



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Στατικής & Αντισεισμικών Ερευνών

Ανάλυση σύνθετης ενεματικής σύνδεσης σε παράκτιες κατασκευές



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Σ. Σμυρνιώτης

Επιβλέπων: **Σπηλιόπουλος Κωνσταντίνος**, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: **Θεοτόκογλου Ευστάθιος**, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2021

Σμυρνιώτης Ν. Σ. (2021)
Ανάλυση σύνθετης ενεματικής σύνδεσης σε παράκτιες κατασκευές
Διπλωματική Εργασία
Εργαστήριο Στατικής & Αντισεισμικών Ερευνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Αθήνα

Smyrniotis N. S. (2021)
Analysis of composite grouted connection in offshore structures
Diploma Thesis
Institute of Static Analysis & Antiseismic Research, National Technical University of
Athens, Greece

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Εισαγωγή.....	7
1. Οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	7
2. Ορισμός ανεμογεννήτριας και ιστορική αναδρομή.....	8
3. Τεχνικά χαρακτηριστικά υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....	12
3.1 Υλικά κατασκευής παράκτιων κατασκευών.....	12
3.2 Τύποι ανεμογεννητριών.....	12
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας και τρόπος λειτουργίας.....	14
3.4 Σύγκριση υπεράκτιας και ενδοχώριας αιολικής ενέργειας.....	15
3.5 Είδη θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....	16
3.5.1 Θεμελιωμένα συστήματα.....	16
3.5.2 Πλωτά συστήματα.....	17
3.5.3 Μονοπάσσαλο σύστημα.....	17
3.6 Περιγραφή στοιχείων ανεμογεννήτριας.....	19
3.6.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού πυλώνα ανεμογεννήτριας.....	20
3.6.2 Πυλώνας ανεμογεννήτριας με σύνδεση τμημάτων.....	21
4. Η grouted connection.....	21
4.1 Περιγραφή της grouted connection.....	21
4.2 Η grouted connection σε monopile και jacket κατασκευές.....	22
4.3 Ιστορικά στοιχεία για τις grouted connections.....	24
5. Φόρτιση σύνθετης σύνδεσης και ρηγμάτωση.....	25
5.1 Κατακόρυφη αντοχή απλών σύνθετων συνδέσεων κυλινδρικού σχήματος χωρίς shear keys.....	30
5.2 Σύνθετες συνδέσεις κυλινδρικού σχήματος με shear keys.....	32
5.3 Κόπωση.....	33
6. Αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού.....	34
6.1 Υπολογισμός της οριζόντιας σχετικής μετατόπισης λόγω δράσης ροπής σε συνδέσεις χωρίς shear key.....	34

6.2 Υπολογισμός της οριζόντιας σχετικής μετατόπισης λόγω δράσης ροπής σε συνδέσεις με shear key	37
7. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	46
7.1 Εισαγωγή στη FEM.....	46
7.2 Ιστορική αναδρομή της FEM.....	46
8. Μοντελοποίηση και υπολογισμός	47
8.1 Είδη αναλύσεων	47
8.2 Μοντελοποίηση και υπολογισμός της σύνδεσης χωρίς shear keys	50
8.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας	50
8.2.2 Εισαγωγή υλικών	53
8.2.3 Σχηματισμός διατομής.....	55
8.2.4 Διακριτοποίηση της σύνδεσης με πεπερασμένα στοιχεία	56
8.2.5 Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης και παραμέτρων επίλυσης	64
8.2.6 Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών.....	72
8.2.7 Επιβολή φορτίων	74
8.3 Μοντελοποίηση και υπολογισμός της σύνδεσης με shear keys	76
8.4 Θεώρηση των υλικών ως μη – γραμμικά	79
8.4.1 Σχεδιασμός καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων για το grout Ducorit D4.....	81
8.4.2 Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων για τον χάλυβα S355	87
9. Αποτελέσματα και Έλεγχοι	88
9.1 Grouted Connection χωρίς shear keys	89
9.2 Grouted Connection με shear keys	95
10. Συμπεράσματα	111
Βιβλιογραφία	112

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές κ. Κωνσταντίνο Σπηλιόπουλο και κ. Ευστάθιο Θεοτόκογλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Η βοήθεια και η καθοδήγησή τους ήταν πολύτιμες ώστε να βγάλω εις πέρας την παρούσα εργασία.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ θέλω να το εκφράσω στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για την κατανόηση και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της ενεματικής σύνδεσης, "grouted connection", παράκτιας ανεμογεννήτριας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του λογισμικού ABAQUS CAE. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο συνδετικό υλικό της σύνδεσης, το grout, το οποίο αναμένεται να εμφανίσει αστοχίες. Αρχικά περιγράφεται η συνδεσμολογία, οι γεωμετρικές παραλλαγές αυτής, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και η συμπεριφορά τους και στη συνέχεια δίνονται από τη βιβλιογραφία αναλυτικοί τύποι για την ένταση και παραμόρφωση της σύνδεσης. Επιπρόσθετα, γίνεται η μελέτη της σύνδεσης τοποθετώντας στις διεπιφάνειες συγκολλημένες ραφές, τα επονομαζόμενα shear keys. 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. Τέλος, εξάγεται η εντατική κατάσταση για να προσδιορισθεί η 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 ABAQUS CAE 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. In addition, the connection is analyzed by placing welded seams on the members' interfaces, the so-called shear keys. 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. Finally, the stress state is exported in the analysis results, in order to specify the connection's behavior under static loading.

Εισαγωγή

Οι μετατροπείς ενέργειας είναι μια αναδύομενη 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.

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 για αυτό το λόγο εντάχθηκαν και στην βιομηχανία των ανεμογεννητριών.

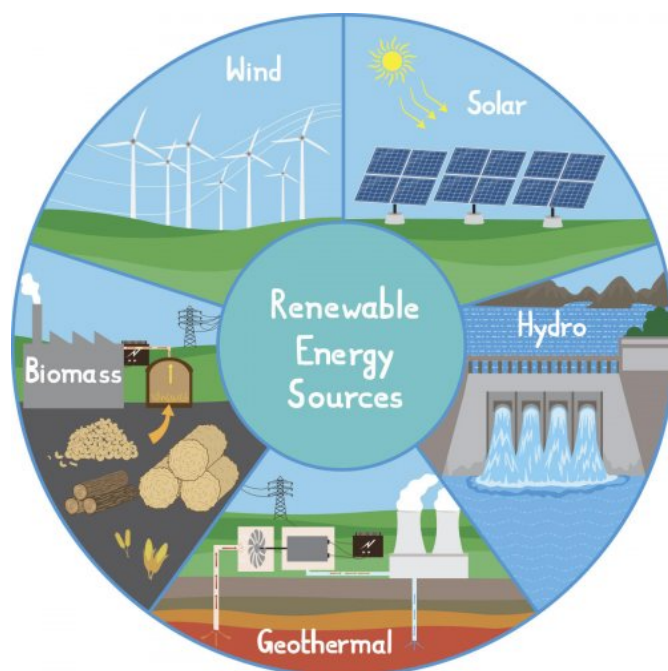
Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Ενέργειας από τον Άνεμο (European Wind Energy Association), στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως οι monopile τύπου συνδέσεις οι οποίες περιορίζονται σε βάθη νερού έως 30 μέτρα. Για μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιούνται άλλου τύπου συνδέσεις.

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. [2]

1. Οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

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. [3]



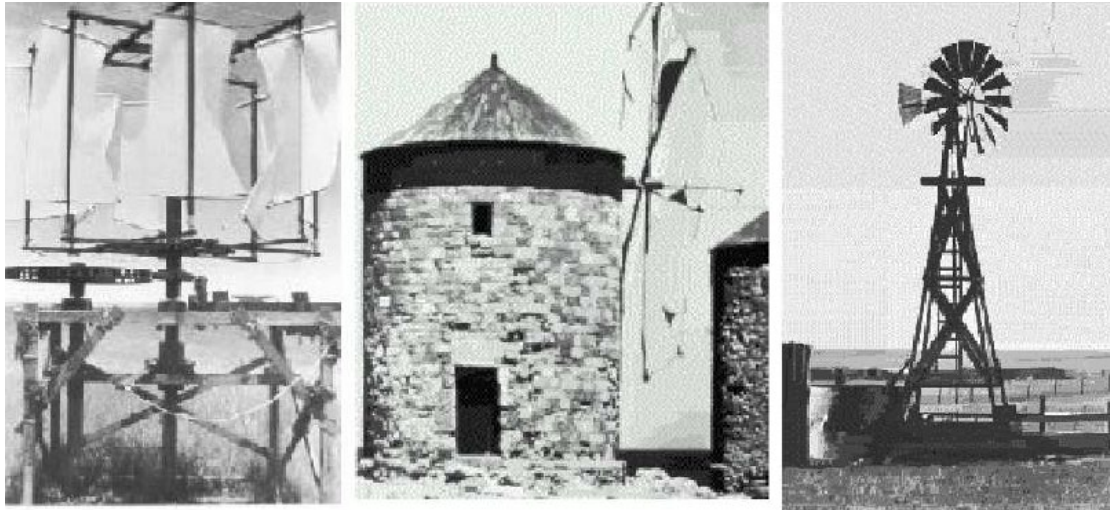
Εικόνα 1.1: *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας [1]*

Οι ΑΠΕ μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου. Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Τέλος, ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής. [3]

Αντιθέτως, έχουν έναν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων. Επίσης, η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται. Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί. [3]

2. Ορισμός ανεμογεννήτριας και ιστορική αναδρομή

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. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει όλη την κατασκευή. Οι πύργοι είναι συνήθως μεταλλικές (χαλύβδινες) σωληνωτές κατασκευές ή δικτυώματα. Μερικοί πύργοι αποτελούνται από σκυρόδεμα. Τα πτερύγια γυρίζουν με τον άνεμο που με τη βοήθεια του ρότορα γυρίζει την



Εικόνα 2.1: α) Αντίγραφο του πρώτου Περσικού μύλου, β) Μεσογειακός, γ) Αμερικανικός (18ος αιώνας)

τουρμπίνα. [3] Σύμφωνα με τους αρχαιολόγους και ιστορικούς η πρώτη χρήση του ανέμου ως φυσική πηγή ενέργειας έγινε γύρω στον 7ο αιώνα π.Χ. 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



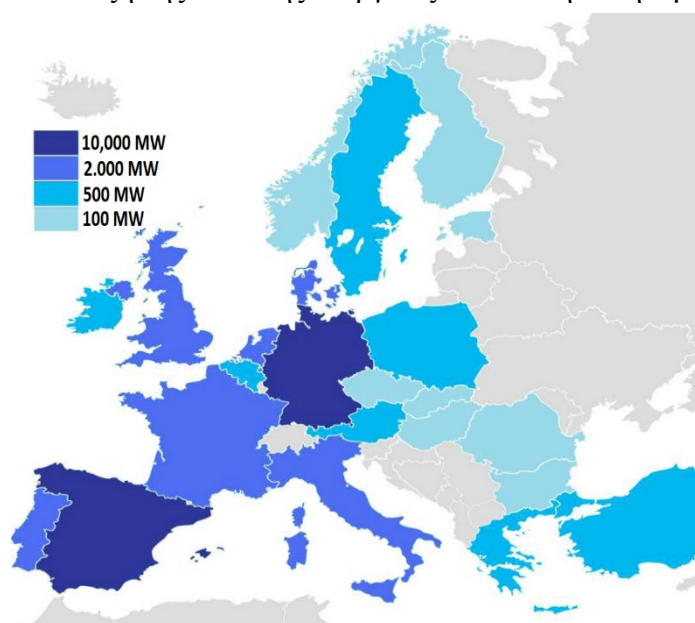
(α)

(β)

Εικόνα 2.2: Χρήσεις αιολικής ενέργειας (α) ανεμόμυλος [7] (β) υπερράκτιο αιολικό πάρκο [8]

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 συστημάτων χαμηλής ισχύος 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. [4], [5]

Ο Golding (1955) και οι Shepherd και Divone στη Spera (1994) παρέχουν μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα 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

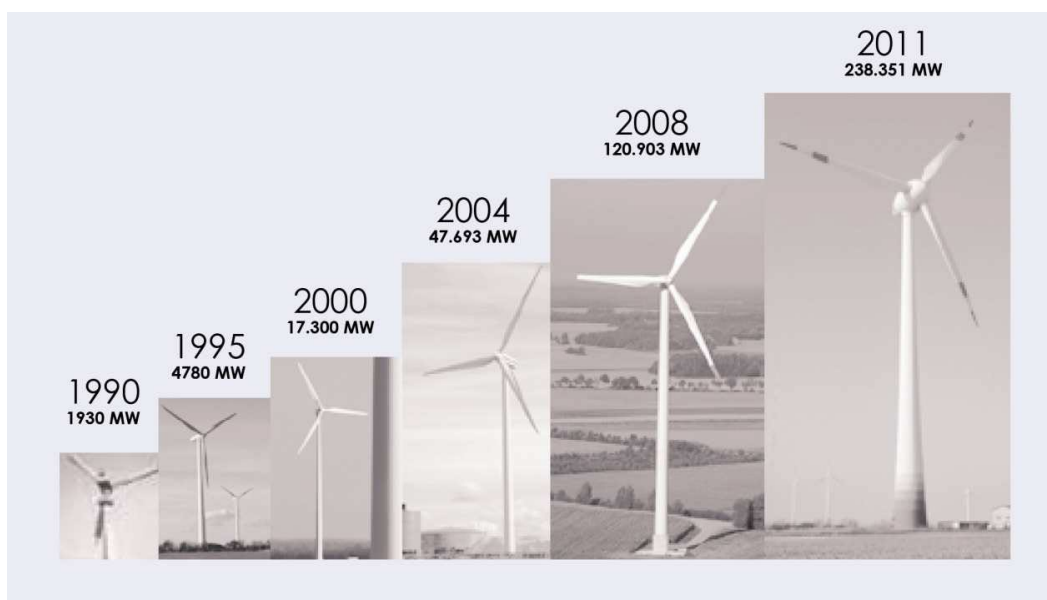


Εικόνα 2.3: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη το 2010

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. [5]

Το θαλάσσιο αιολικό πάρκο (ΘΑΠ) στο Vindeby περιλάμβανε 11 ανεμογεννήτριες, των 450 kW, δίνοντας συνολική ισχύ περίπου 5 MW. [5] 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 multi-megawatt 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 2.4* παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα όπου παρουσιάζει την εξέλιξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας από το 1990 μέχρι το 2011. [5]



Εικόνα 2.4: Η εξέλιξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας 1990 – 2011

3. Τεχνικά χαρακτηριστικά υπεράκτιων ανεμογεννητριών

3.1 Υλικά κατασκευής παράκτιων κατασκευών

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 γαλβανισμό 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. [6]

3.2 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σύμφωνα με τη διεύθυνση των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου στις παρακάτω κατηγορίες:

- ❖ Οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου (*Εικόνα 3.1α*).
- ❖ Οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στη κατεύθυνση του ανέμου.
- ❖ Κατακόρυφου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος και κάθετος στη κατεύθυνση του ανέμου (*Εικόνα 3.1β*).



Εικόνα 3.1: Τύποι ανεμογεννητριών α) οριζοντίου άξονα [11], β) κατακόρυφου άξονα [12]

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWT – horizontal – axis wind turbines) είναι η πιο συχνή περίπτωση ανεμογεννήτριας αλλά και η πιο παλιά. Έχουν τοποθετημένους το ρότορα του άξονα και την ηλεκτρική γεννήτρια στην κορυφή ενός πύργου, στραμμένους προς την κατεύθυνση του ανέμου. [9] Ο άνεμος 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. [10] Κάθε στερεό αντικείμενο παράγει στροβιλισμούς από πίσω όταν φυσάει ο άνεμος, που οδηγεί σε κόπωση του μετάλλου των ανεμογεννητριών. Έτσι η γεννήτρια τοποθετείται από την αντίθετη κατεύθυνση του πύργου υποστήριξης. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε αιολικά πάρκα για την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται συνήθως από τρία πτερύγια. Αυτή η διάταξη έχει χαμηλή κυμάτωση ροπής, η οποία συμβάλλει στην καλή αξιοπιστία. Τα πτερύγια είναι συνήθως λευκό χρώμα για να είναι ορατά από τα αεροσκάφη, το μήκος τους κυμαίνεται από 20 έως 80 μέτρα και περιστρέφονται με ταχύτητα 10 έως 22 στροφές ανά λεπτό. Πολλές γεννήτριες λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα, αν και οι περισσότερες παράγουν ρεύμα με μεταβλητή ταχύτητα. [9]

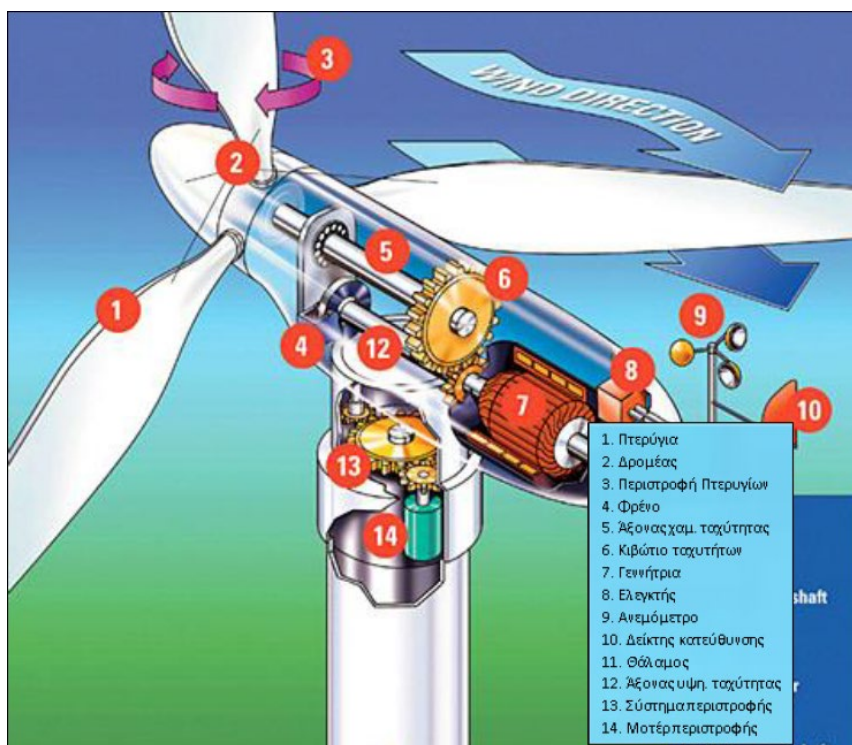
Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα έχουν τοποθετημένο το ρότορα κάθετα στο έδαφος. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι πως η γεννήτρια δε χρειάζεται να είναι στραμμένη προς την κατεύθυνση του ανέμου για να είναι παραγωγική, οπότε είναι πιο αποδοτική σε περιοχές με μεταβλητούς ανέμους, αφού περιστρέφονται κατά 360°. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών είναι ότι παράγουν πολύ λιγότερη ενέργεια κατά μέσο όρο με την πάροδο του χρόνου. Άλλα μειονεκτήματα είναι η σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, το υψηλότερο κόστος της γεννήτριας, ο χαμηλότερος συντελεστής απόδοσης, η μεγάλη φθορά των πτερυγίων λόγω της περιστροφής των 360° και η δυσκολία μοντελοποίησης του ανέμου κατά το σχεδιασμό, δυσκολεύοντας την ανάλυση και το σχεδιασμό του ρότορα κατά τη κατασκευή της ανεμογεννήτριας. [9]

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας και τρόπος λειτουργίας της

Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι αποκλειστικά οριζοντίου άξονα και έχουν συνήθως τρία πτερύγια. Τα κύρια μέρη μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- ❖ Η πρώτη κατηγορία αφορά τα κύρια μηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας (RNA), τα οποία είναι συγκεντρωμένα κυρίως στην άτρακτο (nacelle) και περιλαμβάνουν την ηλεκτρική γεννήτρια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα, το σύστημα ελέγχου και το σύστημα περιστροφής – ευθυγράμμισης των πτερυγίων, το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα πέδησης.
- ❖ Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα κατασκευαστικά μέρη της ανεμογεννήτριας, όπως είναι ο δρομέας, τα πτερύγια, ο πύργος, το τμήμα μετάβασης, ο φορέας στήριξης και η θεμελίωση της ανεμογεννήτριας.

Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην περιστροφή των πτερυγίων της εξαιτίας της ροής του αέρα και αποσκοπεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας στηρίζονται πάνω στο δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα (άξονας χαμηλής ταχύτητας). Με τον τρόπο αυτό η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια χαμηλής ταχύτητας. Στη συνέχεια ο άξονας χαμηλής ταχύτητας συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο αυξάνει στην στροφική ταχύτητα της κινητικής ενέργειας και στη συνέχεια συνδέεται μέσω του άξονα υψηλής ταχύτητας με την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άξονα υψηλής ταχύτητας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου.

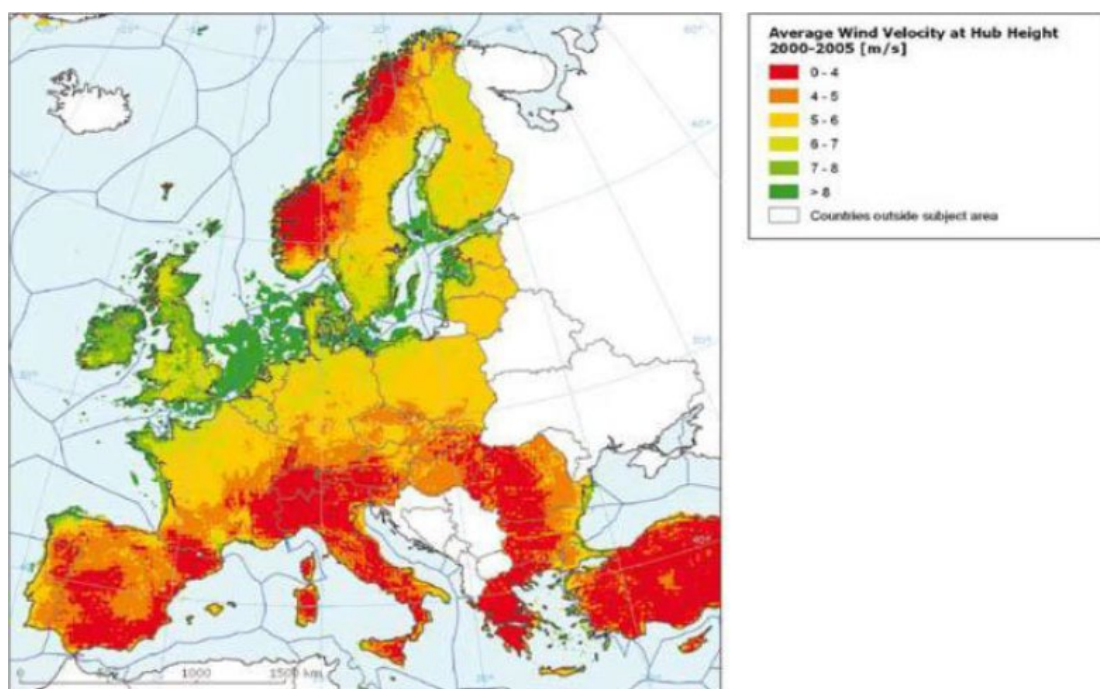


Εικόνα 3.2: Μηχανολογικά μέλη ανεμογεννήτριας [13]

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για μέση ταχύτητα ανέμου 3 – 4 m/s, μεγιστοποιούν την απόδοση τους για ταχύτητα ανέμου 15 m/s, ενώ παύουν την λειτουργία τους για ταχύτητες ανέμου 25 m/s και άνω.

3.4 Σύγκριση υπεράκτιας και ενδοχώριας αιολικής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια η υπεράκτιας ανεμογεννήτριες κερδίζουν διαρκώς έδαφος έναντι των ανεμογεννητριών ξηράς εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους. Πρώτον, στην θαλάσσια επικράτεια υπάρχουν απεριόριστες ελεύθερες εκτάσεις για εκμετάλλευση ενώ στην στεριά είναι αισθητά περιορισμένες ειδικότερα κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένη. Δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα των θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι οι ισχυρότεροι άνεμοι που επικρατούν στην ανοιχτή θάλασσα. Αντίθετα στις ηπειρωτικές περιοχές το πεδίο ροής του ανέμου επηρεάζεται σημαντικά από το ανάγλυφο της περιοχής. Η ύπαρξη βουνών ή κτιρίων μειώνει σημαντικά την μέση ταχύτητα του ανέμου και μεταβάλλει διαρκώς την ροή του, περιορίζοντας έτσι την αποδοτικότητα της επένδυσης. Στην *Εικόνα 3.3* απεικονίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου για την περίοδο 2000 – 2005 για το σύνολο των χωρών της Ευρώπης. Είναι εμφανές ότι οι θαλάσσιες περιοχές έχουν υψηλή μέση ταχύτητα (> 8 m/s) σε αντίθεση με τις ηπειρωτικές όπου η μέση ταχύτητα είναι περιορισμένη (4 – 5 m/s). Επίσης η εγκατάσταση μακριά από την ακτή εξαλείφει προβλήματα αισθητικής και όχλησης λόγω θορύβου αστικών περιοχών γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη ανεμογεννητριών αυξημένης αποδοτικότητας και μειωμένου κόστους. Τέλος, εφόσον η εγκατάσταση και η μεταφορά γίνονται στη θάλασσα δεν τίθενται περιορισμοί μεγέθους των ανεμογεννητριών για την διέλευση από δρόμους όπως συμβαίνει με τις χερσαίες.



Εικόνα 3.3: Χάρτης απεικόνισης της μέσης ταχύτητας του ανέμου το διάστημα 2000 – 2005 στην Ευρώπη στο ύψος του άξονα (80 m στην ξηρά και 120 m στη θάλασσα) [14]

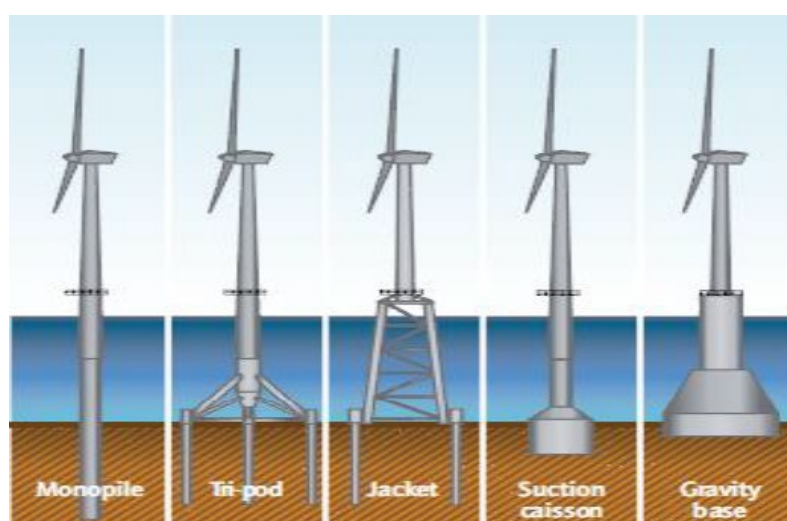
Στον αντίποδα οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος (2 με 3 φορές) σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες στη στεριά. Αυτό μερικώς οφείλεται στην δομή της εγκατάστασης, η οποία χαρακτηρίζεται καθοριστικά από το σύστημα θεμελίωσης της το οποίο αυξάνει σημαντικά το κόστος της επένδυσης. Πρέπει να ληφθούν ακόμα υπόψη οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες που επικρατούν στις υπεράκτιες περιοχές οι οποίες ασκούν σημαντικές δράσεις στην κατασκευή όπως τα φορτία κυματισμού, φορτία θαλασσιών ρευμάτων και η σημαντική διάβρωση λόγω του αλμυρού νερού. Επιπλέον η μεταφορά και η συναρμολόγηση γίνεται με πλωτά μέσα, τα οποία αυξάνουν σημαντικά το κόστος. Επίσης το κόστος συντήρησης είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τις χερσαίες. Μια απλή βλάβη η οποία είναι επισκευάσιμη σε λίγες ώρες στην στεριά, η αποκατάστασή της μπορεί να γίνει μια χρονοβόρα διαδικασία, για μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια, η οποία εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες.

3.5 Είδη θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Το είδος θεμελίωσης και η μορφή του φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας αποτελεί κρίσιμη επιλογή για το σύνολο της κατασκευής καθώς είναι καθοριστική στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους της επένδυσης. Υπάρχουν δύο βασικά είδη υποστήριξης των θαλάσσιων ανεμογεννητριών: τα θεμελιωμένα και τα πλωτά συστήματα. Τα κριτήρια επιλογής σχετίζονται με το βάθος της θάλασσας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την διαθέσιμη τεχνογνωσία.

3.5.1 Θεμελιωμένα συστήματα

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι τα σταθερά συστήματα και η επιλογή τους εξαρτάται από το βάθος της θάλασσας. Για ρηχά νερά (έως 15 m) προτιμάται συνήθως θεμελιώσεις βαρύτητας οι οποίες κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα (gravity base) (Εικόνα 3.4ε). Για μεσαία βάθη (15-50 m) χρησιμοποιούνται κυρίως τα εξής: μονοπάσσαλος (monopile) (Εικόνα 3.4α), τρίποδο (tripod) (Εικόνα 3.4β), δικτυωτός πύργος (jacket) (Εικόνα 3.4γ).



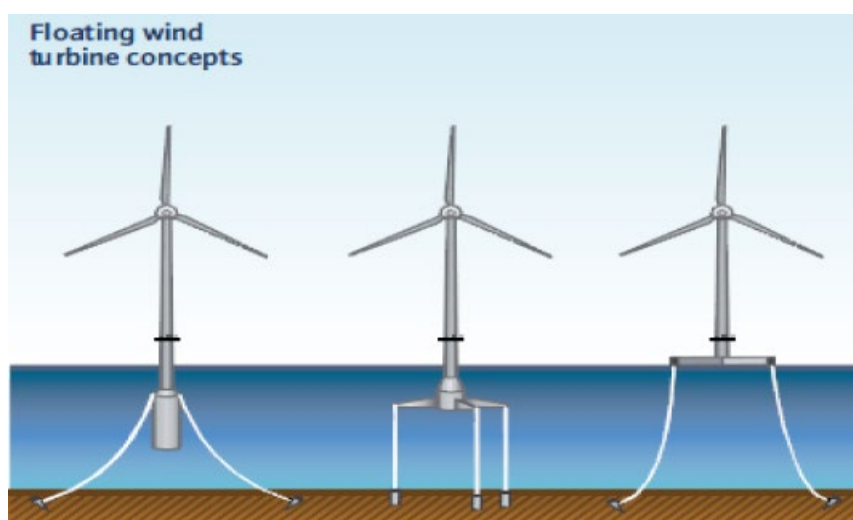
Εικόνα 3.4: Είδη θεμελιώσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών [15]

3.5.2 Πλωτά συστήματα

Μέχρι σήμερα τα περισσότερα εγκατεστημένα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν κατασκευασθεί με σταθερά συστήματα. Παρόλα αυτά στις περισσότερες χώρες οι διαθέσιμες περιοχές για την κατασκευή θαλάσσιων ανεμογεννητριών έχουν μεγάλα βάθη θάλασσας, γεγονός που κάνει τα σταθερά συστήματα οικονομικά ασύμφορα. Επομένως τα επόμενα χρόνια αναμένεται σημαντική ανάπτυξη των πλωτών συστημάτων, ειδικότερα για βάθη θάλασσας άνω των 50 μέτρων εκτιμάται ότι θα αποτελούν την οικονομικότερη λύση.

Τα πλωτά συστήματα (floating structure) έχουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μεγαλύτερη ευελιξία κατά την κατασκευή και εγκατάστασή τους καθώς επίσης και την ικανότητα να μεταβιβάζουν τεράστια καμπτικά φορτία στο νερό. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι πλωτών συστημάτων:

- ❖ Σύστημα τύπου σημαντήρα (spar) (Εικόνα 3.5α).
- ❖ Σύστημα με σκέλη υπό ένταση (tensioned – leg platform TLP) (Εικόνα 3.5β).
- ❖ Σύστημα τύπου φορηγίδας (floating jacket) (Εικόνα 3.5γ).



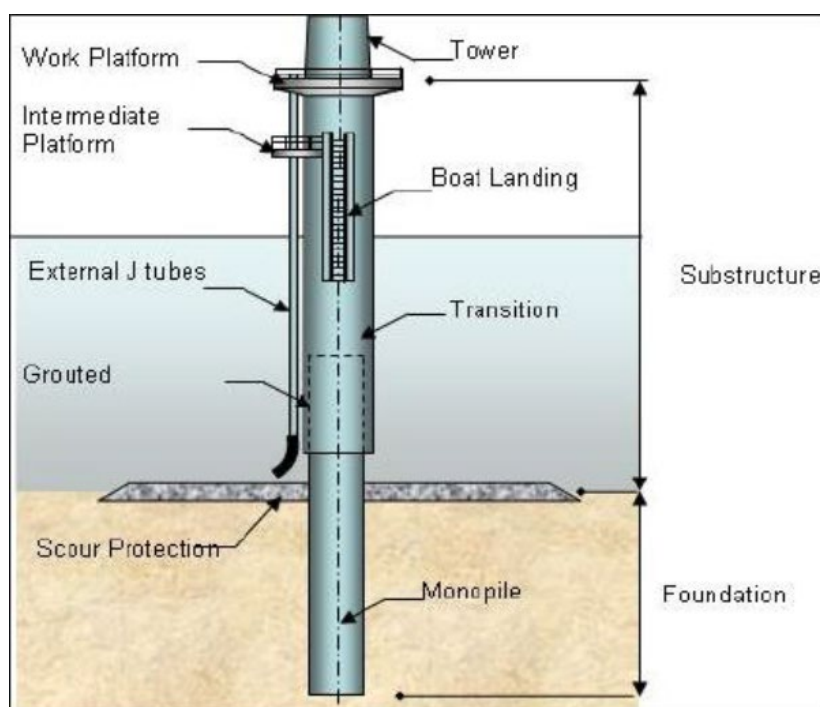
Εικόνα 3.5: Πλωτά συστήματα [15]

3.5.3 Μονοπάσσαλο σύστημα

Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι το μονοπάσσαλο σύστημα το οποίο αποτελείται από έναν μεταλλικό πάσσαλο κοίλης κυκλικής διατομής ο οποίος εμπηγνύεται με δόνηση ή υδραυλικό σφυρί μέσα στο έδαφος. Η διάμετρος, το πάχος και το μήκος εμπηξης του πασσάλου καθορίζονται από το βάθος της θάλασσας, τα όρια αντοχής και λειτουργικότητας της ανεμογεννήτριας. Η συχνή χρήση του εν λόγω συστήματος οφείλεται κυρίως στην απλότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος καθώς και στην σημαντική τεχνογνωσία και εμπειρία που υπάρχει παγκοσμίως πάνω σε τέτοιου είδους συστήματα. Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A), το 74% του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών μέχρι το 2012 θεμελιώθηκαν με μονοπάσσαλο.

Αποτελεί ιδανικό τρόπο θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών για βάθη έως 25 μέτρα. Αντίθετα σε μεγαλύτερα βάθη η κατασκευή γίνεται πιο ασταθής εξαιτίας των σημαντικών υδροδυναμικών φορτίων που της ασκούνται και επομένως προτιμάται κάποιο άλλο σύστημα θεμελίωσης.

Το μονοπάσσαλο σύστημα (Εικόνα 3.6) είναι το μοναδικό στο οποίο ο πάσσαλος αποτελεί ταυτόχρονα την θεμελίωση και τον φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας. Όπως προαναφέρθηκε ο πάσσαλος εμπηγνύεται στο έδαφος με την χρήση υδραυλικής σφύρας (driven piles) η οποία ασκεί σημαντικό θλιπτικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου, τέτοιο ώστε να υπερνικήσει την τριβή που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης ενός τμήματος μετάβασης (transition piece) το οποίο τοποθετείται στην κορυφή του πασσάλου και εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας χωρίς απόκλιση από την κατακόρυφο. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη φλάντζας στην κορυφή του κομματιού μετάβασης και την χρήση κοχλιών.



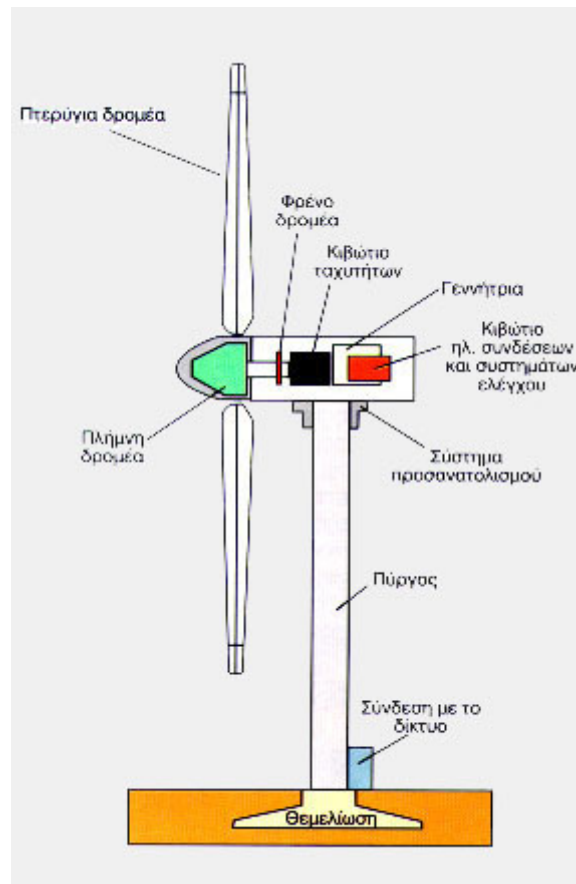
Εικόνα 3.6: Μονοπάσσαλο σύστημα [16]

Από την άλλη μεριά το κομμάτι μετάβασης αποτελεί το πιο αδύναμο τμήμα της κατασκευής αφού συνδέεται με τον πάσσαλο με τσιμέντο ή ειδικά ενέματα. Τα παραπάνω υλικά πλήρωσης πρέπει να εξασφαλίζουν πολύ ισχυρή σύνδεση μεταξύ των μελών ώστε τα φορτία να μεταφέρονται από τον πύργο στο κομμάτι μετάβασης και από εκεί στον πάσσαλο και στη συνέχεια στο έδαφος. Εξαιτίας της δυναμικής και ανακυκλιζόμενης φύσης των φορτίων στα οποία υπόκειται η κατασκευή τα εν λόγω ενέματα ενδέχεται να χάσουν μέρος της αντοχής τους. Επομένως απαιτείται συστηματικός έλεγχος και αντικατάσταση τους όταν χρειασθεί.

