



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

**Ανάλυση σύνθετων συνδέσεων με υπολογιστικές μεθόδους για
ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**

Μεταπτυχιακή εργασία της Παπαευθυμίου Γεωργίας,
Πολιτικού μηχανικού ΕΜΠ

Επιβλέπων: Ευστάθιος Ε. Θεοτόκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η μελέτη της σύνθετης σύνδεσης, 'grouted connection', παράκτιας ανεμογεννήτριας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS WORKBENCH. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο συνδεδετικό υλικό της σύνδεσης, το grout, το οποίο αναμένεται να εμφανίσει αστοχίες. Αρχικά περιγράφεται η συνδεσμολογία, οι γεωμετρικές παραλλαγές αυτής και τα υλικά που χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια δίνονται από τη βιβλιογραφία αναλυτικοί τύποι για την ένταση και παραμόρφωση της σύνδεσης. Στη συνέχεια, γίνεται η ανάλυση του τρισδιάστατου προβλήματος στο λογισμικό με αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και των παραμέτρων που επιλέχθηκαν σε κάθε βήμα. Μελετάται η ιδιαίτερη περίπτωση της ανάλυσης επαφής 'contact analysis'. Αντιμετωπίζονται πρακτικά ζητήματα επιλογής διατυπώσεων επίλυσης για τα υλικά, την ποιότητα του πλέγματος και την αλληλεπίδραση των κομματιών του φορέα. Τέλος, εξάγεται η εντατική κατάσταση για να προσδιορίσει τη συμπεριφορά της σύνδεσης υπό στατική φόρτιση.

ABSTRACT

The current post-graduate project presents the study of the 'grouted connection' of an offshore wind turbine. The analysis is being accomplished with the finite element method by the use of ANSYS WORKBENCH software. The study focuses on the connection's conjunctive material, the grout, which is expected to experience failure. Initially, a description of the connection, its geometrical variations and its materials is presented. Moreover, analytical types about the connection's stress and deformation are collocated. Subsequently, the analysis of the three dimensioned problem is carried out by the software with the procedure and the parameters used given step by step. The special case of contact analysis is being studied. Practical issues such as constitutive formulations for the grout, mesh density, and materials' interaction are confronted. Finally, the stress state is exported in the analysis results, in order to specify the connection's behavior under static loading.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	8
2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	9
3. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	11
4. ΕΙΔΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	11
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	12
6. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	13
7. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	14
8. ΠΥΛΩΝΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	14
9. Η GROUTED CONNECTION	15
9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ GROUTED CONNECTION	15
9.2 Η GROUTED CONNECTION ΣΕ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ JACKET ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	16
10. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ GROUTED CONNECTIONS	16
11. ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ	18
11.1 Απλές σύνθετες συνδέσεις κυλινδρικού σχήματος χωρίς shear keys	23
11.1.2. Κατακόρυφη αντοχή της grouted connection κυλινδρικού σχήματος χωρίς shear keys	23
11.2 Σύνθετες συνδέσεις κυλινδρικού σχήματος με shear keys	26
12. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΡΑΣΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ SHEAR KEYS	28
13. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΡΑΣΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕ SHEAR KEYS	31
14. ΚΟΠΩΣΗ	35
15. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM ANALYSIS)	35
15.1 Εισαγωγή γεωμετρίας προβλήματος και προσδιορισμός είδους ανάλυσης	36
15.2 Εισαγωγή υλικών	38
15.3 Δημιουργία πλέγματος	39
15.4 Επιβολή συνοριακών συνθηκών και φόρτισης	42
15.5 Προσδιορισμός παραμέτρων επίλυσης	46
16. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS	58
17. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	58

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	61

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μετατροπείς ενέργειας είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία η οποία παρουσιάζει σημαντικό δυναμικό και συνεισφέρει σημαντικά στο 'ανανεώσιμο' μέλλον το οποίο η Ευρώπη είναι δεσμευμένη να διαμορφώσει. Η εγκατεστημένη ισχύς των παράκτιων ανεμογεννητριών αυξάνεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες κάνοντας την Ευρώπη παγκόσμιο ηγέτη στον τομέα της παραγωγής ενέργειας μέσω του ανέμου. Αυτό συμβαίνει διότι η ενέργεια από τον άνεμο είναι μια φιλική προς το περιβάλλον πηγή που υπάρχει σε αφθονία. Ο βαθμός στον οποίο η βιομηχανία αυτή αναπτύσσεται μπορεί να γίνει αντιληπτός παρατηρώντας τις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται ότι η ισχύς των παράκτιων πάρκων ανεμογεννητριών στο Ηνωμένο βασίλειο θα φτάνει τα 16 GW μέχρι το 2020 (Τμήμα Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2013) και η συνεισφορά στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας θα φτάσει το 10%. Παρόμοιο πλάνο έχει και η Γερμανία, η οποία στοχεύει σε εγκατεστημένη ισχύ των 15 GW μέχρι το 2030.

Είναι πολύ σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι δαπάνες που απαιτούνται για τέτοιου είδους επενδύσεις είναι βιώσιμες. Επομένως, ο σχεδιασμός μιας παράκτιας ανεμογεννήτριας (offshore wind turbine) πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός. Κοινές κατασκευές που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για να στηρίξουν τον πύργο (tower) και την ανεμογεννήτρια (wind turbine) είναι οι 'monopiles', 'jackets' και 'tripods'. Ανάμεσα στις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις συγκαταλέγεται ο τρόπος έδρασης της ανεμογεννήτριας στη βάση της, η επονομαζόμενη 'grouted connection'. Στην ένωση αυτή, δύο χαλύβδινοι στύλοι συνδέονται μεταξύ τους καθώς το μεταξύ τους κενό γεμίζει με υψηλής αντοχής συνδετικό υλικό, το επονομαζόμενο 'grout'.

Στον τομέα εξόρυξης πετρελαίου και αερίου, οι grouted connections χρησιμοποιήθηκαν κατά πολλές δεκαετίες για τη στήριξη υποθαλάσσιων κατασκευών με επιτυχία και γι' αυτό το λόγο και εντάχθηκαν και στην βιομηχανία των ανεμογεννητριών.

Σύμφωνα με Ευρωπαϊκό Οργανισμό Ενέργειας από τον Άνεμο (European Wind Energy Association), στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως οι monopile τύπου συνδέσεις οι οποίες περιορίζονται σε βάθη νερού έως 30 μέτρα. Για μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιούνται οι άλλου τύπου συνδέσεις.

Η απόδοση της σύνδεσης έχει υπάρξει θέμα σοβαρών συζητήσεων λόγω του μεγάλου πλήθους των monopile συνδέσεων σε ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη. Σχετικά με την συμπεριφορά της grouted connection υπάρχει μικρή έρευνα, οπότε είναι ένα πεδίο που χρίζει διερεύνησης. [20]

1. ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας

στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Ως «ανανεώσιμες πηγές» θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική. Οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Τελευταία, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη. [8]

2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ανεμογεννήτρια είναι αιολική μηχανή που παράγει ρεύμα από την αιολική ενέργεια και μπορεί να τροφοδοτήσει με ρεύμα κατοικημένες περιοχές. Πολλές ανεμογεννήτριες μαζί αποτελούν ένα αιολικό πάρκο. [1]

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει όλη την κατασκευή. Οι πύργοι είναι συνήθως μεταλλικές (χαλύβδινες) σωληνωτές κατασκευές ή δικτυώματα. Μερικοί πύργοι αποτελούνται από σκυρόδεμα.[1]

Τα πτερύγια γυρίζουν με τον άνεμο που με τη βοήθεια του ρότορα γυρίζει την τουρμπίνα.[1]

Σύμφωνα με τους αρχαιολόγους και ιστορικούς η πρώτη χρήση του ανέμου ως φυσικής πηγής ενέργειας έγινε γύρω στον 7ο π.Χ. αιώνα στην Περσία όπου χρησιμοποιήθηκαν ανεμομηχανές για το άλεσμα των δημητριακών και την άντληση νερού. Οι Ολλανδοί, το 1500 μ.Χ. με τον διάσημο σχεδιαστή Jan Adriaenszoon ήταν πρωτοπόροι στην κατασκευή αυτών των ανεμόμυλων. Εκτός από το άλεσμα των δημητριακών, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την αποξήρανση των ελωδών εδαφών της Ολλανδίας. Αυτοί οι ανεμόμυλοι έφθασαν στην Αμερική στα μέσα του 1700, μέσω των Ολλανδών αποίκων. Η αποκαλούμενη Αμερικάνικη multi bladed ανεμογεννήτρια εμφανίστηκε στην ιστορία της αιολικής ενέργειας στα μέσα του 1800. Το βασικό της μοτίβο ήταν η άντληση των υδάτων μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια, για γεωργικές χρήσεις. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν την ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εφευρέθηκαν στις αρχές του 19ου αιώνα στη Δανία. Μέχρι το 1900 υπήρχαν περίπου 2500 ανεμόμυλοι για τα μηχανικά φορτία όπως οι αντλίες και οι μύλοι, παράγοντας μια κατ' εκτίμηση συνδυασμένη μέγιστη δύναμη περίπου 30 MW. Το 1891, ο Δανός Poul LaCour ήταν ο πρώτος που κατασκεύασε ανεμογεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, παρείχε ηλεκτρική ενέργεια στις αγροτικές περιοχές. Κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου, μια μεγάλη ανεμογεννήτρια που είχε διάμετρο ρότορα 17 m κατασκευάστηκε στο Cleveland, του Ohio. Για πρώτη φορά, ένα επιταχυνόμενο κιβώτιο ταχυτήτων εισήχθη στην κατασκευή. Το σύστημα αυτό λειτούργησε για 20 έτη, παράγοντας ισχύ των 12 kW. Εντούτοις, για μεγάλο μέρος του 20ου αιώνα, υπήρξε μικρό ενδιαφέρον για χρήση της αιολικής ενέργειας πέραν της φόρτισης των μπαταριών για τις απομακρυσμένες κατοικίες και των χαμηλής ισχύος συστήματα που αντικαταστάθηκαν γρήγορα όταν η πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο έγινε διαθέσιμη. Μια αξιοσημείωτη εξαίρεση ήταν η ανεμογεννήτρια 1250 kW Smith-Putnam που κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ το 1941.[2], [9]

Ο Golding (1955) και οι Shepherd και Divone στη Spera (1994) παρέχουν μια εξαιρετικά ενδιαφέρον ιστορία της πρώιμης ανάπτυξης των ανεμογεννητριών. Καταγράφουν την ανεμογεννήτρια Balaclava των 100 kW διαμέτρου 30 m στην τότε USSR το 1931 και του Andrea Enfield 100 kW διαμέτρου 24 m πνευματικό σχέδιο που κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο στις αρχές του 1950. Στη Δανία η

μηχανή Gedser των 200 kW διαμέτρου 24 m χτίστηκε το 1956, ενώ η «Electricité de France» δοκίμαζε μια ανεμογεννήτρια 1.1 MW διαμέτρου 35 m το 1963. Στη Γερμανία, ο καθηγητής Hutter κατασκεύασε μια σειρά από καινοτόμες, ελαφριές ανεμογεννήτριες στη δεκαετία του 1950 και του 1960. Παρά αυτές τις τεχνολογικές προόδους και τον ενθουσιασμό του Golding, από τον Ηλεκτρικό Ερευνητικό Οργανισμό του Ηνωμένου Βασιλείου υπήρξε μικρό συνεχές ενδιαφέρον για την παραγωγή αιολικής ενέργειας έως ότου αυξήθηκε εντυπωσιακά η τιμή του πετρελαίου το 1973. Το κίνητρο για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας το 1973 ήταν η τιμή του πετρελαίου και η ανησυχία για τους περιορισμένους πόρους των φυσικών καυσίμων. Σήμερα, ο κύριος λόγος της χρήσης ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι οι πολύ χαμηλές εκπομπές CO₂ (εκτός του κύκλου ζωής της κατασκευής, της εγκατάστασης, της λειτουργίας και του αφοπλισμού) και η δυνατότητα της αιολικής ενέργειας να βοηθήσει στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής. Το 1997 η Επιτροπή (Commission) της Ευρωπαϊκής Ένωσης δημοσίευσε την Λευκή Βίβλο απαιτώντας να συμβάλουν οι ΑΠΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 12% της συνολικής ενέργειας, μέχρι το 2010. Η αιολική ενέργεια διαδραματίζει το βασικό ρόλο στις ΑΠΕ με μια αύξηση της ισχύος των ανεμογεννητριών από 2.5 GW που ήταν το 1995, σε 40 GW μέχρι το 2010. Ως αποτέλεσμα, σήμερα η Ευρώπη παίρνει περίπου το 20% της ηλεκτρικής της ενέργειας από τις ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένου το 5.3% από την αιολική ενέργεια. Οι πρώτες ιδέες για την παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας τον άνεμο στο υπεράκτιο περιβάλλον εμφανίστηκαν πριν το τέλος της δεκαετίας του 1970 και μετά από πολλές μελέτες σκοπιμότητας στην επόμενη δεκαετία. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 τα ΘΑΠ που κατασκευάστηκαν είναι: (μια μοναδική ανεμογεννήτρια) στο Nogensud, της Σουηδίας το 1990 και στο Vindeby, της Δανίας το 1991. [9]

Το θαλάσσιο αιολικό πάρκο (ΘΑΠ) στο Vindeby περιλάμβανε 11 ανεμογεννήτριες, των 450 kW, δίνοντας συνολική ισχύ περίπου 5 MW. [9]

Το Vindeby ακολούθησε σύντομα ένα δεύτερο ΘΑΠ στη Δανία, το Tuno Knob και δύο ακόμα ΘΑΠ που κατασκευάστηκαν στην Ολλανδία. Αυτά ήταν ενσωματωμένα πάνω σε θεμελιώσεις μονού πυλώνα, η οποία έγινε η προτιμώμενη δομή στήριξης για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Από το 1995 έως το 2000 υπήρχε μικρή δραστηριότητα, με ένα ΘΑΠ να κατασκευάζεται στο Bockstigen Valor της Σουηδίας. Κατά το έτος 2000 νέα ΘΑΠ άρχισαν να κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μεγάλες (multi-megawatt) ανεμογεννήτριες. Το πρώτο ΘΑΠ με multi-megawatt ανεμογεννήτριες (7 ανεμογεννήτριες των 1.5 MW) κατασκευάστηκε το 2000 στο Utgrunden της Σουηδίας. Αρκετές των εν λόγω εγκαταστάσεων σηματοδότησαν την έναρξη των πρώτων εμπορικών ΘΑΠ όπως: το Blyth στο Ηνωμένο Βασίλειο (το 2000) αποτελούμενο από 2 ανεμογεννήτριες των 2 MW, το Middelgrunden στη Δανία (το 2001) αποτελούμενο από 20 ανεμογεννήτριες των 2 MW και το Yttre Stengrund στη Σουηδία (το 2001) αποτελούμενο από 5 ανεμογεννήτριες των 2 MW. Αργότερα στις ακτές της Δανίας, τα ΘΑΠ Horns Rev (το 2002, όπου ήταν και το μεγαλύτερο στο κόσμο) και Nysted (το 2003) με 80 και 76 πολύ μεγάλα ανεμογεννήτριες αντίστοιχα, αποτέλεσαν την επιβεβαίωση της δυνατότητας προσαρμογής τέτοιων τύπων ανεμογεννητριών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Από τότε, οι εγκαταστάσεις αυτού του τύπου συνεχίζουν να κατασκευάζονται. Τον Νοέμβριο του 2010, το έργο Thanet στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι το μεγαλύτερο ΘΑΠ στον κόσμο με 300 MW (100 ανεμογεννήτριες των 3 MW), ακολουθεί το Horns Rev II (2009) της Δανίας με 209 MW (91 ανεμογεννήτριες των 2.3 MW). Στην πραγματικότητα, είναι ουσιαστικό να προωθηθεί η χρήση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας για να επιτευχθούν οι δεσμεύσεις που απαιτούνται από το πρωτόκολλο του Κιότο. Εν συνεχεία, στην Εικόνα 1.1.3 παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα όπου παρουσιάζει την εξέλιξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας από το 1990 μέχρι το 2011. [9]

3. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών είναι πολύ απλή. Πρώτα από όλα η ανεμογεννήτρια είναι η μηχανή εκείνη που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ανεμογεννήτρια δουλεύει ως εξής: Ο αέρας περιστρέφει τα πτερύγια τα οποία είναι συνδεδεμένα με τον περιστρεφόμενο άξονα. Αυτός ο άξονας περνάει στο κιβώτιο μετάδοσης κίνησης και το κιβώτιο συνδέεται με έναν άλλον άξονα μέσου του οποίου κινείται μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι σημερινές ανεμογεννήτριες μπορούν να παράγουν από μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες W μέχρι μερικά MW.[4]



σχήμα 1: αρχές λειτουργίας ανεμογεννήτριας [28]

4. ΕΙΔΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

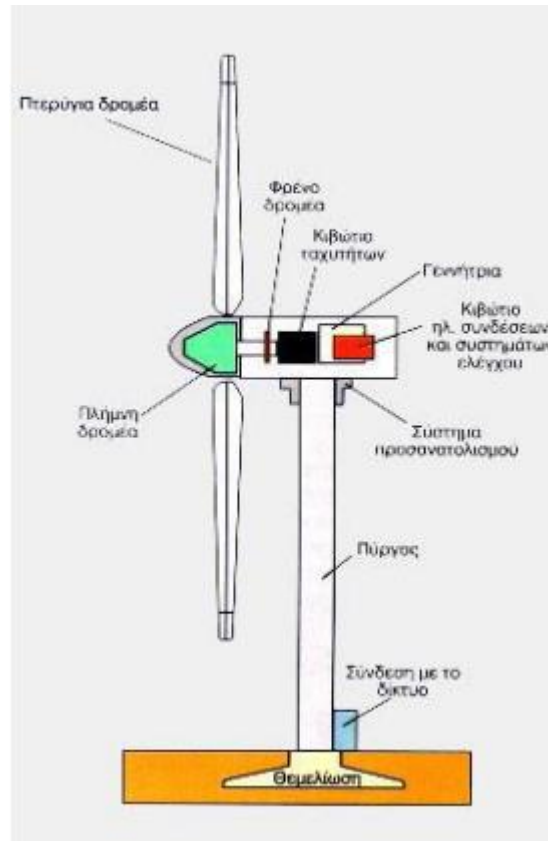
Οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται σε διάφορα μοντέλα, με ένα ή και περισσότερα φτερά, με **οριζόντιο άξονα περιστροφής** των φτερών ή με **κάθετο άξονα**. Οι ανεμογεννήτριες με τον κάθετο άξονα περιστροφής εργάζονται χωρίς να αλλάζουν τη θέση τους σε κάθε αλλαγή της κατεύθυνσης του αέρα, δηλαδή δεν χρειάζονται πηδάλιο. Εφαρμογές έχουν βρει σε διάφορα έργα ακόμη και στην ηλεκτροδότηση σπιτιών. [3]

Για τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα υπήρχε η άποψη ότι όσο πιο λίγα φτερά έχουν, τόσο πιο υψηλόστροφες ήταν οι τουρμπίνες τους, παράλληλα όσο πιο λίγα φτερά έχει η ανεμογεννήτρια, τόσο λιγότερο υλικό είναι απαραίτητο για την κατασκευή τους, δηλαδή οικονομία στα υλικά αλλά και οικονομικότερες στην τιμή κατασκευής. [3]

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Γενικά η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- **τον πύργο:** Συνήθως ο πυλώνας είναι μεταλλικός σωληνωτός κυλινδρικής ή κωνικής διατομής ή δικτυωτός. Για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένος από χάλυβα για να αντέχει τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια της θάλασσας. Αποτελείται από δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα συνδεδεμένα με προεντεταμένους κοχλίες ή σύνθετες συνδέσεις με ένεμα. Το μήκος του κάθε τμήματος μπορεί να ποικίλει από 20 έως 30 μέτρα. Ο πυλώνας μιας Α/Γ υποστηρίζει το σύστημα της ατράκτου (νασέλα και ρότορα) το οποίο ζυγίζει αρκετούς τόνους και ανυψώνει την ανεμογεννήτρια σε ύψος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά μεγαλύτερη και λιγότερο διαταραγμένη σε σχέση με το έδαφος. Το ύψος του πυλώνα έχει να κάνει με την ανάγκη ο δρομέας να βρίσκεται μέσα σε ένα καλό προφίλ ανέμου, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει και ο πυλώνας να μπορεί να αντέξει την αύξηση της ροπής στη βάση του. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι προσομοιάζονται με απλό στατικό σύστημα προβόλου, καθώς και ο πολύ εύκολος υπολογισμός των διατομών και των ιδιοτήτων αυτών.
- **τον θάλαμο:** Περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα (κύριο άξονα, σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων και ηλεκτρογεννήτρια) :
 - Ο κύριος άξονας με το σύστημα πέδησης (φρένα) είναι παρόμοιος με τον άξονα των τροχών ενός αυτοκινήτου με υδραυλικά δισκόφρενα.
 - Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι παρόμοιας κατασκευής με εκείνο του αυτοκινήτου.
 - Η ηλεκτρογεννήτρια είναι παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.
- **τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας:** Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα μικροελεγκτών και «φροντίζουν» για την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε όλες τις συνθήκες.
- **τα πτερύγια:** είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά (υαλονήματα και ειδικές ρητίνες), παρόμοια με αυτά που κατασκευάζονται τα ιστιοπλοϊκά σκάφη, σχεδιασμένα για να αντέχουν σε μεγάλες καταπονήσεις. [12]



σχήμα 2:στοιχεία ανεμογεννήτριας [29]

6. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Τα υλικά της κατασκευής τους καθορίζονται από την δυνατότητα επιβίωσης τους στο εχθρικό περιβάλλον της θάλασσας. Παραδοσιακά χρησιμοποιήθηκαν οι λίθοι από γειτονικά λατομεία και το ξύλο (κορμοί δένδρων ειδικά επεξεργασμένοι για να αντέξουν στην διάβρωση από την ανάπτυξη μικροοργανισμών). Σε συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το άοπλο και το οπλισμένο σκυρόδεμα. Χρησιμοποιήθηκε ειδική τεχνολογία έγχυσης, προσθετικών μάζας για την μείωση κενών και υδατοπερατότητας του σκυροδέματος και προστασία των οπλισμών με γαλαβανισμό και επικαλυπτικές στρώσεις για απόσταση από την επιφάνεια μεγαλύτερη των 5cm. Πρόσφατα έγινε χρήση οπλισμών από υαλονήματα και ανθρακονήματα. Μεταλλικές πασσαλοσανίδες επιλέγονται για προστασία από την διάβρωση (ηλεκτροχημική δράση) με ανοδική (ηλεκτρική) προστασία. Γεωυφάσματα και γεωμεμβράνες χρησιμοποιούνται για τη θεμελίωση ή την διαμόρφωση ειδικών διατομών (επιμήκη στοιχεία από σωλήνες γεωυφάσματος). Ακόμη και GRP (glass reinforced polyester) και άλλα πλαστικά χρησιμοποιούνται σε πλωτά στοιχεία. Τα υλικά αυτά είναι γενικά φιλικά προς το περιβάλλον της θάλασσας και μερικά από αυτά βοηθούν στην τοπική ανάπτυξη θαλάσσιας χλωρίδας και πανίδας και την οικολογική επανάκαμψη της περιοχής που συνήθως διαταράζεται κατά την κατασκευή του έργου. Στις ανεμογεννήτριες τα ελάσματα φύλλων από χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πυλώνων ποικίλουν σε πάχος 12 έως 75 χιλιοστά ανάλογα με το σχεδιασμό τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος, τόσο λεπτότερο είναι το υλικό που απαιτείται για τον πυλώνα. Ο τύπος S355 χάλυβας (Ευρωπαϊκού τύπου) χρησιμοποιείται ευρέως για των πυλώνων των ανεμογεννητριών, λόγω της υψηλής αντοχής του. [11]

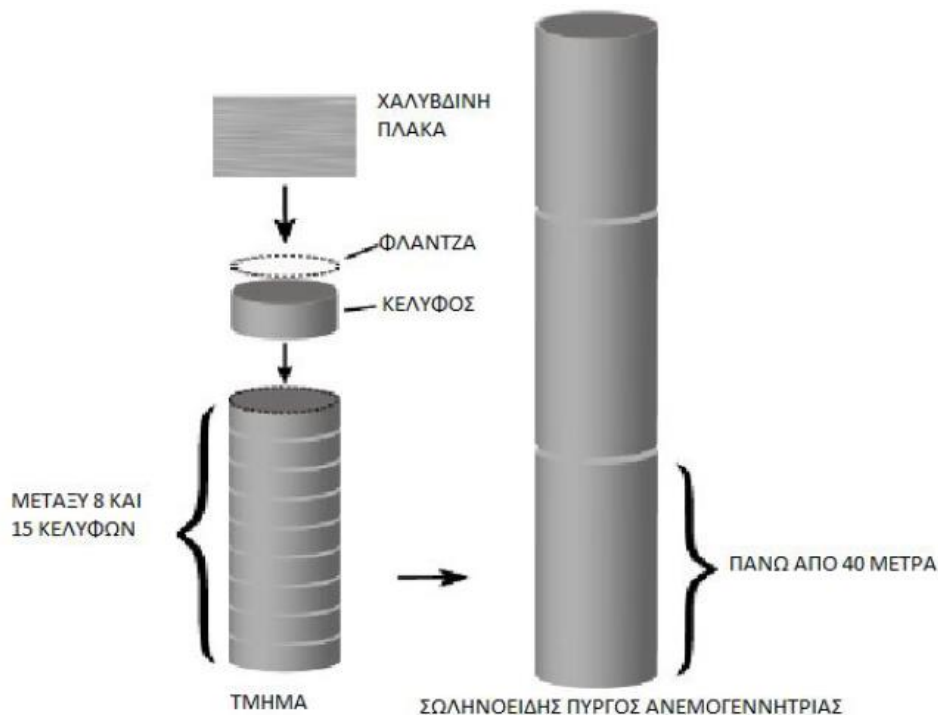
7. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός του πυλώνα της ανεμογεννήτριας πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες απαιτήσεις ως προς τις διαστάσεις, την πλαστική ροπή αντοχής, τον λυγισμό, τη μετατόπιση της κορυφής του πυλώνα κ.α..

- ✓ Στην οριακή κατάσταση αστοχίας ελέγχονται οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises σε κάθε σημείο του πυλώνα και συγκρίνονται με το όριο θραύσης του χάλυβα.
- ✓ Όσον αφορά το λυγισμό ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση λυγισμού σε κάθε σημείο του πυλώνα.
- ✓ Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πυλώνα τίθεται στο 1,00% του ύψους του πυλώνα έτσι ώστε να αποφευχθεί υπερβολική κίνηση που θα παρεμπόδιζε την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.
- ✓ Ελέγχεται επίσης η οριακή κατάσταση αστοχίας σε κόπωση (Fatigue Limit State). [13], [5]

8. ΠΥΛΩΝΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Ένας πυλώνας μπορεί να αποτελείται από μερικά τμήματα χάλυβα, χαρακτηριστικά από 2 έως 4, στα οποία κατά την ένωση τους παρεμβάλλεται η φλάντζα όπου βιδώνονται μαζί. Κάθε τμήμα κατασκευάζεται από διάφορα μεμονωμένα κυλινδρικά κομμάτια που ονομάζονται κελύφη τα οποία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με συγκόλληση η οποία γίνεται από ρομπότ. Κάθε τμήμα ολοκληρώνεται με δύο φλάντζες όπου είναι τοποθετημένες στο άκρο των περιβλημάτων με συγκόλληση Arc Welding (SAW). [12]



σχήμα 3: σύνδεση τμημάτων ανεμογεννήτριας με συγκόλληση [30]

9. Η GROUTED CONNECTION

Ακολούθως περιγράφεται η grouted connection και οι παραλλαγές των κατασκευών στις οποίες συναντάται.

