## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΛΥΦΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ «SANDWICH» ΓΙΑ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στυλιανός Μ. Βερνάρδος Υποψήφιος Διδάκτωρ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: svernard@central.ntua.gr

Ξενοφών Α. Λιγνός Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>lignosx@central.ntua.gr</u> Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης Επ. Καθηγητής Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>badstrat@central.ntua.gr</u>

**Χάρης Ι. Γαντές** Καθηγητής Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>chgantes@central.ntua.gr</u>

### 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το συνεχώς αυξανόμενο ύψος των σύγχρονων ανεμογεννητριών επιβαρύνει τα κατώτερα τμήματα των πυλώνων με επιπρόσθετα φορτία, οδηγώντας σε αύξηση της διαμέτρου βάσης τους πέρα από τα όρια που τίθενται από τους σημερινούς περιορισμούς των οδικών δικτύων. Ως αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος εξετάζεται η αντικατάσταση των συμβατικών, αμιγώς χαλύβδινων πυλώνων με πυλώνες διατομής «sandwich», αποτελούμενους από δύο χαλύβδινα κελύφη τα οποία περικλείουν έναν πυρήνα κονιάματος. Αυτή η γεωμετρία αναμένεται να ενισχύσει τη δυσκαμψία και την αντοχή της διατομής με μικρή αύξηση βάρους και κόστους. Σε αυτό το πλαίσιο, παρουσιάζεται πειραματική μελέτη σε επίπεδο σχεδιασμού και υλοποίησης, που περιλαμβάνει δύο όμοια δοκίμια πυλώνα διατομής «sandwich» υπό κλίμακα, κατασκευασμένα για το σκοπό αυτό. Τα τελευταία υποβλήθηκαν σε κάμψη ως πρόβολοι, μέσω εγκάρσιας φόρτισης στο ελεύθερο άκρο τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα, μέσω εκτεταμένης χρήσης LVDT, Strain Gauges και οπτικών μέσων, παρουσίασαν ικανοποιητική επαναληψιμότητα και προβλεψιμότητα. Η συμπεριφορά των επιμέρους στρωμάτων της διατομής τεκμηριώνει καλή συνεργασία μεταξύ τους κατά το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας, έως την αστοχία που εκδηλώθηκε και για τα δύο δοκίμια μέσω τοπικού λυγισμού, σε περίπου ίδια τιμή φορτίου. Από προκαταρκτική σύγκριση με όμοια πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε συμβατικά, αμιγώς γαλύβδινα δοκίμια προκύπτουν θετικές ενδείξεις για την αποτελεσματικότητα της εξεταζόμενης λύσης.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εικόνα του διεθνούς ενεργειακού χάρτη, όπως προκύπτει από το σύνολο των διεθνών αναλύσεων και αναφορών, καταδεικνύει σαφώς το ευοίωνο μέλλον της βιομηχανίας αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, η οποία ήδη αποτελεί μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες βιομηχανίες διεθνώς. Η σημερινή συνολική ισχύς των διεθνώς εγκατεστημένων ανεμογεννητριών υπερβαίνει τα 500 GW [1], ενώ η ισχύς των αιολικών πάρκων που εγκαταστάθηκαν το 2016 ανήλθε στο 34% επί του συνόλου της εγκατεστημένης ισχύος από ανανεώσιμες πηγές κατά τη χρονιά αυτή [2]. Σε συνδυασμό με την τεχνολογική πρόοδο που αφορά τα μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά μέρη των ανεμογεννητριών, η ταχεία μείωση του κόστους κατασκευής σε πρωτοφανώς χαμηλά επίπεδα επιτρέπει την παραγωγή συνεχώς μακρύτερων πτερυγίων και υψηλότερων πυλώνων, με εκθετική αύξηση της απόδοσης και βελτίωση των οικονομιών κλίμακας [3].

Την τάση αυτή ανακόπτει κατά μεγάλο μέρος το ζήτημα της μεταφοράς τμημάτων πυλώνα μεγάλης διαμέτρου στις τοποθεσίες εγκατάστασης των ανεμογεννητριών που είναι κατά κανόνα δυσπρόσιτες. Αναφορικά με τις επίγειες ανεμογεννήτριες, οι δυνατότητες των οδικών δικτύων (εύρος δρόμων, καμπυλότητα στροφών, ύψος γεφυρών και σηράγγων κ.α.) περιορίζουν τη διάμετρο πυλώνα στα 4,3 μ. κατά προσέγγιση [4,5], ενώ στην περίπτωση υπεράκτιας εγκατάστασης, ανακύπτει σημαντικό ζήτημα κόστους μεταφοράς (μέγεθος και ικανότητα γερανών και πλοίων κ.α.) [6].

Η λύση της αύξησης του πάχους του κελύφους του πυλώνα ή/και της χρήσης χάλυβα υψηλότερης ποιότητας έχει αποδειχθεί ότι δεν προσφέρει ουσιαστική βελτίωση σε επίπεδο ευστάθειας [7], ενώ καθιστά την κατασκευή αντιοικονομική [4]. Οι Schaumann et al. [8] και Lim et al. [9] διερεύνησαν ως εναλλακτική λύση την αντικατάσταση της συμβατικής, αμιγώς χαλύβδινης διατομής του πυλώνα με μια σύνθετη διατομή μορφής «sandwich». Τη μορφή αυτή συνιστούν δύο ομόκεντρα, κυλινδρικά, χαλύβδινα κελύφη διαφορετικής διαμέτρου, με το μεταξύ τους διάκενο (πυρήνας) πληρωμένο με υλικό χαμηλού βάρους και κόστους, όπως σκυρόδεμα ή κάποιο είδος κονιάματος. Σε αντίθεση με την επιλογή αύξησης του πάγους ή βελτίωσης της ποιότητας του χάλυβα, η συγκεκριμένη γεωμετρία δύναται να αυξήσει τη δυσκαμψία του πυλώνα με αναλογικά μικρή αύξηση βάρους και κόστους υλικού, λόγω της απόστασης που δημιουργείται μεταξύ των δύο χαλύβδινων κελυφών, σε συνδυασμό με τη συμβολή του υλικού του πυρήνα στη δυσκαμψία και στην αύξηση της αντοχής. Επίσης, η συνύπαρξη των δύο υλικών είναι αμοιβαία επωφελής, καθώς η παρουσία του υλικού του πυρήνα μπορεί να μειώσει αισθητά τον κίνδυνο τοπικού λυγισμού του εσωτερικού και εξωτερικού γαλύβδινου κελύφους, ενώ παράλληλα τα τελευταία μπορούν να αναλάβουν ρόλο περίσφιγξης του πυρήνα, βελτιώνοντας την αντοχή του. Η συγκεκριμένη ιδιότητα της διατομής μορφής «sandwich» έχει καταγραφεί σε πληθώρα πειραματικών μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί σε υποστυλώματα ή δοκούς που την ενσωματώνουν, όπως ενδεικτικά στις εργασίες [10-14].