3.6 Περιγραφή στοιχείων ανεμογεννήτριας

Γενικά η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- ❖ Πύργος: 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.
- ❖ Θάλαμος: 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.
- ❖ 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.
- ❖ 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. [17]



Εικόνα 3.7: Στοιχεία ανεμογεννήτριας

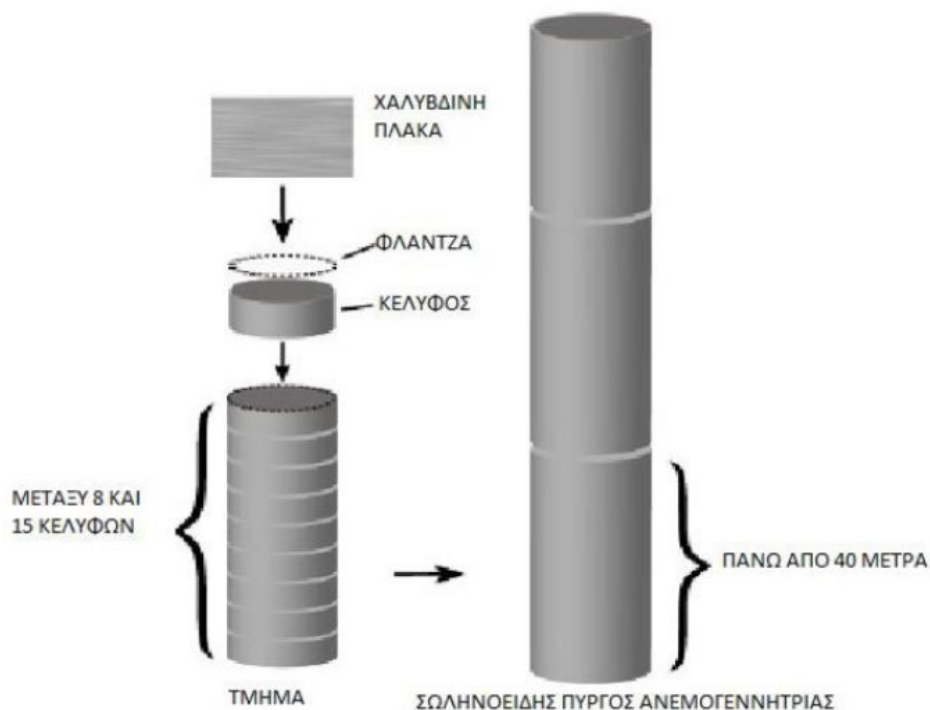
3.6.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού πυλώνα ανεμογεννήτριας

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). [19], [18]

3.6.2 Πυλώνας ανεμογεννήτριας με σύνδεση τμημάτων

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). [17]



Εικόνα 3.8: Σύνδεση τμημάτων ανεμογεννήτριας με συγκόλληση [35]

4. Η grouted connection

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

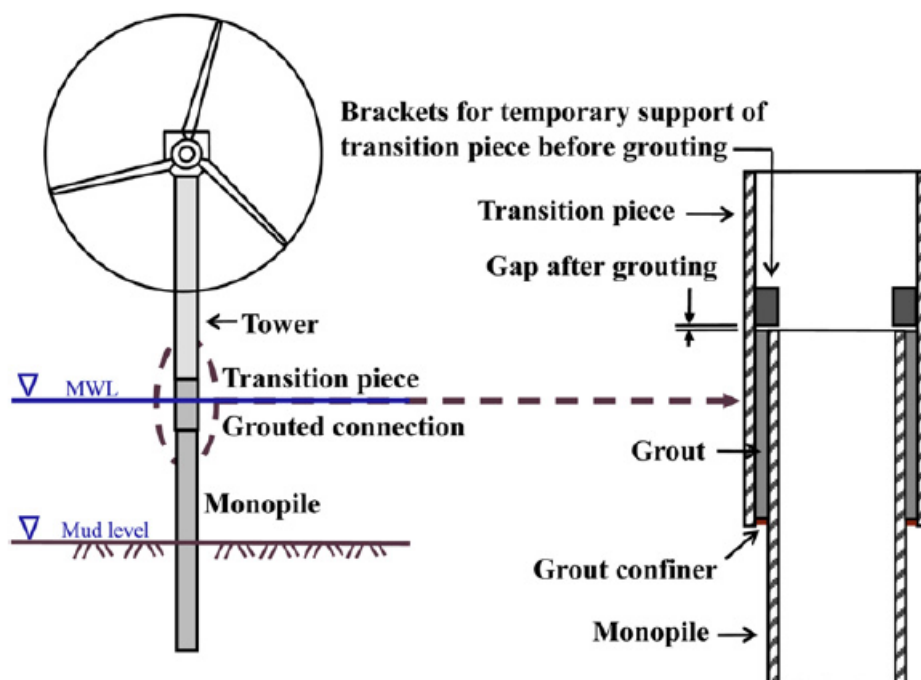
4.1 Περιγραφή της grouted connection

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). [18]

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 μονόστυλου (monopile). [18]

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 επιτυγχάνεται 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. [18], [20]

Για βάθη νερού μεγαλύτερα των 30 μέτρων προτιμώνται τέτοιου τύπου συνδέσεις. [18]



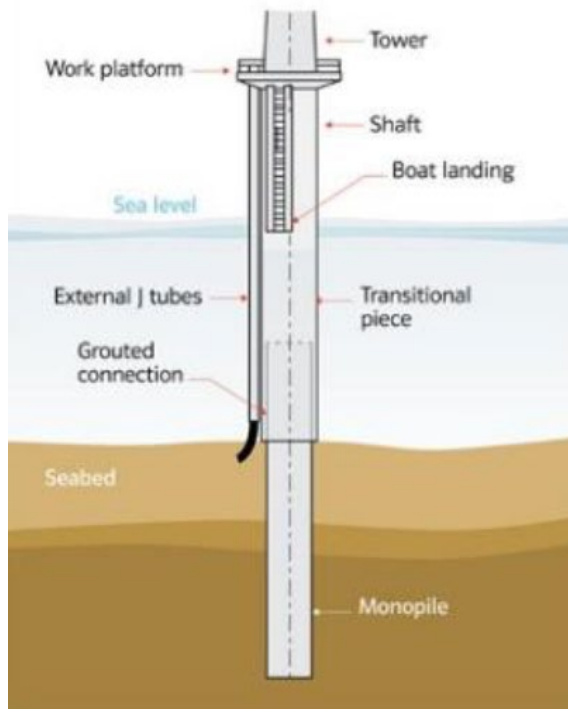
Εικόνα 4.1: Η grouted connection

4.2 Η grouted connection σε monopile και jacket κατασκευές

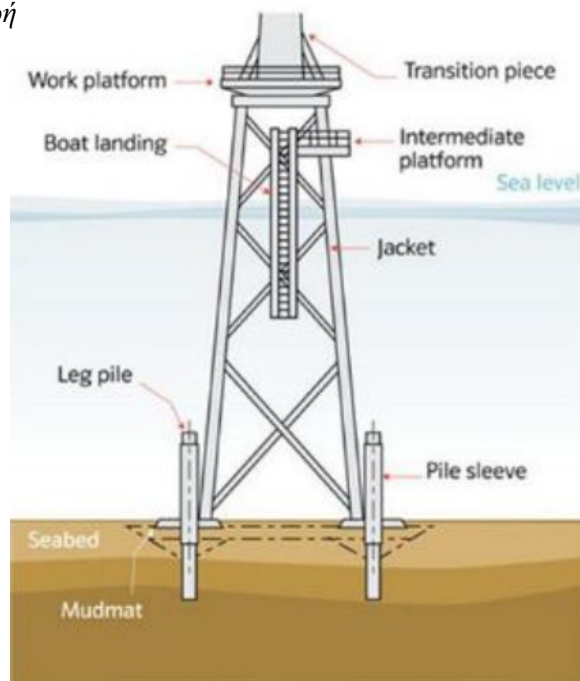
Η grouted connection στις κατασκευές τύπου monopile και jacket χρησιμοποιείται με παρόμοιο τρόπο, ωστόσο υπάρχουν διαφορές σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στα φορτία που επικρατούν. Οι διαστάσεις της σύνδεσης (μήκος και πάχος σύνδεσης) ποικίλουν αναλόγως με την υποκείμενη κατασκευή στην οποία εδράζεται. 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. [2]

Αυτοί οι παράγοντες δεν ελήφθησαν 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 στη συνέχεια. [2]



Εικόνα 4.2: Grouted Monopile κατασκευή



Εικόνα 4.3: Jacket structure

4.3 Ιστορικά στοιχεία για τις grouted connection

Σε παλαιότερες "jacket structures" οι στύλοι 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. [18]

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. [18]

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. [18]

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. Αυτή η μεθοδολογία σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένα στην πλατφόρμα Magnus και συμπεράθηκε ότι γινόταν οικονομία σε σημαντική ποσότητα υλικού, χάλυβα. Πιο επίσημη έγινε αυτή η μέθοδος σχεδιασμού με την έκδοση της Οδηγίας Νο 4 του Τμήματος Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου το 1982 στην οποία συμπεριλήφθηκε η εξίσωση σχεδιασμού των Billington και Tebett. [18]

Μία εκτίμηση της αντοχής των ενεματικών συνδέσεων έγινε επίσης από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου που οδήγησε σε νέες οδηγίες σχεδιασμού. Επιπλέον, βιομηχανίες παρήγαγαν ολοκληρωμένες εργασίες πάνω σε αυτόν τον τρόπο σύνδεσης για να ενταχθούν στον Νηογνώμονα στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα και στις αρχές της δεκαετίας του ογδόντα. [18]

Κατά τη διάρκεια του 1990 αναπτύχθηκε το περιεχόμενο του ISO 19902. Το πρότυπο αυτό εκδόθηκε το 2007. 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. 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. [18]

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. [18]

Μερικά πειράματα σε κυλινδρικές ενεματικές συνδέσεις που έγιναν στο πανεπιστήμιο 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. [18]

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. [18]

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. [18]

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. [18]

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. Άμεση απόρροια αυτής της αναγκαιότητας είναι η εργασία για την αντοχή των κυλινδρικών grouted connections με shear keys που αναφέρεται στον νορβηγικό Νηογνώμονα (DNV) το 2012. Σε αυτή την εργασία έγιναν εργαστηριακά πειράματα αντοχής σε κόπωση, ανάλυση και αξιολόγηση με πεπερασμένα στοιχεία και ανάπτυξη προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού των κατασκευών. [18]

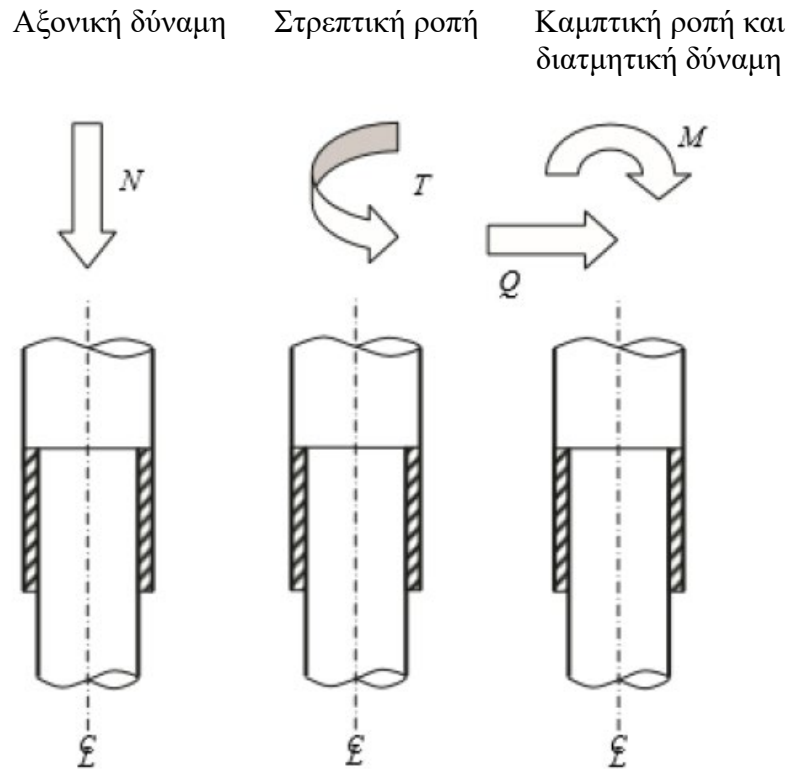
5. Φόρτιση σύνθετης σύνδεσης και ρηγμάτωση

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. [17]

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 περύγια του ρότορα, τον κινητήρα και την κατασκευή του πύργου. Επομένως, η grout connection βιώνει συνεχώς συνδυασμούς ισχυρών δυναμικών φορτίων. [17]

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)



Εικόνα 5.1: Είδη φόρτισης της grouted connection

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. [17]

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. [20]

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 εταιρεία 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) [28] 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, F_w σε kN/m)

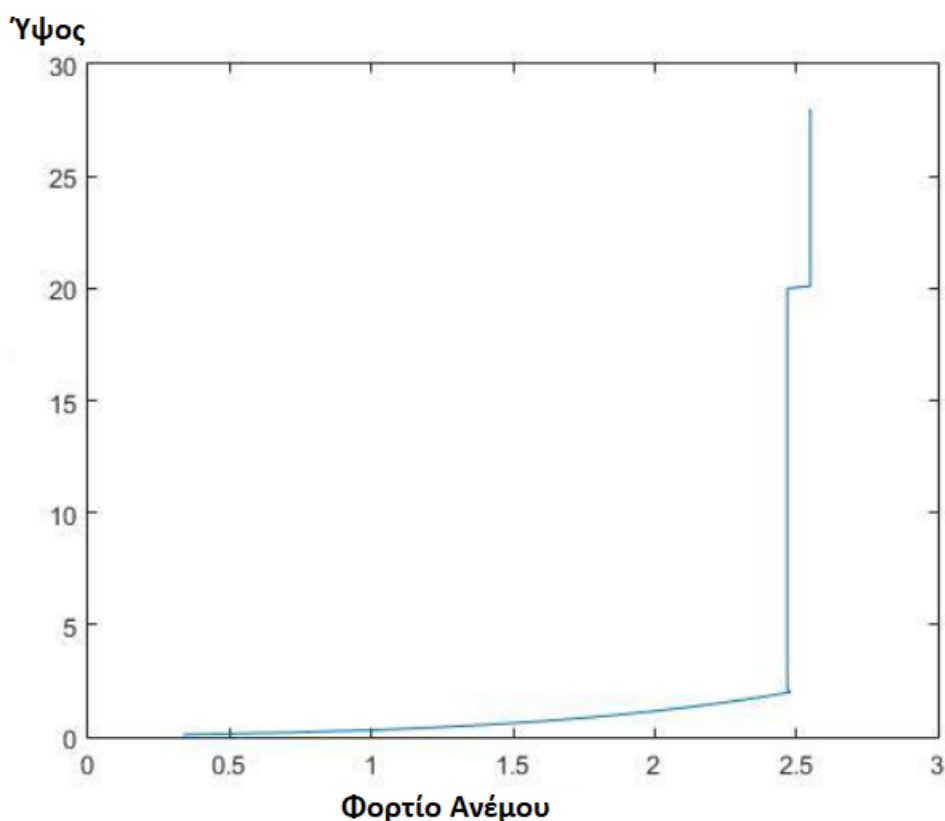
$$z \leq 2.00 \text{ m} : F_w = 0,51D$$

$$z > 2.00 \text{ m} : F_w = 0,013 \ln(20z)([\ln(20z) + 7]D)$$

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.

z, D σε m και F_w σε kN/m

Επί παραδείγματι η τιμή της ανεμοπίεσης για ανεμογεννήτρια στύλου βάσης διαμέτρου D_1 και στοιχείου μετάβασης διαμέτρου D_2 δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.2: 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 αεροελαστικών 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. [17]

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. [21] 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. [21]

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. [21]

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: monopile – 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. [21]

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. [21]

iii) Τριβή

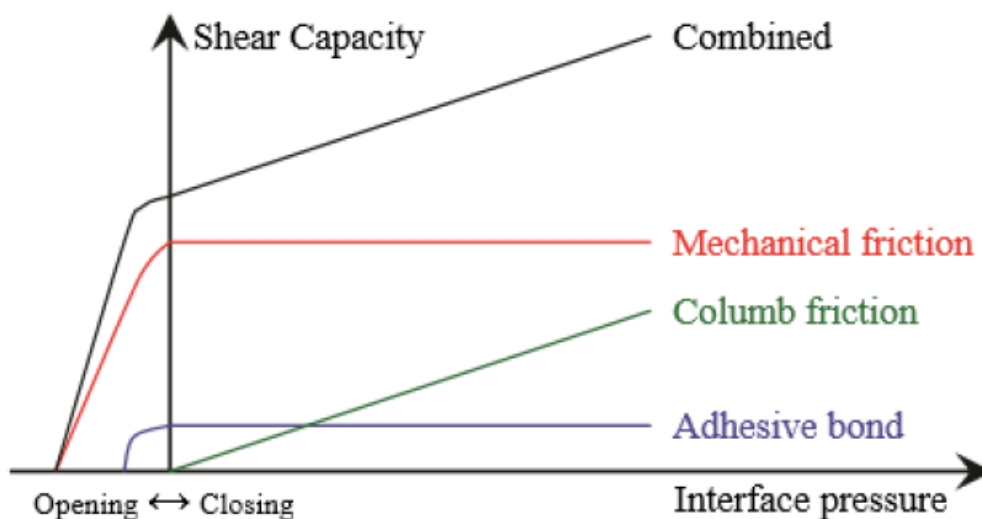
Η κλασική τριβή του Coulomb είναι επίσης παρούσα λόγω των φορτίων πίεσης μεταξύ χάλυβα και grout. Σε συνδυασμό με την προσκόλληση προσθέτει στην διατμητική αντοχή της σύνδεσης όταν εμφανίζονται θλιπτικές πιέσεις στη διεπιφάνεια και δρα μόνη της όταν η προσκόλληση πάψει να υφίσταται.

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. [20]

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. [20]

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 αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με έναν σύνθετο τρόπο ο οποίος εξιδανικευμένος παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 5.3: Προκύπτουσα διατμητική αντοχή σύνδεσης

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. [21]

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. [21]

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 υλικών, αντίθετα από τις περιοχές των ανοιγμάτων όπου η διατμητική αντοχή θα είναι μεγάλη. [21]

Επομένως, η grouted 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 στοιχείου μετάβασης και του στύλου. [21]

Στη συνέχεια, μελετάται αναλυτικά η παραλαβή των φορτίων, για τις δύο περιπτώσεις σύνδεσης: με ή χωρίς shear keys.

5.1 Κατακόρυφη αντοχή απλών σύνθετων συνδέσεων κυλινδρικού σχήματος χωρίς shear keys

Οι κατασκευές αυτές υπόκεινται σε ισχυρές δυναμικές εναλλασσόμενες φορτίσεις και επομένως είναι σημαντική η τεκμηρίωση της αντοχής σε κόπωση των σύνθετων συνδέσεων. Ο σχεδιασμός των grouted connections υπό αξονική φόρτιση γίνεται με βάση το πρότυπο EN ISO 19902 ή τον Νηογνώμονα DNV-OS-J101 για οριακή κατάσταση αστοχίας και οριακή κατάσταση αστοχίας σε κόπωση.

❖ Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας:

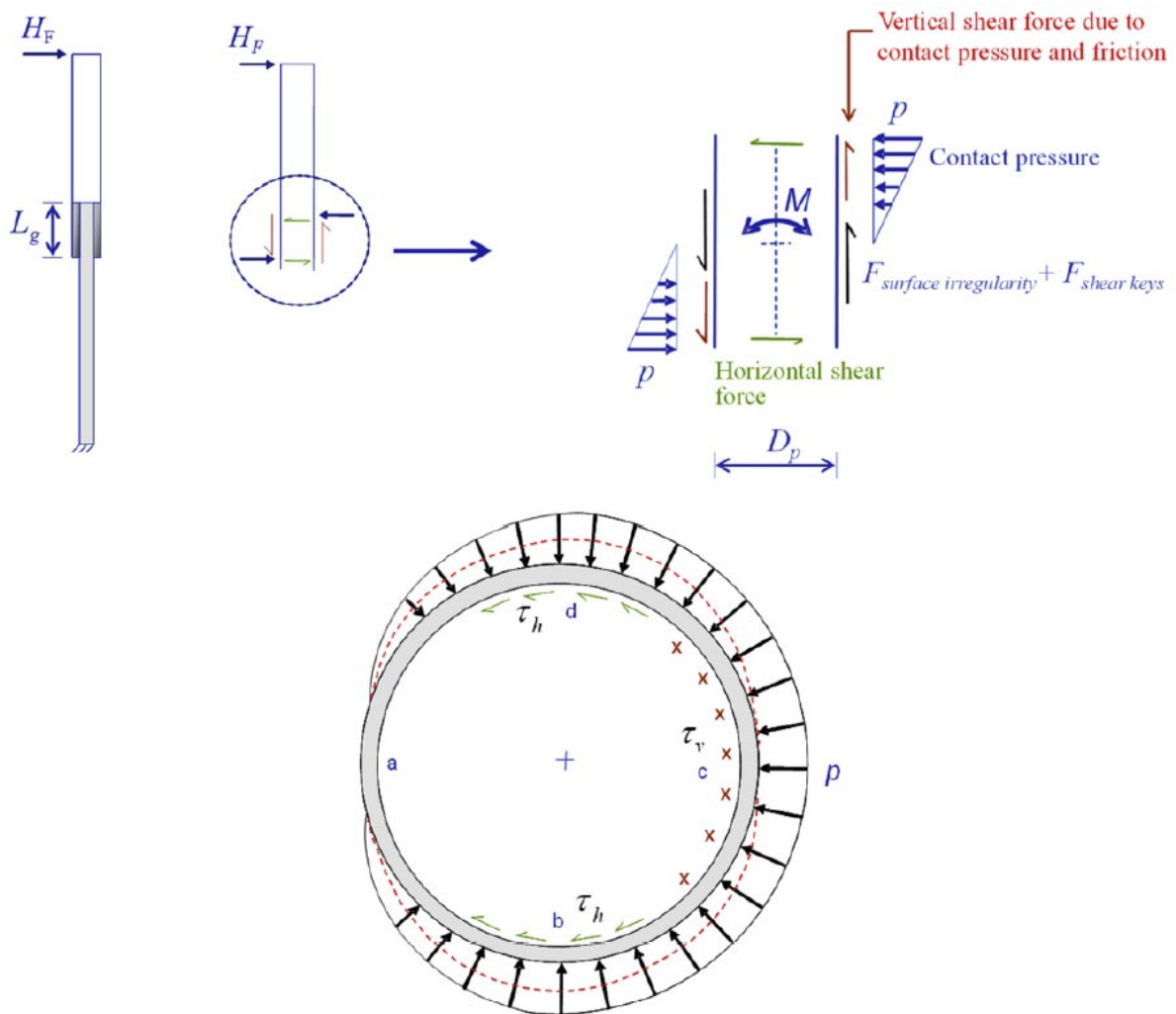
Η αξονική αντοχή μπορεί να ερμηνευτεί από την αντίσταση που προβάλλει η σύνδεση λόγω των ανωμαλιών επιφάνειας, δηλαδή την τραχύτητα της επιφάνειας και γενικότερα λόγω των επιφανειακών ατελειών στους σωλήνες της σύνδεσης. Η αξονική αντοχή μπορεί να ερμηνευτεί από διάφορες φάσεις. Αρχικά, όταν η σύνδεση 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. [20]

❖ Επίδραση της καμπτικής ροπής:

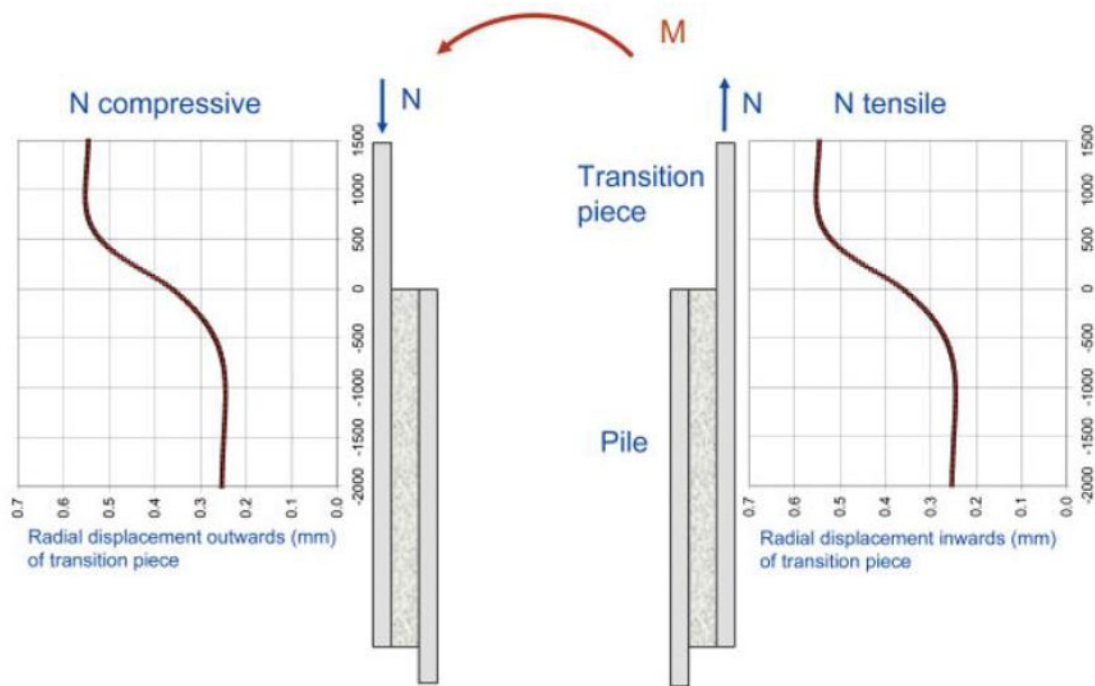
Οι αξονικές τάσεις στο στοιχείο μετάβασης και το monopile λόγω της ροπής κάμψης είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες στη σύνδεση από εκείνες λόγω του κατακόρυφου μόνιμου φορτίου της άνωθεν της σύνδεσης κατασκευής. Η ροπή μεταφέρεται από το στοιχείο μετάβασης στον monopile μέσω οριζόντιων δυνάμεων επαφής όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.4*. 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. [20]

Εφόσον υπάρχει δύναμη τριβής μεταξύ χάλυβα και ενέματος λόγω της πίεσης επαφής, θα υπάρχουν επίσης κατακόρυφες δυνάμεις τριβής εξαιτίας επιφανειακών ατελειών. 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. Οι δυνάμεις τριβής δεν λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό παρά μόνο στα εργαστηριακά πειράματα. [20]

Η δράση της ροπής, που συνεπάγεται μεγάλες πιέσεις επαφής στην κορυφή της σύνδεσης, και η εναλλασσόμενη διατμητική ένταση οδηγούν σε εφελκυσμό τα σημεία της περιφέρειας των κυλίνδρων που μπορεί να ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του ενέματος που όπως έχει αναφερθεί είναι συνήθως σκυρόδεμα που ως γνωστόν δεν έχει μεγάλη εφελκυστική αντοχή. Επιπλέον, 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. [20] Πρέπει να τονιστεί ότι ο ρόλος του ενέματος είναι να μεταφέρει πίεση από το κομμάτι μετάβασης στον υποκείμενο στύλο. Η ροπή μεταφέρεται από το κομμάτι μετάβασης στον μονόστυλο διαμέσου της οριζόντιας επαφής, όπως εικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 5.4: Πιέσεις επαφής στη σύνδεση



Εικόνα 5.5: Ακτινική μετατόπιση σε σύνδεση μεγάλης διαμέτρου υποκείμενης σε ροπή

Εξαιτίας της σχετικά μεγάλης τοπικής λεπτότητας, δηλαδή αναλογίας διαμέτρου προς πάχος, του μονοριπιδίου και του στοιχείου μετάβασης, οι κύλινδροι τείνουν να πάρουν ένα ωοειδές σχήμα (ovalization), και έτσι 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. [20]

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. [20]

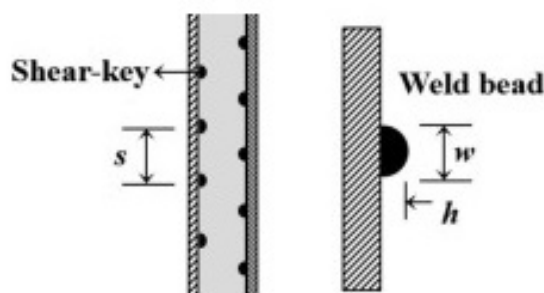
Εάν στην περιφέρεια του μονόστυλου και του στοιχείου μετάβασης εγκατασταθούν shear keys, τα τελευταία θα μεταφέρουν επίσης κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις που θα συνεισφέρουν στη φέρουσα ικανότητα της σύνδεσης σε ροπή και θα αποτρέψουν τη διατμητική αστοχία. [20]

5.2 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 μονοριπιδιές καταπονούνται κυρίως καμπτικά. [22]

Οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν την παραμόρφωση συναρτίζονται 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 την απόσταση των

shear keys μεταξύ τους (h/s). Μερικές συστάσεις περιορίζουν την αναλογία h/s στην τιμή 0.1. Οι αναλογίες που υπερβαίνουν την τιμή 0.04 έχουν σπανίως χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 5.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των shear keys

Η αναλογία διαμέτρου προς πάχος δε χαρακτηρίζει μόνο την ακτινική δυσκαμψία του στύλου αλλά και τον περιορισμό των παραμορφώσεων στο ένεμα. [22]

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 των θλιπτήρων (compressive struts) σε θλιπτικά φορτία που εμφανίζονται μεταξύ των shear keys και των στύλων. [22]

Οι κυριότεροι τρόποι αστοχίας των συνδέσεων με shear keys είναι η διατμητική αστοχία όταν τα shear keys βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις και η σύνθλιψη του ενέματος σε συνδέσεις με καλά ορισμένες αποστάσεις μεταξύ των shear keys, όπου το ένεμα εντείνεται περισσότερο. 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. [22]

5.3 Κόπωση

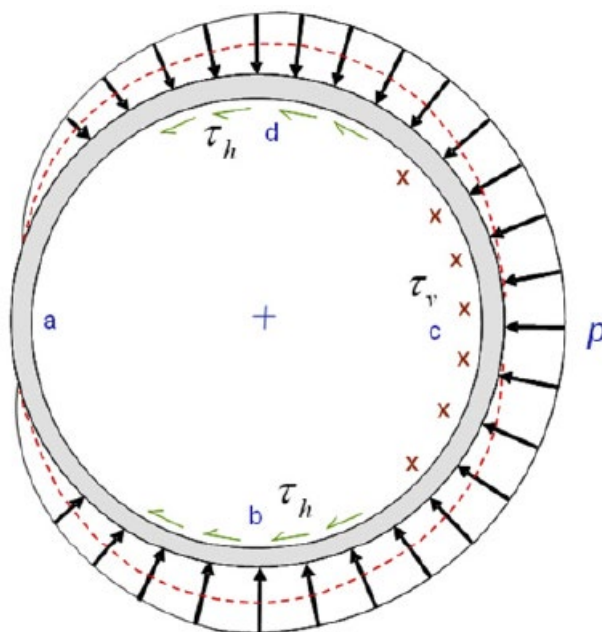
Η κόπωση στις παράκτιες ανεμογεννήτριες μπορεί να περιγραφεί ως η συσσωρευτική ζημιά που προκαλείται από εναλλασσόμενα φορτία χρονικά στη διάρκεια της χρήσης τους η οποία είναι περίπου 20 έτη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα φορτία αυτά είναι του ανέμου και των κυμάτων. Η κρισιμότητα της κόπωσης στη σύνδεση έχει επισημανθεί από τους Schaumann et. Al. (2011). [2]

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 monopile 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). [2]

6. Αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού

6.1 Υπολογισμός της οριζόντιας σχετικής μετατόπισης λόγω δράσης ροπής σε συνδέσεις χωρίς 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 στην *Εικόνα 6.1*. 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. [20]



Εικόνα 6.1: Κατανομή πιέσεων επαφής στο monopile

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

$$M_p = p \frac{R_p L_g^2}{3} \quad (1)$$

Όπου:

p – η μέγιστη ονομαστική πίεση στην κορυφή και στο κάτω μέρος της grouted connection

L_g – το ενεργό μήκος της grouted connection (ισούται με $L - 2t_g$, όπου L και t_g είναι το πραγματικό μήκος και το πάχος του ενέματος αντίστοιχα)

R_p – η εξωτερική ακτίνα του στύλου

- ❖ 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 στην *Εικόνα 6.1* και με πίεση $0.75p$ στο σημείο d.

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

Όπου

μ – συντελεστής τριβής

- ❖ Η ροπή αντοχής λόγω των κατακόρυφων δυνάμεων τριβής προκύπτει από την ολοκλήρωση των δυνάμεων επαφής έξω από την διάστικτη κόκκινη γραμμή από το σημείο a έως το σημείο c, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 6.1* και με πίεση $0.5p$ στο σημείο d.

$$M_{\mu v} = \mu p R_p^2 L_g \quad (3)$$

Η επιλογή της πίεσης στο σημείο d προκύπτει από 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 που προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους ροπών είναι:

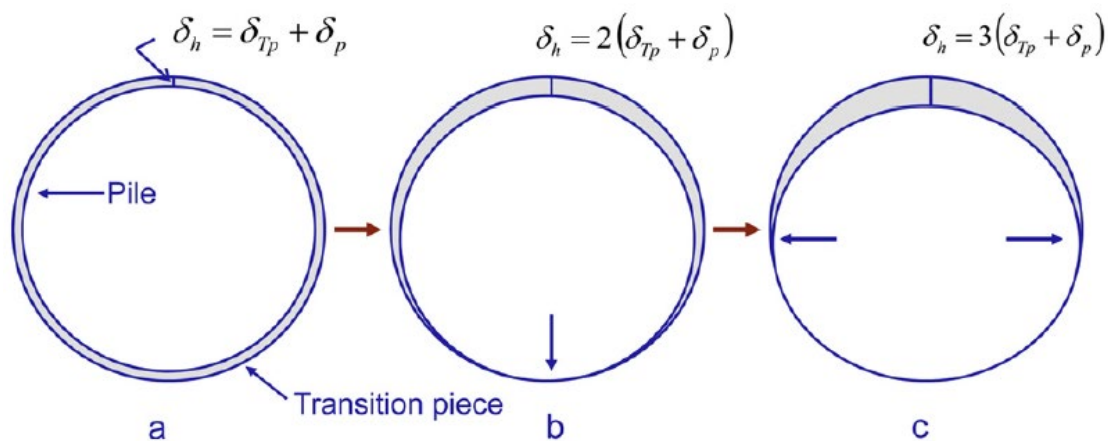
$$M_{tot} = M_p + M_{\mu h} + M_{\mu v} \quad (4)$$

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 monopile βάση. [20]

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

$$p = \frac{3\pi M_{tot}}{R_p L_g^2 (\pi + 3\mu) + 3\pi \mu R_p^2 L_g} \quad (5)$$



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση ανοίγματος μεταξύ χάλυβα και ενέματος

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

$$\delta_H = 3(\delta_p + \delta_{TP}) \quad (6)$$

όπου δ_p είναι η ακτινική μείωση της διαμέτρου του μονόστυλου και δ_{TP} είναι η ακτινική αύξηση της διαμέτρου του στοιχείου μετάβασης για την πίεση επαφής p .

Εδώ, η συμπίεση του ενέματος αμελείται καθώς η συμβολή του στην ολική παραμόρφωση είναι μικρή για τυπικές συνδέσεις ανεμογεννητριών. Η αλλαγή στην ακτίνα λόγω της πίεσης επαφής για το monopile και το transition piece προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις. [20]

$$\delta_p = \frac{p R_p^2}{E t_p} \quad (7)$$

$$\delta_{TP} = \frac{p R_{TP}^2}{E t_{TP}} \quad (8)$$

Όπου:

t_p – το πάχος του στύλου

t_{TP} – το πάχος του στοιχείου μετάβασης

R_{TP} – η εξωτερική ακτίνα του στοιχείου μετάβασης

Η συνολική ακτινική μετατόπιση δ_H προκύπτει ως το άθροισμα των μετατοπίσεων από το στοιχείο μετάβασης και τον στύλο όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 6.2a*. Για φόρτωση ροπής, το στοιχείο μετάβασης κινείται προς τον μονόστυλο έως ότου επιτευχθεί επαφή γύρω από την περιφέρεια, όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 6.2b* και *c*.

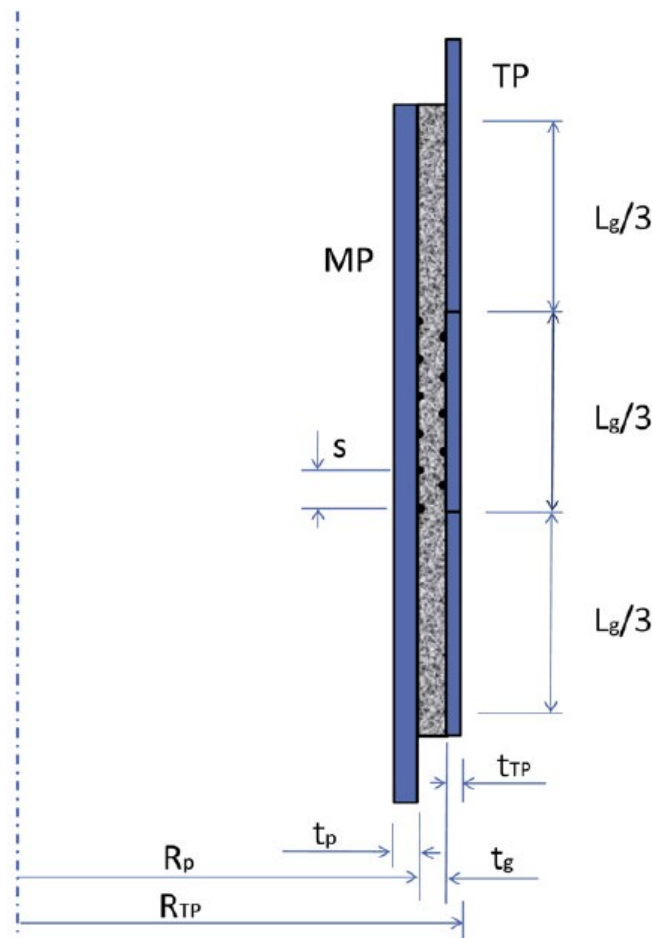
Βασιζόμενοι σε γεωμετρικές θεωρήσεις προκύπτει η κατακόρυφη σχετική μετατόπιση μεταξύ του στοιχείου μετάβασης και του στύλου της βάσης:

$$\delta_v = \delta_H \frac{2R_p}{L_g} \quad (9)$$

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. [20]

6.2 Υπολογισμός της οριζόντιας σχετικής μετατόπισης λόγω δράσης ροπής σε συνδέσεις με shear keys

Στη συνέχεια μελετάται μια κυλινδρική σύνδεση με shear keys, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 6.3*.



Εικόνα 6.3: Παράδειγμα grouted connection με shear keys

Μια ροπή αντίστασης από τα shear keys προστίθεται τώρα στις ροπές αντίστασης που εξετάστηκαν στην ενότητα 6.1. Έτσι, η συνολική ροπή αντίστασης μπορεί να γραφεί ως:

$$M_{tot} = M_p + M_{\mu h} + M_{\mu v} + M_{shearkey} \quad (10)$$

Το άνοιγμα μεταξύ του στύλου και του στοιχείου μετάβασης στο πάνω και κάτω μέρος της σύνδεσης μπορεί να εκφραστεί με την ίδια εξίσωση με την περίπτωση χωρίς shear keys. Ωστόσο, η πίεση επαφής μειώνεται λόγω της δύναμης δράσης από τα shear keys. Η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ του μονόστυλου και του κομματιού μετάβασης προκύπτει όπως νωρίτερα από την Εξ. (9). Αυτή η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση μπορεί να εκφραστεί περαιτέρω με τη χρήση των Εξ. (6), (7) και (8), ως εξής:

$$\delta_v = \frac{6p R_p}{E L_g} \left(\frac{R_p^2}{t_p} + \frac{R_{TP}^2}{t_{TP}} \right) \quad (11)$$

Όπου:

E – το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

p – η μέγιστη ονομαστική πίεση επαφής στο πάνω και κάτω μέρος της σύνδεσης όπως υποδεικνύεται στην *Εικόνα 6.1*.

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

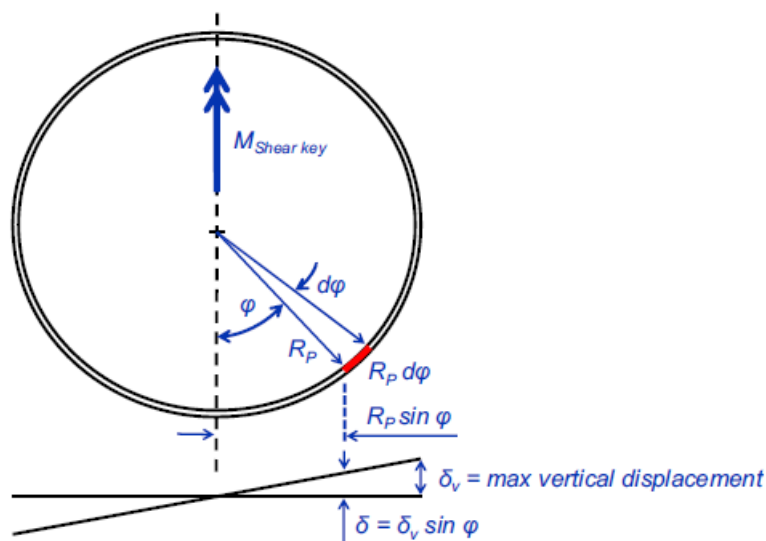
$$M_{shearkey} = 4 \int_0^{\pi/2} k_v R_p d\varphi R_p \sin\varphi (\delta_{v0} \sin\varphi) \quad (12)$$

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 στύλου.

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

Η παραπάνω σχέση προκύπτει με βάση το ακόλουθο σχήμα. [20]



Εικόνα 6.4: Μοντέλο ανάλυσης για τον υπολογισμό της $M_{Shearkey}$

- ❖ Κάνοντας την ολοκλήρωση, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση αντοχής:

$$M_{Shearkey} = \pi \delta_v n k_v R_p^2 \quad (13)$$

Όπου:

$M_{Shearkey}$ – 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 [20]

- ❖ Η συνολική δυσκαμψία από όλα τα shear keys υπολογίζεται ως:

$$k_{vn} = n k_v \quad (14)$$

Τα shear keys τοποθετούνται στην κεντρική περιοχή του grout (Εικόνα 6.3). Αυτό συμβαίνει διότι είναι προτιμητέο να τοποθετούνται σε μια περιοχή χωρίς σημαντικό άνοιγμα κατά τη φόρτωση της ροπής. Η κατακόρυφη ακαμψία του transition piece αντιπροσωπεύει το ήμισυ του ενεργού ύψους L_g .

$$k_{TP} = \frac{2t_p E}{L_g} \quad (15)$$

- ❖ Το αντίστροφο της δυσκαμψίας είναι η ευκαμψία (γενικά):

$$f = \frac{1}{k} \quad (16)$$

- ❖ Θεωρείται ότι τα μέλη είναι τοποθετημένα σε σειρά, οπότε η συνολική ευκαμψία προκύπτει από την παρακάτω σχέση.

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{1}{k_{vn}} + \frac{1}{k_{TP}} \quad (17)$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να υπολογιστεί το k_{eff} . Στη συνέχεια η εξίσωση (13) μετατρέπεται έτσι ώστε να συμπεριλάβει τη δυσκαμψία όλων των shear keys και την αξονική δυσκαμψία του transition piece. Η προκύπτουσα ροπή αντοχής λόγω των shear keys, γράφεται ως:

$$M_{shearkeys} = \pi \delta_{v0} k_{eff} R_p^2 \quad (18)$$

Η k_{eff} είναι σε μονάδες N/mm²

Από τις εξισώσεις (1), (2), (3), (10), (11) και (18) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για την ονομαστική πίεση επαφής.

$$p = \frac{3\pi M_{tot} E L_g}{E L_g \left\{ R_p L_g^2 (\pi + 3\mu) + 3\pi \mu R_p^2 L_g \right\} + 18\pi^2 k_{eff} R_p^3 \left(\frac{R_p^2}{t_p} + \frac{R_{TP}^2}{t_{TP}} \right)} \quad (19)$$

Όπου:

M_{tot} – είναι 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 – ο χαρακτηριστικός συντελεστής τριβής (Η τιμή $\mu = 0.4$ χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστική τιμή σχεδιασμού και η τιμή $\mu = 0.7$ χρησιμοποιείται για αξιολόγηση των δεδομένων εργαστηριακών δοκιμών) [20]

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο κατά την ένταση της ανεμογεννήτριας δημιουργούνται θλιπτήρες στο ένεμα μεταξύ των shear keys και των στύλων, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 6.5*.

Από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων των grouted connections παρατηρείται ότι τα compression struts (θλιπτήρες) αναπτύσσονται μεταξύ των shear keys στο κομμάτι μετάβασης και των shear keys στον μονόστυλο

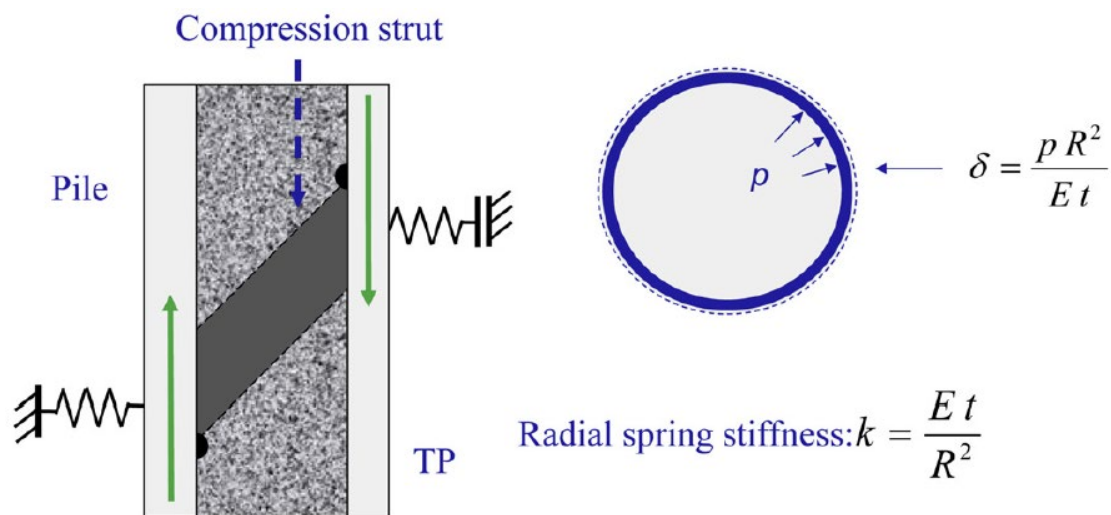
όταν το κομμάτι μετάβασης μετατοπίζεται κατακόρυφα σε σχέση με τον μονόστυλο. Καθώς αυξάνεται η φόρτιση από το κομμάτι μετάβασης, παρατηρείται ότι

οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στο grout ως προς τον θλιπτήρα, οδηγούν σε ρωγμή του grout, η οποία έχει παράλληλη διεύθυνση με τον θλιπτήρα.

