



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης

ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Πανταζής

Επιβλέπων: Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

“Στατική και Δυναμική Επίλυση Πρανών με την Μέθοδο των
Πεπερασμένων Στοιχείων”

“Static and Dynamic Slope Analysis with Finite Element Method”

Για την εκπόνηση αυτής της εργασίας οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχαήλ Σακελλαρίου. Η επιστημονική καθοδήγησή του και η άψογη συνεργασία του βοήθησαν καθοριστικά για το πέρας της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ του διδακτορικούς υποψήφιους του τομέα που ήταν πρόθυμοι να βοηθήσουν σε κάθε απορία. Πάνω από όλα, όμως, ευχαριστώ την οικογένεια μου για όλα όσα έχει κάνει.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το θέμα που διαπραγματεύεται είναι:

«Στατική και Δυναμική επίλυση πρानών με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων»

Η εισαγωγή και ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (Η/Υ) άνοιξε νέους ορίζοντες στις επιστήμες. Αναπτύχθηκαν θεωρίες προσαρμοσμένες στον Η/Υ υπό μορφή μητρώων ή σειρών καθώς και υπολογιστικές μέθοδοι για να επιλύουν προβλήματα που ήταν αδύνατον να λυθούν παλαιότερα. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Method) αναπτύχθηκε λόγω των Η/Υ και χρησιμεύει για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής. Με εφαρμογές σε όλους τους τομείς της, όπως στις κατασκευές και μελέτες πρानών, γεφυρών, σηράγγων, πολυκατοικιών, θεμελιώσεων, οδοστρωμάτων κ.ο.κ., η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι σημαντικό εργαλείο στα χέρια του Μηχανικού.

Σκοπός στην συγκεκριμένη εργασία είναι να χρησιμοποιηθεί αυτό το εργαλείο σε ένα τομέα που απαιτεί ακρίβεια σε βάθος χρόνου, στην μελέτη ευστάθειας των πρानών, φυσικών και τεχνητών. Το έδαφος πάντα τείνει να βρεθεί σε μια κατάσταση ισορροπίας και ευστάθειας μέσω των διάφορων μηχανισμών που δρουν σε αυτό. Βέβαια, πέρα από αυτούς τους εσωτερικούς μηχανισμούς που δρουν στο έδαφος και εξωτερικοί παράγοντες λαμβάνονται υπόψη για την ευστάθεια του πρανούς. Έτσι, γεωτεκτονικά φαινόμενα (π.χ. σεισμοί) καθώς και η επέμβαση του ανθρώπου στην φύση με την κατασκευή τεχνητών έργων αλλάζουν την ισορροπία του πρανούς με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φαινόμενα κατολίσθησης.

Η μεγαλύτερη πρόκληση, επομένως, για τον Μηχανικό είναι η πρόβλεψη και πρόληψη αυτών των φαινομένων. Μέσω αυτής της εργασίας υπολογίζονται και αναλύονται αυτοί οι μηχανισμοί ευστάθειας των πρανών. Επιπλέον, με την προσομοίωση δυσμενών συνθηκών φόρτισης σε αυτά μελετάται η συμπεριφορά τους, έτσι ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xi
ABSTRACT	xiii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xv
1.ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ- ΟΡΙΣΜΟΙ	1
1.1 Πρανή.....	1
1.1.1 Γενικά.....	1
1.1.2 Ευστάθεια Πρανών.....	2
1.1.3 Ευστάθεια έναντι σεισμικών φορτίων.....	3
1.1.4 Ψευδοστατική μέθοδος.....	4
1.1.5 Δυναμική μέθοδος.....	6
1.2 Οπλισμένο Έδαφος.....	7
1.2.1 Γενικά.....	7
1.2.2 Γεωπλέγματα και γεωυφάσματα.....	8
1.3 Μέθοδοι Ανάλυσης – Σχεδιασμού.....	9
1.3.1 Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας.....	9
1.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	9
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	11
2.1 Γενικά.....	11
2.2 Ανάλυση στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	12
2.2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2.2 Γενική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	13
2.3 Μοντέλα Προσομοίωσης.....	15
2.4 Διακριτοποίηση χωρικών μέσων.....	16
2.4.1 Διακριτοποίηση του εδαφικού μέσου.....	16
2.4.2 Διακριτοποίηση γεωπλεγμάτων.....	17
2.4.3 Διακριτοποίηση πλακών.....	17
2.5 Στοιχεία Διεπιφάνειας.....	18
2.6 Καταστατικοί Νόμοι Συμπεριφοράς Εδάφους.....	19

2.7 Διαδικασία Κ ₀	23
2.8 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας (Phi- C Reduction).....	24
2.9 Δυναμική Επίλυση.....	25
2.9.1 Γενικά.....	25
2.9.2 Απόσβεση Rayleigh.....	26
2.9.3 Επιλογή διαστάσεων καννάβου.....	27
2.9.4 Ταχύτητες εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων.....	27
2.9.5 Κρίσιμο χρονικό βήμα.....	28
3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PLAXIS.....	29
3.1 Γενικά.....	29
3.2 Input Program- Εισαγωγή Δεδομένων.....	31
3.2.1 General Settings.....	31
3.2.2 Εισαγωγή γεωμετρικού μοντέλου και συνοριακών συνθηκών.....	32
3.2.3 Εισαγωγή σεισμικής διέγερσης (δυναμική επίλυση).....	34
3.2.4 Καθορισμός υλικών μοντέλου- Material data set.....	35
Εισαγωγή ιδιοτήτων εδαφικών υλικών.....	36
Εισαγωγή ιδιοτήτων γεωπλέγματος.....	39
Εισαγωγή ιδιοτήτων πλακών.....	39
3.2.5 Ορισμός καννάβου πεπερασμένων στοιχείων.....	40
3.2.6 Υπολογισμός αρχικών συνθηκών- Initial Conditions.....	41
3.3 Calculation Program- Υπολογισμός του Μοντέλου.....	43
3.3.1 Καθορισμός επιμέρους σταδίων.....	43
Καρτέλα General.....	44
Καρτέλα Parameters.....	45
Καρτέλα Multipliers.....	48
Εισαχθείσες και επιτευγμένες τιμές (Input and reached values).....	51
Ενεργοποίηση δυναμικής φόρπισης.....	51
3.3.2 Επιλογή σημείων για την εξαγωγή καμπυλών.....	52
3.4 Output Program: Εξαγωγή Αποτελεσμάτων.....	53
3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σε μια διατομή.....	55
3.5 Curves Program: Εξαγωγή καμπυλών.....	55
3.5.1 Καμπύλες φορτίου- μετατόπισης.....	55

3.5.2 Διαγράμματα τάσεων- τροπών.....	56
4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ.....	57
4.1 Γενικά.....	57
4.2 Επίλυση 1.....	58
4.2.1 Σκοπός επίλυσης.....	58
4.2.2 Προσδιορισμός Μοντέλου.....	58
4.2.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 1.....	60
4.2.4 Επίλυση με νομογραφήματα Hoek & Bray.....	64
Ευστάθεια πρανούς έναντι στατικών φορτίων.....	64
Ευστάθεια πρανούς έναντι σεισμικών φορτίων.....	65
4.2.5 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα.....	65
4.3 Επίλυση 2.....	68
4.3.1 Σκοπός επίλυσης.....	68
4.3.2 Προσδιορισμός Μοντέλου.....	69
4.3.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 2.....	73
4.3.4 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα.....	80
4.4 Επίλυση 3.....	82
4.4.1 Σκοπός επίλυσης.....	82
4.4.2 Μέθοδος των λωρίδων.....	83
4.4.3 Προσδιορισμός Μοντέλου.....	83
4.4.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 3.....	86
4.4.5 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα.....	92
4.5 Επίλυση 4.....	93
4.5.1 Σκοπός επίλυσης.....	93
4.5.2 Επίλυση πρανών με Φυγοκεντριστή.....	93
4.5.3 Προσδιορισμός Μοντέλου.....	94
4.5.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 4.....	100
4.5.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων.....	103
4.6 Επίλυση 5.....	104
4.6.1 Σκοπός.....	104
4.6.2 Διαρεύνηση εδαφικών παραμέτρων για ευστάθεια πρανούς.....	104
4.6.3 Διαρεύνηση ευστάθεια πρανούς υπό την εισαγωγή φορτίων.....	109

4.6.4 Ανάλυση συμπεριφοράς κτηρίου στην ευστάθεια του πλανούς.....	116
4.6.5 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα.....	121
5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	
ΠΡΑΝΩΝ.....	125
5.1 Γενικά.....	125
5.2 Σκοπός Επίλυσεων.....	126
5.3 Δημιουργία Γεωμετρικού Μοντέλου.....	126
5.3.1 Επιλογή διαστάσεων μοντέλου.....	126
5.3.2 Καθορισμός γεωμετρικού μοντέλου.....	127
5.3.3 Καθορισμός σταδίων και εισαγωγή σεισμού.....	130
5.4 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων.....	131
5.5 Σύγκριση Δυναμικής Επίλυσης και Ψευδοστατικής Μεθόδου.....	149
5.6 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα.....	155
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	157
6.1 Συμπεράσματα.....	157
6.1 Προτάσεις.....	160
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	161

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για κάθε μηχανικό. Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών και της υπολογιστικής ισχύς η μέθοδος έγινε πιο γρήγορη, πιο ακριβής και το φάσμα χρήσης της πιο ευρύ. Υπό αυτό το πρίσμα κάθε γεωτεχνικό πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Άλλωστε οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα γεωτεχνικά προβλήματα είναι τέτοιες που οι υπολογισμοί τους πρέπει να αναπαριστούν πλήρως την πραγματικότητα και να προβλέπουν με ακρίβεια τις επιπτώσεις κάθε μελέτης.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί την ανάλυση της συμπεριφοράς διαφόρων πρυνών υπολογισμένα με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ), με το πρόγραμμα PLAXIS v.9 να χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την πραγματοποίηση της μεθόδου. Όλα τα πρυνή που αναλύονται είχαν επιλυθεί αρχικά με άλλες μεθόδους, είτε αριθμητικές είτε εργαστηριακές. Σκοπός, ήταν η σύγκριση αυτών των μεθόδων, έτσι ώστε να ελεγχτεί η ακρίβεια της μεθόδου αλλά και να επιβεβαιωθούν και οι προηγούμενες μελέτες. Κύριος τρόπος σύγκρισης των μεθόδων αυτών ήταν μέσω των Συντελεστών Ασφαλείας και της επιφάνειας αστοχίας του κάθε πρυνού. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά καθώς όλες οι επιλύσεις με την ΜΠΣ συμφώνησαν με τις υπάρχουσες μελέτες.

Περαιτέρω αναλύσεις διεξήχθησαν στην επίλυση αυτών των πρυνών. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η ευστάθεια τους υπό συνθήκες σεισμού. Η εισαγωγή του σεισμού έγινε με δύο τρόπους. Αρχικά, έγινε ψευδοστατικά με την εφαρμογή στο μοντέλο σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους, όπως αυτή ορίζεται από τον ΕΑΚ 2000 στις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας. Δευτερευόντως, με δυναμική ανάλυση μέσω της εισαγωγής σεισμικής διέγερσης ενός πραγματικού σεισμού, που ενεργοποιήθηκε στις 28/2/1990 στην Νότια Καλιφόρνια. Η εισαγωγή της έγινε μέσω ενός επιταχυνσιογραφήματος και μελετήθηκε για διάρκεια σεισμού 10 sec και 23,5 sec αντίστοιχα. Σκοπός ήταν η μελέτη συμπεριφοράς των πρυνών υπό αυτές τις συνθήκες, ενώ έγινε και σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων σε ορισμένα από αυτά τα πρυνή. Βάση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές ως προς το αποτέλεσμα, καθώς η δυναμική μέθοδος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί πιο ακριβής για την μελέτη συμπεριφοράς ενός ήδη γνωστού σεισμού. Αντιθέτως, η ψευδοστατική είναι πιο γενική και συντηρητική μέθοδος, που για αυτό τον λόγο όμως την κάνει πιο εύχρηστη.

Τέλος, σε μερικά πρυνή υπολογίστηκε η ευστάθεια τους και σε υπό συνθήκες εξωγενής φόρτισης στην επιφάνεια τους πέρα από την επίδραση του εδαφικού βάρους. Κατ'αυτό τον τρόπο εισήχθησαν στα μοντέλα γραμμικά φορτία, πλάκες και

ολόκληρα κτήρια. Η σύγκριση της ευστάθειας για όλες αυτές τις περιπτώσεις επέφερε σημαντικά αποτελέσματα αποδεικνύοντας ότι επιπλέον φορτίσεις στην επιφάνεια του πρανούς είτε αυτό είναι ένα κτήριο είτε οποιασδήποτε άλλης μορφής προκαλούν μείωση της ευστάθειας του, η οποία βεβαίως εξαρτάται σε ποιο σημείο εφαρμόζεται και αν βρίσκεται κοντά ή όχι στην στέψη του πρανούς.

ABSTRACT

The Finite Element Method is a powerful tool for every engineer. Due to the technology evolution and computing power the method has become faster, more accurate and the use range more wide. Under these circumstances every geotechnical problem can resolve with Finite Element Method. Besides, much specificity is presented in geotechnical problems and the calculations should totally represent the reality and predict with accuracy the consequences of every study.

The main subject of the present Diploma Thesis is the behavior analysis of different slopes calculated with the Finite Element Method (FEM), where the calculation program PLAXIS v.9 is used as tool to carry out the method. All the analyzed slopes have been solved with other methods, numerical or on lavatory. The purpose is to compare those methods, in order to check the accuracy of FEM and to confirm the previous studies. Main comparison way is through the Safety Factors and the failure surface of every slope. The results were impressive, thus all the solutions with Finite Element Method were the same with the existing studies.

Further analysis contacted to solve these slopes. Specifically, slope stability was studied under seismic conditions. Initially, it was conducted a pseudo-static by inputting seismic soil acceleration, as it is defined in the Hellenic Seismic Code 2000 for every Zone of Seismic Risk. Secondly, a dynamic analysis was conducted through a seismic stimulation of a real earthquake; this took place in 28/2/1990 in Southern California. The input of the earthquake was realized using an acceleration graphic and the duration of the earthquake was 10 seconds and 23.5 seconds. The purpose was the study of the slope behavior under those circumstances, while a result comparison was made between those two methods. Based on the output results the two methods have result differences. While the dynamic analysis could be described as more accurate for a study of a known earthquake, the pseudo-static is more generalized and conservative and that is why is more useful.

Finally, some slopes were calculated for their stability under an extrinsic charging in their surface, besides the effects of the soil weight. By those linear charges, plates and building were inputted. The stability comparison for all these cases bought significant results, proving that those additional charges provoke stability reduction, which of course depends in which point is applied and if it near in slope's coronation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η συγκριτική επίλυση πρανών είτε στατικά είτε δυναμικά με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, καθώς και η σύγκριση της μεθόδου με άλλες μεθόδους ανάλυσης προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της. Κατά την στατική επίλυση πρανών διερευνάται και υπολογίζεται η ευστάθεια ενός πρανού υπό την φόρτιση του ιδίου εδαφικού βάρους ή οποιασδήποτε άλλης φόρτισης που μπορεί να οδηγήσει το πρανές σε αστοχία, αλλά και η εισαγωγή γραμμικής σεισμικής επιτάχυνσης, σύμφωνα με τις τιμές που δίνονται από τον Ε.Α.Κ 2000 για κάθε Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας. Από την άλλη, στην δυναμική επίλυση μελετάται η συμπεριφορά και η ευστάθεια του πρανού υπό την εισαγωγή σεισμικής διέγερσης. Το εύρος των πρανών μελέτης ήταν μεγάλο, δεδομένου ότι υπολογίστηκαν άοπλα και οπλισμένα πρανή, στραγγισμένα και αστράγγιστα, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και προσομοιώματα κατασκευών για την μελέτη συμπεριφοράς τους υπό διάφορες συνθήκες. Όλες οι επιλύσεις έγιναν με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και για αυτό χρησιμοποιήθηκε το γεωτεχνικό πρόγραμμα PLAXIS v.9. Πρόκειται για ένα δισδιάστατο πρόγραμμα επίλυσης και ανάλυσης των παραμορφώσεων και των συνθηκών ευστάθειας, για διάφορους τύπους γεωτεχνικών εφαρμογών.

Γενικά, η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε 6 κεφάλαια.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά ορισμοί που συναντήθηκαν καθ' όλη την διάρκεια της συγκεκριμένης μελέτης. Έτσι, περιγράφονται συνοπτικά έννοιες όπως τα οπλισμένα πρανή, ο Συντελεστής Ασφαλείας, η Ψευδο-στατική μέθοδος και τα Πεπερασμένα Στοιχεία.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο έγινε μια βαθύτερη ανάλυση ως προς την θεωρητική σκοπιά ορισμένων εννοιών. Κατά κύριο λόγο αναλύεται το επιστημονικό υπόβαθρο της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και κατ' επέκταση του προγράμματος PLAXIS, που βασίζεται στην συγκεκριμένη μέθοδο, με κάποιες από τις θεωρίες και αριθμητικές μεθόδους που βασίζεται το πρόγραμμα.

Το Τρίτο Κεφάλαιο αποτελεί μια αναλυτική παρουσίαση του προγράμματος PLAXIS v.9, βάση των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία. Αναφέρονται όλα τα επιμέρους στάδια που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι εναλλακτικές που προσφέρει το πρόγραμμα, έτσι ώστε να κατανοήσει ο αναγνώστης την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίλυση αυτών των πρανών.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο παρατίθενται αναλυτικά όλες οι στατικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο για άοπλα όσο και για οπλισμένα πρανή. Σε αυτό το κεφάλαιο βασικός σκοπός είναι η διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών με την εξαγωγή ενός Συντελεστή Ασφαλείας και σε περίπτωση που αστοχεί στην μελέτη της επιφάνειας αστοχίας του πρανού. Πέρα από την μελέτη της επίδρασης του εδαφικού βάρους, των σεισμικών επιταχύνσεων εδάφους και των εισηγμένων φορτίων στην ευστάθεια των πρανών, έγινε και συγκριτική μελέτη της μεθόδου των Πεπερασμένων

Στοιχείων με άλλες μεθόδους ανάλυσης. Επομένως, όλα τα πρηνή που επιλύθηκαν ήταν ήδη επιλυμένα είτε με αριθμητικές μεθόδους είτε με εργαστηριακές, προκειμένου να διερευνηθεί η ταύτιση των αποτελεσμάτων και η ακρίβεια των επιλύσεων.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δυναμικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Κατά την δυναμική επίλυση εισάγεται μια σεισμική διέγερση που εισήχθη στο πρόγραμμα μέσω ενός γνωστού επιταχυνσιογράφηματος που αναφέρεται σε πραγματικό σεισμό. Η δυναμική επίλυση με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία, ειδικά στον καθορισμό των ορίων του μοντέλου προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα ανεπιθύμητης ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων. Οι επιλύσεις αφορούν την μελέτη ενός οπλισμένου πρηνούς, το οποίο υποβάλλεται σε διαφορετικές φορτίσεις. Το ίδιο πρηνές επιλύεται και με ψευδοστατική μέθοδο, προκειμένου να γίνει σύγκριση των δύο επιλύσεων. Σκοπός είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του πρηνούς στις διάφορες συνθήκες φόρτισης και η εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων.

Τέλος, στο Έκτο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα από τις διερευνήσεις που προηγήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης, συγκρίνεται και σχολιάζεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων και οι δυνατότητές της στα γεωτεχνικά προβλήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ- ΟΡΙΣΜΟΙ

Στο παρόν κεφάλαιο επεξηγούνται βασικές έννοιες, οι οποίες αναφέρονται καθ' όλη την διάρκεια της παρούσης μελέτης.

1.1 Πρανή

1.1.1 Γενικά

Ως πρανή ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Η κλίση αυτή είναι η αιτία που παρουσιάζουν τα πρανή αστάθεια λόγω της παρουσίας διατμητικών τάσεων. Όπως σημειώνει και ο Terzaghi (1969) οι εδαφικές μάζες, οι οποίες βρίσκονται όπισθεν κεκλιμένης φυσικής επιφάνειας ή όπισθεν ανοικτού ορύγματος, εμφανίζουν την τάση να μετακινηθούν προς τα κάτω και προς τα έξω υπό την επίδραση της βαρύτητας. Εάν η τάση αυτή εξισορροπείται με την διατμητική αντοχή του εδάφους, τότε το πρανές είναι σταθερό. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση πραγματοποιείται κατολίσθηση. Προσθέτοντας στα παραπάνω λεγόμενα πέρα από τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις βαρύτητας, σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στο εσωτερικό του πρανούς είναι και η πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος. Αυτό το απλοϊκό μοντέλο αποτελεί τη βάση για την κατανόηση του θέματος της ευστάθειας των πρανών και κατ' επέκταση φαινομένων που οδηγούν τα πρανή σε αστοχία.

Η κατάταξη των πρανών σε φυσικά και τεχνικά πρανή είναι η βασικότερη διάκρισή τους. Συγκεκριμένα:

- Φυσικό πρανές είναι αυτό που προήλθε χωρίς την επίδραση του ανθρώπου
- Τεχνικό πρανές, όπως είναι λογικό, είναι αυτό που έχει προέλθει από ανθρώπινη επίδραση και περιλαμβάνει τα επιχώματα, τα ορύγματα, τα φράγματα κ.λ.π. Βεβαίως τα τεχνικά πρανή είναι ελεγχόμενα ως προς τις ιδιότητες τους, καθώς κατασκευάζονται κάτω από συγκεκριμένες προδιαγραφές (ποσοστό συμπίκνωσης, σύνθεση κ.ο.κ.)

Η επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων είναι ικανοί για την εμφάνιση αστοχίας σε ένα φυσικό πρανές. Επομένως, φαινόμενα όπως η διάβρωση, ο παγετός, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα και η σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν αστοχία. Η αστοχία, δηλαδή η κατολίσθηση των φυσικών εδαφών,

δύναται να προκληθεί και από εξωτερικές παρεμβάσεις, όπως είναι η υποσκαφή του ποδός του υφισταμένου πρανού ή η διάνοιξη ορύγματος χωρίς την αντιστήριξη των παρειών του πρανού.

Η ευστάθεια των πρανών είναι ένα ευρύ και πάντα καίριο θέμα, σημαντικό κομμάτι της εδαφομηχανικής, με το οποία τόσο η ελληνική όσο και η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει ασχοληθεί. Τα αποτελέσματά τους έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη βιωσιμότητα πολλών οικισμών, στη διατήρηση επισφαλών συνθηκών θεμελίωσης των τεχνικών έργων, στη σωστή λειτουργία του οδικού δικτύου και στη καταλληλότητα ή μη πολλών περιοχών για διάφορες χρήσεις.

Για τους παραπάνω ακριβώς λόγους κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της ευστάθειας πρανών που διαμορφώνονται κατά την κατασκευή τεχνικών έργων, αλλά και φυσικών πρανών που παρουσιάζουν ενδείξεις πιθανής κατολίσθησης.

1.1.2 Ευστάθεια Πρανών

Βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην ευστάθεια ενός πρανού είναι:

- Η Βαρύτητα, η οποία δημιουργεί διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του πρανού και τείνει να μετακινήσει την μάζα, ώστε να εξομαλυνθεί το έδαφος.
- Η εσωτερική τριβή και η συνοχή του εδάφους που αποτελείται το πρανές. Η τριβή λειτουργεί αντίθετα της βαρύτητα καθώς τείνει να διατηρήσει ενωμένα τα υλικά που συνθέτουν το πρανές, προκαλώντας αντίσταση σε οποιαδήποτε κίνηση.

Επιπλέον, άλλος τρόπος διαχωρισμού των παραγόντων ευστάθειας του πρανού είναι η διάκρισή τους σε εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες σύμφωνα με τον Chandler (1987). Συγκεκριμένα, η βροχόπτωση, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, ο σεισμός και η κλίση του πρανού αποτελούν του εξωτερικούς παράγοντες. Από την άλλη η εσωτερική διάβρωση λόγω της κυκλοφορίας του νερού, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, η στρώση και το είδος του εδάφους συνιστούν τους εσωτερικούς παράγοντες.

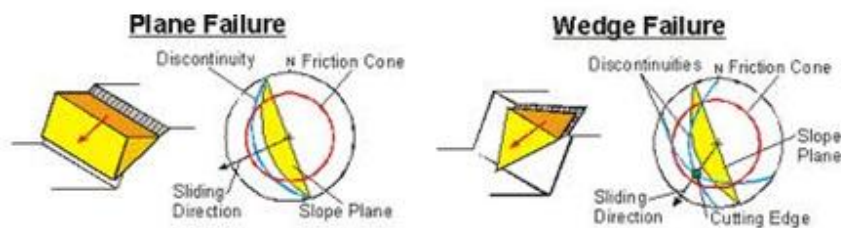
Η ευστάθεια του πρανού ορίζεται από ένα συντελεστή ασφαλείας F.S. (Factor of safety). Ο συντελεστής αυτό ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων που αντιστέκονται στην αστοχία (κατολίσθηση) προς τις δυνάμεις που τείνουν να την προκαλέσουν. Δηλαδή, ο συντελεστής F.S. ισούται με την διαίρεση της διατμητικής αντοχής με την διατμητική τάση.

$$F.S. = \frac{\text{Δυνάμεις ή Ροπές Αντιδρώσες}}{\text{Δυνάμεις ή Ροπές Δρώσες}}$$

Σύμφωνα με την αρχή της οριακής ισορροπίας, ένα πρανές παρουσιάζει αστοχία όταν

ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας. Δηλαδή σε περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας, ένα τμήμα του πρανού θα ολισθήσει στην επιφάνεια αστοχίας εξαιτίας των μεγάλων διατμητικών τάσεων που θα ασκούνται στο πρανές. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να εμφανιστούν κατολισθητικά φαινόμενα στο πρανές και τελικά το φαινόμενο αυτό να σταματήσει μόνο όταν έρθει σε τέτοια θέση όπου οι νέες τάσεις δε θα υπερβαίνουν τη διαθέσιμη αντοχή, λόγω της αλλαγής της γεωμετρίας και των εδαφικών χαρακτηριστικών. Έτσι είναι προφανές ότι συντελεστής ασφαλείας μικρότερος της μονάδας δε μπορεί να γίνει αποδεκτός σε στατικές συνθήκες. Από την άλλη συντελεστής ίσος με την μονάδα υποδηλώνει την οριακή ισορροπία της ευστάθειας του πρανού. Τέλος, όπως είναι λογικό, συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερος της μονάδας υποδηλώνει ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι μεγαλύτερη των τάσεων που ασκούνται σε αυτό, με αποτέλεσμα το πρανές να παραμένει σταθερό. Η τιμή 1,4-1,5 θεωρείται ιδανική ενώ με σεισμική φόρτιση ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να έχει τιμές μεταξύ του εύρους 1-1,1.

Πως προκύπτει όμως ο συντελεστής ασφαλείας; Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από την ανάλυση μιας μεθόδου για τον υπολογισμό της ευστάθειας του πρανού (οριακής ισορροπίας), αφού προηγουμένως έχουμε επιλέξει μια μορφή αστοχίας (επίπεδη ολίσθηση, κυκλική ή περιστροφική κ.λ.π.). Αναφορικά, υπάρχει η επίπεδη και σφηνοειδής ολίσθηση (Εικόνα 1.1.1) όπου παρουσιάζονται κυρίως σε βραχώδη εδάφη και η κυκλική αστοχία που εμφανίζεται σε πρανή με υψηλό πρόσωπο και αδύναμα υλικά (ιλύ, άργιλος κοκ) ή σε διαταραγμένους βράχους.



Εικόνα 1.1.1: Παρουσίαση της επίπεδης και σφηνοειδής αστοχίας

1.1.3 Ευστάθεια έναντι σεισμικών φορτίων

Γενικά η δράση της βαρύτητας είναι η πρωταρχική κινητήρια δύναμη για να συμβεί μια κατολίσθηση, ωστόσο και η σεισμική φόρτιση μπορεί να επιφέρει παραμορφώσεις και μετατοπίσεις σε ένα φυσικό ή τεχνητό πρανές. Βέβαια ο βαθμός παραμόρφωσης και μετατόπισης εξαρτάται και από πολλούς επιμέρους παράγοντες όπως είναι η σύσταση του πρανού, η αντοχή του υλικού και η εδαφική κίνηση.

Τα πιο συνηθισμένα φαινόμενα που παρατηρούνται σε πρανή ύστερα από την επίδραση σεισμικής δόνησης είναι θραύσεις και ρηγματώσεις. Οι θραύσεις και ρηγματώσεις δημιουργούνται από τις αναπτυσσόμενες τάσεις, λόγω της σεισμικής δόνησης, οι οποίες υπερνικούν την αντοχή των εδαφικών υλικών, προκαλώντας στα πρανή αστοχίες.

Οι αστοχίες πρανών από σεισμό μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τον Kramer (1996):

- Αστοχίες πρανών σε εδάφη στα οποία η διατμητική αντοχή τους δεν επηρεάζεται από την σεισμική φόρτιση.

Οι παραμορφώσεις του πρανού προκαλούνται από τις αδρανειακές δυνάμεις του σεισμού, δηλαδή από προσωρινή υπέρβαση της διατμητικής αντοχής από τις τάσεις που εισάγονται από τον σεισμικό κραδασμό

- Αστοχίες πρανών σε εδάφη στα οποία παρατηρείται απομείωση της διατμητικής αντοχής.

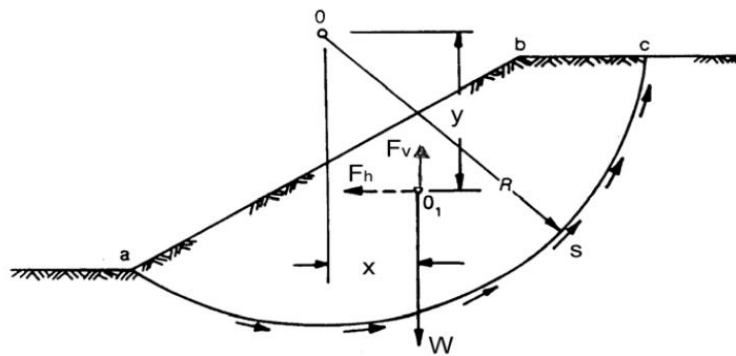
Ο σεισμικός κραδασμός προκαλεί μείωση της αντοχής του εδάφους. Έτσι ώστε δεν μπορεί πλέον να διατηρηθεί ισορροπία υπό την επίδραση των τάσεων που προκαλούνται από αυτόν. Τύποι απομείωσης της διατμητικής αντοχής περιλαμβάνουν τη ρευστοποίηση του εδάφους, πτώση της παραμένουσας αντοχής κάτω από τη βραδεία παραμένουσα σε ταχείς ρυθμούς διάτμησης, κ.λ.π..

1.1.4 Ψευδοστατική μέθοδος

Συνήθης μέθοδος για την ανάλυση της ευστάθειας του πρανού με σεισμό είναι η στατική και η ισοδύναμη-στατική (ψευδοστατική).

Συγκεκριμένα, η ψευδοστατική μέθοδος είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον σεισμικό σχεδιασμό των γεωτεχνικών κατασκευών. Στην μέθοδο αυτή θεωρείται ότι η επιτάχυνση που εφαρμόζεται είναι σταθερή σε όλο το πρανές και δρα σε οριζόντια κατεύθυνση. Με άλλα λόγια το έδαφος θεωρείται ότι αποτελείται από πλήρως πλαστικό υλικό, με αποτέλεσμα η διατμητική αντοχή να ενεργοποιείται στο ίδιο ποσοστό σε κάθε σημείο της πιθανής επιφάνειας ολίσθησης.

Σύμφωνα με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας στην ανάλυση της επίδρασης του σεισμού στην ευστάθεια των πρανών περιλαμβάνεται μια οριζόντια (F_h) και κατακόρυφη (F_v) αδρανειακή δύναμη. Οι αδρανειακές αυτές δυνάμεις είναι προϊόντα των αντίστοιχων σεισμικών επιταχύνσεων και ενεργούν στο κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας (Εικόνα 1.1.2)



Εικόνα 1.1.2: Ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας πρανών

Το μέγεθος των ψευδοστατικών δυνάμεων είναι:

$$F_v = \pm k_v * W \quad (\text{Εξίσωση 1.1})$$

$$F_h = k_h * W \quad (\text{Εξίσωση 1.2})$$

Όπου k_v και k_h είναι ο αδιάστατος κατακόρυφος και οριζόντιος σεισμικός συντελεστής αντίστοιχα και W το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας.

Η κινούσα δύναμη αυξάνεται από την οριζόντια σεισμική δύναμη ενώ η κατακόρυφη αυξομειώνει και την αντίσταση και την κινούσα δύναμη. Για αυτό τον λόγο άλλωστε οι κατακόρυφες σεισμικές επιταχύνσεις αμελούνται συνήθως κατά την ψευδοστατική ανάλυση.

Στην ψευδοστατική ανάλυση ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να οριστεί όπως και στην στατική ανάλυση (λόγος της αντιδρώσας προς την κινούμενη δύναμη) και υπολογίζεται για επίπεδες, κυκλικές και μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης.

Κατά τον υπολογισμό της σεισμικής ασφάλειας του πρανούς ιδανικότερη θεωρείται η μελέτη της κρίσιμης επιτάχυνσης και συγκεκριμένα της τιμής του οριζόντιου σεισμικού συντελεστή k_h . Ως κρίσιμη επιτάχυνση ορίζουμε την επιτάχυνση που όταν εφαρμόζεται στη μάζα, μεταξύ της επιφάνειας ολίσθησης και αυτής του πρανούς δημιουργείται μία κατάσταση οριακής αστοχίας στην επιφάνεια αυτή. Το μέγεθος αυτό αποτελεί ένα μέτρο της αδρανειακής δύναμης που εισάγεται στο πρανές. Παρόλα αυτά η αδρανειακή δύναμη που ασκείται στο πρανές είναι απίθανο να ισούται με το γινόμενο της πραγματικής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης και της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας καθώς τα εδάφη των πρανών στην πραγματικότητα είναι τέτοια που η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ενεργεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Για αυτόν λόγο, άλλωστε, ο Terzaghi (1950) πρότεινε την τιμή 0,10, 0,20, 0,50 του αδιάστατου οριζόντιου σεισμικού συντελεστή για ισχυρό, βίαιο και καταστροφικό σεισμό αντίστοιχα.

Μπορεί η ψευδοστατική μέθοδος να διακρίνεται από την απλότητα των υπολογισμών του και να παρέχει ένα συντελεστή ασφαλείας παρόμοιο με αυτό της στατικής ανάλυσης, ωστόσο παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα:

- Η σύνθετη σεισμική φόρτιση που εισέρχεται στο πρανές αντικαθίσταται σε μια σταθερή δύναμη μιας κατεύθυνσης καθιστά την μέθοδο ανακριβή.
- Είναι αναξιόπιστη για εδάφη τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων ή περισσότερο από 15% απομείωση της αντοχής τους λόγω σεισμικής φόρτισης (Seed, 1979)
- Αδυνατεί να εξηγήσει τον λόγο για τον οποίο αμέσως μετά τον σεισμό παρατηρείται αστοχία

1.1.5 Δυναμική μέθοδος

Συχνά τα εδάφη και οι κατασκευές δεν υποβάλλονται μόνο σε στατική φόρτιση αλλά και σε δυναμική. Συμπεριφέρονται, δηλαδή, δυναμικά καθώς οι επιπλέον αδρανειακές δυνάμεις (από τον Δεύτερο νόμο του Νεύτωνα) ισούνται με την μάζα πολλαπλασιασμένη με την επιτάχυνση. Αν αυτά τα φορτία ή μετατοπίσεις εφαρμόζονται πολύ αργά οι αδρανειακές δυνάμεις μπορεί να αγνοηθούν και με αυτό τον τρόπο να δικαιολογείται η χρήση της στατικής επίλυσης. Για αυτό άλλωστε τον λόγο η δυναμική ανάλυση είναι μια απλή επέκταση της στατικής ανάλυσης. Οι επιταχύνσεις αυτές που σαν αποτέλεσμα έχουν την δημιουργία δονήσεων μπορεί να είναι είτε από τον άνθρωπο είτε φυσικές. Ανθρωπογενής δημιουργία δονήσεων μπορεί να θεωρηθεί η έμπηξη πασσάλων στο έδαφος, η κίνηση των οχημάτων, η λειτουργία των μηχανών και οι εκρήξεις, ενώ φυσικές είναι οι σεισμοί. Οι πιο γνωστές μορφές δονήσεων είναι, βεβαίως, οι σεισμοί. Άλλωστε, οι σεισμοί είναι μια δόνηση του εδάφους προκαλούμενη από την διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Συνεπώς, κατά την δυναμική ανάλυση παρέχεται η δυνατότητα ανάλυσης της συμπεριφοράς του εδάφους κάτω από την δράση των δυναμικών φορτίσεων και της επίδρασης των εδαφικών ταλαντώσεων σε γειτονικές κατασκευές.

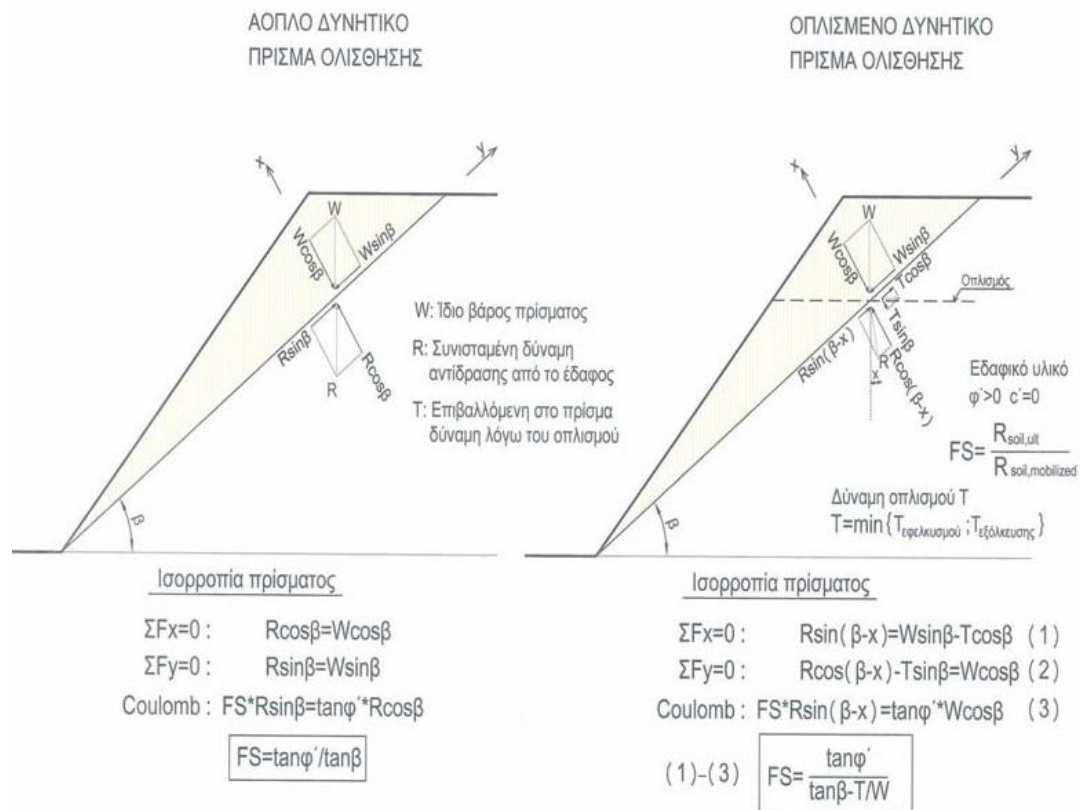
Κατά την προσομοίωση μια δυναμικής ανάλυσης σε ένα πρανές ή οποιοδήποτε άλλον εδαφικό σχηματισμό, λαμβάνεται υπόψη η αδράνεια του υπεδάφους, ο χρόνος μεταφοράς του φορτίου και η απόσβεση, που συναντάται στα εδαφικά υλικά.

Η απόσβεση είναι ένας μηχανισμός ελάττωσης των σεισμικών πλατών και τελικά τον μηδενισμό της κυματικής κίνησης. Όταν το σεισμικό κύμα διέρχεται από το έδαφος ένα μέρος της ελαστικής του ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα, γνωστό και ως φαινόμενο της ανελαστικότητας. Γενικά, όταν ένα σεισμικό κύμα διέρχεται από ένα μέσο, εκλύεται θερμότητα κατά την συμπίεση και απορροφάται στην φάση της αραιώσης. Βέβαια, η διαδικασία αυτή δεν είναι τελείως αντιστρέψιμη, δεδομένου ότι η θερμότητα που παράγεται κατά την συμπίεση δεν είναι ίση με αυτή που απορροφάται στην αραιώση λόγω εσωτερικής τριβής. Πέρα από την απόσβεση άλλοι μηχανισμοί εξασθένισης του κύματος είναι οι ρηγματώσεις, η μεταβολή του ιξώδους καθώς τα υγρά γεμίζουν του πόρους του πετρώματος με υγρά.

1.2 Οπλισμένο Έδαφος

1.2.1 Γενικά

Το έδαφος είναι ένα φυσικό κατασκευαστικό υλικό, το οποίο διαθέτει σχετικά υψηλή θλιπτική αντοχή, αλλά σχεδόν καθόλου εφελκυστική. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η αδυναμία, τα εδάφη (όπως και το σκυρόδεμα) είναι δυνατόν να οπλιστούν. Τα υλικά που τυπικά χρησιμοποιούνται ως οπλισμοί είναι σχετικά ελαφρά και εύκαμπτα, και ενδεχομένως επιμηκύνσιμα, κατέχοντας υψηλή εφελκυστική αντοχή. Παραδείγματα τέτοιων υλικών αποτελούν οι λωρίδες, οι ράβδοι, τα πλέγματα, τα φύλλα και οι ίνες τυχαίου προσανατολισμού από μέταλλο, συνθετικό πλαστικό ή φυσικά υλικά. Όταν οπλισμός και έδαφος συνδυάζονται, προκύπτει ένα σύνθετο υλικό που ονομάζεται οπλισμένο έδαφος, κατέχοντας υψηλή θλιπτική και εφελκυστική αντοχή (παρόμοιο από πρώτη άποψη με το οπλισμένο σκυρόδεμα). Αντικειμενικός σκοπός της εισαγωγής των οπλισμών στην εδαφική μάζα είναι η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού, τόσο από πλευράς μέγιστης διατμητικής αντοχής όσο και από πλευράς παραμορφώσεων. Η αύξηση της αντοχής των οπλισμένων εδαφικών κατασκευών επιτρέπει την κατασκευή απότομων πρανών, αναχωμάτων πάνω σε μαλακό έδαφος θεμελίωσης ή διαφόρων τύπων τοίχων αντιστήριξης. Συγκριτικά με όλες τις άλλες διαθέσιμες επιλογές, οι οπλισμένες εδαφικές κατασκευές είναι οικονομικές. Ως αποτέλεσμα, εδαφικές κατασκευές οπλισμένες με γεωσυνθετικούς ή μεταλλικούς οπλισμούς, κατασκευάζονται παγκοσμίως με αυξημένη συχνότητα είτε για μόνιμες είτε για προσωρινές εφαρμογές.



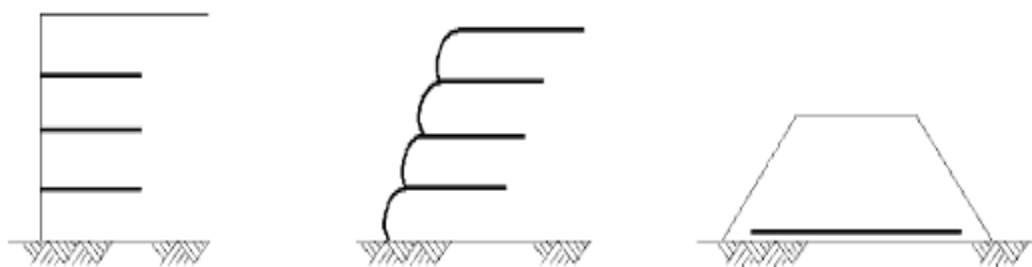
Εικόνα 1.2.1: Συγκριτική ανάλυση επηρεασμού του οπλισμού στο πρανές

1.2.2 Γεωπλέγματα και γεωφάσματα

Γεωσυνθετικά είναι οι μη-μεταλλικοί οπλισμοί είναι, δηλαδή, υλικά από πολυμερή αποτελούμενα από πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο ή πολυεστέρα, ενώ μπορεί να προέρχονται ακόμα και από φυσικά υλικά. Έχουν τη μορφή φύλλου, λωρίδων και ινών και τα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται από τον τρόπο που κατασκευάζονται και το είδος του συνθετικού που χρησιμοποιείται. Οι συνηθέστεροι τύποι γεωσυνθετικών είναι τα γεωφάσματα και γεωπλέγματα.

Τα γεωφάσματα αποτελούν τη μεγαλύτερη κατηγορία γεωσυνθετικών. Είναι πράγματι υφάσματα, αλλά κατασκευάζονται από συνθετικές ίνες και νήματα και όχι από φυσικές όπως το μαλλί ή το βαμβάκι. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, διακρίνονται σε υφασμένα, πλεκτά και μη-υφασμένα. Είναι πολύ εύκαμπτα υλικά και είναι δυνατόν να αναδιπλώνονται γύρω από την πρόσοψη του πρανούς ή του τοίχου αντιστήριξης που οπλίζουν, ενώ προστατεύονται από την υπεριώδη ακτινοβολία χάρη στη βλάστηση, στο σκυρόδεμα ή στα στοιχεία πρόσοψης που τα επικαλύπτουν. Οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην εδαφική μάζα μεταφέρονται στα γεωφάσματα ως εφελκυστική δύναμη, διαμέσου της τριβής στη διεπιφάνεια γεωφάσματος-εδάφους. Εκτός όμως από τις ευνοϊκές μηχανικές ιδιότητες, τα γεωφάσματα παρουσιάζουν διαπερατότητα κάθετα και παράλληλα προς το επίπεδο τους, γι' αυτό χρησιμεύουν και σε άλλες εφαρμογές όπως φιλτράρισμα, στράγγιση και διαχωρισμό.

Τα γεωπλέγματα αποτελούν μια ραγδαία αυξανόμενη, από άποψη όγκου εφαρμογών, ομάδα γεωσυνθετικών. Είναι πλαστικά πλέγματα με μεγάλα ανοίγματα και χρησιμοποιούνται κυρίως για ενίσχυση και ελάχιστα για διαχωρισμό. Παρ' όλο που υπάρχουν διαθέσιμα διαζονικά γεωπλέγματα, τα περισσότερα κατασκευάζονται ώστε να λειτουργούν μονοαξονικά. Τα γεωπλέγματα έχουν μεγαλύτερη δυστένεια και αντοχή από τα συνηθισμένα γεωφάσματα, γι' αυτό και προτιμούνται από τα τελευταία σε εφαρμογές οπλισμού. Σε αντίθεση με τα γεωφάσματα, όπου η τριβή παίζει έναν κυρίαρχο ρόλο στην αλληλεπίδραση με το έδαφος, τα εγκάρσια μέλη των γεωπλεγμάτων βοηθούν στην ανάπτυξη παθητικής αντίστασης. Τέλος, τα γεωπλέγματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε τοίχους με στοιχεία πρόσοψης από κυβόλιθους, για να παρέχουν μια αισθητικά ευχάριστη εμφάνιση τοίχου.



Εικόνα 1.2.2: Εφαρμογές που χρησιμοποιούνται τα γεωπλέγματα

1.3 Μέθοδοι Ανάλυσης – Σχεδιασμού

1.3.1 Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας

Η μέθοδος της οριακής ισορροπίας, όπως και η μέθοδος της οριακής κατάστασης, ανήκει στην κατηγορία των απλών αριθμητικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές βασικά υποθέτουν ότι το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση αστοχίας, αλλά διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζουν τη λύση. Συγκεκριμένα, στη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, υιοθετείται μια αυθαίρετη επιφάνεια αστοχίας και λαμβάνονται συνθήκες ισορροπίας για την αστοχούσα εδαφική μάζα, υποθέτοντας ότι το κριτήριο αστοχίας επικρατεί παντού στην επιφάνεια αστοχίας. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να είναι επίπεδη, καμπύλη ή συνδυασμός αυτών των δύο. Μόνο η συνολική ισορροπία των τμημάτων του εδάφους μεταξύ της επιφάνειας αστοχίας και των ορίων του προβλήματος λαμβάνεται υπ' όψιν. Οι τύποι της ευστάθειας που πρέπει να θεωρηθούν είναι η εξωτερική, η εσωτερική και ο συνδυασμός αυτών. Η εξωτερική ευστάθεια αφορά την συνολικά ευστάθεια της οπλισμένης μάζας ως σύνολο και εκτιμάται χρησιμοποιώντας επιφάνειες αστοχίας εκτός της οπλισμένης μάζας. Η εσωτερική ευστάθεια αφορά την εκτίμηση των πιθανών επιφανειών αστοχίας εντός της οπλισμένης μάζας ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας είναι κατά ένα τμήμα της εκτός και κατά άλλο τμήμα της εντός της οπλισμένης μάζας, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ένας συνδυασμός ανάλυσης εξωτερικής και εσωτερικής ευστάθειας. Η μέθοδος του Coulomb και η μέθοδος των λωρίδων είναι παραδείγματα υπολογισμών οριακής ισορροπίας.

1.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην κατηγορία των μεθόδων πλήρους αριθμητικής ανάλυσης περιλαμβάνονται μέθοδοι οι οποίες προσπαθούν να ικανοποιήσουν όλες τις θεωρητικές απαιτήσεις, συμπεριλαμβάνοντας ρεαλιστικά προσομοιώματα συμπεριφοράς εδαφών και οριακές συνθήκες, οι οποίες προσομοιώνουν τις συνθήκες πεδίου. Εξ' αιτίας της πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, οι μέθοδοι αυτές είναι αριθμητικές από τη φύση τους. Προσεγγίσεις βασισμένες στα πεπερασμένα στοιχεία και στις πεπερασμένες διαφορές είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη γεωτεχνική μηχανική.

Η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων για γεωτεχνικές εφαρμογές ξεκίνησε το 1966, όταν ο Clough και ο Woodward (1966) τη χρησιμοποίησαν για να καθορίσουν τάσεις και μετατοπίσεις σε αναχώματα, και οι Reyes και Deer (1966) περιέγραψαν την εφαρμογή της στην ανάλυση υπογείων εκσκαφών σε βράχους.

Η ικανότητα της ΜΠΣ να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις συνθήκες του πεδίου, βασικά στηρίζεται στην ικανότητα του δομικού μοντέλου να αναπαριστά τη συμπεριφορά του πραγματικού εδάφους και στην ορθότητα των επιβαλλόμενων συνοριακών συνθηκών. Ο χρήστης θα πρέπει μόνο να καθορίσει την κατάλληλη γεωμετρία, τη διαδικασία κατασκευής, τις εδαφικές παραμέτρους και τις συνοριακές συνθήκες. Κατασκευαστικά στοιχεία ενδέχεται να χρειαστεί να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια της αριθμητικής προσομοίωσης, ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες πεδίου. Η επίδραση του χρόνου στην ανάπτυξη της κατανομής των πιέσεων του νερού, επίσης μπορεί να προσομοιωθεί με το να

συμπεριληφθεί συνδυασμένη σύζευξη. Κανένας υποτιθέμενος μηχανισμός αστοχίας ή μέθοδος συμπεριφοράς του προβλήματος δεν απαιτείται, καθώς αυτό προκύπτει από την ανάλυση. Η ανάλυση επιτρέπει την πρόβλεψη της πλήρους ιστορίας του προβλήματος των ορίων των τιμών και μια απλή ανάλυση μπορεί να παρέχει πληροφορίες για όλες τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Δυνητικά η μέθοδος μπορεί να λύσει πλήρως τρισδιάστατα προβλήματα και να μην εξαρτάται καθόλου από τους περιορισμούς που ισχύουν για τις άλλες μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που συναντήθηκε κατά τις επιλύσεις με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων Κατ'επέκταση αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο αποτελεί και μια εισαγωγική θεωρητική ανάλυση του γεωτεχνικού προγράμματος PLAXIS v.9, στο οποίο και θα στηριχθούν οι αναλύσεις. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, οπότε οι αναλύσεις του διέπονται από το θεωρητικό υπόβαθρο που θα αναλυθεί.

2.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία η ανάλυση ευστάθειας των πρανών και η επιρροή των εξεταζόμενων παραμέτρων γίνεται με την χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) σε δύο διαστάσεις. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα διακριτοποίησης του χώρου, δηλαδή ο διαχωρισμό του σε μικρών διαστάσεων υποχώρους (στοιχεία). Με αυτό τον τρόπο ένα ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να μετατραπεί σε διακριτό μέσο αποτελούμενο από μικρότερα στοιχεία με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα, τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων. Η μέθοδος εξασφαλίζει τη συνολική ισορροπία του κάθε στοιχείου καθώς και την ισορροπία των δράσεων στους κόμβους. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου χρησιμοποιούνται μαθηματικά προσομοιώματα που βασίζονται σε διάφορες θεωρίες.

Η μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα (Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων) βασίζεται στη χρήση του εμπορικά διαθέσιμου προγράμματος PLAXIS (v.9). Το PLAXIS σχεδιάστηκε για την ανάλυση και μελέτη ενός ευρέος φάσματος θεμάτων της γεωτεχνικής μηχανικής. Πέρα από την στατική ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανούς το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα δυναμικής επίλυσης του.

2.2 Ανάλυση στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

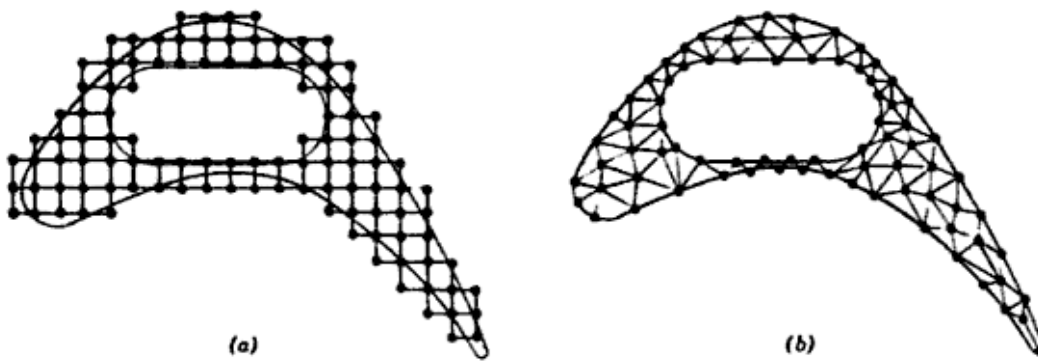
2.2.1 Εισαγωγή

Γενικά, η κατασκευή των συναρτήσεων, που ικανοποιούν τις συνθήκες στα σύνορα, είναι μια σχετικά εύκολη υπόθεση όταν το σύνορο του σώματος είναι απλό. Όταν όμως το σύνορο του σώματος γίνεται πολύπλοκο, η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών γίνεται σχεδόν αδύνατη. Για να αποφευχθούν αυτές ακριβώς οι δυσκολίες, αρκετές συγγενείς αριθμητικές αναλύσεις αναπτύχθηκαν με το πέρασμα το χρόνων. Δυο από τις πιο συνήθεις μεθόδους είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (ΜΠΔ) και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών δίνει μια σημειοκεντρική προσέγγιση στις διέπουσες εξισώσεις. Αυτό το μοντέλο (που δημιουργήθηκε από διαφορικές εξισώσεις για μια σειρά από σημεία πλέγματος) βελτιώνεται όσο περισσότερα σημεία χρησιμοποιούνται. Με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών μπορούν να επιλυθούν μερικά δύσκολα προβλήματα, για παράδειγμα όταν συναντούνται ασυνήθεις γεωμετρίες ή ασυνήθιστες προδιαγραφές συνοριακών συνθηκών, η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι δύσκολη ως προς την χρήση. Αντιθέτως από την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αναγνωρίζει το μοντέλο ως ένα αριθμό περιοχών που λέγονται στοιχεία (Εικόνα 2.2.1). Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μέσα σε κάθε στοιχείο είναι απλές (συνήθως κάποιες πολυωνυμικές εκφράσεις).

Με την χρήση ενός μεγάλου αριθμό στοιχείων γίνεται δυνατό να αποκτήσουμε μια καλή προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης. Το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να αναχθεί πάλι στο αρχικό πρόβλημα σ' ένα πρόβλημα με πεπερασμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας κίνησης. Μερικά πλεονεκτήματα της ΜΠΔ είναι τα ακόλουθα:

- Οι συναρτήσεις είναι απλούστερες και δεν απαιτείται η ικανοποίηση κάποιων συνθηκών στα σύνορα του σώματος.
- Οι ολοκληρώσεις γίνονται σε κάθε στοιχείο χωριστά (οι συναρτήσεις είναι μηδέν έξω από κάθε στοιχείο). Έτσι, στις απλές περιπτώσεις το αποτέλεσμα προκύπτει εύκολα με αναλυτικό τρόπο, ενώ στις πιο σύνθετες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αριθμητική ολοκλήρωση.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια από τις πιο ισχυρές μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση οριακών προβλημάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε από τους μηχανικούς στην προσπάθεια τους να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα κατασκευών. Ο στόχος τους ήταν να χρησιμοποιήσουν μια τεχνική ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιούσαν στις ραβδωτές κατασκευές. Αυτό σημαίνει, ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε σαν εξέλιξη της μητρωϊκής ανάλυσης των κατασκευών. Σήμερα όμως, η μητρωϊκή ανάλυση των κατασκευών περιλαμβάνεται στις ειδικές εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στην επόμενη παράγραφο αυτή έχουμε σαν στόχο να δώσουμε μια μικρή ανάλυση στο αντικείμενο.



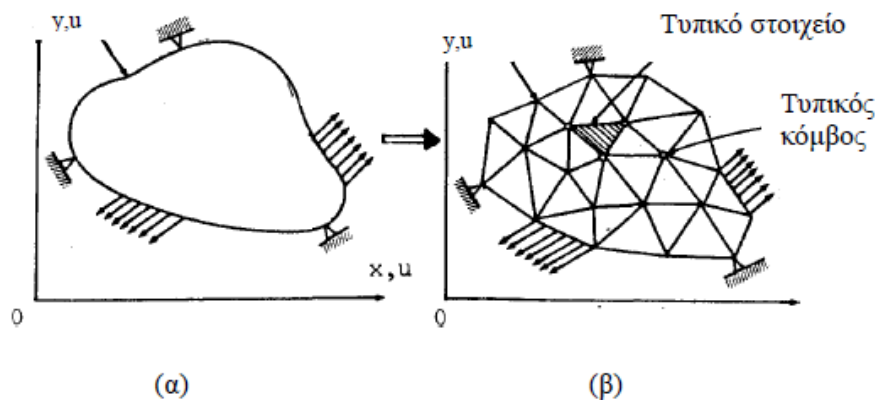
Εικόνα 2.2.1: Διακριτοποίηση (a) πεπερασμένων διαφορών και (b) πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο

2.2.2 Γενική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Ορισμός του καννάβου και γενικότητες

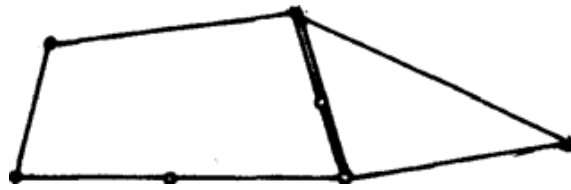
Έστω ένα ελαστικό σώμα που καταλαμβάνει τον χώρο D (Σχήμα 2.1(a)). Ο χώρος αυτός υποτίθεται ότι χωρίζεται με έναν καννάβο ιδεατών επιφανειών ή γραμμών σε έναν αριθμό περιοχών (Εικόνα 2.2.2), τα πεπερασμένα στοιχεία. Στην περίπτωση που ο D είναι τρισδιάστατος, τα πεπερασμένα στοιχεία είναι τρισδιάστατα, ενώ όταν το σώμα είναι δισδιάστατο τα πεπερασμένα στοιχεία είναι δισδιάστατα.

Τα στοιχεία υποτίθεται ότι συνδέονται σ' ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων, τους κόμβους, (κόμβοι βέβαια μπορεί να υπάρχουν και στο εσωτερικό κάποιου στοιχείου, που δεν «συνδέονται» με τα γειτονικά στοιχεία).



Εικόνα 2.2.2: Διαμέριση σώματος. (α) Αρχικό σώμα. (β) Διαμέριση σώματος σε ένα πεπερασμένο αριθμό περιοχών

Κάθε κόμβος, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, έχει κάποιες δυνατότητες μετατόπισης, κάποιους δηλαδή βαθμούς ελευθερίας (β.ε.) κίνησης. Είναι κατανοητό, ότι σε μια τρισδιάστατη κατασκευή κάθε σημείο (άρα και κάθε κόμβος) έχει τρεις β.ε., στη δισδιάστατη δύο και στα δικτυώματα μια.



Εικόνα 2.2.3: Σύνδεση στοιχείων

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο δεν παύει να έχει την ίδια ελαστική συμπεριφορά με το αρχικό σώμα. Το κέρδος από αυτή την υποδιαίρεση είναι, ότι το στοιχείο έχει πεπερασμένο μέγεθος και απλούστερη μορφή. Αυτές του οι ιδιότητες επιτρέπουν τη μελέτη της έντασης του προσεγγιστικά. Έτσι, γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις των κόμβων ενός στοιχείου είναι εφικτή η παρεμβολή, για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων κάθε σημείου του στοιχείου. Το επόμενο βήμα είναι βέβαια ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και τέλος των τάσεων. Με την υπόθεση ότι οι τάσεις στους κόμβους είναι γνωστές, προκύπτει το στατικό μοντέλο. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή του κινηματικού μοντέλου ή μοντέλο μετατοπίσεων, που είναι το περισσότερο εν χρήσει.

Προσδιορισμός των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι μετατοπίσεις σε κάθε σημείο του στοιχείου εκφράζονται συναρτήσει των μετατοπίσεων των κόμβων με την βοήθεια κάποιου παρεμβολικού τύπου. Συνήθως, για την παρεμβολή χρησιμοποιούνται πολυώνυμα και το πεδίο των μετατοπίσεων ορίζεται ξεχωριστά σε κάθε στοιχείο. Τα παραπάνω συνεπάγονται κάποια ελευθερία, δεν αποκλείουν όμως την ύπαρξη κάποιων προϋποθέσεων. Έτσι π.χ., δεν μπορεί να είναι οι μετατοπίσεις των στοιχείων τέτοιες που τα στοιχεία μετά την παραμόρφωση να αλληλεπικαλύπτονται. Άρα, οι σχετικοί κανόνες είναι:

- Οι μετατοπίσεις των στοιχείων πρέπει να ορισθούν έτσι ώστε να υπάρχει συνέχεια μετατοπίσεων μεταξύ τους.

Στην περίπτωση καμπτόμενων κατασκευών δεν μπορούν τα στοιχεία στα σημεία σύνδεσης τους να εμφανίζουν, μετά την παραμόρφωση, γωνίες διαφορετικές από τις γωνίες που εμφάνιζαν πριν την παραμόρφωση. Άρα, υπάρχει και αυτή η πρόσθετη απαίτηση για τις καμπτόμενες κατασκευές.

- Οι μετατοπίσεις σε κάθε στοιχείο πρέπει να είναι συνεχείς συναρτήσεις ώστε να δίνουν συνεχείς παραμορφώσεις.
- Το πεδίο των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να περιγράψει την μετακίνηση στερεού σώματος καθώς και την σταθερή παραμόρφωση της κατασκευής.

Άρα, είναι αναγκαίο να υπάρχει στο πολυώνυμο της παρεμβολής σταθερός όρος καθώς και πρωτοβάθμιοι όροι.

Τροπές – Τάσεις

Στη δισδιάστατη ελαστικότητα οι τροπές δίνονται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} du/dx \\ dv/dy \\ du/dx + dv/dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d/dx & 0 \\ 0 & d/dy \\ d/dy & d/dx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} du/dx \\ dv/dy \\ du/dx + dv/dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d/dx & 0 \\ 0 & d/dy \\ d/dy & d/dx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

$$\text{ή } \varepsilon = Xq \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

όπου X είναι το μητρώο τελεστής που φαίνεται στην τελευταία από τις σχέσεις (Εξίσωση 2.3).

Αντίστοιχα ορίζονται οι τροπές και στην τρισδιάστατη κατάσταση ή και στη μονοδιάστατη. Άρα, η εξίσωση (Εξίσωση 2.3) είναι μια γενική έκφραση, ενώ η σχέση που εκφράζει τις τροπές συναρτήσει των μετατοπίσεων των κόμβων q^e είναι ο ακόλουθος τύπος:

$$E = XNq = Bq^e \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Όμως οι τάσεις συνδέονται με τις τροπές με τη σχέση:

$$\sigma = D\varepsilon \quad (\text{Εξίσωση 2.5})$$

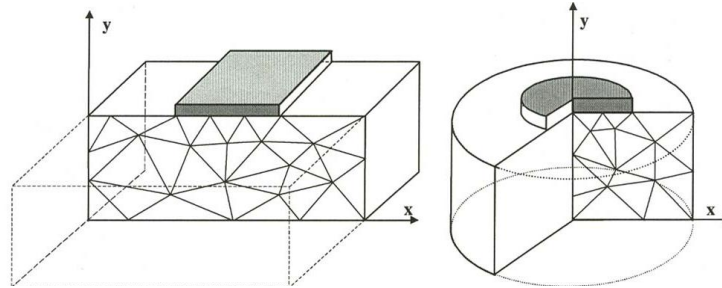
όπου $D = C$ είναι το μητρώο των ελαστικών σταθερών, δηλαδή το μητρώο που έχει μέτρο ελαστικότητας προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, χρησιμοποιώντας και την (Εξίσωση 3) ισχύει:

$$\sigma = DBq^e \quad (\text{Εξίσωση 2.6})$$

2.3 Μοντέλα Προσομοίωσης

Η προσομοίωση φυσικών προβλημάτων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη μόρφωση είτε δισδιάστατων αξονοσυμμετρικών προσομοιωμάτων (axis symmetric model) είτε δισδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων με επίπεδη παραμόρφωση (plane strain model). Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα και των δύο μορφών φαίνονται στην Εικόνα 2.3.1. Τα δισδιάστατα αξονοσυμμετρικά προσομοιώματα χρησιμοποιούνται για κυκλικές κατασκευές με ομοιόμορφη ακτινική διατομή και φόρτιση γύρω από ένα κεντρικό άξονα, όπου η κατάσταση παραμορφώσεων και τάσεων θεωρούνται ταυτόσημες σε κάθε ακτινική διεύθυνση. Τα δισδιάστατα προσομοιώματα επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται για κατασκευές με (περισσότερο ή λιγότερο) ομοιόμορφη διατομή

και αντίστοιχη κατάσταση τάσεων και φορτίσεων για ένα συγκεκριμένο μήκος κάθετα στο επίπεδο (z διεύθυνση), όπου οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις θεωρούνται μηδενικές. Παρόλα' αυτά οι ορθές τάσεις και σε αυτή τη διεύθυνση λαμβάνονται πλήρως υπόψη στην ανάλυση.

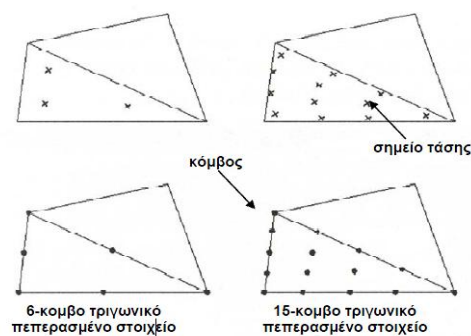


Εικόνα 2.3.1: Παραδείγματα δισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με επίπεδη παραμόρφωση (αριστερά) και αξονοσυμμετρικού προσομοιώματος (δεξιά)

2.4 Διακριτοποίηση χωρικών μέσων

2.4.1 Διακριτοποίηση του εδαφικού μέσου

Για τη διακριτοποίηση του χώρου είναι δυνατή η χρήση δεκαπεντάκομβων (15-nodes) ή εξάκομβων (6-nodes) τριγωνικού σχήματος πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.1. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεκαπεντάκομβια τριγωνικού σχήματος πεπερασμένα στοιχεία παρέχουν μεγαλύτερης ακρίβειας και ποιότητας αποτελέσματα όσον αφορά την εντατική κατάσταση των εδαφικών και κατασκευαστικών προσομοιωμάτων σε φυσικά προβλήματα με ιδιαίτερες δυσκολίες, σε σύγκριση με τα εξάκομβια τριγωνικού σχήματος πεπερασμένα στοιχεία. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι τα πρώτα παρέχουν μια τέταρτης τάξης παρεμβολή για μετακινήσεις και αριθμητική ολοκλήρωση που εμπεριέχει 12 σημεία τάσεων (Gauss points).



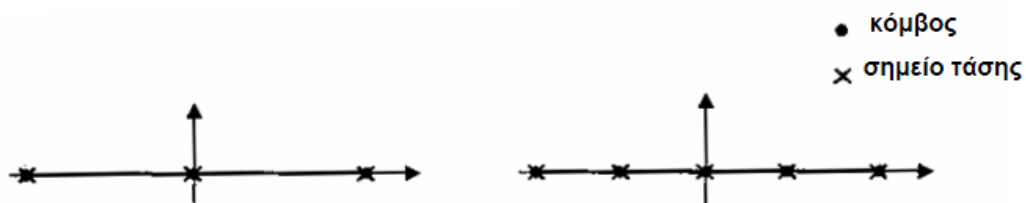
Εικόνα 2.4.1: Θέση κόμβων και σημείων υπολογισμού των τάσεων στα εδαφικά πεπερασμένα στοιχεία

2.4.2 Διακριτοποίηση γεωπλεγμάτων

Εκτός από τη χρήση στοιχείων εδάφους (soil elements) για τη διακριτοποίηση του χώρου που περιλαμβάνει εδαφικά υλικά, απαραίτητη θεωρείται και η προσομοίωση της συμπεριφοράς των γεωπλεγμάτων. Τα γεωπλέγματα είναι κατασκευαστικά

στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν κατασκευές πολύ μικρού πάχους με δυστέμεια, αλλά χωρίς καμπτική δυσκαμψία. Έχουν αντοχή μόνο σε εφελκυσμό και όχι σε θλίψη και χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του οπλισμού σε εφαρμογές οπλισμένου εδάφους.

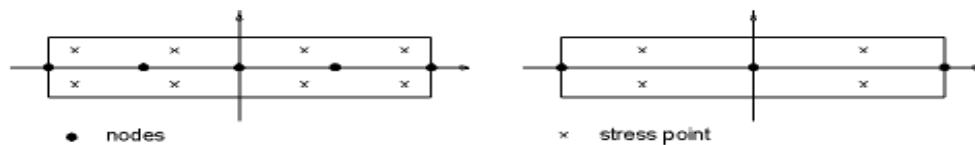
Τα γεωπλέγματα αποτελούνται από στοιχεία γεωπλεγμάτων (γραμμικά στοιχεία) με δύο βαθμούς ελευθερίας κίνησης στη x και y διεύθυνση (u_x , u_y), σε κάθε κόμβο. Όταν χρησιμοποιούνται 15-κομβά στοιχεία εδάφους τότε κάθε στοιχείο γεωπλέγματος ορίζεται από πέντε κόμβους, ενώ τα 3-κομβά στοιχεία γεωπλέγματος χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με 6-κομβά στοιχεία εδάφους. Οι αξονικές δυνάμεις εκτιμώνται σε σημεία που ταυτίζονται με τους κόμβους. Στην Εικόνα 2.4.2 φαίνονται οι θέσεις των κόμβων και των σημείων υπολογισμού των τάσεων για 3-κομβά και 5-κομβά στοιχεία γεωπλεγμάτων.



Εικόνα 2.4.2: Θέση κόμβων και σημείων υπολογισμού των τάσεων σε 3- κομβά και 5- κομβά στοιχεία γεωπλεγμάτων

2.4.3 Διακριτοποίηση πλακών

Οι πλάκες στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελούνται από γραμμικά στοιχεία με τρεις βαθμούς ελευθερίας για τον κάθε κόμβο (u_x , u_y , u_z). Στα 6-κομβά εδαφικά στοιχεία κάθε γραμμικό στοιχείο ορίζεται από τρεις κόμβους ενώ στα 15-κομβά εδαφικά στοιχεία αντιστοιχούν 5 κόμβοι για κάθε γραμμικό στοιχείο, σύμφωνα και με την Εικόνα 2.4.3. Τα γραμμικά αυτά στοιχεία επιδέχονται εκτροπές που οφείλονται σε διάτμηση καθώς και κάμψη. Επιπλέον, το στοιχείο μπορεί να αλλάξει μήκος όταν εφαρμόζεται σε αυτό αξονική δύναμη.



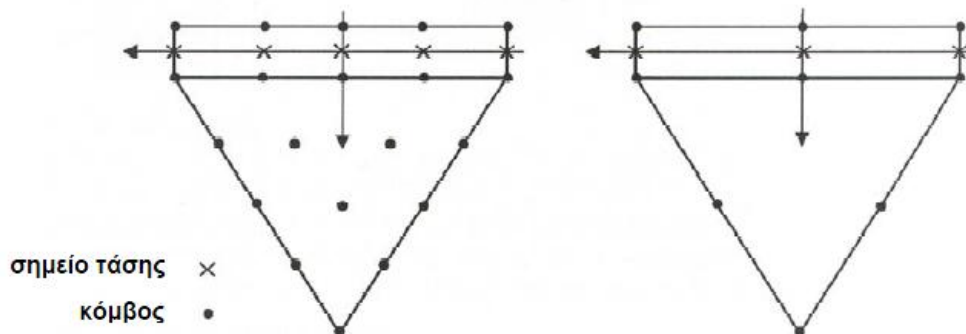
Εικόνα 2.4.3: Θέση κόμβων και σημείων υπολογισμού των τάσεων σε 3- κομβά και 5- κομβά στα γραμμικά στοιχεία

Ένα 3-κομβό γραμμικό στοιχείο αποτελείται από δυο ζεύγη σημείων τάσεων Gauss, ενώ στο 5-κομβό περιέχονται 4 ζεύγη. Τέλος, σημαντικό είναι να μην αλλάξει η αναλογία EI/EA κατά την διάρκεια της επίλυσης, διότι με αυτό τον τρόπο μεταβάλλεται το ισοδύναμο πάχος και έτσι την απόσταση που χωρίζει τα σημεία τάσεων. Αν αυτό γίνει ενώ υπάρχουν δυνάμεις στο γραμμικό στοιχείο θα έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει η κατανομή των καμπτικών στιγμών. Για αυτό σε περίπτωση

που αλλάζει μια από τις δυο παραμέτρους κατά την ανάλυση, πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη η αναλογία που περιγράφηκε νωρίτερα.

