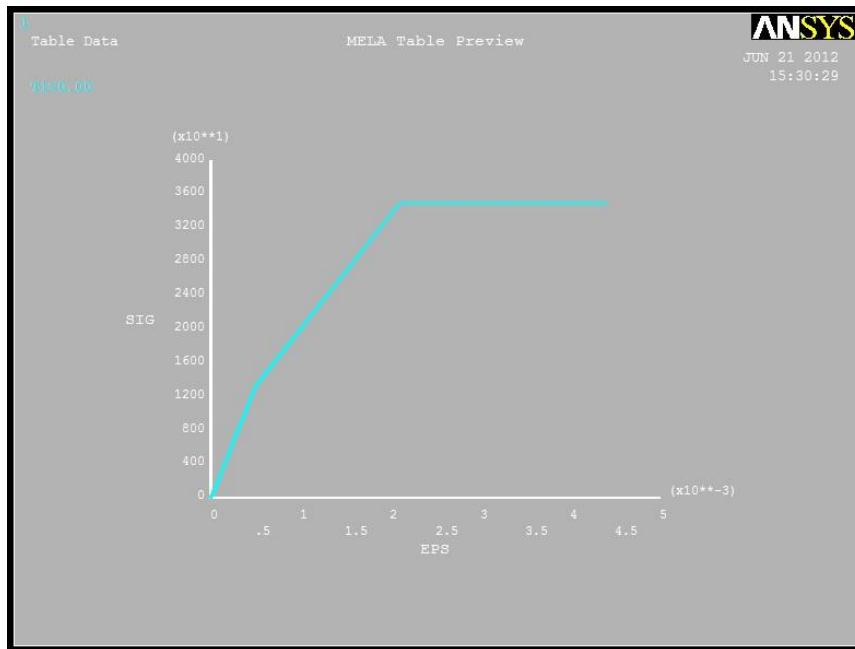
Ο νόμος  $c1$  που δοκιμάζουμε είναι ένας διγραμμικός νόμος, πολύ χονδροειδής αλλά αυτό μας βοηθά στο να διαπιστώσουμε τι και πόσο κερδίζουμε με τους επόμενους νόμους. Ορίζουμε το μέγιστο στο  $\epsilon_{c1}$  κατά Ευρωκώδικα 2, που βρίσκεται πολύ κοντά στο 2‰. Από το σημείο αυτό και μέχρι το 4‰ που θα ορίσουμε το  $\epsilon_{cu}$  παραμένει η καμπύλη οριζόντια.

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS



Σχ.3.5 Διάγραμμα c1 για το σκυρόδεμα

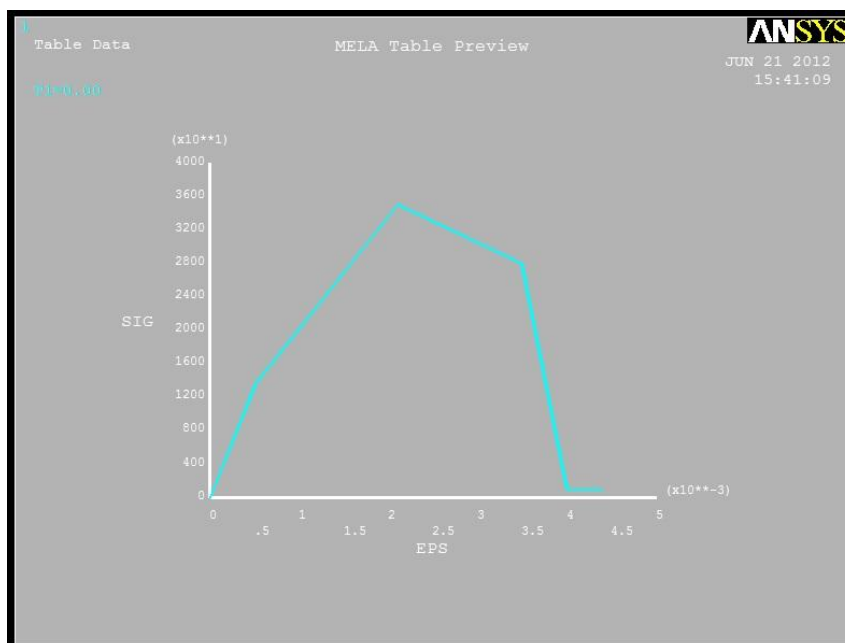
Ο νόμος c2 είναι ένας νόμος πάλι με πλατώ από τη μέγιστη τάση μέχρι την αστοχία του σκυροδέματος, αλλά προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη του Ευρωκώδικα 2 στον ανιόντα κλάδο. Σε σχέση με το νόμο c1 εισάγουμε ένα ενδιαμέσο σημείο στο  $0,4f_{cm}$  με την τιμή που αντιστοιχεί στην εκάστοτε ποιότητα σκυροδέματος. Για κάθε ποιότητα σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί θεωρούμε δεδομένο το  $E_{cm}$  κατά ΕΚΩΣ. Με το νόμο c2 μπορούμε να παρατηρήσουμε διαφοροποιήσεις στην αρχική δυσκαμψία του φορέα μας μέσα από την κλίση της καμπύλης push-over.



Σχ.3.6 Διάγραμμα c2 για το σκυρόδεμα

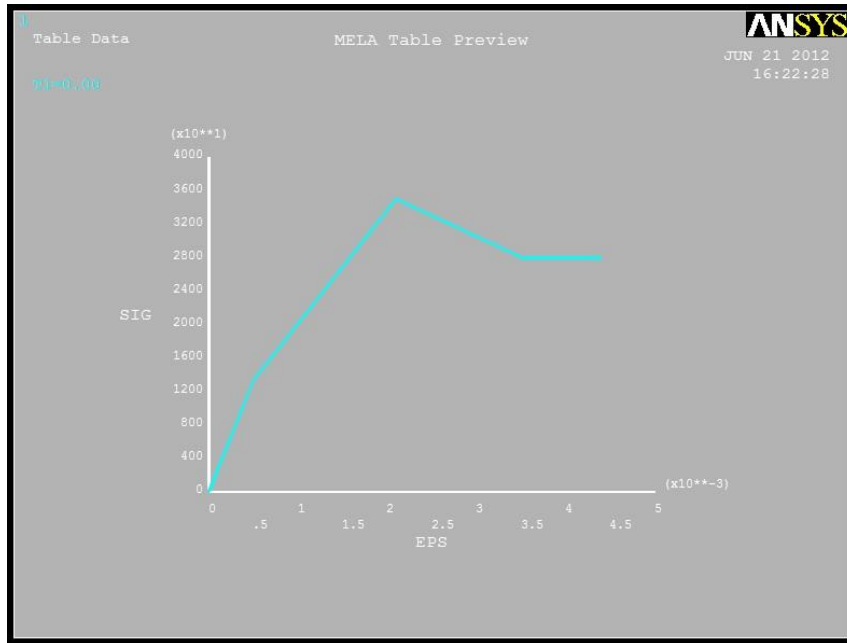
### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Ο νόμος c3 Σχ. αποτυπώνει και τον φθιτό κλάδο του υλικού. Μετά το σημείο του μεγίστου  $\epsilon_{c1}$  έχουμε την πτώση μέχρι την τιμή του 80% της μέγιστης τάσης σε παραμόρφωση 3,5%. Από το σημείο εκείνο και έχουμε πολύ πιο απότομη πτώση μέχρι το μηδενισμό των τάσεων για  $\epsilon=4\%$ . Η καμπύλη αυτή είναι πολυγραμμική και πλησιάζει πολύ το νόμο του Ευρωκώδικα. Παρόλ' αυτά οι έντονες αλλαγές κλίσεων και η μεγάλη πτώση αναμένεται να δημιουργήσουν προβλήματα σύγκλισης.



**Σχ.3.7** Διάγραμμα c3 για το σκυρόδεμα

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο για τους νόμους c1, c2, c3 προτείνουμε το βελτιστοποιημένο νόμο c4. Στο διάγραμμα αυτό εισάγεται ο φθιτός κλάδος αλλά όχι τόσο έντονος και απότομος όσο στο c3. Ο ανιών κλάδος περιέχει το ενδιάμεσο σημείο στο  $0,4f_{cm}$ , ενώ το μέγιστο ορίζεται πάντα στο ίδιο σημείο.



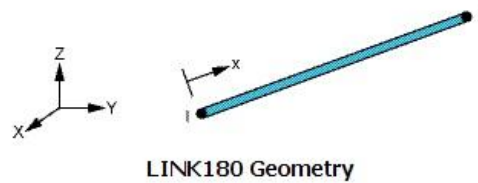
**Σχ.3.8** Διάγραμμα c4 για το σκυρόδεμα

Η πολυγραμμικότητα των εισαγόμενων νόμων δεν αναμένεται να δώσει εντυπωσιακά διαφορετικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό προτιμάται η εισαγωγή πιο απλών νόμων που διευκολύνουν το πρόγραμμα στην επίλυση. Προτείνεται δε σε κάθε περίπτωση που αυτό είναι εφικτό μια πρώτη δοκιμαστική ανάλυση με τον πιο απλό νόμο των υλικών. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζονται ευκολότερα λάθη της προσομοίωσης στο αρχικό στάδιο.

### 3.3. Χάλυβας

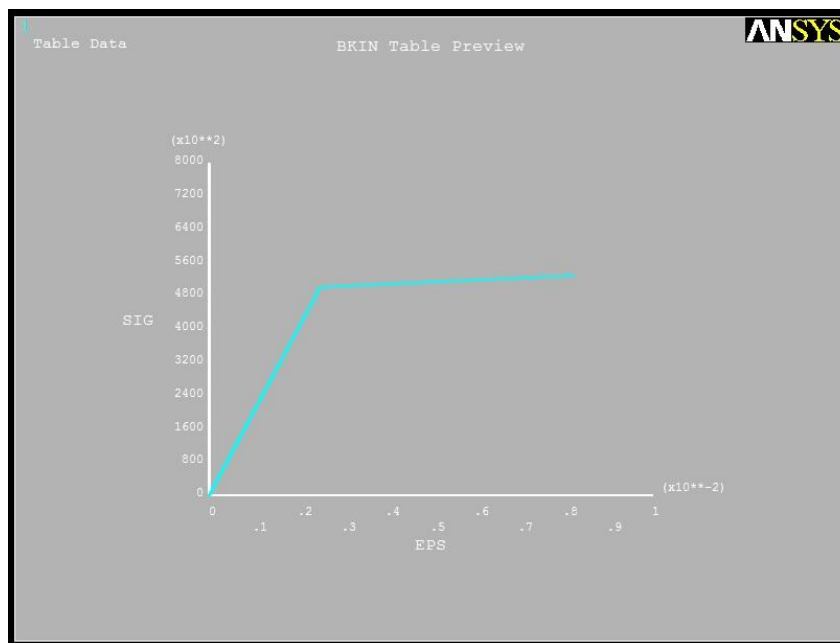
Για την προσομοίωση του χάλυβα επιλέγουμε την εισαγωγή διακριτών γραμμικών στοιχείων LINK180 έναντι της εισαγωγής κατανεμημένου οπλισμού στα στοιχεία του σκυροδέματος. Τα στοιχεία αυτά παραλαμβάνουν μονοαξονικά φορτία εφελκυσμού – θλίψης στη διεύθυνση τους ενώ διαθέτουν 3 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Στη διακριτοποίηση των οπλισμών επιλέγουμε οι κόμβοι αυτοί να συμπίπτουν με τους κόμβους των στοιχείων SOLID65 του σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό και ενώνοντας τους κόμβους πετυχαίνουμε την πλήρη συνεργασία των δύο υλικών. Στην πραγματικότητα υπάρχει μηχανισμός συνάφειας που αναπτύσσεται μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού για να επιτευχθεί η συνεργασία. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι η σύνδεση των υλικών στους κόμβους είναι πλήρης.

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS



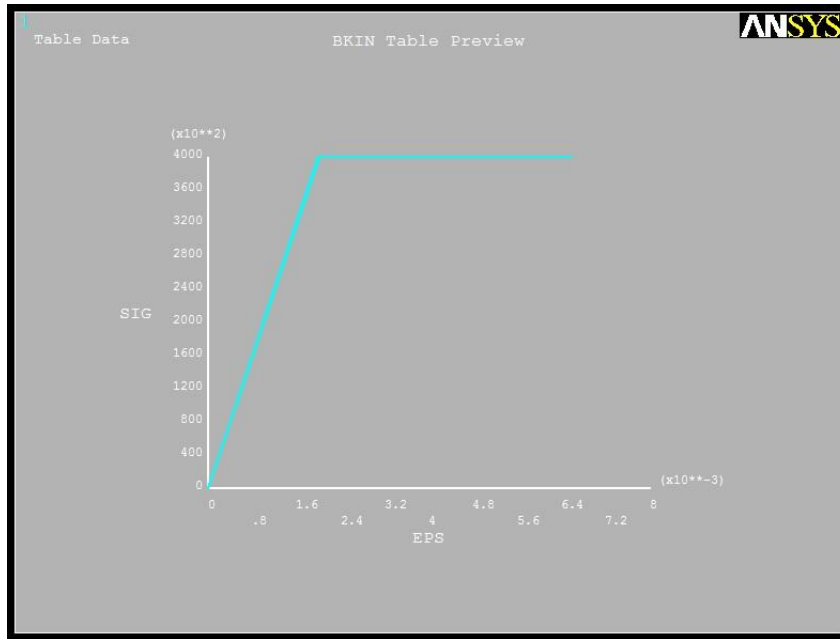
**Σχ.3.9** Στοιχείο LINK180

Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων που εισάγεται για το υλικό, για κάθε ποιότητα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι είτε της μορφής s1 είτε της s2. Για το s1 του Σχ.3.10 ο ανιών κλάδος έχει κλίση 200GPa και φτάνει μέχρι την τάση διαρροής του χάλυβα. Από το σημείο αυτό και μετά έχουμε μικρή κράτνωση της τάξεως του 2,5%.



**Σχ.3.10** Διάγραμμα s1 για χάλυβα

Στο νόμο s2 έχουμε τελείως ελαστοπλαστικό υλικό. Η συμπεριφορά αυτή δεν πλησιάζει τη φυσική κράτνωση που διαπιστώνουμε σε όλους τους χάλυβες στη φύση μετά από κάποιο σημείο. Εντούτοις, στις αναλύσεις συχνά διαπιστώνουμε ότι οι χάλυβες δεν φτάνουν τα επίπεδα φόρτισης όπου αναπτύσσουν την κράτνωση αλλά εντείνονται μέχρι το πλατώ. Για το λόγο αυτό ο ελαστοπλαστικός νόμος μπορεί να μας δώσει τη σωστή συμπεριφορά του υλικού.



**Σχ.3.11** Διάγραμμα s2 για χάλυβα

Από τη διερεύνηση που θα γίνει στη συνέχεια πάνω στο δοκίμιο S1 θα επιλέξουμε τους κατάλληλους νόμους υλικών για τις αναλύσεις μας.

#### 3.4. Διεπιφάνεια παλαιού-νέου σκυροδέματος

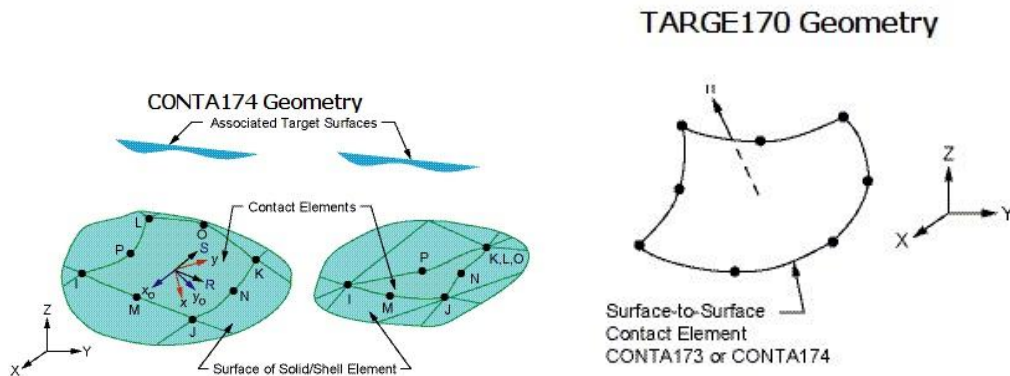
Η διεπιφάνεια παλαιού-νέου σκυροδέματος στην ενίσχυση αλλά και στην επισκευή υποστρωμάτων είναι η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει το βαθμό απόδοσης της κατασκευής μας. Η μοντελοποίηση δε της λειτουργίας της διεπιφάνειας είναι αντιστοίχως τεράστιας σημασίας. Προτείνουμε δύο τρόπους εισαγωγής της λειτουργίας της διεπιφάνειας.

##### 3.4.1. Μέθοδος επιφανειακών στοιχείων τριβής

Αρχικά προσπαθούμε να προσεγγίσουμε τη λειτουργία της διεπιφάνειας με επιφανειακά στοιχεία CONTA. Στο πρόγραμμα μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε αν πρόκειται για συσχέτιση επιφανειών δύσκαμπτη προς εύκαμπτη (rigid to flexible) ή εύκαμπτη προς εύκαμπτη (flexible to flexible). Η περίπτωση μας αντιστοιχεί στην εύκαμπτη προς εύκαμπτη καθώς παρότι τα σκυροδέματα δεν είναι ίδιας ποιότητας έχουν σχετικά παραπλήσιες δυσκαμψίες. Η αντίθετη περίπτωση θα ήταν αυτή του μανδύων από FRP, όπου θα είχαμε δύσκαμπτο προς εύκαμπτο. Επόμενη σημαντική επιλογή της μοντελοποίησης είναι η επιλογή των στοιχείων επαφής που θα χρησιμοποιήσουμε. Το Ansys μας δίνει τις επιλογές στοιχείων που ενώνουν κόμβο με κόμβο, κόμβο με επιφάνεια και επιφάνεια με επιφάνεια. Στην περίπτωση μας κρίθηκε σκόπιμο να διακριτοποιήσουμε τόσο το αρχικό υποσύλωμα όσο και τον μανδύα σε σταθερό κάνναβο ώστε να χρησιμοποιηθούν στοιχεία επαφής επιφάνειας με επιφάνεια. Σχηματίζοντας πεπερασμένα στοιχεία SOLID65 σε ακριβή αντιστοιχία μεταξύ του παλιού σκυροδέματος και του νέου μπορούμε να εισάγουμε τα επιφανειακά στοιχεία επαφής. Με την επιλογή αυτή μειώνουμε

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

και τα εισαγόμενα στοιχεία σε σχέση με το να εισάγαμε στοιχεία επαφής κόμβου. Για τη δημιουργία του ζεύγους επαφής (contact pair) μεταξύ των CONTA174 και TARGE170 πρέπει να γίνει η διάκριση μεταξύ επιφάνειας επαφής (contact surface) και επιφάνειας στόχου (target surface). Τέλος, στις επιλογές των στοιχείων επιλέγουμε ως τρόπο σύνδεσης των CONTA174 και TARGE170 την κανονική επιφάνεια καθώς έτσι επιτρέπεται στη διεπιφάνεια να λειτουργήσει παραπλήσια με τον τρόπο που λειτουργεί στη φύση, χωρίς δηλαδή να τίθενται περιορισμοί σχετικής ολίσθησης ή αποκόλλησης.



**Σχ.3.12** Στοιχεία CONTA174 TARGE170

Τα στοιχεία αυτά έχουν περιορισμένες δυνατότητες και ουσιαστικά καταλήγουμε να τα χρησιμοποιούμε ως στοιχεία τριβής νόμου Mohr-Coulomb, εισάγοντας συντελεστή τριβής  $\mu$  και συνοχή  $c$ . Η συνοχή είναι η μέγιστη αντοχή σύνδεσης των δύο στοιχείων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας όταν δεν υπάρχει θλιπτική εγκάρσια τάση σε αυτή. Για την καλύτερη προσέγγιση των τιμών αυτών μπορεί να αξιοποιηθεί η βιβλιογραφία ΚΑΝΕΠΕ (2009), Δρίτσος (2001), Τάσιος (2009), Βιτζηλαίου (1986). Σε σειρά προγενέστερων αναλυτικών προσομοιώσεων όπως στην εργασία του Βανδώρου (2005) επιλέγονται ως καλύτερες τιμές για λεία διεπιφάνεια  $\mu=0,5$  και  $\tau_{cu}=0,5\text{MPa}$  σταθερή καθ'όλα τα στάδια της φόρτισης, αναγνωρίζοντας την ανακρίβεια του μοντέλου και τα προβλήματα ταύτισης με τα πειραματικά αποτελέσματα. Για τις πιο τραχείες επιφάνειες που έχουν προέρθει από επιμελέστερη τοποθέτηση του μανδύα η απόκλιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων γίνεται εντονότερη. Για την άρση αυτής της διαφοράς οι ερευνητές επιλέγουν να χρησιμοποιούν μειούμενες τιμές για τον συντελεστή τριβής και τη συνοχή στα στάδια φόρτισης του υποστυλώματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται απαραίτητως στις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, οι οποίες όμως δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Προφανώς στα αρχικά στάδια της φόρτισης επιλέγουμε τις μέγιστες τιμές που στη συνέχεια μειώνονται.

Η προτεινόμενη μέθοδος εύρεσης των προς εισαγωγή τιμών αρχίζει από την εύρεση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής της ορθής τάσης στο σύνολο της διεπιφάνειας. Αναλύοντας δοκιμαστικά το ενισχυμένο υποστυλόμετρο καταλήγουμε σε μια τιμή ορθής τάσης πιο κοντά στις μέγιστες εμφανιζόμενες. Με τον τρόπο αυτό θέλουμε να καλύψουμε κυρίως τις μέγιστες τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων από την άλλη εισάγουμε αποκλίσεις στα πρώτα στάδια της φόρτισης. Στη συνέχεια με δεδομένη την ορθή τάση υπολογίζουμε την μέγιστη διατμητική από τους τύπους του ΚΑΝΕΠΕ (2009). Αυτή είναι και

η τιμή της διατμητικής τάσης που εισάγουμε στο πρόγραμμα. Για τη συνοχή προτείνουμε αρχικά τιμή 0, η οποία μπορεί να αυξηθεί με κριτήριο τη διασπορά των αναπτυσσόμενων τιμών των τάσεων της διεπιφάνειας. Εάν οι τιμές που έχουμε εισάγει είναι αρκετά μεγάλες και το μεγαλύτερο τμήμα τις διεπιφάνειας εμφανίζει εν τέλει μικρές τάσεις και ολισθήσεις τότε αυξάνουμε την τιμή της συνοχής. Η μέθοδος αυτή συμβολίζεται με  $f$  (friction) και για την περίπτωση λείας διεπιφάνειας είναι  $f_1$ , τραχείας  $f_2$  και οπλισμένης  $f_3$ .

Η χρήση των επιφανειών τριβής είναι αρκετά απλοϊκός τρόπος προσέγγισης καθώς εισάγονται μέσες τιμές ανεξαρτήτως επιπέδου εγκάρσιας ορθής τάσης αλλά και της θραύσης των εξαρμάτων. Από την άλλη οι εισαγόμενες τιμές συνοχής και συντελεστή τριβής χρίζει αρκετής διερεύνησης. Αυτή η χονδροειδής προσέγγιση επιτείνει ελαφρώς την απόκλιση των αποτελεσμάτων από το επίπεδο φόρτισης της διαρροής και μετά.

#### 3.4.2. Μέθοδος ελατηρίων

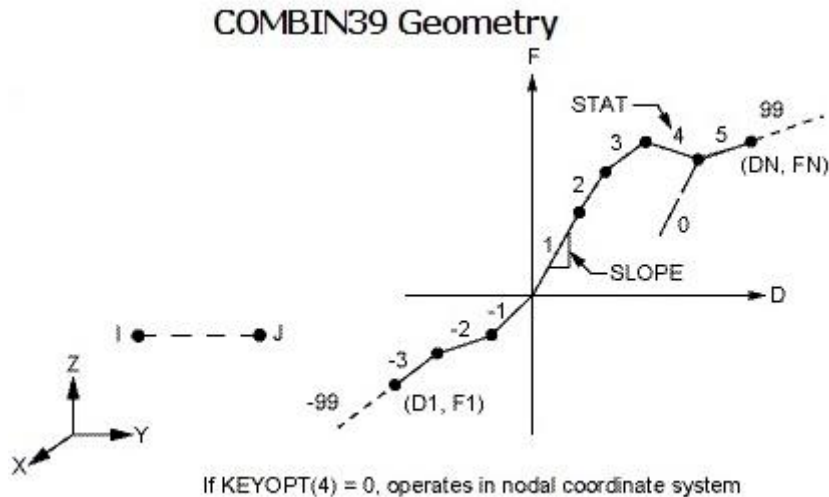
Ένας καλύτερος τρόπος μοντελοποίησης της διεπιφάνειας παλαιού-νέου σκυροδέματος είναι με τη χρήση ελατηρίων COMBIN39. Με τα ελατήρια αυτά θα μπορέσουμε να εισάγουμε τη σχέση τριβής για το επίπεδο της διεπιφάνειας και ελατήρια ελέγχου της αποκόλλησης για την κάθετη διεύθυνση.

Τα στοιχεία COMBIN39 έχουν τη δυνατότητα να είναι μηδενικού μήκους στοιχεία, είναι μονοαξονικά στοιχεία που επιδέχονται μη γραμμικό νόμο δύναμης-παραμόρφωσης. Είναι στοιχεία που δουλεύουν και σε εφελκυσμό και σε θλίψη και μπορούμε να ορίσουμε πολυγραμμικό διάγραμμα F-D.

Χρησιμοποιούμε τρία τέτοια ελατήρια, ένα για κάθε διεύθυνση, σε κάθε κόμβο της διεπιφάνειας. Βεβαίως οι κόμβοι της διεπιφάνειας είναι διπλοί, με έναν κόμβο του αρχικού υποστυλώματος και έναν κόμβο του μανδύα που συμπίπτουν κατά τη διακριτοποίηση. Τους συμπίπτοντες αυτούς κόμβους δεν τους συμπυκνώνουμε όπως κάναμε στα μονολιθικά μοντέλα αλλά τα συσχετίζουμε με τα ελατήρια στις τρεις ορθοκανονικές διευθύνσεις.

Στα ελατήρια της διεπιφάνειας προσπαθούμε να εισάγουμε νόμο F-D που να αντιστοιχεί στις καμπύλες αντίστασης τριβής. Μετατρέπουμε τις σχέσεις  $\tau$ - $s$  σε F-D. Για κάθε τιμή ολίσθησης  $s=D$  πολλαπλασιάζοντας τη διατμητική τάση τα με την επιφάνεια του πεπερασμένου στοιχείου παίρνουμε τη διατμητική δύναμη  $F$ . Επειδή η εισαγωγή μη-γραμμικοτήτων δυσχεραίνει την επίλυση θα προτιμήσουμε τη χρήση νόμου όσο το δυνατόν απλούστερου αλλά αρκούντως αντιπροσωπευτικού των αναπτυσσόμενων τάσεων.





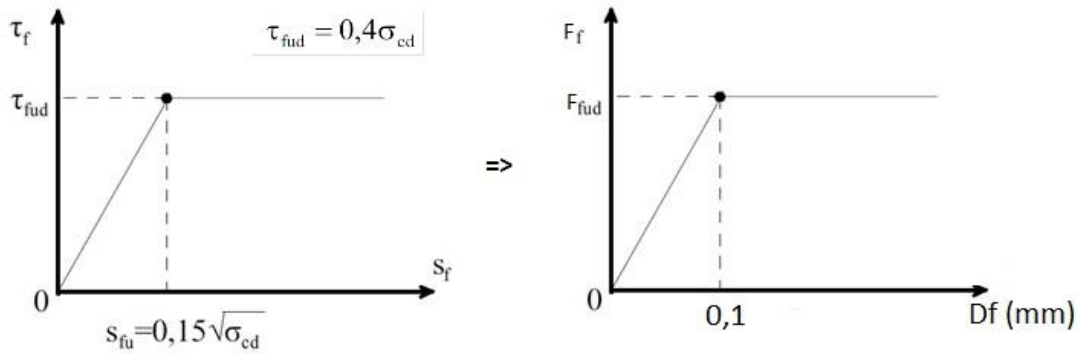
Σχ.3.13 Στοιχείο COMBIN39

Στα ελατήρια της εγκάρσιας προς τη διεπιφάνεια διεύθυνσης εισάγουμε νόμο που θα δίνει πλήρη σύνδεση στις αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις και αποκόλληση για εφελκυστικές τιμές πάνω από κάποια τιμή. Η αποφλοιώση του μανδύα είναι ένα από τα κρίσιμα σημεία της τεχνολογίας των μανδύων. Στην πλειοψηφία των πειραματικών υποστυλωμάτων που συναντάμε στη βιβλιογραφία, η αστοχία αυτή δε συναντιέται πριν την επίτευξη του σημείου διαρροής αλλά συχνά ούτε πριν τη μέγιστη τιμή παραλαμβανόμενου φορτίου στις μονοτονικές φορτίσεις. Απαραίτητη όμως προϋπόθεση για να μην έχουμε πρόωρη αποφλοιώση των μανδύων είναι η τήρηση των προδιαγραφών κατασκευής τους κατά ΠΕΤΕΠ (2008).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική αναζήτηση για τους μηχανισμούς της διεπιφάνειας που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, ορίζουμε τους νόμους F-D που θα εισάγουμε στα ελατήρια της διεπιφάνειας. Θα παρουσιαστούν τα τρία μοντέλα i1, i2, i3 (interface) με διαφοροποίηση το αν πρόκειται για λεία, τραχεία ή οπλισμένη διεπιφάνεια.

#### Μοντέλο λείας διεπιφάνειας i1

Για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του ΚΑΝΕΠΕ (2009) για τις λείες διεπιφάνειες πρέπει να υπάρχει η τιμή της ορθής τάσης σε κάθε σημείο της. Επειδή δεν υπάρχει τρόπος να γίνει αυτό επιλέγουμε να κάνουμε μια χονδροειδή παραδοχή μιας ορθής τιμής τάσης  $\sigma$ , πιο κοντά στη μέγιστη που εντοπίζουμε ότι αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια. Το μοντέλο που θα εισαγάγουμε θα είναι κοινό για όλα τα ελατήρια της διεπιφάνειας, οπότε εξ αρχής γίνεται αντιληπτή η απόκλιση από τη φυσική συμπεριφορά. Κάθε φορά μπορούμε να κάνουμε τη διερεύνηση που παρουσιάζεται στη συνέχεια για το μοντέλο S4 ώστε να εντοπίζουμε ποιοτικά τις περιοχές υψηλών ορθών τάσεων. Με βάση μια τέτοια ανάλυση παίρνουμε στην περίπτωση αυτή μέγιστη τιμή  $\sigma_{cd}=0,5\text{MPa}$ . Έχοντας αυτήν τη τιμή της  $\sigma$  ορίζεται άμεσα το διάγραμμα  $\tau$ - $s$  και μετατρέπεται στο F-D. Η ολίσθηση των διαγραμμάτων είναι κοινή, δηλαδή  $s=D$ . Για τη μετατροπή της διατμητικής  $\tau$  σε F αρκεί να ανφάγουμε την τάση σε δύναμη, πολλαπλασιάζοντας επί την επιφάνεια του πεπερασμένου στοιχείου SOLID65.



**Σχ.3.14** Νόμος ελατηρίων i1, για λείες διεπιφάνειες

Για τα μοντέλα S του κεφαλαίου 4:

$$\sigma_{cd}=0,5\text{MPa} \Rightarrow \tau_{fud}=0,2\text{MPa} \Rightarrow F_{fud}=0,08\text{kN}$$

Επειδή η ορθή τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο μας είναι πολύ μικρή θα δεχθούμε συμβουλευόμενοι τον κανονισμό και τα πειράματα της βιβλιογραφίας  $s_{fu}=D_{fu}=1\text{mm}$ .

Μοντέλο τραχείας διεπιφάνειας i2

Με αντίστοιχο τρόπο όπως έγινε και στο μοντέλο ελατηρίων i1 εργαζόμαστε και για τις τραχείες διεπιφάνειες. Αυτή τη φορά από της καμπύλες του διαγράμματος τ-s, προσπαθούμε να πάμε σε ένα διγραμμικό διάγραμμα F-D. Για την χρήση των τύπων που παρουσιάστηκαν στο 2.3 χρειάζονται οι τιμές της σ και s ώστε μέσα από τους παρακάτω τύπους (3), (4α), (4β) και να υπολογιστεί το διάγραμμα τ-s.

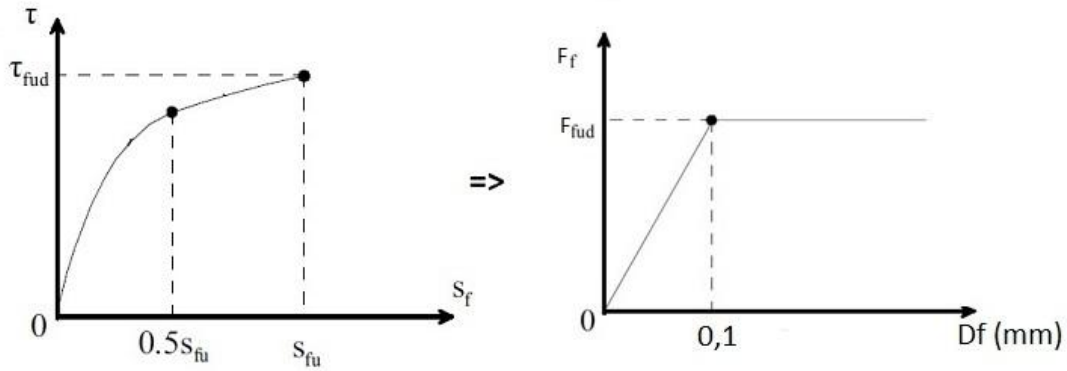
$$\tau_{fud} = 0,4(f_{cd}^2 \sigma_{cd})^{1/3} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

$$\frac{s_f}{s_{fu}} \leq 0,5 \rightarrow \left( \frac{\tau}{\tau_{fud}} \right) = 1,14 \sqrt[3]{(s_f / s_{fu})} \text{ [mm, MPa]} \quad (4\alpha)$$

$$\frac{s_f}{s_{fu}} > 0,5 \rightarrow \left( \frac{\tau}{\tau_{fud}} \right) = 0,81 + 0,19 \frac{s_f}{s_{fu}} \text{ [mm, MPa]} \quad (4\beta)$$

Αφού υπολογισθεί το τ-s, υπολογίζουμε το F ανάγοντας την μέγιστη τάση τ σε δύναμη. Το σημείο όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη τάση το ορίζουμε πάλι σε  $s=D=0,1\text{mm}$ , εκτιμώντας το από τα πειράματα που έχουμε στη διάθεσή μας.

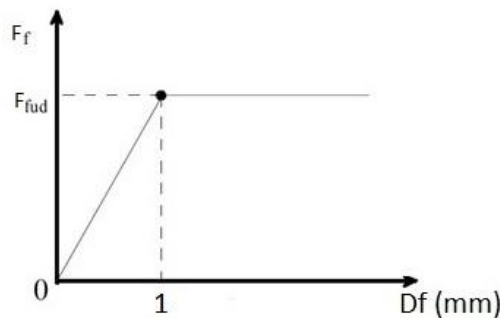
### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS



**Σχ.3.15** Νόμος ελατηρίων i2, για τραχείες διεπιφάνειες

Μοντέλο οπλισμένης διεπιφάνειας i3

Για την μοντελοποίηση της οπλισμένης διεπιφάνειας επιλέγουμε να εισάγουμε πάλι ένα διγραμμικό διάγραμμα F-D, το οποίο μπορεί να ορισθεί για τα στοιχεία COMBIN39. Η διγραμμική καμπύλη ακολουθεί τη μορφή των διαγράμματος i1 και i2 με διαφοροποιημένες τις τιμές του σημείου τομής. Από τα πειράματα της βιβλιογραφίας παρατηρείται ότι η τιμή της ολίσθησης όπου αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική τάση βρίσκεται γύρω στο 1mm. Για το λόγο αυτό σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου θέταμε 0,1mm, στην οπλισμένη διεπιφάνεια το σημείο αυτό είναι στο 1mm.



**Σχ.3.16** Νόμος ελατηρίων i3, για οπλισμένες διεπιφάνειες

Για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης προτείνεται ο υπολογισμός κάθε μηχανισμού προσφοράς διατμητικής τάσης ξεχωριστά. Στη συνέχεια με τους συντελεστές συσχέτισης από την εργασία των Βασιλοπούλου και Τάσιου (2003) βρίσκουμε τη συνολική τους προσφορά. Ο μηχανισμός τριβής υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε και στην περίπτωση i2. Αφού βρούμε την τιμή της ορθής τάσης που θεωρούμε αντιπροσωπευτικότερη, από τον τύπο της Βιντζηλαίου (1986)

$$\tau_{fud} = 0,4(f_{cd}^2 \sigma_{cd})^{1/3} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

υπολογίζουμε την διατμητική τάση λόγω τριβής. Για τη δράση του βλήτρου χρησιμοποιούμε τον τύπο του Rasmussen (1962)

$$\tau_d = (1.3nd_b^2 \sqrt{f_c f_y}) / A_c \quad (12)$$

Αφού υπολογίσουμε τις τιμές αυτές για κάθε υποστύλωμα που ελέγχουμε, στη συνέχεια προσθέτουμε τις τιμές αυτές με τους κατάλληλους συντελεστές. Όπως αναφέραμε και στο 2.3 επιλέγουμε συντελεστή 0,7 για το μηχανισμό τριβής και 0,6 για τον μηχανισμό βλήτρου. Με τον τρόπο αυτό έχουμε πλέον τη μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση στην οπλισμένη διεπιφάνεια. Ανάγοντας την τάση σε δύναμη με βάση την επιφάνεια των πεπερασμένων στοιχείων παίρνουμε τις επιθυμητές τιμές για το νόμο i3 του Σχ.3.16.

### 3.5. Επιπλέον παράμετροι μοντελοποίησης

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η αναζήτηση της λύσης γίνεται με αριθμητικές μεθόδους. Αυτό σημαίνει ότι η ισότητα των σχέσεων δεν είναι απόλυτη αλλά ελέγχεται από κάποιο όριο σύγκλισης. Το προκαθορισμένο όριο του προγράμματος είναι πολύ μικρό για την πολυπλοκότητα του προσομοιώματος που θέλουμε να αναλύσουμε. Αναγκαστικά αυξάνουμε το όριο σύγκλισης ώστε να μην έχουμε πρόωρο τερματισμό των αναλύσεων. Οι μη γραμμικότητες που εισάγουμε, κυρίως με τις ιδιότητες των υλικών δυσχεραίνουν την σύγκλιση. Για το λόγο αυτό αναζητούμε την κατάλληλη τιμή του ορίου ώστε από τη μια αυξάνοντας την να μην έχουμε πρόωρο τερματισμό της ανάλυσης, από την άλλη μειώνοντας την, να μην αποκλίνει η λύση μας από την πραγματικότητα.

Η συνηθέστερη αιτία τερματισμού μιας ανάλυσης πριν την αναμενόμενη αστοχία είναι η υψηλή συγκέντρωση τάσεων σε κάποιους κόμβους. Στις σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν έγινε αντιληπτό ότι κάτι τέτοιο εμφανίζεται και στη βάση του υποστυλώματος, εκτός από τα σημεία επιβολής της φόρτισης που τοποθετούμε πλάκες φόρτισης. Το γεγονός ότι στη βάση συγκεντρώνονται τάσεις είναι αναμενόμενο και αναπόφευκτο αφού εκεί προδιαγραφούμε σε μεγάλο βαθμό την αστοχία. Στην περιοχή της βάσης στα μοντέλα μας χρησιμοποιούμε πλήρη πάκτωση, δεσμεύοντας απόλυτα τους κόμβους των στοιχείων που βρίσκονται εκεί. Η μοντελοποίηση αυτή απέχει από την πραγματικότητα όπου στα μεν πειράματα έχουμε κάποιο θεμέλιο ή κάποια δοκό όπου είναι συνδεδεμένο. Άμεση συνέπεια της επιλογής μας αυτής είναι να πάρουμε πιο δύστροπη κατασκευή άρα λίγο μικρότερες μετατοπίσεις για κάθε επίπεδο φόρτισης. Ένας τρόπος άρσης αυτής της ανακρίβειας είναι η εισαγωγή ελατηρίων στη βάση του προσομοιώματος. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές στις αναλύσεις τους αλλά όπως και οι ίδιοι συμπεραίνουν οι τιμές των ελατηρίων που δίνονται δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων. Άλλος τρόπος είναι η πληρέστερη μοντελοποίηση του θεμελίου. Εισάγοντας ολόκληρο το θεμέλιο επιβαρύνουμε πολλαπλάσια την ανάλυση και το υπολογιστικό κόστος. Επειδή δε το υλικό μας είναι σκυρόδεμα, ορίζοντας τα πολυγραμμικά διαγράμματα το Ansys αδυνατεί να συγκλίνει. Σε κάθε περίπτωση εισάγοντας και θεμέλιο οι αστοχίες διεισδύουν στην περιοχή του πεδίου κάτω από το υποστύλωμα και του επιτρέπουν μεγαλύτερη στρόφη. Το φαινόμενο αυτό πράγματι μας δίνει λίγο μεγαλύτερη ευστρεψία στη βάση αλλά κυρίως επιτρέπει στην ανάλυση να προχωρήσει πολύ περισσότερο σε σχέση με πριν.

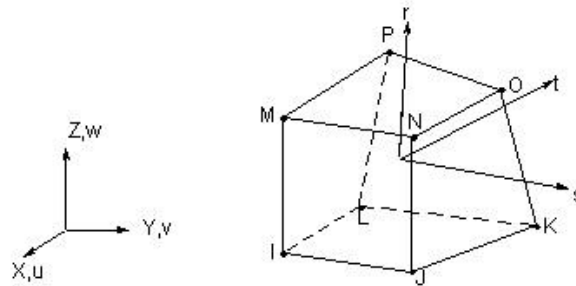
### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Η επιβολή της φόρτισης γίνεται στις αναλύσεις μας με επιβολή φορτίου. Το κατακόρυφο φορτίο που φορτίζει το αρχικό υποστύλωμα το επιβάλλουμε στην πρώτη φάση πριν την επιβολή της οριζόντιας φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο φορτίζουμε το υποστύλωμα με τη σειρά που αυτό συμβαίνει και στα πειράματα.

#### Πλάκες φόρτισης

Τοποθετούνται πλάκες φόρτισης τόσο για το κατακόρυφο αξονικό φορτίο όσο και για το οριζόντιο, όπως άλλωστε εφαρμόζονται και στα πειράματα. Τα μεγέθη των πλακών είναι μεγέθους αντιστοίχων του πραγματικού. Στην επίλυση με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων η αποφυγή τοπικά τεχνητής συγκέντρωσης τάσεων είναι θεμελιώδης. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η φόρτιση μέσω πλακών ώστε να αποφευχθεί η σημειακή αύξηση τάσεων που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα σύγκλισης.

Οι πλάκες φόρτισης διακριτοποιούνται με στοιχεία SOLID185 τα οποία είναι χωρικά στοιχεία που μπορούν να ενωθούν με τα στοιχεία SOLID65 του σκυροδέματος. Επιλέγουμε πάλι να ενώσουμε ακλόνητα τις πλάκες με το σκυρόδεμα πράγμα που επηρεάζει την κατανομή των τάσεων στην περιοχή περί την πλάκα λόγω της διαφοράς του μέτρου ελαστικότητάς τους. Στα στοιχεία SOLID185 ορίζουμε ιδιότητες «χάλυβα» πλήρως ελαστικού όμως, δηλαδή  $E=200\text{GPa}$  και  $\nu=0,30$ .



Σχ.3.17 Στοιχείο SOLID185

#### Επιβαλλόμενη φόρτιση

Η κατακόρυφη δύναμη επιβάλλεται με πίεση στην πλάκα φόρτισης. Η οριζόντια φόρτιση θα επιθυμούσαμε να επιβληθεί με σταδιακή μετακίνηση της πλάκας φόρτισης που θα μετακινούσε με την σειρά της το υποστύλωμα. Η επιβολή μετατόπισης στο πρόγραμμα γίνεται μέσω επιβολής συνθήκης στήριξης στους κόμβους. Η επιβολή μετατόπισης εμφάνισε πολλά περισσότερα προβλήματα σύγκλισης και συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή του σκυροδέματος πίσω από τη λάμα. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να εφαρμόζουμε επιβαλλόμενη σταδιακή φόρτιση. Με αυτόν τον τρόπο παίρνουμε ακριβέστερα αποτελέσματα για τη φάση μέχρι τη διαρροή ενώ από εκεί και μετά έχουμε μεγαλύτερες δυσκολίες. Στο Ansys μας δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης του μεγέθους του βήματος της φόρτισης ώστε να παίρνουμε αρκετές σε πλήθος τιμές στην πορεία της φόρτισης.

## 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

### 4.1. Εισαγωγή

Ο συνδυασμός των στοιχείων και των δυνατοτήτων που μας προσφέρει το Ansys πρέπει να αξιοποιηθεί με τον καλύτερο τρόπο ώστε να πλησιάσουμε κατά το δυνατόν τη φυσική συμπεριφορά. Το κομμάτι της επαλήθευσης του προγράμματος με βάση πραγματικά πειράματα και αποτελέσματα είναι θεμελιώδους σημασίας για την μετέπειτα σωστή χρήση και αξιοποίηση του προγράμματος. Οι αποκλίσεις που θα εμφανιστούν στη φάση αυτή πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ερμηνευτούν πριν περάσουμε στο επόμενο βήμα της διερεύνησης περισσότερων προσομοιωμάτων.

Θα προσπαθήσουμε να επαληθεύσουμε τα πειράματα των πορτογάλων ερευνητών Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005) που πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων υπό μονοτονική φόρτιση. Τα πειράματα αυτά αποτελούν αρκετά καλή προσομοιωτική εφαρμογή για τη χρήση του προγράμματος Ansys. Ξεκινάμε από το δοκίμιο S1 που είναι το απλούστερο καθώς είναι ένα υποστυλώμα σε μορφή προβόλου χωρίς καμία ενίσχυση με μανδύα. Οι διαστάσεις του είναι 200x200x1350. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται C35 και S400. Για την προσομοίωση αυτού του υποστυλώματος θα χρησιμοποιήσουμε όσα αναφέραμε στο κεφάλαιο 3.

Στη συνέχεια κατασκευάζουμε τα ενισχυμένα δοκίμια S4 και S6 των ερευνητών. Τα πειράματά τους αυτά αντιστοιχούν στη διερεύνηση που θέλουμε να κάνουμε πάνω στην εισαγωγή της λειτουργίας της διεπιφάνειας εσωτερικού υποστυλώματος-μανδύα. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται οι μέθοδοι που έχουν προταθεί στο 3.4. Για την περίπτωση της λείας διεπιφάνειας εξετάζονται οι νόμοι f1 και i1 και για την σπλισμένη διεπιφάνεια του S6 οι f3 και i3. Με τους τρόπους αυτούς προσπαθούμε να εισάγουμε τους νόμους διατμητικής τάσης- ολίσθησης της εκάστοτε διεπιφάνειας. Η επιτυχία της επαλήθευσης αυτής θα μας δώσει τη δυνατότητα να διερευνήσουμε με ασφάλεια στη συνέχεια τη λειτουργία των ενισχυμένων υποστυλωμάτων.

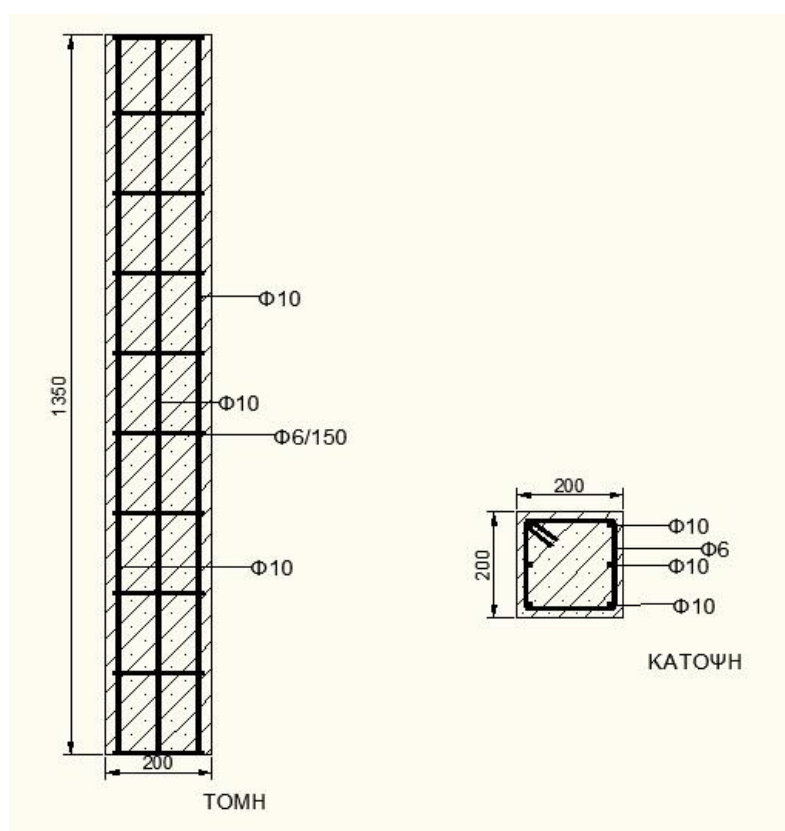
Η διάταξη επιβολής της φόρτισης για όλα τα υποστυλώματα σε μορφή προβόλου που θα εξετάσουμε είναι κοινή και φαίνεται στην Εικ.4.1 . Εφαρμόζουμε σε πρώτη φάση το κατακόρυφο αξονικό φορτίο με κατανομημένη πίεση στην πλάκα φόρτισης. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να αναπτύξουν τα στοιχεία του σκυροδέματος θλιπτικές τάσεις πριν τους εφαρμοστούν οι εφελκυστικές από την οριζόντια φόρτιση. Σε δεύτερη φάση και σε αρκετά επιμέρους βήματα εφαρμόζουμε την οριζόντια φόρτιση. Όπως έχουμε ήδη εξηγήσει εφαρμόζουμε οριζόντια πίεση και όχι παραμόρφωση. Αυτή η επιλογή είναι αναγκαστική και έχει τα θετικά και τα αρνητικά της. Επιβάλλουμε την οριζόντια πίεση σε λάμα που έχει συνδεθεί με το σώμα του υποστυλώματος. Η ίδια διάταξη εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις με διαφορετικές τιμές πιέσεων και στάθμης της λάμας αναλόγως.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

##### 4.2. Μη ενισχυμένο υποστύλωμα, S1

###### 4.2.1. Πείραμα S1

Στα πείραματά τους οι Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005) υλοποιούν εν αρχή το υποστύλωμα S1 που στη συνέχεια πρόκειται να ενισχυθεί. Το υποστύλωμα το κατασκευάζουν υπό μορφή κατακόρυφου προβόλου θεμελιωμένου σε ισχυρό πέδιλο. Με τον τρόπο αυτό σχεδιάζουν το μισό υποστύλωμα, αλλά είναι σε φυσική κλίμακα. Το πέδιλο συνδέεται με προεντεταμένες ράβδους με το ανένδοτο πάτωμα του εργαστηρίου. Το υποστύλωμα είναι ορθογωνικής διατομής 200x200 και ύψους 1,35m. Το δοκίμιο είναι συμμετρικά οπλισμένο στις παρειές που είναι κάθετες στη διεύθυνση της οριζόντιας φόρτισης. Οι οπλισμοί είναι 3Φ10 διαμήκη στις δύο αυτές πλευρές. Οι συνδετήρες αντιστοιχούν σε Φ6/150.



Σχ.4.1 Τομή και κάτοψη υποστυλώματος S1

Απαραίτητη είναι η γνώση των αντοχών του και της ικανότητάς απόκρισής του ώστε να μπορέσουμε στη συνέχεια να το συγκρίνουμε με τα ενισχυμένα. Το σκυρόδεμα είναι ποιότητας C35, ενώ υπάρχουν και δοκίμια δοκιμής για την αντοχή του. Η τιμή που έδειξαν τα δοκίμια ήταν 34,6MPa. Οι χάλυβες ήταν όλοι χαρακτηριστικής τιμής διαρροής S400, αλλά δε διαθέτουμε πειράματα για την πραγματική διαρροή, αντοχή και συμπεριφορά του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε.

Το πέδιλο όπου θεμελιώθηκε το υποστύλωμα συνδέθηκε με το πάτωμα του εργαστηρίου μέσω τεσσάρων προεντεταμένων ράβδων, κάθε μια τανυσμένη με 50kN. Οι οπλισμοί του υποστυλώματος συνεχίζονται και στο πέδιλο, το οποίο είναι επίσης

οπλισμένο. Η επιβολή της κατακόρυφης πίεσης διενεργείται μέσω συστήματος φόρτισης το οποίο προσπαθεί να διατηρήσει καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος σταθερή κατακόρυφη δύναμη 170kN. Είναι αδύνατον να κρατηθεί σταθερή αυτή η τιμή γι' αυτό ελέγχεται η τιμή και μετράται ώστε να γνωρίζουμε η στιγμή της μέγιστης απόκρισης σε ποια τιμή αντιστοιχείται. Η οριζόντια φόρτιση επιβάλλεται μέσω αυξανόμενης οριζόντιας δύναμης με υδραυλικό έμβολο τοποθετημένο οριζοντίως σε ύψος 1m από τη βάση του υποστυλώματος. Για την αποφυγή φαινομένων δευτέρας τάξης στη στάθμη της οριζόντιας φόρτισης έχει δημιουργηθεί κατάλληλη διάταξη για το σκοπό αυτό. Τιμές μετρήσεων μέσω μηκυσιομέτρων (strain gauges) υπάρχουν σε σημεία των οπλισμών στη βάση του προβόλου όπου αναμένεται η αστοχία, ενώ μετρώνται πάντα και οι μετατοπίσεις του υποστυλώματος.

#### 4.2.2. Προσομοίωση S1

Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του Ansys, προσομοιώνουμε το πείραμα αυτό με στόχο την όσο το δυνατόν ακριβέστερη λειτουργία των φυσικών μηχανισμών μέσα στο πρόγραμμα. Η γεωμετρία του δοκιμίου και του προσομοιώματος παραμένει η ίδια. Η διακριτοποίηση γίνεται σε σταθερό κάρναβο 2cm για όλα τα πεπερασμένα στοιχεία. Αλλάζουμε κατά τον ελάχιστο δυνατό βαθμό την ακριβή στάθμη των οπλισμών ώστε οι συνδετήρες να συμπίπτουν πάνω στον κάρναβο. Τα κέντρα βάρους των διαμήκων οπλισμών τοποθετούνται σε απόσταση 2cm από τις παρειές, δηλαδή ενός πεπερασμένου στοιχείου από αυτήν. Αυτό γίνεται πάλι ώστε να συμπίπτουν οι κόμβοι του στοιχείων σκυροδέματος και οπλισμών. Άλλωστε και στο πείραμα η επικάλυψη είναι ακριβώς όση θέτουμε και εμείς στο πρόγραμμα.

Το σκυρόδεμα όπως ήδη έχουμε αναπτύξει εισάγεται με στοιχείο SOLID65, ιδιότητες CONCRETE και την καμπύλη σ-ε του υλικού. Η μορφή της καμπύλης αυτής αποτελεί την κύρια διερεύνηση πάνω στο προσομοίωμα S1. Οι μορφές που δοκιμάζονται είναι οι c1, c2, c3, c4 και παρουσιάζονται και αναλύονται ξεχωριστά στη συνέχεια. Οι οπλισμοί εισάγονται με στοιχεία LINK180 και συνδέονται πλήρως με τα στοιχεία του σκυροδέματος στα οποία εφάπτονται. Οι επιλογή αυτή έχει εξηγηθεί προηγουμένως. Στα στοιχεία αυτά εισάγουμε το διάγραμμα του υλικού του χάλυβα μέσω 2 μορφών, τις s1 και s2. Με διερεύνηση στη συνέχεια καταλήγουμε στο βέλτιστο για τις αναλύσεις μας.

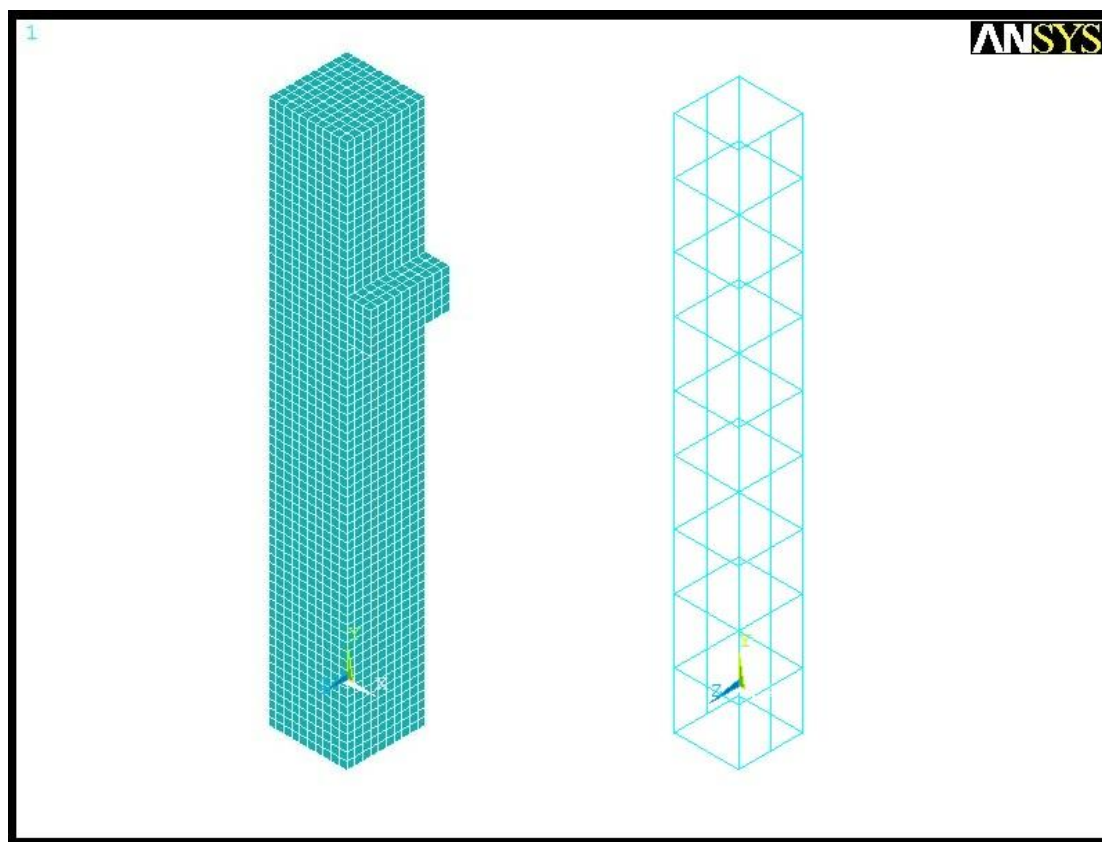
Όπως ήδη έχει αναφερθεί επιλέγουμε την πλήρη πάκτωση του προβόλου στη βάση του. Την κατακόρυφη φόρτιση την εισάγουμε με κατανεμημένης πίεσης μέσω ελαστικής πλάκας. Η οριζόντια φόρτιση εφαρμόζεται σε λάμα που έχει συνδεθεί πλήρως στο σώμα του υποστυλώματος στο κατάλληλο ύψος. Η λάμα είναι διαστάσεων 100x200x6. Τόσο η λάμα όσο και η πλάκα είναι στοιχεία SOLID185 πλήρως ελαστικών ιδιοτήτων.

Η φόρτιση εισάγεται σε βήματα. Αρχικά εφαρμόζεται η κατακόρυφη θλίψη, ώστε να αναπτύξουν τα στοιχεία τάσεις πριν την επιβολή της οριζόντιας φόρτισης. Η οριζόντια φόρτιση επιβάλλεται και αυτή σε επιμέρους βήματα (substeps) και αυξάνεται σταδιακά. Στις αναλύσεις όπου τα Ansys αδυνατεί να συγκλίνει, σταματά η ανάλυση στο τελευταίο βήμα όπου επετεύχθη η σύγκλιση.



#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

Στο Σχ.4.2 φαίνονται τα στοιχεία (elements) που εισάγαμε στο πρόγραμμα, τόσο τα τρισδιάστατα SOLID65 για τα στοιχεία σκυροδέματος και τα SOLID185 για τη λάμα και την πλάκα, όσο και τα LINK180 των οπλισμών.



Σχ.4.2 Πεπερασμένα στοιχεία υποστύλωματος S1

#### 4.2.3. Ανάλυση

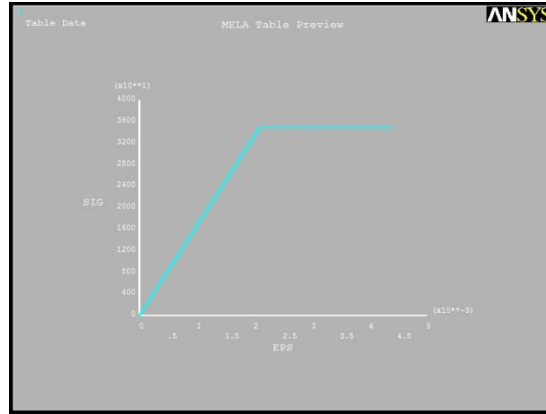
##### 4.2.3.1. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης

Στο σημείο αυτό εξετάζονται τα διαγράμματα υλικών για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Για το σκυρόδεμα έχουμε τα c1, c2, c3, c4 και για τον χάλυβα τα s1, s2. Το προσομοίωμα πάνω στο οποίο θα πιστοποιηθούν είναι το υποστύλωμα S1 (Specimen) της σειράς πειραμάτων των πορτογάλων Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005) που παρουσιάσαμε.

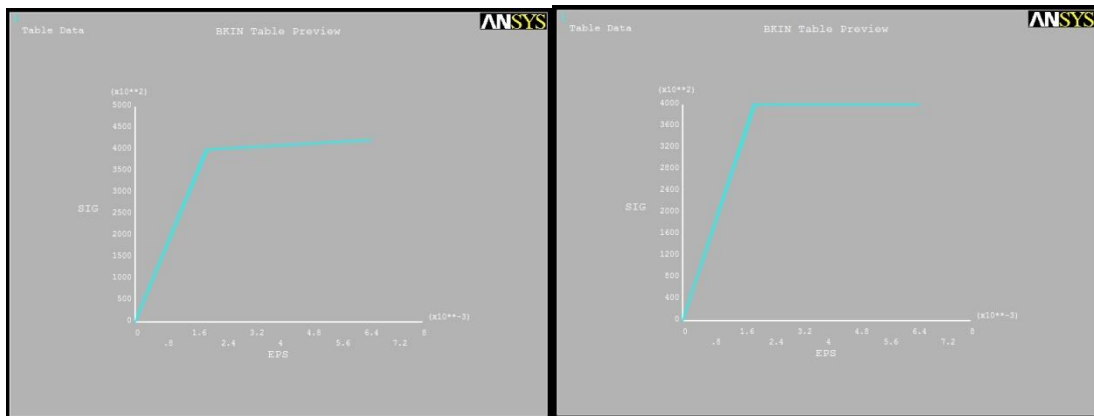
*Ανάλυση με διάγραμμα σκυροδέματος c1 και χάλυβα s1 ή s2*

Το διάγραμμα σκυροδέματος c1 όπως παρουσιάστηκε και στο υποκεφάλαιο 3.2 έχει την πιο απλουστευτική μορφή ενός διγραμμικού υλικού. Πράγματι διαπιστώθηκε ότι αυτό βοήθησε στη σύγκλιση και στο χρόνο επίλυσης από το πρόγραμμα Ansys. Όπως αναμενόταν η απουσία φθιτού θα μας οδηγούσε σε κάποια καμπύλη με κράτυνση ανάλογη αυτής του χάλυβα. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι η αρχική κλίση της καμπύλης push-over ταυτίζεται απόλυτα για το σκυρόδεμα c1, σε αντίθεση με τις επόμενες περιπτώσεις c2, c3,

c4. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν S400, χαρακτηριστική τιμή, και εμείς τον εισάγουμε εδώ με τα μοντέλα s1 και s2 ώστε να ελέγξουμε ποιο από τα 2 είναι το καταλληλότερο. Το μοντέλο ιδιοτήτων χάλυβα s1 έχει κράτυνση της τάξεως του 2,5%, όπως ισχύει στις περισσότερες ποιότητες χάλυβα στη φύση μετά τη διαρροή. Το μοντέλο s2 είναι τελείως ελαστοπλαστικό και το χρησιμοποιούμε στις αναλύσεις μας.

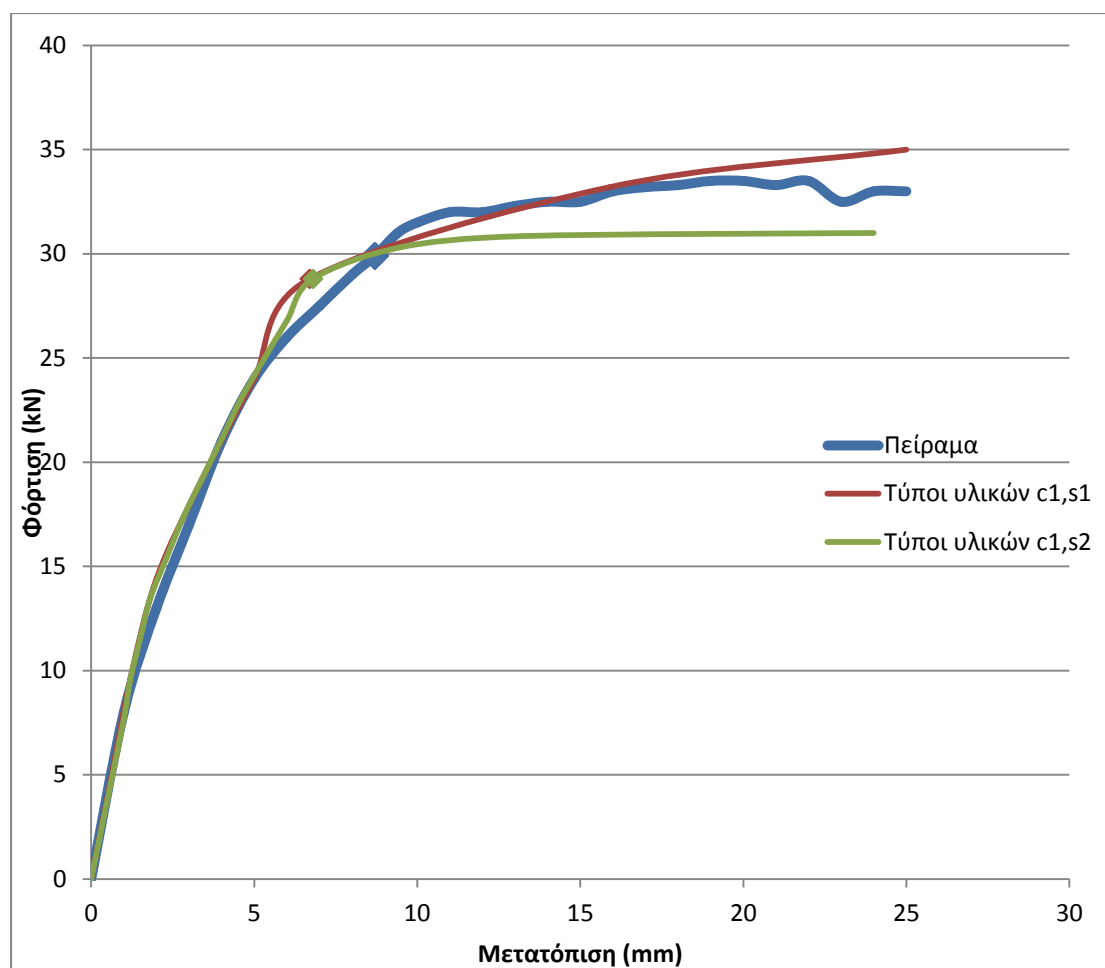


Σχ.4.3 Νόμος σκυροδέματος c1 υποστυλώματος S1



Σχ.4.4 Νόμοι χάλυβα s1 και s2 υποστυλώματος S1

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS



**Σχ.4.5** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης S1 για τύπους υλικών c1,s1 και c1,s2

Όπως αναμενόταν η απουσία φθιτού θα μας οδηγούσε σε κάποια καμπύλη με κράτυνση ανάλογη αυτής του χάλυβα. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι η αρχική κλίση της καμπύλης rush-over ταυτίζεται απόλυτα για το σκυρόδεμα c1, σε αντίθεση με τις επόμενες περιπτώσεις c2, c3, c4. Η διαρροή του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού στην ανάλυση παρατηρείται για φορτίο 28,8kN σε μετατόπιση 6,8mm και στις δύο περιπτώσεις. Η αντίστοιχη πειραματική τιμή σύμφωνα με τους ερευνητές είναι 29,9kN για μετατόπιση 8,7mm όπως καταγράφουν στην εργασία τους και φαίνεται και από τις καμπύλες του σχήματος.

