

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΚΕΛΥΦΩΝ ΤΥΠΟΥ SANDWICH ΓΙΑ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στυλιανός Μ. Βερνάρδος

Υποψήφιος Διδάκτωρ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: s.vernardos@gmail.com

Χάρης Ι. Γαντές

Καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με στόχο την αντιμετώπιση των υψηλών απαιτήσεων αντοχής και δυσκαμψίας των σύγχρονων πυλώνων ανεμογεννητριών, ύψους άνω των 100 m και των δυσχερειών στη μεταφορά των επιμέρους τμημάτων τους με διάμετρο μεγαλύτερη των 4 m, εξετάζεται στην παρούσα μελέτη η χρήση κελυφών τύπου *sandwich*, τα οποία συνίστανται από δύο χαλύβδινα ελάσματα και έναν συνδετικό πυρήνα από ελαφρύτερο υλικό, διαθέτοντας έτσι μεγαλύτερη δυσκαμψία και ταυτόχρονα χαμηλό βάρος, ως εναλλακτική λύση αντί των παραδοσιακών, αμιγώς χαλύβδινων, κοίλων διατομών. Καταστρώνονται, αρχικώς, οι αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της σύνθετης διατομής στην ελαστική περιοχή, είτε υπό αξονική φόρτιση, είτε υπό καθαρή κάμψη, επαληθεύεται, έπειτα η ορθότητά τους μέσω σύγκρισης των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από δύο επιμέρους προσομοιώσεις, στα προγράμματα *myBiaxial* και *Adina* και, τέλος, εισάγονται υπό τη μορφή κώδικα στο λογισμικό *Mathematica*, ώστε να πραγματοποιηθούν εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις. Από τις τελευταίες, που αφορούν ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων χάλυβα και σκυροδέματος, καθώς και παχών των ελασμάτων και του πυρήνα, εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα, βάσει των οποίων επιχειρείται ο εντοπισμός των βέλτιστων επιλογών των παραμέτρων αυτών, με κριτήριο την ταυτόχρονη ικανοποίηση της απαίτησης για μεγιστοποίηση τόσο της ελαστικής ροπής αντοχής όσο και της ισοδύναμης δυσκαμψίας.

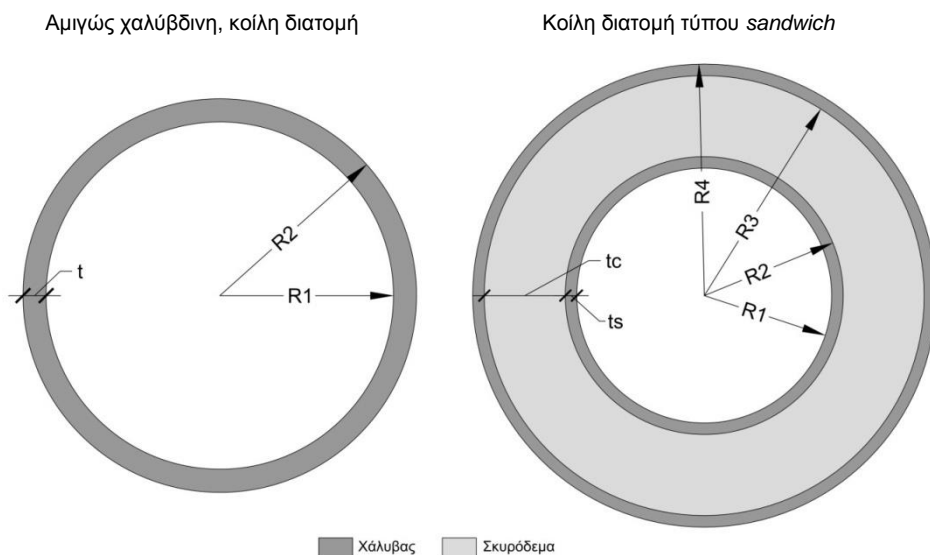
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με ορίζοντα το στόχο που έχει τεθεί από την Ε.Ε. για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές κατά 20% επί της συνολικής παραγωγής έως το έτος 2020 [1], η προσπάθεια που καταβάλλεται για μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού απαιτεί την κατασκευή ανεμογεννητριών με υψηλότερους πυλώνες και μεγαλύτερα πτερύγια [2]. Η τάση αυτή συνεπάγεται υψηλότερες καμπτικές ροπές στη βάση του πυλώνα, ο οποίος παράλληλα γίνεται πιο εύκαμπτος, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερες πλευρικές παραμορφώσεις, αυξημένο κίνδυνο συντονισμού με τα ηλεκτρομηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας, καθώς και εντονότερα φαινόμενα κόπωσης στις συνδέσεις [2], [3], [4]. Μολονότι η πιο προφανής και δόκιμη λύση για το πρόβλημα αυτό είναι η αύξηση της διαμέτρου και του πάχους της διατομής του πυλώνα, η τιμή της πρώτης περί τα 4m είναι δύσκολο να ξεπεραστεί, καθώς η μεταφορά μεγαλύτερων τμημάτων είναι ανέφικτη στις, συνήθως δυσπρόσιτες, περιοχές εγκατάστασης των ανεμογεννητριών [2], [3], [5], [6].

