



ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

ΣΥΝΟΨΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENergy related Steel
STRuctures using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: **Prof. C. GANTES**

SUMMARY OF FINAL REPORT

2015



European Union
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND

Summary

The scope of this report is to summarize the results of the research endeavors carried out in the framework of the research project:

ACTION «ARISTEIA II»

Novel design concepts for ENergy related Steel STRuctures using Advanced Materials (ENSSTRAM)

which have been performed under the coordination of Prof. Charis Gantes (P.I.).

Novel design concepts for two energy-related steel structures, wind-turbine towers and buried pipelines, have been investigated experimentally and numerically. Both types of structures play a vital role for satisfying societal energy needs and their safe and efficient design offers significant financial, social and environmental benefits, while their possible failure could have grave consequences. The proposed novel design concepts aim at exploiting innovative materials, combined with the traditional steel shells, thus enhancing the overall structural performance of both systems and extending their application to more extreme environmental actions.

Better exploitation of wind potential requires taller wind turbine towers with larger diameter blades. For such towers the alternative solution proposed in this project is to replace the traditional conical steel shells by a sandwich-type shell, consisting of an inner and an outer steel plate (faces) with a lightweight fill material (core) in between, thus achieving high stiffness with small weight, as well as high damping. Suitable thickness of faces and core and fill material properties have been proposed and design guidelines have been formulated, incorporating optimization of geometry and materials.

Buried pipelines transporting oil and natural gas are cylindrical steel shells, commonly configured as continuous, with in-situ welding between adjacent parts. The use of flexible joints between steel segments in regions where potentially large ground movements (e.g. active faults or landslides) are anticipated, has been

investigated. This enables the pipeline to sustain larger ground movements by localized deformation at the joints, while the steel parts remain essentially undeformed. Appropriate location and properties of flexible joints have been proposed, approximate analytical and more exact numerical analyses methodologies have been proposed, and design guidelines have been formulated.

The detailed research results are included in the project deliverables and in the publications listed at the end of this short report.

Περιεχόμενα

Summary	I
Περιεχόμενα	1
Εισαγωγή.....	2
Πυλώνες ανεμογεννητριών τύπου sandwich	6
Αγωγοί με εύκαμπτους κόμβους.....	11
Δημοσιεύσεις.....	17

Εισαγωγή

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιήθηκε κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Σκοπός της διεξαγόμενης έρευνας ήταν η διερεύνηση καινοτόμων ιδεών σχεδιασμού δύο τύπων μεταλλικών κατασκευών του ενεργειακού τομέα. Ο πρώτος χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας και αφορά σε πλώνες ανεμογεννητριών, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται για τη μεταφορά καυσίμων και αφορά σε υπόγειους αγωγούς. Και οι δύο κατασκευές παίζουν σημαντικό 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. Παράλληλα, ο σχεδιασμός τους θέτει πολύ ενδιαφέρουσες θεωρητικές και τεχνολογικές προκλήσεις, μερικές από τις οποίες πραγματεύθηκε το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα. Και για τα δύο θέματα οι προτεινόμενες ιδέες σχεδιασμού στοχεύουν στην αξιοποίηση καινοτόμων υλικών σε συνδυασμό με τα παραδοσιακά χαλύβδινα κελύφη, με στόχο τη βελτιστοποίηση της δομικής τους συμπεριφοράς και την επέκταση εφαρμογής τους σε συνθήκες πιο απαιτητικών περιβαλλοντικών δράσεων.

Οι σύγχρονοι πλώνες ανεμογεννητριών διαμορφώνονται ως κολουροκωνικά χαλύβδινα κελύφη με αυξανόμενη διάμετρο προς τη βάση, προκειμένου να αυξάνεται η δυσκαμψία και η αντοχή και να εξοικονομείται υλικό. Το φορτίο λόγω ανέμου επί των πτερυγίων είναι συνήθως το κρίσιμο για τη διαστασιολόγηση του πλώνα, δημιουργώντας μία κυρίαρχη καμπτική ένταση. Με στόχο την ικανοποίηση των διαρκώς αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων από ανανεώσιμες πηγές, υπάρχει μία τάση για υψηλότερους πλώνες και πτερύγια μεγαλύτερης διαμέτρου, προκειμένου να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.

Επομένως, καθ' ύψος του πυλώνα και ιδιαίτερα στη βάση του αναπτύσσονται μεγαλύτερες καμπτικές ροπές, δημιουργώντας απαιτήσεις αυξημένων αδρανειακών χαρακτηριστικών της διατομής, καθώς και κίνδυνο εκδήλωσης τοπικού λυγισμού. Παράλληλα, ο πυλώνας γίνεται πιο εύκαμπτος, οδηγώντας σε αύξηση των πλευρικών παραμορφώσεων και σε πιθανό κίνδυνο συντονισμού με τα ηλεκτρομηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Ο προφανής τρόπος για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα είναι η χρήση μεγαλύτερης διατομής καθ' ύψος του πυλώνα, προκειμένου να αυξηθεί η δυσκαμψία. Ενδεχόμενη αύξηση του πάχους αντί της διαμέτρου είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματική, γιατί όχι μόνο επιβάλλει δυσμενέστερες απαιτήσεις υλικού, αλλά και εισάγει μεγαλύτερες παραμένουσες τάσεις κατά τη διάρκεια της ψυχρής καμπύλωσης των μεταλλικών ελασμάτων, μειώνοντας έτσι το εύρος της ελαστικής απόκρισης του πυλώνα υπό φορτία λειτουργίας. Ωστόσο, η αύξηση της διαμέτρου του πυλώνα περιορίζεται άμεσα από τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς των κωνικών τμημάτων, ειδικά σε κορυφές βουνών όπου εγκαθίστανται συνήθως τα αιολικά πάρκα. Προκύπτει έτσι η ανάγκη μιας άλλης στατικής μορφής πυλώνων.

Η εναλλακτική λύση που διερευνήθηκε σε αυτό το ερευνητικό πρόγραμμα για υψηλούς πυλώνες είναι η χρήση ενός κελύφους με διατομή τύπου sandwich αποτελούμενη από ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα με πλήρωση της μεταξύ τους απόστασης μέσω ενός πυρήνα σκυροδέματος που συγκρατεί τα δύο ελάσματα στη θέση τους, προσφέροντας έτσι μεγάλη δυσκαμψία με μικρό βάρος. Τελικός στόχος ήταν ο βέλτιστος σχεδιασμός της γεωμετρίας (πάχη λεπίδων και πυρήνα). Η έρευνα συμβάλει στο σχεδιασμό ανεμογεννητριών με μειωμένο ίδιο βάρος, κόστος και περιβαλλοντικό αντίκτυπο, μεγάλη αντοχή, με εύκολη μεταφορά και εγκατάσταση. Στα πλαίσια του προγράμματος πραγματοποιήθηκαν βιβλιογραφική επισκόπηση, προκαταρκτική αναλυτική και αριθμητική διερεύνηση, σχεδιασμός και διενέργεια πειραμάτων, βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων, παραμετρικές αναλύσεις και ανάπτυξη μεθοδολογίας σχεδιασμού και κατασκευής πυλώνων ανεμογεννητριών από κελύφη τύπου sandwich.

Οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου είναι κυλινδρικά κελύφη από χάλυβα υψηλής αντοχής. Διαδοχικά τμήματα του αγωγού τοποθετούνται σε ένα όρυγμα και συνδέονται μεταξύ τους με επί τόπου συγκολλήσεις. Μετά γίνεται επανεπίχωση με κατάλληλο εδαφικό υλικό. Μία σημαντική πρόκληση του σχεδιασμού τους πηγάζει από το γεγονός ότι τέτοιοι αγωγοί διατρέχουν πολλά χιλιόμετρα, και επομένως είναι πρακτικά βέβαιο ότι θα διασχίσουν περιοχές με πιθανές αστοχίες εδάφους, όπως κατολισθήσεις, ή εδαφικές αστοχίες λόγω σεισμών (π.χ. λόγω αστάθειας πρανών, ενεργών ρηγμάτων ή ρευστοποιήσεις εδάφους). Κατά τη διάρκεια αυτών των φαινομένων, το έδαφος υπόκειται σε μεγάλες μετατοπίσεις που οι αγωγοί αναγκάζονται να ακολουθήσουν. Έτσι, αναπτύσσονται σημαντικές αξονικές και διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές στον αγωγό που μπορεί να προκαλέσουν εφελκυστική αστοχία των συγκολλήσεων, αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού (ρυτίδωση) των τοιχωμάτων του

αγωγού, ή σπανιότερα αστοχία λόγω καθολικού λυγισμού. Σε μία τέτοια περίπτωση, το μεταφερόμενο καύσιμο μπορεί να διαρρεύσει ελεύθερο, προκαλώντας διακοπή της λειτουργίας του αγωγού, σοβαρή οικονομική ζημιά και μη αναστρέψιμη περιβαλλοντική καταστροφή. Η σύγχρονη πρακτική σχεδιασμού βασίζεται στη χρήση συνεχών αγωγών που κατασκευάζονται από υψηλής ποιότητας χάλυβα και σε τεχνικές προχωρημένων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική απόκριση τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού των αγωγών, τη διαμήκη και εγκάρσια αντίσταση του εδάφους ως μία σειρά ελαστικών-τελείως πλαστικών κατανεμημένων ελατηρίων Winkler, καθώς και φαινόμενα δευτέρας τάξεως που αναπτύσσονται λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων. Προκειμένου να παραλάβει ο αγωγός μεγαλύτερες μετατοπίσεις, η αντοχή του χάλυβα από τον οποίο κατασκευάζεται, καθώς και το πάχος των τοιχωμάτων της διατομής του θα πρέπει αναβαθμιστούν, ενώ το όρυγμα στο οποίο τοποθετείται θα πρέπει να διαπλατυνθεί σημαντικά και να επιχωθεί με ένα πολύ ελαφρύ υλικό, η δε τριβή να μειωθεί τυλίγοντας τον αγωγό με κατάλληλα γεωφάσματα. Ωστόσο, για μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις αυτά τα μέτρα καθίστανται αντιοικονομικά ή και ανεπαρκή.

Στην προτεινόμενη εναλλακτική λύση επιδιώκεται η χρήση σπονδυλωτών αγωγών αντί συνεχών, στις περιοχές όπου αναμένονται εδαφικές αστοχίες. Σε αυτούς τους αγωγούς χρησιμοποιούνται στην περιοχή του ρήγματος εύκαμπτοι κόμβοι μεταξύ διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων, που επιτρέπουν πολύ μεγαλύτερες τοπικές παραμορφώσεις, αφήνοντας τα χαλύβδινα τμήματα ουσιαστικά απαραμόρφωτα και περιορίζοντας τις στροφές και μετακινήσεις του αγωγού σε μία πολύ πιο μικρή ζώνη κοντά στο εδαφικό ρήγμα. Οι χρησιμοποιούμενοι κόμβοι θα πρέπει να είναι μικρού κόστους, να επιτρέπουν μεγάλες τοπικές παραμορφώσεις αποφεύγοντας τη διαρροή και εξασφαλίζοντας επαρκή αξονική και περιφερειακή αντοχή έναντι εσωτερικής πίεσης κατά την φυσιολογική λειτουργία του αγωγού, και να είναι εύκολα αντικαταστάσιμοι, αφού στην περίπτωση των εδαφικών ρηγμάτων ο σχεδιασμός θα στοχεύει στην αποφυγή της διαρροής χωρίς όμως να αποφεύγει τις βλάβες. Στόχος του προγράμματος ήταν να αναπτυχθούν οδηγίες σχεδιασμού σπονδυλωτών υπόγειων αγωγών με αυξημένη δυνατότητα παραλαβής μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα αστοχίας, διακοπής λειτουργίας, οικονομικών απωλειών και συνεπαγόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στα πλαίσια του προγράμματος πραγματοποιήθηκαν βιβλιογραφική επισκόπηση, προκαταρκτική αναλυτική και αριθμητική διερεύνηση, σχεδιασμός και διενέργεια πειραμάτων, βαθμονόμηση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, ανάπτυξη αναλυτικής μεθοδολογίας, παραμετρικές αναλύσεις απόκρισης και ανάπτυξη οδηγιών σχεδιασμού και κατασκευής υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους.

Στις εργασίες συνεισέφεραν τα παρακάτω μέλη της Ερευνητικής Ομάδας:

- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αλέξανδρος Βαλασαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Παύλος Αστερίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Στυλιανός Κατσαοσίδης, Μηχανολόγος Μηχανικός ΤΕ
- Ξενοφών Λιγνός, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΤΕ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων
- Κυριάκος Κάρλος, Μηχανολόγος Μηχανικός

καθώς και οι σύμβουλοι από Πανεπιστήμια του εξωτερικού:

- Theodore Stathopoulos, Professor, Concordia U., Canada
- Charalampos Baniotopoulos, Professor, U. of Birmingham, U.K.
- Michael O'Rourke, Professor, Rensselaer Polytechnic Institute, U.S.A.
- Thomas Denis O'Rourke, Professor, Cornell U., U.S.A.
- Dimitrios Lignos, Associate Professor, McGill U., Canada

Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στους Υ.Δ. της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ Βασίλειο Μελισσιανό, Κωνσταντίνα Κουλάτσου και Ηλία Θανάσουλα, στο Μεταδιδακτορικό Ερευνητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ Γιάννη Χαλούλο, και στους Πολιτικούς Μηχανικούς Θεόδωρο Βασιλόπουλο, Μαρία Δαγαλάκη, Αλέξανδρο Ζάμπα, Σπύρο Ζερβό, Μαριάννα Ιωάννου, Μωρίς Καλδερών, Παύλο Καλφαντή, Άγγελο Καρβέλη, Γιώργο Κορακίτη, Γιώργο Λιβιτσάνο, Γεωργία Μαργαρίτη, Κατερίνα Μουστεράκη, Κωνσταντίνο Μπαχά, Κατερίνα Νταϊφώτη και Γεωργία Παπαδάτου για τη συμβολή τους.

