



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

**Παραμετρική διερεύνηση κατολίσθησης σε περιοχή του Πηλίου με
χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης στις δύο διαστάσεις**

Διπλωματική Εργασία

ΣΟΦΙΑ Θ. ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ

Βόλος, Φεβρουάριος 2018



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

**Παραμετρική διερεύνηση κατολίσθησης σε περιοχή του Πηλίου με
χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης στις δύο διαστάσεις**

Διπλωματική Εργασία

Της φοιτήτριας
Σοφίας Καλογήρου

Υπό την επίβλεψη του
Γεώργιου Εφραιμίδα,
Επικούρου Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού
2018

© 2018 Σοφία Καλογήρου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: (Επιβλέπων)

Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής:

Δρ. Αιμίλιος Κωμοδρόμος, Καθηγητής,

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής:

Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορας

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κύριο Γεώργιο Εφραιμίδη, για την ανάθεση του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησής του. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, κύριο Αιμίλιο Κωμοδρόμο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, και την κυρία Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπαλλήλους του τμήματος τεχνικών υπηρεσιών της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Μαγνησίας για την ευγενική διάθεση της μελέτης, δεδομένα της οποίας ήταν απαραίτητα για την εκπόνηση της διπλωματικής.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πατέρα μου Θεόδωρο, τη μητέρα μου Διαμάντω και τον αδερφό μου Γιώργο για την αγάπη και την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου για την αμέριστη αγάπη και τη στήριξή τους.

Σοφία Καλογήρου

Παραμετρική διερεύνηση κατολίσθησης σε περιοχή του Πηλίου με χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης στις δύο διαστάσεις

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η παραμετρική μελέτη κατολίσθησης που έλαβε χώρα στο νομό Μαγνησίας και συγκεκριμένα στο 48^ο χλμ της Εθνικής Οδού Βόλου- Νεοχωρίου-Ζαγοράς-Ξορυχτίου, με χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης.

Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, έγινε η προσομοίωση του προβλήματος, με τα γεωτεχνικά προγράμματα Phase2 και Slide της εταιρίας Rocscience. Χρησιμοποιήθηκε επίσης το γεωτεχνικό πρόγραμμα Roclab. Οι μηχανικές και οι γεωλογικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, λήφθηκαν α) από τη γεωτεχνική μελέτη "Αποκατάσταση ζημιών στο 48^ο χλμ της Ε.Ο Βόλου- Νεοχωρίου-Ζαγοράς- Ξουρίχτι" που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή και β) τη βιβλιογραφία.

Ο βασικός κορμός της εργασίας αποτελείται από δισδιάστατες αναλύσεις ευστάθειας πρανών σε στατικές και σε σεισμικές συνθήκες, έχοντας ως κύριες παραμέτρους τη στρωματογραφία του εδάφους, την ύπαρξη διακλάσεων καθώς και την παρουσία υδάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται πιθανά μέτρα αντιστήριξης για τη διασφάλιση της ευστάθειας του πρανούς

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις οι κατανομές των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα πρανή, οι συντελεστές αντοχής των πρανών, καθώς και οι συντελεστές ασφάλειας στις κρίσιμες επιφάνειες ολίσθησης. Στο τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα και προτείνεται η μελλοντική έρευνα.

Parametric investigation of landslide in a region of Pelion by using numerical methods in 2D

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the parametric study using numerical methods of a landslide that took place in the county of Magnesia, specifically at the 48th km of Volos-Neochori- Zagora- Xourichti National road.

In order to accomplish this diploma thesis, the problem was simulated, using the geotechnical software Phase2 and Slide, designed by Rocscience company. The geotechnical program Roclab was also used. The mechanical and geological parameters used were taken from a) the geotechnical study of “Damage Recovery at the 48th km of Volos-Neochori-Zagora-Xourichti”, that was conducted in the area , and b) the bibliography.

The main part of the study consists of 2D stability analyses of slopes in static and seismic conditions, having as main parameters the ground stratigraphy, the existence of joints, as well as the presence of water. Subsequently, some remedial measures are suggested, in order to ensure the slope stability.

Subsequently, the displacements and strains presented at the slopes, the slope's strength coefficients, as well as the relevant safety factors of the critical sliding surfaces, are presented in graphical depictions. Finally, the results are discussed and future research is proposed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 7 |
| ABSTRACT..... | 9 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο..... | 14 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 14 |
| 1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ..... | 14 |
| 1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 14 |
| 1.3 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο | 16 |
| ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ..... | 16 |
| 2.1 ΠΡΑΝΗ..... | 16 |
| 2.2 ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ..... | 17 |
| 2.2.1 Επίπεδη ολίσθηση..... | 17 |
| 2.2.2 Σφηνοειδής αστοχία..... | 19 |
| 2.2.3 Ανατροπή..... | 20 |
| 2.2.4 Κυκλική ή περιστροφική αστοχία (ολίσθηση)..... | 21 |
| 2.2.4.1 Γενικευμένη μέθοδος..... | 22 |
| 2.2.4.2 Μέθοδος των λωρίδων..... | 23 |
| 2.2.4.2.1 Συμβατική μέθοδος Fellenius (Σουηδική μέθοδος)..... | 23 |
| 2.2.4.2.2 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop..... | 25 |
| 2.2.4.2.3 Απλοποιημένη μέθοδος Janbu..... | 26 |
| 2.2.4.2.4 Μέθοδος Spencer..... | 27 |
| 2.2.4.2.5 Μέθοδος Morgenstern και Price..... | 27 |
| 2.3 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ..... | 28 |
| 2.3.1 Σε στατικές συνθήκες..... | 28 |
| 2.3.2 Σε σεισμικές συνθήκες..... | 29 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο..... | 30 |
| ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ..... | 30 |
| 3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ..... | 30 |
| 3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ..... | 32 |
| 3.2.1 Καταπτώσεις (falls)..... | 34 |
| 3.2.2 Ανατροπές (topples)..... | 35 |
| 3.2.3 Ολισθήσεις (slides)..... | 36 |
| 3.2.4 Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)..... | 37 |
| 3.2.5 Ροές (flows)..... | 38 |
| 3.2.6 Σύνθετες μετακινήσεις (composite complex slides)..... | 38 |
| 3.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΛΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ..... | 39 |
| 3.3.1 Διαδικασίες εκδήλωσης κατολισθήσεων..... | 39 |
| 3.3.2 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων..... | 39 |
| 3.3.3 Εξωτερικοί παράγοντες δημιουργίας κατολισθήσεων..... | 40 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο..... | 42 |
| ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 42 |

| | |
|---|------------|
| 4.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ..... | 42 |
| 4.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων..... | 42 |
| 4.1.2 Phase2 v.8.0 (RS ²)..... | 43 |
| 4.1.3 Slide v6.0..... | 44 |
| 4.1.4 Roclab..... | 44 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο | 45 |
| ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ..... | 45 |
| 5.1 ΓΕΝΙΚΑ..... | 45 |
| 5.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ..... | 46 |
| 5.2.1 Τοποθεσία..... | 46 |
| 5.2.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά..... | 49 |
| 5.2.3 Γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά..... | 49 |
| 5.2.4 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά..... | 50 |
| 5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ..... | 50 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο | 53 |
| ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ..... | 53 |
| 6.1 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ..... | 53 |
| 6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... | 55 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο | 57 |
| ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ..... | 57 |
| 7.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ..... | 57 |
| 7.1.1 Διαδικασία για Phase2..... | 57 |
| 7.1.2 Διαδικασία για Slide..... | 58 |
| 7.2 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ..... | 59 |
| 7.2.1 Στατικές συνθήκες..... | 59 |
| 7.2.1.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 59 |
| 7.2.1.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 69 |
| 7.2.2 Σεισμικές συνθήκες..... | 75 |
| 7.2.2.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 75 |
| 7.2.2.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 85 |
| 7.3 ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ..... | 96 |
| 7.3.1 Σε στατικές συνθήκες..... | 96 |
| 7.3.1.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 96 |
| 7.3.1.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 101 |
| 7.3.2 Σε σεισμικές συνθήκες..... | 107 |
| 7.3.2.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 107 |
| 7.3.2.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου..... | 118 |
| 7.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ..... | 129 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο | 131 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 131 |
| 8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 131 |
| 8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 131 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 132 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 134 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Οι φυσικές καταστροφές, όπως είναι οι κατολισθήσεις και οι υποχωρήσεις του εδάφους, αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς όχι μόνο συνιστούν κάποιες φορές απειλή για τις ανθρώπινες ζωές, αλλά και επιβαρύνουν την οικονομική και την κοινωνική κατάσταση μιας περιοχής. Έτσι, θεωρείται απαραίτητη η περαιτέρω γνώση και εμπειρία πάνω στη μελέτη τέτοιων καταστροφικών φαινομένων, και αυτό επιτυγχάνεται με τη λεπτομερή καταγραφή των γεγονότων, τη συνεχή παρακολούθηση της μεταβολής των κρίσιμων μεγεθών, την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωυλικών, την ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας, τη μοντελοποίηση των φαινομένων με τη χρήση των κατάλληλων γεωτεχνικών λογισμικών προγραμμάτων, και την εξαγωγή αποτελεσμάτων για τα προτεινόμενα μέτρα ενίσχυσης και αποκατάστασης της παθούσας βραχώμαζας ή εδαφόμαζας.

Η εμφάνιση τέτοιων αστοχιών αποτελεί συχνό φαινόμενο στην Ελλάδα, διότι εμπλέκονται πολλοί παράγοντες, όπως είναι η εδαφική σύσταση, η γεωμορφολογική εξέλιξη, η σεισμική δραστηριότητα αλλά και οι συχνές βροχοπτώσεις. Ωστόσο, και η άμεση ή η έμμεση δραστηριότητα του ανθρώπου επηρεάζει την εκδήλωση τέτοιων φαινομένων. Τις τελευταίες δεκαετίες, η ενδεδειγμένη έρευνα και μελέτη του θέματος από γεωτεχνικούς μηχανικούς και γεωλόγους έχει οδηγήσει στην απόκτηση σημαντικής τεχνογνωσίας για την επίλυση προβλημάτων κατολισθήσεων. Ωστόσο, προέχουν οι προσπάθειες για την πρόληψη της εκδήλωσης των φαινομένων, μια διαδικασία που είναι περίπλοκη και δαπανηρή.

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική προσέγγιση με χρήση αριθμητικών μεθόδων στην αποτύπωση μιας τέτοιας περίπτωσης.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια, Έλληνες και ξένοι επιστήμονες ασχολούνται με τη συγκέντρωση στοιχείων από κατολισθητικά φαινόμενα στον ελλαδικό χώρο, καθώς και με τη ανάπτυξη μιας μεγάλης βάσης δεδομένων προς χρήση για την προστασία του κοινωνικού συνόλου. Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε) αποτελεί σημείο αναφοράς, γιατί συμβάλλει στη γεωλογική μελέτη του τόπου, διατηρώντας ταυτόχρονα μεγάλη βάση δεδομένων. Σημαντική είναι και η ζωνοποίηση των περιοχών σχετικά με την επικινδυνότητα τους στην εμφάνιση ή επανεμφάνιση κατολισθήσεων.

Βιβλιογραφικά, υπάρχουν δημοσιεύσεις που ασχολούνται με τη μελέτη κατολισθήσεων που συνέβησαν σε περιοχές, και δημοσιεύσεις σχετικές με την επικινδυνότητα μιας περιοχής και την πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας. Η προσομοίωση των φαινομένων γίνεται με μια ευρεία γκάμα λογισμικών προγραμμάτων, τα οποία πραγματοποιούν αναλύσεις σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Τέτοια προγράμματα είναι: Phase2,

Slide, Geo5, Geoslope, Sofistik, FLAC/Slope, UDEC κ.α. , τα οποία βασίζονται σε διάφορες αριθμητικές μεθόδους (π.χ. μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος πεπερασμένων διαφορών κλπ.)

1.3 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της εργασίας χωρίζεται σε 7 ενότητες, που καταλαμβάνουν τα κεφάλαια 2-8 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2, παρατίθενται θεωρητικά στοιχεία της ευστάθειας των πρανών

Στο Κεφάλαιο 3, αναφέρονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων, και τα αίτια που τις προκαλούν.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται η περιγραφή των μεθόδων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται μία πλήρης αναφορά στην περιοχή μελέτης, όπου και έλαβε χώρα η κατολίπηση.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, και επιπλέον αναλύονται οι παράμετροι με τις οποίες πραγματοποιήθηκε η ανάλυση.

Στο Κεφάλαιο 7, παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του προβλήματος, και προτείνονται κάποια ενδεικτικά μέτρα υποστήριξης του πρανούς.

Στο Κεφάλαιο 8, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και προτείνονται ερευνητικές ενέργειες για μελλοντική δράση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Ευστάθεια πρανών

2.1 Πρανή

Τα πρανή ορίζονται ως κεκλιμένοι σχηματισμοί εδάφους ή βράχου, οι οποίοι είναι φυσικοί ή τεχνητοί. Τα φυσικά πρανή προκύπτουν είτε από τη διάβρωση του εδάφους (ή μιας βραχώμαζας) είτε από την εναπόθεση διάφορων φυσικών γεωλικών. Τα τεχνητά χωρίζονται στα επιχώματα και τα ορύγματα.

Η συνθήκη ολίσθησης ενός πρανούς καθορίζεται από δύο παράγοντες: την διατμητική τάση που προκαλεί την ολίσθηση και τη διατμητική αντοχή που ανθίσταται στην ολίσθηση. Το βάρος ενός στρώματος του πρανούς αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την κάθετη στο πρανές (ορθή τάση) και την παράλληλη σε αυτό (διατμητική τάση). Η διατμητική τάση τείνει να κινήσει την δυνητικά ολισθαίνουσα μάζα προς τα κάτω, κάτι που παρεμποδίζεται από την διατμητική αντοχή της, η οποία καθορίζεται από την τριβή και τη συνεκτικότητά της.

Λόγοι όπως η υψομετρική διαφορά, η σύσταση και οι διάφορες κλίσεις του πρανούς, το νερό, δημιουργούν διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό, οι οποίες με τη σειρά τους τείνουν να μετακινήσουν τη γεωμάζα. Εάν οι τάσεις αυτές υπερβούν τη διατμητική αντοχή, τότε προκύπτει αστοχία και κατολίσθηση. (Turner & Schuster, 1996)

Πιο αναλυτικά, οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός πρανούς είναι οι εξής: (Duncan, 1999)

- Η κλίση του πρανούς. Καθορίζεται από φυσικά αίτια ή από παρεμβάσεις του ανθρώπου. Στα φυσικά αίτια συμπεριλαμβάνονται οι κατακόρυφες τεκτονικές κινήσεις, η ποτάμια διάβρωση, καθώς και ο ποτάμιος κυματισμός. Στις ανθρώπινες παρεμβάσεις περιλαμβάνονται έργα οδοποιίας, μεταλλευτικές δραστηριότητες και διάφορα τεχνικά έργα.
- Η σύσταση και η δομή του πρανούς. Ένα πρανές απαρτίζεται συχνά από ένα συνδυασμό πετρωμάτων, αποσαθρωμένου μανδύα και εδάφους, με διάφορες ποσότητες φυτοκάλυψης και ποικίλη περιεκτικότητα σε νερό, συνθήκες που επηρεάζουν τη συνοχή του.
- Το νερό. Το νερό, είτε στην επιφάνεια είτε υπόγεια, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην εμφάνιση κατολισθήσεων με την αυξομείωση της πίεσης των πόρων, την εσωτερική διάβρωση και τις αποσαθρωτικές διεργασίες, τη χαλάρωση του πετρώματος κατά μήκος των επιφανειών ασυνέχειας και άλλα.
- Η σεισμικότητα της περιοχής. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού κραδασμού επέρχεται μείωση της συνοχής και το πρανές μπορεί να αστοχήσει.

Ένα πρανές μπορεί να διέρχεται από τρία στάδια: [1]

- Σταθερό: Αντιτίθεται σε όλες τις αποσταθεροποιητικές δυνάμεις.
- Οριακά σταθερό: Η ευστάθεια έχει μειωθεί αρκετά και αναμένεται εκδήλωση αστάθειας.
- Ενεργά Ασταθές: Οι αποσταθεροποιητικές δυνάμεις προκαλούν μετακινήσεις.

2.2 Μορφές αστοχίας

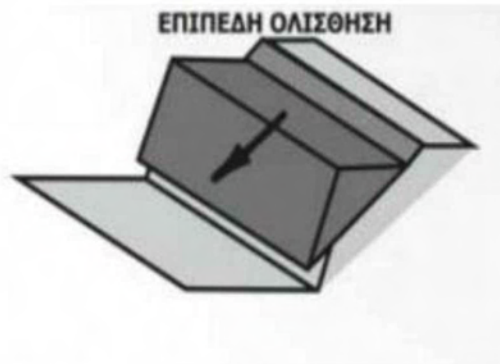
Οι τέσσερις βασικοί μηχανισμοί αστοχίας των βραχωδών πρανών είναι:

1. Ολίσθηση σε επίπεδη επιφάνεια
2. Σφηνοειδής ολίσθηση
3. Ανατροπή
4. Κυκλική ή περιστροφική ολίσθηση

Στην κυκλική ολίσθηση, η γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης συναρτάται με τη γεωμετρία του πρανού, τη μηχανική συμπεριφορά και την αντοχή της βραχώμαζας. Στις υπόλοιπες τρεις, η επιφάνεια αστοχίας καθορίζεται από τις ασυνέχειες, οι οποίες δημιουργούν επίπεδα ολίσθησης και ανατροπής πετρώματος. [12]

2.2.1 Επίπεδη ολίσθηση

Κατά την ολίσθηση σε επίπεδη επιφάνεια, το πρανές ολισθαίνει λόγω ενός καλά ανεπτυγμένου δικτύου ασυνεχειών, το οποίο, σε συνδυασμό με μία προκαθορισμένη ελεύθερη επιφάνεια (επίπεδο ασυνέχειας), και υπό την επίδραση της βαρύτητας, σχηματίζουν πρισματικά τεμάχια που τείνουν να ολισθήσουν. Οι συνθήκες για να συμβεί μια τέτοια αστοχία, κατά τους Hoek & Bray(1977) είναι: α) το επίπεδο ολίσθησης και το επίπεδο του πρανού να έχουν την ίδια διεύθυνση, με μέγιστη απόκλιση $\pm 20^\circ$, β) το επίπεδο ολίσθησης θα πρέπει να τέμνει την επιφάνεια του πρανού, γ) η γωνία τριβής θα πρέπει να είναι μικρότερη από την γωνία κλίσης της επιφάνειας ολίσθησης δ) να υπάρχουν πλευρικές επιφάνειες που να απελευθερώνουν το πέτρωμα. [1]



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση ολίσθησης σε επίπεδη επιφάνεια [1]

Υπάρχουν οι εξής δύο υποπεριπτώσεις επίπεδης ολίσθησης:

- Επίπεδη ολίσθηση με τη δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής, όπου η ρωγμή μπορεί να είναι ή πάνω από τη στέψη ή στο μέτωπο του πρανούς.

Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται ως εξής [1]:

$$F = \frac{c \cdot A + [W \cdot \cos \psi_p - a \cdot \sin \psi_p - U - V \cdot \sin \psi_p] \cdot \tan \varphi}{W \cdot (\sin \psi_p + \alpha \cdot \cos \psi_p) + V \cdot \cos \psi_p} \quad (1)$$

όπου:

c: συνοχή (kPa),

α: συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης,

φ: γωνία τριβής,

ψ_p: κλίση επιπέδου ολίσθησης

- Επίπεδη ολίσθηση χωρίς τη δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής, που συμβαίνει κατά μήκος μόνο μιας επιφάνειας ασυνέχειας.

Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση [1]:

$$F = \frac{c \cdot A + [W \cdot \cos \psi_p - a \cdot \sin \psi_p - U] \cdot \tan \varphi}{W \cdot (\sin \psi_p + \alpha \cdot \cos \psi_p)} \quad (2)$$

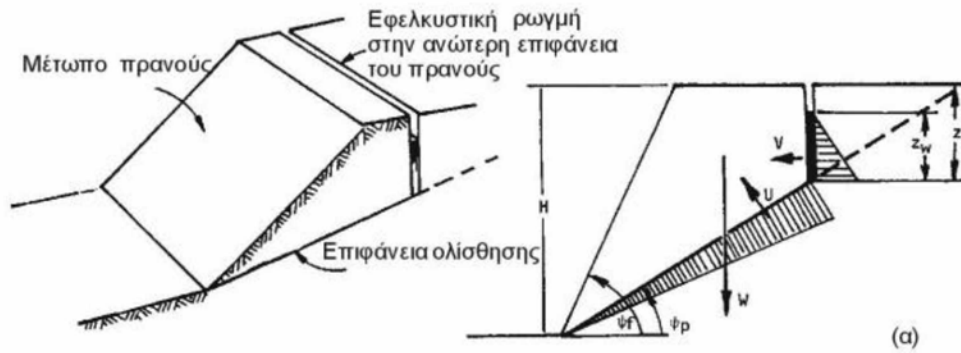
όπου:

c: συνοχή (kPa),

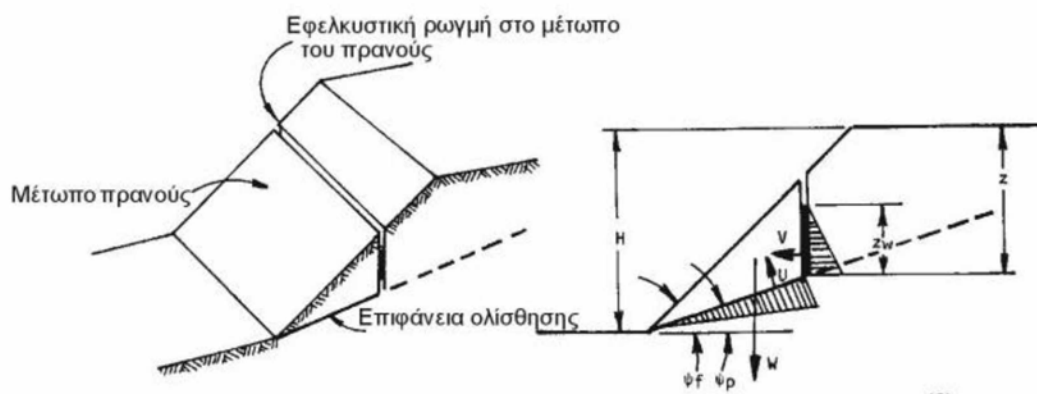
α: συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης,

φ: γωνία τριβής,

ψ_p: κλίση επιπέδου ολίσθησης



(α)

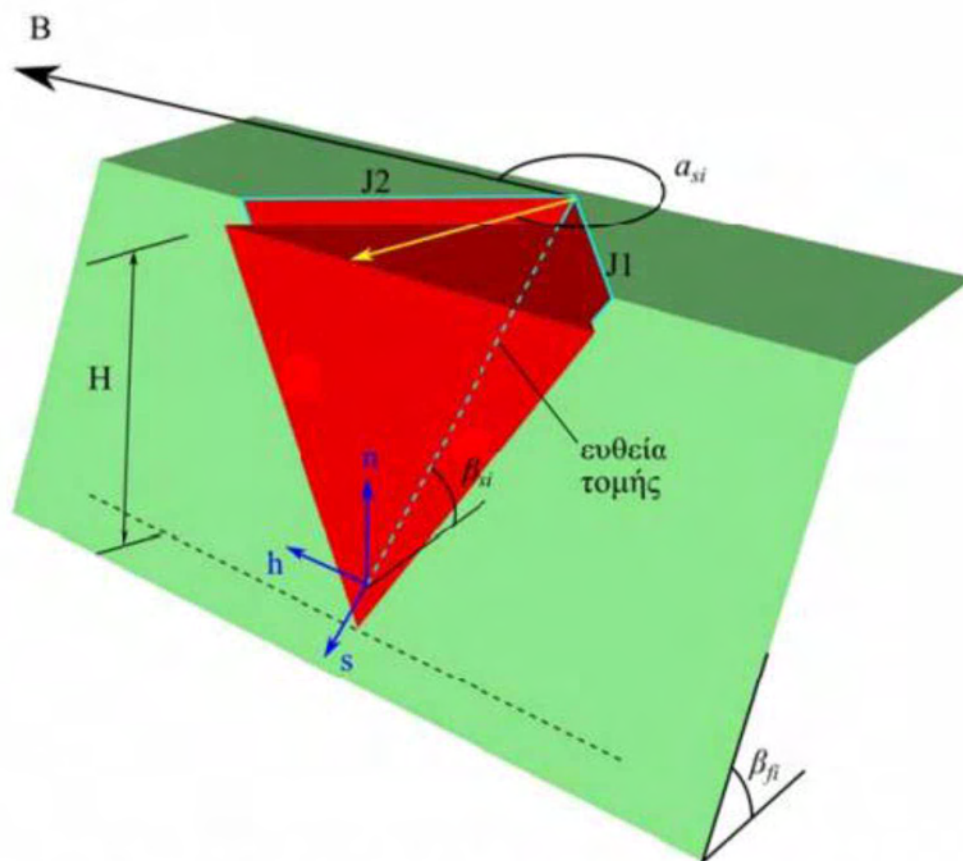


(β)

Εικόνα 2.2: Πρανές με εφελκυστική ρωγμή
 α) πάνω από τη στέψη
 β) στο μέτωπο του πρανούς [1]

2.2.2 Σφηγοειδής αστοχία

Είναι η ολίσθηση που περιλαμβάνει την υπό αστοχία γεωμάζα που καθορίζεται από δύο επιφάνειες που τέμνονται κατά μια γραμμή, με κατηφορική κλίση προς το μέτωπο του πρανούς. Για να συμβεί μια τέτοια ολίσθηση θα πρέπει: α) η διεύθυνση του πρανούς και της σφήνας να συμφωνούν, β) τα δύο επίπεδα να τέμνουν την επιφάνεια του πρανούς και να αλληλοτέμνονται, και γ) η γραμμή διατομής των επιπέδων να σχηματίζει γωνία με το οριζόντιο επίπεδο που να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής της βραχομάζας, αλλά ταυτόχρονα μικρότερη της γωνίας του επιπέδου του πρανούς. [21]



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση σφηνοειδούς αστοχίας [12]

Σε μια προκαταρκτική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την τριβή των επιπέδων ασυνεχειών, και σε ξηρές συνθήκες, ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει δίνεται από την ακόλουθη σχέση [1] :

$$F = A * \tan\varphi_A + B * \tan\varphi_B \quad (3)$$

όπου: A και B είναι αδιάστατοι συντελεστές που εξαρτώνται από την κλίση και τη φορά μέγιστης κλίσης των επιπέδων ασυνεχειών, και φ_A , φ_B οι γωνίες εσωτερικής τριβής των δύο αλληλοτεμνόμενων επιπέδων

2.2.3 Ανατροπή

Η αστοχία της ανατροπής περιλαμβάνει την περιστροφή στρωμάτων ή συμπαγών τμημάτων πετρώματος γύρω από σημείο ή άξονα που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του τεμάχου (Εικ. 2.4). Κατά τους Goodman και Bray (1976) υπάρχουν τα ακόλουθα είδη ανατροπής: 1) Ανατροπή λόγω κάμψης : συνεχή στρώματα πετρώματος, που βυθίζονται απότομα και αντίρροπα προς το πρηνές, κάμπτονται προς την επιφάνεια του πρηνούς και

αστοχούν. 2) Ανατροπή τεμαχών: ανατροπή εγκάρσια ρηγματωμένων σχεδόν κατακόρυφων στρωμάτων ή στηλοειδών τεμαχών πετρώματος. 3) Ανατροπή τεμαχών εμφανιζόμενη ως κάμψη: ψευδοσυνεχής κάμψη σχεδόν κατακόρυφων στρωμάτων με πολλαπλές εγκάρσιες ασυνέχειες.

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη σχέση: [16]

$$F = \frac{\tan\varphi_{available}}{\tan\varphi_{required}} \quad (4)$$

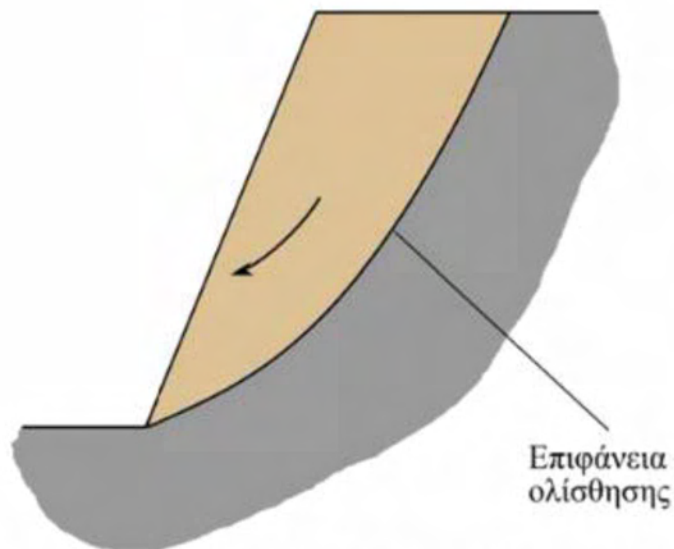
όπου: $\varphi_{available}$ είναι η διαθέσιμη γωνία τριβής και $\varphi_{required}$ είναι η απαιτούμενη γωνία τριβής, ώστε το βραχώδες τεμάχος να είναι οριακά ευσταθές. [12]



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση ανατροπής [12]

2.2.4 Κυκλική ή περιστροφική αστοχία (ολίσθηση)

Κυκλική είναι η ολίσθηση η οποία έχει κατά προσέγγιση σχήμα κυκλικού τόξου. Μπορεί να εκδηλωθεί συνήθως όταν η βραχώμαζα είναι αποσαθρωμένη, και τα τεμάχια του πετρώματος πολύ μικρά, συγκριτικά με το μέγεθος του πρσανούς. [12]



Εικόνα 2.5: Σκαρίφημα κυκλικής αστοχίας [12]

Σε αυτήν την περίπτωση, η ανάλυση της ευστάθειας πραγματοποιείται σύμφωνα με δύο βασικές μεθοδολογίες [1] :

- Γενικευμένη μέθοδος (circular arc analysis)
- Μέθοδος των λωρίδων (method of slices)

2.2.4.1 Γενικευμένη μέθοδος

Αναπτύχθηκε από τον Patterson (1995) και κάνει λόγο για τον υπολογισμό των ροπών περιστροφής και αντίστασης της γεωμάζας. Οι δυνάμεις που ασκούνται στη μάζα προκαλούνται από [1]:

- Το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας, W
- Τις ενεργές τάσεις, N
- Τη διατμητική αντοχή της γεωμάζας
- Την πίεση πόρων, u

Ο συντελεστής ασφάλειας εκφράζεται ως ο λόγος των παθητικών ροπών (αντίστασης) και των ενεργητικών ροπών (ανατροπής) και έχει ως εξής:

$$F = \frac{r*[c'_d*(AB)+tan\varphi'_d]*\sum_{i=1}^n \bar{\sigma}_i}{Wd} \quad (5)$$

όπου:

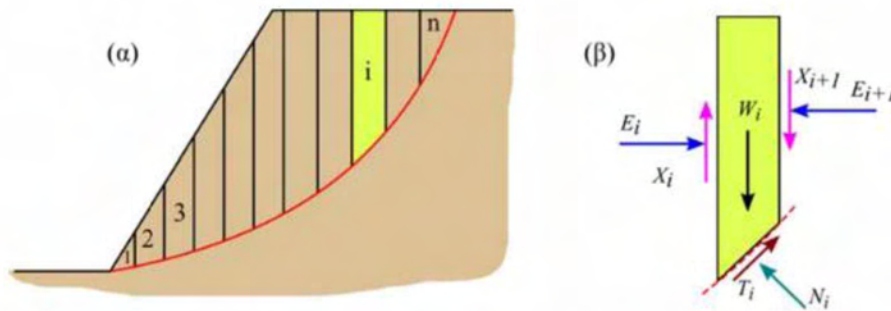
c'_d : η συνοχή που αντιστοιχεί σε μοναδιαίο μήκος τόξου του κύκλου ολίσθησης

(AB): μήκος τόξου

φ' : μέση γωνία τριβής
 σ_i : ενεργή τάση σε σημείο i
 W : βάρος ολισθαίνουσας μάζας
 d : απόσταση του κέντρου του κύκλου ολίσθησης από την κατακόρυφη που περνάει από το κέντρο βάρους της μάζας

2.2.4.2 Μέθοδος των λωρίδων

Η υποδιαίρεση της ολισθαίνουσας μάζας σε επιμέρους λωρίδες (ίσου πλάτους και μοναδιαίου πάχους) με κατακόρυφες πλευρές παρέχει μία καλύτερη προσέγγιση στον υπολογισμό των εδαφικών παραμέτρων. Γνωρίζοντας τη γεωμετρία του πρανούς, η ανάλυση γίνεται σύμφωνα με την εικ. 2.6:



Εικόνα 2.6: Σκαρίφημα της μεθόδου των λωρίδων [12]

όπου:

W_i : βάρος ολισθαίνουσας μάζας

T_i : διατμητική αντοχή στην επιφάνεια ολίσθησης ($\tau=c'+\sigma_i \tan \varphi'$)

N_i : ενεργή τάση κάθετη στη βάση της λωρίδας

X : διαλωριδική πλευρική δύναμη κατά τη διεύθυνση των πλευρών της λωρίδας

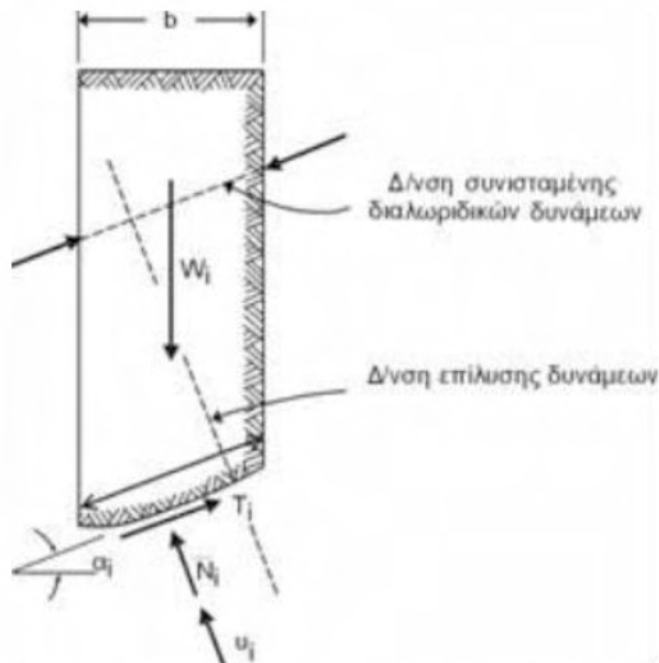
E : διαλωριδική πλευρική δύναμη κάθετη στην πλευρά της λωρίδας

Στη συνέχεια περιγράφονται οι πέντε πιο συνηθισμένες μέθοδοι λωρίδων.

2.2.4.2.1 Συμβατική μέθοδος Fellenius (Σουηδική μέθοδος)

Αποτελεί γνωστή μέθοδο για την προσέγγιση του ζητήματος, κάνοντας την παραδοχή ότι υπάρχει κυλινδρική επιφάνεια ολίσθησης και γίνεται διαχωρισμός της ολισθαίνουσας γεωμάζας σε λωρίδες. Γίνεται η απλοποιητική παραδοχή ότι οι ορθές και οι κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις που δρουν στις πλευρές της λωρίδας δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό

την ολική ευστάθεια της εδαφικής μάζας, ούτως ώστε να μην υπολογιστούν οι εσωτερικές δυνάμεις X και E, και έτσι μπορούν να παραληφθούν από τους υπολογισμούς.



Εικόνα 2.7: Θεώρηση δυνάμεων κατά Fellenius [1]

Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' * \Delta l + (W_i * \cos \alpha_i - u_i * \Delta l) * \tan \phi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i * \sin \alpha_i} \quad (6)$$

όπου:

c, φ η μέση συνοχή και γωνία τριβής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης

W_i, το βάρος της i λωρίδας

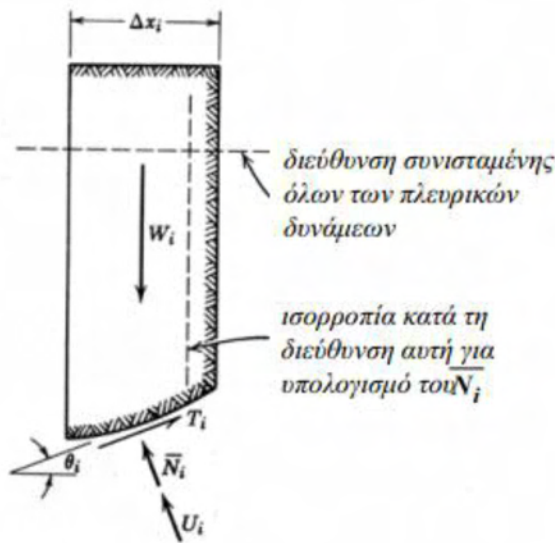
u_i, η πίεση πόρων στη βάση της i λωρίδας

α_i, Δl η κλίση ως προς την οριζόντια και το μήκος της βάσης της i λωρίδας

Η μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες ισορροπίας των δυνάμεων στο γενικό σύστημα. Επίσης, δεν αποτελεί τεχνική άμεσου (και από την αρχή) προσδιορισμού του δυσμενέστερου κύκλου. Έτσι ο συντελεστής ασφάλειας δεν είναι τελικός, καθώς ο κύκλος ολίσθησης είναι τυχαίος. Το ζήτημα αντιμετωπίζεται με τη συστηματική δοκιμή ικανού αριθμού κύκλων ολίσθησης και την εύρεση του δυσμενέστερου και κρίσιμου.

2.2.4.2 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

Η μέθοδος προτάθηκε από τον Bishop το 1995, και είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη. Η βασική παραδοχή που γίνεται είναι ότι οι συνισταμένες των διαλωριδικών πλευρικών δυνάμεων X και E έχουν οριζόντια διεύθυνση, και είναι ίσες και αντίθετες. Η επίλυση γίνεται σε κατακόρυφο άξονα, με αποτέλεσμα να ικανοποιείται η ισορροπία ροπών στο σύνολο της ολισθαίνουσας μάζας [1].



Εικόνα 2.8: Δυνάμεις κατά Bishop [1]

Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται ως:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \{ [c' * b + (W_i - u_i * b) * \tan \phi'] \left(\frac{1}{m_\alpha} \right) \}}{\sum_{i=1}^n W_i * \sin \alpha_i} \quad (7)$$

όπου:

$$m_\alpha = \cos \alpha_i * \left[1 + \left(\frac{\tan \alpha_i * \tan \phi'}{F} \right) \right]$$

c, φ η μέση συνοχή και γωνία τριβής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης

W_i , το βάρος της i λωρίδας

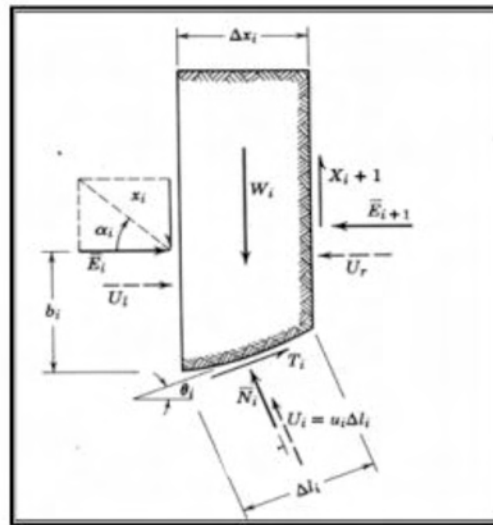
u_i , η πίεση πόρων στη βάση της i λωρίδας

α_i , η κλίση ως προς την οριζόντια

Ο συντελεστής εξάγεται με επαναληπτική διαδικασία.

2.2.4.2.3 Απλοποιημένη μέθοδος Janbu

Η απλουστευμένη μέθοδος από Janbu, Bjerrum και Kjaernsli (1956) αναφέρεται σε καμπυλόγραμμες επιφάνειες ολίσθησης. Ο συντελεστής ασφαλείας προσδιορίζεται από την ισορροπία των οριζοντίων δυνάμεων. βασίζεται στην υπόθεση ότι οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων είναι οριζόντιες (κάθετες δηλαδή στις παρειές των λωρίδων). Ο Janbu εισήγαγε έναν συντελεστή διόρθωσης (f_0) στον αρχικό συντελεστή ασφαλείας (F_0), ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση των διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων.



Εικόνα 2.9: Παραδοχές υπολογισμού δυνάμεων κατά Janbu [23]

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη σχέση :

$$F = f_0 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' + b + (W_i - u_i \cdot b) \cdot \tan \phi]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot \tan \alpha_i} \quad (8)$$

όπου:

c, ϕ η μέση συνοχή και γωνία τριβής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης

W_i , το βάρος της i λωρίδας

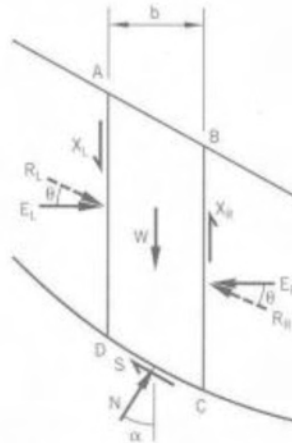
u_i , η πίεση πόρων στη βάση της i λωρίδας

α_i , η κλίση ως προς την οριζόντια

Στη γενικευμένη μέθοδο που πρότεινε ο Janbu θεωρήθηκε ότι είναι γνωστή η θέση του σημείου εφαρμογής των διαλωριδικών δυνάμεων. Σημεία που αποτελούν μία καμπύλη που ονομάζεται καμπύλη ωθήσεων. [1]

2.2.4.2.4 Μέθοδος Spencer

Ο Spencer (1967) βασίστηκε στην παραδοχή ότι οι πλευρικές δυνάμεις είναι παράλληλες, δηλαδή όλες οι πλευρικές δυνάμεις κλείνουν με την ίδια γωνία, λαμβάνοντας υπόψη διατμητικές και κανονικές δυνάμεις. Συνεπώς, ικανοποιείται η ισορροπία των ροπών αλλά και των δυνάμεων.



Εικόνα 2.10: Ανάλυση δυνάμεων κατά Spencer [24]

2.2.4.2.5 Μέθοδος Morgenstern και Price

Η μέθοδος των Morgenstern και Price (1965) αναφέρεται σε μη-κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και βασίζεται στο γεγονός ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων έχει συγκεκριμένη κλίση κατά το μήκος της ολισθαίνουσας επιφάνειας. [1]

Ισχύει η σχέση:

$$X = \lambda f(x)E \quad (9)$$

όπου:

X και E: είναι οι κάθετες και οι οριζόντιες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων,

f(x): μία υποτιθέμενη συνάρτηση μεταξύ των δυνάμεων που δρουν στη διεπιφάνεια των λωρίδων

λ: παράμετρος της παραπάνω υποτιθέμενης συνάρτησης.

[1]

2.3 Ευστάθεια πρανών

2.3.1 Στατικές συνθήκες

Η ευστάθεια προς πρανούς ορίζεται από ένα συντελεστή ασφαλείας (Factor of Safety) ο οποίος είναι ο λόγος των δυνάμεων που αντιστέκονται στην αστοχία προς προς δυνάμεις που τείνουν να την προκαλέσουν. Ουσιαστικά, είναι ο λόγος προς διατμητικής αντοχής προς τη διατμητική τάση.

$$FS = \frac{\text{δυνάμεις που αντιστέκονται στην αστοχία}}{\text{δυνάμεις που την προκαλούν}} \quad (10)$$

Σύμφωνα με την αρχή της οριακής ισορροπίας:

- Εάν $FS > 1$ το πρανές παραμένει σταθερό. Ιδανικές τιμές για στατικές συνθήκες είναι μεταξύ 1.3~1.4. Για σεισμικές είναι 1~1.1
- Εάν $FS = 1$ τότε έχουμε οριακή ισορροπία της ευστάθειας του πρανούς.
- Εάν $FS < 1$ το πρανές είναι ασταθές και είναι αναμενόμενη η ολίσθηση, λόγω των μεγάλων διατμητικών τάσεων.

Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται από την ανάλυση μιας μεθόδου οριακής ισορροπίας, αφού προηγουμένως έχει επιλεγθεί η μορφή αστοχίας που έχει υποστεί το πρανές. [1]

2.3.2 Σεισμικές συνθήκες

Στις περιπτώσεις περιοχών με αυξημένη σεισμικότητα, κρίνεται αναγκαίο η ανάλυση της ευστάθειας των πρηνών να συμπεριλαμβάνει και την απόκριση της βραχόμαζας σε σεισμική καταπόνηση.

Ως βάση για τον καθορισμό των εισαγόμενων στην ανάλυση τιμών των δυναμικών παραμέτρων της σεισμικής κίνησης, συνήθως η επιτάχυνση, λαμβάνεται συγκεκριμένος (στατιστικά αναμενόμενος) σεισμός σχεδιασμού, που αντιστοιχεί στα επιμέρους, σεισμογόνα ρήγματα της περιοχής επιρροής, όπου εντάσσεται η θέση του πρηνούς.

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες στον τεχνικό σχεδιασμό μέθοδοι είναι:

- η ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης. Είναι ιδιαίτερα συντηρητική μέθοδος και πολλές φορές δίνει τιμές συντελεστή ασφάλειας μικρότερες από τις υπολογιζόμενες από τη στατική ανάλυση.
- η μέθοδος ανάλυσης του Newmark (1965)

Σήμερα βρίσκονται σε χρήση και πολλές επιμέρους παραλλαγές των βασικών αυτών μεθόδων. [25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Κατολισθήσεις

3.1 Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων

Κατά τον Terzaghi (1950) η κατολίσθηση είναι «μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού (residual) εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω».

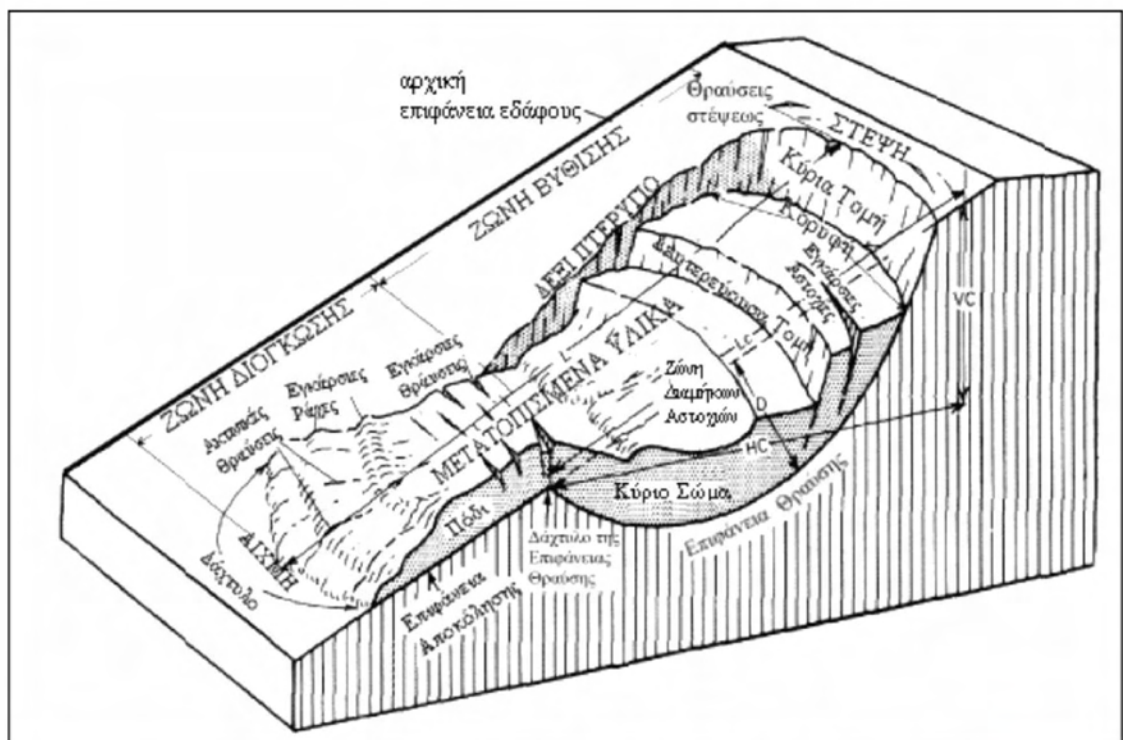
Γενικά ως κατολίσθηση ορίζεται ο αποχωρισμός και η κατάντη μετακίνηση των γεωυλικών που απαρτίζουν τα πρανή, που μπορεί να είναι εδαφικά, βραχώδη τεχνητές επιχωματώσεις ή ένας συνδυασμός αυτών. Ουσιαστικά, οι κατολισθήσεις αποτελούν διάφορες μετακινήσεις πρανών, όπου η διατμητική αστοχία έχει λάβει χώρα.

Οι κατολισθήσεις ενέχουν κινδύνους για τις ανθρώπινες ζωές και το κοινωνικό περιβάλλον, καθώς είναι συνήθως απρόβλεπτες και μη αναμενόμενες. Η καταλληλότητα μιας περιοχής καθορίζεται σημαντικά από τον παράγοντα της κατολισθητικής επικινδυνότητας, γι' αυτό και η εκπόνηση γεωτεχνικών μελετών είναι ζωτικής σημασίας. [2]

Τα βασικά μέρη μιας κατολίσθησης είναι [26]:

- Στέψη: Σχεδόν αμετακίνητο υλικό, δίπλα στα ψηλότερα σημεία του κύριου μετώπου.
- Κύρια τομή: Απότομη επιφάνεια στο αδιατάρακτο έδαφος, στο επάνω μέρος της κατολίσθησης, η οποία προκαλείται από την κίνηση του μετατιθέμενου υλικού. Είναι ένα ορατό μέρος της αστοχίας.
- Κορυφή: Το ψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής.
- Κεφαλή: Το ανώτερο μέρος της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής
- Δευτερεύουσα τομή: Απότομη επιφάνεια στο μετατιθέμενο υλικό που παράγεται από τις ποικίλες κινήσεις στο εσωτερικό του.
- Κύριο σώμα: Μέρος του μετατιθέμενου υλικού που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας, μεταξύ της κύριας τομής και του ποδός της επιφάνειας θραύσης.
- Πόδι: Μέρος της κατολίσθησης, το οποίο κινήθηκε μπροστά από το δάχτυλο της επιφάνειας αστοχίας.
- Αιχμή: Σημείο στο πόδι, το πιο απομακρυσμένο από την κορυφή της κατολίσθησης.
- Δάχτυλο: Είναι το πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή τμήμα του ολισθαίνοντος υλικού της κατολίσθησης.
- Επιφάνεια θραύσης: Επιφάνεια, η οποία σχηματίζει το κατώτερο όριο του μετατοπισμένου υλικού, κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.
- Δάχτυλο της επιφάνειας θραύσης: Αποτελεί την τομή μεταξύ του χαμηλότερου τμήματος της επιφάνειας θραύσης και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.

- Επιφάνεια αποκόλλησης: Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους που υπερκαλύπτεται από το πόδι της κατολίσθησης.
- Μάζα κατολίσθησης: Υλικό μετατοπισμένο από την αρχική του θέση στην πλαγιά λόγω της κίνησης. Σχηματίζει τόσο την μάζα βύθισης όσο και την μάζα διόγκωσης
- Ζώνη βύθισης: Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.
- Ζώνη διόγκωσης: Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά σημεία κατολίσθησης [26]

3.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Στην προσπάθεια ταξινόμησης των κατολισθήσεων, αρκετές είναι οι παράμετροι που διαδραματίζουν βασικό ρόλο,[1]:

1)ο τύπος του ολισθαίνοντος υλικού, 2) η μορφή μετακίνησης, 3) η περιεχόμενη υγρασία, 4) η ταχύτητα κίνησης,5) το αίτιο και η αφορμή κίνησης (σεισμικό-στατικό φορτίο, πίεση νερού, ανθρώπινος παράγοντας), 6) η τοποθεσία μετακίνησης (ξηρά, θάλασσα, λίμνη), 8) η γεωμετρία και η μορφολογία πρανούς, 9) η ύπαρξη φυτοκάλυψης, (11) η σχέση με ενεργότητα (ενεργή, ανενεργή, παλιά), 12) οι κλιματικές συνθήκες.,13) ο μηχανισμός ολίσθησης.

Το σύστημα ταξινόμησης του Varnes (1978) [19] περιλαμβάνει όλους τους τύπους ολίσθησης που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πρανή, εκτός των κλασικών καθιζήσεων.

Έτσι, ανάλογα με το είδος του μετακινούμενου υλικού, έχουμε:

- την κατηγορία των βραχωδών σχηματισμών , όπου η κίνηση αναφέρεται είτε σε συμπαγή-μεμονωμένα τεμάχια, είτε σε βραχώμαζα αποτελούμενη από σύνολο βραχωδών τεμαχίων διακεκριμένων μέσω δομικών ασυνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, κλπ) , και
- δύο κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών: τα κορήματα με επικράτηση χονδρόκοκκου υλικού και τις γαίες με επικράτηση του λεπτόκοκκου υλικού

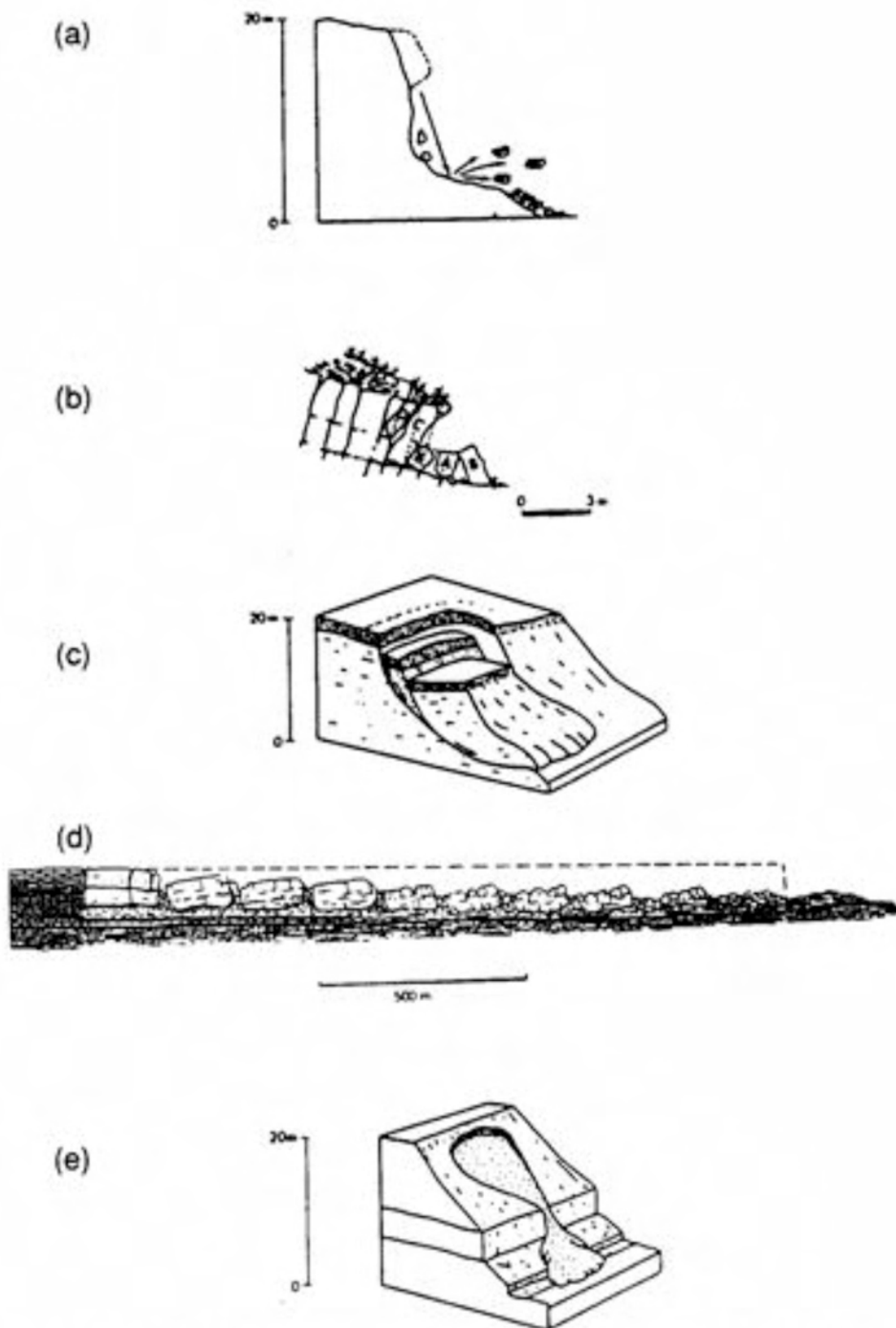
Ανάλογα δε, με τον τύπο της κίνησης, διακρίνουμε:

- τις καταπτώσεις (falls)
- τις ανατροπές (topples)
- τις ολισθήσεις (slides)
- τις πλευρικές εξάπλωσεις (lateral spreads)
- τις ροές (flows)
- τις σύνθετες κινήσεις (complex)

| Τύπος κίνησης | | Τύπος μετακινούμενου υλικού | | |
|-------------------|--------------|---|---------------------------------|-----------------------------|
| | | Βραχώδης υποβάθρο | Μηχανικά εδάφη | |
| | | | Χονδρόκοκκα | Λεπτόκοκκα |
| Κατάπτωση | | Κατάπτωση βράχων | Κατάπτωση κορημάτων | Κατάπτωση γαιών |
| Ανατροπή | | Ανατροπή βράχων | Ανατροπή κορημάτων | Ανατροπή γαιών |
| Ολίσθηση | Περιστροφική | Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου | Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων | Περιστροφική ολίσθηση γαιών |
| | Μεταθετική | Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου | Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων | Μεταθετική ολίσθηση γαιών |
| Πλευρική Εξάπλωση | | Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου | Πλευρική εξάπλωση κορημάτων | Πλευρική εξάπλωση γαιών |
| Ροή | | Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός) | Ροή κορημάτων | Ροή γαιών |
| Σύνθετη | | Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων | | |

| | |
|---|--|
| <p>Χονδρόκοκκα Κορήματα (debris) 20 - 80% >2mm (χαλίκια, κροκάλες, λατύπτες, ογκόλιθοι)</p> | <p>Λεπτόκοκκα Γαίες earth) >80% <2mm (άμμος, ιλύς, άργιλος)</p> |
|---|--|

Εικόνα 3.2: Ταξινόμηση κατά Varnes (1978) [19]

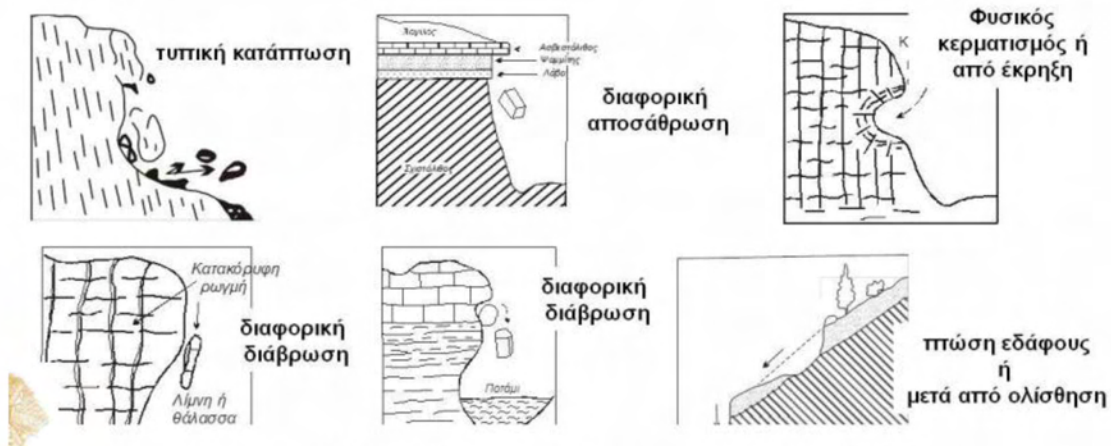


Εικόνα 3.3: Είδη κατολισθήσεων με βάση τον τύπο κίνησης [19]

- a) πτώση (Fall)
- b) ανατροπή (topple)
- c) ολίσθηση (slide)
- d) πλευρική έκταση (lateral spread)
- e) ροή-ρεύμα (flow)

3.2.1 Καταπτώσεις (falls)

Οι καταπτώσεις είναι απότομες κινήσεις μαζών των γεωλογικών υλικών, όπως βράχια και ογκόλιθοι, που έχουν αποκολληθεί από απότομες πλαγιές ή από γκρεμούς, χωρίς ή ελάχιστη διατμητική μετατόπιση. Ο διαχωρισμός συμβαίνει κατά μήκος των ασυνεχειών και η κίνηση συμβαίνει με ελεύθερη πτώση, αναπήδηση ή κύλιση. Οι καταπτώσεις επηρεάζονται έντονα από τη βαρύτητα, τις μηχανικές και καιρικές συνθήκες, και την παρουσία ενδιάμεσου νερού. Η μετακίνηση είναι πολύ ή και κάποιες φορές εξαιρετικά γρήγορη, και μπορεί να έχουν προηγηθεί μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν σε σταδιακό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας. [1]



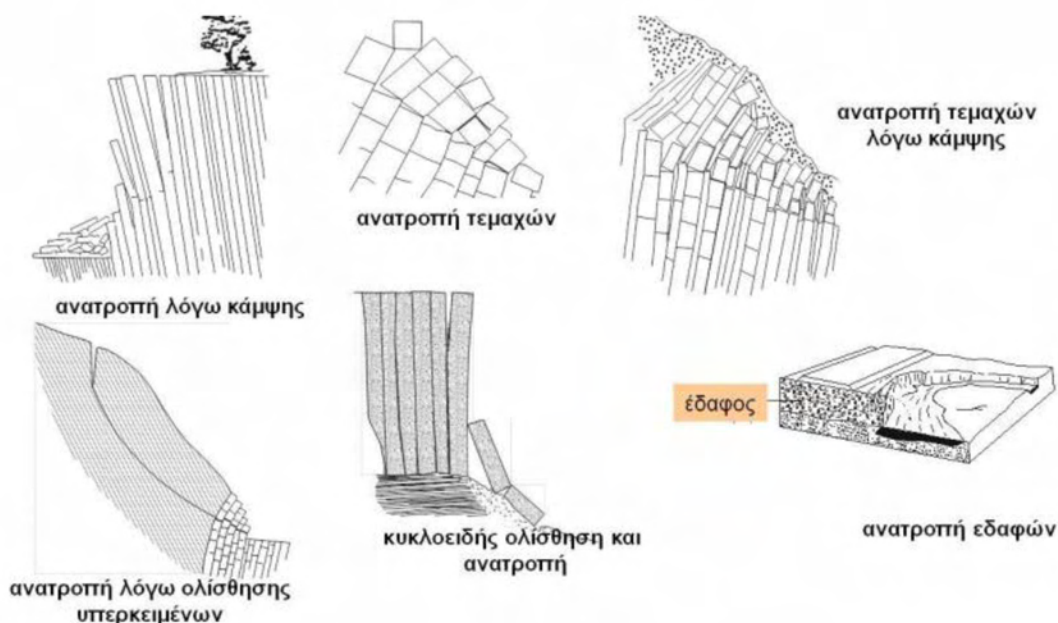
Εικόνα 3.4: Περιπτώσεις καταπτώσεων [19]

3.2.2 Ανατροπές(topples)

Οι ανατροπές διακρίνονται από μία προς τα έξω περιστροφή της μάζας που αποσπάται, γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της ίδιας μάζας. Αιτία είναι περισσότερο η βαρύτητα, αλλά και οι δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια, ή και η επίδραση του νερού. Μεταγενέστερα, εξελίσσεται σε πτώση ή ολίσθηση, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πρανούς. Η ταχύτητα αρχικά είναι πολύ αργή, ενώ μετά γίνεται πολύ γρήγορη [1].

Η ταξινόμηση στις ανατροπές συνεχίστηκε από τους Goodman και Bray (1976), και Hoek και Bray (1977), και πρότειναν την παρακάτω ταξινόμηση στις ανατροπές βράχων:

- Ανατροπή λόγω κάμψης
- Ανατροπή τεμαχών
- Ανατροπή τεμαχών λόγω κάμψης
- Δευτερογενείς ανατροπές\



Εικόνα 3.5: Μορφές ανατροπών [1]

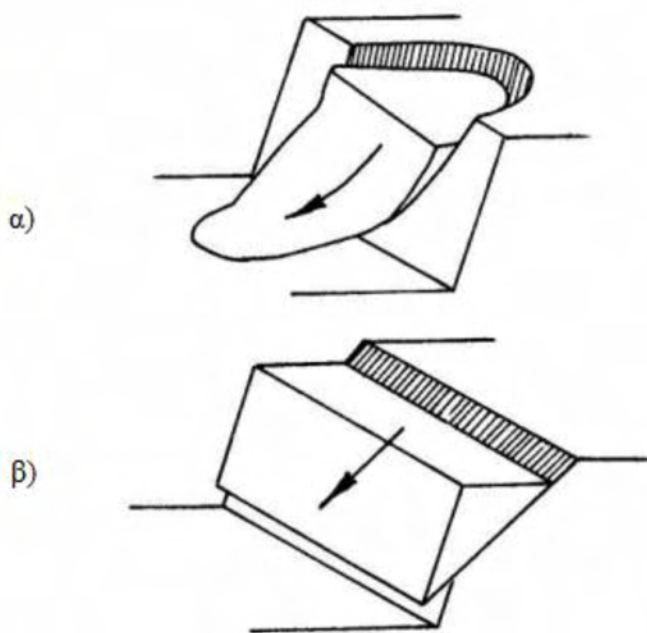
[1]

3.2.3 Ολισθήσεις (Slides)

Στις ολισθήσεις λαμβάνουν μέρος διατμητικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις, και έπειτα διατμητική θραύση του υλικού κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών, εντός των ορίων μιας στενής σχετικά ζώνης. Η μετατόπιση μπορεί να γίνεται προοδευτικά, αναλόγως με την εξέλιξη της διατμητικής θραύσης. Η επιφάνεια ολίσθησης είναι επίπεδη ή κυκλική.

Ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας ολίσθησης, και με το μηχανισμό μετακίνησης, οι ολισθήσεις χωρίζονται σε:[1]

- Περιστροφικές. Εκδηλώνονται κατά μήκος των κοίλων προς τα πάνω επιφανειών. Γίνεται σε κυλινδρική επιφάνεια, με άξονα παράλληλο προς την περιστροφή.
- Μεταθετικές. Κατά μήκος μιας προσεγγιστικά επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας.



Εικόνα 3.6: Τύποι ολισθήσεων [1]

α) Περιστροφική ολίσθηση

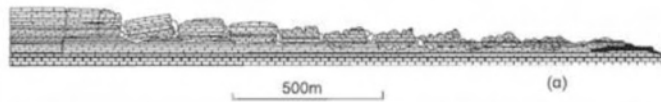
β) Μεταθετική ολίσθηση

3.2.4 Πλευρικές εξάπλωσεις (lateral spreads)

Πλευρικές εξάπλωσεις είναι υποοριζόντιες μετακινήσεις πάνω σε στρώσεις υλικών, και διευκολύνονται από την παρουσία διατμητικών και εφελκυστικών ρωγμών.

Διακρίνονται σε:

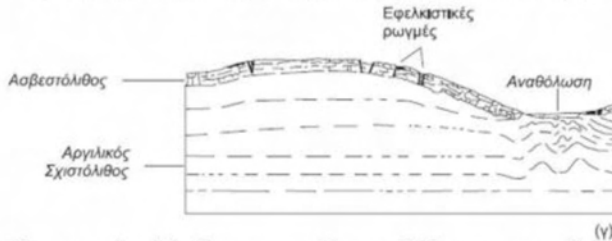
- Εξάπλωση τεμαχίων
- Εξάπλωσεις λόγω ρευστοποίησης
- Σύνθετες πλευρικές εξάπλωσεις



Διαρρηγμένοι ασβεστόλιθοι υπερκείμενοι μαλακότερων σχηματισμών



Γρήγορη πλευρική εξάπλωση αργίλου λόγω ρευστοποίησης άμμου



Πλευρική εξάπλωση ασβεστολίθων – αναθόλωση υποκείμενων σχιστολίθων

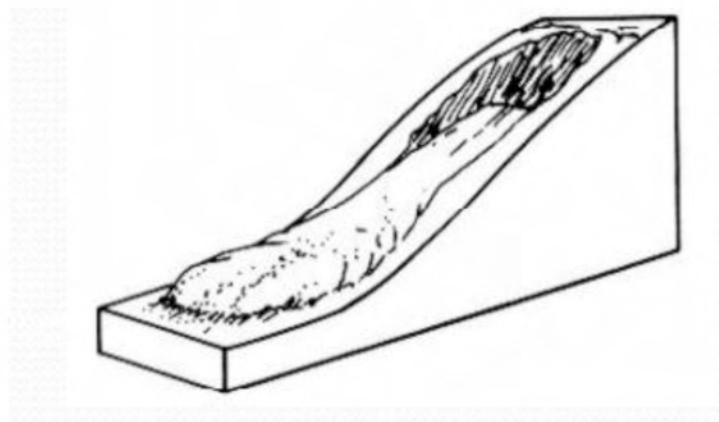
Εικόνα 3.7: Πλευρικές εξάπλωσεις [1]

3.2.5 Ροές (flows)

Οι ροές μπορεί να είναι ξηρές, υγρές, γρήγορες ή αργές, και εμφανίζονται σε πρηνή με χαλαρά υλικά. Σε βραχώδες περιβάλλον, οι μετακινήσεις πραγματοποιούνται με πολύ αργές παραμορφώσεις που διανέμονται σε κοντινές ρωγμές και διακλάσεις. [1]

Διακρίνονται σε:

- Ροές σε βραχώδες υπόβαθρο
- Ροές κορημάτων
- Ροές γαιών



Εικόνα 3.8: Ροές [1]

3.2.6 Σύνθετες μετακινήσεις πρηνών (composite, complex slides)

Σαν σύνθετες ολισθήσεις, είναι αυτές στις οποίες μετακινήσεις διαφορετικού τύπου γίνονται σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, και ορισμένες φορές ταυτόχρονα. Αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων τύπων κατολισθήσεων.

3.3 Παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση κατολισθήσεων

3.3.1 Διαδικασίες εκδήλωσης κατολισθήσεων

Η εκδήλωση κάθε μορφής κατολισθητικού φαινομένου σε πρανές, σε ορισμένη χρονική στιγμή, πραγματοποιείται όταν επέρχεται:

- μείωση της εγγενούς-διαθέσιμης διατμητικής αντοχής, κάτω από το κρίσιμο όριο, είτε
- αύξηση των εξασκούμενων διατμητικών τάσεων, πάνω από το κρίσιμο όριο, είτε
- ταυτόχρονη ανοδική πορεία των τάσεων και καθοδική της αντοχής μέχρι την κρίσιμη συνάντηση-εξίσωσή τους, που εκφράζει το όριο της ασταθούς ισορροπίας και την υπέρβασή του.

3.3.2 Παράγοντες εκδήλωσης κατολίστεσης

- Εσωτερικοί παράγοντες

Οι εσωτερικοί παράγοντες που διευκολύνουν την εκδήλωση κατολισθήσεων αφορούν τα ιδιαίτερα εγγενή χαρακτηριστικά του γεωλογικού υλικού του πρανούς είτε σε επίπεδο ορυκτολογικού υλικού, είτε σε επίπεδο μάζας (π.χ. ευνοϊκή εσωτερική γεωμετρία λόγω τεκτονισμού ή ιζηματογένεσης, παρουσία εναλλαγών σκληρών-μαλακών πετρωμάτων). Η παρουσία των παραγόντων αυτών διευκολύνει την δράση των εξωτερικών παραγόντων μέσω μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Η κύρια επιρροή των εσωτερικών παραγόντων στην εκδήλωση αστοχίας αναφέρεται στη μείωση της διατμητικής αντοχής της μάζας του πρανούς.

- Εξωτερικοί παράγοντες

Οι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να διακριθούν σε φυσικούς και ανθρωπογενείς (π.χ. εκσκαφή, φόρτιση στατική ή δυναμική, άρδευση, στο σώμα του πρανούς).

Οι φυσικοί αναφέρονται κυρίως στις:

- κλιματικές διαδικασίες (κυρίως βροχόπτωση ή χιόνι, μεταβολές θερμοκρασίας, κλπ.)
- τεκτονικές-σεισμικές διαδικασίες.
- στη δράση φυτών και ζώων με μικρότερη συμβολή.

Η δράση των εξωτερικών παραγόντων, τόσο των ανθρωπογενών όσο και των φυσικών προκαλεί σταδιακά ή ραγδαία την εκδήλωση αστοχιών λόγω:

- α) αύξησης των δρώντων διατμητικών τάσεων στη μάζα του πρανούς (in situ stresses), ή
- β) μείωσης της μηχανικής αντοχής της.

3.3.3 Εξωτερικοί παράγοντες δημιουργίας κατολίσθησης

- **Έντονη βροχόπτωση**

Η έντονη-ραγδαία βροχόπτωση αποτελεί βασικό παράγοντα έναρξης κατολισθητικών κινήσεων. Είναι γενικότερη διαπίστωση, ότι ακόμα και λίγες ώρες έντονης βροχόπτωσης (καταιγίδα) αποτελούν κατώφλια έναρξης πολλών τύπων αβαθών κατολισθητικών κινήσεων σε εδαφικούς σχηματισμούς ή σε αποσαθρωμένες ζώνες ή μανδύες βραχωδών σχηματισμών.

Οι συνήθεις κατολισθητικοί τύποι που παρατηρούνται είναι αβαθείς περιστροφικές ή επίπεδες ολισθήσεις, και ροές και οφείλονται στην κρίσιμη αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής και την αστοχία του πρανούς.. Για να εκδηλωθούν βαθιές κατολισθητικές κινήσεις απαιτείται μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση ώστε το νερό να έχει τον απαιτούμενο χρόνο να εισχωρήσει σε μεγάλο βάθος.

- **Λιώσιμο χιονιού**

Το λιώσιμο του συσσωρευμένου στα πρανή χιονιού, αποτελεί σημαντικό κατολισθητικό παράγοντα στις περιοχές υψηλού υψόμετρου. Μεγάλου πάχους κάλυμμα χιονιού τροφοδοτεί με νερό το πρανές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι είναι ο χρόνος κατείσδυσης στις συνήθους διάρκειας βροχοπτώσεις και επομένως είναι αναμενόμενο να μεταφέρει την αποσταθεροποιητική του δράση σε βαθύτερες περιοχές της μάζας, διαβρέχοντας αλλά και διαπερνώντας τον τυχόν υπάρχοντα αποσαθρωμένο εδαφικό μανδύα. Η ενεργοποίηση των κατολισθητικών μηχανισμών είναι ταχύτερη και ευρύτερης έκτασης, όταν μετά έντονες χιονοπτώσεις ακολουθήσουν διαλείμματα αυξημένων θερμοκρασιών ή έντονων βροχοπτώσεων που επιταχύνουν ραγδαία το λιώσιμο του χιονιού και άρα αυξάνουν το ρυθμό φόρτισης του πρανούς με νερό

- **Απότομη πτώση ή άνοδος στάθμης νερού**

1) Πτώση στάθμης.

