



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΟΥΣ
ΟΡΟΦΗΣ ΣΕ ΘΕΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΩΝ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πολίτης Ευάγγελος

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΟΥΣ
ΟΡΟΦΗΣ ΣΕ ΘΕΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΩΝ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πολίτης Ευάγγελος

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 12/07/2019

Νομικός Παύλος, Αν. Καθηγητής, (Υπογραφή)

Μπενάρδος Ανδρέας, Αν. Καθηγητής, (Υπογραφή)

Γιούτα – Μήτρα Παρασκευή, Ε.ΔΙ.Π., (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την αριθμητική ανάλυση της «μηχανικής συμπεριφοράς στρωσιγενούς οροφής σε θέσεις διασταυρώσεων υπογείων θαλάμων».

Τα θέματα που αναλύονται σε κάθε κεφάλαιο είναι τα εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η μέθοδος Θαλάμων και Στύλων και οι παράμετροι σχεδιασμού της.
- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή της στρωσιγενούς οροφής και των ιδιαιτεροτήτων της.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται οι δυσκολίες της ευστάθειας στις θέσεις διασταυρώσεων
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των προσομοιώσεων
- Στο Κεφάλαιο 5 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των τριών σειρών αριθμητικής ανάλυσης
- Στο Κεφάλαιο 6 σχολιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παύλο Νομικό, Αν. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ, για τις συμβουλές και τις υποδείξεις του, καθώς και για την καθοριστική καθοδήγηση και επίβλεψη που μου παρείχε.

Τέλος ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την ανεκτίμητη υποστήριξή τους.

Περίληψη

Μελέτες καταπτώσεων της οροφής σε λιγνιτορυχεία στις Η.Π.Α. έδειξαν ότι πάνω από 70%, των περιστατικών, έγιναν σε σημεία διασταυρώσεων υπογείων θαλάμων. Οι λόγοι ύπαρξης αυτού του φαινομένου είναι τόσο η τρισδιάστατη κατανομή των πιέσεων στις οροφές των διασταυρώσεων, όσο και η ελλιπής εμπειρική γνώση των παραγόντων που προκαλούν αστοχία και ο τρόπος επίδρασης τους. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την αριθμητική ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς στρωσιγενούς οροφής σε διασταυρώσεις υπογείων θαλάμων. Βασικός στόχος της διπλωματικής είναι να ερευνηθεί η διαφορά στην συμπεριφορά της αμέσου οροφής ανάμεσα σε ένα υπόγειο άνοιγμα και στην περιοχή της διασταύρωσης. Ένας επιπλέον στόχος είναι να δοθούν στοιχεία που θα βοηθήσουν στην κατανόηση της επίδρασης των γεωμηχανικών παραμέτρων στην ευστάθεια της οροφής καθώς και την συμπεριφορά των ανυποστήριχτων στρωμάτων σε τρεις διαστάσεις.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις μέσω αριθμητικών μεθόδων σε προσομοιώσεις υπογείων οροφών.

Abstract

Studies about roof-falls in coal mines in the United States showed that more than 70% of the incidents occurred at intersections. The reasons for this phenomenon are both the three-dimensional distribution of the pressures on the roof of the intersections, as well as the lack of empirical knowledge of the factors causing the failure. This thesis deals with the numerical analysis of the mechanical behavior of a immediate roof at intersections of underground openings. The main aim of thesis is to investigate the difference in the behavior of the immediate roof between an underground opening and an intersection.

An additional objective is to provide information that will help to understand the effect of geomechanical parameters on the stability of the roof as well as the behavior of unsupported layers in three dimensions.

In order to achieve these objectives parametric analysis are performed by means of numerical methods in underground roofs simulations.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract	iii
Περιεχόμενα	iv
Λίστα Εικόνων	vi
Λίστα Πινάκων.....	ix
1. Μέθοδος Θαλάμων – Στύλων.....	1
1.1. Ιστορία της μεθόδου - Παραδείγματα	2
1.2. Παράμετροι Σχεδιασμού Θ-Σ.....	3
2. Στρωσιγενής Οροφή.....	6
2.1. Μηχανική Συμπεριφορά Στρωσιγενούς Οροφής.....	7
2.2. Ενίσχυση Οροφής.....	9
2.3. Ένα στρώμα.....	10
2.4. Δυο στρώματα	16
3. Διασταυρώσεις	19
4. Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων.....	23
5. Αριθμητικές Προσομοιώσεις.....	26
5.1. 1 ^η Σειρά Αριθμητικών Προσομοιωμάτων	26
5.1.1. Αποτελέσματα Κατανομής Τάσεων	28
5.1.2. Αποτελέσματα Κατακόρυφης Μετατόπισης	29
5.1.3. Αποτελέσματα Ολίσθησης και Αποκόλλησης των Στρωμάτων	35
5.2. 2 ^η Σειρά Αριθμητικών Προσομοιωμάτων	51
5.2.1. Αποτελέσματα Κατανομής Τάσεων	52
5.2.2. Αποτελέσματα Κατακόρυφης Μετατόπισης	55
5.3. 3 ^η Σειρά Αριθμητικών Προσομοιωμάτων	57
5.3.1. Αποτελέσματα Κατανομής Τάσεων	58
5.3.2. Αποτελέσματα Κατακόρυφης Μετατόπισης	61
5.3.3. Αποτελέσματα Ολίσθησης και Αποκόλλησης των Στρωμάτων	63
6. Συμπεράσματα.....	70
Βιβλιογραφία.....	72
7. Παράρτημα	74
7.1. Προφίλ Βύθισης στο 1 ^ο Στάδιο της 1 ^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων	75
7.2. Προφίλ Βύθισης στον άξονα του Στύλου για το 2 ^ο Στάδιο της 1 ^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων.....	84

7.3.	Προφίλ Βύθισης στο μέσο της Διασταύρωσης για το 2 ^ο Στάδιο της 1 ^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων.....	93
7.4.	Διαγράμματα Κατανομής σ_x για το 1 ^ο Στάδιο της 2 ^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων..	102
7.5.	Διαγράμματα Κατανομής σ_x για το 2 ^ο Στάδιο της 2 ^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων.	103
7.6.	Προφίλ Βύθισης στο 2 ^ο Στάδιο της 2 ^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων.....	106
7.7.	Επίδραση της αύξησης της P_b στο εύρος της Ολίσθησης	109

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Σχηματική Απεικόνιση της Μεθόδου Θ-Σ	1
Εικόνα 1.2 Υπόγεια Εκμετάλλευση Μαρμάρου στην περιοχή Διόνυσος	2
Εικόνα 1.3. Ανακατανομή των τάσεων κατά την αξονική διεύθυνση του σύλου με την διάνοιξη των Θαλάμων	3
Εικόνα 2.1 Κατανομή των τάσεων μετά την εκσκαφή	7
Εικόνα 2.2 Βέλος Κάμψης Δοκού υπό ίδιου βάρους	11
Εικόνα 3.1. Συνήθεις Τύποι Διασταυρώσεων	19
Εικόνα 3.2. Εκμετάλλευση Ανθρακορυχείου με την Μέθοδο Θαλάμων και Στύλων	20
Εικόνα 3.3. Εκτίμηση της κατανομής επαπτομενικής τάσης στο οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται μέσω των ανοιγμάτων των δύο σηράγγων σε υδροστατικό εντατικό πεδίο (Gercek, Stability Considerations for Underground Excavation Intersections, 1986).....	22
Εικόνα 5.1 Κάτοψη 1ης Σειράς Προσομοιωμάτων	26
Εικόνα 5.2 Κάτοψη 2ης και 3ης Σειράς Προσομοιωμάτων.....	26
Εικόνα 5.3 2ο Στάδιο	27
Εικόνα 5.4 1ο Στάδιο	27
Εικόνα 5.5 Κατανομή της διατμητικής τάσης της αμέσου οροφής στο 1ο στάδιο	28
Εικόνα 5.6 Κατανομή της διατμητικής τάσης στο στο πρώτο στάδιο	28
Εικόνα 5.7 Κατανομή της διατμητικής τάσης στο 2ο στάδιο.....	28
Εικόνα 5.8 Κατανομή της διατμητικής τάσης της αμέσου οροφής στο 2ο στάδιο	28
Εικόνα 5.9 Κατακόρυφη Μετατόπιση του προσομοιώματος στο 1ο στάδιο	29
Εικόνα 5.10 Κάμψη του στρώματος της αμέσου οροφής στο 1ο στάδιο.....	29
Εικόνα 5.11 Κατακόρυφη Μετατόπιση του προσομοιώματος στο 2ο στάδιο	29
Εικόνα 5.12 Κάμψη του στρώματος της αμέσου οροφής στο 2ο στάδιο	29
Εικόνα 5.13 Καμπύλες βύθισης της οροφής για $\phi=20$ στο πρώτο στάδιο	30
Εικόνα 5.14 Καμπύλες βύθισης της οροφής για $\phi=30$ στο πρώτο στάδιο	30
Εικόνα 5.15 Καμπύλες βύθισης της οροφής για $\phi=40$ στο πρώτο στάδιο	31
Εικόνα 5.16 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο του σύλου για $\phi=20$ στο 2ο στάδιο	31
Εικόνα 5.17 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο του σύλου για $\phi=30$ στο 2ο στάδιο	32
Εικόνα 5.18 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο του σύλου για $\phi=40$ στο 2ο στάδιο	32
Εικόνα 5.19 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$	33
Εικόνα 5.20 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=30$	33
Εικόνα 5.21 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=40$	34
Εικόνα 5.22 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος 6m	35
Εικόνα 5.23 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=30$ και πλάτος 6m	36
Εικόνα 5.24 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=40$ και πλάτος 6m	36
Εικόνα 5.25 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος 8m	37
Εικόνα 5.26 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=30$ και πλάτος 8m	38
Εικόνα 5.27 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=40$ και πλάτος 8m	38
Εικόνα 5.28 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις για $\phi=20$ και πλάτος 10m	39
Εικόνα 5.29 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις για $\phi=30$ και πλάτος 10m	39
Εικόνα 5.30 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις για $\phi=40$ και πλάτος 10m	40
Εικόνα 5.31 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος 6m στο 2ο στάδιο.....	40
Εικόνα 5.32 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=30$ και πλάτος 6m	41
Εικόνα 5.33 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=40$ και πλάτος 6m	42

Εικόνα 5.34 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=20$ και πλάτος 8m	42
Εικόνα 5.35 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=30$ και πλάτος 8m	43
Εικόνα 5.36 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=40$ και πλάτος 8m	43
Εικόνα 5.37 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=20$ και πλάτος 10m	44
Εικόνα 5.38 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=30$ και πλάτος 10m	44
Εικόνα 5.39 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=40$ και πλάτος 10m	45
Εικόνα 5.40 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$ και πλάτος 6m.....	45
Εικόνα 5.41 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=30$ και πλάτος 6m.....	46
Εικόνα 5.42 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=40$ και πλάτος 6m.....	46
Εικόνα 5.43 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$ και πλάτος 8m.....	47
Εικόνα 5.44 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=30$ και πλάτος 8m.....	48
Εικόνα 5.45 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=40$ και πλάτος 8m.....	48
Εικόνα 5.46 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$ και πλάτος 10m.....	49
Εικόνα 5.47 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=30$ και πλάτος 10m.....	49
Εικόνα 5.48 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=40$ και πλάτος 10m.....	50
Εικόνα 5.49 Κατανομή Κύριας Τάσης στο 1ο στάδιο.....	52
Εικόνα 5.50 Κατανομή Κύριας Τάσης στο 2ο στάδιο.....	53
Εικόνα 5.51 Θέσεις Μέτρησης Τάσης και Μετατόπισης	53
Εικόνα 5.52 Κάμψη των προσομοιωμάτων της 2ης σειράς στο 2ο στάδιο.....	55
Εικόνα 5.53 Κάμψη των προσομοιωμάτων της 2ης σειράς στο 1ο στάδιο.....	55
Εικόνα 5.54 Κατανομή της κύριας τάσης στο πρώτο στάδιο των προσομοιωμάτων της 3ης σειράς.....	58
Εικόνα 5.55 Κατανομή της κύριας τάσης στο δεύτερο στάδιο των προσομοιωμάτων της 3ης σειράς.....	58
Εικόνα 5.56 Κατανομή της διατμητικής τάσης στην διεπιφάνεια των στρωμάτων.....	61
Εικόνα 5.57 Ολίσθηση και Αποκόλληση των στρωμάτων στο πρώτο στάδιο χωρίς επιβολή φορτίου	63
Εικόνα 5.58 Ολίσθηση και Αποκόλληση των στρωμάτων στο δεύτερο στάδιο χωρίς επιβολή φορτίου	63
Εικόνα 5.59 Ολίσθηση στο δεύτερο στάδιο των προσομοιωμάτων με τάση 600Pa.....	64
Εικόνα 5.60 Η περιοχή της ολίσθησης εφαρμόζοντας την πίεση P_b σε τετραγωνικό άνοιγμα πλάτους 6m	65
Εικόνα 5.61 Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 50% σε θάλαμο πλάτους 6m	66

Εικόνα 5.62	Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 100% σε θάλαμο πλάτους 6m	67
Εικόνα 5.63	Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 200% σε θάλαμο πλάτους 6m	67
Εικόνα 5.64	Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 300% σε θάλαμο πλάτους 6m	68
Εικόνα 5.65	Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 400% σε θάλαμο πλάτους 6m	68

Λίστα Πινάκων

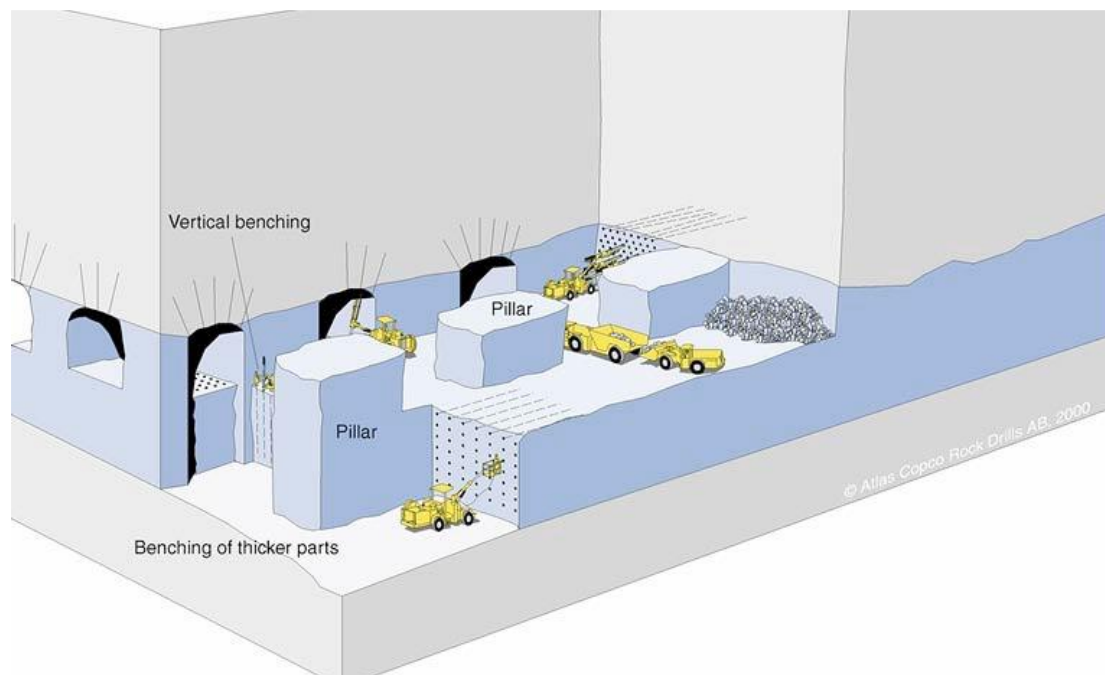
Πίνακας 5.1 Γεωμετρικές Παράμετροι 1ης Σειράς.....	26
Πίνακας 5.2 Γεωτεχνικές Παράμετροι Πετρώματος 1ης Σειράς	27
Πίνακας 5.3 Γεωτεχνικές Παράμετροι Ασυνεχειών 1ης Σειράς.....	27
Πίνακας 5.4 Οι μέγιστες τιμές της βύθισης για κάθε περίπτωση.....	34
Πίνακας 5.5 Ύψος ζώνης χαλάρωσης στο μέσο του θαλάμου ανά περίπτωση για το πρώτο στάδιο.....	50
Πίνακας 5.6 Ύψος ζώνης χαλάρωσης στον άξονα που διαπερνά τα κέντρα των στύλων, ανά περίπτωση για το δεύτερο στάδιο	51
Πίνακας 5.7 Ύψος ζώνης χαλάρωσης στο μέσο της διασταύρωσης ανά περίπτωση για το δεύτερο στάδιο	51
Πίνακας 5.8 Γεωμετρικές Παράμετροι 2ης Σειράς.....	52
Πίνακας 5.9 Μηχανικές Παράμετροι Πετρώματος 2ης Σειράς.....	52
Πίνακας 5.10 Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης για κάθε περίπτωση	54
Πίνακας 5.11 Δείκτες Μεταβολής Τάσεων	54
Πίνακας 5.12 Αριθμητική Προσέγγιση Μέγιστης Εφελκυστικής Τάσης ανά περίπτωση.....	55
Πίνακας 5.13 Οι τιμές της μέγιστης βύθισης ανά περίπτωση	56
Πίνακας 5.14 Δείκτες Μεταβολής της μέγιστης βύθισης	56
Πίνακας 5.15 Αριθμητική Προσέγγιση της μέγιστης κάμψης για το πρώτο στάδιο ανά περίπτωση.....	56
Πίνακας 5.16 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώματος και αριθμητικής προσέγγισης για την μέγιστη βύθιση στο 2ο στάδιο	56
Πίνακας 5.17 Γεωμετρικές Παράμετροι προσομοιωμάτων 3ης Σειράς	57
Πίνακας 5.18 Γεωτεχνικές Παράμετροι πετρώματος της 3ης σειράς.....	57
Πίνακας 5.19 Γεωτεχνικές Παράμετροι Ασυνεχειών 3ης σειράς.....	58
Πίνακας 5.20 Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης ανά περίπτωση της 3ης σειράς	59
Πίνακας 5.21 Δείκτες Σύγκρισης Μεταβολής της Κύριας Τάσης	59
Πίνακας 5.22 Οι τιμές της κύριας τάσης με την εφαρμογή προέντασης	59
Πίνακας 5.23 Μέγιστη βύθιση ανά περίπτωση	61
Πίνακας 5.24 Δείκτες Μεταβολής της Κάμψης.....	61
Πίνακας 5.25 Μέγιστη κάμψη ανά περίπτωση με την εφαρμογή προέντασης	62
Πίνακας 5.26 Η απαιτούμενη πίεση σύμφωνα με τον τύπο του Goodman	65
Πίνακας 6.1 Ποσοστιαία Μεταβολή της Βύθισης υπό την επίδραση της προέντασης.....	71
Πίνακας 6.2 Ποσοστιαία Μεταβολή της Κύριας Τάσης υπό της επίδραση της προέντασης .	71

1. Μέθοδος Θαλάμων – Στύλων

Η συγκεκριμένη μέθοδος ανήκει στις μεθόδους με κενά μέτωπα. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται αρχικά ορύσσοντας παράλληλες στοές και σε δεύτερο στάδιο κάθετες ή με κάποια κλίση σε αυτές, αφήνοντας τμήματα πετρώματος υπό την μορφή στύλου. Οι στύλοι χρησιμεύουν ως κύριο σύστημα υποστήριξης της οροφής του μεταλλείου, κάτι το οποίο γίνεται αξιοποιώντας την φέρουσα ικανότητα αυτών. Ανά περιπτώσεις ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί και δευτερογενής υποστήριξη.

Η ύπαρξη στύλων από το ίδιο το κοιτάσμα αποτελεί απώλεια χρήσιμου υλικού. Για το λόγο αυτό, συχνά η εκμετάλλευση συνεχίζεται με τη φάση της εξόφλησης (retreat mining), δηλαδή τη φάση της μείωσης των διαστάσεων των στύλων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συντελεστή απόληψης.

Μετά την εξόφληση του κοιτάσματος, ο χώρος μένει κενός. Αυτό σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες των περιβάλλοντος του υπόγειου χώρου, αξιοποιείται με την περαιτέρω χρήση μετά το πέρας της εκμετάλλευσης, με την δημιουργία αποθηκευτικών χώρων, εγκαταστάσεων διαφόρων τύπων όπως γραφεία, κελάρια κρασιού, εκθεσιακοί χώροι κ.α.



Εικόνα 1.1 Σχηματική Απεικόνιση της Μεθόδου Θ-Σ

1.1. Ιστορία της μεθόδου - Παραδείγματα

Η μέθοδος Θ-Σ αποτελεί από τις παλαιότερες μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης άνθρακα. Αυτό φαίνεται και από τις αντίστοιχες εμπειρικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την ευστάθεια των στύλων, όπου αναφέρονται κατά κύριο λόγο σε λιγνιτωρυχεία (Μπενάρδος, 2010).

Στην Ελλάδα η συγκεκριμένη μέθοδος σήμερα, εφαρμόζεται για την εξόρυξη βωξίτη στην περιοχή Παρνασσού Γκιώνας, για εξόρυξη μαρμάρου στις περιοχές Διόνυσος Αττικής και Νευροκοπίου Δράμας, στην Β. Εύβοια για εξόρυξη λευκολίθου (Μαντούδι) και για την εκμετάλλευση λιγνιτικού κοιτάσματος στην περιοχή Προσήλιο Κοζάνης. Εκτός από τις μεταλλευτικές δραστηριότητες, εφαρμόστηκε και για την κατασκευή υπογείου χώρου απόθεσης αποβλήτων στο Τεχνολογικό-Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. (Παπαγιαννόπουλος, 2010)



Εικόνα 1.2 Υπόγεια Εκμετάλλευση Μαρμάρου στην περιοχή Διόνυσος

Στην περίπτωση των στρωσιγενών πετρωμάτων, το πλάτος των θαλάμων υπολογίζεται θεωρώντας τις στρώσεις ως αμφίπακτες δοκούς, δίνοντας τις παρακάτω σχέσεις :

$$\delta_{max} = \frac{\gamma \cdot L^4}{32 \cdot E \cdot t^2} \quad (1-1)$$

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot \gamma \cdot L}{4} \quad (1-2)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\gamma \cdot L^2}{2 \cdot t} \quad (1-3)$$

Όπου, δ_{max} : η μέγιστη βύθιση

τ_{max} : η μέγιστη διατμητική τάση

σ_{max} : η μέγιστη εφελκυστική/θλιπτική τάση

L : το πλάτος του θαλάμου

t : το πάχος του στρώματος

E : το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος

γ : το ειδικό βάρος του πετρώματος

Η μέγιστη βύθιση παρατηρείται στο μέσο του θαλάμου. Η μέγιστη διατμητική, θλιπτική και εφελκυστική τάση παρατηρούνται στα άκρα του θαλάμου. Στο μέσο του θαλάμου η διατμητική τάση μηδενίζεται, ενώ το κάτω μέρος του στρώματος εφελκύεται και το επάνω θλίβεται, αναπτύσσοντας τιμές τάσεως ίσες με $\frac{\sigma_{max}}{2}$.

Επειδή η θλιπτική αντοχή των πετρωμάτων είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική, η αστοχία της οροφής θα ξεκινήσει από το άνω μέρος του στρώματος στα άκρα του θαλάμου.

Στις περιπτώσεις που η οροφή αποτελείται από λεπτοπλακώδεις σχηματισμούς ή από δύο και πάνω στρώσεις με τις λεπτότερες σε μικρότερο βάθος, θεωρείται ότι υπάρχει μεγαλύτερη φόρτιση στην οροφή, λόγω μεγαλύτερης παραμόρφωσης των ανώτερων

στρώσεων. Για τον υπολογισμό του προστιθέμενου βάρους, γίνεται χρήση της σχέσης:

$$\gamma_{\alpha} = \frac{E_1 \cdot t_1^2 \cdot \sum_{n=1}^n (\gamma_n \cdot t_n)}{\sum_{n=1}^n (E_n \cdot t_n^3)} \quad (1-4)$$

Όπου, n : ο αριθμός των στρώσεων

Στην περίπτωση αφιδωτής οροφής, μειώνεται το εύρος της ζώνης που φορτίζεται εφελκυστικά συμβάλλοντας στην μείωση των πιθανών αστοχιών της οροφής. (Μπενάρδος, 2010)

2. Στρωσιγενής Οροφή

Τα υπόγεια έργα κατασκευάζονται συχνά σε στρωσιγενείς βραχομάζες. Οι στρώσεις αυτές μπορεί να είναι το αποτέλεσμα ιζηματογενούς απόθεσης, υφής δημιουργημένης από διαδικασίες μεταμόρφωσης, ροής λάβας, διαφόρων παχών, και χαρακτηρίζονται γενικά από επίπεδη γεωμετρία και εμμογή. Σύμφωνα με τους (Brady & Brown, 2006) μια στρωσιγενής βραχομάζα έχει τις ακόλουθες δύο ιδιότητες: 1) χαμηλή ή μηδενική εφελκυστική αντοχή σε διεύθυνση κάθετη προς τη διαστρωμάτωση, και 2) σχετικά χαμηλή διατμητική αντοχή των διεπιφανειών των στρώσεων σε σύγκριση με εκείνη του άρρηκτου βράχου. Η χαμηλή εφελκυστική αντοχή των επίπεδων στρώσεων μπορεί να προκαλέσει αποκόλληση της οροφής μετά το πέρας της εκσκαφής.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οροφής που ενδιαφέρουν το μηχανικό κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός υπογείου έργου είναι, κυρίως, ο προσανατολισμός, η κλίση στρωμάτων, το πάχος των στρωμάτων, καθώς και η γωνία σε αυτά ασυνεχειών. Κατά το στάδιο των ερευνητικών γεωτρήσεων, ο γεωλόγος καλείται να εξετάσει τα δείγματα των γεωτρήσεων προσδιορίζοντας το χαρακτήρα τόσο του άρρηκτου βράχου όσο και των παρατηρούμενων ασυνεχειών. Ακόμη, η χρήση εκρηκτικών υλών για την απομάκρυνση του πετρώματος μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στην ευστάθεια της οροφής, διότι ο κερματισμός του πετρώματος ενδέχεται να προκαλέσει ρωγμές ή αποκόλληση του πετρώματος της οροφής. Βασικό στοιχείο της φάσης σχεδιασμού μιας υπόγειας εκμετάλλευσης είναι ο καθορισμός του μέγιστου δυνατού ανοίγματος των θαλάμων, εντός των οποίων θα πραγματοποιηθεί η εξορυκτική δραστηριότητα. (Βώβου, 2015)

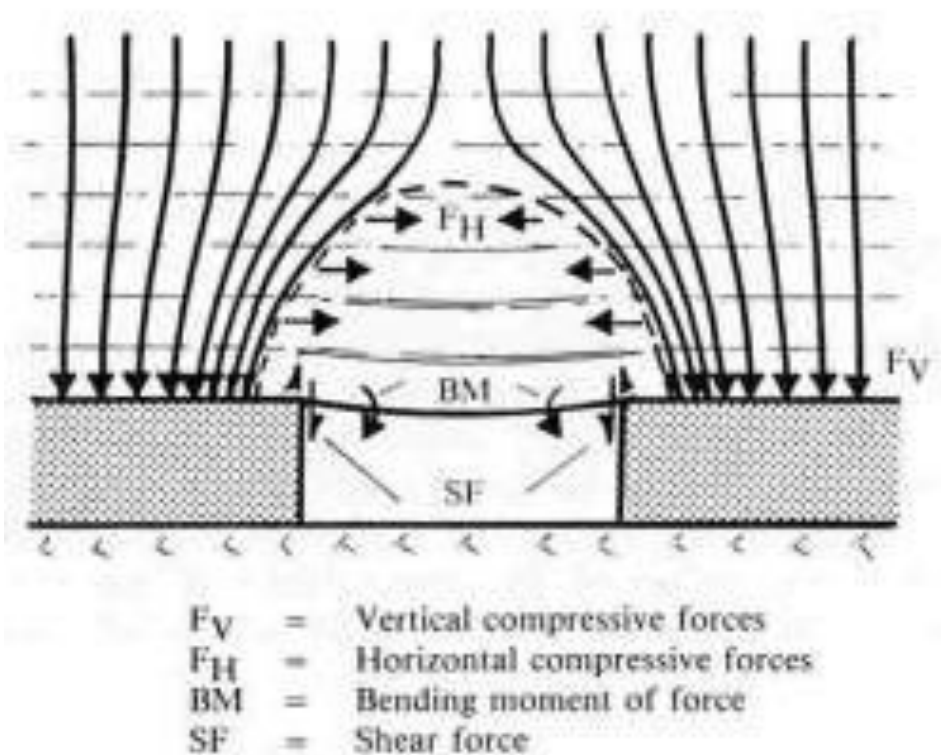
2.1. Μηχανική Συμπεριφορά Στρωσιγενούς Οροφής

Γενικά, η μηχανική συμπεριφορά και οι τρόποι αστοχίας των στρωσιγενών οροφών αποτελούν πεδίο έρευνας των μηχανικών τουλάχιστον από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. (Brady & Brown, 2006)

Συνοπτικά, μια στρωσιγενής οροφή δύναται να αστοχήσει με 4 τρόπους (Σοφιανός & Καπένης, 1999):

- 1) Μηχανική Αστάθεια
- 2) Σύνθλιψη
- 3) Διατμητική Ολίσθηση
- 4) Διαγώνια Ρωγμάτωση

Μετά την εκσκαφή υπόγειου ανοίγματος, η ροή των τάσεων παρακάμπτει το άνοιγμα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ισχυρές θλιπτικές ή εφελκυστικές τάσεις στην περίμετρο της εκσκαφής. Οι θλιπτικές δύνανται να προκαλέσουν αποφλοιώσεις, εσωτερική θραύση του πετρώματος, ολίσθηση και λυγισμό των στρωμάτων, ενώ οι εφελκυστικές να προκαλέσουν ρωγματώσεις και ζώνη χαλάρωσης πάνω από την οροφή.



Εικόνα 2.1 Κατανομή των τάσεων μετά την εκσκαφή

Σε τέτοιες οροφές, όπως πρώτος παρατήρησε ο Fayol (1885), οι ορθές εφελκυστικές τάσεις στις διεπιφάνειες των στρωμάτων προκαλούν διαχωρισμό τους στο μέσον της άμεσης οροφής. Κατά την κάμψη των κατώτερων στρωμάτων της οροφής, αυτά μεταφέρουν ως πλάκα στα στηρίγματα το ίδιο τους βάρος, χωρίς να συνεργάζονται με τα γειτονικά τους στρώματα. Εφόσον κατά την κάμψη τους αδυνατούν να το φέρουν, ρωγματώνονται εγκάρσια στα στρώματα σε διαδοχικές φάσεις και δύνανται να καταλήγουν συχνά στη διαμόρφωση θολωτής οροφής. Γι' αυτό, στα τεχνικά έργα, αλλά και γενικότερα όπου πρακτικά δεν είναι εφικτή ή επιθυμητή η διαμόρφωση επίπεδης οροφής, αυτή διαμορφώνεται σε θόλο, ο οποίος πλεονεκτεί στη δυνατότητα ομαλής διάχυσης των τάσεων εκατέρωθεν του ανοίγματος. (Γιούτα, 2018)

Επειδή τα κατώτερα στρώματα θεωρούνται ότι διαχωρίζονται μεταξύ τους, η ευστάθεια της άμεσης οροφής καθορίζεται από την ικανότητα του μεμονωμένου στρώματος να φέρει το φορτίο του χωρίς να ρωγματώνεται. Κοντά στα άκρα της οροφής, η κατακόρυφη θλιπτική τάση κρατά σε επαφή τα στρώματα, στη διεπιφάνεια των οποίων η διατμητική αντοχή εξαρτάται από το μέγεθος της θλιπτικής τάσης. Εκεί, λόγω της κάμψης κάθε στρώμα στην κάτω ίνα του τείνει να θλίβεται και άρα να βραχύνεται ενώ στην άνω ίνα του τείνει να εφελκύεται και άρα να μηκώνεται. Άρα, στη διεπιφάνεια των στρωμάτων η αποτροπή της ολίσθησης συναρτάται με την ανάπτυξη διατμητικής τάσης (Brady & Brown, 2006). Η ανάπτυξή της επιτρέπει τη στροφή της ροής των τάσεων σε μορφή θόλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε επόμενο προς τα πάνω στρώμα έχει μικρότερο στατικό άνοιγμα από το προηγούμενο, που συνεπάγεται μικρότερο βέλος κάμψης και διαχωρισμό των στρωμάτων. Ως εκ τούτου δημιουργείται ζώνη χαλάρωσης, η έκταση της οποίας εξαρτάται τόσο από τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά όσο και από την τοποθετημένη στήριξη. (Σοφιανός Α. , 2015)

Η θεωρία που αναπτύχθηκε προηγουμένως (Ενότητα 1.2), σε συνδυασμό με τις εμπειρικές μεθόδους, είναι επαρκής για την κατανόηση της συμπεριφοράς της οροφής ανάμεσα στους στύλους. Όμως στα σημεία συμβολής των ανοιγμάτων δεν είναι αρκετή η θεωρία των αμφίπακτων δοκών, αλλά απαιτείται η ανάλυση της οροφής ως πλάκας. Για την καλύτερη ανάλυση των τρόπων αστοχίας πλακών οροφής γίνεται χρήση αριθμητικών μεθόδων.

2.2. Ενίσχυση Οροφής

Η όπλιση ή ενίσχυση της οροφής έχει ως σκοπό, εκτός της αποφυγής του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων, την αποφυγή της ολίσθησης μεταξύ τους λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής στις διεπιφάνειες, ούτως ώστε τα επιμέρους στρώματα να εξαναγκάζονται να λειτουργήσουν ως ενιαίος συμπαγής φορέας. Κάτι τέτοιο συμβαίνει και με τα συγκολλημένα φύλλα κόντρα πλακέ, τα οποία έχουν πολλαπλάσια αντοχή των φύλλων από τα οποία συνίστανται.

Η ανάρτηση των στρωμάτων, έχει ως σκοπό την αποφυγή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων. Επιτυγχάνεται με ήλους που πακτώνονται είτε σε βραχομάζα εκτός της ζώνης χαλάρωσης είτε σε υπερκείμενο ισχυρότερο γειτονικό στρώμα.. (Σοφιανός Α. , 2015)

Για να αποφευχθεί ο διαχωρισμός των στρωμάτων απαιτείται κοινό βέλος κάμψης αυτών, ενώ για την παρεμπόδιση της ολίσθησης χρειάζεται επαρκή διατμητική αντοχή σε σχέση με την διατμητική τάση στις διεπιφάνειες των στρωμάτων. Η τέμνουσα δύναμη $V_{(x)}$ σε εγκάρσια τομή του φορέα, στη θέση x , είναι το ολοκλήρωμα των διατμητικών τάσεων στη διατομή. Η κατανομή αυτών των διατμητικών τάσεων είναι παραβολική και η μέγιστη τιμή τους τ_{max} είναι αυξημένη κατά 50% της τιμής της μέσης τάσης τ_{mean} . Από την συμμετρία του τανυστή των τάσεων γνωρίζουμε ότι η τιμή της διατμητικής συνιστώσας της τάσης σε ένα σημείο, είναι ίση σε κάθετα μεταξύ τους επίπεδα. Άρα, η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων δύναται να υπολογιστεί από την τέμνουσα δύναμη στη διατομή του αποκολλημένου από τα ανώτερα στρώματα φορέα, από τις σχέσεις:

$$V_{(x)} = \gamma \cdot t_s \cdot \left(\frac{s}{2} - x \right) \quad (2-1)$$

$$\tau_{max} = \frac{3 V_{(x)}}{2 t_s} \quad (2-2)$$

Η δημιουργία ή η επαύξηση της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών των στρωμάτων, επιτυγχάνεται με την προένταση της ήλωσης των στρωμάτων. Σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb, για συνοχή c_j και γωνία τριβής ϕ_j , επιτυγχάνεται ικανότητα ανάληψης διαμμητικής τάσης :

$$\tau_c = p_b \cdot \tan \varphi_j + c_j \quad (2-3)$$

Η ενιαία λειτουργία του φορέα απαιτεί η διατμητική αντοχή να είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη από τη στατική, διατμητική τάση, δηλαδή :

$$p_b(x) \geq \frac{\tau_{max} - c_j}{\tan \varphi_j} \quad (2-4)$$

Η μέγιστη τιμή της απαιτούμενης προέντασης προκύπτει για $x=0$ και $c_j=0$ από την σχέση του Goodman :

$$p_{b,max}(x = 0) \geq \frac{3}{4} \frac{\gamma \cdot s}{\tan \varphi_j} \quad (2-5)$$

Η πίεση αυτή στο μέσον, όπου η διατμητική τάση είναι μικρή, θα πρέπει να επαρκεί για την αποτροπή του διαχωρισμού των κατώτερων στρωμάτων λόγω του ίδιου βάρους τους. Όμως, δεδομένης της διαφορετικής καμπτικής καταπόνησης των στρωμάτων στο μέσον του ανοίγματος, συνιστάται ο κάναβος και η προένταση να διατηρούνται ίδιοι κατά το πλάτος του.

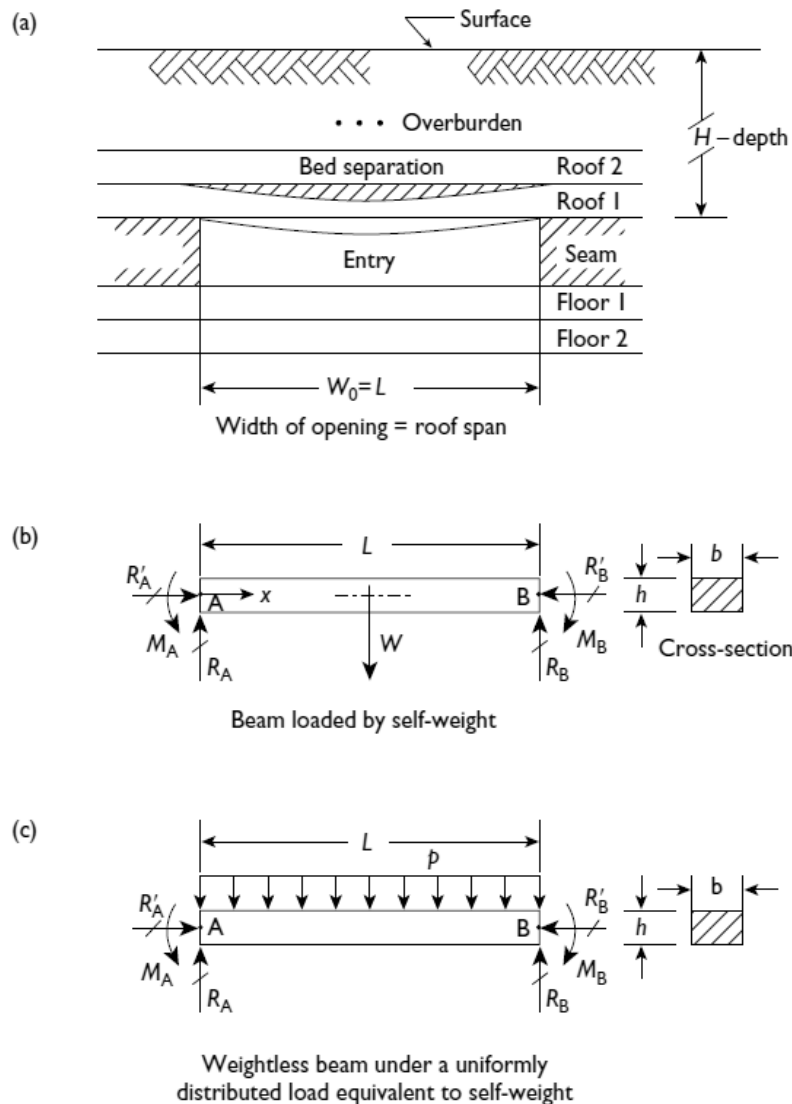
2.3. Ένα στρώμα

Οι θεωρίες που καλύπτουν τη μετακίνηση σκληρών στρωσιγενών πετρωμάτων περίξ ορθογωνικής εκσκαφής περιλαμβάνουν δύο μεγάλες κατηγορίες. Εκείνες που θεωρούν την οροφή ως δοκό ή πλάκα και εκείνες που τη θεωρούν ως δοκό θολιτών, δηλαδή δοκό στο μετελαστικό στάδιο που προκύπτει από κατακόρυφες διακλάσεις, οι οποίες χωρίζουν τη δοκό σε διακριτά τεμάχια. Παρ' όλο που τα πετρώματα δεν είναι ομοιογενή υλικά και επηρεάζονται από πολλούς γεωλογικούς παράγοντες, οι θεωρίες αυτές εξακολουθούν να παραμένουν η καλύτερη προσέγγιση για την επίλυση προβλημάτων ευστάθειας της οροφής υπογείων ανοιγμάτων σε μεταλλεία και υπόγειες κατασκευές.

Μεταξύ του 1956 και του 1962, ο Panek δημοσίευσε τις γνωστές εργασίες του για την κοχλίωση της οροφής σε μία σειρά μελετών του U.S.B.M. στις οποίες η θεωρητική και πειραματική δουλειά του βασιζόταν εξ' ολοκλήρου σε συνεχείς ελαστικές δοκούς.

Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα και, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2, βασίζεται στο διαχωρισμό του τελευταίου στρώματος λόγω ίδιου βάρους, ενώ οι

σχέσεις που περιγράφουν τις βυθίσεις προκύπτουν κατευθείαν από την στοιχειώδη μηχανική.



Εικόνα 2.2 Βέλος Κάμψης Δοκού υπό ίδιου βάρους

Οι πρώτες παρατηρήσεις που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την συμπεριφορά στρωματοειδούς δομής πετρωμάτων της αμέσου οροφής υπογείων ανοιγμάτων προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις του Fayol (1885) κατά την κάμψη δοκών πετρώματος.

Ο Fayol, ενδιαφερόταν για τον υπολογισμό των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης υπόγειων στοών. Στα πρώτα πειράματα μέτρησε το βέλος κάμψης μιας αμφίπακτης δοκού. Στην συνέχεια προστέθηκε και 2^η όμοια δοκός άνω από την

πρώτη, και προέκυψε μεγαλύτερο βέλος κάμψης για την από κάτω δοκό, και της 2^η δοκού μικρότερο από αυτό της πρώτης. Όσο ο αριθμός των δοκών μεγάλωνε το βέλος κάμψης της κατώτερης δοκού συνέχιζε να αυξάνεται μέχρι κάποιου σημείου, πέραν του οποίου περαιτέρω προσθήκη δοκών επάνω στη σειρά δεν το επηρέαζε πλέον, ενώ οι ανώτερες δοκοί της σειράς δεν κάμπτονταν καθόλου.

Τα συμπεράσματά του συνοψίζονται ως κατωτέρω:

- Η κάμψη των στρωμάτων προκαλεί την μερική αποκόλληση τους από τα υπερκείμενα στρώματα, με αποτέλεσμα τα κατακόρυφα φορτία λόγω των υπερκειμένων να μεταβιβάζονται προς τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής και όχι απ' ευθείας επάνω στο κατώτερο μέλος της σειράς.
- Η κάμψη αυτή των στρωμάτων ενεργοποιεί την τριβή μεταξύ των διεπιφανειών τους, η οποία συμβάλλει στην μεταφορά των δυνάμεων προς τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στην οροφή του ανοίγματος μία ζώνη χαλαρώσεως, το όριο της οποίας λαμβάνει τη μορφή θόλου.
- Παρόμοια μορφή με αυτή του θόλου προβλέπεται και για την περίπτωση, που το σύνολο της οροφής επάνω από την εκσκαφή θα αστοχήσει.

Η ιδέα των θολιτών προτάθηκε για πρώτη φορά το 1941, από τον Evans και συγκεκριμένα όταν παρουσίασε την εργασία του με τίτλο “The strength of undermined strata”. Στην εργασία αυτή, μελέτησε τις δοκούς οροφής υπογείων ανοιγμάτων ως ασυνεχείς δοκούς μορφής θολιτών, κατ' αντιστοιχία με την τεχνική γεφύρωσης ανοιγμάτων των τόξων θολιτών, που χρησιμοποιείται στη γεφυροποιία και στην οικοδομική από αρχαιοτάτων χρόνων.

Η θεωρία του Evans (1941) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Corlett (1956), ο οποίος συσχέτισε τη θεωρία της δοκού voussoir με την αποτελεσματικότητα της κοχλίωσης της οροφής, δείχνοντας ότι ο σχηματισμός ενός τόξου μεταφοράς δυνάμεων στην οροφή καθιστούσε ανενεργούς τους κοχλίες, που το μήκος τους ήταν μικρότερο από το ύψος του τόξου. Αργότερα οι Corlett και Emery (1959) χρησιμοποιώντας ένα προσομοίωμα δοκού από τούβλα έδειξαν ότι εάν η πλευρική

πίεση δεν επαρκεί, ώστε να αποτρέψει το άνοιγμα των διεπιφανειών, τότε η δοκός αρχίζει να συμπεριφέρεται ως δοκός voussoir.

Το 1956 ο Mohr παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα δοκιμών παρόμοιων με εκείνων του Evans έδειξε ότι μία μεγάλου πάχους δοκός αποτελούμενη από ασύνδετα τεμάχια κάμπτεται περισσότερο από μία αντίστοιχη δοκό μικρότερου πάχους (σε αντίθεση με τη συμπεριφορά ελαστικών δοκών). Επίσης ο περιορισμός του βέλους κάμψης της δοκού απαιτεί πολύ μεγαλύτερη δύναμη για την μικρού πάχους δοκό από ότι για την μεγάλου πάχους. Όπως αποδείχθηκε στη συνέχεια από άλλους ερευνητές (Sterling, 1977) το συμπέρασμα αυτό είναι αναμενόμενο ενώ δεν είναι πάντοτε αληθές.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων με την τεχνική της φωτοελαστικότητας των Wright και Mirza (1963) και αριθμητικών προσομοιώσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων των Wright and Kelly (1970), το ύψος της θλιβόμενης περιοχής κατά μήκος των ασυνεχειών στήριξης και μέσου της δοκού είναι αρκετά μικρότερο από το μισό του πάχους της δοκού, που είχε θεωρήσει ο Evans. Επιπλέον, το μέγεθος της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης, που αναπτύσσεται στη δοκό, είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από εκείνο, που προέβλεπε η θεωρία του Evans. Στη συνέχεια ο Wright (1972), βασιζόμενος στον μεγάλο αριθμό αριθμητικών αναλύσεων και εργαστηριακών δοκιμών, ανέπτυξε μία νέα μεθοδολογία σχεδιασμού της οροφής υπογείων ανοιγμάτων σε στρωσιγενή πετρώματα (Wright, 1973).

