



## 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.) 3

*Πειραματικές δοκιμές κελυφών τύπου sandwich*

### ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3.1:

*Τεχνική έκθεση πειραματικών δοκιμών κελυφών τύπου sandwich*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
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.)3

*Experimental tests of sandwich-type shells*

DELIVERABLE 3.1:

*Technical report of experimental tests of sandwich-type shells*

2015



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

Co-financed by Greece and the European Union





## Summary

---

Within the framework of an experimental investigation of “sandwich” type wind turbine towers, two cylindrical hollow specimens were constructed, one consisting of a typical, solid steel section and another incorporating a “sandwich” formed section, in order for a comparison to take place, in terms of structural behavior. Both geometries were selected according to the optimization procedure presented in the deliverable 5.1, with an equal outer diameter, the normalized resistance moment of both sections being of similar value, while stiffness differing slightly.

The section of the first specimen is a hot-rolled solid steel CHS140x7, while the section of the second is composed of an outer cold-formed steel CHS140x3 and an inner cold-formed steel CHS113x3, the “core” between them being filled with high strength, self-compacting concrete. The feasibility of unvibrated concreting of the narrow in-between space dictated the selection of such “core” material.

The experimental results confirmed the predicted behavior of the two specimens, proclaiming the “sandwich” concept as a more economical solution.

## Περιεχόμενα

---

1	Εισαγωγή .....	3
2	Περιγραφή διατομών δοκιμίων .....	5
3	Κατασκευή δοκιμίων .....	9
3.1	Προετοιμασία δοκιμίου με συμπαγή μεταλλική διατομή .....	9
3.2	Προετοιμασία δοκιμίου με σύμικτη διατομή «σάντουιτς» .....	10
4	Πειραματική διάταξη.....	13
5	Αποτελέσματα δοκιμών .....	16
6	Αναλυτική προσομοίωση .....	21
7	Προσεγγιστικά στοιχεία κόστους.....	24
8	Συμπεράσματα.....	25

# 1

## Εισαγωγή

---

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

### ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

**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 3**, με τίτλο:

*«Πειραματικές δοκιμές κελυφών τύπου sandwich»*

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 3**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

*«Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μορφής κελύφους τύπου sandwich για πολώνες ανεμογεννητριών θα αξιολογηθεί μέσω πειραματικών δοκιμών με χρήση κατάλληλων δοκιμών υπό κλίμακα, όπως αυτά θα έχουν προεπιλεγεί στην ΕΕ2. Οι στόχοι αυτών των δοκιμών θα είναι:*

- *Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης του υλικού του πυρήνα με τα χαλύβδινα ελάσματα.*
- *Η ποσοτικοποίηση της συμμετοχής στην απόσβεση της υστερητικής ενέργειας των εναλλακτικών ελαφροβαρών υλικών πυρήνα.*
- *Η πιστοποίηση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό των προτεινόμενων πολώνων ανεμογεννητριών.*

*Προβλέπονται πειραματικές δοκιμές σε μονοτονική και ανακλιζόμενη φόρτιση, προκειμένου να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων και του πυρήνα και να συγκριθεί η απόκριση εναλλακτικών λύσεων.».*

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου «σάντουιτς» κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια τύπου κατακόρυφου προβόλου υπό συγκεντρωμένη δύναμη στο ελεύθερο άκρο, με σκοπό τη σύγκριση της μηχανικής συμπεριφοράς στοιχείων διατομής τύπου «σάντουιτς» με ισοδύναμα στοιχεία συμπαγούς μεταλλικής διατομής. Η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δύο διατομών έγινε με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης βελτιστοποίησης του Παραδοτέου 5.1, έτσι ώστε οι δύο διατομές να έχουν την ίδια εξωτερική διάμετρο και περίπου τις ίδιες τιμές ανηγμένης ροπής αντοχής, χωρίς να διαφέρουν σημαντικά σε δυσκαμψία.

Το πρώτο δοκίμιο είναι συμπαγούς μεταλλικής διατομής κοιλοδοκού CHS140x7, διαμορφωμένης υπό θερμή έλαση, ενώ το δεύτερο δοκίμιο έχει σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς» αποτελούμενη από δύο κυκλικές κοιλοδοκούς διατομής CHS140x3 εξωτερικά και CHS113x3 εσωτερικά, διαμορφωμένες εν ψυχρώ, με το ενδιάμεσο τμήμα "πυρήνα" πληρωμένο με αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Η επιλογή του υλικού πλήρωσης έγινε με κριτήριο τη δυνατότητα σκυροδέτησης στο εσωτερικό των κοιλοδοκών χωρίς δόνηση.

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν και η πειραματική διαδικασία εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

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

Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων

Κυριάκος Κάρλος, Μηχανολόγος Μηχανικός

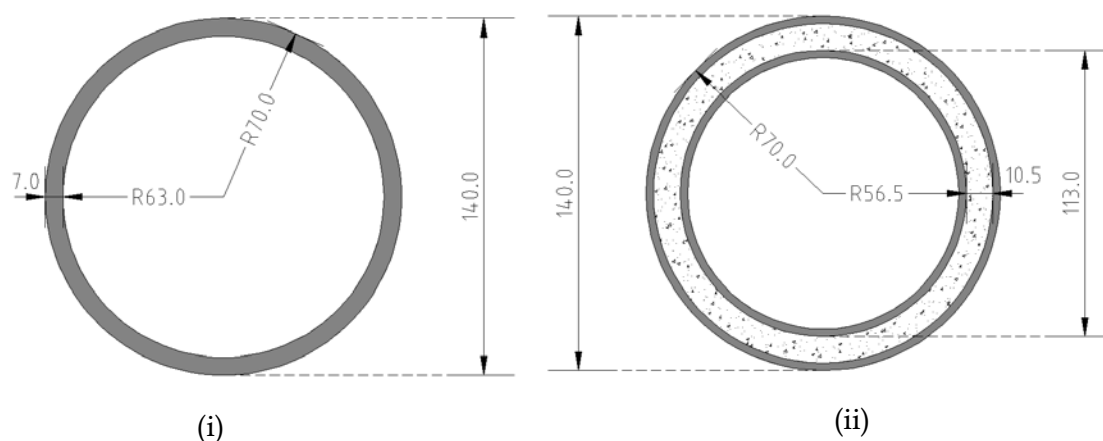
Dimitrios Lignos, Assistant Professor, McGill U., Canada



## Περιγραφή διατομών δοκιμών

Οι διατομές των δοκιμών που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. Η συμβατική χαλύβδινη διατομή (Σχήμα 2.1i) αποτελείται από κοιλοδοκό κυλινδρικής διατομής με εξωτερική διάμετρο  $D=140\text{mm}$  και πάχος τοιχώματος  $t=7\text{mm}$ . Η σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς» (Σχήμα 2.1ii) αποτελείται από δύο κοιλοδοκούς κυλινδρικής διατομής διατεταγμένες ομόκεντρα, με εξωτερικές διαμέτρους  $D_1=140\text{mm}$  και  $D_2=113\text{mm}$  και πάχος τοιχωμάτων  $t_1=t_2=3\text{mm}$ . Έτσι διαμορφώνεται πυρήνας κονιάματος με πάχος  $t_c=10.5\text{mm}$ .

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των δύο διατομών με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Η συμβατική διατομή του Σχήματος 2.1i αναφέρεται ως Διατομή 1 και η σύμμικτη διατομή «σάντουιτς» ως Διατομή 2.