Καταρχήν, η απότομη πτώση στάθμης του νερού σε ταμιευτήρες και άλλα σώματα επιφανειακής παρουσίας νερού είναι διαπιστωμένο πως αποτελεί κύριο παράγοντα εκδήλωσης κατολισθητικών κινήσεων. Στην περιοχή του υλικού που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη, η πίεση του νερού των πόρων είναι υδροστατική. Με την απότομη όμως πτώση της στάθμης, οι υφιστάμενες, στο χαμηλής περατότητας αργιλικό υλικό, υδροστατικές πιέσεις δεν εκτονώνονται γρήγορα, με συνέπεια να αυξηθούν κατά πολύ οι διατμητικές τάσεις. Όταν δε αυτές υπερβούν την αντοχή του υλικού επέρχεται αστοχία και εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων στο πρανές αναφοράς.

2) Άνοδος στάθμης.

Άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού στα πρανή λόφων, παρατηρείται μετά από παρατεταμένες βροχοπτώσεις ή συνδέεται με ανύψωση της στάθμης γειτνιαζόντων σωμάτων

νερού. Η άνοδος αυτή συνεπάγεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και αντίστοιχη, προφανή, μείωση της ενεργού διατμητικής αντοχής του κορεσμένου υλικού των πρανών.

- **Σεισμική φόρτιση**

Η σεισμική φόρτιση, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις (ένταση σεισμού, δομή και μηχανική κατάσταση σχηματισμού), αποτελεί σημαντικό παράγοντα εκδήλωσης πολλών τύπων κατολισθητικών φαινομένων τόσο σε βραχώδη (κυρίως απότομα και έντονα διακλασμένα) πρανή όσο και σε μικρών ακόμα κλίσεων εδαφικά πρανή.

[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Μέθοδοι προσομοίωσης

4.1 Γεωτεχνικά προγράμματα

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται τα γεωτεχνικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη αυτή. Η προσομοίωση των πρανών έγινε με τη βοήθεια των προγραμμάτων Phase2, Slide και Roclab, από την εταιρία Rocscience [29].

Το πρόγραμμα Phase2 ακολουθεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ).

4.1.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Αντικείμενο της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η αναγωγή ενός συνεχούς συστήματος σε διακριτό. Ο βαθμός αυτοματοποίησης της διαδικασίας καθορισμού των γεωμετρικών παραμέτρων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μέσω της εισαγωγής μετασχηματισμού και αναγωγής των στοιχείων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δεδομένη θέση στο πραγματικό σύστημα συντεταγμένων, σε κοινό στοιχείο αναφοράς. [3]

Η κεντρική έννοια της μεθόδου είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Σε μία συνεχή κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί, οπότε κατά συνέπεια απαιτείται η δημιουργία τεχνητού διαχωρισμού σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων τους. Τα τεχνητά στοιχεία είναι κατά κανόνα τριγωνικά ή τετράπλευρα και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Για να χρησιμοποιηθούν μητρωικές μέθοδοι απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και κάποιες φορές και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι τότε γίνεται αναφορά για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων, και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σχετικά με τις κομβικές μετατοπίσεις. Άρα, κατά αυτόν τον τρόπο, άγνωστες είναι μόνο οι μετατοπίσεις στους κόμβους. Το ζήτημα συνεπώς εκφράζεται σαν σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο λύνεται με αριθμητικές μεθόδους. [11]

Ο κύριος τρόπος διατύπωσης της μεθόδου είναι με τη μέθοδο των μετατοπίσεων, όπου: 1) Η κατασκευή διακριτοποιείται σε ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται σε συντοριακούς κόμβους. 2) Προσδιορίζονται οι άγνωστες μετατοπίσεις που θα καθορίσουν ολοκληρωτικά την απόκριση της κατασκευής. 3) Διατυπώνονται οι εξισώσεις ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και στη συνέχεια επιλύονται. 4) Υπολογίζονται οι εσωτερικές κατανομές των τάσεων των στοιχείων, για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους. 5) Εξάγονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, (μετατοπίσεις και τάσεις), με βάση τις παραδοχές του προβλήματος. [11]

4.1.2 Phase2 v.8.0 (RS²)

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα Phase2 (ή RS²) [27] με την έκδοση 8.0. Το Phase2 είναι ένα πρόγραμμα το οποίο πραγματοποιεί δισδιάστατες αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με εφαρμογές στο έδαφος και στο βράχο. Χρησιμοποιείται για ευρεία γκάμα τεχνικών έργων, όπως ευστάθεια πρανών, εκσκαφές, σήραγγες κλπ.

Η διαδικασία μοντελοποίησης συγκροτείται από τρία στάδια [27]:

- Model

Σε πρώτη φάση, γίνεται η επεξεργασία του μοντέλου. Εισάγονται και διαμορφώνονται τα όρια (boundaries) του μοντέλου, στο οποίο σημειώνονται τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, καθώς και υλικά, πιεζομετρικές γραμμές, ασυνέχειες κ.α. Εισάγονται οι επί τόπου τάσεις του εντατικού πεδίου, φορτία και οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες έχουν τη μορφή κινηματικών περιορισμών ή προκαθορισμένων εντατικών συνθηκών κατά τα σύνορα του μοντέλου. Στον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων, γίνεται η επιλογή της κατάλληλης καταστατικής σχέσης σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας (π.χ. γραμμικά ελαστική, ψαθυρή κλπ.) και την ανισοτροπία, και επιλέγεται το κριτήριο αστοχίας, που θεωρείται ότι περιγράφει καλύτερα την αντοχή της βραχώμαζας. Στη συνέχεια, προσδίδονται στη βραχώμαζα (ή στο άρρηκτο πέτρωμα και στις ασυνέχειες) οι κατάλληλες ιδιότητες, που είναι γνωστές είτε από τη γεωτεχνική μελέτη ή από προηγούμενη γεωτεχνική έρευνα στην περιοχή της μελέτης, είτε από βιβλιογραφικά δεδομένα. Επίσης, είναι δυνατή και η εισαγωγή στοιχείων ενίσχυσης (π.χ. αγκύρια). Ακόμα, η περιοχή του μοντέλου, που καταλαμβάνεται από τη βραχώμαζα, διακριτοποιείται (mesh), χωρίζεται δηλαδή σε ζώνες ή στοιχεία του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους και γνωστής γεωμετρίας (τρίγωνα ή τετράπλευρα σε δυο διαστάσεις, κλπ.)

- Compute

Είναι το στάδιο όπου γίνεται ο υπολογισμός και οι αναλύσεις, και προσδιορίζονται οι μετατοπίσεις, οι τάσεις, οι συντελεστές ασφαλείας και όλα τα χρήσιμα για τη μελέτη μεγέθη.

- Interpret

Αποτελεί το στάδιο στο οποίο εξάγονται με οπτικοποίηση τα αποτελέσματα, και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει τις αναλύσεις γραφικά.

Ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στο πρόγραμμα είναι και η μέθοδος της μείωσης της διατμητικής τάσης (Shear Strength Reduction- SSR method). Η μέθοδος αυτή, με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων και μειώνοντας τη διατμητική αντοχή του εδάφους με συγκεκριμένους συντελεστές (SRF), μέχρι να προκύψει αστάθεια, εξάγει τον κρίσιμο

συντελεστή απομείωσης αντοχής του πρανούς, ο οποίος στη διαδικασία ονομάζεται critical SRF, και ταυτίζεται με το safety factor. [33]

4.1.3 Slide v.6.0

Επόμενο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Slide v.6.0 της εταιρίας Rocscience [28]. Το πρόγραμμα πραγματοποιεί αναλύσεις οριακής ισορροπίας σε δύο διαστάσεις. Έχει εφαρμογές σε πληθώρα τεχνικών έργων, όπως πρανή, εκσκαφές, φράγματα κ.α.

Διαθέτει πολλά εργαλεία για τη μορφοποίηση του μοντέλου. Αρχικά, εισάγεται το μοντέλο με τα γεωμετρικά του στοιχεία και όρια. Στη συνέχεια, μπορούν να εφαρμοστούν φορτία, και μετά να προσδιοριστούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των εδαφών, επιλέγοντας και το κατάλληλο κριτήριο αστοχίας. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η εισαγωγή νερού, είτε με πιεζομετρική γραμμή, είτε με συντελεστή πίεσης πόρων R_u , καθώς και η επιβολή σεισμικού φορτίου.

Οι αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιούνται με τη χρήση της μεθόδου των κατακόρυφων λωρίδων. Επιπλέον, είναι δυνατή η ανάλυση μιας ορισμένης επιφάνειας ολίσθησης, ή να επιλεγθεί η ενέργεια να βρεθεί η κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης, καθώς και ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς.

4.1.4 Roclab

Το λογισμικό Roclab της εταιρίας Rocscience [29] χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής βράχων, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown. Η χρήση του είναι απλή, εισάγοντας κάποιες ιδιότητες της βραχώμαζας: α) σ_c , την ανεμπόδιστη αντοχή θλίψης αδιατάρακτου βράχου, β) GSI, το γεωλογικό δείκτη αντοχής, γ) m_i , τη παράμετρο αδιατάρακτου βράχου, και δ) D, τον παράγοντα διαταραχής.

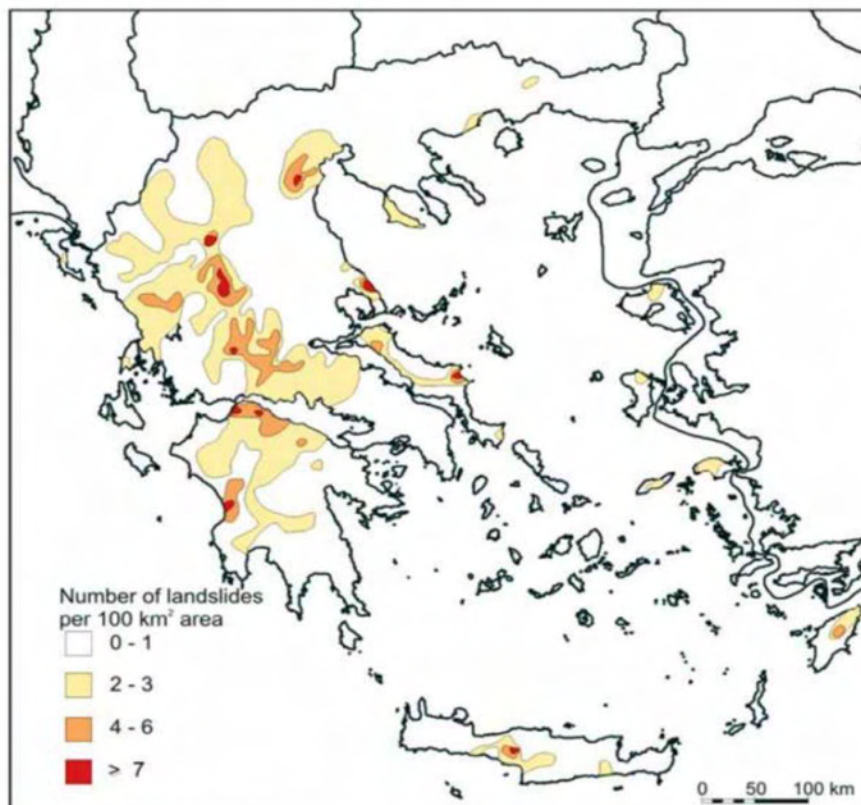
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Περιοχή κατολίσθησης

5.1 Γενικά

Τα κατολισθητικά φαινόμενα στην Ελλάδα αποτελούν συχνό φαινόμενο, εξαιτίας του γεωτεκτονικού καθεστώτος που υφίσταται στον ελληνικό χώρο. Η συνθήκη αυτή καθορίζει όλους τους παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση κατολισθήσεων, που είναι: η λιθολογία και η ύπαρξη στρωμάτων με ασθενείς ιδιότητες, η γεωμορφολογία και οι μεγάλες κλίσεις, η ενεργή τεκτονική δραστηριότητα, και σαφώς το κλίμα. Καταλυτικό ρόλο παίζει και η ανθρώπινη παρέμβαση. Συχνά είναι τα φαινόμενα απρογραμμάτιστων κινήσεων που ως αποτέλεσμα έχουν στην αστοχία πρανών και καταστροφή του περιβάλλοντος.

Συγκεκριμένα για το νομό Μαγνησίας και το Πήλιο, και παρατηρώντας το χάρτη κατολισθητικής επικινδυνότητας του ελληνικού χώρου (Εικόνα 5.1), τον οποίο και συνέταξαν οι Koukis et al (2005) [17] μελετώντας τον αριθμό των φαινομένων ανά 100 τετραγωνικά χιλιόμετρα, συμπεραίνεται ότι τα περισσότερα γεγονότα συγκεντρώνονται στη βόρεια και δυτική Πελοπόννησο, στην Κρήτη, στην Εύβοια, στην Πίνδο, στην Πιερία και στο Πήλιο, δηλαδή κυρίως σε ορεινές περιοχές.



Εικόνα 5.1: Χάρτης κατολισθητικής επικινδυνότητας [17]

5.2 Περιοχή μελέτης

5.2.1 Τοποθεσία

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα όρια του Δήμου Ζαγοράς-Μουρεσίου, ο οποίος ανήκει στο νομό Μαγνησίας, της Περιφέρειας Θεσσαλίας και έχει ως έδρα τη Ζαγορά. Ο Δήμος Ζαγοράς-Μουρεσίου διαιρείται σε δύο Δημοτικές Ενότητες, οι οποίες αντιστοιχούν στους συγχωνευθέντες πρώην δήμους Ζαγοράς και Μουρεσίου.

Στην άμεση περιοχή αποκατάστασης στο 48^ο χλμ και σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου εντοπίζονται οι οικισμοί Ξουριχτίου, η συνοικία Ταξιάρχης του οικισμού Τσαγκαράδας, οι παραλίες Λημιώνας Ξουριχτίου και Μυλοπόταμος Τσαγκαράδας και η χαράδρα του ρέματος Μυλοποτάμου. Επίσης απαντώνται πυκνά δάση αειφύλλων πλατυφύλλων και γεωργικές εκτάσεις ελαιοκαλλιέργειας στην παραλιακή ζώνη και καστανοκαλλιέργειας στα κτήματα ενδιάμεσα και ανάντη των οικισμών. Ακόμη ανατολικά και κατάντη της περιοχής αποκατάστασης υφίσταται παλαιό ανενεργό λατομείο αδρανών υλικών (πρώην Μαλαματίνη).
[30]



Εικόνα 5.2: Τοποθεσία κατολίσθησης [31]



Εικόνα 5.3: Άποψη κατολίσθησης [31]



Εικόνα 5.4: Κατολίσθηση στο 48^ο χιλιόμετρο Βόλου – Νεοχωρίου – Ζαγοράς [31]



Εικόνα 5.5: Ολισθαίνον πρανές [30]



Εικόνα 5.6: Πρανές με ασυνέχειες [30]

5.2.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Στην άμεση περιοχή μελέτης, στο 48ο χλμ της Εθνικής Οδού συναντάται έντονο μωσαϊκό μορφών κάλυψης γης και αντίστοιχων φυσικών ή ανθρωπογενών λειτουργιών και δραστηριοτήτων. Το μωσαϊκό σε συνδυασμό με τις μορφολογικές πτυχώσεις του επιφανειακού υδρογραφικού δικτύου, το έντονο ανάγλυφο, τις κατά θέσεις πηγαίες εμφανίσεις υδάτων και τις εναλλαγές βραχωδών και γαιωδών εδαφών επιτρέπουν την ανάπτυξη ανάλογων καλλιεργειών ή την ανάπτυξη με φυσική αναγέννηση της βλάστησης, χαρακτηριστικά που προσδίδουν μία ποικιλομορφία στην περιοχή. [30]

5.2.3 Γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά

Ο τεκτονισμός του Πηλίου είναι έντονος και πολύπλοκος, ενώ αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα, τα οποία εξελισσόμενα κανονικά δίνουν στα ανώτερα μέλη τους μάρμαρα, με παρεμβολές δολομιτικών μαρμάρων.

Πετρολογικά, το ιδιαίτερο αυτό σύμπλεγμα διακρίνεται σε δύο ενότητες οι οποίες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης, και η συμπεριφορά τους στο νερό παίζει κύριο ρόλο στη δημιουργία και λειτουργία των πηγών.

Οι πετρολογικές ενότητες αποτελούνται από Σχιστόλιθους Πηλίου (Νεοπαλαιοζωϊκού -Τριαδικού), οι οποίοι είναι πετρολογικοί σχηματισμοί που αποτελούνται από μαρμαρυγικούς αμφιβολιτικούς, ασβεστιτικούς, επιδοτιτικούς και χαλαζιακούς σχιστόλιθους, χλωριτικούς σχιστογενέσιους, πρασινίτες, καθώς και φυλλίτες. Έχουν υποστεί αλληπάλληλες φάσεις μεταμόρφωσης, και το ορατό τους πάχος φθάνει τα 800 m περίπου.

Σε μικρές εκτάσεις, επιφανειακά και χωρίς να παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των υδρογεωλογικών συνθηκών του τόπου, εμφανίζονται μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και πλευρικά κορήματα. Η μηχανική κίνηση των ολισθαινόντων εδαφών ακολουθεί συνήθως τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης των πρανών, ενώ τα υλικά των ολισθήσεων αποτίθενται σε χαμηλότερες θέσεις με ήπιες κλίσεις.

Οι σχιστόλιθοι του Πηλίου με ορυκτολογικά συστατικά χαλαζία, άστριοι, μαρμαρυγία, χλωρίτη δίνουν συνολικά την εικόνα των αδιαπέρατων στο νερό σχηματισμών. Αν και στερούνται πρωτογενούς πορώδους στα πρώτα 5-20 m τους, συμπεριφέρονται σαν ημιπερατοί στο νερό σχηματισμοί. Αυτό οφείλεται στο δευτερογενές τους πορώδες που δημιουργείται στο δίκτυο μικροκορημάτων, διαρρήξεων, διακλαδώσεων και γραμμών βλάστησης. Συνεπώς, δημιουργούνται περιορισμένης έκτασης και με διακοπόμενη υδραυλική επικοινωνία, ελεύθεροι υδροφόροι ορίζοντες.

Η παρουσία παλαιού μεγάλου ρήγματος σε συνδυασμό με νεώτερο μικρό (400-450 m) που εμφανίζονται στα χείλη της πηγής παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και λειτουργία της. Σε απόσταση 10-15 m ανάντη εμφανίζεται ένστρωση υδροκρυσταλλικών μαρμάρων, η οποία ενισχύει τη συγκέντρωση νερού και τροφοδοτεί έμμεσα την πηγή.

Στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης απαντώνται έντονα τεκτονισμένα και διαβρωμένα "μάρμαρα Σαρακηνού". Πρόκειται για αποκρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους (250 m πάχους) με έντονη διάρρηξη και βαθειά καρστικοποίηση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εσωτερικά της μάζας τους καρστικοί υδροφορείς πολύ μεγάλης δυναμικότητας. Το ποσοστό

κατείσδυσης εκτιμάται σε 60-65 % των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων της περιοχής [30].

5.2.4 Κλιματολογικά στοιχεία

Από τα κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής και τη μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί από τον Μαυρομάτη το βιοκλίμα της περιοχής κατά Embarger είναι το ύφυγρο με χειμώνα ήπιο. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η περίοδος ξηρασίας της περιοχής μελέτης είναι 3,5 μήνες και αντίστοιχα ο αριθμός των βιολογικά ξηρών ημερών κατά την ξηροθερμική περίοδο είναι περίπου 100 και βιοκλιματικά εντάσσεται σύμφωνα με FAO-UNESCO, στον έντονο μέσο-μεσογειακό τύπο.

Ακόμα, η περιοχή του Βόρειου και Ανατολικού Πηλίου χαρακτηρίζεται από μεγάλο ύψος μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων.

Οι κλιματολογικές συνθήκες, η γεωτεκτονική δομή της περιοχής (γεωμετρία, διαπερατότητα, τεκτονική των σχηματισμών, κτλ), καθώς και η μορφολογία των λεκανών απορροής ελέγχουν τη δυνατότητα κατείσδυσης και αποθήκευσης του ύδατος στους υπόγειους ταμιευτήρες, που εντοπίζονται κυρίως στους προσχωματικούς και στους σχηματισμούς των μαρμάρων (βόρειο τμήμα της χερσονήσου κ.λπ.). Η κίνηση των υπόγειων υδάτων που διηθούνται στους ασβεστόλιθους, ρυθμίζεται από τη διεύθυνση του συστήματος ασυνεχειών, των ρηγμάτων και των καρστικών φαινομένων, καθώς και από τη μορφολογία του αδιαπέρατου υποβάθρου, που υπόκειται των ασβεστόλιθων. Στις προσχώσεις και στα πλευρικά κορήματα, η κίνηση των υπόγειων υδάτων ακολουθεί τη μορφολογία του εδάφους και κατευθύνεται προς τα χαμηλότερα σημεία και τελικά προς τη θάλασσα. [30]

5.3 Περιγραφή γεωτεχνικής μελέτης

Στο 48ο χιλιόμετρο της Εθνικής Οδού Βόλου-Νεοχωρίου-Ζαγοράς λίγο πριν την είσοδο στον οικισμό του Ξουριχτίου σε πρηνές με σημειακή κλίση (περίπου 45°) σημειώθηκε εδαφική αστοχία σε μέτωπο περίπου 60,0m στην ανάντη πλευρά της Εθνικής Οδού, με αποτέλεσμα τα προϊόντα της κατολίσθησης να αποκόψουν την κυκλοφορία. Στο σημείο εκείνο προϋπήρχε και λειτουργούσε παλαιότερα λατομείο αδρανών υλικών λόγω της ύπαρξης υπεδάφους ασβεστολιθικής φύσεως.

Στα πλαίσια της γεωτεχνικής μελέτης στην περιοχή, πραγματοποιήθηκαν 5 περιστροφικές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, με βάθη 10~25 μέτρων. Οι τρεις πρώτες πραγματοποιήθηκαν στον πόδα του πρηνούς, σε υψόμετρο +100~101μ, η τέταρτη στο κέντρο της ολίσθησης σε υψόμετρο +112,87μ, και η πέμπτη σε σημείο εκτός της ολίσθησης, σε υψόμετρο +155,89μ. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε και μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές, από τις οποίες εξάχθηκαν ακριβή στοιχεία για το έδαφος.

Το υπέδαφος της περιοχής αποτελείται από δύο ασβεστολιθικής φύσεως σχηματισμούς και ένα στρώμα σχιστόλιθου:

- Ο μεν ανώτερος αντιστοιχεί στο ολισθαίνον τμήμα και συνιστάται από ελαφρά αποσαθρωμένο και κατακερματισμένο κατά θέσεις υλικό, αποτελούμενο από πολλές διακλάσεις.
- Ο κατώτερος αντιστοιχεί στο σταθερό υπόβαθρο. Είναι υγιής ασβεστόλιθος με ελάχιστες διακλάσεις.
- Στην τέταρτη γεώτρηση, και σε βάθος 6 μέτρων, βρέθηκε ένα στρώμα έντονα αποσαθρωμένου και εξαλλοιωμένου σχιστόλιθου, πάχους περίπου 70 εκατοστών, από το οποίο διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης. Το συγκεκριμένο στρώμα δε βρέθηκε σε άλλη γεώτρηση.

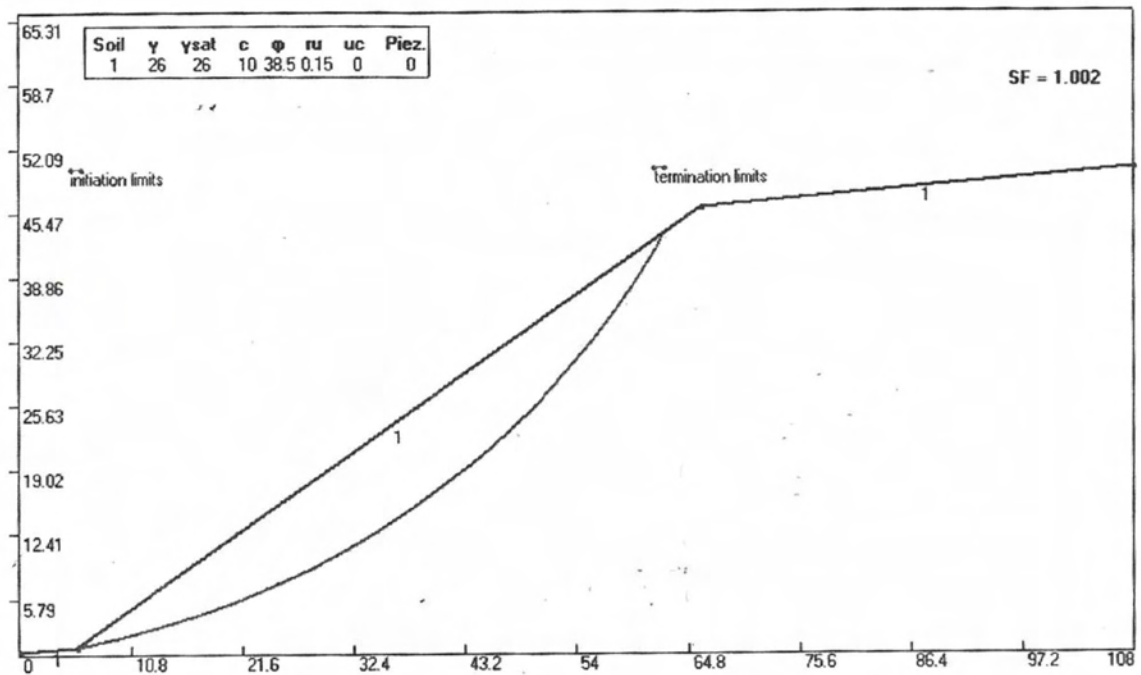
Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Roclab εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικοί παράμετροι αντοχής της βραχώδους ασβεστολιθικής μάζας, οι οποίες παρατίθενται στο παράρτημα.

Μετέπειτα, για τη συγκρότηση της γεωτεχνικής τομής στο κέντρο της κατολίσθησης, εφαρμόστηκε η μέθοδος της αντίστροφης ανάλυσης (back analysis). Η μέθοδος αναφέρει ότι σε περιπτώσεις που έχει ήδη εκδηλωθεί το κατολισθητικό φαινόμενο, οι παράμετροι αντοχής που θα χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των μέτρων αντιστήριξης, πρέπει να βασίζονται στις γεωμετρικές και υδραυλικές συνθήκες του πρσανούς κατά τη χρονική στιγμή της αστοχίας. Όταν οι τιμές των παραμέτρων αντοχής των επιμέρους τμημάτων της εδαφικής μάζας, φτάσουν να δίνουν, μέσω των επαναλαμβανόμενων αναλυτικών λύσεων, τιμή συντελεστή ασφάλειας, $F=1$, τότε αυτές οι τιμές πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως κατάλληλες για το σχεδιασμό των επανορθωτικών τεχνικών μέτρων (κλίση πρσανούς, εσωτερική αποστράγγιση, κλπ.). Έτσι, για την κατολισθαίνουσα μάζα προέκυψαν οι τιμές c και ϕ .

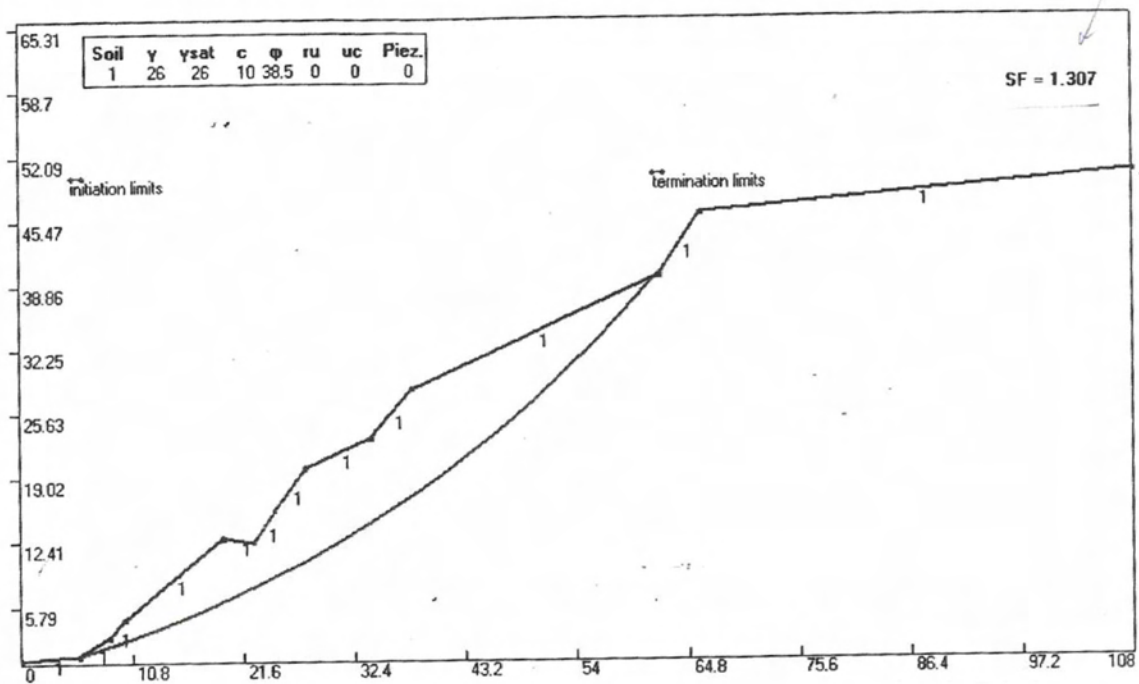
Στη συνέχεια, ακολούθησε η διεξαγωγή των αναλύσεων και ο σχεδιασμός της γεωλογικής τομής, με τη χρήση του προγράμματος PCSTABL 6. Ελήφθησαν υπόψη δύο βασικές παρατηρήσεις:

- Η επιφάνεια ολίσθησης από τις επί τόπου παρατηρήσεις φαίνεται ότι διέρχεται σε βάθος περίπου 6,0m έως 6,70m στο κέντρο της επιφάνειας αστοχίας. (Στο βάθος αυτό συναντάται και το στρώμα του εξαλλοιωμένου σχιστόλιθου). Κάτω από βάθος αυτό η βραχώμαζα φαίνεται να είναι αδιατάρακτη κάτι που επαληθεύτηκε και από τις γεωτρήσεις.
- Η κατολίσθηση έλαβε χώρα μετά από εκτεταμένης χρονικής διάρκειας βροχόπτωση, κατά την διάρκεια της οποίας η μάζα της κατολίσθησης τροφοδοτούνταν στην κεφαλή της από μαζικώς εισρέοντα νερά, λόγω ανεπάρκειας του συστήματος αποχέτευσης ομβρίων ανάντη υφιστάμενου δρόμου. Την ίδια χρονική περίοδο πολλά νερά απέρρεαν στον πόδα της ολίσθησης. Συνεπώς, η αστοχία συνδέεται άμεσα με την έντονη κυκλοφορία νερού στο σώμα του πρσανούς και την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων.

Στο τέλος, προτάθηκαν μέτρα αντιστήριξης με στόχο τον περιορισμό των υδάτων, την αποστράγγιση του πρσανούς, και την εξασφάλιση της οδού από καταπτώσεις βράχων. [13]



Εικόνα 5.7: Γεωτεχνική τομή σχεδιασμού της ολίσθησης [13]



Εικόνα 5.8: Συντελεστής ασφαλείας πρανούς μετά την πλήρη αποστράγγιση [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Δεδομένα και παράμετροι

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται όλα τα δεδομένα και στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του ζητήματος στην παρούσα εργασία. Οι εδαφικές παράμετροι λήφθηκαν από την παραπάνω γεωτεχνική μελέτη που περιγράφηκε προηγουμένως (μέσω του προγράμματος Roclab και της μεθόδου αντίστροφης ανάλυσης), αλλά και βιβλιογραφικά, ερευνώντας για ενδεικτικές τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων.

Έπειτα, αναλύονται οι κατηγορίες με βάση τις οποίες πραγματοποιήθηκε η ανάλυση.

6.1 Γεωτεχνικά δεδομένα

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα των εδαφών, όπως αυτά ελήφθησαν από τη γεωτεχνική μελέτη και τη βιβλιογραφία:

| Υγιής ασβεστόλιθος | |
|---|-------|
| γ (ειδικό βάρος) (kN/ m ³) | 26 |
| c (συνοχή) (MPa) | 0,278 |
| φ (γωνία τριβής) (degrees) | 38,3 |
| σ_c (μονοαξονική αντοχή) (MPa) | 50 |
| GSI | 50 |
| m_i | 12 |
| D | 1 |
| E (μέτρο παραμόρφωσης) (GPa) | 48 |
| ν (συντελεστής Poisson) | 0,25 |

Πίνακας 6.1: Γεωτεχνικές ιδιότητες του υγιούς ασβεστόλιθου

| Ελαφρά αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος | |
|---|------|
| γ (ειδικό βάρος) (kN/ m ³) | 26 |
| c (συνοχή) (MPa) | 0,01 |
| φ (γωνία τριβής) (degrees) | 38,5 |
| E (μέτρο παραμόρφωσης) (GPa) | 48 |
| ν (συντελεστής Poisson) | 0,25 |

Πίνακας 6.2: Γεωτεχνικές ιδιότητες του ελαφρά αποσαθρωμένου ασβεστόλιθου

| Αποσαθρωμένος σχιστόλιθος | |
|---|-------|
| γ (ειδικό βάρος) (kN/ m ³) | 26 |
| c (συνοχή) (MPa) | 0,005 |
| φ (γωνία τριβής) (degrees) | 38,5 |
| E (μέτρο παραμόρφωσης) (GPa) | 28 |
| ν (συντελεστής Poisson) | 0,14 |

Πίνακας 6.3: Γεωτεχνικές ιδιότητες του αποσαθρωμένου σχιστόλιθου

Οι τιμές των μέτρων παραμόρφωσης E και συντελεστών Poisson ν για κάθε στρώμα, ελήφθησαν από βιβλιογραφικές πηγές. Οι πίνακες των μέσων τιμών διαφόρων παραμέτρων των πετρωμάτων παρατίθενται παρακάτω:

| | Αντοχή σε θλίψη (MPa) | | | Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa) | | | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | | | Λόγος Poisson | | |
|---------------------|-----------------------|------|------|---------------------------|------|------|---------------------------|------|------|---------------|------|------|
| | Ελαχ. | Μεγ. | Μέση | Ελαχ. | Μεγ. | Μέση | Ελαχ. | Μεγ. | Μέση | Ελαχ. | Μεγ. | Μέση |
| Βασάλτης | 42 | 355 | 150 | 2 | 28 | 13 | 16 | 101 | 53 | 0.13 | 0.38 | 0.22 |
| Δολερίτης | 227 | 319 | 280 | 12 | 26 | 20 | 60 | 90 | 70 | 0.15 | 0.29 | 0.20 |
| Γνεύσιος | 73 | 340 | 159 | 3 | 21 | 14 | 16 | 103 | 58 | 0.10 | 0.40 | 0.22 |
| Γρανίτης | 30 | 324 | 166 | 3 | 39 | 12 | 10 | 74 | 45 | 0.10 | 0.39 | 0.23 |
| Ασβεστόλιθος | 48 | 210 | 102 | 2 | 40 | 12 | 1 | 92 | 48 | 0.08 | 0.39 | 0.25 |
| Νορίτης | 290 | 326 | 298 | 15 | 25 | 20 | 90 | 110 | 100 | 0.21 | 0.26 | 0.24 |
| Χαλαζίτης | 200 | 304 | 252 | 17 | 28 | 25 | 70 | 105 | 90 | 0.11 | 0.25 | 0.16 |
| Ψαμίτης | 40 | 179 | 96 | 3 | 7 | 5 | 10 | 46 | 22 | 0.10 | 0.40 | 0.24 |
| Σχιστόλιθος | 36 | 172 | 95 | 2 | 5 | 3 | 10 | 44 | 28 | 0.10 | 0.19 | 0.14 |
| Άνθρακας Pittsburgh | 14.4 | 29.7 | 22.2 | 1.9 | 3.2 | 2.5 | 1.5 | 3.7 | 3.2 | - | - | 0.37 |
| Άνθρακας Pocahontas | 18.2 | 19.5 | 18.9 | - | - | - | 2.4 | 2.7 | 2.6 | - | - | - |
| Άνθρακας Herrin | 10.0 | 14.1 | 11.4 | - | - | - | 3.1 | 3.8 | 3.5 | - | - | 0.42 |
| Άνθρακας Witbank | 23.5 | 39.3 | 31.6 | - | - | - | 3.9 | 5.3 | 4.6 | 0.33 | 0.37 | 0.35 |

Εικόνα 6.1: Μηχανικές ιδιότητες ορισμένων πετρωμάτων (Bieniawski, 1984) [5]

6.2 Παραμετρική ανάλυση

Όλες οι γεωλογικές τομές που πραγματοποιήθηκαν στο Phase2 και στο Slide, περνάνε από τις γεωτρήσεις Γ2(στον πόδα του πρανούς) και Γ4 (στο κέντρο της ολίσθησης).

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, έγινε με βάση δύο μοντέλα: ένα απλουστευμένο και ένα πιο ρεαλιστικό. Στο απλουστευμένο, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο με συγκεκριμένη γεωμετρία, με την κλίση του πρανούς ίση με 45 μοίρες και με μέτωπο περίπου 60 μέτρων. Τα όρια είναι πιο εκτεταμένα σε σχέση με την πραγματικότητα, για μια περισσότερο διευρυμένη έρευνα. Από την άλλη, το ρεαλιστικό μοντέλο τείνει προς την πραγματικότητα, με γεωμετρία που καθορίστηκε με τη βοήθεια χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε [32], και με κλίση πρανούς 45° και μέτωπο περίπου 60 μέτρα.

Ακόμα, έγιναν αναλύσεις και στα δύο μοντέλα με το λεπτό στρώμα του αποσαθρωμένου σχιστόλιθου να είναι οριζόντιο, αλλά και αναλύσεις με το στρώμα να έχει μια τυχαία κλίση (17°). Και στις δύο περιπτώσεις όμως, το στρώμα βρίσκεται στα 6 μέτρα από την γεώτρηση 4, η οποία βρίσκεται στο κέντρο της ολίσθησης, ενώ δε βρίσκεται στη γεώτρηση 2, η οποία έλαβε χώρα στον πόδα της ολίσθησης, καθώς δε βρέθηκε σε καμία άλλη γεώτρηση. Στην κατασκευή των εγκάρσιων τομών, για την ανάγκη των αναλύσεων, έγινε η παραδοχή ότι το στρώμα του αποσαθρωμένου σχιστόλιθου έχει πάχος 1 μέτρο.

Επίσης, άλλο ένα στοιχείο που λήφθηκε υπόψη στις αναλύσεις είναι η ύπαρξη ασυνεχειών στο αποσαθρωμένο τμήμα που ολισθαίνει. Αναλύθηκαν τρεις περιπτώσεις: α) μοντέλα χωρίς ασυνέχειες, β) μοντέλα με μία οικογένεια ασυνεχειών με κλίση 22° από τον οριζόντιο άξονα και με τη μεταξύ τους μέση κάθετη απόσταση 7 μέτρα, και γ) μοντέλα με δύο οικογένειες ασυνεχειών, οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους, η μία οριζόντια και η άλλη 90° από την πρώτη, και με τη μεταξύ τους απόσταση 7 μέτρα.

Συμπληρωματικά, όπως έχει προαναφερθεί η εκτεταμένη βροχόπτωση είχε ως αποτέλεσμα την κυκλοφορία του νερού μέσα στο έδαφος και την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων. Από τη γεωτεχνική μελέτη, λήφθηκε ο συντελεστής της πίεσης του νερού των πόρων r_u . Ο r_u είναι ένας συντελεστής που παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εκφράζει την κατανομή της πίεσης πόρων: (Michalowski R., 2002)

$$r_u = \frac{u}{\gamma * h} \quad (11)$$

όπου:

r_u : ο συντελεστής πίεσης πόρων

u : η βαρύτητα

γ : το ειδικό βάρος του εδάφους

h : το βάθος στο σημείο της επιφάνειας αστοχίας

Ο συντελεστής αυτός στη μελέτη είχε τιμή 0,15 για την ολισθαίνουσα επιφάνεια. Στην εργασία αυτή, έγιναν αναλύσεις για δύο περιπτώσεις: α) για $r_u=0,15$ για τον αποσαθρωμένο ασβεστόλιθο και σχιστόλιθο και $r_u=0$ για τον αδιατάρακτο ασβεστόλιθο, και β) $r_u= 0,15$ για τα αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0.08$ για τον υγιή ασβεστόλιθο.

Τέλος, όλες αυτές οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο σε στατικές όσο και σε σεισμικές συνθήκες. Για τις σεισμικές συνθήκες, επιλέχθηκε η σεισμική επιτάχυνση για φυσικά πρανή, όπως αυτή ορίζεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000). Ο νομός Μαγνησίας, σύμφωνα με τον κανονισμό, και μετά την αναθεώρηση των χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας, ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, όπου η σεισμική επιτάχυνση του εδάφους (α) λαμβάνεται 0,24g.

Οι αναλύσεις ευστάθειας υπό σεισμική φόρτιση γίνονται κατά ΕΑΚ-2000 για την περίπτωση πρανών εκσκαφής με: [20]

- οριζόντιο σεισμικό συντελεστή ίσο προς $a_h = a/2$ και
- κατακόρυφο σεισμικό συντελεστή σχεδιασμού $a_v = \pm a_h/2$

όπου: a = σεισμικός συντελεστής περιοχής έργου = 0,24 (ζώνη II)

Άρα, οι σεισμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με:

- οριζόντια συνιστώσα $a_h = 0,12g$, θετική κατά τη φορά της ολίσθησης, και
- κατακόρυφη συνιστώσα $a_v = \pm 0.06g$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Αποτελέσματα αναλύσεων

7.1 Διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων

Η διαδικασία της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει τη δημιουργία των εγκάρσιων τομών στο πρόγραμμα Phase2, με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς περιπτώσεων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων (μετατοπίσεων, συντελεστών ασφαλείας κλπ.) σε στατικές και σεισμικές συνθήκες.

Οι γεωλογικές τομές πραγματοποιήθηκαν και στο πρόγραμμα Slide, όπου και υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφάλειας και οι πιθανές επιφάνειες ολίσθησης, με τη διαφορά ότι σε αυτό το πρόγραμμα δεν συμπεριλήφθη η παράμετρος των ασυνεχειών, καθώς δεν υπάρχει το κατάλληλο εργαλείο για την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Και εδώ, οι υπολογισμοί έγιναν σε στατικές συνθήκες, τόσο και σε σεισμό.

Ακόμα, επιλέχθηκαν κάποιες περιπτώσεις όπου έγινε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των συντελεστών ασφαλείας που υπολογίστηκαν από τα δύο προγράμματα.

Τέλος, προτείνονται μέτρα αντιστήριξης και προσομοίωση αυτών στο πρόγραμμα Slide.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, θα παρουσιαστούν οι ολικές μετατοπίσεις, τα παραμορφωμένα όρια, οι πιέσεις πόρων και οι συντελεστές ασφάλειας. Στο παράρτημα της διπλωματικής, παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα που προέκυψαν από κάθε περίπτωση.

7.1.1 Διαδικασία για Phase2

Για κάθε εγκάρσια τομή, και αφού ορίστηκε η γεωμετρία του πρηνούς, στη συνέχεια καθορίστηκαν τα όρια των βραχωδών υλικών και ορίστηκαν οι μηχανικές και υδραυλικές ιδιότητές τους. Όλα τα πρηνή επιλέχθηκαν σαν ισότροπα μοντέλα, και όσον αφορά στον τύπο του κάθε υλικού, ο αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος και ο αποσαθρωμένος σχιστόλιθος χαρακτηρίστηκαν πλαστικά (plastic), ενώ ο υγιής ασβεστόλιθος ελαστικός (elastic). Στα μοντέλα με τις ασυνέχειες, ορίστηκαν αυτές ως ευθείες γραμμές με δεδομένη κλίση, και με τις εξής ιδιότητες: $c=0$ και $\phi=35^\circ$, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Στο τασικό πεδίο (field stress) γίνεται η επιλογή <<gravity>> και <<use actual ground surface>>, όπου η αρχική κατακόρυφη τάση σε δεδομένο σημείο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το βάθος κάτω από την πραγματική επιφάνεια του εδάφους του μοντέλου και το πραγματικό βάρος του υπερκείμενου υλικού είναι όπως έχει οριστεί στις ιδιότητες των υλικών. Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτής της επιλογής είναι ότι παρέχει μια καλύτερη αρχική εκτίμηση της κατακόρυφης επιτόπιας καταπόνησης όπου η επιφάνεια του εδάφους είναι ακανόνιστη και δεν ορίζεται από μία μόνο οριζόντια επιφάνεια. Γενικά, παρέχει πιο αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα με λιγότερους υπολογισμούς, λόγω της πιο ρεαλιστικής εκτίμησης της κατανομής των αρχικών τάσεων.

Στη συνέχεια, γίνεται η διακριτοποίηση (Discretize and mesh), με Mesh type= Uniform και Element type=6 noded triangles, και εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες με δεξιά, αριστερά και κάτω πάκτωση για το απλουστευμένο μοντέλο, και δεξιά και κάτω πάκτωση για το ρεαλιστικό μοντέλο .

Τέλος, στις περιπτώσεις σεισμού, εισάγονται και οι σεισμικές συνιστώσες της επιτάχυνσης (seismic loading). Έπειτα, το πρόγραμμα αναλύει τα δεδομένα και εξάγονται τα αποτελέσματα.

7.1.2 Διαδικασία για Slide

Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και στο Slide. Αρχικά, ορίστηκαν η γεωμετρία, τα υλικά και οι μηχανικές και υδραυλικές ιδιότητες, και μετά επιλέχθηκε ο τύπος circular και το grid search στο surface options. Τα δεδομένα αναλύονται και εξάγονται οι συντελεστές ασφαλείας και οι επιφάνειες ολίσθησης.

Πρέπει να σημειωθεί σαν κριτήριο αστοχίας για τον προσδιορισμό της αντοχής της βραχώμαζας, επιλέχθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb, το οποίο εξετάζει τις τάσεις σε πιθανά επίπεδα αστοχίας μέσα στο έδαφος. Η αστοχία παρατηρείται όταν η διατμητική τάση μέσα στο υλικό ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή:

$$\tau = \pm(c' + \sigma' * \tan\varphi) \quad (12)$$

Συνεπώς, καθορίζεται ένα ζεύγος από γραμμές στο επίπεδο των τάσεων, που ονομάζονται περιβάλλουσες αστοχίας. Εάν ο ενεργός κύκλος του Mohr τμήσει τις γραμμές, τότε η μέγιστη διατμητική αντοχή έχει ξεπεραστεί, και έτσι παρατηρείται αστοχία. Για να υπάρξει αστοχία δηλαδή, θα πρέπει η διατμητική τάση να ξεπεράσει την αντίσταση τριβής, αλλά και της συνοχής c' του εδάφους. (Muirwood, 1990)

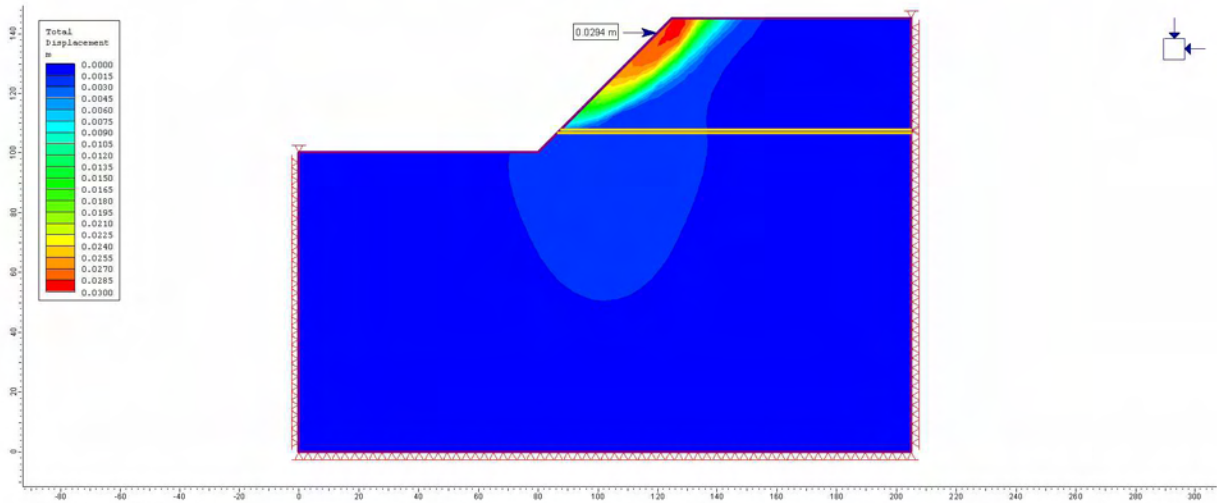
7.2 Απλοποιημένο μοντέλο

7.2.1 Σε Στατικές συνθήκες

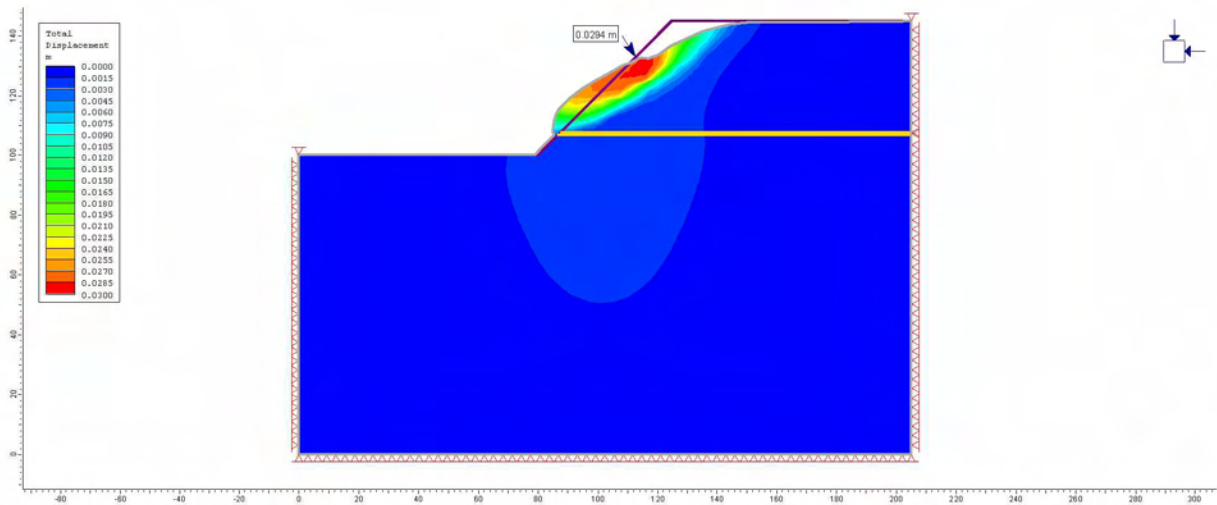
7.2.1.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου

1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- χωρίς ασυνέχειες



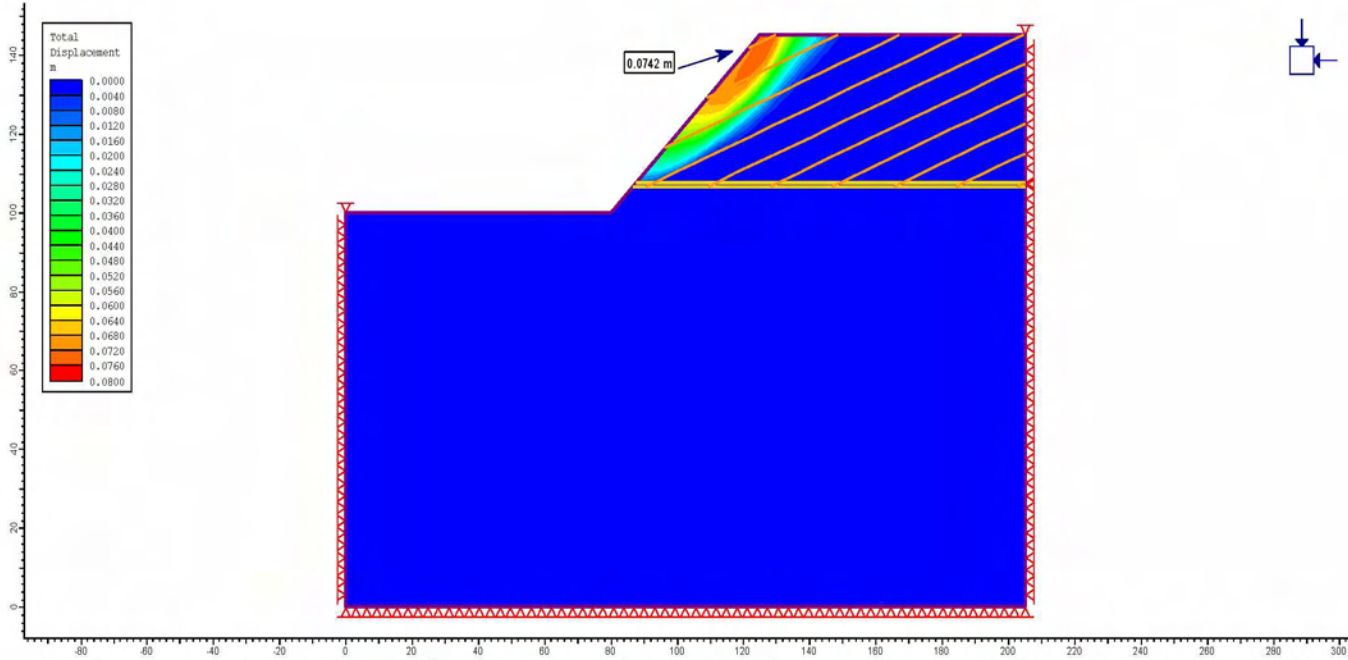
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων (διάνυσμα οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης) και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0294 m.



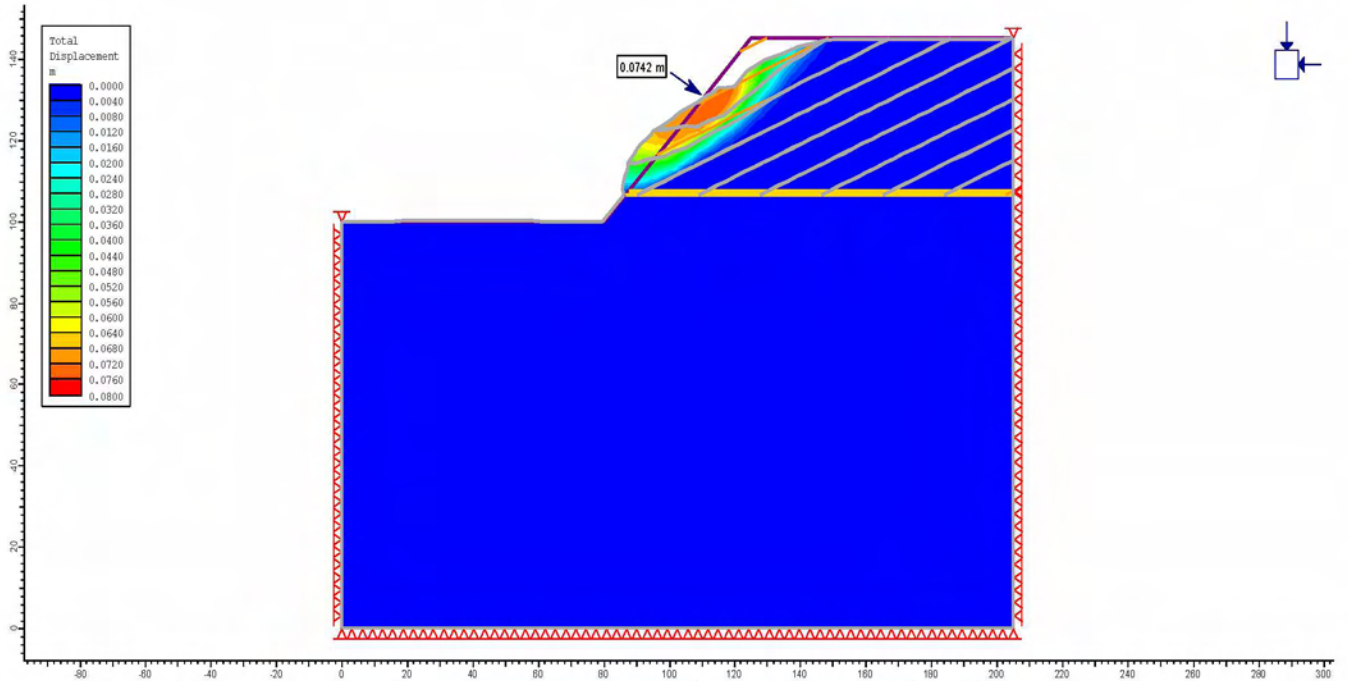
Σχήμα 7.2: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς (Σε κλίμακα 1:1300)

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Με μία οικογένεια ασυνεχειών



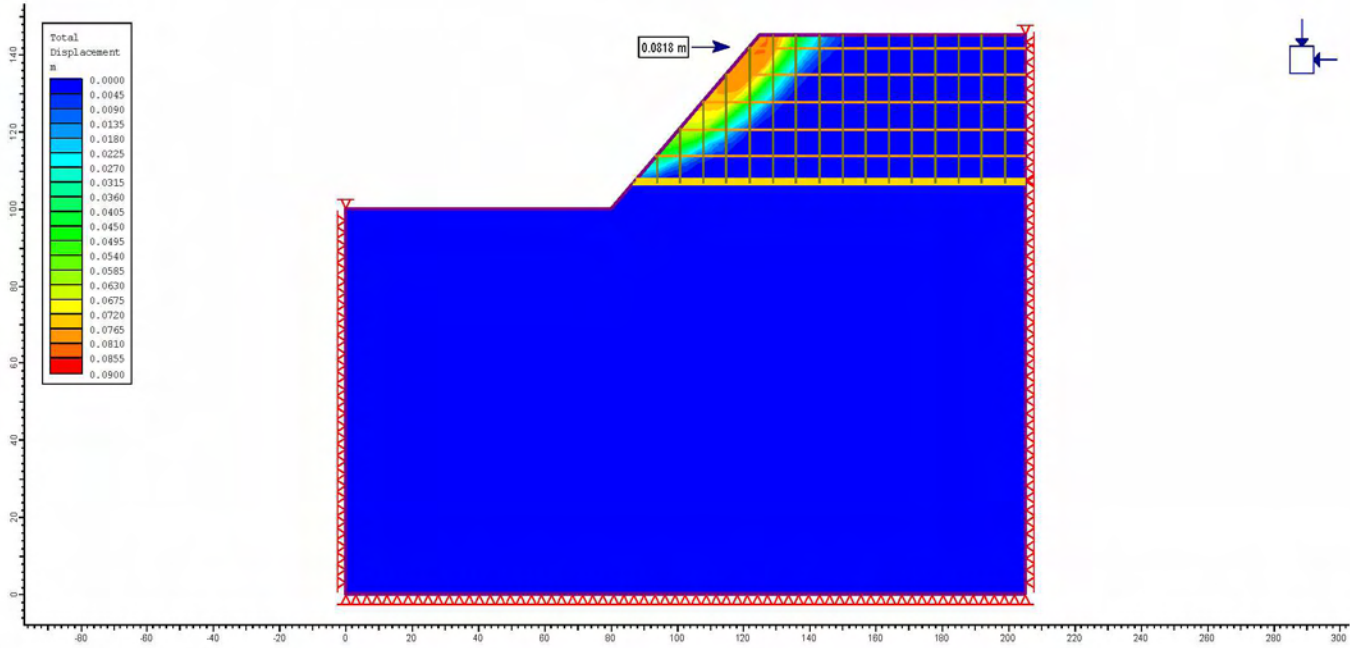
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0742 m



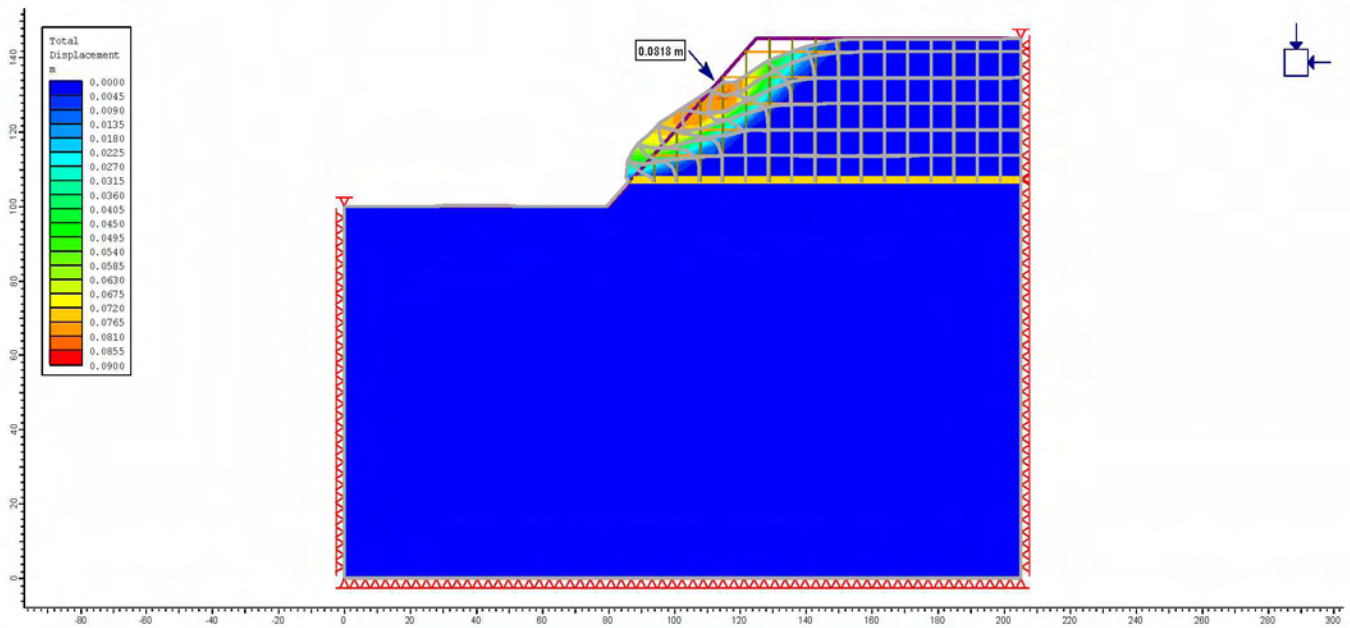
Σχήμα 7.4: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς παρουσία μίας οικογένειας ασυνεχειών με δυσμενή προσανατολισμό

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Με δύο οικογένειες ασυνεχειών



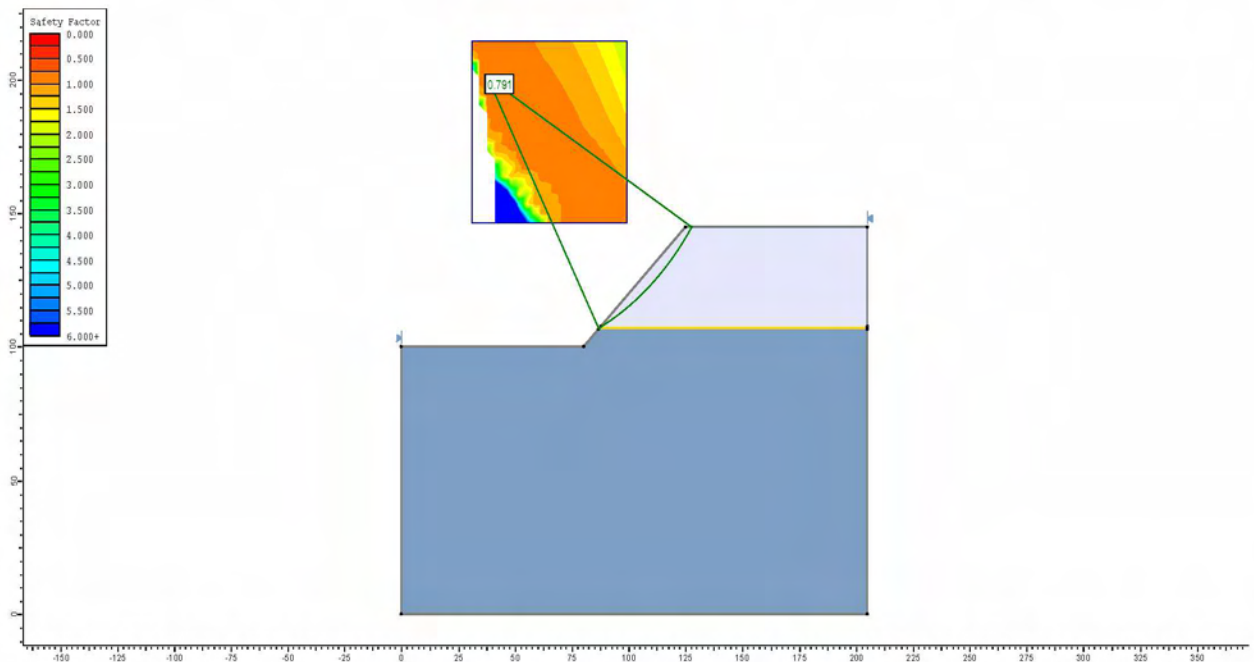
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0818m



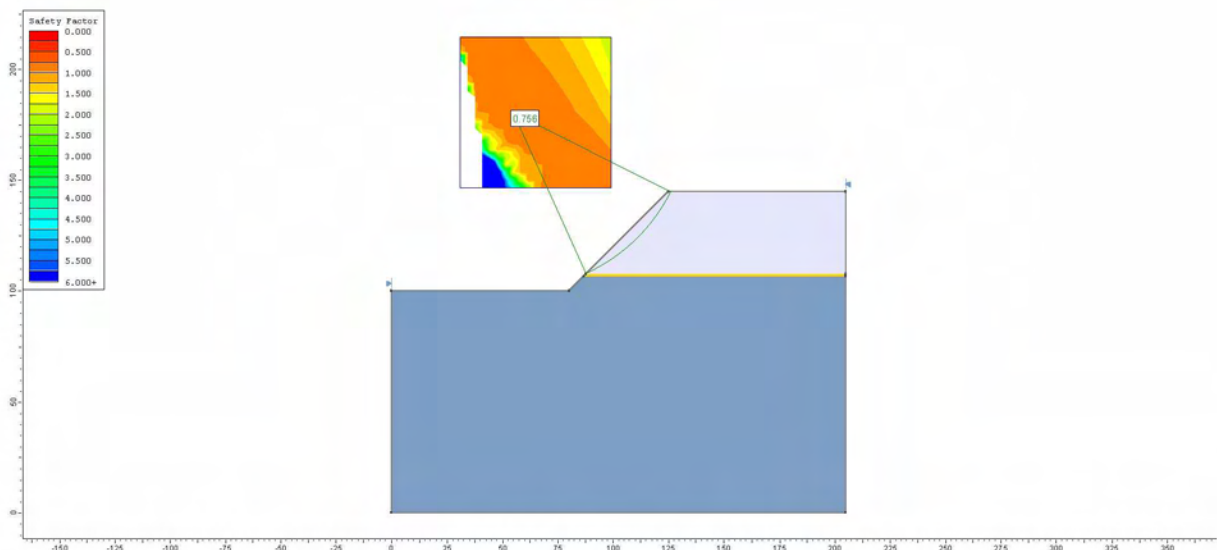
Σχήμα 7.6: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς με δύο οικογένειες ασυνεχειών

Όπως παρατηρούμε στα σχήματα, η ολική μετατόπιση βλέπουμε ότι αυξάνεται με την ύπαρξη μίας οικογένειας ασυνεχειών κατά 5cm περίπου, και κατά 6 cm με τις δύο οικογένειες ασυνεχειών, σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

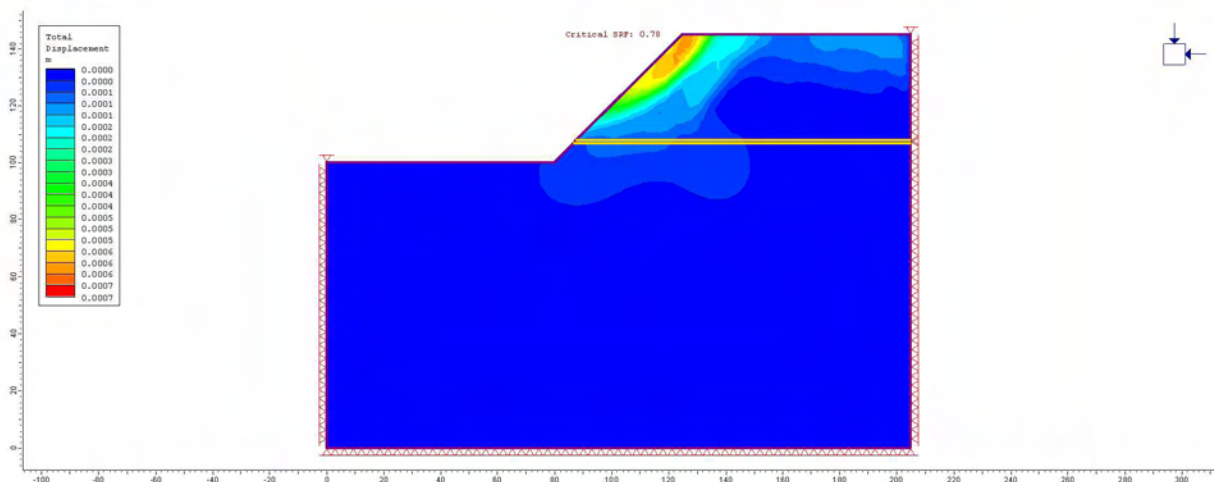
Στη συνέχεια, ακολουθούν οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν και από τα δύο προγράμματα. Στο πρόγραμμα Slide, όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει η επιλογή των ασυνεχειών, οπότε ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε είναι για το πρηνές χωρίς τις ασυνέχειες.



Σχήμα 7.7: Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide είναι 0,791



Σχήμα 7.8: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,756



Σχήμα 7.9: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,78

Από τη εξαγωγή των συντελεστών ασφαλείας και στα δύο προγράμματα για τα πρανή χωρίς ασυνέχειες, παρατηρούμε ότι έχουν μία μικρή διαφορά, και ότι η κατά Janbu μέθοδος είναι συντηρητική, καθώς έχει μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.

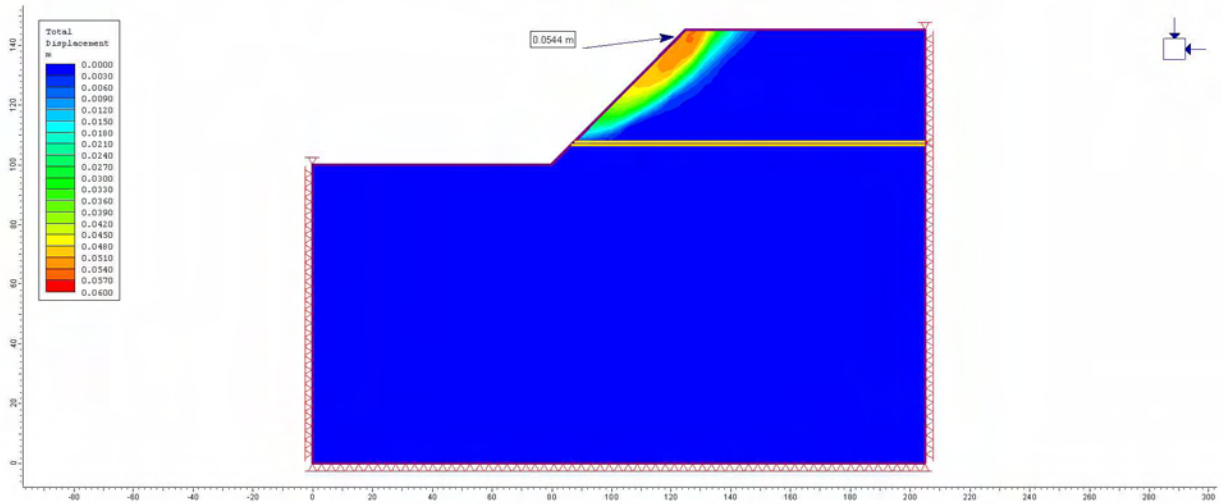
| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,0294 | 0,791 | 0,756 | 0,78 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,0742 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,0818 | | | |

Πίνακας 7.1: Πίνακας αποτελεσμάτων

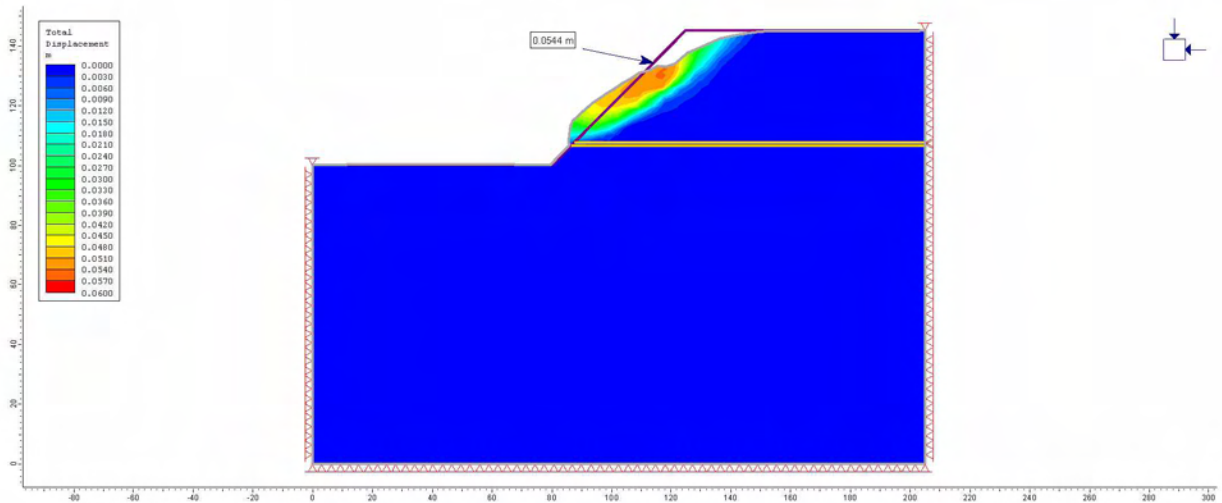
Παρατηρείται ότι στην ύπαρξη μίας οικογένειας ασυνεχειών με δυσμενή κλίση, η αύξηση των μετατοπίσεων είναι κατά 60% στην τιμή της μετατόπισης στο πρανές χωρίς ασυνέχειες. Ενώ στις δύο οικογένειες ασυνεχειών είναι 64% η αύξηση.

4) Τέταρτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγρή βραχώμαζα
- χωρίς ασυνέχειες



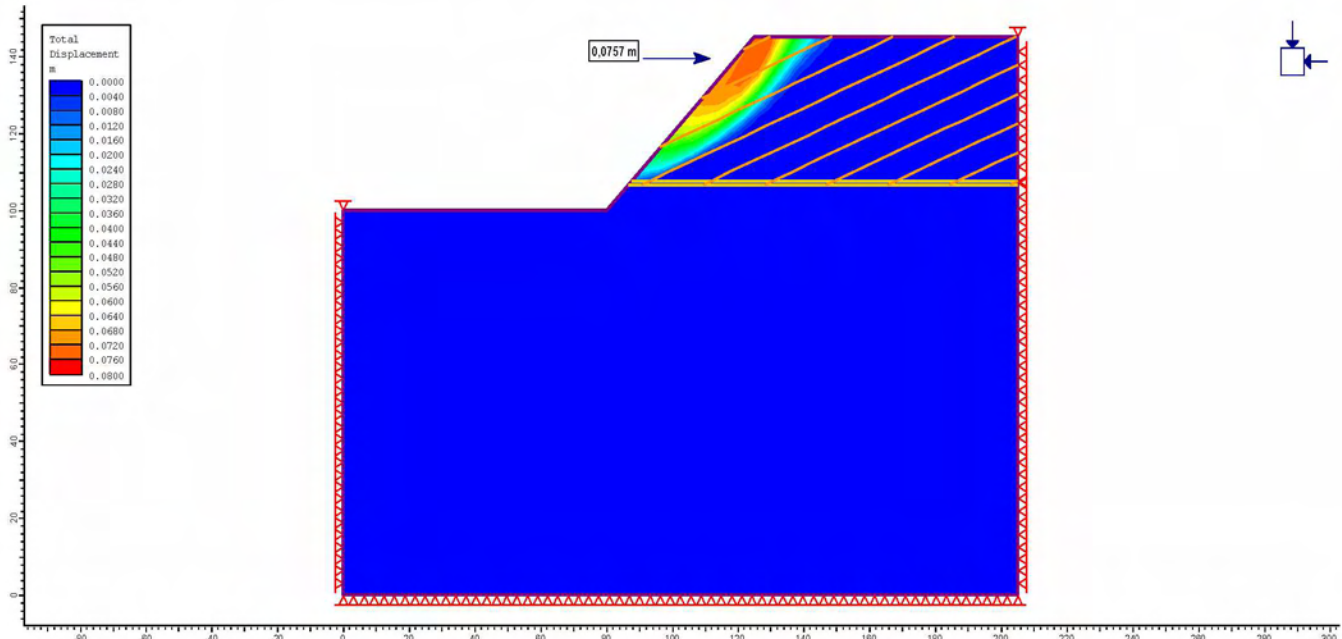
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0544 m



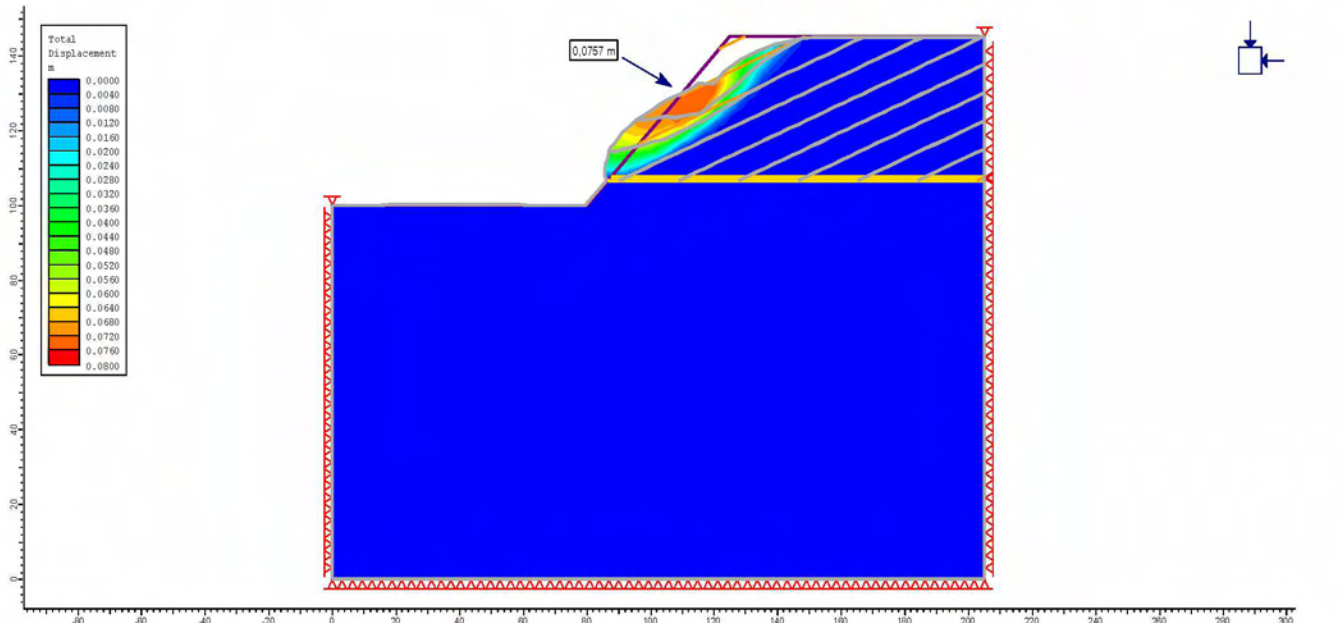
Σχήμα 7.11: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

5) Πέμπτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγρή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών



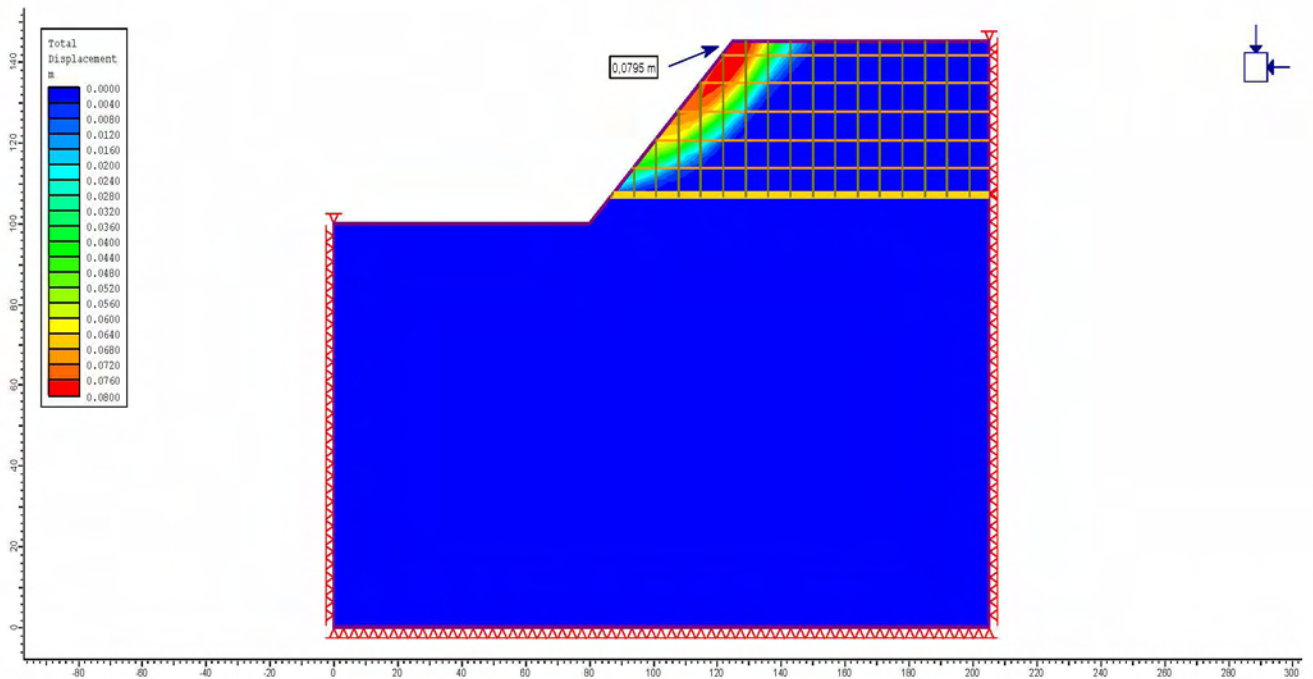
Σχήμα 7.12: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0757 m



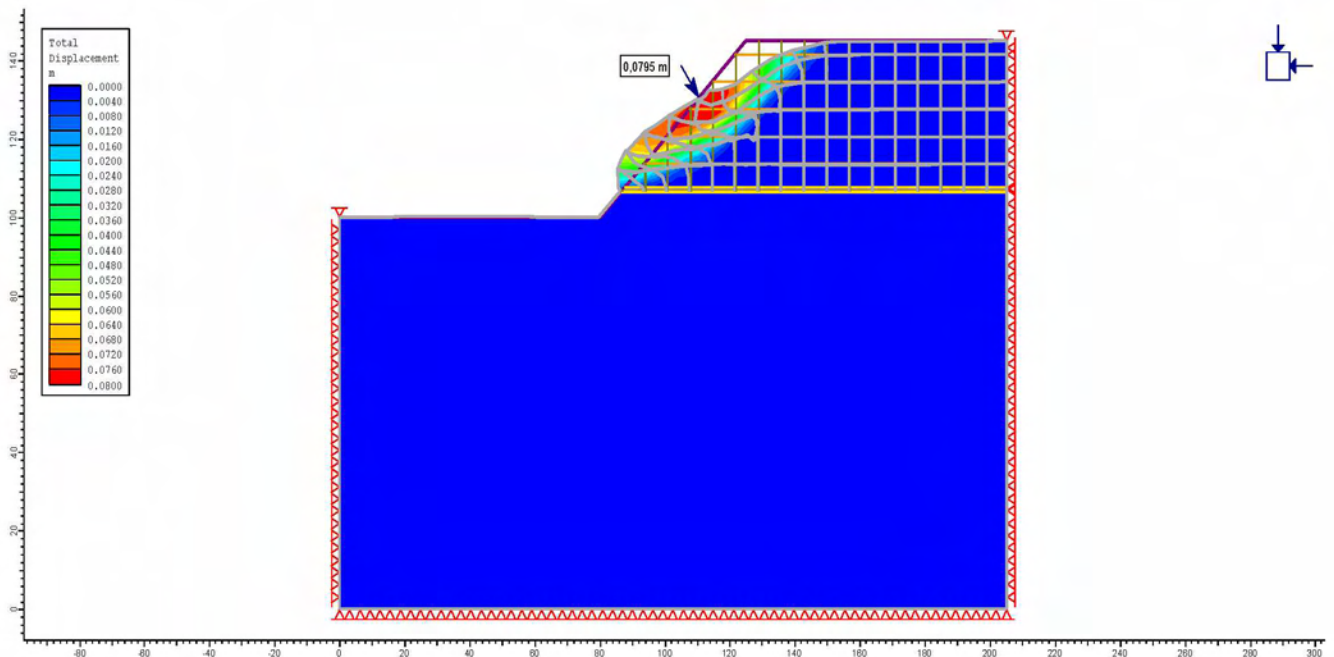
Σχήμα 7.13: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

6) Έκτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγρή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών



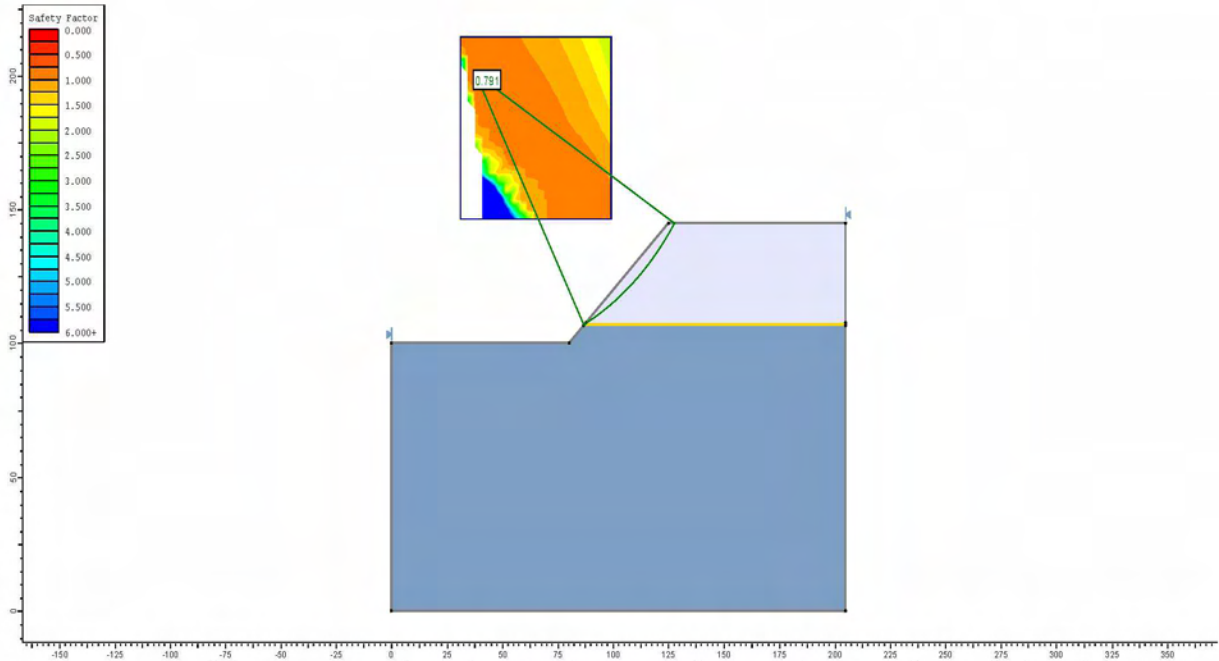
Σχήμα 7.14: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0795 m



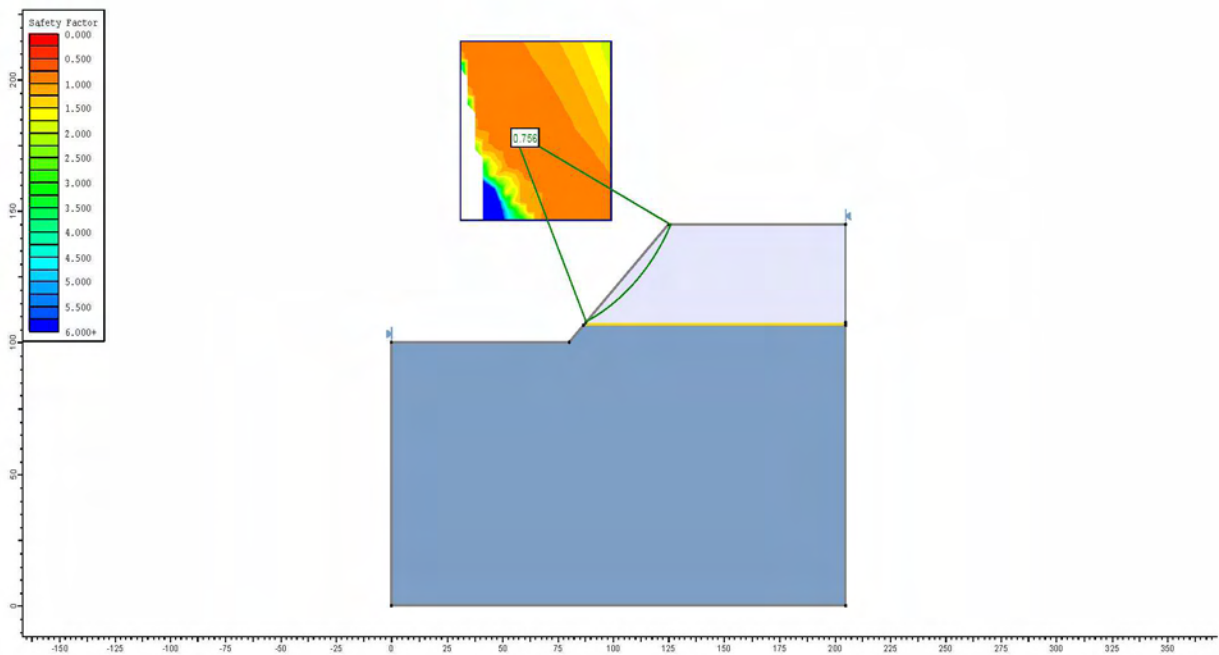
Σχήμα 7.15: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

Παρατηρείται και πάλι ότι με την προσθήκη ασυνεχειών, αυξάνεται η ολική μετατόπιση στο πρανές.

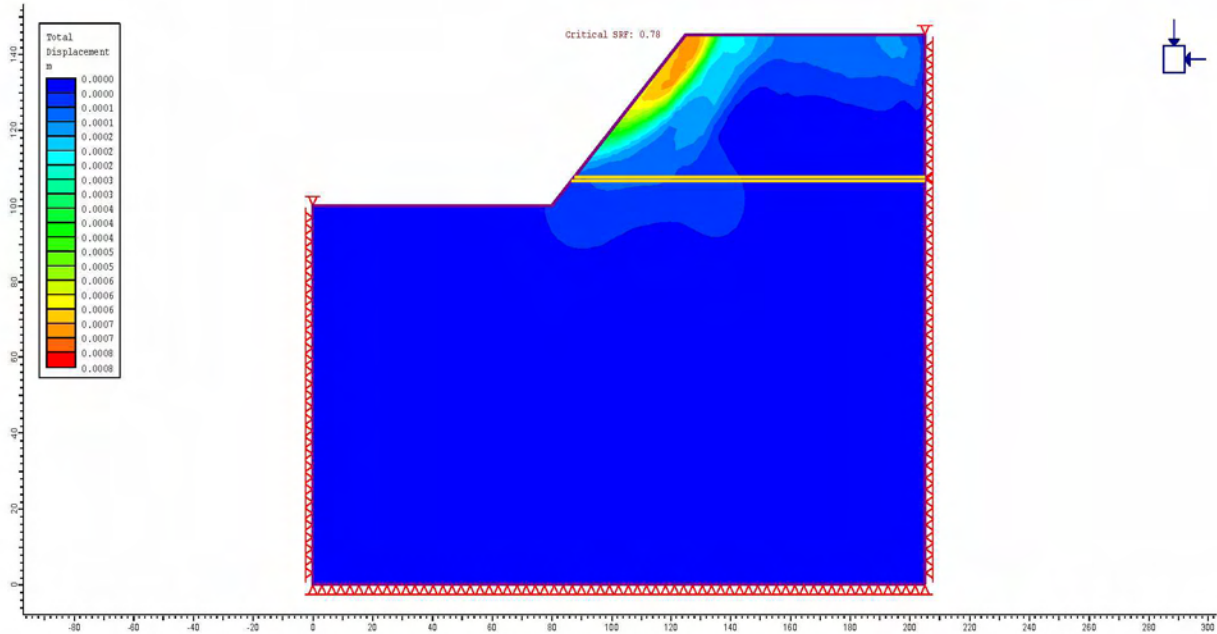
Ακολουθούν οι συντελεστές ασφαλείας για την περίπτωση του πρανού χωρίς ασυνέχειες, με συντελεστή πίεσης πόρων και στον υγιή ασβεστόλιθο.



Σχήμα 7.16: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,791



Σχήμα 7.17: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,756



Σχήμα 7.18: Συντελεστής SRF(critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,78

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,0544 | 0,791 | 0,756 | 0,78 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,0757 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,0795 | | | |

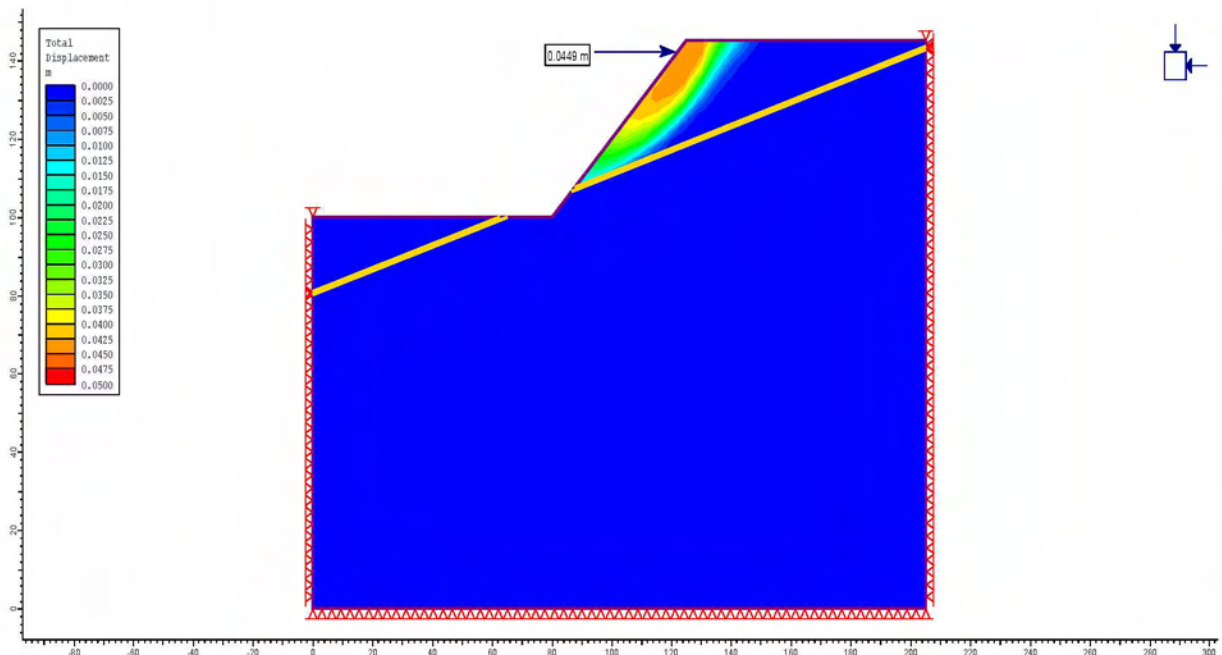
Πίνακας 7.2: Πίνακας αποτελεσμάτων

Συμπεραίνεται ότι η προσθήκη το συντελεστή πίεσης πόρων $r_u = 0.08$ στον υγρή βράχο δεν επηρεάζει το συντελεστή ασφαλείας. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και για $r_u = 0,15$ στην υγρή βραχώμαζα, και πάλι όμως δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές. Έτσι, αφού δεν υπάρχουν αλλαγές στους συντελεστές ασφαλείας, τα αποτελέσματα αυτής της υποκατηγορίας θα παρουσιαστούν στο παράρτημα.

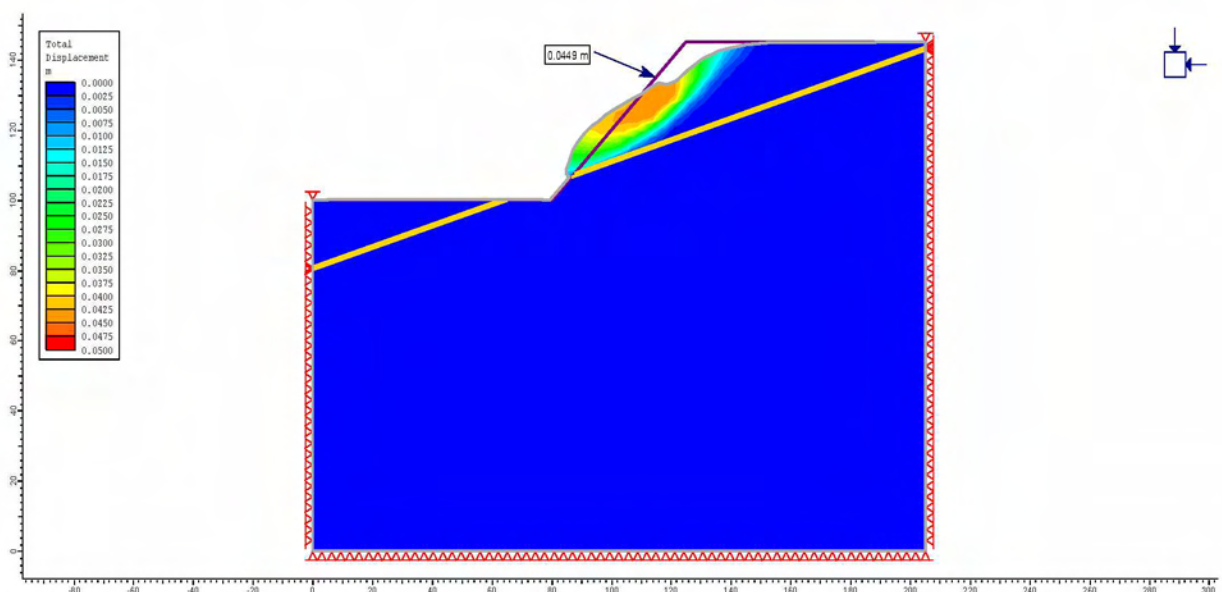
7.2.1.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου (Κατά 17° από τον οριζόντιο άξονα)

1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- χωρίς ασυνέχειες



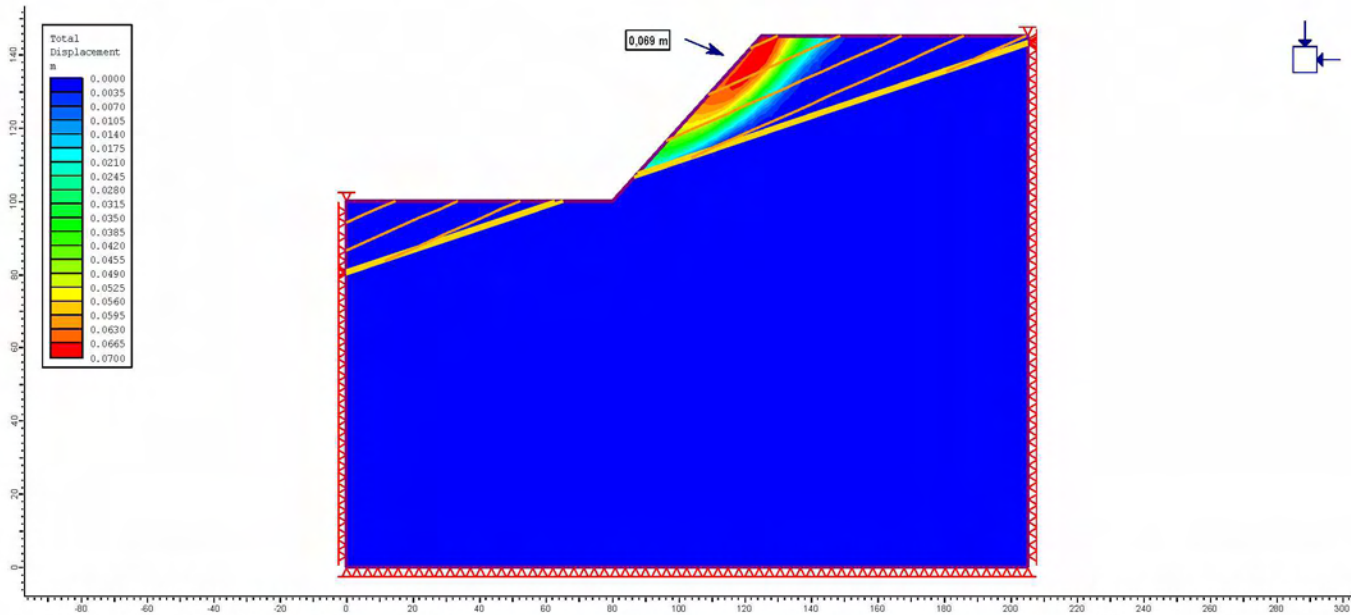
Σχήμα 7.19: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,049 m



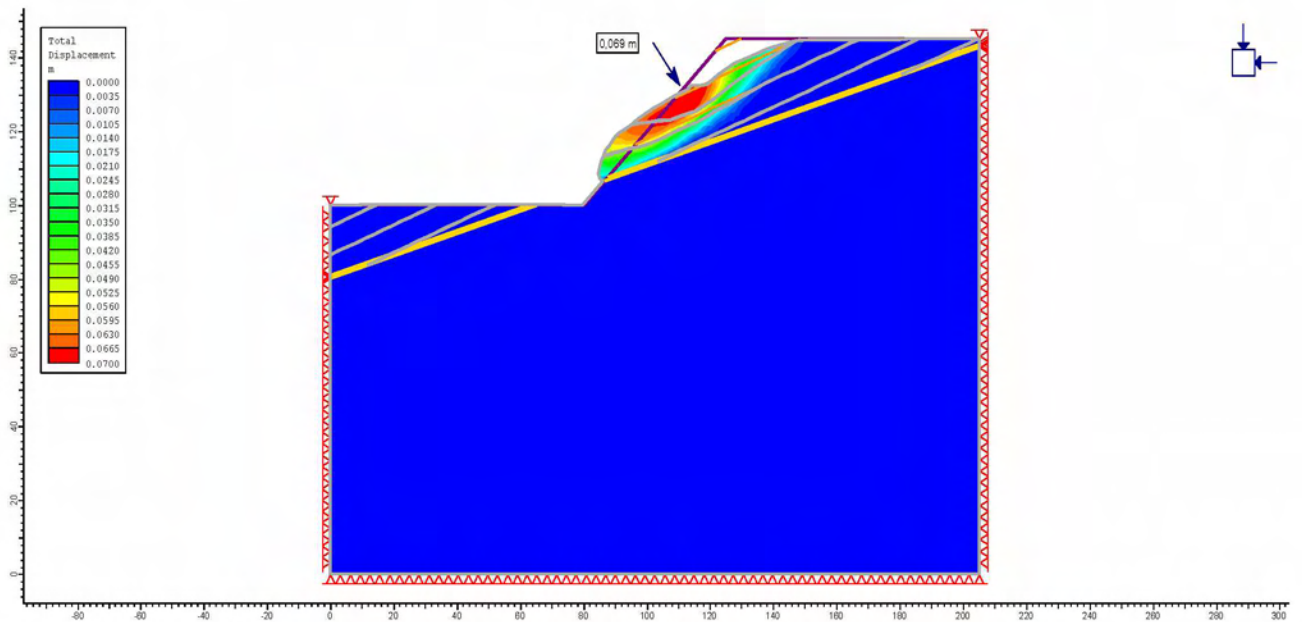
Σχήμα 7.20: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Με μία οικογένεια ασυνεχειών



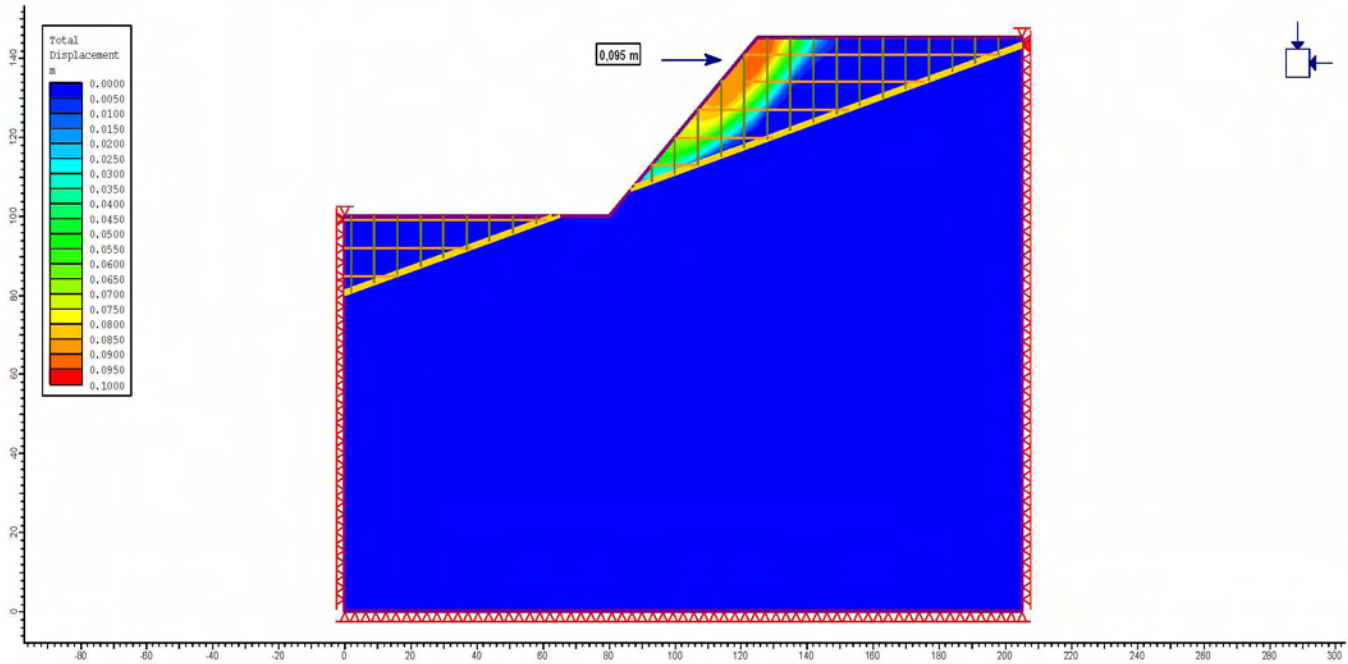
Σχήμα 7.21: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,069 m



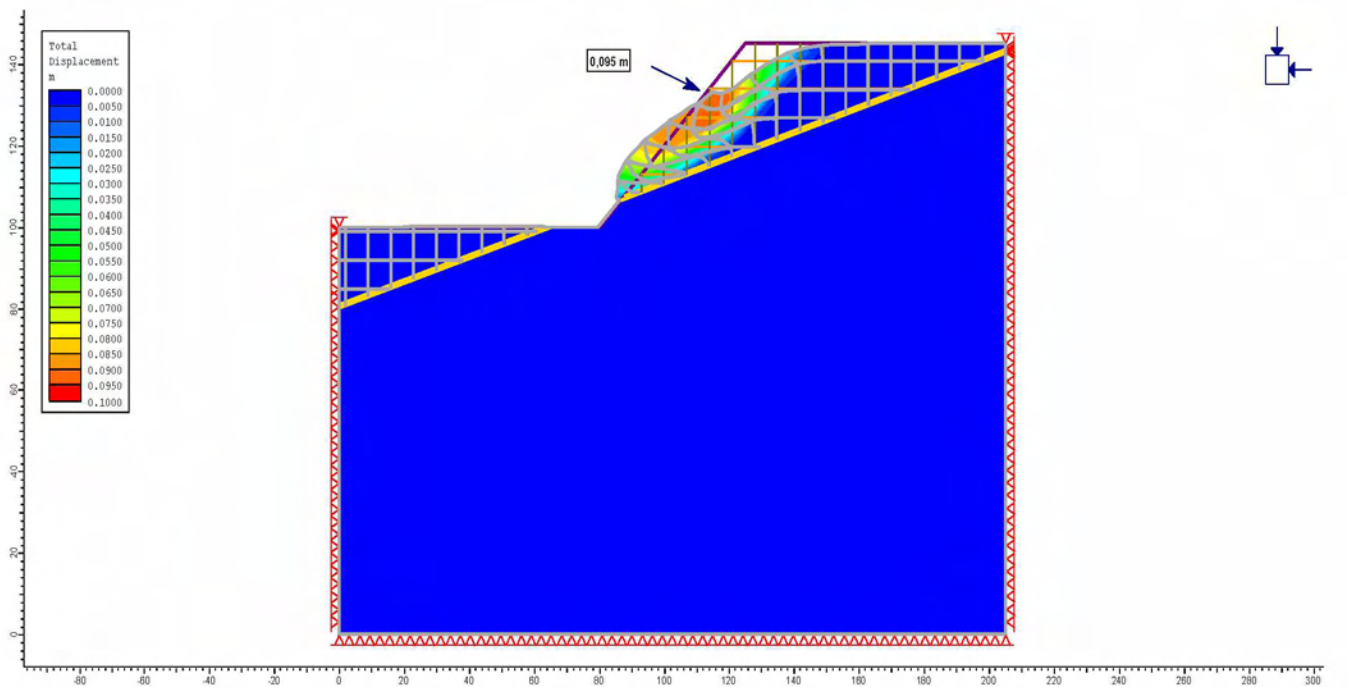
Σχήμα 7.22: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Με δύο οικογένειες ασυνεχειών



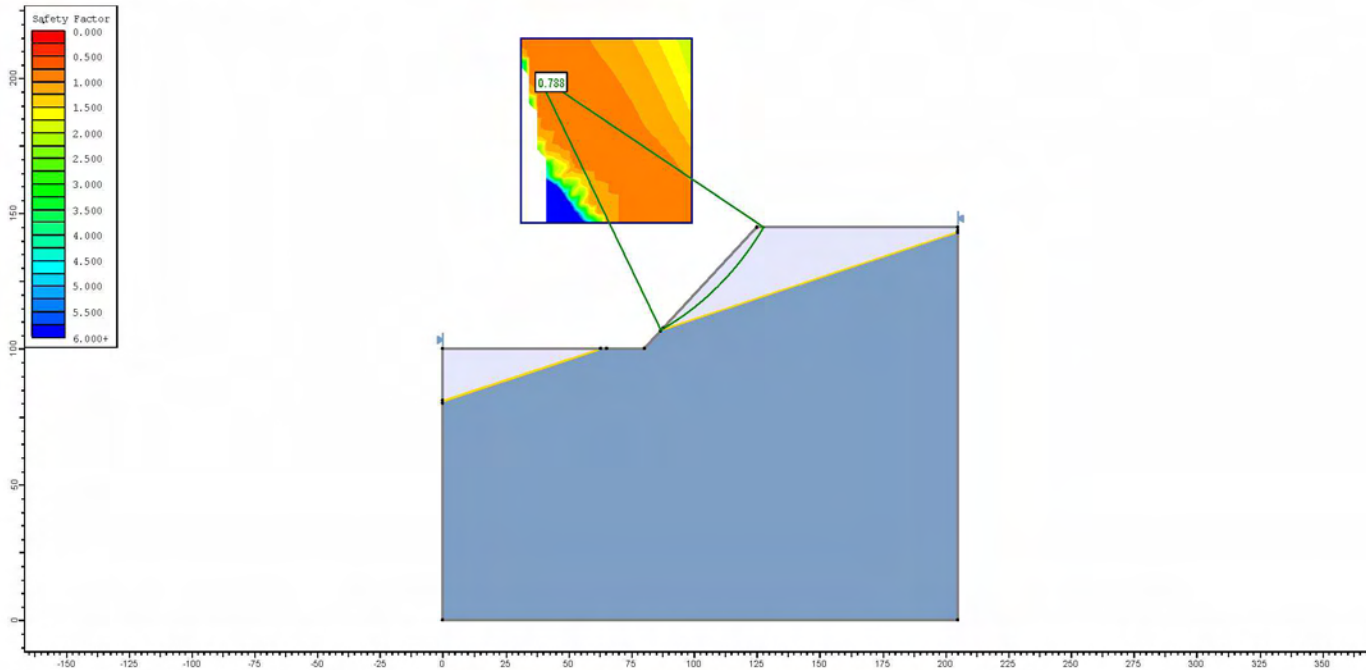
Σχήμα 7.23: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,095 m



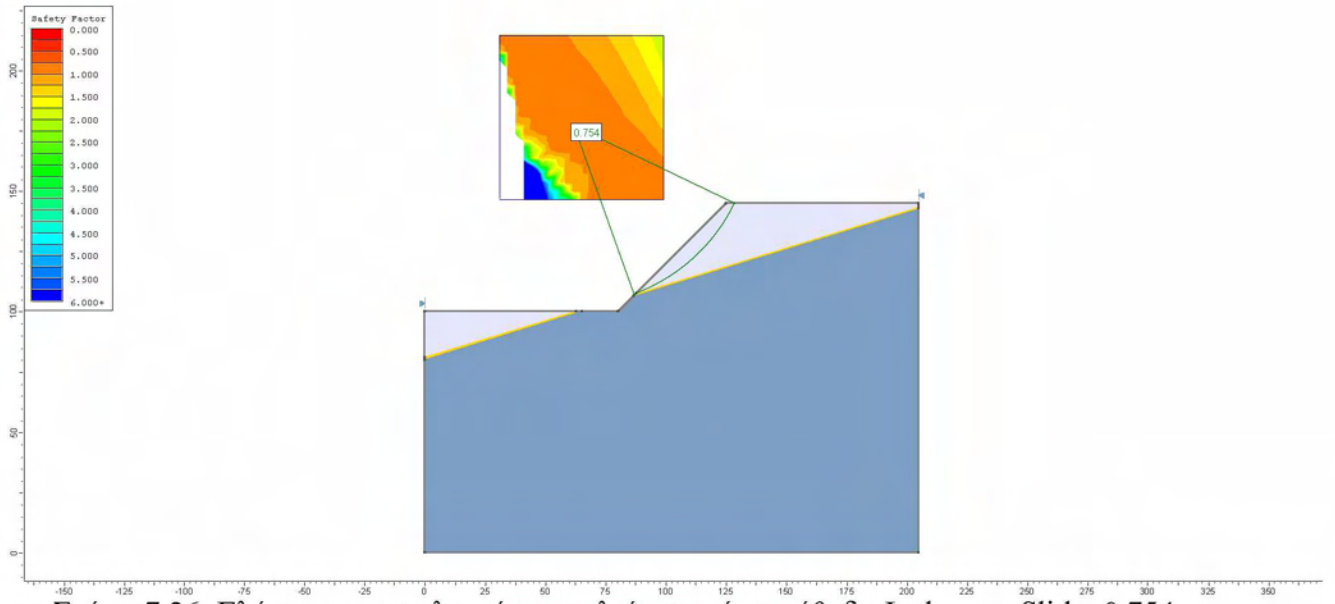
Σχήμα 7.24: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

Παρατηρείται ότι σε σχέση με το οριζόντιο στρώμα, το κεκλιμένο δημιουργεί μεγαλύτερες μετατοπίσεις, που αυξάνονται καθώς προστίθενται και ασυνέχειες.

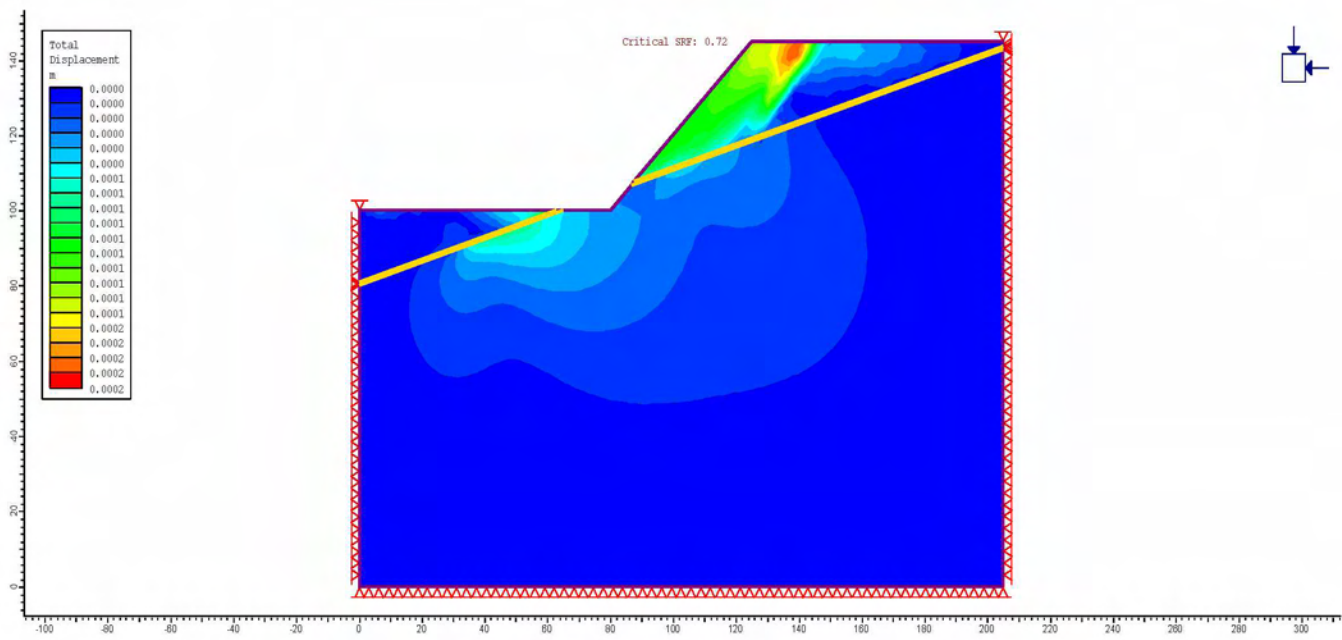
Παρατίθενται οι συντελεστές ασφαλείας για το μοντέλο με το κεκλιμένο στρώμα σχιστόλιθου, χωρίς ασυνέχειες.



Σχήμα 7.25: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,788



Σχήμα 7.26: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,754



Σχήμα 7.27: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0.72

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,049 | 0,788 | 0,754 | 0,72 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,069 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,095 | | | |

Πίνακας 7.3: Πίνακας αποτελεσμάτων

Είναι φανερό ότι οι συντελεστές ασφαλείας έχουν μειωθεί ελάχιστα σε σχέση με αυτούς των πρανών με το οριζόντιο στρώμα, και άρα είναι ελάχιστα πιο πιθανή η αστοχία.

Πιο ειδικά, όσον αφορά τις διαφορές ανάμεσα σε οριζόντιο και κεκλιμένο στρώμα:

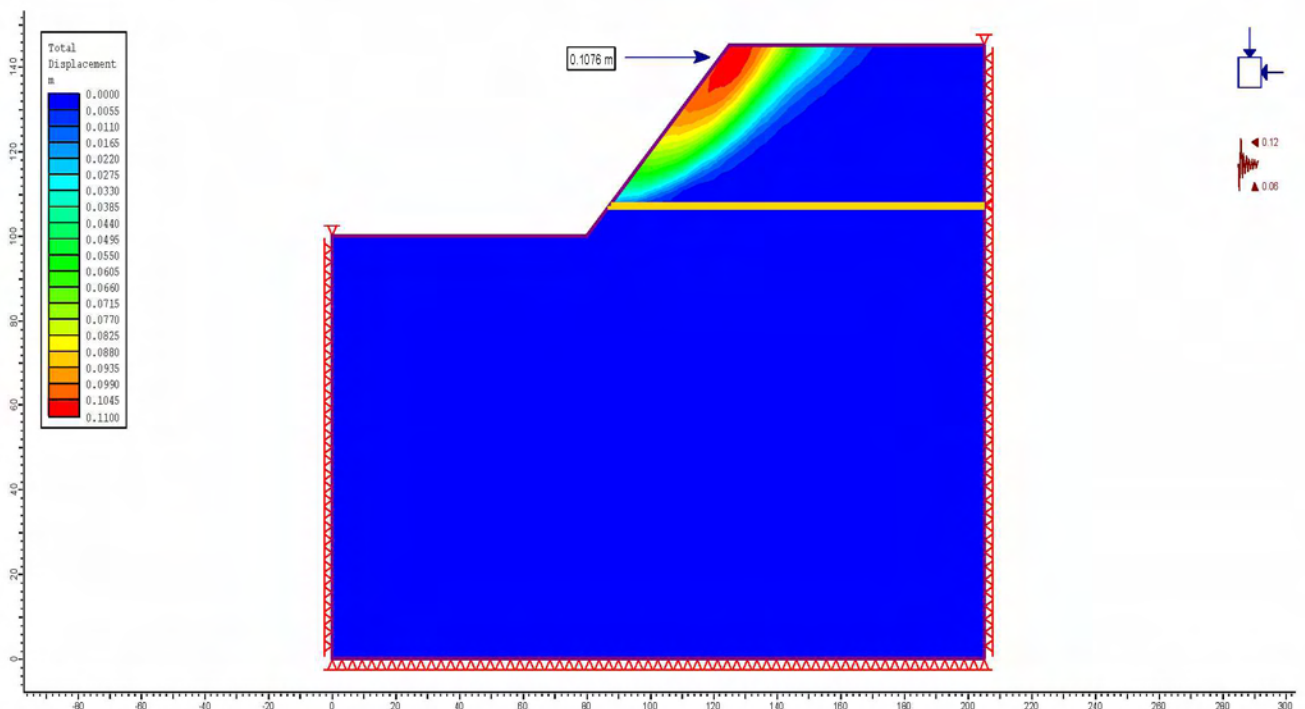
- χωρίς ασυνέχειες → 40% αύξηση στο κεκλιμένο
- 1 οικογένεια → 7,5% μείωση στο κεκλιμένο
- 2 οικογένειες → 13,8% αύξηση στο κεκλιμένο
- Ελάχιστη μείωση των συντελεστών ασφαλείας και του critical SRF

7.2.2 Σε σεισμικές συνθήκες

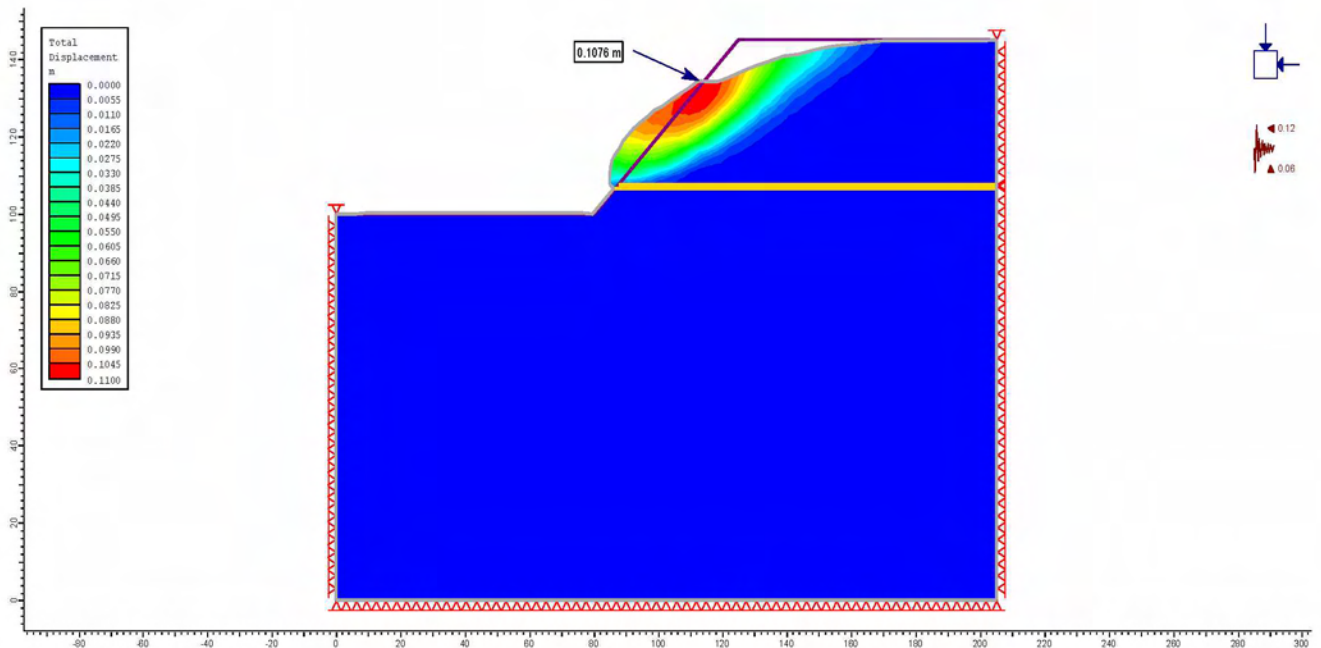
7.2.2.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου

A] $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
 - $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες
 - Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



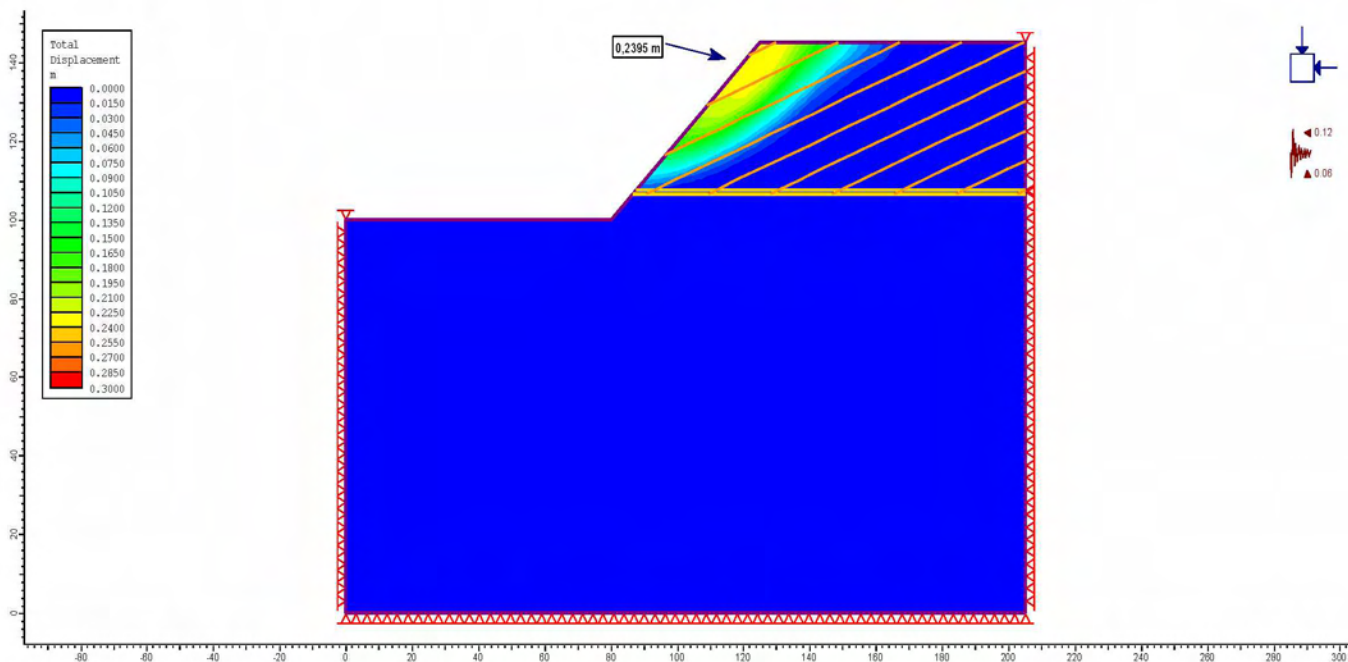
Σχήμα 7.28: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1076 m



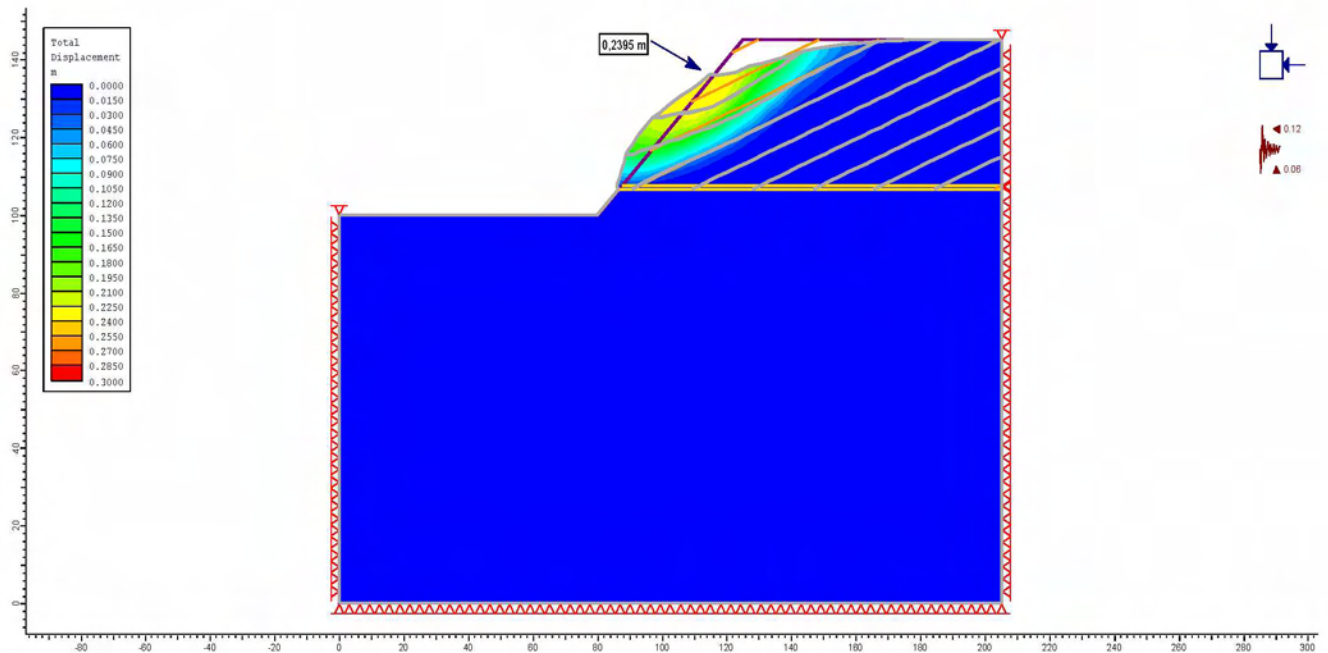
Σχήμα 7.29: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



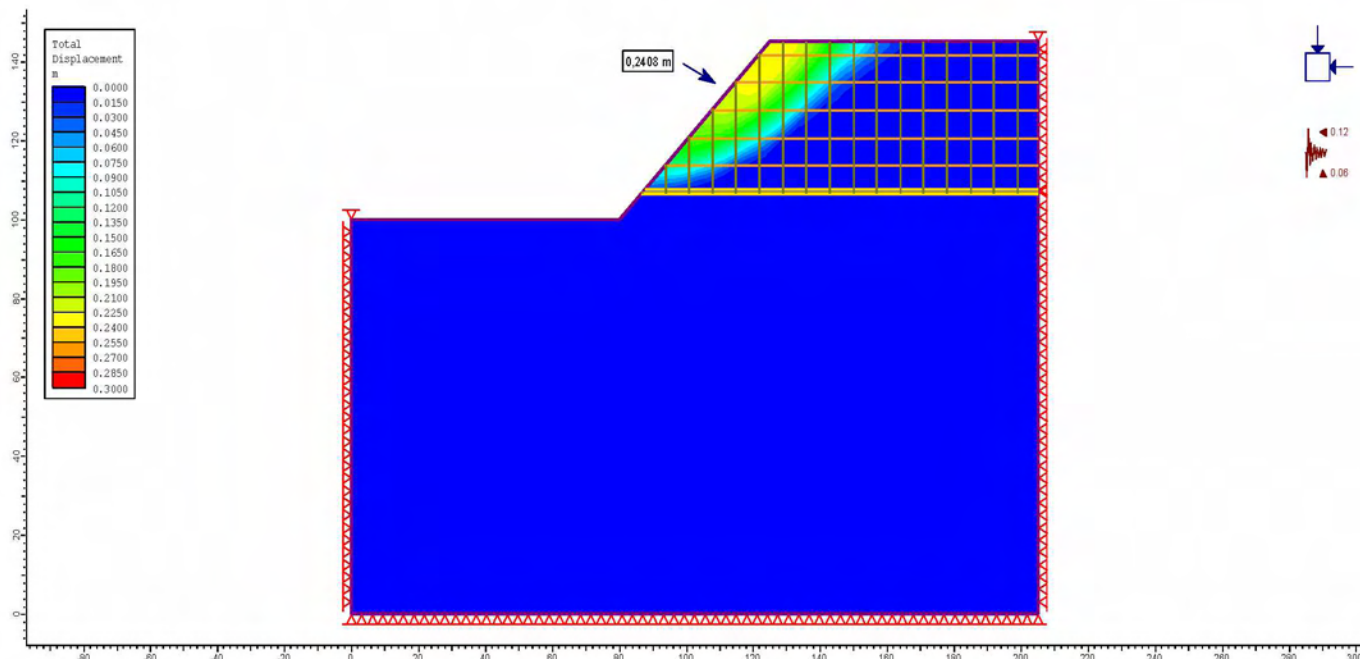
Σχήμα 7.30: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2395 m



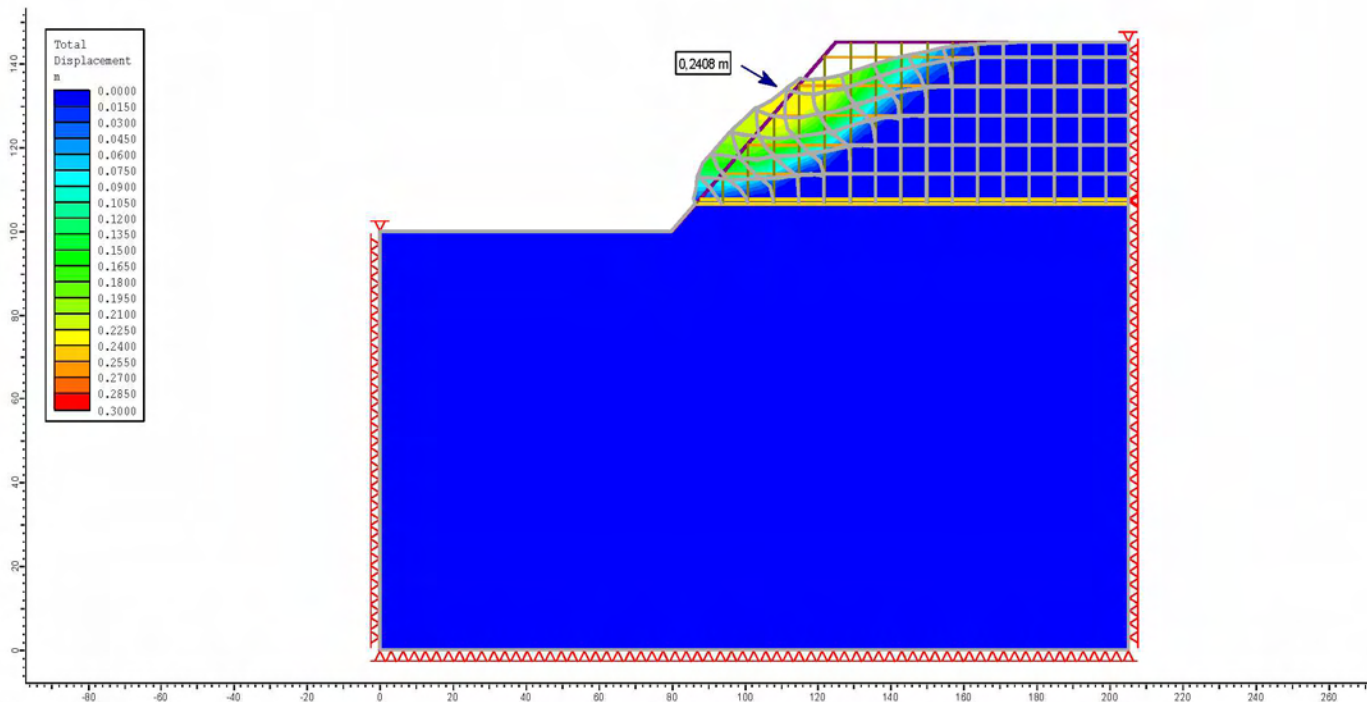
Σχήμα 7.31: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

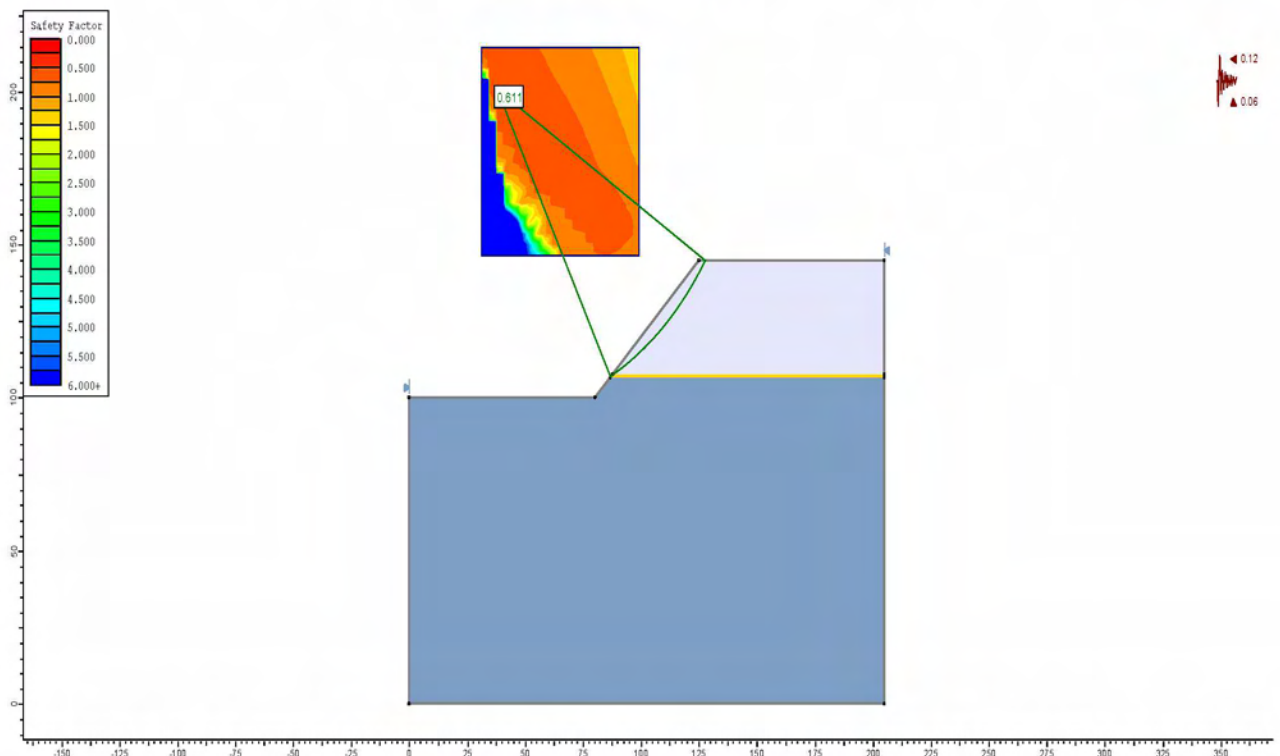


Σχήμα 7.32: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2408 m

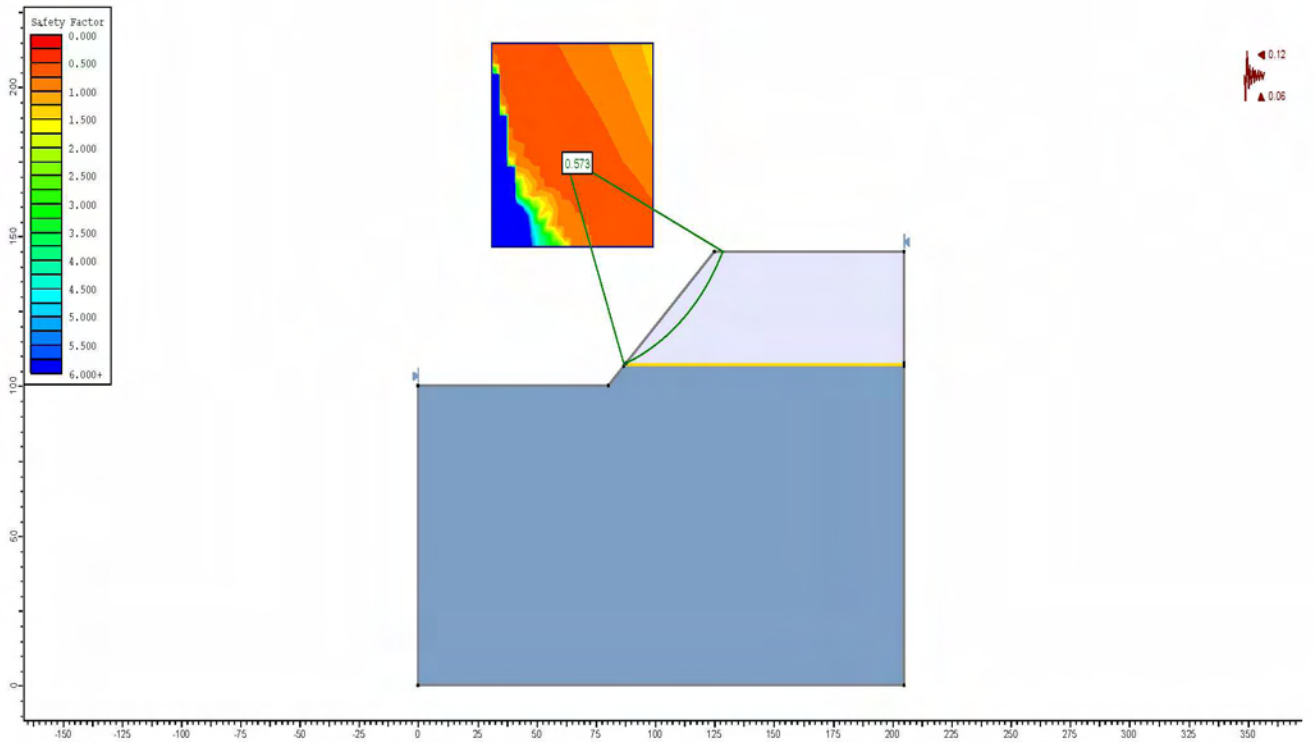


Σχήμα 7.33: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

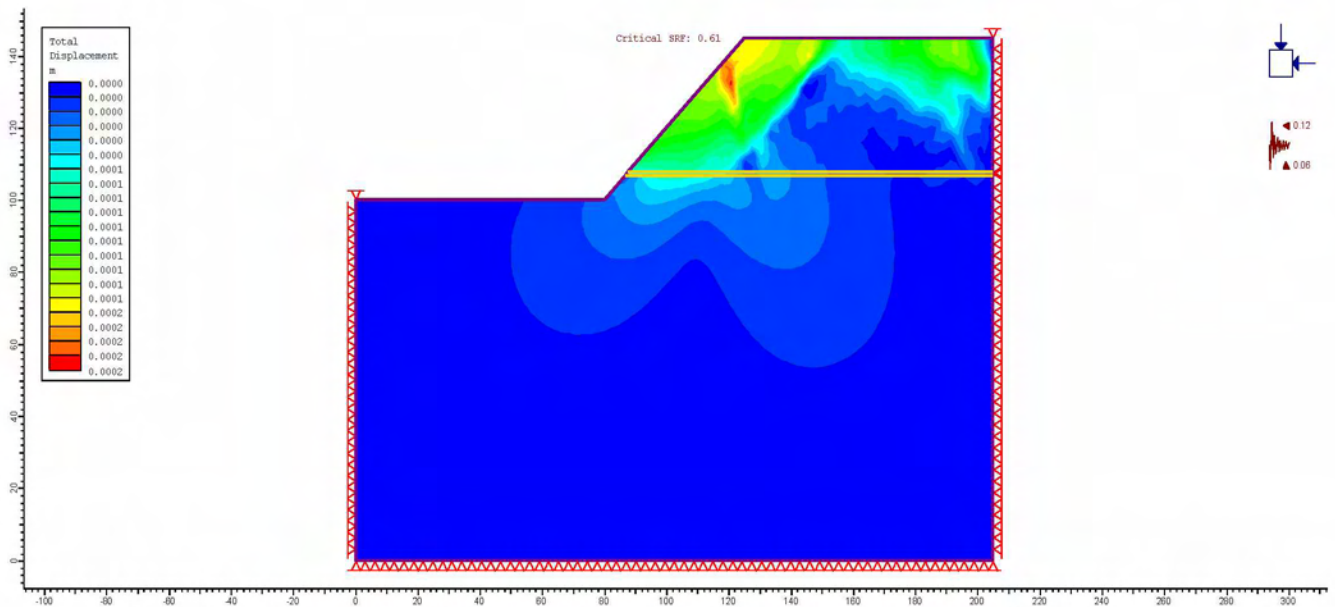
Παρατηρείται σημαντική αύξηση στις μετατοπίσεις της ολισθαίνουσας μάζας με την εισαγωγή της σεισμικής επιτάχυνσης, γεγονός που ήταν αναμενόμενο. Ακολουθούν οι συντελεστές ασφαλείας για πρανές χωρίς ασυνέχειες, σε σεισμικές συνθήκες.



Σχήμα 7.34: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,611



Σχήμα 7.35: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,573



Σχήμα 7.36: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,61

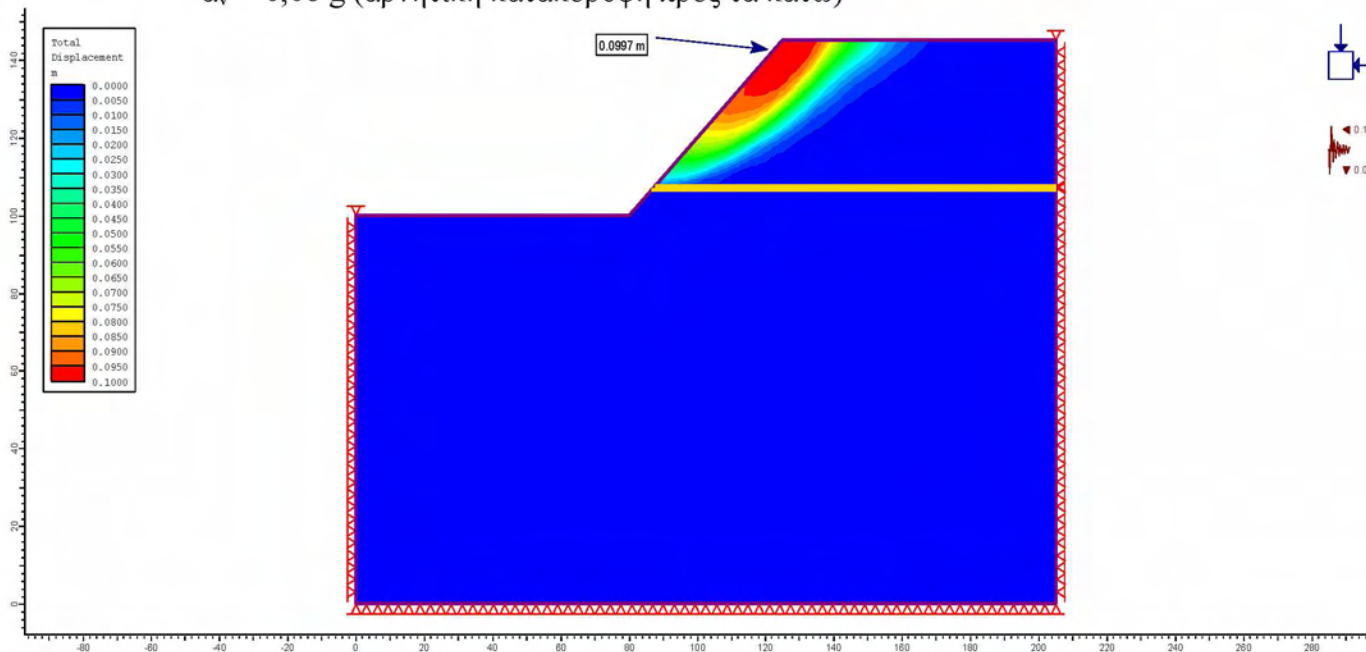
| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,1076 | 0,611 | 0,573 | 0,61 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,2395 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,2408 | | | |

Πίνακας 7.4: Πίνακας αποτελεσμάτων

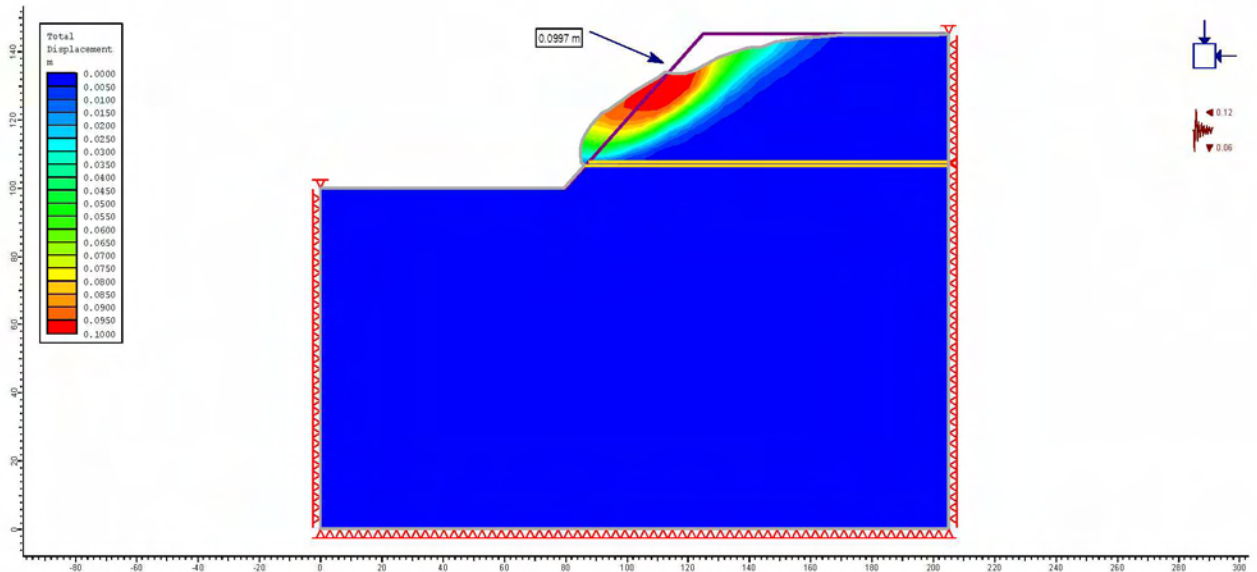
Αξιοσημείωτη αποτελεί η μείωση των συντελεστών ασφαλείας στο πρηνές με το οριζόντιο στρώμα σχιστόλιθου, με σεισμικές συνιστώσες 0,12g την οριζόντια και +0,06g την κατακόρυφη. Ο συντελεστής ασφαλείας κατά Bishop μειώθηκε κατά 22,75%, ο συντελεστής ασφαλείας κατά Janbu κατά 22,45% και ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε στο Phase2 κατά 21,8%. Η αστοχία είναι πιο πιθανή στις σεισμικές συνθήκες.