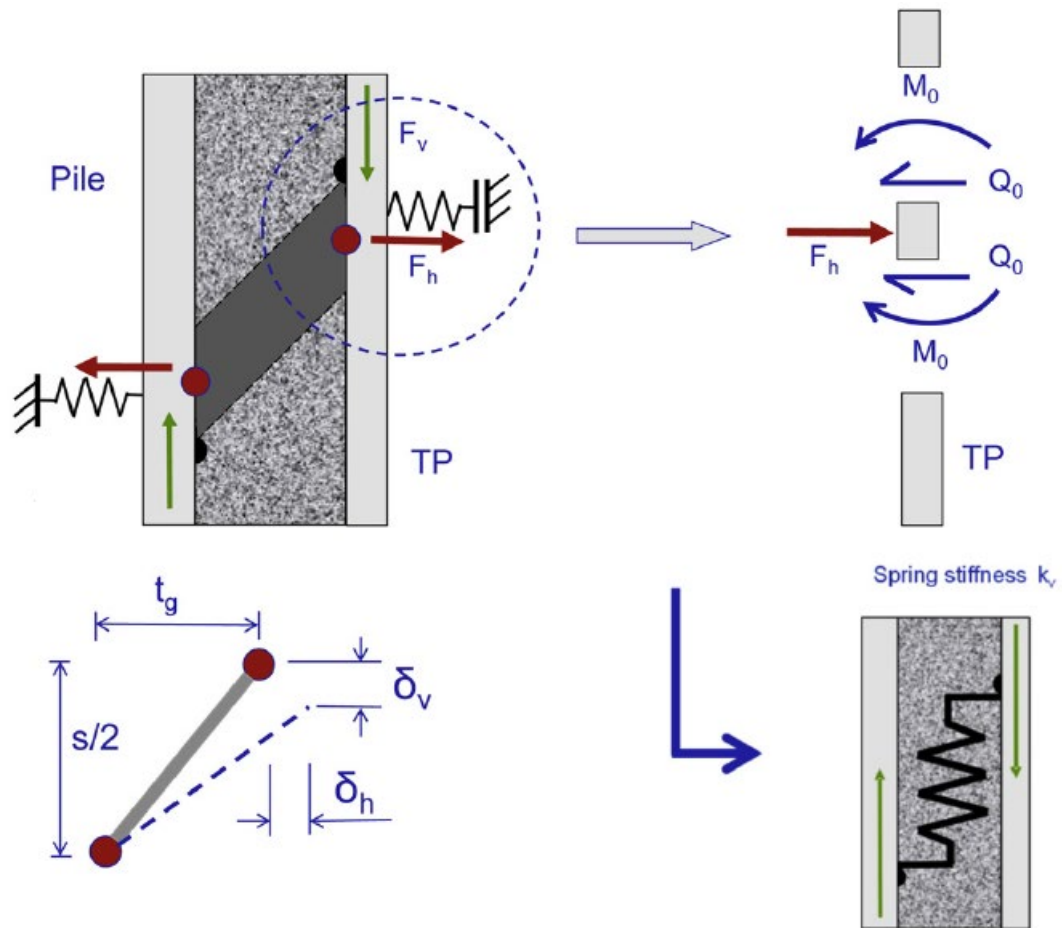
Η δυσκαμψία ελατηρίου, που αντιπροσωπεύει τη δυσκαμψία της grouted connection με τα shear keys, προέρχεται από ένα μοντέλο ανάλυσης όπως φαίνεται στην *Εικόνα 6.5*. Υποτίθεται ότι αναπτύσσεται ένα compression strut μεταξύ ενός shear key στην εσωτερική πλευρά του στοιχείου μετάβασης και ενός shear key στην εξωτερική πλευρά του στύλου.

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. [20] Το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο του Young) για υψηλής αντοχής grout που χρησιμοποιείται σε monopile κατασκευές είναι μεγάλο, συνήθως της τάξης των 50.000 MPa. Έτσι, το grout γίνεται άκαμπτο σε σχέση με την ακτινική συμπίεση και τη διατμητική παραμόρφωση.

Η κύρια ευκαμψία της σύνδεσης οφείλεται στην ακτινική παραμόρφωση του στύλου και του στοιχείου μετάβασης στα άκρα του θλιπτήρα. Αυτές οι ευκαμψίες μπορούν να αναπαρασταθούν με ελατήρια όπως φαίνεται στην *Εικόνα 6.5*. Η σχετική ολίσθηση στην κατακόρυφη διεύθυνση μεταξύ των στύλων καθορίζεται κυρίως από την ελαστική παραμόρφωση των στύλων που προσομοιάζονται με οριζόντια ελατήρια όπως φαίνεται στην εικόνα αυτή. 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 (*Εικόνα 6.6*).



Εικόνα 6.5: Θλιπτήρας (compression strut)



Εικόνα 6.6: Μετατροπή οριζόντιου ελατηρίου σε κατακόρυφο

- ❖ Από αυτό το σχήμα προκύπτει η ακόλουθη σχέση (δύναμη ανά μονάδα μήκους περιφέρειας).

$$Q_0 = \frac{F_h}{2} \quad (20)$$

- ❖ Για την ροπή στο στοιχείο μετάβασης εφαρμόζεται η παρακάτω εξίσωση.

$$M_0 = -\frac{Q_0 l_{eTP}}{2} \quad (21)$$

Όπου το l_{eTP} είναι το ελαστικό μήκος του στοιχείου μετάβασης, το οποίο ορίζεται ως:

$$l_{eTP} = \frac{\sqrt{R_{TP} t_{TP}}}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \quad (22)$$

- ❖ Η σχέση μεταξύ της δύναμης και της ακτινικής μετατόπισης του στοιχείου μετάβασης δίνεται παρακάτω:

$$F_h = \delta_{hTP} \frac{8D_{TP}}{l_{eTP}^3} \quad (23)$$

Όπου το δ_{hTP} είναι η ακτινική παραμόρφωση του στοιχείου μετάβασης για οριζόντια δύναμη F_h και η D_{TP} είναι η δυσκαμψία του, η οποία ορίζεται ως:

$$D_{TP} = -\frac{E t_{TP}^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (24)$$

- ❖ Ομοίως η σχέση μεταξύ της δύναμης και της ακτινικής μετατόπισης του στύλου προκύπτει ως:

$$F_h = \delta_{hp} \frac{8D_p}{l_{ep}^3} \quad (25)$$

Όπου το δ_{hp} είναι η ακτινική παραμόρφωση του στύλου για οριζόντια δύναμη F_h και η D_p είναι η δυσκαμψία του, η οποία ορίζεται ως:

$$D_p = \frac{E t_p^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (26)$$

- ❖ Η συνολική παραμόρφωση του στοιχείου μετάβασης και του στύλου είναι η παρακάτω:

$$\delta_h = \delta_{hTP} + \delta_{hp} \quad (27)$$

- ❖ Η ακόλουθη σχέση λαμβάνεται από ισορροπία ροπών του θλιπτήρα στην *Εικόνα 6.6*.

$$\frac{S}{2}F_h = t_g F_v \quad (28)$$

Όπου το s είναι η απόσταση μεταξύ των shear keys (ή $s/2$ όπως φαίνεται στην *Εικόνα 6.6* καθώς θεωρείται ότι τα shear keys στην πλευρά του monopile είναι μεταξύ εκείνων που βρίσκονται στην πλευρά του transition piece).

Από την *Εικόνα 6.6* προκύπτει η ακόλουθη σχέση όσον αφορά τις κάθετες και οριζόντιες μετατοπίσεις (υποθέτοντας ότι οι μετακινήσεις οδηγούν σε μια μικρή περιστροφή του θλιπτήρα)

$$\frac{\delta_h}{s/2} = \frac{\delta_v}{t_g} \quad (29)$$

Όπου το δ_v είναι η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση του στοιχείου μετάβασης. Από τις εξισώσεις (23) έως (29) προκύπτει η ακόλουθη κατακόρυφη ακαμψία ελατηρίου σε μονάδες μήκους shear key.

$$k_v = \frac{s^2 E}{2^4 \sqrt{3(1-\nu^2)} t_g^2 \left\{ \left(\frac{R_p}{t_p} \right)^{3/2} + \left(\frac{R_{TP}}{t_{TP}} \right)^{3/2} \right\}} \quad (30)$$

$$\text{όπου τώρα: } k_v = \frac{F_v}{\delta_v} \quad (31)$$

Επίσης, υπάρχει μια ευκαμψία στο στοιχείο μετάβασης από την κορυφή του μονοριπής έως το κέντρο των shear keys, όπως αντιπροσωπεύεται από την εξίσωση (15). Συνδυάζοντας τις δυσκαμψίες όπως στην εξίσωση (17), προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για την ενεργή δυσκαμψία ελατηρίου ανά μήκος περιφέρειας της σύνδεσης με shear keys που δρα στην κατακόρυφη διεύθυνση. [20]

$$k_{eff} = \frac{2 t_{TP} S_{eff}^2 n E}{4^4 \sqrt{3(1-\nu^2)} t_g^2 \left\{ \left(\frac{R_p}{t_p} \right)^{3/2} + \left(\frac{R_{TP}}{t_{TP}} \right)^{3/2} \right\} t_{TP} + n S_{eff}^2 L_g} \quad (32)$$

Όπου:

R_p – η εξωτερική ακτίνα του στύλου μονοριπής

t_p – το πάχος του στύλου μονοριπής

R_{TP} – η εξωτερική ακτίνα του στοιχείου μετάβασης

t_{TP} – το 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 key (ο αριθμός των shear keys που υπάρχουν σε κάθε πλευρά της σύνδεσης $n + 1$)

E – το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (210 GPa)

ν – ο λόγος του Poisson (0.3)

t_g – το πάχος του ενέματος

ψ – ο 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)

Αυτή η δυσκαμψία ελατηρίου μπαίνει στην εξίσωση (19) για τον υπολογισμό της ονομαστικής πίεσης επαφής. Στη συνέχεια, μπορεί να υπολογιστεί η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ του στοιχείου μετάβασης και του μονοριπτε από την εξίσωση (11).

- ❖ Η φόρτιση στα shear keys υπολογίζεται στη συνέχεια ως:

$$F_{vShk} = k_{eff} \delta_v \quad (33)$$

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

$$F_{vShk} = \frac{6pk_{eff}R_p}{E L_g} \left(\frac{R_p^2}{t_p} + \frac{R_{TP}^2}{t_{TP}} \right) + \frac{P}{2\pi R_p} \quad (34)$$

Όπου:

P – το 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) [20]

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

$$F_{v1Shk} = \frac{F_{vShk}}{n} \quad (35)$$

Όπου n – ο αριθμός των shear keys

7. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

7.1 Εισαγωγή στη FEM

Για την αριθμητική ανάλυση των σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, με τη χρήση σύγχρονων υπολογιστικών μέσων, χρησιμοποιούνται διάφορες αριθμητικές μέθοδοι. Αν και η διατύπωση των περισσότερων προβλημάτων είναι πλέον δυνατή, η εύρεση της ακριβούς λύσεως, απαιτεί ιδιαίτερο υπολογιστικό χρόνο. Γι' αυτό λοιπόν, αναπτύχθηκαν οι προσεγγιστικές μέθοδοι. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, πρόκειται για μία αριθμητική μέθοδο επίλυσης προβλημάτων αυθαίρετης γεωμετρίας, οριακών συνθηκών και φορτίων, βασισμένη στις μεθόδους Rayleigh –Ritz [29] και σταθμικών υπολοίπων.

Ο στόχος της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων είναι η προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής με μικρότερα και απλούστερα στοιχεία τα οποία συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι διδιάστατα ή τρισδιάστατα στοιχεία. Για να γίνει χρήση μητρωικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό συνεχών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις κόμβων και οι παράγωγοί τους.

Καθώς οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων εξαρτώνται πλήρως από τις μετατοπίσεις των κόμβων, οι πλέον άγνωστοι του προβλήματος είναι οι επικόμβιες μετατοπίσεις, και έτσι το πρόβλημα από συνεχές μετατρέπεται σε διακριτό. Αφού λοιπόν ληφθούν υπόψη οι οριακές συνθήκες και η φόρτιση της κατασκευής, καταλήγουμε στις εξισώσεις ισορροπίας, που θα επιλυθούν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Επομένως, γνωρίζοντας τις κομβικές μετατοπίσεις, είναι δυνατός ο υπολογισμός των τάσεων (σ) και των παραμορφώσεων (ϵ) σε κάθε σημείο της κατασκευής, όπως και των αντιδράσεων (R) στις στηρίξεις.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, αν και αναπτύχθηκε για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής στερεών σωμάτων, εφαρμόζεται σε κάθε πρόβλημα μηχανικής που περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους.

7.2 Ιστορική αναδρομή της FEM

Οι αρχές της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων, αναπτύχθηκαν το 1909 από τον Γερμανό μαθηματικό Ritz ενώ το 1915 μελετήθηκαν σε βάθος από τον Ρώσο μαθηματικό Galerkin. Ωστόσο, λόγω της απουσίας ηλεκτρονικού υπολογιστή, η μέθοδος δεν αναπτύχθηκε περαιτέρω αλλά ούτε και διαδόθηκε. Η ιδέα ανάπτυξης της μεθόδου γεννήθηκε στην αεροναυπηγική, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου, για την αντιμετώπιση προβλημάτων στην κατασκευή αεροσκαφών.

Τα πρώτα ουσιαστικά βήματα έγιναν το 1941 όταν ο Hrenikoff [30] επινόησε μία μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων ελαστικότητας δύο διαστάσεων, προσεγγίζοντας το πεδίο με ισοδύναμες ράβδους και δοκούς. Ακολούθησε το 1943, η θεωρία του Γερμανού μαθηματικού Courant [31] αλλά δεν εφαρμόστηκε καθώς δεν υπήρχε ακόμα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Ακολούθησαν αρκετές δημοσιεύσεις, την περίοδο 1954-1960, όπως αυτές του Ι. Αργύρη και των συνεργατών του, καθώς και των Αμερικανών Turner, Clough, Martin και Top. [32]

Η πρώτη επίσημη παρουσίαση της μεθόδου έγινε το 1960, από τους I. Argyrη και Kelsey. [33] Η ονομασία "Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων" (Finite Element Method – F.E.M) χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το 1960, από τον καθηγητή του πανεπιστημίου "University of California", και από τότε καθιερώθηκε. Το πρώτο βιβλίο με θέμα τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων γράφτηκε το 1967 από τους Zienkiewicz και Cheung. [34] Τα πρώτα πεπερασμένα που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν τα στοιχεία επίπεδης έντασης ή επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ στην πορεία χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα στοιχεία, στοιχεία κελυφών και γενικά στοιχεία για διάφορες μορφές κατασκευών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα και μεγάλες παραμορφώσεις. Το βιβλίο του Oden για τα μη γραμμικά συνεχή εμφανίστηκε το 1972. Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν στην δεκαετία του 1970 και περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων στοιχείων, μελέτες σύγκλισης και άλλους σχετικούς τομείς. Σήμερα, οι εξελίξεις στους μεγάλους H/Y και η διαθεσιμότητα μικροϋπολογιστών έχουν φέρει την μέθοδο αυτή στη διάθεση σπουδαστών και μηχανικών που εργάζονται σε μικρές βιομηχανίες.

Το πρώτο πλέγμα ινών Bragg κατασκευάστηκε από τον Ken Hill το 1978. Αρχικά, τα πλέγματα κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας ένα ορατό λέιζερ που διαδίδεται κατά μήκος του πυρήνα της ίνας. Το 1989, ο Gerald Meltz και οι συνεργάτες του έδειξαν την πολύ πιο ευέλικτη εγκάρσια τεχνική ολογραφική επιγραφή όπου ο φωτισμός λέιζερ προήλθε από την πλευρά της ίνας. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί το μοτίβο παρεμβολής του υπεριώδους φωτός λέιζερ για να δημιουργήσει την περιοδική δομή του πλέγματος ινών Bragg.

Παρόλο που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα στην γραμμική ελαστική περιοχή, σήμερα είναι πλέον εφαρμόσιμα σε διαφόρων ειδών προβλήματα, όπως δυναμικής συμπεριφοράς, λυγισμού ή και σε προβλήματα με μη γραμμική απόκριση και συμπεριφορά υλικού.

8. Μοντελοποίηση και υπολογισμός

8.1 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 προκύπτουσα παραμόρφωση. Η κατάσταση της δυσμενέστερης έντασης μπορεί να προκύψει από τη γραμμική υπέρθεση και συνδυασμό των επιμέρους εντάσεων. [23]

❖ Ανάλυση συχνοτήτων (Frequency Analysis):

Στην ανάλυση συχνοτήτων υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες και τα modes των στοιχείων της κατασκευής. 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. [23]

❖ Δυναμική ανάλυση (Dynamic Analysis):

Κάνοντας υπέρθεση των modes βρίσκεται η απόκριση της κατασκευής στο χρόνο. [23]

❖ 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. Η ανάλυση γίνεται εφαρμόζοντας ένα σετ στατικών φορτίων. Τα φορτία αυτά πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή για να δώσουν την αντοχή σε λυγισμό. [23]

❖ Θερμική ανάλυση (Thermal Analysis):

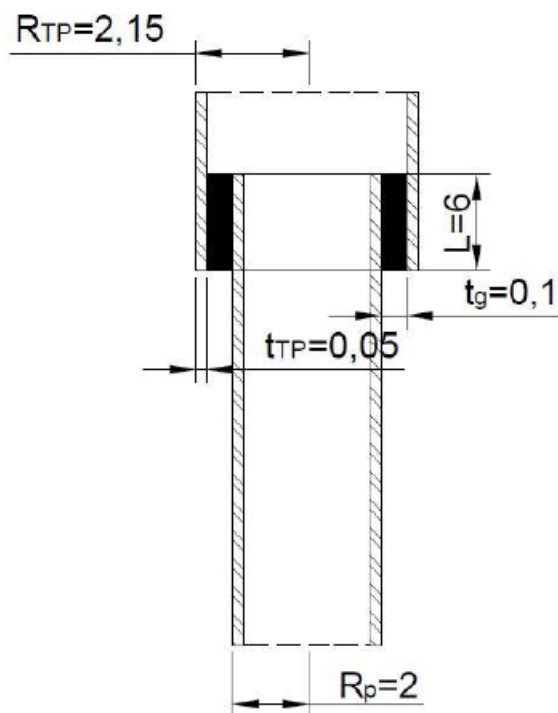
Αναλύεται η κατανομή της θερμοκρασίας με βάση την αρχική, φαινόμενα μεταφοράς κτλ. Αυτή είναι συνήθως μια ανάλυση που εξαρτάται από τον χρόνο, ωστόσο, δεν είναι χρονοβόρα καθώς υπάρχει μόνο ένας βαθμός ελευθερίας σε κάθε μοντελοποιημένο κόμβο. [23]

Στην παρούσα εργασία γίνεται στατική ανάλυση του προβλήματος. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του μοντέλου και την ανάλυσή του με πεπερασμένα στοιχεία είναι το ABAQUS CAE.

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

1. Σχεδίαση 3D μοντέλου στο ABAQUS.
2. Καθορισμός είδους ανάλυσης (π.χ. στατική).
3. Εισαγωγή υλικών κατασκευής και παράμετροι αυτών (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson κτλ.).
4. Δημιουργία πλέγματος κατασκευής – meshing (διαχωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία)
5. Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (π.χ. πάκτωση, κύλιση κτλ.) και τρόπος σύνδεσης μελών κατασκευής.
6. Επιβολή φορτίων
7. Επίλυση
8. Διαγράμματα (π.χ. τάσεων – παραμορφώσεων)

Η γεωμετρία του μοντέλου που επιλύεται επιλέχθηκε σύμφωνα με την μεταπτυχιακή εργασία της Γεωργίας Παπαευθυμίου [42]. Αποτελείται από το transition piece εξωτερικής διαμέτρου 4.30 m, πάχους 5 cm και μήκους 12 m, το grout πάχους 1 cm και μήκους 6 m και το monopile εξωτερικής διαμέτρου 4 m, πάχους 5 cm και μήκους 39 m, όπως στο παρακάτω σχήμα. [42]



Εικόνα 8.1: Γεωμετρία μοντέλου

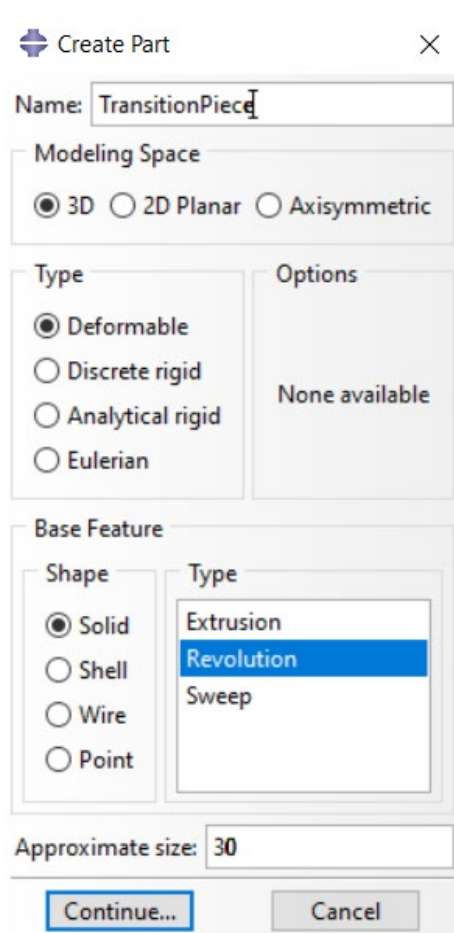
Ωστόσο, για λόγους οικονομίας χρόνου στην επίλυση, δεν μοντελοποιήθηκε ολόκληρος ο φορέας. Το monopile σχεδιάστηκε από το τμήμα της σύνδεσης κατά 8 m προς τα κάτω, σε μήκος δηλαδή διπλάσιο της διαμέτρου του, καθώς αυτό κρίνεται επαρκές για τη μελέτη της grouted connection. [21]

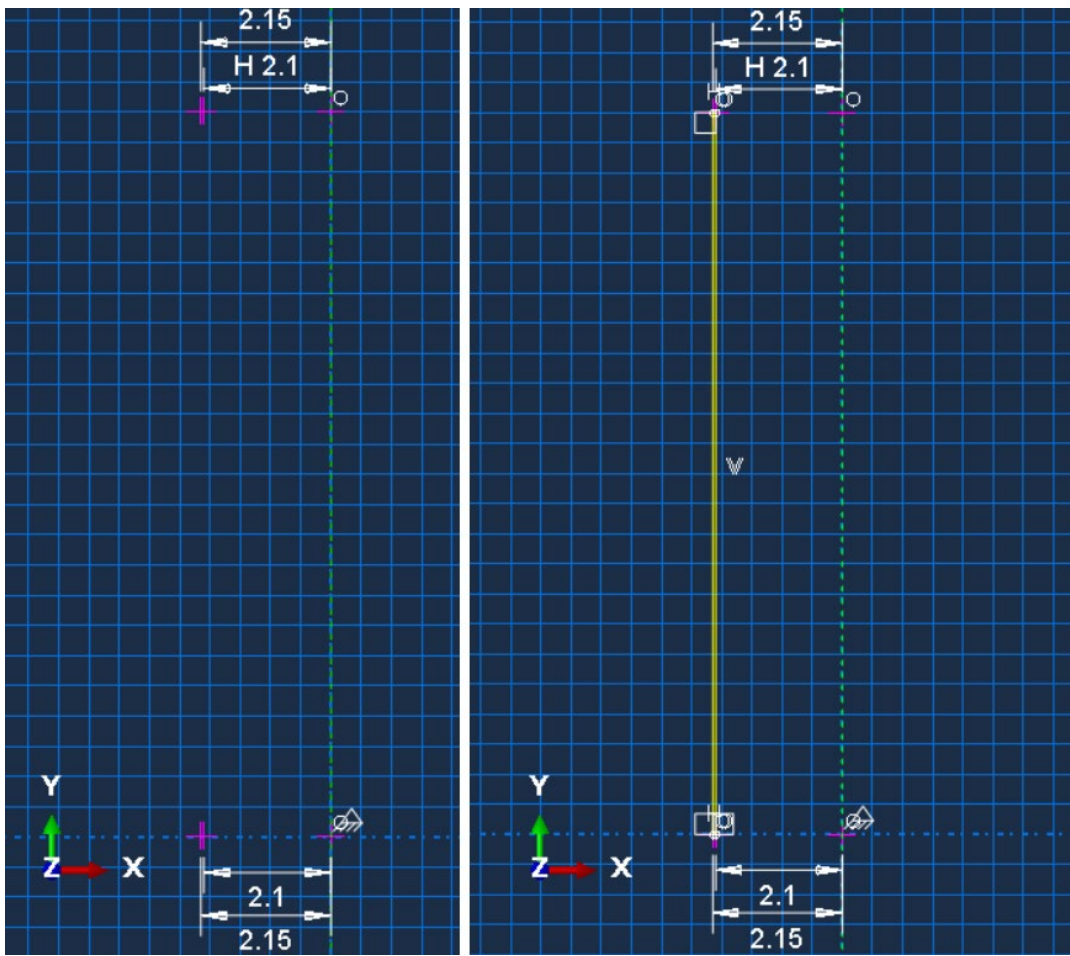
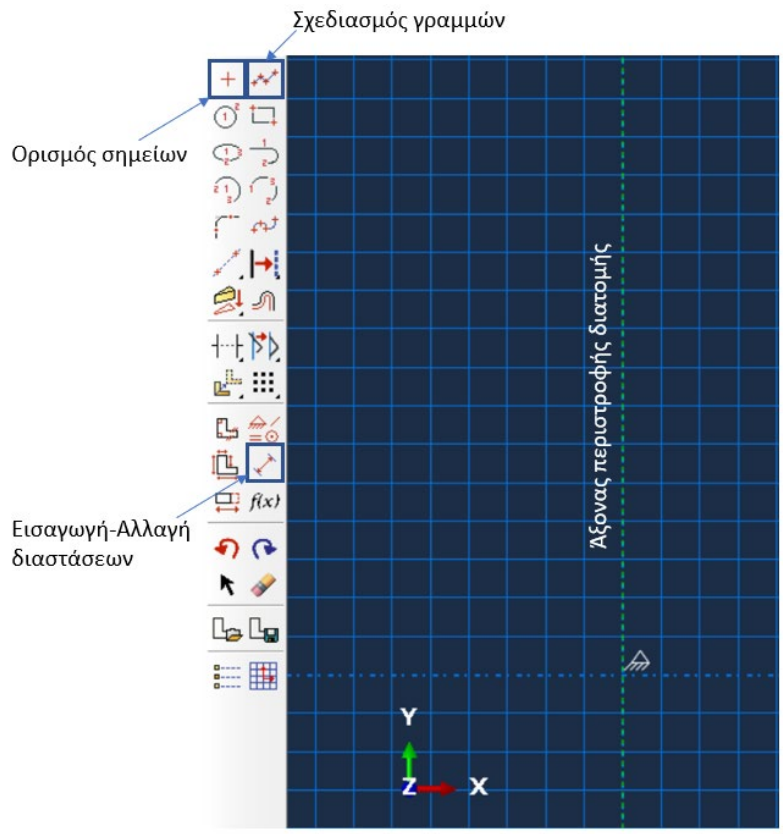
8.2 Μοντελοποίηση και υπολογισμός της σύνδεσης χωρίς shear keys

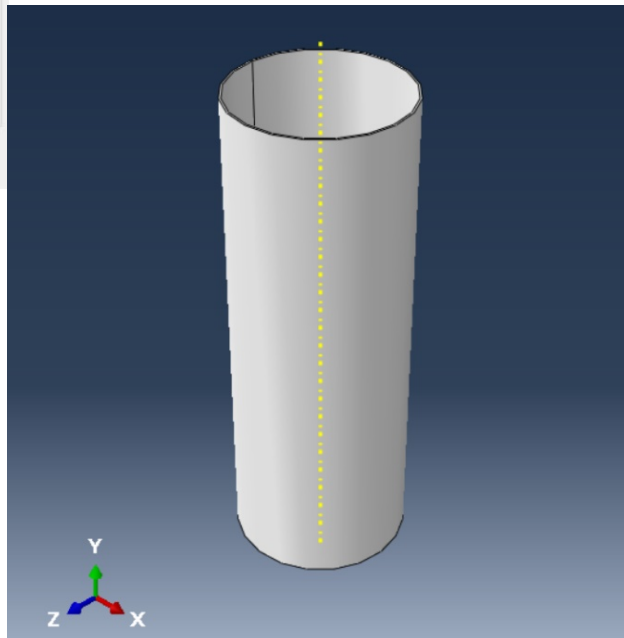
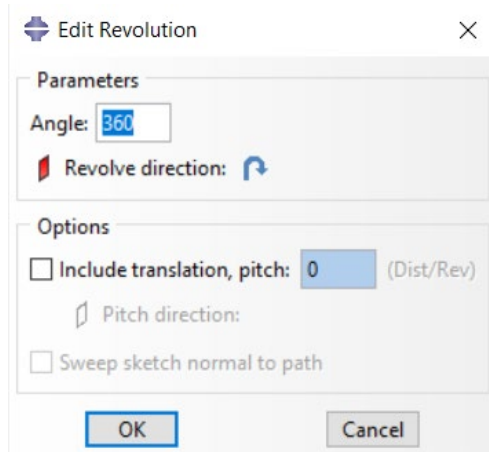
8.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας

Η εισαγωγή της γεωμετρίας των τριών στοιχείων (Transition piece, grout και monopile) έγινε στην επιλογή "Parts" στην αριστερή στήλη.

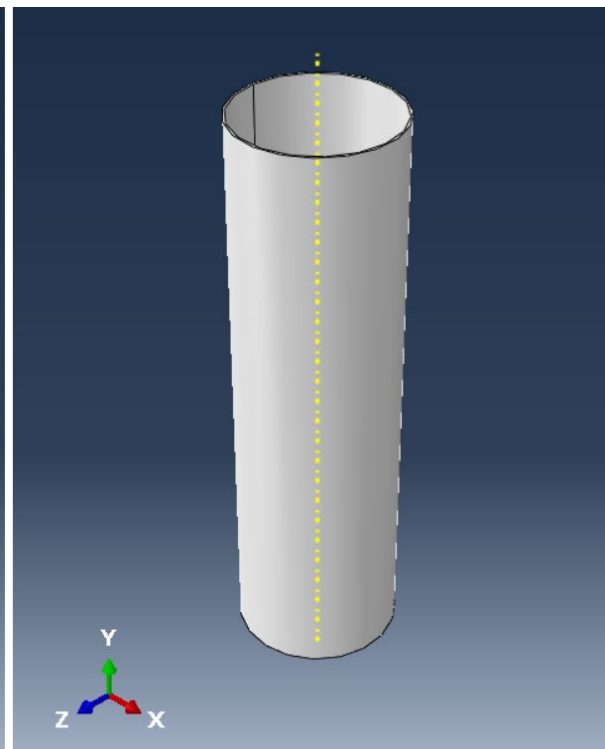
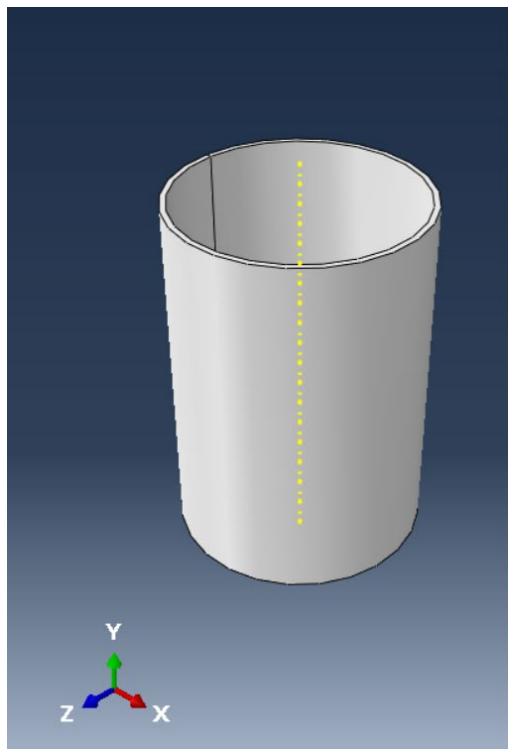
Στην επιλογή "Type" επιλέγουμε "Revolution" έτσι ώστε να σχεδιάσουμε την κατακόρυφη διατομή του εκάστοτε μέλους (πάχος και ύψος) και στη συνέχεια να την περιστρέψουμε κατά 360°, ώστε να δημιουργηθεί το μέλος.







Ομοίως δουλεύουμε για το grout και τον στύλο (monopile).



8.2.2 Εισαγωγή υλικών

Πίνακας 8.1: Yield strength [24]

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

Πίνακας 8.2: Ultimate tensile strength [24]

Thickness [mm]	Ultimate tensile strength S355 (DnV 1 NV36)	
	f_u [MPa]	f_{ud} [MPa]
$t \leq 100$	490	377

Πίνακας 8.3: Χαρακτηριστικές τιμές υλικών για χάλυβα [24]

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

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. Οι διάφορες ιδιότητες του υλικού αποκτιούνται με την προσθήκη αδρανών όπως χαλαζιακή άμμο ή βωξίτη. 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. [25]

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. [25]

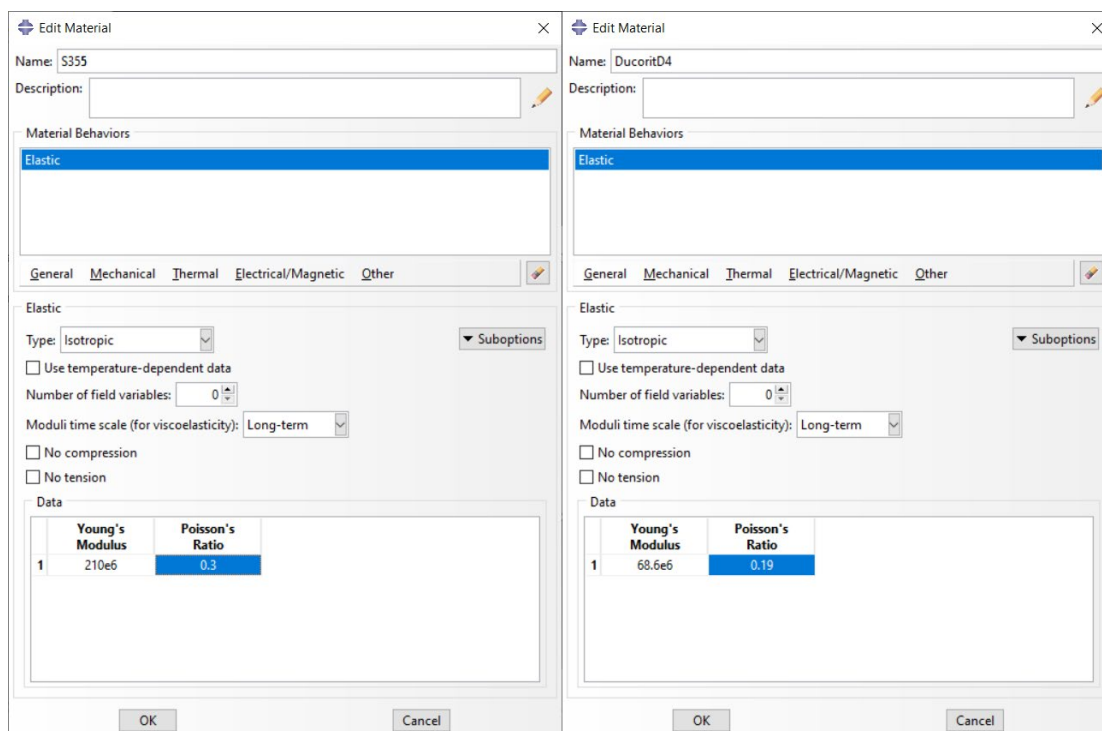
Το Ducorit αναπτύσσει γρήγορα σημαντικό μέρος της αντοχής του. Μετά από είκοσι τέσσερις ώρες σκλήρυνσης στους 20°C (68°F), η αντοχή φτάνει περίπου στο 25% της τελικής αντοχής του. Εξαιτίας της υψηλής αντοχής και σταθερότητας του υλικού, η αντοχή σε κόπωση είναι εξαιρετική σε σχέση με το κοινό σκυρόδεμα και μπορεί να είναι έως και 5 φορές μεγαλύτερη αυτής του κοινού σκυροδέματος. Ακολουθώς δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων κατηγοριών Ducorit. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε Ducorit D4.

Πίνακας 8.4: Μηχανικές ιδιότητες Ducorit [24]

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

Σε πρώτη φάση έγινε θεώρηση ότι το Ducorit είναι ένα γραμμικώς ελαστικό υλικό.

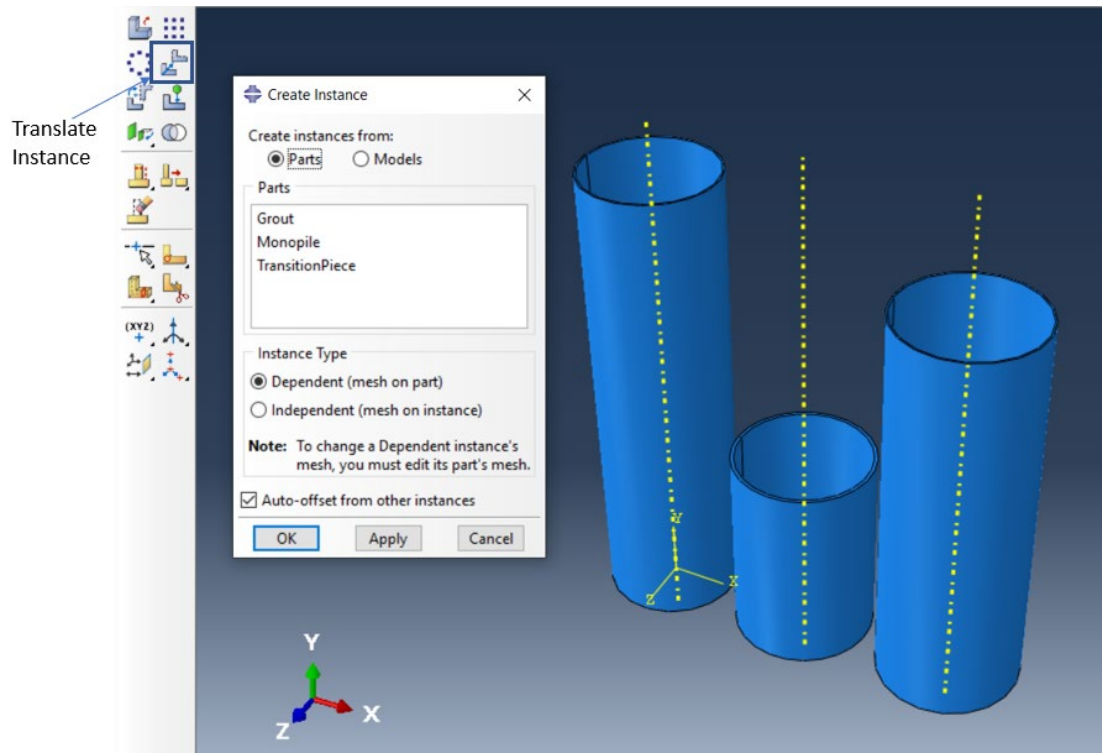
Για την εισαγωγή των υλικών στο ABAQUS, πηγαίνουμε στην επιλογή "Materials" και αμέσως μετά επιλέγουμε "Mechanical" → "Elasticity" → "Elastic" και δίνουμε τα στοιχεία για το κάθε υλικό.



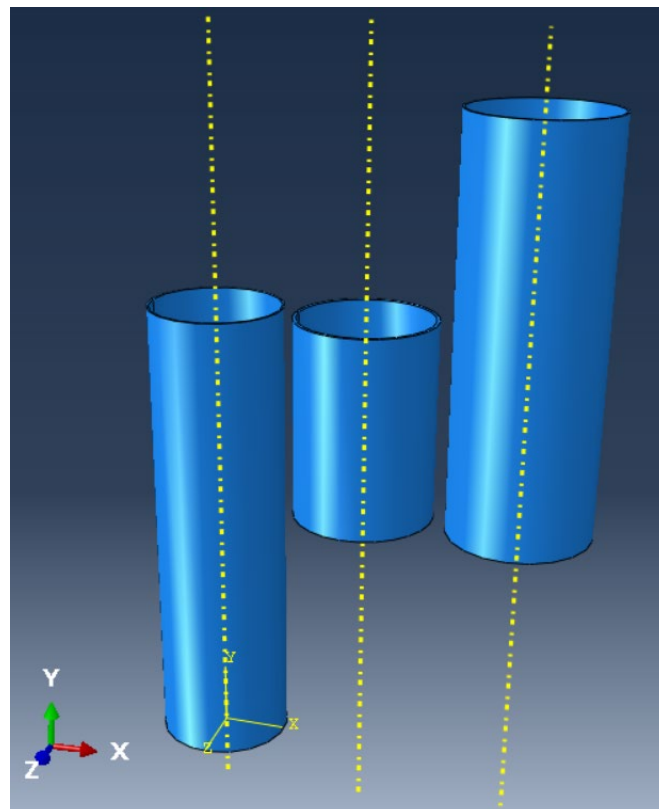
Εν συνεχεία, στην επιλογή "Sections", δημιουργείται η Section για το κάθε μέλος και εφαρμόζεται το υλικό. Τέλος, στην επιλογή "Section Assignment" εφαρμόζονται οι διατομές.

8.2.3 Σχηματισμός διατομής

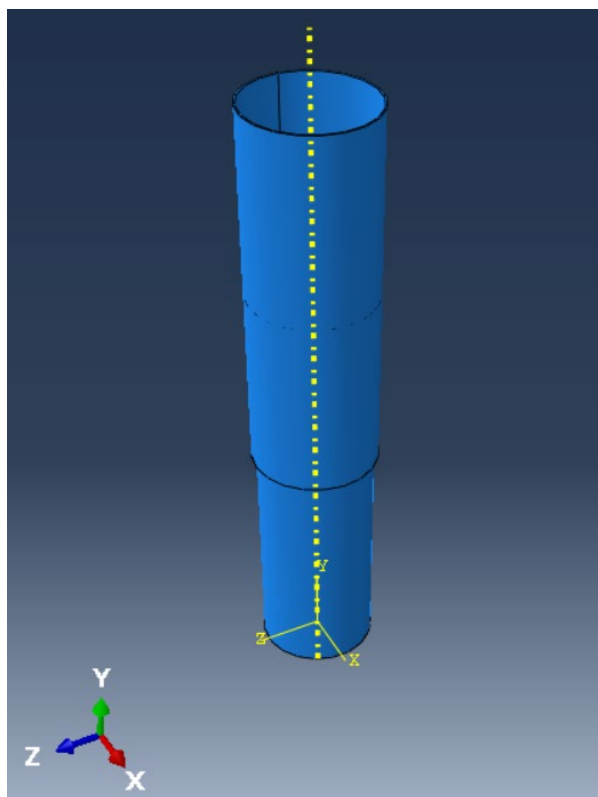
Για την ένωση των τριών μελών, ανοίγουμε την επιλογή "Assembly", επιλέγουμε "Instances" και προσθέτουμε τα τρία μέλη.



Στη συνέχεια επιλέγουμε "Translate Instance" για την σωστή κατακόρυφη τοποθέτησή τους.



Για να τοποθετηθούν και τα τρία μέλη έτσι ώστε να έχουν κοινό άξονα περιστροφής, πηγαίνουμε στο Menu → "Constraint" → "Coaxial". Τέλος, για να μετατραπούν οι νέες θέσεις σε "απόλυτες θέσεις", επιλέγουμε από το Menu → "Instance" → "Convert Constraints" → επιλέγουμε όλη τη σύνδεση → "Done".

