

“ENSSTRAM”

Τίτλος: ENSSTRAM – Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών

Χρηματοδότηση: Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (Αριστεία II - 4916)

Συνεργαζόμενοι φορείς: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Πανεπιστήμιο Πατρών (ΠΠ)

Συντονιστής: Καθ. Χ. Γαντές (ΕΜΠ)

Ερευνητική ομάδα: Καθ. Γ. Μπουκοβάλας, Καθ. Α. Τριανταφύλλου, Κ. Καλοχαιρέτης, Α. Βαλσαμής, Σ. Βερνάρδος, Π. Αστερίου, Α. Τσαντίλης, Ξ. Λιγνός, Κ. Κάρλος, Σ. Κατσατσίδης, Γ. Ζαράκη

Διάρκεια: 14/2/2014 - 31/10/2015

Προϋπολογισμός: 296.000,00 €

Σύνοψη

Καινοτόμες έννοιες σχεδιασμού δύο μεταλλικών κατασκευών του ενεργειακού τομέα, πυλώνων ανεμογεννητριών και υπόγειων αγωγών, διερευνήθηκαν πειραματικά και αριθμητικά. Και οι δύο κατασκευές παίζουν ζωτικό ρόλο στην εξυπηρέτηση κοινωνικών αναγκών σε ενέργεια και ο ασφαλής και αποδοτικός σχεδιασμός τους προσφέρει σημαντικά οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη, ενώ μία ενδεχόμενη αστοχία τους θα μπορούσε να έχει πολύ σοβαρές συνέπειες. Οι προτεινόμενες ιδέες στοχεύουν στην εκμετάλλευση καινοτόμων υλικών σε συνδυασμό με παραδοσιακά χαλύβδινα κελύφη, βελτιστοποιώντας έτσι τη συνολική δομική συμπεριφορά των δύο συστημάτων και επεκτείνοντας την εφαρμογή τους σε περιπτώσεις ακραίων περιβαλλοντικών δράσεων.

Δημοσιεύσεις

Περιοδικά:

1. Vernardos, S. and Gantes, C.J., “Cross-Section Optimization of Sandwich-Type Cylindrical Wind Turbine Towers”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 8, Issue 4, pp. 471-480, 2015.
doi: <http://dx.doi.org/10.3844/ajeassp.2015.471.480>
2. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., “Buckling and Post-buckling Behavior of Beams with Internal Flexible Joints Resting on Elastic Foundation Modeling Buried Pipelines”, *Structures*, Vol. 7, pp. 138–152, Aug. 2016.
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2016.06.007>
3. Melissianos, V.E., Korakitis, G.P., Gantes, C.J. and Bouckovalas, G.D., “Numerical Evaluation of the Effectiveness of Flexible Joints in Buried Pipelines Subjected to Strike-Slip Fault Rupture”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 90, pp. 395–410, Nov. 2016.
doi: <http://dx.doi.org/10.1080/15397734.2016.1165117>
4. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., “Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture”, *Frontiers in Built Environment*, Vol. 2, Article 34, 2016.
doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2016.00034>
5. Melissianos, V.E., Lignos, X.A., Bachas, K.K. and Gantes, C.J., “Experimental Investigation of Pipes with Flexible Joints under Fault Rupture”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 128, pp. 633-648, Jan. 2017.
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.026>
6. Melissianos, V.E., Vamvatsikos, D. and Gantes, C.J., “Performance-Based Assessment of Protection Measures for Buried Pipes at Strike-Slip Fault Crossings”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, υπό κρίση.

Συνέδρια:

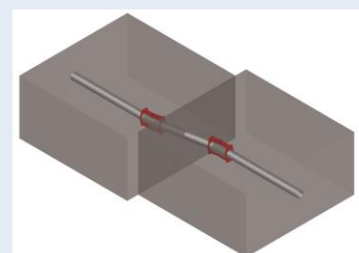
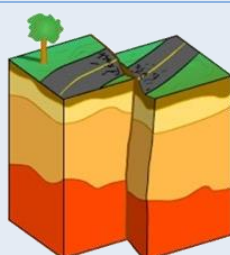
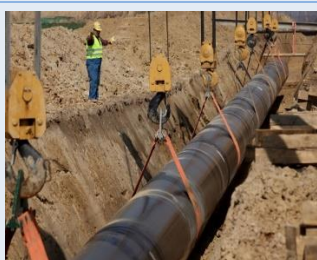
1. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "Earthquake Induced Upheaval Buckling of Buried Pipelines with Flexible Joints", *2ECCES - 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, M.A. Ansal and M. Nurlu (eds.), Istanbul, Turkey, Aug. 25-29, 2014.
2. Karamitros, D., Zoupantis, C. and Bouckovalas, G.D., "An Analytical Method for Active Fault Verification of Buried Steel Pipelines with Bends", *2ECCES - 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, M.A. Ansal and M. Nurlu (eds.), Istanbul, Turkey, Aug. 25-29, 2014.
3. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "Upheaval Buckling of Onshore Buried Steel Pipelines with Flexible Joints", *IASS-SLTE 2014 Symposium*, Brasilia, Brazil, Sep. 15-19, 2014.
4. Μελισσιανός, Β.Ε., Γαντές, Χ.Ι. και Καλφαντής Π.Π., "Αξιολόγηση Κινδύνου Καθολικού Λυγισμού Υπόγειων Μεταλλικών Αγωγών λόγω Ενεργοποίησης Ανάστροφου Σεισμικού Ρήγματος", *8^ο Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών*, Τρίπολη, 2-4 Οκτ. 2014.
5. Βερνάρδος, Σ.Μ. και Γαντές, Χ.Ι., "Προκαταρκτική Διερεύνηση Εφικτότητας Κελυφών Τύπου Sandwich για Πυλώνες Ανεμογεννητριών", *8^ο Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών*, Τρίπολη, 2-4 Οκτ. 2014.
6. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "On the Efficiency of Flexible Joints in Mitigating the Consequences of Seismic Fault Activation on Buried Pipelines", *ARC'14 - Qatar Foundation Annual Research Conference*, Doha, Qatar, 18-19 Nov. 2014.
7. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "Failure Mitigation of Buried Steel Pipeline under Strike-Slip Fault Offset Using Flexible Joints", *SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, Cambridge, U.K., 9-10 July 2015.

Κεφάλαια βιβλίων:

1. Gantes, C.J., Bouckovalas, G.D., Melissianos, V.E. and Valsamis, A., "Pipeline – Fault Crossing: Structural Considerations on the Use of Flexible Joints for Mitigating a Potential Failure", *Jubilee Volume - Andreas Anagnostopoulos: 50 Years of Service at the National Technical University of Athens*, pp. 127-139, Athens, 2015.
2. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "Numerical Modeling Aspects of Buried Pipeline – Fault Crossing", *Computational Methods in Earthquake Engineering - Vol. 3*, edited by M. Papadrakakis, V. Plevris and N.D. Lagaros, Computational Methods in Applied Sciences 44, Springer Verlag, 2017.
doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-47798-5_1

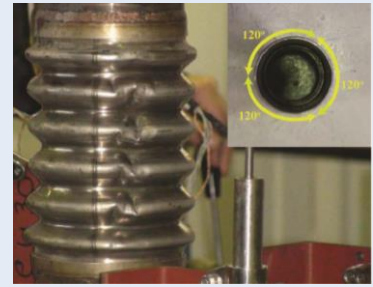
Περιγραφή δραστηριοτήτων του ENSSTRAM για υπόγειους αγωγούς

Οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων είναι χαλύβδινα κυλινδρικά κελύφη που διαμορφώνονται συνήθως ως συνεχή με επί τόπου συγκόλληση μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων. Η χρήση εύκαμπτων κόμβων μεταξύ τμημάτων του αγωγού σε περιοχές όπου αναμένονται μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις (π.χ. ενεργά σεισμικά ρήγματα, κατολισθήσεις) εξετάστηκε ως ένα καινοτόμο μέτρο προστασίας που επιτρέπει στον αγωγό να ακολουθεί τις εδαφικές μετακινήσεις με συγκέντρωση της παραμόρφωσης στους κόμβους, ενώ τα χαλύβδινα τμήματα παραμένουν σχεδόν απαραμόρφωτα. Προτάθηκε κατάλληλη διάταξη και χαρακτηριστικά των κόμβων καθώς και προσεγγιστικές αναλυτικές και ακριβέστερες αριθμητικές λύσεις και διατυπώθηκαν οδηγίες σχεδιασμού.