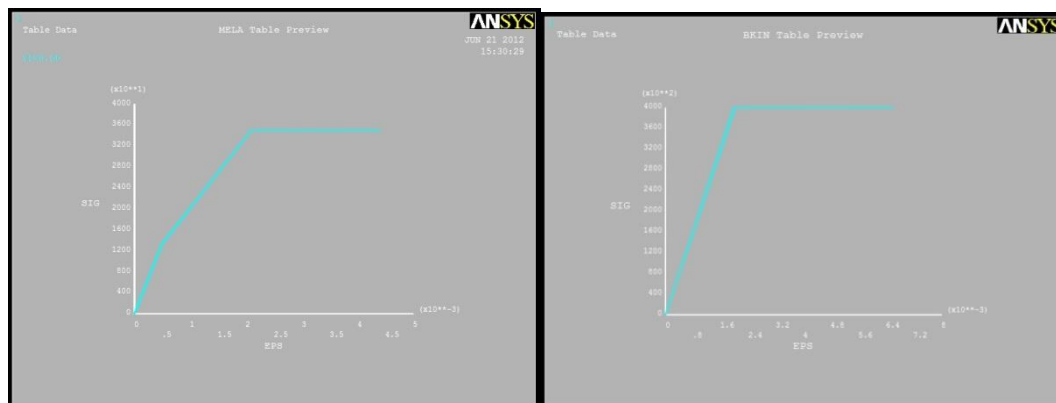
Η μέγιστη τιμή φορτίου που μετρήθηκε από τους πορτογάλους ερευνητές ήταν 33,3kN. Η τιμή αυτή επηρεάζεται όπως και όλες οι πειραματικές τους μετρήσεις από την ακριβή τιμή του κατακόρυφου αξονικού φορτίου που επιβάλλουν. Το μέγιστο φορτίο το επιτυγχάνουν για αξονικό φορτίο 175,7kN μεγαλύτερο δηλαδή από τη σταθερή τιμή 170kN που προσπαθούν και αυτοί στο πείραμα και εμείς στην ανάλυση να διατηρήσουμε σταθερή. Εμείς στην ανάλυση προσεγγίζουμε τη μέγιστη τιμή για μετατόπιση της τάξεως των 25mm στο κρατυνόμενο μέρος της. Στην περίπτωση του κρατυνόμενου χάλυβα πράγματι πλησιάζουμε εξαιρετικά τα πειραματικά αποτελέσματα και μετά τη διαρροή. Στην περίπτωση του ελαστοπλαστικού χάλυβα έχουμε απόκλιση της τάξεως του 6% για τη στιγμή της μέγιστης ανάπτυξης φορτίου. Αυτό οφείλεται ακριβώς στο γεγονός ότι στο μοντέλο s2

δε δίνουμε την επιπλέον προσφορά του χάλυβα που δίδει στην πραγματικότητα, αλλά χάνουμε σε απόδοση μικρό ποσοστό της κράτυνσης.

Παρότι με βάση τα ως τώρα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν η σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα πετυχαίνεται ακριβέστατα με κρατυνόμενο διάγραμμα σ-ε του χάλυβα (s1), εμείς επιλέγουμε στη συνέχεια της εργασίας μας να δουλέψουμε με το ελαστοπλαστικό s2 γνωρίζοντας το γεγονός ότι μπορεί να δίνει συστηματικά λίγο μικρότερες τιμές. Η επιλογή μας αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το πρόγραμμα μπορεί να συνεχίζει να αυξάνει την αναπτυσσόμενη δύναμη του δοκιμίου συνεχώς χωρίς να μας δίνει κάποιο ευκρινές άνω όριο. Στο στάδιο της επαλήθευσης μπορούμε εύκολα να εντοπίσουμε μέχρι ποιο σημείο τα αποτελέσματα του προγράμματος είναι ακριβή, στη συνέχεια όμως, στις διερευνήσεις που θα γίνουν κάτι τέτοιο είναι δύσκολο. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε συντηρητικά το μοντέλο s2 για να μπορούμε να παίρνουμε με σχετική ακρίβεια αλλά μεγαλύτερη σιγουριά την μέγιστη τιμή επιβαλλόμενου φορτίου.

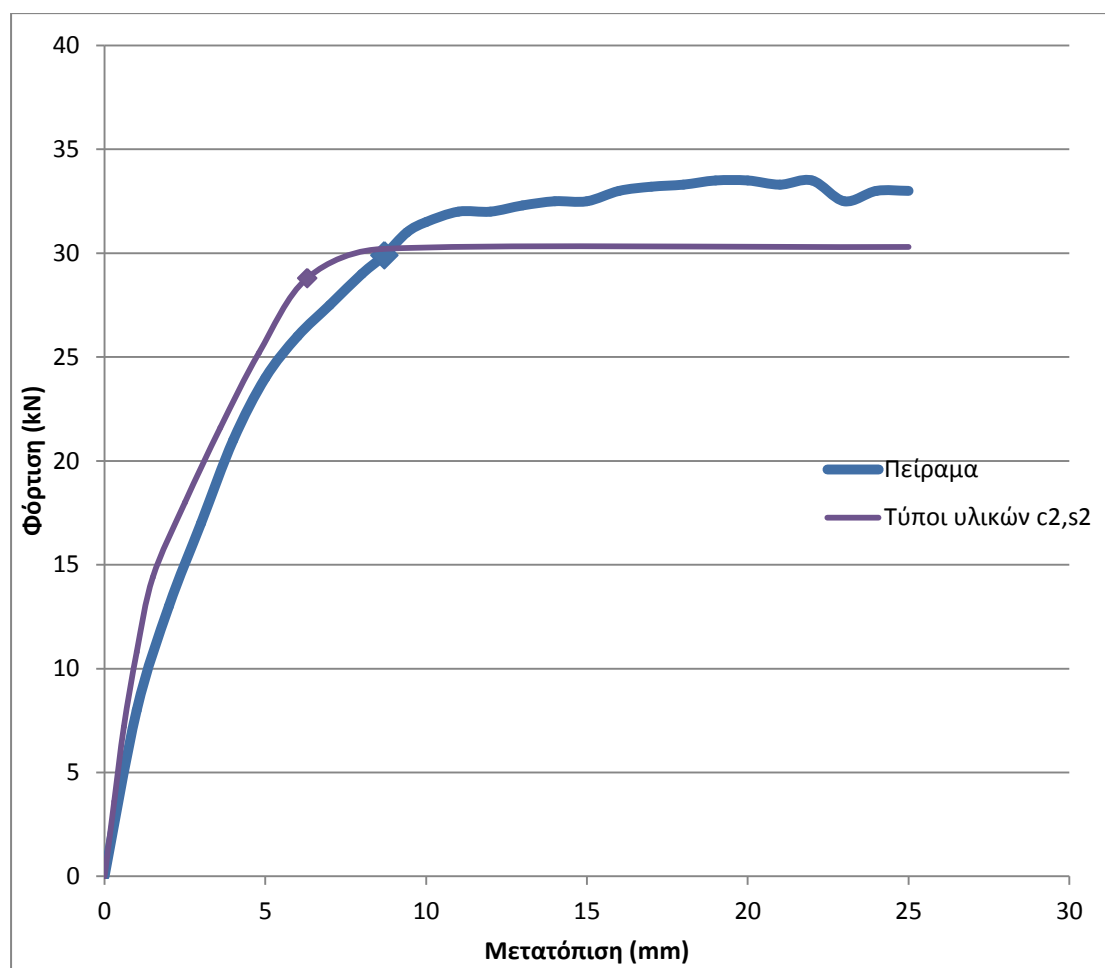
#### Ανάλυση με διάγραμμα σκυροδέματος c2

Το διάγραμμα σκυροδέματος c2 όπως ορίστηκε στο υποκεφάλαιο 3.2 έχει πολυγραμμική μορφή. Επειδή το διάγραμμα αυτό δίνει μεγαλύτερες τάσεις στο πρώτο τμήμα σε σχέση με το c1 είναι λογικό να παίρνουμε και στην καμπύλη rush-over λίγο μεγαλύτερες τιμές φορτίου σε σχέση με πριν. Επίσης οι κλίσεις των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχα μεγαλύτερες. Αφού το διάγραμμα του σκυροδέματος c2 έχει στο πρώτο του τμήμα κλίση μεγαλύτερη σε σχέση με το c1 είναι λογικό επακόλουθο να παίρνουμε απόκλιση στο αρχικό κομμάτι της καμπύλης σε σχέση με πριν με ελαφρώς αυξημένες τιμές φορτίου.



Σχ.4.6 Νόμοι σκυροδέματος c2 και χάλυβα s2 υποστυλώματος S1

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS



**Σχ.4.7** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος S1 για τύπους υλικών c2,s2

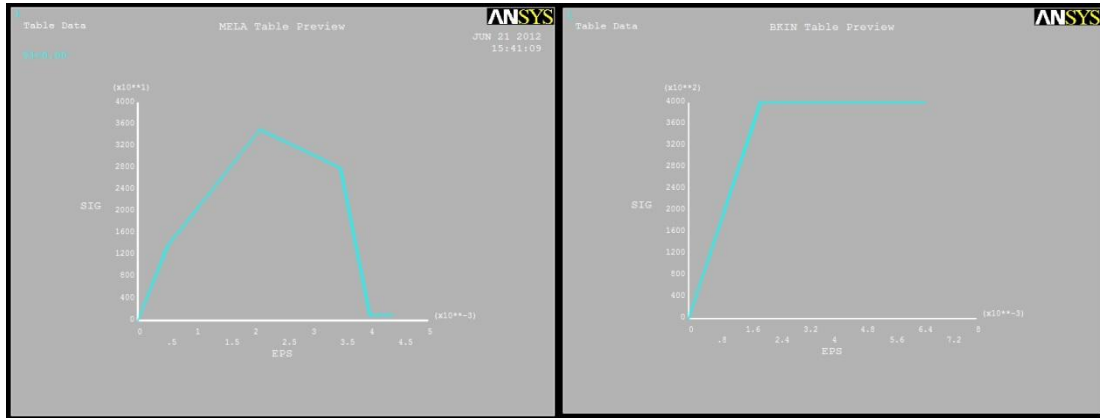
Η διαρροή του εφελκόμενου διαμήκουσ οπλισμού στην ανάλυση παρατηρείται στο σημείο 2 για φορτίο 28,8kN στα 6,3mm λίγο νωρίτερα σε σχέση με πριν. Η αντίστοιχη πειραματική τιμή είναι πάντα λίγο μεγαλύτερη 29,9kN, αλλά εμφανίζεται για μεγαλύτερη παραμόρφωση στα 8,7mm. Η συστηματικά μεγαλύτερη δυσκαμψία που θα συναντήσουμε στις αναλύσεις μας σε σχέση με τα φυσικά πειράματα μπορεί να χρεωθεί κυρίως στη συνθήκες πλήρους πάκτωσης που θέσαμε στη βάση του προβόλου μας.

Τη μέγιστη τιμή πάλι την πετυχαίνουμε όπως αντικατοπτρίζεται στο Σχ.4.7 διάγραμμα για μετατοπίσεις 20-25mm. Ο τρόπος προσέγγισης μοιάζει αρκετά με την περίπτωση του c1 για s2 ειδικά μετά το σημείο διαρροής όπου οι αναλυτικές καμπύλες είναι παράλληλες.

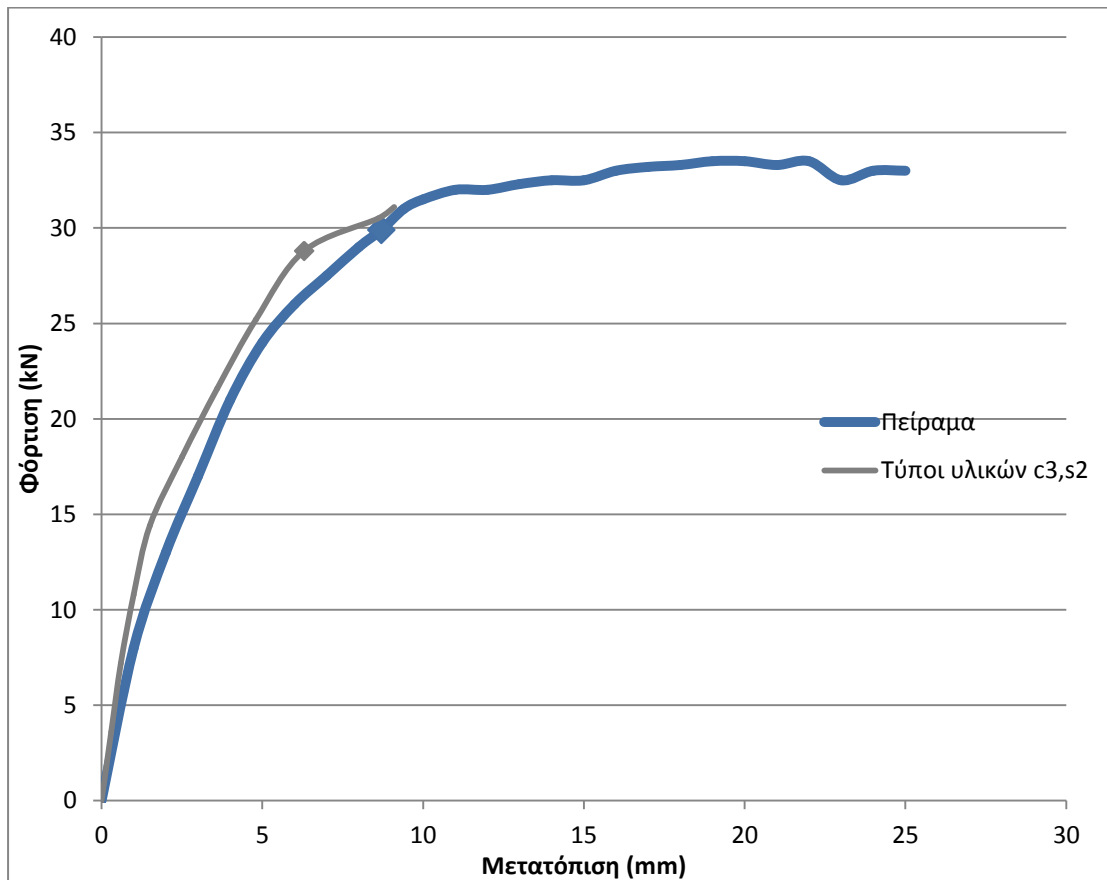
#### *Ανάλυση με διάγραμμα σκυροδέματος c3*

Το διάγραμμα σκυροδέματος c3 έχει πολυγραμμική μορφή και εισάγει και το φθιτό κλάδο του υλικού. Η αναμενόμενη δυσκολία σύγκλισης είναι εμφανής στην πρώτη μας ανάλυση με το υλικό c3, γι'αυτό και δοκιμάζουμε τα όρια σύγκλισης ελαστικοποιώντας τα, στην προσπάθεια να μπορέσει το Ansys να προχωρήσει. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται

ότι για τα τυπικά όρια σύγκλισης που χρησιμοποιούμε η ανάλυση σταματά στα 10mm, τη στιγμή που το δοκίμιο μόλις έχει διαρρεύσει αλλά δε μπορεί να ακολουθήσει ούτε κρατυνόμενο, ούτε φθίνοντα κλάδο. Χαλαρώνοντας τα όρια επιτρέπουμε στο Ansys να φορτίσει τον πρόβολο έως τα 17mm. Παρ'όλα αυτά τα προβλήματα αστάθειας είναι εμφανή και ενώ πιάνουμε ακριβώς την περιοχή της διαρροής στη συνέχεια αποκλίνουμε σημαντικά από το πείραμα. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ενώ η χαλάρωσης των ορίων της σύγκλισης βοηθά στη συνέχιση της ανάλυσης, προκαλεί μεγάλη απόκλιση λόγω της συνεχούς άθροισης του σφάλματος σε κάθε επαυξητικό βήμα της ανάλυσης.



Σχ.4.8 Νόμοι σκυροδέματος c3 και χάλυβα s2 υποστυλώματος S1



Σχ.4.9 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος S1 για τύπους υλικών c3,s2

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

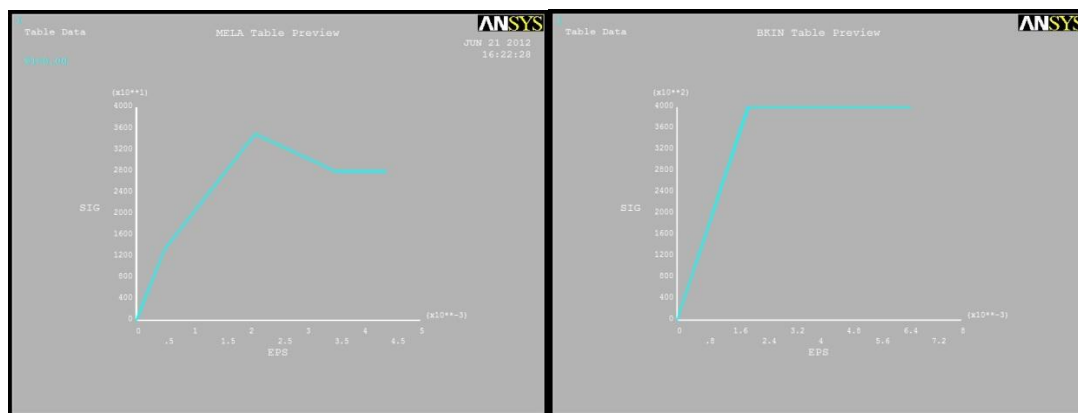
Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες του σκυροδέματος c3 και c2 ταυτίζονται μέχρι το σημείο διαρροής και αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού μέχρι εκείνο το σημείο, οι φορτίσεις αντιστοιχούν σε καταπονήσεις των υλικών σε μικρές στάθμες, όπου τα διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  του σκυροδέματος ταυτίζονται.

Με τα τυπικά όρια σύγκλισης η διαρροή του εφελκόμενου διαμήκους σπλισμού στην ανάλυση παρατηρείται στο σημείο 2 για φορτίο 28,8kN και 6,3mm ίδιο με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

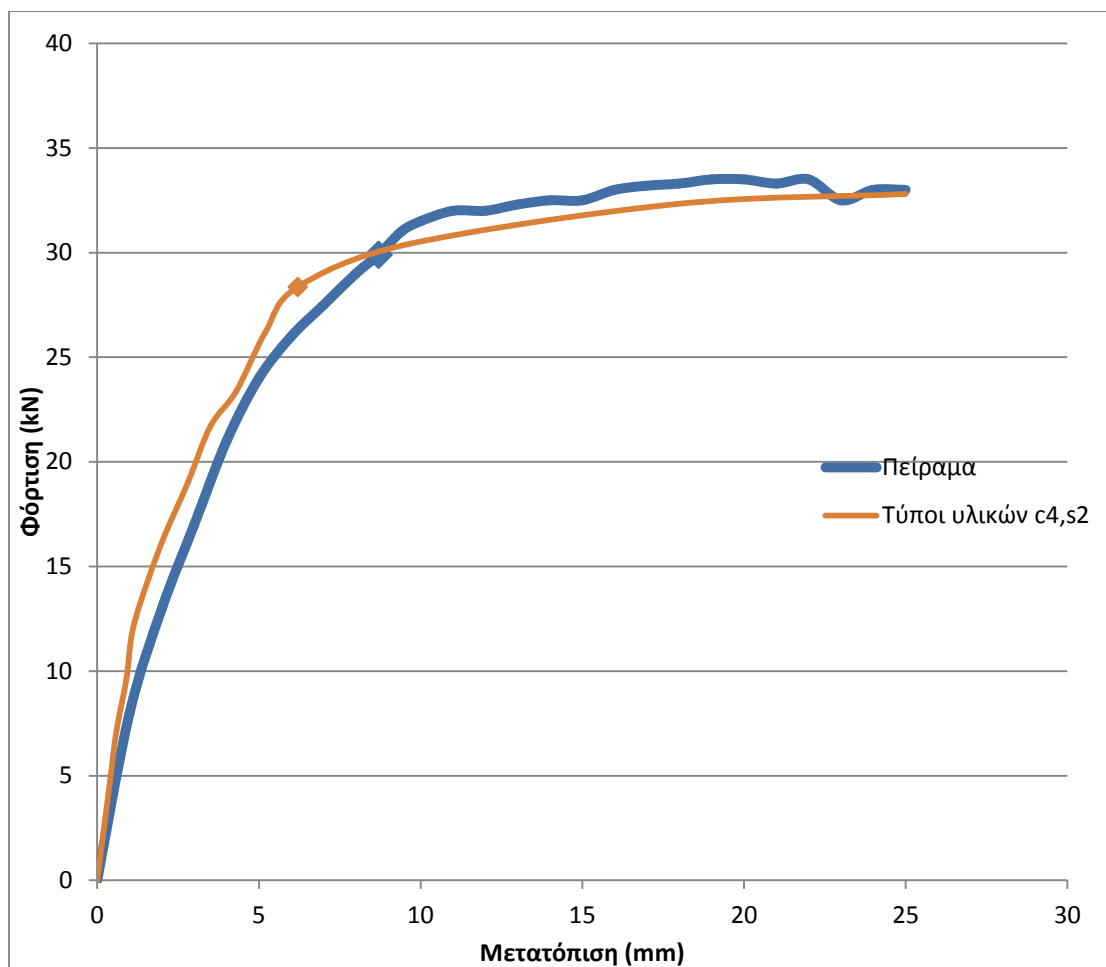
##### *Ανάλυση με διάγραμμα σκυροδέματος c4*

Έχοντας δει τη σύγκλιση των ως τώρα διαγραμμάτων, δοκιμάζουμε και το διάγραμμα c4, το οποίο αποτελεί μια βελτιστοποίηση των προηγούμενων προσπαθώντας να αποφύγουμε τα τεράστια προβλήματα σύγκλισης του νόμου c3 αλλά εισάγοντας φθίνοντα κλάδο. Ο νόμος c4, όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι ίδιος με το νόμο c2 μέχρι τη μέγιστη τάση  $\sigma$  του σκυροδέματος και στη συνέχεια αντί να διατηρείται σταθερή πέφτει ελαφρώς.

Τα διαγράμματα που εισάγαμε για την τελευταία δοκιμή είναι c4 και s2, που παρουσιάζονται και στο Σχ.4.10



**Σχ.4.10** Νόμοι σκυροδέματος c4 και χάλυβα s2 υποστυλώματος S1



**Σχ.4.11** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος S1 για τύπους υλικών c4,s2

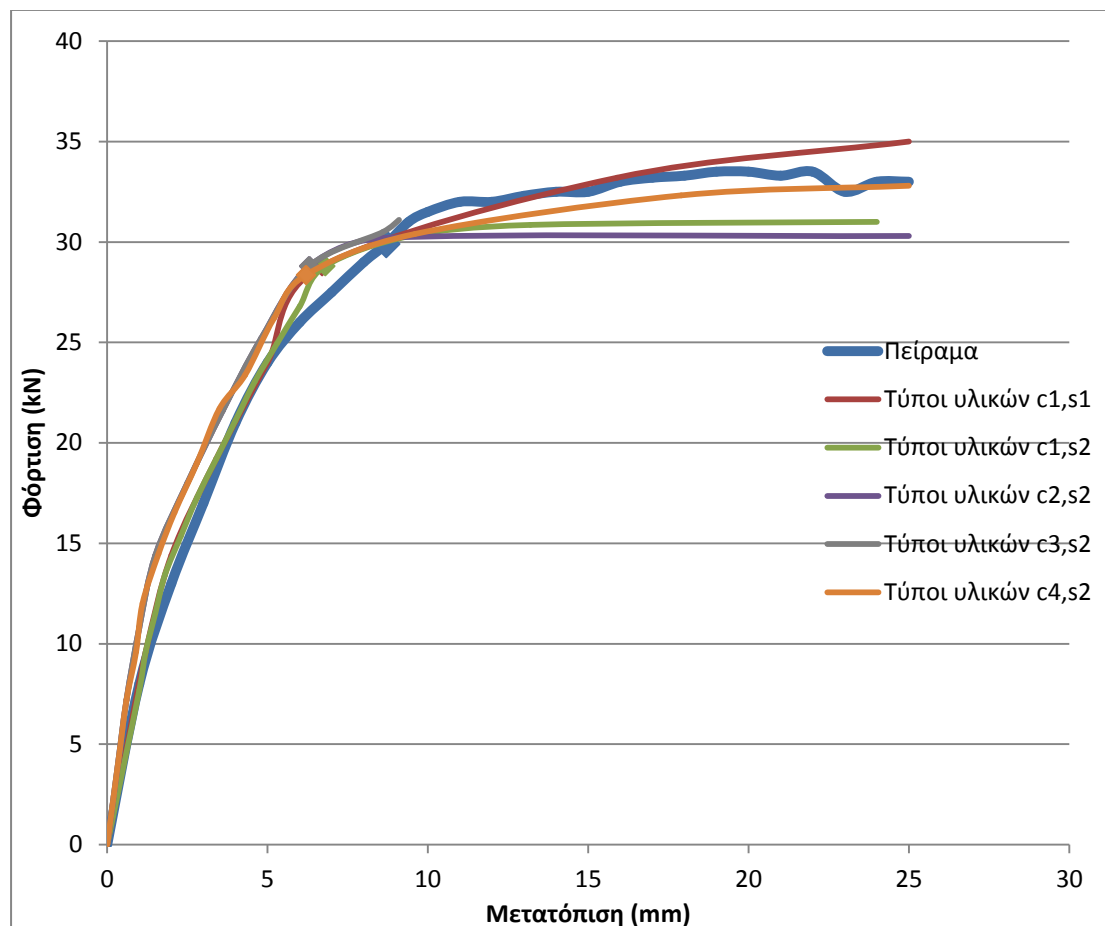
Η σημαντική βελτίωση που παρατηρούμε σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις αφορά το τμήμα μετά τη διαρροή. Παρότι έχουμε ελαστοπλαστικό χάλυβα, νόμου s2, η καμπύλη απόκρισης αγγίζει τη μέγιστη πειραματική τιμή. Αυτό δείχνει ότι ο νόμος c4 είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα από τον c2 και δίνει τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να συγκλίνει στις επιθυμητές τιμές.



#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

##### Σύγκριση διαγραμμάτων P-δ

Παραθέτουμε τη συνολική εικόνα των δοκιμών που κάναμε για τους εισαγόμενους νόμους των υλικών.



Σχ.4.12 Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων S1

Παρατηρούμε ότι το πείραμα προσεγγίζεται αρκετά καλά σε όλες τις δοκιμές, αλλά με κάποιες χαρακτηριστικές αποκλίσεις. Το σημείο διαρροής της καμπύλης σε όλες τις περιπτώσεις είναι στα 28,6kN έναντι 29,9kN στο πείραμα. Η σημαντική απόκλιση εντοπίζεται στην τιμή μετατόπισης τη στιγμή της διαρροής όπου τα προσομοιώματά μας διαρρέουν για 6,3mm έναντι 8,9mm του πειράματος. Πριν το σημείο αυτό η πειραματική καμπύλη σχεδόν ταυτίζεται για το νόμο c1, αλλά πλησιάζει πολύ ικανοποιητικά και για τους υπόλοιπους. Στο κομμάτι πέραν του σημείου διαρροής παρουσιάζονται κάποιες αποκλίσεις. Ευλόγως συμπεραίνουμε ότι το διάγραμμα χάλυβα που εισάγουμε και ιδίως η κλίση στην περιοχή κράτυνσης επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό.

Το κομμάτι της καμπύλης μετά τη διαρροή προσεγγίζεται ακριβέστερα είτε με κρατυνόμενο νόμο χάλυβα s1 είτε με το νόμο c4 για το σκυρόδεμα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Πρέπει να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι ενώ για το σκυρόδεμα είχαμε από τους ερευνητές τιμές για την θλιπτική αντοχή του, για το χάλυβα δεν υπήρχαν στοιχεία

πέρα από την ονομαστική τιμή διαρροής. Αυτό μπορεί να δικαιολογήσει κάποιες από τις πολύ μικρές αποκλίσεις που έχουμε στη σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

#### *Δυσκαμψία*

Η πειραματική μέτρηση για το δοκίμιο S1 έδωσε τέμνουσα δυσκαμψία στο σημείο διαρροής 3,42MN/m. Οι τιμές που παίρνουμε από τις αναλύσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες. Μετρούμε τέμνουσα δυσκαμψία στη διαρροή 4,54MN/m. Η απόκλιση είναι της τάξεως του 25% αλλά δεν αντικατοπτρίζει την πολύ καλή προσέγγιση που έχει γίνει στο σύνολο της ανάλυσης. Οι εφαπτομενικές δυσκαμψίες ακολουθεί εξαιρετικά τη φύση σε όλα τα στάδια της φόρτισης, τόσο μετά την πρώτη ρηγμάτωση όσο και πριν τη διαρροή. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στα περισσότερα συγκρίσιμα μεγέθη είναι τις τάξεως του 5%.

Οι λόγοι που η διαρροή γίνεται για μικρότερη μετατόπιση μπορεί να είναι αρκετοί. Ο σημαντικότερος ίσως είναι αυτός που αναπτύχθηκε και στο υποκεφάλαιο 3.5. Η θεμελίωση στο πείραμα γίνεται σε πραγματικό πέδιλο πεπερασμένων διαστάσεων που στηρίζεται με προεντεταμένες ράβδους στο πάτωμα του εργαστηρίου. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει ενδοσημότητα στη στήριξη που δεν είναι πλήρης πάκτωση όπως αυτή που εισάγουμε εμείς απλοποιητικά στο Ansys. Να σημειωθεί δε ότι στη φύση η στροφική δυνατότητα που υπάρχει στα υποστυλώματα που στηρίζονται σε δοκούς είναι ακόμα μεγαλύτερη.

Από τις δοκιμές που έγιναν συμπεραίνεται επίσης ότι η αρχική δυσκαμψία του δοκιμίου αλλάζει με βάση το νόμο του σκυροδέματος που εισάγουμε. Για το νόμο c1 όπου η αρχική κλίση του διαγράμματος σ-ε είναι μικρότερη, παίρνουμε και ελάχιστη αρχική δυσκαμψία δοκιμίου.

Η γενικότερη συμπεριφορά των υποστυλωμάτων ανεξαρτήτως διαγράμματος σκυροδέματος c και χάλυβα s είναι η ίδια, οπότε στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα της ανάλυσης για σκυρόδεμα c4 και χάλυβα s2 αφού με ελάχιστες διαφορές τα συμπεράσματα είναι κοινά σε όλες τις περιπτώσεις.

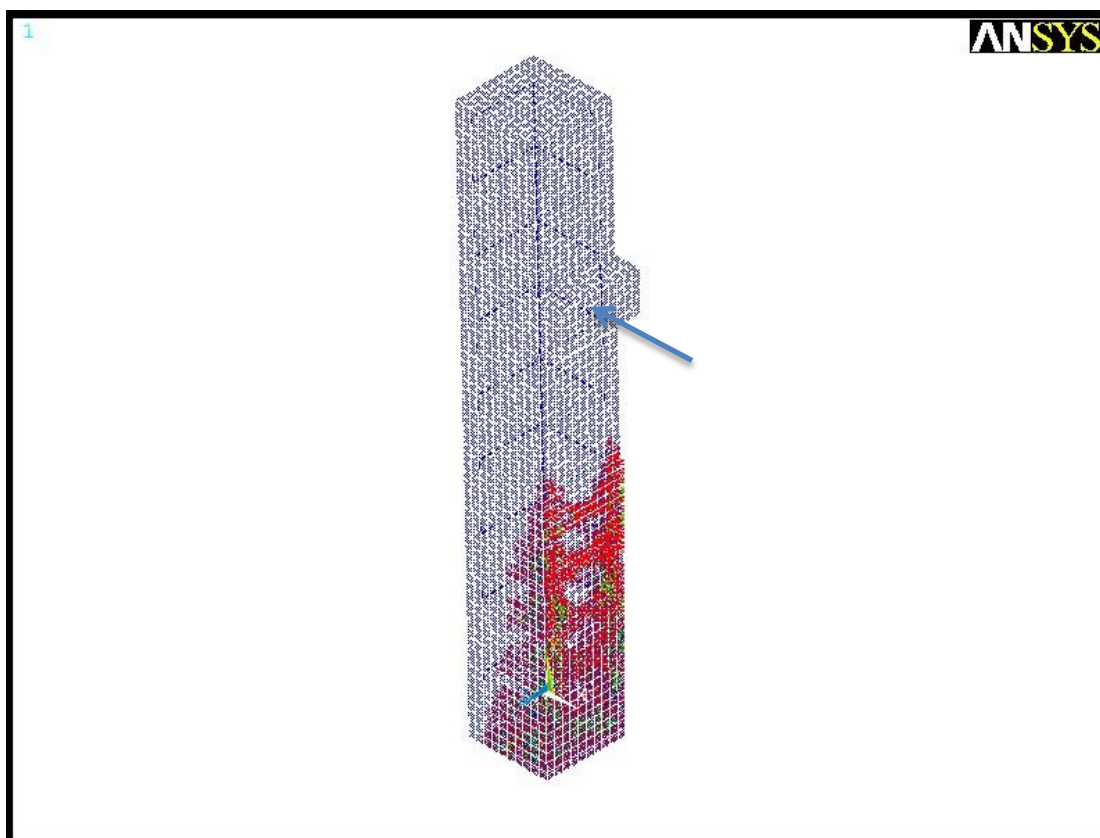
#### **4.2.3.2. Μορφή αστοχίας υποστυλώματος**

Η αστοχία του υποστυλώματος είναι καμπτική. Όλη η σειρά των πειραμάτων των Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005) αστοχεί σε πλάστιμα με διαρροή των διαμήκων οπλισμών και μεγάλες πλαστιμότητες. Δυστυχώς, στις αναλύσεις μας δεν έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε τις τιμές της αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας καθώς οι καμπύλες μας περιορίζονται μέχρι την επίτευξη της μέγιστης τιμής φορτίου. Δεν μπορούμε να ακολουθήσουμε τον φθίνοντα κλάδο, ώστε να δούμε τη συμπεριφορά του υποστυλώματος μέχρι εκείνη τη στιγμή. Παρ'όλα αυτά και στις προσομοιώσεις μας είναι εμφανής η καμπτική αστοχία των υποστυλωμάτων και το αντιλαμβανόμαστε όπως εξηγείται παρακάτω.

Η μορφή αστοχίας του προβόλου κατά την ερευνητική αναζήτηση είναι μια οριζόντια αστοχία στη βάση του δοκιμίου αφότου έχουν διαρρεύσει οι διαμήκεις οπλισμοί.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

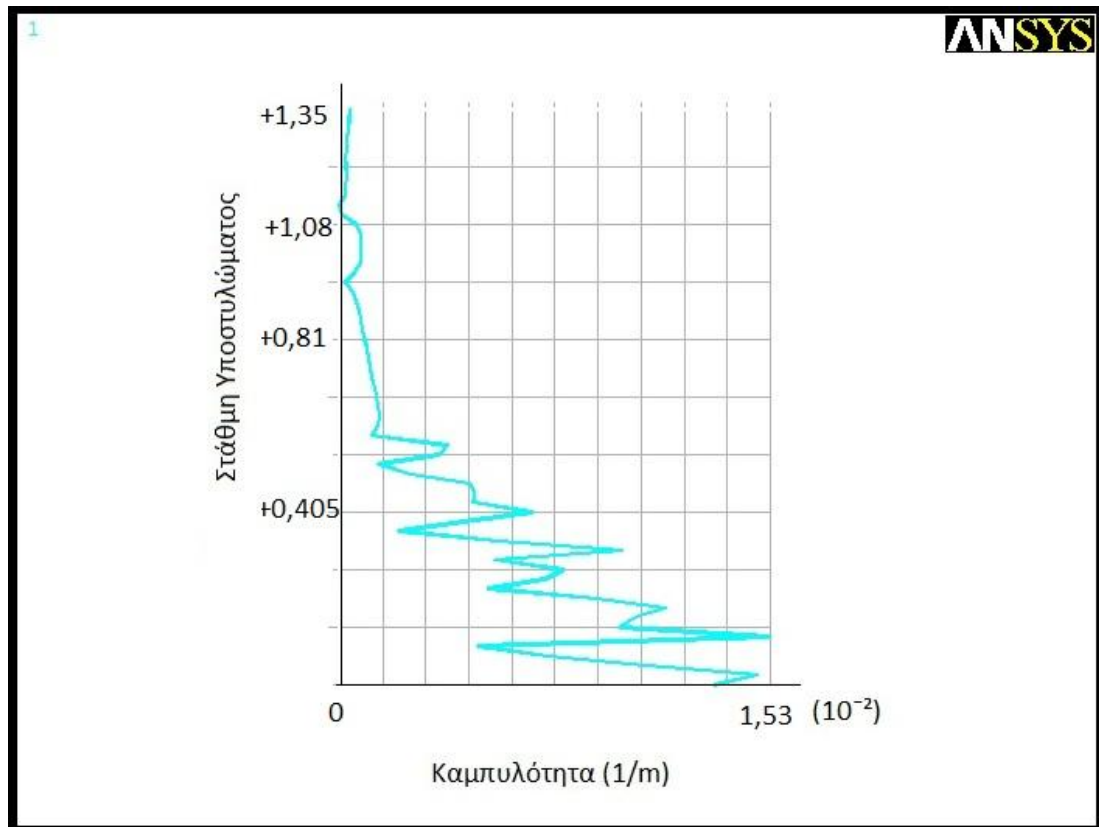
Τέτοιας μορφής αστοχίας παίρνουμε και από την ανάλυση στο Ansys. Η ποιοτική ερμηνεία της αστοχίας του υποστυλώματος και των στοιχείων του σκυροδέματος έχει μεγάλη σημασία στην ορθή προσέγγιση της φύσης μέσω του προγράμματος. Στο Σχ.4.13 φαίνεται μια τυπική συγκέντρωση στοιχείων σκυροδέματος που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό. Όπως αναλύθηκε και στο υποκεφάλαιο 3.2 το Ansys καταστρέφει τα στοιχεία σκυροδέματος μηδενίζοντας τη δυσκαμψία σε τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Η πρώτη αστοχία του πεπερασμένου στοιχείου εμφανίζεται με κόκκινο κύκλο στο σχήμα, η δεύτερη αστοχία του ίδιου στοιχείου με πράσινο κύκλο και η τρίτη με μπλε. Παρατηρούμε λοιπόν ότι πράγματι η αστοχία εμφανίζεται στο εφελκυσμένο μέρος του υποστυλώματος περί τη βάση του. Πρέπει να επισημανθεί και πάλι ότι η αστοχία από θλίψη των στοιχείων σκυροδέματος έχει απενεργοποιηθεί για τη διευκόλυνση της σύγκλισης. Έτσι δεν εμφανίζεται καμία αστοχία από θλίψη στοιχείου σκυροδέματος. Στην πορεία της φόρτισης του υποστυλώματος οι αστοχίες απλώνονται προς τα πάνω αλλά η μορφή της αστοχίας παραμένει πάντα καμπτική. Χαρακτηριστική είναι και η συγκέντρωση τάσεων άρα και αστοχιών στα στοιχεία σκυροδέματος που ενώνονται με τον οπλισμό, κυρίως τους διαμήκεις αλλά και τους συνδετήρες. Το φαινόμενο αυτό οξύνεται λόγω της πλήρους σύνδεσης των δύο υλικών στην προσομοίωση, παρ' όλ' αυτά μπορεί να υπονοήσει την αστοχία συνάφειας στις περιοχές αυτές.



Σχ.4.13 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος S1

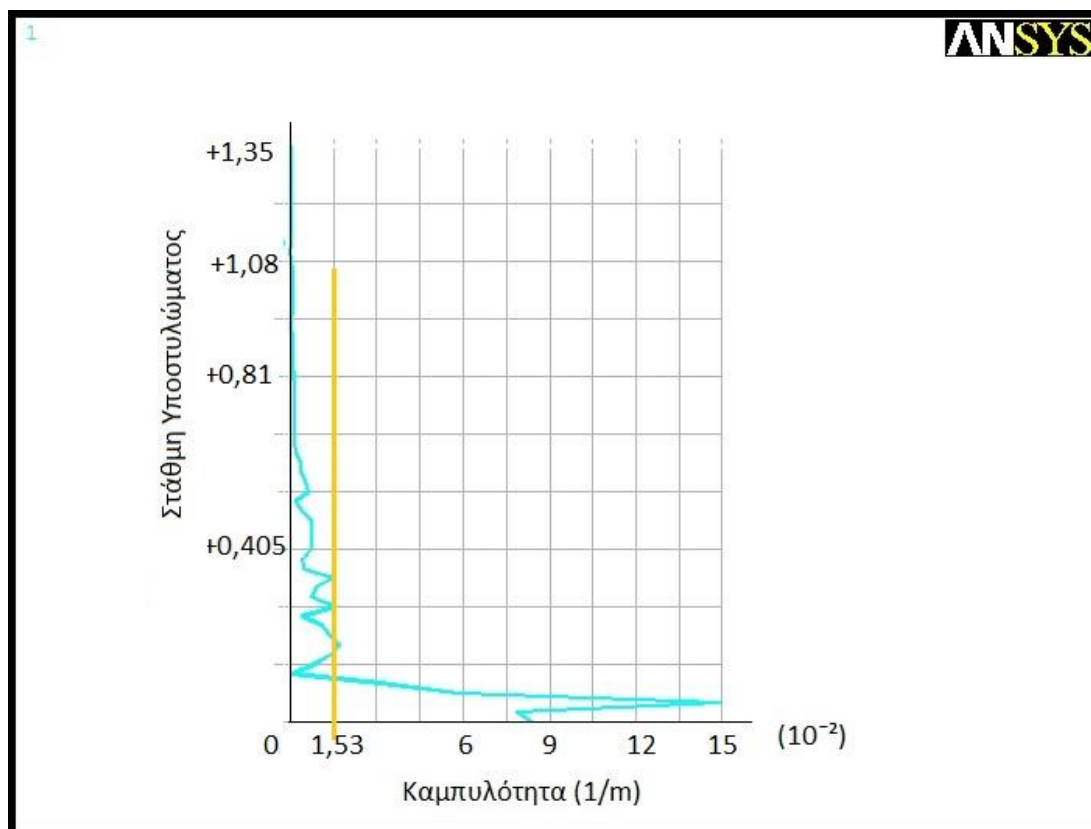
#### 4.2.3.3. Καμπυλότητα υποστυλώματος καθ' ύψος

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι τιμές της καμπυλότητας της διατομής καθ' ύψος του υποστυλώματος για τη φάση της διαρροής του υποστυλώματος και για τη στιγμή όπου έχουμε μέγιστη τη απόκριση που πήραμε από την ανάλυση. Ισχύει η επιπεδότητα των διατομών και έτσι υπολογίζοντας την παραμόρφωση του σκυροδέματος στις εκατέρωθεν πλευρές της διατομής μπορούμε να υπολογίσουμε τη στροφή. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις της παραμόρφωσης των διαμήκων οπλισμών για το σκοπό αυτό. Η μορφή άλλωστε της καμπύλης παραμόρφωσης των διαμήκων εφελκόμενων ράβδων και του διαγράμματος καμπυλότητας αναμένεται να μοιάζει.



Σχ.4.14 Καμπυλότητα S1 καθ' ύψος στη διαρροή

Το στιγμιότυπο του Σχ.4.14 αντιστοιχεί στη στιγμή διαρροής όπου παρατηρείται μια ομαλή σχετικά κατανομή της καμπυλότητας καθ' ύψος. Στη συνέχεια βλέπουμε την καμπυλότητα σε μεταγενέστερη φάση φόρτισης, τη στιγμή που μας έδωσε η ανάλυση τη μέγιστη μετατόπιση.



Σχ.4.15 Καμπυλότητα S1 καθ' ύψος στο μέγιστο φορτίο

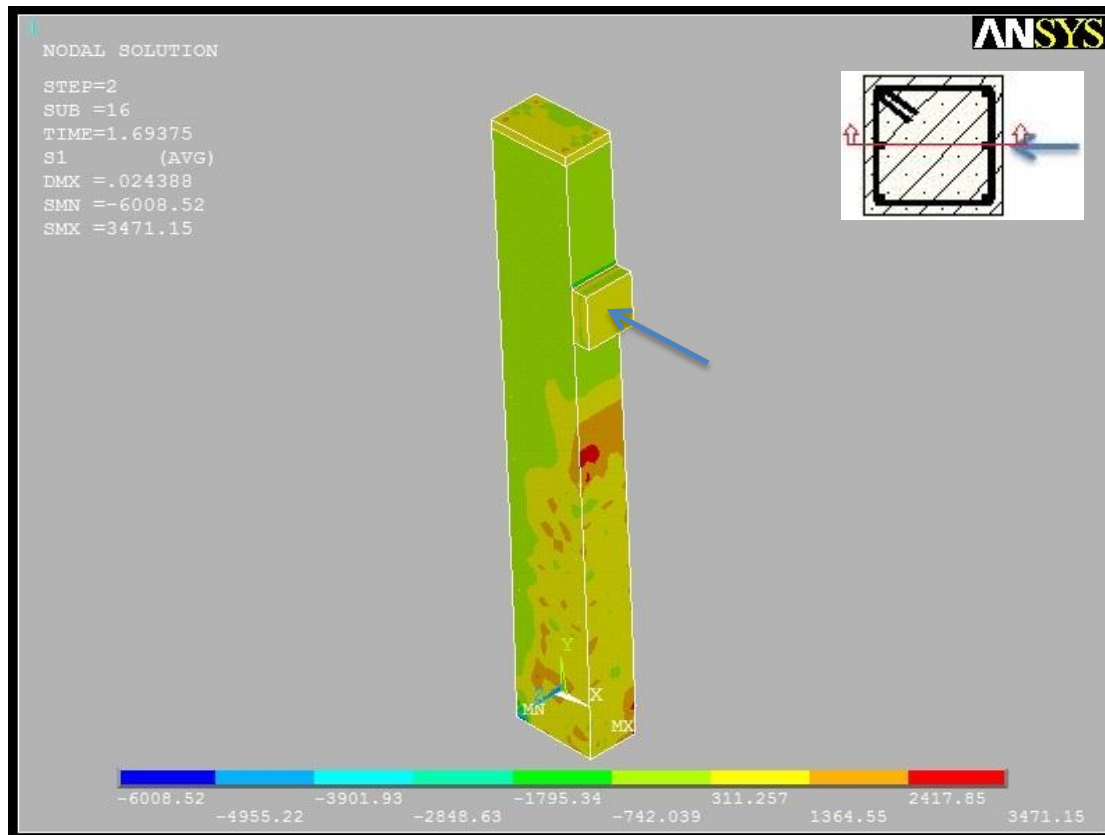
Παρατηρώντας τα διαδοχικά στιγμιότυπα για τις καμπυλότητες του υποστυλώματος παρατηρούμε ότι μετά τη διαρροή η παραμόρφωση και η στροφή συγκεντρώνεται δυσανάλογα στην περιοχή της βάσης. Εκεί άλλωστε σχηματίζεται και η πλαστική άρθρωση, ενώ από τη δεύτερη εικόνα του στιγμιότυπου της μέγιστης μετατόπισης μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος της περιοχής αυτής. Από τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να πάρουμε μια ελάχιστη τιμή για την αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα σε τιμές καμπυλοτήτων. Εδώ παίρνουμε  $\mu > 10$  σε όρους καμπυλοτήτων διατομής. Επειδή όμως δεν έχουμε τα στοιχεία για τη στιγμή της αστοχίας αλλά για κάποια νωρίτερη στιγμή, δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την πραγματική τιμή της πλαστιμότητας.

#### 4.2.3.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος

Απεικονίζουμε την πρώτη κύρια τάση σε κατακόρυφη τομή του υποστυλώματος παράλληλη στη διεύθυνση φόρτισης. Με την τομή αυτή βλέπουμε και το εσωτερικό του. Οι μέγιστες θλιπτικές κύριες τάσεις που αναπτύσσονται είναι της τάξεως των 6MPa, απέχει λοιπόν πολύ από την αστοχία. Αυτό είχαμε δεχθεί άλλωστε και ως δεδομένο για να αφαιρέσουμε τη δυνατότητα αστοχίας του σκυροδέματος σε θλίψη. Οι θλιπτικές αυτές τάσεις συγκεντρώνονται κυρίως στη βάση του προβόλου στη θλιβόμενη πλευρά.

Οι εφελκόμενες κύριες τάσεις πιάνουν, στη φάση της μέγιστης μετατόπισης, τα 3,5MPa. Η τιμή αυτή ξεπερνά και τη μέγιστη μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του C35. Είναι προφανές ότι έχουμε πολλές περιοχές με εφελκυστικές αστοχίες, αλλά ενδιαφέρον

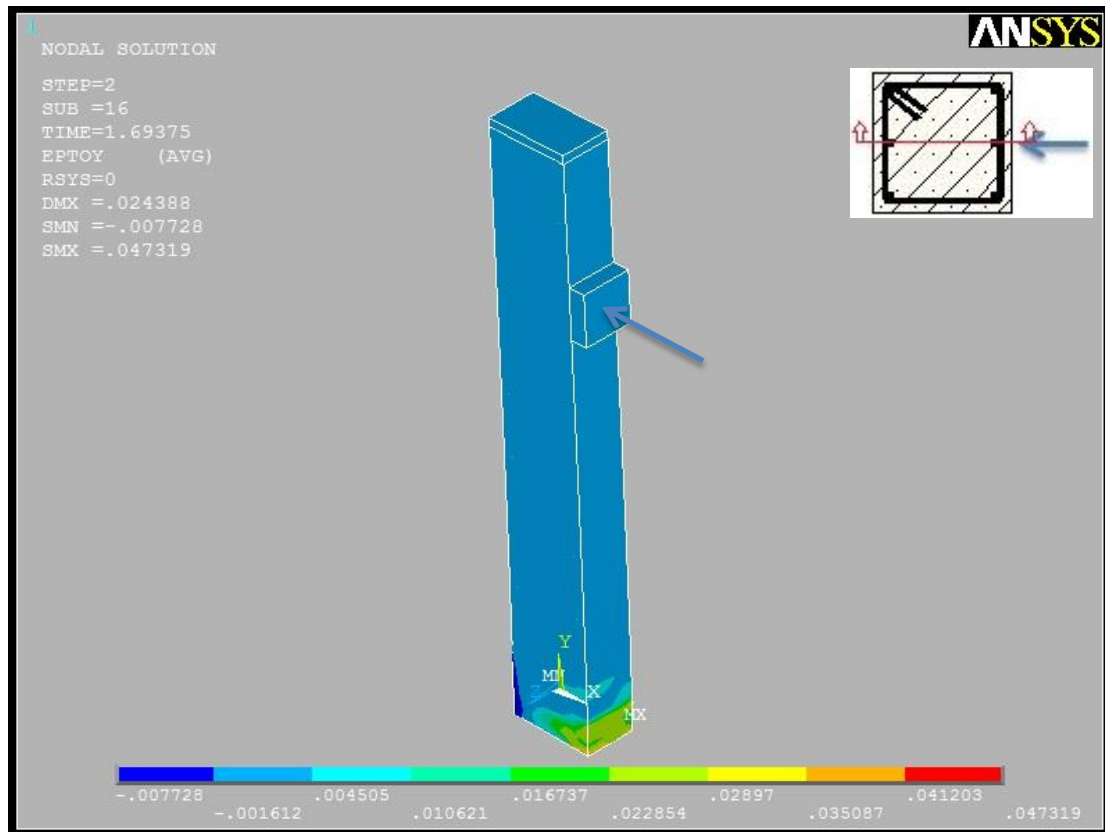
παρουσιάζει και οι περιοχές στις οποίες αναπτύσσονται. Η περιοχή της λάμας παρουσιάζει μικρή τοπική επιβάρυνση λόγω της φόρτισης και δεν επηρεάζει τη λύση ούτε προκαλεί προβλήματα σύγκλισης.



**Σχ.4.16** Εφελκυστικές κύριες τάσεις σε τομή του S1

Η παραμόρφωση του σκυροδέματος σε περισφιγμένα υποστυλώματος είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθέσιμη πλαστιμότητα της διατομής του υποστυλώματος. Το αρχικό υποστύλωμα του προσομοιώματος S1 έχει συνδετήρες Φ6/150 σχετικά πυκνούς, οπότε αναμένεται να συνεισφέρει στην μέγιστη παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος. Στην προχωρημένη φάση της μεγάλης παραμόρφωσης που παρουσιάζουμε οι παραμορφώσεις στην εφελκυσόμενη περιοχή της βάσης είναι της τάξεως του 45%. Η τιμή αυτή προδίδει το σχηματισμό ρωγμής σε εκείνο το σημείο και την προχωρημένη παραμόρφωση και του χάλυβα. Στη θλιβόμενη περιοχή της βάσης η μέγιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση είναι 7%. Αυτό δείχνει την προσφορά της περισφιγξης στην παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος. Πρέπει να γίνει στο σημείο αυτό η επισήμανση ότι οι ακραίες τιμές που δίδονται από την ανάλυση είναι υψηλότερες από τις πραγματικές σε εκείνες περιοχές, καθώς τοπικά εμφανίζεται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων που δεν αντιστοιχεί στη μέση τάση της λίγο ευρύτερης περιοχής.

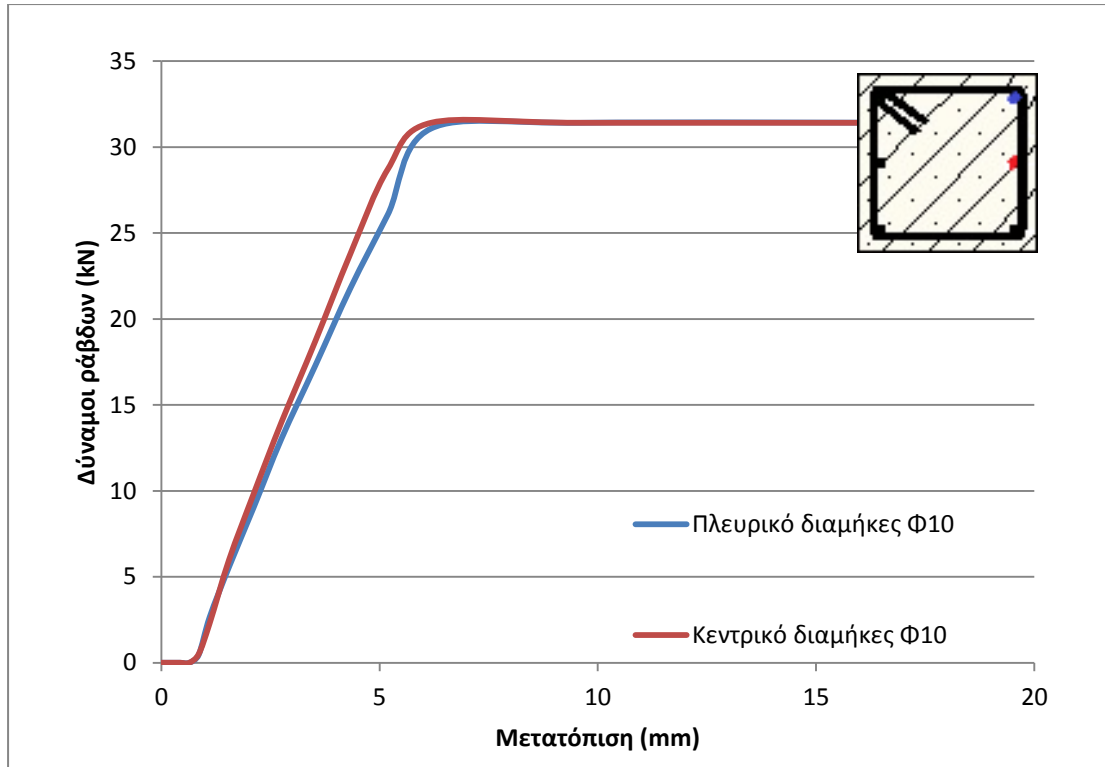
#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS



Σχ.4.17 Κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις σε τομή του S1

#### 4.2.3.5 Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σπλισμών

Όπως είδαμε ήδη το υποστυλώμα διαρρέει στα 6,3mm όταν διαρρέουν οι διαμήκεις εφελκόμενοι σπλισμοί του. Στο σχήμα φαίνονται οι δυνάμεις που αναπτύσσουν οι ράβδοι στη βάση του υποστυλώματος. Από τις 3 ράβδους της εφελκόμενης πλευράς της βάσης η κεντρική ράβδος φαίνεται ότι αποδίδει λίγο περισσότερο, μέχρι να διαρρεύσουν και οι τρεις σχεδόν ταυτόχρονα. Υπενθυμίζουμε ότι έχουμε επιλέξει να αναλύουμε με νόμο χάλυβα s2, ο οποίος είναι τελείως ελαστοπλαστικός.



Σχ.4.18 Δύναμη εφελκόμενων ράβδων του S1

#### 4.2.4. Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις που διερευνήσαμε η προσέγγιση ήταν πολύ καλή. Αυτό υποδηλώνει ότι ο τρόπος προσομοίωσης που χρησιμοποιούμε είναι στη σωστή κατεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά το βέλτιστο από τα διαγράμματα σκυροδέματος c1, c2, c3, c4 βγάζουμε τα εξής τελικά συμπεράσματα. Στις περιπτώσεις μη ενισχυμένων υποστυλωμάτων καλύτερο είναι να χρησιμοποιείται το c4, αφού μας δίνει καλύτερη προσέγγιση στο τμήμα μετά τη διαρροή. Στις περιπτώσεις όμως, των ενισχυμένων υποστυλωμάτων που θα δούμε στη συνέχεια προτείνεται η χρήση πιο απλού διαγράμματος χωρίς φθιτό κλάδο, οπότε θα χρησιμοποιείται το c2. Και τα δυο αυτά διαγράμματα στην επαλήθευση που παρουσιάστηκε δείχνουν να μη προσεγγίζουν την περιοχή της διαρροής, παρ'όλα αυτά δίνουν πιο καλά αποτελέσματα στο επόμενο κομμάτι.

Όσον αφορά το διάγραμμα του χάλυβα, αμέσως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να χρησιμοποιείται διάγραμμα χωρίς κράτυνση, δηλαδή το s2. Το πρόγραμμα επιλύοντας τις εξισώσεις που δίνουν τις τιμές των δυνάμεων με βάση κάποιο όριο σύγκλισης, συνήθως διευρυμένο, δίνει καμπύλες rush-over με συνεχώς αυξανόμενο κλάδο μετά τη διαρροή. Εξαιτίας αυτού θα είναι δύσκολο για το μηχανικό να εντοπίσει την ακριβή μέγιστη τιμή φορτίου που μπορεί να παραλάβει το υποσύλωμα. Αυτό βεβαίως σχετίζεται με τη μέθοδο επιβαλλόμενης φόρτισης και όχι μετατόπισης που έχουμε επιλέξει.



#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

Η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων χωρίς ενίσχυση S1 είναι ποιοτικώς η ίδια, ανεξαρτήτως διαγράμματος σκυροδέματος ή χάλυβα που μπορεί να εισάγουμε. Η συμπεριφορά του μη ενισχυμένου υποστυλώματος είναι καμπτική και η πλαστική άρθρωση σχηματίζεται στη βάση του προβόλου. Το γεγονός αυτό το αποδεικνύουν τόσο οι εμφανιζόμενες ρωγμές όσο και οι τιμές παραμορφώσεων το στοιχείων στην περιοχή αυτή. Συστηματικά η δυσκαμψία που υπολογίζουμε από το πρόγραμμα είναι μεγαλύτερη από τη φύση και οι λόγοι εξηγήθηκαν παραπάνω. Η μετατόπιση διαρροής είναι το μόνο στοιχείο που εντοπίσαμε ότι απέχει αρκετά στις αναλύσεις μας. Από την άλλη τόσο η τιμή φορτίου διαρροής όσο και μέγιστου φορτίου μπορούν να προσεγγισθούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

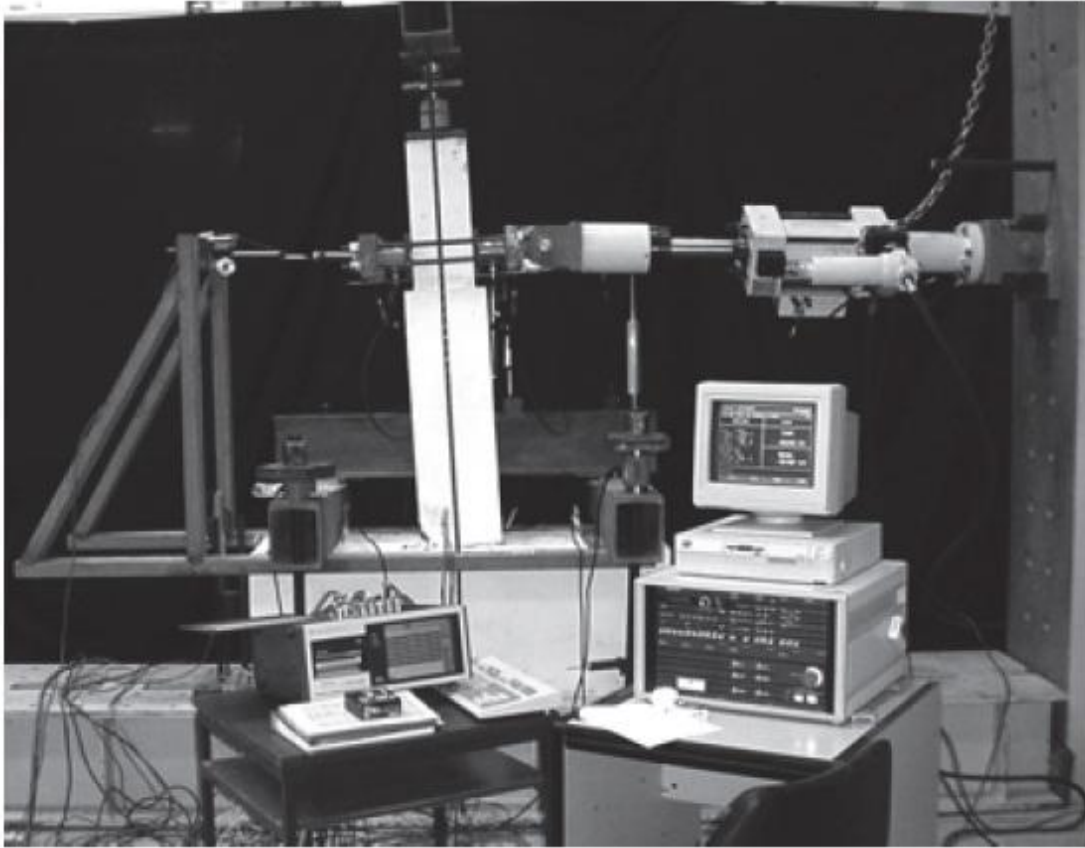
Τα μοντέλα S1 που τρέξαμε στο Ansys χρειάστηκαν περίπου 30' το καθένα.

#### 4.3. Ενισχυμένο υποστυλωμα άοπλης λείας διεπιφάνειας μανδύα

##### 4.3.1. Πείραμα

Το επόμενο πείραμα των ερευνητών που θα προσπαθήσουμε να επαληθεύσουμε είναι το S4, στο οποίο, όπως οι ίδιοι το περιγράφουν, ο μανδύας εφαρμόζεται χωρίς επεξεργασία της διεπιφάνειας. Η διεπιφάνεια λοιπόν που δημιουργείται αντιστοιχεί σε λεία διεπιφάνεια εσωτερικού υποστυλώματος και νέου μανδύα.

Το κεντρικό μέρος του δοκιμίου είναι ακριβώς αυτό που περιγράψαμε για το S1. Αναφερόμαστε σε αρχικό ορθογωνικό υποστυλωμα 200x200 ύψους 1,35m. Ο μανδύας που του τοποθετείται είναι πάχους 35mm κατά συνέπεια η τελική διατομή που δημιουργείται είναι 270x270. Το ύψος του μανδύα εκτείνεται μέχρι το 0,9m από τη θεμελίωση. Η θεμελίωση είναι η ίδια με πριν, ακλόνητα συνδεδεμένη με το δάπεδο του εργαστηρίου με τη διάταξη που φαίνεται και στην Εικ.4.1.

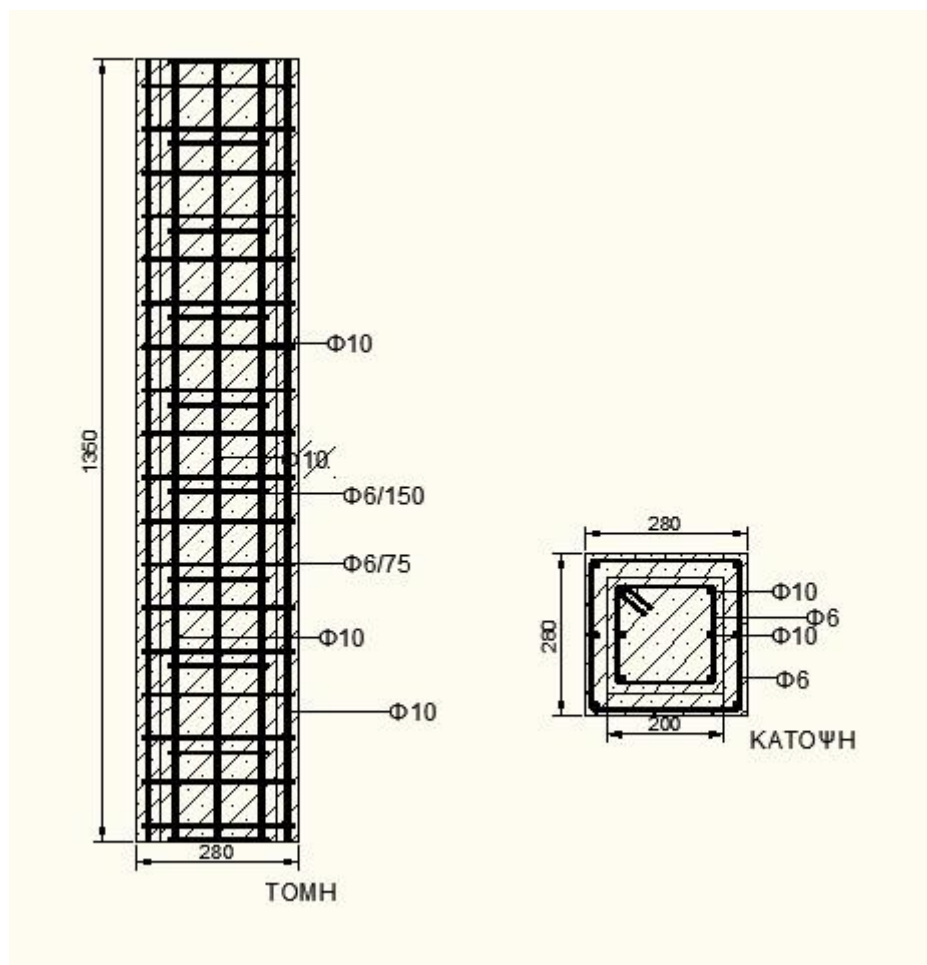


**Εικ.4.1** Εργαστηριακή διάταξη φόρτισης (Julio, Branco, Silva, 2005)

Στο πείραμα αυτό, το σκυρόδεμα του εσωτερικού είναι C35 όπως και πριν, ενώ του μανδύα C80. Πάλι οι τιμές αυτές επιβεβαιώθηκαν και πειραματικά με δοκίμια που είχαν κρατηθεί κατά τη σκυροδέτηση. Για το παλιό σκυρόδεμα μετρήθηκε 34,64kN, ενώ για το νέο 79,79kN.