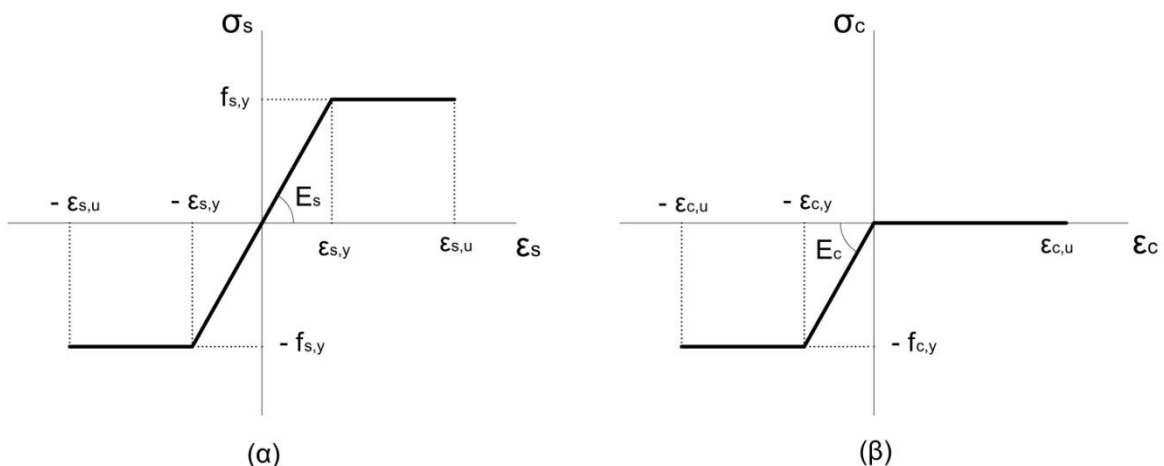
Η εναλλακτική λύση που μελετάται στο συγκεκριμένο άρθρο αφορά τη χρήση στοιχείων κελύφους τύπου *sandwich* σε πυλώνες ύψους άνω των 100m, τεχνολογία που έχει μελετηθεί και εφαρμοστεί στο πρόσφατο παρελθόν σε άλλα φέροντα στοιχεία όπως υποστυλώματα και βάθρα, ωστόσο, στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, ενώ είναι διαδεδομένη όσον αφορά την κατασκευή των πτερυγίων, έχει ελάχιστα διερευνηθεί ως δυνατότητα για την κατασκευή των πυλώνων, όπως στο άρθρο [7] της βιβλιογραφίας. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο χαλύβδινα ελάσματα, τα οποία περικλείουν έναν πυρήνα από ελαφρύτερο υλικό που τα συγκρατεί, με συνέπεια την αύξηση της δυσκαμψίας, λόγω της αυξημένης απόστασης μεταξύ των ισχυρών χαλύβδινων ελασμάτων, με ταυτόχρονη μείωση του βάρους, εξαιτίας της ελαφριάς υπόστασης του συνδετικού μέσου. Παρά τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα παραγωγής σύγχρονων υλικών όπως τα κυψελωτά από αλουμίνιο ή κάποιο άλλο μέταλλο, τα οποία μοιάζουν ιδανική επιλογή για τον πυρήνα μίας διατομής *sandwich*, λόγω του συνδυασμού υψηλής δυσκαμψίας και εξαιρετικά χαμηλού ειδικού βάρους που τα χαρακτηρίζει [8], [9], το κόστος παρασκευής τους αποτελεί ακόμα τροχοπέδη για την ευρεία χρήση τους [9]. Βάσει αυτού, η χρήση ενός παραδοσιακού υλικού, όπως το σκυρόδεμα, ως μέσου πλήρωσης του πυρήνα, κρίνεται για τα σημερινά δεδομένα ως πιο δόκιμη, με κριτήριο τη σχέση μεταξύ κόστους και ευεργετικών φυσικών ιδιοτήτων.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μία προκαταρκτική διερεύνηση της συμπεριφοράς μίας τέτοιας κατασκευής, υιοθετείται ένα απλοποιημένο προσομοίωμα πυλώνα διατομής τύπου *sandwich*, η ελαστική συμπεριφορά του οποίου εξετάζεται μέσω τριών διαφορετικών προσεγγίσεων, προς διασταύρωση των αποτελεσμάτων: την κατάστρωση αναλυτικών εξισώσεων και επίλυση τους σε περιβάλλον Mathematica [10], την ανάλυση μέσω του λογισμικού myBiaxial [11] και την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος Adina [12]. Στη συνέχεια, μέσω παραμετρικών αναλύσεων, κατά τις οποίες μεταβάλλονται τόσο οι ο ποιότητες των υλικών όσο και οι αναλογίες των παχών τους, αναζητούνται οι βέλτιστες από στατικής πλευράς επιλογές, όσον αφορά τις δύο αυτές παραμέτρους. Σε κάθε περίπτωση, λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές ιδιότητες των συμμετεχόντων υλικών, αγνοούνται ωστόσο, στα πλαίσια της προκαταρκτικής αυτής μελέτης, πιθανά φαινόμενα αποκόλλησης των στρώσεων της διατομής, καθώς προϋποτίθεται πλήρης συνεργασία μεταξύ των δύο ελασμάτων και του πυρήνα.

Η υπό εξέταση διατομή, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από δύο χαλύβδινα ελάσματα, συγκρατούμενα από έναν πυρήνα σκυροδέματος, παρουσιάζεται στο Σχ. 1, ενώ οι καταστατικοί νόμοι των δύο υλικών εκφράζονται από τα απλοποιημένα - σε αυτή τη φάση έρευνας - διαγράμματα του Σχ. 2. Κατά παραδοχή, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2, ο εξεταζόμενος χάλυβας συμπεριφέρεται ακριβώς κατά τον ίδιο τρόπο σε θλίψη και εφελκυσμό, ενώ αμελείται πλήρως η ικανότητα του σκυροδέματος να παραλάβει εφελκυστικά φορτία. Στη διατομή ασκείται αρχικά αξονικό φορτίο και εν συνεχεία καμπτική ροπή, με στόχο να διερευνηθεί η συμπεριφορά της τόσο υπό αξονική καταπόνηση όσο και υπό απλή κάμψη. Καθώς κατά κανόνα ο σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών, και ειδικότερα εκείνων που χαρακτηρίζονται από μεγάλο ύψος και συνεπώς αυξημένο κόστος κατασκευής, είναι τόσο συντηρητικός ώστε να αφορά μόνο στο εύρος της ελαστικής περιοχής, η παρουσιαζόμενη, στο παρόν άρθρο, προκαταρκτική έρευνα αφορά αποκλειστικά την ελαστική συμπεριφορά της διατομής τύπου *sandwich* και κατ' επέκταση του πυλώνα που συνίσταται από αυτή, έως ότου, σε κάποιο σημείο της, το αντίστοιχο υλικό φθάσει στο όριο διαρροής του.



Σχ. 1: Γεωμετρικά στοιχεία τυπικής, αμιγώς χαλύβδινης, κοίλης διατομής και κοίλης διατομής τύπου *sandwich* (οι αναλογίες των παχών αποσκοπούν στην ευκρίνεια της απεικόνισης και όχι στη ρεαλιστική προσομοίωση των διατομών)



Σχ. 2: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων (α) χάλυβα, (β) σκυροδέματος

3. ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

3.1 Αξονική καταπόνηση

Η συμπεριφορά ενός κυλίνδρου μήκους L , διατομής *sandwich* με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Σχ. 1 και τα υλικά του Σχ. 2, ο οποίος καταπονείται από εφελκυσμό, διέπεται από την εξ. (1), ενώ στην εξ. (2) περιγράφεται η συμπεριφορά σε θλιπτική φόρτιση,

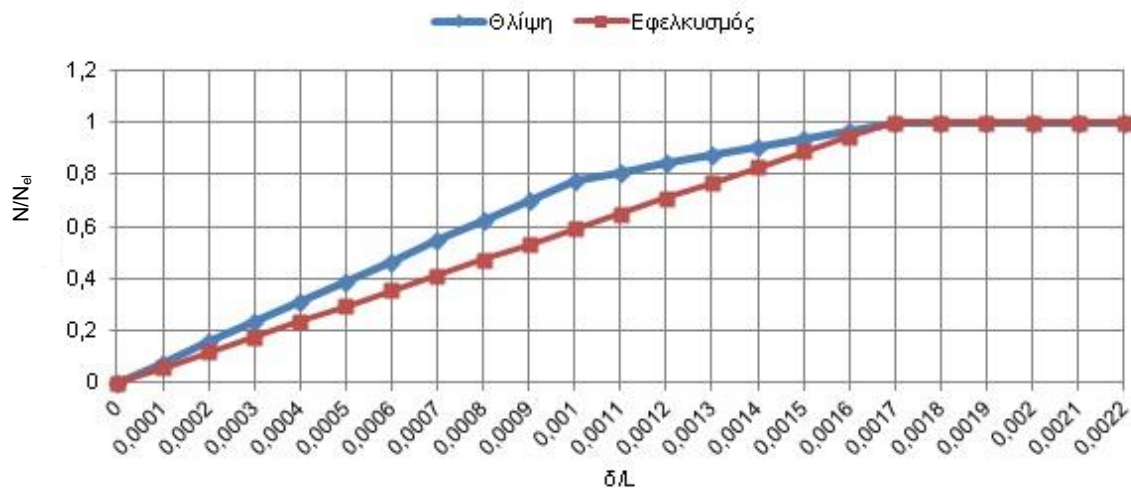
$$N = \frac{\delta}{L} \pi E_s [(R_4^2 - R_3^2) + (R_2^2 - R_1^2)] \quad (1)$$

$$N = \frac{\delta}{L} \pi [E_s (R_4^2 - R_3^2) + E_c (R_3^2 - R_2^2) + E_s (R_2^2 - R_1^2)] \quad (2)$$