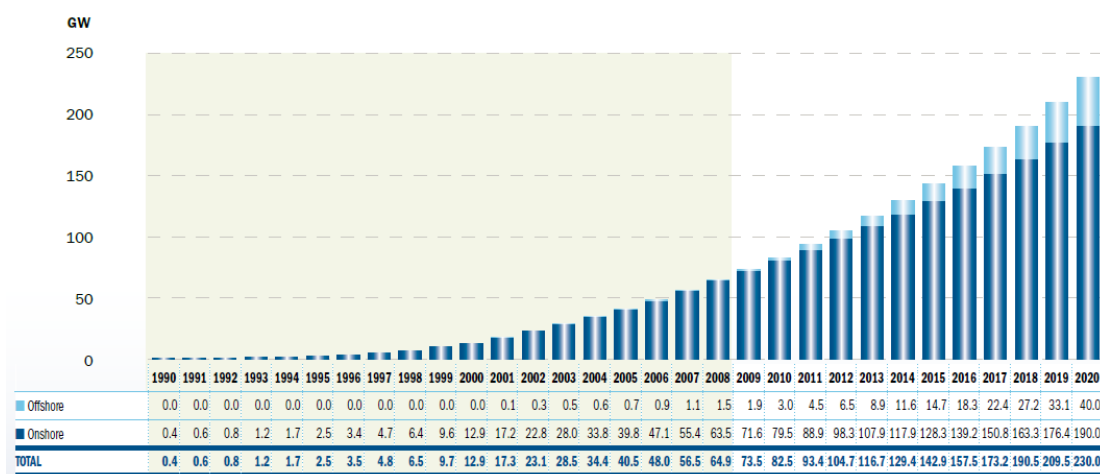
Τα λεπτομερή αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος περιέχονται στα παραδοτέα καθώς και στις επιστημονικές δημοσιεύσεις που αναφέρονται στην τελευταία ενότητα.

2

Πυλώνες ανεμογεννητριών τύπου sandwich

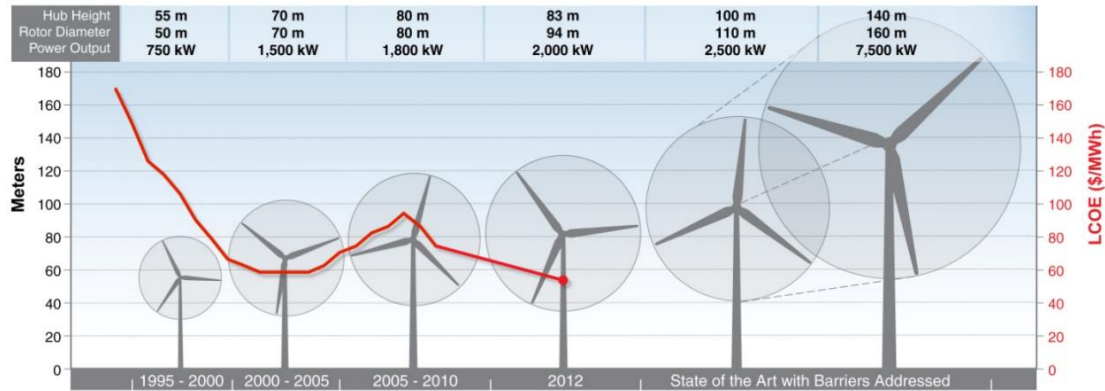
Οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες που χαρακτηρίζουν τη σύγχρονη εποχή έχουν οδηγήσει σε εκθετικά ανοδική εξέλιξη της παραγόμενης αιολικής ενέργειας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 για το σύνολο των αιολικών πάρκων στην Ευρώπη.

Ενδεικτικό της τάσης αυτής είναι το Σχήμα 2.2, το οποίο παρουσιάζει την εξέλιξη των ανεμογεννητριών εντός της τελευταίας εικοσαετίας, όσον αφορά τις παραπάνω παραμέτρους αλλά και το κόστος ανά MWh ενέργειας, το οποίο βαίνει ως επί το πλείστον μειούμενο λόγω των (θετικών) οικονομικών κλίμακας που επιτυγχάνονται λόγω της αύξησης του μεγέθους. Αξίζει να συμπληρωθεί ότι η σημερινή τεχνολογία ήδη επιτρέπει την εγκατάσταση τέτοιων κατασκευών με ύψος πυλώνα που αγγίζει τα 160 m και απόδοση μεγέθους έως και 10MW. Ο σχεδιασμός μεγαλύτερων πυλώνων έρχεται σε αντίφαση με τις δυνατότητες μεταφοράς των τμημάτων από τα εργοστάσια παραγωγής στις θέσεις των αιολικών πάρκων.



Σχήμα 2.1: Συνολική ικανότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας στην Ε.Ε. από το έτος 1990 έως το έτος 2020 βάσει του συντηρητικότερου προβλεπόμενου σεναρίου (EWEA, 2011).

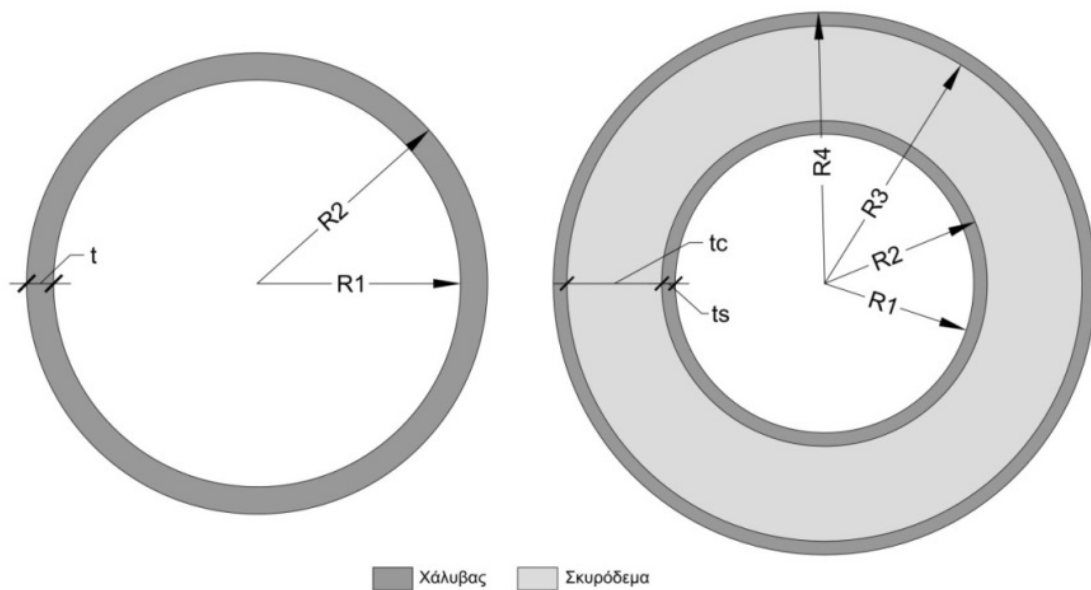
Figure 2.1: Total capacity of wind energy production in the European Union between years 1990 and 2020 based on the most conservative scenario (EWEA, 2011).



