

# Μελέτη των Μετακινήσεων των Πρανών Ορυγμάτων πριν από την Αστοχία.

## A Study on the pre-failure Displacements of an Excavated Slope.

ΓΑΚΗΣ, Α.  
ΤΣΟΤΣΟΣ, ΣΤ.

Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Imperial College, Υπ. Διδάκτορας Α.Π.Θ.  
Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στη παρούσα εργασία μελετώνται οι μετακινήσεις που παρατηρούνται στα πρανή των ορυγμάτων και ειδικότερα η σχέση του μεγέθους τους με την τιμή του συντελεστή ασφαλείας (FOS). Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο Hardening (κρατυνόμενο ελαστοπλαστικό μοντέλο, με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb). Τα αποτελέσματα της εργασίας επιτρέπουν μετά από κατάλληλη σύνθεση, αφενός την μελέτη της εξέλιξης του μηχανισμού αστοχίας, παρακολουθώντας την προσέγγιση του FOS στην οριακή τιμή 1.00, και αφετέρου την διερεύνηση της επιρροής επί του μεγέθους των μετακινήσεων, διάφορων εμπλεκόμενων γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων.

**ABSTRACT :** The displacements observed in excavated slopes and especially the relationship of their magnitude to the factor of safety (FOS) are examined in this paper. A finite elements code, Plaxis, and more specifically the Hardening Soil model (a hardening elastoplastic model, with Mohr-Coulomb failure criterion) were used for the analysis. The results of this work, after the appropriate processing, allow for the study of the evolution of the failure mechanism as the FOS approaches the limiting value 1.00 and the investigation of the effect of various geotechnical and geometrical parameters on the magnitude of the displacements.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, τις περισσότερες φορές περιορίζεται ακόμη και σήμερα στον υπολογισμό ενός στατικού συντελεστή ασφαλείας (F.O.S.) με μεθόδους οριακής ισορροπίας. Τούτο, παρά το ότι με τη διάδοση και την εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων, δίνεται πλέον η δυνατότητα υπολογισμού και των αντίστοιχων μετακινήσεων. Στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των μετακινήσεων που εκδηλώνονται σε ένα πρανές ορύγματος πριν την αστοχία, με το συντελεστή ασφαλείας.

Η τυπική γεωμετρία του υπό μελέτη πρανού, καθώς και οι κύριες υπολογισθείσες μετακινήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Τυπική γεωμετρία πρανού και κύριες μετακινήσεις.

Figure 1. Typical slope geometry with the main displacements.

### 2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στη μελέτη που ακολουθεί, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Hardening (HSM) του κώδικα Plaxis. Το HSM (Brinkgreve & Vermeer 2006) είναι ένα κρατυνόμενο ελαστοπλαστικό μοντέλο που βασίζεται στο γνωστό μοντέλο των Duncan and Chang (Duncan & Chang 1970, Chang & Duncan

1970, Duncan 1996), με την προσθήκη της θεωρίας πλαστικότητας αντί της απλής ελαστικότητας και της διασταλτικότητας των υλικών και εισάγοντας μία επιπρόσθετη επιφάνεια (yield cap) η οποία περιορίζει την ελαστική περιοχή της επιφάνειας διαρροής κατά τον άξονα των  $p'$ . Σε αντίθεση με το τέλεια πλαστικό μοντέλο, η επιφάνεια διαρροής δεν είναι αυστηρά καθορισμένη στον χώρο των κύριων τάσεων, αλλά μεταβάλλεται με τις πλαστικές παραμορφώσεις. Η αστοχία ελέγχεται με το κριτήριο Mohr-Coulomb (Schanz 1999, Brinkgreve & Vermeer 2006). Το HSM έχει βασικό πλεονέκτημα όσον αφορά στη μελέτη πρανών έναντι του Mohr-Coulomb, ότι χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας (αντί για ένα), με αποτέλεσμα να περιγράφεται πληρέστερα η συμπεριφορά στα διάφορα στάδια φόρτισης, πλησιάζοντας με ικανοποιητική ακρίβεια την αναμενόμενη συμπεριφορά ενός πρανούς. Τα μέτρα ελαστικότητας του HSM είναι τα εξής:

- $E_{50}$  - το τέμνον μέτρο ελαστικότητας τριαξονικής δοκιμής
- $E_{oed}$  - το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης
- $E_{ur}$  - το μέτρο ελαστικότητας φόρτισης - αποφόρτισης τριαξονικής δοκιμής.