Το 1977, ο Sterling, βασιζόμενος στις θεωρητικές αναλύσεις προγενέστερων ερευνητών, πραγματοποίησε εκτεταμένα πειράματα φόρτισης δοκών voussoir στο εργαστήριο. Η εργασία του Sterling, επιβεβαίωσε αρχικά τα αποτελέσματα του Wright και βοήθησε στην περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς των δοκών voussoir. Στη συνέχεια σε συνεργασία με άλλους ερευνητές (Sterling και Nelson 1978, Sterling 1980, Sterling, Nelson και Peterson, 1995) διατύπωσε τη θεωρία της τεχνικής του γραμμικού τόξου (linear arch technique) ως μία μεθοδολογία για το σχεδιασμό δοκών voussoir. (Γιούτα, 2018)

Επίλυση αμφίπακτης δοκού υπό ίδιον βάρος με την μέθοδο της τασικής συνάρτησης

Η επίλυση με τασική συνάρτηση είναι πανομοιότυπη με την περίπτωση της αμφιέρειστης δοκού πλην των συνοριακών συνθηκών στα άκρα

Οι σχέσεις υπολογισμού των τάσεων σ_{yy} και σ_{xy} είναι ίδιες με της αμφιέριστης δοκού, ενώ διαφέρει μόνο της σ_{xx} όπου η μόνη διαφορά εντοπίζεται στο συντελεστή του όρου L^2y/t^3 . (Γιούτα, 2018)

$$\sigma_{xx} = \frac{\rho g y}{t^2} \left(6x^2 - 4y^2 - \frac{1}{2}L^2 + \frac{3}{5}y \right) \quad (2-6)$$

$$\sigma_{yy} = -\frac{\rho g y}{2} \left(1 - 4\frac{y^2}{t^2} \right) \quad (2-7)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{3}{2}\rho g x \left(1 - 4\frac{y^2}{t^2} \right) \quad (2-8)$$

Υπολογισμός μετατοπίσεων

Για επίπεδη εντατική κατάσταση καταλήγουμε σε αντίστοιχες σχέσεις και εφαρμόζουμε τις συνοριακές συνθήκες:

$$u_x(y = 0) = 0 \Rightarrow c_1 = 0$$

$$u_y \left(x = \pm \frac{L}{2}, y = 0 \right) = 0 \Rightarrow c_2 = -\frac{\rho g}{2Et^2} \left[\frac{L^4}{16} + \left(\frac{3}{5} + \frac{5}{8}v \right) t^2 L^2 \right]$$

Επομένως το μέγιστο βέλος κάμψης δίνεται από τη σχέση:

$$u_y(x = 0, y = 0) = -\frac{\rho g L^4}{2Et^2} \left[1 + 16 \left(\frac{3}{5} + \frac{5}{8}v \right) \frac{t^2}{L^2} \right] \quad (2-9)$$

Οι σχέσεις υπολογισμού των μετατοπίσεων έχουν ως εξής

$$u_x = \frac{\rho g}{2Et^2} \left[xy(12x^2 - L^2) + 2x \left(-4y^3 + \frac{5}{8}t^2y \right) + vxy(t^2 - 4y^2) \right] \quad (2-10)$$

$$u_y = \frac{\rho g}{2Et^2} \left[y^4 - \frac{t^2y^2}{2} - 2v \left(\frac{12x^2 - L^2}{4}y^2 - y^4 + \frac{3}{10}t^2y \right) - x^4 + \frac{L^2x^2}{2} + \frac{12}{5}x^2t^2 + \frac{5}{2}vx^2t^2 - \frac{L^4}{16} - \left(\frac{3}{5} + \frac{5}{8}v \right) t^2L^2 \right] \quad (2-11)$$

Οι σχέσεις για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση προκύπτουν αντικαθιστώντας το E με $\frac{E}{1-\nu^2}$ και το ν με $\frac{\nu}{1-\nu}$.

$$u_x = \frac{\rho g}{2Et^2} \left[(1-\nu^2) \left\{ xy(12x^2 - L^2) + 2x \left(-4y^3 + \frac{5}{8}t^2y \right) \right\} + \nu(1+\nu)xy(t^2 - 4y^2) \right] \quad (2-12)$$

$$u_y = \frac{\rho g}{2Et^2} \left[(1-\nu^2) \left(y^4 - \frac{t^2y^2}{2} \right) - 2\nu(1+\nu) \left(\frac{12x^2 - L^2}{4}y^2 - y^4 + \frac{3}{10}t^2y \right) + (1-\nu^2) \left(-x^4 + \frac{L^2x^2}{2} + \frac{12}{5}x^2t^2 \right) + \frac{5}{2}\nu(1+\nu)x^2t^2 - (1-\nu^2) \left(\frac{L^4}{16} + \frac{3}{5}t^2L^2 \right) - \frac{5}{8}\nu(1+\nu)t^2L^2 \right] \quad (2-13)$$

Μελέτη των συναρτησιακών

Η ανωτέρω αναλυτική λύση με χρήση της τασικής συνάρτησης αποτελεί την γενικότερη και ακριβέστερη αντιμετώπιση του προβλήματος της αμφίπακτης δοκού υπό ίδιον βάρος. Η κλασσική λύση της στατικής αποτελεί υποπερίπτωση και παρέχει ταυτόσημα αποτελέσματα μόνον όταν έχουν ληφθεί υπόψη και οι μετατοπίσεις που οφείλονται στην διάτμηση και ο λόγος poisson θεωρηθεί μηδενικός. Η παρουσία μη μηδενικού λόγου του Poisson μειώνει τις βυθίσεις που υπολογίζονται από την κλασσική λύση. Για την ακραία περίπτωση λυγηρότητας $L/t=25$, τιμή κατά την οποία η δοκός θεωρείται πως πλησιάζει τη συμπεριφορά ενός καλωδίου, παρατηρούμε επίδραση μικρότερη του 0.1% επί της μέγιστης βύθισης για όλες τις μη μηδενικές τιμές του λόγου poisson. Μεγαλύτερες επιπτώσεις διαπιστώνονται, όπως είναι αναμενόμενο, για τις παχύτερες δοκούς. Για την ακραία τιμή λυγηρότητας $L/t=3$, όπου η δοκός προσεγγίζει σαν συμπεριφορά την πλάκα, η επίδραση κυμαίνεται από 0.5-1.5%. Αυτό συμβαίνει επειδή οι βυθίσεις λόγω διάτμησης είναι μεγαλύτερες όσο αυξάνεται το πάχος της δοκού.

Οι μερικές παράγωγοι των συναρτήσεων των τάσεων και μετακινήσεων μας δίνουν τις θέσεις και τις τιμές των κρίσιμων μεγεθών. Ειδικά για την τάση σ_{yy} υπολογίζουμε:

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = -\frac{\rho g}{2} + \frac{6\rho g y^2}{t^2} \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial y^2} = \frac{12\rho g y}{t^2} \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \Rightarrow y = \pm \frac{t}{\sqrt{12}} \quad (1)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή (1) στη συνάρτηση της σ_{yy} προκύπτει η μέγιστη τιμή της κατακόρυφης τάσης:

$$|\sigma_{yy}|_{max} = \frac{\rho g t}{3\sqrt{12}} \quad (2-16)$$

2.4. Δυο στρώματα

Όπως αναφέρθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά στις στρώσεις όταν αλλάζει το πάχος αυτών. Έτσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε 3 περιπτώσεις, όπου στην 1^η) τα στρώματα είναι όμοια, στην 2^η) τα πιο στιβαρά στρώματα είναι υπερκείμενα και την 3^η) όπου το στιβαρό στρώμα είναι το υποκείμενο.

Όμοια στρώματα

Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά μονοστρωματικής οροφής με διστρωματική, ιδίου ανοίγματος και συνολικού πάχους, προκύπτει από την εξίσωση (1-3) ότι η μέγιστη καμπτική τάση σε οποιοδήποτε εκ των δύο λεπτότερων στρωμάτων είναι η διπλάσια του μονού στρώματος. Η εξίσωση (1-1) δείχνει ότι η βύθιση για τα λεπτά στρώματα είναι τετραπλάσια από του παχέος στρώματος. Τέλος, η εξίσωση (1-2) δείχνει ότι η διατμητική τάση είναι απευθείας ανάλογη του ανοίγματος και ανεξάρτητη του πάχους. Αν η ολίσθηση μεταξύ των δύο στρωμάτων μπορούσε να αποφευχθεί παρέχοντας την απαιτούμενη διατμητική αντοχή κατά μήκος της επιφάνειας της

στρωσιγένειας, το σύνολο των δύο στρωμάτων θα συμπεριφερόταν σαν μονό στρώμα πάχους ίσου με το σύνολο του πάχους των δύο στρωμάτων.

Ασθενέστερο στρώμα υποκείμενο στιβαρότερου

Για $t_2=2t_1$, και θεωρώντας πως επιβάλλουμε μία ιδανική ορθή τάση συμπίεσης p_b για την παρεμπόδιση της ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων, η οριακή κατάσταση στο επίπεδο της ασυνέχειας θα έδινε:

$$\tau_j = (p_b - \sigma^j_{yy}) \tan \varphi_j \Rightarrow p_b = \frac{\tau_j}{\tan \varphi_j} + \sigma^j_{yy} \quad (2-17)$$

όπου τ_j και σ^j_{yy} η διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα στο επίπεδο της ασυνέχειας για οροφή πάχους $t=t_2+t_1$. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2-4), γίνεται εμφανές ότι το φορτίο που μεταβιβάζεται από το ασθενέστερο στο στιβαρότερο στρώμα είναι ίσο με την κατακόρυφη τάση που αναπτύσσεται εντός μονοστρωματικής οροφής στο ύψος όπου εμφανίζεται η ασυνέχεια, εν προκειμένω στο $y=-t/6$. Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (2-7) υπολογίζουμε:

$$\sigma^j_{yy} = -\frac{\rho g(-t/6)}{2} \left(1 - 4 \frac{(-t/6)^2}{t^2} \right) = \frac{2\rho g t}{27} \quad (2-18)$$

Η μέγιστη λοιπόν διατμητική τάση που θα κληθεί η ορθή συμπιεστική πίεση της υποστήριξης να αντισταθμίσει στο επίπεδο της ασυνέχειας σύμφωνα με τη σχέση (2-8) είναι:

$$\tau_j = \frac{3}{2} \rho g \left(\frac{L}{2} \right) \left(1 - 4 \frac{(-t/6)^2}{t^2} \right) = \frac{2\rho g L}{3} \quad (2-19)$$

$$p_b = \frac{\tau_j}{\tan \varphi_j} + \sigma^j_{yy} = \frac{2\rho g L}{3 \tan \varphi_j} + \frac{2\rho g t}{27} \quad (2-20)$$

Στιβαρότερο στρώμα υποκείμενο ασθενέστερου

Θεωρώντας $t_1=2t_2$, και εφαρμόζοντας και πάλι ιδανική συμπιεστική πίεση p_b για την αποφυγή ολίσθησης, η νέα σ_{yy} θα προκύπτει ως εξής:

$$\sigma^j_{yy} = -\frac{\rho g(t/6)}{2} \left(1 - 4 \frac{(-t/6)^2}{t^2} \right) = -\frac{2\rho g t}{27} \quad (2-21)$$

$$p_b = \frac{\tau_j}{\tan \varphi_j} + \sigma^j_{yy} = \frac{2\rho g L}{3 \tan \varphi_j} - \frac{2\rho g t}{27} \quad (2-22)$$

Εφόσον η σ^j_{yy} δρα συμπιεστικά στο άνω ήμισυ της διατομής. Δηλαδή, η απαίτηση για το μέγεθος της p_b είναι μειωμένη.

3. Διασταυρώσεις

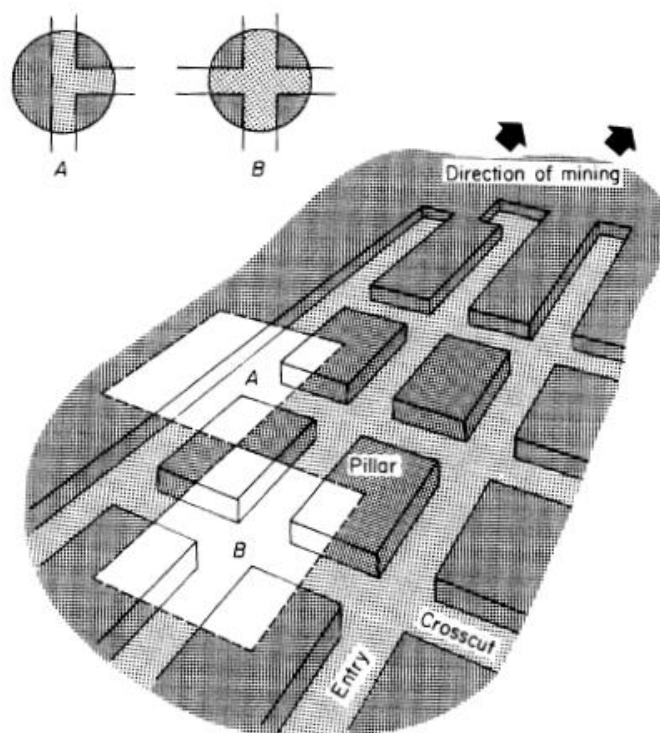
Οι διασταυρώσεις στα υπόγεια έργα εμφανίζονται όπου υπάρχει συμβολή μεταξύ δύο ή περισσοτέρων ανοιγμάτων. Τα ανοίγματα αυτά μπορούν να είναι ίδιας ή διαφορετικής γεωμετρίας.

Οι διασταυρώσεις μπορούν να αναπτυχθούν σε αστικά έργα όπως στη σηραγγοποιεία ή στα υδραυλικά έργα. Στη μεταλλευτική υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις μεθόδων εκμετάλλευσης, όπου αναπτύσσονται διασταυρώσεις. Πιο χαρακτηριστική μέθοδος αποτελεί η μέθοδος Θαλάμων και Στύλων, όπου η ύπαρξη διασταυρώσεων αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της.

Οι διασταυρώσεις μπορούν να χωριστούν σε :

- A. Τριπλής Συμβολής
- B. Τετραπλής Συμβολής

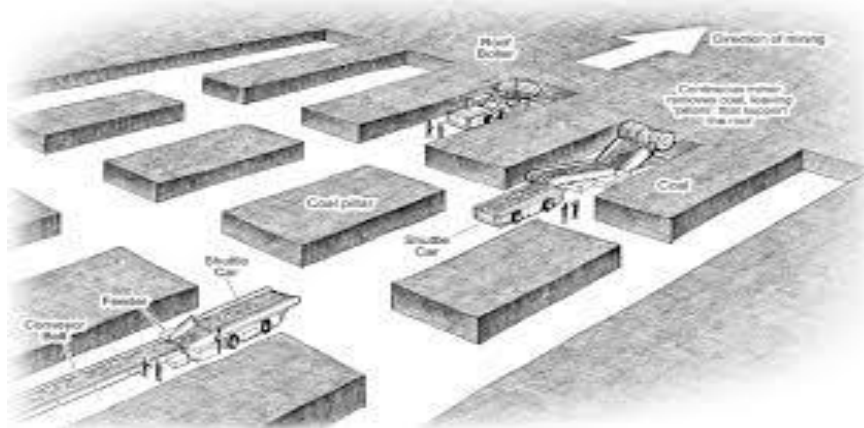
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Συνήθεις Τύποι Διασταυρώσεων



Εικόνα 3.1. Συνήθεις Τύποι Διασταυρώσεων

Μελέτες που διεξήχθησαν από τους (Spearing & Mueller, 2008) και από τους (Chugh & Kollipara, 2009) σχετικά με τις καταπτώσεις βράχων (θανατηφόρα και μη θανατηφόρα ατυχήματα) στις Η.Π.Α. αποκάλυψαν ότι περίπου 70% - 75% των καταπτώσεων οροφής συμβαίνει σε διασταυρώσεις. (Sinha, 2018). Επίσης σε καταγραφή ατυχημάτων λόγω αστοχίας της οροφής, που έγινε στις Η.Π.Α. από το 2002 έως το 2007, βρέθηκε ότι το 70% ήταν σε διασταυρώσεις. (Abbasi, 2010) ενώ μελέτη του RFDB για καταπτώσεις οροφής που διεξήχθη από το 2004 έως το 2008

έδειξε ότι το 80% των συμβάντων, έγινε σε διασταυρώσεις. Σε εκμεταλλεύσεις στις Η.Π.Α. που έγιναν με τις μεθόδους Θαλάμων και Στύλων και Επίμηκων Μετώπων καταγραφήκαν ατυχήματα λόγω αστοχίας της οροφής εκ των οποίων το 30% των θανατηφόρων ατυχημάτων εμφανίστηκαν στις διασταυρώσεις. Από αυτά, το 68% παρατηρήθηκε σε διασταυρώσεις τετραπλής συμβολής, ενώ μόνο το 32% σε διασταυρώσεις τριπλής συμβολής (Abbasi, 2010). Αυτό φαίνεται και από έρευνα που έγινε από τους Pothini και Schonfeldt (1977) όπου η μέση τιμή της σύγκλισης στους χώρους διασταυρώσεων τετραπλής συμβολής, ήταν διπλάσια από την μέση τιμή της σύγκλισης στους χώρους τριπλής συμβολής.



Εικόνα 3.2. Εκμετάλλευση Ανθρακορυχείου με την Μέθοδο Θαλάμων και Στύλων

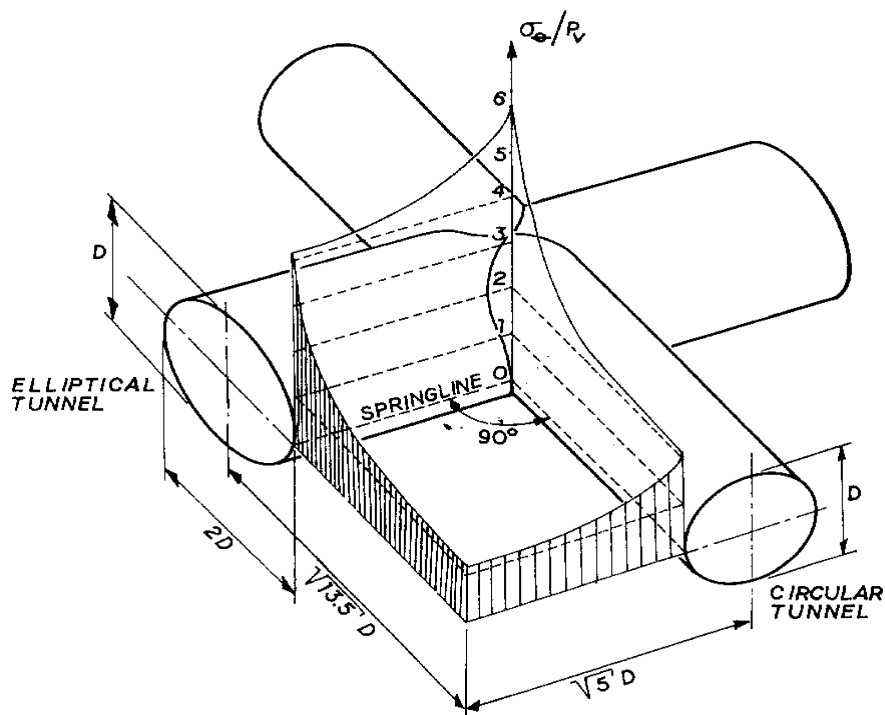
Οι διασταυρώσεις μαζί με τις εισόδους των υπόγειων εκμεταλλεύσεων αποτελούν επισφαλή σημεία ενός υπογείου έργου λόγω των μεγάλων ανοιγμάτων που δημιουργούνται καθώς και της τρισδιάστατης κατανομής των τάσεων. (Abbasi, 2010) Όμως σύμφωνα με τους (Cochrane & Coates, 1970), οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται στην οροφή, στο δάπεδο ή στις παρειές των διασταυρώσεων είναι μεγαλύτερες από αυτές που εμφανίζονται στις εισόδους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το άνοιγμα της στοάς είναι μεγαλύτερο και ότι υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων στις γωνίες των διασταυρώσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Εκτίμηση της κατανομής εφαπτομενικής τάσης στο οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται μέσω των ανοιγμάτων των δύο σηράγγων σε υδροστατικό εντατικό πεδίο Οι δυσκολίες στην ευστάθεια της οροφής, που προκύπτουν στις θέσεις διασταυρώσεων, οφείλονται ότι :

- 1) Στις διασταυρώσεις, η επιφάνεια της οροφής που πρέπει να υποστηριχτεί είναι συνήθως μεγαλύτερη από αυτή στις στοές. Ταυτόχρονα μειώνεται και ο χρόνος αυτουποστήριξης.
- 2) Η διεύθυνση των ασυνεχειών ενδέχεται να επηρεάζει σε διαφορετικό βαθμό τα δύο ανοίγματα.
- 3) Οι τάσεις γύρω από τις διασταυρώσεις αναπτύσσονται σε τρεις διαστάσεις λόγω της ξαφνικής αλλαγής της γεωμετρίας του ανοίγματος. Κατά μία έννοια η τασική κατανομή στα επιμέρους ανοίγματα είναι μειωμένη σε σύγκριση με τις διασταυρώσεις.
- 4) Στις διασταυρώσεις, αφαιρείται η στήριξη που παρέχεται από τα πλευρικά τοιχώματα μιας στοάς. Η αφαίρεση αυτή και η δημιουργία επιπρόσθετων ελεύθερων επιφανειών, μπορεί να αποκαλύψει κάποια ασταθή βραχόμαζα.

Σύμφωνα με τον (Gercek, 1982) , σε μελέτη εξέτασης των διασταυρώσεων, η οροφή αστοχεί αρχικά στις διασταυρώσεις και επεκτείνεται κατά μήκος των εισόδων που εξορύσσονται κάθετα στη μέγιστη οριζόντια τάση. Συγκεκριμένα έβγαλε τα εξής συμπεράσματα :

- 1) Η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση εμφανίζεται στο κέντρο της διασταύρωσης.
- 2) Η μέγιστη κατακόρυφη τάση εμφανίζεται στις γωνίες των στύλων.
- 3) Υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση κρίσιμης τάσης στην οροφή των διασταυρώσεων.
- 4) Μεγάλα ανοίγματα σε διασταυρώσεις αστοχούν γρηγορότερα από άλλες διατομές, στα ίδιο πέτρωμα.
- 5) Η αρίδα χαλάρωσης που σχηματίζεται πάνω από μόνο ένα άνοιγμα, έχει το σχήμα θόλου αυξημένου ύψους πάνω από την διασταύρωση.
- 6) Ο συντελεστής ασφαλείας της οροφής μειώνεται όσο αυξάνεται η οριζόντια τάση.

Επίσης όπως αναφέρεται από τον (Abbasi, 2010) η συμπεριφορά των στύλων μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια της οροφής στις διασταυρώσεις. Π.χ. η ανακατανομή των τάσεων, λόγω της αστοχίας του στύλου μπορεί να επηρεάσει το τόξο πίεσεων στην οροφή ή το δάπεδο και να προωθήσει την ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών.



Εικόνα 3.3. Εκτίμηση της κατανομής εφαπτομενικής τάσης στο οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται μέσω των ανοιγμάτων των δύο σηράγγων σε υδροστατικό εντατικό πεδίο (Gercek, *Stability Considerations for Underground Excavation Intersections*, 1986)

Στα υπόγεια έργα η κατανομή της πίεσης και της μετατόπισης αναπτύσσεται σε τρεις διαστάσεις. Στη σηραγγοποιεία όμως μια τόσο σύνθετη ανάλυση μπορεί να αντικατασταθεί από μια πιο απλή προσέγγιση επίπεδης διατομής, στην οποία οι τάσεις που εμφανίζονται κάθετα στη διατομή θεωρούνται αμελητέες. Κάτι τέτοιο όμως στις περιοχές διασταυρώσεων δεν ισχύει, οπότε μόνο με τρισδιάστατες μεθόδους ανάλυσης μπορεί να γίνει ολοκληρωμένη ανάλυση των τάσεων και των μετατοπίσεων.

4. Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η προσομοίωση της οροφής σε θέσεις διασταυρώσεων έγινε με το πρόγραμμα 3DEC.

Το 3DEC είναι ένας αριθμητικός κώδικας σε τρεις διαστάσεις, για προηγμένες γεωτεχνικές αναλύσεις ογκοτεμαχισμένων πετρωμάτων και υπόγειων υδάτων. Το 3DEC προσομοιώνει την απόκριση των ασυνεχών μέσων όπως μιας ρωγματομένης βραχώμαζα, τα οποία υπόκεινται είτε σε στατική είτε σε δυναμική φόρτιση. Η αριθμητική σύνθεση βασίζεται στη μέθοδο διακριτών στοιχείων (DEM) για προσομοίωση ασυνεχών μέσων. (Itasca Consulting Group, 2019)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον Cundall (1971) για την ανάλυση προβλημάτων Βραχομηχανικής. Βάση αυτής της μεθόδου, το ασυνεχές μέσο αναπαρίσταται ως ένα σύνολο από διακριτά στοιχεία, τα οποία συμπεριφέρονται ως άκαμπτα ή παραμορφώσιμα υλικά.. Η συμπεριφορά αυτών των στοιχείων είναι είτε γνωστή είτε μπορεί να αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα με μαθηματικό τρόπο. Για κάθε στοιχείο, ο υπολογισμός των δυνάμεων αλληλεπίδρασης, των επιταχύνσεων, των ταχυτήτων και των μετακινήσεων, πραγματοποιείται για το κάθε ένα ξεχωριστά σε κάθε χρονικό βήμα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι σωστά μόνο όταν η μεταβολή στην κατάσταση ενός στοιχείου επηρεάζει μόνο αυτά που βρίσκονται σε άμεση επαφή μαζί του στη διάρκεια ενός χρονικού βήματος, που σημαίνει πως χρειάζεται καλό καθορισμό της αλληλοσυσχέτισης μεταξύ των επιμέρους στοιχείων (Jing & Stephansson, 2006). Αυτό ουσιαστικά μεταφράζεται στην ανάγκη ύπαρξης εξαιρετικά μικρού χρονικού βήματος, κάτι που καθιστά τη Μέθοδο των Διακριτών Στοιχείων εξαιρετικά απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ και αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημά της. (Θωμάς, 2015)

Τα παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια υποδιαιρούνται σε ένα πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, και κάθε στοιχείο ανταποκρίνεται σε έναν προκαθορισμένο γραμμικό ή μη γραμμικό νόμο τάσης-παραμόρφωσης. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι υποκείμενες εξισώσεις μηχανικής δε βασίζονται στην αρχική υπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, αλλά η αριθμητική λύση είναι σε θέση να παρακολουθεί την εξέλιξη της αστοχίας (Coulthard, 1999). Το σχήμα επίλυσης είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι

πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση του συνεχούς μέσου. Ο περιορισμός του χρονικού βήματος ισχύει τόσο για τα ογκοτεμάχια όσο και για τις διεπιφάνειες μεταξύ αυτών και το μέγεθός του καθορίζεται είτε από τη μάζα των ογκοτεμαχίων και την ακαμψία των διεπιφανειών, για άκαμπτα ογκοτεμάχια, είτε από το μέγεθος και τις ελαστικές σταθερές των ζωνών παραμόρφωσης και την ακαμψία των διεπιφανειών, για παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια. Η παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών περιγράφεται από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης μέσω των παραμέτρων της ορθής, K_n , και διατμητικής, K_s , δυστροπίας. Η ορθή παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των ορθών τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό περιορισμό ότι η ασυνέχεια διαθέτει μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Η διατμητική δυστροπία ορίζεται από τη μεταβολή της διατμητικής τάσης ανά μονάδα παραμόρφωσης. Το καταστατικό πρότυπο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των ασυνεχειών υποθέτει γραμμικά ελαστική-τελείως πλαστική συμπεριφορά σύμφωνα με το κριτήριο ολίσθησης Coulomb. (Bώβου, 2015)

Η θεμελιώδης σχέση κίνησης των σωματιδίων και των αντίστοιχων δυνάμεων, παρέχεται από τους νόμους του Νεύτωνα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων γίνεται αποκλειστικά μέσω δυνάμεων τριβής και συνοχής, οι οποίες παράγονται από ελατήρια ή και αποσβεστήρες για δυναμικά προβλήματα που συνδέουν τα τεμάχια στην ακτινική και στην εφαπτομενική διεύθυνση.

Στην αρχή κάθε χρονικού βήματος, η δομή των διεπαφών ανανεώνεται μέσω των γνωστών θέσεων των στοιχείων. Έπειτα εφαρμόζεται ο νόμος δύναμης-μετακίνησης σε κάθε διεπαφή, και με βάση τη σχετική κίνηση των στοιχείων και το καταστατικό νόμο που την περιγράφει, υπολογίζονται οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης σε ακτινικό και εφαπτομενικό επίπεδο. Τέλος εφαρμόζεται ο νόμος της κίνησης σε κάθε στοιχείο, ώστε να αλλάξει η ταχύτητα και η θέση του αναλογικά με τις δυνάμεις και την ροπή που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση και τυχόν δυνάμεις πεδίου που δρουν σε αυτό. (Θωμάς, 2015)

Συνοπτικά ,οι παραδοχές που υιοθετεί η μέθοδος για τις προσομοιώσεις είναι οι εξής:

1. Τα στοιχεία αντιμετωπίζονται είτε ως παραμορφώσιμα είτε ως ως απαραμόρφωτα.
2. Οι διεπαφές σχηματίζονται σε απειροελάχιστα μικρές επιφάνειες και θεωρούνται σημειακές
3. Στα σημεία των διεπαφών υιοθετείται εξιδανίκευση ενδόσιμης επαφής, έτσι ώστε να επιτρέπεται τοπικά η αλληλοεπικάλυψη των στοιχείων.
4. Το μέγεθος της επικάλυψης, είναι μικρό σε σχέση με το μέγεθος των στοιχείων και σχετίζεται με τη δύναμη που αναπτύσσεται στη διεπαφή, μέσω κατάλληλης σχέσης δύναμης-μετακίνησης (Νόμος Hooke)
5. Εφαρμόζονται οι Νόμοι του Νεύτωνα για τον υπολογισμό της μεταφορικής και στροφικής κίνησης των στοιχείων
6. Χρησιμοποιείται μικρός βηματικός χρόνος

5. Αριθμητικές Προσομοιώσεις

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς της στρωσιγενούς οροφής σε θέσεις διασταυρώσεων αναπτύχθηκαν τρεις σειρές αριθμητικών προσομοιωμάτων :

- 1) Πλήρες Προσομοίωμα
- 2) Προσομοίωμα Μονοστρωματικής Οροφής
- 3) Προσομοίωμα Διστρωματικής Οροφής

Για κάθε προσομοίωμα έγινε ανάλυση θεωρώντας στρωσιγενή οροφή σε εκμετάλλευση Θαλάμων και Στύλων, με τετραγωνικούς στύλους και Πλάτος Θαλάμου ίσο με 6μ, 8μ και 10μ ενώ για τις ασυνέχειες που οριοθετούν τις στρώσεις, εξετάστηκε η επίδραση της γωνίας τριβής ίση με 20, 30 και 40 μοίρες.

Κάθε προσομοίωμα έχει αναπτυχθεί συμμετρικά του όγκου της εκμετάλλευσης. Συγκεκριμένα η πρώτη προσομοίωση έχει ως άξονες συμμετρίας τα μέσα των στύλων, ενώ στις υπόλοιπες οι άξονες συμμετρίας βρίσκονται στο μέσο του στύλου και στα μέσα των θαλάμων όπως φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5.1) και Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.1 Κάτοψη 1ης Σειράς Προσομοιωμάτων



Εικόνα 5.2 Κάτοψη 2ης και 3ης Σειράς Προσομοιωμάτων

5.1. 1^η Σειρά Αριθμητικών Προσομοιωμάτων

Οι γεωμετρικές παράμετροι των προσομοιωμάτων είναι :

Πίνακας 5.1 Γεωμετρικές Παράμετροι 1ης Σειράς

	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση	3 ^η Περίπτωση
Πλάτος Θαλάμου	6m	8m	10m
Ύψος Υπερκείμενων	115m		
Ύψος Θαλάμου	8m		
Πλάτος Στύλου	5m		
Βάθος Δαπέδου	5m		
Πάχος Στρώσεων	0.5m		
Αριθμός Στρώσεων	30		

Επίσης οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το πέτρωμα είναι :

Πίνακας 5.2 Γεωτεχνικές Παράμετροι Πετρώματος 1ης Σειράς

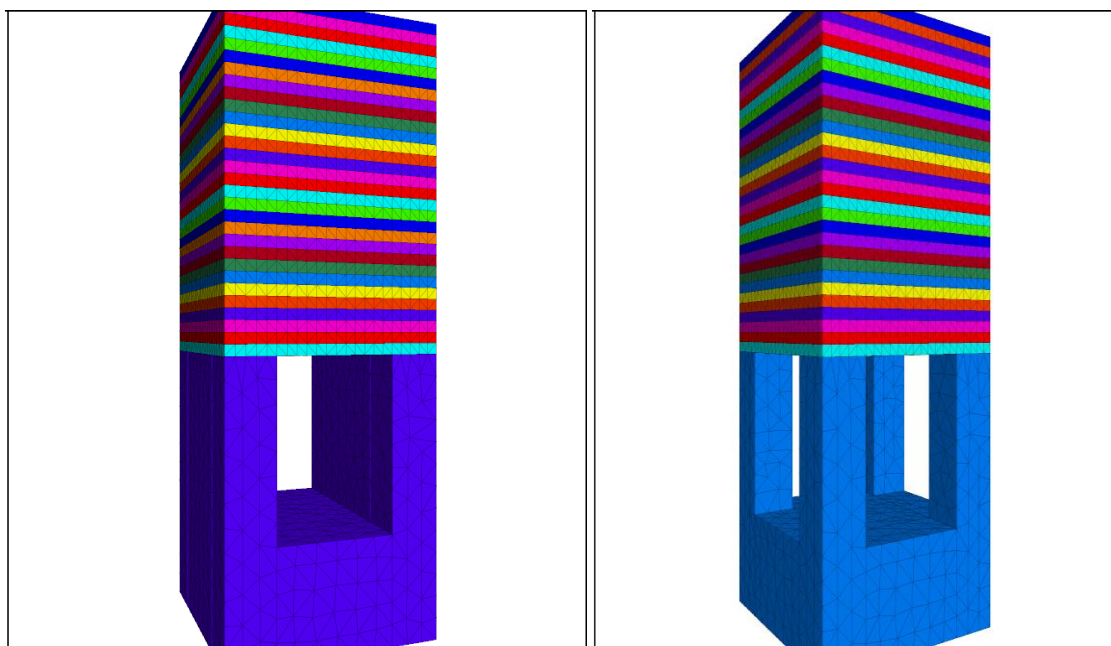
	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Μοναδιαίο Βάρος	γ	25	kN/m^3
Μέτρο Ελαστικότητας	E	30	GPa
Λόγος Poisson	ν	0.25	

Ενώ οι γεωτεχνικές παράμετροι των ασυνεχειών :

Πίνακας 5.3 Γεωτεχνικές Παράμετροι Ασυνεχειών 1ης Σειράς

	Σύμβολο	Περιπτώσεις			Μονάδες
		1 ^η	2 ^η	3 ^η	
Γωνία Τριβής	ϕ	20	30	40	Μοίρες
Ορθή Δυστροπία	K_n	100			GPa
Διαμητική Δυστροπία	K_s	100			GPa
Συνοχή	c_j	0			
Εφελκυστική Αντοχή	σ_{ij}	0			

Η επίλυση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια (Εικόνα 5.4), (Εικόνα 5.3). Στη πρώτη φάση έχει γίνει η εκσκαφή κατά την μία διεύθυνση και στη



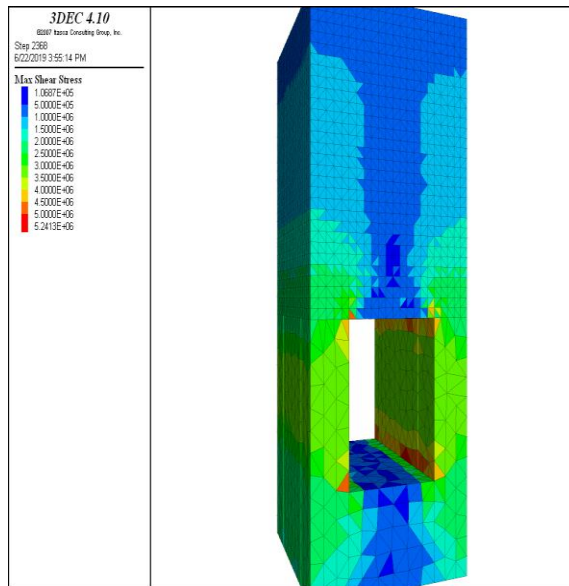
Εικόνα 5.4 1ο Στάδιο

Εικόνα 5.3 2ο Στάδιο

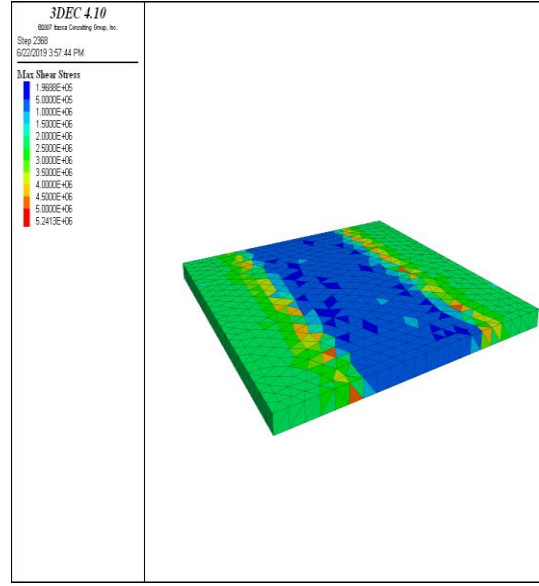
δεύτερη γίνεται εκσκαφή εγκάρσια της πρώτης, δημιουργώντας έτσι τους στύλους καθώς και την διασταύρωση.

5.1.1. Αποτελέσματα Κατανομής Τάσεων

Από το πρώτο προσομοίωμα, στην πρώτη φάση φαίνεται πως η μέγιστη διατμητική τάση αναπτύσσεται στα όρια των στύλων με την οροφή και δάπεδο αντίστοιχα

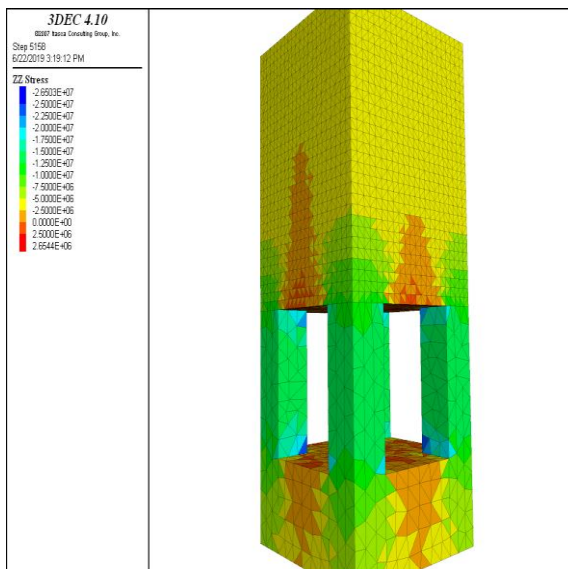


Εικόνα 5.6 Κατανομή της διατμητικής τάσης στο στο πρώτο στάδιο

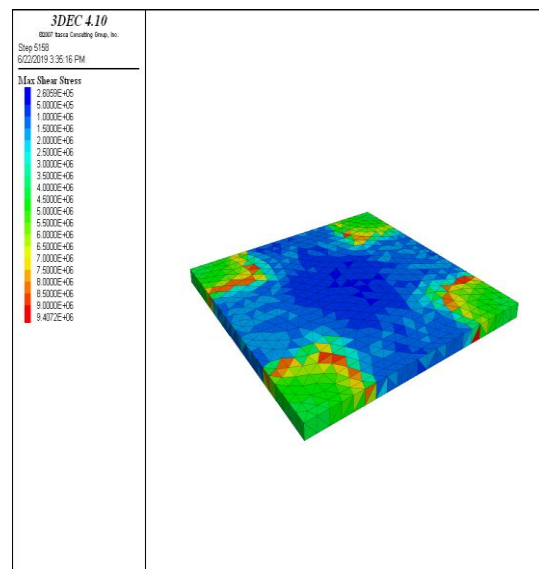


Εικόνα 5.5 Κατανομή της διατμητικής τάσης της αμέσου οροφής στο 1ο στάδιο

Αντίστοιχα δρουν οι διατμητικές τάσεις και στην δεύτερη φάση ενώ βλέπουμε επίσης πως η μέγιστη θλιπτική τάση αναπτύσσεται στις γωνίες των στύλων κοντά στο



Εικόνα 5.7 Κατανομή της διατμητικής τάσης στο 2ο στάδιο

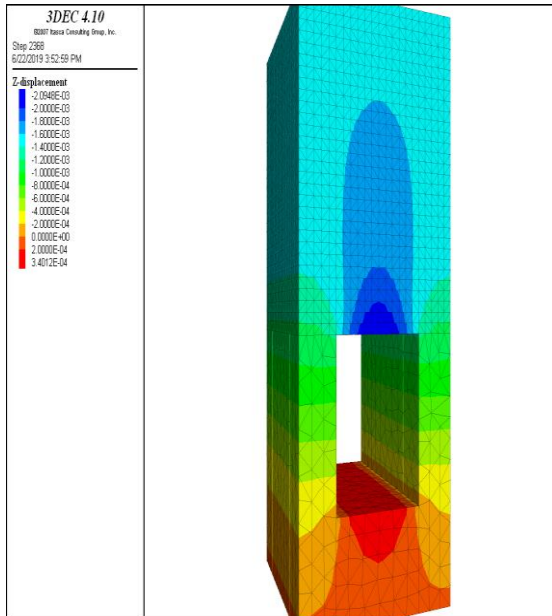


Εικόνα 5.8 Κατανομή της διατμητικής τάσης της αμέσου οροφής στο 2ο στάδιο

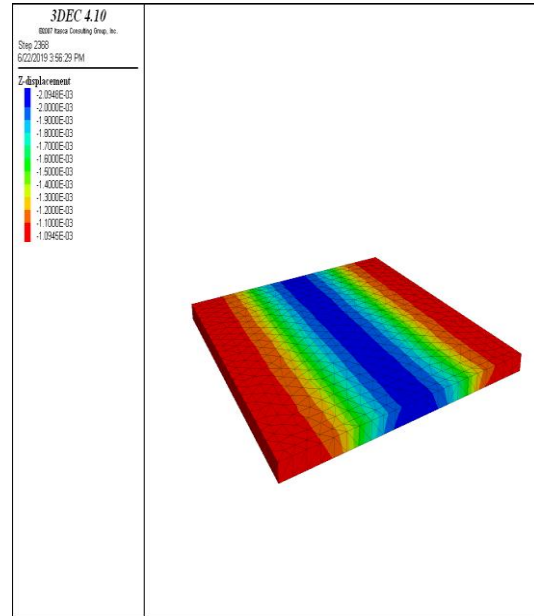
δάπεδο και στην οροφή, ενώ πάνω από τους θαλάμους οι τάσεις μηδενίζονται ή δρουν εφελκυστικά.

5.1.2. Αποτελέσματα Κατακόρυφης Μετατόπισης

Στην πρώτη φάση η μέγιστη βύθιση παρατηρείται στο μέσο του θαλάμου

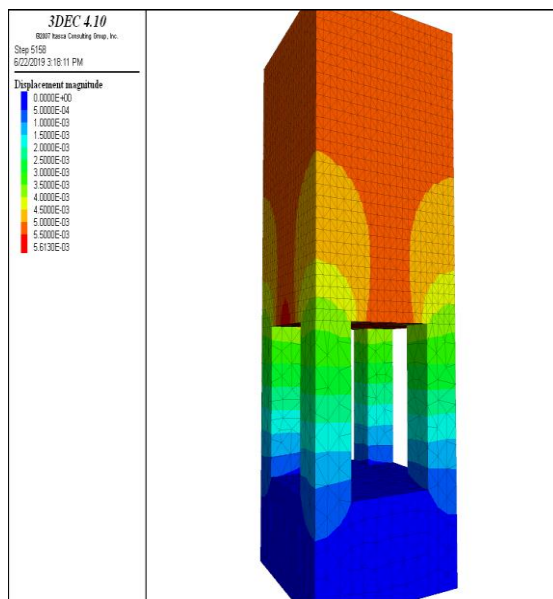


Εικόνα 5.9 Κατακόρυφη Μετατόπιση του προσομοιώματος στο 1ο στάδιο

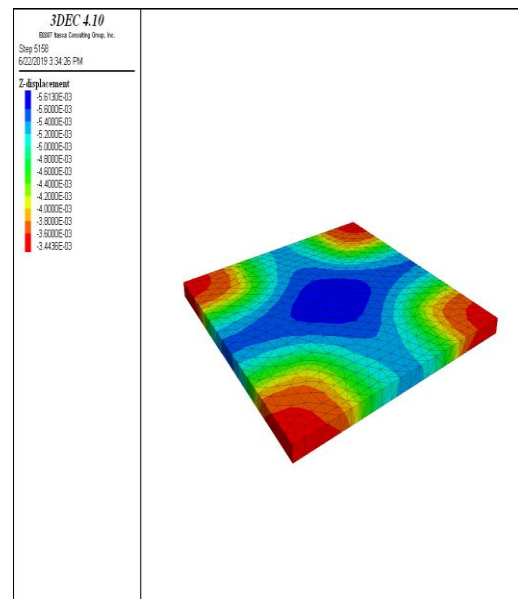


Εικόνα 5.10 Κάμψη του στρώματος της αμέσου οροφής στο 1ο στάδιο

Στην δεύτερη φάση παρατηρείται στο μέσο της διασταύρωσης



Εικόνα 5.11 Κατακόρυφη Μετατόπιση του προσομοιώματος στο 2ο στάδιο

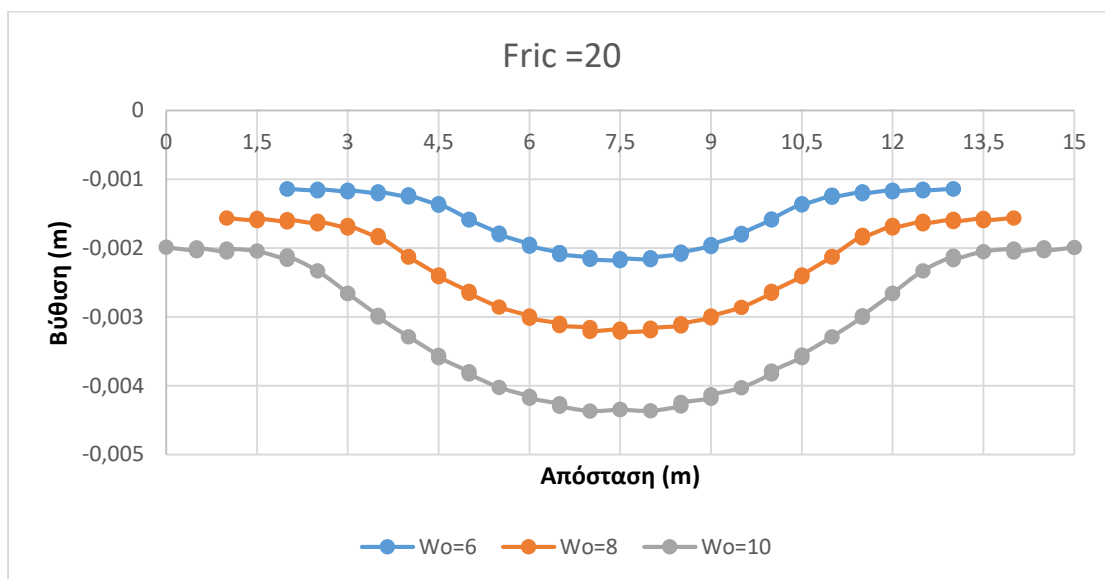


Εικόνα 5.12 Κάμψη του στρώματος της αμέσου οροφής στο 2ο στάδιο

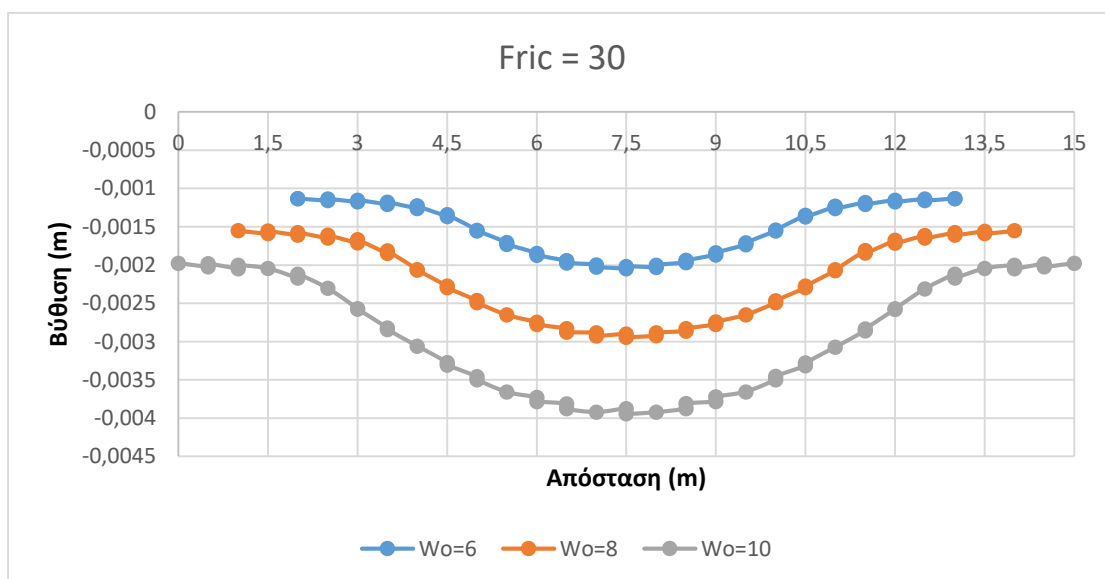
Τα προφίλ της βύθισης για την κάθε περίπτωση βρίσκονται στο παράρτημα 7.1, 7.2, 7.3.