Σχήμα 2.2: Εξέλιξη του μέσου μεγέθους επίγειων ανεμογεννητριών και του σταθμισμένου κόστους παραγόμενης ενέργειας (NREL, 2014)

Figure 2.2: Evolution of the average size of on-shore wind turbines and relative cost of produced energy (NREL, 2014)

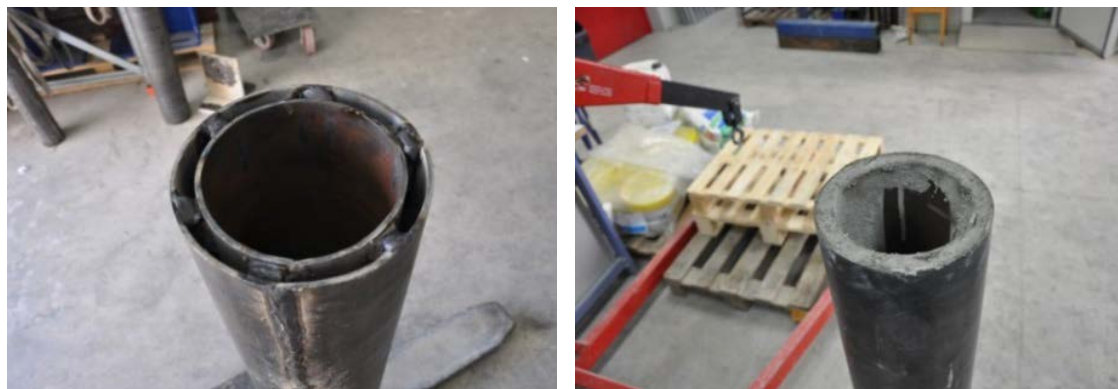
Για το λόγο αυτό στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα διερευνήθηκαν οι προοπτικές χρήσης πυλώνων τύπου sandwich, με διατομή που αποτελείται από δύο χαλύβδινα ελάσματα, συγκρατούμενα από έναν πυρήνα σκυροδέματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η αύξηση τόσο της δυσκαμψίας όσο και της αντοχής της διατομής, χωρίς να απαιτείται αύξηση της εξωτερικής διαμέτρου.



Σχήμα 2.3: 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)

Figure 2.3: Geometry of typical steel and sandwich-type hollow sections (presented thicknesses are not realistic and only outline the geometry of the sections)

Στα πλαίσια του προγράμματος, οι ευεργετικές ιδιότητες των πυλώνων τύπου sandwich πιστοποιήθηκαν αρχικά μέσω πειραματικών δοκιμών κατάλληλων δοκιμών υπό κλίμακα, τόσο αμιγώς χαλύβδινων κυλινδρικών κελυφών όσο και κελυφών τύπου sandwich (σχήματα 2.4 και 2.5) και σύγκρισης μεταξύ τους.

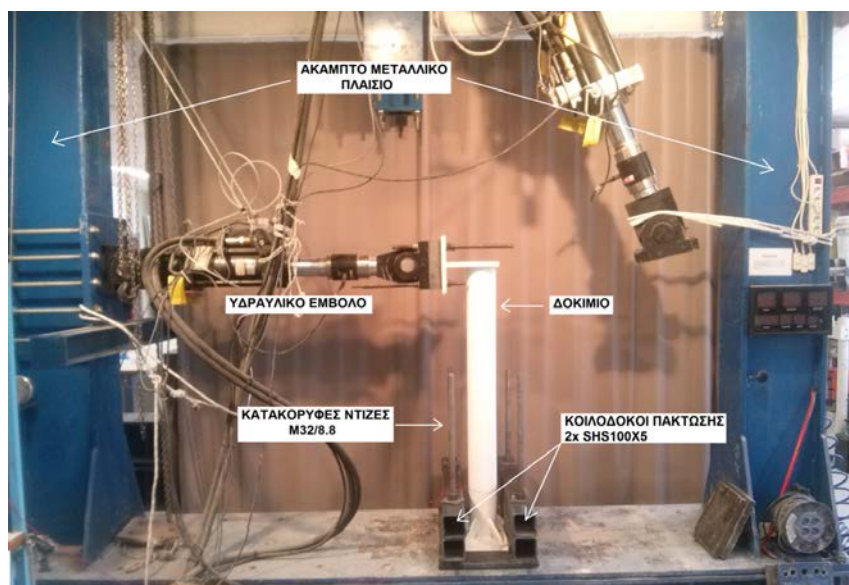


(α)

(β)

Σχήμα 2.4: Δοκίμιο πριν την έγχυση του σκυροδέματος, (β) Πλήρωση με σκυρόδεμα

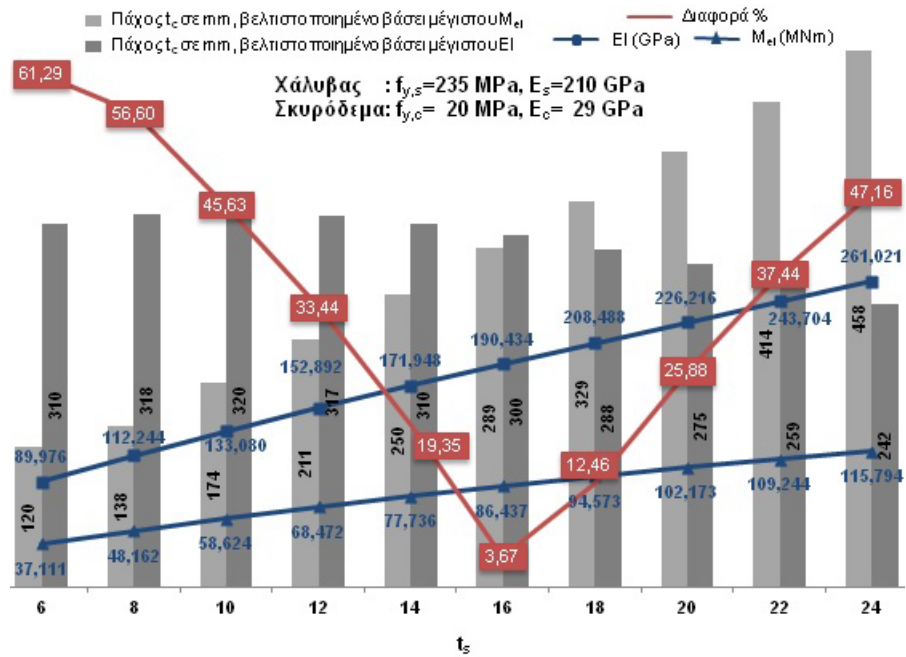
Figure 2.4: (a) Specimen before filling with concrete, (b) Filling with concrete