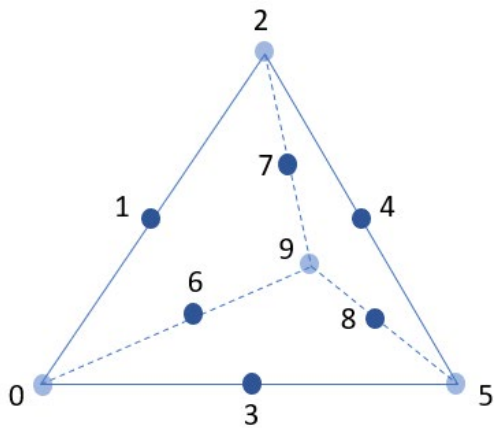


8.2.4 Διακριτοποίηση της σύνδεσης με πεπερασμένα στοιχεία

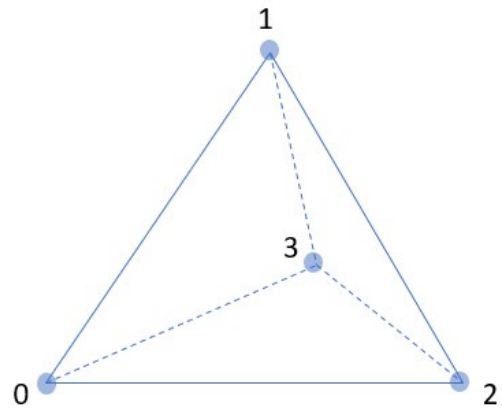
Για την προσομοίωση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία (meshing) απαιτείται η κατανόηση της δομητικής συμπεριφοράς της κατασκευής για την επιλογή του κατάλληλου τύπου και πλήθους στοιχείων. Θα πρέπει να αποφευχθούν στοιχεία με κακή γεωμετρία ή μεγάλου μεγέθους, τα οποία αδυνατούν να καταγράψουν απότομες μεταβολές των εντατικών μεγεθών στην κατασκευή, καθώς επίσης θα πρέπει να αποφευχθεί η άσκοπη πύκνωση του δικτύου η οποία απαιτεί χρόνο προετοιμασίας υπολογιστικής εργασίας χωρίς να προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, απαιτείται η κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής στη φόρτιση που υποβάλλεται καθώς επίσης και η γνώση των ιδιοτήτων και των δυνατοτήτων – αδυναμιών των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. [27]

Το μοντέλο διακριτοποιήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία (elements). Έγιναν αρκετές δοκιμές, με διάφορες πυκνότητες πλέγματος, άλλοτε με πιο πυκνά στοιχεία και άλλοτε με λιγότερο. Το πρόβλημα πρέπει να συγκλίνει και να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και με όχι υπερβολικά μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γεωμετρίες μερικών πεπερασμένων στοιχείων.

C3D10 (10 κόμβοι)

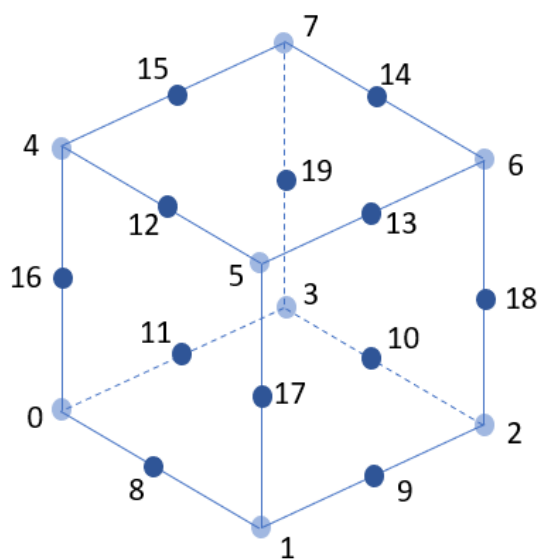


C3D4 (4 κόμβοι)

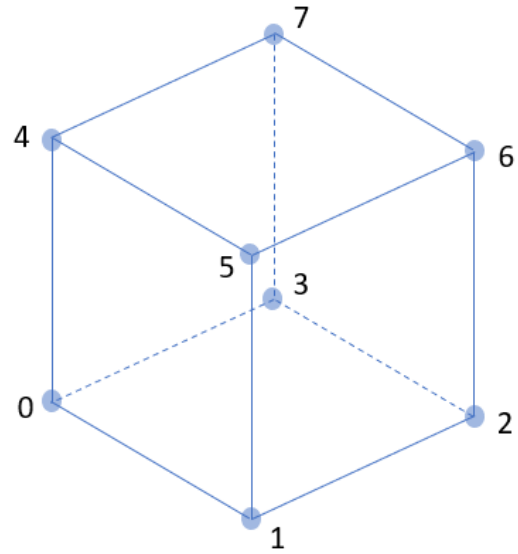


Εικόνα 8.2: Τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία α) quadratic β) linear

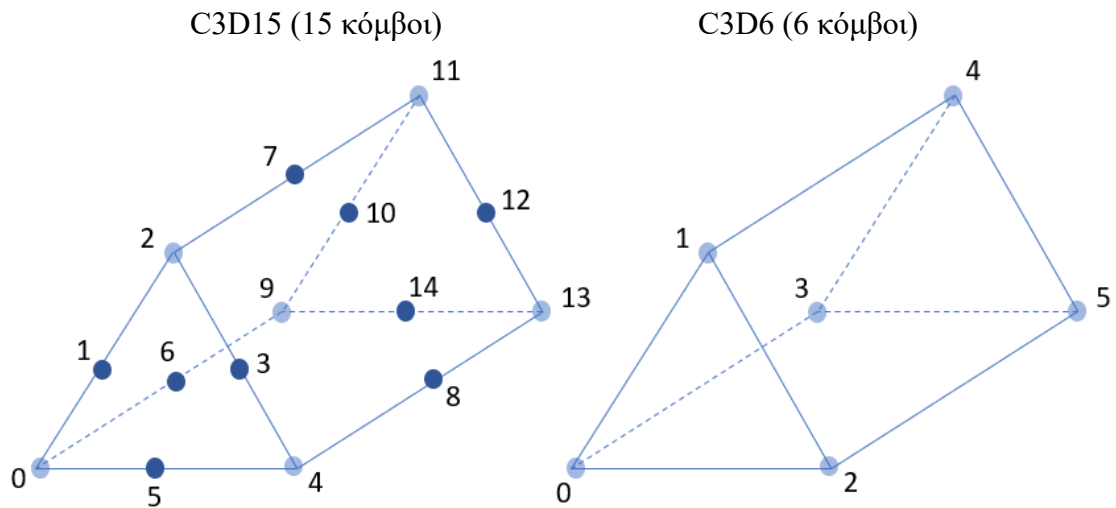
C3D20R (20 κόμβοι)



C3D8R (8 κόμβοι)



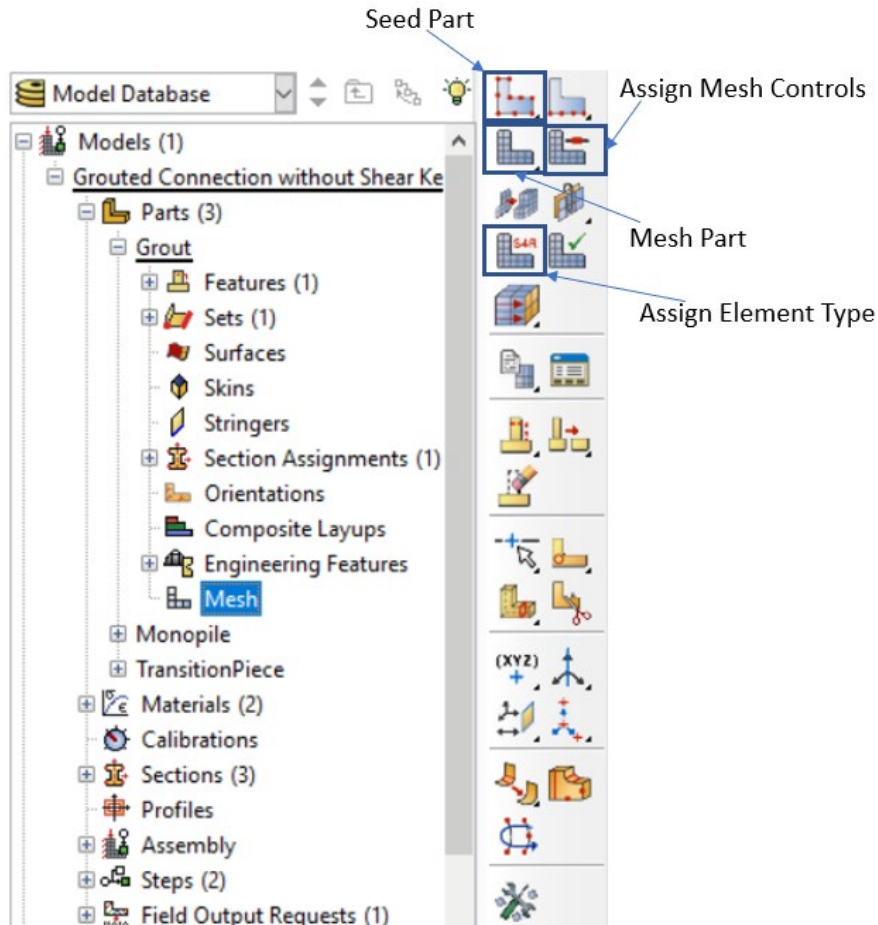
Εικόνα 8.3: Εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία α) quadratic β) linear



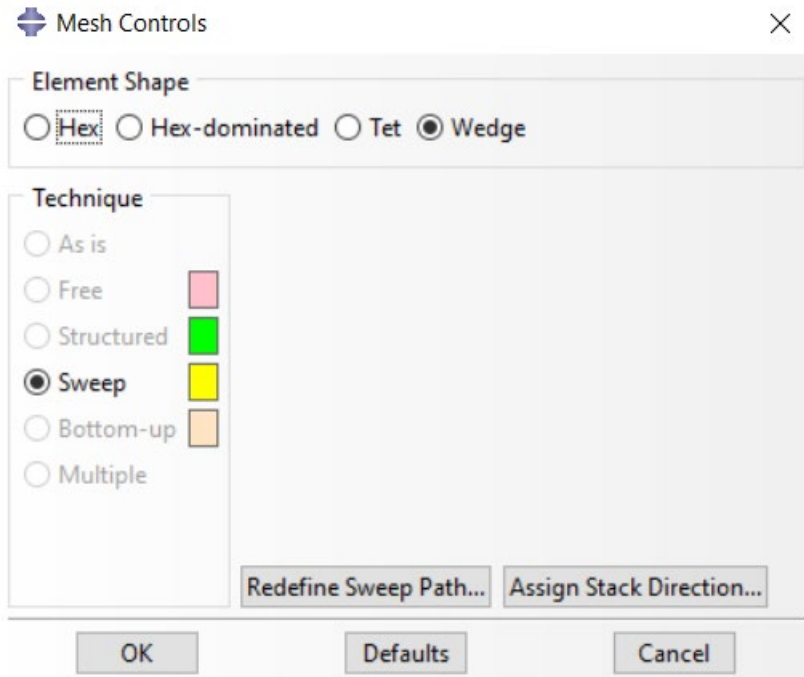
Εικόνα 8.4: Πενταεδρικά πεπερασμένα στοιχεία α) quadratic β) linear

Έγιναν αρκετές δοκιμές με διάφορα στοιχεία. Τελικώς, επιλέχθηκαν και για τα τρία μέλη, πενταεδρικά linear στοιχεία, διότι με αυτά δεν εμφανίστηκε κάποιο πρόβλημα στον έλεγχο αξιοπιστίας.

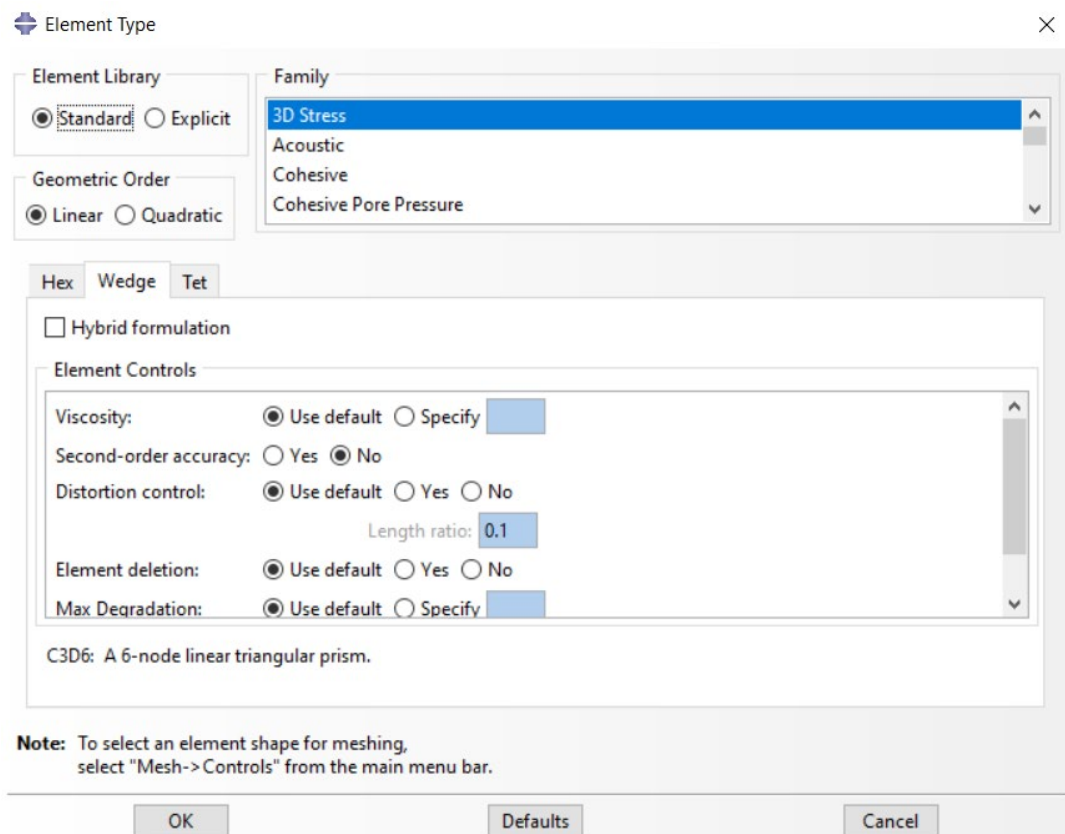
Για την διακριτοποίηση στο ABAQUS, πηγαίνουμε στο εκάστοτε υλικό ("Parts" στην αριστερή στήλη) και επιλέγουμε "Mesh".



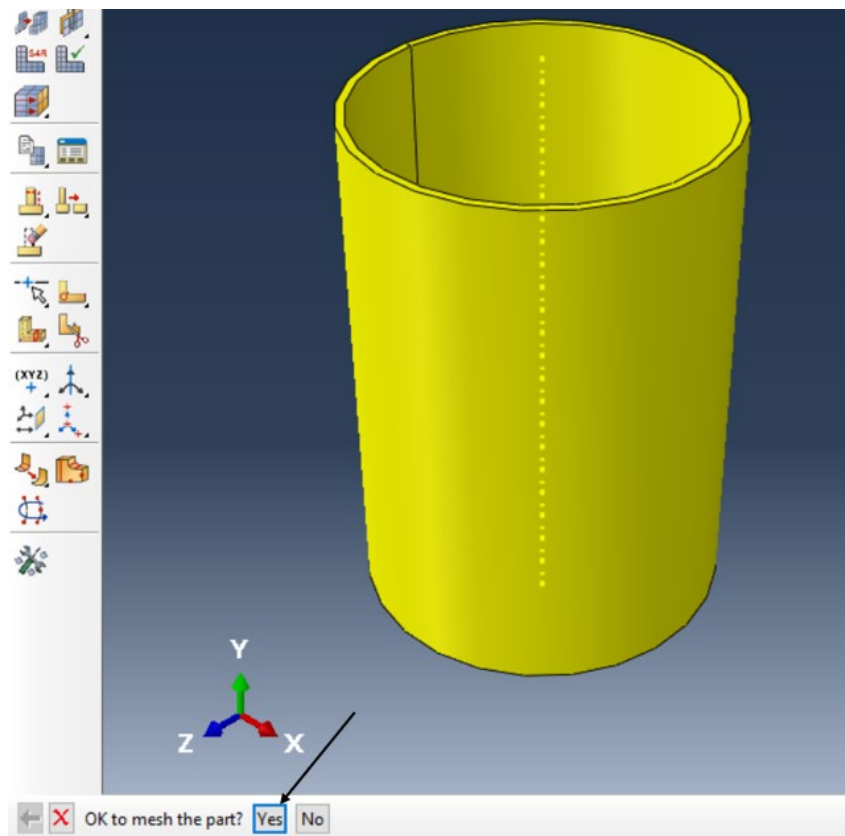
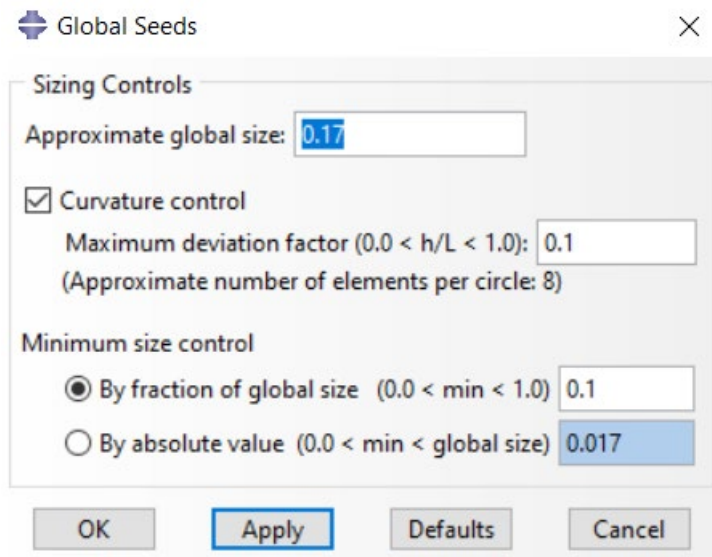
Στις επιλογές που εμφανίζονται επιλέγουμε "Assign Mesh Controls" και έπειτα "Wedge" για πενταεδρικά στοιχεία → "OK".



Στη συνέχεια επιλέγουμε "Assign Element Type" → επιλέγουμε το μέλος που θέλουμε να διακριτοποιήσουμε → "Done" → και στο παράθυρο που εμφανίζεται πατάμε "OK".



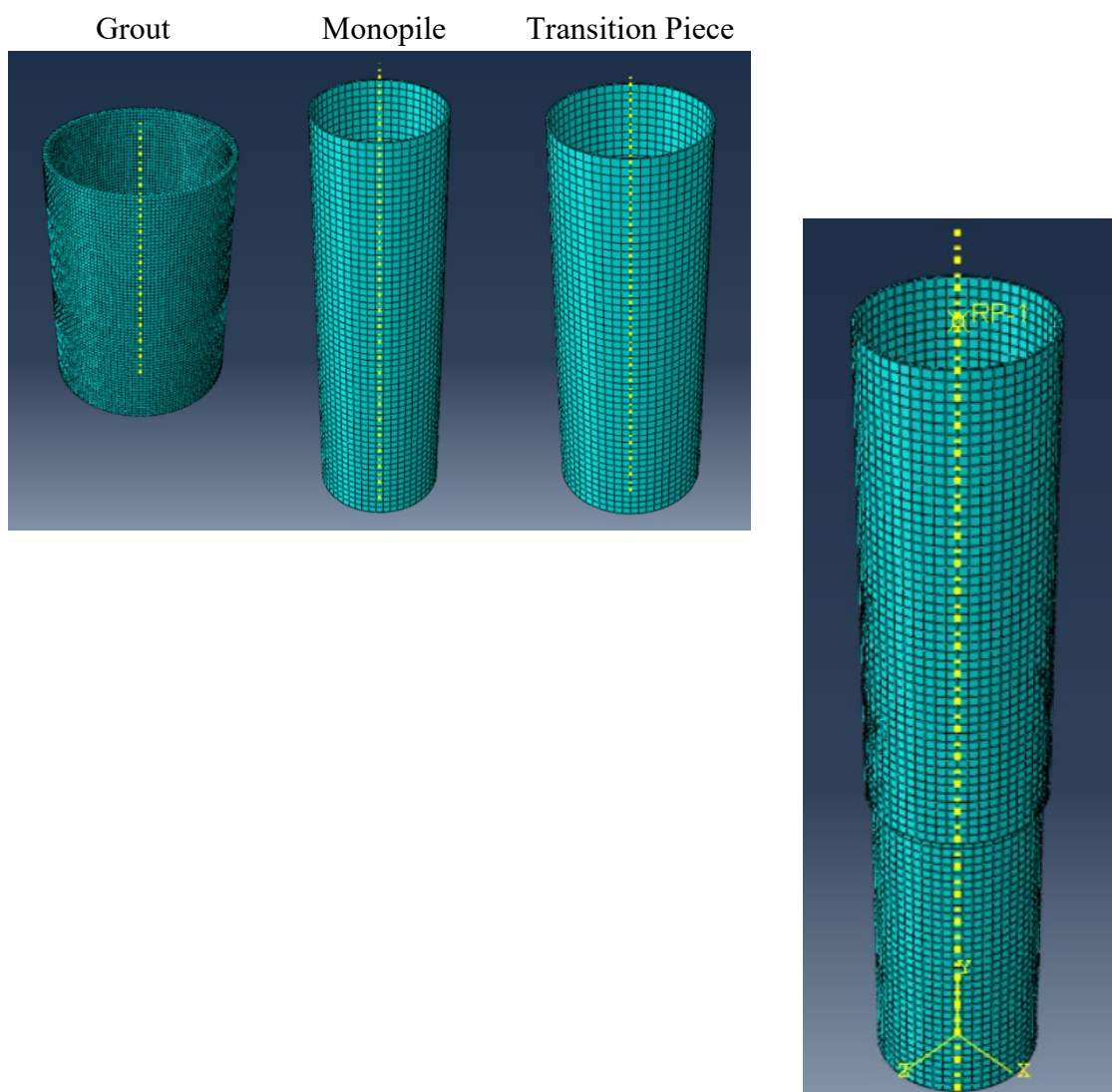
Στην επιλογή "Seed Part" ορίζουμε το μέγεθος των στοιχείων και τέλος, στην επιλογή "Mesh Part" γίνεται η διακριτοποίηση, πατώντας "Yes".



Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τιμές του προβλήματος πρέπει να συγκλίνουν. Έτσι, έγιναν αρκετές αναλύσεις με διάφορες τιμές στο μέγεθος των στοιχείων (Approximate global size). Στον παρακάτω πίνακα ελέγχονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των τάσεων (Von Mises) για τα μεταλλικά μέλη και το grout, στις διάφορες αναλύσεις. Για το grout απαιτούνται πολύ πυκνά στοιχεία, οπότε επιλέχθηκε

η τιμή 0.08. Για τα μεταλλικά στοιχεία παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις, οπότε επιλέχθηκε η τιμή 0.24.

Von Mises Stresses								
Approximate global size	Maximum value (kPa)				Minimum value (kPa)			
	TP & Pile		Grout		TP & Pile		Grout	
ν	stress	απόκλιση από $\nu+0.01$	stress	απόκλιση από $\nu+0.01$	stress	απόκλιση από $\nu+0.01$	stress	απόκλιση από $\nu+0.01$
0.15	123681	67	27687	-1563	737	-272	518	35
0.16	123614	-50	29250	389	1009	268	483	24
0.17	123664	18	28861	154	741	566	459	21
0.18	123646	-15	28707	-138	175	-947	438	9
0.19	123661	125	28845	1901	1122	6	429	4
0.20	123536	-88	26944	-1636	1116	-29	425	-8
0.21	123624	-5	28580	557	1145	693	433	-12
0.22	123629	128	28023	1672	452	-812	445	-18
0.23	123501	-182	26351	198	1264	-78	463	-37
0.24	123683	229	26153	255	1342	-91	500	-31
0.25	123454	-	25898	-	1433	-	531	-

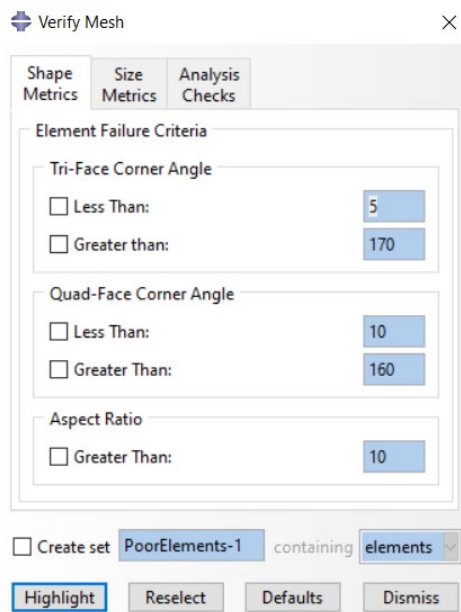


Στην συνέχεια, εξετάζεται ο λόγος αναλογιών (aspect ratio), ώστε τα πεπερασμένα στοιχεία να είναι αξιόπιστα.

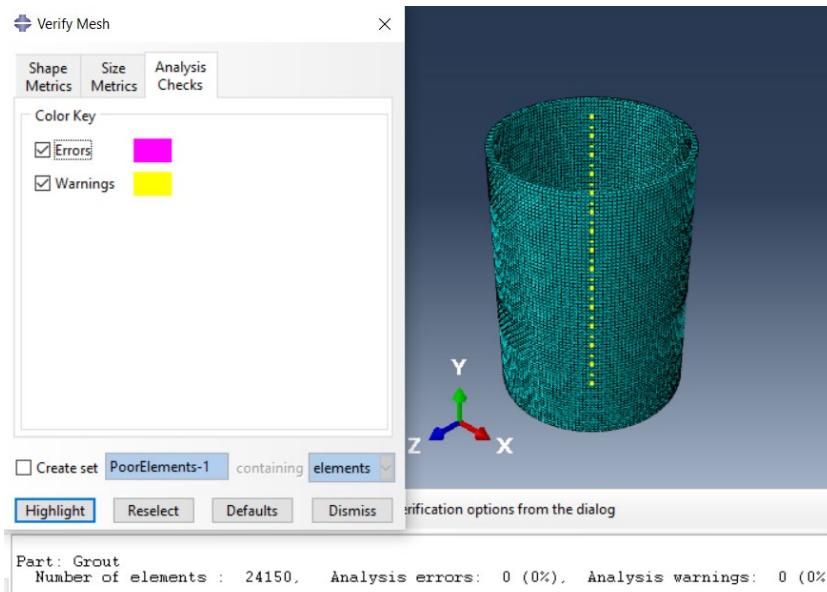
Table 1. Element shape selection criteria limits.

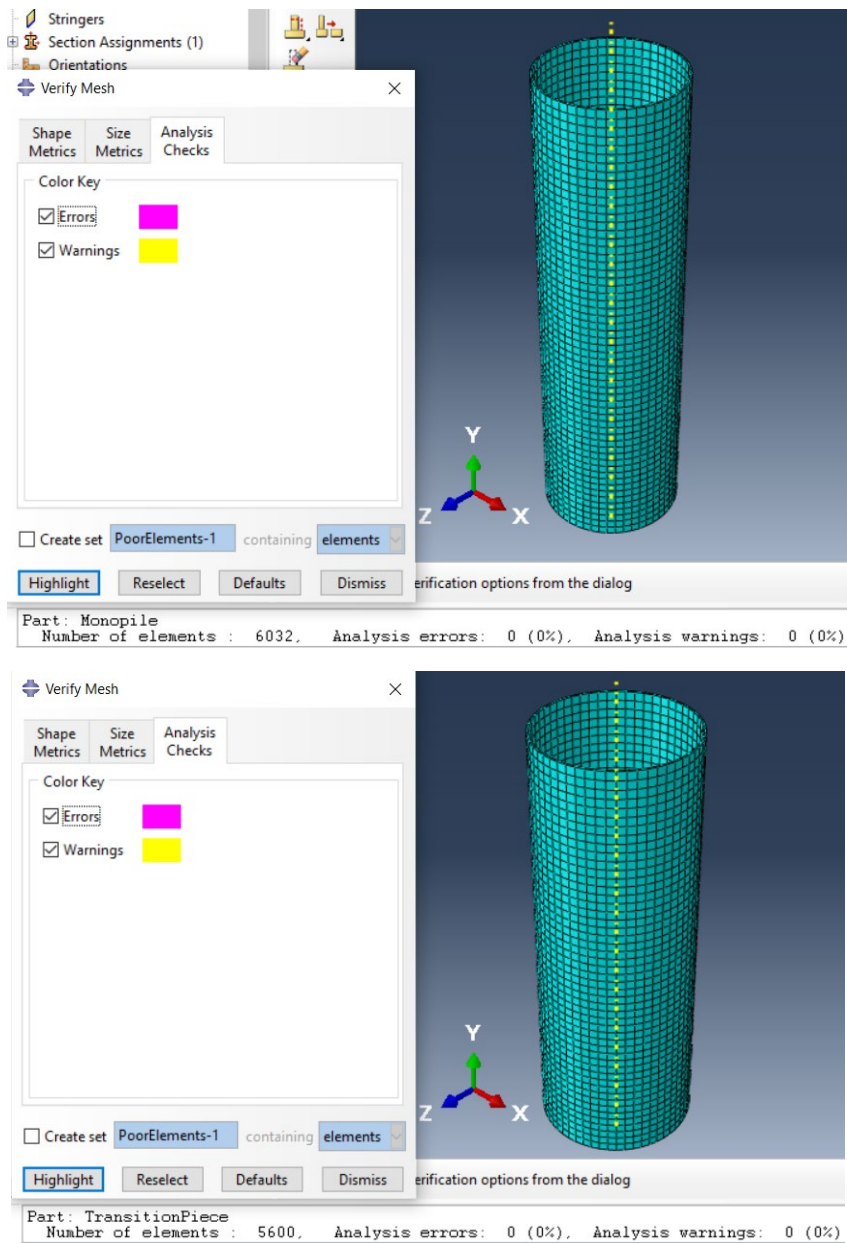
Selection criterion	Quadrilateral	Triangle	Hexahedra	Tetrahedra	Wedge
Shape factor	N/A	0.01	N/A	0.0001	N/A
Smaller face corner angle	10	5	10	5	10
Larger face corner angle	160	170	160	170	160
Aspect ratio	10	10	10	10	10

Για το εκάστοτε μέλος, επιλέγουμε "Mesh" από την αριστερή στήλη, από τις επιλογές που εμφανίζονται επιλέγουμε "Verify Mesh" → επιλέγουμε το μέλος → "Done".



Επιλέγουμε "Analysis Checks" και παρατηρούμε ότι σε κανένα μέλος δεν εμφανίζονται προβλήματα.





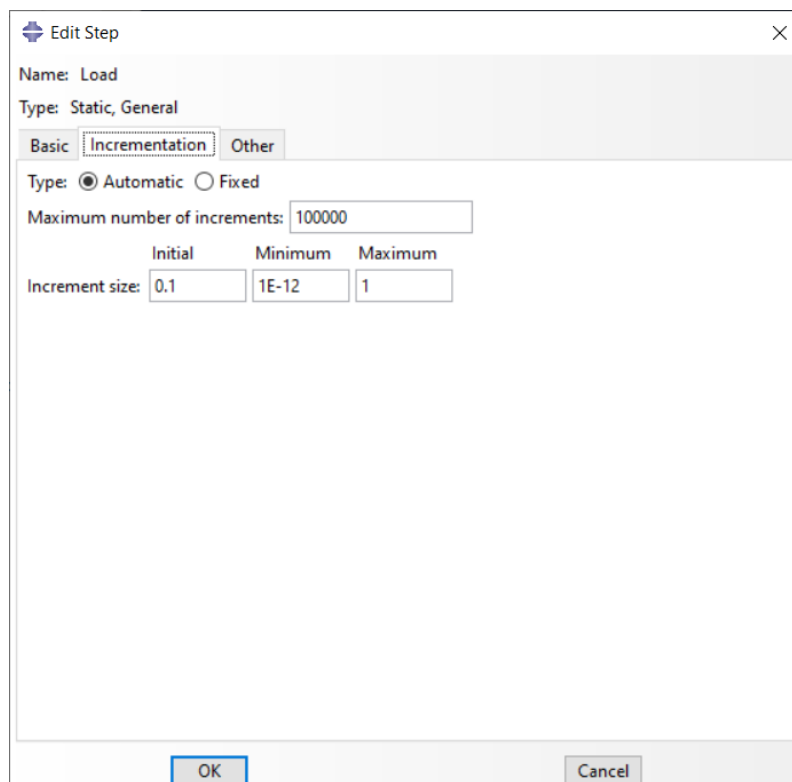
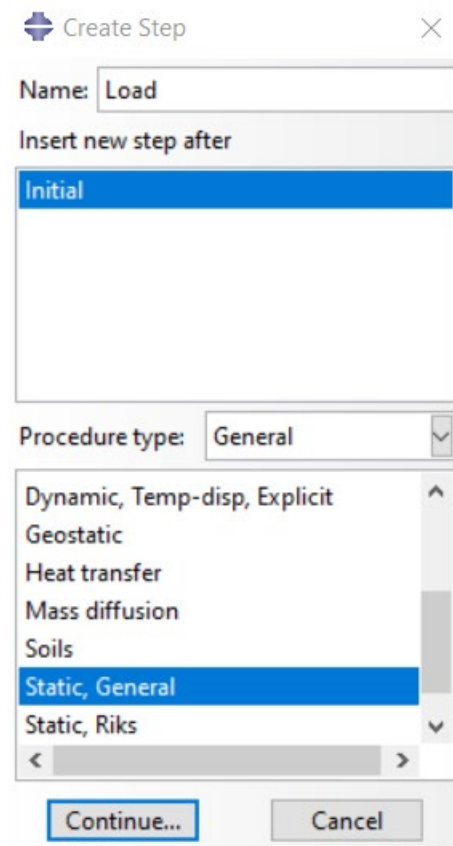
Ομοίως, έγινε έλεγχος για τα μέλη της σύνδεσης με shear keys.

Part: Grout	Number of elements : 217672,	Analysis errors: 0 (0%),	Analysis warnings: 0 (0%)
Part: Monopile	Number of elements : 7124,	Analysis errors: 0 (0%),	Analysis warnings: 0 (0%)
Part: TransitionPiece	Number of elements : 6832,	Analysis errors: 0 (0%),	Analysis warnings: 0 (0%)

Ο σχεδιασμός και η διακριτοποίηση των μελών shear keys γίνονται παρακάτω.

8.2.5 Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης και παραμέτρων επίλυσης

Στο επόμενο βήμα γίνεται η δημιουργία του Step "Load" (αριστερή στήλη), όπου και ορίζεται το είδος της ανάλυσης, δηλαδή η Στατική.

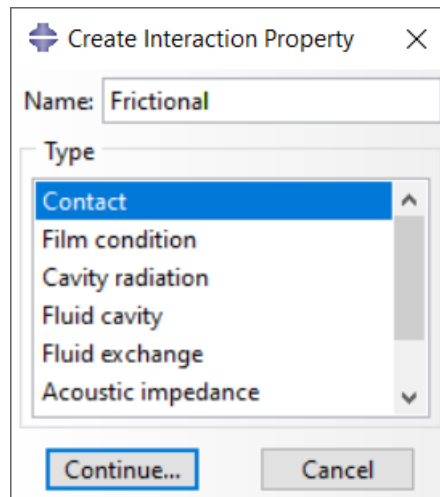


Όταν οι επιφάνειες έρχονται σε επαφή, συνήθως μεταδίδουν διάτμηση καθώς και κανονικές δυνάμεις στη διεπιφάνειά τους. Υπάρχει γενικά μια σχέση μεταξύ αυτών των δύο ποσοτήτων. Η σχέση, γνωστή ως η τριβή μεταξύ των σωμάτων επαφής, εκφράζεται συνήθως ως προς τις τάσεις στη διεπιφάνεια των σωμάτων. Τα μοντέλα τριβής που διατίθενται στο ABAQUS:

- ❖ περιλαμβάνουν το κλασικό μοντέλο τριβής Coulomb (βλ. τριβή Coulomb), το οποίο επιτρέπει τον καθορισμό του συντελεστή τριβής ως προς τον ρυθμό ολίσθησης, την πίεση επαφής, τη μέση θερμοκρασία επιφάνειας στο σημείο επαφής και τις μεταβλητές πεδίου και παρέχει την επιλογή να οριστεί ένας στατικός και ένας κινητικός συντελεστής τριβής με μια ομαλή ζώνη μετάβασης που ορίζεται από μια εκθετική καμπύλη.
- ❖ επιτρέπουν την εισαγωγή ενός ορίου τάσης διάτμησης, τ_{max} , που είναι η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης που μπορεί να μεταφερθεί από τη διεπαφή πριν αρχίσουν να γλιστρούν οι επιφάνειες.
- ❖ περιλαμβάνουν μια ανισοτροπική επέκταση του βασικού μοντέλου τριβής Coulomb.
- ❖ περιλαμβάνουν ένα μοντέλο που εξαλείφει την ολίσθηση τριβής όταν οι επιφάνειες έρχονται σε επαφή.
- ❖ συμπεριλαμβάνουν ένα μοντέλο "μαλακής" διασύνδεσης για τριβή στο Abaqus/Explicit στο οποίο η διατμητική τάση είναι συνάρτηση της ελαστικής ολίσθησης.
- ❖ μπορούν να εφαρμοστούν με μια μέθοδο ακαμψίας (πέναλτι), μια κινηματική μέθοδο (σε Abaqus/Explicit) ή μια μέθοδο πολλαπλασιαστή Lagrange (σε Abaqus/Standard), ανάλογα με τον αλγόριθμο επαφών που χρησιμοποιείται.
- ❖ μπορούν να οριστούν σε υπορουτίνες χρήστη FRIC ή FRIC_COEF (σε Abaqus/Standard) ή VFRIC, VFRICTION ή VFRIC_COEF (σε Abaqus/Explicit).

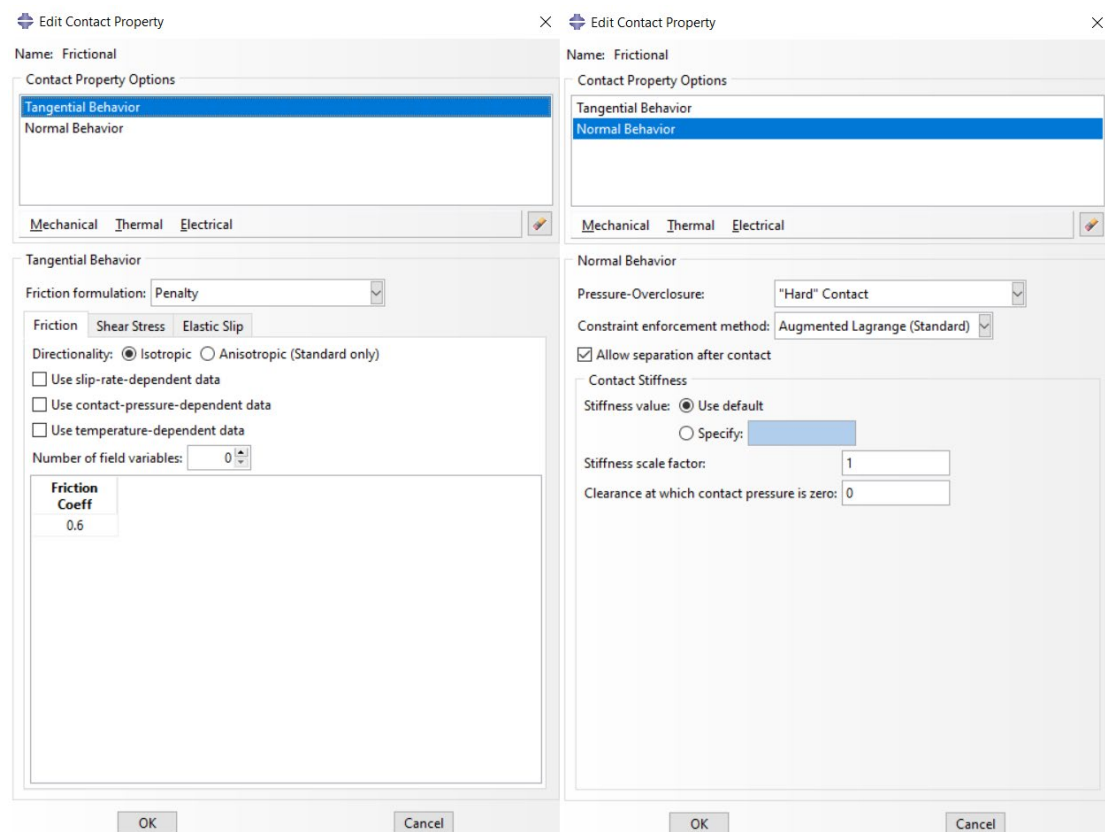
Στο Abaqus/Standard εφαπτομενικές δυνάμεις απόσβεσης μπορούν να εισαχθούν ανάλογες με τη σχετική εφαπτομενική ταχύτητα, ενώ στο Abaqus/Explicit εφαπτομενικές δυνάμεις απόσβεσης μπορούν να εισαχθούν ανάλογες με τον ρυθμό της σχετικής ελαστικής ολίσθησης μεταξύ των επιφανειών επαφής.

Στη συνέχεια, γίνεται στο ABAQUS CAE η δημιουργία της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μελών (Επιλογή "Interaction properties" από την αριστερή στήλη).



"Contact Property Options" → "Mechanical" → "Tangential Behavior" → "Friction formulation" → "Penalty" → "Friction" → "Friction Coeff" → "0.6"

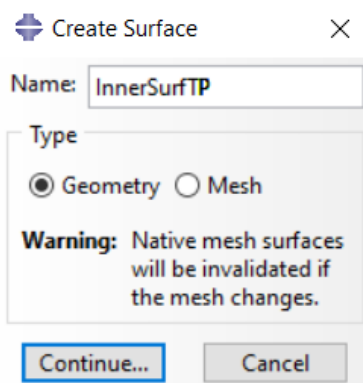
"Contact Property Options" → "Mechanical" → "Normal Behavior" → "Constraint enforcement method" → "Augmented Lagrange (Standard)"



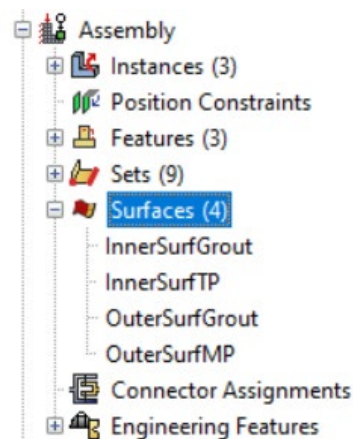
Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε frictional επαφή και στις δύο διεπιφάνειες (monopile – grout και grout – sleeve) και με συντελεστής τριβής που κυμάνθηκε μεταξύ 0.5 και 0.7. Έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος λαμβάνει αυτές τις τιμές.

Οι επιφάνειες που αλληλοεπιδρούν είναι η εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου μετάβασης με την εξωτερική του grout, και η εσωτερική του grout με την εξωτερική του στύλου. Παρακάτω γίνεται ο ορισμός των επιφανειών στο ABAQUS.

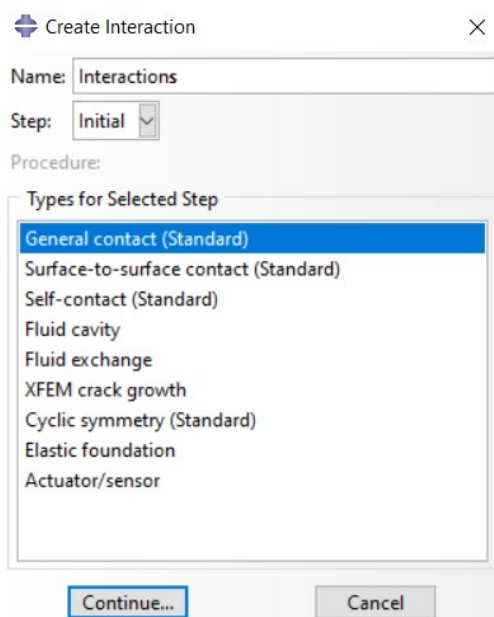
Επιλογή "Assembly" → "Surfaces" → "Continue".