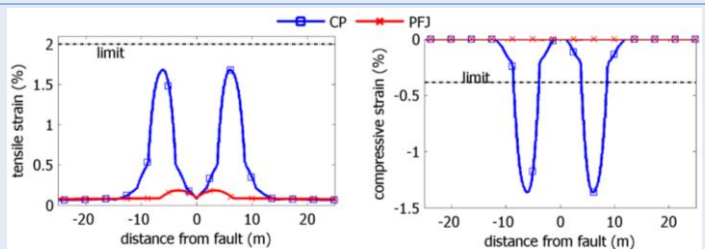
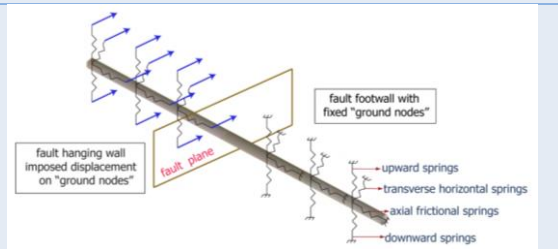
Πειραματική διερεύνηση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων δοκιμίων συνεχών αγωγών και αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, προσομοιώνοντας την παραμόρφωση ενός αγωγού υπό σεισμική διάρρηξη, καθώς και δοκιμές για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των εύκαμπτων κόμβων. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την πολύ σημαντική συμβολή των κόμβων στη μείωση των παραμορφώσεων του αγωγού, παρέχοντας έτσι αποτελεσματική προστασία έναντι τοπικού λυγισμού του τοιχώματος και εφελκυστικής αστοχίας των συγκολλήσεων μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα αναπαρήχθησαν ικανοποιητικά μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική μη γραμμικότητα και τη μη γραμμικότητα υλικού.



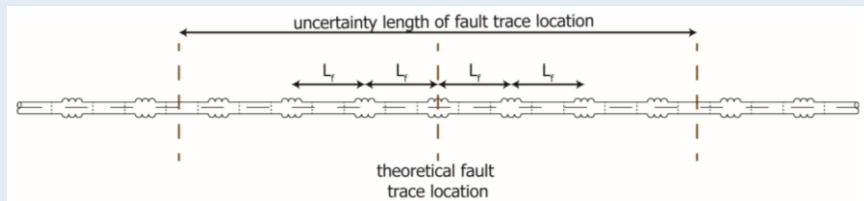
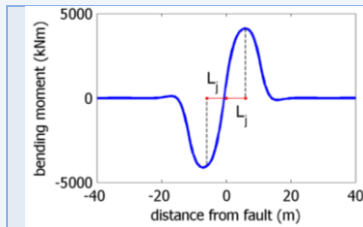
Αριθμητική διερεύνηση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους

Πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων σε όρους μείωσης των παραμορφώσεων. Εκτελέστηκαν εκτεταμένες παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις υπόγειων αγωγών υπό διάρρηξη οριζόντιας ολίσθησης με σκοπό να μελετηθούν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά αγωγών με κόμβους, όπως η γωνία διασταύρωσης αγωγού-ρήγματος, το μέγεθος της σεισμικής διάρρηξης, η γωνιακή ικανότητα του κόμβου, το βάθος ταφής και ο λόγος διαμέτρου προς πάχος. Η αποτελεσματικότητα των κόμβων συγκρίθηκε με αυτή άλλων μέτρων προστασίας που εφαρμόζονται στην κατασκευαστική πρακτική.



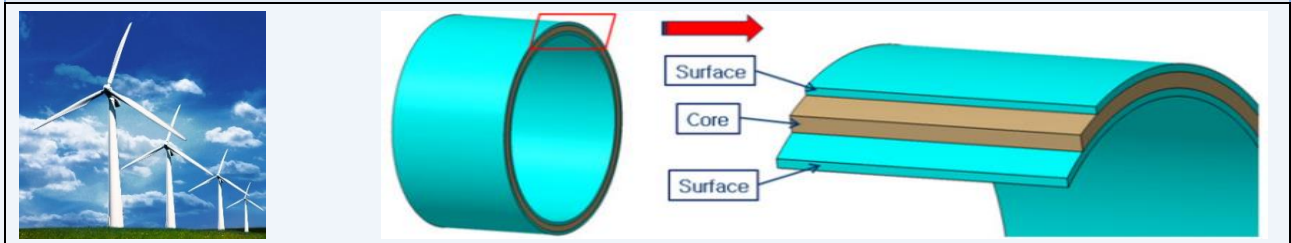
Προκαταρκτικές οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ανέδειξαν τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των αγωγών με κόμβους υπό σεισμική διάρρηξη. Διατυπώθηκαν προκαταρκτικές οδηγίες σχεδιασμού λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες και ταυτόχρονα την αβεβαιότητα εμφάνισης της διάρρηξης του ρήγματος στην επιφάνεια. Δόθηκαν επίσης όρια σχεδιασμού για κάθε κρίσιμη παράμετρο. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της αποτελεσματικότητας των κόμβων και της οικονομίας, οι κόμβοι θα πρέπει να εισάγονται στον αγωγό σε ίσες αποστάσεις L_f καθ' όλο το μήκος του αγωγού, εντός του οποίου αναμένεται να εμφανισθεί η διάρρηξη ρήγματος στην εδαφική επιφάνεια. Η απόσταση L_f εκτιμάται βάσει της απόστασης L_j που προκύπτει από την κατανομή της καμπτικής ροπής του συνεχούς αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη πως οι αρθρωτοί κόμβοι εισάγονται πλησίον της θέσης εμφάνισης της μέγιστης αναμενόμενης καμπτικής ροπής.