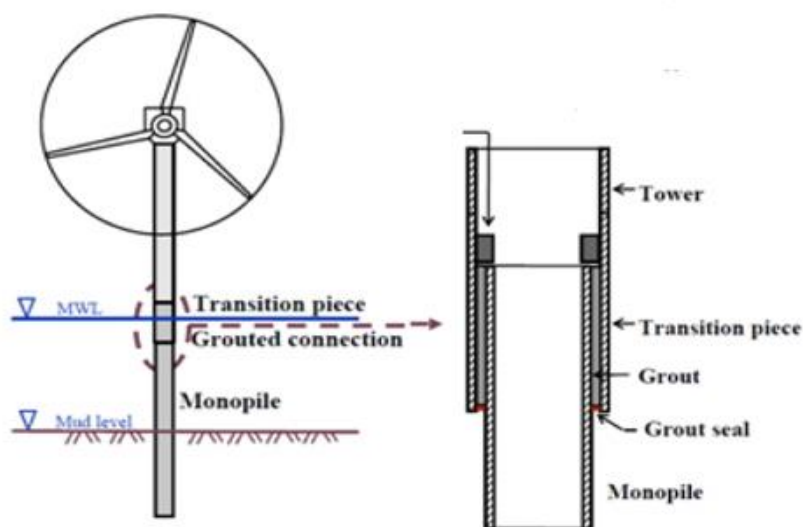
9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ GROUTED CONNECTION

Η σύνδεση μεταξύ του εξωτερικού τμήματος και του εσωτερικού στύλου πραγματοποιείται μέσω μιας υβριδικής σύνδεσης ενέματος και χάλυβα, την επονομαζόμενη **grouted connection**. Αποτελείται από δύο επικαλυπτόμενους χαλύβδινους σωλήνες, την εσωτερική στήλη που οδηγείται στο βυθό της θάλασσας και την εξωτερική στήλη. Το κενό μεταξύ των δύο σωλήνων καλύπτεται με ταχέως σκληρυνόμενο και υψηλής αντοχής ένεμα (High-Performance Concrete (HPC), αντοχής $\geq C65$). [5]

Το μεταβατικό κομμάτι εγκαθίσταται στην κορυφή του στύλου ακουμπώντας πάνω σε προσωρινά στηρίγματα και στη συνέχεια ανεβαίνει στη σωστή κάθετο πριν το γέμισμα με ένεμα. Μετά την πήξη του ενέματος, οι ανυψωτικοί γρύλοι αφαιρούνται αφήνοντας ένα κενό μεταξύ των στηρίξεων και του μονόστύλου (monopole). [5]

Η αντοχή στα φορτία της σύνδεσης μπορεί να αυξηθεί αρκετά με την προσθήκη πρόσθετων μηχανολογικών εξαρτημάτων όπως **weld beads**, δηλαδή συγκολλημένες ραφές σε περιμετρική διεύθυνση. Αυτές οι ραφές ονομάζονται **shear keys** και προσαρμόζονται στις επιφάνειες των επικαλυπτόμενων χαλύβων έτσι ώστε να περιορίζεται η ολίσθηση. Με τα shear keys πετυχαίνεται καλύτερη συνάφεια και επομένως αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα. Περιμετρικά shear keys, ή weld beads, παρέχονται γύρω από το εξωτερικό των στύλων και εσωτερικά των στοιχείων μετάβασης στις grouted connections, 'jacket structures', για να μεταφέρουν τις δυνάμεις μέσω της σύνθετης σύνδεσης. [5], [10]

Για βάθη νερού μεγαλύτερα των 30 μέτρων προτιμούνται τέτοιου τύπου συνδέσεις. [5]

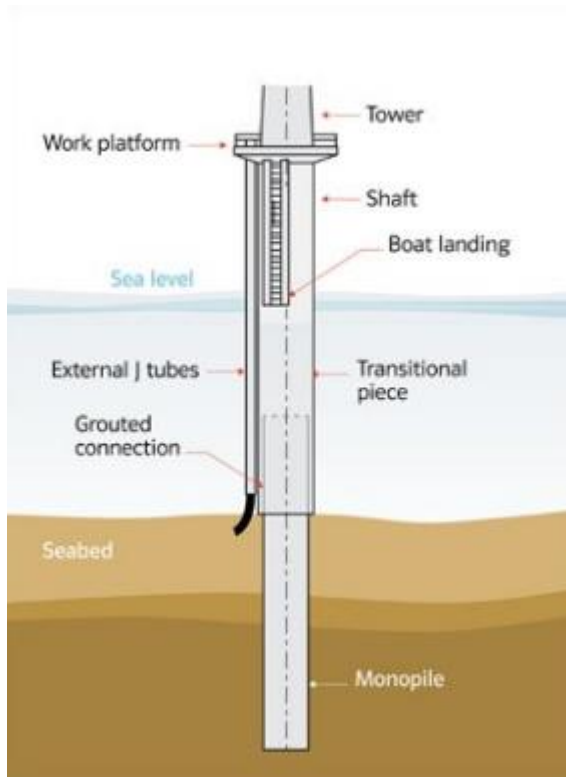


σχήμα 4: η grout connection [10]

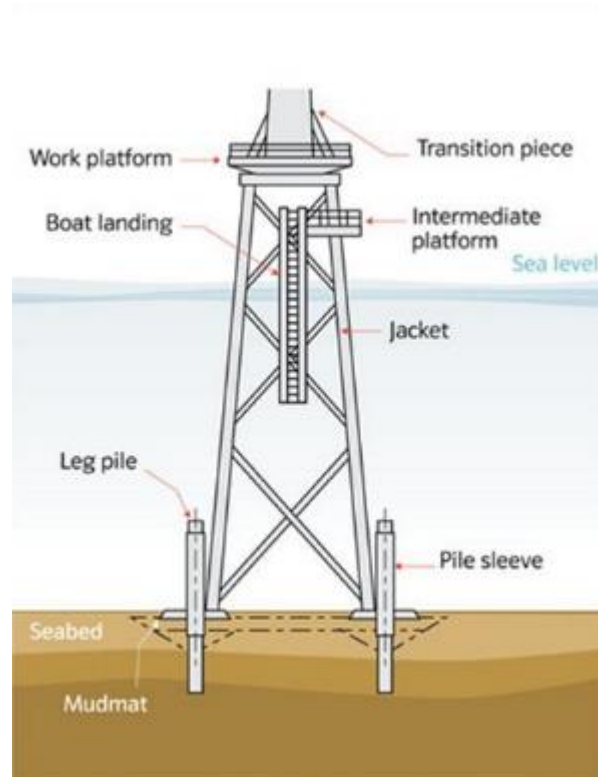
9.2 Η GROUTED CONNECTION ΣΕ ΜΟΝΟΠΙΛΗ ΚΑΙ JACKET ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Η grouted connection στις κατασκευές τύπου monopile και jacket χρησιμοποιείται με παρόμοιο τρόπο, ωστόσο υπάρχουν διαφορές σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στα φορτία που επικρατούν. Οι διαστάσεις της σύνδεσης (μήκος και πάχος σύνδεσης) ποικίλουν αναλόγως με την υποκείμενη κατασκευή στην οποία εδράζεται. Όσον αφορά το πάχος του grout, αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο στις jacket κατασκευές. Οι τελευταίες φορτίζονται κυρίως αξονικά, σε αντίθεση με τις monopile κατασκευές οι οποίες υποβάλλονται κυρίως σε καμπτικές ροπές μεγαλύτερου μεγέθους. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά τις ομοιότητές τους πρόκειται για δύο διαφορετικούς τύπους κατασκευών. [20]

Αυτοί οι παράγοντες δε λήφθησαν επαρκώς υπόψη και οδήγησαν σε επιπτώσεις στην κατασκευή των monopiles από το 2009 και μετέπειτα με αποτέλεσμα ανεπαρκή απόδοση της σύνδεσης (πχ. στο πάρκο Horns Rev I). Αναλυτικά ιστορικά στοιχεία για τις grouted connections δίνονται στο επόμενο κεφάλαιο. [20]



σχήμα 5: monopile κατασκευή [27]



σχήμα 6: jacket structure κατασκευή [27]

10. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ GROUTED CONNECTIONS

Σε παλαιότερες 'jacket structures' οι σύλοι της βάσης οδηγούνταν κατά μήκος του εξωτερικού κομματιού μετάβασης και συγκολλούνταν στην κορυφή του. Το κενό μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού τμήματος γεμιζόταν με ένεμα. Σε αυτές τις κατασκευές δεν απαιτούνταν shear keys για την

επίτευξη επαρκούς δομικής αντοχής. Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε για τις πρώτες εγκατεστημένες πλατφόρμες στη Βόρεια θάλασσα τη δεκαετία του εβδομήντα. [5]

Σε παλαιότερες οδηγίες σχεδιασμού από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου ,American Petroleum Institute, και το Ηνωμένο Βασίλειο δεν υπήρχε σαφής οδηγία για τον τρόπο προσδιορισμού της μηχανικής αντοχής όταν χρησιμοποιούνταν shear keys. [5]

Στο τέλος της δεκαετίας των εβδομήντα ωστόσο, αναπτύχθηκαν οι οδηγίες από το Αμερικανικό Ινστιτούτο πετρελαίου και το Ηνωμένο Βασίλειο για τη χρήση shear keys στις grouted connections. [5]

Σε εργαστήρια του Λονδίνου πραγματοποιήθηκε αριθμός πειραμάτων για τη μηχανική αντοχή των συνδέσεων. Έτσι, αναπτύχθηκε μια εξίσωση σχεδιασμού για την αντοχή των συνδέσεων με shear keys.[5]

Αυτή η μεθοδολογία σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένα στην πλατφόρμα Magnus και συμπεράστηκε ότι γινόταν οικονομία σε σημαντική ποσότητα υλικού, χάλυβα. [5]

Πιο επίσημη έγινε αυτή η μέθοδος σχεδιασμού με την έκδοση της Οδηγίας No 4 του Τμήματος Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου το 1982 στην οποία συμπεριλήφθηκε η εξίσωση σχεδιασμού των Billington και Tebett. [5]

Μία εκτίμηση της αντοχής των ενεματικών συνδέσεων έγινε επίσης από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου που οδήγησε σε νέες οδηγίες σχεδιασμού. [5]

Επιπλέον, βιομηχανίες παρήγαγαν ολοκληρωμένες εργασίες πάνω σε αυτόν τον τρόπο σύνδεσης για να ενταχθούν στον Νηογνόμωνα στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα και στις αρχές της δεκαετίας του ογδόντα. [5]

Κατά τη διάρκεια του 1990 αναπτύχθηκε το περιεχόμενο του ISO 19902. Το πρότυπο αυτό εκδόθηκε το 2007. [5]

Παρότι το επίπεδο ασφαλείας σε αυτό το πρότυπο δείχνει διαφορετικό από εκείνο του Ηνωμένου βασιλείου, ωστόσο παρέχει την ίδια ή και λίγο μεγαλύτερη αντοχή σε διάτμηση στη διεπιφάνεια για αξονική φόρτιση εξαρτώμενη από την αντοχή του ενέματος και την ακτινική δυσκαμψία. [5]

Σημειώνεται ότι η επιτρεπόμενη γεωμετρία των shear keys σε όρους 'ύψος του shear key' διαχωριζόμενο στην απόσταση μεταξύ των shear keys αυξάνεται από 0,04 in σε 0,10 in. [5]

Η τελευταία έκδοση του ARI RP2A (Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms – working stress design) περιλαμβάνει την ίδια διατύπωση σε σχέση με προηγούμενη έκδοσή της με αναφορά στην αντοχή κυλινδρικού σχήματος σύνδεσης με shear keys. [5]

Μερικά πειράματα σε κυλινδρικές ενεματικές συνδέσεις που έγιναν στο πανεπιστήμιου του Aalborg γύρω στο 2000 υποδεικνύουν ότι επαρκής αντοχή μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση shear keys. Εξαιτίας όμως των σημαντικών δυναμικών ροπών που ενεργούν στη σύνδεση, η χρήση των shear keys τέθηκε υπό εξέταση για λόγους κόπωσης του υλικού. [5]

Το 2009 διερευνήθηκε η αξονική αντοχή μεγάλης διαμέτρου grouted connections χωρίς shear keys από βιομηχανίες που ασχολούνταν με τέτοιου είδους συνδέσεις παράκτιων ανεμογεννητριών. Η μελέτη αυτή άρχισε το Νοέμβριο του 2009 και τελείωσε τον Ιανουάριο του 2011. Μία μεθοδολογία σχεδιασμού βασιζόμενη σε grouted κωνικές συνδέσεις εγκαθιδρύθηκε σε αυτή τη μελέτη. [5]

Το 2010 επιβεβαιώθηκε κατόπιν επιθεώρησης ότι σε φάρμες παραγωγής ενέργειας μέσω του ανέμου με ενεματικές συνδέσεις, τα προσωρινά στηρίγματα των συνδέσεων στηρίζονταν στην κορυφή των μονόστυλων και η ροή των δυνάμεων μέσα στην κατασκευή ήταν διαφορετική από αυτή του σχεδιασμού. [5]

Τον Ιανουάριο του 2011 μια άλλη βιομηχανία εισήγαγε μία μελέτη με σκοπό να παρέχει μια ηχητική βάση δεδομένων για την εγκαθίδρυση μιας αξιόπιστης μεθοδολογίας σχεδιασμού για κυλινδρικού σχήματος grouted connections με shear keys υποκείμενες σε εναλλασσόμενες φορτίσεις. [5]

Έτσι, τις τελευταίες δεκαετίες είναι σύνηθες οι παράκτιες κατασκευές πετρελαίου και αερίου να συνδέονται με τη βάση τους μέσω κυλινδρικού σχήματος grouted connections με shear keys ή weld beads. Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας μέσω του ανέμου για τη σύνδεση του πάνω τμήματος των ανεμογεννητριών με τον στύλο στον οποίο στηρίζονται. [5]

Άμεση απόρροια αυτής της αναγκαιότητας είναι η εργασία για την αντοχή των κυλινδρικών grouted connections με shear keys που αναφέρεται στον νορβηγικό Νηογνόμωνα (DNV) το 2012. Σε αυτή την εργασία έγιναν εργαστηριακά πειράματα αντοχής σε κόπωσης, ανάλυση και αξιολόγηση με πεπερασμένα στοιχεία και ανάπτυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού των κατασκευών. [5]

11.ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ

Η grout connection στην εφαρμογή της στις εγκαταστάσεις παράκτιας παραγωγής ενέργειας εκτίθεται σε διάφορα σενάρια φορτίσεων, μεταξύ των οποίων περιβαλλοντική φόρτιση από τον άνεμο, τα κύματα και το βάρος της υπερκείμενης κατασκευής. [12]

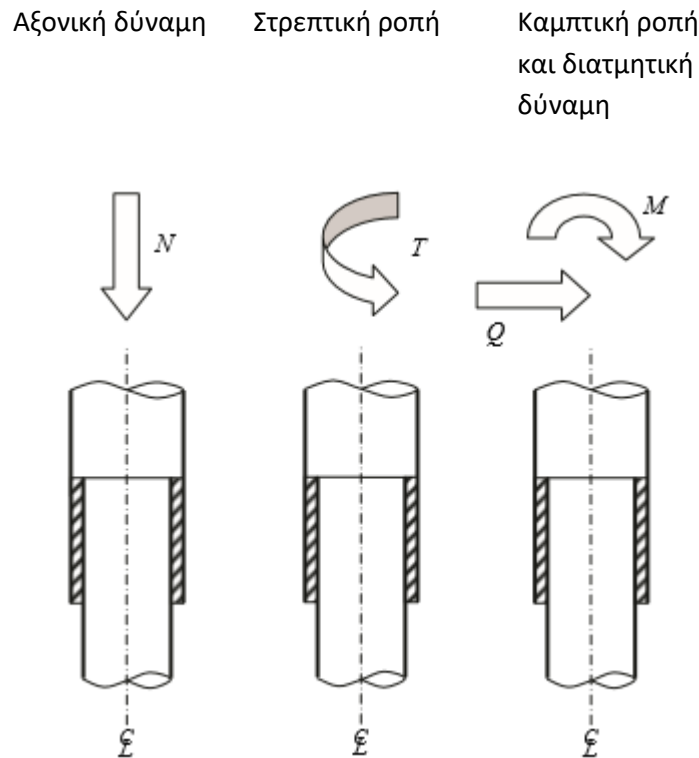
Όντας τμήμα μιας κατασκευής θεμελίωσης ανεμογεννήτριας, το χαρακτηριστικό φορτίο του ανέμου είναι τελείως διαφορετικής φύσεως από εκείνο που αναμένεται για μια στατική κατασκευή που εκτίθεται στον άνεμο. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αεροελαστική φόρτιση ενός μεγάλης διαμέτρου ρότορα. Ωστόσο, οι σημερινές τουρμπίνες διαθέτουν εξελιγμένους προσαρμοστικούς διακόπτες που διαρκώς προσπαθούν να βελτιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας μειώνοντας παράλληλα το δυναμικό φορτίο στα πτερύγια του ρότορα, τον κινητήρα και την κατασκευή του πύργου. Επομένως, η grout connection βιώνει συνεχώς συνδυασμούς ισχυρών δυναμικών φορτίων. [12]

Τα φορτία πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά ακραίων συνθηκών φόρτισης. Πρέπει να ληφθεί υπόψη συνδυασμός φορτίσεων:

- Αξονική φόρτιση (axial loading)
- Πλευρικής φόρτισης ανέμου (lateral loading)

- Φόρτιση καμπτικής ροπής (moment loading)
- Ροπή συστροφής (torsion moment) (συνήθως αμελείται) [6]

Τα διάφορα είδη φόρτισης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



σχήμα 7: είδη φόρτισης της grout connection [12]

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η σύνδεση αποκρίνεται με διαφορετικό τρόπο στα παραπάνω τέσσερα θεμελιώδη φορτία, στο καθένα μεμονωμένα ή σε συνδυασμό αυτών. Αυτό είναι καθοριστικής σημασίας για μια επιτυχή εφαρμογή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. [12]

Οι grouted connections στις monopile κατασκευές μπορεί να θεωρηθούν διαφορετικές από άλλες παράκτιες κατασκευές σε όρους φόρτισης. Οι συνδέσεις σε τυπικές jacket structures καταπονούνται κυρίως σε αξονική φόρτιση ενώ οι monopile κατασκευές σε σημαντικές καμπτικές ροπές. Οι τάσεις στη monopile λόγω της καμπτικής ροπής που προκαλείται λόγω του ανέμου μπορεί να είναι περισσότερο από μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από εκείνες λόγω της αξονικής φόρτισης μόνο. [10]

Ως φορτία χρησιμοποιούνται τα φορτία σχεδιασμού τα οποία προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά φορτία πολλαπλασιασμένα με τον συντελεστή φορτίου (σχεδιασμός με βάση το απόλυτο όριο (ultimate limit state)).

Ως προς την αξονική φόρτιση, τα θεωρούμενα φορτία του πύργου αποτελούνται από το βάρος της νασέλας και του ρότορα και το ίδιο βάρος του πύργου.

- Το ίδιο βάρος του ρότορα και της νασέλας

εφαρμόζονται στην κορυφή του πύργου και δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία της ανεμογεννήτριας.

➤ Το ίδιο βάρος της κατασκευής συνήθως υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, ως συνάρτηση της γεωμετρίας και της μονάδας μάζας του χάλυβα.

Ο άνεμος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κατάλληλους τύπους. Η φόρτιση του ανέμου στον πύργο, υπολογίζετε για συγκεκριμένα δυναμικά χαρακτηριστικά και γεωμετρία της κατασκευής, επιβάλλεται κατά ύψος και περιφερειακά σε όλες τις επιφάνειες του αφού ολοκληρωθεί η σχετική εξίσωση κατανομής σύμφωνα με την ακριβή μέθοδο του Ευρωκώδικα [1-1-4]. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιητική εξίσωση κατανομής που προτείνεται από τον C.C.Baniotopoulos (Topics on the design of tubular steel turbine towers)ως εξής:

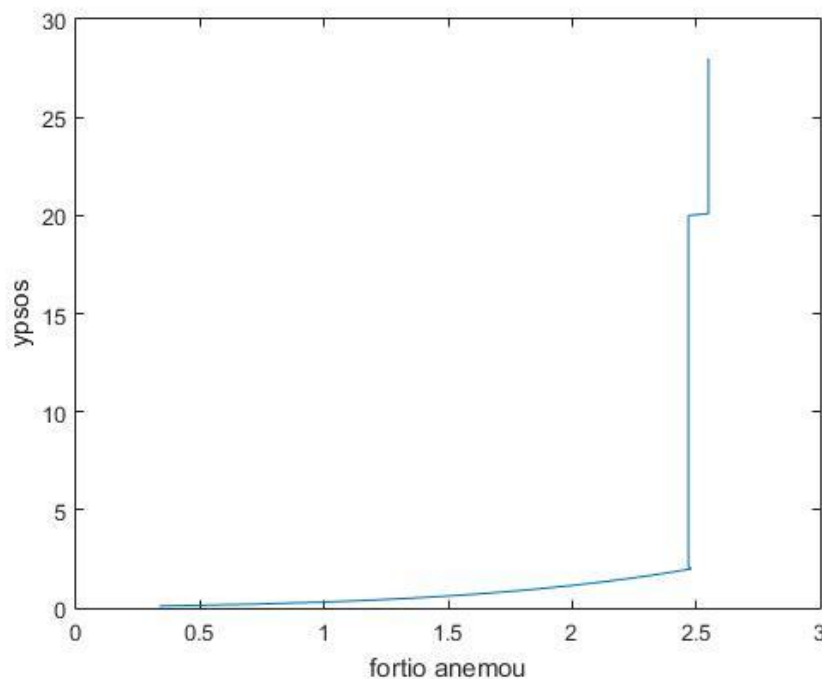
Η κατανομή της ανεμοπίεσης καθ' ύψος [z] του πύργου δίνεται ως συνάρτηση της διαμέτρου [D], από τις εξισώσεις ως ακολούθως (z, D σε m, Fw σε kN/m):

$$Z \leq 2,00m : Fw = 0,51D$$

$$Z > 2,00m : Fw = 0,013 \ln(20z) (\ln(20z) + 7) D$$

Όπου η εξωτερική διάμετρος D μεταβάλλεται κατά ύψος και η συνάρτηση μεταβολής είναι διαφορετική για κάθε συνολικό ύψος [H] του εκάστοτε πύργου ανεμογεννήτριας που εξετάζεται.

Επί παραδείγματι η τιμή της ανεμοπίεσης για ανεμογεννήτρια σύλου βάσης διαμέτρου D= και στοιχείου μετάβασης διαμέτρου D= δίνεται από το παρακάτω σχήμα.



σχήμα 8 : φορτίο ανέμου συναρτήσει του ύψους ανεμογεννήτριας

Η κατανομή της ανεμοπίεσης γύρω από την επιφάνεια εκφράζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [1-4] :

Επιπλέον της κατανεμημένης κατά ύψος ανεμοπίεσης, στην κορυφή του πύργου επιδρά μια συγκεντρωμένη δύναμη και ροπή που δίνονται συνήθως από την κατασκευάστρια εταιρία για διάφορες ακραία τυχαίες περιπτώσεις. Στην ανάλυση της κατασκευής χρησιμοποιείται το δυσμενέστερο δίδυμο φορτίων. Εξαρτάται από την μέση ταχύτητα του ανέμου και τις αναταράξεις στην επιφάνεια του ρότορα, την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων, την πυκνότητα του αέρα, το αεροδυναμικό σχήμα των εξαρτημάτων που αποτελούν την γεννήτρια και τις διαδραστικές επιπτώσεις τους, συμπεριλαμβανομένου αερολαστικών επιπτώσεων.

Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις τρόποι με τους οποίους τα φορτία μπορούν να μεταφερθούν στη σύνδεση διά μέσω του grout: α) με την πίεση επαφής και β) μέσω της διάτμησης μεταξύ χάλυβα και grout. [12]

α) Η μεταφορά των φορτίων μέσω των πιέσεων επαφής είναι η πιο ευκολονόητη. Τα **καμπτικά και/ή τα διατμητικά φορτία** θα προκαλέσουν περιστροφή του ενός κυλίνδρου σε σχέση με τον άλλο με συνέπεια τη δημιουργία δύο περιοχών στις οποίες δρουν πιέσεις επαφής. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται αντιδιαμετρικά και η μία στην κορυφή και η άλλη στη βάση της σύνδεσης. [16]

Ιδανικά, αυτές οι δύο περιοχές θα είναι ίσες σε επιφάνεια και σε μέγεθος πιέσεων και το συνεπαγόμενο ζεύγος δυνάμεων λόγω της αντίστασης της κατασκευής θα εξισορροπεί την εφαρμοζόμενη ροπή ανατροπής. [16]

β) η μεταφορά των φορτίων μέσω της διάτμησης στη διεπαφή είναι ένας πιο σύνθετος μηχανισμός που εξαρτάται από τρία διαφορετικά χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας χάλυβα και grout: i) τις γεωμετρικές ατέλειες (geometric imperfections), ii) την συνάφεια (adhesion) και iii) την τριβή (friction). Και τα τρία αυτά χαρακτηριστικά δίνουν τη δυνατότητα στη σύνδεση να παραλάβει τόσο τα αξονικά φορτία όσο και τα φορτία στρέψης. [16]

i) Γεωμετρικές ατέλειες

Οι γεωμετρικές ατέλειες είναι το πρωταρχικό στοιχείο που προσδίδει στην διατμητική ικανότητα της σύνδεσης. Εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου και του ύψους της σύνδεσης, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τοπικών 'εξογκωμάτων' τόσο κατά μήκος της περιμέτρου της σύνδεσης όσο και καθ' ύψος αυτής στις δύο διεπιφάνειες: monopole-grout και grout-transition piece. Αν και μικρά σε μέγεθος, ωστόσο παρέχουν πολυάριθμες τοπικές μειώσεις και αυξήσεις του πάχους του grout. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αξονική και/ή η περιστροφική σχετική μετατόπιση του grout σε σχέση με τον χάλυβα και αυτό με τη σειρά του θα σφηνώσει το grout μεταξύ των δύο χαλύβδινων κυλίνδρων σε αυτές τις περιοχές παρέχοντας σημαντική μηχανική τριβή εφάμιλλη αυτής που αποκτιέται από την παραδοσιακή χρήση των shear keys. [16]

ii) Συνάφεια

Υπάρχει συμπεριφορά συνάφειας μεταξύ των δύο υλικών λόγω της τραχιάς επιφάνειας του χάλυβα η οποία καθαρίζεται με άμμο πριν ενωθεί με το grout. Παράγεται τόσο επιπρόσθετη διατμητική αντοχή όσο και εφελκυστική αντοχή στη διεπιφάνεια των δύο υλικών σε μικρότερο βαθμό. [16]

iii) Τριβή

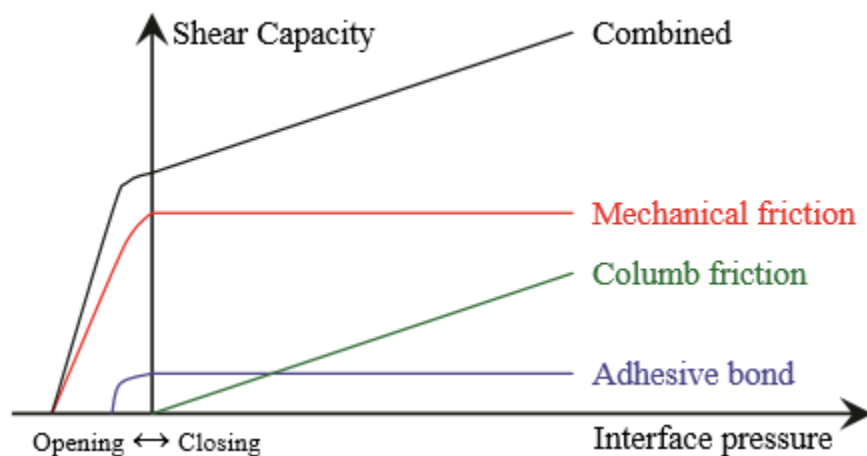
Η κλασική τριβή του Coulomb είναι επίσης παρούσα λόγω των φορτίων πίεσης μεταξύ χάλυβα και grout. Σε συνδυασμό με την προσκόλληση προσθέτει στην διατμητική αντοχή της σύνδεσης όταν

εμφανίζονται θλιπτικές πιέσεις στη διεπιφάνεια και δρα μόνη της όταν η προσκόλληση πάψει να υφίσταται.

Η αξονική φόρτιση λόγω του ίδιου βάρους της μονολιθικής ανεμογεννήτριας άνωθεν της grouted connection είναι σχετικά μικρή. Οι ροπές μεταφέρονται κυρίως μέσω δυνάμεων επαφής (ζεύγη δυνάμεων) λόγω της σχετικής τριβής που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια χάλυβα και ενέματος. Η διάμετρος της σύνδεσης σχεδιάζεται σχετικά μεγάλη. Παρόλο που το πάχος του στοιχείου μετάβασης και του στύλου είναι μεγάλα, η αναλογία διαμέτρου προς πάχος είναι επίσης μεγάλη – μεγαλύτερη από εκείνη που παραδοσιακά ίσχυε στο σχεδιασμό των jacket structures . [10]

Εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας διαμέτρου προς πάχος, οι grouted connections είναι εύκαμπτες στις ροπές και μία ακτινική ρηγμάτωση του ενέματος μπορεί να συμβεί. Επίσης, μπορεί να συμβεί άνοιγμα και ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του ενέματος λόγω της ευκαμψίας της σύνδεσης όταν υπόκειται σε μεγάλη καμπτική ροπή. [10]

Η προκύπτουσα διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας χάλυβα και grout είναι επομένως συνδυασμός της μηχανικής τριβής λόγω των γεωμετρικών ατελειών, της προσκόλλησης και της τριβής Coulomb παράγοντες οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με έναν σύνθετο τρόπο ο οποίος εξιδανικευμένος παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



σχήμα 9: προκύπτουσα διατμητική αντοχή σύνδεσης [16]

Το γράφημα απεικονίζει την εξάρτηση των τριών παραγόντων αλλά και τη συνδυασμένη αλληλεπίδρασή τους σε σχέση με την πίεση στη διεπιφάνεια και την περισσότερο ή λιγότερο απότομη ασυνέχεια που προκύπτει σε/ή κοντά σε μηδενική πίεση καθώς η κατάσταση της επαφής αλλάζει από κλειστή σε ανοιχτή. [16]

Δεν υπάρχει συντελεστής τριβής Coulomb όταν δε μεταφέρεται καθαρή θλιπτική πίεση στη διεπιφάνεια, ωστόσο λόγω της προσκόλλησης η διεπιφάνεια έχει την ικανότητα να μεταφέρει μερική εφελκυστική δύναμη κάθετα στη διεπιφάνεια με κόστος τη μείωση των δεσμών συνοχής. [16]

Όταν η εφελκυστική αντοχή των δεσμών πάψει να υφίσταται, τότε το άνοιγμα της διεπιφάνειας μπορεί να γίνει ανεμπόδιστα. Όταν το μέγεθος του ανοίγματος προσεγγίσει το μέγεθος των γεωμετρικών ατελειών, η διατμητική αντοχή λόγω της μηχανικής τριβής μειώνεται και σταδιακά μηδενίζεται καθιστώντας τη διατμητική αντοχή εντελώς εξαντλημένη. [16]

Αυτή η κατάσταση της μηδενικής διατμητικής αντοχής είναι ωστόσο πιθανή μόνο τοπικά καθώς απαιτεί μεγάλο άνοιγμα μεταξύ των δύο υλικών το οποίο μόνο μια μεγάλη ροπή ανατροπής μπορεί να παράγει. Επομένως, μεγάλες πιέσεις επαφής θα υπάρχουν μεταξύ των δύο υλικά αντίθετα από τις περιοχές των ανοιγμάτων όπου η διατμητική αντοχή θα είναι μεγάλη. [16]

Επομένως, η grout connection στο σύνολό της, ιδανικά δε θα είναι ποτέ σε μία κατάσταση στην οποία τα αξονικά και /ή τα στρεπτικά φορτία δε θα μπορούν να μεταφερθούν μεταξύ του transition piece και του monopile. [16]

Η παραλαβή των φορτίων μελετάται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο για τις δύο περιπτώσεις σύνδεσης: με και χωρίς shear keys.

