

  
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
 Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

---

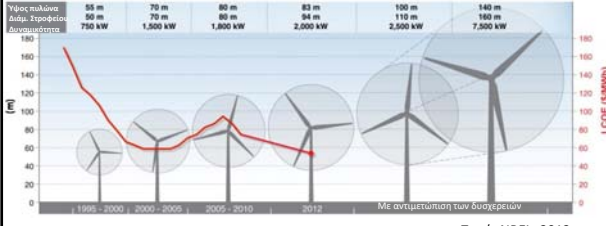
**Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich»  
για Πυλώνες Ανεμογεννητριών**  
 Στυλιανός Μ. Βερνάρδος, Χ. Ι. Γαντές

---

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Ε.Μ.Π.  
 Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Υψος πυλώνα	55 m	70 m	80 m	83 m	100 m	140 m
Διάμ. στροφέου	50 m	70 m	80 m	84 m	110 m	160 m
Επιπλοκή	750 kW	1,500 kW	1,800 kW	2,000 kW	2,500 kW	7,000 kW



Πηγή: NREL, 2013

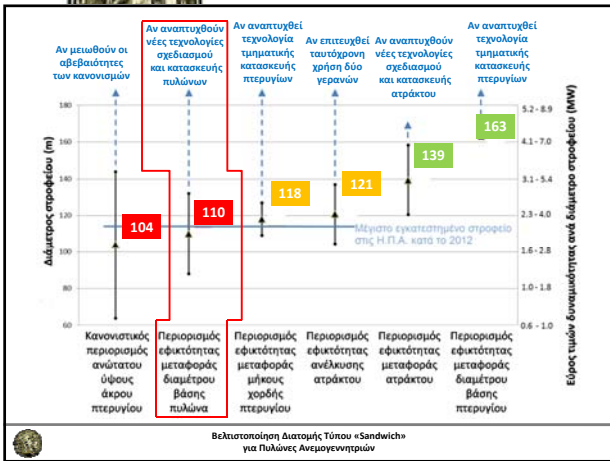
**Υπεροχή ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους λόγω:**

- Αυξημένη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα εδαφικής επιφάνειας
- Βελτιωμένη αεροδυναμικής συμπεριφοράς
- Μειωμένη ευπόθειας πτερυγίων σε περιβαλλοντικούς παράγοντες
- Δυννητικών οικονομικών κλίμακας

Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich»  
για Πυλώνες Ανεμογεννητριών



## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



**Η βελτίωση της ποιότητας χάλυβα δεν αποτελεί αποτελεσματική λύση**

Section:  
H = 30 m  
D = 5.5 m  
t = const.

Steel grade	S 235	S 355	S 460	S 690
$f_{y,red}$ [MPa]	215 for t=50	345 for t=35	460 for t=24	690 for t=16
$\sigma_{cr,k}$ [MPa]	2011	1459	1032	706
$\lambda_{cr}$ [-]	0.33	0.49	0.67	0.99
$\kappa_2$ [-]	0.93	0.78	0.61	0.31
$\sigma_{cr,k} / f_{y,red}$ [%]	85 %	76 %	61 %	31 %

Πηγή: Schaumann, 2008

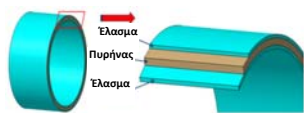
Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich»  
για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

**Εξεταζόμενη Λύση: Πυλώνες Διατομής Sandwich**

Δύο υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας ελάσματα περικλύουν έναν πυρήνα από ελαφρύ υλικό

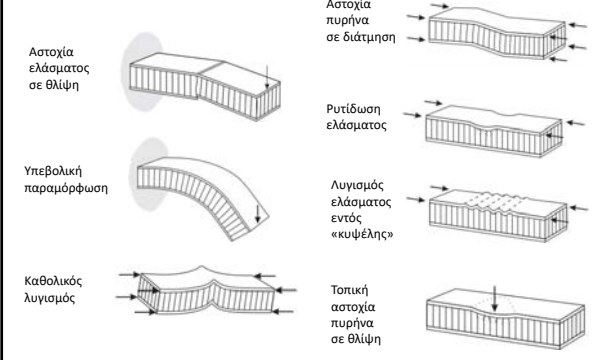
Βελτίωση δυσκαμψίας και καμπτικής αντοχής με μηδαμινή αύξηση βάρους

	Ευκαμπές υλικό	Πάχος πυρήνα t	Πάχος ελάσματα 3t
Δυσκαμψία	1.0	7.0	37.0
Καμπτική αντοχή	1.0	3.5	9.2
Βάρος	1.0	1.03	1.06



Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich»  
για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

**Πιθανά προβλήματα και μηχανισμοί αστοχίας**



Αστοχία πυρήνα σε θλίψη

Αστοχία ελάσματος σε θλίψη

Υπεβολική παραμόρφωση

Καθολικός λυγισμός

Αστοχία πυρήνα σε διάτμηση

Ρυτίδωση ελάσματος

Λυγισμός ελάσματος εντός «κυψέλης»

Τοπική αστοχία πυρήνα σε θλίψη

Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich»  
για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

**Υλικά ελασμάτων:**

- Κράματα χάλυβα ή αλουμινίου
- Σύνθετα υλικά, όπως εποξικά οπλισμένα με ίνες γυαλιού