Περιγραφή δραστηριοτήτων του ENSSTRAM για πυλώνες ανεμογεννητριών

Η καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού απαιτεί ανεμογεννήτριες με υψηλότερους πυλώνες και πτερύγια μεγαλύτερης διαμέτρου. Για τέτοιους πυλώνες η εναλλακτική λύση που προτάθηκε σε αυτό το πρόγραμμα είναι η αντικατάσταση των παραδοσιακών κωνικών χαλύβδινων κελυφών με κελύφη τύπου sandwich, αποτελούμενα από ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα και έναν πυρήνα από ελαφρύ υλικό ανάμεσά τους, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλή δυσκαμψία με χαμηλό βάρος, καθώς και μεγαλύτερη απόσβεση. Προτάθηκαν κατάλληλα πάχη ελασμάτων και πυρήνα, καθώς και ιδιότητες των υλικών τους, και διαμορφώθηκαν οδηγίες σχεδιασμού, ενσωματώνοντας βελτιστοποίηση σε όρους γεωμετρίας και υλικών.



Πειραματική διερεύνηση πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου sandwich

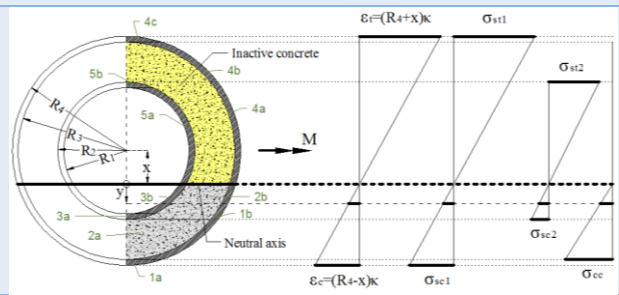
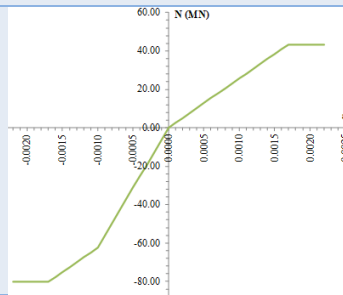
Κατασκευάστηκαν κοίλα κυλινδρικά δοκίμια μορφής προβόλου, διατομής αμιγώς χαλύβδινης καθώς και διατομής sandwich, και υποβλήθηκαν σε κάμψη ώστε να συγκριθεί η στατική συμπεριφορά τους. Ο πυρήνας της διατομής sandwich πληρώθηκε με υψηλής αντοχής αυτό-συμπυκνούμενο κονίαμα, λόγω της δυνατότητας για έγχυση χωρίς δόνηση στο στενό διάκενο μεταξύ των δύο ελασμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την προβλεφθείσα συμπεριφορά για τα δύο δοκίμια, αναδεικνύοντας τη διατομή sandwich ως οικονομικότερη λύση.



Αναλυτική διερεύνηση πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου sandwich

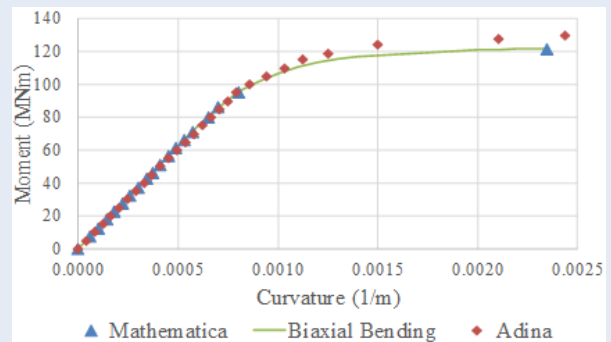
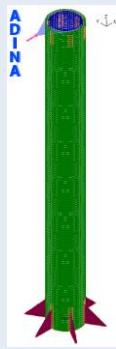
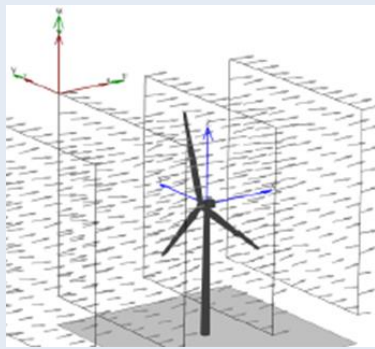
Η συμπεριφορά της διατομής sandwich υπό αξονική φόρτιση αναπαρίσταται γραφικά κάτω αριστερά. Η απόκριση της διατομής υπό καμπτική ροπή προσεγγίστηκε διαιρώντας αρχικά τη διατομή σε επιμέρους τομείς, όπως φαίνεται κάτω δεξιά, υποθέτοντας τις εικονιζόμενες κατανομές τάσεων και παραμορφώσεων στην ελαστική περιοχή και τις αντίστοιχες στην ελαστοπλαστική, επιβάλλοντας ισορροπία δυνάμεων και ροπών, πραγματοποιώντας τις σχετικές ολοκληρώσεις ανά τομέα για μια