B) $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες
 - Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



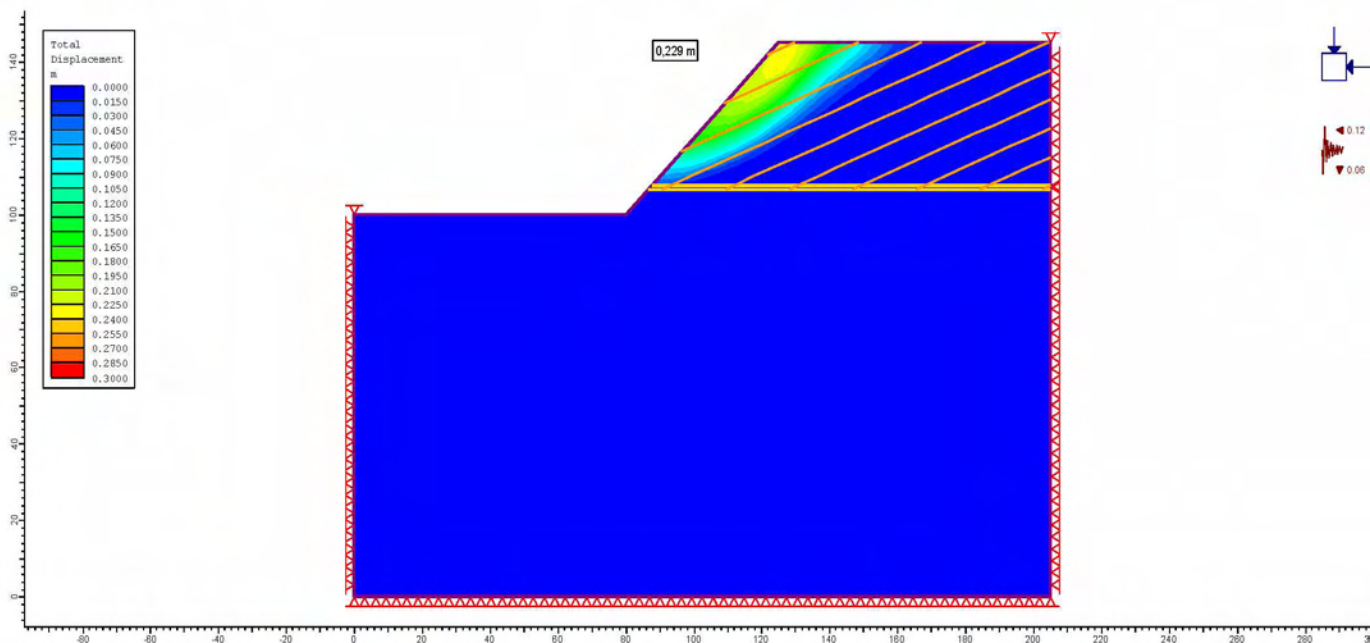
Σχήμα 7.37: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0997 m



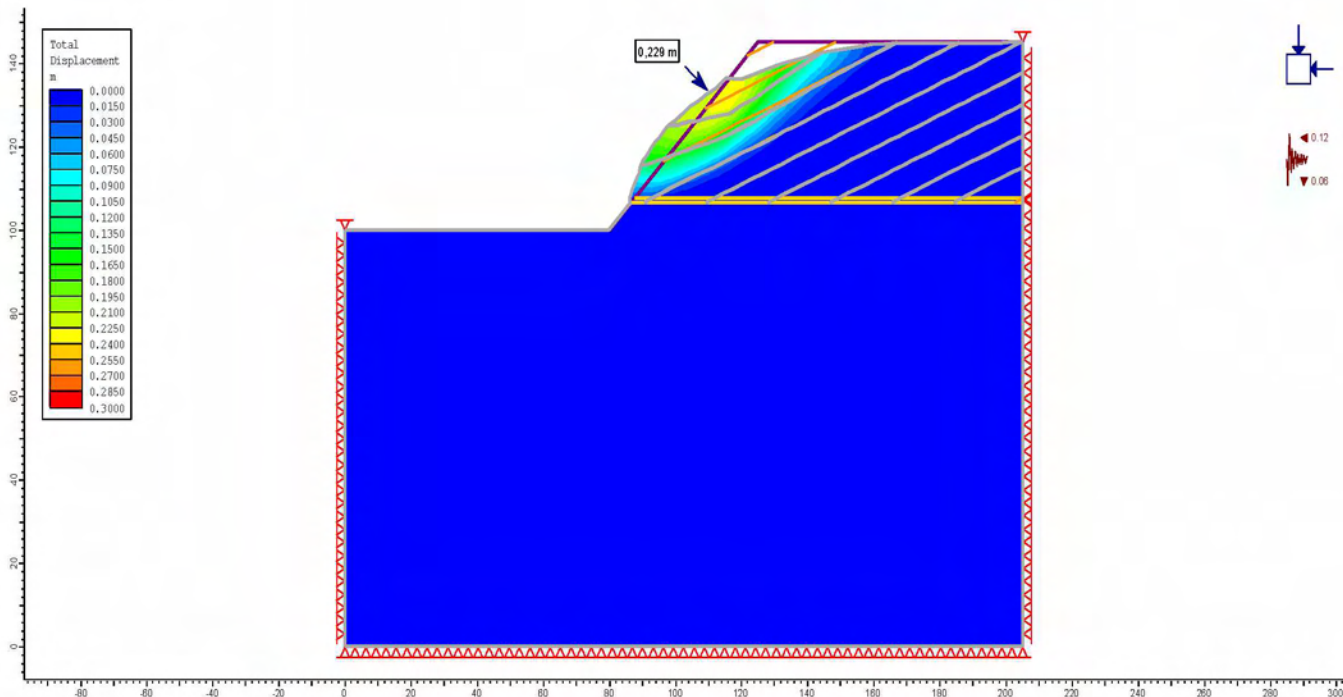
Σχήμα 7.38: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανού

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



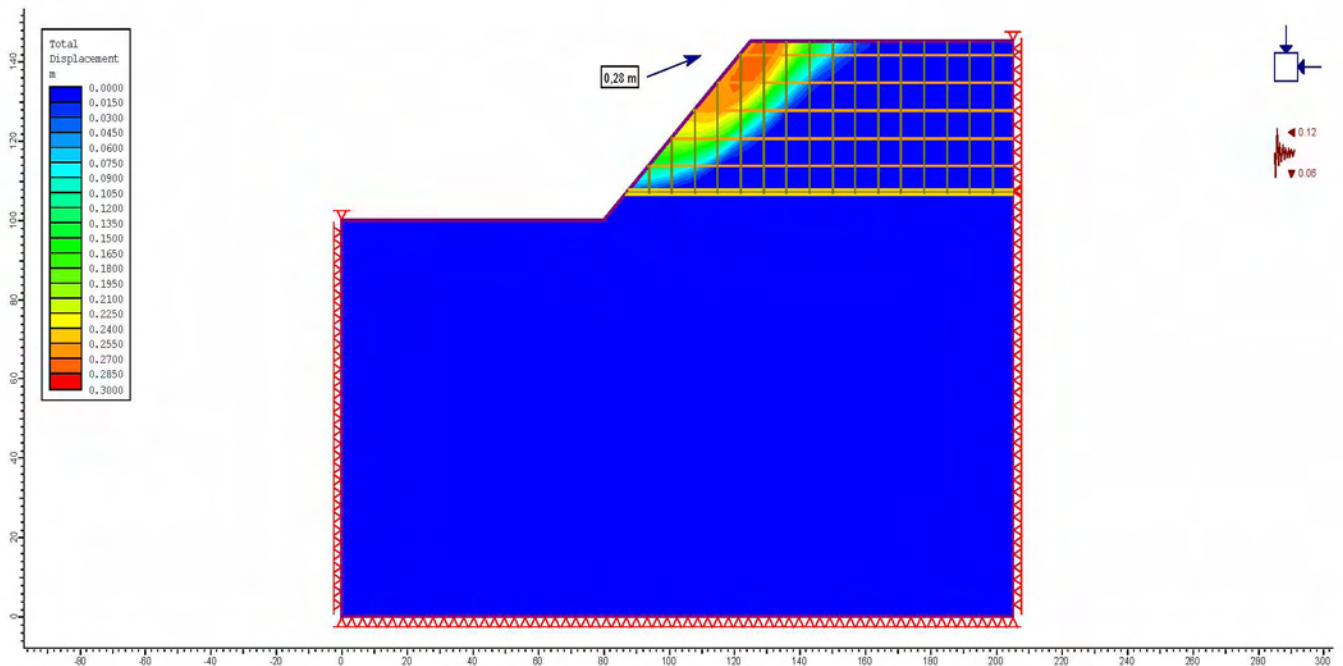
Σχήμα 7.39: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,229 m



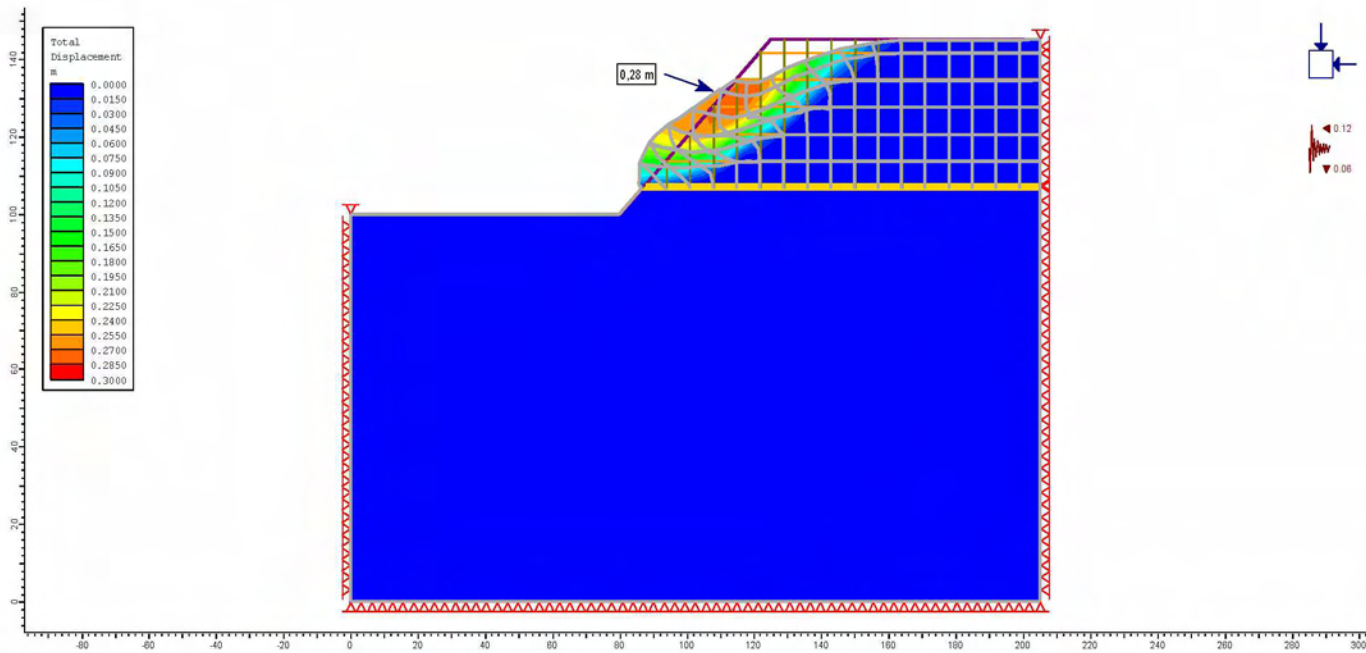
Σχήμα 7.40: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

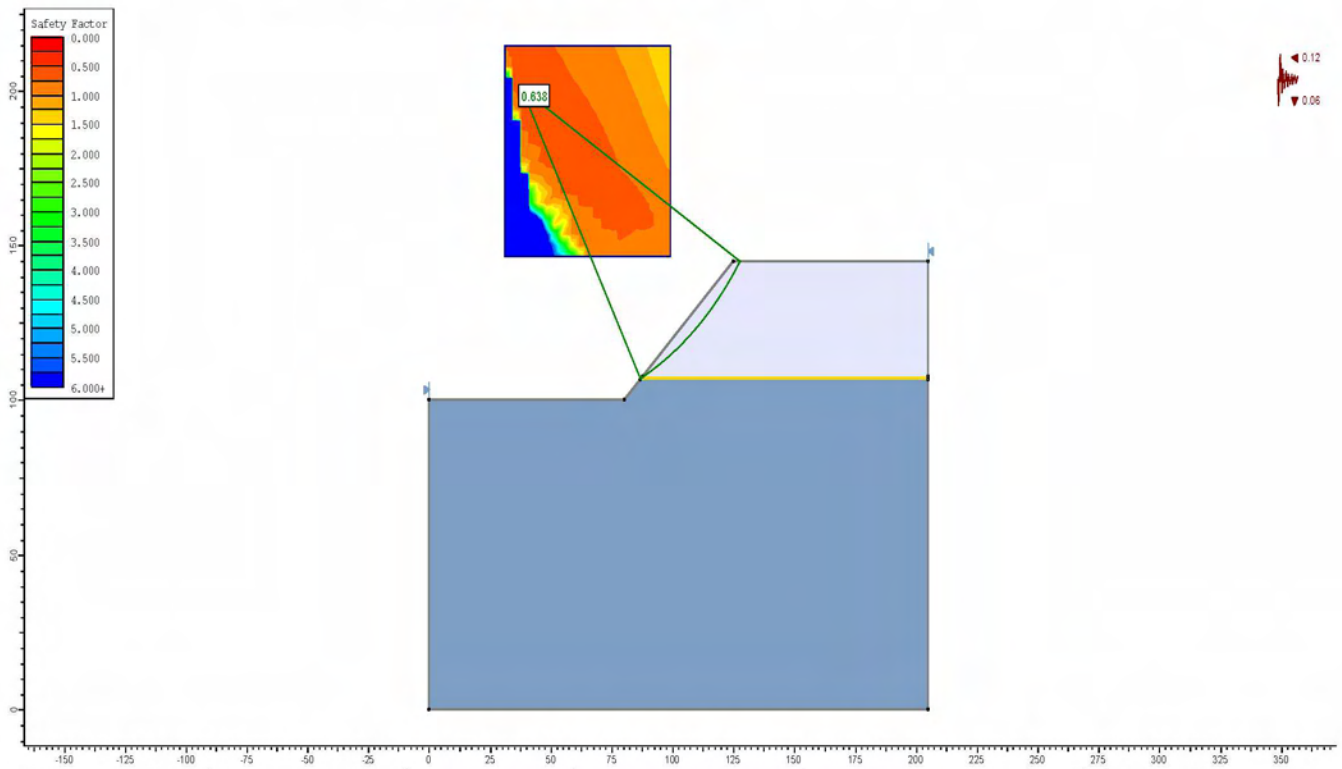


Σχήμα 7.41: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,28 m

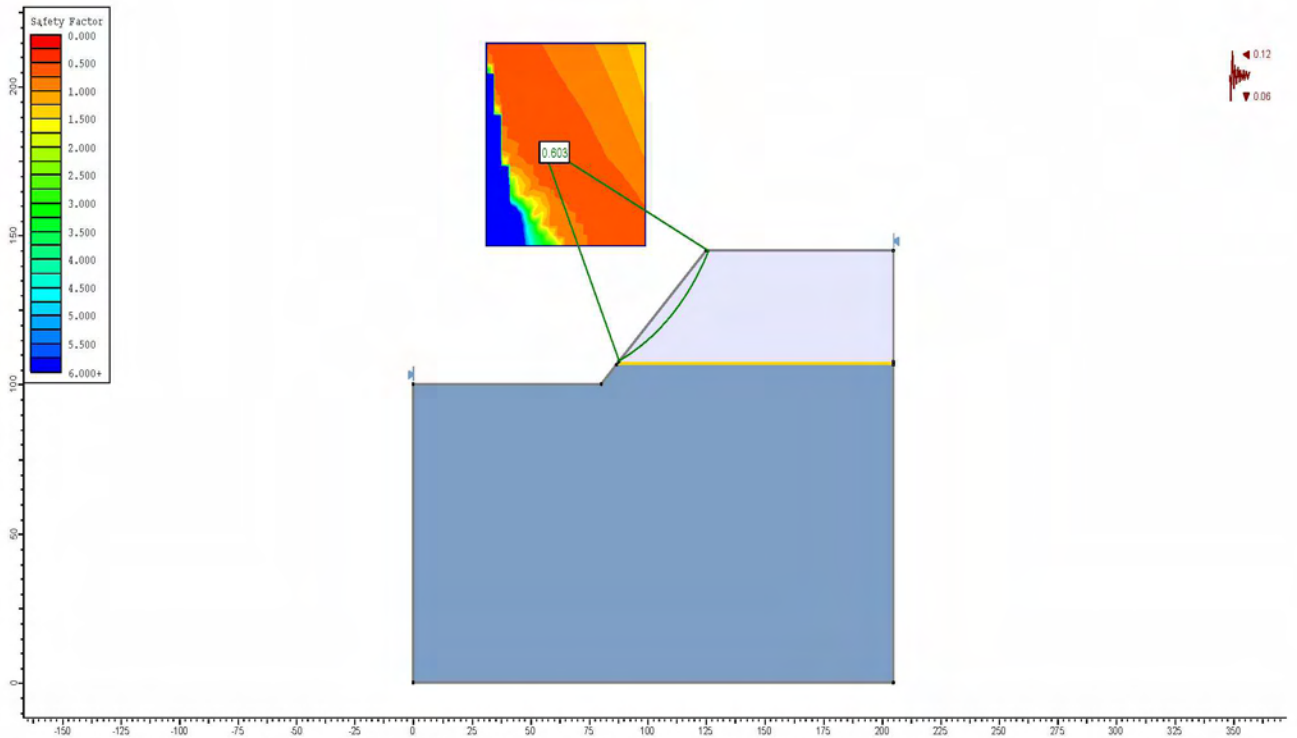


Σχήμα 7.42: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

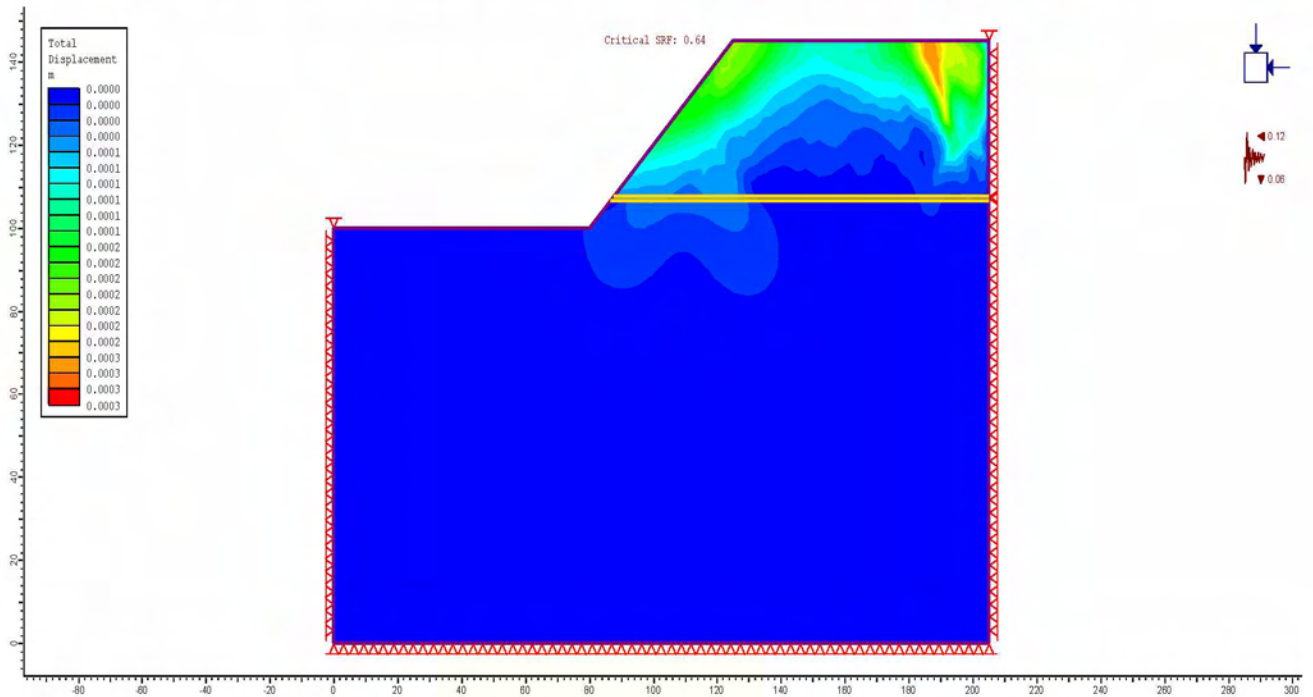
Σημαντική είναι και εδώ η αύξηση των ολικών μετακινήσεων λόγω σεισμού. Ακολουθούν οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν:



Σχήμα 7.43: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,638



Σχήμα 7.44: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,603



Σχήμα 7.45: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,64

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,0997 | 0,638 | 0,603 | 0,64 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,229 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0.28 | | | |

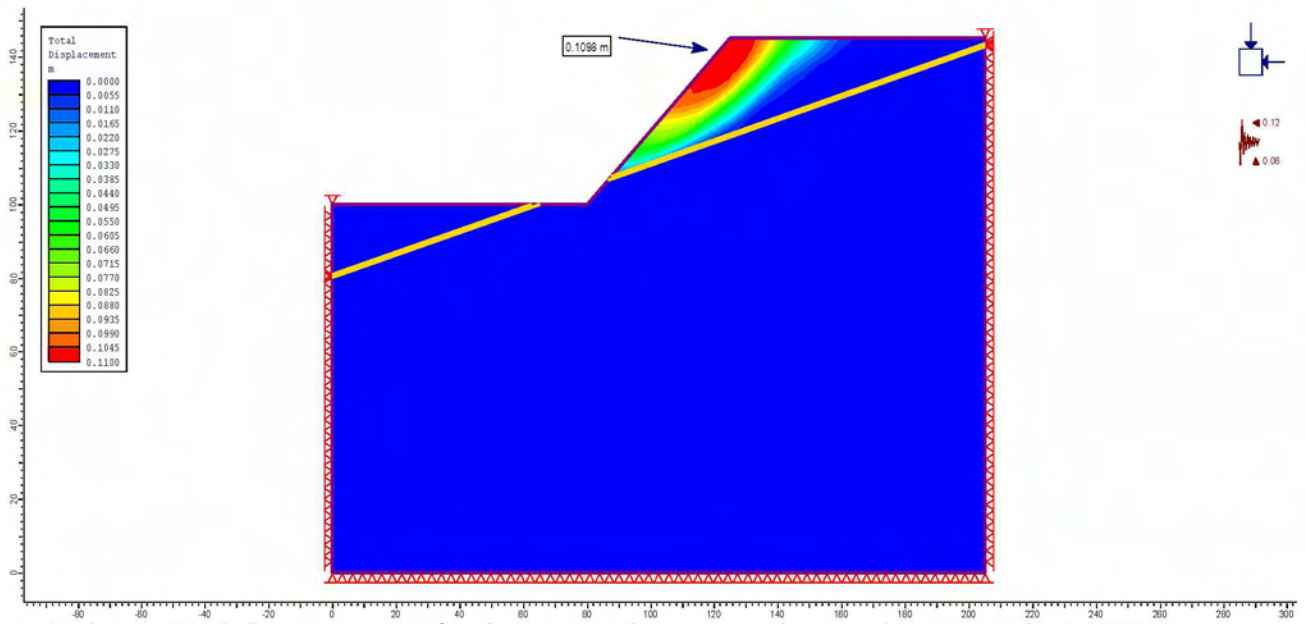
Πίνακας 7.5: Πίνακας αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι με την αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, οι συντελεστές ασφαλείας των πρανών χωρίς ασυνέχειες παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση, σε σχέση με τη θετική κατακόρυφη συνιστώσα.

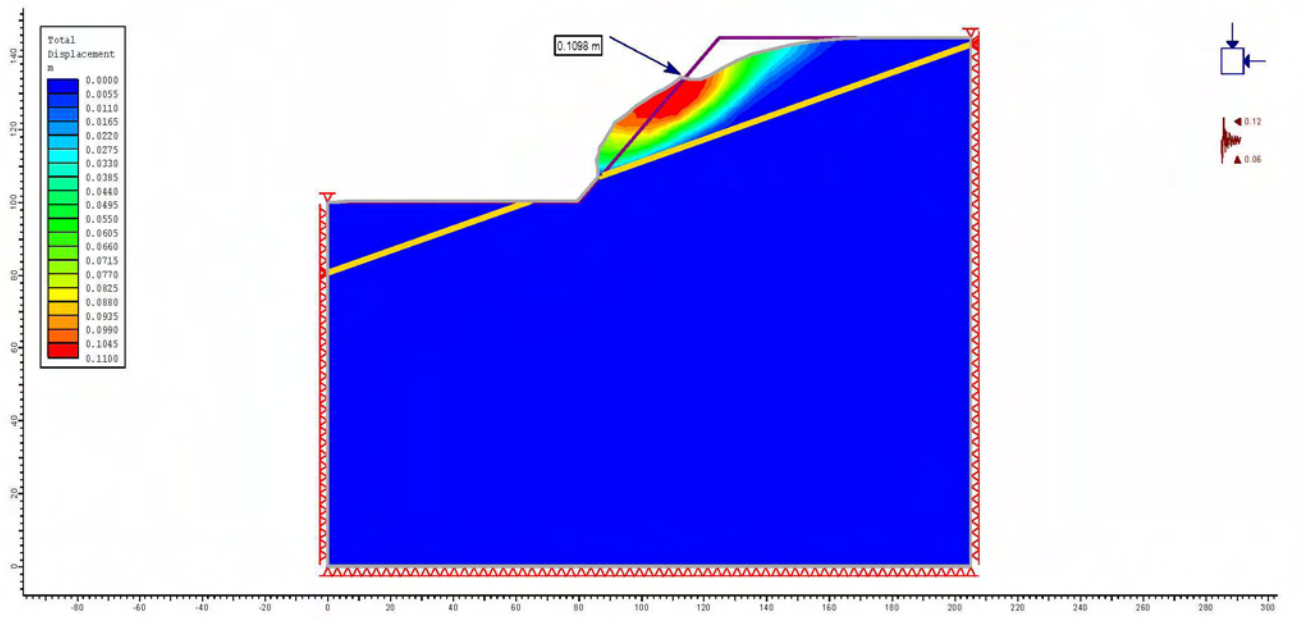
7.2.2.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου (17° από τον οριζόντιο άξονα)

A] $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v= +0,06 g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
 - $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες
 - Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v= +0,06 g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



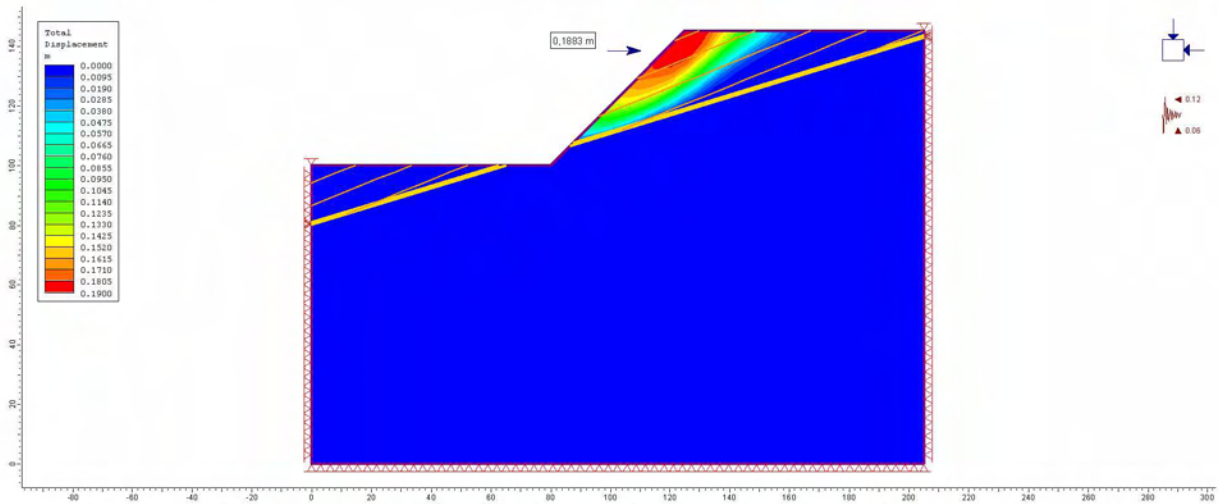
Σχήμα 7.46: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1098 m



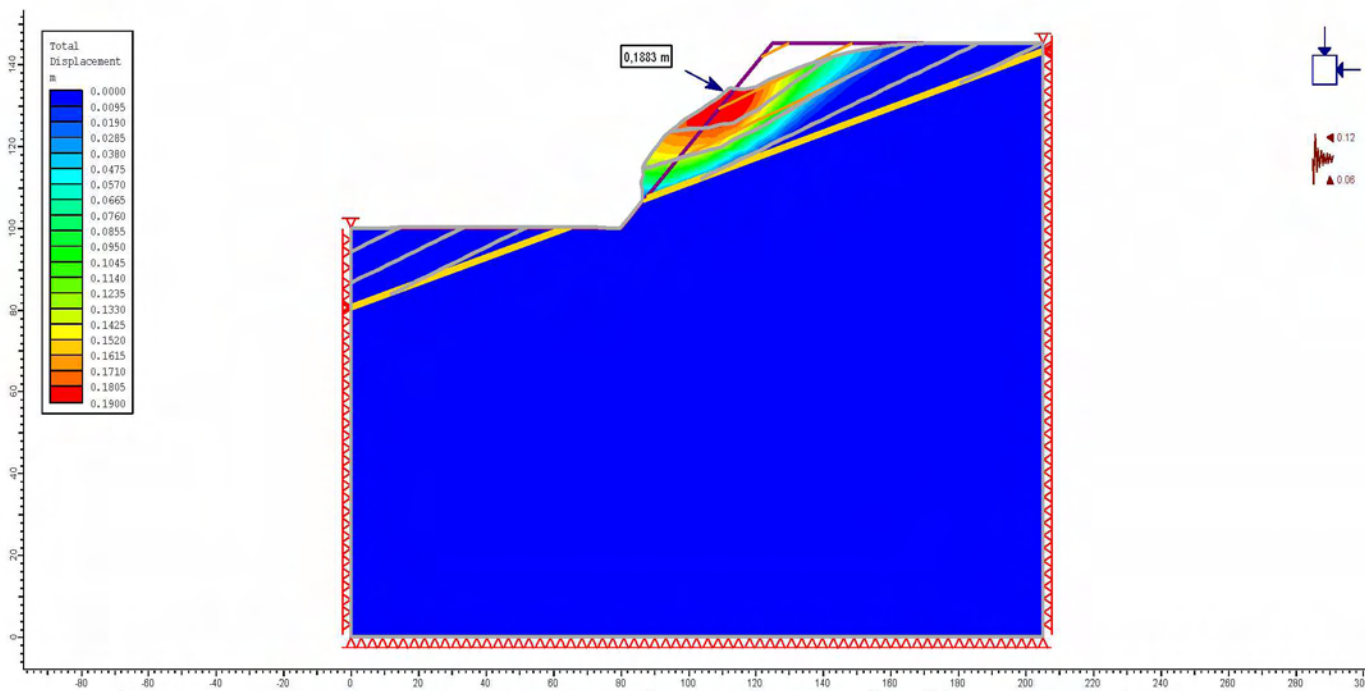
Σχήμα 7.47: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



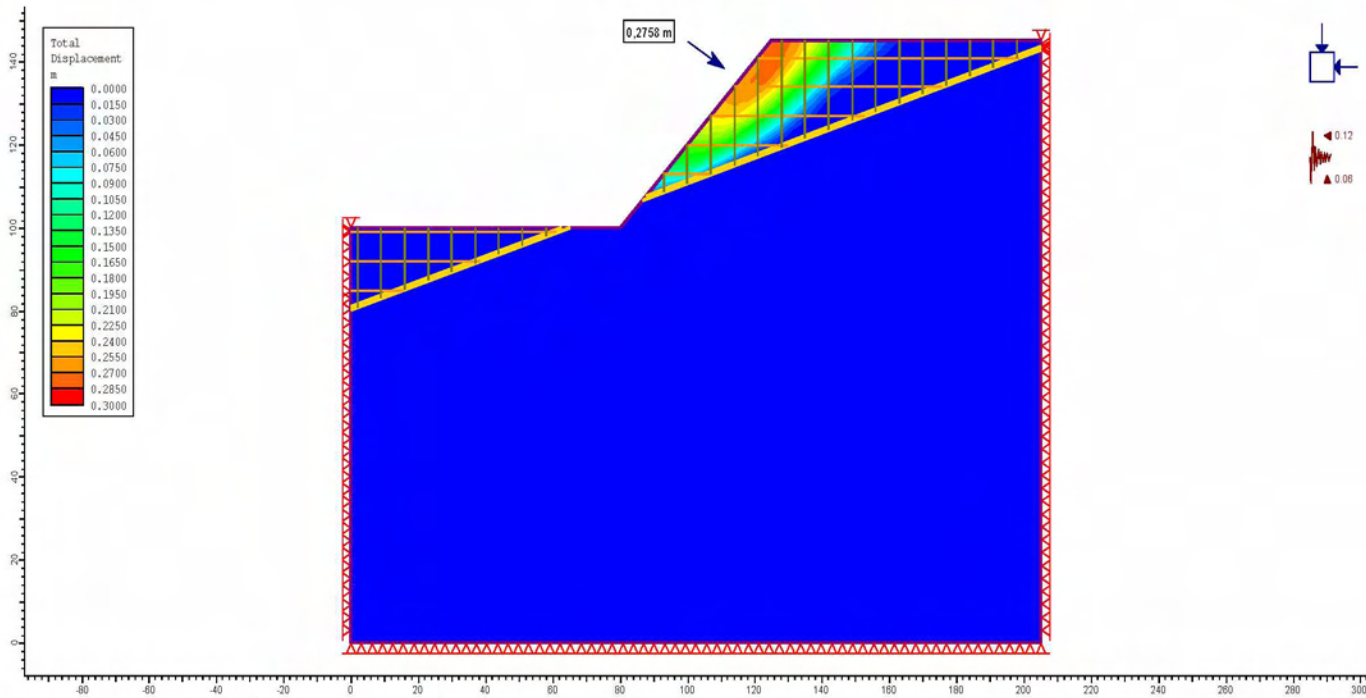
Σχήμα 7.48: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1883 m



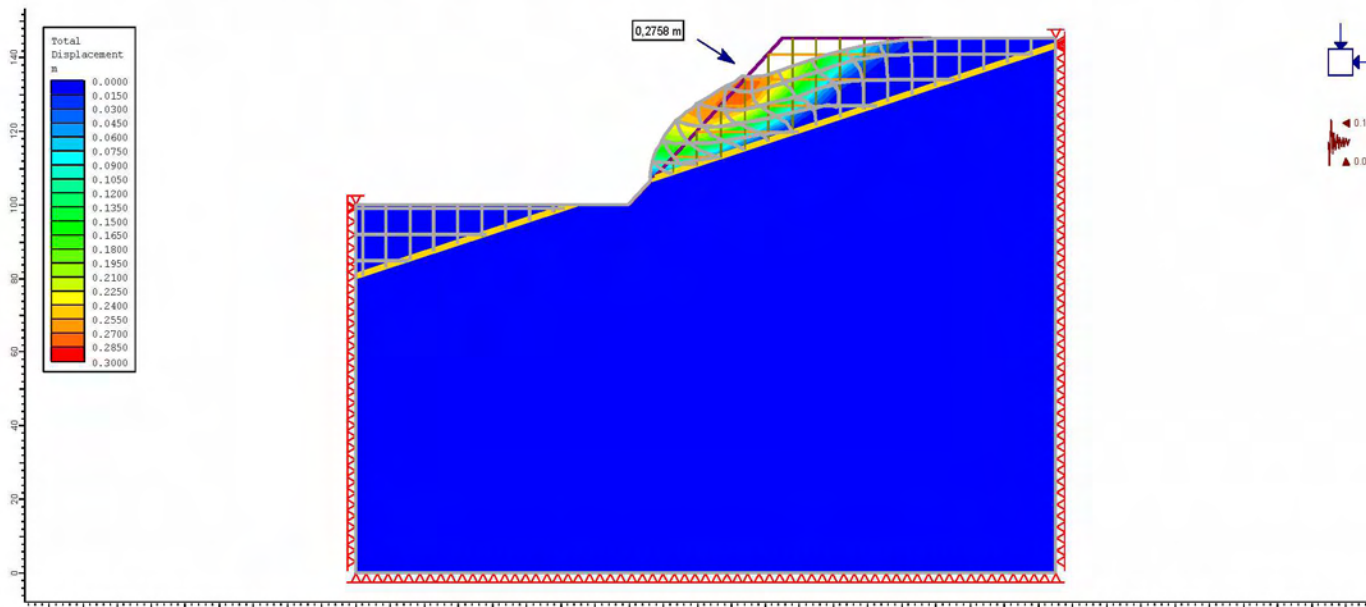
Σχήμα 7.49: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

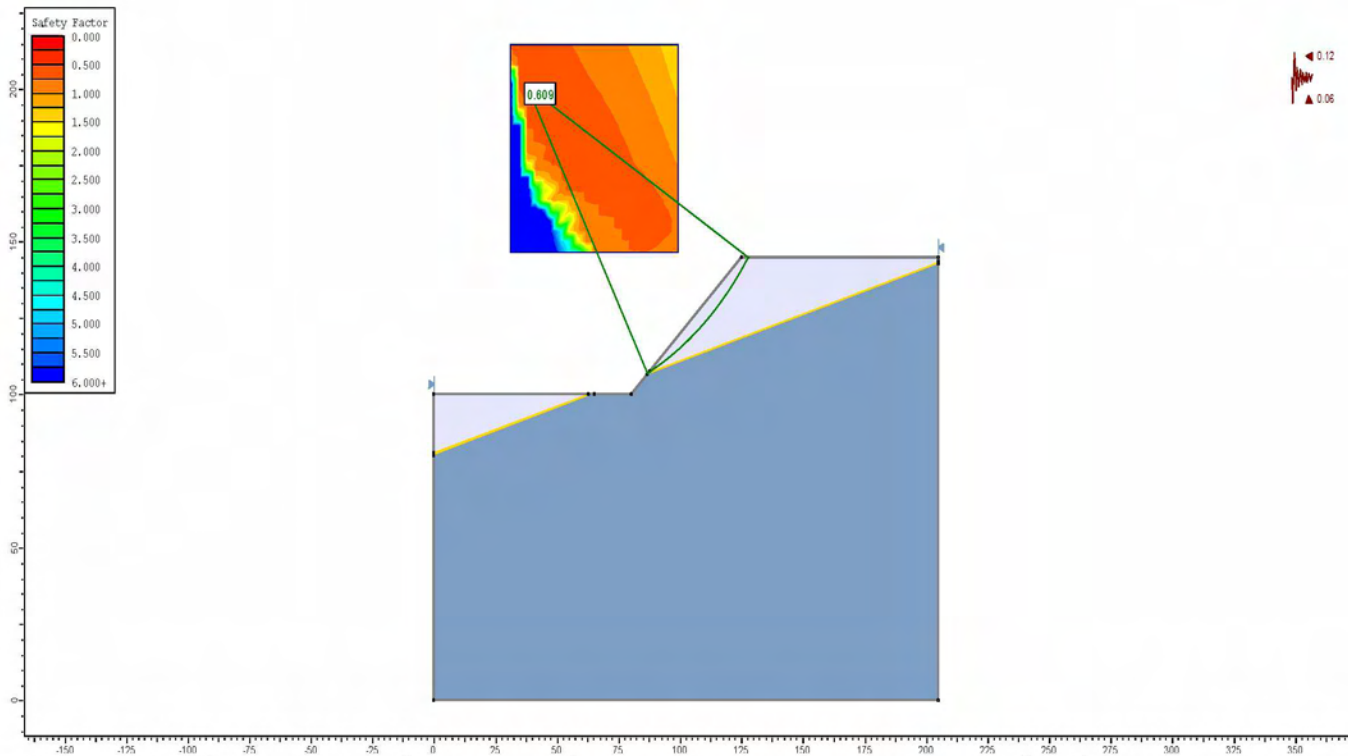


Σχήμα 7.50: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2758 m

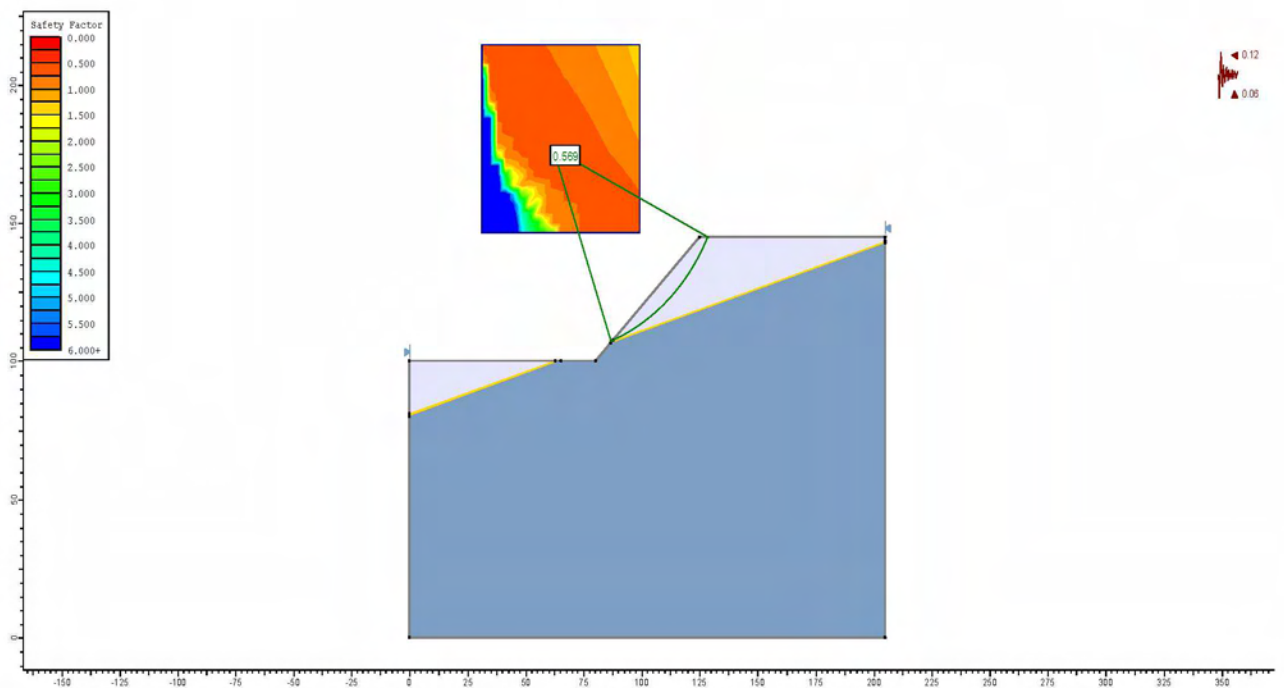


Σχήμα 7.51: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

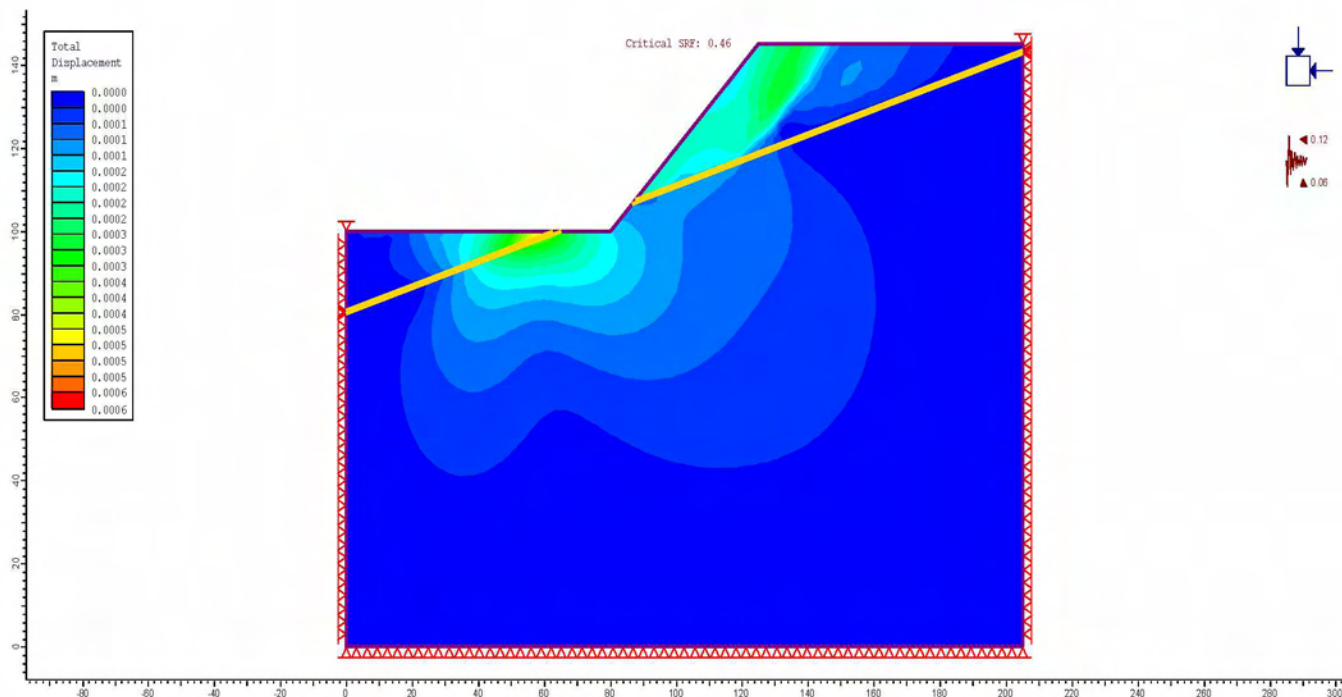
Αισθητή είναι η αύξηση των ολικών μετατοπίσεων με την ύπαρξη των ασυνεχειών.
Ακολουθούν οι συντελεστές ασφαλείας:



Σχήμα 7.53: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,609



Σχήμα 7.54: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,569



Σχήμα 7.55: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,46

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,1098 | 0,609 | 0,569 | 0,46 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,1883 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,2758 | | | |

Πίνακας 7.6: Πίνακας αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε ότι οι συντελεστές ασφαλείας των πρανών, υπό σεισμικές συνθήκες μειώνονται αρκετά: κατά 21,92% στη μέθοδο Bishop, κατά 24,54% στη μέθοδο Janbu και κατά 36,1% στη μέθοδο SSR του Phase2, σε σχέση με τους συντελεστές ασφαλείας στις στατικές συνθήκες, στα πρανή με κεκλιμένο στρώμα σχιστόλιθου.

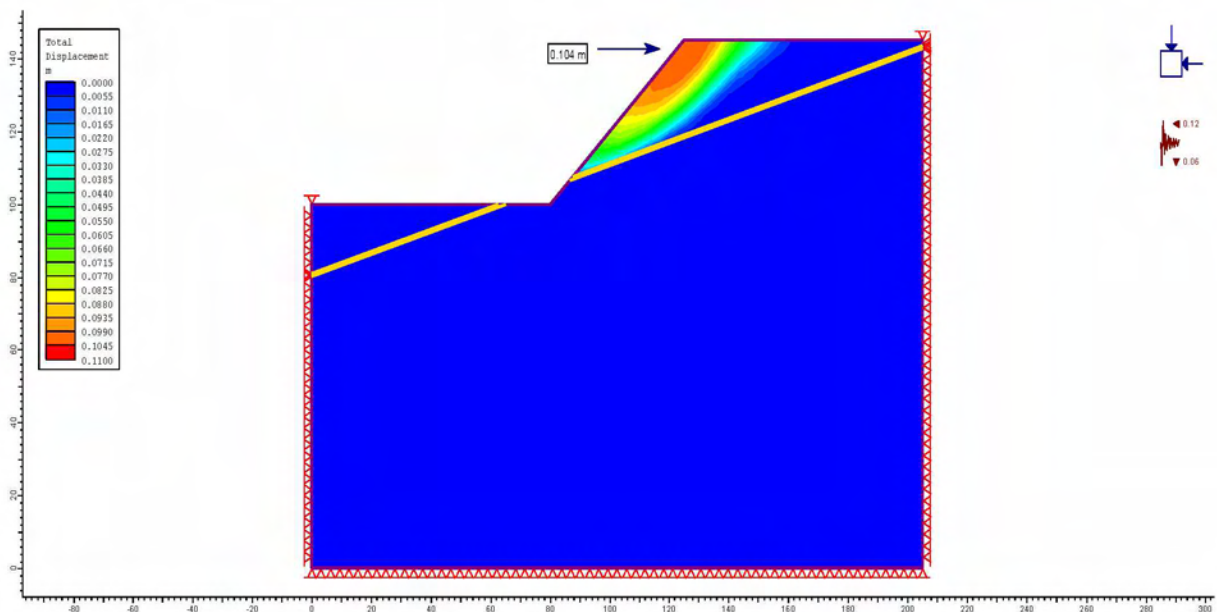
- Από θετική σε αρνητική συνιστώσα υπάρχει μείωση μετατοπίσεων περίπου 5%
- Από οριζόντιο σε κεκλιμένο, μόνο στη μία οικογένεια ασυνεχειών υπάρχει μείωση στο κεκλιμένο
- Μικρότερες μετατοπίσεις στην αρνητική συνιστώσα
- Σε σχέση με τις στατικές συνθήκες, υπάρχει 65-70% αύξηση των ολικών μετατοπίσεων στο οριζόντιο με σεισμό, και 50-65% στο κεκλιμένο.

Οι συντελεστές ασφαλείας παραμένουν οι ίδιοι με την προσθήκη συντελεστή γ_u στον υγρή βράχο.

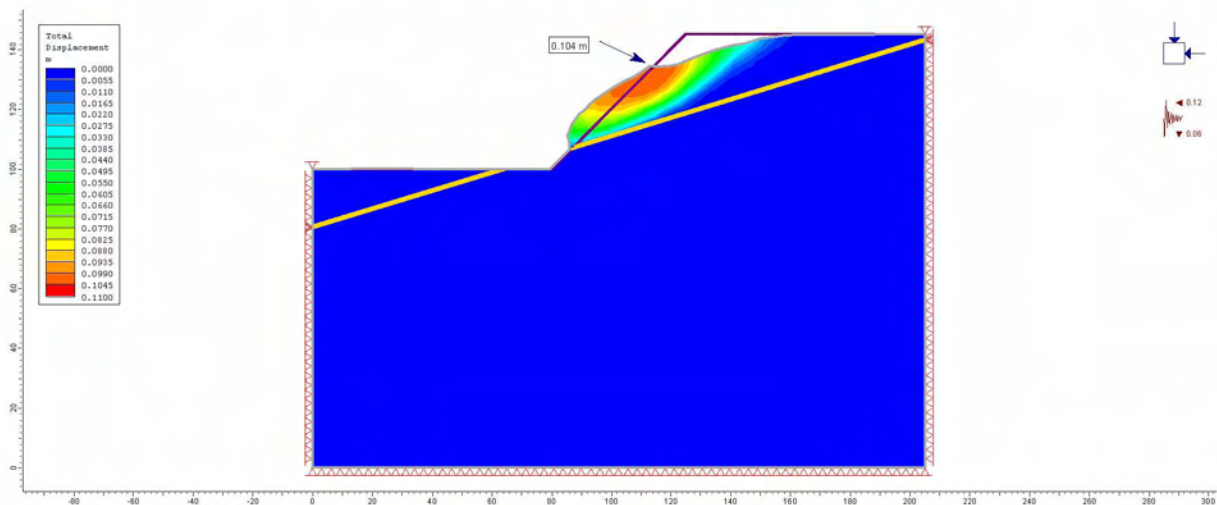
B] $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- χωρίς ασυνέχειες
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



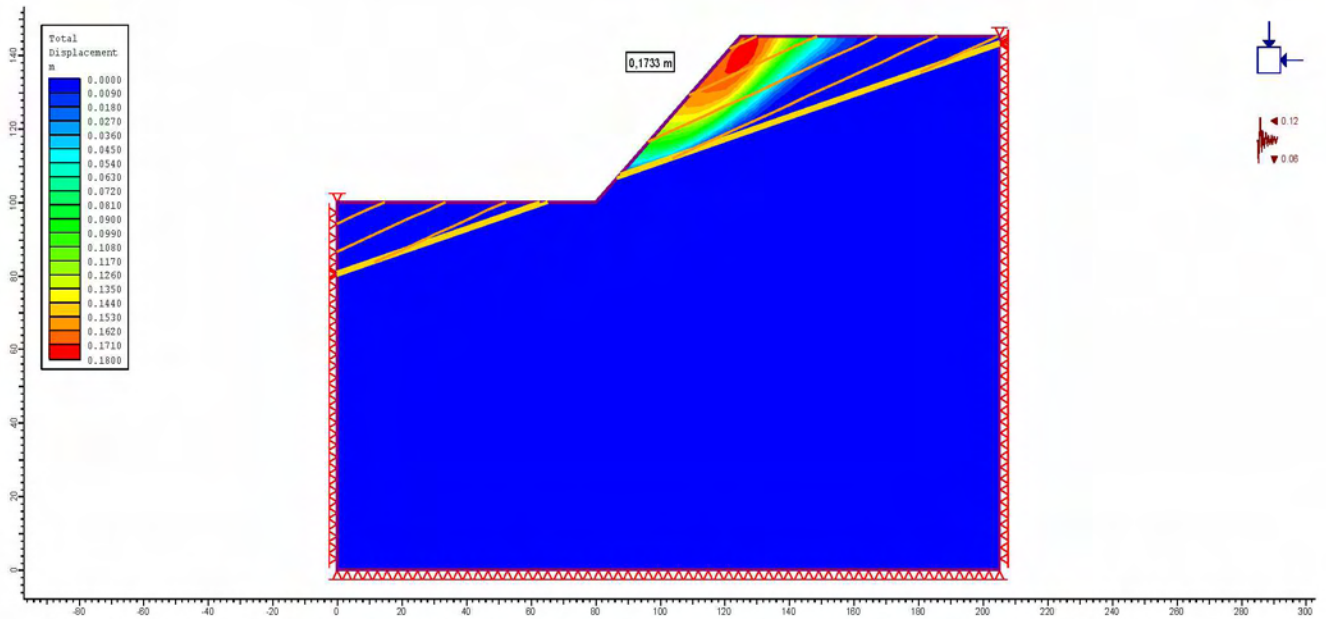
Σχήμα 7.56: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,104 m



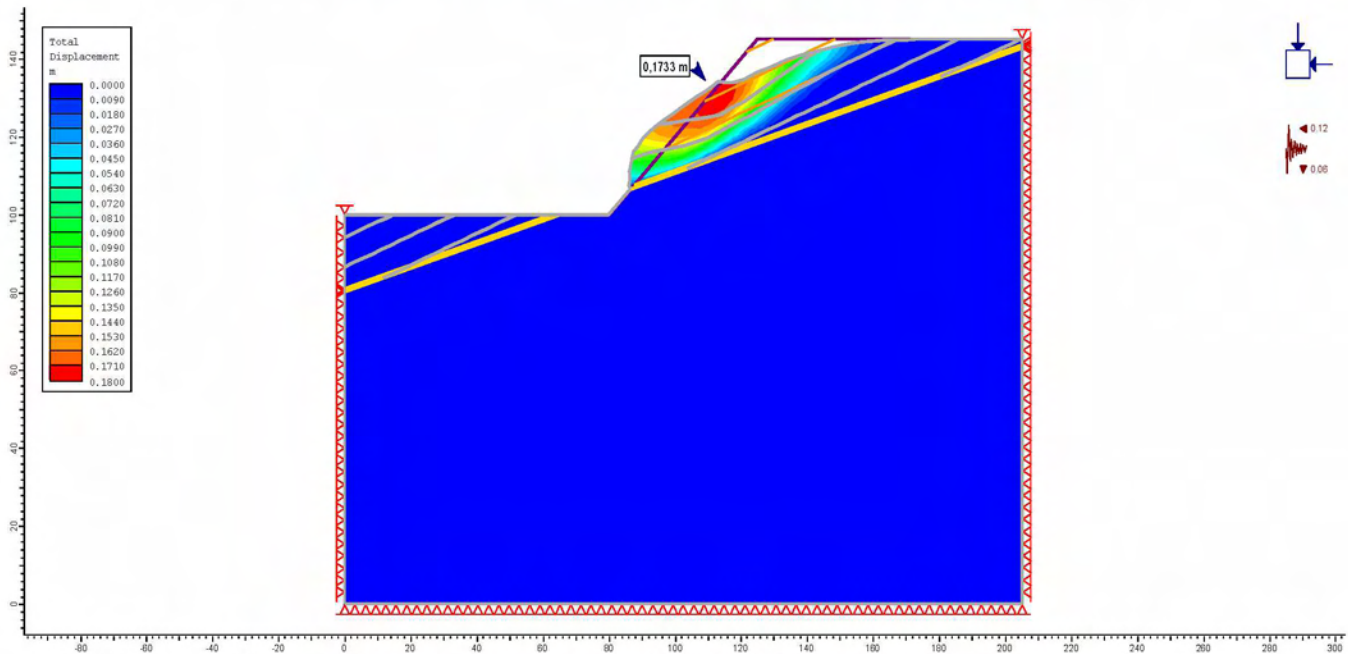
Σχήμα 7.57: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



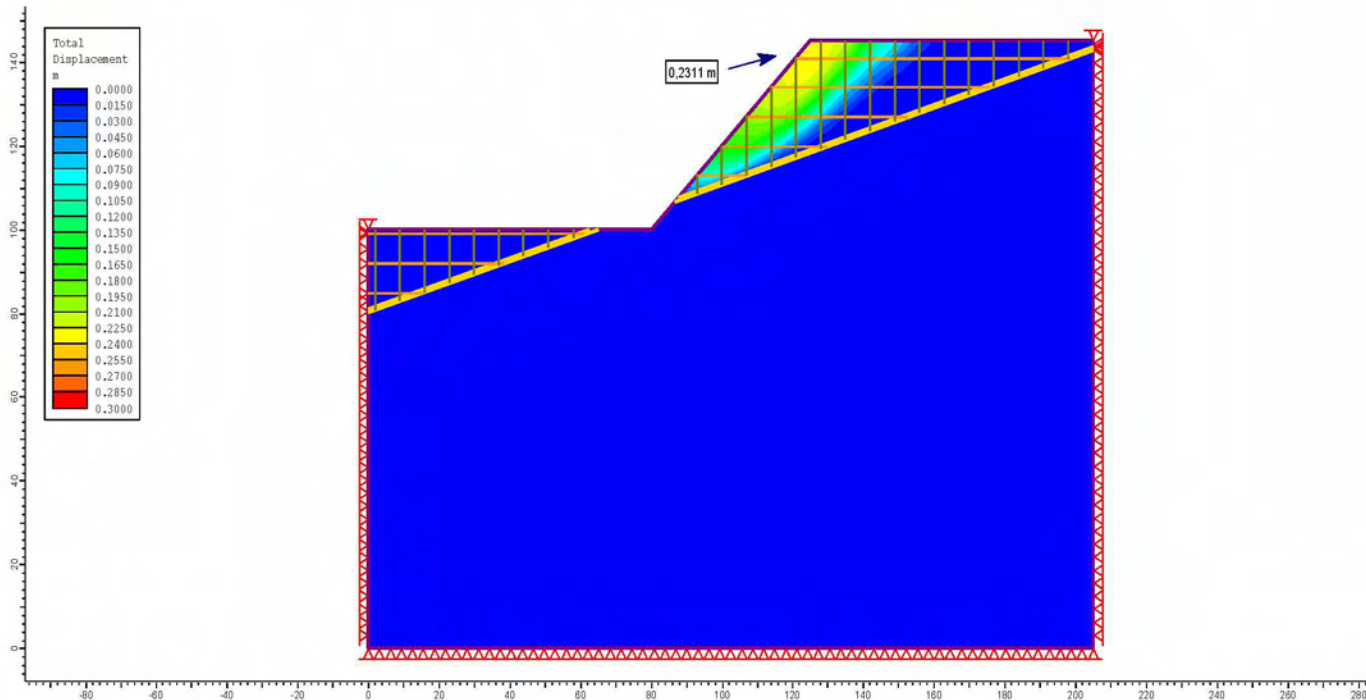
Σχήμα 7.58: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1733 m



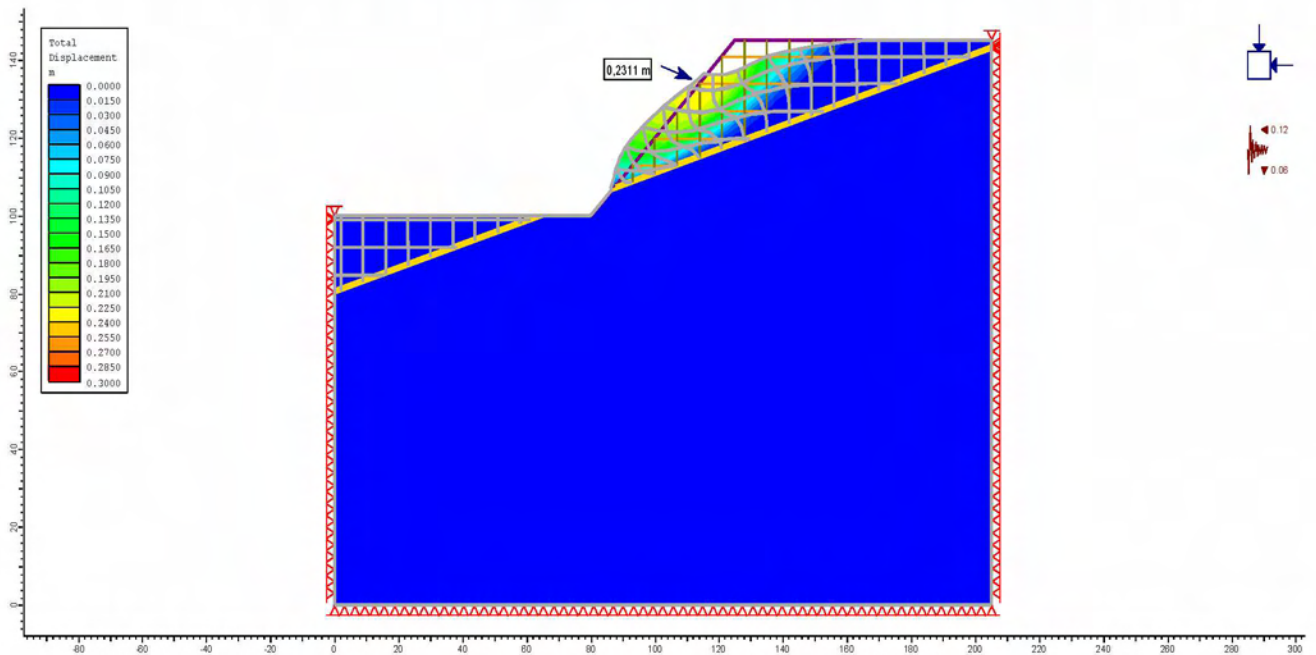
Σχήμα 7.59: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

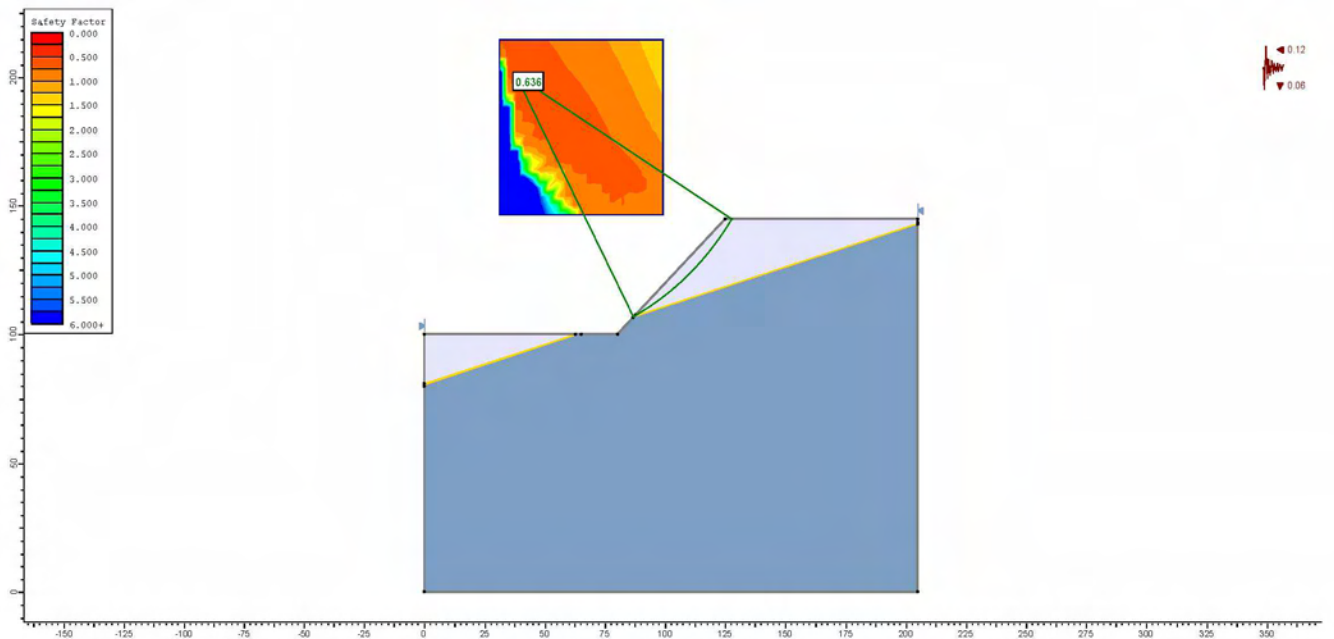


Σχήμα 7.60: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2311 m

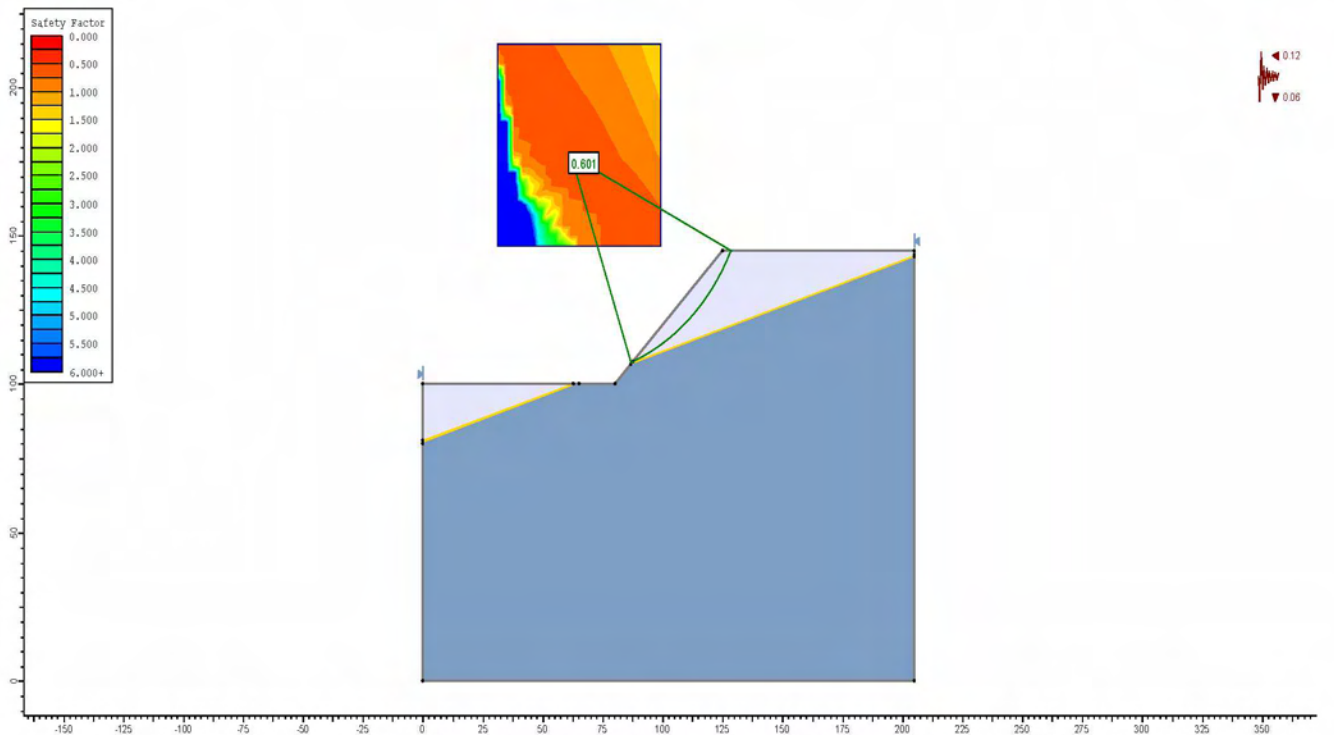


Σχήμα 7.61: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

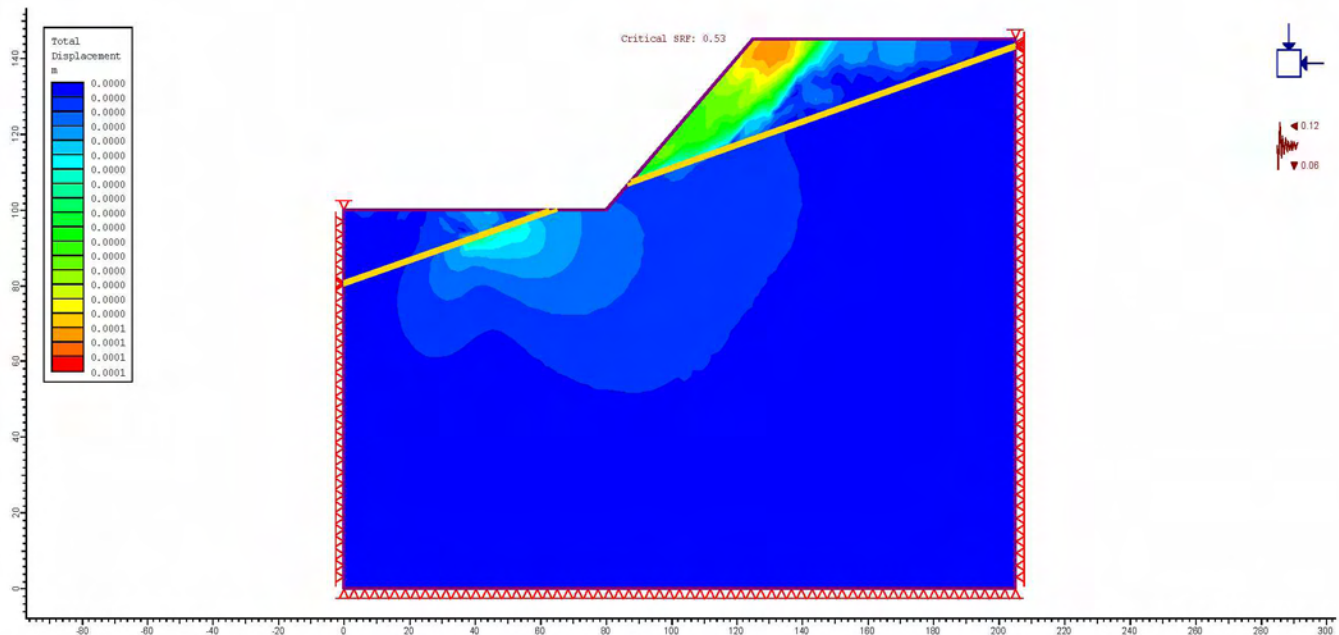
Οι συντελεστές ασφαλείας είναι:



Σχήμα 7.62: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,636



Σχήμα 7.63: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,601



Σχήμα 7.64: Συντελεστής ασφαλείας (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,53

Παρατηρούμε ότι με την αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα σεισμού οι συντελεστές ασφαλείας αυξάνονται ελαφρά.