**Σχήμα 2.1:** (i) Συμπαγής μεταλλική διατομή CHS140x7 (Διατομή 1), (ii) Σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς» CHS140x3 - CHS113x3 (Διατομή 2) με πυρήνα από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (οι διαστάσεις σε mm)

**Figure 2.1:** (i) Homogeneous steel section CHS140x7 (Section 1) και (ii) composite “sandwich-type” section CHS140x3 - CHS113x3 (Section 2) with a self-compacting concrete core (dimensions in mm)

**Πίνακας 2.1** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών

**Table 2.1** Geometric characteristics of cross-sections

Διατομή	Εξωτερική Διάμετρος κοιλοδοκού (ών) D (mm)	Πάχος τοιχώματος t (mm)	Πάχος πυρήνα t <sub>c</sub> (mm)	Εμβαδόν A (mm <sup>2</sup> )	Δυσκαμψία EI (kNm <sup>2</sup> )
Διατομή 1	140	7	-	A <sub>a</sub> = 2923	1361
Διατομή 2	140 - 113	3 - 3	10.5	A <sub>a1</sub> + A <sub>a2</sub> =2327 A <sub>c</sub> = 4072	1149

Η δυσκαμψία των διατομών υπολογίζεται ως  $E_a I_a$  για τη συμπαγή μεταλλική διατομή και ως  $(EI)_{eff} = E_a I_{a1} + E_a I_{a2} + K_e E_{cm} I_c$  για τη σύμμικτη διατομή, όπου στις παραπάνω σχέσεις  $E_a$  και  $E_{cm}$  είναι τα μέτρα ελαστικότητας του χάλυβα και του σκυροδέματος του πυρήνα,  $I_a$  είναι η ροπή αδράνειας συμπαγούς μεταλλικής διατομής,  $I_{a1}$  η ροπή αδράνειας εξωτερικής μεταλλικής διατομής,  $I_{a2}$  η ροπή αδράνειας εσωτερικής μεταλλικής διατομής και  $I_c$  είναι η ροπή αδράνειας πυρήνα. Ο συντελεστής  $K_e$  για τον υπολογισμό της ενεργού δυσκαμψίας του πυρήνα λαμβάνεται ίσος με 0.6, ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή της ρηγμάτωσης. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα λαμβάνεται ίσο με 210GPa και του σκυροδέματος 39.1GPa, βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων δοκιμών επί των υλικών και της προσεγγιστικής σχέσης του Model Code 2010:

$$E_c = \left( 0.8 + 0.2 \frac{f_{cm}}{88} \right) 21500 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad (\text{σε MPa}) \quad (1.1)$$

όπου  $f_{cm}$  η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, ίση με 68.7MPa (βλ. παρακάτω).

Για τον υπολογισμό της ποιότητας των υλικών έγιναν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια χάλυβα των κοιλοδοκών (Εικόνα 2.1i) και κάμψης/θλίψης σε πρισματικά δοκίμια (μήκος ανοίγματος 160mm, πλάτος = ύψος διατομής = 40mm) του πυρήνα (Εικόνα 2.1ii,iii), σύμφωνα με το Πρότυπο EN 1015-11. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2 για το χάλυβα και στον Πίνακα 2.3 για το σκυρόδεμα του πυρήνα, ενώ τυπικές καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για το χάλυβα δίνονται στο Σχήμα 2.2.

Εκ των αποτελεσμάτων για τα χαρακτηριστικά του χάλυβα συνάγεται ότι οι χάλυβες στα δύο δοκίμια δεν είναι συγκρίσιμοι, κάτι που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη σύγκριση της απόκρισης των δοκιμίων, δεδομένου ότι ο αρχικός σχεδιασμός αυτών έγινε έτσι ώστε οι διατομές τους να έχουν περίπου την ίδια ροπή αντοχής, υπό την προϋπόθεση όμως της ίδιας αντοχής χάλυβα και στα δύο δοκίμια. Όπως καταδεικνύεται εύκολα παρακάτω, αυτό μπορεί να γίνει εύκολα μελετώντας τιμές «ανηγμένης» αντοχής.

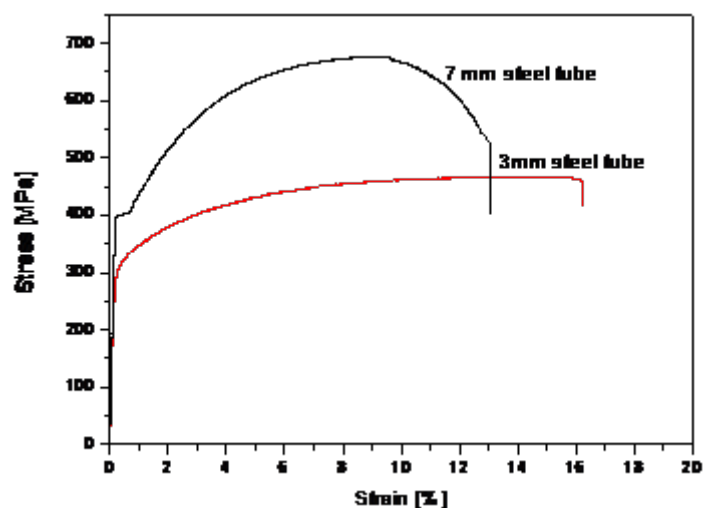


(i)



**Εικόνα 2.1:** (i) Δοκίμια χάλυβα μετά το πέρας δοκιμών εφελκυσμού, (ii) Δοκιμές κάμψης και θλίψης σκυροδέματος πυρήνα

**Photo 2.1:** (i) Steel specimens after the completion of tension tests, (ii) Bending and compression tests of the concrete of the core



**Σχήμα 2.2:** Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών χάλυβα

**Figure 2.2:** Stress-strain curves of steel specimens

**Πίνακας 2.2** Ιδιότητες χάλυβα

**Table 2.2** Steel properties

Δοκίμιο χάλυβα	Διαστάσεις Διατομής (mm x mm)	Αντοχή (MPa)	Τάση Διαρροής (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)
Διατομή 1	7.2 x 24.2	675	398	13	209
Διατομή 2	3.3 x 37.8	467	313 ( $f_{0.2}$ )	16	210

**Πίνακας 2.3** Εφελκυστική αντοχή από δοκιμή κάμψης τριών σημείων και θλιπτική αντοχή κονιάματος

**Table 2.3** Tensile strength from 3-point bending test and compressive strength of concrete mortar

Δοκίμιο	Θλιπτική αντοχή $f_c$ (MPa)	Μέση θλιπτική αντοχή $f_{cm}$ (MPa)	Εφελκυστική αντοχή από κάμψη $f_t$ (MPa)	Μέση εφελκυστική αντοχή $f_{ctm,fl}$ (MPa)
1a	65.0	68.7	6.0	6.7
1b	65.8			
2a	71.9		6.9	
2b	73.1			
3a	66.6		7.2	
3b	69.7			

## Κατασκευή δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων περιελάμβανε τη δημιουργία δύο κατακόρυφων προβόλων καθαρού ύψους  $H=1300\text{mm}$ , οι οποίοι συγκολλήθηκαν σε πλάκα έδρασης διαστάσεων  $400\text{mm} \times 750\text{mm}$  και πάχους  $20\text{mm}$ . Στη βάση των προβόλων συγκολλήθηκαν ακτινωτά έξι ενισχυτικά ελάσματα πάχους  $5\text{mm}$  για την καλύτερη πάκτωση του μέλους, αλλά και για να αποφευχθεί τυχόν πρόωρη αστοχία της συγκόλλησης στην πλάκα έδρασης. Η συγκόλληση των κοιλοδοκών είναι εσωραφή μερικής διείσδυσης με πρόσθετη εξωραφή πάχους  $a=8\text{mm}$ , ενώ οι συγκολλήσεις των ελασμάτων ενίσχυσης θεωρούνται εξωραφές με πάχος  $a=5\text{mm}$ .

