



ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 4

*Βαθμονόμηση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων για
κελύφη τύπου sandwich με βάση τα πειραματικά
αποτελέσματα*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 4.1:

*Τεχνική έκθεση βαθμονόμησης προσομοιωμάτων πεπερασμένων
στοιχείων για κελύφη τύπου sandwich με βάση τα πειραματικά
αποτελέσματα*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENergy related Steel
STRuctures using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: **Prof. C. GANTES**

WORKPACKAGE (W.P.) 4

*Calibration of finite element models of sandwich-type shells on
the basis of experimental results*

DELIVERABLE 4.1:

*Technical report of calibration of finite element models of
sandwich-type shells on the basis of experimental results*

2015



European Union
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND

Summary

The numerical simulation of the experiments, described in the deliverable 3.1, is presented in this technical report, along with the post-experimental calibration of the formulated models.

The procedure followed for the numerical simulation of the experiments described in the deliverable 3.1, along with the post-experimental calibration of the pertinent models, is demonstrated in this technical report.

The ADINA finite-elements-analysis program is employed for the simulation, with both specimens - one consisting of a typical, hollow, steel section and another incorporating a "sandwich" type section - being modeled in such level of detail that two criteria are equally satisfied: non-linearity involved in materials and geometry being taken into account and reasonable computational resources being required for the analyses.

Shell elements are utilized for the steel cylinders of both cases, the stiffeners at the connection with the bottom plate and the spacers used in the "sandwich" case, while 3D-Solid elements constitute the concrete-filled "core" of the latter. Intactness of the bond between the "faces" and the "core" of the "sandwich" model is achieved by means of shared nodes within the contact surfaces. The material laws employed in the simulation perfectly match the original behavior obtained from the steel-coupon and concrete-prism tests.

As far as model calibration is concerned, a significant quantitative difference between the numerical and experimental results is efficiently addressed by means of substitution of the initially fixed connection of the cylinders to the bottom plate by one involving a suitable torsion spring. In order for the spring properties to be realistically selected, a simulation of the connection is carried out in the Sofistik's Steel Connections environment.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	3
2. Δοκίμιο αμιγώς χαλύβδινης διατομής.....	5
2.1 Συνοπτική περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	5
2.2 Αριθμητική προσομοίωση	7
2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης.....	9
3. Δοκίμιο διατομής μορφής «sandwich».....	12
3.1 Συνοπτική περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	12
3.2 Αριθμητική προσομοίωση	15
3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης.....	16
4. Συμπεράσματα	20
5. Αναφορές.....	22

1

Εισαγωγή

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 4**, με τίτλο:

«Βαθμονόμηση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων για κελόφη τύπου sandwich με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 4**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Θα μορφωθούν λεπτομερή προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων για κελόφη τύπου sandwich και θα βαθμονομηθούν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της ΕΕ3. Θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία κελόφους για την προσομοίωση των ελασμάτων και οκτακομβικά τρισδιάστατα ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία για τον πυρήνα, ενώ η σύνδεση μεταξύ τους θα πραγματοποιηθεί με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Η μη γραμμικότητα, τόσο του υλικού όσο και η γεωμετρική, θα ληφθεί υπόψη πραγματοποιώντας αναλύσεις GMNI. Η διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων θα είναι ικανοποιητικά πυκνή έτσι ώστε να προβλεφθούν όλες οι πιθανές μορφές αστοχίας, συμπεριλαμβανομένης και της ροτίδωσης των ελασμάτων».

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα τεχνική έκθεση παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση των δύο διαφορετικών κυλινδρικών δοκιμίων - ενός συμβατικής, χαλύβδινης διατομής και ενός διατομής μορφής «sandwich» - που κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν

πειραματικά, όπως περιγράφηκε στην τεχνική έκθεση του παραδοτέου 3.1 της ενότητας εργασίας Ε.Ε. 3. Τα δύο προσομοιώματα αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του προγράμματος ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ADINA [1]. Σε αμφότερες περιπτώσεις, επιδιώχθηκε αφενός η επαρκώς λεπτομερής προσομοίωση, ώστε να ληφθούν υπόψη οι μη γραμμικότητες υλικών και γεωμετρίας, και αφετέρου η εύλογη απαίτηση υπολογιστικών πόρων κατά την αριθμητική διερεύνηση.

Ειδικότερα, στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης του προσομοιώματος συμβατικής, αμιγώς χαλύβδινης διατομής. Περιγράφεται η γεωμετρία του φορέα, η προσομοίωση του υλικού, η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία και η επιλογή του είδους τους, οι συνθήκες στήριξης, η επιβαλλόμενη φόρτιση και η μέθοδος αριθμητικής επίλυσης. Έπειτα αναλύονται τα αποτελέσματα και πραγματοποιείται σύγκριση με εκείνα που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται με ανάλογο τρόπο η προσομοίωση του πειραματικού δοκιμίου με διατομή μορφής «sandwich». Επιπλέον των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, περιγράφεται η αριθμητική προσέγγιση των ιδιαιτεροτήτων της σύνθετης διατομής, σε επίπεδο γεωμετρίας, υλικών και συμπεριφοράς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά και αξιολογούνται σε σχέση με τον πειραματικό έλεγχο.

Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία συνολική βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της εφαρμοσθείσας αριθμητικής προσέγγισης και συνοψίζονται τελικά συμπεράσματα.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αλέξανδρος Βαλοσαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