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι ο εκθέτης  $m$ , οι τιμές αναφοράς των τεμνόντων μέτρων ελαστικότητας  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{oed}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  και η τάση αναφοράς αυτών,  $p_{ref}$  καθώς και ο λόγος Poisson,  $\nu_{ur}$  για φόρτιση - αποφόρτιση, ενώ για την περιβάλλουσα αστοχίας Mohr Coulomb, η συνοχή  $c'$ , η γωνία τριβής  $\phi'$ , η γωνία διαστολικότητας  $\psi$  καθώς και ο λόγος  $R_f$ . Ο συντελεστής  $Ko_{NC}$  μπορεί είτε να εισαχθεί, είτε υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα με βάση τη γνωστή σχέση του Jacky:

$$Ko_{NC}=1-\sin\phi \quad (1)$$

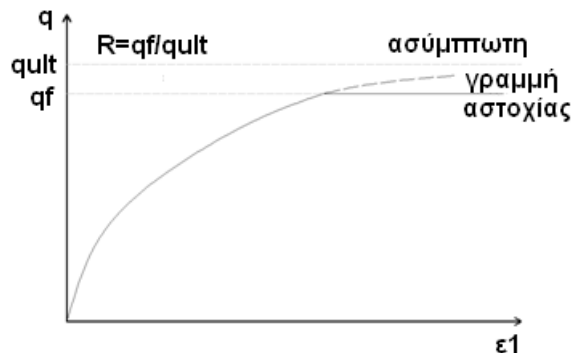
Οι παράμετροι  $m$ ,  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{oed}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  και  $p_{ref}$ , χρησιμοποιούνται αρχικά για τον υπολογισμό της σχέσης των τριών μέτρων ελαστικότητας με τις τάσεις  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_3$  σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_{50}=E_{50}^{ref} \cdot \left( \frac{c \cdot \cos\phi + \sigma'_3 \cdot \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \cdot \sin\phi} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur}=E_{ur}^{ref} \cdot \left( \frac{c \cdot \cos\phi + \sigma'_3 \cdot \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \cdot \sin\phi} \right)^m \quad (3)$$

$$E_{oed}=E_{oed}^{ref} \cdot \left( \frac{\sigma'_1}{p^{ref}} \right)^m \quad (4)$$

Οι παράμετροι  $c$  και  $\phi$  και ο λόγος  $R_f$  (Σχήμα 2) καθορίζουν την περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb, ενώ ο λόγος Poisson χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των οριζόντιων παραμορφώσεων.



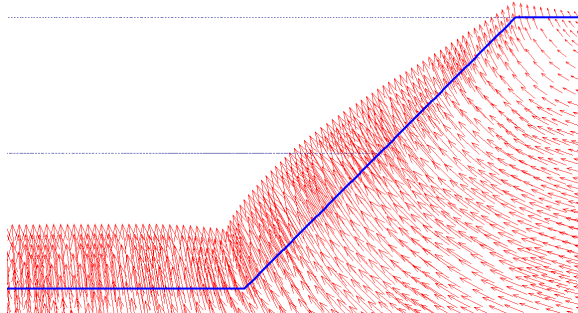
Σχήμα 2. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του HSM.

Figure 2. HSM Stress – strain diagram.

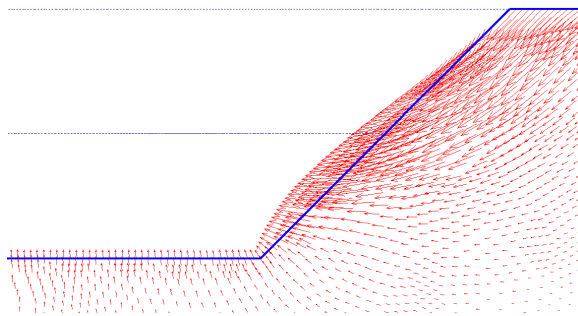
Προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητοί οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου για την δεδομένη μελέτη, στο Σχήμα 3 παρατίθενται σε σύγκριση τα διανύσματα μετακινήσεων σε ένα τυπικό πρανές με τη χρήση μοντέλου Mohr-Coulomb και του HSM. Μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε ότι με τη χρήση του HSM, οι ανυψώσεις είναι πολύ μικρότερες (καθώς ελέγχονται από το μέτρο ελαστικότητας  $E_{ur}$ ) και η μορφή των μετακινήσεων είναι πιο ρεαλιστική.

### 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Σε σχέση με τις γνωστές μεθόδους οριακής ισορροπίας, ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί μία διαφορετική πορεία. Έτσι δεδομένων των αρχικών παραμέτρων αντοχής που δίνονται στο υλικό, μειώνονται σταδιακά η συνοχή και η γωνία τριβής με τον ίδιο λόγο  $\Delta F=c'_0/c'_1=\tan\phi'_0/\tan\phi'_1$  μέχρι να αναπτυχθεί ικανός αριθμός πλαστικών σημείων ώστε να διαμορφωθεί η περιβάλλουσα αστοχίας (μέθοδος απομείωσης αντοχής -strength reduction, Dawson, et al. 1999, Brinkgreve & Vermeer 2006). Σε εκείνο το σημείο οι τιμές των παραμέτρων αντοχής



α)



β)

Σχήμα 3. Διανύσματα ολικών μετακινήσεων σε ένα τυπικό πρανές με τη χρήση μοντέλων α) Mohr-Coulomb και β) HSM.

Figure 3. Total displacement vectors in a typical slope using α) Mohr-Coulomb and β) HS models.

έχουν μειωθεί στην τελική τους τιμή,  $c'_T$  και  $\phi'_T$ , και ο συντελεστής ασφάλειας F.O.S. λαμβάνεται ίσος με  $c'_0 / c'_T = \tan \phi'_0 / \tan \phi'_T$ . Κατά την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, χρησιμοποιείται το μοντέλο Mohr-Coulomb.