2.5 Στοιχεία Διεπιφάνειας

Στα φυσικά προβλήματα όπου το ενδιαφέρον εστιάζεται όχι μόνο στην εντατική κατάσταση και παραμόρφωση των εδαφικών στρωμάτων αλλά και στην αλληλεπίδραση του εδάφους – κατασκευής, συνήθως χρησιμοποιούνται στοιχεία διεπιφάνειας μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής που μπορούν να προσομοιώσουν αυτήν την αλληλεπίδραση και να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης καθορίζεται από το συντελεστή μείωσης της αντοχής (R_{inter}) στη διεπιφάνεια, ο οποίος συσχετίζει την αντοχή του εδάφους (γωνία τριβής και συνοχή) με την αντοχή της διεπιφάνειας πλέγματος-εδάφους (γωνία τριβής διεπιφάνειας και συνάφεια). Κάθε διεπιφάνεια αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία συνδέονται με τα εδαφικά στοιχεία και διαθέτει επίσης συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες που καθορίζονται από τα διάφορα προσομοιώματα των εδαφικών υλικών. Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι τα στοιχεία της διεπιφάνειας εμφανίζονται να έχουν πεπερασμένο πάχος, ενώ ουσιαστικά στη μόρφωση των δισδιάστατων προσομοιωμάτων το πάχος αυτό είναι μηδενικό εφόσον οι συντεταγμένες του κάθε ζεύγους κόμβων ταυτίζονται.



Εικόνα 2.5.1: Κατανομή των κόμβων και σημείων υπολογισμού των τάσεων σε στοιχεία διεπιφάνειας και ο τρόπος σύνδεσης τους με τα εδαφικά στοιχεία

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας στην αλληλεπίδραση εδάφους- κατασκευής χρησιμοποιείται το ελαστο- πλαστικό μοντέλο. Το κριτήριο του Coulomb χρησιμοποιείται στην διάκριση ανάμεσα στην ελαστική συμπεριφορά, όπου λαμβάνουν χώρα μικρές μετατοπίσεις μέσα στην διεπιφάνεια, και στην πλαστική συμπεριφορά της διεπιφάνειας σε περιπτώσεις που συμβαίνουν μόνιμες μετατοπίσεις.

Για να παραμείνει η διεπιφάνεια ελαστική οι διατμητικές τάσεις τα δίνονται από τον τύπο:

$$|\tau| < \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (\text{Εξίσωση 2.7})$$

Και για την πλαστική συμπεριφορά το τ δίνεται από τον τύπο:

$$|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (\text{Εξίσωση 2.8})$$

όπου φ_i και c_i είναι η γωνία τριβής και η συνοχή αντίστοιχα της διεπιφάνειας. Οι παράμετροι αντοχής της διεπιφάνειας συνδέονται με τις παραμέτρους αντοχής του εδάφους. Όπως αναφέρθηκε, κάθε δεδομένο έχει ένα σχετικό συντελεστή μείωσης αντοχής της διεπιφάνειας (R_{inter}). Οι παράμετροι της διεπιφάνειας υπολογίζονται από τις εδαφικές παραμέτρους που έχουν εισαχθεί και τον συντελεστή R_{inter} , σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες:

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \quad (\text{Εξίσωση 2.9})$$

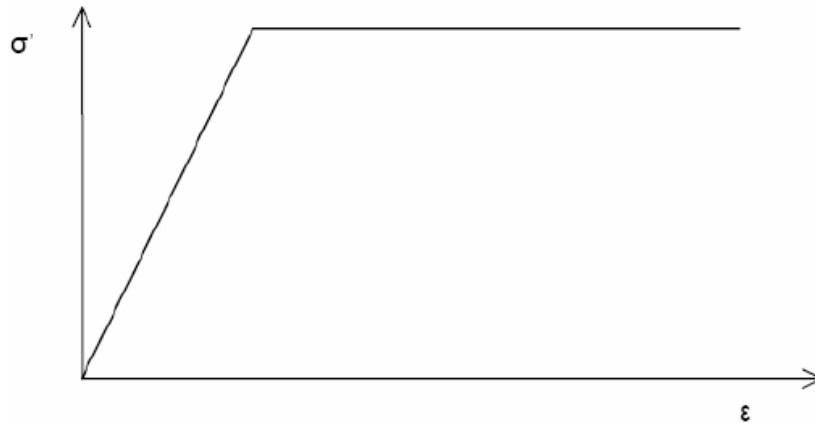
$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil} \quad (\text{Εξίσωση 2.10})$$

$$\text{Για } \psi_i = 0 \text{ για } R_{inter} < 1, \text{ αλλιώς } \psi_i = \psi_{soil} \quad (\text{Εξίσωση 2.11})$$

2.6 Καταστατικοί Νόμοι Συμπεριφοράς Εδάφους

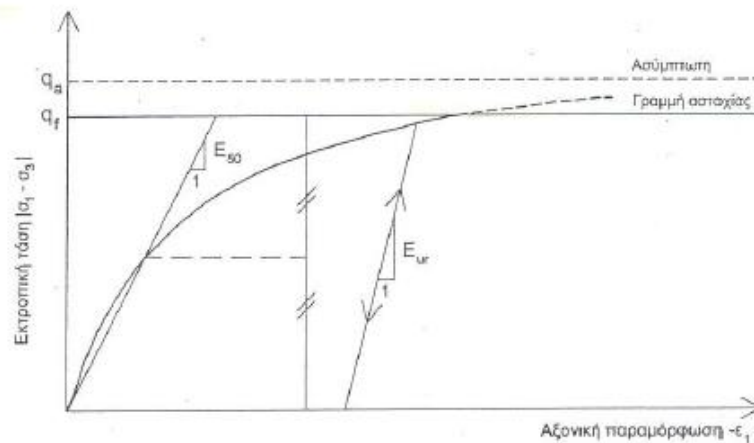
Όλα τα εδάφη υπακούουν σε νόμους συμπεριφοράς για την καλύτερη προσομοίωση τους. Μερικοί από αυτούς τους νόμους αναλύονται παρακάτω:

- **Linear elastic:** Πρόκειται για ένα γραμμικό ελαστικό μοντέλο το οποίο ακολουθεί το νόμο του Hook και εκφράζεται από δύο παραμέτρους, το μέτρο ελαστικότητας (E) και τον λόγο του Poisson (ν). Γενικά, αυτό το μοντέλο είναι μη ρεαλιστικό και πρέπει να περιορίζεται η χρήση του για προσομοίωση του εδάφους.
- **Mohr- Coulomb:** Πρόκειται για ένα ελαστικό- τέλεια πλαστικό μοντέλο. Χρησιμοποιείται για μια γενική προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους μιας και πολλές φορές γίνεται η παραδοχή ότι το έδαφος ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb. Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται 5 παράμετροι:
 - E : μέτρο ελαστικότητας (kN/m^2)
 - ν : λόγος του Poisson
 - φ : γωνία εσωτερικής τριβής ($^\circ$)
 - c : συνοχή (kN/m^2)
 - ψ : γωνία διασταλτικότητας ή διογκωσιμότητας ($^\circ$)



Εικόνα 2.6.1: Βασική ιδέα ενός ελαστικού- τέλεια πλαστικού μοντέλου

- **Soft soil model:** Πρόκειται για ένα μοντέλο συμπεριφοράς μαλακών εδαφών και δίνει τα ρεαλιστικότερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις κανονικά στερεοποιημένων εδαφών και πρωτογενών φορτίσεων.
- **Hardening soil model:** Πρόκειται για ένα μοντέλο με μεταβαλλόμενη επιφάνεια πλαστικότητας και με ενσωματωμένο νόμο κράτυνσης, διατμητικής και σφαιρικής συνιστώσας. Η σχέση τάσεων- παραμορφώσεων απεικονίζεται από την υπερβολή του Σχήματος



Εικόνα 2.6.2: Υπερβολή μοντέλου κρατυνόμενης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

- **Soft soil creep model:** Πρόκειται για ένα μοντέλο για τη περιγραφή μαλακών εδαφών με θεώρηση του φαινομένου του ερπυσμού. Μπορεί να περιγράψει μαλακά εδάφη τα οποία η συμπεριφορά τους εξαρτάται από το χρόνο όπως κανονικά στερεοποιημένες αργίλους.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκε ο καταστατικός νόμος Mohr- Coulomb για την συμπεριφορά του

εδάφους. Η ολοκληρωμένη απόδοση της συνθήκης Mohr- Coulomb αποτελείται από έξι συναρτήσεις, σχηματισμένο σε όρους κυρίων τάσεων.

$$f_{1a} = \frac{1}{2} \sigma'_2 - \sigma'_3 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_3 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.12})$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_3 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.13})$$

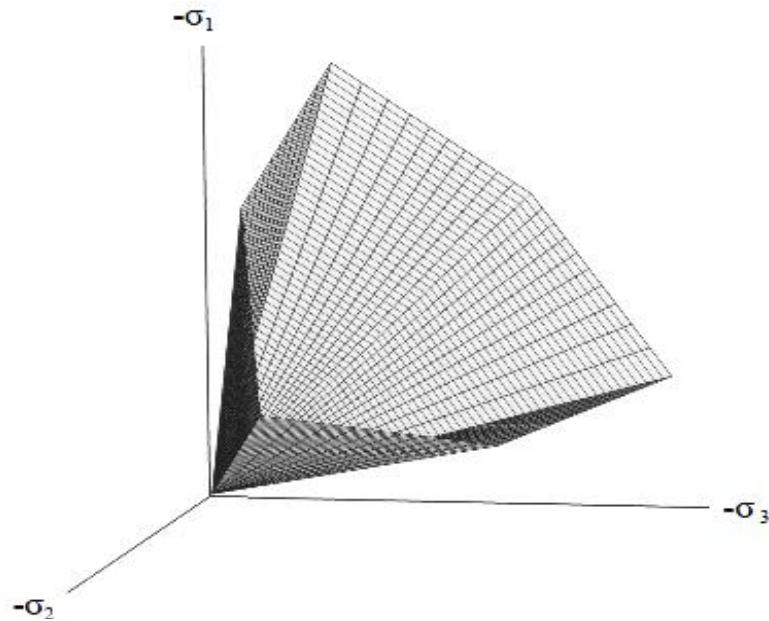
$$f_{1b} = \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_3 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.14})$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2} \sigma'_3 - \sigma'_1 + \frac{1}{2} \sigma'_3 + \sigma'_1 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.15})$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2} \sigma'_1 - \sigma'_3 + \frac{1}{2} \sigma'_1 + \sigma'_3 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.16})$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2} \sigma'_1 - \sigma'_2 + \frac{1}{2} \sigma'_1 + \sigma'_2 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.17})$$

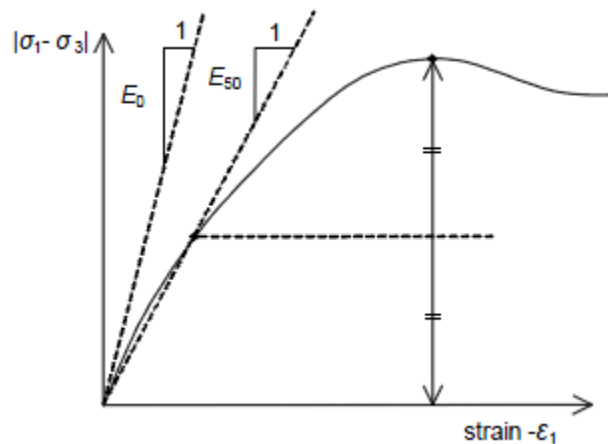
$$f_{3b} = \frac{1}{2} \sigma'_2 - \sigma'_1 + \frac{1}{2} \sigma'_2 + \sigma'_1 \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad (\text{Εξίσωση 2.18})$$



Εικόνα 2.6.3: Τρισδιάστατη γραφικής παράσταση της επιφάνειας διαρροής στο χώρο των κυρίων τάσεων

Στον συγκεκριμένο καταστατικό νόμο, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ως βασικό δείκτη της δυσκαμψίας του εδαφικού υλικού, το μέτρο ελαστικότητας του Young E . Οι τιμές που επιλέγονται για το μέτρο ελαστικότητας που εισάγεται στους υπολογισμούς, πρέπει να έχουν μελετηθεί επαρκώς, δεδομένου ότι τα περισσότερα εδαφικά υλικά εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά από τα πρώτα κιόλας βήματα φόρτισης.

Στην εδαφομηχανική συνήθως, το αρχικό μέτρο ελαστικότητας συμβολίζεται ως E_0 και το τέμνον μέτρο για το 50% της αντοχής του εδάφους ως E_{50} . Έτσι, για εδάφη με μεγάλο εύρος φόρτισης στην ελαστική περιοχή είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται το E_0 , ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις προτείνεται η χρήση του E_{50} . Με βάση λοιπόν αυτήν τη παρατήρηση εξηγείτε το γεγονός ότι εδάφη σε βαθύτερα στρώματα έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία σε σχέση με λιγότερο βαθιά εδάφη.

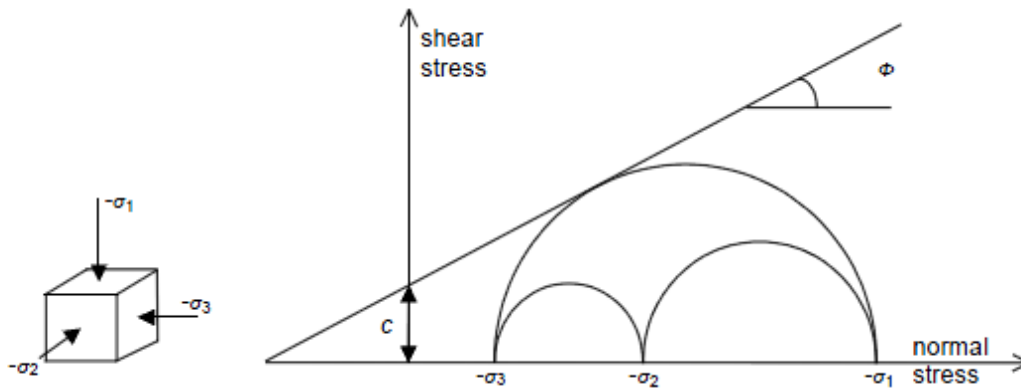


Εικόνα 2.6.4: Προσδιορισμός των E_0 και E_{50} για τυπικά αποτελέσματα αποστραγγισμένης τριαξονικής δοκιμής

Το PLAXIS στο μοντέλο Mohr- Coulomb, προσφέρει την δυνατότητα μεταβολής των τιμών κάποιων μηχανικών χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού καθώς αυξάνεται το βάθος, όπως αυτές του μέτρου ελαστικότητας και της συνοχής. Έτσι εισάγεται η έννοια του μέτρου ελαστικότητας αναφοράς E_{ref} , η τιμή της οποίας θα αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο βάθος αναφοράς y_{ref} . Το ποσοστό αύξησης του μέτρου ελαστικότητας εκφράζεται από τη παράμετρο $E_{increment}$. Με παρόμοιο τρόπο εκφράζεται και η αύξηση της συνοχής. Το πρόγραμμα δίνει επίσης τη δυνατότητα της εισαγωγής των δυναμικών χαρακτηριστικών του εδάφους μέσω της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (V_s), μέσω της οποίας υπολογίζονται οι ελαστικές παράμετροι.

Η γωνία τριβής του εδάφους είναι το μέγεθος εκείνο που καθορίζει ως επί το πλείστον την διατμητική αντοχή του εδάφους και εκφράζεται σε μονάδες μοιρών. Αυτό φαίνεται άλλωστε και στο Σχήμα, όπως επίσης από τη τρισδιάστατη γραφική παράσταση της επιφάνειας διαρροής στο χώρο των κυρίων τάσεων. Για την ακρίβεια, το κριτήριο της διαρροής του μοντέλου Mohr- Coulomb εκφράζει την εφαρμογή του νόμου τριβής του Coulomb σε κάθε επίπεδο μέσα σε ένα στοιχείο υλικού και μπορεί να οριστεί μέσω τριών συναρτήσεων διαρροής, οι οποίες είναι εκφρασμένες με όρους κυρίων τάσεων και εξαρτώνται από την γωνία εσωτερικής τριβής ψ και την συνοχή c .

Τέλος, όσον αφορά στη γωνία διογκωσιμότητας ψ , είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την τάση του εδαφικού υλικού προς διόγκωση και μετράται σε μοίρες. Γενικά τα συνεκτικά εδάφη εμφανίζουν μικρή σχετικώς διογκωσιμότητα, οπότε μπορεί να θεωρηθεί χωρίς μεγάλο σφάλμα $\psi = 0$.



Εικόνα 2.6.5: Απόδοση κύκλων τάσεων, ένας από αυτούς εφάπτεται με την γραμμή Coulomb

Προσοχή πρέπει να δίνεται στα υπερστερεποιημένα αργίλικα εδάφη τα οποία παρουσιάζουν μη αμελητέο βαθμό διόγκωσης και συνεπώς η τιμή του ψ δεν μπορεί να ληφθεί μηδενική. Αντίθετα, στα αμμώδη μη συνεκτικά εδάφη η διογκωσιμότητα εξαρτάται τόσο από την γωνία τριβής όσο και από την πυκνότητα του υλικού. Για παράδειγμα στην περίπτωση της χαλαζιακής άμμου η βιβλιογραφία προτείνει την σχέση $\psi = \phi - 30^\circ$, ενώ για εξαιρετικά χαλαρές άμμους θα μπορούσε να θεωρηθεί ρεαλιστική μια μικρή αρνητική τιμή του ψ .

2.7 Διαδικασία K_0

Πολλά προβλήματα αναλύσεων στην γεωτεχνική μηχανική απαιτούν τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων. Αυτές οι τάσεις, προκαλούμενες από την βαρύτητα, αντιπροσωπεύουν την κατάσταση ισορροπίας του αδιατάρακτου εδαφικού ή βραχώδους στρώματος και ορίζονται μέσω της διαδικασίας K_0 (K_0 procedure).

Γενικά, οι αρχικές τάσεις σε ένα σημείο τάσεις εξαρτώνται από το εδαφικό βάρος πάνω από αυτό το σημείο και την τιμή ΣM_{weight} , σύμφωνα και με τους ακόλουθους τύπους:

$$\sigma'_{v,0} = \sum M_{weight} \left(\sum_i \gamma_i h_i - p_w \right) \quad (\text{Εξίσωση 2.19})$$

$$\sigma'_{h,0} = K_0 \sigma'_{v,0} \quad (\text{Εξίσωση 2.20})$$

Ο συντελεστής K_0 αντιπροσωπεύει την αναλογία των οριζόντιων και κάθετων ενεργών τάσεων.

$$K_0 = \sigma'_{xx} / \sigma'_{yy} \quad (\text{Εξίσωση 2.21})$$

Στην πραγματικότητα, η τιμή του K_0 για ένα φυσιολογικά ενοποιημένο έδαφος είναι συχνά συνδεδεμένη με την γωνία της γωνίας τριβής από την εμπειρική εξίσωση:

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (\text{Εξίσωση 2.22})$$

Σε ένα υπερ- ενοποιημένο έδαφος, ο συντελεστής K_0 θα ήταν αναμενόμενο να είναι μεγαλύτερος από την τιμή που δίνεται από τον παραπάνω τύπο.

Με την χρήση πολύ χαμηλών ή πολύ υψηλών τιμών K_0 , η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε τάσεις οι οποίες παραβιάζουν την συνθήκη αστοχία Coulomb. Σε αυτή την περίπτωση το PLAXIS αυτόματα μειώνει τις πλευρικές τάσεις τόσο όσο να υπακούσει στην συνθήκη αστοχίας. Ωστόσο, αν και οι διορθωμένες τάσεις υπακούουν στην συνθήκη αστοχίας, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το τασικό πεδίο να μην βρίσκεται σε ισορροπία. Είναι γενικά προτιμότερο να δημιουργείται ένα αρχικό τασικών πεδίο το οποίο δεν περιέχει πλαστικά σημεία. Για υλικό με πολύ μικρή (μηδενική) συνοχή, προκειμένου να αποφευχθεί η πλαστικότητα του εδάφους η τιμή του K_0 να βρίσκεται ανάμεσα στις ακόλουθες τιμές:

$$\frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} < K_0 < \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (\text{Εξίσωση 2.23})$$

Όταν επιλεγθεί η διαδικασία K_0 , το πρόγραμμα δημιουργεί κάθετες τάσεις, οι οποίες είναι σε ισορροπία με το ήμισυ του εδαφικού βάρους. Οι οριζόντιες τάσεις από την άλλη υπολογίζονται από την τιμή K_0 . Η διαδικασία, αν και σε περίπτωση που δεν παρουσιάζεται πλαστικότητα, δεν διασφαλίζει ότι το τασικό πεδίο είναι σε ισορροπία. Πλήρης ισορροπία υπάρχει μόνο σε οριζόντιες εδαφικές επιφάνειες, σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ακολουθείται η διαδικασία Gravity loading.



Εικόνα 2.7.1: Παραδείγματα μη οριζόντιων επιφανειών και μη οριζόντιων βαρυτικών στρωματώσεων

2.8 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας (Phi- C Reduction)

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας στο PLAXIS γίνεται μέσω της εντολής Phi- C Reduction. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας επιτυγχάνεται με την

συνεχή μείωση της γωνίας τριβής και της συνοχής του εδαφικού υλικού μέχρις ότου να προκύψει μηχανισμός αστοχίας. Κατά παρόμοιο τρόπο μειώνεται και η αντοχή της διεπιφάνειας, ενώ η αντοχή σε κατασκευαστικά στοιχεία όπως πλάκες και αγκύρια δεν επηρεάζονται.

Για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή χρησιμοποιείται η παράμετρος ΣM_{sf} σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{input}}{\tan\varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (\text{Εξίσωση 2.24})$$

Όπου οι παράμετροι αντοχής που χαρακτηρίζονται ως input είναι οι τιμές που εισήχθησαν στο εδαφικό υλικό από τον χρήστη ενώ αυτές με την ονομασία reduced είναι οι μειωμένες τιμές, όπως προέκυψαν κατά την ανάλυση. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται αν κατά το τελευταίο στάδιο του υπολογισμού έχει πλήρως αναπτυχθεί ο μηχανισμός αστοχίας. Αν δεν έχει αναπτυχθεί ο μηχανισμός αστοχίας τότε είναι απαραίτητο να επαναληφθεί ο υπολογισμός με περισσότερα βήματα. Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$SF = \frac{\text{διαθέσιμη αντοχή}}{\text{αντοχή στην αστοχία}} = \text{τιμή του } \Sigma M_{sf} \text{ στην αστοχία}$$

2.9 Δυναμική Επίλυση

2.9.1 Γενικά

Η ανάλυση ενός μοντέλου είναι δυνατόν να εμπεριέχει εκτός από τις στατικές φορτίσεις και δυναμικές εδαφικές φορτίσεις, των οποίων η προσομοίωση είναι δυνατή με τη χρήση του δυναμικού μέρους (Dynamic module) του κώδικα PLAXIS. Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της χρονικά εξαρτώμενης κίνησης στοιχείου εδάφους, στο οποίο εφαρμόζεται δυναμικό φορτίο είναι:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (\text{Εξίσωση 2.25})$$

Όπου M: μητρώο μάζας

C : μητρώο απόσβεσης

K : μητρώο δυσκαμψίας

F : διάνυσμα φόρτισης

u : διάνυσμα μετακίνησης, το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά

\dot{u} : χρονικά εξαρτώμενη ταχύτητα ταλάντωσης

\ddot{u} : χρονικά εξαρτώμενη επιτάχυνση ταλάντωσης

Η ανωτέρω εξίσωση επιλύεται χρησιμοποιώντας έμμεση ολοκλήρωση ως προς το χρόνο (implicit time integration) με τη μέθοδο Newmark, με τη χρήση κατάλληλου χρονικού βήματος. Το μητρώο δυσκαμψίας, K , περιλαμβάνει τις δυσκαμψίες όλων των υλικών και το διάνυσμα φόρτισης, F, τις συνιστώσες της φόρτισης. Το μητρώο

μάζας, M , περιλαμβάνει τις μάζες όλων των υλικών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα (έδαφος, νερό, κατασκευή) και το μητρώο, C , περιλαμβάνει την απόσβεση όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε ανάλυση.

2.9.2 Απόσβεση Rayleigh

Γενικά, είναι αρκετά δύσκολη μοντελοποίηση των παραμέτρων της απόσβεσης των πραγματικών κατασκευών. Στην πραγματικότητα τα μοντέλα απόσβεσης δεν μπορούν να περιγράψουν στο έπακρο τα πραγματικά χαρακτηριστικά απόσβεσης, παρά μόνο μία προσέγγιση. Μέσα στα διάφορα κλασικά μοντέλα απόσβεσης, το μοντέλο Rayleigh είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο.

Η απόσβεση των υλικών που οφείλεται στις ιξώδεις ιδιότητες του εδάφους, την τριβή και την πλαστικότητα έχει ως αποτέλεσμα μέρος της ελαστικής ενέργειας κατά τη διάδοση των κυμάτων σε κάθε εδαφικό υλικό να μετατρέπεται σε θερμότητα γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση του πλάτους των κυμάτων με την απόσταση. Για τον προσδιορισμό όμως του μητρώου της απόσβεσης δηλαδή του όρου C της Εξίσωσης που σχετίζεται με την απόσβεση, απαιτούνται επιπρόσθετες παράμετροι, οι οποίες δύσκολα μπορούν να προσδιοριστούν με δοκιμές. Γι' αυτό το λόγο το μητρώο συχνά γράφεται και ως συνδυασμός του μητρώου μάζας και του μητρώου ακαμψίας (απόσβεση τύπου Rayleigh):

$$C = \alpha * M + \beta * K \quad (\text{Εξίσωση 2.26})$$

Όπου C : η απόσβεση

M : η μάζα

K : η δυσκαμψία

Εάν δεν υπάρχει απόσβεση υλικού αλλά μόνο γεωμετρική απόσβεση, τότε ισχύει $\alpha = \beta = 0$. Ο συντελεστής α είναι παράμετρος που καθορίζει την επίδραση της μάζας στην απόσβεση του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του α τόσο ευκολότερα αποσβένονται οι χαμηλότερες συχνότητες. Ο συντελεστής β είναι παράμετρος που καθορίζει την επίδραση της ακαμψίας στην απόσβεση του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του β τόσο ευκολότερα αποσβένονται οι μεγαλύτερες συχνότητες.

Οι συντελεστές Rayleigh καθορίζονται από τουλάχιστον δύο τιμές απόσβεσης της απόσβεσης ξ_i , οι οποίες ανταποκρίνονται σε δύο συχνότητες ταλάντωσης ω_i . Η σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων είναι η ακόλουθη:

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2 \omega_i \xi_i \quad (\text{Εξίσωση 2.27})$$

Θέτοντας με αυτό τον τρόπο δύο τιμές του ξ_i , υπολογίζονται οι δύο αντίστοιχες τιμές ω_i και από το σύστημα των δύο εξισώσεων βρίσκονται οι τιμές α και β .

2.9.3 Επιλογή διαστάσεων καννάβου

Η επιλογή των διαστάσεων του καννάβου που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις βασίστηκε στο γεγονός ότι ήταν απαραίτητη η αποφυγή προβλημάτων ανάκλασης των κυμάτων στα πλευρικά όρια του δικτύου καθώς επίσης και αύξησης των τάσεων που προκαλούνται κατά τη δυναμική φόρτιση στα όρια του δικτύου. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων δίνεται η δυνατότητα χρήσης απορροφητικών ορίων στα πλευρικά όρια του δικτύου (absorbent boundaries). Γενικά, όμως, τα όρια του διακριτοποιημένου χώρου πρέπει να βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος των αναλύσεων προκειμένου να αποφεύγονται αριθμητικά σφάλματα τα οποία εμφανίζονται συνήθως στην περιοχή των ορίων του διακριτοποιημένου χώρου.

Η χρήση των απορροφητικών ορίων βασίζεται μέθοδο των Lysmer και Kuhlmeyer (Plaxis manual). Τα στοιχεία των κανονικών και διαμητικών τάσεων απορροφούνται από την απόσβεση στην x διεύθυνση σύμφωνα με τους τύπους:

$$\sigma_n = -c_1 \rho V_p \dot{u}_x \quad (\text{Εξίσωση 2.28})$$

$$\tau = -c_2 \rho V_s \dot{u}_x \quad (\text{Εξίσωση 2.29})$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα, V_p και V_s τα διαμήκη και εγκάρσια κύματα και C_1 και C_2 οι παράμετροι χαλάρωσης.

2.9.4 Ταχύτητες εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων

Κατά τον σεισμό αναπτύσσονται εγκάρσια και διαμήκη κύματα. Με την εισαγωγή των εδαφικών παραμέτρων (E , ν , ρ) οι ταχύτητες των κυμάτων υπολογίζονται αυτόματα. Το εγκάρσιο κύμα (V_p) σε περιορισμένο μονοδιάστατο έδαφος είναι συνάρτηση της ακαμψίας Οιδήμετρου (E_{oed}) και της πυκνότητας της μάζας (ρ). Ομοίως, τα διαμήκη κύματα (V_s) είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας G_{ref} και της πυκνότητας. Αναλυτικά οι συναρτήσεις αυτές εκφράζονται παρακάτω:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{ref}}{\rho}} \quad , \quad V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$$

Όπου:

$$E = \frac{(1-\nu)E_{ref}}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

E = μέτρο ελαστικότητας Young

ν = λόγος Poisson

ρ = πυκνότητα εδάφους

2.9.5 Κρίσιμο χρονικό βήμα

Σημαντική παράμετρος για την δυναμική επίλυση είναι ο υπολογισμός του χρονικού βήματος για του αριθμητικούς υπολογισμούς. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια ενός βήματος έτσι ώστε το κύμα να μην διανύσει απόσταση μεγαλύτερη από το μικρότερο μέγεθος κάποιου πεπερασμένου στοιχείου.

Γενικά ισχύει ότι:

$$\delta_i = \frac{\Delta t}{(n * m)} \quad (\text{Εξίσωση 2.30})$$

Όπου δ_i = σταθερό χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στο δυναμικό υπολογισμό

Δt = χρονική διάρκεια της δυναμικής φόρτισης (10s ή 23.5s)

n = αριθμός βημάτων (1-250) που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της φάσης

m = αριθμός των δυναμικών βημάτων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εφαρμογής της δυναμικής φόρτισης.

Παρόλα αυτά το χρονικό βήμα υπόκειται σε μερικούς περιορισμούς, καθώς αν είναι αρκετά μεγάλο μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες. Για αυτό τον λόγο εισάγεται το κρίσιμο χρονικό βήμα ($\Delta t_{critical}$), το οποίο εξαρτάται από την μέγιστη συχνότητα και τον βαθμό τριγωνοποίησης του πεπερασμένου μοντέλου. Γενικά το κρίσιμο χρονικό βήμα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Delta t_{critical} = \frac{B}{a \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \sqrt{1 + \frac{B^4}{4S^2} - \frac{B^2}{2S} \left[1 + \frac{1-2\nu}{4} \frac{2S}{B^2} \right]}}} \quad (\text{Εξίσωση 2.31})$$

Όπου a = συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο των πεπερασμένων στοιχείων

Για 15- κομβά στοιχεία ισχύει $a = \frac{1}{19\sqrt{c_{15}}}$ με $c_{15} = 4.9479$

ν = λόγος Poisson

B = μέσο πλάτος του πεπερασμένου στοιχείου

S = μέση επιφάνεια του στοιχείου

E = μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

ρ = πυκνότητα του εδάφους

Ως γενική θεώρηση για ακριβείς υπολογισμούς πρέπει $\delta_i \leq \Delta t_{critical}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PLAXIS

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναλυτική παρουσία του προγράμματος PLAXIS. Αναφέρονται όλα τα επιμέρους στάδια που χρειάζονται για να γίνει μια ανάλυση είτε στατική είναι αυτή είτε δυναμική.

3.1 Γενικά

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των γεωτεχνικών προβλημάτων είναι το Plaxis 2D v9. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα δισδιάστατο πρόγραμμα επίλυσης και ανάλυσης των παραμορφώσεων και των συνθηκών ευστάθειας, για διάφορους τύπους γεωτεχνικών εφαρμογών, με την χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Έτσι, σε κάθε επίλυση το έδαφος προσομοιώνεται από ένα κάρναβο πεπερασμένων στοιχείων.

Το Plaxis 2D v9 διακρίνεται σε 4 στάδια για την υλοποίηση των υπολογισμών. Συγκεκριμένα:

1. *Input program*: Γίνεται η εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων του πρανού, των εδαφικών υλικών του και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου.
2. *Calculation program*: Επιλέγεται η μέθοδος υπολογισμού του μοντέλου.
3. *Output program*: Εξάγονται τα αποτελέσματα βάση των υπολογισμών που έχουν προηγηθεί στο calculation program.
4. *Curves program*: Δυνατότητα δημιουργίας καμπυλών με τεταγμένες και τετμημένες τα στοιχεία που υπολογίστηκαν νωρίτερα.

Συνοπτικά, η διαδικασία που ακολουθείται στο Plaxis για στατική επίλυση είναι ο παρακάτω:

Στο Input program γίνονται οι εξής ενέργειες:

- General settings (καθορισμός γενικών χαρακτηριστικών καννάβου)

- Geometry input (εισαγωγή γεωμετρικού μοντέλου)
- Material data set (εισαγωγή εδαφικών υλικών)
- Mesh analysis (τριγωνοποίηση εδαφικού μοντέλου- εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων)
- Initial conditions (εισαγωγή αρχικών συνθηκών)

Calculation program

- Plastic or phi/c reduction calculation (δημιουργία νέας φάσης)
- Insert parameters (εισαγωγή παραμέτρων υπολογισμού)
- Multipliers (εισαγωγή τιμών στους πολλαπλασιαστές)

Output program

- Deformations (εμφάνιση παραμορφώσεων στο μοντέλο)
- Stresses (εμφάνιση τάσεων στο μοντέλο)
- Cross section

Curves program

- Καμπύλες συντελεστών ασφαλείας (Safety factor curves)

Ενώ η διαδικασία που ακολουθείται για την δυναμική επίλυση είναι ο παρακάτω:

Input program

- General settings (καθορισμός γενικών χαρακτηριστικών καννάβου)
- Geometry input (εισαγωγή γεωμετρικού μοντέλου)
- Standard fixities (εισαγωγή συνοριακών συνθηκών)
- Standard earthquake boundaries (εισαγωγή σεισμικών συνόρων)
- Material data set (εισαγωγή εδαφικών υλικών)
- Material damping (απόσβεση υλικού)
- Mesh analysis (τριγωνοποίηση εδαφικού μοντέλου- εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων)
- Initial conditions (εισαγωγή αρχικών συνθηκών)

Calculation program

- Dynamic analysis (επιλογή δυναμικής επίλυσης)
- Insert parameters (εισαγωγή παραμέτρων υπολογισμού)
- Multipliers (εισαγωγή τιμών στους πολλαπλασιαστές)

Output program

- Deformations (εμφάνιση παραμορφώσεων στο μοντέλο)
- Velocities (εμφάνιση κάθετων και οριζόντιων ταχυτήτων)
- Accelerations (εμφάνιση κάθετων και οριζόντιων επιταχύνσεων)

Curves program

- Καμπύλες σημειακών μετατοπίσεων
- Καμπύλες σημειακών επιταχύνσεων

3.2 Input Program- Εισαγωγή Δεδομένων

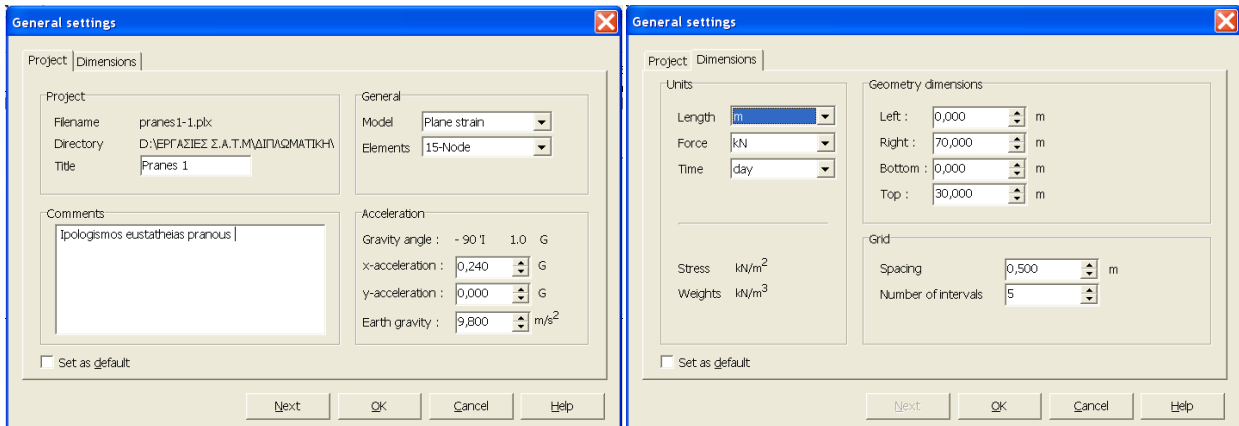
Για να εκτελεστεί η ανάλυση με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο Plaxis 2D v9, πρέπει να δημιουργηθεί ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και να προσδιορισθούν οι εδαφικές ιδιότητες και οι συνοριακές συνθήκες. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε το Input program, το οποίο περιέχει όλες τις εντολές για να δημιουργηθεί και να τροποποιηθεί ένα γεωμετρικό μοντέλο (geometry creation mode), να παραχθεί ένα αντιπροσωπευτικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και να υπολογιστούν οι αρχικές συνθήκες (Initial conditions mode).

3.2.1 General Settings

Κάθε φορά που έχουμε ένα νέο αρχείο στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο *General Settings*. Το παράθυρο general settings αποτελείται από δυο καρτέλες, την καρτέλα *Project* και την καρτέλα *Dimensions*. Η καρτέλα *Project* περιέχει το όνομα της εργασίας και μια προαιρετική περιγραφή, τον τύπο του μοντέλου, τις επιταχύνσεις κατά x και y (για ψευδοστατική επίλυση) και την επιτάχυνση λόγω βαρύτητας. Στην καρτέλα *Dimensions* δηλώνονται όλες οι βασικές μονάδες για το μήκος, την δύναμη και τον χρόνο. Επιπλέον, σε αυτή την καρτέλα εισέρχονται οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης.

Το Plaxis 2D v9 έχει την δυνατότητα να εξάγει δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είτε με μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης (*plain strain*), είτε με αξονοσυμμετρία (*axisymmetric*). Γενικά, το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιείται σε γεωμετρίες με –όσο γίνεται– ομοιόμορφη διατομή και αντίστοιχα τασική κατάσταση. Η κατάσταση της επίπεδης παραμόρφωσης είναι αρκετά συνήθης στην Εδαφομηχανική και αναφέρεται σε περιπτώσεις, κατά τις οποίες οι συνιστώσες των τάσεων δεν μεταβάλλονται κατά τη διεύθυνση ενός άξονα (π.χ. του z) με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις στον άξονα αυτόν να θεωρούνται μηδενικές, όπως φράγματα, επιχώματα και άλλες επιμήκεις κατασκευές. Από την άλλη η αξονοσυμμετρική παραμόρφωση χρησιμοποιείται κυρίως σε κυκλικές κατασκευές, με την συντεταγμένη χ να αναπαριστά την ακτίνα και την συντεταγμένη y να αντιστοιχεί στην συμμετρική αξονική γραμμή.

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα κανναβοποίησης του εδαφικού μοντέλου με εδαφικά τριγωνικά στοιχεία (soil elements) 6 ή 15 κόμβων (nodes). Το τριγωνικό στοιχείο με 15 κόμβους περιέχει 12 σημεία τάσεων (Gauss points), ενώ οι 6 κόμβοι περιέχουν 3 σημεία τάσεων. Συνήθως επιλέγονται τα 15-κομβα στοιχεία διότι παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων. Ως μειονέκτημα καταλογίζεται η απαίτηση για μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ άρα και περισσότερος χρόνος για την ολοκλήρωση της κάθε επίλυσης. Τα 6-κομβα στοιχεία χρησιμοποιούνται για πιο απλές αναλύσεις αλλά πρέπει να επιλέγονται με προσοχή όταν πρόκειται να μελετηθεί περίπτωση με πιθανή αστοχία ή για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, καθώς γενικά υπάρχει υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων αυτών.



Εικόνα 3.2.1: Παράθυρα εισαγωγής γενικών χαρακτηριστικών καννάβου

Το PLAXIS έχει ως προεπιλεγμένη την βαρυτική επιτάχυνση με την τιμή $9,8 \text{ m/s}^2$ και ως διεύθυνση την τιμή -90° , δηλαδή συμπίπτει με το αρνητικό y άξονα. Επιπροσθέτως, εκτός από την βαρυτική επιτάχυνση υπάρχει η δυνατότητα να θέσουμε στο μοντέλο μας ανεξάρτητες επιταχύνσεις προκειμένου να αναπαραχθούν δυναμικές δυνάμεις με ψευδοστατική μέθοδο. Οι τιμές των x και y επιταχύνσεων εκφράζονται σε όρους κανονικής επιτάχυνσης G. Στο πρόγραμμα η βαρύτητα ελέγχεται και υπολογίζεται από τον πολλαπλασιαστή ΣM_{weight} , αντίστοιχα η ψευδοστατική μέθοδος ελέγχεται από τους πολλαπλασιαστές M_{accel} και ΣM_{accel} .

3.2.2 Εισαγωγή γεωμετρικού μοντέλου και συνοριακών συνθηκών

Η παραγωγή ενός πεπερασμένου μοντέλου ξεκινά με την παραγωγή του γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο ουσιαστικά είναι μια αναπαράσταση του προβλήματος. Το γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται από στοιχεία που εισάγει ο χρήστης όπως σημεία και γραμμές και από στοιχεία που εισάγονται αυτόματα από το πρόγραμμα όπως τα συμπλέγματα. Επιπροσθέτως, στο μοντέλο υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής υπογειών σιράγγων, τοίχων αντιστήριξης, πλακών ακόμα και επιπλέον ασκούμενα φορτία.

Geometry Line

Γενικά, πρώτα σχεδιάζεται το περίγραμμα και στην συνέχεια όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Η εισαγωγή των γραμμών γίνεται με την εντολή *Geometry Line* η οποία επιλέγεται από το εικονίδιο που φαίνεται δίπλα ή από το μενού *Geometry* → *Geometry line*. Με την επιλογή της εντολής αυτής μπορούμε να δημιουργήσουμε σημεία και κατ' επέκταση γραμμές είτε με το αριστερό πάτημα του ποντικιού είτε με την εισαγωγή των συντεταγμένων στην command line.


Geogrids

Με την επιλογή του εικονιδίου *Geogrid* ή μέσω της εντολής *Geometry* → *Geogrid*, γίνεται η εισαγωγή γεωπλέγματος σε περίπτωση που απαιτείται στο

γεωμετρικό μοντέλο. Τα γεωπλέγματα είναι λεπτές ελαστικές κατασκευές, με μεγάλες εφελκυστικές δυνάμεις. Ο οπλισμός βελτιώνει τις διατμητικές δυνάμεις στο έδαφος αλλάζοντας το πρότυπο των δυνάμεων του εδάφους.


Στο περιβάλλον του προγράμματος τα γεωπλέγματα εμφανίζονται με κίτρινη γραμμή, ενώ η μόνη εδαφική ιδιότητα που λαμβάνεται υπόψη για τον ορισμό του είναι η ελαστική (αξονική) ακαμψία EA.

Plates

 Οι πλάκες είναι δομικά αντικείμενα που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση λεπτών κατασκευών στο έδαφος με σημαντική καμπτική αντοχή. Οι πλάκες στο PLAXIS χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της επιρροής των τοίχων, των πλακών, των επενδύσεων εκτεινόμενα στην z κατεύθυνση. Στο γεωμετρικό μοντέλο απεικονίζονται με μπλε γραμμή και η επιλογή τους γίνεται είτε μέσω του αντίστοιχου εικονιδίου είτε μέσω της εντολής *Geometry Plates*.

Η πιο σημαντική παράμετρος προσδιορισμού των πλακών είναι η καμπτική ακαμψία EI και η αξονική αντοχή EA.

Interfaces

 Με την εισαγωγή της διεπιφάνειας ουσιαστικά ορίζεται ένα εικονικό πάχος, μια εικονική διάσταση δηλαδή, που χαρακτηρίζει τις εδαφικές ιδιότητες της διεπιφάνειας. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το εικονικό πάχος, τόσες περισσότερες ελαστικές παραμορφώσεις δημιουργούνται. Γενικά, τα στοιχεία διεπιφάνειας υποτίθεται ότι δημιουργούν μικρές ελαστικές παραμορφώσεις, ως εκ τούτου το εικονικό πάχος πρέπει να είναι μικρό. Από την άλλη, αν το εικονικό πάχος είναι πολύ μικρό μπορεί να προκύψουν αριθμητικά προβλήματα. Το εικονικό πάχος υπολογίζεται βάση ενός συντελεστή (*Virtual thickness factor*), όπου λαμβάνει υπόψη το μέσο μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων. Συνήθης τιμή του συντελεστή είναι το 0,1.

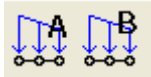
Η δημιουργία μια διεπιφάνειας είναι παρόμοια με αυτή της γεωμετρικής γραμμής. Επιλέγεται είτε από το εικονίδιο *Interface* είτε από την εντολή *Geometry → Interface* και εμφανίζεται στο πρόγραμμα ως διακεκομμένη γραμμή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διεπιφάνειες μπορούν να τοποθετηθούν και στις δυο πλευρές της γεωμετρικής γραμμής. Με αυτό τον τρόπο ενεργοποιείται μια πλήρης αλληλεπίδραση ανάμεσα στα κατασκευαστικά αντικείμενα (όπως τοίχοι, πλάκες, γεωπλέγματα) με το περιβάλλον εδαφικό υλικό. Για να διαχωριστούν οι δύο πιθανές διεπιφάνειες κατά μήκος της γεωμετρικής γραμμής συμβολίζονται με ένα θετικό και ένα αρνητικό πρόσημο. Αυτό γίνεται μόνο για λόγους ταυτοποίησης και δεν επηρεάζει κατά κάποιο τρόπο τα αποτελέσματα.

Συνήθως, επομένως, εφαρμογή της διεπιφάνειας είναι κυρίως όταν στο γεωμετρικό μοντέλο περιλαμβάνονται κατασκευαστικά στοιχεία και ένα από τα ζητούμενα είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους. Η

αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί λεία, δηλαδή δεν υπάρχει τριβή μεταξύ κατασκευής και εδάφους, έως και πλήρως τραχεία.. Η τραχύτητα της αλληλεπίδρασης δηλώνεται από τον συντελεστή μείωσης δύναμης στην διεπιφάνεια R_{inter} . Συνήθης τιμή σε περίπτωση που δεν υπάρχει επίδραση εδάφους- κατασκευής είναι το 1, σε οποιοδήποτε άλλη περίπτωση μια τιμή μικρότερη ή ίση της εφαπτομένης της γωνίας τριβής του εδάφους είναι ιδανική.

Distributed loads



Στο πρόγραμμα είναι δυνατή η εισαγωγή ενός καταναμημένου φορτίου στο γεωμετρικό μοντέλο. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δυο συστήματα φόρτισης (A και B), με τις μονάδες των εισαγόμενων τιμών δίνονται σε δύναμη ανά εμβαδό (kN/m^2), ενώ η τιμή αλλάζει με διπλό κλικ στο φορτίο. Η επιλογή της εντολής αυτής γίνεται από τα αντίστοιχα εικονίδια είτε από την εντολή *Loads* → *Distributed load- Static load system A* ή αντίστοιχα για το σύστημα B από την εντολή *Loads* → *Distributed load- Static load system B*.

Standard Fixities



Με την ολοκλήρωση του γεωμετρικού μοντέλου σειρά έχει η δημιουργία των συνοριακών συνθηκών. Επιλέγοντας το εικονίδιο *Standard Fixities* ή από το μενού *Loads* → *Standard Fixities* το πρόγραμμα τοποθετεί αυτόματα ένα σύνολο γενικών συνοριακών συνθηκών στο γεωμετρικό μοντέλο. Με την εντολή αυτή ενεργοποιούνται οι εξής κανόνες:

- Κάθετα γεωμετρικές γραμμές, για τις οποίες η x - συντεταγμένη είναι ίση με την υψηλότερη ή την χαμηλότερη τιμή της x - συντεταγμένης στο μοντέλο, αποκτώντας κατακόρυφη κύλιση ($u_x = 0$).
- Οριζόντια γεωμετρικές γραμμές, για τις οποίες η y -συντεταγμένη είναι ίση με τη χαμηλότερη τιμή της y - συντεταγμένης στο μοντέλο, αποκτώντας πάκτωση ($u_x = u_y = 0$).
- Δοκοί οι οποίες φτάνουν και τέμνουν το σύνορο του γεωμετρικού μοντέλου υφίστανται δέσμευση της στροφής ($\varphi_z = 0$) στο συγκεκριμένο σημείο του συνόρου, εάν το σημείο αυτό είναι δεσμευμένο τουλάχιστον κατά μια διεύθυνση.

3.2.3 Εισαγωγή σεισμικής διέγερσης (δυναμική επίλυση)

Γενικά σε προβλήματα σεισμών η δυναμική φόρτιση συνήθως εφαρμόζεται κατά μήκος του κάτω μέρους του μοντέλου, με αποτέλεσμα τα εγκάρσια κύματα να διαδίδονται προς τα πάνω. Σε αυτές τις επιλύσεις γενικά η προσομοίωση με μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης είναι η ιδανικότερη. Ωστόσο, το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης δεν περιλαμβάνει την γεωμετρική απόσβεση, ως εκ τούτου μπορεί να είναι απαραίτητο να περιληφθεί η εδαφική απόσβεση για την εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

Σε περίπτωση όπου στο γεωμετρικό μοντέλο ζητείται η εισαγωγή σεισμικής φόρτισης, η διαδικασία σχεδιασμού του γεωμετρικού μοντέλου παραμένει ίδια με αυτήν της στατικής φόρτισης. Η διαφοροποίηση παρατηρείται στην εισαγωγή των φορτίων και των συνοριακών συνθηκών.

Absorbent Boundaries

Τα απορροφητικά σύνορα έχουν ως σκοπό να απορροφήσουν τις προσανξήσεις των τάσεων στα σύνορα του μοντέλου λόγω της δυναμικής φόρτισης, η οποία διαφορετικά θα είχε υποστεί αντανάκλαση μέσα στην εδαφική μάζα.

Το Plaxis διαθέτει μια προεπιλεγμένη ρύθμιση για την δημιουργία κατάλληλων απορροφητικών συνόρων για τις σεισμικές φορτίσεις. Έτσι λοιπόν μέσω της εντολής *Loads* → *Standard earthquake boundaries*. Με την επιλογή της συγκεκριμένης εντολής δημιουργούνται αριστερά και δεξιά του γεωμετρικού μοντέλου κάθετα σύνορα και ταχθείσες μετατοπίσεις $u_x = 0.01$ m και $u_y = 0.00$ m στο κάτω μέρος του γεωμετρικού μοντέλου. Οι οριζόντιες μετακινήσεις εισάγονται ίσες με τη μονάδα αν η χρονοϊστορία του σεισμού εισαχθεί σε μέτρα (m), ενώ οι κατακόρυφες ίσες με το μηδέν. Οι τιμές των μετακινήσεων αλλάζουν με διπλό κλικ επάνω στα βέλη.

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα εισαγωγής σεισμικής καταγραφής μέσω SMC αρχείου, το οποίο περιέχει πληροφορίες για σεισμική φόρτιση. Γενικά, το SMC αρχείο χρησιμοποιεί ένα ειδικό format στο οποίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν επιταχύνσεις, ταχύτητες ή μετακινήσεις με τη διαφορά όμως ότι οι μονάδες μήκους είναι τα εκατοστόμετρα (cm).

3.2.4 Καθορισμός υλικών μοντέλου- Material data set



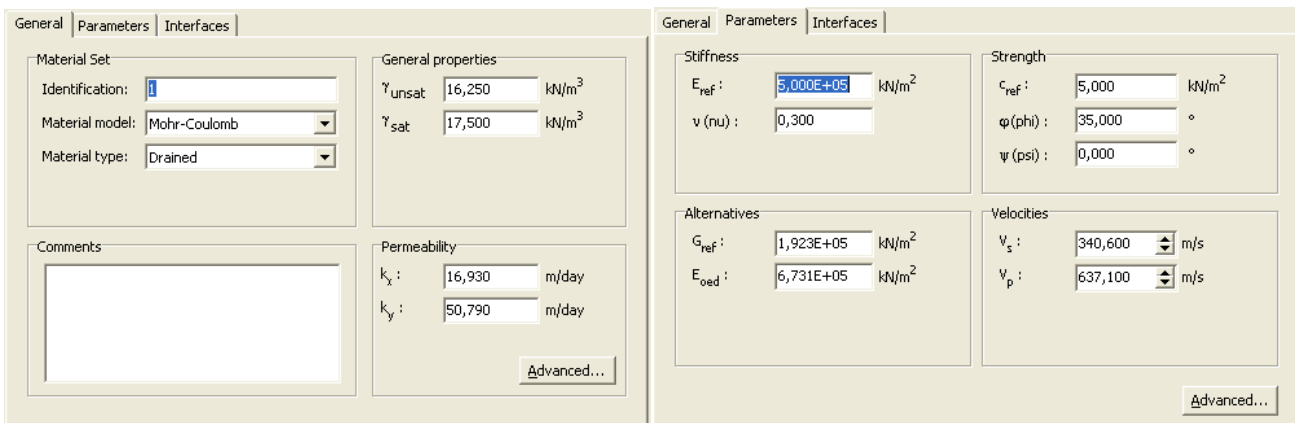
Εφόσον σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το μοντέλο από την πλευρά της γεωμετρίας, σειρά έχει ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών από το οποίο αποτελείται το μοντέλο μας. Η εντολή ενεργοποιείται είτε από το εικονίδιο *Material Sets* είτε από το μενού *Materials*. Πατώντας το εικονίδιο εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου εκεί δηλώνουμε ένα νέο υλικό ή μπορούμε να φορτώσουμε ένα από την βιβλιοθήκη του προγράμματος μέσω της επιλογής *Global*. Με την εντολή αυτή το παράθυρο επεκτείνεται και το παράθυρο εμφανίζεται με δυο πλευρές (*Project data base* και *Global data base*). Και στις δυο πλευρές εμφανίζεται η παράμετρος *Set type*. Η παράμετρος αυτή καθορίζει το είδος του υλικών και συγκεκριμένα αν πρόκειται για εδαφικά υλικά (soil and interfaces), υλικά πλακών (plates), υλικά γεωπλεγμάτων (geogrids) και υλικά αγκυρίων (anchors). Σε περίπτωση που αναφερόμαστε σε εδαφικά υλικά το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα για περαιτέρω διαχωρισμό ανάλογα με τον τύπο του μοντέλου (π.χ. Mohr- Coulomb), τον τύπο του υλικού (Drain, Undrained) ή με το όνομα του υλικού. Τέλος, στο PLAXIS v.9 δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης της συμπεριφοράς του εδάφους, όπως αυτό ορίστηκε από το εδαφικό μοντέλο και τις εδαφικές παραμέτρους, μέσω της εντολής *Soil test*.

Εισαγωγή ιδιοτήτων εδαφικών υλικών

Για την δημιουργία ενός νέου εδαφικού μοντέλου στο *Set type* επιλέγουμε *Soil and Interfaces* και συνεχίζουμε με την εντολή *New*. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την εμφάνιση ενός νέου παραθύρου με τρία φύλλα πληροφοριών, *General*, *Parameters* και *Interfaces*, στα οποία ορίζονται πλήρως τα χαρακτηριστικά του νέου εδαφικού υλικού. Συγκεκριμένα, το φύλλο *General* περιέχει το είδος του εδαφικού μοντέλου. Το φύλλο *Parameters* καθορίζει την παράμετρο της ακαμψίας και της δύναμης του επιλεγμένου εδαφικού υλικού. Τέλος, το φύλλο *Interfaces* καθορίζει την παράμετρο που έχει σχέση με τις ιδιότητες διεπιφάνειας του εδαφικού υλικού.

➤ Καρτέλα General

Αναλυτικότερα, στην περιοχή *Material Set* του φύλλου *General* πέρα από την ονομασία του υλικού, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα σε διάφορους καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς εδάφους (*Material Model*). Επί το πλείστον ο νόμος Mohr- Coulomb είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος. Το μοντέλο αυτό το έδαφος πρόκειται για ένα ελαστικό- τέλεια πλαστικό μοντέλο και χρησιμοποιείται ως γενική προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους. Οι 5 παράμετροι που το χαρακτηρίζουν είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young, ο λόγος Poisson, η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής και η γωνία διογκωσιμότητας.



Εικόνα 3.2.2: Παράθυρα εισαγωγής εδαφικών παραμέτρων – Καρτέλα General (αριστερά) και καρτέλα Parameters (δεξιά)

Κατά κύριο λόγο οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του μοντέλου έχουν ως σκοπό να απεικονίσουν την σχέση μεταξύ πιέσεων και τάσεων σε συνάφεια με την μάζα του εδάφους. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του εδάφους είναι η παρουσία νερού στους πόρους του. Οι πιέσεις λόγω της ύπαρξης του νερού επηρεάζουν σημαντικά την εδαφική απόκριση. Έτσι, για να μελετηθεί η συμπεριφορά αυτή το πρόγραμμα παρέχει άλλη μια επιλογή που μπορεί να κάνει ο χρήστης και είναι ο τύπος του υλικού (*Material Type*). Ο τύπος υλικού διακρίνεται σε:

- Στραγγισμένο υλικό- Drained
- Αστράγγιστο υλικό- UnDrained
- Μη πορώδες υλικό- Non Porous

Στην περιοχή *General Properties* εισάγονται οι τιμές του κορεσμένου ειδικού βάρους (γ_{sat}) και του ακόρεστου ειδικού βάρους (γ_{unsat}). Τα ειδικά αυτά βάρη αναφέρονται στο συνολικό βάρος μονάδας του εδάφους περιλαμβανομένου του νερού στους πόρους. Το ακόρεστο ειδικό βάρος εφαρμόζεται στα υλικά πάνω του φρεατίου επιπέδου ενώ αντίστοιχα το κορεσμένο αναφέρεται στα υλικά που βρίσκονται κάτω του φρεατίου επιπέδου. Γενικά, ισχύει πως το γ_{unsat} είναι μικρότερο από το γ_{sat} . Τα ειδικά αυτά βάρη ενεργοποιούνται κατά την υπολογιστική διαδικασία με την βοήθεια του πολλαπλασιαστή ΣM_{weight} .

Στη περιοχή *Permeability* εισάγονται οι τιμές της διαπερατότητας του εδαφικού υλικού και χρησιμοποιούνται μόνο στις αναλύσεις στερεοποίησης και στους υπολογισμούς υπόγειας ροής. Το πρόγραμμα διαχωρίζει την διαπερατότητα σε δυο κινήσεις, μια σε οριζόντια κίνηση (k_x) και άλλη μια σε κατακόρυφη κίνηση (k_y) καθώς σε μερικά είδη εδαφών (όπως σε τυρφόδη εδάφη) μπορεί να υπάρξει σημαντική διαφορά μεταξύ οριζόντιας και κατακόρυφης διαπερατότητας.

Τέλος η εντολή *Advanced* οδηγεί στο νέο παράθυρο *Advanced General Properties* το οποίο χρησιμοποιείται για εισαχθούν επιπρόσθετες ιδιότητες σε χαρακτηριστικά του μοντέλου. Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι η τιμή του c_k ισούται με 10^{15} , το οποίο σημαίνει ότι η αλλαγή της διαπερατότητας δεν λαμβάνεται υπόψη. Επίσης, ο λόγος κενών, e , σχετίζεται με το πορώδες με τον τύπο $e = n / (1-n)$. Το e_{init} , το μόνο που μπορούμε να επεξεργαστούμε στο μοντέλο Mohr- Coulomb, είναι η τιμή της αρχικής κατάστασης. Τέλος, οι παράμετροι απόσβεσης α και β είναι οι λεγόμενοι συντελεστές Rayleigh και συνδέονται μεταξύ τους με την εξίσωση:

$$C = \alpha * M + \beta * K \quad (Εξίσωση 3.1)$$

Όπου C: η απόσβεση

M: η μάζα

K: η δυσκαμψία

Εάν δεν υπάρχει απόσβεση υλικού αλλά μόνο γεωμετρική απόσβεση, τότε ισχύει $\alpha = \beta = 0$. Ο συντελεστής α είναι παράμετρος που καθορίζει την επίδραση της μάζας στην απόσβεση του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του α τόσο ευκολότερα αποσβένονται οι χαμηλότερες συχνότητες. Ο συντελεστής β είναι παράμετρος που καθορίζει την επίδραση της ακαμψίας στην απόσβεση του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του β τόσο ευκολότερα αποσβένονται οι μεγαλύτερες συχνότητες.

➤ Καρτέλα Parameters

Στο φύλλο *Parameters* εισάγονται οι παράμετροι της ακαμψίας και της σκληρότητας του εδαφικού μοντέλου που περιγράφουμε. Για το μοντέλο Mohr- Coulomb στο τμήμα *Stiffness* εισάγονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E_{ref} και του λόγου Poisson ν ενώ στο πεδίο *Strength* εισάγονται η συνοχή c_{ref} , η γωνία τριβής ϕ και η γωνία διογκωσιμότητας ψ . Αναλυτικότερα για αυτές της παραμέτρους στην Σελίδα 22- 23.

Στο τμήμα *Alternatives* η συμπλήρωση του μέτρου διάτμησης G και του συντελεστή E_{oed} γίνεται αυτόματα από το Plaxis. Οι δυο αυτοί συντελεστές στην ουσία σχετίζονται με τον συντελεστή του Young και με τον λόγο Poisson ν με της ακόλουθους τύπους:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

Στο πεδίο *Velocities* περιέχει της ταχύτητες διαμηκών κυμάτων (V_s) και των εγκάρσιων κυμάτων (V_p). Της στο πεδίο *Alternatives* έτσι και εδώ ο υπολογισμοί γίνονται αυτόματα από της υπόλοιπες παραμέτρους που έχουν εισαχθεί. Βέβαια, είναι δυνατή και η αντίστροφη διαδικασία όπου μπορούμε να εισάγουμε της τιμές των ταχυτήτων και αυτόματα να υπολογιστούν οι ελαστικές παράμετροι.

Οι ταχύτητες υπολογίζονται σύμφωνα με της τύπους:

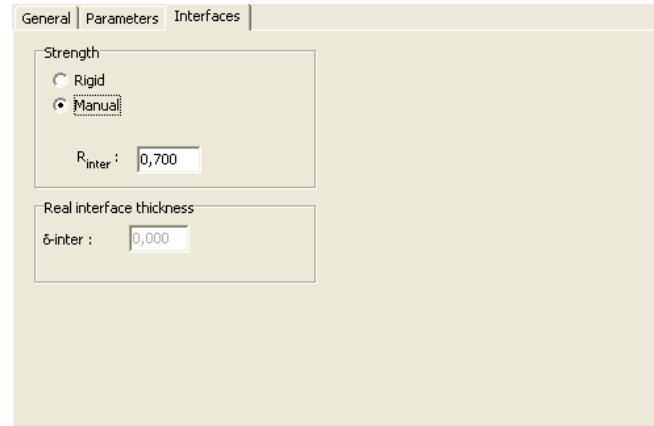
$$V_s = \sqrt{\frac{G_{ref}}{\rho}} \quad , \quad V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$$

Τέλος, και σε αυτή την καρτέλα υπάρχει η εντολή *Advanced*, ανοίγοντας το παράθυρο *Advanced parameters Mohr- Coulomb* (από την στιγμή που το μοντέλο όπου εργαζόμαστε είναι το Mohr- Coulomb). Σε αυτή την περίπτωση η αύξηση της ακαμψίας και η συνεκτική δύναμη σχετίζονται με το βάθος του πρανούς και την χρήση μιας αποκοπώμενης τάσης.

➤ Καρτέλα Interfaces

Τελευταίο φύλλο για τον προσδιορισμό του υλικού είναι το *Interfaces* στο οποίο ορίζονται οι ιδιότητες των στοιχείων διεπιφάνειας (σε περίπτωση που υπάρχουν στο μοντέλο). Τα στοιχεία της διεπιφάνειας χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των στοιχείων της επένδυσης της κατασκευής με αυτά του εδάφους. Σ' αυτά συνήθως δίνονται ιδιότητες της με αυτές των στοιχείων του εδαφικού μέσου, μειωμένες κατάλληλα, ώστε αν ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και κατασκευής. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στον συντελεστή R_{inter} τιμής μικρότερης της μονάδας. Με τον μειωτικό αυτό συντελεστή, πολλαπλασιάζεται η συνοχή c και η γωνία τριβής ϕ του περιβάλλοντος εδάφους και με αυτό τον τρόπο

επιτυγχάνεται συσχέτιση της αντοχής συνάφειας- τριβής, που οφείλεται στην τραχύτητα της επένδυσης στη διεπιφάνεια, με την αντοχή του εδάφους. Η επιλογή του συντελεστή αυτού γίνεται είτε θεωρώντας τον συντελεστή άκαμπτο είτε θέτοντας την δική της τιμή.



Εικόνα 3.2.3: Παράθυρο εισαγωγής εδαφικών παραμέτρων-Καρτέλα Interfaces

Γενικά, η επιλογή *Rigid* χρησιμοποιείται όταν η διεπιφάνεια δεν πρέπει να επηρεάζει την δύναμη του γύρω υλικού άρα η τιμή του συντελεστή R_{inter} ισούται με 1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ιδιότητες της διεπαφής, συμπεριλαμβανομένου την γωνίας διογκωσιμότητας ψ , είναι όμοιες με της ιδιότητες του εδάφους στο σύνολο δεδομένων, εκτός του λόγου Poisson ν . Η επιλογή *Manual* χρησιμοποιείται όταν έχουμε αλληλεπίδραση σε πραγματική δομή του εδάφους, οπότε η διεπαφή είναι πιο αδύναμη και περισσότερο ελαστική με το γειτονικό στρώμα εδάφους. Αυτό σημαίνει πως η τιμή του συντελεστή είναι μικρότερη του 1. Καταλληλότερη τιμή σε περίπτωση έλλειψης υπόλοιπων πληροφοριών είναι το $2/3$.

Εισαγωγή ιδιοτήτων γεωπλέγματος

Σε περίπτωση που το γεώπλεγμα θεωρείται πλαστικό η μόνη ιδιότητα που απαιτείται για την προσομοίωση του γεωπλέγματος είναι η ελαστική αξονική δυστένεια, EA , που εισάγεται σε μονάδες δύναμης ανά μονάδα πλάτους. Η αξονική δυστένεια, EA , συνήθως παρέχεται από της κατασκευαστές γεωπλεγμάτων και μπορεί να προσδιορισθεί από διαγράμματα στα οποία η επιμήκυνση του γεωπλέγματος σχεδιάζεται ως της την εφαρμοζόμενη δύναμη στη διαμήκη διεύθυνση. Η αξονική δυστένεια είναι ο λόγος της αξονικής δύναμης ανά μονάδα πλάτους και της αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta l / l$ όπου Δl είναι η επιμήκυνση l και είναι το μήκος).

$$EA = \frac{F}{\Delta l / l}$$

(Εξίσωση 3.2)

Εισαγωγή ιδιοτήτων πλακών

Για την ελαστική συμπεριφορά της πλάκας χρησιμοποιείται η αξονική δυστένεια EA και η καμπτική ακαμψία EI . Οι παράμετροι EA και EI σχετίζονται με την αντοχή ανά

μονάδα πλάτους στην εκτός επιπέδου κατεύθυνση. Έτσι, η παράμετρος EA ορίζεται ως η δύναμη ανά πλάτος και το EI ως η δύναμη μήκους ανά πλάτος. Από τις δύο αυτές παραμέτρους προκύπτει το ισοδύναμο πάχος της πλάκας.

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (\text{Εξίσωση 3.3})$$


Άλλη μια παράμετρος προσδιορισμού της πλάκας είναι ο λόγος Poisson (ν). Γενικά, προτείνεται η μηδενική τιμή για κατασκευές που είναι σχετικά εύκαμπτες στην εκτός επιπέδου κατεύθυνση. Αντιθέτως, για συμπαγείς κατασκευές όπως παραδείγματος χάριν τοίχοι από σκυρόδεμα ιδανική τιμή θεωρείται το 0,15.

Από την στιγμή που το PLAXIS μελετά τις πλάκες (έκταση σε εκτός επιπέδου κατεύθυνση) παρά ως δοκούς (μονοδιάστατες κατασκευές), η τιμή του Poisson επηρεάζει την παράμετρο EI . Έστω, λοιπόν ότι η τιμή που εισήχθη είναι EI τότε η παρατηρούμενη τιμή του θα είναι $EI/(1-\nu^2)$.

Το φαινόμενο της δυσκαμψίας του λόγου οφείλεται στις τάσεις στην εκτός επιπέδου κατεύθυνση (σ_{zz}) και στο γεγονός ότι οι τροπές εμποδίζονται σε αυτή την κατεύθυνση.

Τελευταία παράμετρος είναι το βάρος (w), το οποίο εισάγεται ως δύναμη ανά μονάδα εμβαδού. Για σχετικά συμπαγείς κατασκευές το βάρος υπολογίζεται από το ειδικό βάρος του υλικού της πλάκας πολλαπλασιαζόμενο με το πάχος της. Για τον ακριβή υπολογισμό του συνολικού βάρους του εδάφους και της κατασκευής στο μοντέλο, το ειδικό βάρος του εδάφους πρέπει να αφαιρεθεί από το ειδικό βάρος του υλικού της πλάκας. Η ενεργοποίηση της πλάκας και του βάρους της γίνεται μαζί με την ενεργοποίηση του εδάφους με την χρήση του πολλαπλασιαστή ΣM_{weight} .

3.2.5 Ορισμός καννάβου πεπερασμένων στοιχείων

 Μετά τον ορισμό των υλικών εδάφους πρέπει να οριστεί ο καννάβος των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να εκτελεστούν οι υπολογισμοί. Επί της ουσίας, όλα τα συμπλέγματα (περιοχές περικλειόμενες από γραμμές) που θα προκύψουν στο γεωμετρικό μοντέλο θα υποδιαιρεθούν αυτόματα σε τριγωνικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά εμφανίζονται σε άτακτη μορφή και τυχαίο προσανατολισμό. Η κανναβοποίηση γίνεται είτε μέσω του εικονιδίου παραπάνω είτε μέσω του μενού *Mesh* → *Global Coarseness* → *Generate*. Στη επιλογή *Global Coarseness* επιλέγεται επίσης η πυκνότητα του δικτύου, καθώς όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο τόσο πιο λεπτομερής είναι η ανάλυση αλλά και πιο χρονοβόρα. Οι επιλογές του ποσοστού πύκνωσης είναι οι ακόλουθες:

- Very Coarse
- Coarse

- Medium
- Fine
- Very Fine

Η κάθε μια από τις παραπάνω επιλογές αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό μέγεθος στοιχείου. Τα μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείου εκφράζεται από την εντολή *Very Coarse* και το μικρότερο από την εντολή *Very Fine*. Το μέγεθος υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$l_e = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n_c}} \quad (\text{Εξίσωση 3.4})$$

Με x, y τις συντεταγμένες του καννάβου και n_c την παράμετρο που εξαρτάται από τη κατάσταση πύκνωσης που έχει επιλεγεί.

Σε περιοχές με μεγάλες συγκεντρωμένες τάσεις ή με προσδοκώμενες μεγάλες παραμορφώσεις είναι επιθυμητό να έχουμε επιπλέον αριθμό τριγωνικών στοιχείων. Από το μενού *Mesh* υπάρχει η δυνατότητα για περαιτέρω πύκνωση του καννάβου είτε περιοχής εδάφους με την επιλογή *Refine cluster*, είτε γύρω από κάποιο στοιχείο επένδυσης με την επιλογή *Refine line*, είτε γύρω από ένα σημείο με την επιλογή *Refine around point*. Η επικύρωση του νέου καννάβου γίνεται με την εντολή *Update*.

3.2.6 Υπολογισμός αρχικών συνθηκών- *Initial Conditions*



Σε αυτό το σημείο υπολογίζονται οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου. Η μετάβαση στις αρχικές συνθήκες γίνεται με την επιλογή του εικονιδίου *Initial conditions*, όπως απεικονίζεται και δίπλα. Στις αρχικές συνθήκες υπολογίζουμε τις αρχικές υδροστατικές πιέσεις (*water conditions mode*) και τις αρχικές γεωστατικές τάσεις (*geometry configuration mode*).



Με το διπλανό εικονίδιο μπορούμε να μεταβαίνουμε από μεταξύ των αρχικών συνθηκών όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Με επιλεγμένο τον αριστερό κύκλο (όπως φαίνεται στο εικονίδιο) ενεργοποιούμε την εντολή *Initial pore pressures* για τον υπολογισμό των αρχικών υδροστατικών πιέσεων, ενώ με τον δεξί κύκλο έχουμε την ενεργοποίηση της εντολής *Initial stresses and geometry configuration*, όπου υπολογίζονται οι αρχικές γεωστατικές τάσεις πάνω στο γεωμετρικό μοντέλο.