Οι εσωτερικοί οπλισμοί είναι 6Φ10 και συνδετήρες Φ6/150. Στο μανδύα τοποθετούνται πάλι 3 διαμήκεις ράβδοι στις 2 πλευρές. Οι ράβδοι αυτοί είναι 6Φ10, οι οποίες πακτώνονται με ρητίνες στο θεμέλιο. Οι συνδετήρες του μανδύα είναι Φ6/75 σε όλο του ύψος του μανδύα. Οι ποιότητες όλων των οπλισμών τόσο των μέσα όσο και των έξω είναι S400.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS



Σχ.4.19 Κάτοψη και τομή υποστυλώματος S4

#### 4.3.2. Προσομοίωση

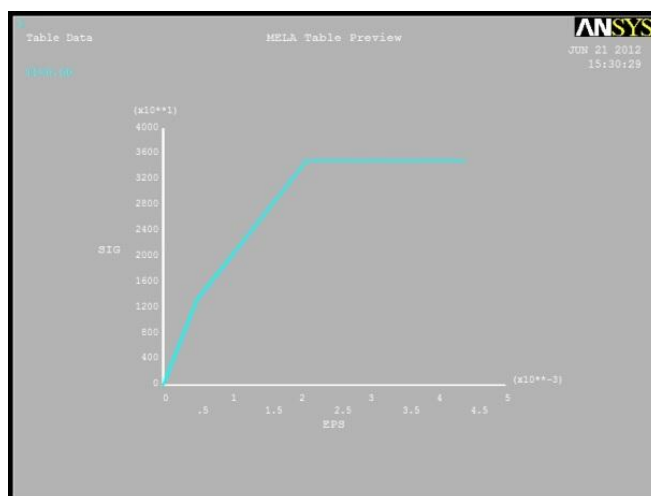
##### 4.3.2.1. Γενικά

Ο τρόπος που μοντελοποιούμε παραμένει ο ίδιος με πριν. Οι διαστάσεις του δοκιμίου που πρέπει να εισάγουμε είναι ακριβώς οι ίδιες με τις πειραματικές. Ύψος εσωτερικού υποστυλώματος 1,35m και μανδύα 0,90m. Η μικρή διαφορά που εισάγουμε είναι η διάσταση του μανδύα. Επειδή η διακριτοποίηση που κάνουμε είναι με σταθερό κάρναβο 2cm, αναγκαστικά κατασκευάζουμε μανδύα πάχους 40mm έναντι 35mm που πραγματικού πειράματος. Αυτό αναμένεται να μας δώσει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές στην ανάλυσή μας.

Οι οπλισμοί του μανδύα τοποθετούνται σε απόσταση 2cm από την εξωτερική πλευρά του μανδύα και σε άλλη τόση απόσταση από τη διεπιφάνεια. Στη θέση αυτή, οι κόμβοι των οπλισμών συμπίπτουν με αυτούς του σκυροδέματος και έτσι πάλι ενώνουμε πλήρως τους κόμβους των σημείων που συμπίπτουν.

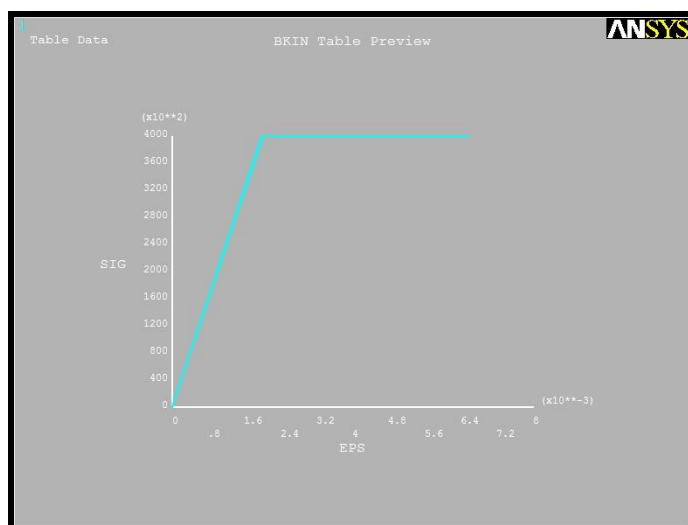
Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι αυτά που έχουν ήδη παρουσιασθεί στο κεφάλαιο 3. Αναλυτικότερα, για το σκυρόδεμα C35 όπως και για το C80 εισάγουμε τους

νόμους υλικού του Σχ.4.20 που ακολουθούν τον τύπο c2. Εξηγήσαμε προηγουμένως ότι αυτή η μορφή είναι η πιο ενδεδειγμένη για τις αναλύσεις μας σε ενισχυμένα υποστυλώματα όπου υπάρχουν περισσότερα στοιχεία που εισάγουν μη γραμμικότητες.



**Σχ.4.20** Νόμος σκυροδέματος c2 για υποστύλωμα S4

Οι χάλυβες είναι όλοι ποιότητας S400 και εισάγονται με το διάγραμμα τύπου s2 που είναι πλήρως ελαστοπλαστικό.



**Σχ.4.21** Νόμος χάλυβα s2 για υποστύλωμα S4

Τα στοιχεία της λάμας και της πλάκας που τοποθετούνται στις περιοχές επιβολής φόρτισης είναι πάντα SOLID185.

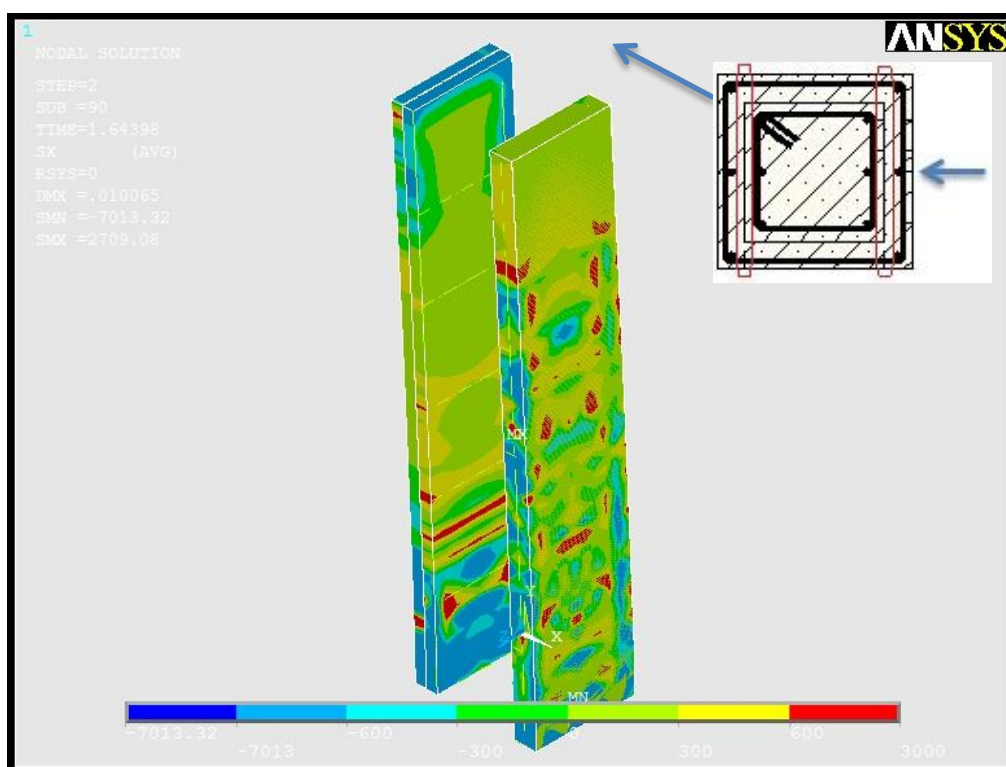
#### 4.3.2.2. Προσομοίωση διεπιφάνειας

Η αναζήτηση που γίνεται πάνω στο δοκίμιο S4, είναι ο τρόπος μοντελοποίησης της διεπιφάνειας. Θα δοκιμάσουμε και τις δυο μεθόδους που έχουμε αναπτύξει για τη

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

δημιουργία της διεπιφάνειας. Η σχέση παλιού-νέου σκυροδέματος που θα εισάγουμε εν τέλει και στα δυο μοντέλα μας θα αντιστοιχεί σε λεία διεπιφάνεια. Για να εισάγουμε όμως τιμές τόσο στα επιφανειακά στοιχεία τριβής όσο και στα ελατήρια πρέπει να έχουμε μια αίσθηση του μεγέθους της ορθής τάσης που ασκείται στη διεπιφάνεια. Τόσο ο ΚΑΝΕΠΕ όσο και κάθε πειραματική καμπύλη που υπάρχει για λείες διεπιφάνειες σχετίζει την τιμή της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης με την επιβαλλόμενη ορθή. Για το λόγο αυτό πρέπει να υπάρχουν δεδομένα κάθε φορά για την κατανομή των ορθών τάσεων στη διεπιφάνεια. Ο τρόπος που θα μπορούσε να βρεθεί αυτό, είναι να γίνουν κάποιες δοκιμαστικές αναλύσεις ώστε με επαναληπτική διαδικασία να πλησιάσουμε στη λύση. Ο τρόπος που προτείνουμε για να έχουμε μια πρώτη ένδειξη των τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια είναι να αναλύσουμε ένα προσομοίωμα χωρίς τη λειτουργία της διεπιφάνειας αλλά με μονολιθική σύνδεση του μανδύα.

Η κατανομή των ορθών αλλά και των διατμητικών τάσεων ποικίλει στις τέσσερις πλευρές της διεπιφάνειας αλλά και σε κάθε μια από αυτές. Εμείς αρκούμαστε στο να εισάγουμε το ίδιο διάγραμμα τ-s σε όλη τη διεπιφάνεια για λόγους απλότητας. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι έχουμε απώλεια στην προσέγγισή μας. Παρ'όλα αυτά αποτελεί μια καλή προσέγγιση όπως θα φανεί και από το αποτέλεσμα. Για να μπορέσουμε να πλησιάσουμε την πραγματικότητα αναλύσαμε δοκιμαστικά ένα ενισχυμένο υποσύλωμα με τα ακριβή χαρακτηριστικά του προβλήματός μας και πήραμε την παρακάτω εικόνα για τις ορθές τάσεις στις πιο φορτιζόμενες διεπιφάνειες, που είναι και κάθετες στη φόρτιση. Το εύρος τιμών που παίρνουμε είναι μεταξύ 0,3-0,5MPa. Εμείς στη μέθοδο που προτείνουμε κρατάμε ως αντιπροσωπευτική τιμή όχι τη μέση αλλά κάποια μεγαλύτερη τιμή. Εδώ θα δεχθούμε ορθή τάση 0,5MPa για να εξάγουμε τις επιθυμητές σχέσεις.



Σχ.4.22 Κατανομή ορθών τάσεων στις κάθετες στη φόρτιση διεπιφάνειες

#### 4.3.2.2.1. Μέθοδος επιφανειακών στοιχείων τριβής (CONTA174 και TARGE170)

Η μέθοδος των επιφανειακών στοιχείων τριβής καταλήγει στο σχηματισμό μιας διεπιφάνειας μηδενικού πάχους που υπάρχει ανάμεσα στο παλιό και στο νέο σκυρόδεμα. Η διεπιφάνεια αυτή έχει διπλά στοιχεία που συμπίπτουν σε θέση αλλά δεν ταυτίζονται, τα CONTA174 από την πλευρά του εσωτερικού υποστυλώματος και τα TARGE170 από την πλευρά του μανδύα.

Στη μέθοδο αυτή ζητούνται ως δεδομένα η συνοχή και ο συντελεστής τριβής για τα επιφανειακά στοιχεία. Απαραίτητο είναι να έχει προηγηθεί η δοκιμαστική ανάλυση ώστε να βρούμε την κατανομή των ορθών τάσεων στη διεπιφάνεια. Αφού βρούμε την κατανομή των τάσεων, υπολογίζουμε μια σταθμισμένη προς τις υψηλότερες τιμές τιμή της ορθής τάσης. Με βάση αυτήν την τιμή που ήδη βρήκαμε  $\sigma_{sd}=0,50\text{MPa}$ , ορίζουμε τη συνοχή και το συντελεστή τριβής.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τους κανονισμούς για λείες διεπιφάνειες ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός και ίσος με 0,4. Οι σχέσεις του ΚΑΝΕΠΕ (2009) δίνουν μέγιστη διατμητική τάση  $\tau_{fud}=0,4\sigma_{cd}=0,20\text{MPa}$ . Θα μπορούσαμε να εισάγουμε μηδενική συνοχή και να αναμείνουμε από το μηχανισμό της τριβής να αναπτύξει όλη τη διατμητική τάση. Επειδή όμως η λειτουργία της διεπιφάνειας παλιού-νέου σκυροδέματος έχει περιοχές με πολύ χαμηλές ορθές τάσεις, όπου αναπτύσσονται μεγάλες διατμητικές τάσεις και ολισθήσεις, πρέπει να σταθμίσουμε την προσφορά της συνοχής στα στοιχεία CONTA174. Αυτή είναι και η μεγαλύτερη δυσκολία του συγκεκριμένου μοντέλου προσομοίωσης που καθιστά την χρήση τους αρκετά χονδροειδή και χρίζει πολύ βαθύτερης διερεύνησης.

Αναλύοντας προσομοιώσεις με διάφορους συνδυασμούς συνοχής και συντελεστή τριβής για το δοκίμιο S4, διαπιστώνουμε ότι με μη μηδενικές τιμές συνοχής τα αποτελέσματα είναι πιο κοντά στα πειραματικά. Το τι τιμή θα δώσουμε στη συνοχή αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο της διερεύνησης. Δυστυχώς είναι παρακινδυνευμένο ακόμα να εξάγουμε ένα γενικό νόμο για την τιμή της συνοχής που πρέπει να εισάγεται στις περιπτώσεις λείων διεπιφανειών ολόκληρου του υποστυλώματος, λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων.

Επόμενη παράμετρος που καθορίζει τις εισαγόμενες τιμές είναι η πραγματική κατάσταση της διεπιφάνειας όσον αφορά την τραχύτητά της. Τα πειράματα από τα οποία παίρνουμε τα δεδομένα αφορούν συνήθως πολύ λείες διεπιφάνειες που έχουν προέλθει από τη σχηματιζόμενη επιφάνεια μετά την αφαψίδωση (ξεκαλούπωμα) των δοκιμίων που εξετάζονται. Η λεία επιφάνεια που εξετάζουμε στις ενισχύσεις με μανδύες, αφορά τη διεπιφάνεια του παλιού σκυροδέματος με το νέο που είτε έχει εγχυθεί είτε εκτοξευτεί. Η συνεργασία των σκυροδεμάτων που αναπτύσσεται είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται στα πειράματα που γίνονται, τουλάχιστον για τις περιοχές όπου δεν υπάρχει ολίσθηση και έχουμε συνοχή.

Το συμπέρασμα αυτό διαπιστώνεται και εκ του αποτελέσματος των αναλύσεων. Εμείς δοκιμάζουμε αρκετές τιμές για τη συνοχή ενώ κρατάμε σταθερό το συντελεστή τριβής

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

στο 0,40. Από σειρά αναλύσεων για την περίπτωση μας ενδείκνυται συνοχή 0,1MPa. Οι τιμές αυτές για τη συνοχή και τον συντελεστή τριβής ορίζουν τη μέθοδο προσομοίωσης για λείες διεπιφάνειες f1.

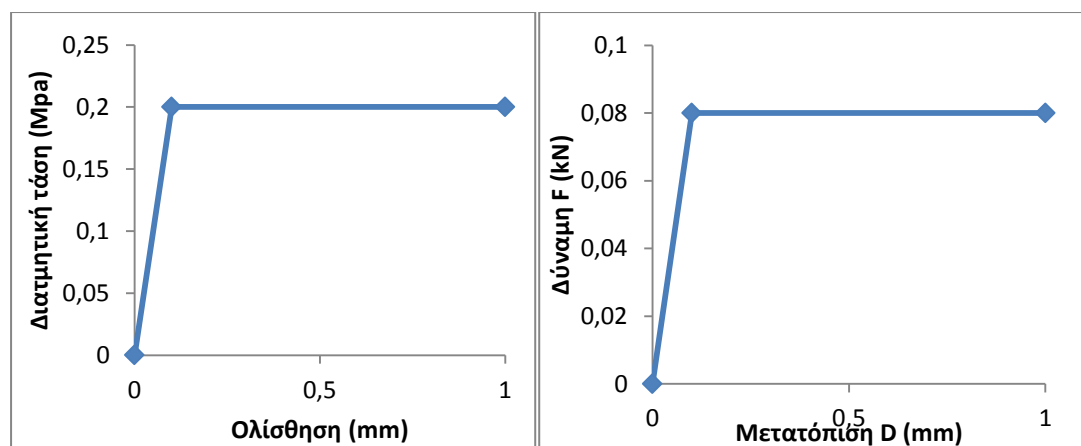
CONTA174-TARGE170		
	συνοχή (MPa)	συντ. Τριβής
λεία διεπιφάνεια f1	0,1	0,4

Πιν.4.1 Δεδομένα εισαγωγής μοντέλου f1, για λεία διεπιφάνεια

##### 4.3.2.2.2. Μέθοδος ελατηρίων (COMBIN39)

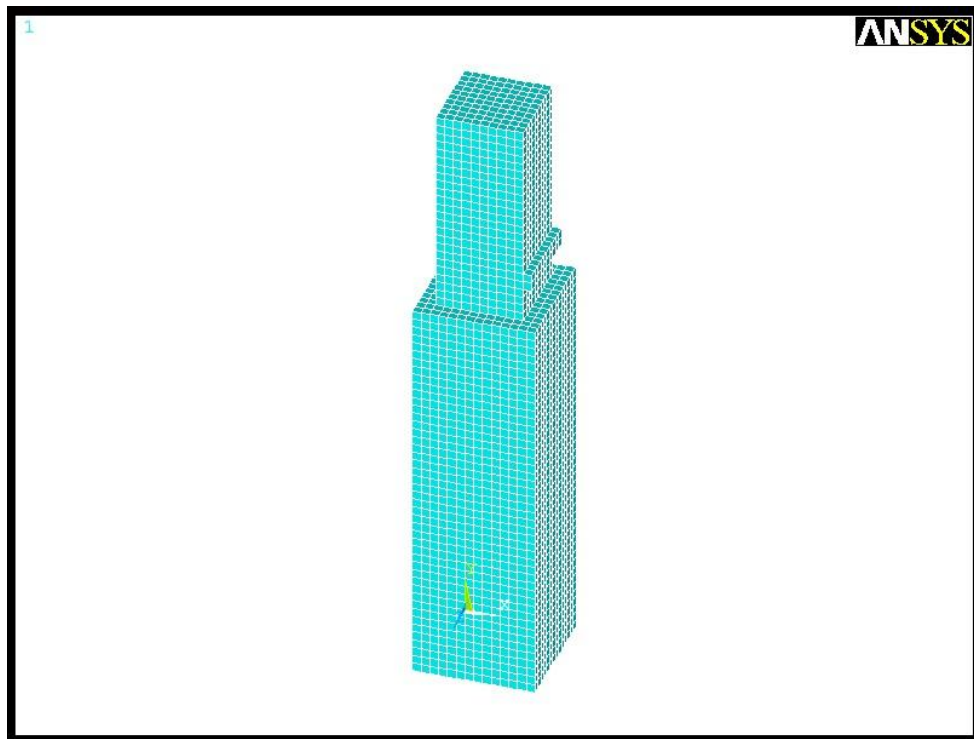
Στη μέθοδο αυτή για κάθε κόμβο της διεπιφάνειας εισάγουμε 3 ελατήρια, ένα ανά καθολική διεύθυνση. Το ελατήριο που είναι κάθετο στη διεπιφάνεια ελέγχει την αποκόλληση και τη σύνθλιψη. Για αυτό το ελατήριο προτείνουμε νόμο F-D που να πλησιάζει τη λειτουργία του ασθενέστερου σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη και εφελκυσμό. Με τέτοιο νόμο θα μπορούσαμε να ελέγξουμε και την περίπτωση αποκόλλησης του μανδύα. Επειδή όμως κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στα πειράματά μας μπορούμε να αρκεστούμε σε νόμο που θα εξασφαλίζει συνεχή επαφή του παλιού και του νέου σκυροδέματος χωρίς την ανάπτυξη μεταξύ κενού, μεταφέροντας έτσι τον έλεγχο στο πλησιέστερο πεπερασμένο στοιχείο σκυροδέματος.

Τα ελατήρια που ορίζουν τη σχέση της διεπιφάνειας είναι 2 και ορίζονται πάντα στις κύριες διευθύνσεις του μοντέλου. Αυτά είναι που θα εισάγουν και τη σχέση διατμητικής τριβής-ολίσθησης στη διεπιφάνεια. Η σχέση F-D για λεία διεπιφάνεια, νόμος i1, όπως την έχουμε είναι διγραμμική. Για δεδομένη τιμή ορθής τάσης της τάξεως των 0,50MPa εισάγουμε νόμο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το διγραμμικό διάγραμμα τ-s το επιλέγουμε έχοντας αξιολογήσει τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας και τις κανονιστικές απαιτήσεις. Η μετατροπή από το ένα διάγραμμα στο άλλο γίνεται ανάγοντας την τάση σε δύναμη, με βάση τη ζώνη επιρροής του ελατηρίου, που αντιστοιχεί σε 2x2(cm<sup>2</sup>).

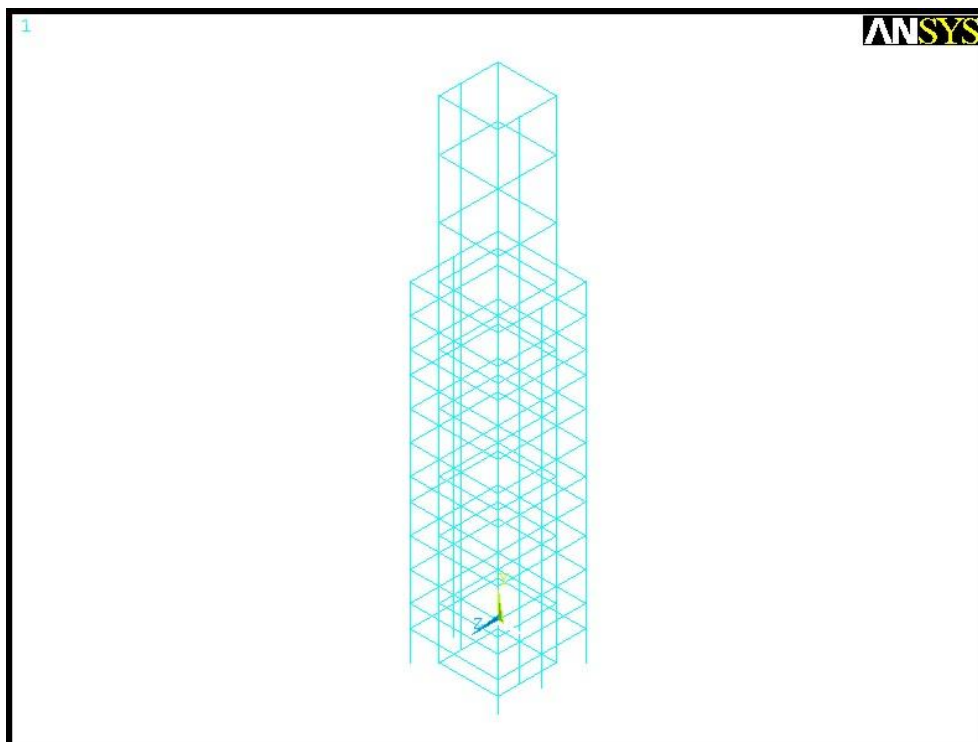


Σχ.4.23 Νόμος i1 για λεία διεπιφάνεια υποστυλώματος S4

Αυτοί οι νόμοι i1 εισάγονται για τα ελατήρια της διεπιφάνειας, ενώ ολόκληρο το προσομοίωμα με τα πεπερασμένα στοιχεία (elements) που δημιουργήθηκαν φαίνεται παρακάτω στο Σχ.4.24



Σχ.4.24 Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος S4



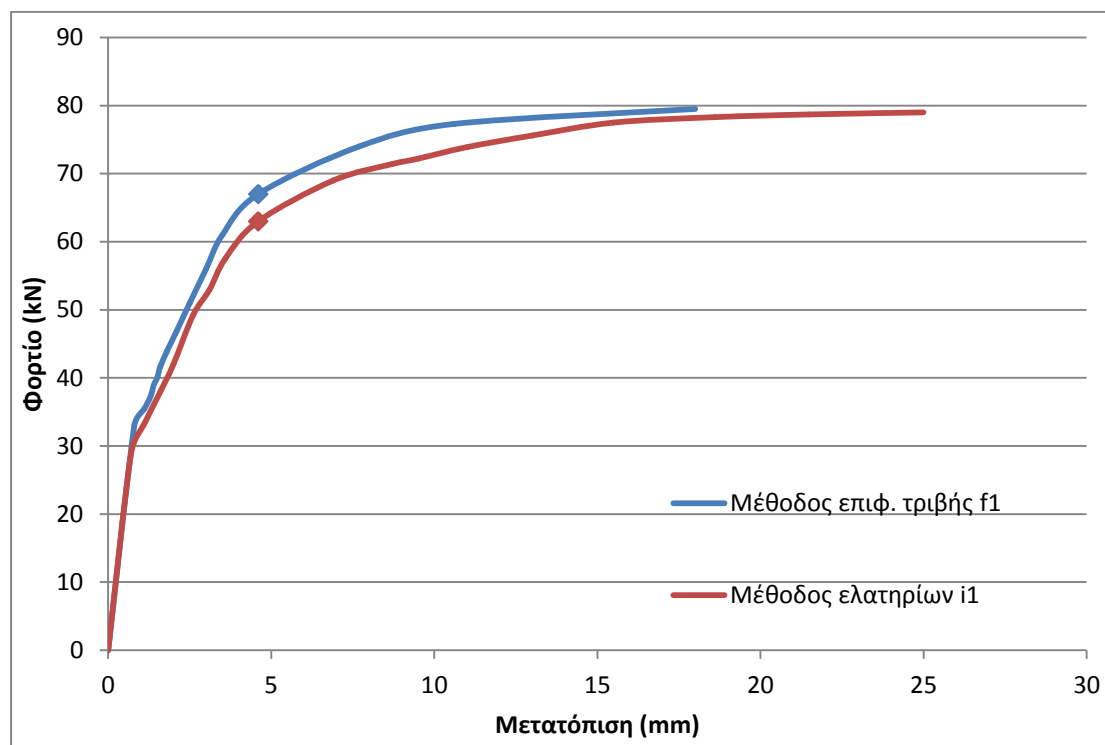
Σχ.4.25 Πεπερασμένα στοιχεία σπλισμών υποστυλώματος S6



#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

##### 4.3.3. Ανάλυση

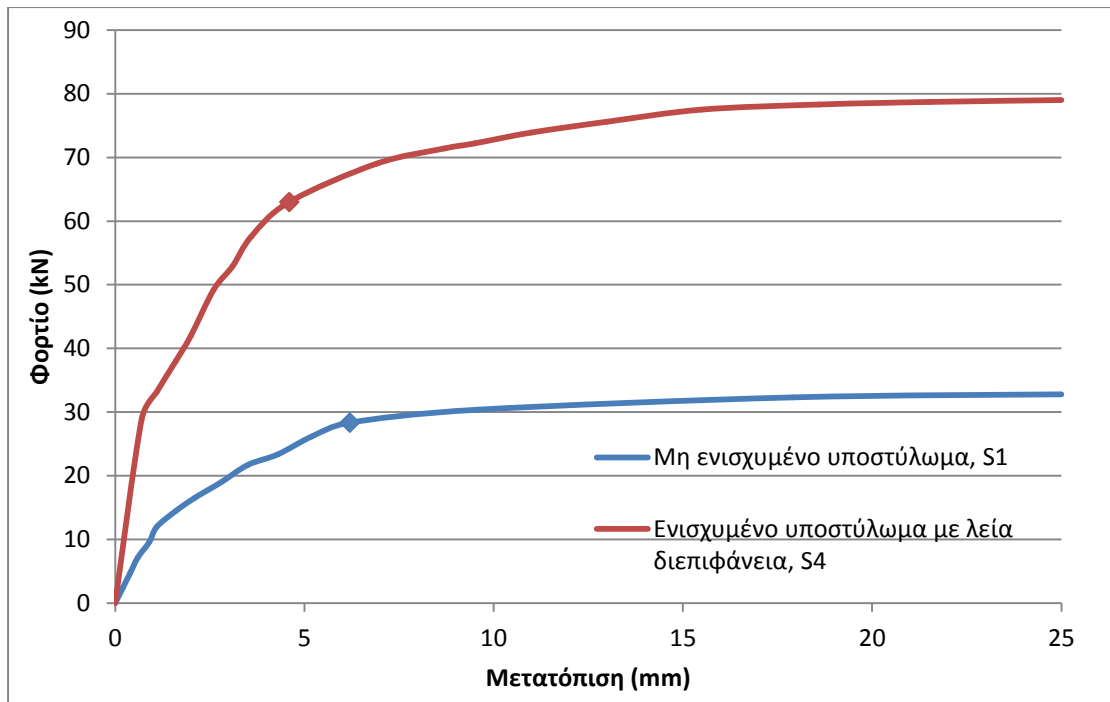
##### 4.3.3.1. Καμπύλη φορτίου- μετατόπισης



Σχ.4.26 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος S4

Κατόπιν διερευνήσεων καταφέραμε να εισάγουμε με δύο διαφορετικούς τρόπους τη λεία διεπιφάνεια και να πάρουμε καμπύλες που πλησιάζουν πολύ καλά η μία την άλλη. Αυτό δείχνει ότι οι μέθοδοι που προτάθηκαν i1 και f1 εισάγουν την αντίστοιχη σχέση διατμητικών τάσεων-ολισθήσεων. Πόσο καλά πλησιάζουν το πείραμα θα το δούμε στη συνέχεια. Επειδή η μέθοδος των επιφανειών τριβής παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες όπως ήδη είπαμε αλλά θα αναπτύξουμε και στη συνέχεια, επιλέγουμε να αναλύσουμε πιο διεξοδικά την προσομοίωση με ελατήρια.

Στο παρακάτω διάγραμμα συγκρίνουμε τις καμπύλες του αρχικού υποστυλώματος με το ενισχυμένο. Βλέπουμε αρχικά το προφανές γεγονός ότι ενισχύοντας με μανδύα ένα υποστυλωμα έχουμε μεγάλη βελτίωση στην απόκρισή του ακόμα και αν η διεπιφάνεια είναι λεία. Η αντοχή στην περίπτωσή μας εμφάνισε αύξηση 1,5 φορά επί αυτής του μη ενισχυμένου, ενώ η δυσκαμψία αυξήθηκε αντιστοίχως.



**Σχ.4.27** Συγκριτικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης S1 και S4

Μπορούμε να παρατηρήσουμε την αντιστοιχία μεταξύ των σημείων διαρροής μεταξύ των δύο καμπυλών. Το σημείο διαρροής των οπλισμών σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα του χάλυβα του μανδύα που στο πείραμά μας είναι πάντα S400. Στη συνήθη πρακτική των επισκευών και ενισχύσεων η ποιότητα χάλυβα του μανδύα είναι υψηλότερη ποιότητας από αυτήν του αρχικού υποστυλώματος.

Διαπιστώνουμε ότι ακόμα και στην περίπτωση λείας διεπιφάνειας μανδύα, η απόδοσή του είναι πραγματικά εντυπωσιακή. Από την απλή αυτή σύγκριση των μέγιστων φορτίων βλέπουμε να υπερδιπλασιάζεται η τιμή φορτίου από 33kN σε 79kN. Αναλύοντας αναλυτικά, με βάση τις σχέσεις σχεδιασμού υποστυλωμάτων, τις διατομές του απλού υποστυλώματος και του ενισχυμένου μπορούσαμε άμεσα να δούμε αυτή την αύξηση. Αυτό που αποτελεί το κρισιμότερο σημείο της τεχνικής των ενισχύσεων είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής συνεργασίας του παλιού και του νέου σκυροδέματος, μεταξύ αρχικού υποστυλώματος και μανδύα.

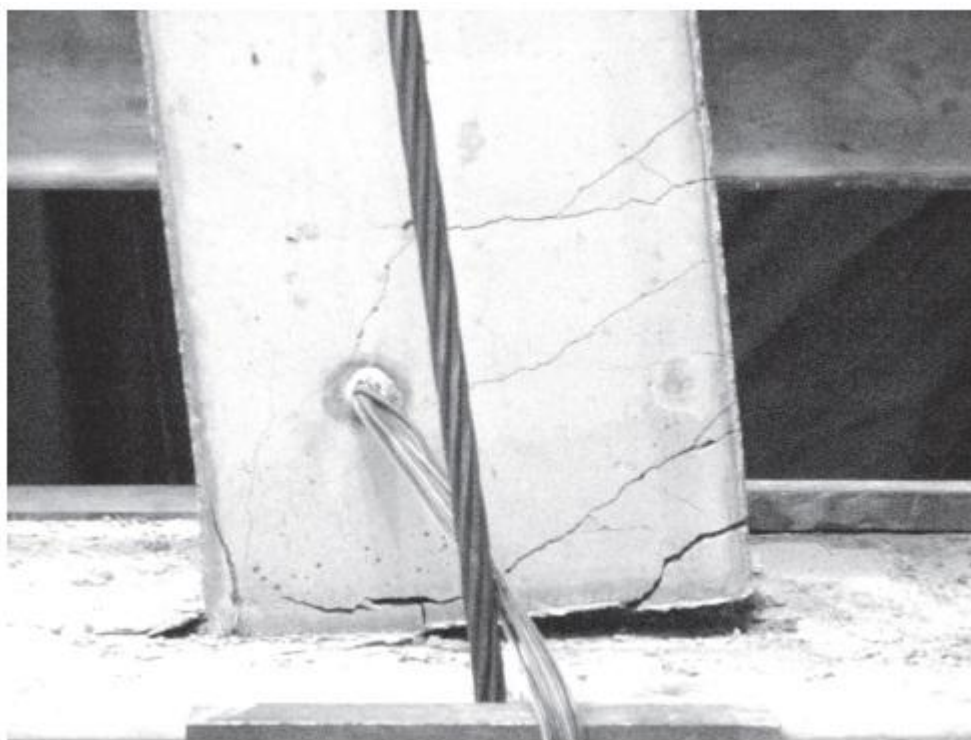
Αν το εξετάσουμε αναλυτικά υπολογίζουμε ότι το ενισχυμένο υποστύλωμα με πλήρη συνάφεια μανδύα (μονολιθικό) θα έδινε μέγιστο φορτίο 83,1kN. Η πειραματική τιμή για το δοκίμιο S4 έδωσε 77,5kN, ενώ η ανάλυση απέδωσε σχεδόν 79kN. Το πρώτο που παρατηρεί κανείς είναι ο συντελεστής μονολιθικότητας που ακόμα και για λεία διεπιφάνεια φτάνει το 93% στο πείραμα. Ακόμα και αν όλες οι παράμετροι συντέλεσαν στο να αναπτύξει το πειραματικό δοκίμιο τόσο υψηλές αντιστάσεις, το αποτέλεσμα παραμένει εντυπωσιακό. Στην ανάλυσή μας ξεπεράσαμε λίγο την πειραματική τιμή και βρεθήκαμε ανάμεσα σ' αυτήν και τη θεωρητική τιμή της μονολιθικής εφαρμογής του μανδύα.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

##### *Δυσκαμψία*

Η πειραματική μέτρηση έδωσε τέμνουσα δυσκαμψία στη διαρροή του υποστυλώματος 11,59MN/m. Με τη μέθοδο των επιφανειακών στοιχείων τριβής ( $f_1$ ) η διαρροή επήρθε στα 4,6mm για τιμή φορτίου 67kN, σχεδόν όσο και στο πείραμα (66,2kN). Για τις τιμές αυτές η τέμνουσα δυσκαμψία είναι 14,56kN/m. Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας με ελατήρια, μοντέλο i1, η τιμή της τέμνουσας δυσκαμψίας είναι ελαφρώς μικρότερη, 13,69kN/m. Και στις δύο περιπτώσεις η διαρροή συμβαίνει σε μικρότερη μετατόπιση. Το γεγονός αυτό το συναντάμε συστηματικά στις αναλύσεις μας και έχουν αναπτυχθεί ήδη οι πιθανοί λόγοι που συμβαίνει στο 4.2, αλλά θα εξεγηθούν αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 5.

##### **4.3.3.2. Μορφή αστοχίας υποστυλώματος**

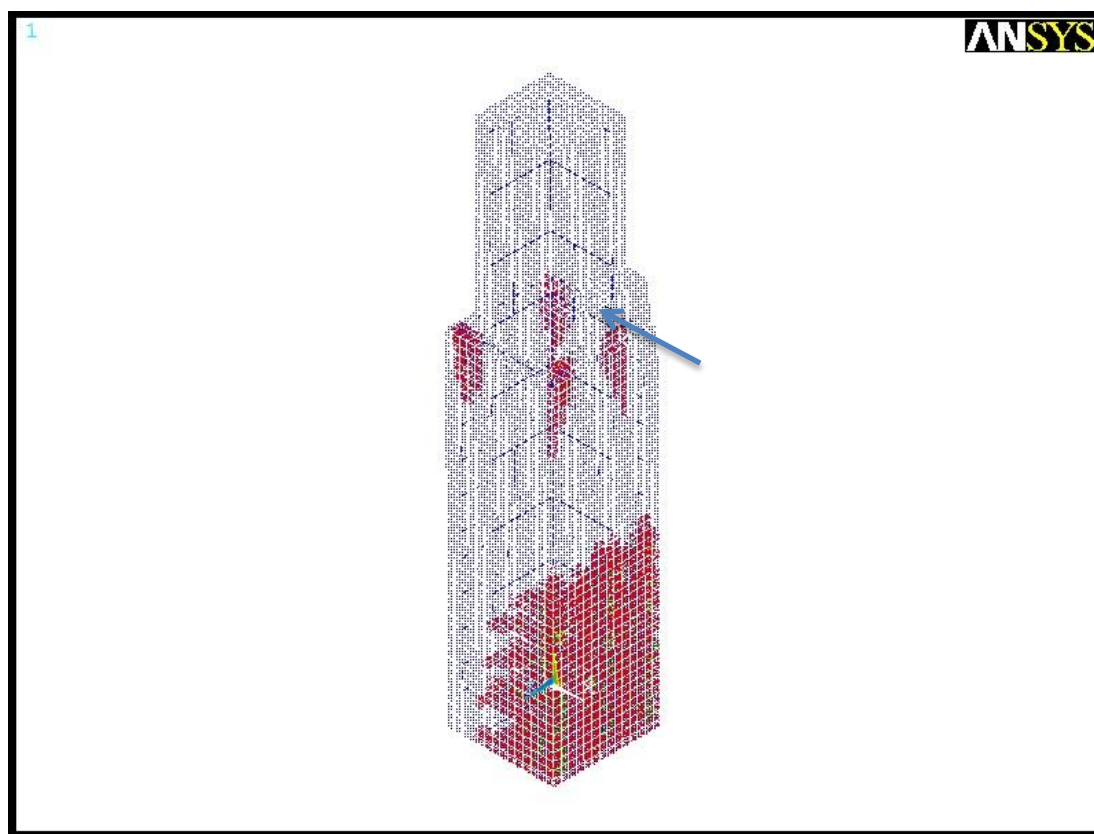


**Εικ.4.2** Ρωγμή στη βάση του υποστυλώματος (Julio, Branco, Silva, 2005)

Η μορφή αστοχίας και αυτού του υποστυλώματος όπως και όλων των υπολοίπων που εξετάζουμε είναι καμπτική. Η Εικ.4.2 είναι χαρακτηριστική για τον τρόπο που εκδηλώνεται η πειραματική αστοχία στο πείραμα. Σχηματίζονται οριζόντιες ρωγμές περί τη βάση στην εφελκυσόμενη παρειά του υποστυλώματος και στο κρισιμότερο σημείο όπου έχουμε τη συγκέντρωση τάσεων με τη θεμελίωση επέρχεται η απόσχιση. Στο Ansys απεικονίζονται οι ρωγμές με τα χαρακτηριστική σύμβαση του SOLID65. Τα κόκκινα κυκλάκια αντιστοιχούν στην πρώτη ρηγμάτωση, ενώ τα δεύτερα στα πράσινα και τα τρίτα στα μπλε. Στο θλιβόμενο πέλμα παρατηρείται στο φυσικό πείραμα η καταστροφή στις γωνίες αλλά αυτό δε συνεπάγεται πάντα αποδιοργάνωση σημαντικού τμήματος της

διατομής. Στην προσομοίωση έχουμε αφαιρέσει τη δυνατότητα αστοχίας του σκυροδέματος οπότε δε μπορούμε να δούμε αν υπάρχει αντιστοίχιση ακριβής με τη φύση.

Στο πρόγραμμα όπως φαίνεται και στις εικόνες οι εφελκυστικές αστοχίες ξεκινούν κυρίως από την εφελκυσόμενη πλευρά της βάσης και τριγωνικά κατανεμημένες επεκτείνονται προς τα πάνω, όπως φαίνεται και στα στιγμιότυπα από διαφορετικές χρονικές φάσεις. Το αξιοσημείωτο που παρατηρείται είναι οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια στο άνω μέρος του μανδύα που έχουμε εφαρμόσει. Το στοιχείο αυτό μάλλον είχε υποεκτιμηθεί στην πειραματική έρευνα καθώς ενώ εμφανίζονται μικρές ρωγμές, δεν κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνησή του. Ίσως το γεγονός ότι στην πράξη οι μανδύες είναι κυρίως κλειστοί και εκτείνονται σε όλο το ύψος του υποστυλώματος να μας κάνει να μην ασχολούμαστε τόσο με τη συγκέντρωση τάσεων στο σημείο αυτό. Πάντως από τις τάσεις αυτές δε μπορούμε να συμπεράνουμε άμεσα ότι μπορεί να επέλθει αποκόλληση του μανδύα αφού κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται ούτε στο πείραμα. Σε κάποια άλλη περίπτωση όμως όπου τα δοκίμια δεν θα αστοχούν καθαρά καμπτικά μπορεί η αποκόλληση να προηγηθεί τη καμπτικής αστοχίας. Τέτοιου είδους διερευνήσεις γίνονται στο κεφάλαιο 6.

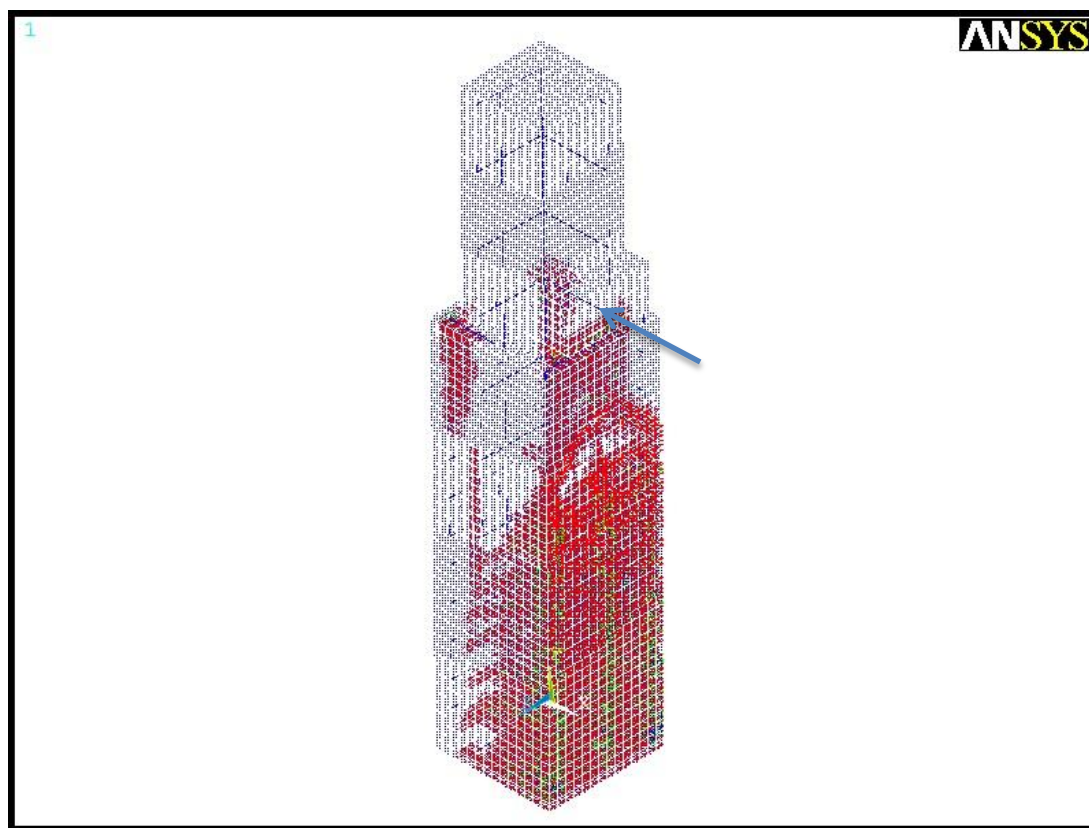


**Σχ.4.28** Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος S4 σε αρχικό στάδιο

Με μια πιο προσεχτική ματιά μπορούμε να δούμε στο πρόγραμμα και στο Σχ.4.29 την εμφάνιση μερικών ακόμα αστοχιών καθ' ύψος στη θλιβόμενη πλευρά του δοκιμίου. Το στιγμιότυπο αυτό αντιστοιχεί σε προχωρημένη στιγμή της φόρτισης, όπου οι τάσεις έχουν αυξηθεί. Η αιτιολόγηση που δίνεται είναι η συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος των ράβδων οπλισμού, που προκαλούν αστοχία της συνάφειας με το σκυρόδεμα. Επειδή

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

όμως στην προσομοίωσή μας έχουμε πλήρη συνάφεια σκυροδέματος ράβδου, αναγκαστικά αστοχεί το σκυρόδεμα που γειτνιάζει με τη ράβδο, στη διεύθυνση της κύριας εφελκυστικής τάσης.

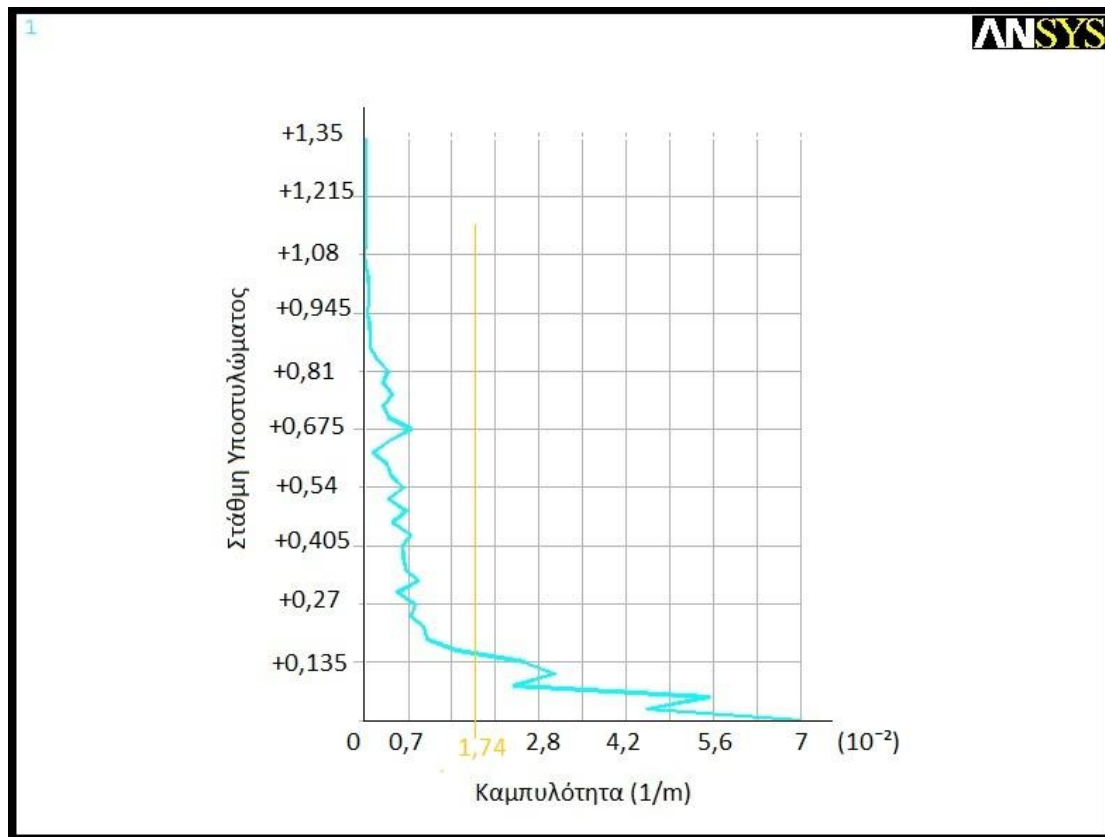


Σχ.4.29 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος S4 σε προχωρημένο στάδιο

##### 4.3.3.3. Καμπυλότητα υποστυλώματος καθ' ύψος

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι τιμές της καμπυλότητας της διατομής καθ' ύψος του υποστυλώματος τη στιγμή που η μετρούμενη καθολική παραμόρφωση είναι 20mm. Θεωρούμε ότι η επιπεδότητα των διατομών ισχύει και έτσι υπολογίζοντας την παραμόρφωση του χάλυβα στις εκατέρωθεν πλευρές της διατομής σε κάθε στάθμη, μπορούμε να υπολογίσουμε τη καμπυλότητα καθ' ύψος. Είναι εμφανής η πολύ μεγάλη τιμή στην περιοχή βάσης του υποστυλώματος. Αυτό υπονοεί την πλαστική άρθρωση που ήδη έχουμε εντοπίζει ότι σχηματίζεται εκεί.

Με αναλυτικούς υπολογισμούς αλλά ακόμα πιο εύκολα μέσα από την ανάλυση μπορούμε να βρούμε την καμπυλότητα διαρροής. Από τα αποτελέσματα του Ansys για τη στιγμή της διαρροής της διατομής βάσης μπορούμε να πάρουμε την τιμή της καμπυλότητας διαρροής, η οποία είναι  $1,74 \cdot 10^{-2} \text{m}^{-1}$ . Στο Σχ.4.30 υπάρχει η διαχωριστική γραμμή που χωρίζει τις περιοχές που έχουν διαρρεύσει. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να βρούμε και το μήκος της πλαστικής άρθρωσης. Τη στιγμή που έχουν ληφθεί οι μετρήσεις η άρθρωση έχει μήκος περίπου 15cm.



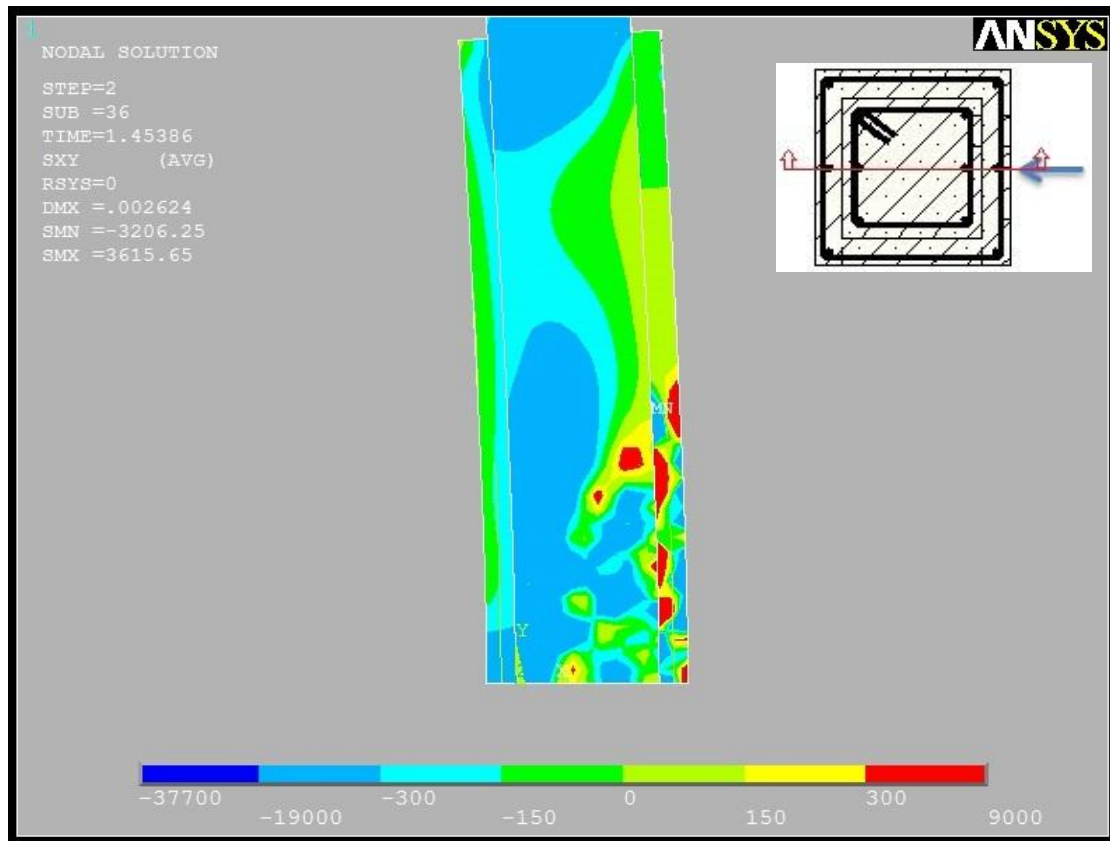
Σχ.4.30 Καμυλότητα υποστυλώματος S4 καθ' ύψος

#### 4.3.3.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος

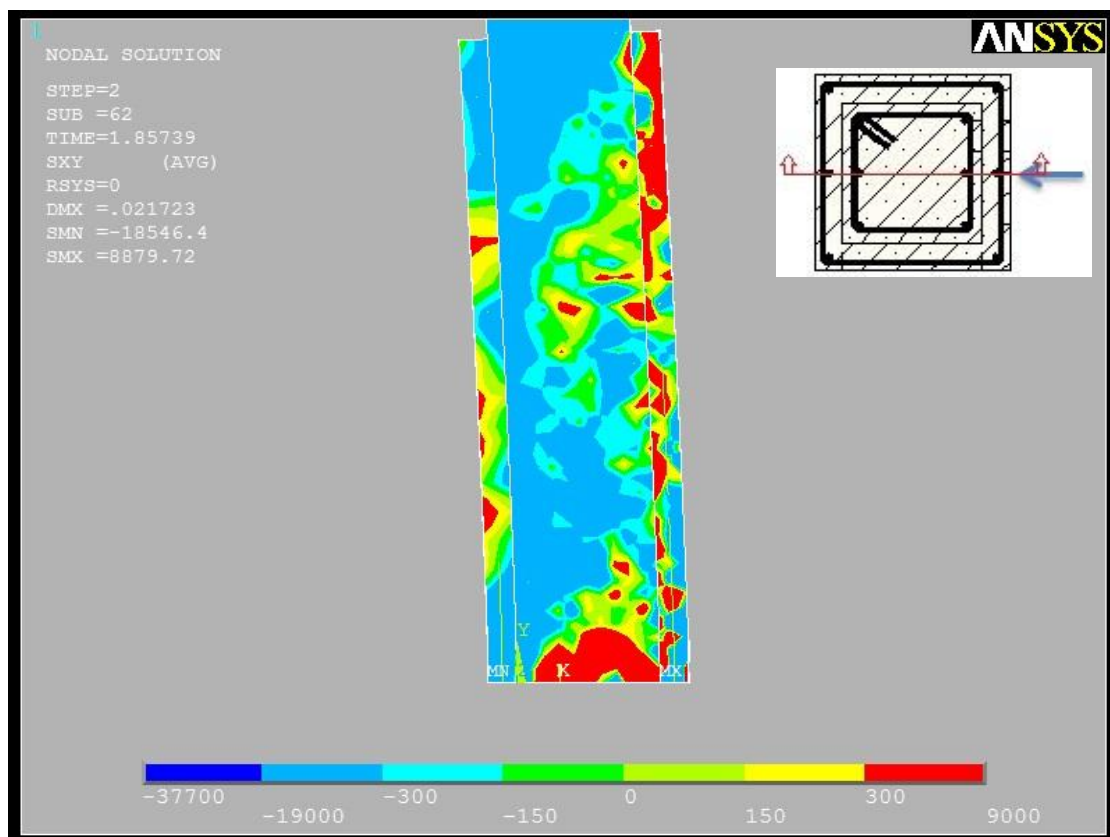
Για να ελέγξουμε τη λειτουργία της διεπιφάνειας που μοντελοποιήσαμε διερευνούμε τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε αυτήν. Τα παρακάτω αποτελέσματα προέρχονται από την ανάλυση με τη μέθοδο των ελατηρίων, μοντέλο i1, για λεία διεπιφάνεια.

Οι εικόνες δείχνουν τις αναπτυσσόμενες κατακόρυφες διατμητικές τάσεις σε κατακόρυφη τομή που έχει γίνει στο μέσον του υποστυλώματος και παράλληλα με τη διεύθυνση της οριζόντιας φόρτισης. Καταγράφονται οι κατακόρυφες διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στις πιο καταπονούμενες διεπιφάνειες που είναι αυτές που βρίσκονται κάθετα στη φόρτιση. Με τον τρόπο αυτό θέλουμε να εντοπίσουμε αν αναπτύσσεται στις διεπιφάνειες η μέγιστη διατμητική τάση των 0,2MPa, οπότε αρχίζουν μεγάλες τιμές ολισθήσεων. Ρυθμίζοντας τη χρωματική απεικόνιση στο Ansys διακρίνονται με κόκκινο χρώμα οι περιοχές όπου οι τάσεις ξεπερνούν τη μέγιστη τιμή διατμητικής δύναμης που αναπτύσσουν τα ελατήρια της εφελκόμενης πλευράς, ενώ αντίστοιχα με γαλάζιο στη θλιβόμενη πλευρά. Οι δύο εικόνες δείχνουν τις κατακόρυφες διατμητικές τάσεις για τα στιγμιότυπα της μετατόπισης 1,82mm και 15,45mm κατά σειρά. Στο δεύτερο στιγμιότυπο η εφελκόμενη πλευρά του μανδύα δείχνει ότι φτάνει σε τιμές που ξεπερνούν τα 0,2MPa, οπότε μας προϋδεάζει για πιθανή ολίσθηση του μανδύα.

#### 4. ΕΠΑΛΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

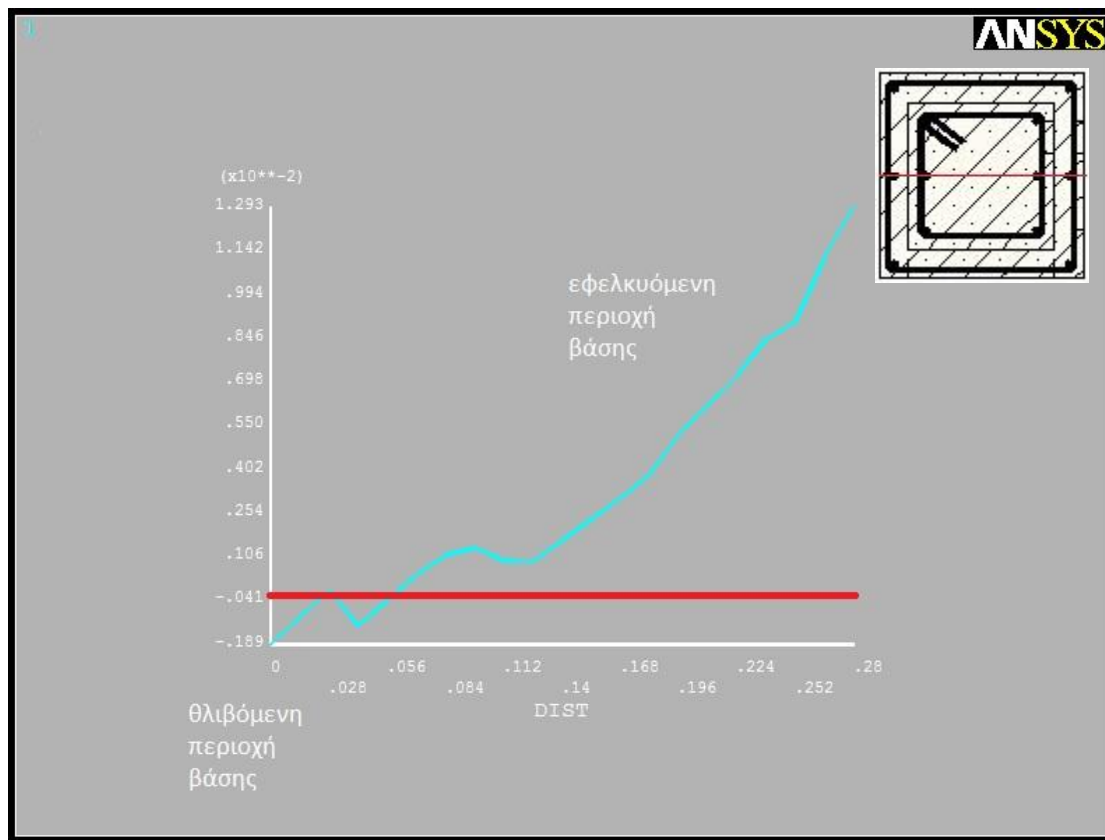


Σχ.4.31 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας σε αρχικό στάδιο



Σχ.4.32 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας σε προχωρημένο στάδιο

Το επόμενο μεγάλο όφελος από την τεχνική των μανδυνών είναι η επίτευξη της περίσφιγξης. Η περίσφιγξη βοηθά το σκυρόδεμα μέσα στους συνδετήρες να αναπτύσσουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις και τάσεις. Συνήθως τα υποστυλώματα που χρειάζεται να ενισχύσουμε είναι ελλειπώς οπλισμένα σε συνδετήρες. Στο πείραμά μας οι συνδετήρες του αρχικού υποστυλώματος είναι Φ6/150 και του μανδύα Φ6/75. Οι πυκνότητα των συνδετήρων στα πειράματα των Πορτογάλων ερευνητών είναι μάλλον μεγαλύτερη του τυπικού που συναντάμε συνήθως. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται πιο τυπικές περιπτώσεις συνδετήρων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος στην ελληνική πρακτική. Η πυκνότητα των συνδετήρων στα πειράματα αποτρέπει τη διατμητική αστοχία και εξωθεί το δοκίμιο σε καμπτική αστοχία, την οποία κυρίως επιδιώκουμε.



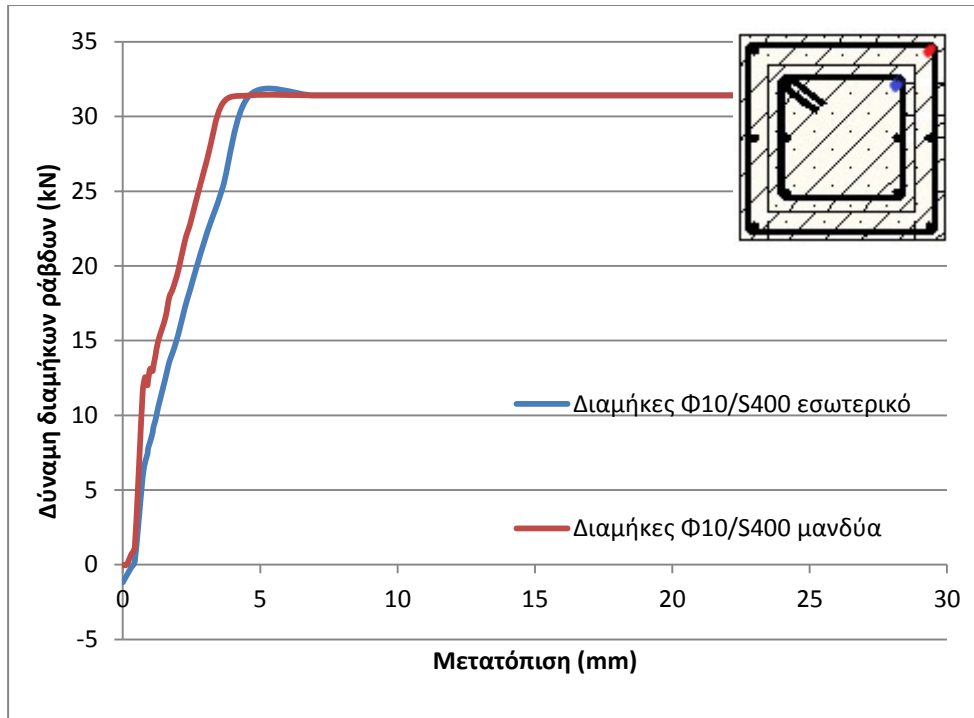
**Σχ.4.33** Ανηγμένες παραμορφώσεις στη βάση για μέγιστο φορτίο

Βλέπουμε τις κύριες ορθές ανηγμένες παραμορφώσεις των στοιχείων της βάσης που βρίσκονται σε ευθεία παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτισης του υποστυλώματος στο μέσον της διατομής. Στην αριστερά πιο θλιβόμενη ίνα η ανηγμένη παραμόρφωση φτάνει στα 1,9%, ενώ από την άλλη στην πιο εφελκυσμένη ίνα φτάνει στα 12,9%. Το στιγμιότυπο αυτό αντιστοιχεί για μετατόπιση του υποστυλώματος στο ύψος της λάμας 18,7mm και είναι σαφές ότι επιδέχεται ακόμα καταπόνηση το υποστυλώμα που έχει διαρρεύσει.



**4.3.3.5. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις οπλισμών**

Παρατηρούμε ότι οι μέσα διαμήκεις οπλισμοί του υποστυλώματος και αυτοί του μανδύα διαρρέουν σχεδόν ταυτόχρονα. Αυτό δε συμβαίνει συνήθως στην πράξη των ενισχύσεων αλλά στο πείραμά μας οι χάλυβες είναι ίδιας ποιότητας οπότε διαρρέουν πολύ κοντά ο ένας στον άλλο. Πιο ρεαλιστικά είναι τα μοντέλα του επόμενου κεφαλαίου όπου οι χάλυβες του μανδύα είναι νεότεροι και καλύτερης ποιότητας. Στο δοκίμιο S4 οι διαμήκεις ράβδοι είναι όλες Φ10 και S400, οπότε δίνουν μετά τη διαρροή τους σταθερή δύναμη 31,4kN.



