



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Χ.Ι. Γαντές
Αναπληρωτής Καθηγητής
&

Χ. Δημόπουλος
Υποψήφιος Διδάκτορας

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥΣ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ**

16^ο Εθνικό Συνέδριο Ενέργειας «Ενέργεια & Ανάπτυξη 2011»



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

ΓΕΝΙΚΑ

- ☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- ☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

- ☐ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
- ☐ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
(περιγραφή δοκιμών, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)
- ☐ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ
(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)
- ☐ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

ΓΕΝΙΚΑ

☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

☐ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

☐ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

(περιγραφή δοκιμίων, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)

☐ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)

☐ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

- ✓ Ο άνεμος είναι δωρεάν και δεν αναλώνεται.
- ✓ Η αιολική ενέργεια είναι στις μέρες μας μια σχετικά ώριμη, οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία .
- ✓ Παρέχει στο χρήστη ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια.

- ❖ Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου δεν μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη ακρίβεια. Επομένως, είναι δυνατή μόνον η εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος σε κάποιο εύρος χρόνου.
- ❖ Μόνο μέρος της αιολικής ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.
- ❖ Υψηλό κόστος εκκίνησης.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Κριτήρια για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου

- Υψηλές τιμές της μέσης χρονιαίας ταχύτητας του ανέμου.
- Αιολικό δυναμικό υψηλής ποιότητας (αρκούντως ομαλό).
- Καθόλου εμπόδια στη διεύθυνση του ανέμου.
- Χώρος ανέγερσης προσιτός μέσω κατάλληλου οδικού δικτύου.
- Εγγύτητα με εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Κοινωνική αποδοχή.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

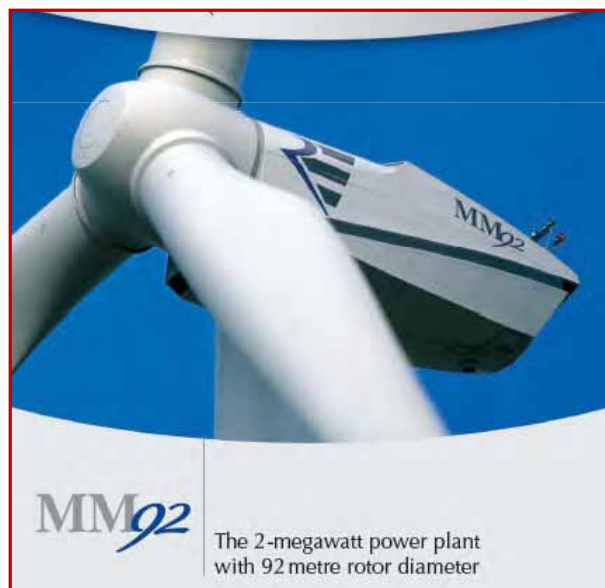


Ε.Μ.Π.

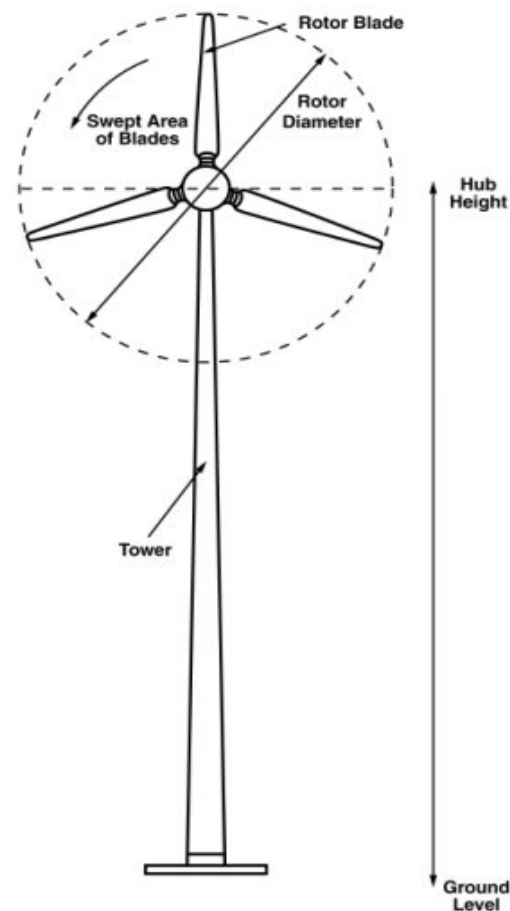
Βασικός τύπος ανεμογεννήτριας

Ο πιο κοινός τύπος:

Η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.