### 3.1 Προετοιμασία δοκιμίου με συμπαγή μεταλλική διατομή

Αρχικά έγινε προετοιμασία των άκρων της κοιλοδοκού για συγκόλληση. Το κάτω άκρο συγκολλήθηκε στην πλάκα έδρασης (Εικόνα 3.1), ενώ στο πάνω έγινε συγκόλληση μεταλλικής πλάκας με σκοπό την επιβολή οριζόντιου φορτίου. Η κοπή στις διατομές των άκρων έγινε υπό γωνία  $30^\circ$ , από εξειδικευμένο τεχνίτη του Εργαστηρίου Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

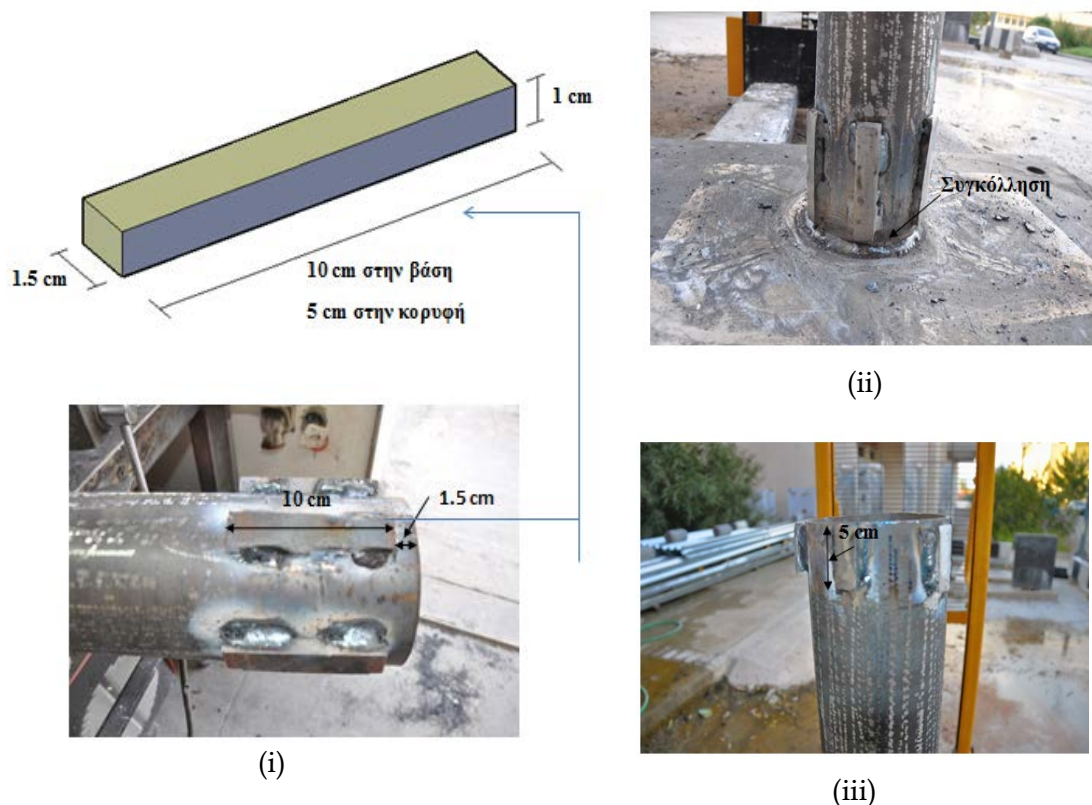


**Εικόνα 3.1:** Διαδικασία συγκόλλησης της κοιλοδοκού στην πλάκα έδρασης

**Photo 3.1:** Process of welding of specimen on base plate

### 3.2 Προετοιμασία δοκιμίου με σύμμικτη διατομή «σάντουιτς»

Αρχικά έγινε η διαμόρφωση των δύο φλοιών (εξωτερικού και εσωτερικού) μέσω καμπύλωσης («κουρμπάρισμα») και συγκόλλησης στα άκρα επίπεδων ελασμάτων μήκους 1300mm και πάχους 3mm. Η εξασφάλιση κενού σταθερού πάχους μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής κοιλοδοκού έγινε μέσω συγκόλλησης μεταλλικών αποστατών κοντά στις διατομές βάσης και κορυφής (Εικόνα 3.2).



**Εικόνα 3.2:** Συγκόλληση μεταλλικών αποστατών: (i) Λεπτομέρεια, (ii) στην πλάκα έδρασης, (iii) στην κορυφή

**Photo 3.2:** Welding of steel spacers: (i) detail, (ii) on the base plate, (iii) at the top

Η εξασφάλιση καλής συνεργασίας χάλυβα-σκυροδέματος με σκοπό την πλήρη διατμητική σύνδεση (και άρα τη μηδενική ολίσθηση) επετεύχθη λαμβάνοντας μια σειρά από μέτρα, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω. Η παρακάτω αλληλουχία εργασιών καταδεικνύει και τον τρόπο κατασκευής του δοκιμίου σύμμικτης διατομής:

- Σχολαστικός καθαρισμός και εκτράχυνση της εξωτερικής επιφάνειας της εσωτερικής κοιλοδοκού με τροχό.
- Καθαρισμός της εσωτερικής επιφάνειας της εξωτερικής κοιλοδοκού με ειδικό διάλυμα καθαρισμού.
- Συγκόλληση της εσωτερικής κοιλοδοκού στην πλάκα έδρασης (Εικόνα 3.3i), τοποθέτηση της εξωτερικής κοιλοδοκού (Εικόνα 3.3i) και συγκόλληση της εξωτερικής κοιλοδοκού στην πλάκα έδρασης (Εικόνα 3.3ii).

- ο Συγκόλληση των δύο κοιλοδοκών μεταξύ τους στην άνω διατομή, κάνοντας χρήση έξι ελασμάτων (Εικόνα 3.3iii).
- ο Πλήρωση του κενού μεταξύ των δύο κοιλοδοκών με ειδικό αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα υψηλής ρευστότητας αλλά και υψηλής αντοχής, κάνοντας έγχυσή του εκ των άνω προς τα κάτω, χωρίς δόνηση (Εικόνα 3.3iv).



(i)



(ii)



(iii)



(iv)

**Εικόνα 3.3:** (i) Συγκόλληση της εσωτερικής κοιλοδοκού στην έδραση και τοποθέτηση της εξωτερικής κοιλοδοκού, (ii) Συγκόλληση της εξωτερικής κοιλοδοκού στην πλάκα έδρασης, (iii) Συγκόλληση των δύο κοιλοδοκών στο άνω άκρο, (iv) Πλήρωση με σκυρόδεμα

**Photo 3.3:** (i) Welding of interior tube on base plate and placement of exterior tube, (ii) Welding of exterior tube on base plate, (iii) Welding of both tubes at the top, (iv) Filling with concrete

Η παρασκευή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος έγινε βάσει ειδικής σύνθεσης, η οποία προέκυψε ως αποτέλεσμα διαδοχικών δοκιμών, ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες ιδιότητες ρευστότητας και αντοχής. Οι αναλογίες του μίγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, ενώ ενδεικτικές φωτογραφίες μέτρησης των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος δίνονται στην Εικόνα 3.4.