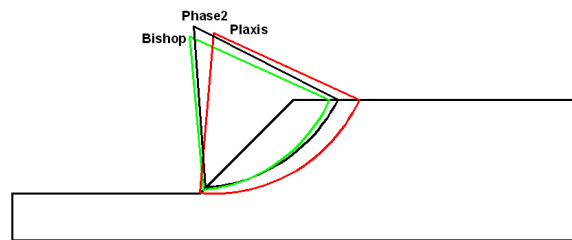
Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας, στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται για ένα πρανές με κλίση 1:1, ύψους 10 m. και τιμές του μεγέθους  $c'/\tan \phi'=50$  kPa, οι συντελεστές ασφάλειας όπως υπολογίστηκαν με δύο προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, το Plaxis 8.2 και το Phase2 (Rocscience) με χρήση της μεθόδου απομείωσης αντοχής όπως περιγράφεται παραπάνω, σε σύγκριση με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop.

$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	Plaxis	Phase2	Bishop
24.52	26.12	1.69	1.69	1.63
23.35	25.04	1.61	1.61	1.55
22.24	23.98	1.53	1.53	1.48
21.18	22.96	1.46	1.46	1.41
20.17	21.97	1.39	1.39	1.34
19.21	21.02	1.32	1.32	1.28
18.30	20.10	1.26	1.26	1.22
17.43	19.22	1.20	1.20	1.16
16.60	18.36	1.14	1.14	1.10
15.81	17.54	1.09	1.09	1.05
15.05	16.76	1.04	1.04	1.00
14.76	16.45	1.02	1.01	0.98

Πίνακας 1. Συντελεστές ασφάλειας πρανούς με κλίση 1:1, ύψους 10 m. και τιμές του μεγέθους  $c'/\tan \phi'=50$  όπως υπολογίστηκαν με διάφορες μεθόδους.

Table 1. Factors of safety for a 1:1 slope, 10 m height and  $c'/\tan \phi'=50$  kPa calculated with various methods.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες επιφάνειες αστοχίας. Παρατηρούμε ότι με μικρές αποκλίσεις, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τον συντελεστή ασφάλειας σε ένα πρανές. Εκτελώντας και πρόσθετες αντίστοιχες αναλύσεις, προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι οι συντελεστές ασφάλειας που υπολογίζονται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων έχουν μέγιστη απόκλιση  $\pm 5\%$  σε σχέση με την απλοποιημένη μέθοδο Bishop.



Σχήμα 4. Επιφάνειες αστοχίας από τις διάφορες μεθόδους.

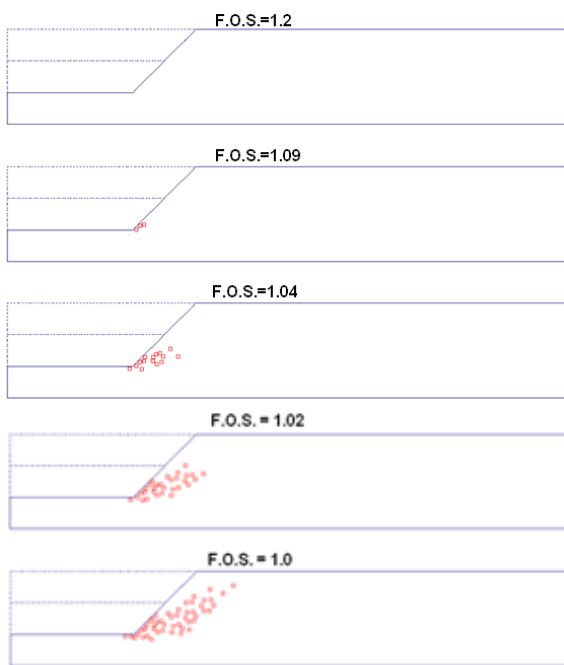
Figure 4. Failure surfaces from various methods.

Παρατηρούμε ότι με μικρές αποκλίσεις, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τον συντελεστή ασφάλειας σε ένα πρανές.

#### 4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ο μηχανισμός αστοχίας ενός πρανούς κατά τη σταδιακή μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και συνεπώς του συντελεστή ασφάλειας από μία αρχικά μεγάλη τιμή προς την αστοχία, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.

Είναι χαρακτηριστικό ότι η διαμόρφωση της ζώνης αστοχίας ξεκινάει από τον πόδα του πρανού και εκτείνεται προς τα άνω όπως είναι γνωστό ότι ισχύει στα πρανή (Potts et al 1997, Potts & Zdravković 1999). Οι παραπάνω παρατηρήσεις δείχνουν ότι ο μηχανισμός αστοχίας μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.