όπου N είναι η εκάστοτε ασκούμενη αξονική δύναμη και δ η αντίστοιχη αξονική μετακίνηση. Η συμπεριφορά αυτή αναπαρίσταται γραφικά στα διαγράμματα του Σχ. 3 για $L=100\text{ m}$, $E_s=210\text{ GPa}$, $f_{y,s}=355\text{ MPa}$, $E_c=30\text{ GPa}$, $f_{y,c}=30\text{ MPa}$, $R_4=2000\text{ mm}$, $R_3=1995\text{ mm}$, $R_2=1895\text{ mm}$, $R_1=1890\text{ mm}$, με τους άξονες αδιαστατοποιημένους, όσον αφορά τον οριζόντιο άξονα ως προς το μήκος του κυλίνδρου και όσον αφορά τον κατακόρυφο ως προς την ελαστική αξονική δύναμη που υπολογίζεται από τις εξ. (3), (4) για εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα.

$$N = f_{y,s} \pi [(R_4^2 - R_3^2) + (R_2^2 - R_1^2)] \quad (3)$$

$$N = \frac{\delta}{L} \pi E_s [(R_4^2 - R_3^2) + (R_2^2 - R_1^2)] + f_{y,c} \pi (R_3^2 - R_2^2) \quad (4)$$



Σχ. 3: Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα συμπεριφοράς υπό εφελκυσμό και θλίψη για $L=100\text{ m}$, $E_s=210\text{ GPa}$, $f_{y,s}=355\text{ MPa}$, $E_c=30\text{ GPa}$, $f_{y,c}=30\text{ MPa}$, $R_4=2000\text{ mm}$, $R_3=1995\text{ mm}$, $R_2=1895\text{ mm}$, $R_1=1890\text{ mm}$

3.2 Καμπτική καταπόνηση

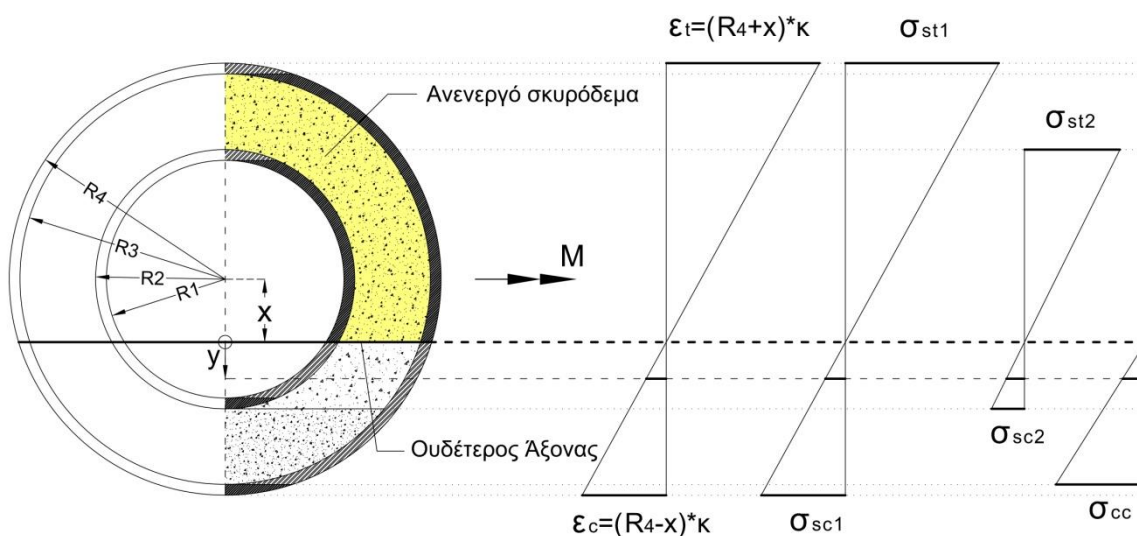
Με απώτερο σκοπό την πλήρη εποπτεία της ελαστικής συμπεριφοράς μίας διατομής τύπου *sandwich* υποβαλλόμενης σε καθαρή κάμψη, καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός των

γενικών εκείνων εξισώσεων οι οποίες οδηγούν στον υπολογισμό της ελαστικής ροπής. Ως πρώτο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση, απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα, μέσω της εξίσωσης των εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διατομή κατά την εφαρμογή μίας συγκεντρωμένη ροπής στο κέντρο της. Η βασική εξ. (5), που εκφράζει την ισορροπία των δυνάμεων αυτών, μέσω του μηδενισμού της συνολικής τάσης στη συνολική επιφάνεια A της διατομής, αναλύεται για την περίπτωση της σύνθετης διατομής στην εξ. (6), όπου x είναι η απόσταση του ουδέτερου άξονα από το κέντρο της διατομής και y η θέση της εκάστοτε εξεταζόμενης χορδής ως προς αυτόν. Προηγουμένως, η διατομή έχει νοερά διασπαστεί σε επιμέρους ζώνες ώστε να είναι εφικτή η ολοκλήρωση των δυνάμεων όπως φαίνεται στο Σχ. 4, στο οποίο επίσης απεικονίζονται οι τάσεις και παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε κάθε υλικό και επομένως σε κάθε ζώνη. Καθώς η εξ. (6) δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί ως προς x με συμβολικό τρόπο, επιλέγονται σε αυτήν τη φάση της διαδικασίας συγκεκριμένες τιμές για τα πάχη και τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών, καθώς και μία τυχαία τιμή καμπυλότητας για τη διατομή. Μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας κάποιας αριθμητικής μεθόδου, όπως η μέθοδος Newton-Raphson, υπολογίζεται έπειτα η τιμή του x , η οποία εκφράζει τη θέση του ουδέτερου άξονα.

$$\int_A \sigma_x dA = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \int_{R_3-x}^{R_4-x} E_s \kappa y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \\ & + \int_0^{R_3-x} E_s \kappa y \left(\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \right) dy \\ & + \int_{R_2-x}^{R_3-x} E_c \kappa y \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} dy \\ & + \int_0^{R_2-x} E_c \kappa y \left(\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} \right) dy \\ & + \int_{R_1-x}^{R_2-x} E_s \kappa y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy \\ & + \int_0^{R_1-x} E_s \kappa y \left(\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} \right) dy \\ & - \int_0^{-x} E_s \kappa y \left(\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \right) dy \\ & - \int_{-x}^{-R_3-x} E_s \kappa y \left(\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \right) dy \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{-R_3-x}^{-R_4-x} E_s \kappa y \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} dy \\
& - \int_0^{-x} E_s \kappa y \left(\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} \right) dy \\
& - \int_{-x}^{-R_1-x} E_s \kappa y \left(\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} \right) dy \\
& - \int_{-R_1-x}^{-R_2-x} E_s \kappa y \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy = 0
\end{aligned}$$



Σχ. 4: Διατομή τύπου sandwich υπό καθαρή κάμψη

Με δεδομένη πλέον τη θέση του ουδέτερου άξονα είναι εφικτός ο υπολογισμός της ροπής που έχει - θεωρητικά - προκαλέσει την καμπυλότητα που υποτέθηκε παραπάνω. Η εξ. (7), μέσω της οποίας προσδιορίζεται η ροπή που έχει αναπτυχθεί, συγκεκριμενοποιείται για τη διατομή του Σχ. 4 στην εξ. (8).