11.1 Απλές σύνθετες συνδέσεις κυλινδρικού σχήματος χωρίς shear keys

Αυτές οι κατασκευές υπόκεινται σε ισχυρές δυναμικές εναλλασσόμενες φορτίσεις και επομένως είναι σημαντική η τεκμηρίωση της αντοχής σε κόπωση των σύνθετων συνδέσεων.

11.1.2. Κατακόρυφη αντοχή της grouted connection κυλινδρικού σχήματος χωρίς shear keys

Ο σχεδιασμός των grouted connections υπό αξονική φόρτιση γίνεται με βάση το πρότυπο EN ISO 19902 ή τον Νηογνόμωνα DNV-OS-J101 για οριακή κατάσταση αστοχίας και οριακή κατάσταση αστοχίας σε κόπωση.

- Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας:

Η αξονική αντοχή μπορεί να ερμηνευτεί από την αντίσταση που προβάλλει η σύνδεση λόγω των ανωμαλιών επιφάνειας, δηλαδή την τραχύτητα της επιφάνειας και γενικότερα λόγω των επιφανειακών ατελειών στους σωλήνες της σύνδεσης. Η αξονική αντοχή μπορεί να ερμηνευτεί από διάφορες φάσεις. Αρχικά, όταν η σύνδεση καταπονείται από αξονικό φορτίο η αντοχή εξαρτάται από ένα συνδυασμό επιφανειακής τραχύτητας και tolerances. Αυτό το στάδιο μπορεί επίσης να καταδειχθεί ως εκείνο που αντιστοιχεί στην αντοχή δεσμού. Στο τέλος αυτού του σταδίου η αντοχή δεσμού υπερβαίνεται. Μετέπειτα, η αντοχή εξαρτάται κυρίως από τις surface tolerances και την ακτινική δυσκαμψία του στύλου monopile και του στοιχείου μετάβασης. Αυτό σημαίνει ότι για μία συγκεκριμένη τιμή επιφανειακής τραχύτητας και ακτινικής δυσκαμψίας η αντοχή ανά μονάδα επιφάνειας θα μειώνεται αυξανόμενης της ακτίνας της grouted connection. [10]

- Επίδραση της καμπτικής ροπής:

Οι αξονικές τάσεις στο στοιχείο μετάβασης και τον monopile λόγω της ροπής κάμψης είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες στη σύνδεση από εκείνες λόγω του κατακόρυφου μόνιμου φορτίου της άνωθεν της

σύνδεσης κατασκευής. Η ροπή μεταφέρεται από το στοιχείο μετάβασης στον monopile μέσω **οριζόντιων δυνάμεων επαφής** όπως φαίνεται στο σχήμα 7. Υπάρχουν επίσης κατακόρυφες δυνάμεις τριβής που συνεισφέρουν στην αντοχή σε ροπή της grouted connection. Η αξονική αντίσταση στην ολίσθηση της σύνδεσης είναι εμφανώς μειωμένη αυξανόμενων των δυναμικών επαναληπτικών φορτίσεων που προκαλούν ολίσθηση στη σύνδεση. Έχει βρεθεί ότι μπορεί να εφαρμοστεί συντελεστής τριβής τιμής 0,40 μεταξύ χάλυβα και ενέματος για συνδέσεις που υπόκεινται σε μακροχρόνια ολίσθηση. [10]

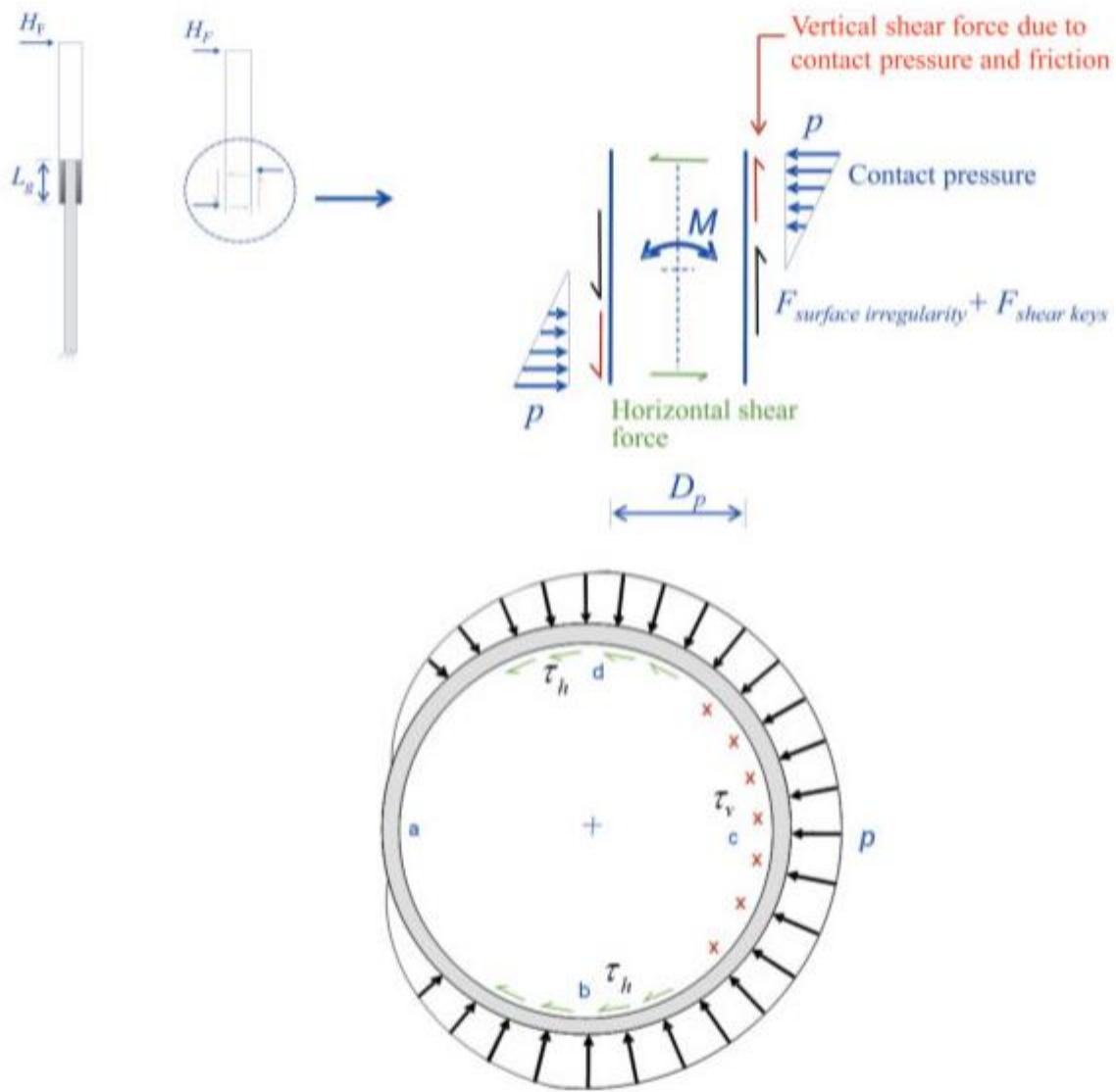
Εφόσον υπάρχει δύναμη τριβής μεταξύ χάλυβα και ενέματος λόγω της πίεσης επαφής, θα υπάρχουν επίσης **κατακόρυφες δυνάμεις τριβής** εξαιτίας επιφανειακών ατελειών. [10]

Οι πιέσεις επαφής θα δρουν σε όλα σχεδόν τα σημεία της περιφέρειας του κυλίνδρου. Αυτές θα παρέχουν μια οριζόντια διατμητική αντίσταση εξαιτίας της τριβής μεταξύ χάλυβα και ενέματος. Αυτές οι **οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις** θα συνεισφέρουν επίσης στην αντοχή σε ροπή της grouted connection. [10]

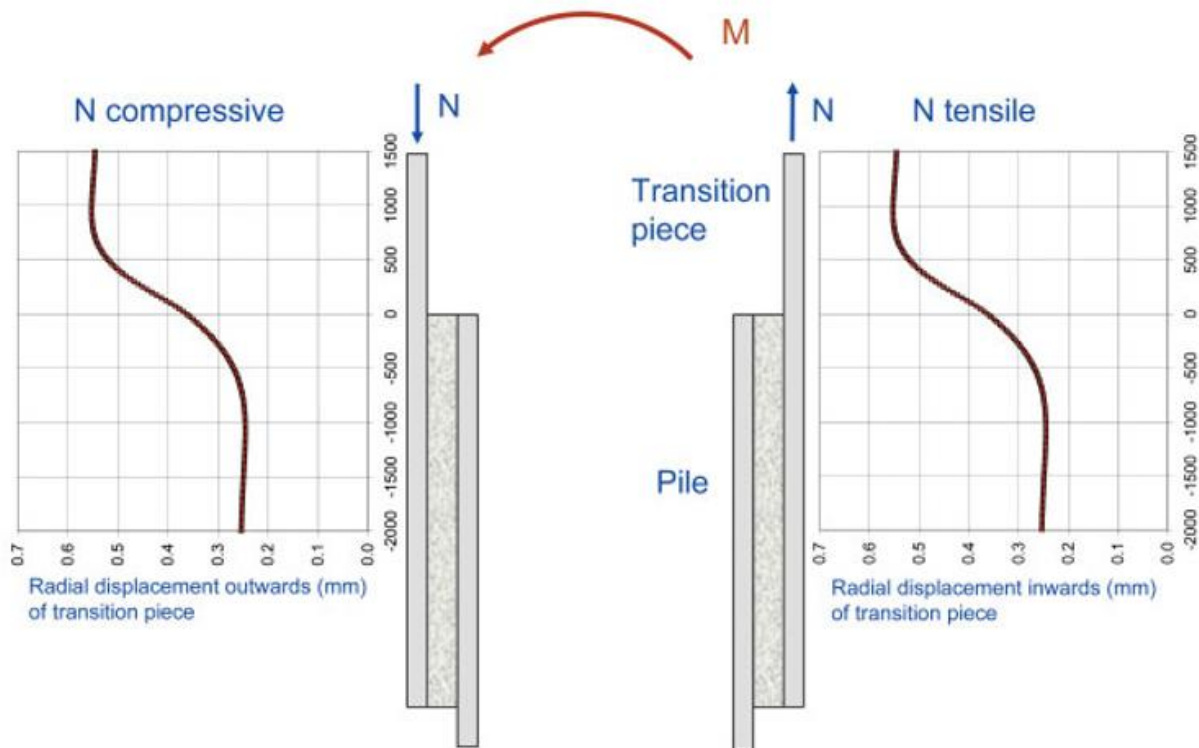
Οι δυνάμεις τριβής δεν λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό παρά μόνο στα εργαστηριακά πειράματα. [10]

Η δράση της ροπής που συνεπάγεται μεγάλες πιέσεις επαφής στην κορυφή της σύνδεσης και η εναλλασσόμενη διατμητική ένταση οδηγεί σε εφελκυσμό τα σημεία της περιφέρειας των κυλίνδρων που μπορεί να ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του ενέματος που όπως έχει αναφερθεί είναι συνήθως το σκυρόδεμα που ως γνωστόν δεν έχει μεγάλη εφελκυστική αντοχή. Επίπλέον, υπάρχει συγκέντρωση τάσεων λόγω τοπικής εκτροπής των κυλίνδρων στα άκρα της σύνδεσης. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του ενέματος σε ακτινικό και κάθετο επίπεδο. [10]

Πρέπει να τονιστεί ότι ο ρόλος του ενέματος είναι να μεταφέρει πίεση από το κομμάτι μετάβασης στον υποκείμενο στυλό. Η ροπή μεταφέρεται από το κομμάτι μετάβασης στον μονόστυλο διαμέσου της οριζόντιας επαφής, όπως εικονίζεται παρακάτω.



σχήμα 10: πιέσεις επαφής στη σύνδεση [10]



σχήμα 11: ακτινική μετατόπιση σε σύνδεση μεγάλης διαμέτρου υποκείμενης σε ροπή [10]

Εξαιτίας της σχετικά μεγάλης τοπικής λεπτότητας, δηλαδή αναλογίας διαμέτρου προς πάχος, του monopile και του στοιχείου μετάβασης, οι κύλινδροι τείνουν να πάρουν ένα ωοειδές σχήμα, ovalization, και θα υπάρξει ένα κενό μεταξύ του ενέματος και του χάλυβα σε περιπτώσεις μεγάλων ροπών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο υλικών, δηλαδή διατμητική αστοχία. [10]

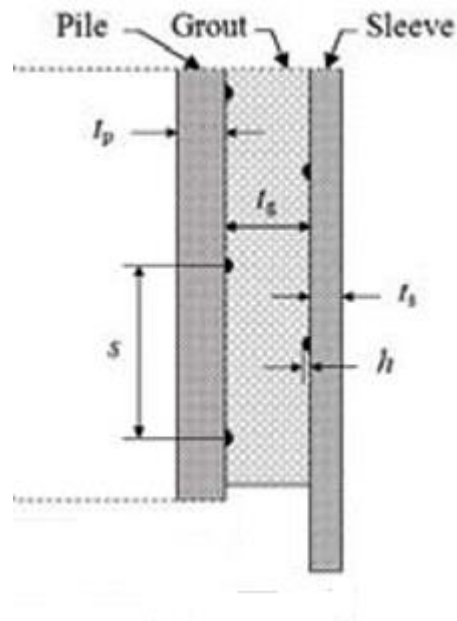
Με βάση εργαστηριακά πειράματα η μακροπρόθεσμη αντοχή σε ολίσθηση μπορεί να μειωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό σε σημείο που να τίθεται υπό αμφισβήτηση η αξιοπιστία της κατασκευής αν δεν υπάρχουν shear keys. [10]

Εάν στην περιφέρεια του μονόστυλου και του κομματιού μετάβασης εγκατασταθούν shear keys, τα τελευταία θα μεταφέρουν επίσης κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις που θα συνεισφέρουν στη φέρουσα ικανότητα σε ροπή της σύνδεσης και θα αποτρέπουν τη διατμητική αστοχία. [10]

11.2 Σύνθετες συνδέσεις κυλινδρικού σχήματος με shear keys

Η καμπτική ροπή λόγω του ανέμου και της δράσης των κυμάτων παραλαμβάνεται από τις δυνάμεις επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ του χάλυβα και του ενέματος. Η αντίσταση στην αξονική καταπόνηση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση shear keys. Ωστόσο, τονίζεται και πάλι ότι οι monopile ανεμογεννήτριες καταπονούνται κυρίως καμπτικά. [15]

Οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν την παραμόρφωση συναρτήσει της φόρτισης και τη μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση είναι η **αναλογία διαμέτρου προς πάχος (D/t)**, η **θλιπτική αντοχή του ενέματος** και η **αναλογία ύψους προς τη μεταξύ τους απόσταση (h/s) των shear keys**. Μερικές συστάσεις περιορίζουν την αναλογία h/s στην τιμή 0.1. H/s αναλογίες που υπερβαίνουν την τιμή 0.04 έχουν σπανίως χρησιμοποιηθεί.



σχήμα 12: grouted connection with shear keys [31]

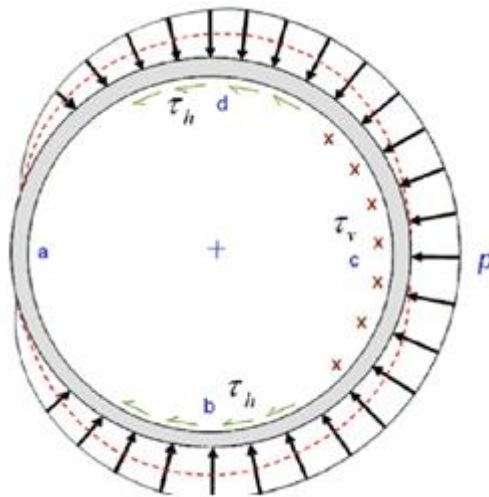
Η αναλογία διαμέτρου προς πάχος δε χαρακτηρίζει μόνο την ακτινική δυσκαμψία του στύλου αλλά και τον περιορισμό των παραμορφώσεων στο ένεμα. [15]

Τρεις **μηχανισμοί μεταφοράς του φορτίου** μπορούν να εντοπιστούν στις συνδέσεις με shear keys: Μέσω της τριβής και της συνάφειας των επιφανειών και μέσω της αντοχής σε θλιπτικά φορτία των θλιπτήρων (compressive struts) που εμφανίζονται μεταξύ των shear keys και των στύλων. [15]

Οι κυριότεροι **τρόποι αστοχίας** των συνδέσεων με shear keys είναι η διατμητική αστοχία για συνδέσεις στις οποίες τα shear keys βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις και η σύνθλιψη του ενέματος στις περιοχές που εντείνεται περισσότερο για συνδέσεις με καλά ορισμένες αποστάσεις μεταξύ των shear keys. Στην τελευταία περίπτωση συμβαίνουν συνήθως διαγώνιες ρωγμές στο ένεμα. Η συμπεριφορά στην κόπωση των συνδέσεων εξαρτάται κυρίως από το καθεστώς της φόρτισης. Σύμφωνα με τον Hordyk (1996), η κλίση της καμπύλης S/N αυξάνεται με τη μείωση της φόρτισης και κυρίως σε εναλλασσόμενες φορτίσεις. Στην περίπτωση της θλίψης η κλίση της καμπύλης είναι μικρή. Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των κύκλων που απαιτούνται για αστοχία παρουσιάζει μεγάλη διασπορά. [15]

12. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΡΑΣΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ SHEAR KEYS

Μία αναλυτική έκφραση για τη σχέση καμπτικής ροπής και πιέσεων επαφής μπορεί να προκύψει βασιζόμενη σε συγκεκριμένες υποθέσεις που αφορούν την κατανομή της πίεσης. Γίνεται υπόθεση μίας σταθερής πίεσης γύρω από το μισό της περιφέρειας του monopile (από το σημείο b έως d) όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Η κατανομή της πίεσης θεωρείται ότι μειώνεται (από το σημείο d έως το a και από το σημείο b έως το a) ως μια συνημιτονοειδής συνάρτηση. Θεωρείται ότι η κατανομή της πίεσης εξαρτάται από την αναλογία διαμέτρου προς πάχος της σύνδεσης. Για μία μικρή αναλογία, αναμένεται μεγαλύτερη πίεση στο σημείο c από οποιαδήποτε άλλη θέση στην περιμέτρο. [10]



σχήμα 13: κατανομή πιέσεων επαφής στον monopile

- Η ροπή αντοχής λόγω των πιέσεων επαφής προκύπτει ολοκληρώνοντας την πίεση επαφής στο μισό της περιμέτρου (b έως d):

$$M_p = p \frac{R_p L_g^2}{3}$$

Όπου:

P: μέγιστη ονομαστική πίεση στην κορυφή και στο κάτω μέρος της grouted connection όπως φαίνεται στο σχήμα 7.

L_g: ενεργό μήκος της grouted connection (=L-2t_g όπου L: πραγματικό μήκος της σύνδεσης και t_g: πάχος ενέματος)

R_p: εξωτερική ακτίνα του σύλου

- Η ροπή αντοχής λόγω των οριζόντιων δυνάμεων τριβής προκύπτει από την ολοκλήρωση των πιέσεων επαφής μέσα από τη διάστικτη κόκκινη γραμμή από το σημείο a έως το c, όπως φαίνεται στο σχήμα 8 και με πίεση $0.75p$ στο σημείο d:

$$M_{\mu h} = \mu p \frac{R_p L_g^2}{\pi}$$

Όπου:

μ : συντελεστής τριβής

- Η ροπή αντοχής λόγω των κατακόρυφων δυνάμεων τριβής προκύπτει από την ολοκλήρωση των πιέσεων επαφής έξω από τη διάστικτη κόκκινη γραμμή από το σημείο a έως το c, όπως φαίνεται στο σχήμα 8 και με πίεση $0.5p$ στο σημείο d:

$$M_{\mu v} = \mu p R_p^2 L_g$$

Η επιλογή της πίεσης στο σημείο d προκύπτει τη θεώρηση ότι η ελαχιστοποίηση των δυνάμεων τριβής μπορεί να προκύψει από δύο ορθογωνικές διευθύνσεις και με βάση τα αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Η ολική ροπή προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους ροπών:

$$M_{tot} = M_p + M_{\mu h} + M_{\mu v}$$

Επιπλέον, υπάρχει μία ροπή τριβής λόγω των ανωμαλιών επιφάνειας (surface irregularity), η οποία αγνοείται για συνδέσεις μεγάλης διαμέτρου.

Η συμβολή της καθολικής διατμητικής δύναμης στην ονομαστική πίεση επαφής θεωρείται μικρή στις συνδέσεις με μονοριπλή βάση. [10]

Προκύπτει από τις ανωτέρω σχέσεις των ροπών μια εκτίμηση της μέγιστης ονομαστικής πίεσης επαφής:

$$p = \frac{3\pi M_{tot}}{R_p L_g^2 (\pi + 3\mu) + 3\pi\mu R_p^2 L_g}$$

Μία εκτίμηση του μέγιστου ανοίγματος μεταξύ χάλυβα και ενέματος στην κορυφή του μονοριπλε προκύπτει από θεώρηση συμπίεσης του μονοριπλε στην περιφέρεια και επιμήκυνσης του στοιχείου μετάβασης:

$$\delta_H = 3(\delta_p + \delta_{TP})$$

Όπου:

$$\delta_p = \frac{pR_p^2}{Et_p}$$

$$\delta_{TP} = \frac{pR_{TP}^2}{Et_{TP}}$$

Όπου:

t_p : πάχος σύλου

t_{TP} : πάχος στοιχείου μετάβασης

R_{TP} : εξωτερική ακτίνα στοιχείου μετάβασης

Στον υπολογισμό της παραπάνω σχέσης αγνοείται η συμπίεση του ενέματος στην ολική παραμόρφωση ως μικρή. [10]

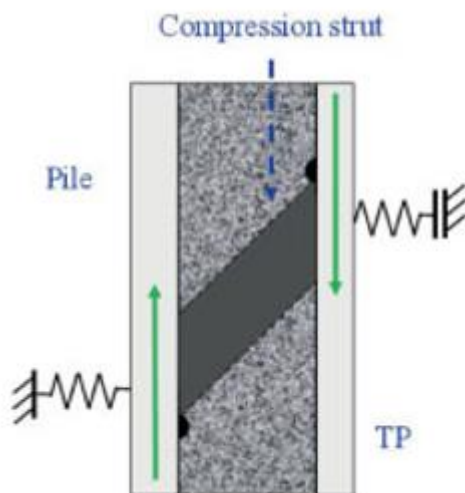
Βασιζόμενη σε γεωμετρικές θεωρήσεις προκύπτει η κατακόρυφη σχετική μετατόπιση μεταξύ του στοιχείου μετάβασης και του σύλου της βάσης:

$$\delta_v = \delta_H \frac{2R_p}{L_g}$$

Αναμένεται να υπάρξει σημαντική ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και ενέματος σε περίπτωση εύκαμπτης σύνδεσης, (μεγάλη αναλογία διαμέτρου προς πάχος), και δράσης μεγάλων ροπών ακόμη και με μεγάλο συντελεστή τριβής ολίσθησης. Επομένως δεν έχει αποτέλεσμα η προσπάθεια βελτίωσης της απόκρισης συνδέσεων μεγάλων διαμέτρων που υπόκεινται σε μεγάλες δυναμικές καμπτικές ροπές αυξάνοντας την τραχύτητα των επιφανειών. [10]

13. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΔΡΑΣΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕ SHEAR KEYS

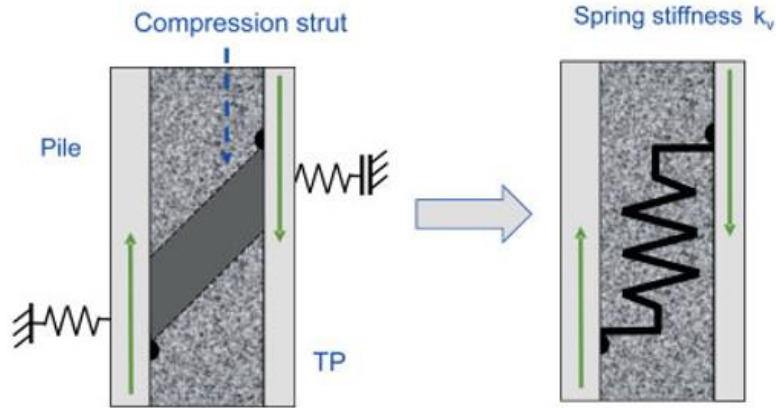
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο κατά την ένταση της ανεμογεννήτριας δημιουργούνται θλιπτήρες στο ένεμα μεταξύ των shear keys και των στύλων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



σχήμα 14: θλιπτήρας (compression strut) [10]

Ο θλιπτήρας είναι δύσκαμπτος συγκρινόμενος με την ακτινική δυσκαμψία των δύο στύλων. Επομένως, η ακτινική εκτροπή καθορίζεται κυρίως από το πάχος και το μέτρο Young του χάλυβα και τη γεωμετρία της σύνδεσης όσον αφορά την ακτίνα. [10]

Η σχετική ολίσθηση στην κατακόρυφη διεύθυνση μεταξύ των στύλων καθορίζεται κυρίως από την ελαστική παραμόρφωση των στύλων που προσομοιάζονται με οριζόντια ελατήρια όπως φαίνεται στο σχήμα 12. Όταν είναι γνωστή η σχετική ολίσθηση, μπορεί να υπολογισθεί η φόρτιση που καταπονεί τα shear keys και να γίνει σχεδιασμός με βάση τόσο το απόλυτο όριο αστοχίας (ultimate limit state), όσο και με το όριο αστοχίας σε κόπωση (fatigue limit state). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μετατροπή της οριζόντιας δράσης ελατηρίου σε κατακόρυφη δράση ελατηρίου μεταξύ των shear keys και των στύλων όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



σχήμα 15: μετατροπή κατακόρυφου σε οριζόντιο ελατήριο [10]

η προκύπτουσα ροπή από ένα shear key μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη σχέση:

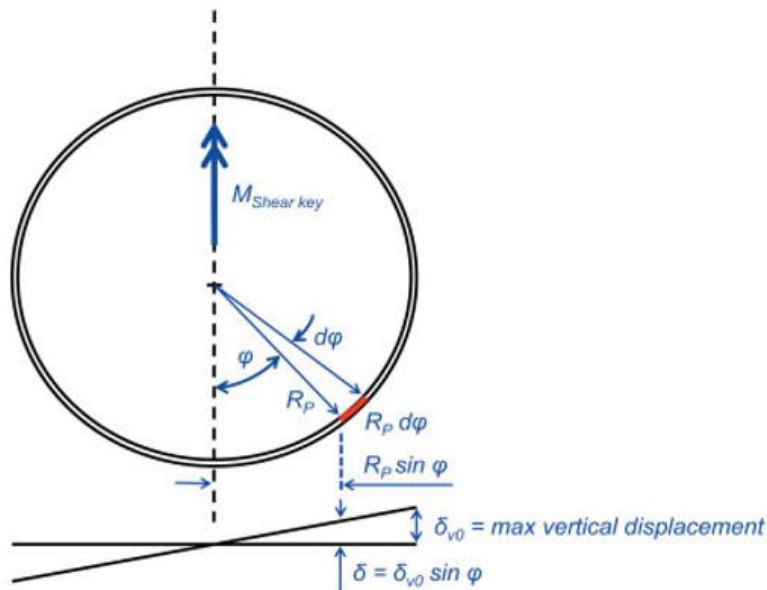
$$M_{shearkey} = 4 \int_0^{\pi/2} k_v R_p d\varphi R_p \sin \varphi (\delta_{v0} \sin \varphi)$$

Όπου:

k_v : η δυσκαμψία του κατακόρυφου ελατηρίου που αναπαριστά τη δυσκαμψία ελατηρίου ενός shear key ανά μονάδα μήκους του shear key στην περιφέρεια του σύλου

δ_{v0} : η μέγιστη σχετική κατακόρυφη μετατόπιση υπολογισμένη στις θέσεις των shear keys

Η παραπάνω σχέση προκύπτει με βάση το ακόλουθο σχήμα. [10]



σχήμα 16 : $M_{shear key}$ [10]