Οι φορείς αυτοί, ωστόσο, διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με τον πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας, καθώς, λόγω του αυξημένου λόγου πάχους προς διάμετρο που διαθέτουν, η στατική τους λειτουργία προσεγγίζει περισσότερο εκείνη ενός συμπαγή φορέα απ' ό,τι ενός κελύφους. Αντίθετα, τα δοκίμια διατομής «sandwich» που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη

διαθέτουν λόγο πάχους προς διάμετρο επαρκώς μικρό, ώστε να προσεγγίζουν υπό κλίμακα τη γεωμετρία ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας.

# 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Σε εργασία των Dimopoulos & Gantes [15], όπου παρουσιάστηκε πειραματική αποτίμηση της επιρροής της ανθρωποθυρίδας στη συμπεριφορά του πυλώνα ανεμογεννήτριας, μέρος των πειραματικών δοκιμών είχε πραγματοποιηθεί σε πυλώνες χωρίς οπή, για λόγους σύγκρισης. Στις εν λόγω δοκιμές τα δοκίμια ήταν αμιγώς χαλύβδινα, με γεωμετρικές αναλογίες πραγματικού πυλώνα υπό κλίμακα 10%. Στο πλαίσιο της αξιολόγησης της λύσης της σύνθετης διατομής κρίθηκε σκόπιμο να αξιοποιηθούν τα δεδομένα της προγενέστερης αυτής διερεύνησης, ως μέσο σύγκρισης. Για τη βέλτιστη δυνατή συγκρισιμότητα, επιδιώχθηκε η διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων, όσον αφορά τόσο το δοκίμιο όσο και τις πειραματικές συνθήκες, ώστε η μοναδική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διερευνήσεων να έγκειται στη διατομή του δοκιμίου. Για τον μετασχηματισμό του συμπαγούς κυλινδρικού κελύφους σε σύνθετο, το πάχος του χάλυβα παρέμεινε συνολικά ίδιο· το κέλυφος διαιρέθηκε ωστόσο σε δύο ισοπαχή επιμέρους κελύφη τα οποία απομακρύνθηκαν μεταξύ τους ώστε να σχηματιστεί ο πυρήνας της σύνθετης διατομής. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου του αμιγώς χαλύβδινου κελύφους, μαζί με εκείνα του δοκιμίου σύνθετης διατομής τύπου «sandwich», περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 4, όπως και η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε αυτούσια στις δύο πειραματικές διερευνήσεις.

Για την επιλογή του πάχους του πυρήνα της σύνθετης διατομής τύπου «sandwich», επιστρατεύθηκε μεθοδολογία βελτιστοποίησης γεωμετρίας για διατομή τέτοιας μορφής σε όρους αντοχής και δυσκαμψίας, η οποία έχει παρουσιαστεί από τους Vernardos & Gantes [16]. Βάσει της συγκεκριμένης μεθόδου, με δεδομένο το πάχος του εσωτερικού και εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος της διατομής, προέκυψε το πάχος πυρήνα με το οποίο επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν η παράλληλη μεγιστοποίηση καμπτικής αντοχής και δυσκαμψίας.

Οι προδιαγραφές της εφαρμογής και συγκεκριμένα η απαίτηση για αποτελεσματική διείσδυση χωρίς δόνηση μέσα από το μικρό πάχος του πυρήνα του δοκιμίου, καθόρισαν τον τύπο του κονιάματος που επιλέχθηκε. Χρησιμοποιήθηκε το κονίαμα LINEA 810 SL της εταιρείας ΚΕΜΑ, το οποίο διαθέτει το κατάλληλο μέγεθος αδρανών, επαρκή ρευστότητα, και ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης, ενώ δεν αναπτύσσει σημαντική συρρίκνωση κατά την πήξη. Παράλληλα, διαθέτει υψηλή συνάφεια με το χάλυβα και αναπτύσσει ικανοποιητική αντοχή [17].

Επισημαίνεται ότι, στις πειραματικές δοκιμές των Dimopoulos & Gantes [15], χρησιμοποιήθηκε ένα κέλυφος – προέκταση δοκιμίου για την άσκηση του φορτίου από το έμβολο. Το κέλυφος προέκτασης ήταν αμιγώς χαλύβδινο και σχεδιασμένο ώστε να διαθέτει υπεραντοχή, η οποία να εξασφαλίζει την παραμονή του στην ελαστική περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Ομοίως, στα πειράματα της παρούσας εργασίας, γίνεται χρήση του ίδιου κελύφους προέκτασης (Σχ. 2). Πέραν του παράγοντα της συγκρισιμότητας με τα προγενέστερα πειραματικά αποτελέσματα, η χρήση της προέκτασης στη συγκεκριμένη περίπτωση εξυπηρετεί και ένα δεύτερο σκοπό: Είναι εύλογο ότι στην περίπτωση ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας η κατανομή των φορτίων είναι τέτοια, ώστε το κατώτερο τμήμα του να επιβαρύνεται σημαντικά περισσότερο σε σχέση με τα ανώτερα, τόσο αξονικά λόγω συσσωρευμένου βάρους, όσο και καμπτικά λόγω αυξημένου μοχλοβραχίονα. Αυτό, σε συνδυασμό με την επιδίωξη για ελαχιστοποίηση του βάρους και του κόστους κατασκευής, οδηγεί στην πιθανή λύση μιας υβριδικής κατασκευής, η οποία να διαθέτει ένα κατώτερο τμήμα με σύνθετη διατομή τύπου «sandwich» και ένα ανώτερο τμήμα συμβατικής, αμιγώς χαλύβδινης διατομής. Η ιδέα της συγκεκριμένης μορφής υβριδικού πυλώνα έχει ήδη δημοσιευθεί από τους Keindorf & Schaumann [18]. Το πειραματικό δοκίμιο της παρούσας διερεύνησης, σε συνδυασμό με το κέλυφος προέκτασης, αποτελεί μια μορφή τέτοιου υβριδικού πυλώνα, και η μελέτη του συνιστά παράλληλα μια πρώτη αποτίμηση της συμπεριφοράς του τελευταίου.