Από την εξ. (9), με γνωστά τα μεγέθη της ροπής και της καμπυλότητας που αυτή δημιουργεί, μπορεί τώρα να υπολογιστεί η ισοδύναμη δυσκαμψία της σύνθετης διατομής, \overline{EI} , μέσω της οποίας, τέλος, προσδιορίζεται η ζητούμενη ελαστική ροπή, ως εκείνη για την οποία το κρίσιμότερο σημείο της διατομής εισέρχεται στη διαρροή. Τα υποψήφια κρίσιμα σημεία είναι αφενός η ακραία ίνα του εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος στην εφελκόμενη περιοχή, στην οποία το σκυρόδεμα παραμένει ανενεργό και δε συνεισφέρει στην παραλαβή φορτίων και αφετέρου η ακραία ίνα του σκυροδέματος στη θλιβόμενη περιοχή, όπου αυτό το σημαντικά ασθενέστερο σε σχέση με το χάλυβα υλικό αναπτύσσει τη μέγιστη τάση του. Βάσει των παραπάνω, η ελαστική ροπή της διατομής υπολογίζεται, τελικά, από την εξ. (10).

$$\int_A \sigma_x y \, dA = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
M &= \int_{R_3-x}^{R_4-x} E_s \kappa y^2 \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} \, dy \\
&+ \int_0^{R_3-x} E_s \kappa y^2 \left(\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_{R_2-x}^{R_3-x} E_c \kappa y^2 \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \, dy \\
&+ \int_0^{R_2-x} E_c \kappa y^2 \left(\sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_{R_1-x}^{R_2-x} E_s \kappa y^2 \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} \, dy \\
&+ \int_0^{R_1-x} E_s \kappa y^2 \left(\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_0^{-x} E_s \kappa y^2 \left(\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_{-x}^{-R_3-x} E_s \kappa y^2 \left(\sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_3^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_{-x}^{-R_4-x} E_s \kappa y^2 \sqrt{R_4^2 - (x+y)^2} \, dy \\
&+ \int_{-R_3-x}^{-x} E_s \kappa y^2 \left(\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_{-R_1-x}^{-R_1-x} E_s \kappa y^2 \left(\sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} \right) \, dy \\
&+ \int_{-R_1-x}^{-R_2-x} E_s \kappa y^2 \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} \, dy
\end{aligned} \quad (8)$$

$$M = (\overline{EI}) \kappa \quad (9)$$

$$M_{el} = \min \left\{ M_{s,max} = \frac{f_{y,s} \overline{EI}}{E_s (R_4 + x)}, M_{c,max} = \frac{f_{y,c} \overline{EI}}{E_c (R_3 - x)} \right\} \quad (10)$$

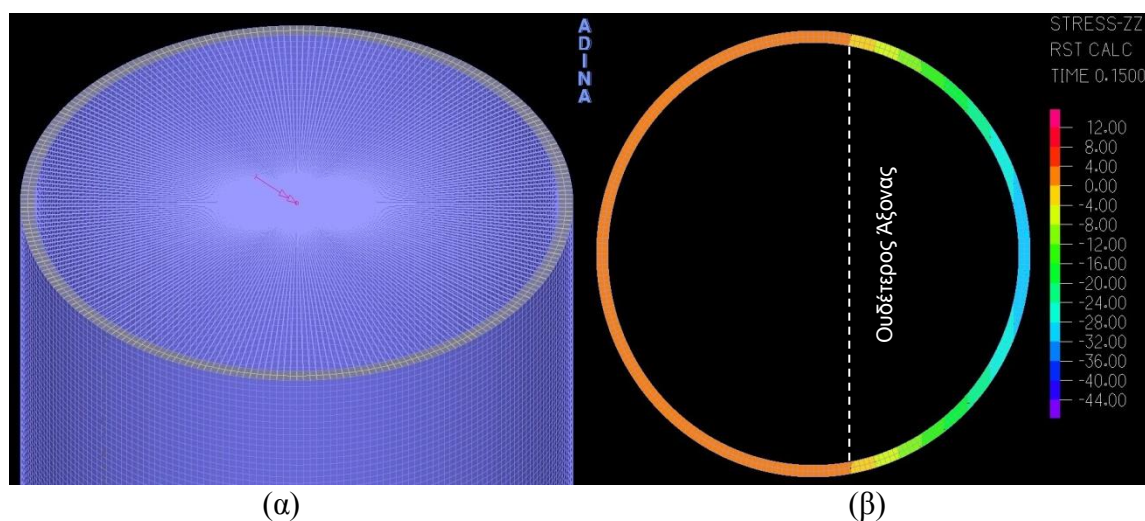
3.3 Επιβεβαίωση ορθότητας υπολογισμών

Οι εξισώσεις της προηγούμενης ενότητας, οι οποίες περιγράφουν την ελαστική συμπεριφορά μίας διατομής τύπου *sandwich*, υποβαλλόμενης σε καθαρή κάμψη, μεταφέρονται υπό τη μορφή κώδικα στο πρόγραμμα Mathematica [10], ώστε να καταστεί δυνατή η επεξεργασία και παραμετροποίησή τους, με στόχο την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων.

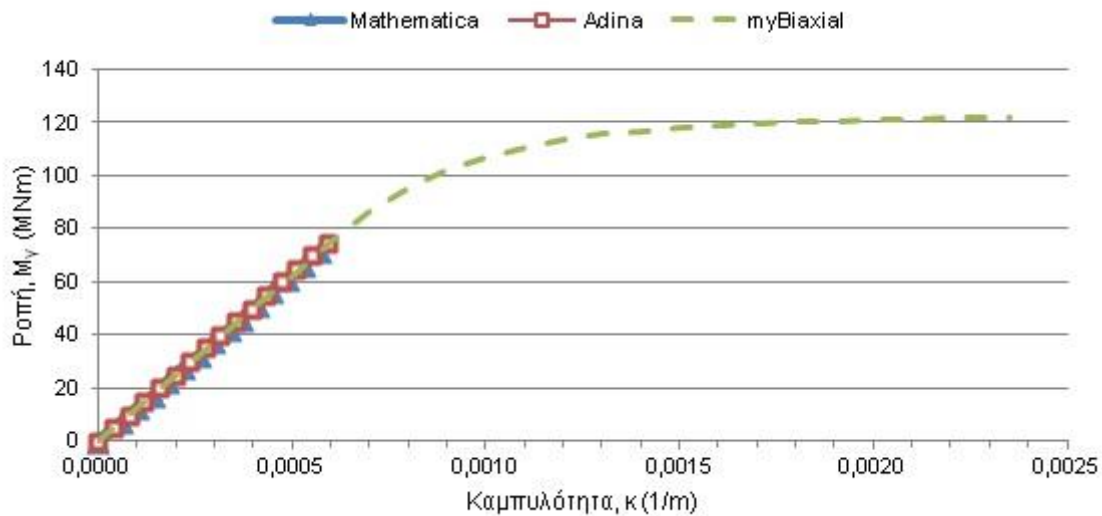
Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα των υπολογισμών, επιχειρήθηκε η διασταύρωση των αποτελεσμάτων του κώδικα Mathematica [10] με τα αποτελέσματα του λογισμικού *myBiaxial* [11], εξειδικευμένου στην ανάλυση σύνθετων διατομών υπό καμπτική και αξονική καταπόνηση, καθώς και με εκείνα του προγράμματος αριθμητικής ανάλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, *Adina* [12]. Ως μέσο σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για ποικίλους συνδυασμούς παχών και ιδιοτήτων των υλικών, πάντοτε μέχρι το όριο της πρώτης διαρροής.