Διάμετρος ρότορα 92 μέτρα





Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

ΓΕΝΙΚΑ

☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

☐ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

(περιγραφή δοκιμίων, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)

☐ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)

☐ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Τύποι πυλώνων



[από Erich Hau, 2006]

Χ.Ι. Γαντές & Χ. Δημόπουλος

Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών
με έμφαση σε σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα

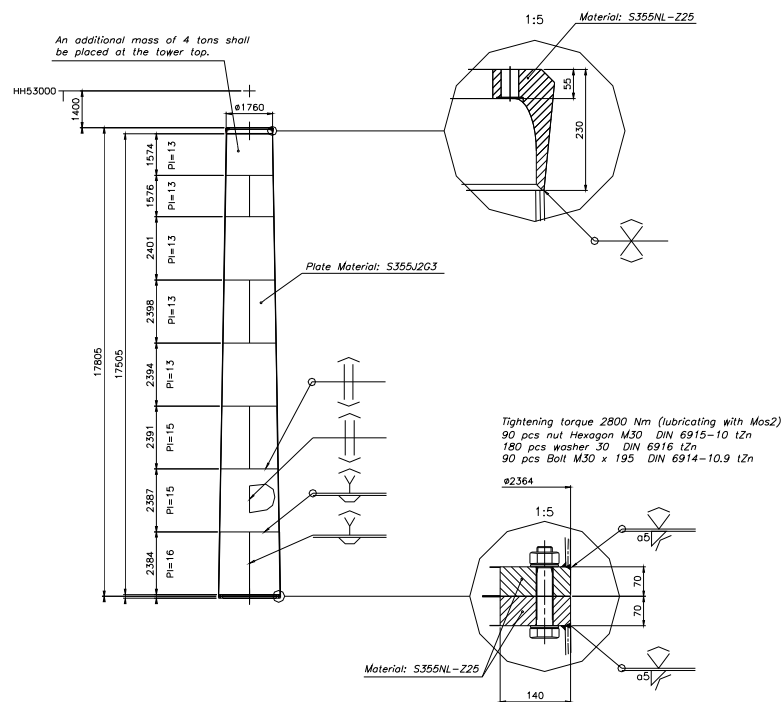
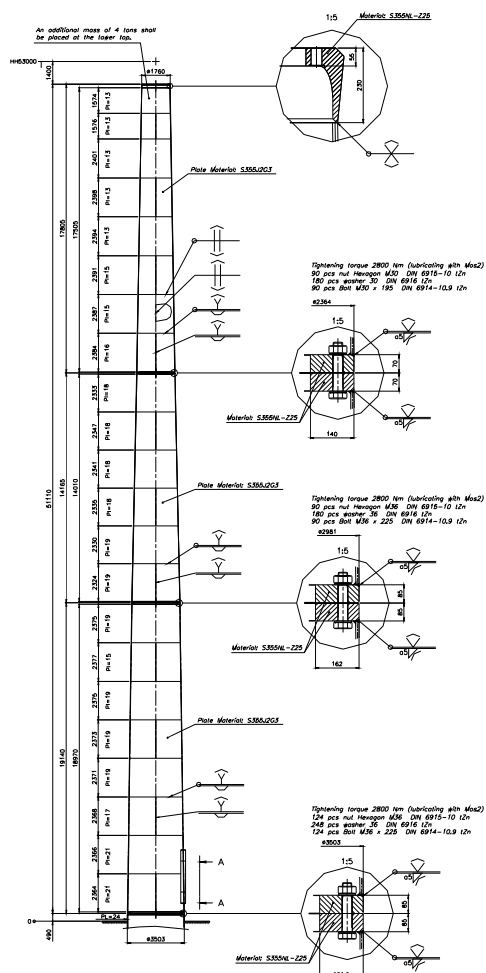
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Σωληνωτοί πυλώνες από χάλυβα



Χ.Ι. Γαντές & Χ. Δημόπουλος

Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών
με έμφαση σε σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