2

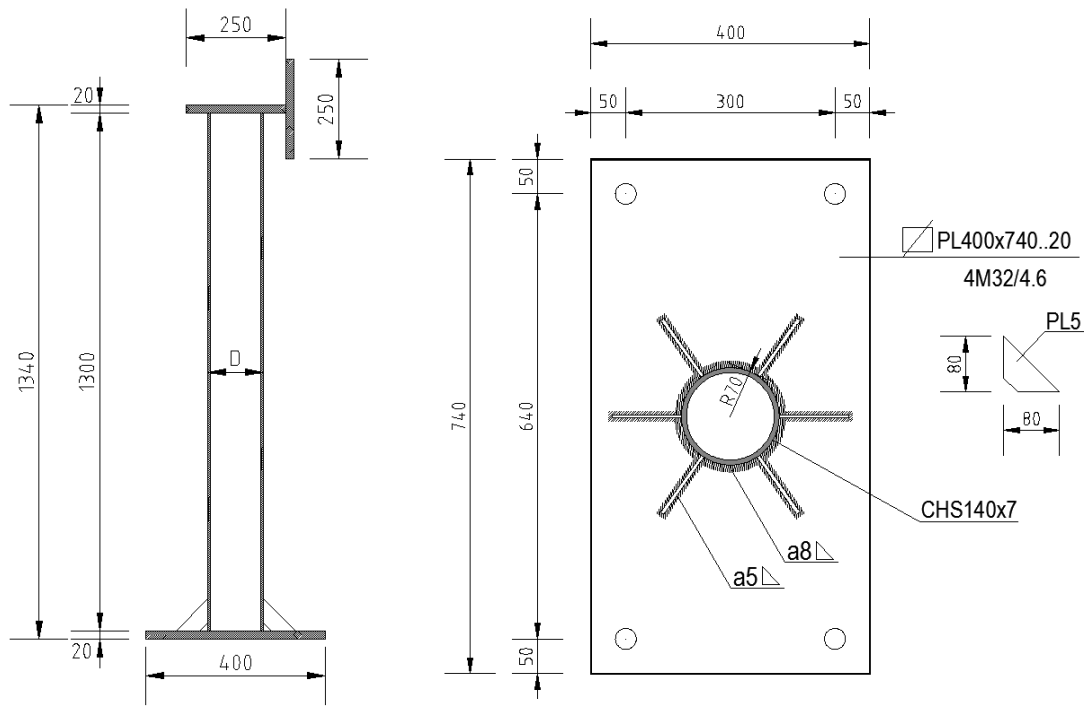
Δοκίμιο αμιγώς χαλύβδινης διατομής

2.1 Συνοπτική περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Το αμιγώς χαλύβδινο δοκίμιο, που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές, είναι κοίλο κυλινδρικό, ύψους 1300mm, εξωτερικής διαμέτρου 140mm και πάχους 7mm. Στη βάση του πραγματοποιήθηκε συγκόλληση με πλάκα έδρασης, η οποία με τη σειρά της συνδέθηκε στην οριζόντια βάση του άκαμπτου πλαισίου δοκιμών, με τρόπο τέτοιο ώστε να διαμορφωθούν συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Για την αποφυγή αστοχίας της συγκόλλησης με την πλάκα έδρασης, συγκολλήθηκαν επιπλέον στη βάση του κυλίνδρου, ανά 60°, 6 ενισχυτικά ελάσματα πάχους 5mm. Στην κορυφή του το κυλινδρικό δοκίμιο συγκολλήθηκε με σύστημα δύο πλακών, συγκολλημένων μεταξύ τους σε μορφή «Ταυ» και συνδεδεμένων με το έμβολο επιβολής της δύναμης, ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης σε όλη τη διατομή. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1, ενώ περιγράφονται αναλυτικότερα στην τεχνική έκθεση που συντάχθηκε στα πλαίσια της Ενότητας Εργασίας 3.

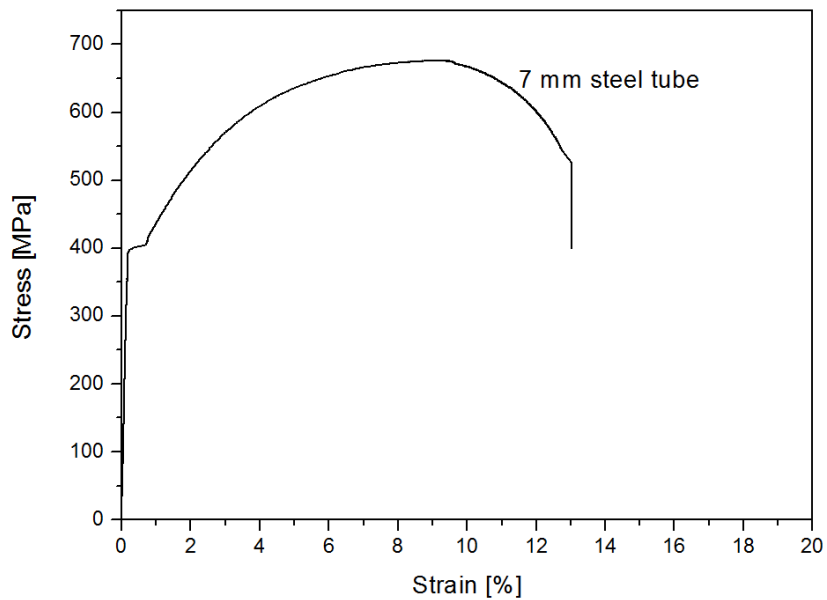
Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κυλινδρικού δοκιμίου αλλά και των βοηθητικών ελασμάτων υποβλήθηκε σε δοκιμή εφελκυσμού, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται με τη μορφή διαγράμματος τάσης - παραμόρφωσης στο Σχήμα 2.2. Υπολογίστηκε τάση διαρροής του χάλυβα ίση με 398MPa, μέτρο ελαστικότητας 209GPa, τάση αστοχίας 675MPa και παραμόρφωση αστοχίας 13%.

Κατά τη διενέργεια του πειράματος, επιβλήθηκε μέσω του εμβόλου, και με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, οριζόντια μετατόπιση στην κορυφή του δοκιμίου, με ρυθμό επιβολής 0.05mm/s. Για την καταγραφή των παραμορφώσεων τοποθετήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges) στην εφελκυσόμενη πλευρά του δοκιμίου, σε απόσταση 125mm από την πλάκα έδρασης του.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία πειραματικού δοκιμίου αμιγώς χαλύβδινης διατομής

Figure 2.1: Geometry of steel-only test specimen



Σχήμα 2.2: Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης χάλυβα αμιγώς χαλύβδινης διατομής

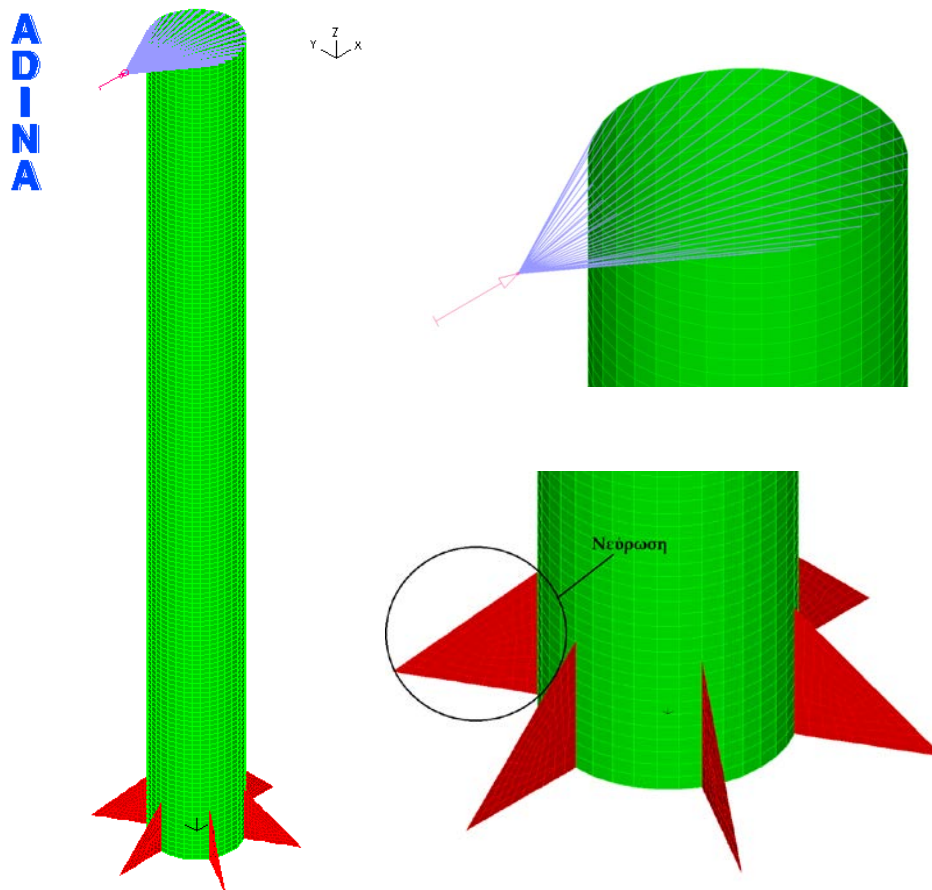
Figure 2.2: Stress - strain curve of steel-only specimen's steel

2.2 Αριθμητική προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση στο πρόγραμμα ADINA, διαμορφώθηκε αρχικά η γεωμετρία του φορέα στις πραγματικές του διαστάσεις. Η πλάκα έδρασης αντικαταστάθηκε από πακτώσεις στη βάση του κυλινδρικού φορέα και στις βάσεις των ενισχυτικών ελασμάτων. Το σύστημα πλακών στην κορυφή προσομοιώθηκε με χρήση άκαμπτου συνδέσμου (rigid link), στον οποίο εφαρμόζεται το φορτίο, πριν μεταφερθεί ομοιόμορφα στην ανώτερη διατομή του κυλίνδρου.

Κατά την προσομοίωση του υλικού ενσωματώθηκε σχεδόν αυτούσιο το διάγραμμα του Σχήματος 2.2. Το είδος του υλικού επιλέχθηκε ώστε να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα και να είναι δυνατή η ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων.