Από τα αποτελέσματα της βύθισης στο μέσο του θαλάμου του πρώτου σταδίου, φαίνεται πως η επίδραση της γωνίας τριβής φ είναι μικρή ($<0,2\text{mm}$), ενώ αντίθετα η αύξηση του πλάτους του θαλάμου δρα αναλογικά της βύθισης ($>1\text{mm}$). Στο δεύτερο στάδιο φαίνεται αντίστοιχα πως η αύξηση του πλάτους του θαλάμου δίνει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στη βύθιση. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

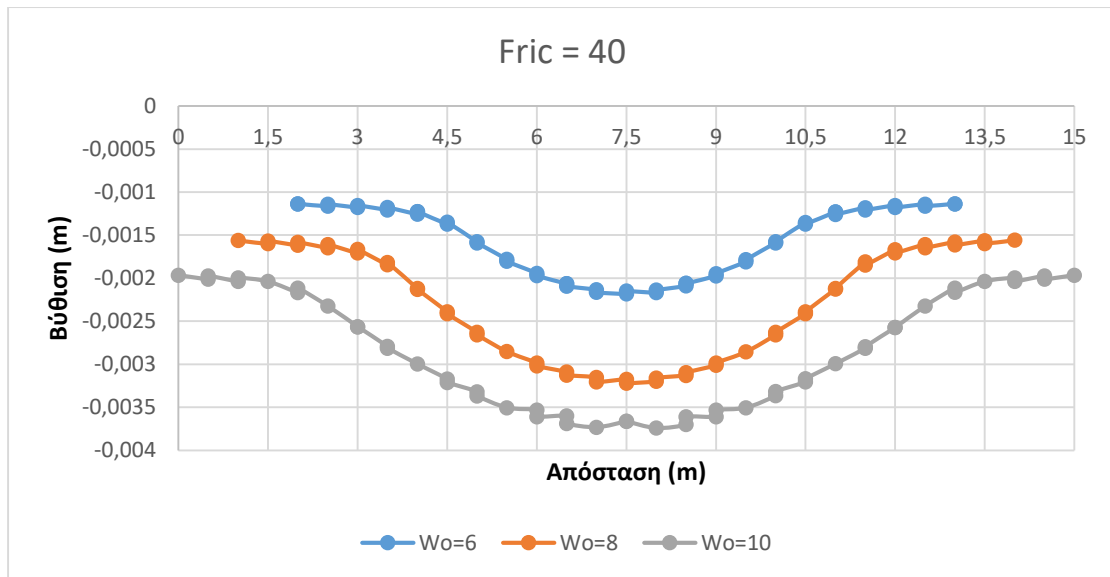
Για το 1^ο στάδιο



Εικόνα 5.13 Καμπύλες βύθισης της οροφής για $\varphi=20$ στο πρώτο στάδιο



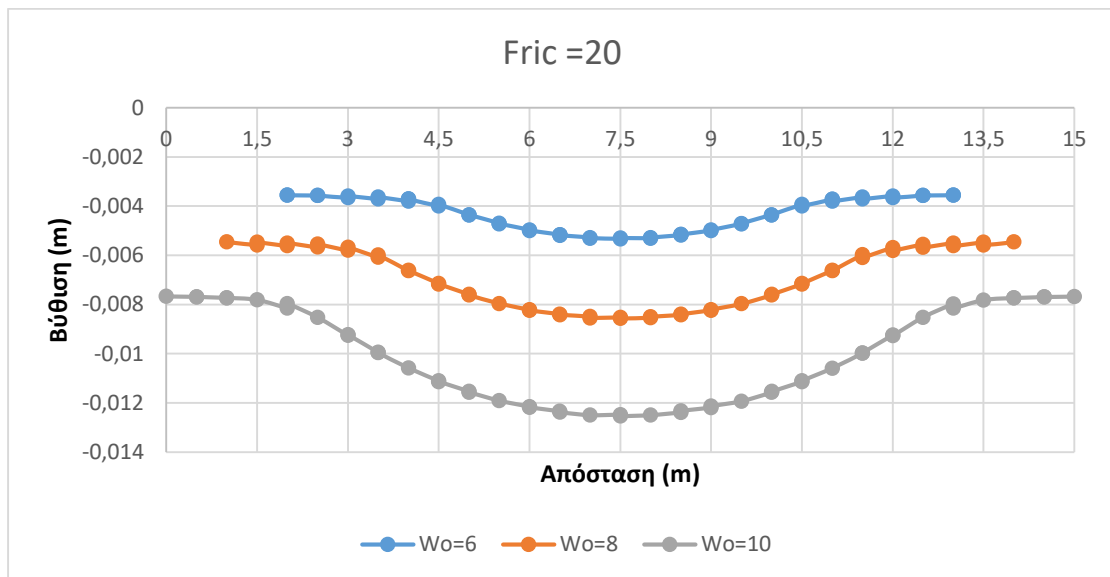
Εικόνα 5.14 Καμπύλες βύθισης της οροφής για $\varphi=30$ στο πρώτο στάδιο



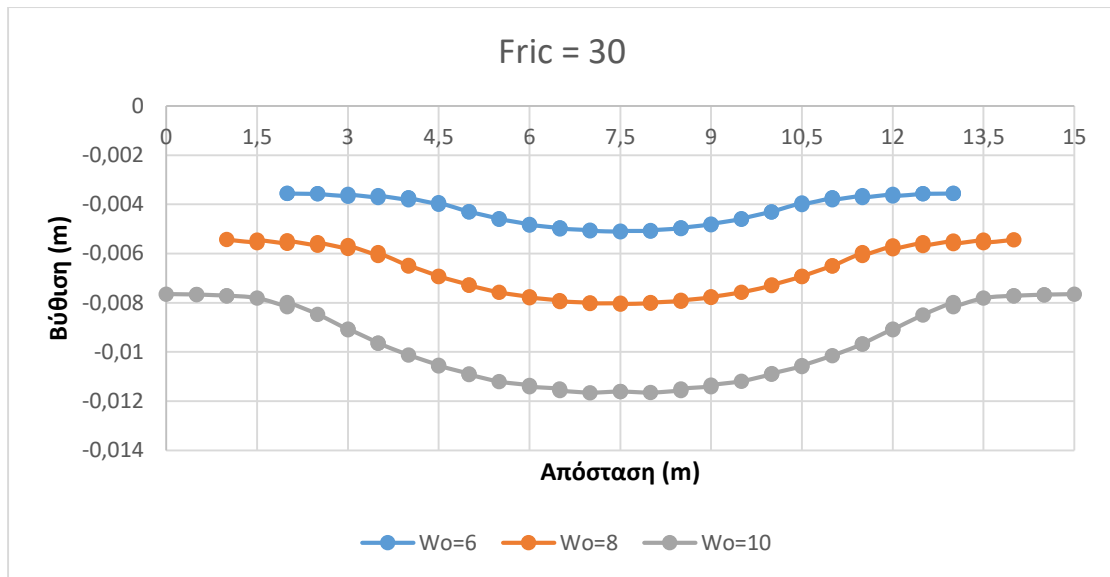
Εικόνα 5.15 Καμπύλες βύθισης της οροφής για $\phi=40$ στο πρώτο στάδιο

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις βλέπουμε πως η μέγιστη βύθιση πρακτικά δεν επηρεάζεται από την γωνία τριβής. Για πλάτος θαλάμου 6m υπάρχει βύθιση περίπου 1mm, για πλάτος θαλάμου 8m η βύθιση είναι ίση 1.5mm και για πλάτος θαλάμου 10m ίση με κοντά στα 2mm.

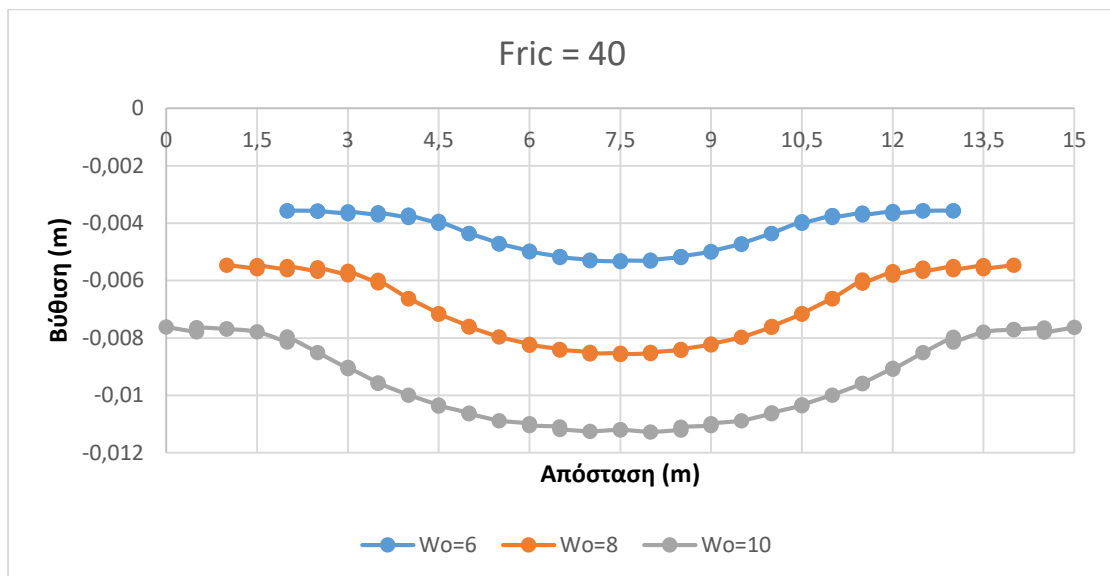
Στο δεύτερο στάδιο, στον άξονα που διαπερνά από τα μέσα του στύλου.



Εικόνα 5.16 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο του στύλου για $\phi=20$ στο 2ο στάδιο



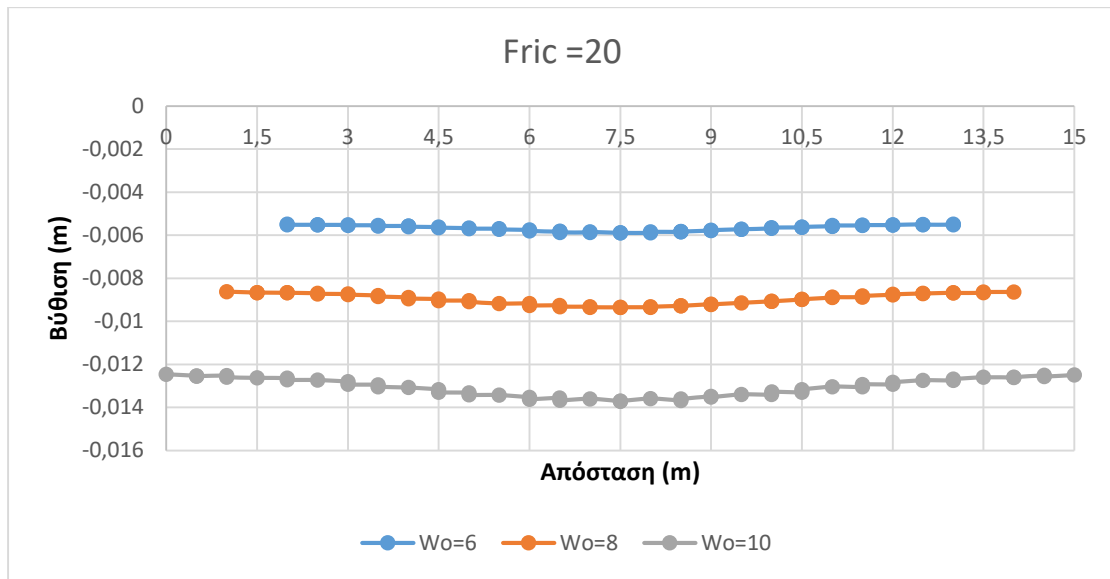
Εικόνα 5.17 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο του στύλου για $\varphi=30$ στο 2ο στάδιο



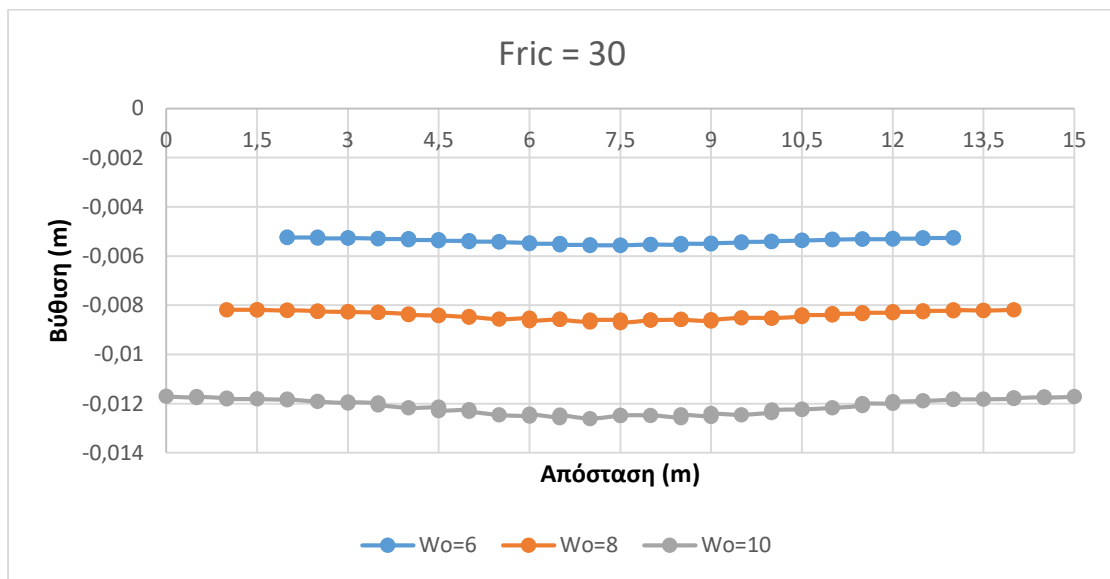
Εικόνα 5.18 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο του στύλου για $\varphi=40$ στο 2ο στάδιο

Στο 2^ο στάδιο για πλάτος θαλάμου 6m η βύθιση είναι περίπου 2mm, για πλάτος θαλάμου 8m υπερβαίνει σχεδόν 2.5mm και για πλάτος θαλάμου 10m είναι περίπου 4mm.

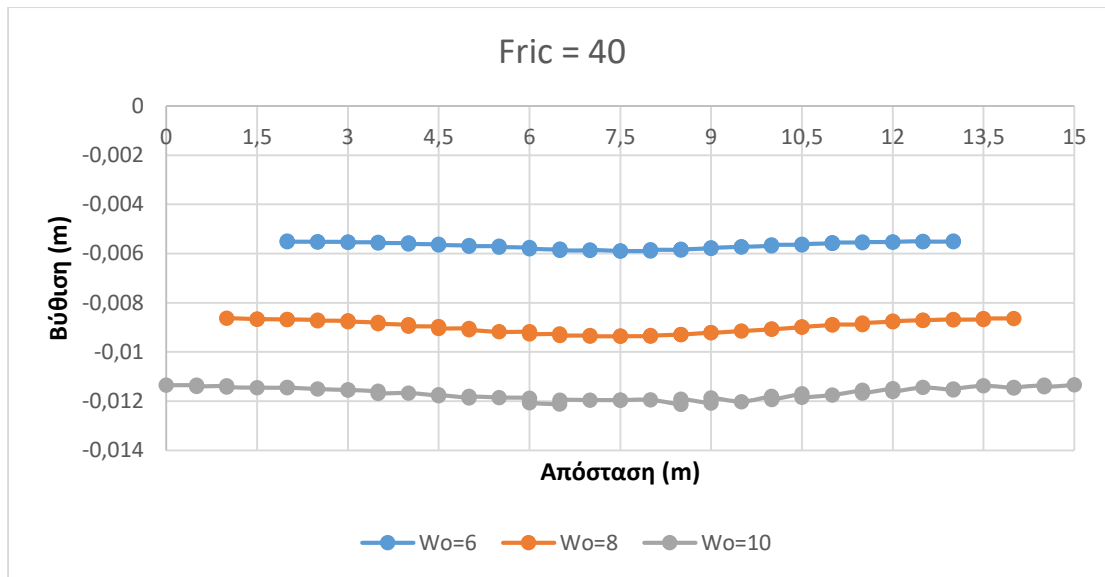
Στο δεύτερο στάδιο στο μέσο του θαλάμου.



Εικόνα 5.19 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης για $\varphi=20$



Εικόνα 5.20 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης για $\varphi=30$



Εικόνα 5.21 Καμπύλες βύθισης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης για $\varphi=40$

Στο μέσο της διασταύρωσης βλέπουμε πως αυξάνεται η βύθιση σε σχέση με το μέσο του θαλάμου, από 0.5mm για πλάτος θαλάμου 6m έως 1mm για πλάτος θαλάμου 10m.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα η μέγιστη τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης εντοπίζεται στο μέσο του θαλάμου για το πρώτο στάδιο και στο κέντρο της διασταύρωσης για το 2^ο, ενώ στην διεύθυνση που περνά από τα μέσα των στύλων η βύθιση φτάνει στη μέγιστη τιμή της στο μέσο των θαλάμων, πράγμα αναμενόμενο.

Συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

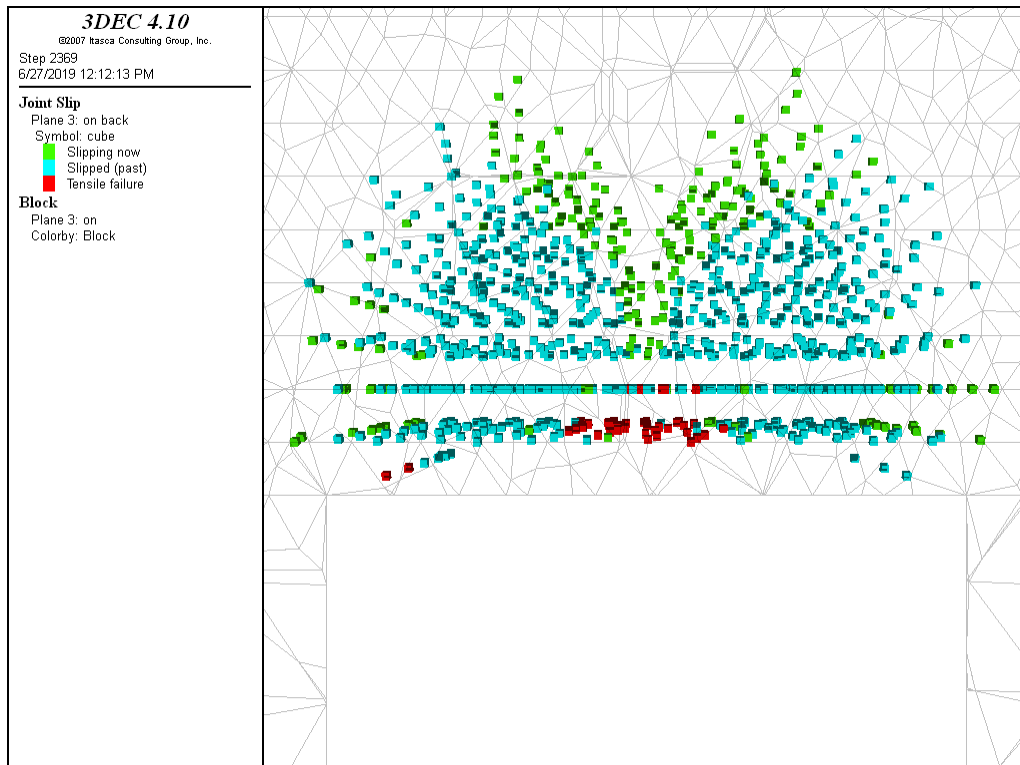
Πίνακας 5.4 Οι μέγιστες τιμές της βύθισης για κάθε περίπτωση

zDisp (mm)			Wo		
			6m	8m	10m
Phase A	φ	20	-2.18125	-3.219	-4.36481
		30	-2.04672	-2.94214	-3.9427
		40	-1.98783	-2.8443	-3.74152
Phase B - Pillar	φ	20	-5.33722	-8.56898	-12.5398
		30	-5.11227	-8.04967	-11.6546
		40	-5.01471	-7.86771	-11.2699
Phase B - Room	φ	20	-5.8969	-9.35684	-13.7164
		30	-5.5739	-8.71566	-12.6124
		40	-5.42694	-8.47086	-12.1337

5.1.3. Αποτελέσματα Ολίσθησης και Αποκόλλησης των Στρωμάτων

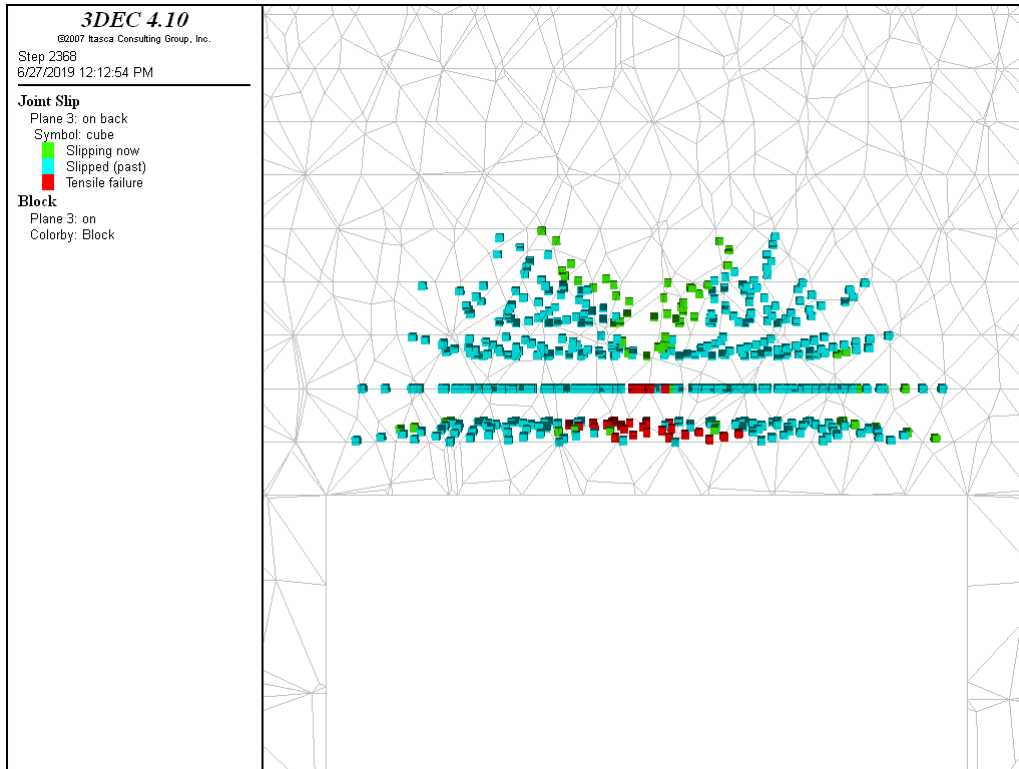
Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι περιοχές που συμβαίνει ολίσθηση (μπλε και πράσινο χρώμα) καθώς και οι περιοχές αποκόλλησης των στρωμάτων (κόκκινο χρώμα), για την πρώτη φάση.

Για το πρώτο στάδιο στο μέσο του θαλάμου :



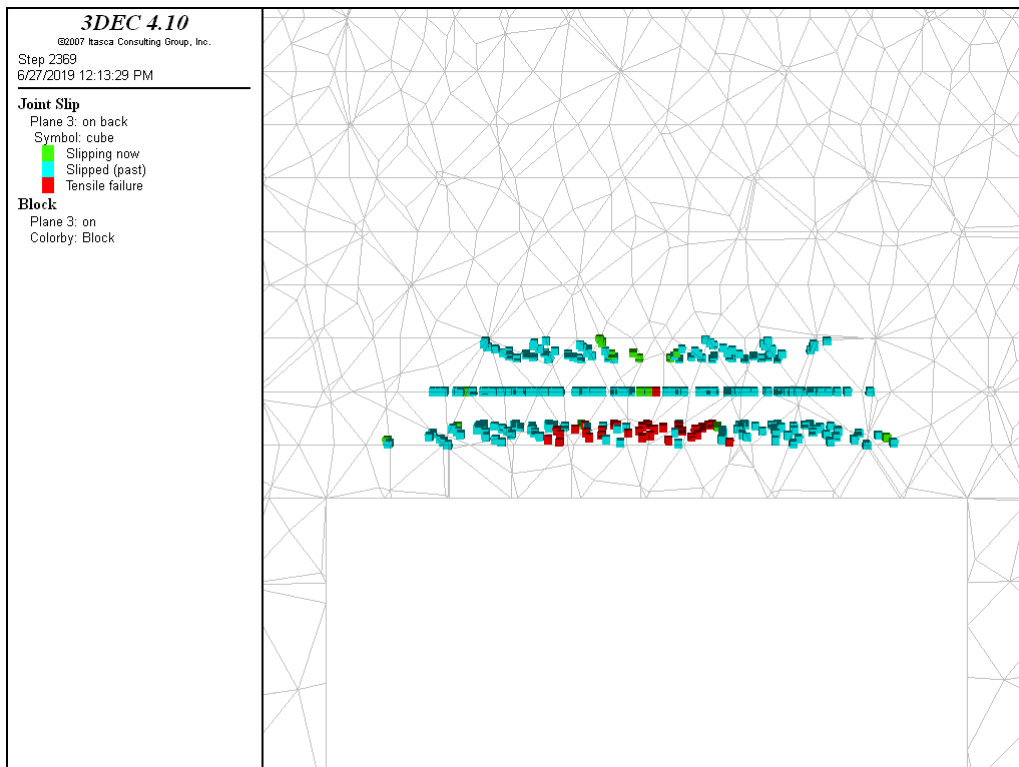
Εικόνα 5.22 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος 6m

Για $\phi=20$ και πλάτος 6m υπάρχει αποκόλληση μεταξύ 1^{ου} 2^{ου} και 3^{ου} στρώματος ενώ υπάρχει ολίσθηση μέχρι το 8 στρώμα.



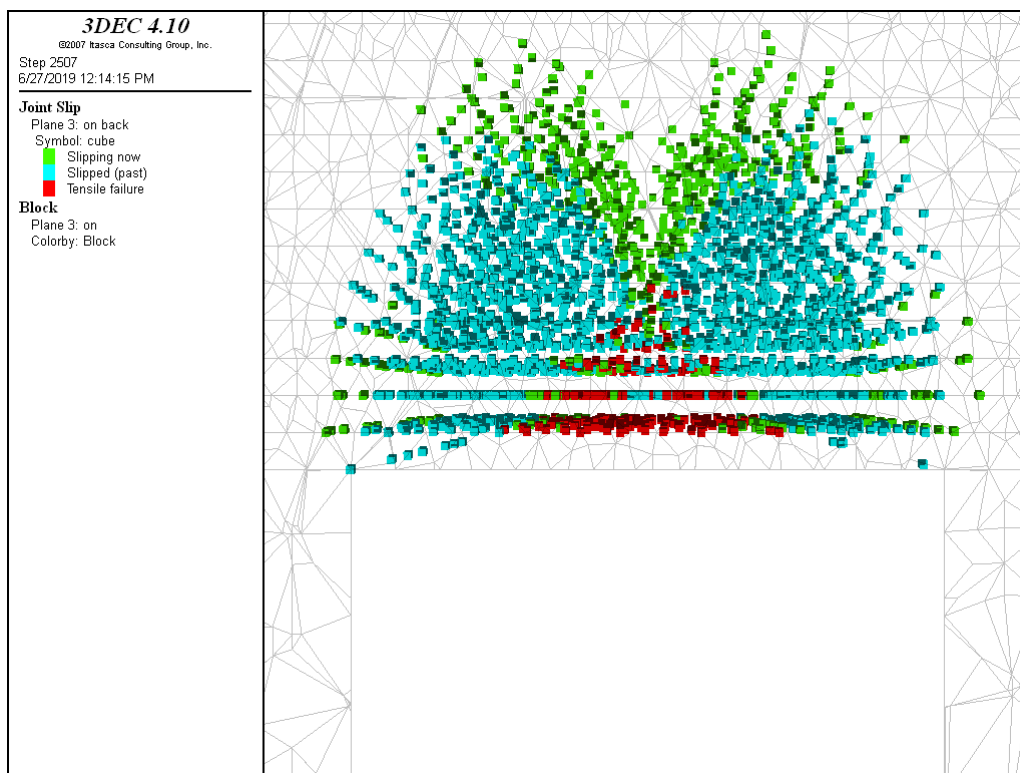
Εικόνα 5.23 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\varphi=30$ και πλάτος 6m

Για $\varphi=30$ συνεχίζει να υπάρχει αποκόλληση μεταξύ των τριών πρώτων στρωμάτων αλλά υπάρχει μείωση της ολίσθησης αφού ολισθαίνουν μέχρι το 5^ο στρώμα.



Εικόνα 5.24 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\varphi=40$ και πλάτος 6m

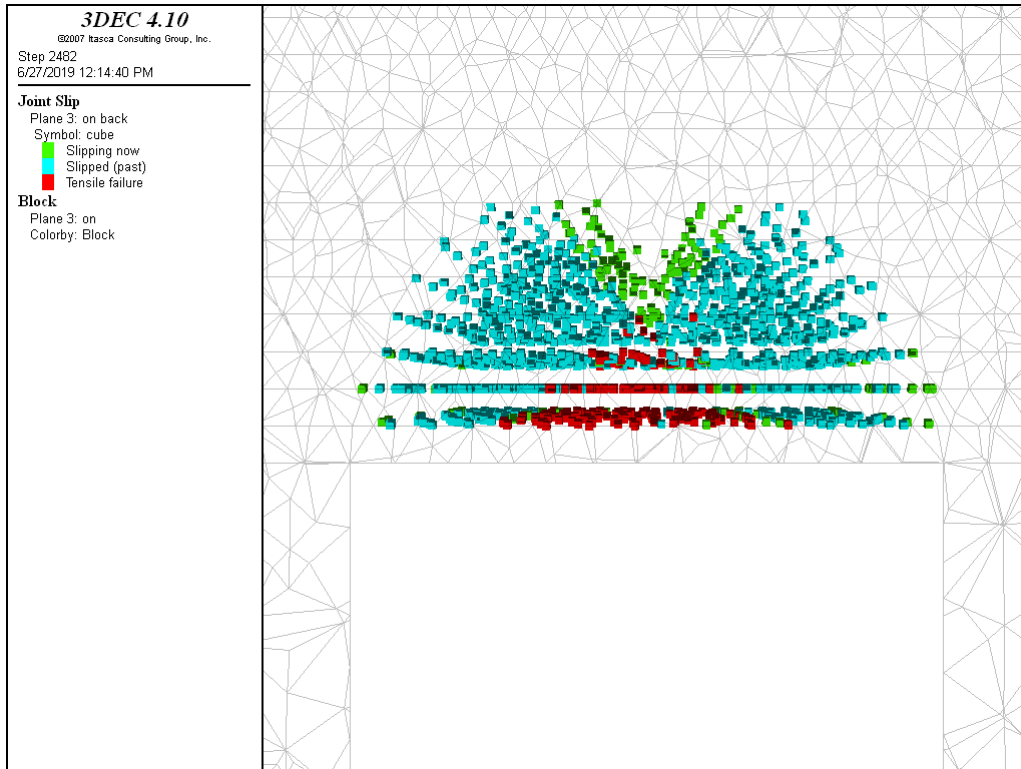
Για $\phi=40$ υπάρχει ολίσθηση των στρωμάτων μέχρι και του τρίτου ενώ η αποκόλληση παραμένει μέχρι το 2^ο στρώμα από το τρίτο.



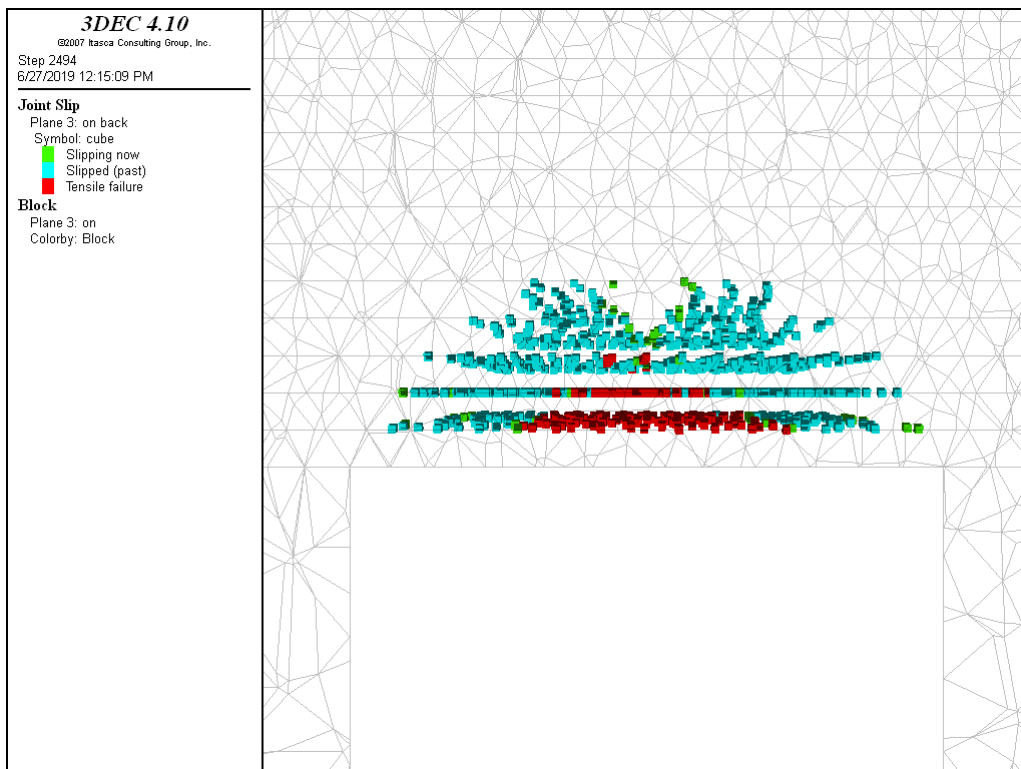
Εικόνα 5.25 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος 8m

Η αποκόλληση των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος θαλάμου 8m, φτάνει μέχρι το 5^ο στρώμα ενώ ολισθαίνουν τα 11 πρώτα στρώματα. Αυξάνοντας την γωνία τριβής σε $\phi=30$, υπάρχει αποκόλληση από το 4^ο στρώμα και κάτω ενώ η ολίσθηση περιορίζεται έως το 7^ο στρώμα. Για $\phi=40$ μειώνεται κι άλλο η αποκόλληση, ως το 3^ο στρώμα και η ολίσθηση που φθάνει έως το 5^ο στρώμα.

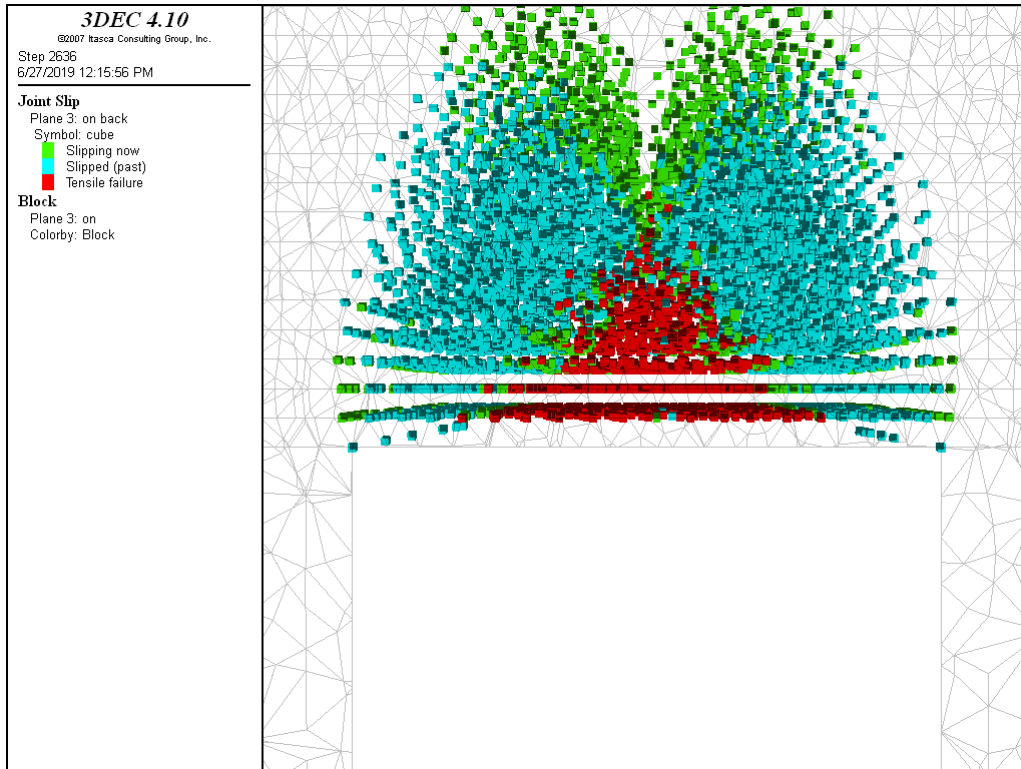
Για πλάτος θαλάμου ίσο με 10m και γωνία τριβής $\phi=20$, προκαλείται αποκόλληση μέχρι έως το 8^ο στρώμα και ολίσθηση έως το 15^ο. Με γωνία τριβής $\phi=30$ η αποκόλληση φθάνει έως το 6^ο στρώμα και η ολίσθηση περιορίζεται μέχρι το 10^ο στρώμα. Τέλος για $\phi=40$ αποκολλόνται τα στρώματα μέχρι και το 4^ο ενώ η ολίσθηση φτάνει μέχρι και το 7^ο.



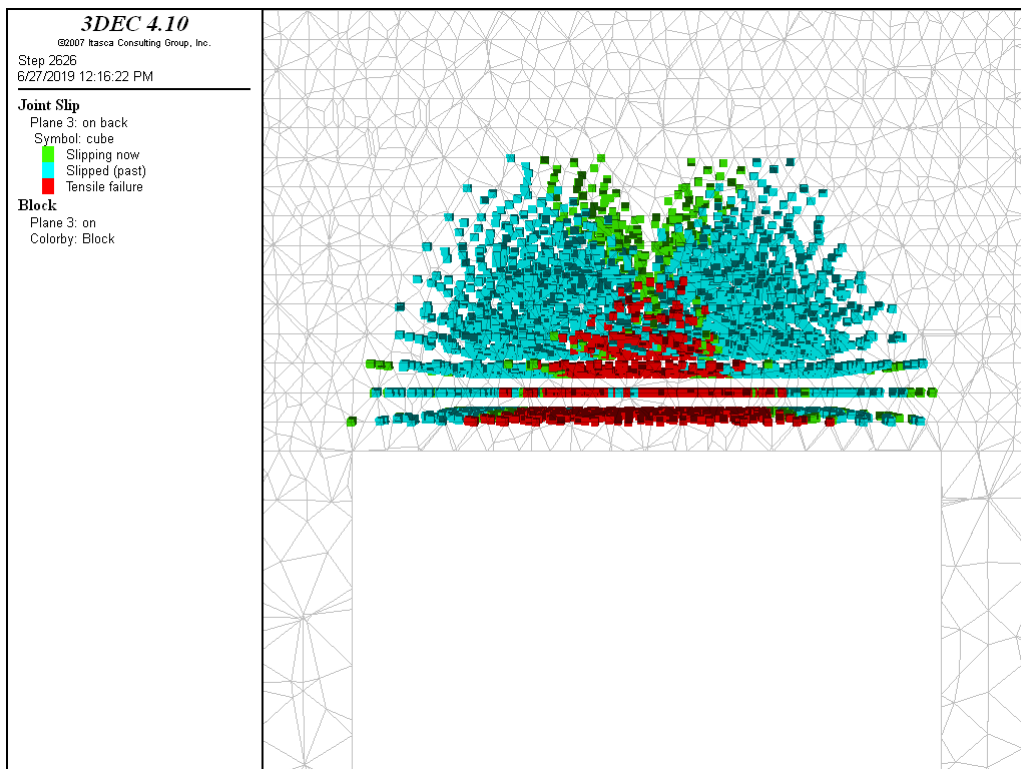
Εικόνα 5.26 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\varphi=30$ και πλάτος 8m



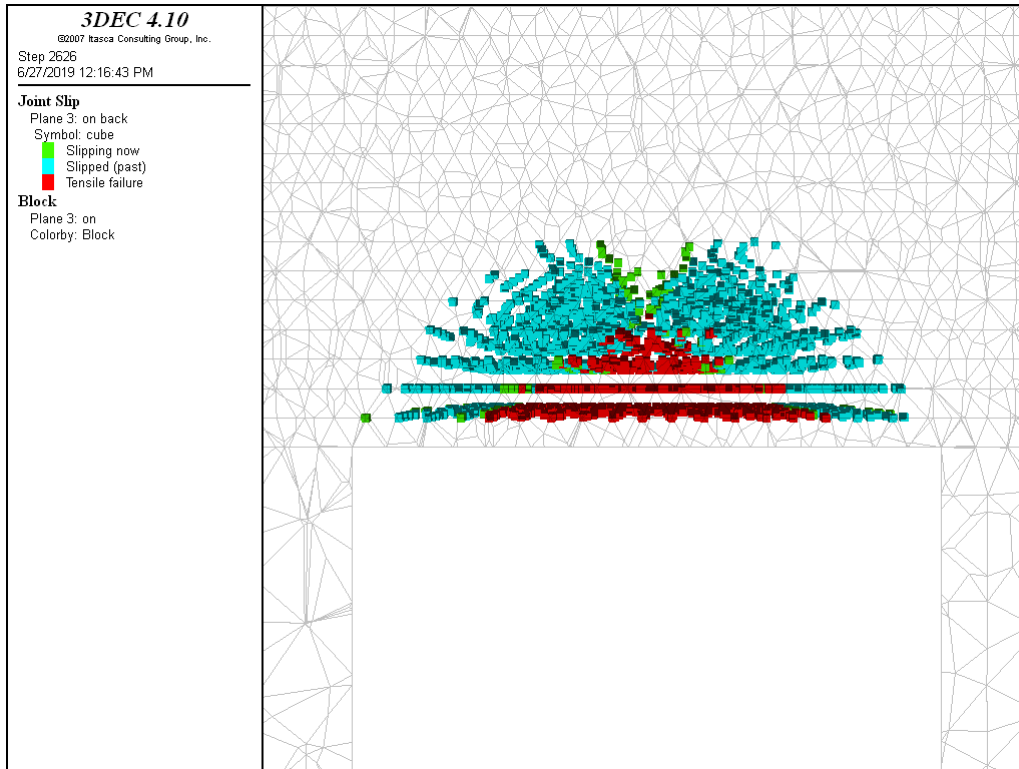
Εικόνα 5.27 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\varphi=40$ και πλάτος 8m



Εικόνα 5.28 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις για $\phi=20$ και πλάτος 10m

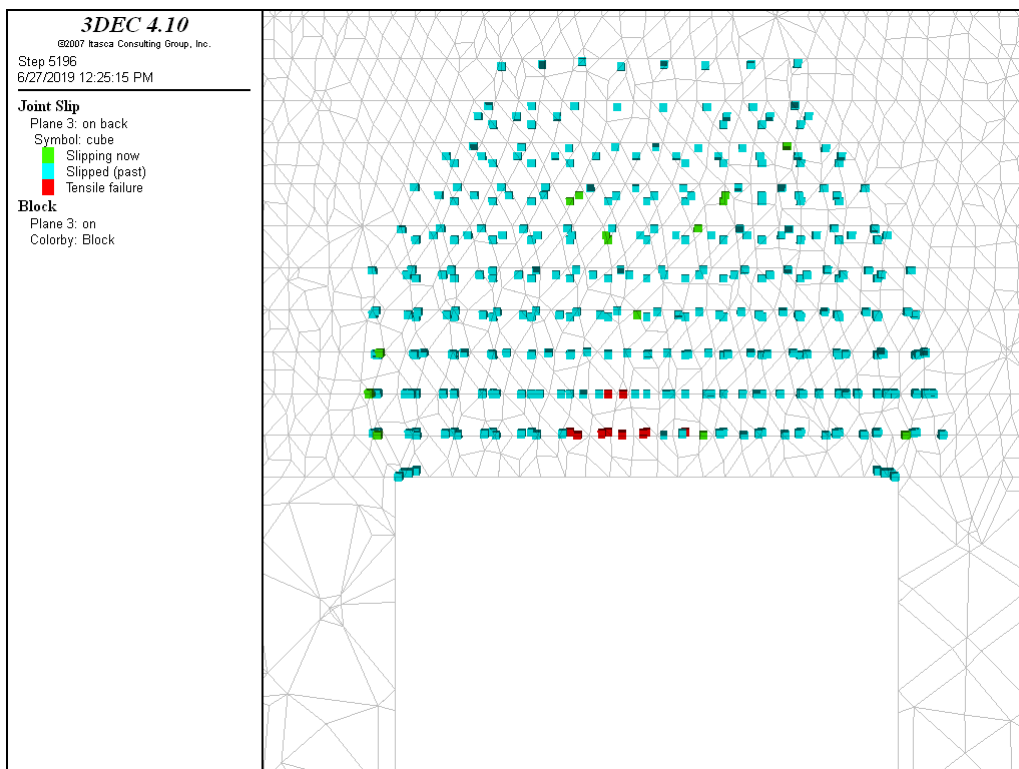


Εικόνα 5.29 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις για $\phi=30$ και πλάτος 10m



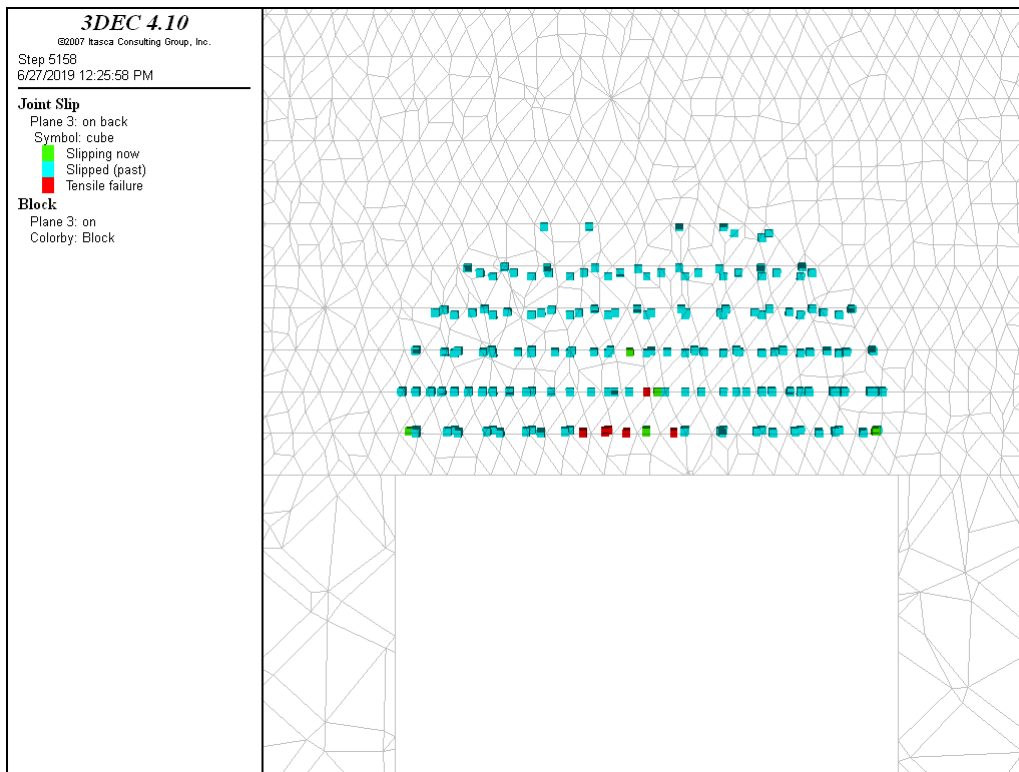
Εικόνα 5.30 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις για $\phi=40$ και πλάτος 10m

Για το δεύτερο στάδιο κατά μήκος της διεύθυνσης στο μέσο του στύλου.



Εικόνα 5.31 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=20$ και πλάτος 6m στο 2ο στάδιο

Στο 2^ο στάδιο για πλάτος θαλάμου 6m και $\phi=20$ υπάρχει αποκόλληση μεταξύ 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} στρώματος και ολίσθηση μέχρι το 10^ο στρώμα.