**Πίνακας 3.1** Σύνθεση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (σε kg ανά m<sup>3</sup>)

**Table 3.1** Composition of self-compacting concrete (in kg per m<sup>3</sup>)

Τσιμέντο	Χαλαζιακή άμμος	Πυριτική παυιάλη	Ασβεστολιθική παυιάλη	Ρευστοποιητής	Ποσότητα νερού από λόγο N/T	Συνολική ποσότητα νερού
692	1205	55	172	15	214	235



(i)

(ii)

(iii)

(iv)

**Εικόνα 3.4:** (i) Χαλαζιακή άμμος μέγιστου κόκκου 2mm ως αδρανές υλικό του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, (ii) Ανάμιξη συστατικών, (iii) Δοκιμή εξάπλωσης (mini slump flow), (iv) Δοκιμή mini V-funnel

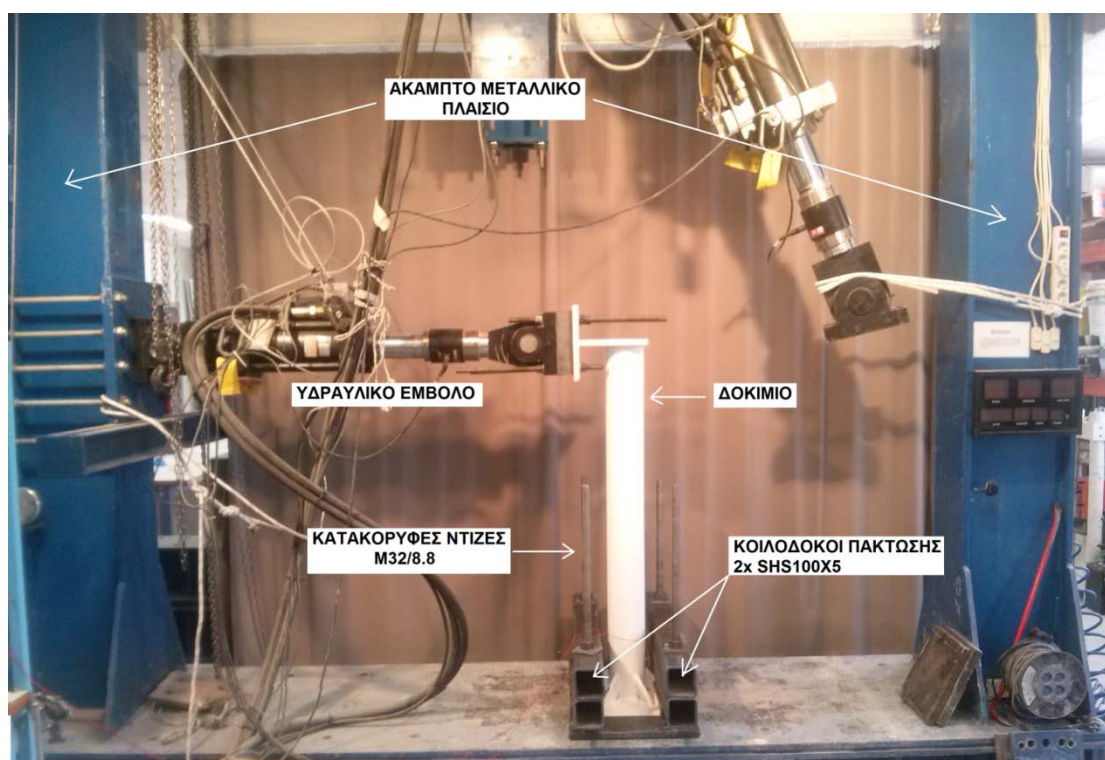
**Photo 3.4:** (i) Quartz sand with maximum grain size equal to 2mm as an aggregate of self-compacting concrete, (ii) Mixing of ingredients, (iii) Spreading test (mini slump flow), (iv) Mini V-funnel test



# 4

## Πειραματική διάταξη

Κάθε δοκίμιο φορτίστηκε ως κατακόρυφος πρόβολος με συγκεντρωμένη δύναμη η οποία επιβάλλονταν μονοτονικά μέσω υδραυλικού εμβόλου δυναμικότητας 500kN στο άνω άκρο (Εικόνα 4.1 και Σχήμα 4.1). Η σύνδεση με το έμβολο έγινε με την βοήθεια δύο πλακών πάχους 20mm και διαστάσεων 200mm x 250mm, συγκολλημένων σε σχήμα οριζώντιου "ταυ". Η κατακόρυφη πλάκα έφερε τέσσερις οπές Φ18 για τη σύνδεση με το έμβολο μέσω ντιζών.

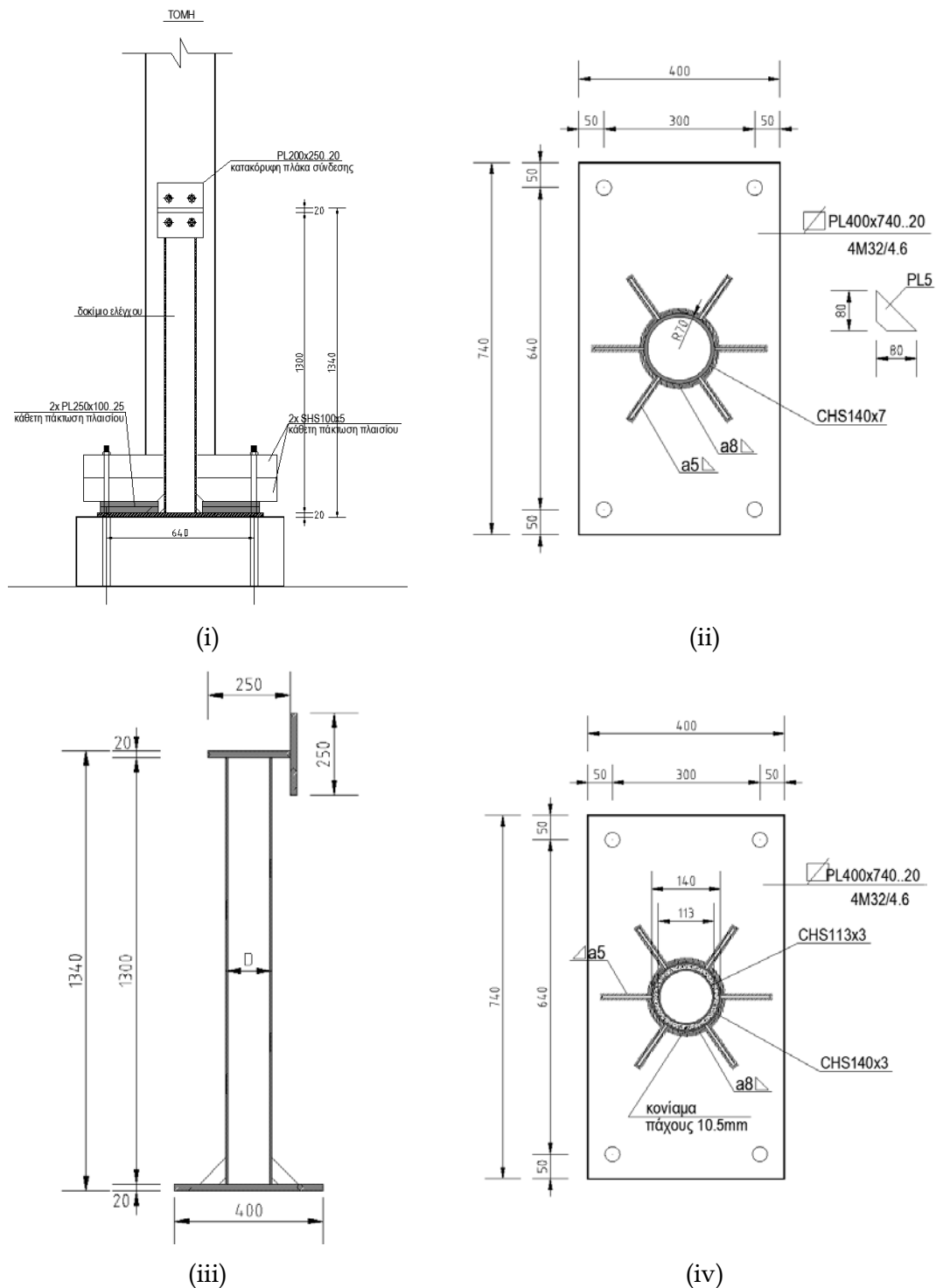


Εικόνα 4.1: Πειραματική διάταξη

Photo 4.1: Testing set-up

Η σύνδεση της πλάκας έδρασης με την οριζόντια βάση του άκαμπτου πλαισίου δοκιμών έγινε με την τοποθέτηση δύο ζευγών τετραγωνικών κοιλοδοκών SHS100x5

μεταξύ της πλάκας έδρασης και βοηθητικών πλακών πάχους 20 mm (Σχήμα 4.1i), οι οποίες βιδώνονταν στο άκαμπτο πλαίσιο με ντίζες M32 ποιότητας 8.8.