# 4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

# 4.1 Κατασκευή δοκιμίων

Κατασκευάστηκαν δύο όμοια δοκίμια διατομής μορφής «sandwich», όσα και τα αμιγώς χαλύβδινα της προγενέστερης πειραματικής έρευνας. Τα χαλύβδινα κελύφη και οι φλάντζες κατασκευάστηκαν από την ελληνική εταιρεία ΑΦΟΙ ΒΑΛΑΣΗΣ Α.Ε., με σημαντική εμπειρία σε ένα ευρύ φάσμα μεταλλικών κατασκευών, ενώ οι επιπλέον συγκολλήσεις, μετά την πλήρωση με κονίαμα, που αναφέρονται παρακάτω, πραγματοποιήθηκαν από πιστοποιημένο συγκολλητή. Για την κατασκευή των κελυφών, των φλαντζών και των κοχλιών χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας S235. Για κάθε κέλυφος, εσωτερικό και εξωτερικό, φύλλο χάλυβα πάχους 2 mm κόπηκε σε κατάλληλες διαστάσεις, καμπυλώθηκε και συγκολλήθηκε κατά τη διαμήκη διεύθυνση, ώστε να αποκτήσει το επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα. Σε κάθε φλάντζα ανοίχθηκαν 28 οπές διαμέτρου 22 mm για τους κοχλίες (Σχ. 3). Στη συνέχεια, τα δύο κελύφη, πρώτα το εσωτερικό και έπειτα το εξωτερικό, τοποθετήθηκαν σε μία φλάντζα (βάση) και συγκολλήθηκαν σε αυτήν με εξωραφή.

Το κονίαμα παρασκευάστηκε σύμφωνα με τις οδηγίες και τις προδιαγραφές του παραγωγού. Η πλήρωση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε υδραυλικά, με τη βοήθεια αντλίας κενού (

Φωτ. 1(α)). Καθώς η εισαγωγή συσκευής δόνησης στον πυρήνα κατά την πλήρωση ήταν ανέφικτη λόγω περιορισμένου πάχους, η διαδικασία της υδραυλικής πλήρωσης προτιμήθηκε σε σχέση με την απλή έγχυση, στοχεύοντας σε σημαντικά καλύτερη συμπύκνωση. Η συγκεκριμένη μέθοδος, σε συνδυασμό με την ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης του κονιάματος, ενισχύθηκε επικουρικά κατά την πλήρωση από συνεχείς κρούσεις με τη χρήση ελαστικού σφυριού (

Φωτ. 1(β)). Κατά την ολοκλήρωση της πλήρωσης, η ανοιχτή επιφάνεια κάθε δοκιμίου σκεπάστηκε με υγρό πανί και συντηρήθηκε έτσι για 28 ημέρες, ώστε να περιοριστεί κατά το ήττον η εξίδρωση του κονιάματος στις πρώτες ώρες αλλά και προκειμένου αυτό να αναπτύξει αποδοτικά την αντοχή του.

Κατά το πέρας των 28 ημερών, πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση της δεύτερης (άνω) φλάντζας με εξωραφή, ώστε το δοκίμιο να λάβει την τελική του μορφή, η οποία φαίνεται στη Φωτ. 2.

Από καθένα από τα δύο φύλλα χάλυβα, από τα οποία προέκυψαν οι ισάριθμοι πυλώνες, λήφθηκαν 3 δοκίμια για έλεγχο των ιδιοτήτων του μέσω δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού. Τα συνολικά 6 δοκίμια κόπηκαν από κάθε έλασμα με πριονοκορδέλα και διαμορφώθηκαν με χρήση φρέζας στις διαστάσεις που φαίνονται στο Σχ. 1, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ΕΝ ISO 6892-1 [19]



Σχ. 1: Γεωμετρία δοκιμίων για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα

Για τον μετέπειτα έλεγχο της αντοχής του κονιάματος λήφθηκαν, με τον ίδιο τρόπο πλήρωσης, συνολικά 12 δοκίμια, 4 για καθεμιά από τις 3 παρτίδες κονιάματος που απαιτήθηκε να παρασκευαστούν ( (α) (β) (γ)

Φωτ. 1γ). Για την παρακολούθηση της εξέλιξης της αντοχής τους, τα δοκίμια προγραμματίστηκε να θραυστούν σε ηλικία, 7, 14 και 28 ημερών, καθώς και κατά τις ημερομηνίες εκτέλεσης των πειραμάτων στους φορείς διατομής «sandwich».