Σε εργασίες που η επίδραση του νερού πρέπει να ληφθεί υπόψη, ενεργοποιούμε την εντολή *Initial pore pressures*. Την πρώτη φορά εμφανίζεται ένα παράθυρο για την εισαγωγή της τιμής του βάρους του νερού. Το πρόγραμμα έχει ως προεπιλογή την τιμή $9,8 \text{ kN/m}^3$, την οποία και δεχόμαστε. Άλλος ένας τρόπος εισαγωγής της τιμής του βάρους του νερού είναι από το μενού *Geometry* → *Water Weight*.



Με το πέρας αυτής της εργασίας το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα εισαγωγής της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα. Αυτό επιτυγχάνεται με την

επιλογή του εικονιδίου δίπλα είτε μέσω του μενού *Geometry*→ *Phreatic level*. Το φρεάτιο επίπεδο αντιπροσωπεύει μια σειρά από σημεία όπου η πίεση του νερού είναι μηδενική. Εισάγοντας την στάθμη, η πίεση του νερού (η οποία θεωρείται υδροστατική) θα αυξάνεται γραμμικά με το βάθος σύμφωνα με το βάρος νερού που δηλώθηκε νωρίτερα. Τα φρεάτια επίπεδα στο Plaxis καθορίζονται με δυο ή περισσότερα σημεία, τα οποία εισάγονται από τον χρήστη με τρόπο όμοιο όπως αυτόν της εισαγωγής γεωμετρικών σημείων.



Η πίεση του νερού των πόρων εμφανίζεται με το πάτημα του εικονιδίου *Generate water* ή από το μενού *Generate*→ *Water pressures*. Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται το παράθυρο *Water pressure generation*, όπου υπάρχουν δυο διαφορετικές τρόποι για την επίλυση της πίεσης του νερού στο μοντέλο. Πρώτη είναι η επιλογή *Phreatic level*. Σε αυτή την περίπτωση η επίλυση προκύπτει από την στάθμη που είχε οριστεί νωρίτερα. Το αποτέλεσμα εμφανίζεται σε ένα νέο παράθυρο και για να ενημερωθεί το πρόγραμμα για την επίλυση πατάμε το εικονίδιο *Update*. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα της και η γρήγορη ταχύτητα επίλυσης.

Δεύτερος τρόπος είναι η επιλογή *Groundwater calculation (steady flow)*. Σε αυτή την επίλυση η πίεση του νερού υπολογίζεται βάση του καννάβου που έχει οριστεί, την διαπερατότητα των υλικών και τις συνοριακές συνθήκες ροής. Αυτή η μέθοδος είναι πιο περίπλοκη, άρα και πιο χρονοβόρα. Σε περίπτωση που επιλεγθεί η επιλογή *Groundwater calculation* είναι απαραίτητο να επιλεγθούν οι παράμετροι ελέγχου της επαναληπτικής διαδικασίας. Οι τιμές μπορούν είτε να επιλεγθούν από τις προεπιλεγμένες από την εντολή *Standard settings*, είτε να εισαχθούν από τον χρήστη με την εντολή *Manual settings*. Αναλυτικά οι παράμετροι αναλύονται παρακάτω:

- *Tolarated error (ανεκτό σφάλμα)*: Είναι το σχετικό ανεκτό σφάλμα του ισοζυγίου του νερού. Ως προεπιλεγμένη τιμή είναι το 0,01.
- *Over- relaxation (υπερ- χαλάρωση)*: Αυτός είναι ο συντελεστής υπερ-χαλάρωσης στην επαναληπτική διαδικασία λύσης. Προεπιλεγμένη τιμή είναι το 1,0. Τιμή μεγαλύτερη του 1,0 χρησιμοποιείται για να επιτυγχάνει την επαναληπτική διαδικασία, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση.
- *Maximum iteration (μέγιστος αριθμός επαναλήψεων)*: Συνήθης τιμή των επαναλήψεων είναι 100 αλλά σε μερικές περιπτώσεις, ένας μεγαλύτερο αριθμός επαναλήψεων είναι απαραίτητος για να επιτευχθεί μια συγκλίνουσα λύση.
- *Tension cut- off (αποκοπή τάσης)*: Η χρήση εφελκυστικών τάσεων στους πόρους σε μια ανάλυση παραμόρφωσης, με παράλληλες ενεργές δυνάμεις να ενεργούν στο έδαφος, οδηγούν σε μια υπερεκτίμηση των διατμητικών δυνάμεων. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να μην λάβουμε υπόψη τις εφελκυστικές τάσεις στους πόρους με την παράμετρο *Tension cut- off*. Ως προεπιλεγμένη τιμή είναι το 0.

Με το τέλος του υπολογισμού των αρχικών υδροστατικών τάσεων, σειρά έχει ο υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι σε περίπτωση που το μοντέλο θεωρείται στραγγισμένο, η διαδικασία των αρχικών υδροστατικών τάσεων παραλείπεται και ξεκινούμε κατευθείαν από το στάδιο που θα περιγραφεί παρακάτω.

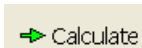


Οι αρχικές τάσεις σε ένα εδαφικό σώμα επηρεάζονται από το βάρος του υλικού και τον σχηματισμό του. Κατά τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων όποια στοιχεία (π.χ. πλάκες) πέρα του εδαφικού υλικού δεν συμμετέχουν. Σε αυτό το στάδιο ουσιαστικά υπολογίζονται οι αρχικές κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις ($\sigma_{v,0}$ και $\sigma_{h,0}$ αντίστοιχα). Η κατακόρυφη τάση σχετίζεται με το βάρος του υλικού ενώ η οριζόντια χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή πλευρικής βαρυτικής πίεσης, γνωστό και ως K_0 . Στο Plaxis οι αρχικές γεωστατικές τάσεις παράγονται προσδιορίζοντας τον συντελεστή K_0 ή με την μέθοδο Gravity loading.

Ο προσδιορισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων με την μέθοδο K_0 γίνεται με την επιλογή του εικονιδίου παραπάνω ή από το μενού *Generate* → *Initial stresses*. Ως αποτέλεσμα εμφανίζεται το παράθυρο *K₀- procedure*. Στο παράθυρο αυτό εμφανίζεται ο συντελεστής ΣM_{weight} , η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει την αναλογία της βαρύτητας που ασκείται. Γενικά, ως προεπιλεγμένη τιμή είναι το 1, το οποίο δείχνει πως είναι ενεργοποιημένη όλη η εδαφική μάζα του μοντέλου. Τέλος, υπάρχει και η στήλη K_0 , όπου υπολογίζεται ο συντελεστής K_0 για κάθε τμήμα ξεχωριστά. Ο συντελεστής υπολογίζεται από τον τύπο του Jaky ($1 - \sin\phi$), ωστόσο ο χρήστης μπορεί να εισάγει και δική του τιμή. Πατώντας *OK* ξεκινά ο υπολογισμός των τάσεων και το αποτέλεσμα εμφανίζεται σε ένα νέο παράθυρο, αποδεχόμαστε τον υπολογισμό πατώντας *Update*.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία K_0 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γεωμετρικά οριζόντια στρώματα με οριζόντια εδαφική επιφάνεια και ,αν υπάρχει νερό, με οριζόντιο φρεάτιο επίπεδο. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ακολουθείται η μέθοδος *Gravity loading*, αποφεύγεται το στάδιο που περιγράφηκε νωρίτερα και καταφεύγουμε στο calculation program (πρόγραμμα υπολογισμού).

3.3 Calculation Program- Υπολογισμός του Μοντέλου



Η μετάβαση στο calculation program γίνεται με το εικονίδιο δίπλα. Με το υποπρόγραμμα αυτό προσδιορίζονται οι παράμετροι των υπολογισμών που θα πραγματοποιηθούν καθώς γίνεται και η ίδια ανάλυση. Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιήσει την ανάλυση σε επιμέρους στάδια. Έτσι ξεχωριστά στάδια παραδείγματος χάριν μπορεί να αποτελέσουν μια φόρτωση στο μοντέλο σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μια κατασκευή ή ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας.

3.3.1 Καθορισμός επιμέρους σταδίων.

Όταν ανοίξει το περιβάλλον του προγράμματος παρατηρούμε ότι ως μοναδικό στάδιο έχει το στάδιο *Initial phase* με αριθμό φάσης το 0. Αυτό το στάδιο αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση του έργου όπως ορίστηκε νωρίτερα στο Input program. Η φάση 0 είναι η αρχή όπου όλες οι υπόλοιπες φάσεις του έργου ξεκινούν. Για να

εισαχθεί το πρώτο στάδιο στον υπολογισμό πρέπει να επιλεγεί η εντολή *Next*, εναλλακτικά μπορεί να επιλεγεί από το μενού *Edit*→ *Next phase*. Ομοίως εισάγονται και οι επόμενες φάσεις ενώ η διαγραφή μια φάσης επέρχεται με την εντολή *Delete*. Μετά την εισαγωγή της, η φάση πρέπει να προσδιοριστεί. Αυτό γίνεται με τον προσδιορισμό των τριών καρτελών *General*, *Parameters* και *Multipliers*.

Καρτέλα *General*

Στην καρτέλα *General* ορίζεται ο τύπος των υπολογισμών που θα πραγματοποιηθούν. Οι επιλογές του προγράμματος είναι οι ακόλουθες:

- *Plastic*: ελαστο-πλαστική ανάλυση των παραμορφώσεων.
- *Consolidation*: ανάλυση της συμπεριφοράς των υδροστατικών πιέσεων σε σχέση με τον χρόνο.
- *Phi/c reduction*: συντελεστής ασφαλείας μέσω της μείωσης των ϕ και c παραμέτρων.
- *Dynamic analysis*: δυναμική ανάλυση των παραμορφώσεων.

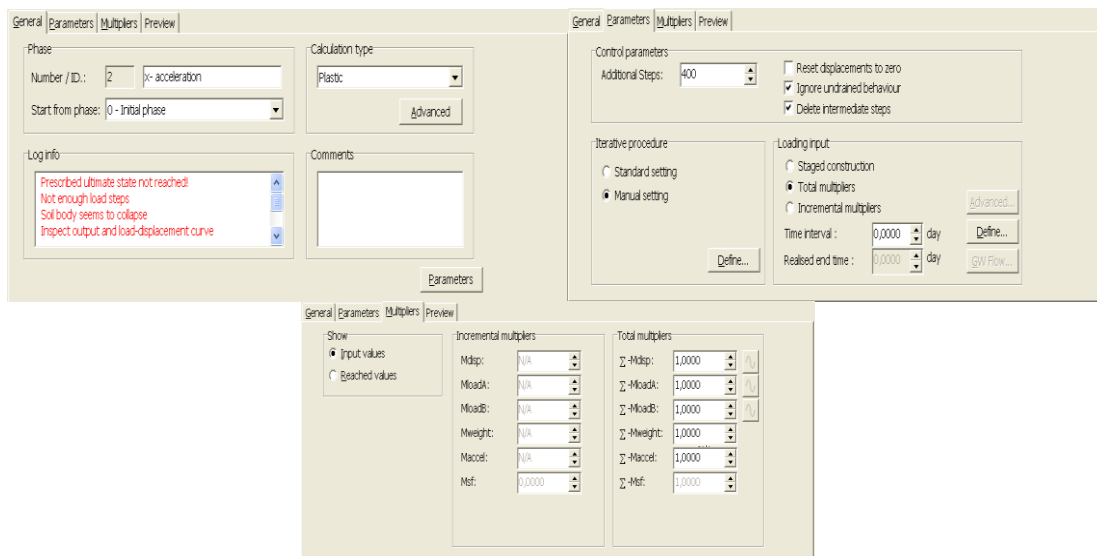
Επιπλέον, ορίζεται το όνομα του περιγραφόμενου σταδίου καθώς και από ποιο προηγούμενο στάδιο ξεκινά. Το Plaxis αυτόματα με την εισαγωγή ενός νέου σταδίου το ξεκινά από το αμέσως προηγούμενο στάδιο αλλά επιτρέπεται και η χειροκίνητη αλλαγή. Τέλος, επιλέγοντας την εντολή *Advanced* υπάρχει η δυνατότητα για όλα τα είδη των υπολογισμών, πλην της δυναμικής ανάλυσης, η χρήση της εντολής *Updated mesh* κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις των μεγάλων παραμορφώσεων για όλα τα είδη των υπολογισμών πλην της δυναμικής επίλυσης. Βέβαια, η επιλογή αυτή δεν χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις παρά μόνο σε ειδικές. Συγκεκριμένα ο υπολογισμός αυτός θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν αναμένονται παραμορφώσεις που επηρεάζουν σημαντικά το σχήμα της γεωμετρία του μοντέλου.

Για τις περισσότερες εφαρμογές τα αποτελέσματα των μεγάλων παραμορφώσεων είναι αμελητέα, για αυτό και δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η εν λόγω εντολή. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι παραμορφώσεις αυτές. Συγκεκριμένα, σε οπλισμένα πρανή ή σε μελέτες όπου υπάρχει μαλακό έδαφος και μπορούν να προκύψουν μεγάλες παραμορφώσεις. Τέλος, να αναφερθεί ότι η ανάλυση *Updated mesh* είναι πιο χρονοβόρα και λιγότερο αυτόνομη από μια κανονική επίλυση για αυτό και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις όπως τις προαναφερθείσες.

Αντίστοιχα, η εντολή *Updated water pressures* χρησιμοποιείται όταν πρέπει συνεχόμενα να επαναυπολογίζονται οι υδροστατικές πιέσεις σύμφωνα με τις νέες θέσεις των σημείων τάσης.

Καρτέλα Parameters

Στην δεύτερη κατά σειρά καρτέλα (Parameters) ορίζονται οι παράμετροι της ανάλυσης που πραγματοποιείται σε κάθε στάδιο. Έτσι, ορίζεται ο μέγιστος αριθμός βημάτων στα οποία θα πρέπει να ολοκληρωθεί το συγκεκριμένο στάδιο. Η επιλογή αυτή γίνεται με την εντολή *Additional Steps*. Ο υπολογισμός θα πρέπει να ολοκληρώνεται στο εύρος των βημάτων που έχει δοθεί, σε περίπτωση που ολοκληρώθηκαν τα βήματα και δεν έχει προκύψει υπολογισμός τότε είναι απαραίτητη η εισαγωγή επιπλέον βημάτων. Γενικά, ο υπολογισμός θα προχωρήσει μέχρις ότου ένα από τα παρακάτω κριτήρια ικανοποιηθούν:



Εικόνα 3.3.1: Καρτέλες του προγράμματος υπολογισμού

- Όταν το συνολικό προβλεπόμενο φορτίο έχει εφαρμοστεί ο υπολογισμός της φάσης έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς. Τότε, στο κουτί Log info εμφανίζεται το μήνυμα 'Prescribed ultimate state fully reached'.
- Όταν έχει εφαρμοστεί ο μέγιστος αριθμός βημάτων, τότε είναι πιθανό ο υπολογισμός να σταματήσει πριν να εφαρμοστεί το συνολικό προβλεπόμενο φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση στο Log info εμφανίζεται το μήνυμα 'Prescribed ultimate state not reached; Not enough load steps' και προτείνεται ο επανυπολογισμός της φάσης με επιπλέον βήματα.
- Όταν το φορτίο έχει οδηγήσει σε κατάρρευση του μοντέλου, τότε στην προκειμένη περίπτωση το συνολικό φορτίο δεν έχει εφαρμοστεί. Σε αυτή την περίπτωση η παράμετρος δυσκαμψία CSP είναι μικρότερη του 0,02. Το μήνυμα που εμφανίζεται είναι 'Prescribed ultimate state not reached; Soil body collapses'.

- Η διαδικασία αύξησης του φορτίου δεν μπορεί να προχωρήσει σε περαιτέρω εφαρμογή του φορτίου στο μοντέλο, αλλά η παράμετρος δυσκαμψίας CSP είναι μεγαλύτερη του 0,02. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται το μήνυμα 'Prescribed ultimate state not reached: load advancement procedure fails. Try manual control'. Σε αυτή την περίπτωση το συνολικό φορτίο δεν έχει εφαρμοσθεί και ο χρήστης μπορεί να ξανατρέξει τον υπολογισμό με την απειλογή της εντολής Arc-length control.

Αν θέλει ο χρήστης να μηδενιστούν οι μετακινήσεις του προηγούμενου σταδίου τότε επιλέγεται η εντολή *Reset displacements to zero*. Παραδείγματος χάριν, σε στάδιο που ακολουθεί το στάδιο υπολογισμού των παραμορφώσεων λόγω βαρύτητας είναι απαραίτητη η επιλογή της εντολής διότι αλλιώς οι στοιχειώδεις μετατοπίσεις που συμβαίνουν στο τωρινό στάδιο προστίθενται με αυτές του σταδίου των βαρυτικών παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ανακριβείς υπολογισμοί, χωρίς όμως να επηρεάζει τις τάσεις που ασκούνται στο μοντέλο.

Επίσης, αν ο χρήστης επιθυμεί να αγνοηθούν οι αστράγγιστες συνθήκες τότε επιλέγεται η εντολή *Ignore undrained behavior*. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται σε περίπτωση που τα υλικά που ορίστηκαν νωρίτερα στο Input program έχουν χαρακτηριστεί ως αστράγγιστα (Undrained). Με αυτό τον τρόπο προσωρινά τα υλικά αυτά θεωρούνται στραγγισμένα (Drained) και όποιος αρχικός υπολογισμός υδροστατικών πιέσεων έχει προκύψει νωρίτερα δεν λαμβάνεται υπόψη για το συγκεκριμένο στάδιο να σημειωθεί ότι στην consolidation analysis η εντολή *Ignore undrained behavior* δεν μπορεί να επιλεγθεί καθώς η συγκεκριμένη ανάλυση δεν διαχωρίζει τα υλικά ως στραγγισμένα ή αστράγγιστα.

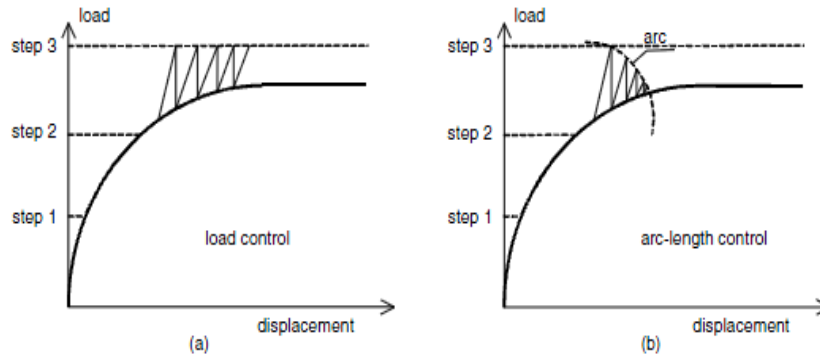
Άλλη μια δυνατότητα που έχει ο χρήστης είναι να κρατήσει όλες τις τιμές για όλα τα βήματα του υπολογισμού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *Delete intermediate steps*. Με την μη επιλογή της εντολής αυτής επιτυγχάνεται αυτό που περιγράφηκε νωρίτερα, σε αντίθετη περίπτωση το πρόγραμμα διαγράφει όλα τα βήματα εξόδου πλην του τελευταίου. Γενικά, το τελικό βήμα περιέχει τα πιο σχετικά αποτελέσματα ενός σταδίου υπολογισμού, ενώ τα ενδιάμεσα βήματα είναι λιγότερο σημαντικά.

Από εδώ και πέρα οι διαδικασίες ορισμού των σταδίων διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του υπολογισμού. Η εργασία ασχολείται με τον πλαστικό υπολογισμό, τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και την δυναμική ανάλυση. Για αυτούς θα περιγραφούν και οι διαδικασίες που απαιτούνται.

Στην περιοχή *iterative procedure* εισάγονται οι παράμετροι της επαναληπτικής διαδικασίας. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών όπως είναι το ανεκτό σφάλμα (tolerated error), οι μέγιστες επαναλήψεις (maximum iterations) ή η παράμετρος της χαλάρωσης (over-relaxation) μπορούν να τεθούν αυτόματα από το πρόγραμμα μέσω της εντολής *Standard setting* ή σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να αλλάξει τις τιμές αυτές μέσω της εντολής *Manual setting* έχει την δυνατότητα να το κάνει.

Αναλυτικότερα στην πλαστικό υπολογισμό (plastic calculation) και στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας (ϕ/c reduction) παρατηρούνται οι παρακάτω παράμετροι:

- *Tolerated error*: κατά τον υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να υπάρξει κάποια απόκλιση από την ακριβή τιμή. Το πρόγραμμα έχει θεσπίσει το ανεκτό σφάλμα έτσι ώστε να ελέγχεται ο υπολογισμός. Σε κάθε βήμα το πρόγραμμα εξακολουθεί να διενεργεί επανάληψη έως ότου τα υπολογιζόμενα σφάλματα να είναι μικρότερα από την καθορισμένη τιμή. Όπως είναι λογικό μεγάλο ανεκτό σφάλμα θα μας δώσει μεν πιο γρήγορες παρατηρήσεις, πιο ανακριβείς δε.
- *Over- relaxation*: Για να μειωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση το Plaxis χρησιμοποιεί την διαδικασία over-relaxation όπως φαίνεται στην εικόνα... Η μέγιστη τιμή του είναι 2 ωστόσο η τιμή της παραμέτρου αυτής εξαρτάται άμεσα από την γωνία εσωτερικής τριβής (φ). Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή φ τόσο πιο μικρή τιμή της παραμέτρου. Μια τιμή στο 1,2 θεωρείται ικανοποιητική για εδάφη άνω των 20° .
- *Maximum iterations*: Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει τον μέγιστο αριθμό των επαναλήψεων σε κάθε υπολογιστικό βήμα ξεχωριστά. Το εύρος των επαναλήψεων είναι από 1 έως 100 με συνήθη τιμή τις 50.
- *Desired minimum και desired maximum*: Οι παράμετροι αυτοί εμφανίζονται μόνο στον πλαστικό υπολογισμό και στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και επί της ουσίας προσδιορίζει το επιθυμητό μέγιστο και ελάχιστο αριθμό επαναλήψεων ανά βήμα αντίστοιχα. Το εύρος είναι 1- 100 αλλά ως προεπιλεγμένη θεωρείται για το μέγιστο το 10 και ελάχιστο το 4.
- *Arc- length control*: Πρόκειται για μια μέθοδο όπου και αυτή συναντάται μόνο σε πλαστική ανάλυση και σε υπολογισμούς συντελεστή ασφαλείας. Χρησιμοποιείται στη συγκέντρωση αξιόπιστων φορτίων κατάρρευσης για υπολογισμούς ελεγχόμενων φορτίων. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή το πρόγραμμα αυτόματα αξιολογεί το τμήμα του εξωτερικού φορτίου που πρέπει να εφαρμοστεί για κατάρρευση όπως φαίνεται και στο Σχήμα. Η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται για υπολογισμούς ελεγχόμενων φορτίων, ενώ σε περίπτωση απενεργοποίησης της μεθόδου υπολογίζονται οι ελεγχόμενες μετατοπίσεις. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση απενεργοποίησης της μεθόδου και προκύπτει αστοχία κατά την επίλυση, μπορεί να προκύψουν προβλήματα σύγκλισης.



Εικόνα 3.3.2: Επαναληπτικές διαδικασίες για (a) έλεγχο κανονικής φόρτισης και (b) έλεγχο Arc- length

Επιπλέον παράμετροι παρουσιάζονται κατά την δυναμική ανάλυση και αναλύονται παρακάτω:

- *Dynamic sub-steps*: Για κάθε επιπλέον χρονικό βήμα το πρόγραμμα υπολογίζει τον αριθμό των υποβημάτων που είναι απαραίτητα για να φτάσει τον εκτιμώμενο χρόνο με μια επαρκή ακρίβεια, με βάση τα δημιουργημένα πεπερασμένα στοιχεία και του υπολογισμένου $\Delta t_{critical}$. Όσο μεγαλύτερα είναι τα δυναμικά υποβήματα τόσο πιο ακριβής είναι ο υπολογισμός. Αντίθετα, με μείωση των βημάτων προκύπτουν γρηγορότερα αλλά λιγότερο ακριβή αποτελέσματα.
- *Newmark alpha and beta*: Οι παράμετροι α και β του Newmark καθορίζουν την αριθμητική ολοκλήρωση του χρόνου σύμφωνα με το σύστημα Newmark. Προκειμένου να διατηρηθεί μια ανεξάρτητη σταθερή επίλυση, οι παράμετροι αυτοί θα πρέπει να ικανοποιούν τους ακόλουθους κανόνες: $\beta \geq 0.5$ και $\alpha \geq 0.25(0.5 + \beta)^2$
 - ✓ Σε περίπτωση απόσβεσης μπορούν χρησιμοποιηθούν οι πρότυπες ρυθμίσεις: $\alpha = 0.3025$ και $\beta = 0.6$
 - ✓ Σε περίπτωση μέσης επιτάχυνσης είναι δυνατή η χρήση των παρακάτω τιμών: $\alpha = 0.25$ και $\beta = 0.5$
- *Boundary C_1 και C_2* : Οι C_1 και C_2 είναι συντελεστές χαλάρωσης που χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την απορροφητικότητα του κύματος στα απορροφητικά σύνορα. Ο C_1 διορθώνει την διάχυση προς κάθετη κατεύθυνση προς το όριο ενώ ο C_2 διορθώνει την εφαπτόμενη κατεύθυνση. Σε περίπτωση ύπαρξης εγκάρσιων κυμάτων (που είναι η πιο συνηθισμένη περίπτωση) ο C_2 πρέπει να προσαρμοστεί για να βελτιωθεί η απορρόφηση. Οι συνήθεις τιμές είναι $C_1 = 1$ και $C_2 = 0.25$.

Στην περιοχή *Loading Input* μπορεί να επιλεγεί ο τρόπος της εισαγόμενης φόρτισης. Οι επιλογές είναι οι παρακάτω:

- *Staged construction*: ο χρήστης μπορεί να διαφοροποιήσει το μοντέλο της κατασκευής στο τέλος της υπολογιστικής φάσης. Σε αυτή την περίπτωση το

συνολικό επίπεδο φορτίου που πρέπει να επιτευχθεί στο τέλος της υπολογιστικής φάσης καθορίζεται από τον προσδιορισμό νέου γεωμετρικού μοντέλου, την διαμόρφωση του φορτίου ή την κατανομή των υδροστατικών πιέσεων.

Με την επιλογή του κουμπιού *Define* ανοίγει το Input program και εμφανίζεται το παράθυρο του Staged construction. Το παράθυρο αυτό είναι παρόμοιο με το παράθυρο των αρχικών συνθηκών, εκτός του ότι οι επιλογές που είναι σχετικές με τις αρχικές συνθήκες (όπως η διαδικασία K_0) δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν. Επίσης, είναι αδύνατη η εκ νέου εισαγωγή του γεωμετρικού μοντέλου.

Κατά παρόμοιο τρόπο με το παράθυρο των αρχικών συνθηκών, το παράθυρο του Staged construction αποτελείται από δύο μέρη, την γεωμετρική διαμόρφωση και την συμπεριφορά του νερού. Κατά την γεωμετρική διαμόρφωση είναι δυνατή η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση φορτίων, εδαφικών τμημάτων και κατασκευαστικών αντικειμένων. Ενώ με την συμπεριφορά του νερού είναι δυνατή η δημιουργία νέων υδατικών πιέσεων βασισμένο στην εισαγωγή ενός νέου φρεατίου επιπέδου.

- *Total multipliers*: επιτυγχάνεται συνολική επιβολή των φορτίσεων μέσω των παραμέτρων που ορίζονται στην καρτέλα *Multipliers*. Αυτοί οι παράμετροι θα αναλυθούν παρακάτω. Κατά την δυναμική ανάλυση η επιλογή Total multipliers είναι η μόνη που μπορεί να επιλεγεί.
- *Incremental multipliers*: σε αυτή την περίπτωση ο χρήστης προσδιορίζει τα στοιχειώδη φορτία μέσω παραμέτρων που εφαρμόζονται στην τρέχουσα διαμόρφωση των εξωτερικών φορτίων. Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται στην καρτέλα *Multipliers*. Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας μόνο η επιλογή Incremental multipliers μπορεί να επιλεγεί.

Καρτέλα *Multipliers*

Κατά την διάρκεια μια ανάλυσης παραμορφώσεως είναι αναγκαίος ο έλεγχος μεγέθους όλων των ειδών φόρτισης. Γενικά, τα φορτία ενεργοποιούνται μέσω του staged construction εισάγοντας την κατάλληλη τιμή. Παρ' όλα αυτά τα εφαρμόσιμα φορτία υπολογίζονται από το γινόμενο της τιμής εισόδου του φορτίου και τον αντίστοιχο πολλαπλασιαστή του. Ως εκ τούτου εναλλακτικά από την μέθοδο του staged construction, τα φορτία μπορούν να αυξάνονται αλλάζοντας τον αντίστοιχο πολλαπλασιαστή. Η εισαγωγή των τιμών των πολλαπλασιαστών γίνεται μέσα από την καρτέλα *Multipliers* και χωρίζονται, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, σε Total multipliers και Incremental multipliers. Οι πολλαπλασιαστές που συμβολίζονται με M απευθύνονται στους Incremental multipliers, ενώ όσοι συμβολίζονται με ΣM στους Total multipliers.

- M_{disp} , ΣM_{disp} : Οι πολλαπλασιαστές αυτοί ελέγχουν το μέγεθος των μετατοπίσεων όπως εισάγονται στο στάδιο staged construction. Η συνολική τιμή των μετατοπίσεων που προκύπτουν κατά το υπολογισμό είναι το

αποτέλεσμα των αντίστοιχων εισηγμένων τιμών στο staged construction και της παραμέτρου ΣMdisp.

- MloadA, ΣMloadA, MloadB, ΣMloadB: Οι πολλαπλασιαστές αυτοί ελέγχουν το μέγεθος των διανεμόντων φορτίων και των σημειακών φορτίων, όπως αυτά έχουν δηλωθεί στο στάδιο δημιουργίας του γεωμετρικού μοντέλου.
- Mweight, ΣMweight: Είναι πιθανό στο πρόγραμμα να διενεργηθούν υπολογισμοί κατά τους οποίους η εδαφική βαρύτητα εφαρμόζεται στο πρόβλημα. Η συγκεκριμένοι πολλαπλασιαστές ελέγχουν την αναλογία του προτύπου βαρύτητας στην ανάλυση και κατ' επέκταση την αναλογία των υλικών βαρών, όπως αυτά έχουν ορισθεί στο input program.

Ο πολλαπλασιαστής εφαρμόζεται τόσο σε εδαφικά βάρη όσο και σε υδατικά βάρη. Για αυτό τον λόγο, αν ο πολλαπλασιαστής είναι μηδέν, το εδαφικό βάρος δεν λαμβάνεται υπόψη και όλες οι υδατικές πιέσεις θα είναι επίσης μηδέν. Όταν, όμως, ο πολλαπλασιαστής τεθεί ίσο με την μονάδα τότε όλο το εδαφικό και υδατικό βάρος ενεργοποιείται και εφαρμόζεται. Τιμή μεγαλύτερη του ένα συνήθως δεν χρησιμοποιείται εκτός από την μελέτη προσομοίωσης φυγόκεντρου. Τέλος, τιμή ίση με τη μονάδα τίθεται αυτόματα από το πρόγραμμα, κατά την αρχή της ανάλυσης, για τον υπολογισμό του εδαφικού και υδατικού βάρους σε περίπτωση όπου, κατά τον υπολογισμό των αρχικών συνθηκών, έχει γίνει υπολογισμός με την διαδικασία K₀.

- Maccel, ΣMaccel: Οι πολλαπλασιαστές αυτοί ελέγχουν το μέγεθος των ψευδοστατικών δυνάμεων ως αποτέλεσμα της επιτάχυνσης που έχει δηλωθεί στο παράθυρο General settings του Input program. Η συνολική τιμή των επιταχύνσεων που προκύπτουν κατά το υπολογισμό είναι το αποτέλεσμα των αντίστοιχων εισηγμένων επιταχύνσεων και της παραμέτρου ΣMaccel.

Οι ψευδοστατικές δυνάμεις μπορούν να ενεργοποιηθούν αν το βάρος του υλικού είναι ήδη ενεργό (ΣMweight= 1). Για ΣMweight= 1 και ΣMaccel= 1 αντίστοιχα και οι βαρυτικές δυνάμεις αλλά και οι ψευδοστατικές είναι ενεργοποιημένες. Το σχήμα παρακάτω δείχνει διάφορους συνδυασμούς εδαφικού βάρους και επιτάχυνσης. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η ενεργοποίηση της συνιστώσας της επιτάχυνσης σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση δίνει αποτελέσματα ψευδοστατικής δύναμης κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Τέλος, με αύξηση του ΣMweight χωρίς παράλληλη αύξηση του ΣMaccel θα παραχθεί δύναμη η οποία θα αυξάνεται χωρίς να αλλάξει η τελική διεύθυνση.

- Msf, ΣMsf: Οι πολλαπλασιαστές αυτοί έχουν σχέση με την διαδικασία Phi-c reduction, η οποία όπως έχει αναφερθεί υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας. Ο ΣMsf ορίζεται από το πηλίκο των πραγματικών παραμέτρων δύναμης με τις μειωμένες τιμές τους και ελέγχει την μείωση της εφαπτομένης της γωνίας τριβής και της συνοχής, όπως ορίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Η τιμή του ΣMsf είναι 1 στην αρχή του υπολογισμού για να ορίσει όλες τις εδαφικές τιμές στις αρχικές αμειώτες. Για αυτό άλλωστε τον λόγο το πρόγραμμα υπολογίζει μόνο τον συντελεστή ασφαλείας σε πρανή που δεν

υπόκεινται σε μόνιμες μετατοπίσεις. Ένας εμπειρικός τρόπος του Συντελεστή Ασφαλείας σε πρηνή που δέχονται μόνιμες μετατοπίσεις είναι ο πολλαπλασιασμός της συνοχής του υλικού με ένα αριθμό. Με την νέα συνοχή επιλύεται η ευστάθεια του πρηνούς και σε περίπτωση που δεν υπόκειται σε μόνιμες μετατοπίσεις το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει τον συντελεστή ασφαλείας, που θα είναι μεγαλύτερος του 1. Ο συντελεστής ασφαλείας του πρηνούς με την αρχική συνοχή θα είναι το πηλίκο του νέου συντελεστή ασφαλείας με τον αριθμό που πολλαπλασιάστηκε η αρχική συνοχή. Όσο αφορά τον πολλαπλασιαστή Msf , χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την προσαύξηση της μείωσης αντοχής του πρώτου υπολογιστικού βήματος. Η πρότυπη τιμή του πολλαπλασιαστή είναι 0.1.

Εισαχθείσες και επιτευγμένες τιμές (Input and reached values)

Οι εισαχθείσες τιμές διαφέρουν σε σχέση με τις τελικές τιμές που προέκυψαν μετά το πέρας του υπολογισμού. Συνήθως αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει μόνιμη μετατόπιση εδαφικής μάζας. Με την επιλογή Reached values εμφανίζονται νέοι παράμετροι, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

- $\Sigma Mstage$: Ο πολλαπλασιαστής $\Sigma Mstage$ σχετίζεται με το staged construction και δίνει την αναλογία του σταδίου κατασκευής που έχει ολοκληρωθεί. Ο πολλαπλασιαστής ξεκινά από το μηδέν και καταλήγει στο 1 σε περίπτωση επιτυχημένης ανάλυσης.
- $\Sigma Marea$: Ο συγκεκριμένος πολλαπλασιαστής σχετίζεται με το staged construction και δίνει την αναλογία του συνολικού όγκου της εδαφικής μάζας στο γεωμετρικό μοντέλο που εξακολουθεί να είναι ενεργό. Αν όλη η εδαφική μάζα είναι ενεργή τότε ο πολλαπλασιαστής παίρνει την τιμή 1.
- Stiffness: Η παράμετρος της ακαμψίας δίνει μια ένδειξη της απώλειας της ακαμψίας που προκύπτει λόγω της πλαστικότητας των υλικών. Η παράμετρος παίρνει την τιμή 1 όταν η δομή είναι πλήρως ελαστική και μειώνεται το μέγεθός της όσο η πλαστικότητα αναπτύσσεται, με την παράμετρο να παίρνει μηδενική τιμή όταν υπάρχει αστοχία στο μοντέλο.
- Force-X, Force-Y: Οι παράμετροι αυτοί υποδεικνύουν τις δυνάμεις που αντιστοιχούν σε μη μηδενικές μετατοπίσεις. Σε μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης οι συγκεκριμένοι παράμετροι εκφράζονται σε μονάδα της δύναμης ανά μονάδα πλάτους του έξω από την επίπεδη κατεύθυνση.
- Pmax: Η παράμετρος αυτή σχετίζεται με την αστράγγιστη εδαφική συμπεριφορά και αντιπροσωπεύει τις μέγιστες απόλυτες πιέσεις πόρων στο πλέγμα, εκφρασμένο σε μονάδα τάσης. Κατά την πλαστική ανάλυση η παράμετρος γενικά αυξάνεται.

Ενεργοποίηση δυναμικής φόρτισης.

Στο πρόγραμμα υπολογισμού, οι πολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιήσουν τα δυναμικά φορτία. Με την επιλογή *Dynamic analysis* γίνεται

δυνατή η ενεργοποίηση του δυναμικού φορτίου (δηλαδή του σεισμού) χρησιμοποιώντας το παράθυρο *Dynamic loading- Displacements* σύμφωνα με το Σχήμα 3.3.4. Η καρτέλα αυτή ενεργοποιείται μόνο για αναλύσεις total multipliers.

Η εισαγωγή του σεισμικού φορτίου μπορεί να γίνει είτε ενεργοποιώντας την εντολή *Harmonic load multiplier*, όπου ορίζει ο χρήστης μια αρμονική συνάρτηση, είτε με την εντολή *Load multiplier from data file*, με την οποία το σεισμικό φορτίο εισάγεται από κάποιο αποθηκευμένο αρχείο.

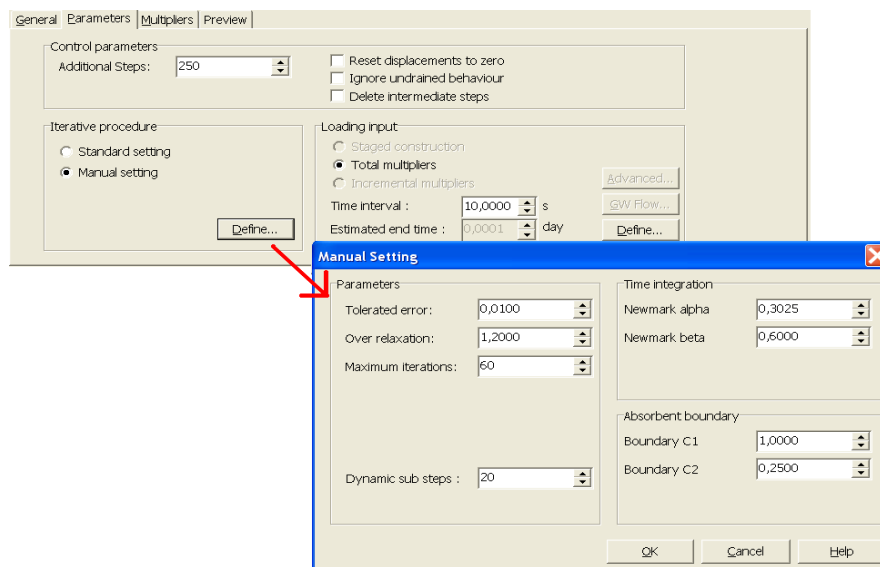
Συγκεκριμένα στο Plaxis τα αρμονικά φορτία ορίζονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F = \hat{M} * \hat{F} * \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{Εξίσωση 3.5})$$

Όπου \hat{M} = πλάτος πολλαπλασιαστή

\hat{F} = εισηγμένη τιμή φορτίου

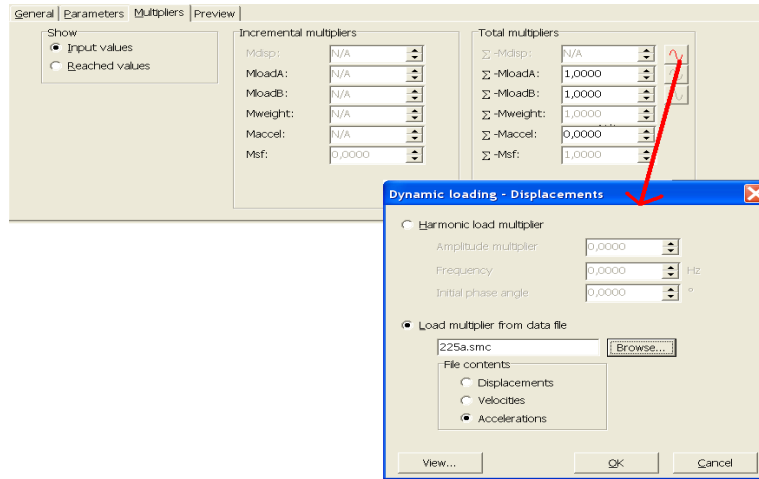
φ_0 = αρχική γωνία φάσης σε μοίρες



Εικόνα 3.3.3: Παρουσίαση της καρτέλας Parameters στην δυναμική επίλυση

Αρά είναι κατανοητό πως για τον υπολογισμό του αρμονικού φορτίου είναι απαραίτητη η γνώση του πλάτους του πολλαπλασιαστή, της συχνότητας και της αρχικής γωνίας σε φάση. Από την άλλη η εισαγωγή σεισμού με την εντολή *Load multiplier from data file* γίνεται, όπως αναφέρθηκε με την εισαγωγή κάποιου αποθηκευμένου αρχείου. Το αρχείο σεισμού θα πρέπει να έχει τη μορφή ενός απλού αρχείου (.txt), (αρχείο ASCII), ή να είναι αρχείο SMC (.smc), (Strong Motion CD-ROM). Το αρχείο ASCII πρέπει να περιέχει σε κάθε γραμμή ένα ζεύγος τιμών (χρόνου- πολλαπλασιαστή) όπου μπορεί να χρησιμοποιηθούν επιταχύνσεις, ταχύτητες ή μετακινήσεις. Το αρχείο SMC χρησιμοποιεί ένα ειδικό format στο οποίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν επιταχύνσεις, ταχύτητες ή μετακινήσεις με τη διαφορά

όμως ότι οι μονάδες μήκους είναι τα εκατοστόμετρα (cm). Στην επικεφαλίδα του αρχείου δίνονται επίσης πληροφορίες σχετικά με τον σεισμό και το όργανο καταγραφής.



Εικόνα 3.3.4: Καθορισμός σεισμικής φόρτισης

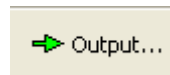
3.3.2 Επιλογή σημείων για την εξαγωγή καμπυλών



Όταν έχουν ολοκληρωθεί όλες οι παραπάνω ενέργειες που αναφέρθηκαν για τον ορισμό των σταδίων υπολογισμού και πριν η διαδικασία υπολογισμού ξεκινήσει, πρέπει να επιλεχθούν κάποια σημεία από τον ίδιο τον χρήστη για την δημιουργία των καμπυλών μετατόπισης ή τάσεων στο curves program.

Με την επιλογή *Select points for curves* από το εικονίδιο ή μέσω της εντολής *View*→*Select points for curves* μπορούν να εισαχθούν μέχρι 10 σημεία στο γεωμετρικό μοντέλο. Τα σημεία (κόμβοι) αυτά επιλέγονται σε περιοχές όπου αναμένεται μεγαλύτερη μετατόπιση της εδαφικής μάζας έτσι ώστε να προκύψουν πιο αντιπροσωπευτικές καμπύλες.

3.4 Output Program: Εξαγωγή Αποτελεσμάτων



Από την στιγμή που το υπολογιστικό κομμάτι έχει τελειώσει, τα αποτελέσματα μπορούν να αξιολογηθούν μεταβαίνοντας στο Output program μέσω του αντίστοιχου εικονιδίου. Σε αυτό το πρόγραμμα ο χρήστης μπορεί να μελετήσει τις μετατοπίσεις και τις τάσεις σε ολόκληρο το γεωμετρικό μοντέλο, όπως επίσης και τις διατομές σε δομικά στοιχεία.

Αρχικά ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το γεωμετρικό μοντέλο και την υπολογιστική φάση που πρέπει να μελετηθούν. Μετά την επιλογή εμφανίζεται ένα παράθυρο με την με το παραμορφωμένο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Οι παραλλαγές και οι επιλογές του χρήστη για εξαγωγή συμπερασμάτων είναι πολλές σε αυτό το πρόγραμμα, εδώ θα αναφερθούν οι κυριότερες.

Ολικές μετατοπίσεις (Total displacements): Οι ολικές μετατοπίσεις είναι η συνισταμένη των κάθετων και οριζοντίων μετατοπίσεων σε όλους τους κόμβους στο τέλος κάθε υπολογιστικού βήματος. Αυτή η επιλογή γίνεται μέσω της εντολής *Deformations*→ *Total displacements*.

Ολικές τροπές (total strains): Οι ολικές τροπές είναι οι συσσωρευμένες τροπές στο γεωμετρικό μοντέλο στα σημεία τάσεων στο τέλος κάθε υπολογιστικού βήματος. Οι κύριες τροπές παρουσιάζονται στο μοντέλο ως σταυροί. Για τα στοιχεία που αποτελούνται από 15 κόμβους, αντιστοιχούν 3 σημεία τάσεων άρα και τρεις σταυροί. Το μήκος της οριζόντιας γραμμής του σταυρού αποτυπώνει το μέγεθος της κύριας τροπής και η κάθετη την κύρια κατεύθυνση αυτής. Τροπές που υπόκεινται σε επέκταση συμβολίζονται με τόξο και όχι με σταυρό. Οι ολικές τροπές υπολογίζονται από την εντολή *Deformations*→ *Total strains*.

Ενεργές τάσεις (effective stresses): Παρόμοια λογικής με τις τροπές είναι και οι τάσεις. Έτσι και οι τάσεις παρουσιάζονται ως σταυρός με το μήκος της οριζόντιας γραμμής του σταυρού να αποτυπώνει το μέγεθος της κύριας τάσης και της κάθετης την κύρια κατεύθυνση αυτής. Από τις ενεργές τάσεις είναι δυνατή η επιλογή των τάσεων διάτμησης (τ_{rel}), οι οποίες αποτελούν μια ένδειξη της εγγύτητας των τάσεων στην ανάπτυξη αστοχίας. Οι ενεργές τάσεις εμφανίζονται με την εντολή *Stresses*→ *Effective stresses*.

Ολικές τάσεις (Total stresses): Οι ολικές τάσεις είναι το άθροισμα των ενεργών τάσεων και των ενεργών πορωδών πιέσεων. Υπολογίζονται από την εντολή *Stresses*→ *Total stresses*.

Πλαστικά σημεία (Plastic points): Τα πλαστικά σημεία συμβολίζονται από μικρά σύμβολα που μπορεί να έχουν διαφορετικά σχήματα και χρώματα, καθώς εξαρτώνται από τον τύπο της πλαστικότητας που συμβαίνει. Τα πλαστικά σημεία Coulomb είναι ιδιαίτερος χρήσιμα στον έλεγχο της επάρκειας του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων. Αν η ζώνη πλαστικότητας Coulomb φθάσει το σύνορο του δημιουργημένου πλέγματος, τότε προτείνεται η εκ νέου δημιουργία πλέγματος με μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείων. Τα πλαστικά σημεία υπολογίζονται μέσω της εντολής *Stresses* → *Plastic points*.

Ενεργές πορώδεις πιέσεις (Active pore pressures): Οι ενεργές πορώδεις πιέσεις είναι το σύνολο των υδατικών πιέσεων (σταθερή κατάσταση πορωδών πιέσεων μαζί με τις υπερβατικές πορώδεις πιέσεις) στο γεωμετρικό μοντέλο, όπως εμφανίζεται στο τέλος κάθε σταδίου. Ομοίως με τις κύριες τάσεις, οι ενεργές πορώδεις πιέσεις παρουσιάζονται ως σταυροί, ωστόσο είναι ιστροπικές και δεν έχουν κύρια κατεύθυνση. Το μήκος της γραμμής αντιπροσωπεύει το μέγεθος της πίεσης και η διεύθυνση συμπίπτει είτε με τον x άξονα είτε με τον y . Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πιέσεις αυτές είναι πάντοτε αρνητικές. Η επιλογή των συγκεκριμένων πιέσεων γίνεται από την εντολή *Stresses*→ *Active pore pressures*.

3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σε μια διατομή.

Με την επιλογή του εικονιδίου *Cross-section* ή μέσω της εντολής *View*→ *Cross-section*, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μια διατομή στο γεωμετρικό μοντέλο. Ακριβείς οριζόντιες και κάθετες διατομές επιτυγχάνονται με την παράλληλο πάτημα του κουμπιού *Shift* στο πληκτρολόγιο. Ύστερα από τις ενέργειες αυτές εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο *Output*, με τις ήδη γνωστές εντολές για την επεξεργασία της διατομής. Τέλος, είναι δυνατή η δημιουργία πολλών διατομών, καθώς κάθε διατομή παρουσιάζεται σε ξεχωριστό παράθυρο.

3.5 Curves Program: Εξαγωγή καμπυλών

Πέρα από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το PLAXIS δίνει την δυνατότητα εξαγωγής και των αντίστοιχων καμπυλών. Το *Curves program* παρέχει όλες αυτές τις πληροφορίες για την εξαγωγή καμπυλών μετατόπισης, διαγράμματα τάσεων και τροπών και διαγράμματα συντελεστών ασφαλείας. Με το άνοιγμα του προγράμματος ανοίγει ένα νέο παράθυρο, όπως του *Σχήματος*, στο οποίο επιλέγονται οι παράμετροι στο *x* και *y* άξονα.

3.5.1 Καμπύλες φορτίου- μετατόπισης

Το είδος αυτό των καμπυλών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οπτικοποίηση ανάμεσα στην εφαρμοσμένη φόρτιση και της παραγόμενης μετατόπισης σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο γεωμετρικό μοντέλο. Συνήθως, ο *x* άξονας σχετίζεται με την μετατόπιση ενός συγκεκριμένου κόμβου και ο *y* άξονας περιέχει πληροφορίες σχετικές με την φόρτιση, όπως αυτές εκφράζονται από τους πολλαπλασιαστές.

3.5.2 Διαγράμματα τάσεων- τροπών

Τα διαγράμματα τάσεων- τροπών χρησιμοποιούνται στην οπτικοποίηση της συμπεριφοράς των τοπικών τάσεων- τροπών του εδάφους. Στην πραγματικότητα τα διαγράμματα τάσεων- τροπών αντιπροσωπεύουν την ιδανική συμπεριφορά του εδάφους σύμφωνα με το επιλεγμένο εδαφικό μοντέλο. Διαθέσιμες είναι οι ακόλουθες τάσεις και τροπές:

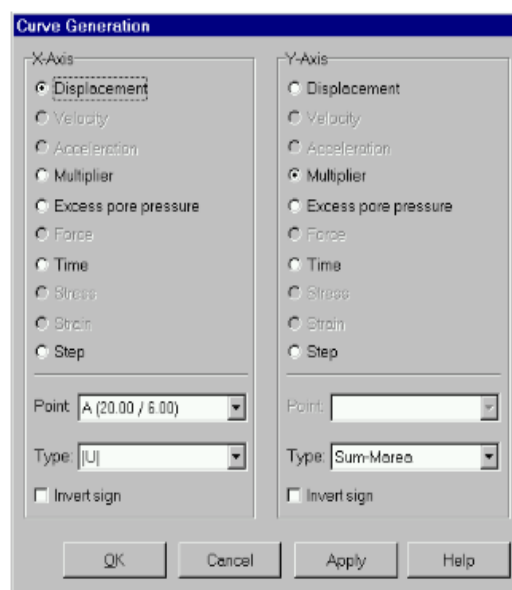
Τάσεις:

- $\sigma'_{xx,yy,zz}$: Ενεργές τάσεις σε *x*, *y*, *z* άξονα
- σ'_{xy} : Διατμητικές τάσεις
- $\sigma'_{1,2,3}$: Με απόλυτη έννοια οι μεγαλύτερες, μεσαίες και μικρότερες αντίστοιχα ενεργές κύριες τάσεις
- p' : Ισοτροπικές ενεργές τάσεις

- q : ισοδύναμες διατμητικές τάσεις

Τροπές:

- $\varepsilon_{xx,yy}$: Οριζόντιες και κάθετες αντίστοιχα τροπές
- γ_{xy} : Διατμητικές τροπές
- $\varepsilon_{1,2,3}$: Πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες αντίστοιχα κύριες τροπές
- $\varepsilon_{v,q}$: ογκομετρικές και ισοδύναμες διατμητικές αντίστοιχα τροπές



Εικόνα 3.5.1: Παράθυρο δημιουργίας καμπυλών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται όλες οι στατικές επιλύσεις που έλαβαν χώρα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

4.1 Γενικά

Μετά την γενική παρουσίαση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις είναι σκόπιμο να γίνει η περιγραφή των πρानών- μοντέλων και των δεδομένων των αναλύσεων.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι επιλύσεις που έγιναν με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό PLAXIS v.9. Πέρα από τις παραμετρικές επιλύσεις υπάρχουν και διερευνητικές συγκρίσεις των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν με την συγκεκριμένη μέθοδο, σε σχέση με αποτελέσματα όπως προέκυψαν από άλλες μεθόδους. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η αξιολόγηση και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Το φάσμα μελέτης της ευστάθειας των πρानών στην συγκεκριμένη μελέτη είναι αρκετά ευρύ. Συνοπτικά, οι επιλύσεις ξεκινούν από την μελέτη της ευστάθειας ενός τεχνητού άοπλου πρानούς και συνεχίζουν με την μελέτη ενός φυσικού πρανούς το οποίο βρίσκεται σε οριακή κατάσταση ισορροπίας. Έπειτα, μελετάται ένα φυσικό πρανές, λαμβάνοντας υπόψη αυτή την φορά την επίδραση του νερού όπως ορίζεται αυτό από τον φρεάτιο ορίζοντα. Τέλος, γίνεται μια συγκριτική μελέτη με την ερευνητική μελέτη της Ε. Καπόγιαννη κατά την οποία υπολογίζεται η ευστάθεια οπλισμένων πρανών σε φυσικά μοντέλα με την χρήση φυγοκεντρική. Το μοντέλο επανασχεδιάζεται στο PLAXIS προκειμένου να αξιολογηθούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων.

Όταν γίνεται λόγος για έλεγχο ευστάθειας πρανούς, συνήθως διερευνάται με τον προσδιορισμό της δυσμενέστερης επιφάνειας ολίσθησης και την εξασφάλιση συντελεστού ασφαλείας τουλάχιστον ίσου με 1. Η ευστάθεια μελετάται υπό την

επίδραση του εδαφικού βάρους στο πρανές ή σε συνδυασμό με κάποιο εξωγενές φορτίο, όπως παραδείγματος χάριν η κατασκευή ενός κτηρίου. Επιπλέον, ανάλυση έγινε και στην ευστάθεια των πρανών κατά την επίδραση σεισμικού φορτίου που ελέγχεται με θεώρηση των ακόλουθων πρόσθετων ενεργών επιταχύνσεων που δρουν στην εδαφική μάζα.

Οριζόντια: $a_h = a_\pi$ (Εξίσωση 4.1)

Κατακόρυφη: $a_v = \pm 0,50 a_\pi$ (Εξίσωση 4.2)

Όπου a_π είναι η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του πρανούς, που λαμβάνεται ίση με 0,5α για φυσικά πρανή. Με βάση την σεισμική επιτάχυνση του εδάφους η Χώρα υποδιαιρείται σε τρεις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας (Πίνακας 4.1.1). Τέλος, να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές των σεισμικών επιταχύνσεων εδάφους εκτιμάται ότι έχουν πιθανότητα υπέρβασης 10 % στα 50 χρόνια.

Πίνακας 4.1.1: Κατηγοριοποίηση σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους

Ζώνη Σεισμικής επικινδυνότητας	I	II	III
α	0,16	0,24	0,36

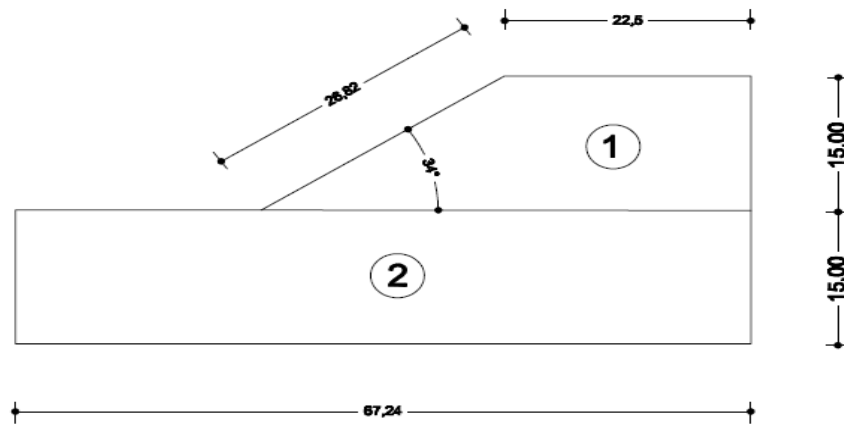
4.2 Επίλυση 1

4.2.1 Σκοπός επίλυσης

Ζητούμενο είναι η μελέτη ευστάθειας του πρανούς υπό την επίδραση εδαφικού βάρους και εν συνεχεία υπό την επίδραση οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μεγέθους 0,24 g με την ψευδοστατική μέθοδο. Στην συνέχεια ο συντελεστής ασφαλείας που θα προκύψει με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θα συγκριθεί με τον συντελεστή ασφαλείας που θα υπολογιστεί από την επίλυση με το νομογράφημα Hoek & Bray.

4.2.2 Προσδιορισμός Μοντέλου

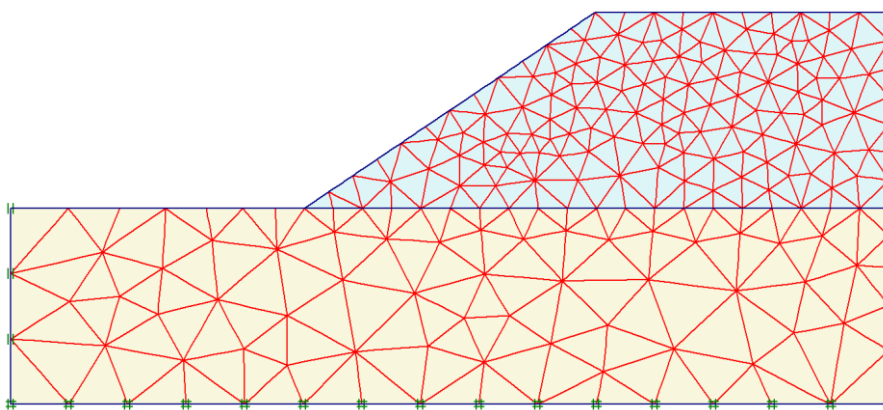
Το πρανές ύψος 15 μέτρα με κλίση 2/3 (~34°). Το μοντέλο αποτελείται από δύο εδαφικά στρώματα με 15 μέτρα έκαστο. Κάθε εδαφικό στρώμα αποτελείται από διαφορετικό υλικό. Συγκεκριμένα, το Υλικό 1 συναντάται στο εδαφικό στρώμα 1 και αντίστοιχα το Υλικό 2 στο στρώμα 2. Τέλος, το πρανές θεωρείται στραγγισμένο, οπότε η επίδραση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα δεν λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 4.2.1: Διαστασολόγηση γεωμετρικού μοντέλου πρανούς

Το προσομοίωμα του πρανού διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά με βάση των κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS. Ως μοντέλο προσομοίωσης επιλέχθηκε η επίπεδη παραμόρφωση, διότι είναι αντιπροσωπευτικότερο για τέτοιου είδους επιλύσεις. Για τη διακριτοποίηση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν 15-κομβά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και για τη δημιουργία του κανάβου επιλέχθηκε το μεσαίο δίκτυο (medium) με επιπλέον πύκνωση της περιοχής που ορίζεται από το Υλικό 1. Περαιτέρω πύκνωση δεν είχε σημαντική επίδραση στο μέγεθος των μετακινήσεων και επιπλέον είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος με αποτέλεσμα η διαδικασία επίλυσης να είναι υπερβολικά μακρόχρονη.

Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για το πρανές, που δημιουργήθηκε με τον Κώδικα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS φαίνεται στο Σχήμα 4.2.2.



Σχήμα 4.2.2: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για το πρανές μελέτης

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλα τα χαρακτηριστικά του δημιουργημένου πεπερασμένου μοντέλου.

Πίνακας 4.2.1: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου

Παράμετροι	
Μοντέλο προσομοίωσης	Επίπεδη παραμόρφωση
Πύκνωση Δικτύου	Μεσαία
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	389
Αριθμός κόμβων	3231
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	2,28
Αριθμός σημείων υπολογισμού τάσεων	4668

Προκειμένου να υπάρξει κατάλληλη προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους εισήχθη ένα κατάλληλο εδαφικό μοντέλο με τις αντίστοιχες εδαφικές παραμέτρους που το χαρακτηρίζει. Επομένως, μετά την εισαγωγή του γεωμετρικού μοντέλου, σειρά έχει ο καθορισμός των παραμέτρων των δυο εδαφικών υλικών που αποτελείται το πρανές. Ουσιαστικά, παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Mohr-Coulomb μαζί με παραμέτρους που καθορίζουν την παρουσία νερού στο πρανές, αν βέβαια αυτό θεωρείται αστράγγιστο. Ο Πίνακας 4.2.2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές των παραμέτρων των υλικών.

Πίνακας 4.2.2: Συγκεντρωτικές τιμές των εδαφικών παραμέτρων για τα υλικά 1 και 2

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Υλικό 1 <input type="checkbox"/>	Υλικό 2 <input type="checkbox"/>	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC*	MC*	-
Τύπος υδραυλικής συμπεριφοράς	<i>Type</i>	Drained	Drained	-
Ειδικός Βάρος πάνω από Φρ. Επίπεδο	γ_{unsat}	22	25	kN/m ³
Ειδικός Βάρος κάτω από Φρ. Επίπεδο	γ_{sat}	22	25	kN/m ³
Οριζόντια διαπερατότητα	k_x	0	0	m/day
Κάθετη διαπερατότητα	k_y	0	0	m/day
Μέτρο ελαστικότητας Young	E_{ref}	100000	500000	kN/m ²
Λόγος Poisson	ν	0.3	0.3	-
Συνοχή	c_{ref}	5	100	kN/m ²
Γωνία τριβής	φ	35	38	°
Γωνία διασταλτικότητας	ψ	5	8	°

*MC: Mohr- Coulomb

4.2.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 1

Έπειτα από την εισαγωγή των κατάλληλων παραμέτρων, σειρά έχει ο ορισμός και η επίλυση των επιμέρους φάσεων. Οι μετατοπίσεις λόγω εδαφικού βάρους υπολογίστηκαν με την χρήση του Staged construction, όπου ως αρχική κατάσταση θεωρήθηκε το οριζόντιο εδαφικό στρώμα 2 με παράλληλο υπολογισμό των αρχικών

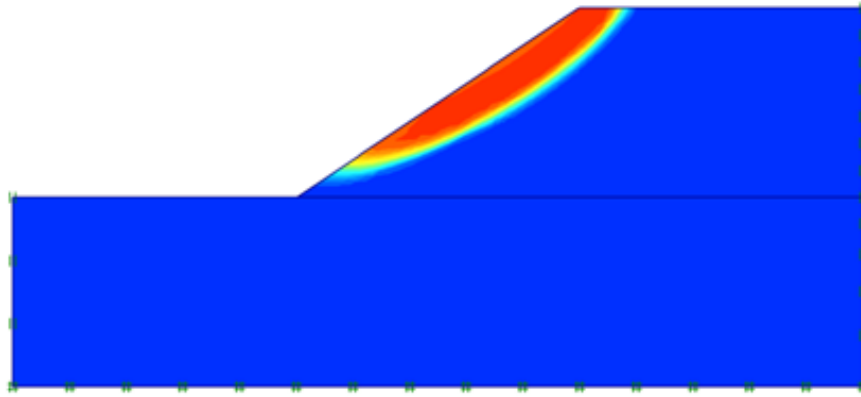
τάσεων με την διαδικασία K_0 . Στην συνέχεια ενεργοποιήθηκε το στρώμα με το εδαφικό υλικό 1, ενώ η επιτάχυνση εισήχθη με τον πολλαπλασιαστή $\Sigma M_{\text{accel}} = 1$. Σειρά, πλέον, έχουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν και μπορούν πλέον να αξιολογηθούν στο πρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιμέρους σταδίων και στον Πίνακα 4.2.3 τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

Πίνακας 4.2.3: Παρουσίαση αποτελεσμάτων υπολογισμών των δυο σταδίων

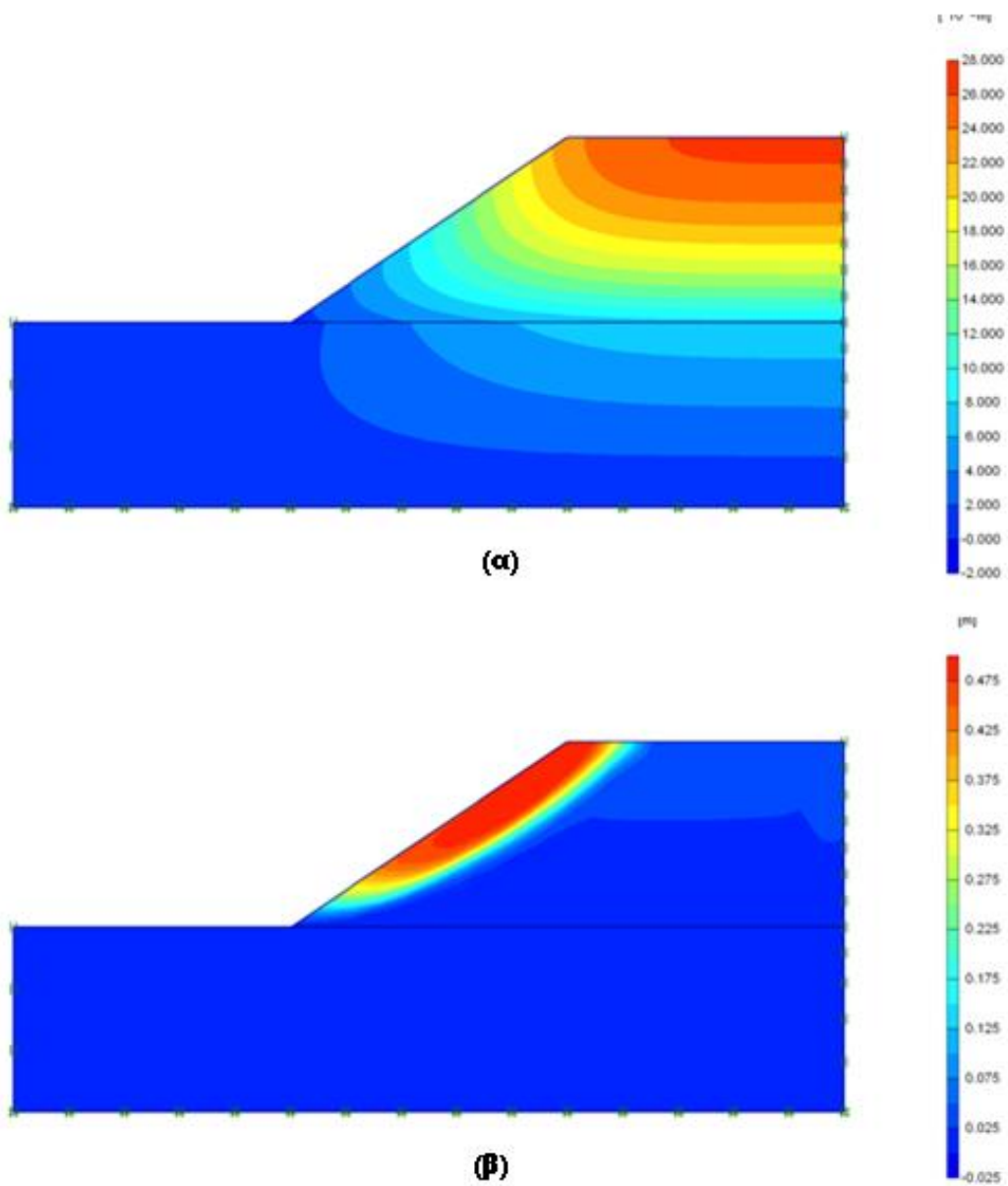
Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m^2)	Δυσμενείς Συνολικές τάσεις (kN/m^2)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	Συντελεστής Ασφαλείας	ΣM_{weight}	ΣM_{accel}
Εδαφική Βαρύτητα	0.026	-684.84	-684.84	-0.247	1.275	1	0
Οριζόντια επιτάχυνση 0,24g	Αστοχία	-663,06	-663,06	-19,26	-	1	0,539

Κάποια γρήγορα συμπεράσματα προκύπτουν από την μελέτη του παραπάνω πίνακα. Όπως προκύπτει το πρανές υπό την επίδραση μόνο του εδαφικού του βάρους παραμένει σταθερό με συντελεστή ασφαλείας 1,275. Αντιθέτως, υπό την επίδραση οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g το πρανές υπόκειται σε μόνιμες μετατοπίσεις. Επίσης, θεωρώντας το πρανές στραγγισμένο, δηλαδή αγνοώντας την ύπαρξη νερού, οι ενεργές και οι ολικές τάσεις θα είναι ίσες. Τέλος, το μεγάλο μέγεθος των τροπών στην εφαρμογή της οριζόντιας επιτάχυνσης είναι άλλη μια ένδειξη ότι το πρανές θα παρουσιάσει παραμορφώσεις και θα υποστεί μόνιμες μετατοπίσεις.

Στο Σχήμα 4.2.3 παρουσιάζεται η πιθανή επιφάνεια αστοχίας κατά την φόρτιση του εδάφους από το ίδιο βάρος του. Πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας τα αριθμητικά αποτελέσματα δεν έχουν κάποια φυσική σημασία και δεν λαμβάνονται υπόψη. Ωστόσο, κατά το τελευταίο στάδιο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας υπολογίζεται προσεγγιστικά η επιφάνεια αστοχίας ή η επιφάνεια που δυνητικά θα μπορούσε να αστοχήσει. Όπως σχολιάστηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια η διαδικασία του συντελεστή ασφαλείας στο PLAXIS λειτουργεί με την συνεχή μείωση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής του εδαφικού υλικού, μέχρι το μοντέλο να αστοχήσει. Για αυτό ακριβώς τον λόγο λαμβάνεται υπόψη το τελευταίο βήμα του υπολογισμού που αντιστοιχεί στην οριακή ισορροπία του πρανούς.



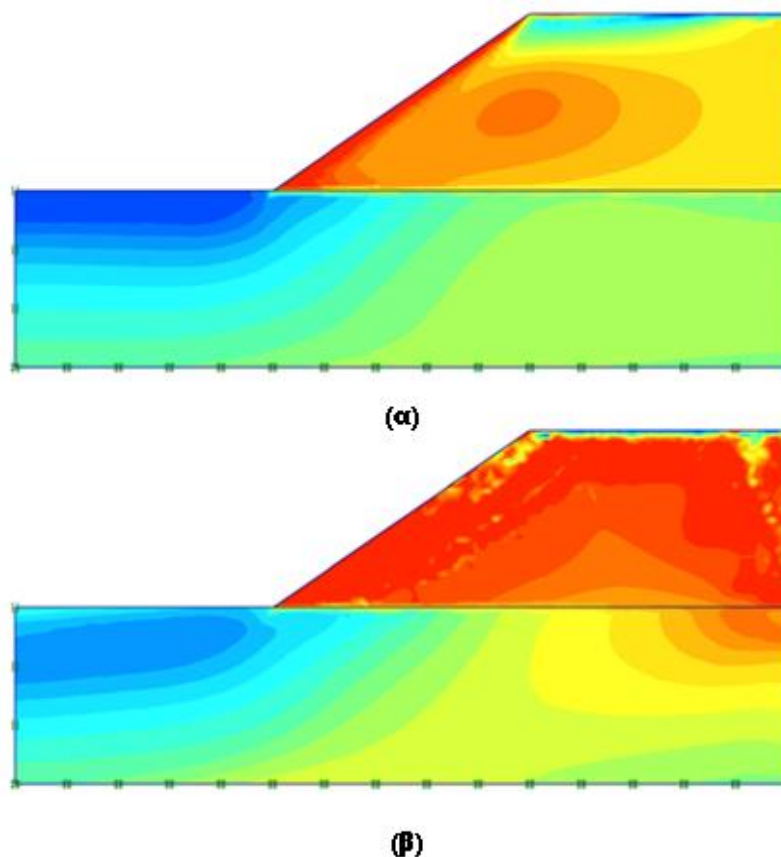
Σχήμα 4.2.3: Πιθανή επιφάνεια αστοχίας υπό την φόρτιση του εδαφικού βάρους.



Σχήμα 4.2.4: Ολικές μετατοπίσεις υπό την επίδραση (α) εδαφικού βάρους (β) οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24 G

Στο Σχήμα 4.2.4 απεικονίζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των ολικών μετατοπίσεων για τα δυο διαφορετικά στάδια. Κατά την επίδραση του εδαφικού βάρους μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρουσιάζονται στην στέγη του πρανούς και περιορίζονται σε μετατοπίσεις λίγων εκατοστών (μέγιστο 2,6 εκατοστά). Αντιθέτως υπό την επίδραση της οριζόντιας επιτάχυνσης, το πρανές αστοχεί ενώ η μετακινούμενη μάζα εμφανίζεται κατά μήκος του κεκλιμένου μέρους του πρανούς. Τα πρανές πριν παρουσιάσει μόνιμες μετατοπίσεις μετατοπίστηκε μέχρι και μισό μέτρο. Συγκρίνοντας τα δυο σχήματα είναι εμφανές ότι η εισαγωγή επιτάχυνσης διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο για την ευστάθεια και το μέγεθος των μετακινήσεων σε ένα πρανές, παρά το εδαφικό βάρος του υλικού.