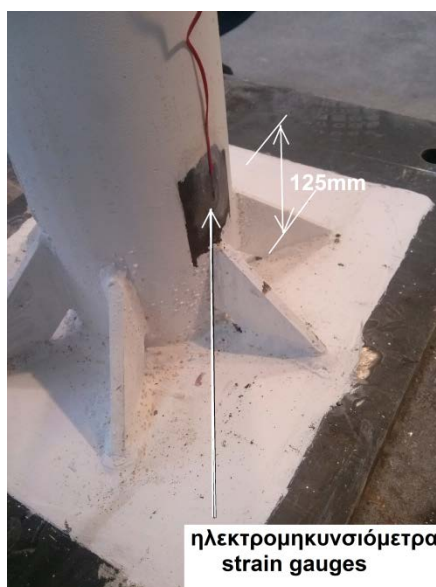
**Σχήμα 4.1:** (i) Τομή πειραματικής διάταξης, (ii) Σύνδεση έδρασης δοκιμίου Διατομής 1, (iii) Γεωμετρία δοκιμίων, (iv) Σύνδεση έδρασης δοκιμίου Διατομής 2

**Figure 4.1:** (i) Section of testing set-up, (ii) Base connection of specimen with section 1, (iii) Specimen geometry, (iv) Base connection of specimen with section 2

Για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του χάλυβα τοποθετήθηκαν κατά τη φάση κατασκευής των δοκιμίων ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (Εικόνα 4.2i) ως εξής: ένα στην ακραία εφελκόμενη ίνα του δοκιμίου Διατομής 1 και ένα ζεύγος στην εφελκόμενη και θλιβόμενη ίνα του δοκιμίου Διατομής 2, σε απόσταση 125mm από την πλάκα έδρασης (Εικόνα 4.2ii). Έτσι, η διατομή όπου τοποθετήθηκαν ηλεκτρομηκυσσιόμετρα απέχει  $1300\text{mm}-125\text{mm}+(20\text{mm}/2)=1185\text{mm}$  από τη θεωρητική στάθμη εφαρμογής της δύναμης στο άνω άκρο. Τέλος, ο ρυθμός φόρτισης που επιβλήθηκε ήταν σταθερός και ίσος με  $0.05\text{mm}$  ανά δευτερόλεπτο.



(i)



(ii)

**Εικόνα 4.2:** (i) Εφαρμογή ηλεκτρομηκυσσιόμετρου, (ii) Θέση μηχανομετρου σε σχέση με την πλάκα έδρασης

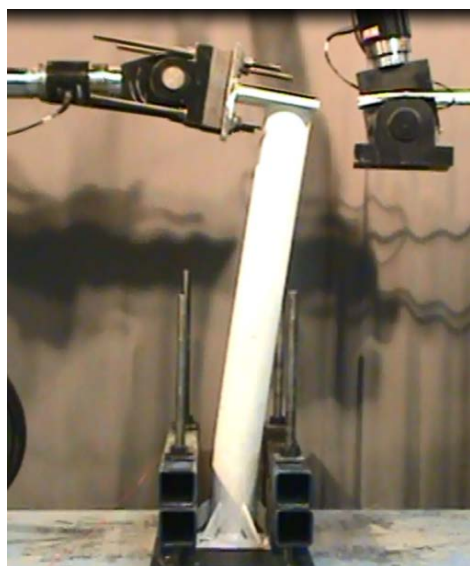
**Photo 4.2:** (i) Placement of strain gauge, (ii) Position of strain gauge with respect to base plate

## Αποτελέσματα δοκιμών

---

Η γενική κατάσταση των παραμορφωμένων δοκιμών στο τέλος της φόρτισης φαίνεται στις Εικόνες 5.1i,ii, ενώ λεπτομέρειες με τις σημαντικότερες μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στο τελικό στάδιο της φόρτισης δίνονται στις Εικόνες 5.2i,ii.

Το δοκίμιο συμπαγούς χαλύβδινης διατομής φορτίσθηκε έως ότου η σχετική μετατόπιση (οριζόντια μετατόπιση διαιρεμένη με το μήκος του προβόλου) έφτασε περίπου το 12%, με αντίστοιχη δύναμη 49.47kN. Σε φορτίο 35.56kN και αντίστοιχη σχετική μετατόπιση 2.9% αστόχησαν - μετά από έντονη διαρροή του χάλυβα στις περιοχές υψηλής ροπής - οι ραφές συγκόλλησης των ενισχυτικών ελασμάτων της εφελκυόμενης περιοχής (Σχήμα 5.2i).



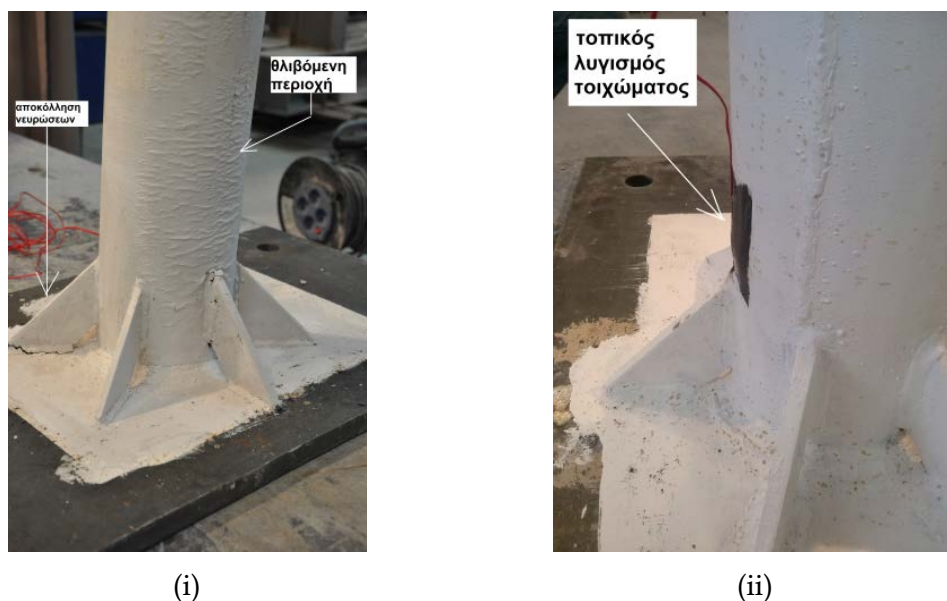
(i)



(ii)

**Εικόνα 5.1:** Παραμορφωμένα δοκίμια: (i) Μεταλλική Διατομή 1, (ii) Σύμμικτη Διατομή 2

**Photo 5.1:** Deformed specimens: (i) Steel section 1, (ii) Composite section 2



**Εικόνα 5.2:** (i) Αστοχία συγκόλλησης στην εφελκυόμενη περιοχή της έδρασης (δοκίμιο συμπαγούς μεταλλικής διατομής), (ii) Τοπικός λυγισμός του τοιχώματος στη θλιβόμενη περιοχή (δοκίμιο σύμμικτης διατομής)

**Photo 5.2:** (i) Welding failure at the tension area of the base support (homogeneous steel section specimen), (ii) Local buckling of shell wall at the compression area (composite section specimen)

Το δοκίμιο σύμμικτης διατομής φορτίσθηκε μέχρι σχετική μετατόπιση 9.5%, που αντιστοιχεί σε μέγιστο 35.52kN. Η αστοχία στη διατομή εκδηλώθηκε με τη μορφή τοπικής σύνθλιψης και καμπύλωσης στην περιοχή επαφής της εξωτερικής κοιλοδοκού με το εντονότερα θλιβόμενο έλασμα ενίσχυσης (Εικόνα 5.2ii), λόγω συγκεντρωμένων εγκάρσιων θλιπτικών τάσεων που εισάγονται απευθείας στην κοιλοδοκό μέσω του ελάσματος. Μετά το πέρας της δοκιμής έγινε κοπή και αφαίρεση τμήματος της εξωτερικής κοιλοδοκού κοντά στη βάση του δοκιμίου, στην εφελκυόμενη περιοχή (Εικόνα 5.3), με σκοπό τον οπτικό έλεγχο συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος. Η δυσκολία αποκόλλησης του χάλυβα από το σκυροδέμα κατέδειξε ότι η σύνδεση χάλυβα - σκυροδέματος ήταν «καλή».