Στην περίπτωση του λογισμικού *Adina* [12], η προσομοίωση της διατομής τύπου *sandwich* πραγματοποιήθηκε μέσω ενός κυλίνδρου, πακτωμένου στη βάση του και υποβαλλόμενου σε καθαρή κάμψη, μέσω συγκεντρωμένης, καμπτικής ροπής στην κορυφή του. Ο κύλινδρος συνίσταται από τρισδιάστατα, συμπαγή πεπερασμένα στοιχεία (3D-Solid elements), που προσομοιώνουν τον πυρήνα σκυροδέματος και πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (Shell elements), που προσομοιώνουν τα δύο χαλύβδινα ελάσματα. Προκειμένου να συμπεριληφθεί στην ανάλυση η προϋπόθεση της πλήρους και άρρηκτης συνεργασίας των τριών στρώσεων της διατομής, το προσομοίωμα κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε τα συμπαγή στοιχεία του πυρήνα να διαθέτουν κοινούς κόμβους με τα επιφανειακά στοιχεία των ελασμάτων εκατέρωθέν του. Τμήμα του προσομοιώματος απεικονίζεται στο Σχ. 5(α).

Όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων του Σχ. 6, υπήρξε απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών προσεγγίσεων. Επιπροσθέτως, με τη βοήθεια της χρωματικής αναπαράστασης της κατανομής των τάσεων που αναπτύσσονται στη διατομή (Σχ. 5(β)), είναι εφικτός ο προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα και η σύγκριση, έπειτα, με τη θέση που προκύπτει από τον κώδικα που έχει συνταχθεί στο περιβάλλον Mathematica [10]. Τα αποτελέσματα και σε αυτήν την περίπτωση παρουσίασαν απόλυτη σύγκλιση.



Σχ. 5: (α) Προσομοίωμα κυλινδρικής διατομής sandwich με πεπερασμένα στοιχεία, στο πρόγραμμα Adina και (β) Χρωματική παρουσίαση διαβάθμισης αναπτυσσόμενων τάσεων για τον προσδιορισμό του ουδέτερου άξονα

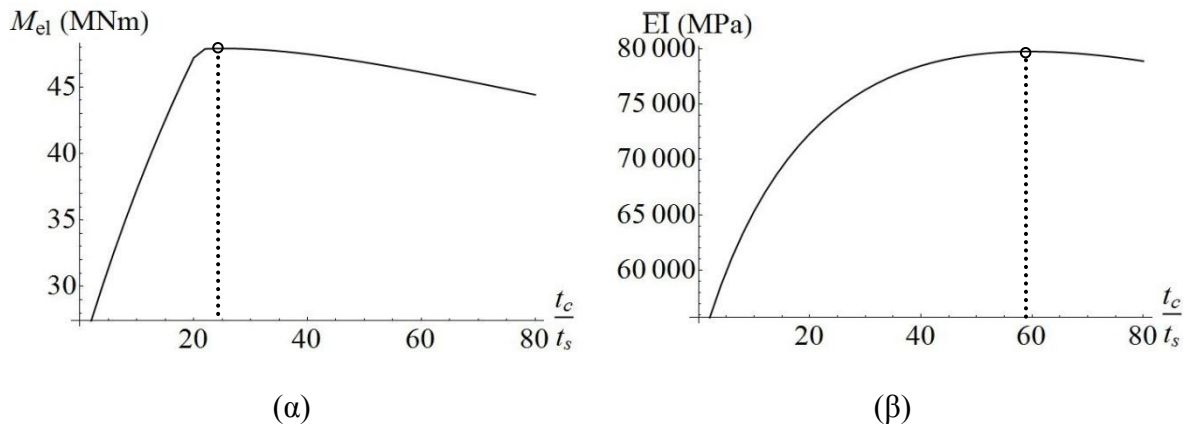


Σχ. 6: Σύγκριση διαγράμματος ροπών - καμπυλοτήτων μεταξύ Mathematica, myBiaxial και Adina για διατομή τύπου sandwich, χαρακτηριστικών:
 $E_s=210 \text{ GPa}$, $f_{s,y}=355 \text{ MPa}$, $E_c=32 \text{ GPa}$, $f_{c,y}=30 \text{ MPa}$, $t_s=10 \text{ mm}$, $t_c=100 \text{ mm}$, $R_4=2000 \text{ mm}$

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Αφού επαληθεύτηκε η ορθότητα των εξισώσεων της ενότητας 2.2 και του κώδικα Mathematica [10] που στηρίχθηκε σε αυτές, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με στόχο τη διερεύνηση της επιρροής των διαφορετικών συνδυασμών παχών και ιδιοτήτων των υλικών στην αντοχή της διατομής σε καμπτική καταπόνηση.

Αρχικά, μεταβλήθηκε το πάχος του πυρήνα σκυροδέματος λαμβάνοντας τιμές από $t_c=10 \text{ mm}$ έως $t_c=400 \text{ mm}$, με βήμα 10 mm , διατηρώντας τις ιδιότητες των υλικών ως έχουν στην περιγραφή του Σχ. 6 και επιλέγοντας πάχος χαλύβδινων ελασμάτων $t_s=5 \text{ mm}$. Η μεταβολή της ελαστικής ροπής σε συνάρτηση με το λόγο των παχών των υλικών παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχ. 7(α). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, για το συγκεκριμένο συνδυασμό ποιότητας υλικών και πάχους χάλυβα, υπάρχει μία τιμή του σκυροδέματος για την οποία μεγιστοποιείται η ελαστική ροπή αντοχής της διατομής και πέρα από την οποία η αύξηση του πάχους δεν ωφελεί, αλλά αντιθέτως υποβιβάζει την αντοχή. Από το ίδιο σχήμα φαίνεται πως η τιμή αυτή του λόγου παχών, για τα συγκεκριμένα δεδομένα, βρίσκεται περίπου στο 26. Ωστόσο, θα ήταν επιπόλαιο να αποφανθεί κανείς για τη βέλτιστη - από στατικής άποψης - αναλογία υλικών, αν δεν εξετάσει επιπλέον την επιρροή του λόγου των παχών στην ισοδύναμη δυσκαμψία της διατομής. Όπως απεικονίζεται στο Σχ. 7(β), η ισοδύναμη δυσκαμψία παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την ελαστική ροπή, όμως ο βέλτιστος λόγος παχών βρίσκεται σε αυτήν την περίπτωση κοντά στο 60, κάτι το οποίο συνεπάγεται περισσότερο από διπλάσιο πάχος σκυροδέματος σε σχέση με εκείνο που προέκυψε βάσει του προηγούμενου κριτηρίου, ενώ και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους υπόλοιπους συνδυασμούς ιδιοτήτων των υλικών, προκύπτουν ποιοτικώς όμοια.