Τέλος, στο Σχήμα 4.2.5 συγκρίνονται οι σχετικές διατμητικές τάσεις στα δυο στάδια. Οι διατμητικές τάσεις αστοχίας θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικές για την αναπαράσταση των χαρακτηριστικών αστοχίας. Οι σχετικές διατμητικές τάσεις αποτελούν μια ένδειξη της εγγύτητας των σημείων τάσεων στην ανάπτυξη αστοχίας και ορίζονται ως τον λόγο των προκαλούμενων διατμητικών τάσεων με τις διατμητικές τάσεις αστοχίας. Το παρακάτω σχήμα συνοψίζει μια προοδευτική αύξηση των διατμητικών τάσεων στο κεκλιμένο επίπεδο του πρανούς, αυξημένο ιδιαίτερα δε όταν στο πρανές εισάγεται οριζόντια θετική επιτάχυνση.

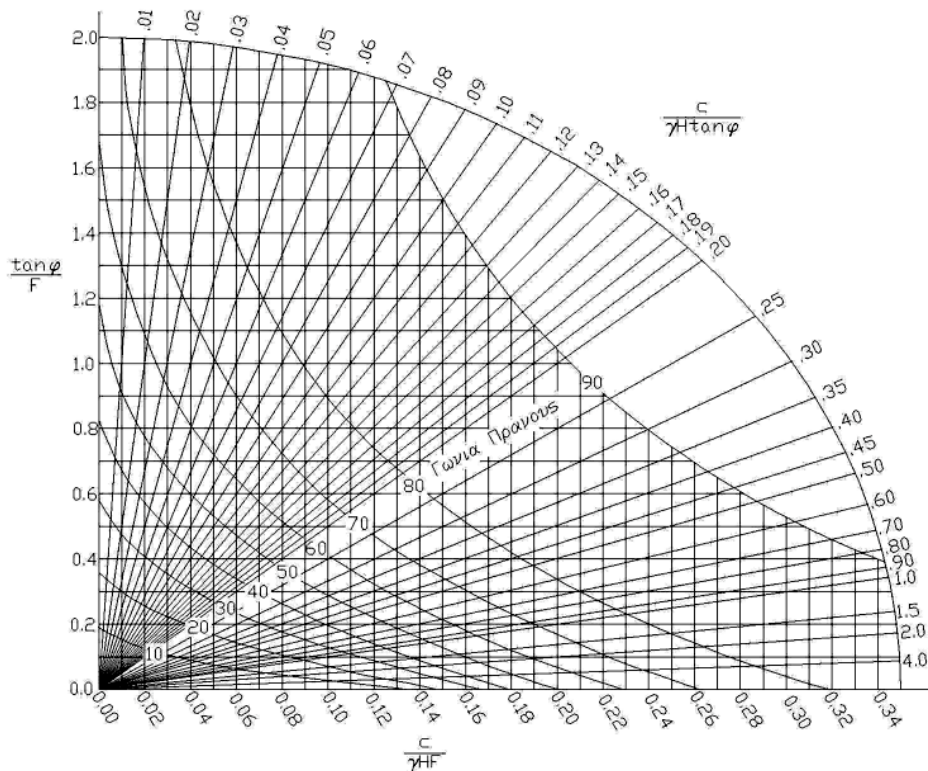


Σχήμα 4.2.5: Σχετικές διατμητικές τάσεις υπό την επίδραση (α) εδαφικού βάρους (β) οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24 G

4.2.4 Επίλυση με νομογραφήματα Hoek & Bray

Ευστάθεια πρανούς έναντι στατικών φορτίων

Με την βοήθεια των νομογραφημάτων που προτείνονται από την μέθοδο προκύπτει η τιμή του συντελεστή F . Τα νομογραφήματα είναι συνολικά 5, ένα για κάθε τιμή που μπορεί να πάρει η τιμή του συντελεστή r_u (0, 1/3H, 1/2H, 3/4H, 0.5), δηλαδή τον λόγο πίεσης πόρων ύδατος. Στην επίλυση λήφθηκε το νομογράφημα της Εικόνας 4.2.1, το οποίο αναφέρεται σε ακόρεστο πρανές.



Εικόνα 4.2.1: Νομογράφημα Hoek & Bray για ακόρεστο πρανές

Μερικές παραδοχές που λήφθηκαν κατά τον υπολογισμό είναι οι ακόλουθες:

- Τα εδάφη μελετούνται σε συνθήκες πλήρους στράγγισης ($r_u = 0$)
- Το έδαφος 2 θεωρούμε πως δεν αστοχεί καθώς πρόκειται για έδαφος υψηλής συνεκτικότητας με μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής. Η αστοχία υπολογίζεται για το στρώμα που αποτελείται από το έδαφος 1.
- Η αντοχή του εδάφους δίνεται από το κριτήριο Mohr- Coulomb
- Σε περίπτωση αστοχίας του πρανούς, αυτή θα έχει κυκλική μορφή

Αρχικά, υπολογίστηκε ο λόγος $c / \gamma H \tan\phi = 0.022$

Σύμφωνα με το αντίστοιχο νομογράφημα κυκλικής αστοχίας προκύπτει για κλίση πρανούς 34° ο λόγος $\tan\phi/F = 0.54$ και ο λόγος $c/\gamma HF = 0.012$.

Επομένως από την επίλυση των 2 τελευταίων ως προς F προκύπτουν οι δυο λύσεις :

$$F_1 = 1.3 \text{ και } F_2 = 1.26.$$

Τελική λύση του συντελεστή ασφαλείας θα θεωρήσουμε τον μέσο όρο των δυο αποτελεσμάτων. Συνεπώς $F = 1.28 > 1$, άρα το πρανές παραμένει σταθερό υπό την επίδραση στατικών φορτίων.

Ευστάθεια πρανούς έναντι σεισμικών φορτίων

Θεωρούμε ότι το πρανές βρίσκεται σε περιοχή με ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II με $\alpha_h = 0,24$ (ως ποσοστό του g).

Η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου των πρανών η οποία στηρίζεται στον συντελεστή ασφαλείας, κρίνεται ανεπαρκής. Η επιδεκτικότητα των πρανών σε διάφορες μορφές αστοχίας κατά την εκδήλωση ενός σεισμικού γεγονότος, προσδιορίζεται μέσω της κρίσιμης επιτάχυνσης k_{cr} . Η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης εξαρτάται μόνο από την γωνία κλίσης του πρανού και από τον στατικό συντελεστή ασφαλείας (που υπολογίστηκε νωρίτερα), όπως φαίνεται και από τον παρακάτω τύπο:

$$k_{cr} = \frac{F - 1.0}{1.18 + \frac{0.66}{\tan \beta}} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

Από αντικατάσταση του τύπου έχουμε $k_{cr} = 0,128 \ll 0.24$

Εν συνεχεία υπολογίζονται οι σεισμικές επιταχύνσεις βάσης και στέψης του πρανού. Υποθέτουμε ότι στην βάση του επιχώματος ενεργεί οριζόντια σεισμική επιτάχυνση μισή του $0,24$. Εξαιτίας του σχήματος του πρανού (τραπεζοειδές) η μέγιστη επιτάχυνση ενισχύεται στην στέψη και είναι ίση με $2,5 * 0,5 * 0,24 = 0,3$.

Η μέση τιμή των σεισμικών επιταχύνσεων βάσης και στέψης θα είναι:

$$(0,5 * 0,24 + 0,3) / 2 = 0,21 > 0,13.$$

Άρα το πρανές με την επίδραση σεισμικών φορτίων αστοχεί.

4.2.5 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του PLAXIS προκύπτουν κάποιες παρατηρήσεις:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, το πρανές κατά την επίδραση θετικής επιτάχυνσης κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση λόγω αδρανείας. Επομένως, εισάγοντας

θετική επιτάχυνση (προς δεξιά), το πρανές έχει την τάση να μετακινηθεί προς τα αριστερά με ίδιο μεγέθους επιτάχυνση αλλά αντίθετη κατεύθυνση. Με αυτό τον τρόπο εξηγείται για ποιο λόγο το πρανές υπόκειται σε μόνιμες μετατοπίσεις υπό την επίδραση της θετικής επιτάχυνσης. Αντίστοιχα, αν στο συγκεκριμένο πρανές εισαχθεί αρνητικής φορά επιτάχυνση ίδιου μεγέθους θα παρουσιάσει επιπλέον ευστάθεια και μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας.

- Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως κυκλική και εμφανίζεται στο κεκλιμένο τμήμα του πρώτου εδαφικού στρώματος που είναι πιο χαλαρό σε σχέση με το υλικό βάσης.

Επιπλέον από την σύγκριση των δύο μεθόδων προκύπτουν τα ακόλουθα:

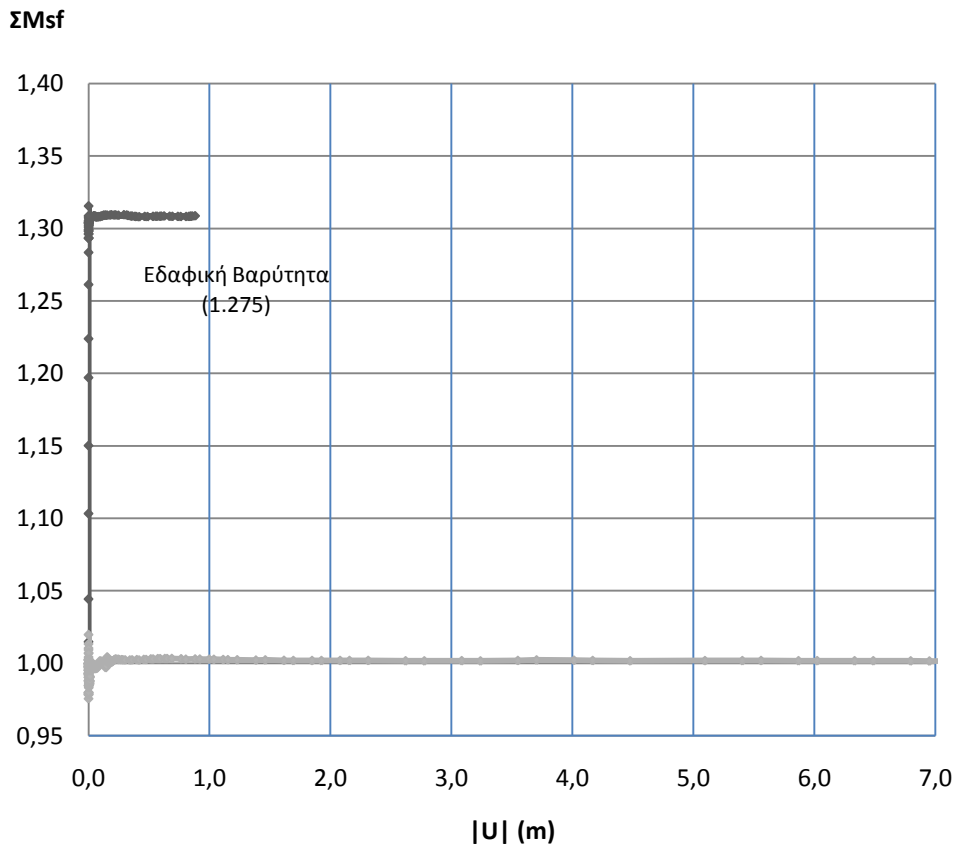
- Ο συντελεστής ασφαλείας όπως προέκυψε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με αυτόν που προέκυψε με την μέθοδο των νομογραφημάτων δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής ασφαλείας με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων υπολογίστηκε 1,275 ενώ με την χρήση των νομογραφημάτων 1,28. Πρακτικά δηλαδή, οι συντελεστές είναι ίδιοι δεδομένου ότι η μέθοδος των νομογραφημάτων δεν είναι τόσο ακριβής, όσο η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς έναντι σεισμικών φορτίων με την μέθοδο της οριακής ισορροπίας και με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οδήγησε στο ίδιο συμπέρασμα, το πρανές θα υποστεί μόνιμες μετατοπίσεις. Πέρα όμως από το συμπέρασμα ότι το πρανές θα υποστεί μόνιμες μετατοπίσεις, προκύπτουν και κάποια άλλα εξίσου σημαντικά συμπεράσματα όσο αφορά το μέγεθος της επιτάχυνσης που το πρανές θα ευσταθεί οριακά. Συγκεκριμένα, όπως προέκυψε από του υπολογισμούς η μέση τιμή των σεισμικών επιταχύνσεων βάσης και στέψης είναι 0,13g.

Για την εισαγωγή της σεισμικής επιτάχυνσης χρησιμοποιείται ο πολλαπλασιαστής ΣM_{accel} . Ουσιαστικά, ο πολλαπλασιαστής αυτός αποτελεί μέτρο της εισηγμένης επιτάχυνσης. Έτσι, όταν $\Sigma M_{accel} = 1$ τότε στο πρανές θα έχει εφαρμοστεί πλήρως η επιτάχυνση που εισήχθη (στην συγκεκριμένη περίπτωση 0,24g). Σύμφωνα με την ανάλυση της σεισμικής επιτάχυνσης, το πρανές θα αστοχήσει με την εφαρμογή του 53,9% της επιτάχυνσης 0,24g ($\Sigma M_{accel} = 0.539$). Επομένως, με την Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων το πρανές αστοχεί με την εισαγωγή επιτάχυνσης 0,129g ($0,539 * 0,24g = 0,129g$).

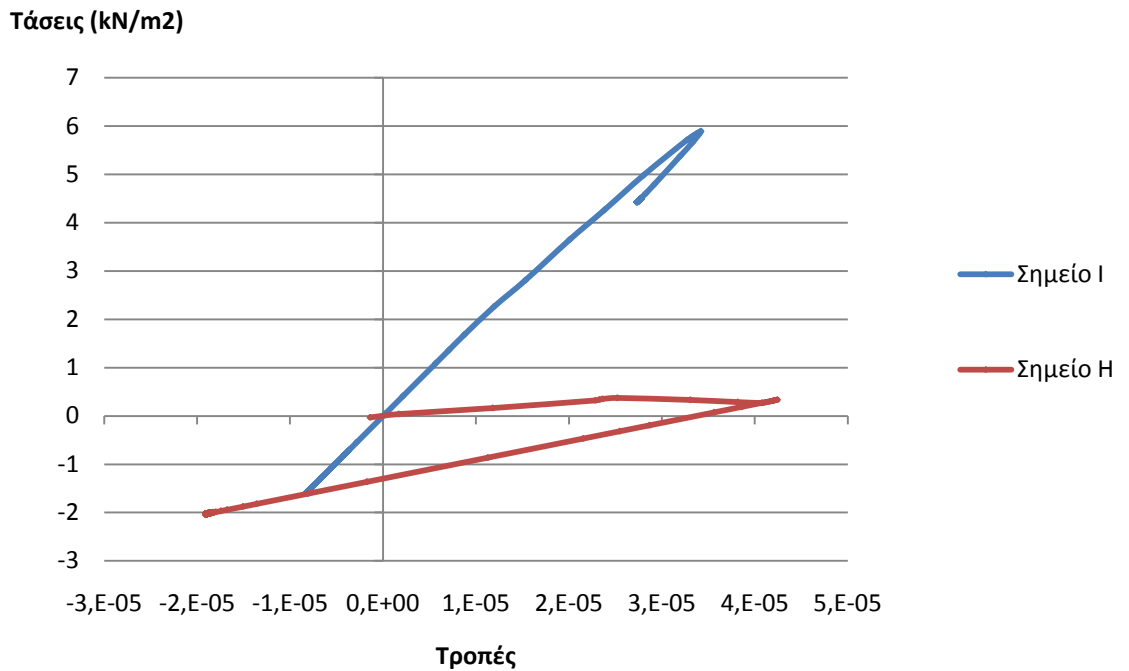
Προς επαλήθευση της συγκεκριμένης λογικής έγινε επιπλέον υπολογισμός υπό την επίδραση οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μεγέθους 0,129g, με

αποτέλεσμα το πρανές να βρίσκεται σε συνθήκες οριακής ισορροπίας με Συντελεστή Ασφαλείας 1,002 (Διάγραμμα 4.2.1).

Επίσης, σύμφωνα με το διάγραμμα διατμητικών τάσεων- τροπών (Διάγραμμα 4.2.2) η εισαγωγή σεισμικής επιτάχυνσης προκαλεί αύξηση παραμορφώσεων με παράλληλη αύξηση των τάσεων. Λόγω της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους η συνεχής επιβάρυνση του με σεισμικές επιταχύνσεις οδηγούν σε μείωση της αντοχής του υλικού. Ωστόσο η συμπεριφορά του συγκεκριμένου υλικού, σύμφωνα με το διάγραμμα αποδεικνύει την δημιουργία μόνιμων παραμορφώσεων που οδηγούν το πρανές σε κατάρρευση. Τα σημεία που επιλέχθηκαν είναι το σημείο I που βρίσκεται στον παρειά του πρανούς και το Η που βρίσκεται στο μέσο του εδαφικού υλικού 1.



Διάγραμμα 4. 2.1: Σύγκριση Συντελεστών Ασφαλείας του πρανούς υπό την επίδραση του εδαφικού βαρους και της εισηγμένης επιτάχυνσης μεγέθους 0,129g



Διάγραμμα 4.2.2: Παρουσίαση τάσεων- τροπών όταν στο πρανές ασκείται οριζόντια σεισμική επιτάχυνση μεγέθους 0,24 G

4.3 Επίλυση 2

4.3.1 Σκοπός επίλυσης

Ζητούμενο είναι η μελέτη ευστάθειας του πρανούς υπό την επίδραση της εδαφικής βαρύτητας και εξαγωγή του συντελεστή ασφαλείας για την σύγκριση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της παρούσης μελέτης με άλλες που έχουν διεξαχθεί στο συγκεκριμένο πρανές. Εν συνεχεία θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του πρανούς υπό το εδαφικό του βάρος σε συνδυασμό με την επίδραση διαφορετικών συνδυασμών σεισμικών επιταχύνσεων με την ψευδοστατική μέθοδο. Συγκεκριμένα, η ευστάθεια μελετήθηκε για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g
- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g
- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,16g
- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,16g
- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g
- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g
- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g

- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g

4.3.2 Προσδιορισμός Μοντέλου

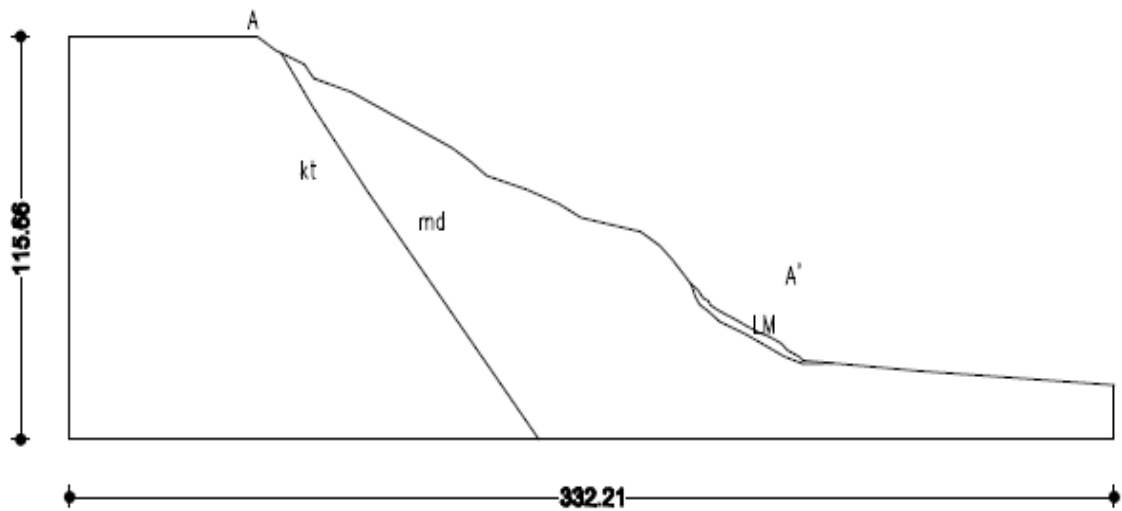
Το μελετώμενο πρανές είναι ένα φυσικό πρανές και βρίσκεται στην περιοχή Κερασιά Καρδίτσας. Σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν γίνει (Ματζιάρης Β., Φερεντίνου Μ., Αγγελοπούλου Ο., Καρανάσιου Σ. και Σακελλαρίου Μ., 2007, Landslide Hazard Analysis- A case study in Kerasia village), το πρανές έχει παρουσιάσει κατολισθητικά φαινόμενα. Ένα πρανές κατολισθαίνει όταν ασκούνται μεγάλες διατμητικές τάσεις στο πρανές και σταματά μόνο όταν το έδαφος έρθει σε τέτοια θέση που οι νέες πλέον τάσεις δεν υπερβαίνουν την αντοχή του εδάφους. Δηλαδή, όταν το πρανές παρουσιάζει Συντελεστή Ασφαλείας μικρότερο της μονάδας το έδαφος θα μετακινηθεί τόσο όσο ο Συντελεστής να γίνει ίσος με την μονάδα, να βρεθεί δηλαδή σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Σε αυτή την περίπτωση επομένως, αφού το πρανές έχει παρουσιάσει ήδη κατολισθητικά φαινόμενα, ο συντελεστής ασφαλείας ανέρχεται ίσος με την μονάδα. Από την (Εικόνα 4.3.1) είναι εμφανής η περιοχή όπου έχουν παρουσιαστεί κατολισθήσεις. Οι υπολογισμοί του πρανούς στην υπάρχουσα μελέτη έγινε με το πρόγραμμα Slide και την μέθοδο των λωρίδων- μέθοδο Janbu.



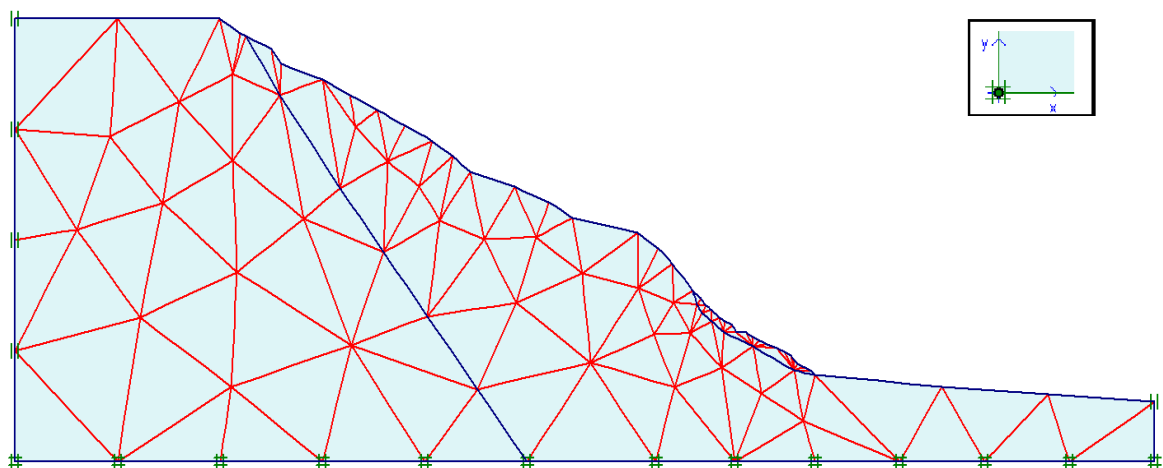
Εικόνα 4.3.1: Παρουσίαση του φυσικού πρανούς στην περιοχή Κερασιά του νομού Καρδίτσας

Το μελετώμενο πρανές πρόκειται για ένα φυσικό πρανές με συνολικό μήκος 272,60 μέτρα και ύψος 118,63 μέτρα. Αποτελείται συνολικά από τρία εδαφικά στρώματα. Το πρώτο στρώμα (LM- landslide materials) αποτελείται από υλικά που κατολίσθησαν και πλέον οι αρχικές εδαφικές τους ιδιότητες έχουν διαφοροποιηθεί. Το δεύτερο εδαφικό στρώμα (md) αποτελείται από πλατείς ασβεστόλιθους με ψαμμίτες και

σχιστόλιθους, ενώ το τρίτο εδαφικό στρώμα (kt) από βραχώδη και συμπαγή υλικά. Η εδαφική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από το ελαστο-πλαστικό κριτήριο αστοχίας Mohr– Coulomb σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Προς απλούστευση των υπολογισμών θεωρήθηκε ότι όλο το γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται από το εδαφικό υλικό του δεύτερου στρώματος. Τέλος, το πρανός θεωρείται στραγγισμένο, οπότε η επίδραση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα δεν λαμβάνεται υπόψη. Παρακάτω παρουσιάζεται η τομή του πρανούς A-A' (Σχήμα 4.3.1) και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, όπως σχεδιάστηκε στο PLAXIS, με το εικονίδιο πάνω δεξιά να απεικονίζει τους άξονες x, y υποδηλώνοντας ποιά εκλαμβάνει το πρόγραμμα ως θετική και ποια ως αρνητική φορά (Σχήμα 4.3.2).



Σχήμα 4.3.1 : Παρουσίαση της γεωμετρίας και των εδαφικών στρώσεων του πρανούς



Σχήμα 4.3.2 : Διακριτοποίηση του πρανούς σε πεπερασμένα στοιχεία

Ως μοντέλο προσομοίωσης επιλέχθηκε η επίπεδη παραμόρφωση, διότι είναι αντιπροσωπευτικότερο για τέτοιου είδους επιλύσεις. Για τη διακριτοποίηση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν 15-κομβά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και για τη πύκνωση του δικτύου επιλέχθηκε το μεσαίο δίκτυο (medium) με επιπλέον πύκνωση στο στρώμα (LM) και στην περιοχή γύρω από αυτό, διότι εκεί αναμένονται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων και των κόμβων είναι τέτοιος ώστε να εξοικονομείται μεν υπολογιστικό κόστος αλλά να μην διακινδυνεύεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αναλυτικά οι παράμετροι καθορισμού του πεπερασμένου μοντέλου στον Πίνακα 4.3.1.

Πίνακας 4.3.1: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου

Παράμετροι	
Μοντέλο προσομοίωσης	Επίπεδη παραμόρφωση
Πύκνωση Δικτύου	Μεσαία
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμός στοιχείων στο μοντέλο	182
Αριθμός κόμβων	1597
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	14.53
Αριθμός υπολογισμού σημείων τάσεων	2184

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους επιλέχθηκε το μοντέλο του Mohr-Coulomb. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το έδαφος πρόκειται για ένα ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο και χρησιμοποιείται ως γενική προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους. Σε αυτή την περίπτωση, οι παράμετροι του μοντέλου Mohr- Coulomb (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής, γωνία διογκωσιμότητας) δεν δόθηκαν, για αυτό τον λόγο χρειάστηκε να υπολογισθούν μέσω του προγράμματος RocLab.

Επί της ουσίας, στο λογισμικό RocLab δίδονται οι παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Hoek- Brown, βάση των οποίων προκύπτουν οι παράμετροι του μοντέλου Mohr- Coulomb. Γενικά, το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (\text{εξίσωση 4.4})$$

όπου: σ_1 , σ_3 = μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

σ_{ci} = μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος (χωρίς ασυνέχειες)

m_b , s , α = σταθερές που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της βραχώμαζας

Επίσης, άλλη μια παράμετρος που εισάγεται είναι η παράμετρος D, που έχει άμεση σχέση με το βαθμό διαταραχής και χαλάρωσης της βραχώμαζας στη φάση της

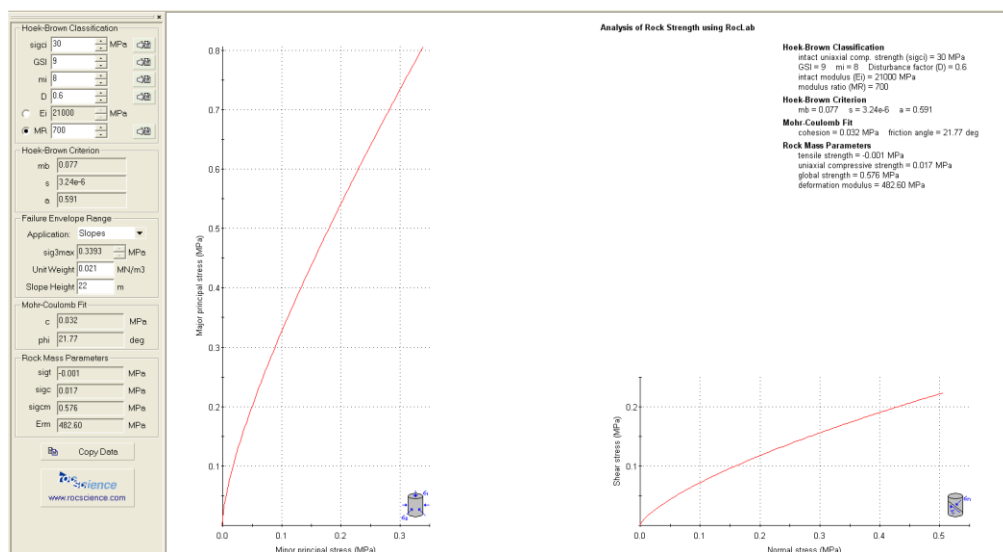
εκσκαφής. Οι τιμές που λαμβάνει μεταβάλλονται από 0 (για αδιατάρακτες βραχώμαζες) ως 1 (για πλήρως διαταραγμένες βραχώμαζες). Η τιμή 0,6 θεωρήθηκε ιδανική στην συγκεκριμένη περίπτωση. Παράλληλα με την επίλυση των παραμέτρων, στο πρόγραμμα περιλαμβάνονται διαγράμματα των τάσεων που υπολογίστηκαν για την εδαφική μάζα. Το περιβάλλον επίλυσης του Roclab απεικονίζεται στην Εικόνα 4.3.2

Πίνακας 4.3.2: Παραμετρικές τιμές Hoek- Brown

Τομή	A-A'
σ_c (MPa)	3
Δείκτης GSI	9
Τιμή μ	8
Ειδικός βάρος γ (kN/m ³)	21

Η εισαγωγή των παραμέτρων αυτών στο πρόγραμμα δίνει ως επίλυση για το υλικό του μοντέλου την συνοχή του, την γωνία εσωτερικής τριβής και το μέτρο ελαστικότητας του. Τελικά, προέκυψε:

- Συνοχή (c): 32 kN/m²
- Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ): 21,77°
- Μέτρο ελαστικότητας (E_i): 482600 kN/m²



Εικόνα 4.3.2: Εύρεση των εδαφικών παραμέτρων Mohr- Coulomb μέσω του προγράμματος RocLab

Επομένως, ο τελικός πίνακας των εδαφικών παραμέτρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.3. Επίσης, επειδή πρόκειται για στραγγισμένο πρανές η διαπερατότητα θα θεωρηθεί μηδενική, χωρίς αυτό να επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.3.3: Παρουσίαση των εδαφικών παραμέτρων του υλικού Md

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Md □	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	-
Τύπος υδραυλικής συμπεριφοράς	<i>Type</i>	Drained	-
Ειδικός Βάρος πάνω από Φρ. Επίπεδο	γ_{unsat}	21	kN/m ³
Ειδικός Βάρος κάτω από Φρ. Επίπεδο	γ_{sat}	24	kN/m ³
Οριζόντια διαπερατότητα	k_x	0	m/day
Κάθετη διαπερατότητα	k_y	0	m/day
Μέτρο ελαστικότητας Young	E_{ref}	482600	kN/m ²
Λόγος Poisson	ν	0.32	-
Συνοχή	c_{ref}	32	kN/m ²
Γωνία τριβής	φ	21.77	°
Γωνία διασταλτικότητας	ψ	0	°

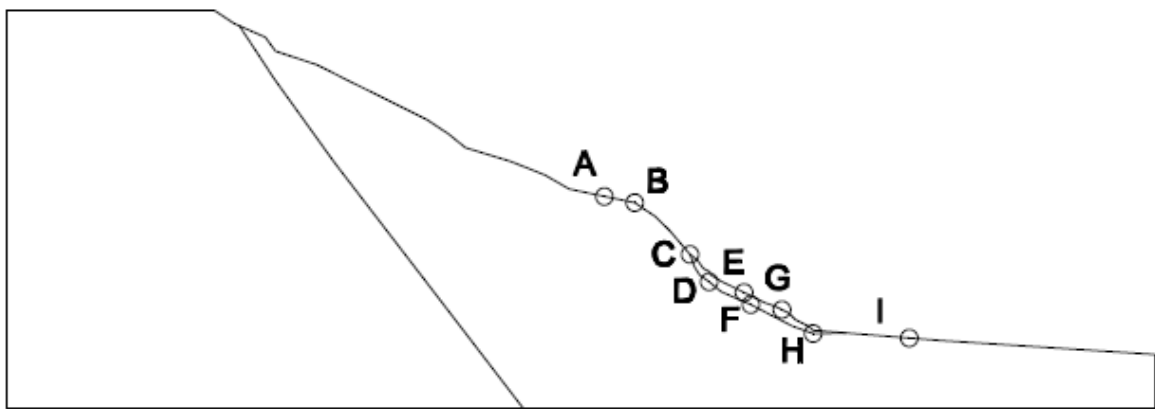
4.3.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 2

Προκειμένου να επιλυθούν όλες οι περιπτώσεις σεισμικών ψευδοστατικών φορτίσεων που αναφέρθηκαν, πρέπει να γίνει η επίλυση σε επιμέρους στάδια. Όπως έχει προαναφερθεί για την εισαγωγή της επιτάχυνσης χρησιμοποιείται ο πολλαπλασιαστής ΣM_{accel} . Στην επίλυση αυτή μελετάται ειδικότερα η επίδραση της ευστάθειας του πρανούς σε περίπτωση επίδρασης σεισμικής επιτάχυνσης και προς την θετική φορά και ως προς την αριστερή φορά. Επομένως, η διαφοροποίηση της συγκεκριμένης επίλυσης με την 1^η επίλυση είναι η τιμή του ΣM_{accel} . Σε περίπτωση που ζητείται θετική επιτάχυνση εισάγεται η τιμή 1, σε αντίθετη περίπτωση εισάγεται η τιμή -1. Για την ενεργοποίηση του εδαφικού βάρους στον υπολογισμό ο πολλαπλασιαστής ΣM_{weight} παίρνει την τιμή 1.

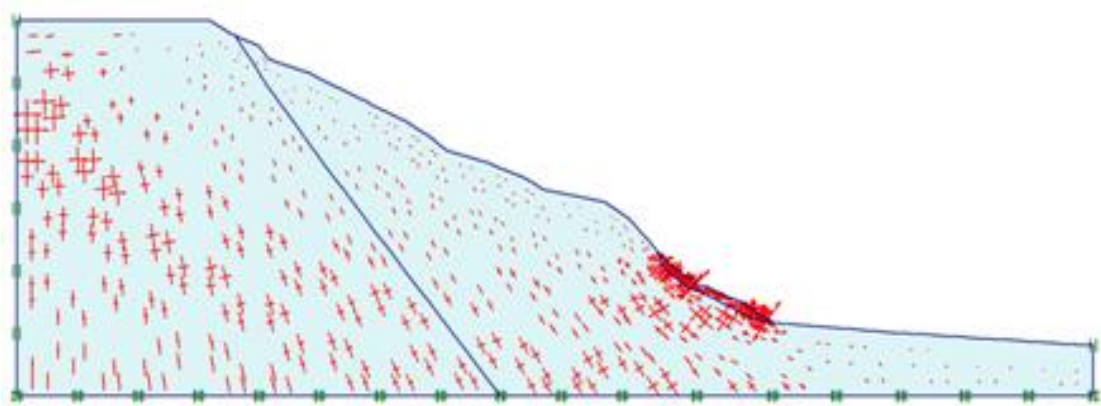
Άλλη μια ενέργεια κατά των ορισμό των σταδίων είναι η επιλογή σημείων για την εξαγωγή καμπυλών. Στο πρανές αυτών επιλέχθηκαν κόμβοι στην γύρω περιοχή του εδαφικού στρώματος LM, καθώς εκεί είναι το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ανάλυση της μελέτης.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων ενώ στον Πίνακα 4.3.4 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, τάσεις και τροπές καθώς και οι Συντελεστές Ασφαλείας συνολικά σε όλα τα στάδια υπολογισμών. Επειδή οι

επιλύσεις είναι πολλές και μια εκτενής παρουσίαση των σχημάτων όλων των περιπτώσεων θα ήταν υπερβολική, επιλέγονται οι ακραίες συνθήκες. Συνεπώς, πέρα από την παρουσίαση της επίδρασης της εδαφικής βαρύτητας, μελετάται η συνθήκη όπου το πρανές είναι πιο σταθερό (σύμφωνα με τον συντελεστή ασφαλείας), δηλαδή η οριζόντια επιτάχυνση μεγέθους $0,24g$ σε συνδυασμό με την κατακόρυφη επιτάχυνση μεγέθους $-0,12g$. Επίσης, παρουσιάζεται η δυσμενέστερη συνθήκη για το πρανές (δυσμενέστερη συνθήκη θεωρείται η επίλυση εκείνη που οδήγησε σε κατάρρευση του πρανούς με την λιγότερο δυνατή εφαρμογή του εδαφικού βάρους και επιτάχυνσης), δηλαδή ο συνδυασμός οριζόντιας αρνητικής επιτάχυνσης $0,24g$ και αρνητικής κατακόρυφης μεγέθους $0,12g$.



Σχήμα 4.3.3: Επιλεγμένα σημεία για την παραγωγή καμπύλων



Σχήμα 4.3.4: Παρουσίαση των ολικών τροπών υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους

Στο Σχήμα 4.3.4 παρουσιάζονται οι ολικές τροπές που εφαρμόζονται στο πρανές. Αυξημένη παρουσία των τροπών στο στρώμα του κατολισθαίνοντος υλικού

υποδεικνύει αυξημένη παραμόρφωση στο συγκεκριμένο στρώμα και αποδεικνύει ότι η περιοχή αυτή είναι επιρρεπής σε αστοχία.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις και κάθετες μετατοπίσεις ξεχωριστά για τις τρεις ακραίες περιπτώσεις. Κατά τον υπολογισμό στις ολικές μετατοπίσεις υπεισέρχονται και οι υπολογισμοί των κάθετων μετατοπίσεων, δηλαδή των καθιζήσεων που συμβαίνουν κυρίως στην κορυφή του πρανούς λόγω βαρύτητας και συμπίκνωσης του εδαφικού υλικού. Για αυτό τον λόγο θα μελετηθούν ξεχωριστά προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα για την επίδραση των οριζόντιων και κάθετων επιταχύνσεων στις μετατοπίσεις ενός πρανούς .

Με την εφαρμογή επιτάχυνσης στο σώμα εφαρμόζονται αδρανειακές δυνάμεις αντίθετης της κατεύθυνσης της επιτάχυνσης. Επομένως, η εφαρμογή οριζόντιας θετικής επιτάχυνσης δηλαδή επιτάχυνσης που θα ασκείται από αριστερά προς τα δεξιά, έχει ως αποτέλεσμα την γένεση μετατοπίσεων κατά την αντίθετη κατεύθυνση λόγω αδράνειας. Με την θετική επιτάχυνση στο σώμα ασκούνται αδρανειακές δυνάμεις, τα οποία είναι προϊόντα των αντίστοιχων σεισμικών επιταχύνσεων και ενεργούν στο κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας, προς την αριστερή κατεύθυνση. Η άσκηση δύναμης προς τα αριστερά αυξάνει τις ολικές τάσεις που ασκούνται στο σώμα άρα αυξάνεται και η διατμητική αντοχή που έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της σταθερότητας του

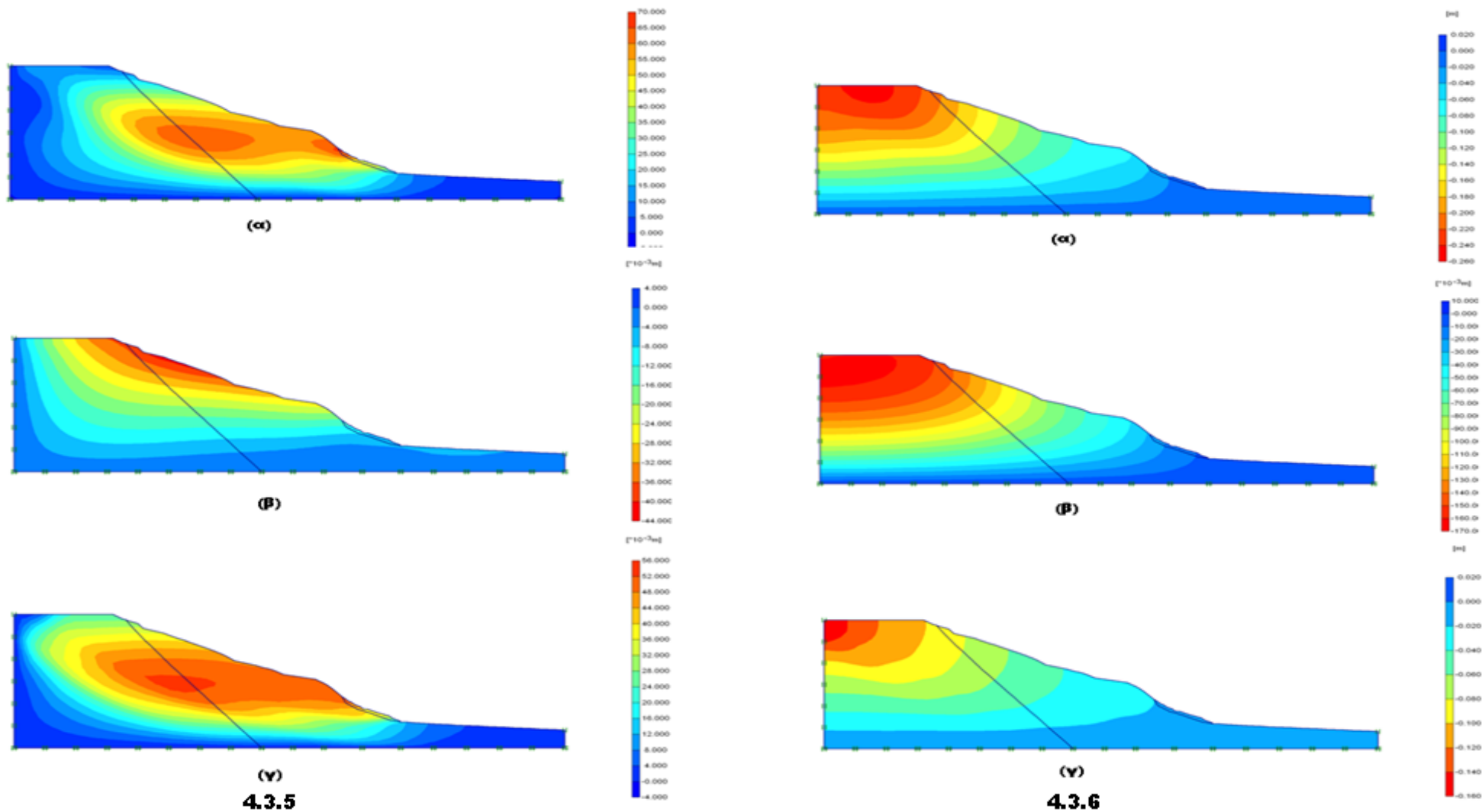
Επομένως, όπως ήταν αναμενόμενο, κατά την εφαρμογή οριζόντιας θετικής επιτάχυνσης στο πρανές δημιουργούνται μετατοπίσεις προς τα αριστερά συμβάλλοντας κατά αυτό τον τρόπο στην ευστάθεια του πρανούς. Εκτός από την ελάττωση του μεγέθους των μετατοπίσεων που εφαρμόζονται σε σχέση με τις οριζόντιες μετατοπίσεις λόγω του εδαφικού του βάρους, παρατηρείται και διαφοροποίηση στην περιοχή που ασκούνται αυτές. Ενώ, λοιπόν, κατά την άσκηση μόνο του εδαφικού βάρους στο πρανές οι οριζόντιες μετατοπίσεις εμφανίζονται κυρίως στο μέσο του πρανούς και πάνω από το στρώμα του κατολισθαίνοντος υλικού, στην εφαρμογή της θετικής επιτάχυνσης οι μετατοπίσεις εμφανίζονται στην στέψη του πρανούς. Κατά αντίθετο τρόπο λειτουργεί η αρνητική επιτάχυνση, η οποία οδηγεί σε μόνιμη μετατόπιση το πρανές με την εφαρμογή μόνο της μισής περίπου οριζόντιας αλλά και κάθετης επιτάχυνσης.

Η επίδραση της κατακόρυφης επιτάχυνσης λειτουργεί με παρόμοια λογική, όπως περιγράφηκε με την επίδραση της οριζόντιας επιτάχυνσης στην μετατόπιση ($\Sigma M_{\text{accel}} = -0,436$). Συνεπώς, η εφαρμογή αρνητικής κατακόρυφης επιτάχυνσης προκαλεί στο πρανές μετατοπίσεις προς τα πάνω, κίνηση δηλαδή που αντιστέκεται στην μετατόπιση λόγω του εδαφικού βάρους.

Στον Πίνακα 4.3.4 παρουσιάζονται όλες οι υπολογιστικές παράμετροι για το κάθε στάδιο ξεχωριστά.

Πίνακας 4.3.4: Παρουσίαση των επιλύσεων των επιμέρους σταδίων

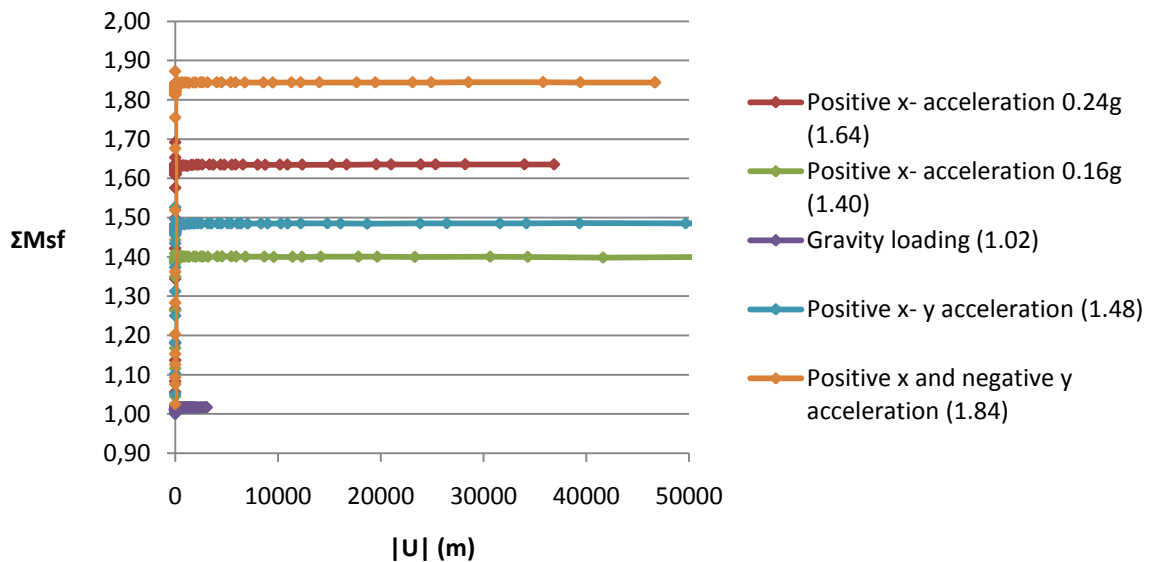
Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς Συνολικές τάσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	Συντελεστής Ασφαλείας	ΣΜ _{weight}	ΣΜ _{accel}
Εδαφική Βαρύτητα	0.247	-2310	-2310	-0.775	1.017	1	0
x _{accel} = 0,24g	0.189	-2500	-2500	-0.360	1.635	1	1
x _{accel} = -0,24g	Αστοχία	-969.56	-969.56	1.29	-	0,447	-0,447
x _{accel} = 0,16g	0.196	-2440	-2440	-0.3352	1.401	1	1
x _{accel} = 0.16g	Αστοχία	-1160	-1160	1.32	-	0,532	-0,532
x _{accel} = 0.24g y _{accel} = 0.12g	0.214	-2780	-2780	-0.401	1.485	1	1
x _{accel} = -0.24g y _{accel} = -0.12g	Αστοχία	-897,67	-897,69	-0.766	-	0,436	-0,436
x _{accel} = 0.24g y _{accel} = -0.12g	0,164	-2220	-2220	-0,320	1,844	1	1
x _{accel} = -0.24g y _{accel} = 0.12g	Αστοχία	-1020	-1020	1,23	-	0,443	-0,443



Σχήμα 4.3.5: Οριζόντιες μετατοπίσεις (α) υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους (β) υπό την επίδραση οριζόντιας θετικής επιτάχυνσης 0,24g και κατακόρυφης αρνητικής 0,12g (γ) υπό την επίδραση οριζόντιας αρνητικής επιτάχυνσης 0,24g και κατακόρυφης αρνητικής 0,12g

Σχήμα 3.5: Κάθετες μετατοπίσεις (α) υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους (β) υπό την επίδραση οριζόντιας θετικής επιτάχυνσης 0,24g και κατακόρυφης αρνητικής 0,12g (γ) υπό την επίδραση οριζόντιας αρνητικής επιτάχυνσης 0,24g και κατακόρυφης αρνητικής 0,12g

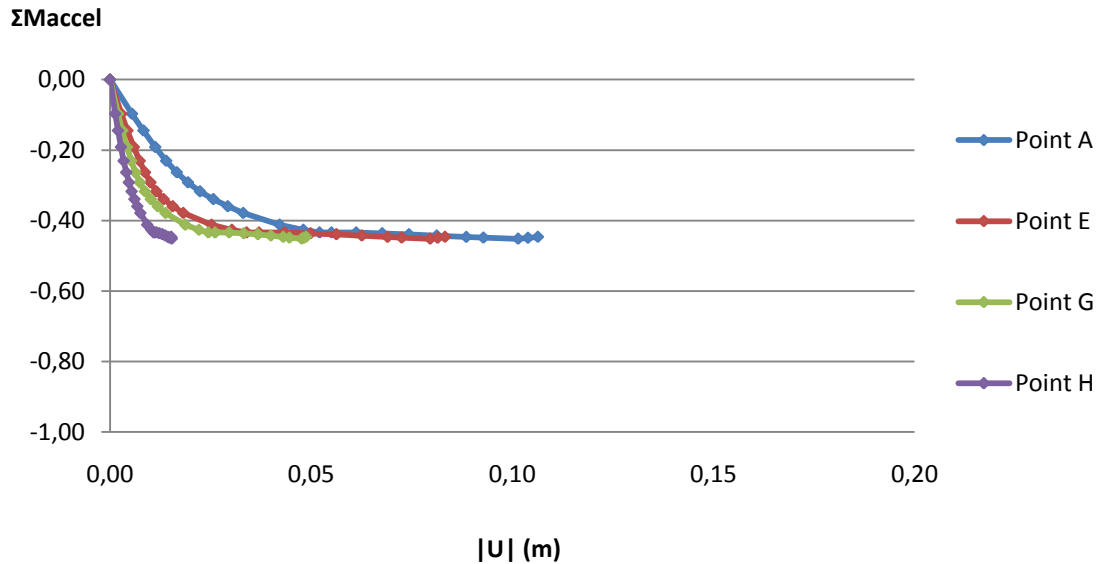
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών ασφαλείας. Διακρίνονται μόνο τα στάδια όπου δεν παρουσιάζεται μόνιμη μετατόπιση της μάζας, δηλαδή ο συντελεστής είναι άνω της μονάδας. Αντιθέτως, όπου παρουσιάζεται μόνιμη μετατόπιση ο συντελεστής ασφαλείας είναι ήδη μικρότερος του 1 και περαιτέρω αξιολόγηση του δεν είναι χρήσιμη. Μια προσεγγιστική μεθοδολογία υπολογισμού του σε περιπτώσεις αστοχίας με το PLAXIS είναι ο πολλαπλασιασμός της συνοχής και της γωνίας τριβής του υλικού με ένα αριθμό. Με την νέα συνοχή και γωνία τριβής επιλύεται η ευστάθεια του πρανούς και σε περίπτωση που δεν υπόκειται σε μόνιμες μετατοπίσεις το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει τον συντελεστή ασφαλείας, που θα είναι μεγαλύτερος του 1. Ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς με την αρχική συνοχή και γωνία τριβής θα είναι το πηλίκο του νέου συντελεστή ασφαλείας με τον αριθμό που πολλαπλασιάστηκε η αρχική συνοχή. Στο Διάγραμμα 4.3.1 αποτυπώνονται όλοι οι συντελεστές ασφαλείας για ευκολότερη σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων.



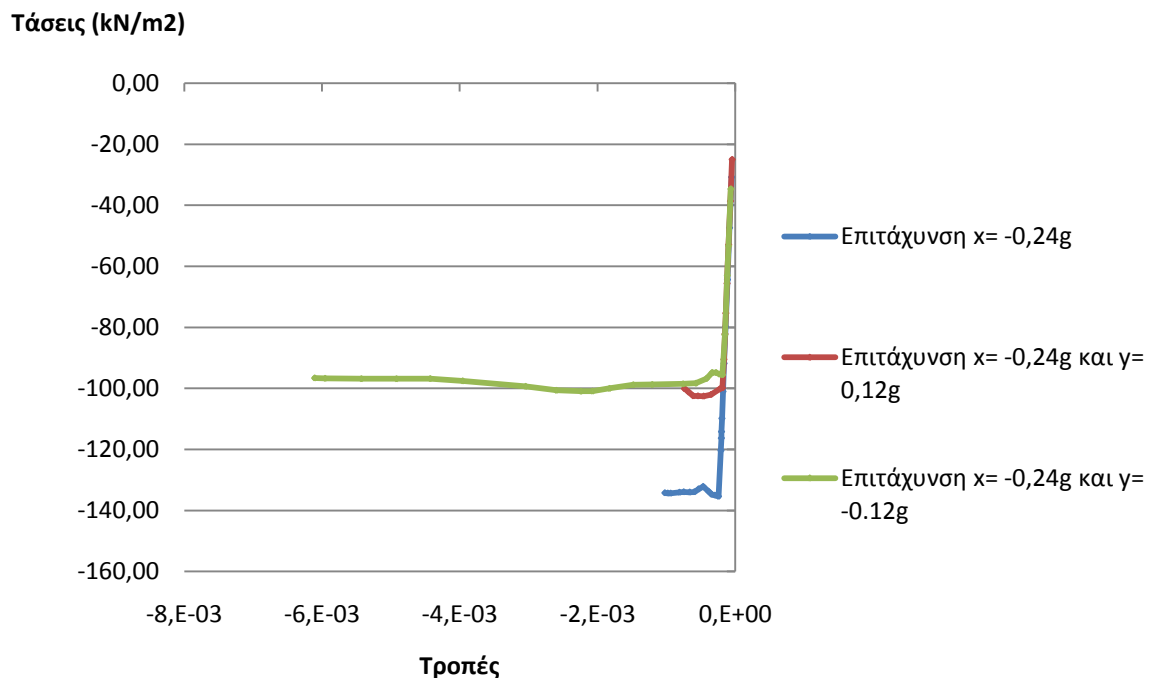
Διάγραμμα 4.3.1: Παρουσίαση των Συντελεστών Ασφαλείας των σταδίων που δεν υπέστησαν μόνιμη μετατόπιση

Επιπλέον, παρουσιάζεται το διάγραμμα μετατόπισης σε σχέση με τον πολλαπλασιαστή ΣM_{accel} (Διάγραμμα 4.3.2). Ο πολλαπλασιαστής αυτός, ενεργοποιεί τις τιμές των σεισμικών επιταχύνσεων για ψευδοστατική επίλυση. Το διάγραμμα απευθύνεται στο στάδιο όπου εισήχθη αρνητική σεισμική φόρτιση 0,24g. Όπως φαίνεται ο ΣM_{accel} δεν έφτασε στην τιμή -1 προκειμένου να ολοκληρωθεί κανονικά η επίλυση, αλλά σταθεροποιήθηκε στην τιμή -0,446 προκαλώντας μόνιμες μετατοπίσεις στην εδαφική μάζα. Από τα σημεία που επιλέχθηκαν στην επιφάνεια του πρανούς μπορούμε να διακρίνουμε το μέγεθος της μετατόπισης που έχει υποστεί το καθένα ξεχωριστά με την επίδραση της σεισμικής επιτάχυνσης. Το σημείο A έχει υποστεί την μεγαλύτερη μετατόπιση (~ 12,5 εκατοστά), μετατόπιση που οφείλεται κυρίως στην

καθίζηση που επέρχεται στο πάνω στρώμα λόγω βαρύτητας. Τέλος, παρατίθεται το διάγραμμα τάσεων- τροπών όταν στο πρανές ασκείται μόνο αρνητική σεισμική επιτάχυνση και συγκρίνεται με τις άλλες δύο περιπτώσεις, δηλαδή να ασκείται θετική και αρνητική αντίστοιχα κατακόρυφη επιτάχυνση μαζί την οριζόντια στο πρανές.



Διάγραμμα 4.3.2: Συσχέτιση της εισαγωγής οριζόντιας αρνητικής επιτάχυνσης μεγέθους 0,24g με τις μετατοπίσεις των σημείων A, E, G, H

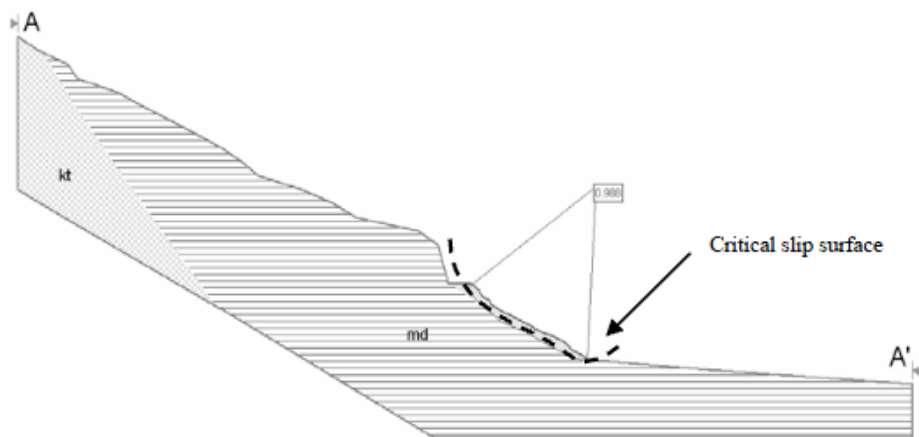


Διάγραμμα 4.3.3: Σύγκριση μέγιστων ενεργών τάσεων και τροπών στο πρανές υπό την επίδραση τριών διαφορετικών σεισμικών επιταχύνσεων.

4.3.4 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα

Σύγκριση αποτελεσμάτων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και υπάρχουσας μελέτης:

- Όπως είναι γνωστό το εν λόγω πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας, δηλαδή ο Συντελεστής Ασφαλείας (Σ.Α.) του πλησιάζει την τιμή του 1. Προς επαλήθευση τούτου ο Σ.Α. του εδαφικού βάρους κατά την επίλυση με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων υπολογίστηκε 1,017.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 4.3.4 οι ολικές τροπές υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στο στρώμα LM. Το στρώμα LM, όπως έχει αναφερθεί είναι το στρώμα που σχηματίστηκε από υλικά κατολίσθησης. Η μεγάλη συγκέντρωση τροπών στην περιοχή υποδηλώνει την πιθανότητα ολίσθησης αυτού του στρώματος. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και από την μελέτη, όπου σύμφωνα με το Εικόνα 4.3.3 η κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης ορίζεται από το στρώμα LM.



Εικόνα 4.3.3: Αναπαράσταση της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας σύμφωνα με την προϋπάρχουσα μελέτη

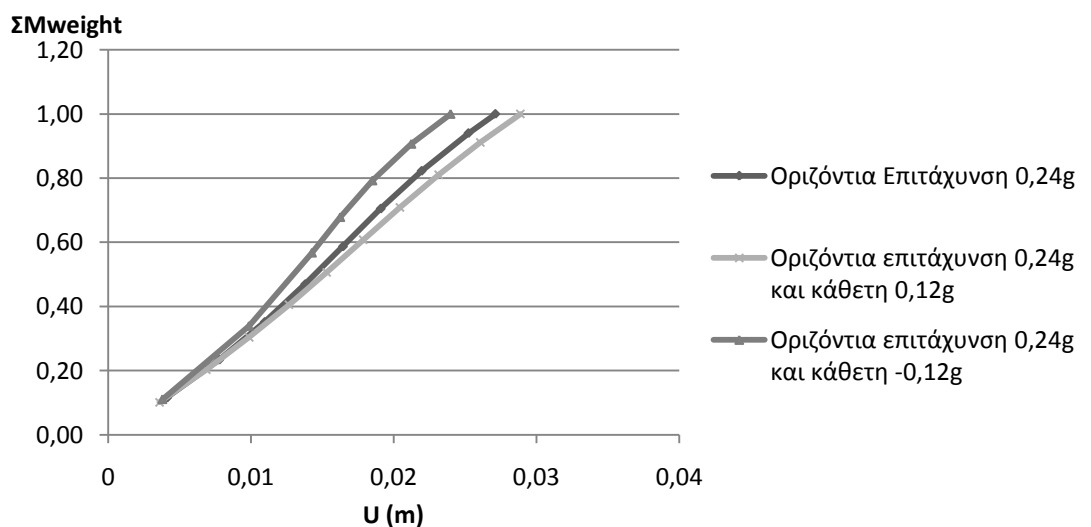
Από τις επιπλέον ψευδοστατικές επιλύσεις που έγιναν προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα:

- Η επίδραση των σεισμικών επιταχύνσεων άλλοτε επιβαρύνει και άλλοτε ενισχύει την ευστάθεια του πρανούς. Γενικά προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρανές, η εισαγωγή οριζόντιας αρνητικής σεισμικής επιτάχυνσης οδηγεί σε μόνιμες μετατοπίσεις το πρανές. Από την άλλη η εφαρμογή οριζόντιας θετικής επιτάχυνσης συντελεί στην ενίσχυση της ευστάθειας του πρανούς, με μείωση των εδαφικών μετακινήσεων σε σχέση με τις μετακινήσεις που δημιουργούνται λόγω μόνο της εδαφικής φόρτισης.

Τέλος, όπως προέκυψε και από τις επιλύσεις παραπάνω η επίδραση της κάθετης επιτάχυνσης είτε θετικής είτε αρνητικής επιφέρει μικρές αλλαγές.

- Μεγαλύτερος συντελεστής ασφαλείας παρατηρείται κατά την εφαρμογή οριζόντιας θετικής επιτάχυνσης 0,24g με παράλληλη αρνητική κατακόρυφη επιτάχυνση 0,12g. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1,84, δηλαδή 12 % μεγαλύτερος σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει χωρίς την επίδραση της αρνητικής κατακόρυφης επιτάχυνσης. Ομοίως, για θετική κατακόρυφη επιτάχυνση ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται κατά 10,8%. Παρατηρείται επομένως πως η κατακόρυφη επιτάχυνση επηρεάζει σε ένα μέρος την ευστάθεια του πρανούς, όμως όχι τόσο όσο επηρεάζεται από την οριζόντια επιτάχυνση. Κατά την ψευδοστατική επίλυση η κινούσα δύναμη αυξάνεται από την οριζόντια σεισμική δύναμη ενώ η κατακόρυφη αυξομειώνει και την αντίσταση και την κινούσα δύναμη και για αυτό τον λόγο άλλωστε οι κατακόρυφες σεισμικές επιταχύνσεις δεν επηρεάζουν τόσο όσο οι οριζόντιες.

Παρομοίως, οι επίδραση της κατακόρυφης επιτάχυνσης στις μετατοπίσεις δεν επιφέρει μεγάλες αλλαγές. Στο Διάγραμμα 4.3.3 παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης θετικής και αρνητικής επιτάχυνσης στο πρανές. Έτσι, μελετάται στο σημείο Α του πρανούς οι μετατοπίσεις που προκύπτουν πρώτα από άσκηση μόνο οριζόντιας επιτάχυνσης και στην συνέχεια εισάγεται η θετική και η αρνητική επιτάχυνση αντίστοιχα. Σύμφωνα και με το διάγραμμα η εισαγωγή κατακόρυφης θετικής επιτάχυνσης οδηγεί σε μεν μεγαλύτερες μετατοπίσεις αλλά η αύξηση του μεγέθους των μετατοπίσεων αυτών μεταφράζεται σε λίγα χιλιοστά, μέγεθος αμελητέο δηλαδή. Αντίστοιχα, η κάθετη αρνητική μειώνει κατά μερικά χιλιοστά τις μετατοπίσεις στο σημείο.

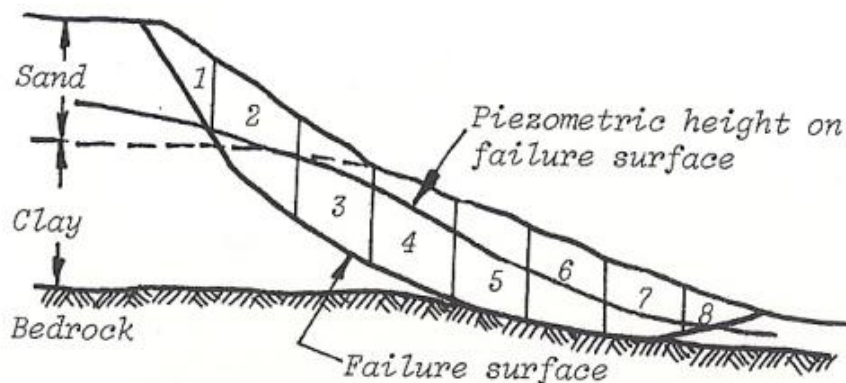


Διάγραμμα 4.3.3: Σύγκριση των μετατοπίσεων στο σημείο Α κατά την εφαρμογή κατακόρυφων επιταχύνσεων μεγέθους 0,12g

4.4 Επίλυση 3

4.4.1 Σκοπός επίλυσης

Η μελέτη ευστάθειας του πρανούς είναι ένα από τα ζητούμενα και σε αυτή την περίπτωση. Η μελέτη ευστάθειας λόγω εδαφικής βαρύτητας περιλαμβάνει τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και την διερεύνηση της πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Το εν λόγω πρανές είναι επίλυση από το βιβλίο “Rock Slope Engineering” και είναι ήδη υπολογισμένο με την μέθοδο των λωρίδων- μέθοδο Janbu (Εικόνα 4.4.1), με υπολογισμένο Συντελεστή Ασφαλείας 1,95. Επομένως, άλλο ένα ζητούμενο είναι η σύγκριση του συντελεστή ασφαλείας και της επιφάνειας αστοχίας με τα ήδη υπολογισμένα, όπως προέκυψαν από την μέθοδο των λωρίδων. Εν συνεχεία, θα γίνει και μελέτη της επίδρασης διαφορετικών συνδυασμών σεισμικών επιταχύνσεων με την ψευδοστατική μέθοδο.



Εικόνα 4.4.1: Παρουσίαση του πρανούς μελέτης με την μέθοδο των λωρίδων

Η ευστάθεια ψευδοστατικά σε συνδυασμό με την επίδραση του εδαφικού βάρους μελετήθηκε για τις παρακάτω περιπτώσεις επιταχύνσεων:

- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g
- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g
- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g
- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g
- Οριζόντια θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g
- Οριζόντια αρνητική επιτάχυνση μεγέθους 0,24g και κατακόρυφη θετική επιτάχυνση μεγέθους 0,12g

Σκοπός είναι η ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων και η εξαγωγή επιμέρους συμπερασμάτων.

4.4.2 Μέθοδος των λωρίδων

Πριν την παρουσίαση του γεωμετρικού μοντέλου αναλύεται η μέθοδος των λωρίδων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε δηλαδή για την επίλυση του συγκεκριμένου πρανού, έτσι ώστε να γίνει μετέπειτα η σύγκριση του με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Η πρώτη ανάλυση της ευστάθειας με τη μέθοδο των λωρίδων παρουσιάστηκε από τον Petterson το 1916 (Petterson, 1955). Έκτοτε, μία σειρά από άλλες μεθόδους οριακής ισορροπίας, περισσότερο ακριβείς, βασισμένες επίσης στην ιδέα των λωρίδων προτάθηκαν από διάφορους επιστήμονες. Γενική αρχή της εν λόγω μεθόδους ανάλυσης είναι ότι η εδαφική μάζα άνωθεν της επιφάνειας ολίσθησης υποδιαιρείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κάθετων λωρίδων. Ο πραγματικός αριθμός λωρίδων που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη γεωμετρία του πρανού και το προφίλ της εδαφικής τομής. Μερικές μέθοδοι βασίζονται στην υπόθεση μιας κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης ενώ άλλες υποθέτουν μια αυθαίρετη (μη-κυκλική) επιφάνεια ολίσθησης.

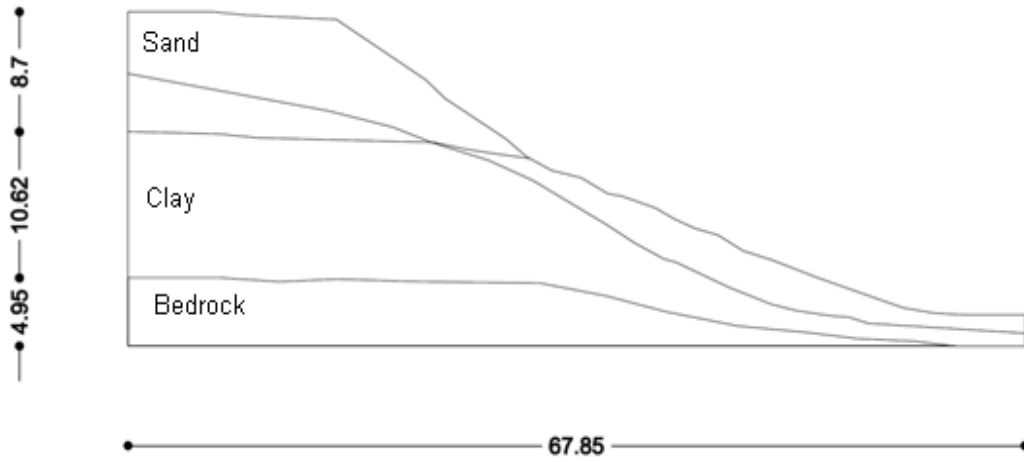
Οι μέθοδοι λωρίδων γενικά μπορεί να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης, σε αυτές δηλαδή που θεωρούν κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και σε αυτές που θεωρούν επιφάνεια ολίσθησης ακανόνιστου σχήματος. Οι μέθοδοι που θεωρούν κυκλική επιφάνεια ολίσθησης εξετάζουν την ισορροπία των ροπών ως προς το κέντρο του κύκλου για ολόκληρο το ελεύθερο σώμα που αποτελείται από λωρίδες. Αντίθετα, οι μέθοδοι που θεωρούν μια αυθαίρετη επιφάνεια ολίσθησης ακανόνιστου σχήματος εξετάζουν συνήθως την ισορροπία από την άποψη μεμονωμένων λωρίδων. Οι μέθοδοι αυτές γενικά διαφοροποιούνται κυρίως στην υπόθεση σχετικά με τις ορθές και διατμητικές δυνάμεις που δρουν μεταξύ των λωρίδων.

4.4.3 Προσδιορισμός Μοντέλου

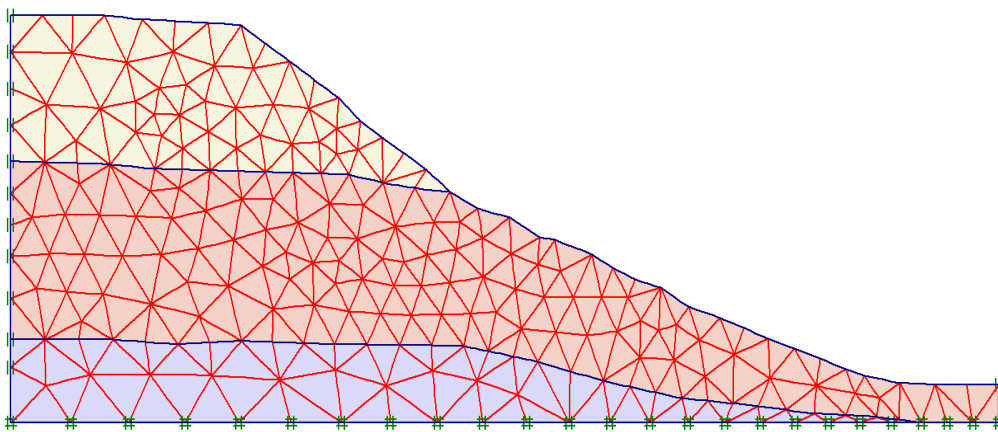
Το πρανές έχει μήκος 67,85 μέτρα και ύψος 24,27 μέτρα και αποτελείται από τρεις εδαφικές στρώσεις. Σύμφωνα και με το Σχήμα 4.4.1 το χαμηλότερο εδαφικό στρώμα αποτελείται από βραχώδες υλικό, αδιαπέραστο στο νερό και με μεγάλη συνοχή. Πάνω από τον βράχο βρίσκεται ένα στρώμα αργίλου πάχους 10,6 μέτρων και η κορυφή του πρανού αποτελείται από άμμο πάχους 8,7 μέτρων. Επιπλέον, η ύπαρξη του νερού αποτυπώνεται από την πιεζομετρική γραμμή που διακρίνεται στο σχήμα και συναντάται μόνο στο στρώμα άμμου και αργίλου. Η συμπεριφορά πριν την αστοχία καθώς και η φόρτιση-αποφόρτιση του εδάφους υπακούν στην θεωρία ελαστικότητας. Για την συμπεριφορά χαλάρωσης λόγω αύξησης των παραμορφώσεων καθώς και για την συμπεριφορά του εδάφους μετά την αστοχία υιοθετείται κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

Απαραίτητη ενέργεια είναι η κανναβοποίηση του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ως μοντέλο προσομοίωσης επιλέχθηκε η επίπεδη παραμόρφωση, για τη διακριτοποίηση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν 15-κομβά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και για τη δημιουργία του καννάβου

επιλέχθηκε το μεσαίο δίκτυο (medium). Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στον Πίνακα 4.4.1 και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο Σχήμα 4.4.1



Σχήμα 4.4.1 : Γεωμετρικό μοντέλο πρανούς



Σχήμα 4.4.2: Μεσαία Τριγωνοποίηση του γεωμετρικού μοντέλου

Πίνακας 4.4.1: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου

Παράμετροι	Επίπεδη παραμόρφωση
Μοντέλο προσομοίωσης	Μεσαία
Πύκνωση Δικτύου	15
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	389
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	3231
Αριθμός κόμβων	2,28
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	4668
Αριθμός υπολογισμού σημείων τάσεων	

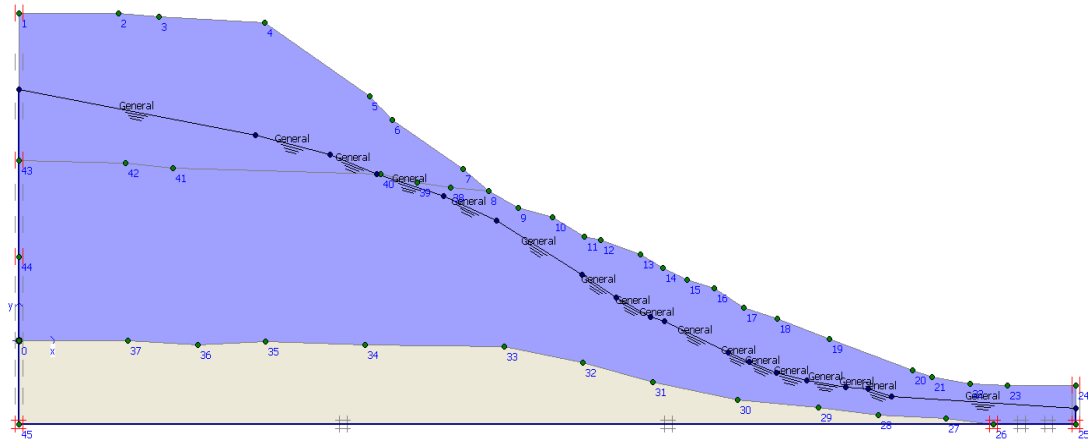
Για την δημιουργία του μοντέλου ακολουθείται η ίδια διαδικασία των προηγούμενων επιλύσεων. Συνοπτικά, λοιπόν, έχουμε τον σχεδιασμό του γεωμετρικού μοντέλου και την εισαγωγή των συνοριακών του συνθηκών. Όπως προαναφέρθηκε το βραχώδες υπόστρωμα είναι στραγγισμένο και με μεγάλη συνοχή. Επομένως, επί της ουσίας η συμπεριφορά του βραχώδους υποστρώματος δεν επηρεάζει την ευστάθεια του πρανούς. Επιπλέον, ο άργιλος και ο η άμμος -που αποτελούν το κύριο μέρος του πρανούς- χαρακτηρίζονται ως αστράγγιστες, ενώ η άμμος παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή συνοχή.