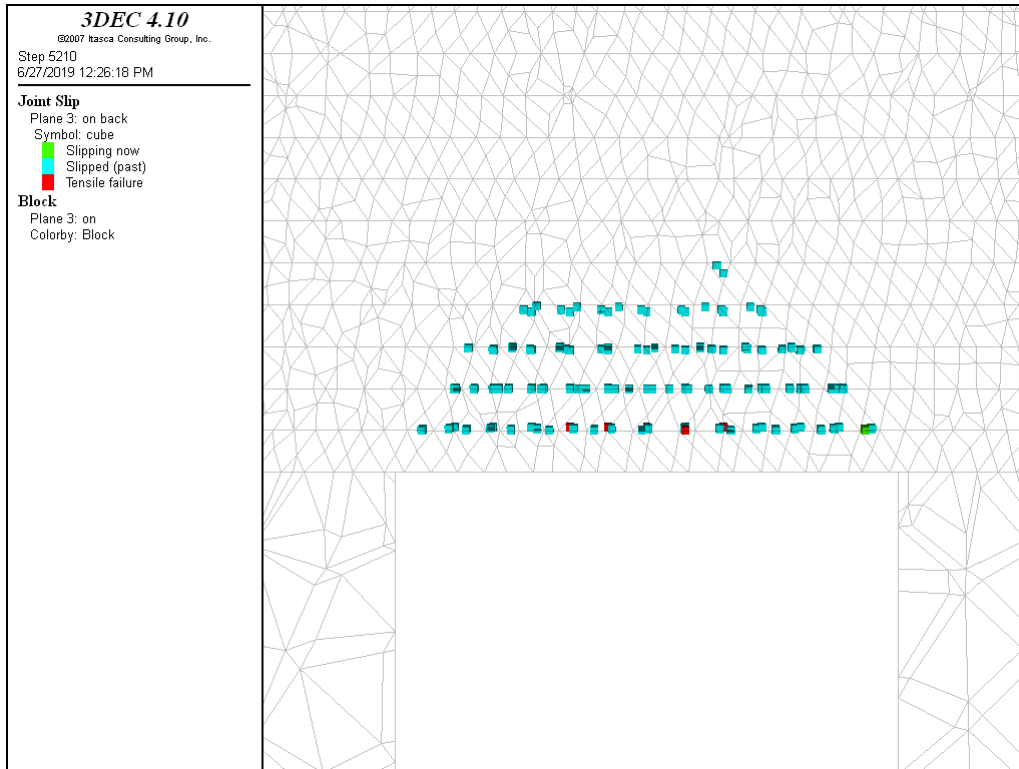


Εικόνα 5.32 Ολισθήσεις και Αποκόλλσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=30$ και πλάτος 6m

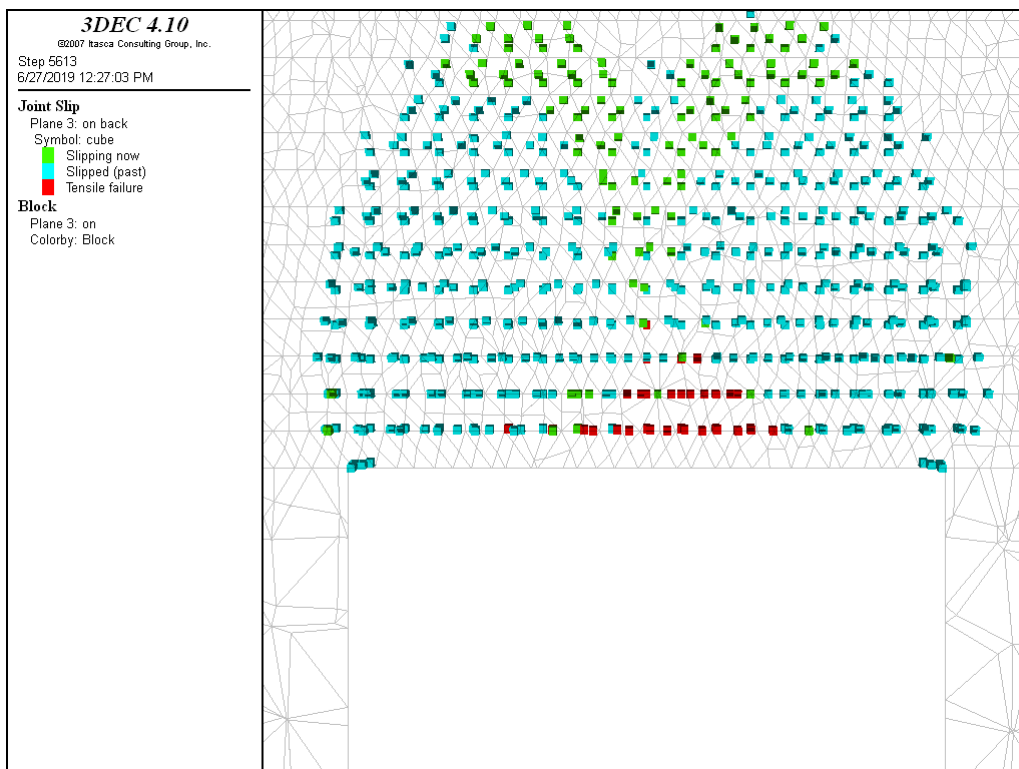
Για $\phi=30$ η αποκόλληση δεν αλλάζει, μειώνονται όμως τα στρώματα που ολισθαίνουν καθώς η ολίσθηση σταματάει στο 6^ο στρώμα. Για $\phi=40$ φαίνεται να υπάρχει αποκόλληση μόνο μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} στρώματος και ολίσθηση μέχρι το 5^ο στρώμα.

Για πλάτος 8m, $\phi=20$ υπάρχει αποκόλληση των στρωμάτων μέχρι το 4^ο και ολίσθηση μέχρι το 12^ο στρώμα. Για $\phi=30$ μειώνεται η αποκόλληση μέχρι το 3^ο στρώμα και ολίσθηση μέχρι το 8^ο και συνεχίζεται η μείωση για $\phi=40$, όπου αποκολλείται μέχρι και το 2^ο στρώμα και ολισθαίνει μέχρι και το 6^ο.

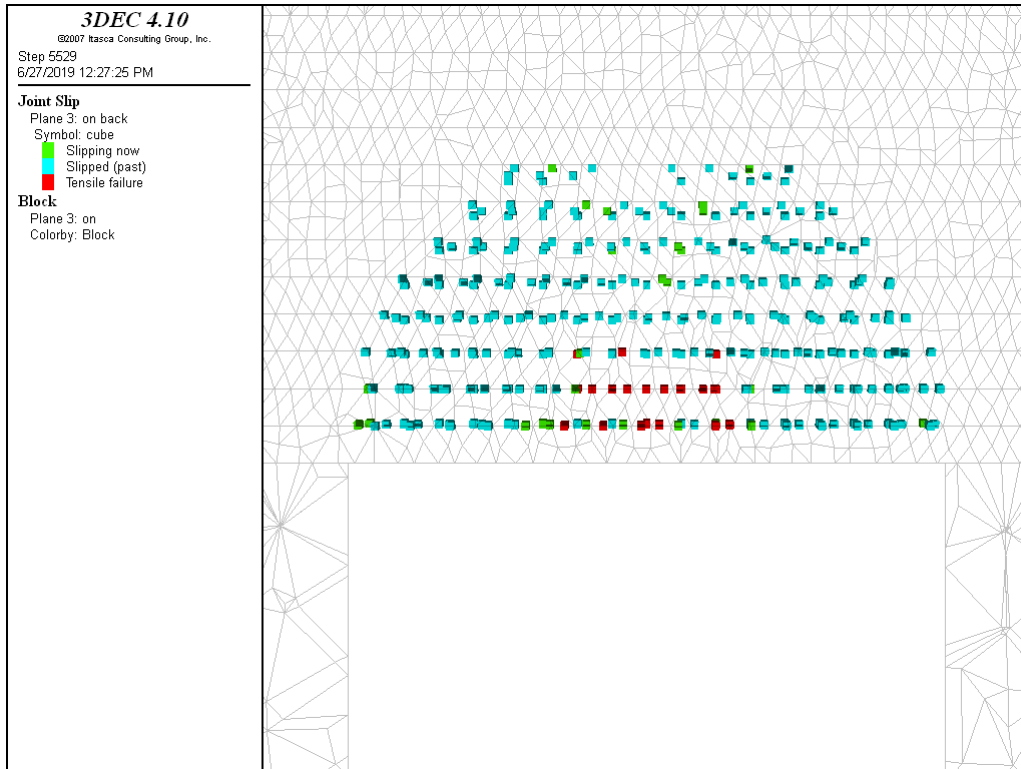
Τέλος, για πλάτος θαλάμου 10m και $\phi=20$, υπάρχει αποκόλληση μέχρι το 8^ο στρώμα και ολίσθηση μέχρι το 17^ο, για $\phi=30$ υπάρχει αποκόλληση μέχρι το 5^ο και ολίσθηση μέχρι το 11^ο στρώμα και για $\phi=40$ υπάρχει αποκόλληση μέχρι το 3^ο στρώμα και ολίσθηση μέχρι το 8^ο.



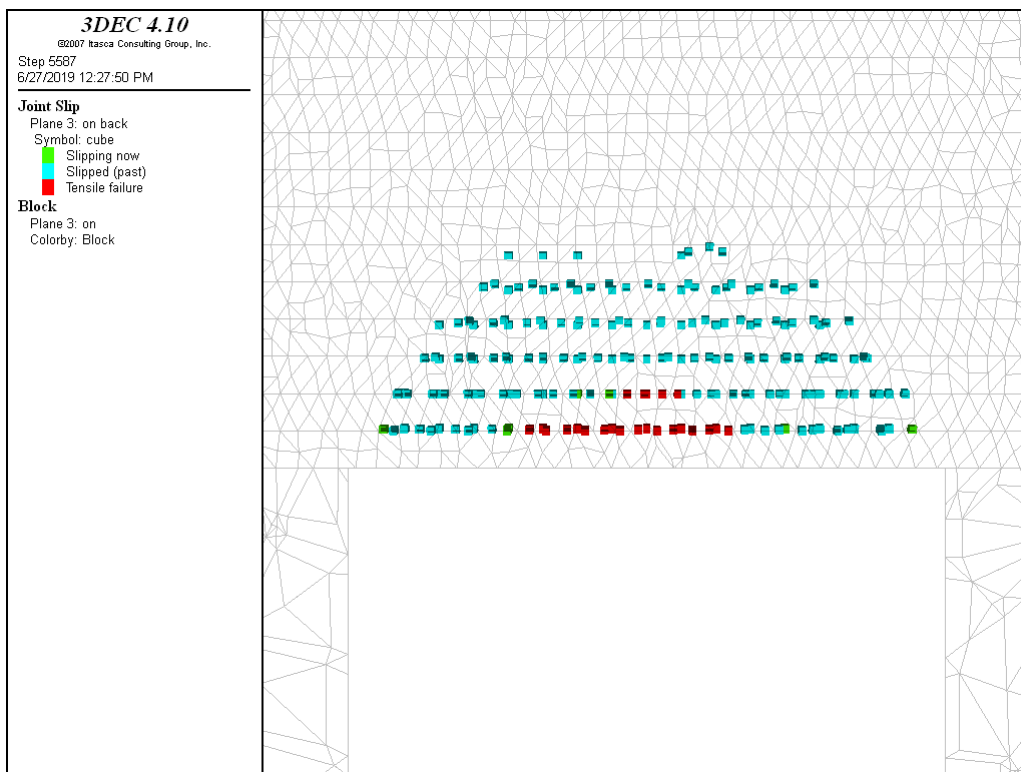
Εικόνα 5.33 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=40$ και πλάτος 6m



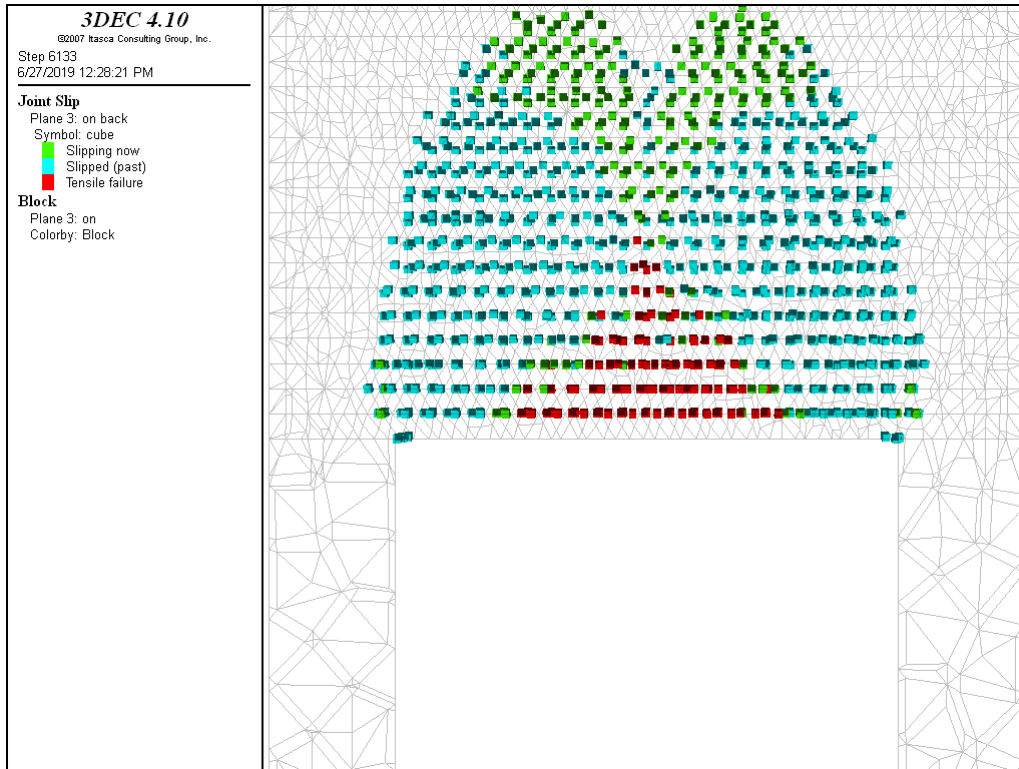
Εικόνα 5.34 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=20$ και πλάτος 8m



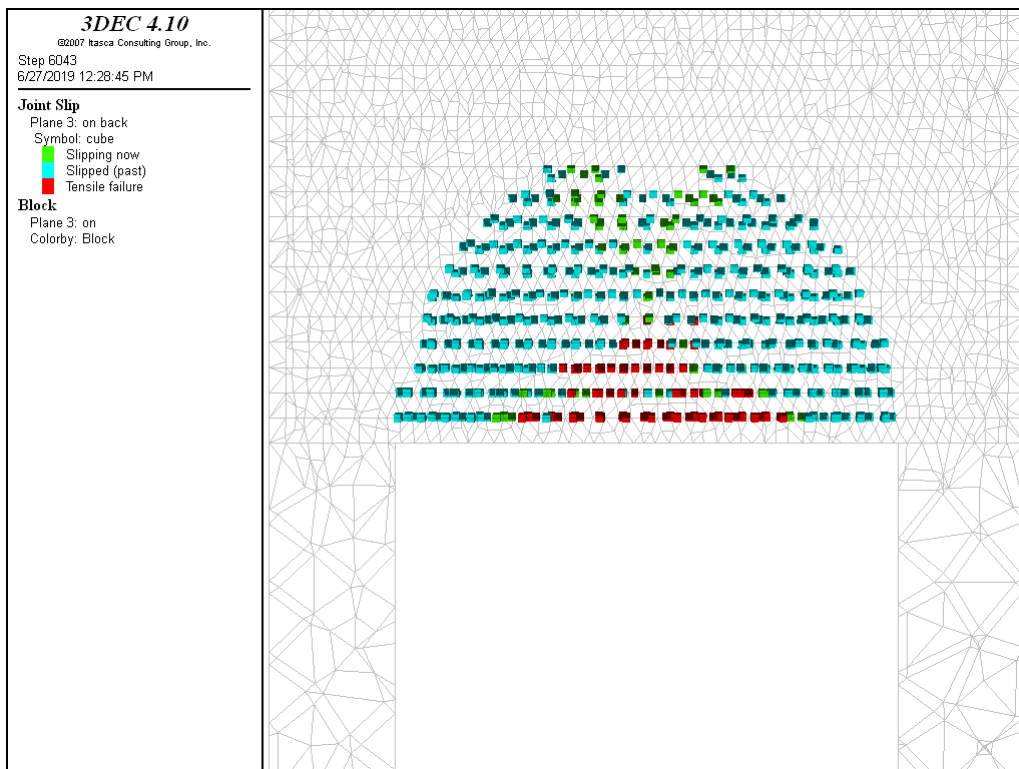
Εικόνα 5.35 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\varphi=30$ και πλάτος 8m



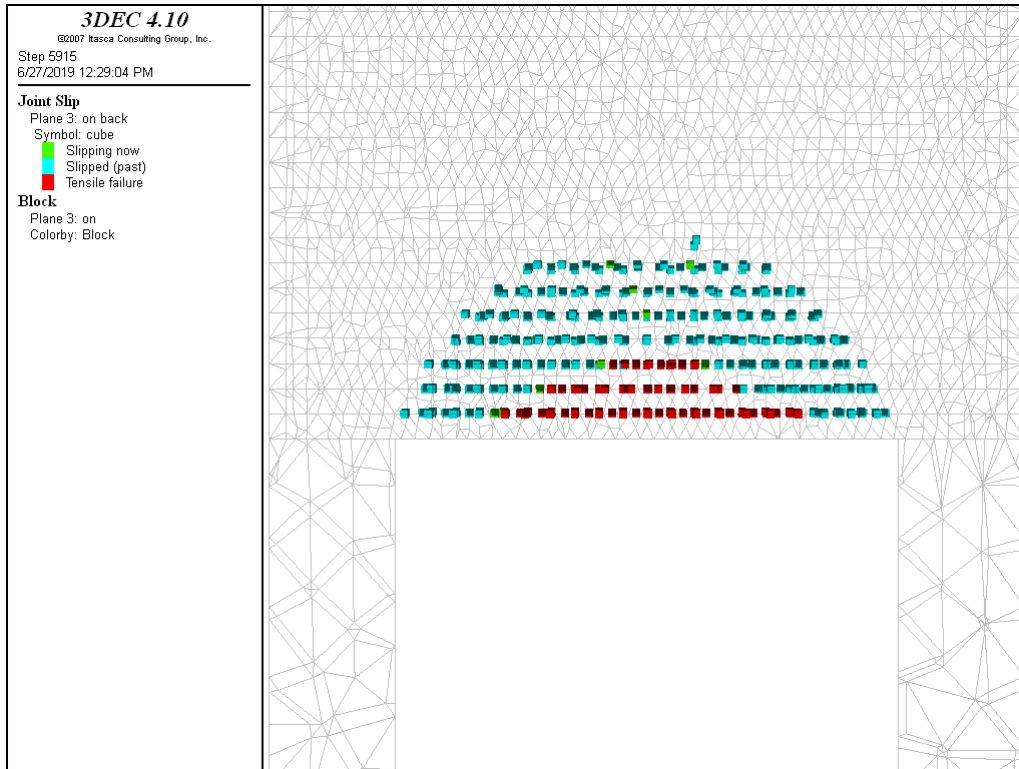
Εικόνα 5.36 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\varphi=40$ και πλάτος 8m



Εικόνα 5.37 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=20$ και πλάτος 10m

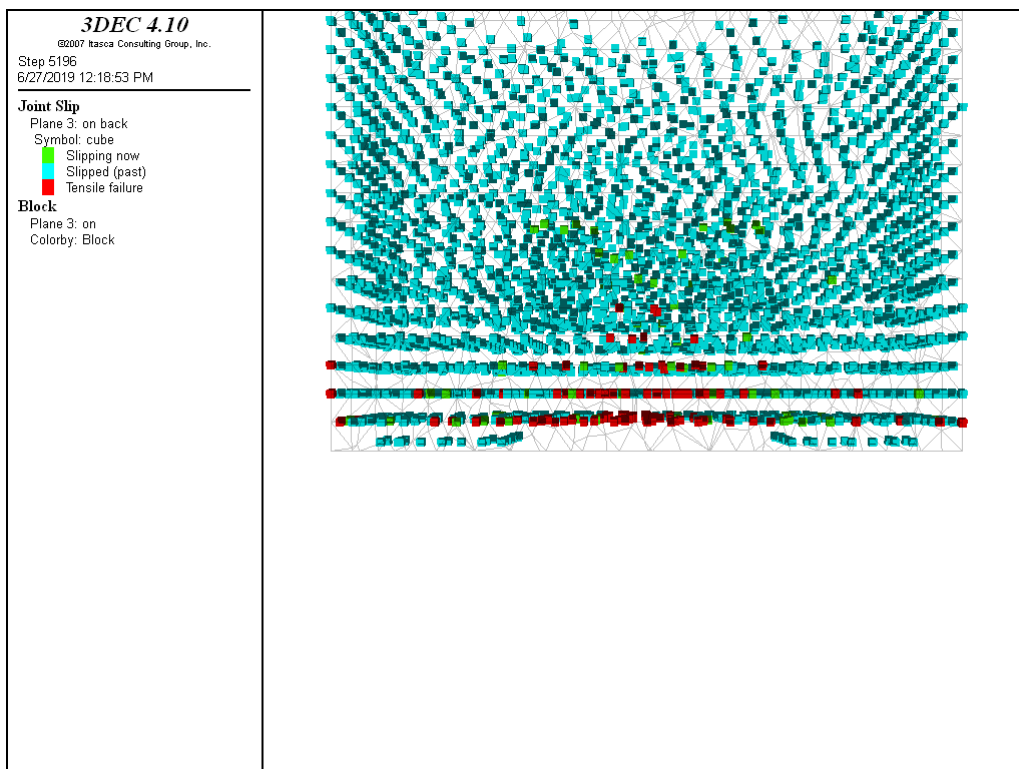


Εικόνα 5.38 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων στο 2ο στάδιο για $\phi=30$ και πλάτος 10m



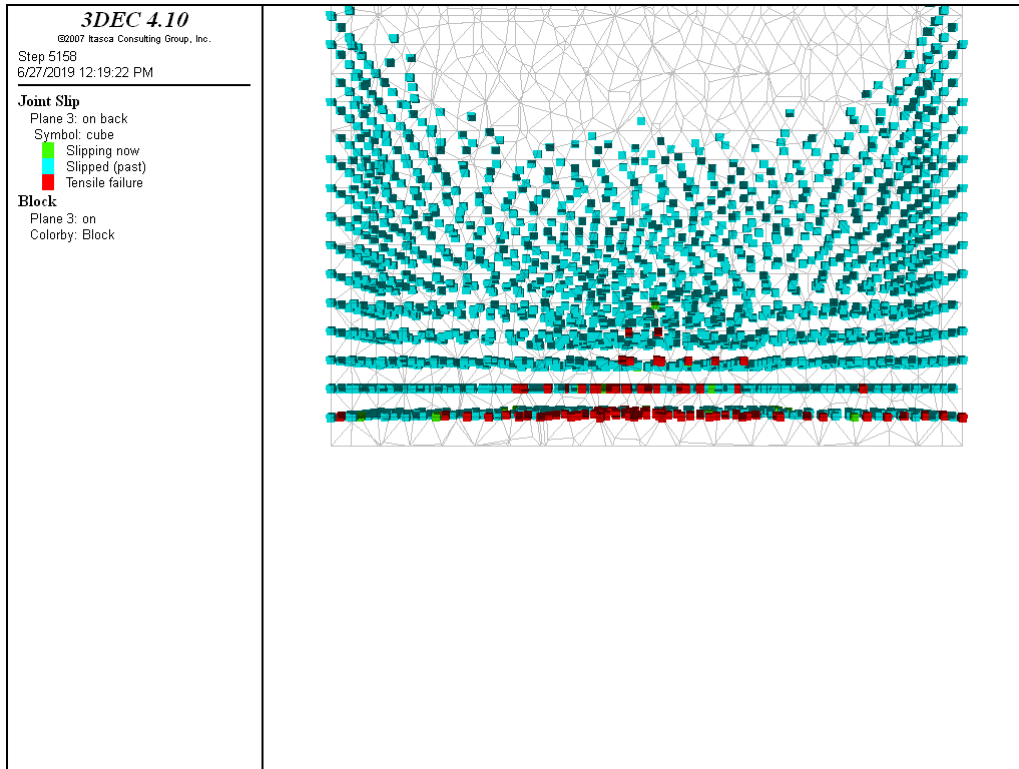
Εικόνα 5.39 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις των στρωμάτων για $\phi=40$ και πλάτος 10m

Και για το δεύτερο στάδιο στη διεύθυνση του κέντρου της διασταύρωσης



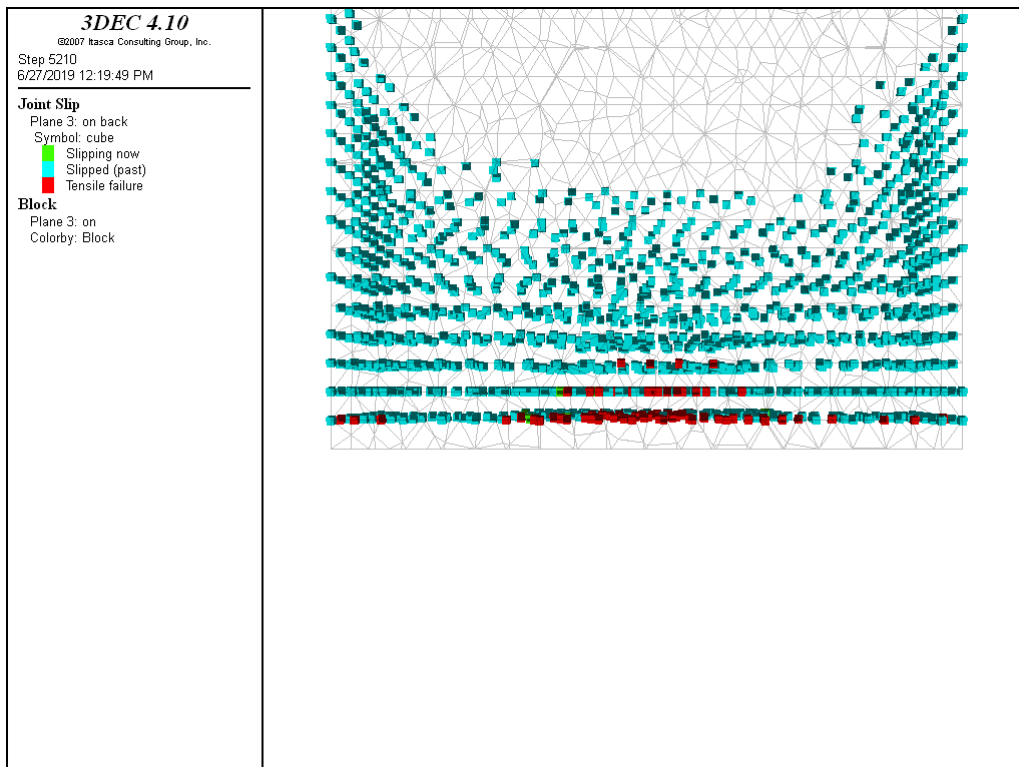
Εικόνα 5.40 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$ και πλάτος 6m

Για πλάτος θαλάμου 6m και $\phi=20$ υπάρχει αποκόλληση μέχρι το 5^ο στρώμα ενώ η ολίσθηση φθάνει μέχρι το 15^ο στρώμα.



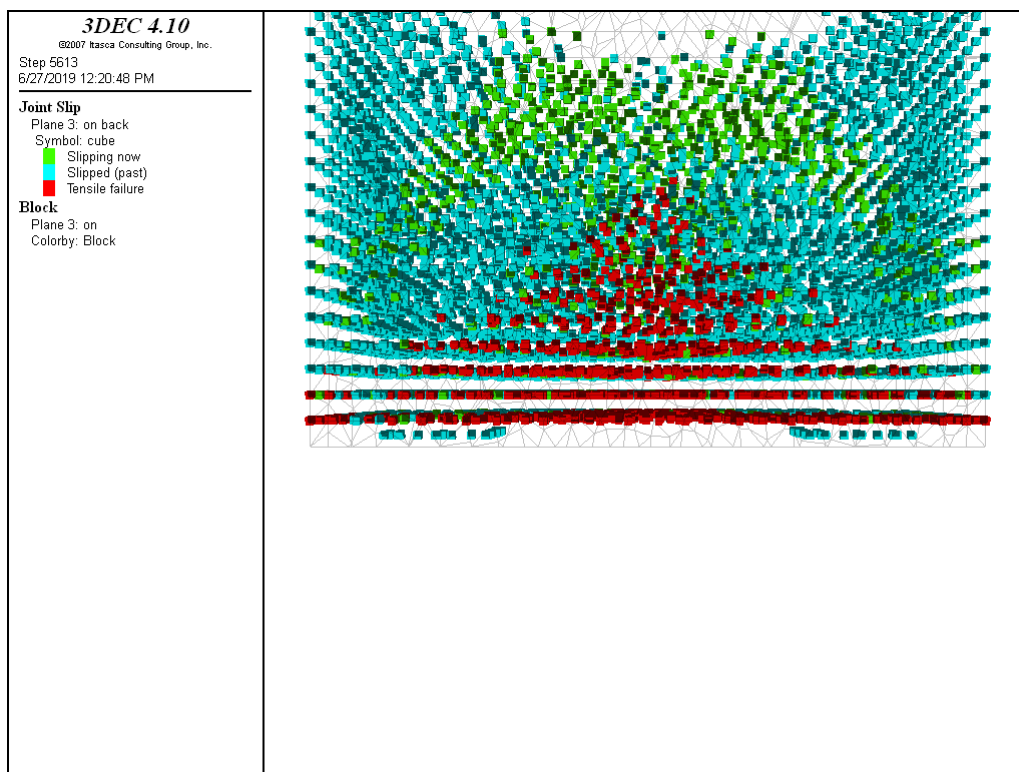
Εικόνα 5.41 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\varphi=30$ και πλάτος 6m

Για $\varphi=30$ η αποκόλληση περιορίζεται στο 4^ο στρώμα και ολίσθηση παραμένει έως το 15^ο στρώμα.



Εικόνα 5.42 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\varphi=40$ και πλάτος 6m

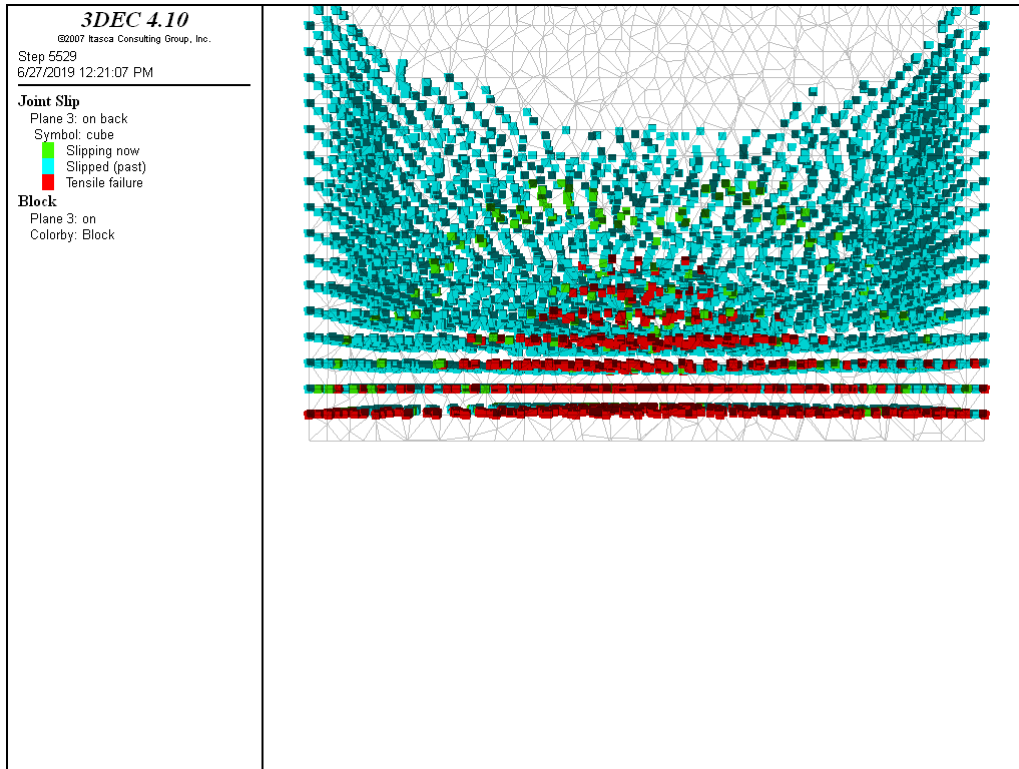
Για $\phi=40$, παραμένει η ολίσθηση μέχρι το 15° , αλλά μειώνεται η αποκόλληση μέχρι το 3° στρώμα.



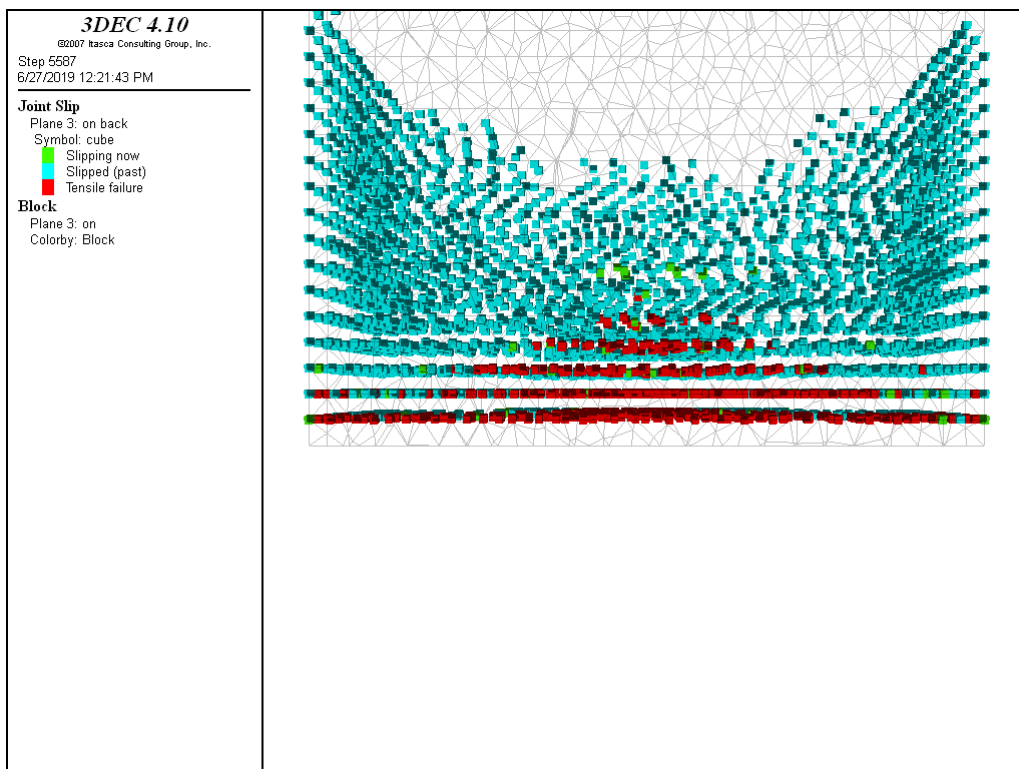
Εικόνα 5.43 Ολισθήσεις και Αποκόλλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$ και πλάτος $8m$

Για πλάτος $8m$ και $\phi=20$, η αποκόλληση φθάνει μέχρι το 11° στρώμα και η ολίσθηση μέχρι το 17° στρώμα. Για $\phi=30$, η αποκόλληση μειώνεται στο 7° στρώμα ενώ τα στρώματα που ολισθαίνουν δεν αλλάζουν. Για $\phi=40$ ολισθαίνουν 16 στρώματα και αστοχούν σε αποκόλληση τα πρώτα 7 .

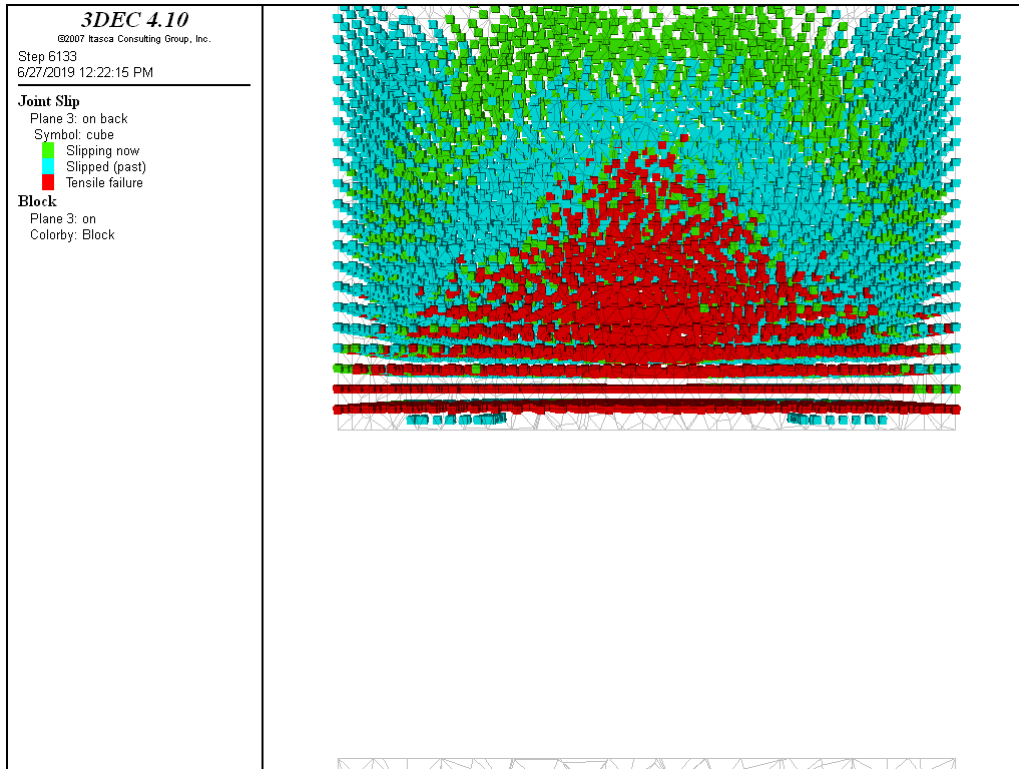
Για πλάτος θαλάμου $10m$ και $\phi=20$ η ολίσθηση φτάνει μέχρι το 23° στρώμα και η αποκόλληση μέχρι το 14° , ενώ για $\phi=30$ μειώνεται στα 11 στρώματα και η ολίσθηση στα 19 . Τέλος για $\phi=40$ η αποκόλληση φτάνει μέχρι και το 8° στρώμα ενώ η ολίσθηση μέχρι το 18° .



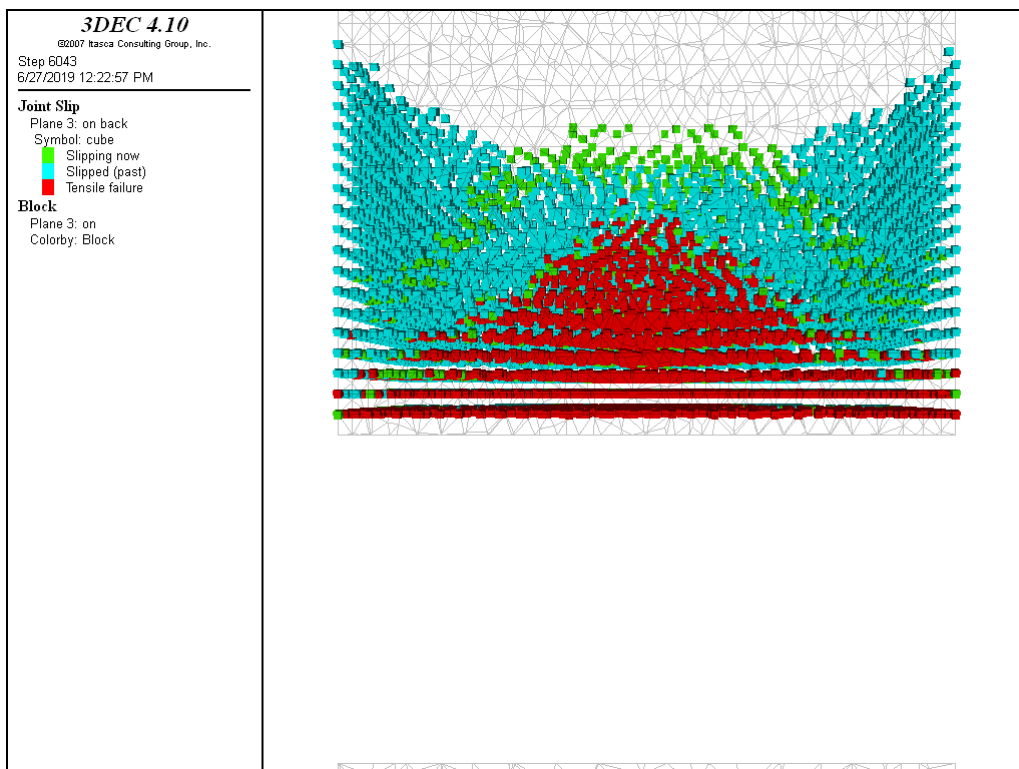
Εικόνα 5.44 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=30$ και πλάτος 8m



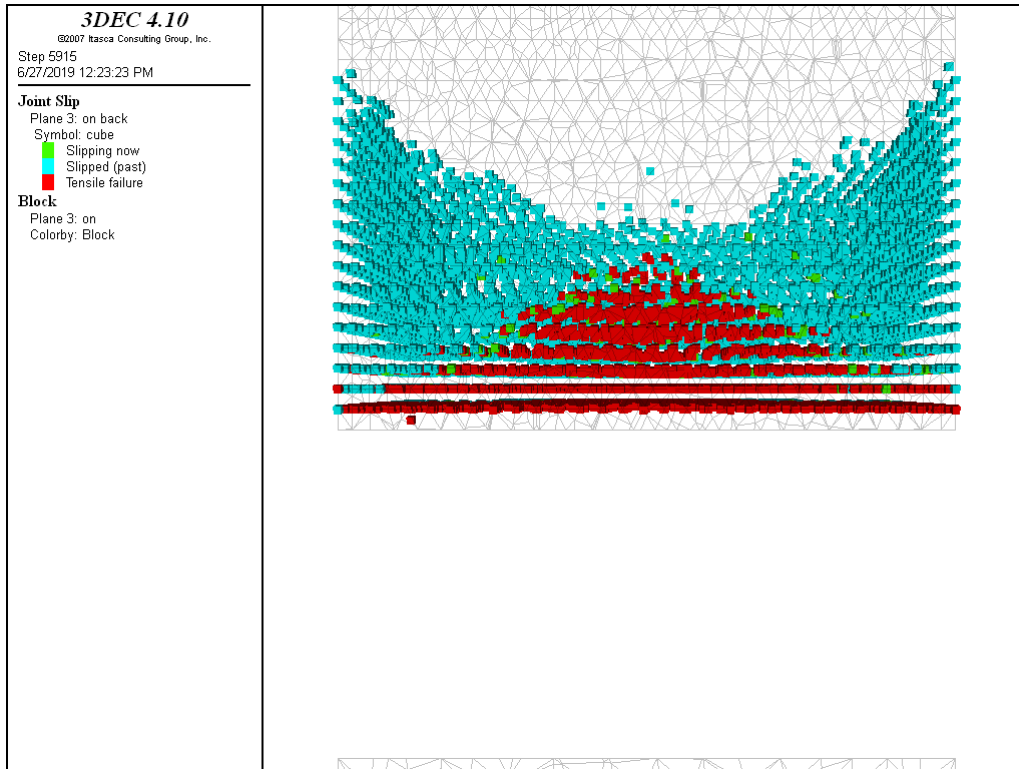
Εικόνα 5.45 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=40$ και πλάτος 8m



Εικόνα 5.46 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=20$ και πλάτος 10m



Εικόνα 5.47 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=30$ και πλάτος 10m



Εικόνα 5.48 Ολισθήσεις και Αποκολλήσεις στο μέσο της διασταύρωσης για $\phi=40$ και πλάτος 10m

Συνοπτικά για κάθε θέση το ύψος της αποκόλλησης και της ολίσθησης φαίνονται στους παρακάτω πίνακες :

Πίνακας 5.5 Ύψος ζώνης χαλάρωσης στο μέσο του θαλάμου ανά περίπτωση για το πρώτο σταδιο

Πλάτος	6m			8m			10m		
	20	30	40	20	30	40	20	30	40
ϕ	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Ύψος Αποκόλλησης (m)	1,5	1,5	1	2,5	2	1,5	4	3	2
Ύψος Ολίσθησης (m)	4	2,5	1,5	5,5	3,5	2,5	7,5	5	3,5

Πίνακας 5.6 Ύψος ζώνης χαλάρωσης στον άξονα που διαπερνά τα κέντρα των στύλων, ανά περίπτωση για το δεύτερο στάδιο

Πλάτος	6m			8m			10m			
	φ	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Ύψος Αποκόλλησης (m)	1,5	1,5	1	2	1,5	1	4	2,5	1,5	
Ύψος Ολίσθησης (m)	5	3	2,5	6	4	3	8,5	5,5	4	

Πίνακας 5.7 Ύψος ζώνης χαλάρωσης στο μέσο της διασταύρωσης ανά περίπτωση για το δεύτερο στάδιο

Πλάτος	6m			8m			10m			
	φ	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Ύψος Αποκόλλησης (m)	2,5	2	1,5	5,5	3,5	3,5	7	5,5	4	
Ύψος Ολίσθησης (m)	7,5	7,5	7,5	8,5	8,5	8	11,5	9,5	9	

5.2. 2^η Σειρά Αριθμητικών Προσομοιωμάτων

Με τη δεύτερη σειρά αριθμητικών προσομοιωμάτων επιχειρείται η προσομοίωση της συμπεριφοράς μονοστρωματικής οροφής. Η ανάλυση έγινε σε δύο στάδια, όπου στο πρώτο θεωρείται διάνοιξη σε μία διεύθυνση και στο δεύτερο στάδιο θεωρείται διάνοιξη εγκάρσια της πρώτης. Ο άξονας συμμετρίας του προσομοιώματος βρίσκεται στο μέσο της διασταύρωσης όπως περιγράφηκε στην Εικόνα 5.2. Για την δημιουργία του προσομοιώματος θεωρήσαμε πως η οροφή συμπεριφέρεται ως αμφίπακτη στην περιοχή που βρίσκεται πάνω από τον στύλο. Η ανάλυση που γίνεται είναι χωρίς επιπρόσθετο φορτίο λόγω υπερκειμένων, ενώ ασκείται μόνο το βάρος της στρώσης. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της οροφής που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στους πίνακες Πίνακας 5.8, Πίνακας 5.9.

Γεωμετρικές Παράμετροι

Πίνακας 5.8 Γεωμετρικές Παράμετροι 2ης Σειράς

	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση	3 ^η Περίπτωση
Πλάτος Θαλάμου	6m	8m	10m
Πλάτος Στύλου	5m		
Πάχος Στρώσης	0.5m		

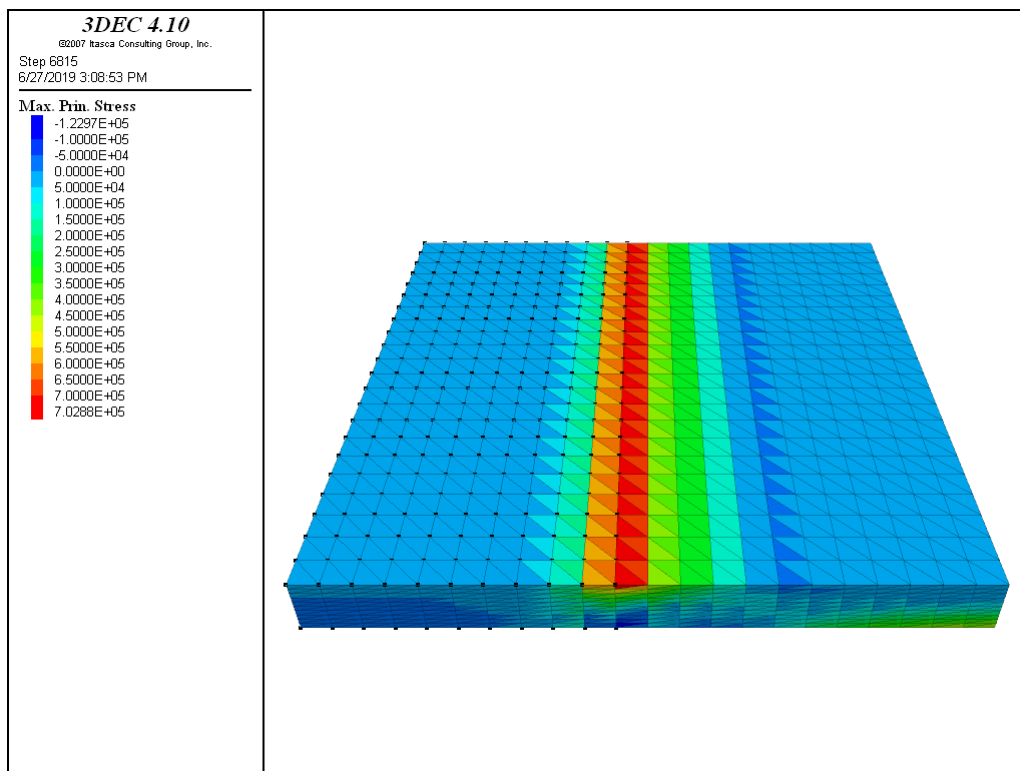
Μηχανικές Παράμετροι

Πίνακας 5.9 Μηχανικές Παράμετροι Πετρώματος 2ης Σειράς

	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Μοναδιαίο Βάρος	γ	25	kN/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	E	30	GPa
Λόγος Poisson	ν	0.25	

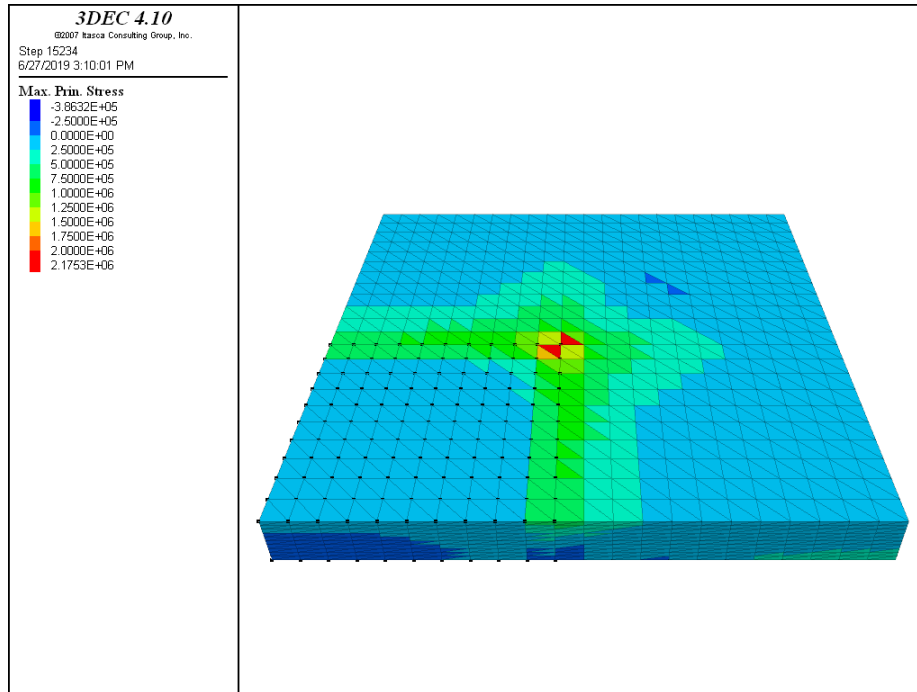
5.2.1. Αποτελέσματα Κατανομής Τάσεων

Στο πρώτο στάδιο βρέθηκε πως η μέγιστη κύρια τάση αναπτύσσεται στην παρειά του θαλάμου και συγκεκριμένα στο άνω όριο και μειώνεται όσο πλησιάζει προς το κέντρο του θαλάμου. Στην Εικόνα 5.49 φαίνεται χαρακτηριστικά η ανάπτυξη των τάσεων. Η περιοχή με τις μαύρες κουκίδες αντιπροσωπεύει την πάκτωση.