**Υλικά πυρήνα:**

- Σκυρόδεμα και άλλα συμβατικά υλικά
- Σύγχρονα υλικά, όπως:

Κυψελωτά (honeycombs)



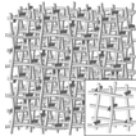
Πηγή: Suzhou Yida Purifying Laboratory Equipments Co.Ltd, 2014

Αφρώδη (foams)



Πηγή: König et al., 2000

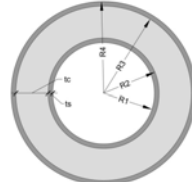
Συρμάτινα πλέγματα μορφής WBC



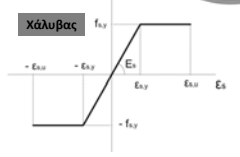
Πηγή: Lee and Kang, 2014

Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich» για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

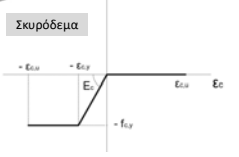
**Αναλυτική Λύση**



**Χάλυβας**



**Σκυρόδεμα**

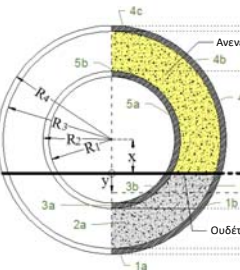


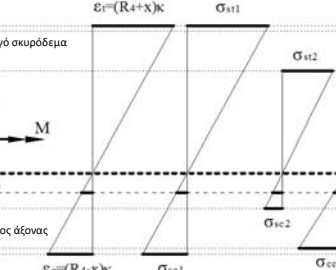
Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich» για Πυλώνες Ανεμογεννητριών



## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Αναλυτική Λύση**





Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich» για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

**Αναλυτική Λύση**

**Υπολογισμός θέσης ουδέτερου άξονα**

Επιλογή τιμής καμπυλότητας  $\Rightarrow$

$$\int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \epsilon_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx = 0$$

$$\int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \epsilon_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy dx + \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \epsilon_{xy} \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx = 0$$

**Υπολογισμός ροπής**

$$M_x = \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx$$

$$M_x = \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy dx - \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx$$

Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich» για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

**Αναλυτική Λύση**

**Υπολογισμός ροπής**

$$M_x = \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx$$

$$M_x = \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy dx - \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx$$

$M = \bar{M} \kappa$

**Υπολογισμός δυσκαμψίας**  $\Rightarrow$  **Υπολογισμός ελαστικής ροπής αντοχής**

$$M_x = \min \left\{ M_{\text{lim}} = \frac{E_s \bar{M}}{E_c (R_2 + c)}, M_{\text{lim}} = \frac{E_s \bar{M}}{E_c (R_1 - c)} \right\}$$

Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich» για Πυλώνες Ανεμογεννητριών

**Αναλυτική Λύση**

**Υπολογισμός θέσης πλαστικού ουδέτερου άξονα**

Επιλογή τιμής καμπυλότητας  $\Rightarrow$

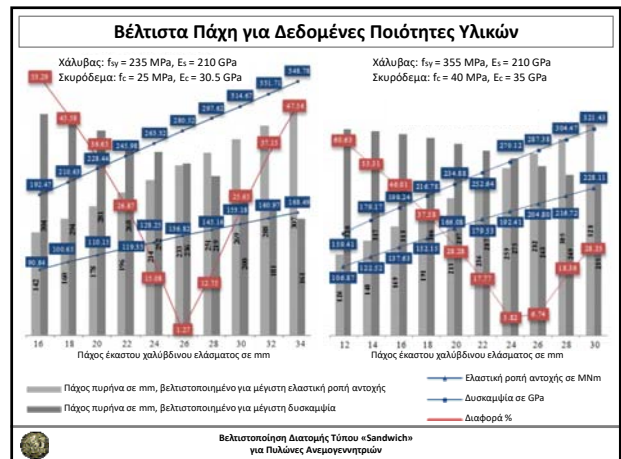
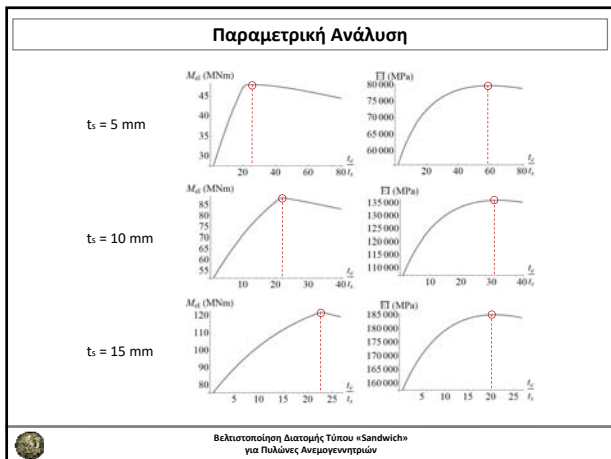
$$\int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \epsilon_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx = 0$$

**Υπολογισμός πλαστικής ροπής αντοχής**

$$M_x = \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} - \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx$$

$$M_x = \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_2^2 - (x+y)^2} dy dx - \int_{-4c}^{4c} \int_{-R_2}^{R_2} \sigma_{xy} \sqrt{R_1^2 - (x+y)^2} dy dx$$

Βελτιστοποίηση Διατομής Τύπου «Sandwich» για Πυλώνες Ανεμογεννητριών



## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