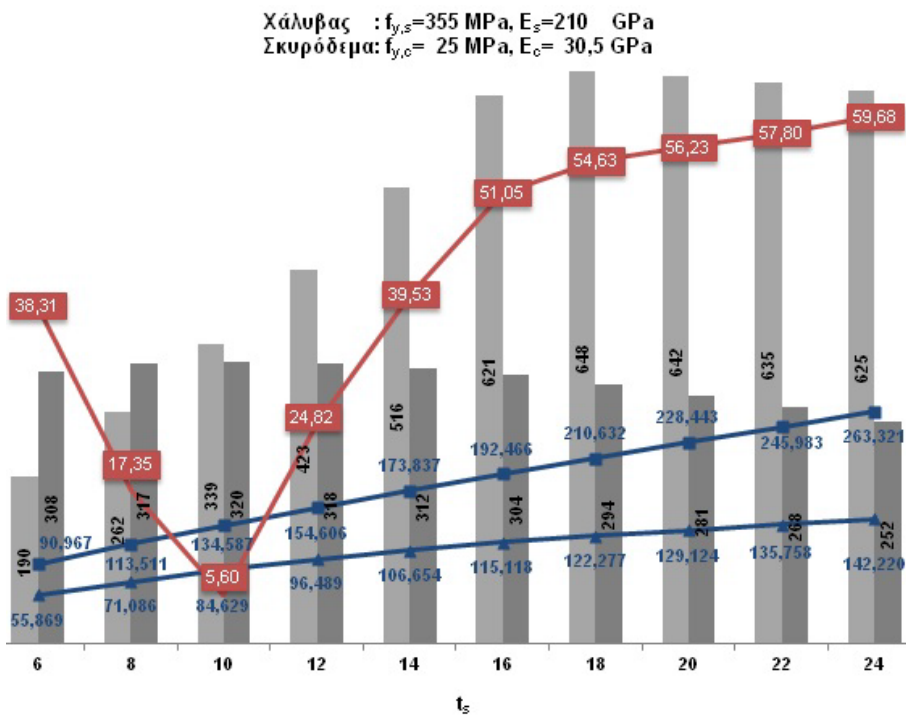
Σχήμα 2.5: Πειραματική διάταξη

Figure 2.5: Testing set-up

Στη συνέχεια, τα πειραματικά αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση απλούστερων αναλυτικών και ακριβέστερων αριθμητικών προσομοιωμάτων. Με βάση παραμετρικές αναλύσεις αυτών των προσομοιωμάτων προτάθηκαν μεθοδολογίες βελτιστοποίησης διατομών αυτού του τύπου (σχήματα 2.6 και 2.7).



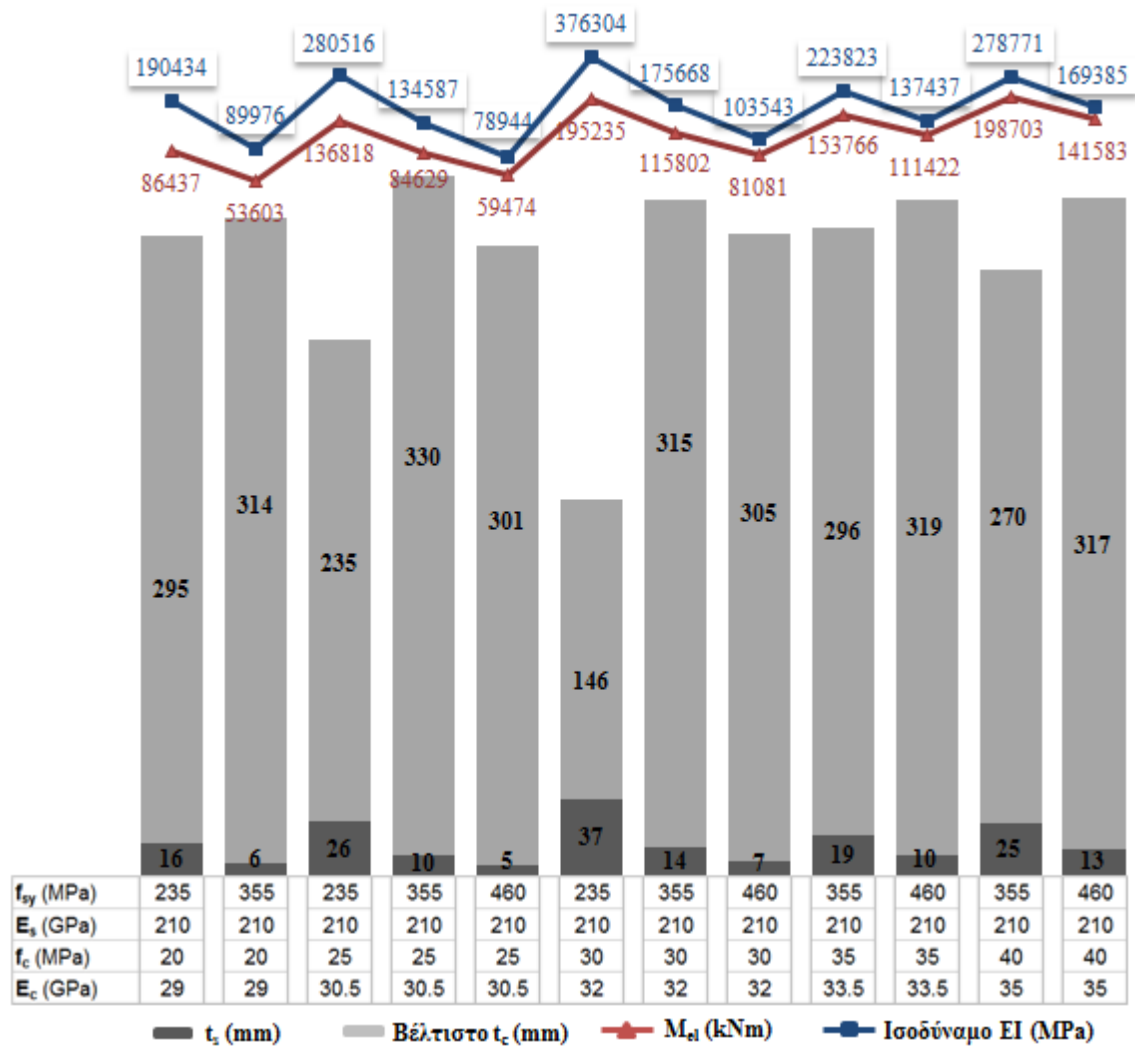
(i)



(ii)

Σχήμα 2.6: Βέλτιστοι συνδυασμοί παχών πυρήνα σκυροδέματος - χαλύβδινων ελασμάτων για μεγιστοποίηση της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης δυσκαμψίας, για $R_4=2000$ mm και (i) $f_{y,s}=235$ MPa, $E_s=210$ GPa, $f_c=20$ MPa, $E_c=29$ GPa, (ii) $f_{y,s}=355$ MPa, $E_s=210$ GPa, $f_c=25$ MPa, $E_c=30.5$ GPa

Figure 2.6: Optimal combinations of concrete-core and steel-faces thicknesses, for maximization of elastic moment resistance and stiffness, for $R_4=2000$ mm and (i) $f_{y,s}=235$ MPa, $E_s=210$ GPa, $f_c=20$ MPa, $E_c=29$ GPa, (ii) $f_{y,s}=355$ MPa, $E_s=210$ GPa, $f_c=25$ MPa, $E_c=30.5$ GPa