**Σχ.4.34** Δύναμη εφελκόμενων ράβδων υποστυλώματος S4

Οι οπλισμοί διαρρέουν τη στιγμή που η μετατόπιση στο ύψος της στάθμης επιβολής της οριζόντιας φόρτισης είναι περίπου 4,6mm και η φόρτιση 63kN. Σημειώνεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είχαν δώσει 66,2kN, οπότε η αναλυτική προσομοίωση είναι επιτυχής.

**4.3.4 Συμπεράσματα**

Για το πείραμα S4 δεν έχουμε όλα τα στοιχεία από την εργασία των Eduardo Julio, Fernando Branco, Vitor Silva (2005) αλλά αυτά που έχουμε είναι επαρκή για να ελέγξουμε τις μεθόδους προσομοίωσης της λείας διεπιφάνειας. Αρχικά παρατηρούμε ότι ακόμα και στο πείραμα οι ερευνητές πετυχαίνουν χωρίς επεξεργασία της διεπιφάνειας πολύ υψηλές τιμές αντοχής. Ο συντελεστής μονολιθικότητας φτάνει το 93%, γεγονός που καταδεικνύει την αποδοτικότητα των μανδύων ακόμα και χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία της διεπιφάνειας.

Εκτιμάμε πάντως ότι η αναπτυσσόμενη τραχύτητα στην εφαρμογή του μανδύα, όπως έγινε, χωρίς επεξεργασία της διεπιφάνειας, είναι μεγαλύτερη από αυτό που ορίζει ο ΚΑΝΕΠΕ ως λεία διεπιφάνεια. Εμείς από την πλευρά μας χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία που εισάγαμε για τη λεία διεπιφάνεια με τους τρόπους των επιφανειακών στοιχείων τριβής f1 αλλά και τη μέθοδο των ελατηρίων i1.

Και με τις δυο μεθόδους πλησιάζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί πάλι η δυσκαμψία, η οποία συστηματικά είναι μεγαλύτερη. Παρ'ότι εισάγουμε νόμους που αντιστοιχούν σε λεία διεπιφάνεια παίρνουμε και εμείς εξίσου υψηλές τιμές με το πείραμα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως η μικρή διαφορά που εισάγουμε στο πάχος του μανδύα, άρα και στη συνολική αντοχή του υποστυλώματος. Η διαφοροποίησή μας αυτή ισοσταθμίζει τη σχέση λείας διεπιφάνειας που έχουμε θεωρήσει.

Η μεγάλη δυσκολία στην επαλήθευση της λειτουργίας μιας διεπιφάνειας είναι η γνώση των πραγματικών χαρακτηριστικών της. Η αντιμετώπιση της άγνοιας αυτής γίνεται μέσω της αξιοποίησης των πειραμάτων της βιβλιογραφίας για τις κατηγορίες διεπιφανειών σκυροδέματος. Ο νόμος τ-s που θα κριθεί ότι εφαρμόζει στο ενισχυμένο υποστυλώμα πιθανότατα να απέχει από τη φύση. Εκτός αυτού οι καταστατικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της διεπιφάνειας εισήχθηκαν ενιαίες για όλες τις πλευρές τις διεπιφάνειας και σ' όλο το ύψος αυτών. Το γεγονός αυτό εισάγει αναμφισβήτητα μεγάλες αποκλίσεις για περιοχές των διεπιφανειών. Οι τιμές που εισήχθηκαν επιλέχθηκαν με βάση της μέγιστες των ορθών τάσεων και είχαν ως στόχο να καλυφθεί η μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση. Αυτό επίσης συνέβαλε στο να παίρνουμε αυξημένα αποτελέσματα σε σχέση με τα πειράματα. Κρίνοντας από όλ' αυτά θεωρούμε ότι η προσέγγιση που έγινε ήταν πολύ καλή και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν πράγματι να αναπαραστήσουν τη λειτουργία της διεπιφάνειας στο προσομοίωμα.

Από τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν f1 και i1, κρίνουμε ότι η μέθοδος των ελατηρίων είναι πιο φιλική στη χρήση, μας δίνει περισσότερες επιλογές καθορισμού και εισαγωγής δεδομένων και οι νόμοι F-D που εισάγουμε προέρχονται από απλή αναγωγή του νόμου τ-s. Για αυτούς τους λόγους, όπως και άλλους που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια θα δοθεί βάση στην παρούσα εργασία στη χρήση της μεθόδου των ελατηρίων.

Τέλος, αξιοσημείωτη είναι η διαφορά στο χρόνο επίλυσης του κάθε μοντέλου από το Ansys. Το μοντέλο με τις επιφάνειες τριβής χρειάζεται 3.30' για να επιλυθεί ενώ αυτό με τα ελατήρια 1.00' Η διαφορά αυτή είναι κάτι παραπάνω από καθοριστική ώστε να επιμείνουμε στην προσομοίωση της διεπιφάνειας με ελατήρια (COMBIN39). Παρ' όλο που με τη μέθοδο των ελατηρίων εισάγουμε 3 στοιχεία σε κάθε κόμβο έναντι, δύο επιφανειακών στοιχείων στη μέθοδο των στοιχείων επαφής (CONTA174) υπάρχει λόγος που η επίλυση είναι λιγότερο επιβαρυνόμενη. Η εύρεση λύσης στα επιφανειακά στοιχεία γίνεται μέσω σημείων Gauss, τα οποία πολλαπλασιάζουν τις εξισώσεις για κάθε ένα από τα επιφανειακά στοιχεία τριβής, χωρίς να αυξάνεται θεαματικά η ακρίβεια της προσομοίωσης.

## 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

### 4.4. Ενισχυμένα υποστυλώματα οπλισμένης διεπιφάνειας μανδύα

#### 4.4.1. Πείραμα

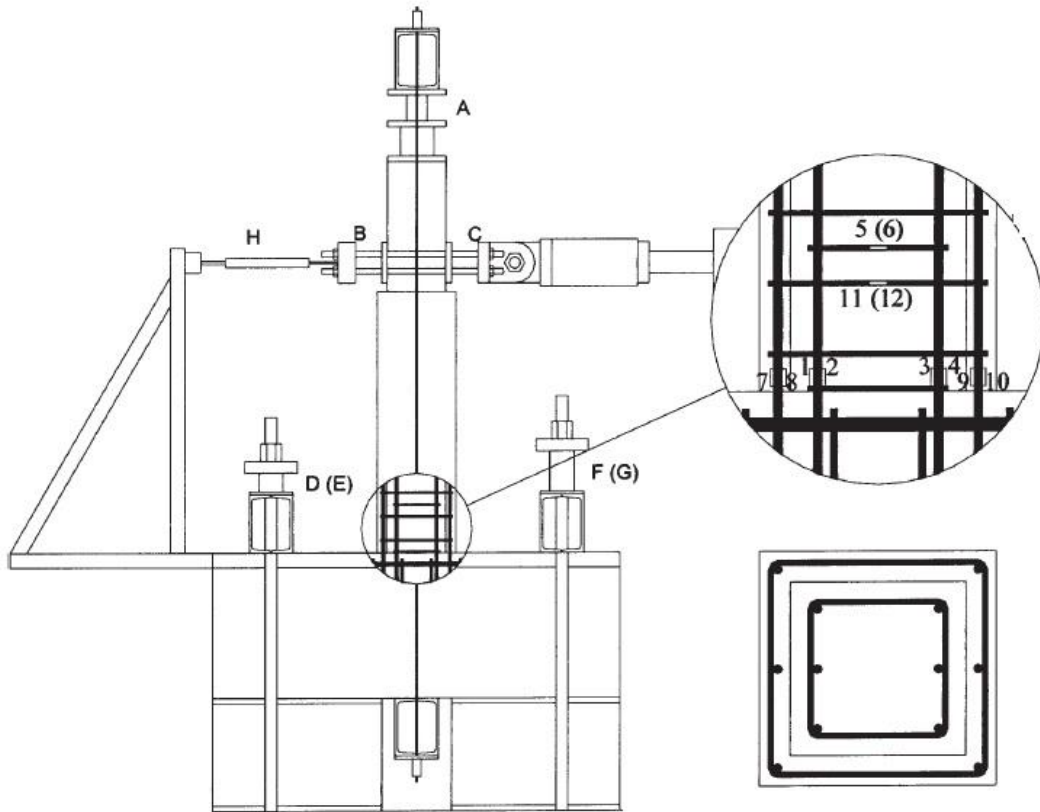
Το επόμενο πείραμα που επιδιώκουμε να επαληθεύσουμε αναλυτικά είναι το πείραμα S6 των Eduardo Julio, Fernando Branco και Vitor Silva (2005) , όπου χρησιμοποιούν οπλισμένη διεπιφάνεια αρχικού υποστυλώματος - μανδύα. Το δοκίμιο στα γενικά χαρακτηριστικά του είναι ακριβώς το ίδιο με το προηγούμενο S4 που παρουσιάσαμε.

Το εσωτερικό υποστυλωμα είναι διατομής 200x200 και ύψους 1,35m. Ο μανδύας που τοποθετείται είναι πάχους 35mm και εκτείνεται μέχρι ύψους 0,9m.

Το σκυρόδεμα του αρχικού υποστυλώματος είναι C35, με μετρημένη τιμή 35,13kN στα δοκίμια ελέγχου. Ο μανδύας λόγω του μικρού πάχους του κατασκευάζεται από ένεμα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Η ποιότητά του είναι C80, με εργαστηριακή μέτρηση θραύσης δοκιμίου στα 81,68kN. Οι οπλισμοί του εσωτερικού είναι 6Φ10 οι διαμήκεις και συνδετήρες Φ6/150. Ο μανδύας οπλίζεται με 6Φ10 και Φ6/75 αντίστοιχα. Οι ποιότητα των οπλισμών είναι ενιαία, S400.

Η διαφοροποίηση που γίνεται στο S6 σε σχέση με το S4, είναι η επιμελής προετοιμασία της διεπιφάνειας με αμμοβολή και η τοποθέτηση βλήτρων. Σύμφωνα και με προγενέστερες έρευνες των ίδιων, Julio, Branco και Silva (2003), η αμμοβολή είναι η καλύτερη μέθοδος εκτράχυνσης. Από την άλλη η χρήση ρητίνων επιπροσθέτως της αμμοβολής δε συνεισφέρει. Η χρήση βλήτρων όπως αναφέρεται και κανονιστικά ,αλλά επαληθεύεται και από σειρά πειραμάτων, αυξάνει τη διατμητική αντίσταση. Παρόλ' αυτά η τοποθέτηση βλήτρων λόγω και του μικρού μήκους αγκύρωσης στο μανδύα δεν αυξάνει την αντίσταση σε αποκόλληση του μανδύα. Στο δοκίμιό μας τοποθετούνται 4 βλήτρα Φ10 ανά πλευρά. Σύμφωνα με τον τρόπο εφαρμογής, τα βλήτρα αγκυρώνονται στο παλιό σκυρόδεμα σε οπή με ρητίνη ενώ στο νέο σκυρόδεμα δια συνάφειας.

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχ.4.35 το υποστυλωμα θεμελιώνεται σε πέδιλο, το οποίο με τη σειρά του πακτώνεται στο ισχυρό δάπεδο του εργαστηρίου με προεντεταμένες ράβδους. Η επιβολή των φορτίσεων γίνεται με υδραυλικά έμβολα. Κατακορύφως επιβάλλουν δύναμη 170kN, η οποία πάντως έχει μικρή διακύμανση στην τιμή της. Οριζοντίως εφαρμόζεται αυξανόμενη δύναμη δια του εμβόλου, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται και οι μετρήσεις μετατόπισης σε εκείνη τη στάθμη.



Σχ.4.35 Εργαστηριακή διάταξη επιβολής φορτίων

#### 4.4.2. Προσομοίωση

##### 4.4.2.1. Γενικά

Η προσομοίωση του μοντέλου S6 διαφέρει ελάχιστα από το S4 που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Η μόνη διαφοροποίηση είναι στους νόμους που χρησιμοποιούμε για να επαληθεύσουμε τη λειτουργία της οπλισμένης διεπιφάνειας. Η μοντελοποίηση της διεπιφάνειας θα γίνει και με τους 2 τρόπους. Ήδη έχουμε εκφράσει την προτίμησή μας στη μέθοδο των ελατηρίων αλλά θα δοκιμάσουμε πάλι και τα επιφανειακά στοιχεία τριβής για νόμο οπλισμένης διεπιφάνειας  $f_3$ . Για την εισαγωγή των νόμων της διεπιφάνειας χρειαζόμαστε πάλι τιμή ορθής αναπτυσσόμενης τάσης στη διεπιφάνεια. Χρησιμοποιούμε πάλι την τιμή  $0,5\text{MPa}$ , αφού άλλωστε αυτός είναι ο τρόπος που έχουμε προτείνει για τον υπολογισμό της τάσης. Στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρουμε και στο κεφάλαιο 2, προτείνονται σχέσεις για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης ορθής τάσης από τα βλήτρα. Εμείς προτιμάμε τη μέθοδο που έχουμε παρουσιάσει καθώς μας δίνει μια σφαιρική εικόνα για την κατανομή των τάσεων ανά περιοχή της διεπιφάνειας. Απαιτείται βέβαια μια δοκιμαστική επίλυση για να πάρουμε τα μεγέθη  $\sigma_{sd}$ .

Πέρα από τη διεπιφάνεια, όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ίδια με την προσομοίωση του S4. Πρέπει να επισημανθεί και πάλι το γεγονός ότι εισάγουμε μανδύα πάχους  $40\text{mm}$  έναντι των  $35\text{mm}$  που είναι στο πείραμα. Αυτό αναμένεται να δώσει μεγαλύτερες τιμές στα μεγέθη διαρροής και αστοχίας, όπως έγινε και νωρίτερα.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

Παράλληλα, ο νόμος του σκυροδέματος που εισάγουμε όπως προτείναμε είναι ο νόμος c2 ενώ για το χάλυβα ο s2.

##### 4.4.2.2. Προσομοίωση διεπιφάνειας

###### 4.4.2.2.1. Μέθοδος επιφανειακών στοιχείων τριβής (CONTA174 και TARGE170)

Με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που χειριστήκαμε το δοκίμιο S4, εργαζόμαστε και στο S6. Πρέπει να εισάγουμε τιμή για τη συνοχή και για τον συντελεστή τριβής. Στο νόμο f1 για τη λεία διεπιφάνεια εισάγαμε το σταθερό  $\mu=0,4$  και εκτιμήσαμε ότι χρειάζεται κάποια τιμή συνοχής μη μηδενική. Στην τραχεία επιφάνεια λίγο διαφοροποιείται το σκεπτικό. Πάλι πρώτα καθορίζουμε έναν συντελεστή τριβής αναγκαστικά σταθερό για κάθε τιμή της ορθής τάσης. Από την καμπύλη του ΚΑΝΕΠΕ για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής σε τραχεία διεπιφάνεια παίρνουμε μια αρκετά υψηλή τιμή 7,5. Η καμπύλη του κανονισμού δίνει πολύ υψηλές τιμές συντελεστή τριβής για μικρές ορθές τάσεις. Κρατώντας σταθερό το συντελεστή στο 7,5, ψάχνουμε την τιμή της συνοχής. Σε αυτήν την περίπτωση προτείνεται μηδενική συνοχή σε αντίθεση με το νόμο f1.

<b>CONTA174-TARGE170</b>		
	συνοχή (MPa)	συντελεστής Τριβής
Οπλισμένη διεπιφάνεια f3	0	7,5

**Πιν.4.2** Δεδομένα εισαγωγής μοντέλου f3, για οπλισμένη διεπιφάνεια

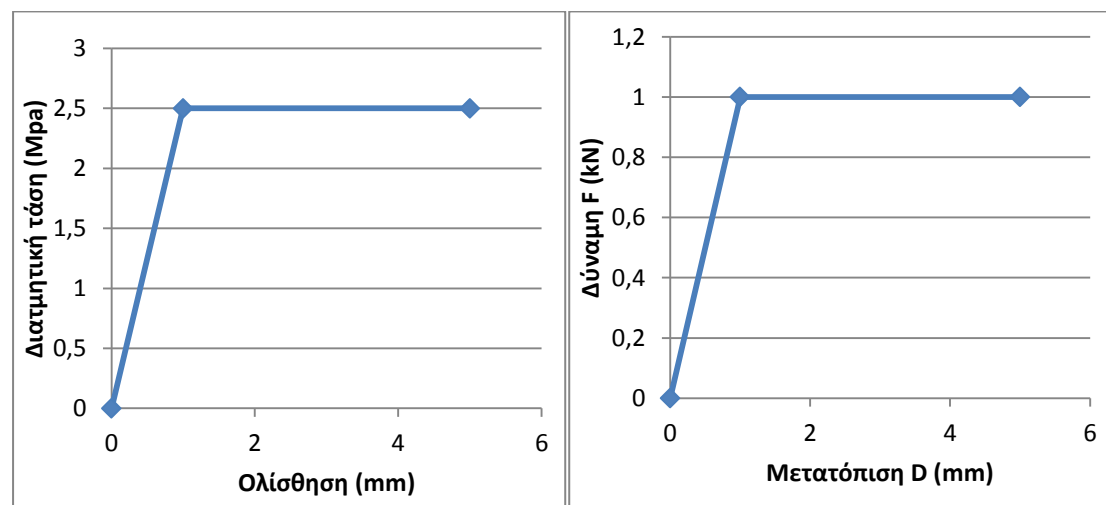
###### 4.4.2.2.2. Μέθοδος ελατηρίων (COMBIN39)

Η μέθοδος των ελατηρίων όπως έχει ήδη παρουσιαστεί μέχρι στιγμής εφαρμόζεται και στην περίπτωση οπλισμένης διεπιφάνειας. Επιλέγουμε να προσομοιώσουμε τη διεπιφάνεια με το συγκεκριμένο τρόπο, έναντι ενός πιο αναλυτικού μοντέλου με την εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων βλήτρων στο Ansys. Για την εισαγωγή των δεδομένων στο διάγραμμα F-D των ελατηρίων που είναι πάνω στη διεπιφάνεια χρησιμοποιούμε τα συμπεράσματα της εργασίας των Τάσιου, Βασιλοπούλου (2003). Το διάγραμμα που θα εισάγουμε για το νόμο i3 είναι πάντα διγραμμικό, όπως έχουμε επιλέξει. Από τη βιβλιογραφία βλέπουμε ότι η ολίσθηση όπου αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική αντίσταση είναι μεταξύ 0,1mm και 1mm. Εμείς ορίζουμε την ολίσθηση αυτή στην τιμή 1mm.

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση εξαρτάται από σειρά παραγόντων. Μερικοί από αυτούς είναι η διάμετρος του βλήτρου, η επικάλυψή του, η αγκύρωση και προφανώς και η πυκνότητα τοποθέτησης των βλήτρων. Ξεπερνούμε όλες αυτές τις

παραμέτρους υπολογίζοντας ξεχωριστά τη συνεισφορά του μηχανισμού της τριβής και του μηχανισμού βλήτρου και στη συνέχεια τα αθροίζουμε με τους κατάλληλους συντελεστές συνεισφοράς. Από τον τύπο των Τάσιου, Βιντζηλαίου (1986) υπολογίζεται η μέγιστη συνεισφορά τη τριβής  $\tau_{fud}=0,4\sqrt[3]{fcd^2\sigma cd}=3,74\text{MPa}$ , όπου  $f_{cd}$  είναι η αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος C35, ενώ  $\sigma_{cd}=0,5\text{MPa}$ , όπως έχουμε δεχθεί. Από τον τύπο του Rasmussen (1962)  $\tau_d=(1,3nd_b^2\sqrt{fcfy})/A_c=0,34\text{MPa}$ . Με τους συντελεστές συσχέτισης 0,7 για το μηχανισμό βλήτρου και 0,6 για αυτόν της τριβής, παίρνουμε συνολική μέγιστη διατμητική τάση 2,5MPa.

Έχοντας πλέον το επιθυμητό διάγραμμα τ-s που θέλουμε να εισάγουμε σε όλες τις διεπιφάνειες του δοκιμίου μας κάνουμε την αναγωγή σε διάγραμμα F-D. Έτσι παίρνουμε το διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω με μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη του ελατηρίου 1kN.



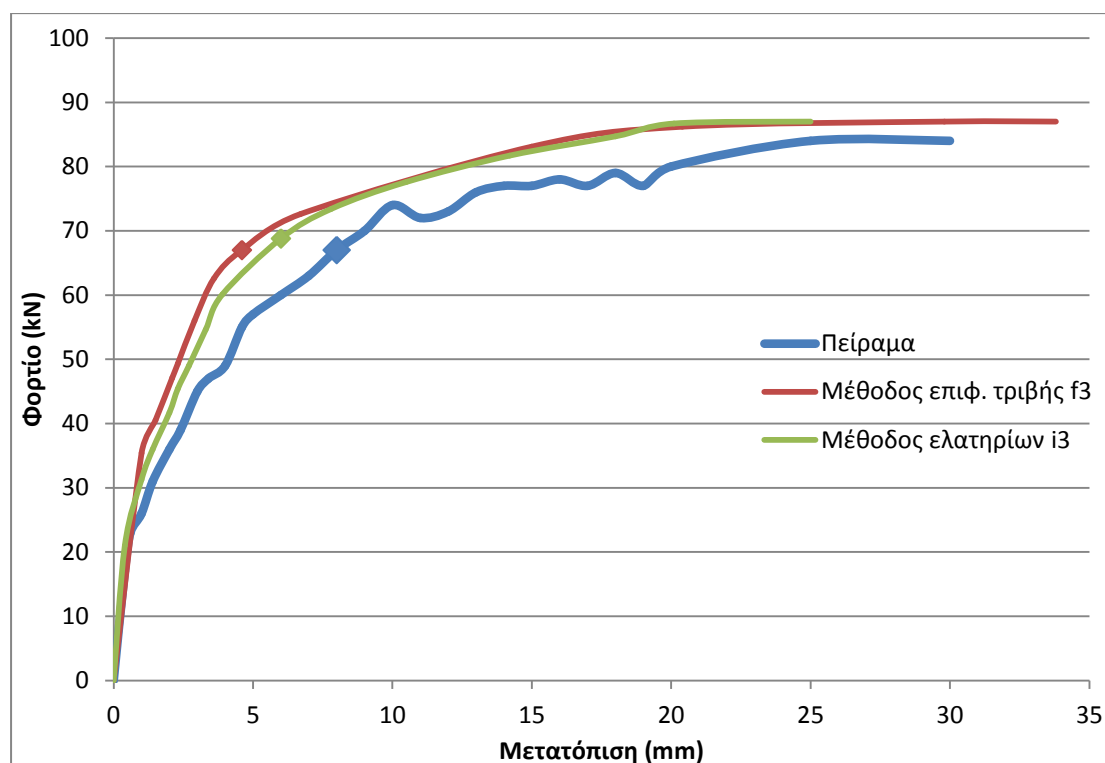
Σχ.4.36 Νόμος i3 για σπλισμένη διεπιφάνεια υποστυλώματος S6

#### 4.4.3. Ανάλυση

##### 4.4.3.1. Καμπύλη Φορτίου-μετατόπισης

Έχοντας βρει ουσιαστικά ένα κάτω όριο μιας ενισχυμένης κολώνας με μανδύα αμελώς τοποθετημένο (S4), επιχειρούμε να βρούμε πόσο περισσότερα μπορούμε να κερδίσουμε με μια σπλισμένη διεπιφάνεια (S6). Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν για το S6 δύναμη διαρροής 66,7kN και μέγιστη 83,8kN. Η ανάλυσή μας προσέγγισε με ακρίβεια την πειραματική συμπεριφορά στις μέγιστες φορτίσεις και πήραμε για τη μέθοδο των ελατηρίων μέγιστη δύναμη 87kN όπως και με τη μέθοδο των επιφανειών τριβής. Οι καμπύλες των δύο μεθόδων που χρησιμοποιήσαμε f3 και i3 σχεδόν ταυτίζονται. Αυτό δείχνει ότι οι προτεινόμενες μέθοδοι προσέγγισης των διαγραμμάτων τ-s είναι ισοδύναμες.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

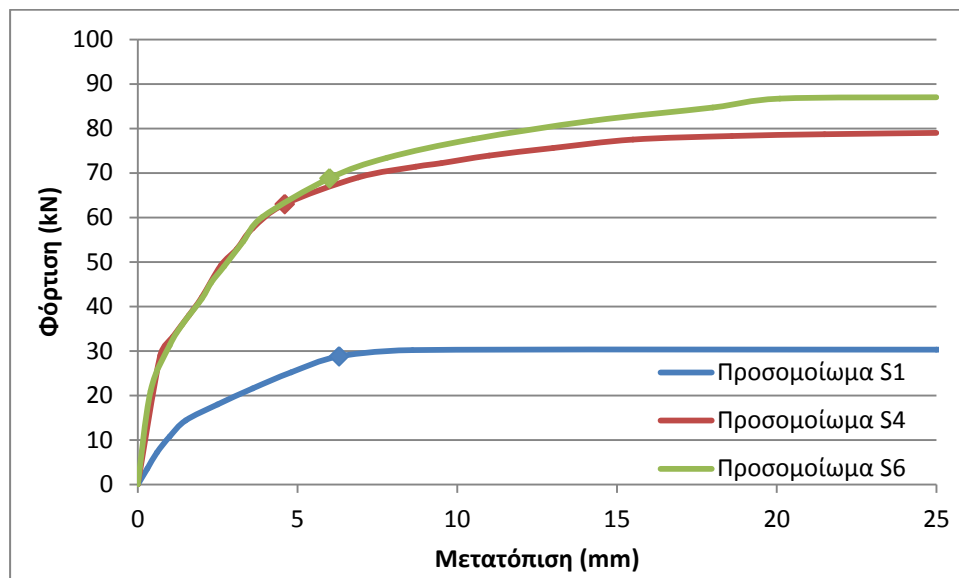


Σχ.4.37 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος S6

Η προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων που έγινε δεν είναι πολύ ικανοποιητική σε πρώτη προσέγγιση, αλλά επιδέχεται βελτιώσεις σε μελλοντική έρευνα καθώς η προσομοίωση της λειτουργίας τη διεπιφάνειας μανδύα δεν έχει ερευνηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία όσο άλλα στοιχεία προσομοίωσης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλυτικές καμπύλες δείχνουν να είναι σταθερά ισχυρότερες από την πειραματική. Η απόκλιση είναι τις τάξεις του 3-15%. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι ήδη γνωστοί και το αποτέλεσμα είναι σχετικά αναμενόμενο. Αρχικά έχουμε εισάγει στο πρόγραμμα μανδύα μεγαλύτερο του πραγματικού κατά 5mm. Με απλοϊκούς υπολογισμούς μπορούμε να πούμε ότι εξαιτίας αυτού παίρνουμε μια σταθερή προσαύξηση της τάξεως του 4%. Επιπλέον, οι προτεινόμενες μέθοδοι για την προσομοίωση του μανδύα αποσκοπούν στην κάλυψη της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης με αποτέλεσμα να εισάγουμε νόμους που θα λαμβάνουν υπόψη όχι τόσο ακραίες τιμές. Στη βάση αυτών των παραμέτρων μπορούμε να βγάλουμε τα υπόλοιπα συμπεράσματα.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η συνήθης κατασκευή μανδύα αλλά και η επιμελέστερη ακόμα περισσότερο πλησιάζουν πολύ τη συμπεριφορά ενός μανδύα με πλήρη συνάφεια. Ειδικότερα όμως, αρχίζοντας από την επεξεργασία της διεπιφάνειας με εκτράχυνση, αμμοβολή αλλά και με χρήση βλήτρων και καβίλιων πετυχαίνουμε αποτελέσματα πολύ πιο κοντά σε συμπεριφορά πλήρους (μονολιθικής) σύνδεσης παλιού και νέου σκυροδέματος. Ποσοτικά τα πειραματικά αποτελέσματα απέχουν λιγότερο από 7% από το ιδεατό μονολιθικής συμπεριφοράς. Για το πείραμα S6 συγκεκριμένα, η πειραματική μέγιστη φόρτιση είναι 83,8kN, μεγαλύτερη και από τη θεωρητική τιμή πλήρους σύνδεσης του μανδύα που θα έδινε 82,9kN. Αυτό, από μόνο του δείχνει ότι

μπορούμε με χρήση βλήτρων να πετύχουμε εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό μονολιθικότητας που μπορεί να ξεπερνά και τη μονάδα. Ανάλογα συμπεράσματα καταγράφουν και άλλοι ερευνητές όπως ο Βανδώρος (2005). Με αυτές τις πρώτες παρατηρήσεις αντιλαμβανόμαστε την αποδοτικότητα της μεθόδου των μανδύων και της ορθής προσομοίωσης της διεπιφάνειας παλιού και νέου σκυροδέματος.



Σχ.4.38 Συγκριτικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης S1,S4,S6

Στο σημείο αυτό συγκρίνουμε τα προσομοιώματα S1, S4 και S6 που έχουμε αναλύσει. Τα γενικά συμπεράσματα που βγαίνουν από αυτήν την απεικόνιση είναι αντίστοιχα με αυτά από τα πειράματα. Η απόδοση του μανδύα είναι πολύ μεγάλη, ενώ η περίπτωση σχετικά λείας διεπιφάνειας δεν απέχει πολύ από την οπλισμένη .

#### Δυσκαμψία

Η εφαπτομενική δυσκαμψία των καμπυλών πλησιάζει ικανοποιητικά τα πειράματα. Η αρχική κλίση εφαρμόζει απόλυτα ενώ μόνο στο κομμάτι μεταξύ αρχικής ρηγματώσης και πρώτης διαρροής έχουμε μικρή απόκλιση. Η πειραματική μέτρηση στο δοκίμιο S6 έδωσε τέμνουσα δυσκαμψία στη διαρροή 8,6MN/m. Η δυσκαμψία από τα προσομοιώματά μας S6 είναι 9,82 MN/m. Πάλι η δυσκαμψία στις αναλύσεις μας είναι ψηλότερη κατά 14% και αυτό οφείλεται στη μετατόπιση διαρροής που στο πείραμα είναι 7,9mm ενώ στις αναλύσεις 6mm.

Παρατηρούμε ότι συστηματικά παίρνουμε μικρότερες παραμορφώσεις στις προσομοιώσεις μας από τη φύση. Αυτό αιτιολογείται από αρκετούς λόγους που δεν μπορούμε να τους αναιρέσουμε στη φάση αυτής της ανάλυσης. Αρχικά η πλήρης πάκτωση στη βάση του υποστυλώματος αφαιρεί την ευκαμψία και τη δυνατότητα στροφής στη βάση οπότε αυξάνει τη δυσκαμψία. Ιδίως στην περίπτωση ενίσχυσης με μανδύες αυτό το γεγονός οξύνεται καθώς και η συνεισφορά του μανδύα με το πολύ υψηλότερης ποιότητας σκυρόδεμα ακολουθεί αυτήν του αρχικού υποστυλώματος. Επίσης είδαμε και νωρίτερα την

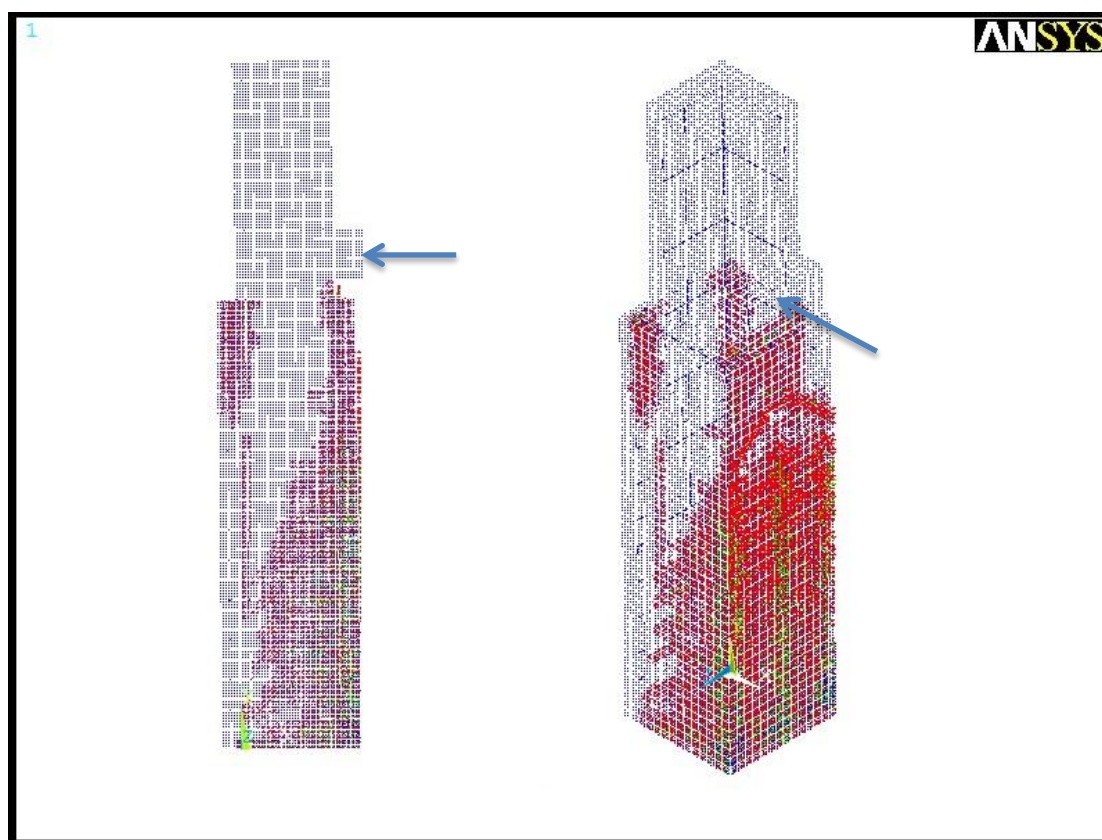


#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

επίδραση της μορφής του διαγράμματος του υλικού του σκυροδέματος c2 στο αρχικό τμήμα της καμπύλης. Τέλος, στα προσομοιώματα ενισχυμένων υποστυλωμάτων με τα μοντέλα γενικής εφαρμογής που χρησιμοποιούμε χάνεται σε κάποια βαθμό η ακρίβεια των μηχανισμών στις χαμηλές παραμορφώσεις. Ο λόγος όπως ήδη έχει εξηγηθεί σχετίζεται με το γεγονός ότι εισάγουμε τιμές στα προσομοιώματα της διεπιφάνειας για τις υψηλότερες τιμές.

##### 4.4.3.2. Μορφή αστοχίας υποστυλώματος

Η αστοχία και αυτού του υποστυλώματος είναι καμπτική. Ο μανδύας δεν κινδυνεύει με αποφλοιώση και η απεικόνιση τόσο στο εργαστήριο όσο και στην προσομοίωση στο Ansys είναι η τυπική για καμπτική αστοχία. Στη συνέχεια βλέπουμε τη γραφική απεικόνιση που εξάγουμε από το πρόγραμμα για τις ρωγμές. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν πάλι οι ρωγμές που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια στην πλευρά που εν γένει θλίβεται. Αυτό υποδηλώνει την απαρχή της ρωγμής στη διεπιφάνεια χωρίς να είμαστε βέβαιοι τότε αυτή ανοίγει. Στα πειράματα δεν έχουν γίνει ιδιαίτερες επισημάνσεις πάνω στην ανάπτυξη αυτών των ρωγμών που εμφανίζονται. Ο τρόπος που προσομοιώνουμε τη διεπιφάνεια με τα ελατήρια στην εγκάρσια διεύθυνση θα μπορούσε να μας δείξει πότε έχουμε αποκόλληση του μανδύα. Η αστοχία όμως σε περιοχές της διεπιφάνειας απεικονίζεται μέσω των ρωγμών των γειτονικών στοιχείων σκυροδέματος. Οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε οποιαδήποτε διεύθυνση καταστρέφουν τα στοιχεία του σκυροδέματος και ουσιαστικά ατονούν τη συνεισφορά του μανδύα σε εκείνη την περιοχή.



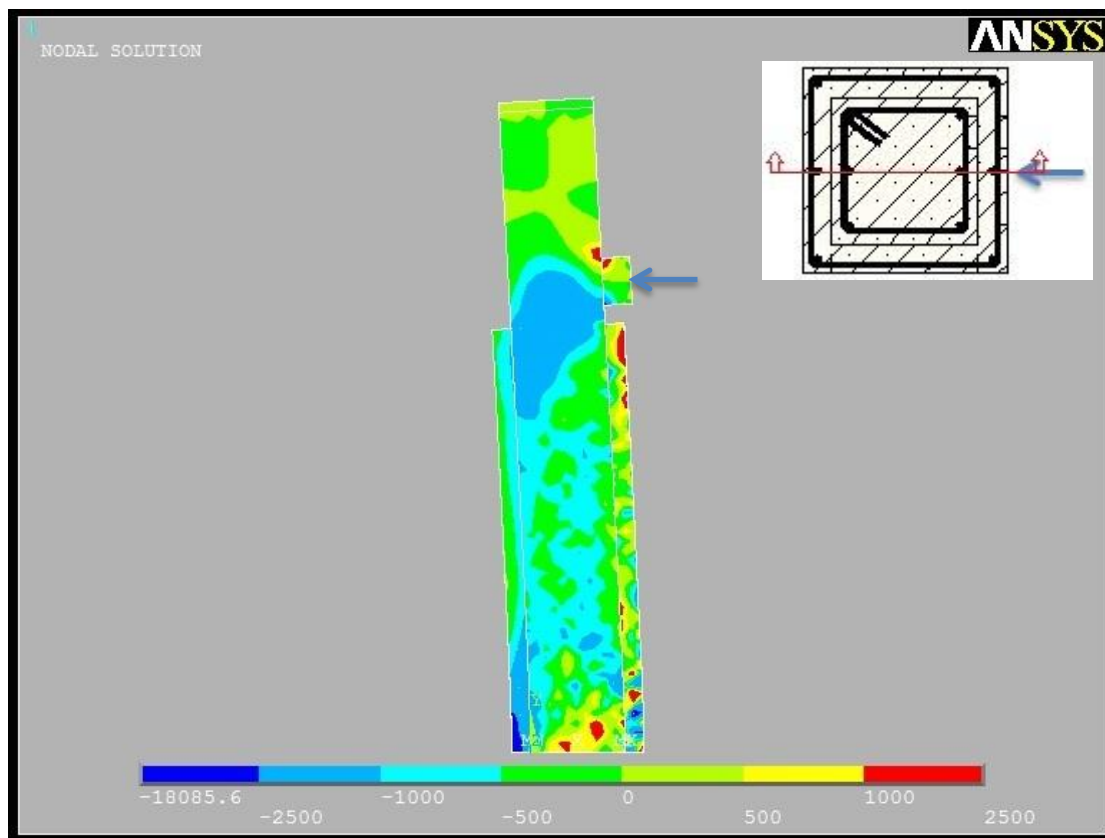
Σχ.4.39 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος S6

#### 4.4.3.3. Καμπυλότητα υποστυλώματος καθ' ύψος

Η καμπυλότητα του ενισχυμένου υποστυλώματος είναι παρόμοια για τις περιπτώσεις S4 και S6 και όπως θα φανεί και στη συνέχεια, οι τιμές της καμπυλότητας είναι μεγάλες παρ' ότι δεν προσομοιώνουμε ολόκληρη τη συμπεριφορά του υποστυλώματος μέχρι το φθίνοντα κλάδο.

#### 4.4.3.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος

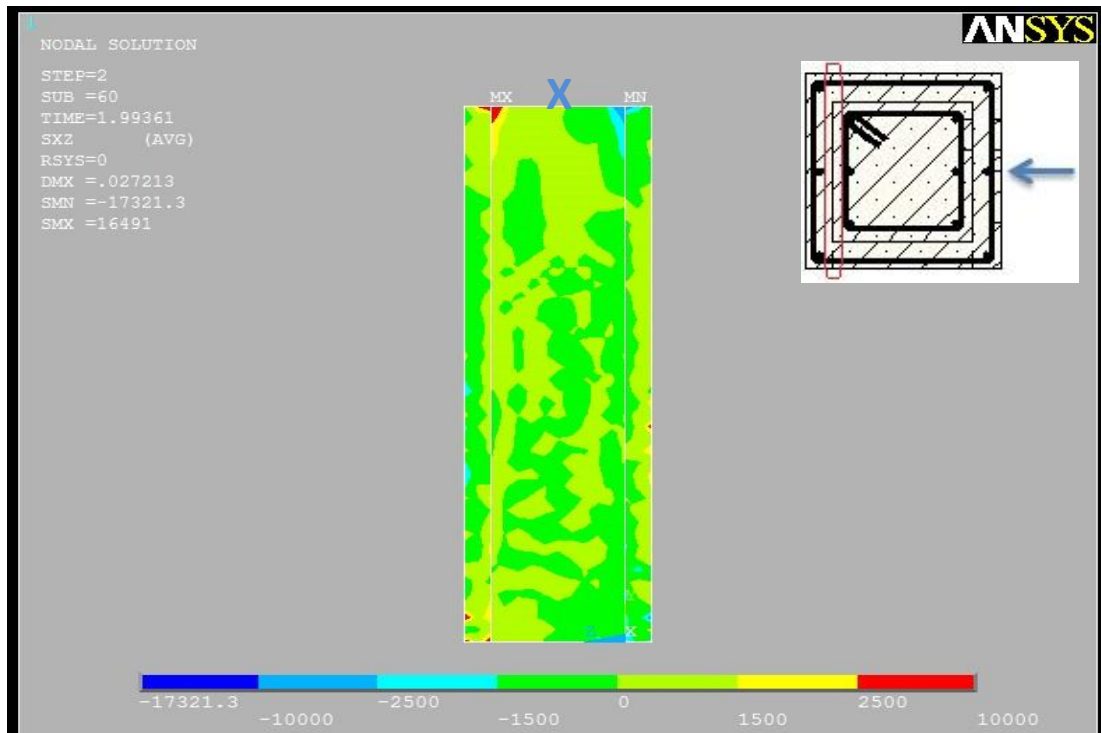
Ενδιαφέρον έχει η απεικόνιση των τάσεων σε μια τομή του δοκιμίου μας. Η αναπαράσταση είναι ποιοτική και δεν μπορούμε να δούμε την ποσοτική κατανομή των τάσεων στις περιοχές της διεπιφάνειας του μανδύα. Παρ'όλ'αυτά αποτελεί μια πολύ ενδεικτική απεικόνιση της συνεργασίας που επιτυγχάνεται.



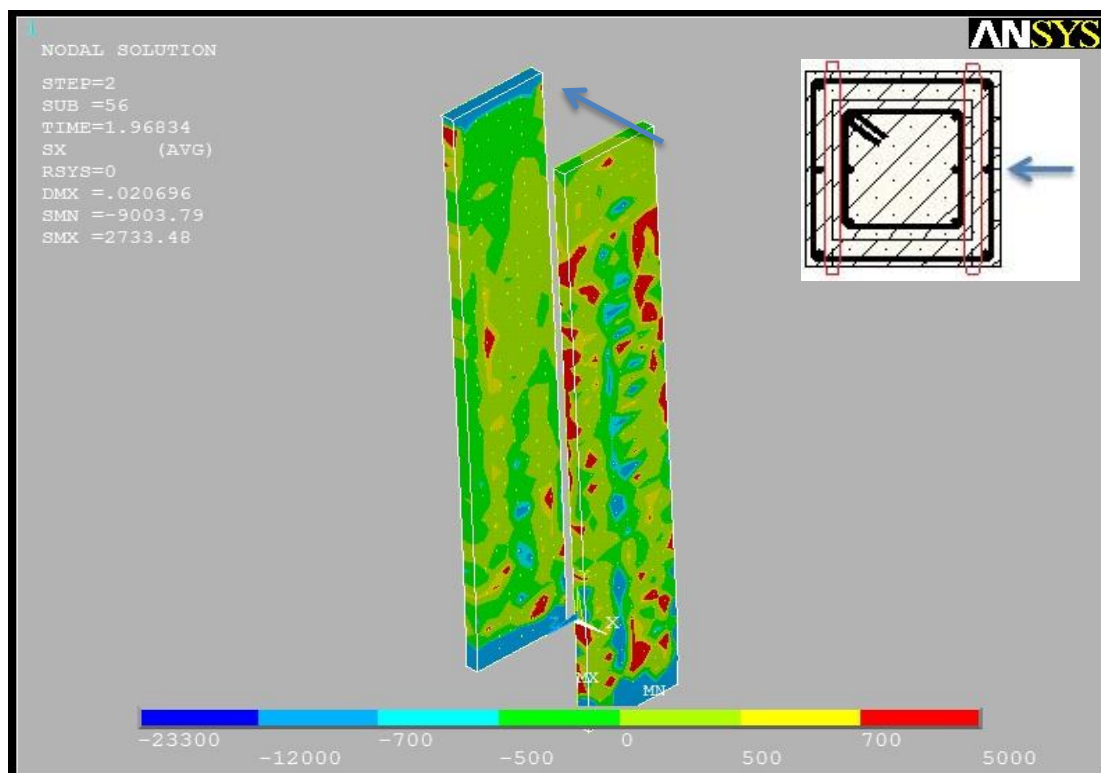
**Σχ.4.40** Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας υποστυλώματος S6

Στο Σχ.4.40 βλέπουμε τις κατακόρυφες διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται σε κατακόρυφη τομή στο μέσον του υποστυλώματος παράλληλα στη φόρτιση. Με τις χρωματικές διακρίσεις βλέπουμε ότι σε κανένα σημείο των διεπιφανειών δεν υπερβαίνεται η μέγιστη τιμή των 2,5MPa που έχει καθοριστεί ότι μπορεί να αναπτύξει η σπλισμένη μας διεπιφάνεια. Πέραν αυτού, οι οριζόντιες διατμητικές τάσεις (Σχ.4.41) στις διεπιφάνειες είναι πολύ μικρότερες από τις κατακόρυφες. Αυτό το παρατηρούμε αφού οι τιμές των τάσεων μετά βίας ξεπερνούν τα 1,5MPa σε ελάχιστα σημεία.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS



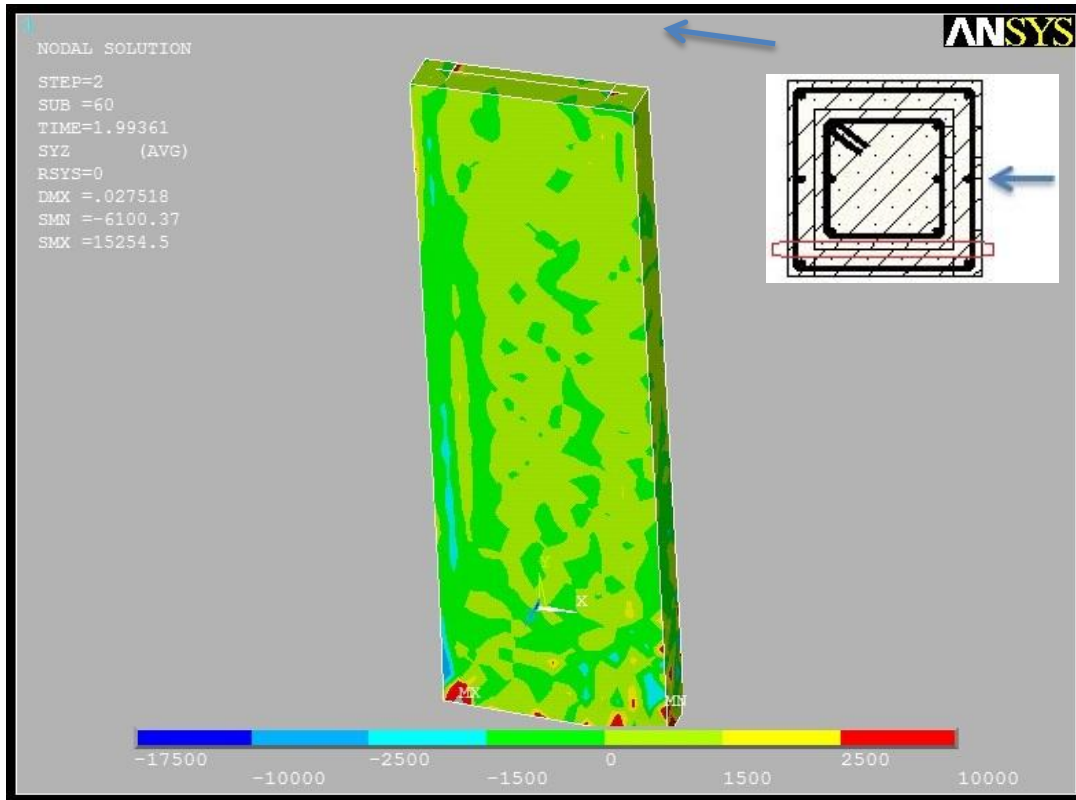
Σχ.4.41 Οριζόντιες διατμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας υποστυλώματος S6



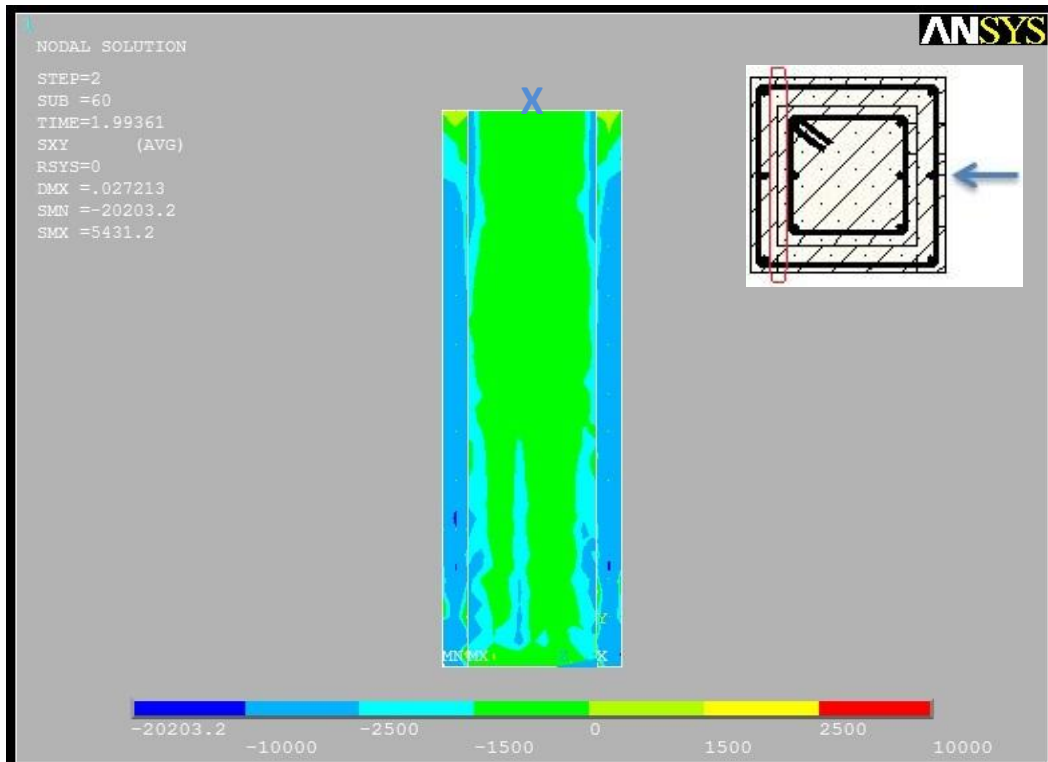
Σχ.4.42 Ορθές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος S6

Οι ορθές τάσεις στις πιο καταπονούμενες διεπιφάνειες πράγματι αναπτύσσουν ορθή τάση κοντά στο 0,5MPa, που είχαμε θεωρήσει. Εξαίρεση αποτελεί η βάση του υποστυλώματος όπου η τιμή υπερβαίνεται και κάποια σημεία στην εφελκυσμένη πλευρά. Μπορούμε, λοιπόν, να πούμε ότι η παραδοχή μας για την αντιπροσωπευτική τιμή της ορθής τάσης των διεπιφανειών ήταν σωστή.

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS



Σχ.4.43 Οριζόντιες διαμητικές τάσεις πλαινής διεπιφάνειας υποστυλώματος S6

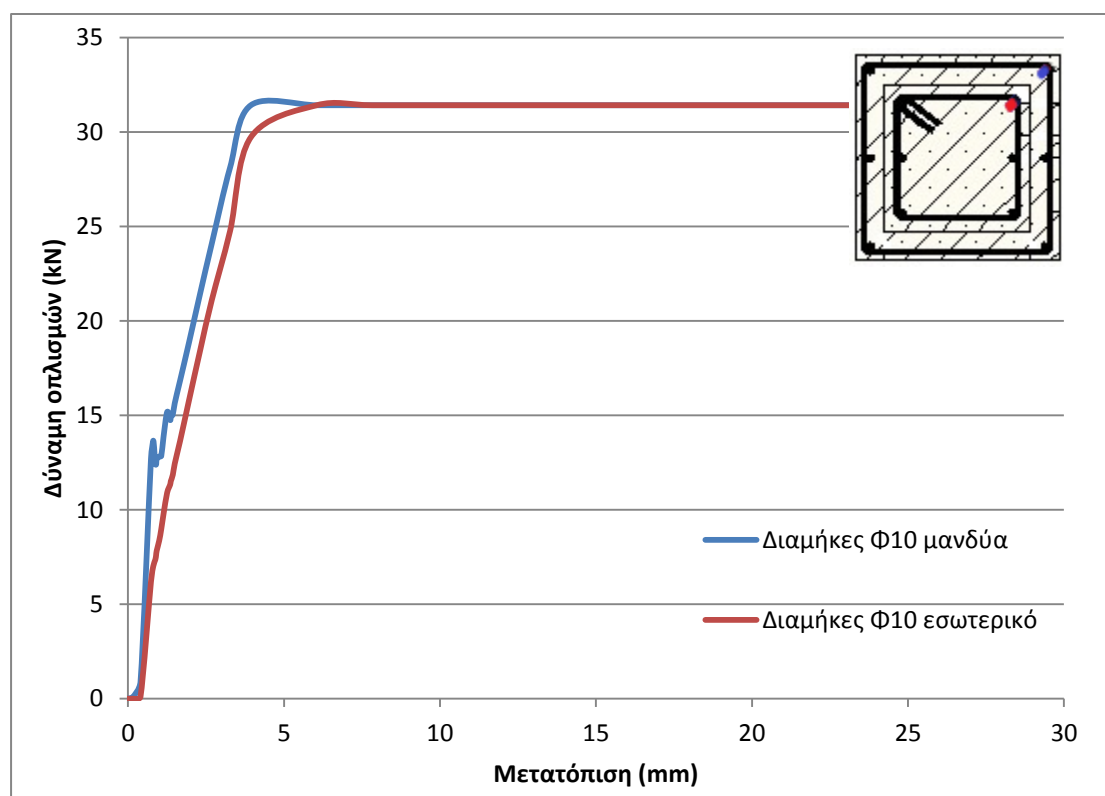


Σχ.4.44 Κατακόρυφες διαμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας υποστυλώματος S6

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

Καταλαβαίνουμε λοιπόν από τις τέσσερις πλευρές της διεπιφάνειας έχουμε την πιο θλιβόμενη, την εφελκυσμένη και τις πλαϊνές, όπου δεν αναπτύσσονται ιδιαίτερες τάσεις. Οι κατακόρυφες διατμητικές τάσεις είναι πάντα μεγαλύτερες από τις οριζόντιες.

##### 4.4.3.5. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σπλισμών



Σχ.4.45 Δύναμη διαμήκων σπλισμών υποστυλώματος S6

Οι διαμήκεις σπλισμοί είναι όλοι Φ10 και S400. Ο εξωτερικός χάλυβας διαρρέει ελάχιστα νωρίτερα από τον εξωτερικό. Η διαρροή του υποστυλώματος γίνεται σχεδόν στα 7mm και από το σημείο αυτό και μετά η συμπεριφορά των σπλισμών είναι πλήρως πλαστική. Άλλωστε ο νόμος που έχουμε εισάγει για το χάλυβα είναι ελαστοπλαστικός s2.

#### 4.4.4. Συμπεράσματα

Το δοκίμιο S6 προσομοιώθηκε με κύριο στόχο τη διερεύνηση της λειτουργίας της οπλισμένης διεπιφάνειας όπως έχουμε επιλέξει να τις προσομοιώσουμε. Η προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι σχετικά καλή για το εύρος της διερεύνησης που έγινε. Τα δεδομένα μιας οπλισμένης διεπιφάνειας και οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διατμητική της αντοχή είναι πολλές. Για το λόγο αυτό, η προσέγγιση που έγινε με βάση μια ενιαία τιμή για όλες τις πλευρές της διεπιφάνειας, θεωρούμε ότι αποτελεί μια πολύ καλή αρχική μέθοδο προσέγγισης.

Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν f3 και i3 πηγάζουν από τον ίδιο νόμο τ-s για οπλισμένη διεπιφάνεια, αλλά με διαφορετικές παραδοχές καταλήγουμε στην εισαγωγή των δεδομένων. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε και από τους δύο τρόπους είναι κοντινά μεταξύ τους. Οι διαφορές εντοπίζονται πριν το σημείο της διαρροής όπου η γενικότητα της χρήσης κοινών νόμων σε όλες τις διεπιφάνειες αποκλίνει από την πραγματική συμπεριφορά. Στη σύγκριση με το πείραμα εντοπίζονται αποκλίσεις.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στις ως τώρα αναλύσεις μας είναι της τάξεως του 3-14%. Οι λόγοι εν πολλοίς έχουν ήδη εξηγηθεί. Η μη ενδοτικότητα της πάκτωσης του προβόλου, η πλήρης συνάφεια των διαμήκων οπλισμών με το σκυρόδεμα είναι παραδοχές που έχουμε θεωρήσει εξ αρχής. Οι λόγοι αυτοί συστηματικά δίνουν μικρότερη μετατόπιση διαρροής και κατά συνέπεια μεγαλύτερη τέμνουσα δυσκαμψία. Η απόκλιση από αυτούς τους λόγους υπολογίζεται σε 5%. Παράλληλα, η προσομοίωση μανδύα με μεγαλύτερο πάχος από το πραγματικό, έδινε συστηματικά τιμές δύναμης περίπου 3% μεγαλύτερες από αυτές που θα είχαμε στην ορθότερη προσομοίωση. Το σφάλμα αυτό εξαλείφεται στα επόμενα κεφάλαια όπου κατασκευάζουμε εξ αρχής ακριβή γεωμετρικά προσομοιώματα. Τέλος, οι μέθοδοι προσομοίωσης της διεπιφάνειας που προτείνουμε στηρίζονται στις μέγιστες τιμές ορθών τάσεων, πράγμα που σημαίνει ότι για μικρές ολισθήσεις υπερεκτιμούν τη αναπτυσσόμενη διατμητική δύναμη και τη δυσκαμψία ολίσθησης. Αυτός ο λόγος επιτείνει την απόκλιση στα αρχικά στάδια της φόρτισης.

Οι συντελεστές μονολιθικότητας που πετυχαίνουμε αγγίζουν τη μονάδα. Αυτό είναι άλλωστε και το συμπέρασμα από τα πειράματα που είχαν διενεργήσει οι Eduardo Julio, Fernando Branco και Vitor Silva (2005). Γίνεται αντιληπτό ότι εισάγοντας βλήτρα στη διεπιφάνεια υποστυλώματος-μανδύα μπορούμε να πετύχουμε πλήρη αξιοποίηση των υλικών μας. Πειραματικά οι ίδιοι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η παρουσία οπλισμού κάθετα στη διεπιφάνεια αυξάνει μεν τις αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις αλλά δεν προσφέρει περισσότερο στον κίνδυνο αποφλοίωσης. Εν τούτοις, σε όλα τα δοκίμια που επαληθεύτηκαν δεν εμφανίστηκε αποκόλληση του μανδύα. Παρ' όλα αυτά στις αναλύσεις εντοπίζουμε τα σημεία απ' όπου μπορεί να ξεκινήσει το φαινόμενο αυτό.

Ως γενικό συμπέρασμα θεωρούμε ότι η μέθοδος των ελατηρίων είναι αξιόπιστη. Εν αρχή, απαιτείται περισσότερη διερεύνηση του εισαγόμενου νόμου τ-s που θεωρούμε ότι προσεγγίζει τη λειτουργία της οπλισμένης διεπιφάνειας. Η επιλογή τύπων της βιβλιογραφίας μας δίνει καλά αποτελέσματα. Για τις οπλισμένες διεπιφάνειες μανδύα φαίνεται ότι η προσέγγιση με τους τύπους της βιβλιογραφίας είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα απ' ότι ήμασταν στο δοκίμιο S4 με τη λεία διεπιφάνεια. Το επόμενο βήμα

#### 4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ANSYS

που μπορούμε να κάνουμε είναι να χωρίσουμε τις διεπιφάνειες σε περιοχές διαφορετικών εντάσεων. Η παραδοχές μας για τα μοντέλα f3 και i3 γίνονται για τις μέγιστες τιμές ορθών τάσεων. Αυτή η παραδοχή δίνει μεγαλύτερες τιμές για τις περιοχές των μικρών ολισθήσεων. Κατά συνέπεια, παίρνουμε λίγο αυξημένη συνολική απόκριση του δοκιμίου. Με διαχωρισμό της επιφάνειας σε περιοχές διαφορετικών τάσεων εκτιμάμε ότι θα πετύχουμε ακόμα ακριβέστερα αποτελέσματα. Σε αναλύσεις που διενεργήθηκαν με χωρισμό των διεπιφανειών σε άνω και κάτω τμήμα με διαφορετικό νόμο σε κάθε μια από τις περιοχές, δεν υπήρξε αισθητή βελτίωση. Κατά συνέπεια κρίνουμε ότι ο ενιαίος νόμος είναι ικανοποιητικός για το επίπεδο της διερεύνησης που κάνουμε.

Τέλος, οι αναλύσεις των δοκιμίων S6 χρειάζονται αρκετά μεγαλύτερο χρόνο για να επιλυθούν από το S1. Το S1 χρειάστηκε περίπου 30', ενώ το S6 χρειάζεται 2.30' με τη μέθοδο των ελατηρίων και 4.00' με τη μέθοδο των επιφανειών τριβής. Όλες οι αναλύσεις έχουν γίνει με τον ίδιο τετραπύρρηνο επεξεργαστή AMD , στα 1,4GHz και εγκατεστημένη μνήμη RAM 6GB.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

### 5.1. Γενικά

Με τη βοήθεια υπολογιστικών μοντέλων μπορούμε πιο εύκολα και γρήγορα να διερευνήσουμε τις μεθόδους ενίσχυσης υποστυλωμάτων χωρίς να χρειάζεται συνεχώς να τις ελέγχουμε σε πειραματικές διατάξεις. Απαραίτητη είναι βεβαίως η χρήση και η γνώση πειραματικών αποτελεσμάτων που θα βεβαιώσουν τη σωστή μοντελοποίηση και τη βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων. Έχοντας ήδη εξετάσει αρκετές από τις παραμέτρους για την ακριβέστερη δυνατή προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων στα προηγούμενα κεφάλαια, είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε σειρά υπολογιστικών μοντέλων που θα μας βοηθήσουν να εξάγουμε κυρίως ποιοτικά αλλά και ποσοτικά συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθώντας τα βήματα και τις μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε για την επαλήθευση του Ansys νωρίτερα, αρχίζουμε τη διερεύνηση μας σε υποστυλώματα με πιο συνήθη χαρακτηριστικά όσον αφορά τις χρησιμοποιούμενες ποιότητες υλικών. Εξετάζουμε το τυπικό υποστυλόμενο μιας ελληνικής 5όροφης οικοδομής της δεκαετίας του '60. Αφού αναλύσουμε το αρχικό υποστυλόμενο και καταγράψουμε τη συμπεριφορά του στη μονοτονική φόρτιση, το ενισχύουμε με μανδύα. Υπολογίσουμε μέσω του επόμενου προσομοιώματος το θεωρητικό μέγιστο μιας ενίσχυσης με μανδύα, ώστε να ξέρουμε στη συνέχεια σε τι ποσοστό αυτού μπορούμε να φτάσουμε. Ακολούθως, αναλύουμε τα προσομοιώματα όπου η λειτουργία της διεπιφάνειας παλαιού-νέου σκυροδέματος είναι ενεργή σύμφωνα με τις μεθόδους που έχουμε χρησιμοποιήσει και νωρίτερα.

Για τη φόρτιση όλων των προσομοιωμάτων στα κεφάλαια 5 και 6 χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη φόρτισης, όπως εφαρμόστηκε και στα πειράματα που είδαμε νωρίτερα. Η βάση των προβόλων είναι πλήρως πακτωμένη. Στην κορυφή των δοκιμών τοποθετείται πάλι πλήρως πακτωμένα μια «μεταλλική» πλάκα. Η πλάκα αυτή έχει ακριβώς τις διαστάσεις του αρχικού υποστυλώματος μας που είναι 300x300. Η πλάκα έχει πάχος μιας σειράς στοιχείων SOLID185. Όπως αποδείχθηκε και μετά τις αναλύσεις η πλάκα αυτή δεν ήταν τόσο απαραίτητη καθώς η επιβολή της κατακόρυφης φόρτισης γινόταν με κατανεμημένη πίεση και όχι με συγκεντρωμένο φορτίο. Η κατακόρυφη αυτή φόρτιση επιβαλλόταν πριν τη οριζόντια φόρτιση ώστε να μπορέσουν να αναπτύξουν τα στοιχεία σκυροδέματος όλη τη θλίψη που τους ασκείται πριν τον εφελκυσμό τους που οδηγεί και στις αστοχίες. Σε αντίθεση με τις δυσκολίες των πειραματικών διατάξεων, στην ανάλυση και σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων όπως το Ansys μπορούμε με ευκολία να διατηρήσουμε σταθερή την κατακόρυφη φόρτιση στην τιμή που επιθυμούμε.

Η οριζόντια φόρτιση ασκείται τόσο στα ενισχυμένα όσο και στα μη ενισχυμένα δοκίμια στο εσωτερικό τμήμα του υποστυλώματος. Ο μανδύας όταν τον τοποθετούμε σταματάει κάτω από το ύψος επιβολής της φόρτισης ώστε να μην επηρεάζεται από τοπικά φαινόμενα. Η λάμα διαστάσεων 120x300x6 αποτελείται από δύο στρώσεις στοιχείων SOLID185. Την τοποθετούμε σε μέσο ύψος 1,2m. Επακόλουθο των προηγούμενων είναι η



## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

κατασκευή μανδυών χαμηλότερα από το επίπεδο της λάμας, γι' αυτό ο μανδύας σταματά 15cm χαμηλότερα από το μέσον της λάμας.

Στην παρακάτω εικόνα από την εργασία του Βανδώρου (2005) φαίνονται οι χαρακτηριστικές εργαστηριακές διατάξεις που προσομοιώνουμε εμείς με τους παραπάνω τρόπους.