Το κυλινδρικό κέλυφος διακριτοποιήθηκε μέσω 6012 τετρακομβικών στοιχείων κελύφους (shell elements), ενώ 582 στοιχεία του ίδιου τύπου συνέστησαν καθένα από τα 6 ενισχυτικά ελάσματα της βάσης. Σχετικές δοκιμές επιβεβαίωσαν την επάρκεια του συγκεκριμένου βαθμού διακριτοποίησης. Δόθηκε προσοχή ώστε τα ενισχυτικά ελάσματα και το κυλινδρικό κέλυφος να διαθέτουν κοινούς κόμβους στις συνοριακές γραμμές τους, ώστε να αντιμετωπισθούν ως ενιαίο στερεό σώμα όπως επιτάσσουν οι μεταξύ τους συγκολλήσεις. Το τελικό προσομοίωμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου αμιγώς χαλύβδινης διατομής

Figure 2.3: Finite-elements model of the steel-only specimen

Ως φόρτιση του φορέα, εφαρμόστηκε μετακίνηση κορυφής κατά την οριζόντια διεύθυνση X με ρυθμό 0.05mm/s, ίδιο με εκείνον του πειράματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η μετακίνηση ασκήθηκε στο εξωτερικό σημείο (master node) που συνδέει άκαμπτα όλα τα σημεία της κορυφαιάς διατομής (rigid link). Σημειώνεται ότι κατά τη διενέργεια του πειράματος, και καθώς το βέλος μετακίνησης στην κορυφή του φορέα αυξανόταν, το έμβολο δεν παρέμενε οριζόντιο, αλλά ακολουθούσε μέσω των αρθρώσεων του την παραμόρφωση του φορέα. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι αντίστοιχες μεταβολές του μοχλοβραχίονα της ροπής κατά την προσομοίωση, η διεύθυνση του διανύσματος μετακίνησης ρυθμίστηκε ώστε να παραμένει κάθετη σε αυτήν του παραμορφωμένου φορέα καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Συμπεριλήφθηκε ακόμα ως φορτίο το ίδιο βάρος του φορέα, θεωρώντας πυκνότητα χάλυβα 7850kg/m³.

Τέλος, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson, με χρήση του ενεργειακού κριτηρίου σύγκλισης και θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων.

2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης

Το πείραμα διήρκεσε έως ότου η ασκούμενη δύναμη έφτασε τα 49.47kN και η αντίστοιχη μετατόπιση τα 165mm, με έντονη διαρροή του χάλυβα. Τα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης και του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 (καμπύλη πειράματος, καμπύλη προσομοίωσης χωρίς ελατήριο).

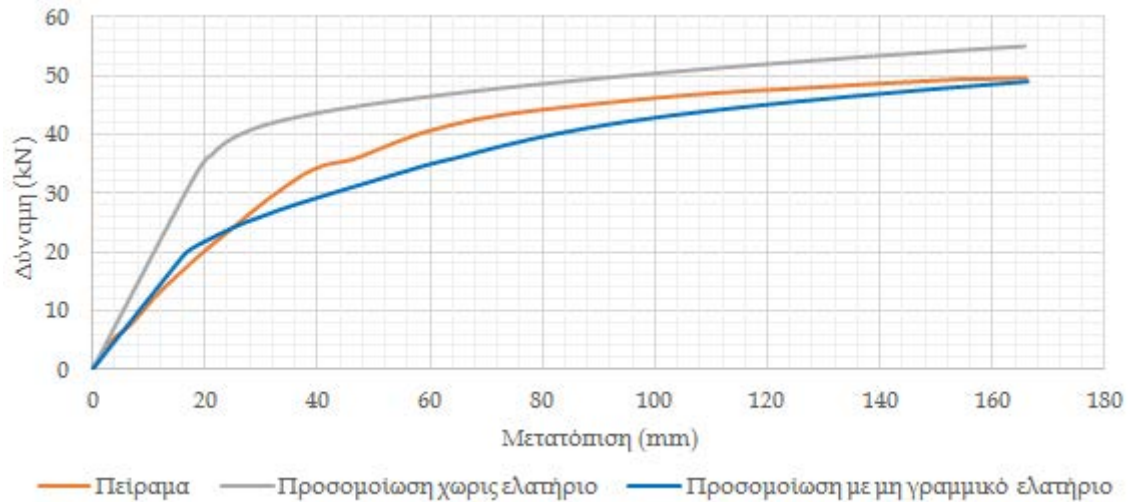
Παρατηρείται σημαντική απόκλιση της πειραματικής καμπύλης συγκριτικά με την καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης, όσον αφορά κυρίως την αρχική δυσκαμψία του φορέα, όπου η διαφορά ανέρχεται στο 36%, αλλά και τη μέγιστη τάση όπου παρουσιάζεται διαφορά 10%. Η ασυμφωνία προσομοίωσης και πειράματος αποδίδεται στη θεώρηση της σύνδεσης στη βάση του φορέα κατά την προσομοίωση ως πλήρους πάκτωσης, όπως σχεδιάστηκε και φαινομενικά υλοποιήθηκε στην πειραματική δοκιμή. Ωστόσο, κατά μια ρεαλιστικότερη θεώρηση, η σύνδεση που επιτεύχθηκε υπήρξε στην πραγματικότητα ημιάκαμπτη, επιτρέποντας μια μικρή στροφή στη βάση του φορέα, η οποία συνεπάγεται την προαναφερθείσα μείωση της κλίσης της πειραματικής καμπύλης δύναμης - μετατόπισης.

Προκειμένου αυτό να ληφθεί υπόψη στην αριθμητική προσομοίωση, η σύνδεση προσομοιώθηκε στο υπο-πρόγραμμα Steel Connections του λογισμικού SOFISTIK [2], ώστε να υπολογιστεί η δυσκαμψία που στην πραγματικότητα αυτή διαθέτει. Καθώς η συγκεκριμένη σύνδεση δεν ανήκει στις τυπικές μορφές που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα, πραγματοποιήθηκε μια όσο το δυνατόν πλησιέστερη προσομοίωση αυτής, με συμπεριφορά που απεικονίζεται με τη μορφή διαγράμματος ροπής - καμπυλότητας στο Σχήμα 2.5.

Η ημιάκαμπτη σύνδεση που προέκυψε κατ' αυτόν τον τρόπο, προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ADINA μέσω ενός στροφικού, μη γραμμικού ελατηρίου με την υπολογισμένη όπως περιγράφηκε δυσκαμψία, τοποθετημένου στη βάση του φορέα και συνδεδεμένου με αυτή με χρήση άκαμπτων συνδέσμων. Η βασισμένη στα παραπάνω αριθμητική ανάλυση παρουσίασε ικανοποιητική σύγκλιση με το αποτέλεσμα της πειραματικής δοκιμής, όσον αφορά τόσο την αρχική δυσκαμψία όσο και την τελική αντοχή του δοκιμίου, με απόκλιση περίπου 1% για καθένα από τα δύο μεγέθη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 (καμπύλη πειράματος, καμπύλη προσομοίωσης με χρήση μη γραμμικού ελατηρίου). Τέλος, η εικόνα του παραμορφωμένου φορέα μετά την ολοκλήρωση του πειράματος και μετά το πέρας της αριθμητικής επίλυσης, παρουσιάζεται στις Εικόνες 2.1i,ii, αντίστοιχα.