Φωτ. 1: (a) Αντλία κενού για υδραυλική έγχυση, (β) τελική φάση έγχυσης, (γ) δοκίμια κονιάματος για προσδιορισμό ιδιοτήτων

# 4.2 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

## Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο χώρο δοκιμών του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο

Σχ. 2 παρουσιάζεται η —κοινή στην προγενέστερη και τη νέα διερεύνηση— πειραματική διάταξη, η οποία περιλαμβάνει το πλαίσιο φόρτισης, το υδραυλικό έμβολο, καθώς και το τοποθετημένο δοκίμιο. Το πλαίσιο δοκιμών αποτελείται από δύο επιμέρους επίπεδα πλαίσια, πρότυπης διατομής HEB500, τεμνόμενα κάθετα μεταξύ τους. Το έμβολο είναι κατασκευασμένο από την εταιρία MALVASIA, με δυναμικότητα σε όρους μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης και μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου 250 bar και 500 kN, αντίστοιχα.

Επιπλέον του κύριου δοκιμίου, τόσο στην προγενέστερη όσο και στην παρούσα διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκαν δύο ακόμα τμήματα· το πρώτο αποτελεί ένα χαλύβδινο κέλυφος-προέκταση, επί του οποίου εφαρμόζεται το φορτίο του εμβόλου, όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 3, ενώ το δεύτερο συνιστά ένα βραχύ χαλύβδινο κέλυφος-βάση, συγκολλημένο σε μια μεταλλική πλάκα, μέσω του οποίου το κύριο δοκίμιο συνδέεται στο υποστύλωμα του πλαισίου. Αμφότερα τα επιπρόσθετα αυτά τμήματα συνδέθηκαν στο κύριο δοκίμιο μέσω φλαντζών και κοχλιών, στο άνω και στο κάτω άκρο του αντίστοιχα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στα Σχ. 2(β),Σχ. 3.



Σχ. 2: (α) Σκαρίφημα πειραματικής διάταζης, (β) γεωμετρικά στοιχεία κύριου δοκιμίου και βοηθητικών τμημάτων (τροποποιημένα από [15])



Σχ. 3: Γεωμετρικά στοιχεία φλαντζών (τροποποιημένο από [15])

Και στις δύο διερευνήσεις, το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση, με τη βάση του συνδεδεμένη στο υποστύλωμα του πλαισίου με κοχλιωτή σύνδεση ροπής. Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση, η πλάκα του βραχέως κελύφους βάσης συνδέθηκε με το υποστύλωμα του πλαισίου μέσω 14 κοχλιών M20 ποιότητας 10.9. Στη συνέχεια, η κάτω φλάντζα του κύριου δοκιμίου συνδέθηκε με τη φλάντζα του βραχέως κελύφους βάσης μέσω 28 κοχλιών M20 ποιότητας 10.9. Τή συνέχεια, η κάτω φλάντζα του κύριου δοκιμίου συνδέθηκε με τη φλάντζα του βραχέως κελύφους βάσης μέσω 28 κοχλιών M20 ποιότητας 10.9. Τέλος, με όμοιο τρόπο, η κάτω φλάντζα του κελύφους προέκτασης συνδέθηκε με την άνω φλάντζα του κύριου δοκιμίου, ενώ η ελεύθερη άνω φλάντζα της προέκτασης αποτέλεσε το σημείο επαφής με το έμβολο επιβολής της φόρτισης. Μετά την πλήρη τοποθέτηση του δοκιμίου, το σύνολο των κοχλιών προεντάθηκε κατά 600 kNm με χρήση «ροπόκλειδου», σε δύο κύκλους

επαναλήψεων. Επιπροσθέτως, το υποστύλωμα του πλαισίου ενισχύθηκε τοπικά στην περιοχή σύνδεσης του δοκιμίου με δύο ζεύγη νευρώσεων σε κάθε πλευρά του κορμού.

Η καταγραφή της συμπεριφοράς του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης πραγματοποιήθηκε με τρεις παράλληλες μεθόδους: μετρήσεις μετακίνησης, μετρήσεις παραμόρφωσης και οπτικό έλεγχο. Οι μετρήσεις της πρώτης κατηγορίας έγιναν αφενός μέσω των τιμών επιβαλλόμενης μετακίνησης του εμβόλου και αφετέρου με χρήση Γραμμικών Μεταβλητών Διαφορικών Μετασχηματιστών (LVDT) στις θέσεις που φαίνονται στο Σχ. 4(α), ώστε στη συνέχεια να σχηματίσουν τους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας σε αντιπαραβολή με τη δύναμη αντίστασης του εμβόλου. Οι μετρήσεις της δεύτερης κατηγορίας πραγματοποιήθηκαν με χρήση παραμορφωσίμετρων (Strain Gauges), τοποθετημένων αξονικά στα σημεία που φαίνονται στο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**(β), για την παρακολούθηση τοπικών φαινομένων στο εξωτερικό και στο εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος, καθώς και τον έλεγχος έγινε με βιντεοσκόπηση του πειράματος από δύο συσκευές, οι οποίες τοποθετήθηκαν εντός και εκτός του δοκιμίου, για την αποτύπωση της συμπεριφοράς του εσωτερικού και του εξωτερικού κελύφους αντίστοιχα.



Σχ. 4: Σημεία τοποθέτησης (α) των LVDT για καταγραφή μετακινήσεων, (β) των Strain Gauges (SG) για καταγραφή παραμορφώσεων (το πάχος του κελύφους έχει μεγεθυνθεί για λόγους ευκρίνειας)

#### Ομοίως με την προγενέστερη έρευνα, όπως φαίνεται στη διάταξη του

Σχ. 2(α), η μετακίνηση του υδραυλικού εμβόλου ασκήθηκε κατακόρυφα και εγκάρσια στο οριζόντια τοποθετημένο δοκίμιο, επί της ακραίας φλάντζας του κελύφους προέκτασης, ώστε η καμπτική ροπή να αποτελεί την κυρίαρχη μορφή φόρτισης. Η μετακίνηση του εμβόλου εφαρμόστηκε με σταθερό ρυθμό 0,01 mm/sec. Η τελική διάταξη απεικονίζεται στη Φωτ. 2.