Κάνοντας την ολοκλήρωση προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση αντοχής:

$$M_{shearkey} = \pi \delta_{v0} k_v R_p^2$$

Η αντίσταση στην κάμψη από πολλά shear keys μπορεί να υπολογισθεί αθροιστικά. Η συνολική αντίσταση στην εξωτερική ροπή προκύπτει αθροίζοντας τις ροπές: $M_{shear keys}$, M_p , $M_{\mu h}$, $M_{\mu v}$

Όπου:

$M_{shear keys}$: η ροπή αντοχής από τα shear keys

M_p : η ροπή αντοχής από τις πιέσεις επαφής

$M_{\mu h}$: η ροπή αντοχής από τις πιέσεις επαφής και την τριβή που έχει ως αποτέλεσμα μία οριζόντια διατμητική δύναμη αντίστασης μεταξύ χάλυβα και ενέματος

$M_{\mu v}$: η ροπή αντοχής από τις πιέσεις επαφής και την τριβή που έχει ως αποτέλεσμα μία κατακόρυφη διατμητική δύναμη αντίστασης μεταξύ χάλυβα και ενέματος [10]

Μία ενεργή δυσκαμψία ελατηρίου ανά μήκος περιφέρειας της σύνδεσης με shear keys που δρα στην κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$k_{eff} = \frac{2t_{TP}s_{eff}^2 nE_{\psi}}{4\sqrt{3(1-\nu^2)}t_g^2 \left\{ \left(\frac{R_p}{t_p} \right)^{3/2} + \left(\frac{R_{TP}}{t_{TP}} \right)^{3/2} \right\} t_{TP} + ns_{eff}^2 L_g}$$

Όπου:

R_p : η εξωτερική ακτίνα του στύλου monopile

t_p : το πάχος του στύλου monopile

R_{TP} : η εξωτερική ακτίνα του στοιχείου μετάβασης

t_{TP} : πάχος του στοιχείου μετάβασης

$S_{eff} = s-w$

s : η απόσταση από κέντρο σε κέντρο των shear keys

w : το πάχος του shear key

n : ο αριθμός των ενεργών shear keys (ο αριθμός των shear keys που υπάρχουν σε κάθε πλευρά της σύνδεσης είναι $n+1$)

E : το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (210 GPa)

ν : ο λόγος του Poisson (0,3)

t_g : πάχος του ενέματος

ψ : συντελεστής σχεδιασμού ($\psi=1$ για υπολογισμό του φορτίου που δρα σε κάθε shear key και $\psi=0,5$ για υπολογισμό της μέγιστης ονομαστικής ακτινικής πίεσης επαφής)

Από την ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης προκύπτει ότι υπάρχει μια ευκαμψία του στοιχείου μετάβασης σε αξονική διεύθυνση από την κορυφή του στύλου έως το κέντρο των shear keys. Η ονομαστική ακτινική πίεση επαφής στην κορυφή και στη βάση της σύνδεσης προκύπτει ως:

$$p = \frac{3\pi M_{tot} E L_g}{E L_g \left\{ R_p L_g^2 (\pi + 3\mu) + 3\pi \mu R_p^2 L_g \right\} + 18\pi^2 k_{eff} R_p^3 \left(\frac{R_p^2}{t_p} + \frac{R_{TP}^2}{t_{TP}} \right)}$$

Όπου:

M_{tot} : είτε η καμπτική ροπή σχεδιασμού για την οριακή κατάσταση αστοχίας (ultimate limit state), είτε η μέγιστη καμπτική ροπή από δυναμικά φορτία για το όριο αντοχής σε κόπωση (fatigue limit state)

μ : χαρακτηριστικός συντελεστής τριβής (=0,4) [10]

Η δρώσα δύναμη ανά μονάδα μήκους στην περιφέρεια από την καμπτική ροπή και την κατακόρυφη δύναμη προκύπτει ως:

$$F_{VShk} = \frac{6\rho k_{eff}}{E} \frac{R_p}{L_g} \left(\frac{R_p^2}{t_p} + \frac{R_{TP}^2}{t_{TP}} \right) + \frac{P}{2\pi R_p}$$

Όπου:

P: ίδιο βάρος της κατασκευής πάνω από τη σύνδεση συμπεριλαμβανομένου του πλήρους βάρους του στοιχείου μετάβασης για την οριακή κατάσταση αστοχίας (P=0 για την οριακή κατάσταση αστοχίας σε κόπωση)

Η μέση δρώσα δύναμη ανά μονάδα μήκους στην περιφέρεια από την καμπτική ροπή και την κατακόρυφη δύναμη σε ένα shear key προκύπτει ως:

$$F_{V1Shk} = \frac{F_{VShk}}{n}$$

Όπου:

n : ο αριθμός των shear keys

14.ΚΟΠΩΣΗ

Η κόπωση στις παράκτιες ανεμογεννήτριες μπορεί να περιγραφεί ως η συσσωρευτική ζημιά που προκαλείται από εναλλασσόμενα φορτία χρονικά στη διάρκεια της χρήσης τους η οποία είναι περίπου 20 έτη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα φορτία αυτά είναι του ανέμου και των κυμάτων . Η κρισιμότητα της κόπωσης στη σύνδεση έχει επισημανθεί από τους Schaumann et. Al. (2011). [20]

Οι Andersen και Petersen (2004) παρουσίασαν αποτελέσματα από μεγάλης κλίμακας πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν για λογαριασμό του Νηογνώμονα DNV. Δοκίμια υπό κλίμακας των πραγματικών διαστάσεων (1:8) υπεβλήθησαν σε κυκλικά φορτία. Παρατηρήθηκε η δημιουργία ενός κενού αλλά μόνο στην περίπτωσης εξαιρετικά υψηλής φόρτισης και όχι λόγω της κόπωσης. Γι' τον παραπάνω λόγο δεν προτάθηκε η χρήση των shear keys στις mono-rpile κατασκευές. Ωστόσο, σε δοκιμές σε μεγαλύτερων διαστάσεων δοκίμια κλίμακας (1:6), τις οποίες πραγματοποίησαν οι Schaumann και Wilke (2007), η δημιουργία κενού (gap) ήταν εμφανής στην φόρτιση σε κυκλικά φορτία και επισημάνθηκε επίσης η ρηγμάτωση του grout (grout cracking). [20]

15.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM ANALYSIS)

Μέσω της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζεται το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής (stiffness matrix) και οι προκύπτουσες μετατοπίσεις.

Είδη αναλύσεων:

Στατική ανάλυση (static analysis):

Στη στατική ανάλυση αναλύεται το είδος της φόρτισης που προκαλεί τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Η ανάλυση είναι γραμμική και επομένως για κάθε φόρτιση εξετάζεται η προκείμενη παραμόρφωση. Η κατάσταση της δυσμενέστερης έντασης μπορεί να προκύψει από τη γραμμική υπέρθεση και συνδυασμό των επιμέρους εντάσεων. [6]

Ανάλυση συχνοτήτων (frequency analysis):

Στην ανάλυση συχνοτήτων υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες και τα modes των στοιχείων της κατασκευής. [6]

Το πρόγραμμα θα εκτελέσει μια ανάλυση για τις χαμηλότερες συχνότητες. Ωστόσο, προσδιορίζοντας μια 'shift value' είναι δυνατή η απόκτηση αποτελεσμάτων για ένα σετ υψηλότερων συχνοτήτων γύρω από μία προκαθορισμένη από τον χρήστη συχνότητα. [6]

Δυναμική ανάλυση (dynamic analysis):

Κάνοντας υπέρθεση των modes βρίσκεται η απόκριση της κατασκευής στο χρόνο. [6]

Ανάλυση λυγισμού (stability/buckling analysis):

Η ανάλυση αυτή γίνεται σε κατασκευές με μεγάλη αναλογία μήκους προς πλάτος. Είναι σημειωτέο ότι τα φορτία που προκαλούν λυγισμό μπορεί να είναι μικρότερα από τα φορτία που προκαλούν προβλήματα αντοχής. [6]

Η ανάλυση γίνεται εφαρμόζοντας ένα σετ στατικών φορτίων. Τα φορτία αυτά πολλασιάζονται με ένα συντελεστή για να δώσουν την αντοχή σε λυγισμό. [6]

Θερμική ανάλυση (thermal analysis):

Αναλύεται η κατανομή της θερμοκρασίας με βάση την αρχική, φαινόμενα μεταφοράς κτλ. Αυτή είναι συνήθως μια ανάλυση που εξαρτάται από τον χρόνο, ωστόσο, δεν είναι χρονοβόρα καθώς υπάρχει μόνο ένας βαθμός ελευθερίας σε κάθε μοντελοποιημένο κόμβο. [6]

Στην παρούσα εργασία γίνεται στατική ανάλυση του προβλήματος.

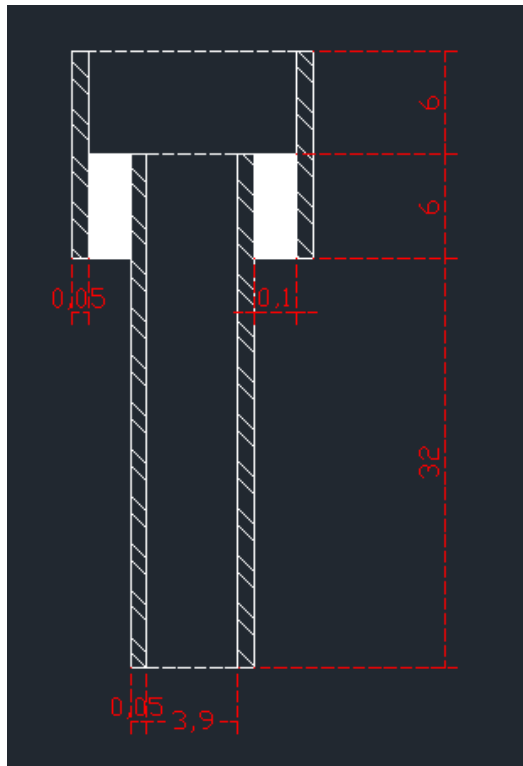
Το πρόγραμμα στο οποίο πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση του μοντέλου είναι το autocad (CAD), το οποίο δίνει την δυνατότητα να μεταφερθεί η γεωμετρία του μοντέλου απευθείας στο ANSYS workbench(CAE) ώστε να γίνει η ανάλυση με τα πεπερασμένα στοιχεία.

Εν συντομία τα στάδια προετοιμασίας για την επίλυση είναι τα ακόλουθα:

1. Απευθείας εισαγωγή 3D μοντέλου ή σχεδίαση αυτού στο ANSYS.
2. Καθορισμός είδους ανάλυσης (π.χ. στατική).
3. Εισαγωγή υλικών κατασκευής και παράμετροι αυτών (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson κτλ).
4. Δημιουργία πλέγματος κατασκευής (διαχωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία)
5. Εισαγωγή συντομικών συνθηκών (πχ. πάκτωση, κύλιση κτλ) και τρόπος σύνδεσης μελών κατασκευής.
6. Επιβολή φορτίων
7. Επίλυση
8. Διαγράμματα (π.χ. τάσεων-παραμορφώσεων)

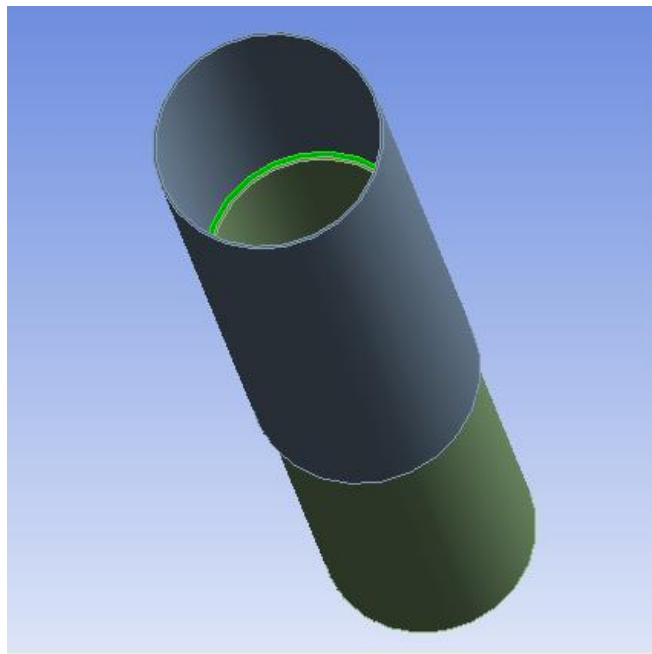
15.1 Εισαγωγή γεωμετρίας προβλήματος και προσδιορισμός είδους ανάλυσης

Το μοντέλο που επιλύεται αποτελείται από τον monopile διαμέτρου 4m και μήκους 39 m, το grout πάχους 0,1 m και μήκους 6 m και το transition piece πάχους 0,05 m και μήκους 12 m όπως στο ακόλουθο σχήμα.



σχήμα 17: διαστάσεις μοντέλου

Ωστόσο, για λόγους οικονομίας χρόνου στην επίλυση δεν μοντελοποιήθηκε ολόκληρος ο φορέας. Ο υποοριζόντιος σχεδιάστηκε από το τμήμα της σύνδεσης κατά 8 m προς τα κάτω, σε μήκος δηλαδή διπλάσιο της διαμέτρου του, καθώς αυτό κρίνεται επαρκές για τη μελέτη της grout connection. [16]



σχήμα 18: μοντέλο στο ANSYS

Επιλέγεται να γίνει στατική ανάλυση του φορέα.

15.2 Εισαγωγή υλικών

Στη συνέχεια, εισήχθησαν οι μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών του μοντέλου.

Επιλέχθηκε χάλυβας υψηλής αντοχής S355 ο οποίος για πάχος 50 mm εμφανίζει τις ακόλουθες αντοχές.

Table 0-1: Yield strength [MPa]

Thickness [mm]	Ultimate Load State S355 Yield strength	
	f_y [MPa]	f_{yd} [MPa]
$t \leq 16$	355	309
$16 < t \leq 40$	345	300
$40 < t \leq 63$	335	291
$63 < t \leq 80$	325	283

Table 0-2: Ultimate tensile strength [MPa]

Thickness [mm]	ULS S355 (DnV_1 NV36) ultimate Tensile strength	
	f_u [MPa]	f_{ud} [MPa]
$t \leq 100$	490	377

Table 0-3: Characteristic Material values for steel in general

Steel	
Modulus of elasticity, E [MPa]	210000
Shear modulus, G [MPa]	81000
Density, ρ [kg/m ³]	7850
Poisson's ratio, ν [-]	0.3

σχήμα 19: μηχανικές ιδιότητες χάλυβα S355 [17]

Για το grout επιλέχθηκε το εξαιρετικής απόδοσης, Ducorit® το οποίο χρησιμοποιείται για δομικές grouted connections σε εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών και σε εγκαταστάσεις πετρελαίου και αερίου παράκτιες και μη. [18]

Οι διάφορες ιδιότητες του υλικού αποκτιούνται με την προσθήκη αδρανών όπως χαλαζιακή άμμο ή βωξίτη. [18]

Τα προϊόντα Ducorit χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντοχή και δυσκαμψία, κάνοντάς τα ένα ισχυρό δομικό συστατικό και όχι απλά ένα υλικό γεμίσματος. Επίσης, είναι εύχρηστα και φιλικά προς το περιβάλλον. [18]

Όσον αφορά την αντλησιμότητά τους, είναι ανλήσιμα μέχρι και μερικές εκατοντάδες μέτρα μέσω σωλήνων. Χάρη στο ιξώδες και στην υψηλή εσωτερική συνάφεια του υλικού, δεν υπάρχει κίνδυνος ξεπλύματος κομματιών τσιμέντου, διαχωρισμός ή ένωση με το νερό όταν χρησιμοποιείται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. [18]

Το Ducorit αναπτύσσει γρήγορα σημαντικό μέρος της αντοχής του. Μετά από είκοσι τέσσερις ώρες σκλήρυνσης στους 20°C (68°F), η αντοχή φτάνει περίπου στο 25% της τελικής αντοχής του. [18]

Εξαιτίας της υψηλής αντοχής και σταθερότητας του υλικού, η αντοχή σε κόπωση είναι εξαιρετική σε σχέση με το κοινό σκυρόδεμα και μπορεί να είναι έως και 5 φορές μεγαλύτερη αυτής του κοινού σκυροδέματος.

Ακολούθως δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων κατηγοριών Ducorit . Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε Ducorit D4.

Grout	E [MPa]	ν	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	β_{DP} [°]
D4	68600	0.19	197.5	4.4	70.785
S5	53000	0.19	114.8	4.0	70.333

σχήμα 20: μηχανικές ιδιότητες ducorit [18]

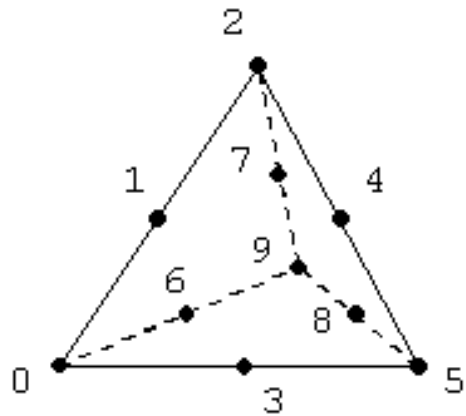
15.3 Δημιουργία πλέγματος

Στη συνέχεια, το μοντέλο διακριτοποιήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία (elements). Χρησιμοποιήθηκε ένα αρκετά πυκνό πλέγμα έπειτα από δοκιμές τέτοιο ώστε το πρόβλημα να συγκλίνει και να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και με όχι υπερβολικά μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Στον έλεγχο σχήματος (shape checking) επιλέχθηκε το κριτήριο 'Aggressive mechanical' το οποίο δημιουργώντας περισσότερα στοιχεία αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο αλλά βοηθάει στη σύγκλιση όταν υπάρχει μη γραμμικότητα στο πρόβλημα. Είναι βασισμένο στην ιακωβιανή αναλογία (jacobian ratio) στους κόμβους. Γενικά, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το μητρώο της ιακωβιανής συσχετίζει τα υπολογιζόμενα μεγέθη από το σύστημα συντεταγμένων των κόμβων στο σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου. Εάν υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση των στοιχείων τότε θα προκληθεί σφάλμα κατά τη μετατροπή. Εάν η ιακωβιανή είναι μικρότερη του μηδενός ή μεγαλύτερη του ορίου τότε το πρόβλημα δε θα συγκλίνει. Στις επιφάνειες επαφής του grout για μεγαλύτερη ακρίβεια έγινε πύκνωση των στοιχείων με την επιλογή 'refinement'. [34]

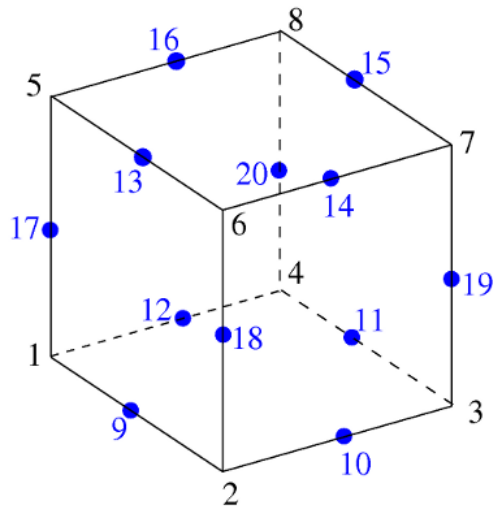
Τελικά παρήχθησαν 502115 κόμβοι και 99849 στοιχεία. Τα είδη των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι: SOLID187, SOLID186, COMBIN14, CONTA174 και TARGE170.

Τα solid187 στοιχεία διαμορφώνονται σε τετράεδρα με 10 κόμβους (tet10) ενώ τα στοιχεία solid186 σε εξαέδρα με 20 κόμβους (hex20). Είναι υψηλής τάξης τρισδιάστατα στοιχεία και έχουν 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις x, y και z στο τοπικό σύστημα

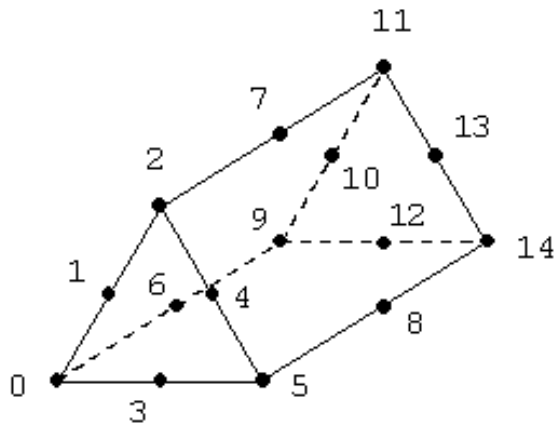
συντεταγμένων. Τα στοιχεία αυτά υποστηρίζουν προβλήματα λυγισμού και μεγάλων παραμορφώσεων. Εμφανίζουν τετραπλευρική συμπεροφορά ως προς τη μετατόπιση (quadratic displacement behavior). Τα στοιχεία combin14 διαμορφώνονται σε πεντάεδρα με 15 κόμβους (wed15) και χρησιμοποιούνται σε τρισδιάστατα προβλήματα ως στρεπτικά ή διαμήκη ελατήρια με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: μετατοπίσεις κατά x , y και z στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται ως στρεπτικά ελατήρια. Τα στοιχεία conta174 χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν την επαφή και την ολίσθηση μεταξύ τρισδιάστατων επιφανειών παραμορφώσιμων και μη. Είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια των στοιχείων solid186 και solid187 και έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την επιφάνεια του στοιχείου με το οποίο συνδέονται. Ομοίως ισχύει και για τα στοιχεία target170. Ολόκληρος ο φορέας είναι διαμορφωμένος με solid186 και solid187 στοιχεία και με πολύ μικρότερο αριθμό στοιχείων combin14. Στις επιφάνειες επαφής χρησιμοποιούνται τα στοιχεία conta174 και target170 στην 'μαλακή' και 'σκληρή' πλευρά αντιστοίχως. [24]



σχήμα 21: στοιχείο tet10

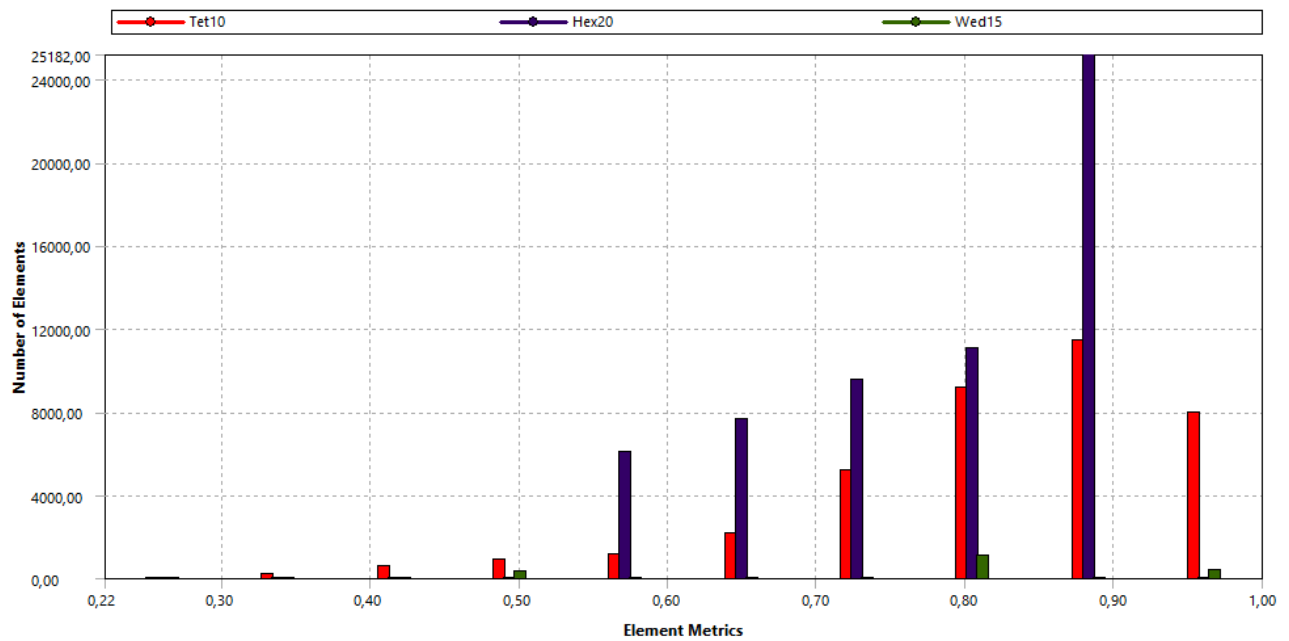


σχήμα 22: στοιχείο hex20

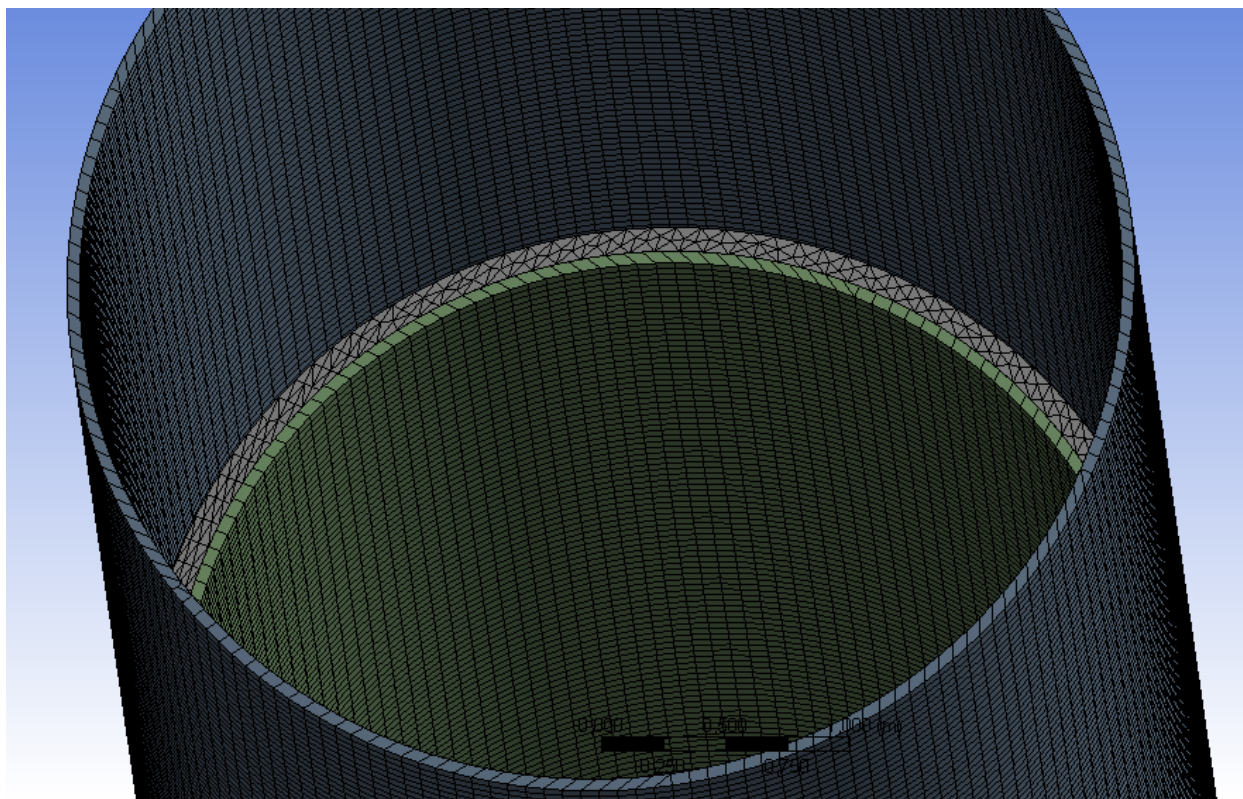


σχήμα 23: στοιχείο wed15

Τα περισσότερα στοιχεία εμφανίζουν μεγάλη ακρίβεια όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. (τιμή στο διάγραμμα του ansys mesh metric κοντά στη μονάδα).



σχήμα 24: αριθμός στοιχείων και μέτρο της ποιότητας αυτών.