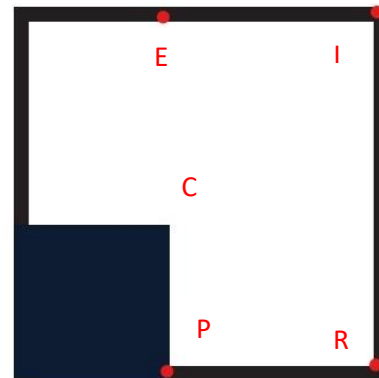
Εικόνα 5.49 Κατανομή Κύριας Τάσης στο 1ο στάδιο

Στο δεύτερο στάδιο η μέγιστη κύρια τάση αναπτύσσεται στην γωνία του στύλου, ενώ έχει αυξημένη τιμή στις παρειές του στύλου και επεκτείνεται στους άξονες των ορίων του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.50



Εικόνα 5.50 Κατανομή Κύριας Τάσης στο 2ο στάδιο

Για την καλύτερη κατανόηση της μεταβολής των κύριων τάσεων από το πρώτο στάδιο στο δεύτερο, υπολογίστηκαν δείκτες με βάση τις μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σε κάθε περίπτωση. Οι δείκτες αυτοί είναι :



Εικόνα 5.51 Θέσεις Μέτρησης Τάσης και Μετατόπισης

$$f_1 = \frac{\sigma_{I,2} - \sigma_{R,2}}{\sigma_{R,2}} \quad (5-1)$$

$$f_2 = \frac{\sigma_{P,2} - \sigma_{P,1}}{\sigma_{P,2}} \quad (5-2)$$

$$f_3 = \frac{\sigma_{E,2} - \sigma_{P,1}}{\sigma_{P,1}} \quad (5-3)$$

$$f_4 = \frac{\sigma_{R,2} - \sigma_{R,1}}{\sigma_{R,1}} \quad (5-4)$$

$$f_5 = \frac{\sigma_{I,1} - \sigma_{R,1}}{\sigma_{R,1}} \quad (5-5)$$

$$f_6 = \frac{\sigma_{C,2} - \sigma_{P,1}}{\sigma_{P,1}} \quad (5-6)$$

Όπου $\sigma_{i,j}$: η μέγιστη κύρια τάση, με i το σημείο υπολογισμού της τάσης και j το στάδιο της εκσκαφής.

I : Στο κέντρο της διασταύρωσης

R : Στο μέσο του θαλάμου

P : Στο μέσο της παρειάς του στύλου

E : Στην προέκταση της παρειάς του στύλου στο μέσο του θαλάμου

C : Στη γωνία του στύλου

Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης που υπολογίσθηκαν για κάθε σημείο βρίσκονται στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10 Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης για κάθε περίπτωση

σ_1 (MPa)	Wo=6		Wo=8		Wo=10	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
P	0.63	0.65	1.12	1.22	1.76	2.01
E	-	0.48	-	0.84	-	1.33
I	-	0.50	-	0.87	-	1.36
R	0.44	0.47	0.75	0.83	1.15	1.31
C	-	2.18	-	4.24	-	7.28

Οι τιμές των δεικτών που υπολογίσθηκαν βρίσκονται στον Πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11 Δείκτες Μεταβολής Τάσεων

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
f_1	7.91%	4.93%	4.42%
f_2	3.96%	8.46%	14.40%
f_3	-23.12%	-25.41%	-24.71%
f_4	7.08%	10.02%	10.02%
f_5	15.55%	15.44%	18.16%
f_6	245.66%	277.69%	313.33%

Επίσης έγινε υπολογισμός της σ_x στις θέσεις της Εικόνα 5.51 για κάθε πλάτος θαλάμου. Τα διαγράμματα της κατανομής της σ_x βρίσκονται στο παράρτημα 7.4, 7.5

Για το πρώτο στάδιο προσεγγίστηκε και αριθμητικά η μέγιστη εφελκυστική τάση στη ακραία ίνα στην στήριξη σύμφωνα με τον τύπο :

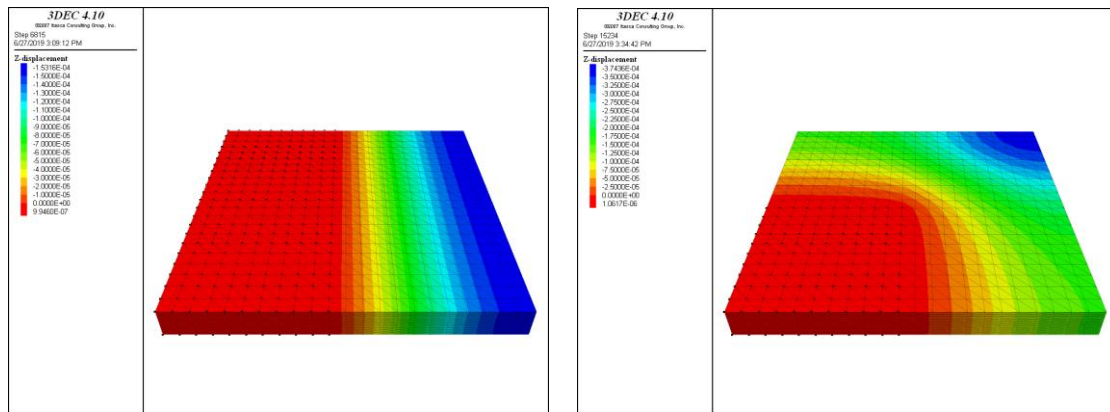
$$\sigma_{amax} = \frac{\gamma \cdot s^2}{2t} \quad (5-7)$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12 Αριθμητική Προσέγγιση Μέγιστης Εφελκυστικής Τάσης ανά περίπτωση

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
σ_{max} (MPa)	0.9	1.6	2.5

5.2.2. Αποτελέσματα Κατακόρυφης Μετατόπισης



Εικόνα 5.53 Κάμψη των προσομοιωμάτων της 2ης σειράς στο 1ο στάδιο

Εικόνα 5.52 Κάμψη των προσομοιωμάτων της 2ης σειράς στο 2ο στάδιο

Η βύθιση της οροφής στο πρώτο στάδιο, όπως αναλύθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο έχει εξετασθεί αναλυτικά για δεκαετίες. Όπως ήταν αναμενόμενο η μέγιστη βύθιση βρίσκεται στο μέσο του θαλάμου Εικόνα 5.53. Στο δεύτερο στάδιο η μέγιστη βύθιση βρίσκεται στο κέντρο της διασταύρωσης έχοντας τιμή κατά πολύ μεγαλύτερη του 1^{ου} σταδίου Εικόνα 5.52.

Όπως για τις κύριες τάσεις, έτσι και για την μέγιστη βύθιση, υπολογίστηκαν δείκτες μεταβολής για το κέντρο της διασταύρωσης και το κέντρο του θαλάμου.

$$f_6 = \frac{\delta_{I,2} - \delta_{R,2}}{\delta_{R,2}} \quad (5-8)$$

$$f_7 = \frac{\delta_{I,2} - \delta_{R,1}}{\delta_{R,1}} \quad (5-9)$$

Οι μέγιστες τιμές της βύθισης που υπολογίσθηκαν για κάθε σημείο βρίσκονται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13 Οι τιμές της μέγιστης βύθισης ανά περίπτωση

δ_{\max} (mm)	Wo=6		Wo=8		Wo=10	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
I	-	0.37	-	1.10	-	2.62
R	0.15	0.17	0.44	0.51	1.03	1.27

Οι τιμές των δεικτών που υπολογίσθηκαν βρίσκονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14 Δείκτες Μεταβολής της μέγιστης βύθισης

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
f_6	124.03%	113.82%	106.74%
f_7	144.42%	147.51%	154.57%

Επίσης για το πρώτο στάδιο προσεγγίστηκε και αριθμητικά η κάμψη στο μέσο του θαλάμου σύμφωνα με τον τύπο (1-1).

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.15 Αριθμητική Προσέγγιση της μέγιστης κάμψης για το πρώτο στάδιο ανά περίπτωση

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
δ_{mid} (mm)	0.14	0.43	1.04

Επίσης βλέπουμε πως για ίσο πλάτος θαλάμων, μπορεί να προσεγγιστεί αριθμητικά η μέγιστη κάμψη στο μέσο της διασταύρωσης. Για την προσέγγιση θεωρούμε αμφίπακτη δοκό διαγώνια της διασταύρωσης με μήκος :

$$s' \cong s_o * 1,27 = s_o(\sqrt{2} - 0,17)$$

Και προκύπτει ο τύπος :

$$\delta_{\text{int,max}} \cong \delta_{\text{mid}} \cdot \sqrt{6} \quad (5-10)$$

Πίνακας 5.16 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώματος και αριθμητικής προσέγγισης για την μέγιστη βύθιση στο 2ο στάδιο

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
$\delta_{\text{int,max}}$ (mm)	0.35	1.11	2.71
3DEC (mm)	0.37	1.10	2.62

Τα προφίλ της βύθισης των προσομοιωμάτων στο δεύτερο στάδιο για κάθε πλάτος θαλάμου, φαίνονται στο παράρτημα 7.6. Οι διευθύνσεις υπολογισμού της κάμψης είναι 1) η ευθεία που συνδέει το κέντρο του στύλου με το κέντρο της διασταύρωσης (Intersection) και 2) η ευθεία που συνδέει το κέντρο του στύλου με το κέντρο του θαλάμου. (Room)

5.3. 3^η Σειρά Αριθμητικών Προσομοιωμάτων

Στην τρίτη σειρά αριθμητικών προσομοιωμάτων ακολουθήσαμε την ίδια στρατηγική όπως στην προσομοίωση μονοστρωματικής οροφής. Περαιτέρω έγινε μια ανάλυση χωρίς άλλο φορτίο, πλην του ιδίου βάρους, και μία ανάλυση με θλιπτικό φορτίο κάθετα προς την διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων για την προσομοίωση υποστήριξης με ηλώσεις και εφαρμογή προέντασης ίση με την απαιτούμενη για την αποτροπή της ολίσθησης. Για το πρώτο στάδιο η προένταση υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο του Goodman (2-5), ενώ για το δεύτερο στάδιο αυξήσαμε σταδιακά την απαιτούμενη πίεση P_b ώστε να μην υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των στρωμάτων στην περιοχή της διασταύρωσης. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της οροφής που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στους πίνακες Πίνακας 5.17, Πίνακας 5.18, Πίνακας 5.19.

Οι γεωμετρικές παράμετροι του προσομοιώματος είναι :

Πίνακας 5.17 Γεωμετρικές Παράμετροι προσομοιωμάτων 3ης Σειράς

	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση	3 ^η Περίπτωση
Πλάτος Θαλάμου	6m	8m	10m
Πλάτος Στύλου	5m		
Πάχος Στρώσεων	0.5m		
Αριθμός Στρώσεων	2		

Επίσης οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το πέτρωμα είναι :

Πίνακας 5.18 Γεωτεχνικές Παράμετροι πετρώματος της 3ης σειράς

	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Μοναδιαίο Βάρος	γ	25	kN/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	E	30	GPa
Λόγος Poisson	ν	0.25	

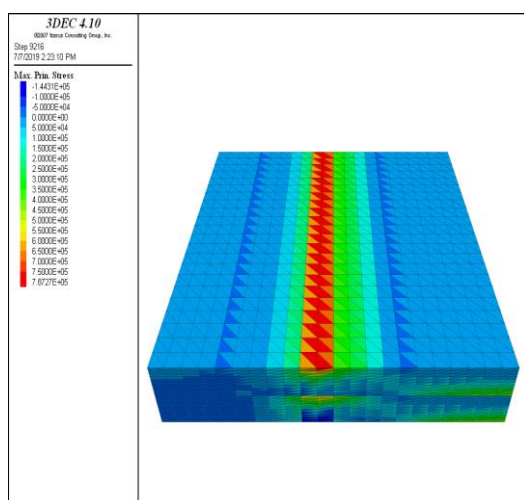
Ενώ οι γεωτεχνικές παράμετροι των ασυνεχειών :

Πίνακας 5.19 Γεωτεχνικές Παράμετροι Ασυνεχειών 3ης σειράς

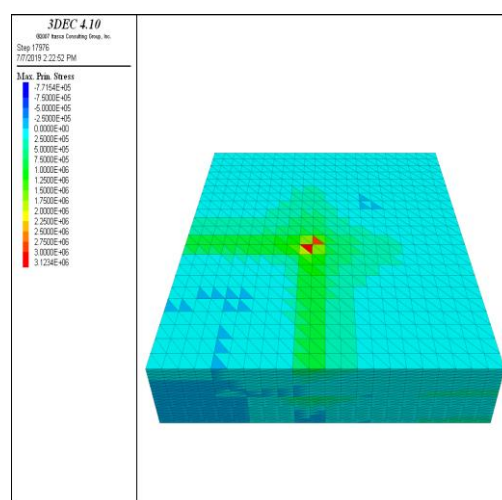
	Σύμβολο	Περίπτώσεις			Μονάδες
		1 ^η	2 ^η	3 ^η	
Γωνία Τριβής	φ	20	30	40	Μοίρες
Ορθή Δυστροπία	K_n	100			GPa
Διατμητική Δυστροπία	K_s	100			GPa
Συνοχή	c_j	0			
Εφελκυστική Αντοχή	σ_{tj}	0			

5.3.1. Αποτελέσματα Κατανομής Τάσεων

Όπως και στα προηγούμενα προσομοιώματα, έτσι και εδώ η κύρια εφελκυστική τάση εμφανίζεται στα πλευρικά όρια του θαλάμου για το πρώτο στάδιο και στο δεύτερο στάδιο αναπτύσσεται στις γωνίες του στύλου.



Εικόνα 5.55 Κατανομή της κύριας τάσης στο πρώτο στάδιο των προσομοιωμάτων της 3ης σειράς



Εικόνα 5.54 Κατανομή της κύριας τάσης στο δεύτερο στάδιο των προσομοιωμάτων της 3ης σειράς

Η τιμή της κύριας τάσης είναι ανεξάρτητη της γωνίας τριβής, οπότε με μεταβολή μόνο του πλάτους θαλάμου, οι μέγιστη τάση έχει τις παρακάτω τιμές για τα συγκεκριμένα σημεία.

Πίνακας 5.20 Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης ανά περίπτωση της 3ης σειράς

σ_1 (MPa)	Wo=6		Wo=8		Wo=10	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
P	0.76	0.79	1.34	1.47	2.10	2.40
E	-	0.50	-	0.87	-	1.35
I	-	0.52	-	0.90	-	1.39
R	0.44	0.48	0.76	0.85	1.17	1.33
C	-	3.12	-	6.05	-	10.24

Αντίστοιχα οι τιμές των δεικτών είναι

Πίνακας 5.21 Δείκτες Σύγκρισης Μεταβολής της Κύριας Τάσης

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
f_1	7.99%	5.14%	4.21%
f_2	4.08%	9.49%	13.99%
f_3	-33.99%	-35.29%	-35.63%
f_4	8.65%	12.53%	12.53%
f_5	17.33%	18.31%	18.44%
f_6	310.90%	352.40%	387.20%

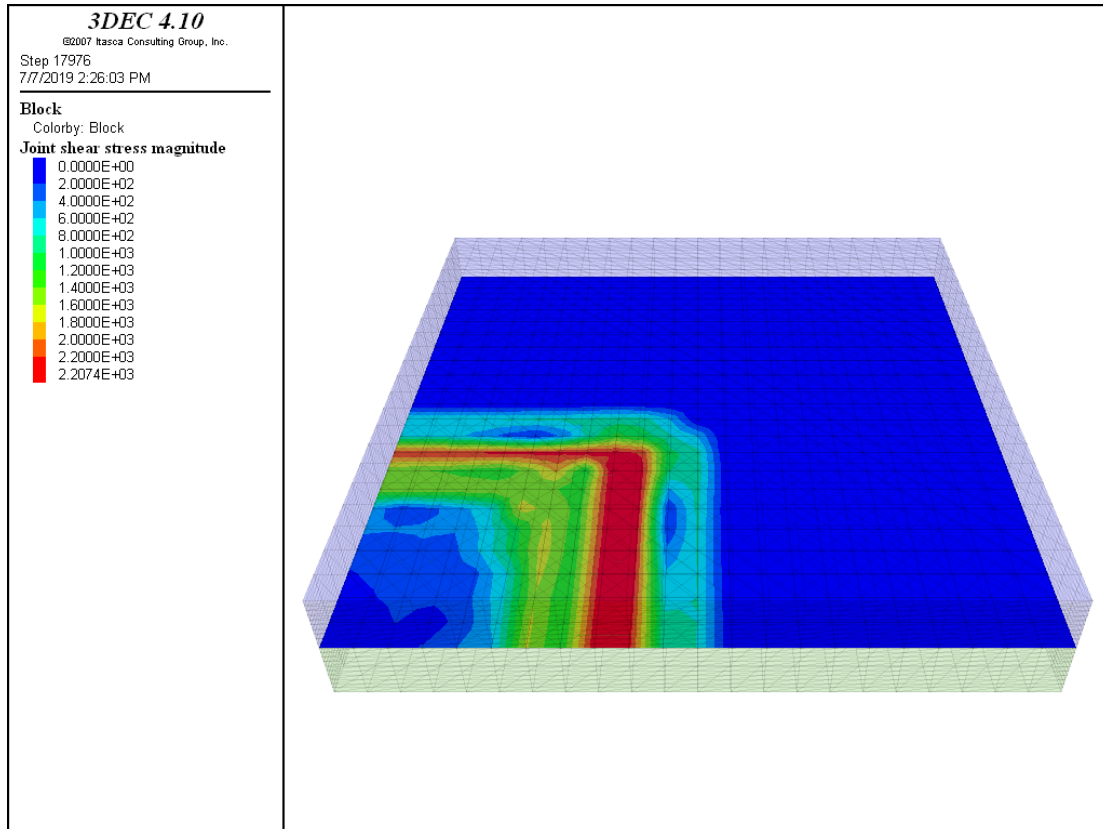
Με την εφαρμογή της P_b η κύρια τάση μεταβλήθηκε όπως φαίνεται στον πίνακα

Πίνακας 5.22 Οι τιμές της κύριας τάσης με την εφαρμογή προέντασης

	Wo=6		Wo=8		Wo=10	
	σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
1,5*Pb						
P	0.64	0.65	1.07	1.14	1.62	1.83
E	-	-0.13	-	-0.19	-	-0.26
I	-	-0.13	-	-0.19	-	-0.24
R	-0.08	-0.09	-0.12	-0.14	-0.16	-0.18
C	-	2.06	-	3.80	-	6.22
2*Pb					^E σ_1 (MPa)	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
P	0.68	0.68	1.12	1.16	1.68	1.89
E	-	-0.13	-	-0.25	-	-0.35
I	-	-0.18	-	-0.25	-	-0.33
R	-0.10	-0.13	-0.16	-0.19	-0.22	-0.25
C	-	2.10	-	3.86	-	6.32

3*Pb	σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
P	0.76	0.74	1.24	1.22	1.83	1.94
E	-	-0.18	-	-0.36	-	-0.49
I	-	-0.27	-	-0.38	-	-0.49
R	-0.16	-0.20	-0.24	-0.30	-0.33	-0.40
C	-	2.18	-	3.95	-	6.50
4*Pb	σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
P	0.77	0.81	1.35	1.34	1.96	1.91
E	-	-0.24	-	-0.36	-	-0.63
I	-	-0.35	-	-0.50	-	-0.65
R	-0.21	-0.26	-0.32	-0.40	-0.44	-0.54
C	-	2.23	-	4.07	-	6.30
5*Pb	σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)		σ_1 (MPa)	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
P	0.84	0.81	1.34	1.40	1.95	2.01
E	-	-0.30	-	-0.45	-	-0.61
I	-	-0.44	-	-0.62	-	-0.80
R	-0.26	-0.33	-0.40	-0.50	-0.55	-0.67
C	-	2.30	-	4.21	-	6.42

Η διατμητική τάση μεταξύ των στρωμάτων αυξάνεται στα σημεία γύρω από το στύλο, όπου και υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης. Όμως η ροή των τάσεων μετά την εκσκαφή, αναπτύσει θλιπτικές τάσεις στην περιοχή του στύλου αυξάνοντας την διατμητική αντοχή στην διεπιφάνεια των στρωμάτων, σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb.



Εικόνα 5.56 Κατανομή της διατμητικής τάσης στην διεπιφάνεια των στρωμάτων

5.3.2. Αποτελέσματα Κατακόρυφης Μετατόπισης

Οι τιμές της μέγιστης βύθισης είναι

Πίνακας 5.23 Μέγιστη βύθιση ανά περίπτωση

Displacement (mm)	Wo=6		Wo=8		Wo=10	
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
I	-	-0.40	-	-1.16	-	-2.71
R	-0.16	-0.18	-0.46	-0.54	-1.06	-1.32

Και των δεικτών

Πίνακας 5.24 Δείκτες Μεταβολής της Κάμψης

	Wo=6	Wo=8	Wo=10
f_6	124.03%	113.82%	106.74%
f_7	144.42%	147.51%	154.57%

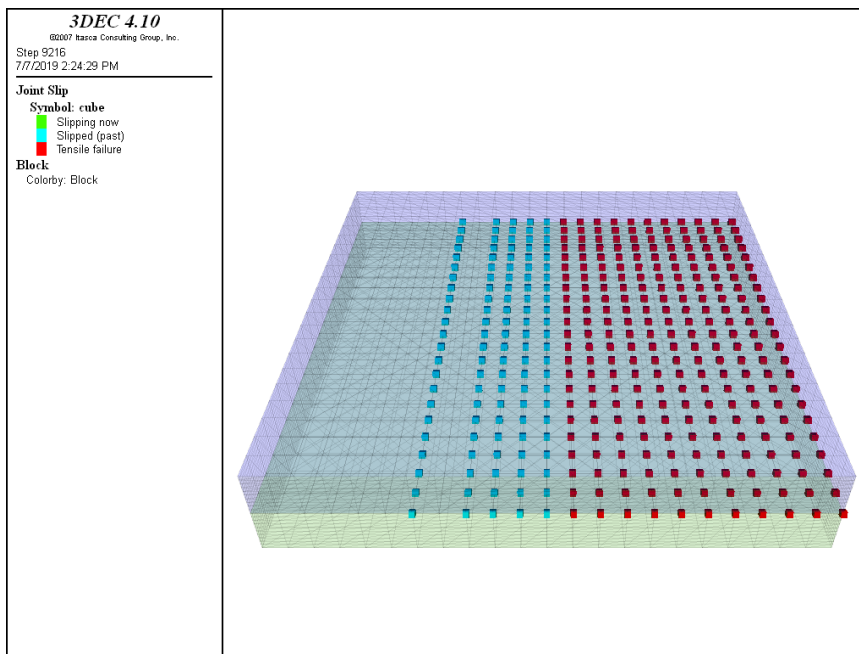
Ενώ με την αύξηση της P_b η μέγιστη βύθιση μειώθηκε όπως φαίνεται στον Πίνακας 5.25

Πίνακας 5.25 Μέγιστη βύθιση ανά περίπτωση με την εφαρμογή προέντασης

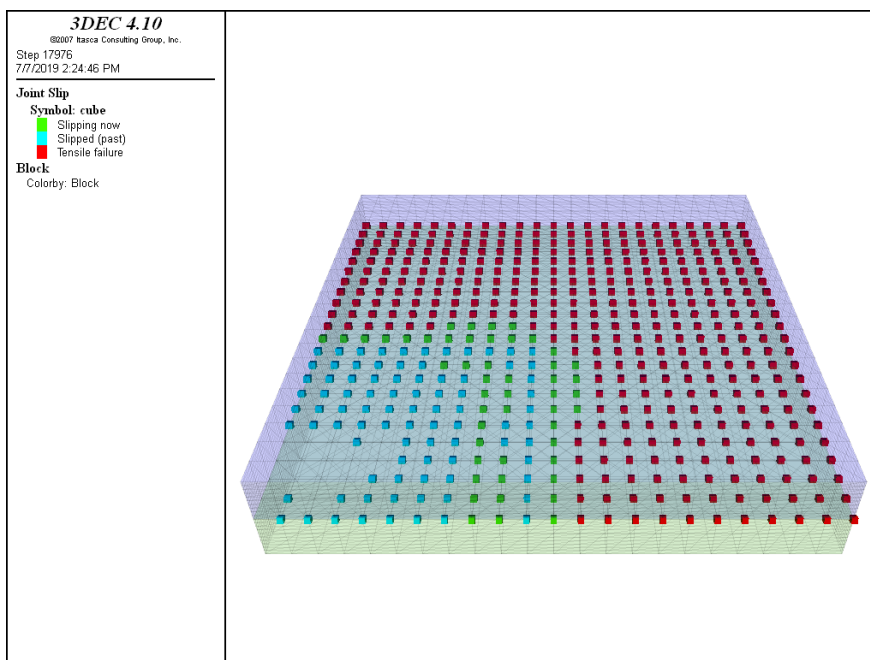
	Wo=6		Wo=8		Wo=10	
1,5*Pb	Zdisp (mm)					
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
	I	-	-0.160	-	-0.446	-
R	-0.070	-0.078	-0.195	-0.234	-0.436	-0.560
2*Pb	Zdisp (mm)					
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
	I	-	-0.156	-	-0.440	-
R	-0.067	-0.076	-0.193	-0.227	-0.434	-0.561
3*Pb	Zdisp (mm)					
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
	I	-	-0.151	-	-0.428	-
R	-0.064	-0.071	-0.191	-0.218	-0.439	-0.546
4*Pb	Zdisp (mm)					
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
	I	-	-0.143	-	-0.418	-
R	-0.063	-0.067	-0.189	-0.221	-0.438	-0.498
5*Pb	Zdisp (mm)					
	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B	Phase A	Phase B
	I	-	-0.137	-	-0.415	-
R	-0.061	-0.065	-0.188	-0.209	-0.433	-0.493

5.3.3. Αποτελέσματα Ολίσθησης και Αποκόλλησης των Στρωμάτων

Χωρίς την άσκηση πίεσης στο προσομοίωμα, στο πρώτο στάδιο εμφανίζεται ολίσθηση κοντά στην παρειά του θαλάμου και αποκόλληση σε όλη την περιοχή πάνω από τον θάλαμο ενώ αντίστοιχο αποτέλεσμα βλέπουμε και για το δεύτερο στάδιο.

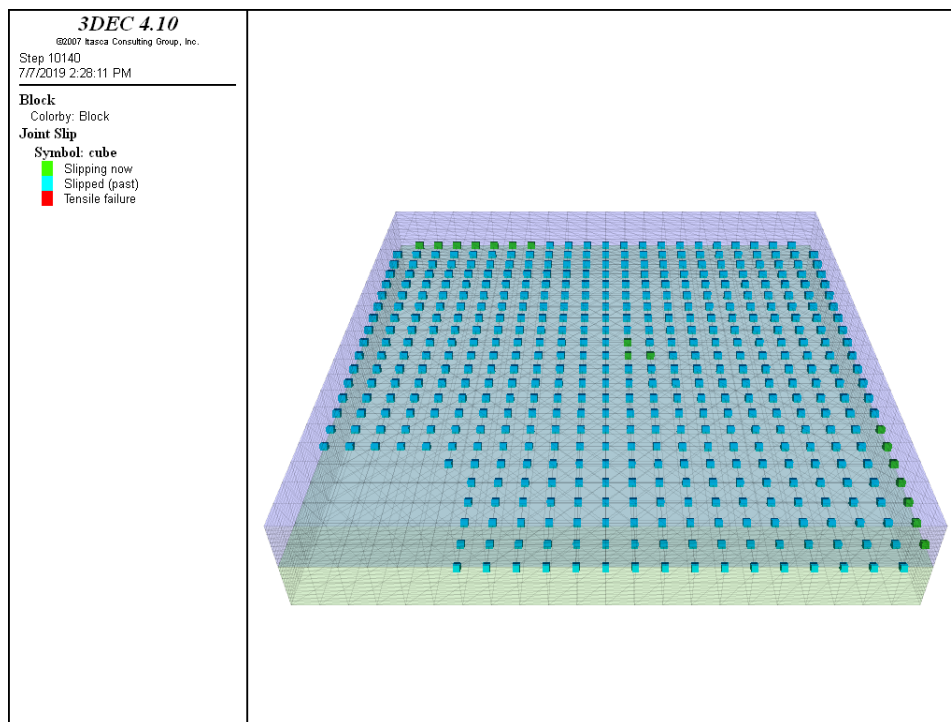


Εικόνα 5.57 Ολίσθηση και Αποκόλληση των στρωμάτων στο πρώτο στάδιο χωρίς επιβολή φορτίου



Εικόνα 5.58 Ολίσθηση και Αποκόλληση των στρωμάτων στο δεύτερο στάδιο χωρίς επιβολή φορτίου

Στην πραγματικότητα επειδή τα στρώματα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά δεν θα έπρεπε να εμφανίζεται αποκόλληση μεταξύ τους. Αυτό ερμηνεύεται ως αριθμητικό σφάλμα του προγράμματος να δείχνει ως αποκόλληση των στρωμάτων ακόμα και όταν η διαφορά της βύθισης μεταξύ τους είναι μικρότερη από 1 μm. Για να δούμε το εύρος της ολίσθησης, εφαρμόσαμε μια θλιπτική τάση ίση με 600Pa. Η συγκεκριμένη πίεση δεν επηρέασε τα μετρούμενα μεγέθη, αλλά ήταν αρκετή ώστε να μην εμφανίζεται αποκόλληση, όπως φαίνεται στην εικόνα.



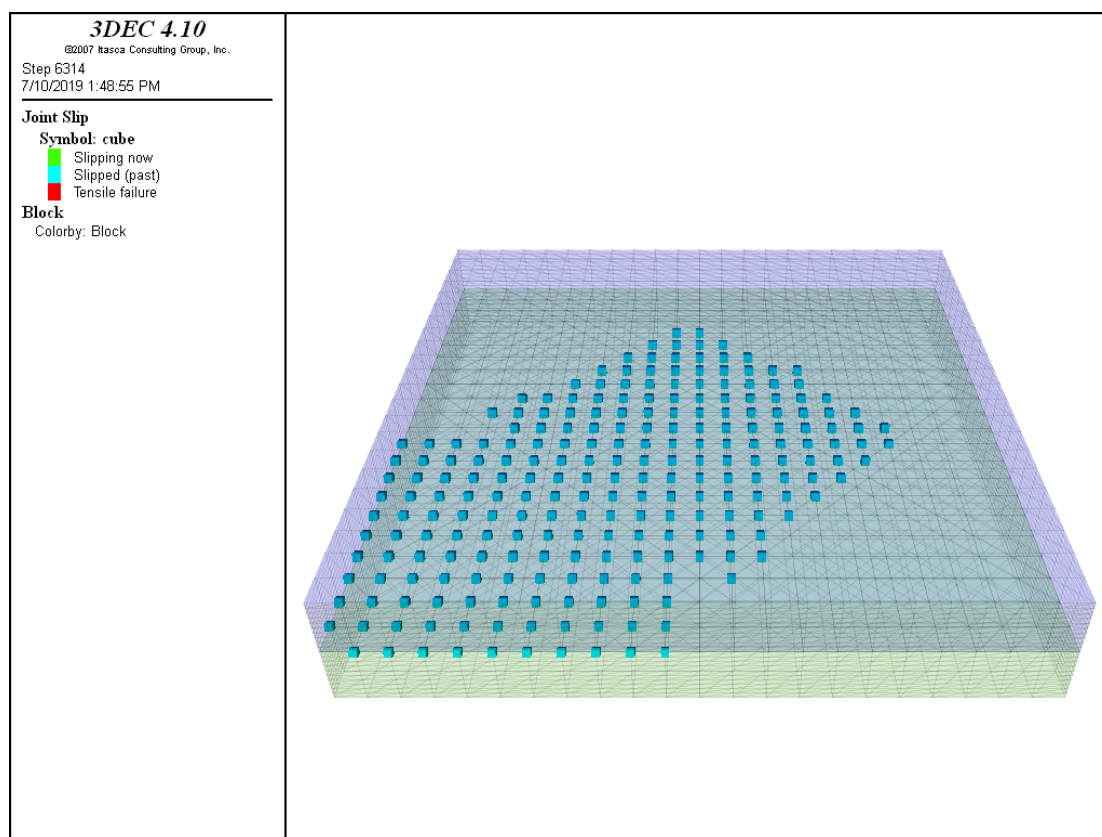
Εικόνα 5.59 Ολίσθηση στο δεύτερο στάδιο των προσομοιωμάτων με τάση 600Pa

Εφαρμόζοντας την πίεση που υπολογίστηκε σύμφωνα με την σχέση (2-5) αποτράπηκαν οι ολισθήσεις και οι αποκολλήσεις στο 1^ο στάδιο. Όμως φάνηκε πως δεν αρκεί αυτή η πίεση για την αποφυγή της ολίσθησης στις θέσεις διασταυρώσεων παρά μόνο για την παρεμπόδιση της αποκόλλησης των στρωμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.59.

Οι τιμές τις p_b για κάθε περίπτωση φαίνονται στον Πίνακα 5.26

Πίνακας 5.26 Η απαιτούμενη πίεση σύμφωνα με τον τύπο του Goodman

	$\phi=20$	$\phi=30$	$\phi=40$	
Wo=6m	309.0912	194.8557	134.0723	(kPa)
Wo=8m	412.1216	259.8076	178.763	
Wo=10m	515.152	324.7595	223.4538	

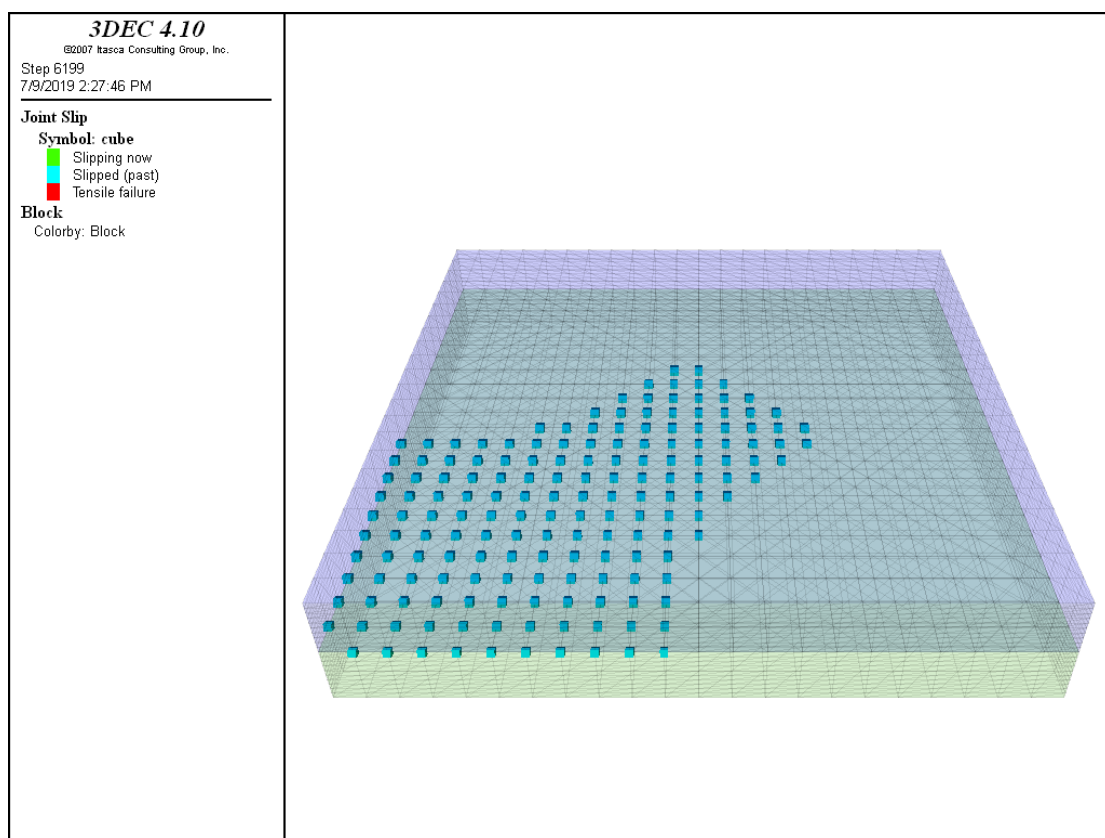


Εικόνα 5.60 Η περιοχή της ολίσθησης εφαρμόζοντας την πίεση P_b σε τετραγωνικό άνοιγμα πλάτους 6m

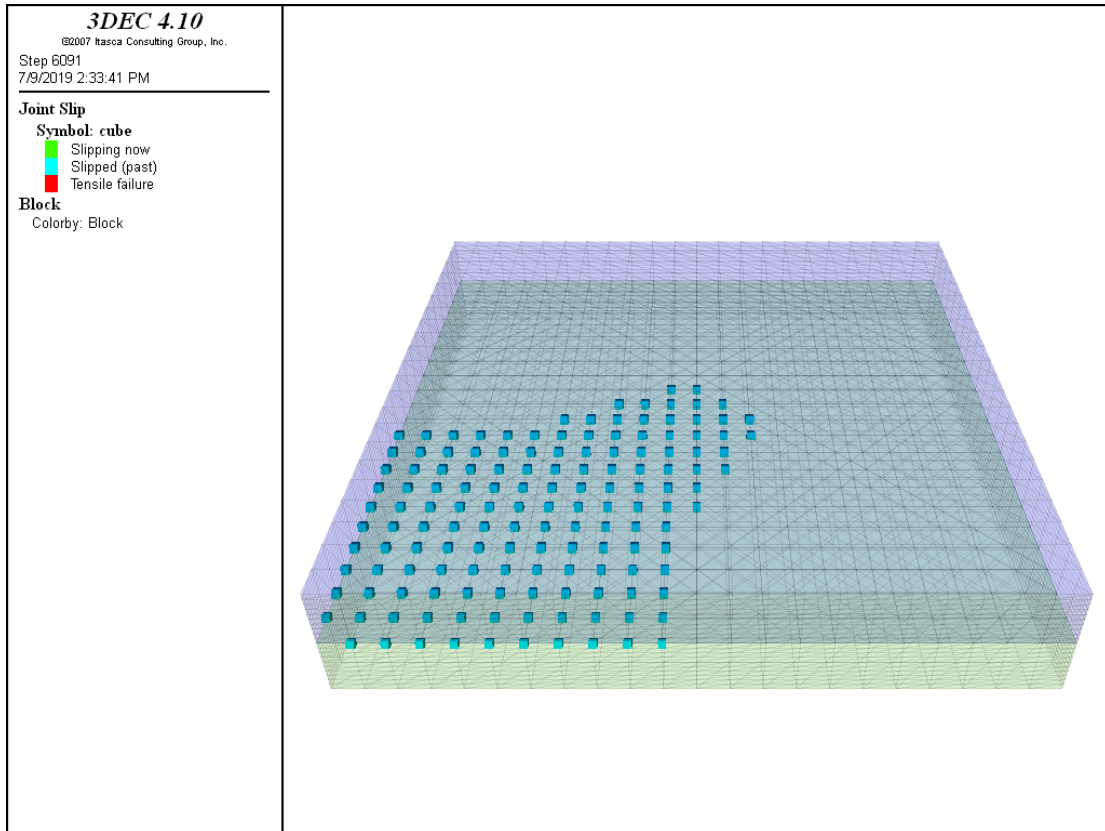
Αυξάνοντας σταδιακά την απαιτούμενη πίεση p_b φαίνεται πως μειώνεται η επιφάνεια που υφίσταται ολίσθηση. Πιο συγκεκριμένα :

- 1) Με αύξηση 50% υπάρχει έντονη μείωση της επιφάνειας ολίσθησης στην περιοχή της διασταύρωσης, αλλά συνεχίζει να καταλαμβάνει μεγάλο εύρος διαγώνια του στύλου (Εικόνα 5.16)

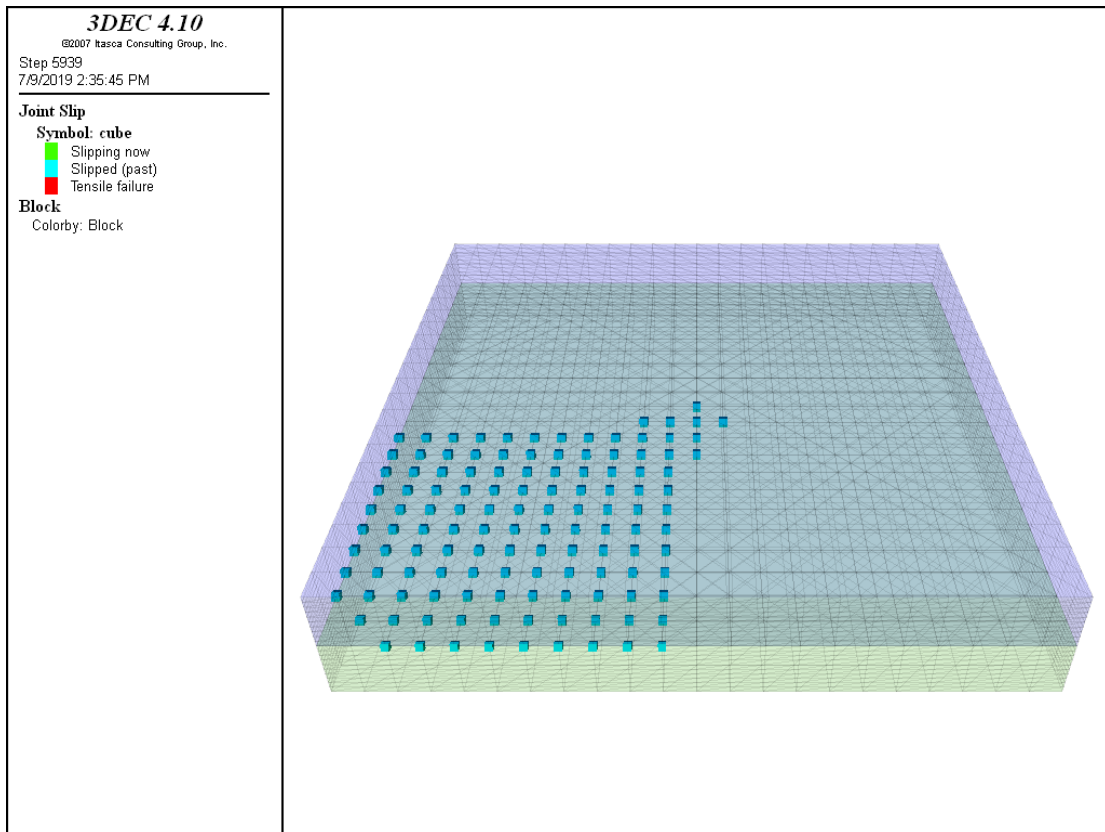
- 2) Με αύξηση 100% η ολίσθηση περιορίζεται κοντά στη γωνία του στύλου.
(Εικόνα 5.17)
- 3) Με αύξηση 200% τα στρώματα ολισθαίνουν ελάχιστα στη διαγώνιο της άκρης του στύλου. Εικόνα 5.18 Με αύξηση 300% και 400% παρατηρείται πως αρχίζει και αποτρέπεται η ολίσθηση πάνω από το στύλο. Για 300% αύξηση η ολίσθηση που εμφανίζεται μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και αριθμητικό σφάλμα του προγράμματος, ενώ για αύξηση 400% δεν υπάρχει ολίσθηση πέρα από τον στύλο. (Εικόνα 5.19, Εικόνα 5.20)



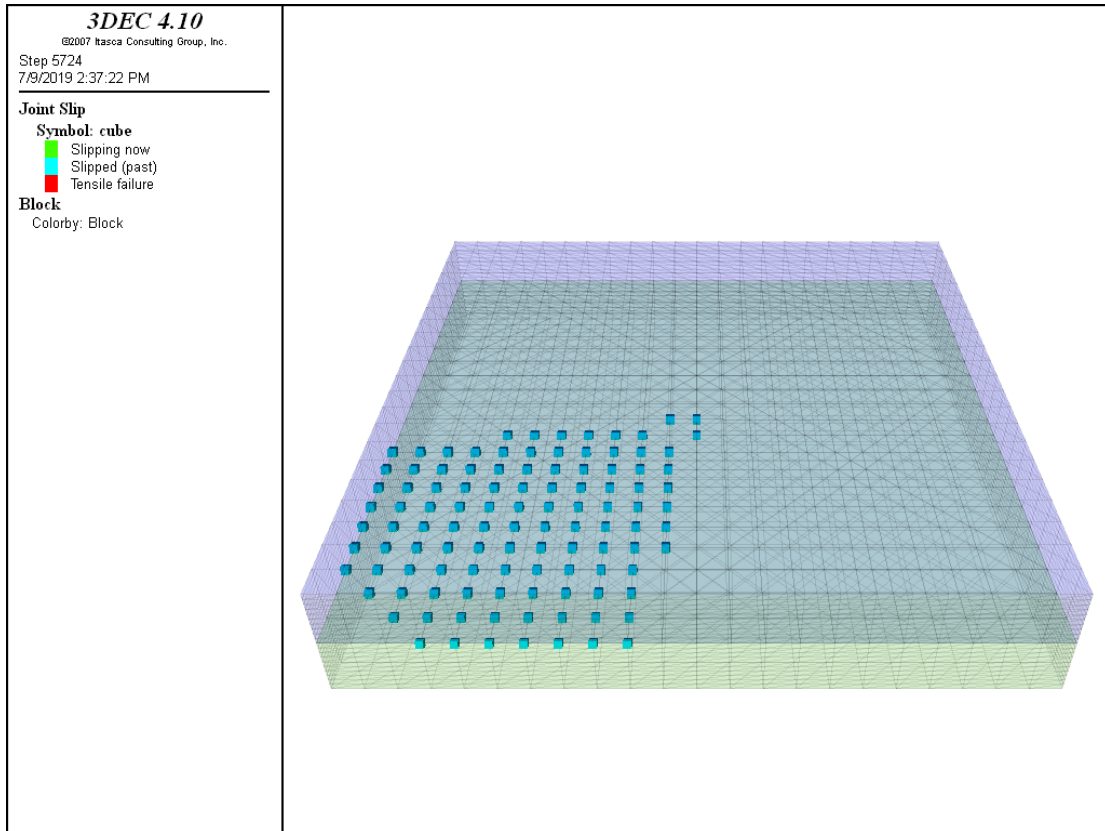
Εικόνα 5.61 Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 50% σε θάλαμο πλάτους 6m



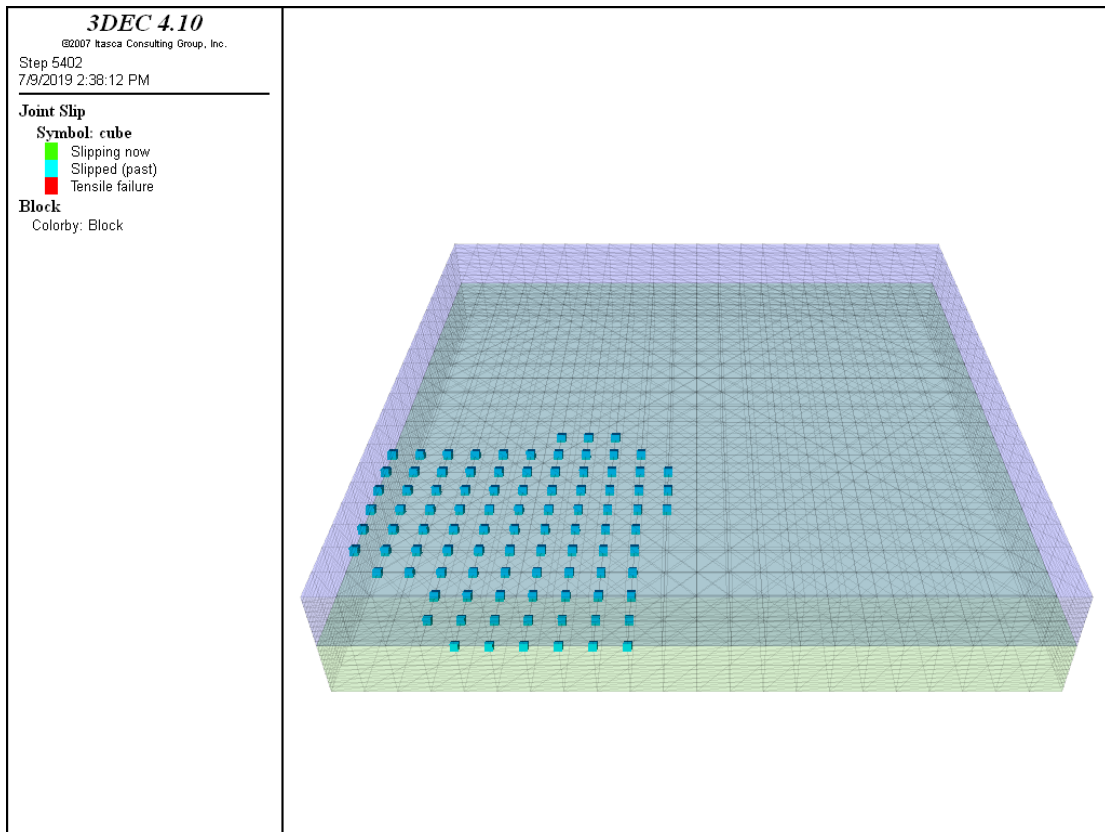
Εικόνα 5.62 Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 100% σε θάλαμο πλάτους 6m



Εικόνα 5.63 Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 200% σε θάλαμο πλάτους 6m



Εικόνα 5.64 Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 300% σε θάλαμο πλάτους 6m



Εικόνα 5.65 Η περιοχή ολίσθησης εφαρμόζοντας πίεση P_b αυξημένη κατά 400% σε θάλαμο πλάτους 6m

Στο παράρτημα φαίνεται για τα υπόλοιπα πλάτη θαλάμων πώς μειώνεται το εύρος της ολίσθησης αυξάνοντας την απαιτούμενη πίεση P_b έως 400%.