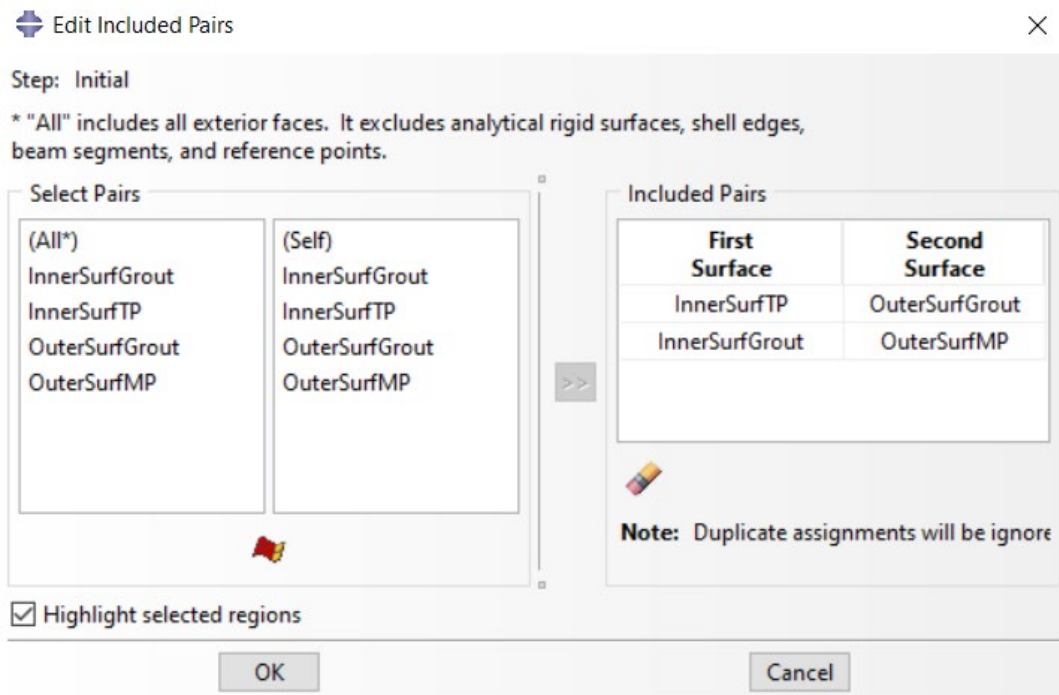
Γίνεται η επιλογή της επιφάνειας και "Done".



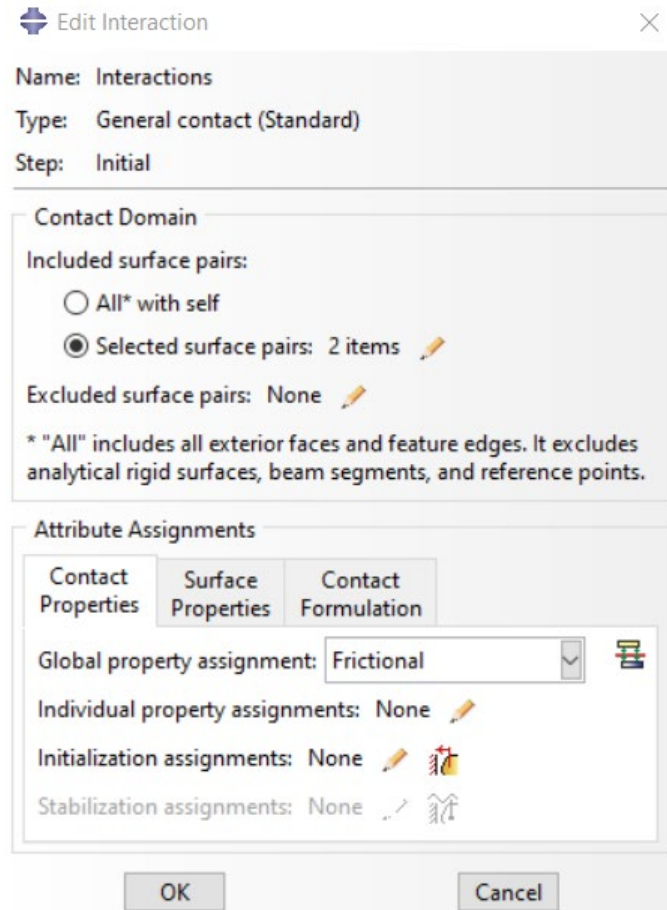
Για τη δημιουργία των αλληλοεπιδράσεων (Interactions) επιλέγουμε "Interactions" στην αριστερή στήλη.



Επιλογή "Selected surface pairs" → "Edit" → Επιλέγονται τα ζευγάρια των επιφανειών που αλληλοεπιδρούν → "OK".

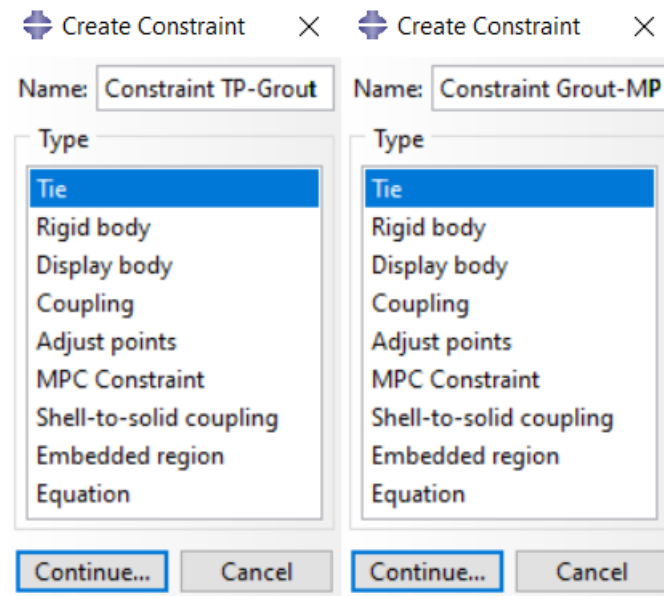


"Contact Properties" → "Global property assignment" → "Frictional" → "OK"

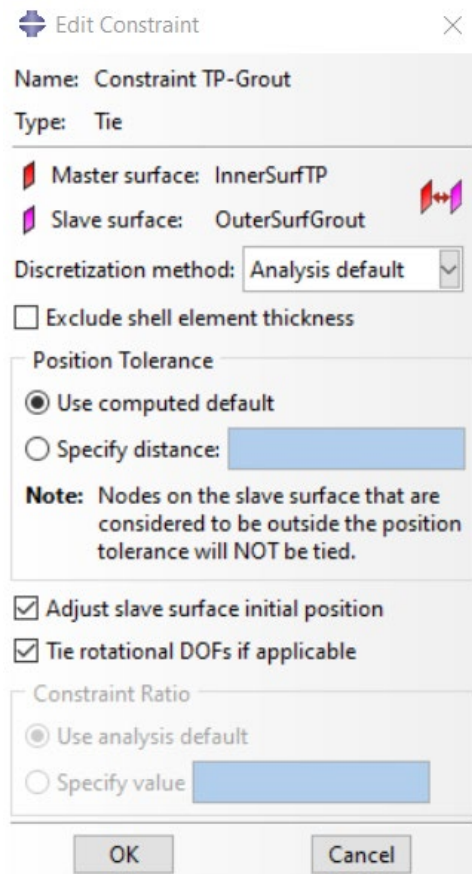


Στη συνέχεια, δημιουργούνται τα "Constraints". Για τη σύνδεση των μελών τα constraints είναι τύπου "Tie", ενώ δημιουργείται και ένα "Multiple Point Constraint" (MPC) για την εφαρμογή και τη μεταφορά των φορτίων στη σύνδεση.

Στην αριστερή στήλη, επιλέγουμε "Constraints" → "Tie" → "Continue" και στη συνέχεια τα ζευγάρια των επιφανειών που έρχονται σε επαφή.

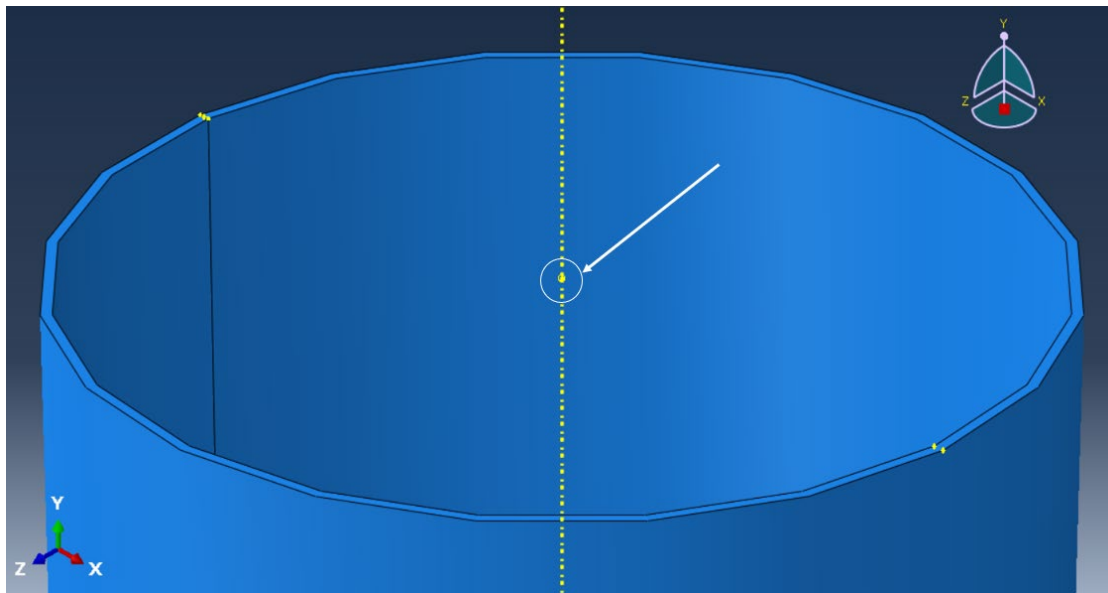
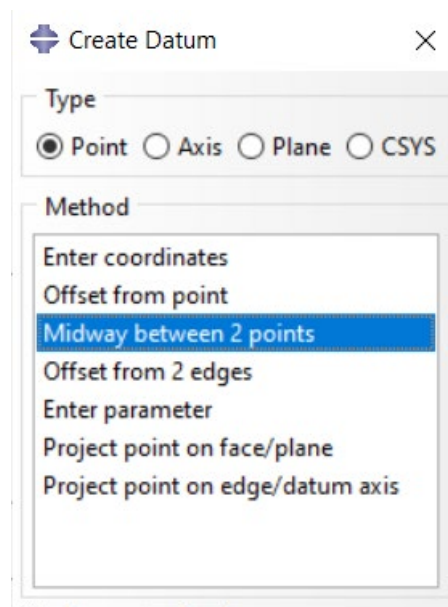


Στο παράθυρο που εμφανίζεται, πατάμε "OK".

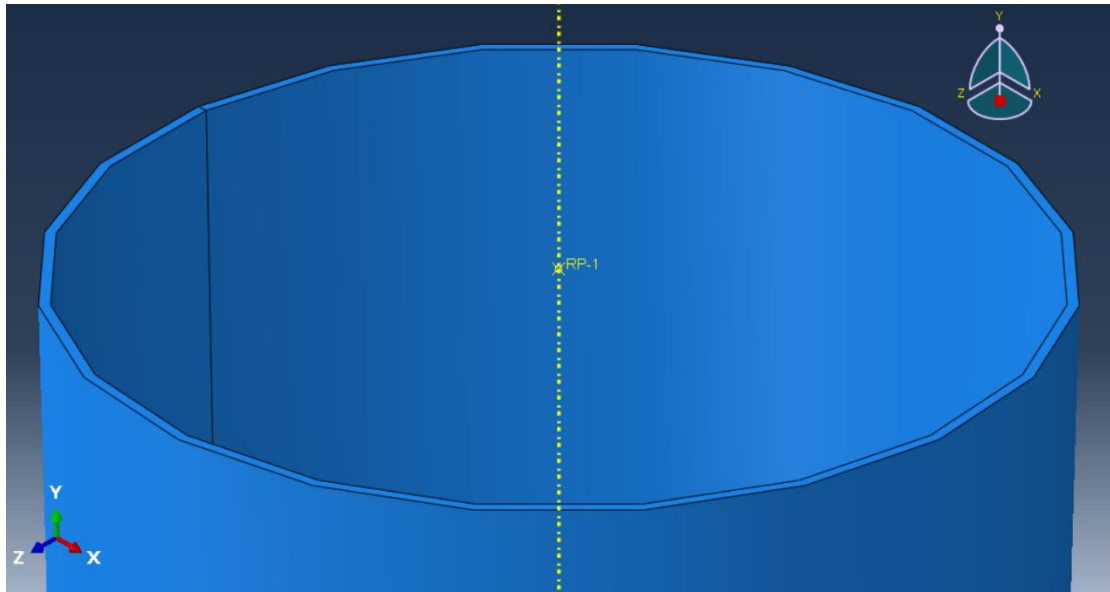


Για τη δημιουργία του MPC, ορίζεται πρώτα ένα σημείο "Reference Point" στο οποίο θα εφαρμοστούν τα φορτία και το οποίο βρίσκεται στο πάνω μέρος της σύνδεσης και πάνω στον άξονα περιστροφής της.

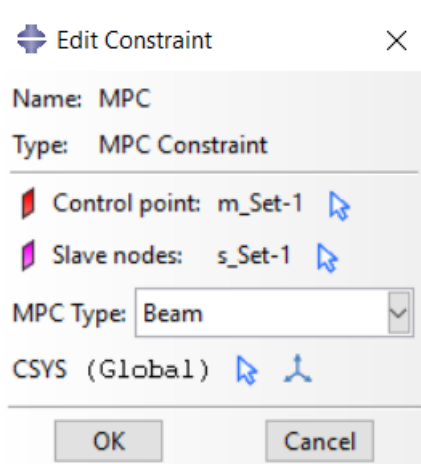
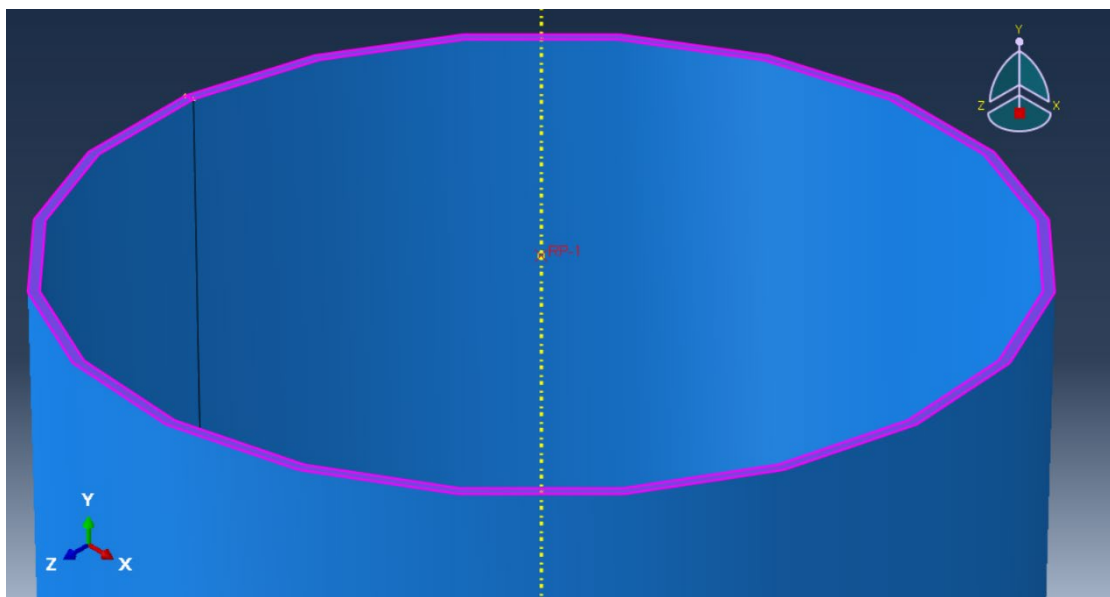
Πρώτα επιλέγουμε "Assembly" → "Tools" → "Datum" → "Point" → "Midway between 2 points" → και επιλέγουμε τα δύο αντιδιαμετρικά σημεία πάνω στην εσωτερική περιφέρεια του στοιχείου μετάβασης. Το μέσο σημείο που προέκυψε είναι το σημείο που χρειαζόμαστε.

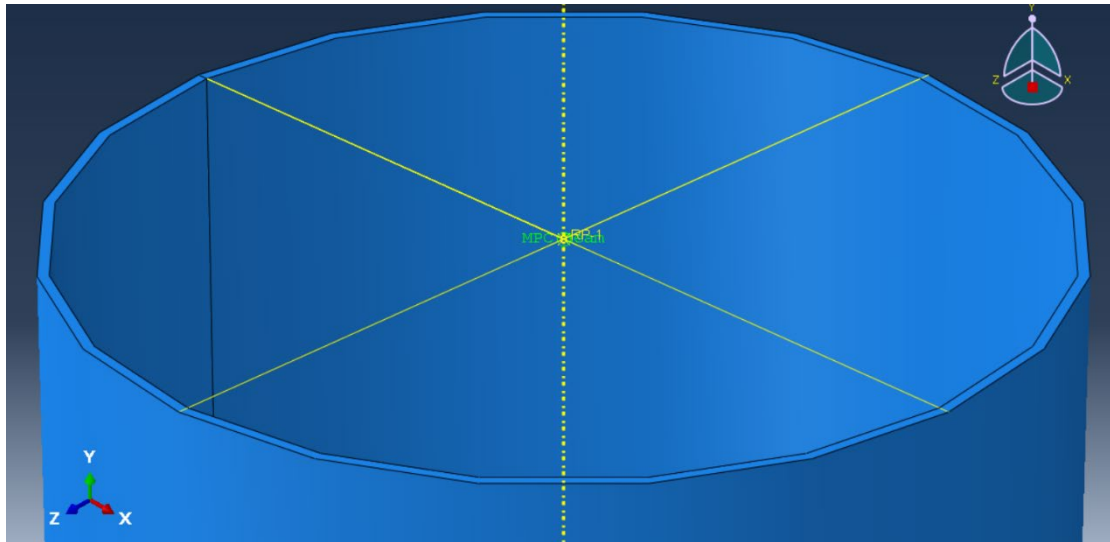


Στη συνέχεια, επιλέγουμε "Assembly" → "Tools" → "Reference Point" → και επιλέγουμε το σημείο που ορίσαμε προηγουμένως.



Τέλος, επιλέγουμε "Constraints" → "MPC Constraint" → επιλέγουμε για MPC control point το σημείο που ορίσαμε και ως επιφάνεια επιλέγουμε την πάνω επιφάνεια του στοιχείου μετάβασης → "Done" → "MPC Type: Beam" → "OK".

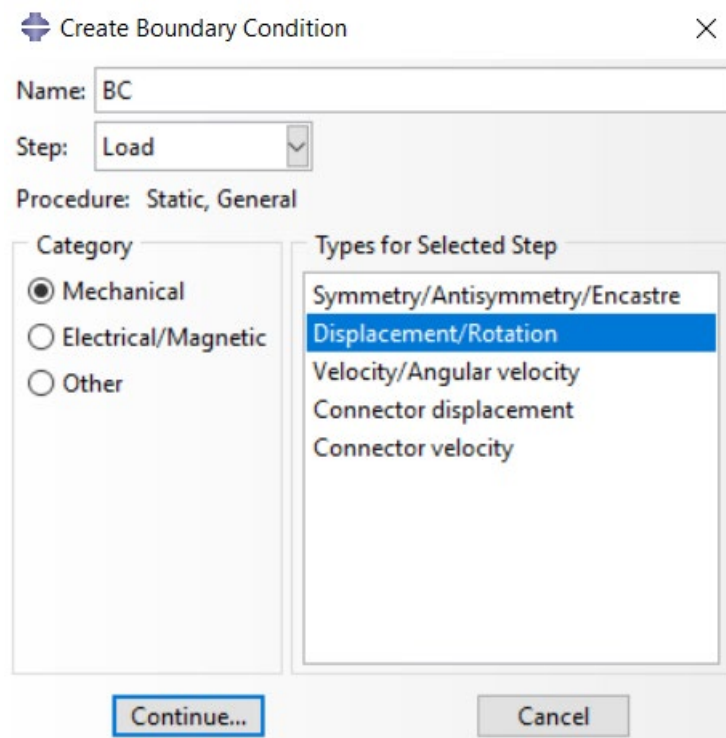




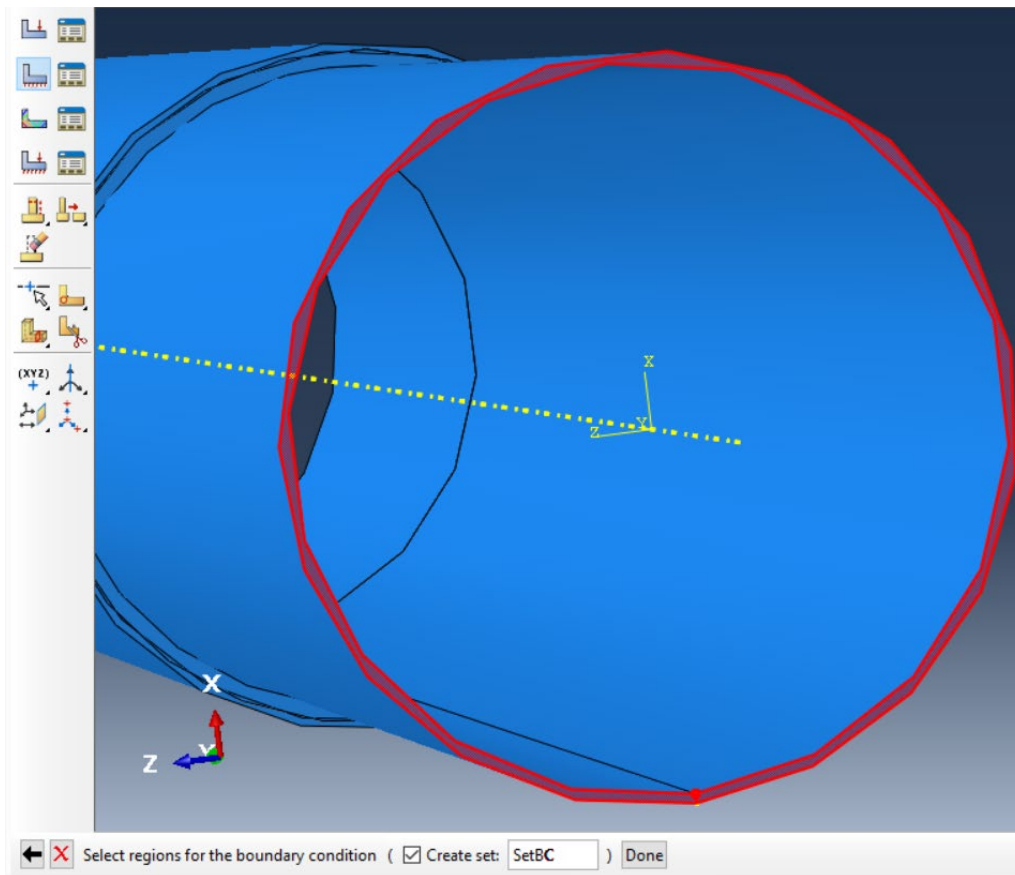
8.2.6 Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών

Στην βάση του monopile επιβάλλεται συνοριακή συνθήκη πάκτωσης.

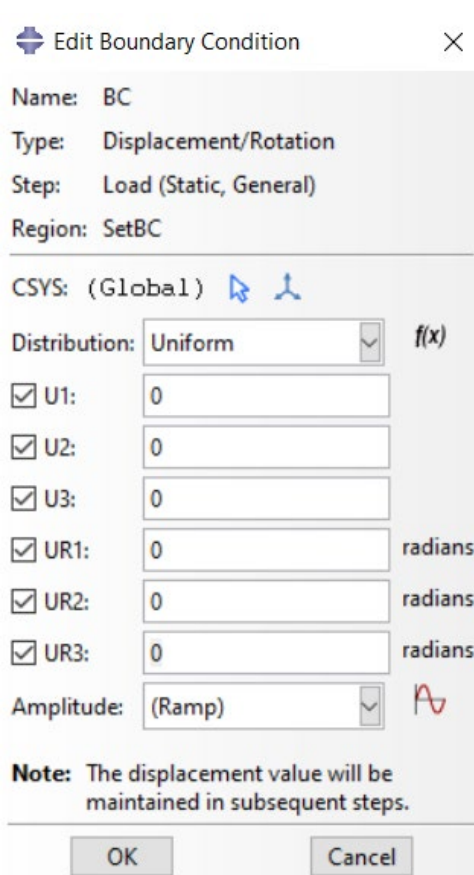
Επιλέγουμε από την αριστερή στήλη "Steps" → "Load" → "BCs" → "Category: Mechanical" & "Type for Selected Step: Displacement/Rotation" → "Continue"

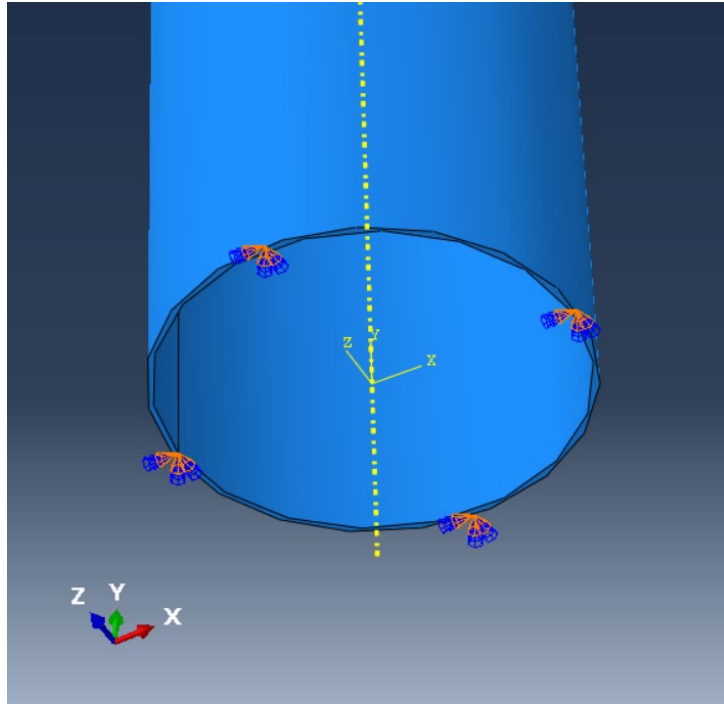


Επιλέγουμε την επιφάνεια που θα πακτωθεί, δηλαδή την κάτω επιφάνεια του monopile, και πατάμε "Done".



Στο παράθυρο μου εμφανίζεται επιλέγουμε και τους 6 βαθμούς ελευθερίας και πατάμε "OK".



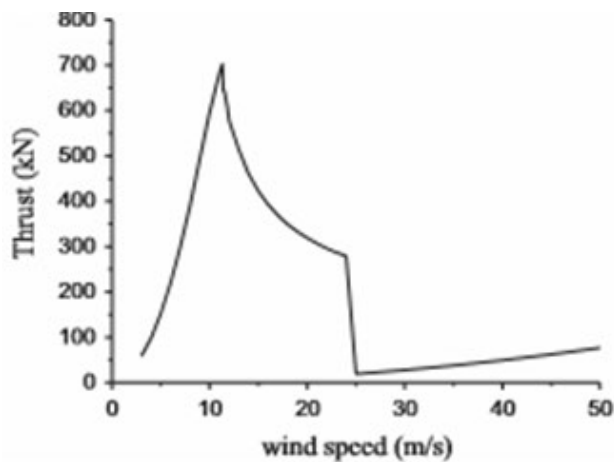


8.2.7 Επιβολή φορτίων

Τα φορτία της που καταπονούν την κατασκευή είναι ροπή κάμψης, διατμητική και αξονική δύναμη και εφαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου μετάβασης. 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. [36]

Πίνακας 8.5: Δεδομένα φόρτισης

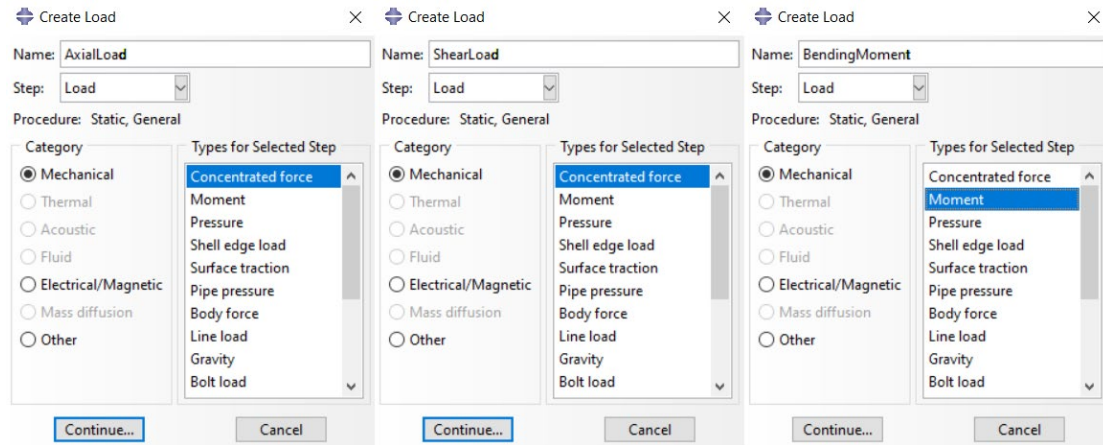
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπτική Ροπή (kNm)	Διατμητική δύναμη (kN)	Αξονική δύναμη (kN)
11.4	56400	700	6000



Εικόνα 8.5: Ωθηση από τον άνεμο

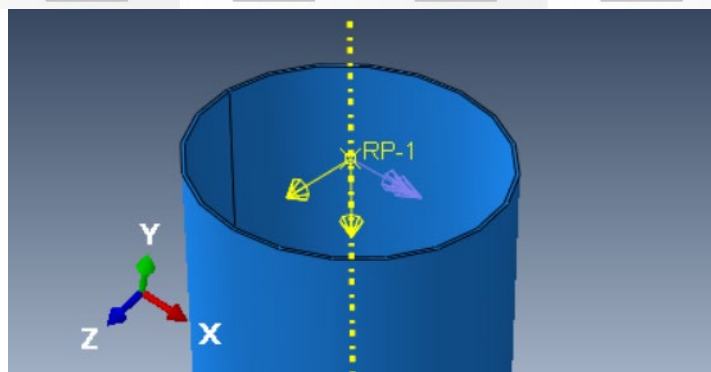
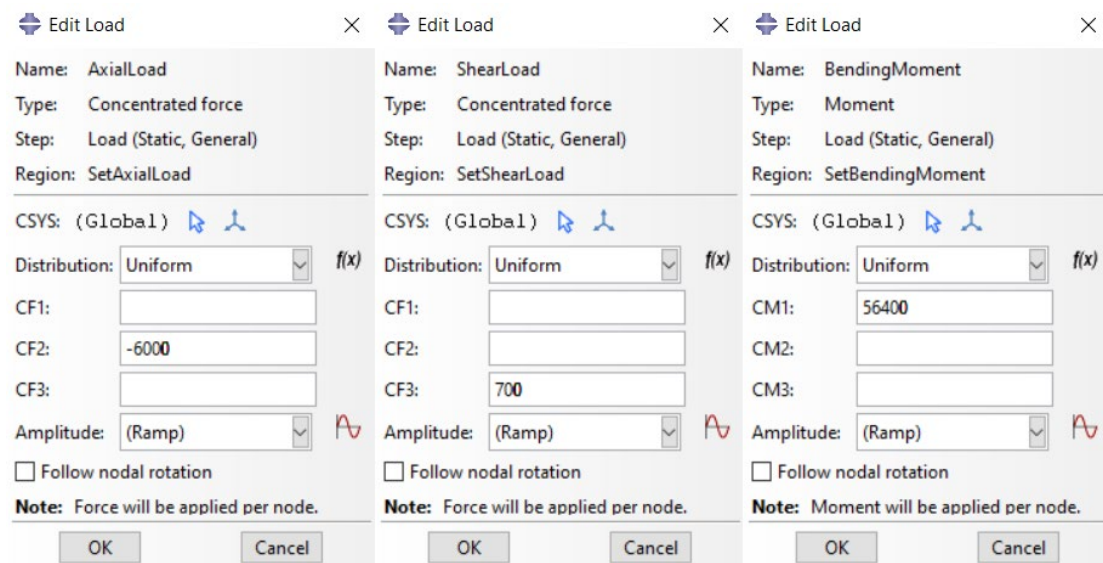
Για την επιβολή των φορτίων στο ABAQUS, επιλέγουμε στην αριστερή στήλη "Steps" → "Load" → "Loads".

Για τη διατμητική και την αξονική δύναμη, στο παράθυρο που εμφανίζεται, επιλέγεται ο τύπος "Concentrated load" (Συγκεντρωμένη δύναμη), ενώ για τη ροπή κάμψης επιλέγεται "Moment" (Ροπή).



Στη συνέχεια, για κάθε φορτίο, επιλέγουμε το σημείο εφαρμογής του, που είναι το RP-1.

Τέλος, στο παράθυρο εμφανίζεται εισάγουμε την τιμή του εκάστοτε φορτίου. Το πρόσημο υποδηλώνει την κατεύθυνση και οι μονάδες μέτρησης είναι σε kN και kNm .



8.3 Μοντελοποίηση της σύνδεσης με shear keys

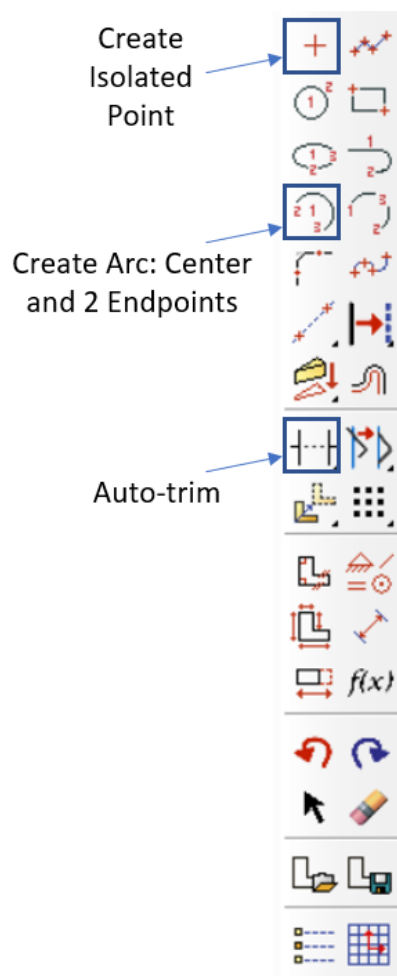
Για λόγους απλοποίησης στον σχεδιασμό, θεωρήθηκε ότι τα shear keys έχουν ημικυκλική διατομή. Οπότε ισχύει: $w = 2h$

Τα shear keys τοποθετούνται σε μια περιοχή εσωτερικά της διεπιφάνειας των μελών και σε μήκος $L_g/3$ καθ' ύψος της σύνδεσης.

$$L_g = L - 2t_g = 6 - 2 \cdot 0.10 = 5.80 \text{ m}$$

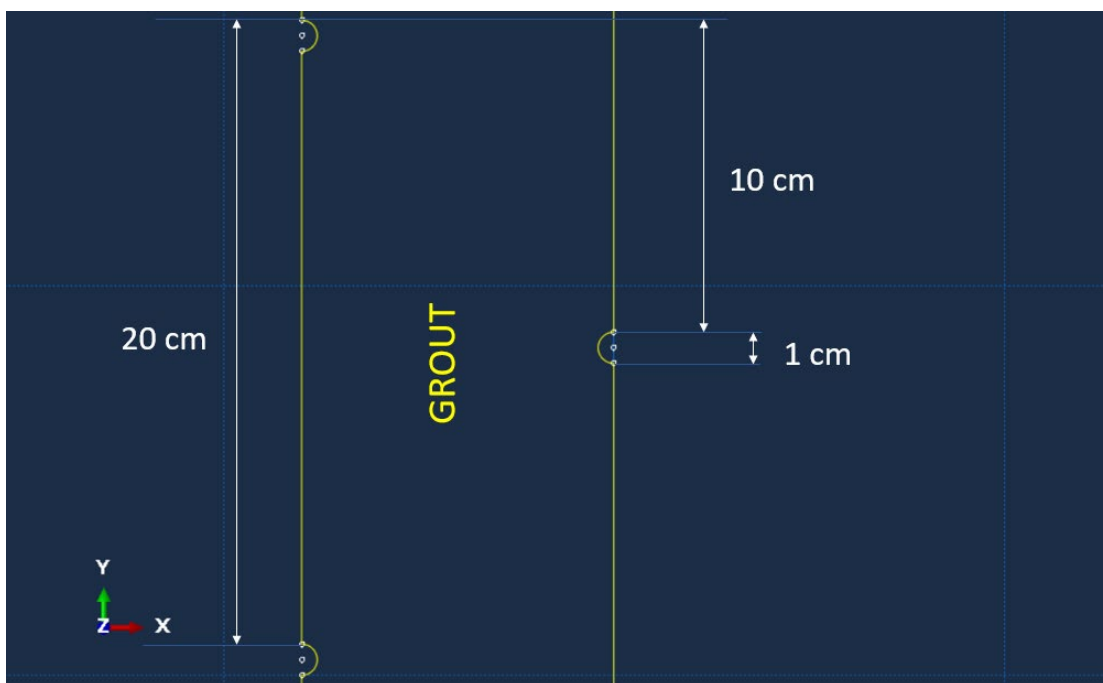
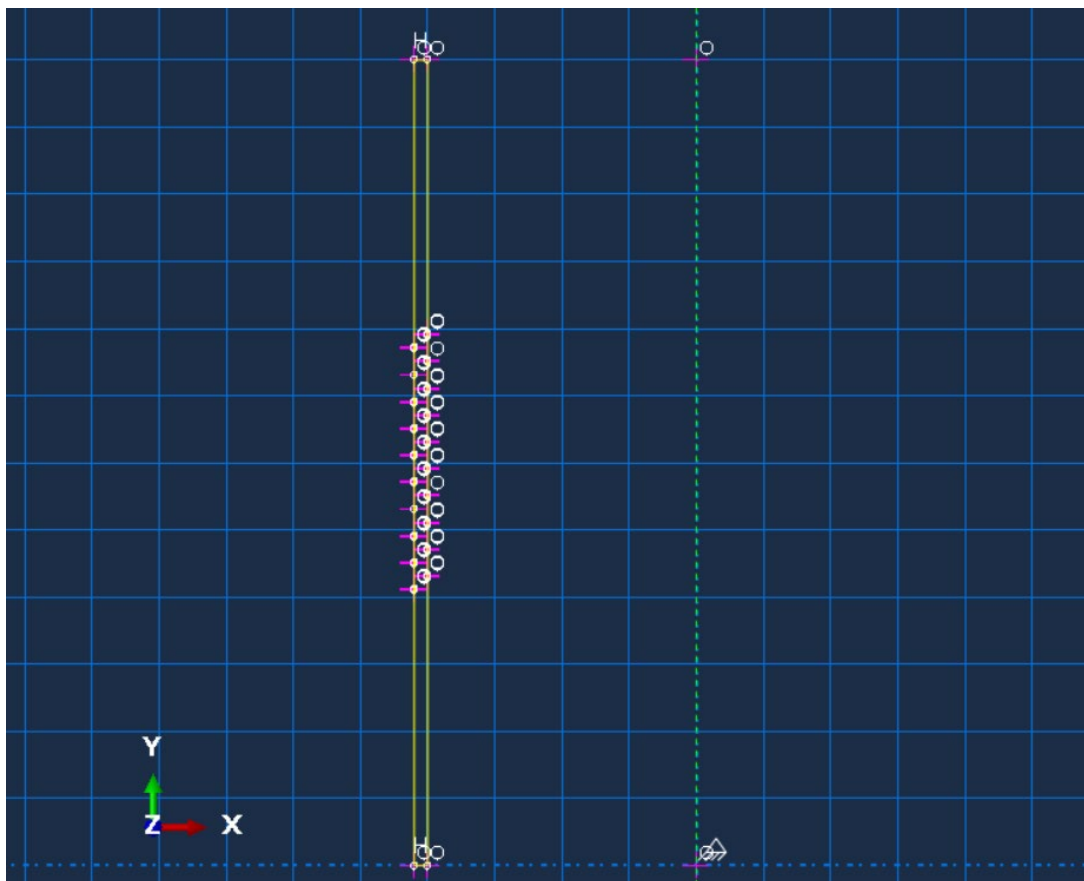
$$L_g/3 \approx 1.93 \text{ m}$$

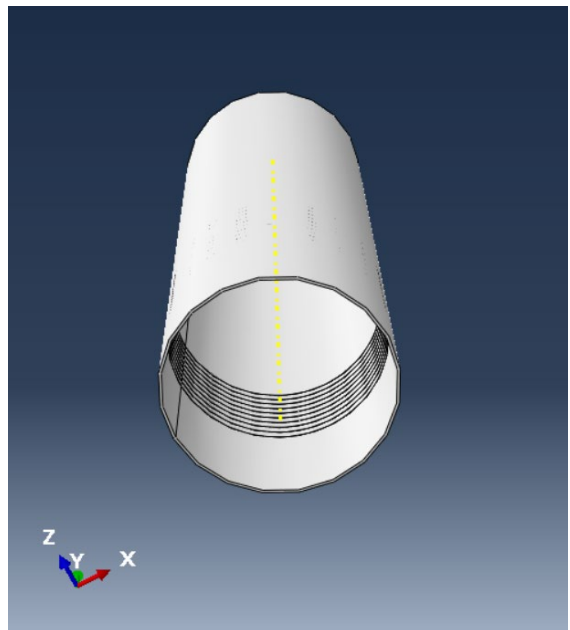
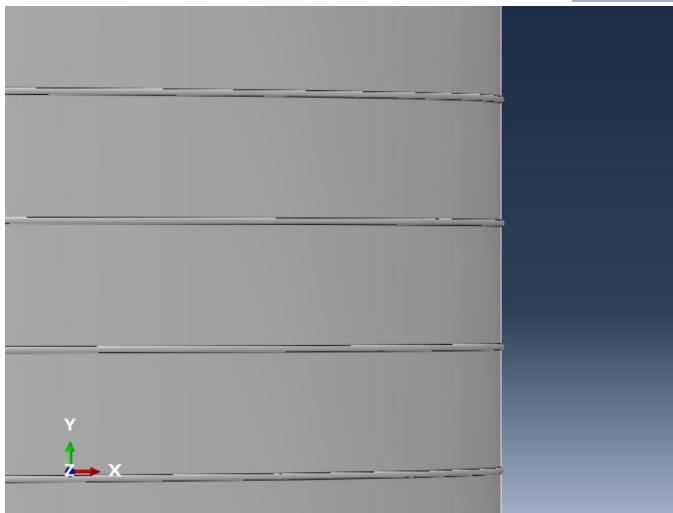
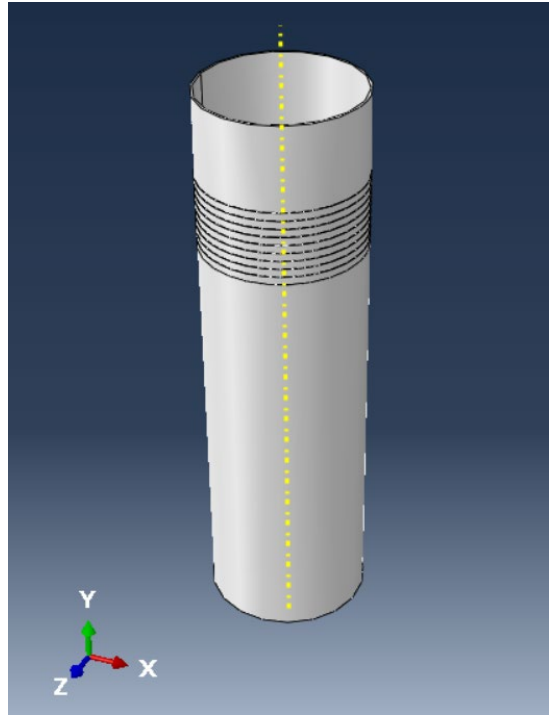
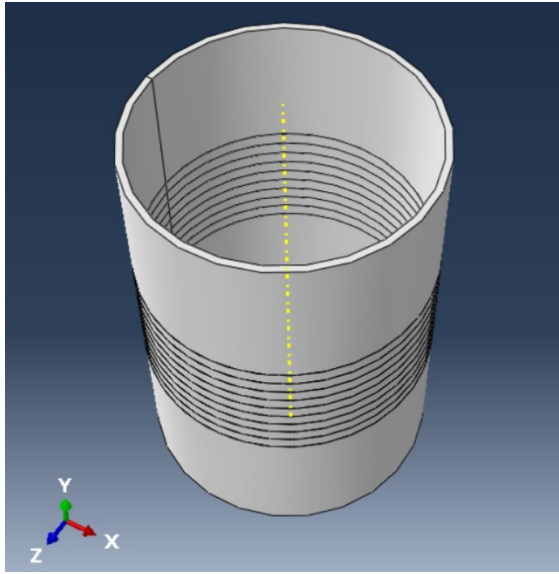
Εφόσον το πάχος του grout είναι 10 cm, επιλέγεται η απόσταση των shear keys να είναι $s = 20 \text{ cm}$ και $s/2 = 10 \text{ cm}$ η κατακόρυφη απόσταση των απέναντι shear keys.