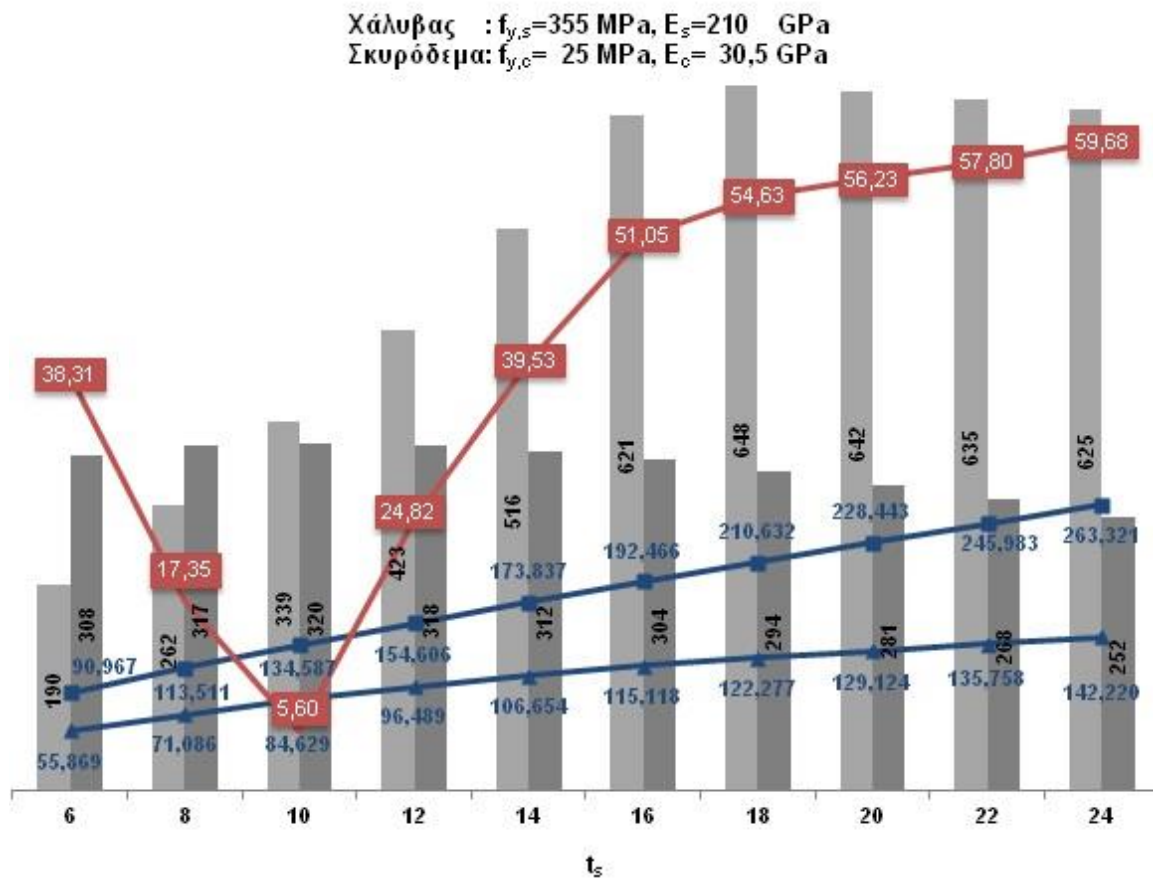
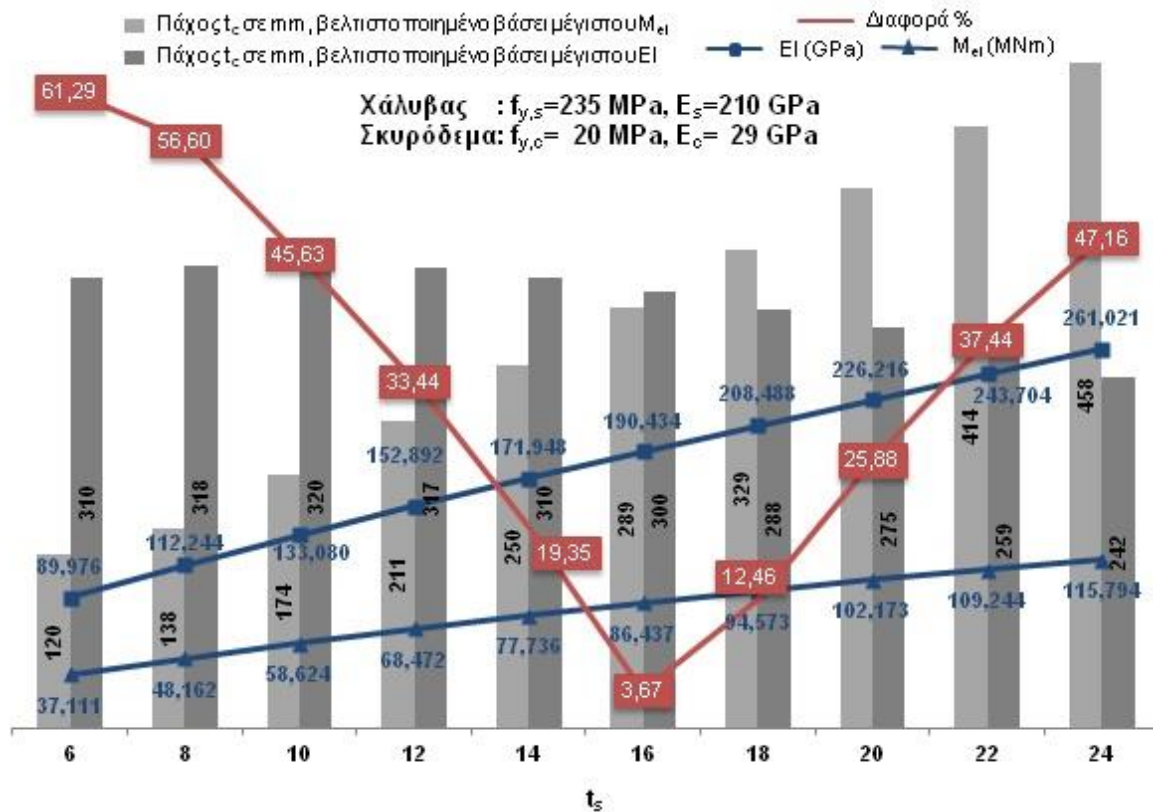
Σχ. 7: Επιρροή του λόγου παχών σκυροδέματος και χάλυβα (α) στην ελαστική ροπή αντοχής, (β) στην ισοδύναμη δυσκαμψία διατομής τύπου sandwich, χαρακτηριστικών:
 $E_s=210 \text{ GPa}$, $f_{s,y}=355 \text{ MPa}$, $E_c=32 \text{ GPa}$, $f_{c,y}=30 \text{ MPa}$, $t_s=10 \text{ mm}$, $t_c=100 \text{ mm}$, $R_4=2000 \text{ mm}$

Με βάση την παρατήρηση αυτή, προκύπτει η ανάγκη να αναζητηθεί το πάχος σκυροδέματος εκείνο, το οποίο θα ικανοποιεί κατά το δυνατόν την απαίτηση τόσο για μέγιστη ροπή αντοχής, όσο και για μέγιστη δυσκαμψία. Μέσω κατάλληλου αλγορίθμου, που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό σε κώδικα Mathematica [10], εντοπίστηκαν για ένα σημαντικό εύρος ποιοτικών χαρακτηριστικών των υλικών, αλλά και παχών των χαλύβδινων ελασμάτων, οι τιμές πάχους του πυρήνα σκυροδέματος που επιτυγχάνουν την ταυτόχρονη ικανοποίηση των δύο απαιτήσεων, στο μέγιστο εφικτό βαθμό.

