


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
 Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ
 ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

Κωνσταντίνος Γ. Κουλάτσου Ηλίας Δ. Θανάσουλας
 Κατερίνα Η. Νταϊφώτη Στυλιανός Βερνάρδος Χάρης Ι. Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Τεχνητές χρονοϊστορίες ανέμου και απόκρισης
- Αλληλεπίδραση κοχλία - ελάσματος
- Προσομοίωση αποκατάστασης συνέχειας
- Έλεγχος σε κόπωση
- Σχεδιασμός πειραμάτων
- Συμπεράσματα

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Εισαγωγή

Επίπεδα ελάσματα καμπυλώνονται στο επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα

Συγκολλούνται:
 → Η κοινή ακμή
 → Τα τεμάχια μεταξύ τους
 → Τα δακτυλιοειδή πέλματα




Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Εισαγωγή


Μεταφορά προκατασκευασμένων τμημάτων στο πεδίο του έργου

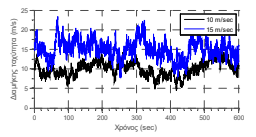
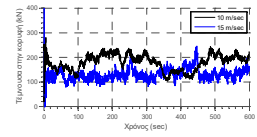
Ανέγερση τμημάτων με γερανό




Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Τεχνητές χρονοϊστορίες ανέμου και απόκρισης



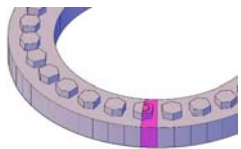
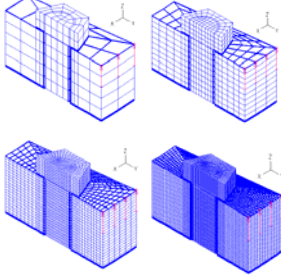



Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος

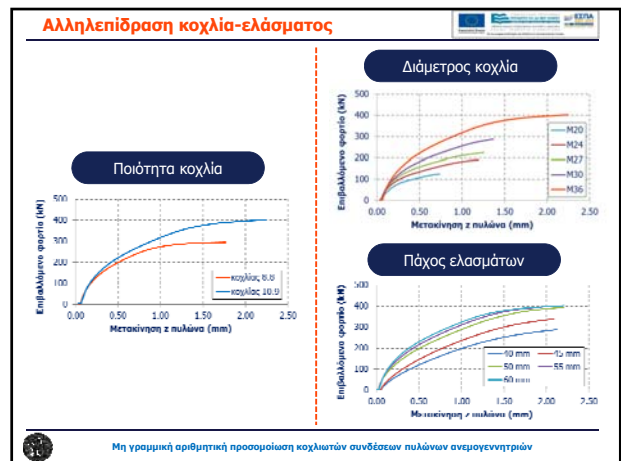
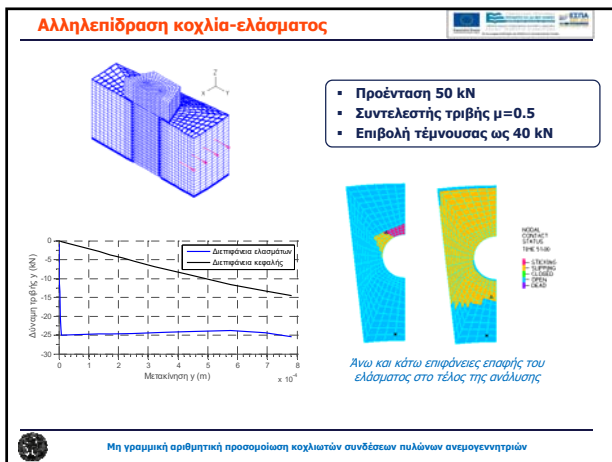
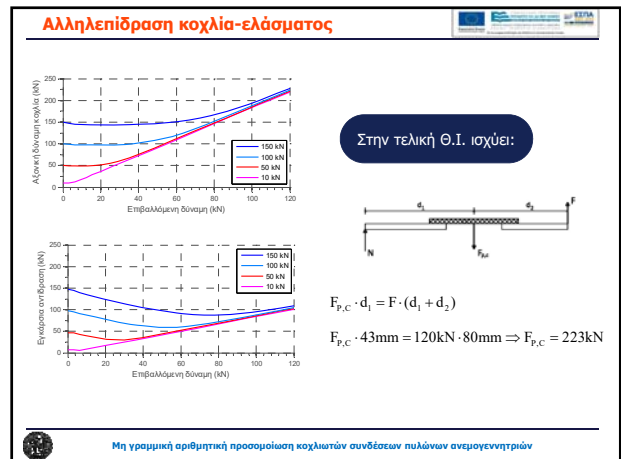
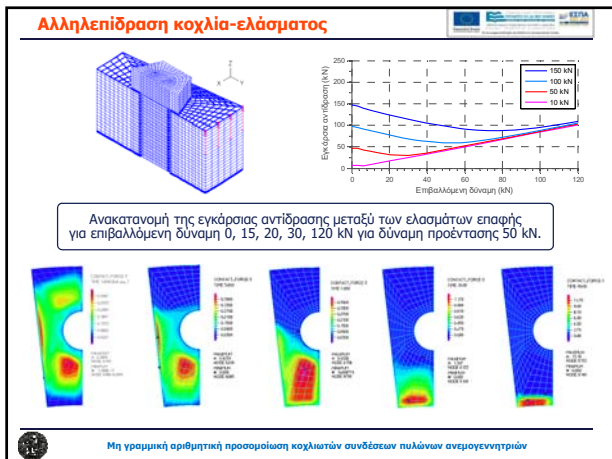
Τμήμα σύνδεσης που προσομοιώθηκε