Από τα παραπάνω φαίνεται πως χρειάζεται αρκετά μεγαλύτερη προένταση των ηλώσεων στις περιοχές των διασταυρώσεων σε σχέση με την απαιτούμενη προένταση στους θαλάμους.

6. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν οι ιδιαιτερότητες που προκύπτουν κατά την εκσκαφή διασταυρώσεων υπογείων θαλάμων σε στρωσιγενείς οροφές. Η ανάπτυξη διασταυρώσεων στα υπόγεια έργα αποτελεί σύνθετο φαινόμενο, αλλά παρ' όλα αυτά, σε θέσεις διασταυρώσεων έχει καταγραφεί μεγάλο ποσοστό καταπτώσεων της οροφής.

Η μηχανική συμπεριφορά της στρωσιγενούς οροφής έχει απασχολήσει τους μηχανικούς τουλάχιστον από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, όμως οι έρευνες αφορούσαν σημεία όπου αρκεί η δισδιάστατη ανάλυση της οροφής, ανάγοντας την συμπεριφορά της ως αμφίπακτης ή αμφιέριστης δοκού. Στις θέσεις διασταυρώσεων δεν επαρκεί αυτή η θεωρία, και η μελέτη της οροφής γίνεται εφικτή μέσω της χρήσης αριθμητικού κώδικα σε τρεις διαστάσεις.

Από τα αποτελέσματα των επιλύσεων των προσομοιωμάτων προκύπτει πως :

1. Η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται στις γωνίες του στύλου και είναι αυξημένη ως και τρεις φορές της τιμής που αναπτύσσεται στις παρειές ενός θαλάμου.
2. Η μέγιστη βύθιση εντοπίζεται στο μέσο της διασταύρωσης και δύναται να θεωρηθεί ότι ισοδυναμεί με την βύθιση αμφίπακτης δοκού, μήκους ίσου με την διαγώνιο της διασταύρωσης, μειωμένη περίπου κατά 0.17m, δηλαδή:

$$s' \cong s_o * 1,27 = s_o(\sqrt{2} - 0,17)$$

Η μείωση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη των υπόλοιπων στύλων οι οποίοι εμποδίζουν την κάμψη της οροφής. Παρ' όλα αυτά, επειδή στις γωνίες των στύλων αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις, είναι πιθανή η αστοχία στις γωνίες του, αυξάνοντας το άνοιγμα της διασταύρωσης.

3. Για την αποτροπή της ολίσθησης μεταξύ των στρωμάτων χρειάζεται αυξημένη προένταση των ηλώσεων περίπου κατά 200% της $p_{b,max}$.

Επίσης, στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η μείωση (%) της κάμψης της οροφής στο μέσο της διασταύρωσης, με την εφαρμογή p_b .

Πίνακας 6.1 Ποσοστιαία Μεταβολή της Βύθισης υπό την επίδραση της προέντασης

Displacement (mm)	Wo=6	Wo=8	Wo=10
1,5*Pb	-0,6	-0,61552	-0,62768
2*Pb	-0,61	-0,62069	-0,63321
3*Pb	-0,6225	-0,63103	-0,63875
4*Pb	-0,6425	-0,63966	-0,66347
5*Pb	-0,6575	-0,64224	-0,66974

Αντίστοιχα, η μείωση (%) της κύριας τάσης με την αύξηση της προέντασης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.2 Ποσοστιαία Μεταβολή της Κύριας Τάσης υπό της επίδραση της προέντασης

σ_1	Wo=6	Wo=8	Wo=10
1,5*Pb	-0,34	-0,37	-0,39
2*Pb	-0,33	-0,36	-0,38
3*Pb	-0,30	-0,35	-0,37
4*Pb	-0,29	-0,33	-0,38
5*Pb	-0,26	-0,30	-0,37

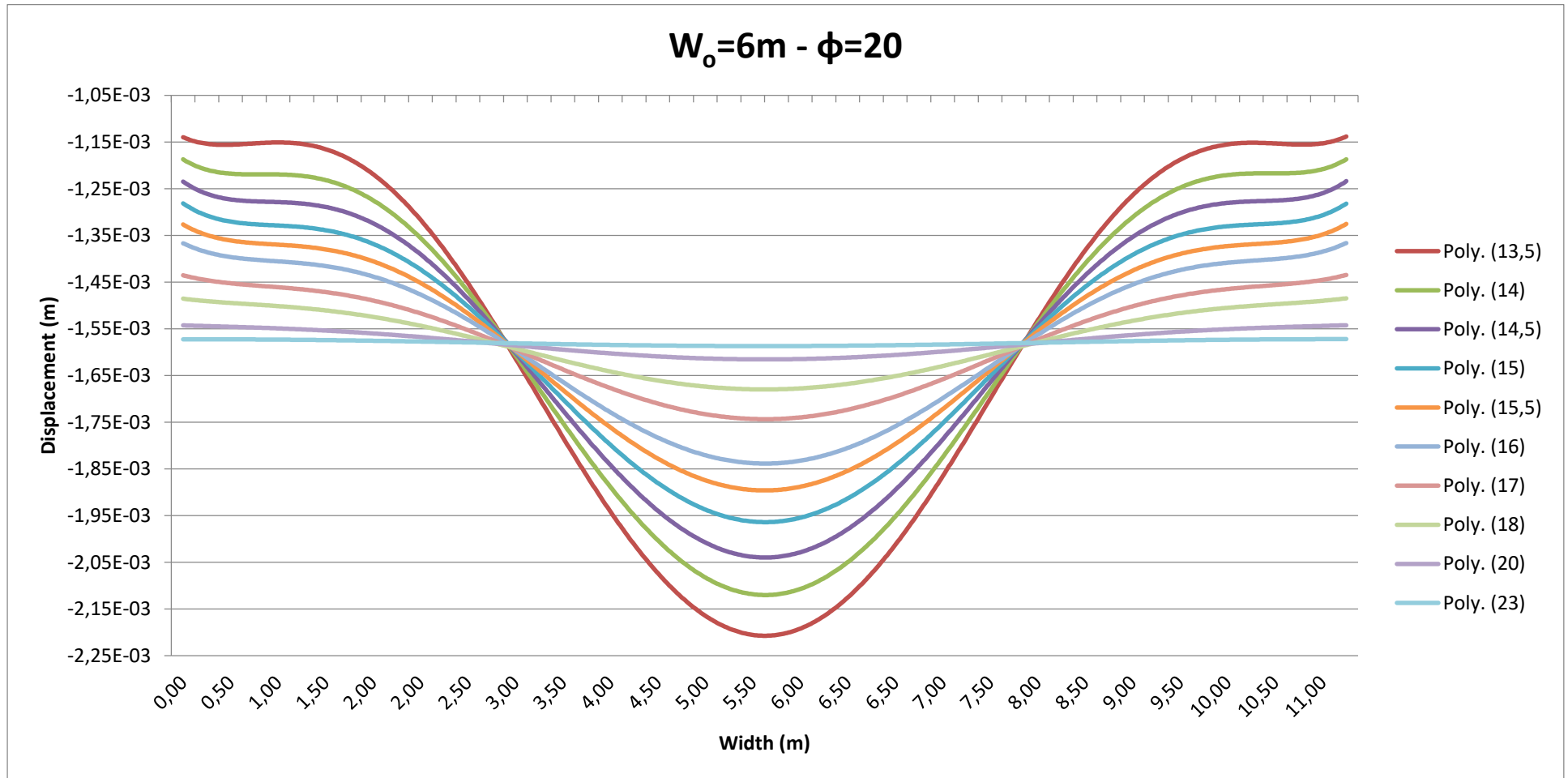
Από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται η αρχική εκτίμηση της επικινδυνότητας στις θέσεις διασταυρώσεων και φαίνεται πως χρειάζεται περαιτέρω έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της οροφής σε αυτές τις θέσεις.

Βιβλιογραφία

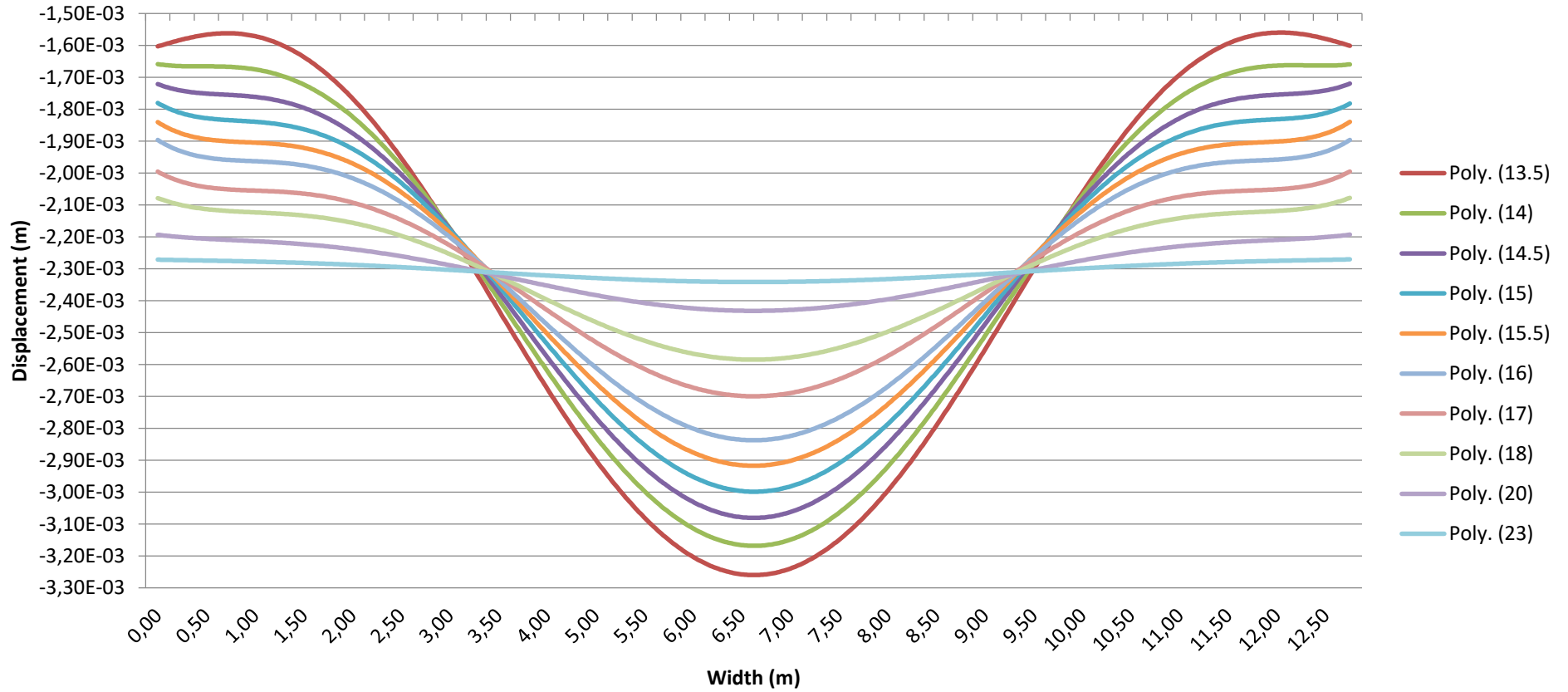
- Abbasi, B. (2010). *A Numerical Analysis of Mine Intersections and Support Systems Stability*. Illinois: Southern Illinois University Carbondale.
- Brady, B., & Brown, E. (2006). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Kluwer Academic Publishers.
- Chugh, Y., & Kollipara, V. (2009). *AN Analysis Of Roof Fall Data Base For Illinois Coal Mines*. Illinois Clean Coal Institute.
- Cochrane, D., & Coates, T. (1970). Development of Design Specifications for Rock Bolting from Research in Canadian Mines. σ. 12.
- Coulthard, M. A. (1999). Applications of Numerical Modelling in Underground Mining and Construction. *Geotechnical and Geological Engineering 17* (σσ. 373-385). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Gercek, H. (1982). *Stability of Intersections in Room and Pillar Coal Mining*. USA: Penn State Univ.
- Gercek, H. (1986). Stability Considerations for Underground Excavation Intersections. *Mining Science and Technology 4* (σσ. 49-57). Amsterdam: Elsevier.
- Itasca Consulting Group. (2019). *3D Discrete Element Modeling in Jointed and Blocky Material*. Ανάκτηση από <https://www.itscag.com/software/3dec>
- Jing, L., & Stephansson, O. (2006). *Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Application*. Amsterdam: Elsevier.
- Sinha. (2018). Validation of Critical Strain Technique for Assessing Stability of Coal Mine Intersections and It's Potential for Development of Roof Control Plans.
- Spearing, A., & Mueller, A. (2008). *Intersection Support in U.S. Coal Mines*. NIOSH.
- Βώβου, Θ. (2015). *Υπόγεια Εκμετάλλευση Λατομείων Ασβετολίθου και Μαρμάρου, Ζητήματα Ευστάθειας Οροφής και Στύλου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Γιούτα, Π. (2018). *Ανάλυση της Συμπεριφοράς Στρωσιγενούς Πετρώματος γύρω από Υπόγεια Ανοίγματα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Θωμάς, Κ. (2015). *Υπολογιστικές Τεχνικές Αιχμής στη Γεωτεχνική Μηχανική με την Μέθοδο των Διακριτών Στοιχείων*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Μπενάρδος, Α. (2010). *Υπόγεια Έργα*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Παπαγιαννόπουλος, Π. (2010). *Εκτίμηση της Αντοχής Στύλων για Περιπτώσεις Σκληρών Πετρωμάτων και Ανάλυση της Επίδρασης Μέτρων Ενίσχυσης στην Ευστάθεια τους*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σοφιανός, Α. (2015). *Υποστήριξη Υπογείων Έργων*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα.
- Σοφιανός, Α., & Καπένης, Α. (1999). Συμπεριφορά χαμηλού θόλου των υπογείων οροφών για ακραία παραμορφωσιμότητα του πετρώματος.

7. Παράρτημα

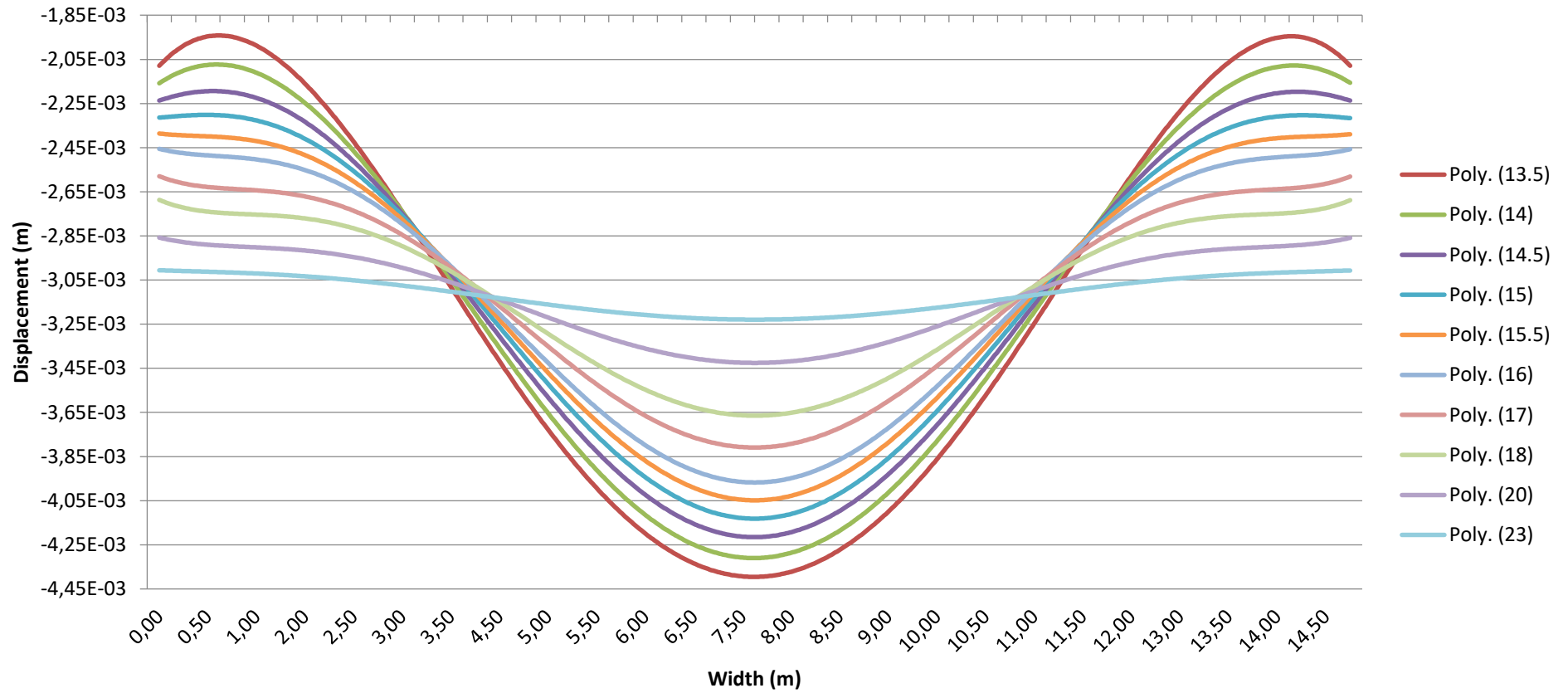
7.1. Προφίλ Βύθισης στο 1^ο Στάδιο της 1^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων



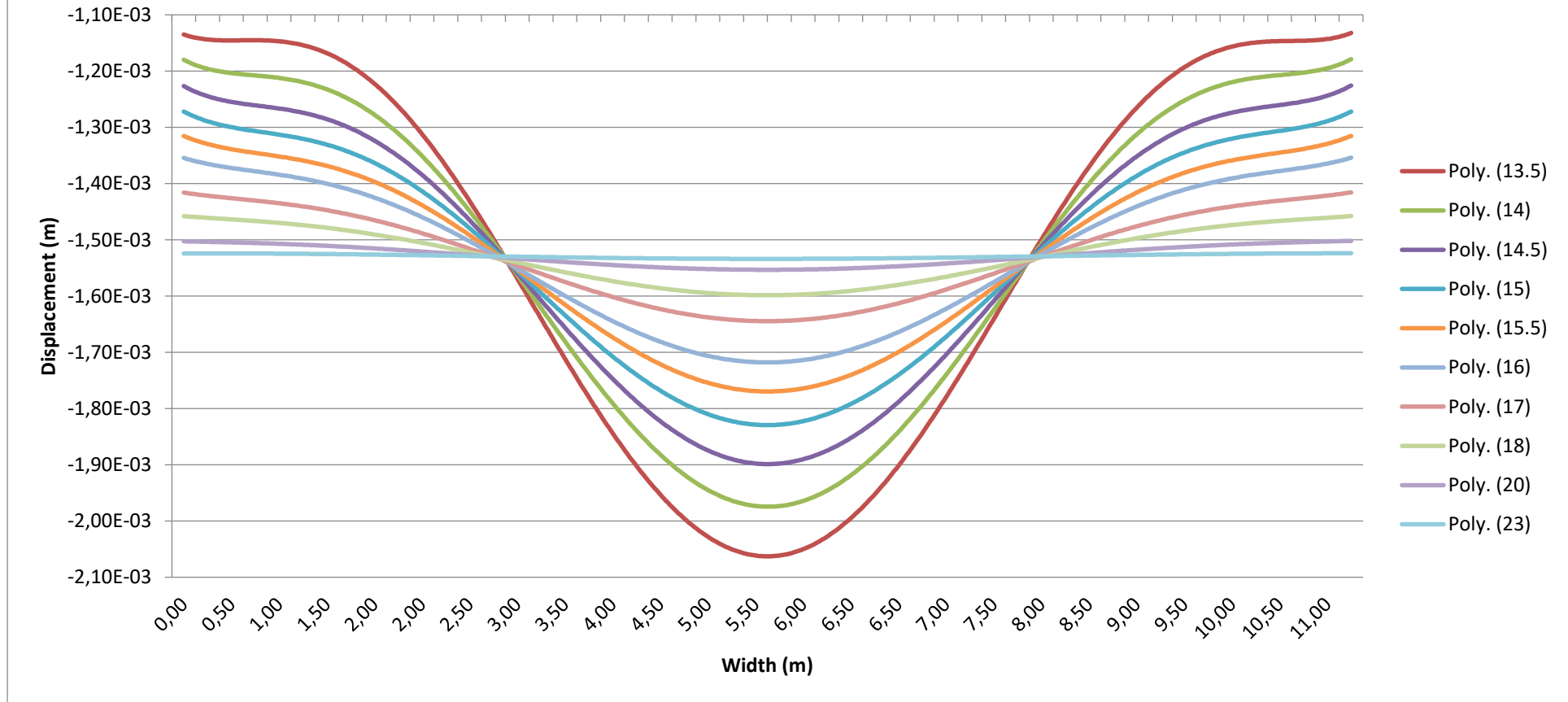
$W_0=8m - \phi=20$



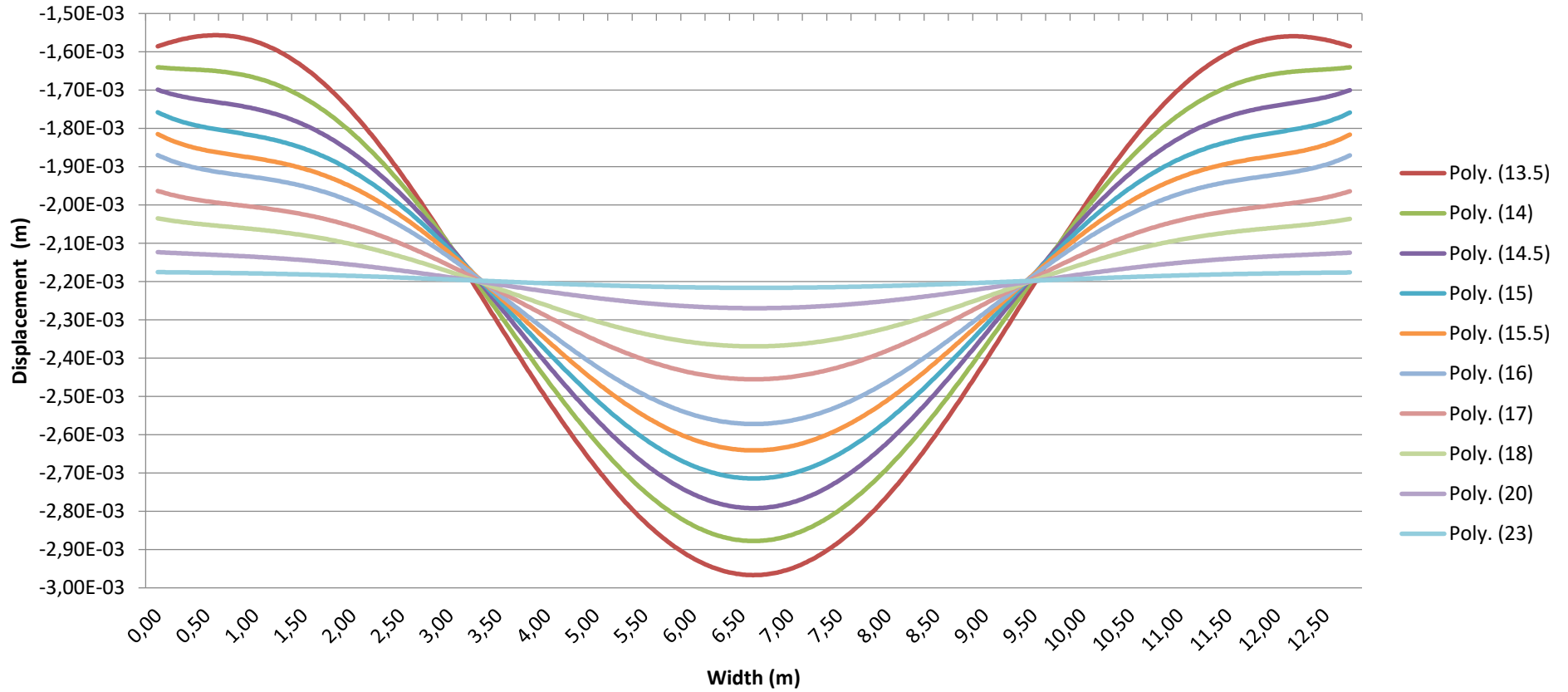
$W_o=10m - \phi=20$



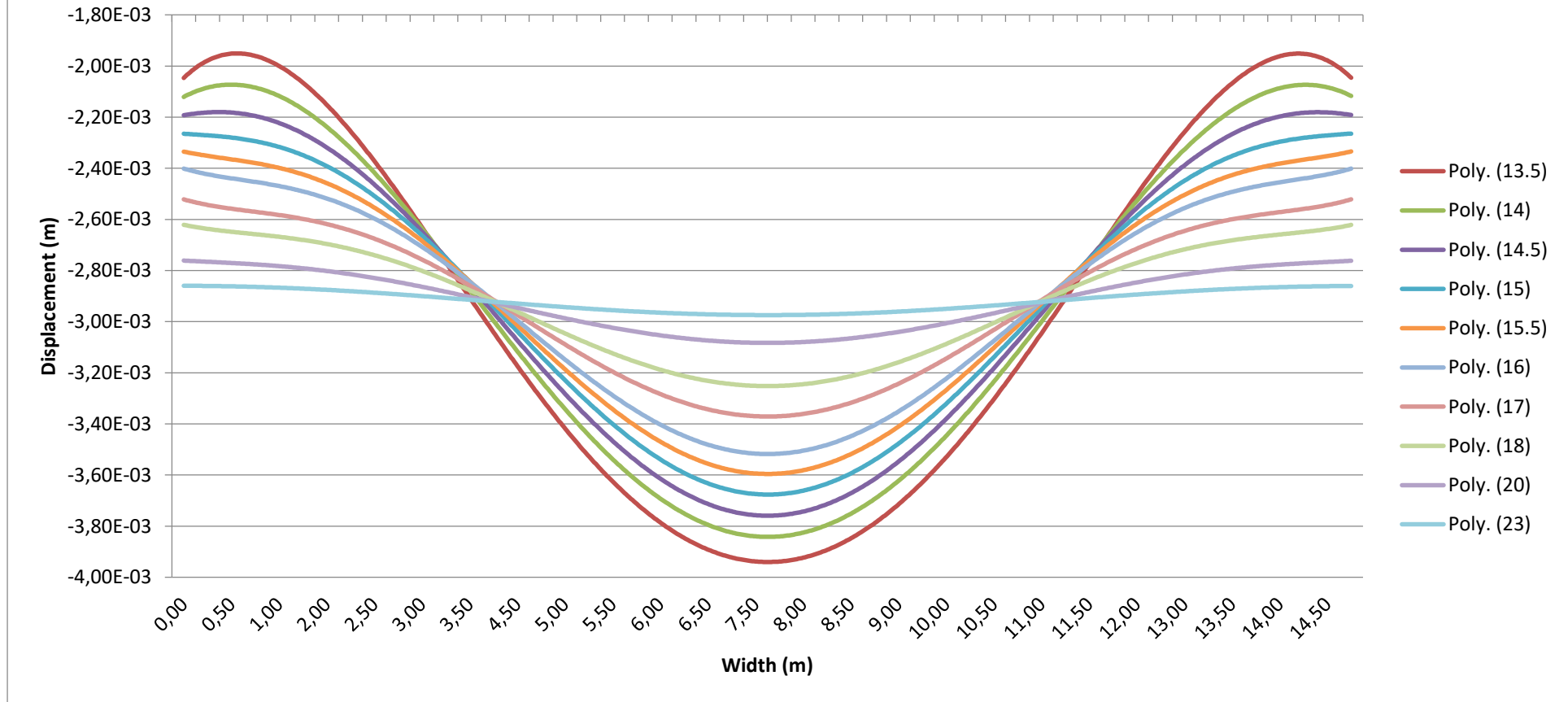
$W_0=6m - \phi=30$



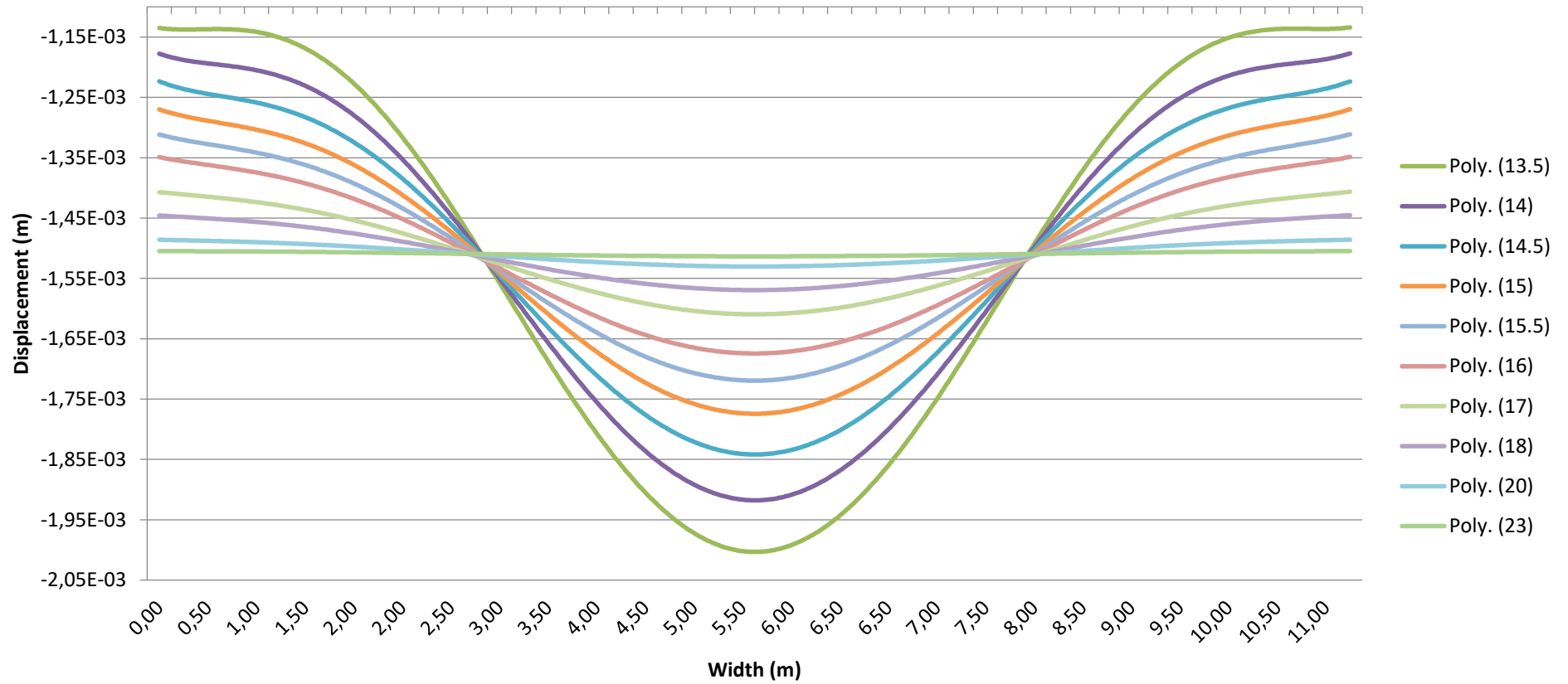
$W_0=8m - \phi=30$



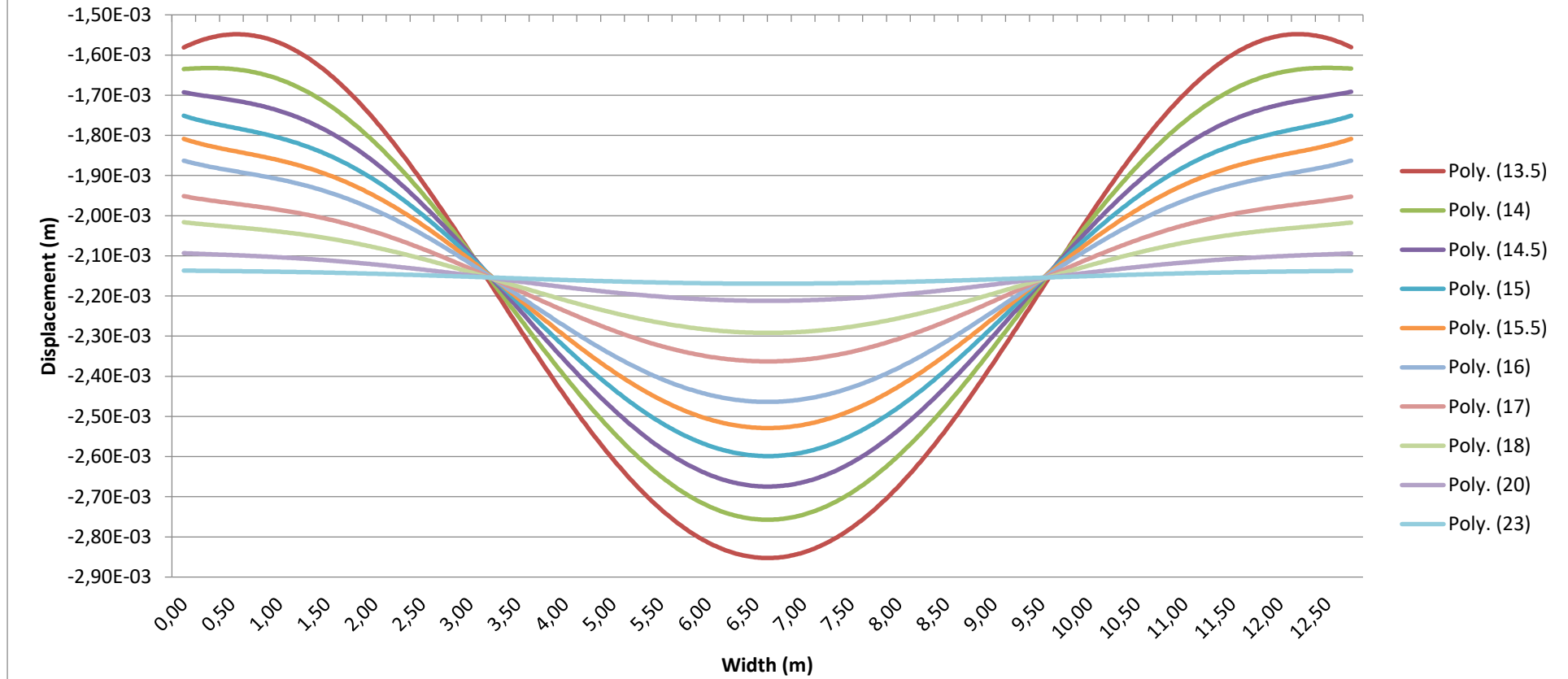
$W_o=10m - \phi=30$



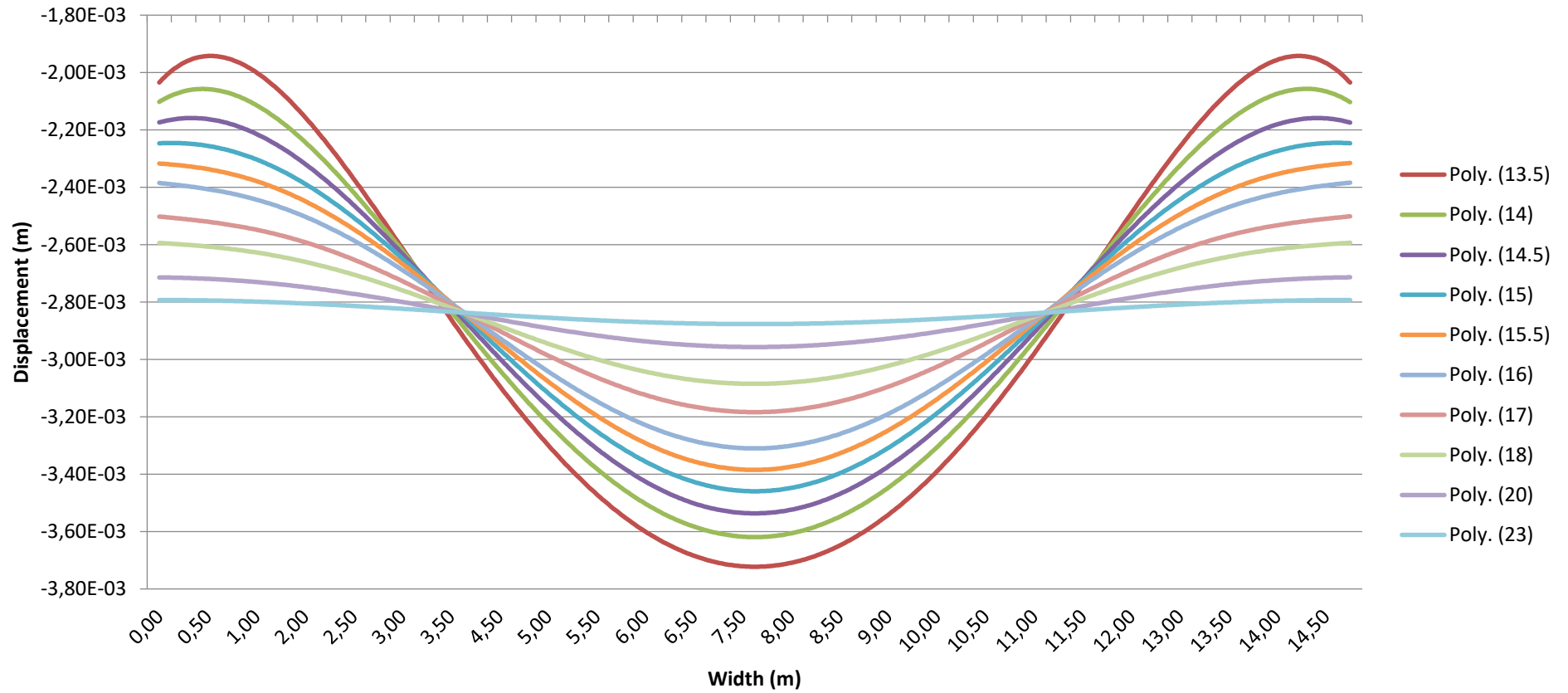
$W_0=6m - \phi=40$



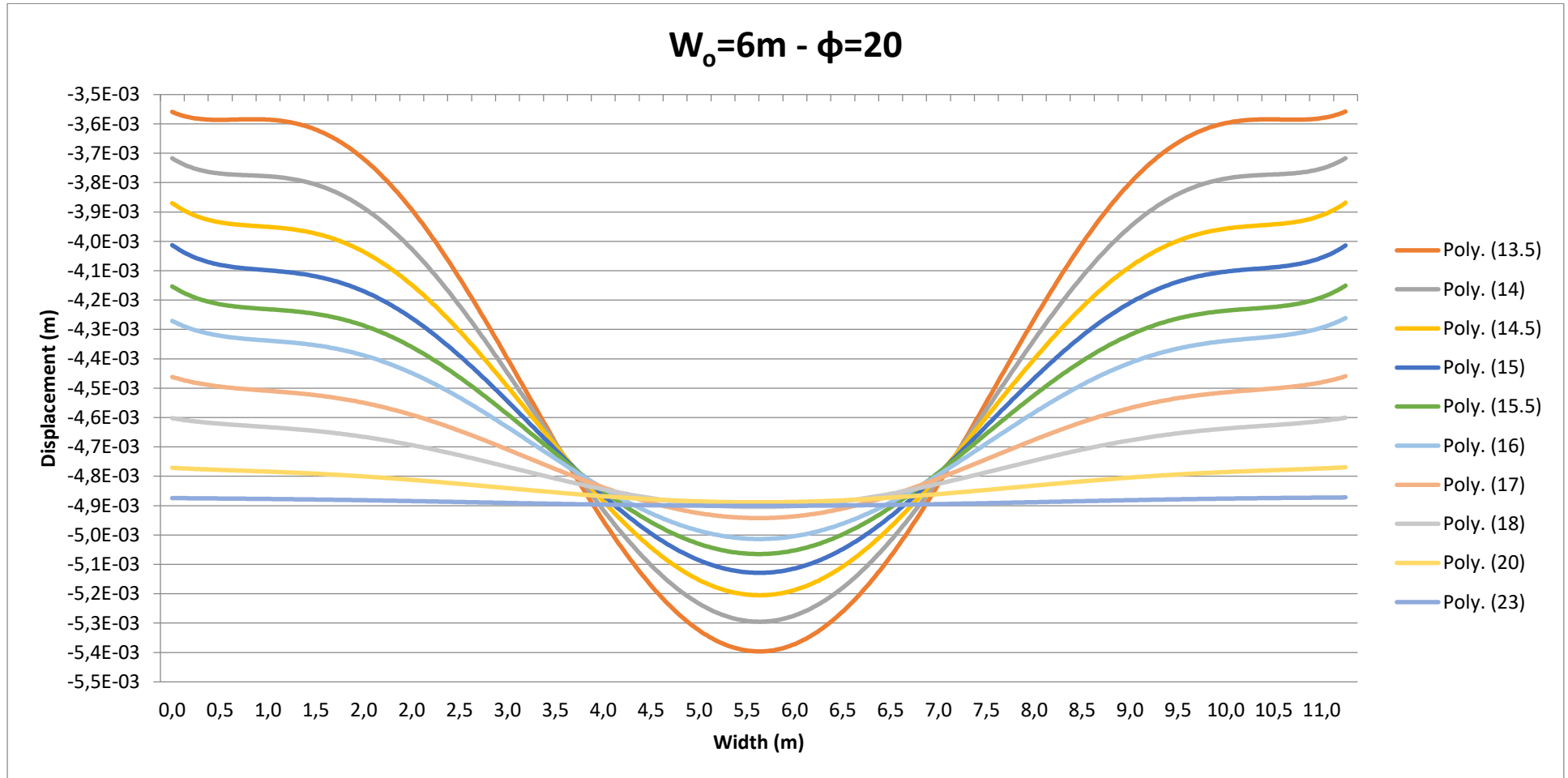
$W_0=8m - \phi=40$



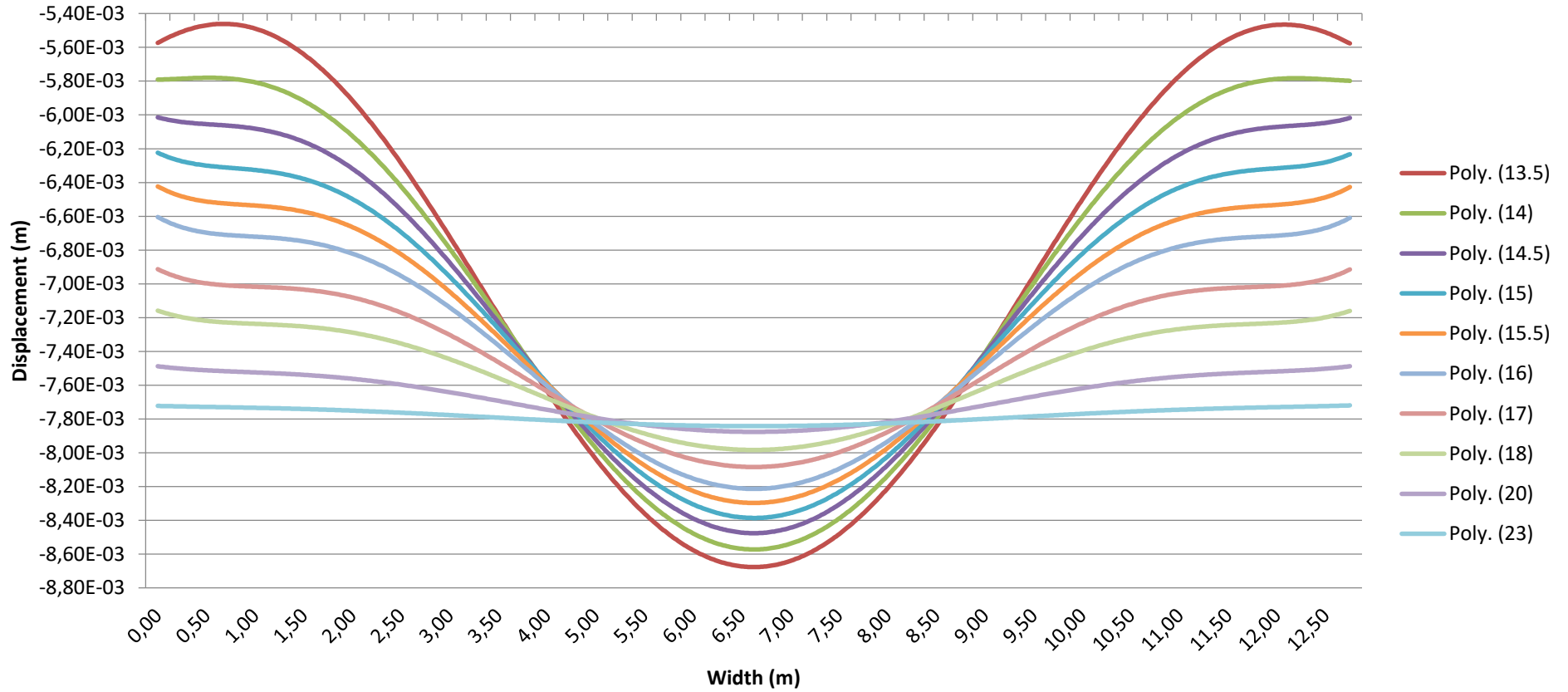
$W_o=10m - \phi=40$



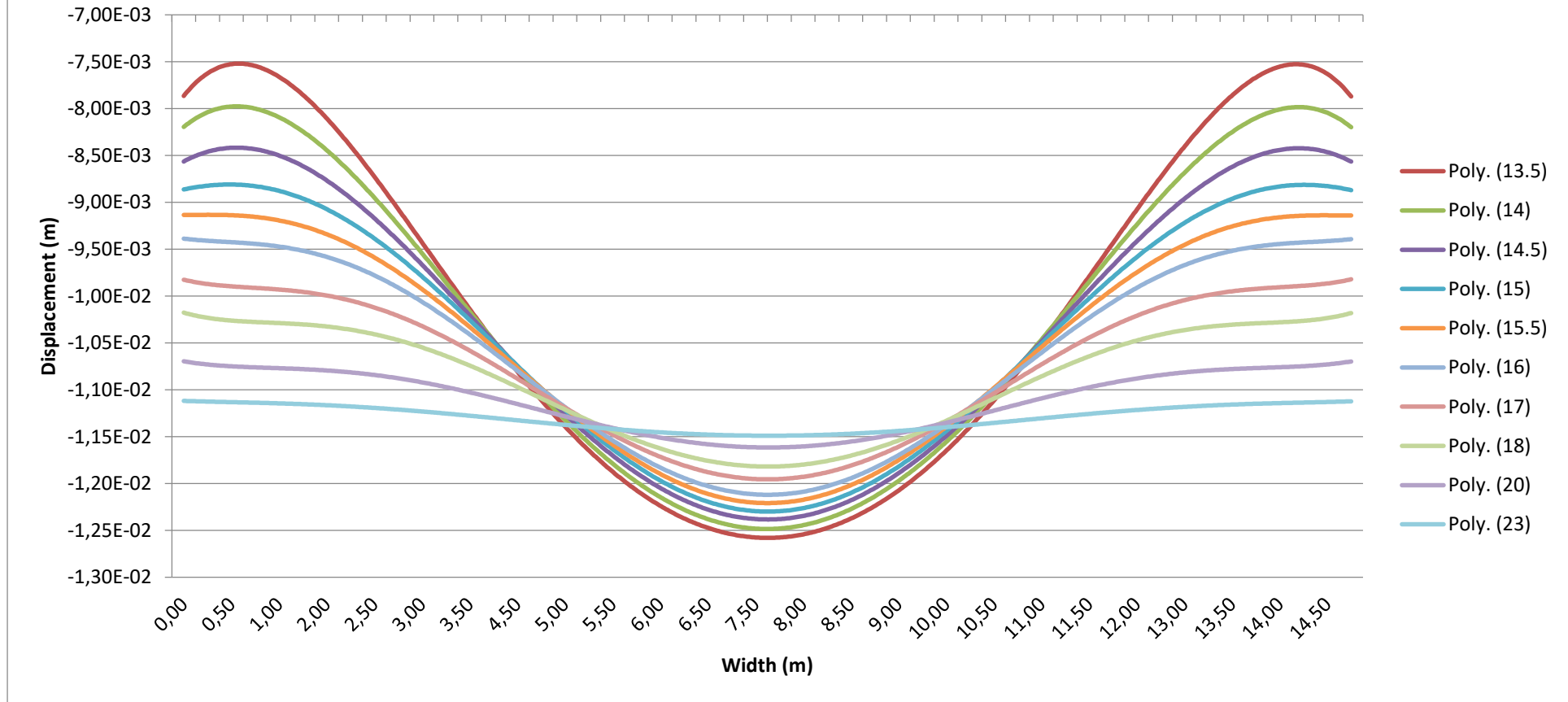
7.2. Προφίλ Βύθισης στον άξονα του Στύλου για το 2^ο Στάδιο της 1^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων



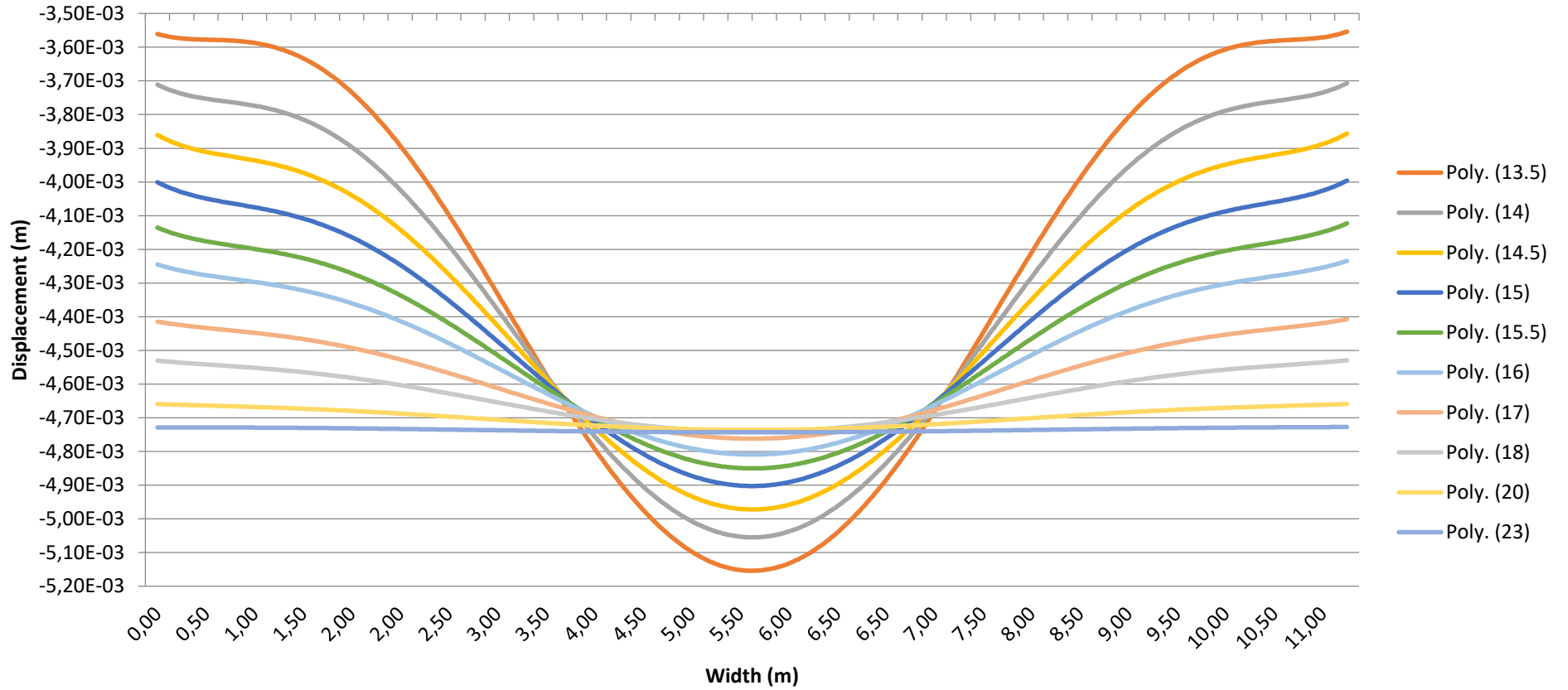
$W_0=8m - \phi=20$



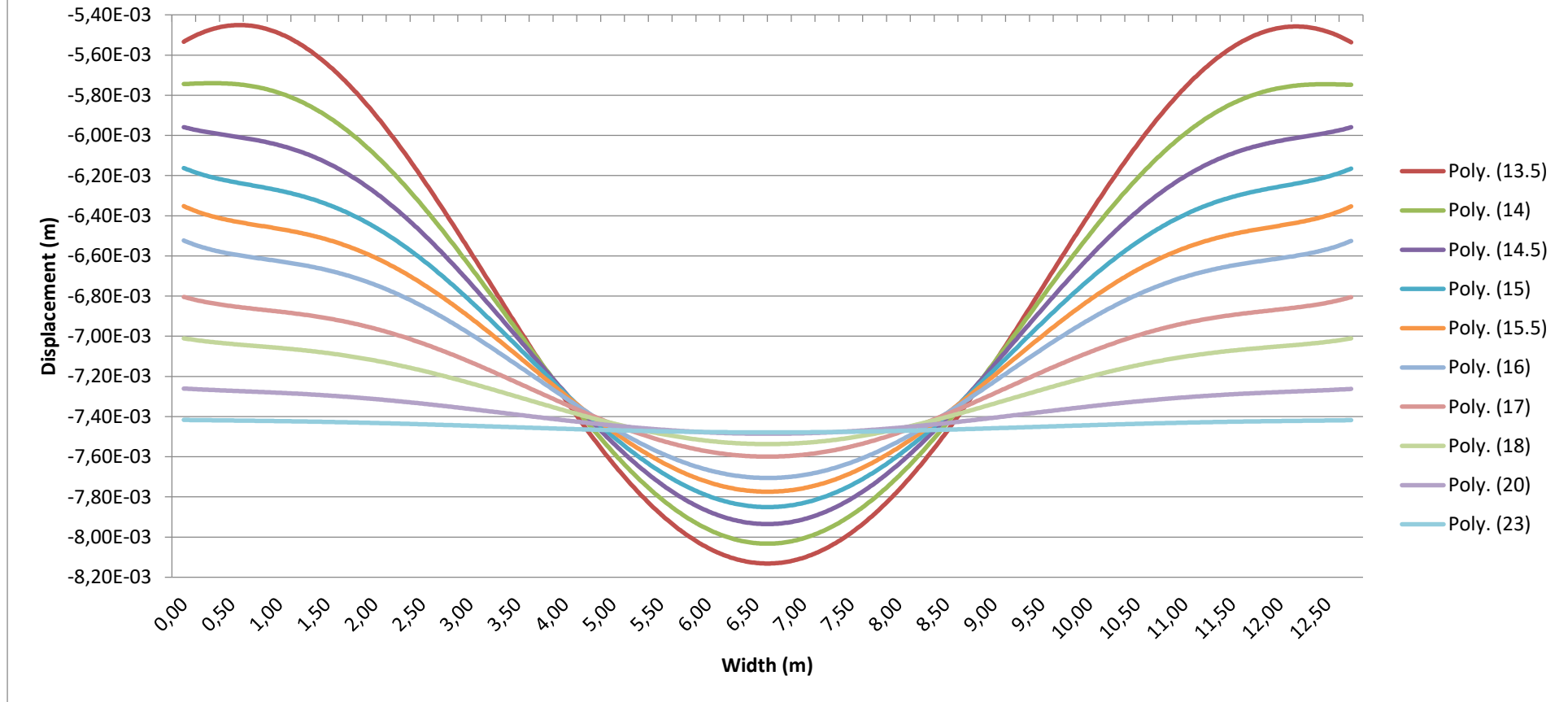
$W_o=10m - \phi=20$



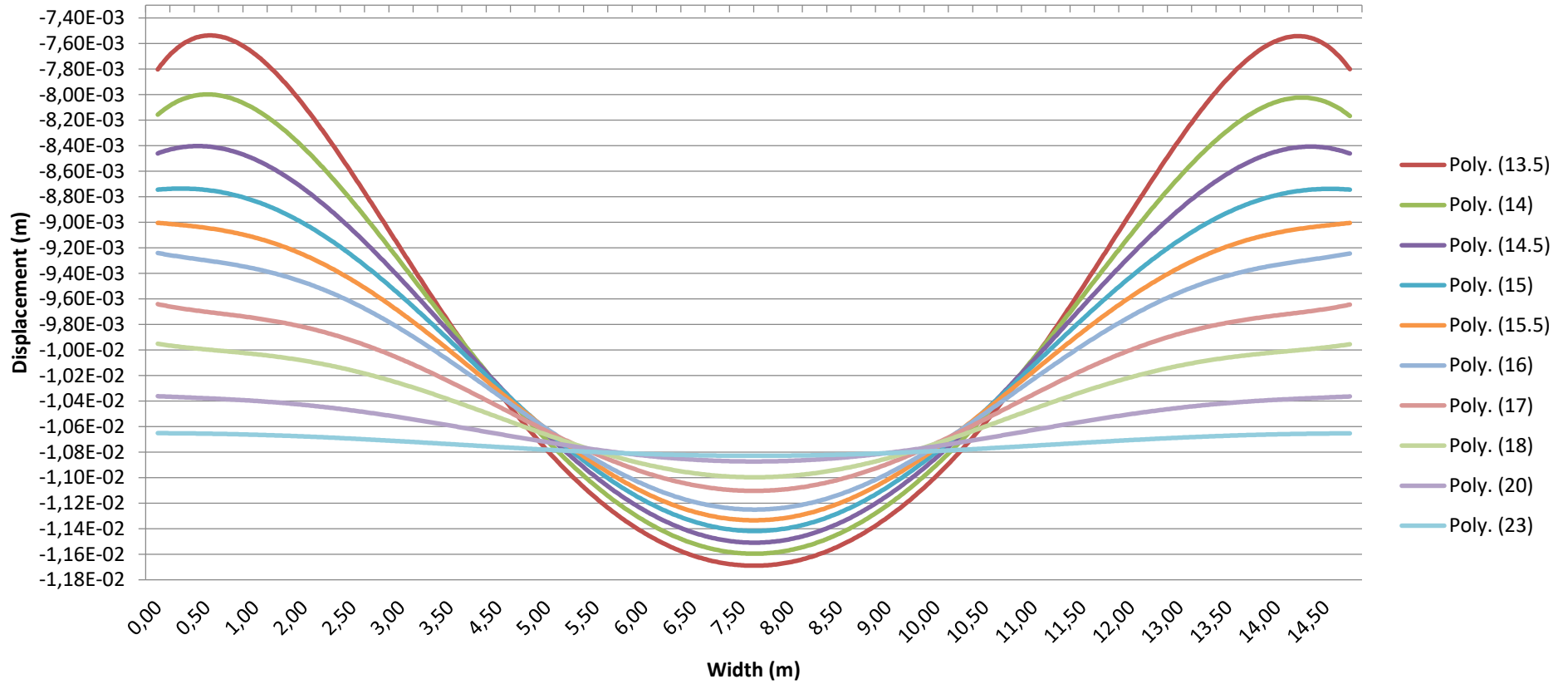
$W_0=6m - \phi=30$



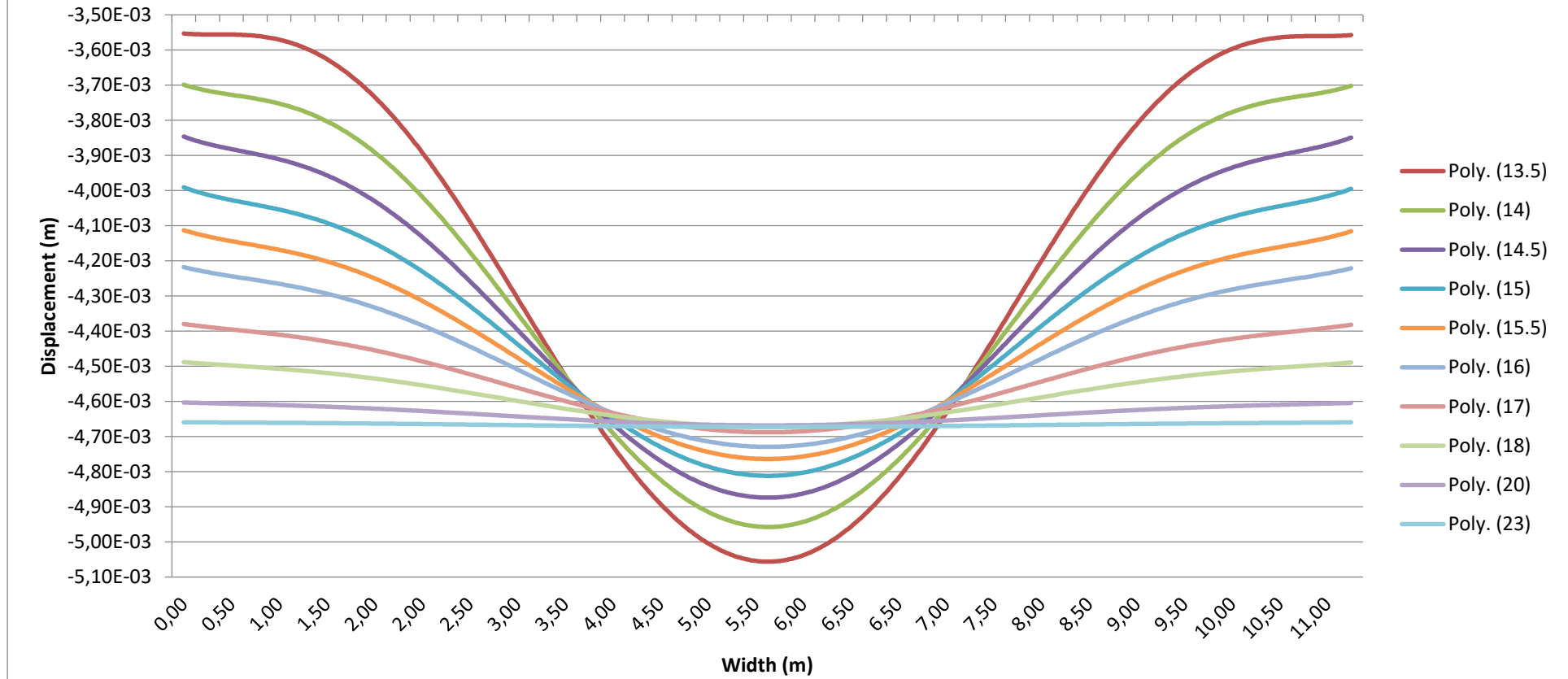
$W_0=8m - \phi=30$



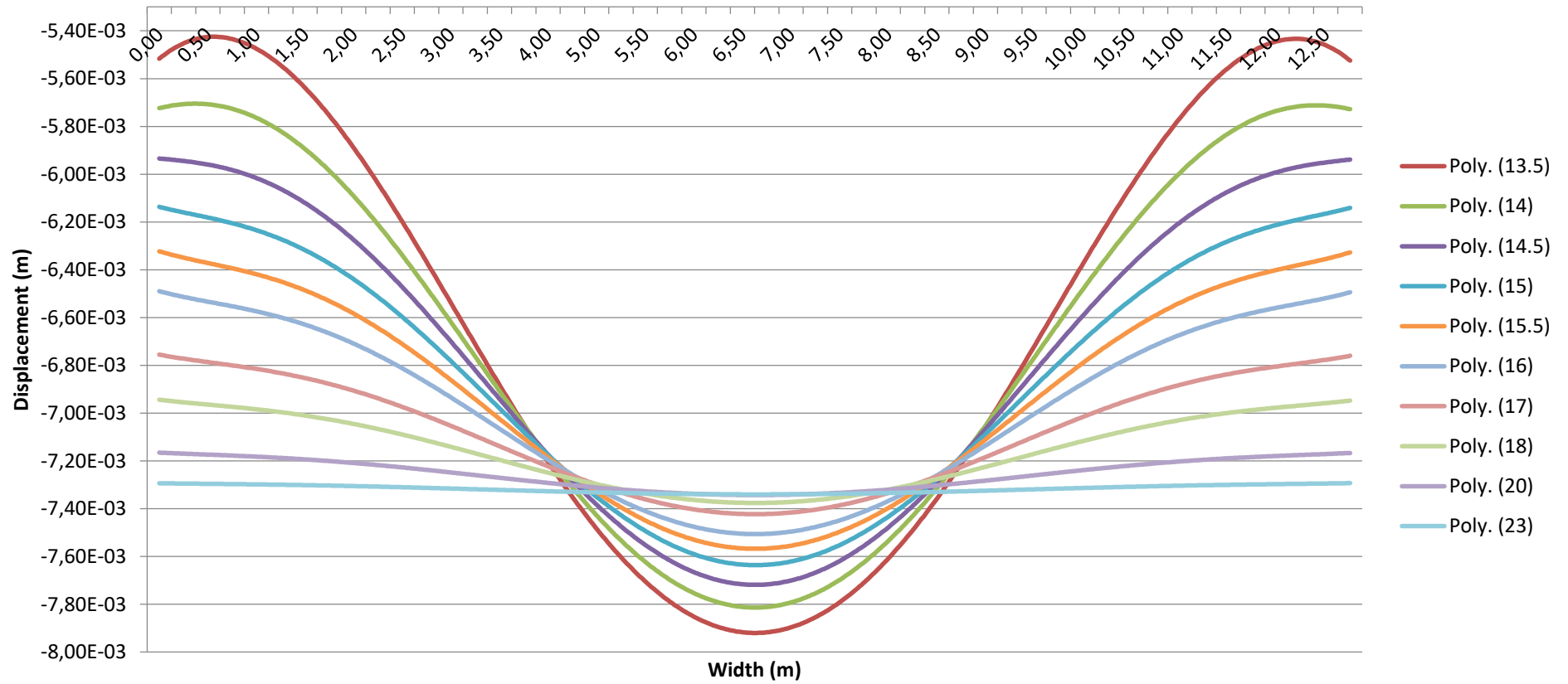
$W_o=10m - \phi=30$



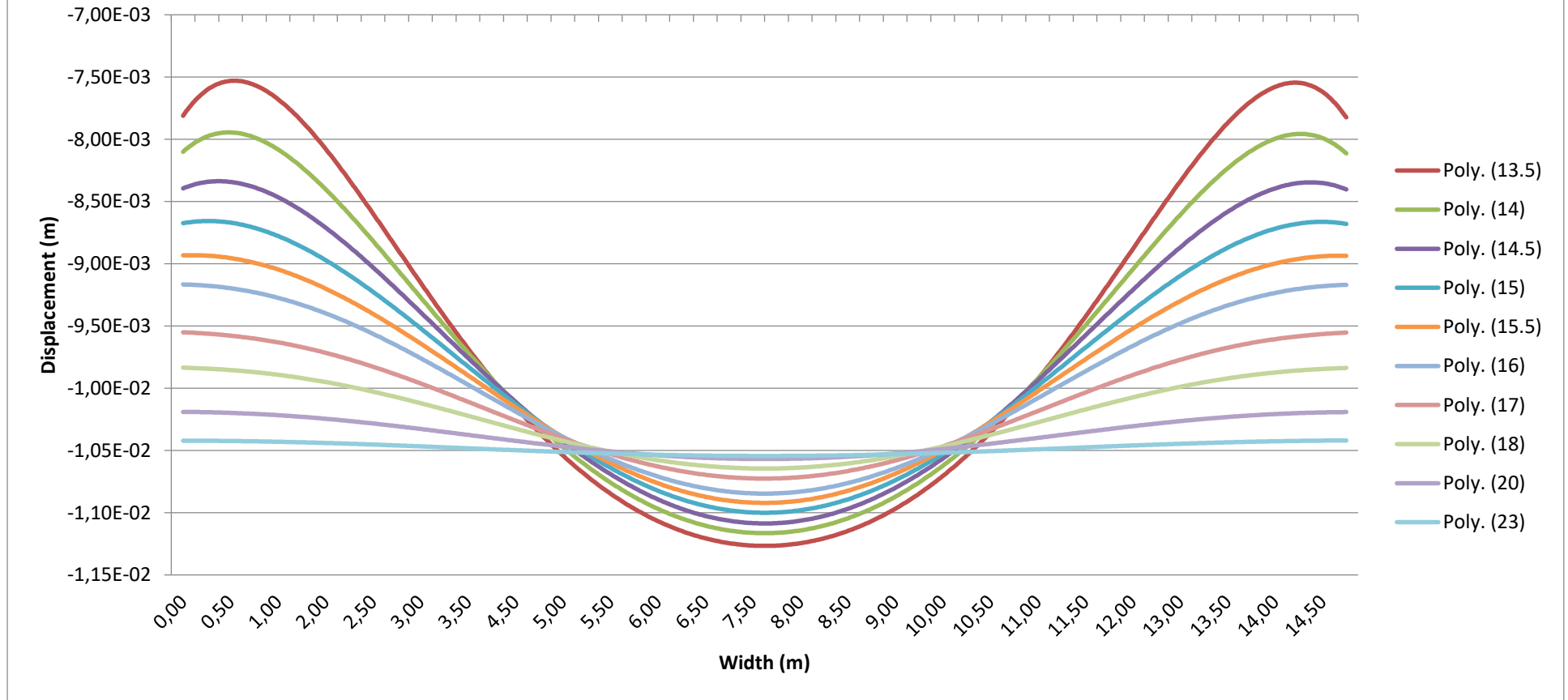
$W_0=6m - \phi=40$



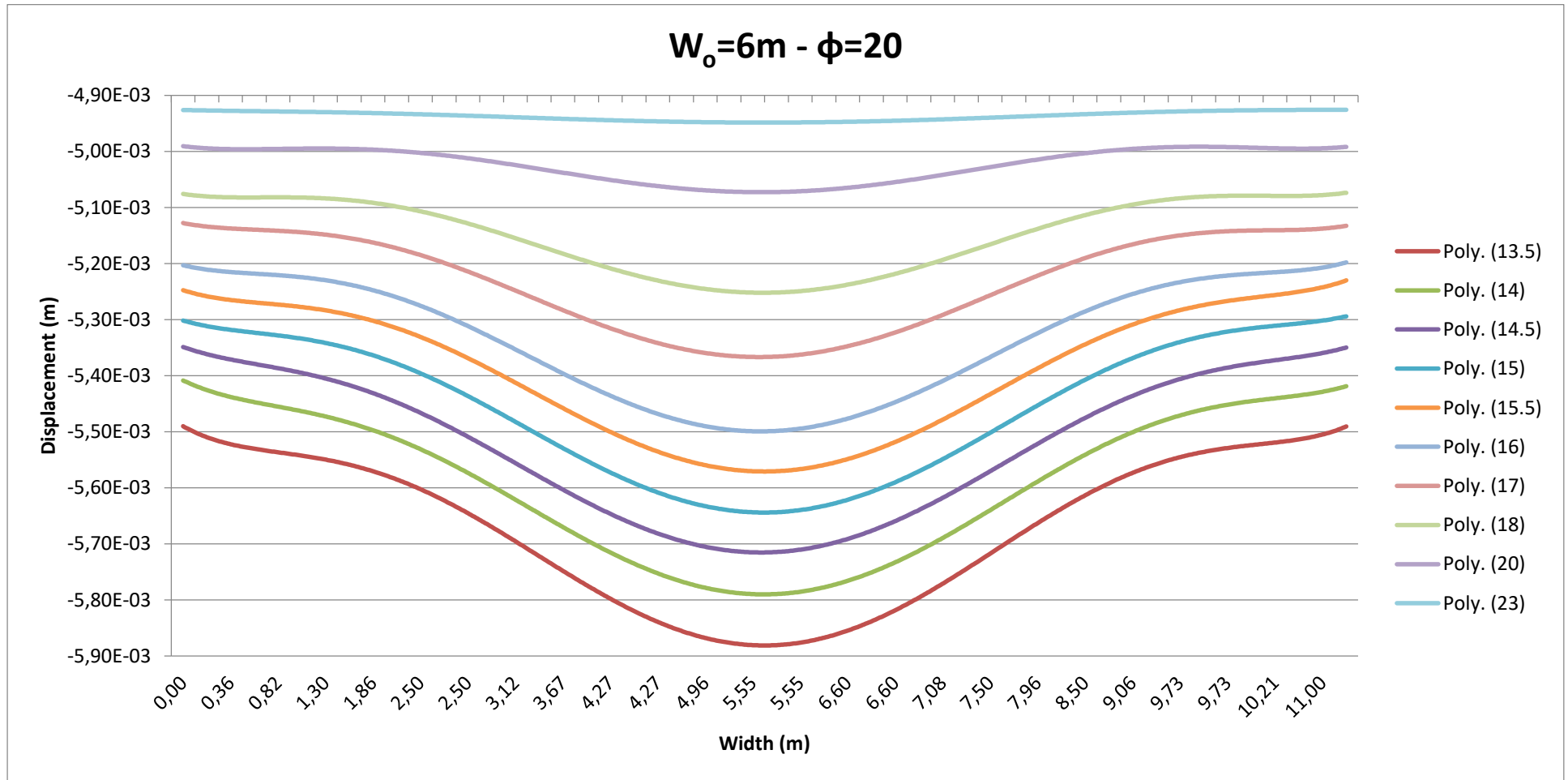
$W_0=8m - \phi=40$



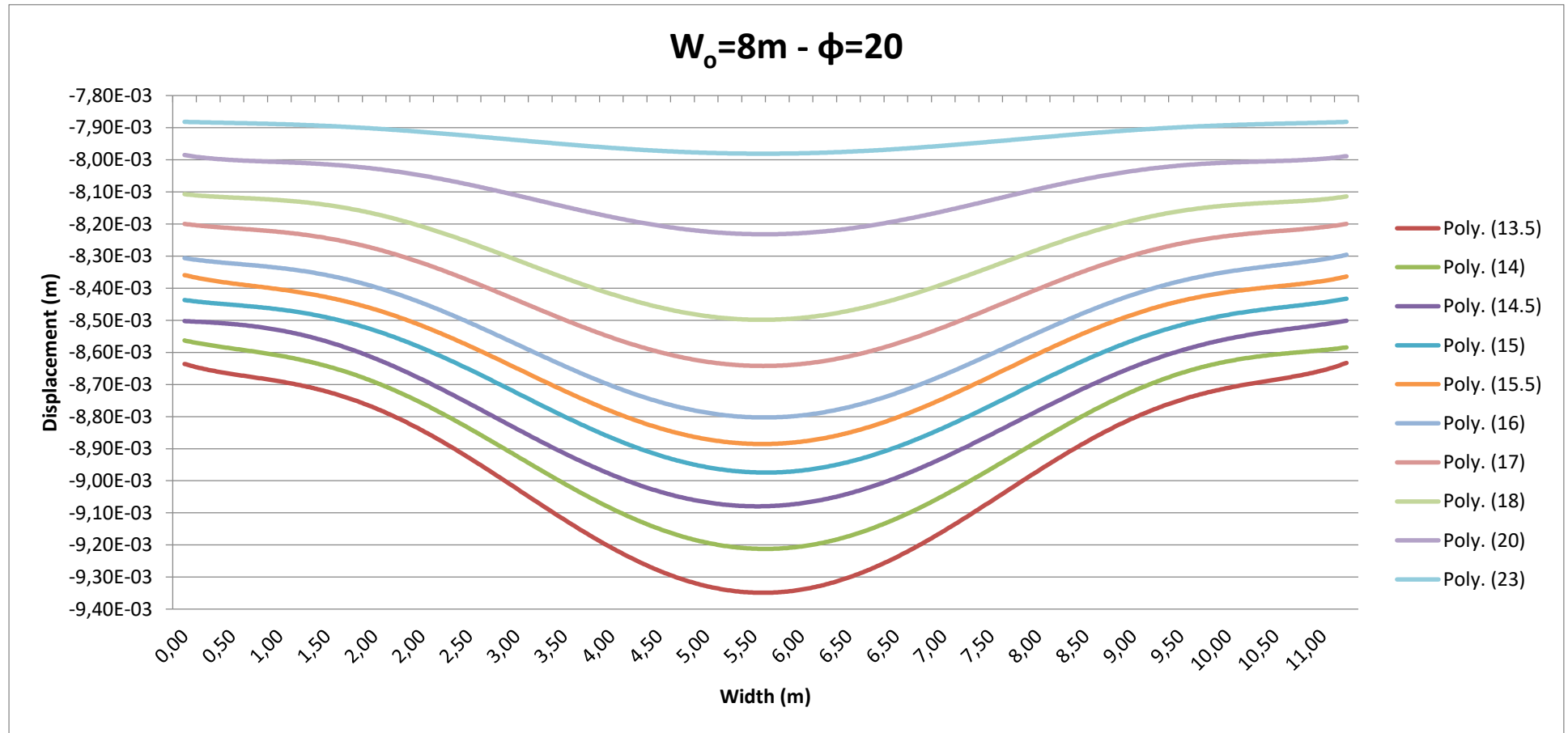
$W_o=10m - \phi=40$



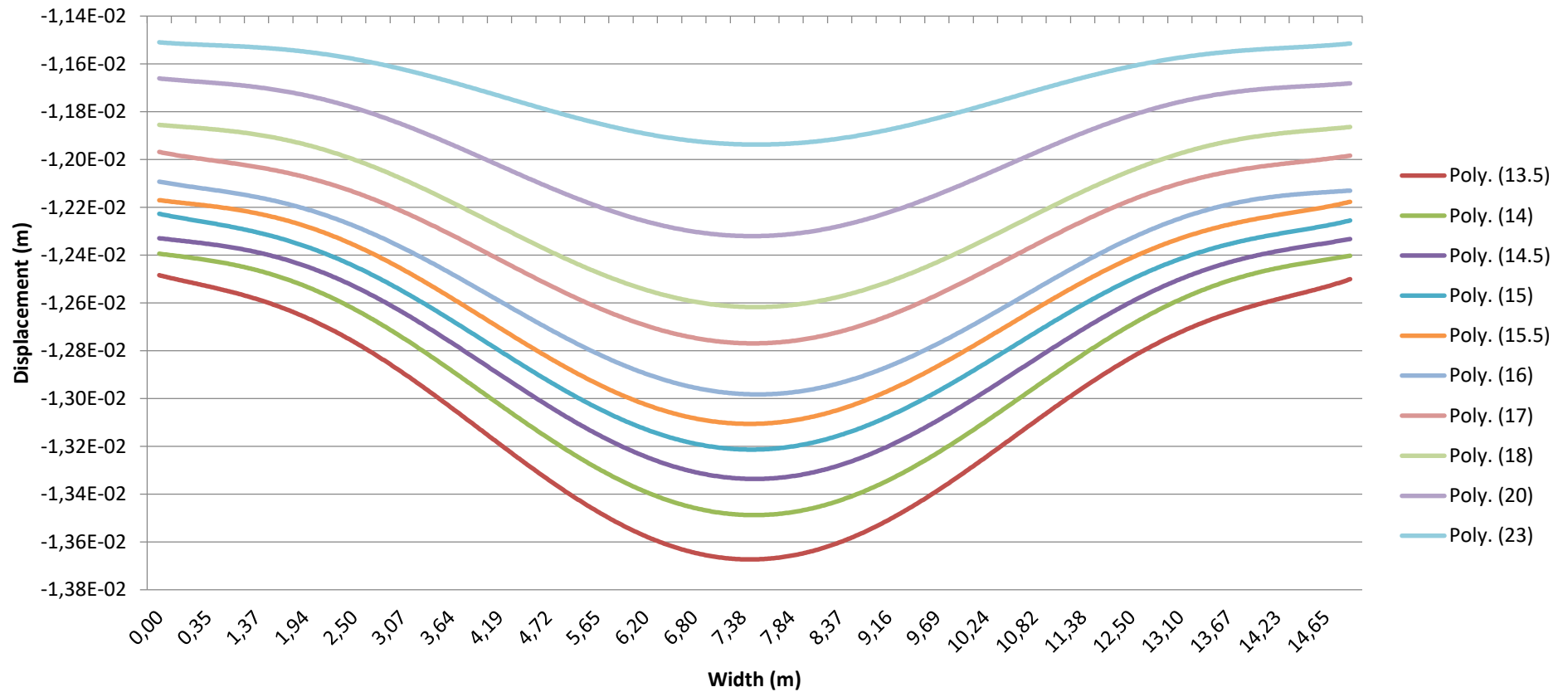
7.3. Προφίλ Βύθισης στο μέσο της Διασταύρωσης για το 2^ο Στάδιο της 1^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων



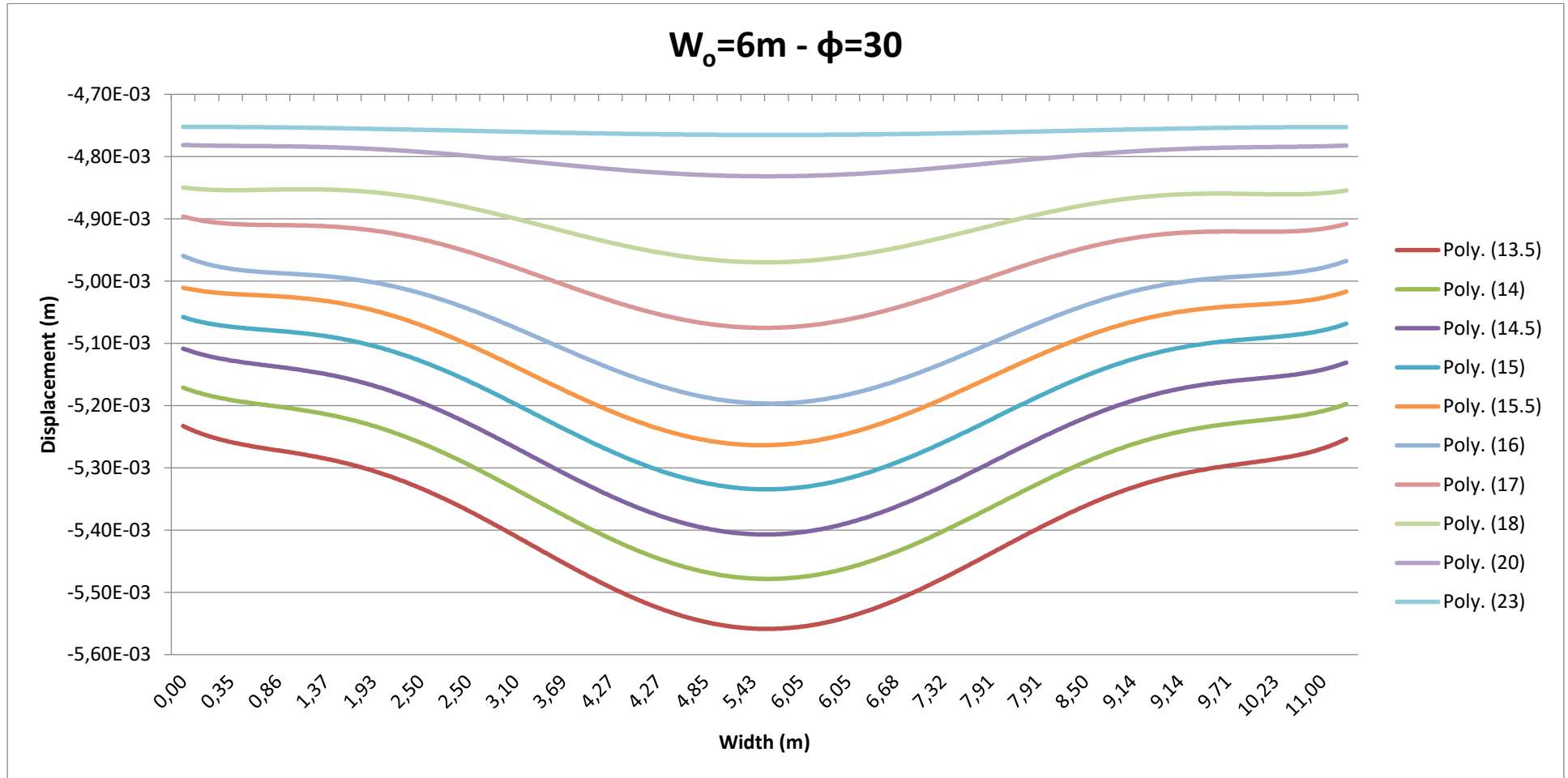
Υπόμνημα										
Καμπύλη (Υψος, m)	13.5	14	14.5	15	15.5	16	17	18	20	23
Στρώμα	1°	2°	3°	4°	5°	6°	8°	10°	14°	20°