**Εικ.5.1** Εργαστηριακή διάταξη επιβολής στηρίξεων και φορτίσεων (Βανδώρος, 2005)

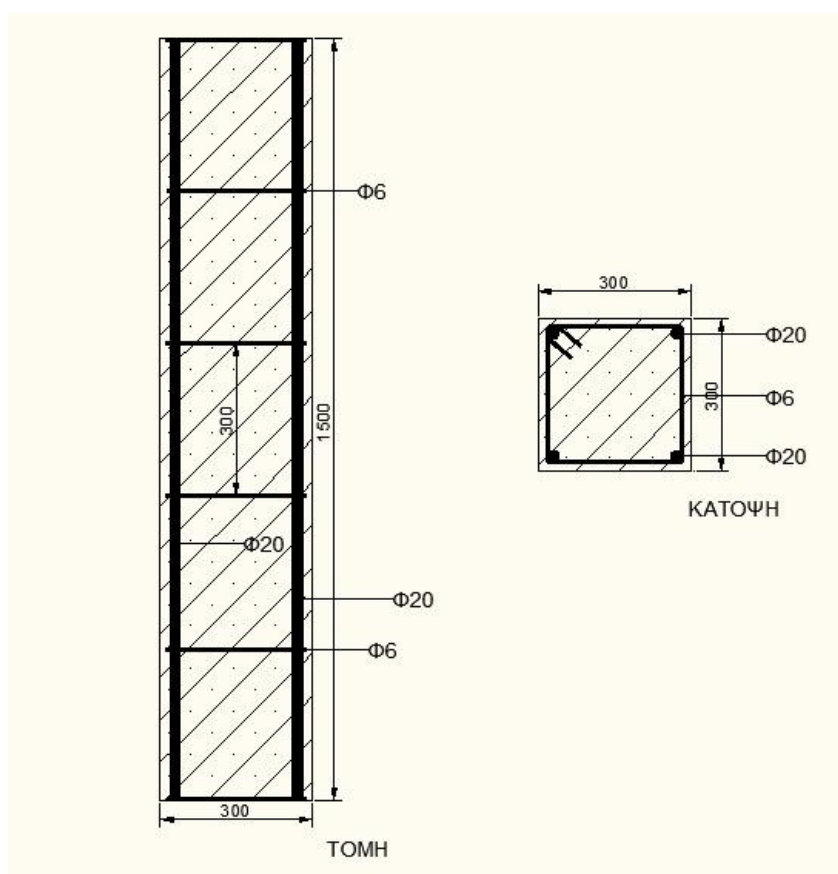
Στις αναλύσεις μας επιβάλουμε οριζόντια δύναμη και όχι μετατόπιση. Θα διευκόλυνε ιδιαίτερα να μπορούσαμε να εφαρμόσουμε μετατόπιση ώστε να καταγράφονται καλύτερα οι τιμές για τις μεγάλες παραμορφώσεις. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει το πρόγραμμα με τις συνθήκες στήριξης που εφαρμόζει στην περίπτωση εφαρμογής μετατόπισης είναι ανυπέβλητες. Όλα τα προσομοιώματα που παρουσιάζονται ακολουθούν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους ανάλυσης που έχουμε παρουσιάσει ως τώρα. Για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται σε κάθε περίπτωση αναλυτικά όλα τα δεδομένα του υποστυλώματος αλλά επικεντρωνόμαστε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και στη συγκριτική εξαγωγή συμπερασμάτων.

## 5.2. Αρχικό υποστύλωμα χωρίς ενίσχυση

## 5.2.1. Προσομοίωση I

## 5.2.1.1. Διαστάσεις

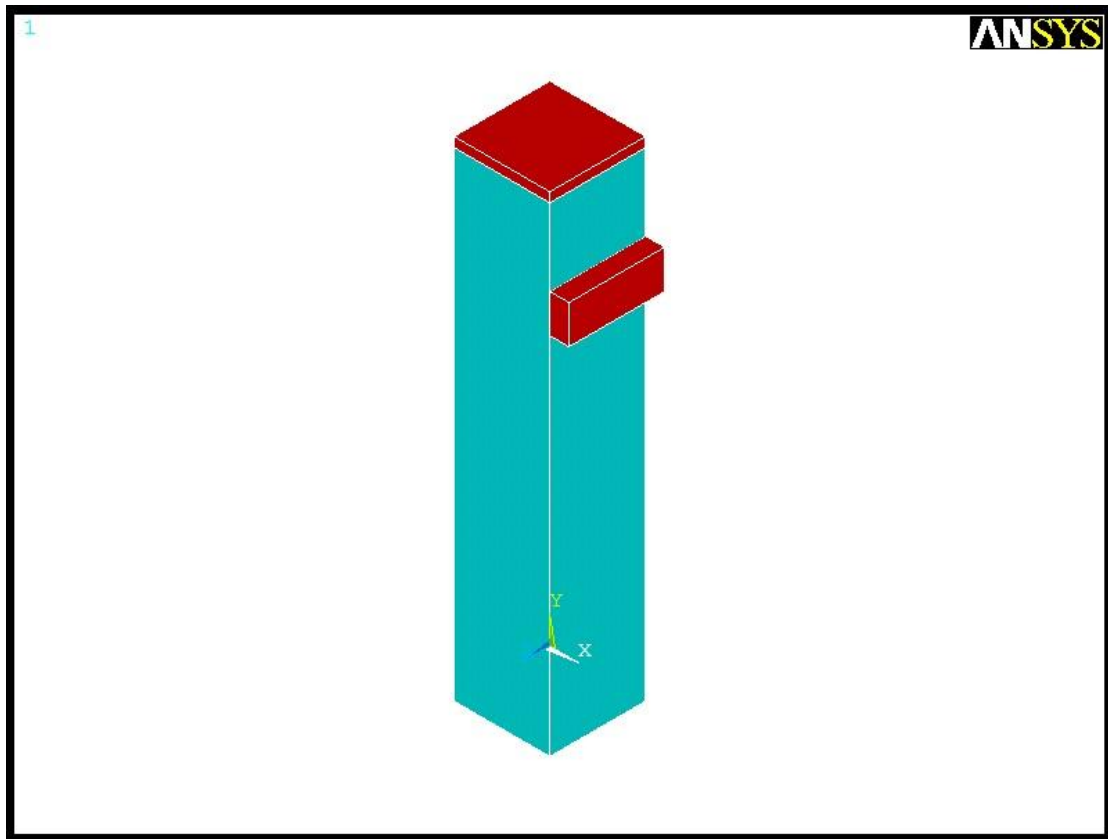
Επιλέγουμε ένα τυπικό υποστύλωμα της δεκαετίας του '60, το οποίο θα ενισχύσουμε στη συνέχεια με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Το υποστύλωμα είναι ορθογωνικών διαστάσεων διατομής 300x300. Η διάσταση αυτή είναι τυπική για τις ελληνικές κατασκευές της περιόδου εκείνης. Συνήθως τα εσωτερικά υποστυλώματα του ισογείου ήταν λίγο φαρδύτερα 400x400 και στένευαν όσο ανεβαίνουμε ορόφους μέχρι 250x250. Όπως και στο κεφάλαιο 4, έτσι και εδώ αναλύουμε τη συμπεριφορά του υποστυλώματος κατασκευάζοντας πρόβολο ύψους 1,2m. Το τυπικό ύψος ορόφου τη δεκαετία εκείνη ήταν 3m, ενώ η διάσταση του δοκαριού 250x500. Μοντελοποιούμε λοιπόν το ημιυποστύλωμα σε μορφή προβόλου. Πακτώνουμε πλήρως στη βάση του και η άνω πλευρά του προβόλου αντιστοιχεί στο μέσον του υποστυλώματος. Η πάκτωση στη βάση όπως έχει ήδη επεξηγηθεί επιλέγεται σε όλες τις σειρές αναλύσεων στο εξής αντί ελαστικών προσεγγίσεων. Στην κορυφή του προβόλου τοποθετούμε μεταλλική λάμα για την αποφυγή συγκέντρωσης των τάσεων. Για να εφαρμόσουμε την οριζόντια δράση σε ύψος 1,2m πρέπει να κατασκευάσουμε τον πρόβολο μας 1,5m, μεγαλύτερο δηλαδή κατά 0,3m, ώστε να τοποθετηθεί η λάμα φόρτισης στο ύψος 1,2m. Αντίστοιχα και με όσα κάναμε νωρίτερα τοποθετούμε μεταλλική λάμα 120x300x6 στη στάθμη επιβολής της οριζόντιας φόρτισης.



Σχ.5.1 Κάτοψη και τομή υποστυλώματος I

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

Στο Σχ.5.2 φαίνονται οι αντίστοιχοι όγκοι που σχηματίσαμε στο Ansys για την κατασκευή του Προσομοιώματος I (Initial). Με γαλάζιο διακρίνονται οι όγκοι του σκυροδέματος και με κόκκινο η πλευρική λάμα για την οριζόντια φόρτιση και η πλάκα για την κατακόρυφη. Φορτίζουμε κατακόρυφα με κατανεμημένη πίεση 4800kPa που αντιστοιχεί σε δύναμη 432kN. Η φόρτιση αυτή είναι συνήθης για τα φορτία σχεδιασμού της δεκαετίας του '60 για τα υποστυλώματα του ισογείου μιας 5όροφης οικοδομής και αντιστοιχεί σε ανηγμένη αξονική  $\nu=0,3$ . Η οριζόντια φόρτιση όπως έχει ήδη εξηγηθεί πολλές φορές γίνεται με οριζόντια σταδιακή αυξανόμενη δύναμη και όχι μετατόπιση.

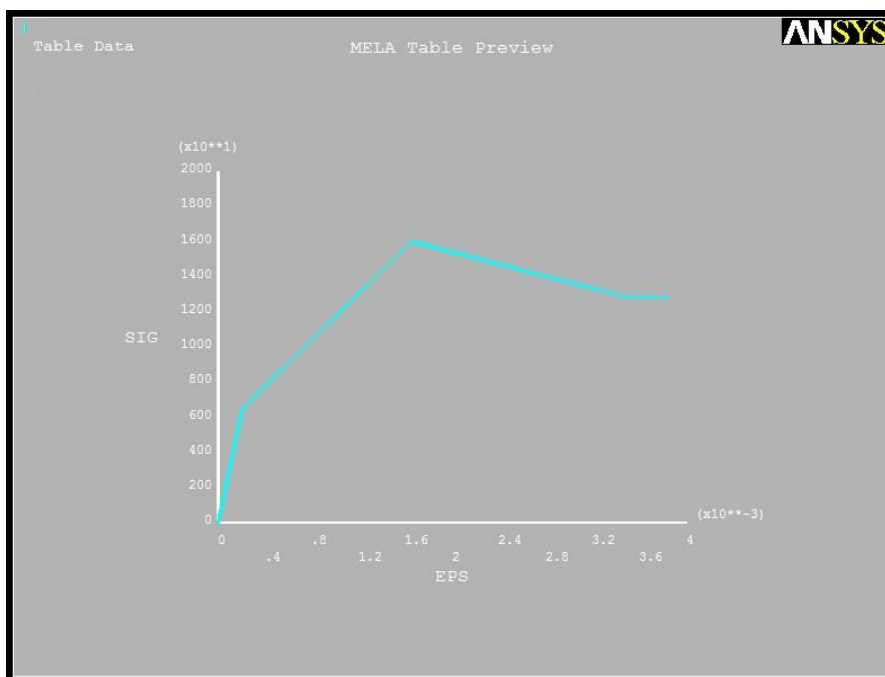


Σχ.5.2 Όγκοι υποστυλώματος I

### 5.2.1.2. Υλικά

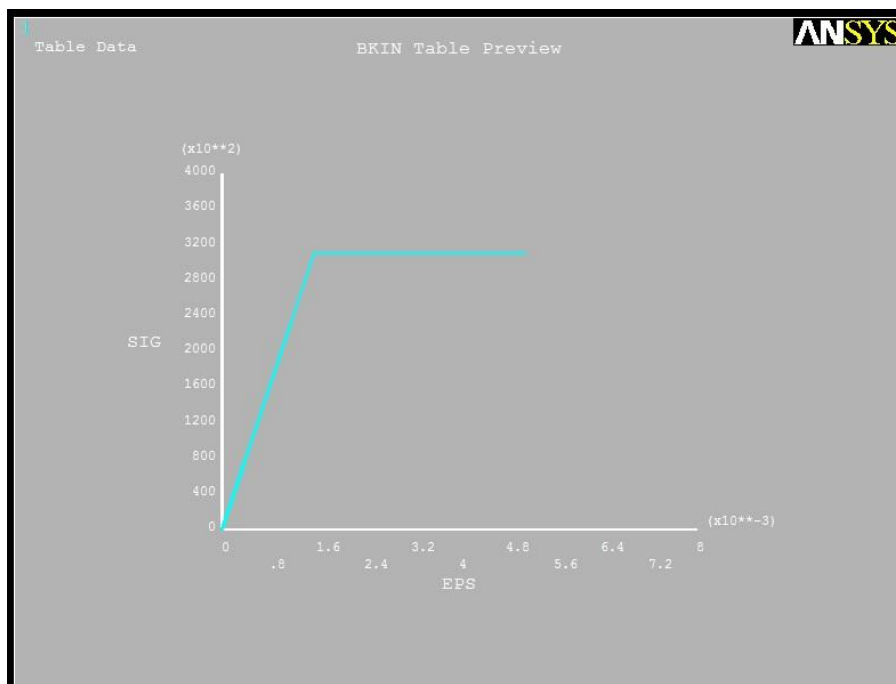
Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C16, όπως η πλειονότητα των κατασκευών της δεκαετίας του '60. Με βάση τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν νωρίτερα καταλήξαμε στην επιλογή της μορφής διαγράμματος σκυροδέματος c4, ως τη βέλτιστη για τις περιπτώσεις μη ενισχυμένων υποστυλωμάτων. Ο νόμος αυτός που φαίνεται στο Σχ.5.3 και πλησιάζει αρκετά το μοντέλο του Ευρωκώδικα 2 εκτός από τον φθίνοντα κλάδο, τον οποίο όπως είδαμε δεν μπορούμε να τον προσεγγίσουμε περισσότερο. Πάλι αφαιρούμε τη δυνατότητα αστοχίας του υλικού σε σύνθλιψη αφού απέχουμε από αυτά τα επίπεδα φόρτισης.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



**Σχ.5.3** Νόμος σκυροδέματος c4 υποστυλώματος Ι

Η διατομή όπως φαίνεται και παραπάνω στο Σχ.5.5 είναι οπλισμένη με 4 διαμήκη Φ20 σε όλο το ύψος του δοκιμίου στις γωνίες, ποιότητας StI της εποχής εκείνης, τα οποία είχαν σημείο διαρροής στα 310MPa. Οι συνδετήρες έχουν τη συνήθη για τότε πυκνότητα Φ6/300. Και οι συνδετήρες είναι λείοι χάλυβες κατηγορίας StI. Για το διάγραμμα του χάλυβα επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το s2 που έχει μηδενική κράτνυση και προσεγγίζει καλύτερα τα πραγματικά αποτελέσματα όπως είδαμε. Η επικάλυψη είναι 2cm.



**Σχ.5.3** Νόμος χάλυβα s2 υποστυλώματος Ι

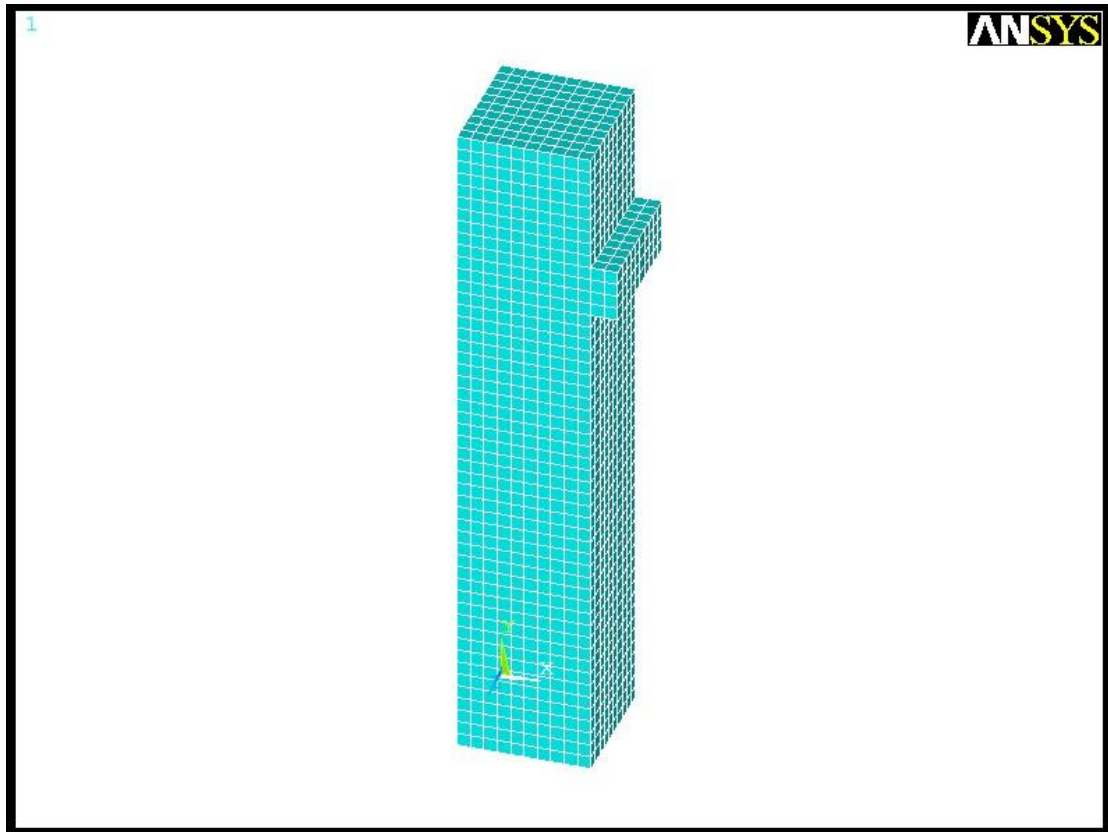
Προσομοίωμα I			
		ποιότητα	διάγραμμα
Σκυρόδεμα	εσωτερικά	C16	c4
Χάλυβας	εσωτερικά 4Φ20, Φ6/300	StI	s2

Πιν.5.1 Υλικά υποστυλώματος I

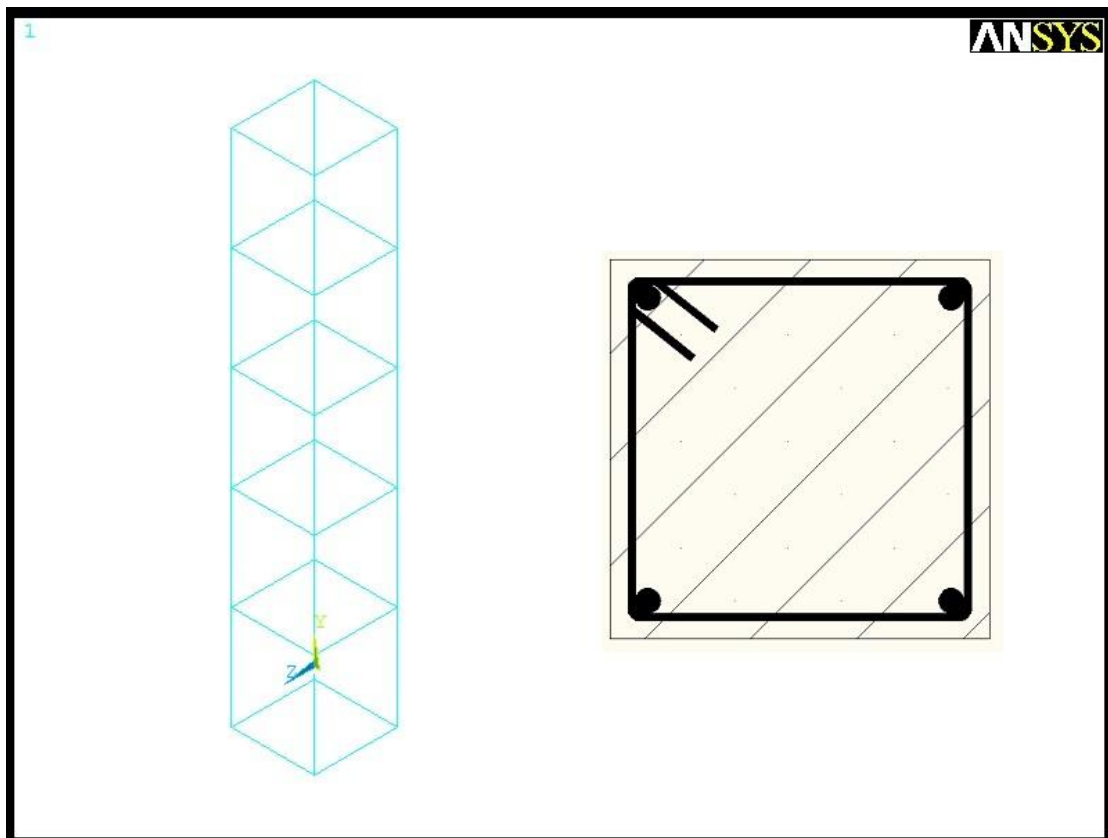
### 5.2.1.3. Στοιχεία προσομοίωσης

Η επιβολή της φόρτισης και οι παράμετροί της παραμένουν σταθερές για όλα τα μοντέλα που θα αναλύσουμε από εδώ και πέρα. Θεωρούμε πλήρη πάκτωση στη βάση του προβόλου, πρώτα φορτίζουμε κατακόρυφα με σταθερή δύναμη και στη συνέχεια επιβάλλουμε σταδιακά την οριζόντια φόρτιση μέσω της λάμας. Με τον τρόπο αυτό αναπαριστούμε σωστά τη φυσική πειραματική διάταξη όπου η αξονική θλίψη επιβάλλεται πλήρως πριν την επιβολή της οριζόντιας φόρτισης.

Η προσομοίωση γίνεται με τα στοιχεία του Ansys όπως αυτά παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3 και επαληθεύτηκαν στο κεφάλαιο 4. Η διακριτοποίηση γίνεται σε σταθερό κάρναβο διάστασης 3cm. Το μέγεθος αυτό διευκολύνει στη σωστή τοποθέτηση του διαμήκους οπλισμού και στον ακριβέστερο συνυπολογισμό της προσφοράς του χωρίς να χρειαστούν αναγωγές. Ταυτόχρονα με αυτή τη διάσταση των στοιχείων σχηματίζεται υπολογιστικό μοντέλο με λογικό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων το οποίο ούτε θα στερεί από την ακρίβεια της ανάλυσης ούτε θα επιβαρύνει υπερβολικά σε υπολογιστική ισχύ. Οι οπλισμοί συνδέονται πλήρως με τα στοιχεία του σκυροδέματος καθώς αυτό αποτελεί μια από τις παραδοχές που χρησιμοποιούμε σε όλη την εργασία. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα δημιουργηθέντα στοιχεία, τόσο τα στοιχεία SOLID65 του σκυροδέματος, τα SOLID185 της 2 λάμας και της πλάκας φόρτισης όσο και στο επόμενο σχήμα τα LINK180 με τα οποία εισάγουμε τους οπλισμούς.



Σχ.5.4 Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος Ι



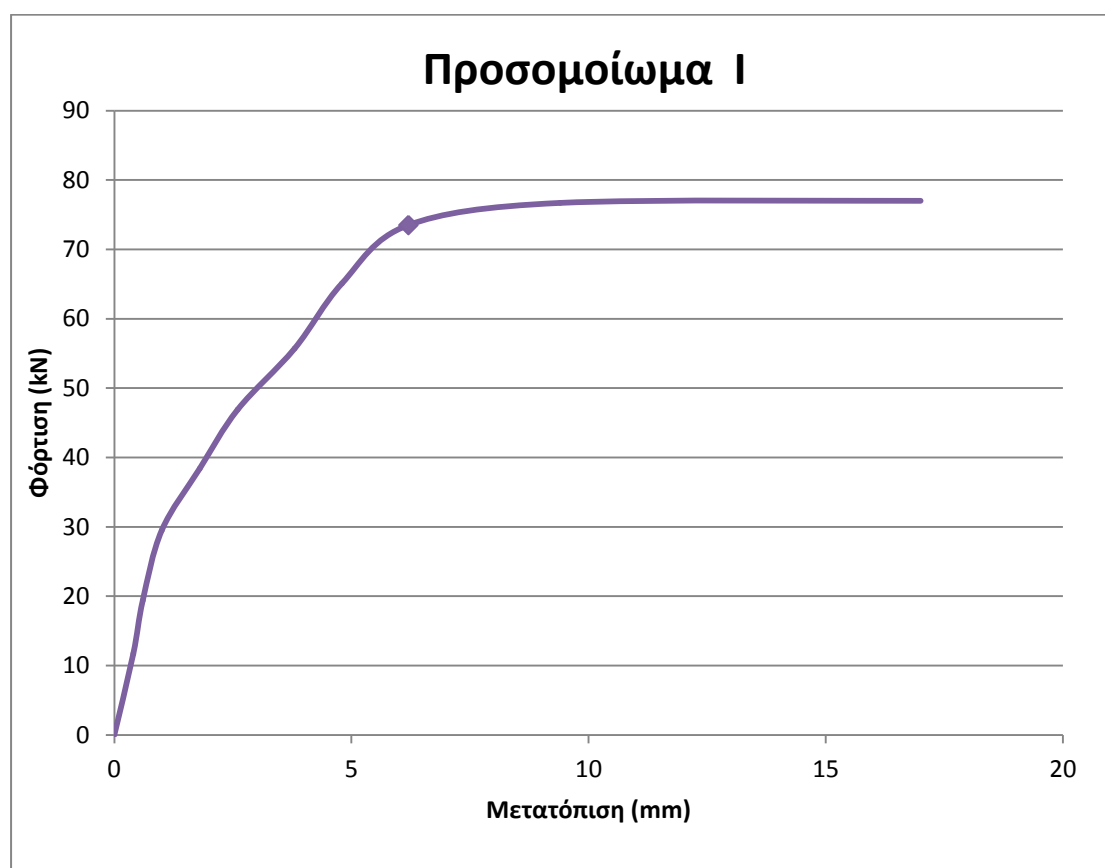
Σχ.5.5 Οπλισμοί υποστυλώματος Ι

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

### 5.2.2. Ανάλυση

#### 5.2.2.1. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης

Εκτελώντας την ανάλυση παίρνουμε την καμπύλη απόκρισης του Προσομοιώματος Ι. Το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο με βάση και τις αναλύσεις που έχουν προηγηθεί, χωρίς κάποια διακύμανση ανεξήγητη ή πρωτοεμφανιζόμενη. Εντοπίζουμε με την πρώτη ματιά τα 2 κομβικά σημεία της καμπύλης, τα οποία είναι η πρώτη ρηγμάτωση της διατομής και το σημείο διαρροής. Στην περιοχή του πλατώ η κλίση ακολουθεί την καμπύλη του χάλυβα και ουσιαστικά παραμένει οριζόντια. Όπως διαπιστώσαμε και στο κεφάλαιο 4 δεν υπάρχει η δυνατότητα να αποτυπωθεί ο φθίνων κλάδος και γι' αυτό υπάρχει το ερωτηματικό σε ποιο σημείο αρχίζει η πτώση της καμπύλης. Είναι πάντως δεδομένο ότι οι τιμές παραμόρφωσης που παίρνουμε στα αποτελέσματα, αναπτύσσονται και στην πραγματικότητα. Έχουμε δηλαδή την εικόνα της παραμόρφωσης μέχρι το σημείο που προχώρησε η ανάλυση, πριν τον φυσικό φθιτό κλάδο.



Σχ.5.6 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος Ι

Η αρχική ρηγμάτωση της διατομής της βάσης εμφανίζεται στην τιμή 29,5kN. Το σημείο διαρροής πετυχαίνεται για 73,5kN σε μετατόπιση 6,2mm στο ύψος της επιβολής φόρτισης. Η μέγιστη τιμή παραλαμβανόμενης δύναμης είναι 78kN.

Προσομοίωμα Ι			
αρχική ρηγματώση	διαρροή δοκιμίων		μέγιστη δύναμη
29,5kN	6,2mm	73,5kN	78kN

**Πιν.5.2** Αποτελέσματα υποστυλώματος Ι

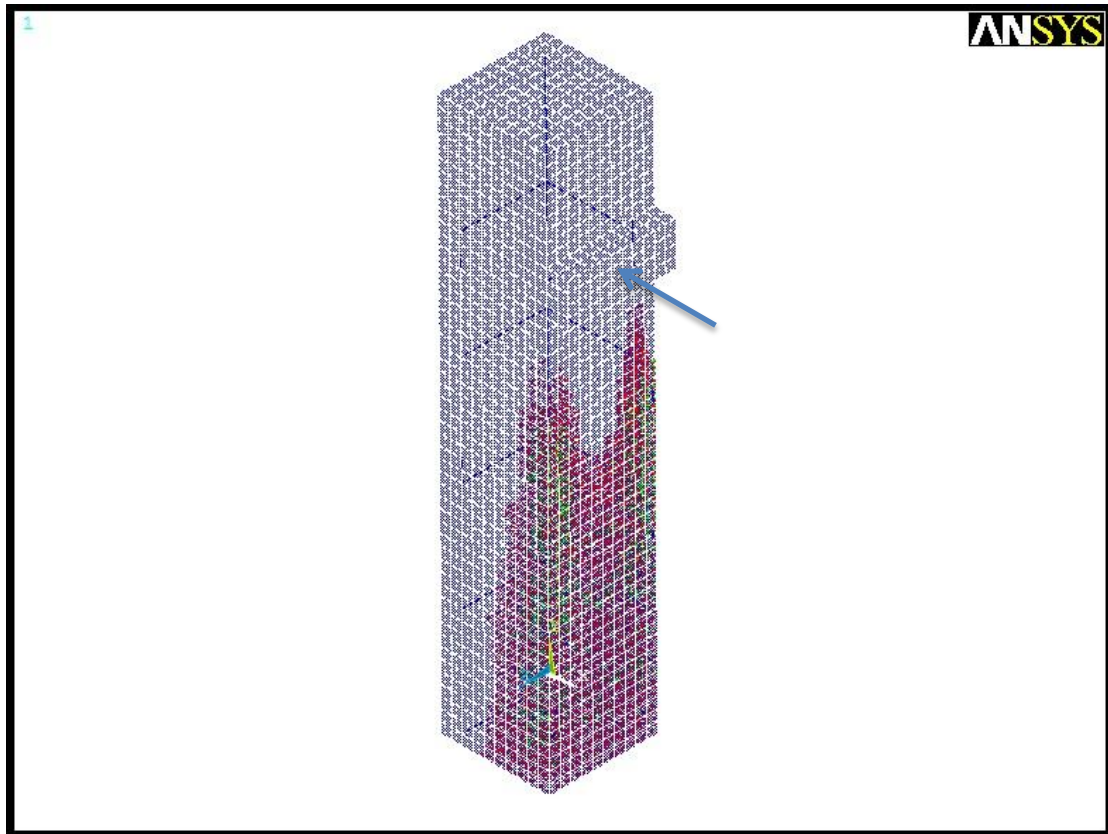
Η αρχική δυσκαμψία όπως παρουσιάζεται και στην καμπύλη P-δ είναι 30MN/m και θα συγκριθεί και αυτό με τα επόμενα μοντέλα που θα αναλύσουμε. Η τέμνουσα δυσκαμψία είναι 11,9MN/m.

#### 5.2.2.2. Μορφή αστοχίας

Η αστοχία του προβόλου είναι καμπτική, με διαρροή των διαμήκων εφελκόμενων οπλισμών και ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων. Όπως έχουμε συνειδητοποιήσει από τις ως τώρα αναλύσεις παίρνουμε ακριβέστατα αποτελέσματα για τις τιμές φορτίου διαρροής και μέγιστου φορτίου, αλλά για ελαφρώς πιο δύσκαμπτό υποστύλωμα. Οι αστοχίες που δημιουργούνται και οδηγούν στη σταδιακή απομείωση της δυσκαμψίας οφείλονται στην υπέρβαση των εφελκυστικών αντοχών των στοιχείων σκυροδέματος σε κάποια διεύθυνση.

Στο παρακάτω Σχ.5.7 βλέπουμε την τυπική μορφή εμφάνισης εφελκυστικών ρωγμών σε 3 διευθύνσεις για τα στοιχεία του σκυροδέματος. Η αστοχία όπως φαίνεται και από την πορεία εξάπλωσης των ρωγμών είναι καμπτική και η ρωγμή εμφανίζεται, όπως και σε πολλά πειράματα, στη βάση του προβόλου. Στο σχήμα διακρίνονται και οι αστοχίες σε δεύτερη διεύθυνση για τα ίδια στοιχεία σκυροδέματος με χρώμα πράσινο. Χωρίς να είναι δυνατή η διάκρισή τους με το μάτι στο σχήμα υπάρχουν και αστοχίες σε τρίτη διεύθυνση μέσα στα ίδια στοιχεία σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην προσφέρουν πια αυτά και να έχουν πλήρως απολέσει τη συνεισφορά τους.





**Σχ.5.7** Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος Ι

Το διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας που παρουσιάζεται στη συνέχεια είναι ιδιαίτερα κατατοπιστικό για την πλαστική συμπεριφορά του δοκιμίου και την αστοχία που συγκεντρώνεται στη βάση. Καταγράφουμε το διάγραμμα για τη στάθμη της βάσης και σε απόσταση 30cm από αυτήν. Αντιλαμβανόμαστε άμεσα ότι η κρίσιμη περιοχή είναι η βάση του προβόλου και εκεί σχηματίζεται η πλαστική άρθρωση. Στο διάγραμμα δεν εμφανίζεται κάποια απότομη μεταβολή οπότε πράγματι η συμπεριφορά είναι πλαστική και όχι ψαθυρή. Στον υπολογισμό της ροπής λαμβάνεται υπόψη και η ροπή δευτέρας τάξης που προκαλείται από την απόκλιση της αξονικής δύναμης από την κατακόρυφο. Έτσι έχουμε τη ροπή που προκαλεί το οριζόντιο φορτίο που έχουμε υπολογίσει αλλά και τη ροπή δευτέρας τάξης που προκαλεί το κατακόρυφο φορτίο στις στάθμες που εξετάζουμε, τη βάση του υποστυλώματος και σε απόσταση 30cm από αυτήν. Η συνολική ροπή υπολογίζεται από τον τύπο

$$M_{\text{tot}} = M_0 + M_2 = F \cdot h + N \cdot \delta, \text{ όπου}$$

$M_{\text{tot}}$ : συνολική ροπή σε κάθε εξεταζόμενη διατομή

$M_0$ : ροπή πρώτης τάξης

$M_2$ : ροπή δευτέρας τάξης

$F$ : οριζόντια δύναμη

$h$ : απόσταση εξεταζόμενης διατομής από στάθμη επιβολής οριζόντιου φορτίου

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

N: κατακόρυφη αξονική δύναμη

$\delta$ : οριζόντια μετατόπιση κορυφής προβόλου

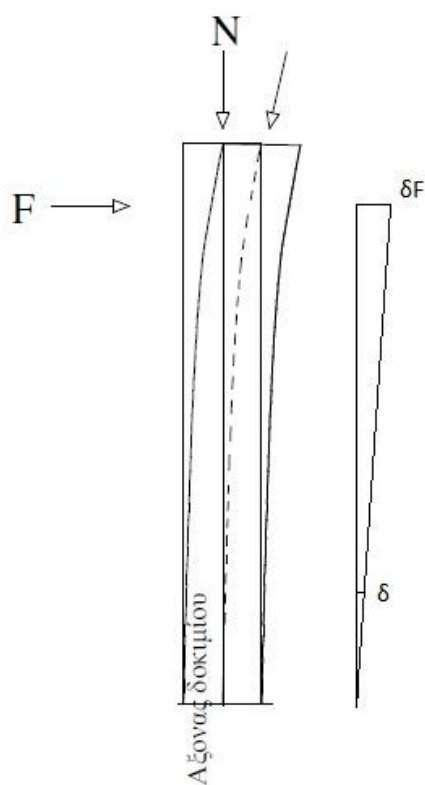
Η γωνία στροφής για κάθε διατομή-στάθμη υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις των σχετικών μετακινήσεων που καταγράφονται εκατέρωθεν της διατομής από τη σχέση

$$\theta = \frac{\alpha + \beta}{L}, \text{ όπου}$$

$\theta$ : γωνίας στροφής της διατομής

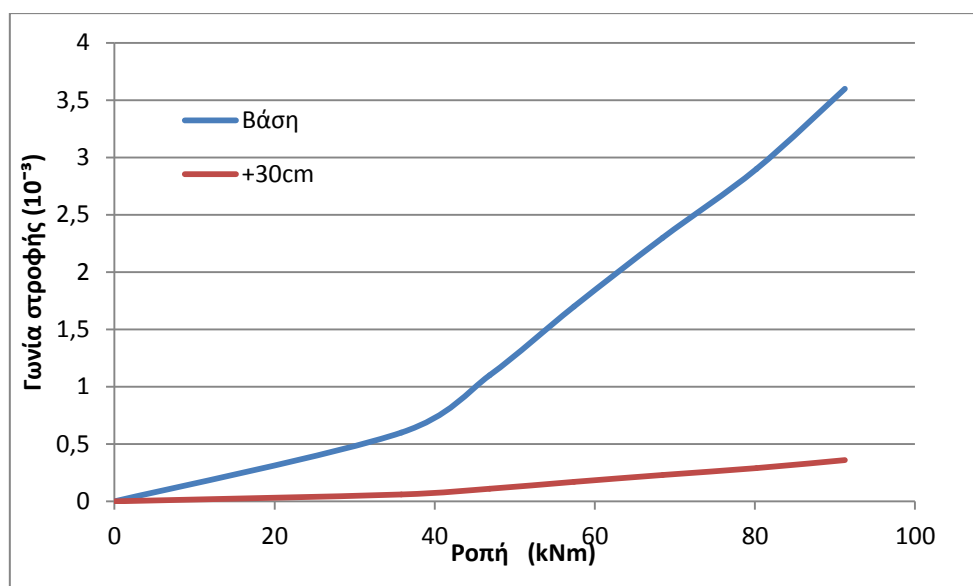
$\alpha, \beta$ : μετρήσεις των σχετικών μετακινήσεων εκατέρωθεν της διατομής

L: απόσταση σημείων μέτρησης



Σχ.5.8 Υπολογισμός γωνίας στροφής υποστυλώματος καθ' ύψος

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



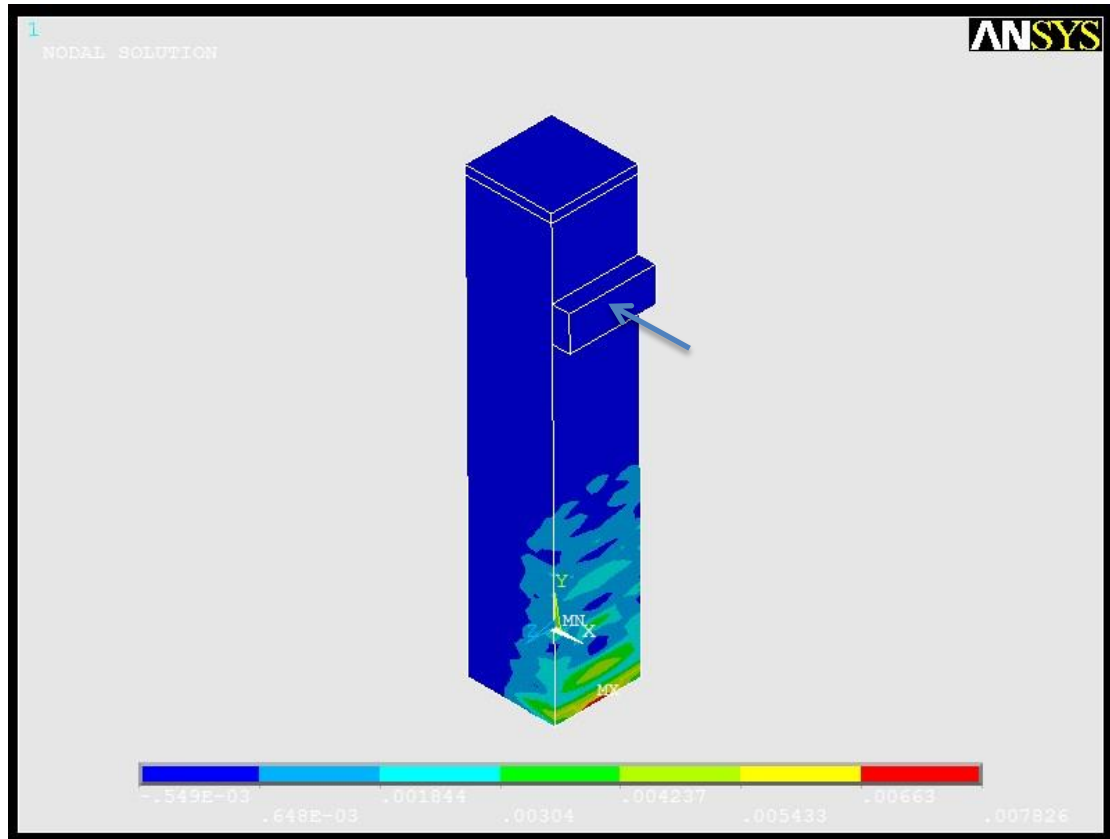
Σχ.5.9 Γωνία στροφής υποστυλώματος

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι η γωνία στροφής της διατομής στη βάση και σε απόσταση 30cm από τη βάση έχουν μεγάλη διαφορά. Αυτό μας υποδεικνύει ότι στην περιοχή αυτή της βάσης υπάρχει η μεγαλύτερη στροφή άρα εκεί δημιουργείται πλαστική άρθρωση. Η εικονιζόμενη διαφορά στροφής για τα επίπεδα φόρτισης από την αστοχία και μετά φτάνουν τη μια τάξη μεγέθους.

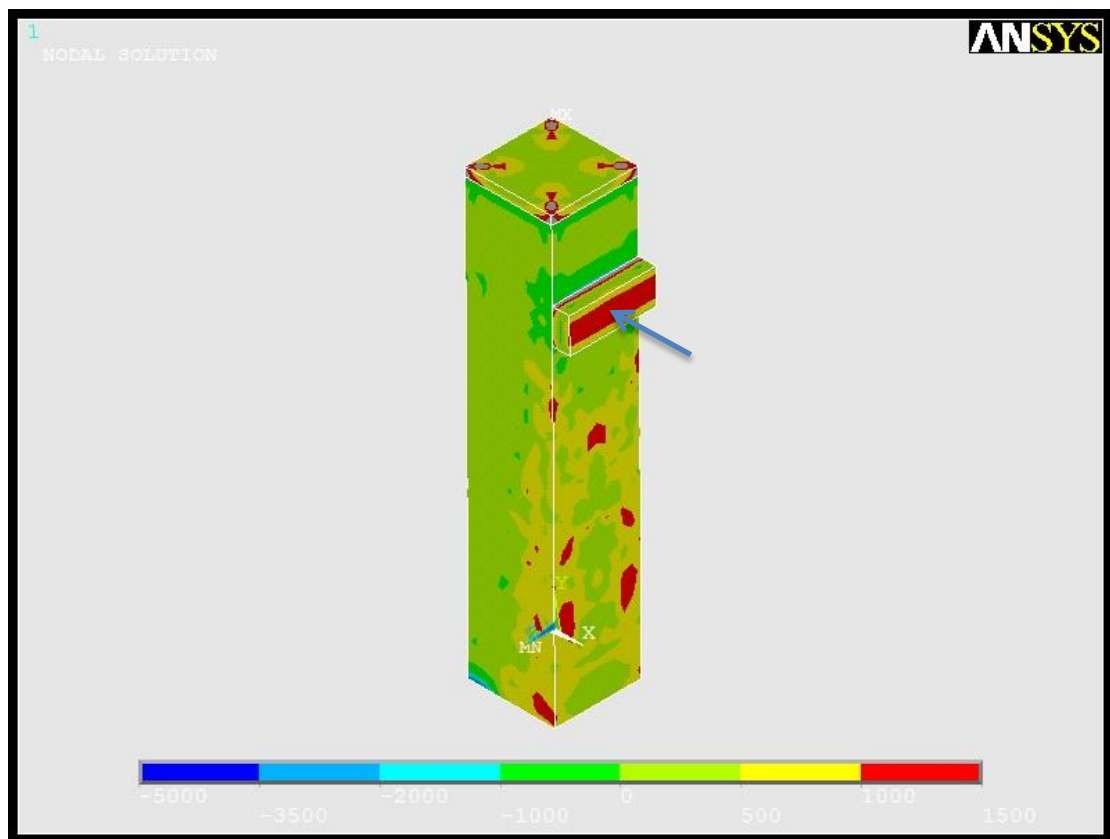
### 5.2.2.3. Ανηγμένες παραμορφώσεις σκυροδέματος

Στο Ansys μπορούμε να αντιληφθούμε το σχηματισμό της ρωγμής από μια γραφική απεικόνιση των κατακόρυφων μετατοπίσεων των κόμβων στον στοιχείων. Παρατηρούμε στο Σχ.5.10 μεγάλη συγκέντρωση κατακόρυφων μετατοπίσεων στην περιοχή της βάσης στην εφελκυστική περιοχή, με χαρακτηριστική μορφή διασποράς νέας ρηγμάτωσης.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



Σχ.5.10 Κατακόρυφες παραμορφώσεις υποστυλώματος Ι



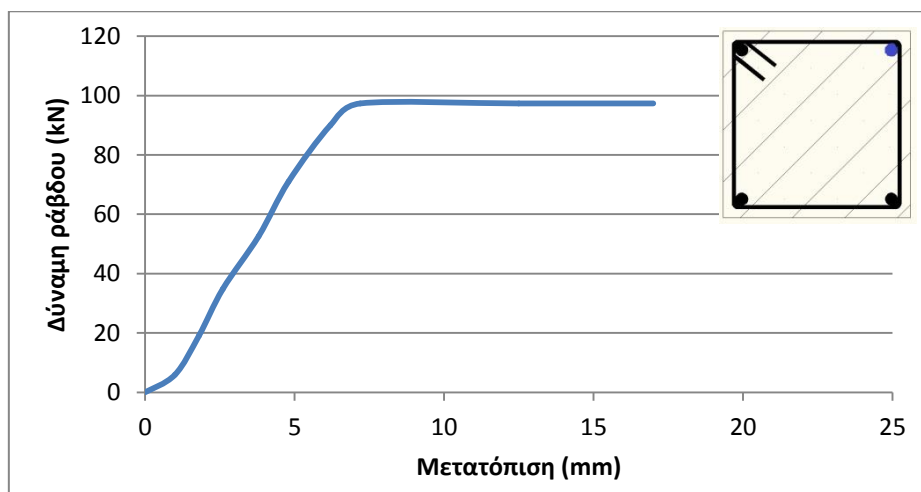
Σχ.5.11 Κύριες τάσεις υποστυλώματος Ι

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

Από την απεικόνιση της πρώτης κύριας τάσης των στοιχείων του σκυροδέματος στο παραπάνω Σχ.5.11 βλέπουμε τις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται σε χαρακτηριστικά σημεία. Όπως και στο αντίστοιχο εργαστηριακό πείραμα εντοπίζεται περιοχή έντονης θλίψης στη θλιβόμενη πλευρά της βάσης. Η απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων και η φιλοσοφία τους επιτρέπει τη συγκέντρωση τάσεων στις μαθηματικές επιλύσεις σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι συμβαίνει στη φύση. Για το λόγο αυτό πάντα στα μοντέλα αυτά συναντάμε σημεία πολύ υψηλής συγκέντρωσης τάσεων που μπορεί να προκαλέσουν και προβλήματα σύγκλισης με αποτέλεσμα τον πρόωρο τερματισμό της ανάλυσης. Στην εφελκυσόμενη «παρειά» του υποστυλώματος έχουμε αρκετή διάχυση των εφελκυστικών τάσεων -άλλωστε το στιγμιότυπο αυτό είναι από το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης- προς τα επάνω. Φαίνεται ότι η παρουσία των συνδετήρων σε μικρό βαθμό αποδίδει μόνο σε πολύ μικρή ακτίνα από τη θέση τους. Τέλος, οι συγκεντρώσεις τάσεων στις λάμες είναι φαινόμενα που υπάρχουν στη φύση αλλά με κατάλληλες διατάξεις στα πειράματα αποφεύγουμε την επίδρασή τους στα αποτελέσματα. Στην αναλυτική προσέγγιση εισάγοντας υλικά τελείως ελαστικών ιδιοτήτων για τις λάμες αποφεύγουμε προβλήματα σύγκλισης παρά τη συγκέντρωση τάσεων. Ουσιαστικά η γραμμικότητα του υλικού αντισταθμίζει το υπολογιστικό κόστος της συγκέντρωσης τάσεων.

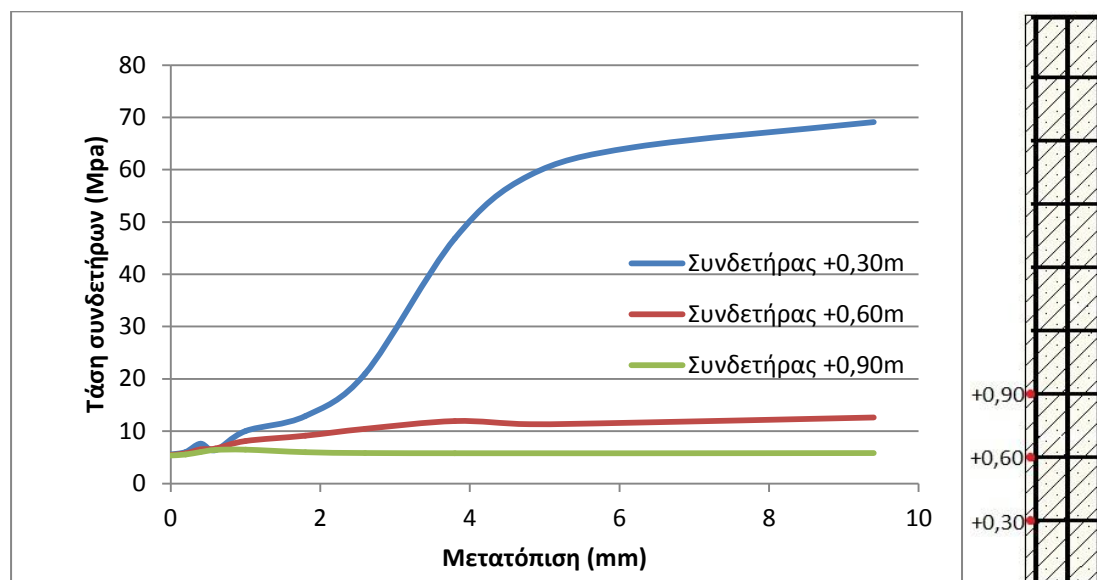
### 5.2.2.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις οπλισμών

Η διαρροή του υποστυλώματος επέρχεται με τη διαρροή των διαμήκων οπλισμών. Από το σημείο αυτό και μετά δεν αναπτύσσονται σημαντικές αντοχές αλλά μόνο παραμορφώσεις. Σε ένα φυσικό δοκίμιο αν έχουμε άγνοια για τις πραγματικές αντοχές των επιμέρους υλικών και των υπεραντοχών που αυτά αναπτύσσουν πιθανώς να υποεκτιμήσουμε την απόδοση του υποστυλώματος. Στο κομμάτι αυτό της εργασίας, εισάγουμε ντετερμινιστικά τα δεδομένα για τα υλικά χωρίς στοχαστική διερεύνηση της πιθανής απόκλισης. Συγκεκριμένα για τους οπλισμούς που είναι ποιότητας StI, χρησιμοποιούμε ελαστικοπλαστικό διάγραμμα τύπου s2. Έτσι δεν θα πάρουμε στα προσομοιώματά μας μεγαλύτερη δύναμη από τους οπλισμούς μετά τη διαρροή τους.



Σχ.5.12 Δύναμη διαμήκων ράβδων υποστυλώματος I

Παρακάτω αποτυπώνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στους συνδετήρες σε τρεις στάθμες. Η μέτρηση έχει γίνει στο σκέλος του συνδετήρα που είναι παράλληλο στη φόρτιση για τις στάθμες +0,30m , 0,60m, 0,90m. Η αρχική εμφάνις επισήμανση είναι το γεγονός ότι ο χαμηλότερος συνδετήρας καταπονείται πολλαπλάσια από τους επόμενος. Όσο πιο χαμηλά βρίσκεται ο συνδετήρας τόσο πιο πολύ εντείνεται. Για τον συνδετήρα που βρίσκεται στην περιοχή της άρθρωσης που δημιουργείται από τα αρχικά στάδια της εμφάνισης αστοχιών στο σκυρόδεμα, ο χάλυβας αρχίζει να παραλαμβάνει μεγάλες τάσεις. Σε καμία περίπτωση πάντως δεν πλησιάζουμε τη διαρροή των συνδετήρων.



**Σχ.5.13** Τάσεις συνδετήρων υποστυλώματος Ι

Πρέπει να επισημανθεί ότι η προσομοίωσή μας θεωρεί πλήρη σύνδεση των στοιχείων οπλισμού και σκυροδέματος. Αυτό δε μας δίνει τη δυνατότητα να καταγράψουμε τα φαινόμενα που εμφανίζονται στη φύση της χαλάρωσης του συνδετήρα στις περιπτώσεις που δεν είναι σωστά αγκυρωμένος. Με τις αναλύσεις δηλαδή υπερεκτιμούμε την απόδοση των συνδετήρων αφού δε τους δίνουμε τη δυνατότητα να πάψουν να προσφέρουν στον ίδιο βαθμό από τη στιγμή που θα αρχίσει να αστοχεί το σκυρόδεμα γύρω από το συνδετήρα.

### 5.2.3. Συμπεράσματα

Υπό μονοτονική φόρτιση το υποστυλώμα μας αστοχεί καμπτικά, επέρχεται η διαρροή των διαμήκων οπλισμών και το υποστυλώμα συνεχίζει να παίρνει παραμορφώσεις. Η πραγματική αναπτυσσόμενη τιμή πλαστιμότητας του υποστυλώματος δεν μπορεί να υπολογιστεί από την ανάλυση αφού δε μας δίνεται το ακριβές σημείο όπου αρχίζει ο φθιτός κλάδος της καμπύλης. Αυτό που μπορούμε να δούμε είναι την παραμόρφωση μέχρι την οποία έτρεξε η ανάλυση πριν τερματίσει. Η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης που δίνει η ανάλυση αποτελεί ένα δείκτη πλαστιμότητας.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

Τα σημεία συγκέντρωσης των τάσεων στο προσομοίωμα είναι αυτά όπου αναμένεται να εμφανίζονται και σε πραγματικό πείραμα. Ιδιαίτερες συγκεντρώσεις στη βάση του προβόλου τόσο εφελκυστικές όσο και θλιπτικές. Οι περιοχές της επιβολής τάσεων εμφανίζουν τοπικές έως σημειακές τάσεις οι οποίες δεν επηρεάζουν τη λύση. Η επιβολή των φορτίσεων μέσω λάμας και πλάκας φόρτισης όπως και η επιβολή κατανεμημένης τάσης σε αυτά βοηθά στην αποφυγή μεγαλύτερων συγκεντρώσεων τάσεων που θα οδηγούσαν σε αδυναμία σύγκλισης του προγράμματος.

Οι υψηλές αναπτυσσόμενες τάσεις συγκεντρώνονται στην περιοχή της βάσης. Τόσο το σκυρόδεμα όσο και οι οπλισμοί στην περιοχή αυτοί καταπονούνται αισθητά περισσότερο από τις υπόλοιπες περιοχές. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι η ανάγκη ενίσχυσης πιθανώς να μπορούσε να καλυφθεί και μόνο με τοπική ενίσχυση στην περιοχή εκείνη. Παρόλ' αυτά οι τεχνικές δυσκολίες της τοπικής ενίσχυσης μπορεί να μη μας δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η δυσκολία αγκύρωσης των οπλισμών στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερη, ενώ δημιουργούνται σημεία ασυνέχειας και απότομης αλλαγής της διατομής και της δυσκαμψίας που προκαλούν συγκεντρώσεις τάσεων. Στην εργασία αυτή προσεγγίζουμε την περίπτωση ολόκληρων μανδύων. Επειδή όμως προσομοιώνουμε ημιυποστυλώμα με μανδύα μικρότερου ύψους από το συνολικό του υποστυλώματος εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα και για τη συγκέντρωση τάσεων στα σημεία όπου τελειώνει ο μανδύας.

### 5.3. Ενισχυμένα υποστυλώματα με μονολιθική σύνδεση μανδύα

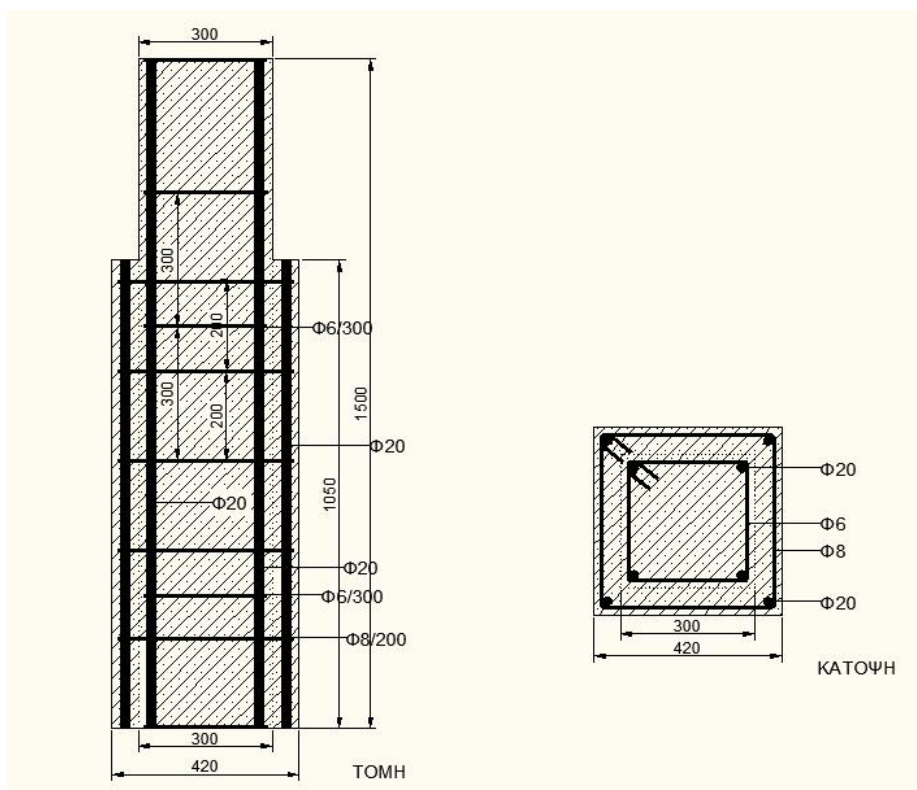
#### 5.3.1. Προσομοιώματα M1, M2, M3

Ενισχύουμε το αρχικό μας υποστυλώμα 300x300 (I) με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Στη φάση αυτή μοντελοποιούμε «μονολιθικά» δοκίμια, δηλαδή έχουμε πλήρη σύνδεση αρχικού υποστυλώματος και μανδύα, παλαιού-νέου σκυροδέματος. Τα προσομοιώματα αυτά M (monolithic) χρησιμοποιούνται ως μέτρα σύγκρισης των ρεαλιστικότερων J (jacket) που αναλύονται στη συνέχεια. Θα ελέγξουμε 3 περιπτώσεις για την ποιότητα σκυροδέματος του μανδύα. Η πρώτη περίπτωση M1 αφορά μανδύα ποιότητας C35, το M2 ποιότητας C50 και το M3 ποιότητας C80. Το εσωτερικό του υποστυλώματος παραμένει πάντα ίδιο με εκείνο του I, όπου έχουμε σκυρόδεμα C16. Αφού παρουσιαστεί μια αρχική σύγκριση και των 3, θα καταλήξουμε στην περαιτέρω ανάλυση το M1, το οποίο είναι πιο κοντά στα χρησιμοποιούμενα στην Ελλάδα.

Ο μανδύας που τοποθετούμε είναι πάχους 60mm και η τελική διατομή του υποστυλώματος γίνεται 420x420. Η διάσταση αυτή του μανδύα είναι από τις πιο λεπτές που χρησιμοποιούνται στη πράξη. Για μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος συναντάται πάχος 5-10cm ενώ για έγχυτο σκυρόδεμα το πάχος αναγκαστικά είναι μεγαλύτερο. Ο μανδύας είναι στα πειράματά μας κλειστός, οπότε μπορεί να προσφέρει και την επιθυμητή περίσφιγξη. Το ύψος του εκτείνεται από τη βάση όπου πακτώνεται, μέχρι τη στάθμη +1,05m. Όπως έχει ήδη επεξηγηθεί επιλέγουμε ο μανδύας να μην εκτείνεται πιο ψηλά,

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

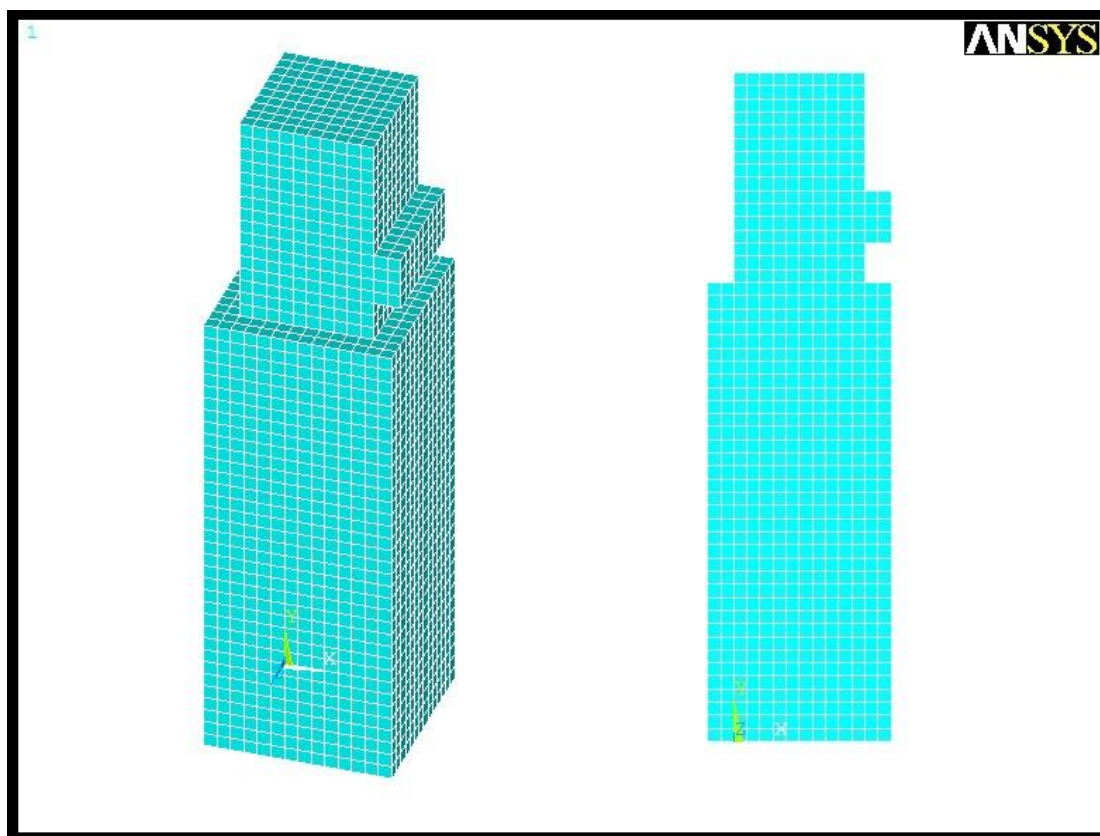
ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του από την οριζόντια επιβολή φόρτισης μέσω της λάμας. Η λάμα τοποθετείται σε μέσο ύψος 1,2m.



Σχ.5.14 Κάτοψη και τομή υποστυλώματος M

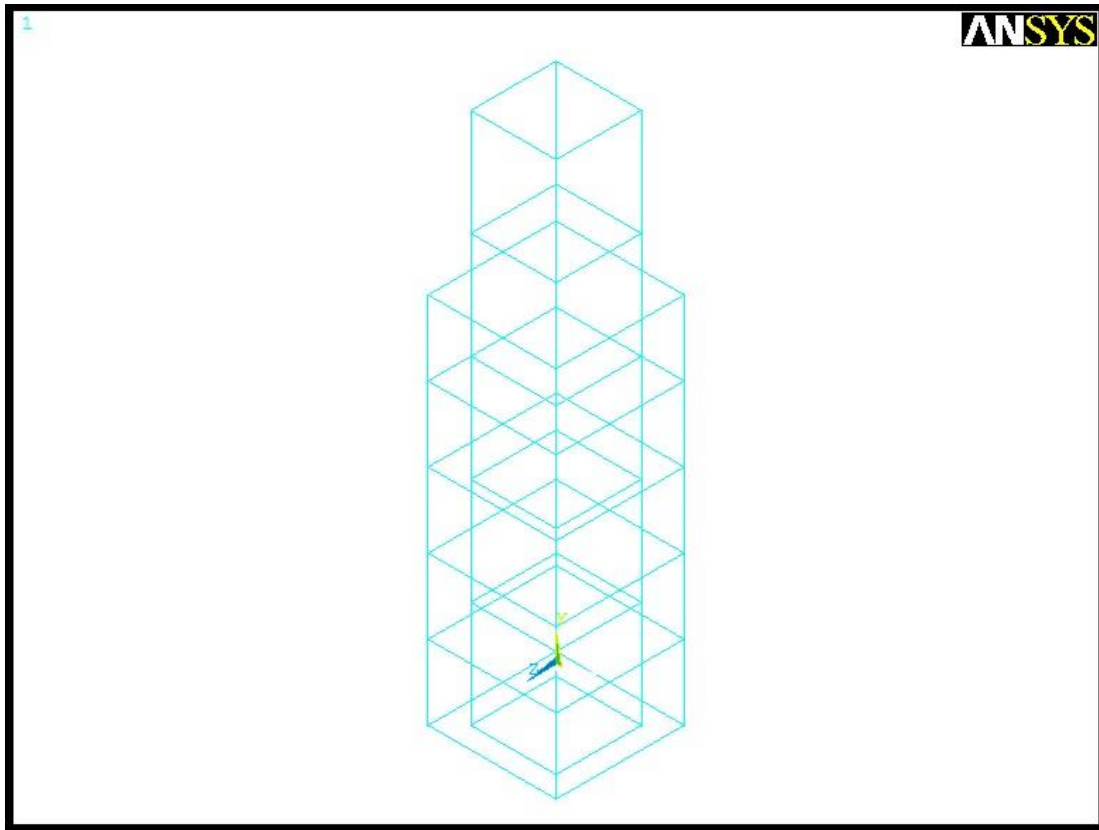
Οι τελικές διαστάσεις της ενισχυμένης διατομής είναι 420x420, ενώ όπως φαίνεται και στα σχήματα πάνω από το μανδύα παραμένει η αρχική διατομή 300x300. Η λάμα τοποθετείται στα +1,20m και είναι διατάσεων 300x120x60. Η σύνδεση τόσο της λάμας όσο και της πλάκας φόρτισης με το υποστύλωμα είναι πλήρης πάκτωση χωρίς δυνατότητα σχετικής ολίσθησης. Αυτό άλλωστε εφαρμόζουμε σε όλα τα πειράματα.





Σχ.5.15 Πεπερασμένα στοιχεία υποστυλώματος M

Οι οπλισμοί του εσωτερικού υποστυλώματος είναι οι ίδιοι με πριν, με το μοντέλο I. Στο παλιό σκυρόδεμα έχουμε διαμήκη 4Φ20 και συνδετήρες Φ6/300 ποιότητας StI. Οι οπλισμοί του μανδύα είναι επίσης 4Φ20 διαμήκη, θεωρητικά πλήρως αγκυρωμένα τα οποία όμως είναι χάλυβας S500. Οι ενισχύσεις γίνονται πάντα σε μεταγενέστερο χρόνο όπου οι ποιότητες υλικών βελτιώνονται και στις μέρες μας οι χάλυβες είναι νευροχάλυβες S500. Οι συνδετήρες είναι Φ8/200 και αυτοί S500. Η πυκνότητα των οπλισμών αυτή είναι μικρότερη από τις συνήθειες που εφαρμόζονται στην πράξη. Οι απαιτήσεις πλαστιμότητας, περίσφιγξης και αντοχών ελέγχονται πάντα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κανονισμού. Παρ' όλ' αυτά επιλέγεται συνήθως η υπερόπλιση σε συνδετήρες του μανδύα καθώς υπάρχουν επισφάλειες στην αποτίμηση των αντοχών του υλικού του εσωτερικού υποστυλώματος ιδίως όταν αυτό έχει προηγουμένως βλάβη.