Διερεύνηση πυκνότητας δικτύου FE

- Συνθήκες συμμετρίας
- Συνθήκες επαφής
- Εγκάρσια εφελκ. δύναμη πυλώνα

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών



Αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος

Φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής

Φλάντζα προσυγκόλλησης

Φλάντζα με προέκταση

Φλάντζα εξωραφής

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος

Φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής

Max. von Mises $\sigma=88.9$ MPa

- Φορτίο 100 kN
- Προένταση 300 kN

Ορθή τάση $\sigma_z=85.7$ MPa

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος

Φλάντζα προσυγκόλλησης

- Φορτίο 100 kN
- Προένταση 300 kN

Max. von Mises $\sigma=86.1$ MPa

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος

Φλάντζα με προέκταση

- Φορτίο 100 kN
- Προένταση 300 kN

Max. von Mises $\sigma=78.4$ MPa

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Αλληλεπίδραση κοχλία-ελάσματος

Φλάντζα εξωραφής

Max. von Mises άνω $\sigma=369$ MPa

Max. von Mises κάτω $\sigma=278$ MPa

- Φορτίο 100 kN
- Προένταση 300 kN

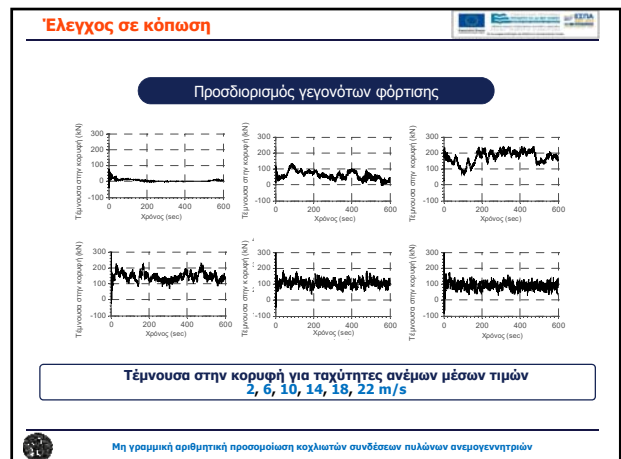
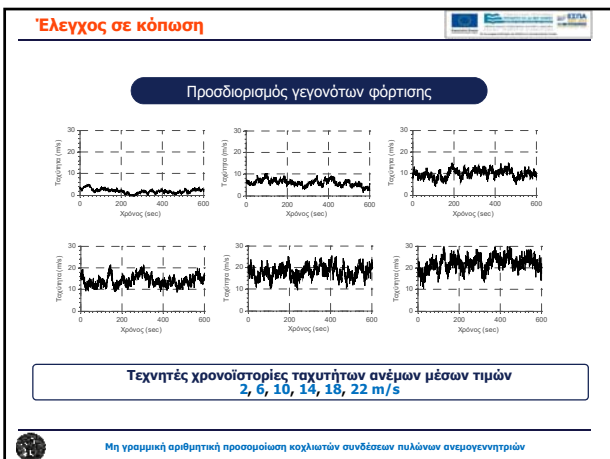