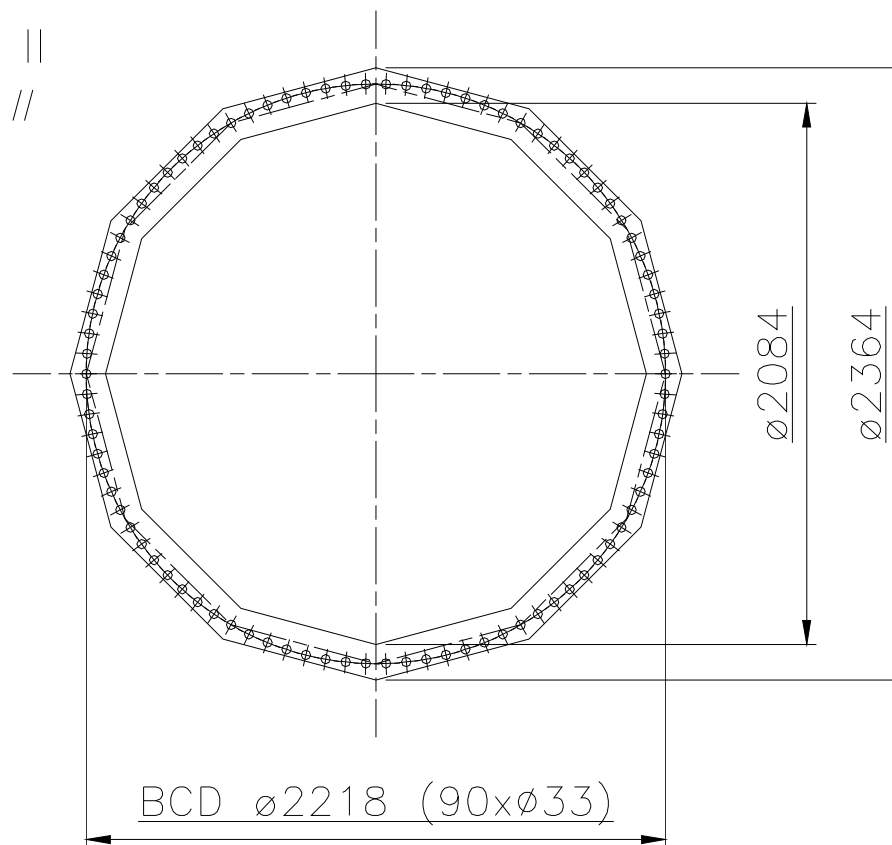


Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Σωληνωτοί πυλώνες από χάλυβα

Mellemflange II
Middle flange II



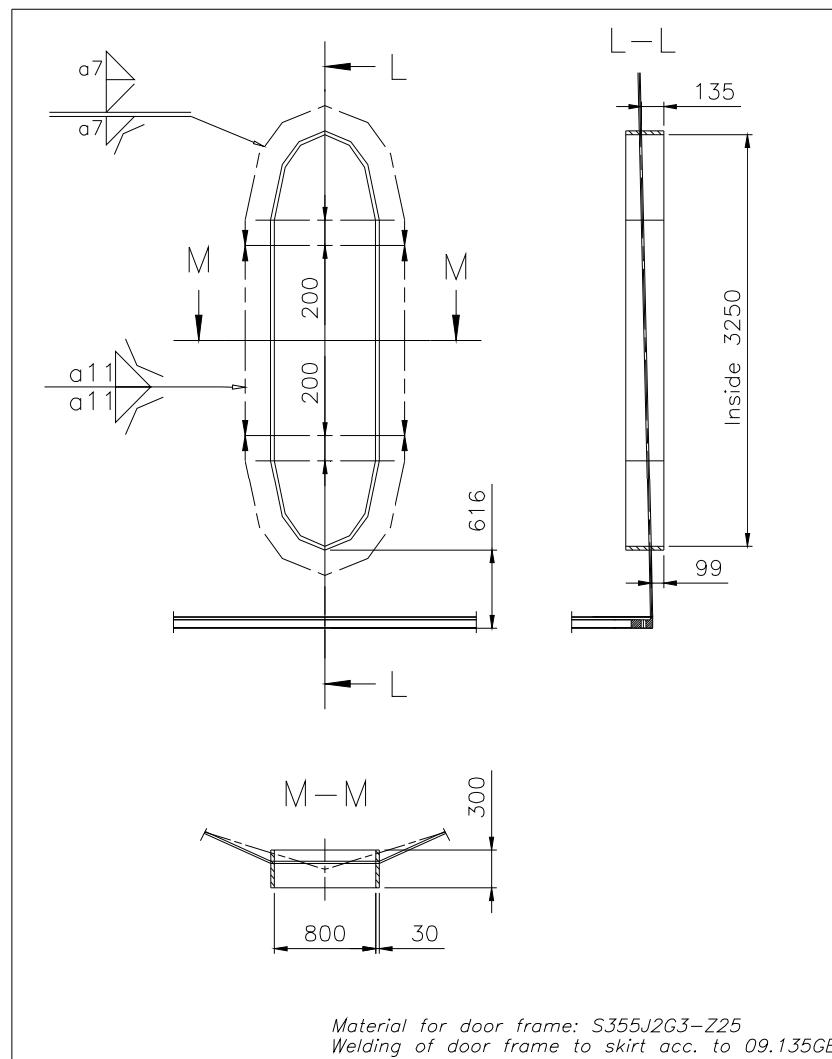
1:40



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Σωληνωτοί πυλώνες από χάλυβα