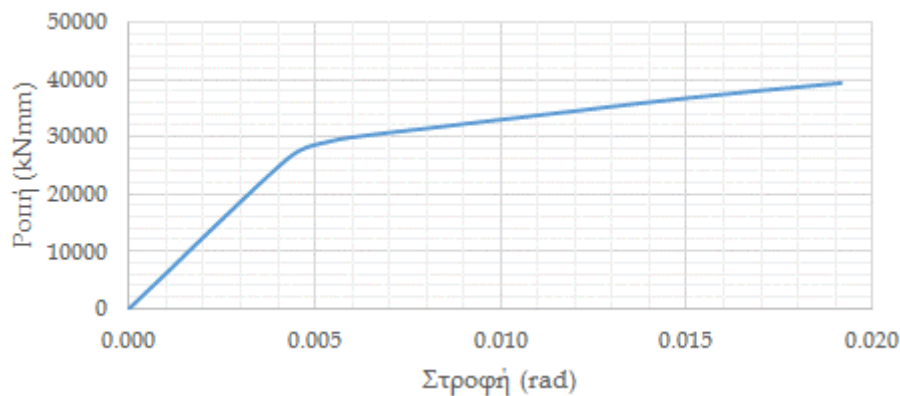
Όταν η δύναμη του εμβόλου της πειραματικής διάταξης έφτασε τα 35.56kN οι συγκολλησεις των νευρώσεων της εφελκόμενης περιοχής με την πλάκα έδρασης αστόχησαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2i. Η επίδραση της αστοχίας αυτής λήφθηκε υπόψη στην προσομοίωση, καθώς τα πακτωμένα στοιχεία στη βάση των συγκεκριμένων ελασμάτων προγραμματίστηκε να απενεργοποιηθούν κατά την αντίστοιχη χρονική στιγμή. Στην Εικόνα 2.2ii παρουσιάζεται λεπτομερέστερα η τελική μορφή του φορέα της προσομοίωσης, με χρωματική απεικόνιση της κατανομής τάσεων

Von Mises, όπου γίνεται εμφανής η συγκεκριμένη αστοχία. Η απότομη μείωση και επαναφορά της κλίσης στο διάγραμμα δύναμης μετατόπισης του Σχήματος 2.4 - περισσότερο εμφανής στην καμπύλη του πειράματος και λιγότερο σε αυτήν της προσομοίωσης - αντικατοπτρίζει την εν λόγω εξέλιξη.



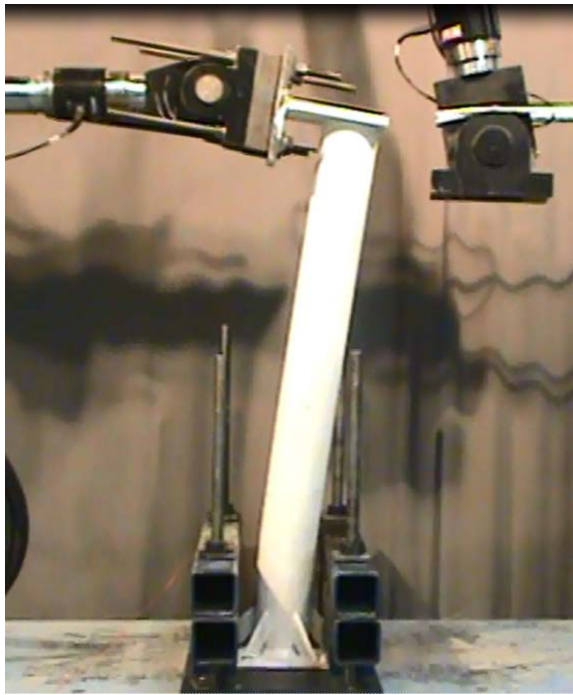
Σχήμα 2.4: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης - μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης και του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της αριθμητικής προσομοίωσης, για τον αμιγώς χαλύβδινο φορέα

Figure 2.4: Comparison of force - displacement curves from the test's hydraulic ram and the simulation's loaded node, of the steel-only specimen

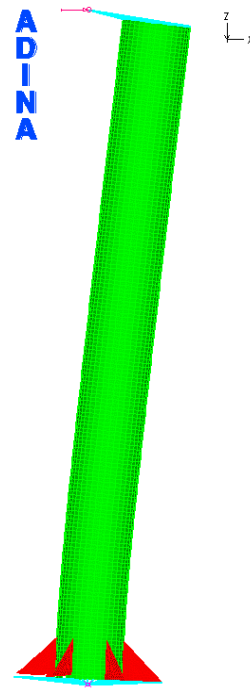


Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροπής - στροφής της ημιάκαμπτης σύνδεσης στη βάση του δοκιμίου αμιγώς χαλύβδινης διατομής από την προσομοίωση στο λογισμικό Steel Connections

Figure 2.5: Moment - rotation curve of the semi-rigid connection at the bottom of the steel-only specimen from the simulation in Steel Connections software



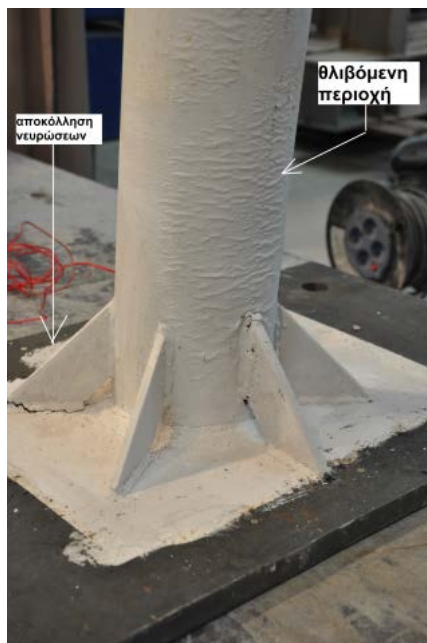
(i)



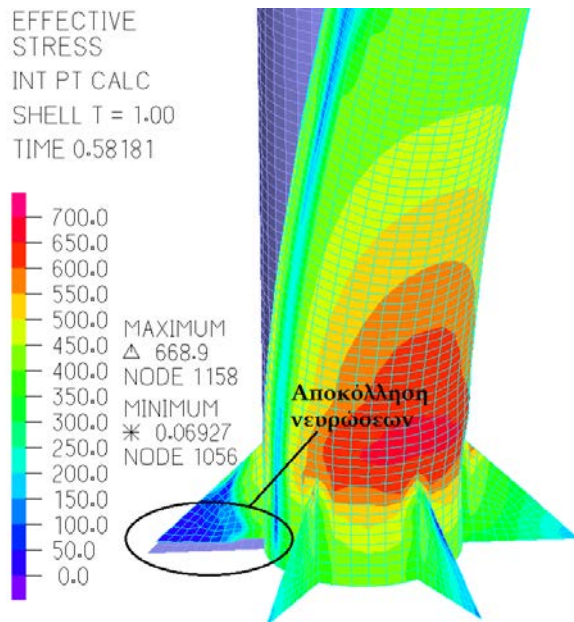
(ii)

Εικόνα 2.1: Παραμορφωμένος φορέας αμιγώς χαλύβδινης διατομής (i) κατά το πέρας του πειράματος, (ii) κατά το πέρας της προσομοίωσης

Photo 2.1: Deformed shape of steel-only specimen (i) at the end of testing, (ii) at the end of simulation



(i)



(ii)

Εικόνα 2.2: Παραμορφωμένη κατάσταση με αποκόλληση νευρώσεων κατώτερου τμήματος του φορέα αμιγώς χαλύβδινης διατομής (i) από την πειραματική διερεύνηση, (ii) από την προσομοίωση

Photo 2.2: Deformed shape with stiffeners' failure of the lower part of the steel-only specimen (i) from the test, (ii) from the simulation

3

Δοκίμιο διατομής μορφής «sandwich»

3.1 Συνοπτική περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Το δοκίμιο διατομής μορφής «sandwich» που κατασκευάστηκε για τους σκοπούς του πειράματος αποτελείται από δύο ομόκεντρα κυλινδρικά κελύφη πάχους 3mm έκαστο, εξωτερικών διαμέτρων 113mm και 140mm αντίστοιχα και ύψους 1300mm, με αυτοσυμπυκνωμένο κονίαμα να πληροί το εσωτερικό διάκενο πάχους 105mm. Ο εσωτερικός και ο εξωτερικός κύλινδρος συγκολλήθηκαν διαδοχικά με την πλάκα έδρασης, ενώ στην κορυφή χρησιμοποιήθηκε για την ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης το σύστημα πλακών σχήματος «Ταυ» του αμιγώς χαλύβδινου δοκιμίου, συγκολλημένο στον εξωτερικό κύλινδρο. Στη βάση χρησιμοποιήθηκαν ενισχυτικά ελάσματα ίδιων διαστάσεων και σε ίδια διάταξη με την περίπτωση του αμιγώς χαλύβδινου δοκιμίου. Τα παραπάνω παρουσιάζονται σχεδιαστικά στα Σχήματα 3.1i,ii.