Φωτ. 2: Πειραματική διάταζη

Οι δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού για τα χαλύβδινα δοκίμια έγιναν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε σερβοϋδραυλικό πλαίσιο φόρτισης INSTRON 300 kN. Η βαθμονόμηση του φορτίου έγινε με δακτύλιο Wykeham Farrance ευαισθησίας 10.62 N με γραμμική απόκριση μέγιστου σφάλματος 0.2%. Η βαθμονόμηση της μετατόπισης έγινε με διακριβωμένο μικρομετρικό κοχλία High Mag ευαισθησίας 1μm.

Τα πρισματικά δοκίμια κονιάματος εξετάστηκαν στο Τμήμα Τεχνικών Υλικών & Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ). Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε αρχικά σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων για τον έλεγχο της εφελκυστικής καμπτικής αντοχής του, ενώ στη συνέχεια καθένα από τα δύο επιμέρους τμήματα που προέκυψαν από τη θραύση υποβλήθηκε σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του.

# 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

## 5.1 Ιδιότητες υλικών

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα συνοψίζονται στον **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** (η τάση διαρροής προσδιορίστηκε ως εκείνη που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 0,20%). Στο Σχ. 5 απεικονίζεται ενδεικτικά η καμπύλη (μηχανικής) τάσης – παραμόρφωσης μίας από τις δοκιμές εφελκυσμού, ενώ η μορφή του αντίστοιχου δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή φαίνονται στη Φωτ. 3.

		Δοκίμια πυλώνα Α	Δοκίμια πυλώνα Β
Μέτρο ελαστικότητας	Μέση τιμή	207,00	207,33
(GPa)	Τυπική απόκλιση	τή απόκλιση 0,00	0,47
Τάση διαρροής	Μέση τιμή	303,33	300,00
(MPa)	Τυπική απόκλιση 2,36	0,00	

Πιν. 1: Μηχανικά χαρακτηριστικα χάλυβα από δοκιμές μονοαζονικού εφελκυσμού σε έζι δοκίμια



Σχ. 5: Διάγραμμα (μηχανικής) τάσης – παραμόρφωσης χάλυβα, δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού ενός εκ των έζι δοκιμίων.



Φωτ. 3: Δοκίμιο για έλεγχο μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα (α) πριν και (β) μετά τη δοκιμή μονοαζονικού εφελκυσμού

Η εξέλιξη καμπτικών και θλιπτικών αντοχών του κονιάματος σε σχέση με το χρόνο παρέλευσης από την ημέρα της έγχυσης παρουσιάζεται στον Πιν. 2. Παρά το γεγονός ότι στις 28 ημέρες θα αναμενόταν το κονίαμα να έχει αναπτύξει το σημαντικότερο ποσοστό των προδιαγραφόμενων αντοχών του (καμπτική και θλιπτική αντοχή, 5 MPa και 25 MPa, αντίστοιχα) αυτό δεν επετεύχθη. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον τρόπο πλήρωσης ο οποίος διαφέρει από τον συμβατικό (έγχυση). Την 77η ημέρα από την έγχυση, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε το 1ο πείραμα στους φορείς διατομής «sandwich», το κονίαμα προσέγγισε την προδιαγραφόμενη αντοχή του, ενώ κατά την ημερομηνία εκτέλεσης του 2ου πειράματος, 101 ημέρες μετά την έγχυση, η καμπτική αντοχή έφτασε οριακά την προδιαγραφόμενη τιμή και η θλιπτική αντοχή την υπερέβη κατά περίπου 20%.

Ηλικία (ημέρες)	7	14	28	77 (1° πείραμα)	101 (2° πείραμα)
Καμπτική (εφελκυστική) αντοχή (MPa)	2,46	3,34	3,67	4,50	5,00
Θλιπτική αντοχή (MPa)	15,08	17,45	18,71	24,38	31,05



### 5.2 Συμπεριφορά φορέα

Κατά όμοιο τρόπο και στις δύο πειραματικές δοκιμές, η αστοχία προήλθε από τοπικό λυγισμό του εξωτερικού χαλύβδινου κελύφους στη θλιβόμενη πλευρά του δοκιμίου, κοντά στη βάση. Στην πρώτη δοκιμή (Φωτ. 4(α)), ο λυγισμός αυτός εμφανίστηκε σε απόσταση περί τα 90 mm από το άκρο του κελύφους, ενώ στη δεύτερη (Φωτ. 4(β)) εκδηλώθηκε σε απόσταση από το άκρο περίπου 60 mm. Τα φορτία αστοχίας και οι αντίστοιχες μετακινήσεις παρατίθενται στον Πιν. 3.



Φωτ. 4: Τοπικός λυγισμός στη βάση της θλιβόμενης πλευράς του φορέα κατά το πέρας (α) της πρώτης δοκιμής και (β) της δεύτερης δοκιμής

		Πείραμα 1	Πείραμα 2
Φορτίο αστοχίας (kN)		67,62	65,28
η κατά t (mm)	Έμβολο	38,20	42,44
	LVDT 1	42,41	46,96
ίνησ τοχίο	LVDT 2	14,19	15,77
ETAK	LVDT 4	0,17	0,15
ΣĘ	LVDT 5	-1,61	-1,53

Πιν. 3: Φορτία αστοχίας των δύο δοκιμίων και αντίστοιχες μετακινήσεις από το έμβολο και τα LVDT

Οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τα δεδομένα του εμβόλου και των LVDT, των οποίων οι θέσεις απεικονίστηκαν στο Σχ. 4(α), παρουσιάζονται στα Σχ. 6,Σχ. 7. Στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων απεικονίζονται οι τιμές της μετακίνησης, είτε του εμβόλου στο ελεύθερο άκρο του προβόλου, είτε των LVDT, και στον κατακόρυφο άξονα η αναπτυσσόμενη αντίδραση του εμβόλου εξαιτίας της εφαρμοζόμενης μετακίνησης. Το Σχ. 6 αντιστοιχεί στις κατακόρυφες μετακινήσεις, όπως καταγράφηκαν από το έμβολο, το LVDT 1 που ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 422 mm από το έμβολο και το LVDT 2 που βρισκόταν στη σύνδεση κελύφους προέκτασης και κύριου δοκιμίου. Στο Σχ. 7(α) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφηκαν στην πλάκα σύνδεσης δοκιμίου και υποστυλώματος, από τα LVDT 4 και LVDT 5, ενώ στο Σχ. 7(β) οι τιμές της κατακόρυφης μετακίνησης του LVDT 3, η οποία εκφράζει την ολίσθηση της πλάκας ως προς το υποστύλωμα.