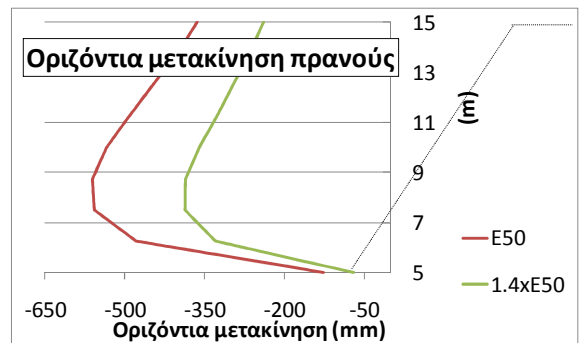
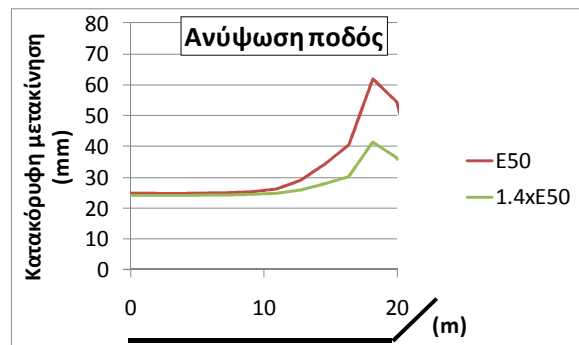
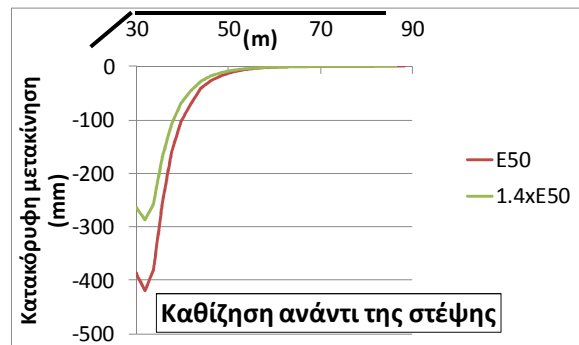
Σχήμα 5. Ανάπτυξη σημείων πλαστικής διαρροής στο πρανές κατά την μείωση του συντελεστή ασφάλειας.

Figure 5. Generation of plastic yield points in the slope during the reduction of the safety factor.

#### 5. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

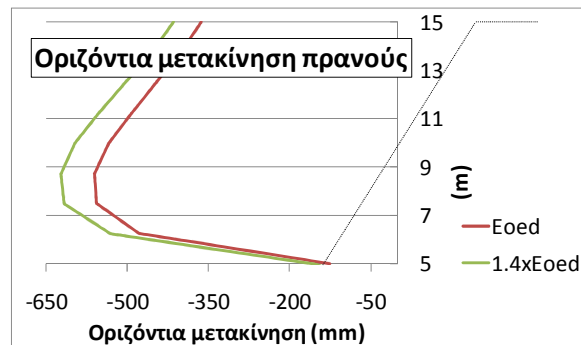
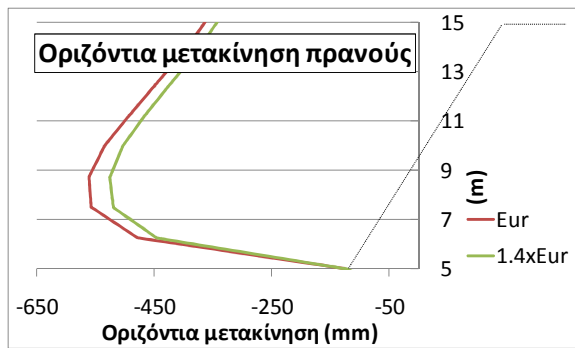
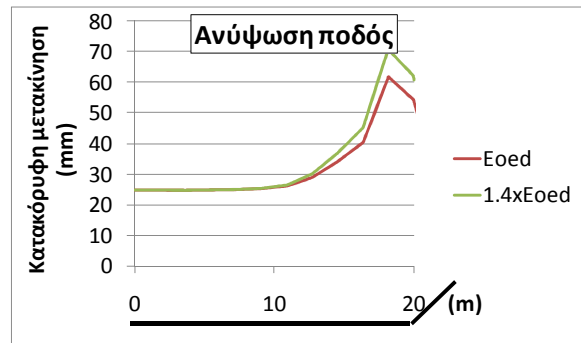
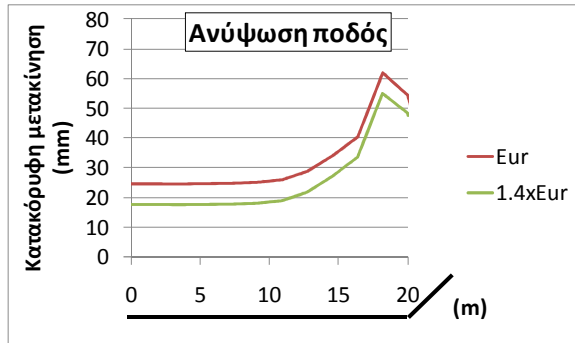
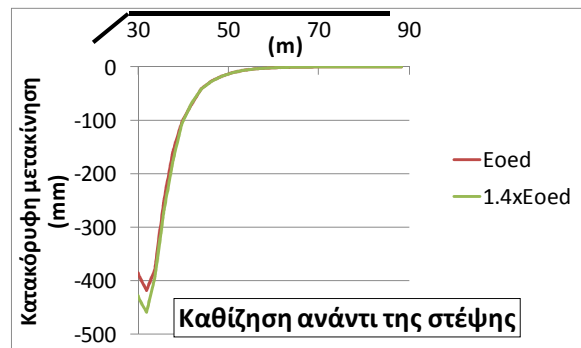
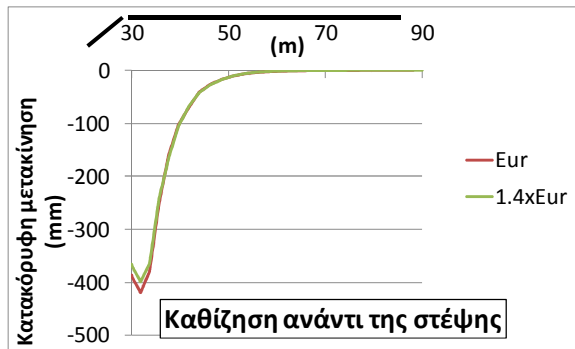
Με πρόθεση να διερευνηθεί η επιρροή των μέτρων ελαστικότητας στις υπολογισθείσες μετακινήσεις, σε μία περίπτωση πρανού (κλίση 1:1, ύψος 10m. και  $c/\tan\phi=50$  kPa) αυξήθηκαν κατά 40% με τη σειρά καθένα εκ των τριών μέτρων προκειμένου να μελετηθεί το μέγεθος της επιρροής στη μεταβολή των