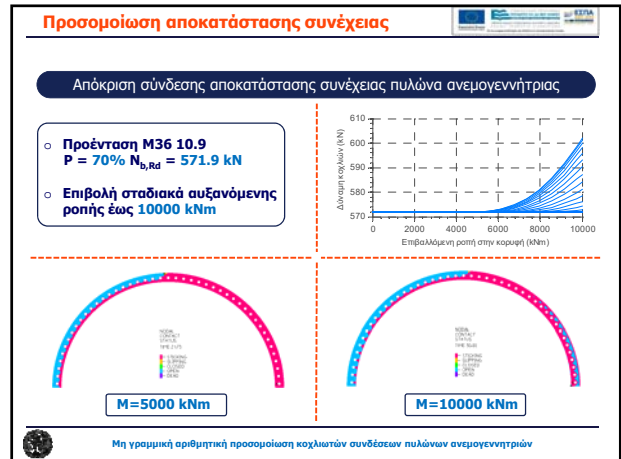
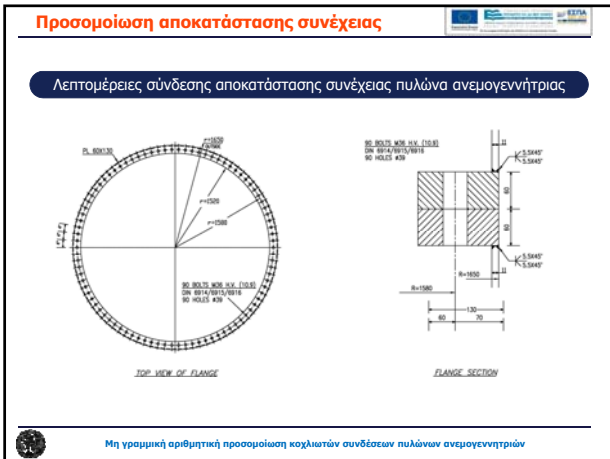
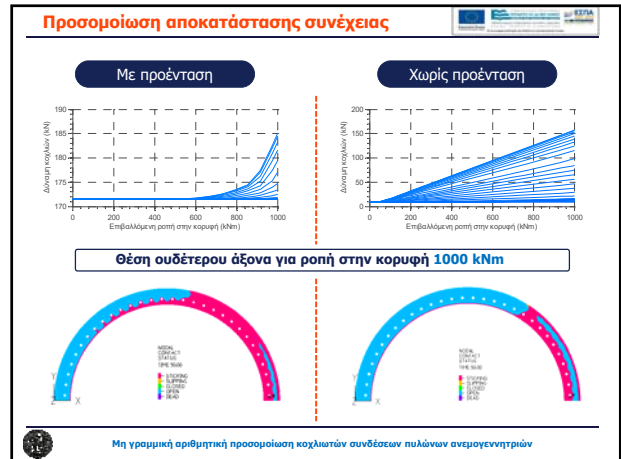
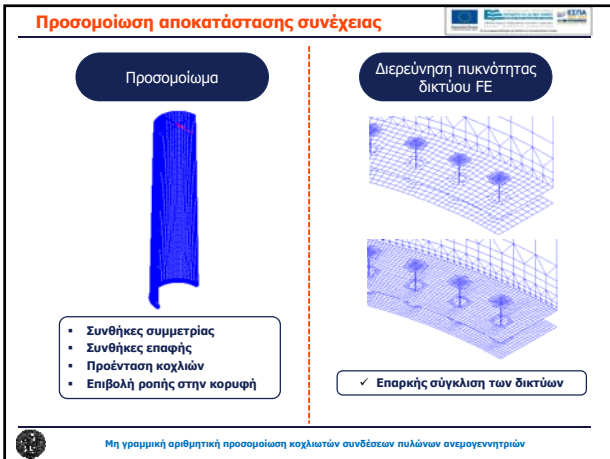
Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Προσομοίωση αποκατάστασης συνέχειας

Μέθοδοι προσομοίωσης

- + Όλοι οι τύποι συγκόλλησης
- + Άντυγα κορμού κοχλία
- Μεγάλο δίκτυο FE
- Μόνο φλάντζα προσυγκόλλησης
- Μικρό δίκτυο FE
- Άντυγα κορμού κοχλία

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών



Έλεγχος σε κόπωση

Προσδιορισμός ιστορικού τάσεων

Ιστορικό ορθών τάσεων σ_x στην συγκόλληση για ταχύτητες ανέμων μέσων τιμών 2, 6, 10, 14, 18, 22 m/s

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Έλεγχος σε κόπωση

Μέτρηση κύκλων εύρους τάσεων με μέθοδο "Rainflow"

Ιστογράμματα εύρους τάσεων σ_x στην συγκόλληση για ταχύτητες ανέμων μέσων τιμών 2, 6, 10, 14, 18, 22 m/s

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Έλεγχος σε κόπωση

Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού

Μέση ταχύτητα ανέμου των 10 λεπτών \rightarrow Κατανομή Rayleigh

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πιθανότητα f
0-4	0.160
4-8	0.342
8-12	0.290
12-16	0.147
16-20	0.049
20-24	0.011

Ετήσιο ιστόγραμμα Σ (ιστογραμμάτων 10 λεπτών $\times 6 \times 24 \times 365 \times f$)

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Έλεγχος σε κόπωση

Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης

Συγκέντρωση βλάβης Palmgren-Miner ή κανόνας Miner $\rightarrow D_d = \sum \frac{n_i}{N_{Ri}}$

Κατηγορία λεπτομέρειας σύνδεσης \rightarrow Επαυξημένη καμπύλη αντοχής κατ. 11

Η ετήσια συσσώρευση βλάβης είναι $D_d = 0.0402$, που ισοδυναμεί με αστοχία σε 24.9 έτη.

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Σχεδιασμός πειραμάτων

Σκοπός
Διερεύνηση συμπεριφοράς κοχλιών και συγκολλήσεων υπο ανακυκλίζομενη φόρτιση

Διαστάσεις δοκιμίων

- Ορθογ. φλάντζα 80 x 100 mm
- Πάχος φλάντζας 40 mm
- Πάχος πυλώνα 6 mm
- Κοχλίας M20 10.9
- Χάλυβας S235

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Σχεδιασμός πειραμάτων

Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης

$F_{min}=0 \text{ kN}, F_{max}=100 \text{ kN} \Rightarrow \Delta F=100 \text{ kN}, N_R=2 \times 10^5$

Λεπτομέρεια	$\Delta \sigma_x$ (kN/cm ²)	$\Delta \sigma_R$ (kN/cm ²)	$\Delta \sigma_x / \Delta \sigma_R$	$\Delta \sigma_x / \Delta \sigma_R$
Κοχλίας	5.0	10.77	31.83	2.761
Εξωραφή	4.0	8.62	20.83	2.417
Εσωραφή	7.1	15.3	20.83	1.362

$F_{min}=0 \text{ kN}, F_{max}=100 \text{ kN} \Rightarrow \Delta F=100 \text{ kN}, N_R=5 \times 10^5$

Λεπτομέρεια	$\Delta \sigma_x$ (kN/cm ²)	$\Delta \sigma_R$ (kN/cm ²)	$\Delta \sigma_x / \Delta \sigma_R$	$\Delta \sigma_x / \Delta \sigma_R$
Κοχλίας	5.0	7.94	31.83	3.747
Εξωραφή	4.0	6.35	20.83	3.281
Εσωραφή	7.1	11.27	20.83	1.848

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιωτών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Σχεδιασμός πειραμάτων

Πειραματική διάταξη

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Σχεδιασμός πειραμάτων

Δοκίμια εσωραφών

Φλάντζα προσυγκόλλησης Συγκόλληση με ορισμένες επιφάνειες επαφής Συγκόλληση με προέκταση φλάντζας

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Σχεδιασμός πειραμάτων

Δοκίμια εσωραφών

Παμετρικές δοκιμές

- Πάχος φλάντζας:
 - $t=35\text{ mm}$
 - $t=30\text{ mm}$
 - $t=25\text{ mm}$
- Διάμετρος κοχλία:
 - M16 10.9
- Θέση κοχλία:
 - 41mm από τον πυλώνα

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Σχεδιασμός πειραμάτων

Δοκίμια εξωραφών

Συγκόλληση με απλή εξωραφή Συγκόλληση εξωραφής με προεξοχή

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

Συμπεράσματα

- Για τη μείωση του φαινομένου της κόπωσης κρίνεται επιβεβλημένη η χρήση προεντεταμένων κοχλιών.
- Η αξονική δύναμη που παραλαμβάνουν οι κοχλίες, για μικρή επιβαλλόμενη δύναμη, εξαρτάται μόνο από το βαθμό προέντασης τους. Όσο αυξάνεται όμως η επιβαλλόμενη δύναμη, η αξονική δύναμη των κοχλιών είναι ανεξάρτητη από το βαθμό προέντασης και εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δακτυλίου.
- Η φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής και η φλάντζα προσυγκόλλησης παρουσιάζουν αρκετά παρόμοια συμπεριφορά.
- Η φλάντζα με προέκταση παρουσιάζει την μεγαλύτερη ομοιομορφία τάσεων.
- Η φλάντζα εξωραφής παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων. Η κατανομή των τάσεων χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιομορφία. Δικαιολογείται ο χαρακτηρισμός στον DIN 4133 ως "λιγότερο καλή".
- Στην υπό μελέτη σύνδεση η συγκόλληση φαίνεται να αστοχεί ύστερα από 24.9 έτη

Μη γραμμική αριθμητική προσομοίωση κοχλιών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών