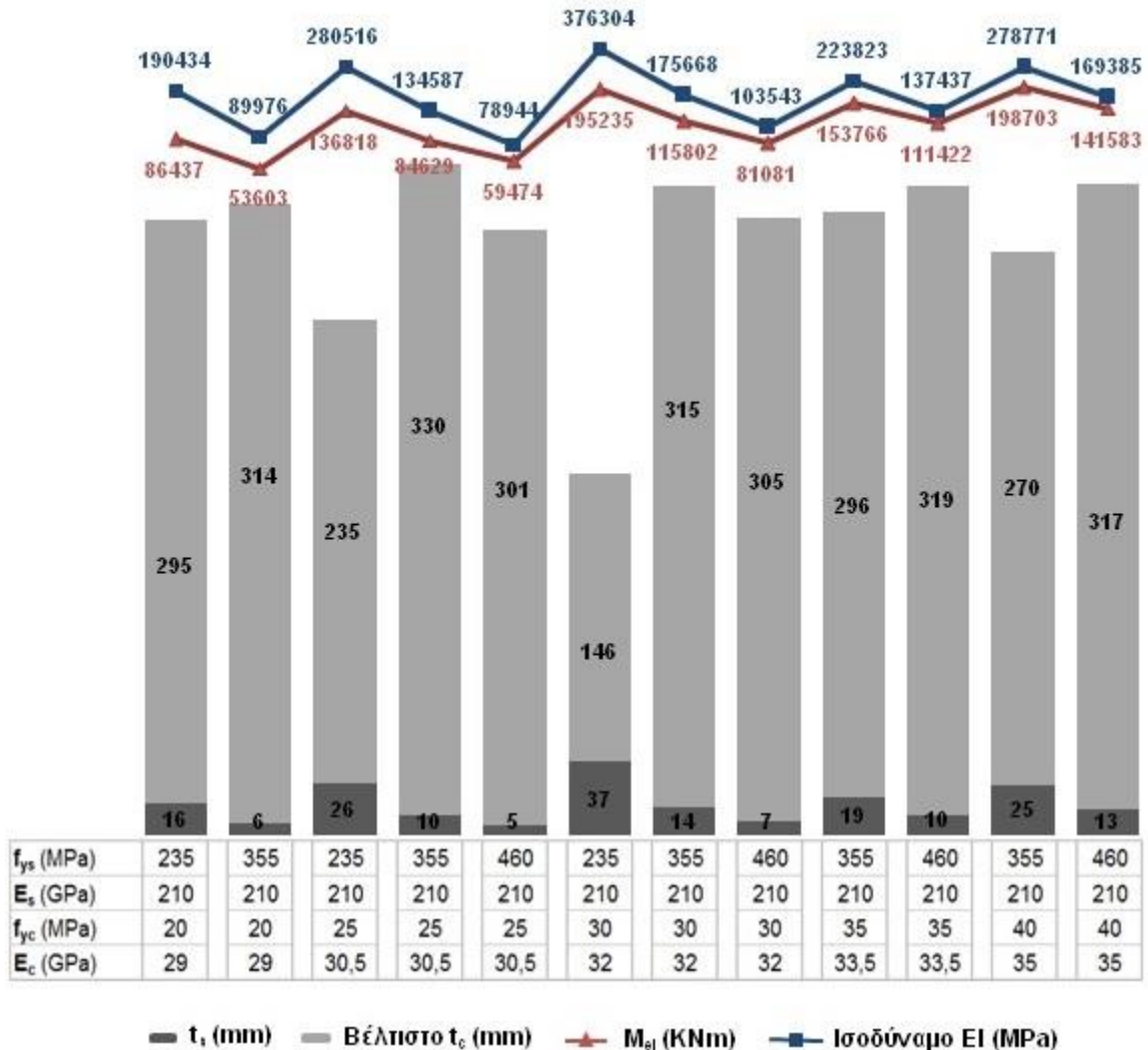
Στα διαγράμματα του Σχ. 8 παρουσιάζονται - ενδεικτικά για δύο επιλογές ποιότητας υλικών - τα αποτελέσματα της αναζήτησης εκείνων των αναλογιών πάχους, οι οποίες επιφέρουν είτε μέγιστη ελαστική ροπή, είτε μέγιστη ισοδύναμη δυσκαμψία στη διατομή. Συγκεκριμένα, για δεδομένο κάθε φορά συνδυασμό ποιοτικών χαρακτηριστικών των υλικών, τοποθετούνται στον οριζόντιο άξονα τα πάχη των χαλύβδινων ελασμάτων, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται τα βέλτιστα πάχη του πυρήνα σκυροδέματος, στην αριστερή στήλη βάσει του πρώτου κριτηρίου και στη δεξιά βάσει του δεύτερου. Αναγράφονται ακόμα, για κάθε τιμή πάχους ελάσματος, οι μέγιστες τιμές ελαστικής ροπής και ισοδύναμης ακαμψίας που προκύπτουν από το αντίστοιχο βέλτιστο πάχος του πυρήνα σκυροδέματος και τέλος, επισημαίνεται η ποσοστιαία απόκλιση που παρουσιάζουν τα δύο κριτήρια, όσον αφορά το βέλτιστο πάχος του πυρήνα, ώστε να καθίσταται εύκολος ο εντοπισμός της λύσης εκείνης που ευνοεί κατά το δυνατόν ισότιμα τα δύο μεγέθη.

Αντίστοιχα διαγράμματα, όπως αυτό του Σχ. 8, δημιουργήθηκαν για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που προκύπτουν από τρεις διαφορετικές ποιότητες χάλυβα με επιμέρους χαρακτηριστικά: $\{E_s=210 \text{ GPa}, f_s=235 \text{ MPa}\}$, $\{E_s=210 \text{ GPa}, f_s=355 \text{ MPa}\}$, $\{E_s=210 \text{ GPa}, f_s=460 \text{ MPa}\}$ και πέντε διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος με αντίστοιχες ιδιότητες: $\{E_c=29 \text{ GPa}, f_c=20 \text{ MPa}\}$, $\{E_c=30,5 \text{ GPa}, f_c=25 \text{ MPa}\}$, $\{E_c=32 \text{ GPa}, f_c=30 \text{ MPa}\}$, $\{E_c=33,5 \text{ GPa}, f_c=35 \text{ MPa}\}$, $\{E_c=35 \text{ GPa}, f_c=40 \text{ MPa}\}$. Το αποτέλεσμα της μελέτης των διαγραμμάτων αυτών, συνοψίζεται στο Σχ. 9, όπου παρουσιάζεται, για κάθε συνδυασμό ποιοτικών ιδιοτήτων των υλικών, η βέλτιστη τιμή πάχους χαλύβδινων ελασμάτων και πυρήνα σκυροδέματος, η οποία οδηγεί στη σύγκλιση των κριτηρίων της μεγιστοποίησης της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Η απουσία συγκεκριμένων συνδυασμών από το διάγραμμα οφείλεται στην αδυναμία τους να

ικανοποιήσουν επαρκώς και ταυτοχρόνως τα δύο κριτήρια, ανεξαρτήτως της επιλογής πάχους των στρώσεων της διατομής.