διάφορων μετακινήσεων. Προτιμήθηκε το πρανές να βρίσκεται κοντά στην αστοχία ( $F.O.S. = 1$ ) ώστε η μεταβολή αυτή να είναι πιο εμφανής. Στα Σχήματα 6 έως 8 παρουσιάζεται η μεταβολή στην κατακόρυφη μετακίνηση ανάντι της στέψης και στον πόδα καθώς και στην οριζόντια μετακίνηση του πρανού στις περιπτώσεις αύξησης των  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  και  $E_{oed}^{ref}$  αντίστοιχα.



Σχήμα 6. Μεταβολή των μετακινήσεων λόγω αύξησης κατά 40% του  $E_{50}^{ref}$ .

Figure 6. Change in displacements due to 40% increase of  $E_{50}^{ref}$ .



Σχήμα 7. Μεταβολή των μετακινήσεων λόγω αύξησης κατά 40% του  $E_{ur}^{ref}$ .  
Figure 7. Change in displacements due to 40% increase of  $E_{ur}^{ref}$ .

Τα αποτελέσματα κρίνονται εύλογα όσον αφορά στη μεταβολή των  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  καθώς αύξηση του  $E_{50}$ , φαίνεται ότι συνεπάγεται γενική μείωση των μετακινήσεων, ενώ η μεταβολή του  $E_{ur}$  επηρεάζει κυρίως τις ανυψώσεις στην οριζόντια επιφάνεια στη βάση του πρανούς, καθώς συνδέεται με την αποφόρτιση. Ο ρόλος όμως του  $E_{oed}$  δεν είναι απολύτως ξεκάθαρος. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται πως μείωση του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης, συνεπάγεται και μείωση τόσο στις καθιζήσεις άνωθεν της στέψης όσο και στις οριζόντιες μετακινήσεις του πρανούς. Με βάση τη βιβλιογραφία του

Σχήμα 8. Μεταβολή των μετακινήσεων λόγω αύξησης κατά 40% του  $E_{oed}^{ref}$ .  
Figure 8. Change in displacements due to 40% increase of  $E_{oed}^{ref}$ .

HSM, το  $E_{oed}$  συνδέεται κυρίως με την εκδήλωση ογκομετρικών πλαστικών παραμορφώσεων (οι οποίες όμως στις υπό εξέταση περιπτώσεις δεν μεταβάλλονται αισθητά) καθορίζοντας την επιφάνεια yield cap. Έτσι από το  $E_{oed}$  εξαρτώνται άμεσα οι πλαστικές παραμορφώσεις που σχετίζονται με αυτή την επιφάνεια διαρροής και η επιρροή του στις μετακινήσεις του πρανούς δεν είναι απόλυτα αναγνωρίσιμη.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στόχος των αναλύσεων ήταν η μελέτη της σχέσης των μετακινήσεων σε ένα πρηνές ορύγματος με το συντελεστή ασφάλειας. Η υπολογιστική διαδικασία αποτελείτο από 3 στάδια: στο 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκτελείτε η εκσκαφή που οδηγεί στην τελική διαμόρφωση του πρηνούς, με εδαφικό μοντέλο HSM και υπολογίζονται οι αντίστοιχες μετακινήσεις. Ως χαρακτηριστική μετακίνηση επιλέχθηκε η μέγιστη μετακίνηση ( $u_{max}$  στο Σχήμα 1). Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο, υπολογίζεται μέσω της μεθόδου απομείωσης αντοχής, με χρήση μοντέλου Mohr-Coulomb, ο συντελεστής ασφάλειας του πρηνούς στην τελική κατάσταση. Οι επιλύσεις έγιναν για πρηνή κλίση 1:1 και ύψους 10 m ενώ ως χαρακτηριστική παράμετρος κάθε περίπτωσης επιλέχθηκε η λσφ (Duncan & Wright, 2005):