Οι αμελητέες τιμές μετακίνησης του LVDT 3 υποδηλώνουν πρακτικά τη μη ολίσθηση της πλάκας στήριξης. Από τα δεδομένα των LVDT 4 και LVDT 5, εύκολα προκύπτει σε κάθε βήμα το μέγεθος της στροφής της σύνδεσης κατά την οριζόντια διεύθυνση κάθετα στο δοκίμιο. Η τιμή της που αντιστοιχεί στο οριακό φορτίο υπολογίζεται σε 0,16° και για τις δύο δοκιμές, και ισοδυναμεί με κατακόρυφη μετακίνηση του ελεύθερου άκρου του δοκιμίου περί τα 7,50 mm. Παρατηρείται ικανοποιητική επαναληψιμότητα μεταξύ των δύο πειραματικών δοκιμών όσον αφορά στη μακροσκοπική συμπεριφορά του φορέα, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις των 5 LVDT. Η μικρή διαφορά ανάμεσα στις δύο δοκιμές, αναφορικά με τη μετακίνηση που αντιστοιχεί στο οριακό φορτίο, κρίνεται δικαιολογημένη ως συνέπεια μικρής επιπρόσθετης στροφής που εντοπίστηκε βάσει υπολογισμών στη σύνδεση μεταξύ κύριου δοκιμίου και προέκτασης κατά τη δεύτερη δοκιμή.



Σχ. 6: Δρόμοι ισορροπίας των δύο δοκιμίων από (α) το έμβολο και (β) τα LVDT 1, 2 (Σχ. 4(α))



Σχ. 7: Διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης της πλάκας στήριζης των δύο δοκιμίων ως προς το υποστύλωμα του πλαισίου κατά την (α) οριζόντια και (β) κατακόρυφη διεύθυνση (Σχ. 4(α))

Σχ. 8,Σχ. 9Σχ. 10 παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων φορτίου – παραμόρφωσης οι μετρήσεις των Strain Gauges, στις βασικότερες από τις θέσεις του Σχ. 4(β). Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η ευαισθησία των Strain Gauges καθιστά τη βλάβη τους αρκετά πιθανή και τη μέτρηση των παραμορφώσεων σε τοπικό επίπεδο ευάλωτη σε θόρυβο από ποικίλες αιτίες. Συνεπώς, οι τιμές των παραμορφώσεων και τα σχετικά διαγράμματα δεν αντιμετωπίζονται τόσο ως δεδομένα ακριβείας σε ποσοτικό επίπεδο, όσο ως αδρές απεικονίσεις συμπεριφοράς σε ποιοτικό επίπεδο.

#### Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, παρατηρείται από τα

Σχ. 8(α), Σχ. 9(α) ότι στην εφελκυόμενη πλευρά του δοκιμίου το εξωτερικό και το εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος λειτούργησαν κατά τον ίδιο περίπου τρόπο στο πρώτο πείραμα, κάτι που δηλώνει την ικανοποιητική συνεργασία τους στο πλαίσιο της σύνθετης διατομής, με παρόμοιου βαθμού διαρροή στις δύο θέσεις, σε απόσταση 30 mm και 80 mm από τη βάση. Κατά τη δεύτερη δοκιμή, η διαρροή στην εφελκυόμενη πλευρά υπήρξε σημαντικά εντονότερη και στις δύο αυτές θέσεις. Από τη σύγκριση των παραμορφώσεων του εξωτερικού και του εσωτερικού κελύφους κατά το δεύτερο πείραμα (Σχ. 9(α)), σε απόσταση 80 mm από τη βάση, η συνεργασία τους παρουσιάζεται ικανοποιητική έως φορτίο περίπου 45 kN που αντιστοιχεί χονδρικά στη διαρροή, κάτι που ωστόσο δεν ήταν δυνατό να επαληθευτεί και από τη δεύτερη θέση, καθώς εκεί το Strain Gauge του εσωτερικού κελύφους παρουσίασε βλάβη.

#### Τα

Σχ. 8(β), Σχ. 9(β), που αφορούν τη θλιβόμενη πλευρά του δοκιμίου, επαληθεύουν σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά που παρουσιάστηκε οπτικά στη Φωτ. 4. Η εκδήλωση τοπικού λυγισμού σε απόσταση 90 mm από τη βάση, κατά την πρώτη δοκιμή, συμβαδίζει με τις μεγάλες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τα Strain Gauges κοντά στη θέση αυτή (Σχ. 9(β)), σε αντίθεση με εκείνες σε απόσταση 30 mm από τη βάση (

Σχ. 8(β)), που εκφράζουν μια σχεδόν γραμμική και ελαστική συμπεριφορά. Κατά το δεύτερο πείραμα, ο τοπικός λυγισμός εκδηλώθηκε, όπως προαναφέρθηκε, σε απόσταση από τη βάση περί τα 60 mm, ανάμεσα στις δύο θέσεις των Strain Gauges, και λίγο πλησιέστερα σε εκείνα που ήταν τοποθετημένα σε απόσταση 80 mm από τη βάση. Πράγματι, όπως δείχνουν οι μετρήσεις των Strain Gauges του εξωτερικού κελύφους, οι παραμορφώσεις είναι σημαντικές και στις δύο θέσεις οι οποίες περικλείουν την περιοχή του λυγισμού, με μεγαλύτερες εκείνες που καταγράφηκαν πλησιέστερα σε αυτόν. Στην περίπτωση του εσωτερικού κελύφους, η κατανομή των παραμορφώσεων παρουσιάζεται αντίστροφη, κάτι που ενδεχομένως οφείλεται σε εκδήλωση τοπικού λυγισμού του πλησιέστερα στη βάση σε σχέση με το εξωτερικό κέλυφος. Σε κάθε περίπτωση, η συνεργασία των δύο κελυφών τεκμαίρεται ικανοποιητική, τουλάχιστον έως τα 45 kN περίπου που αντιστοιχούν στη διαρροή, και για τις δύο δοκιμές.