**Σχ.5.16** Πεπερασμένα στοιχεία οπλισμών υποστυλώματος Μ

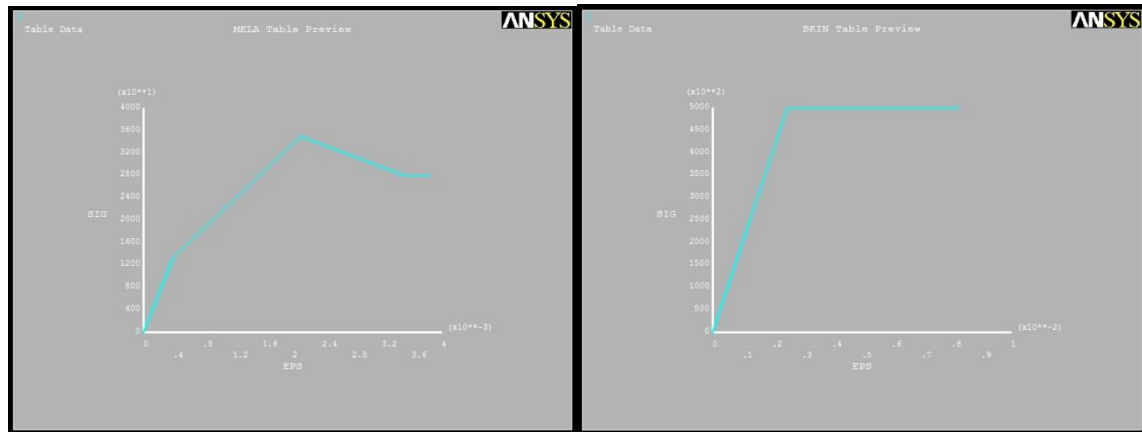
### 5.3.2. Ανάλυση

#### 5.3.2.1. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης

##### *Προσομοίωμα M1, ποιότητα μανδύα C35*

Το προσομοίωμα M1 διαφοροποιείται από τα επόμενα M2 και M3 μόνο στην ποιότητα του σκυροδέματος μανδύα. Η ποιότητα στο μοντέλο αυτό είναι C35, σύμφωνα με το διάγραμμα τύπου c4 για το σκυρόδεμα, το οποίο μας δίνει την βέλτιστη προσέγγιση. Ο χάλυβας του μανδύα είναι S500, τύπου s2. Τα διαγράμματα των 2 αυτών υλικών φαίνονται παρακάτω.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

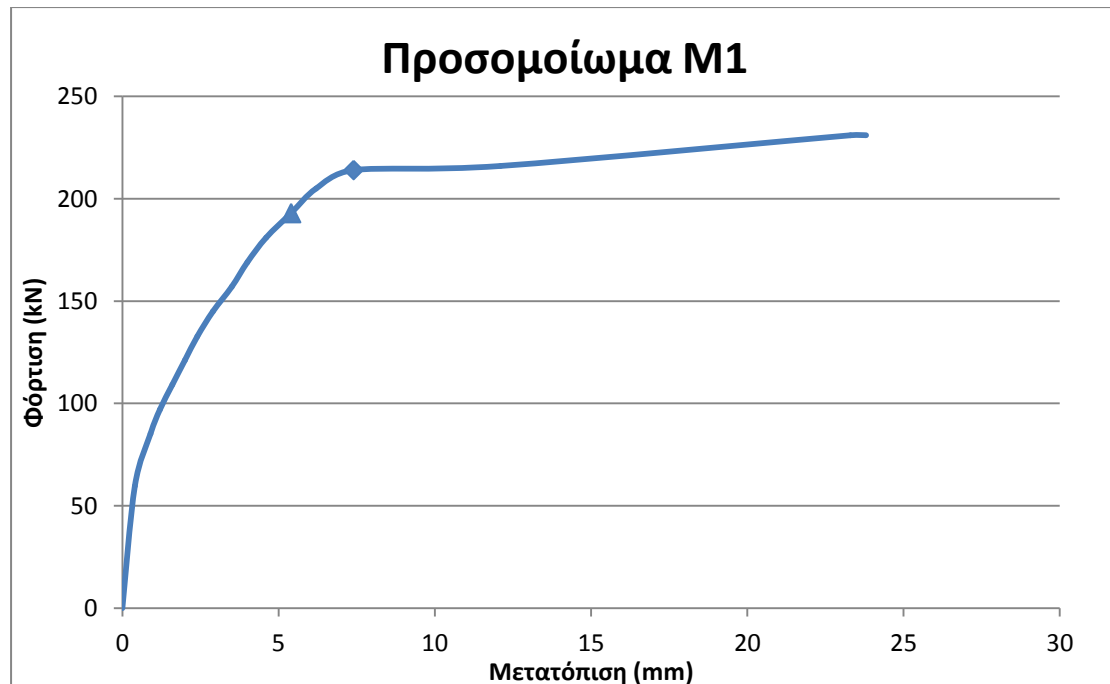


Σχ.5.17 Νόμοι υλικών c4 και s2 υποστυλώματος M

Προσομοίωμα M1			
		ποιότητα	διάγραμμα
Σκυρόδεμα	εσωτερικά	C16	c4
	μανδύας	C35	c4
Χάλυβας	εσωτερικά 4Φ20, Φ6/300	StI	s2
	μανδύας 4Φ20, Φ8/200	S500	s2

Πιν.5.3 Υλικά υποστυλώματος M1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του M1 δίνουν το διάγραμμα push-over που παρουσιάζονται στο Σχ.5.18



Σχ.5.18 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος M1

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

Η διαρροή των μέσα διαμήκων οπλισμών προηγείται. Άλλωστε η ποιότητα των μέσα 4Φ20 είναι ποιότητας StI, ενώ του μανδύα S500. Η πρώτη διαρροή συμβαίνει στα 193,3kN και η δεύτερη στα 216,2kN. Τα σημεία αυτά είναι μακριά το ένα από το άλλο ενώ εντοπίζονται στη μασχάλη της καμπύλης. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται εμφανής η επίδραση της κάθε μιας από τις 2 διαρροές ξεχωριστά, αφού η αλλαγή στην κλίση της καμπύλης που παρατηρείται είναι μεγάλη. Η σειρά με την οποία διαρρέουν οι μέσα και οι έξω οπλισμοί δεν είναι προκαθορισμένη. Στη συνηθέστερη περίπτωση όπου οι νέοι οπλισμοί του μανδύα είναι υψηλότερης ποιότητας, αυτοί διαρρέουν αργότερα. Στη περίπτωσή μας η μέγιστη τιμή της αναλαμβανόμενης οριζόντιας δύναμης είναι 235kN. Στη συνέχεια θα συγκρίνουμε την τιμή αυτή με την ενίσχυση με υψηλότερης ποιότητας σκυρόδεμα.

<b>Προσομοίωμα M1</b>		
διαρροή δοκιμίου		μέγιστη δύναμη
έσω οπλισμοί	οπλισμοί μανδύα	
5,4mm/193kN	7,4mm/216,2kN	235kN

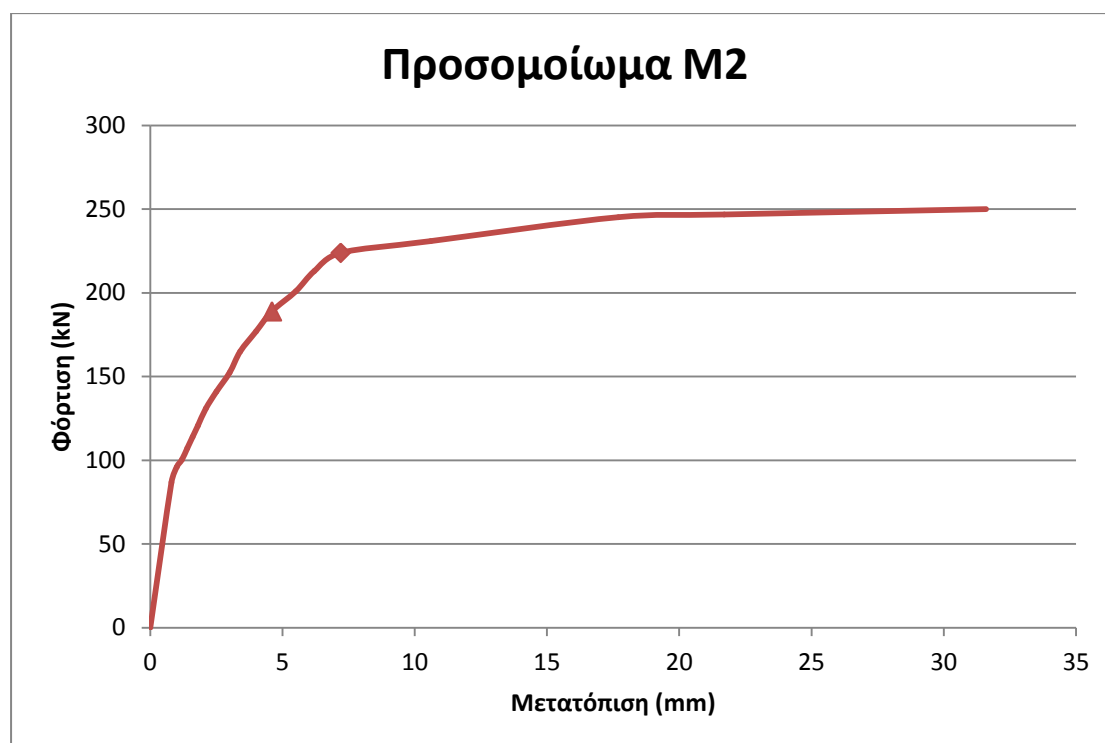
**Πιν.5.4** Αποτελέσματα υποστυλώματος M1

*Προσομοίωμα M2, ποιότητα μανδύα C50*

Η διαφοροποίηση στο M2 είναι η ποιότητα C50 στο μανδύα. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της προσομοίωσης είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση.

<b>Προσομοίωμα M2</b>			
		ποιότητα	διάγραμμα
Σκυρόδεμα	εσωτερικά	C16	c4
	μανδύας	C50	c4
Χάλυβας	εσωτερικά 4Φ20, Φ6/300	StI	s2
	μανδύας 4Φ20, Φ8/200	S500	s2

**Πιν.5.5** Υλικά υποστυλώματος M2



**Σχ.5.19** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος M2

Και σε αυτό το μοντέλο η διαρροή των έσω οπλισμών προηγείται και εμφανίζεται για παραμόρφωση 4,6mm και 189kN. Η διαρροή των οπλισμών του μανδύα επέρχεται λίγο μετά στα 223,9kN στα 7,2mm. Στην περίπτωση αυτή γίνεται πιο σαφής η διάκριση των 2 αυτών σημείων. Παρατηρούμε ότι η διαρροή των μέσα οπλισμών δεν επιφέρει μεγάλη μείωση στη δυσκαμψία του υποστυλώματος, σε αντίθεση με την διαρροή και των έξω οπλισμών όπου πλέον επέρχεται η πλήρης διαρροή και δεν μπορεί το δοκίμιο να παραλάβει μεγαλύτερη δύναμη.

Προσομοίωμα M2		
διαρροή δοκιμίου		μέγιστη δύναμη
έσω οπλισμοί	οπλισμοί μανδύα	
4,6mm/189kN	7,2mm/223,9kN	250kN

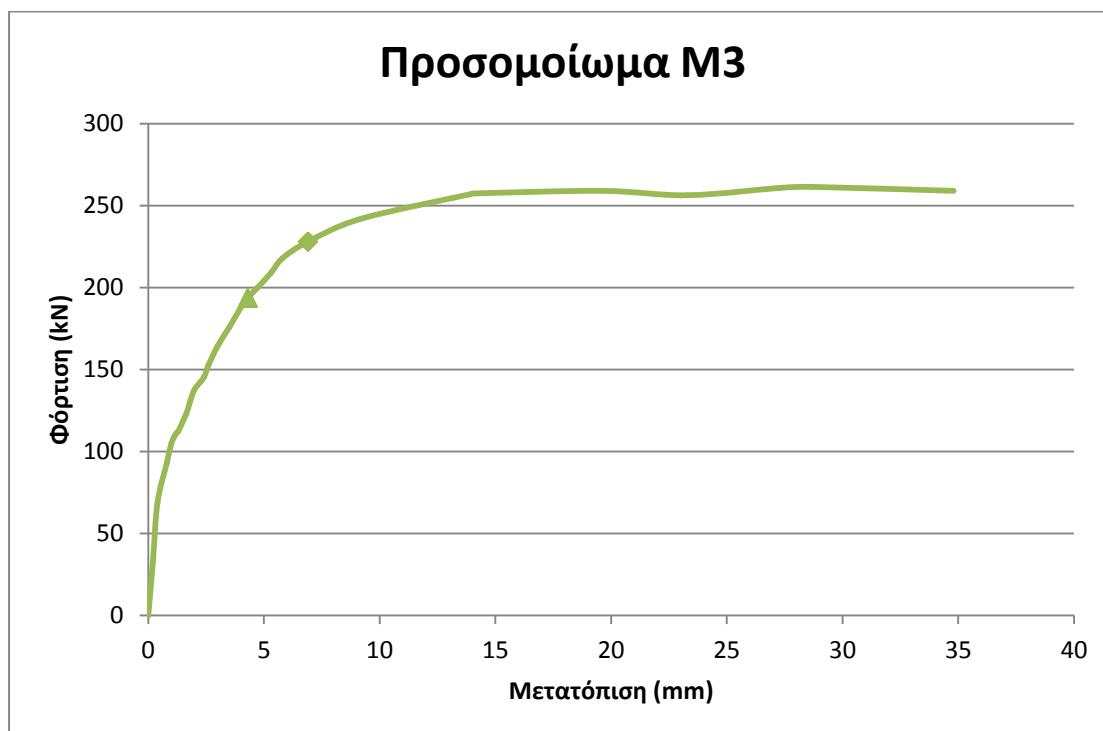
**Πιν.5.6** Αποτελέσματα υποστυλώματος M2

#### Προσομοίωμα M3, ποιότητα μανδύα C80

Εδώ εξετάζεται η περίπτωση του μανδύα πολύ υψηλής αντοχής. Αντίστοιχα ήταν και τα πειράματα που επαληθεύτηκαν στο κεφάλαιο 4. Η πρακτική τέτοιων μανδύων δεν είναι πολύ συνήθης. Ο λόγος σχετίζεται με τη δυσκολία επίτευξης τέτοιων αντοχών στην πράξη με τις πιο χρησιμοποιούμενες τεχνικές. Η διασπορά που παρατηρείται στις τιμές αντοχής με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σημαντική. Με τη χρήση ειδικών προσθέτων προσεγγίζονται πιο εύκολα οι τιμές αυτές.

Προσομοίωμα M3			
		ποιότητα	διάγραμμα
Σκυρόδεμα	εσωτερικά	C16	c4
	μανδύας	C80	c4
Χάλυβας	εσωτερικά 4Φ20, Φ6/300	StI	s2
	μανδύας 4Φ20, Φ8/200	S500	s2

Πιν.5.7 Υλικά υποστυλώματος M3



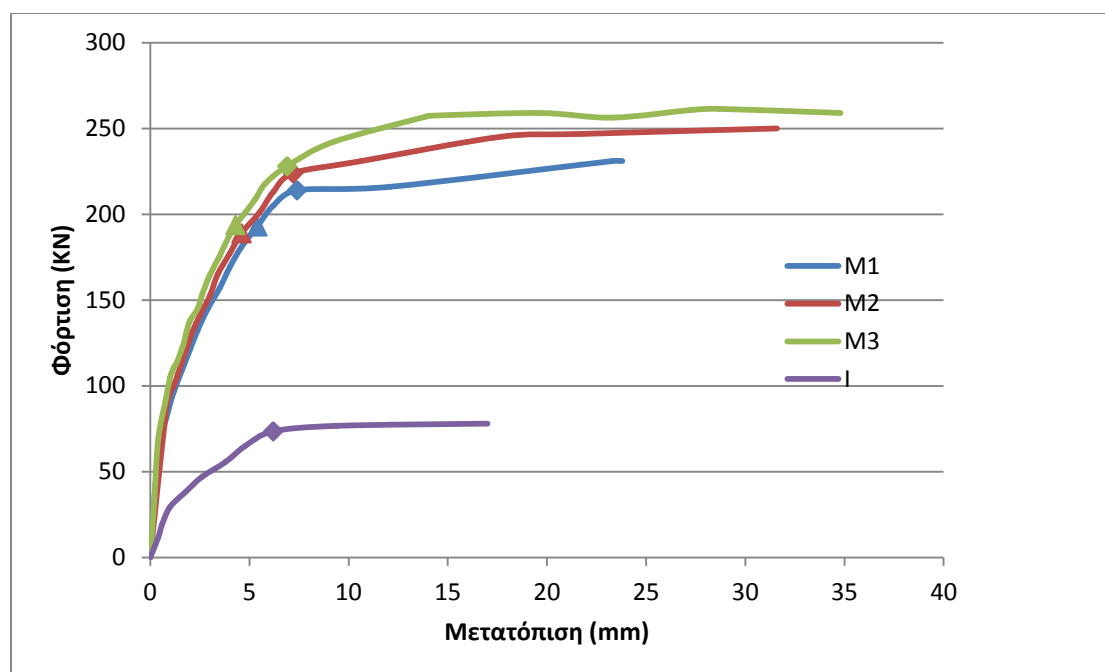
Σχ.5.20 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης υποστυλώματος M3

Η καμπύλη αυτή έχει το χαρακτηριστικό της πιο ομαλής μεταβολής της δυσκαμψίας του υποστυλώματος. Παρατηρούμε ότι με υψηλότερες ποιότητες μανδύα η διαρροή του μέσα και του έξω οπλισμού πλησιάζουν περισσότερο. Αυτό το γεγονός προσαρμόζει τη μείωση της δυσκαμψίας σε πιο ομαλή τροχιά.

Προσομοίωμα M3		
διαρροή δοκιμίου		μέγιστη δύναμη
έσω οπλισμοί	οπλισμοί μανδύα	
4,3mm/193,8kN	6,9mm/228,8kN	260kN

Πιν.5.8 Αποτελέσματα υποστυλώματος M3

## Σύγκριση περιπτώσεων M1, M2, M3



Σχ.5.21 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων I και M1, M2, M3

Έχοντας την απεικόνιση των 3 μονολιθικών μοντέλων M1, M2, M3 και του αρχικού μη ενισχυμένου I μπορούμε να κάνουμε κάποιες ευκολοκατανόητες αρχικές επισημάνσεις. Παρατηρούμε ότι από τη μέγιστη φόρτιση των 78kN μπορούμε με την ενίσχυση του μανδύα να τριπλασιάσουμε την τιμή αυτή. Επόμενη εμφανής παρατήρηση είναι η πολύ μεγαλύτερη δυσκαμψία των ενισχυμένων δοκιμίων. Στο αρχικό μοντέλο I οι μεταβολές της δυσκαμψίας είναι πολύ εντονότερες. Αντίστοιχη παρατήρηση μπορεί να γίνει και στη σύγκριση των M1, M2, M3. Παρατηρούμε ότι όσο υψηλότερης ποιότητας είναι ο μανδύας τόσο πιο ομαλή είναι η απομείωση της δυσκαμψίας στη στάθμη της διαρροής. Οι καμπύλες των ενισχυμένων προσομοιωμάτων ακολουθούν την ίδια τάση μέχρι τη διαρροή των εσωτερικών οπλισμών. Χαρακτηριστικό είναι δε ότι η πρώτη διαρροή γίνεται για την ίδια τιμή φόρτισης περίπου 189-194kN. Οι τιμές της διαρροής επιτυγχάνονται για όλο και μικρότερες τιμές μετατόπισης όσο αυξάνεται η ποιότητα του μανδύα.

Παρατηρούμε ότι η προσφορά της καλύτερης ποιότητας μανδύα δεν αποδίδει αναλόγως στην αντοχή του υποστυλώματος. Από την αντοχή της διατομής και μόνο μπορεί να βγει αυτό το συμπέρασμα, ενώ είδαμε ότι και η συμπεριφορά όταν το δοκίμιο είναι μονολιθικό δεν αλλάζει. Ο λόγος που θα μπορούσαμε να πούμε ότι προτιμάται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αντοχή σχετίζεται κυρίως με άλλους παράγοντες. Παρά το υψηλότερο κόστος στα σκυροδέματα ψηλότερης αντοχής επιλέγονται λόγω των καλύτερων ιδιοτήτων τους όπως η ανθεκτικότητα, η αντοχή σε φθορά, τριβή και κρούση, διατηρούνται καλύτερες ιδιότητες σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας. Τέλος, το κρισιμότερο στην τεχνολογία των μανδυσών είναι η σύνδεση του παλιού με το νέο σκυρόδεμα. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που συνήθως αν είναι δυνατόν από πλευράς υποδομών στην εκάστοτε εργασία προτιμάται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από υψηλότερες αντοχές και πολύ καλύτερες ιδιότητες πρόσφυσης, εφόσον εφαρμόζεται σωστά.

	Φορτία διαρροής (kN)		Μέγιστο φορτίο (kN)
	1 <sup>η</sup> διαρροή	2 <sup>η</sup> διαρροή	
I	73,5		78
M1	193	214	231
M2	189	224	250
M3	194	228	260

**Πιν.5.9** Αποτελέσματα υποστυλωμάτων I και M1, M2, M3

### *Δυσκαμψίες υποστυλωμάτων με μονολιθική σύνδεση μανδύα*

Η αρχικές δυσκαμψίες όπως φαίνεται και στο σχήμα είναι αρκετά μεγαλύτερες για τα ενισχυμένα υποστυλώματα. Η καλύτερη ποιότητα μανδύα δε φαίνεται να αποδίδει για το αρχικό αυτό κομμάτι της καμπύλης. Μέχρι το σημείο της διαρροής των μέσα σπλισμών οι τρεις καμπύλες πηγαίνουν με μικρές αποκλίσεις. Το σημείο της διαρροής των έξω σπλισμών διαφέρει αρκετά στις περιπτώσεις που εξετάσαμε. Η τέμνουσες δυσκαμψίες για τα σημεία διαρροής φαίνονται στον πίνακα.

	Τέμνουσα Δυσκαμψία (MN/m)	
	1η διαρροή	2η διαρροή
I	11,9	
M1	35,7	17,9
M2	47,3	31,0
M3	45,0	33,1

**Πιν.5.10** Δυσκαμψίες υποστυλωμάτων I και M1, M2, M3

Η δυσκαμψία υπερτριπλασιάζεται όπως και η αντοχή που είδαμε νωρίτερα.

Η συνολική συμπεριφορά των τριών περιπτώσεων μοιάζει. Η εφαρμογή των ενισχύσεων στην Ελλάδα χρησιμοποιεί σκυροδέματα πιο κοντά στο C35 απ' ό τι στο C80 λόγω της μεγαλύτερης ευχέρειας παραγωγής του. Άλλωστε όπως είδαμε και στα αποτελέσματα η απόδοση του μανδύα με υψηλότερη ποιότητα δεν είναι πολύ μεγάλη. Προφανώς αυτό κυμαίνεται από περίπτωση σε περίπτωση και σχετίζεται και με το πάχος του μανδύα και με πολλά χαρακτηριστικά της διατομής και των χρησιμοποιούμενων υλικών. Στο υπόλοιπο της εργασίας επικεντρωθήκαμε στην ανάλυση της περίπτωση μανδύα C35 και όλες οι συγκρίσεις γίνονται για αυτήν την ποιότητα.

### 5.3.2.2. Μορφή αστοχίας

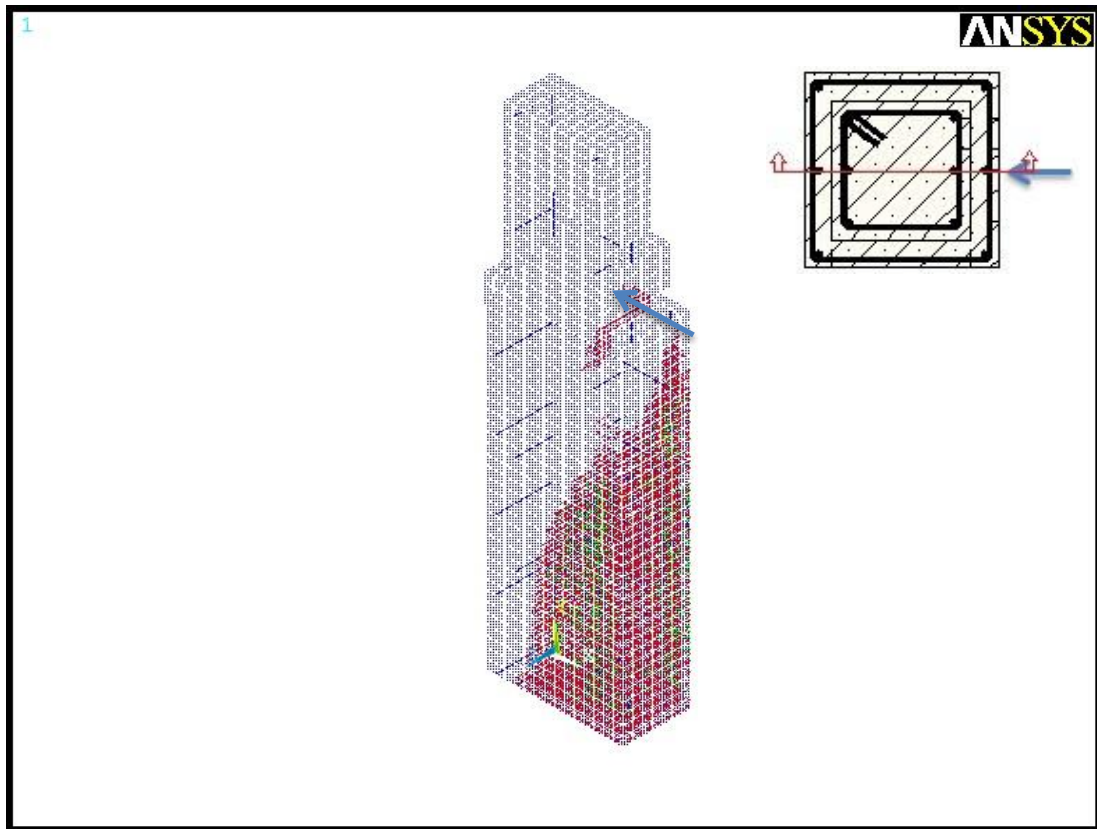
Τα αποτελέσματα προέρχονται από το M1, αλλά η ίδια συμπεριφορά εντοπίζεται και στα M2 και M3. Η αστοχία του ενισχυμένου υποστυλώματος με μονολιθική σύνδεση μανδύα είναι καμπτική. Ήδη το αρχικό υποστυλώμα I έδειξε ότι δεν αστοχεί διατμητικά.



## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

Ενισχύοντας με 4Φ10 διαμήκη και συνδετήρες Φ8/200 σπλίζουμε αρκούντως διατμητικά ώστε να αστοχήσει πρώτα καμπτικά το υποστυλωμα. Ήδη από τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης που συγκρίναμε, παρατηρούμε ότι για τα ενισχυμένα υποστυλώματα η ανάλυση προχώρησε σε αισθητά μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Μπορεί με τις αναλύσεις μας να μην έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα του υποστυλώματος, αλλά παίρνουμε μια ένδειξη.

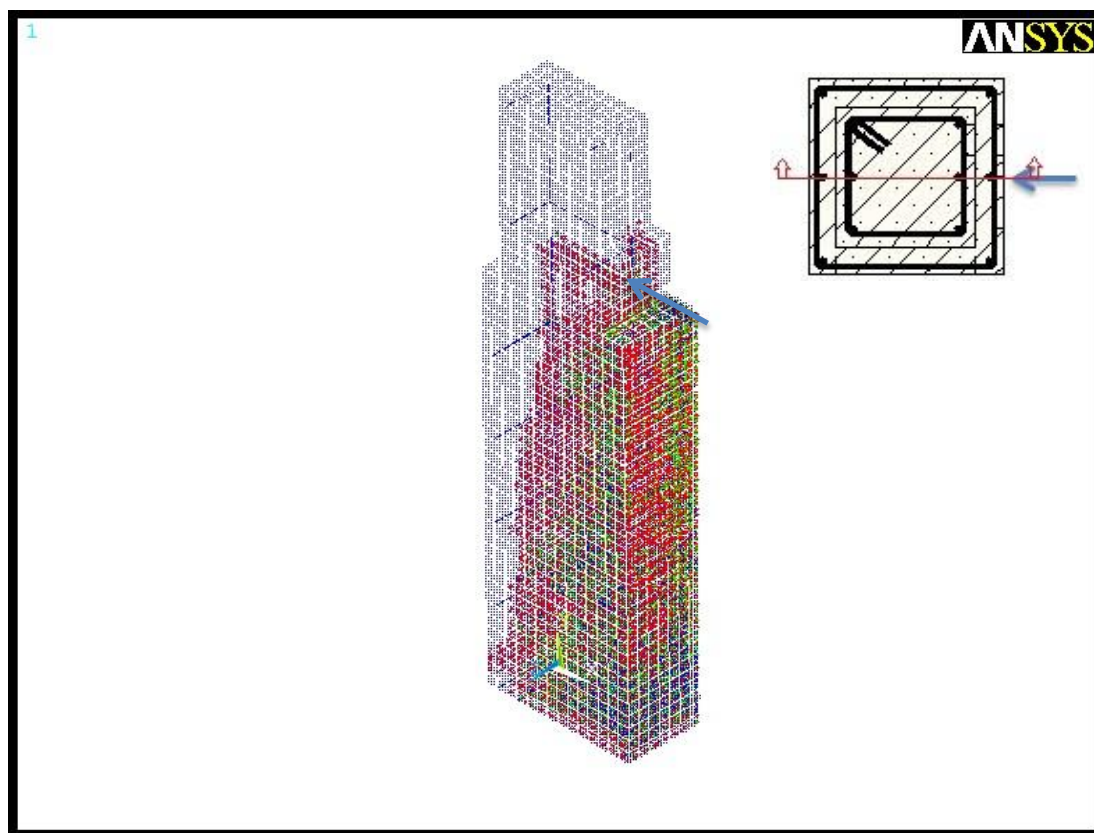
Στα σχήματα που ακολουθούν αποτυπώνονται οι εμφανιζόμενες εφελκυστικές αστοχίες των στοιχείων σκυροδέματος σε κατακόρυφη τομή του υποστυλώματος. Βλέπουμε την εξάπλωση της αστοχίας σε δύο στιγμιότυπα. Στο πρώτο ήδη υπάρχει αποδιοργάνωση του σκυροδέματος σε σημαντική περιοχή του υποστυλώματος. Ταυτόχρονα εμφανίζονται και εφελκυστικές αστοχίες στη διεπιφάνεια στο σημείο τερματισμού του μανδύα. Οι τελευταίες αυτές αστοχίες έχουν αρκετό ενδιαφέρον καθώς μπορεί να προκαλέσουν ρωγμές στην περιοχή εκείνη. Η συγκέντρωση των εφελκυστικών τάσεων στο σημείο εκείνο σχετίζεται άμεσα και με τη διάταξη φόρτισης, όπως και με την εφαρμογή πλήρους ή τοπικού μανδύα.



**Σχ.5.22** Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος M1 σε αρχικό στάδιο

Η εξάπλωση της αστοχίας είναι πολύ γρήγορη και έντονη από κάτω προς τα πάνω, ενώ η περιοχή που αστοχεί σε εφελκυσμό από αρχικά τριγωνική μορφή, παίρνει σταδιακά ορθογωνική μορφή μέχρι τη στάθμη φόρτισης. Η πιο ακραίες περιοχές που φορτίζονται περισσότερο είναι αυτές του μανδύα. Εκεί βλέπουμε προχωρημένη αστοχία με τη χαρακτηριστική εμφάνιση δεύτερου επιπέδου αστοχίας (πράσινο χρώμα) αλλά και τρίτου (μπλε χρώμα). Επειδή όμως η ποιότητα του εσωτερικού σκυροδέματος είναι χαμηλότερη,

εκεί έχουμε πρώτα τις εφελκυστικές αστοχίες αφού έχουμε και μικρότερη εφελκυστική αντοχή.



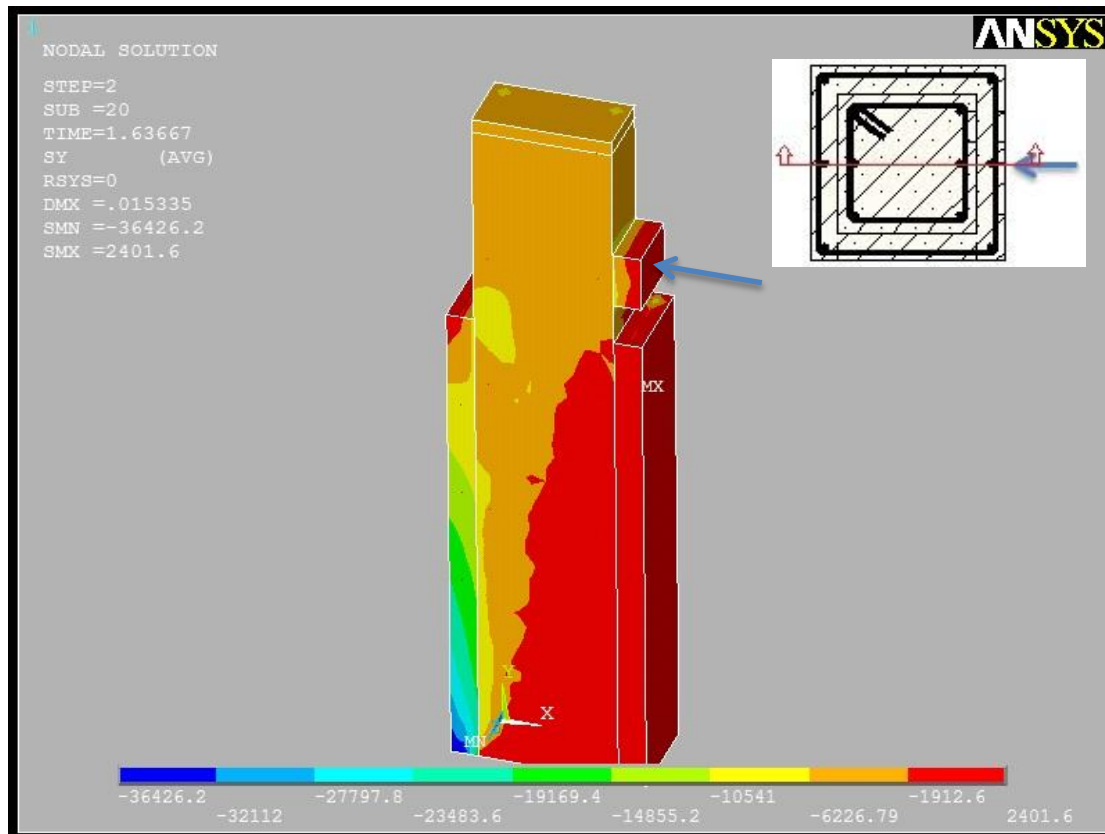
Σχ.5.23 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος M1 σε προχωρημένο στάδιο

### 5.3.2.3. Παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος

#### *Κατανομή τάσεων στη διεπιφάνεια*

Η παραπάνω χαρακτηριστική αναπαράσταση των περιοχών εφελκυστικής αστοχίας έχει ακριβή αντιστοιχία με τις αναπτυσσόμενες τάσεις ανά περιοχές στο υποστυλωμα. Για μια αρκετά προχωρημένη στιγμή της φόρτισης αποτυπώνουμε τις κατακόρυφες τάσεις σε μια τομή του υποστυλώματος. Η κατανομή των έντονων εφελκυστικών τάσεων στο στιγμιότυπο αυτό έχει ξεπεράσει το στάδιο της τριγωνικής μορφής και πλησιάζει την ορθογωνική. Παρατηρούμε ότι η κατακόρυφη θλιπτική τάση περιορίζεται σε πολύ μικρή περιοχή όπου πλησιάζει ή και ξεπερνά τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη. Από την άλλη στην εφελκυσόμενη πλευρά όλη η κόκκινη περιοχή έχει ξεπεράσει σε κατακόρυφες ορθές τάσεις την μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του C35. Παρ'όλ'αυτά η καταπόνηση είναι τριαξονική και όχι μονοαξονική, γι'αυτό οι αστοχίες καθορίζονται από το κριτήριο των Willam-Warnke.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

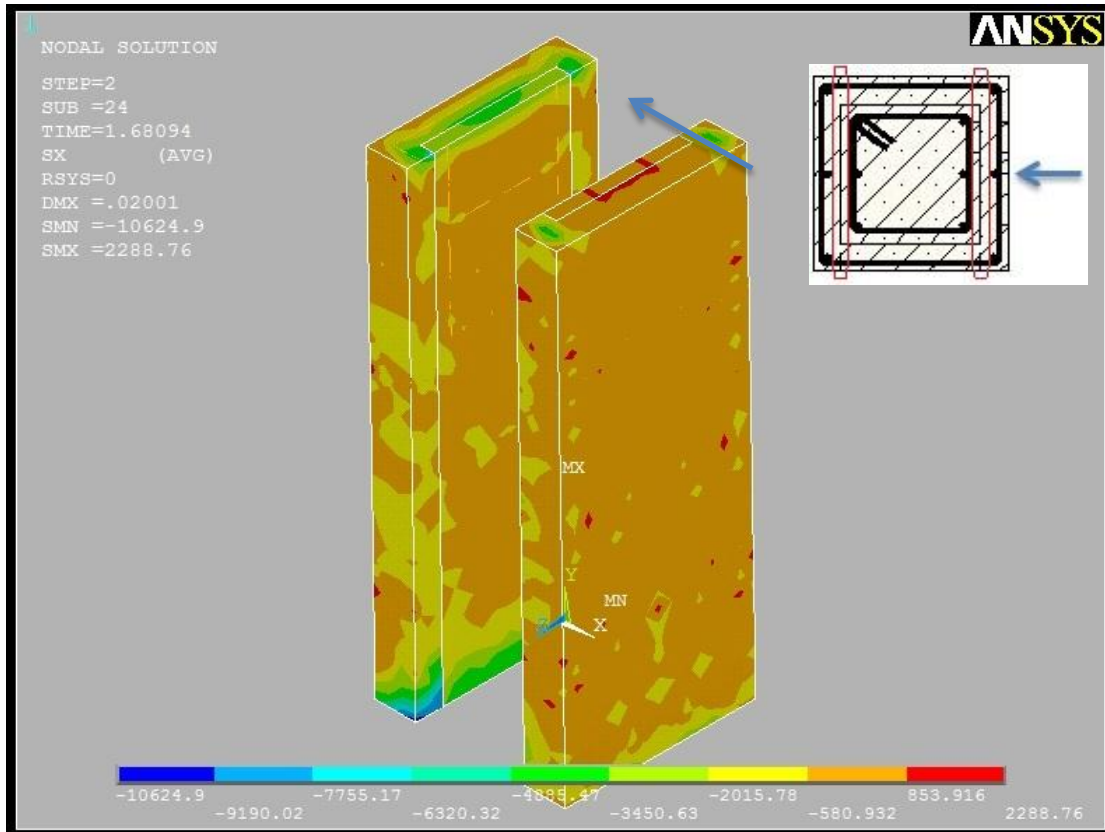


**Σχ.5.24** Κατακόρυφες ορθές τάσεις υποστυλώματος M1

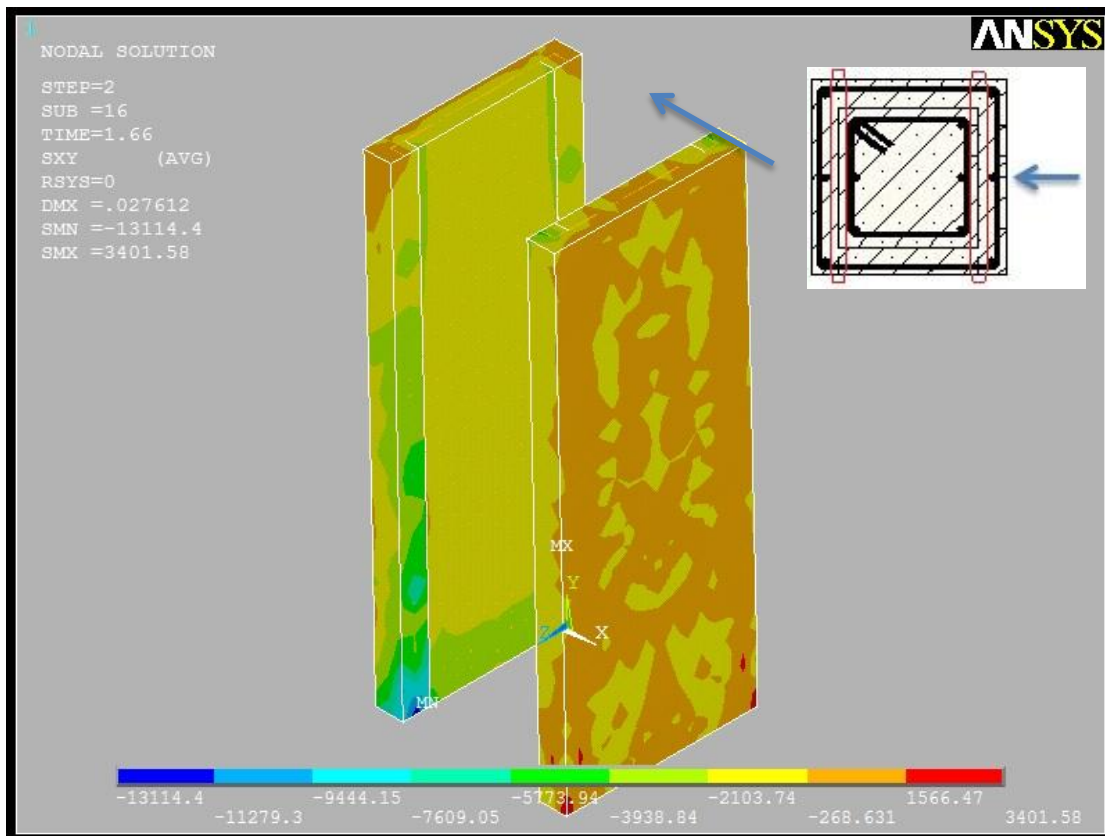
Για το επόμενο προσομοίωμα J, όπου θα εισάγουμε τη λειτουργία της διεπιφάνειας, θα μας χρειαστεί η τιμή της ορθής τάσης που αναπτύσσεται στις διεπιφάνειες. Ο τρόπος που προτείνουμε να υπολογίζονται αυτές οι τάσεις είναι μέσω μιας ανάλυσης όπου θα υπάρχει πλήρης σύνδεση του μανδύα, όπως στα προσομοιώματα M. Απεικονίζουμε λοιπόν τις ορθές τάσεις στο Σχ.5.25 και βλέπουμε την κατανομή τους στις πιο καταπονούμενες διεπιφάνειες που είναι οι κάθετες στη διεύθυνση της οριζόντιας φόρτισης. Η τελική τιμή που θα κρατήσουμε ως αντιπροσωπευτική για όλη τη διεπιφάνεια δεν θα είναι η μέση τιμή. Θεωρούμε αντιπροσωπευτικότερη μια τιμή πιο κοντά στις υψηλότερες τάσεις, αφού θέλουμε να πλησιάσουμε τις μέγιστες αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις.

Η αντιπροσωπευτική ορθή τάση που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια είναι 0,7MPa. Φαίνεται και στην απεικόνιση ότι γύρω από αυτήν την τιμή είναι οι αναπτυσσόμενες τάσεις τη στιγμή της μεγάλης μετατόπισης. Οι αναπτυσσόμενες κατάκόρυφες διατμητικές τάσεις φαίνονται στη συνέχεια. Αυτές θα συγκριθουν με το προσομοίωμα J όπου θα έχουμε λειτουργία της διεπιφάνειας παλιού-νέου σκυροδέματος. Ως πρώτη ένδειξη βλέπουμε ότι οι διατμητικές αυτές τάσεις δεν ξεπερνούν τα 2,5MPa πάνω στη διεπιφάνεια. Ενώ οι οριζόντιες διατμητικές τάσεις αναμένονται πολύ μικρότερες σε τιμή.

5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



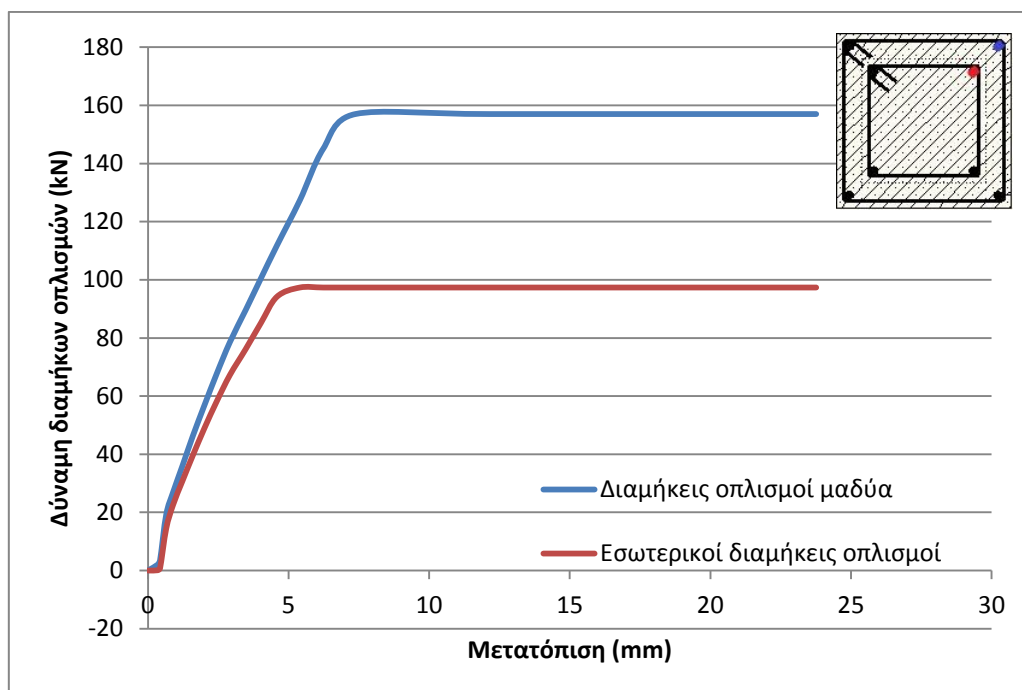
Σχ.5.25 Ορθές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος M1



Σχ.5.26 Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος M1

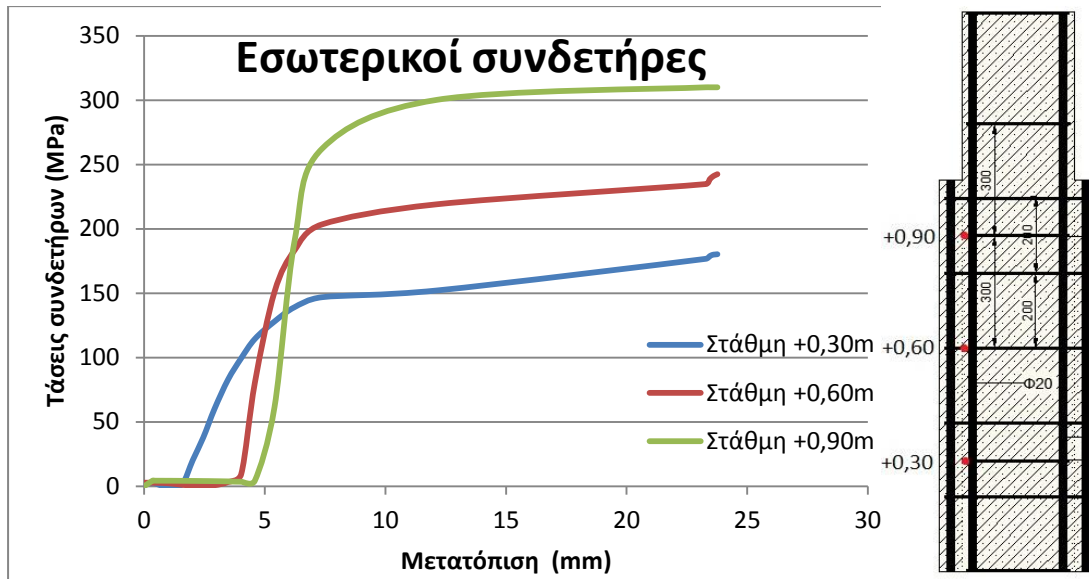
## 5.3.2.4. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σπλισμών

Καταγράφουμε τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις των εφελκόμενων διαμήκων σπλισμών του ενισχυμένου υποστυλώματος. Οι σπλισμοί του μανδύα προσφέρουν μεγαλύτερη δύναμη αφού είναι Φ8 και S500. Πρώτα διαρρέουν οι εσωτερικοί που είναι StI για μετατόπιση 5,4mm και αργότερα οι εξωτερικοί σε 12,1mm. Στα υποστυλώματα αυτά παρατηρούμε μεγάλη απόσταση μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης διαρροής σε σχέση με το κεφάλαιο 4. Αυτό δικαιολογείται αφού τοποθετούμε χάλυβα πολύ υψηλότερης ποιότητας στην ενίσχυση και αποτελεί άλλο ένα από τα κέρδη της μεθόδου.



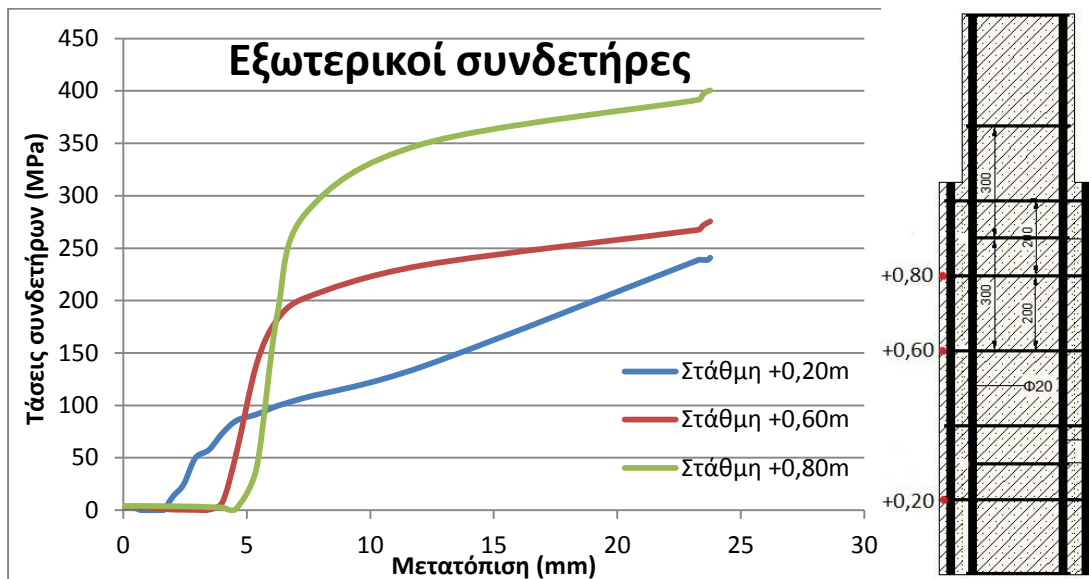
Σχ.5.27 Δύναμη διαμήκων σπλισμών υποστυλώματος M1

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στους συνδετήρες του ενισχυμένου υποστυλώματος παρουσιάζονται παρακάτω. Καταγράφουμε την εξέλιξη των τάσεων αυτών τόσο στους εσωτερικούς όσο και στους εξωτερικούς συνδετήρες σε διαφορετικές στάθμες καθ' ύψος. Το πρώτο ποιοτικό συμπέρασμα είναι ότι η μορφή των καμπυλών είναι ίδια για τους μέσα και τους έξω συνδετήρες που βρίσκονται στις ίδιες περίπου στάθμες. Σε αντίθεση με το μη ενισχυμένο υποστυλώμα, στην περίπτωση του «μονολιθικά» ενισχυμένου στις υψηλότερες στάθμες αναπτύσσονται εν τέλει μεγαλύτερες τάσεις.



Σχ.5.28 Τάσεις εσωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος M1

Ενώ αρχικά προσφέρουν οι χαμηλότεροι συνδετήρες, αφότου ξεκινά να συνεισφέρουν και οι υψηλότερης στάθμης τάχιστα αναπτύσσουν πολύ μεγάλες τάσεις. Στην περίπτωση δε του εσωτερικού συνδετήρα της στάθμης +0,90m, ο συνδετήρας διαρρέει, καθώς είναι ποιότητας StI. Κανένας από τους έξω συνδετήρες δε διαρρέει.



Σχ.5.29 Τάσεις εξωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος M1

5.3.2.5. Ποσοστό παραλαβής φορτίου από τον μανδύα

Η κατανομή των παραλαμβανόμενων δράσεων από το εσωτερικό υποστύλωμα και το μανδύα έχει μεγάλο ενδιαφέρον στην τεχνολογία των ενισχύσεων με μανδύες. Το ποσοστό αυτό αλλάζει στην πορεία της οριζόντιας φόρτισης. Για την προχωρημένη στιγμή της παραμόρφωσης οι θλιπτικές τάσεις έχουν περιοριστεί αποκλειστικά στο θλιβόμενο

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

τμήμα του μανδύα. Με τον τρόπο αυτό η αναπτυσσόμενη ροπή παραλαμβάνεται από το θλιβόμενο τμήμα του μανδύα και τους εφελκυσμένους οπλισμούς. Η οριζόντια φόρτιση στη βάση παραλαμβάνεται στο προσομοίωμα M1 κατά 90% από το μανδύα και 10% από το εσωτερικό τμήμα του υποστυλώματος.

### 5.3.3. Συμπεράσματα

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν προσομοιώματα με πλήρη σύνδεση του μανδύα πάνω στο αρχικό υποστύλωμα. Η σύνδεση αυτή είναι τελείως θεωρητική και δεν μπορεί να υλοποιηθεί στην πράξη. Αναλύουμε τα προσομοιώματα M ώστε να έχουμε το άνω όριο της ενίσχυσης που μπορεί να επιτευχθεί με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του μανδύα. Στη συνέχεια θα τρέξουμε το J και θα διαπιστώσουμε το συντελεστή μονολιθικότητας που πετυχαίνουμε με χρήση βλήτρων στη διεπιφάνεια. Οι τρεις περιπτώσεις που είδαμε μας έδωσαν παρόμοια ποιοτικά συμπεράσματα. Επιλέξαμε να ασχοληθούμε με το M1 καθώς χρησιμοποιεί C35, το οποίο είναι πιο σύνηθες στις εφαρμογές.

Η αστοχία που επέρχεται είναι καμπτική με την αναμενόμενη εμφάνιση ρωγμής στη βάση του υποστυλώματος. Οι οπλισμοί διαρρέουν και συμπεραίνουμε από τις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης ότι η ενίσχυση που εφαρμόσαμε προσέδωσε μεγαλύτερη πλαστιμότητα, χωρίς να μπορούμε να την υπολογίσουμε με ακρίβεια. Με τα χαρακτηριστικά του υποστυλώματος και του μανδύα που εξετάσαμε η ενίσχυση προσέδωσε τρεις φορές μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία.

Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσοστό συνεισφοράς του μανδύα στην ανάληψη των δράσεων. Όλη η κατακόρυφη θλίψη συγκεντρώνεται στο μανδύα στη βάση του προβόλου. Ταυτόχρονα, η οριζόντια δύναμη παραλαμβάνεται κατά 90% από το μανδύα και μόλις 10% από το εσωτερικό του αρχικού υποστυλώματος. Ο τρόπος που αναλαμβάνονται οι δυνάμεις στο ενισχυμένο υποστύλωμα επηρεάζει και τις αναπτυσσόμενες τάσεις στους συνδετήρες. Παρατηρούμε μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες τάσεις σε συνδετήρες που βρίσκονται πιο ψηλά σε σχέση με αυτούς της βάσης. Η παρουσία του μανδύα φαίνεται ότι βοηθά και τους εσωτερικούς οπλισμούς να αναπτύξουν τις αντοχές τους, μέχρι και να διαρρεύσουν.

### 5.4. Ενισχυμένα υποστυλώματα με προσομοίωση της λειτουργία διεπιφάνειας

#### 5.4.1. Προσομοιώματα J1 και J2

##### 5.4.1.1. Γενικά

Ως τώρα έχουμε αναλύσει το αρχικό υποσύλωμα I, τυπικό για την ελληνική επικράτεια. Στη συνέχεια είδαμε τη συμπεριφορά ιδεατών υποστυλωμάτων με μονολιθική σύνδεση μανδύα (M1, M2, M3). Όλη η ως τώρα προσπάθεια έγινε με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με το ενισχυμένο υποσύλωμα όπου θα έχουμε εισαγάγει και τη λειτουργία της διεπιφάνειας. Επιλέγουμε να ασχοληθούμε πλέον μόνο με την περίπτωση μανδύα C35, καθώς είναι πιο κοντά στις συνήθεις ποιότητες που χρησιμοποιούνται. Στις περιπτώσεις C50 και C80 με εκτοξευόμενα σκυροδέματα που έχουν μεγαλύτερη αντοχή υπάρχει μεγάλη διασπορά στις τιμές αυτές, καθώς επηρεάζονται κατά πολύ από τη διαδικασία κατασκευής.

Θα κατασκευάσουμε τα προσομοιώματα J (jacket). Η αρίθμησή τους δεν αντιστοιχεί στην ποιότητα του μανδύα όπως στα μοντέλα M1, M2, M3 (monolithic) αφού τώρα εξετάζουμε μόνο ποιότητα μανδύα C35. Η διαφοροποίηση στα μοντέλα J αφορά τη διεπιφάνεια υποστυλώματος-μανδύα. Στο J1 έχουμε λεία διεπιφάνεια, ενώ στο J2 έχουμε οπλισμένη διεπιφάνεια. Με την αναζήτηση που θα γίνει στο σημείο αυτό θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε δύο υποστυλώματα που έχουν κατασκευαστεί με διαφορετική επεξεργασία στη διεπιφάνεια με το αρχικό μη ενισχυμένο υποσύλωμα και το θεωρητικά ενισχυμένο με μονολιθικό τρόπο.

Κατασκευάζουμε το ίδιο υποσύλωμα, με τις γνωστές διαστάσεις και το ενισχύουμε με μανδύα C35 όπως κάναμε και νωρίτερα. Τώρα όμως προσομοιώνουμε τη διεπιφάνεια παλιού-νέου σκυροδέματος με ελατήρια. Ο τρόπος αυτός προσέγγισης της λειτουργίας αναπτύχθηκε αναλυτικότερα στα κεφάλαια 3 και 4. Το υποσύλωμά μας είναι αρχικής διατομής 300x300 και εφαρμόζουμε μανδύα 6cm. Το ύψος του εσωτερικού υποστυλώματος είναι 1,5m, ενώ ο μανδύας φτάνει μέχρι ύψος 1,05m. Οι ποιότητες υλικών που έχουμε είναι για το παλιό τμήμα C16 και StI οι χάλυβες, ενώ τα καλύτερης ποιότητας υλικά του μανδύα είναι C35 και S500.

Η διακριτοποίηση γίνεται πάλι σε κάρναβο 3cm καθώς αυτό μας διευκολύνει. Για τα πεπερασμένα στοιχεία σκυροδέματος χρησιμοποιούμε στοιχεία SOLID65, και τα εισάγουμε με το διάγραμμα c2, όπως το έχουμε παρουσιάσει ήδη αναλυτικότερα. Με το νόμο αυτό διευκολύνουμε την ανάλυση αποφεύγοντας τα πιο πολυγραμμικά διαγράμματα και τους φθιτούς κλάδους. Έχει ήδη διερευνηθεί και αποδειχθεί ότι η χρήση διαγραμμάτων όπως το c4 δυσχεραίνει σε πολλαπλάσιο βαθμό την επίλυση.

##### 5.4.1.2. Προσομοίωση διεπιφανειών

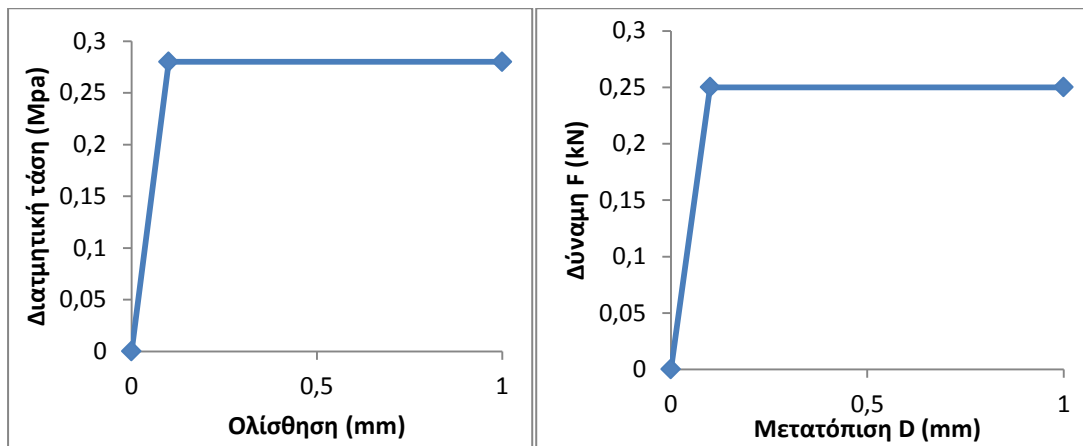
Η διεπιφάνεια θα εισαχθεί με τη μέθοδο των ελατηρίων που έχει ήδη παρουσιαστεί. Η μέθοδος αυτή μας δίνει περισσότερες δυνατότητες προσέγγισης της φυσικής λειτουργίας παλιού-νέου σκυροδέματος. Επίσης, πλεονεκτεί από το γεγονός ότι σε σχέση με την μέθοδο επιφανειακών στοιχείων τριβής είναι πολύ ταχύτερη σε υπολογιστικό



## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

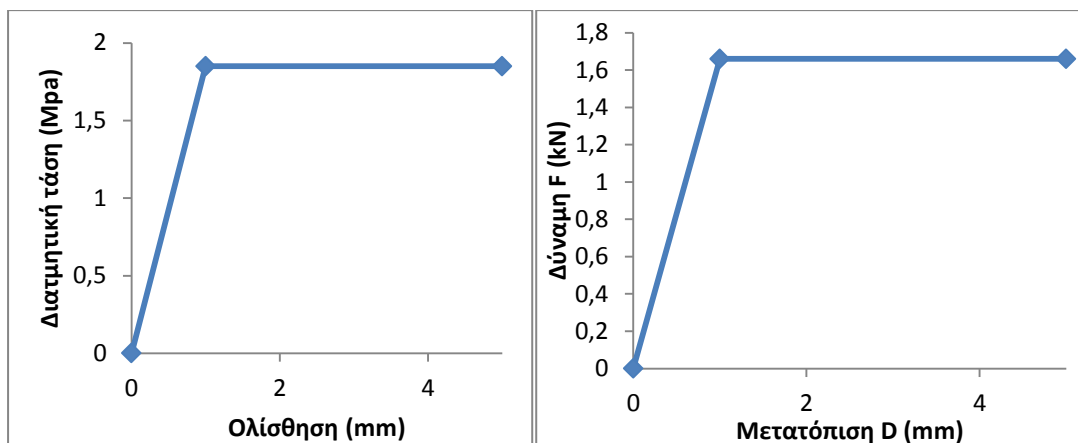
χρόνο. Η πρώτη περίπτωση που θα εξετάσουμε είναι η λεία διεπιφάνεια με το διάγραμμα i1 και η δεύτερη είναι η οπλισμένη διεπιφάνεια με το διάγραμμα i3. Για τη χρήση των νόμων  $i$  που έχουμε προτείνει χρειάζεται εν αρχή μια τιμή για την ορθή τάση στις διεπιφάνειες. Με τις απλοποιητικές παραδοχές που έχουμε αποδεχθεί, υπολογίσαμε από το M1, τιμή 0,70MPa.

Για τη λεία διεπιφάνεια ο νόμος i1 αντιστοιχεί σε διγραμμικό νόμο με σημείο τομής των ευθειών τε παραμόρφωση 0,1mm. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση για ολισθήσεις μεγαλύτερες από αυτήν είναι  $\tau_{fud}=0,4\sigma_{cd}=0,28\text{MPa}$ . Αυτές οι τιμές ανάγονται σε διάγραμμα F-D, ως ακολούθως.



Σχ.5.30 Νόμος ελατηρίων i1 υποστυλώματος J1

Για την οπλισμένη διεπιφάνεια υπολογίζουμε ξεχωριστά τη μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση λόγω τριβής και λόγω της δράσης βλήτρου. Στη συνέχεια με τη χρήση συντελεστών συνεισφοράς υπολογίζουμε τη συνολική μέγιστη τάση. Η οπλισμένη διεπιφάνεια του προσομοιώματος J2 έχει την ίδια πυκνότητα βλήτρων με το πείραμα S6 που έχουμε εξετάσει, θεωρούμε 5Φ10 ανά πλευρά. Η μέγιστη διατμητική τάση λόγω τριβής είναι  $\tau_{fud}=0,4\sqrt[3]{fcd^2\sigma cd}=2,48\text{MPa}$  ενώ από δράση βλήτρου  $\tau_d=(1,3nd_b^2\sqrt{fcfy})/Ac=0,18\text{MPa}$ . Συνδυάζοντας τα δύο με συντελεστές 0,7 και 0,6 αντίστοιχα παίρνουμε συνολικά  $\tau=1,85\text{MPa}$ . Το προτεινόμενο διάγραμμα F-D της μεθόδου είναι διγραμμικό με σημείο τομής στο 1mm. Το τελικό διάγραμμα φαίνεται παρακάτω



Σχ.5.31 Νόμος ελατηρίων i3 υποστυλώματος J2

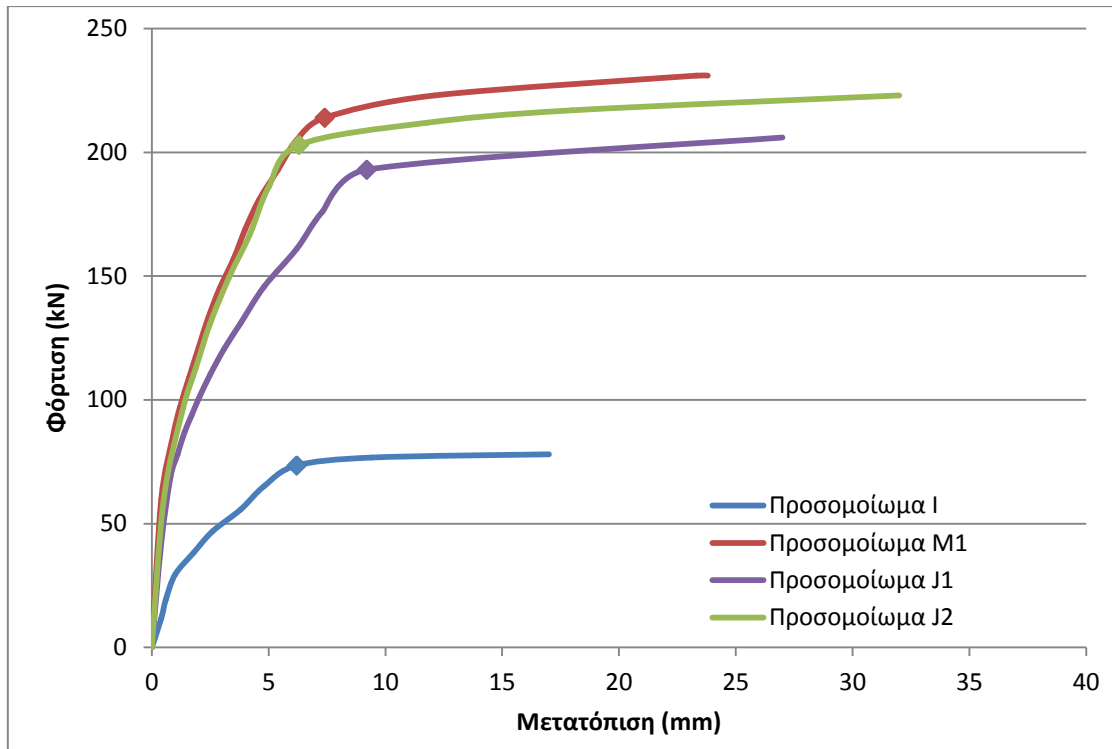
Τα αποτελέσματα συγκρίνονται άμεσα με το μονολιθικό M1 ώστε να εντοπίσουμε τις διαφορές τους. Στόχος στην κατασκευή μιας πραγματικής ενίσχυσης στο έργο είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης προσέγγισης του ενισχυμένου με το ιδεατό μονολιθικό.