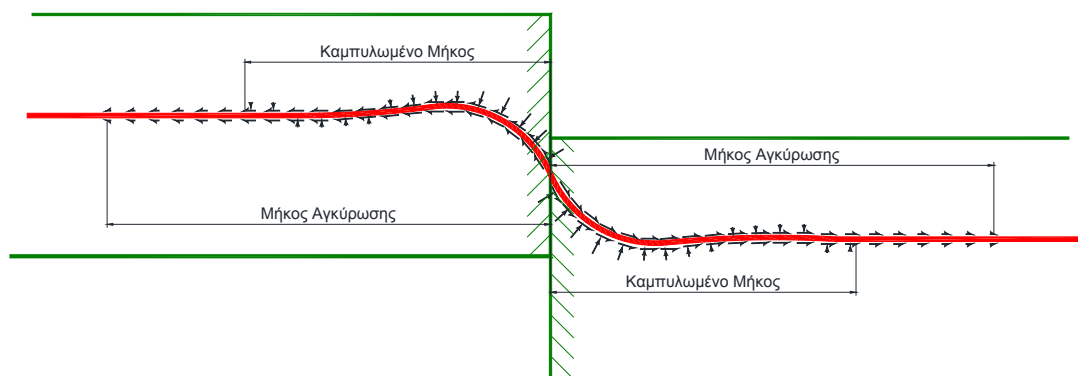
Σχήμα 2.7: Συνδυασμοί παχών χαλύβδινων ελασμάτων και πυρήνα σκυροδέματος που οδηγούν σε σύγκλιση των κριτηρίων μεγιστοποίησης της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης δυσκαμψίας, για διάφορους συνδυασμούς ποιότητας υλικών και εξωτερική ακτίνα $R_4=2000$ mm

Figure 2.7: Concrete-core and steel-faces thickness combinations providing convergence of the criteria of elastic moment resistance and stiffness maximization, for an outer radius of $R_4=2000$ mm and various combinations of material properties

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και της παραμετρικής διερεύνησης, διατυπώθηκαν συστάσεις για την ανάλυση και το σχεδιασμό πυλώνων ανεμογεννητριών με διατομές τύπου sandwich.

Αγωγοί με εύκαμπτους κόμβους

Οι σεισμικά επιβαλλόμενες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται σε διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων προκαλούν στον αγωγό τάσεις και παραμορφώσεις, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας διάρρηξης (strike-slip). Ο αγωγός καμπυλώνεται προκειμένου να ακολουθήσει την μετακίνηση του εδάφους, με αποτέλεσμα να ασκούνται σε αυτόν εγκάρσιες δυνάμεις από το περιβάλλον υλικό επίχωσης της τάφρου (επιβαλλόμενες επί του "καμπυλωμένου μήκους"), ενώ ταυτόχρονα επιμηκύνεται, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού και εδάφους (επιβαλλόμενες επί του "μήκους αγκύρωσης"). Ο συνδυασμός των δυνάμεων αυτών και της εξαναγκασμένης παραμόρφωσης δημιουργεί στο περιμετρικό τοίχωμα του αγωγού θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.1: Παραμόρφωση και επιβαλλόμενες δυνάμεις στον αγωγό κατά τη διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας κατεύθυνσης

Figure 3.1: Deformation and imposed forces on the pipeline during the activation of strike-slip fault

Δεδομένου ότι ο σεισμός επιβάλλει μετατοπίσεις και όχι δυνάμεις στους αγωγούς, η σεισμική καταπόνηση του αγωγού αποτελεί πρόβλημα *Ελεγχόμενης Παραμόρφωσης* και όχι *Ελεγχόμενης Τάσης*. Είναι επομένως αποδεκτό, σε περιπτώσεις σημαντικών εδαφικών μετατοπίσεων, όπως αυτές που επιβάλλονται λόγω διάρρηξης ενεργών

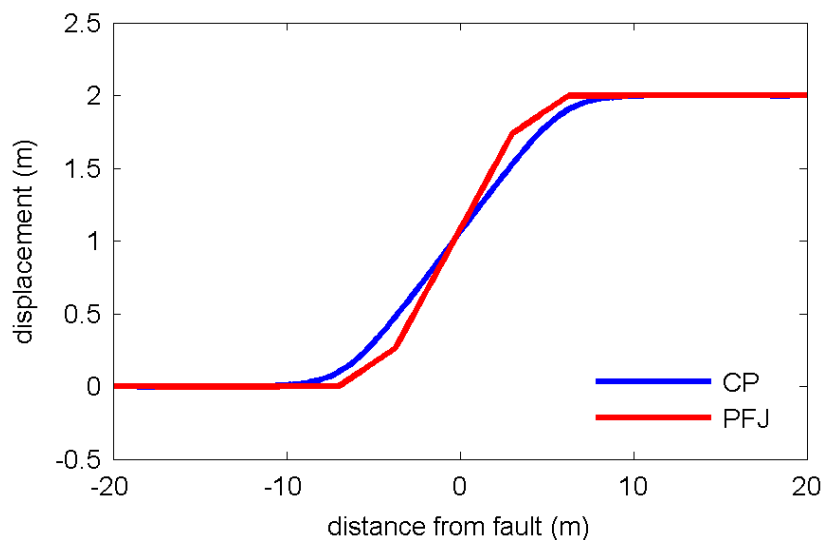
ρηγμάτων, οι τάσεις του αγωγού να μπορούν να υπερβούν το όριο διαρροής, υπό την προϋπόθεση ότι οι αντίστοιχες παραμορφώσεις παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Το όριο θλιπτικής παραμόρφωσης καθορίζεται ώστε στο τοίχωμα του αγωγού να μην εκδηλωθεί τοπικός λυγισμός, ενώ το όριο εφελκυστικής παραμόρφωσης είναι τέτοιο, ώστε να αποφευχθεί η θραύση των ραφών συγκόλλησης μεταξύ διαδοχικών τμημάτων του αγωγού. Τα μέτρα προστασίας του αγωγού αποσκοπούν, επομένως, στη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.

Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος επιδιώκεται με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων (Σχήμα 3.2) να μετατραπεί ο αγωγός σε σπονδυλωτό, ώστε κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος η παραμόρφωση να εκδηλωθεί ως στροφή στους κόμβους και τα χαλύβδινα τμήματα να μείνουν σχεδόν απαραμόρφωτα (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.2: Αγωγός με εύκαμπτους κόμβους

Figure 3.2: Pipeline with flexible joints



Σχήμα 3.3: Παραμόρφωση συνεχούς αγωγού (CP) και αγωγού με εύκαμπτους κόμβους (PFJ) κατά τη διάρρηξη σεισμικού ρήγματος

Figure 3.3: Deformation of continuous pipeline (CP) and pipeline with flexible joints (PFJ) during the activation of seismic fault

Στα πλαίσια του προγράμματος, οι ευεργετικές ιδιότητες των εύκαμπτων κόβων πιστοποιήθηκαν αρχικά μέσω πειραματικών δοκιμών κατάλληλων δοκιμίων υπό κλίμακα, με και χωρίς εύκαμπτους κόμβους (σχήματα 3.4 και 3.5) και σύγκρισης μεταξύ τους. Χρησιμοποιήθηκαν κόμβοι του τύπου που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.6. Επιβεβαιώθηκε ότι οι αναπτυσσόμενες ανηγμένες παραμορφώσεις των αγωγών λόγω επιβαλλόμενων εγκαρσίων παραμορφώσεων μειώνονται δραματικά λόγω της χρήσης των εύκαμπτων κόβων.