Από το πρόγραμμα προτείνεται η διαφορά της γωνίας τριβής με την γωνία διασταλτικότητας να είναι $\varphi - 30^\circ$ για αμμώδη εδάφη, ενώ για τα υπόλοιπα η μηδενική τιμή είναι αντιπροσωπευτική. Επίσης, προτείνεται το ειδικό βάρος κάτω από το φρεάτιο επίπεδο να είναι 3 kN/m^3 επιπλέον σε σχέση με το ειδικό βάρος πάνω από το φρεάτιο επίπεδο. Τέλος, ο υπολογισμός των υδροστατικών πιέσεων θα γίνει βάση του φρεατίου επιπέδου και όχι βάση της υπόγειας ροής. Επομένως, η εισαγωγή της διαπερατότητας δεν είναι απαραίτητη σε αυτό το στάδιο για αυτό και θεωρήθηκε μηδενική.

Πίνακας 4.4.2: Συγκεντρωτικές τιμές των παραμέτρων για τα εδαφικά υλικά

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Clay <input type="checkbox"/>	Rock <input type="checkbox"/>	Sand <input type="checkbox"/>	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	MC	MC	-
Τύπος υδραυλικής συμπεριφοράς	<i>Type</i>	Un-Drained	Drained	Drained	-
Ειδικός Βάρος πάνω από Φρ. Επίπεδο	γ_{unsat}	20	25	18	kN/m^3
Ειδικός Βάρος κάτω από Φρ. Επίπεδο	γ_{sat}	23	28	21	kN/m^3
Οριζόντια διαπερατότητα	k_x	0	0	0	m/day
Κάθετη διαπερατότητα	k_y	0	0	0	m/day
Μέτρο ελαστικότητας Young	E_{ref}	500000	1000000	200000	kN/m^2
Λόγος Poisson	ν	0.32	0.32	0.32	-
Συνοχή	c_{ref}	40	100	1	kN/m^2
Γωνία τριβής	φ	30	35	37.24	$^\circ$
Γωνία διασταλτικότητας	ψ	0	0	7.24	$^\circ$

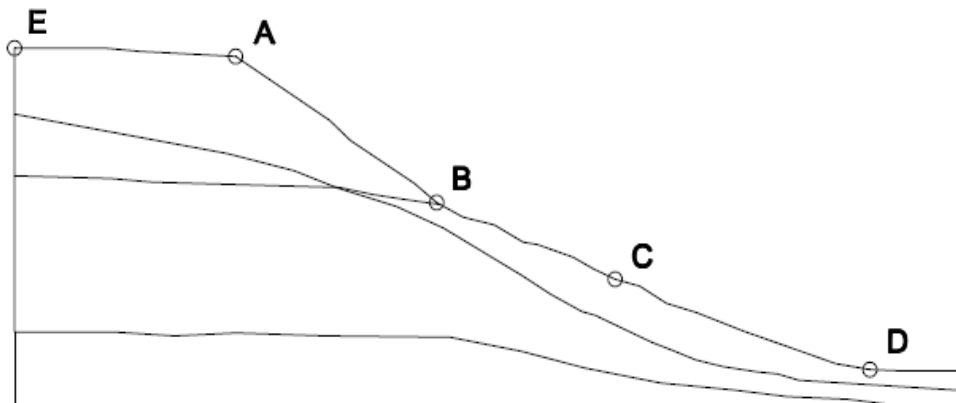
Λόγω της ύπαρξης νερού απαραίτητη ενέργεια μετά την εισαγωγή των εδαφικών ιδιοτήτων στο μοντέλο είναι η εισαγωγή των αρχικών συνθηκών. Το Plaxis δίνει την δυνατότητα υπολογισμού των υδροστατικών και γεωστατικών τάσεων. Επειδή, όμως το πρανές είναι μη οριζόντιο δεν θα υπολογιστούν οι αρχικές γεωστατικές συνθήκες. Όσο αφορά τις υδροστατικές πιέσεις ο υπολογισμός ολοκληρώνεται όταν στο γεωμετρικό μοντέλο σχεδιαστεί το φρεάτιο επίπεδο στο πρανές και δηλωθεί ως αδιαπέραστο το βραχώδες υπόστρωμα.



Σχήμα 4.4.3: Σχεδιασμός του φρεατίου επιπέδου

4.4.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 3

Επειδή η ανάλυση ασχολείται με την ψευδοστατικό υπολογισμό και την επίδραση του εδαφικού βάρους, ο ορισμός των σταδίων γίνεται με τους πολλαπλασιαστές ΣM_{weight} και ΣM_{accel} , όπως περιγράφηκε και στις προηγούμενες επιλύσεις. Τέλος, επιλέχθηκαν τα σημεία για την εξαγωγή καμπυλών. Όπως διακρίνονται στο Σχήμα 4.4.4 πρόκειται για σημεία σε όλο το μήκος της επιφάνειας του πρανούς προκειμένου να μελετηθεί καλύτερα η συμπεριφορά της επιφάνειας του πρανούς σε τυχόν μετατοπίσεις.



Σχήμα 4.4.4: Επιλεγμένα σημεία για την παραγωγή καμπυλών

Παρακάτω διακρίνονται τα επιμέρους αποτελέσματα των σταδίων υπολογισμού υπό την μορφή των εξαγόμενων σχημάτων από το πρόγραμμα και συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.4.3. Ομοίως με την Επίλυση 2, θα μελετηθεί η συμπεριφορά του εδαφικού βάρους και εν συνεχεία οι δύο ακραίες περιπτώσεις. Αυτός που ενισχύει περισσότερο την ευστάθεια είναι ο συνδυασμός θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης μεγέθους 0,24g και κατακόρυφης αρνητικής επιτάχυνσης μεγέθους 0,12g. Αντιθέτως, ο συνδυασμός οριζόντιας αρνητικής επιτάχυνσης 0,24g με παράλληλη εφαρμογή κατακόρυφης

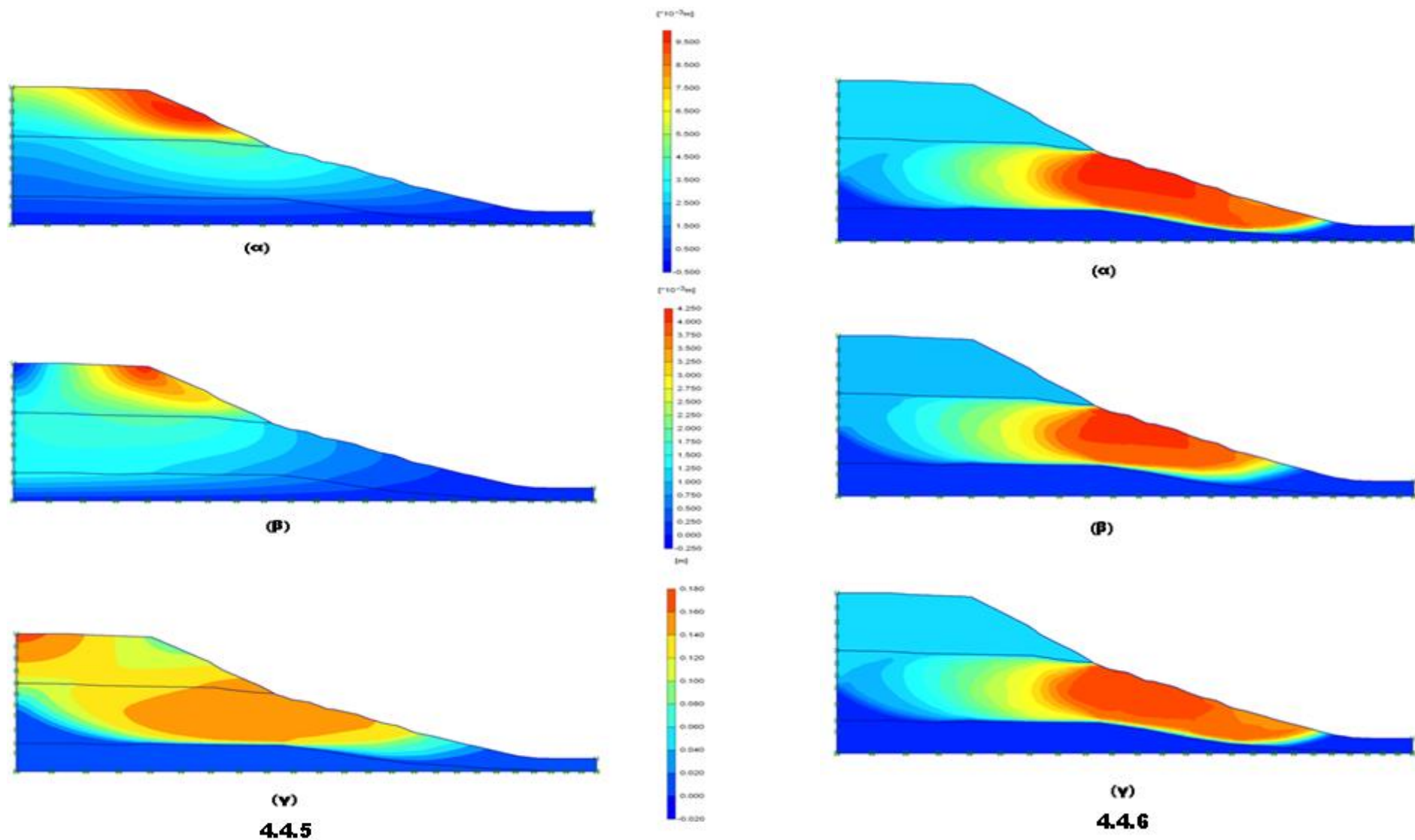
θετικής επιτάχυνσης 0,12g έχει ως απόρροια την απομείωση της ευστάθειας του, εξάγοντας τον χαμηλότερο Συντελεστή Ασφαλείας.

Στο Σχήμα 4.4.5 παρουσιάζονται οι ολικές μετατοπίσεις για τα τρία στάδια. Όπως προκύπτει, κατά την εφαρμογή μόνο του εδαφικού βάρους, μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρούνται στην στέψη του πρανούς, όπου συναντάται το υλικό με την μικρότερη συνοχή. Οι μετατοπίσεις αυτές περιορίζονται ακόμα περισσότερο όταν στο πρανές ασκηθεί θετική οριζόντια επιτάχυνση και αρνητική κάθετη (Σχήμα 4.4.5β). Αντιθέτως, η οριζόντια αρνητική επιτάχυνση (Σχήμα 4.4.5γ) οδηγεί σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις κυρίως στο αργιλικό στρώμα, καθώς και στην κορυφή του πρανούς, που ως αποτέλεσμα την καθίζηση του πρανούς κατά 18 εκατοστά.

Πέρα από το μέγεθος των μετατοπίσεων του πρανούς για τις διάφορες περιπτώσεις υπολογίστηκαν και οι πιθανές επιφάνειες αστοχίας (Σχήμα 4.4.6). Υπό την επίδραση των διαφορετικών περιπτώσεων είναι εμφανές ότι η επιφάνεια αστοχίας μεταβάλλεται ως προς το μέγεθος, όχι όμως ως προς την περιοχή που θα εφαρμοσθεί. Αν επομένως, το πρανές βρεθεί σε κατάσταση αστοχίας, το εδαφικό στρώμα του αργίλου θα παρουσιάσει τις μεγαλύτερες μόνιμες μετατοπίσεις. Αντιθέτως, παρόλη την μικρή συνοχή της άμμου (σχεδόν μηδενική), η μεγάλη γωνία τριβής της ($37,24^\circ$) σε πρώτη φάση δεν προκαλεί στο στρώμα μόνιμες μετατοπίσεις. Ωστόσο, συμβάλει στην εμφάνιση αστοχίας στο αργιλικό στρώμα λόγω της επιβάρυνσης που προκαλείται από το μετατοπισμένο αμμώδες στρώμα.

Τέλος, παρατίθεται άλλο ένα συγκριτικό σχήμα, όπου παρουσιάζονται οι ουδέτερες τάσεις στους πόρους του πρανούς. Διαφοροποίηση στην συμπεριφορά των πιέσεων παρατηρείται κατά την εφαρμογή θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης και κατακόρυφης θετικής (Σχήμα 4.4.7γ). Σύμφωνα, λοιπόν, με το σχήμα ισχυρές πιέσεις εμφανίζονται άνω του φρεατίου ορίζοντα, στο αμμώδες στρώμα. Σε συνδυασμό με το Διάγραμμα 4.4.2, συμπεραίνεται ότι η αρνητική επιτάχυνση οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων άνω του φρεατίου ορίζοντα. Οι αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται στο πρανές, πέρα από τις μεταβολές που προκαλούν στην μετατόπιση του πρανούς συμβάλουν και στην κατανομή και το μέγεθος των υδροστατικών πιέσεων. Έτσι, εφαρμογή αρνητικής επιτάχυνση οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων στο αμμώδες στρώμα ενώ θετική επιτάχυνση προκαλεί αύξηση στο μέγεθος των πιέσεων στο αργιλικό στρώμα.

Συμπερασματικά, όπως παρατηρείται και από τον Πίνακα αλλά και από το διάγραμμα του συντελεστή ασφαλείας (Διάγραμμα 4.4.1) καμία από τις επιλύσεις δεν οδηγεί σε μόνιμες μετατοπίσεις, καθώς όλες οι επιλύσεις έχουν συντελεστή ασφαλείας άνω του 1. Προσθέτως, μελετήθηκε η συμπεριφορά των πιέσεων στους εδαφικούς πόρους για δυο διαφορετικά σημεία, που επιλέχθηκαν κατά το στάδιο του υπολογισμού, το ένα άνω του φρεατίου επιπέδου και άλλο ένα κάτω φρεατίου επιπέδου. Κατ' αυτόν τον τρόπο μελετάται η συμπεριφορά των πιέσεων όταν το πρανές δέχεται μόνο την φόρτιση από το βάρος του αλλά και όταν υποβάλλεται σε επιτάχυνση (Διάγραμμα 4.3.3).



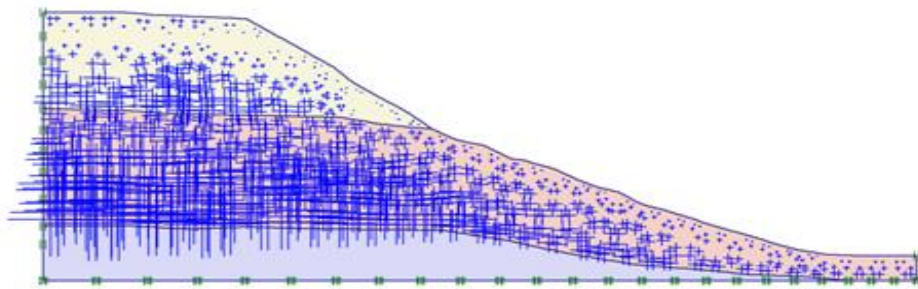
Σχήμα 4.4.5: Παρουσίαση των ολικών μετατοπίσεων στο πρανές (α) υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους (β) υπό την επίδραση θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g και κάθετης αρνητικής 0,12g (γ) υπό την επίδραση αρνητικής οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g και κάθετης θετικής 0,12g

Σχήμα 4.4.6: Παρουσίαση των πιθανών επιφανειών αστοχίας στο πρανές (α) υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους (β) υπό την επίδραση θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g και κάθετης αρνητικής 0,12g (γ) υπό την επίδραση θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g και κάθετης θετικής 0,12g

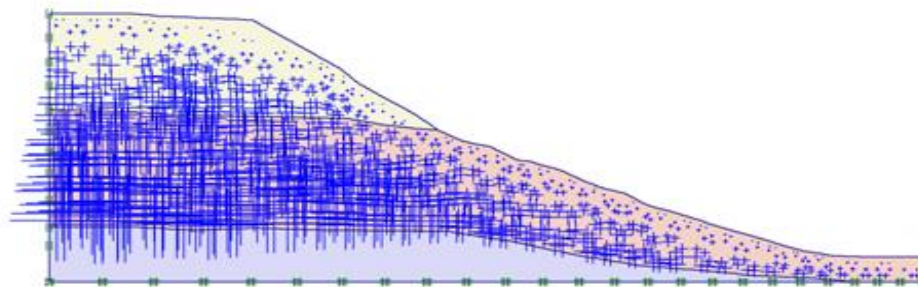
Πίνακας 4.4.3: Συγκεντρωτικά στοιχεία υπολογισμών των επιμέρους σταδίων

Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς πορώδεις πιέσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	Συντελεστής Ασφαλείας	ΣM_{weight}	ΣM_{accel}
Εδαφική Βαρύτητα	0.010	-490,73	-351,52	-0.154	1.928	1	0
$x_{accel} = 0,24 \text{ G}$	0.005	-550,13	-421,81	-0.079	3,455	1	1
$x_{accel} = -0,24 \text{ G}$	0,122	-615,98	697,12	-11,93	1,294	1	-1
$x_{accel} = 0.24 \text{ G}$ $y_{accel} = 0.12 \text{ G}$	0.006	-609,52	-465,26	-0.098	2,852	1	1
$x_{accel} = -0.24 \text{ G}$ $y_{accel} = -0.12 \text{ G}$	0,084	-771,89	664,10	-8,14	1,399	1	-1
$x_{accel} = 0.24 \text{ G}$ $y_{accel} = -0.12 \text{ G}$	0,004	-490,90	-378,56	-0,062	4,460	1	1
$x_{accel} = -0.24 \text{ G}$ $y_{accel} = 0.12 \text{ G}$	0,166	-812,02	646,13	17,95	1,179	1	-1

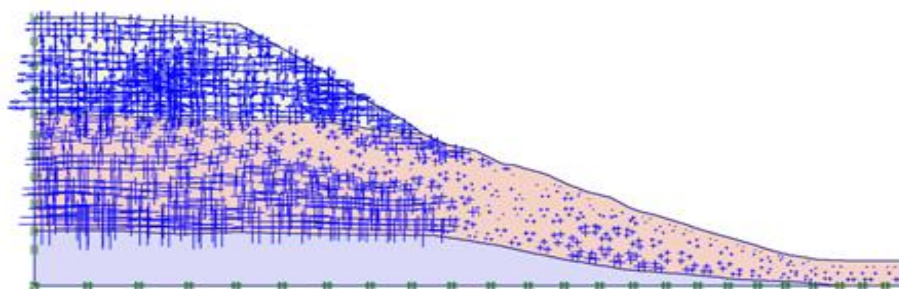
Υπενθυμίζεται ότι στο PLAXIS ο πολλαπλασιαστής ΣM_{accel} παίρνει την μηδενική τιμή όταν δεν υπεισέρχεται επιτάχυνση στο πρανές, την τιμή 1 όταν ασκείται θετική επιτάχυνση και -1 όταν ασκείται αρνητική. Στο συγκεκριμένο συγκριτικό διάγραμμα λαμβάνεται υπόψη μόνο η οριζόντια επιτάχυνση. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα συμπεραίνεται ότι μέσω της σεισμικής δόνησης, τα κενά ανάμεσα στα σωματίδια του υλικού παύουν να υφίστανται και το νερό ανεβαίνει προς την επιφάνεια. Έτσι επέρχεται α) καθίζηση του ρευστοποιήσιμου στρώματος, β) άνοδος του νερού η οποία με την σειρά της θα μειώσει την αντοχή όποιων υπερκείμενων στρωμάτων.



(α)

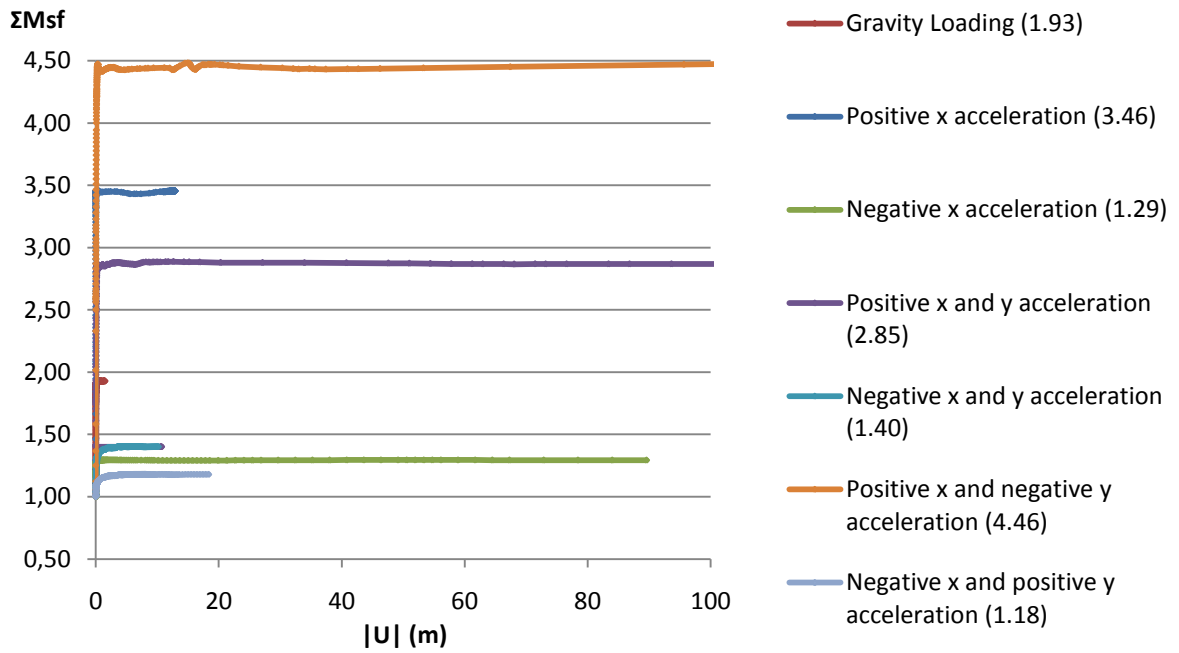


(β)

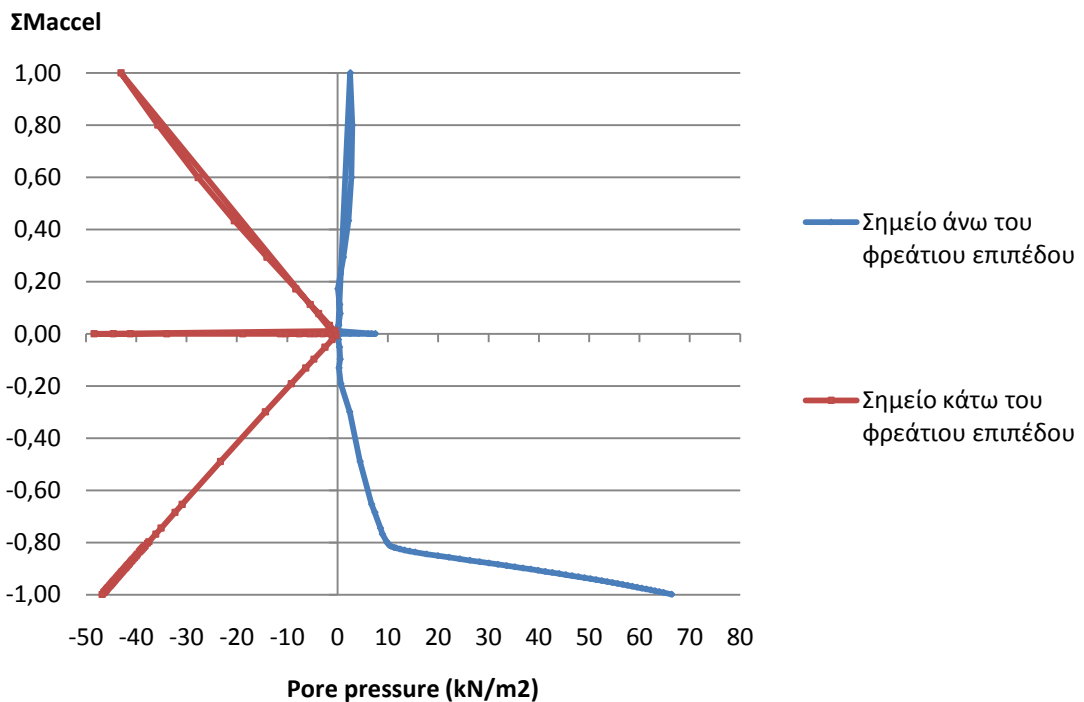


(γ)

Σχήμα 4.4.7: Παρουσίαση των ενεργών πιέσεων στους πόρους του πρανές (α) υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους (β) υπό την επίδραση θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g και κάθετης αρνητικής 0,12g (γ) υπό την επίδραση αρνητικής οριζόντιας επιτάχυνσης 0,24g και κάθετης θετικής 0,12g



Διάγραμμα 4.4.1: Σύγκριση συντελεστών ασφαλείας για τα επιμέρους στάδια



Διάγραμμα 4.4.2: Συσχέτιση πιέσεων στους πόρους του πρανού με την εφαρμογή του εδαφικού βάρους και επιτάχυνσης $\pm 0,24 G$ σε σημείο άνω του φρεατίου και κάτω του φρεατίου αντίστοιχα.

4.4.5 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα

Σύγκριση αποτελεσμάτων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων και της Μεθόδου των Λωρίδων:

- Ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους με την μέθοδο των λωρίδων είναι 1,95. Ο αντίστοιχος συντελεστής που προέκυψε από την επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι 1,92. Επομένως, οι δυο μέθοδοι συμφωνούν ως προς τον συντελεστή ασφαλείας χωρίς να προκύπτουν ουσιαστικές διαφορές. Από την άλλη, η επιφάνεια αστοχίας διαφοροποιείται στις δύο μεθόδους. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.4.6, η επιφάνεια αστοχίας του πρανούς εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης του αργίλου, ενώ από την μέθοδο των λωρίδων η επιφάνεια αστοχίας παρατηρείται και στα δυο στρώματα. Ωστόσο η μέθοδος των λωρίδων δεν θεωρείται ακριβής στον προσδιορισμό μιας επιφάνειας αστοχίας και περισσότερο αποτελεί μια εκτίμηση της επιφάνειας. Επομένως, τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων όσο αφορά την επιφάνεια αστοχίας είναι ουσιαστικά ασύγκριτα, καθώς με τη μεν Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων υπολογίζεται με αριθμητικές μεθόδους, με τη δε Μέθοδο των λωρίδων σε εμπειρικούς και αυθαίρετους ορισμούς.

Συμπεράσματα:

- Η μεν εισαγωγή θετικής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης οδηγεί σε ενίσχυση του πρανούς η δε εισαγωγή αρνητικής οριζόντιας επιτάχυνσης επιβαρύνει την ευστάθεια του πρανούς. Όσο αφορά την συμπεριφορά του πρανούς κατά την εφαρμογή κάθετης επιτάχυνσης ισχύει γενικά ότι η θετική κάθετη επιτάχυνση επιβαρύνει την ευστάθεια ενώ η αρνητική βελτιώνει. Παρόλα αυτά ακόμα και στην δυσμενέστερη περίπτωση το πρανές δεν δέχεται μόνιμες μετατοπίσεις.
- Σύμφωνα με τον Συντελεστή ασφαλείας δυσμενέστερη περίπτωση θεωρείται η αρνητική οριζόντια επιτάχυνση μεγέθους 0,24g σε συνδυασμό με την εισαγωγή θετική κάθετης επιτάχυνσης 0,12g. Σύμφωνα με την επιφάνεια αστοχίας πιθανότερο για μετατόπιση είναι το στρώμα του αργίλου. Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται μέγιστη μετατόπιση 16,6 εκατοστών.
- Κατά την επίδραση θετικής οριζόντιας επιτάχυνσης η πίεση του νερού στους πόρους άνω του φρεατίου ορίζοντα είναι σχεδόν μηδενικές ενώ κάτω από το φρεάτιο έχει αρνητικό πρόσημο. Αυτό σημαίνει πως στο πρανές ασκούνται δυνάμεις άνωσης. Αντίθετα, υπερπίεσεις εμφανίζονται κατά την επίδραση αρνητικής οριζόντιας επιτάχυνσης, όπου το πρανές χωρίζεται σε δυο επιμέρους μέρη. Στο σώμα που βρίσκεται κάτω από φρεάτιο επίπεδο ασκούνται δυνάμεις προς τα πάνω, δηλαδή δυνάμεις ανώσεως. Από την άλλη,

για το σώμα που βρίσκεται πάνω από το φρεάτιο επίπεδο ασκούνται θετικές πιέσεις στους πόρους με αποτέλεσμα να δημιουργούν δυνάμεις αντίθετες της άνωσης.

Γενικά κατά την παρουσία υπόγειων νερών στο πρανές ισχύει ότι η συνισταμένη της ανώσεως είναι κατακόρυφη και αντίθετη προς τη διεύθυνση της βαρύτητας (υδροστατική πίεση). Η αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων προκαλεί αντίστοιχη ελάττωση της ενεργού τάσεως και επομένως οδηγεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής. Καθώς αυξάνεται, λοιπόν, η πίεση των πόρων, ευνοούνται αντίστοιχα και οι εκδηλώσεις κατολισθήσεων.

4.5 Επίλυση 4

4.5.1 Σκοπός επίλυσης

Στην συγκεκριμένη μελέτη έγινε αριθμητική επίλυση δυο οπλισμένων πρανών, τα οποία υπολογίστηκαν και με την χρήση φυγοκεντρική από την υποψήφια Διδάκτορα Ε. Καπόγιαννη. Σκοπός, επομένως, αυτής της μελέτης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τις δυο διαφορετικές μεθόδους. Κατά την εργαστηριακή μελέτη τα οπλισμένα πρανή με γνωστές παραμέτρους, που θα περιγραφούν παρακάτω, υπόκεινται σε μόνιμες μετατοπίσεις. Συνεπώς, αναμενόμενο αποτέλεσμα και στην επίλυση με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι τα δυο οπλισμένα πρανή να αστοχήσουν.

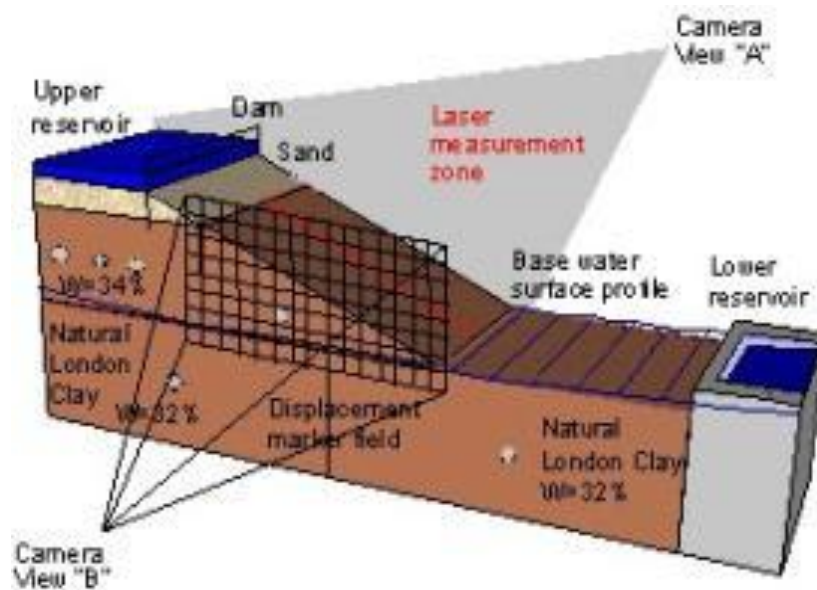
4.5.2 Επίλυση πρανών με Φυγοκεντρική

Αρχικά θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της εργαστηριακής μεθόδου στην οποία επιλύθηκαν τα δυο πρανή. Η επίλυση με την χρήση φυγοκεντρική είναι ένα μεγάλο εργαλείο διαθέσιμο για την γεωτεχνική μηχανική, καθώς δίνει την δυνατότητα μελέτης και ανάλυσης προβλημάτων με την χρήση γεωτεχνικών υλικών. Ένας φυγόκεντρος είναι ουσιαστικά ένα εξελιγμένο πλαίσιο φορτίου, στο οποίο μπορούν εξεταστούν μοντελοποιημένα εδαφικά δείγματα

Η μοντελοποίηση διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στην γεωτεχνική μηχανική. Η φυσική μοντελοποίηση αναπαράγει ένα γεγονός ανάλογο με αυτό που θα μπορούσε να υπάρχει στο πρωτότυπο. Το μοντέλο συνήθως είναι μια εκδοχή μειωμένης κλίμακας του πρωτοτύπου, χωρίς όμως να υπάρχει διαφοροποίηση στο τελικό αποτέλεσμα που θα προκύπτει. Η ομοιότητα του μοντέλου με το πρωτότυπο επιτυγχάνεται με νόμους κλίμακας.

Ένα ειδικό χαρακτηριστικό της γεωτεχνικής μοντελοποίησης είναι η ανάγκη αναπαραγωγής της εδαφικής συμπεριφοράς σε όρους αντοχής και ακαμψίας. Τα εδαφικά μοντέλα που τοποθετούνται στον φυγοκεντρική δέχονται επιτάχυνση έτσι ώστε να υποβληθούν σε μια αδρανειακή ακτινική επιτάχυνση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί υπό όρους μοντέλου, η επιτάχυνση βαρύτητας ή και ακόμα πολλές φορές μεγαλύτερη τη γήινης βαρύτητας. Το έδαφος που τοποθετήθηκε στο μοντέλο του

δοχείου έχει μια ελεύθερη από τάσεις επιφάνεια, ενώ μέσα στο εδαφικό σώμα το μέγεθος των τάσεων αυξάνεται με το βάθος με μια αναλογία που σχετίζεται με την πυκνότητα του εδάφους και την αντοχή στην επιτάχυνση. Αν το ίδιο υλικό χρησιμοποιείται και στο μοντέλο και στο πρωτότυπο και αν η διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου στην εφαρμογή παρόμοιων τάσεων είναι προσεκτική, τότε για το μοντέλο στον φυγοκεντριστή που θα υποβληθεί σε μια αδρανειακή επιτάχυνση N φορές της γήινης βαρύτητας, οι κάθετες τάσεις σε βάθος h_m θα είναι όμοιες με τις αντίστοιχες στο πρωτότυπο σε βάθος h_p όπου $h_p = N * h_m$. Αυτός είναι ο βασικός νόμος κλίμακας του φυγοκεντρικού μοντέλου, δηλαδή ότι η ομοιότητα των τάσεων επιτυγχάνεται σε ομόλογα σημεία επιταχύνοντας το μοντέλο σε κλίμακα N επί N φορές την βαρύτητας της Γης.



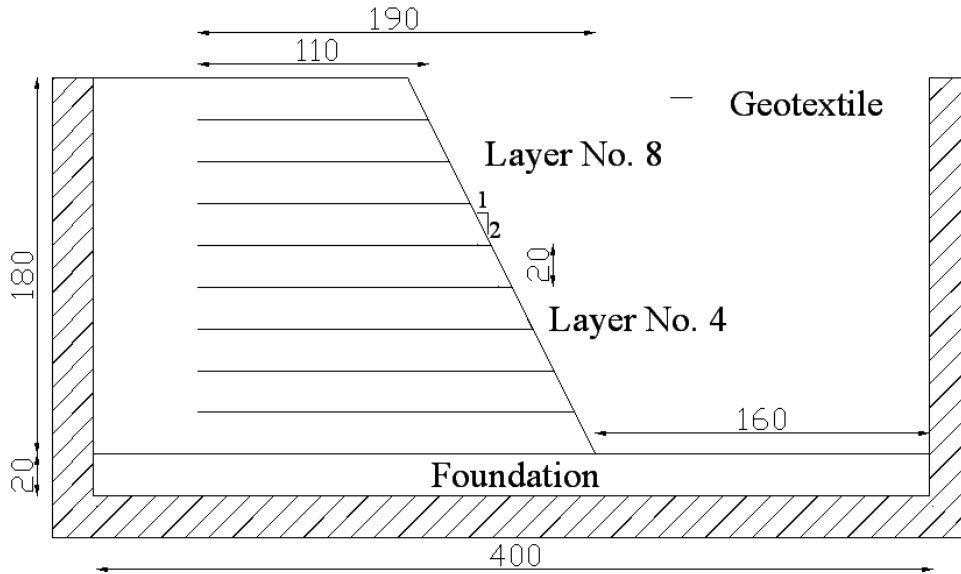
Εικόνα 4.5.1: Διαδικασία μελέτης του πρανού υπό κλίμακα στον φυγοκεντριστή. Η περιοχή μελέτης καναβοποιείται και οι μετατοπίσεις υπολογίζονται με την συνεχή λήψη φωτογραφιών.

4.5.3 Προσδιορισμός Μοντέλου

Τα μοντελοποιημένα οπλισμένα πρανή της μελέτης έχουν ύψος 20 cm με κλίση 2:1 (κατακόρυφη: οριζόντια). Συνολικά το πρανές επενδύθηκε με 9 στρώσεις γεωπλέγματος μήκους 11- 19 cm ανά 2 cm με την μέθοδο wrap-around. Κατά την εκπόνηση της μελέτης της Ε. Καπόγιαννη μελετήθηκαν πρανή από 10 φορές μεγαλύτερα του αρχικού μοντέλου μέχρι και 100 φορές μεγαλύτερα. Τέλος, το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του μοντέλου οπλισμένου πρανού είναι άμμος από το Πέρθ της δυτικής ακτής της Αυστραλίας.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν προς ανάλυση μοντέλα 50 φορές ($n= 50$) και 100 φορές ($n= 100$) μεγαλύτερα του αρχικού μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση των δυο οπλισμένων πρανών οι εδαφικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, αλλάζουν μόνο οι διαστάσεις των πρανών και η παράμετρος EA του

γεωπλέγματος (αξονική δυστένεια) . Επομένως, το μοντέλο $n=100$ θα είναι διπλάσιο του μοντέλου $n=50$ μόνο ως προς τις διαστάσεις.



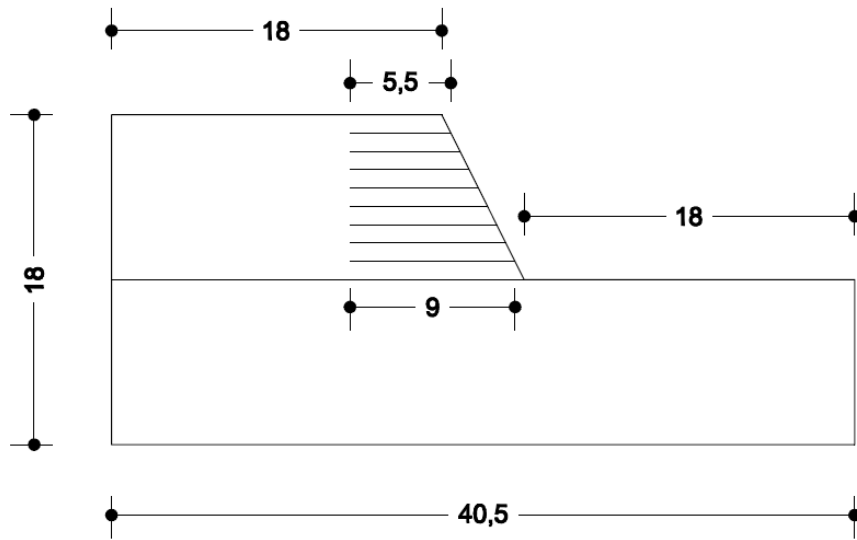
Σχήμα 4.5.1: Τομή μοντελοποιημένου οπλισμένου πρανούς (Καπόγιαννη, 2010)

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν προς ανάλυση μοντέλα 50 φορές ($n=50$) και 100 φορές ($n=100$) μεγαλύτερα του αρχικού μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση των δυο οπλισμένων πρανών οι εδαφικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, αλλάζουν μόνο οι διαστάσεις των πρανών και η παράμετρος EA του γεωπλέγματος (αξονική δυστένεια) . Επομένως, το μοντέλο $n=100$ θα είναι διπλάσιο του μοντέλου $n=50$ μόνο ως προς τις διαστάσεις.

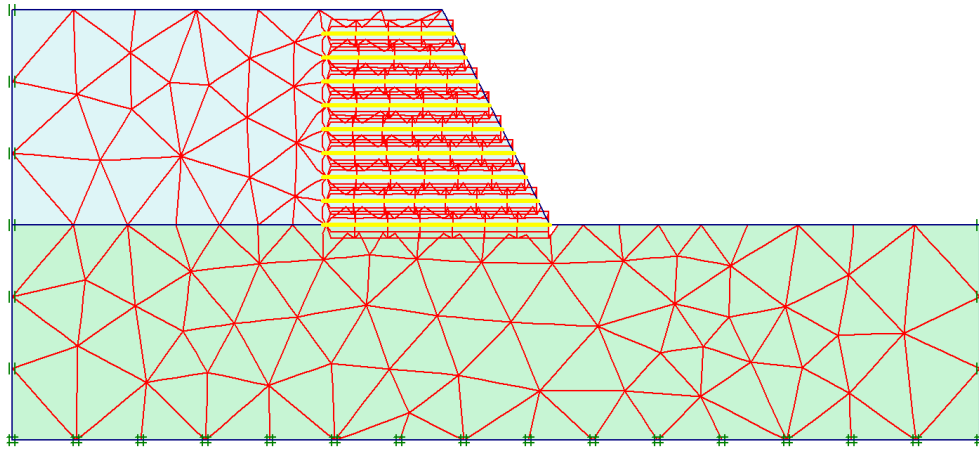
Το γεωμετρικό μοντέλο που επιλύθηκε τελικά με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων μεταβλήθηκε από αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά τους εργαστηριακούς ελέγχους προκειμένου το PLAXIS να λειτουργεί ομαλά. Οι παραλλαγές αυτές δεν επηρεάζουν την αξιοπιστία της μελέτης καθώς περιορίστηκαν στην αύξηση του πάχους του υποστρώματος και στην αύξηση του μήκους του πρανούς. Δεν υπήρξαν επεμβάσεις στο μήκος των γεωπλεγμάτων, του ύψους του πρανούς ή της γωνίας του, παράμετροι δηλαδή που είναι ικανοί να αλλάξουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Επίσης, για την καλύτερη διεξαγωγή αποτελεσμάτων το υλικό βάσης διαφοροποιήθηκε από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στον φυγοκεντρική. Στην εργαστηριακή μελέτη η βάση του πρανούς αποτελείται από το ίδιο υλικό με το υπόλοιπο σώμα (άμμος), ωστόσο στην επίλυση με το PLAXIS επιλέχθηκε ένα θεωρητικό υλικό (Υλικό 2), πολύ ισχυρό, ώστε να μην παρουσιάζονται μετατοπίσεις στην βάση. Διαφορετικά θα εμπόδιζε την εξαγωγή αποτελεσμάτων για την περιοχή που μας ενδιαφέρει περισσότερο, δηλαδή στην περιοχή όπου παρουσιάζεται το Υλικό 1 και τα γεωπλέγματα. Τέλος, σχετικά με τη συμπεριφορά των υδατικών πιέσεων, αυτές θεωρήθηκαν στραγγισμένες συνθήκες.

➤ $n=50$

Η δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου επήλθε με την βοήθεια του Σχήματος 4.5.1 όπου πολλαπλασιάστηκαν όλες οι διαστάσεις του 50 φορές.



Σχήμα 4.5.2: Διαστασολόγηση γεωμετρικού μοντέλου $n=50$



Σχήμα 3.1 : Διακριτοποίηση του πρανούς σε πεπερασμένα στοιχεία

Οι οπλισμοί στο μοντέλο $n=50$ τοποθετήθηκαν ανά ένα μέτρο και τα μήκη τους ήταν μεταξύ 5,5 μέτρων (τελευταία στρώση) και 9 μέτρων (πρώτη στρώση). Για την επίλυση του πρανούς επιλέχθηκε η επίπεδη παραμόρφωση, για τη διακριτοποίησή του χρησιμοποιήθηκαν 15-κομβά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και για τη δημιουργία του καννάβου επιλέχθηκε το μεσαίο δίκτυο (medium). Περαιτέρω πύκνωση στην περιοχή των γεωπλεγμάτων, όπου εκεί αναμένονται οι μεγαλύτερες μετακινήσεις δεν είχε σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Αντιθέτως, η σημαντική αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων στην συγκεκριμένη περιοχή είχε ως αποτέλεσμα η διαδικασία επίλυσης να είναι μακρόχρονη και τα αποτελέσματα δυσδιάκριτα. Συγκεντρωμένα όλα τα χαρακτηριστικά του

πεπερασμένου μοντέλου στον Πίνακα 4.5.1 και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο Σχήμα 4.5.3.

Πίνακας 4.5.1: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου n= 50

Παράμετροι	
Μοντέλο προσομοίωσης	Επίπεδη παραμόρφωση
Πύκνωση Δικτύου	Μεσαία
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	269
Αριθμός κόμβων	2651
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	1,65
Αριθμός υπολογισμού σημείων τάσεων	3228

Επειδή το μοντέλο είναι οπλισμένο, παρουσιάζεται μια νέα παράμετρος που δεν συναντήθηκε σε προηγούμενες επιλύσεις είναι ο συντελεστής διεπιφάνειας (R_{inter}), ο οποίος καθορίζει τον βαθμό αλληλεπίδρασης εδάφους και γεωπλέγματος. Για την κατάλληλη προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους και των γεωπλεγμάτων εισήχθησαν οι χαρακτηριστικές παράμετροι έκαστων. Οι εδαφικές παράμετροι, όπως αναφέρθηκε, παραμένουν ίδιοι για τα δύο μοντέλα. Αντιθέτως, οι ιδιότητες του γεωπλέγματος αλλάζουν με την διαφοροποίηση του μοντέλου. Συνολικά οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.2 και Πίνακα 4.5.3.

Πίνακας 4.5.2: Παρουσίαση των εδαφικών παραμέτρων του Υλικού 1 και 2

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	MC	-
Τύπος υδραυλικής συμπεριφοράς	<i>Type</i>	Drained	Drained	-
Ειδικός Βάρος πάνω από Φρ. Επίπεδο	γ_{unsat}	16,25	25	kN/m ³
Ειδικός Βάρος κάτω από Φρ. Επίπεδο	γ_{sat}	17,50	28	kN/m ³
Οριζόντια διαπερατότητα	k_x	16,930	0	m/day
Κάθετη διαπερατότητα	k_y	50,790	0	m/day
Μέτρο ελαστικότητας Young	E_{ref}	250000	500000	kN/m ²
Λόγος Poisson	ν	0,30	0,30	-
Συνοχή	c_{ref}	0,30	200	kN/m ²
Γωνία τριβής	ϕ	33	40	°
Γωνία διασταλτικότητας	ψ	3	0	°
Συντελεστής διεπιφάνειας	R_{inter}	0,649	Rigid	-

Πίνακας 4.5.3: Παρουσίαση των παραμέτρων του γεωπλέγματος για το μοντέλο n= 50

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	1	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	Elastic	-
Αξονική δυστένεια (ελαστική αντοχή)	<i>EA</i>	1185	kN/m

Πολλές από τις άνωθεν παραμέτρους χρειάστηκε να υπολογισθούν, καθώς δεν υπήρχαν δεδομένα για αυτές δεδομένου ότι οι παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση με την μέθοδο του φυγοκεντριστή ήταν διαφορετικές από αυτές που εισάγονται στο PLAXIS. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής διεπιφάνειας για τα εδαφικά υλικά και η αξονική δυστένεια για τα γεωπλέγματα ήταν δυο παράμετροι που υπολογίσθηκαν.

Ο συντελεστής διεπιφάνειας είναι ξεχωριστός για κάθε υλικό και σαν εμπειρικός κανόνας χρησιμοποιείται η παραδοχή ότι πρέπει να είναι ίσος ή μικρότερος της εφαπτομένη της γωνίας τριβής του υλικού. Το υλικό 2 θεωρήθηκε πως δεν επηρεάζει την δύναμη του γύρω υλικού άρα η τιμή του συντελεστή R_{inter} ισούται με 1 (Rigid). Αντιθέτως, για το Υλικό 1 επιλέχθηκε η τιμή ως εξής:

$$R_{inter} = \tan\varphi = \tan 33 = 0.649$$

Η αξονική δυστένεια από την άλλη υπολογίζεται από τον Εξίσωση 4.3. Γενικά, η ανηγμένη παραμόρφωση ισούται με τον λόγο της επιμήκυνσης προς το συνολικό μήκος.

$$EA = \frac{F}{\varepsilon} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

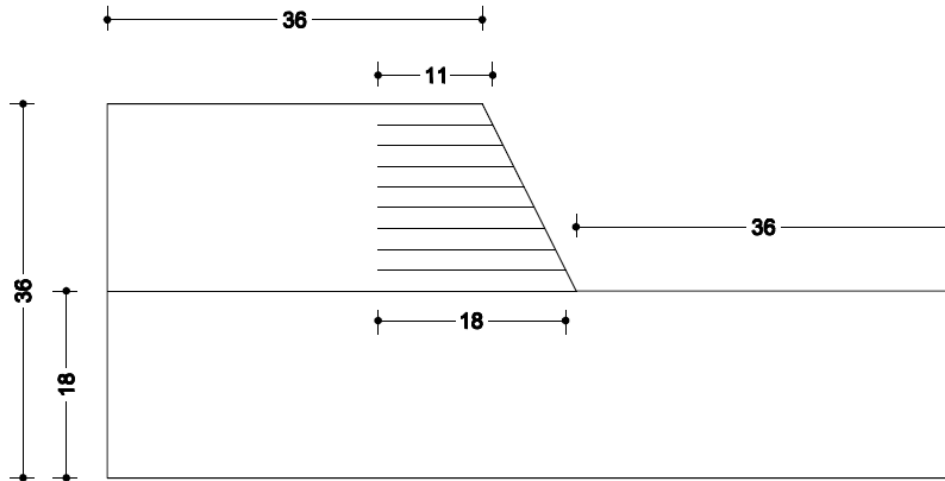
Τέλος, άλλη μια απλοποιητική παραδοχή που έγινε είναι η μεταβολή της συνοχής της άμμου. Στο πείραμα του φυγοκεντριστή η συνοχή της άμμου ήταν μηδενική, ωστόσο το PLAXIS δεν δέχεται μηδενικές τιμές για τον προσδιορισμό της συνοχής. Έτσι, από το εγχειρίδιο συνίσταται ως ελάχιστη τιμή τα 0,3 kPa, χωρίς αυτό να επηρεάζει τις αξιοπιστία των επιλύσεων.

Με παρόμοιο τρόπο έγιναν οι υπολογισμοί των συγκεκριμένων παραμέτρων και στις επόμενες υποπεριπτώσεις.

➤ n= 100

Οι διαστάσεις του μοντέλου n= 100 θα είναι διπλάσιες σε σχέση με το μοντέλο n= 50. Επομένως, η τοποθέτηση των οπλισμών σε αυτή την περίπτωση έγινε ανά δύο μέτρα και το μήκος τους ποικίλει από 11- 19 μέτρα. Στο Σχήμα 4.5.4 παρουσιάζεται το γεωμετρικό μοντέλο

Ο καθορισμός των πεπερασμένων στοιχείων δεν παρουσιάζει διαφοροποίηση σε σχέση με την διακριτοποίηση που επιλέχθηκε στο μοντέλο $n=50$. Διαφορά παρατηρείται στο μέγεθος των στοιχείων, καθώς πρόκειται για το διπλάσιο μοντέλο. Περιληπτικά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου διακρίνονται στο Πίνακα 4.5.4.



Σχήμα 4.5.4: Διαστασολόγηση γεωμετρικού μοντέλου $n=100$

Πίνακας 4.5.4: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου $n=100$

Παράμετροι	
Μοντέλο προσομοίωσης	Επίπεδη παραμόρφωση
Πύκνωση Δικτύου	Μεσαία
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	269
Αριθμός κόμβων	2651
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	3,29
Αριθμός σημείων τάσεων	3228

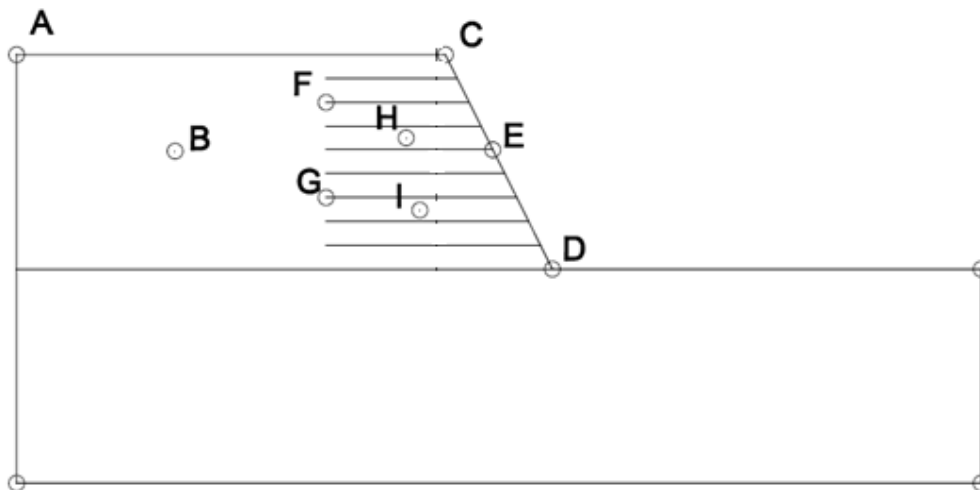
Ενώ με την χρήση της Εξίσωσης 4.3 υπολογίζεται η νέα αξονική δυστένεια του γεωπλέγματος. Οι εδαφικές παράμετροι δεν διαφοροποιούνται σε σχέση με το μοντέλο $n=50$, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.2.

Πίνακας 4.5.4: Παρουσίαση των παραμέτρων του γεωπλέγματος για το μοντέλο $n=100$

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	1	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	Elastic	-
Αξονική δυστένεια (ελαστική αντοχή)	<i>EA</i>	2625	kN/m

4.5.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων Επίλυσης 4

Σειρά έχει ο προσδιορισμός των επιμέρους επιλύσεων. Οι συγκεκριμένες επιλύσεις γίνονται με την μέθοδο της τμηματικής κατασκευής (staged construction), όπου ως αρχική συνθήκη θεωρείται το οριζόντιο εδαφικό στρώμα της βάσης. Έπειτα ορίζεται το δεύτερο εδαφικό στρώμα και τα γεωπλέγματα και γίνεται ο υπολογισμός της ευστάθειας του πρανούς μέσω του πολλαπλασιαστή ΣM_{stage} . Προκειμένου το πρανές να θεωρηθεί ότι δεν παρουσιάζει μόνιμες μετατοπίσεις ο πολλαπλασιαστής πρέπει να φτάσει στην τιμή 1. Σε περίπτωση που δεν φτάσει την τιμή 1 στα προκαθορισμένα βήματα, το πρανές θα παρουσιάσει μόνιμες μετατοπίσεις. Για την εξαγωγή καμπυλών απαραίτητη είναι η επιλογή σημείων στο μοντέλο, όπως διακρίνονται και στο Σχήμα 4.5.5. Τα σημεία επιλέχθηκαν εκεί όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, έτσι ώστε να μελετηθούν καλύτερα οι τάσεις και μετατοπίσεις που ασκούνται στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 4.5.5: Επιλογή σημείων για την εξαγωγή καμπυλών και για τα δυο μοντέλα ανάλυσης

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται μερικά αποτελέσματα των μοντέλων. Αρχικά, παρουσιάζεται η κατανομή των διατμητικών τροπών στα δυο οπλισμένα πρανή. Γενικά, οι διατμητικές τροπές είναι ένα μέτρο ένδειξης των παραμορφώσεων σε ένα εδαφικό σώμα. Ποσοτικά, είναι η μετατόπιση ενός επιπέδου σε σχέση με ένα δεύτερο οποιοδήποτε επίπεδο, διαχωρισμένο από την κάθετη απόσταση μεταξύ αυτών των επιπέδων. Στο Σχήμα 4.5.7 παρουσιάζονται οι επιφάνειες όπου παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση τροπών, αποτελώντας κατ' αυτό τον τρόπο μια ένδειξη για την επιφάνεια που αστοχεί στα συγκεκριμένα πρανή. Και στις δυο περιπτώσεις οι επιφάνειες αστοχίας εμφανίζονται στην περιοχή των γεωπλεγμάτων, με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τροπών να εμφανίζονται στον πόδα του πρανούς όπως ήταν αναμενόμενο. Η σύγκριση των δυο γεωμετρικών μοντέλων αποδεικνύει ότι στο

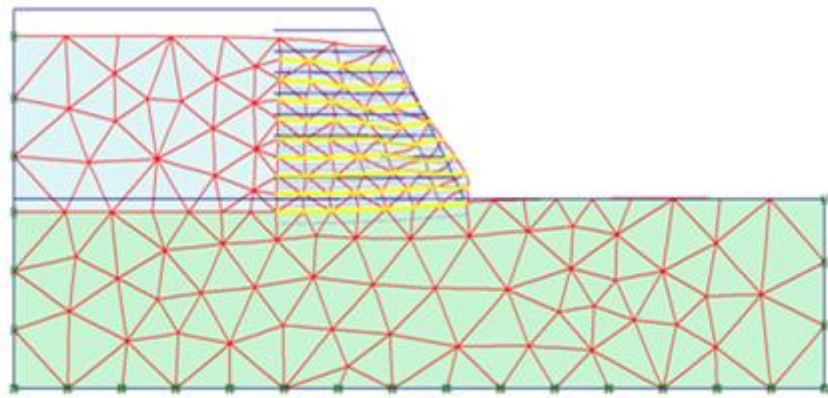
μοντέλο $n=100$ συναντούνται μεγαλύτερες τροπές από θέμα μεγέθους ενώ και η επιφάνεια αστοχίας εκτείνεται σε μεγαλύτερο μέρος του πρανούς.

Άλλωστε το ίδιο συμπέρασμα απορρέει και από το Σχήμα 4.5.6 που παρουσιάζεται το παραμορφωμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Στο μοντέλο $n=50$ παρατηρείται μετακίνηση στον πόδα του πρανούς ενώ υπάρχει και μια μικρή καθίζηση στην στέψη. Αντιθέτως, στο μοντέλο $n=100$ υπάρχει μια γενική μετατόπιση της πλαγιάς του πρανούς προς τα δεξιά, λόγω των ισχυρότερων και σε μεγαλύτερη έκταση τροπών που εμφανίζοντας σε εκείνη την περιοχή.

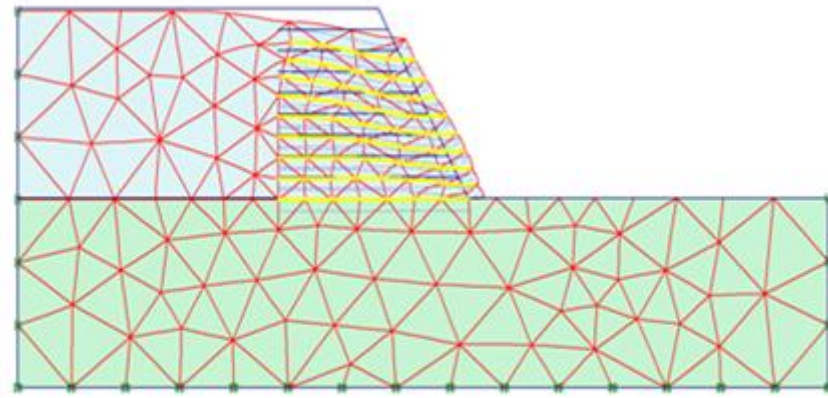
Επίσης στο Σχήμα 4.5.7 παρουσιάζονται οι σχετικές διατμητικές τάσεις για τα δυο πρανή. Η διατμητική τάση ορίζεται ως η τάση που εφαρμόζεται παράλληλα ή εφαπτομενικά στο πρόσωπο ενός υλικού, αντίθετα δηλαδή από τις κανονικές τάσεις που εφαρμόζονται κάθετα. Αποτελούν δε, μια ένδειξη της εγγύτητας των σημείων τάσεων στην ανάπτυξη αστοχίας. Αύξηση και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει στο στρώμα της άμμου και κυρίως στην περιοχή που κατασκευάστηκαν τα γεωπλέγματα. Αναλυτικά οι αριθμητικές τιμές των πιο σημαντικών παραμέτρων για τα στάδια που μελετήθηκαν στον Πίνακα 4.5.6.

Πίνακας 4.5.6: Παρουσίαση των επιλύσεων των επιμέρους σταδίων

Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m^2)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	ΣM_{stage}	Συντελεστής Ασφαλείας
$n=50$ (άοπλο)	Αστοχία	-235.83	-0.013	0.10	-
$n=50$ (οπλισμένο)	Αστοχία	-236.57	-0.021	0.11	-
$n=100$ (άοπλο)	Αστοχία	-450,63	-0.141	0.02	-
$n=100$ (οπλισμένο)	Αστοχία	-466.03	0,608	0.08	-

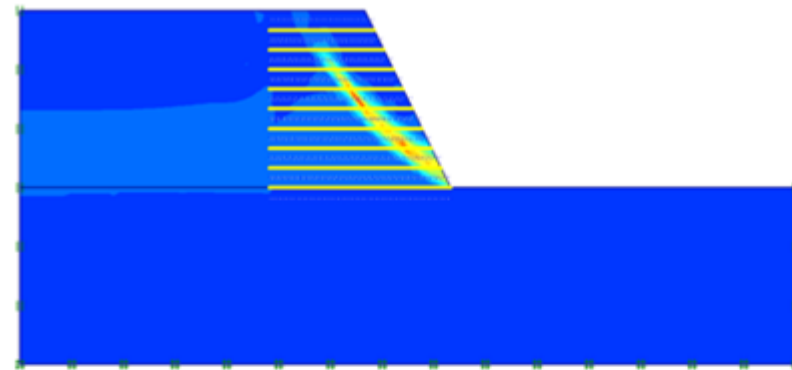


(α)

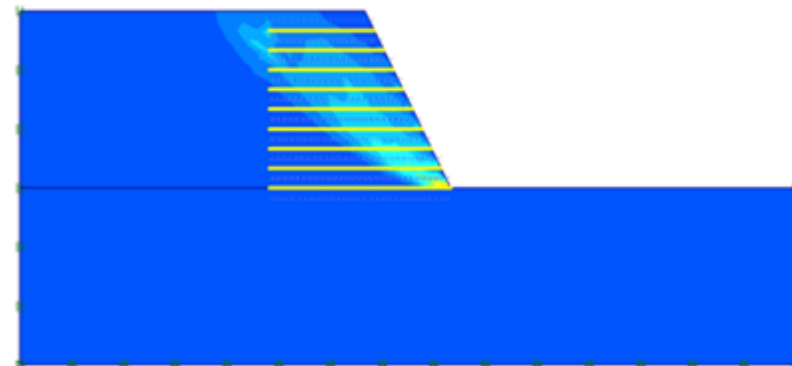


(β)

4.5.6

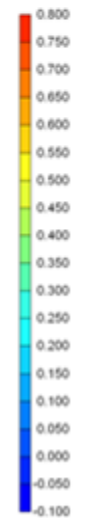
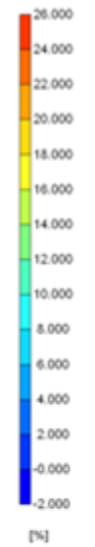


(α)



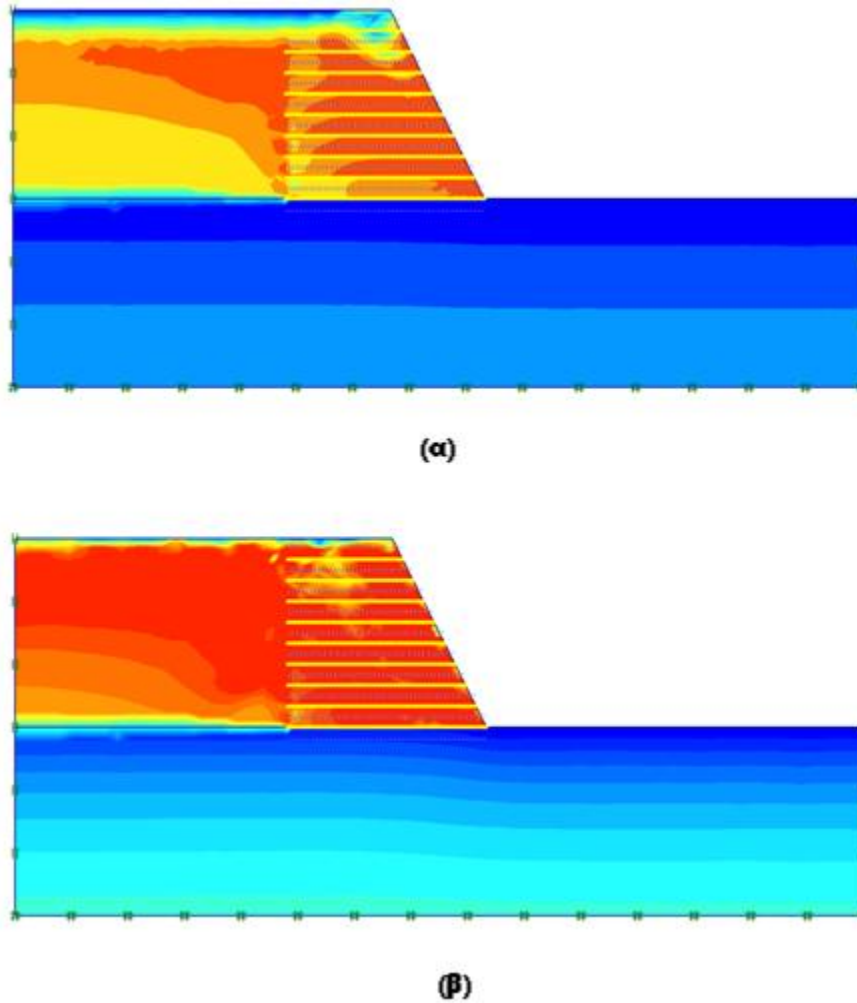
(β)

4.5.7



Σχήμα 4.5.6: Παρουσίαση παραμορφωμένου μοντέλου Πεπερασμένων στοιχείων (α) στο μοντέλο n= 50 (β) στο μοντέλο n=100

Σχήμα 4.5.7: Παρουσίαση διατμητικών τροπών (α) στο μοντέλο n= 50 (β) στο μοντέλο n=100



Σχήμα 4.5.8: Παρουσίαση σχετικών διαμητικών τάσεων (α) στο μοντέλο $n=50$ (β) στο μοντέλο $n=100$

4.5.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Σύγκριση αποτελεσμάτων της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και της υπάρχουσας εργαστηριακής μελέτης:

- Όπως αναφέρθηκε και κατά την περιγραφή της επίλυσης 4, τα υπολογιστικά μοντέλα πρανών 50 και 100 φορές μεγαλύτερα από το φυσικό μοντέλο αστοχούν στην μελέτη με την χρήση φυγοκεντρική. Προς επαλήθευση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων η αριθμητική επίλυση μέσω της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων αποδεικνύει ότι τα συγκεκριμένα οπλισμένα πρανή θα υποστούν μόνιμες μετατοπίσεις. Παρόλη την ύπαρξη οπλισμών στο πρανές, η μεγάλη γωνία κατασκευής του σε συνδυασμό με την μηδενική συνοχή και την μικρή γωνία τριβής δεν ήταν δυνατό να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα.

- Από την μελέτη του πολλαπλασιαστή ΣM_{stage} συμπεραίνουμε ότι τα γεωπλέγματα συνεισφέρουν στην επιπλέον ευστάθεια του πρανού, χωρίς ωστόσο να είναι ικανά να το διατηρήσουν σταθερό.

4.6 Επίλυση 5

4.6.1 Σκοπός

Η συγκεκριμένη μελέτη επίλυσης αποτελεί συνέχεια της επίλυσης 4, όπως υπολογίστηκε νωρίτερα. Επομένως, πέρα από την επίλυση της ευστάθειας των πρανών και την συγκριτική μελέτη τους με την μέθοδο του φυγοκεντριστή έγινε και περαιτέρω μελέτη. Γνωρίζοντας ότι τα συγκεκριμένα πρανή δεν ευσταθούν, εισήχθησαν οι κατάλληλοι παράμετροι έτσι ώστε να μην εμφανίζουν φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης οπλισμένα ενώ άοπλα να υπόκεινται σε μόνιμες μετατοπίσεις. Με αυτή την λογική θα αποδειχθεί η συνεισφορά και ο βαθμός επηρεασμού της παρουσίας τους γεωπλέγματος στο πρανές, πράγμα που δεν φάνηκε πλήρως στην επίλυση 4 λόγω της εμφάνισης αστοχίας και στο άοπλο και στο οπλισμένο.

Έπειτα, σε νέο εδαφικό μοντέλο που προέκυψε τοποθετήθηκε φορτίο στην επιφάνεια του για την μελέτη της συμπεριφοράς του πρανού υπό την άσκηση ενός συγκεκριμένου μεγέθους φορτίο. Το φορτίο δοκιμάστηκε σε διάφορες θέσεις μέχρις ότου το πρανές να ευσταθεί. Τέλος, στην θέση που το φορτίο δεν προκαλεί στο πρανές μόνιμες μετατοπίσεις, τοποθετήθηκε ένας σκελετός κτηρίου. Με αυτό τον τρόπο θα μελετηθεί η συμπεριφορά του κτηρίου στο πρανές σε σχέση με την άσκηση απλού γραμμικού φορτίου στο ίδιο σημείο. Αναλυτικά οι προαναφερθείσες επιλύσεις θα μελετηθούν στις επόμενες παραγράφους.

4.6.2 Διερεύνηση εδαφικών παραμέτρων για ευστάθεια πρανού

Ζητούμενο είναι η μετατροπή των εδαφικών παραμέτρων που περιγράφηκαν νωρίτερα (Πίνακας 4.5.2) έτσι ώστε το άοπλο πρανές να υπόκειται σε μόνιμες μετατοπίσεις ενώ το οπλισμένο να είναι σταθερό υπό την επίδραση του εδαφικού φορτίου.

Έπειτα από δοκιμές οι παρακάτω παράμετροι οδήγησαν στο ζητούμενο αποτέλεσμα. Ουσιαστικά για να αυξηθεί η ευστάθεια ενός πρανού αυξάνεται η συνοχή του υλικού και η γωνία τριβής του. Κατ' αυτόν τον τρόπο έγινε και η διερεύνηση στην συγκεκριμένη περίπτωση. Όπως αποδείχθηκε η μεταβολή της συνοχής από τα 0,3 kN/m² στα 5 kN/m² με παράλληλη αύξηση της γωνίας τριβής κατά 2° επέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι τελικές παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.1.

Με βάση αυτές τις τελικές παραμέτρους διεξήχθησαν οι επιλύσεις με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και προέκυψαν τα ακόλουθα αριθμητικά δεδομένα (Πίνακας 4.6.2) και τα αντίστοιχα σχήματα.