#### 5.4.2. Ανάλυση

##### 5.4.2.1. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι η μορφή της καμπύλης είναι ίδια μορφολογικά σε ένα μονολιθικό και ένα μη μονολιθικό υποστυλώμα. Αυτό εν αρχή υποδηλώνει ότι δεν έχουμε αποφλοίωση του μανδύα η οποία θα έδινε απότομη αλλαγή σε κάποιο σημείο. Συγκρίνουμε τα επίπεδα φόρτισης στα οποία παρατηρούνται οι αρχικές ρωγμές του σκυροδέματος, οι διαρροές των οπλισμών όπως και τις κλίσεις των διαγραμμάτων στα επιμέρους τμήματα.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



**Σχ.5.32** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων I, M1, J1, J2

Όπως ήδη είχαμε εντοπίσει η απόδοση των μανδυών είτε με λεία διεπιφάνεια είτε με οπλισμένη είναι πολύ καλή. Τα αποτελέσματα πλησιάζουν πολύ κοντά το ιδεατό προσομοίωμα M , με τη μονολιθική σύνδεση του μανδύα. Η περίπτωση οπλισμένης διεπιφάνειας δείχνει να ταυτίζεται απόλυτα με το ιδεατό μονολιθικό μέχρι και τις διαρροές τους. Η δυσκαμψία των προσομοιωμάτων M1 και J2 ταυτίζονται απόλυτα, ενώ στο J1 έχουμε μικρότερη δυσκαμψία.

Η λεία διεπιφάνεια δίνει συστηματικά μικρότερες τιμές από την οπλισμένη όπως αναμενόταν. Οι δυσκαμψίες για τα ενισχυμένα υποστυλώματα διπλασιάζονται για το J1 και τριπλασιάζονται για το J2. Η διαρροή επέρχεται στο J1 για 193kN στα 9,2mm ενώ για το J2 σε φορτίο 203kN στα 6,3mm. Είναι εμφανές πόσο πιο δύσκαμπτο γίνεται το υποστύλωμα με οπλισμένη διεπιφάνεια και η αισθητά μικρότερη μετατόπιση για την οποία επέρχεται η διαρροή των οπλισμών.

	Φορτίο διαρροής (kN)	Μετατόπιση διαρροής (mm)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Τέμνουσα δυσκαμψία (MN/m)
<b>I</b>	73,5	6,2	78	11,8
<b>M1</b>	214	7,4	231	35,7
<b>J1</b>	193	9,2	206	21
<b>J2</b>	203	6,3	223	32,2

**Πιν.5.11** Αποτελέσματα υποστυλωμάτων I και M1, J1, J2

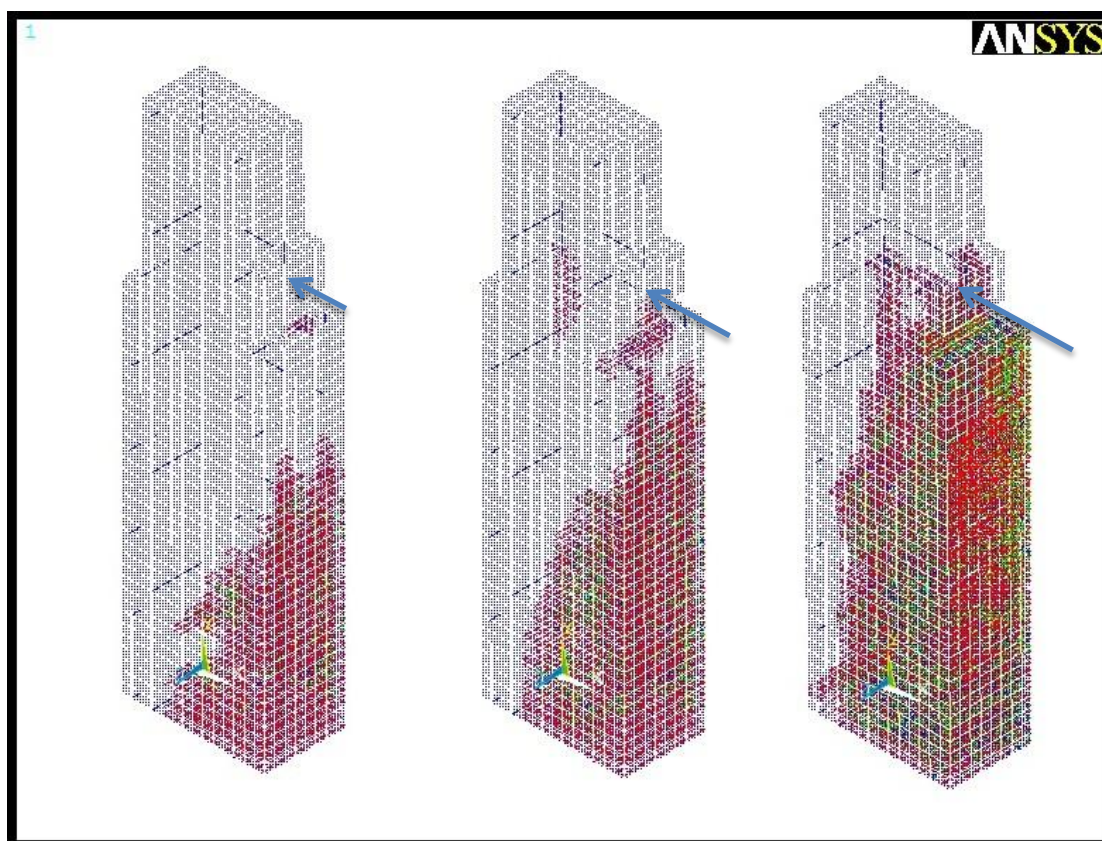
### Συντελεστής μονολιθικότητας

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα που βγάζουμε από αυτήν την αναζήτηση είναι η διαπίστωση της επιτυχίας εφαρμογής του μανδύα τόσο στην περίπτωση λείας διεπιφάνειας J1 όσο και σε οπλισμένης J2. Οι καμπύλες που παίρνουμε πλησιάζουν πολύ την καμπύλη του προσομοιώματος M1, όπου θεωρήσαμε την ιδεατή μονολιθική σύνδεση του μανδύα. Πιο συγκεκριμένα για το J1 υπολογίζουμε συντελεστή μονολιθικότητας 0,90, ενώ για το J2 0,95. Οι τιμές αυτές είναι πολύ υψηλές, αλλά επαληθεύονται και πειραματικά όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο εξής θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα τα αποτελέσματα του ποροσομοιώματος J2.

#### 5.4.2.2. Μορφή αστοχίας

Η μορφή αστοχίας είναι καμπτική. Στο σχήμα παρουσιάζονται τρία στάδια από την εξέλιξη της φόρτισης. Η αρχική μορφή των εφελκυστικών αστοχιών έχει την τριγωνική μορφή που στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε ορθογωνική. Οι δεύτερες (πράσινες) και τρίτες (μπλε) εφελκυστικές αστοχίες στα στοιχεία σκυροδέματος γίνονται όλο και περισσότερες και επεκτείνονται προς τα επάνω. Εμφανίζονται και πάλι αστοχίες και στη διεπιφάνεια με το μανδύα στο πάνω μέρος όπου τερματίζει. Παρόμοια αποτελέσματα είχαμε δει και στους «μονολιθικούς» μανδύες, οπότε συμπεραίνουμε ότι η λειτουργία της διεπιφάνειας δεν επιφέρει κάποια αλλαγή στο πώς αστοχεί το υποστυλώμα.



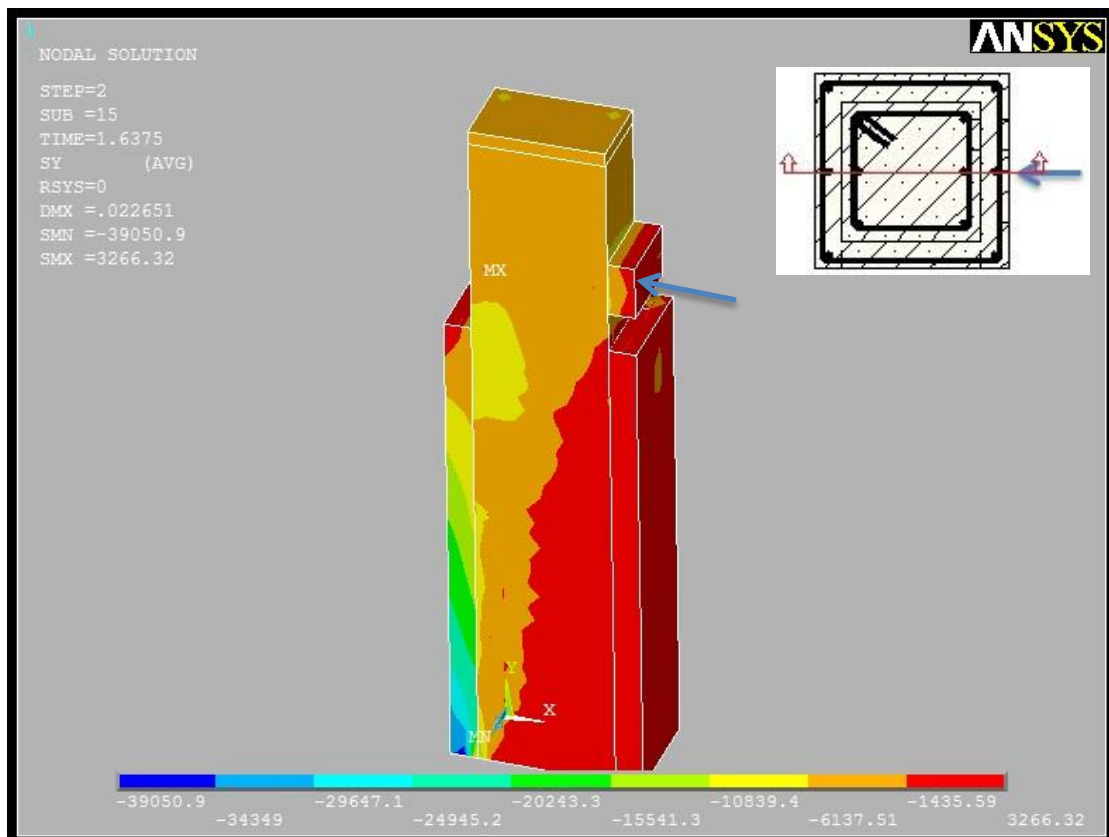
Σχ.5.33 Σταδιακές εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος J2

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

Σημαντική παράμετρος στην οποία ίσως δε δίνεται μεγάλη βάση στην παρούσα εργασία είναι ο κίνδυνος αποφλοίωσης του μανδύα. Σειρά ερευνητικών εργασιών έχουν ασχοληθεί με τις παραμέτρους που το επηρεάζουν. Στα πειράματα του κεφαλαίου 4 δεν παρατηρήθηκαν τέτοια φαινόμενα, όπως ούτε και στις αναλύσεις. Στις αναλύσεις έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε την αποκόλληση με τη μέθοδο των ελατηρίων που προτείνουμε. Το κάθετο ελατήριο στη διεπιφάνεια ελέγχει τη σχέση αποκόλλησης. Ο τρόπος για να εμφανιστεί το άνοιγμα μεταξύ μανδύα και εσωτερικού υποστυλώματος είναι να ορισθεί νόμος F-D για τα κάθετα ελατήρια που θα φθίνει μετά από κάποιο όριο. Το όριο αυτό είναι πολύ δύσκολο με την υπάρχουσα βιβλιογραφία να ορισθεί καθώς δεν υπάρχουν πειράματα καθαρού εφελκυσμού διεπιφάνειας σκυροδεμάτων. Ως πρώτη προσέγγιση μπορεί να ληφθεί η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος. Με αυτόν τον τρόπο εργαστήκαμε και στις αναλύσεις μας στην εργασία αυτή.

### 5.4.2.3. Ανηγμένες παραμορφώσεις και τάσεις σκυροδέματος

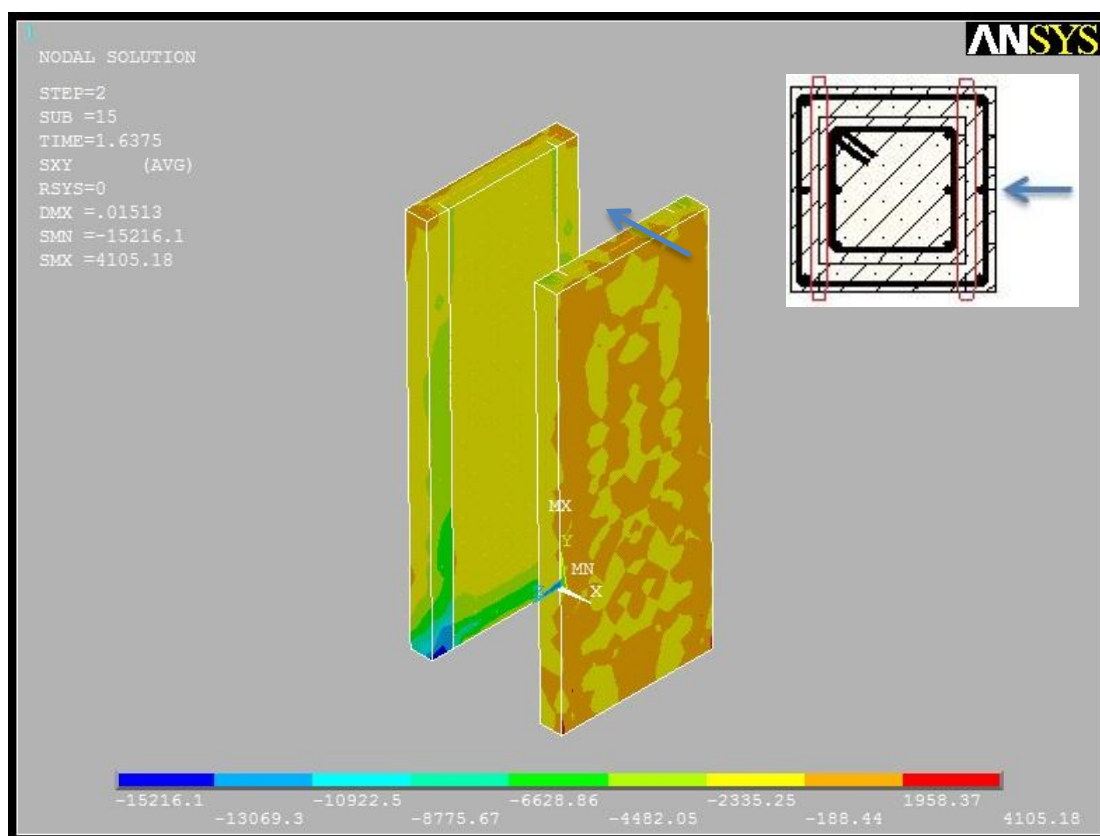
Οι κατακόρυφες εφελκυστικές τάσεις που παρουσιάζονται στην τομή ακολουθούν την αναμενόμενη κατανομή που είδαμε και στα μονολιθικά προσομοιώματα Μ. Η λειτουργία της διεπιφάνειας, αφού δεν έχουμε αποκόλληση του μανδύα, δεν αλλάζει κάτι σημαντικά στις τροχιές των τάσεων. Άλλωστε, όπως θα δούμε και στη συνέχεια η μέγιστη διατμητική τάση της διεπιφάνειας δεν υπερβαίνεται οπότε δεν έχουμε και μεγάλες ολισθήσεις που να μην μπορούν να αναπτύξουν αντίστοιχα μεγάλες διατμητικές τάσεις.



Σχ.5.34 Κατακόρυφες ορθές τάσεις υποστυλώματος J2

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

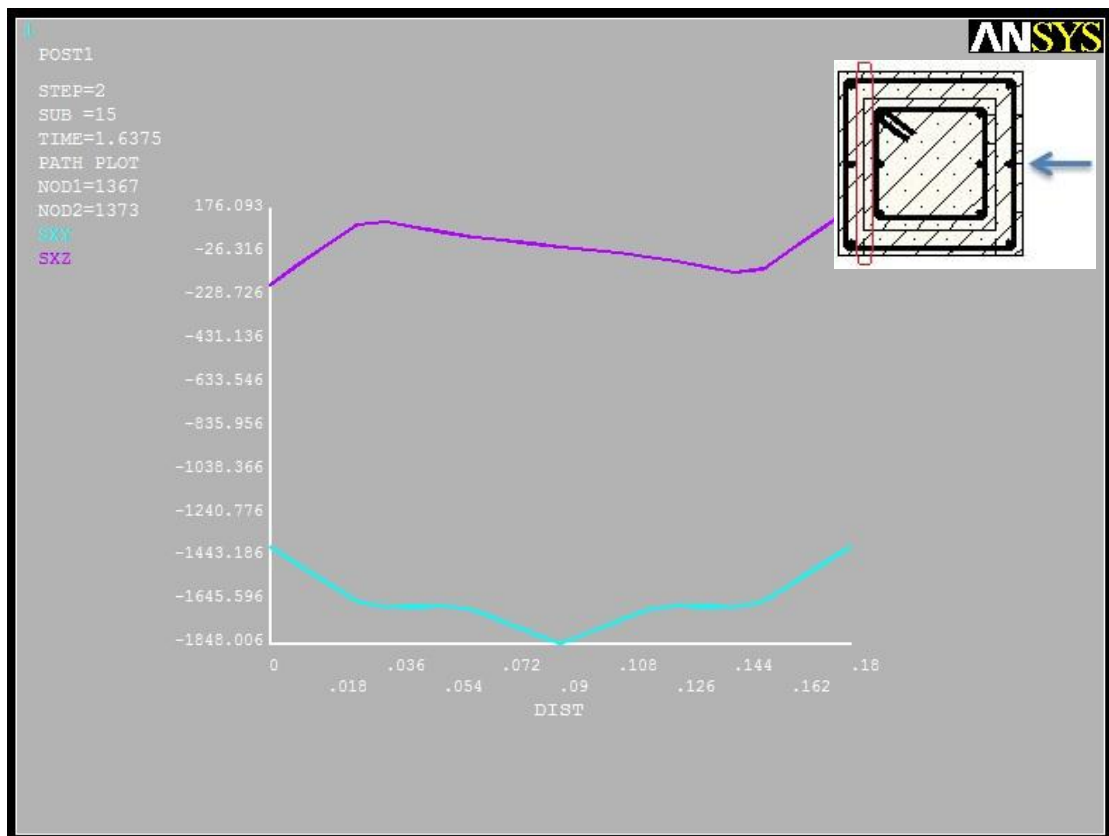
Η διεπιφάνεια υποστυλώματος-μανδύα διαδραματίζει το βασικότερο ρόλο στις ενισχύσεις με μανδύα, γι' αυτό ενδιαφερόμαστε για τις τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια αυτή. Οι διατμητικές τάσεις ενδιαφέρουν άμεσα αφού αυτές καλείται η διεπιφάνεια να παραλάβει είτε μόνο μέσα από τους μηχανισμούς τριβής στο προσομοίωμα J1, είτε μέσω της αλληλεπίδρασης του μηχανισμού τριβής και του μηχανισμού βλήτρου στο J2. Ο νόμος i3 που έχουμε ορίσει στο J2 ουσιαστικά έχει μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση 1,85MPa και βλέπουμε στη συνέχεια ότι η τάση σε λίγα σημεία φτάνει το όριο αυτό. Στην πρώτη εικόνα βλέπουμε την κατανομή της κατακόρυφης διατμητικής τάσης στις δύο διεπιφάνειες που είναι κάθετες στη διεύθυνση φόρτισης.



**Σχ.5.35** Κατακόρυφες διατμητικές τάσεις διεπιφανειών υποστυλώματος J2

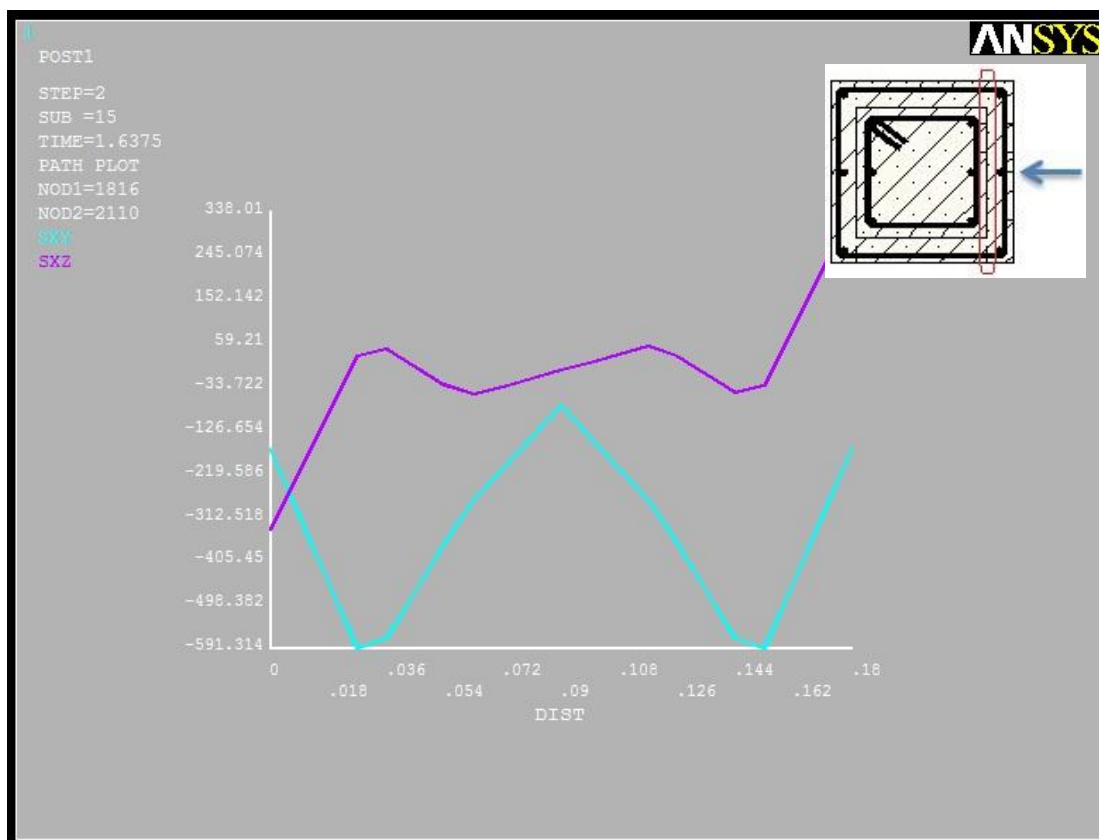
Στη συνέχεια παρουσιάζονται πιο αναλυτικά οι διατμητικές τάσεις για διαφορετικές περιοχές της διεπιφάνειας. Στις αναλύσεις μας περιοριζόμαστε σε μεθόδους εισαγωγής ενιαίων δεδομένων για όλη τη διεπιφάνεια. Από τα παρακάτω σχήματα καταλαβαίνουμε ότι κάθε πλευρά της διεπιφάνειας είναι διαφορετική. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζουμε τόσο τις κατακόρυφες όσο και τις οριζόντιες διατμητικές τάσεις. Είναι ξεκάθαρο ότι η οριζόντιες διατμητικές τάσεις είναι πολύ μικρότερες από τις κατακόρυφες σε όλες τις πλευρές.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



**Σχ.5.36** Διατμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας υποστυλώματος J2

Οι απεικονίσεις αναφέρονται σε οριζόντια ευθεία πάνω στη βάση του υποστυλώματος σε κάθε πλευρά της διεπιφάνειας. Η πιο καταπονούμενη θλιπτική πλευρά του μανδύα αγγίζει τα 1,85MPa στο μέσον για την κατακόρυφη διατμητική τάση (γαλάζια γραμμή), ενώ προς τα άκρα μειώνεται. Η οριζόντια διατμητική τάση (μωβ γραμμή) είναι αισθητά μικρότερη, συμμετρική και αυτή βεβαίως, ενώ το μέγιστό της είναι 0,23MPa.

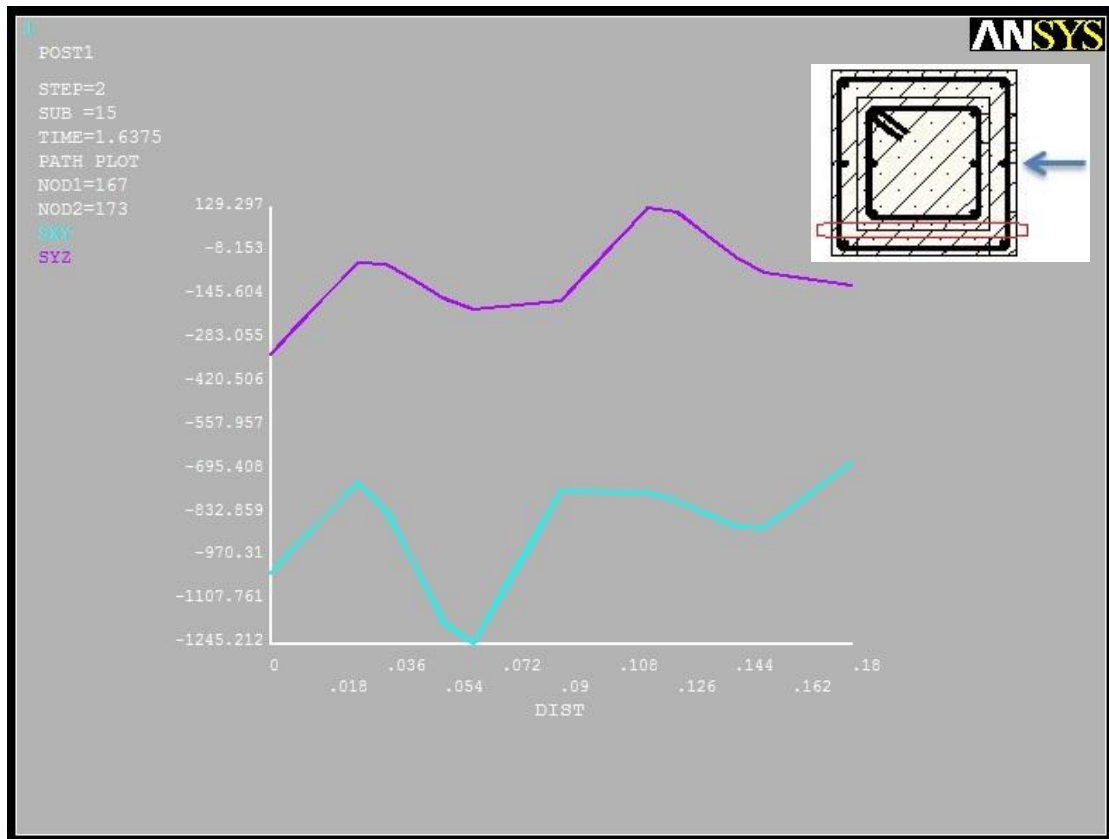


**Σχ.5.37** Διατμητικές τάσεις εφελκόμενης διεπιφάνειας υποστυλώματος J2

Η εφελκόμενη πλευρά του μανδύα διαφέρει αρκετά από τη θλιβόμενη. Αρχικά οι τάσεις είναι μικρότερες για την κατακόρυφη διατμητική τάση. Εδώ λόγω της ταυτόχρονης θλίψης και του εφελκισμού που επιβάλλεται στην πλευρά αυτή έχουμε μέγιστη τάση 0,59MPa, πολύ μικρότερη από τη θλιβόμενη. Η οριζόντια τάση είναι της ίδιας τάξεως με μέγιστο 0,31MPa. Επίσης, εμφανής είναι η επίδραση των σπλισμών στη μορφή της γαλάζιας γραμμής όπου τα μέγιστα δίνονται στα σημεία που είναι κοντά στους μέσα διαμήκεις σπλισμούς.



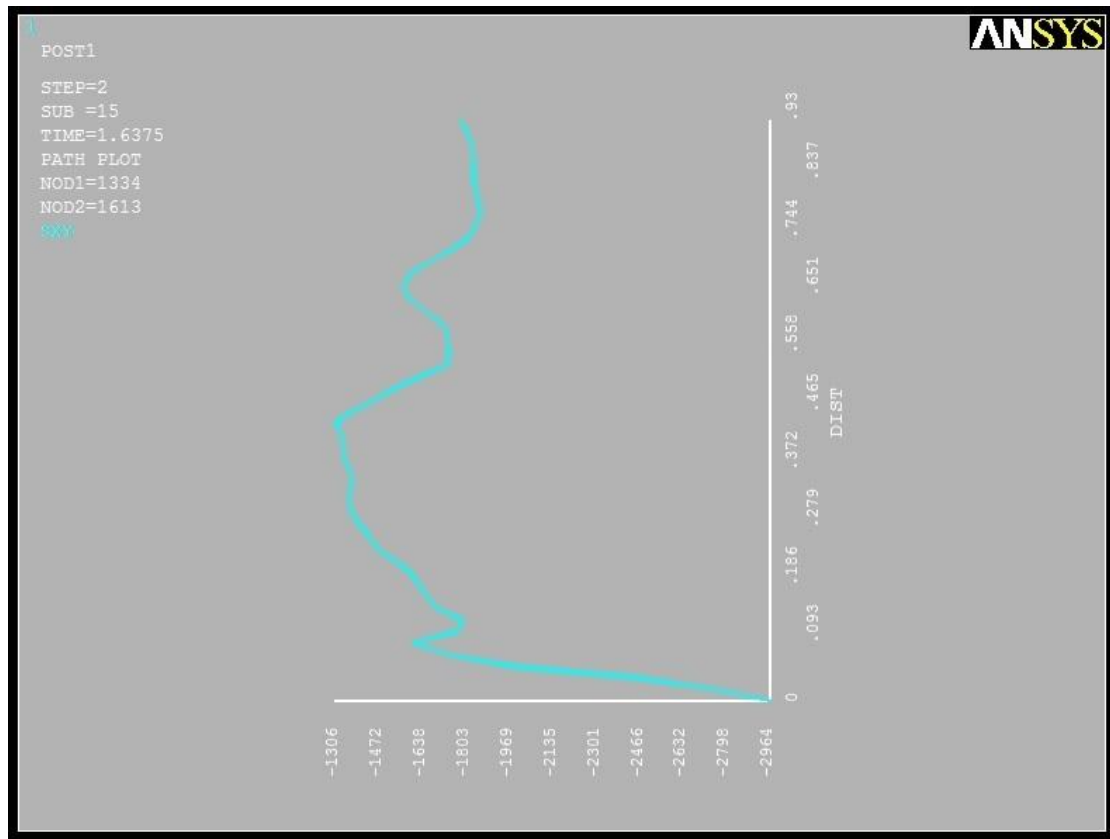
## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ



**Σχ.5.38** Διατμητικές τάσεις πλευρικής διεπιφάνειας υποστυλώματος J2

Οι παράλληλες προς τη φόρτιση πλευρές ταυτίζονται λόγω απόλυτης συμμετρίας. Οι οριζόντιες διατμητικές τάσεις (μωβ γραμμή) δίνει μέγιστα της τάξης του 0,3MPa, ενώ για τις κατακόρυφες κυμαίνονται από 0,7-1,25MPa. Οι τιμές αυτές αναπτύσσονται στη βάση όπου έχουν ληφθεί οι μετρήσεις.

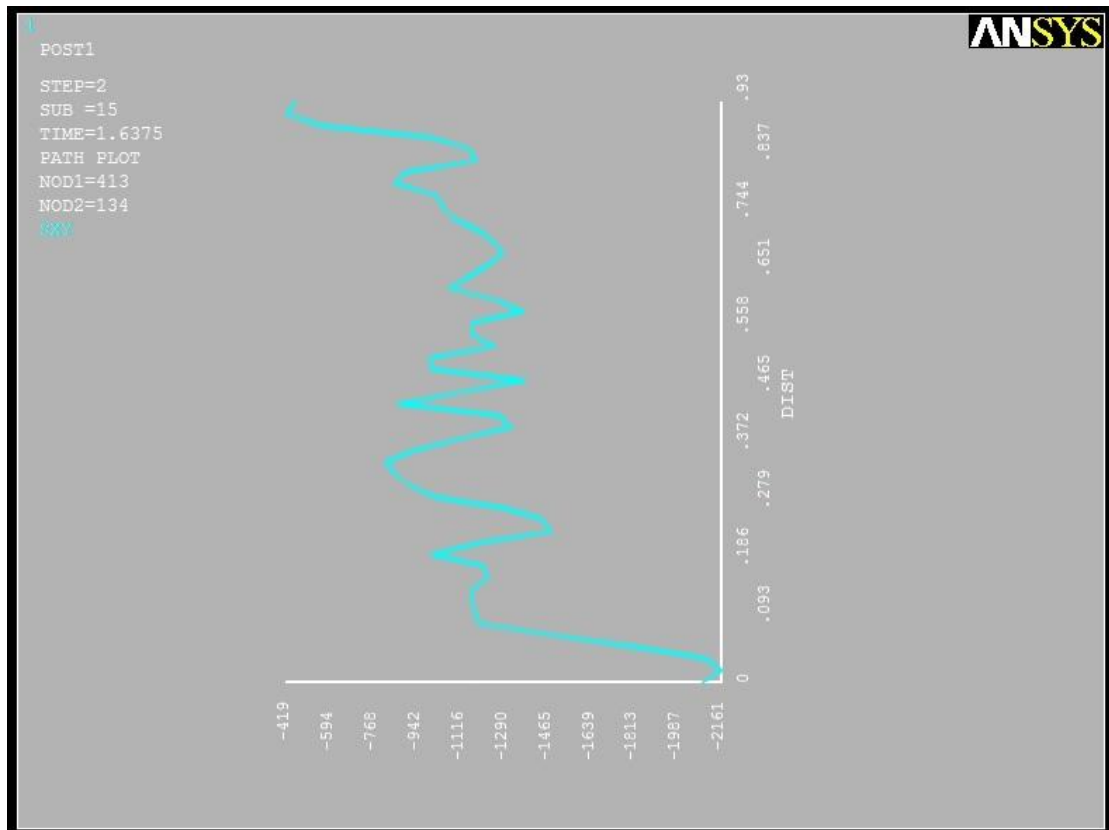
Στη συνέχεια παρουσιάζουμε την κατανομή των κατακόρυφων διατμητικών τάσεων καθ' ύψος στις διεπιφάνειες που είναι κάθετες στη φόρτιση.



**Σχ.5.39** Διατμητικές τάσεις θλιβόμενης διεπιφάνειας καθ' ύψος

Στην πιο θλιβόμενη πλευρά οι τάσεις πλησιάζουν σε κάποιες στάθμες τα 1,85MPa που είναι το μέγιστο. Στο πάνω και το κάτω μέρος του μανδύα πιάνουμε τις μέγιστες τιμές. Στο ενδιάμεσο οι τάσεις μειώνονται.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

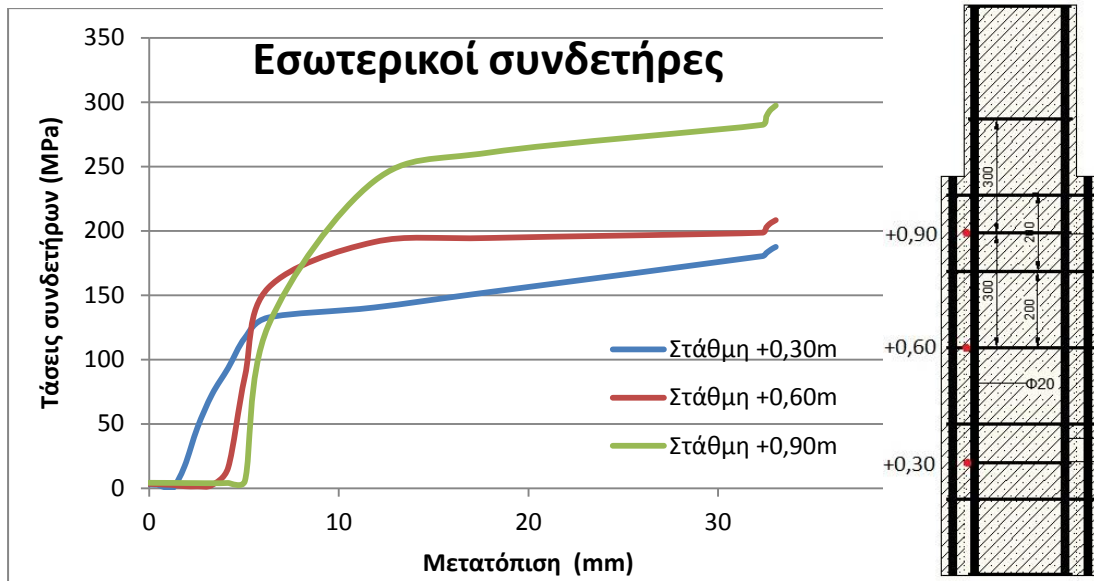


**Σχ.5.40** Διατμητικές τάσεις εφελκόμενης διεπιφάνειας καθ' ύψος

Στην εφελκόμενη πλευρά του μανδύα οι τάσεις είναι πιο μικρές γύρω στο 1,1MPa.

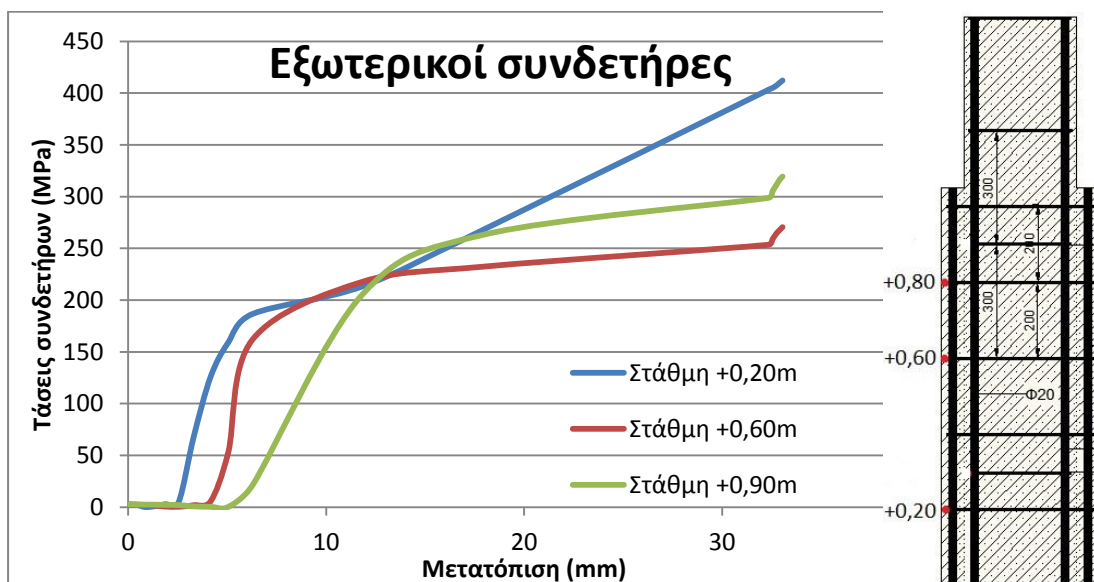
### 5.4.2.4. Παραμορφώσεις και τάσεις σπλισμών

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις των συνδετήρων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς διαφοροποιείται η κατανομή σε σχέση με το προσομοίωμα M που εξετάσαμε νωρίτερα. Η κινητοποίηση των συνδετήρων αρχίζει από τον χαμηλότερο προς τον ψηλότερο. Για τους εσωτερικούς συνδετήρες η μορφή ομοιάζει με αυτήν των M. Τελικά οι άνω συνδετήρες θα αναπτύξουν μεγαλύτερες τάσεις και θα πλησιάσουν αυτοί του +0,90m τη διαρροή.



Σχ.5.41 Τάσεις εσωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος J2

Οι εξωτερικοί συνδετήρες παρουσιάζουν διαφορετική κατανομή σε σχέση με αυτά που είδαμε μέχρι τώρα στα ενισχυμένα υποστυλώματα. Πάλι ενεργοποιούνται οι συνδετήρες από κάτω προς τα πάνω. Στους εξωτερικούς συνδετήρες όμως στην πορεία της φόρτισης ο χαμηλότερος συνδετήρας συνεχίζει αυξητικά να αποδίδει τάσεις ξεπερνώντας την τιμή όλων των υπολοίπων. Αυτή η επισήμανση που διαφοροποιεί τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οφείλεται στην αστοχία του μανδύα που δεν είναι πλέον πλήρως συνδεδεμένος με το εσωτερικό τμήμα. Η πλαστική άρθρωση που σχηματίζεται στο χαμηλότερο τμήμα του προβόλου, τη στιγμή που έχουν τη δυνατότητα να ολισθήσει ο μανδύας μας οδηγεί σε υψηλές παραμορφώσεις και τάσεις του χαμηλότερου συνδετήρα του.



Σχ.5.42 Τάσεις εξωτερικών συνδετήρων υποστυλώματος J2

### 5.4.2.5. Ποσοστό παραλαβής φορτίου από τον μανδύα

Το οριζόντιο φορτίο παραλαμβάνεται κατά 85% από το μανδύα και κατά 15% από το εσωτερικό αρχικό μέρος του υποστυλώματος. Αυτή η κατανομή της παραλαβής του φορτίου ισχύει για τη φάση της προχωρημένης αστοχίας. Στα αρχικά στάδια η κατανομή γίνεται με βάση τη δυσκαμψία της αρηγγάτωτης διατομής και σταδιακά όσο αστοχούν εφελκυστικά κάποιες περιοχές της βάσης έχουμε ανακατανομές.

### 5.4.3. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα έχουμε μια σφαιρική εικόνα της προσφοράς των ενισχύσεων με μανδύα στα υποστυλώματα. Ταυτόχρονα με τους προτεινόμενους νόμους για την εισαγωγή της λειτουργίας της διεπιφάνειας έχουμε τη δυνατότητα να διερευνήσουμε και την επίδραση της σύνδεσης του μανδύα στη συμπεριφορά του ενισχυμένου υποστυλώματος. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα εκτιμούμε ότι βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

Η προτεινόμενη μέθοδος των ελατηρίων  $i$ , παρ' ότι χονδροειδώς εισάγει ενιαίο νόμο για όλες τις πλευρές της διεπιφάνειας μπορεί να προσεγγίσει πολύ καλά τις αναμενόμενες τιμές. Για την περίπτωση της λείας διεπιφάνειας όπου οι επιτρεπόμενες αναπτυσσόμενες τάσεις στη διεπιφάνεια είναι μικρότερες η καμπύλη απόκρισης είναι συστηματικά από κάτω από την περίπτωση της οπλισμένης διεπιφάνειας. Η απόκλιση των δύο περιπτώσεων είναι της τάξης του 5%. Οι συντελεστές μονολιθικότητας που πετυχαίνουμε είναι για το J1 90% , ενώ για το J2 95%. Με αυτά τα ποσοστά βλέπουμε πόσο κοντά στο θεωρητικό μέγιστο είμαστε.

Οι κατανομές των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων ανά πλευρά μανδύα παρουσιάζονται αναλυτικά. Στην πιο θλιβόμενη πλευρά εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ολισθήσεις. Από την άλλη στην εφελκυστική πλευρά η ταυτόχρονη παρουσία εφελκυσμού και θλίψης δεν δίνει πολύ ακραίες τιμές ολίσθησης. Σε κάθε περίπτωση πάντως η οριζόντια συνιστώσα της διατμητικής τάσης των διεπιφανειών είναι πολύ μικρότερη από την κατακόρυφη. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι εκεί επιδέχεται περισσότερο αναζήτηση. Άλλωστε και οι διακυμάνσεις της κατακόρυφης τάσης από πλευρά σε πλευρά διεπιφάνειας είναι πολύ έντονες. Τα συμπεράσματα από αυτήν την ανάλυση μπορούν να αποτελέσουν το έναυσμα για τη βελτίωση των νόμων  $i$  που προτείνουμε για την προσομοίωση της διεπιφάνειας. Χωρίζοντας τις περιοχές της διεπιφάνειας σε περισσότερες ζώνες διαφορετικής έντασης, άρα και διαφορετικών τιμών στα διαγράμματα F-D, μπορούμε να προσεγγίσουμε την πειραματική συμπεριφορά με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Εντοπίζεται , επίσης, διαφοροποίηση στις αναπτυσσόμενες τάσεις των συνδετήρων του μανδύα λόγω των ολισθήσεων στο μανδύα και της αστοχίας στη βάση του προβόλου. Οι έντονες αποδιοργανώσεις στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης ιδίως στο μανδύα παραμορφώνουν και εντείνουν τους συνδετήρες σε μεγάλο βαθμό. Ταυτόχρονα, το

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

ποσοστό παραλαβής οριζόντιου φορτίου από το μανδύα ανέρχεται στο 85%, έναντι 90% που είχαμε υπολογίσει για το μονολιθικό.

Οι αναλύσεις τέτοιων προσομοιωμάτων χρειάζονται περίπου 2.30'. Αυτό σχετίζεται και με το πλήθος των βημάτων που ζητάμε από το Ansys να διατρέξει τη φόρτιση. Για να έχουμε μια αρκετά αντιπροσωπευτική καμπύλη των μεγεθών επιλέγουμε συνήθως 20-25 βήματα για κάθε φόρτιση. Όσο περισσότερα βήματα επιλέγουμε τόσο πιο μεγάλη είναι η ανάλυση , ενώ τα αποτελέσματα φτάνουν τα 3Gb , ενίοτε και περισσότερα. Η επιβολή οριζόντιας δύναμης έναντι οριζόντιας μετατόπισης επιλέγεται για τις αναλύσεις μας όπως έχουμε δεχθεί εξ αρχής. Η επιλογή αυτή πλεονεκτεί στην ευχέρεια του Ansys να επιλύσει το πρόβλημα αλλά δεν μπορεί να καταγράψει αρκετές τιμές για τα στάδια μετά τη διαρροή.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ

## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

### 6.1. Γενικά

Οι περιπτώσεις των ενισχύσεων που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα είναι οι πιο συνηθισμένες στην ελληνική επικράτεια με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται και χρησιμοποιούνται, τις διαστάσεις και τις φορτίσεις στα υποστυλώματα. Στο έργο όμως συναντάμε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις που μπορεί να δίνουν διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά στη συμπεριφορά του ενισχυμένου υποστυλώματος. Με τις μεθόδους προσομοίωσης που επαληθεύσαμε και το νόμο  $i$  για την εισαγωγή της διεπιφάνειας, θα διερευνήσουμε περισσότερες περιπτώσεις.

Το προσομοίωμα με βάση το οποίο γίνονται όλες οι ποιοτικές και ποσοτικές συγκρίσεις είναι το J2. Σ' αυτό έχουμε εισάγει λειτουργία οπλισμένης διεπιφάνειας  $i3$ . Συγκεντρωτικά πρόκειται για πακτωμένο υποστυλώμα στο μισό του πραγματικού ύψους του αμφιπροβόλου με οριζόντια φόρτιση στο  $+1,20m$  και μανδύα ύψους  $1,05m$ . Η διάσταση της εσωτερικής διατομής είναι  $300 \times 300$ , ενώ ο μανδύας είναι πάχους  $60$  σχηματίζοντας την ενισχυμένη διατομή  $420 \times 420$ . Τα υλικά είναι C16 και StI για το εσωτερικό και C35 και S500 για το μανδύα. Η εφαρμογή του μανδύα θεωρούμε ότι έχει γίνει με επιμελή επεξεργασία της διεπιφάνειας και 4 βλήτρα  $\Phi 10$  ανά πλευρά. Έτσι εισάγουμε όπως προτείνουμε νόμο  $i3$  για τα ελατήρια της διεπιφάνειας.

Αλλάζοντας κάθε φορά μόνο ένα χαρακτηριστικό του προσομοιώματος J2, θα διερευνήσουμε διαφορετικές περιπτώσεις υποστυλωμάτων. Τα προσομοιώματα P διαφοροποιούνται ως προς το μέγεθος της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης. Το J2 που έχουμε αναλύσει φορτίζεται με  $v=0,30$  ως προς τη διατομή του εσωτερικού υποστυλώματος  $300 \times 300$ , και αντιστοιχεί στο P3. Αντίστοιχα διερευνούμε τα P1 με  $v=0,10$ , P2 με  $v=0,20$  και P4 με  $v=0,40$ .

Στη συνέχεια ψάχνουμε τη συμπεριφορά των υποστυλωμάτων με βάση τη διάκρισή τους σε καμπτικά, ενδιάμεσα και κοντά. Το J2 που ήδη έχουμε θεωρείται καμπτικό με ύψος προβόλου  $1,20m$ , δηλαδή συνολικό ύψος υποστυλώματος  $2,40m$ . Κατασκευάζουμε δύο κοντύτερα υποστυλώματα. Το H2 έχει ύψος ημιυποστυλώματος  $0,90m$  και έχει  $\alpha s=2,14$  οπότε χαρακτηρίζεται ενδιάμεσο. Το τελευταίο είναι το H3 ένας αρκετά κοντός πρόβολος ύψους μόλις  $0,60m$  με  $\alpha s=1,43$ .

Τέλος, εξετάζουμε την επίδραση της περίσφιγξης στη συμπεριφορά των υποστυλωμάτων. Στα τρία υποστυλώματα H1, H2, H3 που αναλύουμε στη συνέχεια, τοποθετούμε πυκνότερους συνδετήρες μανδύα. Όλα τα προσομοιώματα των κεφαλαίων 5 και 6 έχουν συνδετήρες μανδύα  $\Phi 8/200$ , οπότε κατασκευάζουμε τα S που θα έχουν  $\Phi 8/100$ . Με απόλυτη αντιστοιχία των H σε S τα συγκρίνουμε με μόνη διαφορά μεταξύ τους την πυκνότητα των συνδετήρων του μανδύα.



## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

### 6.2. Επίδραση αξονικού φορτίου

#### 6.2.1. Προσομοιώματα P1, P2,P3

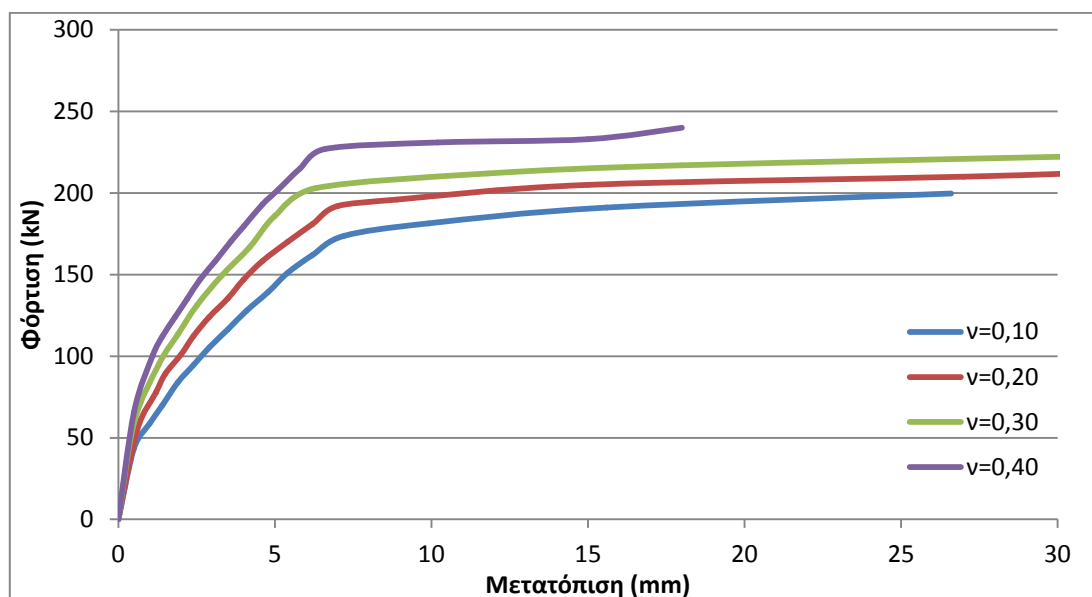
Εξετάζουμε το πόσο και πώς μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος του αξονικού φορτίου το μηχανισμό του μανδύα και την αστοχία του ενισχυμένου υποστυλώματος. Το μοντέλο σύγκρισης που έχουμε ήδη αναλύσει είναι το J2 με ποιότητα σκυροδέματος μανδύα C35. Στο J2 η τιμή της αξονικής κατακόρυφης φόρτισης που έχουμε επιβάλλει αντιστοιχεί σε  $v=0,30$  για το αρχικό υποστύλωμα. Η τιμή αυτή είναι αντιπροσωπευτική του σχεδιασμού της δεκαετίας του '60 για μια πενταόροφη οικοδομή. Υπολογίζοντας τα φορτία σχεδιασμού για την κατασκευή αυτή καταλήγουμε στο ανηγμένο αξονικό φορτίο  $v=0,30$  για το εσωτερικό υποστύλωμα του ισογείου που αντιστοιχεί σε συγκεντρωμένη δύναμη 432kN. Στα υποστυλώματα του ισογείου, κυρίως στα γωνιακά αλλά και στα εσωτερικά συναντάμε συνήθως τις περισσότερες βλάβες. Παρ'όλ'αυτά εξετάζουμε και τα υποστυλώματα των υψηλότερων ορόφων όπου το  $v$  έχει μικρότερες τιμές. Για το σκοπό αυτό, αναλύουμε μια σειρά δοκιμών τα οποία είναι αντίστοιχα με το J2 με μόνη διαφοροποίηση την τιμή του κατακόρυφου αξονικού  $v$ . Το πρώτο προσομοίωμα που φτιάχνουμε είναι το P1 όπου  $v=0,10$ , το επόμενο είναι το P2 με  $v=0,20$ , το P4 αντιστοιχεί σε  $v=0,40$ , ενώ για  $v=0,30$  (P3) έχουμε ακριβώς το υποστύλωμα σύγκρισης J2. Η αναζήτηση επικεντρώνεται αρχικά στην ποιοτική ερμηνεία της συμπεριφοράς του προβόλου στη σταδιακή οριζόντια φόρτιση.

Το προσομοίωμα σύγκρισης που θα έχουμε είναι το J2 όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 5.4. Η κατακόρυφη δύναμη ανάγεται σε όλες τις περιπτώσεις επί της διατομής του αρχικού-εσωτερικού υποστυλώματος και έχει  $v=0,30$ . Ο μανδύας είναι ποιότητας C35 την οποία έχουμε επιλέξει ως την πιο συνήθη ποιότητα που χρησιμοποιείται στις ενισχύσεις στην Ελλάδα. Οι οπλισμοί του μανδύα είναι διαμήκεις 4Φ20 στις γωνίες και συνδετήρες Φ8/20, όλα νευροχάλυβας S500. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της ανάλυσης παραμένουν σταθερές στη σύγκριση των P1, P2,P3, J1=P4.

Τα επίπεδα κατακόρυφης φόρτισης που δοκιμάζουμε είναι μικρά αν τα ανάγουμε ως προς την ενισχυμένη διατομή. Επιλέγουμε όμως να υπολογίζουμε σκεπτόμενοι πόσο παραπάνω αποδίδουν οι ενισχύσεις σε σχέση με το αρχικό μας υποστύλωμα. Για το λόγο αυτό αναφερόμαστε σε  $v$  επί της αρχικής διατομής.

## 6.2.2. Ανάλυση

## Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης



Σχ.6.1 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης προσομοιωμάτων P

Οι καμπύλες ακολουθούν την αναμενόμενη μορφή και είναι σχεδόν παράλληλες. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιβαλλόμενη αξονική τόσο μεγαλύτερο είναι και το παραλαμβανόμενο φορτίο από το υποστυλωμα. Αυτό συμβαίνει καθ' όλη την πορεία της φόρτισης.

	$\nu$	$V_y$	$K$	$V_{max}$
		(kN)	(MN/m)	(kN)
P1	0,1	174	24,1	200
P2	0,2	192	27,4	210
P3	0,3	203	32,2	223
P4	0,4	227	34,4	240

Πιν.6.1 Αποτελέσματα προσομοιωμάτων P

Η δυσκαμψία φαίνεται ότι αυξάνεται, αυξανόμενου του  $\nu$ , ενώ το σημείο διαρροής επέρχεται για πολύ κοντινές μεταξύ τους τιμές παραμορφώσεων.

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πλαστιμότητα ενώ αυξήθηκε για τιμές  $\nu=0,2$  και  $\nu=0,3$  σε σχέση με το  $\nu=0,1$ , στη συνέχεια πάλι μειώθηκε για  $\nu=0,4$ . Φαίνεται πώς η προσφορά της αξονικής δύναμης στην πλαστιμότητα έχει όρια. Για χαμηλά επίπεδα αξονικής φόρτισης έχουμε ευεργετική επίδραση της θλίψης λόγω της τριαξονικότητας που προκαλείται στα στοιχεία σκυροδέματος και καθυστερούν τις εφελκυστικές αστοχίες. Από κάποιο επίπεδο φόρτισης και μετά, η μεγάλη αξονική φόρτιση προκαλεί ψαθυρότητα στο υποστυλωμα και το οδηγεί σε νωρίτερη αστοχία. Ο θεωρητικός τύπος υπολογισμού της πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητας δίνεται παρακάτω και θεωρεί ότι το μέγεθος  $\nu$  αυξανόμενο μειώνει τη διαθέσιμη πλαστιμότητα.

## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

$$(\mu_{1/r})_{av.} \approx \left[ \frac{\varepsilon_{cu}^*}{\varepsilon_{sy} + 0,0015} \right] : \left[ v + \frac{f_{sy}(\rho - \zeta\rho')}{f_c} \right] \quad (18)$$

όπου  $\varepsilon_{cu}^*$  : μέγιστη διαθέσιμη παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος

$\varepsilon_{sy}$  : παραμόρφωση διαρροής οπλισμών

$\rho$  : ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού

$\rho'$  : ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού

$\zeta$  : 0,70 έως 1,0

Το συμπέρασμα αυτό είναι σωστό για επίπεδα φόρτισης αξονικής πάνω από ένα όριο.

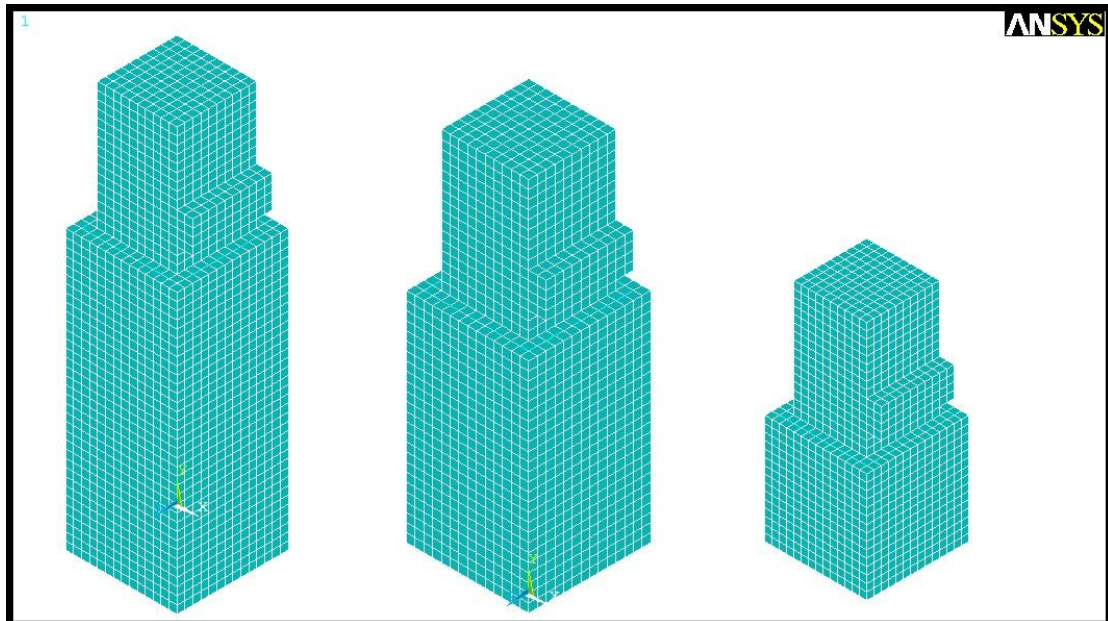
### 6.2.3. Συμπεράσματα

Η επίδραση της αξονικής δύναμης δρα ευεργετικά για την απόκριση του υποστυλώματος στα μεγέθη που εξετάστηκαν. Η ενισχυμένη διατομή μπορεί με μεγαλύτερη ευκολία να φέρει τις αξονικές δράσεις που θα έπαιρνε πριν η μη ενισχυμένη. Τα υποστυλώματα υπό μεγαλύτερη ανηγμένη αξονική  $v$ , δίνουν μεγαλύτερη παραλαμβανόμενη δύναμη και μεγαλύτερη δυσκαμψία. Από την άλλη η πλαστιμότητα φαίνεται ότι μειώνεται για τις μεγάλες τιμές του  $v$ . Το συμπέρασμα αυτό συνάδει με τις εργασίες της βιβλιογραφίας.

### 6.3. Επίδραση διατμητικού μήκους υποστυλώματος

#### 6.3.1. Προσομοιώματα H1, H2, H3

Η αναζήτηση της συμπεριφοράς ενός υποστυλώματος σε συνάρτηση με το διατμητικό του μήκος παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Τα προβλήματα και οι αστοχίες που συναντάμε σε κοντά υποστυλώματα μας προϊδεάζουν για αυτό. Ο μηχανισμός αστοχίας, όπως αναφέρουμε και στο κεφάλαιο 2 είναι διαφορετικός στα κοντά υποστυλώματα σε σχέση με τα πιο λυγηρά. Χαρακτηριστικότερο φαινόμενο είναι η εκρηκτική αστοχία που επέρχεται σε μερικές περιπτώσεις. Στην εργασία αυτή δεν ασχολούμαστε με ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, όπου θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε περισσότερα. Παρόλ' αυτά και στη μονοτονική φόρτιση εντοπίζουμε ποιοτικές διαφοροποιήσεις τις οποίες παρουσιάζουμε στη συνέχεια.



**Σχ.6.2** Προσομοιώματα H1, H2, H3 στο Ansys

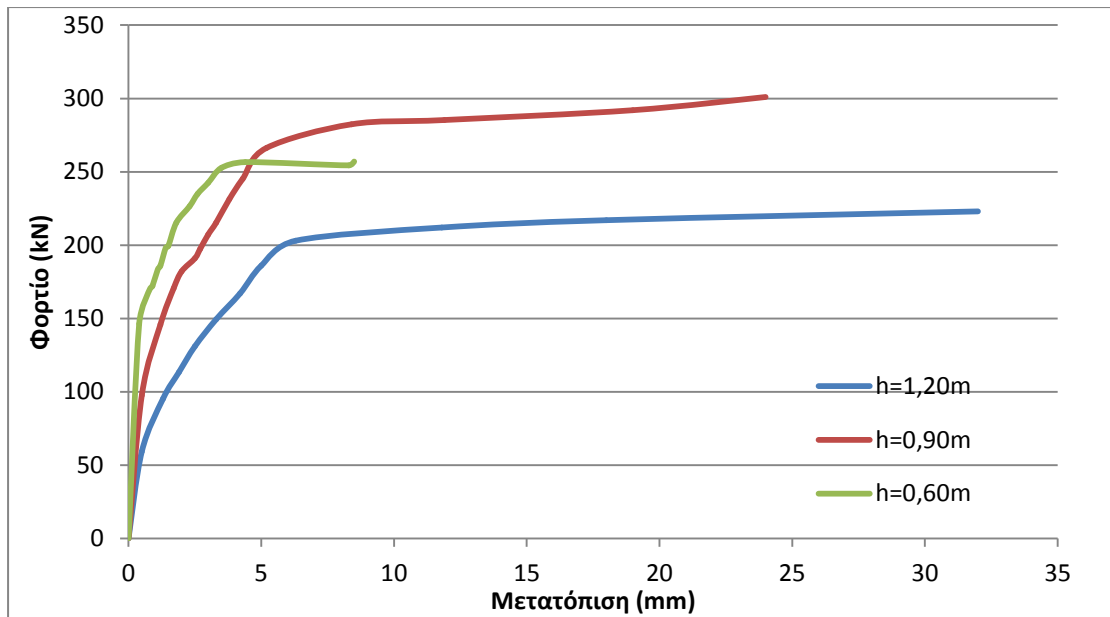
Εξετάζουμε τρεις περιπτώσεις υποστυλωμάτων με μόνη διαφοροποίηση μεταξύ τους το διατμητικό τους μήκος. Το πρώτο υποστυλόμενο του σχ. είναι το H1, το οποίο είναι ακριβώς το J2 που έχουμε παρουσιάσει αναλυτικά. Φορτίζεται σε στάθμη +1,2m και έχει την ενισχυμένη διατομή διαστάσεων 420x420. Η περίπτωση αυτή έχει  $a_s=L/2h=2,85$  και θα λέγαμε ότι αντιστοιχεί σε κανονικό υποστυλόμενο. Το επόμενο είναι το H2, το οποίο είναι κοντύτερο. Φορτίζεται στα +0,90m και έχει διατμητικό μήκος  $a_s=2,14$ . Η περίπτωση αυτή πλησιάζει τα θεωρητικά όρια μεταξύ ενδιάμεσου και κοντού υποστυλώματος. Τέλος, το H3 είναι κοντό υποστυλόμενο αφού φορτίζεται στα +0,60m και έχει  $a_s=1,43$ . Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία και οι επιλογές προσομοίωσης για τα υποστυλώματα H είναι τα ίδια.

### 6.3.2. Αναλύσεις

#### 6.3.2.1. Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης

Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής είμαστε σε θέση να πλησιάσουμε με μεγάλη ακρίβεια τη φυσική απόκριση των δοκιμίων. Στο γράφημα βλέπουμε τις καμπύλες απόκρισης για τις περιπτώσεις διαφορετικών διατμητικών μηκών που εξετάζουμε.

## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ



**Σχ.6.3** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης προσομοιωμάτων H1, H2, H3

Η περίπτωση  $h=1,20\text{m}$  που αφορά  $a_s=L/2h=2,85>2,5$  αντιστοιχεί στο υποστύλωμα J2 που έχουμε ήδη εξετάσει αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 5.4. Σε σχέση με αυτήν την καμπύλη (μπλε), η επόμενη (κόκκινη) αφορά μικρότερο διατμητικό μήκος  $a_s=2,14$  κάτω από το θεωρητικό όριο 2,5 για τα ενδιάμεσα υποστυλώματα. Η καμπύλη στην περίπτωση αυτή μοιάζει με την πρώτη οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αστοχία επέρχεται με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή με πλάστιμη αστοχία με μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία. Αντιθέτως, για την περίπτωση H3 με  $a_s=1,43$  η καμπύλη πιάνει το άνω της όριο χαμηλότερα απ' ότι θα αναμέναμε. Αυτό υποδηλώνει διαφορετική μορφή αστοχίας από τις προηγούμενες περιπτώσεις και μας προϊδεάζει για διατμητική αστοχία. Άλλωστε το διατμητικό μήκος  $a_s=1,43$  είναι κάτω και από το 1,5, δηλαδή κάτω από το όριο για τη λειτουργία κοντού υποστυλώματος.