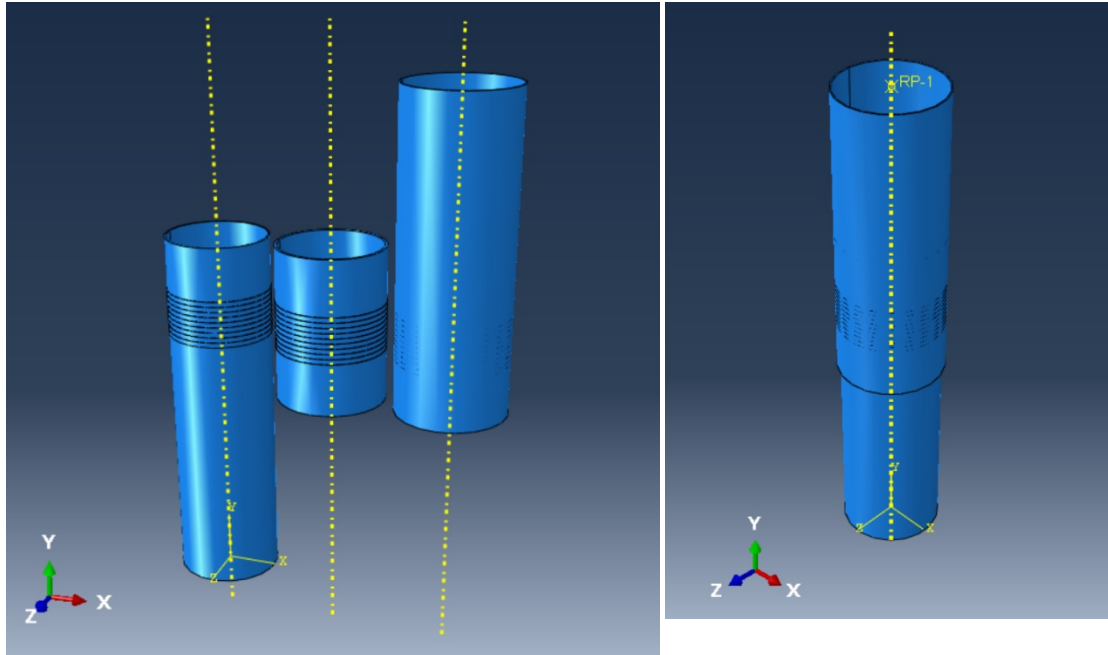


Για τον σχεδιασμό στο ABAQUS, σχεδιάστηκε αρχικά η κατακόρυφη διατομή όπως στην περίπτωση χωρίς shear keys. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το εργαλείο "Create Isolated Point" ορίστηκαν τα σημεία αρχή και τέλους των τόξων των shear keys. Τα τόξα σχεδιάστηκαν με το εργαλείο "Create Arc: Center and 2 Endpoints". Τέλος με το εργαλείο "Auto-trim" αφαιρούνται τα ευθύγραμμα τμήματα που ξεμένουν από το αρχικό σχέδιο.

Η γωνία που θα σχηματίσουν οι θλιπτήρες (compression struts) είναι $\arctan[(s/2-w)/t_g] = \arctan[(10-1)/10] \approx 42^\circ$







Για την διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, ακολουθήθηκε ο ίδιος τρόπος με την περίπτωση χωρίς shear keys.

8.4 Θεώρηση των υλικών ως μη – γραμμικά

Αρχικά, η θεώρηση έγινε σύμφωνα με τους Zhiping Kuang και Guanyu Zheng [37].

Τα πειραματικά δεδομένα της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του grout σε θλίψη. Η συμπαγής κόκκινη γραμμή στην *Εικόνα 8.6* δείχνει την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων του grout, που λαμβάνεται από μονοαξονικό πείραμα θλίψης. Προκειμένου να προσεγγιστεί η διακύμανση της τάσης και της παραμόρφωσης υπό την μονοαξονική κατάσταση, το συστατικό μοντέλο grout τροποποιείται για να παρέχει καλύτερη προσαρμογή στην καμπύλη δοκιμής. Στο τροποποιημένο μοντέλο, η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων περιλαμβάνει δύο στάδια: το ανοδικό στάδιο και το φθίνον στάδιο. Το ανοδικό στάδιο περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

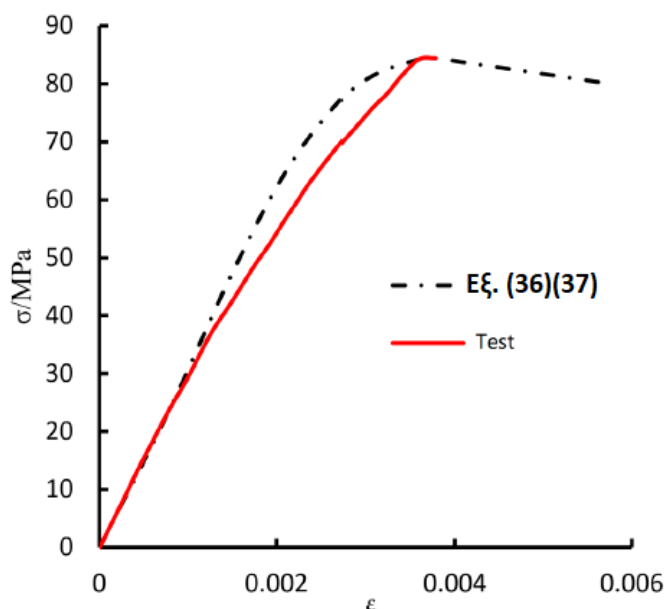
$$\sigma = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 f_c}{0.85\varepsilon^2 - 0.7\varepsilon\varepsilon_0 + 0.85\varepsilon_0^2} \quad (36)$$

ενώ το φθίνον στάδιο περιγράφεται από την παρακάτω:

$$\sigma = \left(1.1 - 0.1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) f_c \quad (37)$$

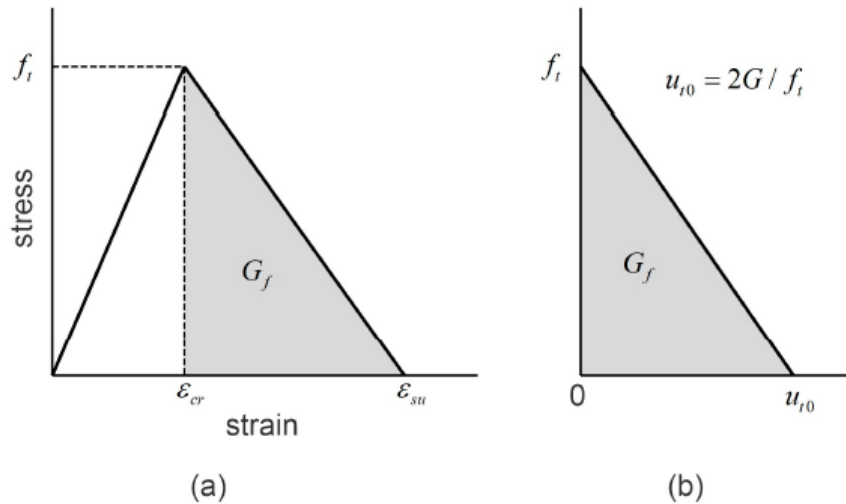
όπου σ και ε είναι οι συνιστώσες τάσεων και παραμορφώσεων αντίστοιχα, f_c είναι η μέγιστη τάση του ενέματος που προέκυψε από το πείραμα θλίψης, και ε_0 είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση. [37]

Παρατηρήθηκε από την *Εικόνα 8.6* ότι η εξίσωση του ανερχόμενου κλάδου είναι πολύ κοντά στην πειραματική καμπύλη του grout. Επομένως, οι εξισώσεις (36) και (37) θα χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν την συμπεριφορά του grout σε θλίψη. [37]



Εικόνα 8.6: Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων του grout σε μονοαξονική θλίψη [37]

Για την αναπαράσταση της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων του μη ρηγματωμένου grout σε εφελκυσμό, χρησιμοποιείται το διγραμμικό μοντέλο που φαίνεται στην *Εικόνα 8.7a*. Το γραμμικό τμήμα μιας απόκρισης εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων τερματίζεται όταν η τάση φτάσει την τιμή f_t (αντοχή σε εφελκυσμό). Η αντίστοιχη παραμόρφωση είναι ε_{cr} . Υποτίθεται ότι το μέτρο ελαστικότητας για εφελκυσμό και θλίψη του grout είναι ο ίδιος σε αυτό το γραμμικό στάδιο. Στη συνέχεια, το υλικό μαλακώνει, και η τάση αρχίζει να μειώνεται γραμμικά καθώς αυξάνονται οι παραμορφώσεις. Η εφελκυστική απόκριση τερματίζεται στην τελική εφελκυστική παραμόρφωση ε_{su} . Η *Εικόνα 8.7b* αντιπροσωπεύει την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων μετά την διαρροή, και είναι προφανές ότι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη απεικονίζει την ενέργεια θραύσης G_f . [37]



Εικόνα 8.7: (a) Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων του grout σε μονοαξονικό εφελκυσμό, (b) Μοντέλο "μαλάκωσης" του grout σε εφελκυσμό

8.4.1 Σχεδιασμός καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων για το grout Ducorit D4

Το μέτρο ελαστικότητας του Ducorit D4 είναι 68600 MPa. Οπότε η παράγωγος της συνάρτησης $\sigma(\varepsilon)$ [εξίσωση (36)], για $\varepsilon = 0$, πρέπει είναι ίση με την τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Έτσι, υπολογίζουμε το ε_0 .

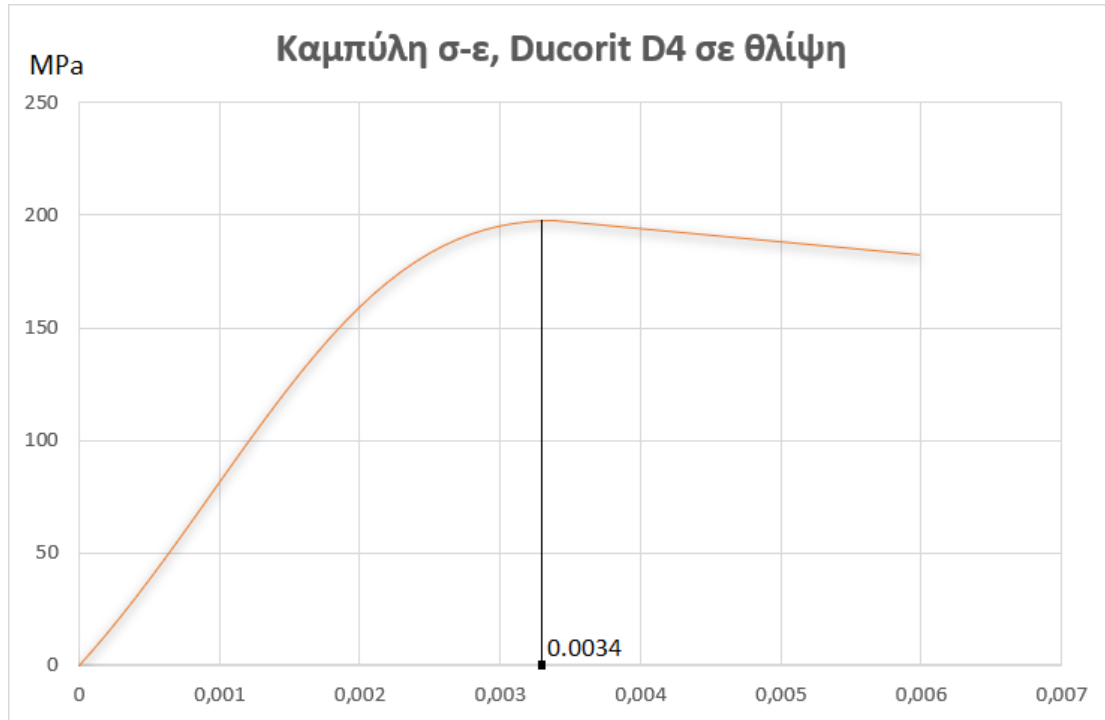
$$\sigma(\varepsilon) = \frac{A(\varepsilon)}{B(\varepsilon)} \rightarrow \sigma'(\varepsilon) = \frac{A'(\varepsilon)B(\varepsilon) - A(\varepsilon)B'(\varepsilon)}{B^2(\varepsilon)}$$

$$f_c = 197.5 \text{ MPa}$$

Πρέπει $\sigma'(0) = 68600$. Μεταβάλλουμε την τιμή ε_0 , μέχρις ότου να δώσει την τιμή που θέλουμε.

ε_0	0,00338705
ε	0
$A(\varepsilon)$	0
$A'(\varepsilon)$	0,668942375
$B(\varepsilon)$	9,75129E-06
$B'(\varepsilon)$	-0,002370935
$\sigma'(\varepsilon)$	68600,38711

Άρα $\varepsilon_0 \approx 0.0034$



Σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό (European standard MC90) η ενέργεια θραύσης του grout ορίζεται ως εξής: [38]

$$G_f = \alpha \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0.7} \quad (38)$$

Όπου f_c είναι η αντοχή του grout σε θλίψη και η τιμή του είναι από την δοκιμή κύβου σε θλίψη και α είναι συντελεστής τροποποίησης. Για το υλικό του grout, το οποίο συνήθως περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών σωματιδίων, μπορούμε να πάρουμε περίπου την τιμή $\alpha = 0.02 \text{ Nmm/mm}^2$ για την πραγματική ανάλυση. [38]

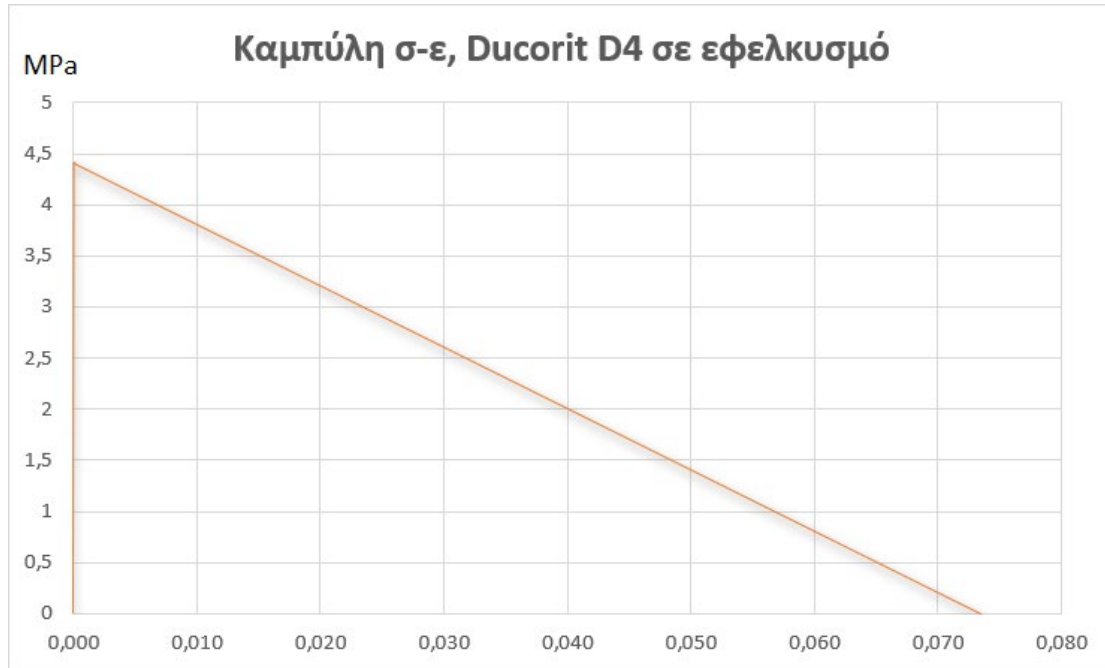
$$\text{Άρα: } G_f = 0.02 \cdot (197.5/10)^{0.7} = 0.1614$$

$$\text{Από το εμβαδόν τριγώνου: } u_{i0} = 2G/f_c = 2 \cdot 0.1614 / 4.4 = 0.07337$$

$$\text{Μέχρι την τιμή } f_t \text{ το grout συμπεριφέρεται ελαστικά, άρα } f_t = E \cdot \varepsilon_{cr} \rightarrow \varepsilon_{cr} = 4.4 / 68600$$

$$\rightarrow \varepsilon_{cr} = 0.00006414$$

$$\text{Άρα } \varepsilon_{su} = \varepsilon_{cr} + u_{i0} = 0.07343$$



Στην περίπτωση της θλίψης, παρατηρούμε ότι στο διάστημα μεταξύ $\varepsilon_1 = 0$ και $\varepsilon_2 = 0.00181$, η αύξηση των τάσεων είναι περίπου γραμμική. Στην παραμόρφωση ε_2 η τιμή της κλίσης της καμπύλης είναι ίση με το μέτρο ελαστικότητας. Οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε την τιμή $\varepsilon_2 = 0.00181$ ως την παραμόρφωση διαρροής σε θλίψη.

ε_0	0,00338705
ε	0,00180905
$A(\varepsilon)$	0,00121015
$A'(\varepsilon)$	0,668942375
$B(\varepsilon)$	8,24391E-06
$B'(\varepsilon)$	0,00070445
$\sigma'(\varepsilon)$	68600,17228

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές που θα εισαχθούν στο ABAQUS.

Θλίψη		
ε	σ (kPa)	$\varepsilon-\varepsilon_y$ (inelastic strain)
0.00180905	146793.1584	0
0.0019	152854.8662	0.00009095
0.002	159093.5527	0.00019095
0.0021	164864.1399	0.00029095
0.0022	170150.6899	0.00039095
0.0023	174943.7475	0.00049095
0.0024	179240.0556	0.00059095
0.0025	183042.1221	0.00069095
0.0026	186357.6731	0.00079095
0.0027	189199.0245	0.00089095
0.0028	191582.4069	0.00099095
0.0029	193527.2742	0.00109095
0.003	195055.6203	0.00119095
0.0031	196191.3288	0.00129095
0.0032	196959.5695	0.00139095
0.0033	197386.2536	0.00149095
0.00338705	197500	0.001578
0.0034	197497.5553	0.00159095
0.0035	197319.5023	0.00169095

Εφέλκυσμός		
ε	σ (kPa)	$\varepsilon-\varepsilon_y$ (cracking strain)
0.0000641	4400	0
0.0050000	4103.986696	0.0049359
0.0100000	3804.126794	0.0099359
0.0150000	3504.266891	0.0149359
0.0200000	3204.406988	0.0199359
0.0250000	2904.547085	0.0249359
0.0300000	2604.687182	0.0299359
0.0350000	2304.827279	0.0349359
0.0400000	2004.967376	0.0399359
0.0450000	1705.107473	0.0449359
0.0500000	1405.24757	0.0499359
0.0550000	1105.387668	0.0549359
0.0600000	805.5277647	0.0599359
0.0650000	505.6678618	0.0649359
0.0700000	205.8079589	0.0699359
0.0734317	0	0.0733676

Στη συνέχεια, δίνουμε στο ABAQUS τις τιμές για την ελαστική συμπεριφορά, δηλαδή όπως δουλέψαμε αρχικά. ("Mechanical" → "Elasticity" → "Elastic")

Data		
	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	68600000	0.19

Για την πλαστική συμπεριφορά, επιλέγουμε "Mechanical" → "Plasticity" → "Concrete Damaged Plasticity" και εισάγουμε τις τιμές στις παραμέτρους.

Material Behaviors

Elastic
Concrete Damaged Plasticity

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Concrete Damaged Plasticity

Plasticity Compressive Behavior Tensile Behavior

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data					
	Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
1	45	0.1	1.16	0.667	0.0005

Σύμφωνα με τους Ziquan Dai , Sze Dai Pang και JY Richard Liew, η γωνία διαστολής, η εκκεντρότητα, οι διαξονική αναλογία (f_{b0}/f_{c0}), το K_c και οι παράμετροι ιξώδους παίρνουν τις τιμές 45, 0.1, 1.16, 0.667 και 0.0005 αντίστοιχα. [39]

Στις επιλογές "Compressive Behavior" και "Tensile Behavior" προσθέτουμε τις τιμές των καμπυλών που ορίσαμε παραπάνω.

Concrete Damaged Plasticity

Plasticity Compressive Behavior Tensile Behavior

Use strain-rate-dependent data

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data		
	Yield Stress	Inelastic Strain
1	146793.1584	0
2	152854.8662	9.095E-05
3	159093.5527	0.00019095
4	164864.1399	0.00029095
5	170150.6899	0.00039095
6	174943.7475	0.00049095
7	179240.0556	0.00059095
8	183042.1221	0.00069095

OK

Concrete Damaged Plasticity

Plasticity Compressive Behavior Tensile Behavior

Type: Strain

Use strain-rate-dependent data

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data		
	Yield Stress	Cracking Strain
1	4400	0
2	4103.986696	0.0049359
3	3804.126794	0.0099359
4	3504.266891	0.0149359
5	3204.406988	0.0199359
6	2904.547085	0.0249359
7	2604.687182	0.0299359

OK

Η δεύτερη θεώρηση μη γραμμικότητας έγινε από τους Nikolaos I. Tziavos, Hassan Hemida, Nicole Metje και Charalampos Baniotopoulos [44]. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα, η παραμόρφωση της μέγιστης τάσης λαμβάνει την τιμή:

$$\varepsilon_{cl} = \frac{0.7f_{cm}^{0.31}}{1000} \quad (39)$$

Όπου $f_{cm} = 130 \text{ MPa}$ [44]

Στον εφελκυσμό, η ενέργεια θραύσης λαμβάνει την τιμή:

$$G_F = G_{F0} - \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \quad (40)$$

Όπου $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$ [44]

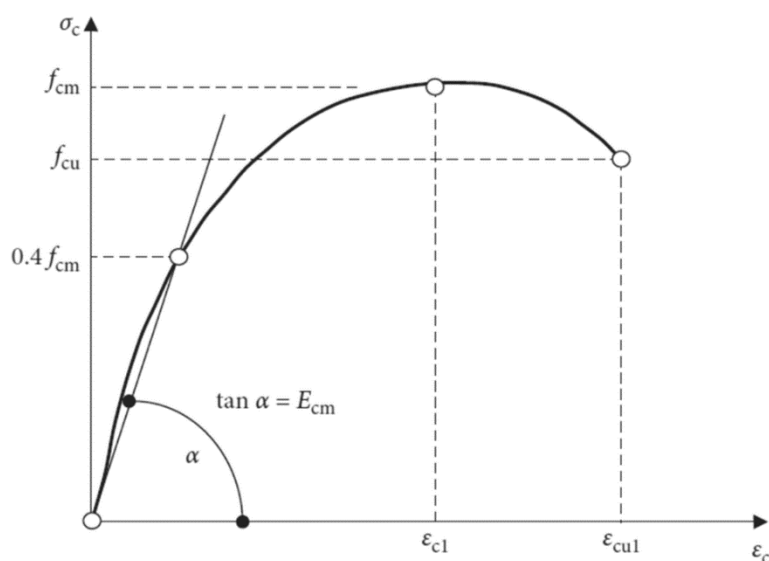
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του grout λαμβάνονται από τον πίνακα. [44]

Table 2

HSG properties and CDP parameters.

Description/Symbol	Value/Unit	CDP	Value
Modulus of Elasticity, E	50000 [MPa]	Dilation angle, ψ	38°
Poisson's ratio, ν	0.19	Eccentricity	0.1
Density, ρ	2380 [kg/m ³]	Compressive yield stress	1.162
Tensile strength, f_t	7 [MPa]	Uniaxial yield stress	
Fracture Energy, G_F	150.8 [Nm/m ²]	Viscosity	0
		K_c	2/3

Τέλος, σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα, σχεδιάζεται η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σε θλίψη, η οποία και εισάγεται στο ABAQUS, όπως προηγουμένως.

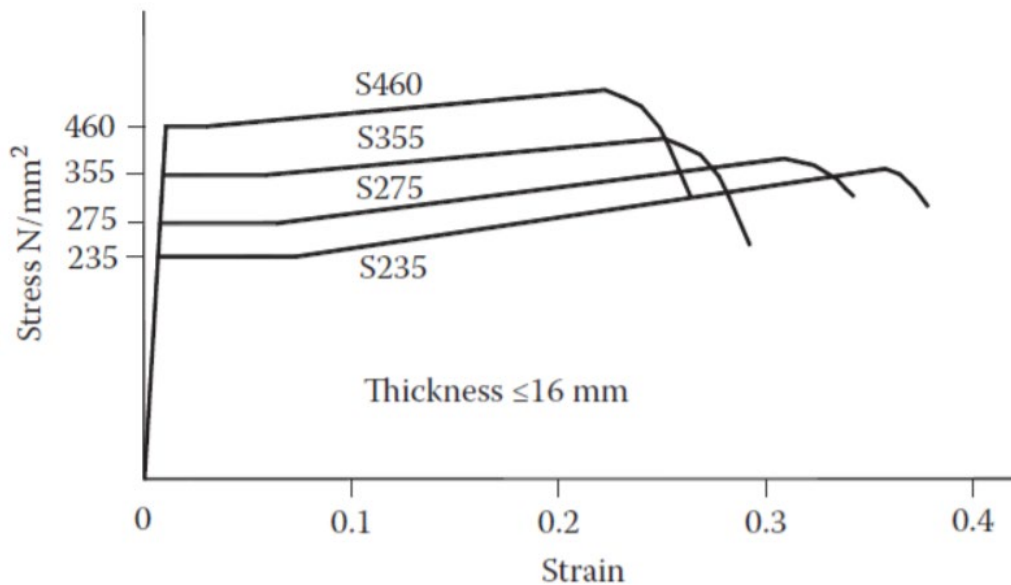


8.4.2 Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων για τον χάλυβα S355

Για τον χάλυβα S355 χρησιμοποιήθηκε το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.

$$\varepsilon_{sy} = \sigma_s/E_s = (355000 \text{ kPa})/(210000000 \text{ kPa}) = 0.0017$$

Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα [40], εκτιμήθηκε ότι η παραμόρφωση αστοχίας του χάλυβα S355 είναι $\varepsilon_u \approx 0.25$.



Άρα η πλαστική παραμόρφωση είναι $\varepsilon_{pl} = 0.25 - 0.0017 \approx 0.24831$

Material Behaviors

- Elastic
- Plastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	210000000	0.3

Plastic

Hardening: Isotropic

Use strain-rate-dependent data

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	Yield Stress	Plastic Strain
1	355000	0
2	355000	0.24831

9. Αποτελέσματα και Έλεγχοι

Η σύνδεση ελέγχθηκε για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή τριβής (0.6 , 0.5 και 0.7). Γενικά, ο συντελεστής τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα σε υλικά όπως ο χάλυβας και το grout λαμβάνει τιμές σε αυτό το διάστημα. Επίσης, η τιμή 0.6 λαμβάνεται στη μεταπτυχιακή διπλωματική. [42]

Παρατηρήθηκε ωστόσο, ότι δεν υπάρχει διαφορά στις τάσεις για διαφορετική τιμή του συντελεστή τριβής.

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.

[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 . [26]

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

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (36)$$

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: $\sigma_1 \leq \sigma_c$

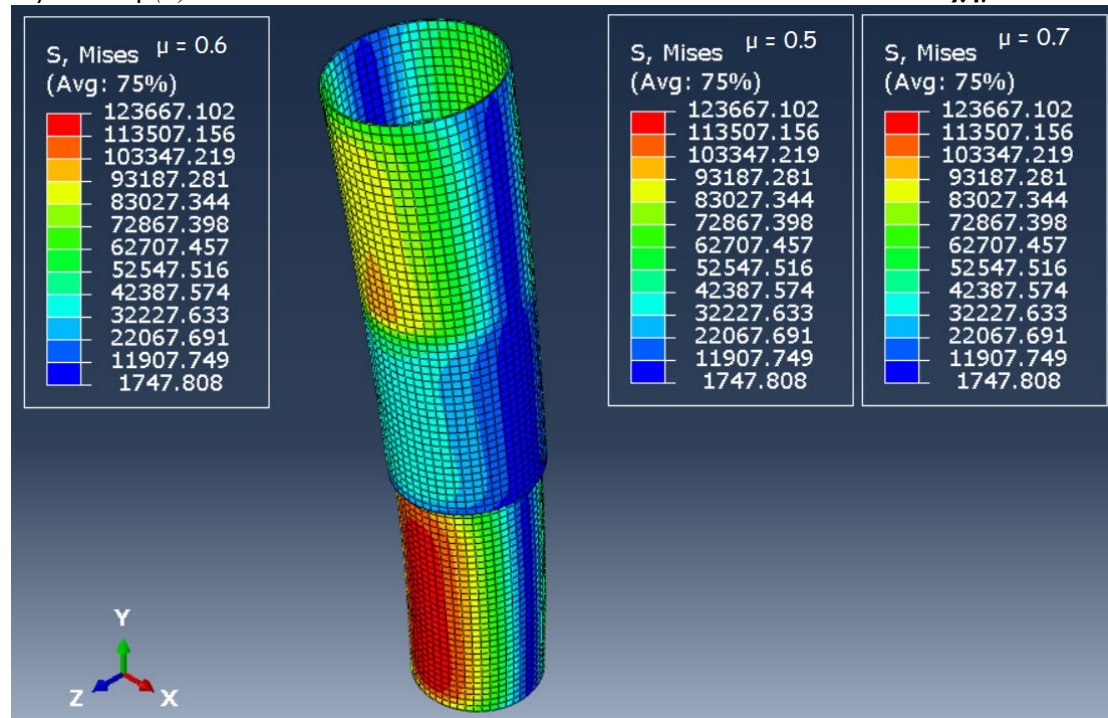
Δίνεται εντολή επίσης να υπολογισθούν οι πιέσεις επαφής (στις δύο διεπιφάνειες), η κατάσταση της επαφής, το κενό και η διείσδυση που προκαλούνται καθώς επίσης και οι ορθές και διατμητικές τάσεις και η συνολική παραμόρφωση.

Για τα δυο μοντέλα που σχεδιάστηκαν, ερευνήθηκαν τρεις περιπτώσεις: (α) η συμπεριφορά και των δύο υλικών είναι ελαστοπλαστική, (β) η συμπεριφορά του χάλυβα είναι ελαστική, ενώ του grout ελαστοπλαστική, (γ) η συμπεριφορά και των δύο υλικών είναι ελαστική. Επίσης μελετήθηκαν και δύο ακόμα περιπτώσεις: (δ) με διπλάσιες τιμές φορτίων και (ε) με πάχος του grout ίσο με το μισό της τιμής που λήφθηκε αρχικά. Τέλος έγινε επίλυση των μοντέλων με την ελαστοπλαστική θεώρηση των υλικών σύμφωνα με το πανεπιστήμιο του Μπέρμιγχαμ [44].

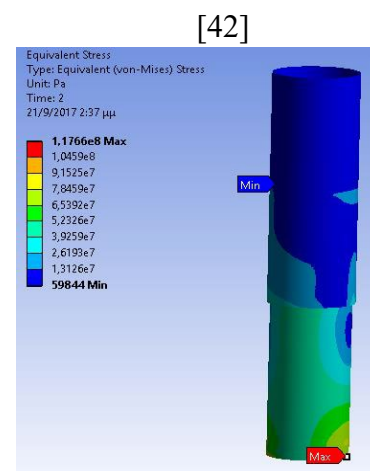
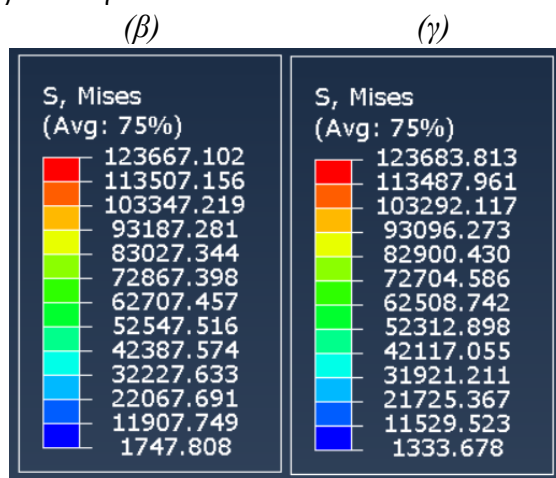
9.1 Grouted Connection χωρίς shear keys

❖ Steel Members – Von Mises Stresses (kPa)

περίπτωση (α)



περίπτωση



(Μέγιστη τιμή: 117660 kPa)

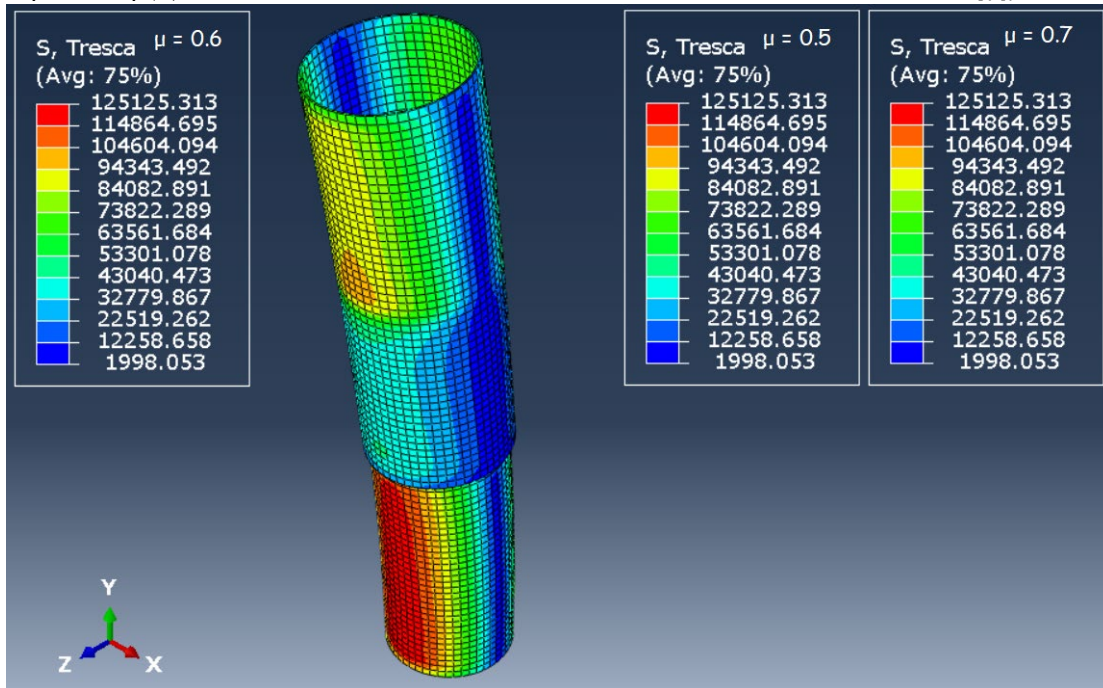
Έλεγχος

$$\sigma_v = 123667,102 \text{ kPa} < \sigma_y = 355000 \text{ kPa}$$

❖ Steel Members – Tresca Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

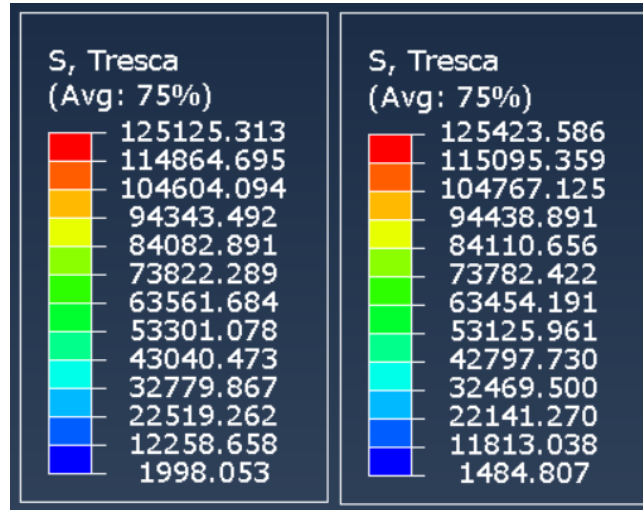
Σχήμα 2



περίπτωση

(β)

(γ)

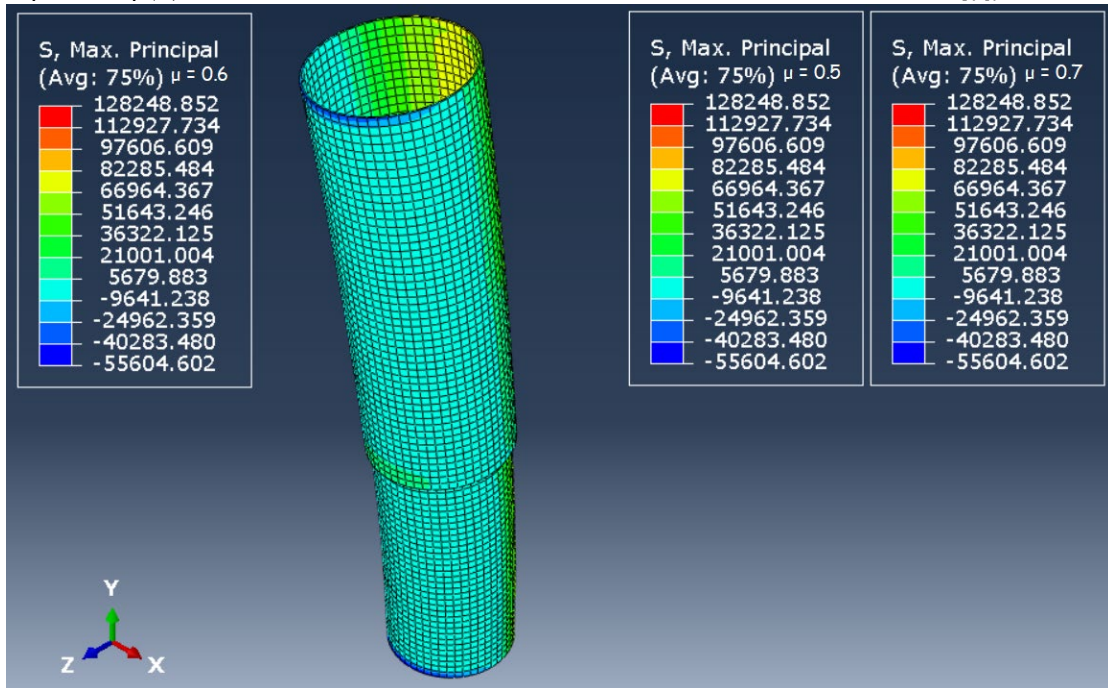


Έλεγχος

$$1/2 * \sigma_{max} - \sigma_{min} = 1/2 * 125125,313 - 1998,053 = 60564,604 \text{ kPa} < \sigma_y / \sqrt{3} = 204959,346 \text{ kPa}$$

❖ Steel Members – Max Principal Stresses (kPa)

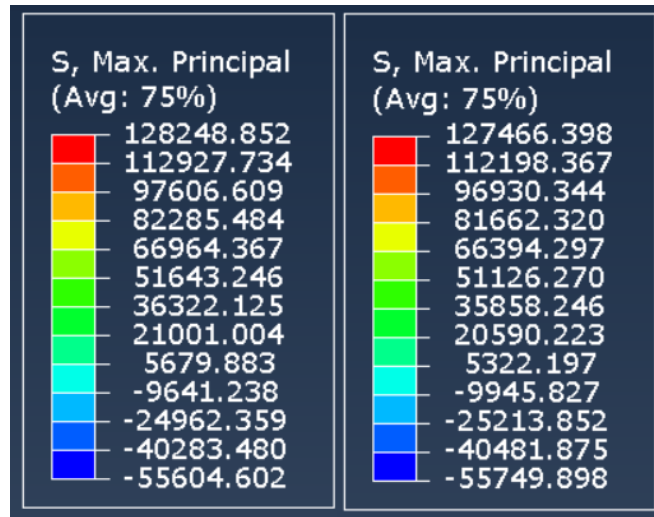
περίπτωση (α)



περίπτωση (β)

(β)

(γ)

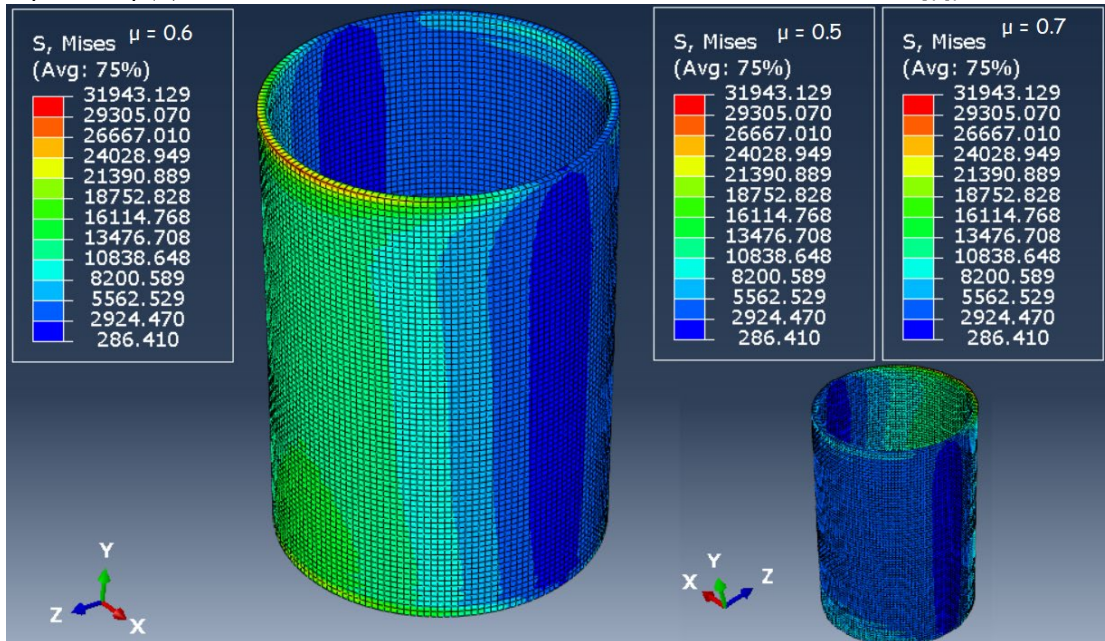


Έλεγχος

$$\sigma_1 = 128248,852 \text{ kPa} < \sigma_y = 355000 \text{ kPa}$$

❖ Grout – Von Mises Stresses (kPa)