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,104 | 0,636 | 0,601 | 0,53 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,1733 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,2311 | | | |

Πίνακας 7.7: Πίνακας αποτελεσμάτων

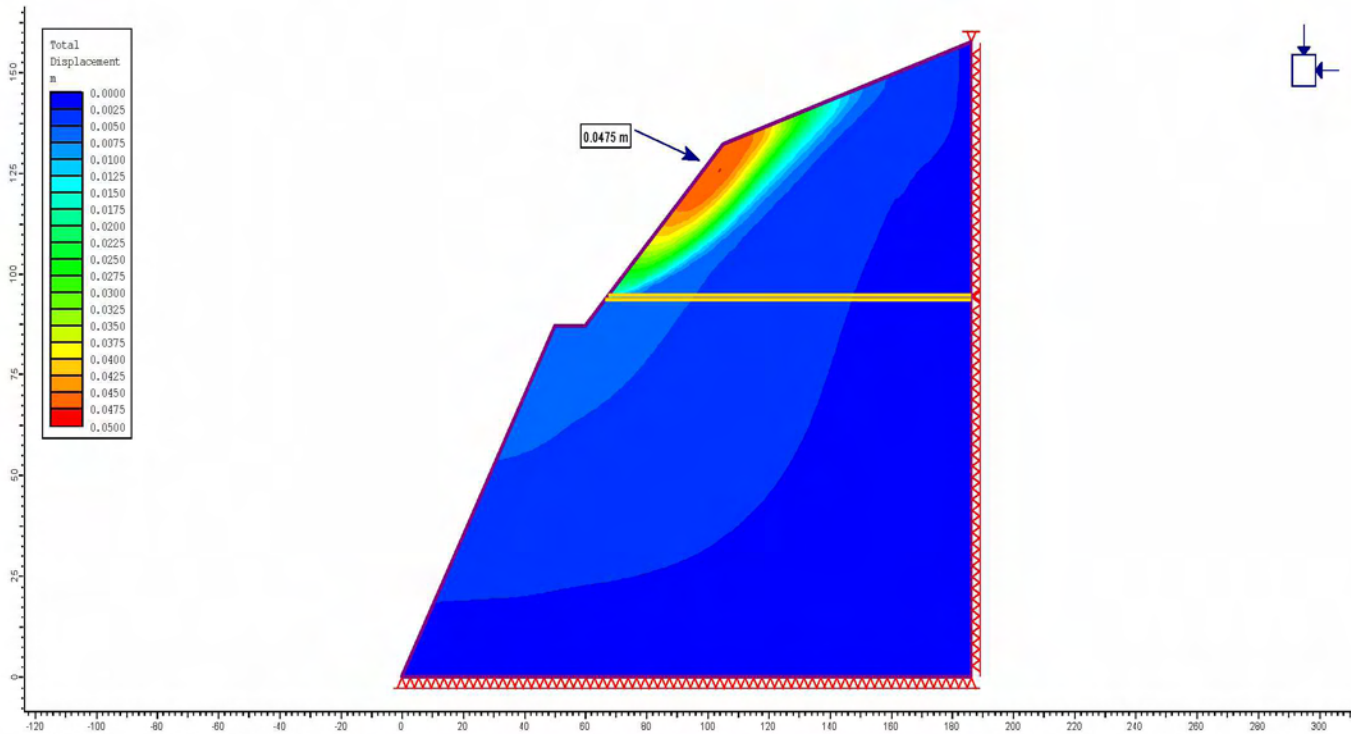
7.3 Ρεαλιστικό μοντέλο

7.3.1 Σε στατικές συνθήκες

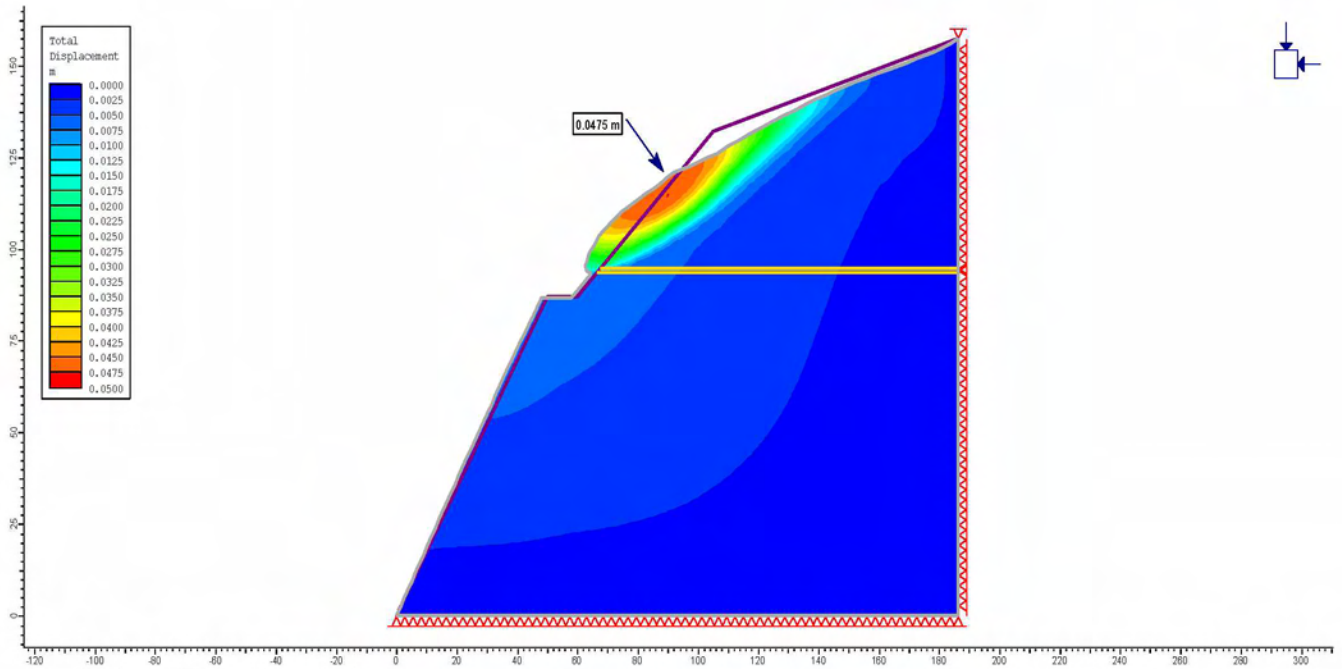
7.3.1.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου

1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- χωρίς ασυνέχειες



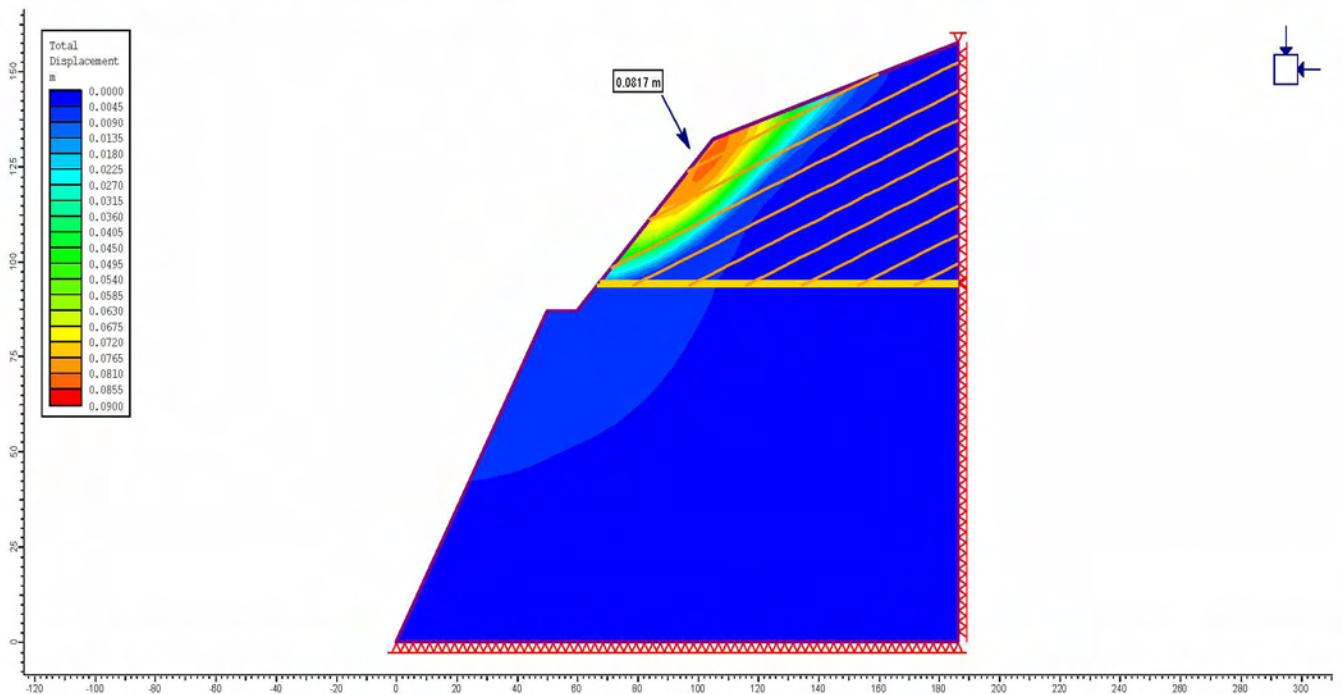
Σχήμα 7.65: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0475 m



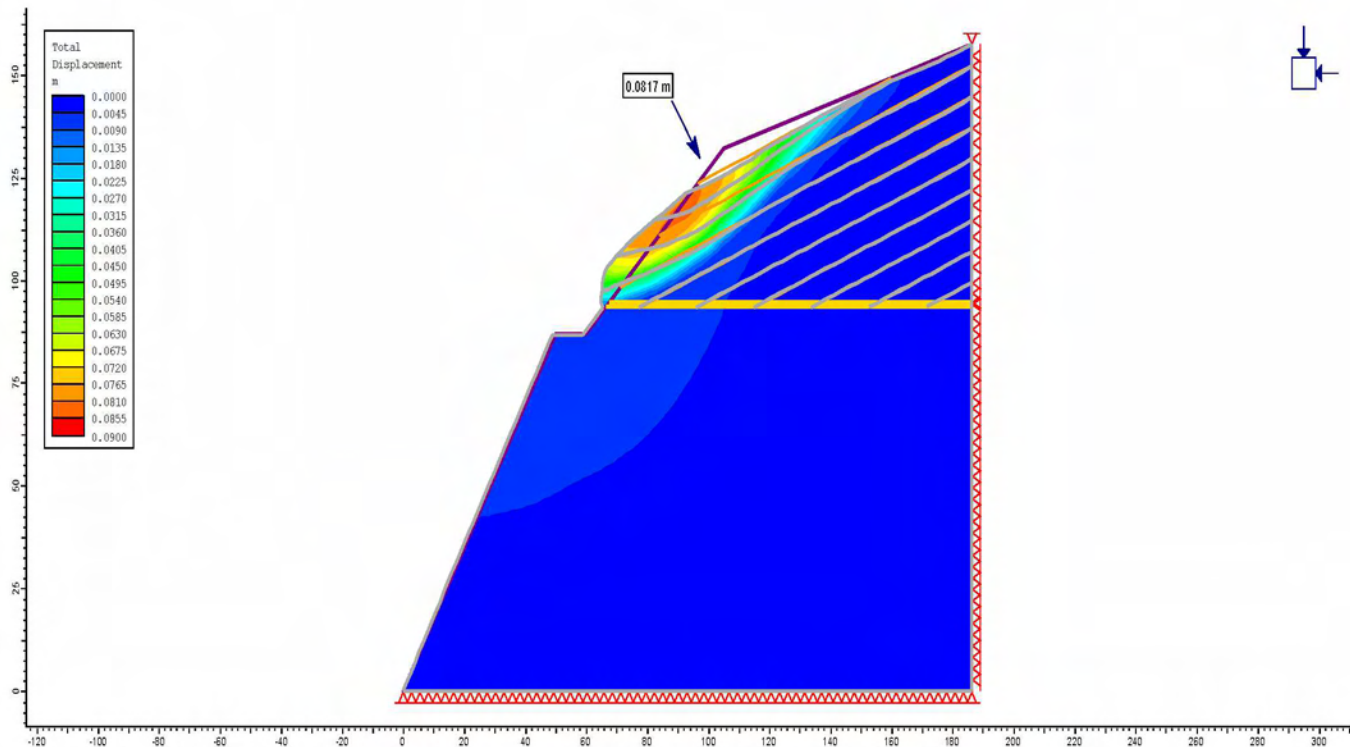
Σχήμα 7.66: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Με μία οικογένεια ασυνεχειών



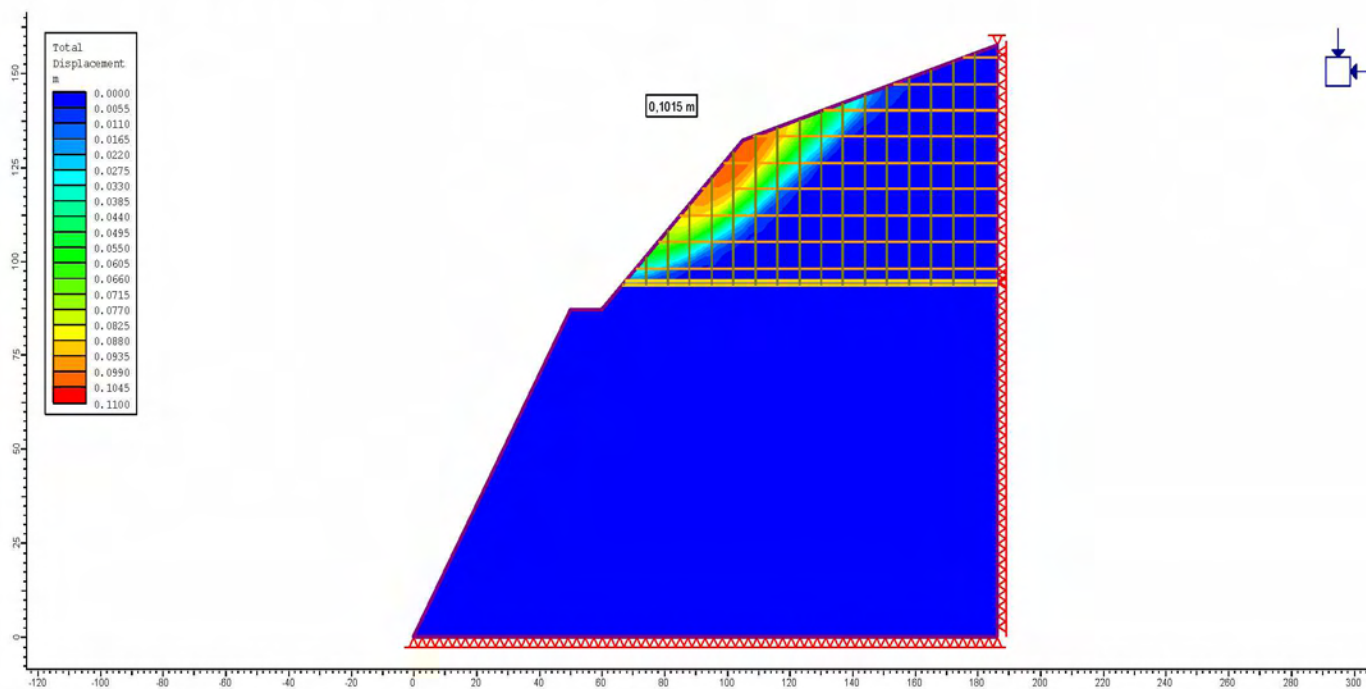
Σχήμα 7.67: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0817 m



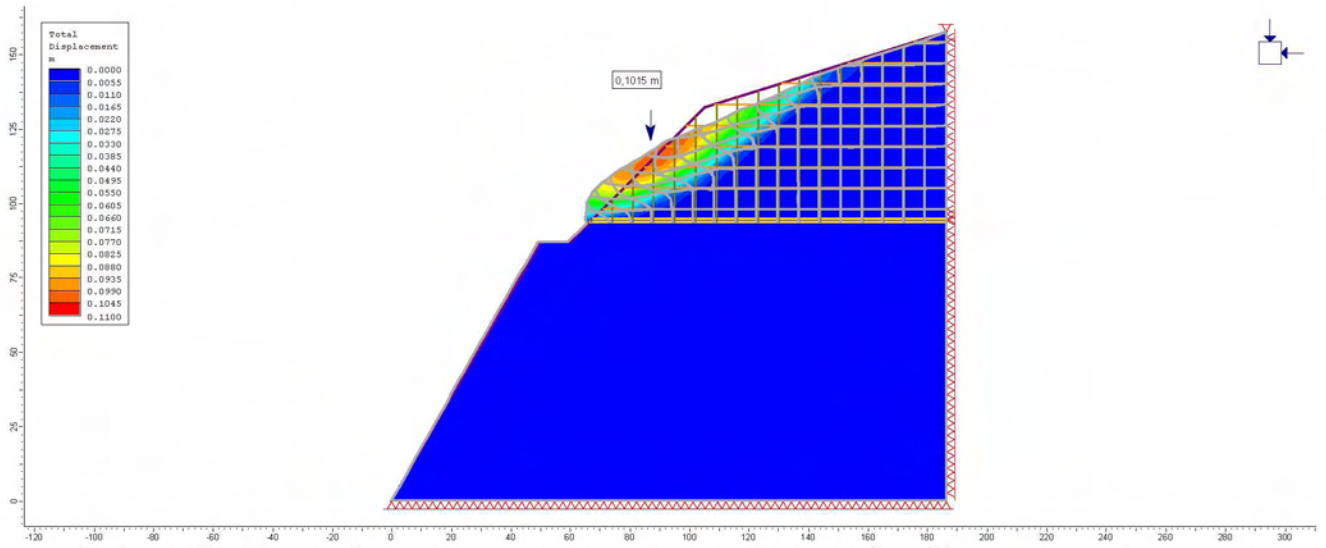
Σχήμα 7.68: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανού

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Με δύο οικογένειες ασυνεχειών

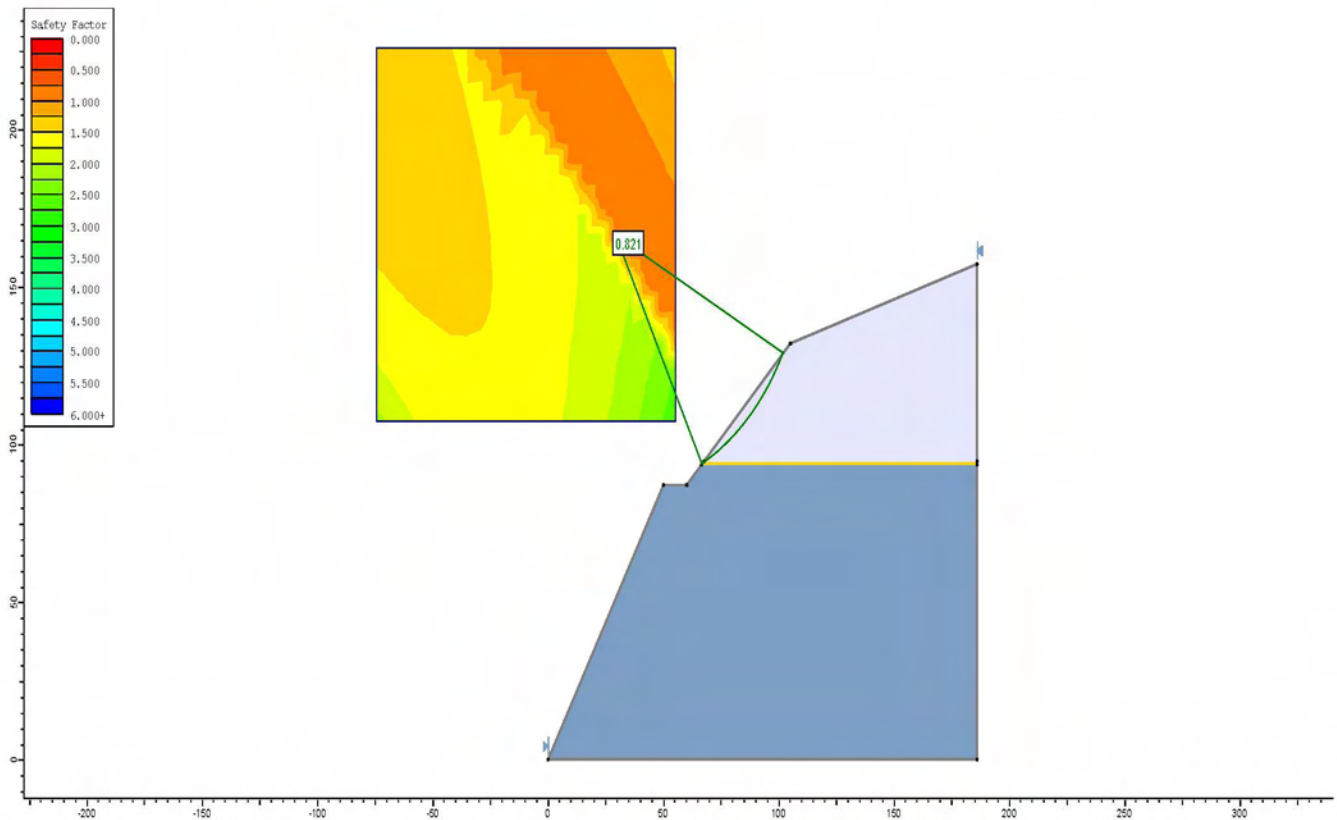


Σχήμα 7.69: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1015 m

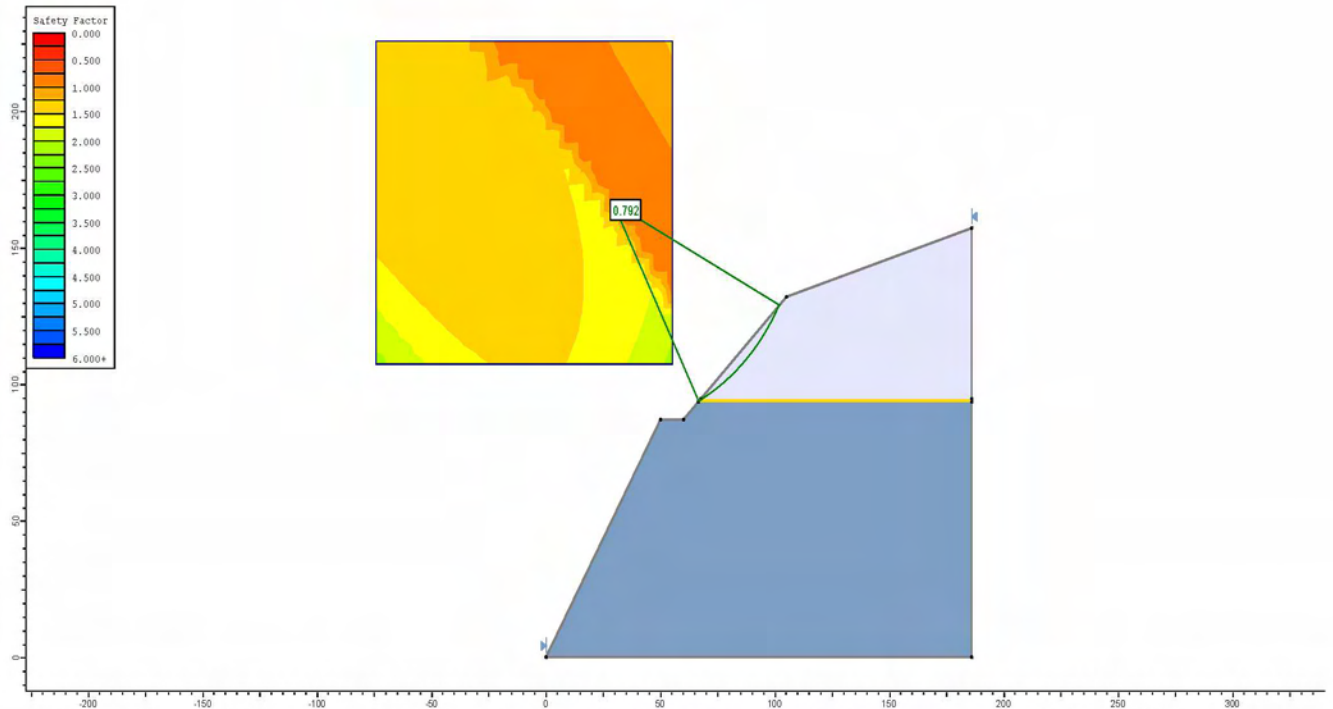


Σχήμα 7.70: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανού

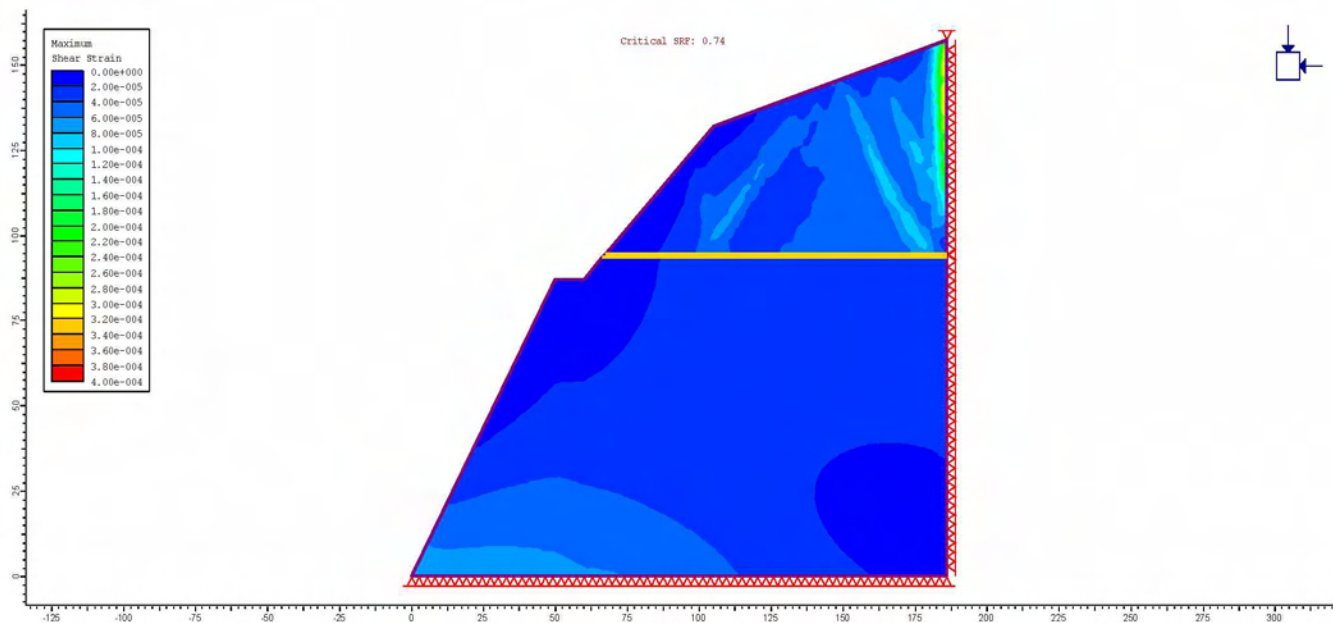
Οι συντελεστές ασφάλειας που προέκυψαν για τα πρανή χωρίς ασυνέχειες είναι:



Σχήμα 7.71: Ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,821



Σχήμα 7.72: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,792



Σχήμα 7.73: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,74

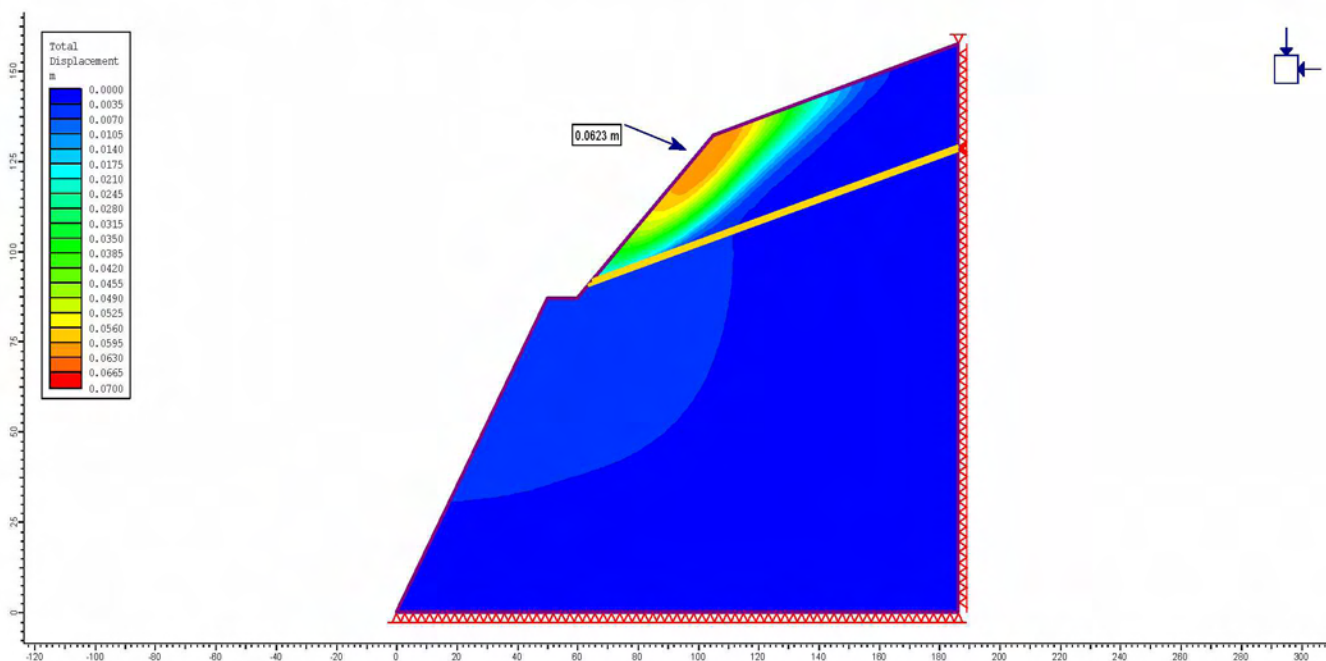
Παρατηρείται ότι και οι τρεις συντελεστές ασφαλείας υποδεικνύουν ότι η αστοχία είναι πολύ πιθανή. Όπως και στο απλουστευμένο μοντέλο, οι αναλύσεις όπου εμφανίζεται συντελεστή πίεσης πόρων και στον υγρή ασβεστόλιθο, παρατίθενται στο παράρτημα της εργασίας.

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,0475 | 0,821 | 0,792 | 0,74 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,0817 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,1015 | | | |

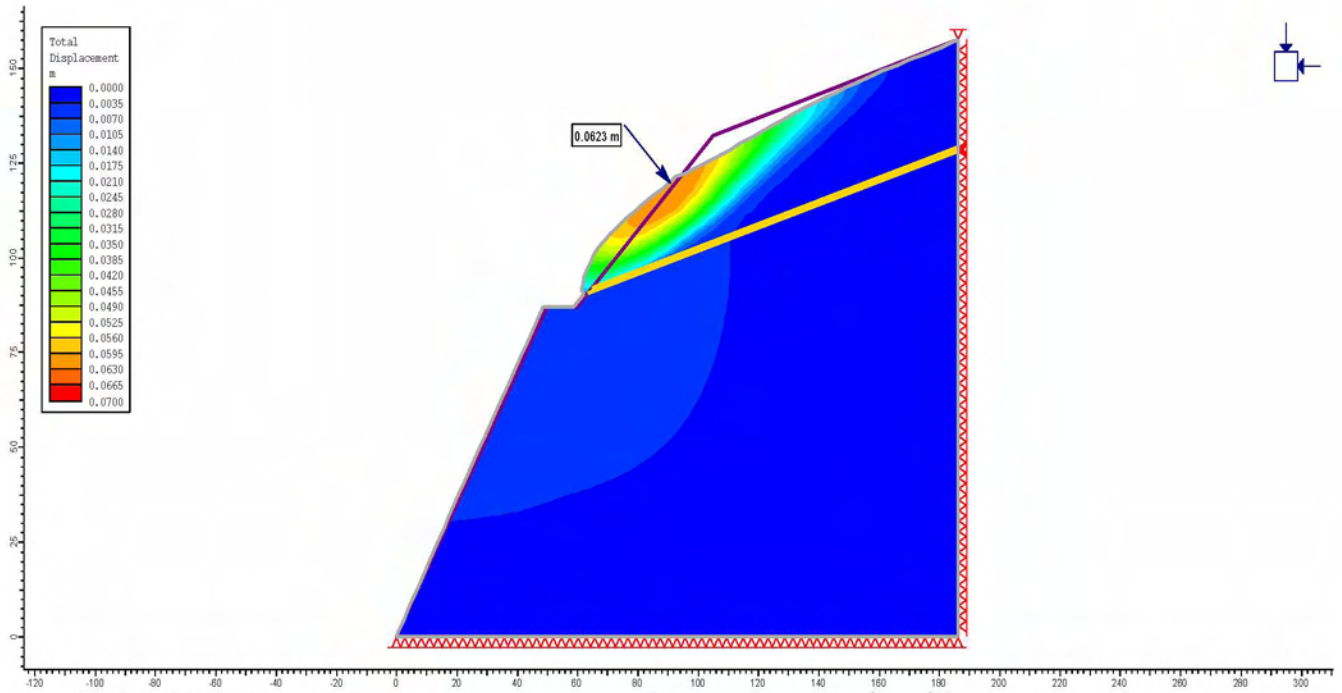
Πίνακας 7.8: Πίνακας αποτελεσμάτων

7.3.1.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου (Γωνία 17° από τον οριζόντιο άξονα)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
 - $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες



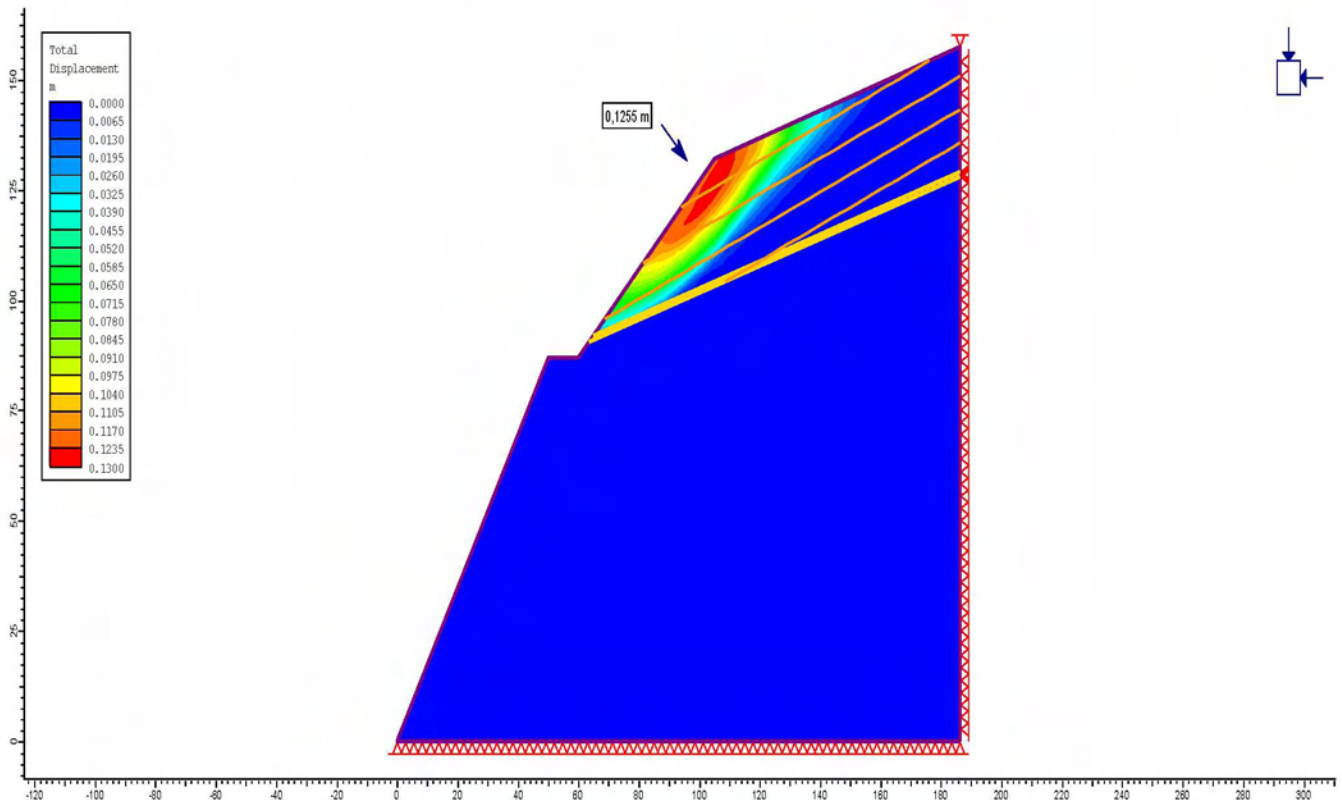
Σχήμα 7.74: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0623 m



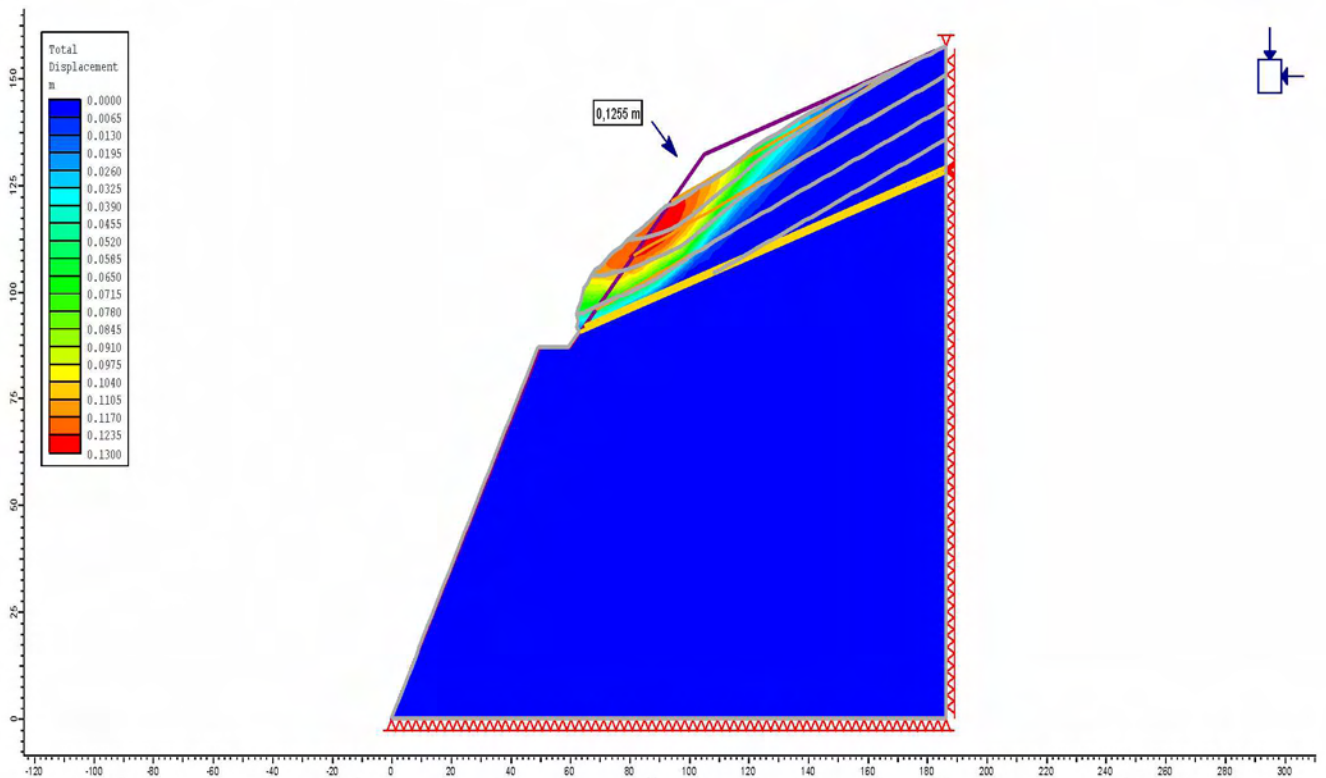
Σχήμα 7.74: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρηνούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Με μία οικογένεια ασυνεχειών



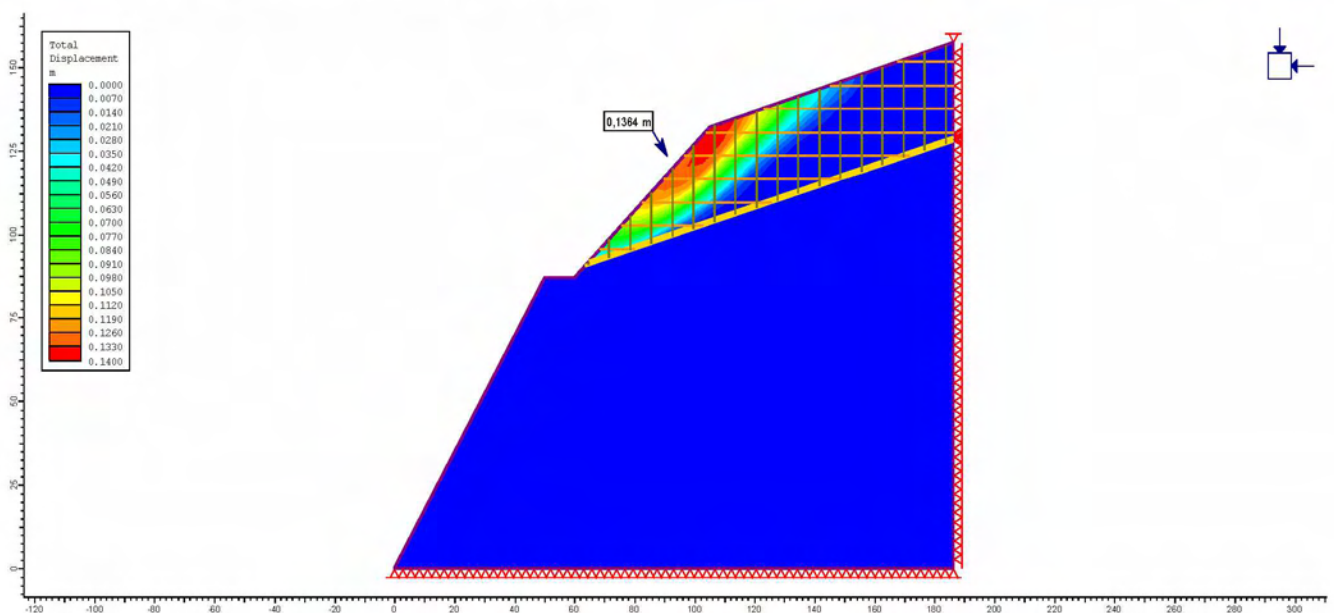
Σχήμα 7.76: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1255 m



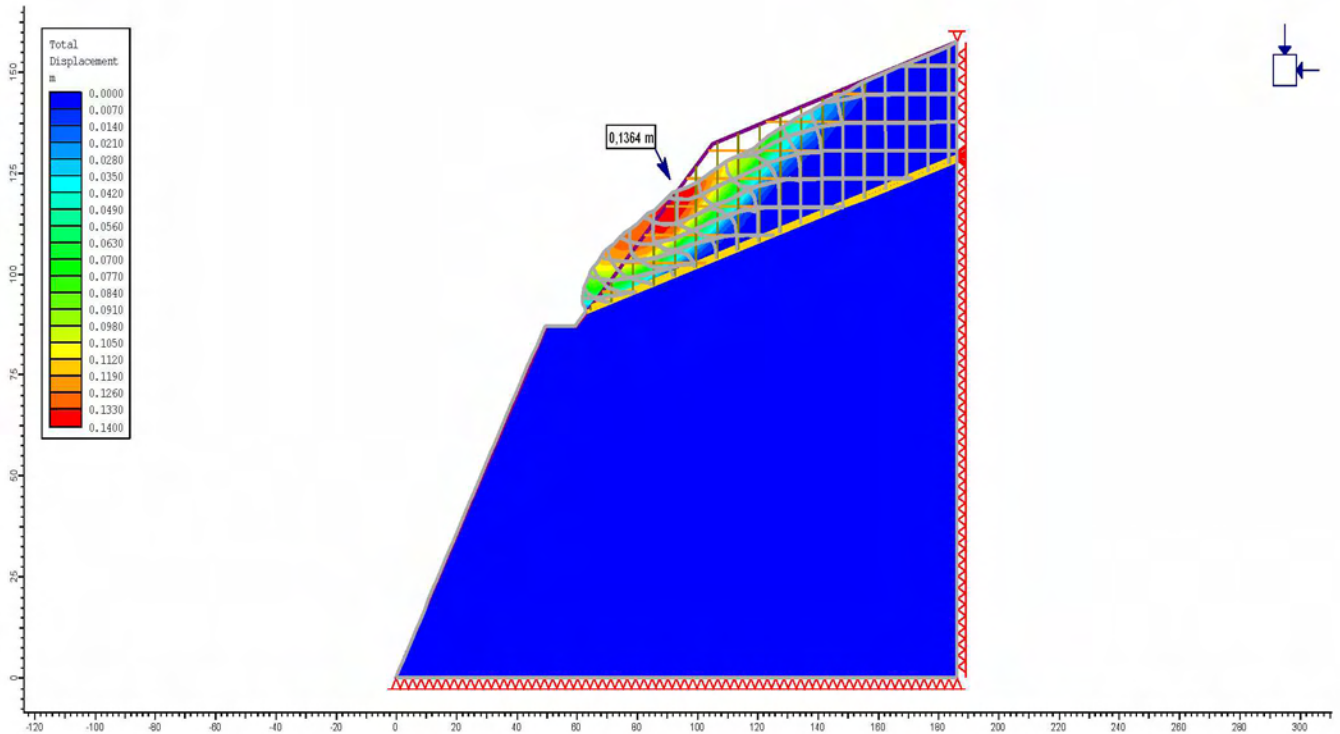
Σχήμα 7.77: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρηνούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Με δύο οικογένειες ασυνεχειών

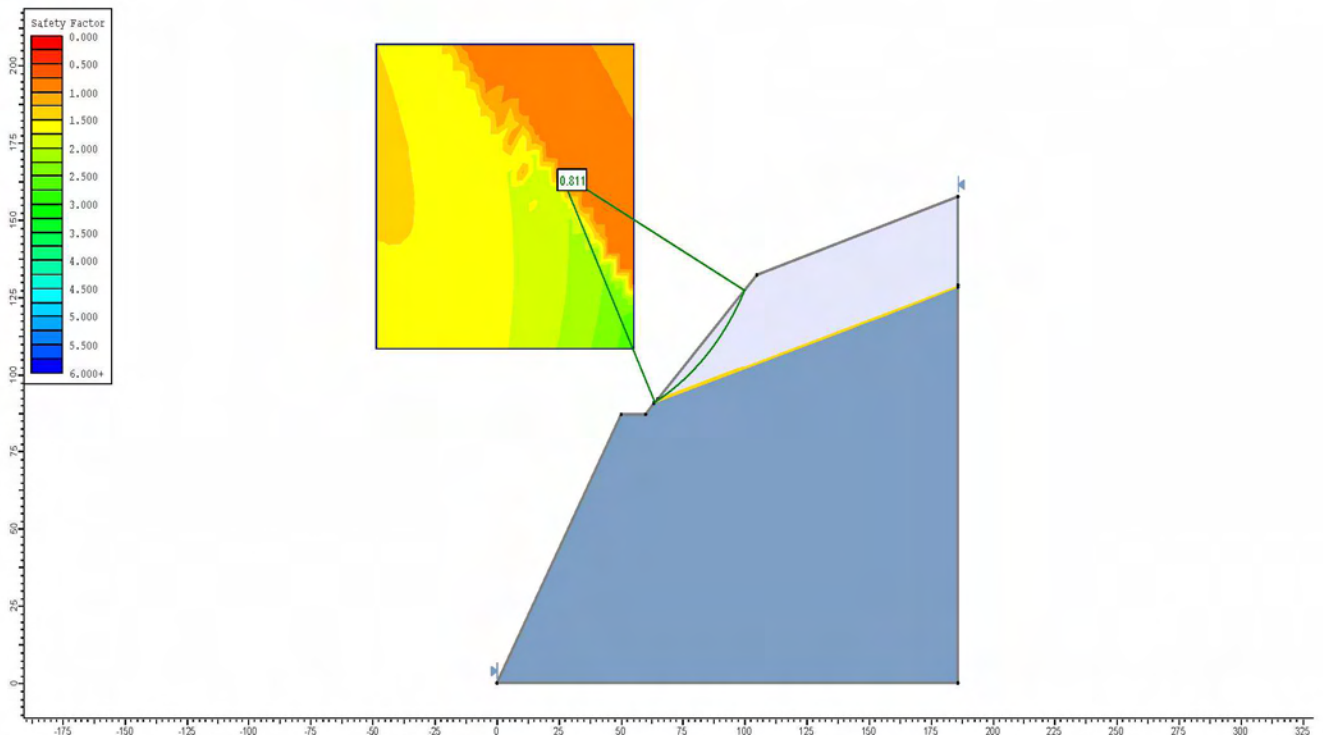


Σχήμα 7.78: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1364 m

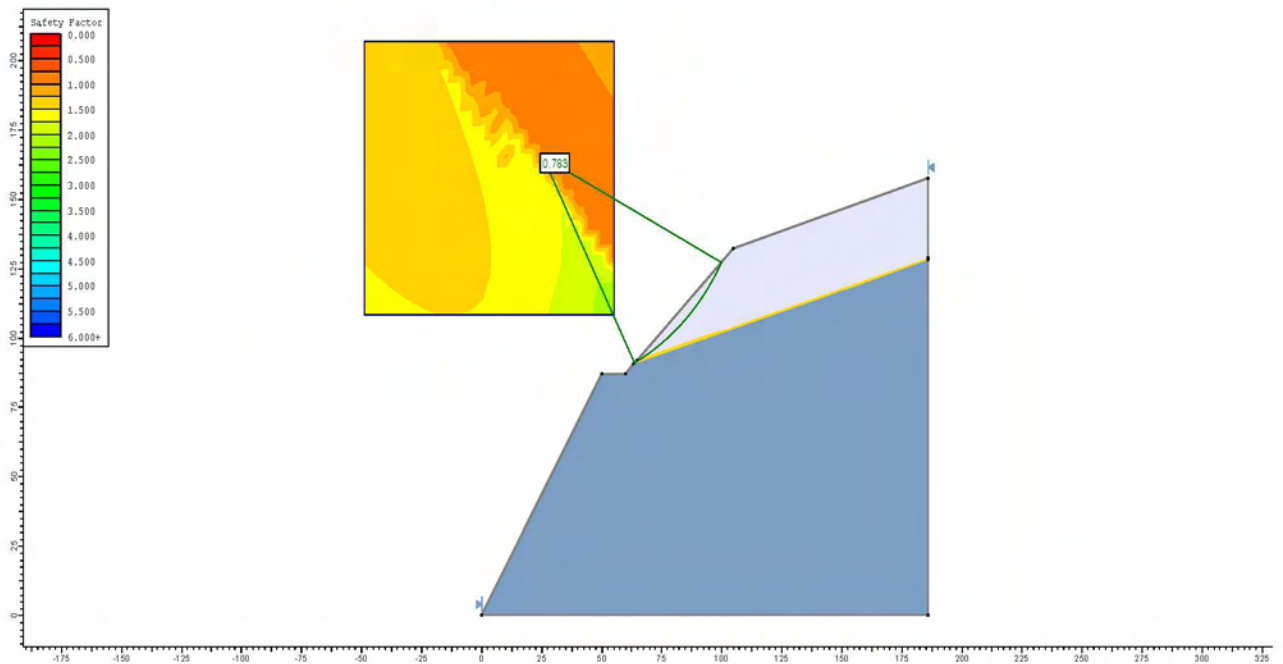


Σχήμα 7.79: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

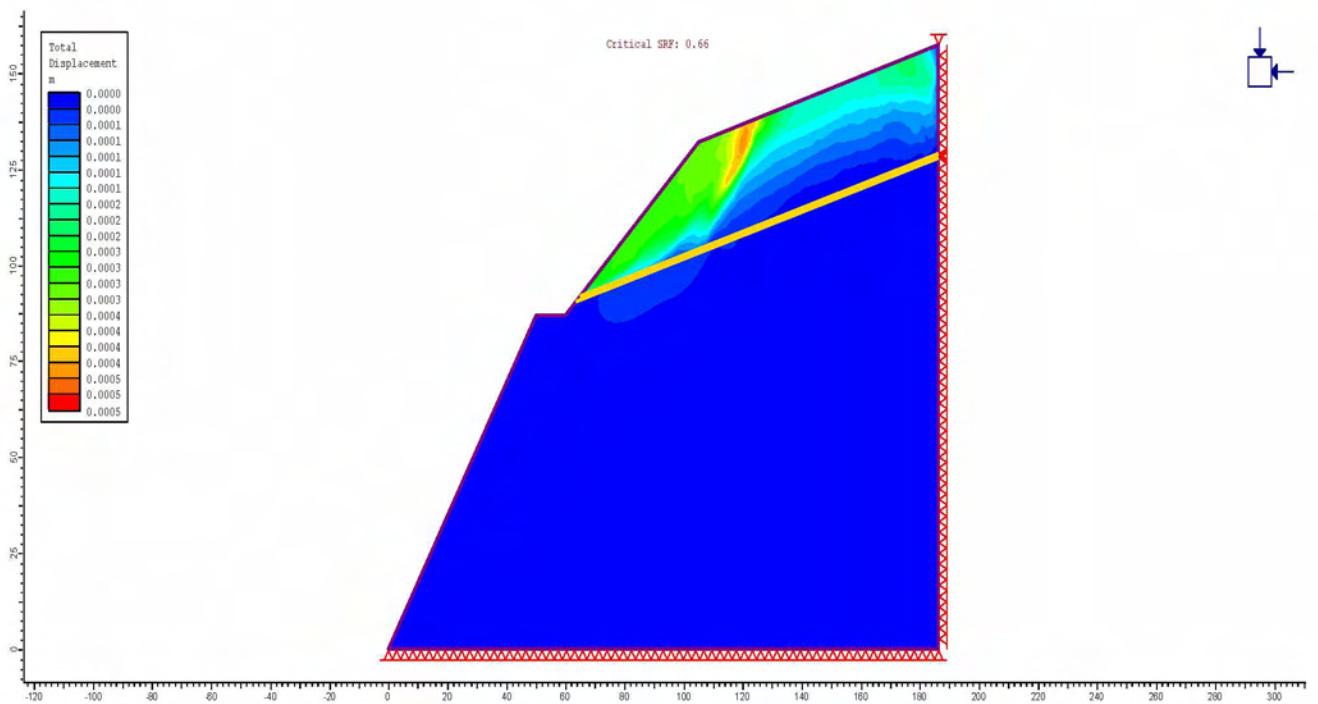
Υπάρχει και εδώ σαφής αύξηση των ολικών μετατοπίσεων, λόγω της κλίσης που έχει πάρει το αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου. Οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν, είναι:



Σχήμα 7.80: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,811



Σχήμα 7.81: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,783



Σχήμα 7.82: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2:0,66

Σημειώνεται η παρατήρηση ότι οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας είναι μικρότεροι από αυτούς των πρανών με το οριζόντιο στρώμα.

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,0623 | 0,811 | 0,783 | 0,66 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,1255 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0.1364 | | | |

Πίνακας 7.9: Πίνακας αποτελεσμάτων

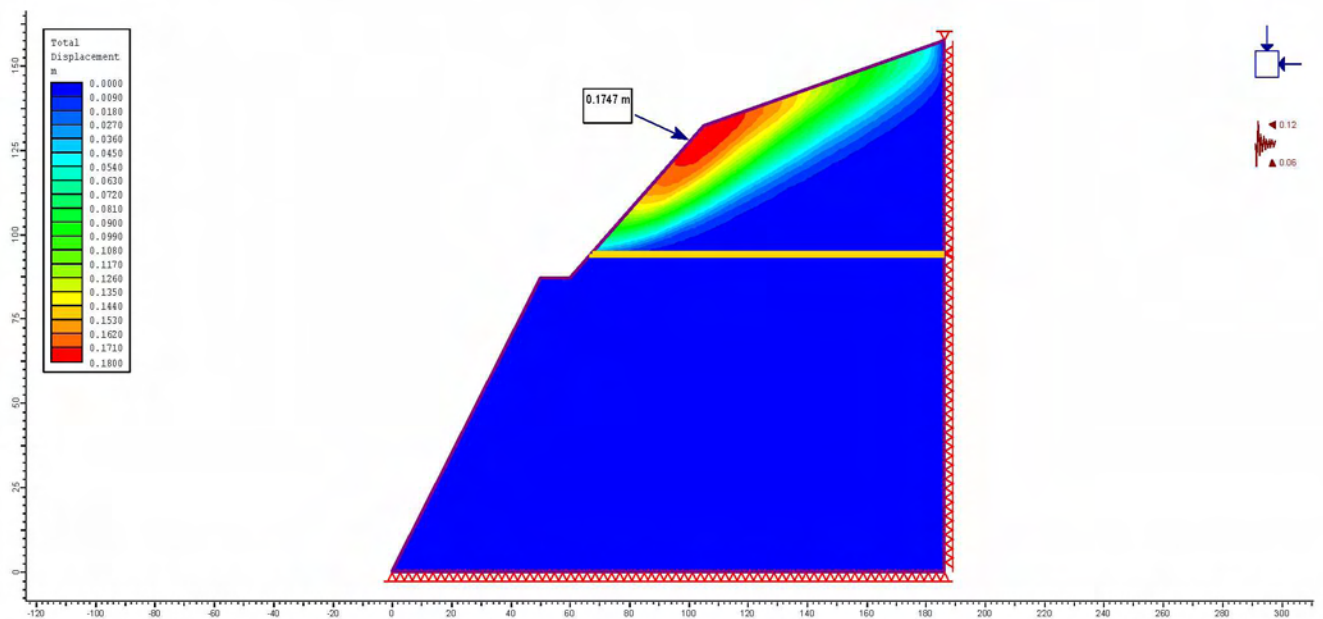
7.3.2 Σε Σεισμικές συνθήκες

7.3.2.1 Οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου

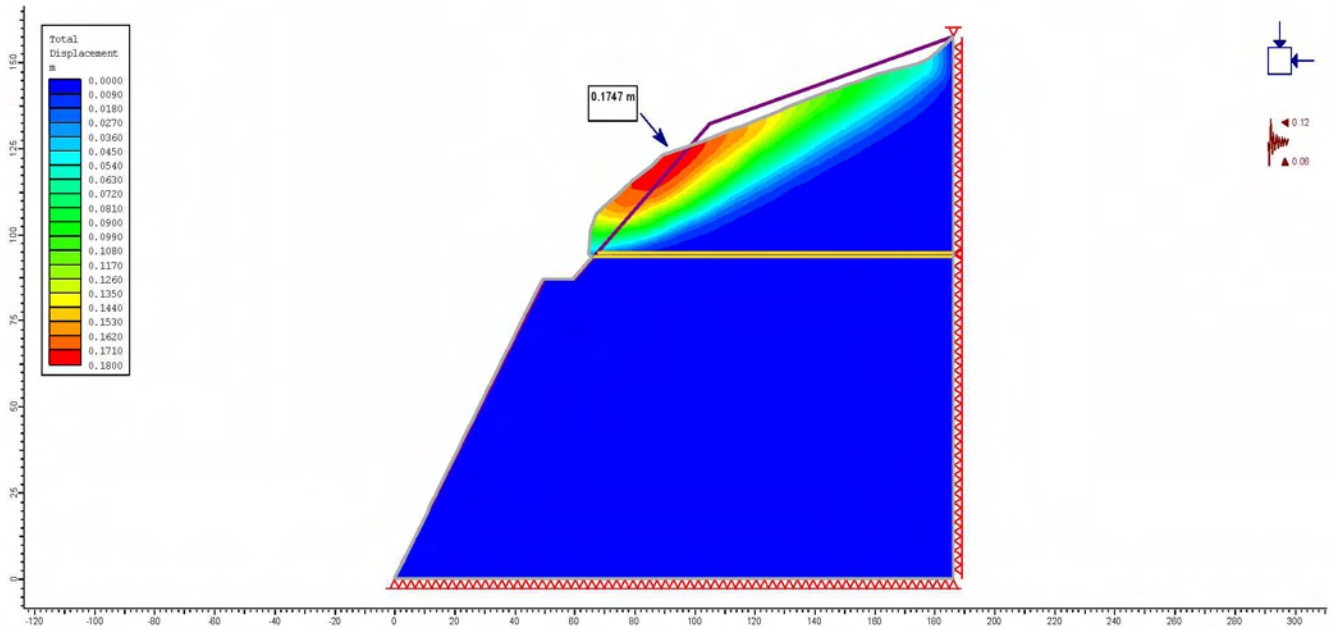
A] $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- χωρίς ασυνέχειες
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



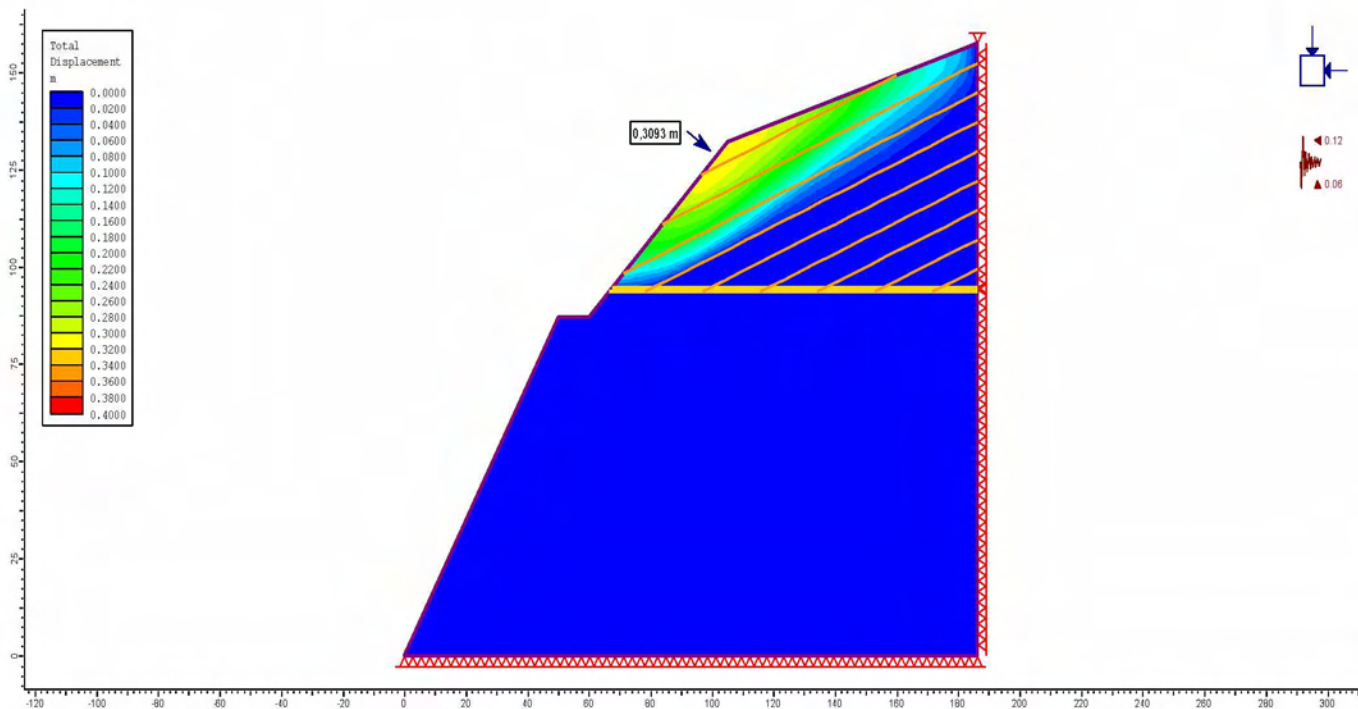
Σχήμα 7.83: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1747 m



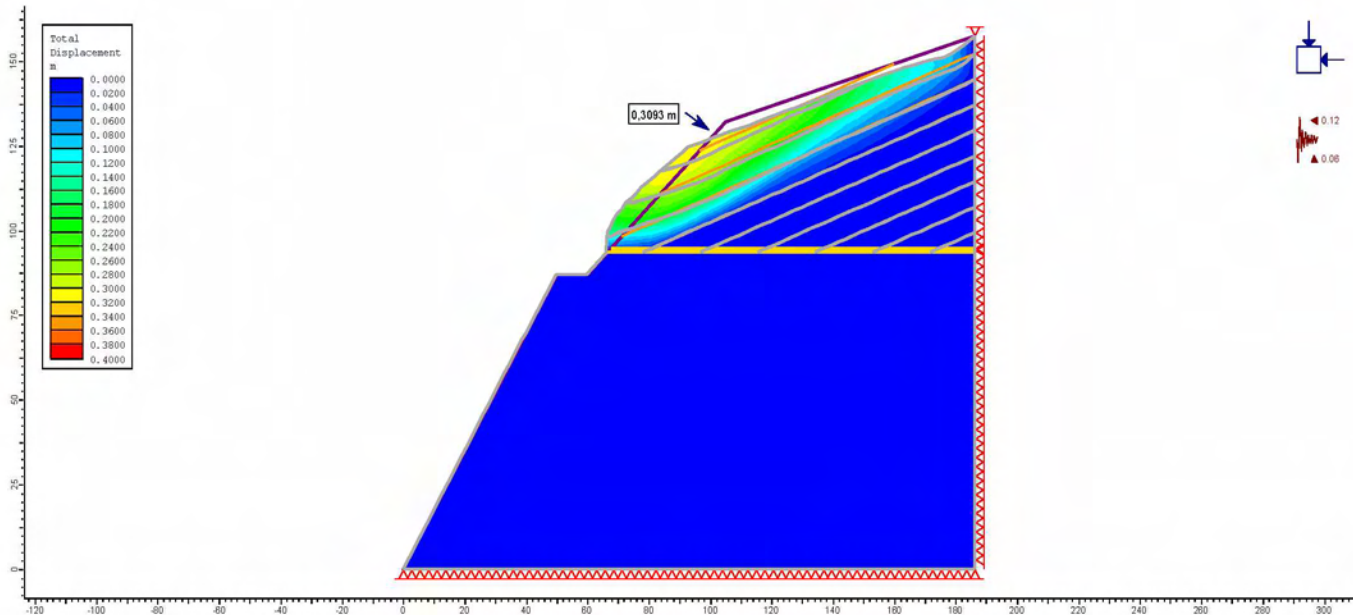
Σχήμα 7.84: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



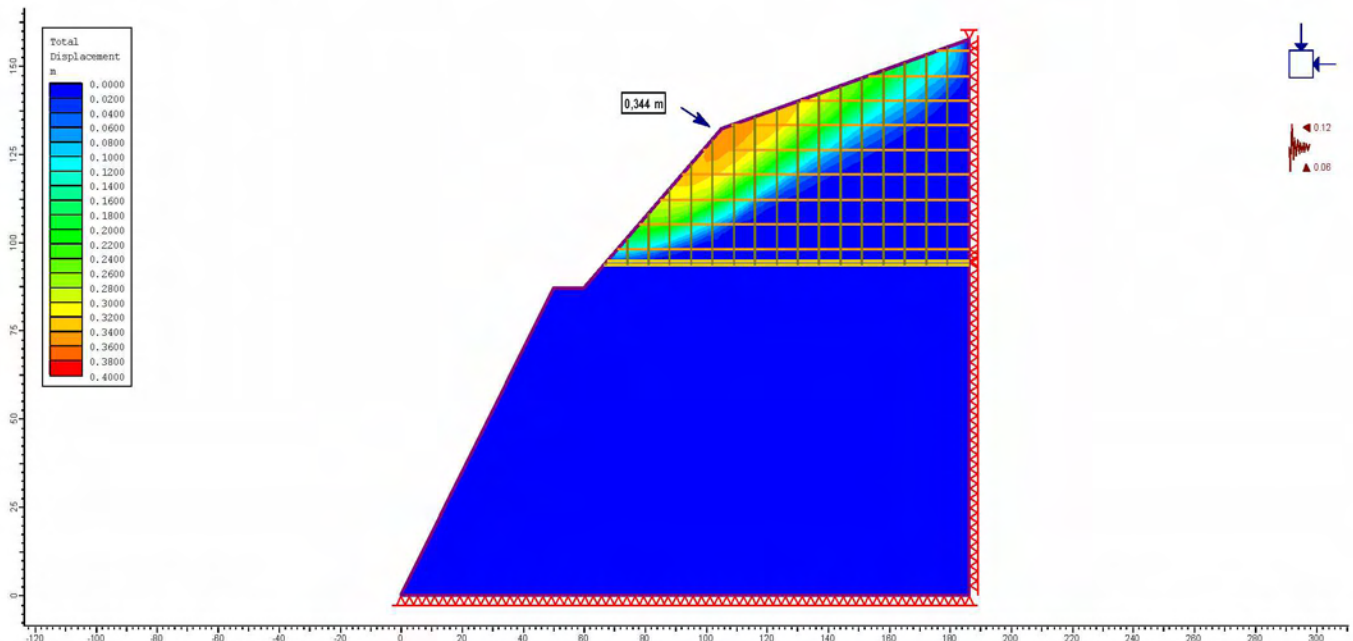
Σχήμα 7.85: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3093 m



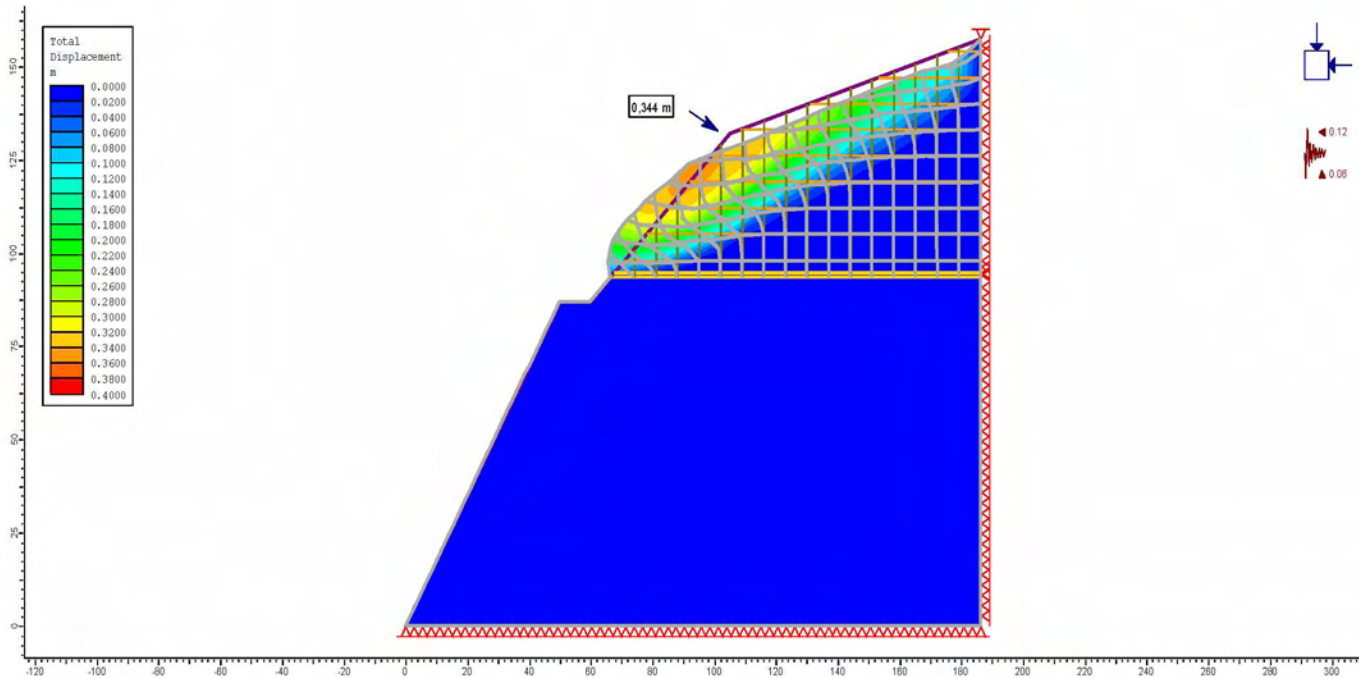
Σχήμα 7.86: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

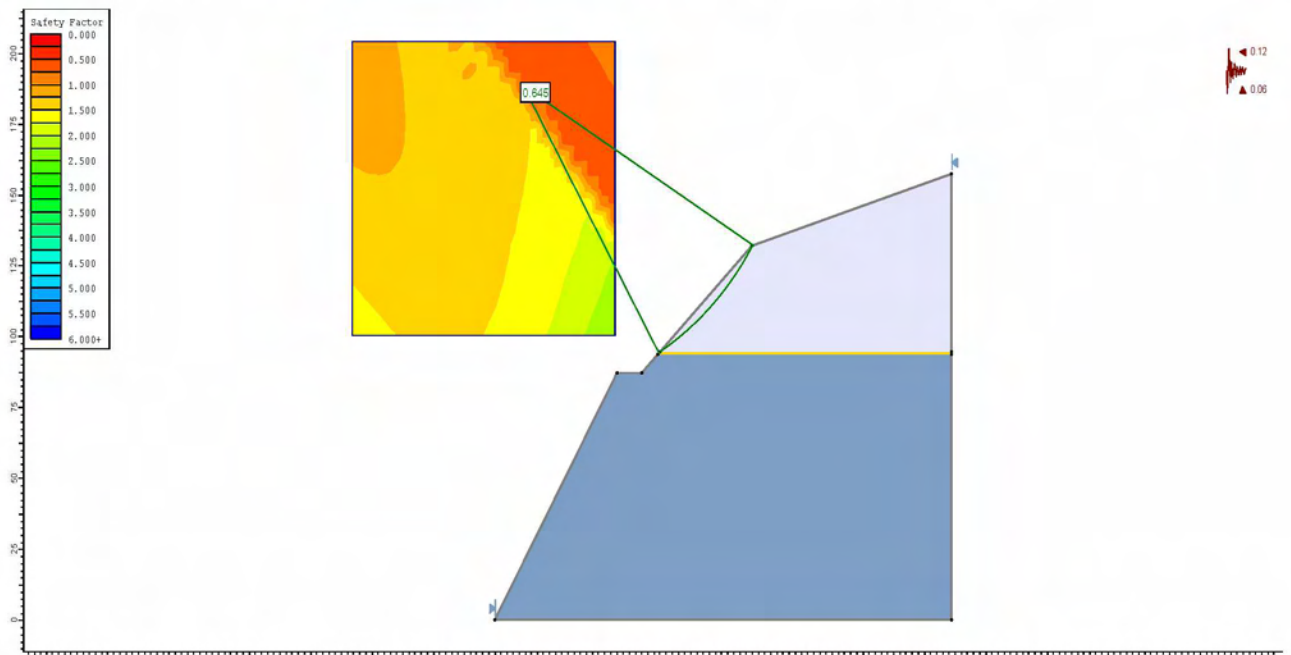


Σχήμα 7.87: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,344 m

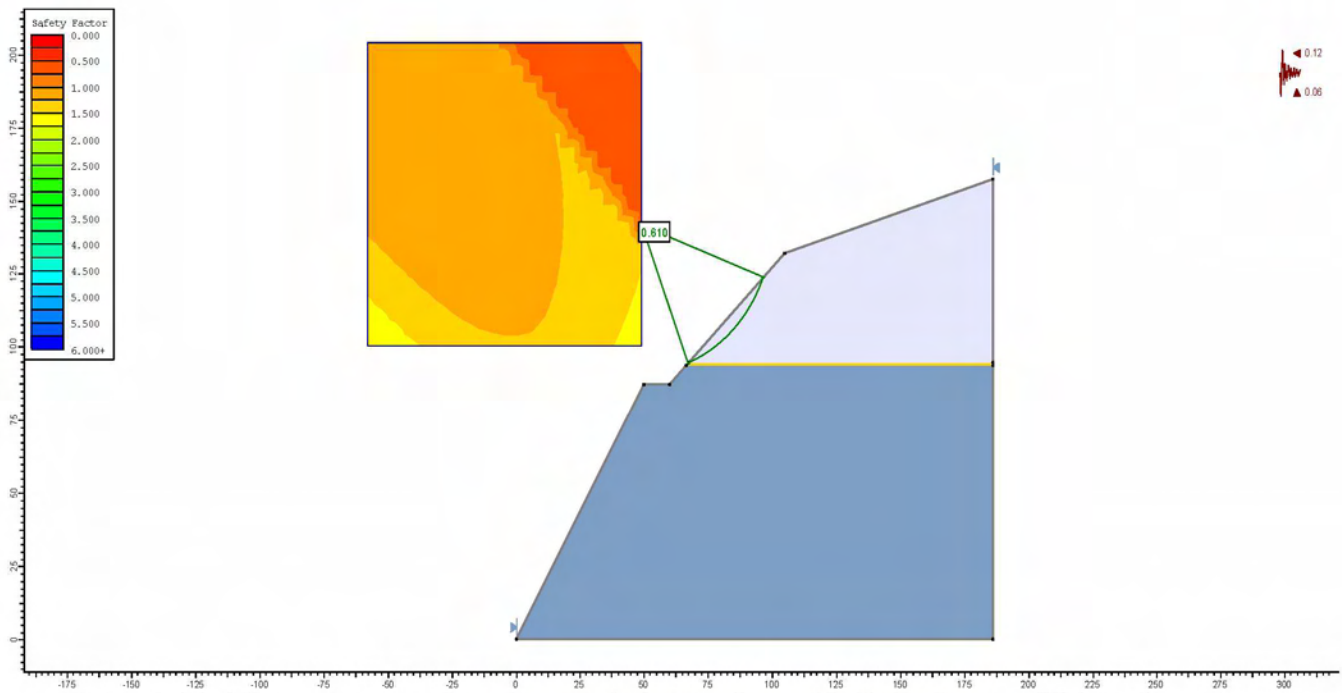


Σχήμα 7.88: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

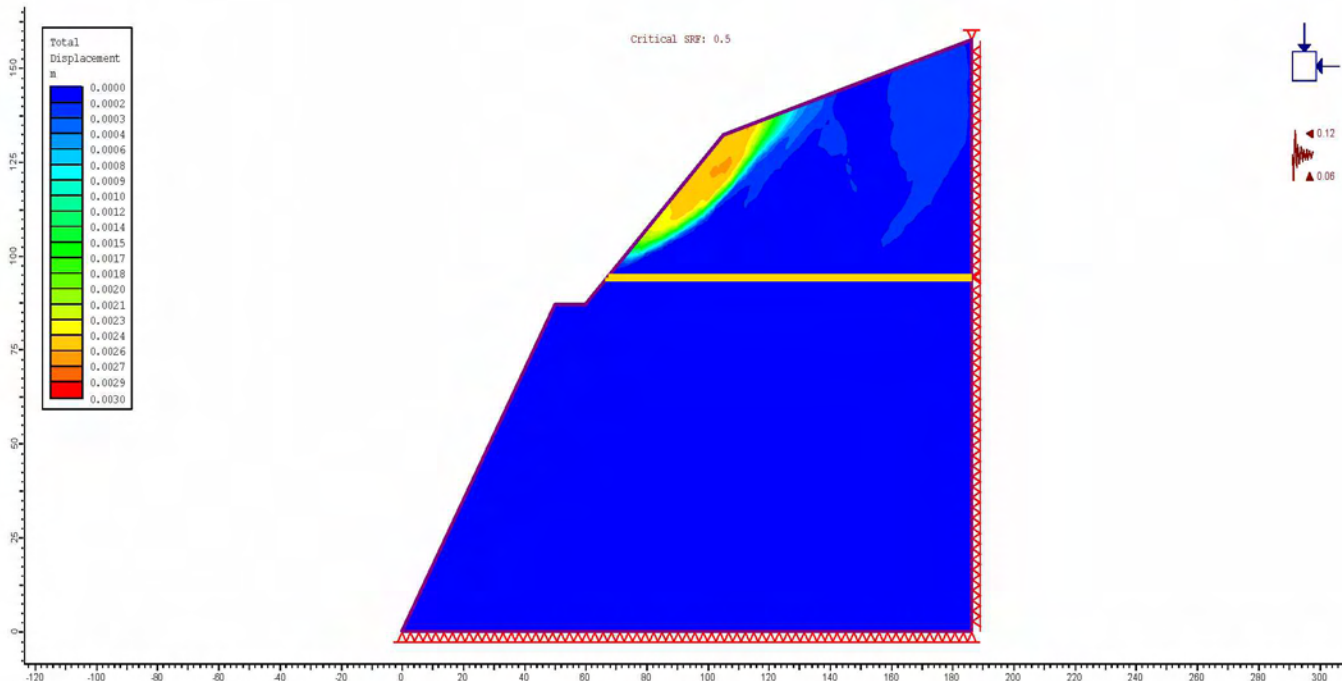
Αρκετή αύξηση έχουν λάβει οι μετατοπίσεις λόγω σεισμού και στο ρεαλιστικό μοντέλο πρανούς. Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν είναι:



Σχήμα 7.89: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,645



Σχήμα 7.90: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide:0,61



Σχήμα 7.91: Συντελεστής ασφαλείας (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,5

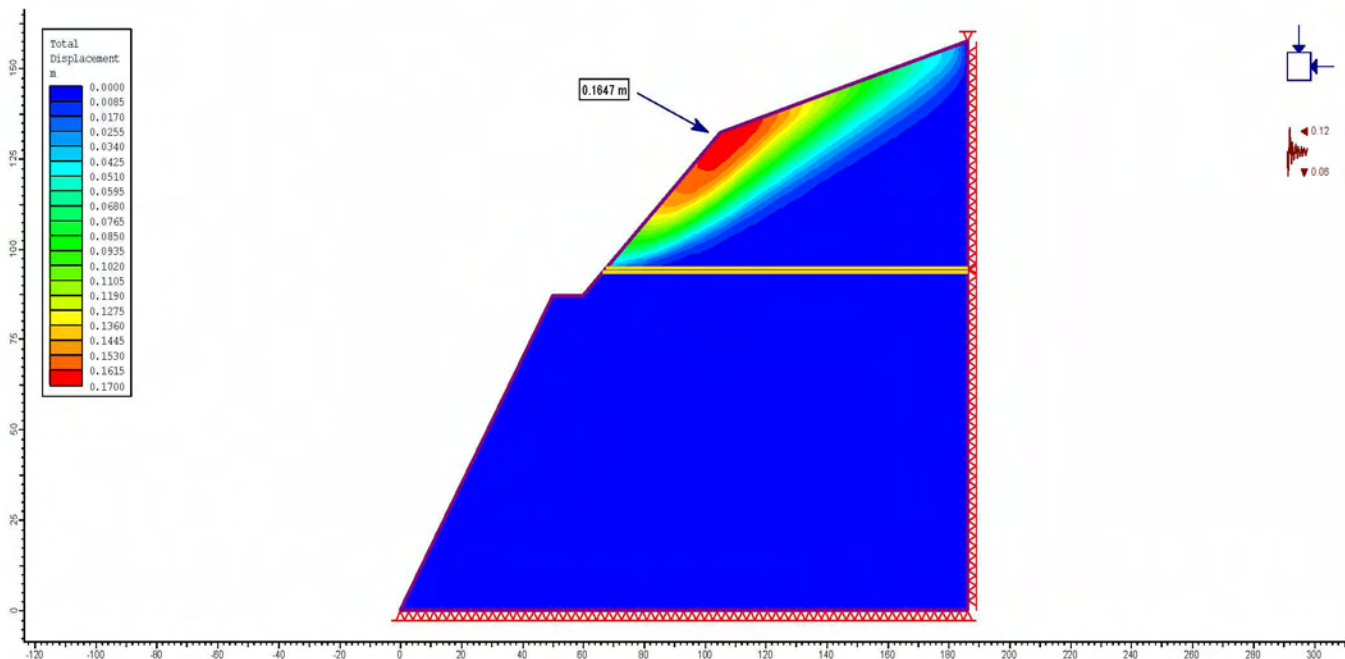
Αξιοσημείωτη είναι και εδώ η μείωση των συντελεστών ασφαλείας ανά μέθοδο.