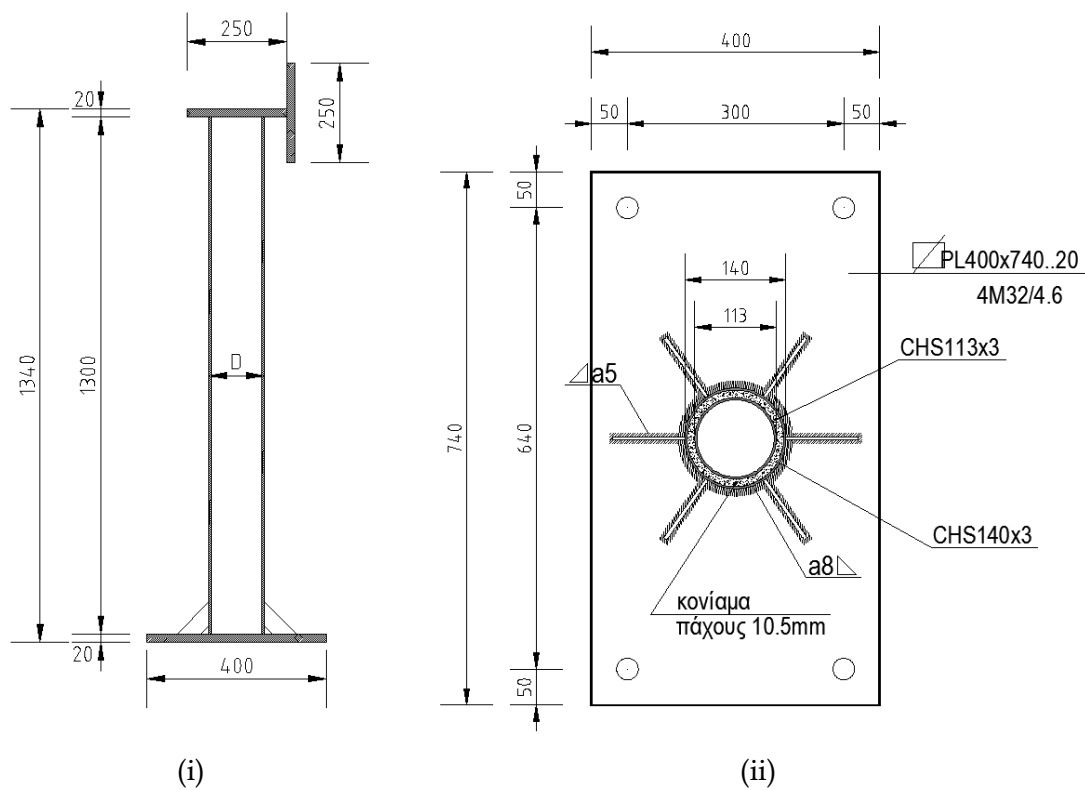
Επιπλέον, για τη διασφάλιση ίσης καθ' ύψος απόστασης μεταξύ των δύο κυλίνδρων, αλλά και για την επίτευξη καλύτερης συνεργασίας μεταξύ τους, τοποθετήθηκαν στη βάση και στην κορυφή του δοκιμίου ελάσματα-αποστάτες διαστάσεων 10mm x 100mm x 15mm και 10mm x 50mm x 15mm αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Οι αποστάτες διατάχθηκαν ανά 60°, στα ίδια επίπεδα που ορίζονται από τα τριγωνικά ενισχυτικά ελάσματα.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα μεταλλικά μέρη που συνιστούν το δοκίμιο δοκιμάστηκε σε εφελκυσμό και παρουσίασε τη συμπεριφορά που φαίνεται στο Σχήμα 3.2, σημαντικά διαφορετική ποσοτικά από εκείνη του χάλυβα του αμιγώς χαλύβδινου δοκιμίου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε τάση διαρροής ίση με 313MPa, μέτρο ελαστικότητας 210000MPa, τάση αστοχίας 467MPa και παραμόρφωση αστοχίας 16%. Το κονίαμα υψηλής αντοχής και ρευστότητας που παρασκευάστηκε ώστε να αποτελέσει τον πυρήνα του δοκιμίου υποβλήθηκε για την καταγραφή των ιδιοτήτων του σε ελέγχους θλίψης και κάμψης τριών σημείων. Βάσει αυτών, η μέση θλιπτική τάση του υπολογίστηκε ίση με 68.7MPa, η αντίστοιχη εφελκυστική ίση με 6.7MPa και το μέτρο ελαστικότητας ίσο με 39.1GPa.

Προκειμένου να επιτευχθεί καλή συνάφεια και πλήρης συνεργασία μεταξύ των δύο χαλύβδινων ελασμάτων και του πυρήνα κονιάματος, πραγματοποιήθηκε κατά το

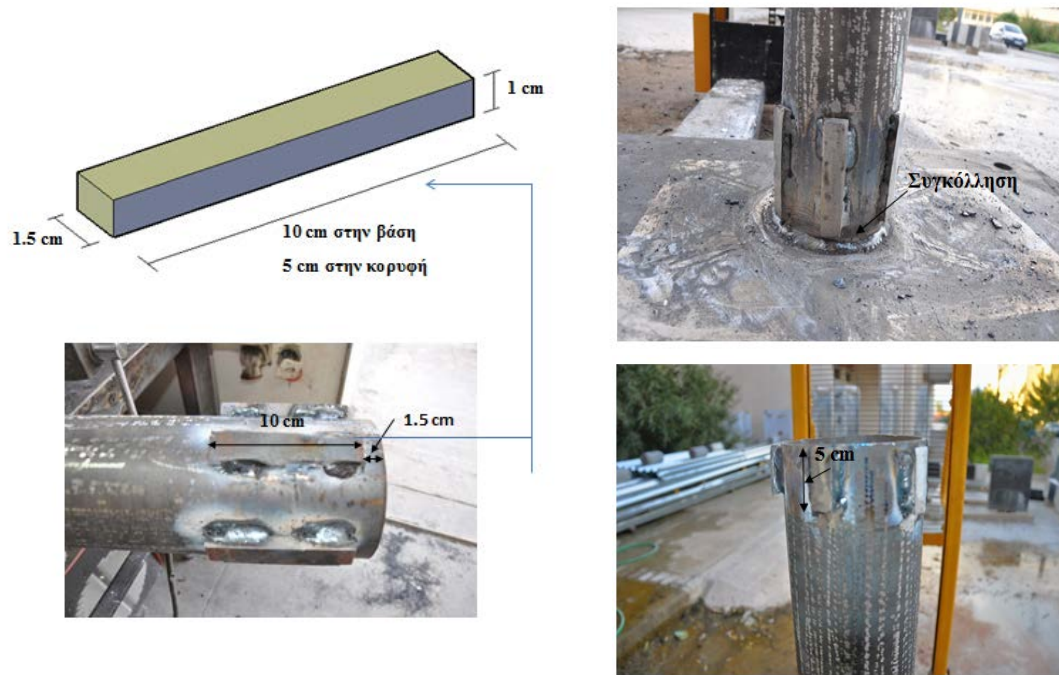
αρχικό στάδιο της κατασκευής του δοκιμίου σχολαστικός καθαρισμός και εκτράχυνση με τροχό της εξωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού κυλίνδρου, καθώς και καθαρισμός της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού κυλίνδρου με ειδικό διάλυμα καθαρισμού. Πράγματι, κατά την ολοκλήρωση του πειράματος, οπότε επιχειρήθηκε η κοπή και αφαίρεση μικρού τμήματος του εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος, η άρρηκτη συνεργασία των δύο υλικών καταδείχθηκε από τη δυσκολία της μεταξύ τους αποκόλλησης.