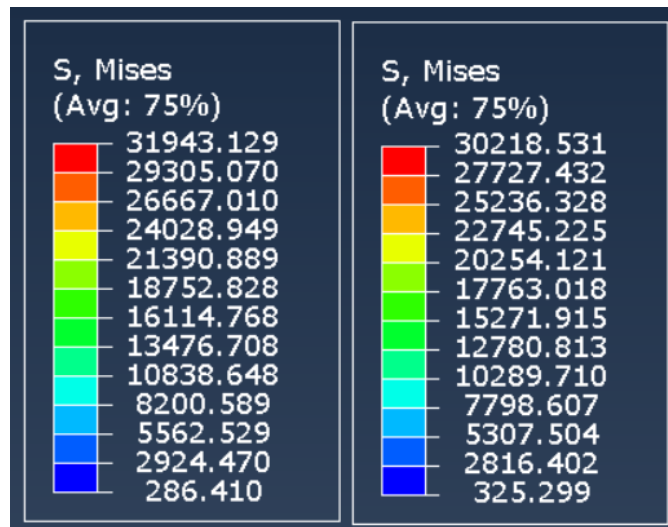
περίπτωση (α)



περίπτωση

(β)

(γ)



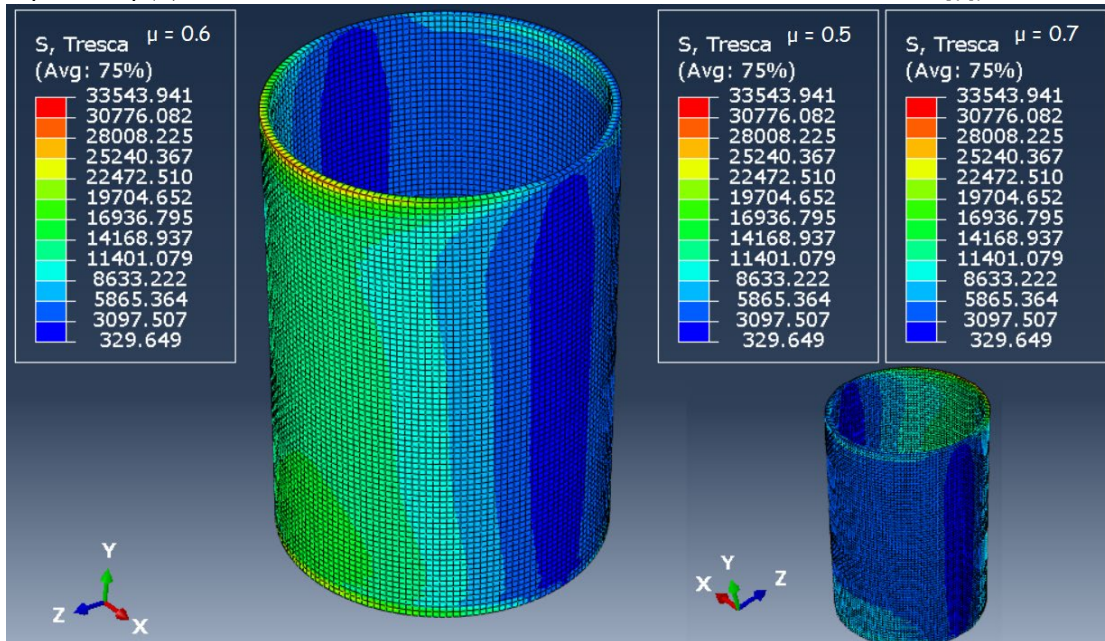
Έλεγχος

$\sigma_v = 31943,129 \text{ kPa} > \sigma_y = 4400 \text{ kPa}$

❖ Grout – Tresca Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

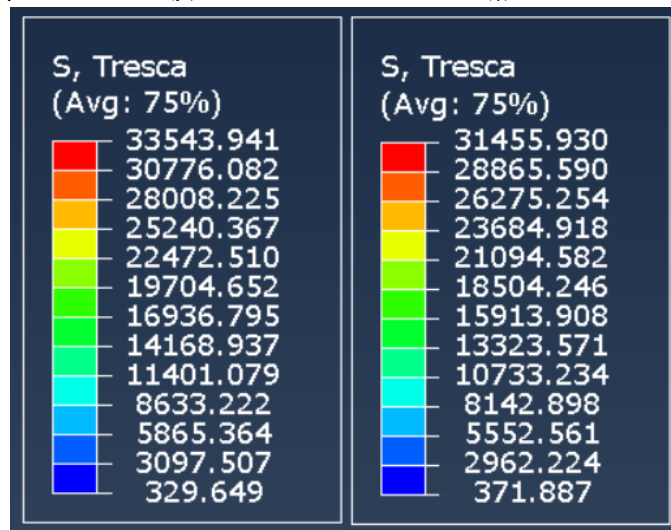
Σχήμα 5



περίπτωση

(β)

(γ)



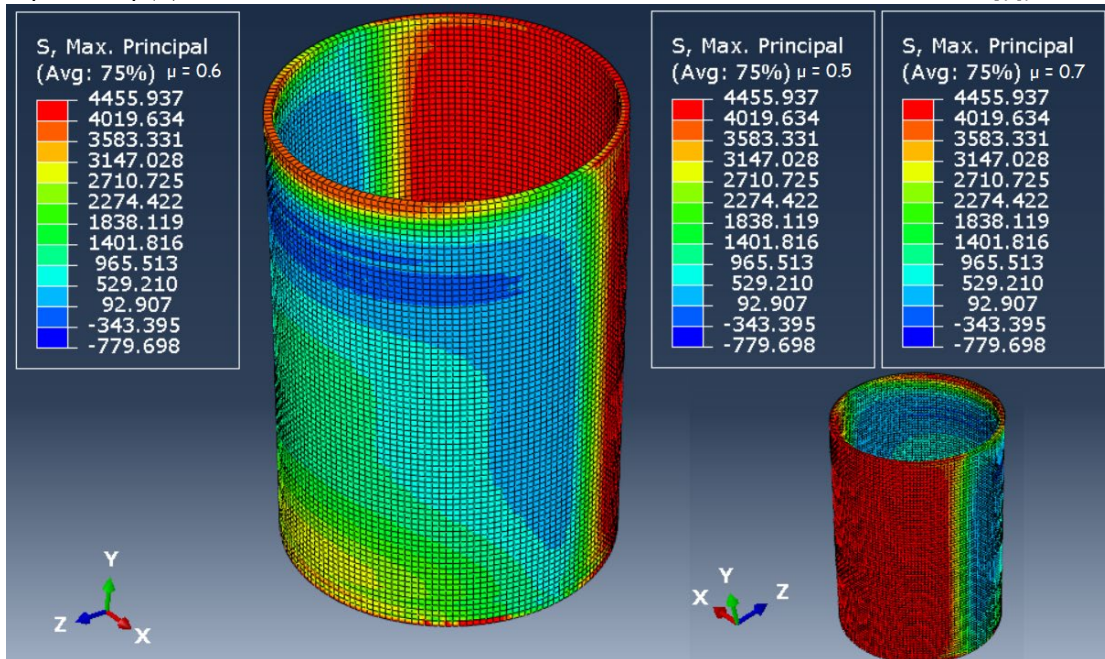
Έλεγχος

$$1/2 * \sigma_{max} - \sigma_{min} = 1/2 * 33543,941 - 329,649 = 16442,322 \text{ kPa} > \sigma_y / \sqrt{3} = 2540,341 \text{ kPa}$$

❖ Grout – Max Principal Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

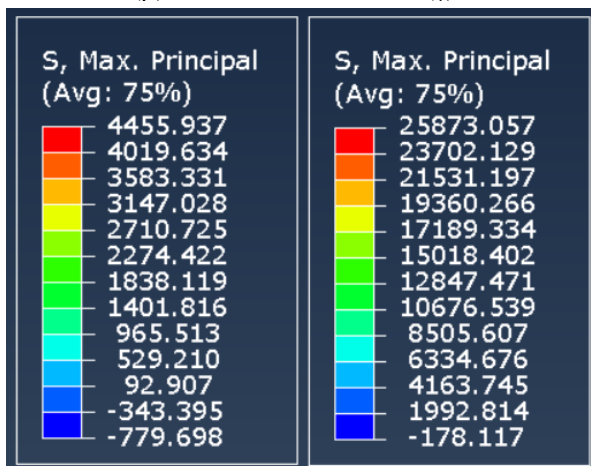
Σχήμα 6



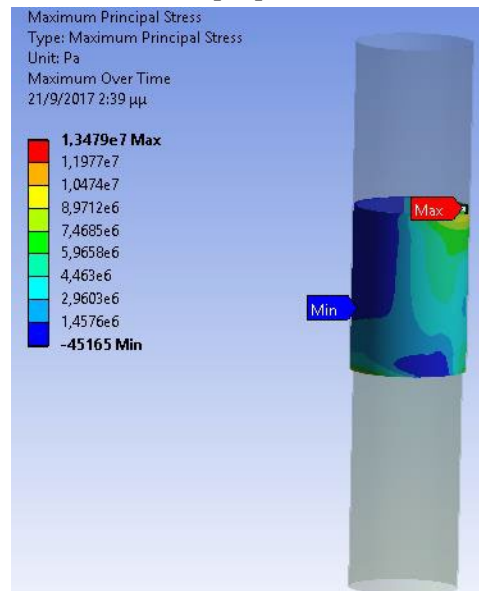
περίπτωση

(β)

(γ)



[42]



(Μέγιστη τιμή: 13479 kPa)

Έλεγχος

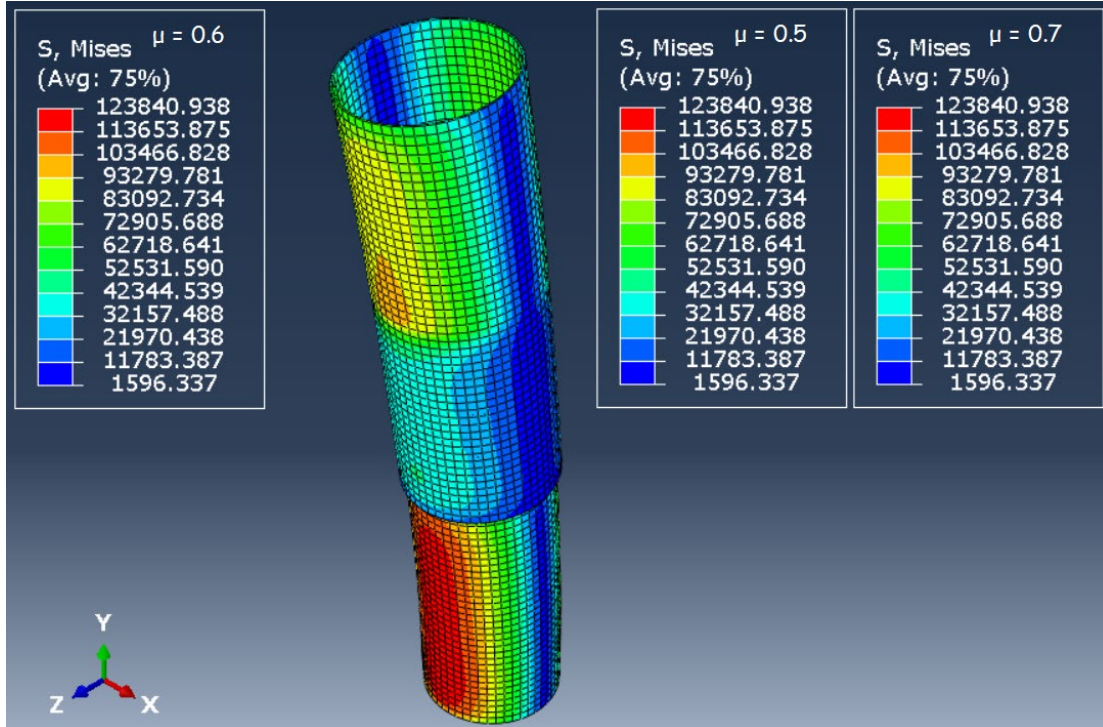
$$\sigma_1 = 4455,937 \text{ kPa} > \sigma_y = 4400 \text{ kPa}$$

9.2 Grouted Connection με Shear Keys

❖ Steel Members – Von Mises Stresses

περίπτωση (α)

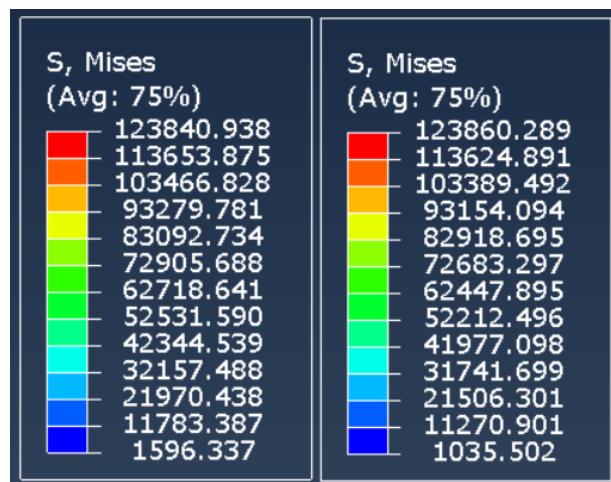
Σχήμα 7



περίπτωση

(β)

(γ)



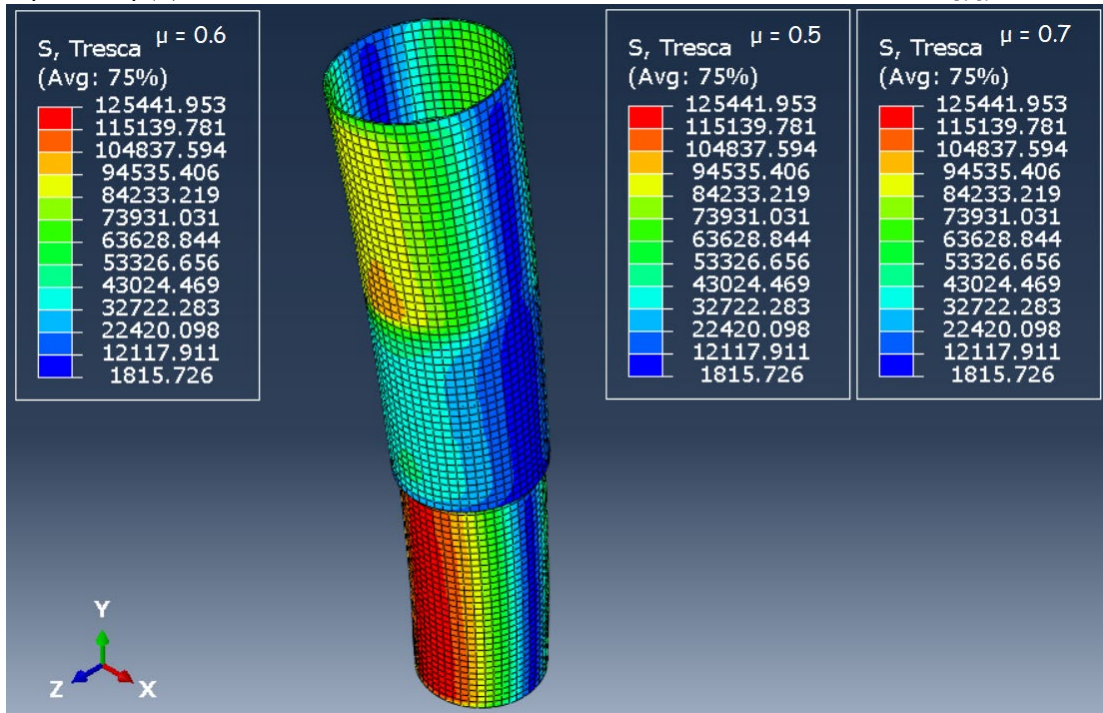
Έλεγχος

$$\sigma_v = 123840,938 \text{ kPa} < \sigma_y = 355000 \text{ kPa}$$

❖ Steel Members – Tresca Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

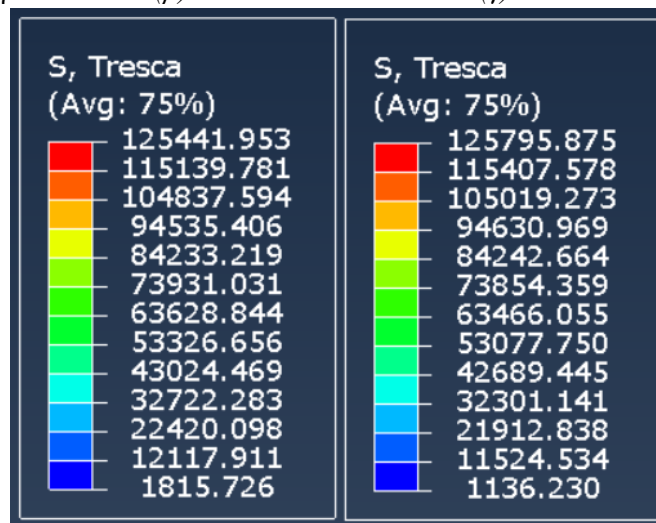
Σχήμα 8



περίπτωση

(β)

(γ)



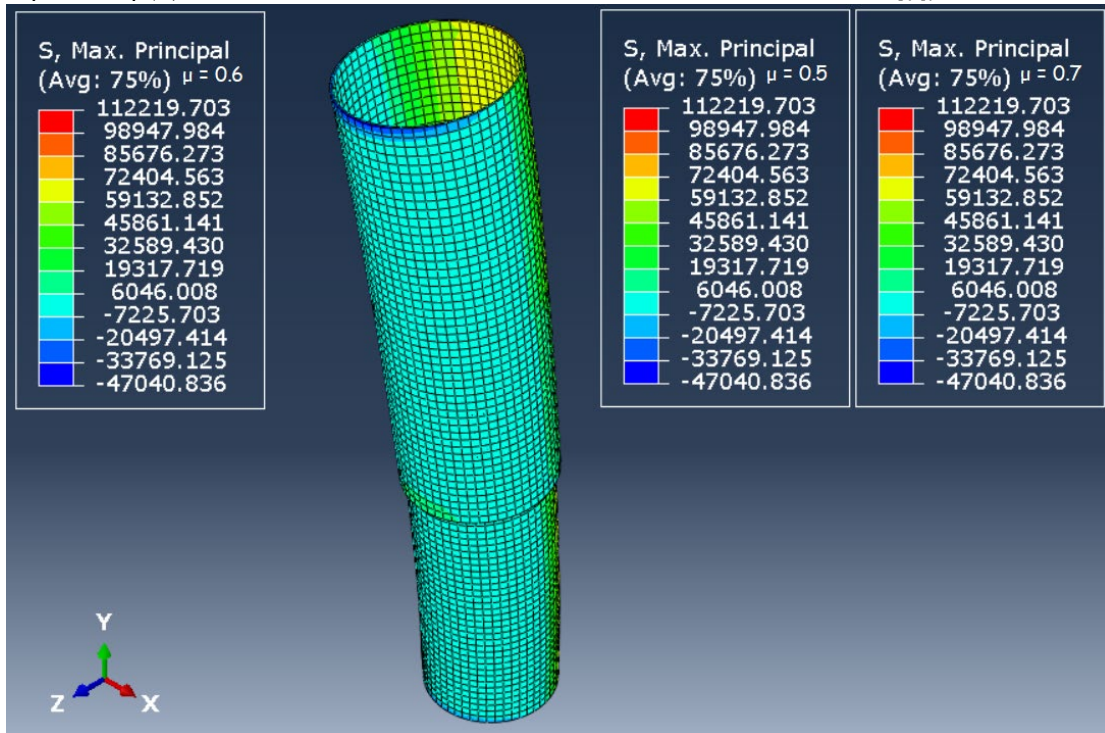
Έλεγχος

$$1/2 * \sigma_{max} - \sigma_{min} = 1/2 * 125441,953 - 1815,726 = 60905,251 \text{ kPa} < \sigma_y / \sqrt{3} = 204959,346 \text{ kPa}$$

❖ Steel Members – Max Principal Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

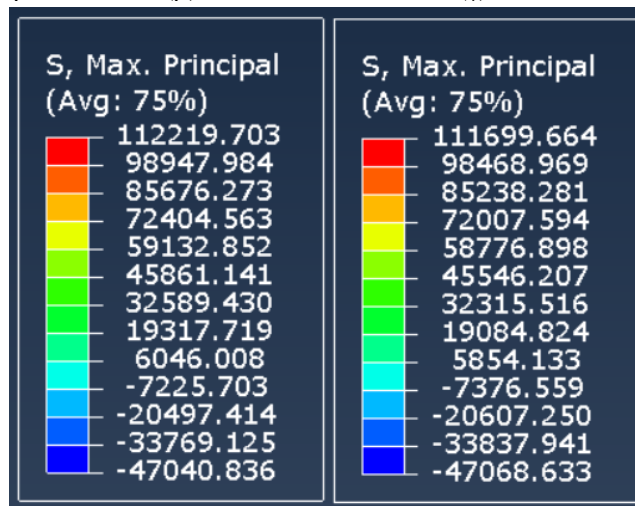
Σχήμα 9



περίπτωση

(β)

(γ)

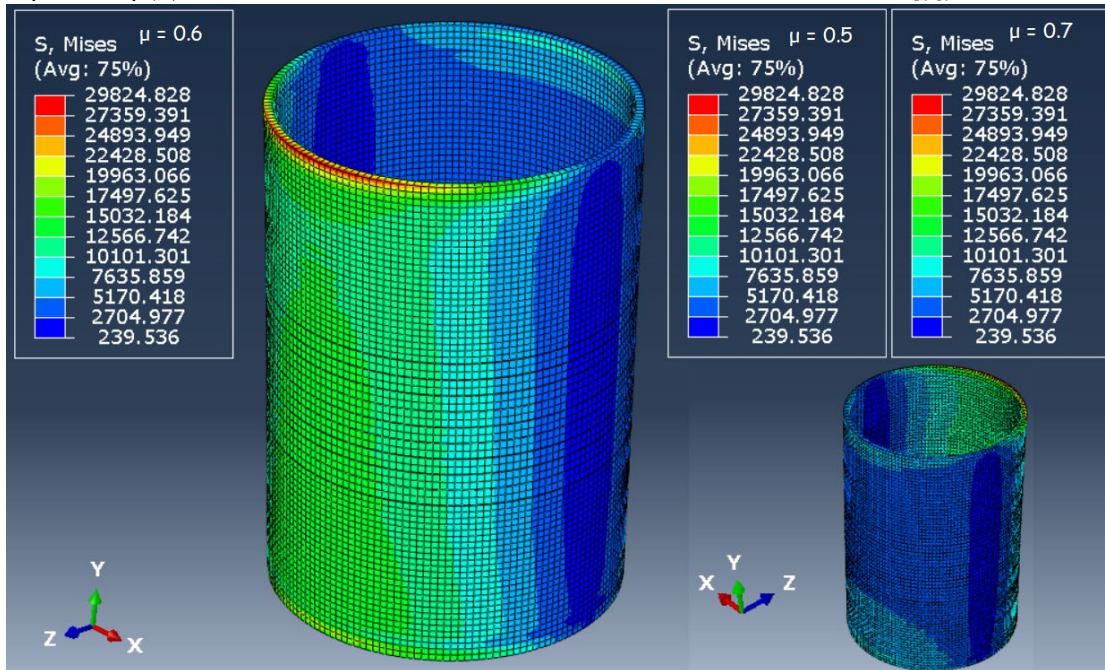


Έλεγχος

$$\sigma_1 = 112219,703 \text{ kPa} < \sigma_y = 355000 \text{ kPa}$$

❖ Grout – Von Mises Stresses

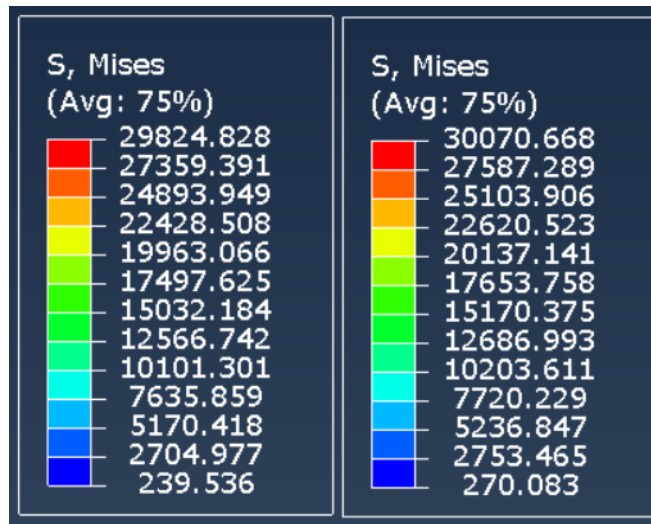
περίπτωση (α)



περίπτωση

(β)

(γ)



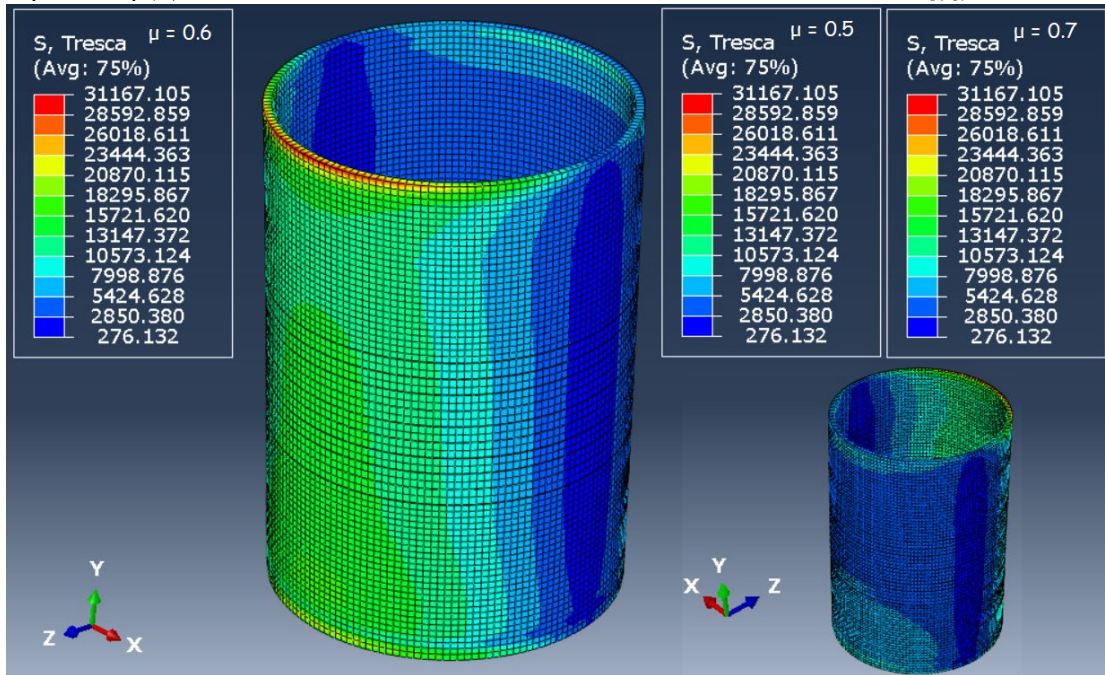
Έλεγχος

$\sigma_v = 29824,828 \text{ kPa} > \sigma_y = 4400 \text{ kPa}$

❖ Steel Members – Tresca Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

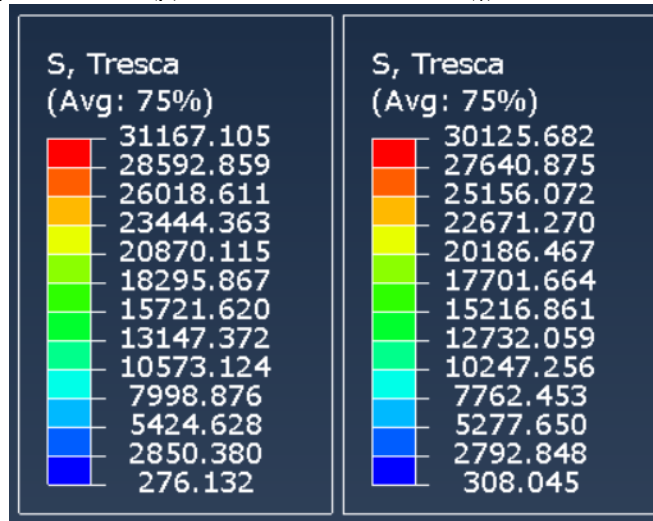
Σχήμα 11



περίπτωση

(β)

(γ)



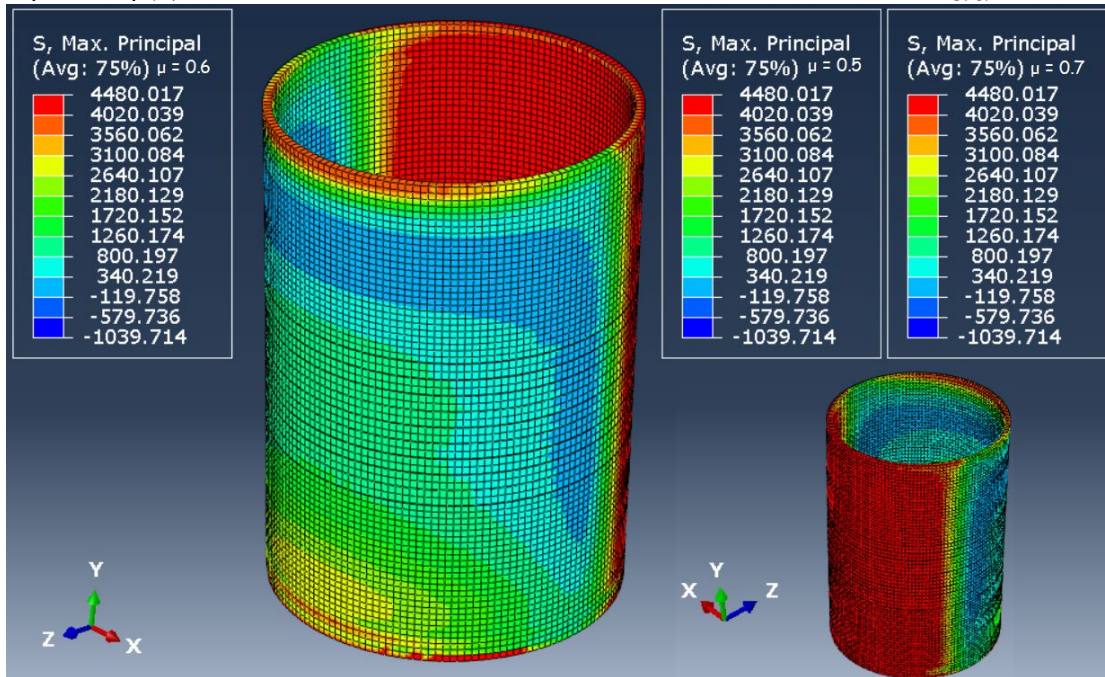
Έλεγχος

$$1/2 * \sigma_{max} - \sigma_{min} = 1/2 * 31167,105 - 276,132 = 15307,421 \text{ kPa} > \sigma_y / \sqrt{3} = 2540,341 \text{ kPa}$$

❖ Grout – Max Principal Stresses (kPa)

περίπτωση (α)

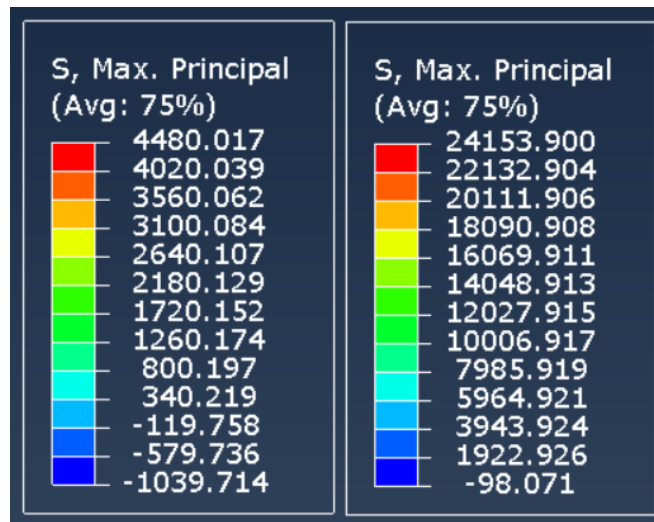
Σχήμα 12



περίπτωση

(β)

(γ)



Έλεγχος

$$\sigma_I = 4480.017 \text{ kPa} > \sigma_y = 4400 \text{ kPa}$$

Το μέγιστο άνοιγμα μεταξύ χάλυβα και ενέματος στην κορυφή του μονοριλε προκύπτει από τις αναλυτικές εξισώσεις που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 6.

Χωρίς shear keys		Με shear keys	
Mtot	60600	v	0.3
μ	0.6	n	10
Rp	2	seff	0.19
Rtp	2.15	s	0.2
t-tp	0.05	w	0.01
t-p	0.05	μ	0.4
Lg	6		
E	210000000	keff	2140762
tg	0.1		
		p	629.0635
p	1162.010604	kv	610792.6
δ-p	0.000442671	kvn	6107926
δ-tp	0.000511561	k-tp	3500000
		keff	2225011
δH	0.002862696	δH	0.00155

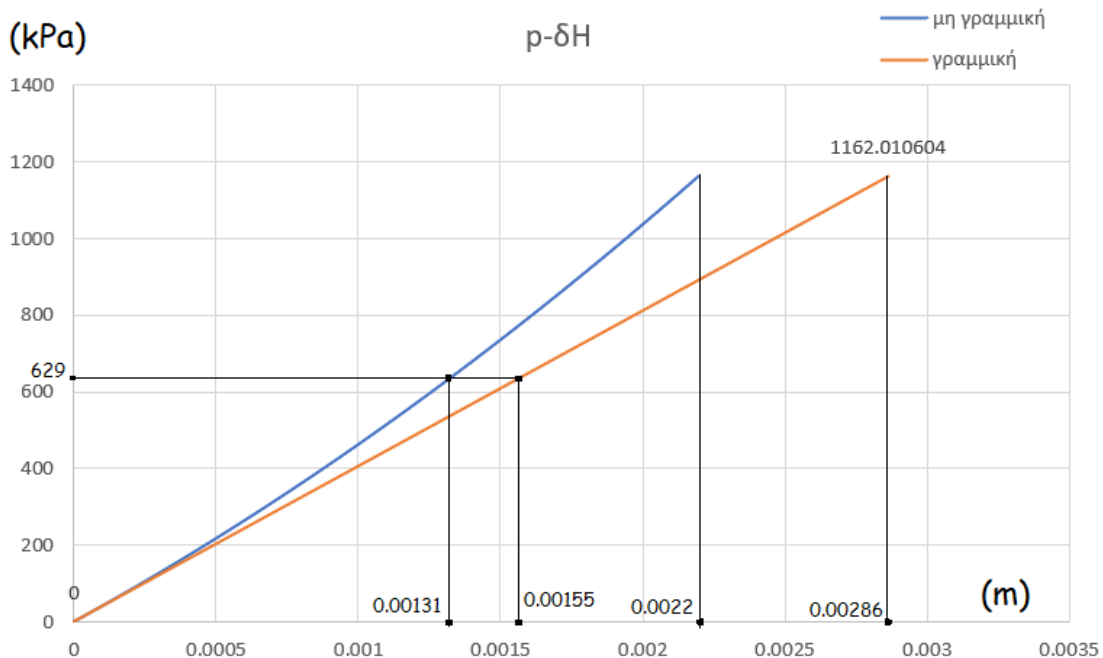
Από τις εξισώσεις αυτές προέκυψε $\delta_H = 2.86 \text{ mm}$

Από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που έγινε, υπολογίστηκε ότι $\delta_p \approx 0.000365 \text{ m}$ και $\delta_{TP} \approx 0.000368 \text{ m}$.

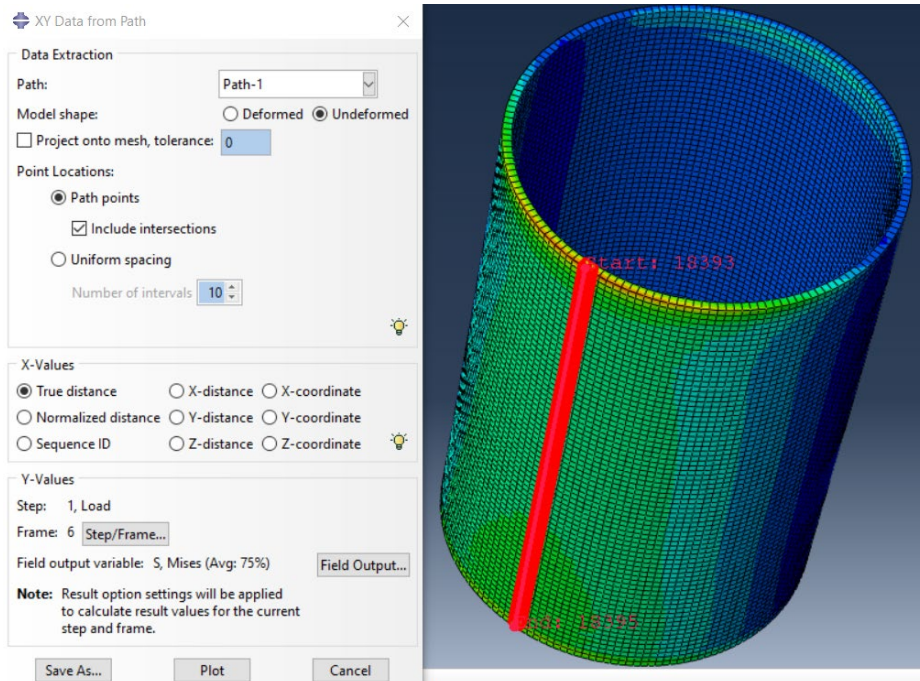
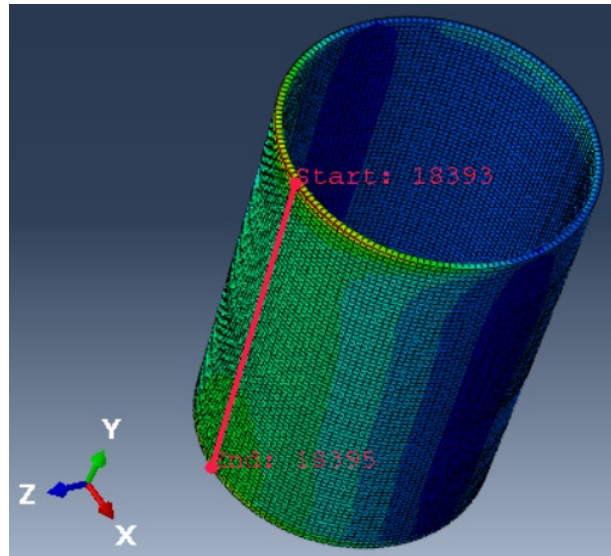
Οπότε $\delta_H = 3(\delta_p + \delta_{TP}) \approx 2.20 \text{ mm}$, δηλαδή απόκλιση 0.66 mm

Η απόκλιση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι στις αναλυτικές εξισώσεις δε λαμβάνεται η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών, όπως γίνεται στην ανάλυση στο ABAQUS.

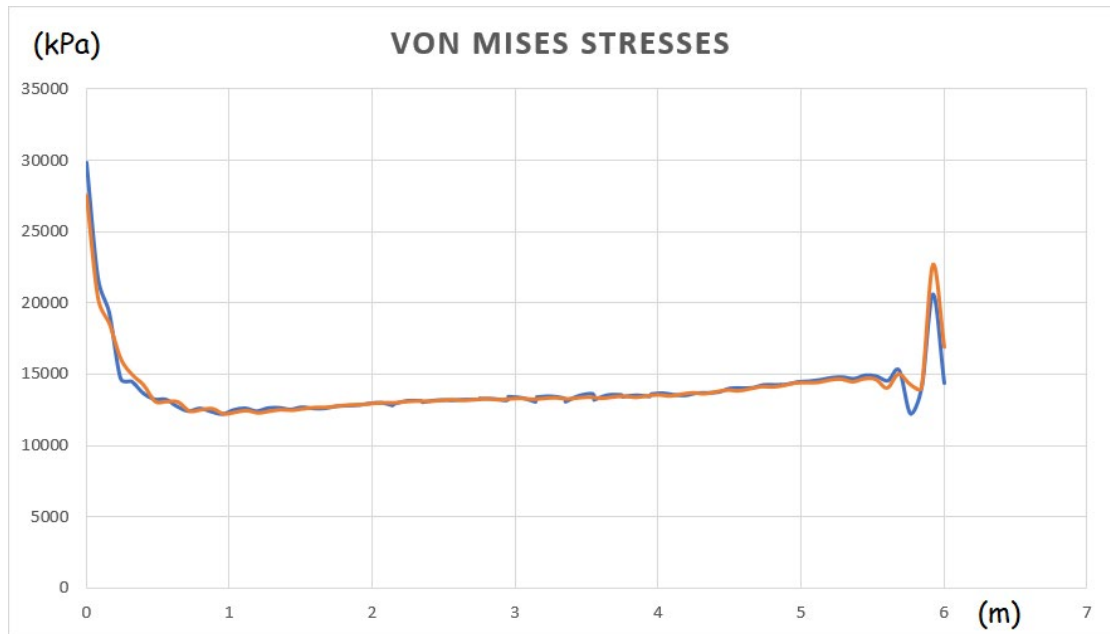
Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες των σχέσεων μεταξύ της πίεσης επαφής και του ανοίγματος, για ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά του grout. Η γραμμική σχέση προκύπτει από τις αναλυτικές εξισώσεις (εξισώσεις (1) έως (9)), ενώ η μη γραμμική σχέση προσεγγίστηκε από την τιμή του ανοίγματος που προέκυψε από το ABAQUS. Για την περίπτωση με shear keys προκύπτει η ίδια γραμμική κατανομή σύμφωνα με τις αναλυτικές εξισώσεις (εξισώσεις (10) έως (19)), και η τιμή του ανοίγματος υπολογίζεται σε $\delta_H = 0.00155 \text{ m}$ (για $p = 629.06 \text{ kPa}$). Στην ελαστοπλαστική ανάλυση προκύπτει η τιμή $\delta_H \approx 0.00125 \text{ m}$, η οποία είναι πολύ κοντά στην τιμή που δίνει η παρακάτω μη – γραμμική κατανομή (0.00131 m).