Σχ. 8: Διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης των Strain Gauges (SG), στο εξωτερικό και το εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος, σε απόσταση 30 mm από τη βάση (α) της εφελκυόμενης πλευράς και (β) της θλιβόμενης πλευράς (Σχ. 4(β))

Από τα διαγράμματα του Σχ. 10, φαίνεται αδρομερώς η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα κατά την εξέλιξη της φόρτισης. Από τις μετρήσεις των strain gauges που τοποθετήθηκαν στην αρχική θέση του ουδέτερου άξονα, στη μέση γραμμή της διατομής (Σχ. 10(α)), είναι εμφανής η σταδιακή ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων στην περιοχή αυτή από φορτίο περί τα 25 kN και έπειτα. Αυτό υποδηλώνει μετακίνηση του ουδέτερου άξονα προς τη θλιβόμενη πλευρά της διατομής, όπως ήταν αναμενόμενο, δεδομένης της αμελητέας αντοχής του κονιάματος σε εφελκυσμό. Τη μετακίνηση αυτή επιβεβαιώνουν εν μέρει οι τιμές των παραμορφώσεων των Strain Gauges που ήταν τοποθετημένα σε (κάθετη) απόσταση 45 mm εκατέρωθεν της μέσης γραμμής (Σχ. 10(β)). Ειδικότερα, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις στην άνω θέση βαίνουν αυξανόμενες με την αύξηση του φορτίου, ενώ οι θλιπτικές παραμορφώσεις της θέσης κάτω από τη μέση γραμμή αυξάνονται με πολύ μικρότερο ρυθμό, και αρχίζουν να μειώνονται σταδιακά, αφότου το φορτίο φρέθηκε ανάμεσα στη μέση γραμμή και στη θέση του strain gauge κάτω από αυτήν, γεγονός που συμβαδίζει με αρχική εκτίμηση η οποία έγινε με χρήση αναλυτικών σχέσεων [16].



Σχ. 9: Διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης των Strain Gauges (SG), στο εξωτερικό και το εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος, σε απόσταση 80 mm από τη βάση (α) της εφελκυόμενης πλευράς και (β) της θλιβόμενης πλευράς (Σχ. 4(β))



Σχ. 10: Διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης των Strain Gauges (SG), στο εζωτερικό και το εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος, (α) στον ουδέτερο άζονα και (β) 45 mm εκατέρωθεν του ουδέτερου άζονα (Σχ. 4(β))

#### 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάστηκε πειραματική διερεύνηση, σε επίπεδο σχεδιασμού, κατασκευής δοκιμίων και υλοποίησης δοκιμών, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ (ΕΜΚ-ΕΜΠ) σε κυλινδρικά δοκίμια σύνθετης διατομής μορφής «sandwich», αποτελούμενης από έναν πυρήνα κονιάματος που περικλείεται από δύο χαλύβδινα κελύφη. Η συγκεκριμένη μορφή διατομής εξετάζεται ως πιθανή λύση για τη βελτίωση της δυσκαμψίας και αντοχής πυλώνων ανεμογεννητριών, με αναλογικά μικρή αύξηση βάρους και κόστους. Βάσει αναλυτικής μεθοδολογίας αναζητήθηκε η γεωμετρία που μεγιστοποιεί κατά το δυνατόν ταυτόχρονα τη δυσκαμψία και την ελαστική καμπτική αντοχή, υπό γεωμετρικούς περιορισμούς που τέθηκαν με σκοπό τη συγκρισιμότητα με παλαιότερες δοκιμές σε αμιγώς χαλύβδινους πυλώνες. Η κατασκευή των χαλύβδινων κελυφών πραγματοποιήθηκε από εξειδικευμένη εταιρεία μεταλλικών κατασκευών, ενώ η πλήρωση με το κονίαμα που επιλέχθηκε έγινε στο ΕΜΚ-ΕΜΠ υδραυλικά με χρήση αντλίας κενού για καλύτερη δυνατή συμπύκνωση. Το δοκίμιο μέσω κατάλληλης συνδεσμολογίας τοποθετήθηκε οριζόντια, ως πρόβολος, σε πλαίσιο δοκιμών του ΕΜΚ-ΕΜΠ, και ασκήθηκε σε αυτό εμμέσως εγκάρσια μετακίνηση με τη βοήθεια χαλύβδινου κελύφους προέκτασης, σχεδιασμένου ώστε να συμπεριφέρεται ελαστικά καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Τόσο οπτικά, όσο και μέσω μετρητικών οργάνων LVDT, η συμπεριφορά του δοκιμίου μακροσκοπικά παρουσίασε πολύ ικανοποιητική επαναληψιμότητα, με μικρές διαφορές ανάμεσα στις δύο δοκιμές που οφείλονται σε μικρή επιπρόσθετη στροφή στη σύνδεση κύριου δοκιμίου – προέκτασης. Η αστοχία επήλθε στα δύο πειράματα από τοπικό λυγισμό του εξωτερικού γαλύβδινου κελύφους περίπου στην ίδια περιοχή, κοντά στη βάση της θλιβόμενης πλευράς του δοκιμίου. Οι παραμορφώσεις σε τοπικό επίπεδο, όπως καταγράφηκαν μέσω Strain Gauges στο εσωτερικό και το εξωτερικό χαλύβδινο κέλυφος, ανέδειξαν την ικανοποιητική συνεργασία των τελευταίων και συμβάδισαν σε γενικές γραμμές με την προαναφερθείσα συμπεριφορά του φορέα, ενώ κατέγραψαν τη μετακίνηση του ουδέτερου άζονα της διατομής προς τη θλιβόμενη περιοχή, όπως αναμενόταν δεδομένης της διαφοροποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων του κονιάματος υπό θλίψη και εφελκυσμό. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης αναμένεται να συνεισφέρουν στην αποτίμηση της συμπεριφοράς της σύνθετης διατομής μορφής «sandwich», μέσω σύγκρισης με τα αντίστοιχα της αμιγώς χαλύβδινης διατομής καθώς και με αποτελέσματα αναλυτικών σχέσεων και αριθμητικών προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, με τελικό στόχο την αξιολόγησή της ως εναλλακτικής λύσης για την κατασκευή σύγχρονων πυλώνων ανεμογεννητριών.