Πίνακας 4.6.1: Εισαγωγή των νέων εδαφικών παραμέτρων για σταθερό πρανές

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	MC	-
Τύπος υδραυλικής συμπεριφοράς	<i>Type</i>	Drained	Drained	-
Ειδικός Βάρος πάνω από Φρ. Επίπεδο	γ_{unsat}	16,25	25	kN/m ³
Ειδικός Βάρος κάτω από Φρ. Επίπεδο	γ_{sat}	17,50	28	kN/m ³
Οριζόντια διαπερατότητα	k_x	16,930	0	m/day
Κάθετη διαπερατότητα	k_y	50,790	0	m/day
Μέτρο ελαστικότητας Young	E_{ref}	250000	500000	kN/m ²
Λόγος Poisson	ν	0.30	0.30	-
Συνοχή	c_{ref}	5	200	kN/m ²
Γωνία τριβής	φ	35	40	°
Γωνία διασταλτικότητας	ψ	5	0	°
Συντελεστής διεπιφάνειας	R_{inter}	0.7	Rigid	-

Πίνακας 4.6.2: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών επιλύσεων στα επιμέρους στάδια

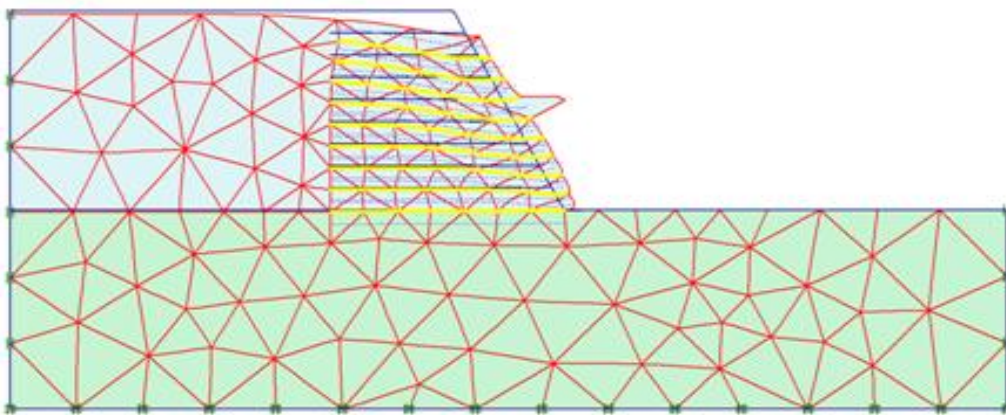
Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	ΣM_{stage}	Συντελεστής Ασφαλείας
n= 50 (άοπλο)	Αστοχία	-298,69	-0.951	0.54	-
n= 50 (οπλισμένο)	0,024	-362,89	0,934	1	1,182
n= 100 (άοπλο)	Αστοχία	-522,00	1,63	0.28	-
n= 100 (οπλισμένο)	0.267	-722,24	-	1	1,359

Σύμφωνα με τον πίνακα άνωθεν τα δυο άοπλα μοντέλα αστοχούν, ενώ τα οπλισμένα παραμένουν σταθερά. Αποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την συμβολή των γεωπλεγμάτων στην ευστάθεια ενός πρανούς. Άλλωστε η σύγκριση των ολικών μετατοπίσεων που λαμβάνουν χώρα στα πρανή (Σχήμα 4.6.1 και Σχήμα 4.6.2) παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα. Τα άοπλα πρανή αστοχούν με την εμφάνιση μικρότερων μετατοπίσεων σε σχέση με τα αντίστοιχα οπλισμένα. Επίσης, η περιοχική εμφάνιση των μετατοπίσεων και για τα δύο άοπλα πρανή παρουσιάζεται στο ίδιο

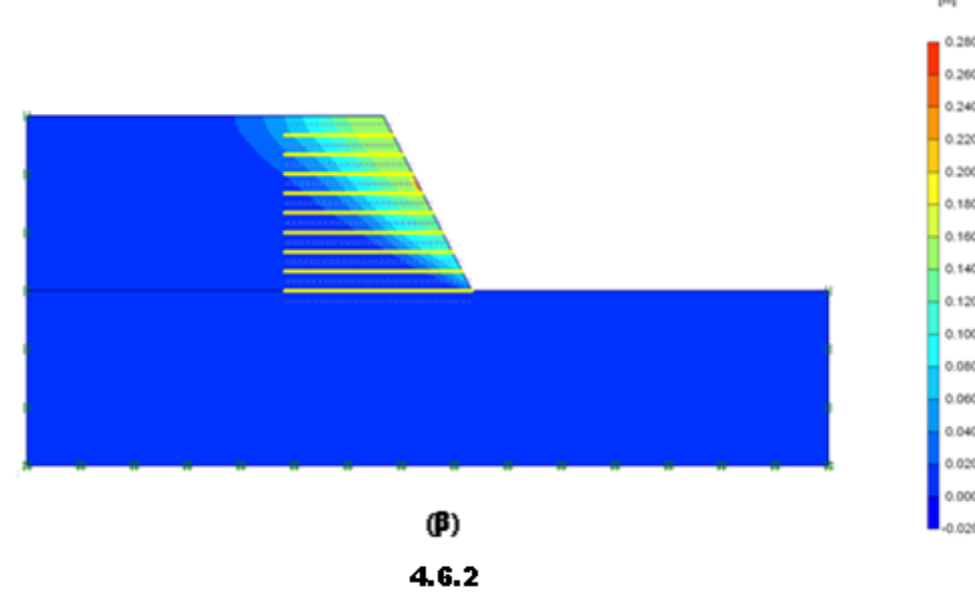
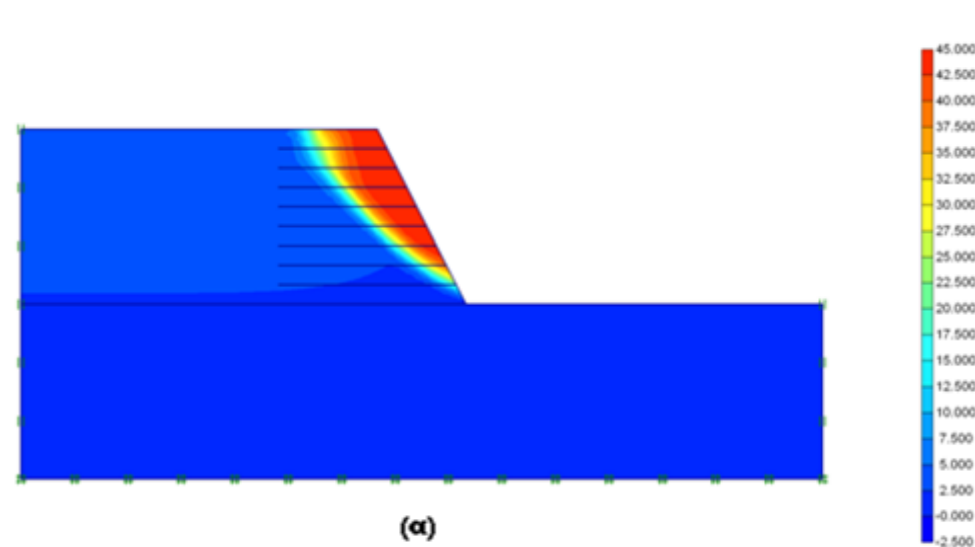
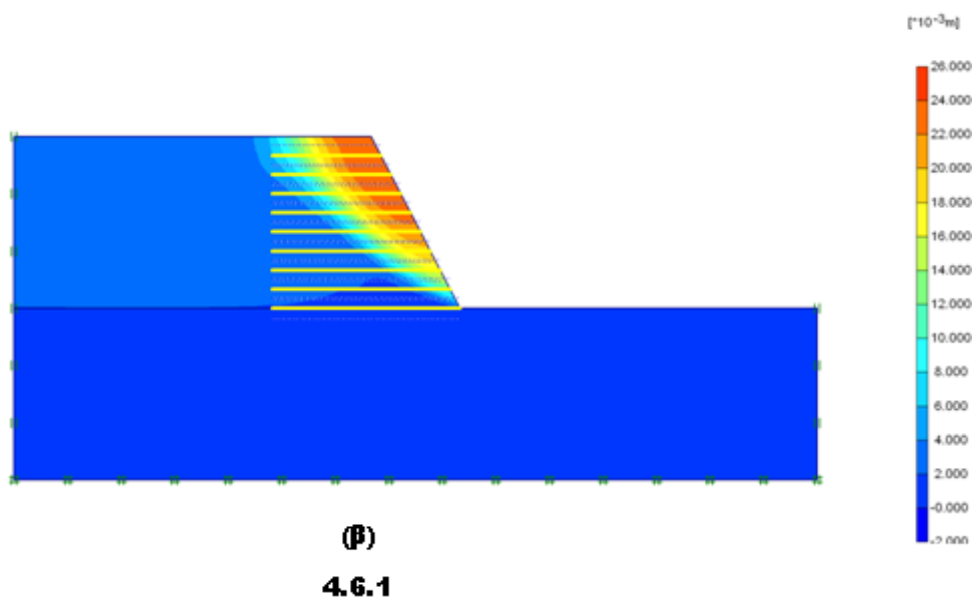
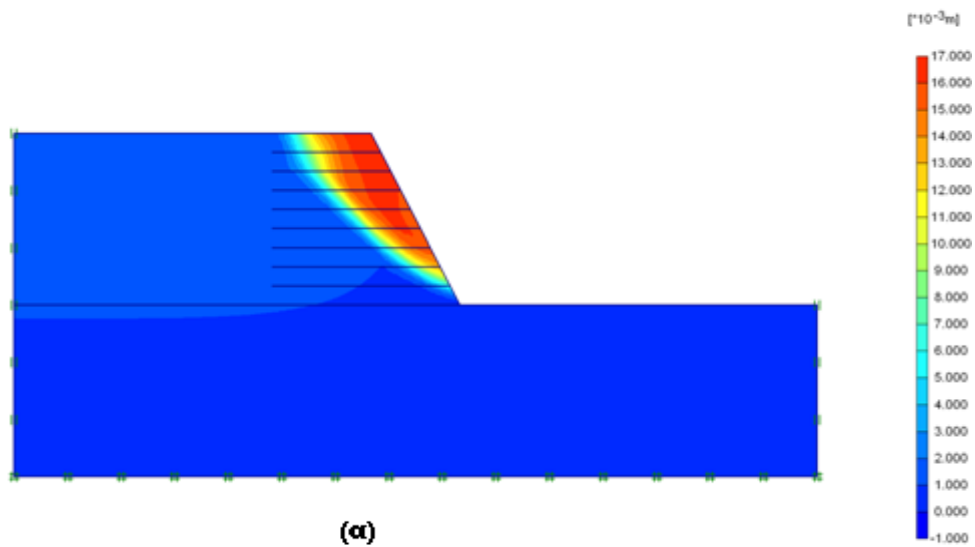
σημείο του πρανούς, δηλαδή στην στέψη και το κεκλιμένο επίπεδο του αμμώδους στρώματος. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό των επιφανειών αστοχίας άοπλων πρανών που συναντιούνται στην ίδια περιοχή, βάση των σχετικών διατμητικών τάσεων, όπως αυτές εξάγονται το Σχήμα 4.6.4. Η περιοχή που οι σχετικές διατμητικές τάσεις -ο λόγος των προκαλούμενων διατμητικών τάσης με τις διατμητικές τάσεις αστοχίας- λάβουν την τιμή 1 χαρακτηρίζεται από φαινόμενα αστοχίας.

Επίσης, σύμφωνα με τους Συντελεστές Ασφαλείας το οπλισμένο πρανές $n=50$ έχει συντελεστή 1,18 ενώ το αντίστοιχο πρανές $n=100$ συντελεστή 1,36. Η διαφοροποίηση αυτή της τάξεως του 13% στις δύο επιλύσεις οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διαφορετική αξονική δυστένεια (EA) του γεωπλέγματος στο κάθε μοντέλο. Τα γεωπλέγματα του μοντέλου $n=100$ παρουσιάζουν σχεδόν διπλάσια αντοχή σε σχέση με αυτά του $n=50$ ενισχύοντας κατ' αυτό τον τρόπο την ευστάθεια του πρανούς. Με την χρήση του PLAXIS είναι δυνατή και η εξαγωγή των οριακών επιφανειών αστοχίας. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας και κατ' επέκταση της επιφάνειας αστοχίας επιτυγχάνεται με την συνεχή μείωση της γωνίας τριβής και της συνοχής του εδαφικού υλικού μέχρις ότου να προκύψει μηχανισμός αστοχίας. Δικαιολογείται επομένως, η μεγαλύτερη επιφάνεια αστοχίας που παρουσιάζει το οπλισμένο μοντέλο $n=100$, καθώς πρόκειται για πιο σταθερό πρανές άρα για να υπολογιστεί η επιφάνεια αστοχίας του χρειάστηκε να μειωθούν περισσότερο η συνοχή και η γωνία τριβής του εδάφους.

Τέλος, κατά τον υπολογισμό ευστάθειας του μοντέλου $n=100$ παρουσιάστηκε μια τοπική αστοχία όψης (Σχήμα 4.6.5) ενώ το πρανές παραμένει σταθερό. Μπορεί από την αριθμητική επίλυση να απορρέει ένα τέτοιου είδους πρόβλημα αλλά αυτό αντιμετωπίζεται με ανάκαμψη του οπλισμού στην όψη του πρανούς. Άλλωστε, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η μέθοδος τοποθέτησης των γεωπλεγμάτων που χρησιμοποιείται είναι η wrap-around, κατά την οποία το γεώπλεγμα αναδιπλώνεται στα άκρα.

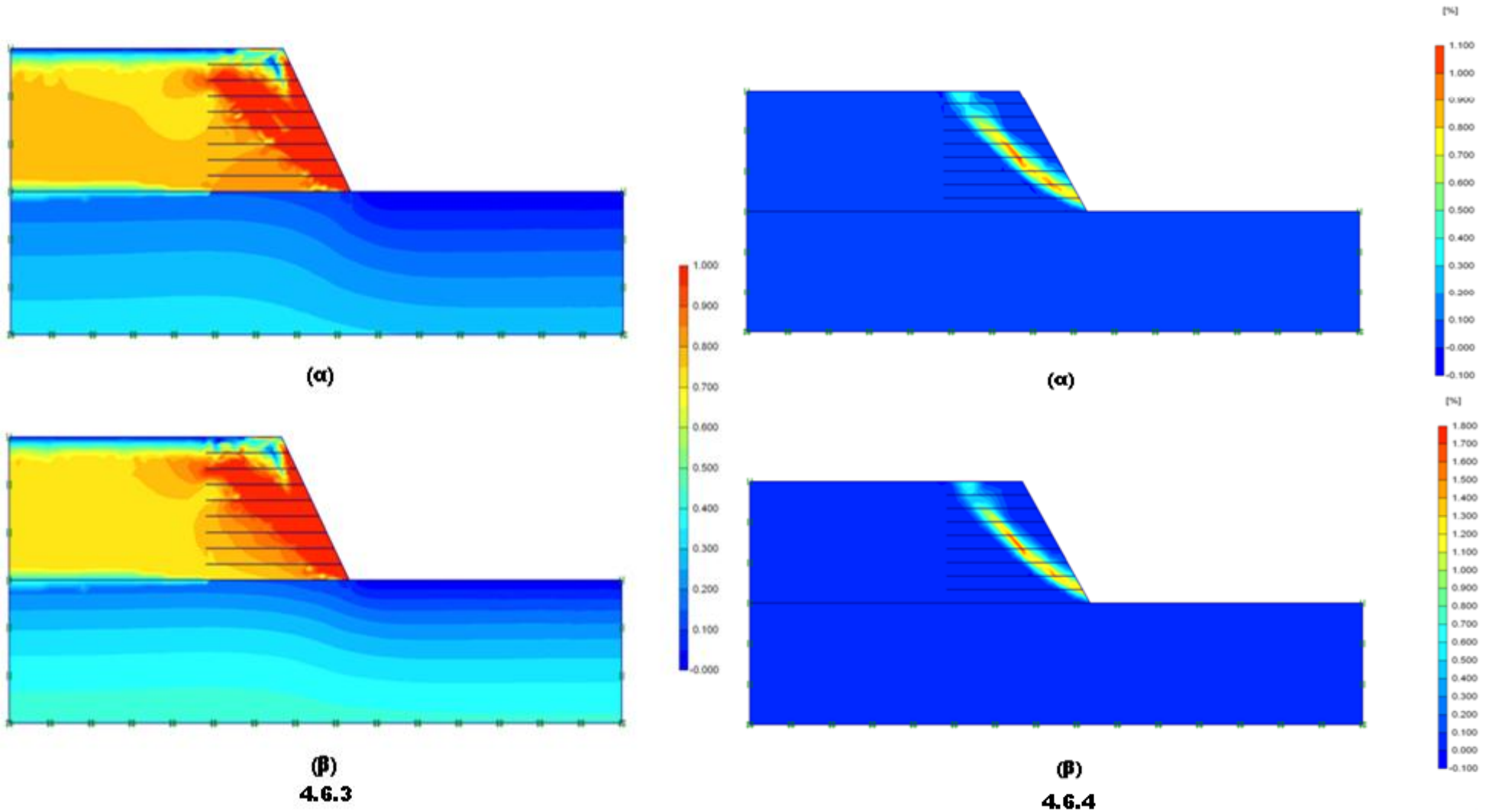


Σχήμα 4.6.5: Παρουσίαση τοπικής αστοχίας όψης στο οπλισμένο πρανές $n=100$



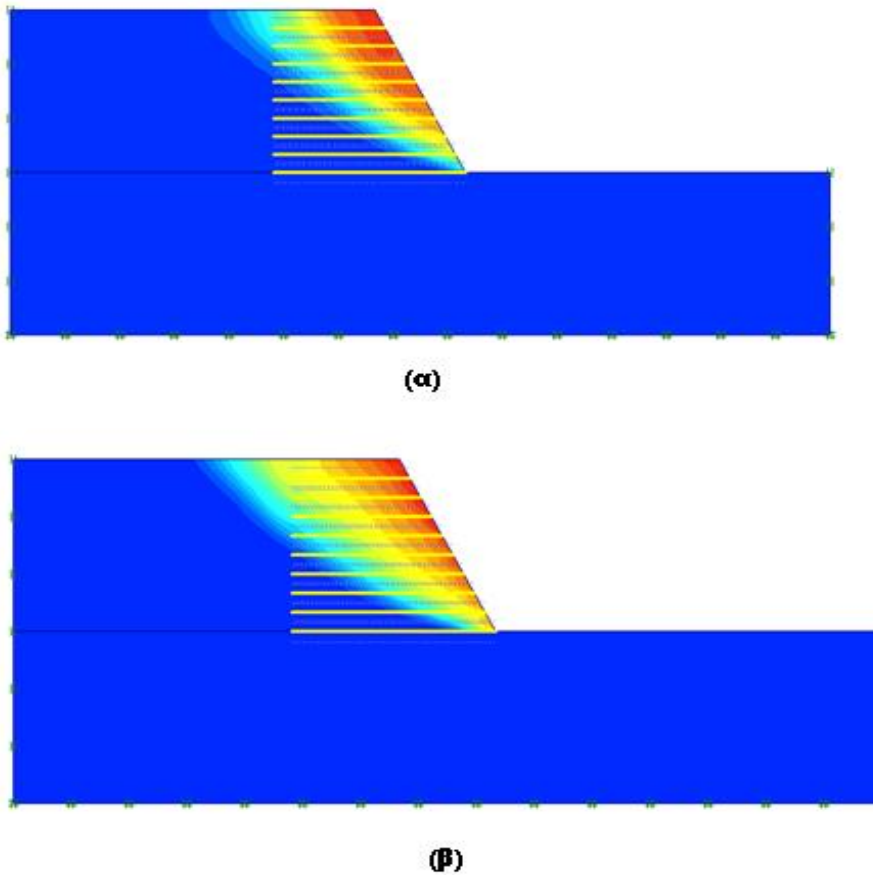
Σχήμα 4.6.1: Παρουσίαση των ολικών μετατοπίσεων του πρανούς $n=50$ (α) άοπλο (β) οπλισμένο

Σχήμα 4.6.2: Παρουσίαση των ολικών μετατοπίσεων του πρανούς $n=100$ (α) άοπλο (β) οπλισμένο



Σχήμα 4.6.3: Παρουσίαση σχετικών διατμητικών τάσεων στο άοπλο μοντέλο (α) $n=50$ (β) $n=100$

Σχήμα 4.6.4: Παρουσίαση διατμητικών τροπών στο άοπλο μοντέλο (α) $n=50$ (β) $n=100$



Σχήμα 4.6.7: Πιθανή επιφάνεια αστοχίας οπλισμένου πρανούς για το μοντέλο (α) $n=50$ (β) $n=100$

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω αναλύσεις μια αλλαγή της εδαφικής παραμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε ευστάθεια του οπλισμένου πρανούς. Σύμφωνα όμως με την εξαγωγή των συντελεστών ασφαλείας προκύπτει ότι και υπό αυτές τις συνθήκες η ευστάθεια των πρανών δεν επαρκεί για περαιτέρω μελέτη. Επειδή, όπως αναφέρθηκε, επόμενο ζητούμενο είναι η εφαρμογή φορτίων στην επιφάνεια των μοντέλων, σκοπός είναι η εξαγωγή ενός πιο σταθερού πρανούς. Για αυτό τον λόγο δημιουργείται ένα νέο εδαφικό μοντέλο. Τα μοντέλο αυτό θα έχει τις γεωμετρικές διαστάσεις του μοντέλου $n=50$, εδαφικές παραμέτρους τις νέες όπως ορίστηκαν στον Πίνακα 4.6.1 και η αξονική δυστένεια του γεωπλέγματος όπως ορίστηκε για το μοντέλο $n=100$ στον Πίνακα 4.5.5.

4.6.3 Διερεύνηση ευστάθεια πρανούς υπό την εισαγωγή φορτίων

Για το νέο μοντέλο που περιγράφηκε, αφού πρώτα μελετήθηκε ότι δεν αστοχεί, εισήχθη γραμμικό φορτίο μεγέθους $146,25 \text{ KN/m}^2$. Το μέγεθος αυτό υπολογίστηκε βάση του τύπου:

$$F = \gamma * g$$

Όπου γ : εδαφικό βάρος πάνω από το φρεάτιο επίπεδο

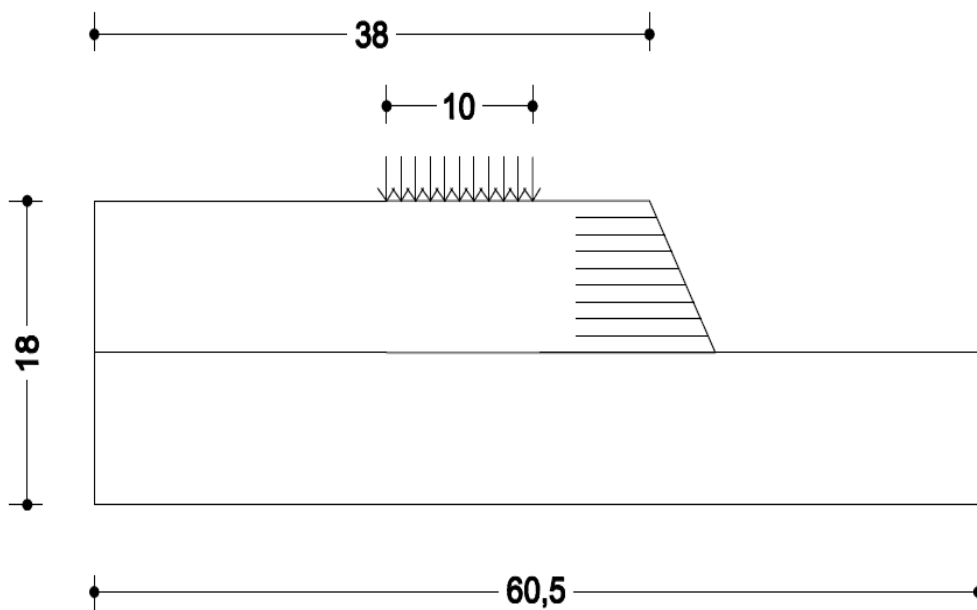
g: επιτάχυνση βαρύτητας

Το φορτίο αυτό δοκιμάζεται σε διάφορες θέσεις στην επιφάνεια του πρανούς (Σχήμα 4.6.6) και μελετάται σε ποια θέση υπάρχει πιθανότητα να παρουσιάσει φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης. Το πρανές υπέστη μεταβολές στις γεωμετρικές του διαστάσεις καθώς αυξήθηκε το πλάτος του. Αυτό έγινε για την αποφυγή άσκησης των γραμμικών φορτίων κοντά στα σύνορα του γεωμετρικού μοντέλου καθώς με αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα των επιλύσεων μπορεί να είναι λανθασμένα.

Συνολικά έγιναν 6 επιλύσεις με εισαγωγή φορτίου. Η πρώτη φόρτιση έγινε κοντά στην στέψη του πρανούς (2 μέτρα) προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του φορτίου εκεί που παρατηρείται ο μηχανισμός αστοχίας του πρανούς. Έπειτα τοποθετήθηκε φορτίο 5 μέτρα από την στέψη του πρανούς, εκεί δηλαδή που τελειώνει ο οπλισμός του γεωπλέγματος. Τέλος, οι υπόλοιπες φορτίσεις πραγματοποιήθηκαν μετατοπισμένες προς τα αριστερά η κάθε μια ανά δυο μέτρα.

Θεωρώντας την αριστερή γωνία του πρανούς ως το σημείο (0,0) θα παρουσιαστούν οι θέσεις των φορτίων όπως εισήχθησαν στις έξι επιλύσεις:

- 1^η επίλυση: (36,18) έως (26,18)
- 2^η επίλυση: (33,18) έως (20,18)
- 3^η επίλυση: (30,18) έως (20,18)
- 4^η επίλυση: (28,18) έως (18,18)
- 5^η επίλυση: (26,18) έως (16,18)
- 6^η επίλυση: (22,18) έως (12,18)



Σχήμα 4.6.6: Παρουσίαση νέου γεωμετρικού μοντέλου n= 50 με την εισαγωγή φορτίου

Το νέο αυτό μοντέλο διακριτοποιήθηκε σε πεπερασμένα στοιχεία, σύμφωνα με τα στοιχεία που περιγράφονται στον Πίνακα 4.6.3.

Πίνακας 4.6.3: Παρουσίαση γενικών χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου

Παράμετροι	Επίπεδη παραμόρφωση
Μοντέλο προσομοίωσης	Μεσαία
Πύκνωση Δικτύου	
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	342
Αριθμός κόμβων	3189
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	1,78
Αριθμός υπολογισμού σημείων τάσεων	4104

Ο Πίνακας 4.6.4 συγκεντρώνει όλα τα υπολογιστικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τις επιλύσεις. Η μόνη επίλυση που αστοχεί είναι η 1^η επίλυση, αυτή δηλαδή που η φόρτιση βρίσκεται 2 μέτρα από την στέψη του πρανούς. Επίσης, από τον πίνακα προκύπτει ότι οι φορτίσεις που βρίσκονται σχετικά μακριά από την στέψη του πρανούς (4^η, 5^η, 6^η επίλυση) δεν επηρεάζουν σημαντικά την ευστάθεια του πρανούς όσο αφορά το μέγεθος των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τις συγκεκριμένες φορτίσεις. Αντιθέτως, όσο πιο κοντά στην στέψη του πρανούς βρίσκεται η άσκηση του φορτίου, τόσο πιο μεγάλες παραμορφώσεις παρουσιάζονται. Άλλωστε συγκρίνοντας και τον Συντελεστή Ασφαλείας κάθε περίπτωσης (Διάγραμμα 4.6.2) οδηγούμαστε στο ίδιο συμπέρασμα, καθώς το πρανές υπό την δράση μόνο του εδαφικού βάρους κατέχει τον μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας ενώ όσο το φορτίο μετακινείται προς στα αριστερά προκαλεί αύξηση του συντελεστή.

Στα συγκριτικά σχήματα περιγράφονται οι συμπεριφορές των πρανών υπό τις διάφορες συνθήκες φόρτισης, καθώς και η επίδραση του εδαφικού βάρους. Αναλυτικότερα οι συγκρίσεις αυτές στα σχήματα που παρατίθενται παρακάτω.

Βάση του Σχήματος 4.6.8 στην περίπτωση που εφαρμόζεται φορτίο στο πρανές σε απόσταση 2 μέτρων από το πρανές, το πεδίο των τροπών είναι εμφανώς τροποποιημένο, σε σχέση με τις τροπές που προκύπτουν στο σώμα μόνο από την επίδραση του εδαφικού βάρους (Σχήμα 4.6.8β). Άλλωστε η μεγάλη συγκέντρωση τροπών είναι ένας λόγος που το πρανές υπό αυτές τις συνθήκες αστοχεί. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνουν χώρα και στην μετατόπιση του φορτίου κατά 5 μέτρα από την στέψη του πρανούς (Σχήμα 4.6.8γ). Το φορτίο συμμετέχει ενεργά στην παρουσία διατμητικών τροπών και κατ' επέκταση στην παρουσία παραμορφώσεων στο πρανές. Αντιθέτως, αν το φορτίο των 146,25 kN/m εφαρμοσθεί 8 και περισσότερα μέτρα από την στέψη επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου την παραμόρφωση λόγω εδαφικού βάρους και η φέρουσα ικανότητα του εδάφους παραμένει σταθερή.

Πίνακας 4.6.4: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών επιλύσεων στα επιμέρους στάδια

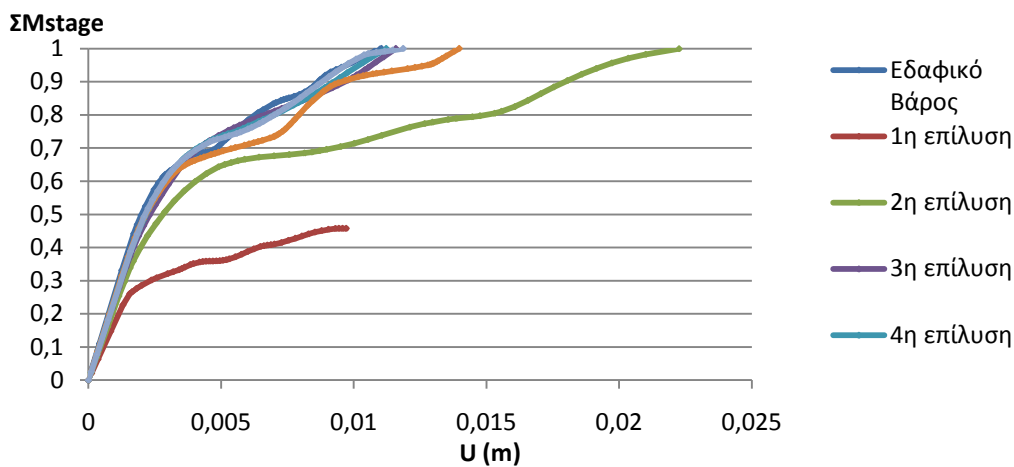
Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m^2)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	ΣM_{stage}	Συντελεστής Ασφαλείας
Επίδραση Εδαφικού βάρους	0,011	367,07	0,498	1	1,775
1 ^η επίλυση	Αστοχία	-317,24	0,451	0,457	-
2 ^η επίλυση	0,027	-428,62	1,56	1	1,274
3 ^η επίλυση	0,011	-429,85	0,487	1	1,390
4 ^η επίλυση	0,011	-429,50	0,447	1	1,501
5 ^η επίλυση	0,014	-430,06	0,428	1	1,605
6 ^η επίλυση	0,012	-429,52	0,502	1	1,584

Το φορτίο φαίνεται καθαρά ότι προκαλεί αύξηση της επιφάνειας αστοχίας στο πρανές στο Σχήμα 4.6.9. Έτσι, όσο πιο κοντά είναι η εφαρμογή του φορτίου στην στέψη του πρανούς τόσο μεγαλύτερη εκτροπή της επιφάνειας αστοχίας συμβαίνει σε σχέση με την επιφάνεια αστοχίας λόγω του εδαφικού βάρους. Άλλωστε, σύμφωνα με το Σχήμα 4.6.9α η επιφάνεια αστοχίας στο πρανές υπό την άσκηση μόνο του εδαφικού βάρους περιορίζεται στην κεκλιμένη όψη του, κυρίως λόγω μη επένδυσης της όψης με γεώπλεγμα κατά την προσομοίωση του πρανούς στο PLAXIS. Τέλος, καθώς το φορτίο απομακρύνεται σε απόσταση 10m από την στέψη (Σχήμα 4.6.9δ), η δημιουργούμενη επιφάνεια αστοχίας επηρεάζεται λιγότερο επιστρέφοντας τελικώς στην αρχική της θέση (υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου) όταν το φορτίο έχει απομακρυνθεί αρκετά από την στέψη.

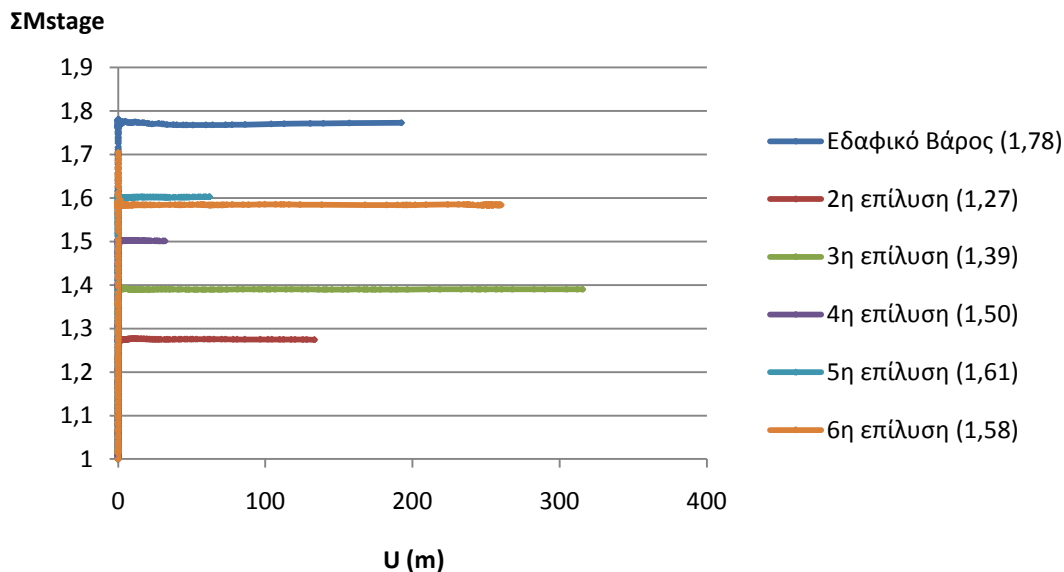
Ο επηρεασμός του συγκεκριμένου μεγέθους φορτίου σε σχέση με την θέση του στο πρανές διακρίνεται και στο Διάγραμμα 4.6.1. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα απεικονίζονται οι μετατοπίσεις που προκαλούνται στην στέψη του πρανούς για τις διάφορες επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Κατά την εφαρμογή του πρανούς κοντά στην περιοχή της στέψης, δηλαδή για τις επιλύσεις 1 και 2, τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων διαφοροποιούνται σε σχέση με την ελεύθερη κατάσταση όπου το εδαφικό βάρος είναι η μόνη δύναμη που συμμετέχει. Συγκεκριμένα, η 1^η επίλυση

αστοχεί καθώς ο πολλαπλασιαστής ΣM_{stage} - υπεύθυνος για την συνολικό υπολογισμό φόρτισης του πρανούς- κατά τον υπολογισμό δεν έφτασε την τιμή 1. Από την άλλη, η δεύτερη επίλυση για $\Sigma M_{stage} = 1$ έδωσε μετατοπίσεις στην στέψη μεγέθους περίπου 23 εκατοστών, δύο φορές μεγαλύτερες δηλαδή από τις μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν κατά την εφαρμογή μόνο του εδαφικού βάρους.

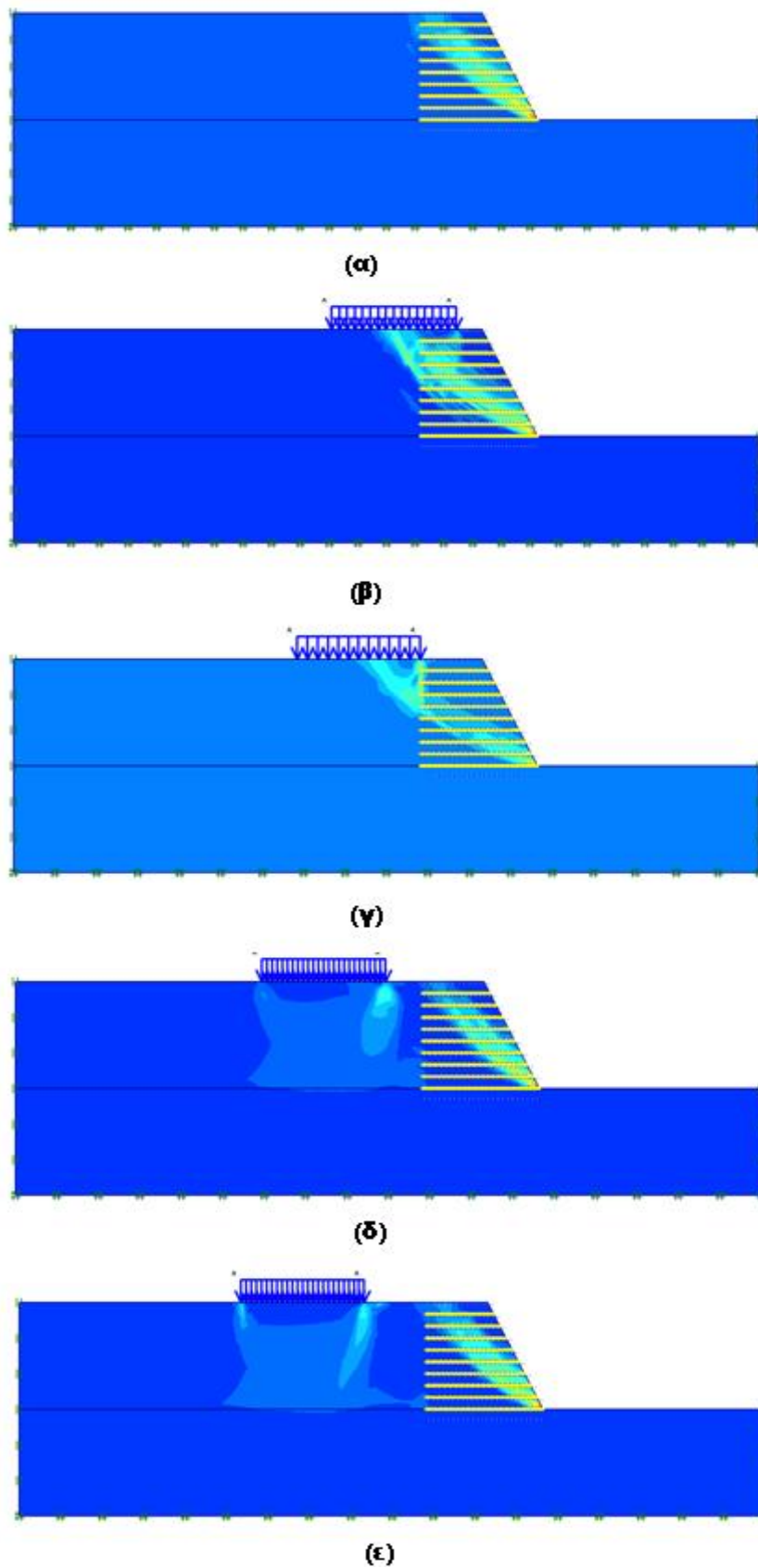
Οι υπόλοιπες επιλύσεις, όπως είναι εμφανές, δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στις συνολικές μετατοπίσεις που συναντούνται στην στέψη του πρανούς. Με αυτό το αποτέλεσμα συμπεραίνεται ότι τα φορτία επηρεάζουν κατά κύριο λόγο την εδαφική μάζα που βρίσκεται κατά και γύρω από το φορτίο, προκαλώντας κυρίως φαινόμενα καθίζησης, που δεν προκαλούν εν τέλει συνολικά προβλήματα στην ευστάθεια του πρανούς.



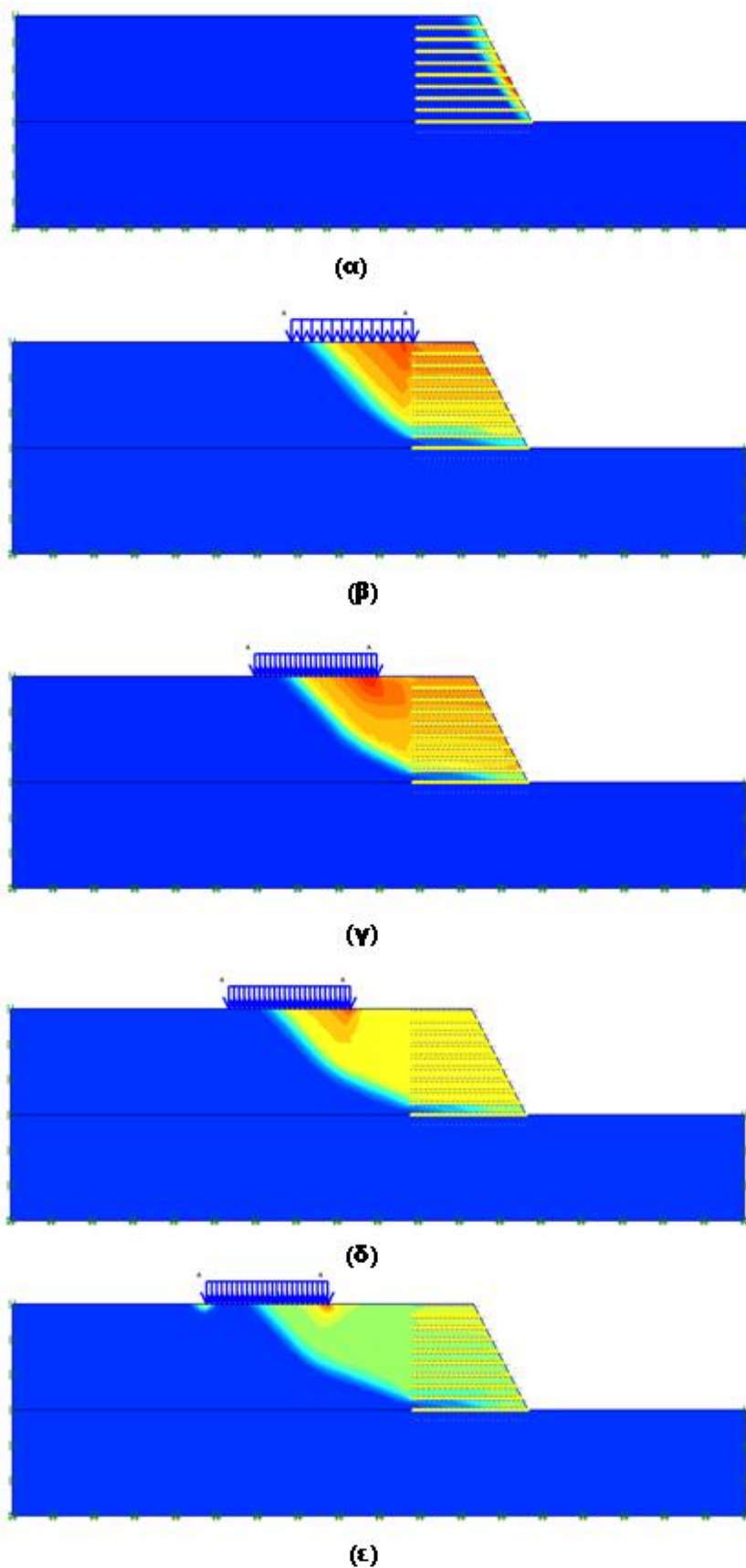
Διάγραμμα 4.6.1: Σύγκριση μετατοπίσεων στην στέψη του πρανούς στις επιμέρους επιλύσεις



Διάγραμμα 4.6.2: Σύγκριση Συντελεστών Ασφαλείας των επιμέρων επιλύσεων



Σχήμα 4.6.8: Ισοϋψείς παραγόμενες πλαστικές παραμορφώσεις στο πρανές υπό (α) την επίδραση του εδαφικού βάρους και την άσκηση φορτίου κατά (β) την 1^η επίλυση (γ) 2^η επίλυση (δ) 3^η επίλυση (ε) 4^η επίλυση



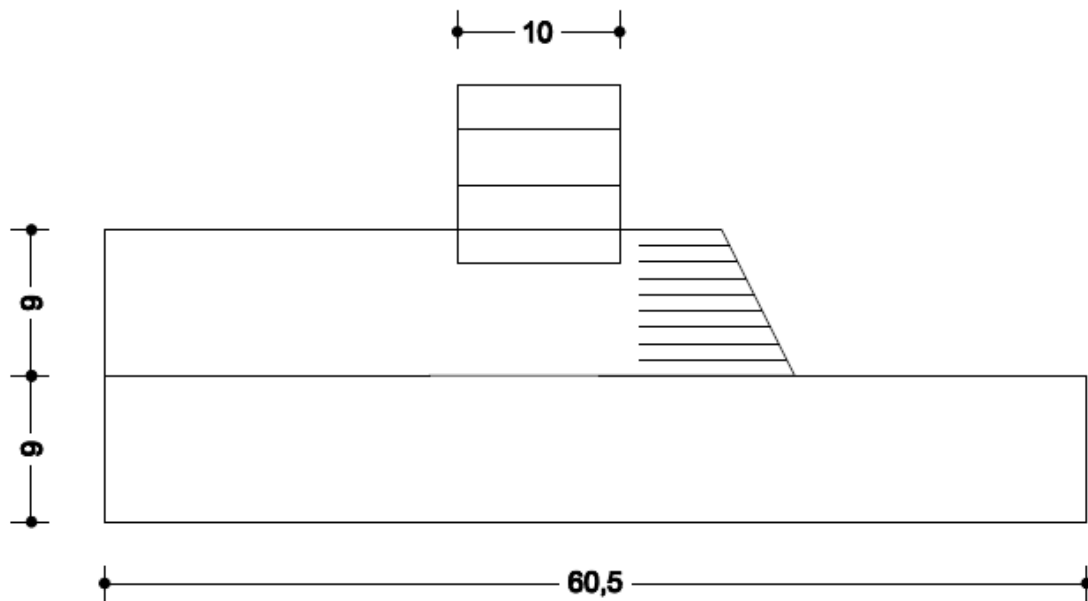
Σχήμα 4.6.9: Σύγκριση πιθανών επιφανειών αστοχίας (υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους (β) κατά την 2^η επίλυση γγ) κατά την 3^η επίλυση (δ) κατά την 4^η επίλυση (ε) κατά την 5^η επίλυση

4.6.4 Ανάλυση συμπεριφοράς κτηρίου στην ευστάθεια του πρανούς

Στην συγκεκριμένη επίλυση εξετάζεται η συμπεριφορά ενός κτηρίου στην επίδραση του πρανού. Η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στην τοποθέτηση της κατασκευής σε δύο διαφορετικά σημεία. Αρχικά, έγινε η πρώτη επίλυση με την κατασκευή να βρίσκεται δίπλα στο γεωπλέγματα, ενώ η δεύτερη να απέχει 3 μέτρα από αυτά. Στο PLAXIS όταν γίνεται αναφορά για την εισαγωγή κτηρίου στο μοντέλο, ουσιαστικά πρόκειται για τον καθορισμό του σκελετού του (τοίχοι του και πατώματα), με την εισαγωγή πλακών στο μοντέλο.

Το κτήριο αποτελείται από 3 ορόφους και ένα υπόγειο. Είναι 10 μέτρα στο πλάτος και 27 μέτρα ύψος. Το συνολικό ύψος από το επίπεδο του εδάφους είναι 3×3 μέτρα = 9 μέτρα και το υπόγειο είναι 2 μέτρα σε βάθος. Το συνολικό φορτίο υπολογίστηκε στα $3,75 \text{ kN/m}^2$ και λαμβάνεται υπόψη ως βάρος των ορόφων και των τοίχων.

Το τελικό γεωμετρικό μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.10.



Σχήμα 4.6.10: Παρουσίαση νέου γεωμετρικού μοντέλου $n=50$ με την εισαγωγή κτηρίου

Οι εδαφικές παράμετροι και οι παράμετροι των γεωπλεγμάτων παραμένουν σταθεροί. Επιπλέον, στο νέο μοντέλο, είναι απαραίτητο να εισαχθούν οι παράμετροι των πλακών, έτσι ώστε να οριστούν οι τοίχοι και τα πατώματα.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι παράμετροι EA και EI , πρέπει να είναι γνωστό ένα αρχικό μέτρο ελαστικότητας και εν συνεχεία από τον υπολογισμό των A και I , να υπολογιστούν οι αντίστοιχες παράμετροι EA και EI . Συνεπώς, μια τιμή ελαστικότητας $E=30 \text{ GPa}$ θεωρήθηκε ικανοποιητική για την παρούσα μελέτη. Οι παράμετροι A και I υπολογίστηκαν με την βοήθεια των Εξισώσεων 4.4 και 4.5.

$$A = b * h \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

όπου το b αφορά τη διάσταση εκτός επιπέδου που θεωρείται για λόγους ευκολίας μονάδα, μιας και το πρόγραμμα δουλεύει σε επίπεδη παραμόρφωση και το h τη διάσταση εντός επιπέδου-το πάχος των πλακών. Με αυτή την λογική επήλθαν οι παραπάνω λύσεις.

Μια άλλη παράμετρος που υπολογίστηκε ήταν το βάρος της πλάκας. Το PLAXIS εισάγει το βάρος ως δύναμη ανά μονάδα εμβαδού. Για σχετικά συμπαγείς κατασκευές το βάρος υπολογίζεται από το ειδικό βάρος του υλικού της πλάκας πολλαπλασιαζόμενο με το πάχος της. Θεωρώντας ως ειδικό βάρος υλικού το σκυροδέματος, που ως γνωστό το βάρος του είναι 25 kN/m^3 , υπολογίστηκε το βάρος το πλακών ($25 \text{ kN/m}^3 * 0,15 \text{ m} = 3,75 \text{ kN/m/m}$).

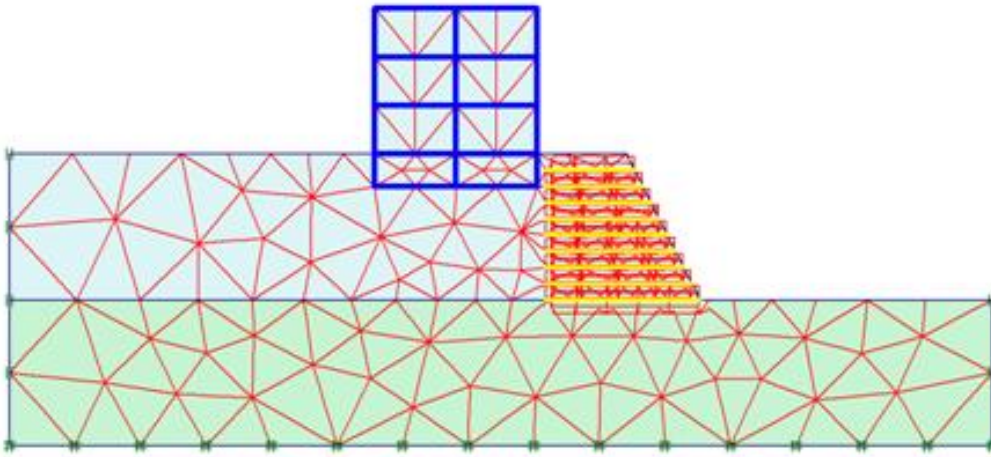
Πίνακας 4.6.5: Παρουσίαση υπολογισμένων παραμέτρων πλακών

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Τοίχοι/πατώματα	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	-
Αξονική Δυστένεια	<i>EA</i>	$4,5 * 10^6$	kN/m
Καμπτική Ακαμψία	<i>EI</i>	8437,5	kNm ² /m
Πάχος πλάκας	<i>d</i>	0,15	m
Βάρος	<i>w</i>	3,75	kN/m/m
Λόγος Poisson	<i>v</i>	0,15	-

Με την εισαγωγή των παραμέτρων όλων των υλικών που συναντούνται στο πρανές, γίνεται η κανναβοποίηση του μοντέλου, σύμφωνα με το Σχήμα 4.6.11 ενώ οι παράμετροι του πεπερασμένου μοντέλου συνοψίζονται στον Πίνακα 4.6.7.

Πίνακας 4.6.7: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου $n=50$

Παράμετροι	
Μοντέλο προσομοίωσης	Επίπεδη παραμόρφωση
Πύκνωση Δικτύου	Μεσαία
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	258
Αριθμός κόμβων	2441
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	2,52
Αριθμός υπολογισμού σημείων τάσεων	3096



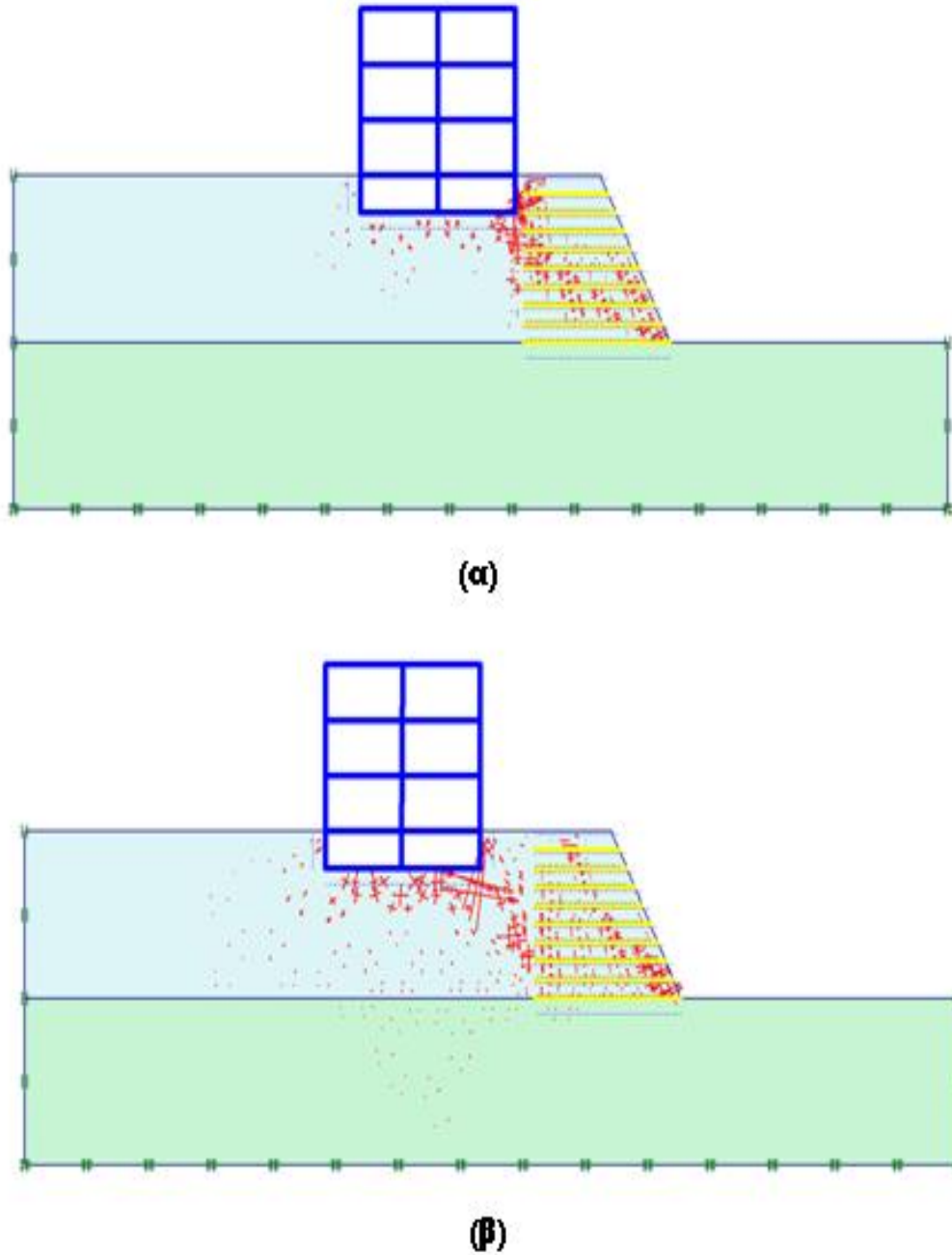
Σχήμα 4.6.11 : Διαχωρισμός του πρανού σε πεπερασμένα στοιχεία

Η διαδικασία της συγκεκριμένης επίλυσης διαφοροποιήθηκε σε σχέση με τις υπόλοιπες επιλύσεις. Για να υπολογιστεί η επίλυση χωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα. Στο πρώτο τμήμα ου υπολογισμού λήφθηκε υπόψη η επίδραση του εδαφικού πρανού στο πρανές, ενώ κατά το δεύτερο αφαιρέθηκε το εδαφικό στρώμα που τώρα καταλαμβάνει το υπόγειο του κτηρίου και τοποθετηθήκαν οι 3 όροφοι άνω του εδάφους. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η σύγκριση των ενδεχομένων αλλαγών που συνέβησαν στο πρανές κατά την εισαγωγή του κτηρίου.

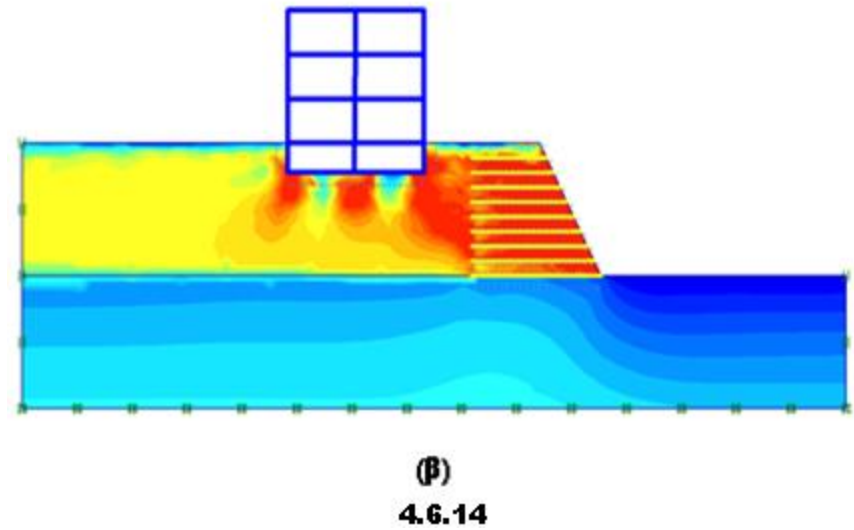
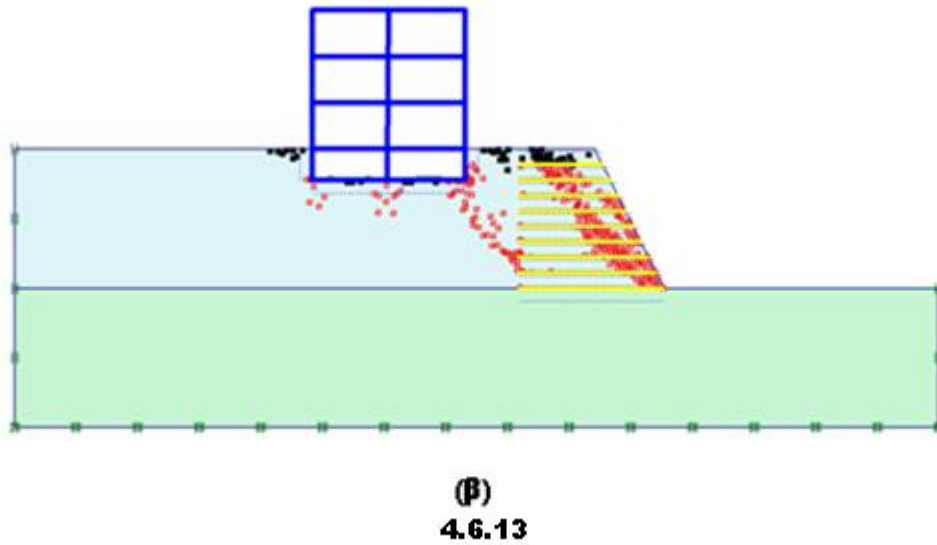
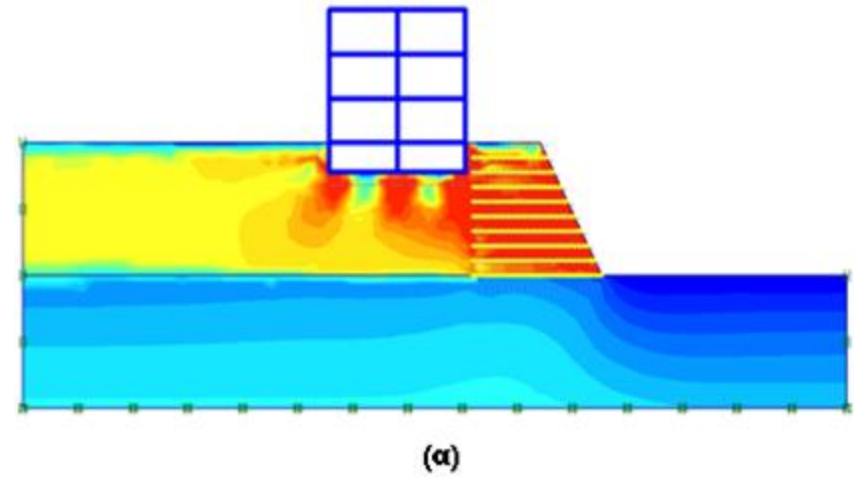
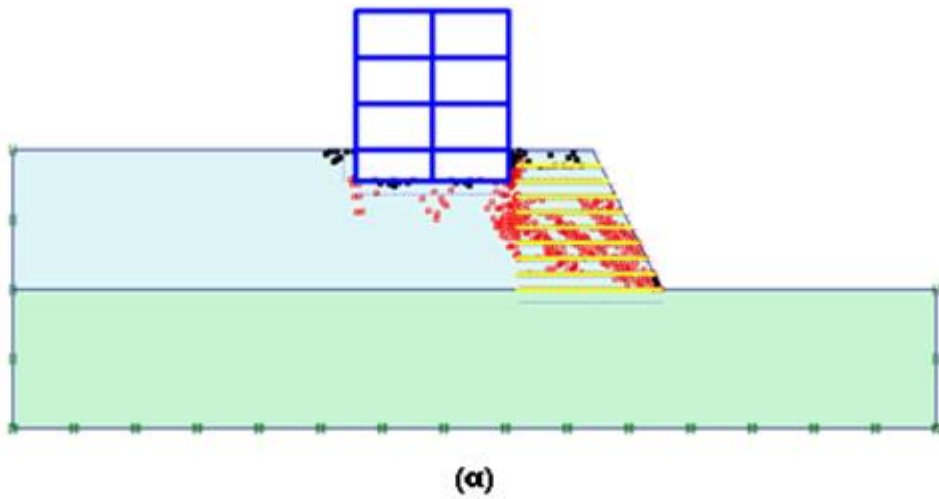
Αυτό που προκύπτει ως γενικό συμπέρασμα είναι ότι η εισαγωγή ενός κτηρίου στο συγκεκριμένο πρανές δεν θα επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην ευστάθεια του ή στο μέγεθος των μετατοπίσεων που θα παρατηρηθούν. Το κτήριο εμφανίζει τοπικές παραμορφώσεις που εν τέλει δεν επηρεάζουν τον πρανές ως σύνολο. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.6.12 και στις δύο περιπτώσεις μεγαλύτερες τροπές εμφανίζονται στο δεξιό άκρο του κτηρίου, που έχει ως αποτέλεσμα να οδηγεί και σε παραμορφώσεις στην περιοχή των γεωπλεγμάτων. Ωστόσο, το μέγεθος αυτών των παραμορφώσεων είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τις παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα λόγω εδαφικού βάρους. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση του κτηρίου ακριβώς δίπλα στα γεωπλέγματα, δηλαδή η πρώτη επίλυση, προκαλεί μέγιστες τροπές 0,179% και φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο την επιφάνεια των παραμορφώσεων. Αντιθέτως, η δεύτερη επίλυση αποφέρει μέγιστες τροπές 0,049% , την στιγμή που βάση των επιλύσεων στην παράγραφο 4.6.3 οι μέγιστες τροπές στο σώμα του πρανού υπό την επίδραση του εδαφικού βάρους είναι 0,498%.

Η συγκέντρωση τροπών σε αυτά τα σημεία των επιλύσεων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων πλαστικότητας (Σχήμα 4.6.13). Και στις δύο περιπτώσεις φαινόμενα πλαστικότητας παρουσιάζονται στις άκρες των πλακών του υπογείου, ενώ η δεξιά άκρη που είναι πιο κοντά στην επιφάνεια, που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις, παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση πλαστικών σημείων. Μάλιστα, το κτήριο όσο πιο κοντά βρίσκεται στην περιοχή των γεωπλεγμάτων τόσο

περισσότερο συμμετέχει και αυτό στην παρουσία παραμορφώσεων. Γίνεται επομένως εμφανής η παρέμβαση της δυσκαμψίας του κτηρίου. Επιβεβαίωση του συμπεράσματος αυτού προκύπτει και από την κατανομή των σχετικών διατμητικών τάσεων (Σχήμα 4.6.14).



Σχήμα 4.6.12: Παρουσίαση ολικών τροπών υπό την επίδραση μόνο του κτηρίου στο πρανές για την (α) πρώτη επίλυση (β) δεύτερη επίλυση

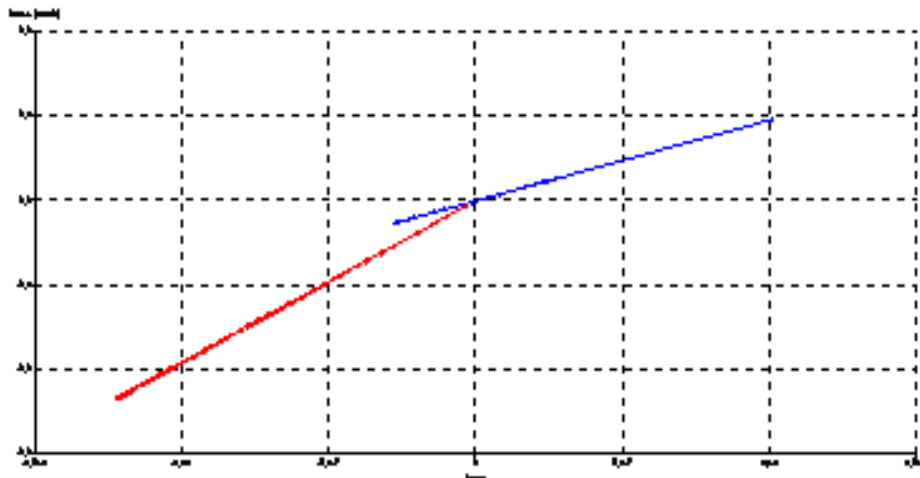


Σχήμα 4.6.13: Παρουσίαση πλαστικών και εφελκυστικών σημείων υπό την δράση του κτηρίου κατά την (α)πρώτη επίλυση (β) δεύτερη επίλυση

Σχήμα 4.6.14: Κατανομή σχετικών διατμητικών τάσεων στο πρανές υπό την δράση του κτηρίου κατά την (α) πρώτη επίλυση (β) δεύτερη επίλυση

4.6.5 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα

- Σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια ενός εδαφικού στρώματος διαδραματίζει το μέγεθος της συνοχής του αλλά και η γωνία τριβής του υλικού. Είναι γνωστό άλλωστε ότι η διατμητική αντοχή ενός πρανούς, βάση της εξίσωσης του Coulomb, ισούται με το άθροισμα της συνοχής και του γινομένου της κατακόρυφης φόρτισης με την εφαπτομένη γωνία τριβής. Μικρή αλλαγή των εδαφικών παραμέτρων των οπλισμένων πρανών της επίλυσης 4 (μεταβολή της συνοχής κατά 5 kN/m^2 και κατά 2° την γωνία τριβής) ήταν ικανά να καταστήσουν τα νέα πρανά σταθερά.

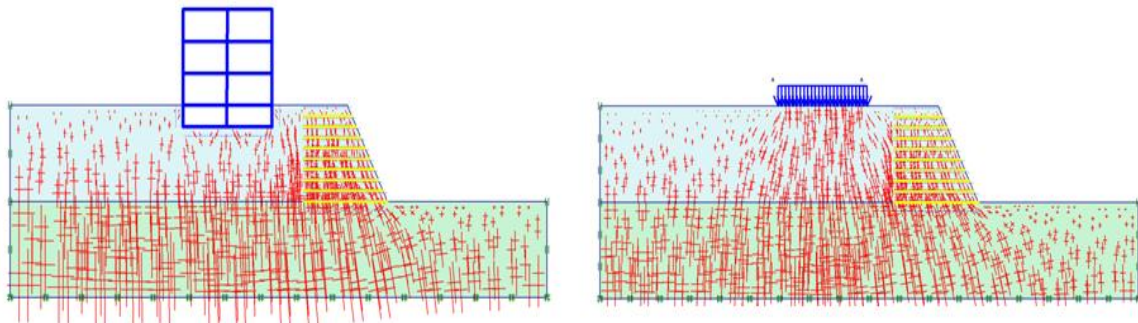


Διάγραμμα 4.6.3: Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων στο πρανές με τις αρχικές παραμέτρους (μπλε) και νέες παραμέτρους (κόκκινο)

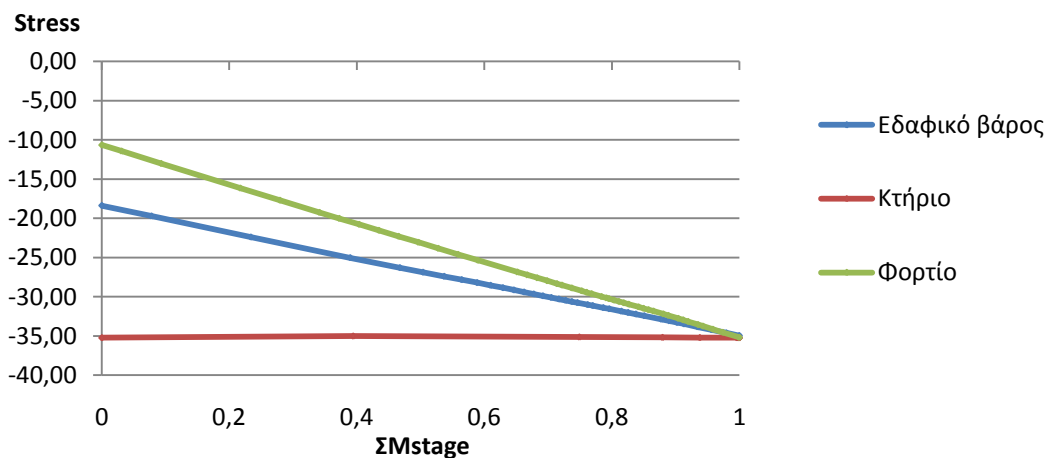
- Η χρήση γεωπλεγμάτων για την όπλιση των πρανών αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα πρανά που υπολογίστηκαν ώστε να αστοχούν άοπλα, οπλισμένα δεν εμφάνισαν φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης. Επίσης, με την αξονικής δυστένειας των γεωπλεγμάτων προκύπτει αυξημένη σταθερότητα στο πρανές. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η ευστάθεια του πρανούς $n=50$ υπό την επίδραση του βάρους για δύο διαφορετικές τιμές αξονικής δυστένειας EA (παράγραφοι 4.6.2 και 4.6.3), Για γεώπλεμα με $EA=1185 \text{ kN/m}$, ο συντελεστής υπολογίστηκε 1,182. Αντίθετα, όταν η EA τέθηκε ίση με 2625 kN/m , ο συντελεστής ανήλθε στο 1,775, αύξηση δηλαδή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά 33 %. Επομένως, βάση των συμπερασμάτων αυτών τα γεωπλέγματα όντας οικονομικότερα, ευκολότερα στην τοποθέτηση και φιλικότερα προς το περιβάλλον μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα τους για την όπλιση ακόμα και απότομων πρανών, όπως τα πρανά της μελέτης με κλίση 2:1. Η συμπεριφορά των γεωπλεγμάτων κατά τις κύριες επιλύσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.16. Σημαντική παρατήρηση είναι η κατανομή των εφελκυστικών δυνάμεων όταν το πρανές αστοχεί. Η κατανομή

επικεντρώνεται σε μια περιοχή που αντιστοιχεί με την επιφάνεια αστοχίας του πρανούς.

- Η άσκηση φόρτισης στην επιφάνεια ενός πρανούς οδηγεί σε μείωση του Συντελεστή Ασφαλείας του, μειώνοντας κατ' επέκταση την ευστάθεια του πρανούς. Επίσης, όσο πιο κοντά ασκείται το φορτίο στην στέγη του πρανούς τόσο πιο ασταθές είναι το πρανές και μπορεί να παρουσιάσει φαινόμενα μόνιμης μετατόπισης. Αντιθέτως, όσο απομακρύνεται το φορτίο παύει να συμμετέχει ως φορτίο αστοχίας και τα αποτελέσματα της φόρτισης εμφανίζονται κυρίως σε τοπικό επίπεδο.
- Κατά την εισαγωγή φορτίου στην επιφάνεια του πρανούς οι τάσεις εφαρμόζονται σε όλο το μήκος της επιφάνειας φόρτισης. Αντιθέτως, όταν αντικαθίσταται το φορτία από πλάκα (π.χ. κατασκευή κτηρίου) οι τάσεις συγκεντρώνονται στα άκρα των πλακών, φαινόμενο που οφείλεται στην καμπτική ακαμψία που παρουσιάζουν οι πλάκες. Ως αποτέλεσμα το μέγεθος των τάσεων υπό την δράση πλακών είναι σταθερό σε όλο το μήκος, αντίθετα υπό την δράση φορτίου οι τάσεις αυξομειώνονται γραμμικά (Διάγραμμα 4.6.1).