**Εικόνα 5.3:** Αφαίρεση τμήματος της εξωτερικής κοιλοδοκού

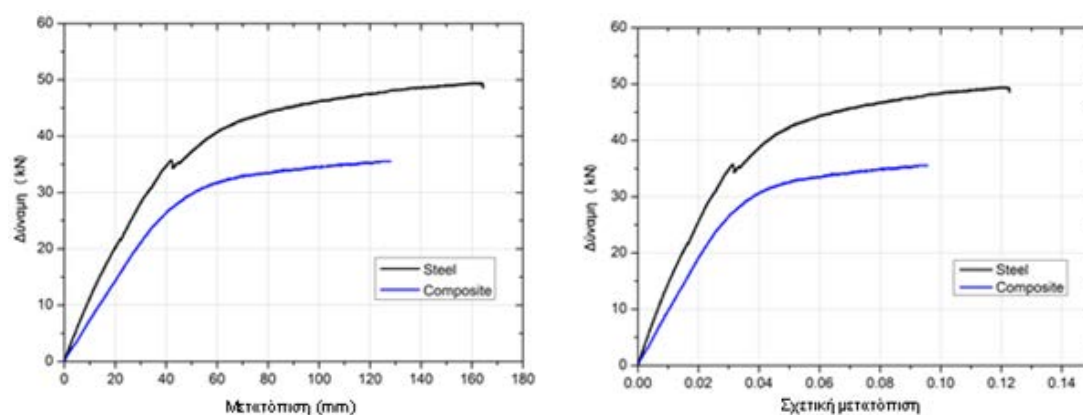
**Photo 5.3:** Removal of part of the exterior tube

Οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης στο ελεύθερο άκρο του προβόλου και δύναμης - σχετικής μετατόπισης δίνονται στα Σχήματα 5.1i,ii. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι σε μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις (περίπου πάνω από 5%) η δύναμη του εμβόλου αποκλίνει από την οριζόντια θέση, ενώ και ο μοχλοβραχίονας της δύναμης αυτής μεταβάλλεται, ως αποτέλεσμα της ύπαρξης αρθρώσεων τόσο στη βάση του εμβόλου όσο και κοντά στη σύνδεσή του με τη μεταλλική διάταξη («ταυ») που μεταφέρει τη δύναμη στο δοκίμιο. Για το σκοπό αυτό η δύναμη που υπολογίζεται (στον κατακόρυφο άξονα) είναι στην πραγματικότητα η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης του εμβόλου, ενώ για τον υπολογισμό της ροπής (στα παρακάτω) γίνεται χρήση του διορθωμένου μοχλοβραχίονα της δύναμης.

Δεδομένου ότι οι χάλυβες των δύο δοκιμών ήταν σημαντικά διαφορετικής τάσης διαρροής και αντοχής, στη συνέχεια η απόκριση των δοκιμών δίνεται βάσει αδιάστατων μεγεθών. Έτσι η δύναμη  $F$  διαιρείται με το γινόμενο  $R^2 f_y$  και η μετατόπιση  $\Delta$  με το  $R$ , όπου  $R$  η μέση ακτίνα της κάθε διατομής (ιση με 66.5mm για τη συμπαγή μεταλλική διατομή και 61.75mm για τη σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς») και  $f_y$  η τάση διαρροής:

$$f = \frac{F}{R^2 f_y} \quad (4.1)$$

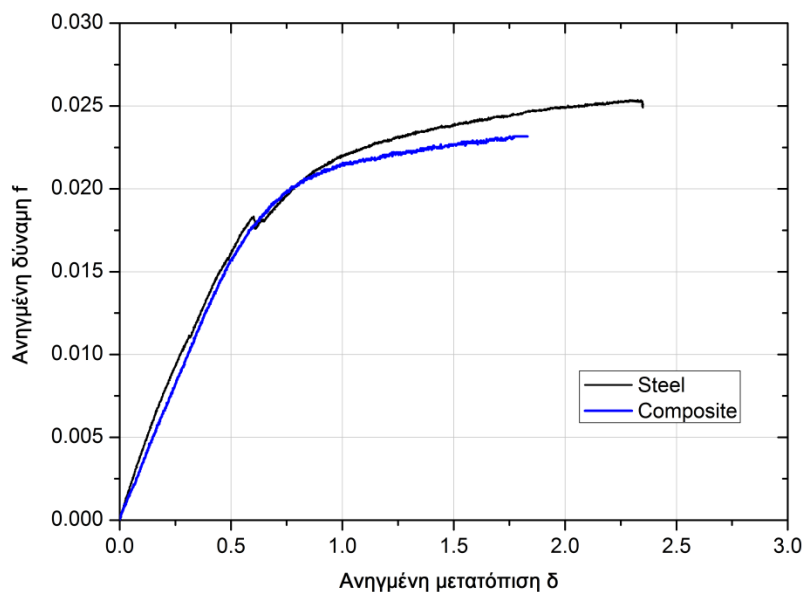
$$\delta = \frac{\Delta}{R} \quad (4.2)$$



**Σχήμα 5.1:** (i) Καμπύλες δύναμης - μετατόπισης, (ii) Καμπύλες δύναμης - σχετικής μετατόπισης

**Figure 5.1:** (i) Force - displacement curves, (ii) Force - relative displacement curves

Τα σχετικά αποτελέσματα σε όρους ανηγμένων μεγεθών δίνονται στο Σχήμα 5.2, το οποίο καταδεικνύει τη σχεδόν ταυτόσημη απόκριση των δύο δοκιμών σε όρους τόσο δυσκαμψίας όσο και αντοχής, σύμφωνα με την αρχική απαίτηση της διαστασιολόγησής τους.