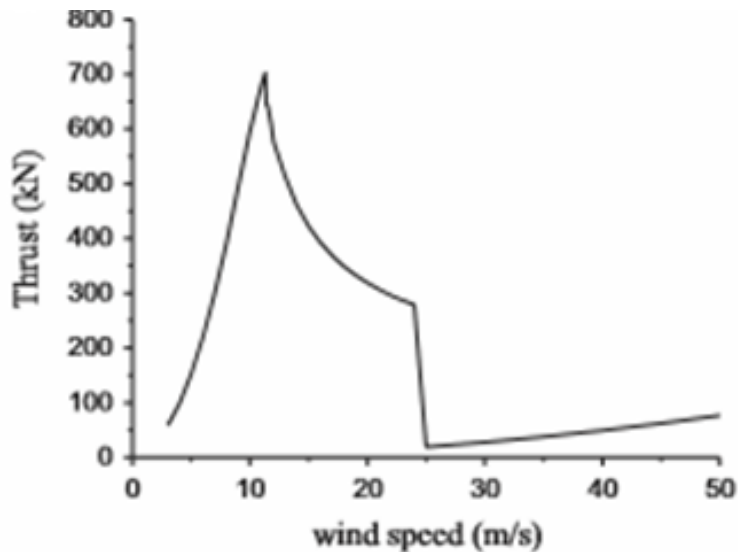
σχήμα 25: διακριτοποίηση μοντέλου σε στοιχεία

15.4 Επιβολή συνοριακών συνθηκών και φόρτισης

Στην βάση του monopile επιβάλλεται συνοριακή συνθήκη πάκτωσης. Τα φορτία της που καταπονούν την κατασκευή είναι ροπή κάμψης, δύναμη διατμητική και αξονική και εφαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια του transition piece. Η φόρτιση αυτή έχει προκύψει από διάγραμμα της ώθησης συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου για ανεμογεννήτρια τύπου NREL 5 MW (MARINA platforms, Νορβηγία). Λήφθηκε η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης.[26]

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπτική ροπή (kNm)	Διατμητική δύναμη (kN)	Αξονική δύναμη (kN)
11,4	56400	700	6000

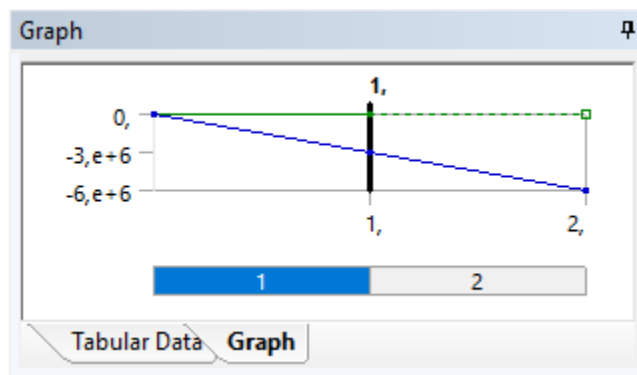
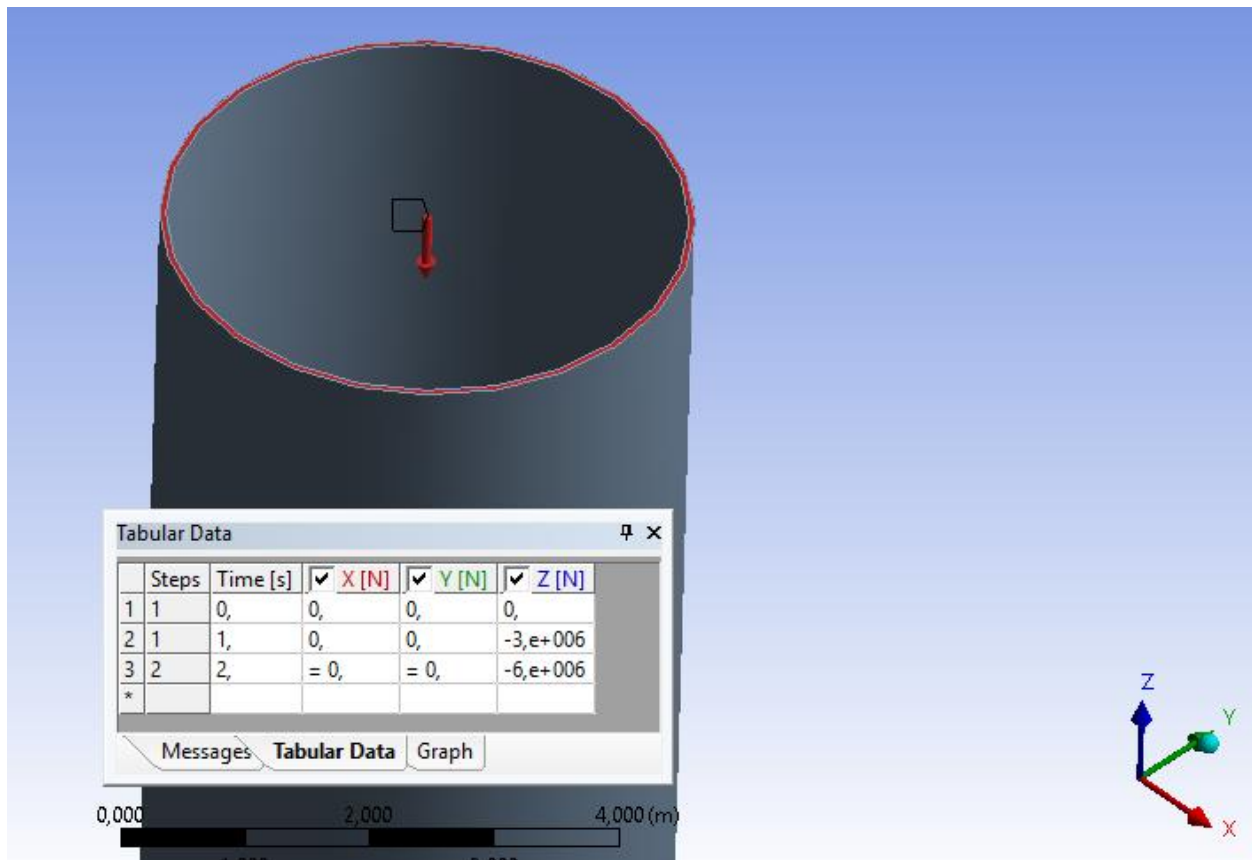
σχήμα 26: δεδομένα φόρτισης



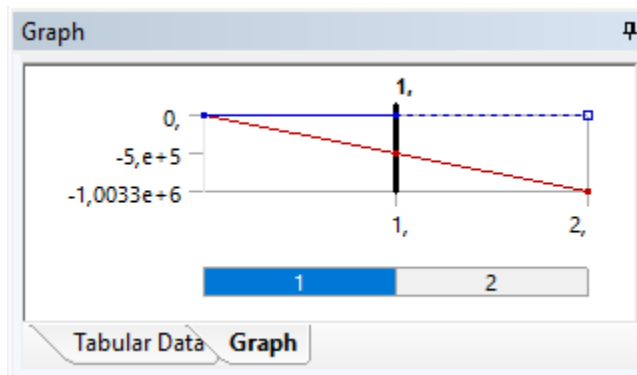
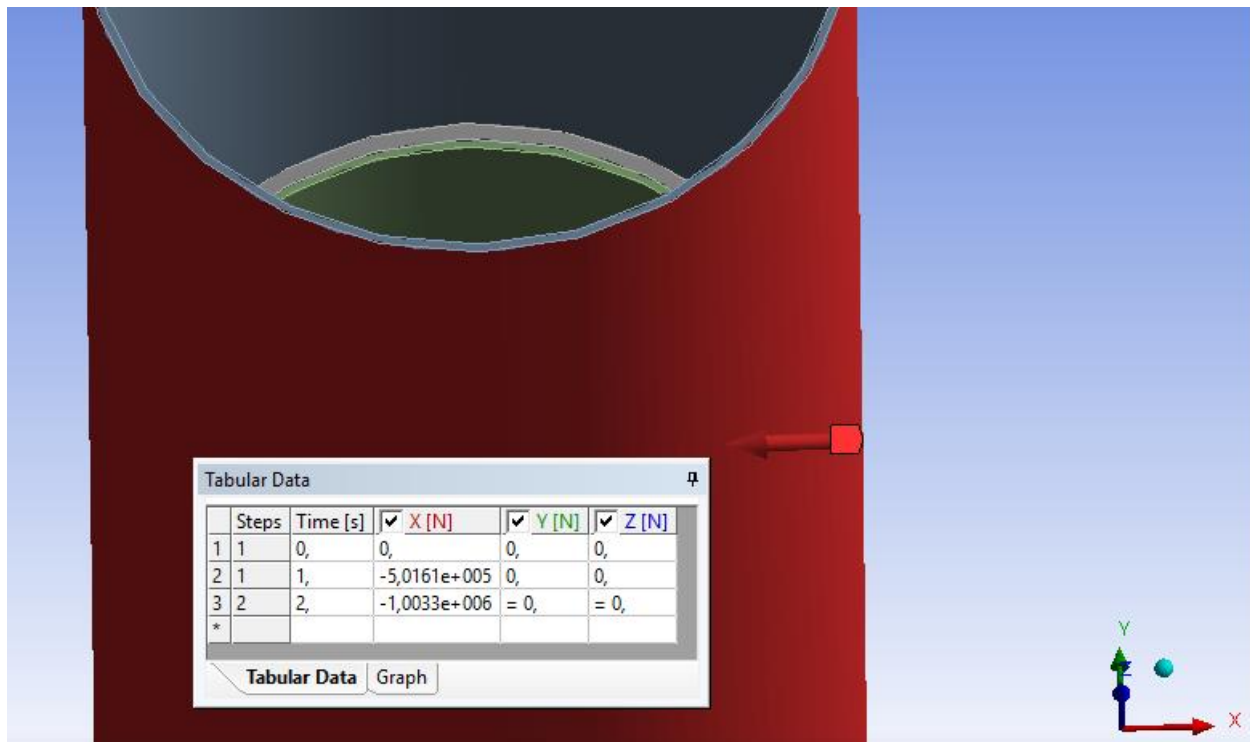
σχήμα 27: ώθηση από τον άνεμο

Τα φορτία επιβλήθησαν σε δύο βήματα 'steps' στον φορέα (το μισό του φορτίου στο τέλος του πρώτου βήματος) με γραμμική μεταβολή. Επιλέχθηκαν επιπλέον υποβήματα 'substeps' σε κάθε βήμα για ακόμη ομαλότερη επιβολή του φορτίου κατά τα οποία εφαρμόζονται περισσότερες επαναλήψεις και διορθωτικές εξισώσεις ισορροπίας για να βοηθήσουν στη σύγκλιση. Η αξονική και η διατμητική δύναμη επιβλήθηκαν στο μοντέλο ως απομακρυσμένες δυνάμεις 'remote forces'. Το ίδιο και η καμπτική ροπή ως ζεύγος απομακρυσμένων δυνάμεων. Το κάθε φορτίο επιβάλλεται σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου επηρεάζοντας ωστόσο όλα τα σημεία της επιφάνειας στην οποία ασκείται. Η σύνδεση αυτή στο λογισμικό γίνεται με εξισώσεις 'multi point constraints'. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων και οι επιφάνειες στις οποίες ασκούνται. Από τη δύναμη διάτμησης και το ζεύγος δυνάμεων της ροπής προκύπτει τελικά μια οριζόντια δύναμη στην κορυφή του sleeve και μια στη βάση της grout connection.

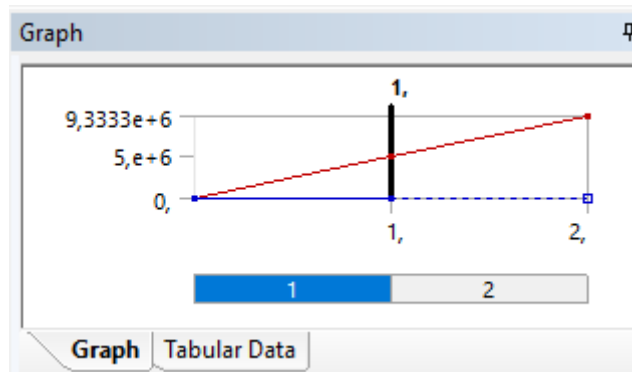
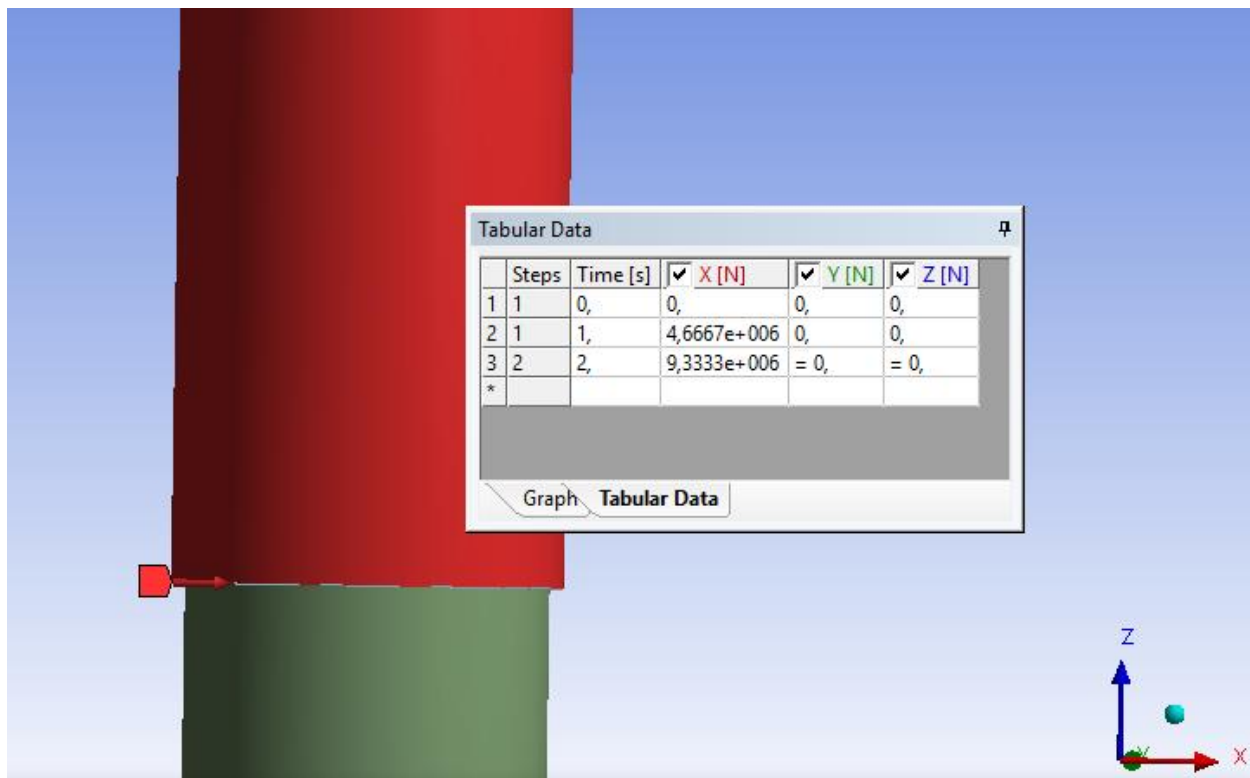
Ακολούθως φαίνεται σχηματικά η επιβολή της φόρτισης στον φορέα που εξετάζεται.



σχήμα 28: αξονική δύναμη



σχήμα 29: remote force στην κορυφή του grout connection



σχήμα 30: remote force στη βάση του grout connection

15.5 Προσδιορισμός παραμέτρων επίλυσης

Μεταξύ των διαφόρων ειδών επαφής είναι η **'frictional'** και η **'bonded'** επαφή. Στην πρώτη, οι επιφάνειες τις επαφής παραμένουν ενωμένες σα κολλημένες καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης. Στην δεύτερη περίπτωση, ορίζεται συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών (friction coefficient) και επιτρέπεται ολίσθηση ή και η κενού.

Σε έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών, οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων με **'bonded contact'** επαρκούν για να υπολογίσουν τις τάσεις μεταξύ μερών μιας συνδεσμολογίας τα οποία μπορεί να βιδωμένα μεταξύ τους ή συγκολλημένα ή απλά κολλημένα κτλ. Σε περιπτώσεις όμως όπως μηχανισμούς γραναζιών και οδοντωτούς τροχούς ή κινητήρες ή μοχλούς κτλ. στις οποίες η υπάρχουσα

κινούμενα μέρη ή γενικά η επαφή μεταξύ των μερών αλλάζει με τον χρόνο, απαιτούνται διαγνωστικά εργαλεία τα οποία θα βοηθήσουν στην επίτευξη της σύγκλισης. [19]

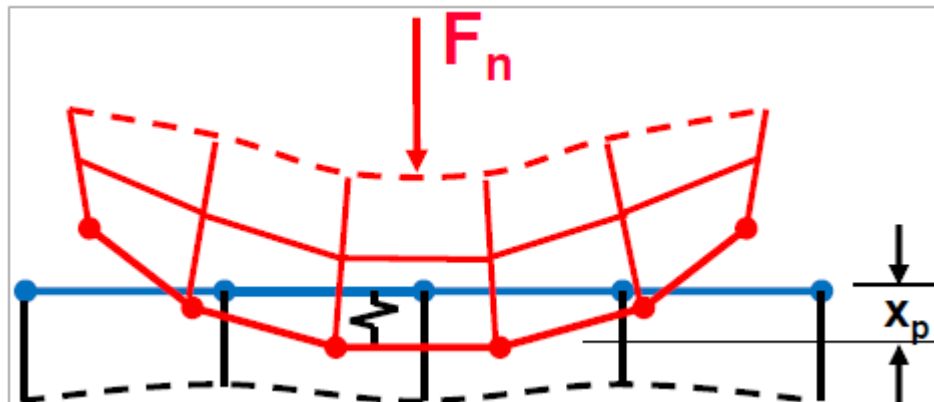
Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε frictional επαφή και στις δύο διεπιφάνειες (monopile-grout και grout- sleeve) και συντελεστής τριβής 0,6. Ως επιφάνεια contact (μαλακή, που μπορεί να συμπιεστεί) επιλέχθηκε η επιφάνεια με υλικό το grout και ως επιφάνεια target (σκληρή, ασυμπίεστη) εκείνη με υλικό τον χάλυβα.

Ως συμπεριφορά της επαφής επιλέγεται 'asymmetric behavior' (one pass contact) καθώς αυτό συνεπάγεται ότι όλα τα contact στοιχεία βρίσκονται στη μία πλευρά της επαφής και όλα τα target στοιχεία στην άλλη. Η συνολική πίεση επαφής που ασκείται στις δύο πλευρές είναι ο μέσος όρος των πιέσεων επαφής στην κάθε μία πλευρά. [22]

Υπάρχουν διάφορες διατυπώσεις για την επαφή όπως η 'Pure penalty' και η 'Augmented Lagrange'. Καθότι γενικά τα σώματα τα οποία βρίσκονται σε επαφή δεν διαπερνούν το ένα το άλλο, το λογισμικό πρέπει να καθορίσει τη σχέση μεταξύ των δύο επιφανειών στην ανάλυση. Όταν η εφαρμογή αποτρέπει την αλληλοεισχώρηση, τότε κοινώς ενισχύει την συμβατότητα της επαφής 'contact compatibility'. Οι δύο διατυπώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω επιτρέπουν την αλληλοεισχώρηση το οποίο είναι και επιθυμητό στον πρόβλημα που μελετάται. Είναι και οι δύο μέθοδοι που βασίζονται στη θεωρία του πέναλτι 'penalty based'. [24]

$$F_{normal} = k_{normal} x_{penetration}$$

Όπου k_{normal} εννοείται η δυσκαμψία στην επαφή.



σχήμα 31: σχηματική απεικόνιση των Penalty based και Augmented Lagrange διατυπώσεων [23]

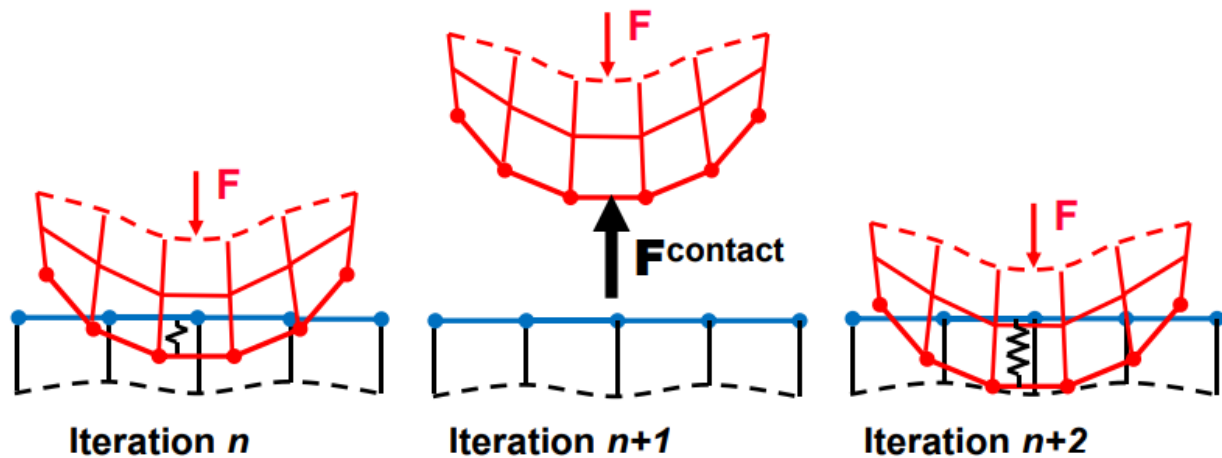
ιδανικά, μια άπειρη k_{normal} , συνεπάγεται μηδενική διείδυση. Αριθμητικά όμως αυτό δεν είναι εφικτό με τις penalty based μεθόδους στις οποίες η διείδυση είναι αποδεκτή όταν κυμαίνεται σε μικρές τιμές. Η διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο γεγονός ότι η Augmented Lagrange χρησιμοποιεί μια μεταβλητή 'λ' η οποία την κάνει λιγότερο ευαίσθητη στο μέγεθος της δυσκαμψίας k_{normal} .

Pure penalty διατύπωση: $F_{normal} = k_{normal} x_{penetration}$

Augmented Lagrange διατύπωση: $F_{normal} = k_{normal} x_{penetration} + \lambda$

Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται η διατύπωση της Augmented lagrange καθώς ελέγχει περισσότερο την διείδυση.

Η παράμετρος k_{normal} είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει τη σύγκλιση όσο και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Μια μεγάλη τιμή της παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά μπορεί να δυσκολέψει τη σύγκλιση. Αν είναι υπερβολικά μεγάλη, ο φορέας μπορεί να ταλαντώνεται στα σημεία της επαφής.



σχήμα 32: περίπτωση ταλάντωσης σε αυξημένο k_{normal} [23]

Η k_{normal} στα περισσότερα προβλήματα θεωρείται ίση με τη μονάδα. Ωστόσο σε καμπτικά προβλήματα και όπου υπάρχει δυσκολία στη σύγκλιση μια μικρότερη τιμή ίση με 0,1 μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση. Η επιλογή να ανανεώνεται η k_{normal} έπειτα από κάθε επανάληψη εξασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται η κατάλληλη τιμή για την περίπτωση που εξετάζεται. [23], [24]

Η κίνηση στερεού σώματος είναι ένα συχνά συναντούμενο πρόβλημα σύγκλισης σε μοντέλα στα οποία τα μέρη τους δεν είναι αρχικά σε επαφή. Ο καθορισμός των επαφών μεταξύ των μερών είναι πολύ σημαντικό να καθοριστεί εξ'αρχής. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή του **contact tool** στην ενότητα **connections**. Εδώ ελέγχεται η κατάσταση της αρχικής επαφής (**initial contact status**), αν δηλαδή τα μέρη τα οποία θεωρείται ότι βρίσκονται σε επαφή όντως αγγίζουν το ένα το άλλο. [19]

Μετά την παραγωγή των αποτελεσμάτων της αρχικής επαφών των μερών (**generate initial contact results**) προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (m)	Gap (m)	Geometric Penetration (m)	Geometric Gap (m)	Resulting Pinball (m)	Real Constant
Frictional - grout To monopile	Contact	Frictional	Closed	10786	7,328e-013	0,	2,8776e-007	3,7036e-012	9,6173e-002	4,
Frictional - grout To monopile	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,
Frictional - grout To sleeve	Contact	Frictional	Closed	6310,	7,3025e-013	0,	1,1532e-007	2,7289e-012	9,7519e-002	6,
Frictional - grout To sleeve	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,

Color Legend

Red	The contact status is open but the type of contact is meant to be closed. This applies to bonded and no separation contact types.
Yellow	The contact status is open. This may be acceptable.
Orange	The contact status is closed but has a large amount of gap or penetration. Check penetration and gap compared to pinball and depth.
Gray	Contact is inactive. This can occur for MPC and Normal Lagrange formulations. It can also occur for auto asymmetric behavior.

σχήμα 33: αρχική κατάσταση επαφής

Στις γραμμές συνοψίζονται το είδος της επαφής και επισημαίνονται τα διάφορα προβλήματα.

Στην προκειμένη περίπτωση οι επαφές είναι ουσιαστικά κλειστές δηλαδή δεν υπάρχουν κενά μεταξύ των επιφανειών.

Στο πρόβλημα εντάχθηκαν 2 είδη μη-γραμμικότητας: η **γεωμετρική** και η **μη γραμμικότητα λόγω επαφής**. Εάν μια κατασκευή εμφανίζει μεγάλες παραμορφώσεις, η αλλαγή στη γεωμετρία της μπορεί να προκαλέσει μη γραμμική συμπεριφορά. Η επαφή δύο σωμάτων είναι ' μεταβλητής κατάστασης' (μπορεί π.χ. από κλειστή να γίνει ανοιχτή), και τότε θα υπάρχει απότομη αλλαγή στη δυσκαμψία της κατασκευής.

Σε μια μη γραμμική ανάλυση το μητρώο δυσκαμψίας $[K]$ εξαρτάται από τη μετατόπιση $\{x\}$.

$$\{F\} = [K(x)]\{x\}$$

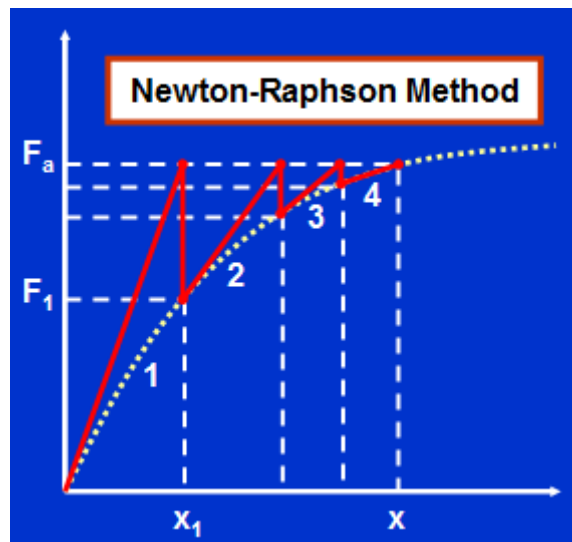
Η γραμμική ανάλυση είναι μια επαναληπτική διαδικασία επειδή η σχέση του φορτίου και της μετατόπισης δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή.

- Μέθοδος Newton Raphson

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton Raphson η οποία παρουσιάζει γενικά ταχεία σύγκλιση με αυτόματη επιλογή από το λογισμικό αν θα χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος της Γραμμής (Line Search) όπου υπάρχει δυσκολία στη σύγκλιση.

Εν συντομία, στη μέθοδο Newton-Raphson για την εύρεση της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης πραγματοποιούνται διαδοχικές προσεγγίσεις με διόρθωση. Το σύνολο του φορτίου F_a εφαρμόζεται στην πρώτη επανάληψη. Ως αποτέλεσμα βρίσκεται μετατόπιση x_1 . Από τις μετατοπίσεις υπολογίζονται οι εσωτερικές δυνάμεις F_1 . Αν $F_a \neq F_1$, τότε το σύστημα δεν ισορροπεί και ένα καινούριο μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται (κεκλιμένη κόκκινη γραμμή στο σχήμα που ακολουθεί). Η διαφορά $F_a - F_1$ είναι οι υπολοιπόμενες δυνάμεις (residual forces), οι οποίες πρέπει να είναι αρκετά μικρές (ανοχή)

ώστε να συγκλίνει η διαδικασία. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο μέχρις ότου $F_a \approx F_1$ [23]



σχήμα 34: η επαναληπτική μέθοδος Newton Raphson [23]

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης επιλέγεται να βρεθούν τα παρακάτω:

- οι τάσεις tresca (maximum shear stress)

Οι τάσεις tresca προκύπτουν από τις κύριες τάσεις με βάση τον ακόλουθο τύπο

τάση Tresca stress= μέγιστη κύρια τάση-ελάχιστη κύρια τάση

Σύμφωνα με το κριτήριο Tresca θα πρέπει: $\frac{1}{2} \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \leq \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$

- οι ισοδύναμες τάσεις (equivalent tensile stresses)

Οι ισοδύναμες τάσεις (ή αλλιώς τάσεις Von Mises) επιτρέπουν την παρουσίαση μια εντατικής κατάστασης στις τρεις διαστάσεις από μία θετική τιμή τάσης που υπολογίζεται από τον τανυστή τάσεως Cauchy. Το υλικό διαρρέει όταν η ενέργεια παραμόρφωσης σε έναν μοναδιαίο όγκο του φτάσει την ενέργεια παραμόρφωσης στον ίδιο όγκο όταν εντείνεται μονοαξονικά στην αντοχή διαρροής του. Άρα σύμφωνα με το κριτήριο του Von Mises, συμβαίνει διαρροή όταν η τάση Von Mises σ_v φτάσει την αντοχή διαρροής του υλικού σ_y . [21]

Οι ισοδύναμες τάσεις σχετίζονται με τις κύριες τάσεις σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}$$

Σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises θα πρέπει: $\sigma_v \leq \sigma_y$

- οι μέγιστες κύριες τάσεις (maximum principal stresses)

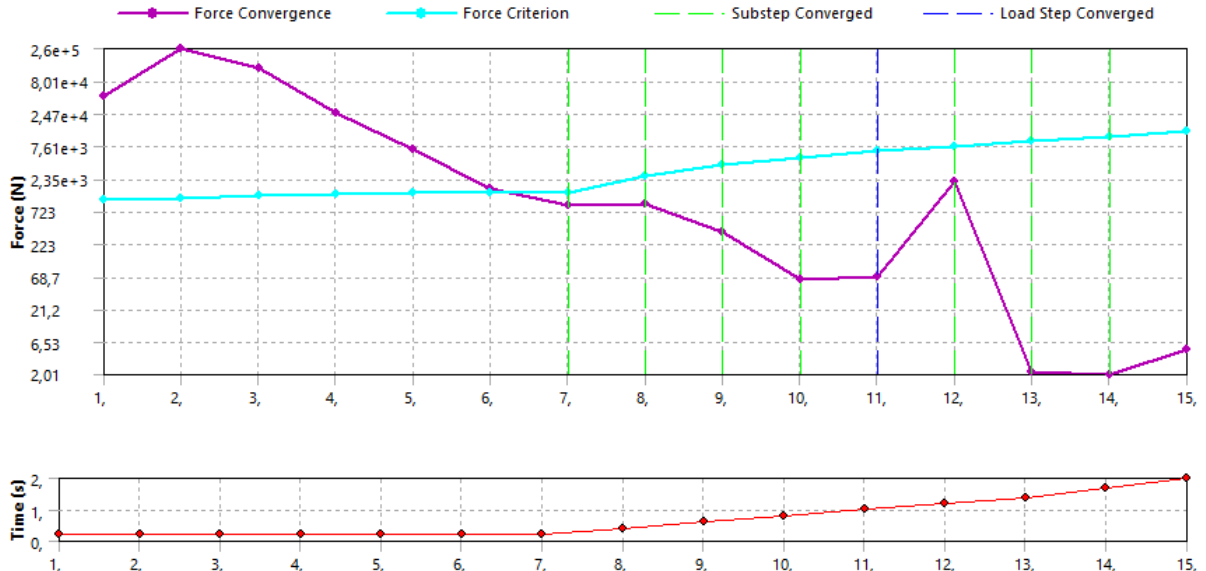
Η μέγιστη κύρια τάση σ_1 είναι ουσιαστικά το διάνυσμα της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. Αυτή συγκρίνεται με την εφελκυστική αντοχή του grout σ_c .