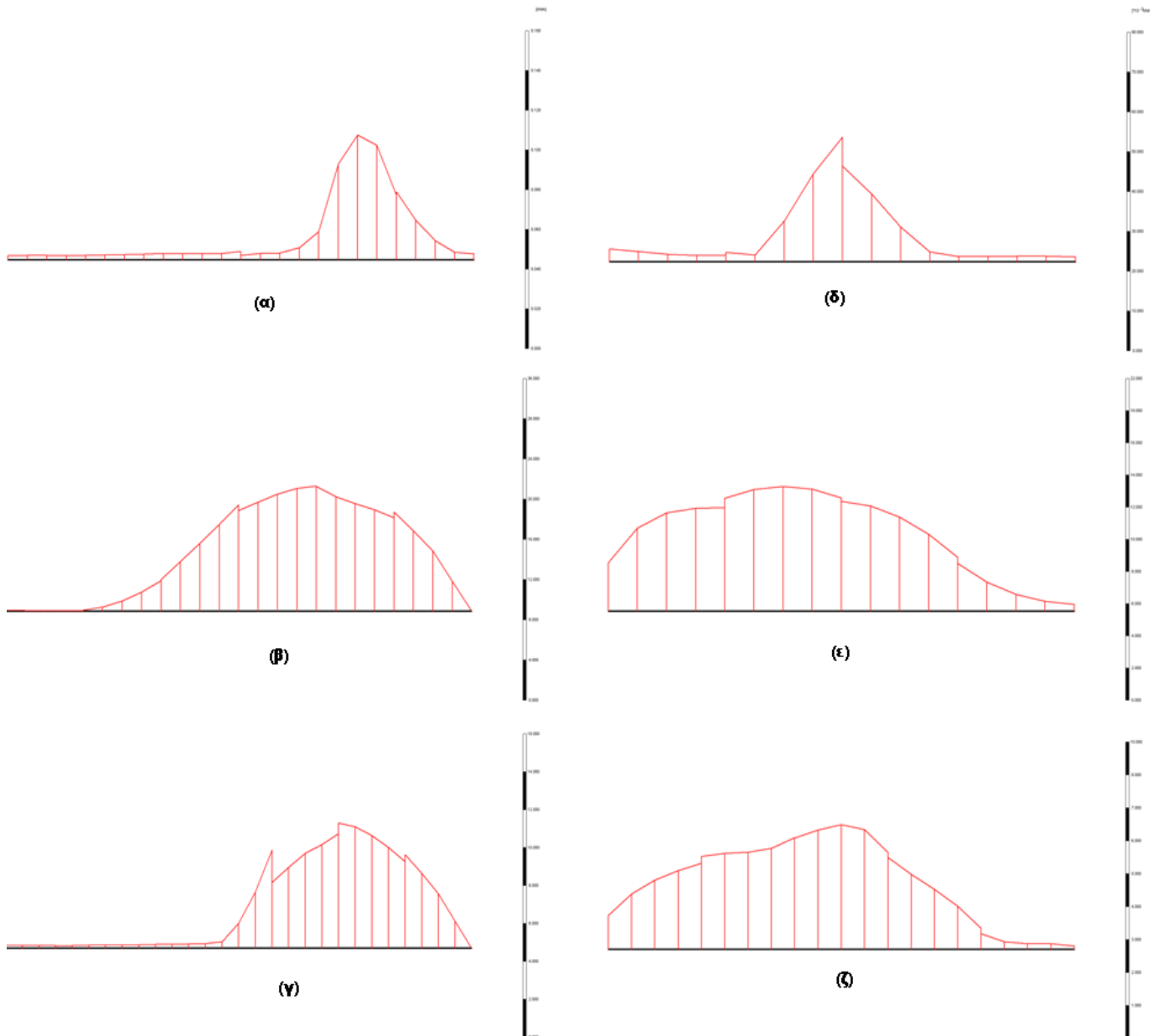


Σχήμα 4.6.15: Παρουσίαση κατανομής ενεργών τάσεων υπό την επίδραση πλακών (αριστερά) και υπό την επίδραση φορτίου (δεξιά)



Διάγραμμα 4.6.1: Σύγκριση των ενεργών τάσεων υπό την επίδραση διαφόρων συνθηκών φόρτισης σε σχέση με το μέγεθος ενεργοποίησης του πρανούς

- Λόγω της καμπτικής ακαμψίας των πλακών επέρχεται και μείωση των τροπών στο σώμα. Σύγκριση των παραμορφώσεων υπό την επίδραση φορτίου και υπό την επίδραση του κτηρίου αποδεικνύει το εν λόγω συμπέρασμα.



Σχήμα 4.6.16: Σύγκριση εφελκυστικών δυνάμεων σε ενδεικτικά γεωπλέγματα υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων. Παρουσίαση της κατανομής των τάσεων στην 4^η στρώση του πρανούς $n=50$ (α) όταν αστοχεί (β) με νέες παραμέτρους και $EA=1182$ kN/m (γ) με νέες παραμέτρους κα $EA=2625$ kN/m. Κατανομή στη 8^η στρώση του πρανούς $n=50$ (δ) όταν αστοχεί (ε) με νέες παραμέτρους κα $EA=1182$ kN/m (ζ) με νέες παραμέτρους κα $EA=2625$ kN/m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΑΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται όλες οι δυναμικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας

5.1 Γενικά

Για την επίλυση των πρανών στην παρούσα μελέτη με την δυναμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, που βασίζεται στη χρήση του εμπορικά διαθέσιμου προγράμματος PLAXIS v.9 και ειδικότερα του δυναμικού μέρους του (Dynamic Module). Το δυναμικό μέρος του παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης της συμπεριφοράς του εδάφους κάτω από τη δράση των δυναμικών φορτίσεων και της επίδρασης των εδαφικών ταλαντώσεων σε γειτονικές κατασκευές. Οι αιτίες δυναμικής φόρτισης είναι αρκετές αλλά εδώ θα μελετηθεί η επίδραση των σεισμικών φορτίσεων στο πρανές. Συγκεκριμένα, δυναμική ανάλυση θα γίνει στην Επίλυση 5 (Ενότητα 4.6), όπου και θα επιλυθεί με την εισαγωγή σεισμικής διέγερσης.

Το πρανές μελέτης υποβλήθηκε σε σεισμό με την εισαγωγή ενός επιταχυνσιογραφήματος πραγματικού σεισμού. Πρόκειται για ένα σεισμό που συνέβη στον ορεινό όγκο της Νότια Καλιφόρνια στις 28/2/1990 μεγέθους 5,4 και σε βάθος 5 km. Παρουσίασε μέγιστη επιτάχυνση $-239,90 \text{ cm/s}^2$ και συχνότητα 200 Hz, για αυτό άλλωστε τον λόγο έγινε αισθητός σε μια μεγάλη περιοχή. Ο συγκεκριμένος σεισμός προκάλεσε αρκετές ζημιές, καθώς ενεργοποίησε κατολισθήσεις με αποτέλεσμα να κλείσουν δρόμοι στην περιοχή Mount Baldy και να παρατηρηθούν ζημιές και στο φράγμα του Σαν Αντόνιο. 38 άνθρωποι τραυματίστηκαν εξαιτίας του σεισμού, κυρίως σε περιοχές που ήταν κοντά στο επίκεντρο.

Ο συγκεκριμένος σεισμός και ως μέγεθος και ως επιτάχυνση βρίσκεται στα πλαίσια των ελληνικών δεδομένων και για αυτό τον λόγο δεν εξήχθη νέο επιταχυνσιογράφημα ενός ελληνικού σεισμού και δόθηκε έμφαση στη ανάλυση του συγκεκριμένου.

Το πρανές που αναλύθηκε είναι αυτό της επίλυσης 5, με αύξηση όμως των ορίων προς αποφυγή ανακλάσεων των σεισμικών κυμάτων. Παρακάτω θα αναλυθούν οι περιορισμοί και οι δυναμικοί παράμετροι που έπρεπε να ληφθούν υπόψη για την δημιουργία του δυναμικού μοντέλου καθώς και οι επιμέρους συγκριτικές επιλύσεις. Ειδικότερα η επιλογή της θέσης και του είδους των συνοριακών συνθηκών θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική στην κατασκευή προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Είναι γνωστό, άλλωστε, ότι η κύρια δυσκολία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων έγκειται στην εφαρμογή των κατάλληλων συνθηκών στα όρια του δικτύου έτσι ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα ανεπιθύμητης ανάκλασης των κυμάτων, τα οποία είναι εντονότερα κατά τις δυναμικές αναλύσεις.

5.2 Σκοπός Επιλύσεων

Οι δυναμικές επιλύσεις που θα πραγματοποιηθούν στο εν λόγω κεφάλαιο αφορούν την μελέτη συμπεριφοράς του πρανούς και τον έλεγχο ευστάθειας του υπό την επίδραση διαφόρων στατικών φορτίσεων κατά την διάρκεια σεισμικής διέγερσης. Επιλέχθηκαν δύο διάρκειες σεισμικής διέγερσης. Η πρώτη είναι 10 δευτερόλεπτα ενώ η δεύτερη 23,5 δευτερόλεπτα. Σκοπός είναι οι διάφορες επιλύσεις να συγκριθούν μεταξύ τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων, ενώ θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της δυναμικής επίλυσης με αυτά της ψευδοστατικής, προκειμένου να ελεγχθεί αν τα αποτελέσματα τους συγκλίνουν.

Οι δυναμικές επιλύσεις αναλύθηκαν σε σεισμική διάρκεια 10s αλλά και 23,35s, που είναι άλλωστε ο χρόνος εφαρμογής της σεισμικής διέγερσης. Αναλυτικά, οι επιλύσεις που θα πραγματοποιηθούν είναι οι εξής:

- Επίδραση εδαφικού βάρους
- Εισαγωγή φορτίου $146,25 \text{ kN/m}^2$
- Δράση φορτίου $146,25 \text{ kN/m}^2$ πάνω σε αβαρή πλάκα πάχους 1 μέτρου
- Δράση φορτίου $146,25 \text{ kN/m}^2$ πάνω σε αβαρή πλάκα πάχους 2 μέτρων
- Εισαγωγή κτηρίου

Να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι φορτίσεις είτε πρόκειται για φορτίο με ή χωρίς πλάκα είτε για κτήριο τοποθετήθηκαν στο μοντέλο του πρανούς στην Δυναμική ανάλυση 8 μέτρα από την στέψη του πρανούς.

5.3 Δημιουργία Γεωμετρικού Μοντέλου

5.3.1 Επιλογή διαστάσεων μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε το γεωμετρικό μοντέλο είναι όμοιο της Στατικής Επίλυσης 5, μόνο που πλέον τα όρια έχουν αυξηθεί κατά 20 μέτρα αριστερά και δεξιά. Άλλωστε κατά την δυναμική ανάλυση η περιοχή μελέτης θα πρέπει να βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος των αναλύσεων (περιοχή γεωπλεγμάτων και φόρτισης). Το PLAXIS προς αποφυγή τέτοιων καταστάσεων διαθέτει την επιλογή των απορροφητικών ορίων, αριστερά και δεξιά του πρανούς. Τα απορροφητικά όρια

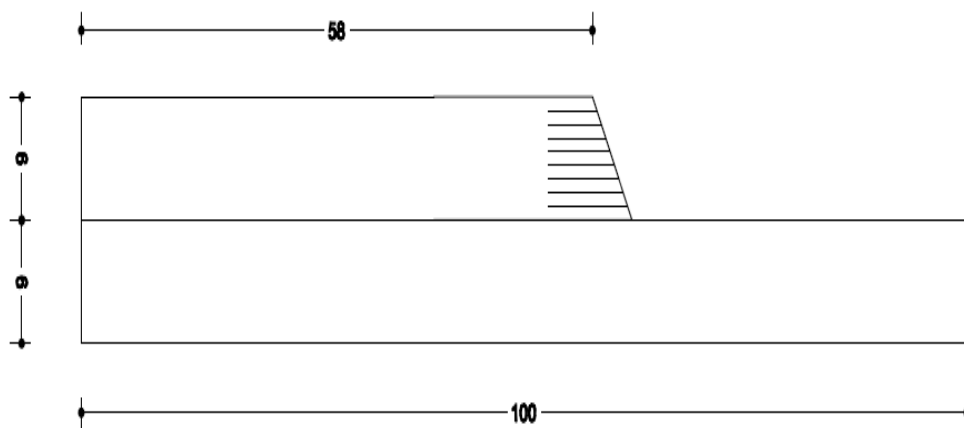
συμβάλλουν τόσο στην απορρόφηση των κυμάτων που προσπίπτουν στο συγκεκριμένο όριο όσο και στην οποιαδήποτε αύξηση τάσης παρουσιαστεί. Τα κύματα αυτά, στην περίπτωση που το όριο δεν ήταν απορροφητικό, θα υφίστανται ανάκλαση και θα παρέμεναν στο εσωτερικό του προσομοιώματος προκαλώντας διατάραξη του φαινομένου. Επίσης, η ύπαρξη του απορροφητικού ορίου στο αριστερό όριο διασφαλίζει την παραδοχή της άπειρης έκτασης του εδάφους. Σημειώνεται επιπλέον ότι η χρήση των αποσβεστήρων ταλάντωσης κατά μήκος των ορίων του δικτύου του PLAXIS βασίζεται στη μέθοδο των Lysmer και Kuhlmeyer (PLAXIS v.9 manual).

Επομένως, σχετικά με το μέγεθος του πρανούς μελέτης ύστερα από αρκετές και με την βοήθεια της εντολής animation των τάσεων και των μετατοπίσεων διαπιστώθηκε ότι το αυξημένο μοντέλο κατά 20 μέτρα από κάθε πλευρά δεν επηρεάζει τις μετακινήσεις στο κεκλιμένο μέρος του πρανούς, άρα το συνολικό μήκος του μοντέλου θα αποφασίστηκε να είναι 100 μέτρα. Επίσης, μελέτη έγινε και για το βάθος του σεισμού. Αρχικά δοκιμάστηκε η εισαγωγή του σεισμού ανάμεσα στα δυο εδαφικά υλικά, ωστόσο οι μετακινήσεις που εμφανίστηκαν δεν ήταν οι αναμενόμενες. Τελικά επιλέχθηκε η εισαγωγή του σεισμού στην βάση του πρανούς, που θα δώσει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

5.3.2 Καθορισμός γεωμετρικού μοντέλου

Όταν γίνεται αναφορά για τον σχεδιασμό του γεωμετρικού μοντέλου σε αυτό περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός του, η εισαγωγή των παραμέτρων για κάθε εδαφικό υλικό ή κατασκευή που συναντάται στο πρανές και τέλος η διακριτοποίησή του σε πεπερασμένα στοιχεία προκειμένου να ξεκινήσει η αριθμητική επίλυση.

Το τελικό μοντέλο μελέτης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.1



Σχήμα 5.3.1: Παρουσίαση Γεωμετρικού μοντέλου για την δυναμική επίλυση

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση ήταν όμοια με αυτά της επίλυσης 5. Ωστόσο, επειδή εξαιτίας της επίπεδης παραμόρφωσης, στο πρόγραμμα δεν γίνεται αυτόματος έλεγχος της απόσβεσης και ορίζεται μέσω των συντελεστών

Rayleigh. Από την βιβλιογραφία θεωρήθηκε ότι μια τιμή απόσβεσης 2% για τους δυο συντελεστές α και β είναι ιδανική για την εφαρμογή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Επίσης, σύμφωνα με τους δύο παρακάτω τύπους υπολογίζονται οι ταχύτητες των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων σε κάθε εδαφικό υλικό.

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{ref}}{\rho}} \quad , \quad V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$$

Αναλυτικά οι εδαφικές παράμετροι και οι παράμετροι των κατασκευαστικών υλικών που θα συναντηθούν στις επιλύσεις παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 5.3.1: Παρουσίαση των παραμέτρων του γεωπλέγματος

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	1	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	Elastic	-
Αξονική δυστένεια (ελαστική αντοχή)	<i>EA</i>	2625	kN/m

Πίνακας 5.3.2: Παρουσίαση υπολογισμένων παραμέτρων κτηρίου

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Τοίχοι/πατώματα	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	-
Αξονική Δυστένεια	<i>EA</i>	$4,5 \cdot 10^6$	kN/m
Καμπτική Ακαμψία	<i>EI</i>	8437,5	kNm ² /m
Πάχος πλάκας	<i>d</i>	0,15	m
Βάρος	<i>w</i>	3,75	kN/m/m
Λόγος Poisson	<i>v</i>	0,15	-
Συντελεστές απόσβεσης Rayleigh	<i>α, β</i>	0,02	-

Πίνακας 5.3.3: Παρουσίαση υπολογισμένων παραμέτρων πλάκας πάχους 1 μέτρο



Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Πλάκα	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	-
Αξονική Δυστένεια	<i>EA</i>	$3 \cdot 10^7$	kN/m
Καμπτική Ακαμψία	<i>EI</i>	$2,5 \cdot 10^6$	kNm ² /m
Πάχος πλάκας	<i>d</i>	1	m
Βάρος	<i>w</i>	0	kN/m/m
Λόγος Poisson	<i>v</i>	0,25	-
Συντελεστές απόσβεσης Rayleigh	<i>α, β</i>	0,02	-

Πίνακας 5.3.4: Παρουσίαση υπολογισμένων παραμέτρων πλάκας πάχους 2 μέτρα

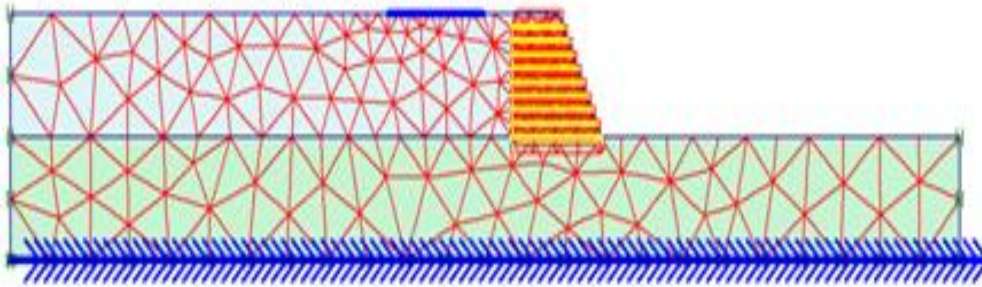
Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	Πλάκα	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	-
Αξονική Δυστένεια	<i>EA</i>	$6 \cdot 10^7$	kN/m
Καμπτική Ακαμψία	<i>EI</i>	$2 \cdot 10^7$	kNm ² /m
Πάχος πλάκας	<i>d</i>	1	m
Βάρος	<i>w</i>	0	kN/m/m
Λόγος Poisson	<i>v</i>	0,25	-
Συντελεστές απόσβεσης Rayleigh	<i>α, β</i>	0,02	-

Το βάρος των πλακών θεωρήθηκε μηδενικό γιατί σε αυτό ασκείται το φορτίο μεγέθους 146,25 kN/m². Σκοπός από αυτή την παραδοχή είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της καμπτικής ακαμψίας στο πρανές και τις τυχόν διαφοροποιήσεις που θα προκύψουν σε σχέση με την απλή άσκηση του φορτίου στο πρανές αλλά και οι διαφορετικές συμπεριφορές ανάμεσα στις δύο πλάκες λόγω διαφορετικού πάχους.

Πίνακας 5.3.5: Παρουσίαση εδαφικών παραμέτρων πρανούς

Παράμετροι	Ονομασία Plaxis	1 	2 	Μονάδες
Μοντέλο Υλικού	<i>Model</i>	MC	MC	-
Τύπος υδραυλικής συμπεριφοράς	<i>Type</i>	Drained	Drained	-
Ειδικός Βάρος πάνω από Φρ. Επίπεδο	<i>γ_{unsat}</i>	16,25	25	kN/m ³
Ειδικός Βάρος κάτω από Φρ. Επίπεδο	<i>γ_{sat}</i>	17,50	28	kN/m ³
Οριζόντια διαπερατότητα	<i>k_x</i>	16,930	0	m/day
Κάθετη διαπερατότητα	<i>k_y</i>	50,790	0	m/day
Μέτρο ελαστικότητας Young	<i>E_{ref}</i>	250000	500000	kN/m ²
Λόγος Poisson	<i>v</i>	0.30	0.30	-
Συνοχή	<i>c_{ref}</i>	5	200	kN/m ²
Γωνία τριβής	<i>φ</i>	35	40	°
Γωνία διασταλτικότητας	<i>ψ</i>	5	0	°
Συντελεστής διεπιφάνειας	<i>R_{inter}</i>	0.7	Rigid	-
Συντελεστής απόσβεσης Rayleigh	<i>α</i>	0.02	0.02	-
Συντελεστής απόσβεσης Rayleigh	<i>β</i>	0.02	0.02	-
Ταχύτητα διαμήκους κύματος	<i>V_s</i>	240.8	274.6	m/s
Ταχύτητα εγκάρσιου κύματος	<i>V_p</i>	450.5	513.7	m/s

Με τον καθορισμό των απορροφητικών ορίων και των εδαφικών παραμέτρων ολοκληρώνεται ο προσδιορισμός του γεωμετρικού μοντέλου. Σειρά έχει η διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία. Για το συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε επίπεδη παραμόρφωση και η μεσαία τριγωνοποίηση. Η μεσαία επιλέχθηκε καθώς θεωρείται ικανή για ακριβή αποτελέσματα δεδομένου ότι η δυναμική επίλυση είναι πολύ πιο χρονοβόρα σε σχέση με την στατική.



Σχήμα 5.3.2: Διακριτοποίηση του πρανού σε πεπερασμένα στοιχεία

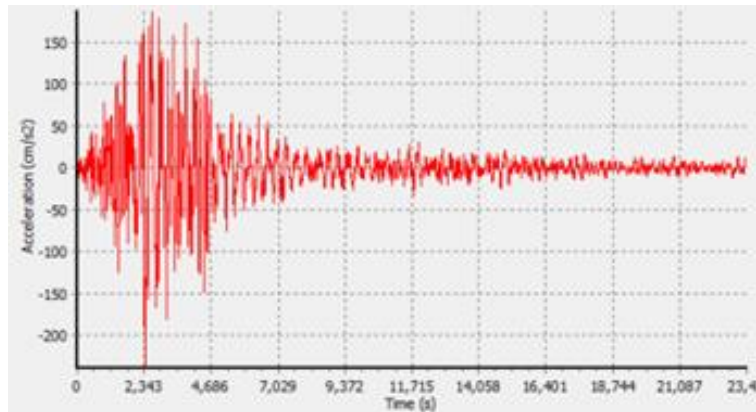
Πίνακας 5.3.6: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πεπερασμένου μοντέλου

Παράμετροι	
Μοντέλο προσομοίωσης	Επίπεδη παραμόρφωση
Πύκνωση Δικτύου	Μεσαία
Αριθμός κόμβων ανά στοιχείο	15
Συνολικός αριθμό στοιχείων στο μοντέλο	312
Αριθμός κόμβων	2913
Μέσο μέγεθος στοιχείου (m)	2,41
Αριθμός υπολογισμένων σημείων τάσεων	3744

5.3.3 Καθορισμός σταδίων και εισαγωγή σεισμού

Για την δυναμική επίλυση χρειάστηκαν 2 στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται ουσιαστικά στατικός υπολογισμός της επίδρασης του εδαφικού βάρους και γενικά των φορτίσεων που ασκούνται στο πρανές. Με την επίλυση του πρώτου σταδίου ακολουθεί το δεύτερο στάδιο, δηλαδή η δυναμική επίλυση όπου εισάγεται ο σεισμός.

Η εισαγωγή μιας σεισμικής φόρτισης μπορεί να γίνει με δυο τρόπους, είτε με αρμονική φόρτιση είτε με την εισαγωγή έτοιμης φόρτισης από αρχείο SMC- Strong Motion CD-ROM. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η εισαγωγή σεισμικής διέργησης μέσω του αρχείου SMC. Το αρχείο αυτό περιέχει ένα διάγραμμα επιτάχυνσης- χρόνου (Σχήμα 4.2.3), το οποίο μετατρέπεται σε μετατόπιση από το πρόγραμμα, λαμβάνοντας υπόψη το βήμα χρόνου και της μεθόδου ολοκλήρωσης.



Σχήμα 5.3.3: Παρουσίαση του επιταχυνσιογραφήματος του σεισμού

Κατά την διαδικασία καθορισμού των σταδίων μια άλλη παράμετρος πρέπει να ληφθεί υπόψη για την δυναμική επίλυση. Πρόκειται για την επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος για τους αριθμητικούς υπολογισμούς. Γενικά ισχύει ότι:

$$\delta_t = \frac{\Delta t}{(n * m)} \quad (\text{εξίσωση 5.1})$$

Όπου δ_t = σταθερό χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στο δυναμικό υπολογισμό

Δt = χρονική διάρκεια της δυναμικής φόρτισης (10s ή 23.35s)

n = αριθμός βημάτων (1-250) που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της φάσης

m = αριθμός των δυναμικών βημάτων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εφαρμογής της δυναμικής φόρτισης

Η διάρκεια του χρονικού βήματος επίλυσης επιλέγεται έτσι ώστε να είναι βέβαιο ότι κατά τη διάρκεια ενός βήματος το κύμα δεν θα διανύσει απόσταση μεγαλύτερη από το μικρότερο μέγεθος κάποιου πεπερασμένου. Το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα τον αριθμό των δυναμικών βημάτων που απαιτούνται προκειμένου να ισχύει ο παραπάνω περιορισμός. Αν και επιβαρύνει τις επιλύσεις γενικά θεωρείται σημαντικός παράγοντας για την αποφυγή αριθμητικών σφαλμάτων. Στις επιλύσεις των 10 δευτερολέπτων ο αριθμός των δυναμικών βημάτων m ήταν 49 ενώ για σεισμό 23,5 δευτερολέπτων 114.

5.4 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2 οι επιλύσεις αφορούν ένα πρανές το οποίο θα δοκιμασθεί υπό διάφορες συνθήκες γραμμικής φόρτισης σε σεισμική διέγερση 10 δευτερολέπτων και 23,5 δευτερολέπτων αντίστοιχα.

Βάση των επιλύσεων προέκυψαν τα ακόλουθα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις δυο διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις.

Πίνακας 5.4.1: Παρουσίαση των επιλύσεων για σεισμό 10 δευτερολέπτων

Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	Δυσμενείς Διατμητικές τροπές (%)	Συνολική Μέγιστη Επιτάχυνση (m/s ²)	ΣΜ _{weight}
Εδαφική Βαρύτητα	0.065	-819,63	-0.846	0,830	0,206	1
Φορτίο	0.066	-819,33	0,886	1,07	0,208	1
Φορτίο με πλάκα 1 μέτρο πάχος	0,066	-684,80	-0,718	0,872	0,208	1
Φορτίο με πλάκα 2 μέτρο πάχος	0,066	-684,80	-0,718	0,872	0,208	1
Κτήριο	0,066	-532,77	0,675	0,813	0,220	1

Πίνακας 5.4.2: Παρουσίαση των επιλύσεων για σεισμό 23,35 δευτερολέπτων

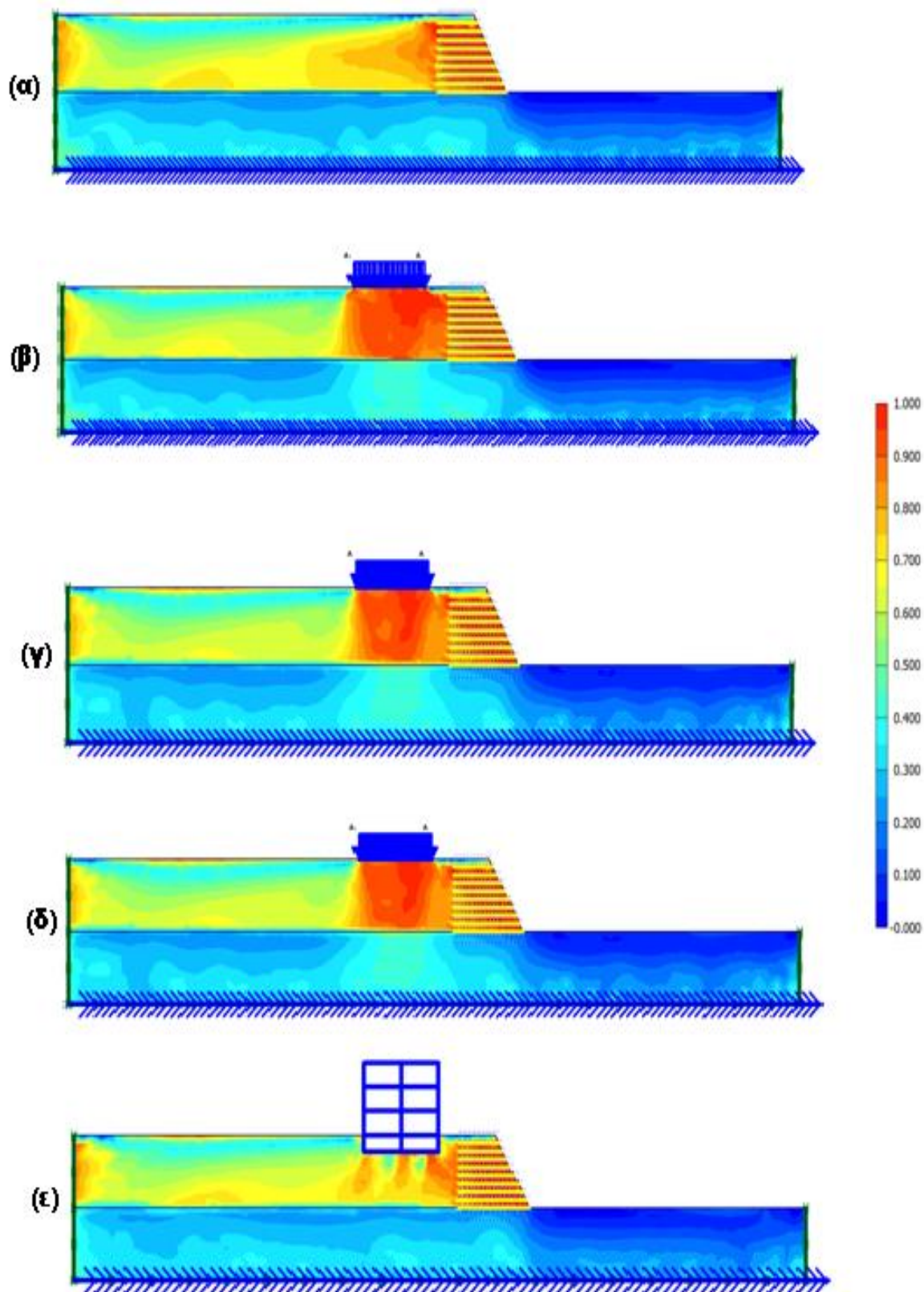
Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m ²)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	Δυσμενείς Διατμητικές τροπές (%)	Συνολική Μέγιστη Επιτάχυνση (m/s ²)	ΣΜ _{weight}
Εδαφική Βαρύτητα	0.094	-839,69	0,847	0,799	0,150	1
Φορτίο	0.096	-838,33	0,886	1,07	0,150	1
Φορτίο με πλάκα 1 μέτρο πάχος	0,096	-679,90	0,718	0,871	0,150	1
Φορτίο με πλάκα 2 μέτρο πάχος	0,096	-679,90	0,718	0,871	0,150	1
Κτήριο	0,096	-530,27	0,683	0,811	0,149	1

Άμεσα και κοινά αποτελέσματα μεταξύ των δυο διαφορετικών σεισμικών χρόνων προκύπτουν από την ανάλυση των παραπάνω πινάκων. Αρχικά, η επίδραση επιπλέον φόρτισης οποιασδήποτε μορφής σε σεισμική διέγερση 10 sec και 23,35 sec δεν επηρεάζει αισθητά το μέγεθος των μετατοπίσεων στο μοντέλο. Η διαφορά των δυσμενών μετατοπίσεων μεταξύ το πρανούς, που ως μοναδική φόρτιση είναι το εδαφικό του βάρος σε σχέση με τις δυσμενείς μετατοπίσεις πρανούς υπό οποιασδήποτε μορφής φόρτισης από την επιφάνεια, ανέρχεται σε μερικά χιλιοστά λιγότερα. Συνεπώς, οι μέγιστες μετατοπίσεις προκαλούνται κυρίως από την διέγερση του σεισμού. Επίσης, η χρήση της πλάκας δείχνει να επιφέρει σημαντικές μειωμένες διαφορές στο μέγεθος των δυσμενέστερων τάσεων και τροπών σε σχέση με την εφαρμογή του φορτίου χωρίς πλάκα. Επιπλέον μείωση παρατηρείται στην εισαγωγή του κτηρίου που οφείλεται και στο γεγονός ότι για την κατασκευή του κτηρίου αφαιρείται εδαφικό υλικό.

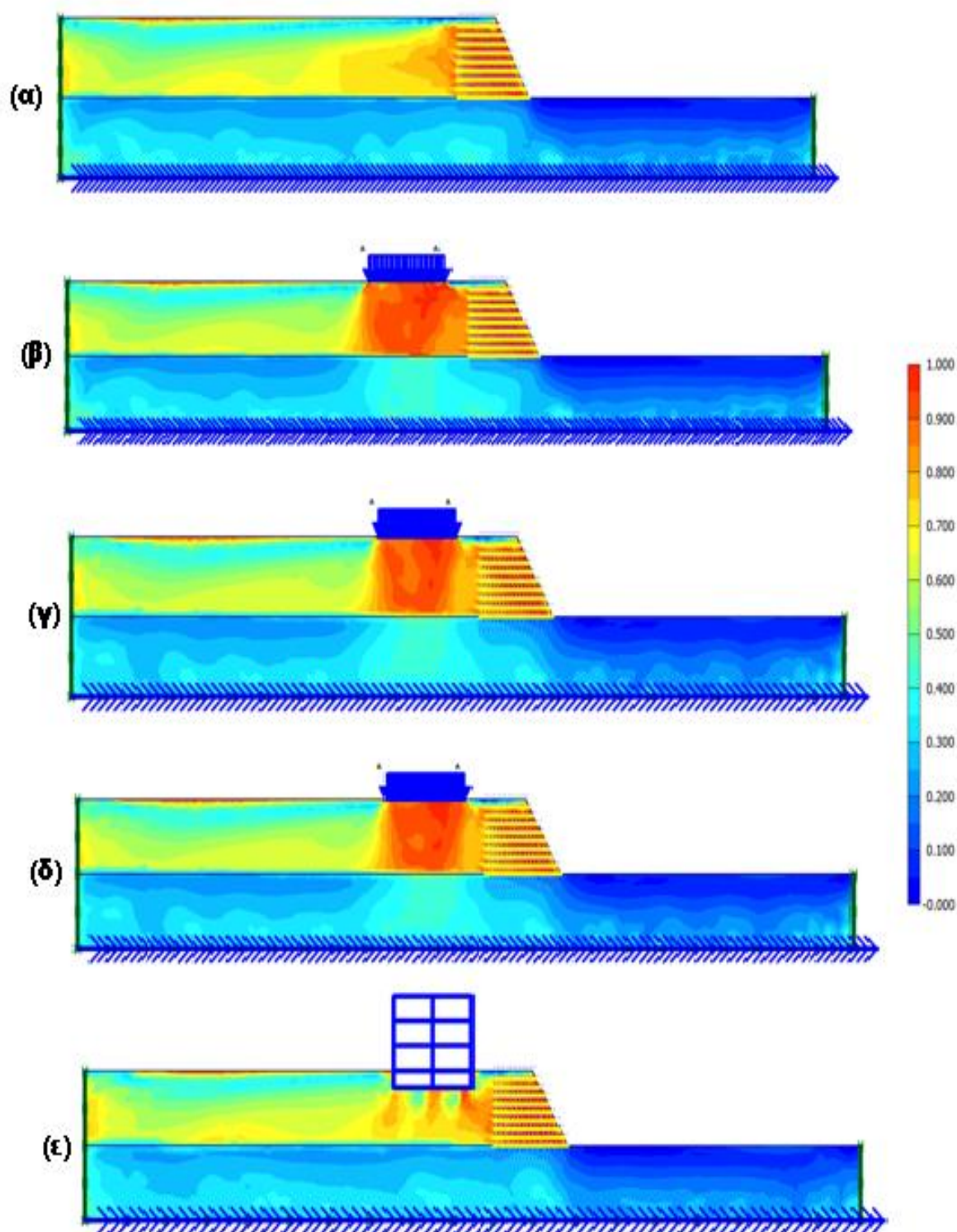
Παρακάτω όλα αυτά τα γρήγορα συμπεράσματα θα αναλυθούν και θα αποδειχθούν μέσω των εξαγόμενων σχημάτων και διαγραμμάτων που προέκυψαν κατά την επίλυση.

Στο Σχήμα 5.4.1 και Σχήμα 5.4.2 παρουσιάζονται οι σχετικές διατμητικές, όπως έχει αναφερθεί κατά την στατική επίλυση που χρησιμοποιήθηκαν οι σχετικές διατμητικές τάσεις, αποτελούν μια ένδειξη της εγγύτητας των σημείων τάσεων στην ανάπτυξη αστοχίας και ορίζονται από τον λόγο των προκαλούμενων διατμητικών τάσεων με τις διατμητικές τάσεις αστοχίας. Σύμφωνα με αυτά τα σχήματα παρατηρείται μια προοδευτική αύξηση των διατμητικών τάσεων όταν σε αυτά ασκείται επιπλέον φόρτιση. Οι σχετικές διατμητικές τάσεις κατά την επίδραση του εδαφικού βάρους περιορίζονται στην περιοχή που συναντούνται τα γεωπλέγματα, στο κεκλιμένο μέρος του πρανούς, όπως ήταν αναμενόμενο. Με την εισαγωγή των φορτίων παρουσιάζεται επιβάρυνση, με την παρουσίαση τάσεων στα σημεία που ασκούνται οι φορτίσεις. Παρατηρώντας την κατανομή των τάσεων στα σημεία που εισάγεται η φόρτιση παρατηρείται και κάτι άλλο ακόμα. Με άσκηση μόνο του φορτίου οι τάσεις είναι ομοιόμορφες σε όλο το μήκος φόρτισης. Αντιθέτως, κατά την εισαγωγή πλάκας οι τάσεις συγκεντρώνονται κυρίως στις άκρες. Περισσότερο εμφανές αυτό το φαινόμενο είναι κατά την μελέτη του κτηρίου (Σχήμα 5.4.1ε και Σχήμα 5.4.2ε) Εμφανέστερα τα αποτελέσματα αυτά διακρίνονται κατά την στατική επίλυση που προηγήθηκε της δυναμικής επίλυση. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 5.4.3 απεικονίζεται αυτό που περιγράφηκε νωρίτερα, ενώ στο Σχήμα 5.4.4 απεικονίζονται οι τοπικές μετατοπίσεις που παράγουν οι φορτίσεις με ή χωρίς πλάκα. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μετατοπίσεις από το φορτίο είναι ακονιστές ως προς το μέγεθός τους. Αντιθέτως, με την εισαγωγή της πλάκας οι μετατοπίσεις αυτές γίνονται γραμμικές

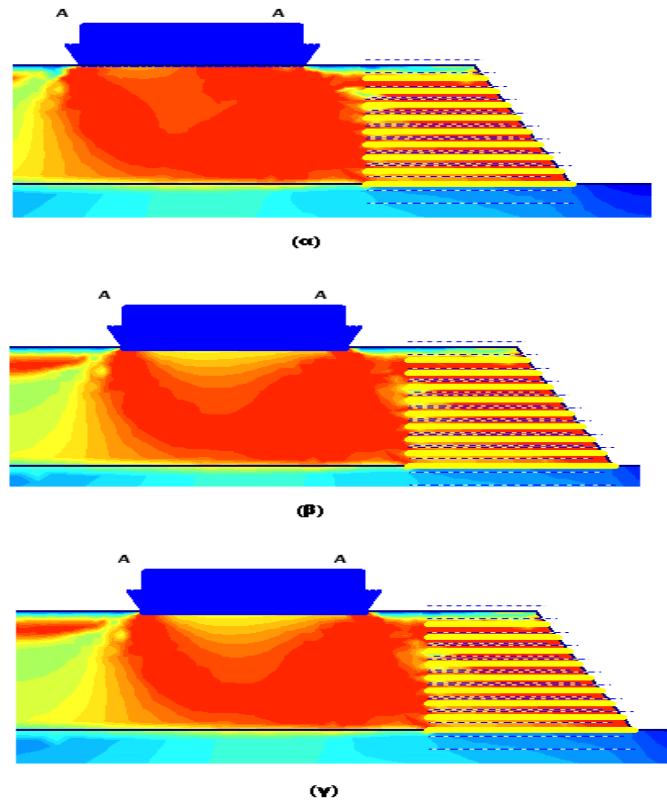
Τα διαγράμματα που κυρίως αναλύονται στο συγκεκριμένο εδάφιο είναι η σύγκριση της ιστορίας των μετατοπίσεων μεταξύ των διάφορων περιπτώσεων. Επίσης, παρουσιάζονται οι ιστορίες των επιταχύνσεων και των συγκριτικών διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο πλακών σε ένα κοινό σημείο.



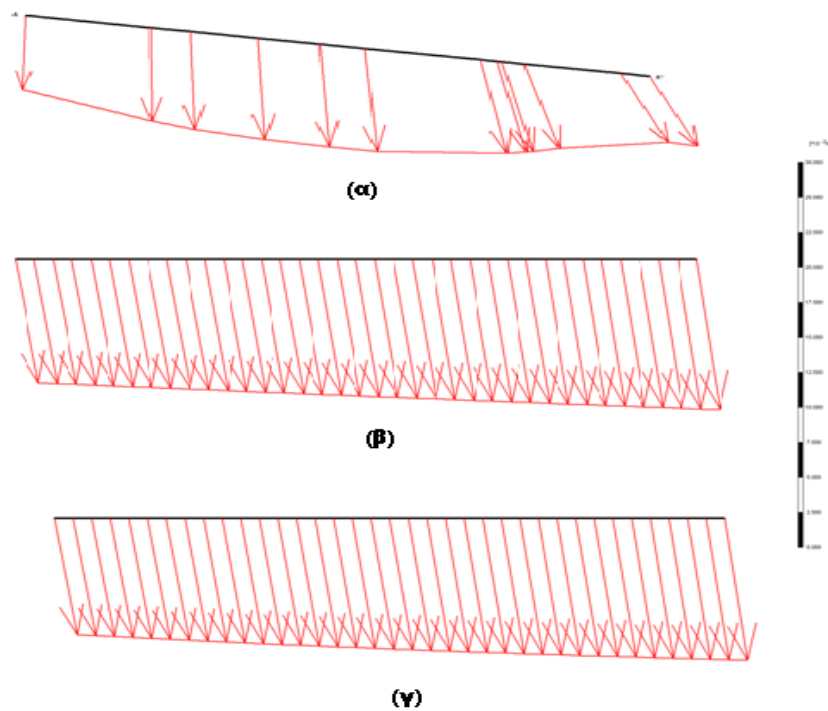
Σχήμα 5.4.1: Σύγκριση σχετικών διατμητικών τάσεων για σεισμική διέγερση 10 sec υπό την δράση (α) εδαφικού βάρους (β) φορτίου (γ) φορτίου με πλάκα πάχους 1 m (δ) φορτίου με πλάκα πάχους 2 m



Σχήμα 5.4.2: Σύγκριση σχετικών διατμητικών τάσεων για σεισμική διέγερση 23,35 sec υπό την δράση (α) εδαφικού βάρους (β) φορτίου (γ) φορτίου με πλάκα πάχους 1 m (δ) φορτίου με πλάκα πάχους 2 m



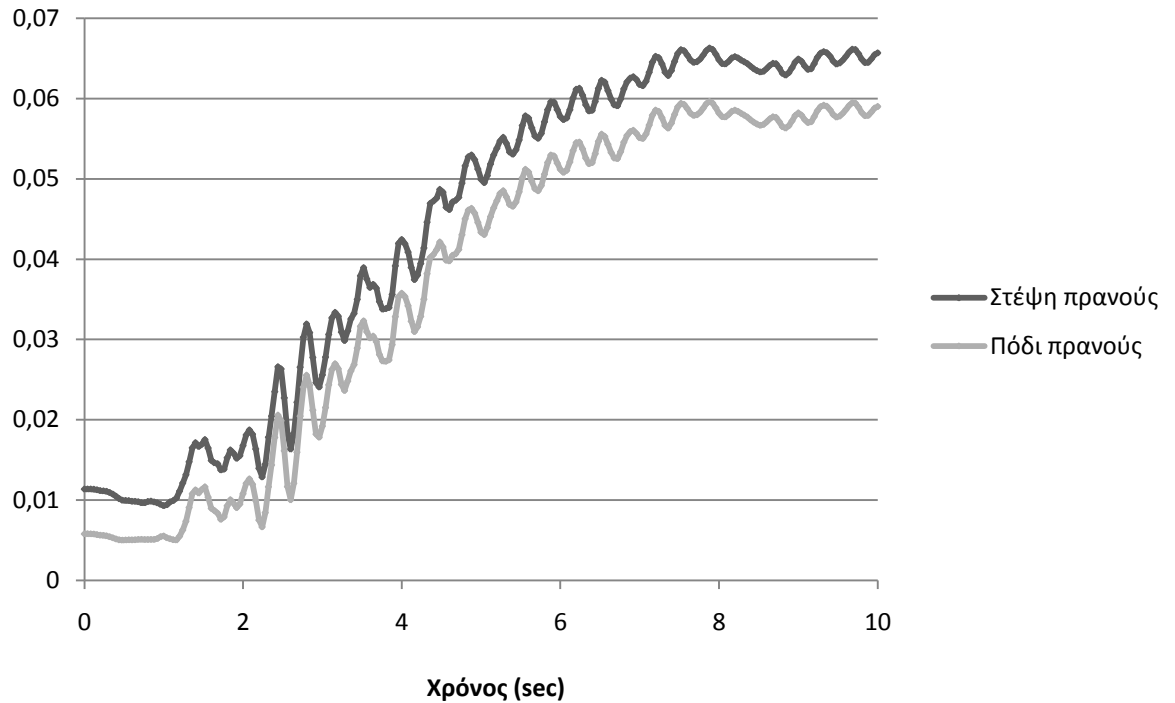
Σχήμα 5.4.3: Σύγκριση σχετικών διατμητικών τάσεων υπό την δράση (α) φορτίου (β) φορτίου με πλάκα πάχους 1 m (γ) φορτίου με πλάκα πάχους 2 m



Σχήμα 5.4.4: Σύγκριση τοπικών μετατοπίσεων (α) φορτίου (β) φορτίου με πλάκα πάχους 1 m (γ) φορτίου με πλάκα πάχους 2 m

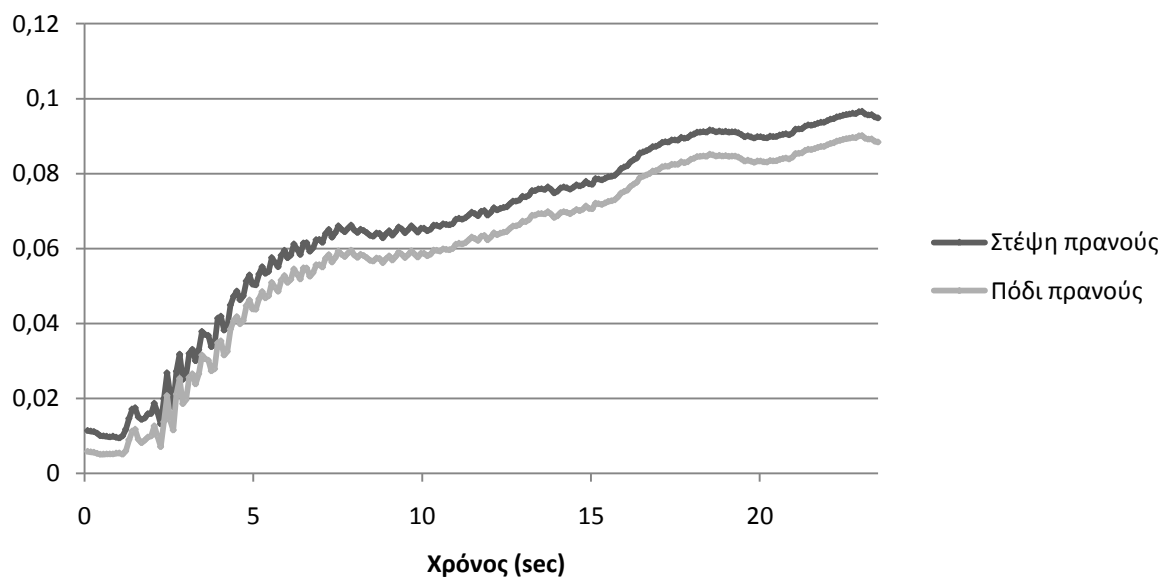
➤ Διαγράμματα Μετατοπίσεων

Μετατόπιση (m)

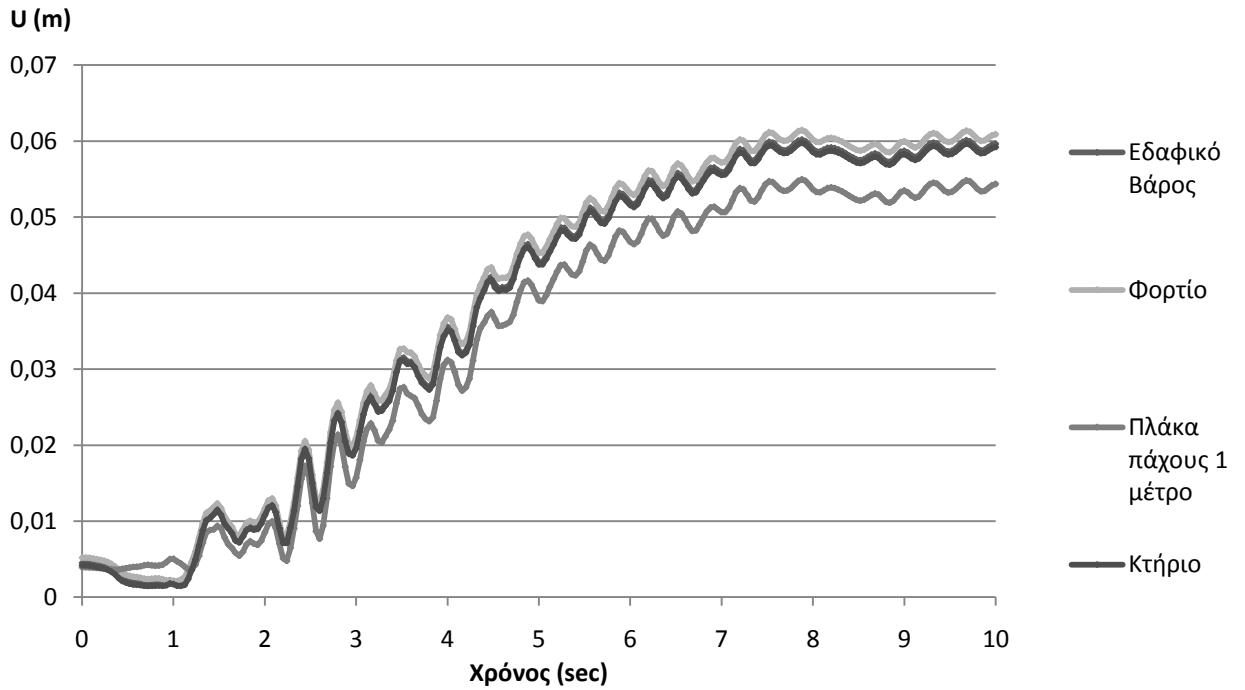


Διάγραμμα 5.4.1: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετατοπίσεων στέψης και ποδιού πρανούς κατά την δυναμική ανάλυση υπό την φόρτιση του εδαφικού βάρους (10 sec)

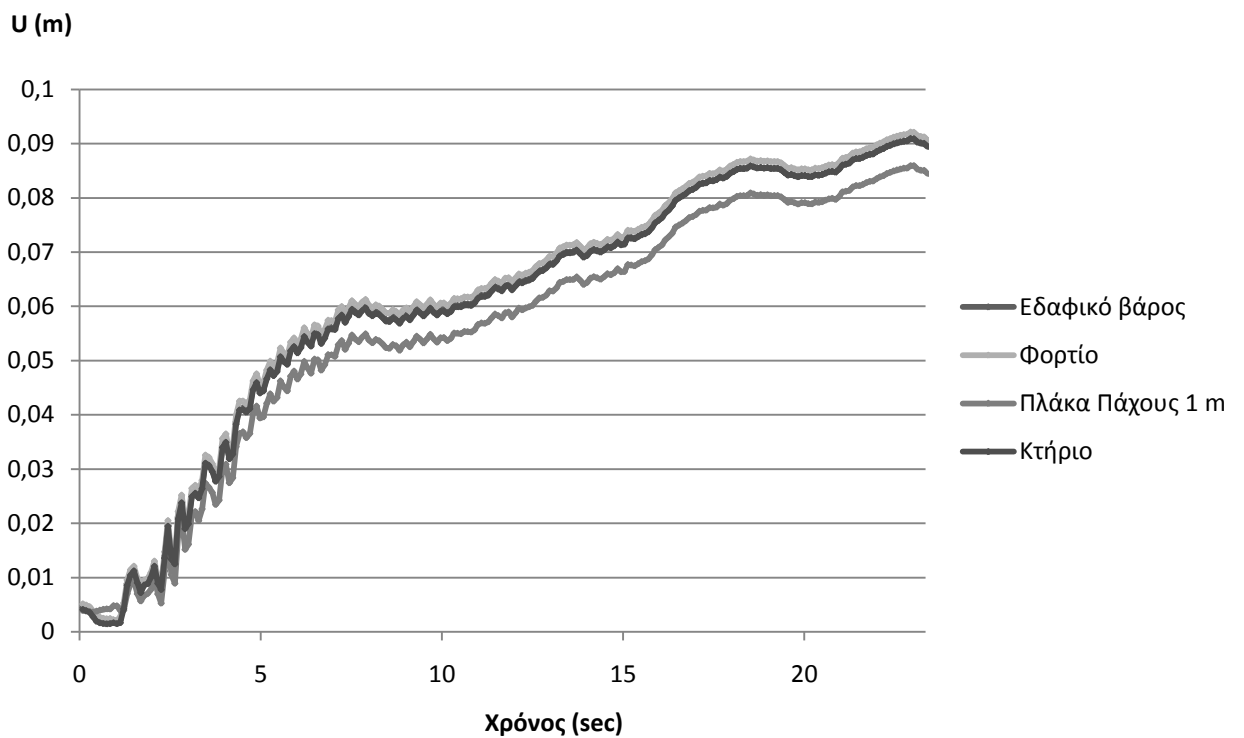
Μετατόπιση (m)



Διάγραμμα 5.4.2: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετατοπίσεων στέψης και ποδιού πρανούς κατά την δυναμική ανάλυση υπό την φόρτιση του εδαφικού βάρους (23.35 sec)

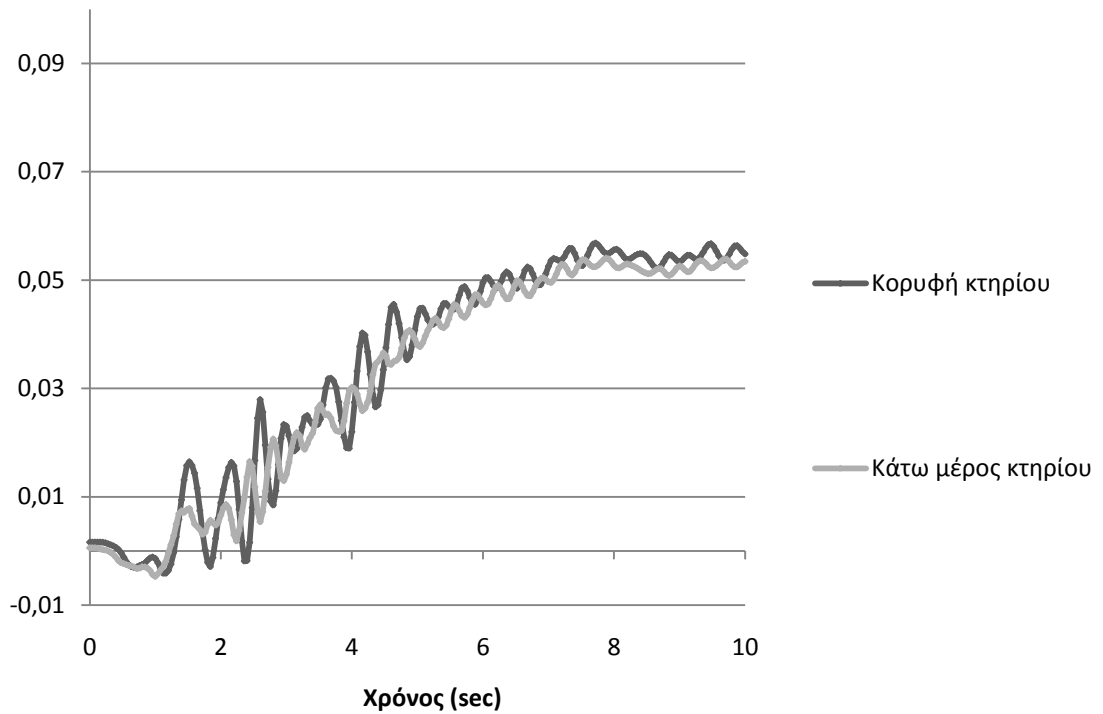


Διάγραμμα 5.4.3: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετατοπίσεων στο πόδι του πρανούς για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης για σεισμό 10 sec



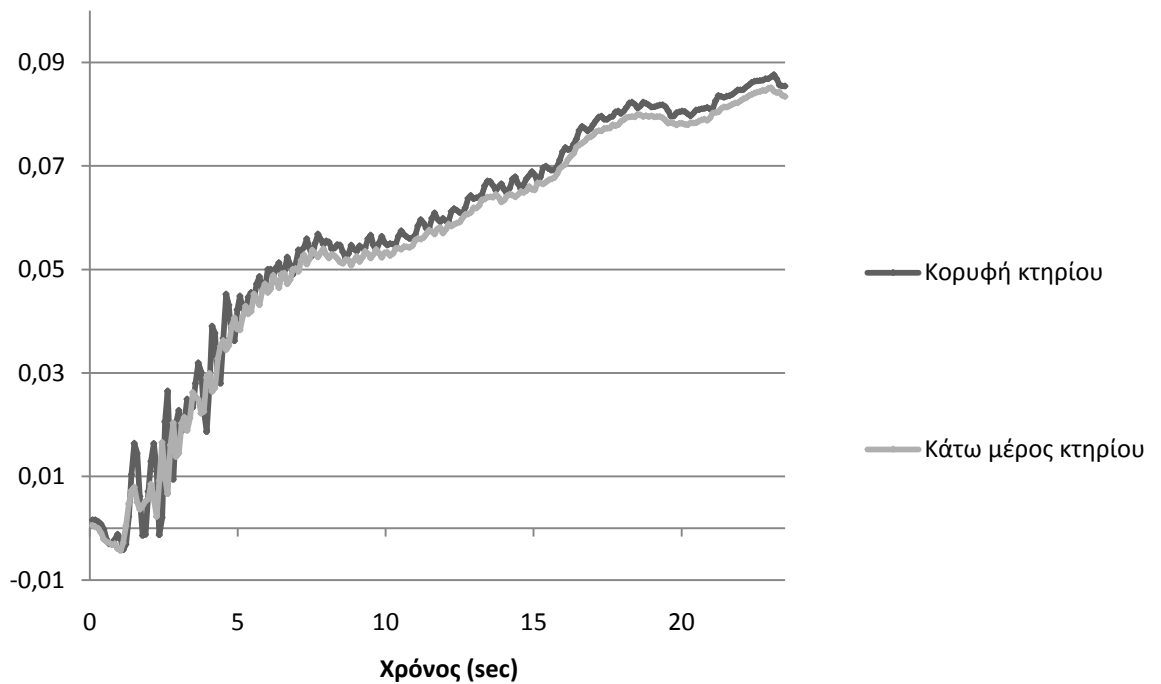
Διάγραμμα 5.4.4: Σύγκριση χρονοϊστορίας μετατοπίσεων στο πόδι του πρανούς για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης για σεισμό 23,35 sec

Μετατόπιση (m)



Διάγραμμα 5.4.5: Σύγκριση ιστορίας οριζόντιων μετατοπίσεων στην κορυφή και του πόδα του κτηρίου για 10 sec σεισμού

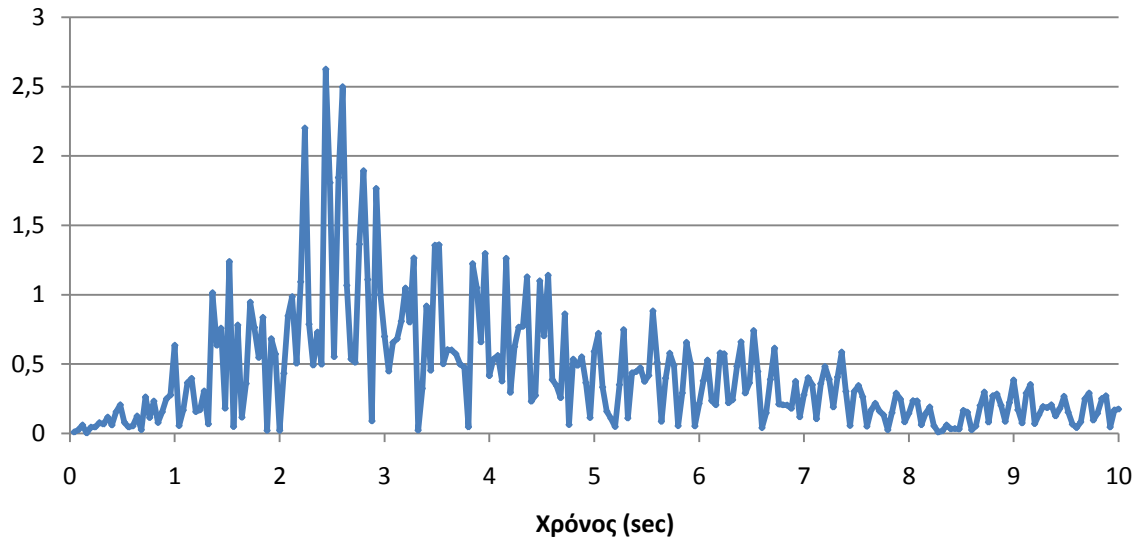
Μετατόπιση (m)



Διάγραμμα 5.4.6: Σύγκριση ιστορίας οριζόντιων μετατοπίσεων στην κορυφή και του πόδα του κτηρίου για 23,5 sec σεισμού

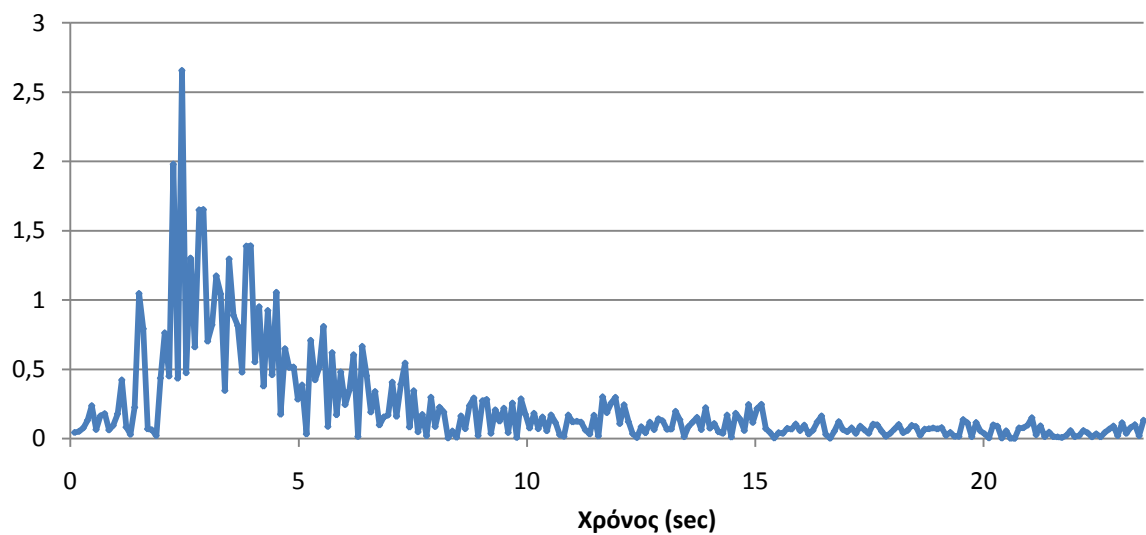
➤ Διαγράμματα Επιταχύνσεων

$|a|$ (m/s²)

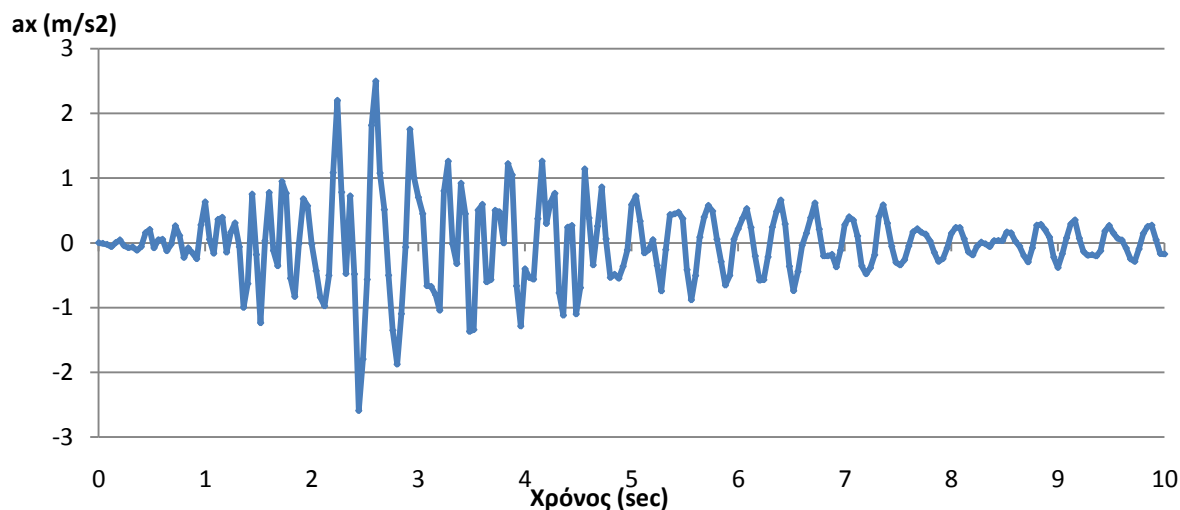


Διάγραμμα 5.4.7: Χρονοϊστορία συνισταμένης επιτάχυνσης μοντέλου υπό την δράση του εδαφικού βάρους σε σεισμική διέγερση 10 sec

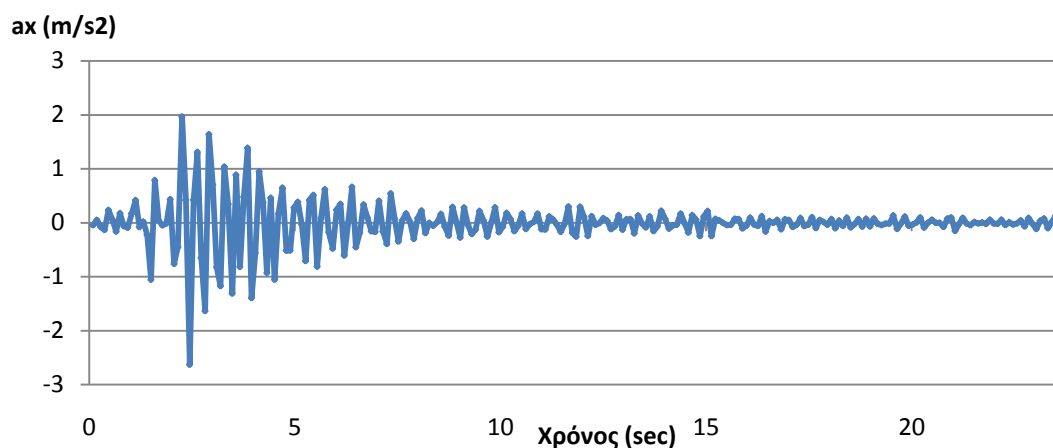
$|a|$ (m/s²)



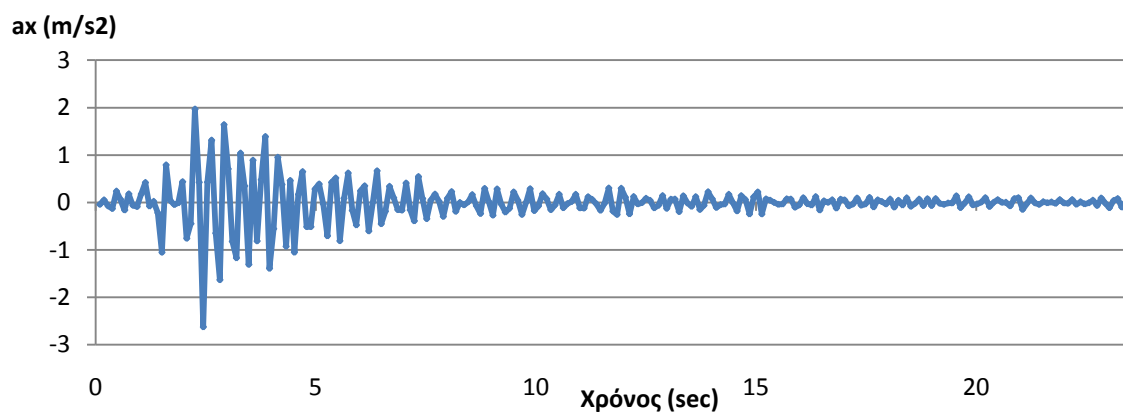
Διάγραμμα 5.4.8 : Χρονοϊστορία συνισταμένης επιτάχυνσης υπό την δράση του εδαφικού βάρους σε σεισμική διέγερση 23,35 sec



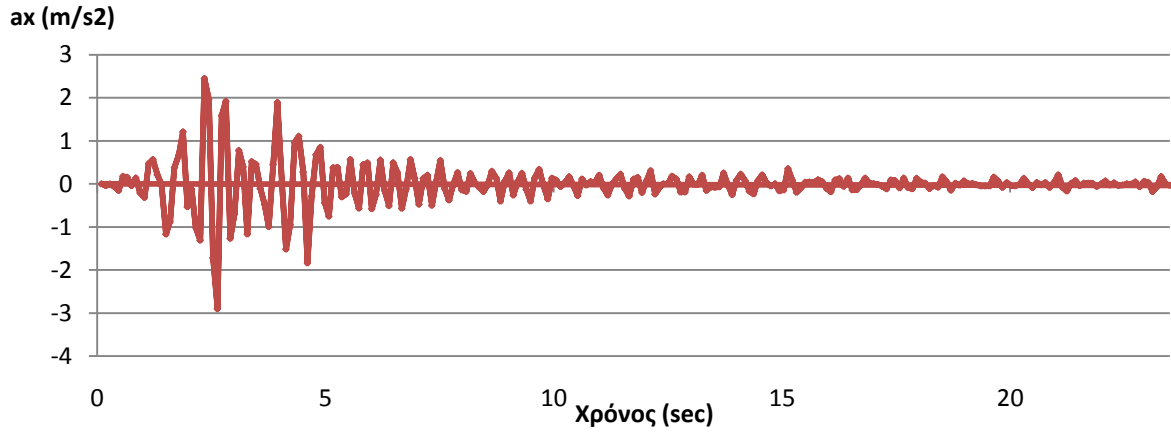
Διάγραμμα 5.4.9 : Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης υπό την δράση φορτίου για σεισμική διέγερση 10 sec



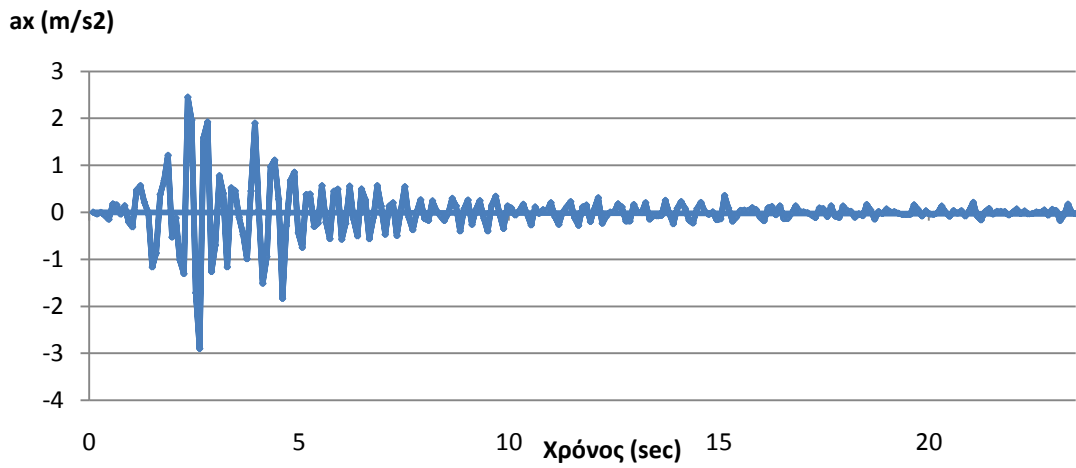
Διάγραμμα 5.4.10 : Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης υπό την δράση φορτίου για σεισμική διέγερση 23,35 sec



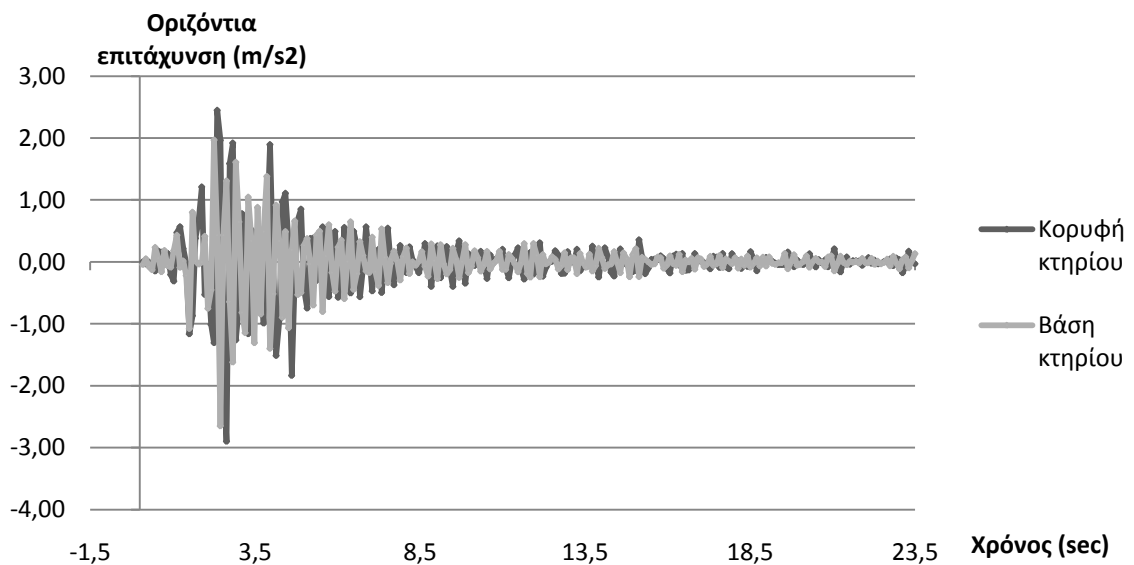
Διάγραμμα 5.4.11 : Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης υπό την δράση φορτίου και πλάκας πάχους 1 m για σεισμική διέγερση 23,35 sec