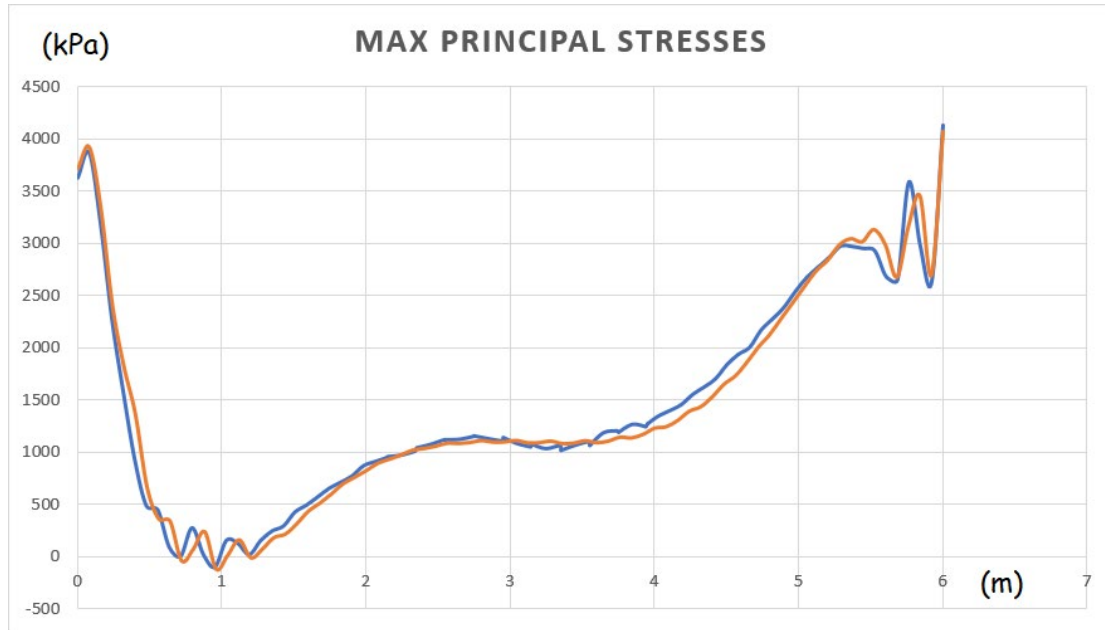


Στη συνέχεια, μέσω του ABAQUS, δημιουργείται ένα Path κατά μήκος του grout όπου δέχεται τη μεγαλύτερη θλίψη, και συγκρίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στις περιπτώσεις με και χωρίς shear keys.



πορτοκαλί – χωρίς shear keys
μπλε – με shear keys





Παρατηρούμε ότι οι κατανομές σχεδόν ταυτίζονται. Αυτό σημαίνει ότι για τη συγκεκριμένη γεωμετρία της σύνδεσης, τα shear keys δεν επιδρούν στην ανακατανομή των τάσεων.

Σύμφωνα με τους Nikolaos I. Tziavos, Hassan Hemida, Nicole Metje και Charalampos Baniotopoulos [44], δημιουργούνται θλιπτήρες κατά την παρακάτω γεωμετρία των μελών. Παρατηρούμε ότι για την αρχική γεωμετρία που μελετήσαμε δεν επαρκούν όλοι οι έλεγχοι του παρακάτω πίνακα.

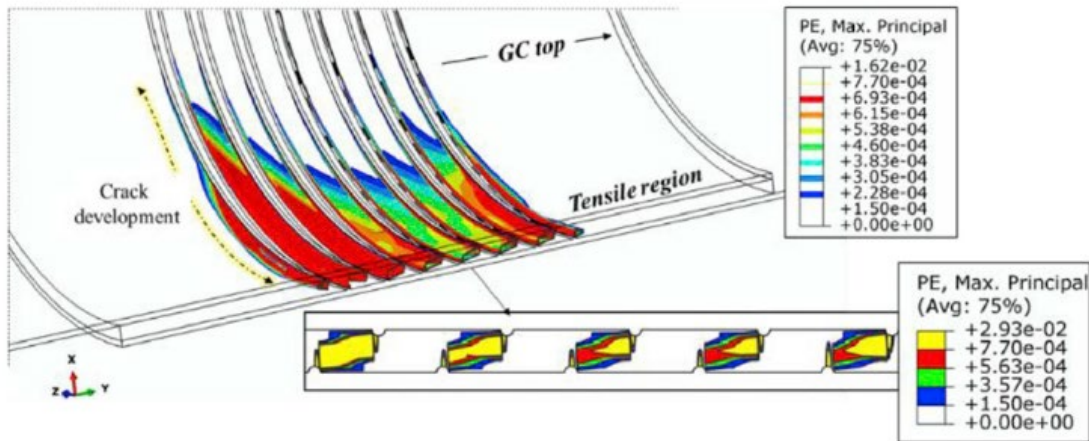
Table 1
Dimensions of FE models.

Description	Symbol	Value ^a	Limit ^b
Shear key height [mm]	h	3	n/a
Shear key spacing [mm]	s	60	n/a
Shear key width [mm]	w	6	n/a
^c Shear key ratio [-]	h/s	0.05	< 0.1
^c Width to height ratio [-]	w/h	2	$1.5 < w/h < 3$
Shear key number [-]	n	7	
Pile, Sleeve length [mm]	L_p, L_s	1955	n/a
Grout length [mm]	L_g	1040	n/a
Pile diameter, thickness [mm]	D_p, t_p	800, 8	$10 < R_p/t_p < 30$
Sleeve diameter, thickness [mm]	D_s, t_s	856, 8	$9 < R_{TP}/t_{TP} < 70$
Grout diameter, thickness [mm]	D_g, t_g	840, 20	n/a
Overlap length [-]	$F_o = L_g/D_p$	1.3	$1.5 < L_g/D_p < 3$

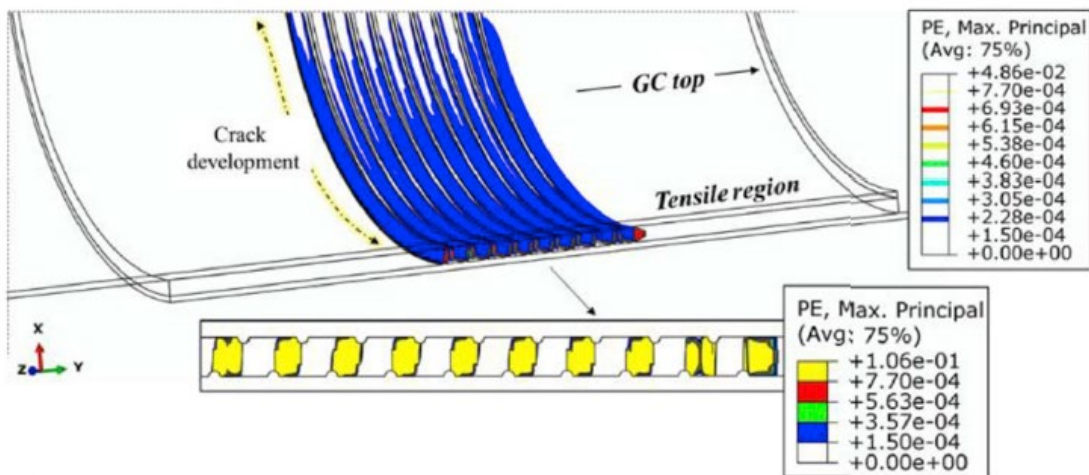
[44]

Plastic strains of Grout a) $s = 60$ mm, b) $s = 30$ mm, c) $s = 120$ mm [44]

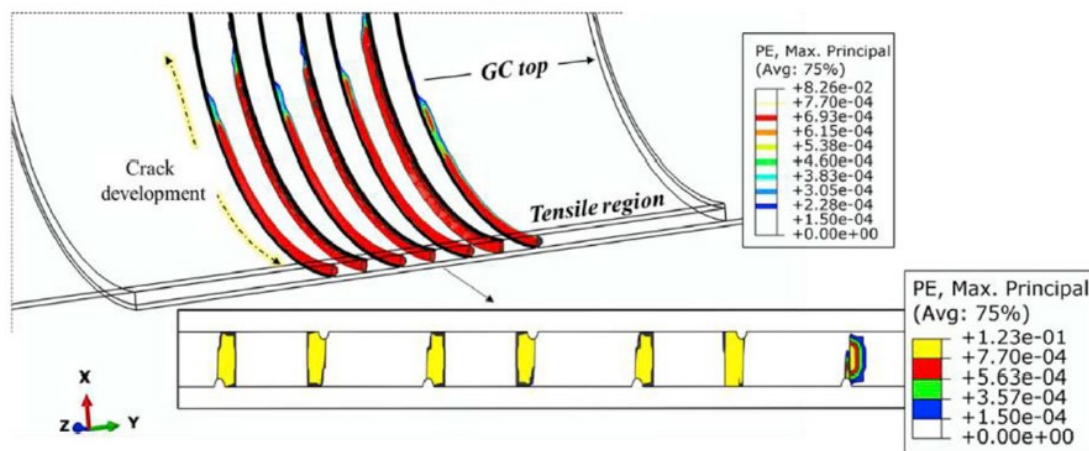
(a)



(b)



(c)



Εν συνεχεία, σχεδιάζεται η grouted connection με την παραπάνω γεωμετρία, για τις περιπτώσεις χωρίς και με shear keys. [44]

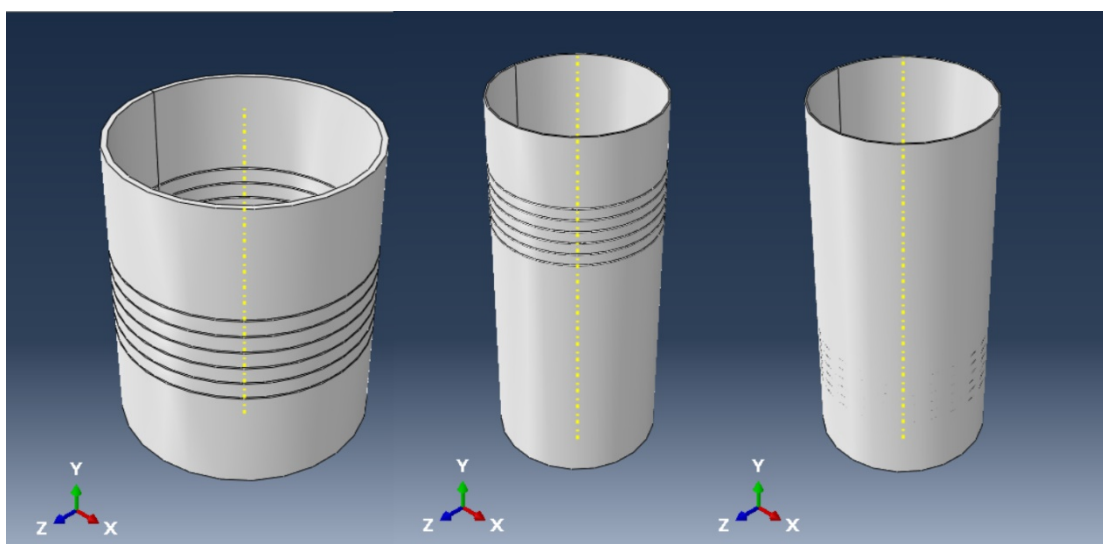
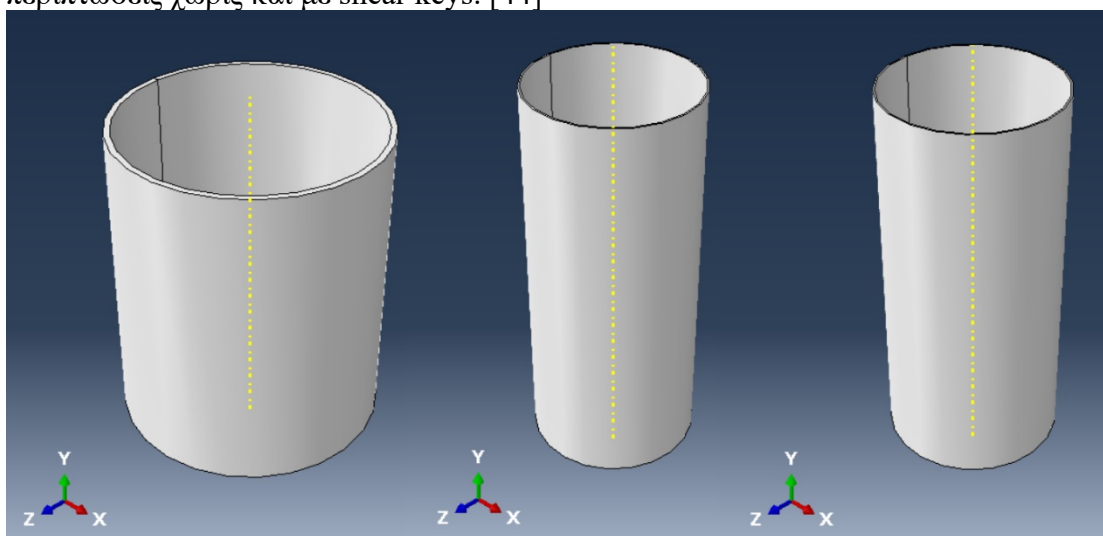


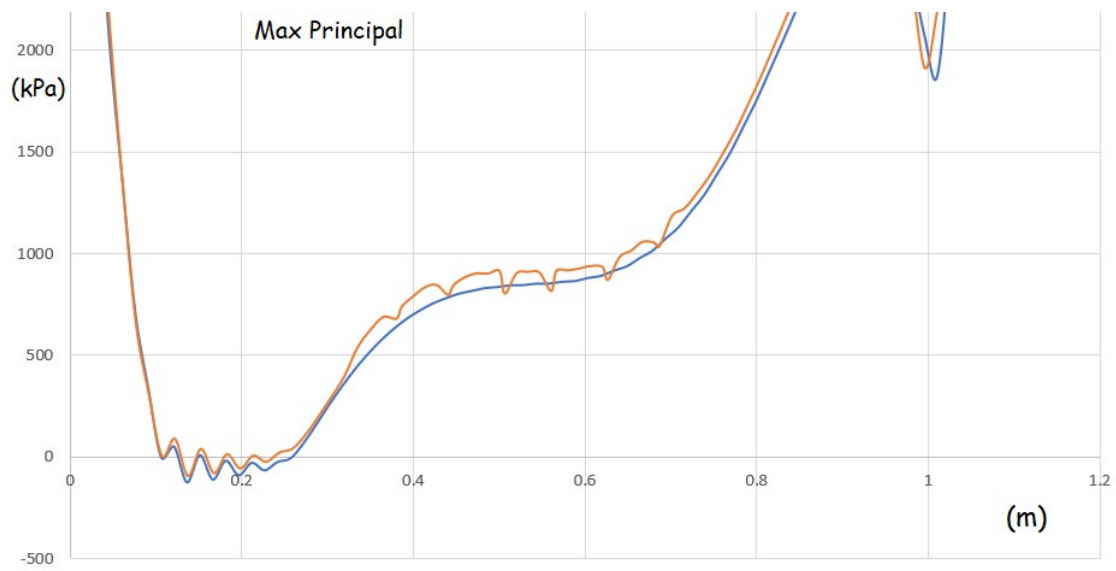
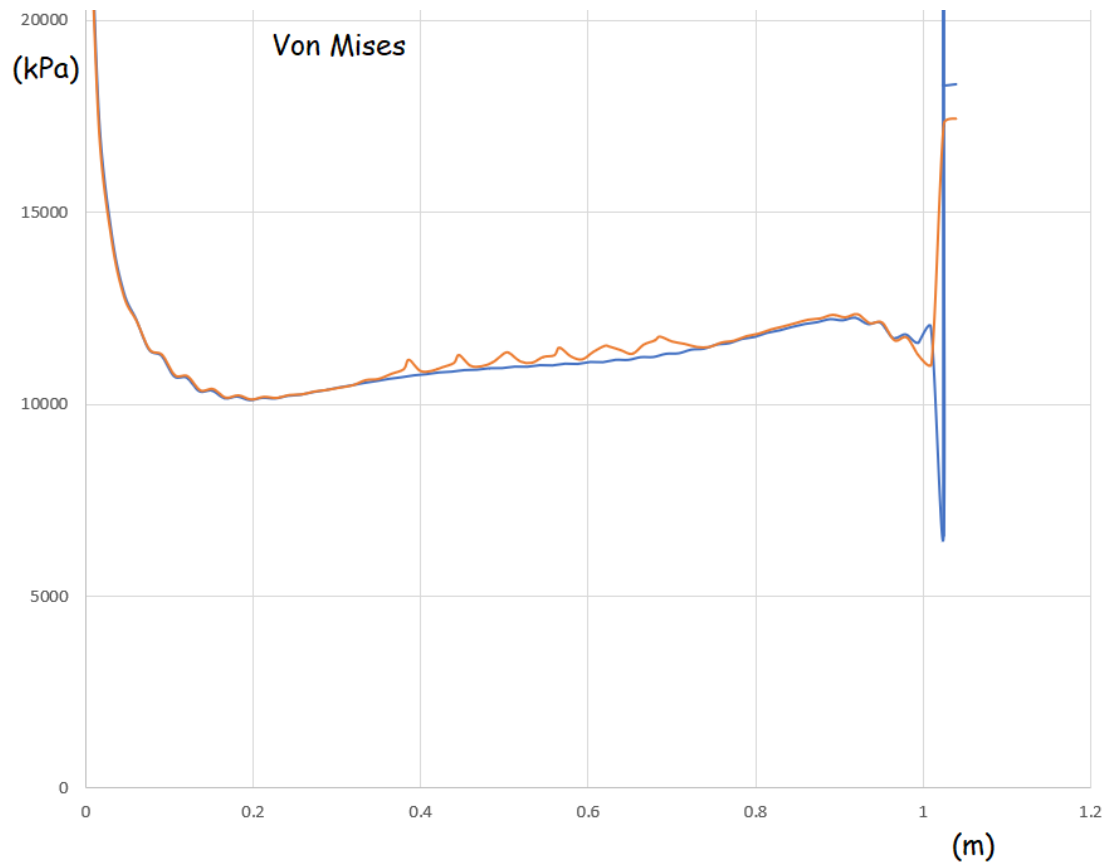
Table 2
HSG properties and CDP parameters.

Description/Symbol	Value/Unit	CDP	Value
Modulus of Elasticity, E	50000 [MPa]	Dilation angle, ψ	38°
Poisson's ratio, ν	0.19	Eccentricity	0.1
Density, ρ	2380 [kg/m ³]	Compressive yield stress	1.162
Tensile strength, f_t	7 [MPa]	Uniaxial yield stress	
Fracture Energy, G_F	150.8 [Nm/m ²]	Viscosity	0
		K_c	2/3

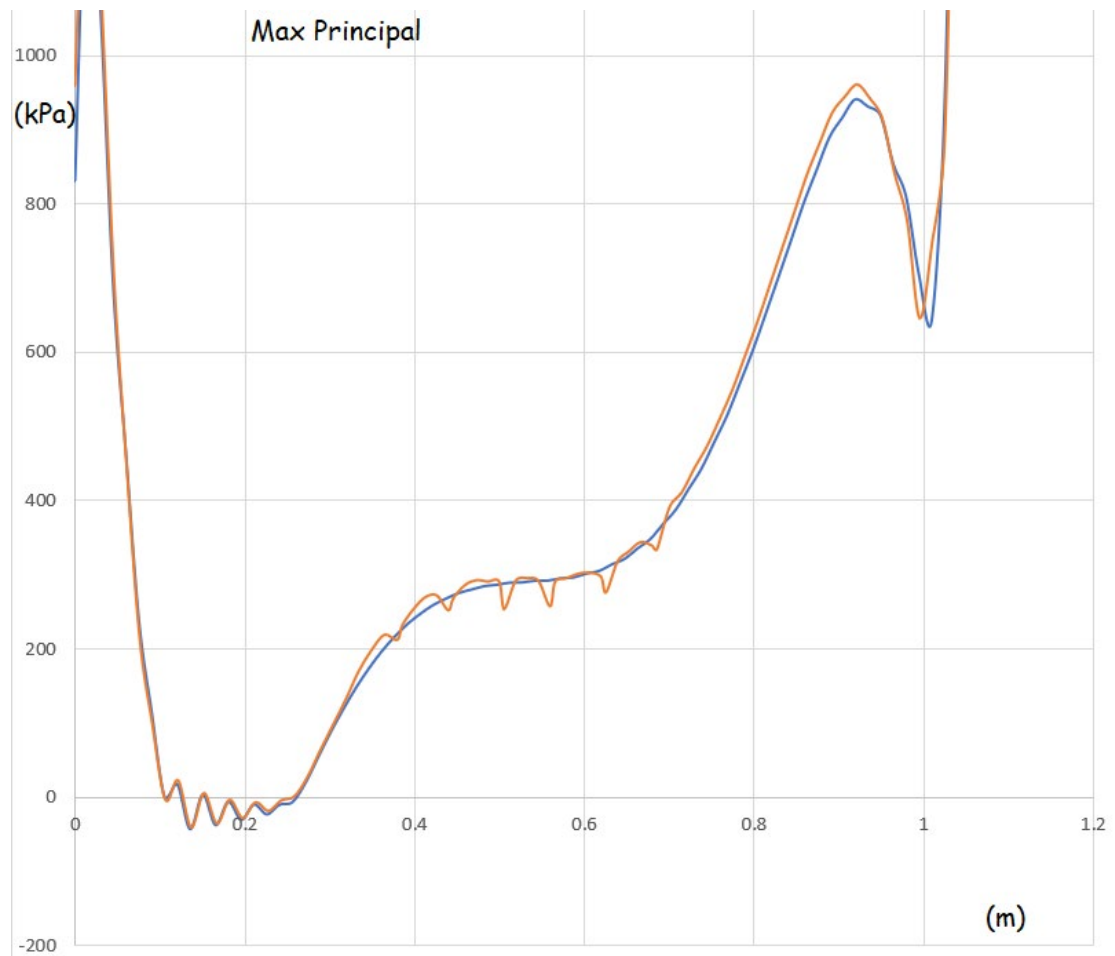
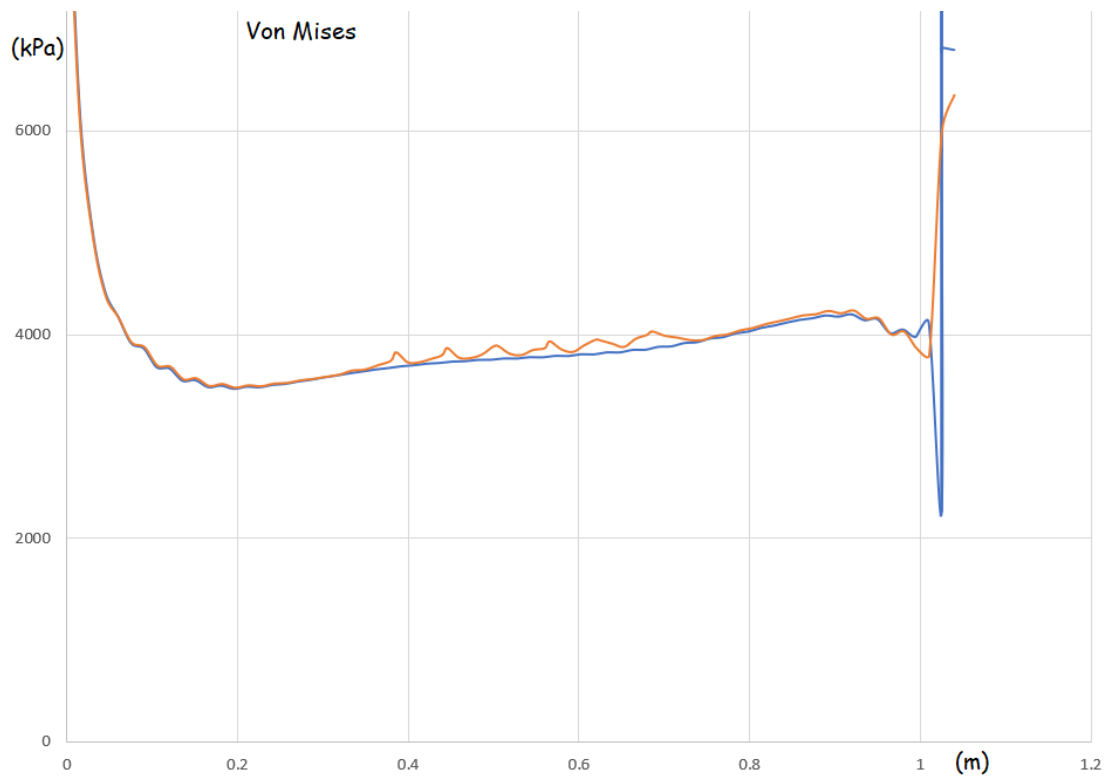
[44]

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές των τάσεων στο θλιβόμενο “Path” κατά μήκος του grout, για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις σε διάφορους συνδυασμούς φορτίων. Παρατηρούμε ότι οι ισοδύναμες τάσεις Von Mises λαμβάνουν μεγαλύτερη τιμή στις περιοχές μεταξύ των shear keys, ενώ λαμβάνουν μικρότερη τιμή στο πάνω και κάτω μέρος της σύνδεσης.

Φορτία: $F_y = -150 \text{ kN}$, $F_z = 30 \text{ kN}$, $M_x = 350 \text{ kNm}$

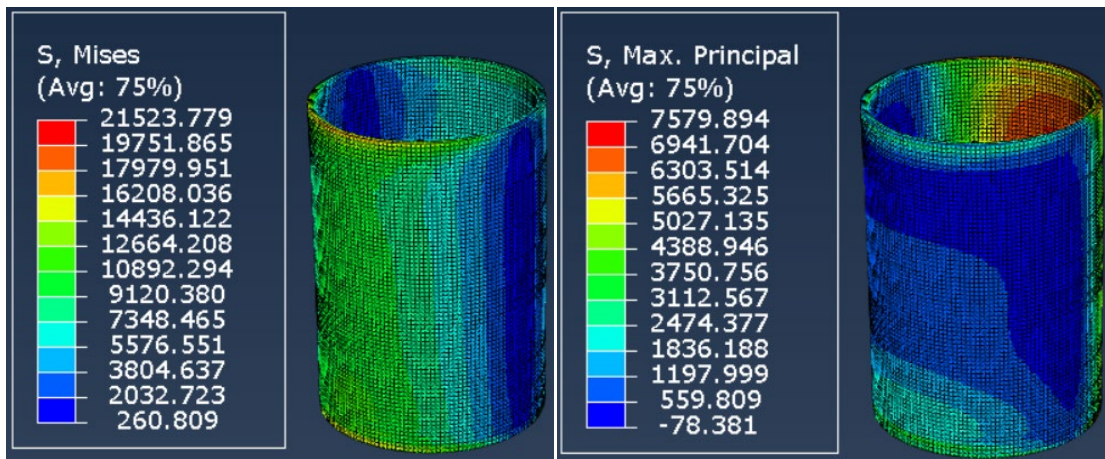
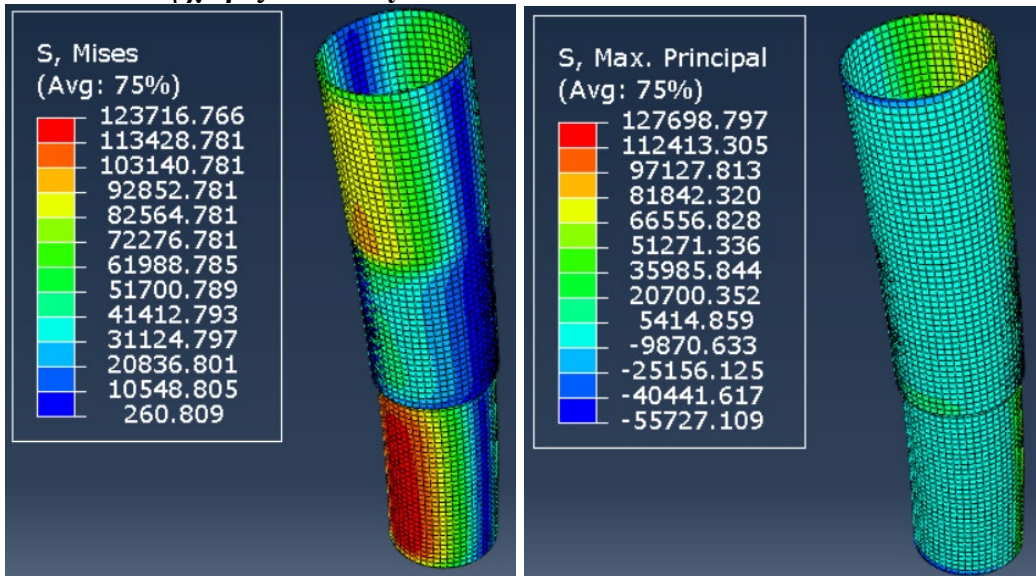


Φορτία: $F_y = -60 \text{ kN}$, $F_z = 10 \text{ kN}$, $M_x = 120 \text{ kNm}$

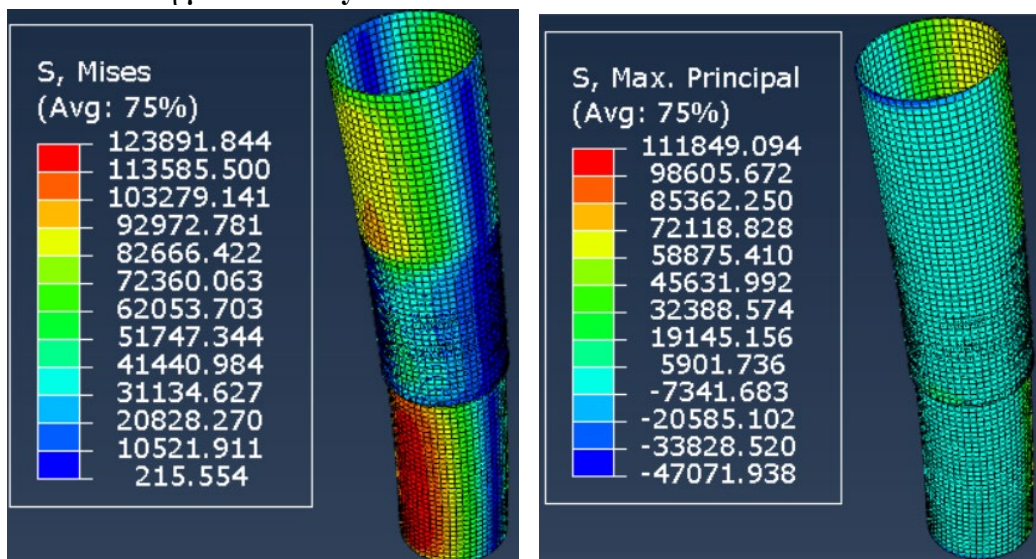


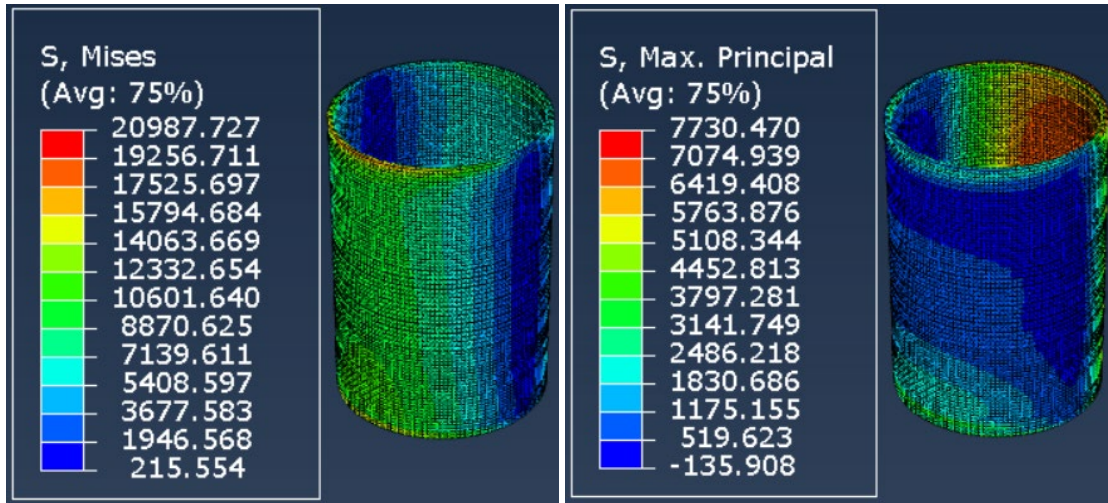
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση με θεώρηση ελαστοπλαστικών νόμων σύμφωνα με το πανεπιστήμιο του Μπέρμιγχαμ [44].

❖ Σύνδεση χωρίς shear keys

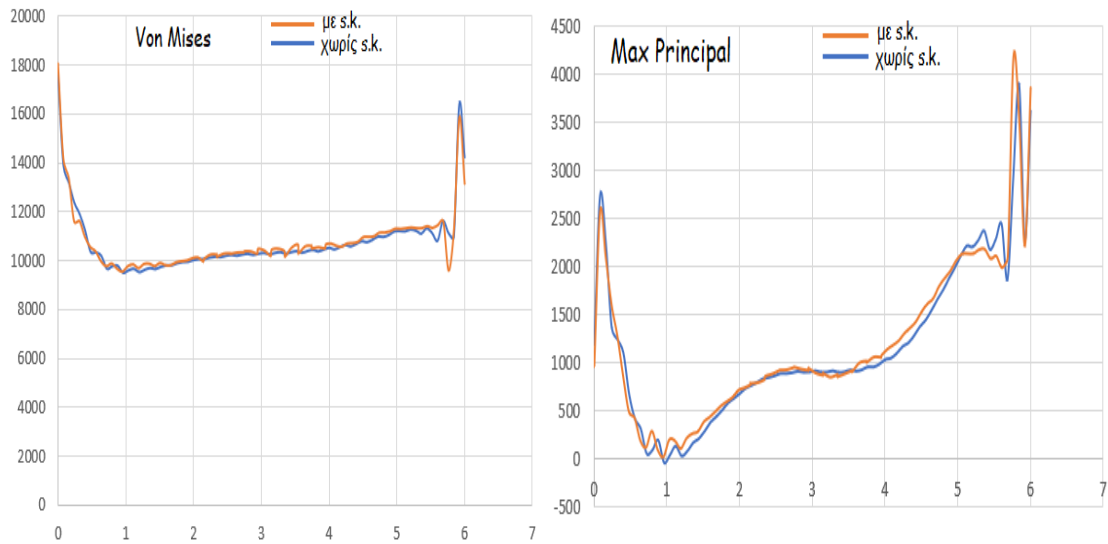


❖ Σύνδεση με shear keys

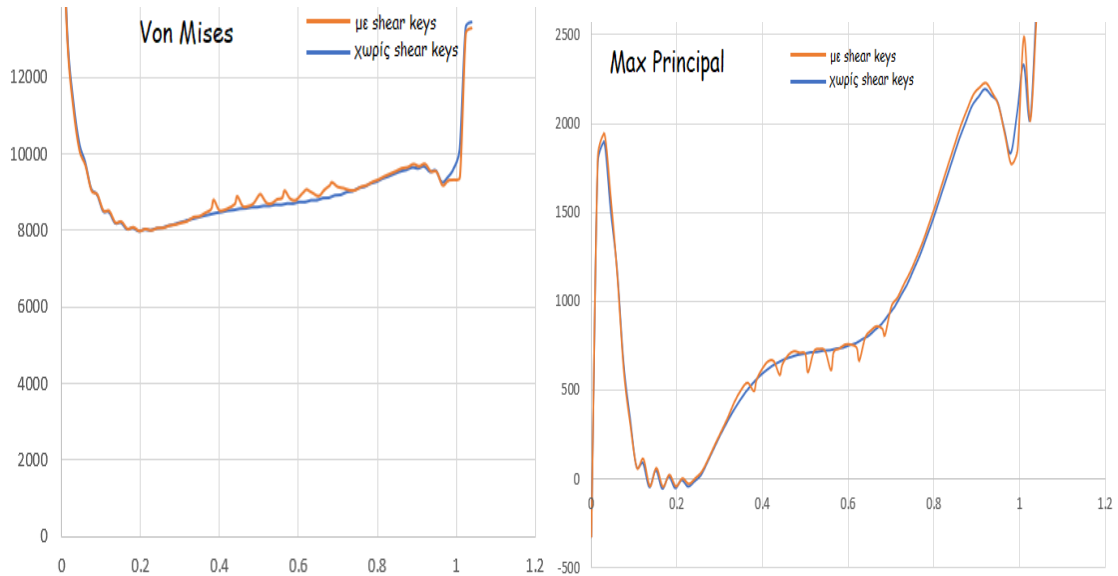




Κατανομές των τάσεων
Αρχική γεωμετρία σύνδεσης



Γεωμετρία σύνδεσης από το πανεπιστήμιο του Μπέρμιγχαμ [44]



10. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα που παρατίθενται, προκύπτει ότι το grout αστοχεί λόγω ανεπαρκούς εφελκυστικής ικανότητας όπως υποδεικνύει το κριτήριο μέγιστης κύριας τάσης. Οι περιοχές της αστοχίας εστιάζονται στην κορυφή και στη βάση της σύνδεσης δηλωτικές του ζεύγους δυνάμεων που δρα στον φορέα, μιας πλέον καμπτικής απόκρισης. Στις περιοχές αυτές λόγω συγκέντρωσης τάσεων αναμένεται θραύση του grout. Ο χάλυβας φαίνεται να επαρκεί σύμφωνα με το κριτήριο της ισοδύναμης τάσης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, η κατανομή των τάσεων στον χάλυβα δεν αλλάζει σε καμία από τις δύο θεωρήσεις συμπεριφοράς του υλικού, ελαστική και ελαστοπλαστική. Στην περίπτωση της ανάλυσης με διπλάσιες τιμές φορτίων, οι τάσεις αυξάνονται αναλογικά. Το grout καλείται να παραλάβει μεγαλύτερες τάσεις και αστοχεί γρηγορότερα στην περίπτωση όπου χρησιμοποιηθεί διατομή με το μισό της αρχικής τιμής του πάχους t_g .

Η συμβολή των shear keys εξαρτάται από τη γεωμετρία του μοντέλου της σύνδεσης όπως φαίνεται στον πίνακα χαρακτηριστικών από τη μελέτη των Nikolaos I. Tziavos, Hassan Hemida, Nicole Metje και Charalampos Baniotopoulos [44]. Με τη γεωμετρία αυτή, από τα διαγράμματα που εξήχθησαν συμπεραίνουμε ότι τα shear keys θα παραλάβουν μεγάλο ποσοστό από τις τάσεις. Με τα shear keys περιορίζεται η ολίσθηση μεταξύ των υλικών, δημιουργείται καλύτερη συνάφεια και επομένως αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα. Η μεγαλύτερη πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων θα προσεγγίσει καλύτερα τη συμπεριφορά της σύνδεσης. Αυτό, όμως, δεν ήταν δυνατό να γίνει στην παρούσα διπλωματική λόγω μεγάλου υπολογιστικού κόστους.

Προτείνεται η ενίσχυση του υλικού του grout με ίνες γυαλιού ή η χρήση άλλου βελτιωμένου σύνθετου υλικού προκειμένου να αυξηθεί η εφελκυστική αντοχή του, είτε να θεωρηθεί άλλο υλικό αντί του grout το οποίο θα έχει ενδεχομένως βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, θα πρέπει να γίνει δυναμική ανάλυση και μελέτη της σύνδεσης σε κόπωση. Επίσης, μπορούν να ληφθούν επιπλέον στηρίγματα στις περιοχές όπου παρατηρείται ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα. Τέλος, μπορεί να μεταβληθεί η γεωμετρία της σύνδεσης σε κωνική μορφή.

Βιβλιογραφία

- [1] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<https://www.deccanherald.com/content/661665/impacts-renewable-energy-projects.html>
- [2] Cost, 2015, Grouted connections on offshore wind turbines
- [3] https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας
- [4] <http://www.slideshare.net/kiriakosspachos1/2-16521280>
- [5] Κατσίρος Α., Χαϊντίνης Χ., 2013, ‘Τεχνολογία και ανάπτυξη παράκτιων αιολικών πάρκων και τρόποι διασύνδεσής τους με το δίκτυο της ΔΕΗ’
- [6] courses.arch.ntua.gr/fsr/132188/kefalaio8.pdf
- [7] <http://www.taxidologio.gr/mykonos-todo-anemomyloi.html>
- [8] <http://www.solarmarket.gr>
- [9] https://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια
- [10] <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/operating-principle.html>
- [11] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Off-shore_Wind_Farm_Turbine.jpg
- [12] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο: <http://www.top-alternative-energy-sources.com/vertical-axis-wind-turbine.html>
- [13] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<http://www.alliantenergykids.com/EnergyandTheEnvironment/RenewableEnergy/022397>
- [14] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<http://www.eea.europa.eu/publications/europes-onshore-and-offshore-wind-energy-potential>
- [15] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf
- [16] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<http://studentaccess.emporia.edu/~lgerber1/monopile.jpg>
- [17] nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/mhx/2014
- [18] Structural mechanics for design of grouted connections in monopole wind turbine structures, DNV, Norway
- [19]
https://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/.../birdasm_wind.pdf
- [20] Lotsberg, I (2013). ‘Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures’, Marine Structures, 32, 115-132.

- [21] 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.
- [22] S. Anders, L. Lohaus, 2008, ‘Optimized High-Performance Concrete in Grouted Connections’, Taylor and Francis Group
- [23] 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.
- [24] Dedic, N, (2009), ‘Analysis of Grouted Connections in Monopile wind Turbine Foundations Subjected to Horizontal Load Transfer’, Research Report, Aalborg University.
- [25] Densit.gr
- [26] <http://www.failurecriteria.com/misesriteriontr.html>
- [27] Μ. Παπαδρακάκης, (2001), ‘Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων’
- [28] C.C.Baniotopoulos ‘Topics on the design of tubular steel turbine towers’
- [29] “The Rayleigh-Ritz Method,” Math. Sci. Eng., 1972, doi: 10.1016/S0076-5392(09)60387-8
- [30] A. Hrennikoff, “Solution of Problems of Elasticity by the Frame-Work Method,” Appl. Sci. Res., 1941.
- [31] R. Courant, “Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations,” Bulletin of the American Mathematical Society. 1943, doi: 10.1090/S0002-9904-1943-07818-4.
- [32] M. J. TURNER, R. W. CLOUGH, H. C. MARTIN, and L. J. TOPP, “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures,” J. Aeronaut. Sci., 1956, doi: 10.2514/8.3664.
- [33] J. H. Argyris and S. Kelsey, Energy Theorems and Structural Analysis. 1960.
- [34] Y. K. Zienkiewicz, O. C. Cheung, The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. 1967.
- [35] Μαλαξιανάκης Αντώνης, 2014, ‘Τεχνολογία πυλώνων παράκτιων ανεμογεννητριών’ σελ. 20
- [36] Niaxin Ren, Zhen Gao, Torgeir Moan and Ling Wan, 2015, “Long –term performance of the Spar-Torus-Combination (STC) system with different survival modes”
- [37] Zhiping Kuang, Guanyu Zheng, “Computational and Experimental Mechanical Modelling of a Composite Grouted Splice Sleeve Connector System”, Article, Tongji University, Shanghai, China, 2018
- [38] Comite Euro-International Du Beton. CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures; Thomas Telford Services Ltd.: London, UK, 1993.

[39] Ziquan Dai , Sze Dai Pang , JY Richard Liew, “Thin-Walled Structures”, “Axial load resistance of grouted sleeve connection for modular construction”, Full length article, National University of Singapore, Singapore, 2020

[40] <http://site.iugaza.edu.ps/malqedra/files/lecture-2-13.pdf>

[41] <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAECAERefMap/simacae-c-mgnconcpartitionverify.htm>

[42] Παπαευθυμίου Γεωργία, “Ανάλυση σύνθετων συνδέσεων με υπολογιστικές μεθόδους για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας”, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2017

[43] Theotokoglou E and Papaefthimiou G, 2017, ‘Computational analysis of grouted connections’, Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Fransisco

[44] Nikolaos I. Tziavos, Hassan Hemida, Nicole Metje, Charalampos Baniotopoulos, “Non-linear finite element analysis of grouted connections for offshore monopile wind turbines”, School of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, UK, 2019