Η φόρτιση του δοκιμίου ασκήθηκε μέσω του υδραυλικού εμβόλου με ρυθμό 0.05mm/s, όπως προηγουμένως. Δύο ηλεκτρομηκονσιόμετρα τοποθετήθηκαν, ομοίως με το πρώτο πείραμα, σε ύψος 125mm από τη βάση έδρασης, ένα στην εφελκόμενη και ένα στη θλιβόμενη πλευρά του δοκιμίου.



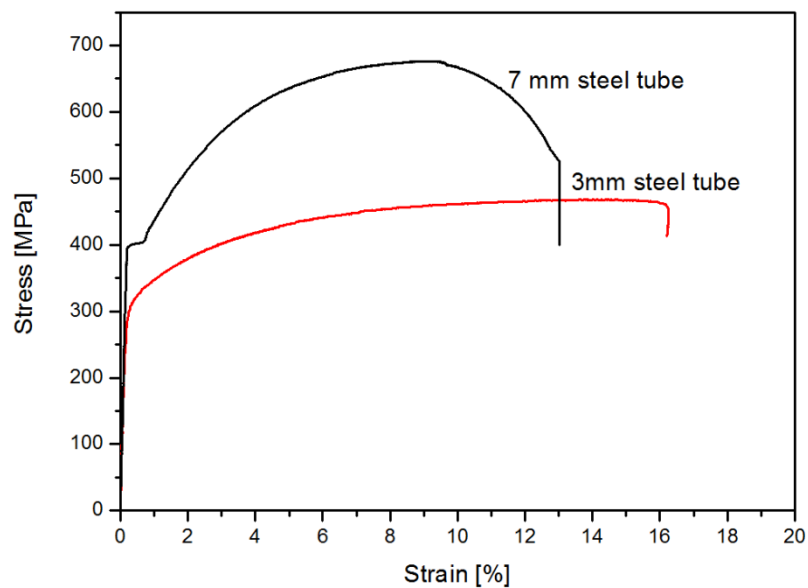
Σχήμα 3.1: Γεωμετρία πειραματικού δοκιμίου διατομής μορφής «sandwich»

Figure 3.1: Geometry of “sandwich”-type test specimen



Εικόνα 3.1: Χαλύβδινοι αποστάτες στη βάση και στην κορυφή του δοκιμίου

Photo 3.1: Steel spacers at the bottom and the top of the specimen



Σχήμα 3.2: Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης χάλυβα διατομής μορφής «sandwich» σε σύγκριση με εκείνη του χάλυβα της αμιγώς χαλύβδινης διατομής

Figure 3.2: Stress - strain curve of steel of the “sandwich”-type section compared to that of steel of the steel-only section

3.2 Αριθμητική προσομοίωση

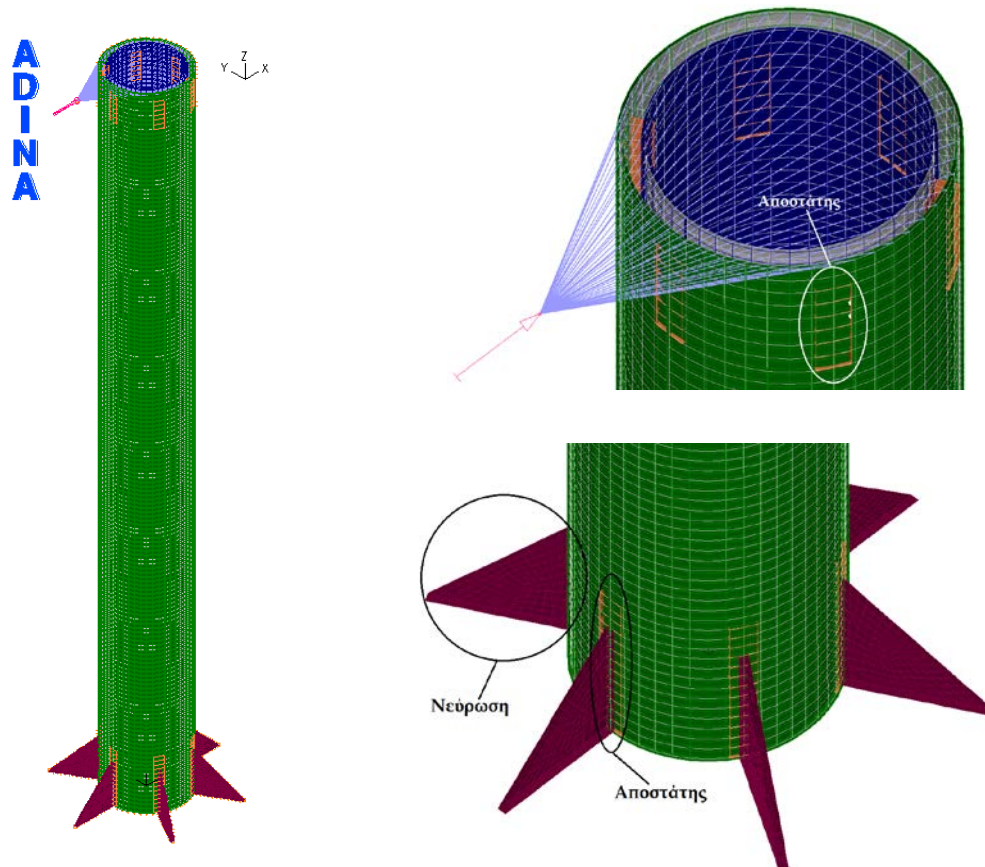
Η γεωμετρία του φορέα σχεδιάστηκε λεπτομερώς, σε πραγματικές διαστάσεις, αποτελούμενη από τους δύο ομόκεντρους κυλίνδρους, τα 6 τριγωνικά ενισχυτικά ελάσματα της βάσης και τα 12 ελάσματα-αποστάτες - 6 στη βάση και 6 στην κορυφή του φορέα. Η πλάκα έδρασης αντικαταστάθηκε, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, με πακτώσεις στη βάση του εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου, καθώς και στις βάσεις των τριγωνικών ενισχυτικών ελασμάτων. Το ζεύγος πλακών της κορυφής αντικαταστάθηκε και πάλι με άκαμπτο σύνδεσμο (rigid link), μέσω του οποίου κατανέμεται ομοιόμορφα η φόρτιση στην κορυφαία διατομή του εξωτερικού κυλίνδρου, καθώς η συγκόλληση των πλακών στο πείραμα πραγματοποιήθηκε μόνο σε αυτόν.

Όσον αφορά τα υλικά της προσομοίωσης, το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα ενσωματώθηκε χωρίς απλοποιητικές επεμβάσεις, ενώ χρησιμοποιήθηκε το ίδιο είδος υλικού με την περίπτωση της συμβατικής διατομής, ώστε να είναι και πάλι δυνατή η πλαστικοποίησή του, καθώς και να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα. Για το κονίαμα επιλέχθηκε εξειδικευμένο είδος υλικού που παρέχεται από το πρόγραμμα για την προσομοίωση σκυροδέματος, με εισαγωγή των τιμών από τους πειραματικούς ελέγχους και εύλογες παραδοχές.

Τα δύο κυλινδρικά κελύφη προσομοιώθηκαν με τετρακομβικά στοιχεία κελύφους (shell elements), όπως και τα τριγωνικά ενισχυτικά ελάσματα και οι αποστάτες. Για τον πυρήνα κονιάματος χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα συμπαγή οκτακομβικά στοιχεία (3d solid elements). Από το βαθμό διακριτοποίησης που επιλέχθηκε έπειτα από δοκιμές προέκυψαν 16032 συμπαγή στοιχεία για τον πυρήνα, ενώ δημιουργήθηκαν 8016 στοιχεία κελύφους για κάθε κυλινδρικό κέλυφος, 139 για κάθε τριγωνικό ενισχυτικό έλασμα, 26 για κάθε αποστάτη της βάσης και 12 για κάθε αποστάτη της κορυφής του φορέα. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται το προσομοίωμα, καθώς και τμήματα από την κορυφή και τη βάση του, όπου διακρίνονται τα επιμέρους στοιχεία.

Προκειμένου να προσομοιωθεί η πλήρης συνεργασία που εξασφαλίστηκε στην πειραματική διαδικασία, δημιουργήθηκαν κοινοί κόμβοι στις διεπιφάνειες των δύο υλικών, οι οποίοι συνεπάγονται κοινή μετακίνηση των αντίστοιχων στοιχείων. Ομοίως προσομοιώθηκαν οι διεπαφές των ενισχυτικών ελασμάτων με τον εξωτερικό κύλινδρο και εκείνες των αποστατών βάσης και κορυφής με τους δύο κυλίνδρους.

Η φόρτιση πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή μετακίνησης 0.05mm/s στο εξωτερικό σημείο του άκαμπτου συνδέσμου (rigid link), παραμένοντας οριζόντια καθ' όλη τη διάρκειά της, ανεξαρτήτως της παραμόρφωσης του φορέα. Λήφθηκε ακόμα υπόψη το ίδιο βάρος του φορέα με πυκνότητα χάλυβα 7850kg/m³ και πυκνότητα κονιάματος 2500kg/m³, ενώ η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και πάλι με εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson, χρήση του ενεργειακού κριτηρίου σύγκλισης και θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων.



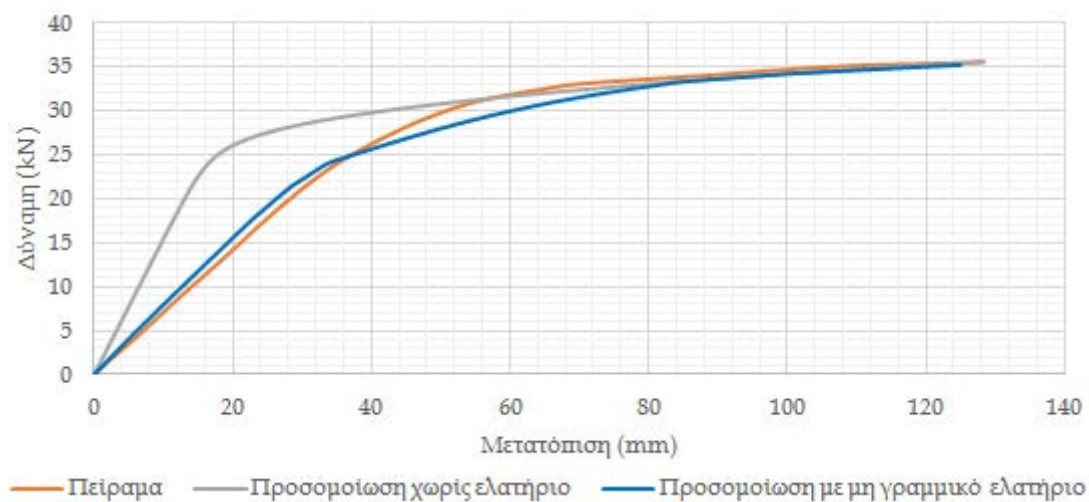
Σχήμα 3.3: Προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου διατομής μορφής «sandwich»

Figure 3.3: Finite element model of the “sandwich”-type specimen

3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης

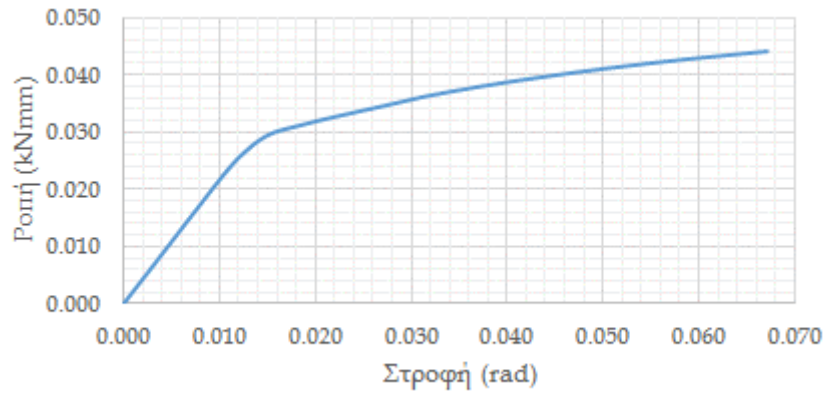
Η πειραματική δοκιμή ολοκληρώθηκε μόλις επήλθε αστοχία του δοκιμίου, η οποία εκδηλώθηκε με τη μορφή τοπικής σύνθλιψης και καμπύλωσης στην περιοχή επαφής του εξωτερικού χαλύβδινου κελύφους με το εντονότερα θλιβόμενο ενισχυτικό έλασμα, κατά τη στιγμή που η δύναμη και η μετακίνηση του εμβόλου ήταν 35.52kN και 128mm, αντίστοιχα. Η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα κατά το πέρας της πειραματικής δοκιμής, καθώς και της αριθμητικής επίλυσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2, ενώ στην Εικόνα 3.3 γίνεται εμφανέστερη η τοπική αστοχία, με την ίδια ακριβώς μορφή και στις δύο περιπτώσεις. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται η συμπεριφορά του φορέα μέσω του διαγράμματος δύναμης - μετακίνησης του εμβόλου, σε σύγκριση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της αριθμητικής προσομοίωσης (καμπύλη πειράματος, καμπύλη προσομοίωσης χωρίς ελατήριο). Ομοίως με την περίπτωση του αμιγώς χαλύβδινου φορέα, η καμπύλη της πειραματικής δοκιμής εκφράζει σημαντικά χαμηλότερη δυσκαμψία σε σχέση με το αριθμητικό προσομοίωμα, με διαφορά που εδώ φθάνει το 100%, ενώ αντίθετα η τελική αντοχή ταυτίζεται στις δύο καμπύλες.

Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 2.3, η θεώρηση της σύνδεσης ως πλήρους πάκτωσης δεν αντιπροσωπεύει την ημιάκαμπτη φύση της, που επέτρεψε και σε αυτήν την περίπτωση τη στροφή της κατά τη φόρτιση. Με χρήση και πάλι του λογισμικού Steel Connections η σύνδεση προσομοιώθηκε με όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση. Το διάγραμμα ροπής - στροφής που προέκυψε από την προσομοίωση φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 2.3 για τον αμιγώς χαλύβδινο φορέα, η πλήρης πάκτωση της βάσης στην προσομοίωση αντικαταστάθηκε από μη γραμμικό ελατήριο, με το νόμο του Σχήματος 3.5, συνδεδεμένο με τους κόμβους που ανήκουν σε αυτήν μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links). Η νέα συμπεριφορά του φορέα παρουσιάζεται στο διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του Σχήματος 3.4 (καμπύλη προσομοίωσης με χρήση μη γραμμικού ελατηρίου), με εμφανή μείωση της απόκλισης από την πειραματική καμπύλη, σε αντιδιαστολή με την προηγούμενη προσομοίωση.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης (i) του εμβόλου της πειραματικής διάταξης, (ii) του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της προσομοίωσης, από το φορέα διατομής μορφής «sandwich»

Figure 3.4: Force - displacement curve (i) of test's hydraulic ram (ii) of simulation's loaded node, from the "sandwich"-type specimen

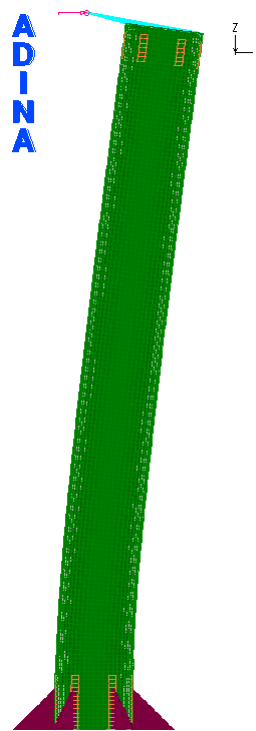


Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροπής - στροφής της ημιάκαμπτης σύνδεσης στη βάση του δοκιμίου διατομής μορφής «sandwich» από την προσομοίωση στο λογισμικό Steel Connections

Figure 3.5: Moment - rotation curve of the semi-rigid connection at the bottom of the “sandwich”-type specimen from the simulation in Steel Connections software



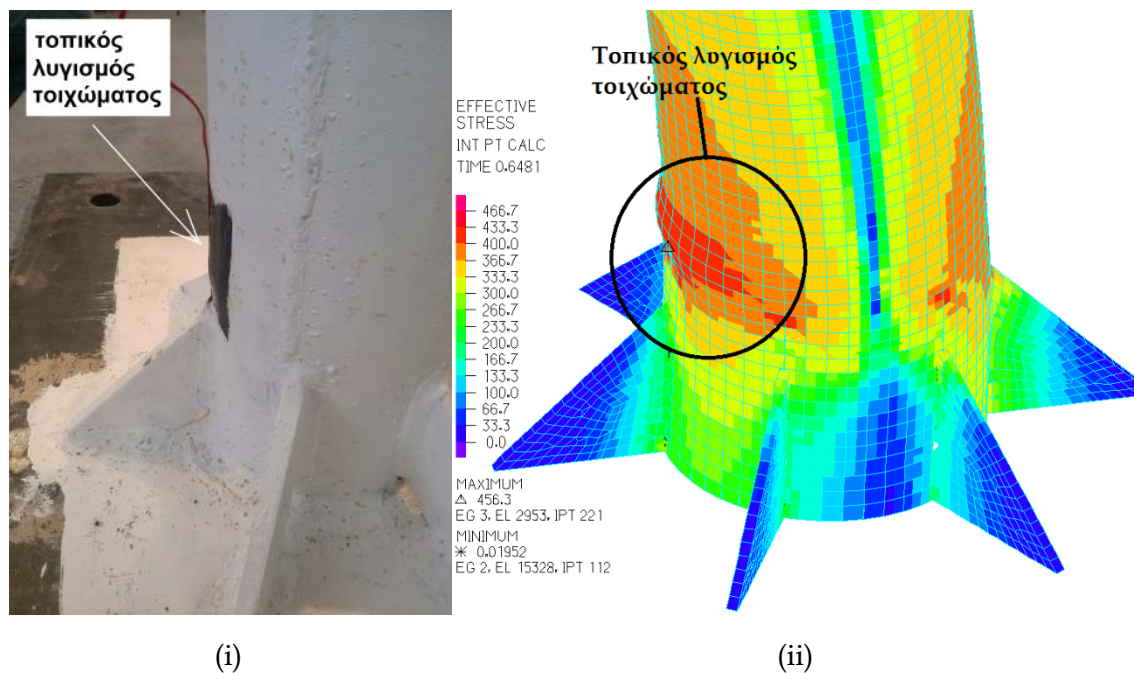
(i)



(ii)

Εικόνα 3.2: Παραμορφωμένος φορέας διατομής μορφής «sandwich» (i) κατά το πέρας του πειράματος, (ii) κατά το πέρας της προσομοίωσης

Photo 3.2: Deformed shape of “sandwich”-type specimen (i) at the end of testing, (ii) at the end of simulation



Εικόνα 3.3: Παραμορφωμένη κατάσταση με τοπικό λυγισμό κατώτερου τμήματος του φορέα διατομής «sandwich» (i) από την πειραματική διερεύνηση, (ii) από την προσομοίωση

Photo 3.3: Deformed shape with local buckling of the lower part of the steel-only specimen (i) from the test, (ii) from the simulation

4

Συμπεράσματα

Λεπτομερή προσομοιώματα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων μορφώθηκαν για δύο τύπους πυλώνων, έναν με αμιγώς χαλύβδινη κοίλη κυκλική διατομή, και έναν με κοίλη, σύμμικτη διατομή μορφής «sandwich». Για τη μόρφωση των προσομοιωμάτων και την επακόλουθη αριθμητική επίλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ADINA. Τα προσομοιώματα δημιουργήθηκαν έτσι ώστε να αποτυπώνουν με ακρίβεια τη γεωμετρία και τη μηχανική συμπεριφορά των πραγματικών δοκιμίων που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της Ενότητας Εργασίας 3 για τη διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών, με κατάλληλη επιλογή είδους πεπερασμένων στοιχείων για τα επιμέρους τμήματά τους, διακριτοποίησης, συνθηκών στήριξης και φόρτισης, καθώς και καταστατικών νόμων των υλικών.

Ο φορέας με αμιγώς χαλύβδινη διατομή, φορτιζόμενος έως ότου η σχετική μετακίνηση κορυφής (μετακίνηση διαιρεμένη με το ύψος) φτάσει το 12% περίπου, τόσο στο πείραμα όσο και κατά την προσομοίωση, παρουσίασε την αναμενόμενη συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από έντονη διαρροή του χάλυβα, η οποία ξεκινά από τη βάση του δοκιμίου, στις περιοχές μέγιστης θλίψης και μέγιστου εφελκυσμού και επεκτείνεται. Απρόβλεπτη αστοχία των συγκολλήσεων των νευρώσεων της εφελκυσόμενης πλευράς με την πλάκα έδρασης, που εκδηλώθηκε χρονικά περίπου στο μέσον της πειραματικής δοκιμής, ενσωματώθηκε εκ των υστέρων στην αριθμητική προσομοίωση με κατάλληλο τρόπο, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει ουσιαστικά είτε την πραγματική, είτε την προσομοιωμένη συμπεριφορά του φορέα. Οι καμπύλες ασκούμενης δύναμης και μετατόπισης κορυφής από το πείραμα και την αριθμητική επίλυση παρουσίασαν αρχικά σημαντική απόκλιση μεταξύ τους, κυρίως ως προς την αρχική δυσκαμψία του δοκιμίου, κάτι το οποίο οφείλεται σε αναπόφευκτη, μικρή στροφή της σύνδεσής του με την πλάκα έδρασης κατά την εκτέλεση του πειράματος και αντιμετωπίστηκε με αναθεώρηση του τρόπου σύνδεσης στη βάση του προσομοιώματος.

Το δοκίμιο σύμμικτης διατομής μορφής «sandwich» φορτίστηκε μέχρι την αστοχία του, η οποία εκδηλώθηκε, τόσο στην πειραματική δοκιμή όσο και στην αριθμητική προσομοίωση, με τη μορφή τοπικού λυγισμού του εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος στην περιοχή μέγιστης θλίψης, κοντά στη βάση, όταν η σχετική μετακίνηση κορυφής έφτασε το 9.5% περίπου. Σημαντική απόκλιση παρουσιάστηκε στην αρχική δυσκαμψία

του φορέα, η οποία όπως στην περίπτωση του αμιγώς χαλύβδινου φορέα περιορίστηκε δραστικά με την προσαρμογή της σύνδεσης στη βάση κατά την προσομοίωση, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να στραφεί ελεγχόμενα.

Συμπερασματικά, τα προσομοιώματα αποτύπωσαν κατά την αριθμητική επίλυση με επιτυχία την πραγματική εικόνα των δύο φορέων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της φόρτισης, τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά. Με διατήρηση της βασικής του δομής, όπως αυτή περιγράφηκε στα προηγούμενα, το προσομοίωμα διατομής τύπου «sandwich» θεωρείται συνεπώς κατάλληλο για περαιτέρω διερεύνηση πυλώνων αυτού του τύπου.

Αναφορές

- [1] ADINA R&D Inc., Theory and Modeling Guide – Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, 2006.
- [2] SOFiSTiK HELLAS A.E., Steel CONnections 2013.099, 2013.