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,1747 | 0,645 | 0,61 | 0,5 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,3093 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,344 | | | |

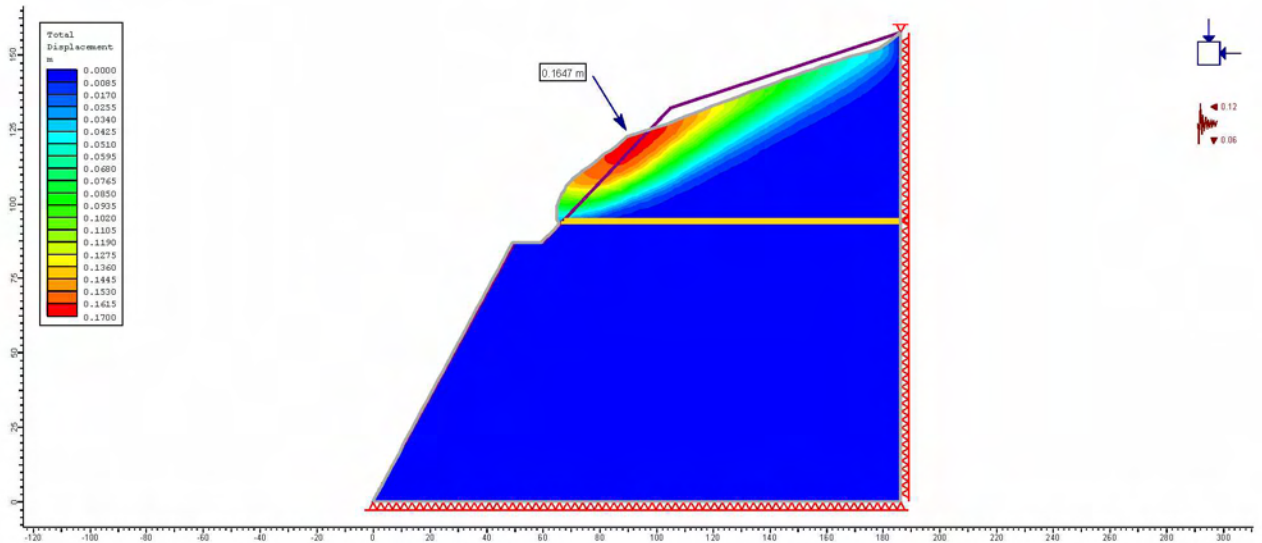
Πίνακας 7.10: Πίνακας αποτελεσμάτων

B) $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες
 - Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης: $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



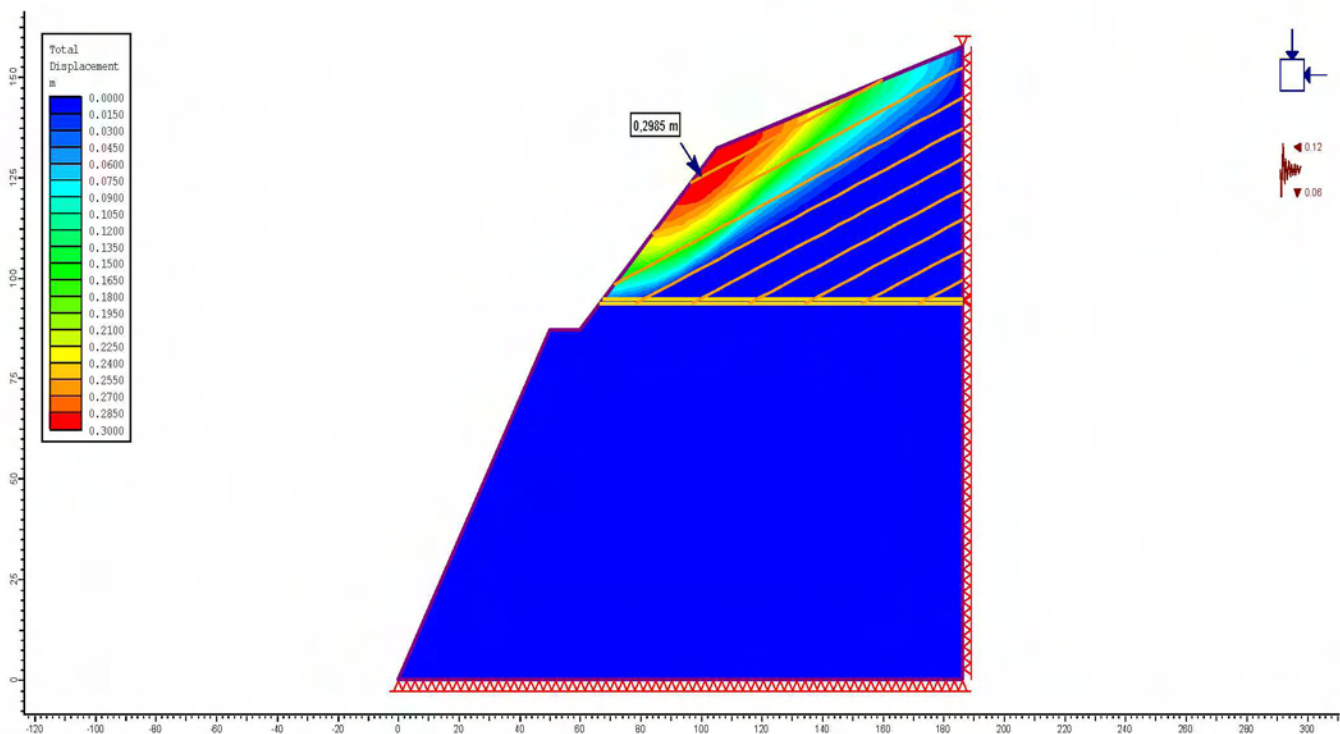
Σχήμα 7.92: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1647 m



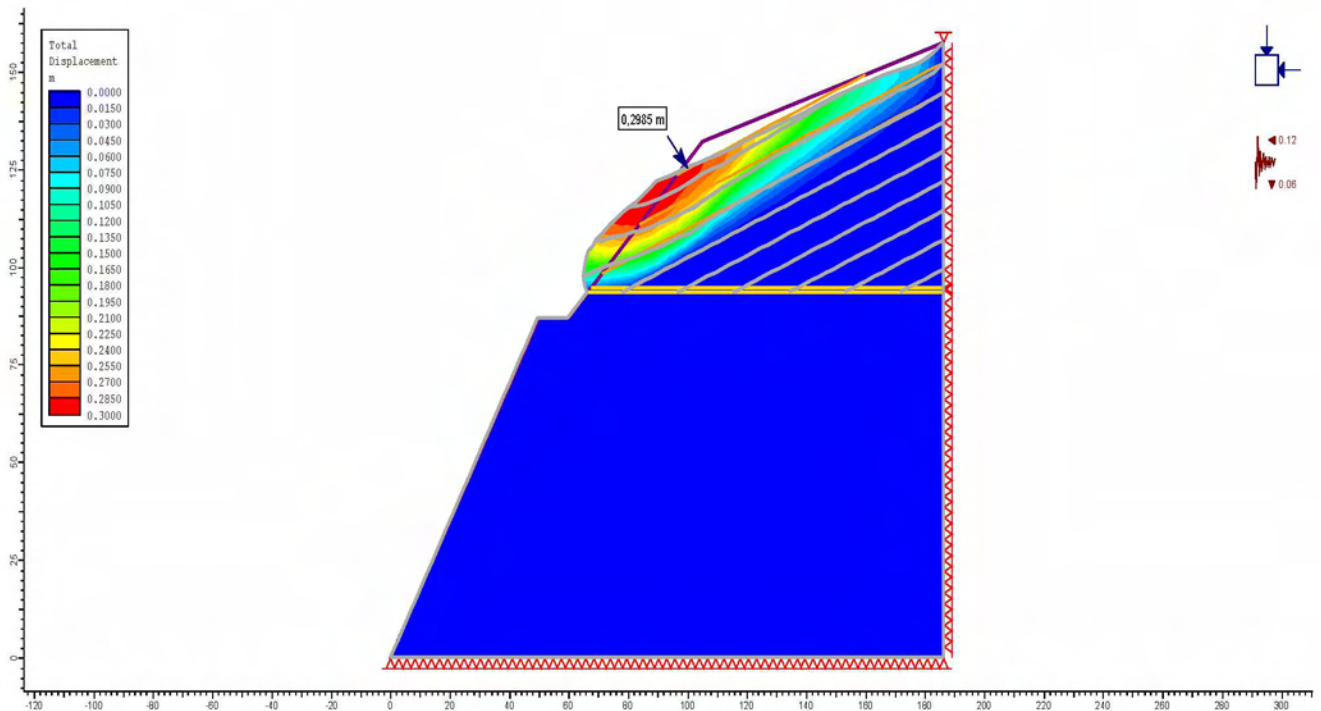
Σχήμα 7.93: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



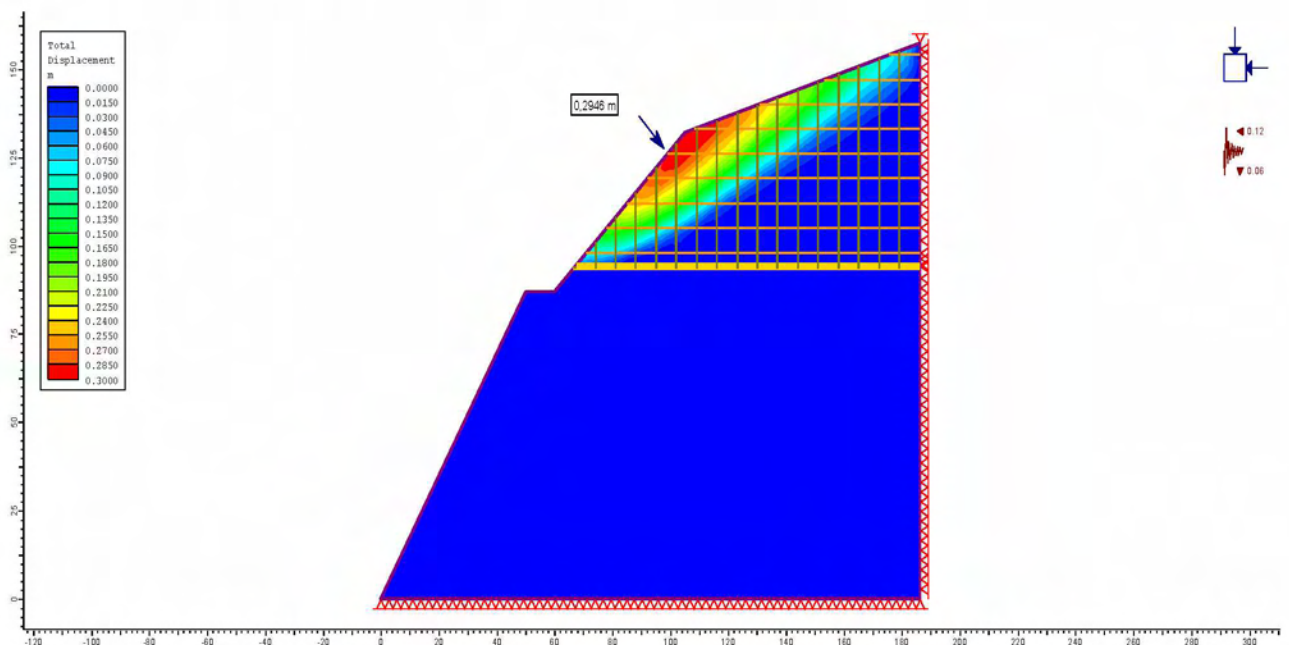
Σχήμα 7.94: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2985 m



Σχήμα 7.95: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

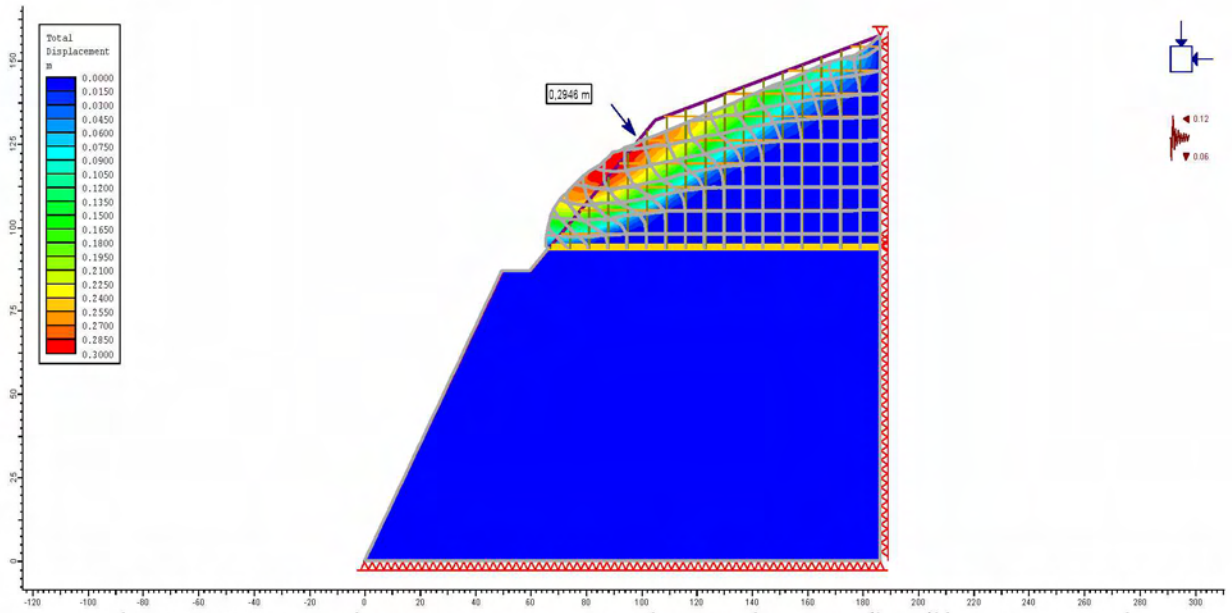
3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $\tau_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $\tau_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



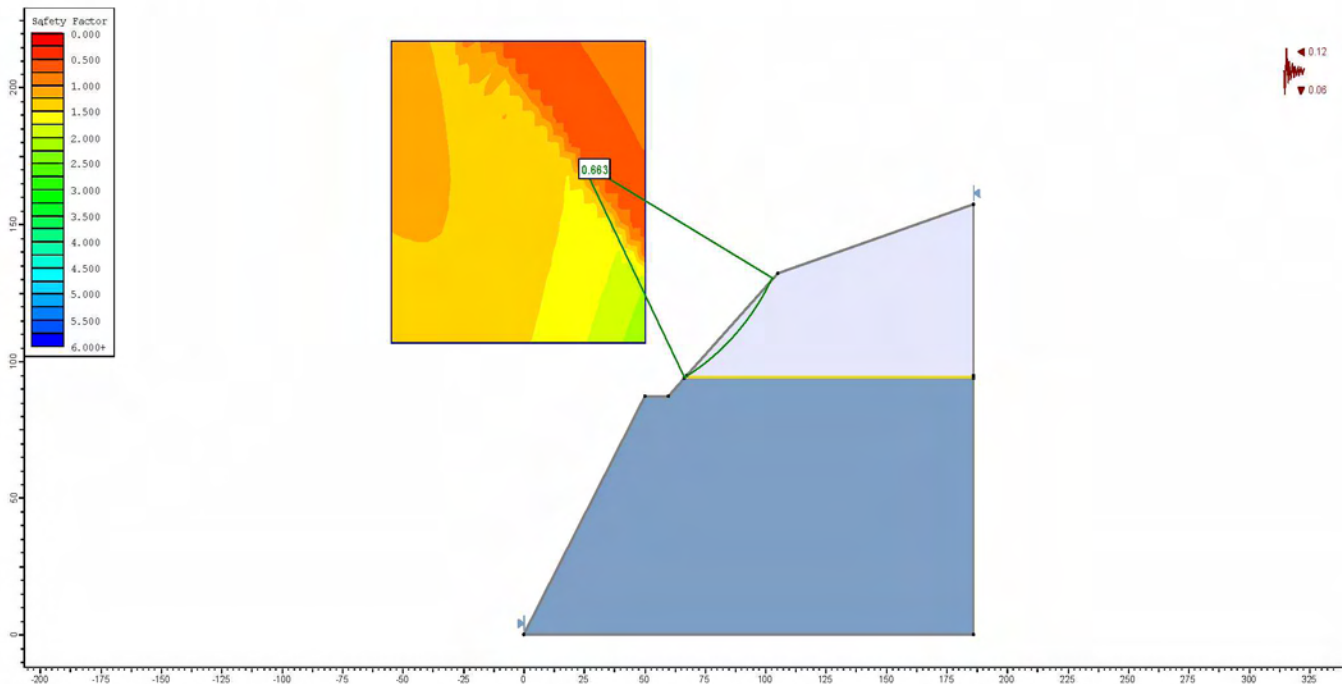
Σχήμα 7.96: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2946

m

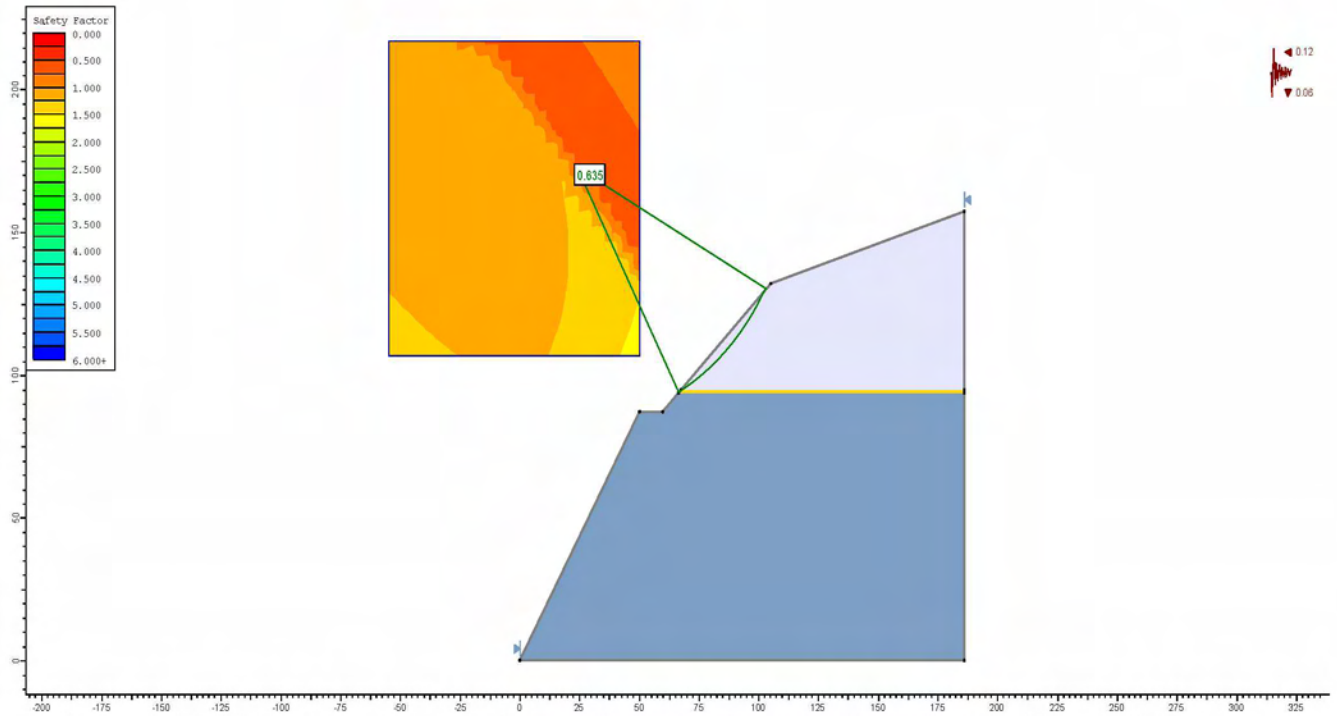


Σχήμα 7.97: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

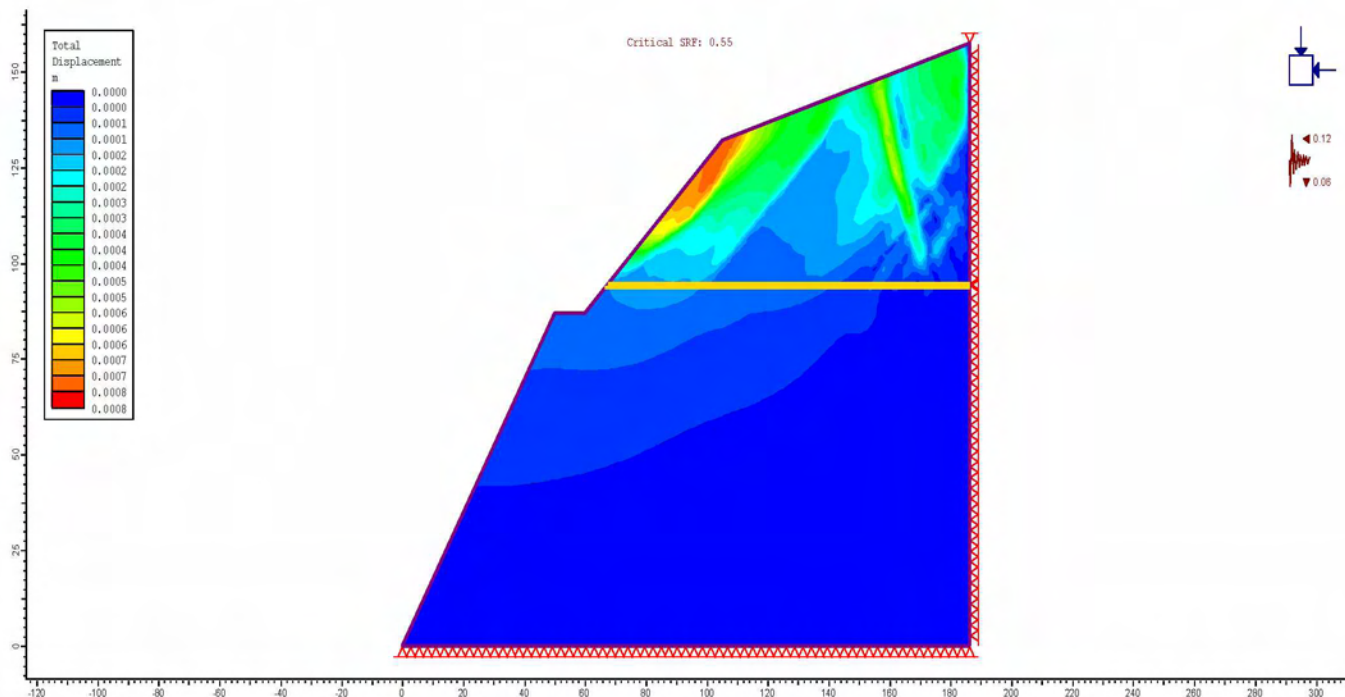
Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν είναι:



Σχήμα 7.98: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,663



Σχήμα 7.99: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,635



Σχήμα 7.100: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,55

Έχοντας την κατακόρυφη συνιστώσα σεισμού αρνητική, παρατηρείται ότι οι συντελεστές ασφαλείας είχαν μια μικρή αύξηση, σε σχέση με τη θετική κατακόρυφη συνιστώσα.

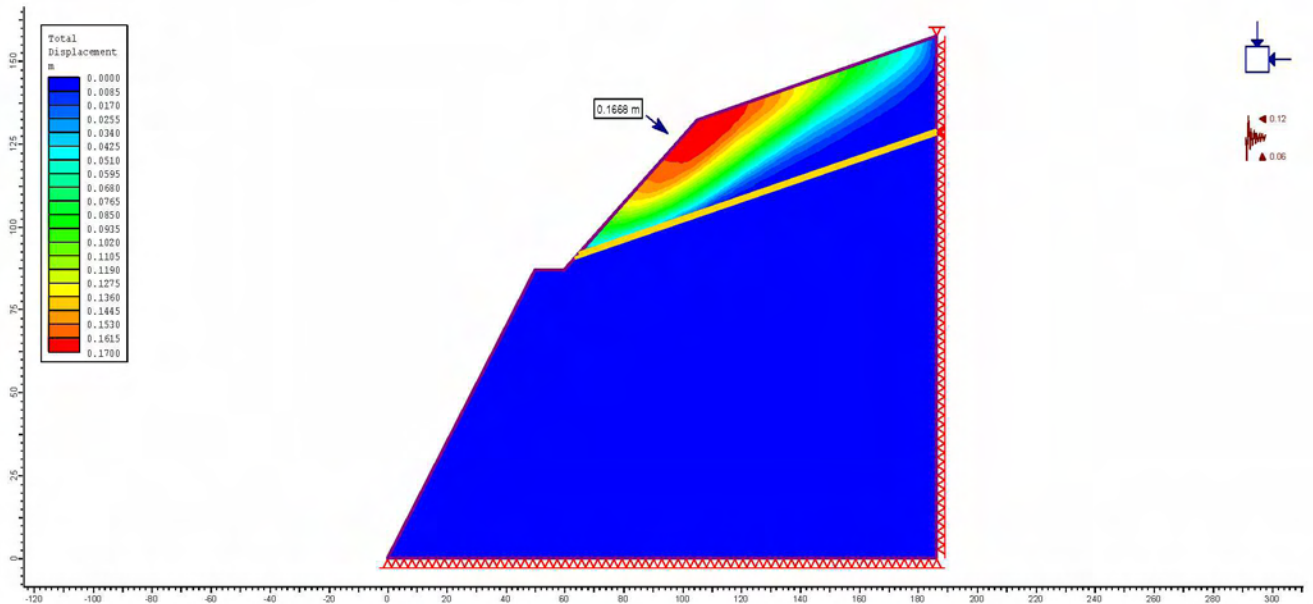
| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,1647 | 0,663 | 0,635 | 0,55 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,2985 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,2946 | | | |

Πίνακας 7.11: Πίνακας αποτελεσμάτων

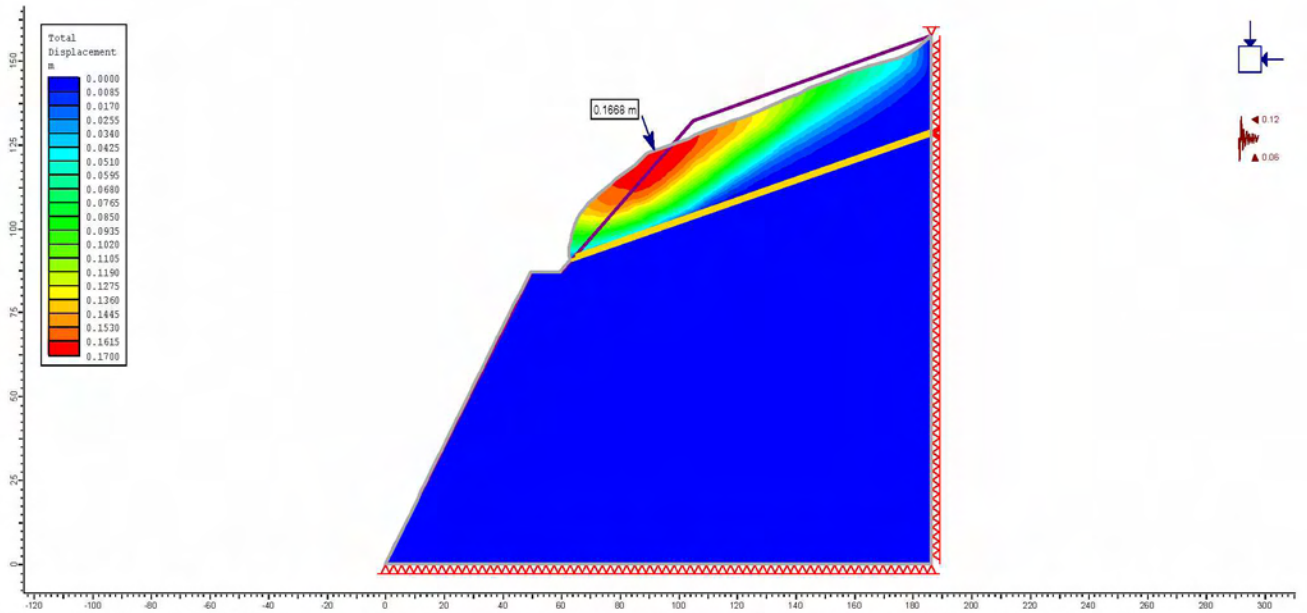
7.3.2.2 Κεκλιμένο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου (Γωνία 17° από τον οριζόντιο άξονα)

A] $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
 - $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες
 - Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



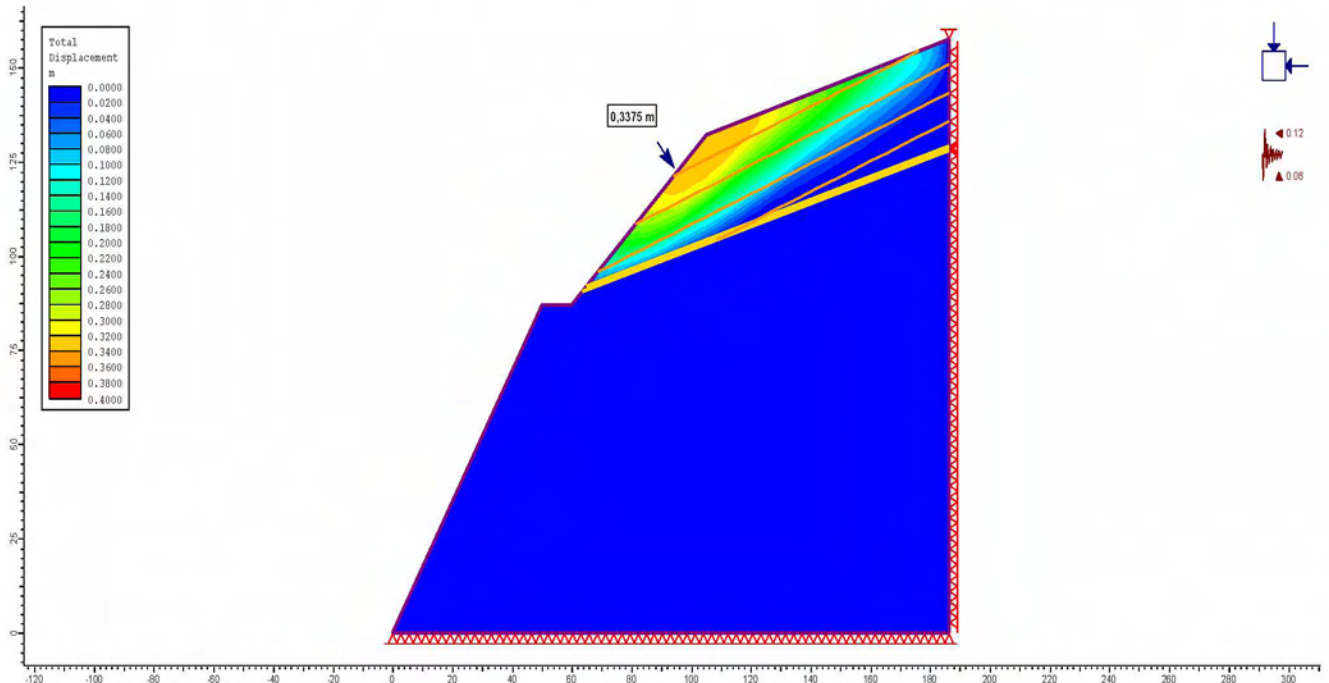
Σχήμα 7.101: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1668 m



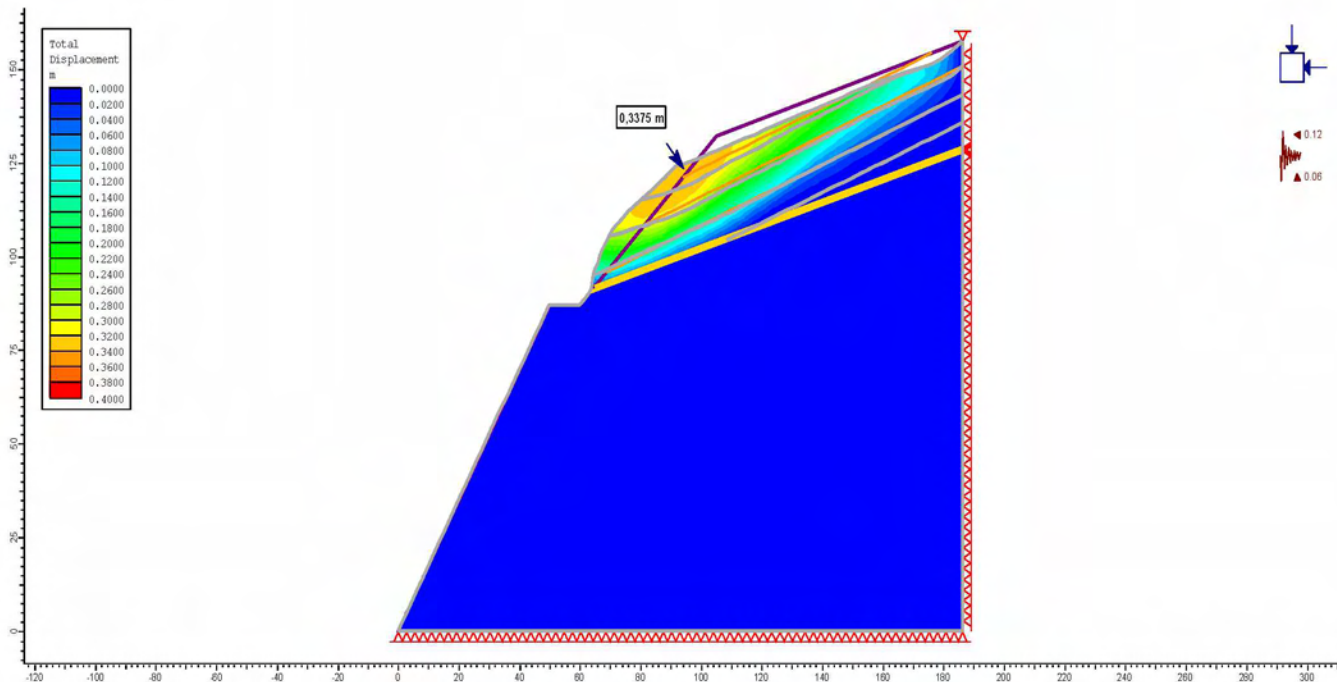
Σχήμα 7.102: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)



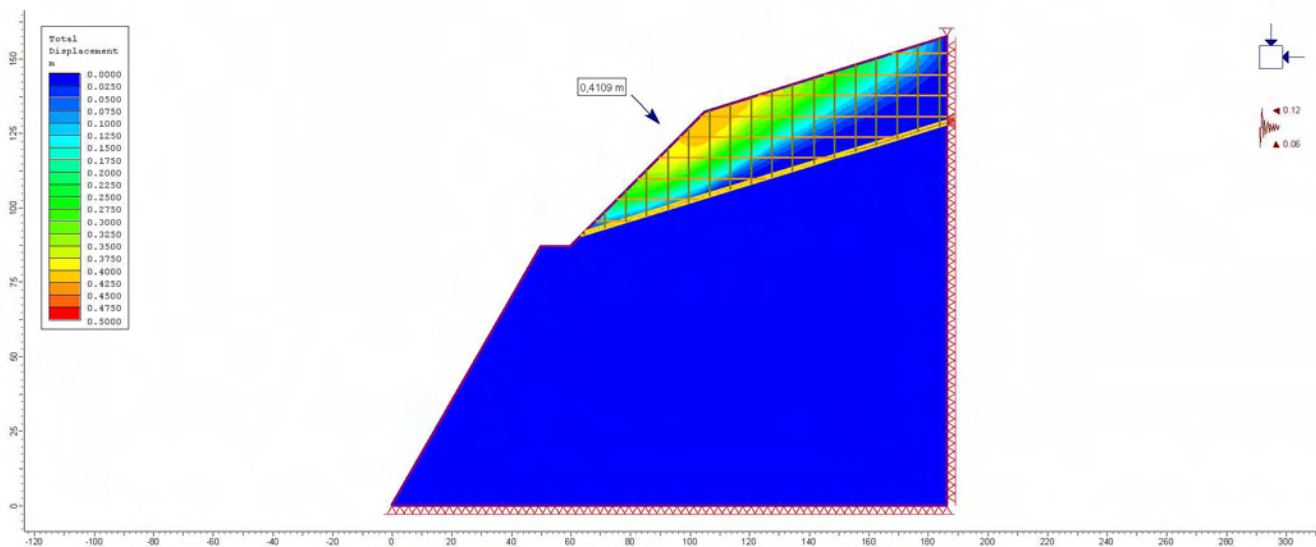
Σχήμα 7.103: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3375 m



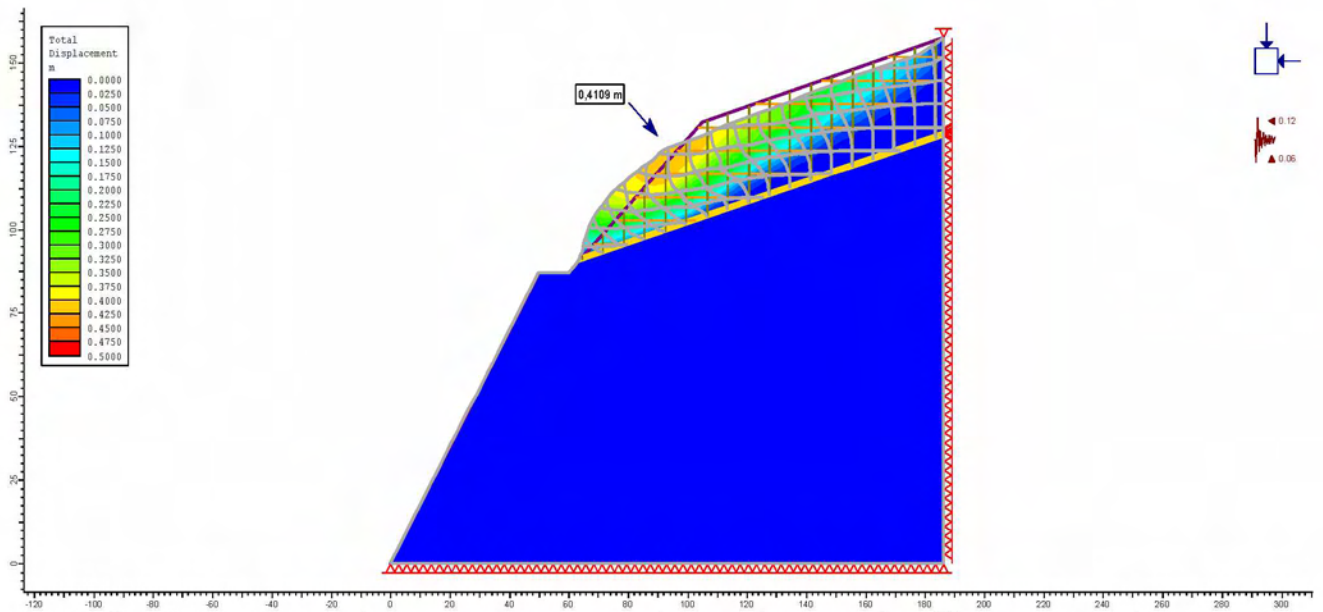
Σχήμα 7.104: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρηνούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=+0,06g$ (θετική κατακόρυφη προς τα πάνω)

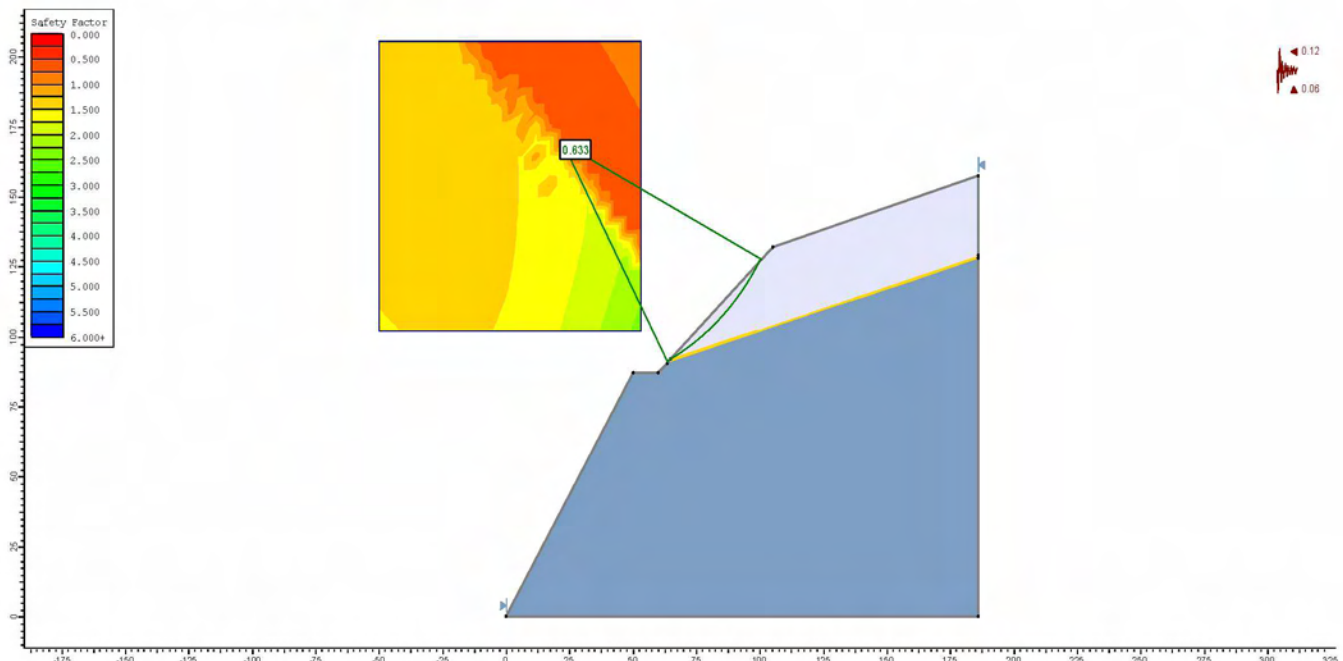


Σχήμα 7.105: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,4109 m

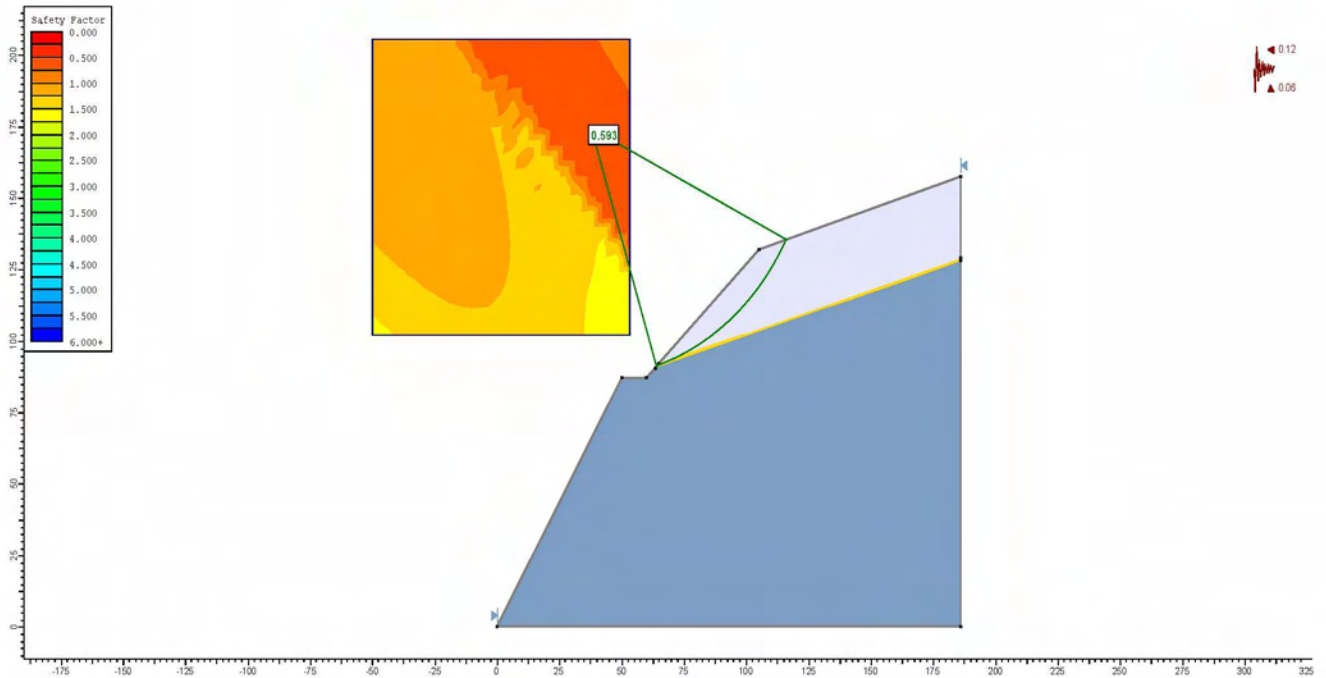


Σχήμα 7.106: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανού

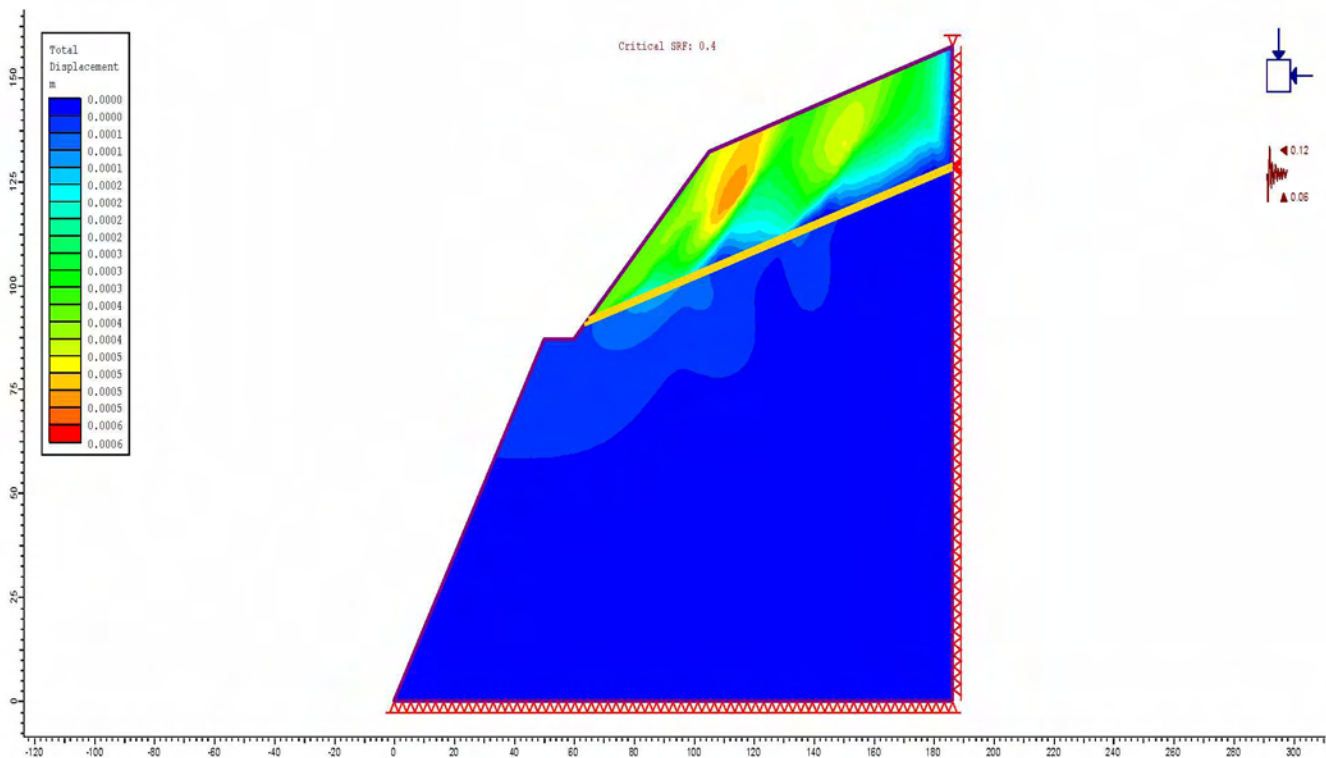
Αρκετά αυξημένες είναι οι μετατοπίσεις και σε αυτήν την περίπτωση, λόγω του κεκλιμένου στρώματος και της σεισμικής δραστηριότητας. Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν είναι:



Σχήμα 7.107: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,633



Σχήμα 7.108: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide:0,593



Σχήμα 7.109: Συντελεστής SRF (critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,4

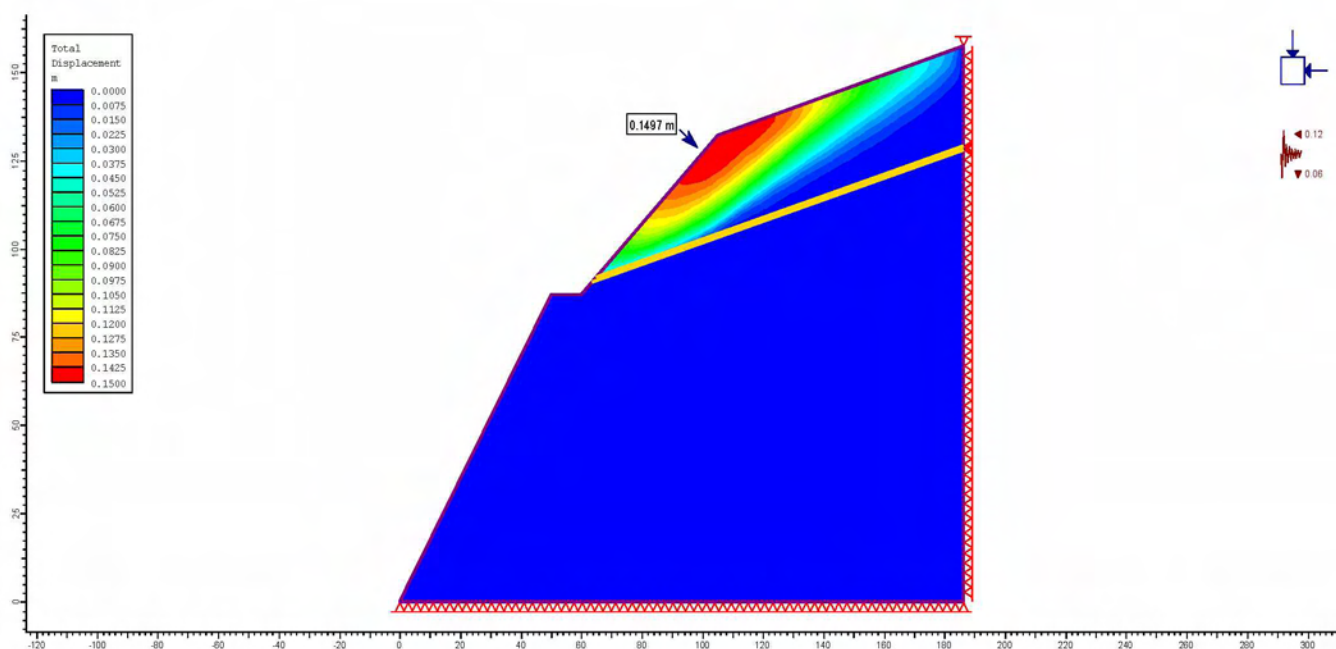
Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση, ότι οι συντελεστές ασφαλείας είναι αρκετά μειωμένοι.

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,1668 | 0,633 | 0,593 | 0,4 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,3375 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,4109 | | | |

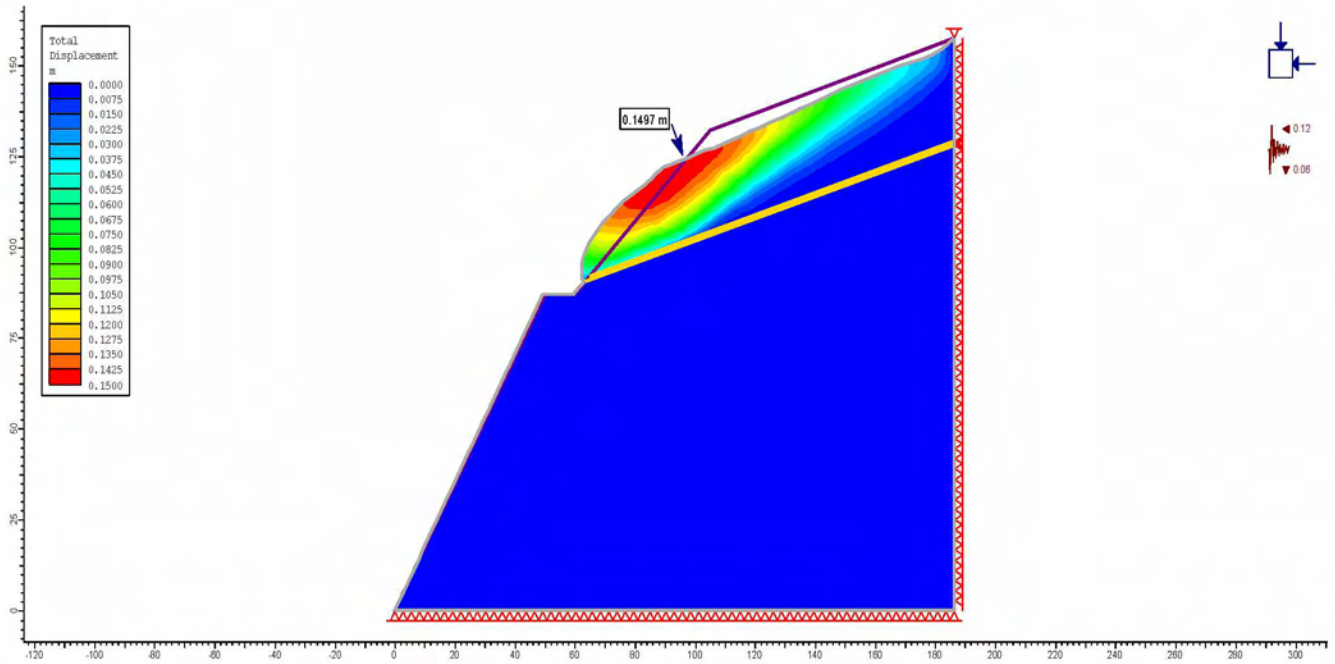
Πίνακας 7.12: Πίνακας αποτελεσμάτων

B) $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

- 1) Πρώτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:
- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
 - χωρίς ασυνέχειες
 - Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



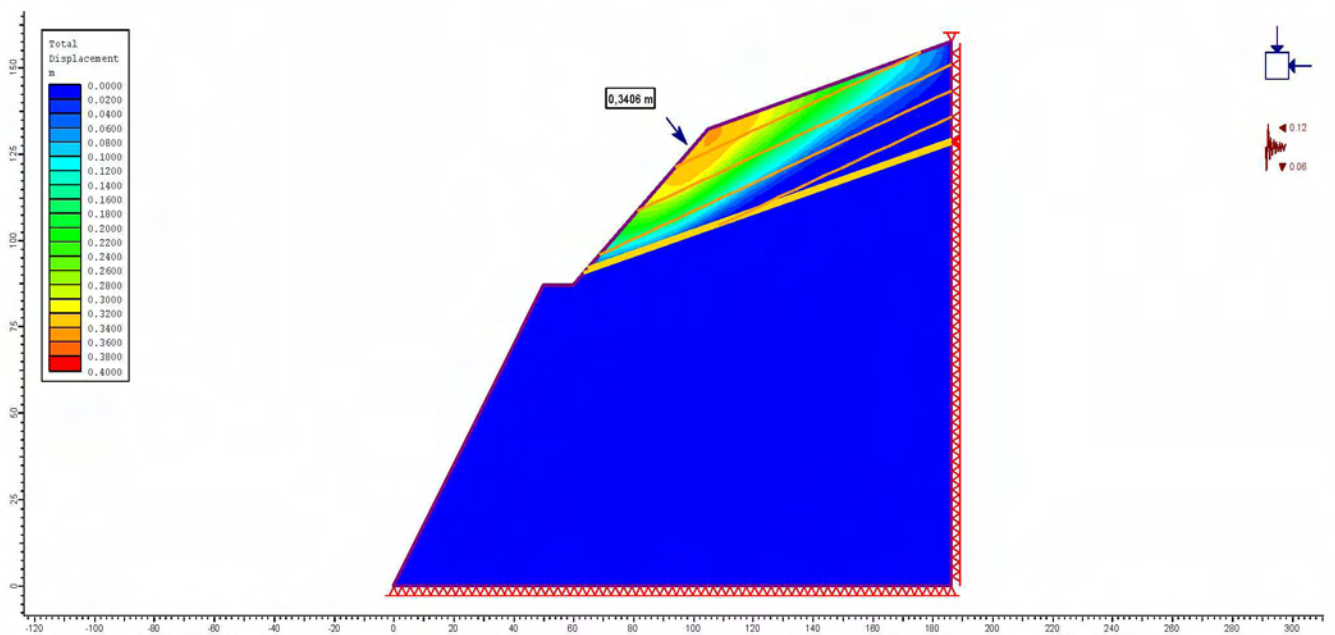
Σχήμα 7.110: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1497 m



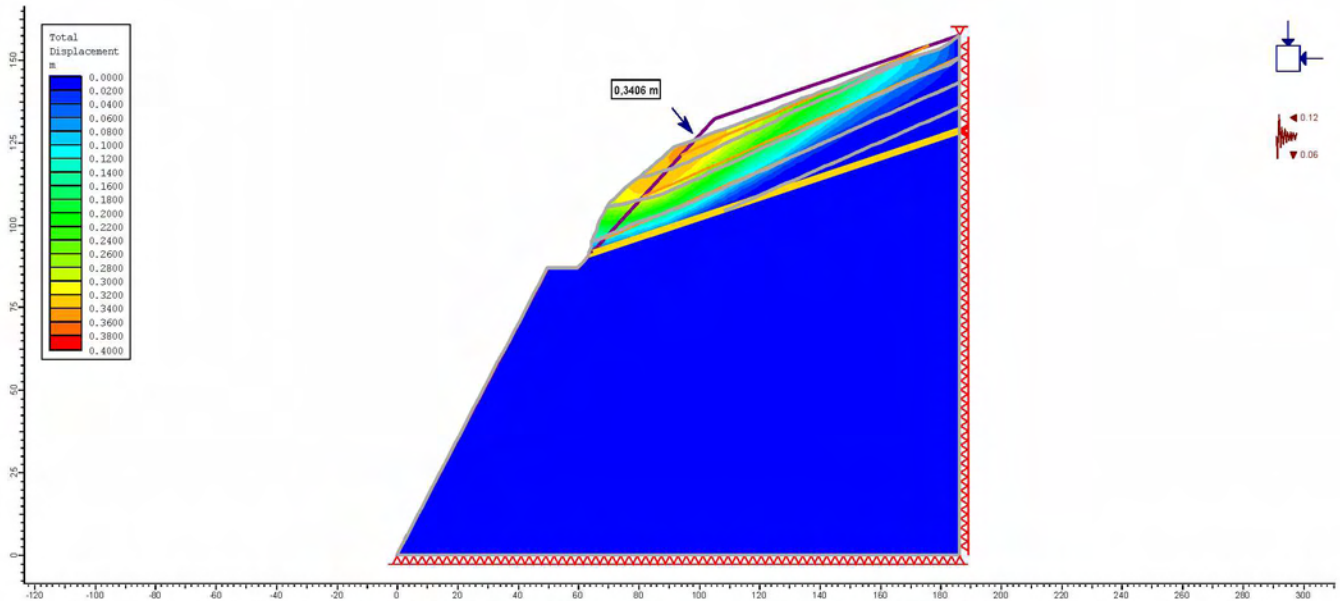
Σχήμα 7.111: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

2) Δεύτερη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγρή βραχώμαζα
- Μία οικογένεια ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $\alpha_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $\alpha_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)



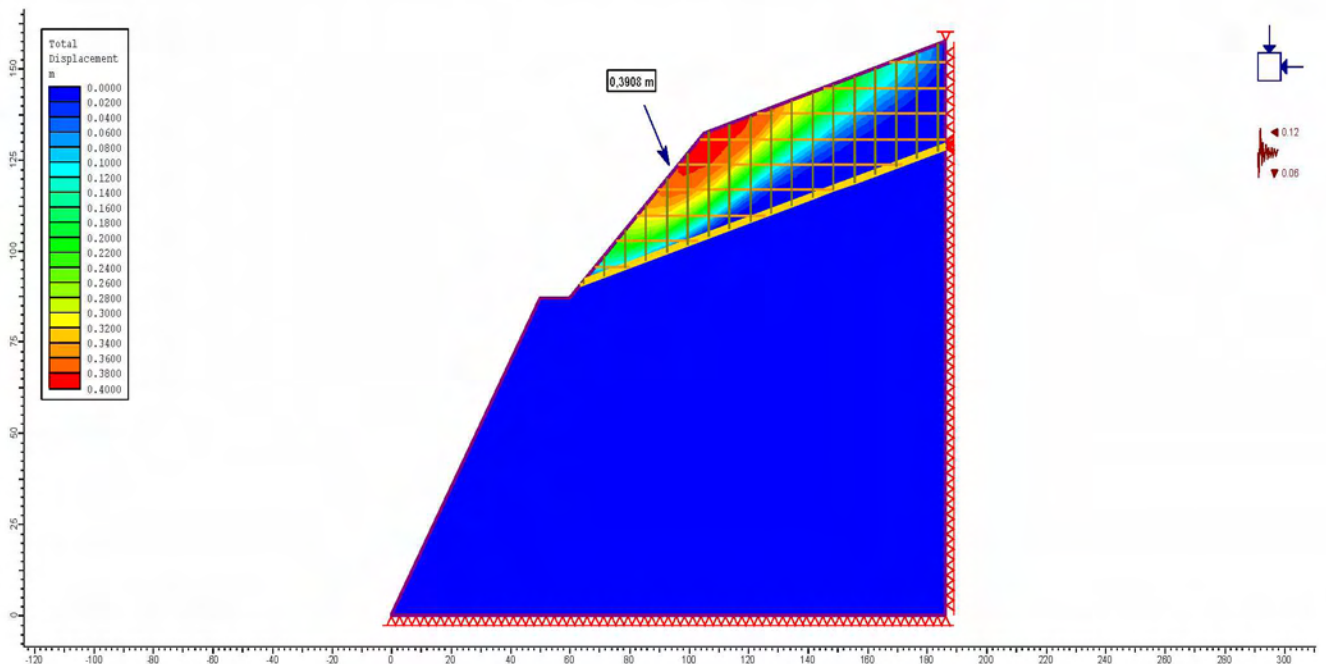
Σχήμα 7.112: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3406 m



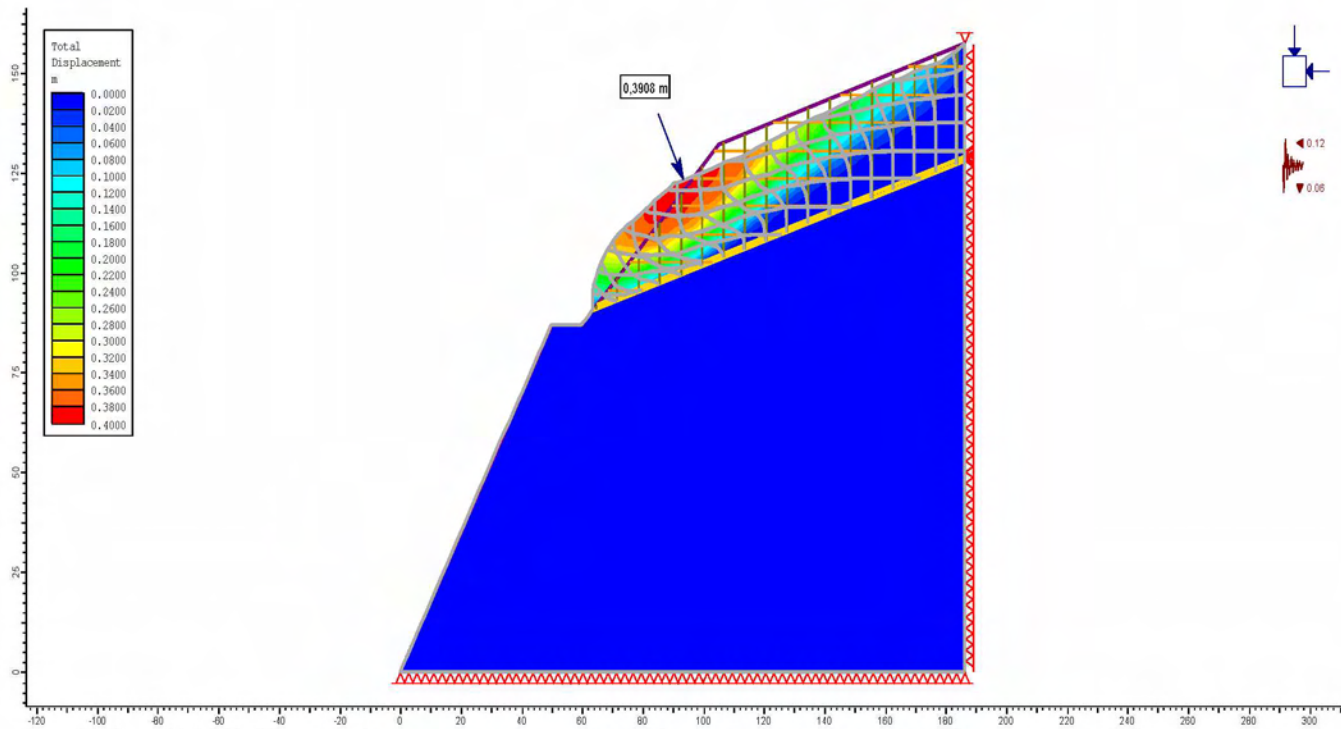
Σχήμα 7.113: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

3) Τρίτη περίπτωση ανάλυσης είναι με:

- $r_u=0,15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0$ στην υγιή βραχώμαζα
- Δύο οικογένειες ασυνεχειών
- Με συνιστώσες σεισμικής επιτάχυνσης:
 $a_h=0,12g$ κατά τη φορά της ολίσθησης και
 $a_v=-0,06g$ (αρνητική κατακόρυφη προς τα κάτω)

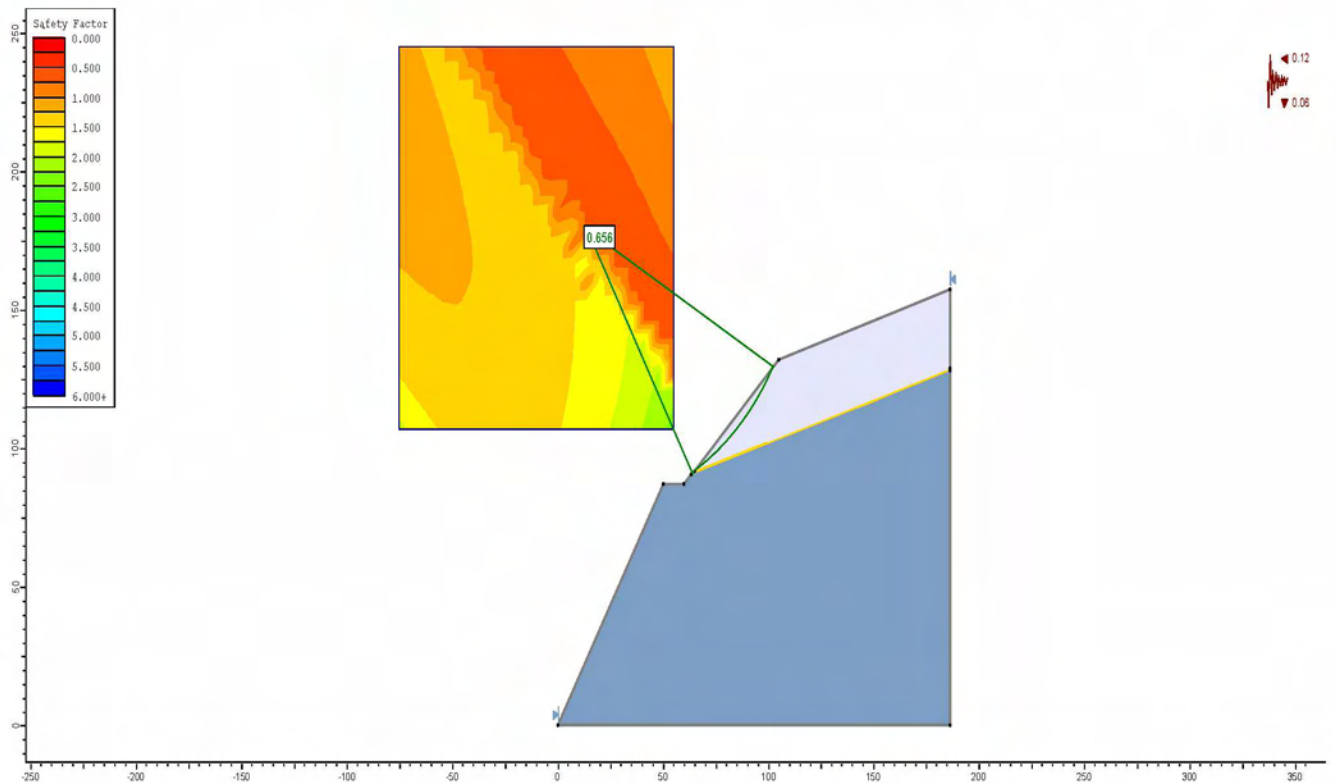


Σχήμα 7.114: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3908 m

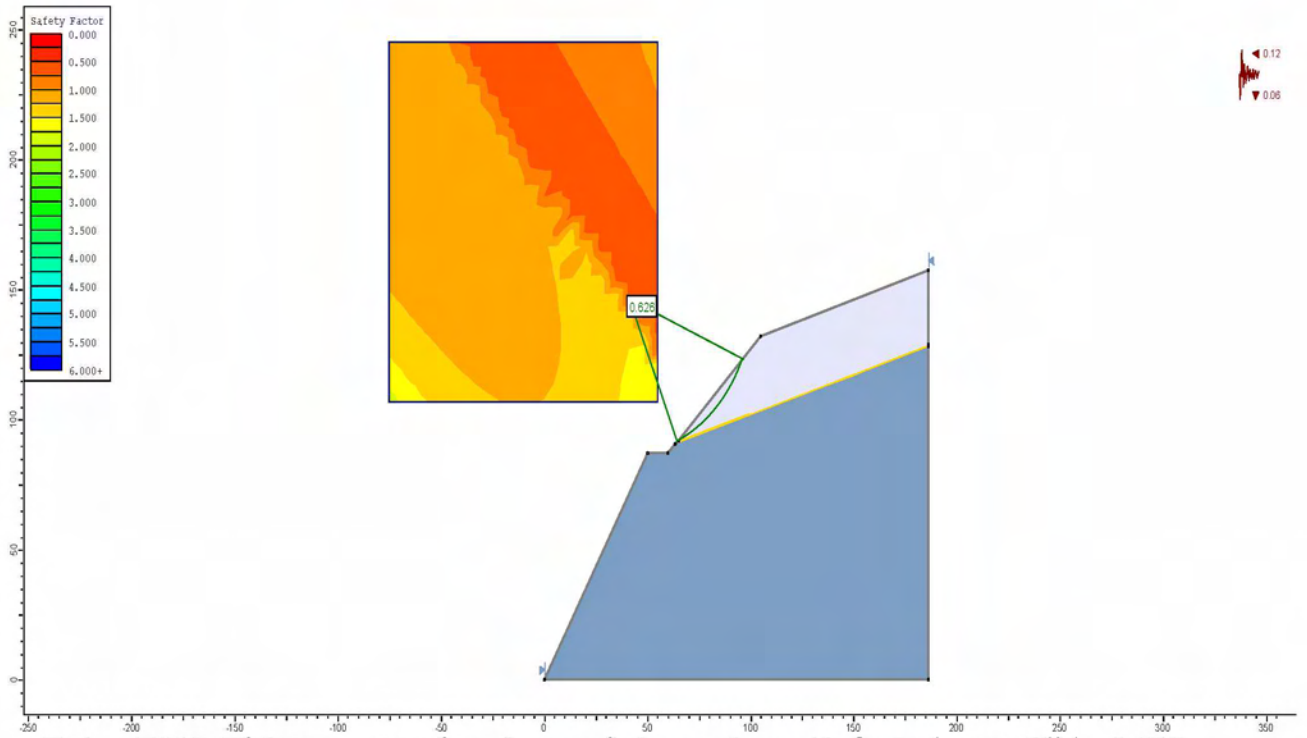


Σχήμα 7.115: Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

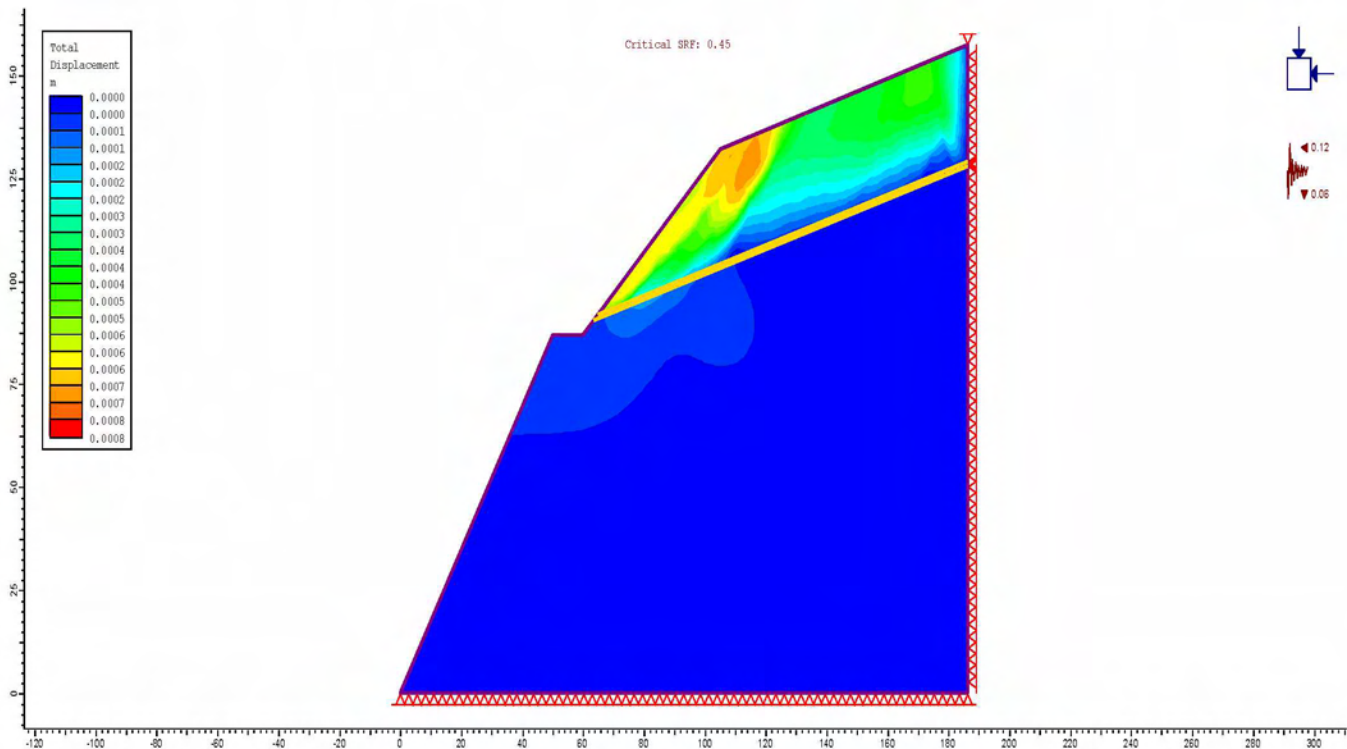
Και στο ρεαλιστικό αυτό μοντέλο, παρατηρείται ότι οι ολικές μετατοπίσεις είναι ελάχιστα μικρότερες στο σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, σε σχέση με το σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα. Ακολουθούν οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας:



Σχήμα 7.116: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά την απλοποιημένη μέθοδο Bishop στο Slide: 0,656



Σχήμα 7.117: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο Janbu στο Slide: 0,626



Σχήμα 7.118: Συντελεστής SRF(critical SRF) στο πρόγραμμα Phase2: 0,45

| | Ολική Μετατόπιση (m) | Συντελεστής ασφαλείας Bishop | Συντελεστής ασφαλείας Janbu | Critical SRF |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Χωρίς ασυνέχειες | 0,1497 | 0,656 | 0,626 | 0,45 |
| Μία Οικογένεια ασυνεχειών | 0,3406 | | | |
| Δύο οικογένειες ασυνεχειών | 0,3908 | | | |

Πίνακας 7.13: Πίνακας αποτελεσμάτων

- Από θετική σε αρνητική συνιστώσα υπάρχει μείωση μετατοπίσεων περίπου 5-12%
- Από οριζόντιο σε κεκλιμένο, μόνο στην περίπτωση χωρίς ασυνέχειες υπάρχει μείωση των μετατοπίσεων στο κεκλιμένο
- Γενικά, μικρότερες μετατοπίσεις στην αρνητική συνιστώσα
- Σε σχέση με τις στατικές συνθήκες, υπάρχει κατά μέσο όρο 70% αύξηση των ολικών μετατοπίσεων στο οριζόντιο με σεισμό, και 60-65% στο κεκλιμένο.
- Συντελεστές ασφαλείας ελάχιστα μικρότεροι στη θετική συνιστώσα, εκτός από Bishop σε κεκλιμένο
- Μειώνονται κατά 20-30% σε σχέση με τις στατικές συνθήκες
- Ο critical SRF μειώνεται κατά 44% στο οριζόντιο σε σχέση με τις στατικές συνθήκες, και κατά 65% στο κεκλιμένο.