Χ.Ι. Γαντές & Χ. Δημόπουλος

Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών
με έμφαση σε σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

ΓΕΝΙΚΑ

- ☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- ☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

- ☐ **ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**
- ☐ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
(περιγραφή δοκιμίων, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)
- ☐ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ
(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)
- ☐ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Αντικείμενο ερευνητικής εργασίας στο ΕΜΠ



Η ερευνητική εργασία ασχολείται με επίγειους πυλώνες Α/Γ οριζόντιου άξονα με κυλινδρικό ή οiwονεί κυλινδρικό κέλυφος με έμφαση στο σχεδιασμό της περιοχής της ανθρωποθυρίδας και τη βελτίωση της αντοχής της μέσω κατάλληλων ενισχύσεων.

Χ.Ι. Γαντές & Χ. Δημόπουλος

Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών
με έμφαση σε σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα

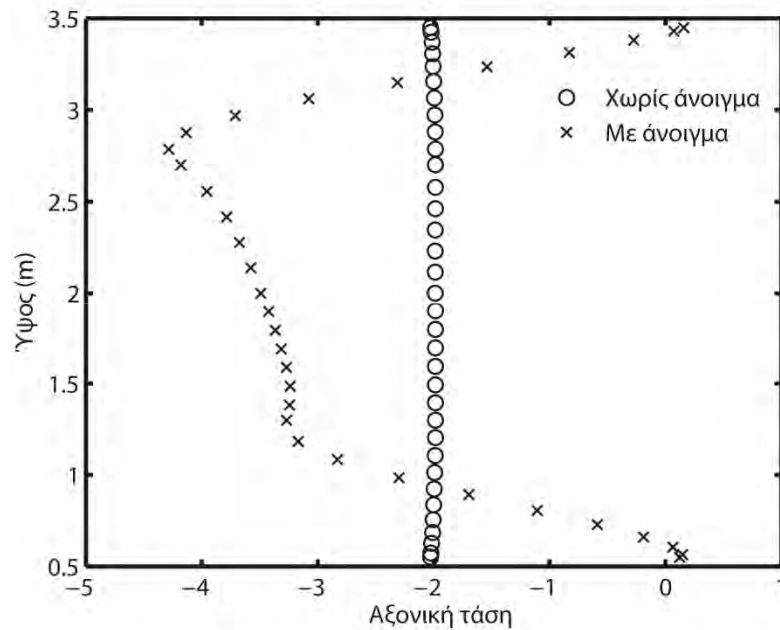
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011



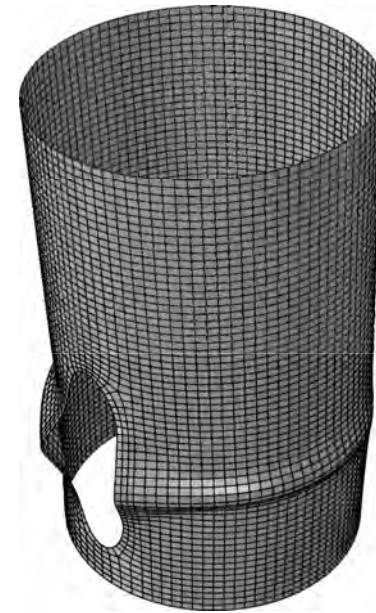
Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Συγκέντρωση τάσεων γύρω από το άνοιγμα και τοπικός λυγισμός



← Παρειά
ανοίγματος





Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΓΕΝΙΚΑ

- ☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- ☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

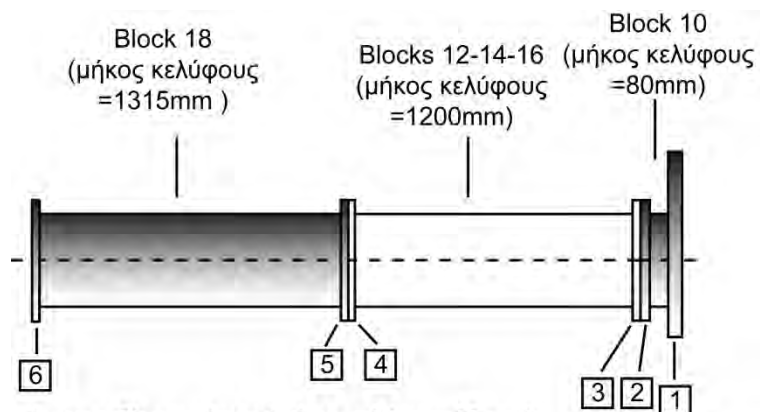
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