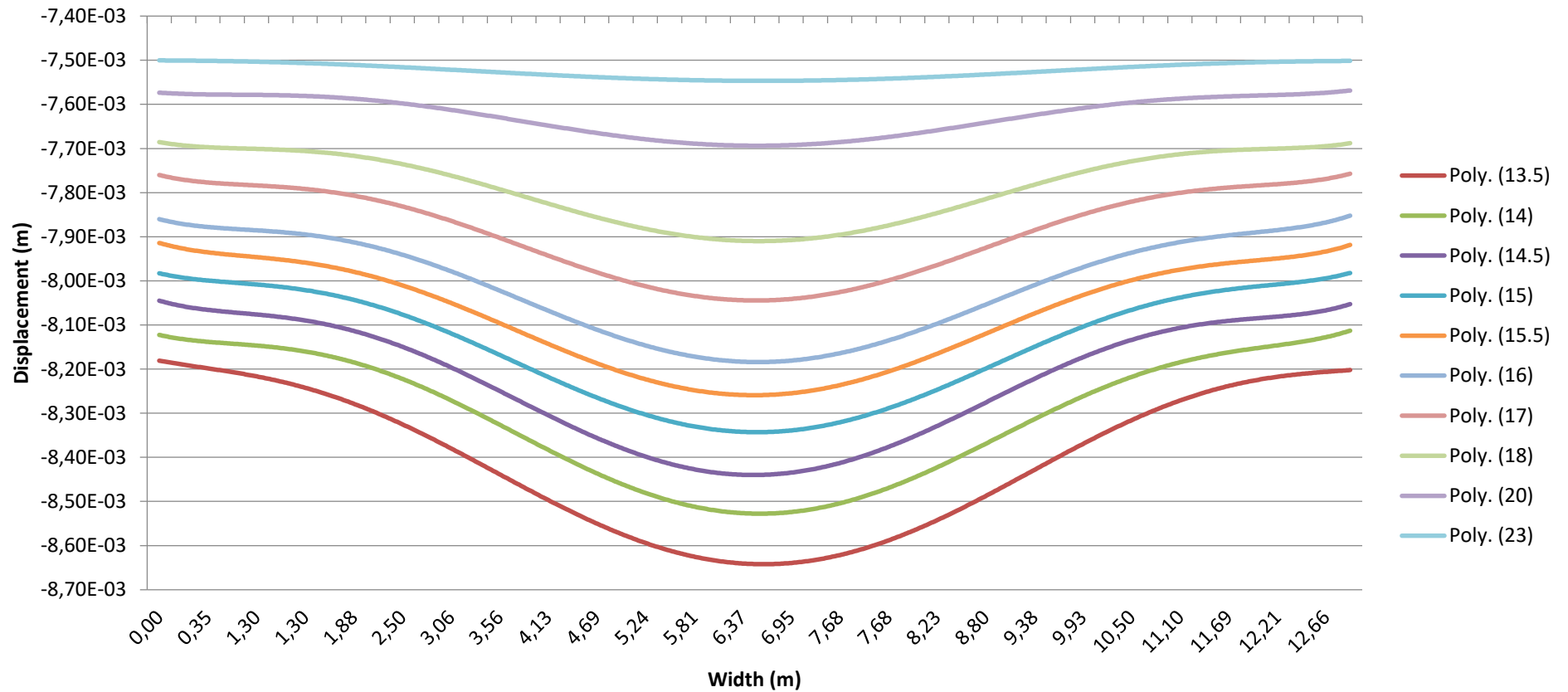
$W_o=10m - \phi=20$



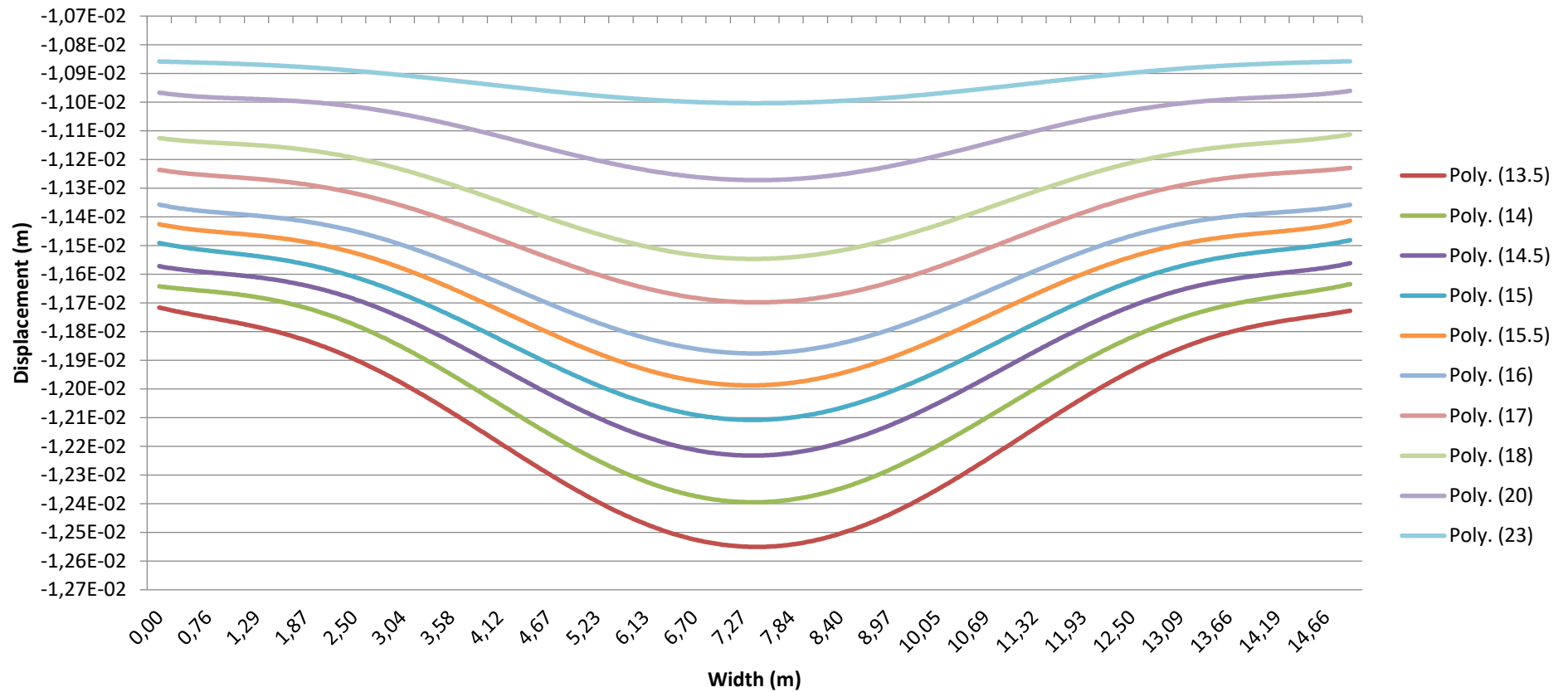
$W_o=6m - \phi=30$



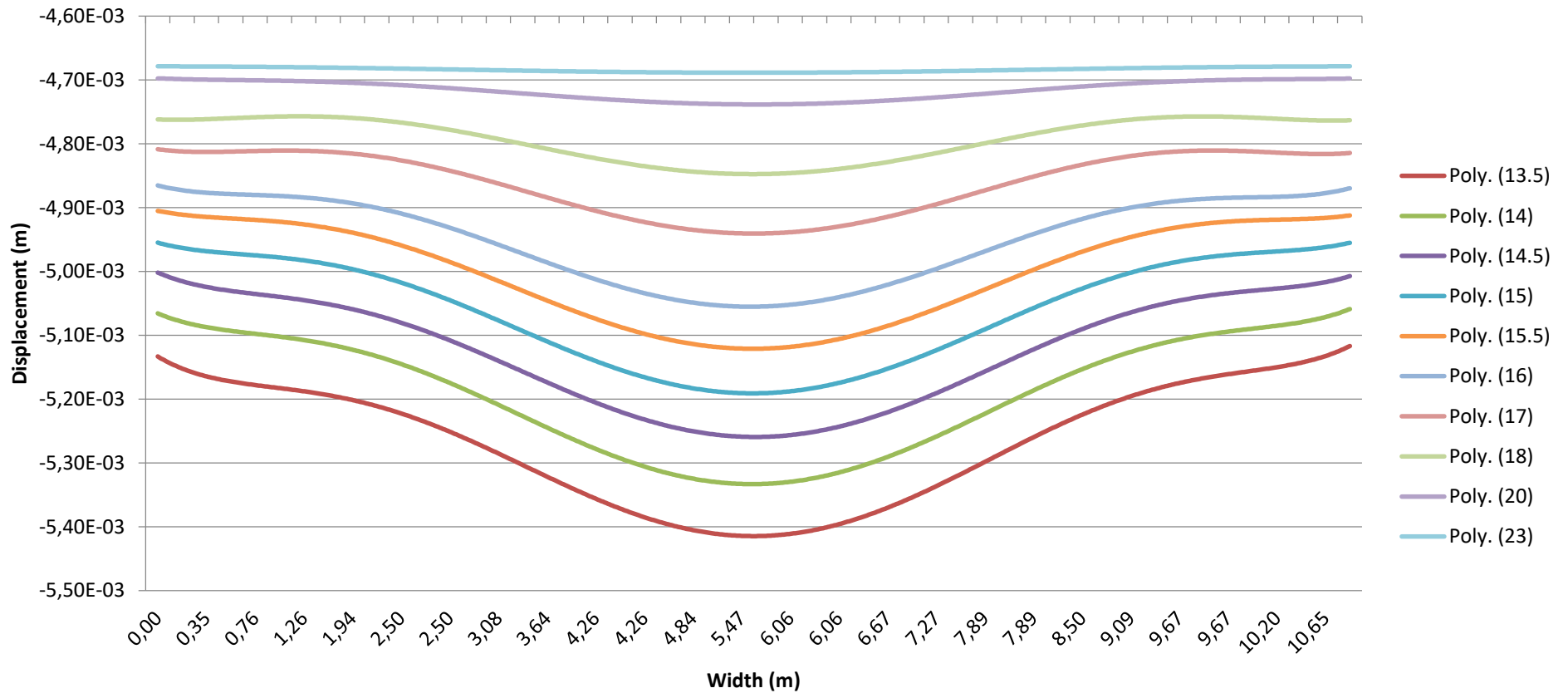
$W_o=8m - \phi=30$



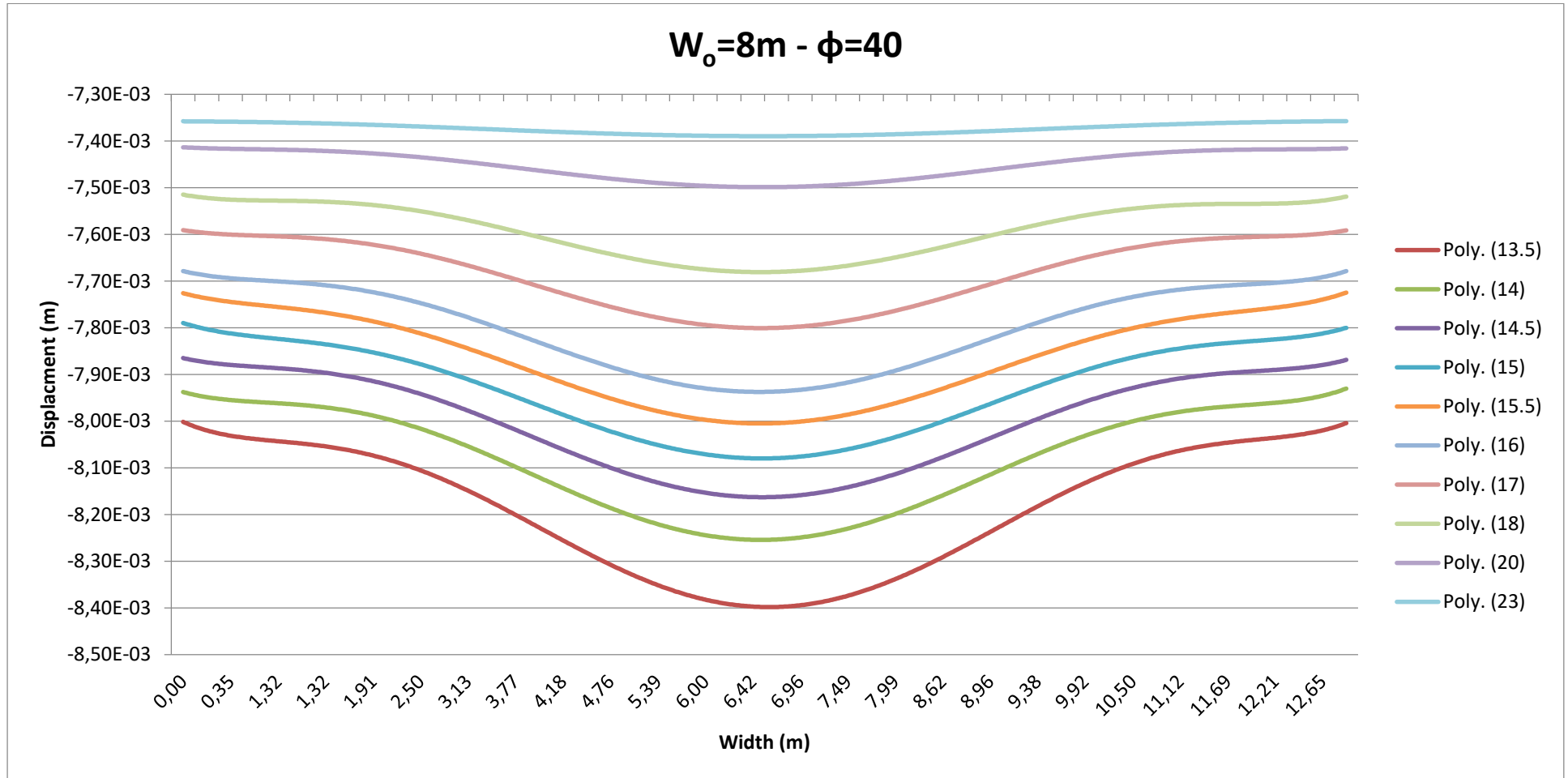
$W_o=10m - \phi=30$



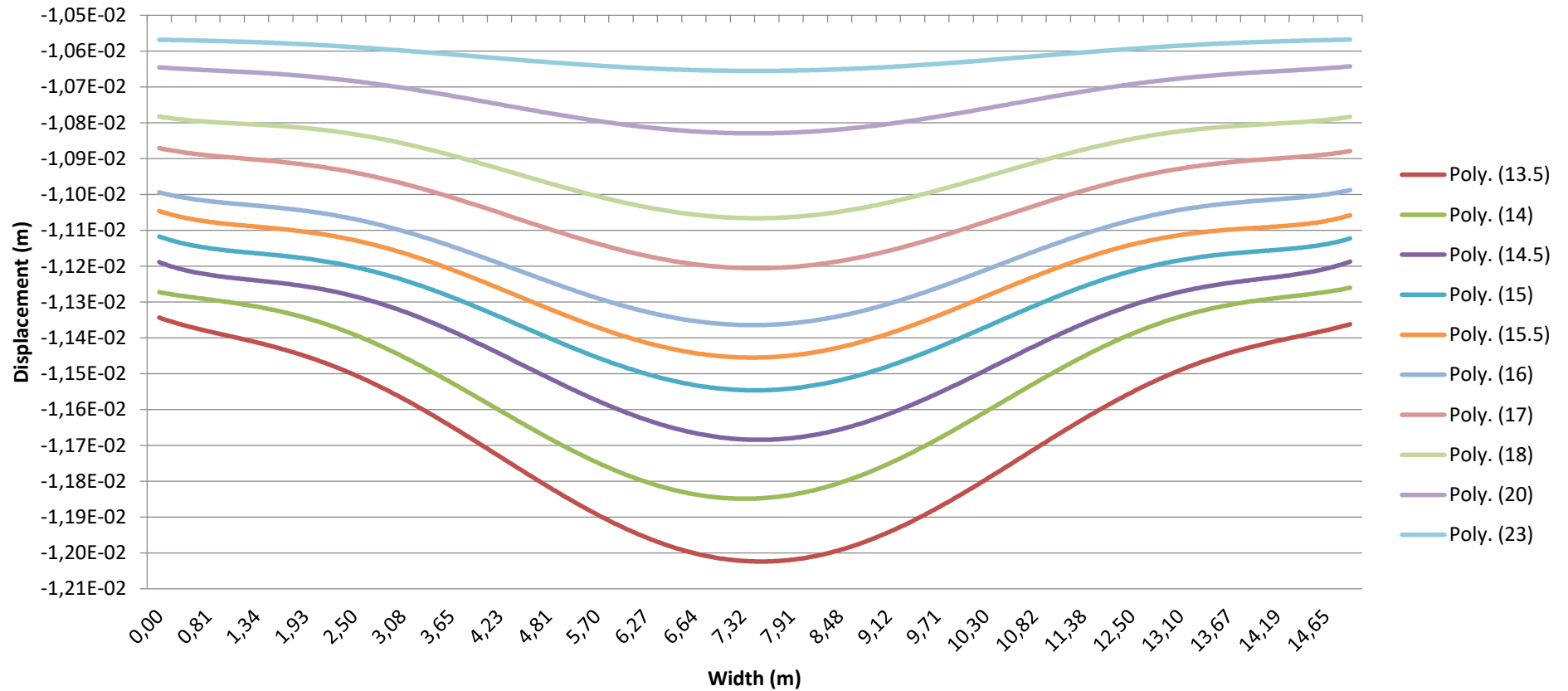
$W_o=6m - \phi=40$



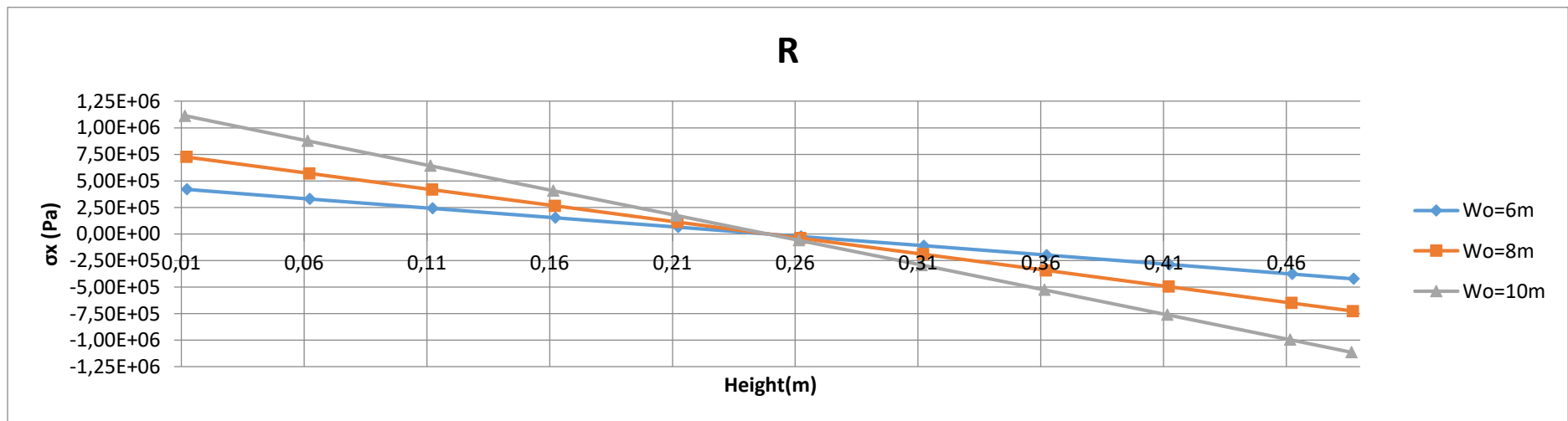
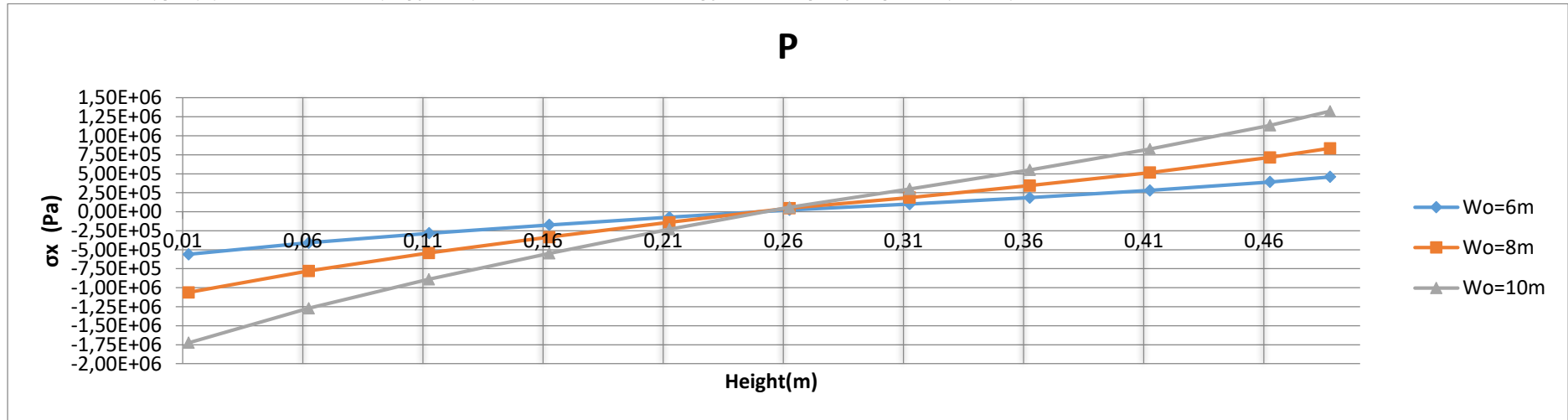
$W_o=8m - \phi=40$



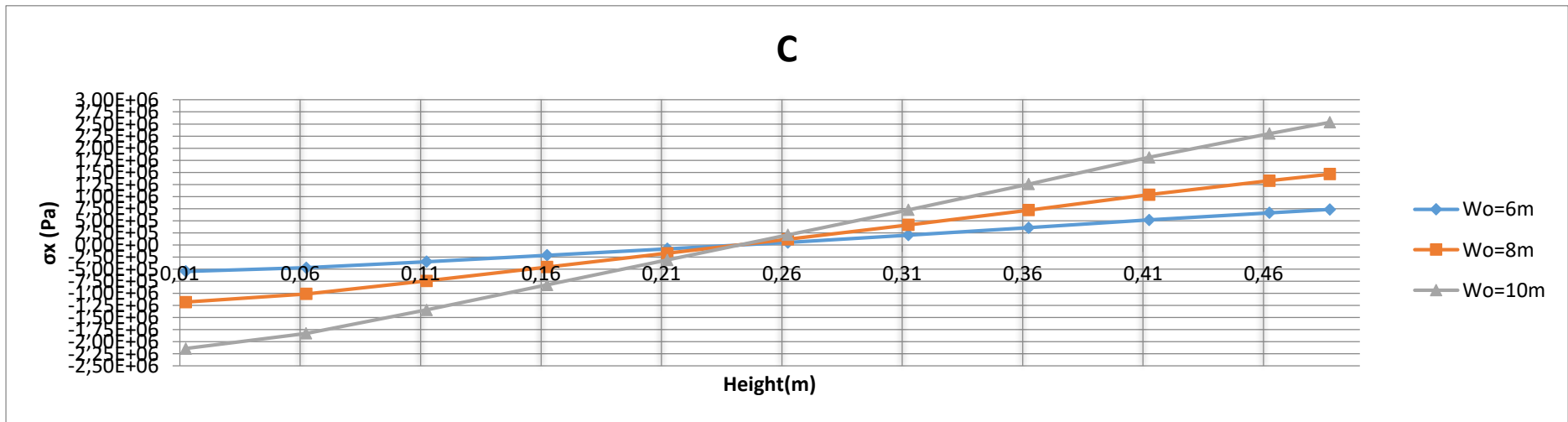
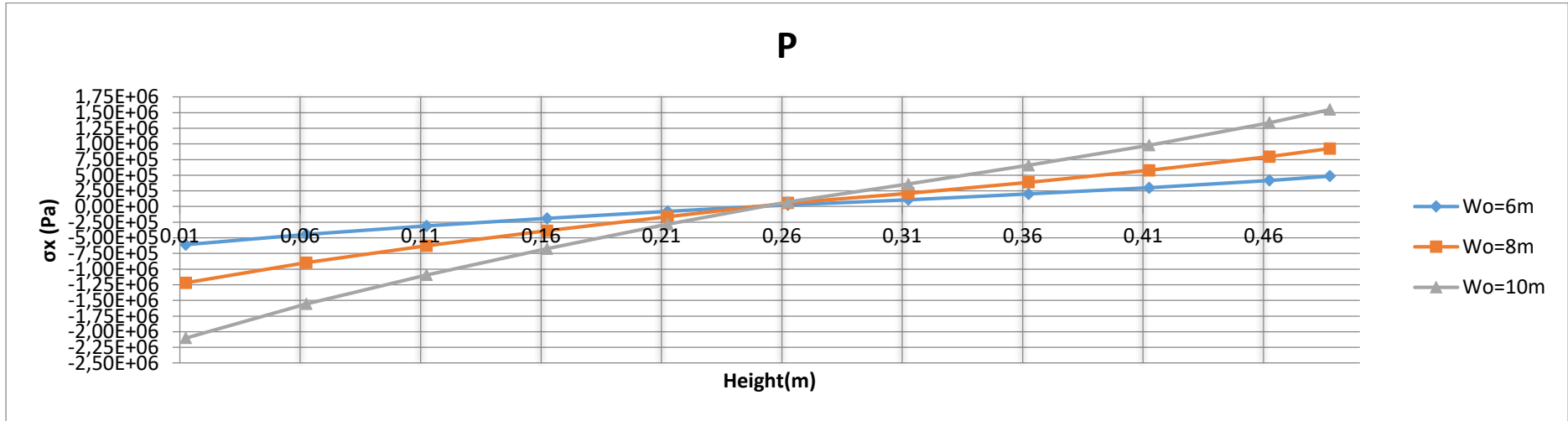
$W_o=10m - \phi=40$

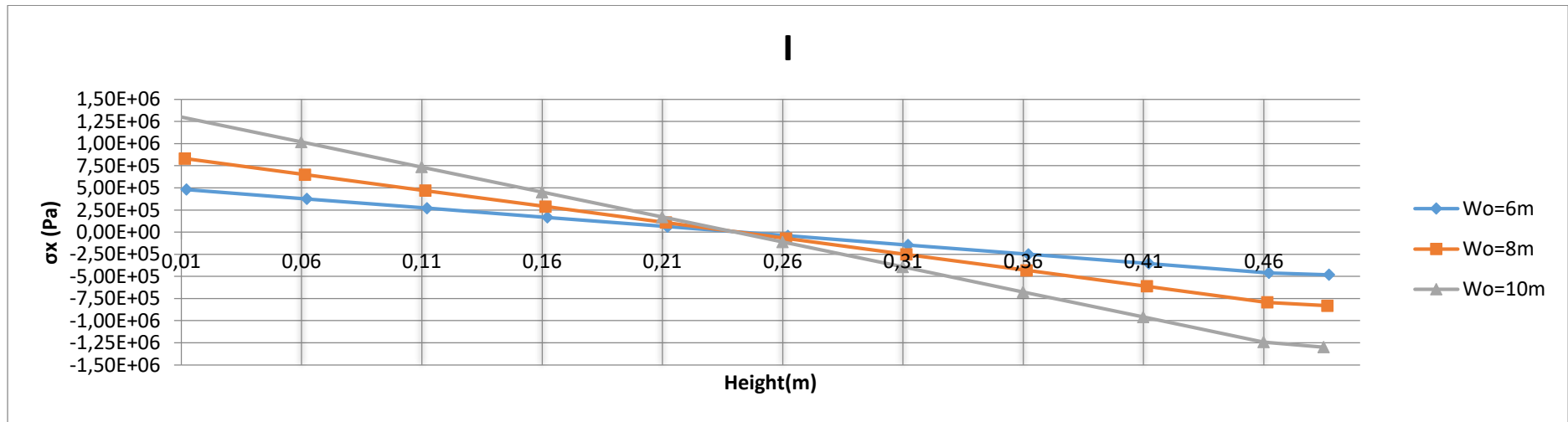
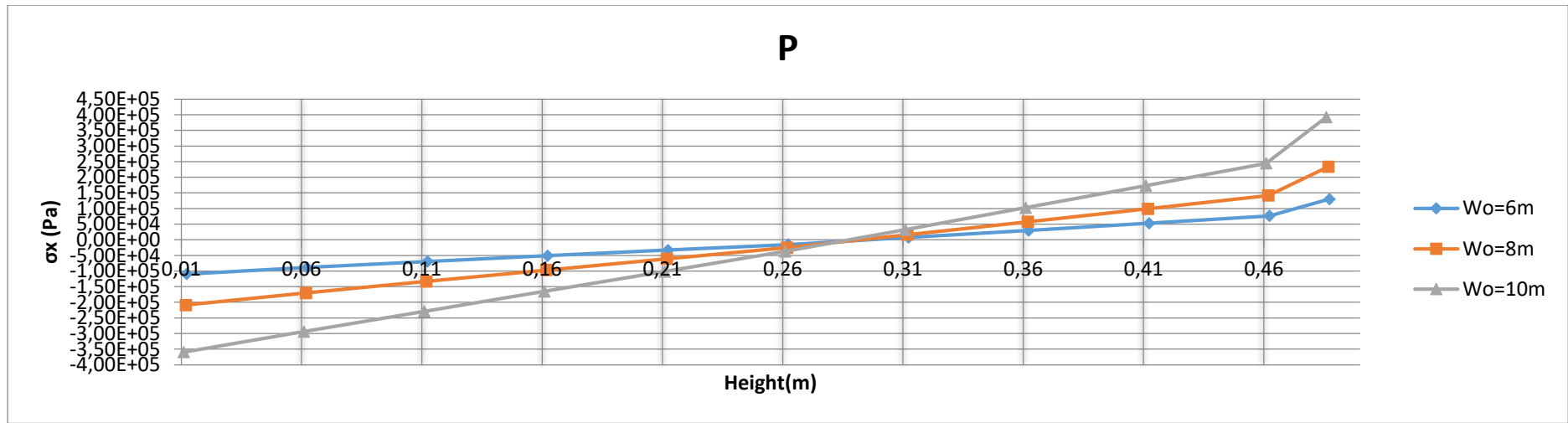


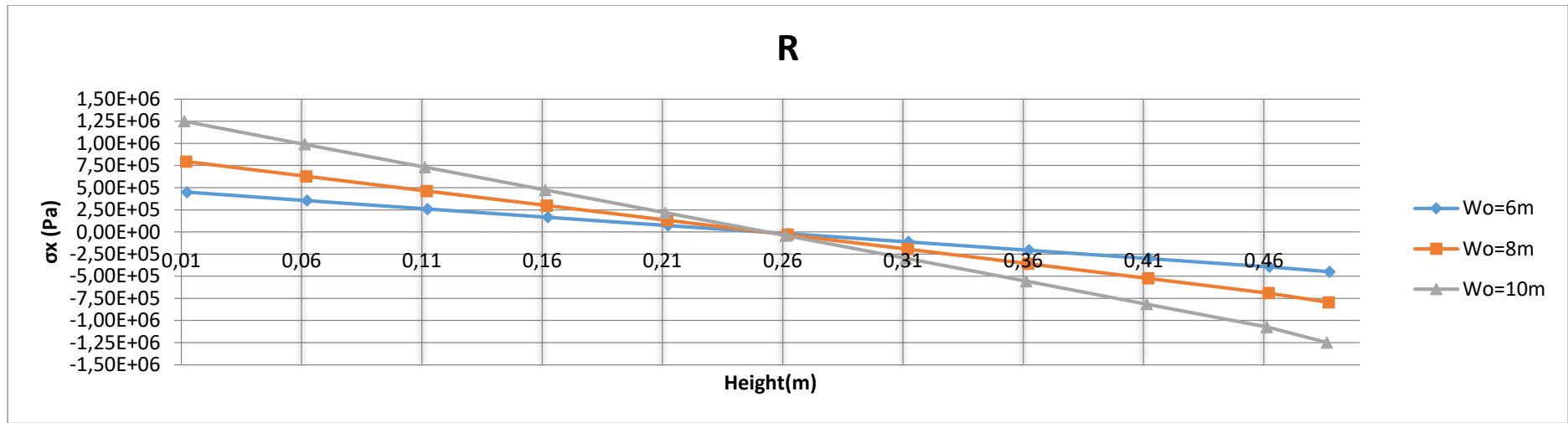
7.4. Διαγράμματα Κατανομής σ_x για το 1^ο Στάδιο της 2^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων



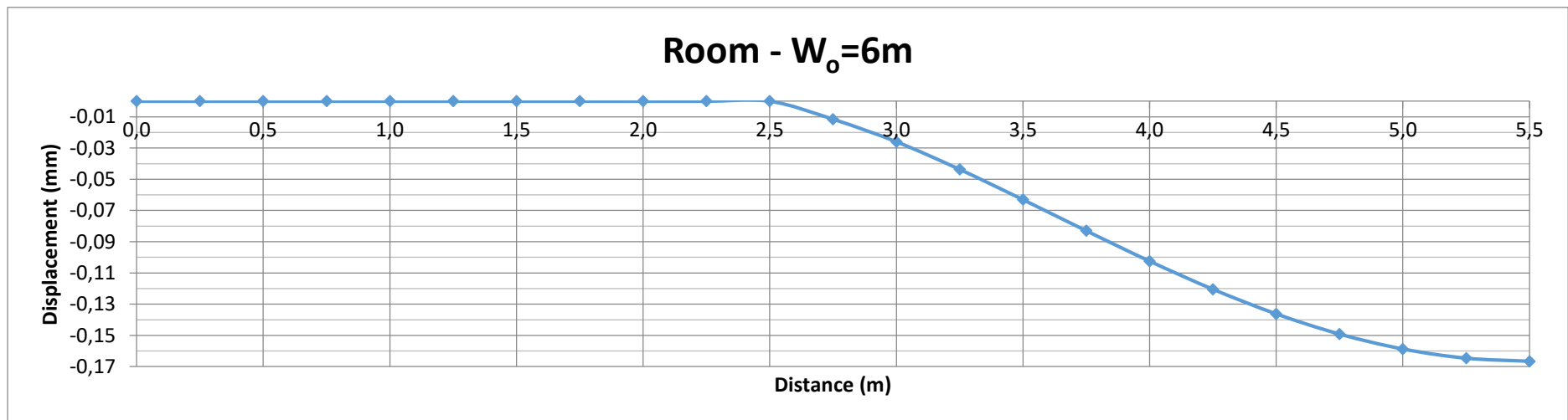
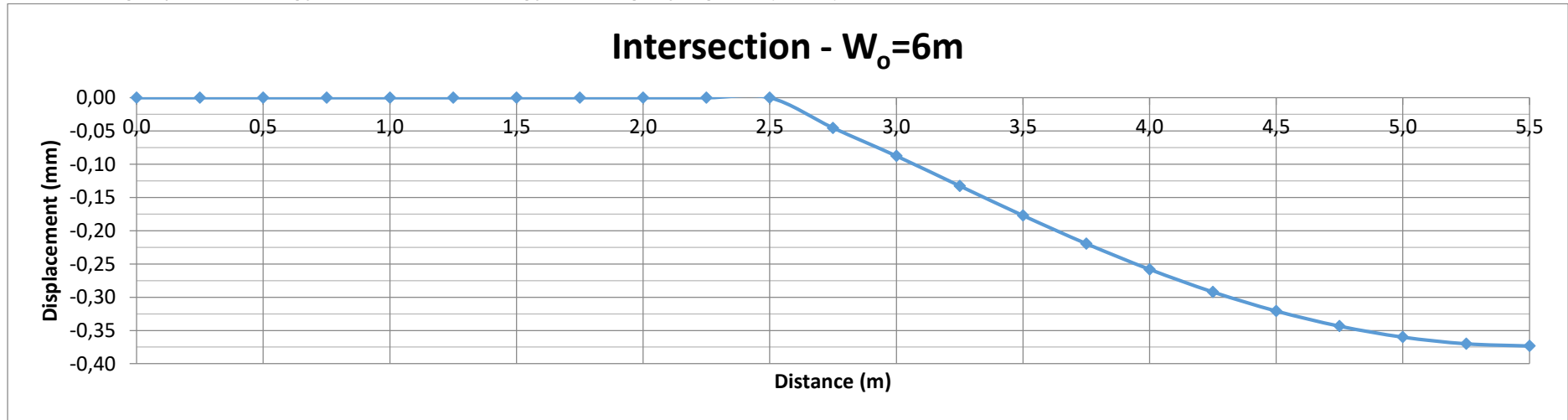
7.5. Διαγράμματα Κατανομής σ_x για το 2^ο Στάδιο της 2^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων

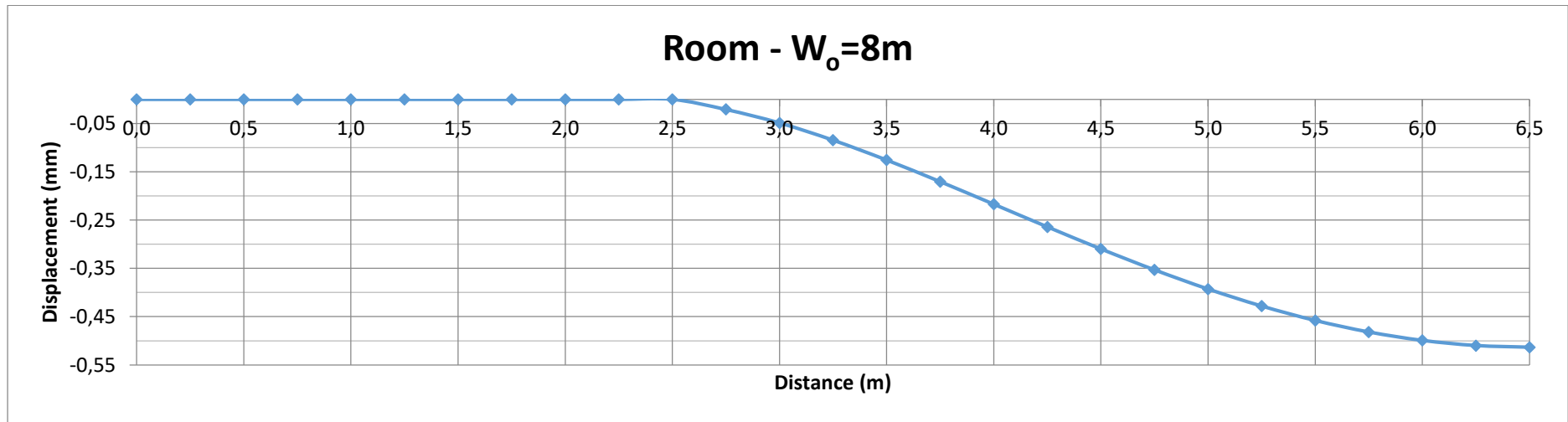




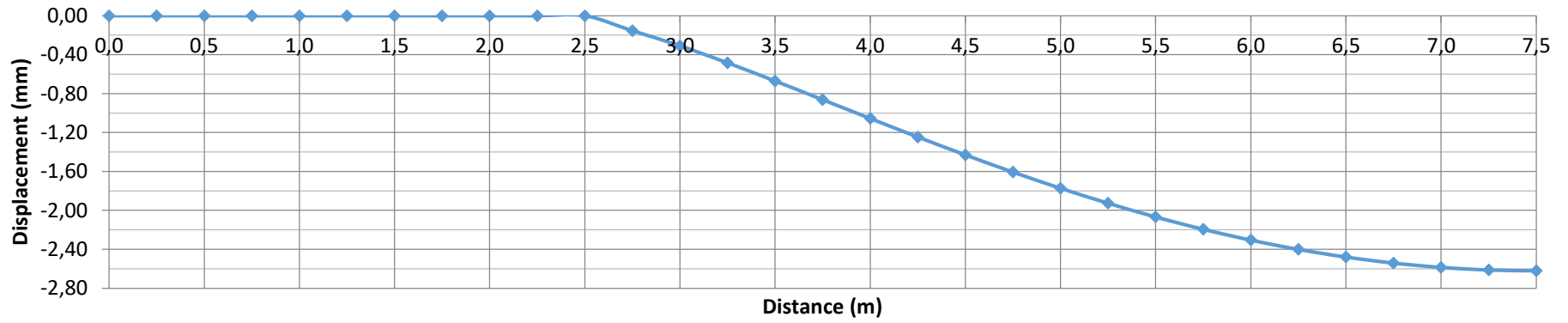


7.6. Προφίλ Βύθισης στο 2^ο Στάδιο της 2^{ης} Σειράς Προσομοιωμάτων

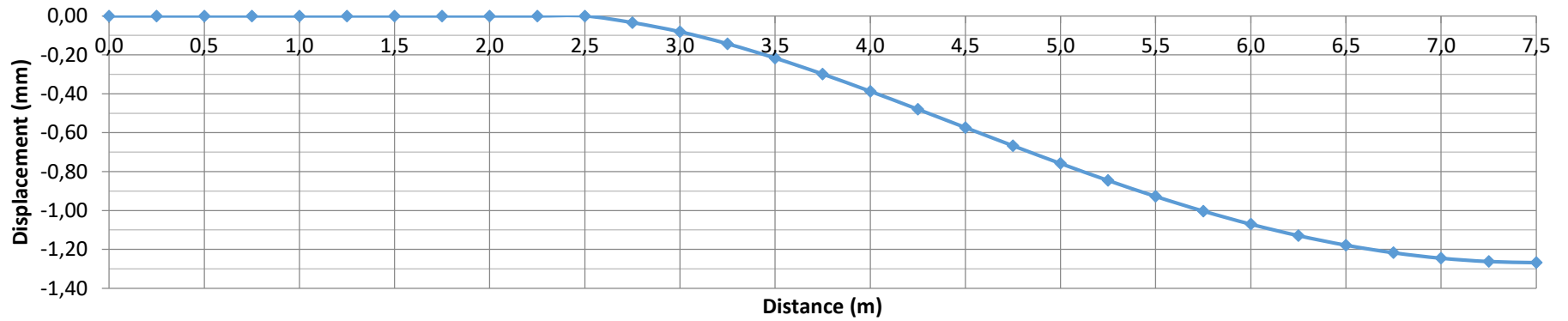




Intersection - $W_0=10m$

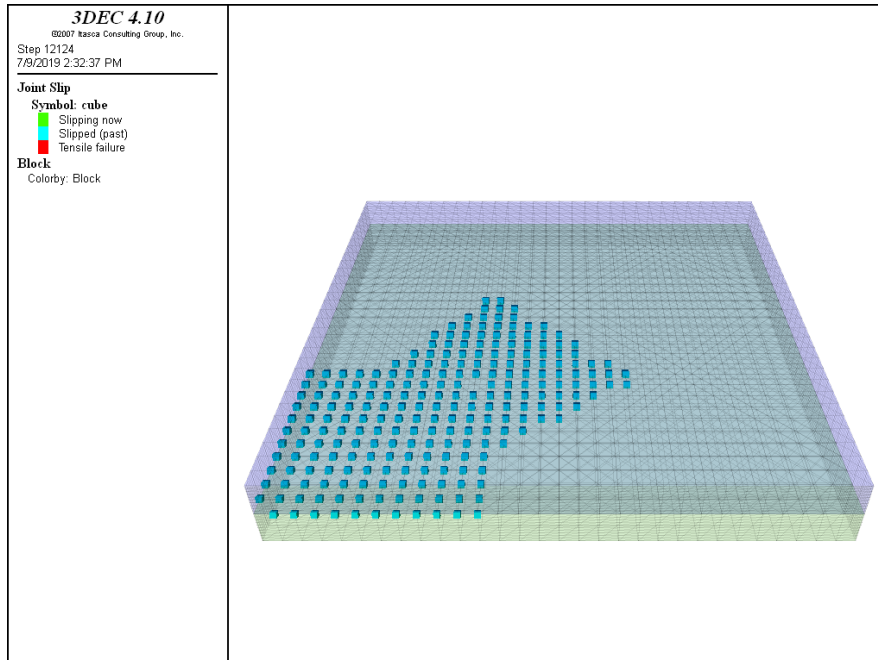


Room - $W_0=10m$

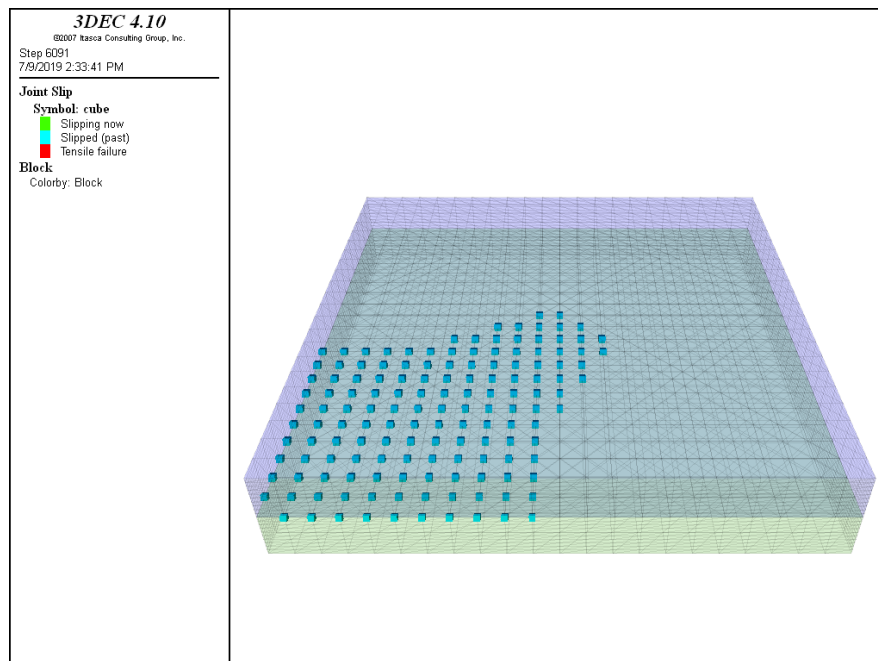


7.7.Επίδραση της αύξησης της P_b στο εύρος της Ολίσθησης

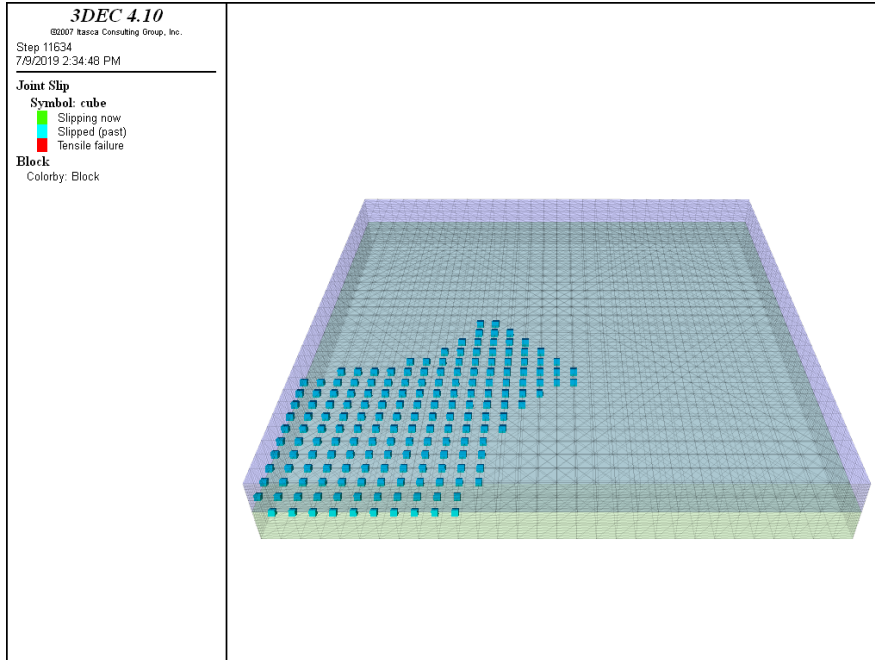
Αύξηση της P_b κατά 50% για $W_0=8m$



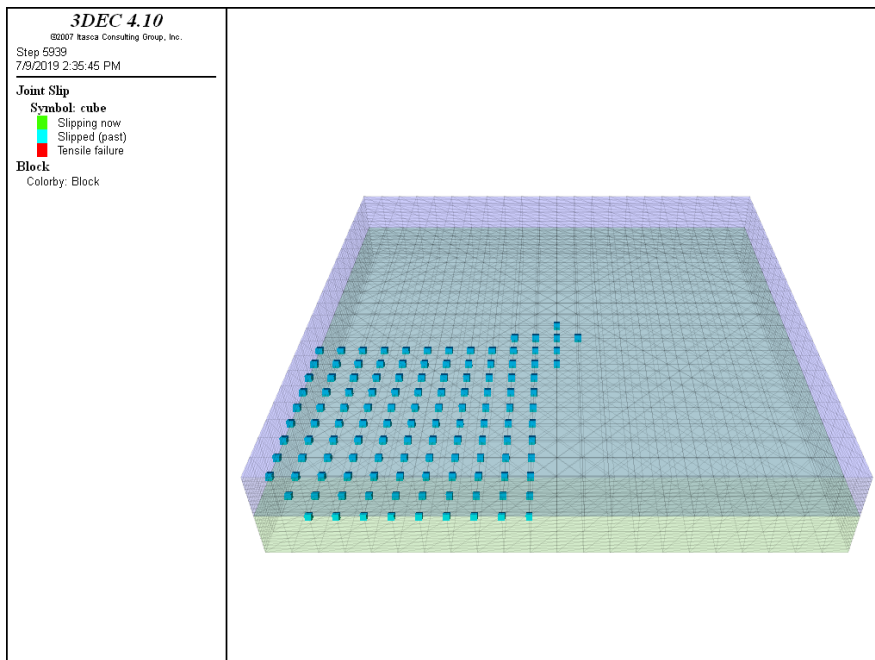
Αύξηση της P_b κατά 50% για $W_0=10m$



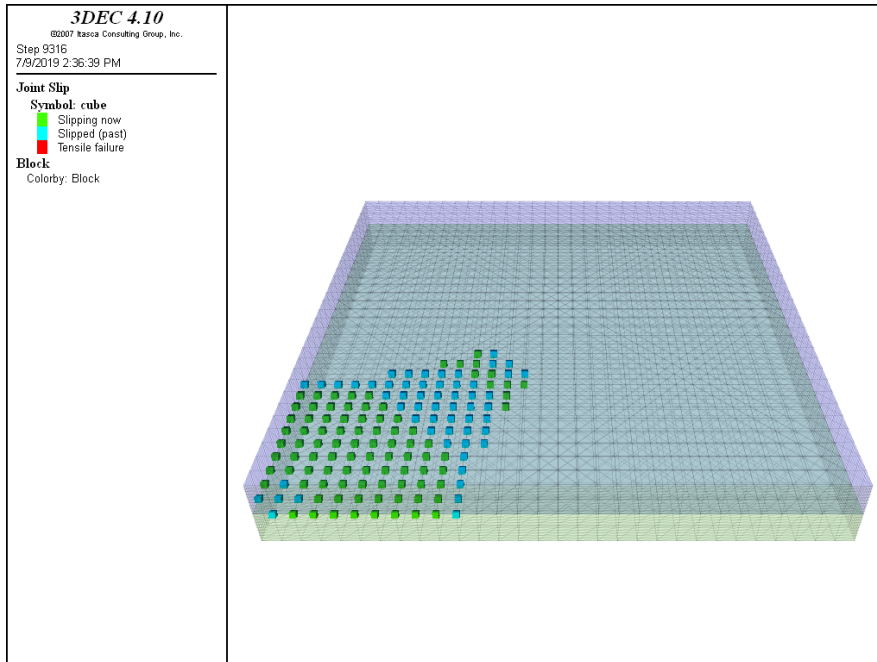
Αύξηση της P_b κατά 100% για $W_o=8m$



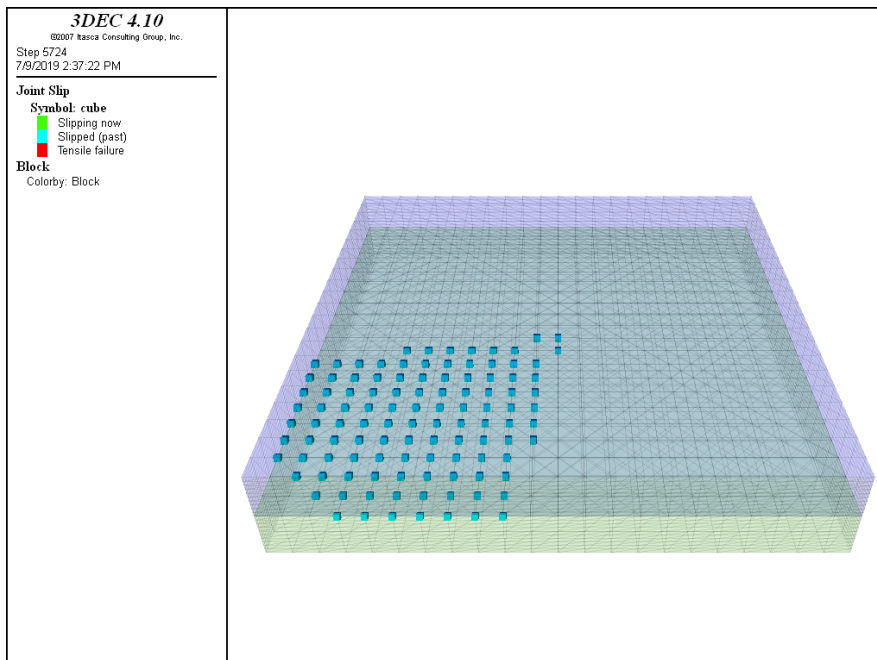
Αύξηση της P_b κατά 100% για $W_o=10m$



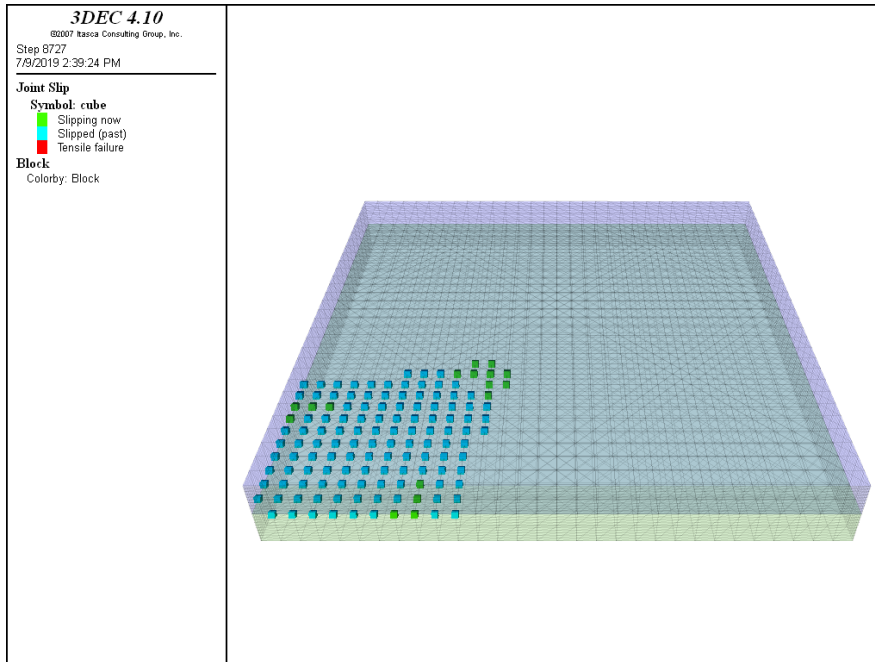
Αύξηση της P_b κατά 200% για $W_o=8m$



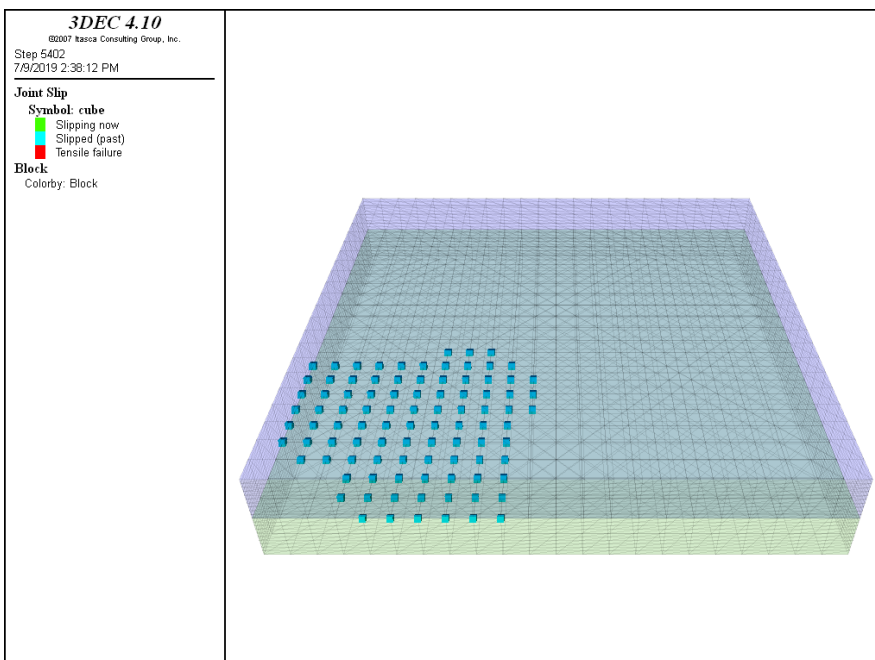
Αύξηση της P_b κατά 200% για $W_o=10m$



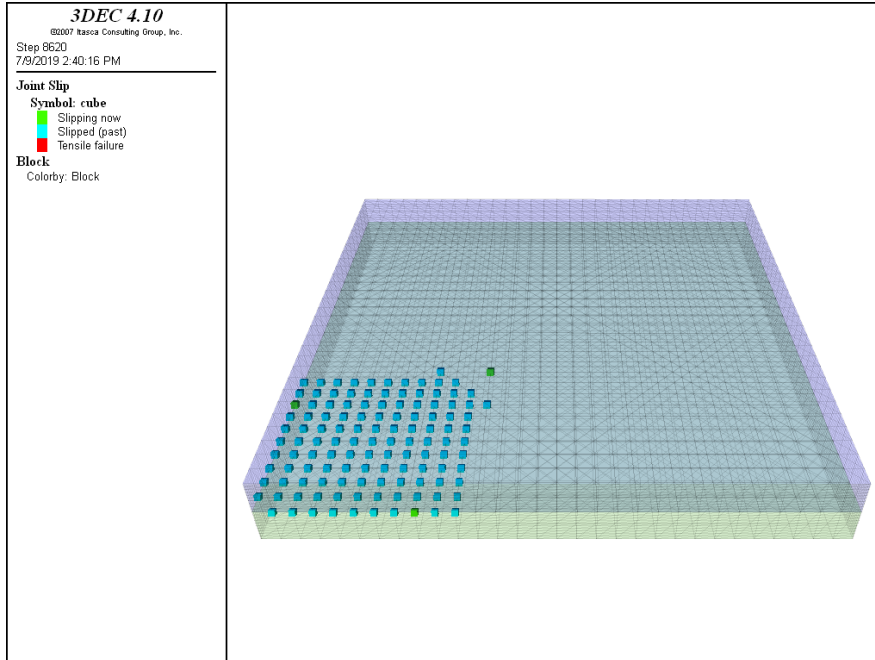
Αύξηση της P_b κατά 300% για $W_o=8m$



Αύξηση της P_b κατά 300% για $W_o=10m$



Αύξηση της P_b κατά 400% για $W_0=8m$



Αύξηση της P_b κατά 400% για $W_0=10m$