Παρατηρείται έντονα το γεγονός ότι η ύπαρξη ασυνεχειών σε όλες τις περιπτώσεις αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αστοχία. Οι ιδιότητες των ασυνεχειών, όπως είναι ο προσανατολισμός που έχουν, η μεταξύ τους απόσταση, το υλικό πλήρωσης, η τραχύτητα κ.α., επηρεάζουν κατά ένα σημαντικό βαθμό στην ευστάθεια του πρανούς.

7.4 Προτεινόμενα μέτρα αντιστήριξης

Όπως έχει προαναφερθεί, η αστοχία του πρανούς οφειλόταν στην αποσταθεροποιητική δράση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, τα οποία αύξησαν την πίεση του νερού των πόρων εσωτερικά στο έδαφος.

Μία προτεινόμενη λύση είναι η εφαρμογή αποστραγγιστικών έργων στο πρανές, όπως είναι οι αποστραγγιστικές γεωτρήσεις, οι οποίες θα βοηθήσουν να φύγουν τα υπόγεια ύδατα και να επέλθει πλήρης αποστράγγιση.

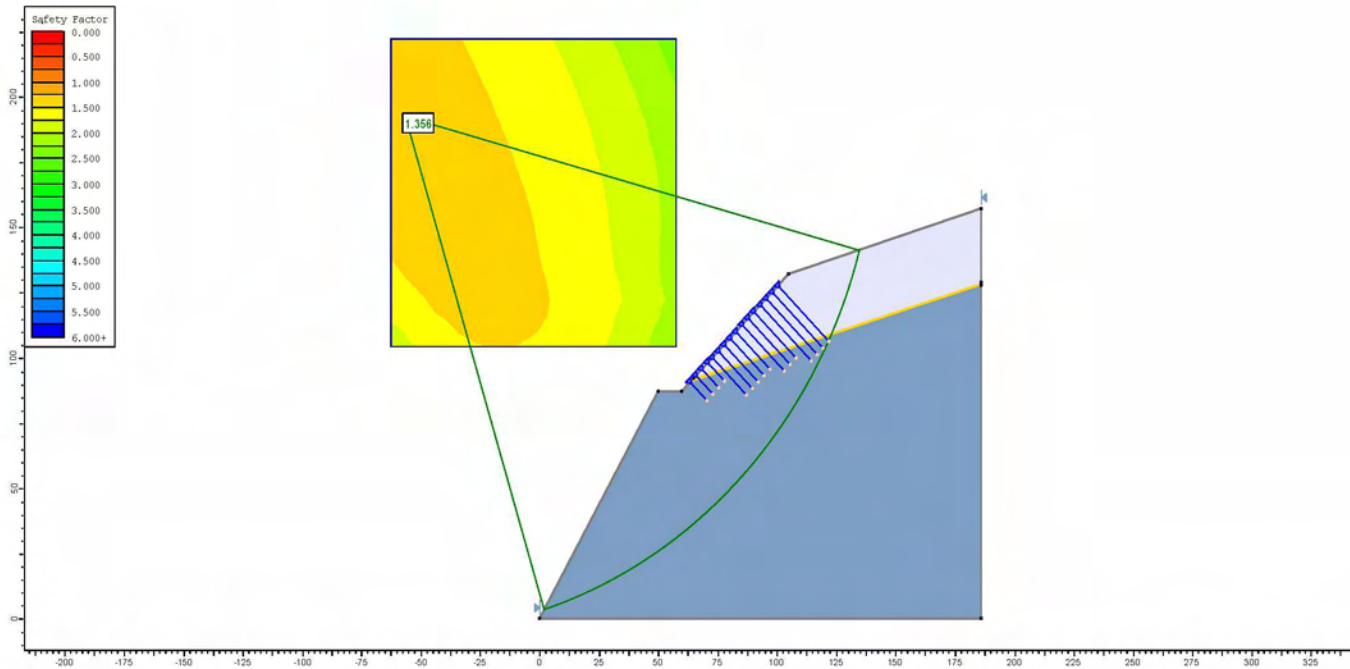
Σε δεύτερη φάση, και αφού έχει αποστραγγιστεί πλήρως το πρανές, και ο συντελεστής πίεσης πόρων r_u είναι πλέον μηδέν, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα συγκράτησης του εδάφους με αγκυρώσεις.

Τα αγκύρια είναι κατασκευαστικά στοιχεία, ικανά να μεταφέρουν μία δύναμη εφελκυσμού σε στρώματα υπεδάφους βαθύτερα. Ανάλογα με τη διάρκεια ζωής τους τα αγκύρια διαχωρίζονται σε προσωρινά και μόνιμα, και ανάλογα το ρόλο του στην εντατική κατάσταση του χώρου, διακρίνονται σε ενεργά (προεντεταμένα) και σε παθητικά (απλές ηλώσεις) [7]. Η σαφής γνώση της στρωματογραφίας του υπεδάφους, των ιδιοτήτων των βραχωδών και εδαφικών υλικών, αλλά και της ύπαρξης νερού, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία του αγκυρίου.

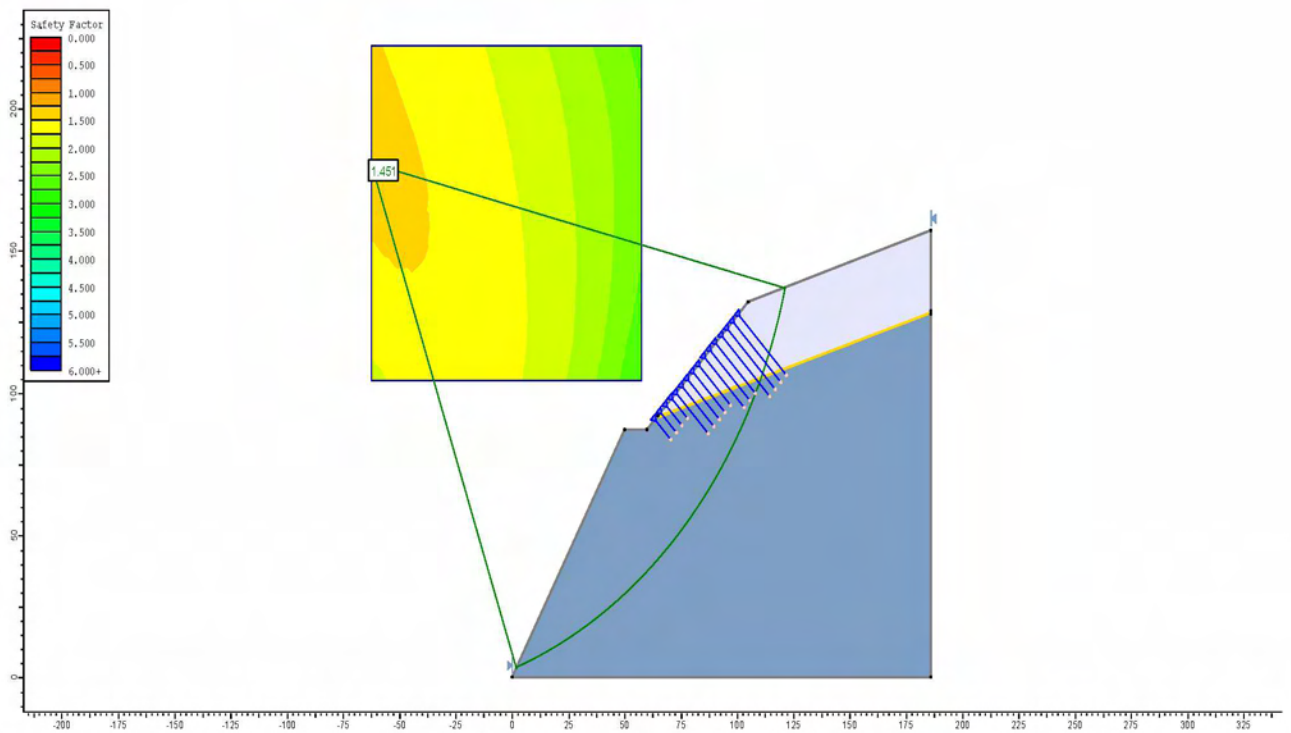
Στην εργασία αυτή, έγινε η προσπάθεια προσομοίωσης ενός μοντέλου πρανούς, το οποίο έχει υποστηριχθεί με αγκυρώσεις, στο πρόγραμμα Slide.

Επιλέχθηκε το ρεαλιστικό μοντέλο του πρανούς, χωρίς ασυνέχειες, εφόσον η ανάλυση πραγματοποιείται στο πρόγραμμα Slide, με το στρώμα του αποσαθρωμένου σχιστόλιθου να είναι κεκλιμένο. Θεωρητικά, το πρανές έχει αποστραγγιστεί, οπότε ο συντελεστής της πίεσης του νερού των πόρων r_u είναι μηδέν. Επιλέχθηκε σειρά αγκυρίων (bolt pattern) με τύπο end anchored σε active method. Αυτά τα αγκύρια είναι πρόσφυσης άκρου και συνήθως διαστελλόμενης κεφαλής. Έγινε η επιλογή αγκυρίων φορτίου 700KN και μήκους 10,20, 25 και 30 μέτρων, διατεταγμένα ανά 3 μέτρα, με κλίση 45° από τον οριζόντιο άξονα.

Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε κατά τη μέθοδο Janbu είναι $SF=1,356$, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από τον ελάχιστο που επιτρέπει ο κανονισμός(1,3). Με τη μέθοδο Bishop, ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε είναι $SF= 1,451$ Στη γεωτεχνική μελέτη, από όπου πάρθηκε και το ζήτημα, υπολογίστηκε ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας, μετά τα αποστραγγιστικά έργα που προτάθηκαν, και κατά τη μέθοδο Janbu είναι 1,307. [13]



Σχήμα 7.119: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά Janbu, μετά την εφαρμογή αγκυρώσεων: 1.356



Σχήμα 7.120: Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας κατά Bishop, μετά την εφαρμογή αγκυρώσεων: 1,451

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

Συμπεράσματα –Προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε μία περίπτωση κατολισθητικού φαινομένου που έχει λάβει χώρα σε περιοχή του Πηλίου, με διάφορες παραμέτρους, που αφορούσαν τη στρωματογραφία του εδάφους, την ύπαρξη διακλάσεων (μία οικογένεια με δυσμενή προσανατολισμό, ή δύο οικογένειες κάθετες μεταξύ τους, μία με οριζόντιο και μία με κατακόρυφο προσανατολισμό), και την ύπαρξη πίεσης του νερού των πόρων, σε στατικές και σεισμικές συνθήκες.

Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν, είχαν συντελεστή ασφαλείας αρκετά μικρότερο από τον ελάχιστο επιτρεπόμενο, ο οποίος κυμαίνεται από 1,3 έως 1,4. Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν από το Slide, είχαν εύρος από 0,6 έως 0,9 περίπου. Ακόμα, όσον αφορά στην εξαγωγή των συντελεστών αντοχής, παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής που υπολογίζεται στο Phase2, είναι συνήθως μικρότερος, αν συγκριθεί με τους συντελεστές του Slide.

Όσον αφορά στις συνθήκες, ήταν αναμενόμενο η πιθανότητα αστοχίας να αυξάνεται όταν υπάρχει σεισμική δραστηριότητα. Ακόμα, το κεκλιμένο στρώμα του αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, αλλά και η ύπαρξη ασυνεχιών δυσμενούς προσανατολισμού ευνοούσαν ακόμα περισσότερο την αστοχία. Ο παράγοντας που δεν επηρέασε τους συντελεστές ασφαλείας, παρά μόνο λίγο τις μετατοπίσεις στην ολισθαίνουσα περιοχή, είναι η ύπαρξη του τ_u του συντελεστή της πίεσης του νερού των πόρων, στον υγρή ασβεστόλιθο.

Τέλος, τα αποστραγγιστικά μέτρα και μέτρα ενίσχυσης με αγκύρια είναι αυτά που χρειάζονται για την ευστάθεια του υπό εξέταση πρανούς.

8.2 Προτάσεις

Υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και εξαγωγής νέων συμπερασμάτων, με χρήση παραδοχών και παραμέτρων είτε ίδιων με αυτών που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, είτε καινούριων και διαφορετικών. Μερικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση και έρευνα είναι:

- Η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις μέσω των προγραμμάτων RS³ και Slide³.
- Η χρήση διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας, όπως Hoek-Brown ή Barton-Bandis.
- Η ανάλυση με διαφορετική κλίση του αποσαθρωμένου στρώματος σχιστόλιθου ή με διαφορετικές περιπτώσεις οικογενειών ασυνεχιών.
- Προσέγγιση διαφορετικών μεθόδων υποστήριξης του πρανούς.
- Δημιουργία μοντέλων με σύνθετη γεωλογική δομή του υπεδάφους (π.χ. αντικλινικές και συγκλινικές πτυχωσιγενείς δομές)

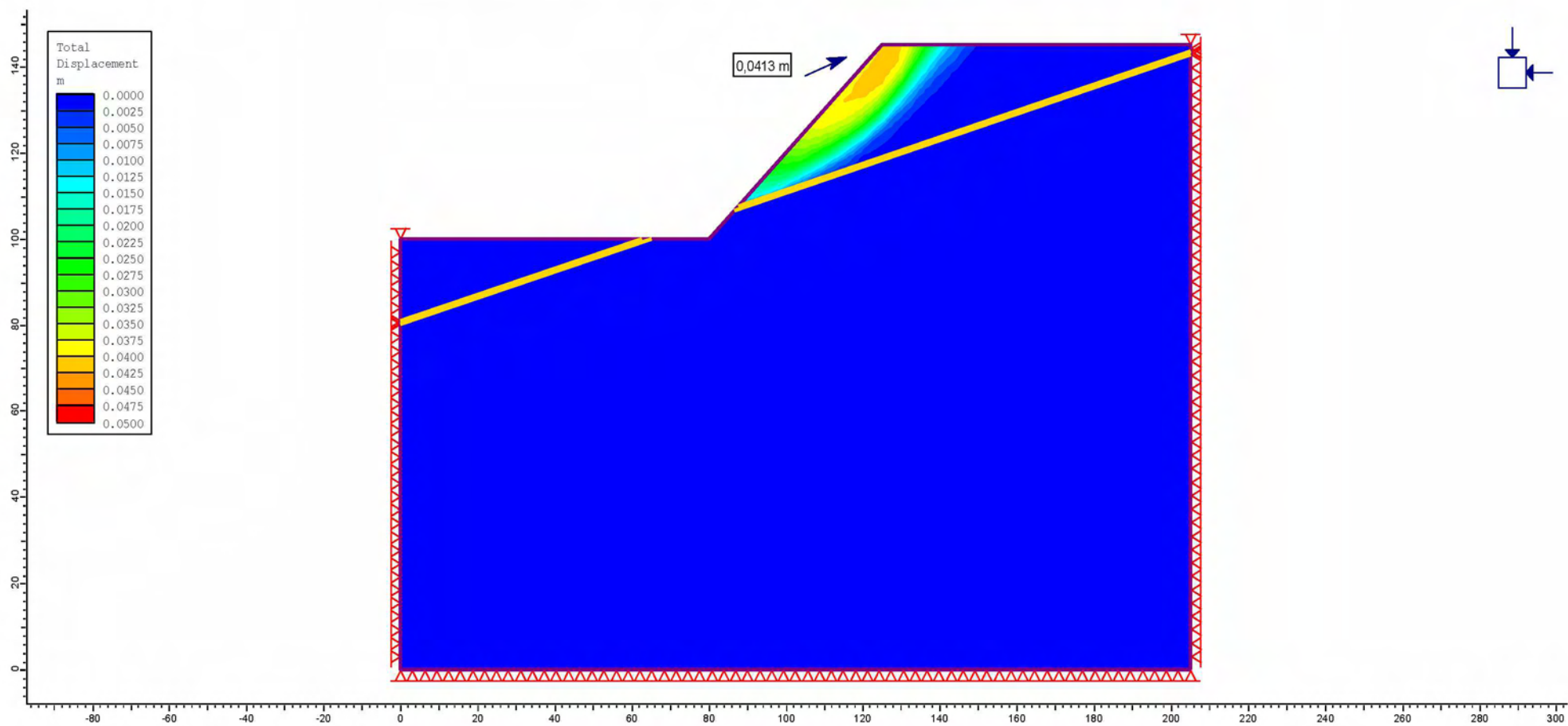
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κούκης Γ. και Σαμπατακάκης Ν., Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2007
2. Μπαντής Σ., Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Gutenberg, 2008
3. Κωμοδρόμος Α., Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική: Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευών, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008
4. Μαραγκός Χ., Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου. Υπόγειες Κατασκευές. Φράγματα, Εκδόσεις Χρήστος Ν. Μαραγκός, 2013
5. Αγιουτάντης Ζ., Στοιχεία Γεωμηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2010
6. Δ.Ι Παπανικολάου και Χρ. Σίδερης, Γεωλογία-Η επιστήμη της γης, Εκδόσεις Πατάκη , 2012
7. Παπασπύρου Σ. ,Αγκυρώσεις, 1985
8. Λέκκας Ε., Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές, Εκδόσεις Access, 2000
9. Βασιλειάδης Ε., Ζωνοποίηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών φαινομένων στον ελληνικό χώρο. Δημιουργία και εφαρμογή μοντέλων με γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, Διδακτορική διατριβή, 2010
10. Παπανικολάου Δ., Διακάκης Μ., Μεταβολές στην ένταση και την κατανομή των φυσικών καταστροφών, 2011
11. Καρύδης Π., Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές, 2003
12. Νομικός Π. , Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015
13. Χατζηνικολάου Ν., Γεωτεχνική μελέτη ‘‘Αποκατάσταση ζημιών στο 48^ο χλμ της Ε.Ο Βόλου-Νεοχωρίου-Ζαγοράς-Ξουρίτσι’’, 2012
14. Μαυρομάτης Γ., Το βιοκλίμα της Ελλάδος. Ίδρυμα Δασικών Ερευνών, Τόμος 1, 1980
15. Duncan M., Wright S., Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons, Inc, 2005
16. Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah , Rock Slope Engineering, Civil and Mining, Spon Press, 2004
17. Koukis G, Sabatakakis N, Nikolaou N, Loupasakis C , Landslide hazard zonation in Greece. In: Sassa K, Fukuoka H, Wang F, Wang G (eds) Proceedings of open symposium on landslide risk analysis and sustainable disaster management in the First, 2005
18. Michalowski R., Stability charts for uniform slopes, 2002
19. Varnes, Classification of landslides, Springer, 1978
20. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός- ΕΑΚ
21. http://www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex2/2012/A6_P.pdf
22. https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3994/1/12_chapter11.pdf
23. http://users.ntua.gr/gbouck/downfiles/Computational_methods_Notes_2006.pdf
24. http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/1315/Psaltou_Emmanouil.pdf?sequence=8
25. [https://eclass.duth.gr/modules/.../Αναλυσ.%20ευστάθειας%20πρανών%20\(γενικά\).doc](https://eclass.duth.gr/modules/.../Αναλυσ.%20ευστάθειας%20πρανών%20(γενικά).doc)
26. <http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geomecal/docs/landslides.html>
27. <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>
28. <https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide>

29. <https://www.rocscience.com/>
30. <http://www.thessaly.gov.gr/main.aspx?catid=130&id=3465>
31. <https://www.google.com/intl/el/earth>
32. <http://www.igme.gr/geoportal/>
33. https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp9/phase2_model/Shear_Strength_Reduction_Overview.htm

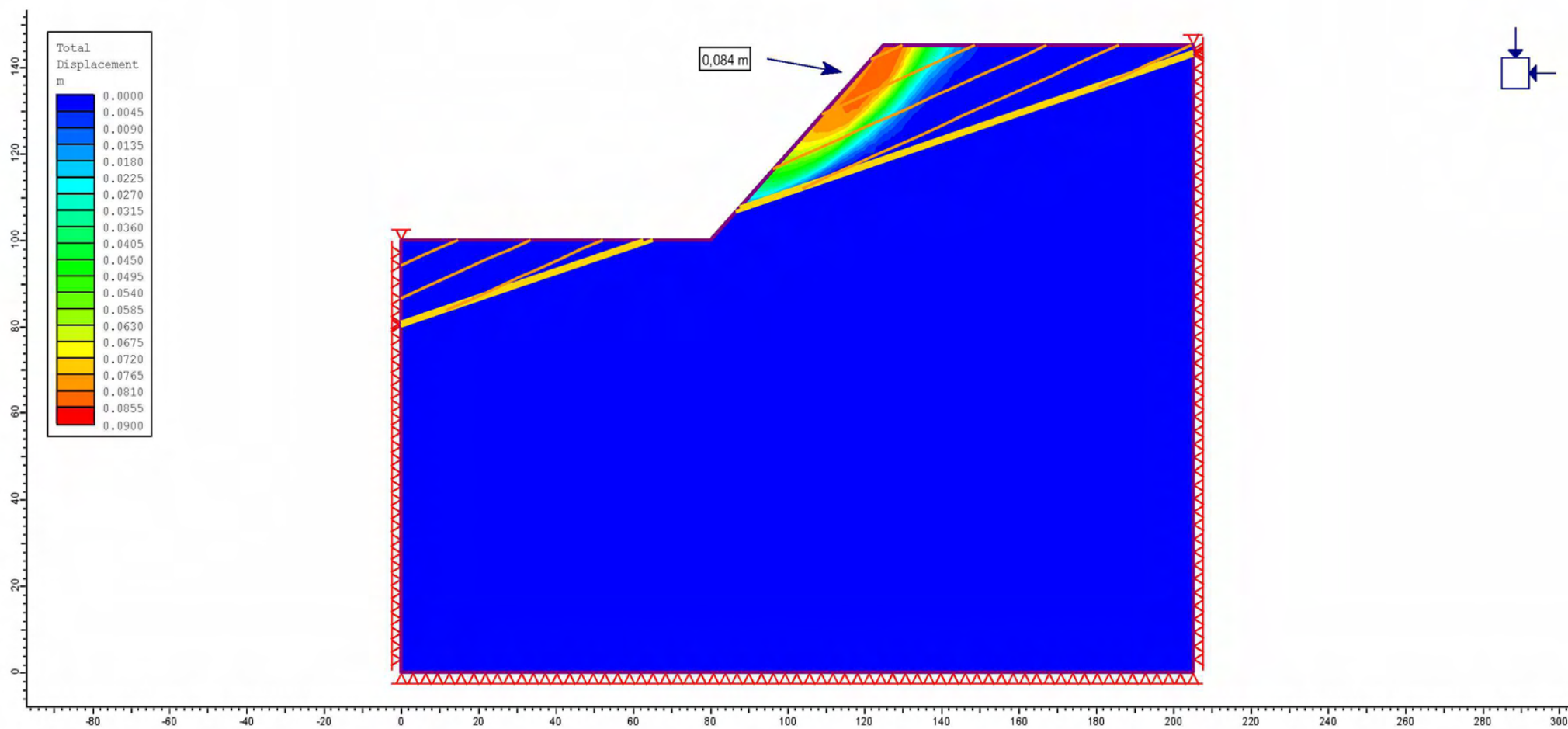
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



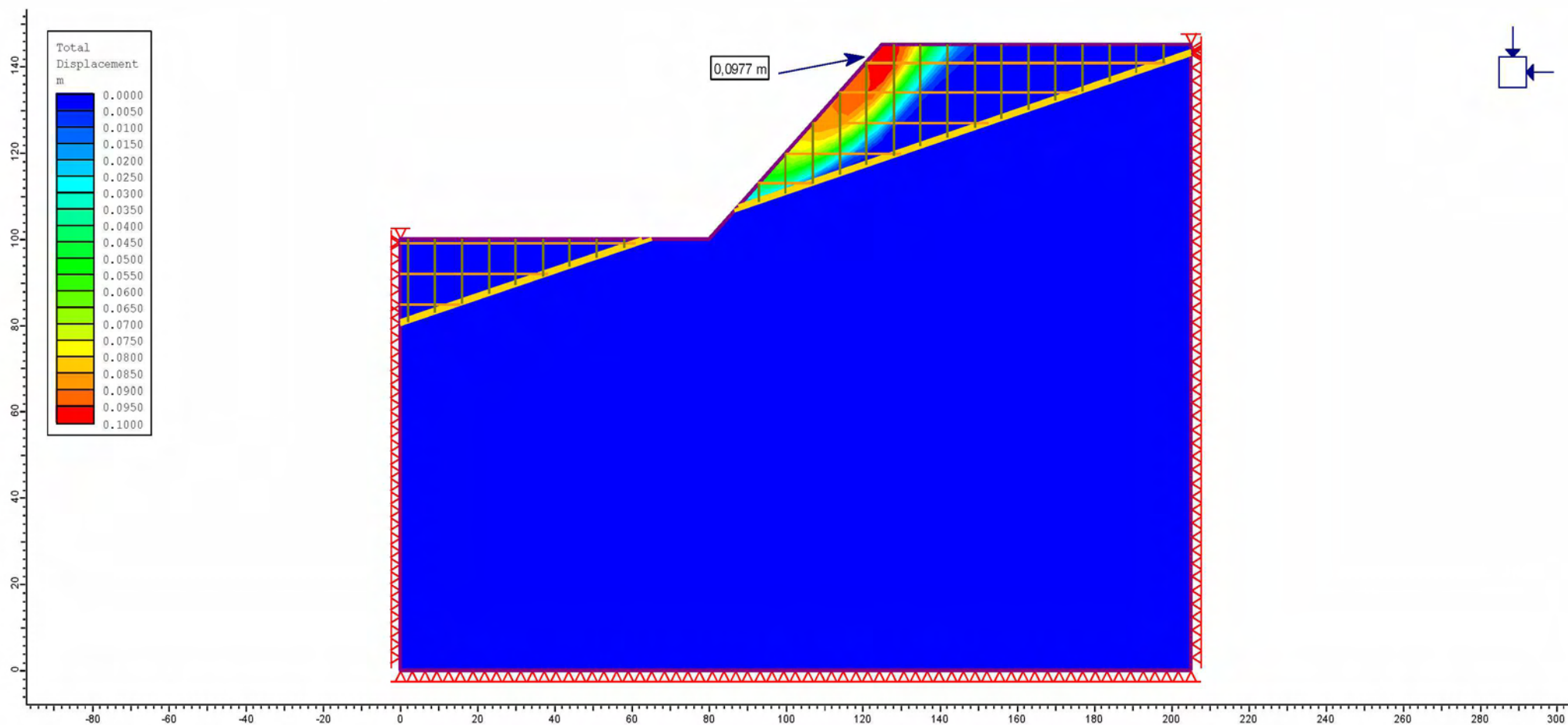
Εικόνα Π1: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων (διάνυσμα οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης) στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0413 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



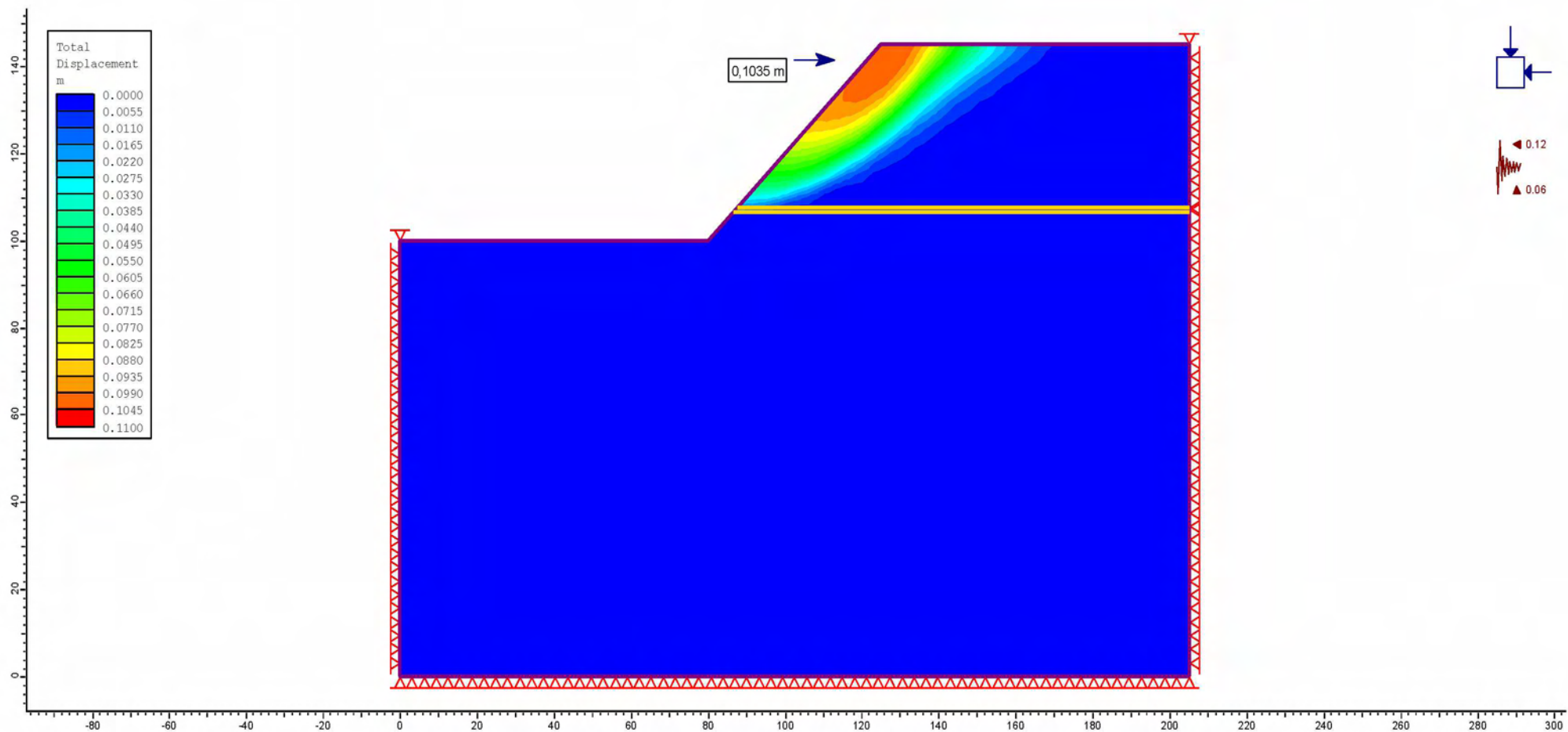
Εικόνα Π2: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου και μία οικογένεια ασυνεχειών, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,084 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



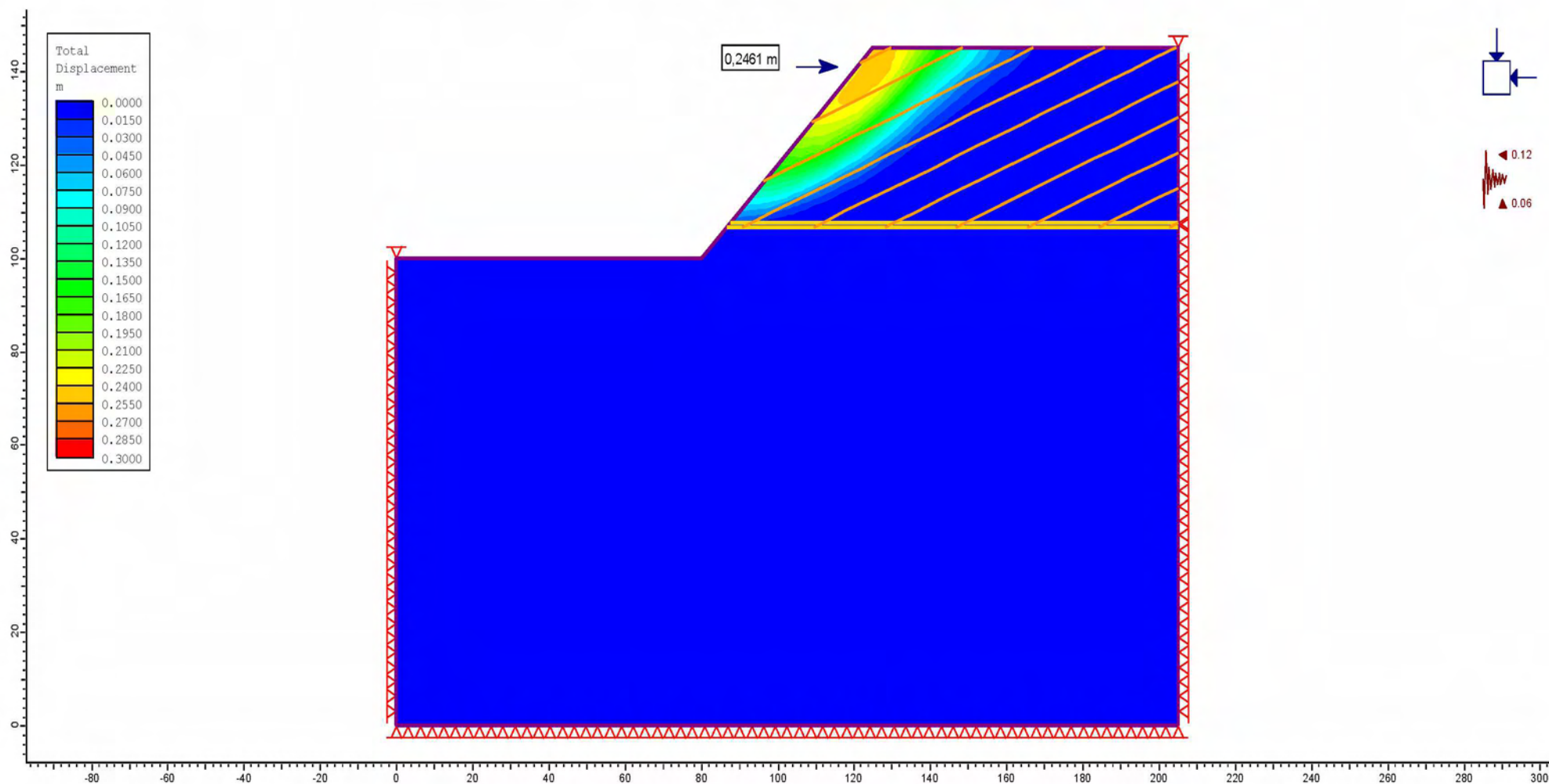
Εικόνα Π3: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου και δύο οικογένειες ασυνεχειών, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0977 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



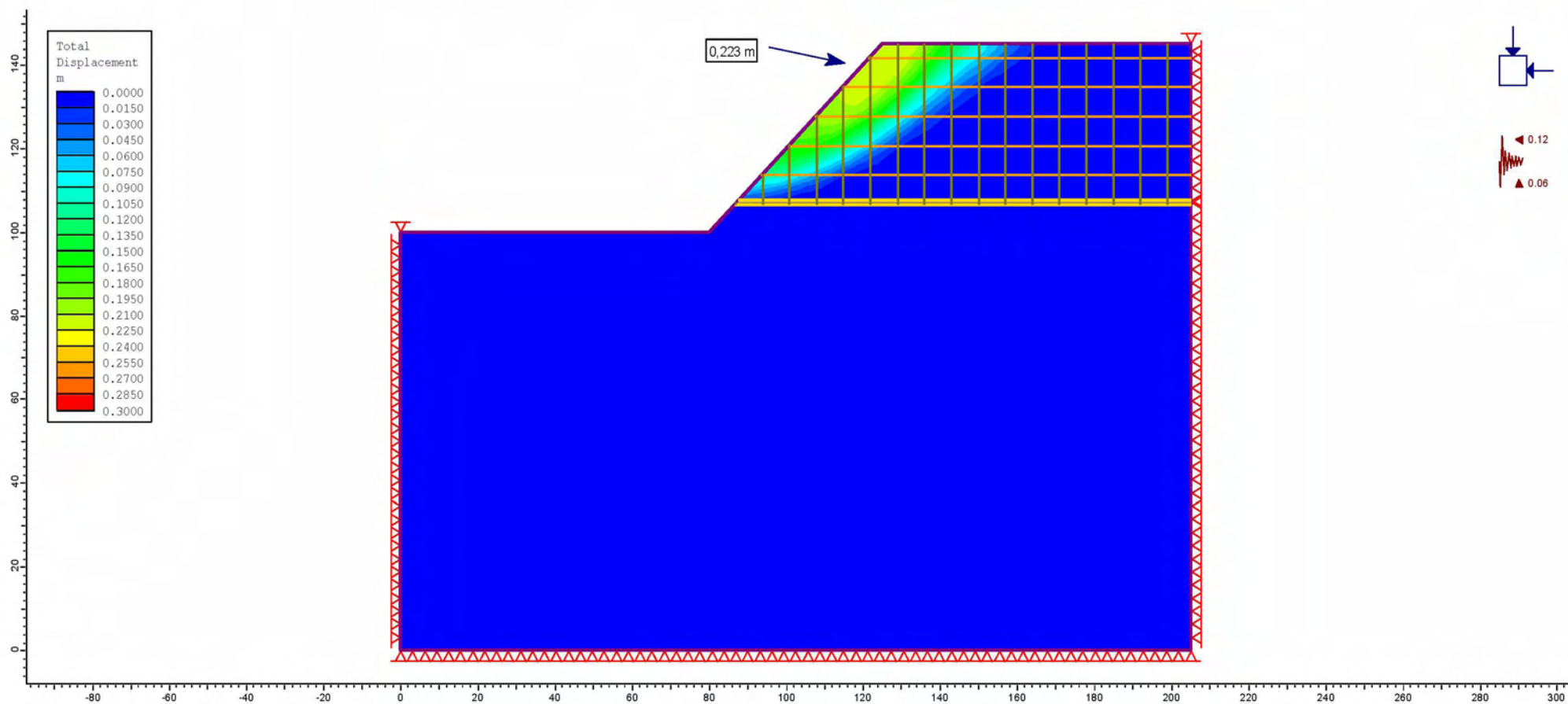
Εικόνα Π4: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1035 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



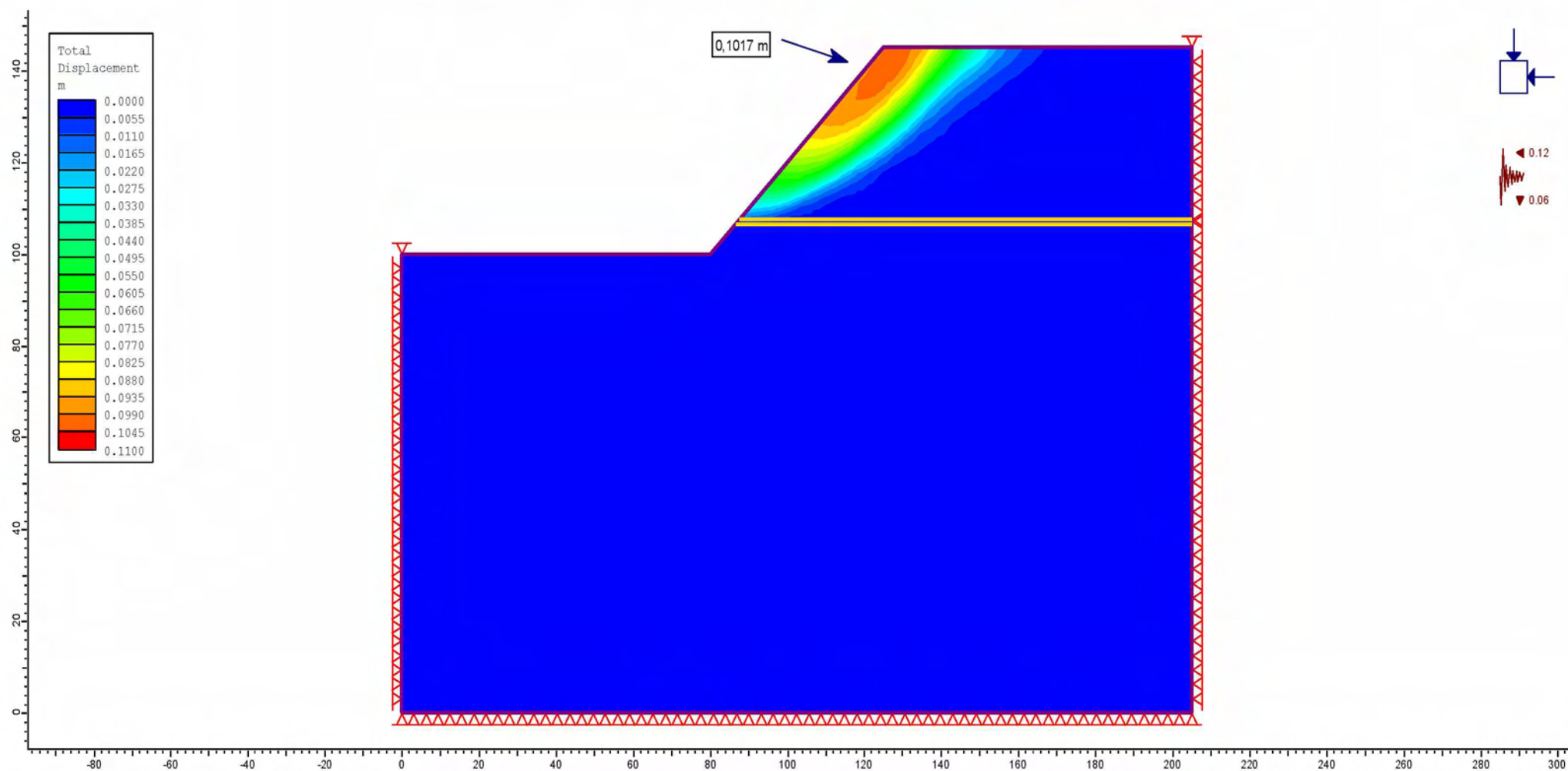
Εικόνα Π5: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2461 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



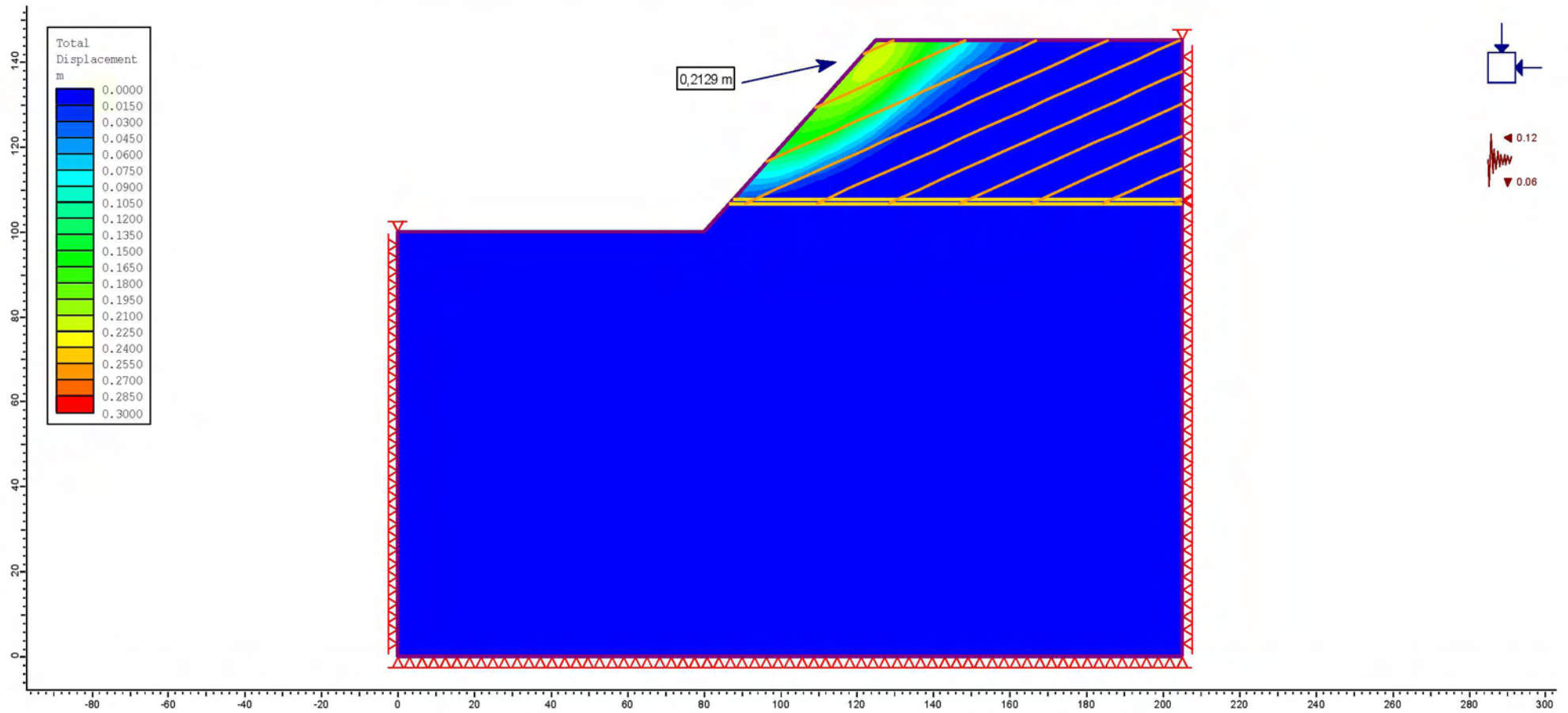
Εικόνα Π6: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,223 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



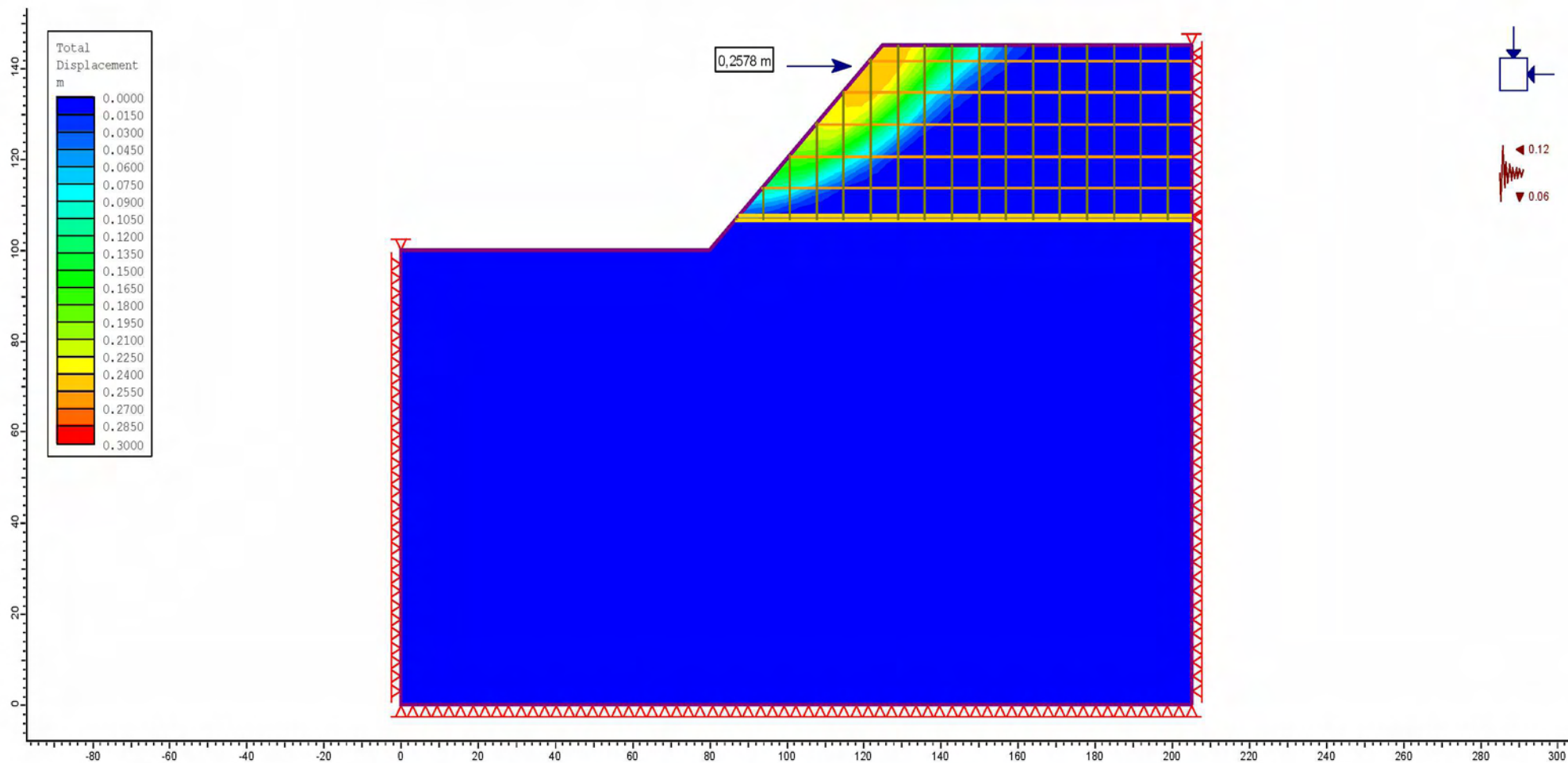
Εικόνα Π7: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1017 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



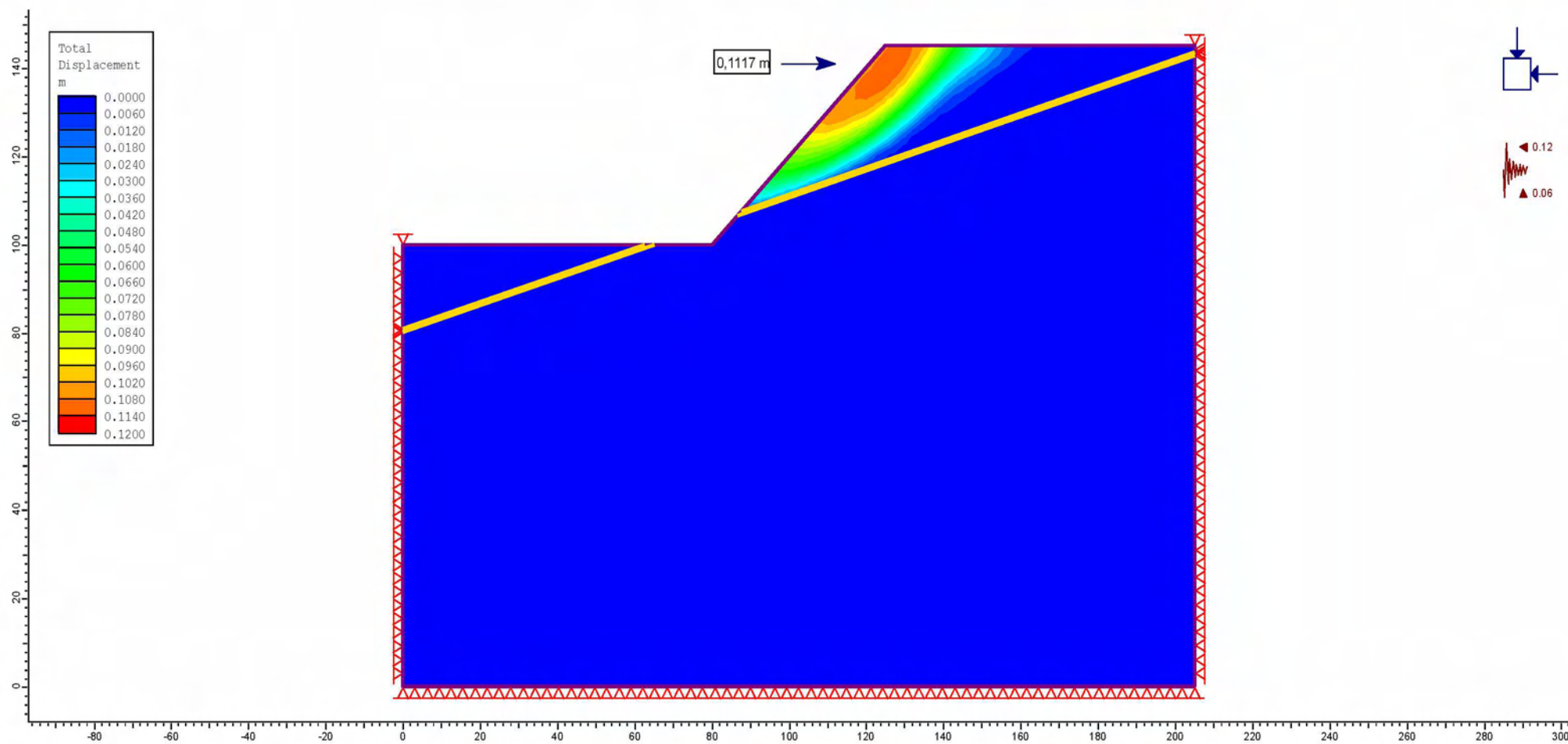
Εικόνα Π8: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2129 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



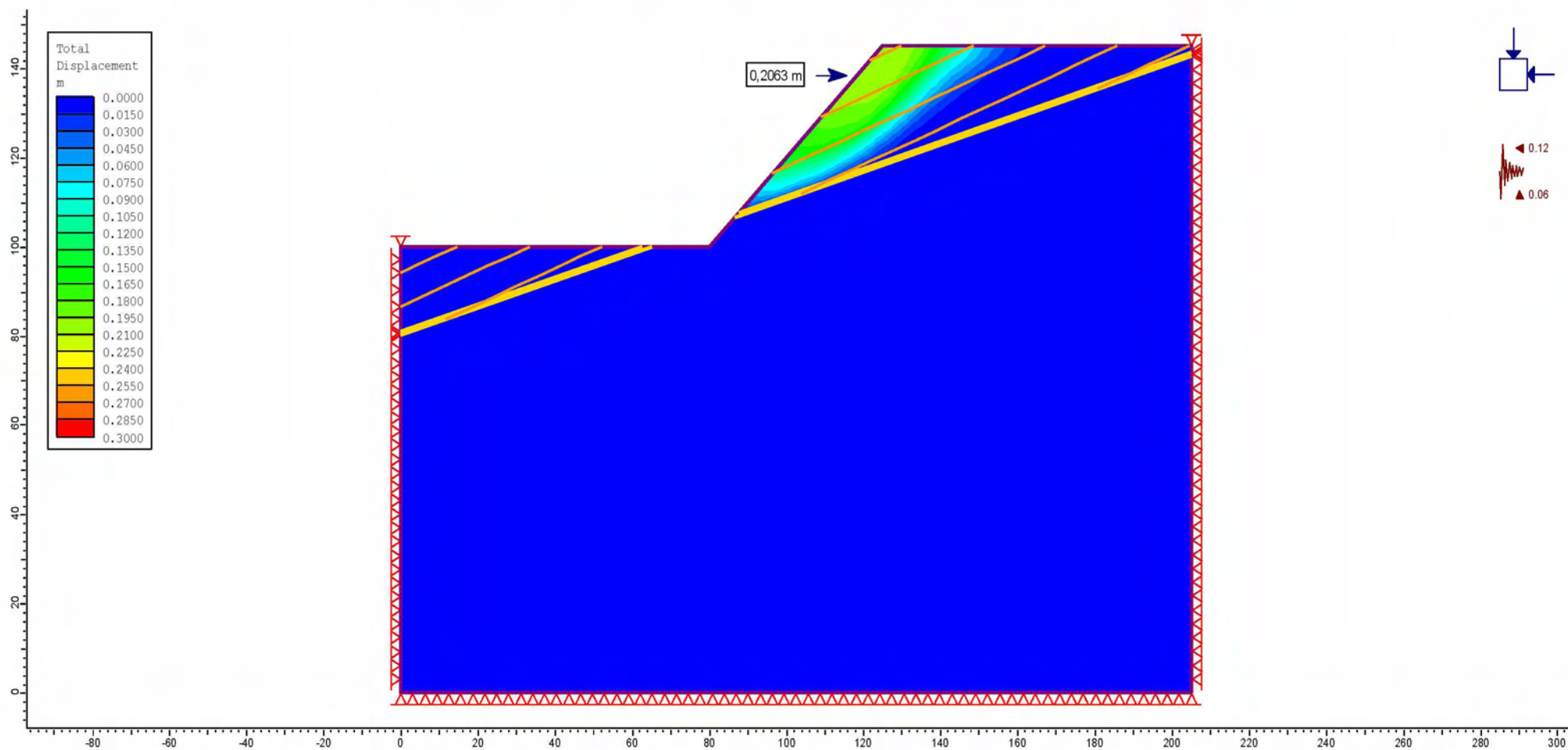
Εικόνα Π9: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2578 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



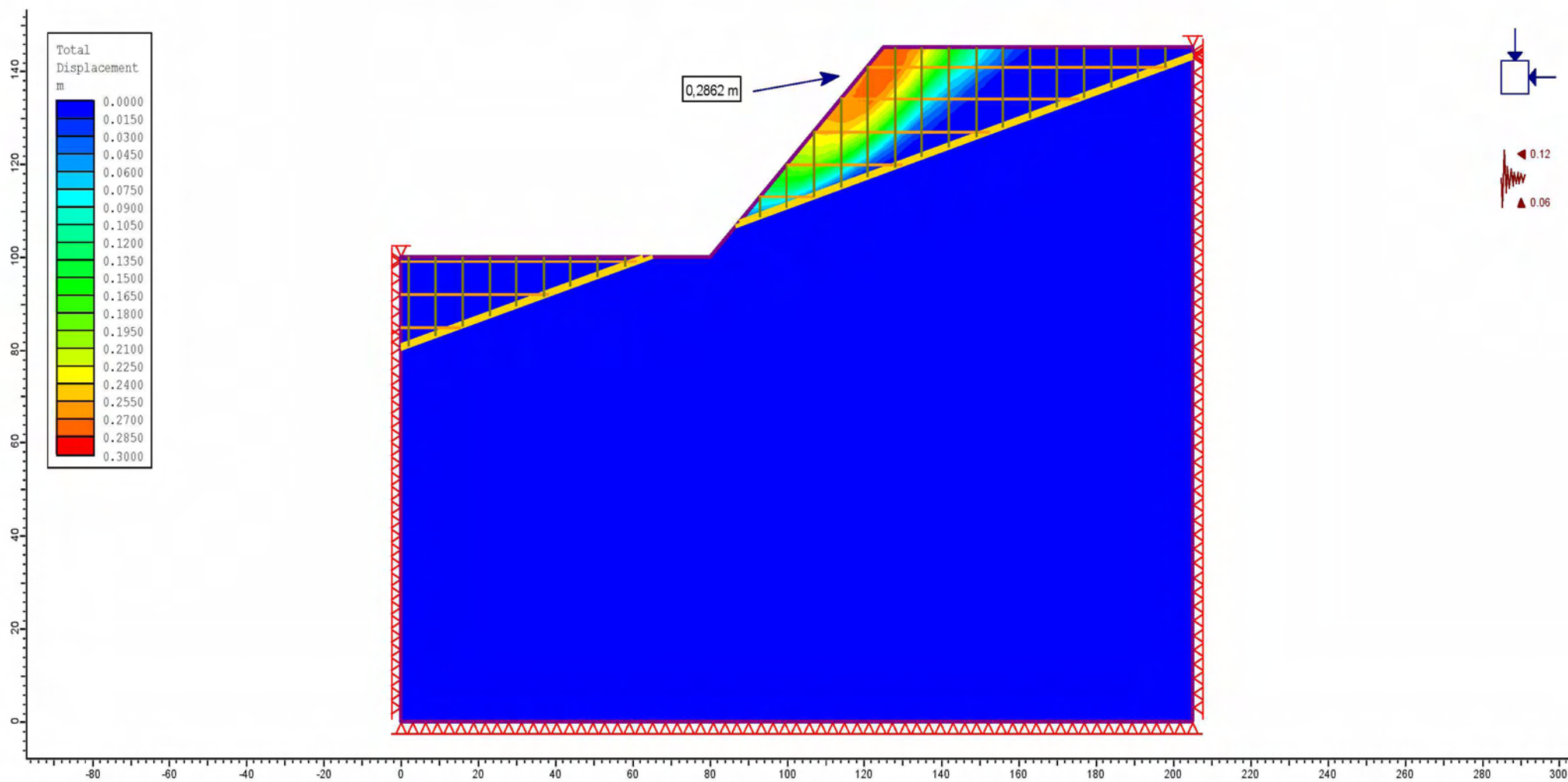
Εικόνα Π10: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1117 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



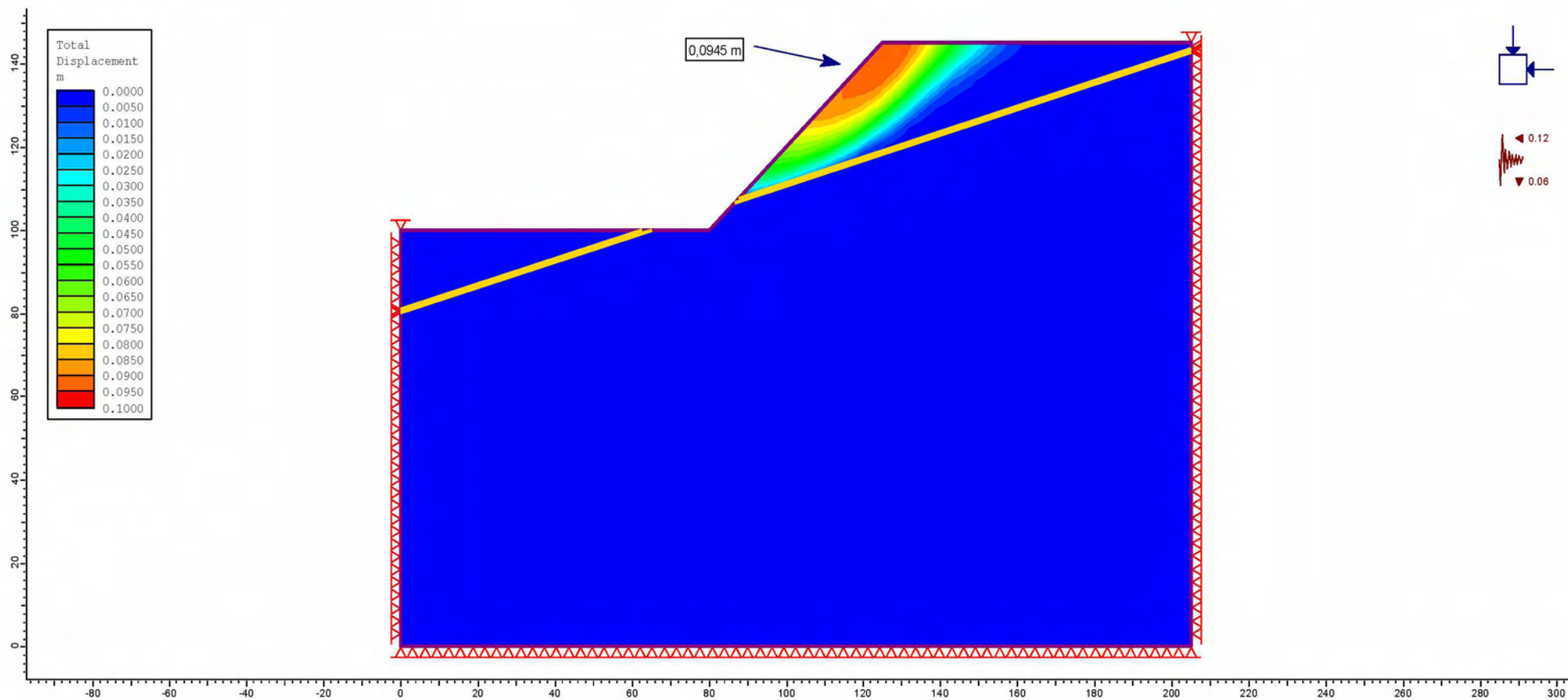
Εικόνα Π11: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2063 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



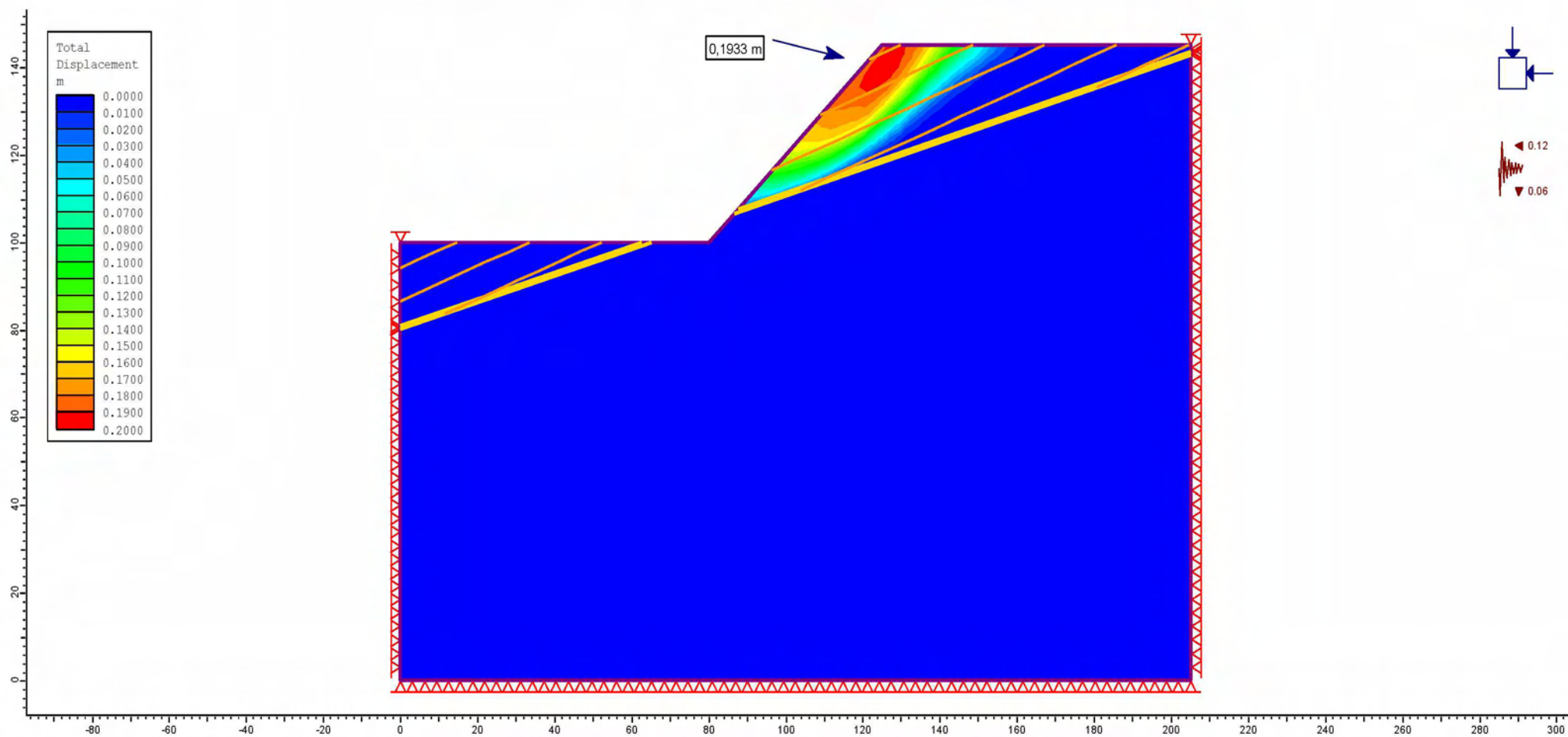
Εικόνα Π12: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2862 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