Υπολογίζουμε τη μέγιστη παραλαμβανόμενη ροπή από τα υποστυλώματα με την παραδοχή ότι για όλες τις περιπτώσεις αυτή αναπτύσσεται στη βάση του προβόλου. Αυτό ισχύει για τις περιπτώσεις H1 και H2 ενώ για την περίπτωση H3 χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

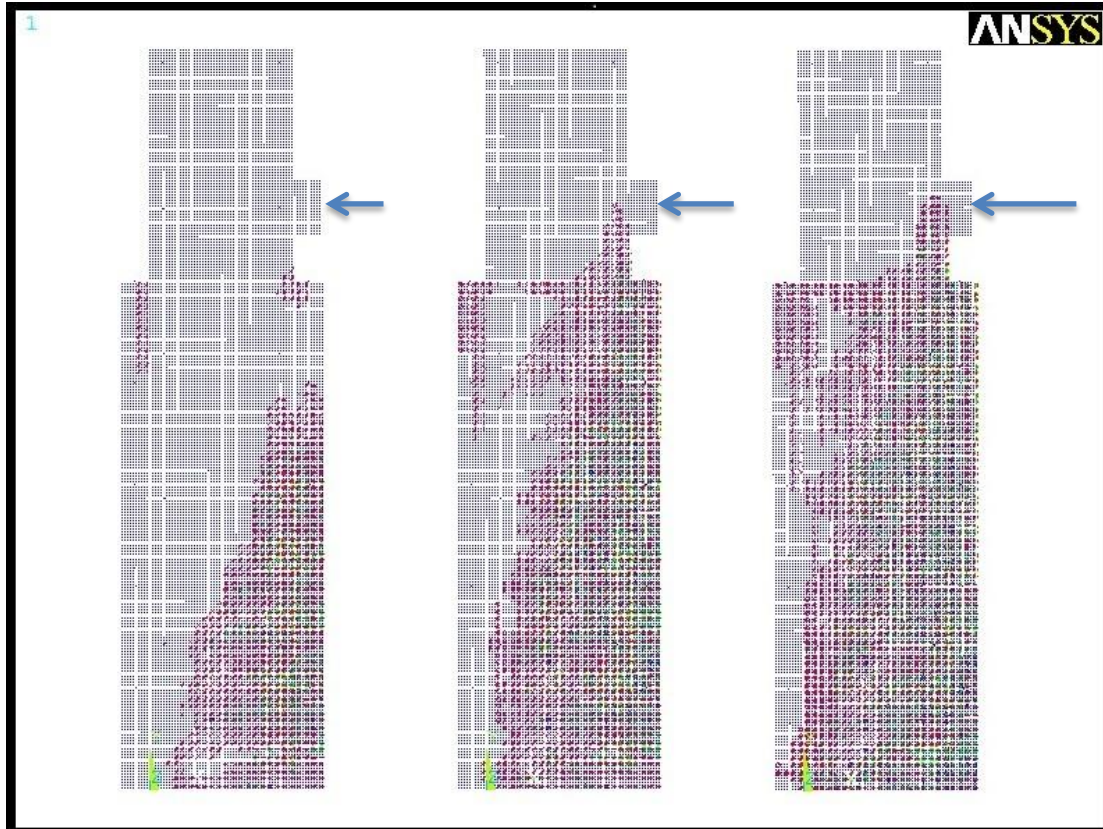
	$a_s$	$V_{max}$	$M_{max}$
H1	2,86	223	268
H2	2,14	301	271
H3	1,43	254	152,4

**Πιν.6.2** Αποτελέσματα προσομοιωμάτων H1, H2, H3

Είναι και πάλι εμφανές ότι το H3 δεν εξαντλεί τα καμπτικά του όρια, άρα αστοχεί διατμητικά. Οι δυσκαμψίες παρουσιάζουν μια αναλογία, καθώς όσο κοντύτερο είναι το υποστύλωμα τόσο μεγαλύτερη είναι η δυσκαμψία. Άλλωστε και στη φύση, η μεγαλύτερη δυσκαμψία των κοντών υποστυλωμάτων είναι αυτή που προκαλεί τις μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες τέμνουσες σε αυτά.

### 6.3.2.2. Μορφή αστοχίας

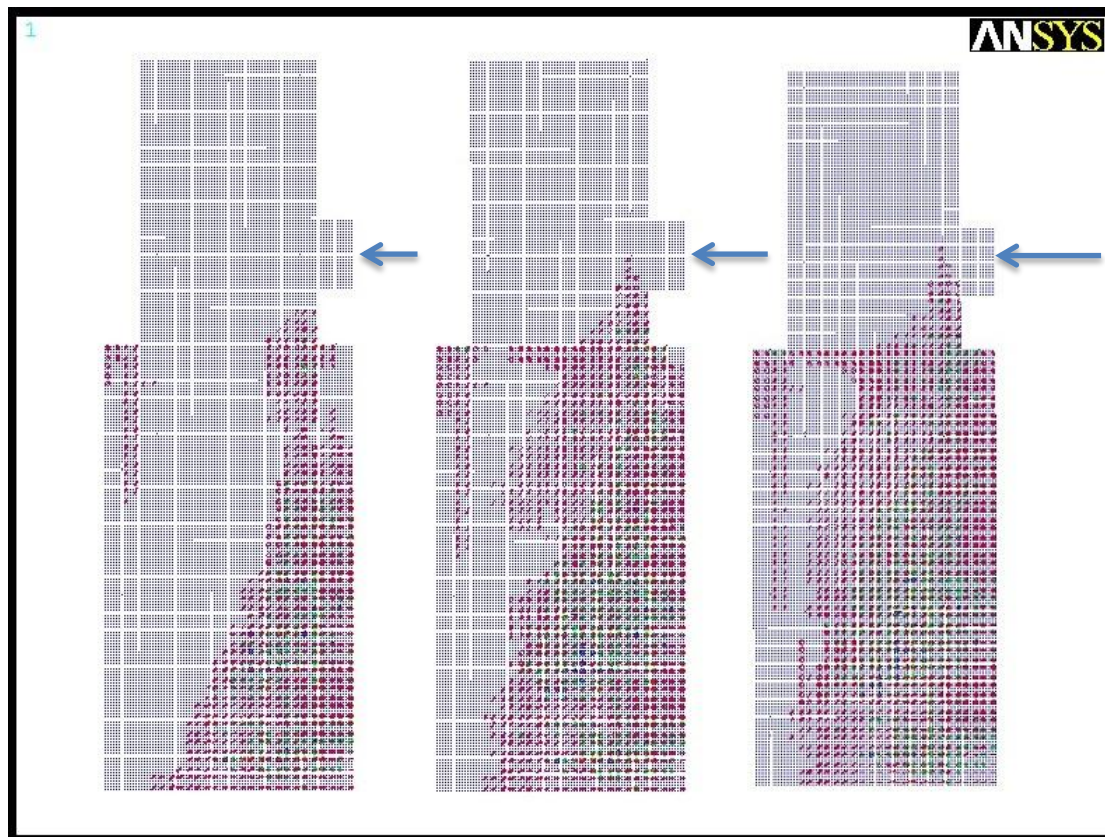
Έχει ήδη διαφανεί ότι το προσομοίωμα H3 συμπεριφέρεται ως κοντό υποστύλωμα. Στο πρόγραμμα Ansys εντοπίζουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία που μας δείχνουν τέτοια συμπεριφορά για το υποστύλωμα αυτό. Αρχίζουμε πρώτα από το H1 που το έχουμε ήδη εξετάσει. Η εμφανιζόμενες εφελκυστικές αστοχίες αρχίζουν από μια τριγωνική κατανομή και καταλήγει σε ορθογωνική. Η εμφάνιση της δεύτερης (πράσινης) και τρίτης (μπλε) αστοχίας γίνεται εμφανέστερη στην πορεία της φόρτισης. Η αστοχία ξεκινά από τη βάση όπου σχηματίζεται και η ρωγμή, ενώ στη συνέχεια σταδιακά αστοχούν προς τα πάνω.



Σχ.6.4 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος H1

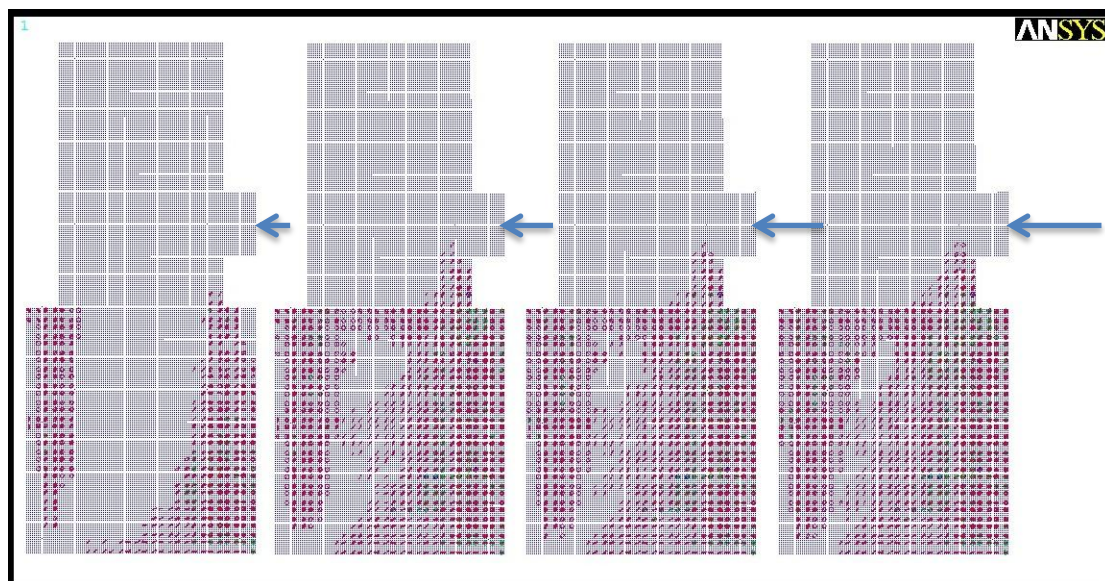
Οι εμφανιζόμενες αστοχίες στο H2 ακολουθούν την ίδια σχεδόν ανάπτυξη με του H1. Η μορφή από τριγωνική γίνεται ορθογωνική. Παράλληλα, έχουμε πιο έντονη την εμφάνιση κατακόρυφων αστοχιών στη θλιβόμενη πλευρά ψηλά στο μανδύα. Οι αστοχίες αυτές επεκτείνονται πιο έντονα προς τα κάτω στην περίπτωση H2 όπου έχουμε μικρότερο διατμητικό μήκος. Στη φύση οι αστοχίες αυτές εμφανίζονται με κατακόρυφη ρωγμή λόγω απώλειας συνάφειας μεταξύ διαμήκους οπλισμού και σκυροδέματος. Στα προσομοιώματά μας έχουμε εισάγει πλήρη συνάφεια μεταξύ οπλισμών και σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην ελέγχουμε πλήρως το φαινόμενο. Παρόλ' αυτά οδηγούμε τις αστοχίες στον εφελκυσμό των στοιχείων του σκυροδέματος, όπως εμφανίζονται κατακόρυφα. Οι αστοχίες αυτές φαίνεται ότι και στο πρόγραμμα είναι πιο έντονες για ενδιάμεσα υποστυλώματα όπου  $a_s < 2,5$ .

## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ



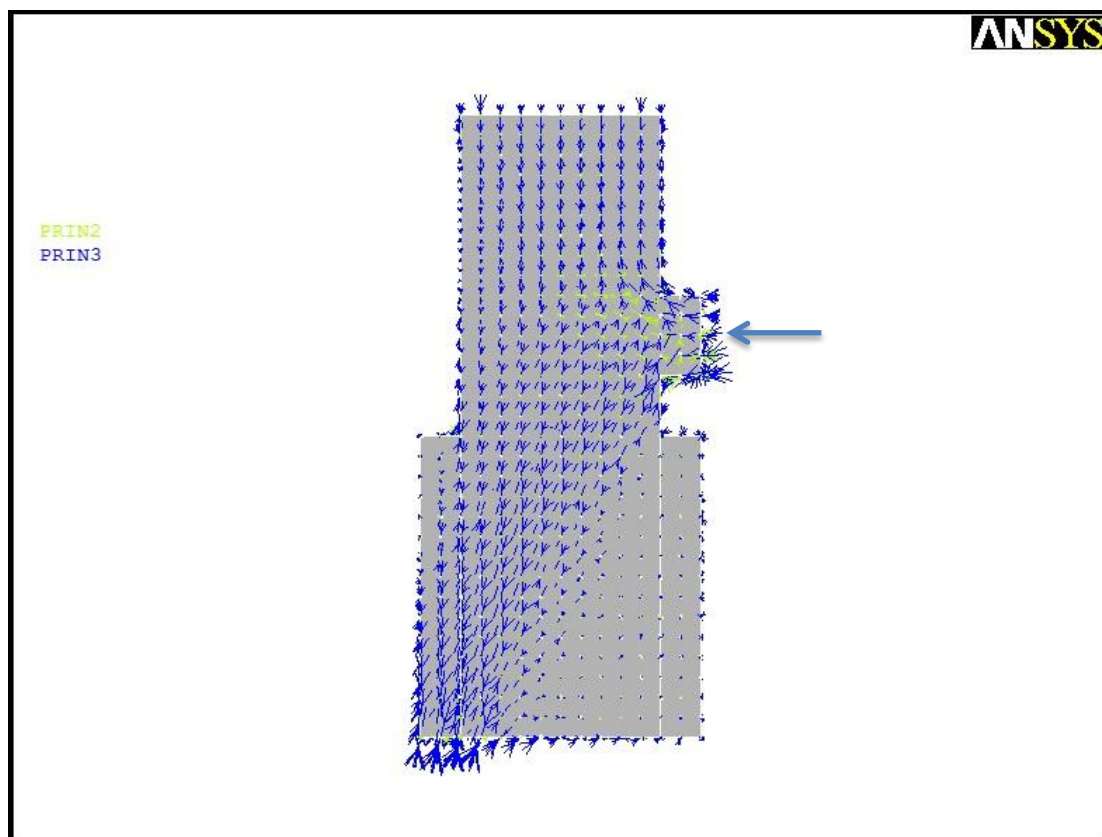
Σχ.6.5 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος Η2

Η περίπτωση του κοντού υποστυλώματος Η3, με  $a_s=1,43 < 1,5$ , διαφοροποιείται αισθητά από τις προηγούμενες που αναλύσαμε. Οι αστοχίες εμφανίζονται σχεδόν ταυτόχρονα τόσο στην εφελκυστική πλευρά όσο και στη θλιβόμενη. Η εξάπλωση των αστοχιών είναι ομοιόμορφη για όλο το ύψος.



Σχ.6.6 Εφελκυστικές αστοχίες υποστυλώματος Η3

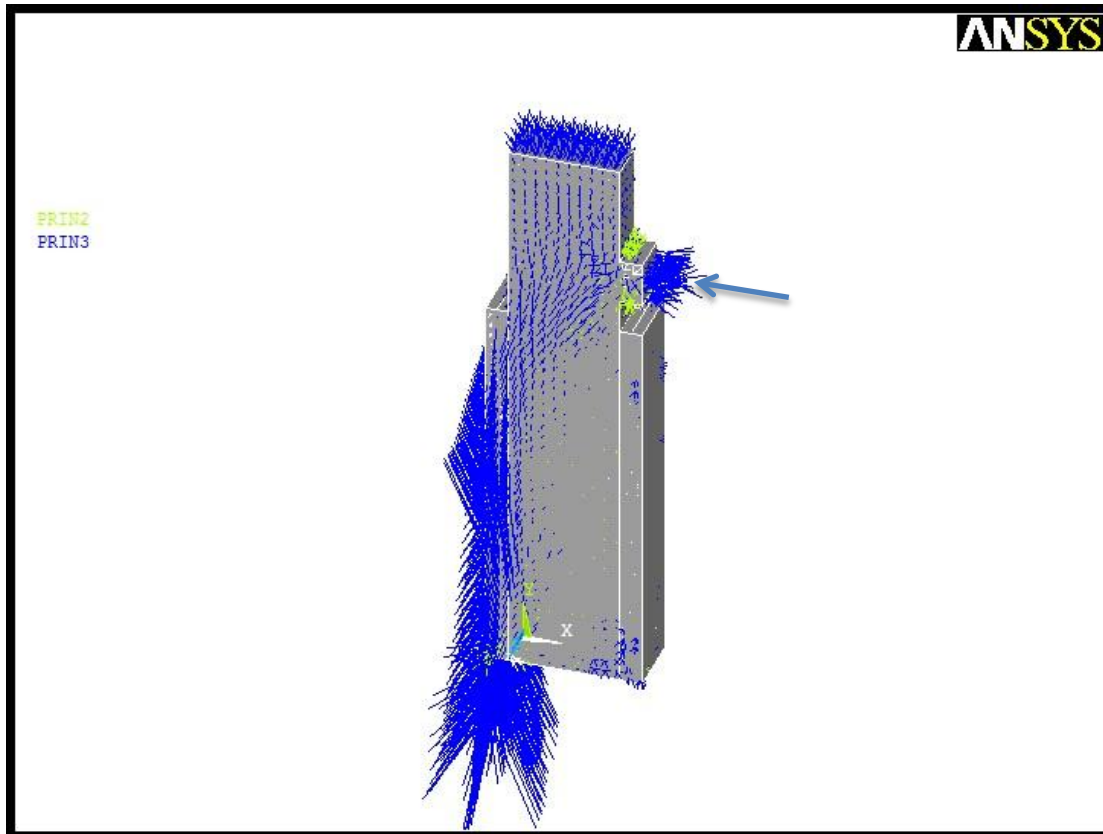
Φαίνεται από τα σχήματα και τις αστοχίες που δημιουργούνται ότι για τα πιο κοντά υποστυλώματα οι τάσεις μεταφέρονται κυρίως μέσω του μηχανισμού του διαγώνιου θλιπτήρα του σκυροδέματος. Η συγκέντρωση αρκετών αστοχιών και στην άνω αριστερά περιοχή της τομής πέρα από την κάτω δεξιά περιοχή προδίδουν την διεύθυνση της κύριας θλίψης από την περιοχή της οριζόντιας φόρτισης προς διαγώνια και κάτω αριστερά στην τομή.



**Σχ.6.7** Τροχιές κύριων θλιπτικών τάσεων υποστυλώματος Η3

Για τα ενδιάμεσα ή και κανονικά υποστυλώματα των περιπτώσεων Η1 και Η2 οι τροχιές των κύριων θλιπτικών τάσεων πάλι κλίνουν πλαγίως αλλά δεν καλύπτουν όλη τη διαγώνιο. Μεταφέρουν τις δυνάμεις από το σημείο φόρτισης πλαγίως στο μανδύα και από εκεί κατεβαίνουν στη βάση. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει από το θεωρητικό που αναμέναμε. Για μεγάλες τιμές του  $a_s > 2,5$  αναμένουμε πλήρη ενεργοποίηση του μηχανισμού δικτυώματος. Στις αναλύσεις μας δεν καταφέραμε να εντοπίσουμε κάτι τέτοιο. Όπως βλέπουμε για  $a_s = 2,86$  που εξετάσαμε, το μεγαλύτερο μέρος της ροής των τάσεων κινείται μέσω του μανδύα κατακόρυφα, ενώ πολύ μικρό ποσοστό φαίνεται να αναλαμβάνεται από το μηχανισμό του δικτυώματος. Η παρουσία ενός τόσο ισχυρότερου και πιο δύσκαμπτου υλικού στο μανδύα ενισχύει την παραλαβή θλιπτικών τάσεων μέσα από το ίδιο χωρίς να επιτρέψει την ανάπτυξη του Moersh.





Σχ.6.8 Τροχιές κύριων θλιπτικών τάσεων υποστυλώματος H1

### 6.3.3. Συμπεράσματα

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των κοντών υποστυλωμάτων είναι ιδιαίτερης σημασίας για τις κατασκευές. Η ψαθυρή αστοχία που τα χαρακτηρίζει μας αναγκάζει να τα αποφεύγουμε αν αυτό είναι δυνατόν. Στις περιπτώσεις που εξετάσαμε εντοπίσαμε τέτοια συμπεριφορά για το H3 όπου  $a_s=1,43 < 1,5$ . Στις άλλες δύο περιπτώσεις η συμπεριφορά ήταν παρόμοια και η αστοχία καμπτική. Η μέγιστη παραλαμβανόμενη ροπή της διατομής του ενισχυμένου υποστυλώματος δεν επιτυγχάνεται, αλλά το στοιχείο αστοχεί νωρίτερα. Διαρρέουν μόνο οι μέσα οπλισμοί του προσομοιώματος H3 και όχι και οι έξω.

Η διατμητική αστοχία εντοπίζεται στο πρόγραμμα από τις εφελκυστικές αστοχίες που καταγράφονται με τα χαρακτηριστικά χρώματα για την πρώτη (κόκκινο), τη δεύτερη (πράσινη) και την τρίτη (μπλε). Παράλληλα μπορούμε να δούμε και τις τροχιές των κύριων θλιπτικών τάσεων με την καθαρή εμφάνιση του μηχανισμού του διαγώνιου θλιπτήρα στην περίπτωση του κοντού υποστυλώματος.

Συγκεντρωτικά μπορούμε να αναφέρουμε την αύξηση της φέρουσας ικανότητας για τα υποστυλώματα με μικρότερο λόγο διάτμησης  $a_s$  μέχρι να έχουμε κοντά υποστυλώματα. Ταυτόχρονα όμως, για μικρότερο  $a_s$ , η συμπεριφορά γίνεται πιο ψαθυρή με μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης.

#### 6.4. Επίδραση περίσφιγξης

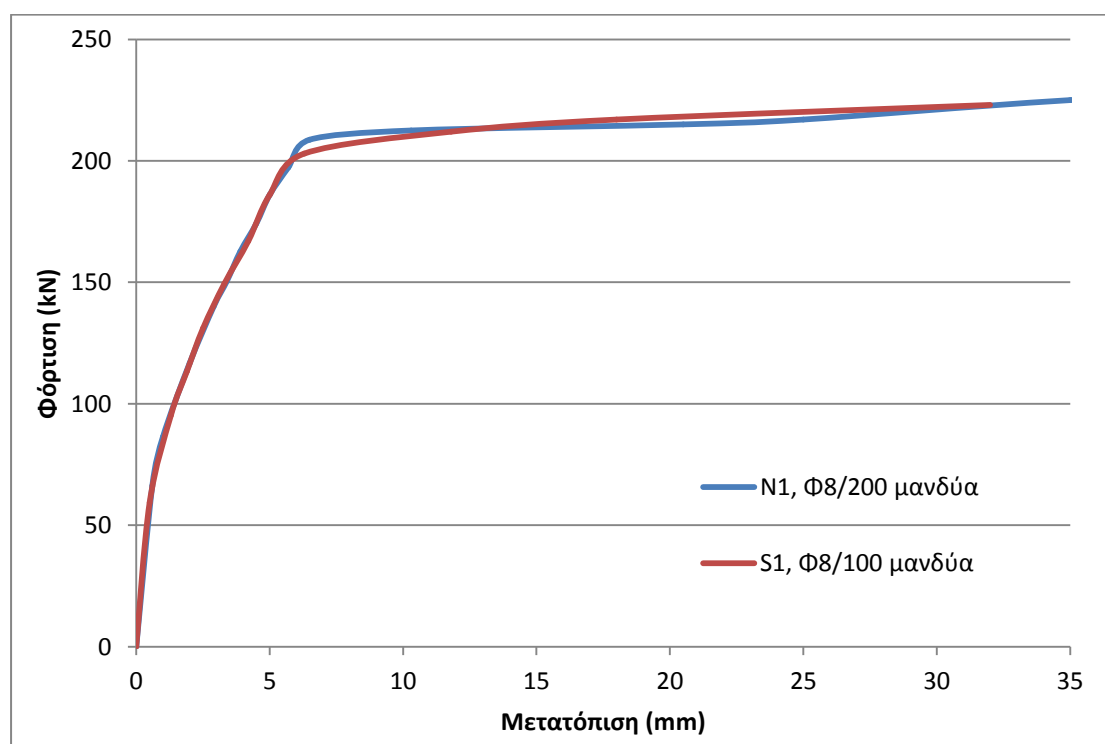
##### 6.4.1. Προσομοιώματα S1, S2, S3

Η περίπτωση ενίσχυσης με μανδύα που εξετάσαμε ως τώρα σπλιζόταν με  $\Phi 8/200$ . Η πυκνότητα αυτή για τους συνδετήρες του συνδετήρα είναι μάλλον μικρότερη από αυτή που συνήθως εφαρμόζουμε. Οι κανονισμοί ειδικά για τις κρίσιμες περιοχές θέτουν αυστηρότερες κανονιστικές διατάξεις που μας αναγκάζουν να τοποθετούμε πυκνότερους συνδετήρες. Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τις περιπτώσεις τοποθέτησης  $\Phi 8/100$  στο μανδύα και θα συγκρίνουμε τη συμπεριφορά του υποστυλώματος με τα ως τώρα ληφθέντα από τα υποστυλώματα H1, H2, H3.

Τα προσομοιώματα που εξετάζουμε S (stirrups) είναι όμοια με τα H που ήδη παρουσιάσαμε. Η διαφοροποίησή τους περιορίζεται στους εγκάρσιους σπλισμούς του μανδύα και μόνο. Στα H οι συνδετήρες είναι  $\Phi 8/200$ , ενώ στα S  $\Phi 8/100$ . Η αρίθμηση οφείλεται στην αντιστοίχιση με τα ύψη των περιπτώσεων H, δηλαδή το S1 αφορά υποστυλωμα με φόρτιση στο +1,2m, το S2 στα +0,90m και το S3 στα +0,60m. Όλες οι υπόλοιπες παραδοχές και επιλογές τις ανάλυσης είναι ίδιες όπως έχουν αναλυθεί ως τώρα.

##### 6.4.2. Ανάλυση

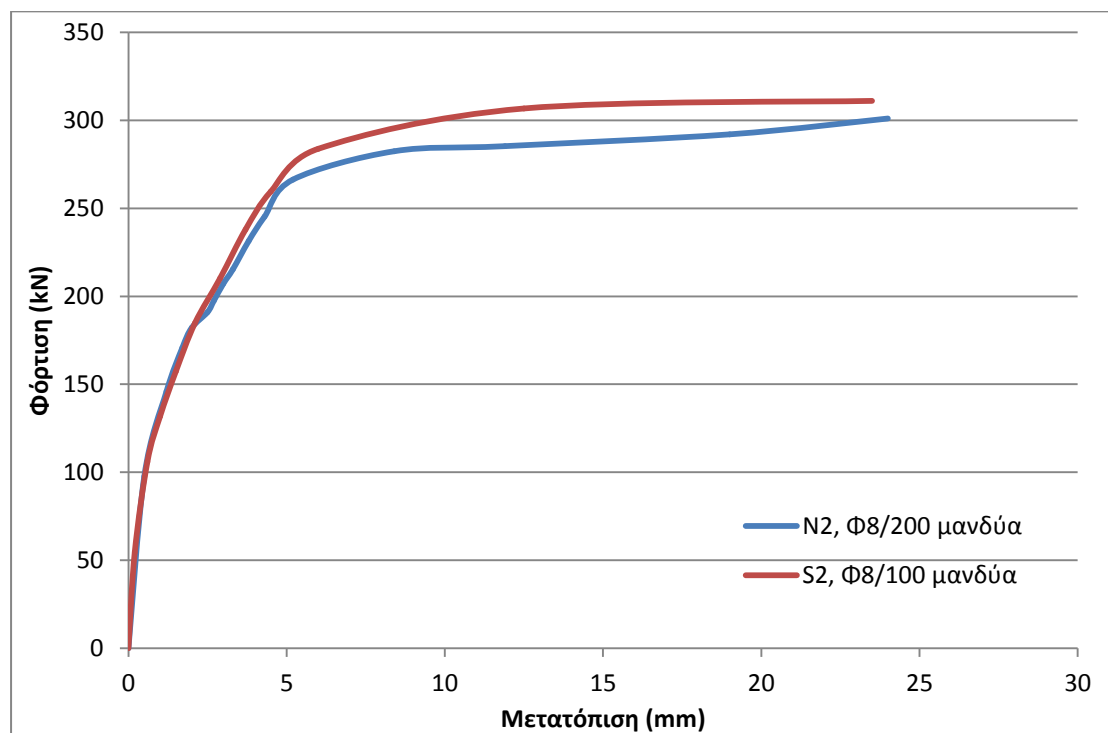
Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνουμε τις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα αντίστοιχα σε ύψος υποστυλώματα H και S.



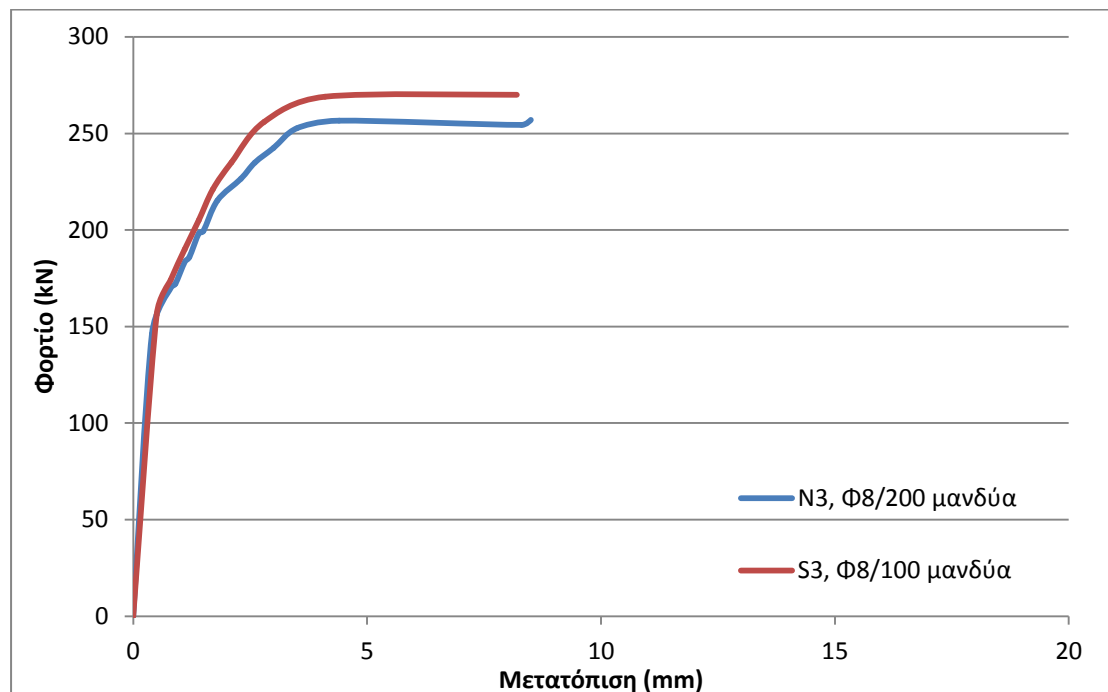
Σχ.6.9 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων N1, S1

## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

Για την περίπτωση πιο ψηλού υποστυλώματος με  $a_s=L/2h=2,85$  δεν παρατηρούμε κάποια διαφοροποίηση στις καμπύλες αφού συμπίπτουν. Αυτό το αποτέλεσμα μάλλον μας παραξενεύει, αφού θα περιμέναμε η περίσφιγξη να μας δώσει πιο ψηλές αντοχές.



Σχ.6.10 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων N2, S2



Σχ.6.11 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης υποστυλωμάτων N3, S3

Η μεγάλη συνεισφορά της περίσφιγξης που θέλουμε να αξιοποιήσουμε είναι η αύξηση της πλαστιμότητας. Με την περίσφιγξη αυξάνεται η παραμόρφωση αστοχίας του

σκυροδέματος άρα και η δυνατότητα στροφής στη βάση. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε και παίρνουμε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Στις αναλύσεις μας δεν μπορούμε να πάρουμε την ακριβή τιμή της πλαστιμότητας αφού δε γνωρίζουμε σε ποιο σημείο αρχίζει ο φθιτός κλάδος της καμπύλης. Παρόλ' αυτά μπορούμε εν γένει να διακρίνουμε αν η ανάλυση προχωρά σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις ή όχι συγκριτικά. Στις συγκρίσεις που παρουσιάσαμε όλες οι αναλύσεις τερματίζουν στην ίδια μετατόπιση οπότε δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλές συμπέρασμα για το αν πράγματι έχουμε αύξηση της πλαστιμότητας.

Με τη βοήθεια των τύπων της βιβλιογραφίας θα προσεγγίσουμε τη θεωρητική αύξηση της πλαστιμότητας στα υποστυλώματα  $S$  σε σχέση με τα  $H$ . Θα λάβουμε υπόψη μόνο την προσφερόμενη περισφιγξη από τους συνδετήρες του μανδύα και όχι και από τους εσωτερικούς συνδετήρες που άλλωστε είναι πολύ αραιοί. Το ογκομετρικό μηχανικό ποσοστό των συδετήρων στο υποστυλώμα μας υπολογίζεται από τον τύπο

$$\omega_w = \frac{4bA_{sw}}{b^2s} \frac{f_{sy}}{f_c} \quad \text{ή} \quad \omega_w = \frac{\pi b A_{sw}}{\frac{\pi b^2}{4}s} \frac{f_{sy}}{f_c} \quad (19)$$

, οπότε  $\omega_{w1}=0,175$  για  $\Phi 8/100$  και  $\omega_{w2}=0,087$  για  $\Phi 8/200$ .

Η αποτελεσματικότητα της περισφιγξης είναι  $\alpha = \alpha_n \alpha_s$ , όπου

$$\alpha_n = 1 - \frac{8}{3} \frac{1}{n} = \frac{1}{3} \quad (20)$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{s}{b}\right)^2, \quad (21)$$

για  $\Phi 8/100$  είναι  $\alpha_{s1}=0,74$ , οπότε  $\alpha_1=0,247$  και  $\alpha\omega_{w1}=0,04$

και για  $\Phi 8/200$   $\alpha_{s2}=0,56$ , οπότε  $\alpha_2=0,187$  και  $\alpha\omega_{w2}=0,016$

Για την περίπτωση μας όπου  $\alpha\omega_w < 0,1$  και στις δύο περιπτώσεις

$$f_{c1}^* = (1 + 2,5\alpha\omega_{w1})f_c = 1,1f_c \quad (22\alpha)$$

$$f_{c2}^* = (1 + 2,5\alpha\omega_{w2})f_c = 1,04f_c \quad (22\beta)$$

Υπολογίζεται άρα το ποσοστό αύξησης των αντοχών του σκυροδέματος από την περισφιγξη που επιβάλλουμε με το μανδύα. Κερδίζουμε τουλάχιστον 5-10% για τις διατάξεις που εξετάζουμε, ενώ η τριαξονικότητα της φόρτισης και οι ασκούμενες θλιπτικές τάσεις από τους συνδετήρες συμβάλλουν επιπλέον.

$$\varepsilon_{cu1}^* = \varepsilon_{cu} + 0,1\alpha\omega_{w1} = 0,0035 + 0,004 = 0,0075 \quad (23\alpha)$$

$$\varepsilon_{cu2}^* = \varepsilon_{cu} + 0,1\alpha\omega_{w2} = 0,0035 + 0,0016 = 0,0051 \quad (23\beta)$$

Ο τύπος της πλαστιμότητας είναι ανάλογος του  $\varepsilon_{cu}^*$  οπότε αναμέναμε αύξηση της πλαστιμότητας αντίστοιχη με αυτήν της τάσης αστοχίας του περισφιγμένου υποστυλώματος δηλαδή κατά περίπου 50%.

## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

Ο ρόλος του οπλισμού περισφίξεως δεν είναι απλός. Η παρουσία του είναι καθοριστική για τη βέλτιστη λειτουργία του μανδύα. Κατά τη διάρκεια ανακυκλιζόμενων φορτίσεων κυρίως, που δεν εξετάζουμε στην παρούσα εργασία, η πιθανότητα αποκόλλησης της επικάλυψης των εξωτερικών οπλισμών αλλά και όλου του μανδύα είναι υπαρκτή. Στις μονοτονικές φορτίσεις ο κίνδυνος είναι αισθητά μικρότερος, αλλά η ακεραιότητα των διατομών είναι κύριας σημασίας. Η παρουσία πυκνότερου οπλισμού σε μορφή συνδετήρων προσφέρει θλιπτικές τάσεις στα στοιχεία του σκυροδέματος και τα καθυστερεί από μια πιθανή εφελκυστική αστοχία.

### 6.4.3. Συμπεράσματα

Η ανάγκη ύπαρξης πυκνών συνδετήρων στις ενισχύσεις με μανδύα είναι υπαρκτή. Στις αναλύσεις που έγιναν εντοπίστηκε κυρίως η προσφορά τους στην παραλαβή μεγαλύτερου φορτίου. Αυτό το συμπέρασμα διαπιστώνεται κυρίως στα πιο κοντά υποστυλώματα, ενώ στα ψηλότερα δεν προσφέρει το ίδιο. Όσον αφορά την αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα ενώ περιμένουμε αύξησή της με  $\Phi 8/100$  έναντι  $\Phi 8/100$ , δεν μπορούμε να εξάγουμε ακριβές συμπέρασμα από τα προσομοιώματά μας με το Ansys.

Πέραν από τη συνεισφορά του πυκνού εγκάρσιου οπλισμού στην πλαστιμότητα, η παρουσία του βελτιώνει και άλλες ιδιότητες του υποστυλώματος. Οι συνθήκες συνάφειας των διαμήκων κυρίως ράβδων με το σκυρόδεμα βελτιώνονται. Στις αναλύσεις μας έχουμε δεχθεί την παραδοχή της πλήρους συνάφειας των υλικών, οπότε δεν μπορούμε να εντοπίσουμε στη σύγκριση των αποτελεσμάτων περιπτώσεις όπου ολισθαίνουν οι ράβδοι. Επόμενη παραδοχή που δεχόμαστε στο πρόγραμμα είναι η αδυναμία λυγισμού των ράβδων. Στη φύση αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσία επαρκούς εγκάρσιου οπλισμού καλά αγκυρωμένου. Για όλους αυτούς τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω οι κανονισμοί επιβάλλουν την τοποθέτηση πυκνών οπλισμών γενικώς αλλά και ιδίως στις κρίσιμες περιοχές.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1. Προσομοίωση με το Ansys

Το πρόγραμμα Ansys αποτελεί ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Άλλα προγράμματα αντίστοιχης ή και μικρότερης χρήσης είναι τα ATENA, LS-DYNA, Ferla, Abaqus. Όλες οι αναλύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την εργασία πραγματοποιήθηκαν με το Ansys 13.0 (2011). Η συνολική εκτίμηση για την δυνατότητα του προγράμματος να προσεγγίζει προβλήματα του μηχανικού πάνω στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι θετική. Η προσέγγιση που μπορεί να επιτευχθεί είναι πολύ καλή. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως είναι η αρχική επαλήθευση του προγράμματος για οποιαδήποτε ειδική περίπτωση προκύπτει σε κάθε ανάλυση. Για τα προβλήματα μεγαλύτερης κλίμακας που συνοδεύονται από μικρότερες απαιτήσεις ακρίβειας στην εισαγωγή του πολυγραμμικού διαγράμματος υλικού του σκυροδέματος εκτιμούμε ότι τα αποτελέσματα είναι ακριβή για τον επιθυμητό βαθμό προσέγγισης. Για τα προβλήματα μικρότερης κλίμακας, όπου αυξάνονται οι απαιτήσεις στην ακρίβεια εισαγωγής των υλικών και λεπτομερειών της διακριτοποίησης, η εισαγωγή μη-γραμμικότητας δυσχεραίνει την επίλυση. Το πρόγραμμα ως υπολογιστικό εργαλείο έχει την ικανότητα να επιλύει με την επιθυμητή ακρίβεια τα προβλήματα που του εισάγονται. Παρόλ' αυτά ο μηχανικός είναι εκείνος που πρέπει να σταθμίσει το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας και πυκνότητας λεπτομερειών και μη-γραμμικότητας ώστε να μπορέσει να προχωρήσει η ανάλυση και να μην έχουμε πρόωρο τερματισμό της.

Οι αναλύσεις που έγιναν είναι όλες υπό μονοτονική φόρτιση στην οποία το πρόγραμμα μπορεί να προσεγγίσει πολύ καλά μέχρι πριν το φθιτό κλάδο. Η αδυναμία που εντοπίσαμε στην προσέγγιση του κλάδου αυτού αποτελεί σημαντική έλλειψη στις αναλύσεις αφού κυρίως δεν μπορέσαμε να υπολογίσουμε τις αναπτυσσόμενες καθολικές πλαστιμότητες. Το πρόβλημα αυτό μας προϊδεάζει ότι και για ανακυκλιζόμενες φορτίσεις πιθανώς να υπάρχουν τα ίδια προβλήματα. Η πρώτη προσπάθεια για να υπερβούμε το εμπόδιο αυτό είναι να χαλαρώσουμε τα όρια της σύγκλισης στις επιλύσεις. Αυτό μπορεί να γίνει εν τέλει σε μικρό βαθμό και με αποτελέσματα που χρίζουν αρκετές επαληθεύσεις.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, αξιοποιήθηκαν με τον καλύτερο τρόπο ώστε να μπορέσουμε να αναπαραστήσουμε στο πρόγραμμα τη μεταφορά δυνάμεων που γίνεται στη φυσική κατασκευή. Τα στοιχεία LINK180 που χρησιμοποιήθηκαν, παρότι είναι μόνο εφελκούμενα στοιχεία μας δίνουν ικανοποιητική λειτουργία. Τα στοιχεία SOLID65 με τη δυνατότητα του CONCRETE, μας δίνουν αρκετές επιλογές και μπορούμε να τα βαθμονομήσουμε εισάγοντας τις κατάλληλες τιμές ώστε να προσεγγίζουν την πραγματική αστοχία. Η πλήρης σύνδεση των δύο υλικών που επιλέξαμε οδήγησε σε πιο δύσκαμπτα προσομοιώματα. Εντούτοις, η προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς δεν απόκλινε περισσότερο από 5-10%.

Η βασική απόκλιση των αναλύσεων από τα πειραματικά αποτελέσματα σχετίζεται με την τέμνουσα δυσκαμψία και τη μετατόπιση διαρροής. Τα αποτελέσματά μας δίνουν υποστυλώματα συστηματικά πιο δύσκαμπτα. Η απόκλιση της μετατόπισης διαρροής που

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

συναντάμε κυμαίνεται μεταξύ 5-15%. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλές φορές και δεν μπορούν να αρθούν από τον τρόπο προσομοίωσης που χρησιμοποιούμε στην εργασία. Οφείλονται κυρίως στην δυνατότητα στροφής της θεμελίωσης του φυσικού υποστυλώματος που δεν αναπαρίσταται επαρκώς στις αναλύσεις. Επόμενες αιτίες μπορεί να είναι η ολίσθηση των διαμήκων ράβδων από το σκυρόδεμα καθ' ύψος του υποστυλώματος πέραν από το τμήμα της θεμελίωσης. Εν γένει τα αποτελέσματα στο πρόγραμμα είναι πιο συντηρητικά στις παραμορφώσεις καθώς δεν μπορούν να προδιαγράψουν τα πιθανοτικά φαινόμενα μικροαστοχιών και μικρορωγμών που συμβαίνουν στη φύση και επιταχύνουν τη μείωση της δυσκαμψίας.

Οι διεπιφάνειες παλιού-νέου σκυροδέματος εισάγονται στην εργασία με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος αφορά επιφανειακά στοιχεία τριβής. Ο μετασχηματισμός των σχέσεων της βιβλιογραφίας σε νόμο τριβής είναι αρκετά δύσκολη υπόθεση. Οι προσεγγίσεις που έγιναν ήταν ικανοποιητικές, συμπεραίνεται άρα ότι με σωστή αξιολόγηση των εισαγόμενων τιμών μπορεί να γίνει σωστή χρήση της μεθόδου. Επειδή η μέθοδος αυτή δε μας δίνει πολλές δυνατότητες βελτίωσης του νόμου και μας περιορίζει, προτιμάμε τη δεύτερη μέθοδο των ελατηρίων. Στη μέθοδο αυτή που αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε στις περισσότερες αναλύσεις, εισάγουμε στη διεπιφάνεια ελατήρια κατά τις τρεις διευθύνσεις. Τα ελατήρια της διεπιφάνειας καθορίζουν την αναπτυσσόμενη διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας.

Για τους νόμους  $i$  που εισάγουμε στα ελατήρια της διεπιφάνειας πρώτα πρέπει να εκτιμήσουμε με βάση τη βιβλιογραφία το νόμο  $\tau$ - $s$  ανάλογα με την ποιότητα της διεπιφάνειας. Αφού αποφασίσουμε για το διάγραμμα  $\tau$ - $s$ , το μετατρέπουμε σε διγραμμικό F-D. Τα αποτελέσματα και της μεθόδου αυτής ήταν πολύ ικανοποιητικά δεδομένων των χονδροειδών προσεγγίσεων που έγιναν. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται είναι της τάξεως του 5-10% και αφορούν την περιοχή πριν τη διαρροή. Σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης οι νόμοι που προτείνουμε φαίνεται πως δίνουν μεγαλύτερες τάσεις για μικρές τιμές ολισθήσεων.

Το μέγεθος των αναλύσεων που έγιναν ήταν εύλογο για να τρέξει το πρόγραμμα Ansys σε φορητό τετραπύρνο υπολογιστή HP επεξεργαστή AMD στα 1,4GHz και εγκατεστημένη μνήμη RAM 6GB. Οι χρόνοι που χρειάστηκαν έφτασαν τις 4 ώρες, για τα πιο βαριά προσομοιώματα, ενώ το πλήθος των ενδιάμεσων σταδίων οριζόντιας φόρτισης ήταν καθοριστικός παράγοντας. Επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η οριζόντια δύναμη σε 25 βήματα, ώστε να έχουμε αρκετά αποτελέσματα στην πορεία της φόρτισης.

### 7.2. Αναλυτική διερεύνηση ενισχύσεων με μανδύα

Η προσέγγιση της πειραματικής συμπεριφοράς με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys γίνεται με αρκετή ακρίβεια. Οι τιμές φορτίου διαρροής και μέγιστου φορτίου πλησιάζονται με ακρίβεια. Από την άλλη, η δυσκαμψία των προσομοιωμάτων είναι μεγαλύτερη και παίρνουμε μετατόπιση διαρροής κατά 5-15% μικρότερη από τη φυσική. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις μπορούμε να προχωρήσουμε στις εκτιμήσεις μας για την απόδοση των ενισχύσεων και την επίδραση που έχουν διάφοροι παράμετροι που υπεισέρχονται.

Τα ενισχυμένα υποστυλώματα, τόσο για την περίπτωση εφαρμογής του μανδύα χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία της διεπιφάνειας όσο και για την περίπτωση τοποθέτησης βλήτρων και ταυτόχρονης επεξεργασίας, πλησιάζουν πολύ το θεωρητικό μέγιστο δυνατό. Υπολογίσαμε συντελεστές μονολιθικότητας της τάξεως του 90% για την περίπτωση ενισχυμένου υποστυλώματος με λεία διεπιφάνεια και 95%-100% για την περίπτωση οπλισμένης διεπιφάνειας. Οι τιμές αυτές είναι πολύ υψηλές και ακόμα και με μια πιθανή απόκλιση των αναλύσεων από τη φύση της τάξεως του 5% παραμένουν πολύ κοντά στη μονάδα.

Ο κίνδυνος της αποφλοιώσεως του μανδύα είναι υπαρκτός αλλά μάλλον όχι και τόσο μεγάλος για την περίπτωση μονοτονικών φορτίσεων. Στις ανακυκλήσεις υπάρχει πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα οι αναπτυσσόμενες ρωγμές να οδηγήσουν στην αποκόλληση του μανδύα. Στις αναλύσεις που έγιναν για αυτή την εργασία δεν παρουσιάστηκε τέτοια περίπτωση, αν και θεωρούμε ότι υπάρχει έλλειψη επαρκών πειραματικών δεδομένων στη βιβλιογραφία για την αναπτυσσόμενη μέγιστη ορθή τάση αποκόλλησης στη διεπιφάνεια παλιού-νέου σκυροδέματος. Η παρουσία οπλισμών κάθετα στη διεπιφάνεια έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι δε βοηθά στην αποφυγή της αποκόλλησης. Παράλληλα θεωρούμε ότι οι υψηλές τάσεις που συγκεντρώνονται στο πάχος του μανδύα επιτείνουν τον κίνδυνο.

Αρχικά διαπιστώνουμε ότι η ενίσχυση με τοποθέτηση μανδύα αποτελεί μια εξαιρετικά αποδοτική μέθοδο με μεγάλα οφέλη σε αντοχές και δυσκαμψία. Τα μεγέθη αυτά, στα υποστυλώματα που εξετάσαμε, τριπλασιάστηκαν χρησιμοποιώντας λεπτούς μανδύες από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Σε όλες τις περιπτώσεις των υποστυλωμάτων κανονικού ύψους οι αστοχίες ήταν καμπτικές, με διαρροή τόσο των μέσα όσο και των έξω οπλισμών και αρκετή ικανότητα μετατόπισης στη συνέχεια. Το διάγραμμα καμπυλοτήτων καθ' ύψος δείχνει τις πολύ μεγάλες παραμορφώσεις της περιοχής της βάσης όπου σχηματίζεται η πλαστική άρθρωση. Η τιμή της καμπυλότητας ξεπερνά το δεκαπλάσιο της καμπυλότητας διαρροής, οπότε έχουμε μια πρώτη τάξη μεγέθους για την απαιτούμενη πλαστιμότητα σε όρους καμπυλότητας. Σε όλες τις αναλύσεις εκτός της περίπτωσης του κοντού υποστυλώματος, η αστοχία είναι καμπτική. Η μορφή των εφελκυστικών αστοχιών στα στοιχεία του σκυροδέματος στο Ansys είναι χαρακτηριστική. Η εφελκυσόμενη πλευρά του υποστυλώματος εντείνεται όλο και περισσότερο μέχρι το σημείο της πλήρους διαρροής των οπλισμών. Στα επίπεδα αυτά της φόρτισης το πέριξ των ράβδων σκυρόδεμα έχει τελείως αποδιοργανωθεί. Η θλιβόμενη πλευρά αναπτύσσει τάσεις που δεν ξεπερνούν τις αντοχές του περισφιγμένου σκυροδέματος. Μετά τη διαρροή αρχίζουν οι μεγάλες παραμορφώσεις που εστιάζονται στη βάση του προβόλου σε περιοχή 15-20cm. Εκεί σχηματίζεται πλαστική άρθρωση και οι στροφές που αναπτύσσονται είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιες της στροφής διαρροής.

Η αποτελεσματικότητα του μανδύα φαίνεται και από τα ποσοστά ανάληψης των μέγιστων φορτίων. Η οριζόντια δύναμη παραλαμβάνεται κατά 90% από το μανδύα και μόλις από 10% από το εσωτερικό κατά τη φάση της μέγιστης φόρτισης. Ταυτόχρονα, η παρουσία υλικών υψηλότερης ποιότητας του μανδύα οδηγούν τα στοιχεία του εσωτερικού-παλαιού σκυροδέματος στα όρια της αστοχίας τους. Η παρουσία της ενίσχυσης



## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

και της περίσφιγξης βοηθούν στην πλήρη εκμετάλλευση των υλικών του εσωτερικού υποστυλώματος.

Οι διαμήκεις σπλισμοί διαρρέουν με την αναμενόμενη σειρά. Στην πιο ρεαλιστική περίπτωση, όπου οι σπλισμοί του μανδύα είναι καλύτερης ποιότητας, πρώτα διαρρέουν οι μέσα παλιοί σπλισμοί και μετά οι έξω. Η πλήρης διαρροή του υποστυλώματος επέρχεται με την αστοχία και των έξω, ενώ η πρώτη διαρροή δε μειώνει σημαντικά τη δυσκαμψία. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις στους συνδετήρες παρουσιάζουν επίσης ενδιαφέρον. Στο μη ενισχυμένο υποστυλώμα οι κατώτεροι συνδετήρες παραμορφώνονται αρκετά ώστε να δίνουν τις υψηλότερες τάσεις. Αντίθετα στα ενισχυμένα υποστυλώματα αυτό αντιστρέφεται. Οι τάσεις είναι μεγαλύτερες για τους συνδετήρες στις ψηλότερες στάθμες. Η παρουσία του μανδύα βοηθά τους έσω συνδετήρες να παραλάβουν μεγαλύτερες τάσεις και να φτάσουν το όριο διαρροής τους. Στον μανδύα πάλι οι ψηλότεροι συνδετήρες παίρνουν μεγαλύτερες τάσεις με εξαίρεση την περιοχή της βάσης όπου επέρχεται η αστοχία του μανδύα και οι μεγάλες παραμορφώσεις εντείνουν υπερβολικά τους συνδετήρες σε εκείνη τη στάθμη.

Στις αναλύσεις παρατηρήθηκαν οι τροχιές των θλιβόμενων τάσεων που ξεκινούν από την επιβαλλόμενη οριζόντια φόρτιση και καταλήγουν στη βάση σε συνδυασμό πάντα με την κατακόρυφη φόρτιση. Από τη θεωρία περιμένουμε την ανάπτυξη του δικτυώματος του Moersh για τη μεταφορά των δυνάμεων στην περίπτωση των κανονικών σε μήκος υποστυλωμάτων. Στα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι για τα ενισχυμένα υποστυλώματα όπου η ποιότητα του σκυροδέματος του μανδύα, άρα και του μέτρου ελαστικότητας, είναι πολύ μεγαλύτερη του εσωτερικού, ο μηχανισμός του δικτυώματος ατονεί. Στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο κομμάτι των θλιπτικών τάσεων διατρέχει το θλιβόμενο τμήμα του μανδύα. Στην περίπτωση του κοντού υποστυλώματος όπως εκτιμά και η θεωρία έχουμε λειτουργία λοξού θλιπτήρα για τη μεταφορά της δύναμης.

Η επίδραση της ποιότητας της διεπιφάνειας είναι εμφανής στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης. Όσο επιμελέστερη είναι η επεξεργασία της διεπιφάνειας τόσο καλύτερη απόκριση έχει το υποστυλώμα. Η παρουσία των βλήτρων βελτιώνει ακόμα περισσότερο τη συμπεριφορά. Στην εργασία η παρουσία εγκαρσίου σπλισμού αντιμετωπίζεται με χαρακτηριστικά διεπιφάνειας και όχι με διακριτά στοιχεία σπλισμού που να διαπερνούν τη διεπιφάνεια και τα εκατέρωθεν αυτής στοιχεία σκυροδέματος. Εξαιτίας αυτού δεν ήταν δυνατόν να διερευνηθεί η περαιτέρω συνεισφορά των βλήτρων στην αποφυγή της αποκόλλησης και στο εύρος του ανοίγματος της διεπιφάνειας.

Διερευνήσαμε την περίπτωση εμφάνισης συμπεριφοράς κοντού υποστυλώματος. Κάτι τέτοιο επετεύχθη για  $\alpha_s=1,4$  όπου κανονιστικά θεωρείται καθαρά κοντό υποστυλώμα. Στην περίπτωση αυτή, πράγματι το υποστυλώμα αστοχεί διατμητικά και δεν προλαβαίνουν να διαρρεύσουν πλήρως και οι σπλισμοί του μανδύα. Η μορφή αστοχίας διαφοροποιείται από την συνήθη τριγωνική μορφή και έχουμε ομοιόμορφη αστοχία καθ' ύψος. Η τροχιά των κύριων θλιπτικών τάσεων γίνεται πάνω στο διαγώνιο θλιπτήρα.

### 7.3. Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Η αναζήτηση που παρουσιάζεται στο τεύχος αυτό έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του γράφοντος με προκαθορισμένα χρονικά περιθώρια.

Στην ανάλυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με το Ansys, το στοιχείο που χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τα στοιχεία σκυροδέματος είναι το SOLID65. Βεβαίως το SOLID65 συνοδεύεται απαραίτητως από την εισαγωγή της περιβάλλουσας αστοχίας με την ιδιότητα CONCRETE. Η ιδιότητα αυτή εκφράζει το μοντέλο Willam-Warnke (1975) για την περιβάλλουσα. Καταφέραμε να προσεγγίσουμε πολύ καλά την πειραματική συμπεριφορά, πράγμα που σημαίνει ότι το στοιχείο δουλεύει σωστά. Θα μπορούσε όμως να βελτιωθεί ο νόμος τροποποιώντας κάποια σημεία, που οδηγούν τα στοιχεία σε αστοχία και εν συνεχεία όλη την ανάλυση σε πρόωρο τερματισμό. Ήδη γίνεται έρευνα σχετικά με το εφελκυστικό τμήμα του μοντέλου των Willam-Warnke, με στόχο να τροποποιηθεί. Έχει παρατηρηθεί ότι το μοντέλο δίνει συστηματικά πιο συντηρητική αστοχία στον εφελκυσμό απ'ότι στην πράξη.

Πάνω στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί η διερεύνηση κυρίως στο θέμα της θεμελίωσης του υποστυλώματος. Η απλοποιητική παραδοχή της πλήρους πακτώσεως αλλοιώνει λίγο τα αποτελέσματα. Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε η διερεύνηση πραγματικών συνθηκών στήριξης και έδρασης των υποστυλωμάτων σε κόμβους και δοκούς. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 3.5 αυτό μπορεί να εισαχθεί με στροφικά ελατήρια αλλά και άλλες μεθόδους. Επίσης, μπορεί να εισαχθεί νόμος συνάφειας για τους οπλισμούς και κυρίως για τους διαμήκεις. Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε πλήρης σύνδεση των στοιχείων χάλυβα και σκυροδέματος που στερεί τμήμα της δυνατότητας παραμόρφωσης του υποστυλώματος.

Το θέμα της ενίσχυσης υπό φορτίο υποστυλώματος με μανδύα παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον. Η δυσκολία της πειραματικής προσομοίωσης είναι προφανής. Παρόλ' αυτά υπάρχουν και τέτοια πειράματα. Το ενδιαφέρον είναι ότι τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών δεν είναι κοινά στη διεθνή βιβλιογραφία. Αυτό προκαλεί ερωτηματικά αλλά και μεγάλη δυσκολία στην προσομοίωση με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στη βάση μιας συστηματικής πειραματικής εργασίας μπορεί παράλληλα να διερευνηθεί η επίδραση της υπό φορτίου κολώνας. Χωρίς ικανοποιητική επαλήθευση πειραμάτων κρίνεται εξαιρετικά επισφαλής η προσέγγιση.

Η μέθοδος των ελατηρίων που παρουσιάστηκε για την προσομοίωση της διεπιφάνειας είχε πολύ θετικά αποτελέσματα. Φαίνεται πως πρόκειται για μια μέθοδο με πολλές δυνατότητες βελτίωσης και προσέγγισης της φυσικής λειτουργίας. Το επόμενο βήμα θα μπορούσε να είναι η χρήση ελατηρίων διαφορετικών χαρακτηριστικών ανά πλευρά διεπιφάνειας ή ανά τμήματος αυτής. Όλ' αυτά σχετίζονται πρωτίστως με τις δυνατότητες που παρέχονται από το πρόγραμμα Ansys και από την ευκολία με την οποία μπορεί να εισαχθούν τα στοιχεία αυτά. Για το πρόγραμμα προτείνεται η βελτίωση των δυνατοτήτων του στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Χρειάζεται να υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων σε υπολογιστικά φύλλα. Από το πρόγραμμα μπορούμε να πάρουμε όλα τα δεδομένα για κάθε στοιχείο και κόμβο του προσομοιώματος. Χρειάζεται όμως μεγαλύτερη ευχέρεια στις αριθμητικές πράξεις μεταξύ τους ώστε να εξάγονται πιο εύκολα συμπεράσματα.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πεδίο των ενισχύσεων με μανδύα είναι αρκετά ευρύ και έχει πολλές παραμέτρους, οπότε δεν έχει διερευνηθεί με επαρκή αριθμό πειραμάτων. Στη βιβλιογραφία συναντάμε σειρές πειραμάτων με υποστυλώματα ενισχυμένα τα οποία είναι λίγα συνήθως σε αριθμό και συγκρίνονται μεταξύ τους. Τα πειράματα που υπάρχουν δείχνουν μεγάλη ετερογένεια στα δεδομένα και είναι δύσκολο να εξαχθούν προς το παρόν συνολικά συμπεράσματα πέραν των βασικών επισημάνσεων. Προτείνεται λοιπόν να γίνει μια πιο ολοκληρωμένη ερευνητική εργασία όπου θα εξεταστούν περισσότερες παράμετροι και θα ενταχθούν σε αυτήν και οι υπάρχουσες μετρήσεις. Ιδίως για το κομμάτι των διεπιφανειών σκυροδέματος, τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά για τις ανάγκες των αναλύσεων μας αλλά απέχουν από τη διάταξη φόρτισης που ισχύει στις διεπιφάνειες του μανδύα. Η διενέργεια τέτοιων πειραμάτων είναι σαφώς δύσκολη και επίπονη. Είναι δε μάλλον εκτός του ενδιαφέροντος της αγοράς που στρέφεται στη διερεύνηση νέων υλικών για τις ενισχύσεις όπως τα ινιοπλισμένα πολυμερή (FRP).

Όλη η παρούσα εργασία αναφέρεται σε μονοτονικές φορτίσεις και στα αποτελέσματα από αυτές. Στην πράξη όμως οι φορτίσεις που κυρίως καταπονούν τις κατασκευές μας και μας αναγκάζουν να τις επισκευάζουμε είναι ο σεισμός με τις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Η προσομοίωση των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων είναι πολλαπλάσια πιο δύσκολη στην προσέγγιση αλλά αποτελεί το επόμενο βήμα που πρέπει να γίνει.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- «Κανονισμός Επεμβάσεων» (ΚΑΝΕΠΕ), Σχέδιο 3, ΟΑΣΠ, Φεβ. 2009
- «Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος» ΕΚΩΣ, ΟΑΣΠ, 2005
- «Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός» ΕΑΚ, ΟΑΣΠ
- «Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97», ΦΕΚ 315/Β/97
- Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 3 EN1998-3 «Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτηρίων»
- «Συστάσεις για τις επισκευές κτηρίων βλαμμένων από σεισμό», ΕΜΠ, 7<sup>η</sup> έκδοση 1988
- «Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτήρια», ΟΑΣΠ, 2005
- Βανδώρος Κ., «Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς υποστυλωμάτων ενισχυμένων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις», Διδακτορική διατριβή, Πάτρα 2005
- Βιντζηλαίου Ε., «Θεμελιώδεις μηχανισμοί μεταφοράς δυνάμεων σε διεπιφάνειες οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις», Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 1986
- Δρίτσος Σ.Η., «Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα», Πανεπιστημιακές εκδόσεις Πατρών, 2<sup>η</sup> έκδοση 2001
- Δρίτσος Σ.Η., «Επισκευές-ενισχύσεις κατασκευών πριν και μετά το σεισμό», Πρακτικά 14 Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως, 2003
- Δρίτσος Σ.Η., Θεοδωράκης Σ.Μ., Σπανός Χ., Τζανέτος Γ., «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές» (ΠΕΤΕΠ), ΙΟΚ, 2008
- Κωτσοβός Μ.Δ., «Οπλισμένο Σκυρόδεμα», Εκδόσεις Συμεών, 2010
- Λαμπρόπουλος Α.Π., Δρίτσος Σ.Η., «Πρόβλεψη συμπεριφοράς υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων», 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, Αλεξανδρούπολη, 2006
- Οικονόμου Χ., Πενέλης Γ., «Συγκριτική μελέτη τεχνικών χαρακτηριστικών μανδύων από χυτό και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα»
- Παπαδρακάκης Μ., «Ανάλυση Φορέων με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2001
- Ροβήλος Α., «Μετασεισμικός Έλεγχος- Σεισμική Παθολογία Κτιρίων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2001

Σπαθής Α.-Λ., Μπούσιας Ε.Ν., Φαρδής Μ.Ν., «Δοκιμές υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με μανδύες σκυροδέματος ή ινοπλισμένα πολυμερή», 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, Αλεξανδρούπολη 2006

Τάσιος Θ.Π., «Θεωρία σχεδιασμού ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ και ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ», Εκδόσεις Συμμετρία, 2009

Τριανταφύλλου Αθ., «Δομικά Υλικά», Πάτρα, 1998

Φαρδής Μ.Ν., «Οδηγός σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011

Χρονόπουλος Μ., «Συμπεριφορά διεπιφάνειας μεταξύ παλιού-νέου σκυροδέματος, Βλήτρα-αγκύρια στις επεμβάσεις σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα», Πρακτικά 7<sup>ου</sup> Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Πάτρα 1985

Ansys Inc., ANSYS Release 13, User's manual, 2010

ATC-40, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", Applied Technology Council, Vol I, California, USA

"Bulletin d'information N162, Comite Euro-international du beton", Aug 1983

Eurocode 8 Part 3, "Design of structures for earthquake resistance: Assessment and retrofiting of buildings", Draft No5, Doc CEN/TCEN250/SC8/N, 2004

Fib Bulletin 24, "Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings", 2003

Bett J., Richard Klingner R.E., Jirsa J.O., "Lateral Load Response of Strengthened and repaired reinforced concrete columns", ACI Structural Journal, Sep-Oct 1988

Bousias S.N., Fardis M.N., Spathis A., "Shotcrete of FRP jacketing of concrete columns for seismic retrofiting"

Chronopoulos M.P., "Response of repaired/strengthened reinforced concrete columns under cyclic actions", 8<sup>th</sup> European conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 1986

Chronopoulos M.P., "Incorporated steel structures: a repair/strengthening technique"

Diab Y.G., "Strengthening of reinforced concrete beams by using sprayed concrete: experimental approach", Journal of Engineering Structures, Vol 20(7), p631-643

Dritsos S., Pilakoutas K., "Strengthening of reinforced concrete elements by new concrete layers", 5<sup>th</sup> SECED Conference on European seismic design, chester, UK, 1995

Ersoy U., Tankut T., Suleiman R., "Behavior of Jacketed Columns, ACI Structural Journal", May-June 1993

Georgopoulos, Dritsos, "A steel jacketing technique for strengthening R/C columns, 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering", Rotterdam, 1995

- Moaveni Saeed, "Finite element Analysis", Prentice Hall, 1999
- Julio E., Branco F., Silva V., "Reinforced Concrete Jacketing-Interface Influence on Monotonic Loading Response", ACI Structural Journal/March-April 2005
- Julio E., Branco F., "Reinforced Concrete Jacketing-Interface Influence on Cyclic Loading Response", ACI Structural Journal/July-August 2008
- Palieraki V., Vintzileou E., Zeris C., "Behaviour of interfaces in repaired/strengthened RC elements subjected to cyclic actions: Experiments and Modelling"
- Park R., Priestley M.J.N., "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings", John Wiley and Sons, New York, 1992
- Park R., "Recent seismic load test on reinforced concrete structural elements and subassemblages at the University of Canterbury", 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, 1995
- Rodriguez M., Park R., "Seismic Load tests on Reinforced concrete columns strengthened by jacketing", ACI Structural Journal, March-April 1994
- Maw-Shyong Sheu, Shih-Fu Chang, "Hysteretic rules of short columns strengthened by wire meshes or loop plates", 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, 1995
- Tankut A.T., Ersoy U., Bahadir Aksan, "Repair and strengthening of reinforced concrete columns", Greek-Turkish Reg. Seminar, Izmir, April 1989
- William K. J., Warnke E.D., "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete, Int. Association for bridge and Structural Engineering", ISMES, Bergamo, Vol,19, p.174, 1975