$$\lambda c\phi = (\gamma \cdot H \cdot \tan\phi) / c \quad (5)$$

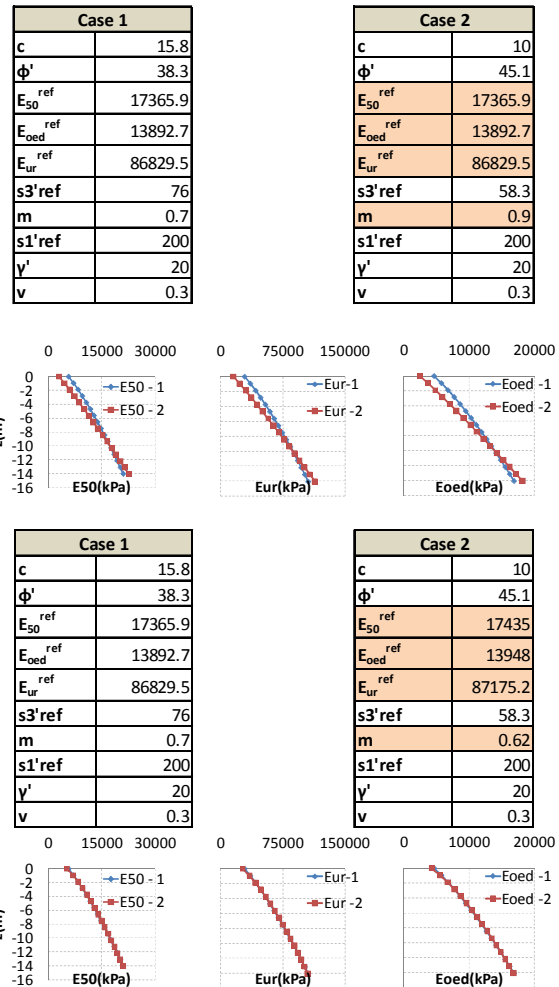
, όπου  $\gamma$  είναι το ειδικό βάρος του γεωυλικού (ενδεικτικά 20 kN/m<sup>3</sup> στις αναλύσεις) και H το ύψος του πρηνούς.

Σύμφωνα με τις Εξισώσεις 2,3 και 4, τα μέτρα ελαστικότητας σχετίζονται άμεσα με τις παραμέτρους c και φ. Οι μετακινήσεις πριν την αστοχία, εξαρτώνται σημαντικά και από τις τιμές των μέτρων τα οποία στο συγκεκριμένο μοντέλο μεταβάλλονται με το βάθος.

Προκειμένου αυτή η εξάρτηση να περιορισθεί κατά το δυνατόν και να φανεί καθαρά η σχέση των μετακινήσεων με το Συντελεστή Ασφάλειας, οι τιμές των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο (πέραν των c και φ) επιλέχθηκαν μετά από βοηθητικούς υπολογισμούς κατά τρόπο ώστε στην αρχική κατάσταση, η κατανομή των μέτρων ελαστικότητας με το βάθος να είναι η ίδια σε όλες τις επιλύσεις. Αποτέλεσμα είναι να προκύπτει η μεταβολή των μετακινήσεων αποκλειστικά λόγω της μεταβολής του Συντελεστή Ασφάλειας, ανεπηρέαστη από το μέγεθος των μέτρων ελαστικότητας.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η ομοιομορφία, γράφηκε κατάλληλος κώδικας επεξεργασίας που επέτρεπε μέσω επαναληπτικών δοκιμών τον προσδιορισμό των κατάλληλων τιμών των  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{oed}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  και m, ώστε στην αρχική κατάσταση η κατανομή των μέτρων ελαστικότητας με το βάθος να είναι ίδια για όλες τις επιλύσεις. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η αρχική και η τελική επιλογή παραμέτρων για μία τυχαία

περίπτωση (case 2), ώστε τα μέτρα ελαστικότητας να είναι κατά το δυνατόν ίδια με το βάθος με μία πρότυπη περίπτωση (case 1).



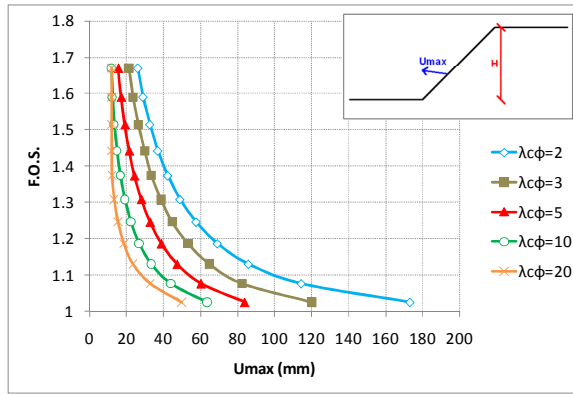
Σχήμα 9. Διαδικασία Υπολογισμού των παραμέτρων εισαγωγής στο μοντέλο HSM.