- ☐ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
- ☐ **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**
(περιγραφή δοκιμών, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)
- ☐ **ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**
(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)
- ☐ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

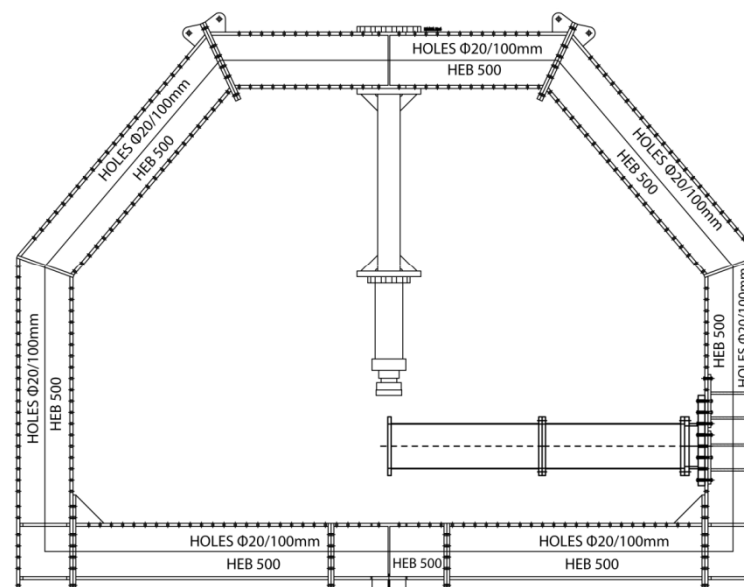


Ε.Μ.Π.

Πειραματική διάταξη



- 1: στηριζόμενο άκρο (πάχος πλάκας=60mm)
- 2: φλάντζα 01, πάχος=40mm
- 3: φλάντζα 02, πάχος=35mm
- 4: φλάντζα 03, πάχος=30mm
- 5: φλάντζα 04, πάχος=30mm
- 6: ελεύθερο άκρο (φλάντζα 05, πάχος=30mm)

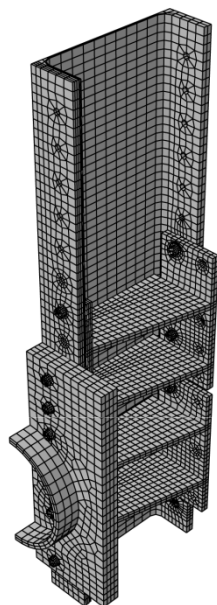




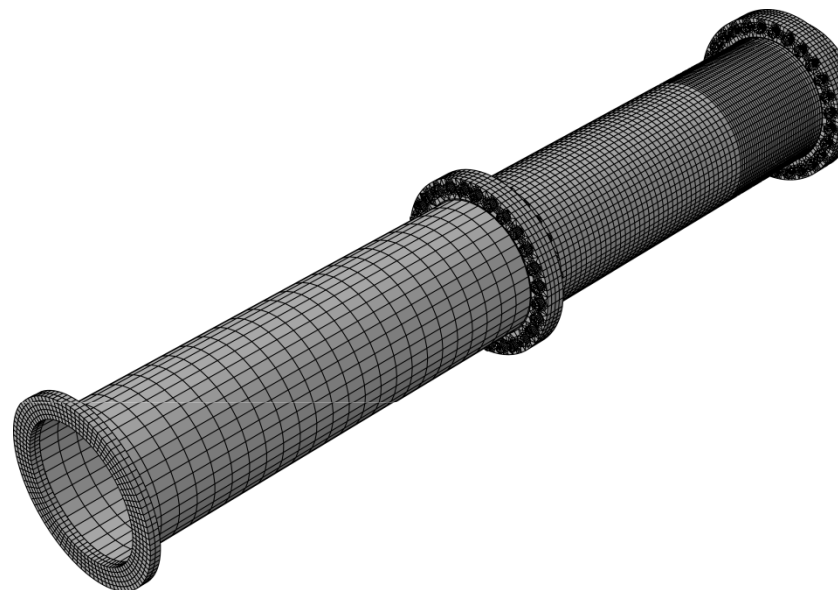
Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Αριθμητική Προσομοίωση με το ABAQUS



Απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα για τον υπολογισμό της ευκαμψίας της στήριξης.



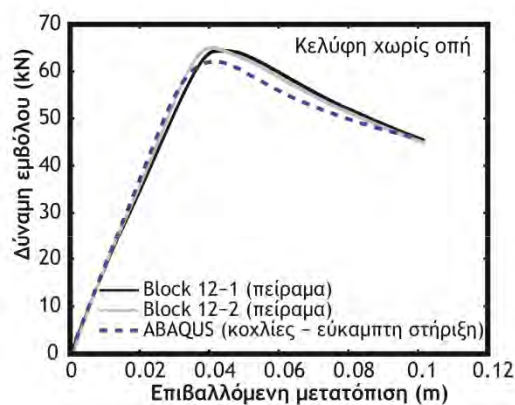
Λεπτομερές αριθμητικό προσομοίωμα για την εκτίμηση των δρόμων ισορροπίας και των παραμορφώσεων.



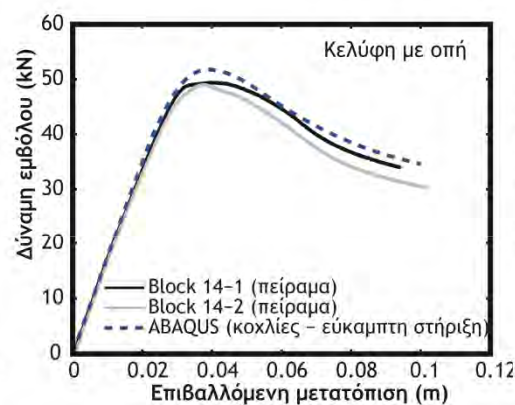
Ε.Μ.Π.

Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα

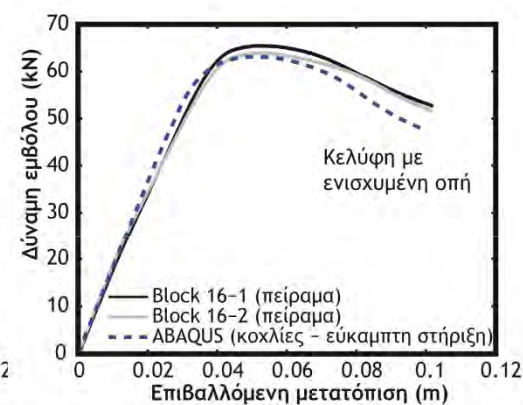
Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων



Χωρίς άνοιγμα



Με άνοιγμα



Με ενισχυμένο άνοιγμα



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011

ΓΕΝΙΚΑ

- ☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- ☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

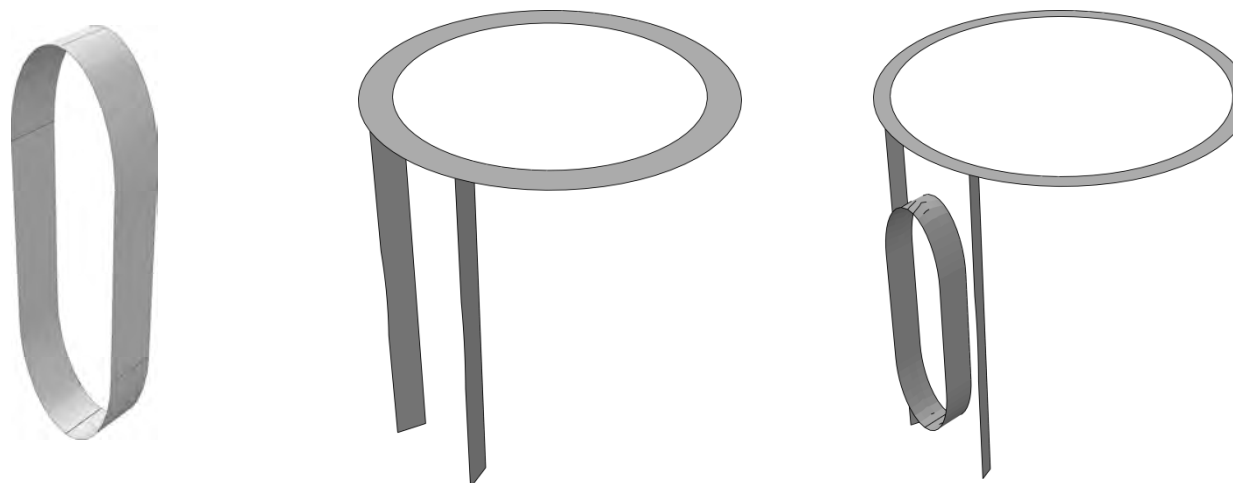
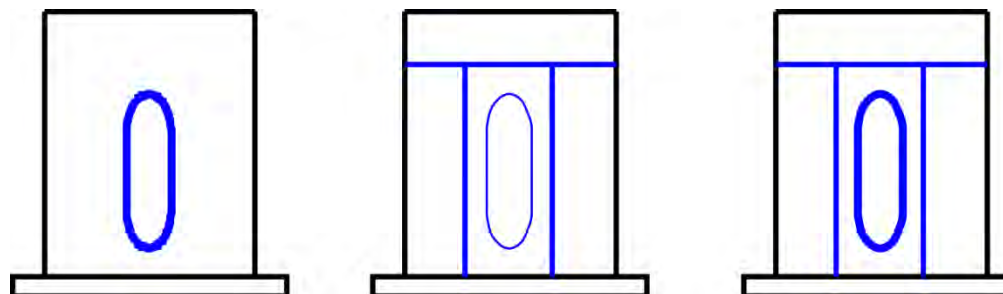
- ☐ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
- ☐ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
(περιγραφή δοκιμίων, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)
- ☐ **ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**
(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)
- ☐ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μορφές ενίσχυσης στην παραμετρική ανάλυση



Χ.Ι. Γαντές & Χ. Δημόπουλος

Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών
με έμφαση σε σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα

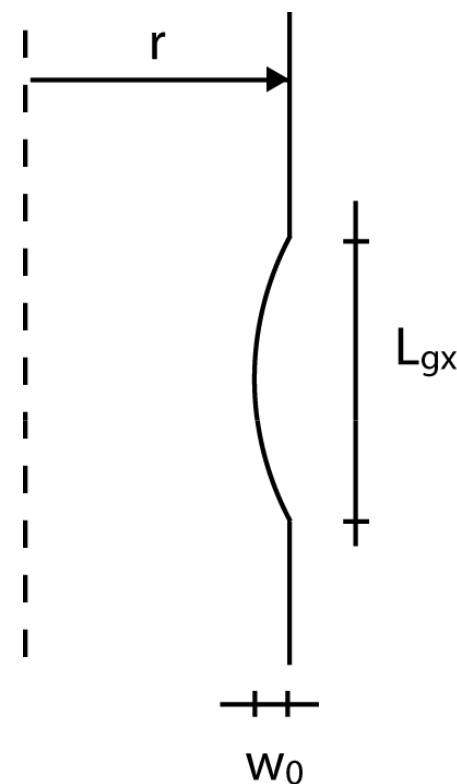
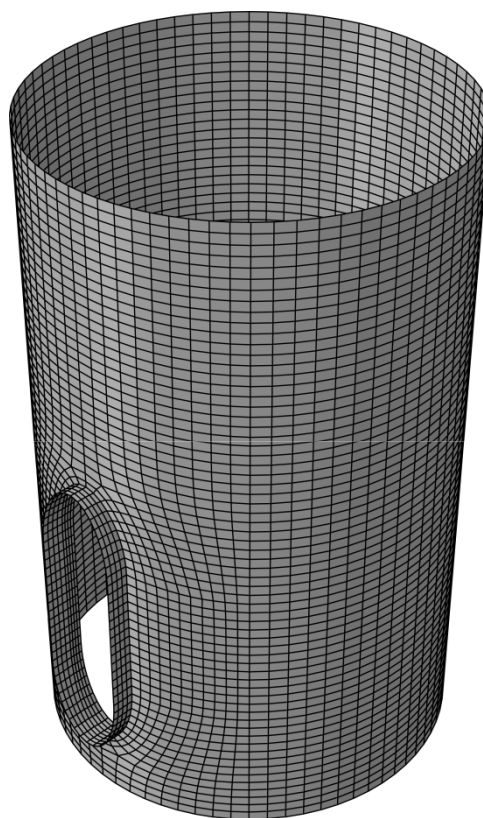
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Σύγκριση αποδοτικότητας τριών βασικών τύπων ενίσχυσης

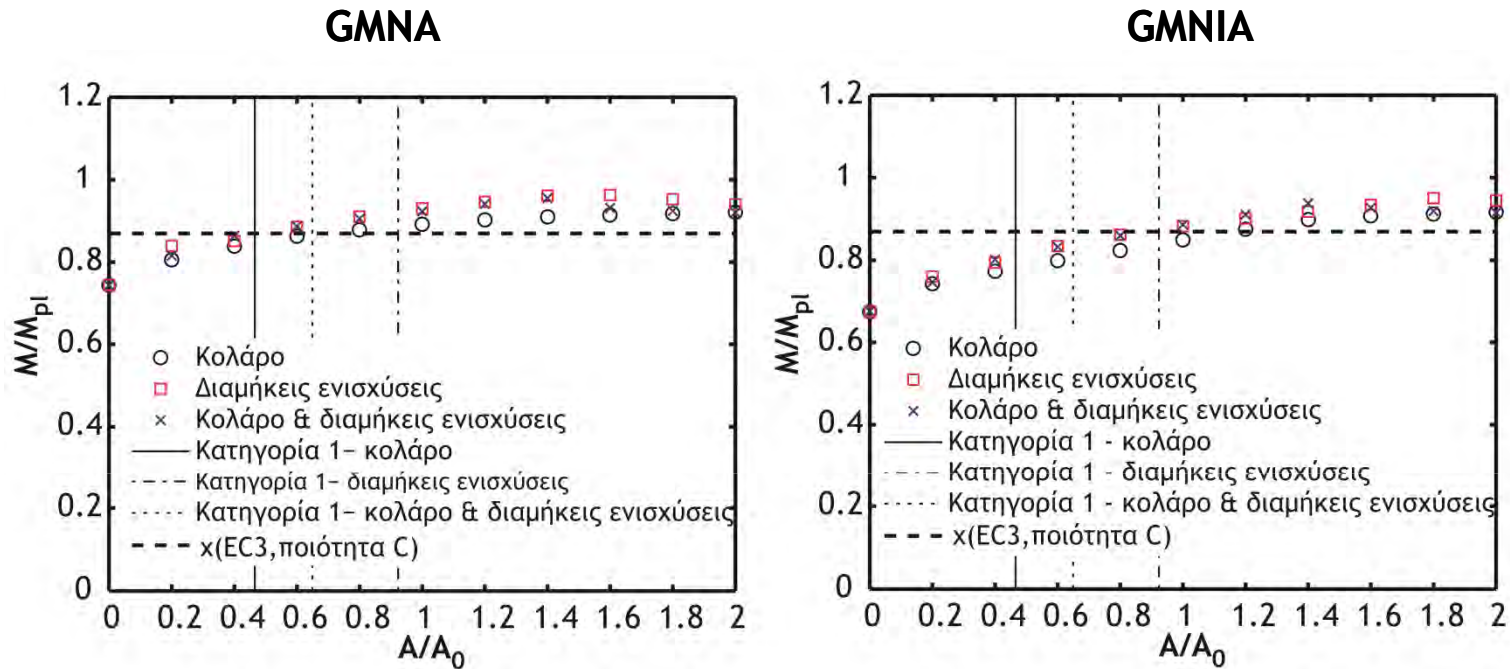


(α) Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και (β) μορφή ατέλειας στις αναλύσεις GMNIA



Ε.Μ.Π.

Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης



- ❑ Οι μορφές ενίσχυσης είναι πρακτικά ισοδύναμες.
- ❑ Η χρήση συνδυασμού πλαισίου και διαμήκων ενισχύσεων δεν οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής.
- ❑ Επομένως, προτείνεται η χρήση είτε απλού πλαισίου είτε απλών διαμήκων ενισχύσεων.



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ενότητες παρουσίασης

ΓΕΝΙΚΑ

- ☐ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- ☐ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

- ☐ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
(περιγραφή δοκιμίων, αποτελέσματα, σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις)
- ☐ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ
(μελέτη μορφών ενίσχυσης, περιγραφή προσομοιωμάτων, αποτελέσματα)
- ☐ **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011



Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ☐ Η σύγχρονες τάσεις στην αιολική ενέργεια οδηγούν σε μεγάλο ύψος πυλώνων.
- ☐ Ευρέως διαδεδομένη λύση στις μέρες μας είναι ο σωληνωτός πυλώνας από χάλυβα.
- ☐ Η ερευνητική εργασία στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ αφορά την βελτιστοποίηση της ενίσχυσης της ανθρωποθυρίδας.
- ☐ Από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί έχει πιστοποιηθεί η επάρκεια των αριθμητικών εργαλείων στο να προβλέπει τη συμπεριφορά των πυλώνων.
- ☐ Μέσω αριθμητικών παραμετρικών αναλύσεων είναι σε εξέλιξη η σύγκριση εναλλακτικών τρόπων ενίσχυσης της ανθρωποθυρίδας με τελικό στόχο την διατύπωση κανόνων σχεδιασμού των πυλώνων.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 2011