# 7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις θερμές ευχαριστίες τους προς τον Δρ. Χ. Τέα και την εταιρεία BAUMIT ΕΛΛΑΣ Α.Ε. για την ευγενική παραχώρηση του συνόλου της ποσότητας κονιάματος που απαιτήθηκε για την υλοποίηση των πειραμάτων, τον Δρ. Α. Ασπρογέρακα και το Τμήμα Τεχνικών Υλικών & Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) για τη συντήρηση των δοκιμίων κονιάματος και τη διενέργεια των δοκιμών ελέγχου αντοχής του, καθώς και τους τελειόφοιτους της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Ν. Παπαγεωργίου και κ. Ν. Ψυχάρη για τη συνεισφορά τους στην προετοιμασία των πειραματικών δοκιμών.

# 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] GWEC, "Global wind 2016 report", Global Wind Energy Council, 2017.
- [2] REN21, "Renewables 2017 global status report", *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, 2017.
- [3] Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF, "Global trends in renewable energy investment 2017", *Frankfurt School of Finance & Management gGmbH*, 2017.
- [4] NREL, "Analysis of transportation and logistics challenges affecting the deployment of larger wind turbines: summary of results", *National Renewable Energy Laboratory*, 2014.
- [5] IRENA, "Leveraging local capacity for onshore wind", *International Renewable Energy Agency*, 2017.
- [6] IRENA, "Innovation outlook: off shore wind", *International Renewable Energy Agency*, 2016.
- [7] Schaumann P. & Keindorf C., "Sandwich-towers for wind energy converters", *DEWI Magazin*, Issue 33, 2008, pp. 65-76.
- [8] Schaumann P. et al., "Schalenbeulen von sandwichzylindern mit einem neuen elastomer als verbundwerkstoff", *Stahlbau*, Vol. 75, Issue 4, 2006, pp. 748-753.
- [9] Lim S. et al., "A study on optimal design of filament winding composite tower for 2 MW class horizontal axis wind turbine systems", *International Journal of Composite Materials*, Vol. 3, Issue 1, 2013, pp. 15-23.
- [10] Wei S. et al., "Performance of new sandwich tube under axial loading: Experiment", *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 121, Issue 12, 1995, pp. 1806-1814.
- [11] Zhao X-L. et al., "Tests of concrete-filled double skin CHS composite stub columns", *Steel and Composite Structures—An International Journal*, Vol. 2, Issue 2, 2002, pp. 129-146.

- [12] Tao Z. et al., "Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam–columns", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, Issue 8, 2004, pp. 1129-1158.
- [13] Han L-H. et al., "Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending", *Engineering Structures*, Vol. 28, Issue 12, 2006, pp. 1698-1714.
- [14] Hassanein M.F. & Kharoob O.F., "Compressive strength of circular concrete-filled double skin tubular short columns", *Thin-Walled Structures*, Vol. 77, 2014, pp. 165-173.
- [15] Dimopoulos C.A. & Gantes C.J., "Experimental investigation of buckling of wind turbine tower cylindrical shells with opening and stiffening under bending", *Thin-Walled Structures*, Vol. 54, 2012, pp. 140-155.
- [16] Vernardos S.M. & Gantes C.J., "Cross-section optimization of sandwich-type cylindrical wind turbine towers", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 8, Issue 4, 2015, pp. 471-480.
- [17] KEMA, "LINEA 810 SL", *Technical Data Sheet*, Issue March 2014 (Revision: April 2016), 2016.
- [18] Keindorf C. & Schaumann P., "Sandwichtürme für windenergieanlagen mit höherfesten stahl- und verbundwerkstoffen", *Stahlbau*, Vol. 79, Issue 9, 2010, pp. 648-659.
- [19] CEN, "Metallic materials Tensile testing part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009)", *European Committee for Standardization*, 2009.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON BENDING BEHAVIOR OF "SANDWICH"-SECTION SHELLS FOR WIND TURBINE TOWERS

Stylianos M. Vernardos PhD Candidate National Technical University of Athens Athens, Greece e-mail: <u>svernard@central.ntua.gr</u>

Xenofon A. Lignos Dr. Electrical Engineer National Technical University of Athens Athens, Greece e-mail: lignosx@central.ntua.gr Efstratios G. Badogiannis Assist. Professor National Technical University of Athens Athens, Greece e-mail: <u>badstrat@central.ntua.gr</u>

Charis J. Gantes Professor National Technical University of Athens Athens, Greece e-mail: <u>chgantes@central.ntua.gr</u>

### SUMMARY

Increased height of modern wind turbines encumbers the lower segments of their towers with larger loads, and dictates the expansion of tower-base diameters beyond the limits imposed by today's means of transportation. This issue is addressed herein by substituting conventional steel tower sections with sandwich-type ones, consisting of two steel faces and a cement-mortar core. This geometry is expected to enhance the stiffness and load capacity of the section with minimal weight and cost addition. In this context, an experimental study is presented in terms of both design and implementation, involving two identical, downscaled, sandwich-tower specimens, constructed for this purpose. The latter were subjected to bending in cantilever set-up, by means of lateral quasi-static loading at their free end. Test results, obtained by extensive use of LVDT, strain gauges and optical means, showed satisfactory repeatability and predictability. The different layers of the sandwich section presented a consolidated behavior during the process, until a local-buckling failure mechanism occurred at similar loads for both specimens. A preliminary comparison with identical tests on conventional steel specimens presents a positive foresight of this solution's potential.