Figure 9. Calculation procedure of the input HSM model parameters.

Περιορίζοντας επομένως την επιρροή των μέτρων ελαστικότητας στο ελάχιστο, εκτελέστηκαν οι αναλύσεις, για τιμές της λσφ =2,3,5,10 και 20. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 10.

Παρατηρούμε ότι η επίδραση του συντελεστή ασφάλειας είναι σημαντική, καθώς όσο αυτός πλησιάζει στη μονάδα οι μετακινήσεις αυξάνονται. Παράλληλα η επιρροή της λσφ είναι επίσης ξεκάθαρη, καθώς όσο αυτή μειώνεται (δηλαδή όσο αυξάνεται το μέγεθος c/tanφ σε πρηνή με ίδιο ύψος και ίδιο ειδικό βάρος), τόσο αυξάνονται οι μετακινήσεις για την ίδια τιμή του συντελεστή ασφάλειας.





Σχήμα 10. Σχέση συντελεστή ασφαλείας – μέγιστης μετακίνησης για πρανές κλίση 1:1 και ύψους 10 m.  
Figure 10. Factor of safety – maximum displacement relationship for 1:1 slope with 10 m. height.

Στη συνέχεια, προκειμένου να διαπιστωθεί η επιρροή της κλίσης του πρανούς στην παραπάνω σχέση, σε δύο συγκεκριμένες τιμές της λσφ (επιλέχθηκαν οι τιμές λσφ=5 και 10) αναλύθηκαν πρανή με κλίση 1.5:1 και 1:1.5. Στα Σχήματα 11α και 11β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων.

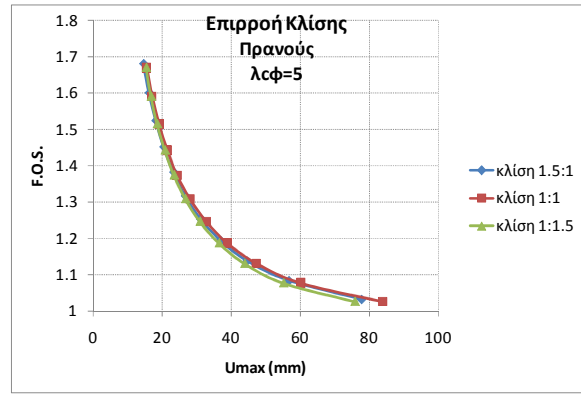
Όπως είναι φανερό, η κλίση του πρανούς δεν επηρεάζει τη σχέση μετακινήσεων συντελεστή ασφαλείας για σταθερή τιμή της λσφ.

Τέλος, κρίθηκε σημαντικό να διευκρινιστεί και η επιρροή του ύψους του πρανούς καθώς όλες οι έως τώρα αναλύσεις έγιναν για πρανή με ύψος 10 m.. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε μία τιμή της λσφ (=5) και εκτελέστηκαν αναλύσεις για ύψη πρανούς 5, 10 και 15 m.. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων φαίνονται στο Σχήμα 12.

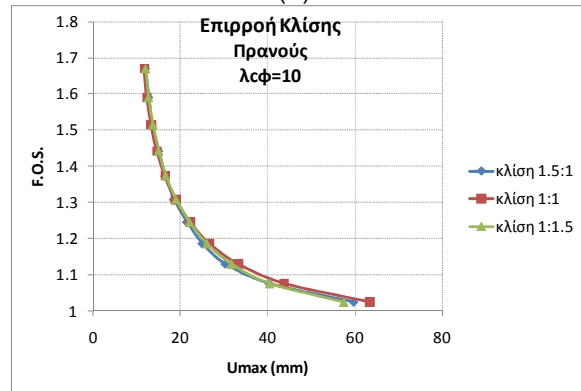
Όπως παρατηρούμε, αύξηση του ύψους του πρανούς συνεπάγεται και αύξηση της μέγιστης μετακίνησης για την ίδια τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Προκειμένου να διερευνηθεί αυτή η σχέση, εκτελέστηκαν μεγάλο πλήθος αναλύσεων (που δεν παρουσιάζονται χάριν συντομίας) οι οποίες οδηγούν στην παρατήρηση ότι η μέγιστη μετακίνηση εξαρτάται από την τιμή του ύψους H για όλες τις τιμές λσφ, ακολουθώντας τη σχέση

$$u_H = u_{10} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{1.68} \quad (6)$$

όπου  $u_H$  η ζητούμενη μετακίνηση και  $u_{10}$  η μετακίνηση σε πρανές ύψους 10 m.