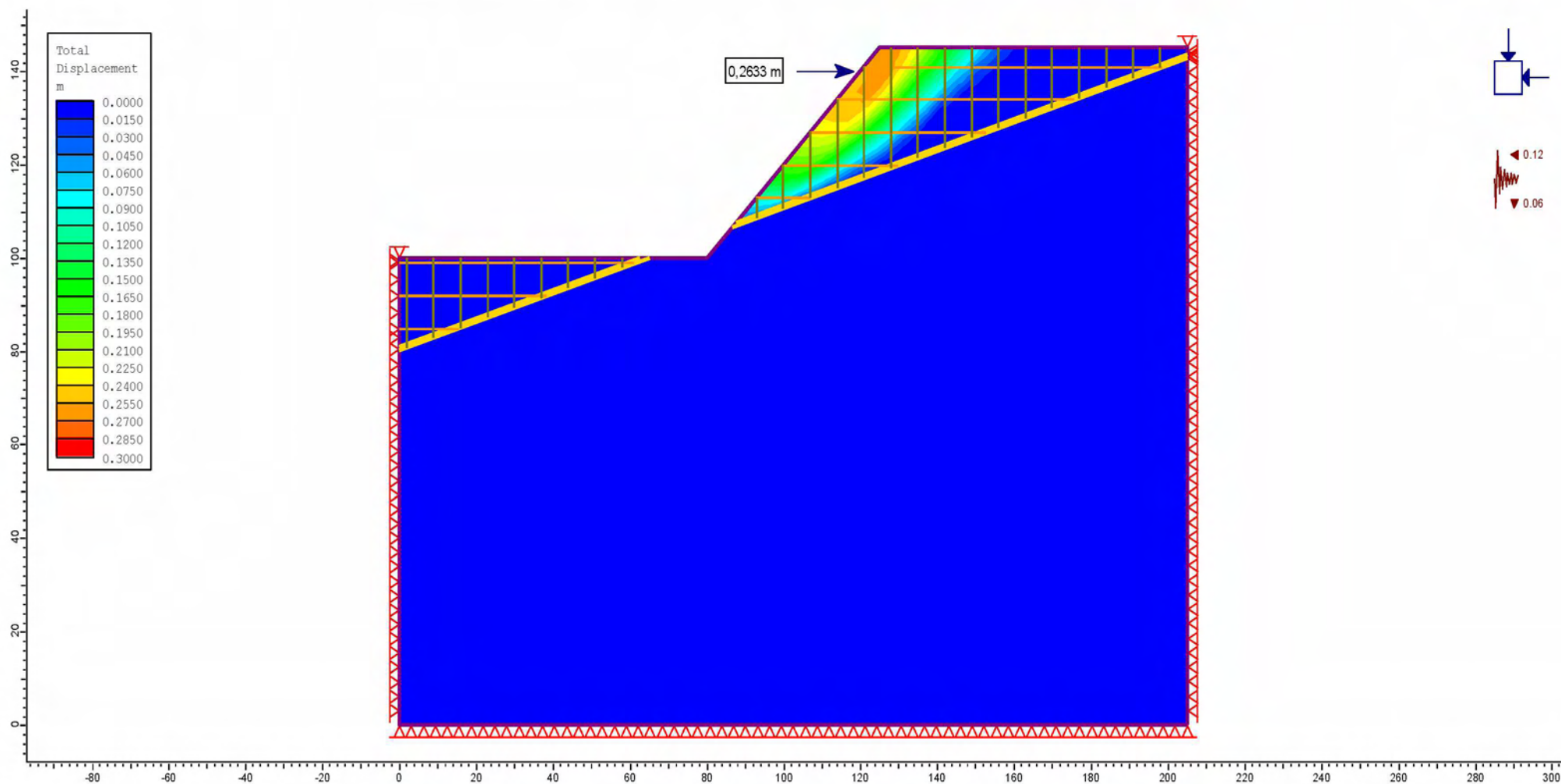
Εικόνα Π13: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0945 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



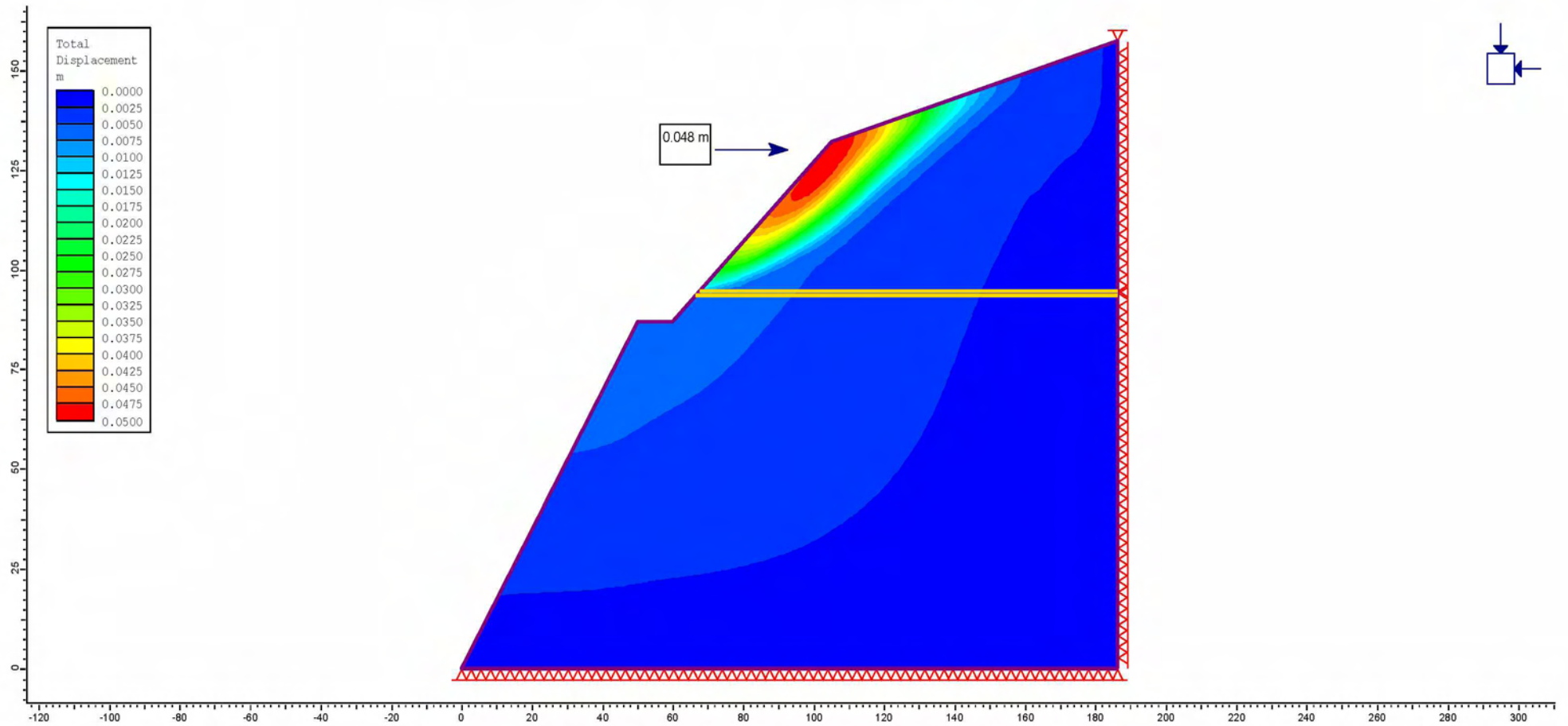
Εικόνα Π14: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1933 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



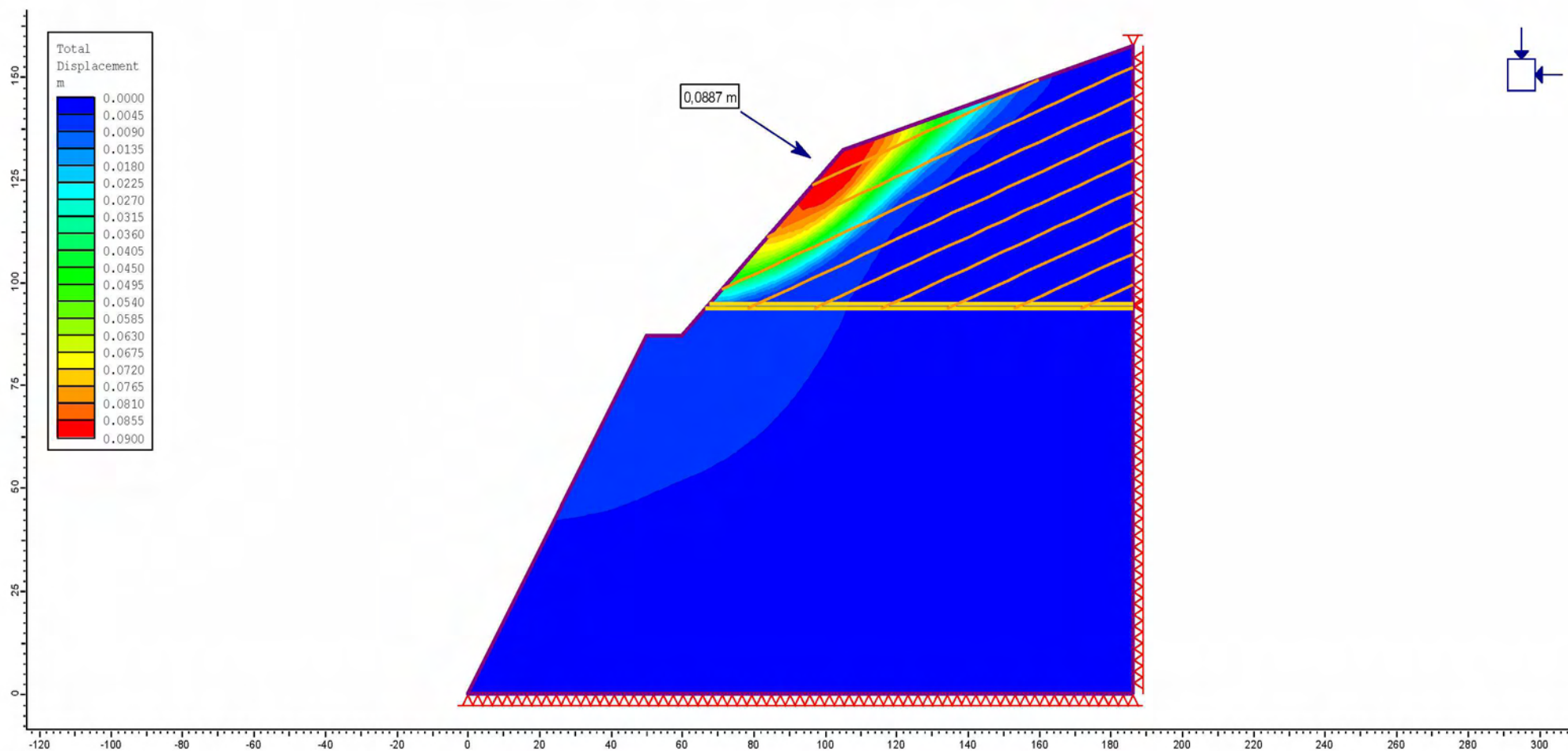
Εικόνα Π15: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο απλουστευμένο μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2633 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



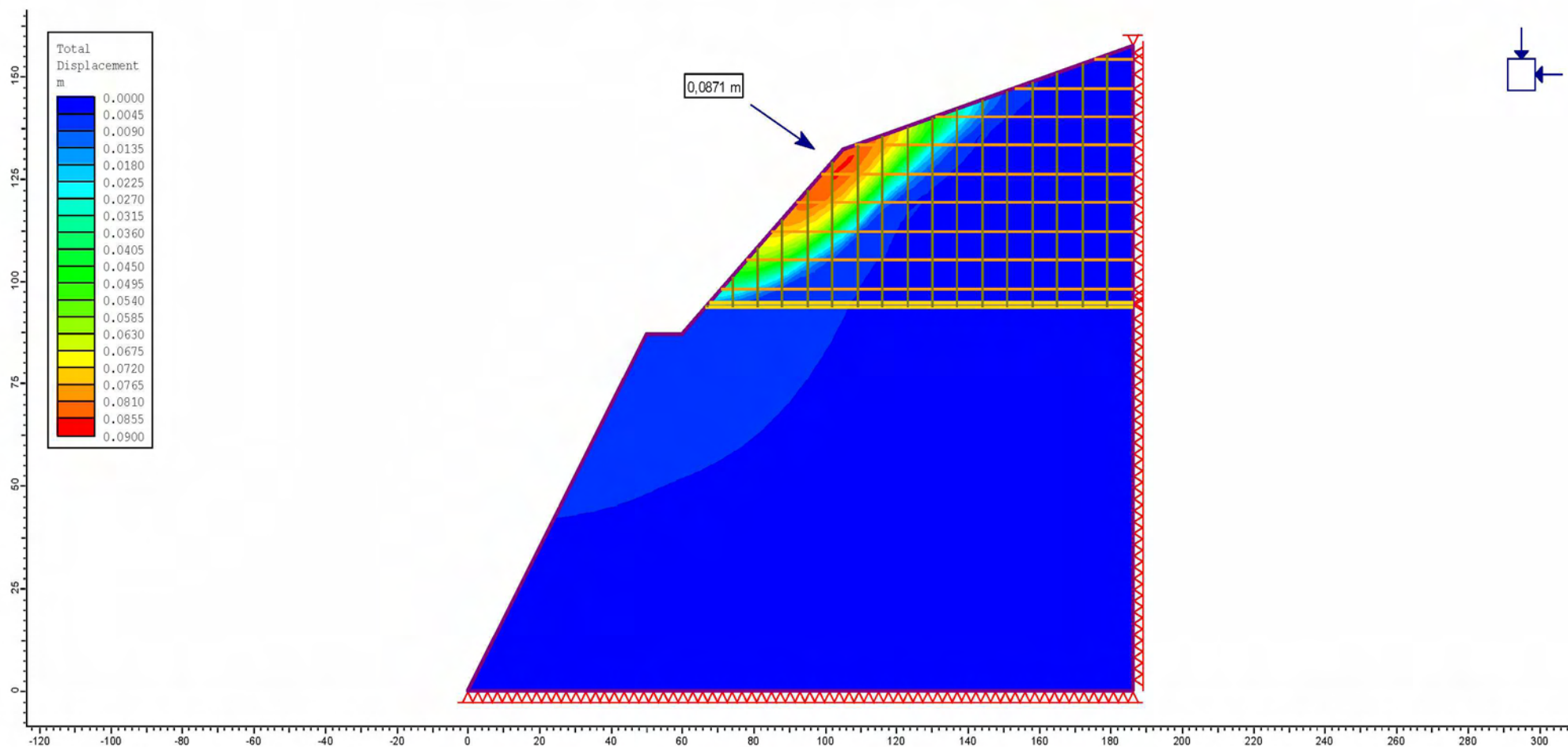
Εικόνα Π16: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,048 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



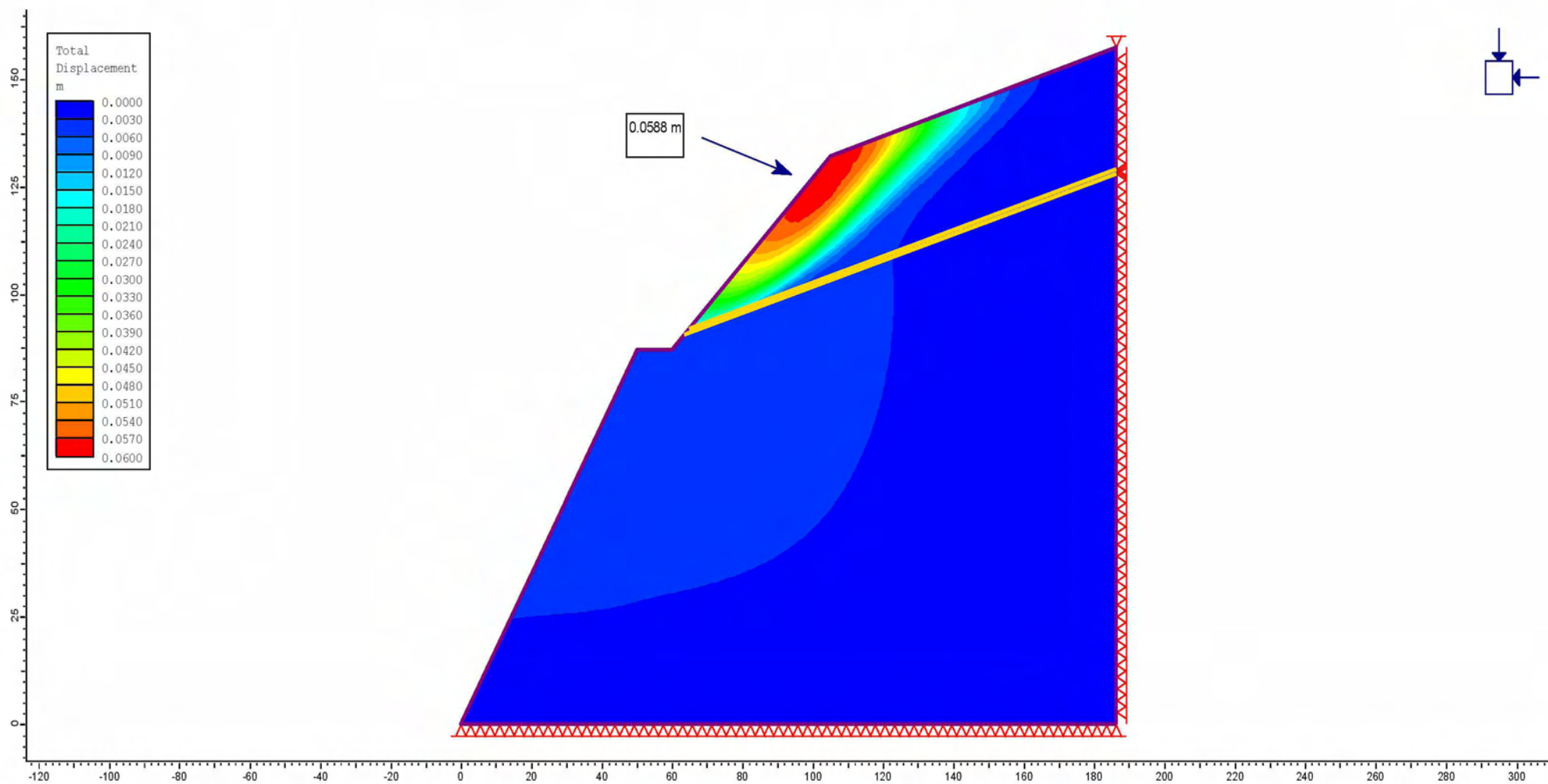
Εικόνα Π17: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0887 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



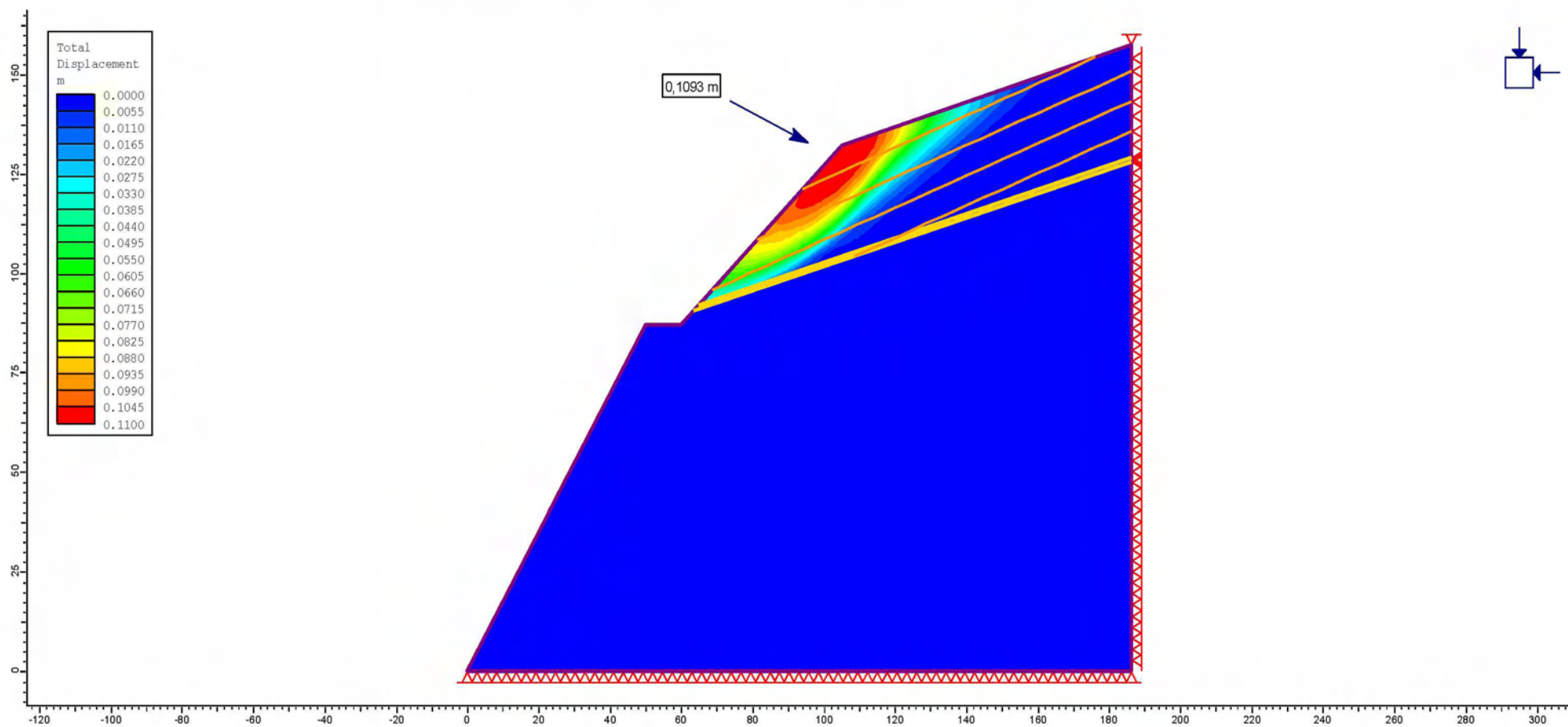
Εικόνα Π18: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0871 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



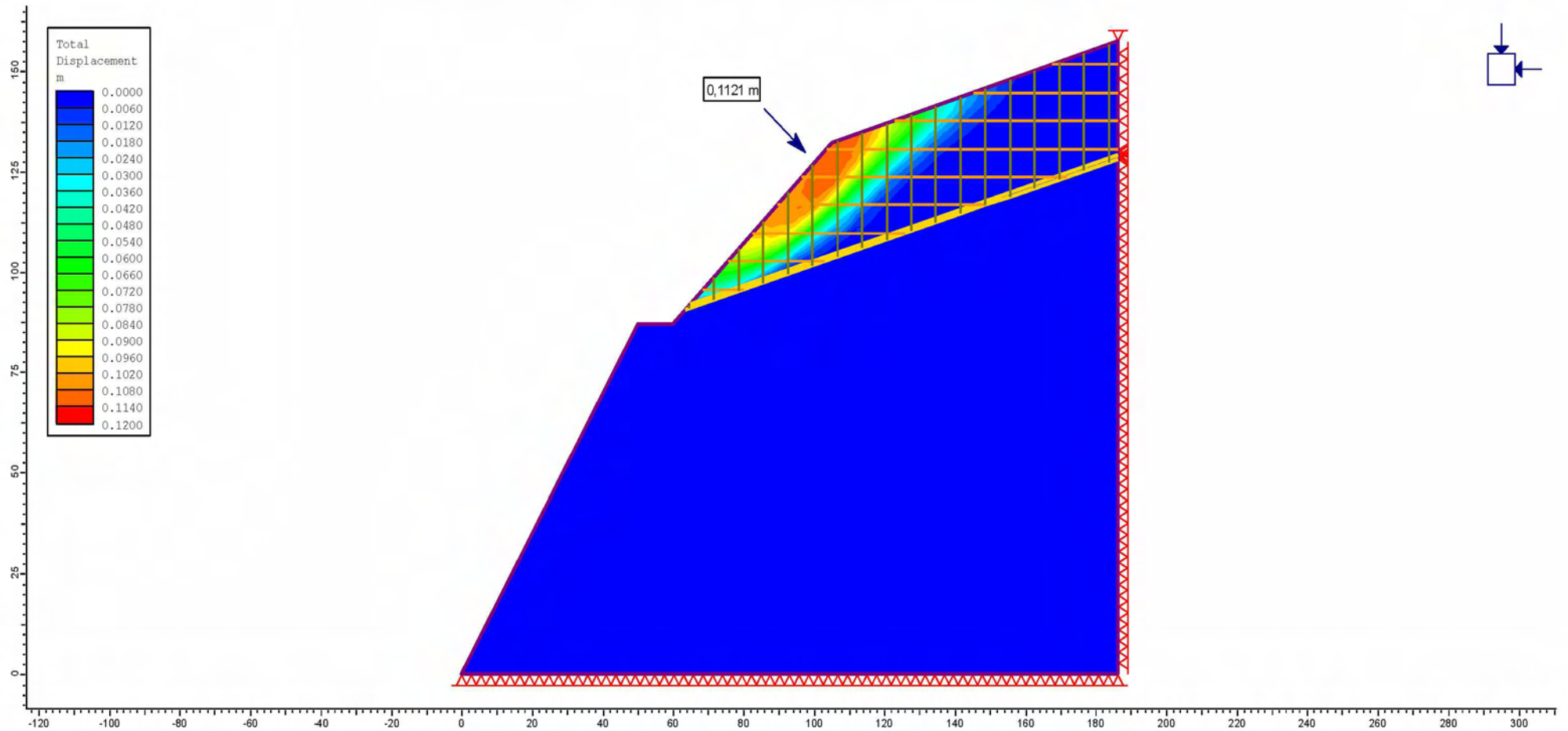
Εικόνα Π19: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,0588 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγρή βραχώμαζα



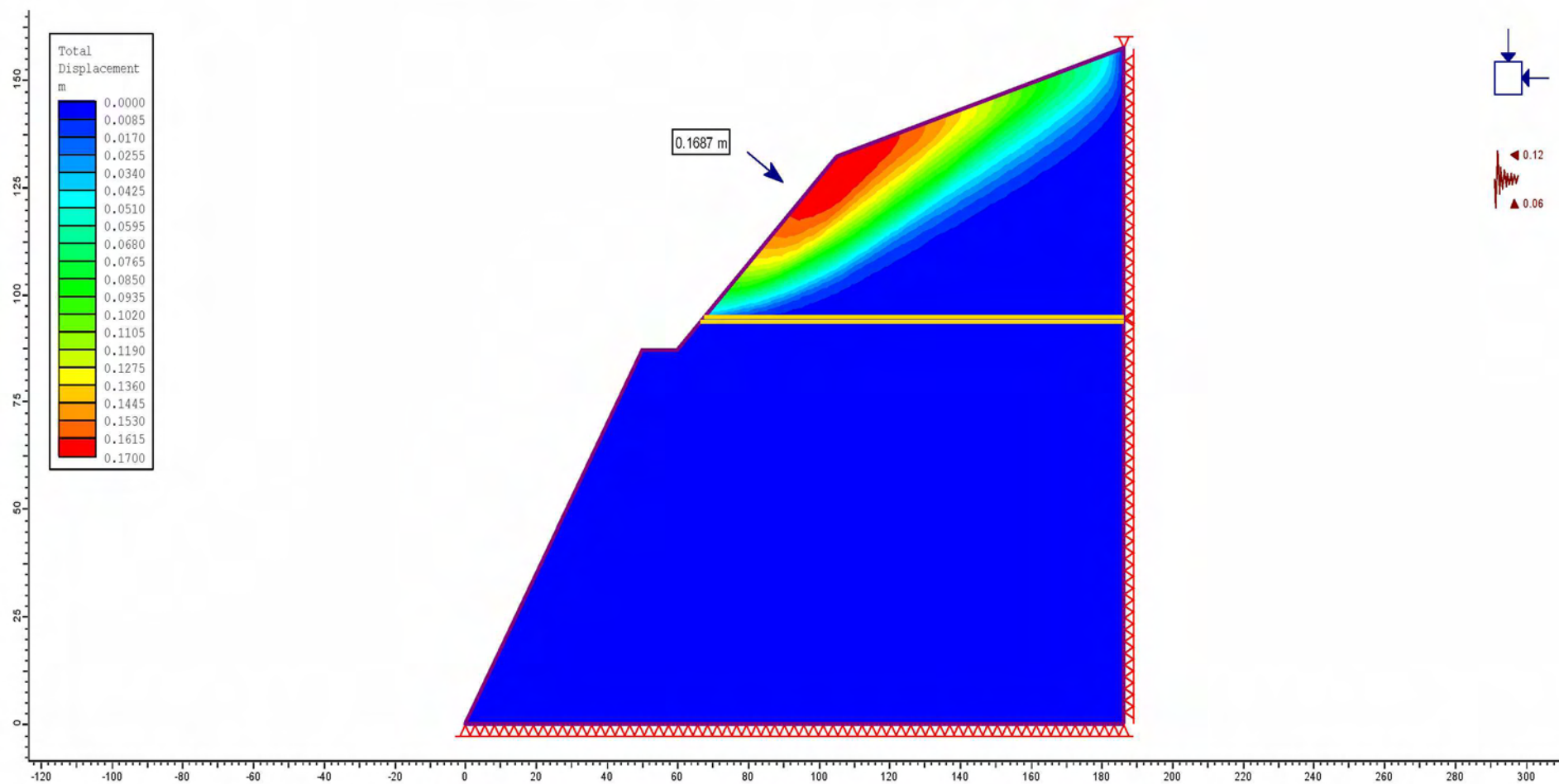
Εικόνα Π20: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1093 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



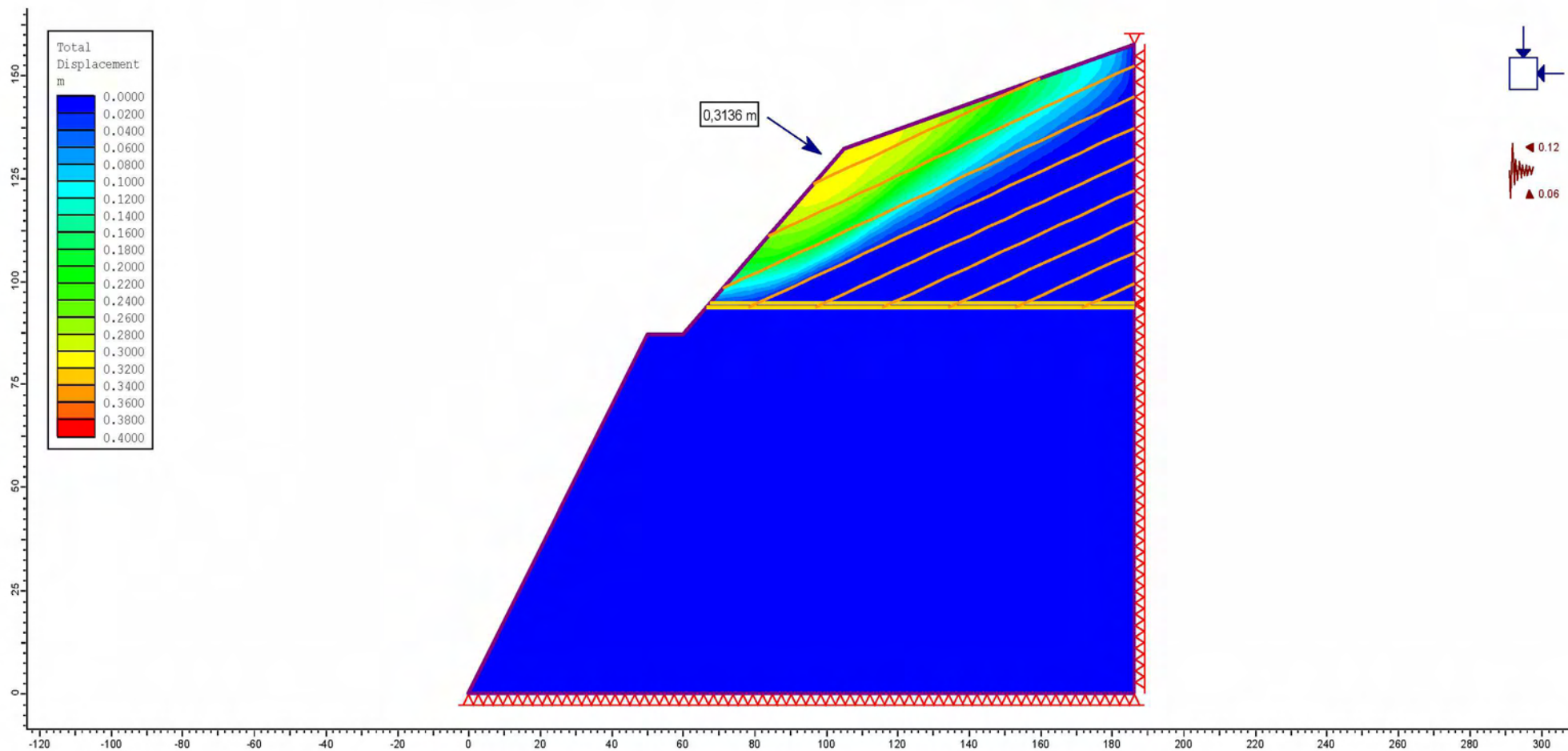
Εικόνα Π21: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1121 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



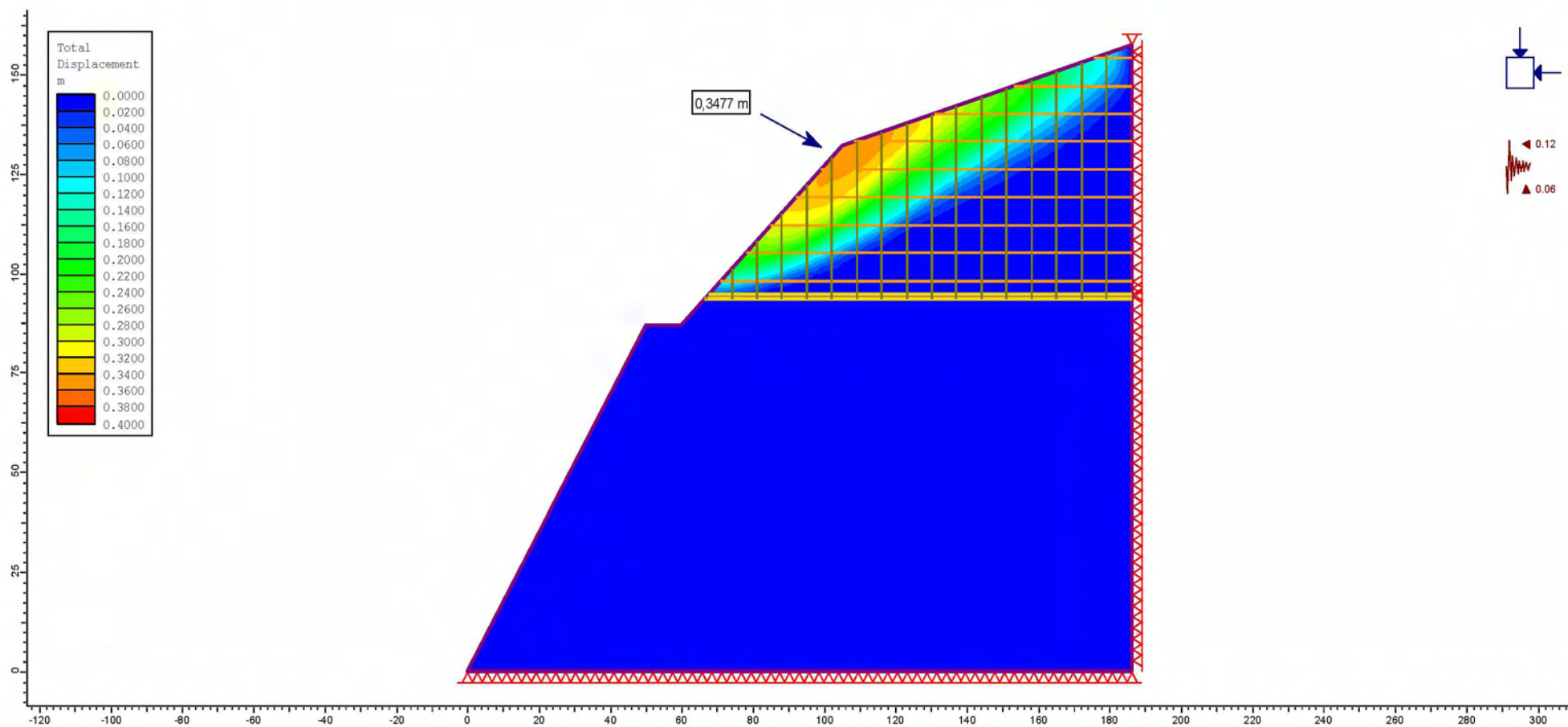
Εικόνα Π22: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1687 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



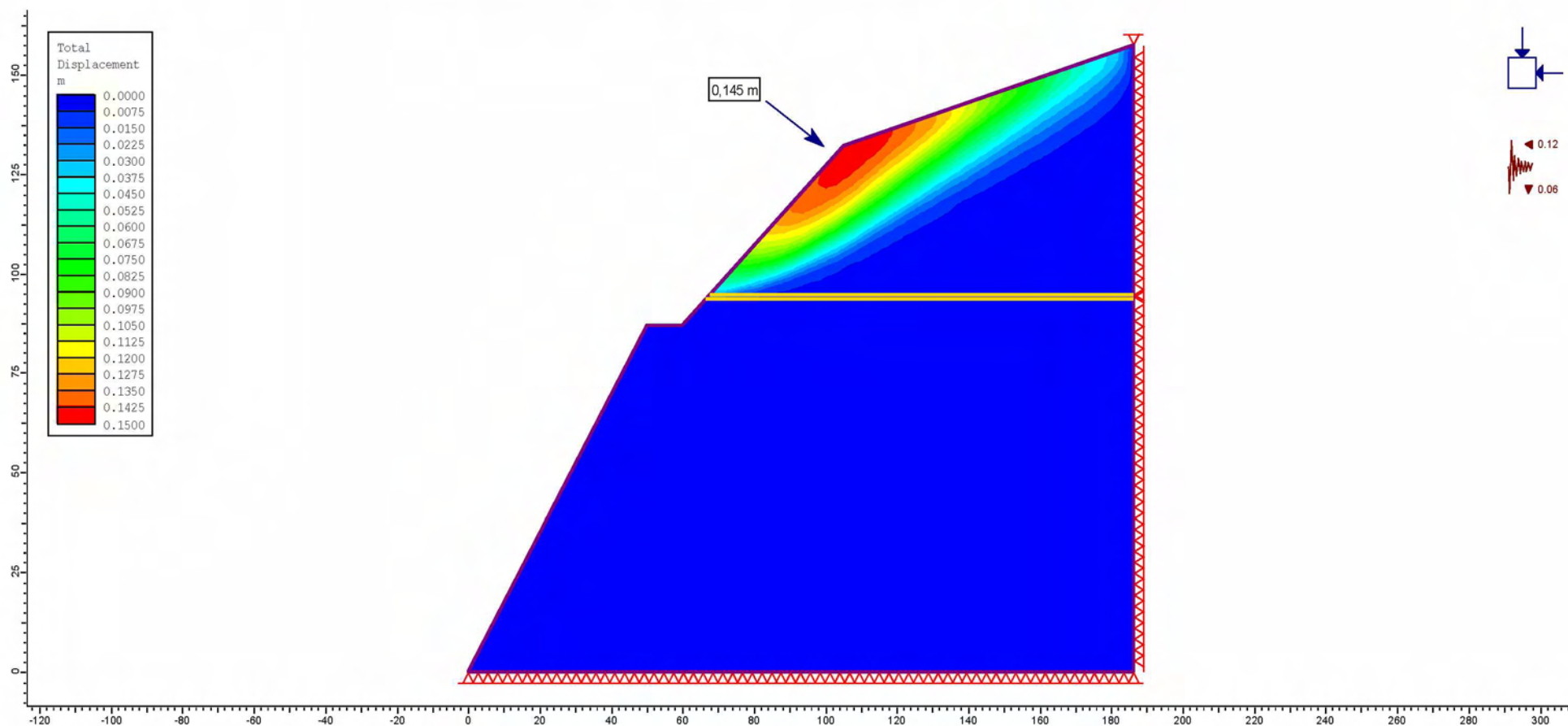
Εικόνα Π23: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3136 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



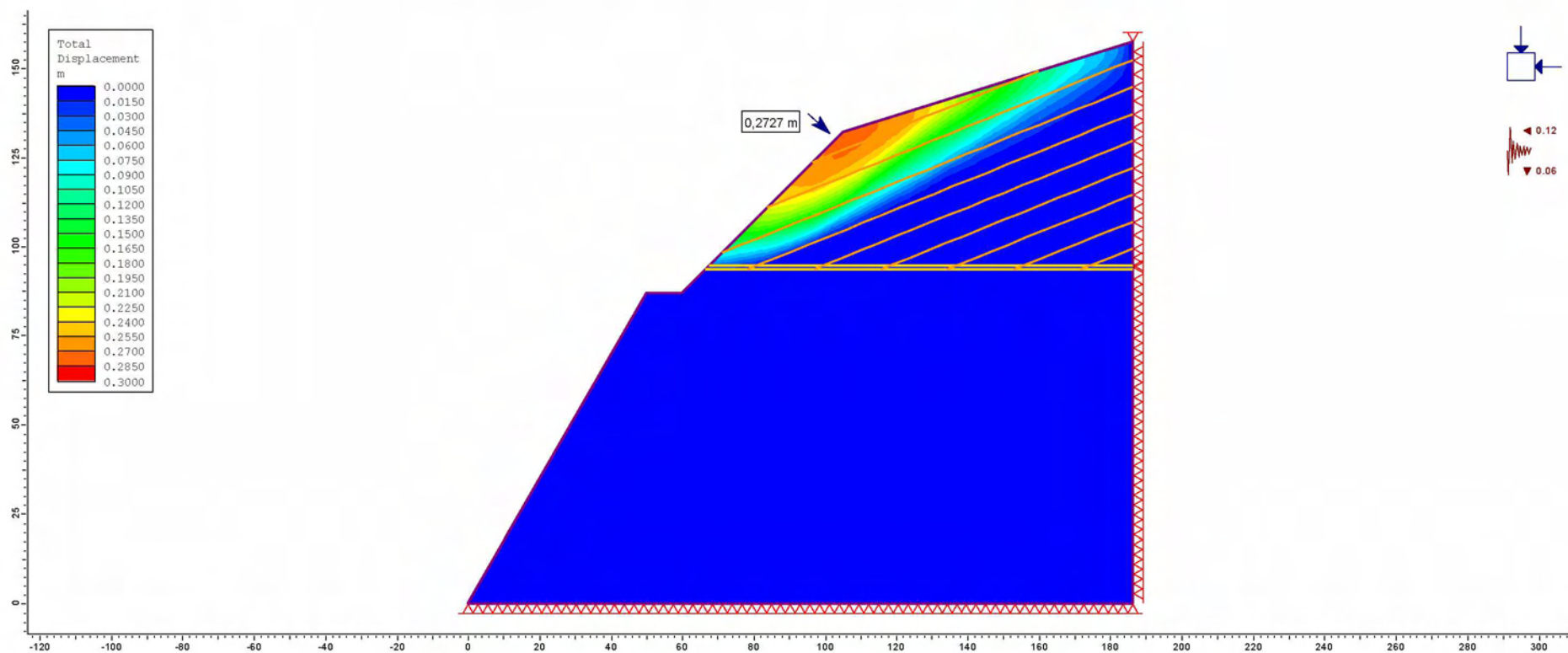
Εικόνα Π24: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3477 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



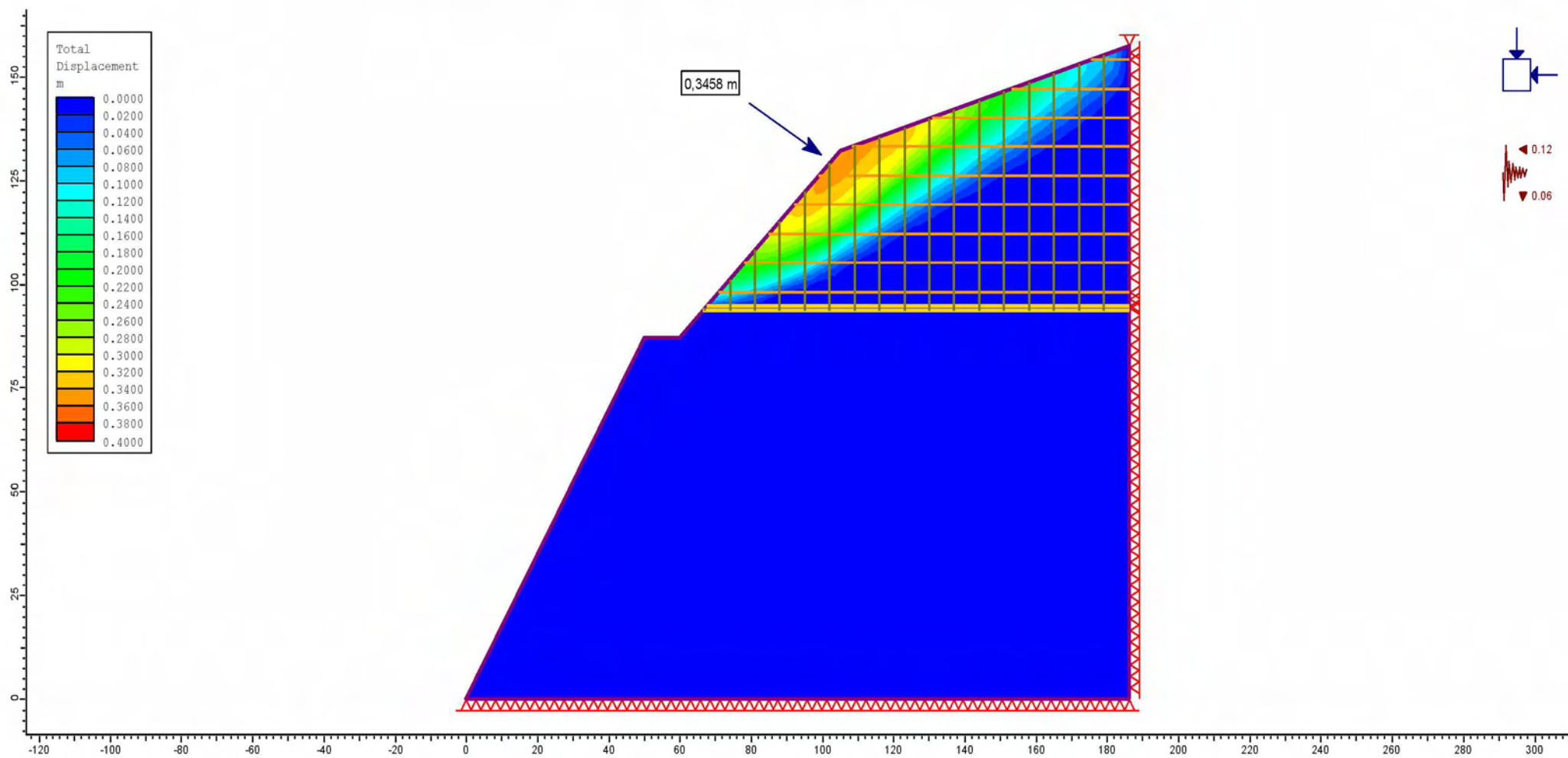
Εικόνα Π25: : Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,145 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



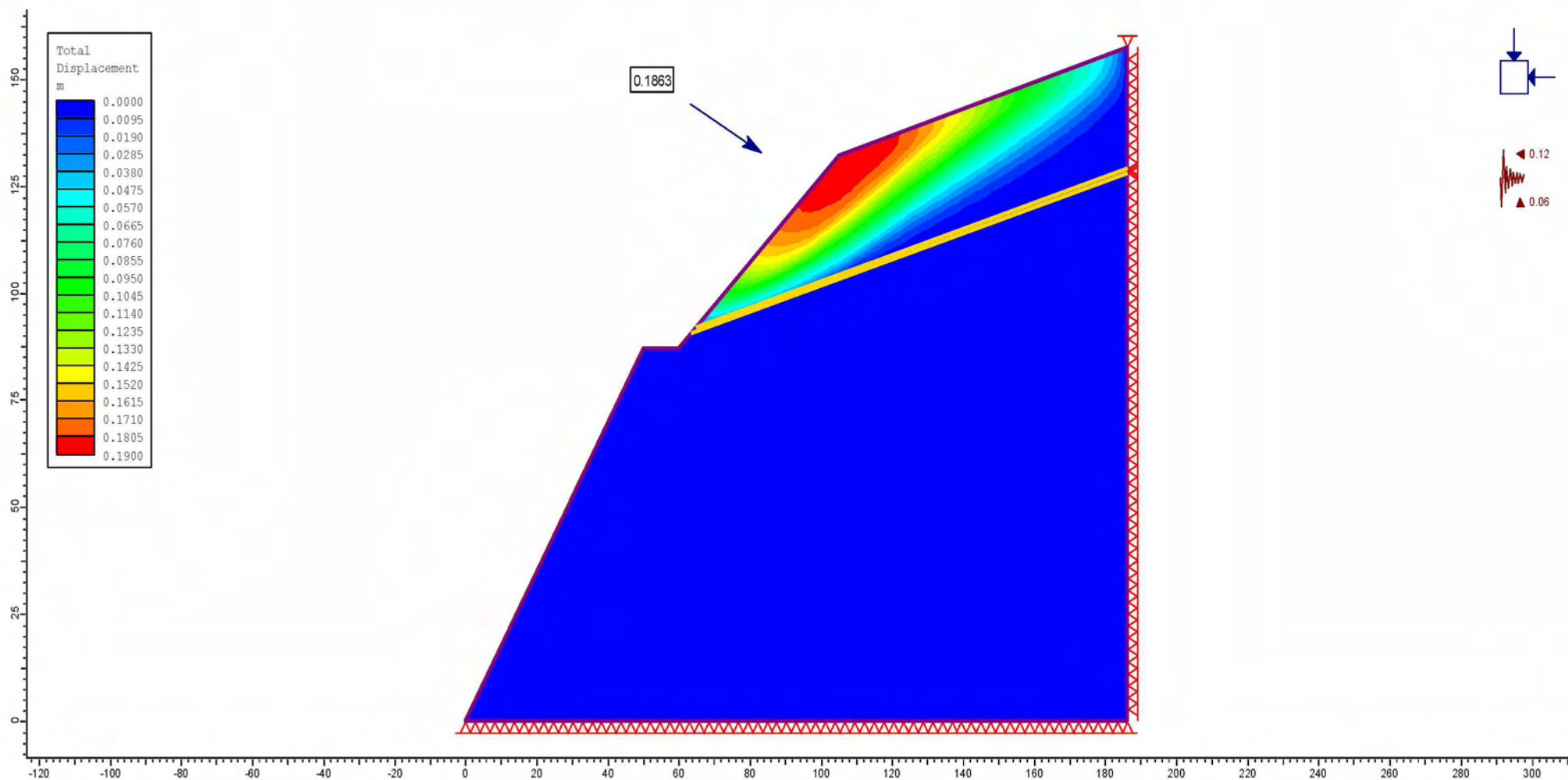
Εικόνα Π26: : Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,2727 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



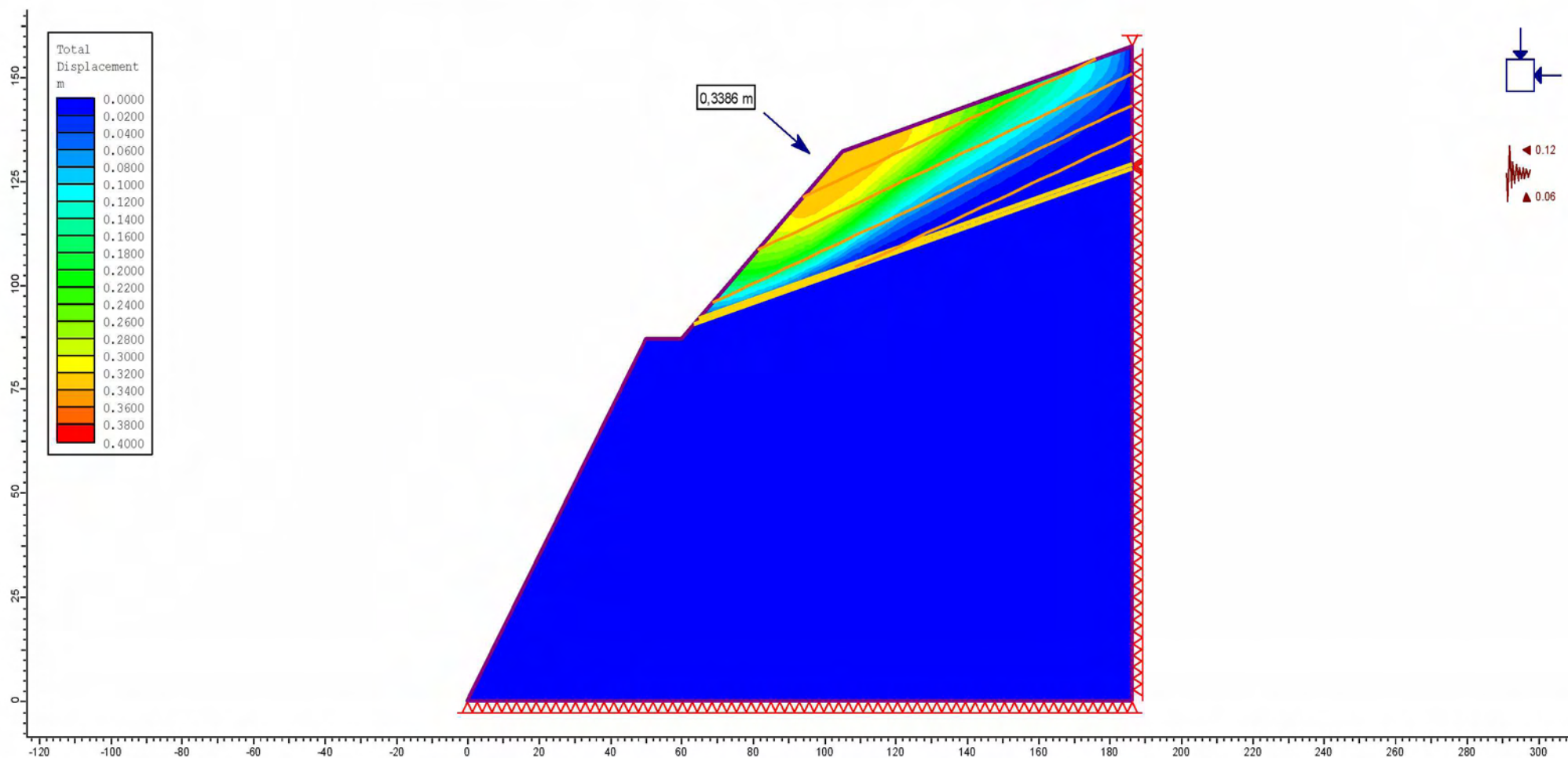
Εικόνα Π27: : Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με οριζόντιο στρώμα αποσθρωμένου σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3458 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



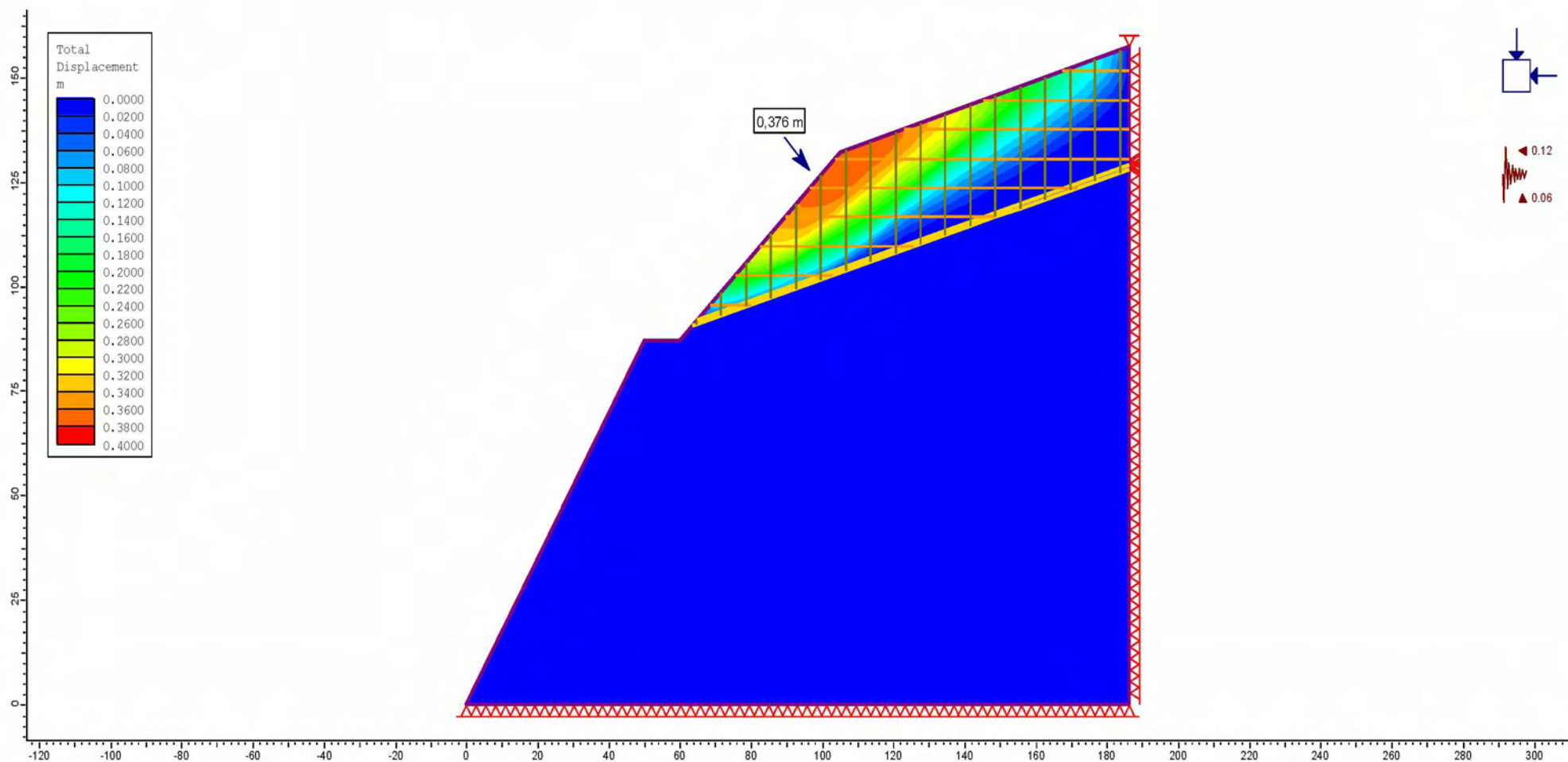
Εικόνα Π28: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1863 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



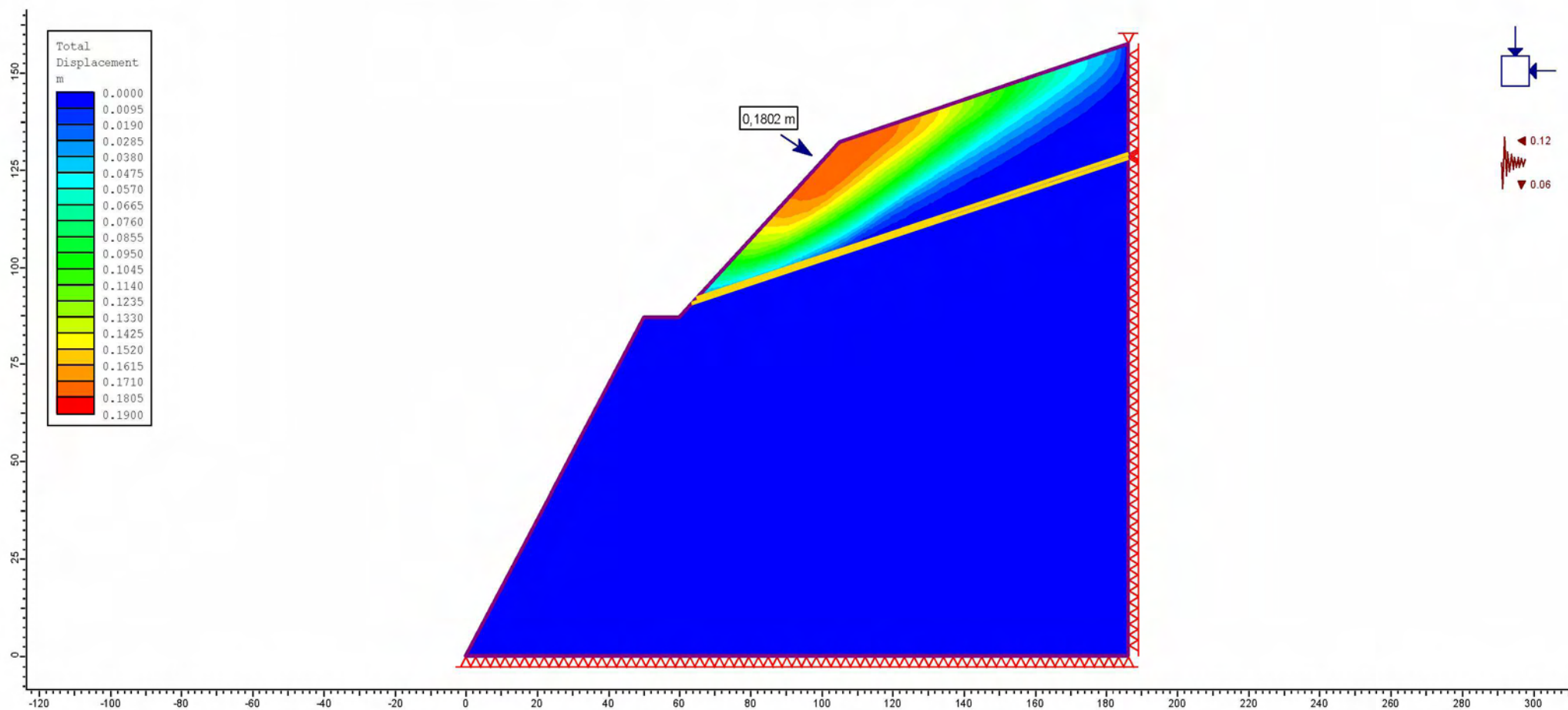
Εικόνα Π29: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3386 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



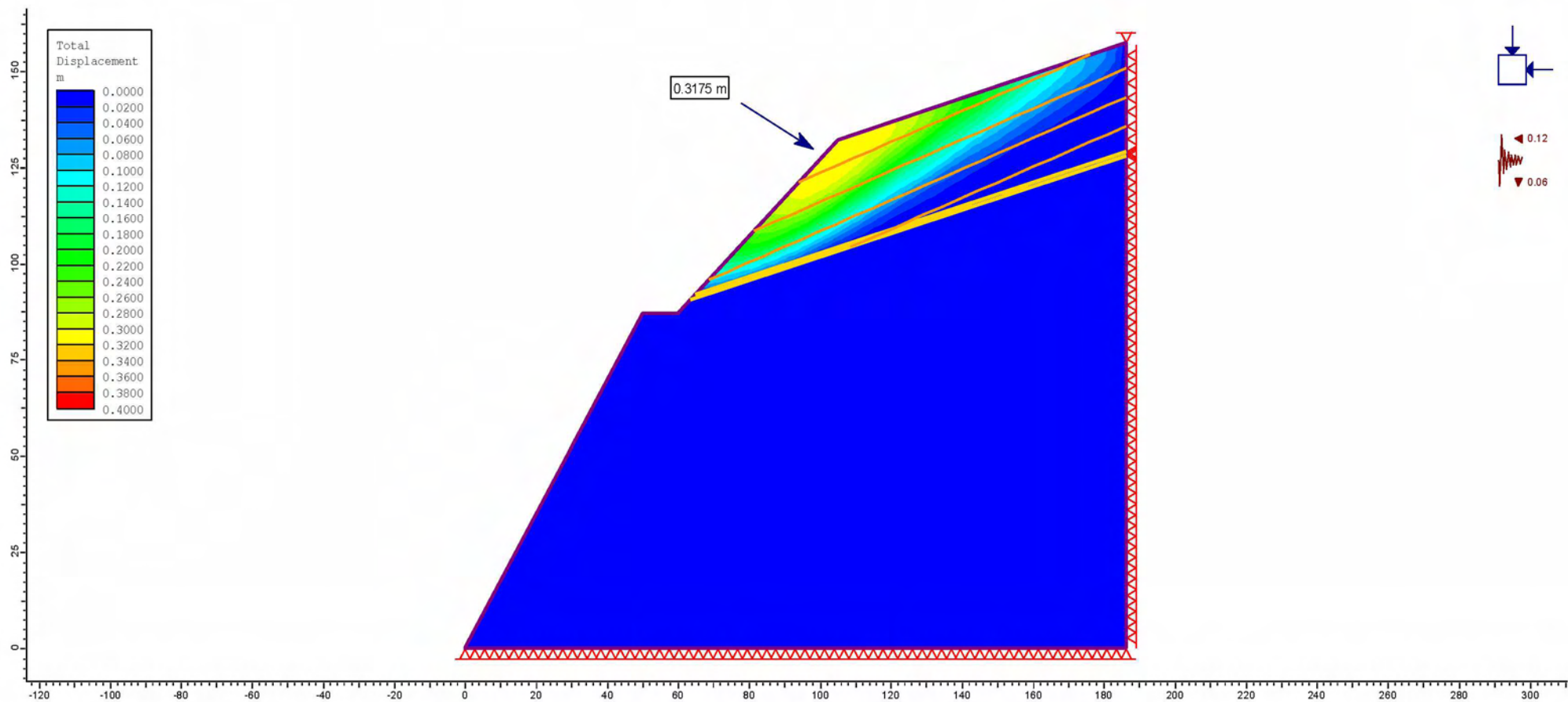
Π30: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με θετική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,376 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



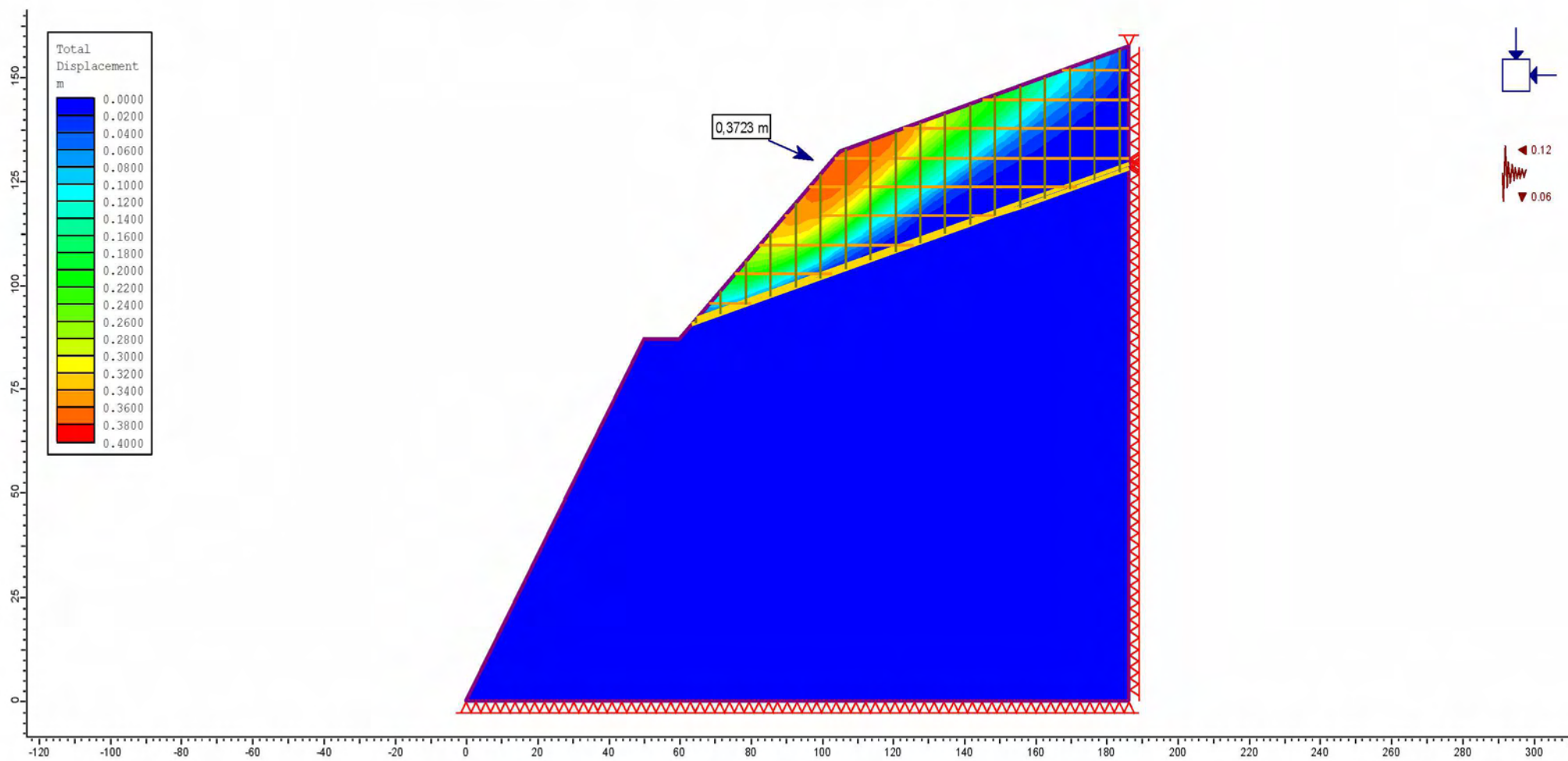
Εικόνα Π31: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,1802 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



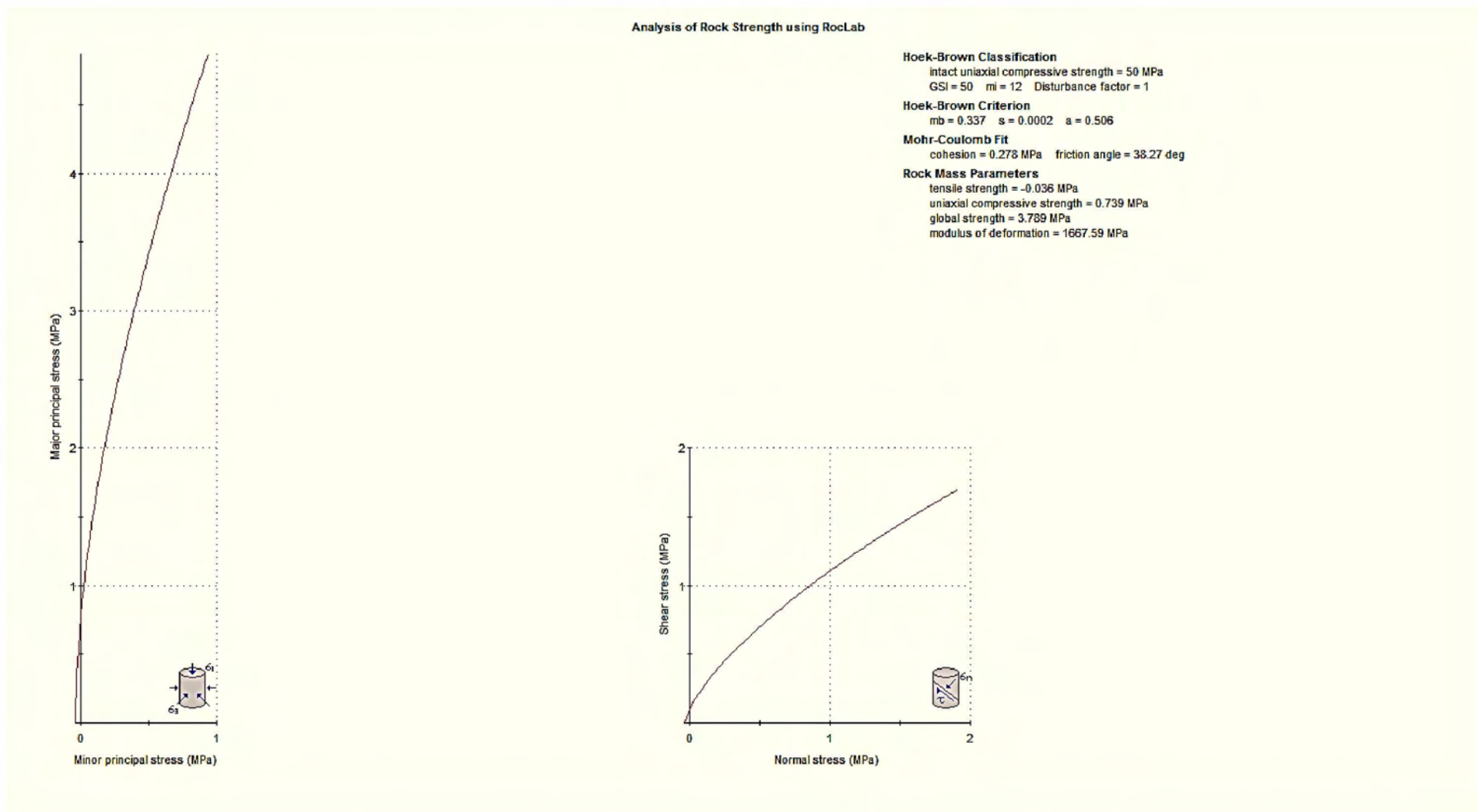
Εικόνα Π32: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσαθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, μία οικογένεια ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3175 m

$r_u=0.15$ αποσθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



Εικόνα Π33: Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων στο ρεαλιστικό μοντέλο, με κεκλιμένο αποσθρωμένο στρώμα σχιστόλιθου, δύο οικογένειες ασυνεχειών, υπό σεισμό με αρνητική κατακόρυφη συνιστώσα, και εύρεση μέγιστης τιμής 0,3723 m

$r_u=0.15$ αποσαθρωμένα στρώματα και $r_u=0,08$ στην υγιή βραχώμαζα



Εικόνα Π34: Εύρεση παραμέτρων μηχανικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας, με τη χρήση του προγράμματος Roclab [13]