Σχήμα 3.4: Πειραματική διάταξη με συνεχές δοκίμιο

Figure 3.4: Experimental set-up with continuous specimen



Σχήμα 3.5: Πειραματική διάταξη με δοκίμιο με κόμβους

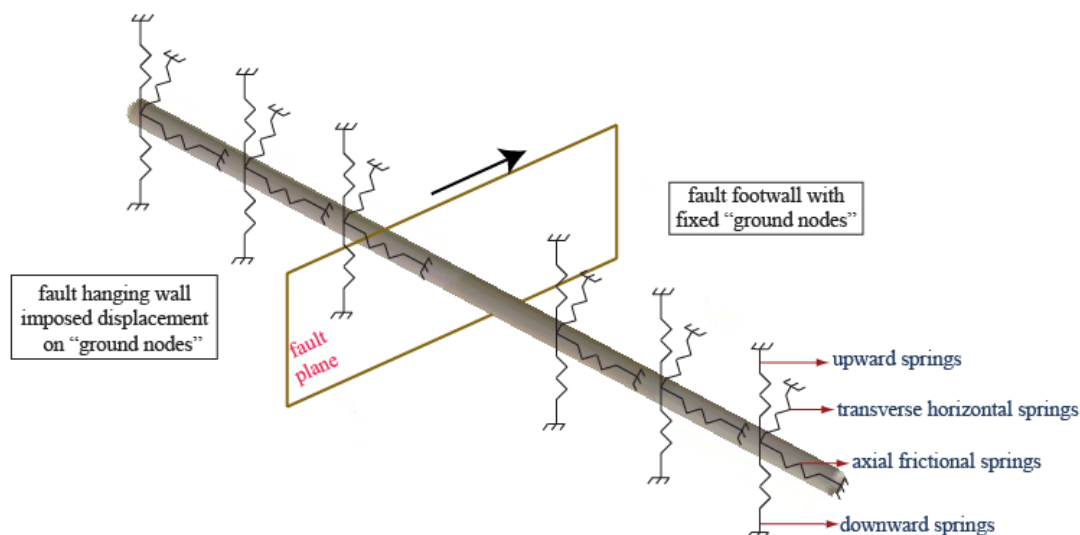
Figure 3.5: Experimental set-up with specimen with flexible joints



Σχήμα 3.6: Εύκαμπτος κόμβος πειραματικών δοκιμών

Figure 3.6: Flexible joint used in the experimental investigation

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για να πιστοποιηθούν αριθμητικά προσομοιώματα τύπου δοκού (Σχήμα 3.7), καθώς και απλοποιητικές αναλυτικές λύσεις.



Σχήμα 3.7: Αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων τύπου δοκού

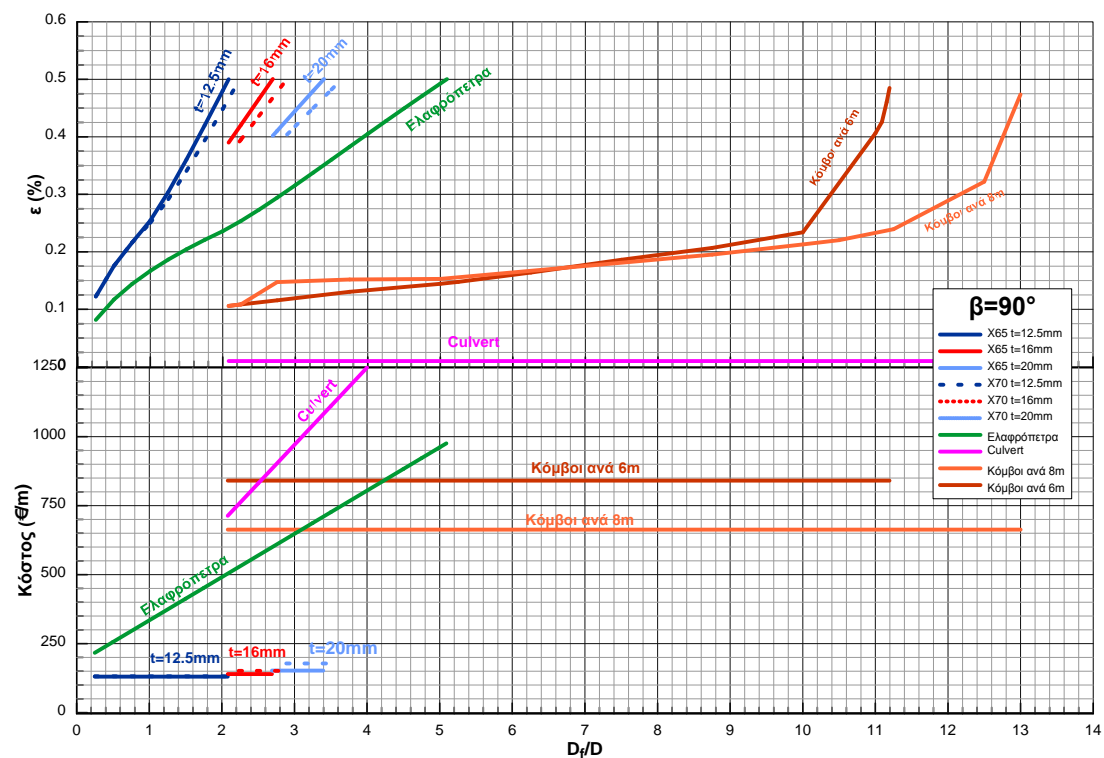
Figure 3.7: Beam-type finite element model

Τέλος, με χρήση τόσο των αριθμητικών προσομοιωμάτων όσο και των αναλυτικών λύσεων, έγινε μεγάλος αριθμός παραμετρικών αναλύσεων με στόχο τη διερεύνηση της αποδοτικότητας των εύκαμπτων κόμβων, τον προσδιορισμό βέλτιστων θέσεων και ιδιοτήτων τους, και την τεχνικο-οικονομική τους σύγκριση με άλλα μέσα αντιμετώπισης των συνεπειών ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται για την περίπτωση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης στα Σχήματα 3.8 και 3.9, για γωνίες διασταύρωσης αγωγού και ρήγματος ίσες προς 90° και 60° αντίστοιχα. Η αύξηση του πάχους προέκυψε να είναι η βέλτιστη λύση για μικρές και μεσαίες μετατοπίσεις ρήγματος (περίπου μικρότερες του 3.5D). Η χρήση εύκαμπτων κόμβων φαίνεται να είναι βέλτιστη για ρηγματα οριζόντιας ολίσθησης όταν ο αγωγός διασταυρώνεται με το ρήγμα στις 90° με την τοποθέτηση των κόμβων ανά 8m να είναι πιο οικονομική, με μειωμένο

κόστος σε σχέση με την χρήση ελαφρόπετρας που αποτελεί την τρίτη επικρατέστερη λύση. Η χρήση culvert μπορεί να θεωρείται μια ασφαλής λύση αλλά δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα, αφού όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετατόπιση ρήγματος αυξάνεται υπέρογκα και το κόστος της συγκεκριμένης λύσης.

Όσον αφορά την απόδοση των εύκαμπτων κόμβων σε σχέση με το κόστος στην περίπτωση όπου η διασταύρωση ρήγματος με τον αγωγό είναι στις 60°, δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση αφού η χρήση ελαφρόπετρας μειώνει επαρκώς τις παραμορφώσεις και κοστίζει λιγότερο. Φυσικά η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί και σε αυτή την περίπτωση εναλλακτικό τρόπο σχεδιασμού σε περιοχές που δεν είναι εύκολο ή οικονομικά συμφέρον να μεταφερθεί η απαραίτητη ελαφρόπετρα.

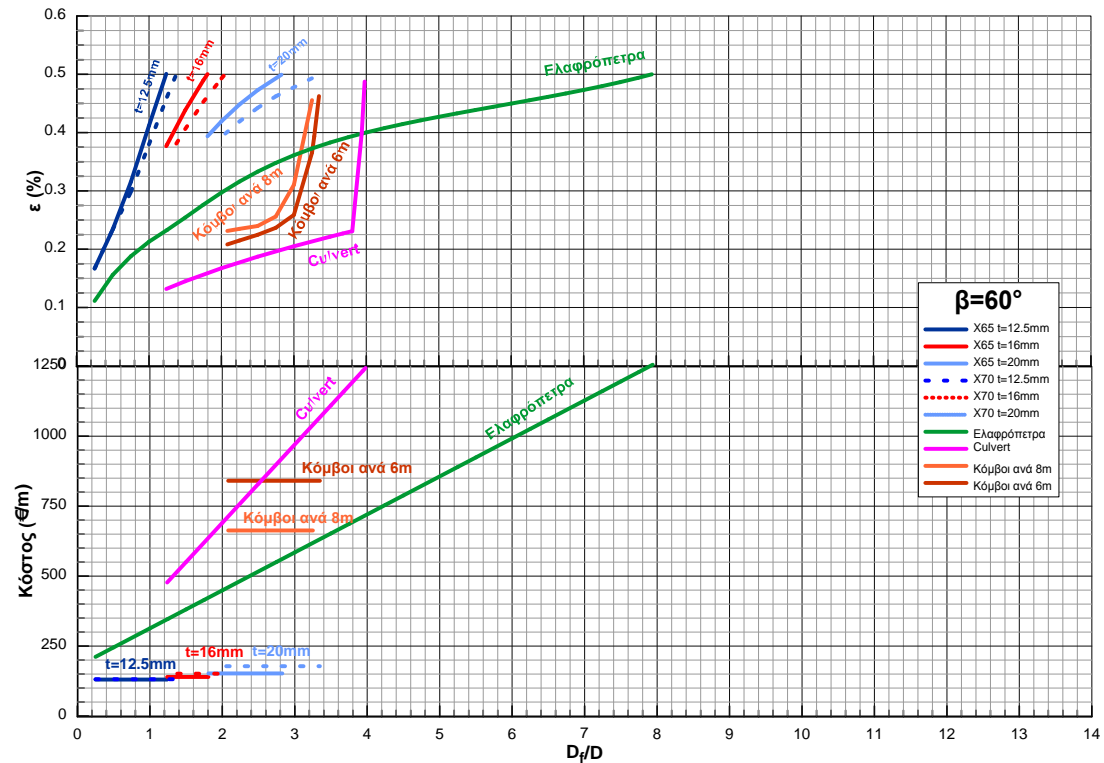


Σχήμα 3.8: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσεως του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 90°

Figure 3.8: Diagrams of the developing axial strains and cost versus the fault offset to pipe diameter ratio, for each alternative design method, for fault crossing angle equal to 90°.

Στην περίπτωση ρήγματος ορθής διάρρηξης διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού ενδείκνυται για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις $d_f \leq 1.5D$, όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού, ενώ για $1.5D < d_f \leq 2.15D$ συνιστάται η χρήση ελαφρόπετρας, καθώς κρίνεται οικονομικά πιο συμφέρουσα λύση από τη χρήση των κόμβων και των κιβωτίων (culvert), ωστόσο είναι δυσέυρετη σε μεγάλες ποσότητες. Για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις και μικρότερες από $3.3D$ η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποτελεί την πιο

αποτελεσματική και συμφέρουσα λύση. Τέλος, για ακόμη μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις (>3.3D) συστήνεται η προστασία του αγωγού από υπόγεια κιβώτια (culvert) οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 3.9: Διαγράμματα μέγιστων αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων και κόστους συναρτήσει του λόγου της μετακίνησης του ρήγματος προς τη διάμετρο του αγωγού για κάθε εναλλακτική μέθοδο σε γωνία διασταύρωσης ρήγματος με αγωγό στις 60°

Figure 3.9: Diagrams of the developing axial strains and cost versus the fault offset to pipe diameter ratio, for each alternative design method, for fault crossing angle equal to 60o.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και της παραμετρικής διερεύνησης, διατυπώθηκαν συστάσεις για την ανάλυση και το σχεδιασμό αγωγών με εύκαμπτους κόμβους σε θέσεις διασταύρωσης με ενεργά σεισμικά ρήγματα.

4

Δημοσιεύσεις

Οι δημοσιεύσεις από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας που είτε έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια του προγράμματος είτε είναι σε εξέλιξη με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος, είναι οι παρακάτω:

1. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "Earthquake Induced Upheaval Buckling of Buried Pipelines with Flexible Joints", *2ECEES - 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, M.A. Ansal and M. Nurlu (eds.), Istanbul, Turkey, Aug. 25-29, 2014.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. 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.
8. 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 of Andreas Anagnostopoulos*, Athens, 2015, έχει υποβληθεί.
9. 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 Lagaros, N.D., Springer Verlag, 2015, έχει υποβληθεί.
10. Melissianos, V.E., Gantes, C.J. and Vamvatsikos, D., "Probabilistic Assessment of Flexible Joints in Mitigating the Consequences of Faulting on Buried Steel Pipelines", *Journal of Pressure Vessel Technology (ASME)*, έχει υποβληθεί.
11. Melissianos, V.E. and Gantes, C.J., "Buckling and Post-buckling Behavior of Compressed Beams with Internal Flexible Joints Resting on Elastic Foundation", *Structures*, σε φάση τελικών διορθώσεων πριν την υποβολή.
12. Melissianos, V.E., Korakitis, G.P., Gantes, C.J. and Bouckovalas, G.D., "Numerical Evaluation of Buried Pipelines with Flexible Joints at Strike-Slip Fault Crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, σε φάση τελικών διορθώσεων πριν την υποβολή.
13. Valsamis, A., Bouckovalas, G.D. and Gantes, C.J., "Alternative Design of Pipelines at Active Fault Crossings Using Flexible Joints", σε φάση τελικών διορθώσεων πριν την υποβολή.
14. Melissianos, V.E., Lignos, X.A., Mpachas, K. and Gantes, C.J., "Experimental Investigation of the Efficiency of Internal Flexible Joints in Reducing Strains in CHS Beams under Transverse Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, σε φάση συγγραφής.
15. Vernardos, S. and Gantes, C.J., "Experimental Investigation of Sandwich-Type Cylindrical Shells under Transverse Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, σε φάση συγγραφής.