**Σχήμα 5.2:** Διαγράμματα ανηγμένης δύναμης - ανηγμένης μετατόπισης

**Figure 5.2:** Relative force - relative displacement curves

Με βάση τις μετρούμενες παραμορφώσεις στη διατομή τοποθέτησης των μηκυνσιομέτρων μπορεί να εξαχθεί η καμπυλότητα "φ" της συγκεκριμένης διατομής από τη σχέση:

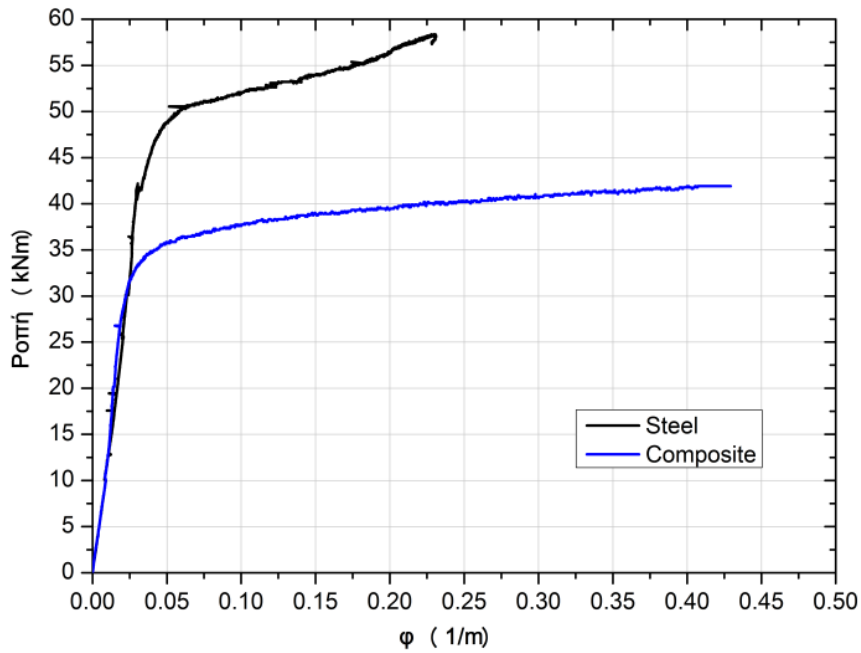
$$\varphi = \frac{\varepsilon_t}{x_t} \quad (4.3)$$

όπου  $\varepsilon_t$  η μετρηθείσα παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα και  $x_t$  η απόσταση της ακραίας εφελκόμενης ίνας από τον ουδέτερο άξονα. Στην περίπτωση της συμπαγούς χαλύβδινης διατομής η θέση του ουδέτερου άξονα είναι στο κέντρο βάρους της διατομής, ενώ στην περίπτωση της σύμμικτης διατομής ο ουδέτερος άξονας αλλάζει θέση, αναλόγως του ύψους της ρηγματωμένης περιοχής. Επίσης, με δεδομένο τον (διορθωμένο για μεγάλες μετατοπίσεις, όπως εξηγείται παραπάνω) μοχλοβραχίονα  $H_1$  της δύναμης ως προς τη στάθμη υπολογισμού της καμπυλότητας (διατομή τοποθέτησης των μηκυνσιομέτρων), υπολογίζεται η ροπή στη συγκεκριμένη διατομή, οπότε καθίσταται εφικτός ο προσδιορισμός της σχέσης ροπής - καμπυλότητας (Σχήμα 5.3i) αλλά και, για ευκολότερη σύγκριση, και της ανηγμένης ροπής - καμπυλότητας (Σχήμα 5.3ii).

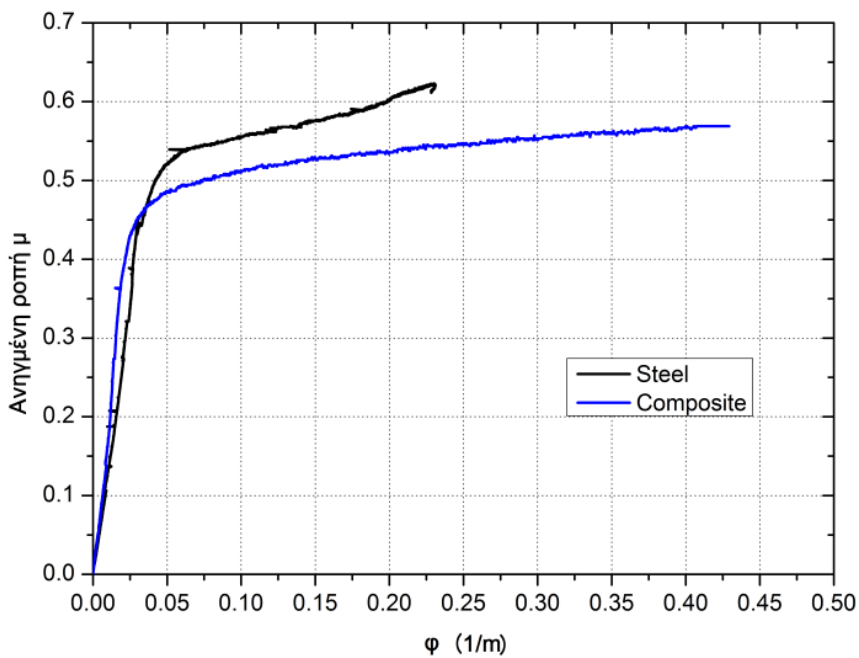
Η ανηγμένη ροπή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{FH_1}{R^3 f_y} \quad (4.4)$$

και στην αστοχία ( $\mu_R$ ) είναι ίση με 0.49 για το δοκίμιο Διατομής 1 και 0.57 για το δοκίμιο Διατομής 2.



(i)



(ii)

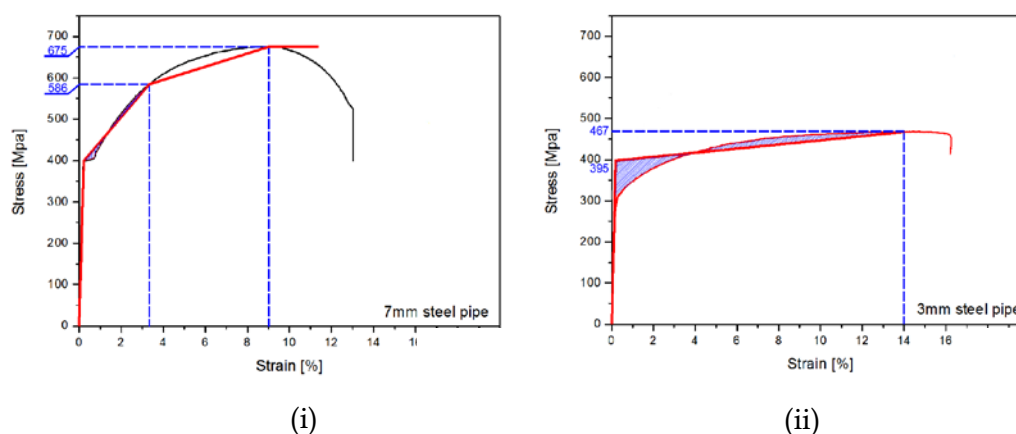
**Σχήμα 5.3:** Πειραματικές σχέσεις (i) ροπής - καμπυλότητας και (ii) ανηγμένης ροπής - καμπυλότητας στη στάθμη τοποθέτησης των ηλεκτρομηκονοσιόμετρων

**Figure 5.3:** Experimental curves: (i) Moment - curvature, (ii) relative moment - curvature, at the level of placement of strain gages



## Αναλυτική προσομοίωση

Στην ενότητα αυτή υπολογίζονται οι τιμές της ροπής αντοχής  $M_R$  και της ανηγμένης ροπής  $m_R$  σύμφωνα με υπολογισμούς ανάλυσης διατομής βάσει προσομοιώματος ινών (fiber model) και καταστατικούς νόμους υλικών σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως δίνονται στο Σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1:** Αναλυτική προσομοίωση πειραματικών δεδομένων για το χάλυβα (i) της συμπαγούς μεταλλικής διατομής και (ii) της σύμμικτης διατομής «σάντουιτς»

**Figure 6.1:** Analytical approximation of the steel of (i) the homogeneous steel section, (ii) the composite sandwich-type section

Οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για το χάλυβα ορίζονται ως εξής: Για το χάλυβα του δοκιμίου Διατομής 1, ο οποίος έχει σαφώς καθορισμένη τάση διαρροής (Σχήμα 6.1i), ο αρχικός ελαστικός κλάδος μέχρι την τάση διαρροής ακολουθείται από ένα δεύτερο κλάδο, ο οποίος τέμνει την πειραματική καμπύλη σε σημείο τέτοιο (όπου η τάση είναι 586MPa), ώστε να σχηματίζονται μεταξύ αναλυτικού ευθύγραμμου κλάδου και πειραματικής καμπύλης ίσα εμβαδά. Στη συνέχεια, το σημείο που αντιστοιχεί στο τέλος του δεύτερου κλάδου (τάση 586MPa) συνδέεται με το σημείο μέγιστης τάσης (αντοχής).

Για το χάλυβα του δοκιμίου Διατομής 2, ο οποίος όμως δεν έχει σαφώς καθορισμένη τάση διαρροής, ο αρχικός ελαστικός κλάδος επεκτείνεται έως το σημείο εκείνο, το οποίο συνδεόμενο ευθύγραμμο με τη μέγιστη τάση (αντοχή) δημιουργεί ένα δεύτερο κλάδο, έτσι ώστε και πάλι να σχηματίζονται ίσα εμβαδά μεταξύ του κλάδου αυτού και της πειραματικής καμπύλης (Σχήμα 6.1ii).

Με τον τρόπο αυτό η αναλυτική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για το χάλυβα Διατομής 1 είναι τριγραμμική, ενώ η αντίστοιχη για το χάλυβα Διατομής 2 είναι διγραμμική. Τα δεδομένα για την προσομοίωση του χάλυβα συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1.

**Πίνακας 6.1** Δεδομένα για το χάλυβα

**Table 6.1** Data for steel

Διατομή	Μέτρο ελαστικότητας $E_a$ (GPa)	Τάση διαρροής $f_y$ (MPa)	Παραμόρφωση στη διαρροή $\epsilon_{sy}$ (%)	Τάση αστοχίας $f_u$ (MPa)	Οριακή παραμόρφωση $\epsilon_{su}$ (%)
Μεταλλική	210	400	0.190	675	9.0
Σύμμικτη	210	395	0.188	467	14.0

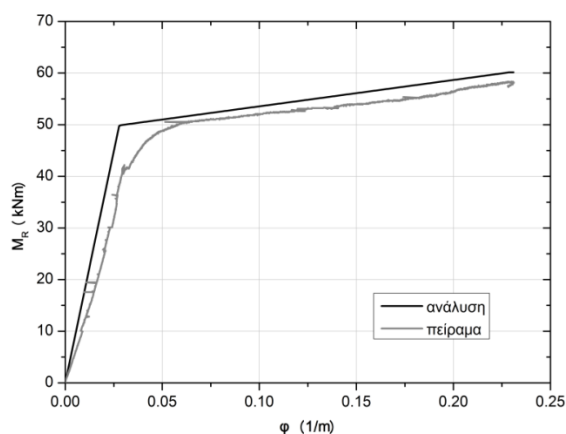
Στην ανάλυση διατομής το σκυρόδεμα προσομοιώθηκε ως ελαστοπλαστικό υλικό (δηλαδή με διγραμμικό καταστατικό νόμο χωρίς κράτυνση) σε θλίψη, με μηδενική εφελκυστική αντοχή. Η αντοχή του ελήφθη ίση με 68.7MPa, η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο όριο ελαστικότητας 0.2% και η οριακή παραμόρφωση 0.4% (ελαφρώς προσαυξημένη από το σήνηθες 0.35% λόγω συνθηκών περισφιξης - πάντως πτωχής - στην περιοχή που διαμορφώνεται μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής κοιλοδοκού). Τέλος, η διατμητική σύνδεση μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος θεωρήθηκε πλήρης (μηδενική ολίσθηση).

Η ανωτέρω ανάλυση διατομής γίνεται με αυτοματοποιημένο τρόπο μέσω κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab.

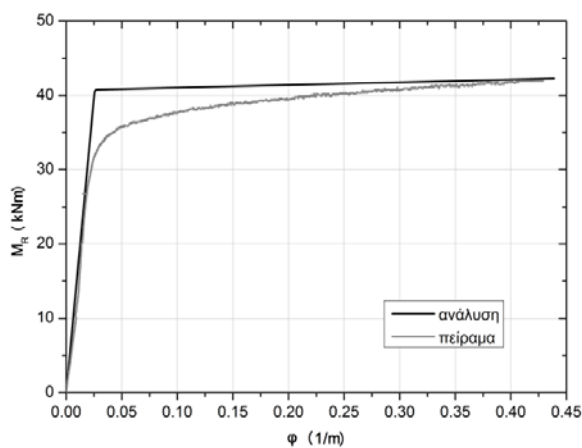
Η σύγκριση της πρόβλεψης του απλού αναλυτικού προσομοιώματος με τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2 και στο Σχήμα 6.2, όπου επιβεβαιώνεται η πολύ καλή συμφωνία μεταξύ ανάλυσης και πειράματος, με τη διαφορά τιμών αναλυτικής - πειραματικής ροπής αντοχής να είναι ίση με περίπου 5% για τη μεταλλική διατομή και περίπου 1% για τη σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς».

**Πίνακας 6.2** Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών τιμών  
**Table 6.2** Comparison between experimental and analytical values

Διατομή	Μέση ακτίνα R (mm)	Πειραματική ροπή αντοχής $M_R$ (kNm)	Αναλυτική ροπή αντοχής $M_R$ (kNm)	Πειραματική ανηγμένη ροπή αντοχής $\mu_R$ (kNm)	Αναλυτική ανηγμένη ροπή αντοχής $\mu_R$ (kNm)
Μεταλλική	66.50	57.42	60.15	0.49	0.51
Σύμμικτη	61.75	41.92	42.24	0.57	0.46



(i)



(ii)

**Σχήμα 6.2:** Σύγκριση πειραματικής με αναλυτική σχέση ροπής - καμπυλότητας για το δοκίμιο (i) της συμπαγούς μεταλλικής διατομής και (ii) της σύμμικτης διατομής «σάντουιτς»

**Figure 6.2:** Comparison between experimental and analytical moment-curvature

relations for (i) the homogeneous steel section, (ii) the composite sandwich-type section

# 7

## **Προσεγγιστικά στοιχεία κόστους**

---

Σε όρους κόστους, ενώ οι δύο διατομές έχουν παραπλήσια ανηγμένη ροπή αντοχής (για την ακρίβεια, βάσει του Πίνακα 6, η μεταλλική διατομή έχει «πειραματική» ροπή αντοχής κατά 14% μικρότερη της σύμμικτης, και «αναλυτική» ροπή αντοχής κατά 11% μεγαλύτερη της σύμμικτης), η διατομή «σάντουιτς» έχει ποσότητα χάλυβα κατά περίπου 25% μικρότερη από τη συμπαγή μεταλλική διατομή, ενώ αυτή τη διαφορά βάρους την έχει περίπου στο διπλάσιο σε σκυρόδεμα. Δεδομένου δε ότι ο λόγος κόστους χάλυβα προς σκυρόδεμα κατά βάρος είναι υπερπολλαπλάσιος του δύο, συνάγεται ότι η σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς» είναι οικονομικότερη.

# 8

## **Συμπεράσματα**

---

Επιχειρήθηκε η πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς απλών δοκιμίων που προσομοιώνουν πυλώνες ανεμογεννητριών με συμπαγή μεταλλική διατομή και σύμμικτη διατομή τύπου «σάντουιτς». Τα δύο πειραματικά δοκίμια σχεδιάσθηκαν, ώστε να έχουν την ίδια εξωτερική διάμετρο και περίπου την ίδια ανηγμένη καμπτική αντίσταση, κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε πειραματικά, ενώ κατεδείχθη ότι το προσομοίωμα σύμμικτης διατομής «σάντουιτς» είναι οικονομικότερο. Τέλος εδείχθη ότι απλή αναλυτική προσομοίωση σε επίπεδο διατομής προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια την πειραματική απόκριση των προσομοιωμάτων.