Σχ. 8: Βέλτιστοι συνδυασμοί παχών σκυροδέματος - χάλυβα για μεγιστοποίηση της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης ακαμψίας, για δύο συνδυασμούς υλικών και εξωτερική ακτίνα $R_4=2000$ mm



Σχ. 9: Πάχη χαλύβδινων ελασμάτων και πυρήνα σκυροδέματος που οδηγούν σε σύγκλιση των κριτηρίων μεγιστοποίησης της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης ακαμψίας, για διάφορους συνδυασμούς ποιότητας υλικών και εξωτερική ακτίνα $R_4=2000$ mm

Βάσει του Σχ. 9, καθίσταται εφικτή αλλά και ευχερής η επιλογή της βέλτιστης - από στατικής άποψης - γεωμετρίας μίας διατομής τύπου *sandwich*, με δεδομένα υλικά και συγκεκριμένες απαιτήσεις καμπτικής αντοχής αλλά και δυσκαμψίας, καλύπτοντας ένα σημαντικό εύρος, από περίπου 53600 KNm έως 198700 KNm, όσον αφορά την πρώτη και μεταξύ περίπου 78900 MPa και 376300 MPa, όσον αφορά τη δεύτερη. Μπορεί να αποφευχθεί, έτσι, η επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών τα οποία ικανοποιούν το ένα κριτήριο, εις βάρος όμως του άλλου, όπως φαίνεται σε πολλές περιπτώσεις του Σχ. 8, ή καλύπτουν επαρκώς τις δύο απαιτήσεις αλλά με περιττή ποσότητα ή άσκοπα υψηλή ποιότητα υλικών, εις βάρος της οικονομίας της κατασκευής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιλογή της διατομής τύπου *sandwich* από δύο χαλύβδινα ελάσματα και έναν πυρήνα σκυροδέματος διερευνήθηκε σε προκαταρκτικό στάδιο με απώτερο στόχο την περαιτέρω

εξέτασή της ως εναλλακτικής λύσης για την κατασκευή πυλώνων ανεμογεννητριών μεγάλου ύψους, άνω του οποίου η χρήση αμιγώς χαλύβδινων κοίλων διατομών καθίσταται ανεπαρκής είτε με όρους στατικής συμπεριφοράς, είτε με όρους οικονομίας. Καταστρώθηκαν αναλυτικές εξισώσεις για τις περιπτώσεις της αξονικής καταπόνησης και της καθαρής κάμψης, έως το πρώτο σημείο διαρροής που αποτελεί και στην πράξη άνω όριο για το σχεδιασμό των πυλώνων και η ορθότητά τους επαληθεύτηκε μέσω συγκρίσης διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των προγραμμάτων myBiaxial [11] και Adina [12]. Συντάχθηκε, έπειτα, κώδικας στο λογισμικό Mathematica [10] και πραγματοποιήθηκαν μέσω αυτού παραμετρικές αναλύσεις για ένα σημαντικό εύρος ποιότητας υλικών και πάχους των επιμέρους στρώσεων της διατομής. Παρατηρήθηκε ότι για κάθε επιλογή πάχους χαλύβδινου ελάσματος υπάρχει ένα αντίστοιχο πάχος πυρήνα σκυροδέματος που μεγιστοποιεί την ελαστική ροπή αντοχής, πέρα από το οποίο η περαιτέρω αύξηση, όχι μόνο δεν αυξάνει την αντοχή αλλά την υποβιβάζει σημαντικά, ενώ το ίδιο φαινόμενο παρουσιάστηκε στην περίπτωση της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Βάσει της παρατήρησης αυτής πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση, σε όρους στατικής συμπεριφοράς, όσον αφορά τα πάχη των στρώσεων και τις ποιότητες των υλικών.

Παρά το γεγονός ότι σε πυλώνες ανεμογεννητριών η υπέρβαση του ορίου διαρροής και η μετάβαση στην πλαστική περιοχή είναι ανεπιθύμητες λόγω της μεγάλης σημασίας της κόπωσης ως κρίσιμου μηχανισμού αστοχίας, κρίνεται χρήσιμο για λόγους πληρότητας να διερευνηθεί στο προσεχές μέλλον η ικανότητα ενός πυλώνα διατομής τύπου *sandwich* να παραμορφωθεί πλαστικά πριν την κατάρρευση. Είναι επίσης πρωταρχικής σημασίας η επέκταση της παρούσας έρευνας, πέρα από την παραδοχή της μεμονωμένης αξονικής ή καθαρής καμπτικής φόρτισης, σε συνθήκες ταυτόχρονης επιβολής αξονικής δύναμης και ροπής, λόγω της συνύπαρξης στην πραγματικότητα του ίδιου βάρους μίας ανεμογεννήτριας και της ανεμοπίεσης που αυτή υφίσταται. Επιπλέον, κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή διαδικασιών μαθηματικής βελτιστοποίησης, πέραν της ποιοτικού χαρακτήρα προσέγγισης που εφαρμόστηκε στο παρόν άρθρο. Τέλος, απαιτείται να μελετηθούν οι πιθανοί μηχανισμοί αποκόλλησης των χαλύβδινων ελασμάτων και του πυρήνα σκυροδέματος, ως μία από τις βασικότερες μορφές αστοχίας μίας διατομής τύπου *sandwich*.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και την Ελλάδα μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» (ΕΣΠΑ 2007-2013) – Δράση: «Αριστεία II».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EUROPEAN COMMISSION "Directive 2009/28/EC - Article 3: Mandatory national overall targets and measures for the use of energy from renewable sources", Official Journal of the European Union, Vol. 52, Legislation 140, 5 June 2009, pp. 24-25
- [2] HAU E. "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", 2nd Edition, Springer, 2006, p. 421
- [3] BURTON T. et al. "Wind Energy Handbook", Wiley, 2001, pp. 453-464

- [4] BASU B. "Tower design and analysis", "Wind Power Generation and Wind Turbine Design", WIT Press, 2010, pp. 527-553.
- [5] DET NORSKE VERITAS AND RISØ NATIONAL LABORATORY "Guidelines for Design of Wind Turbines", 2nd Edition, DNV/Risø, 2002, pp. 168-169
- [6] TWELE J., HEILMANN C., SCHUBERT M. "Wind turbines design and components" "Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation", 2nd Edition, Springer, 2012, pp. 94-101
- [7] SCHAUMANN P., KEINDORF C. "Sandwich-Towers for Wind Energy Converters", DEWI Magazin, August 2008
- [8] BANHART J. "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", Progress in Materials Science, Vol. 46, No. 6, September 2001, pp. 559-632
- [9] SIMANČÍK F. "Metallic foams: ultra light materials for structural applications", Inżynieria Materiałowa, May 2001, pp. 823-828
- [10] WOLFRAM RESEARCH INC. "Mathematica, Version 9.0", 2012
- [11] CHARALAMPAKIS A. E., KOUMOUSIS V. K. "Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load", Advances in Engineering Software, Vol. 39, 2008, pp. 923-936
- [12] ADINA R & D INC. "Theory and Modeling Guide - Volume I: ADINA, Report ARD 08-7", 2006

PRELIMINARY FEASIBILITY INVESTIGATION OF SANDWICH TYPE SHELLS FOR WIND TURBINE TOWERS

Stylios M. Vernardos

PhD Candidate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: s.vernardos@gmail.com

Charis J. Gantes

Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

SUMMARY

In order to address the structural demands of modern wind turbine towers of height greater than 100m and the difficulties in the transportation of their parts with a diameter of more than 4m, in the current study the concept of sandwich-type shells is examined, consisting of two steel faces and a binding core made of some lightweight material, thus offering both higher stiffness and lower weight, as an alternative to traditional hollow circular steel sections. The analytical equations governing the behavior of the composite section in the elastic range, under either axial loading or pure bending, are initially formulated, and then verified by comparison between the resulting moment - curvature diagrams and those obtained from simulations in the software programs myBiaxial and Adina and, finally, compiled in Mathematica software code for an extensive parametric analysis. From the latter, involving a wide range of steel and concrete qualities, as well as thicknesses of the faces and the core, qualitative conclusions are extracted, on the basis of which an optimization of these parameters is attempted, for simultaneous satisfaction of both the maximum elastic bending resistance and maximum equivalent stiffness requirements.