Θα πρέπει επομένως: $\sigma_1 \leq \sigma_c$

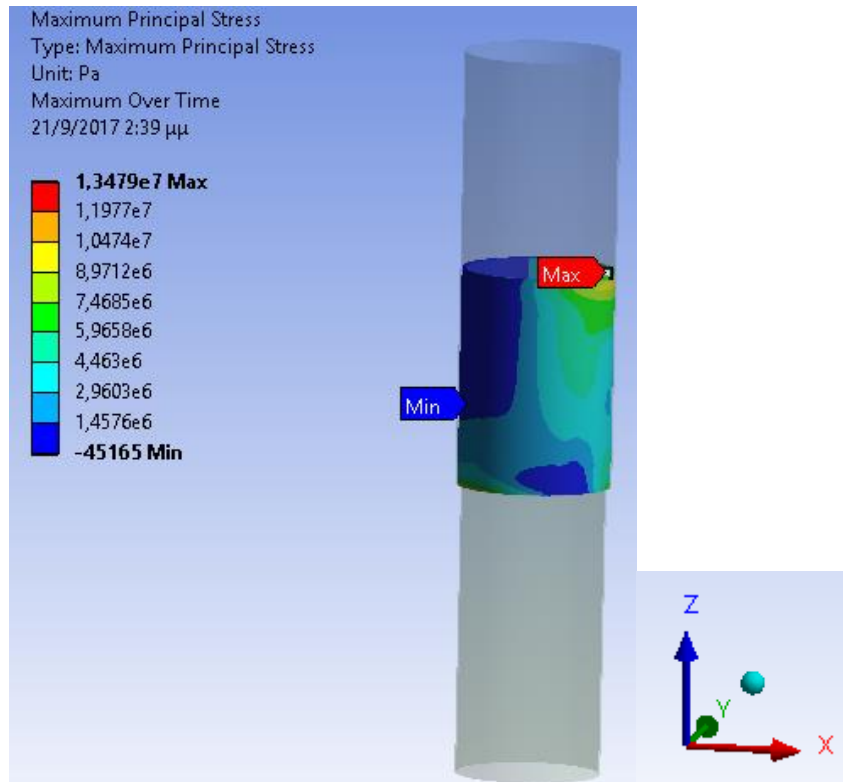
Δίνεται εντολή επίσης να υπολογισθούν οι πιέσεις επαφής (στις δύο διεπιφάνειες), η κατάσταση της επαφής, το κενό και η διείσδυση που προκαλούνται καθώς επίσης και οι ορθές και διατμητικές τάσεις ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}$) και η συνολική παραμόρφωση κατά τον x και z άξονα χωριστά. Οι πιέσεις επαφής και οι ορθές και διατμητικές τάσεις υπολογίζονται σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου.

15.6 Αποτελέσματα επίλυσης

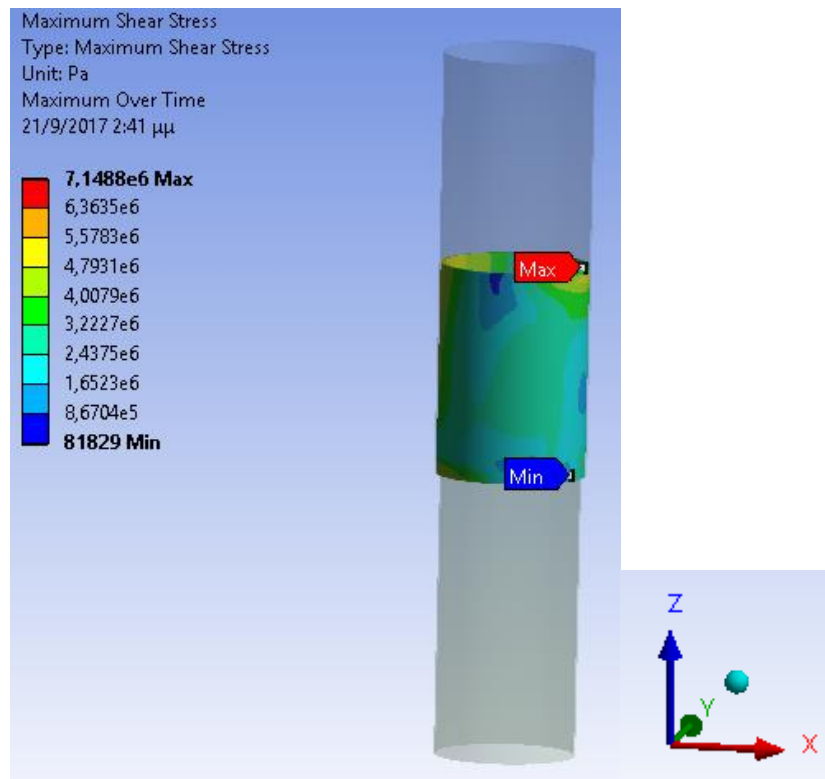
Δίνονται σε μορφή σχημάτων τα αποτελέσματα της επίλυσης.



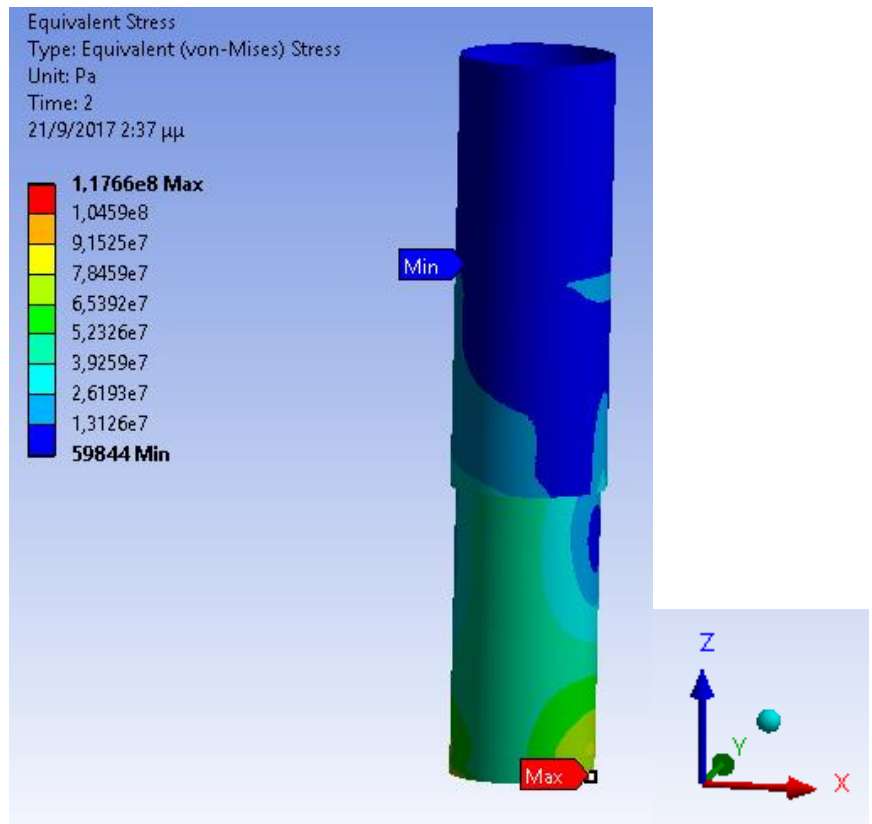
σχήμα 35: διάγραμμα σύγκλισης



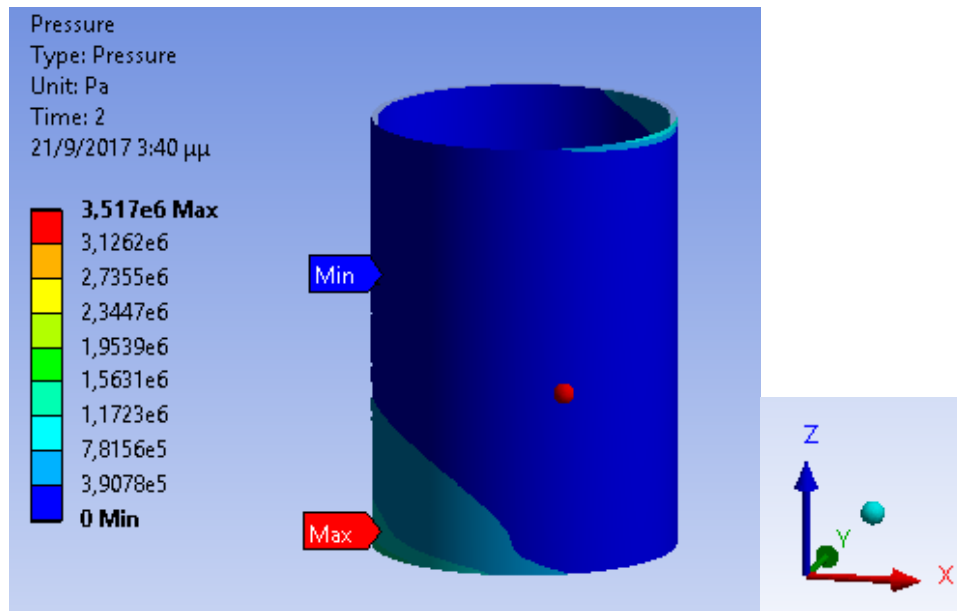
σχήμα 36: maximum principal stress στο grout



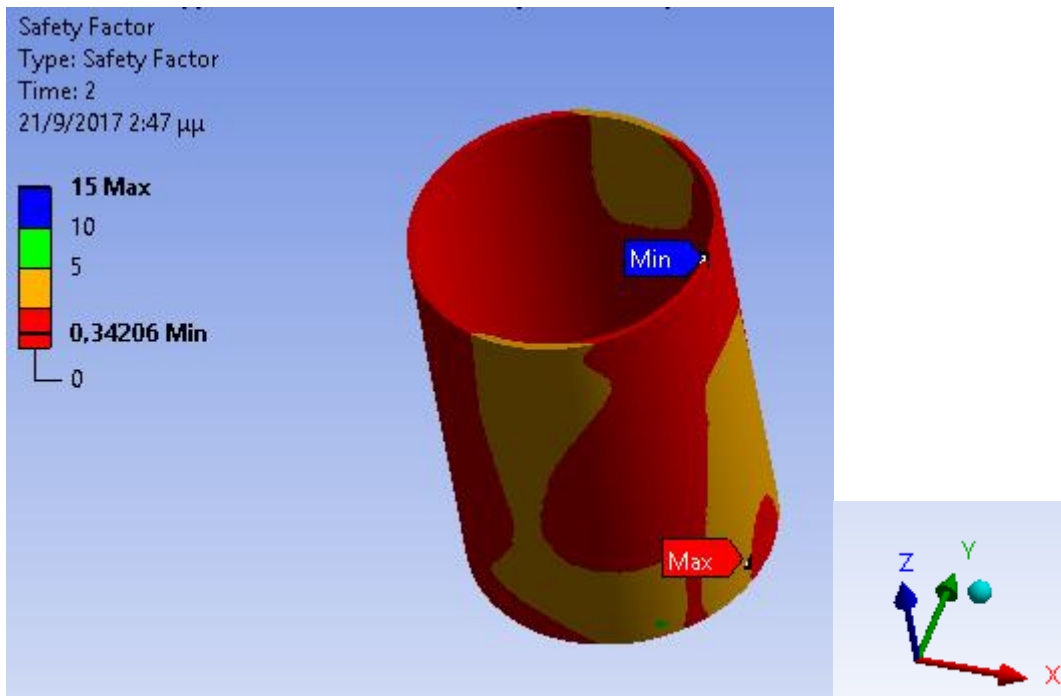
σχήμα 37: maximum shear stress στο grout



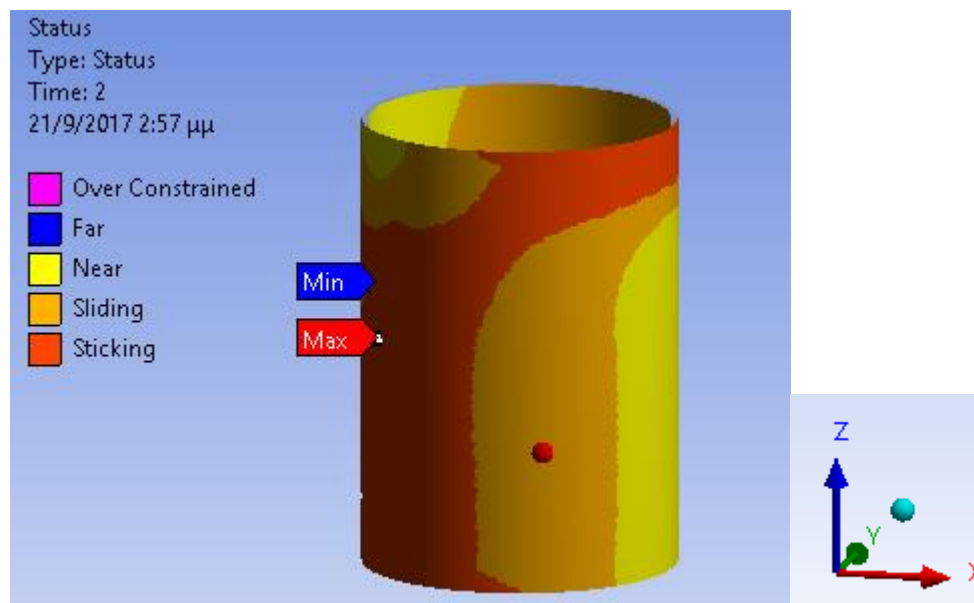
σχήμα 38: equivalent stress στον monopole και στο sleeve



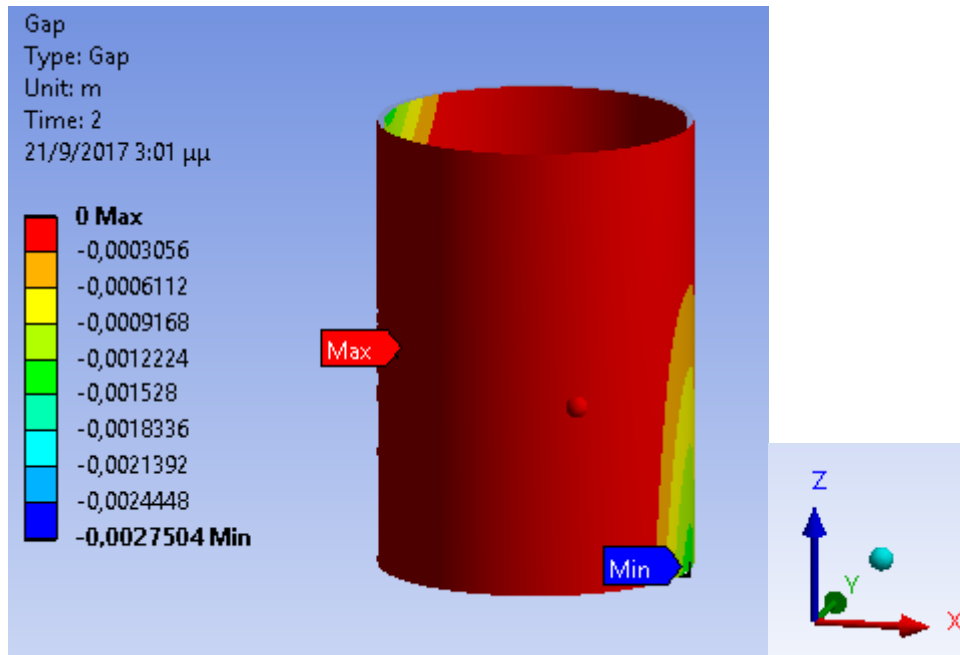
σχήμα 39: contact pressure στο grout



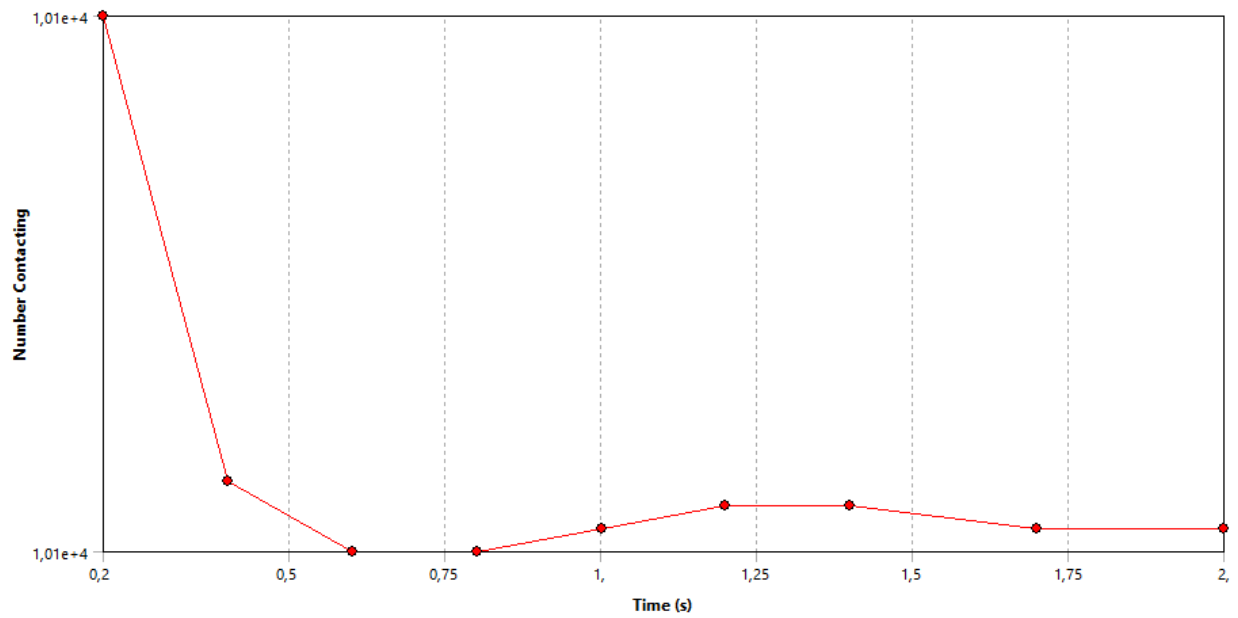
σχήμα 40: safety factor στο grout



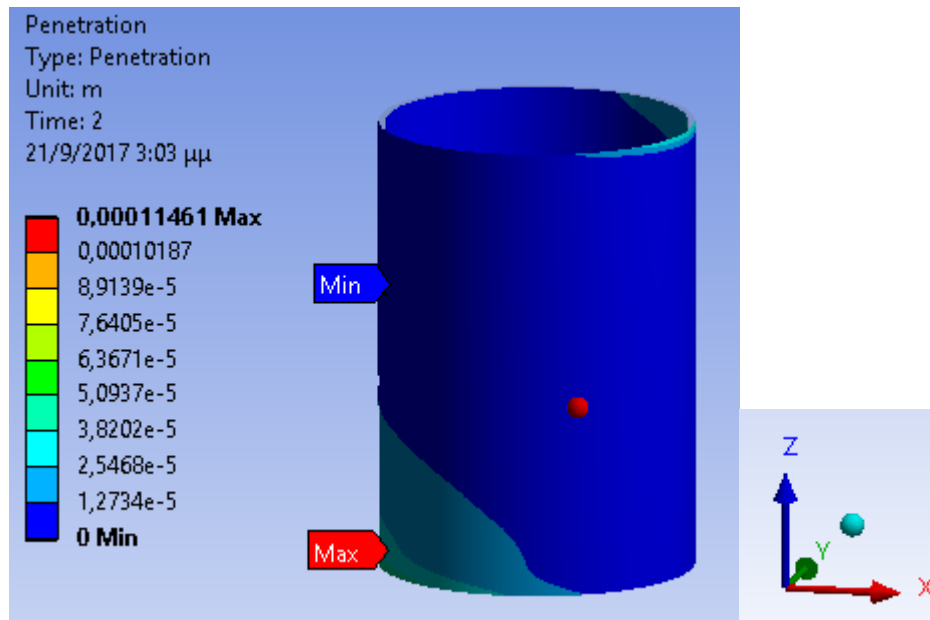
σχήμα 41: κατάσταση επαφής



σχήμα 42: δημιουργία κενού

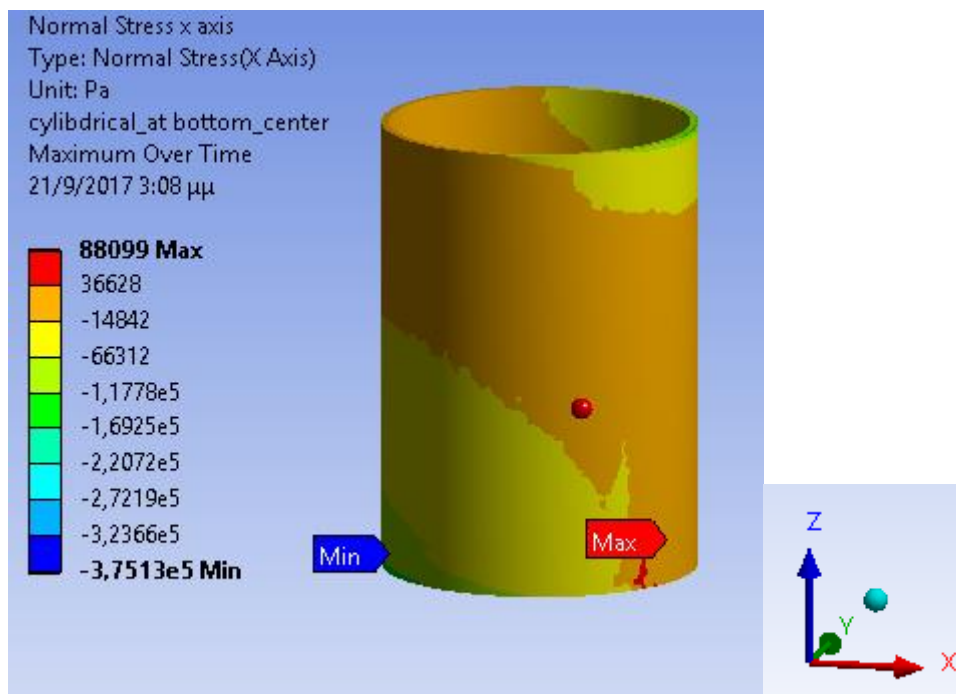


σχήμα 43: αριθμός στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή

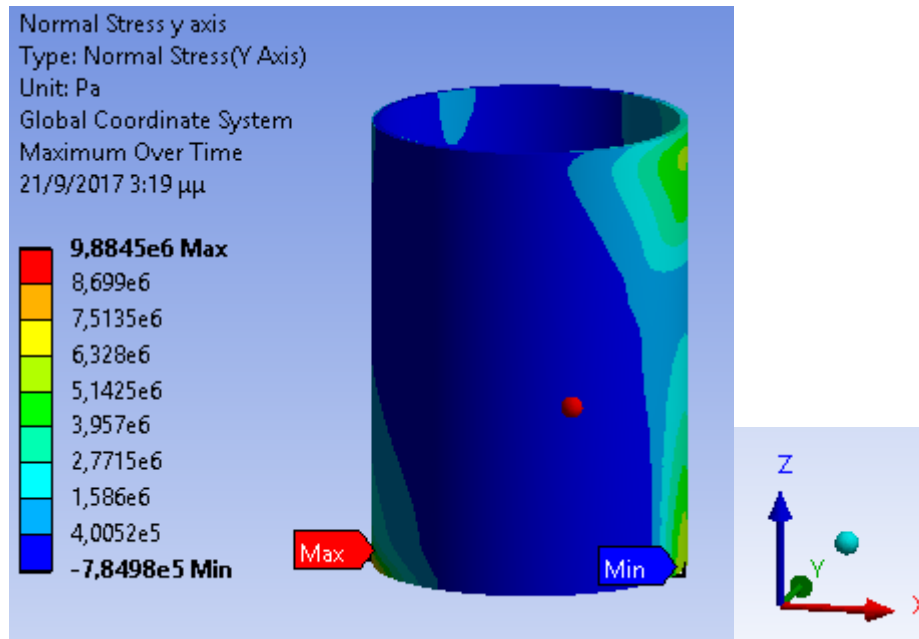


σχήμα 44: διείσδυση

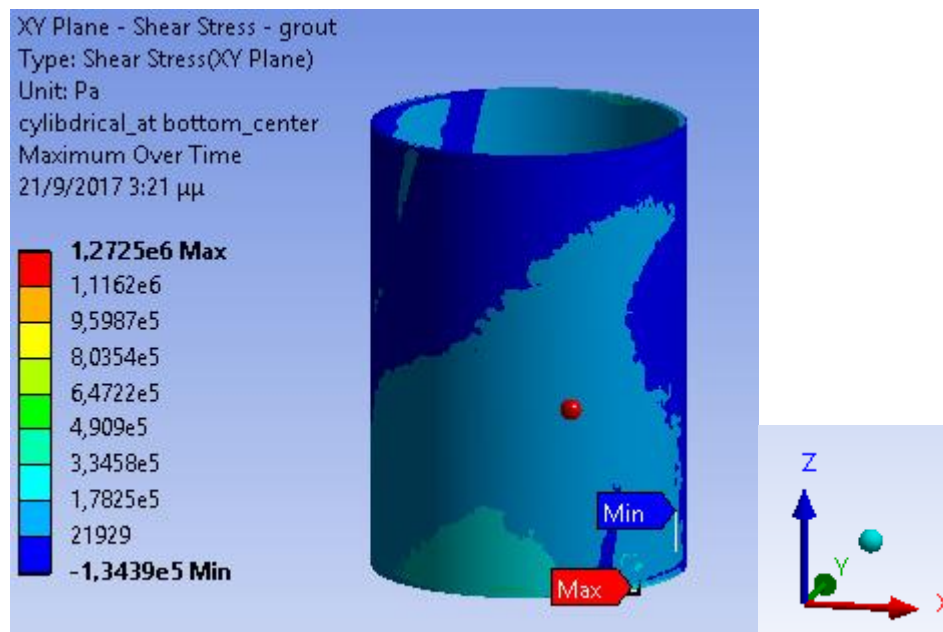
Η μέγιστη παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση x προκύπτει 0,0094 m και στη διεύθυνση z 0,0007 m.



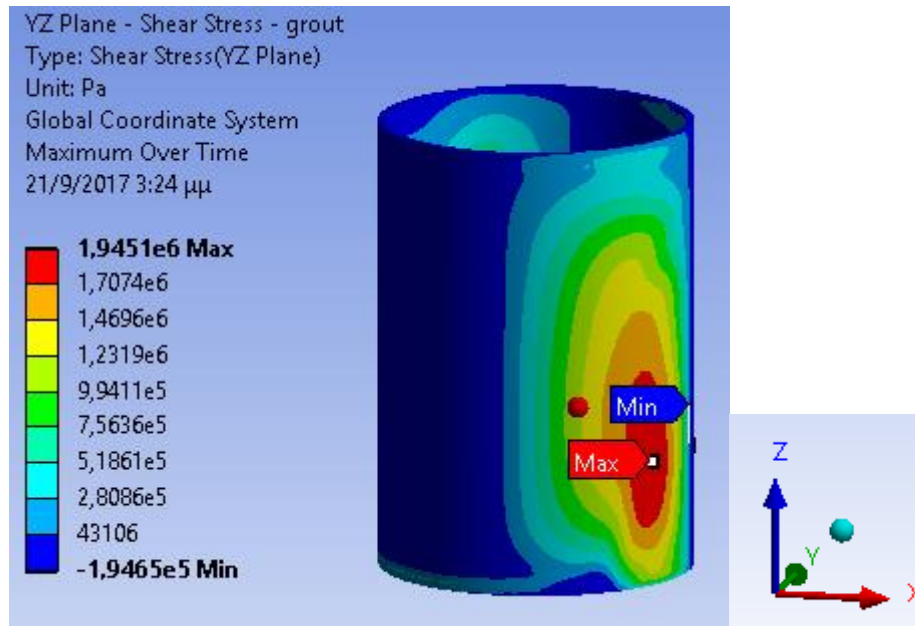
σχήμα 45: normal stress στον άξονα x



σχήμα 46: normal stress στον άξονα y



σχήμα 47: shear stress στο επίπεδο xy στο grout



σχήμα 48: shear stress στο επίπεδο yz στο grout

16. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Το μέγιστο άνοιγμα δ_H από τους αναλυτικούς που περιγράφονται στο κεφάλαιο 12: $\delta_H = 3(\delta_p + \delta_{TP})$ υπολογίζεται σε 0,009 m και συμφωνεί με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση στο λογισμικό: $\delta=0,0094$ m.

17. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση τα αποτελέσματα όπως αυτά παραθέτονται στο κεφάλαιο 15.6 προκύπτει ότι το grout αστοχεί λόγω ανεπαρκούς εφελκυστικής ικανότητας όπως υποδεικνύει το κριτήριο μέγιστης κύριας τάσης. Οι περιοχές της αστοχίας εστιάζονται σε δύο αντιδιαμετρικές περιοχές στην κορυφή και στη βάση της σύνδεσης δηλωτικές του ζεύγους δυνάμεων που δρά στον φορέα, μιας πλέον καμπτικής απόκρισης. Στις περιοχές αυτές λόγω συγκέντρωσης τάσεων αναμένεται θραύση του grout. Στις αντίθετες περιοχές, εκεί όπου η συγκέντρωση τάσεων είναι χαμηλή, δημιουργείται κενό μεταξύ του χάλυβα και του grout. Ο χάλυβας φαίνεται να επαρκεί σύμφωνα με το κριτήριο της ισοδύναμης τάσης. Προτείνεται η ενίσχυση του υλικού του grout με ίνες γυαλιού ή η χρήση άλλου βελτιωμένου σύνθετου υλικού προκειμένου να αυξηθεί η εφελκυστική αντοχή του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) <https://el.wikipedia.org/wiki/>
- 2) <http://www.slideshare.net/kiriakospachos1/2-16521280>
- 3) http://newtech-pub.com/wp-content/uploads/2013/12/013-032-Kefalaio1_anemogennhtries.pdf
- 4) <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/operating-principle.html>
- 5) Structural mechanics for design of grouted connections in monopole wind turbine structures, DNV, Norway
- 6) Michailides, C, Gao, Z, and Moan, T (2016), 'Experimental Study of the Functionality of a Semisubmersible Wind Turbine Combined with Flap-Type Wave Energy Converters', *Renewable Energy*, 93, 675-690.
- 7) courses.arch.ntua.gr
- 8) <http://www.elzoni.gr/>
- 9) Κασιός Α., Χαϊντίνης Χ., 2013, 'Τεχνολογία και ανάπτυξη παράκτιων αιολικών πάρκων και τρόποι διασύνδεσής τους με το δίκτυο της ΔΕΗ'
- 10) Lotsberg, I (2013). 'Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures', *Marine Structures*, 32, 115-132.
- 11) courses.arch.ntua.gr/fsr/132188/kefalaio8.pdf
- 12) nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/mhx/2014
- 13) https://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/.../birdasm_wind.pdf
- 14) Baniotopoulos C.C., Lavassas I., Nikolaidis G., Zervas P., 2011, 'Topics on the design of tubular steel turbine towers', Institute of metal structures, Aristotle university
- 15) S. Anders, L. Lohaus, 2008, 'Optimized High-Performance Concrete in Grouted Connections', Taylor and Francis Group
- 16) Nielsen, LP (2007). "Finite Element Analysis of Large Diameter Grouted Connections," Proc. of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2007-29199), San Diego, California, USA.
- 17) Dedic, N (2009). "Analysis of Grouted Connections in Monopile wind Turbin Foundations Subjected to Horizontal Load Transfer," Research Report, Aalborg University.

- 18) Densit.gr
- 19) www.ansys.com
- 20) Cost, 2015, Grouted connections on offshore wind turbines
- 21) <http://www.failurecriteria.com/misescriteriontr.html>
- 22) Mechanical apdl contact technology guide
- 23) Ansys customer training material
- 24) https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_sim/ds_contact_theory.html
- 25) <http://www.eng-tips.com>
- 26) Niaxin Ren, Zhen Gao, Torgeir Moan and Ling Wan, 2015, 'Long –term performance of the Spar-Torus-Combination (STC) system with different survival modes'
- 27) <http://www.4coffshore.com>
- 28) <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/operating-principle.html>
- 29) http://users.sch.gr/imarinakis/aeolian_energy.htm
- 30) Μαλαξιανάκης Αντώνης, 2014, 'Τεχνολογία πυλώνων παράκτιων ανεμογεννητριών' σελ.20
- 31) Ganga Prakha, Chen Zhang and neil Harding, 2012, 'Grouted connections for monopiles-limits for large wind turbines, 30-44
- 32) Theotokoglou, EE, and Turlomousis, 2010, 'Crack Kinking in Sandwich Structures under Three Point Bending', Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 53, 158-164.
- 33) Andersen S.Morten, Petersen P ,2004, 'Structural design of grouted connection in offshore steel monopile foundations,' Proc. of the Global Wind Power Conference (Det Norske Veritas (ed)), 1-13, Roskilde, DK.

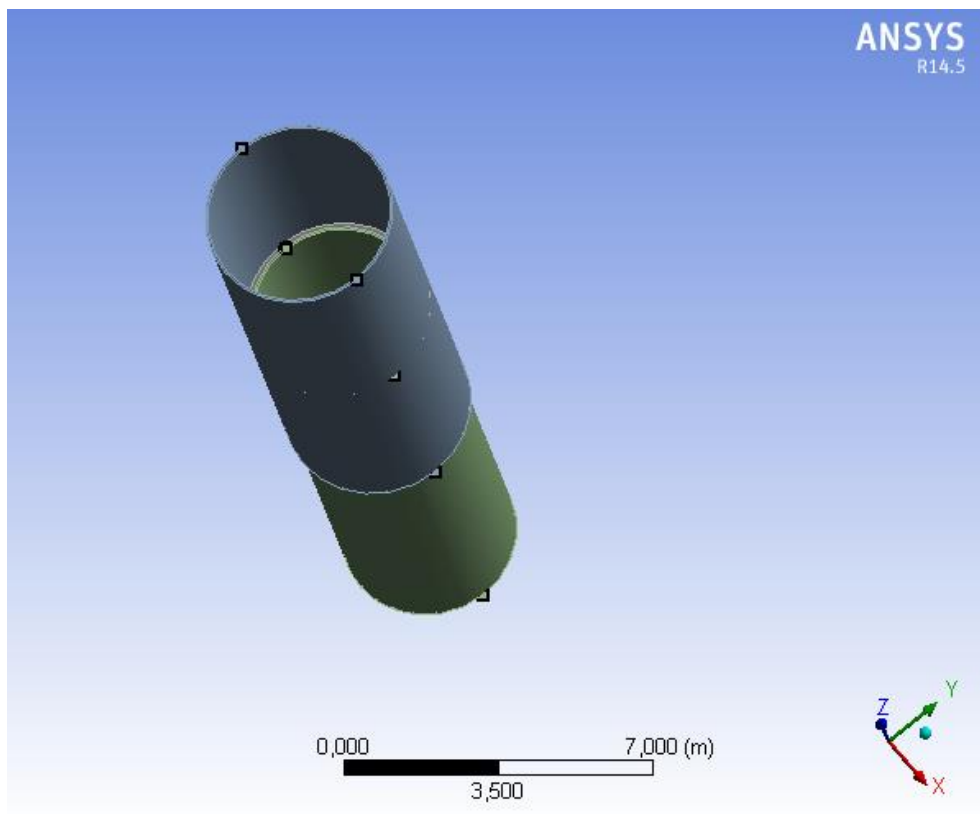
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ακολούθως δίνεται των τεύχος παραμέτρων επίλυσης και υπολογισμών του λογισμικού.



Project

First Saved	Sunday, June 11, 2017
Last Saved	Sunday, October 8, 2017
Product Version	14.5 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
- [Model \(I4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Parts](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Connections](#)
 - [Contacts](#)
 - [Contact Regions](#)
 - [Contact Tool](#)
 - [Results](#)
 - [Initial Information](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Mesh](#)
 - [Refinement](#)
 - [Named Selections](#)
 - [Static Structural \(I5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(I6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Number Contacting](#)
 - [Results](#)
 - [Stress Tool_MAX EQUIVALENT STRESS](#)
 - [Safety Factor](#)
 - [Contact Tool](#)
 - [Results](#)
 - [Probes](#)
- [Material Data](#)
 - [Concrete](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (I4)

Model (I4) > Comment

Put Comment Here.

Geometry

TABLE 2
Model (I4) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\gpapa\Desktop\11_6_17_files\dp0\SYS-13\DM\SYS-13.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	4,3 m
Length Y	4,2937 m
Length Z	20, m
Properties	
Volume	24,38 m ³
Mass	1,5198e+005 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	3
Active Bodies	3
Nodes	502115
Elements	99849
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	

Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\gpapa\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (I4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>grout</i>	<i>sleeve</i>	<i>monopile</i>
State	Meshed		
Graphics Properties			
Visible	Yes		
Transparency	1		
Definition			
Suppressed	No		

Stiffness Behavior	Flexible		
Coordinate System	Default Coordinate System		
Reference Temperature	By Environment		
Material			
Assignment	Ducorit	Structural Steel	
Nonlinear Effects	Yes		
Thermal Strain Effects	Yes		
Bounding Box			
Length X	4,2 m	4,3 m	4, m
Length Y	4,2 m	4,2937 m	3,9708 m
Length Z	6, m	12, m	14, m
Properties			
Volume	7,7108 m ³	8,0662 m ³	8,6035 m ³
Mass	21128 kg	63320 kg	67537 kg
Centroid X	950,63 m	950,62 m	950,63 m
Centroid Y	909,85 m		
Centroid Z	11, m	14,004 m	7, m
Moment of Inertia Ip1	1,0757e+005 kg·m ²	9,0093e+005 kg·m ²	1,2335e+006 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	1,0758e+005 kg·m ²	9,0172e+005 kg·m ²	1,2335e+006 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	88381 kg·m ²	2,8363e+005 kg·m ²	2,6093e+005 kg·m ²
Statistics			
Nodes	78043	204408	219664
Elements	38641	29624	31584
Mesh Metric	None		

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (I4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>	<i>cylindrical_at bottom_center</i>
State	Fully Defined	
Definition		
Type	Cartesian	Cylindrical
Coordinate System ID	0,	
Coordinate System		Program Controlled
Origin		
Origin X	0, m	950,63 m
Origin Y	0, m	909,85 m
Origin Z	0, m	
Define By		Global Coordinates
Location		Defined
Directional Vectors		
X Axis Data	[1, 0, 0,]	
Y Axis Data	[0, 1, 0,]	
Z Axis Data	[0, 0, 1,]	
Principal Axis		
Axis		X
Define By		Global X Axis
Orientation About Principal Axis		
Axis		Y
Define By		Default
Transformations		

Base Configuration		Absolute
Transformed Configuration		[950,63 909,85 0,]

Connections

TABLE 5
Model (I4) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\gpapa\Desktop\11_6_17_files\dp0\global\MECH\SYS-13>Contact Tool\

TABLE 6
Model (I4) > Connections > Contacts

Object Name	<i>Contacts</i>
State	Fully Defined
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0,

Tolerance Value	5,2257e-002 m
Use Range	No
Face/Face	Yes
Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies

TABLE 7
Model (I4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	<i>Frictional - grout To monopile</i>	<i>Frictional - grout To sleeve</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Contact	1 Face	
Target	1 Face	
Contact Bodies	grout	
Target Bodies	monopile	sleeve
Definition		
Type	Frictional	
Friction Coefficient	0,6	
Scope Mode	Manual	
Behavior	Asymmetric	
Trim Contact	Program Controlled	
Suppressed	No	
Advanced		

Formulation	Augmented Lagrange	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled	
Penetration Tolerance	Program Controlled	
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled	
Interface Treatment	Adjust to Touch	
Normal Stiffness	Manual	
Normal Stiffness Factor	0,1	
Update Stiffness	Each Iteration	
Stabilization Damping Factor	0,	
Pinball Region	Program Controlled	
Time Step Controls	None	

TABLE 8
Model (I4) > Connections > Contact Tools

Object Name	<i>Contact Tool</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Worksheet

Model (I4) > Connections > Contact Tool

Name	Contact Side
Frictional - grout To monopile	Both
Frictional - grout To sleeve	Both

TABLE 9
Model (I4) > Connections > Contact Tool > Results

Object Name	<i>Penetration</i>	<i>Gap</i>	<i>Status</i>
State	Solved		
Definition			

Type	Penetration	Gap	Status
Identifier			
Suppressed	No		
Integration Point Results			
Display Option	Averaged		
Results			
Minimum	0, m	-2,5103e-007 m	
Maximum	3,4911e-013 m	0, m	
Minimum Occurs On	grout		
Maximum Occurs On	grout		
Information			
Time	0, s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		

TABLE 10
Model (I4) > Connections > Contact Tool > Contact Data Tables

Object Name	<i>Initial Information</i>
State	Solved

Model (I4) > Connections > Contact Tool > Initial Information

Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (m)	Gap (m)	Geometric Penetration (m)	Geometric Gap (m)	Resulting Pinball (m)	Real Constant
Frictional - grout To monopile	Contact	Frictional	Closed	10786	7,328e-013	0,	2,8776e-007	3,7036e-012	9,6173e-002	4,
Frictional -	Target	Friction	Inactiv	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,

grout To monopile		al	e							
Frictional - grout To sleeve	Contact	Frictional	Closed	6310,	7,3025e- 013	0,	1,1532e- 007	2,7289e- 012	9,7519e- 002	6,
Frictional - grout To sleeve	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,

TABLE 11
Model (I4) > Connections > Contact Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Update Interval	2,5 s

Mesh

TABLE 12
Model (I4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly

Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	12,2520 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Shape Checking	Aggressive Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No

Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	502115
Elements	99849
Mesh Metric	None

TABLE 13
Model (I4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	<i>Refinement</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
Suppressed	No
Refinement	2

Named Selections

TABLE 14
Model (I4) > Named Selections > Named Selections

Object Name	<i>monopile_bottom_corner_node</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Node
Definition	
Send to Solver	Yes

Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Exclude
Statistics	
Type	Manual
Total Selection	1 Node
Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No

Static Structural (15)

TABLE 15
Model (I4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (15)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 16
Model (I4) > Static Structural (15) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	1,

Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	5,
Minimum Substeps	5,
Maximum Substeps	5,
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No

Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Max Number of Result Sets	Program Controlled
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\gpapa\Desktop\11_6_17_files\dp0\SYS-13\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

TABLE 17
Model (I4) > Static Structural (I5) > Analysis Settings
Step-Specific "Step Controls"

Step	Step End Time	Auto Time Stepping	Define By	Initial Substeps	Minimum Substeps	Maximum Substeps
1	1, s	On	Substeps	5,	5,	5,
2	2, s	Program Controlled				

TABLE 18
Model (I4) > Static Structural (I5) > Analysis Settings
Step-Specific "Output Controls"

Step	Max Number of Result Sets
1	Program Controlled
2	1000,

TABLE 19
Model (I4) > Static Structural (I5) > Loads

Object Name	<i>Fixed Support</i>	<i>vertical_limitation_top</i>	<i>Remote Force_top</i>	<i>Remote Force_bottom</i>	<i>Remote Force aksonikh</i>
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	1 Face	2 Faces	1 Face		
Coordinate System	Global Coordinate System				
X Coordinate			952,78 m	948,48 m	950,63 m
Y Coordinate			909,85 m		
Z Coordinate			14, m	8, m	20, m
Location	Defined				
Definition					
Type	Fixed Support	Displacement	Remote Force		
Suppressed	No				
Define By	Components				
Coordinate System	Global Coordinate System				
X Component	Free		Tabular Data	0, N (ramped)	
Y Component	Free		0, N (ramped)		
Z Component	0, m (ramped)		0, N (ramped)	Tabular Data	
Behavior	Deformable				
Advanced					
Pinball Region	All				

FIGURE 1
Model (I4) > Static Structural (I5) > vertical_limitation_top

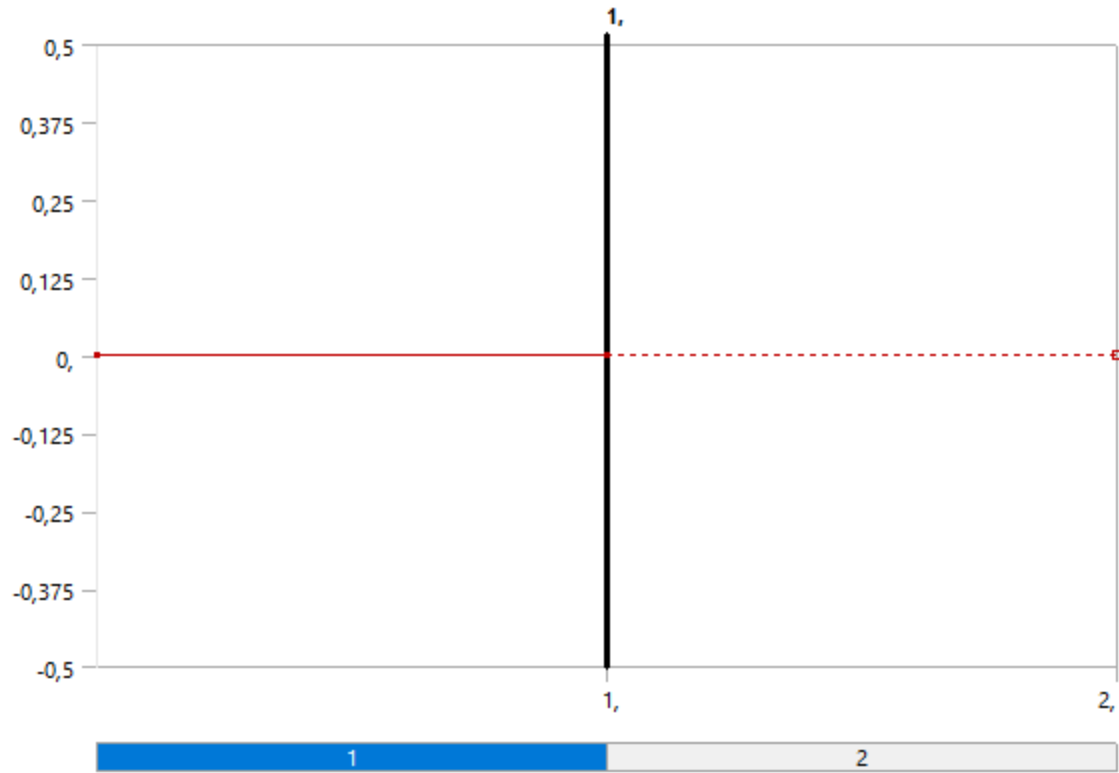


FIGURE 2
Model (I4) > Static Structural (I5) > Remote Force_top

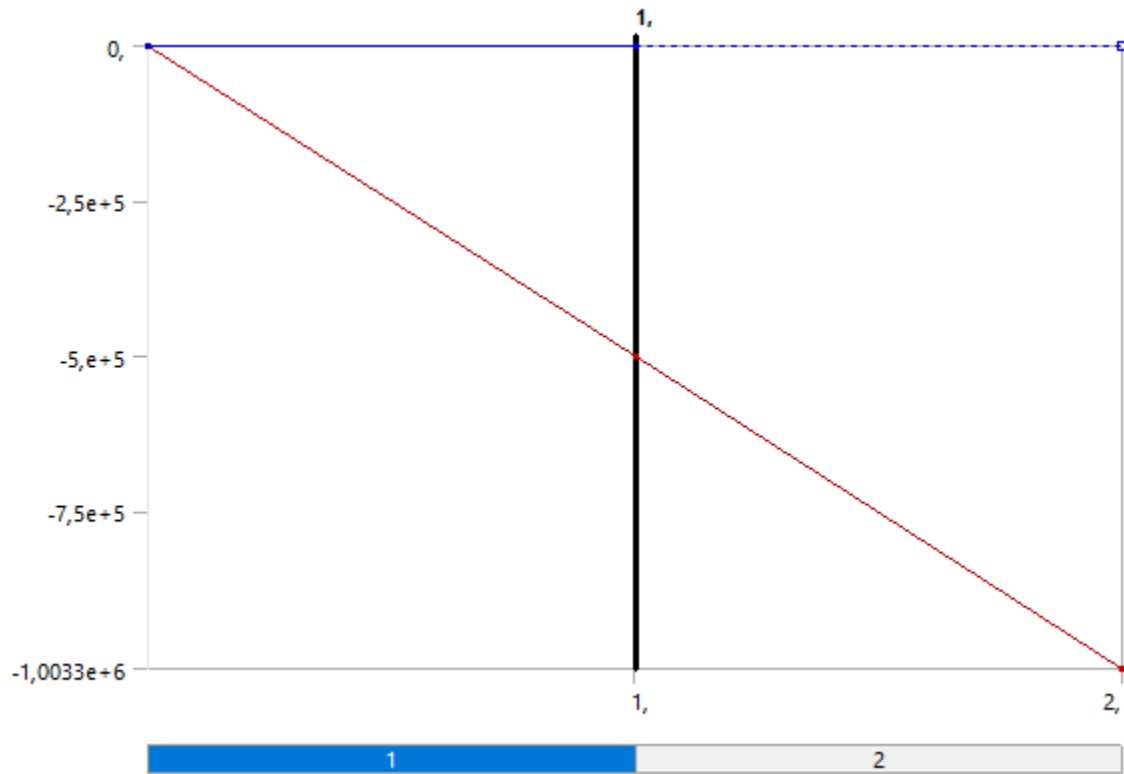


TABLE 20
Model (I4) > Static Structural (I5) > Remote Force_top

Steps	Time [s]	X [N]	Y [N]	Z [N]
1	0,	0,	0,	0,
	1,	-5,0161e+005		
2	2,	-1,0033e+006	= 0,	= 0,

FIGURE 3
Model (I4) > Static Structural (I5) > Remote Force_bottom

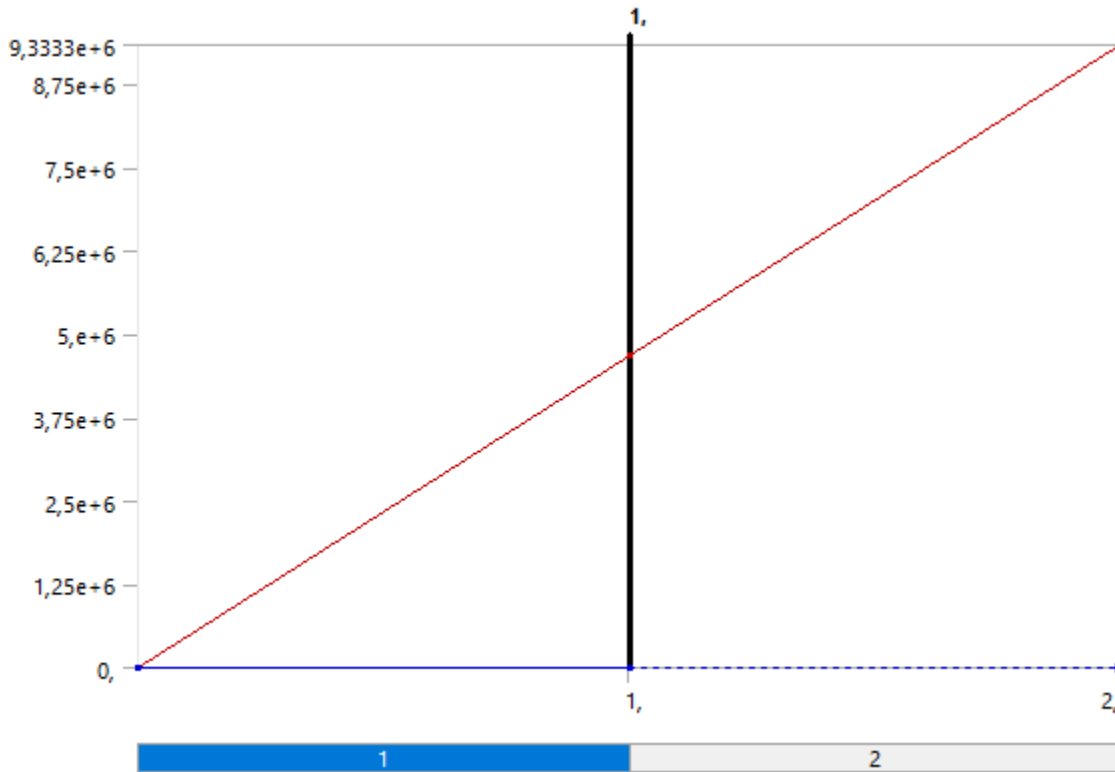


TABLE 21
Model (I4) > Static Structural (I5) > Remote Force_bottom

Steps	Time [s]	X [N]	Y [N]	Z [N]
1	0,	0,	0,	0,
	1,	4,6667e+006		
2	2,	9,3333e+006	= 0,	= 0,

FIGURE 4
Model (I4) > Static Structural (I5) > Remote Force aksonikh



TABLE 22
Model (I4) > Static Structural (I5) > Remote Force aksionikh

Steps	Time [s]	X [N]	Y [N]	Z [N]
1	0,	0,	0,	0,
	1,			-3,e+006
2	2,	= 0,	= 0,	-6,e+006

Solution (I6)

TABLE 23
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution

Object Name	<i>Solution (I6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

Information	
Status	Done

TABLE 24
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	4
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 25
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Solution Information > Result Charts

Object Name	<i>Number Contacting</i>
State	Solved
Definition	
Type	Number Contacting
Suppressed	No

Scope	
Contact Region	Frictional - grout To sleeve
Results	
Minimum	10098
Maximum	10121

FIGURE 5
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Solution Information > Number Contacting

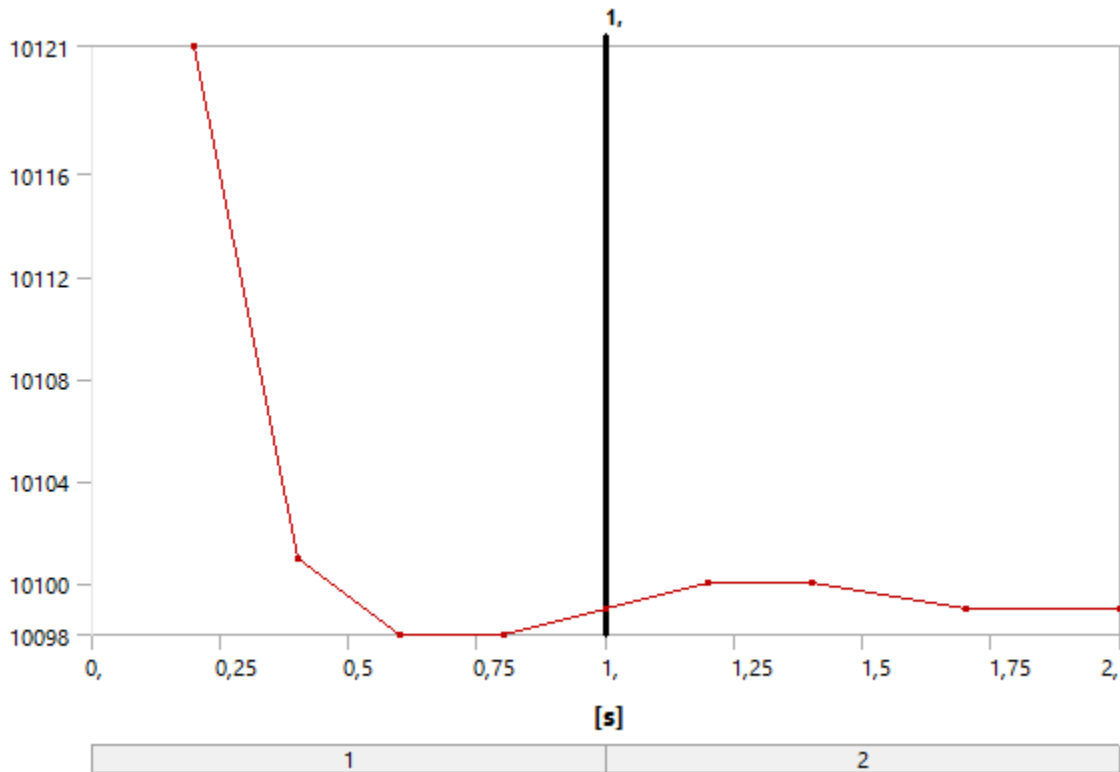


TABLE 26
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Results

Object Name	Normal Stress <i>x axis</i>	XY Plane - Shear Stress - grout	Normal Stress <i>y axis</i>	YZ Plane - Shear Stress - grout	Equivalent Stress
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				

Geometry	1 Body				All Bodies
Definition					
Type	Normal Stress	Shear Stress	Normal Stress	Shear Stress	Equivalent (von-Mises) Stress
Orientation	X Axis	XY Plane	Y Axis	YZ Plane	
By	Maximum Over Time				Time
Coordinate System	cylindrical_at bottom_center		Global Coordinate System		
Identifier					
Suppressed	No				
Display Time					Last
Calculate Time History					Yes
Integration Point Results					
Display Option	Averaged				
Results					
Minimum	-3,7513e+005 Pa	-1,3439e+005 Pa	-7,8498e+005 Pa	-1,9465e+005 Pa	59844 Pa
Maximum	88099 Pa	1,2725e+006 Pa	9,8845e+006 Pa	1,9451e+006 Pa	1,1766e+008 Pa
Minimum Occurs On					monopile
Maximum Occurs On					monopile
Minimum Value Over Time					
Minimum					7896,3 Pa
Maximum					59844 Pa
Maximum Value Over Time					
Minimum					1,1778e+007 Pa