δεδομένη καμπυλότητα, προσδιορίζοντας τη θέση του ουδέτερου άξονα μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, και υπολογίζοντας τέλος την αντίστοιχη ροπή.



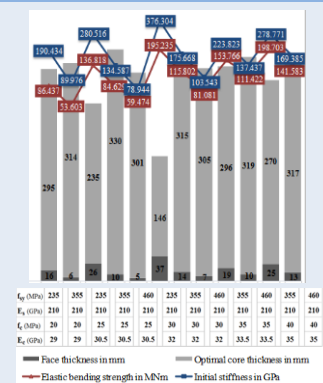
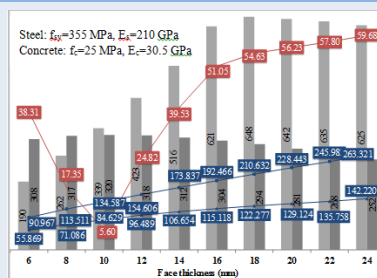
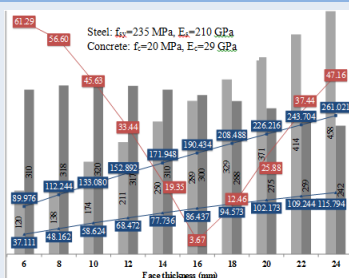
Αριθμητική διερεύνηση πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου sandwich

Η αεροδυναμική απόκριση του πυλώνα προσομοιώθηκε με χρήση των λογισμικών ελεύθερης πρόσβασης TurbSim, AeroDyn και FAST, τα οποία έχουν αναπτυχθεί από τα National Renewable Energy Laboratory (NREL) και National Wind Technology Center (NTWC) για την παραγωγή τεχνητών χρονοϊστοριών ταχύτητας ανέμου και φόρτισης. Αναπτύχθηκαν και αναλύθηκαν πιο σύνθετα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Adina, καθώς και απλούστερα υβριδικά αναλυτικά-αριθμητικά μοντέλα στο λογισμικό Mathematica, παρουσιάζοντας καλή σύγκλιση με τα αναλυτικά αποτελέσματα.



Προκαταρκτικές οδηγίες σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών τύπου sandwich

Πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις ώστε να διερευνηθεί η επιρροή διαφορετικών συνδυασμών των κρίσιμων παραγόντων στη δυσκαμψία και στην αντοχή της διατομής, θεωρώντας μια διατομή sandwich εξωτερικής διαμέτρου 4m, που αποτελεί σύνηθες άνω όριο, καθορισμένο από περιορισμούς μεταφοράς. Κρίσιμους παράγοντες αποτελούν τα πάχη του πυρήνα και των ελασμάτων όσον αφορά τη γεωμετρία της διατομής, και η ελαστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας χάλυβα και σκυροδέματος αναφορικά με τις ιδιότητες των υλικών. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Η προτεινόμενη λύση είναι υβριδική, αποτελούμενη από τμήματα διατομής sandwich κοντά στη βάση του πυλώνα και αμιγώς χαλύβδινα τμήματα κοντά στην κορυφή του, επιτυγχάνοντας βέλτιστες οικονομία κατασκευής και στατική συμπεριφορά.



- Core thickness in mm, optimized for maximum elastic bending strength
- Core thickness in mm, optimized for maximum initial stiffness
- Elastic bending strength in MNm
- Initial stiffness in GPa
- Difference %

t_p (MPa)	235	355	235	355	460	235	355	460	355	460	355	460
E_p (GPa)	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
ϵ_p (MPa)	20	20	25	25	25	30	30	30	35	35	40	40
E_p (GPa)	29	29	30.5	30.5	30.5	32	32	32	33.5	33.5	35	35

— Face thickness in mm — Optimal core thickness in mm
— Elastic bending strength in MNm — Initial stiffness in GPa