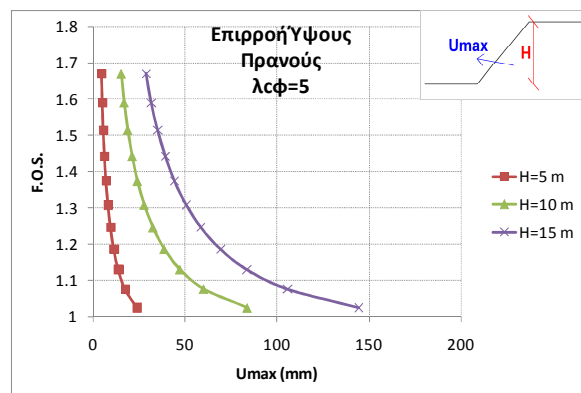


(α)

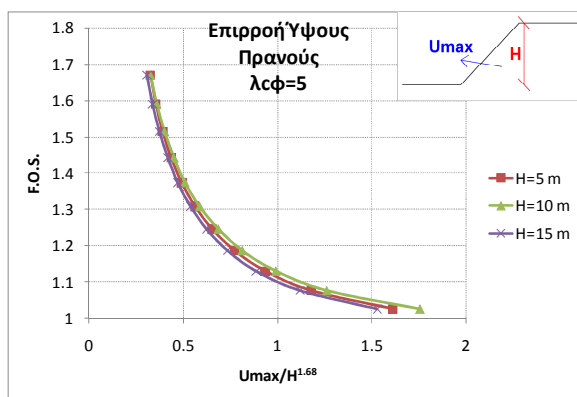


(β)

Σχήμα 11. Επιρροή της κλίσης του πρανούς στη σχέση συντελεστή ασφαλείας – μέγιστης μετακίνησης για τιμές της λσφ (α) 5 και (β) 10.  
Figure 11. Effect of inclination on the factor of safety – maximum displacement relationship for values of λσφ (α) 5 και (β) 10.



Σχήμα 12. Επιρροή του ύψους του πρανούς στη σχέση συντελεστή ασφαλείας – μέγιστης μετακίνησης για τιμή της λσφ = 5.  
Figure 12. Effect of height on the factor of safety – maximum displacement relationship for λσφ= 5.



Σχήμα 13. Επιρροή του ύψους του πρανούς στη σχέση συντελεστή ασφάλειας – μέγιστης μετακίνησης κανονικοποιημένης με τον όρο  $H^{1.68}$ , για τιμή της  $\lambda\sigma\phi = 5$ .

Figure 13. Effect of height on the factor of safety – maximum displacement normalized by  $H^{1.68}$  relationship, for  $\lambda\sigma\phi = 5$ .

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στο συντελεστή ασφάλειας και στις μετακινήσεις που υπολογίζονται σε ένα πρανές, μέσα από αναλύσεις που εκτελέστηκαν με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα για πρανή ύψους 10 m. Το σχήμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση, καθώς στη συνέχεια η μετακίνηση  $u_H$  για ένα πρανές ύψους  $H$  m, μπορεί να εκτιμηθεί από τη Σχέση (6).

Η κλίση του πρανούς δεν επηρεάζει τη σχέση μεταξύ του συντελεστή ασφάλειας και των μετακινήσεων. Τούτο βέβαια δε σημαίνει πως η κλίση του πρανούς δεν είναι σημαντικός παράγοντας, καθώς όσο αυτή αυξάνεται με τα ίδια χαρακτηριστικά αντοχής, μειώνεται ο συντελεστής ασφάλειας και αυξάνονται οι μετακινήσεις. Απλώς για ίδιες τιμές του συντελεστή ασφάλειας, οι μετακινήσεις θα είναι ίδιες για σταθερή τιμή  $\lambda\sigma\phi$ , ανεξάρτητα της κλίσης.

Η χρήση του μοντέλου Hardening εκφράζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των πρανών (Σχήμα 4), όμως καθώς οι παράμετροι του μοντέλου είναι αρκετές, ιδίως σε σχέση με το απλό τέλεια πλαστικό μοντέλο (Mohr-Coulomb) απαιτείται καλή γνώση του μοντέλου και ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών των παραμέτρων.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brinkgreve, R. & Vermeer, P. 2006, "Plaxis Manual (V.8)", University of Stuttgart, Germany/Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Chang, C. & Duncan, J.M. 1970, "Analysis of Soil Movement around a Deep Excavation", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 96, no. 5, pp. 1655-1681.
- Dawson, E.M., Roth, W.H. & Drescher, A. 1999, "Slope stability analysis by strength reduction", Geotechnique, vol. 49, no. 6, pp. 835-840.
- Desai, C.S. & Abel, J.F. 1972, Introduction to the finite element method, Van Nostrand Reinhold New York.
- Duncan, J.M. 1996, "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, no. 7, pp. 577-596.
- Duncan, J.M. & Chang, C. 1970, "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 96, no. 5, pp. 1629-1653.
- Duncan, J.M. & Wright, S.G. 2005, Soil strength and slope stability, John Wiley & Sons.
- Potts, D. M., Kovacevic, N. & Vaughan, P. R. 1997. Geotechnique 47, No. 5, 953-982.
- Potts, D.M. & Zdravković, L. 1999, Finite element analysis in geotechnical engineering: theory, Telford.
- Schanz, T. 1999, "The hardening soil model: Formulation and verification", Beyond 2000 in Computational Geotechnics: 10 Years of PLAXIS International; Proceedings of the International Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Amsterdam, The Netherlands, 18-20 March 1999, Taylor & Francis, pp. 281.