Maximum		1,1766e+008 Pa
Information		
Time		2, s
Load Step		2
Substep		4
Iteration Number		15

FIGURE 6
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Equivalent Stress

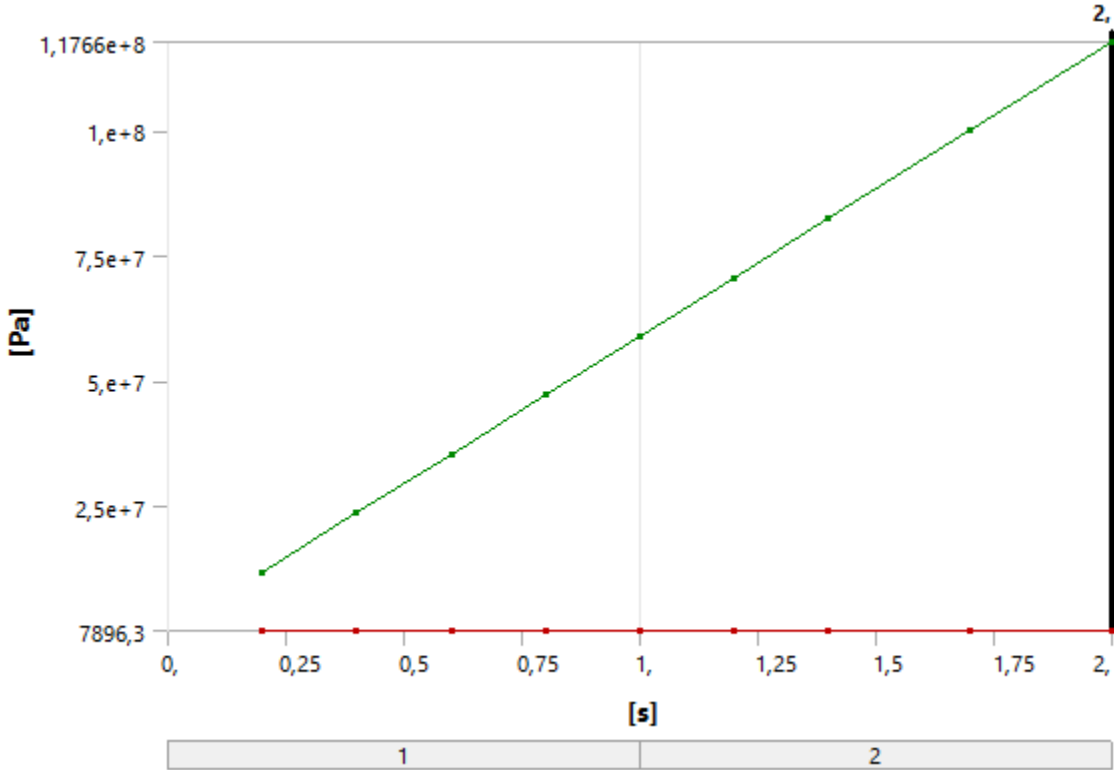


TABLE 27
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,2	7896,3	1,1778e+007
0,4	12627	2,3551e+007
0,6	16827	3,5322e+007

0,8	22220	4,7092e+007
1,	28193	5,8859e+007
1,2	34586	7,0622e+007
1,4	40510	8,2385e+007
1,7	50081	1,0002e+008
2,	59844	1,1766e+008

TABLE 28
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Results

Object Name	<i>Maximum Principal Stress</i>	<i>Maximum Shear Stress</i>
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Body	
Definition		
Type	Maximum Principal Stress	Maximum Shear Stress
By	Maximum Over Time	
Identifier		
Suppressed	No	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Results		
Minimum	-45165 Pa	81829 Pa
Maximum	1,3479e+007 Pa	7,1488e+006 Pa

TABLE 29
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Stress Safety Tools

Object Name	<i>Stress Tool_MAX EQUIVALENT STRESS</i>
-------------	--

State	Solved
Definition	
Theory	Max Equivalent Stress
Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material

TABLE 30
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Stress Tool_MAX EQUIVALENT STRESS > Results

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Results	
Minimum	0,34206
Minimum Value Over Time	
Minimum	0,34206
Maximum	3,4217

Maximum Value Over Time	
Minimum	15,
Maximum	15,
Information	
Time	2, s
Load Step	2
Substep	4
Iteration Number	15

FIGURE 7
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Stress Tool_MAX EQUIVALENT STRESS > Safety Factor

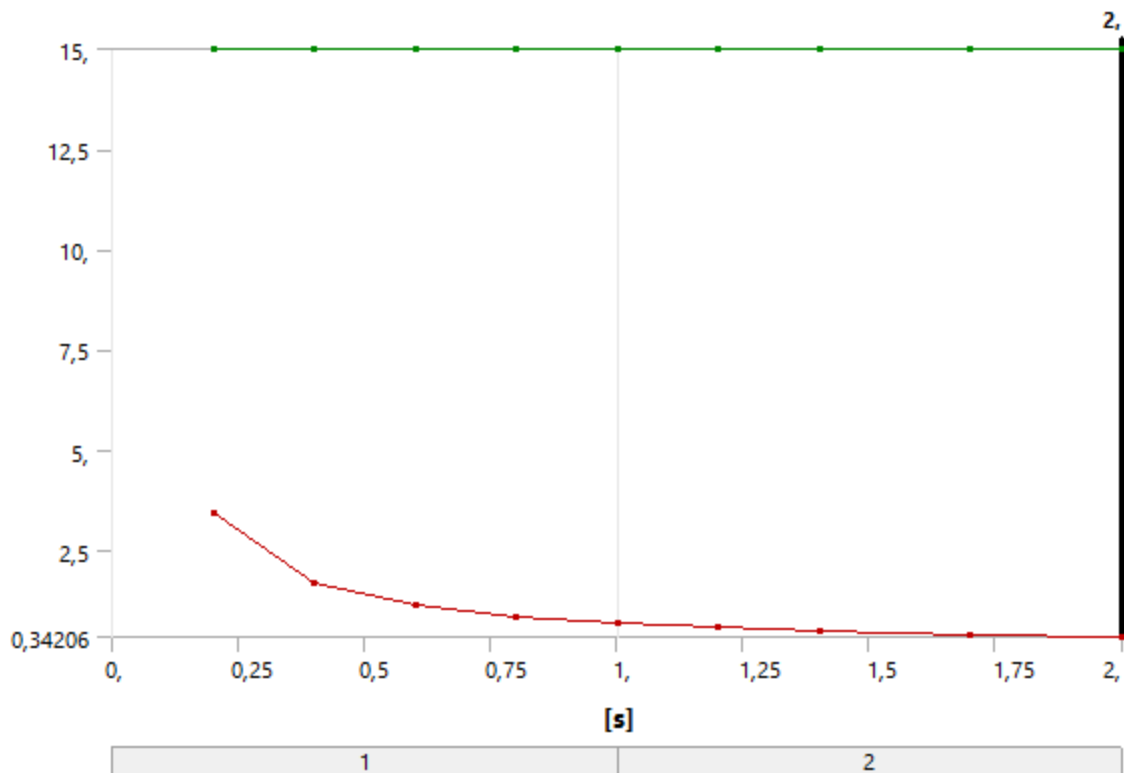


TABLE 31
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Stress Tool_MAX EQUIVALENT STRESS > Safety Factor

Time [s]	Minimum	Maximum
0,1	~3,5	15
0,25	~2,5	15
0,5	~1,8	15
0,75	~1,4	15
1,0	~1,1	15
1,25	~0,9	15
1,5	~0,8	15
1,75	~0,7	15
2,0	0,34206	15

0,2	3,4217	15,
0,4	1,711	
0,6	1,1406	
0,8	0,8554	
1,	0,6843	
1,2	0,5703	
1,4	0,48874	
1,7	0,40246	
2,	0,34206	

TABLE 32
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tools

Object Name	<i>Contact Tool</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Worksheet

Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool

Name	Contact Side
Frictional - grout To monopile	Contact
Frictional - grout To sleeve	Contact

TABLE 33
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Results

Object Name	<i>Status</i>	<i>Gap</i>	<i>Penetration</i>	<i>Pressure</i>
State	Solved			
Definition				
Type	Status	Gap	Penetration	Pressure
By	Time			

Display Time	Last		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Suppressed	No		
Integration Point Results			
Display Option	Averaged		
Information			
Time	2, s		
Load Step	2		
Substep	4		
Iteration Number	15		
Results			
Minimum	-2,7504e-003 m	0, m	0, Pa
Maximum	0, m	1,1461e-004 m	3,517e+006 Pa
Minimum Value Over Time			
Minimum	-2,7504e-003 m	0, m	0, Pa
Maximum	-2,7535e-004 m	0, m	0, Pa
Maximum Value Over Time			
Minimum	0, m	1,1449e-005 m	3,5135e+005 Pa
Maximum	0, m	1,1461e-004 m	3,517e+006 Pa

FIGURE 8
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Status

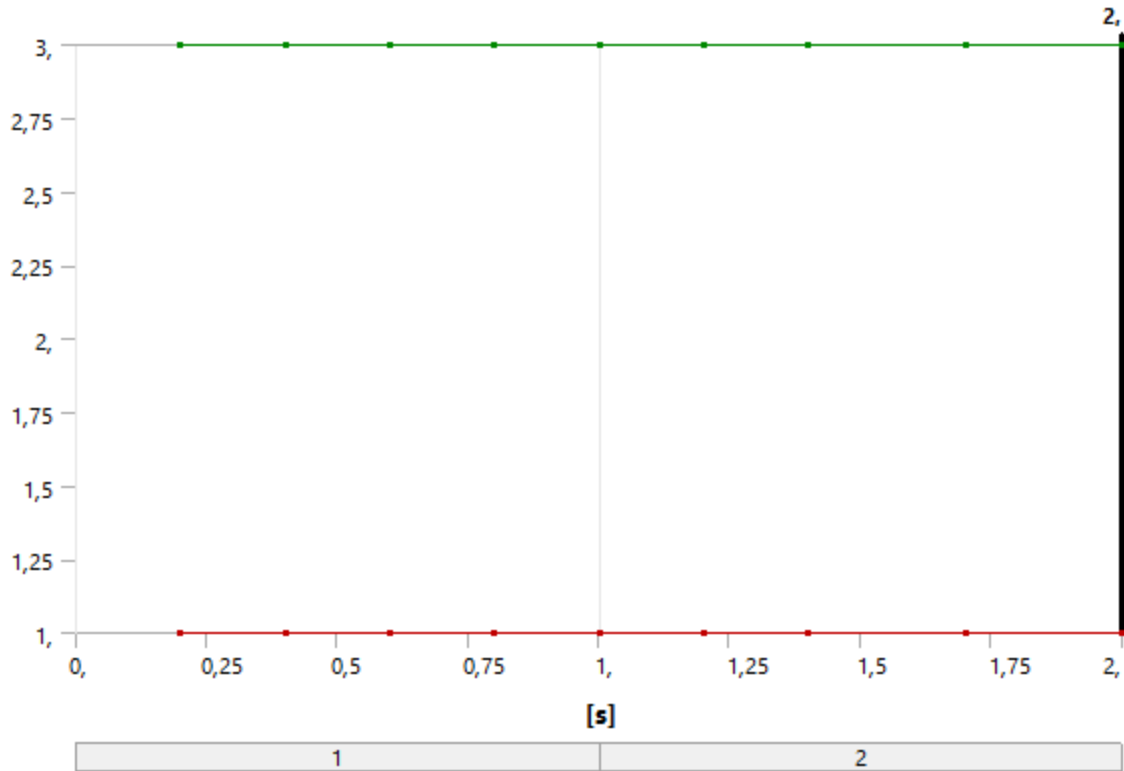


TABLE 34
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Status

Time [s]	Minimum	Maximum
0,2	1,	3,
0,4		
0,6		
0,8		
1,		
1,2		
1,4		
1,7		
2,		

FIGURE 9
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Gap

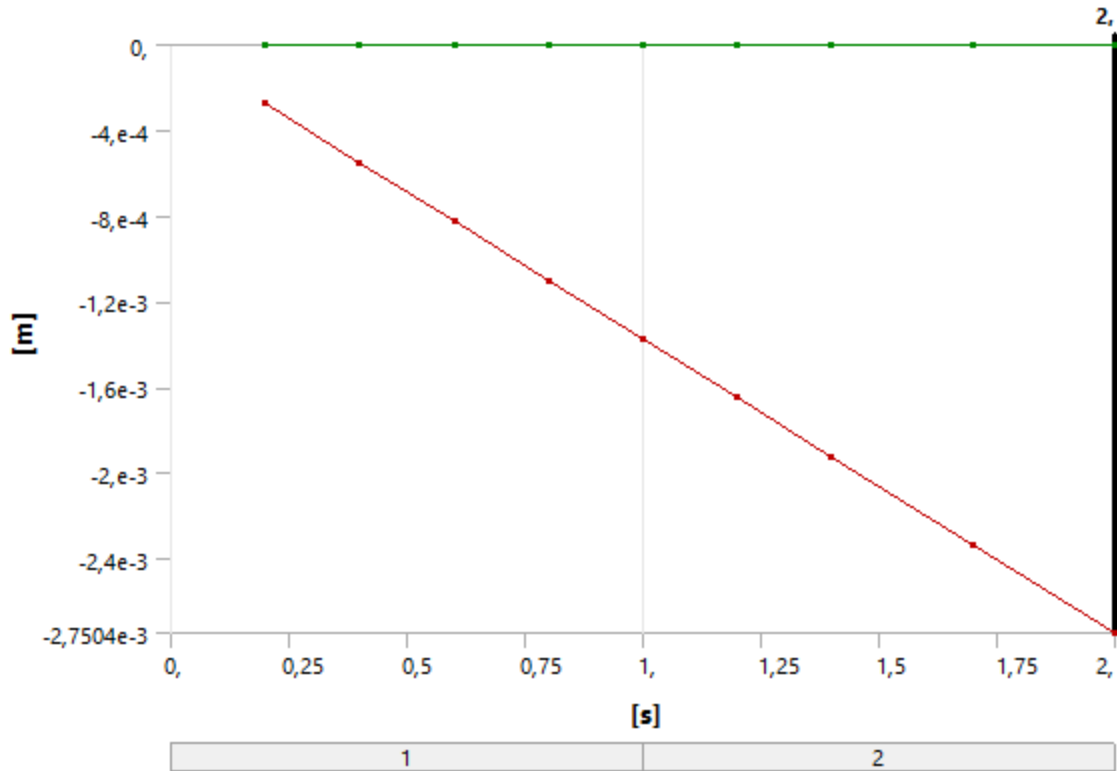


TABLE 35
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Gap

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,2	-2,7535e-004	0,
0,4	-5,5054e-004	
0,6	-8,257e-004	
0,8	-1,1008e-003	
1,0	-1,3759e-003	
1,2	-1,651e-003	
1,4	-1,926e-003	
1,7	-2,3384e-003	
2,0	-2,7504e-003	

FIGURE 10
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Penetration

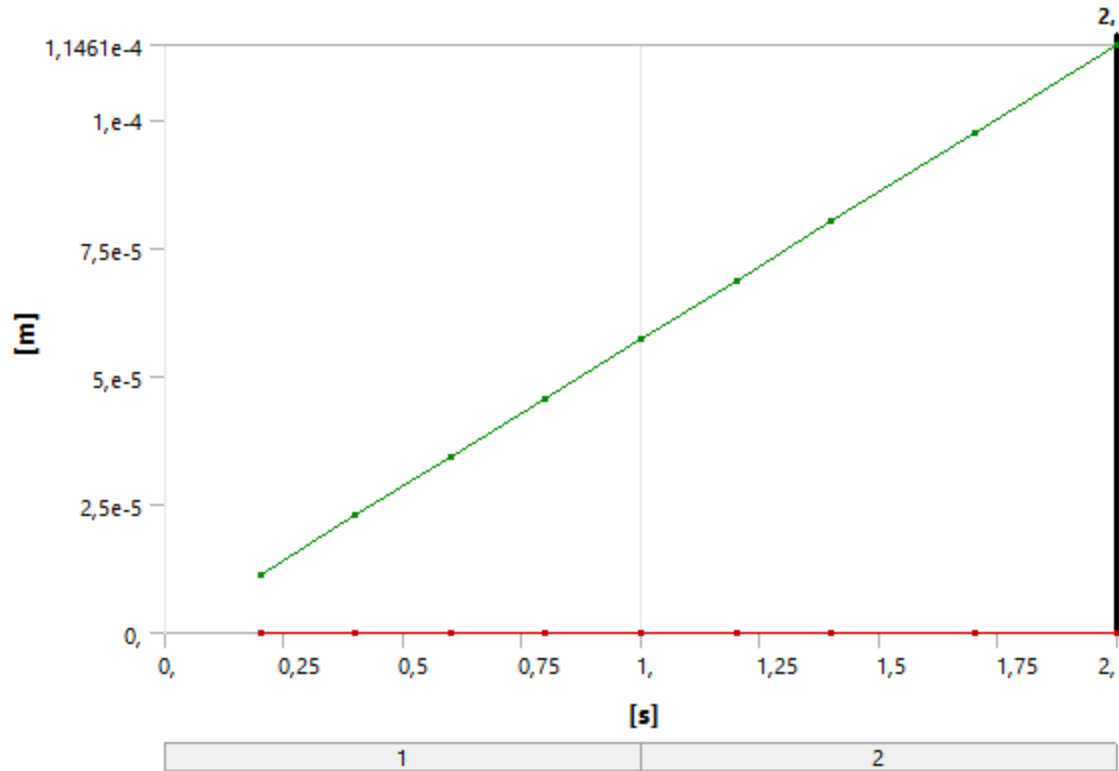


TABLE 36
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Penetration

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,2	0,	1,1449e-005
0,4		2,2895e-005
0,6		3,4344e-005
0,8		4,5798e-005
1,0		5,7256e-005
1,2		6,8741e-005
1,4		8,0184e-005
1,7		9,7394e-005
2,0		1,1461e-004

FIGURE 11
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Pressure

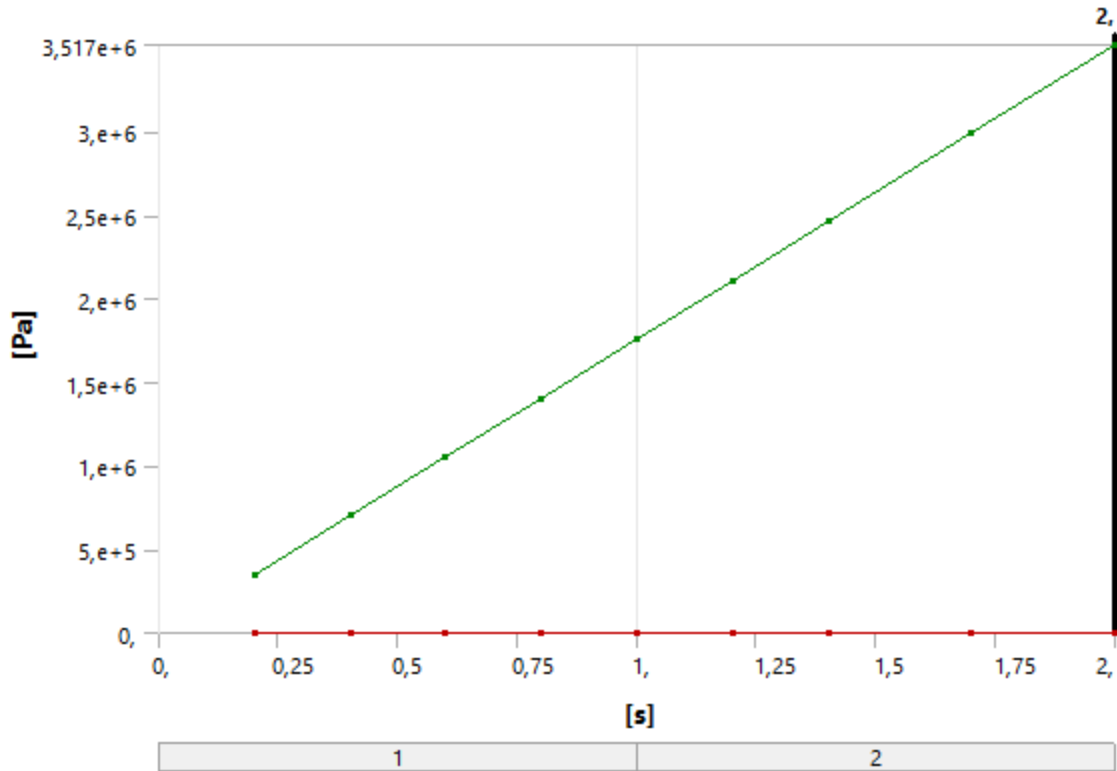


TABLE 37
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Contact Tool > Pressure

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,2		3,5135e+005
0,4		7,026e+005
0,6		1,0539e+006
0,8		1,4054e+006
1,0	0,	1,757e+006
1,2		2,1095e+006
1,4		2,4607e+006
1,7		2,9888e+006
2,0		3,517e+006

TABLE 38
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Probes

Object Name	<i>Deformation Probe_x</i>	<i>Deformation Probe_z</i>
State	Solved	
Definition		
Type	Deformation	
Location Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Body	
Orientation	Global Coordinate System	
Suppressed	No	
Options		
Result Selection	X Axis	Z Axis
Display Time	End Time	
Spatial Resolution	Use Maximum	
Results		
X Axis	9,4377e-003 m	
Z Axis		7,0266e-004 m
Maximum Value Over Time		
X Axis	9,4377e-003 m	
Z Axis		7,0266e-004 m
Minimum Value Over Time		
X Axis	9,4582e-004 m	
Z Axis		7,0187e-005 m
Information		
Time	2, s	
Load Step	2	
Substep	4	

Iteration Number	15
------------------	----

FIGURE 12
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Deformation Probe_x

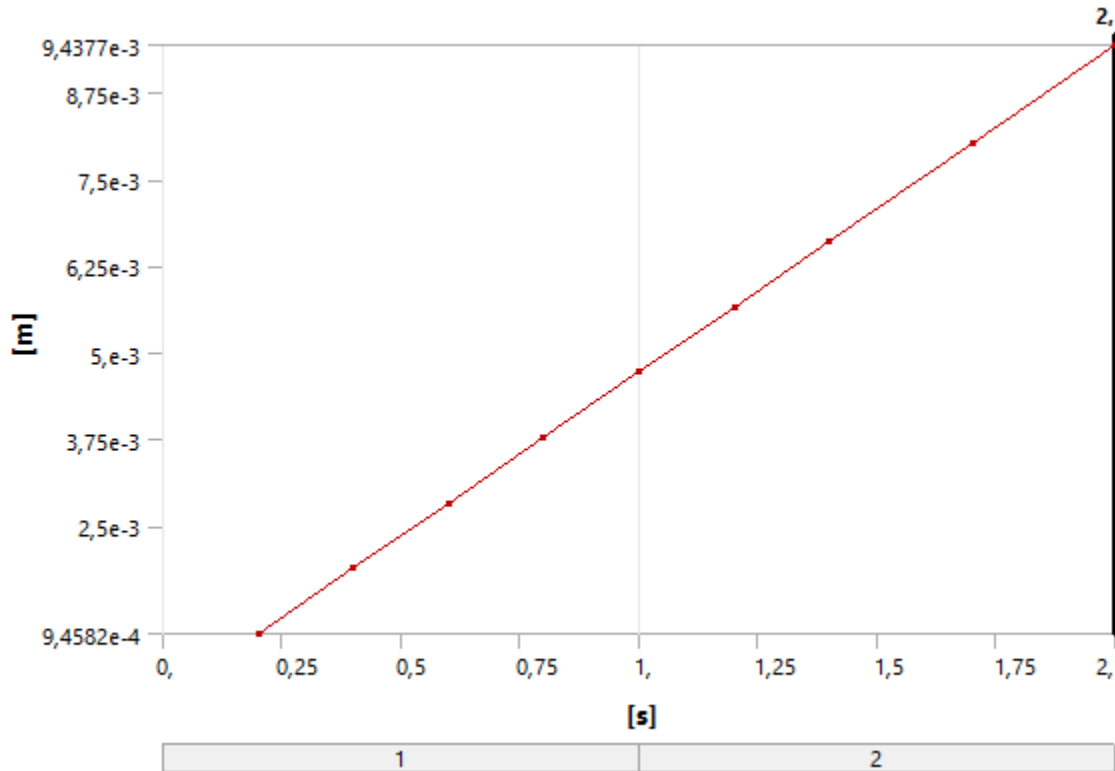


TABLE 39
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Deformation Probe_x

Time [s]	Deformation Probe_x (X) [m]
0,2	9,4582e-004
0,4	1,891e-003
0,6	2,8357e-003
0,8	3,7801e-003
1,0	4,7241e-003
1,2	5,6677e-003
1,4	6,6108e-003
1,7	8,0248e-003

2,	9,4377e-003
----	-------------

FIGURE 13
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Deformation Probe_z

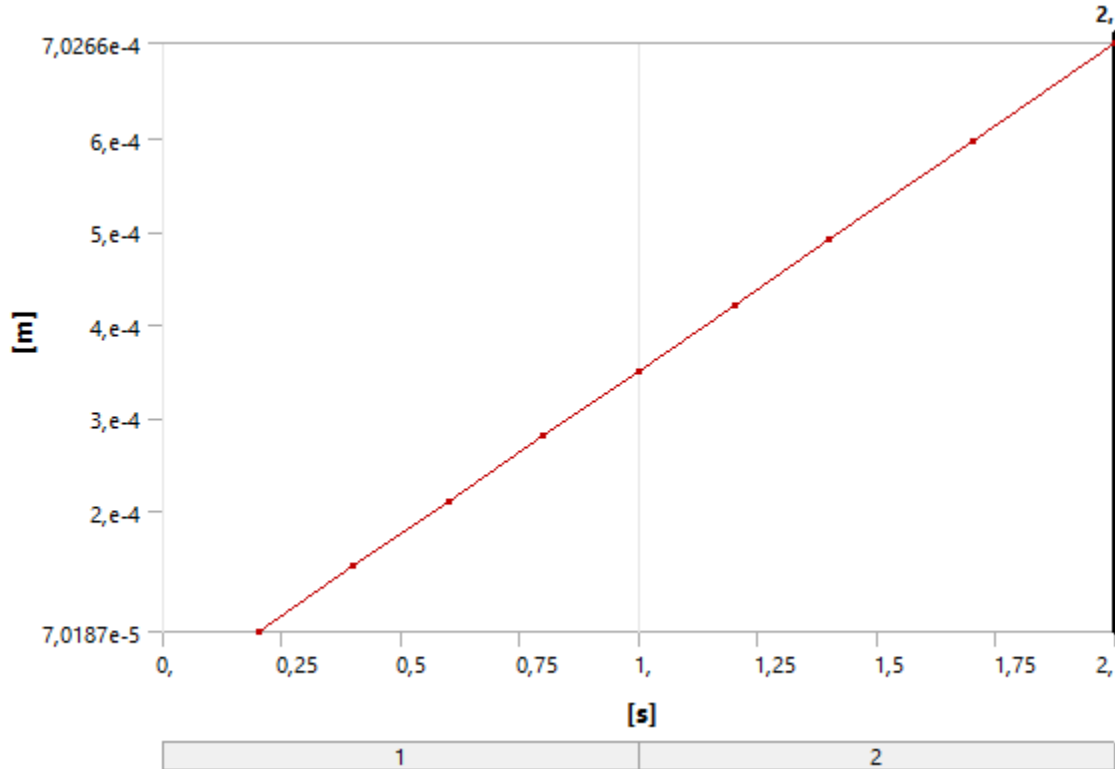


TABLE 40
Model (I4) > Static Structural (I5) > Solution (I6) > Deformation Probe_z

Time [s]	Deformation Probe_z (Z) [m]
0,2	7,0187e-005
0,4	1,4036e-004
0,6	2,1052e-004
0,8	2,8071e-004
1,	3,509e-004
1,2	4,2109e-004
1,4	4,9134e-004
1,7	5,9688e-004

2,	7,0266e-004
----	-------------

Material Data

Concrete

TABLE 41
Concrete > Constants

Density	2740, kg m ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,4e-005 C ⁻¹
Specific Heat	780, J kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	0,72 W m ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 42
Concrete > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength Pa
1,975e+008

TABLE 43
Concrete > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength Pa
1,975e+008

TABLE 44
Concrete > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength Pa
4,4e+006

TABLE 45
Concrete > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength Pa
4,4e+006

TABLE 46
Concrete > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C

22,

TABLE 47
Concrete > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	7,e+010	0,19	3,7634e+010	2,9412e+010

Structural Steel

TABLE 48
Structural Steel > Constants

Density	7850, kg m ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	434, J kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	60,5 W m ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-007 ohm m

TABLE 49
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength Pa
3,7e+008

TABLE 50
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength Pa
2,9e+008

TABLE 51
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength Pa
2,91e+008

TABLE 52
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength Pa

3,7e+008

TABLE 53
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22,

TABLE 54
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress Pa	Cycles	Mean Stress Pa
3,999e+009	10,	0,
2,827e+009	20,	0,
1,896e+009	50,	0,
1,413e+009	100,	0,
1,069e+009	200,	0,
4,41e+008	2000,	0,
2,62e+008	10000	0,
2,14e+008	20000	0,
1,38e+008	1,e+005	0,
1,14e+008	2,e+005	0,
8,62e+007	1,e+006	0,

TABLE 55
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient Pa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient Pa	Cyclic Strain Hardening Exponent
9,2e+008	-0,106	0,213	-0,47	1,e+009	0,2

TABLE 56
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2,1e+011	0,3	1,75e+011	8,0769e+010

TABLE 57
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000