Διάγραμμα 5.4.12 : Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης υπό την δράση φορτίου και πλάκας πάχους 2 m για σεισμική διέγερση 23,35 sec

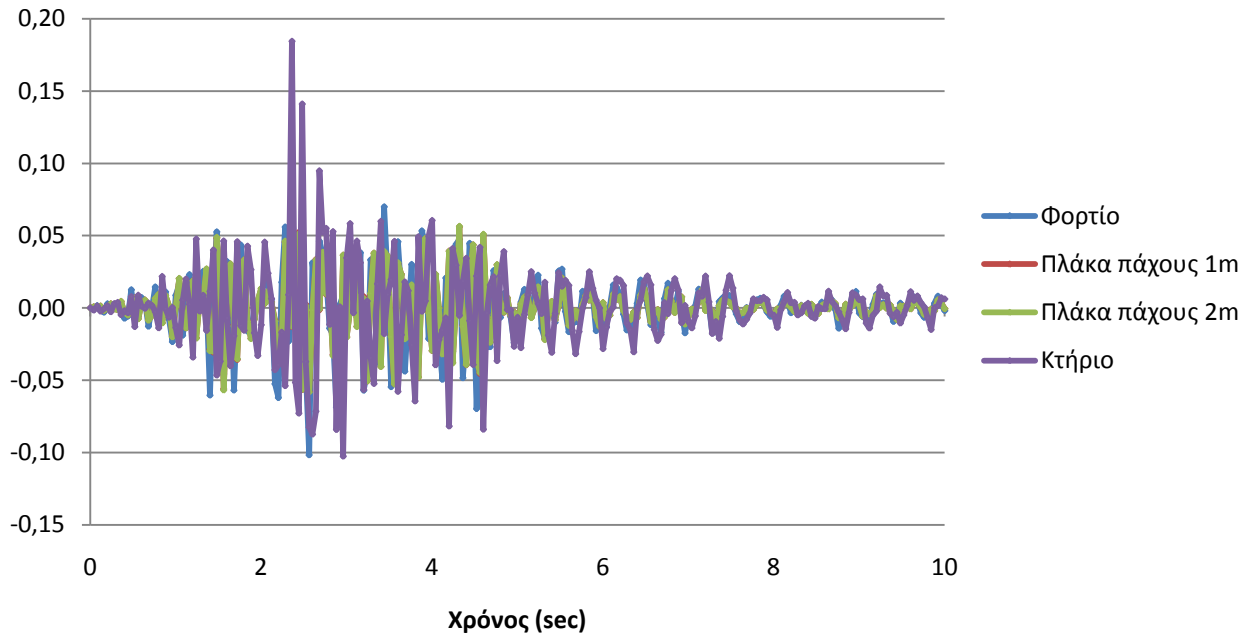


Διάγραμμα 5.4.13 : Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης υπό την δράση κτηρίου για σεισμική διέγερση 23,35 sec



Διάγραμμα 5.4.14: Σύγκριση χρονοϊστορίας οριζόντιων επιταχύνσεων στην κορυφή και την βάση του κτηρίου υπό την δράση σεισμού 23,5 sec

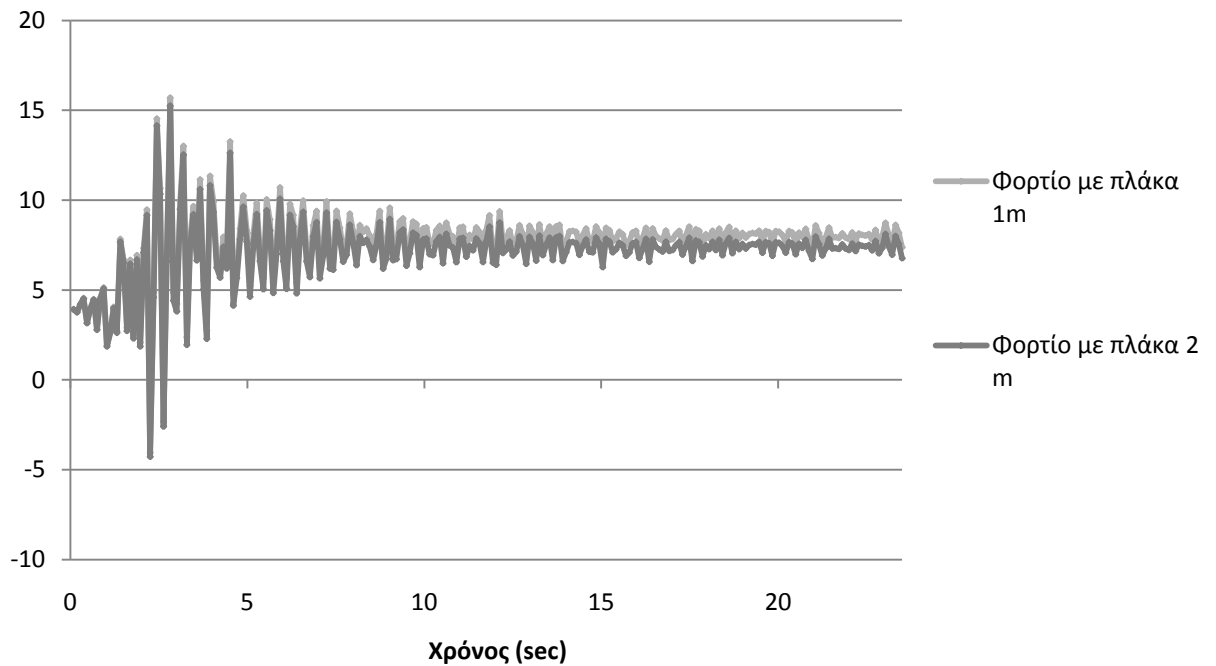
a_y (m/s²)



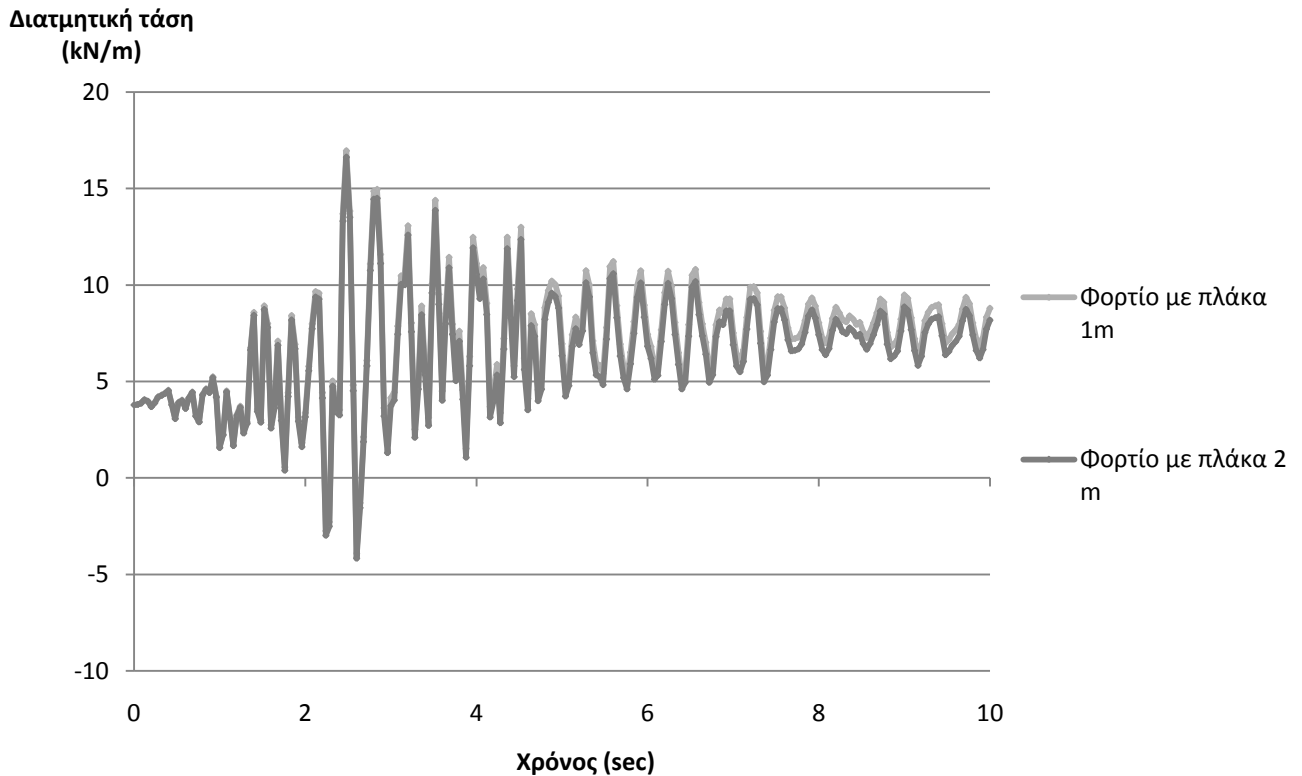
Διάγραμμα 5.4.15: Σύγκριση χρονοϊστορίας κατακόρυφων επιταχύνσεων

➤ Διαγράμματα Διατμητικών τάσεων

Διατμητική τάση
(kN/m)



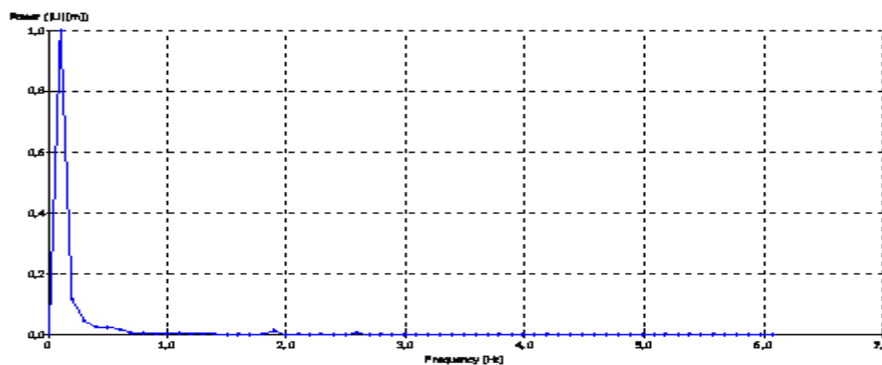
Διάγραμμα 5.4.16: Σύγκριση χρονοϊστορίας διατμητικών τάσεων για σεισμό 23,5 sec



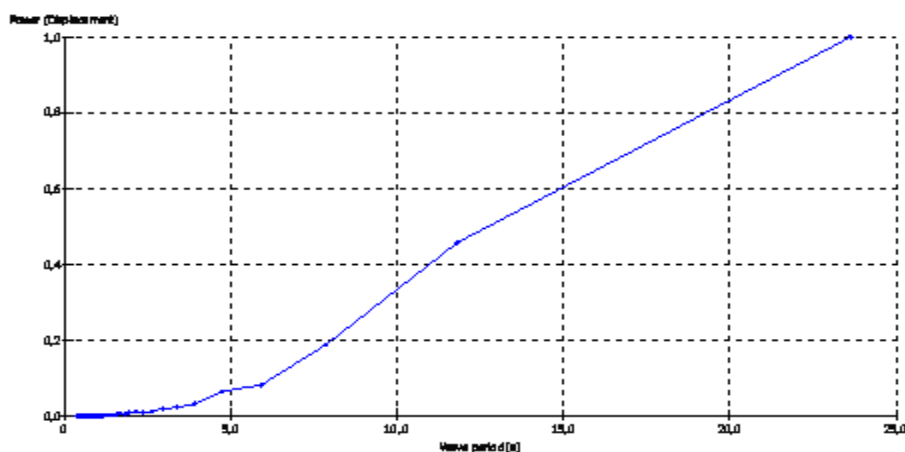
Διάγραμμα 5.4.17: Σύγκριση χρονοϊστορίας διαμητικών τάσεων για σεισμό 10 sec

➤ Φάσμα απόκρισης κτηρίου

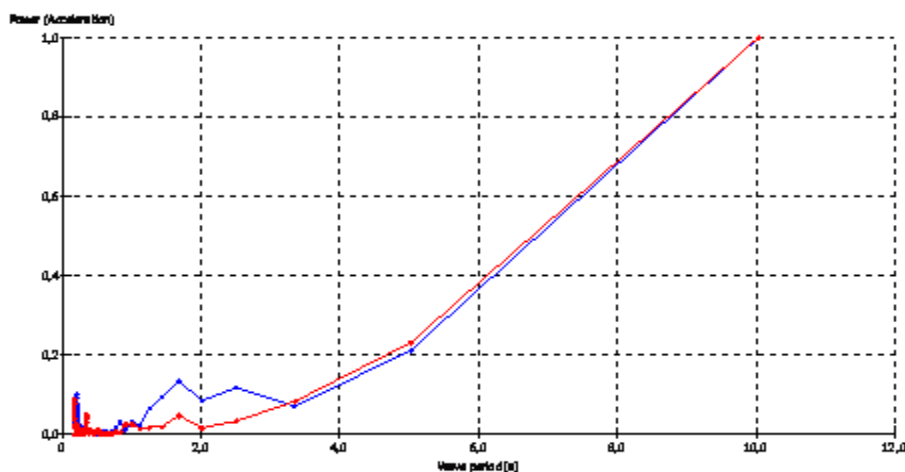
Οι επιπτώσεις ενός σεισμού δεν εξαρτώνται μόνο από το μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης αλλά και από το συχνοτικό περιεχόμενό της, καθώς και από την ίδια την κατασκευή. Έτσι εισάγεται η έννοια του φάσματος απόκρισης με το οποίο επιτρέπεται η εκτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών για μια δεδομένη εδαφική φόρτιση. Το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον γιατί κατά την ίδια χρονική στιγμή κατά την οποία γίνεται μέγιστη η μετάθεση, παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους η διαμητική τροπή και τάση καθώς και η ελαστική ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ο υπολογισμός της καταπόνησης του κτηρίου χωρίς πολύπλοκούς υπολογισμούς.



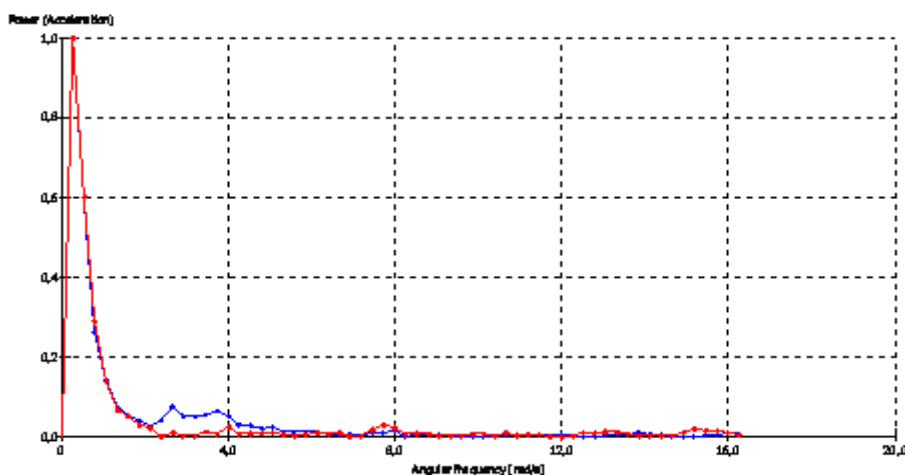
Φάσμα απόκρισης μετατόπισης- συχνότητας στην κορυφή του κτηρίου κατά την διάρκεια σεισμού 10 sec



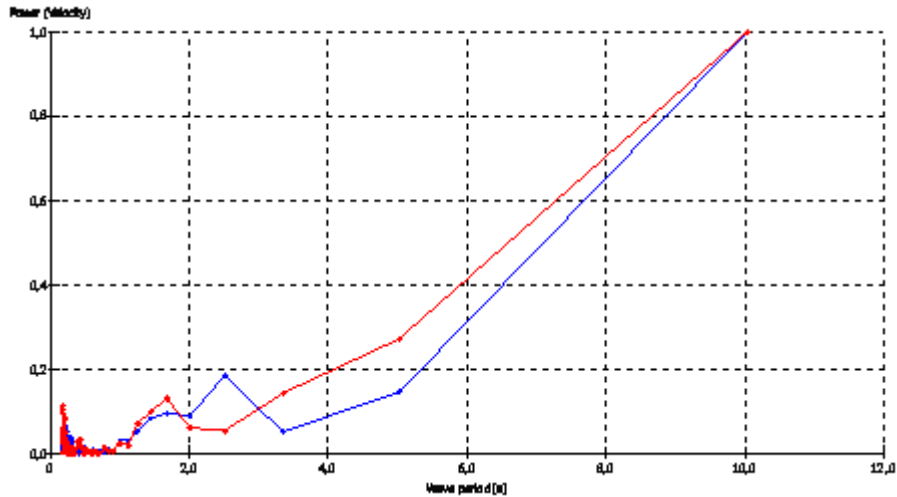
Φάσμα απόκρισης μετατόπισης- περιόδου κύματος στην κορυφή του κτηρίου κατά την διάρκεια σεισμού 23,35 sec



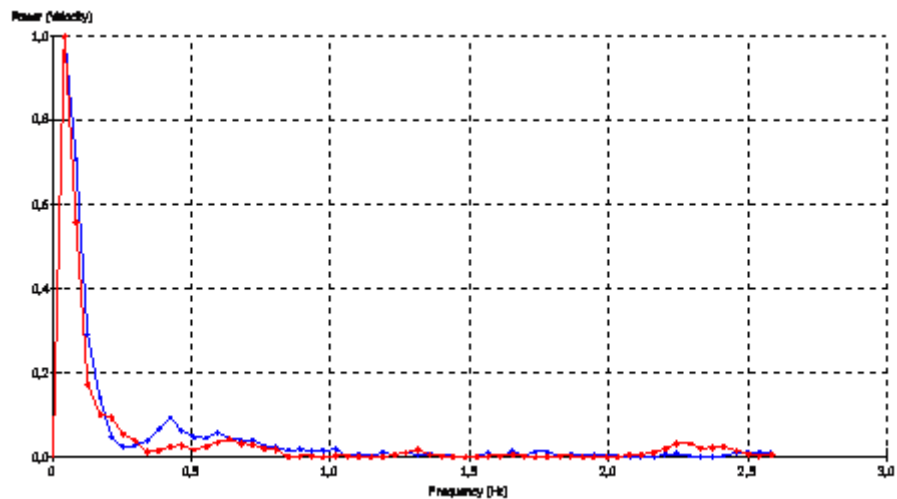
Φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης- περιόδου κύματος στην κορυφή του κτηρίου (μπλε) και της βάσης του κτηρίου (κόκκινο) κατά την διάρκεια σεισμού 10 sec



Φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης- συχνότητας κύματος στην κορυφή του κτηρίου (μπλε) και της βάσης του κτηρίου (κόκκινο) κατά την διάρκεια σεισμού 23,35 sec



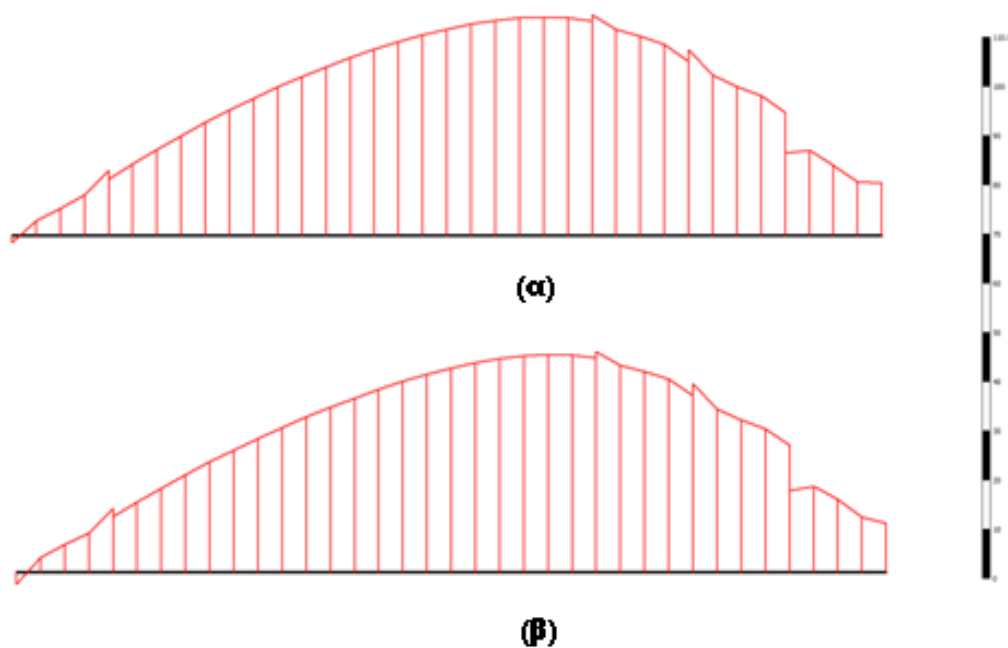
Φάσμα απόκρισης ταχύτητας- περιόδου κύματος στην κορυφή του κτηρίου (μπλε) και της βάσης του κτηρίου (κόκκινο) κατά την διάρκεια σεισμού 10 sec



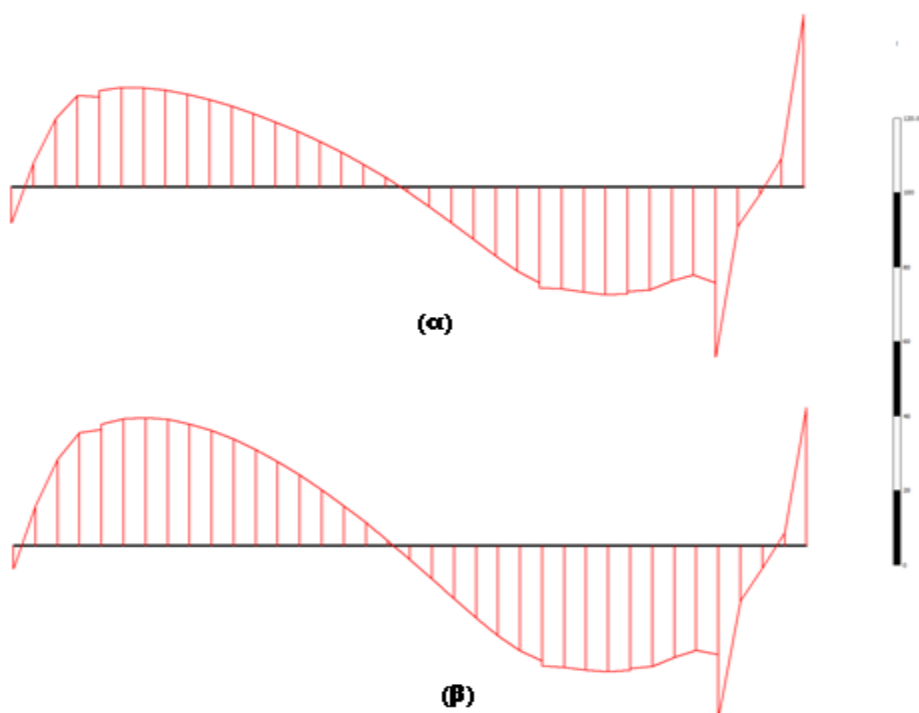
Φάσμα απόκρισης ταχύτητας- συχνότητας κύματος στην κορυφή του κτηρίου (μπλε) και της βάσης του κτηρίου (κόκκινο) κατά την διάρκεια σεισμού 23,35 sec

Παρακάτω μελετάται η συμπεριφορά των πλακών υπό την εφαρμογή των δυο σεισμικών φορτίσεων. Όπως παρατηρείται από τα σχήμα και τον συγκεντρωτικό Πίνακα 5.4.3 διαφοροποιήσεις μεταξύ των πλακών υπάρχουν. Δεδομένου ότι στις οι δύο επιλύσεις έχουν δοθεί ίδιοι παράμετροι υπό την άσκηση ίδιας φόρτισης συμπεραίνεται ότι οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στην μεταβολή του πάχους της πλάκας. Γενικά, με την αύξηση της αξονικής δυστένειας EA και καμπτικής ακαμψίας EI , κατ'έπекταση δηλαδή την αύξηση του πάχους της πλάκας, παρατηρείται μείωση των αξονικών δυνάμεων με παράλληλη αύξηση των διατμητικών δυνάμεων και των εφελκυστικών ροπών. Με αύξηση του χρόνου της σεισμικής φόρτισης αυξάνονται οι μετατοπίσεις στις πλάκες ανεξαρτήτου πάχους.

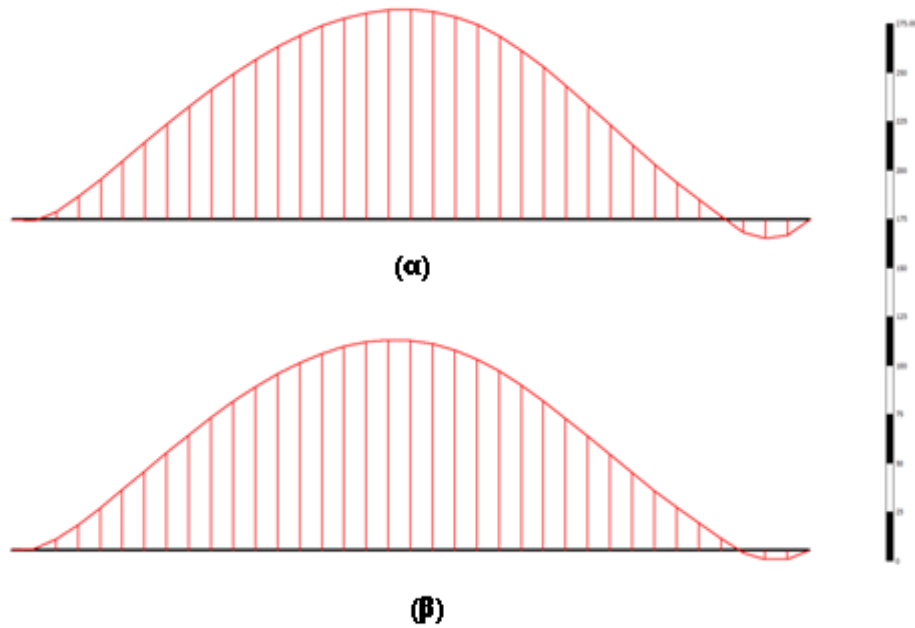
Τέλος, οι θετικές αξονικές δυνάμεις υποδηλώνουν την παρουσία εφελκυστικών τάσεων στην πλάκα.



Σχήμα 5.4.5: Σύγκριση αξονικών δυνάμεων που ασκούνται στην πλάκα (α) πάχους 1 μέτρο (β) πάχους 2 μέτρων υπό την σεισμική φόρτιση 23,35 sec



Σχήμα 5.4.6: Σύγκριση διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται στην πλάκα (α) πάχους 1 μέτρο (β) πάχους 2 μέτρων υπό την σεισμική φόρτιση 23,35 sec



Σχήμα 5.4.7: Σύγκριση εφελκυστικών ροπών που ασκούνται στην πλάκα (α) πάχους 1 μέτρο (β) πάχους 2 μέτρων υπό την σεισμική φόρτιση 23,35 sec

Πίνακας 5.4.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πλακών

Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Αξονικές δυνάμεις (kN/m)	Δυσμενείς επίπεδες Διατμητικές δυνάμεις (kN/m)	Δυσμενείς Εφελκυστικές ροπές (kNm/m)
Πλάκα πάχους 1m (10 sec)	0,057	54,80	40,93	-74,28
Πλάκα πάχους 2m (10 sec)	0.057	49,63	-46,49	-108,59
Πλάκα πάχους 1m (23,5 sec)	0,087	49,80	40,61	-73,95
Πλάκα πάχους 2m (23,5 sec)	0,087	44,60	-46,26	-108,12

5.5 Σύγκριση Δυναμικής Επίλυσης και Ψευδοστατικής Μεθόδου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της Δυναμικής επίλυσης, όπως αυτά προέκυψαν από τις προηγούμενες παραγράφους, με τα αποτελέσματα της ψευδοστατικής επίλυσης.

Η ακραία τιμή της επιτάχυνσης του σεισμού είναι $-239,90 \text{ cm/s}^2$, το οποίο μεταφράζεται ως $0,245\text{g}$. Επιλύεται επομένως με ψευδοστατική επίλυση η ευστάθεια των πρανών με την εισαγωγή αντίστοιχης εδαφικής επιτάχυνσης. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των στατικών επιλύσεων, για την δεδομένη γεωμετρία του πρανούς μια θετική (δεξιά φορά) οριζόντια επιτάχυνση θα ενίσχυε την ευστάθεια του πρανούς λόγω ανάπτυξης αδρανειακών δυνάμεων. Αντιθέτως, με την εισαγωγή αρνητικής (αριστερή φορά) οριζόντιας επιτάχυνσης μειώνεται η ευστάθεια του πρανούς. Μελετάται, επομένως, η δυσμενέστερη συνθήκη για την ευστάθεια του πρανούς άρα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της δυναμικής επίλυσης με αυτά της ψευδοστατικής κατά την εισαγωγή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους $-0,245\text{g}$.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην ψευδοστατική επίλυση εμφανίζονται στον Πίνακα 5.5.1 ώστε να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δυναμικών επιλύσεων στους Πίνακες 5.4.2 και 5.4.1

Πίνακας 5.5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Ψευδοστατικής επίλυσης

Στάδια υπολογισμού	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Ενεργές τάσεις (kN/m^2)	Δυσμενείς Ολικές τροπές (%)	Δυσμενείς Διατμητικές τροπές (%)	ΣM_{accel}	ΣM_{weight}
Εδαφική Βαρύτητα	0,064	-396,17	4,32	5,26	1	1
Φορτίο	0,291	-509,52	17,37	20,06	1	1
Φορτίο με πλάκα 1 μέτρο πάχος	0,081	-466,04	5,85	6,07	1	1
Φορτίο με πλάκα 2 μέτρο πάχος	0,080	-466,26	6,23	6,15	1	1
Κτήριο	0,082	-398,70	14,10	11,62	1	1

Σύμφωνα με τον Πίνακα η εισαγωγή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους $-0,24g$ επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα με την Δυναμική μέθοδο. Κανένα πρανός δεν υπόκειται σε μόνιμες παραμορφώσεις και κατ' επέκταση δεν αστοχεί.

Οι μετατοπίσεις έχουν σύγκλιση σε σχέση με την εισαγωγή του σεισμού $23,35 \text{ sec}$, όπου είναι η πλήρης εφαρμογή του σεισμικής διέγερσης. Ωστόσο οι μετατοπίσεις αυτές δεν είναι πλήρως συγκρίσιμες, διότι οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στην εφαρμογή τους.

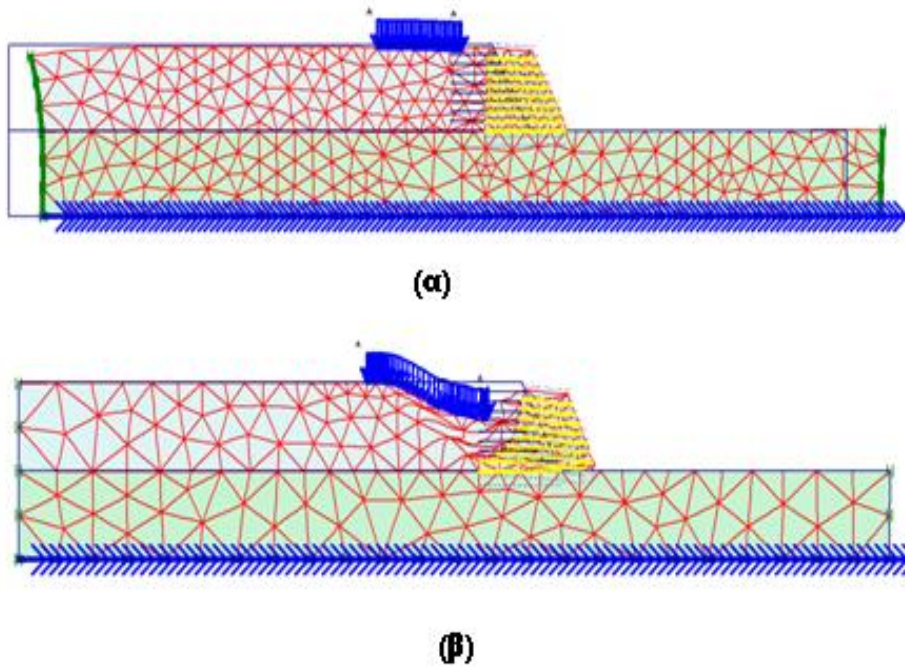
Η όποια διαφοροποίηση οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες. Αρχικά, κατά την δυναμική ανάλυση οι επιταχύνσεις δεν εφαρμόζονται μόνο κατά μια φορά και με συνεχή επιτάχυνση ιδίου μεγέθους, όπως γίνεται στην ψευδοστατική επίλυση, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς στο οριζόντιο επίπεδο και κατακόρυφο επίπεδο (βλέπε παράγραφο 5.4- χρονοϊστορίες επιταχύνσεων). Με αυτό τον τρόπο η ευστάθεια του πρανούς την μια στιγμή ενισχύεται και την άλλη απομειώνεται. Εν αντιθέσει με την ψευδοστατική που η απομείωση της ευστάθειας είναι συνεχής με την εισαγωγή αρνητικής επιτάχυνσης μεγέθους $0,245g$.

Επίσης, κατά την δυναμική ανάλυση λαμβάνεται υπόψη και ένα μέγεθος που κατά την ψευδοστατική επίλυση παραλείπεται. Είναι η απόσβεση, που στην συγκεκριμένη περίπτωση εισήχθη με την ορισμό των συντελεστών Rayleigh. Αποτέλεσμα της απόσβεσης είναι η μείωση του πλάτους του σεισμικού κύματος, όσο αυτό ταξιδεύει μέσα στο εδαφικό υλικό. Έτσι, η επιτάχυνση με την πάροδο του χρόνου μειώνεται μέχρις ότου εξαλειφθεί τελείως. Αντιθέτως, η σεισμική επιτάχυνση στην ψευδοστατική επίλυση μειώνεται γραμμικά, προκαλώντας έτσι εντονότερα φαινόμενα σε σχέση με την δυναμική ανάλυση.

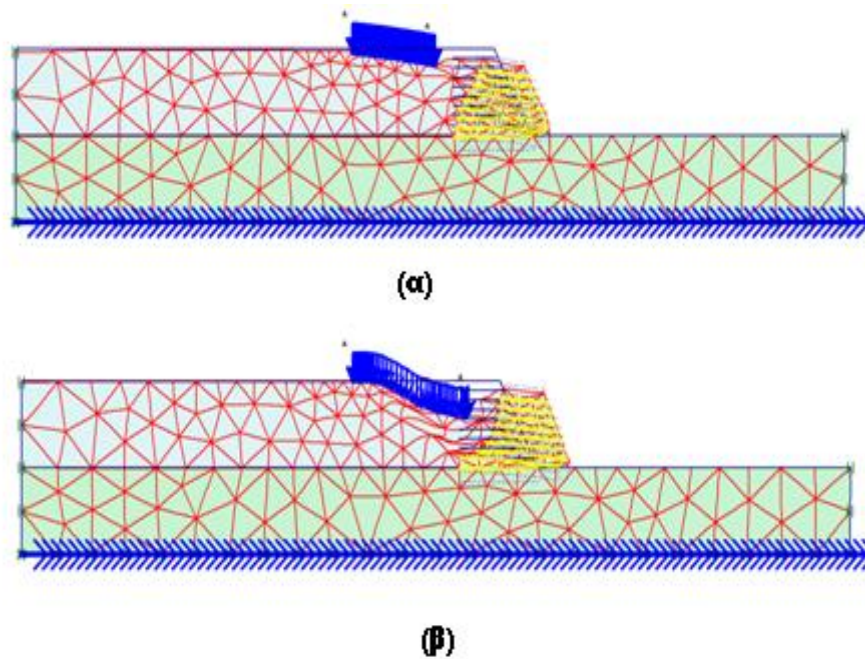
Σε αυτό οφείλεται και η μεγάλη διαφορά στην σύγκλιση της μετατόπισης υπό την δράση του φορτίου. Κατά την ψευδοστατική ανάλυση προκύπτει μετατόπιση $0,29$ εκατοστών την ώρα που στην δυναμική ανάλυση σημειώνεται δυσμενέστερη μετατόπιση ίση με $9,6$ εκατοστά. (Σχήμα 5.5.1). Η συμπεριφορά του φορτίου στη ψευδοστατική αποδεικνύει την διαφορά της συμπεριφοράς όταν το ίδιο φορτίο ασκείται πάνω σε πλάκα. Το έδαφος τότε δεν δέχεται τέτοιου μεγέθους μετατοπίσεις, σύμφωνα με το Σχήμα 5.5.2.

Επίσης, Στο Σχήμα 5.5.3 και Σχήμα 5.5.4 παρουσιάζονται οι μέγιστες επιταχύνσεις που εμφανίζονται στο κτήριο υπό την δυναμική και ψευδοστατική ανάλυση αντίστοιχα. Η συμπεριφορά του κτηρίου είναι παρόμοια καθώς και στις δύο περιπτώσεις μετακινείται προς τα αριστερά, εξαιτίας της αρνητικής επιτάχυνσης. Ωστόσο το κτήριο κατά την δυναμική ανάλυση παρουσιάζει μεγαλύτερη ελαστική συμπεριφορά. Στον Πίνακα 5.5.2 μελετάται η συγκριτική συμπεριφορά της δεξιάς κατακόρυφης πλάκας του κτηρίου για τον στατικό, ψευδοστατικό και δυναμικό υπολογισμό.

Γενικά, η δυναμική ανάλυση θεωρείται πιο ακριβής μέθοδος αλλά πιο πολύπλοκη σε σχέση με την ψευδοστατική. Για μελέτες χωρίς υψηλές απαιτήσεις η ψευδοστατική είναι ιδανική μέθοδος.



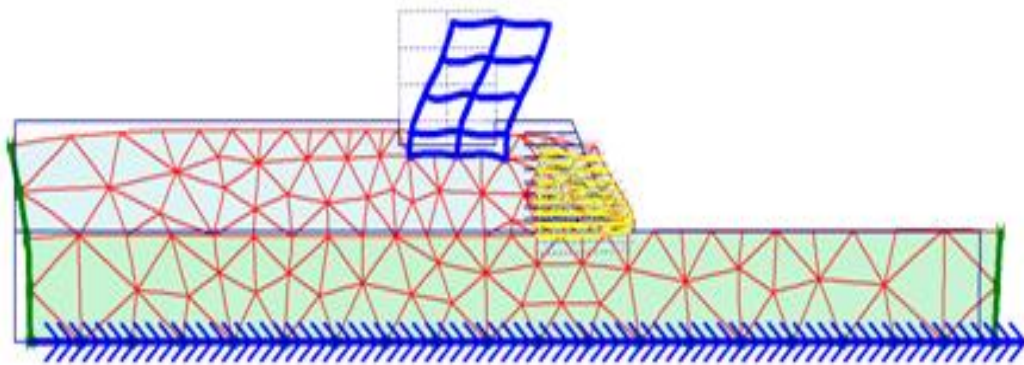
Σχήμα 5.5.1: Παρουσίαση παραμορφωμένου καννάβου κατά (α) την δυναμική ανάλυση (β) ψευδοστατική ανάλυση



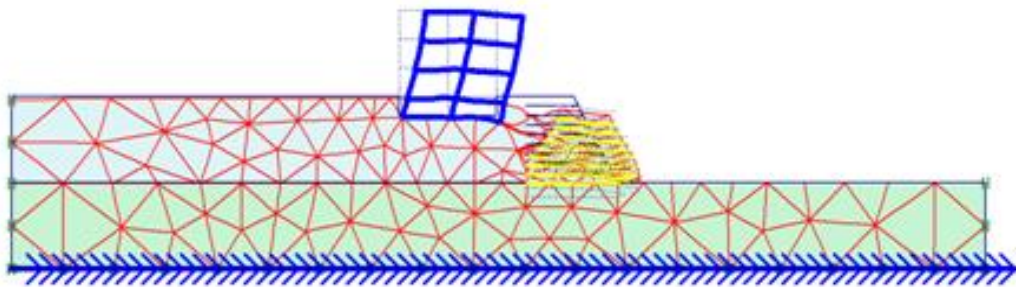
Σχήμα 5.5.2: Συμπεριφορά μοντέλου κατά την ψευδοστατική επίλυση κατά (α) την παρουσία πλάκας 1 m (β) χωρίς την παρουσία πλάκας

Πίνακας 5.5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πλάκας κτηρίου στο τελικό στάδιο

Είδος Επίλυσης	Δυσμενείς Μετατοπίσεις (m)	Δυσμενείς Αξονικές δυνάμεις (kN/m)	Δυσμενείς επίπεδες Διαμητικές δυνάμεις (kN/m)	Δυσμενείς Εφελκυστικές ροπές (kNm/m)
Στατική	0,005	-74,74	10,60	12,80
Ψευδοστατική	0.053	-101,73	-17,36	-26,50
Δυναμική (10 sec)	0,055	-76,38	10,97	-15,46
Δυναμική (23,35 sec)	0,086	-77,41	14,59	-16,29

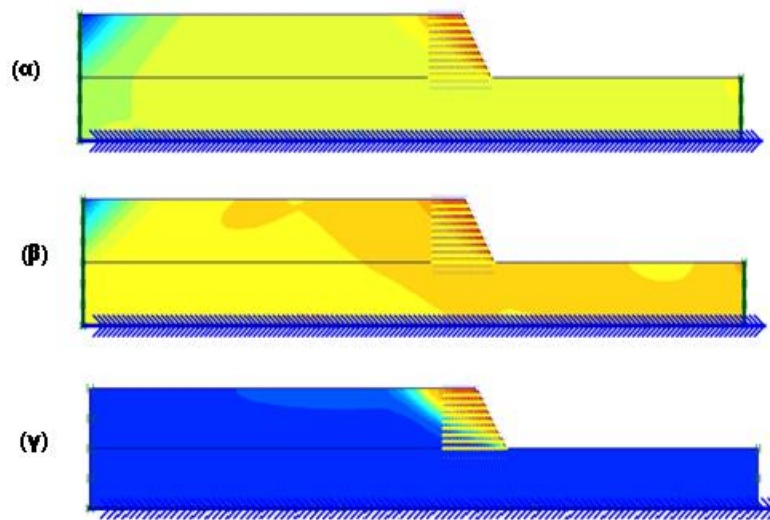


Σχήμα 5.5.3: Μέγιστη επιτάχυνση κτηρίου μεγέθους $3,77 \text{ m/s}^2$ στην χρονική στιγμή 2,6 sec για διάρκεια σεισμού 10 sec

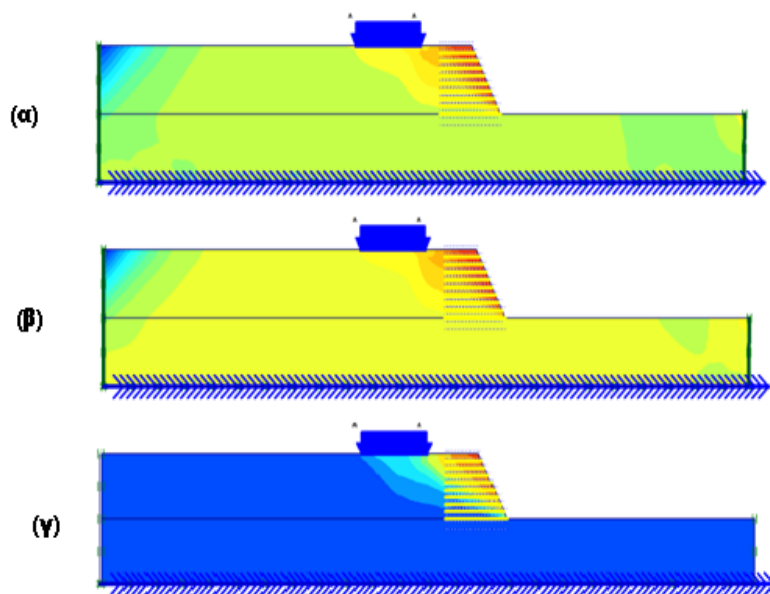


Σχήμα 5.5.4: Μέγιστη επιτάχυνση κτηρίου κατά την επίδραση αρνητικής οριζόντιας επιτάχυνσης $0,24g$ κατά $5,38 \text{ cm}$

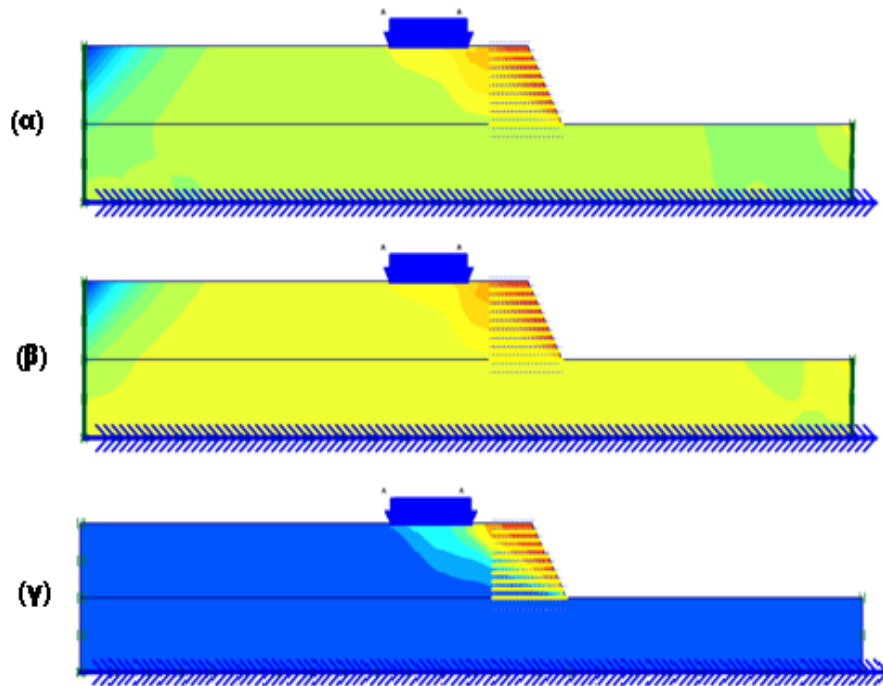
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις που συμβαίνουν στο πρανές κατά την δυναμική και ψευδοστατική ανάλυση. Όπως προκύπτει κατά την δυναμική ανάλυση ανεξαρτήτου διάρκειας σεισμού παρατηρούνται μετατοπίσεις σε όλο το πρανές, ενώ υψηλότερες μετατοπίσεις παρουσιάζονται στην περιοχή των γεωπλεγμάτων. Εν αντιθέσει στην ψευδοστατική επίλυση οι συνολικές μετατοπίσεις παρουσιάζονται μόνο στην περιοχή των γεωπλεγμάτων. Βάση των σχημάτων επαληθεύεται και το συμπέρασμα που είχε εξαχθεί κατά την στατική ανάλυση. Η εφαρμογή φορτίων αυξάνει την περιοχή των μετατοπίσεων, ενώ η χρήση πλάκας μειώνει τις μετατοπίσεις στην περιοχή που εφαρμόζεται η φόρτιση. Όμως η αύξηση του πάχους της πλάκας δεν αποφέρει αλλαγές στις μετατοπίσεις.



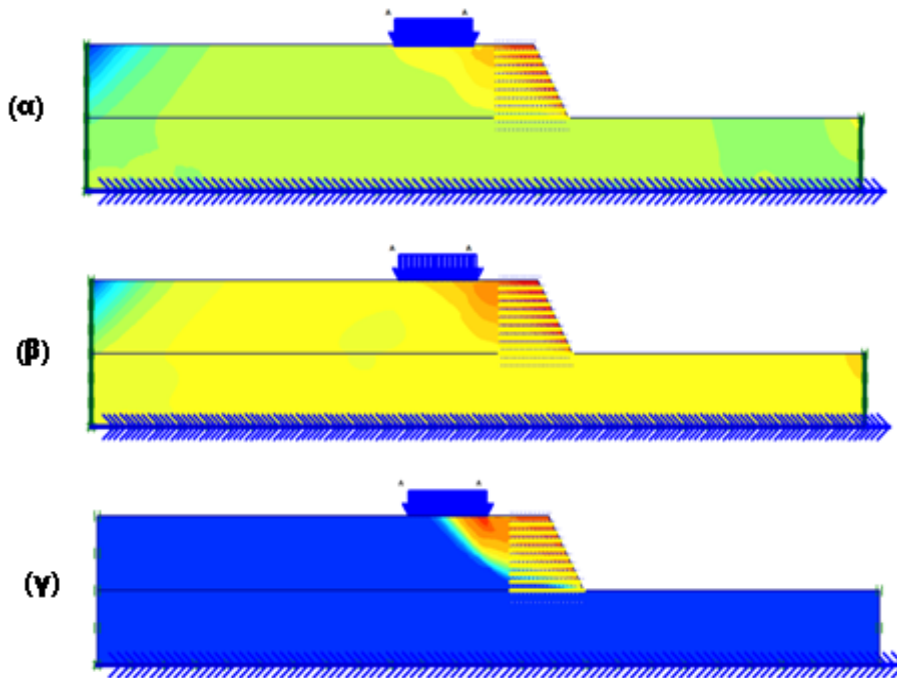
Σχήμα 5.5.5: Σύγκριση μετατοπίσεων (α)σε σεισμό 10 sec (β) σε σεισμό 23,35 sec (γ) ψευδοστατικά



Σχήμα 5.5.6: Σύγκριση μετατοπίσεων υπό τν δράση φορτίου σε πλάκα 1m (α) σε σεισμό 10 sec (β) σε σεισμό 23,35 sec (γ) ψευδοστατικά



Σχήμα 5.5.7: Σύγκριση μετατοπίσεων υπό τη δράση φορτίου σε πλάκα 2m (α) σε σεισμό 10 sec (β) σε σεισμό 23,35 sec (γ) ψευδοστατικά



Σχήμα 5.5.8: Σύγκριση μετατοπίσεων υπό τη δράση φορτίου (α) σε σεισμό 10 sec (β) σε σεισμό 23,35 sec (γ) ψευδοστατικά

5.6 Συγκρίσεις- Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκε η συμπεριφορά πρανούς υπό δυναμική ανάλυση με την εισαγωγή γνωστού σεισμού.

- Σύγκριση έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων δυναμικής και ψευδοστατικής επίλυσης. Η ακραία τιμή επιτάχυνσης του σεισμού υπολογίσθηκε σε όρους επιτάχυνσης βαρύτητας, έτσι ώστε να γίνει και ο υπολογισμός ψευδοστατικά. Όπως αποδείχθηκε το πρανές είτε σε αυτό δρουν μόνο οι δυνάμεις του βάρους ή κάποιο εξωγενές φορτίο (π.χ. κτήριο) παραμένει σταθερό. Ίδιο αποτέλεσμα προέκυψε και από τις δύο μεθόδους, αν και όπως αναφέρθηκε οι δύο τρόποι διαφέρουν ως προς τον τρόπο μεθοδολογία τους. Κύριες διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στην εισαγωγή και διεύθυνση των επιταχύνσεων που διέρχονται το πρανές και στην απόσβεση που κατά τον ψευδοστατικό υπολογισμό δεν λαμβάνεται υπόψη. Συμπερασματικά, λοιπόν, και οι δύο αναλύσεις αποδεικνύουν την ευστάθεια των πρανών αλλά περαιτέρω ασφαλείς αναλύσεις όπως παραδείγματος χάριν την σύγκριση των μετατοπίσεων που θα λάβουν χώρα στο πρανές δεν μπορούν να διενεργηθούν. Επίσης, συμπεραίνεται ότι η ψευδοστατική μέθοδος χαρακτηρίζεται ως συντηρητική μέθοδος διότι δεν λαμβάνει υπόψη την τυχόν μείωση της συνοχής λόγω ανακυκλώμενης φόρτισης όπως η δυναμική.
- Κατά την δράση του σεισμού τα φορτία που εισήχθησαν στο πρανές δεν προκάλεσαν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Οι ακραίες μετατοπίσεις που παρατηρούνται είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών ενώ στην στέψη του πρανούς οι διαφοροποιήσεις στις μετακινήσεις πλησιάζουν την διαφορά του εκατοστού. Μικρότερη μετατόπιση στην στέψη παρατηρείται κατά την χρήση πλακών, ανεξαρτήτου πάχους. Ως φαίνεται οι εισαγωγή πλάκας στην εφαρμογή φορτίου ελαττώνει τις μετατοπίσεις, τις τάσεις και τις τροπές σε σχέση με την απλή εφαρμογή του φορτίου. Άλλωστε συγκρίνοντας και τις διατμητικές τάσεις το φορτίο έχει την τάση να τις κατανέμει σε όλο το μήκος εφαρμογής του, εν αντιθέσει με την περίπτωση της πλάκας, που οι διατμητικές τάσεις συγκεντρώνονται κυρίως στις άκρες της.
- Η αύξηση του πάχους της πλάκας όπως αναφέρθηκε δεν επηρεάζει την μετατόπισή της, ωστόσο επηρεάζει κυρίως τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτή. Αύξηση πάχους σημαίνει αύξηση της αξονικής δυστένειας και της καμπτικής ακαμψίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των αξονικών δυνάμεων και κατ' επέκταση την μείωση των εφελκυστικών τάσεων που παρατηρήθηκαν στις συγκεκριμένες πλάκες.
- Μελέτη των χρονοϊστοριών της κορυφής κτηρίου αποδεικνύει ότι στην κορυφή συναντούνται μεγάλες επιταχύνσεις, ίσες σχεδόν με τις τιμές του σεισμού. Από αυτό είναι κατανοητό ότι κατά τον σεισμό το κτήριο δέχεται

μεγαλύτερες καταπονήσεις από ότι το έδαφος από κάτω του και μας δείχνει την αναγκαιότητα αντισεισμικής μελέτης των κτηρίων.

- Κατά την δυναμική ανάλυση το έδαφος υποβάλλεται σε τοπική αστοχία που εμφανίζεται στο αριστερό άκρο του πρανούς. Αυτή η τοπική αστοχία οφείλεται στην εξαναγκασμένη ταλάντωση που συμβαίνει σε αυτή την περιοχή. Λόγω του μοντέλου που επιλέχθηκε (Mohr- Coulomb) ενισχύεται ενώ σε περίπτωση που είχε επιλεγθεί γραμμικό ελαστικό μοντέλο, δεν θα εμφανιζόταν. Ωστόσο το μοντέλο Mohr- Coulomb περιγράφει καλύτερα το έδαφος και η αστοχία αυτή δεν επηρεάζει την συμπεριφορά της περιοχής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα αναφερθούν περιληπτικά όσα διαπραγματεύτηκε η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Θα αναλυθούν όλοι οι στόχοι που είχαν τεθεί στην αρχή των επιλύσεων ενώ θα διατυπωθούν προτάσεις για περαιτέρω μελέτη, βασιζόμενοι στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

6.1 Συμπεράσματα

Οι αρχικοί στόχοι που τέθηκαν κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν τέσσερις. Αρχικά τέθηκε η συγκριτική μελέτη της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων με άλλες μεθόδους, αριθμητικές και εργαστηριακές. Οι επιλύσεις που συγκρίθηκαν με άλλες μεθόδους είναι οι επιλύσεις 1 έως 4 του Τέταρτου Κεφαλαίου. Η συνήθης σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων ήταν η με δύο τρόπους. Πρώτα, μέσω της εξαγωγής ενός συντελεστή ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι ιδανικός για να συγκριθούν οι μέθοδοι και να διερευνηθεί η ακρίβεια των επιλύσεων, καθώς πρόκειται για ένα μέγεθος που είναι κοινό σε όλες τις μεθόδους. Άλλωστε και σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000, η ευστάθεια του πρηνούς καθορίζεται από τον Συντελεστή Ασφαλείας. Σε όλες τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων συμφωνούσαν απόλυτα με τα ήδη υπολογισμένα. Συγκεκριμένα οι διαφορές του Συντελεστή Ασφαλείας κυμάνθηκαν από 0% (Μέθοδος των Νομογραφημάτων Hoek-Bray) έως 0,01% για την μέθοδο των λωρίδων. Σε περίπτωση που τα δεδομένα ήταν επαρκή, μια άλλη διαδικασία ελέγχου της μεθόδου ήταν η μελέτη της επιφάνειας αστοχίας. Βέβαια, η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι ένα απολύτως συγκρίσιμο μέγεθος όπως ο Συντελεστής Ασφαλείας, ενώ από μέθοδο σε μέθοδο μπορεί να υπάρχουν μικροδιαφορές. Οι επιλύσεις των επιφανειών αστοχίας στην συγκεκριμένη έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τις επιτυχίες συγκρίσεις της μεθόδου, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Πέρα από την αξιοπιστία της μεθόδου, η ταχύτητα

επίλυσής τους μέσω των διαθέσιμων λογισμικών και η δυνατότητα γενικευμένης χρήσης της σε πολλές εφαρμογές που αφορούν τον Μηχανικό καθιστούν την μέθοδο ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την επίλυση ακόμα και των πιο δύσκολων και οριακών καταστάσεων.

Δεύτερος στόχος, αφού επιβεβαιώθηκε η αξιοπιστία της μεθόδου, ήταν η παραμετρική μελέτη της ευστάθειας των Πρανών. Εισήχθησαν συνθήκες κατά τις οποίες επιβαρυνόταν η ευστάθεια ενός πρανούς ενώ μελετήθηκαν και οι τρόποι διατήρησης ή αύξησης της ευστάθειας κυρίως μέσω του οπλισμού των πρανών. Συνοπτικά, όπως άλλωστε είναι γνωστό η μείωση της συνοχής και της γωνίας τριβής του εδάφους μειώνουν την ευστάθεια του πρανούς. Ωστόσο, κατά την συγκεκριμένη εργασία περισσότερο μελετήθηκε η επίδραση εξωγενών παραγόντων στην ευστάθεια των πρανών. Συνεπώς, επιβλήθηκαν φορτία στην επιφάνεια οπλισμένου πρανούς (βλέπε επίλυση 5, 4^ο Κεφάλαιο). Συνήθως, η επιβολή τέτοιων φορτίων προέρχεται από επέμβαση του ανθρώπου με την κατασκευή κτηρίων ή άλλων τεχνικών έργων. Στην εργασία τοποθετήθηκε γραμμικό φορτίο που αναπαριστά μια κατασκευή, ενώ έπειτα τοποθετήθηκε και σκελετός κτηρίου. Κύριο συμπέρασμα των επιλύσεων αυτών ήταν ότι η θέση επιβολής της φόρτισης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια του πρανούς. Ακόμα και για το οπλισμένο με γεωπλέγματα πρανές, που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, αν η φόρτιση εφαρμοζόταν κοντά στην στέψη του πρανούς το πρανές παρουσίαζε μόνιμες μετατοπίσεις. Αντιθέτως, όσο απομακρυνόταν από την στέψη μειωνόταν το μέγεθος της επιφάνειας αστοχίας και αυξανόταν ο Συντελεστής Ασφαλείας. Με απομάκρυνση από την περιοχή της στέψης, ο συντελεστής έτεινε να γίνει ίσος με το συντελεστή που παρουσίασε το πρανές υπό την επίδραση μόνο του εδαφικού βάρους. Σε αυτή την περίπτωση οι επιδράσεις της φόρτισης αποκτούσαν τοπικό χαρακτήρα, δηλαδή προκαλούσαν τοπική καθίζηση και δεν επηρέαζαν την συνολική ευστάθεια του πρανούς. Για να κατανοηθεί η σημαντική επίδραση της φόρτισης κοντά στην στέψη του πρανούς, πρέπει να σημειωθεί ότι ο Συντελεστής ασφαλείας του οπλισμένου πρανούς υπό την δράση του εδαφικού βάρους υπολογίστηκε ίσος με 1,775. Η συγκεκριμένη τιμή υποδηλώνει ένα αρκετά σταθερό πρανές. Εφαρμογή φόρτισης $-146,25 \text{ kN/m}^2$ δύο μέτρα της στέψης του ήταν ικανή να το οδηγήσει σε αστοχία. Αντικατάσταση του φορτίου με σκελετό κτηρίου έδωσε παρόμοια αποτελέσματα, όσο πιο μακριά από την στέψη τόσο πιο σταθερό το πρανές. Τέλος, υπολογίστηκε και η επίδραση του γεωπλέγματος στο πρανές. Έτσι, με διπλασιασμό της αξονικής δυστένειας του πρανούς προκύπτει αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας του πρανούς κατά 33 %

Τρίτος στόχος ήταν η μελέτη συμπεριφοράς των πρανών υπό την επίδραση σεισμικών επιταχύνσεων. Οι σεισμικές επιταχύνσεις εισήχθησαν με δύο τρόπους. Αρχικά, με ψευδοστατική επίλυση και έπειτα με δυναμική. Κατά την ψευδοστατική επίλυση μελετήθηκε η συμπεριφορά των πρανών υπό την συνδυασμένη εισαγωγή οριζόντιας και κατακόρυφης εδαφικής επιτάχυνσης είτε κατά την θετική φορά είτε κατά την αρνητική. Τα μελετώμενα πρανά θεωρήθηκαν ότι ανήκουν στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II, όπου η οριζόντια επιτάχυνση θεωρείται ίση με $0,24g$, ενώ η

κατακόρυφη είναι η μισή της οριζόντιας, δηλαδή 0,12g. Γενικό συμπέρασμα από αυτές τις επιλύσεις (βλέπε επιλύσεις 2 και 3, 4^ο Κεφάλαιο) είναι ότι η επίδραση των σεισμικών επιταχύνσεων άλλοτε επιβαρύνει και άλλοτε ενισχύει την ευστάθεια του πρανούς. Η εφαρμογή της σεισμικής επιτάχυνσης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αδρανειακών δυνάμεων προκαλώντας μετατόπιση του πρανούς κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αυτή που εισήχθη η επιτάχυνση. Συγκεκριμένα, κατά την εισαγωγή θετικής οριζόντιας επιφάνειας, το πρανές τείνει να μετακινηθεί προς τα αριστερά. Παρομοίως, θετική κατακόρυφη επιτάχυνση προκαλεί μετατοπίσεις προς τα κάτω. Ωστόσο, όπως διερευνήθηκε η κατακόρυφη επιτάχυνση συμμετέχει στη συμπεριφορά του πρανούς σε πολύ μικρότερο ποσοστό σε σχέση με την οριζόντια επιτάχυνση. Είναι προφανές επομένως, για ποιο λόγο ένα πρανές δύναται να είναι πιο σταθερό υπό την εφαρμογή σεισμικής εδαφικής επιτάχυνσης σύμφωνα με την ψευδοστατική ανάλυση.

Επιπλέον μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς έγινε με την εισαγωγή πραγματικού σεισμού στον υπολογισμό του πρανούς (βλέπε 5^ο Κεφάλαιο). Η μελέτη έγινε υπό την εξωγενή φόρτιση της επιφάνειας του πρανούς, με διάφορα είδη φόρτισης. Η δυναμική επίλυση αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο κομμάτι των Πεπερασμένων Στοιχείων καθώς πρέπει να ελεγχθούν πολλοί παράμετροι προκειμένου να μην παρατηρηθεί ανάκλαση των σεισμικών κυμάτων. Κατά την δράση του σεισμού τα φορτία που εισήχθησαν στο πρανές δεν προκάλεσαν μεγάλες διαφοροποιήσεις καθώς η επίδραση των φορτίσεων στην μετατόπιση του πρανούς είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών, επομένως οι μέγιστες μετατοπίσεις προκαλούνται κυρίως από την διέγερση του σεισμού. Όσο αφορά τις πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη εισαγωγή του φορτίου στην επιφάνεια του πρανούς ισχύει πως η αύξηση του πάχους της πλάκας όπως αναφέρθηκε δεν επηρεάζει την μετατόπισή της, ωστόσο επηρεάζει κυρίως τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτή. Αύξηση πάχους σημαίνει αύξηση της αξονικής δυστένειας και της καμπτικής ακαμψίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των αξονικών δυνάμεων και κατ' επέκταση την μείωση των εφελκυστικών τάσεων που παρατηρήθηκαν στις συγκεκριμένες πλάκες.

Σύμφωνα με τις κοινές επιλύσεις με δυναμική και ψευδοστατική ανάλυση αποδεικνύεται η ευστάθεια των πρανών υπό την εισαγωγή ιδίου μεγέθους επιτάχυνσης. Περαιτέρω ασφαλείς αναλύσεις όπως παραδείγματος χάριν την σύγκριση των μετατοπίσεων που θα λάβουν χώρα στο πρανές δεν μπορούν να διενεργηθούν. Συγκεκριμένα, κατά την δυναμική ανάλυση οι επιταχύνσεις δεν εφαρμόζονται μόνο κατά μια φορά και με συνεχή επιτάχυνση ιδίου μεγέθους, όπως γίνεται στην ψευδοστατική επίλυση, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς στο οριζόντιο επίπεδο και κατακόρυφο επίπεδο. Με αυτό τον τρόπο η ευστάθεια του πρανούς την μια στιγμή ενισχύεται και την άλλη απομειώνεται. Εν αντιθέσει με την ψευδοστατική που η απομείωση της ευστάθειας έχει συνεχές μέγεθος και η επιτάχυνση είναι γραμμικά μεταβαλλόμενη. Επίσης, κατά την δυναμική ανάλυση λαμβάνεται υπόψη και ένα μέγεθος που κατά την ψευδοστατική επίλυση παραλείπεται. Είναι η απόσβεση, που στην συγκεκριμένη περίπτωση εισήχθη με την ορισμό των

συντελεστών Rayleigh. Αποτέλεσμα της απόσβεσης είναι η μείωση του πλάτους του σεισμικού κύματος, όσο αυτό ταξιδεύει μέσα στο εδαφικό υλικό. Έτσι, η επιτάχυνση με την πάροδο του χρόνου μειώνεται μέχρις ότου εξαλειφθεί τελείως. Αντιθέτως, η σεισμική επιτάχυνση στην ψευδοστατική επίλυση μειώνεται γραμμικά, προκαλώντας έτσι εντονότερα φαινόμενα σε σχέση με την δυναμική ανάλυση.

Από την μελέτη των χρονοϊστοριών της κορυφής κτηρίου αποδεικνύει ότι στην κορυφή συναντούνται μεγάλες επιταχύνσεις, ίσες σχεδόν με τις τιμές του σεισμού. Από αυτό είναι κατανοητό ότι κατά τον σεισμό το κτήριο δέχεται μεγαλύτερες καταπονήσεις από ότι το έδαφος από κάτω του και μας δείχνει την αναγκαιότητα αντισεισμικής μελέτης των κτηρίων. Η μεγάλη καταπόνηση του κτηρίου απεικονίζεται στην και στην συμπεριφορά των πλακών του κτηρίου. Συγκρίνοντας την δυναμική επίλυση της πλάκας με αυτή που έγινε ψευδοστατικά προκύπτει ότι υπόκειται σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις ενώ δέχεται και μεγαλύτερα μεγέθη αξονικών και διατμητικών δυνάμεων, που οδηγούν στην αύξηση των τάσεων στις πλάκες. Παρόλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις το κτήριο ταλαντώνεται δίχως όμως να υπάρξει πρόβλημα στην ευστάθειά του.

Συμπερασματικά, όσο αφορά την σύγκριση των δύο μεθόδων η ψευδοστατική μέθοδος θα χαρακτηριζόταν ως μια πιο συντηρητική μέθοδος υπολογισμού της ευστάθειας του πρανούς. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν λαμβάνει υπόψη τυχόν μείωση της συνοχής λόγω ανακυκλωμένης φόρτισης, όπως η δυναμική φόρτιση, ειδικά σε περιπτώσεις παρουσίας νερού.

6.1 Προτάσεις

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων διαθέτει ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Με αυτή την λογική πολλές επιπλέον μελέτες μπορούν διερευνηθούν με έναυσμα την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Η δυναμική ανάλυση με το συγκεκριμένο γεωτεχνικό πρόγραμμα προσφέρει πολλές δυνατότητες μελέτης. Γενικά, θα ήταν δυνατή μια μελέτη διερεύνησης της δυναμικής ευστάθειας και συμπεριφοράς του πρανούς που θα παρουσιάζει διαφορετικό σπλισμό από το γεώπλεγμα, που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία. Παραδείγματος χάριν να γίνει η μελέτη ενός τοίχου αντιστήριξης, είναι πρόταση για μια εξέλιξη αυτού που έγινε στην παρούσα εργασία. Επίσης, να διερευνηθεί μια συγκριτική μελέτη των επιπτώσεων σε ένα κτήριο ή σε ένα πρανές κατά την δυναμική και την ψευδοστατική ανάλυση. Αυτή την φορά όμως θα εισαχθούν στο πρόγραμμα οι επιταχύνσεις γνωστού ελληνικού σεισμού και θα συγκριθεί με την εδαφική επιτάχυνση της περιοχής που παρουσιάστηκε ο σεισμός, σύμφωνα με τις τιμές που παρέχει ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός. Τέλος, ορμώμενοι των αποτελεσμάτων της Επίλυσης 3 για την συμπεριφορά του φρεατίου ορίζοντα υπό την εφαρμογή σεισμικών επιταχύνσεων, προτείνεται η περαιτέρω ανάλυση για την μελέτη και σύγκριση της συμπεριφοράς του και στην δυναμική ανάλυση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Brinkgreve R.B.J., (2002), **PLAXIS 2D- Version 9 manual**, A.A. Balkema, Netherlands
2. Huebner H. Kenneth, (2001), **The Finite Element Method for Engineers**, Σελ. 3- 8, John Wiley & Sons, Canada
3. Aryal Kr., (2006), **Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods**, Doctoral Thesis, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim
4. Taylor R.N., (1995), **Geotechnical centrifuge technology**, Σελ. 19-20, Chapman & Hall, Glasgow
5. Gorog P., Torok A., (2007), **Slope stability assessment of weathered clay by using field data and computer modeling: a case study from Budapest**, Department of Construction Materials and Engineering Geology, Budapest University of Technology, Budapest, Hungary
6. Park S.-K., Koh H.-M., Lee H.S., (2006), **Structural health monitoring: Proceedings of the Third European Workshop**, Σελ. 417, DEStech publications, USA
7. Ματζιάρης Β., Φερεντίνου Μ., Αγγελοπούλου Ο., Καρανάσιου Σ., Σακελλαρίου Μ., (2007), **Landslide Hazard Analysis- a case study in Kerasia village (Prefecture of Karditsa)**, Πρακτικά 11^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Αθήνα
8. Terzaghi K., Peck R.B., (1969), **Εφηρμοσμένη Εδαφομηχανική Α και Β τόμος**, Γκιούρδας, Αθήνα
9. Σακελλαρίου Μ., (2008), **Γεωτεχνική Μηχανική**, Σελ. 139-219, Ε.Μ.Π, Αθήνα
10. Μαρκέτος Ε. Γ., (1998), **Τεχνική Μηχανική Τόμος ΙΙ: Αντοχή Υλικών**, Σελ. 2-39, Συμμετρία, Αθήνα
11. **Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000**
12. Τσελέντης Α. (1997), **Σύγχρονη Σεισμολογία Τόμος Α**, Σελ. 204, Παπασωτηρίου, Αθήνα
13. Μαυραζιώτης Ν.Γ., Αθανασόπουλος Α.Γ., (2006), **Κατασκευές οπλισμένου εδάφους- Ανάλυση δύο περιπτώσεων αστοχίας υπό στατική και σεισμική φόρτιση**, 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5- 2/6/2006

14. Γερόλυμος Ν., Κουρκούλης Ρ., Γκαζέτας Γ., (2006), **Ανάλυση βίαιων κατολισθήσεων κατά τον σεισμό Mid- Niigata 2004: Η περίπτωση του πρανούς Higashi Takezawa**, 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5- 2/6/2006
15. Κουρκούλης Ρ., Γκαζέτας Γ., (2008), **Αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής κατά την διάρκεια κατολισθήσεων λόγω σεισμού**, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5/11- 7/11/2008

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

1. Κοζάνης Στ., (1996), **Ανάπτυξη προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων με εφαρμογές σε τρισδιάστατα προβλήματα μη γραμμικής συμπεριφοράς**, Σελ. 33- 62, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
2. Μπάτσου Ι., (2009), **Η αστοχία των πρανών και κατολισθητικά φαινόμενα. Μηχανισμοί πρόκλησης τους και αντιμετώπιση**, Διπλωματική εργασία, Σχολή Γεωγραφίας, Καποδιστριακό πανεπιστήμιο, Αθήνα
3. Ραΐση Ε.Ο., (2009), **Ανάπτυξη λογισμικού σε περιβάλλον C++ για τον προσδιορισμό της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας πρανών κατά Sarma & Tan**, Σελ. 7-10, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
4. Ανδριανάκης Ε., (2008), **Εντοπισμός ατελειών σε επίπεδη πλάκα ομογενούς και σύνθετου υλικού με χρήση νευρωνικών δικτύων και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων**, Σελ. 9- 15, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
5. Ράπτη Δ., (2006), **Τοίχοι οπλισμένου εδάφους υπό σεισμική φόρτιση- αριθμητική ανάλυση συμπεριφοράς**, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
6. Δημητρίου Ι., (2008), **Μελέτη σεισμικής απόκρισης κρηπιδοτοιχών βαρύτητας και πρόταση καμπυλών τρωτότητας με χρήση αριθμητικών μεθόδων**, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
7. Λάζαρη Μ., (2009), **Εκτίμηση σεισμικών μετακινήσεων ενεργών κατολισθήσεων**, Σελ. 5- 36, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
8. Σταθοπούλου Β., (2005), **Σεισμική Μόνωση τοίχων εδαφικής αντιστήριξης με γεωαφρό διογωμένης πολυστερίνης- παραμετρική αριθμητική ανάλυση**, Σελ. 32- 50, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα