

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΙΔΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ  
ΙΛΑΡΙΩΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC**

υπό

**ΔΗΜΗΤΡΙΟ ΣΑΜΙΟ**

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

2016



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14698/1  
Ημερ. Εισ.: 03-10-2017  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ  
2016  
ΣΑΜ

© 2016 ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΑΜΙΟΣ

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  
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου  
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθώς επίσης και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα και την Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου για την συνεργασία τους και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν στη αξιολόγηση της εργασίας μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω τη ευγνωμοσύνη μου στον Καθηγητή και Πρόεδρο του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο καθώς η συμβολή του προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτή η διπλωματική εργασία ήταν αναγκαία και ουσιώδης.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου και τον αδελφό μου, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια που δώσανε τη δυνατότητα να σπουδάσω, και που πάντα με στήριζαν και με στηρίζουν στις επιλογές μου . Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου, στον πατέρα μου και αδελφό μου.

Δημήτριος Σάμιος

# **ΜΕΛΕΤΗ ΕΙΔΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΙΛΑΡΙΩΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLAC**

Δημήτριος Σάμιος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2016

Επιβλέπων: Γεώργιος Εφραιμίδης, Λέκτορας

## **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη των γεωλογικών και τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια κατασκευής του φράγματος του Ιλαρίωνα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε έρευνα για τη συλλογή στοιχείων και πληροφοριών όσον αφορά τη γεωλογία στη θέση του φράγματος καθώς και της ευρύτερης περιοχής του ταμιευτήρα. Τα στοιχεία αυτά στη συνέχεια μελετήθηκαν και αξιολογήθηκε η κατάσταση των γεωλογικών σχηματισμών ως προς τη συνέχεια και τη σταθερότητα. Επόμενο βήμα ήταν ο εντοπισμός μέσω διαφόρων πηγών των τεχνικογεωλογικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στο φράγμα του Ιλαρίωνα. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στα κατολισθητικά φαινόμενα που αναπτύχθηκαν στο δεξί αντέρεισμα καθώς και στο τρόπο αντιμετώπισης τους κατά την κατασκευή του έργου. Ακολούθησε η εξ ολοκλήρου καινούργια μελέτη του δεξιού αντερείσματος ως προς τη σταθερότητα και την αντιστήριξη του μέσω διαφορετικών και ποικίλων μέτρων από τα υφιστάμενα. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) πεπερασμένων διαφορών. Τα παρακάτω κεφάλαια έχουν δομηθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να παρουσιαστούν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες από αυτές που συγκεντρώθηκαν καθώς επίσης να γίνει αντιληπτή στον αναγνώστη η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των αναλύσεων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα FLAC μέσω απεικονίσεων των επιφανειών ολίσθησης, τασικών κατανομών, διανυσματικών βελών μετατόπισης, κατανομών πλαστικότητας και κατανομών ταχύτητας. Τα αποτελέσματα συζητιούνται και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

# **STUDY OF SPECIAL GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CONDITIONS IN THE ILARIONAS DAM USING THE PROGRAM FLAC**

Dimitrios Samios

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2016

Supervisor: George Efremidis, Lecturer

## **Abstract**

This diploma thesis is intended to study the geological and technical problems encountered during construction of the Ilarion dam. Initially a survey was conducted to collect data and information on the geology at the dam position and the surrounding area of the reservoir. Then the collected data are used in order to study the situation of geological formations and to evaluate them for continuity and stability. Next step is to identify, through different sources, several geotechnical problems encountered in the Ilarion dam. The interest is focused in landslides occurred in the right abutment and on their way to address when building the project. Followed by the entirely new study of the stability of the right abutment and supporting methods through different measures than those proposed before. All analyzes were performed using the program FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). The next chapters present as much information as possible from those gathered as well to grasp the reader the methodology used to perform the numerical analysis. Finally, the results of tests carried out in FLAC program are presented through representations of sliding surfaces of dynamic allocations, vector displacement arrows, and plasticity and velocity distributions. The results are discussed and the conclusions presented.

## Πίνακας Περιεχομένων

### Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή1

1.1	Κίνητρο και υπόβαθρο .....	1
1.2	Γεωμορφολογικά κριτήρια .....	2
1.3	Γεωλογικά κριτήρια.....	3
1.4	Οργάνωση διπλωματικής εργασίας.....	4

### Κεφάλαιο 2 Γεωμορφολογία περιοχής φράγματος..... 5

2.1	Λιθολογία περιοχής.....	5
2.2	Υδρογεωλογικό υπόβαθρο .....	12

### Κεφάλαιο 3 Κατασκευή Φράγματος –Προβλήματα & Αντιμετώπιση..... 13

3.1	Φράγμα και συναφή έργα.....	14
3.2	Ταμιευτήρας .....	16
3.3	Δεξί αντέρεισμα.....	18
3.3.1	Γεωλογικές συνθήκες δεξιού αντερείσματος .....	18
3.3.2	Γεωτεχνικός σχεδιασμός δεξιού αντερείσματος .....	19
3.3.3	Κατολίσθηση Φεβρουαρίου 2004 .....	20
3.3.4	Κατολίσθητικές κινήσεις Ιανουαρίου 2006 .....	22
3.3.5	Υφιστάμενη κατάσταση και μέτρα αντιστήριξης πρανούς.....	24

### Κεφάλαιο 4 Βραχομηχανική συμπεριφορά πρανών..... 25

4.1	Ευστάθεια πρανών.....	25
4.2	Ευστάθεια πρανών έναντι στατικών φορτίων .....	26

### Κεφάλαιο 5 Ανάλυση και εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC..... 27

5.1	Μεθοδολογία .....	27
5.1.1	Διαδικασία μείωσης της αντοχής.....	27
5.1.2	Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας με βαρύτητα στη διατμητική αντοχή του υλικού Hoek – Brown .....	28
5.2	Ψευδοστατική ανάλυση.....	30
5.3	Διαδικασία προσομοίωσης .....	32
5.4	Διακριτοποίηση .....	33
5.4.1	Επιλογή μοντέλου υλικού .....	34

### Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα - Αναλύσεις..... 36

6.1	Φυσικό Πρανές.....	36
6.1.1	Διακριτοποιημένος κάρναβος .....	36
6.1.2	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	37
6.1.3	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	38
6.1.4	Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων.....	39
6.1.5	Κατανομή αναπτυσσόμενων ταχυτήτων.....	40
6.1.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	41
6.1.7	Διανύσματα Μετατοπίσεων .....	42
6.1.8	Συντελεστής Ασφαλείας.....	43
6.2	Πρανές – Διαμόρφωση αναβαθμών .....	44



6.2.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	45
6.2.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	46
6.2.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	47
6.2.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	48
6.2.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	49
6.2.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	50
6.2.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	51
6.3	Ψευδοστατική ανάλυση – Αναβαθμών .....	52
6.3.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	52
6.3.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	53
6.3.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	54
6.3.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων.....	55
6.3.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	56
6.3.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	57
6.3.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	58
6.4	Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας πασσάλων .....	59
6.4.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	60
6.4.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	61
6.4.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	62
6.4.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	63
6.4.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	64
6.4.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	65
6.4.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	66
6.5	Εισαγωγή δυο σειρές αγκυρίων.....	67
6.5.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	68
6.5.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	69
6.5.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	70
6.5.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	71
6.5.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	72
6.5.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	73
6.5.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	74
6.6	Εισαγωγή τεσσάρων σειρών αγκυρίων .....	75
6.6.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	76
6.6.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας τάσεων - $\sigma_{xx}$ .....	77
6.6.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	78
6.6.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	79
6.6.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	80
6.6.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	81
6.6.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	82
6.7	Εισαγωγή έξι σειρών αγκυρίων.....	83
6.7.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	84
6.7.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης $\sigma_{xx}$ .....	85
6.7.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων ταχυτήτων .....	86
6.7.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	87
6.7.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	88
6.7.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	89
6.7.7	Συντελεστής Ασφαλείας.....	90
6.8	Ψευδοστατική Φόρτιση για πρηνές αντιστηριζόμενο με έξι σειρές αγκυρίων.....	91
6.8.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	91
6.8.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	92
6.8.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	93

6.8.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	94
6.8.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	95
6.8.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	96
6.8.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	97
6.9	Εισαγωγή έξι σειρών αγκυρίων και υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας συμπεριλαμβανομένου των πασσάλων.....	98
6.9.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	99
6.9.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	100
6.9.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	101
6.9.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	102
6.9.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	103
6.9.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	104
6.9.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	105
6.10	Ψευδοστατική φόρτιση και υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για το σύνολο των μέτρων αντιστήριξης.....	106
6.10.1	Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$ .....	106
6.10.2	Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$ .....	107
6.10.3	Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων .....	108
6.10.4	Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων .....	109
6.10.5	Διανύσματα μετατοπίσεων.....	110
6.10.6	Δείκτες Πλαστικότητας.....	111
6.10.7	Συντελεστής ασφαλείας .....	112
<b>Κεφάλαιο 7 Σύννοση Διπλωματικής Εργασίας.....</b>		<b>113</b>
<b>Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα .....</b>		<b>116</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>118</b>

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Το φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος για να ανακόψει τη συνέχεια της ροής με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική εκμετάλλευση του.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι [6]:

- ❖ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας,
- ❖ η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών,
- ❖ η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων,
- ❖ η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων, και
- ❖ η ρύθμιση της παροχής φυσικών ρευμάτων.

Συχνά τα φράγματα εξυπηρετούν περισσότερους από έναν σκοπούς (φράγματα πολλαπλής σκοπιμότητας). Το φράγμα του Ιλαρίωνα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, για παράδειγμα, εξυπηρετεί τόσο ανάγκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και ανάγκες ύδρευσης. Στον ελληνικό χώρο, τα γνωστότερα φράγματα είναι αυτά που σχετίζονται:

- ❖ Με υδροηλεκτρική χρήση, όπως του Λούρου (1954), του Λάδωνα (1955), του Ταυρωπού (1959), των Κρεμαστών (1965), του Καστρακίου (1969), του Πολυφύτου (1974), του Πουρναρίου (1981), της Σφηκιάς και των Ασωμάτων (1985), του Στράτου (1988) κ.ά..
- ❖ Με υδρευτική χρήση, όπως του Μαραθώνα που ξεκίνησε το έτος 1926 και ολοκληρώθηκε το 1931, του Μόρνου που ολοκληρώθηκε το έτος 1979 κ.ά..
- ❖ Με αρδευτική χρήση, όπως της Λευκόγειας Δράμας (1972), της Απολακκιάς Ρόδου (1978), του Λειβαδιού Αστυπάλαιας (1978), της Φανερωμένης και της Πλακιώτισσας στην περιοχή Μεσαράς Ηρακλείου (1980), του Δοξά στην περιοχή του Φενεού Κορινθίας (1982), της Φωλιάς Καβάλας (1983), του Κατάφυτου Δράμας (1984) κ.ά..

Στη σύγχρονη εποχή η πλειονότητα των φραγμάτων χρησιμοποιείται για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα παγκοσμίως τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%). Τα οφέλη από τη λειτουργία αυτών των φραγμάτων υπήρξαν πολλαπλά, όμως έχουν σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η ΔΕΗ Α.Ε., από τα μέσα της δεκαετίας του '50 μέχρι σήμερα, εκμεταλλεύομενη το έντονο φυσικό ανάγλυφο της χώρας μας, έχει κατασκευάσει μεγάλα και μικρά (με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 15MW) υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ), τα οποία βρίσκονται ήδη σε λειτουργία. Τα ΥΗΕ της ΔΕΗ, είναι έργα αιχμής, αφού είναι δυνατό να τίθενται αμέσως σε λειτουργία και να διασφαλίζουν την ετοιμότητα και ισορροπία του συστήματος.

Με τα μεγάλα ΥΗΕ που λειτουργούν σήμερα, αξιοποιείται το 30-35% περίπου του τεχνικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού της χώρας, καλύπτοντας το 10% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και διαθέτοντας το 30% περίπου της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του διασυνδεδεμένου συστήματος. Δεδομένου δε, ότι οι απαιτήσεις σε νερό (δυνάμει ανανεούμενο αγαθό) συνεχώς αυξάνονται, η αποθήκευση αυτού του αγαθού γίνεται πλέον επιτακτική ανάγκη.

Ωστόσο κατά το σχεδιασμό, μελέτη και κατασκευή ενός φράγματος προκύπτουν αρκετά γεωτεχνικά, γεωλογικά προβλήματα τα οποία είναι αρκετά ενδιαφέροντα και πρέπει να μελετηθούν ειδικά, προσεχτικά καθώς οι απαιτήσεις ασφάλειας είναι μεγάλες. Η ασφαλής λειτουργία ενός φράγματος είναι απαραίτητη καθώς ένα καταστροφικό σενάριο αστοχίας του ίδιου φράγματος ή ενός από τα περιβάλλοντα τεχνικά έργα μπορεί να έχει καταστροφικές οικονομικές, περιβαλλοντικές συνέπειες ακόμα και απώλειες ανθρώπινων ζωών.

Επομένως η γεωλογία της εκάστοτε περιοχής θέσης κατασκευής του έργου θα πρέπει να μελετάται διεξοδικά ως προς τη σταθερότητα, την ομοιομορφία και τη συνέχεια. Διότι μια διαρροή σε δυνητική θέση για το φράγμα μπορεί να προκαλέσει την ολική αστοχία του. Ο σχεδιασμός των γεωτεχνικών έργων που περιβάλλουν το έργο είναι εξίσου σημαντικός καθώς η αστοχία – κατολίσθηση ενός πρανού μπορεί να προκαλέσει κυματισμό στο ταμιευτήρα και να υπερπηδήσει τη στέψη του φράγματος με αποτέλεσμα την διατάραξη ή και την αστοχία του [13],[14].

## 1.2 Γεωμορφολογικά κριτήρια

Η μορφολογία μιας κοιλάδας έχει μεγάλη σημασία στην κατασκευή φραγμάτων. Ιδανική περίπτωση κοιλάδας είναι εκείνη, που στη θέση του φράγματος στενεύει και αμέσως ανάντη διευρύνεται.

Το χαρακτηριστικό αυτό ευνοεί την κατασκευή μικρού όγκου και ύψους φράγματος ενώ παρέχεται η δυνατότητα συγκέντρωσης μεγάλου όγκου νερού στον ταμιευτήρα. Επίσης σημασία έχει η κλίση της κοιλάδας κατά μήκος της γραμμής ροής του ποταμού. Επιθυμητή – τουλάχιστον για τα Υδροηλεκτρικά (ΥΗ) Έργα – είναι εκείνη που έχει μικρή κλίση κατά μήκος του ταμιευτήρα και μεγάλη αμέσως κατόντη της θέσης του φράγματος.

Οι κυριότεροι τύποι κοιλάδων από πλευράς Τεχνικής Γεωλογίας είναι [2]:

- Οι χαράδρες (Gorges), όπου η σχέση χορδής : ύψους των φραγμάτων είναι μικρότερη του 3. (προσφέρονται για τοξωτά φράγματα)
- Στενές κοιλάδες (Narrow Valleys) σε σχήμα λατινικού V ή ανεστραμμένου Ελληνικού Π, όπου η σχέση χορδής : ύψους κυμαίνεται μεταξύ 3 και 6. (προσφέρονται κυρίως για φράγματα βαρύτητας)
- Πλατιές κοιλάδες (Wide Valleys) με σχέση χορδής : ύψους  $> 6$  ή 7. (προσφέρονται για φράγματα βαρύτητας ή χωμάτινα)
- Οι επίπεδες (Flat country plains)

Η μορφή μιας κοιλάδας εξαρτάται από τη γεωλογική και τεκτονική δομή της περιοχής, τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, το βαθμό αποσάθρωσης των πετρωμάτων. Έτσι οι κοιλάδες μπορεί να είναι σύμμετρες ή ασύμμετρες, καλυμμένες από υλικά κλιτύων ή όχι, κοιλάδες με αναβαθμίδες [1],[ 6],[7].

### 1.3 Γεωλογικά κριτήρια

Τα γεωλογικά κριτήρια είναι σημαντικότερα και από τα μορφολογικά και παίζουν καθοριστικό ρόλο για:

- i. Την τελική επιλογή ή απόρριψη της θέσης του φράγματος,
- ii. Τον τύπο του φράγματος,
- iii. Τον σχεδιασμό του φράγματος, και
- iv. Την ασφάλεια, το κόστος και το χρόνο κατασκευής του φράγματος.

Η αρχική επιλογή μιας θέσης μπορεί να αποφασίζεται με βάση τους μορφολογικούς παράγοντες, η οριστικοποίησή της όμως στηρίζεται πρωταρχικά στα γεωλογικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά έχουν σχέση με την ευρύτερη γεωλογική δομή της περιοχής, την πετρολογική σύσταση, την τεκτονική διεργασία των πετρωμάτων, την ποιότητα και αντοχή της βραχομάζας, τη γεωμετρική διάταξη αυτών στο χώρο, την ευστάθεια πρανών, τη διαπερατότητα, την ύπαρξη υλικών κατασκευής και γενικά την όλη συμπεριφορά της βραχομάζας [1, 2, 3].

Τα γεωλογικά κριτήρια θεωρούνται ότι είναι εκείνα που αν δεν ληφθούν σοβαρά υπόψη μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχίες που πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφικές. Η περιοχή κατασκευής ενός φράγματος θα πρέπει να εξασφαλίζει ορισμένες προϋποθέσεις, οι σημαντικότερες των οποίων σε γενικές γραμμές είναι οι ακόλουθες:[10],[13]

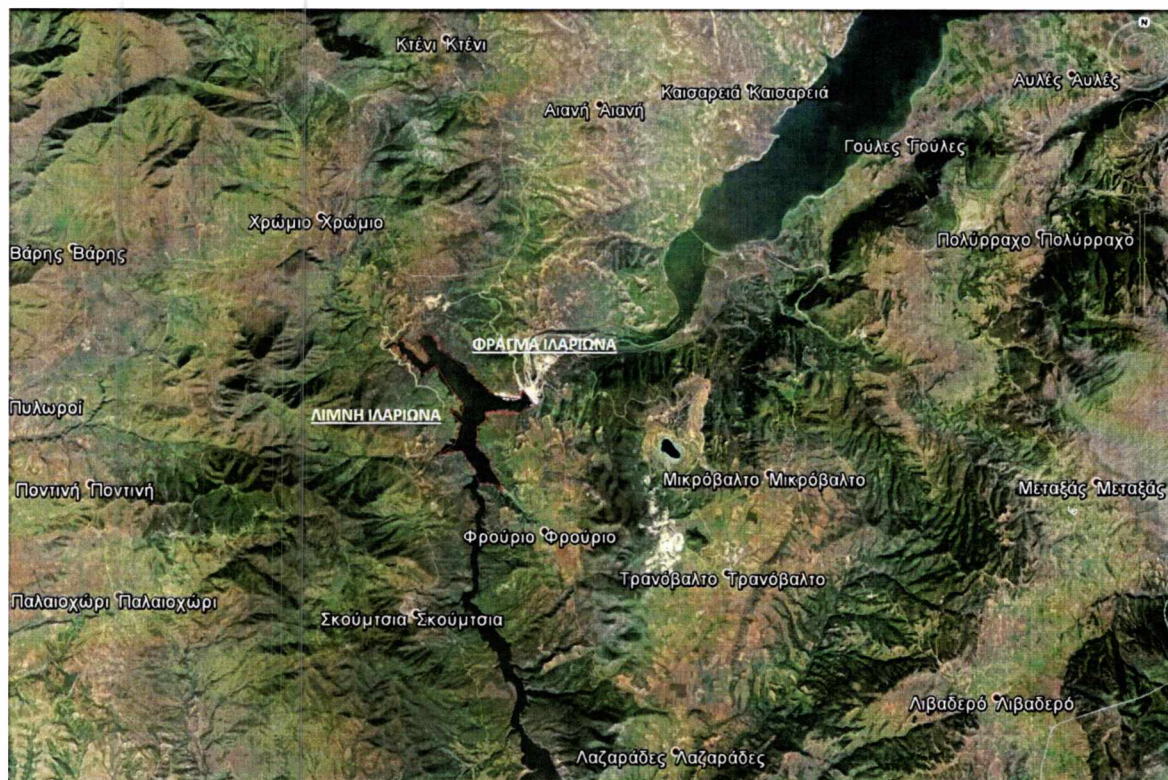
- Ύπαρξη των ικανών και αναγκαίων ποσοτήτων νερού που συγκεντρώνονται από τη λεκάνη απορροής.
- Εξασφάλιση στεγανότητας του ταμιευτήρα από τα πετρώματα τα οποία τον δομούν.
- Ευστάθεια των πρανών τόσο της λεκάνης κατάκλυσης ή και υψηλότερων περιοχών, όσο και της θέσης του φράγματος.
- Ικανοποιητική γνώση της σεισμικότητας της περιοχής για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.
- Παρουσία στη λεκάνη απορροής και σε ικανοποιητικό βαθμό, ανθεκτικών στη διάβρωση βραχωδών και εδαφικών σχηματισμών, ώστε οι φερτές ύλες να εξασφαλίζουν τουλάχιστον τη διάρκεια ζωής που προβλέπεται από το Benefit Cost Ratio (BCR) (Δείκτης ωφελιμότητας), που στην οικονομική ανάλυση λαμβάνονται τα 50 χρόνια. Δείκτης ωφελιμότητας BCR ονομάζεται το πηλίκο της απόδοσης (A) του έργου στη διάρκεια ζωής του, προς το ολικό κόστος (K) κατασκευής και συντήρησης – λειτουργίας  $BCR=A/K$ . Το έργο θεωρείται οικονομικό όταν ο δείκτης αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας.
- Εξασφάλιση ασφαλούς θεμελίωσης και στεγανότητας στη ζώνη του φράγματος.
- Παρουσία πετρωμάτων με ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα για την κατασκευή του φράγματος και ποιότητα που να περιορίζει, όσο το δυνατόν περισσότερο, το κόστος υπογείων κατασκευών και να επιτρέπει την ασφαλή διάταξη των συναφών έργων.
- Ύπαρξη δάνειο-θαλάμων απόληξης υλικών κατασκευής σε αποστάσεις σχετικά μικρές

## 1.4 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε τρεις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαιο 2 - 7, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

- ❖ **Κεφάλαιο 2** αναλύεται η γεωλογική κατάσταση της θέσης του φράγματος όσο αφορά τη λιθολογία, τη τεχνική γεωλογία, τη μηχανική συμπεριφορά του βραχώδους υπόβαθρου και το υδρογεωλογικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής.
- ❖ **Κεφάλαιο 3** αναπτύσσονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη κατασκευή του φράγματος και παρουσιάζονται όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες που συλλέχθηκαν και μπορεί να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.
- ❖ **Κεφάλαιο 4** αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με τα είδη αστοχιών των πρανών και με τους τρόπους υπολογισμού συντελεστών ασφαλείας.
- ❖ **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται αναλυτικά το θεωρητικό και υπολογιστικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ευστάθειας του δεξιού αντερείσματος μέσω του προγράμματος FLAC.
- ❖ **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται οι σχετικές αναλύσεις για τα διάφορα μέτρα αντιστήριξης και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.
- ❖ **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η τελική σύνοψη των αποτελεσμάτων και παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

## Κεφάλαιο 2 Γεωμορφολογία περιοχής φράγματος



Εικόνα 2.1 Δορυφορική εικόνα περιοχής – θέσης φράγματος [27]

### 2.1 Λιθολογία περιοχής

Το Έργο είναι κατασκευασμένο στο γεωτεκτονικό περιβάλλον της Πελαγονικής ζώνης. Στη γεωλογική δομή της ζώνης κατάληψης συμμετέχει ευρύ φάσμα γεωλογικών σχηματισμών, τόσο του Παλαιοζωικού προαλπικού υποβάθρου, όσο και του Μεσοζωικού αλπικού καλύμματος. Σημαντική συμμετοχή έχουν επίσης οι τριτογενείς και κυρίως οι τεταρτογενείς μεταλπηκοί σχηματισμοί, καθώς και οι σύγχρονες αποθέσεις των ποταμών, των χειμάρρων και τα πλευρικά κορήματα[14], [15].

Το προαλπικό μεταμορφωμένο Υπόβαθρο της Πελαγονικής εκπροσωπείται με Παλαιοζωικούς Γνευσιοσχιστόλιθους και Μαρμαρυγιακούς Σχιστόλιθους. Στο σύνολό τους είναι πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί, με καθοριστική επίδραση στην υπόγεια υδροφορία και υδραυλική, της ευρύτερης νότιας πλευράς του Ταμιευτήρα. Στην περιοχή του έργου η παρουσία τους περιορίζεται σε μια μικρή επιφανειακή εμφάνιση στην περιοχή Λογγάς, του χωριού Ελάτη. Στην ευρύτερη περιοχή αποτελούν ένα συνεχές στεγανό φράγμα, τόσο πλευρικά (νότια), όσο και κάτω από την ζώνη των καρστικών μαρμάρων Βουνάσας–Τρανόβαλτου, από την περιοχή της Δεσκάτης μέχρι την περιοχή του Ρυμνίου ( γεωλογικός χάρτης - εικόνα 2.1).

Στους Αλπικούς σχηματισμούς της περιοχής του έργου περιλαμβάνονται, τα Τριαδικά Μάρμαρα Βουνάσας-Τρανοβάλτου, οι Φυλλίτες του κάτω Ιουρασικού, οι Οφιόλιθοι του μέσου και άνω Ιουράσικου και οι Ασβεστόλιθοι του άνω Ιουρασικού-Κρητιδικού. Τα Τριαδικά Μάρμαρα Βουνάσας – Τρανοβάλτου. Είναι παχυστρωματώδεις υπόλευκοι έως γκριζοί ανακρυσταλλωμένοι καρστικοί ασβεστόλιθοι. Αναπτύσσονται σε μία ζώνη πάχους 500m περίπου, στη νότια πλευρά του Ταμιευτήρα από το ύψος της Δεσκάτης μέχρι το Ρύμνιο. Στις βόρειες πλαγιές της Βουνάσας, από το χωριό Παλιουριά μέχρι την περιοχή “Λογγά” της Ελάτης η καρστική αυτή ζώνη έρχεται σε επαφή με τον ταμιευτήρα. Στη συνέχεια η ζώνη απομακρύνεται από το νότιο όριο του ταμιευτήρα. Στη περιοχή του χωριού Τρανοβάλτος γίνεται εκτεταμένη εκμετάλλευση των μαρμάρων, ενώ ανατολικότερα ο σχηματισμός βυθίζεται κάτω από τους Πλειοπλειστοκαινικούς σχηματισμούς της λεκάνης των Σερβίων. Ακόμη πιο ανατολικά επανεμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι, σε μικρές αποσπασματικές εμφανίσεις στις παραποτάμιες περιοχές, 2χλμ κατάντη του φράγματος, όπου δίνουν και τις σημαντικές καρστικές πηγές του Ρυμνίου [15]. Οι πιθανές απώλειες νερού μέσα από τη ζώνη των καρστικών τριαδικών Μαρμάρων Βουνάσας – Τρανοβάλτου, είναι το μοναδικό, αλλά πάντως πολύ σημαντικό πρόβλημα στεγανότητας του Ταμιευτήρα.

Οι Φυλλίτες είναι ένας συνολικός χαρακτηρισμός μιας λιθολογικής σειράς μεταμορφωμένων (σε πρασινοσχιστολιθική φάση μεταμόρφωσης) πετρωμάτων, ηλικίας κατώτερου Ιουρασικού. Η σειρά περιλαμβάνει, τυπικούς Φυλλίτες, Ασβεστοφυλλίτες, Μαρμαρυγικούς - Σερικιτικούς και Χλωριτικούς Σχιστόλιθους, Χαλαζίτες με τη μορφή φλεβικών διεισδύσεων ή ενστρώσεων, καθώς και φακοειδείς ενστρώσεις κρυσταλλικών Ασβεστολιθών. Η διάταξη των χαλαζιτικών φλεβών και ενστρώσεων, που έχουν πάχος από λίγα μέχρι μερικές δεκάδες εκατοστά, είναι σε σημαντικό βαθμό προσανατολισμένη, ακολουθώντας τη σχιστότητα της βραχομάζας. Το ίδιο ως ένα βαθμό ισχύει και για τη διάταξη των ασβεστολιθικών εγκλεισμάτων τα οποία τοπικά εμφανίζουν ένα παράλληλο προσανατολισμό προς τη σχιστότητα, σε μακρο-κλίμακα όμως έχουν σαφώς φακοειδή διαμόρφωση, με σχετικά απότομες πλευρικές αποσφηνώσεις. Οι διαστάσεις αυτών των ασβεστολιθικών ενστρώσεων, στην επιμήκη τους διάσταση είναι σημαντικές (μερικές δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα) ενώ το πάχος τους περιορίζεται σε λίγα μέτρα και πάντως δεν ξεπερνά τα 10-20 μέτρα. Από τις παρατηρήσεις, στον σχετικά περιορισμένο χώρο του έργου, δημιουργείται η εντύπωση ότι οι ασβεστολιθικές ενστρώσεις είναι πιο συχνές στους ανώτερους φυλλιτικούς ορίζοντες και ότι η τοποθέτηση μέσα στη φυλλιτική βραχομάζα, ή τουλάχιστον η διαμόρφωσή τους είναι τεκτονική[15].

Οι Φυλλίτες δομούν γεωλογικά την περιοχή εξόδου του Αλιάκμονα από το φαράγγι του Ιλαρίωνα και αποτελούν το γεωλογικό περιβάλλον των κυριότερων κατασκευών του έργου. Καταλαμβάνουν το μέγιστο μέρος της επιφάνειας θεμελίωσης του Φράγματος και το γεωλογικό μέσο στο οποίο σχεδιάσθηκαν και υλοποιούνται τα μέτρα στεγανοποίησης της περιοχής του [15].

Οι Οφιόλιθοι, γενικός όρος που περιλαμβάνει μια μεγάλη σειρά υπερβασικών και βασικών πυριγενών πετρωμάτων (Περιδοτίτες, Πυροξενίτες, Γάβρους, Διορίτες, Δουνίτες, συχνά σερπεντινωμένους) στην παγκόσμια γνωστή και εξαιρετικά ενδιαφέρουσα, από γεωλογική πετρογραφική και μεταλλευτική άποψη, εμφάνιση του Βούρινου. Ο σχηματισμός είναι αλλόχθονος, δημιουργήθηκε από άνοδο και υποθαλάσσια έκχυση βασικού μάγματος, δυτικότερα από τη σημερινή του θέση, στο χώρο της Υποπελαγονικής Ζώνης. Στη συνέχεια κατά το μέσο Ιουρασικό, επωθήθηκε προς τα ανατολικά και τοποθετήθηκε τεκτονικά πάνω από τα αυτόχθονα πετρώματα της Πελαγονικής Ζώνης (Φυλλίτες, Τριαδικά Μάρμαρα). Τα πετρώματα αυτά έχουν περιορισμένη υδατοπερατότητα και μόνο στην επιφανειακή χαλαρωμένη ζώνη τους μπορεί να κυκλοφορήσει και να αποθηκευτεί νερό. Για τον ταμιευτήρα



είναι πρακτικά ένας ικανοποιητικά στεγανός σχηματισμός και εξασφαλίζει την στεγανότητα σε μεγάλο μήκος της βόρειας και σε σημαντικό τμήμα της νότιας πλευράς του [15].

Οι Ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού. Είναι μερικά ανακρυσταλλωμένοι, παχυσωματώδεις ανοιχτόχρωμοι καρστικοί ασβεστόλιθοι. Εμφανίζονται στην περιοχή του φράγματος, και σχηματίζουν το στενό φαράγγι με τα υψηλά κατακόρυφα πρανή, 50 -100 μέτρα ανάντη του άξονα. Η επαφή των ασβεστολίθων αυτών με τους υποκείμενους Φυλλίτες στη περιοχή του φράγματος είναι τεκτονική. Στους ασβεστόλιθους αυτούς θεμελιώθηκε το ανάντη πρόφραγμα και μέρος του ανάντη σώματος στήριξης του αναχώματος του φράγματος. Επίσης στο σχηματισμό αυτό διανοίχτηκε μεγάλο τμήμα όλων των σηράγγων, εκτός των αποστραγγιστικών. Ο σχηματισμός είναι καρστικός και έντονα υδροπερατός και αποτέλεσε βασική παράμετρο σχεδιασμού του Έργου, τόσο στην επιλογή της ακριβούς θέσης του άξονα όσο και στην επιλογή των επεμβάσεων στεγανοποίησης της περιοχής φράγματος.

Στους νεότερους μεταλλικούς σχηματισμούς, που συμμετέχουν στη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του έργου περιλαμβάνονται, οι Μολάσες της Μεσελληνικής Αύλακας, οι Πλειοκαινικοί λιμναίοι σχηματισμοί των λεκανών Σερβίων και Καρπερού, οι νεότεροι Πλειστοκαινικοί ποταμοχειμάρια και χερσαίοι σχηματισμοί, οι σύγχρονες αποθέσεις στις κοίτες του ποταμού και των χειμάρρων, και τα πλευρικά κορήματα στα πρανή των ορεινών όγκων.

Οι Μολάσες. Στην επιφάνεια εμφανίζονται μόνο σε μικρές αποσπασματικές εμφανίσεις στις όχθες του ποταμού, από την περιοχή Παλιουριάς –Παναγιάς μέχρι την περιοχή του Καρπερού. Σε όλη την πιο πάνω περιοχή όμως αποτελούν το υπόβαθρο των λιμναίων πλειοκαινικών σχηματισμών της λεκάνης Καρπερού. Πρόκειται για την στρωματογραφική ακολουθία της σειράς Τσοτιλίου – Μετεώρων, αποτελούμενη από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μάργες. Μεμονωμένοι αμιγώς χονδροκλαστικοί ορίζοντες της Μολάσας παρουσιάζουν κάποια υδατοπερατότητα, στο σύνολό του πάντως ο σχηματισμός, σύμφωνα με τις θεωρήσεις της μελέτης, εξασφαλίζει ικανοποιητική στεγανότητα για τον ταμιευτήρα [15].



## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

#### ΟΛΟΚΑΙΝΟ

**Σύγχρονες προσχώσεις και ελουβιακός μαντίλις:** ασυνόριστα υλικά με άμμο, αργίλους και χάλκιες στις κοίτες των ποταμών και χειμάρρων, καθώς και σε κλίτες λόφων.



**Recent deposits and eluvial mantle:** unconsolidated material with sands, clays and gravels in the river and torrent beds, as well as in areas of lower altitude.

### QUATERNARY

#### HOLOCENE

#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

**Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων:** ανθρακίτες και οχτρολιθικές κροκάδες και λεπυρές συγκαλλημένες με ερυθρόχρωμο σβερνακικό υλικό.



**Screte and talus cones:** carbonate and schist cobbles and rubbles consolidated with red-colored carbonate cement.  
Thickness: 20 – 30m

#### UPPER PLEISTOCENE

**Κροκαλοτοπή:** χαλαρά κροκαλοτοπή που αποτελούν τσιάλια σβερβίδια του Αλιάκμονα ποταμού.



**Conglomerates:** loose conglomerates consisting an old terrace of Alikmon river.

#### ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ (ΒΙΛΛΑΦΡΑΓΚΙΟ)

#### LOWER PLEISTOCENE (VILLAFRANCHIAN)

**Ερυθρές άργιλοι, κροκαλοαυτοτοπομή, άμμοι:** ποταμοχημικές αποθέσεις με τσιάλια βαθιά συνεκτικότητας κατά θέας.  
Πάχος: έως 100m



**Red clays, breccio-conglomerates, sands:** fluvial-torrential deposits of ranging cohesiveness locally.  
Thickness: up to 100m

### NEOGENE

#### NEOGENE

#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ - ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

#### UPPER PLOCCENE - LOWER PLEISTOCENE

**Άμμοι, ψαμμίτες, άργιλοι:** καστονο - κτηνόχορπες αμυγδαίες αποθέσεις, μικρού βαθμού συνεκτικότητας και με άφθονο απολιθώματα.



**Sands, sandstones, clays:** brown-yellow lacustrine deposits of low cohesion, with abundant fossils.  
Fossils:

Πάχος: 50m

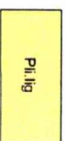
*Planorbis, Neritina*

Thickness: 50m

#### ΜΕΣΟ - ΑΝΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

#### MIDDLE - UPPER PLOCCENE

**Μάρμαρες, άργιλοι, άμμοι, λιγνίτες:** τα κατώτερα μέλη αποτελούνται από κροκαλοτοπή και ερυθρές άργιλους ενώ προς τα πάνω εξελίσσονται σε λευκούς πηγύλι, ψαμμίτων και ψαμμιτομαργαλών. Σχηματισμός ανάλογος με Πάχος: μεγαλύτερο των 500m



**Marls, clays, sands, lignites:** the lower members consist of conglomerates and red clays, passing upwards into white marly limestones in banks, while marls and thin lignite layers.  
Thickness: exceeding 500m

#### ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

#### LOWER MIOCENE

**Μολάσσα:** αποτελείται από εναλλόμενες κροκαλοτοπιών (με κροκάδες από σβερστολιθικά και κρυσταλλικά πετρώματα) και ψαμμίτων και από εναλλόμενες μαργαλών, ψαμμίτων και ψαμμιτομαργαλών. Σχηματισμός ανάλογος με το Σχηματισμό Τσιολίου.  
Ηλικία: Κατώτερο Μειόκαινο  
Πάχος: έως 200m



**Molasse:** consisting of alternations of conglomerates (with cobbles of limestone and crystalline rocks) and sandstones, as well as alternations of marls, sandstones and arenaceous marls. This formation corresponds to the Tsoli formation.  
Age: Lower Miocene  
Thickness: up to 200m

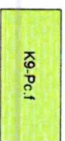
#### ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ

#### PELAGONIAN ZONE

#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΤΙΔΙΚΟ ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΑΙΣΤΡΙΑΧΤΙΟ

#### UPPER CRETACEOUS UPPER MAASTRICHTIAN

**Φλύσχης:** μεταψαμμίτες, μεταπηλίτες, φυλλίτες και σβερστομαργαλιό σβερστολίθοι που μετατρέπουν σε λατροπηλάκους σβερστολίθους με μάργες.  
Ηλικία: Άνωτερο Μαιστράχτιο. Βάσει των αντίστοιχων σχηματισμών σε γειτονικά γεωλογικά φύλλα.  
Πάχος: έως 200m

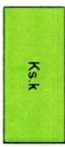


**Flysch:** melasandstones, melapelles, phyllites and calc-marly limestones passing into thin-platey limestones with marls.  
Age: Upper Maastrichtian, based on relevant formations in adjacent geological map sheets.  
Thickness: up to 200m

## LEGEND

ΣΕΝΩΝΙΟ

**Ασβεστόλιθοι Λεπτοκρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και λεπτοκρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι με τυφλοπόρους**  
 Πάχος: έως 100m

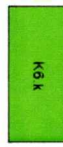


**Limestones thin-platey:** calc-narly limestones and thin-platey limestones with sliex.  
 Thickness: up to 100m

SENONIAN

ΒΑΡΕΜΙΟ/ΑΛΒΙΟ - ΣΕΝΩΝΙΟ

**Ασβεστόλιθοι:** αναπτύσσονται επικλινόμενως πάνω στους αερίεντινιμωμένους χαρξόβουγλιτες με τη χωρίξ λασπίτι και παρατηρούνται στο ύψωμα 670 ΝΝΑΑκίδ του χωριού Κτένι.  
 Από τη βάση προς την οροφή διακρίνονται:



**Limestones:** transversely developing on the serpentinized harzburgites with/ without laterite, observed at 670 altitude SSE of Kteni village.  
 From base to top the following were distinguished:

BARREMIAN / ALBIAN – SENONIAN

Αθροισικά κροκαλοποιές με κροκάδες προερχόμενες από κοραλλιογενείς ασβεστόλιθους με λασπίτικο τοιχείο.  
 Απολιθώματα στις κροκάδες:

*Tubiphytes moronensis* CRESCENTI, *Suppiluliumella* sp.

και θραύσματα κοραλλίων,  
 Ηλικία: κροκαλλών: Ανώτερο Ιουρασικό

and coral fragments.  
 Cobbles' age: Upper Jurassic.

Μαύλος, πλακώδης, μικρικός και λασπιτοπαγής ασβεστόλιθος, υφέλυπης φάσεως, που βρίσκεται επί του κροκαλοποιούς ή απ' ευθείας επί του υποβάθρου.  
 Απολιθώματα:

*Salpingoporella uradanasi* CONRAD, PEYBERNÉS & RADIOICIC and ostracodes.

και οστρακόωδη,  
 Ηλικία: Βαρρέμιο - Αλβιο

Age: Barremian - Albian.

Παυσιτάκωδης κλαστικοί ασβεστόλιθοι (τρουβιλιτικοί ασβεστογενίτες), τυφλοπόροιοι, με στρωματίδια ή φώλες με τετραγώνους βιομικρίτες.  
 Απολιθώματα:

Thick-platey clastic limestones (trufbiditic calcarenites), sliex-bearing, occur with thin layers or pockets of pelagic bionmicrites.  
 Fossils:

*Obololima (Conicobololima) conica* (D'ARCIAC), *Nezzazalima simplex* OMARA, *Nezzazalima picardi* (HENSON), *Pseudolituonella reichelii* MARIÉ, *Chrysosidima gradata* DORBIGNY, *Cuneolina pavonia* DORBIGNY, *Pseudocyclammina sphaeroides* GENDROT, "*Traumatoporella*";

θραύσματα πουβιλιτών (R adiolitida e). Στους τετραγώνους βιομικρίτες, ακτινώδη, βελόνες στόγγων και στόνια τετραγώνου τρομητοπόρου (*Rotalipora* sp.).  
 Ηλικία: Κενοζώοιο.

rudist fragments (R adiolitida e). In the pelagic bionmicrites: radiolaria, sponge spicules and rare planctonic foraminifers (*Rotalipora* sp.).  
 Age: Cenomanian.

Πολυγενείς ασβεστοποιοιές με κλαστές προερχόμενες από τον προηγούμενο οριζώντα ή από τεταγμένα στρωματίδια, συνήθως με χαυδή διατόφι.  
 Απολιθώματα:

*Dicyclina schlumbergeri* MUNIER-CHALMAS, *Reticulirella* sp.

και τα του προηγούμενου οριζώντα μέσα στους κλαστές.  
 Ηλικία: Κατώτερο Σενώοιο

and those of the former horizon within the clasts.  
 Age: lower Senonian.

Πάχος: έως 200m

Thickness: up to 200m

ΑΝΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

**Ηηητικοί ασβεστόλιθοι:** τερρόλεκοί ασβεστόλιθοι, μικρολασπιτοπαγείς έως κλαστικοί, σε φάση πρέθλοπιου τύπου reef, που αναπτύσσονται στο ύψωμα Καστρο στο χωριό Κτένι.  
 Απολιθώματα:



**Nettic limestones:** gray-white limestones, microbrecciate to clastic, with reef type margin phase, developing at Kastro altitude in Kteni village.  
 Fossils:

UPPER JURASSIC

θραύσματα εχινόδερμων και ασβεστινικών στόγγων, βελόνες εχίνων, κοράλλια, ασβεστινικοί στόγγιοι, επιφλοιωτικά φύκη.  
 Ηλικία: Ανώτερο Ιουρασικό  
 Πάχος: έως 50m

fragments of echinoderms and calcitic sponges, echinus spicules, corals, calcitic sponges, crusted algae.  
 Age: Upper Jurassic.  
 Thickness: up to 50m

*Tubiphytes moronensis* CRESCENTI, *Mercierella?* dactea DRAGASTAN, *Muranella parvissima* (DRAGASTAN), *Protoperonopsis striata* WETNSCHENK, *Mohliella basiliensis* (MOHLER), *Salpingoporella cf. pygmaea* (GUENBEL), "*Bacrinella*";

ΜΕΣΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

**Ηφαίστεια οφθαλμική ενότητα:** σύστημα ποταμών διαδοικών φάσων που εφεί τονία προς τα πάνω κυματίζει και προσεκκοποιεί λάβες με εφόδους κροταλούς. Οι εφόδοι κροταλοί τρέφουν το ποτάμιον Αιτωλικό. *Sylocapsa robusta* MATSUOKA, *Sylocapsa oblongula* KOCHER, *Umma* sp. A BAUMGARTNER et al. και *Sylocapsa beata* MATSUOKA, που προσδιορίζουν ηλικία Ανωτέρου Βαυαρικού-Κεντρικού Βαυαρικού (Chan et al., 2003 in Oikali).

Ηλικία: Μέσο Ιουρασικό (Ανώτερο Βαυαρικό - Κεντρικό Βαυαρικό)

Πάχος: έως 200m



**Volcanic ophiolitic unit:** multiple diabase vein complex, with massive pillow lavas and red cherts towards the top. The red cherts contain the following Radiolaria: *Sylocapsa robusta* MATSUOKA, *Sylocapsa oblongula* KOCHER, *Umma* sp. A BAUMGARTNER et al. and *Sylocapsa beata* MATSUOKA, which determine an age of Upper Bajocian - lower Bathonian (Chan et al., 2003 in Oikali).

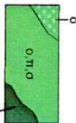
Age: Middle Jurassic (upper Bajocian - lower Bathonian)

Thickness: up to 200m

**Υπεροβασική ενότητα:** υπερτονιτικό και συχνά φυλλώδη υπεροβασικά πετρώματα, προς τη βάση με αεραγωγούς (σ) ανακατέι η μαρμαίωση σαρπ με εκκολαφές **χαρτογράφηση - βουνίων** (σ,π,σ) και οι βουνιές (σ) θάλασσα σε χρωμίτες. Τονία ορισμένοι προσπορίζεται, εφόδους, κροταλούς συγκεντρωσών υπό μορφή φυλλών οφθαλμικών.

Ηλικία: Μέσο Ιουρασικό, με βάση χρονολογήσεις U-Pb σε ζιρκόνια (Υόββου και Τζαχουλοπούλη, προσοχής Μπακογιάννης, Κνίδη) που έδωσαν ηλικίες 168 - 173 Ma (Lati et al., 2004 in Chem. Geol.).

Πάχος: έως 700m



**Ultrabasic unit:** schistose and frequently foliated ultrabasic rocks of **serpentinites** (σ) towards the base, followed by **harzburgite and dunite alternations** (σ,π,σ) and finally **dunites** (σ) rich in chromites. In places, limited bivalent concentrations occur in the form of emersion nests.

Age: Middle Jurassic, according to U-Pb zircon dating (in gabbro and plagiogranite from the Microclisoura area, Kniid) which provided ages between 168 - 173 Ma (Lati et al., 2004 in Chem. Geol.).

Thickness: up to 700m

ΚΑΤΩΤΕΡΟ - ΜΕΣΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

**Τεκτονο-επιμορφωτές μέλαγγες:** με οχρτολίθους και φυλλίτες που μετατρέπουν προς τα υποκείμενα ενδοβασικά πετρώματα υπό μορφή **χαρτογράφησης** οχρτολίθων, ένα προς τα πάνω μετατρέπουν σε οχρτολίθους και φυλλίτες. **Χαρτογράφηση** στο την **παραοχρτολίθική φάση** μετατρέφονται με την παρουσία των οφθαλμικών παραγενέσεων **χολαζό-αβιθιό-επιδο-βιοίτη** και **χλωρίτη-μολυβδίνης-επιδο-αβιθι**. Τα οστρώα μέλη **έξυλίσσονται** σε ένα μέλαγγα που περιέχει κατά τόπους **φωσφοίτη** τεύχη κρυσταλλικών οφθαλμικών, μορφών, **μτροφωμίων**, **σερπεντίνων**, **αμφιβολίτων**, **εφύδρων** κροταλίων και ιδόμων.

Ηλικία: Κεντρικό - Μέσο Ιουρασικό

Πάχος: έως 50m



**Tectono-sedimentary melange:** with schists and phyllites passing to the underlying carbonate rocks in form of calc-miscaceous schists, and upwards into schists and phyllites. They are characterized by greenschist facies metamorphism with the presence of mineral paragenesis with quartz-able-epidote-biotite and chlorite-muscovite-epidote-able. The upper members pass into a melange that contains locally lenticular particles of crystalline limestone, marbles, meta-sandstones, serpentinites, amphibolites, red cherts and jaspers.

Age: Lower - Middle Jurassic.

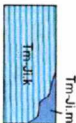
Thickness: up to 50m

ΜΕΣΟ ΤΡΙΑΣΙΚΟ-ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

**Αφειρολίθιοι κρυσταλλικοί:** ανοικτότερο έως λευκό, **μέσο-παχύ-στρωματώδες** (Tm-Jl,k), προς τη βάση μετατρέπουν τονία σε οκροπέτρους και κροταλούς που και θέλει είναι δοκιμαζόμενοι. Προς την οψη γίνονται **κροταλινώδεις με ενσπινδούς τριπολιθών** (Tm-Jl,mr2) που μετατρέπουν σε τονιόδεις κροταλούς.

Ηλικία: Μέσο Τριασικό - Κατώτερο Ιουρασικό με βάση τη γεωλογική φύλλα

Πάχος: μεγαλύτερο των 500m



**Limestones crystalline:** light gray to white, **medium to thick-bedded** (Tm-Jl,k), passing towards the base into **dark gray and thin-bedded**, in places dolomitized. Towards the top they become **thin-layered with silicate intercalations** (Tm-Jl,mr2) passing into laminar cherts.

Age: Middle Triassic - Lower Jurassic, according to the adjacent geological map sheets.

Thickness: exceeding 500m

ΠΑΛΑΙΟΖΟΙΚΟ

**Γνεϊσοί - γνευσιοοχρτολίθιοι - οχρτολίθοι:** οφθαλμώδεις, γνεϊσο-οχρτογενέσεις με τονιστή οχρτωδή υπό μορφή οχρτολίθων σε ελληνοπαρυφικούς, ελληνοβασικούς, χλωρίτη-μολυβδίνης-μολυβδίνης, επιδο-μολυβδίνης-μολυβδίνης οχρτολίθους, ένα προς τα πάνω σε βιοίτη-μολυβδίνης οχρτολίθους, **διδοχίτων** συχνά στο χαλαράς φάσεις.

Ηλικία: Παλαιόζοικη

Πάχος: μεγαλύτερο των 1000m



**Gneisses - gneiss-schists - schists:** augen gneisses - schist-gneisses with laminated schistose texture, passing into bimicaeous, amphibolite, chlorite-garnet-muscovite, epidote-muscovite schists, and upwards into biotite-amphibolite schists. They are frequently traversed by quartz veins.

Age: Paleozoic.

Thickness: exceeding 1000m

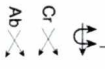
ΠΑΛΕΟΖΟΙΚΟ

MIDDLE JURASSIC

LOWER - MIDDLE JURASSIC

MIDDLE TRIASSIC - LOWER JURASSIC

Γεωλογικό όριο	—————	Geological boundary
Γεωλογικό όριο πιθανό ή καλυμμένο	- - - - -	Geological boundary probable or covered
Πήγμα ορατό	—————	Fault
Πήγμα πιθανό ή καλυμμένο	- - - - -	Fault probable or covered
Πήγμα κοινικό με ένδειξη του καταβόσκους τμήχους και πιθανή προέκτασή του	—————	Normal fault indicating footwall block and its probable extension
Εφίπτευση και πιθανή προέκτασή της	—————	Uplift and its probable extension
Επιείσηση και πιθανή προέκτασή της	—————	Overthrust and its probable extension
Τεκτονική επαφή	—————	Tectonic contact
Δείκνωση και κλίση στρωμάτων	—————	Strike and dip of beds
Οριζόντια στρωμάτια	—————	Horizontal beds
Δείκνωση και κλίση φυλλωδοφής	—————	Strike and dip of foliation
Ψήφισμα	—————	Stretching lineation
Δείκνωση και κλίση αναστραμμένων στρωμάτων	—————	Strike and dip of reversed beds
Άξονας κεκλιμένου οριζικού	—————	Recurrent antinormal axis
Εμφάνιση μεταλλεύματος Χρωμίου	—————	Ore occurrence of Chromite
Εμφάνιση μεταλλεύματος Ασβεστού	—————	Ore occurrence of Asbestos



Η γεωλογική χαρτογράφηση έγινε διαδοχικά από τους γεωλόγους του ΙΓΜΕΜ Δρ. Α. ΦΩΤΙΑΔΗ κατά την περίοδο 1991-93, 1995, 2006-08, Δρ. Δ. ΓΑΛΑΝΑΚΗ κατά την περίοδο 1995, 2006-07, Δρ. Α. ΜΑΥΡΙΔΗ και Δρ. Α. ΚΕΛΕΠΕΡΤΖΗ κατά το έτος 1977.

Μικροπαλαιοντολογία: Δρ Ν. ΚΑΡΡΑΣ

Γεωλογική χαρτογράφηση: Πρόγραμμα εκπόνησης Βασικού Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000

Ψηφιοποίηση – Χαρτοσύνθεση: Έργα συγχρηματοδοτούμενα από το Γ΄ ΚΠΣ (2000 - 2006)

Χαρτογραφία – Επιμέλεια: Δ/ση Γενικής Γεωλογίας και Γεωλογικών Χαρτογραφήσεων, Εργαστήριο Ψηφιακής Χαρτογραφίας - ΓΣΠ και Έκδοσης Γεωλογικών Χαρτών

Διευθυντής: Δρ Π. ΤΣΟΜΠΟΣ

Έκδοση:

Διατηρείται το συγγραφικό δικαίωμα του ΙΓΜΕΜ

Γενικός Διευθυντής:

The geological mapping was carried out successively by the IGME geologists Dr A. PHOTIADES during 1991-93, 1995, 2006-08, Dr D. GALANAKIS during 1995, 2006-07, Dr A. MAVRIDES and Dr A. KELEPERTZIS during 1977 .

Micropaleontology: Dr N. CARRAS

Geological mapping: Program for compiling the Geological Map of Greece at scale 1:50.000

Digitizing – Map compilation: Funded by the EU Community Support Framework 2000-2006 (3rd CSF).

Cartography – Editing: Division of Geology and Geological Mapping, Digital Cartography - GIS and Geological Maps Publication Laboratory

Head: Dr P. TSOMBOS

Publication:

Copyright IGME

General Director:

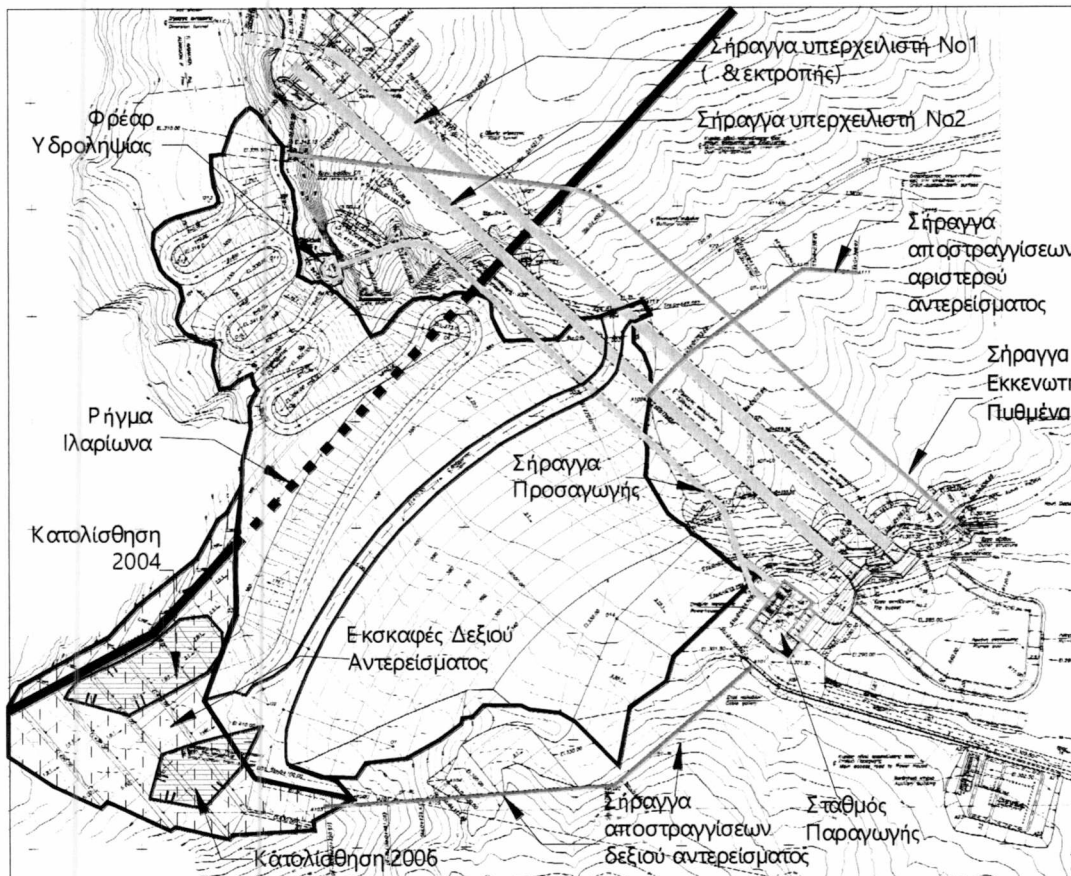
## 2.2 Υδρογεωλογικό υπόβαθρο

Ο φυλλίτης και οι φυλλιτικές εν διαστρώσεις της μεταβατικής ζώνης χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή διαπερατότητα ( $k < 10^{-6}$  m/sec). Από τη συσχέτιση των τιμών αυτών με τις τάξεις σχιστοποίησης, προκύπτει σχετική αύξηση της διαπερατότητας όσο μειώνεται η ανάπτυξη των επιφανειών σχιστότητας και αυξάνεται η συχνότητα των επιφανειών διάκλασης. Αντίστοιχη διαφοροποίηση παρατηρήθηκε και στις δύο κύριες φυλλιτικές ενότητες της μεταβατικής ζώνης η διαπερατότητα των οποίων κυμαίνεται από  $10^{-6}$  έως  $10^{-9}$  m/sec.

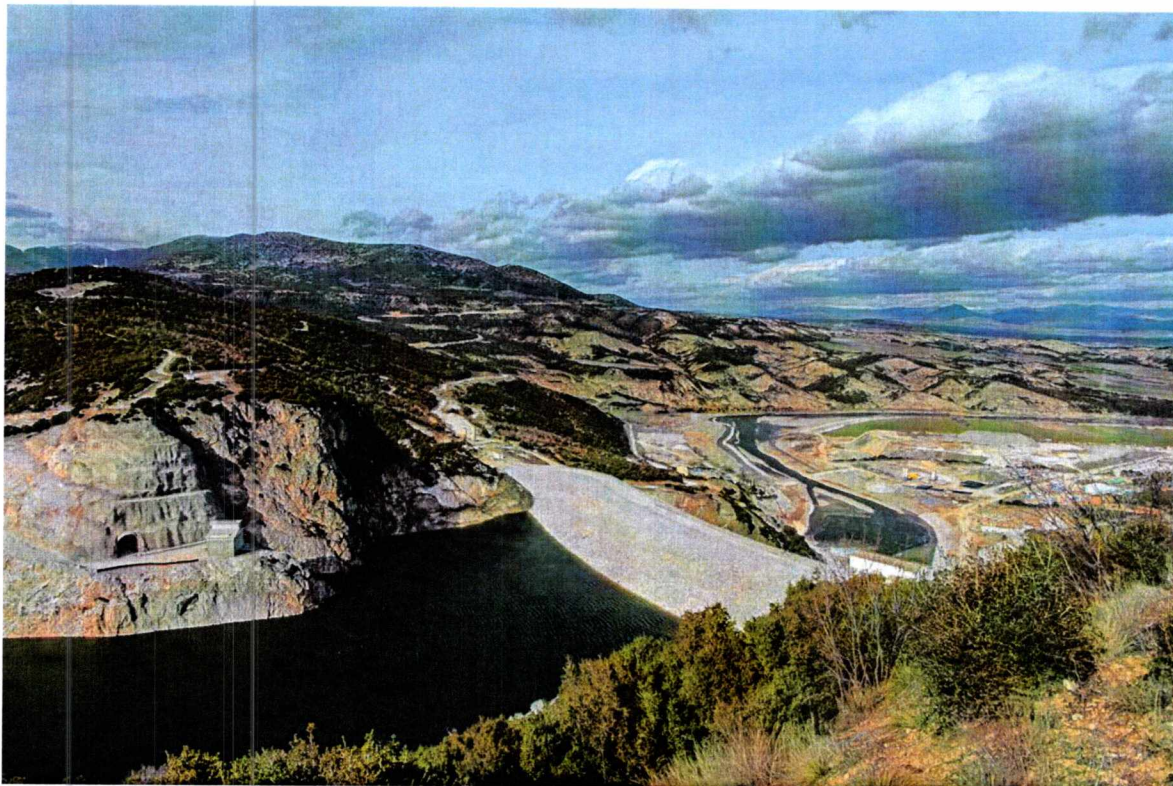
Η διαπερατότητα του κρυσταλλικού ασβεστόλιθου και των αντίστοιχων οριζόντων της μεταβατικής ζώνης καλύπτει σημαντικό εύρος τιμών και κυμαίνεται από  $10^{-4}$  έως  $10^{-9}$  m/sec. Με σαφή επικράτηση υψηλών απορροφήσεων (>30 Lugeon). Στην περιοχή του αριστερού αντερείσματος, ανεξάρτητα από την καρστικοποίηση της βραχώμαζας και τον βαθμό πλήρωσης των καρστικών έγκοιλων, σημειώθηκαν μεγαλύτερες απορροφήσεις στις κατιούσες βαθμίδες πίεσης, γεγονός που υποδηλώνει γρήγορη απόπλυση των υλικών πλήρωσης. Αντίθετα στην περιοχή του δεξιού αντερείσματος, όπου τα φαινόμενα καρστικοποίησης είναι λιγότερο έντονα παρατηρήσαμε μείωση των απορροφήσεων στις κατιούσες βαθμίδες πίεσης, κατά πλειοψηφία. Στους ορίζοντες της μεταβατικής ζώνης, η σχέση διαπερατότητας-καρστικοποίησης είναι περισσότερο σαφής. Στα τμήματα καρστικοποίησης I-II, η διαπερατότητα είναι της τάξης του  $10^{-7}$  m/sec ενώ αυτή αυξάνει κατά μία δύναμη ( $10^{-6}$  m/sec) όταν η καρστικοποίηση αυξάνει κατά μία τάξη.

Η διαπερατότητα των πλειο-πλειστοκαινικών σχηματισμών που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή του αριστερού αντερείσματος είναι γενικά μικρή και κυμαίνεται από  $10^{-6}$  έως  $5 \times 10^{-9}$  m/sec. Στην παρουσία όμως ζωνών τεκτονισμού με ή χωρίς ζώνη κερματισμού, όπου θα πρέπει να θεωρείται δυνατή η ανάπτυξη υψηλών τιμών διαπερατότητας [13-14][15].

### Κεφάλαιο 3 Κατασκευή Φράγματος, Προβλήματα & Αντιμετώπιση



Εικόνα 3.1, Διάταξη φράγματος Ιλαρίωνα [16]



Εικόνα 3.2 Φωτογραφία Φράγματος Ιλαρίωνα.

### 3.1 Φράγμα και συναφή έργα

Η εκμετάλλευση της φυσικής στεγανότητας των Φυλλιτών, στον σχεδιασμό των έργων στεγανοποίησης της ευρύτερης περιοχής του φράγματος, ήταν το κύριο κριτήριο με το οποίο επιλέχθηκε η θέση του φράγματος, έξω από το στενό ασβεστολιθικό φαράγγι. Η φυλλιτική βραχομάζα εμφανίζει μία σαφώς ανισότροπη συμπεριφορά, αναφορικά με την υδατοπερατότητα. Σε διευθύνσεις εγκάρσιες προς τη σχιστότητα, που είναι το κυρίαρχο σύστημα ασυνεχειών, ο σχηματισμός είναι πρακτικά στεγανός. Αντίθετα σε διευθύνσεις παράλληλες προς τη σχιστότητα η υδατοπερατότητα μπορεί να είναι σημαντική κυρίως μέσα από τις ασβεστοφυλλιτικές ζώνες. Το πρόβλημα της στεγανότητας του ευρύτερου αριστερού αντερείσματος διερευνήθηκε διεξοδικά, μέχρι την τελική φάση της μελέτης. Η τελική άποψη με βάση την οποία και σχεδιάστηκαν τα μέτρα στεγανοποίησης είναι ότι [15].

Η πιθανότητα ουσιαστικών διαρροών μέσα από τα ρήγματα, σε διευθύνσεις εγκάρσιες προς τη σχιστότητα είναι πολύ μικρή. Οι ασβεστοφυλλίτες είναι το μοναδικό μέλος του λιθολογικού πακέτου των φυλλιτών που εμφανίζεται με ανοικτές ασυνέχειες σε βάθη που φθάνουν ή και ξεπερνούν τα 100 μέτρα. Επίσης η υδατοπερατότητα στις αλλεπάλληλες ασβεστολιθικές ζώνες, που παρεμβάλλονται στους Φυλλίτες του αριστερού αντερείσματος παράλληλα προς τη σχιστότητα, είναι γενικά πολύ υψηλή, δεδομένου ότι οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι σε σημαντικό βαθμό καρστικοί. Η σχιστότητα, με παράταξη υποπαράλληλη προς τον άξονα και κλίση προς τα ανάντη, είναι γενικά ευνοϊκή για τη στεγανότητα. Μόνο στα “ανοικτά” του αριστερού αντερείσματος είναι δυνητικά πιθανές διαρροές, με κίνηση του



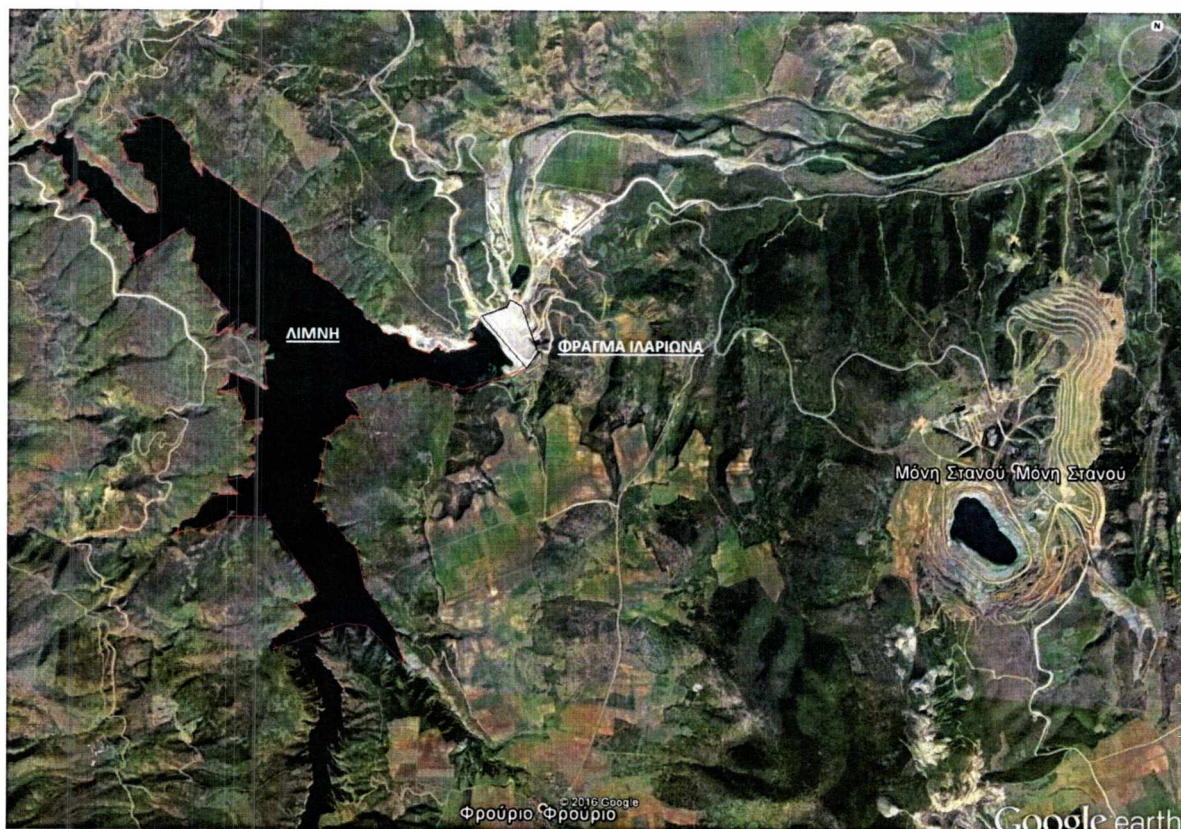
νερού, παράλληλα προς τη σχιστότητα και έξοδο είτε στις θέσεις που οι υδροπερατές ζώνες τέμνονται από εγκάρσιες μιγαγγείες, είτε με πλευρική διήθηση στα πλειοκαινικά ιζήματα που πληρούν την παλαιά κοίτη του Αλιάκμονα. Διαρροές με πλευρική διήθηση στα πλειοκαινικά ιζήματα της παλαιάς κοίτης του Αλιάκμονα, είναι δυνατές και απευθείας μέσα από τους ασβεστόλιθους, που σε απόσταση 2 km περίπου ΒΔ. του φράγματος έρχονται σε άμεση επαφή με τον εν λόγω σχηματισμό. Στη γεωερευνητική φάση της μελέτης διαπιστώθηκε ότι μεμονωμένοι ορίζοντες των πλειοκαινικών σχηματισμών, χαλαρά κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, κ.ά. έχουν σημαντική ως υψηλή διαπερατότητα, ενώ ο υπόλοιπος σχηματισμός είναι πρακτικά στεγανός [15], [4].

Η οριζόντια ανάπτυξη των στρωμάτων των Πλειοκαινικών αποθέσεων είναι εξαιρετικά ασταθής. Το πάχος τους μεταβάλλεται διαρκώς, και οι πλευρικές αποσφηνώσεις τους είναι πολύ συχνές και απότομες. Με αυτό το δεδομένο η μελέτη κατέληξε στην άποψη, ότι κίνηση νερού, μέσα στους διαπερατούς ορίζοντες του σχηματισμού, μπορεί να γίνει μόνο σε περιορισμένες αποστάσεις. Με βάση αυτή την παραδοχή, δεν αναμένονται ουσιαστικές διαρροές μέσω των λιμναίων πλειοκαινικών σχηματισμών, βόρεια του φράγματος στην περιοχή της παλιάς κοίτης, ούτε από άμεση τροφοδοσία, όπου ο σχηματισμός έρχεται σε επαφή με τη μελλοντική λίμνη, ούτε από έμμεση τροφοδοσία μέσω των πλευρικών διηθήσεων που προαναφέρθηκαν. Εκτός από τη διαπερατότητα, η σχιστότητα επηρεάζει καθοριστικά την ευστάθεια και τη γενικότερη συμπεριφορά της φυλλιτικής βραχομάζας στα φυσικά και τεχνητά πρανή, καθώς και στις υπόγειες εκσκαφές.

Στο αριστερό αντέρεισμα ο προσανατολισμός της σχιστότητας είναι ευνοϊκός για την ευστάθεια. Τα φυσικά πρανή ήταν σταθερά, σχετικά απότομα και με μικρή αποσπασματική χαλαρή επικάλυψη. Ενώ στο δεξιό αντέρεισμα ο προσανατολισμός της σχιστότητας είναι ελαφρά δυσμενής με φαινόμενες κλίσεις ομόρροπες στα φυσικά πρανή. Στο γεγονός αυτό κυρίως οφείλεται η γενικευμένη αστάθεια των φυσικών πρανών. Το δεξιό αντέρεισμα, καλύπτονταν από υλικά κατολισθήσεων σημαντικού πάχους (5-15m) σχεδόν στο σύνολό του [15],[4].

Για τα μεγάλων διαστάσεων υπόγεια έργα (σήραγγες) στο λιθολογικά δυσμενές φυλλιτικό περιβάλλον, η σχετική θέση της σχιστότητας και αξόνων των σηράγγων ήταν η κύρια παράμετρος που καθόρισε την ευστάθεια. Στο σύνολο σχεδόν των σηράγγων, στις φυλλιτικές τους διαδρομές, ο προσανατολισμός της σχιστότητας ήταν ευνοϊκός. Μόνο σε τμήματα τμήματα των μικρής διαμέτρου αποστραγγιστικών σηράγγων η σχιστότητα ήταν δυσμενής.

## 3.2 Ταμιευτήρας



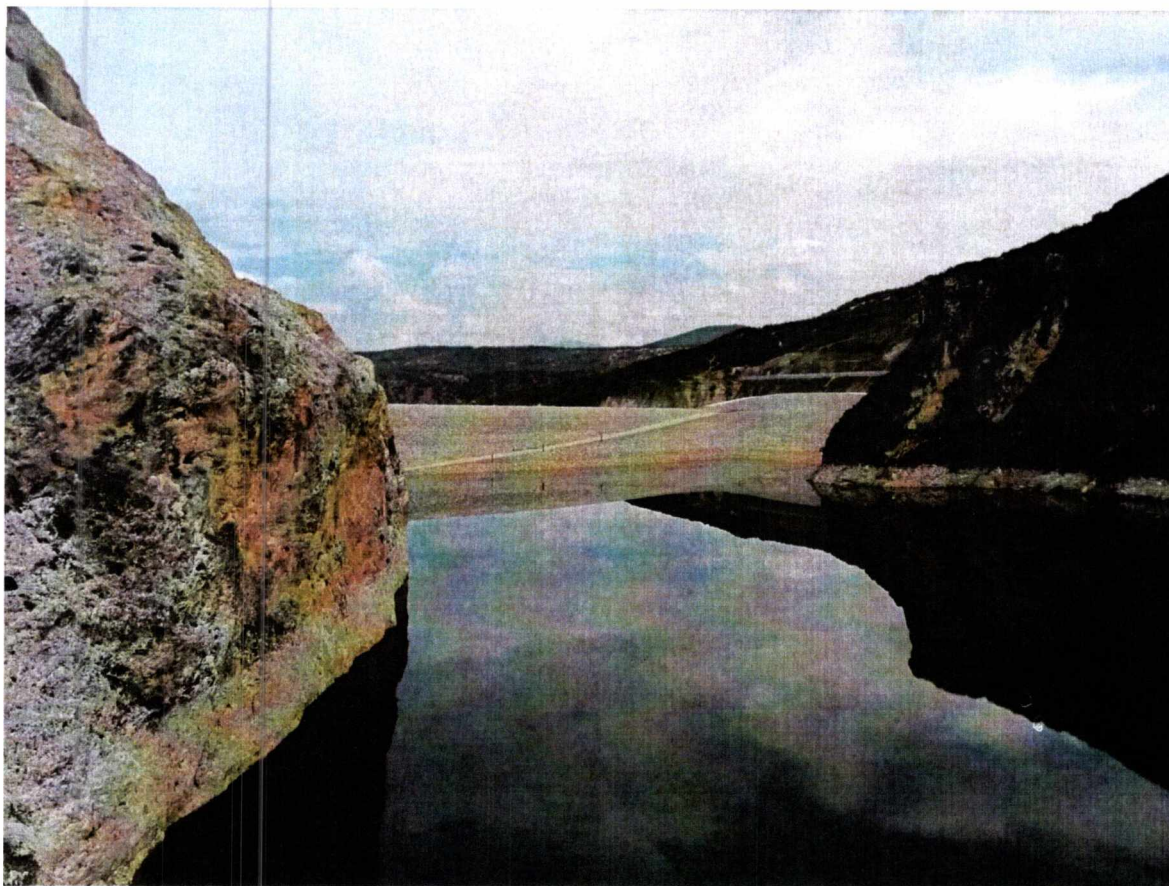
Εικόνα 3.3 Δορυφορική φωτογραφία Φράγματος Ιλαριωνα [27]

Η επιμήκης ζώνη των Τριαδικών καρστικών μαρμάρων Βουνάσας – Τρανόβαλτου πλάτους 500m περίπου, τέμνει τον μελλοντικό ταμιευτήρα στην περιοχή “Λογγά” της Ελάτης και με διεύθυνση από δυτικά προς τα ανατολικά καταλήγει στις πηγές Ρυμνίου, 2 km περίπου κατάντη της θέσης Φράγματος. Στην περιοχή Λογγά η ζώνη των μαρμάρων εξαφανίζεται κάτω από ένα κάλυμμα Πλειστοκαινικών χερσαίων ιζημάτων, πάχους 150 m περίπου, για να αναδυθεί δυτικότερα πάλι στην επιφάνεια και να συνεχισθεί προς τα δυτικά, στον ορεινό όγκο της Βουνάσας, μέχρι το ύψος του χωριού Παλιουριά, όπου βυθίζεται οριστικά κάτω από τους Οφιόλιθους και τις Μολάσες. Σύμφωνα με τα πορίσματα της γεωτεχνικής μελέτης κατασκευής του φράγματος (Πηγή: 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων, 2008) το βύθισμα είναι καρστικό με τον πυθμένα του να οριοθετεί περίπου και το δάπεδο του καρστ στα μάρμαρα. Εμφανής είναι και η συμβολή της τεκτονικής στη δημιουργία του βυθίσματος με τα μεγάλα ρήγματα που οριοθετούν ΒΑ τη λεκάνη.

Οι πιθανές διαρροές του Ταμιευτήρα, από την περιοχή του Λογγά προς τις πηγές Ρυμνίου, μέσα από τη ζώνη των μαρμάρων, ήταν το μεγαλύτερο γεωλογικό πρόβλημα που αντιμετώπισε η μελέτη του ΥΗ-Έργου, και εξίσου σοβαρό πρόβλημα για την κατασκευή. Τα κύρια στοιχεία που προέκυψαν από την έρευνα και τεκμηριώνουν την ύπαρξη του προβλήματος είναι [15]:

- Η συνέχεια της ζώνης των καρστικών μαρμάρων από την περιοχή του Λογγά μέχρι τις πηγές του Ρυμνίου.

- Η καρστικότητα των μαρμάρων που μέχρι το υψόμετρο + 300 m περίπου είναι έντονη. Κάτω από το υψόμετρο αυτό η καρστικότητα μειώνεται προοδευτικά για να σταματήσει πρακτικά περί το υψόμετρο + 190, όπου σύμφωνα με τα πορίσματα της μελέτης, εκτιμάται ότι βρίσκεται το δάπεδο καρστικοποίησης των μαρμάρων.
- Η ενιαία, σύμφωνα με τις όλες τις ενδείξεις, στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μέσα στη ζώνη των μαρμάρων. Οι στάθμες δείχνουν μια μικρή κλίση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (της τάξης του 0,2%), από την περιοχή του Λογγά, μέχρι τις πηγές Ρυμνίου, κλίση λογική για καρστικό μέσο.
- Η πολύ χαμηλή στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των μαρμάρων, που στην περιοχή του Λογγά είναι 35 – 45m χαμηλότερα από τη στάθμη του ποταμού. Η στάθμη αυτή παραπέμπει σε ανάλογα βαθιά στράγγιση της ζώνης των μαρμάρων, που σύμφωνα με τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής μόνο προς την περιοχή των πηγών Ρυμνίου είναι δυνατή.



Εικόνα 3.4 Φωτογραφία στέψης του φράγματος

### 3.3 Δεξί αντέρεισμα



Εικόνα 3.5 Φωτογραφία δεξιού αντερείσματος

#### 3.3.1 Γεωλογικές συνθήκες δεξιού αντερείσματος

Η γεωλογία του δεξιού αντερείσματος είχε διερευνηθεί διεξοδικά κατά τη φάση της μελέτης με την εκτέλεση λεπτομερούς γεωλογικής χαρτογράφησης, την διάτρηση 25 ερευνητικών γεωτρήσεων, σε πολλές από τις οποίες είχαν εγκατασταθεί πιεζόμετρα.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί του δεξιού αντερείσματος στη θέση θεμελίωσης του Φράγματος διαχωρίζονται από το σημαντικό κανονικό ρήγμα Ιλαρίωνα, το οποίο διατέμνει κάθετα περίπου την κοιλάδα του ποταμού (βλ. Σχ. 1). Το ρήγμα Ιλαρίωνα φέρνει σε τεκτονική επαφή τους κατάντη φυλλίτες με τους ανάντη παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους, Ιουρασικής ηλικίας. Το ανάγλυφο στην ανάντη του ρήγματος περιοχή, στην οποία θεμελιώνεται το κύριο τμήμα του ανάντη σώματος του Φράγματος, είναι ιδιαίτερα έντονο (υψηλά και απόκρημνα πρανή κλπ.). Αντίστοιχα, η μορφολογία κατάντη του ρήγματος, όπου θεμελιώνεται το κύριο μέρος του φράγματος (πυρήνας - κατάντη σώμα), είναι σχετικά ήπια στα ανώτερα υψόμετρα του αντερείσματος (κλίσεις της τάξης των  $20^{\circ}$  –  $30^{\circ}$ ), και γίνεται ελαφρά πιο απότομο (έως  $35^{\circ}$  περίπου) στα χαμηλότερα 50 m, αμέσως πάνω από την κοίτη του ποταμού [16].

Η βραχομάζα στην περιοχή αυτή δομείται από εναλλαγές φυλλιτών διαφόρων ορυκτολογικών τύπων (“τυπικοί”, σερικιτικοί, γραφιτικοί, ασβεστιτικοί κλπ). Στην περιοχή

εκσκαφών επικρατούν σαφώς οι “τυπικοί” φυλλίτες, και ακολουθούν οι ασβεστιτικοί, ενώ οι σερικιτικοί και γραφιτικοί φυλλίτες εμφανίζονται σε μικρού πάχους στρώσεις. Η διάταξη των φυλλιτικών εναλλαγών γίνεται παράλληλα με τη σχιστότητα, η οποία παρουσιάζεται κάθετη περίπου προς τις ισοϋψείς του φυσικού πρανούς, με κλίση προς τα ανάντη της τάξης των 35° έως 45° (μέση τιμή 37°). Όλοι οι τύποι φυλλίτη, πλην των ασβεστιτικών και μερικώς και των “τυπικών”, είναι συνήθως έντονα εξαλλοιωμένοι και σχιστοποιημένοι, ενώ επιφανειακά καλύπτονται από χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς (κορήματα – παλαιές κατολισθήσεις κλπ) μεταβλητού πάχους (από 5 έως 20 m περίπου) [16].

### 3.3.2 Γεωτεχνικός σχεδιασμός δεξιού αντερείσματος

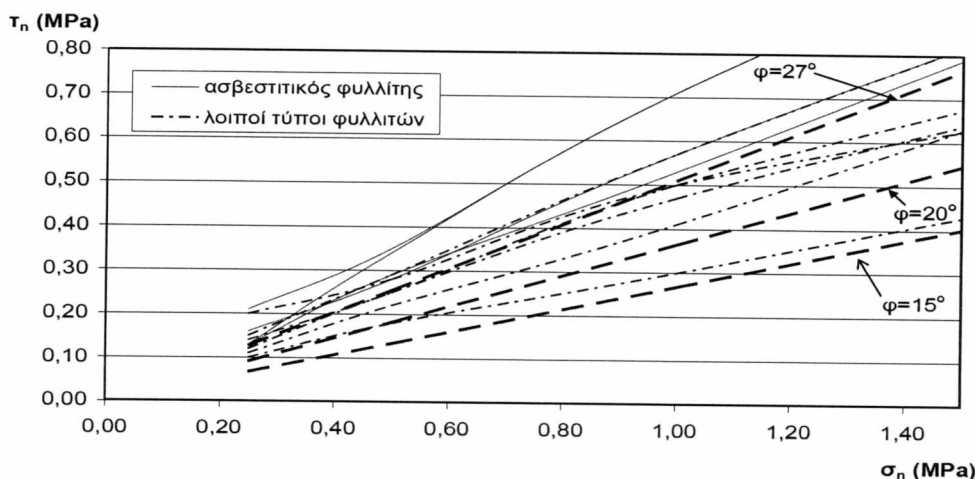
Για το σχεδιασμό των εκσκαφών του δεξιού αντερείσματος ελήφθη καταρχήν υπόψη η ανάγκη πλήρους απομάκρυνσης των επιφανειακών χαλαρών, ώστε να καταστεί εφικτή η θεμελίωση του φράγματος σε βραχομάζα αποδεκτής ποιότητας. Επιπλέον αναγκαία προϋπόθεση ήταν η διαμόρφωση μόνιμων πρανών με ευσταθείς κλίσεις στο τμήμα της εκσκαφής πάνω από την στέψη του φράγματος (υψόμετρο +410 m). Λόγω αφενός της μεγάλης έκτασης και του ύψους των δημιουργούμενων πρανών και αφετέρου της σχετικά υποβαθμισμένης ποιότητας της φυλλιτικής βραχομάζας, κρίθηκε σκόπιμο η διασφάλιση της ευστάθειας να επιτευχθεί με την επιλογή κατάλληλης γεωμετρίας εκσκαφών, αφαιρώντας πλήρως τα επιφανειακά χαλαρά υλικά [16].

Επελέγη η διαμόρφωση των πρανών εκσκαφής να γίνει με διεύθυνση παράλληλη περίπου με αυτή των ισοϋψών του φυσικού εδάφους και με σχετικά ήπιες κλίσεις, ώστε να αποφευχθεί η εφαρμογή μέτρων προστασίας. Τέλος, προκρίθηκε να εφαρμοστεί φυτοκάλυψη των μόνιμων πρανών με τη μέθοδο της υδροσποράς, για να μειωθεί η επιφανειακή διάβρωση και να επιταχυνθεί η περιβαλλοντική αποκατάσταση του χώρου. Βάσει του επιλεγέντος σχεδιασμού των πρανών, ο όγκος εκσκαφών προέκυψε σημαντικός ( $1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$  περίπου). Τα μόνιμα πρανά (πάνω από τη στέψη του φράγματος), ύψους 110 m περίπου, διαμορφώθηκαν με μέση κλίση 30° περίπου, ενώ τα υποκείμενα προσωρινά πρανά (έως την θεμελίωση του φράγματος στην κοίτη), ύψους ίσου με 130 m, με μέση κλίση 25° έως 35°. Στα μόνιμα πρανά προβλέφθηκε η υλοποίηση αναβαθμών, πλάτους 5 m ανά 20 m καθ’ ύψος, ώστε να είναι εφικτή η επίσκεψη και η τοποθέτηση οργάνων για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους. Η ευστάθεια των πρανών ελέγχθηκε με δύο μεθόδους [16]

- Με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, ελέγχοντας την αντοχή της φυλλιτικής βραχομάζας έναντι θραύσης. Οι διατμητικές παράμετροι αντοχής εκτιμήθηκαν με χρήση του κριτηρίου Hoek-Brown για βραχομάζα με ασυνέχειες. Είχε προηγηθεί βαθμονόμηση βάσει του συστήματος GSI της βραχομάζας των διαφόρων τύπων φυλλίτη και το σχετικό φάσμα τιμών προέκυψε στην περιοχή  $20 \leq GSI \leq 35$  και  $5 \leq m_i \leq 8$  (οι χαμηλότερες τιμές για τους σερικιτικούς – γραφιτικούς φυλλίτες και οι υψηλότερες για τους ασβεστιτικούς και δευτερευόντως για τους “τυπικούς” φυλλίτες). Η αντοχή σε θλίψη ( $\sigma_{ci}$ ) προέκυψε στο φάσμα  $2 \text{ MPa} \leq \sigma_{ci} \leq 50 \text{ MPa}$ , με μέση τιμή ίση με 25 MPa περίπου, μετά από σειρά δοκιμών σημειακής φόρτισης και περιορισμένο αριθμό δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε φυλλιτικούς πυρήνες όλων των τύπων από γεωτρήσεις. Οι χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση των διατμητικών παραμέτρων της βραχομάζας ήταν:  $GSI = 25$ ,  $m_i = 5$  και  $\sigma_{ci} = 10 \text{ MPa}$ . Οι τιμές αυτές επελέγησαν λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά ποσοστά παρουσίας των διαφόρων

λιθολογικών τύπων στο αντέρισμα και ήταν συντηρητικές, καθώς ελήφθη υπόψη το κάτω όριο τιμών κάθε τύπου φυλλίτη.

- Με αναλύσεις σφηνών, σχηματιζόμενων από συνδυασμούς του κύριου συστήματος ασυνεχειών (σχιστότητα) με όλα τα λοιπά κύρια συστήματα διακλάσεων, μεταβάλλοντας τους προσανατολισμούς και τις κλίσεις των πρηνών εκσκαφής. Είχαν προηγηθεί σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης επί της σχιστότητας σε τυπικούς ορυκτολογικούς τύπους φυλλιτών, χαρακτηριστικά αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2. Από τις δοκιμές είχε προκύψει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αντοχή αιχμής ελάχιστα διαφοροποιούνταν από την παραμένουσα.



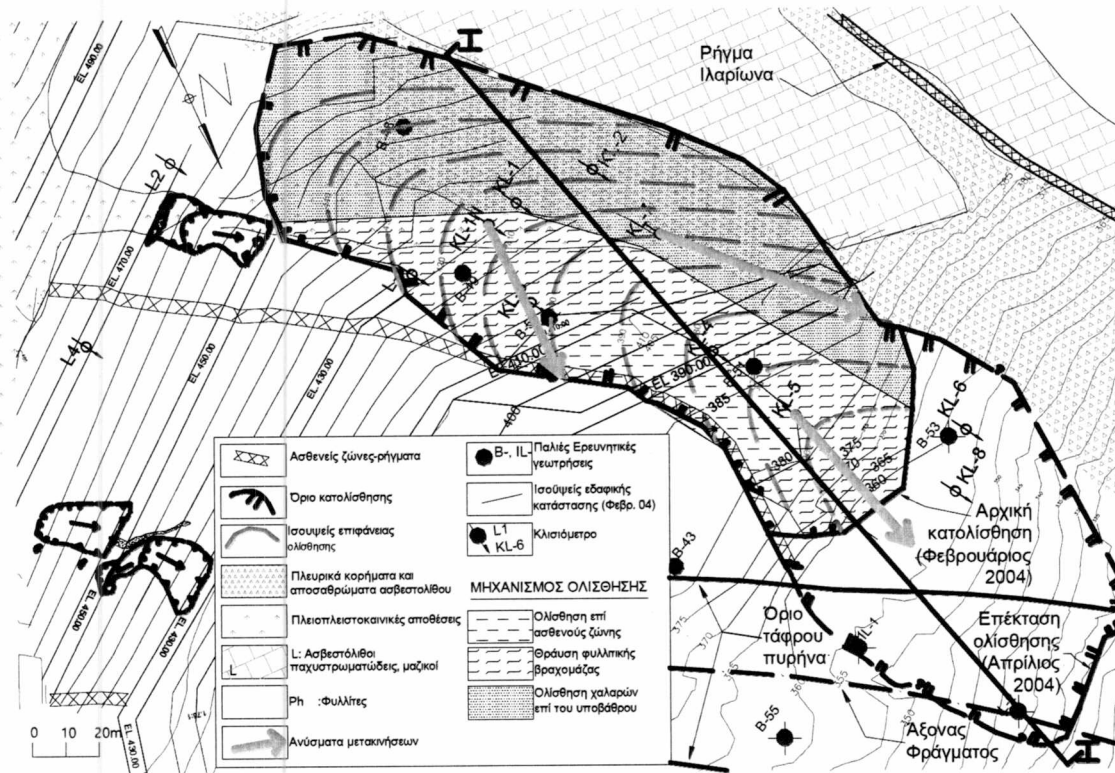
Εικόνα 3.6 , Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης επί της σχιστότητας σε πυρήνες φυλλίτη από γεωτρήσεις [16]

### 3.3.3 Κατολίσθηση Φεβρουαρίου 2004

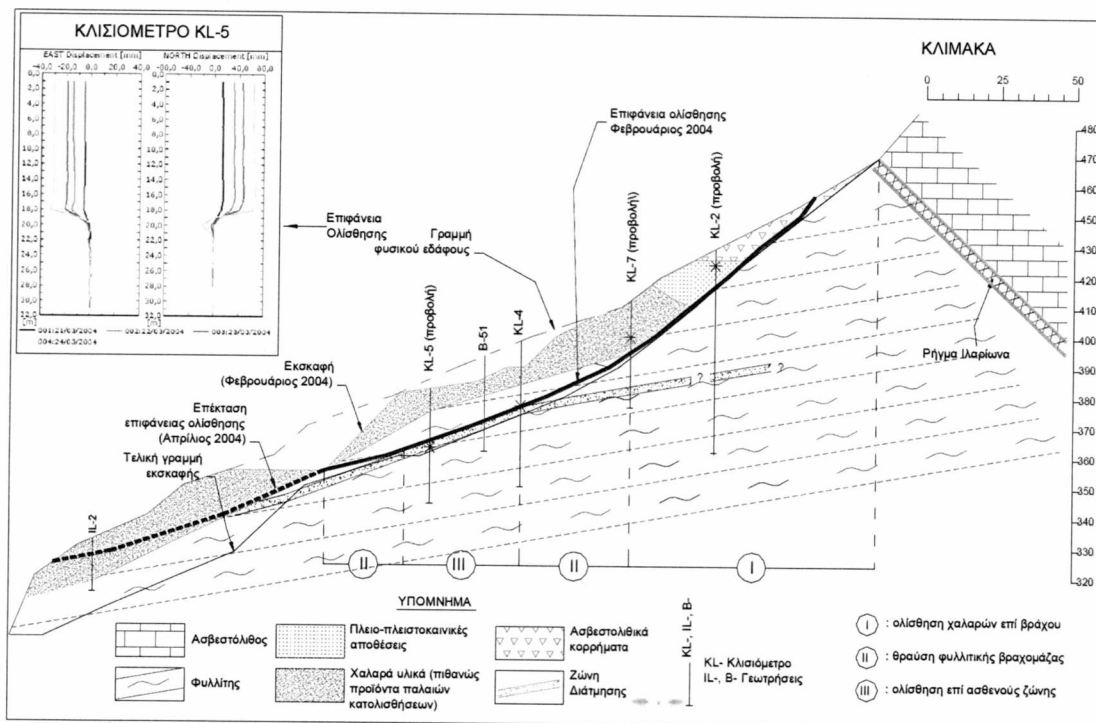
Με την έναρξη των εργασιών διαπιστώθηκαν κάποιες διαφορές στην τοπογραφία σε σχέση με τα σχέδια της μελέτης στην περιοχή όπου διαμορφωνόταν το ανάντη τμήμα της εκσκαφής, στην επαφή με τα υψηλά και απότομα (σχεδόν κατακόρυφα και κατά θέσεις με αρνητικές κλίσεις) ασβεστολιθικά πρηνή αμέσως ανάντη του ρήγματος Ιλαρίωνα. Υλοποίηση των γραμμών εκσκαφής της μελέτης στο τμήμα αυτό θα προϋπέθετε σοβαρές επεμβάσεις στα ασβεστολιθικά πρηνή. Για το λόγο αυτό οι γραμμές εκσκαφής τροποποιήθηκαν στην περιοχή αυτή και μεταξύ υψομέτρων +450 m και +350 m περίπου, με εφαρμογή πλέον απότομων κλίσεων (έως 45ο) προσωρινών πρηνών στα στο ανάντη τμήμα της εκσκαφής.

Οι κλίσεις αυτές θεωρήθηκαν αποδεκτές καθώς, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, η φυλλιτική βραχομάζα στην περιοχή διέθετε σχετικά ικανοποιητικά διατμητικά χαρακτηριστικά. Οι αλλαγές αυτές είχαν ως συνέπεια την δραστική (κατά 15% και πλέον) μείωση του συνολικού όγκου των εκσκαφών του αντερείσματος. Μόλις η εκσκαφή έφτασε στο υψόμετρο +355 περίπου εμφανίστηκαν ρωγματώσεις στο ανάντη τμήμα των πρηνών, στην επαφή με την ασβεστολιθική βραχομάζα, οι οποίες επεκτείνονταν έως το υψόμετρο +470 m περίπου. Ταυτόχρονα, καταγράφηκε αργή εξελισσόμενη μετακίνηση της βραχομάζας επί διακριτής επιφάνειας ολίσθησης στο κατόντη τμήμα, μεταξύ υψομέτρων +390 m και +355 m

(βλ. Σχ. 3). Η επιφάνεια ολίσθησης ήταν λεία και ελαφρά κυματοειδής, και ακολουθούσε στο μεγαλύτερο μήκος της προδιαγεγραμμένη ζώνη διάτμησης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπόψη ζώνης προσέγγιζαν αυτά της σχιστότητας στην περιοχή, αλλά με την, ιδιαίτερα δυσμενή για την ευστάθεια, διαφοροποίηση της τάξης των  $15^\circ$  έως  $20^\circ$  περίπου ως προς τη διεύθυνση κλίσης [14-16].



Εικόνα 3.7, Κατολίσθηση Φεβρουαρίου 2004 στο δεξί αντέρεισμα [16]



Εικόνα 3.8 Τομή πρανούς- Στάδια εκσκαφών – Κατολισθήσεις [16]

### 3.3.4 Κατολισθητικές κινήσεις Ιανουαρίου 2006

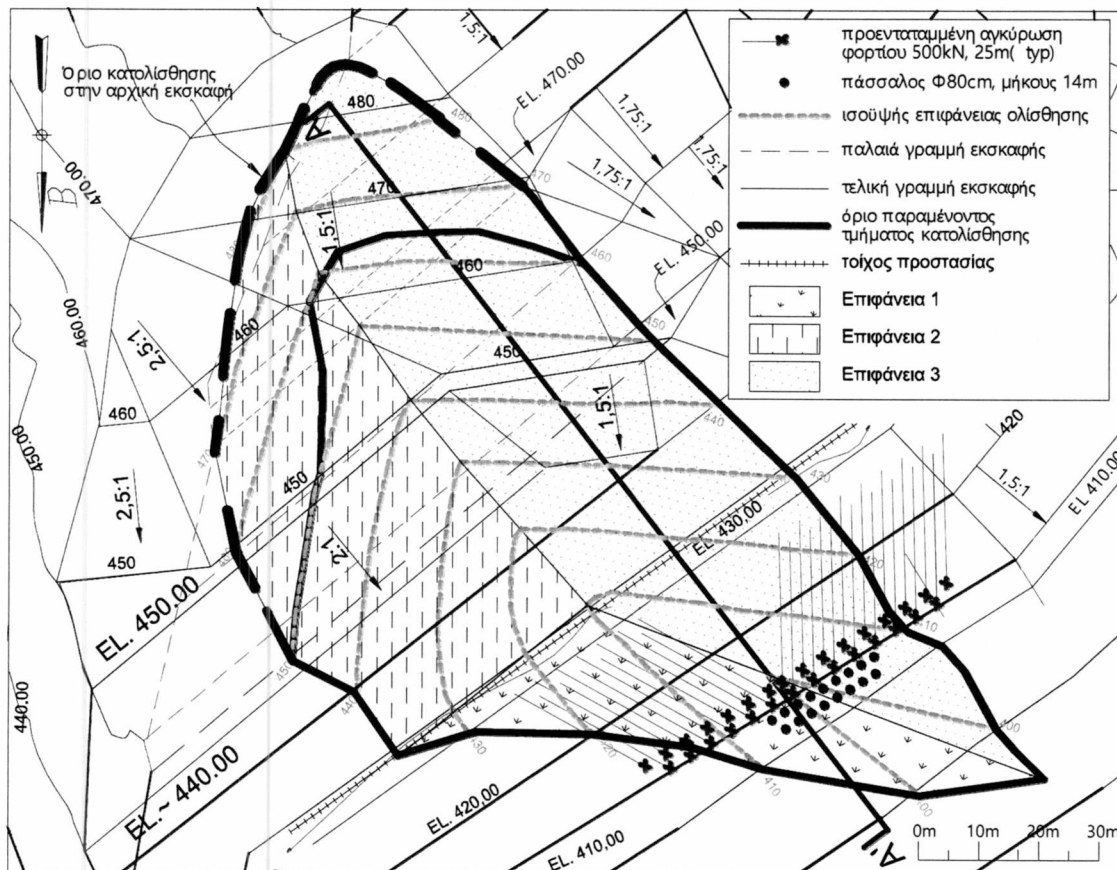
Τον Ιανουάριο του 2006, μετά από μια περίοδο έντονων βροχοπτώσεων εκδηλώθηκε κατολισθητική κίνηση στα υλοποιημένα τελικά πρανή εκσκαφής, 100m περίπου κατάντη των διαμορφωθέντων για την αντιμετώπιση της κατολίσθησης της περιόδου 2004. Οι πρώτες ενδείξεις για την κατολίσθηση ήταν οπτικές (διόγκωση πρανού εκσκαφής κάτω από τον αναβαθμό στο υψόμετρο +410m και έως το υψόμετρο +395m περίπου, με παρουσία επιφάνειας ολίσθησης) και τεκμηριώθηκαν από τις ενδείξεις ήδη εγκατεστημένων οργάνων.

Η εδαφική κίνηση προκάλεσε επίσης εμφανείς ρωγματώσεις και παραμορφώσεις σε υφιστάμενες κατασκευές, όπως στον τοίχο προστασίας στον αναβαθμό +430m, όπου αποκολλήθηκαν οι εγκάρσιες δοκοί και οι μεταλλικές πλάκες από τις κατακόρυφες δοκούς στις οποίες ήταν συγκολλημένες, αλλά και σημαντική διεύρυνση της μικρής προϋπάρχουσας ρωγμής στην πλάκα επένδυσης του αναβαθμού στη στάθμη +430 καθώς και εμφάνιση νέων ρωγμών στους αναβαθμούς +410 και +450 [14-16].

Η πολύ αργή εξέλιξη της κατολισθητικής κίνησης μετά την πρώτη εβδομάδα σημαντικών μετακινήσεων επέτρεψε την τοποθέτηση μέσα στη μετακινούμενη μάζα και περίξ αυτής 6 κλισιομέτρων, πέραν των ήδη εγκατεστημένων. Από την αξιολόγηση των μετρήσεων των οργάνων καθώς και των μετρήσεων διεύρυνσης των ρωγμών, προσδιορίστηκε με καλή ακρίβεια η γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης. Επίσης καθορίστηκε με ακρίβεια η διεύθυνση της κατολισθητικής κίνησης, η οποία προέκυψε κάθετη περίπου προς το πρανές εκσκαφής.



Η ολισθαίνουσα μάζα είχε μορφή σφήνας, οριοθετούμενης από τρεις κατά προσέγγιση επίπεδες επιφάνειες. Το μέγιστο βάθος της κατολίθησης εκτιμήθηκε σε 20m περίπου, ενώ ο όγκος της μετακινούμενης μάζας σε 75.000m<sup>3</sup> [16][13].



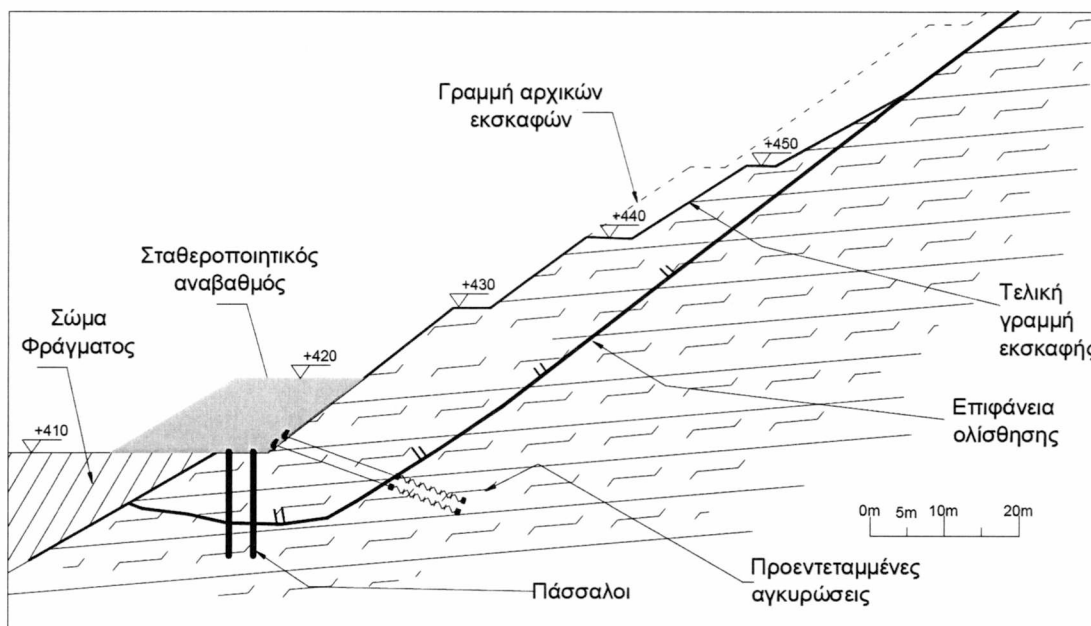
Εικόνα 3.9 Κατολισθητικές κινήσεις Ιανουαρίου 2006 στο δεξι άντρείσισμα [16]

### 3.3.5 Υφιστάμενη κατάσταση και μέτρα αντιστήριξης πρανούς

Για την διερεύνηση των συνθηκών ευστάθειας και τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης της κατολίσθησης εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης ανάστροφες αναλύσεις, με τη μέθοδο οριακής ισοροπίας και παρουσιάζονται στο πίνακα 3.1:

Μέτρα προστασίας	Συντελεστές Ασφαλείας	Βελτίωση συντελεστή ασφαλείας
Κανένα	0,97	0%
Εκσκαφή	1,20	24%
Εκσκαφή & Πάσσαλοι + αγκυρώσεις	1,24	28%
Εκσκαφή & Πάσσαλοι + αγκυρώσεις & κατασκευή φράγματος	1,47	52%
Εκσκαφή & Πάσσαλοι + αγκυρώσεις & κατασκευή φράγματος & σταθεροποιητικός αναβαθμός	1,68	73%

Πίνακας 3.1 Συντελεστές ασφαλείας μελέτης κατασκευής - υφιστάμενη κατάσταση [16]



Εικόνα 3.10 Τομή υφιστάμενης κατάστασης πρανούς – μέτρα αντιστήριξης [16]

## Κεφάλαιο 4 Βραχομηχανική συμπεριφορά πρανών

### 4.1 Ευστάθεια πρανών

Τα προβλήματα ανάλυσης της ευστάθειας του πρανούς γενικώς αναλύονται με την εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση του πρανούς κατά μήκος μιας συγκεκριμένης (και διαφορετικής σε κάθε έλεγχο) επιφάνειας και εκείνων που ασκούνται κατά μήκος αυτής και αντιτίθενται στην ολίσθηση. Η ευστάθεια των πρανών εξαρτάται από τους εξής παράγοντες : [1-3]

- Τη συνοχή ( $c$ ) και την εσωτερική τριβή ( $\phi$ ), οι οποίες συγκρατούν ενωμένα τα υλικά που αποτελούν το πρανές και αντιστέκονται σε οποιαδήποτε μετακίνηση, συμβάλλοντας στην ευστάθειά τους.
- Τη βαρύτητα, η οποία τείνει να παρασύρει προς τα κάτω και προς τα έξω ορισμένη μάζα εδάφους και επομένως αποτελεί παράγοντα αστάθειας του πρανούς.
- Τη στρώση και την κατάτμηση του εδάφους.
- Την αποστράγγιση του πρανούς.
- Τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- Τις χρονικές μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών βασίζονται στη παραδοχή κάποιας μορφής αστοχίας. Στη περίπτωση που το υλικό μελέτης είναι βράχος τότε οι μορφές αστοχίας που παρατηρούνται είναι : [6]

- α) κατολίσθηση με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης,
- β) κατολίσθηση σφηνοειδούς μορφής (διεδρική),
- γ) κατάπτωση με ανατροπή και
- δ) κατολίσθηση με περιστροφή (κυκλική).

Η τελευταία παρατηρείται σε εδαφικά πρανή ή έντονα διαταραγμένους βράχους. Πιο αναλυτικά: [11]

α) **Επίπεδη ολίσθηση.** Επίπεδη αστοχία προκύπτει όταν μια γεωλογική ασυνέχεια είναι παράλληλη στην επιφάνεια του πρανούς και η κλίση της επιφάνειας ολίσθησης είναι μικρότερη από τη κλίση του πρανούς και μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής. Περίπτωση επίπεδης ολίσθησης έχουμε όταν η συνοχή είναι ίση με μηδέν ( $c=0$ ).

β) **Σφηνοειδής ολίσθηση.** Αστοχία σφήνας προκύπτει όταν δημιουργηθεί μια επιφάνεια αστοχίας μεταξύ δύο ασυνεχειών, οι οποίες προκαλούν την μετακίνηση της μάζας που περικλείεται από αυτές προς τα κατάντη, κατά μήκος του ίχνους τομής τους, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια σφήνα.

γ) **Κατάπτωση με ανατροπή.** Κατάπτωση με ανατροπή προκύπτει όταν η κλίση των ασυνεχειών είναι αρκετά μεγάλη και αντίθετη με την κλίση του πρανούς.

δ) **Κυκλική αστοχία.** Όταν τα υλικά είναι πολύ ασθενή, όπως σε ένα εδαφικό πρανές, ή όταν η βραχώμαζα είναι έντονα ρηγματωμένη ή θρυμματισμένη, τότε η αστοχία ορίζεται από μια ασυνέχεια και τείνει να ακολουθήσει μια κυκλική επιφάνεια.

## 4.2 Ευστάθεια πρανών έναντι στατικών φορτίων

Αφού γίνει η παραδοχή της μορφής αστοχίας, ακολουθεί ανάλυση με μεθόδους οριακής ισορροπίας από την οποία προκύπτει κάποιος συντελεστής, ο οποίος ονομάζεται Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας και συμβολίζεται με  $F$  ή FOS (Factor of Safety). Ο στατικός συντελεστής ασφαλείας ισούται με το λόγο των δυνάμεων ή ροπών που ανθίστανται στη ολίσθηση (διατμητική αντοχή εδάφους) προς τις δυνάμεις ή ροπές που συνεισφέρουν στην αστάθεια του πρανούς και προκαλούν την ολίσθησή του. [5]

Αν ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με τη μονάδα τότε έχουμε οριακή ισορροπία – ευστάθεια του πρανούς. Αντίθετα, αν ο συντελεστής είναι μικρότερος από τη μονάδα τότε το πρανές είναι ασταθές και είναι πιθανή η εκδήλωση κάποιας κατολίσθησης. Συνήθως, αποδεκτοί συντελεστές ασφαλείας είναι 1.4 έως 1.5 και 1.0 όταν συνυπολογίζεται η σεισμική δράση. Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους όπως τη μέθοδο του κύκλου τριβής (Taylor), με τα νομογραφήματα Hoek και Bray κτλ. [22]

## Κεφάλαιο 5 Ανάλυση και εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC

Το FLAC είναι ένας αριθμητικός κώδικας προσομοίωσης για προχωρημένα γεωτεχνικά προβλήματα και αναλύσεις. Αποτελεί πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών σε εδαφικά ή βραχώδη υλικά τα οποία παραμορφώνονται πέραν της ελαστικής περιοχής και που μπορούν να υποβληθούν σε πλαστική ροή όταν φτάσουν στα όριά της αντοχής τους. Τα υλικά αυτά αντιπροσωπεύονται από στοιχεία, ή ζώνες που σχηματίζουν ένα πλέγμα το οποίο προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει στο σχήμα της κατασκευής που πρόκειται να μοντελοποιηθεί.

### 5.1 Μεθοδολογία

FLAC/Slope είναι ειδικά σχεδιασμένο για να εκτελεί πολλαπλές αναλύσεις και παραμετρικές μελέτες για τις αναλύσεις ευστάθειας πρανών. Η δομή του προγράμματος επιτρέπει διαφορετικά μοντέλα σε μια ανάλυση που μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν, να αποθηκευτούν και να ανακαλεστούν για άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου. Ένα σχέδιο ανάλυσης ευστάθειας πρανούς στο FLAC χωρίζεται σε τέσσερα στάδια, τα οποία είναι:

1. Η μοντελοποίηση του γεωλογικού σχηματισμού.
2. Η κατασκευή του κανάβου.
3. Η επίλυση – υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας.
4. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Επίσης μπορεί να εισαχθεί κάθε γεωλογικός σχηματισμός που επιθυμεί ο χρήστης σε οποιοδήποτε μοντέλο ( Mohr-Coulomb, Hoek – Brown, Finn – Byrne, Ubiquitous - Joint κτλ.) με το δικό του όνομα και παραμέτρους. [21]

#### 5.1.1 Διαδικασία μείωσης της αντοχής

Η μέθοδος μείωση της διατμητικής αντοχής χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την ανάλυση ευστάθειας πρανών το 1975 από Zienkiewicz et al. Η μέθοδος περιλαμβάνει την κατασκευή ενός αριθμητικού μοντέλου του πρανούς χρησιμοποιώντας προγράμματα όπως το FLAC, Phase 2, UDEC και άλλους κώδικες συνεχούς και ασυνεχούς μέσου. Μόλις το μοντέλο κατασκευαστεί οι διατμητικές δυνάμεις όλων των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν το πρανές αυξάνονται ή μειώνονται επαναληπτικά κατά ένα παράγοντα μείωσης (SRF) έως ότου το πρανές αστοχήσει.

Η αστοχία κρίνεται με βάση την παρακολούθηση ενός σημείου - στόχο στο πρανές όπου μια ξαφνική αλλαγή στην μετατόπιση συμπίπτει με την έναρξη της αστάθειας. Οι Dawson et al [25] δείχνουν ότι οι παράγοντες μείωσης της διατμητικής αντοχής είναι γενικά μέσα σε ένα μικρό ποσοστό των οριακών αναλύσεων ένας συνδεδεμένος κανόνας ροής, στον οποίο η γωνία τριβής ( $\phi$ ) και η γωνία διασταλτικότητας ( $\psi$ ) είναι ίσες.[25]

Επίσης η μέθοδος μείωσης της διατμητικής αντοχής είναι σήμερα αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες ευστάθειας πρανών, διότι περιλαμβάνει όλα τα οφέλη αναλύσεων της οριακής ισορροπίας και επιτρέπει στο χρήστη να μελετήσει μετατοπίσεις στο πρανές που είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση των συντελεστών ασφαλείας. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας μπορεί να πραγματοποιηθεί με αναλύσεις σταθερότητας στο FLAC. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στη «μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής».

Η «τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής» εφαρμόζεται κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με στόχο να μειώσει σταδιακά τη διατμητική αντοχή του υλικού προκειμένου το πρανές να επέλθει σε μια κατάσταση οριακής ισορροπίας. Η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας FOS υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις μειώνοντας τη γωνία τριβής ( $\phi$ ) και τη συνοχή, ( $c$ ), έως ότου επέλθει η αστοχία στο πρανές. Με την τεχνική αυτή, πραγματοποιείται σύγκλιση μεταξύ της σταθερής και ασταθούς κατάστασης στο πρανές. Δηλαδή αφού προσδιορισθεί πρώτα το άνω και το κάτω όριο των οριακών τιμών του συντελεστή ασφαλείας, στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκλιση των τιμών αυτών έως ότου η μεταξύ διαφορά τους μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο αποδεκτό όριο.[20-23]

Η εύρεση του ορίου μεταξύ της φυσικής σταθερότητας και της αστάθειας βασίζεται σε ένα αντικειμενικό κριτήριο στο FLAC που αποφασίζει κατά πόσον το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία ή σε μια κατάσταση συνεχούς κίνησης. Η μέθοδος της μείωσης της αντοχής μπορεί να εφαρμοστεί ουσιαστικά σε οποιοδήποτε μοντέλο αστοχίας για την αξιολόγηση ενός συντελεστή ασφαλείας με βάση τη μείωση ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού είτε αυτό είναι η διατμητική αντοχή, η συνοχή ή η γωνία τριβής. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στο πλαίσιο του μοντέλου Mohr-Coulomb και τροποποιημένου μοντέλου Hoek – Brown[25].

Η σύγκλιση του συντελεστή ασφαλείας σταματά όταν η διαφορά μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης τιμής της ανάλυσης καθίσταται μικρότερη από 0.005. Η προσέγγιση της λύσης κατ' αυτή τη μέθοδο πραγματοποιείται με την εντολή SOLVE\_fos και μπορεί να εκτελέσει ένα μεγάλο αριθμό λύσεων πριν να καθοριστεί ο συντελεστής ασφαλείας.

### **5.1.2 Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας με βαρύτητα στη διατμητική αντοχή του υλικού Hoek – Brown**

Το τροποποιημένο μοντέλο Hoek-Brown υποστηρίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC με υπολογισμούς SOLVE\_fos. Οι επιλογές για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με διαφορετική βαρύτητα σε δυο παραμέτρους του γεωλογικού σχηματισμού είναι οι εξής :

- i. Υπολογισμός με βαρύτητα στην διατμητική αντοχή .
- ii. Υπολογισμός με βαρύτητα στην θλιπτική αντοχή .

Το κριτήριο Hoek-Brown μπορεί να προσεγγιστεί σε τοπικό επίπεδο με βάση το κριτήριο Mohr-Coulomb:

$$\tau = \sigma' \tan \phi_c + c_c \quad (1.1)$$

Όπου η τοπική συνοχή ( $c_c$ ) και η τοπική γωνία τριβής ( $\phi_c$ ) δίδονται από την σχέση της τοπικής τιμής του  $\sigma_3$  οριζόντιας κύριας συνιστώσας της τάσης [25]: όπου αν  $\sigma_3 \geq 0$  :

$$\phi_c = 2 \tan^{-1} \sqrt{N_{\phi_c}} - 90^0, \quad (1.2)$$

$$c_c = \frac{\sigma_c^{ucs}}{2\sqrt{N_{\phi_c}}}, \quad (1.3)$$

$$N_{\phi_c} = 1 + am_b \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}, \quad (1.4)$$

$$\sigma_c^{ucs} = \sigma_3 (1 - N_{\phi_c}) + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1.5)$$

και αν  $\sigma_3 < 0$ :

$$N_{\phi_c} = 1 + am_b (s)^{a-1}, \quad (1.6)$$

$$\sigma_c^{ucs} = \sigma_{ci} (s)^a. \quad (1.7)$$

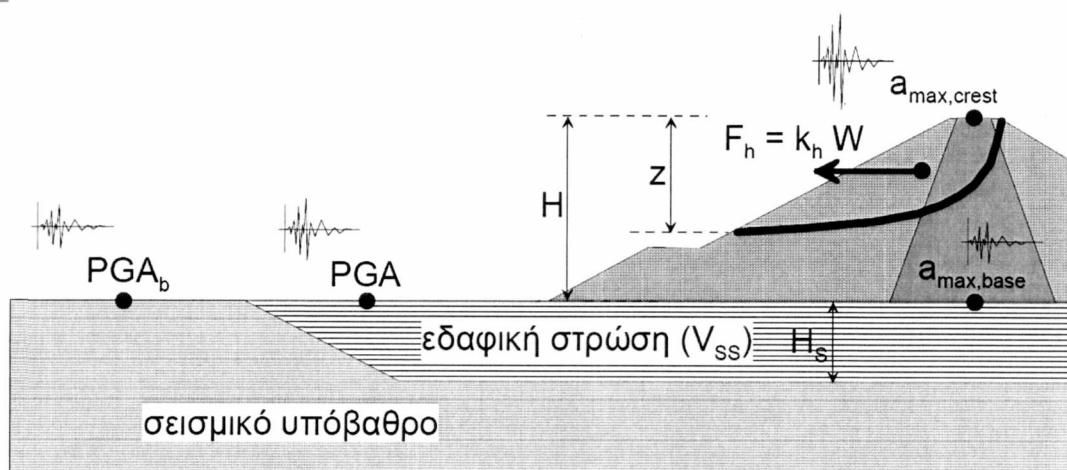
Μια ρεαλιστική προσέγγιση για την αξιολόγηση του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς σύμφωνα με τη μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής, κατά την οποία οι παράγοντες της τοπικής συνοχής  $c_c$ , και ο συντελεστής τριβής  $\tan(\phi_c)$  διαιρούνται με ένα μειωτικό συντελεστή μέχρι να εντοπιστεί η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης. Ο μειωτικός συντελεστής εφαρμόζεται άμεσα στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της διατμητικής αντοχής  $\tau_{max}$ . Ο συντελεστής μείωσης στο όριο της αστοχίας του πρανού ορίζεται ως ο συντελεστής ασφαλείας με βάση την παραπάνω μέθοδο. [25][18][20]

Μολονότι, θεωρητικά, είναι δυνατό να βρεθεί η καλύτερη τιμή για να ταιριάζει με τη μειωμένη περιβάλλουσα σε μια εξίσωση τύπου Hoek-Brown, αυτό το βήμα δεν απαιτείται σε αυτό το συγκεκριμένο μοντέλο επειδή η θεωρία βασίζεται στην άμεση χρήση της εφαπτομένης στη περιβάλλουσα (δεν υπάρχει ανάγκη για να οριστεί μια καμπύλη και, στη συνέχεια, την εφαπτομένη, όταν η εφαπτομένη είναι διαθέσιμη κατά το πρώτο μέρος). Επίσης, η προτεινόμενη τεχνική μείωσης παρέχει διάφορα μέσα για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της διατμητικής τάσης κατά την αστοχία. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής μείωσης δεν εφαρμόζεται άμεσα στις παραμέτρους του μοντέλου. [25].

## 5.2 Ψευδοστατική ανάλυση

Η ανάλυση ψευδοστατικής οριακής ισορροπίας έχει χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από την ανάλυση της διατομής της δυναμικής μάζας του πρανού, η οποία ονομάζεται επιφάνεια ολίσθησης, και είναι είτε μια κυκλική ή μη κυκλική επιφάνεια. Ψευδοστατική ανάλυση είναι μια διαδικασία που συνήθως χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των γεωλογικών κατασκευών εκπροσωπώντας τις επιπτώσεις ενός σεισμού με σταθερή οριζόντια ή και κάθετη επιτάχυνση.

Η ψευδοστατική ανάλυση η οποία ήταν πρακτικώς η μόνη μέθοδος ανάλυσης μέχρι την αρχή της δεκαετίας του 1970, και η οποία οδηγεί στον υπολογισμό ενός συντελεστή ασφαλείας  $FS_d$  έναντι σεισμικής «αστοχίας» του πρανού. Το περιγραφόμενο πρόβλημα παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Εικόνα 5.1, όπου ορίζονται και άλλες κρίσιμες παράμετροι του προβλήματος, όπως οι μέγιστες τιμές της σεισμικής επιτάχυνσης στη στέψη,  $a_{max,crest}$ , και τη βάση του φράγματος,  $a_{max,base}$ , καθώς και οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στο «ελεύθερο πεδίο» του εδάφους θεμελίωσης του φράγματος, PGA, και η αντίστοιχη τιμή στο αναδυόμενο υπόβαθρο  $PGA_b$  ( $PGA_b = PGA$ , σε περίπτωση που το φράγμα θεμελιώνεται επί βραχώδους υποβάθρου). [17]



Εικόνα 5.1 Ορισμός προβλήματος ψευδοστατικής ανάλυσης [Πηγή: 1<sup>ο</sup> Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων 2008]

Σύμφωνα με αυτή την απλουστευτική μέθοδο, τιμές του συντελεστή  $FS_d$  μεγαλύτερες από 1.0 υπονοούν σεισμικώς ασφαλείς συνθήκες, ενώ τιμές του ίδιου συντελεστή μικρότερες από 1.0 υπονοούν σεισμική «αστοχία» του πρανού. Το πόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής  $FS_d$  από την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή ασφαλείας  $FS$  υπό στατικές συνθήκες εξαρτάται κυρίως από την τιμή της οριζόντιας αδρανειακής δύναμης  $F$  που ασκείται στο κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας του πρανού, και οποία ισούται με το βάρος  $W$  της ολισθαίνουσας μάζας επί έναν σεισμικό συντελεστή  $k_h$ . Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι η επιλογή της κατάλληλης τιμής του  $k_h$  για την εκτίμηση του  $FS_d$  είναι εξαιρετικής σημασίας για τον ορθολογικό και ασφαλή σχεδιασμό ενός χωμάτινου φράγματος [17].

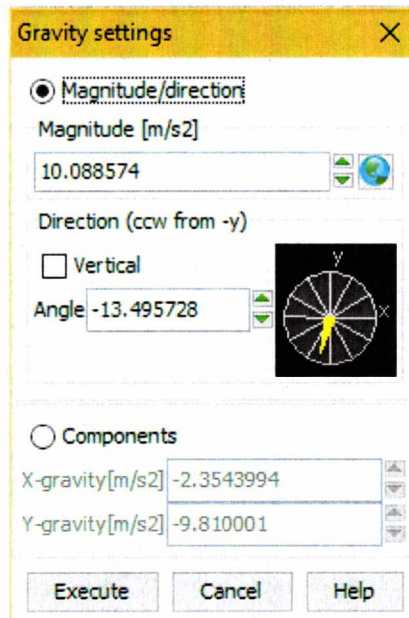


Η περιοχή που περικλείεται μεταξύ του μετώπου του πρανούς και της επιφάνειας αστοχίας, που είναι γνωστή ως η μάζα ολίσθησης, υποδιαιρείται σε μία σειρά από φέτες οι οποίες στη συνέχεια αναλύονται για ισορροπία με διάφορες υπολογιστικές μεθόδους. Σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε σεισμό, χρησιμοποιούνται οριζόντιοι και κάθετοι ψευδοστατικοί (σεισμικοί) συντελεστές,  $k_h$  και  $k_v$ , αντίστοιχα για τον υπολογισμό των οριζόντιων και κάθετων δυνάμεων που προκαλούνται από ένα πιθανό σεισμό. Αυτές οι δυνάμεις με τη σειρά τους προστίθεται στη συνολική ισορροπία και υπολογισμό των ατομικών φετών που συνθέτουν την επιφάνεια αστοχίας – ολίσθησης.

Στην ανάλυση οριακής ισορροπίας, η αδιάστατοι συντελεστές των ψευδοστατικών επιταχύνσεων,

- $K_h = a_g/g$  και  $k_v = a_u/g$ , όπου η  $a_g$ ,  $a_u$  είναι η οριζόντια και κάθετη επιτάχυνση,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας  $m/s^2$

Μια ψευδοστατική ανάλυση μπορεί να διενεργηθεί στο FLAC ορίζοντας ένα μη σταθερό πεδίο βαρύτητας. Το μέγεθος της βαρυτικής επιτάχυνσης και η κατεύθυνση μπορεί να οριστεί για να συμπεριλάβει τη ψευδοστατική επιτάχυνση που θέλουμε να ορίσουμε.



Εικόνα 5.2 Ορισμός μη σταθερού βαρυτικού πεδίου (FLAC) με δυσμενή διεύθυνση προς τη κλίση του πρανούς – 0.24g

### 5.3 Διαδικασία προσομοίωσης

Η εν λόγω ανάλυση στοχεύει στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας για το δεξί αντέρεισμα στη φυσική του κατάσταση, για το διαμορφωμένο κατά αναβαθμούς πρανές καθώς και στον υπολογισμό συντελεστών ασφαλείας μέσω διαφορετικών διαφόρων μέτρων αντιστήριξης. Επίσης διερευνάται η επίδραση του κάθε μέτρου αντιστήριξης στη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας και η επίδραση του σεισμού μέσω ψευδοστατικών αναλύσεων.

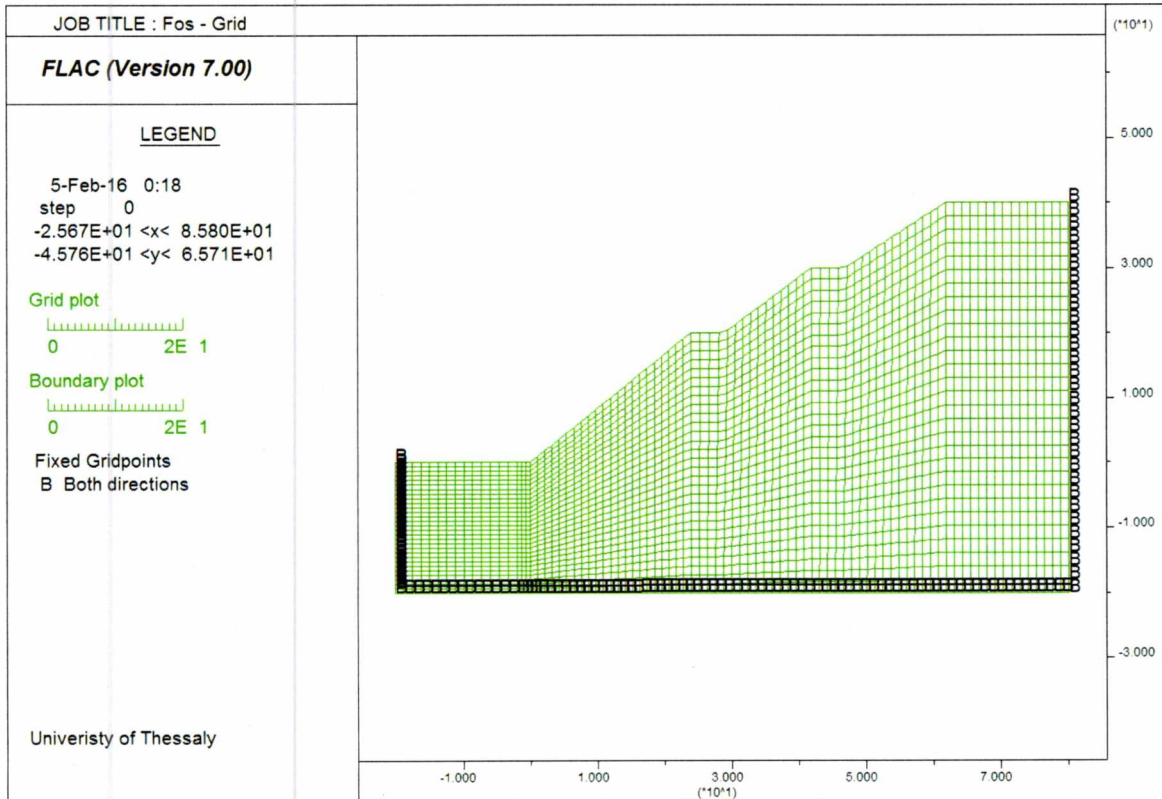
Η πρώτη ανάλυση έγινε προκειμένου να διαπιστωθεί η επικρατούσα κατάσταση στο φυσικά διαμορφωμένο πρανές πριν την δημιουργία αναβαθμών. Αφού ελέγχθηκε ο φυσικός συντελεστής ασφαλείας στη συνέχεια ακολούθησαν οι αναλύσεις που περιγράφονται παρακάτω.

Η κύρια ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε έξι στάδια στα οποία δεν υπάρχει επίδραση σεισμού καθώς επίσης και σε ακόμα τρεις επιλύσεις του συντελεστή ασφαλείας υπό την επίδραση του σεισμού μέσω των ψευδοστατικών φορτίσεων.

- ❖ Στάδιο I: Ανάλυση φυσικής κατάστασης πρανούς .
- ❖ Στάδιο II: Ανάλυση πρανούς αποκλειστικά για τη διαμόρφωση τεχνητών αναβαθμών.
- ❖ Στάδιο III: Ψευδοστατική ανάλυση πρανούς αποκλειστικά για τη διαμόρφωση τεχνητών αναβαθμών για σεισμική επιτάχυνση 0.24g.
- ❖ Στάδιο IV: Εισαγωγή στο διαμορφωμένο με τεχνητούς αναβαθμούς πρανές δύο σειρές πασσάλων Φ800 mm και μήκους 15m στο πόδα του πρανούς ανά 2m κατά το πλάτος.
- ❖ Στάδιο V: Εισαγωγή στο διαμορφωμένο με τεχνητούς αναβαθμούς πρανές δύο σειρές προεντεταμένων αγκυρίων ανά 1.5m κατά το πλάτος.
- ❖ Στάδιο VI: Εισαγωγή στο διαμορφωμένο με τεχνητούς αναβαθμούς πρανές τεσσάρων σειρών προεντεταμένων αγκυρίων ανά 1.5m κατά το πλάτος.
- ❖ Στάδιο VII: Εισαγωγή στο διαμορφωμένο με τεχνητούς αναβαθμούς πρανές έξι σειρών προεντεταμένων αγκυρίων ανά 1.5m κατά το πλάτος.
- ❖ Στάδιο VIII: Ψευδοστατική ανάλυση του πρανούς για τις έξι σειρές αγκυρίων του προηγούμενου βήματος για σεισμική επιτάχυνση 0.24g.
- ❖ Στάδιο IX: Εισαγωγή στο διαμορφωμένο με τεχνητούς αναβαθμούς πρανές έξι σειρές προεντεταμένων αγκυρίων και δύο σειρές πασσάλων Φ800 mm και μήκους 15m.
- ❖ Στάδιο X: Ψευδοστατική ανάλυση για τα μέτρα αντιστήριξης του σταδίου IX για σεισμική επιτάχυνση 0.24g.

## 5.4 Διακριτοποίηση

Σύμφωνα με την εικόνα 3.8 - δεξί αντέρισμα φράγματος Ιλαρίωνα όπως διαμορφώθηκε μετά τις τελικές εκσκαφές (ασφαλείας) σε αναβαθμούς παρουσιάζεται, στην εικόνα 5.1, ο κάρναβος ο οποίος δημιουργήθηκε για την εν λόγω ανάλυση. Οι συνοριακές συνθήκες ορίζουν το κάρναβο στις δύο κάθετες πλευρές του καθώς και στο κάτω όριο όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1 απαγορεύοντας τη κίνηση των στοιχείων και κόμβων του κάρναβου στη κάθετη και οριζόντια διεύθυνση.



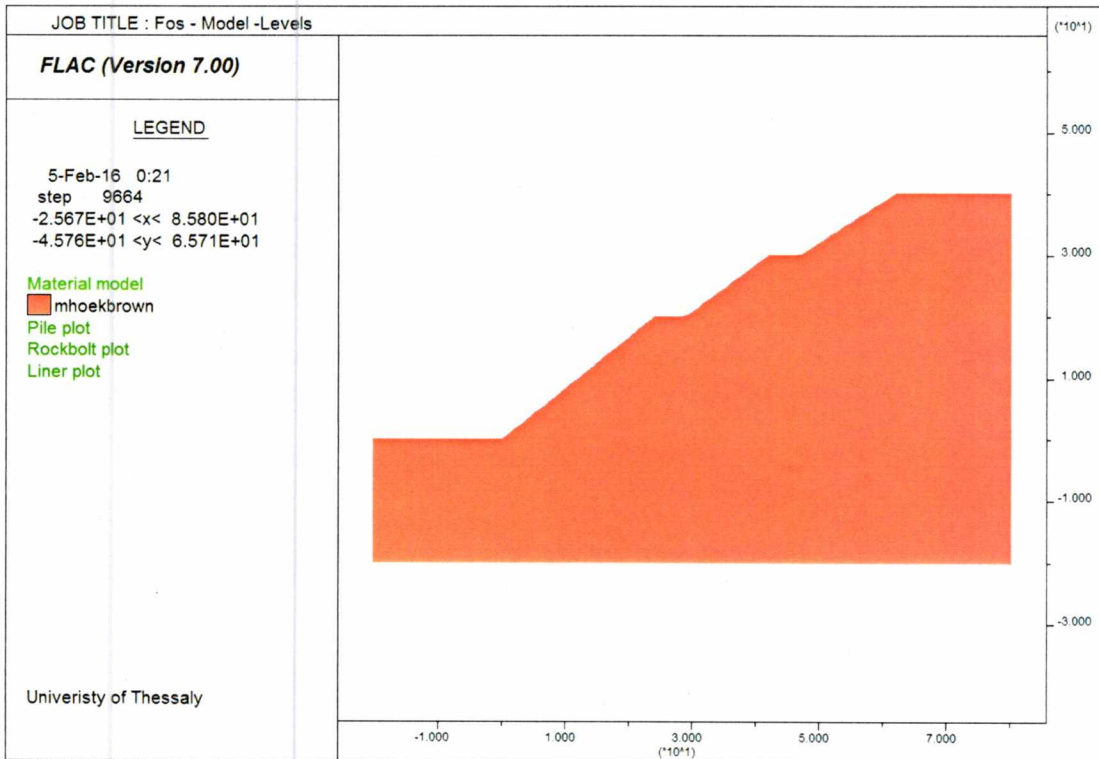
Εικόνα 5.1, Κάρναβος FLAC, Φράγμα Ιλαρίωνα- Δεξί αντέρισμα

### 5.4.1 Επιλογή μοντέλου υλικού

Στο μοντέλο του εδαφικού πρανούς δόθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες της εικόνας 5.3 για το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown. Οι τιμές αυτές για τον γεωλογικό σχηματισμό του Φυλλίτη είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών ασφαλείας κατά τον σχεδιασμό του έργου από τη Δ.Ε.Η. Στην εικόνα 5.2 απεικονίζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει - περιγράψει τον γεωλογικό σχηματισμό του Φυλλίτη. Οι κύριες τιμές που δόθηκαν στον γεωλογικό σχηματισμό ήταν ο δείκτης περιγραφής κατάστασης του πετρώματος  $GSI = 25$ ,  $m_i = 5$ , η αντοχή σε θλίψη  $\sigma_{ci} = 10 \text{MPa}$ , η αντοχή σε διάτμηση  $0.6 \text{MPa}$ . [14-16]

Επιλέχθηκε το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown καθώς πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικοί υπολογισμοί του συντελεστή ασφαλείας ορίζοντας τον γεωλογικό σχηματισμό του Φυλλίτη μέσω του μοντέλου Mohr-Coulomb, οι οποίοι έδειξαν υπερεκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας σε σύγκριση με αυτούς που εκτιμήθηκαν κατά τη κατασκευή του φράγματος. Επομένως το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δεν μπορεί να περιγράψει έγκυρα το γεωλογικό σχηματισμό του Φυλλίτη.

Στη προκείμενη περίπτωση οι γεωλογικοί παράμετροι που υπάρχουν διαθέσιμοι και συμπληρώνουν το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb αντιστοιχούν στα υγιή τμήματα της βραχώμαζας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική σύσταση του Φυλλίτη ως προς τις αποσαθρώσεις, ασυνέχειες και σχιστότητα. Για το λόγο αυτό γίνεται επιλογή του μοντέλου Hoek - Brown.



Εικόνα 5.2, Μοντέλο Προσομοίωσης.

**Define Material**

Class: Rock

Name: Fillitis

Model

Elastic  Mohr-Coulomb  Ubiquitous  Modified Hoek-Brown

Mass-Density [kg/m3] 2500.0

Elastic Properties

Bulk modulus [Pa] 1E9

Shear modulus [Pa] 4.27E8

Alternate input

Elastic modulus [Pa] .12138893E9

Poisson's ratio 0.31310183

**Modified Hoek-Brown**

mb 0.10892529

s 2.9929468E-5

a 0.5310661

Alternate input

GSI 25

mi 5

D 0.6

sigci [Pa] 1.5E7

tension [Pa] 600000.0

Length [m]

Dilation options

Associate by plastic flow

Constant

Fraction friction angle

FoS solution control:  
 (0) by shear strength

Evolution parameter

Include

Option (1) Plastic shear strength

Tables

mb  s  a  d  t

OK Cancel Help

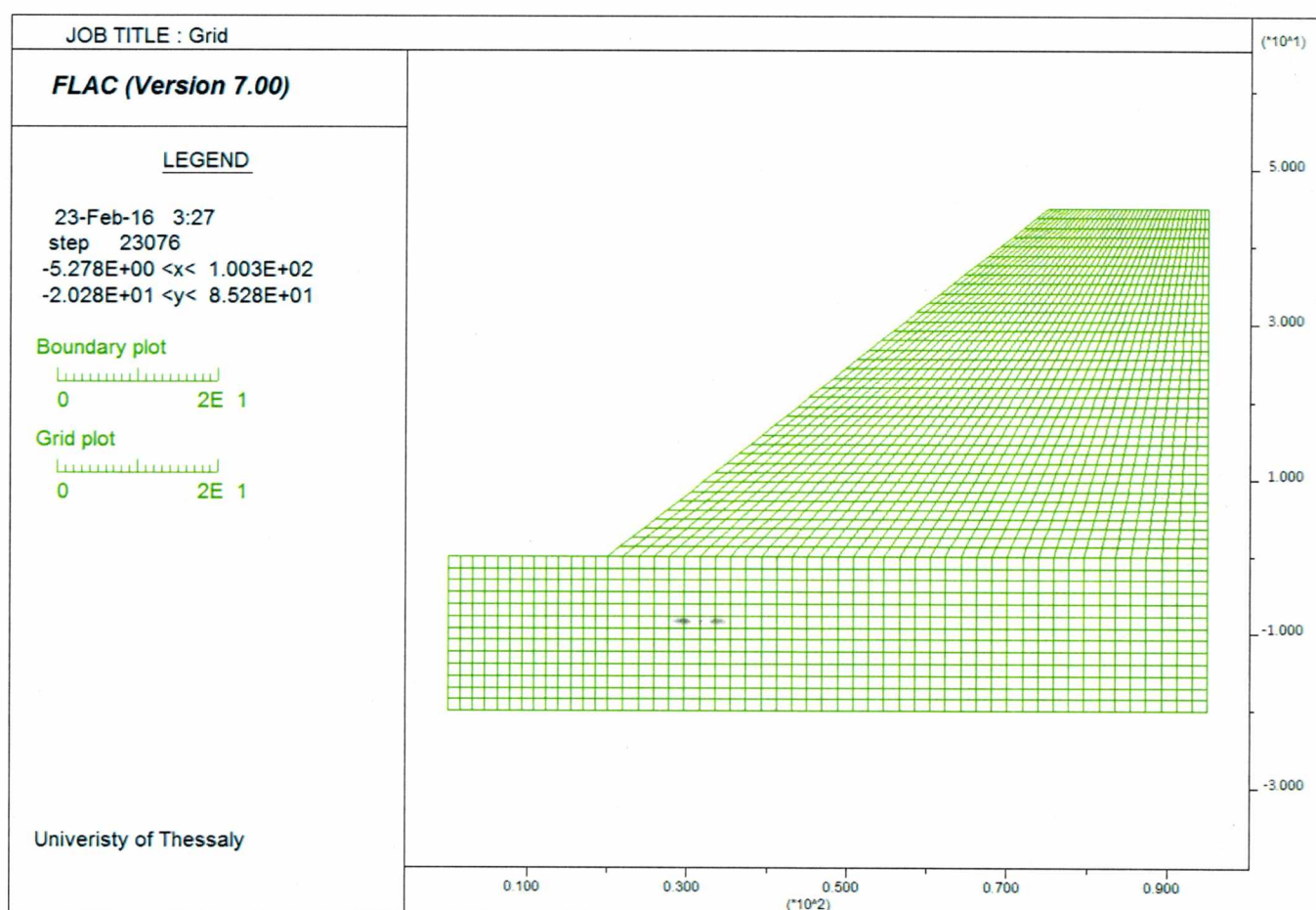
Εικόνα 5.3 Απεικόνιση ορισμού γεωλογικού σχηματισμού στο FLAC.

## Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα - Αναλύσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Παρατίθενται απεικονίσεις των τασικών κατανομών, των αναπτυσσόμενων κατανομών ταχυτήτων, των επιφανειών ολίσθησης, ρυθμών διάτμησης καθώς επίσης συμπληρωματικά διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της επικρατούσας κατάστασης αστοχίας. Σε κάθε στάδιο πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς το προηγούμενο στάδιο. Επίσης σχολιάζεται η επίδραση κάθε μέτρου αντιστήριξης στις αναπτυσσόμενες ταχύτητες, οριζόντιες μετακινήσεις καθώς επίσης και στις αναπτυσσόμενες επιφάνειες ολίσθησης.

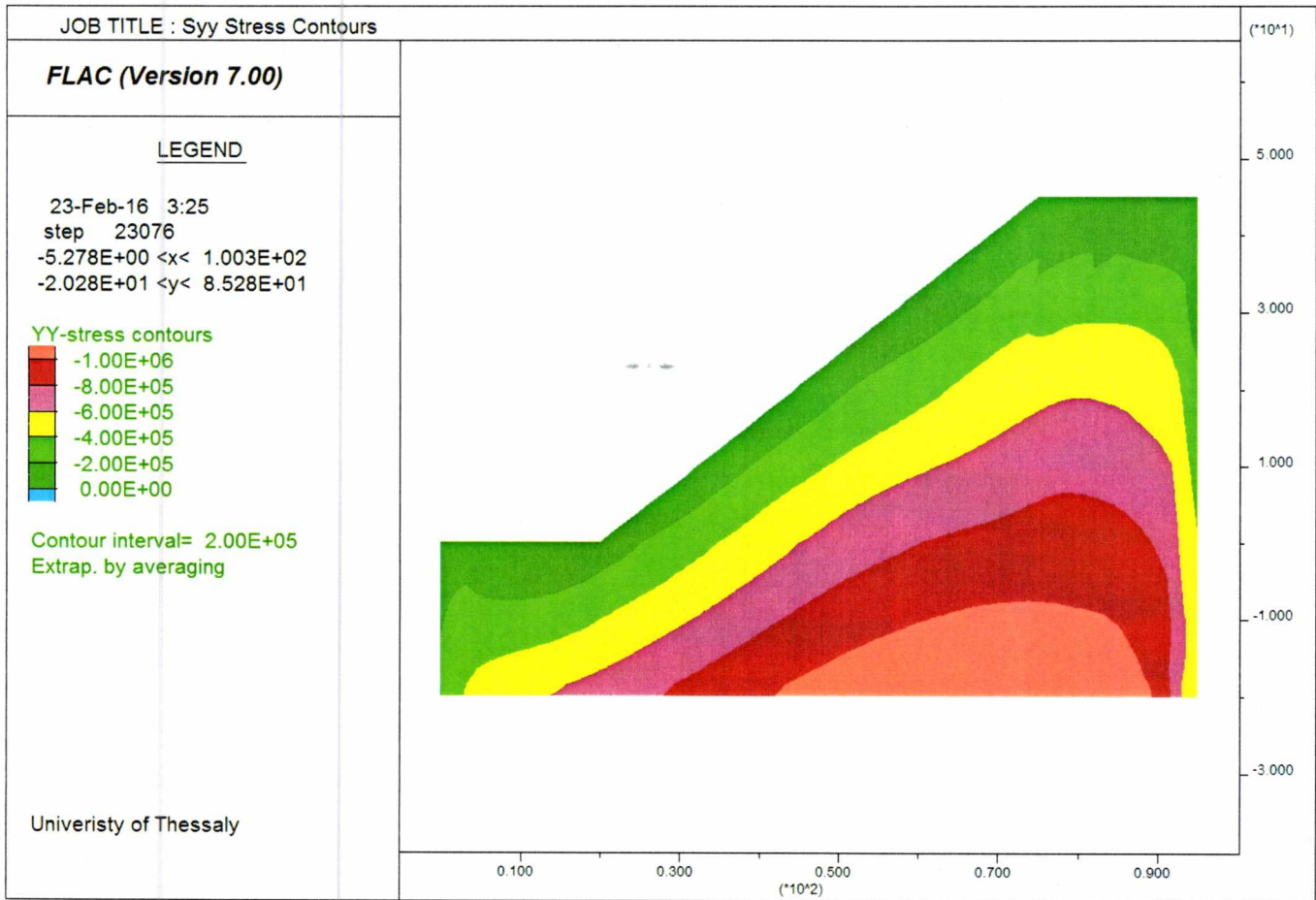
### 6.1 Φυσικό Πρανές

#### 6.1.1 Διακριτοποιημένος κανάβος



Εικόνα 6.1 Γεωμετρία κανάβου

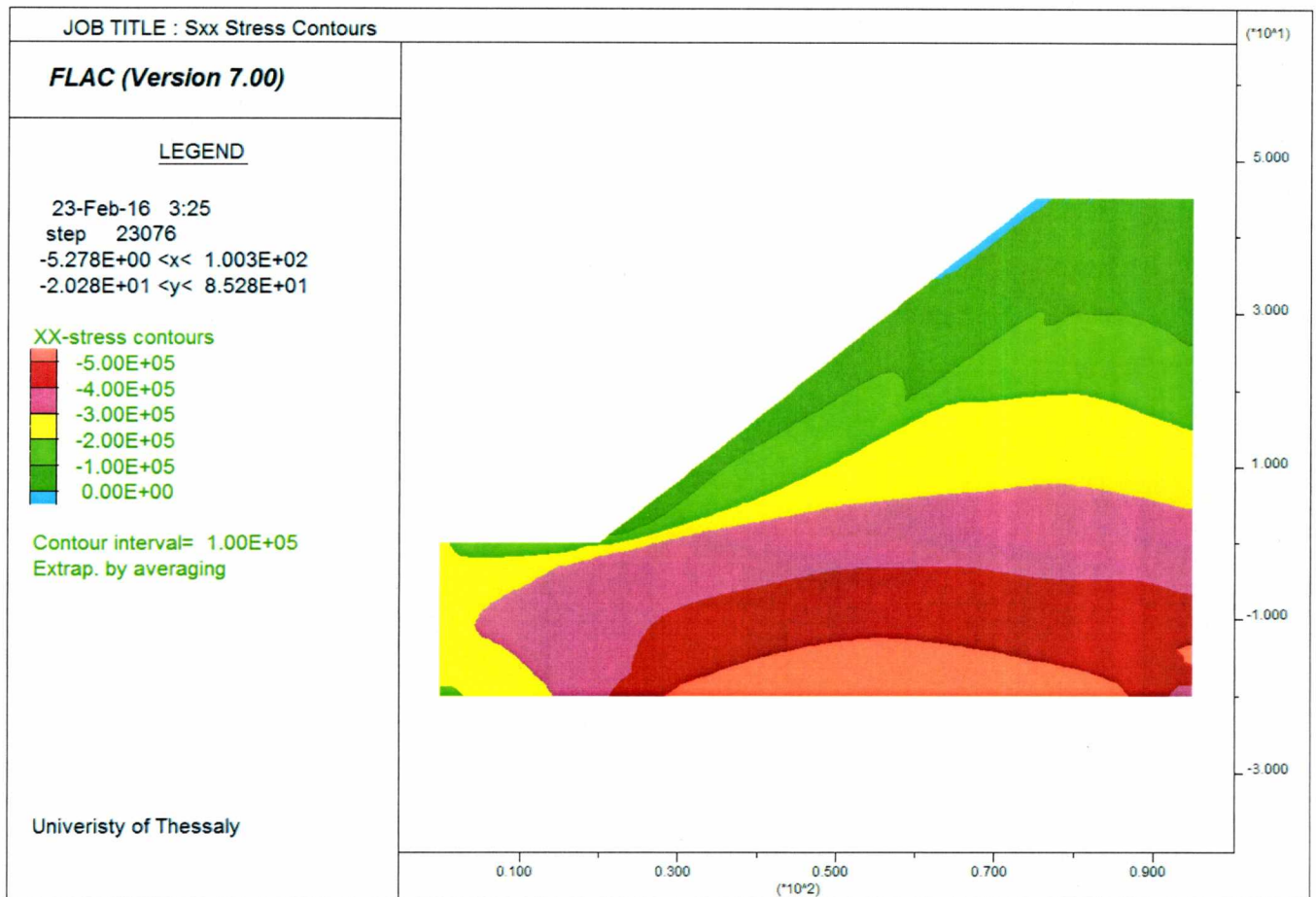
### 6.1.2 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.2 Κατανομή κατακόρυφων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{yy}$

Παρατηρείται για το διαμορφωμένο φυσικό πρηνές ομοιομορφία στην ανάπτυξη της κατανομής των κατακόρυφων συνιστωσών της τάσης.

### 6.1.3 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$

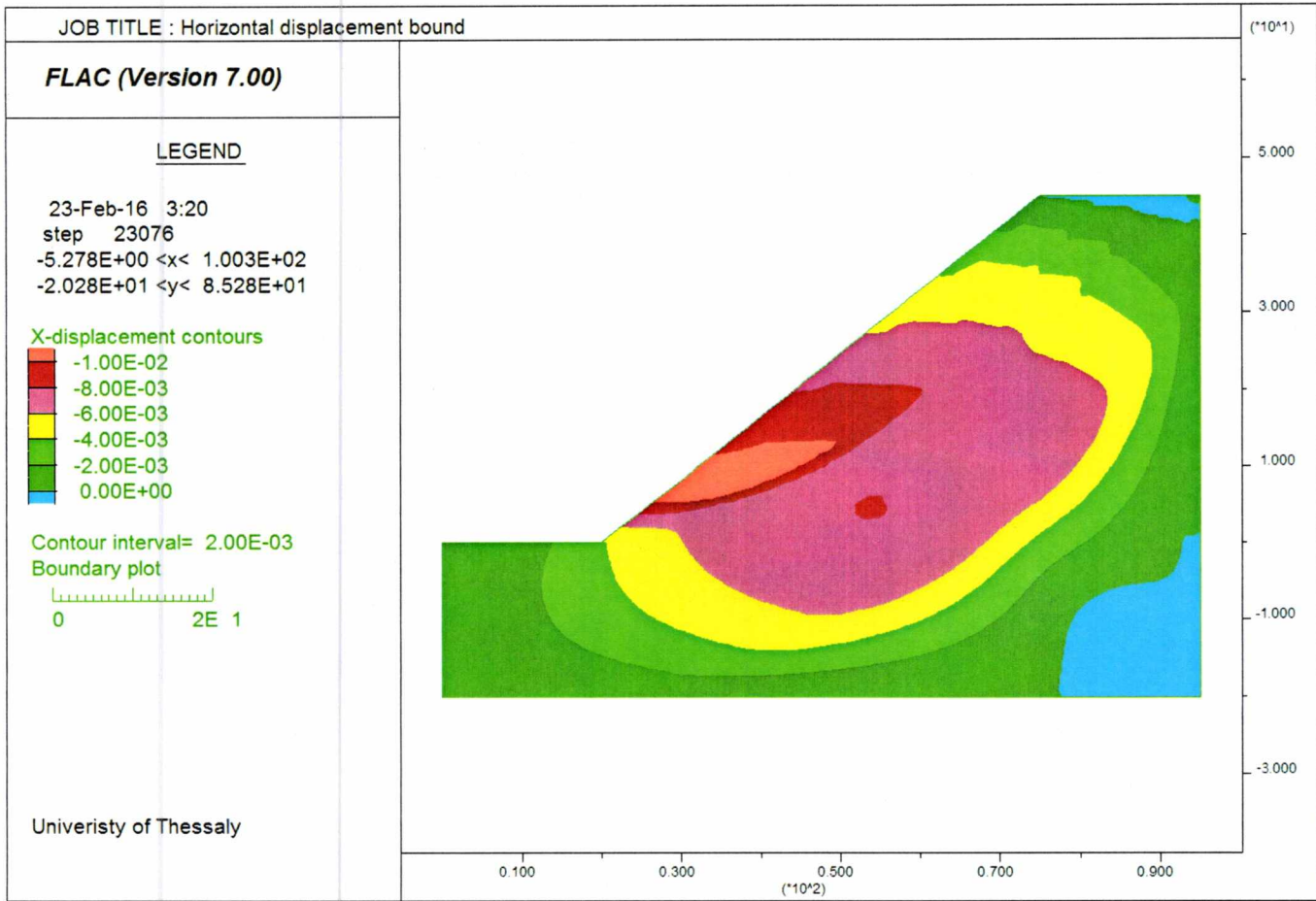


Εικόνα 6.3 Κατανομή οριζόντιων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{xx}$

Παρατηρείται για το διαμορφωμένο φυσικό πρηνές ομοιομορφία στην ανάπτυξη της κατανομής των οριζόντιων συνιστωσών της τάσης.



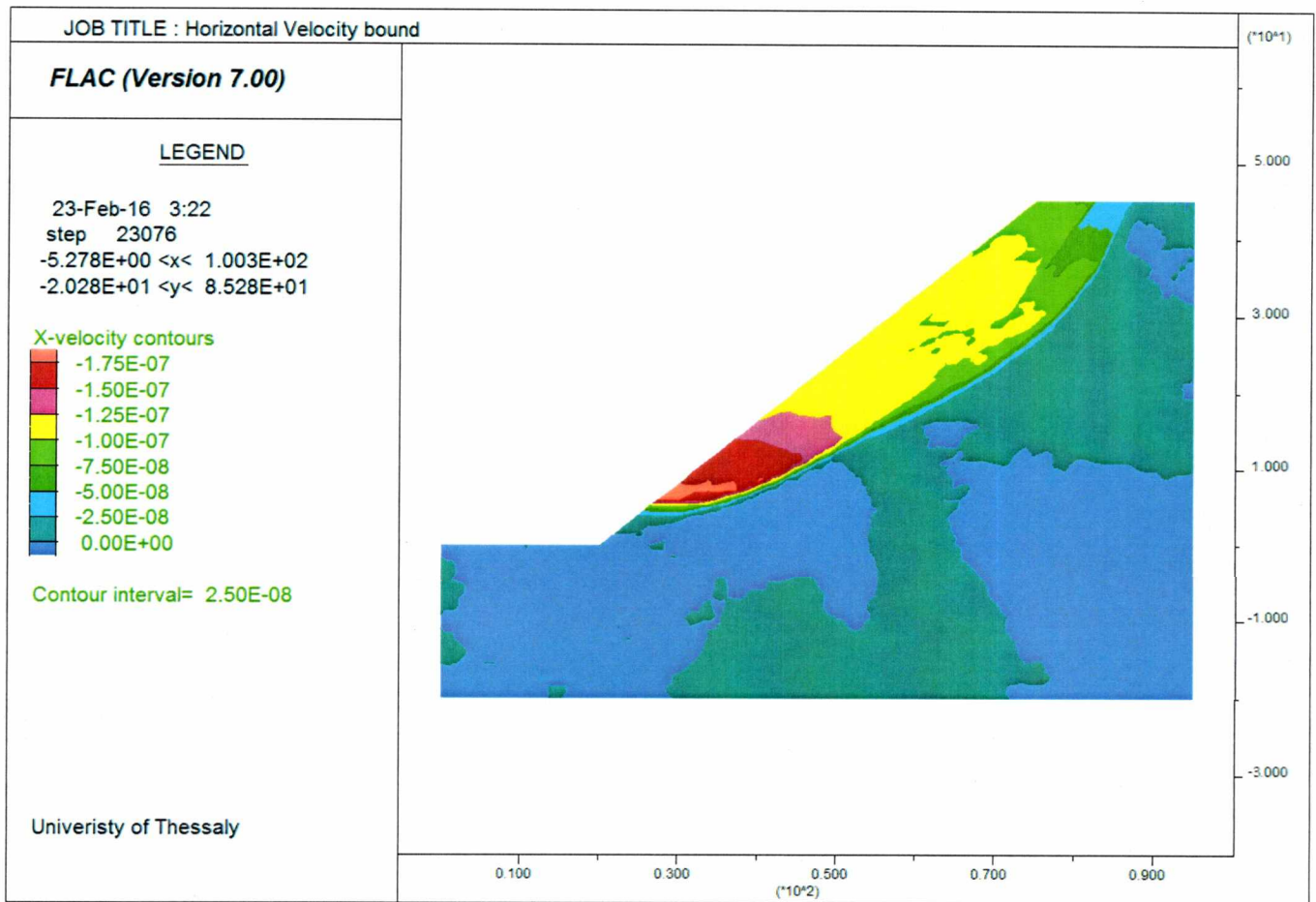
### 6.1.4 Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων



Εικόνα 6.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων κατά την αστοχία

Παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων στο πρηνές με τις μεγαλύτερες κατά μέτρο μετακινήσεις να συγκεντρώνονται χαμηλά στο πρηνές.

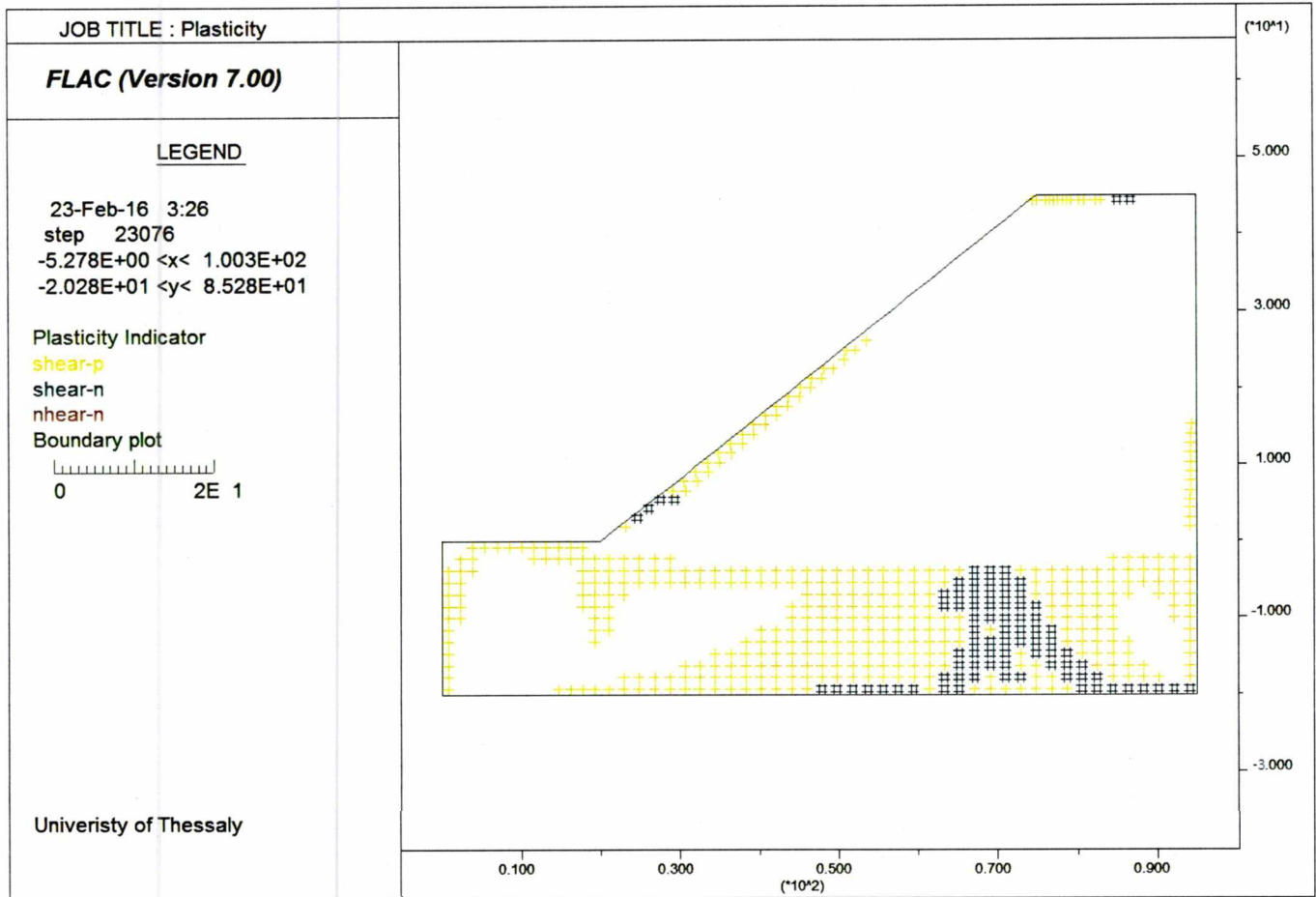
### 6.1.5 Κατανομή αναπτυσσόμενων ταχυτήτων



Εικόνα 6.5 Κατανομή αναπτυσσόμενων ταχυτήτων κατά την αστοχία

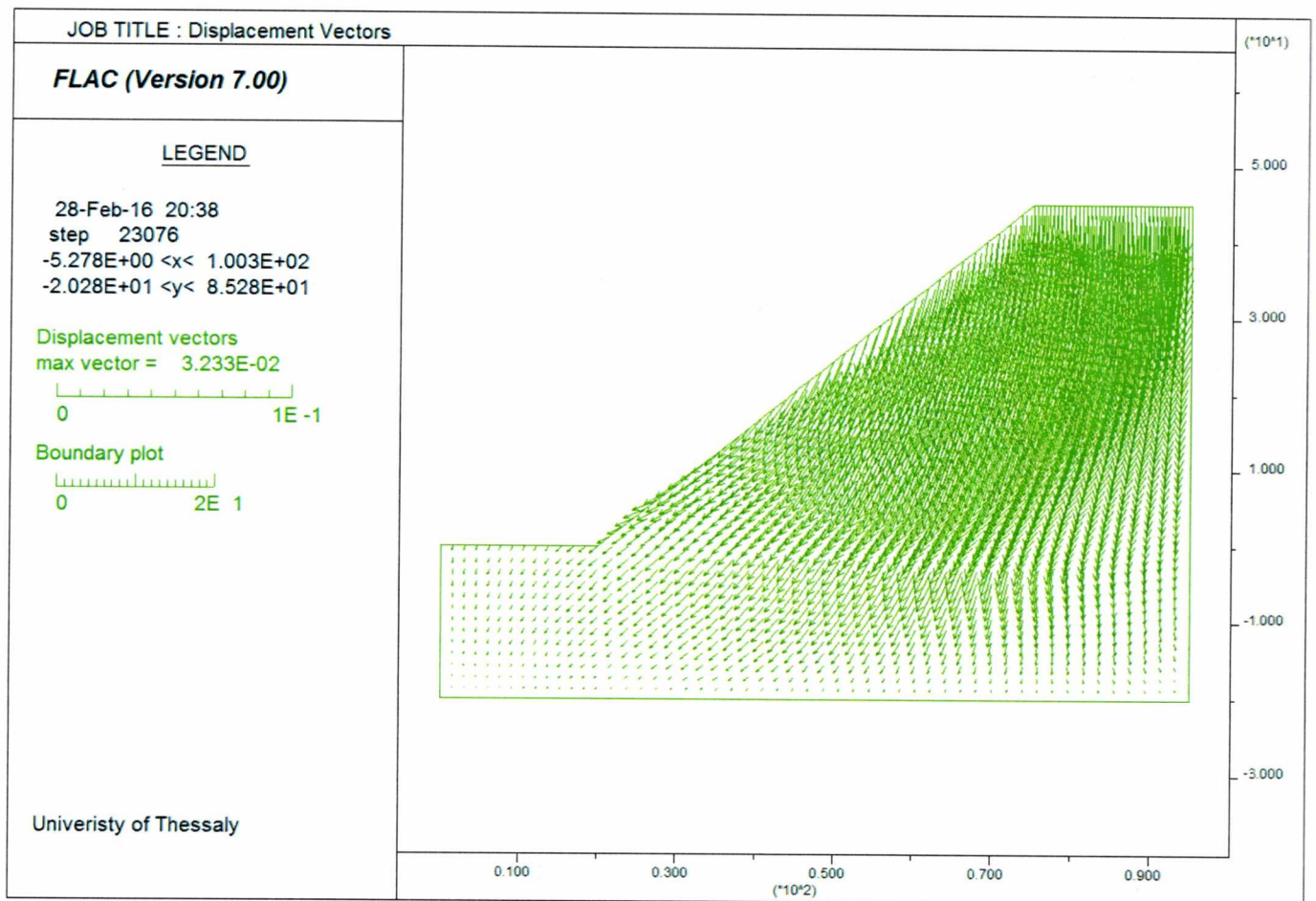
Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων να επεκτείνεται στο ανοιχτό μέτωπο λίγο πιο πάνω από τον πόδα του πρανούς.

### 6.1.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.6 Δείκτης πλαστικότητας

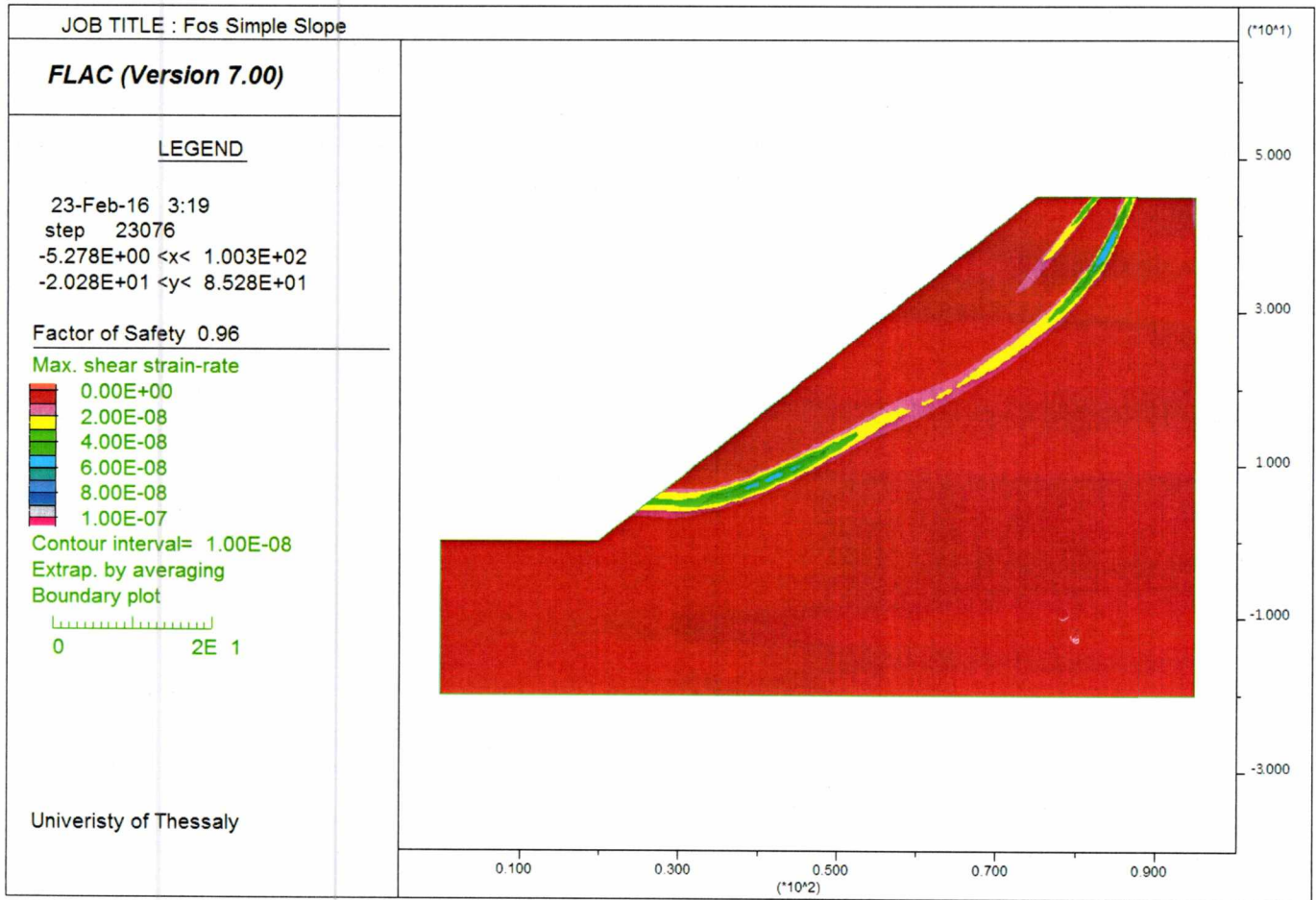
## 6.1.7 Διανύσματα Μετατοπίσεων



Εικόνα 6.7 Διανύσματα μετατοπίσεων

Το μέγιστο βέλος μετακίνησης έχει μέτρο 3.23cm και αντιστοιχεί τη στιγμή που το πρανές αστοχεί. Υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των μετακινήσεων κατά την έκταση του πρανούς.

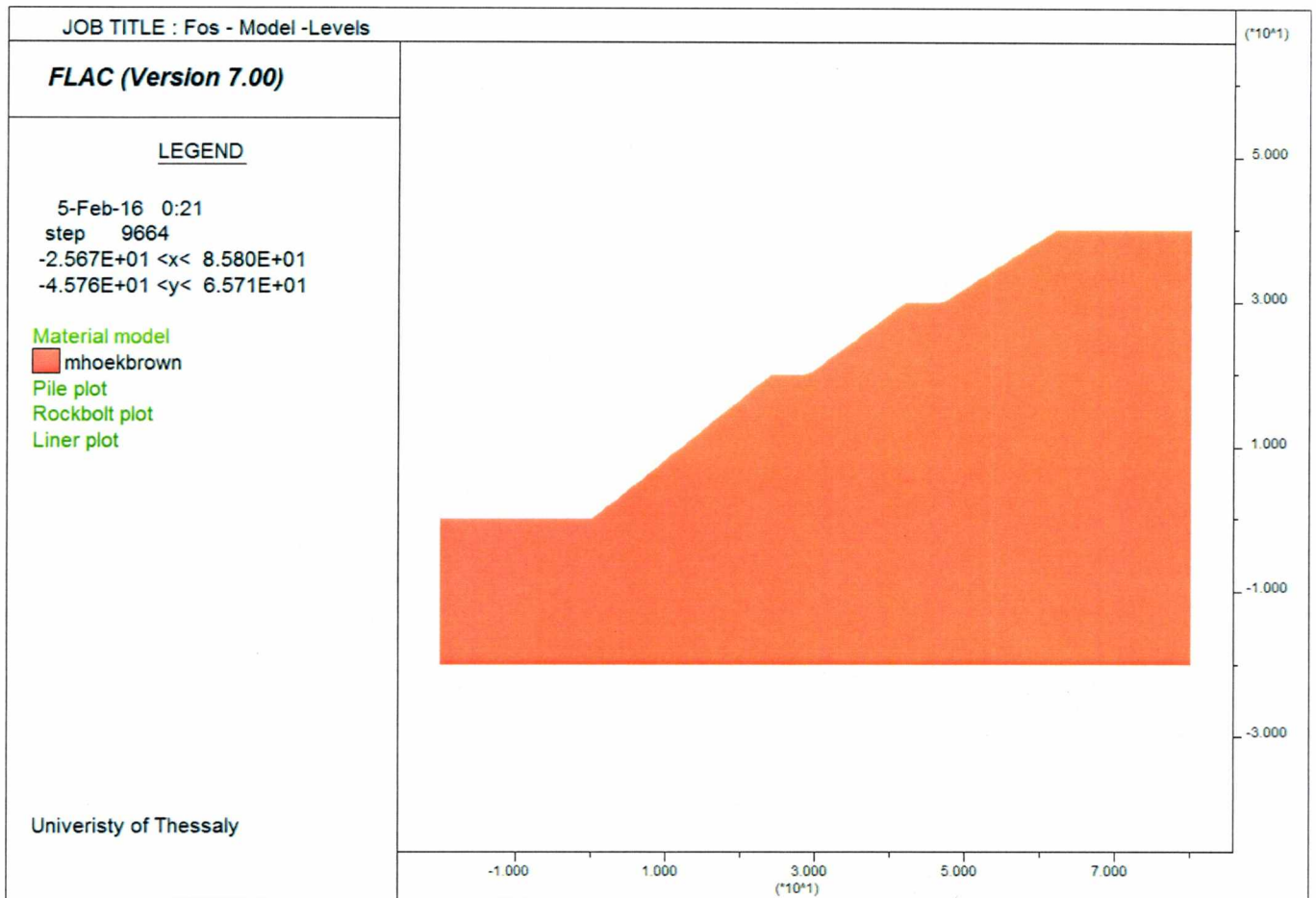
### 6.1.8 Συντελεστής Ασφαλείας



Εικόνα 6.8 Συντελεστής Ασφαλείας FOS = 0.96 φυσικού πρανούς

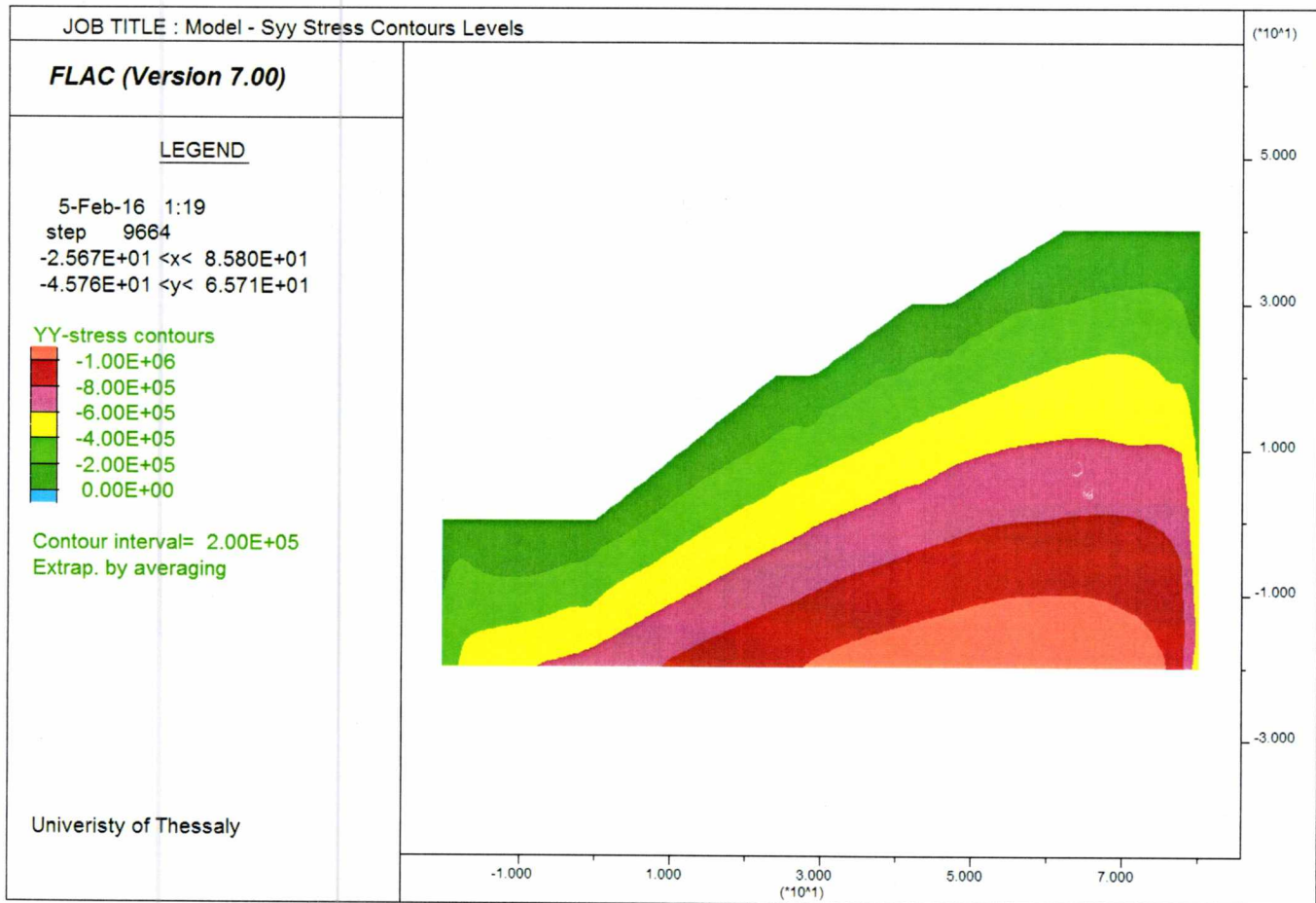
Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται FOS= 0.96. Δεν είναι αποδεκτή τιμή για την απαιτούμενη ασφάλεια. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης.

## 6.2 Πρανές – Διαμόρφωση αναβαθμών



Εικόνα 6.9 Μοντέλο Προσομοίωσης

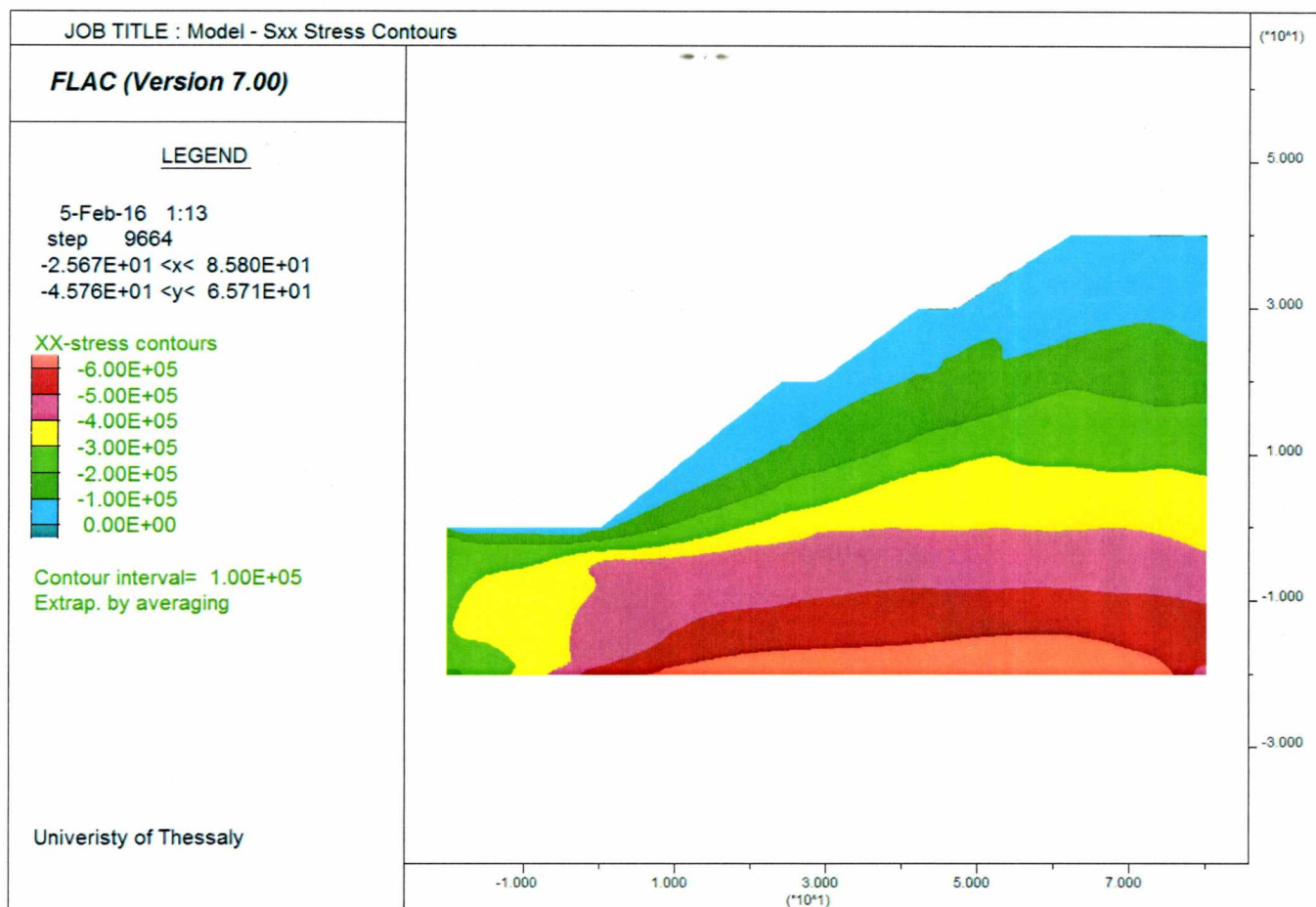
## 6.2.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.10 Κατανομή κατακόρυφων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{yy}$

Παρατηρείται για το διαμορφωμένο κατά αναβαθμούς πρανές ομοιομορφία στην ανάπτυξη της κατανομής των κατακόρυφων συνιστωσών της τάσης χωρίς σημαντικές αλλαγές ως προς τη κατανομή εικόνα 6.2 του φυσικού πρανούς.

## 6.2.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$

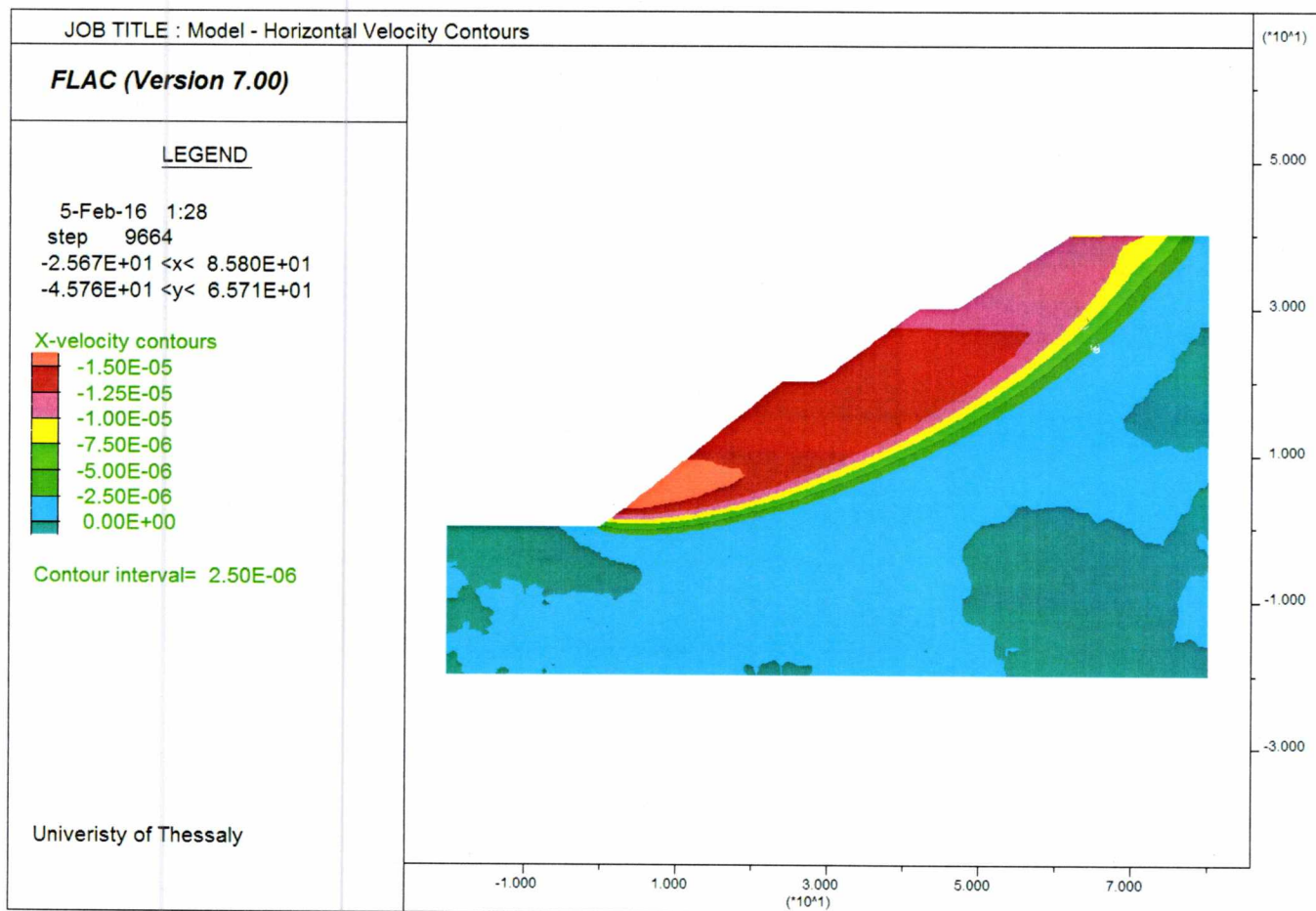


Εικόνα 6.11 Κατανομή οριζόντιων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{xx}$

Παρατηρείται για το διαμορφωμένο κατά αναβαθμούς πρανές ομοιομορφία στην ανάπτυξη της κατανομής των οριζόντιων συνιστωσών της τάσης χωρίς σημαντικές διαταράξεις ως προς την εικόνα 6.3 του φυσικού πρανούς.



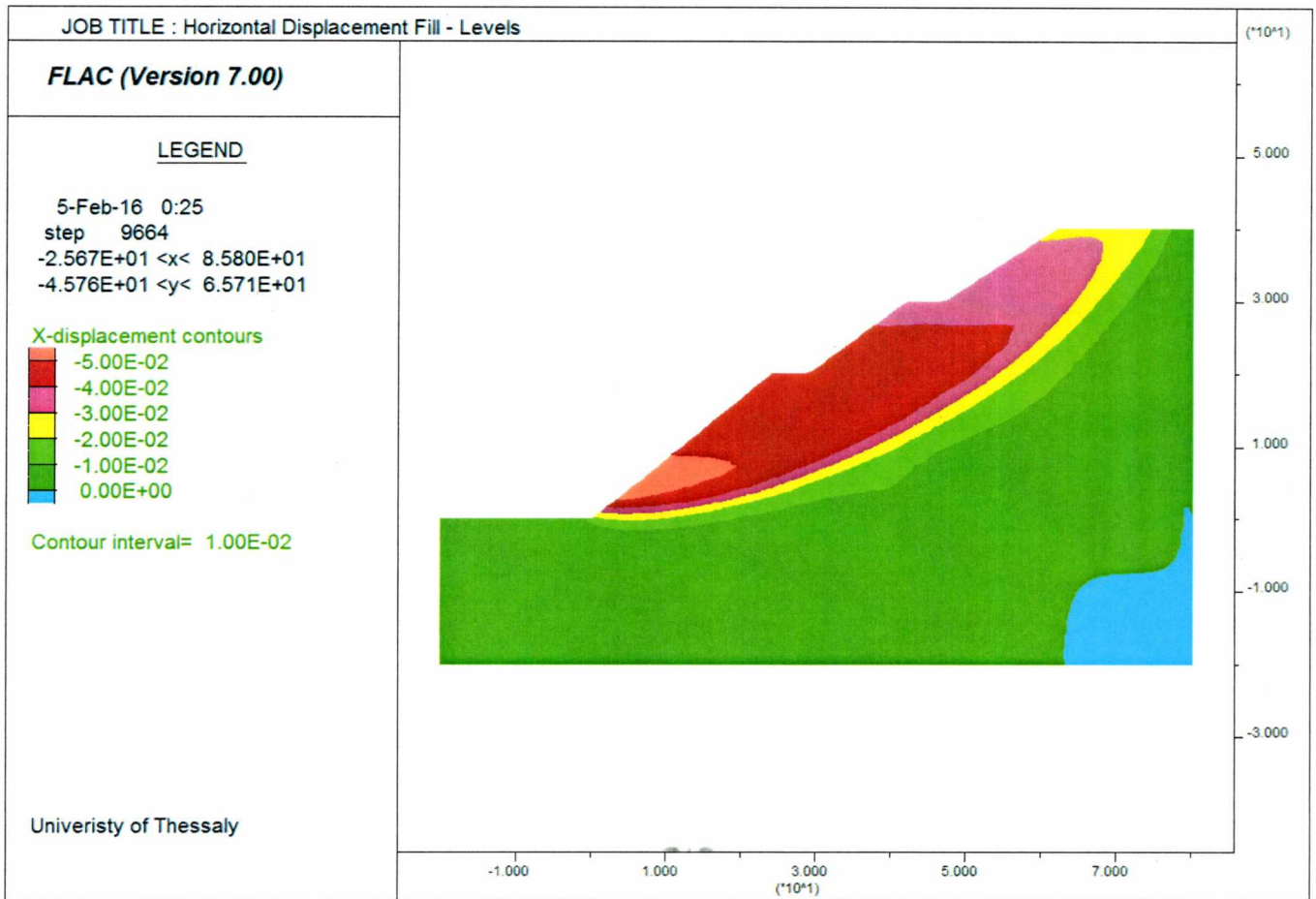
### 6.2.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων



Εικόνα 6.12 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων.

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων να επεκτείνεται στο ανοιχτό μέτωπο ακριβώς μέχρι το πόδα του πρανούς. Οι σημαντικές ταχύτητες αναπτύσσονται σε μεγάλο τμήμα της κλίσης του αντερείσματος αρκετά ομοιόμορφα.

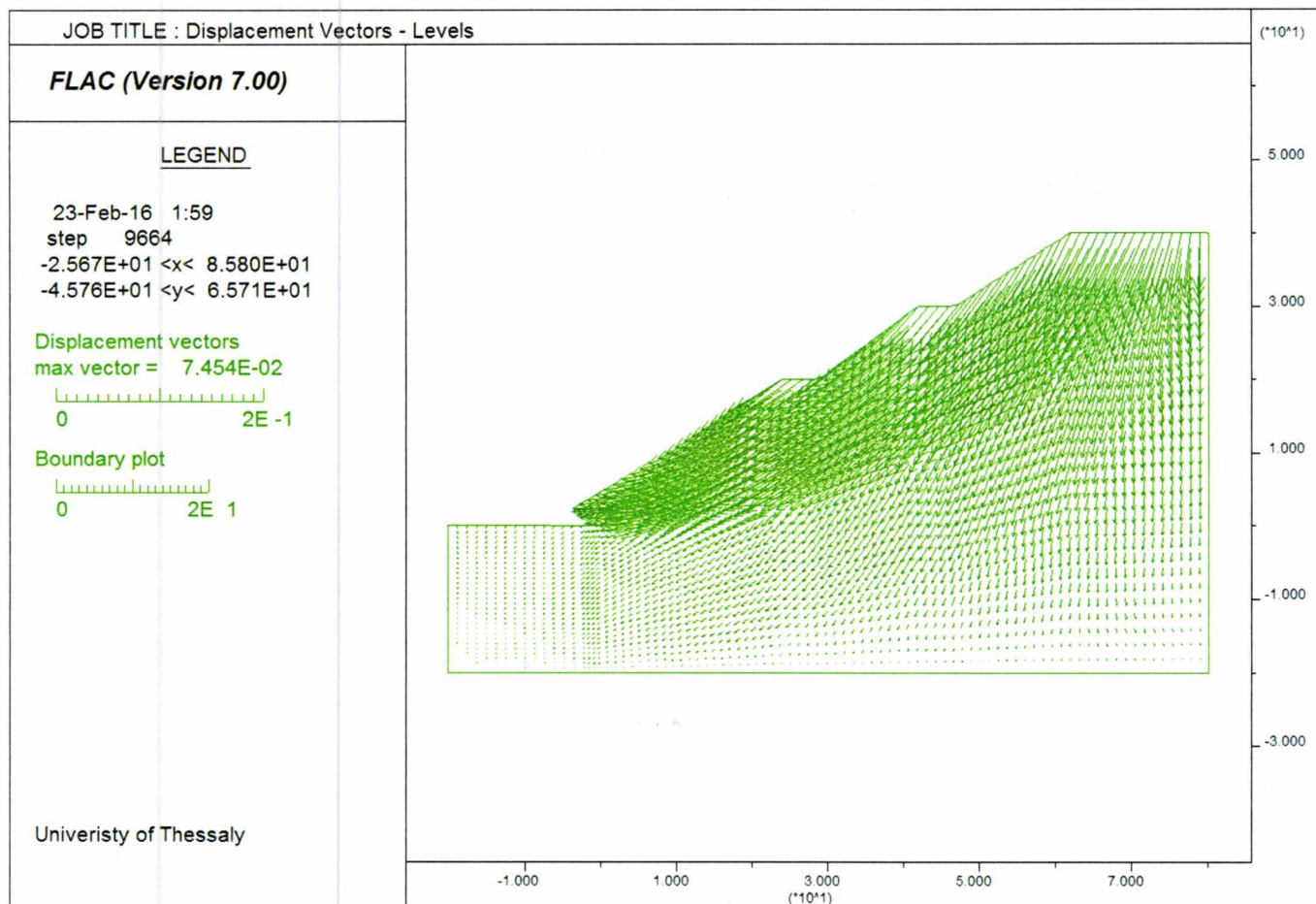
## 6.2.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.13 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων να συμβαδίζουν με τη προηγούμενη εικόνα 6.12 των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων και να ορίζουν την ενεργή ολισθαίνουσα επιφάνεια.

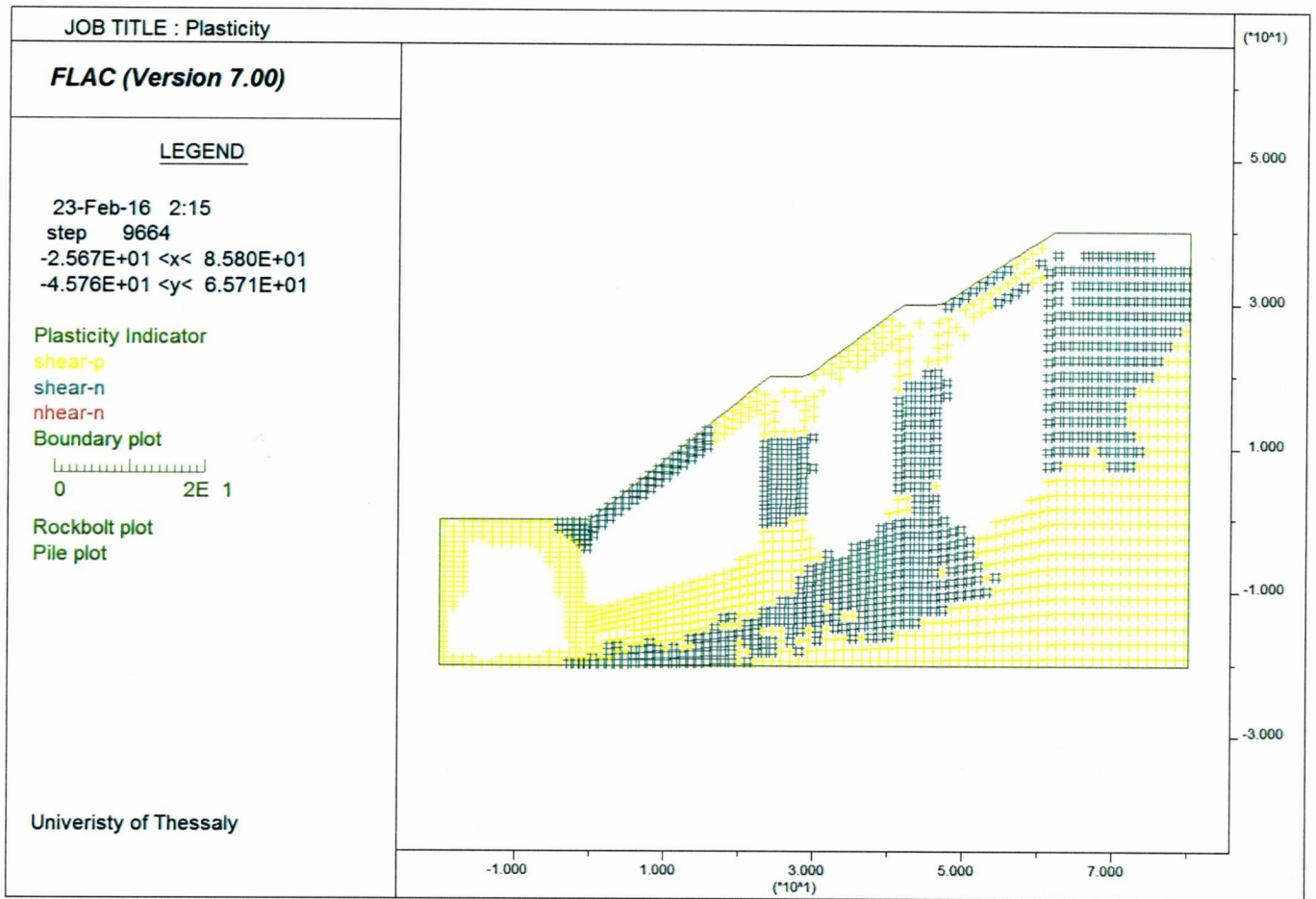
## 6.2.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.14 Διανύσματα Μετατοπίσεων

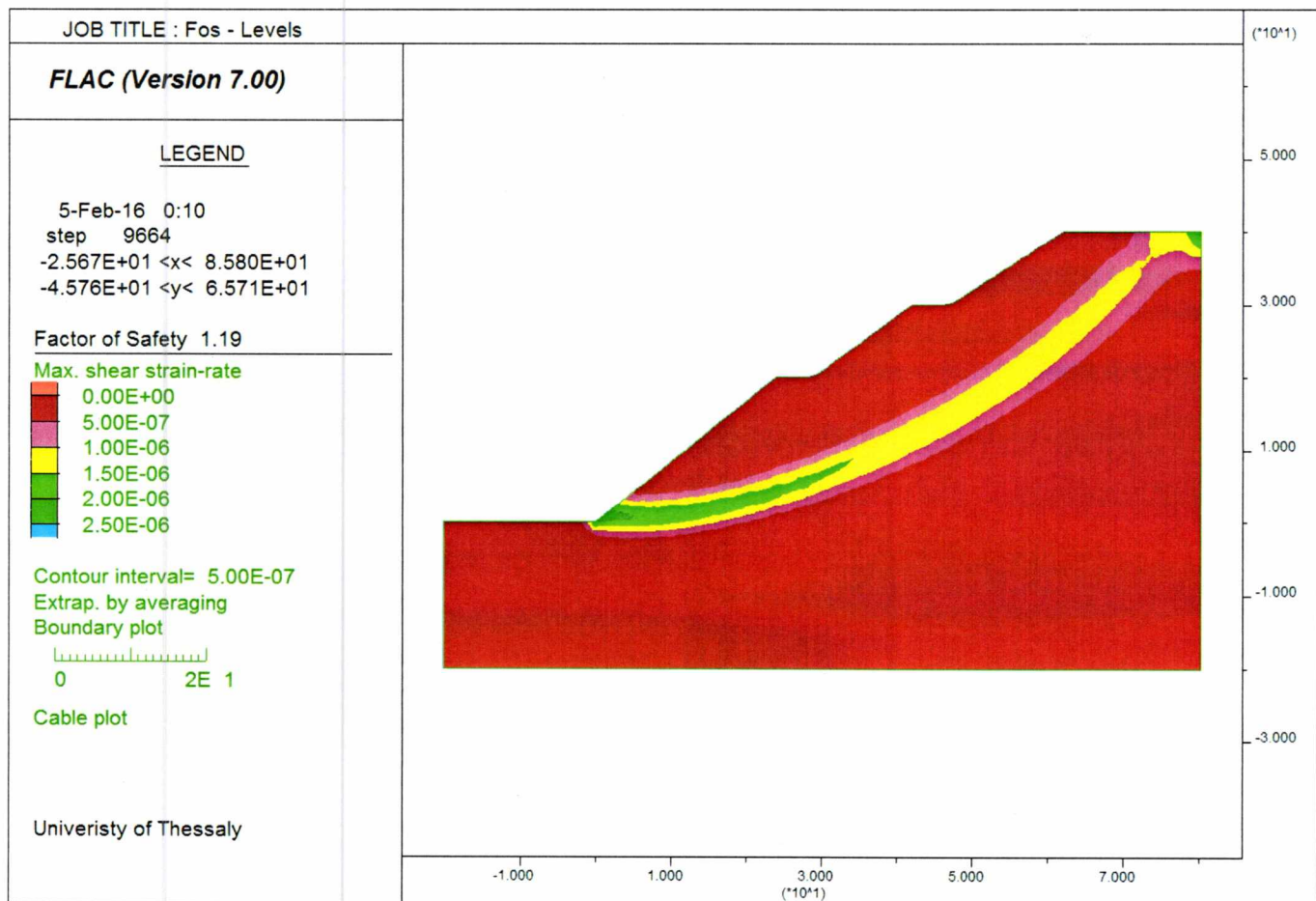
Το μέγιστο βέλος μετακίνησης έχει μέτρο 7.45cm και αντιστοιχεί τη στιγμή που το πρανές αστοχεί. Υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των μετακινήσεων κατά την έκταση της κλίσης του πρανούς. Εν σχέση με το φυσικό πρανές παρατηρείται μεγαλύτερο κατά μέτρο βέλος μετακίνησης. Οι κρίσιμες μετακινήσεις έχουν μεταφερθεί πιο χαμηλά στο μέτωπο του πρανούς.

## 6.2.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.15 Δείκτες Πλαστικότητας

## 6.2.7 Συντελεστής ασφαλείας

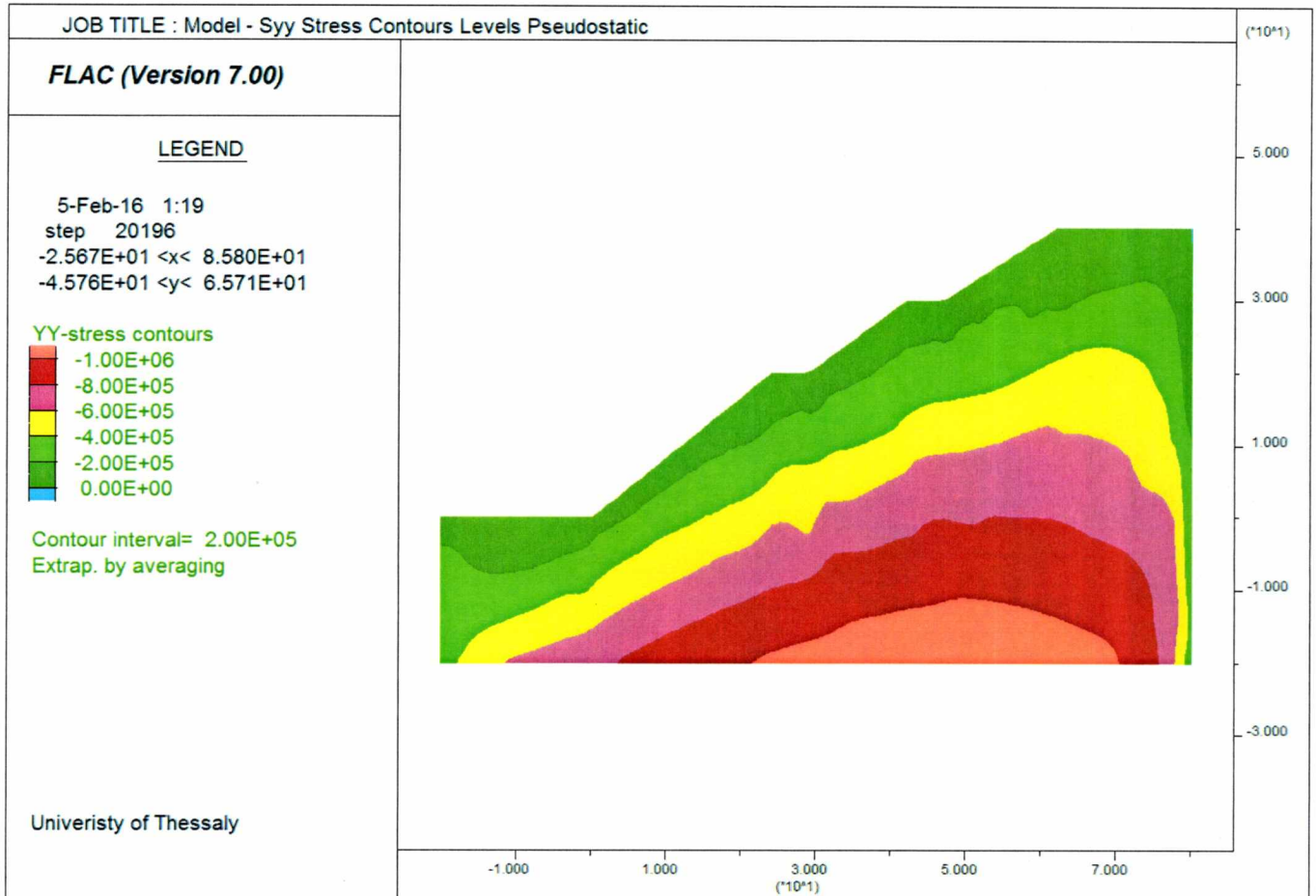


Εικόνα 6.16 Συντελεστής ασφαλείας FOS= 1.19 – Μέτρο αντιστήριξης: Σχηματισμός Αναβαθμών

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται FOS= 1.19. Δεν είναι αποδεκτή τιμή για την απαιτούμενη ασφάλεια καθώς απαιτείται συντελεστής ασφαλείας FOS > 1.40 για στατικές συνθήκες φόρτισης. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Παρατηρείται σε σχέση με το φυσικό πρηνές βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας κατά ποσοστό 19.4%.

## 6.3 Ψευδοστατική ανάλυση – Αναβαθμών

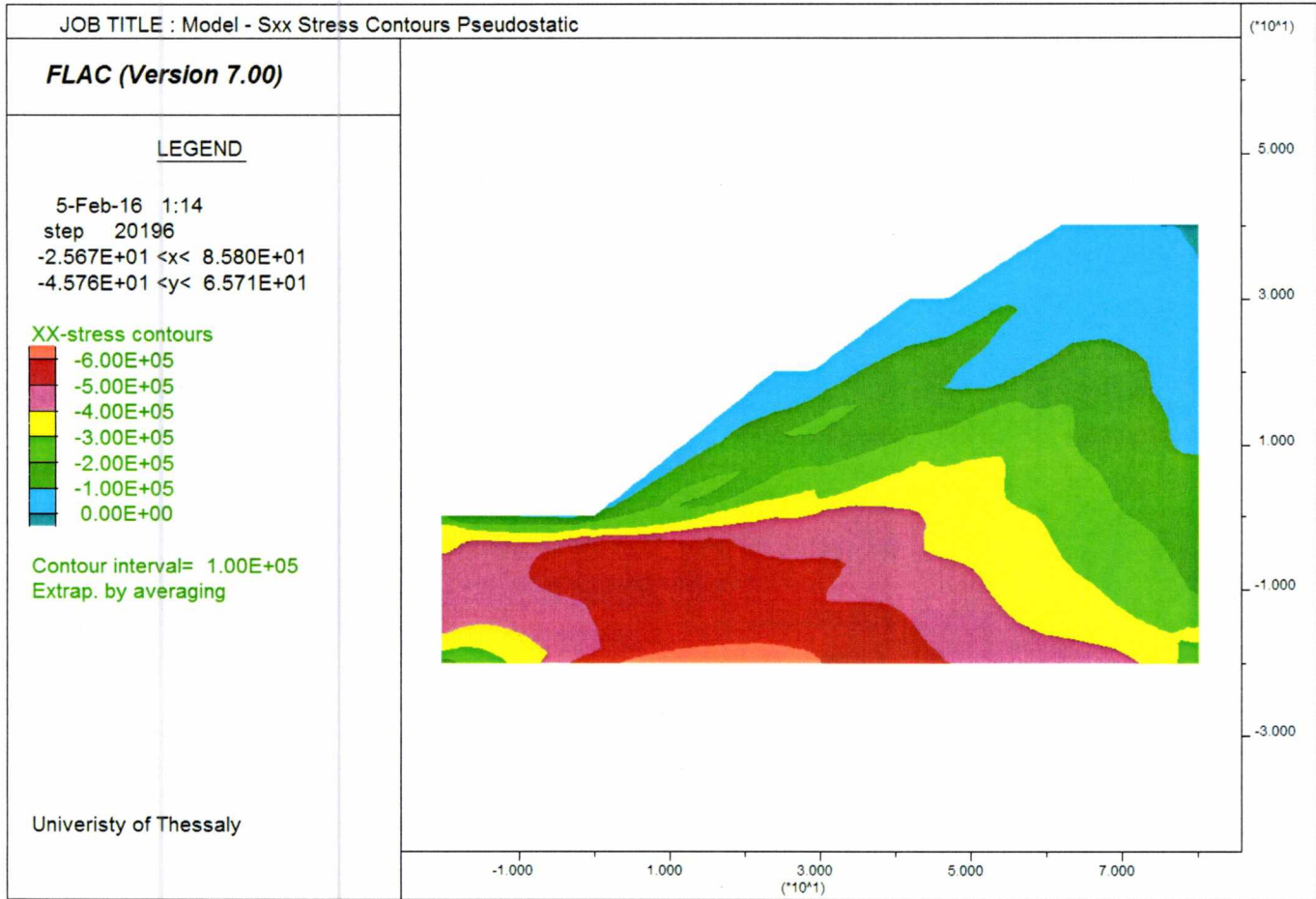
### 6.3.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.17 Κατανομή κατακόρυφων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{yy}$  για μη σταθερό βαρυτικό πεδίο επιτάχυνσης 0,24g - Ψευδοστατικής Ανάλυσης

Παρατηρείται μικρής κλίμακας διατάραξη στην κατανομή των κατακόρυφων συνιστωσών της τάσης καθώς το σταθερό βαρυτικό πεδίο μετατρέπεται σε μη σταθερό με δυσμενή διεύθυνση επιτάχυνσης ως προς τη κλίση.

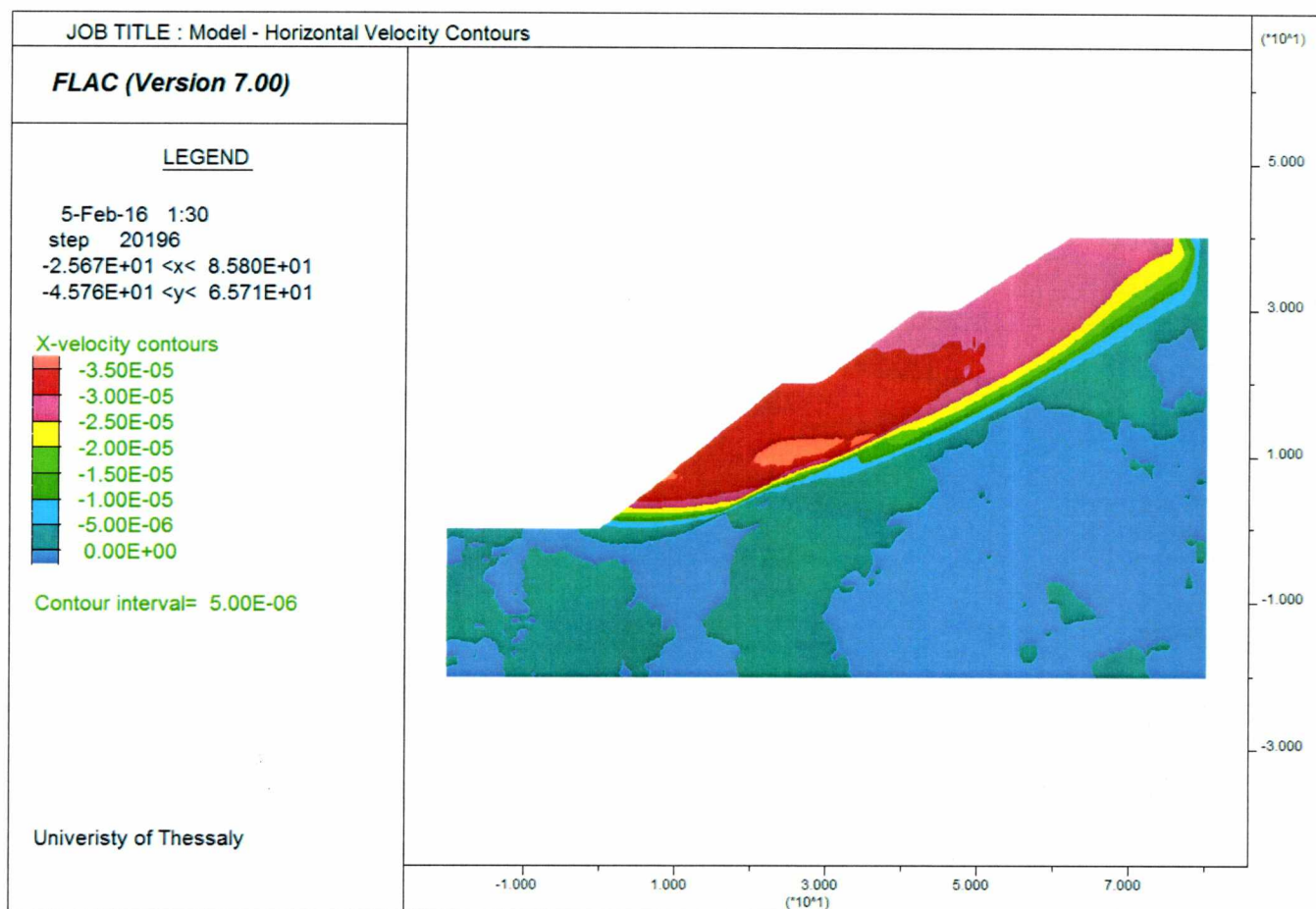
### 6.3.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.18 Κατανομή οριζοντίων συνιστωσών τάσεων  $\sigma_{xx}$  για μη σταθερό βαρυντικό πεδίο επιτάχυνσης 0,24g - Ψευδοστατική Ανάλυση

Παρατηρείται σημαντική διατάραξη στην κατανομή των οριζόντιων συνιστωσών της τάσης καθώς το σταθερό βαρυντικό πεδίο μετατρέπεται σε μη σταθερό με δυσμενή διεύθυνση επιτάχυνσης ως προς τη κλίση.

### 6.3.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων

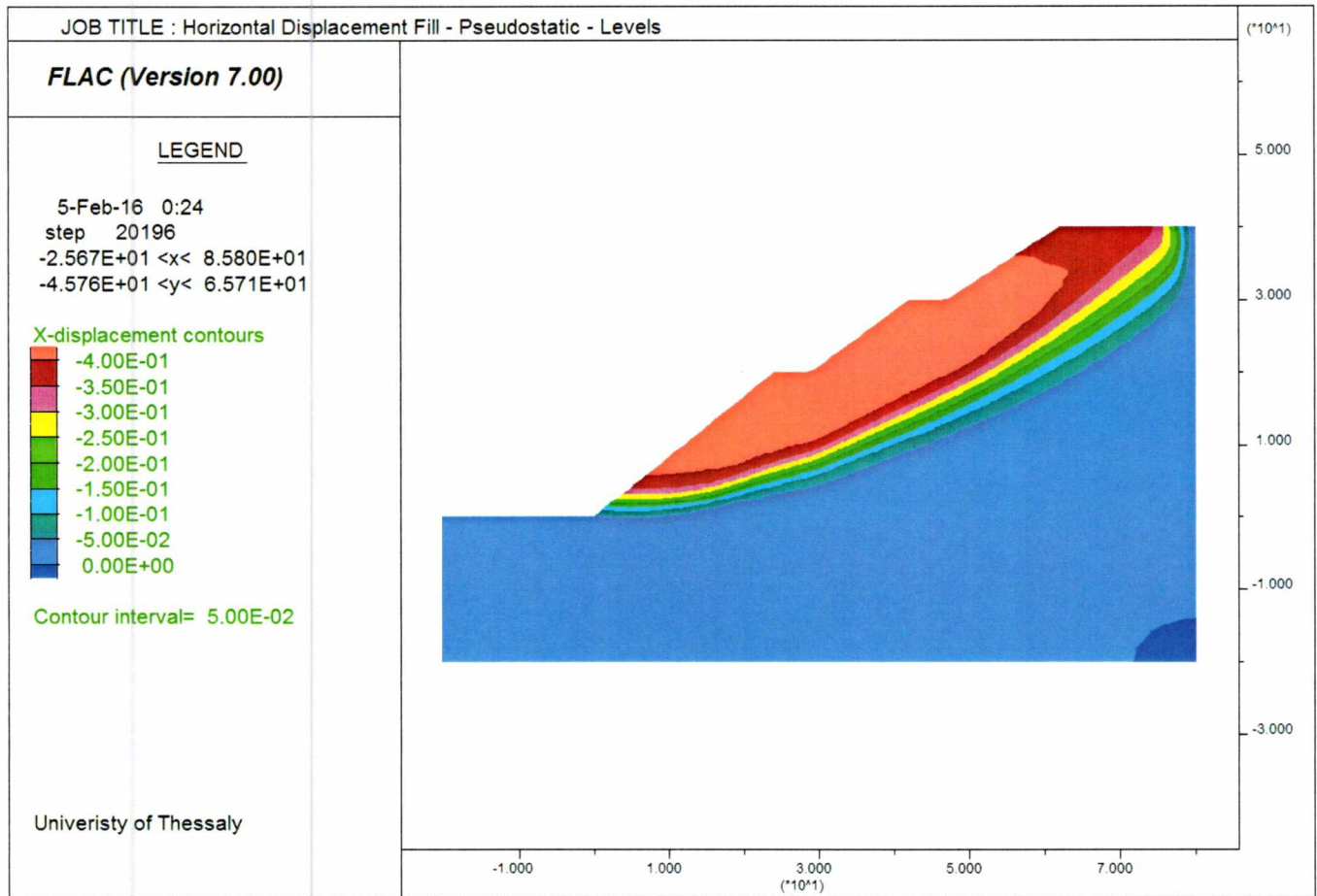


Εικόνα 6.19 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων -Ψευδοστατικής Ανάλυσης

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων να επεκτείνεται στο ανοιχτό μέτωπο ακριβώς μέχρι το πόδα του πρανούς. Υπάρχει εμφανής διατάραξη στη κατανομή σε σχέση με τις στατικές συνθήκες φόρτισης καθώς παρατηρούνται αρκετά μεγαλύτερες κατά μέτρο ταχύτητες. Οι σημαντικές ταχύτητες αναπτύσσονται στο μεγαλύτερο τμήμα της κλίσης του αντερείσματος σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση στατικών συνθηκών και σταθερού βαρυτικού πεδίου.



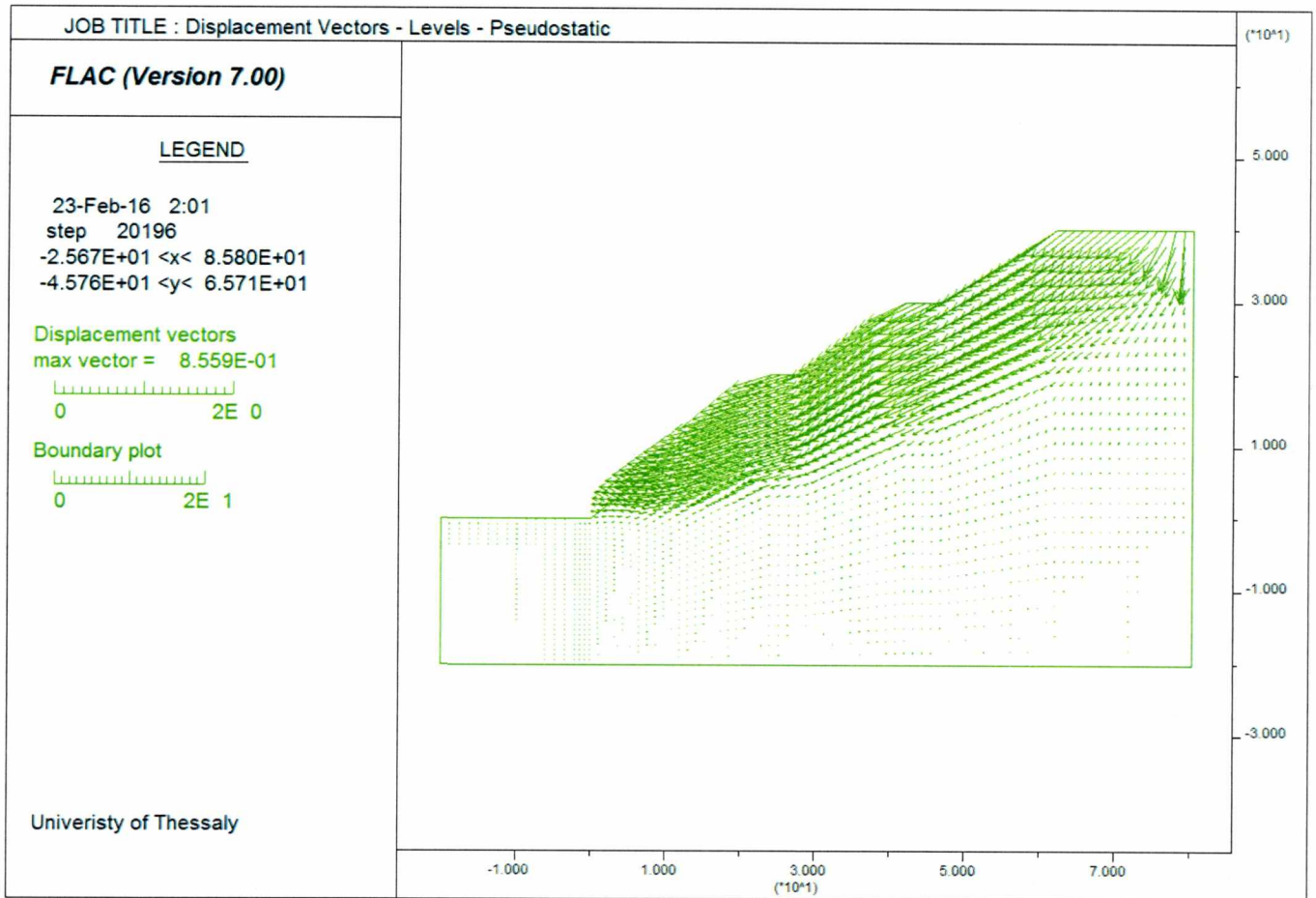
### 6.3.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.20 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων όπως σχηματίζεται κατά τη στιγμή της αστοχίας. Το τμήμα της βραχομάζας που τείνει να ολισθήσει με σημαντική κατά μέτρο μετακίνηση στην εν λόγω ψευδοστατική φόρτιση εκτείνεται στο μεγαλύτερο τμήμα της κλίσης.

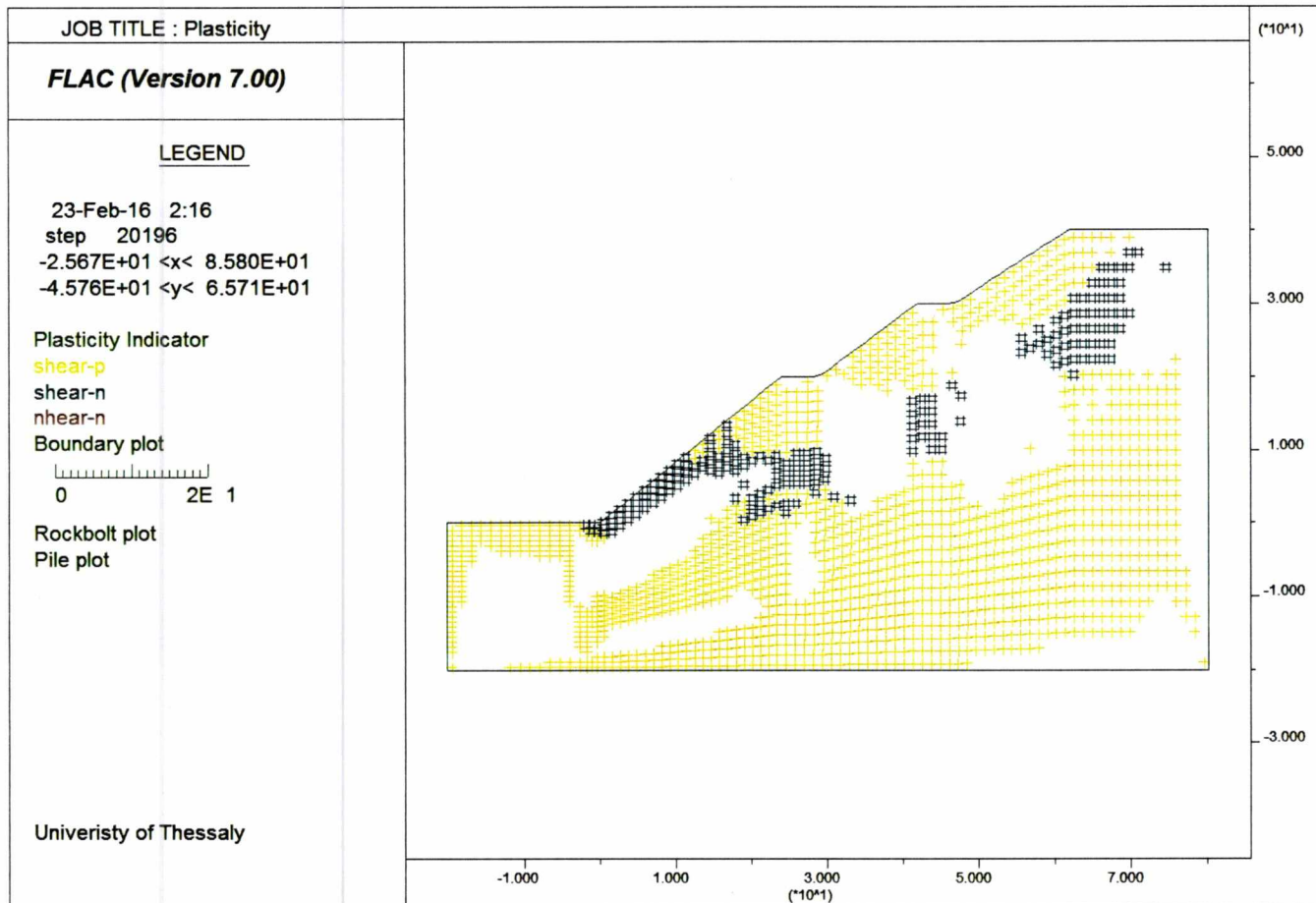
### 6.3.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.21 Διανύσματα μετατοπίσεων

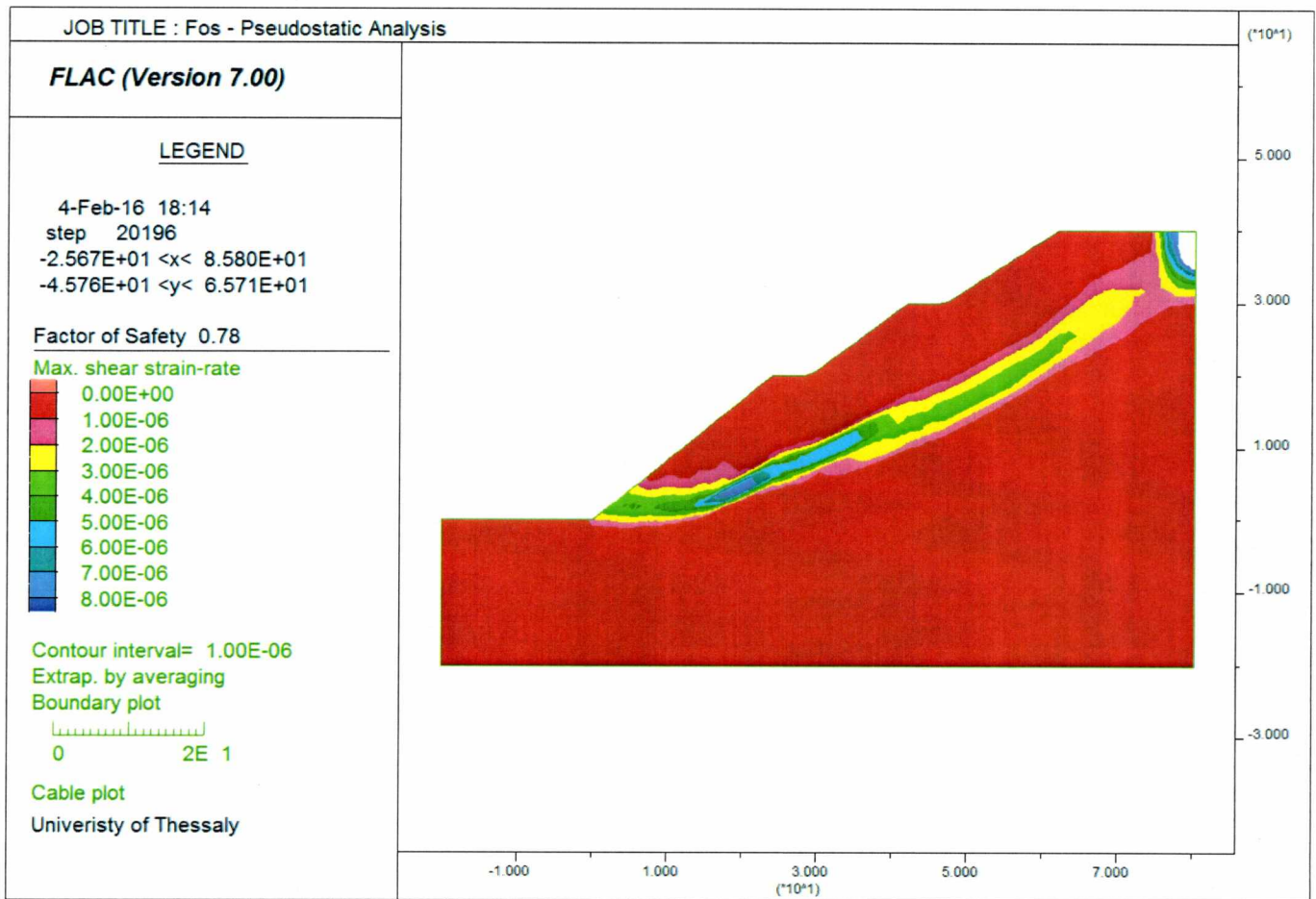
Το μέγιστο βέλος μετακίνησης έχει μέτρο 85.00cm και αντιστοιχεί τη στιγμή που το πρανές αστοχεί (εκρηκτική – ψαθυρή αστοχία).

### 6.3.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.22 Δείκτες Πλαστικότητας

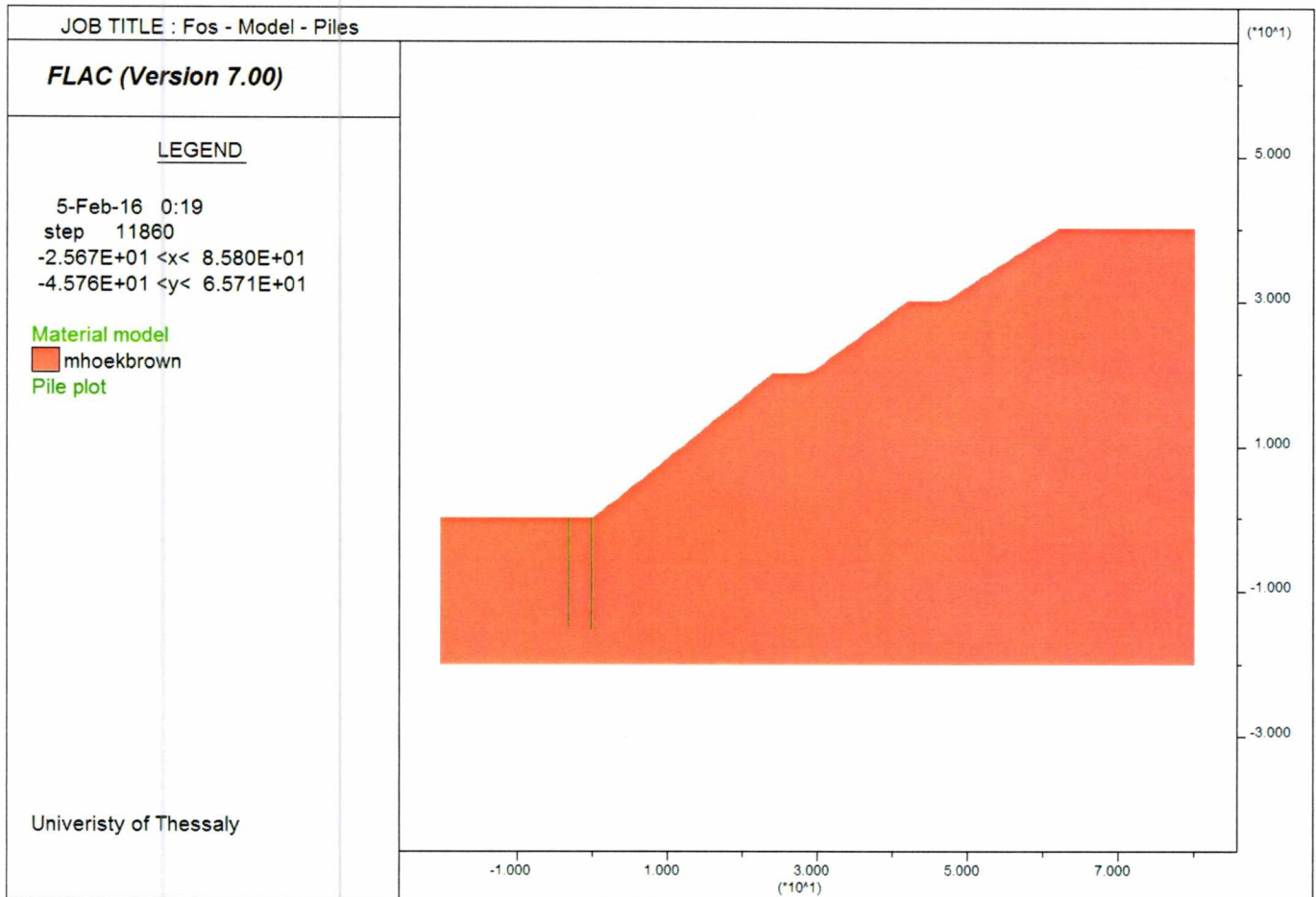
### 6.3.7 Συντελεστής ασφαλείας



Εικόνα 6.23 Συντελεστής Ασφαλείας FOS=0.78 -Ψευδοστατικής Ανάλυσης

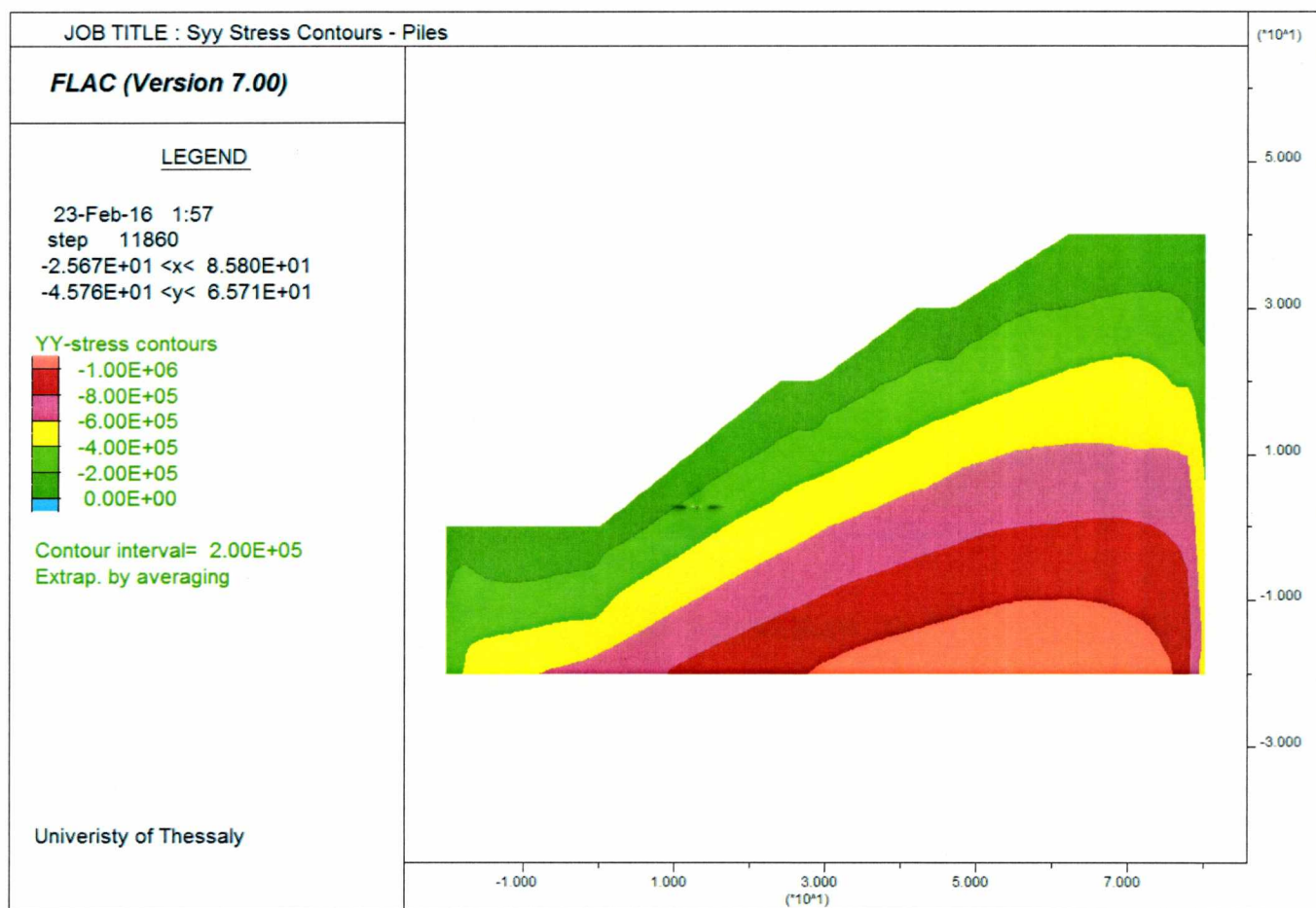
Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται FOS= 0.78. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Ο συντελεστής για τη παραπάνω ανάλυση δε προκύπτει ικανοποιητικός για οριζόντια επιτάχυνση σεισμού 0.24g. Επομένως σε επόμενο βήμα θα εφαρμόσουμε κάποια μέτρα αντιστήριξης προκειμένου να βελτιωθεί ο συντελεστής ασφαλείας τουλάχιστον Fos= 1.00 (όριο για σεισμικές φορτίσεις).

## 6.4 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας πασσάλων



Εικόνα 6.24 Μοντελοποίηση Πρανούς – Αναβαθμούς – Πασσάλους

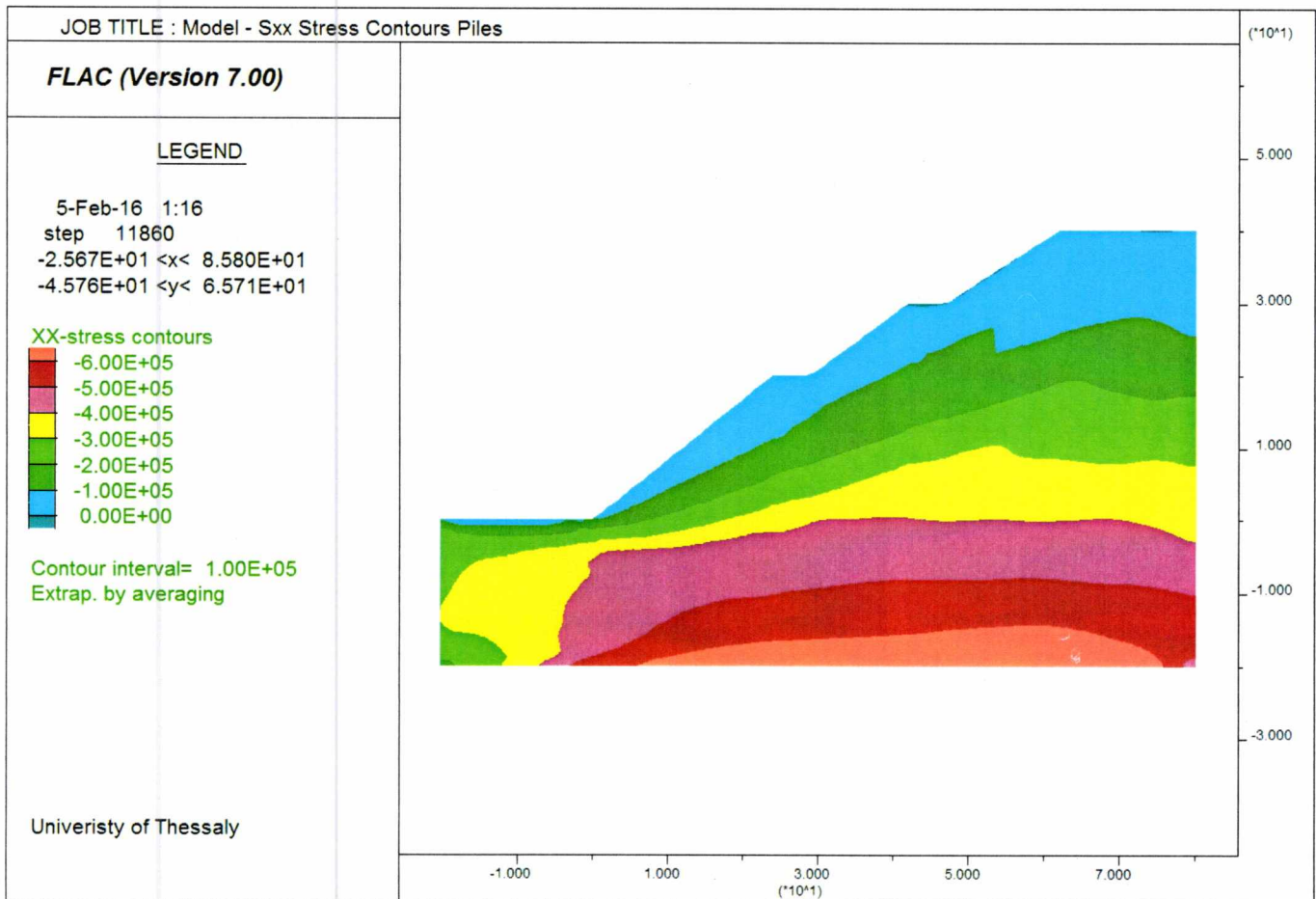
### 6.4.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.25 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{yy}$  για τους διαμορφωμένους αναβαθμούς και την εισαγωγή πασσάλων

Μετά την εισαγωγή των δύο πασσάλων δε παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη κατανομή ή στη τάξη μεγέθους της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης.

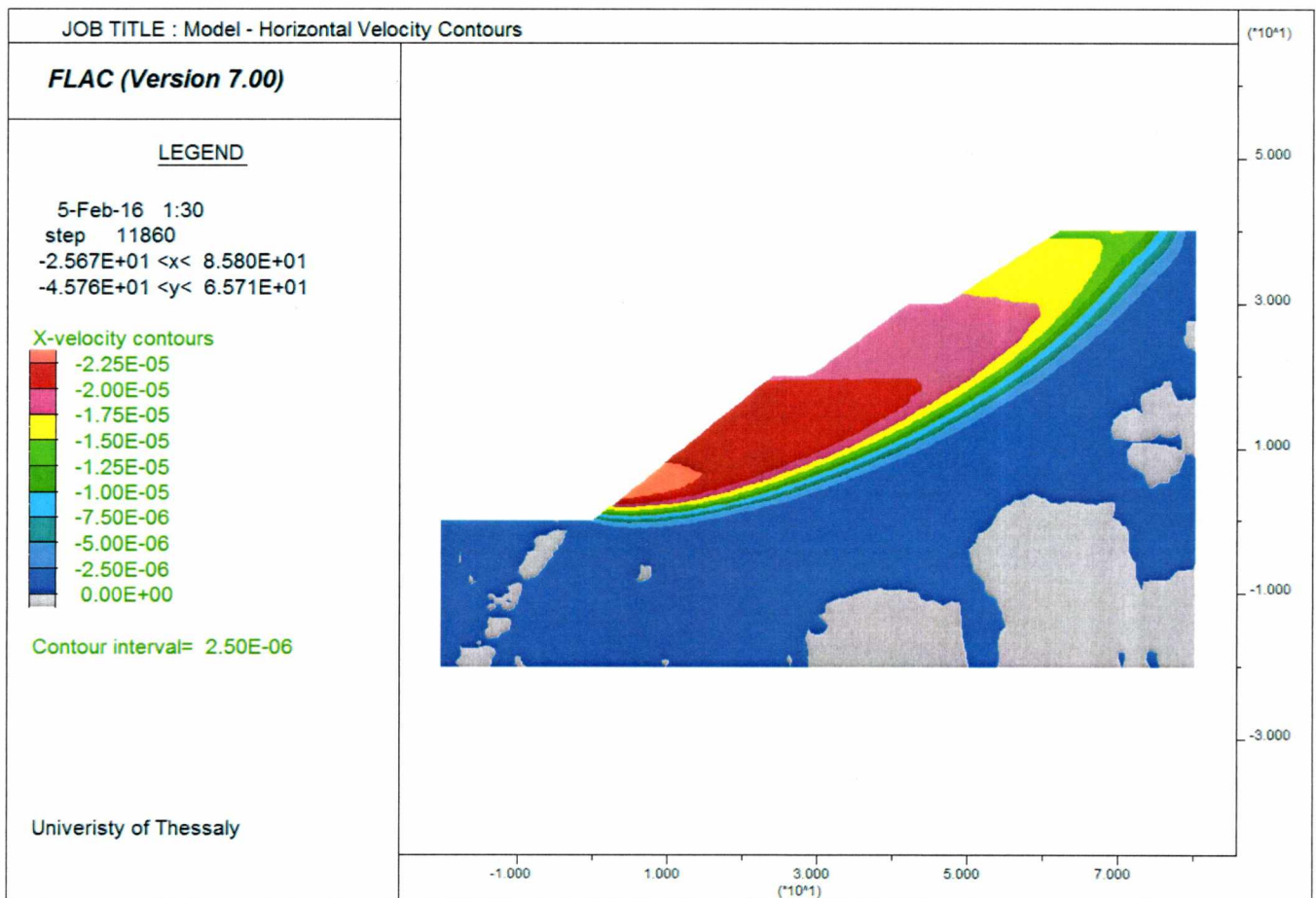
## 6.4.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.26 Κατανομή οριζόντιων τάσεων  $\sigma_{xx}$  για τους διαμορφωμένους αναβαθμούς και την εισαγωγή πασσάλων

Μετά την εισαγωγή των δύο πασσάλων δε παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη κατανομή ή στη τάξη μεγέθους της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης.

### 6.4.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων

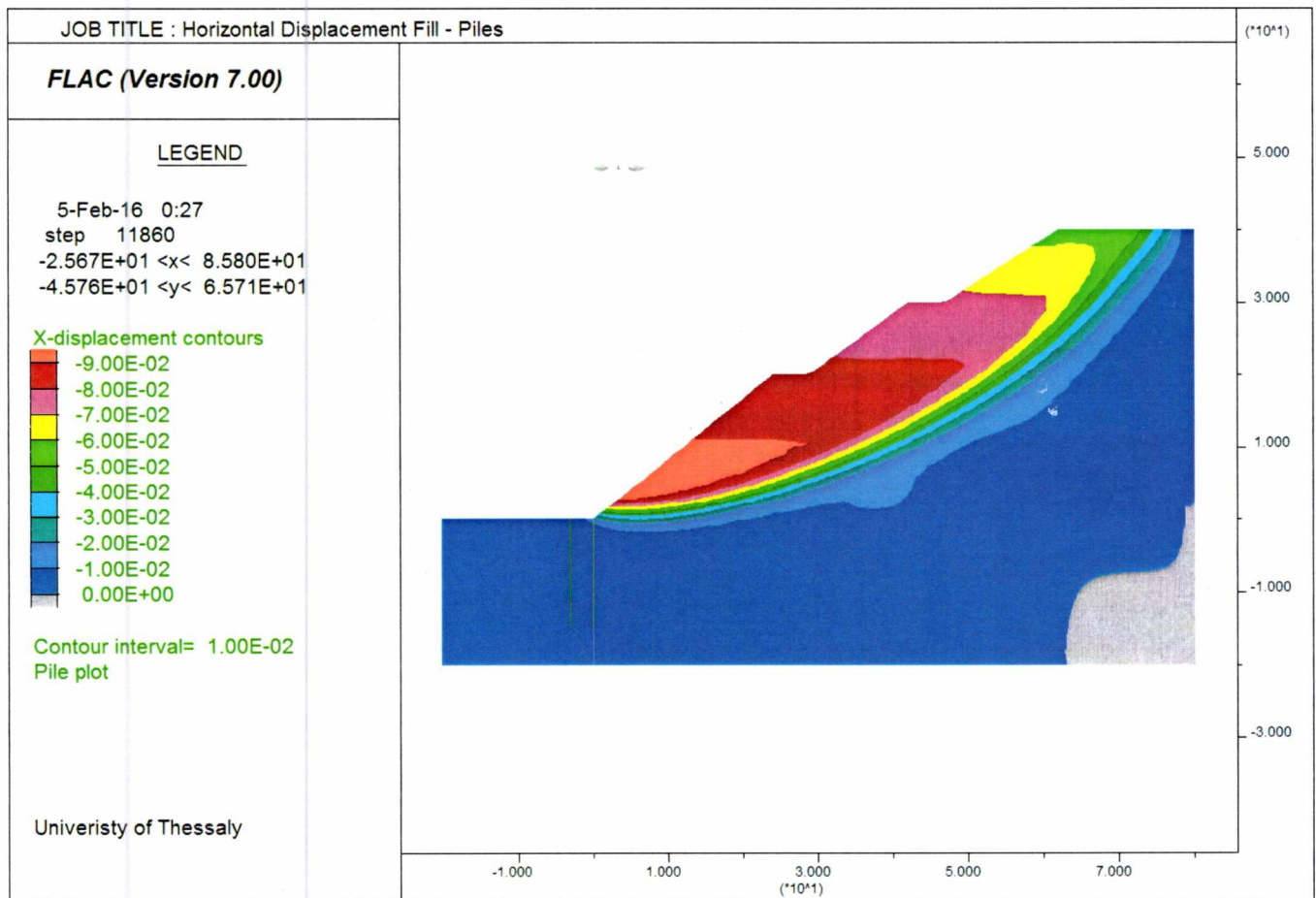


Εικόνα 6.27 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων για τους διαμορφωμένους αναβαθμούς και την εισαγωγή πασσάλων

Στη παραπάνω απεικόνιση των οριζόντιων αναπτυσσόμενων ταχυτήτων γίνεται αντιληπτή η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης και παρατηρείται ότι δεν αναπτύσσεται έως το πόδα του πρανούς. Επομένως το μέτρο αντιστήριξης των πασσάλων αναμένεται να μην έχει σημαντική βελτίωση στο συντελεστή ασφαλείας. Ωστόσο λόγω της αύξησης της αντίστασης στο σημείο έμπηξης των πασσάλων υπάρχει αύξηση των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων χαμηλά στην μετακινούμενη επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει καθώς η ολισθαίνουσα επιφάνεια και οι μετακινήσεις εκτονώνονται με μεγαλύτερη ένταση λόγω της αυξημένης αντίστασης στο σημείο εισαγωγής των πασσάλων. Οι πάσσαλοι ενίσχυσαν το γεώπλεγμα (κάναβο) στο σημείο που εισήχθησαν αλλά δεν αντιδρούν στις κρίσιμες μετακινήσεις για να έχουν ουσιώδες αποτέλεσμα στη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας.



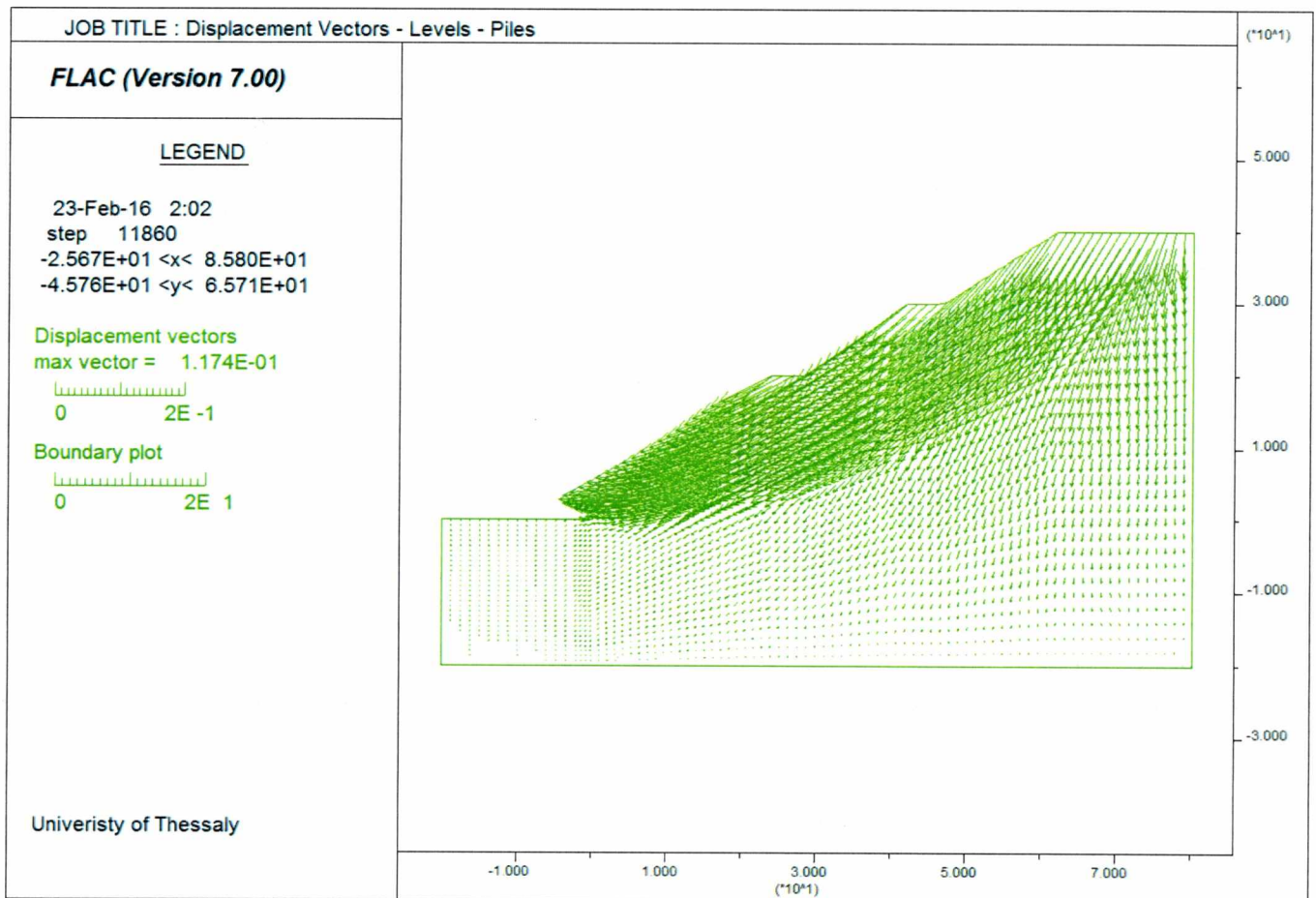
#### 6.4.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.28 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

Στην παραπάνω απεικόνιση παρατηρείτε σε συνέχεια με την εικόνα 6.27 πως η μετακινούμενη βραχομάζα δεν επεκτείνεται έως το σημείο που βρίσκονται οι πάσσαλοι.

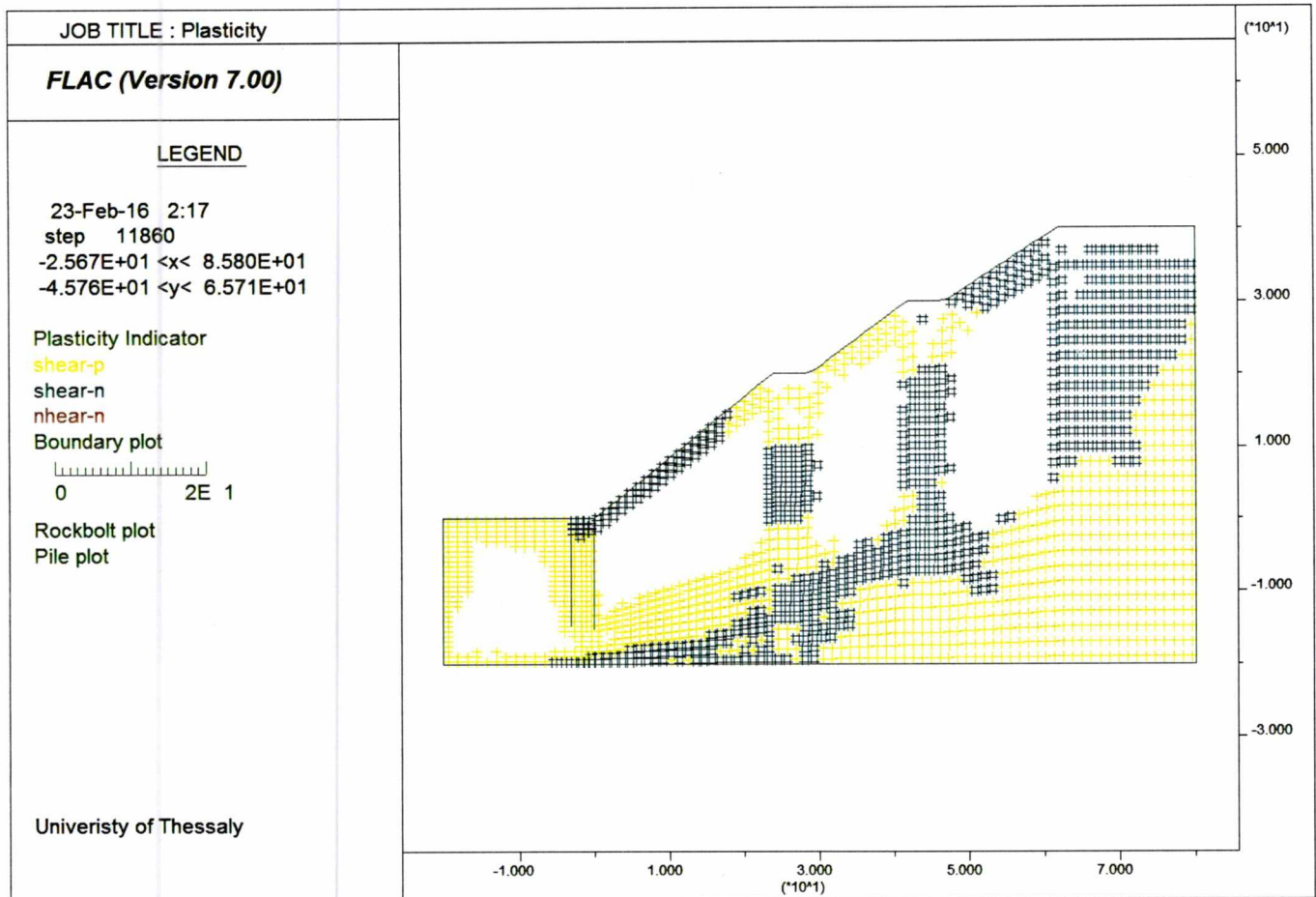
## 6.4.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.29 Διανύσματα μετατοπίσεων

Το μέγιστο διάνυσμα μετατόπισης που αναπτύσσεται κατά την κρίσιμη στιγμή της αστοχίας έχει μέτρο 11.70cm. Οι σημαντικές μετακινήσεις συγκεντρώνονται πιο έντονα στο κατώτερο τμήμα της κλίσης. Προκύπτει σαφώς μια πιο έντονη αστοχία μετά την εισαγωγή των πασσάλων καθώς αυξήθηκε η μέγιστη μετακίνηση.

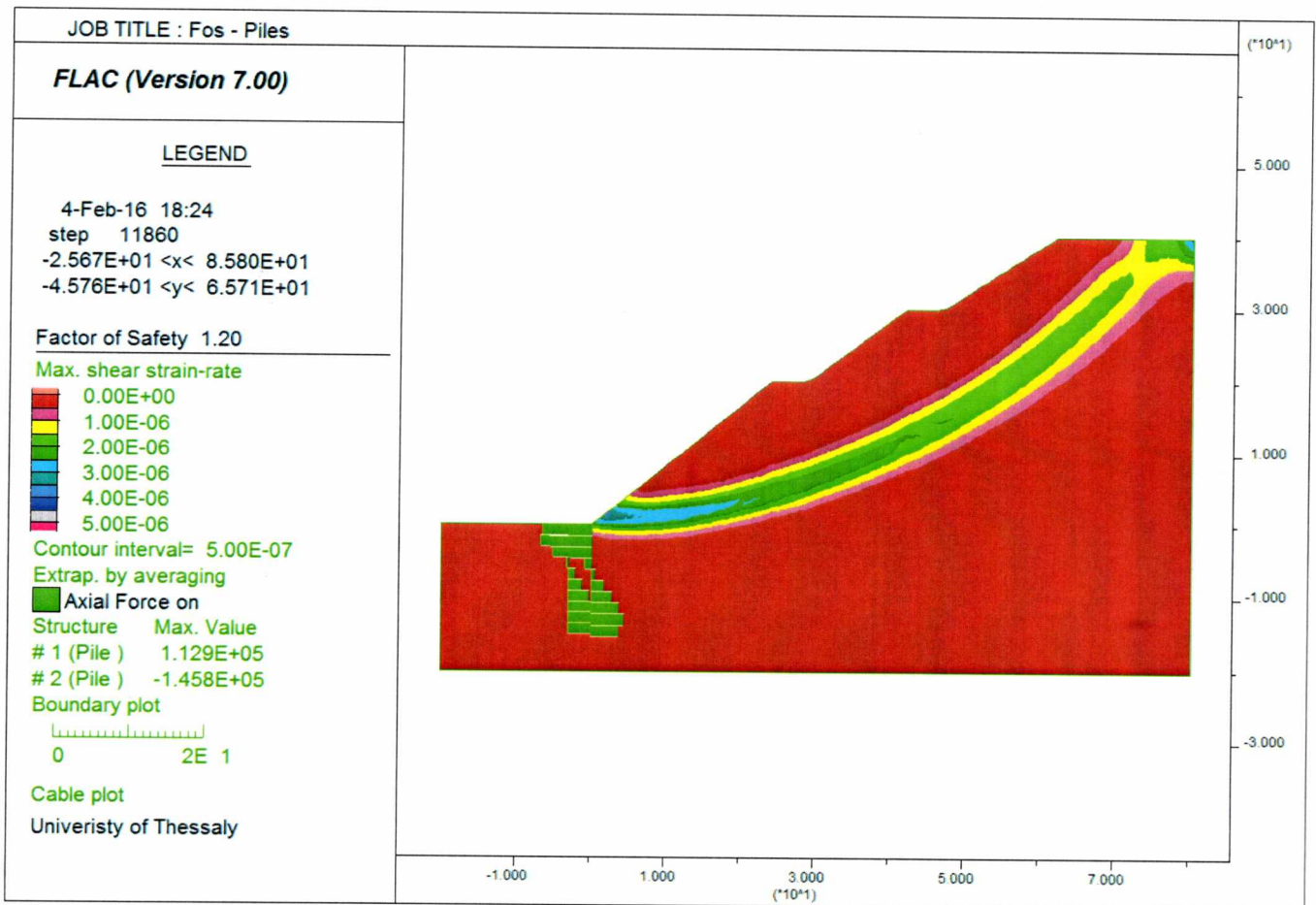
### 6.4.6 Δείκτες πλαστικότητας



Εικόνα 6.30 Δείκτες Πλαστικότητας



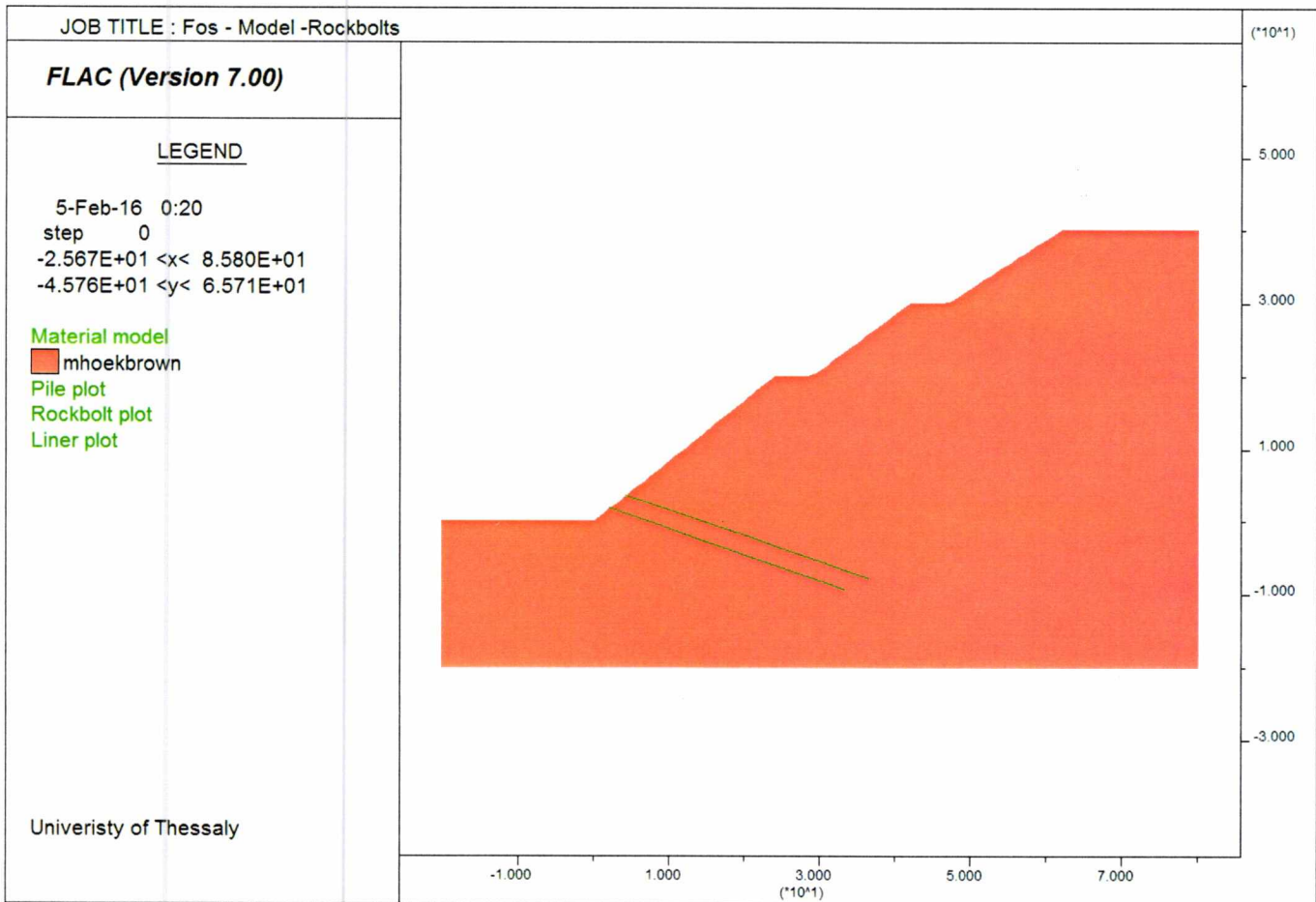
## 6.4.7 Συντελεστής ασφαλείας



Εικόνα 6.31 Συντελεστής Ασφαλείας FOS=1.20 - Διαμόρφωση αναβαθμών και εισαγωγή πασσάλων

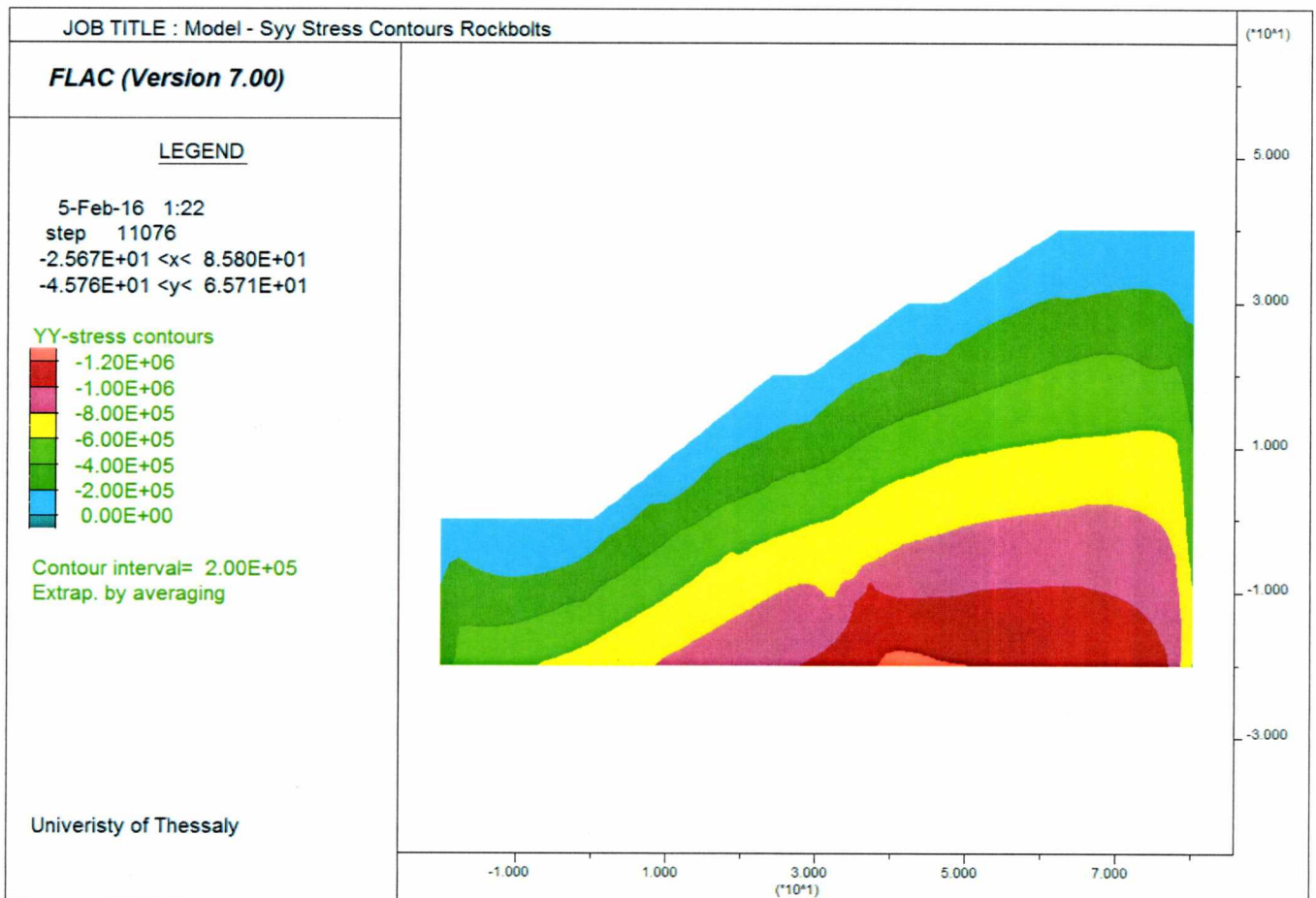
Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε FOS=1.20. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας υποδεικνύει ότι οι πάσσαλοι δεν έχουν κάποια σημαντική επίδραση στη βελτίωση της ευστάθειας του πρανούς. Βελτιώσαν κατά 0.84%. Το γεγονός ότι οι πάσσαλοι δε επιδρούν στη βελτίωση οφείλετε στην επιφάνεια ολίσθησης η οποία δεν αναπτύσσεται ως του πασσάλους.

## 6.5 Εισαγωγή δυο σειρές αγκυρίων



Εικόνα 6.32 Μοντέλο αντιστηριζόμενο με διπλή σειρά αγκυρίων

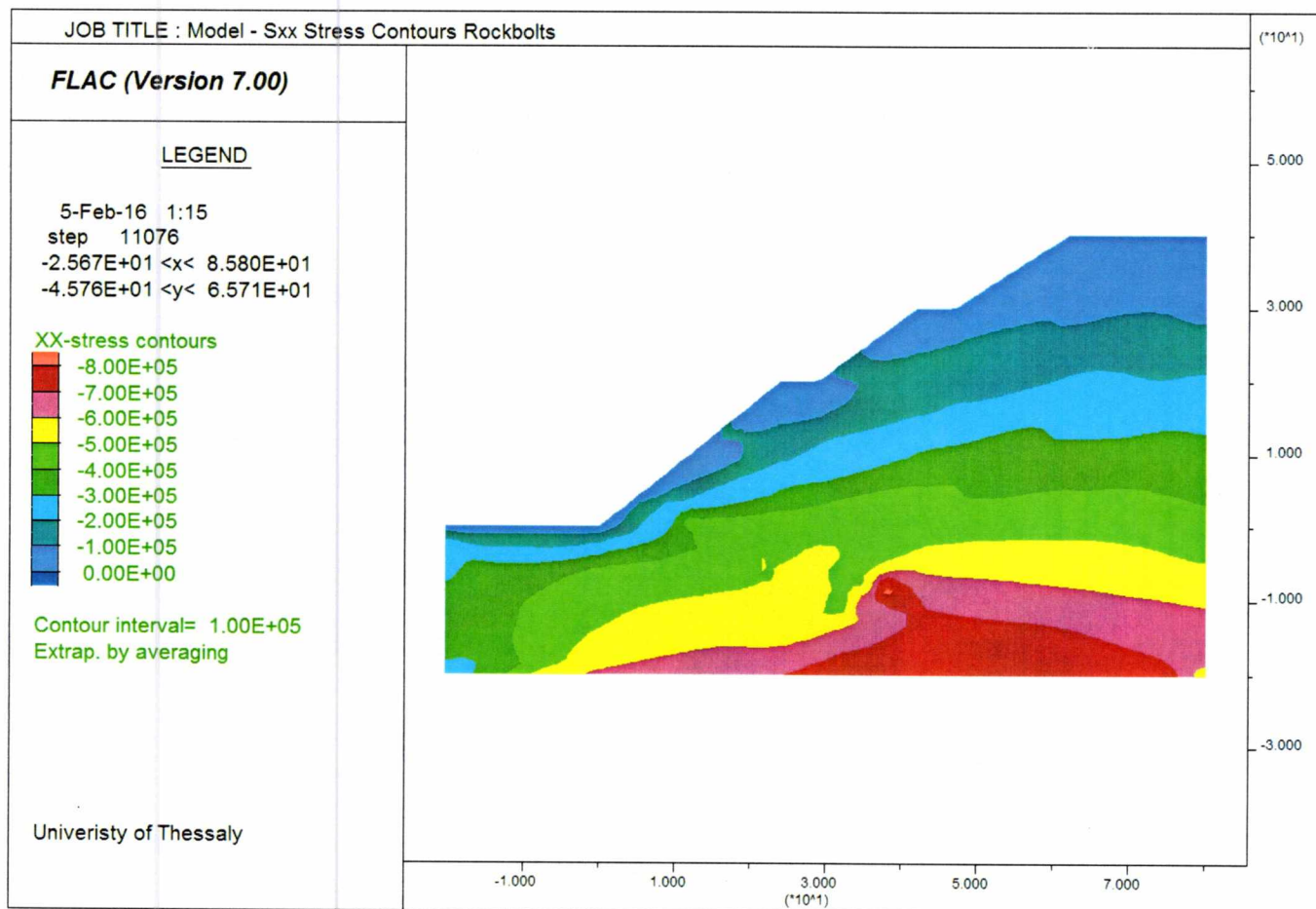
### 6.5.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.33 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{yy}$  μετά την εισαγωγή διπλής σειράς αγκυρίων

Μετά την εισαγωγή των δύο αγκυρίων δε παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή ή στη τάξη μεγέθους της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης πέραν από το σημείο εισαγωγής των δυο αγκυρίων όπου εντοπίζεται μια μικρή διατάραξη στην ομοιομορφία της κατανομής.

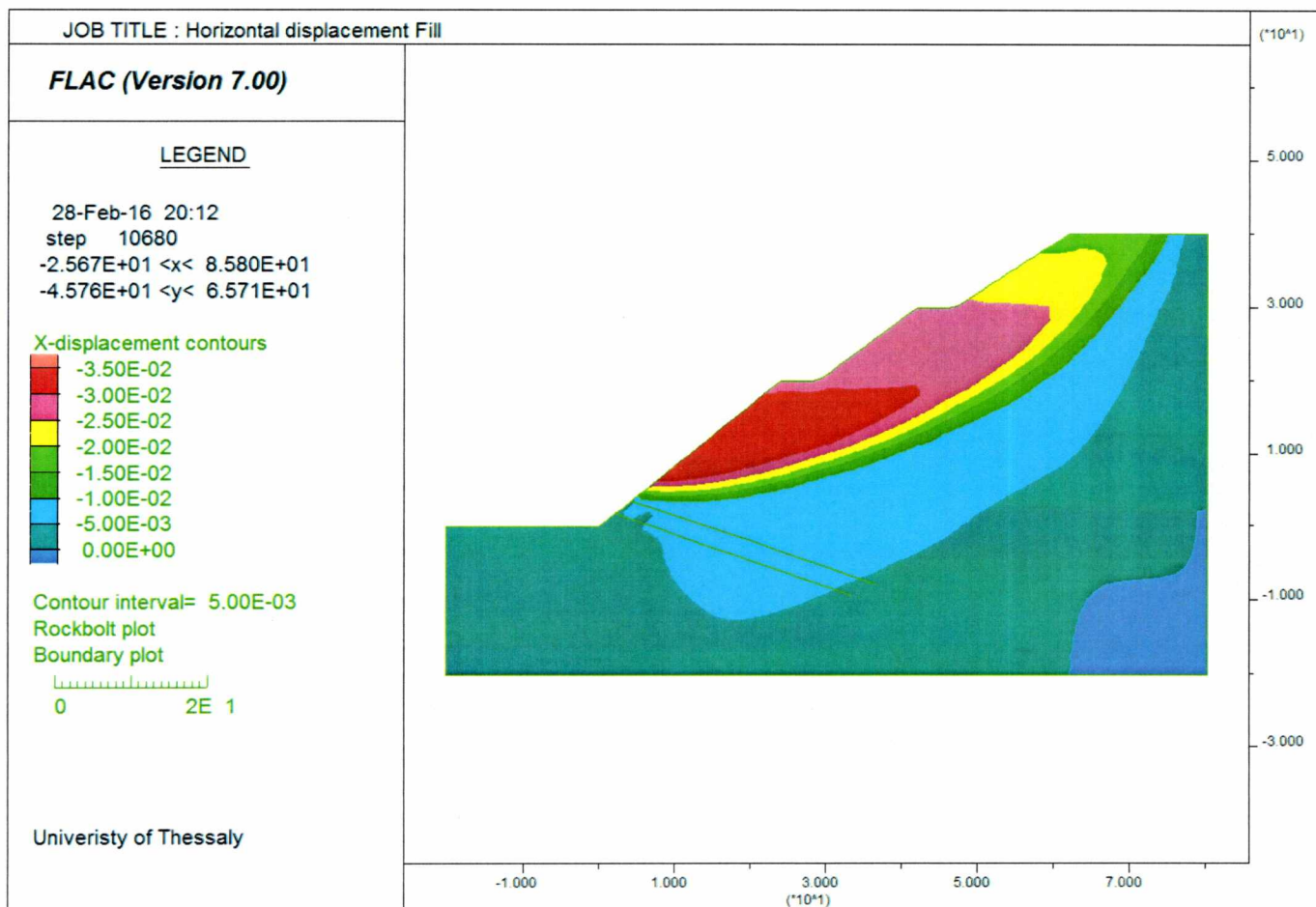
## 6.5.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.34 Κατανομή οριζόντιων τάσεων  $\sigma_{xx}$  μετά την εισαγωγή διπλής σειράς αγκυρίων

Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατανομή κατακόρυφων τάσεων, μετά την εισαγωγή των αγκυρίων παρατηρείται αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης.

### 6.5.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων

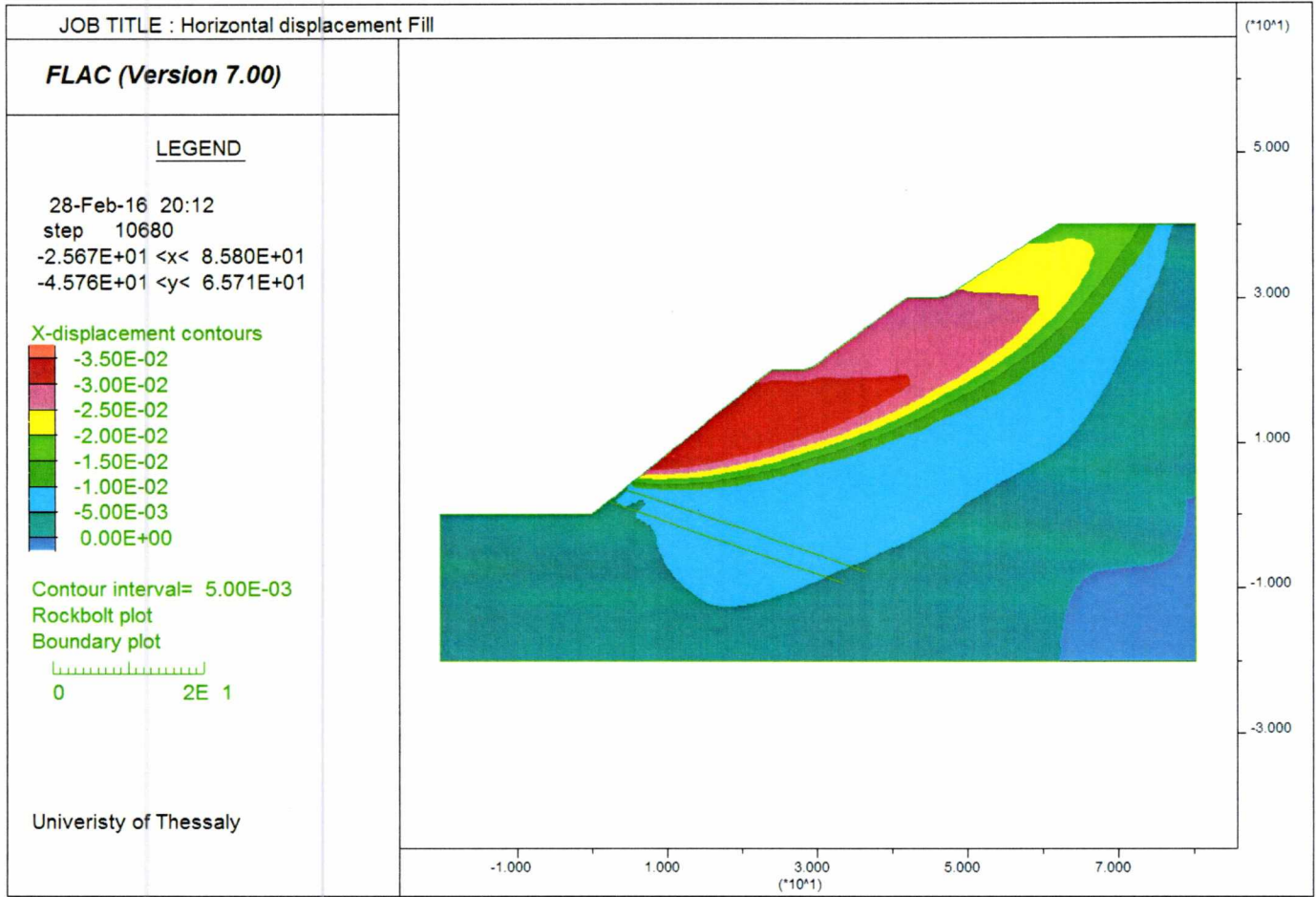


Εικόνα 6.35 Κατανομή οριζόντιων ταχυτήτων για πρανές αντιστηριζόμενο από διπλή σειρά αγκυρίων

Η ανάπτυξη των οριζόντιων ταχυτήτων σε αυτό το στάδιο μας υποδεικνύει την εμφανής βελτίωση της ευστάθειας του πρανούς καθώς η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης έχει μειωθεί ως προς την έκταση ανάπτυξης της έως το σημείο εφαρμογής των αγκυρίων. Τα μεγέθη των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων έχουν επίσης μειωθεί σχεδόν κατά 30%.



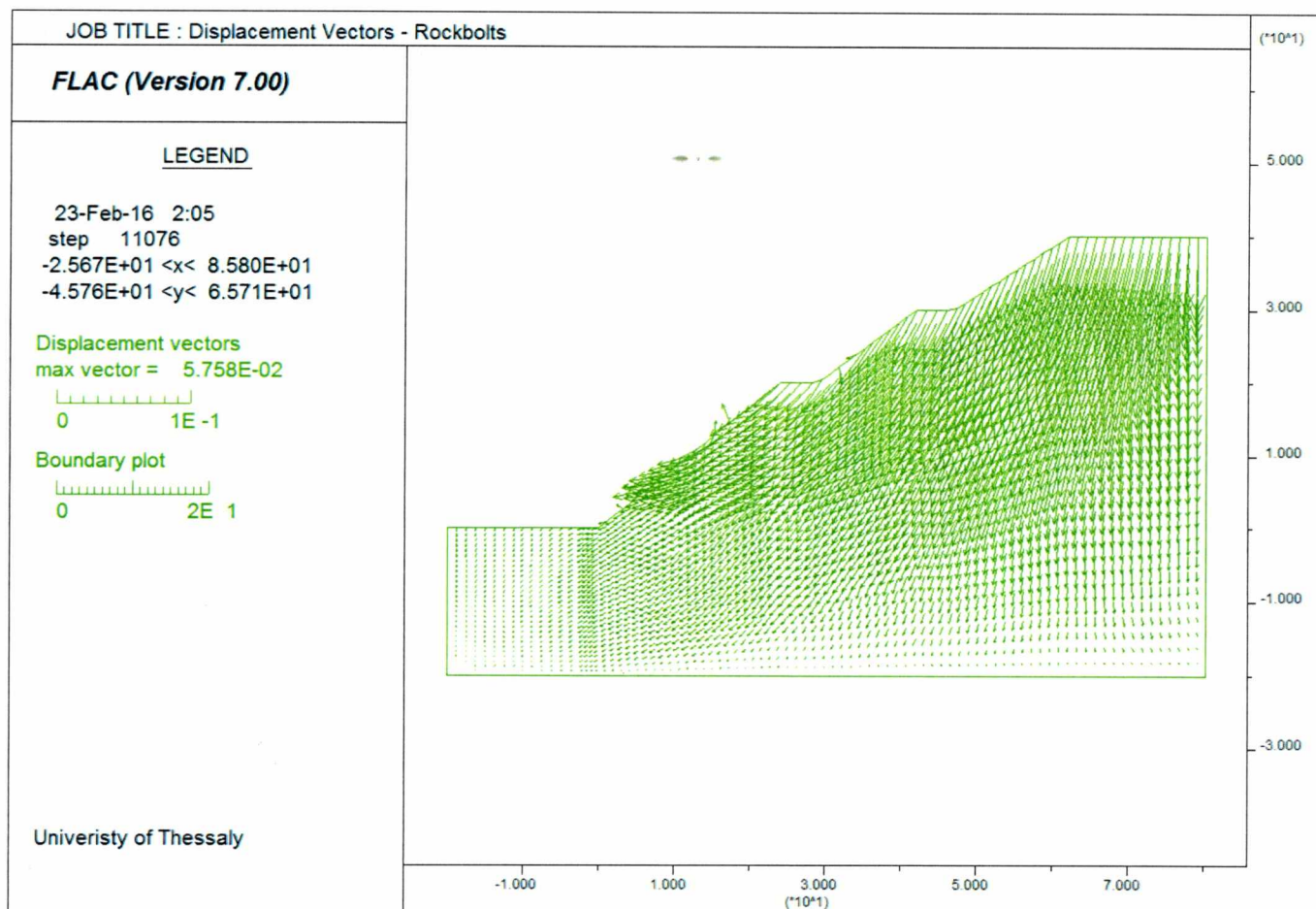
### 6.5.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.36 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

Η κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων ακολουθεί πιστά τη προηγούμενη απεικόνιση των αναπτυσσόμενων κατανομών ταχύτητας κατά την αστοχία και επιβεβαιώνει την εμφανή μείωση των μετακινήσεων καθώς και την βελτίωση της ευστάθειας.

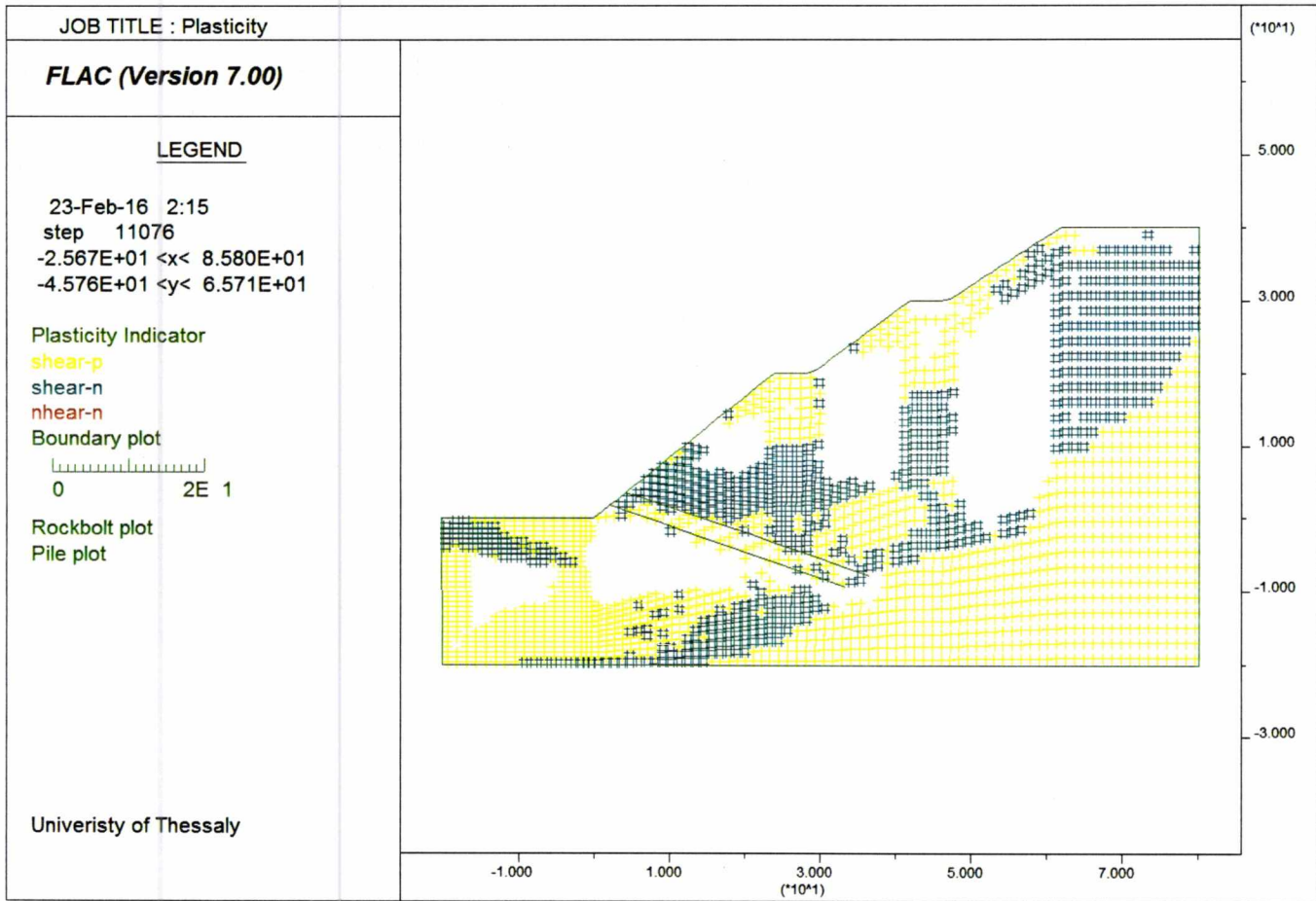
## 6.5.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.37 Διανύσματα Μετατοπίσεων

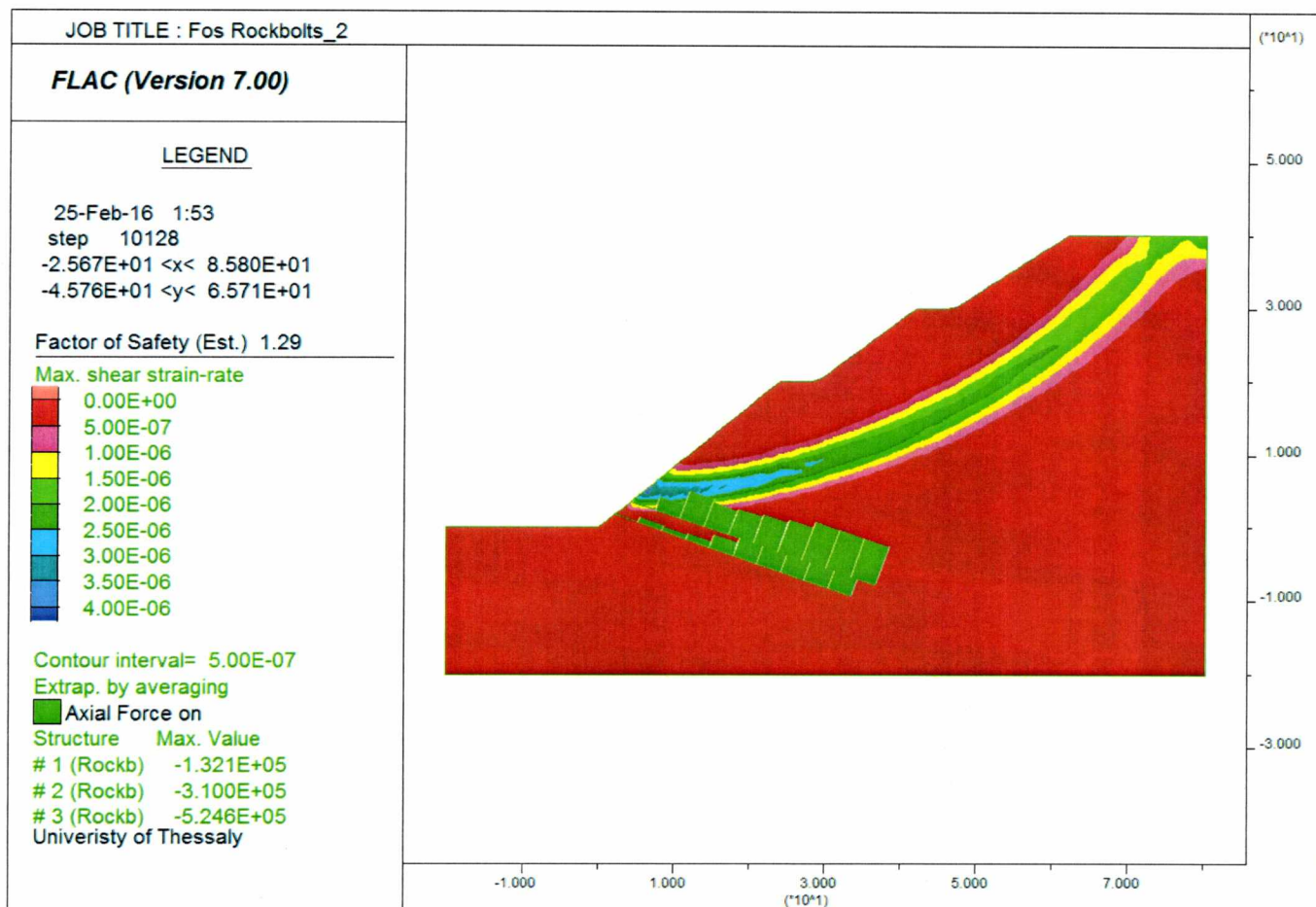
Το μέγιστο διάνυσμα μετατόπισης που αναπτύσσεται κατά την κρίσιμη στιγμή της αστοχίας έχει μέτρο 5.75cm. Οι σημαντικές μετακινήσεις συγκεντρώνονται στο σημείο που έχουν εισαχθεί τα αγκύρια. Όμως οι μετακινήσεις έχουν μειωθεί και ως προς το βέλος της μέγιστης μετακίνησης αλλά και ως προς την έκταση που καταλαμβάνουν.

### 6.5.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.38 Δείκτες Πλαστικότητας

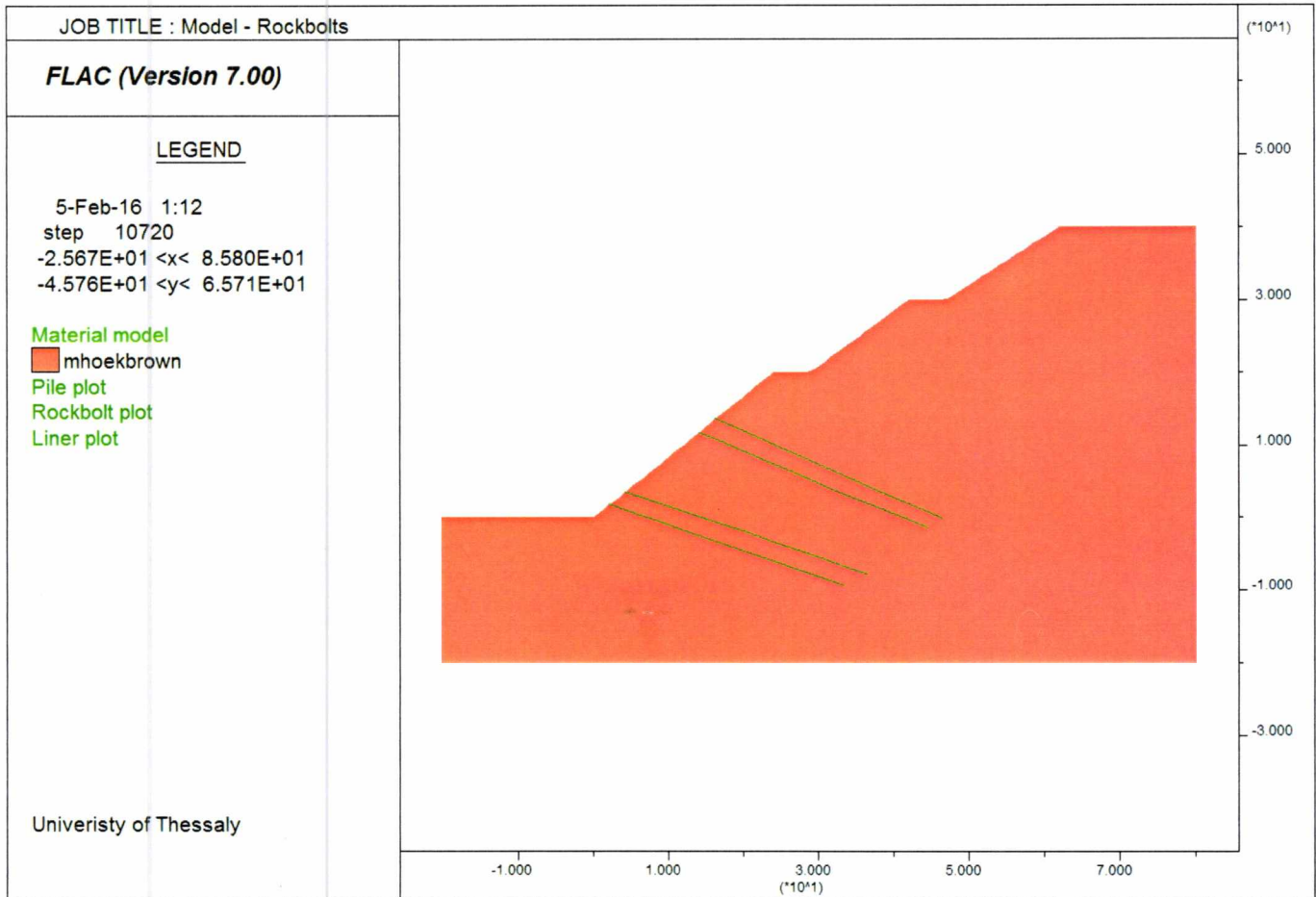
## 6.5.7 Συντελεστής ασφαλείας



Εικόνα 6.39 Συντελεστής Ασφαλείας FOS= 1.29 πρανούς αντιστηριζόμενο από διπλή σειρά αγκυρίων.

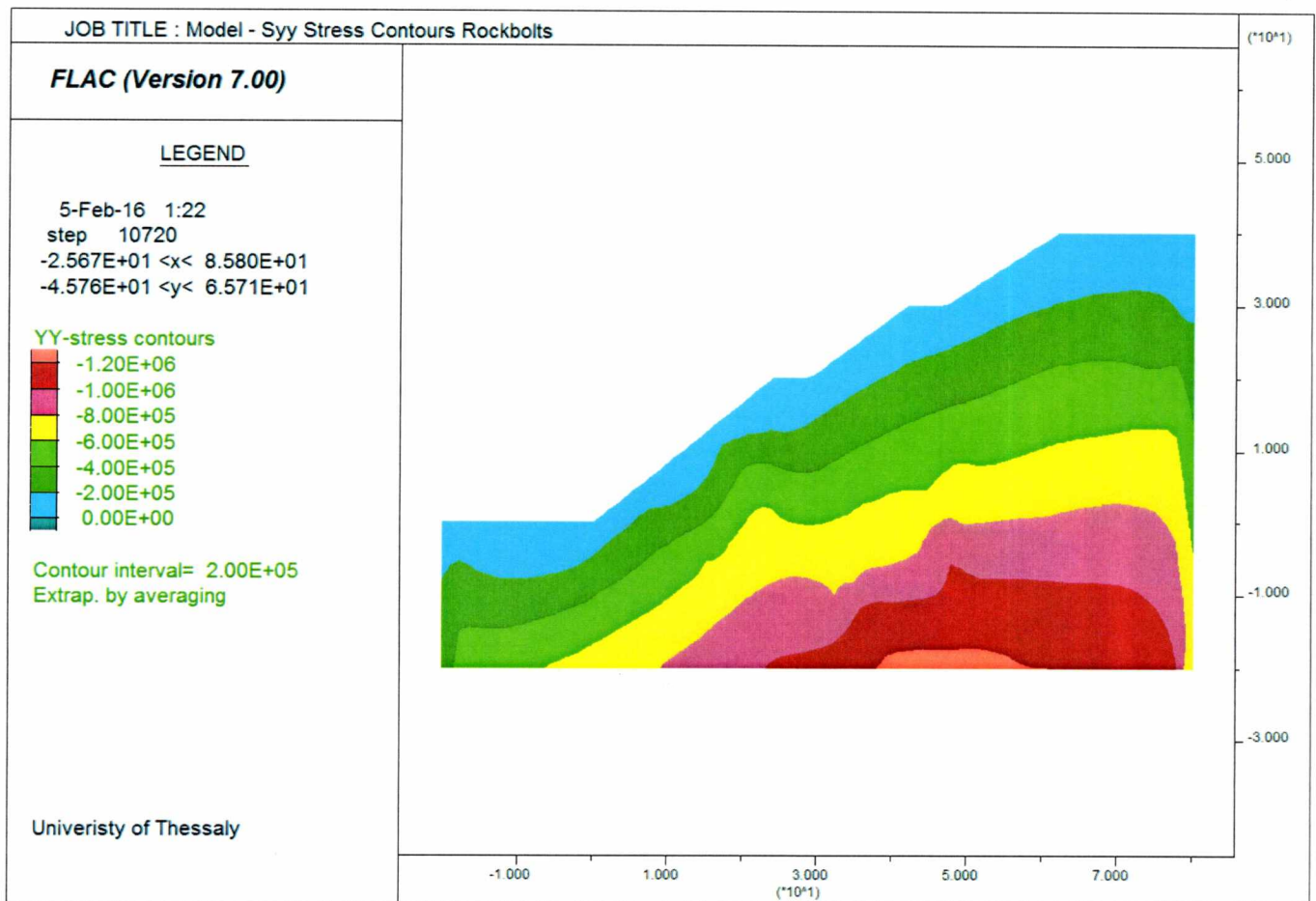
Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε FOS=1.29. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Στο σημείο αυτό παρατηρείται πως λειτουργούν τα αγκύρια και πως περιορίζουν τον ρυθμό διάτμησης πιο ψηλά στο πρανές βελτιώνοντας τον συντελεστή ασφαλείας. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται είναι της τάξης 7.8% ως προς το συντελεστή ασφαλείας για το διαμορφωμένο αποκλειστικά με αναβαθμούς πρανές.

## 6.6 Εισαγωγή τεσσάρων σειρών αγκυρίων



Εικόνα 6.40 Μοντέλο αντιστηριζόμενο από τέσσερις σειρές αγκυρίων

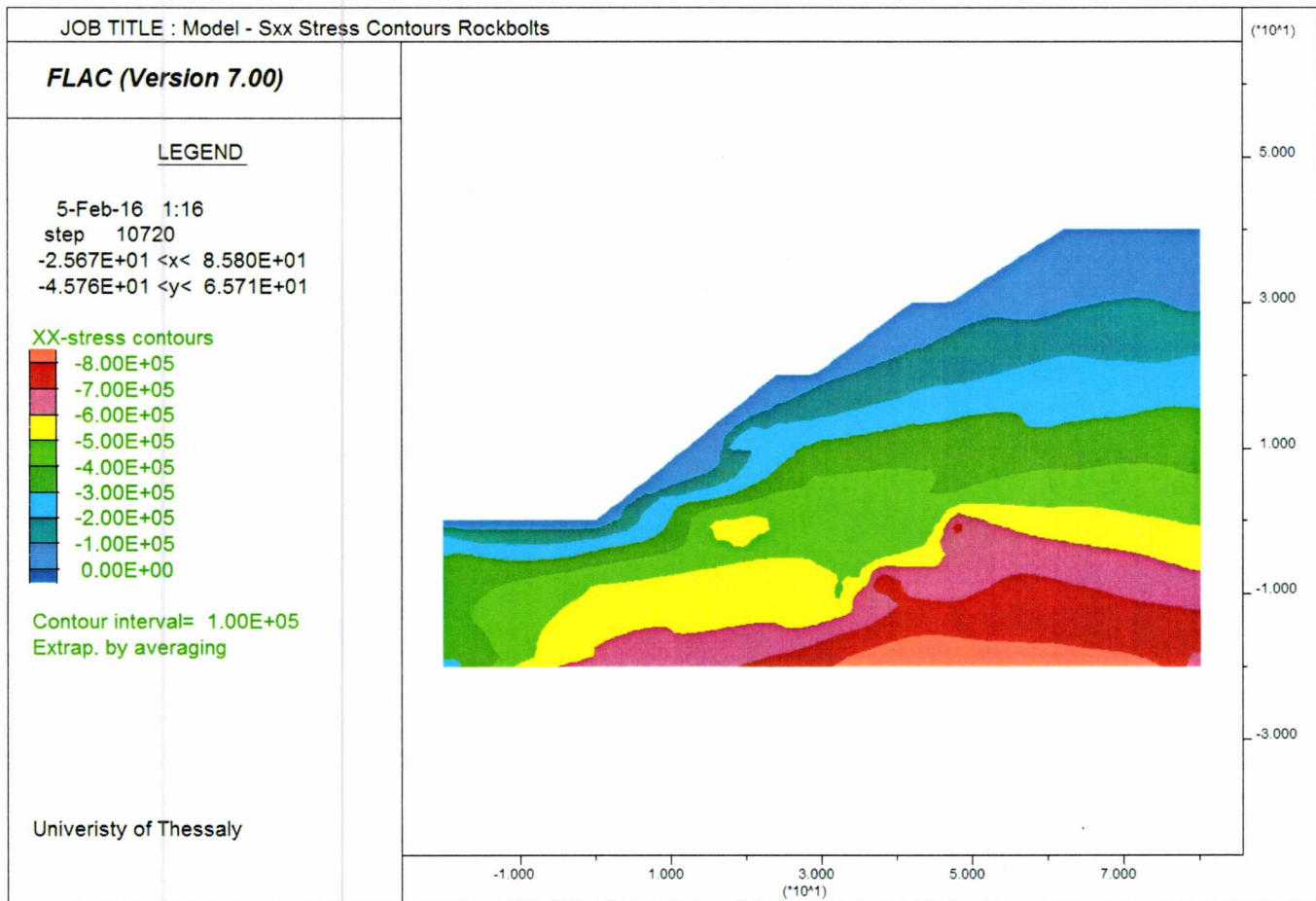
### 6.6.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.41 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{yy}$  μετά την εισαγωγή των αγκυρίων

Μετά την εισαγωγή των επιπλέον σειρών αγκυρίων δε παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή ή στη τάξη μεγέθους της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης πέραν από το σημείο εισαγωγής των αγκυρίων όπου εντοπίζεται μια μικρή διατάραξη στην ομοιομορφία της κατανομής.

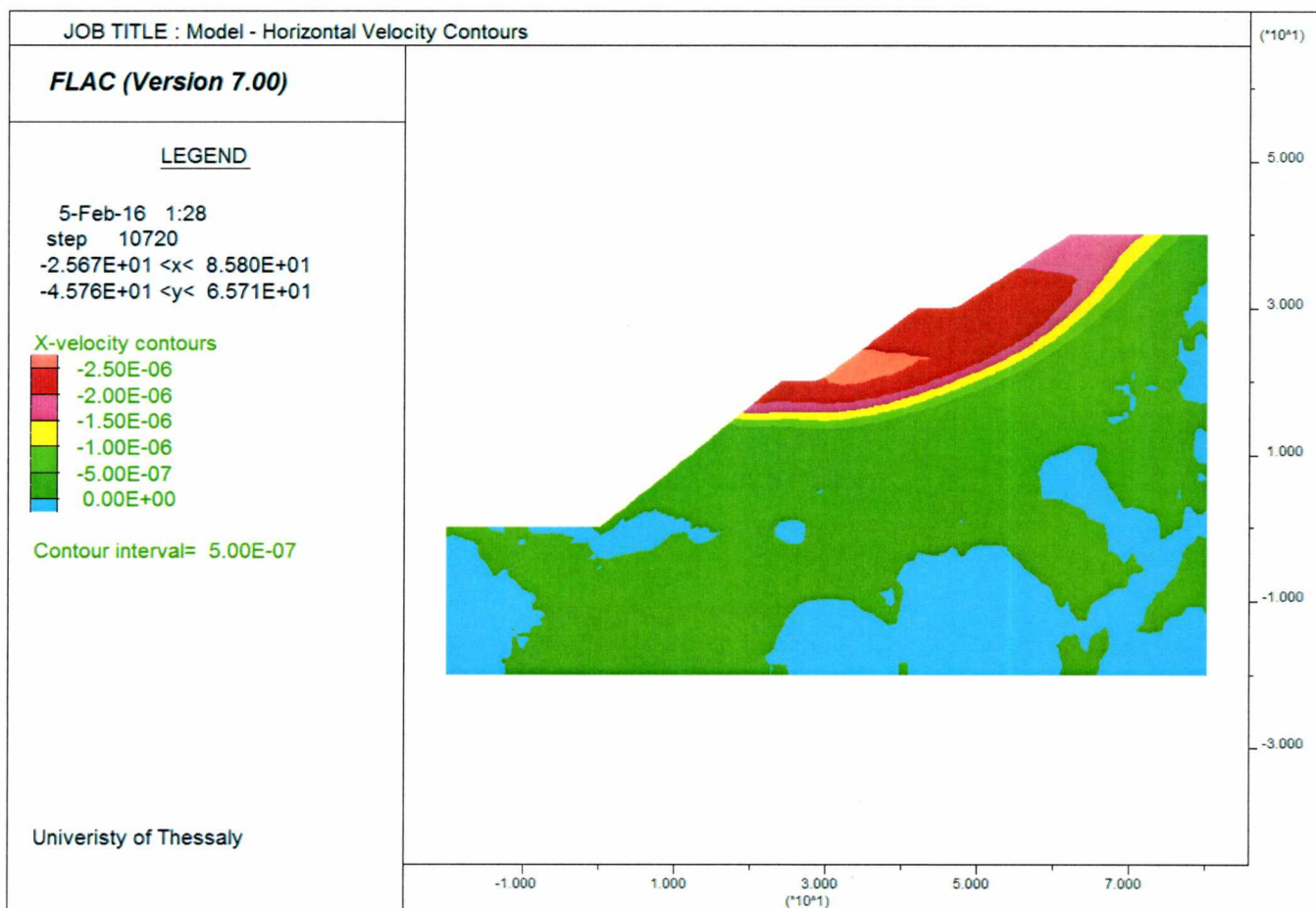
## 6.6.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας τάσεων - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.42 Κατανομή οριζόντιων τάσεων  $\sigma_{xx}$  μετά την εισαγωγή των αγκυρίων

Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατανομή κατακόρυφων τάσεων, μετά την εισαγωγή των αγκυρίων παρατηρείται αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης. Συγκρίνοντας με την αντίστοιχη κατανομή τάσεων για τις δυο σειρές αγκυρίων γίνεται αντιληπτή η αύξηση της διατάραξης.

### 6.6.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων

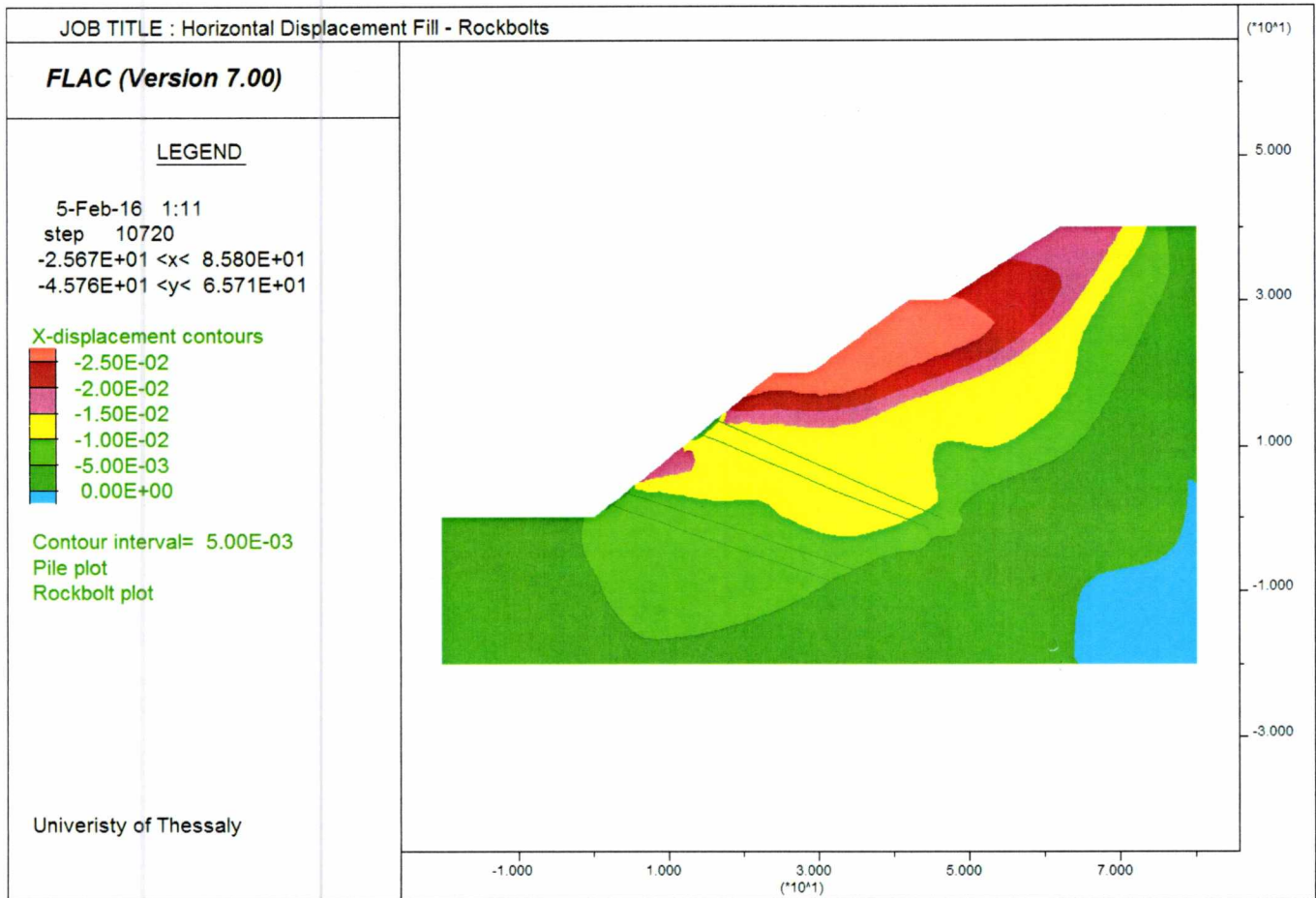


Εικόνα 6.43 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων κατά την αστοχία

Στην παραπάνω απεικόνιση των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων το μετακινούμενο τμήμα της βραχομάζας που τείνει να ολισθήσει ελαττώνεται κι άλλο εν σχέση με τη προηγούμενη ανάλυση. Το μέγεθος της βραχομάζας που τείνει να κινηθεί κατά την αστοχία είναι μικρότερο και σε έκταση αλλά και σε μεγέθη ταχυτήτων.



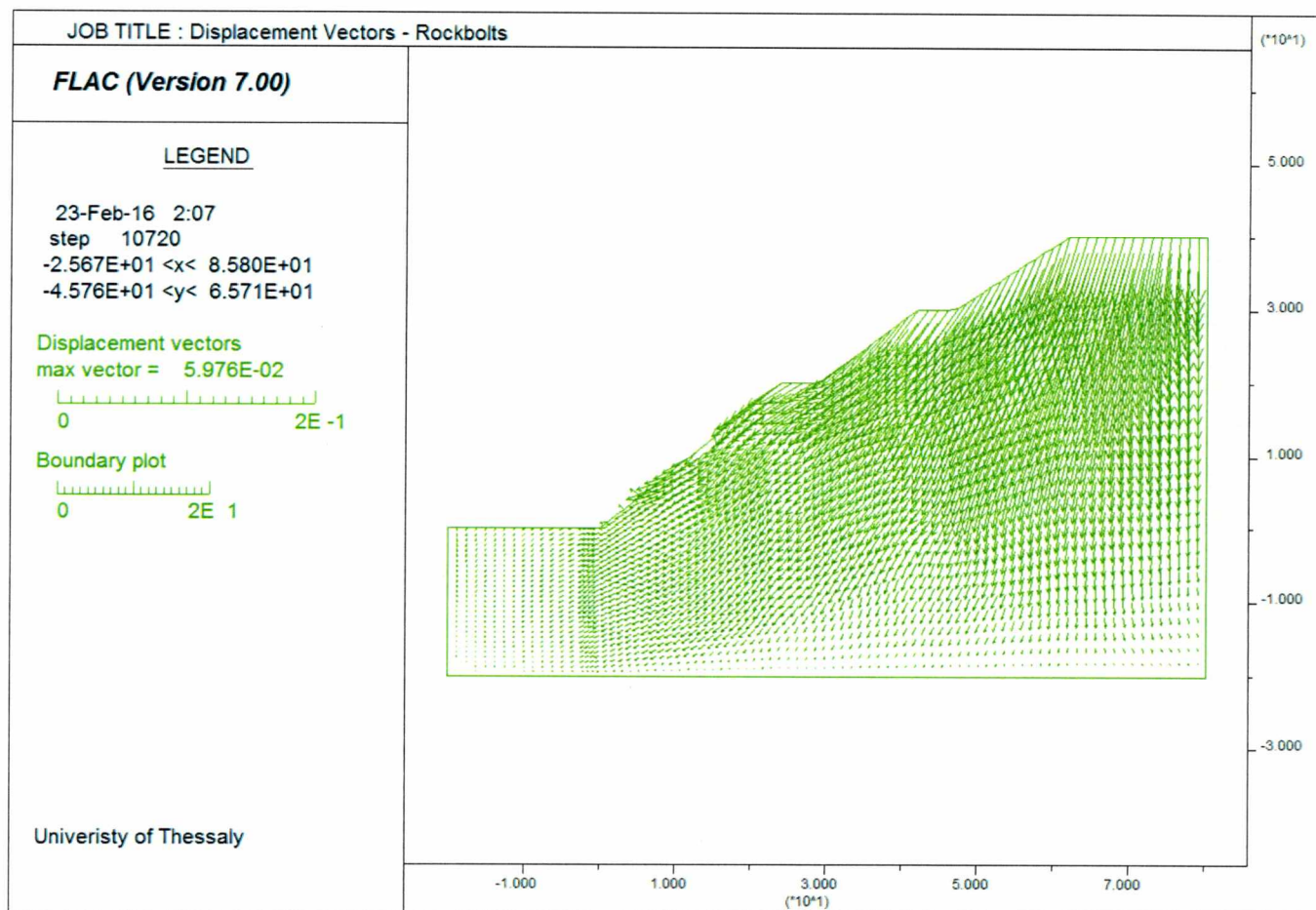
## 6.6.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.44 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων κατά την αστοχία

Η κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων ακολουθεί και επιβεβαιώνει τη προηγούμενη απεικόνιση των αναπτυσσόμενων κατανομών ταχύτητας κατά την αστοχία. Παρατηρείται σαφή μείωση της επιφάνειας ολίσθησης, με ανάπτυξη ως το σημείο εισαγωγής της τέταρτης σειράς αγκυρών.

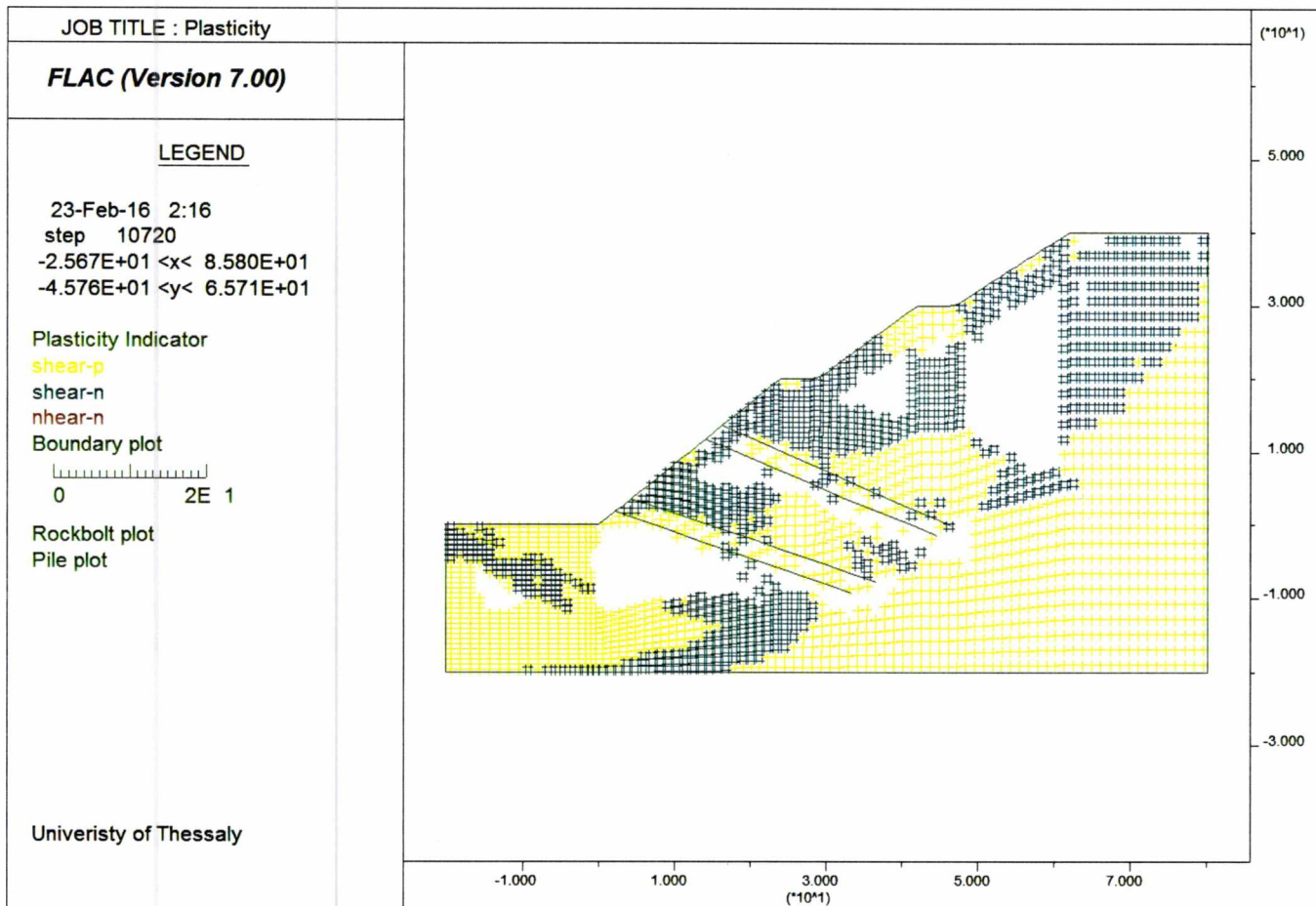
## 6.6.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.45 Διανύσματα Μετατοπίσεων

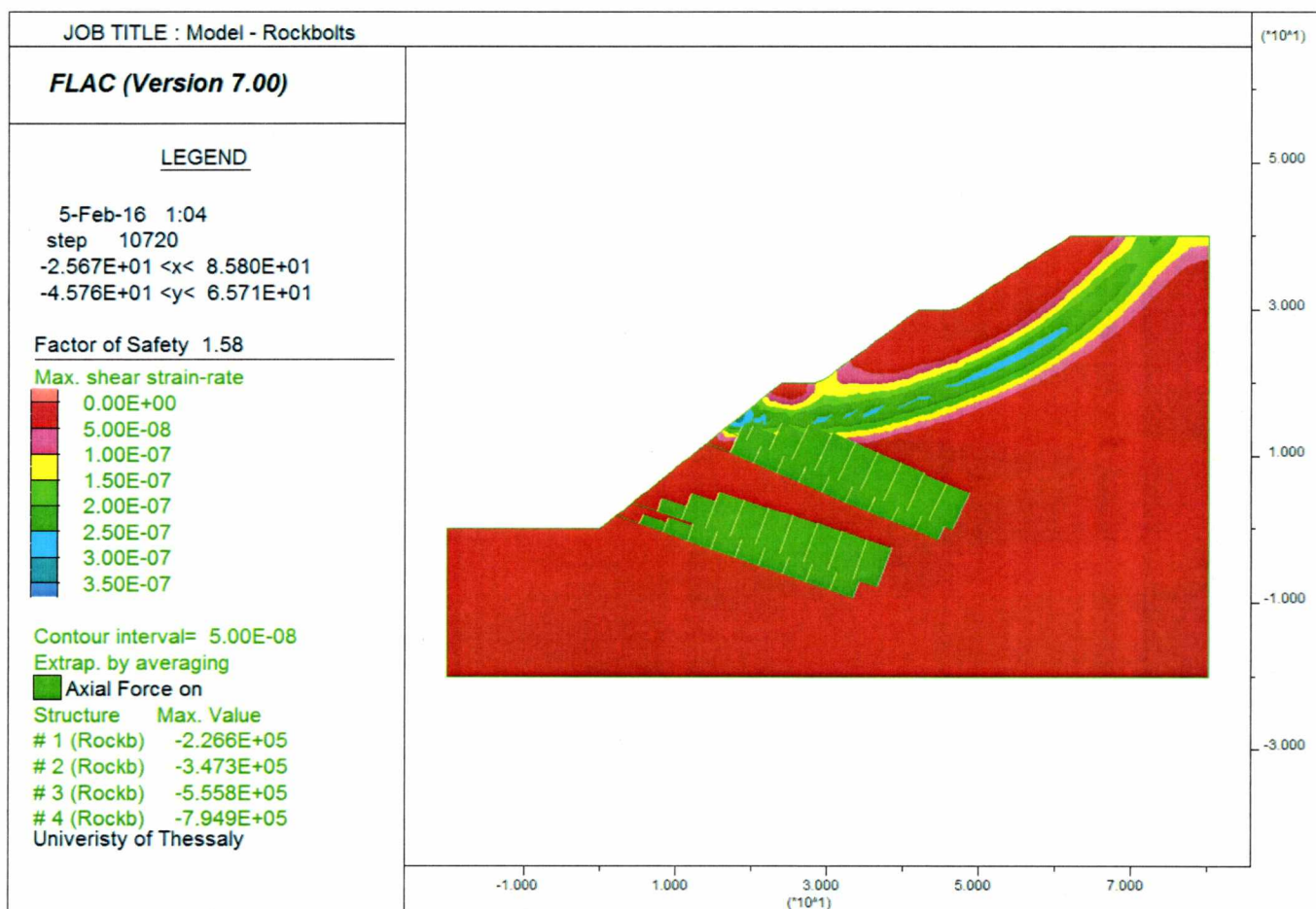
Το μέγιστο διάνυσμα μετατόπισης που αναπτύσσεται κατά την κρίσιμη στιγμή της αστοχίας έχει μέτρο 5.98cm. Οι σημαντικές μετακινήσεις συγκεντρώνονται στο σημείο που έχουν εισαχθεί τα αγκύρια. Παρατηρείται σαφή μείωση των μετακινήσεων καθώς και στο περιορισμό τους στα σημεία κάτω από τα αγκύρια.

### 6.6.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.46 Δείκτες Πλαστικότητας

## 6.6.7 Συντελεστής ασφαλείας

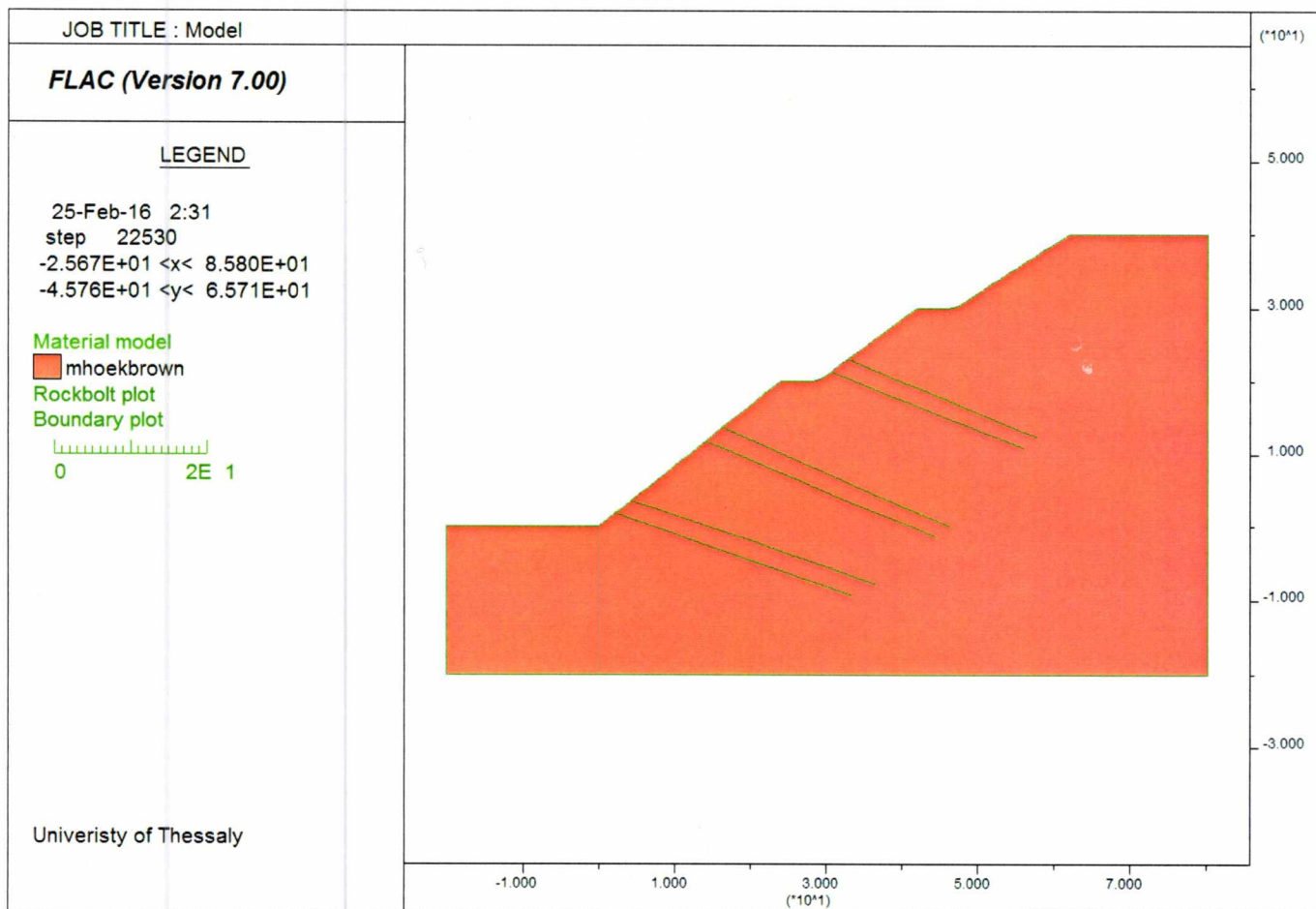


Εικόνα 6.47 Συντελεστής Ασφαλείας FOS= 1.58 αντιστηριζόμενο από τέσσερις σειρές αγκυρίων

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε FOS=1.58. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Η εισαγωγή των επιπλέον δύο σειρών αγκυρίων έχει σημαντικά αποτελέσματα στη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας σε ποσοστό 18.4% ως προς τα προηγούμενα μέτρα αντιστήριξης. Υπάρχει μεγαλύτερη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας καθώς οι επιπλέον σειρές αγκυρίων δρουν απευθείας στο κέντρο της ενεργής επιφάνειας ολίσθησης που παρατηρήθηκε στην εικόνα-6.39 απαγορεύοντας τη ανάπτυξη των κρίσιμων μετακινήσεων.

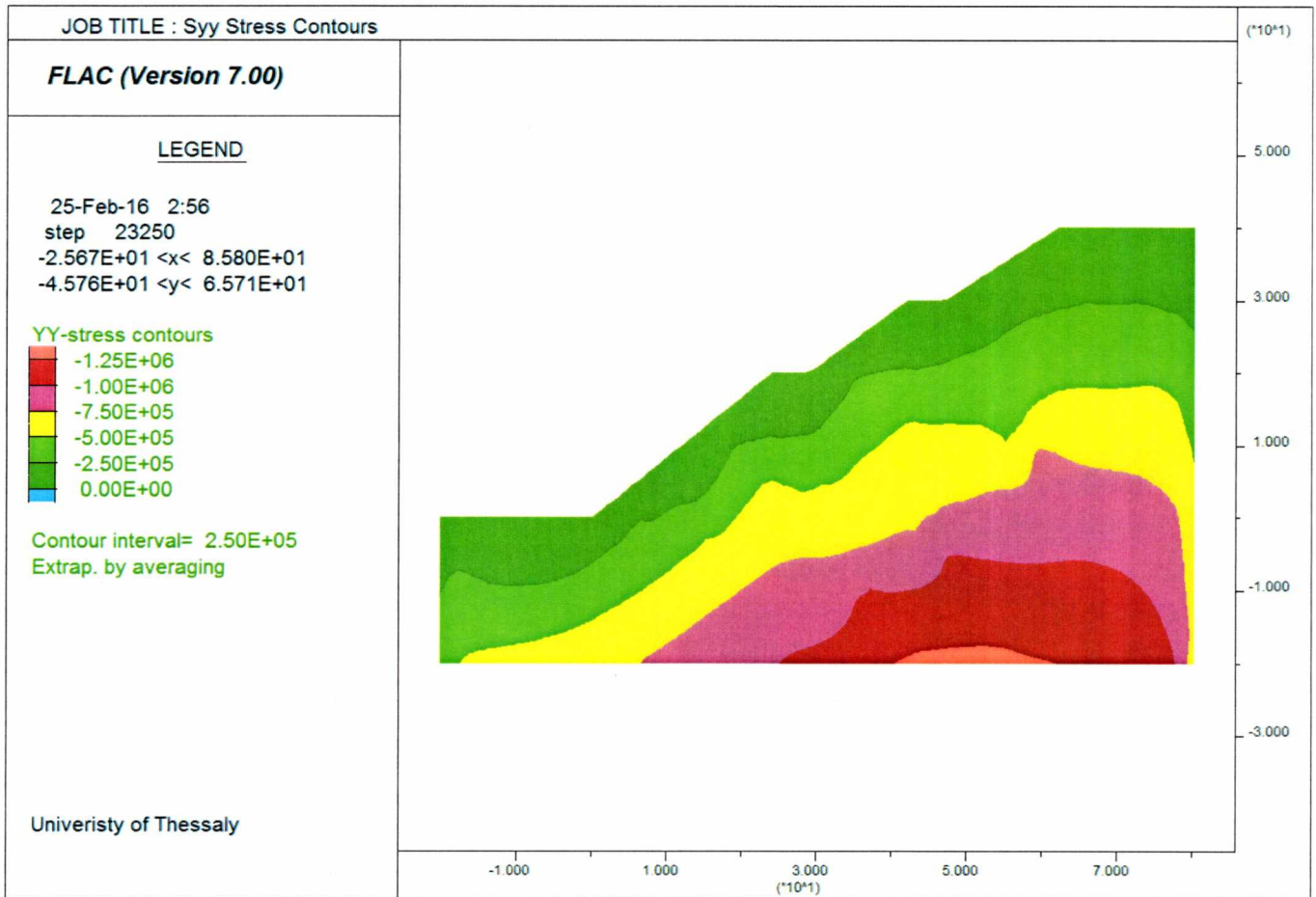
Ο συντελεστής FOS=1.58 είναι αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας καθώς είναι άνω του ορίου FOS= 1.40 για στατικές συνθήκες φόρτισης, όμως τα παραπάνω μέτρα αντιστήριξης δεν είναι αποτελεσματικά έναντι σεισμικής φόρτισης καθώς υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας FOS<1.00.

## 6.7 Εισαγωγή έξι σειρών αγκυρίων



Εικόνα 6.48 Μοντέλο προσομοίωσης αντιστηριζόμενο από έξι σειρές αγκυρίων

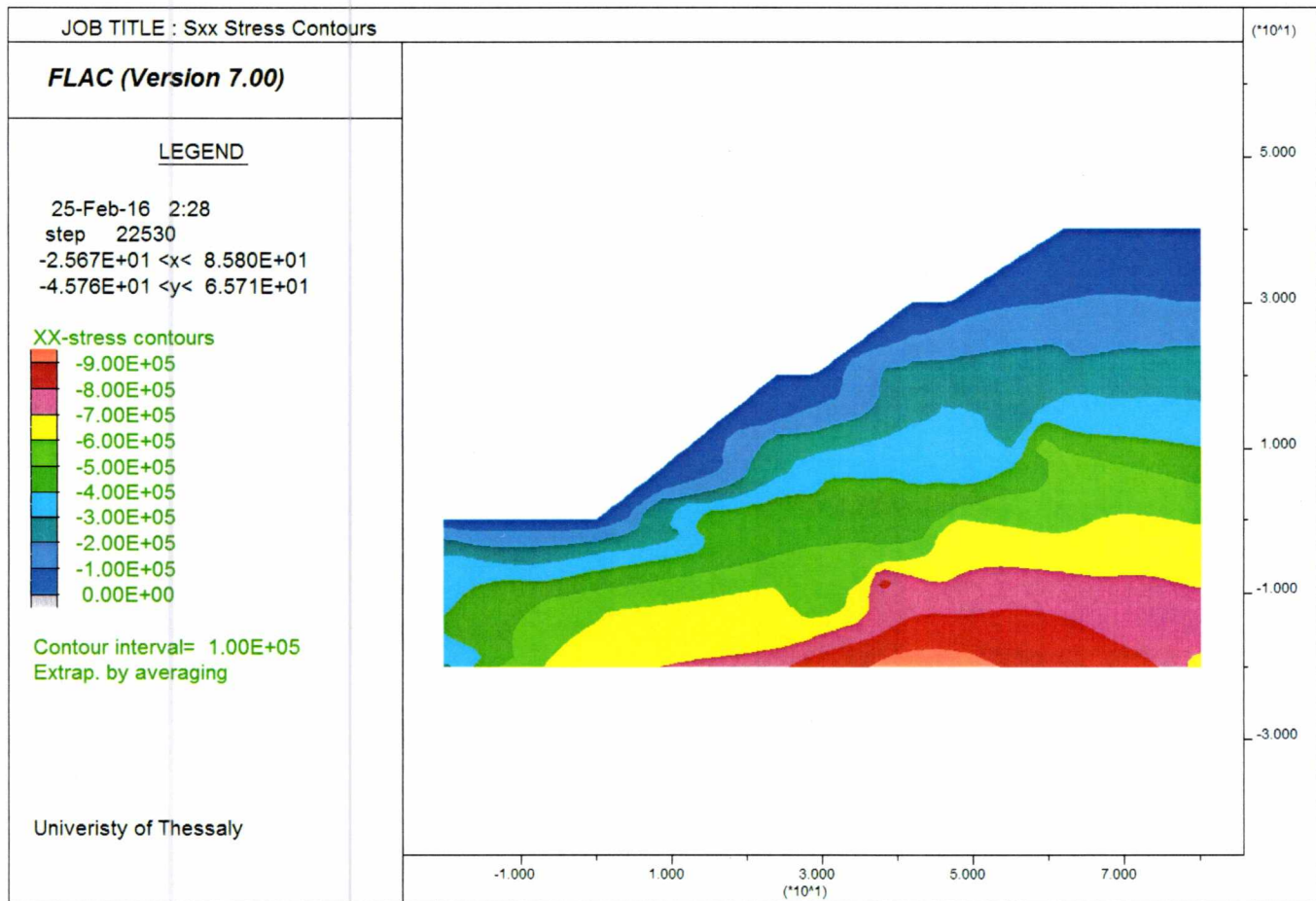
### 6.7.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.49 Κατανομή κατακόρυφων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{yy}$

Μετά την εισαγωγή των επόμενων σειρών αγκυρίων δε παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή ή στη τάξη μεγέθους της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης πέραν από το σημεία εισαγωγής των αγκυρίων όπου εντοπίζονται μικρές διαταράξεις στην ομοιομορφία της κατανομής.

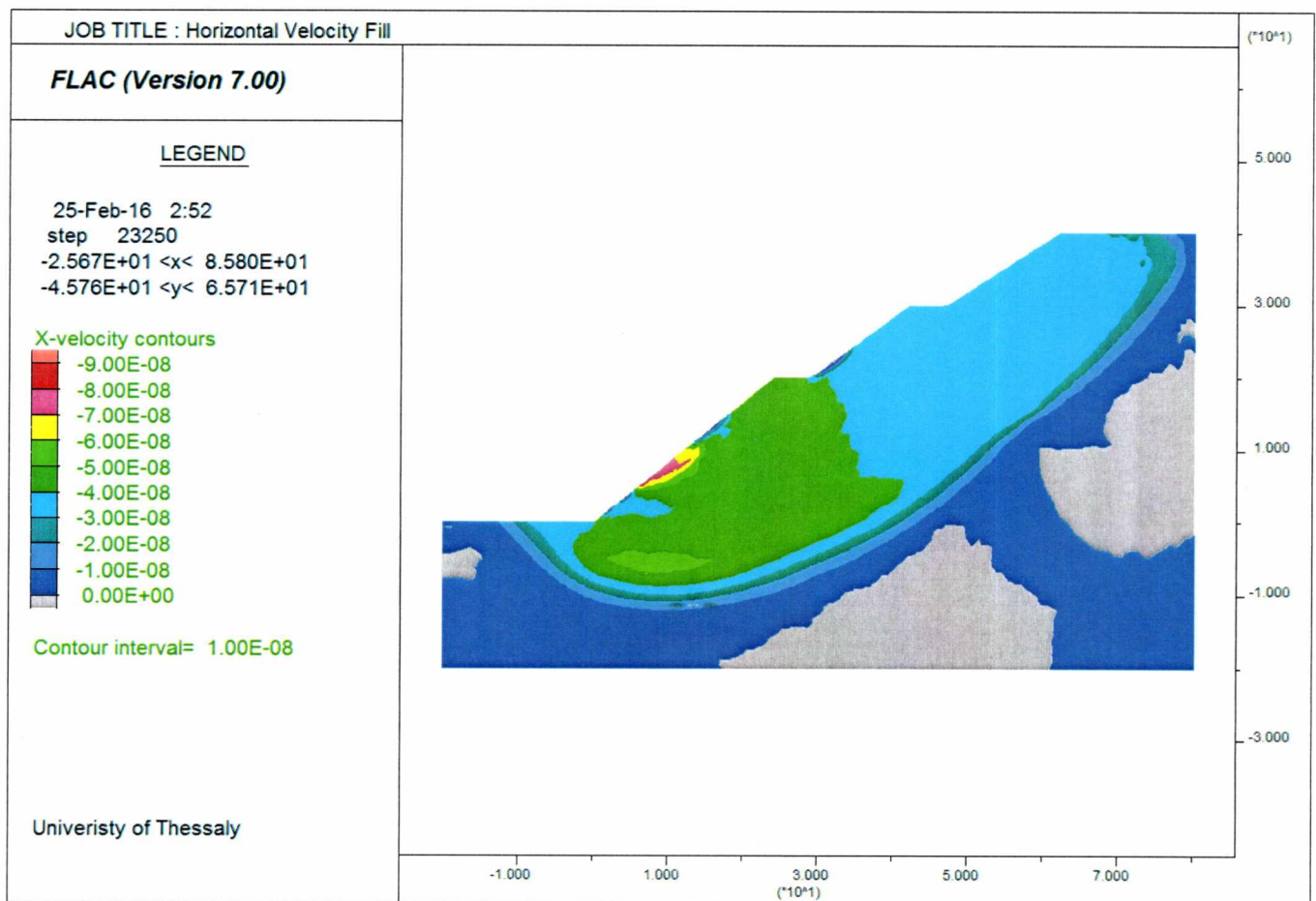
## 6.7.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσα της τάσης $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.50 Κατανομή οριζόντιων συνιστωσών των τάσεων  $\sigma_{xx}$

Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατανομή κατακόρυφων τάσεων, μετά την εισαγωγή των αγκυριών παρατηρείται αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης. Συγκρίνοντας με την αντίστοιχη κατανομή τάσεων για τις δυο σειρές αγκυριών γίνεται αντιληπτή η αύξηση της διατάραξης.

### 6.7.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων ταχυτήτων

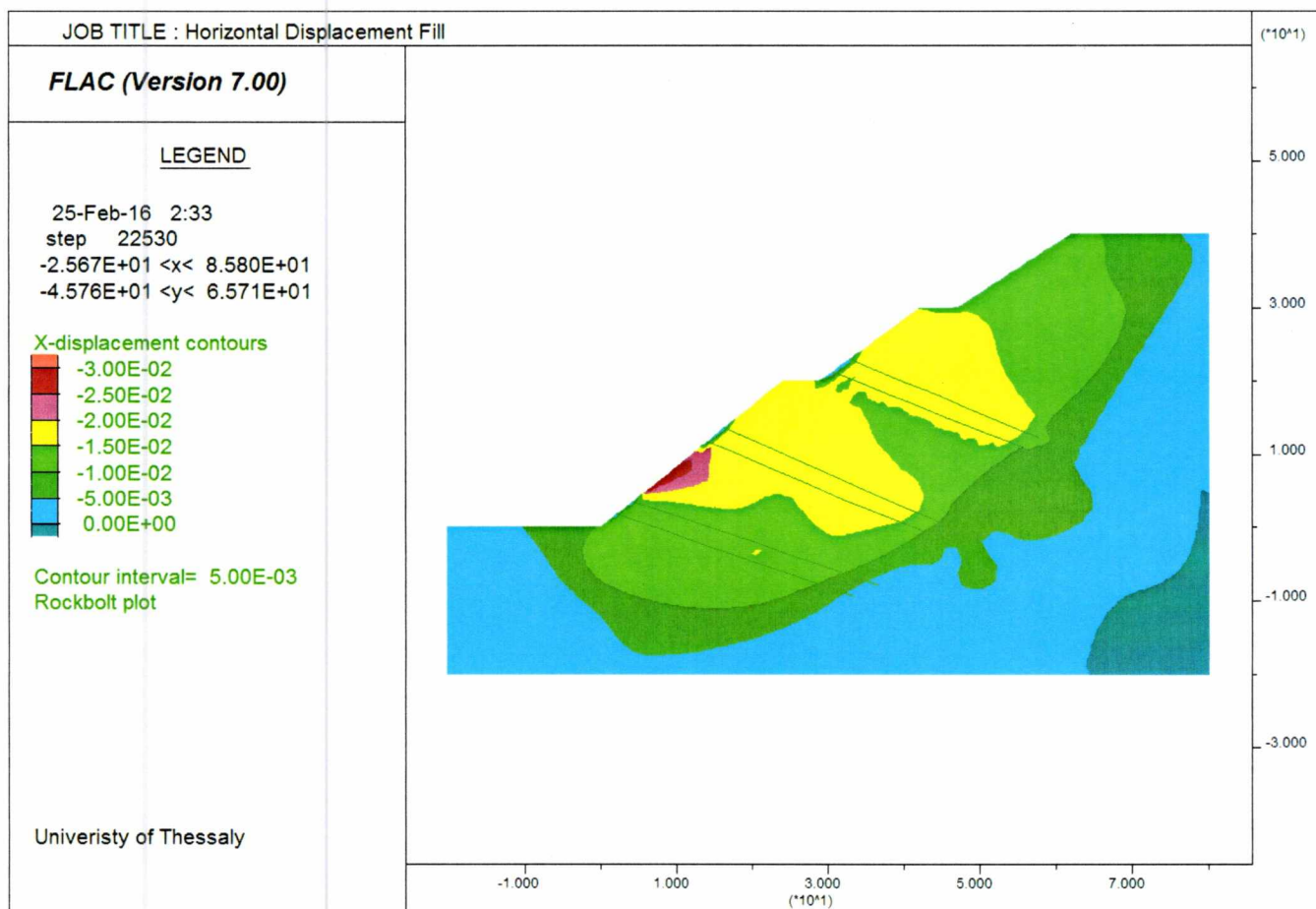


Εικόνα 6.51 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων κατά την αστοχία

Στο σημείο αυτό η ανάπτυξη των ταχυτήτων έχει επεκταθεί σε μεγαλύτερος βάθος στο πρηνές. Για έξι σειρές αγκυριών παρατηρείται η επέκταση της μετακινούμενης μάζας βαθύτερα. Επίσης οι τάξεις μεγέθους είναι σημαντικά μικρότερες όμως η τάση να μεγαλώσει το μέγεθος της βραχομάζα που θα ολισθήσει σε μια επικείμενη αστοχία είναι σημαντική.



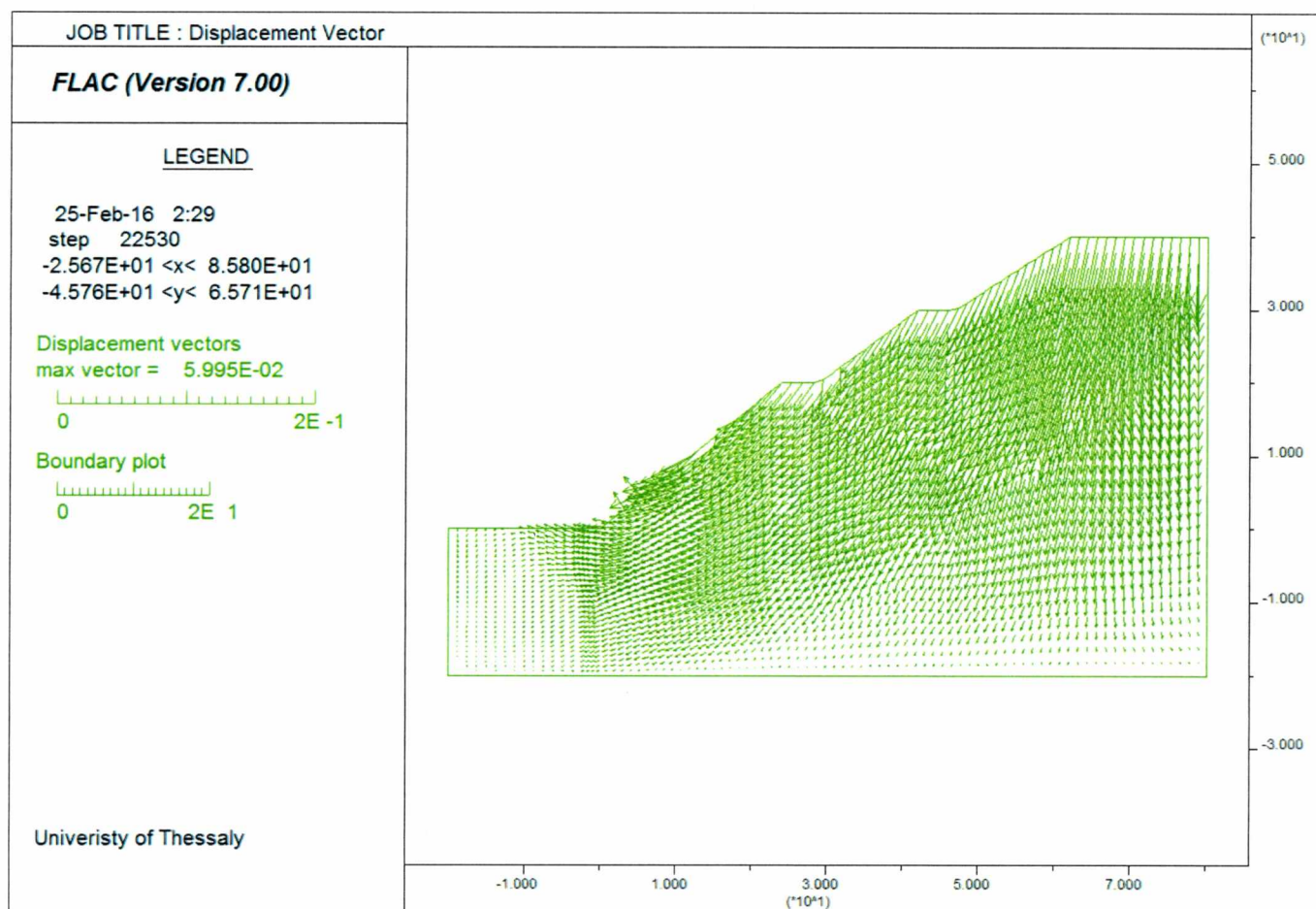
## 6.7.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.52 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων κατά την αστοχία

Η κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων ακολουθεί και επιβεβαιώνει τη προηγούμενη παρατήρηση για την κατανομή των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων κατά την αστοχία. Παρατηρείται η επέκταση της επιφάνειας ολίσθησης πέρα από την ενισχυμένη με αγκύρια και υγρή βραχομάζα. Επίσης η ανάπτυξη της μετακινούμενης βραχομάζας ξεπερνάει πλέον το πόδα του πρανούς. Η εφαρμογή των πασσάλων σε επόμενο βήμα πιθανώς να βελτιώσει και να συμπληρώσει την επιθυμητή ασφάλεια στο πρανές.

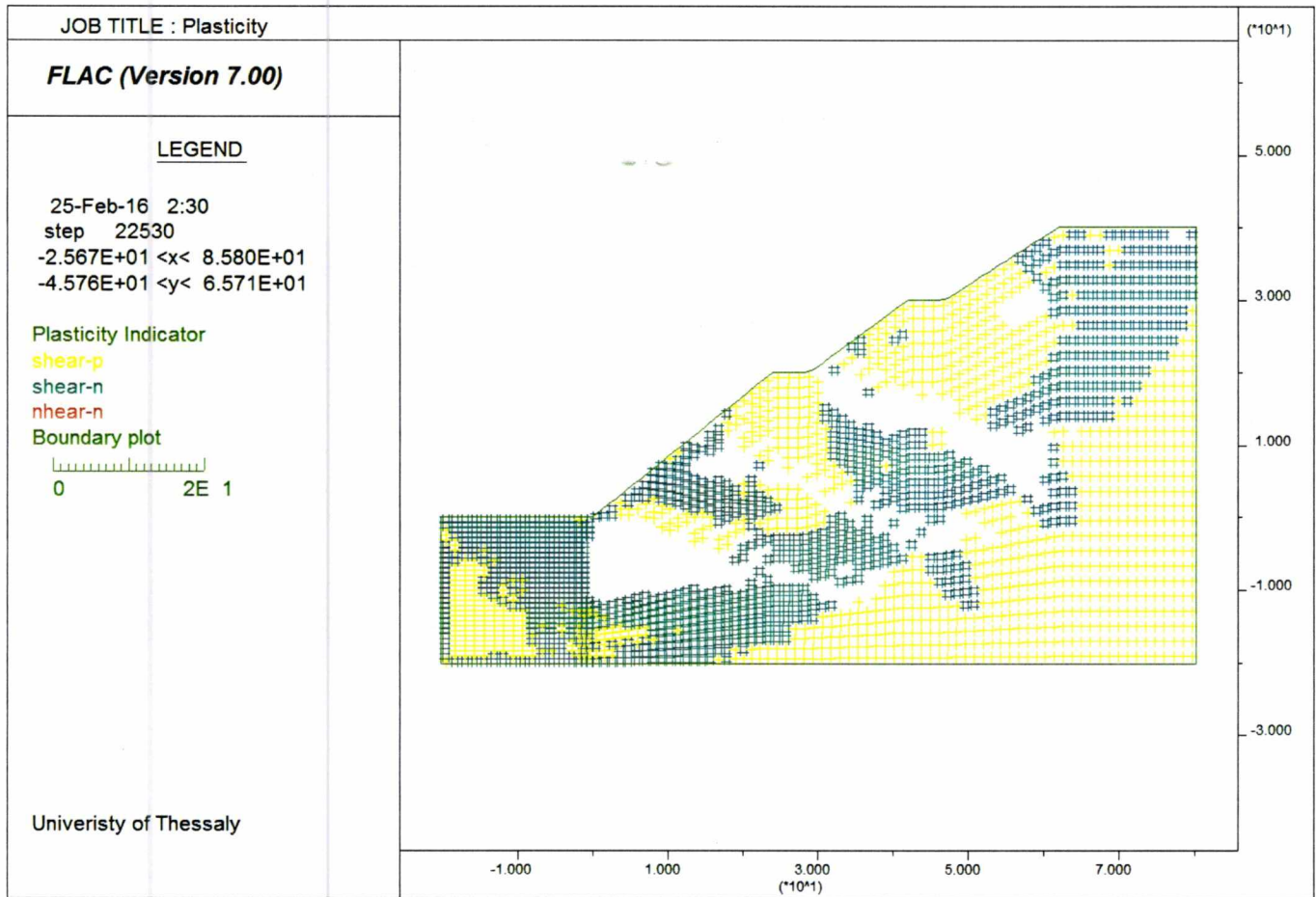
## 6.7.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.53 Διανύσματα μετατοπίσεων κατά την αστοχία

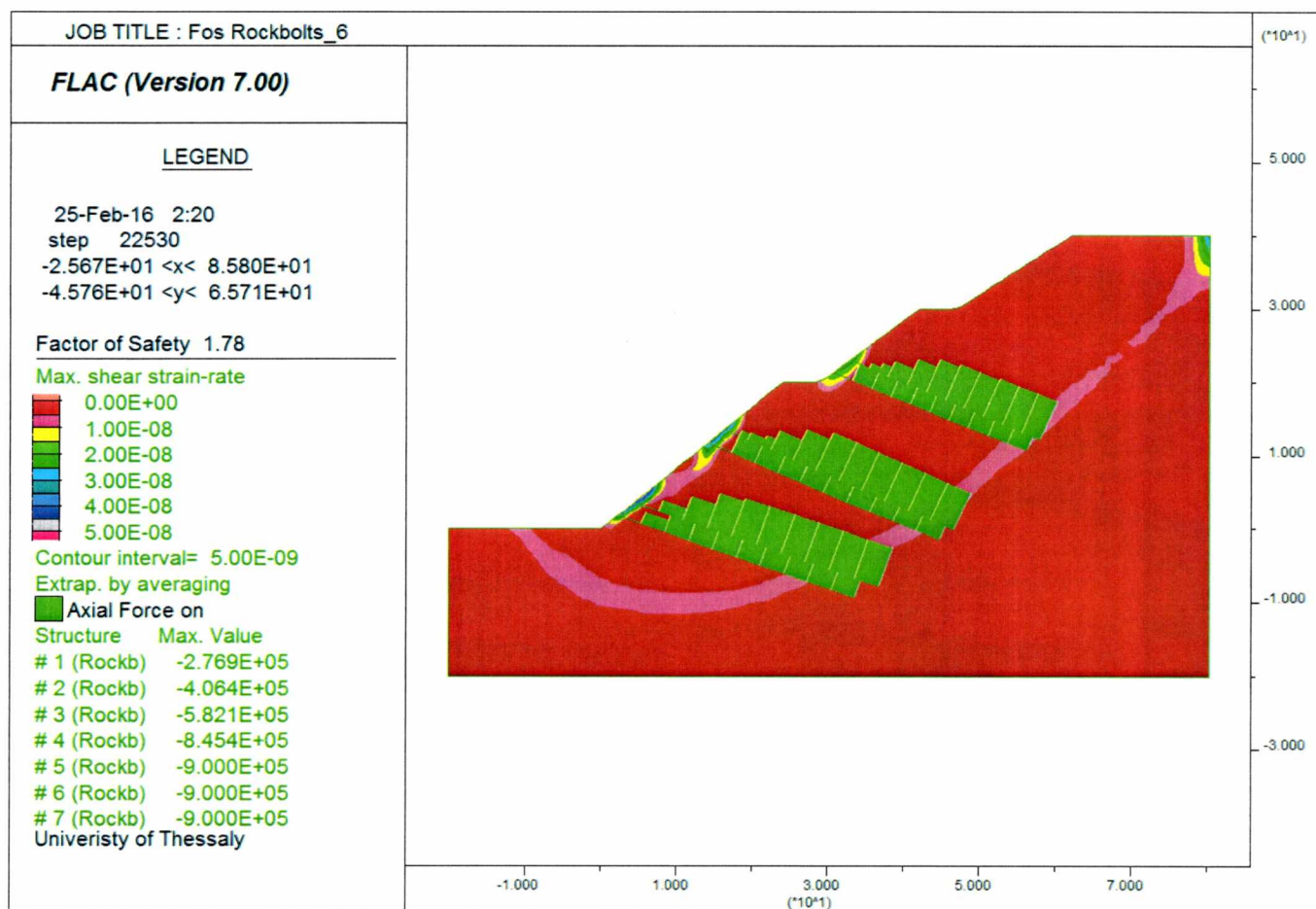
Το μέγιστο διάνυσμα μετατόπισης που αναπτύσσεται κατά την κρίσιμη στιγμή της αστοχίας έχει μέτρο 5.99cm. Δεν υπάρχει αλλαγή στο μέγιστο βέλος μετακίνησης σε σύγκριση με τη προηγούμενη ανάλυση. Παρατηρούνται όμως καινούργιες μετακινήσεις στο κατώτερο τμήμα του πρανούς.

### 6.7.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.54 Δείκτες Πλαστικότητας

## 6.7.7 Συντελεστής Ασφαλείας

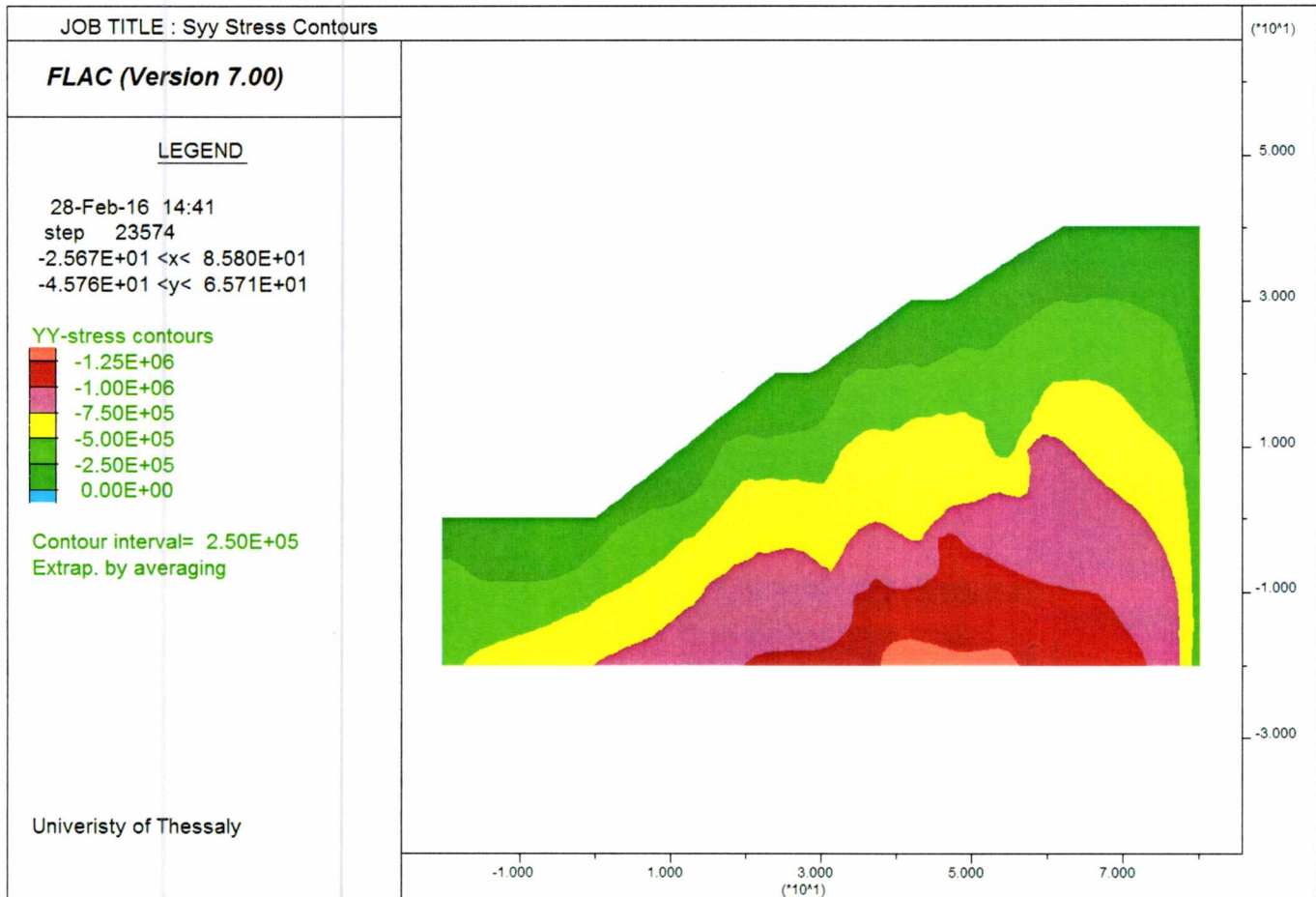


Εικόνα 6.55 Συντελεστές Ασφαλείας FOS = 1.78

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε FOS=1.78. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Η εισαγωγή των επιπλέον δύο σειρών αγκυρίων έχει σημαντικά αποτελέσματα στη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας σε ποσοστό 11.3% ως προς τα προηγούμενα μέτρα αντιστήριξης (τέσσερις σειρές αγκυρίων). Ο συντελεστής FOS=1.78 είναι αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας καθώς είναι άνω του ορίου FOS= 1.40 για στατικές συνθήκες φόρτισης. Στο επόμενο βήμα θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητα των έξι σειρών αγκυρίων έναντι σεισμικής φόρτισης.

## 6.8 Ψευδοστατική Φόρτιση για πρανές αντιστηριζόμενο με έξι σειρές αγκυριών.

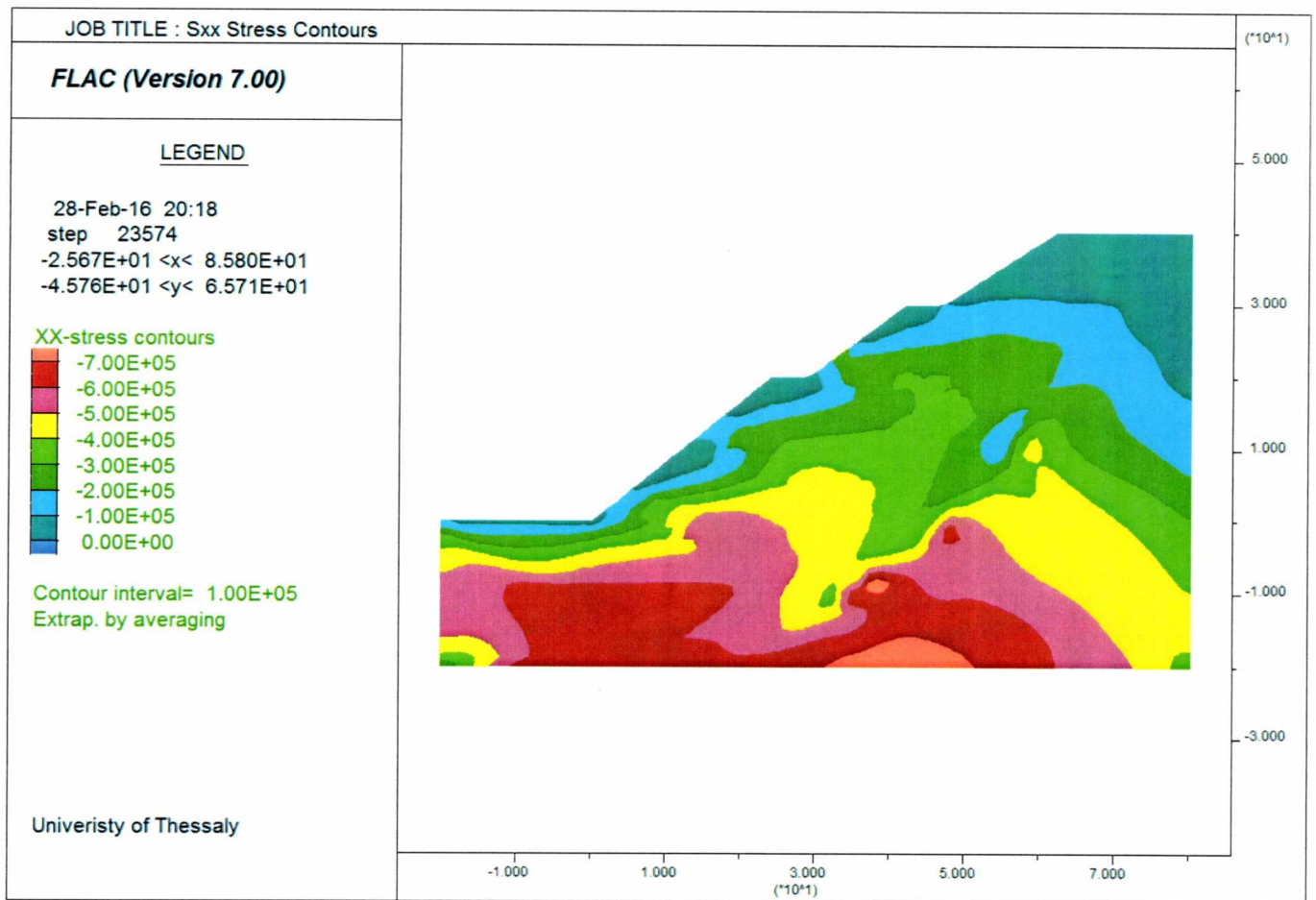
### 6.8.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.56 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{yy}$  για μη σταθερό βαρυτικό πεδίο επιτάχυνσης 0,24g - Ψευδοστατικής Ανάλυσης

Παρατηρείται μεγάλης κλίμακας διατάραξη στην κατανομή των κατακόρυφων συνιστωσών της τάσης καθώς το σταθερό βαρυτικό πεδίο μετατρέπεται σε μη σταθερό με δυσμενή διεύθυνση επιτάχυνσης ως προς τη κλίση.

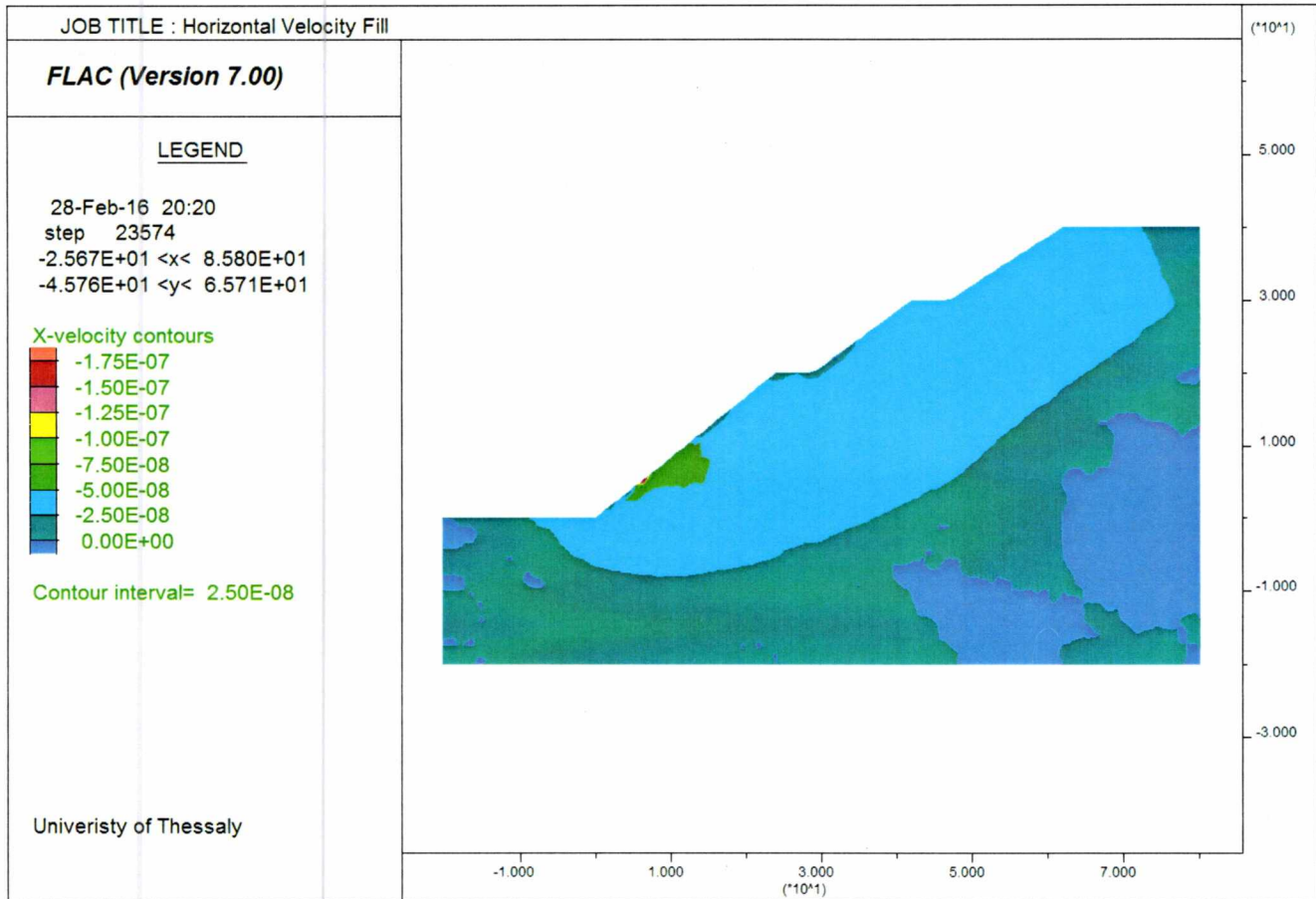
## 6.8.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.57 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{xx}$

Παρατηρείται σημαντική διατάραξη στην κατανομή των οριζόντιων συνιστωσών της τάσης καθώς το σταθερό βαρυντικό πεδίο μετατρέπεται σε μη σταθερό με δυσμενή διεύθυνση επιτάχυνσης ως προς τη κλίση.

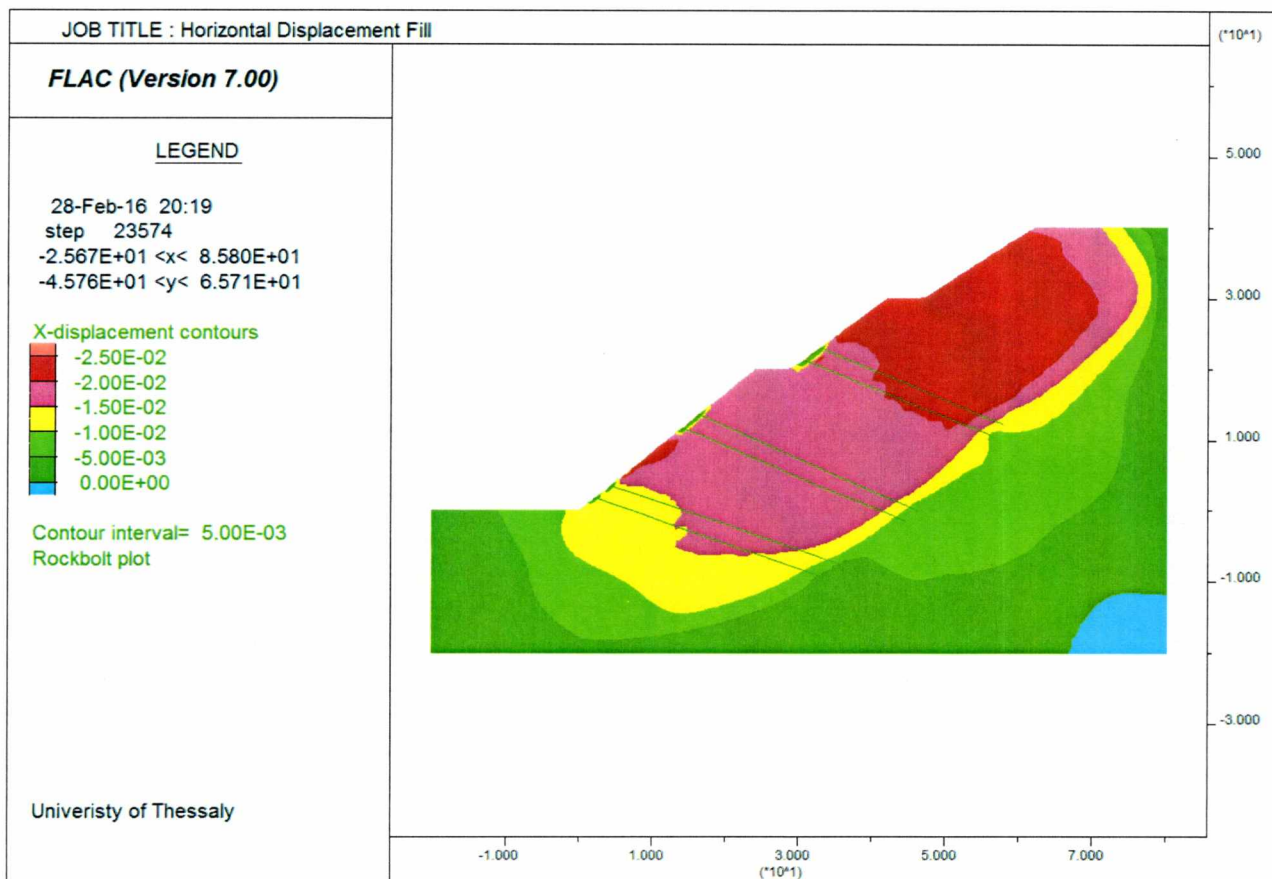
### 6.8.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων



Εικόνα 6.58 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων να επεκτείνεται σε μεγαλύτερη έκταση από το πόδα του πρανούς. Οι σημαντικές ταχύτητες αναπτύσσονται ενιαία σε ολόκληρο το τμήμα της κλίσης του αντερείσματος σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση στατικών συνθηκών και σταθερού βαρυτικού πεδίου.

## 6.8.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

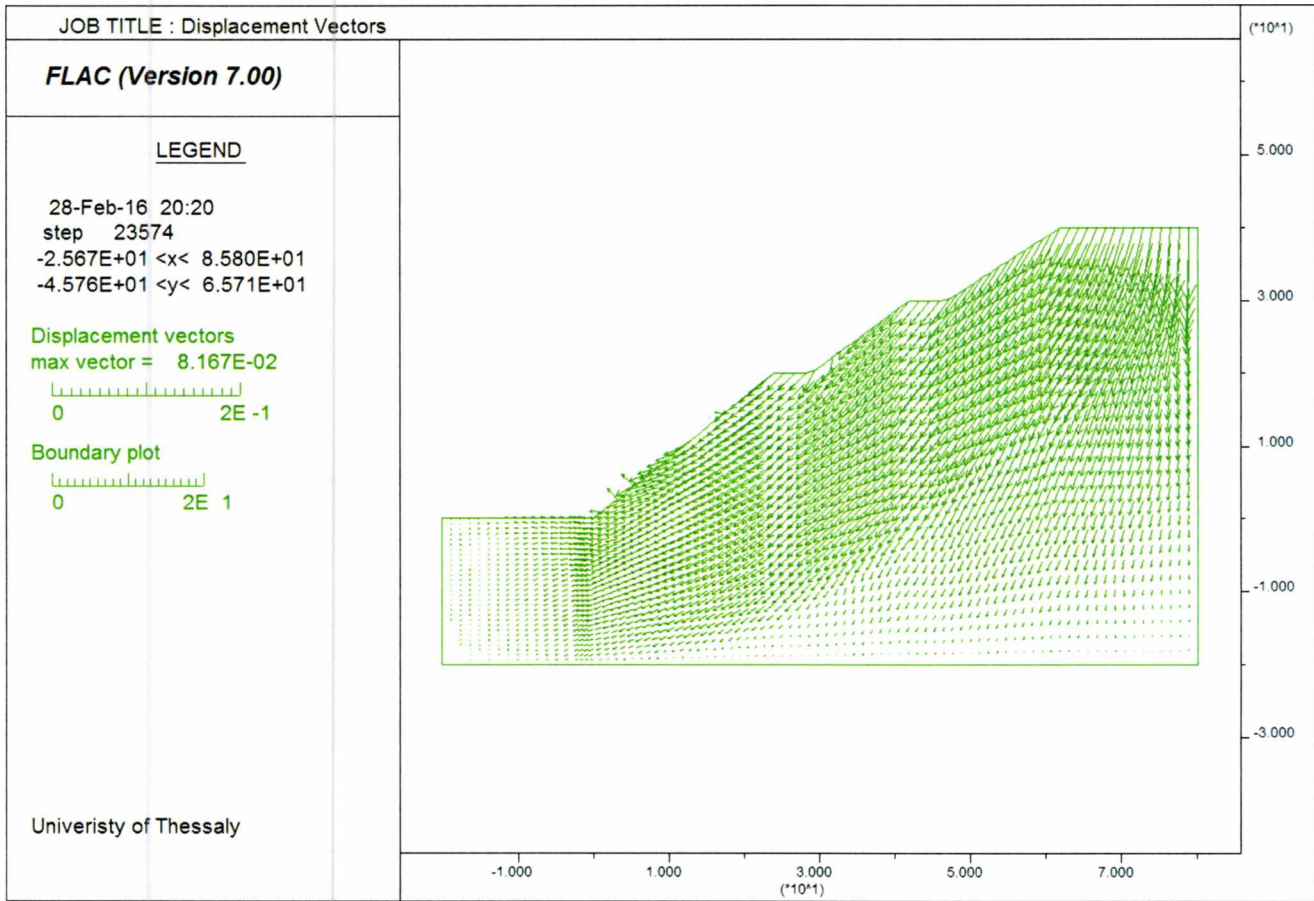


Εικόνα 6.59 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων όπως σχηματίζεται κατά τη στιγμή της αστοχίας. Το τμήμα της βραχομάζας που τείνει να ολισθήσει δεν παρουσιάζει διαφορές ως προς τη τάξη μεγέθους σε σχέση με τη ανάλυση αυτών των μέτρων αντιστήριξης για στατικές συνθήκες.



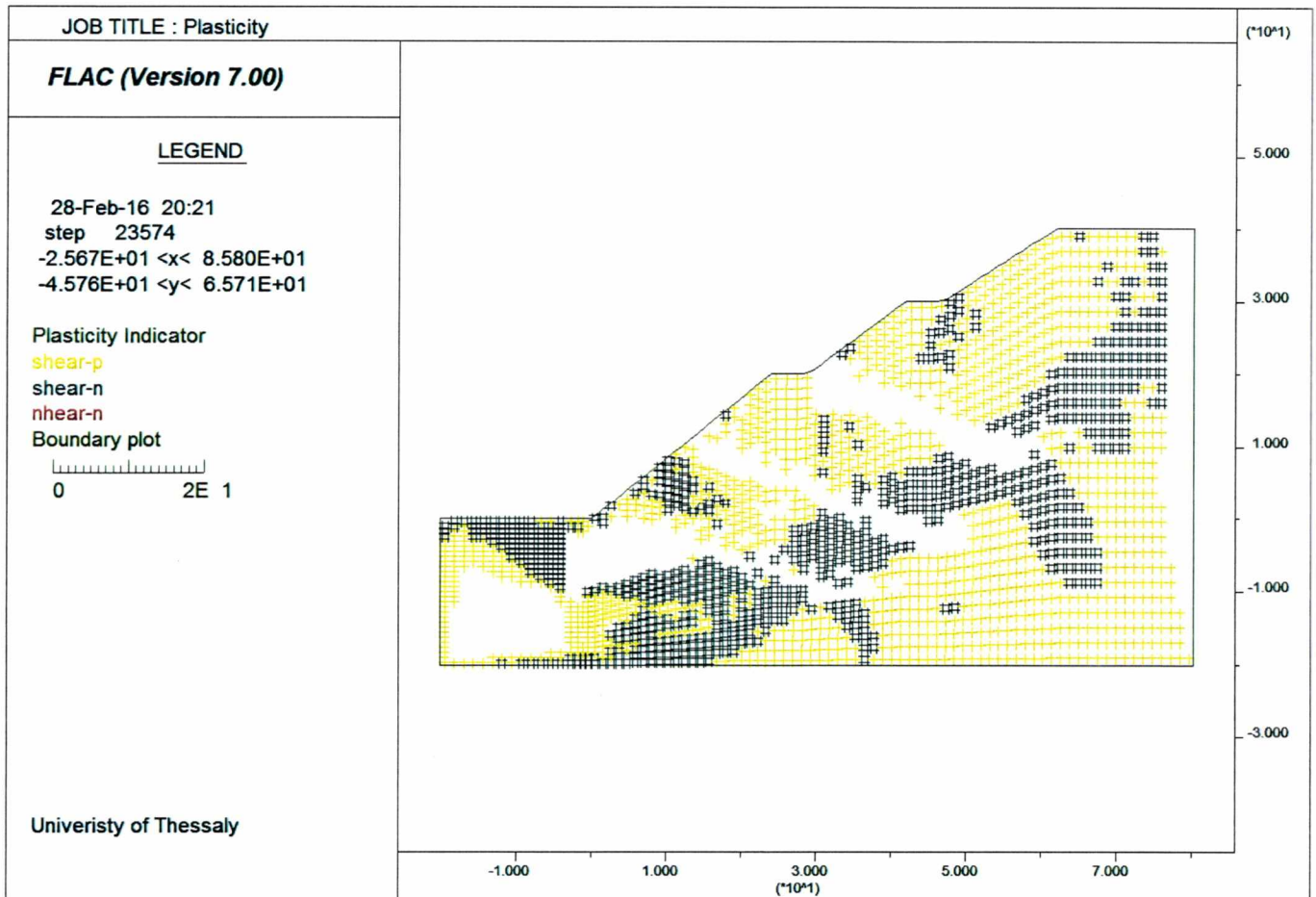
### 6.8.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.60 Διανύσματα Μετατοπίσεων

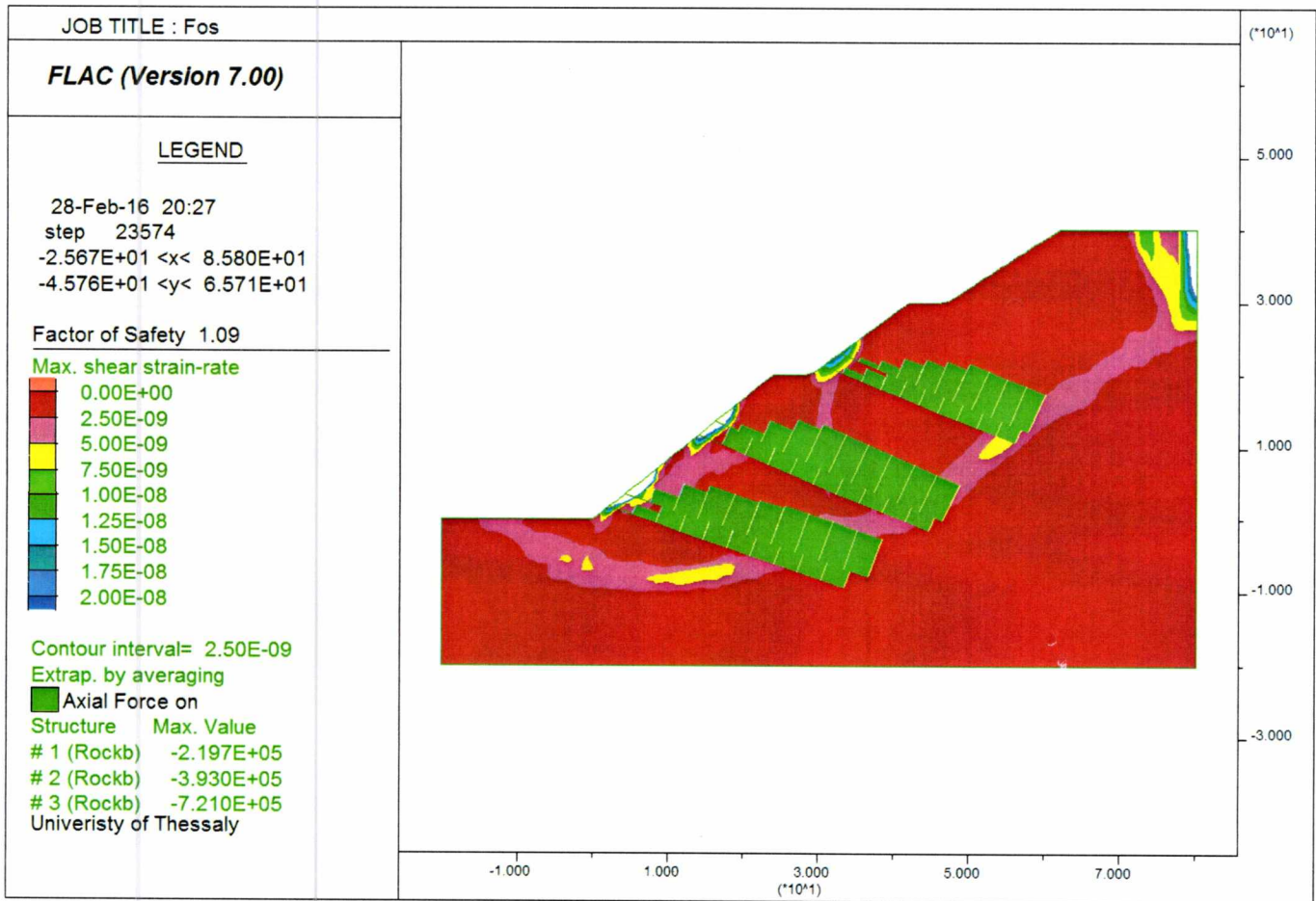
Το μέγιστο βέλος μετακίνησης έχει μέτρο 8.17cm σε αντίθεση με τη πρώτη ψευδοστατική ανάλυση για το διαμορφωμένο αποκλειστικά με αναβαθμούς πρανές το οποίο αστόχησε με μετακίνηση 85.00cm. Μειώθηκε το μέγιστο διάνυσμα της μετατόπισης κατά 90.4%.

## 6.8.6 Δείκτες Πλαστικότητας



Εικόνα 6.61 Δείκτες Πλαστικότητας

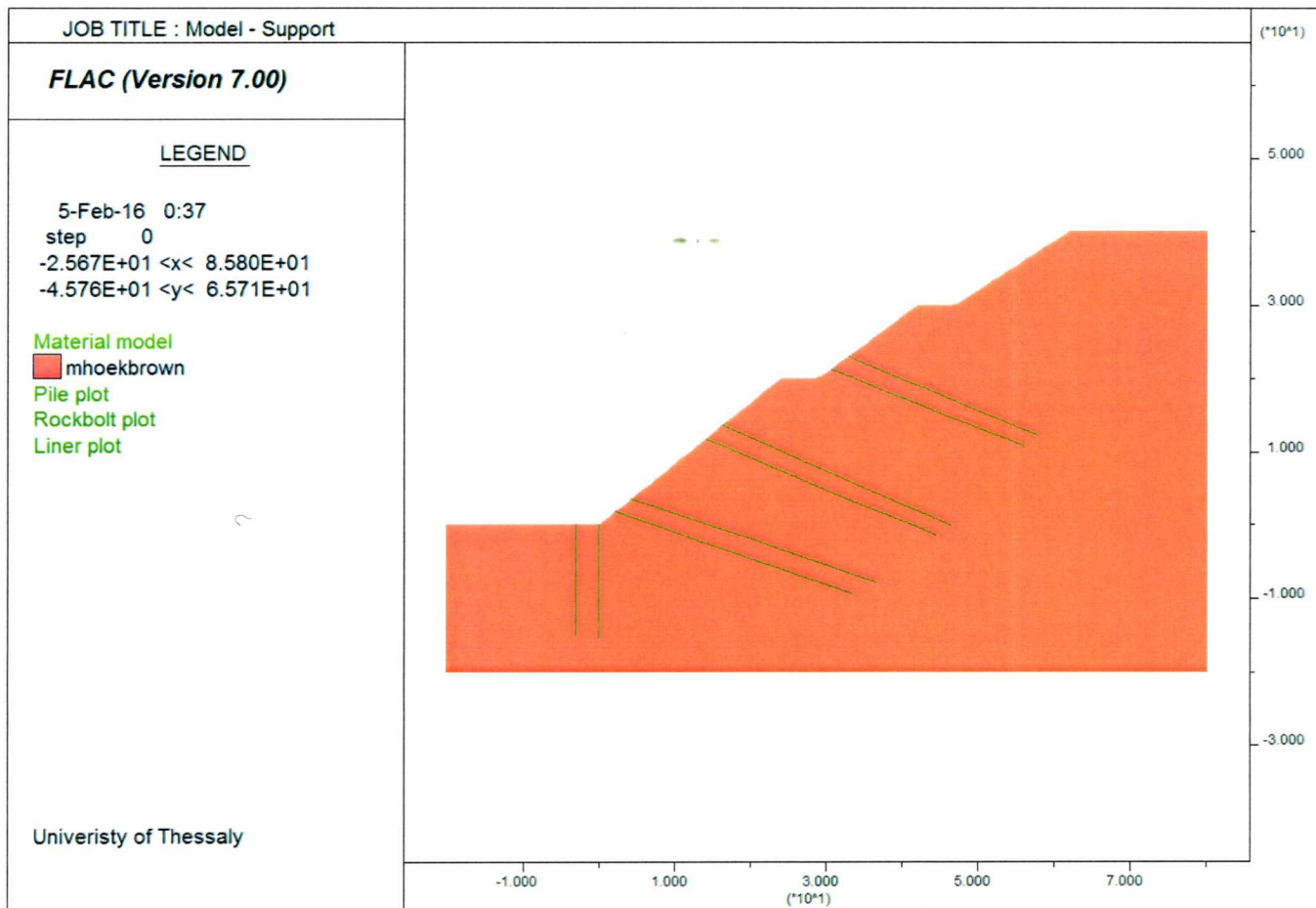
### 6.8.7 Συντελεστής ασφαλείας



Εικόνα 6.62 Συντελεστή ασφαλείας FOS= 1.09 για ψευδοστατική φόρτιση 0.24g

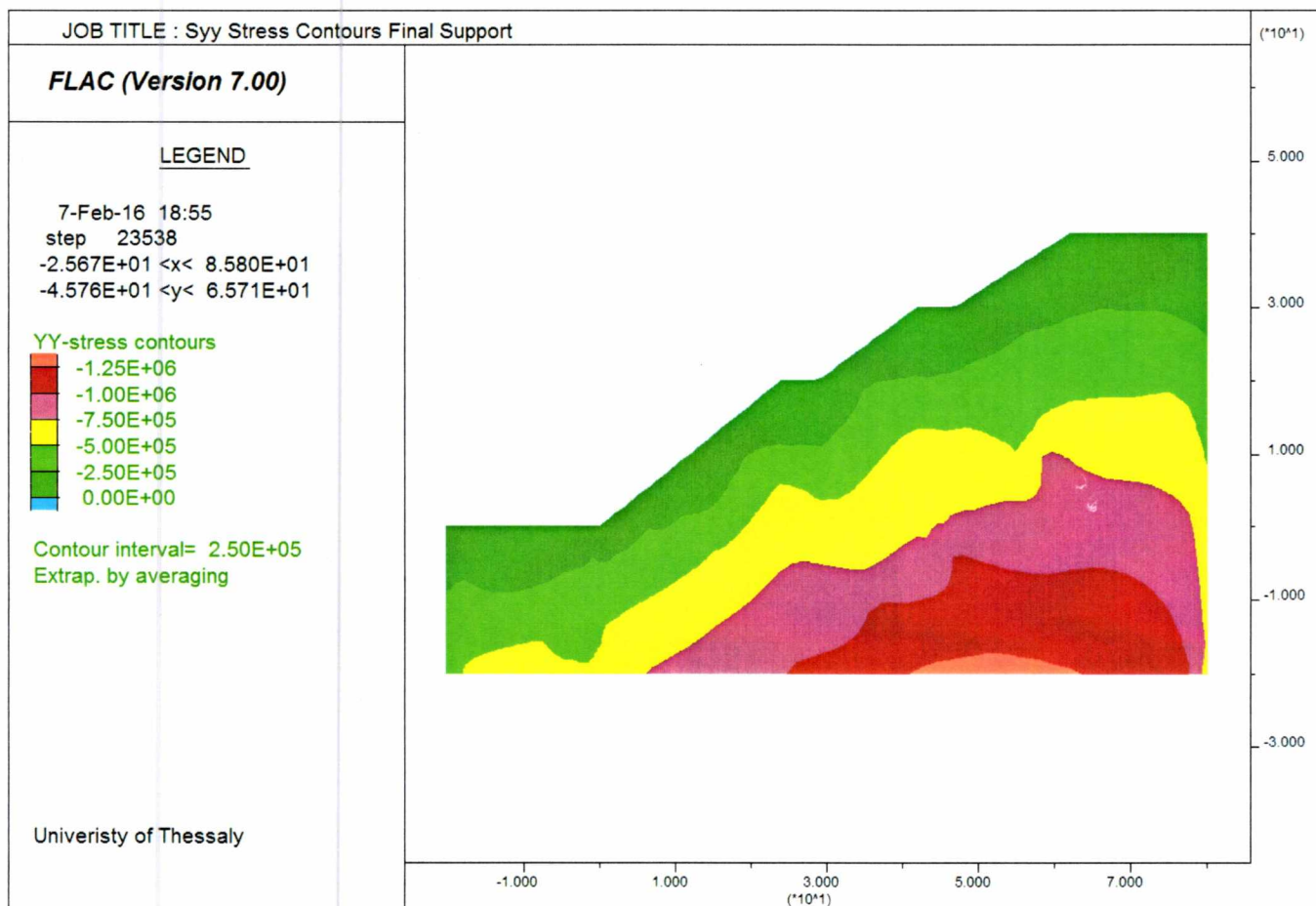
Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται FOS= 1.09. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Ο συντελεστής για τη παραπάνω ανάλυση προκύπτει ικανοποιητικός για οριζόντια επιτάχυνση σεισμού 0.24g. Η βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με την πρώτη ψευδοστατική ανάλυση του διαμορφωμένου αποκλειστικά με αναβαθμούς πρηνές ανέρχεται στο αξιόλογο ποσοστό 39.7%.

## 6.9 Εισαγωγή έξι σειρών αγκυρίων και υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας συμπεριλαμβανομένου των πασσάλων.



Εικόνα 6.63 Μοντέλο πρανούς με τη διαμόρφωση αναβαθμών ,εισαγωγή πασσάλων και έξι σειρών αγκυρίων

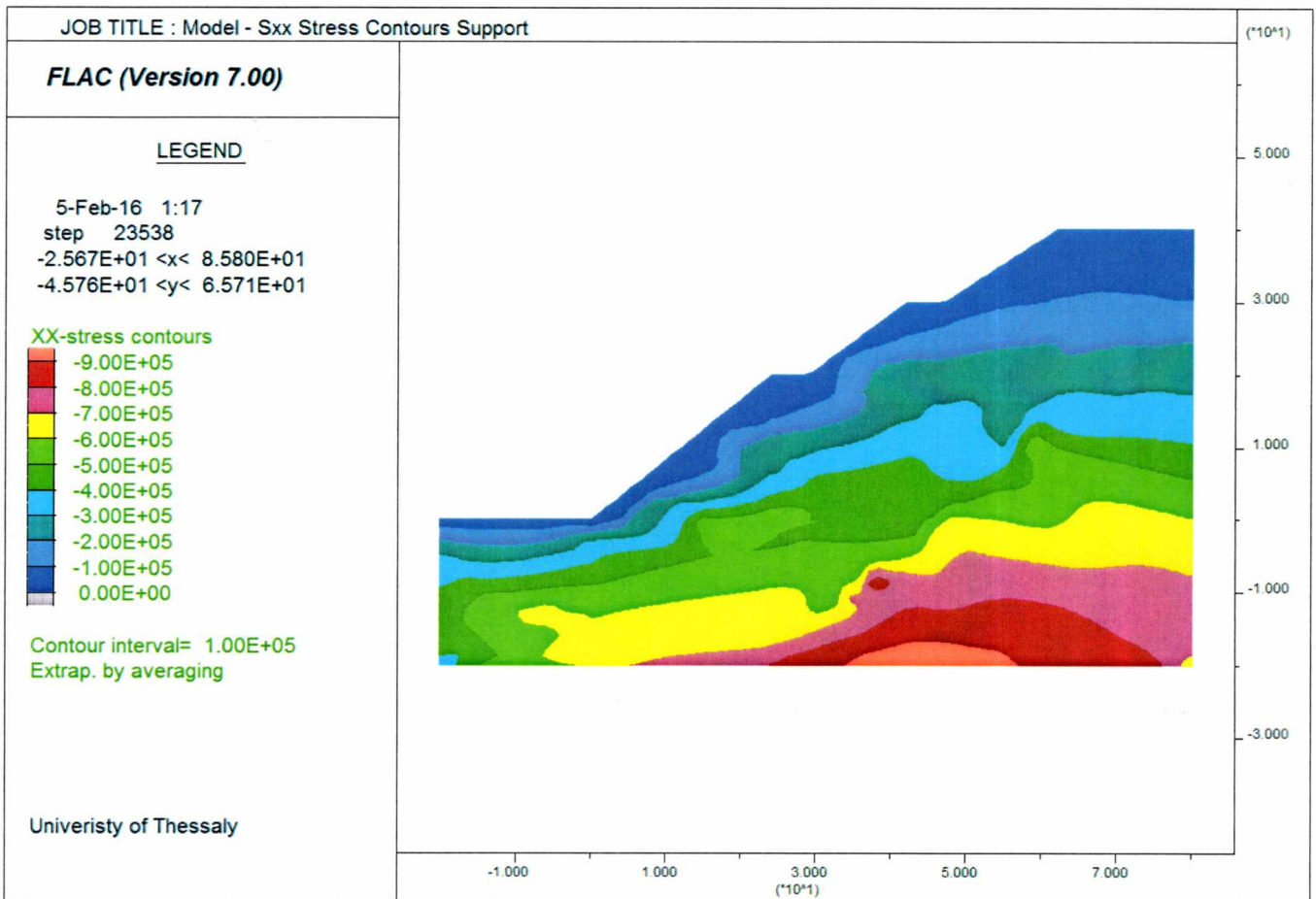
### 6.9.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.64 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{yy}$  μετά την εισαγωγή των μέτρων αντιστήριξης (αναβαθμούς, πασσάλους και έξι σειρές αγκυρίων).

Μετά την εισαγωγή των πασσάλων δε παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή ή στη τάξη μεγέθους της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης πέραν από τα σημεία εισαγωγής των τελικών μέτρων αντιστήριξης όπου εντοπίζονται μικρές διαταράξεις στην ομοιομορφία της κατανομής.

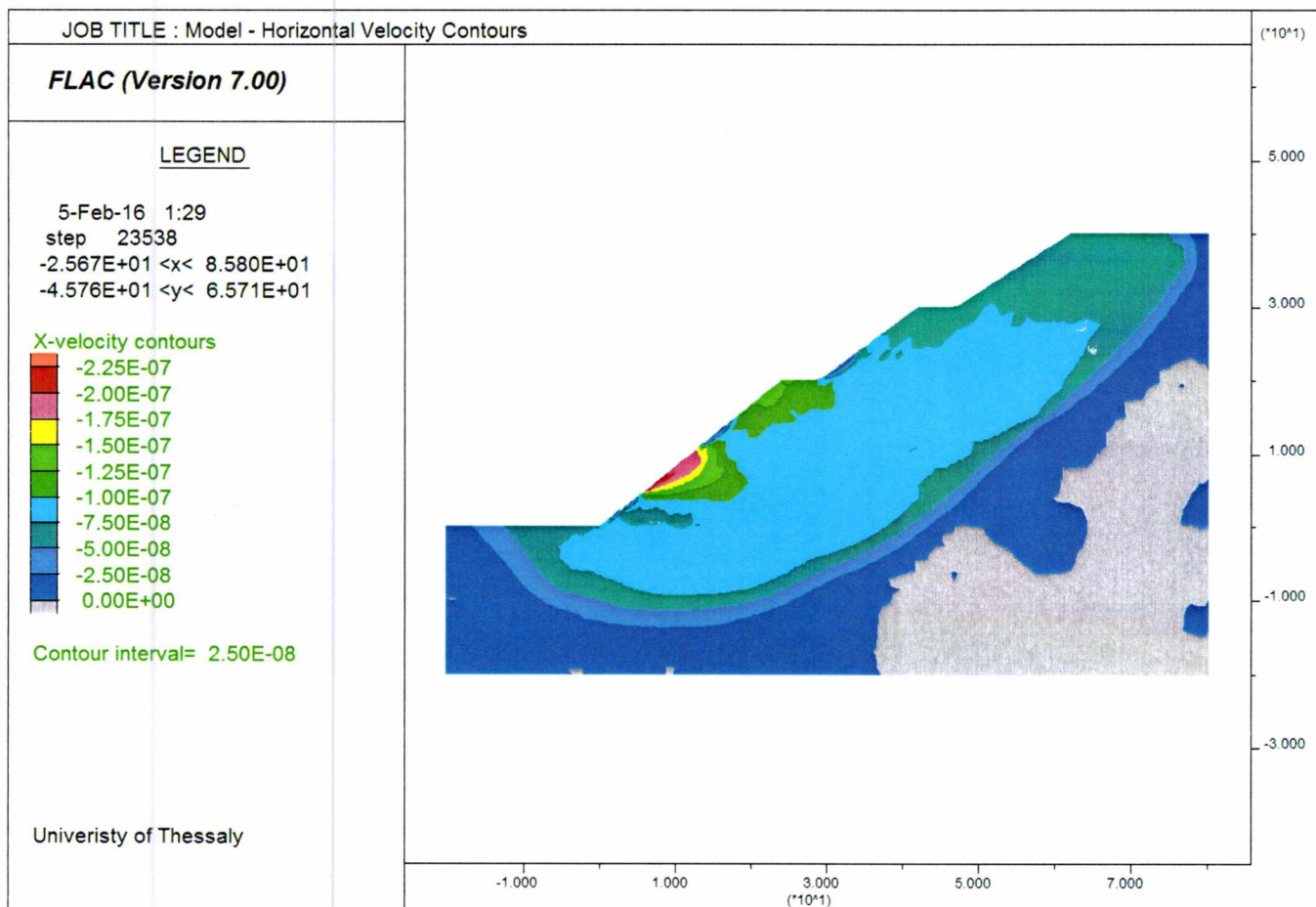
## 6.9.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.65 Κατανομή οριζόντιων τάσεων  $\sigma_{xx}$  για τα τελικά μέτρα αντιστήριξης

Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατανομή κατακόρυφων τάσεων, μετά την εισαγωγή των αγκυριών παρατηρείται αξιοσημείωτη αλλαγή στη γενική κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης. Συγκρίνοντας με την φυσική κατανομή γίνεται αντιληπτή η κλίμακα της διατάραξης.

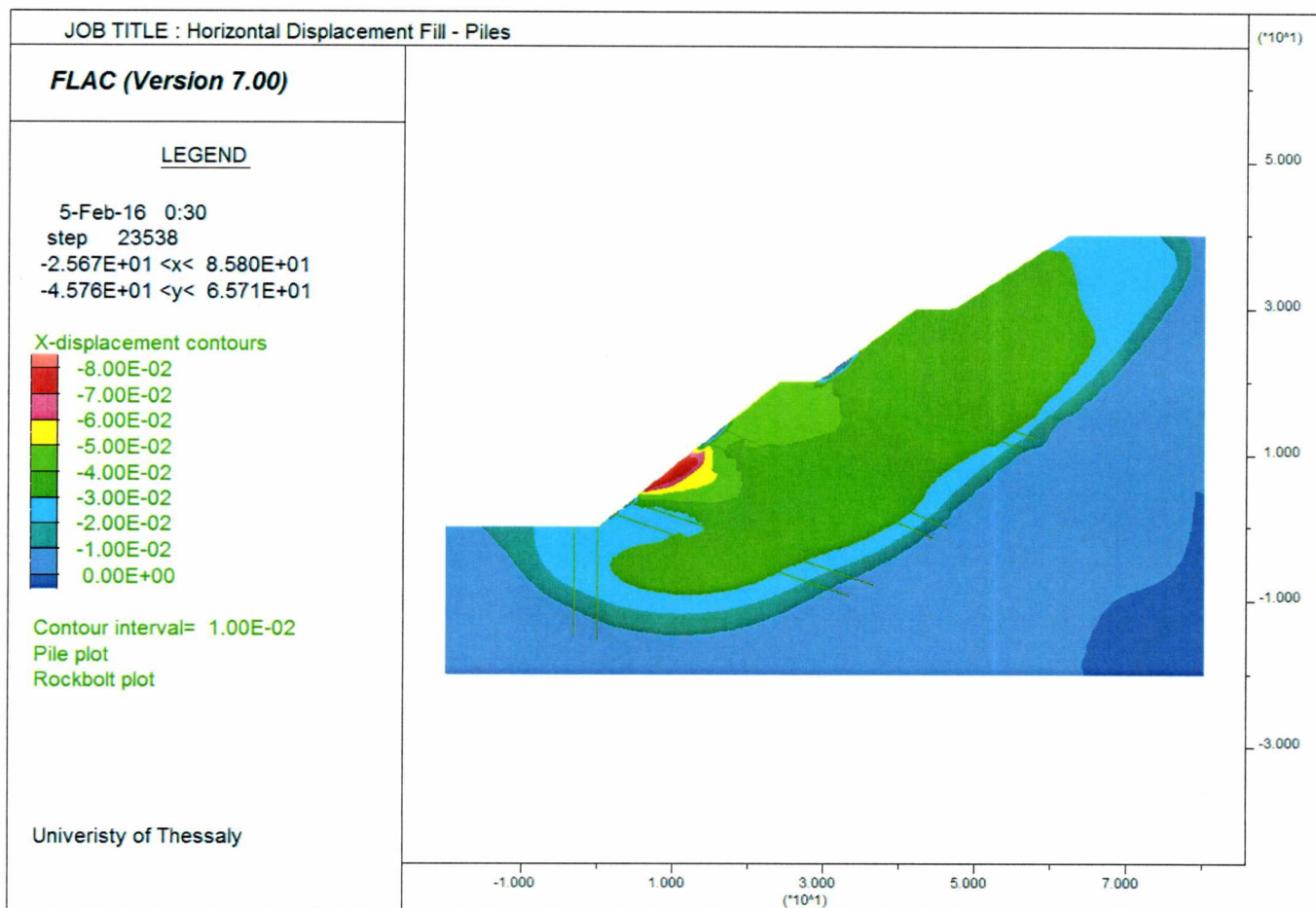
### 6.9.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων



Εικόνα 6.66 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων κατά την αστοχία για τα τελικά μέτρα αντιστήριξης

Η ανάπτυξη των ταχυτήτων δε παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές σε σχέση με τη ανάλυση για στατικές συνθήκες φόρτισης των έξι σειρών αγκυριών.

## 6.9.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

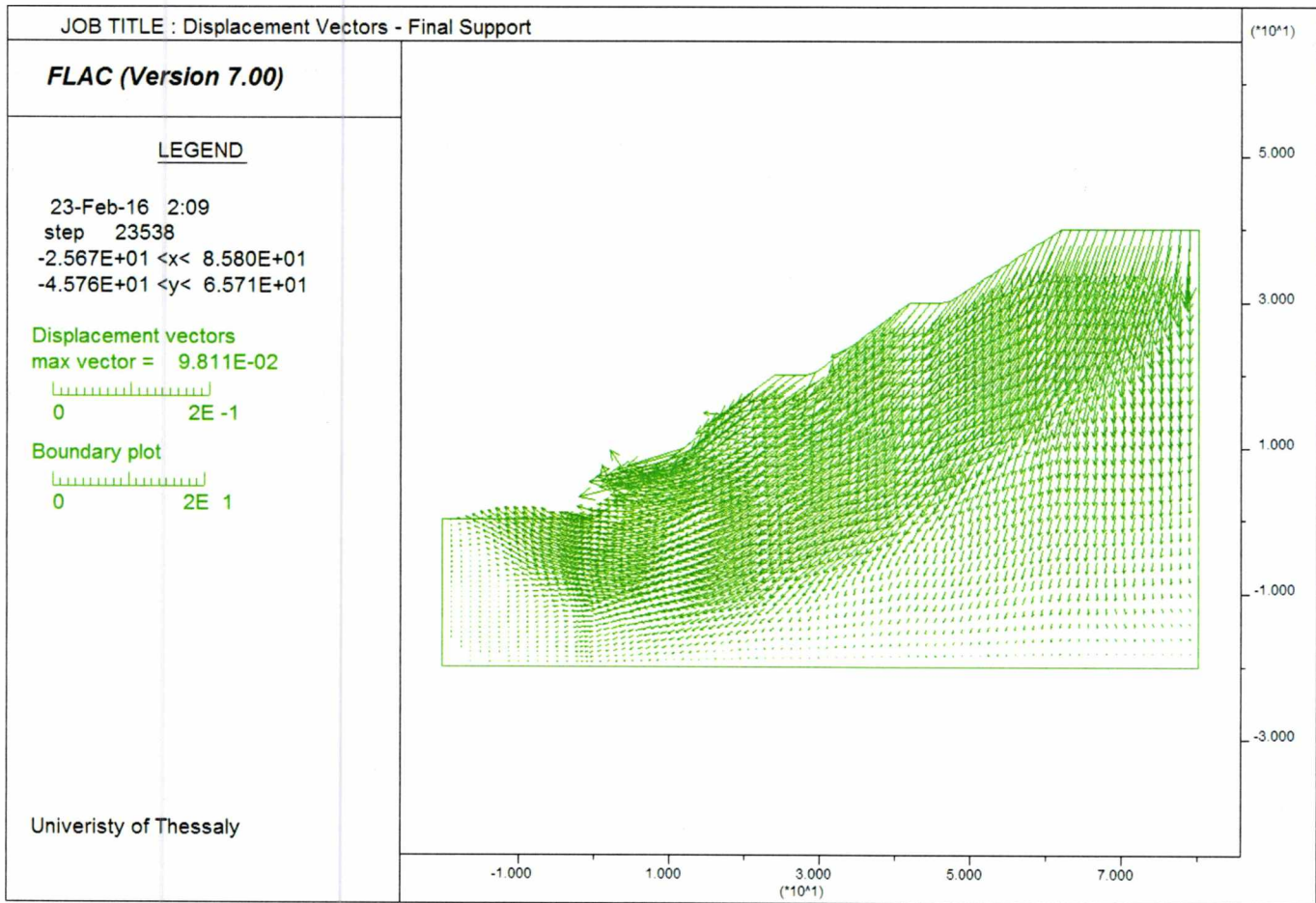


Εικόνα 6.67 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων κατά την αστοχία για τα τελικά μέτρα αντιστήριξης

Παρατηρείται η επέκταση της επιφάνειας ολίσθησης πέρα από την ενισχυμένη με αγκύρια και υγιή βραχομάζα. Επίσης η ανάπτυξη της μετακινούμενης βραχομάζας ξεπερνάει πλέον το πόδα του πρανούς. Επομένως η εφαρμογή των πασσάλων αναμένεται να βελτιώσει την υπάρχουσα ευστάθεια του πρανούς και επομένως τον συντελεστή ασφαλείας.



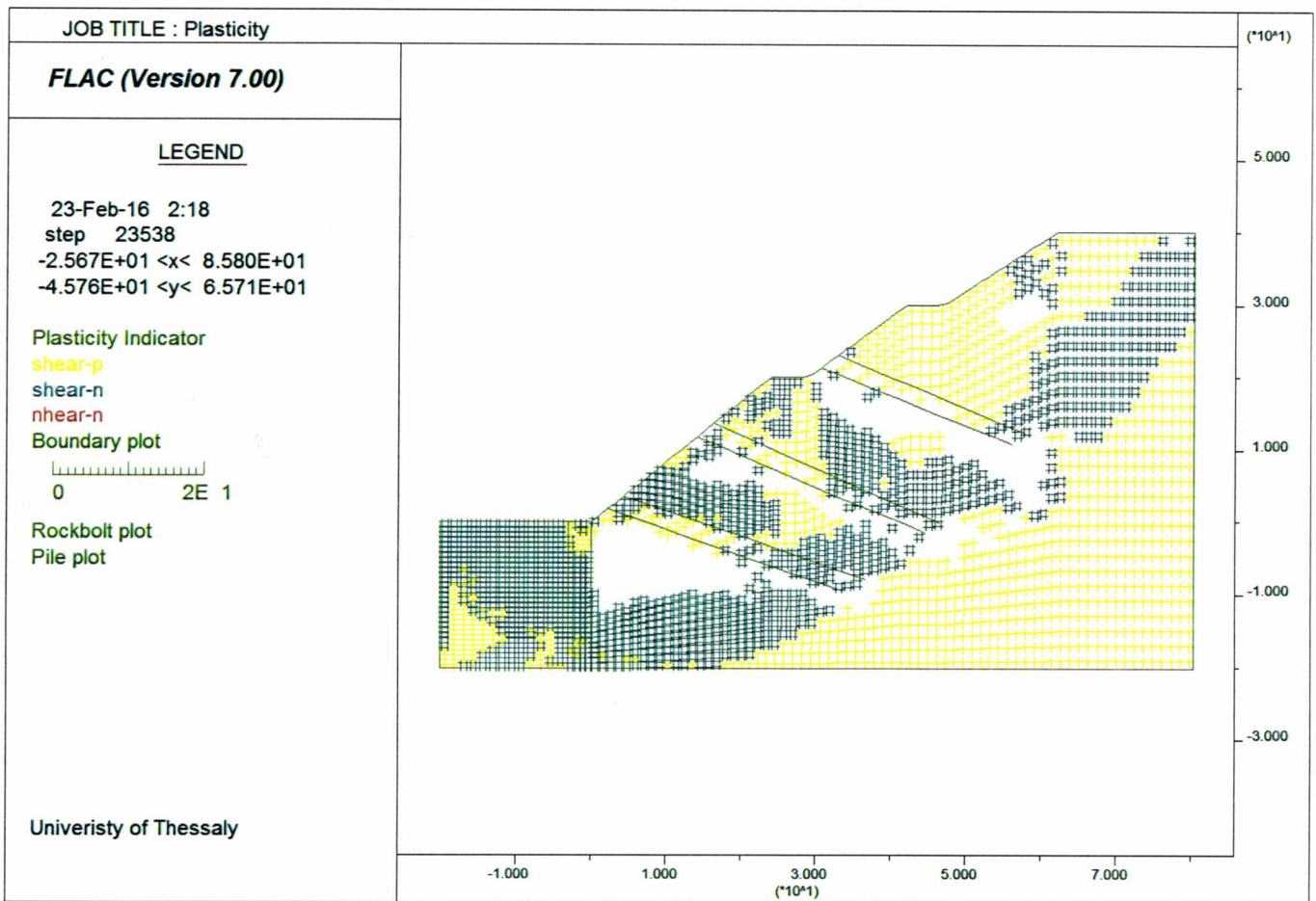
## 6.9.5 Διανύσματα μετατοπίσεων



Εικόνα 6.68 Διανύσματα Μετατοπίσεων

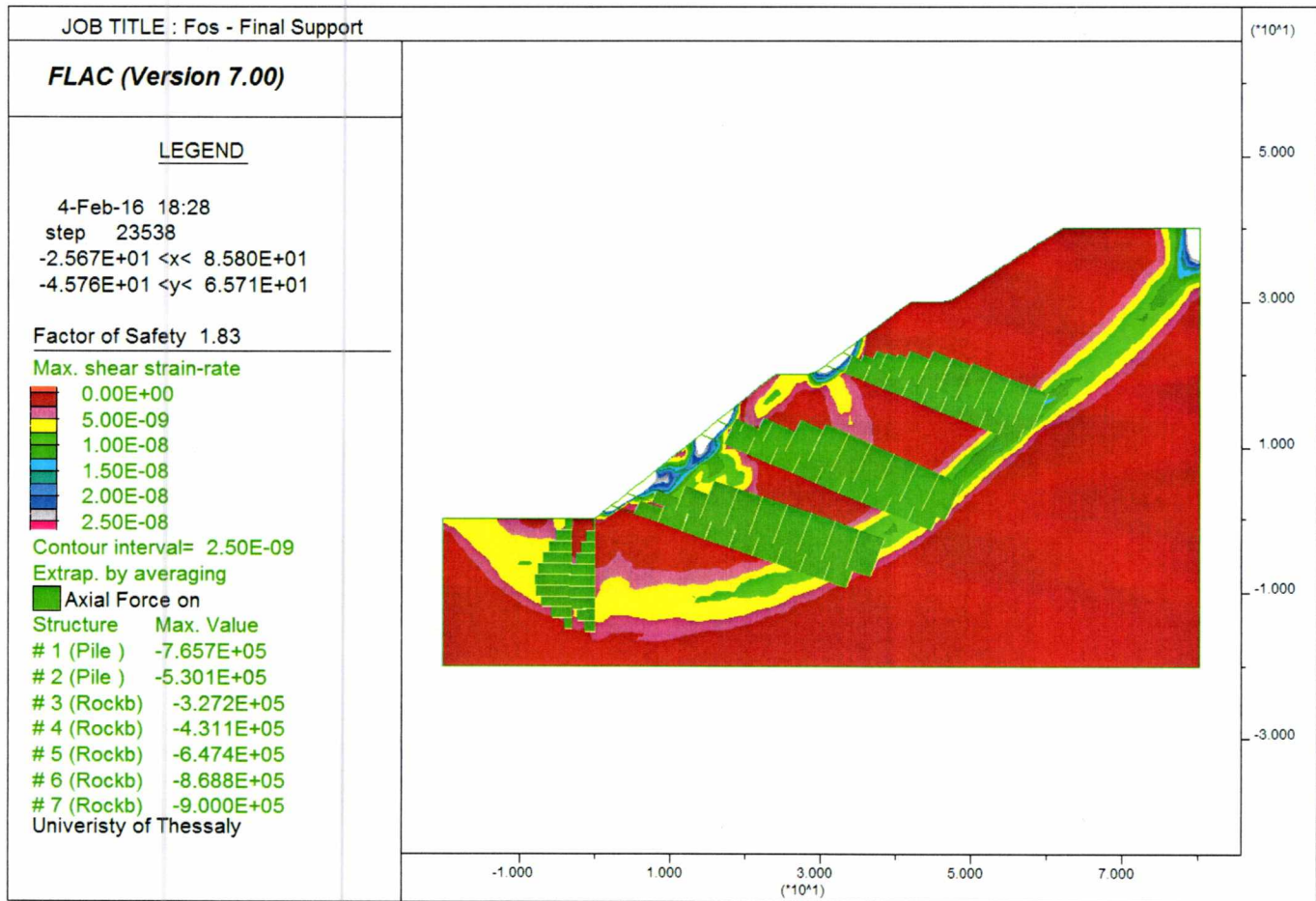
Το μέγιστο διάνυσμα μετατόπισης που αναπτύσσεται κατά την κρίσιμη στιγμή της αστοχίας έχει μέτρο 9.81cm. Παρατηρείτε αύξηση των μετακινήσεων στο κατώτερο τμήμα του πρανούς.

## 6.9.6 Δείκτες πλαστικότητας



Εικόνα 6.69 Δείκτες Πλαστικότητας

## 6.9.7 Συντελεστής ασφαλείας

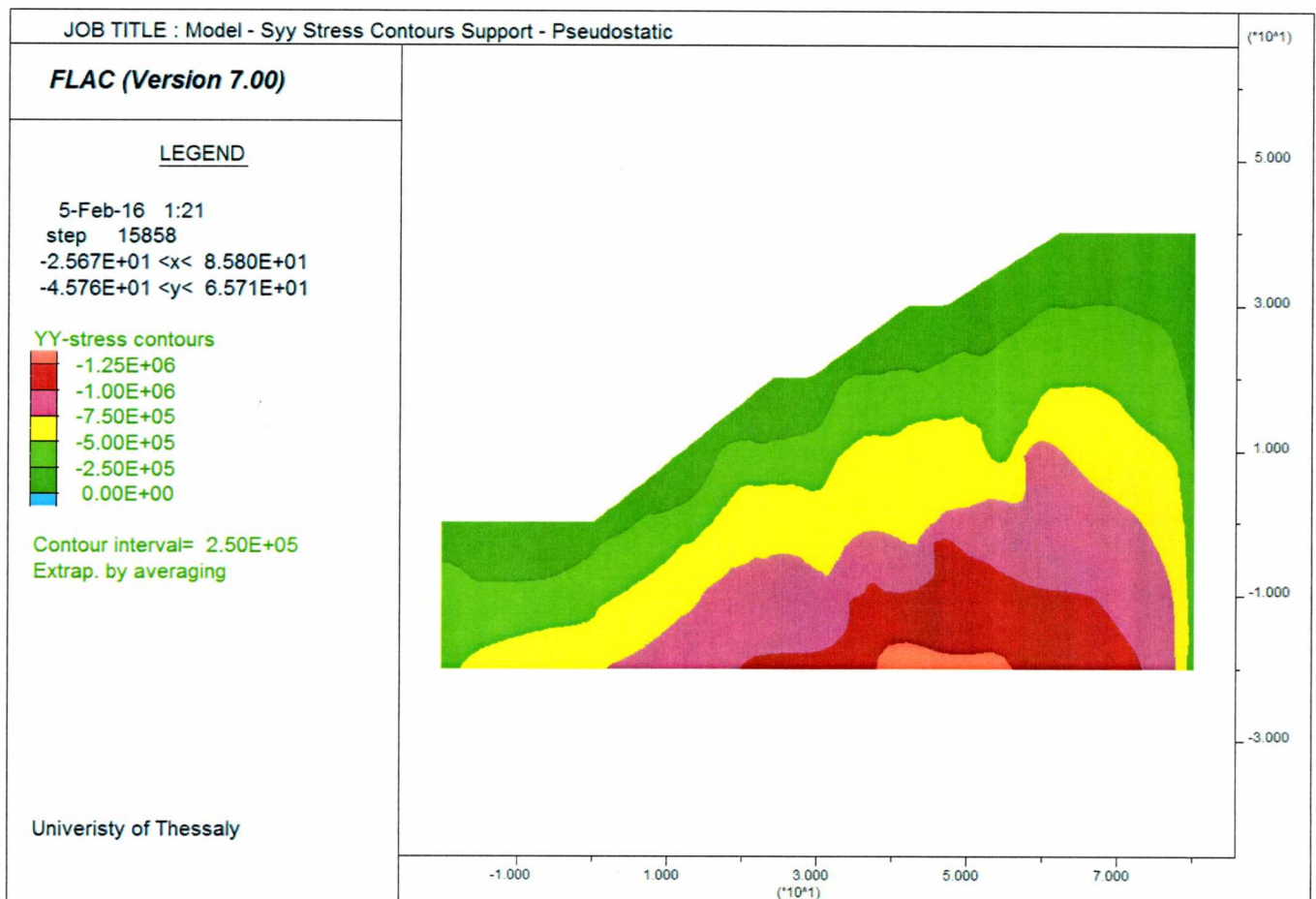


Εικόνα 6.70 Συντελεστής Ασφαλείας FOS= 1.83 πρανούς αντιστηριζόμενο από τα τελικά μέτρα αντιστήριξης(αναβαθμούς, πασσάλους και έξι σειρές αγκυρίων).

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται FOS=1.83. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας σε αυτό το στάδιο και η απεικόνιση της επιφάνειας ολίσθησης υποδεικνύουν ότι η προηγούμενη υπόθεση ως προς την επέκταση της επιφάνειας ολίσθησης πέρα από το πόδα του πρανούς ήταν σωστή. Οι πάσσαλοι λειτουργούν και επιδρούν στην επιφάνεια ολίσθησης σημαντικά ως ένα συμπληρωματικό μέτρο αντιστήριξης σε ποσοστό 2.8%.

## 6.10 Ψευδοστατική φόρτιση και υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για το σύνολο των μέτρων αντιστήριξης

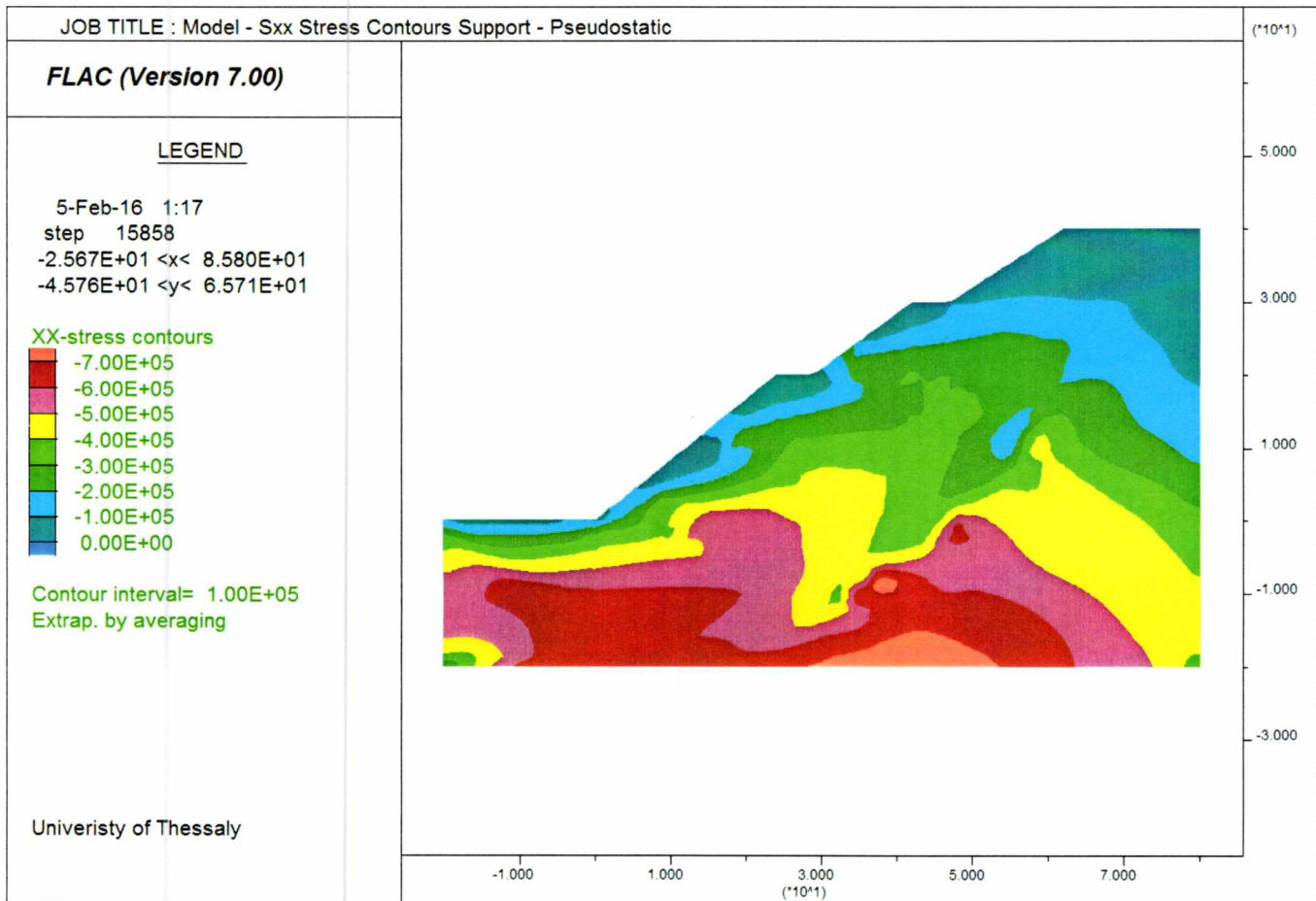
### 6.10.1 Κατανομή κατακόρυφης συνιστώσα της τάσης - $\sigma_{yy}$



Εικόνα 6.71 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων  $\sigma_{yy}$  μετά την εισαγωγή των τελικών μέτρων αντιστήριξης για μη σταθερό βαρυτικό πεδίο επιτάχυνσης 0.24g - Ψευδοστατική φόρτιση

Παρατηρείται μεγάλης κλίμακας διατάραξη στην κατανομή των κατακόρυφων συνιστωσών της τάσης καθώς το σταθερό βαρυτικό πεδίο μετατρέπεται σε μη σταθερό, με δυσμενή διεύθυνση επιτάχυνσης ως προς τη κλίση.

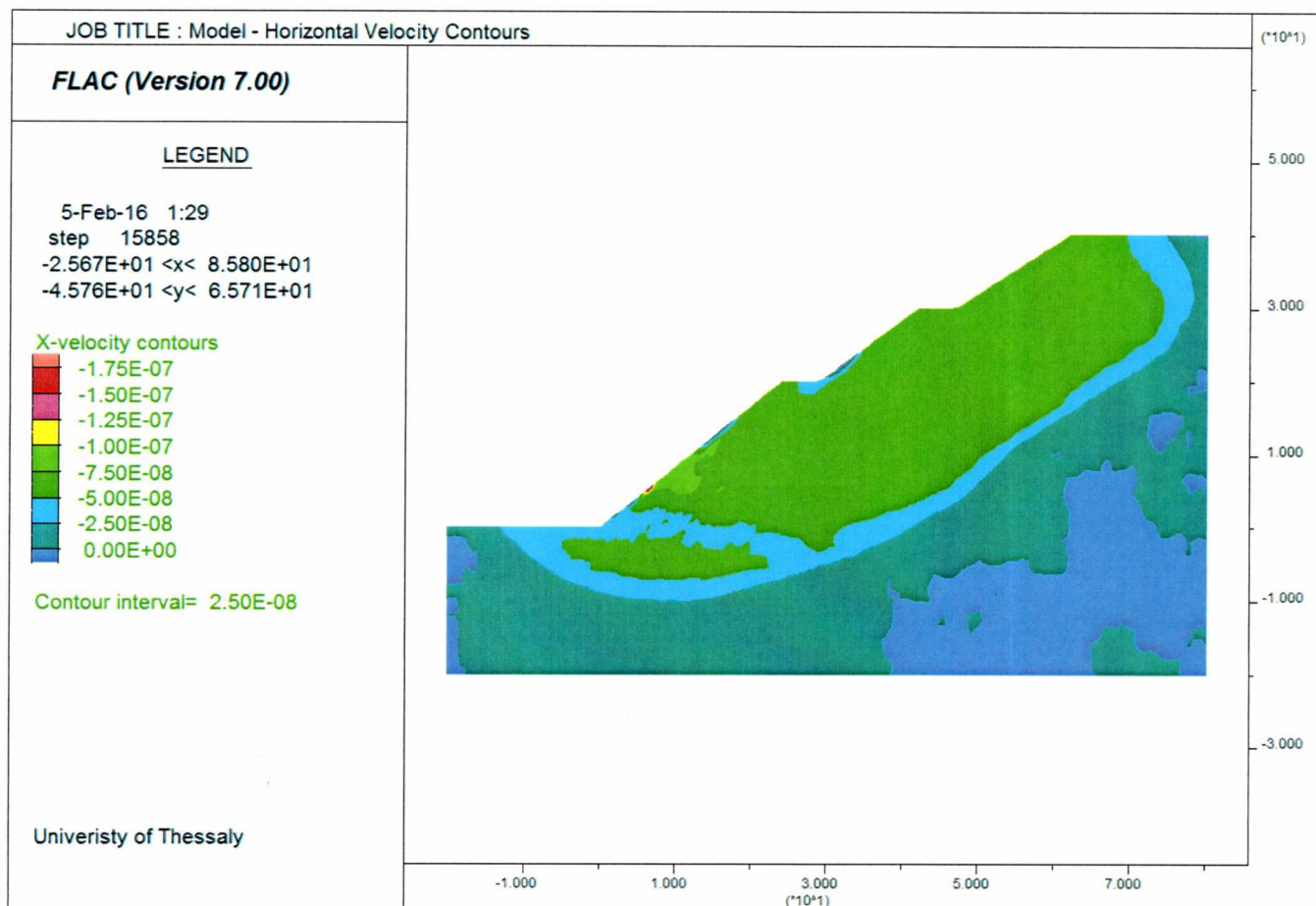
## 6.10.2 Κατανομή οριζόντιας συνιστώσας της τάσης - $\sigma_{xx}$



Εικόνα 6.72 Κατανομή οριζόντιων τάσεων  $\sigma_{xx}$  μετά την εισαγωγή των τελικών μέτρων αντιστήριξης για μη σταθερό βαρυτικό πεδίο 0.24g - Ψευδοστατική φόρτιση

Παρατηρείται σημαντική διατάραξη στην κατανομή των οριζόντιων συνιστωσών της τάσης καθώς το σταθερό βαρυτικό πεδίο μετατρέπεται σε μη σταθερό με δυσμενή διεύθυνση επιτάχυνσης ως προς τη κλίση.

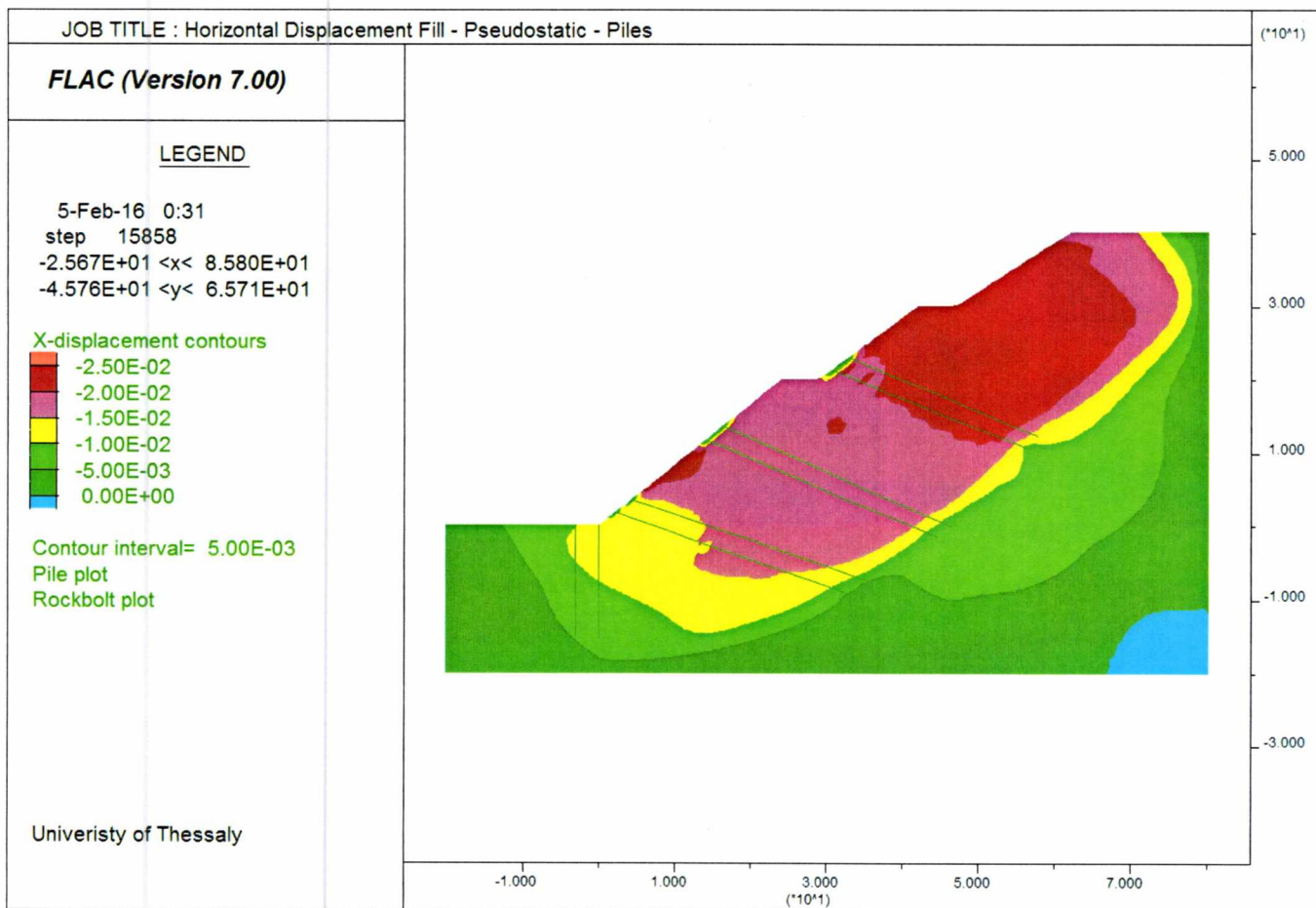
### 6.10.3 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων



Εικόνα 6.73 Κατανομή αναπτυσσόμενων οριζόντιων ταχυτήτων μετά την εισαγωγή των τελικών μέτρων αντιστήριξης για μη βαρυτικό πεδίο επιτάχυνσης 0.24g - Ψευδοστατική φόρτιση

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων να επεκτείνεται σε μεγαλύτερη έκταση από το πόδα του πρανούς. Οι σημαντικές ταχύτητες αναπτύσσονται ενιαία σε ολόκληρο το τμήμα της κλίσης του αντερείσματος.

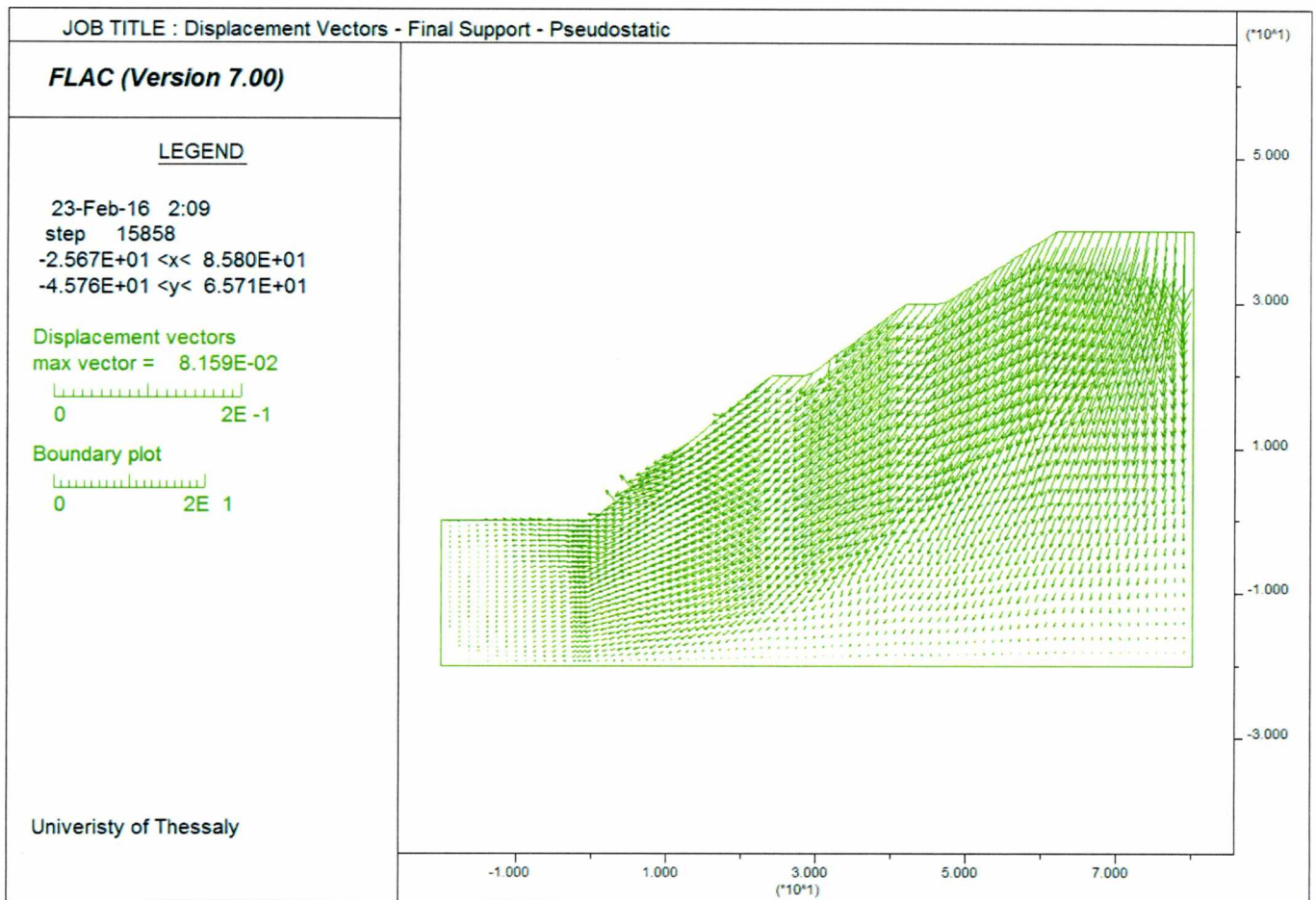
#### 6.10.4 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων



Εικόνα 6.74 Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων

Παρατηρείται η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης στην παραπάνω απεικόνιση της κατανομής των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων όπως σχηματίζεται κατά τη στιγμή της αστοχίας. Το τμήμα της βραχομάζας που τείνει να ολισθήσει δεν παρουσιάζει διαφορές ως προς τη τάξη μεγέθους σε σχέση με τη ανάλυση για αυτά τα μέτρα αντιστήριξης για στατικές συνθήκες.

### 6.10.5 Διανύσματα μετατοπίσεων

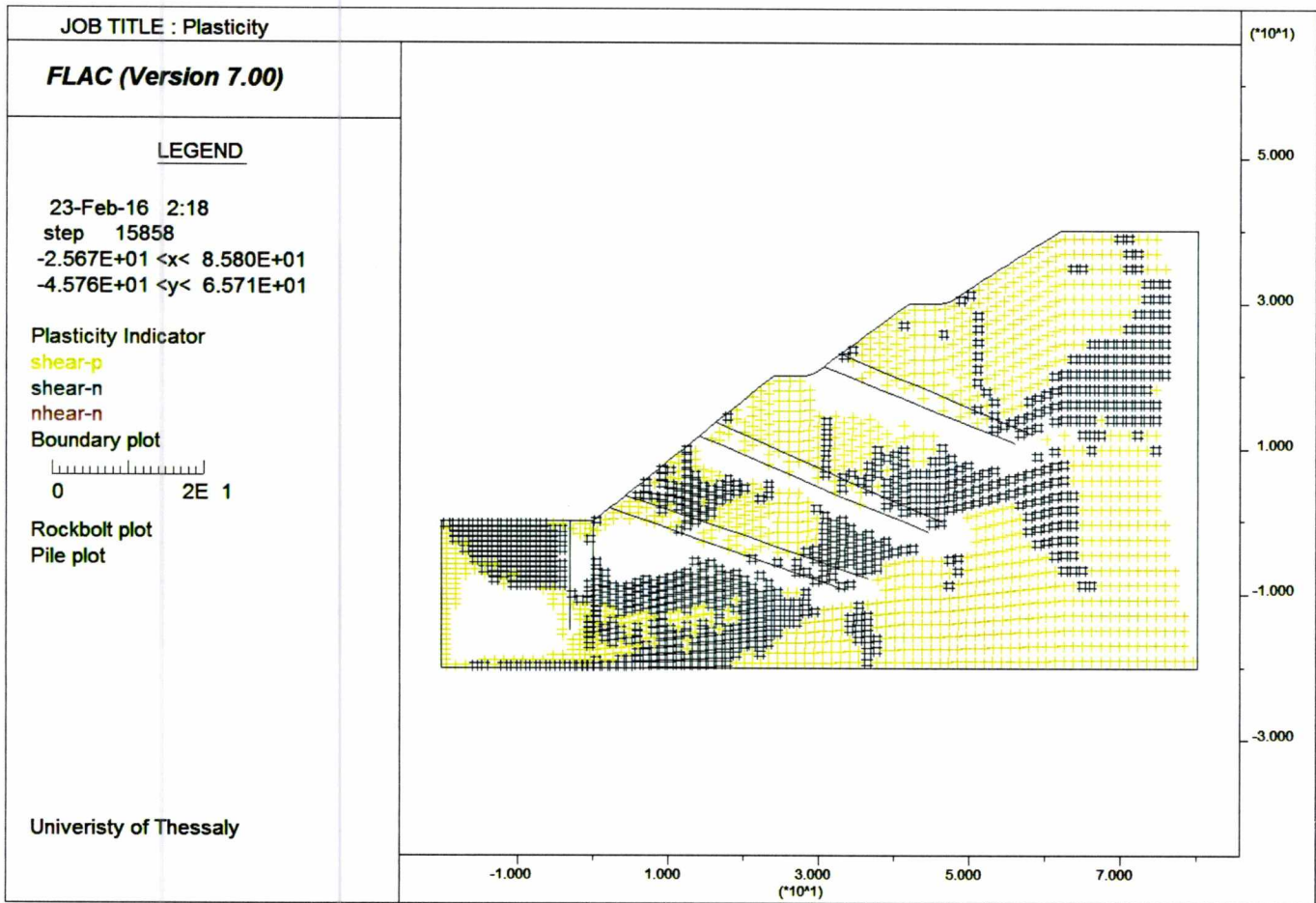


Εικόνα 6.75 Διανύσματα μετατοπίσεων

Το μέγιστο βέλος μετακίνησης έχει μέτρο 8.16cm σε αντίθεση με τη πρώτη ψευδοστατική ανάλυση για το διαμορφωμένο αποκλειστικά με αναβαθμούς πρανές το οποίο αστόχησε με μετακίνηση 85.00cm.

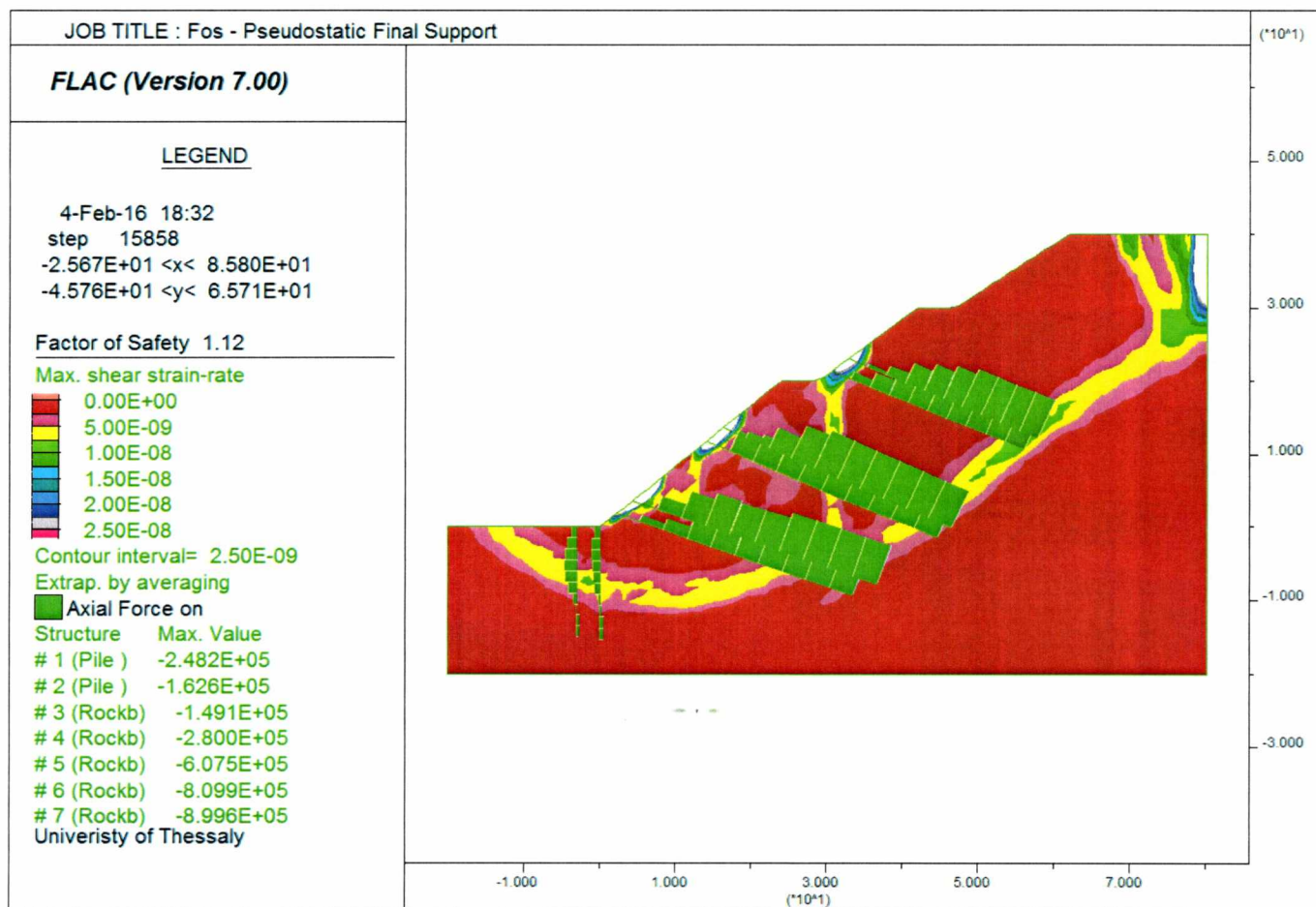


### 6.10.6 Δείκτες πλαστικότητας



Εικόνα 6.76 Δείκτες Πλαστικότητας

## 6.10.7 Συντελεστής ασφαλείας



Εικόνα 6.77 Συντελεστής Ασφαλείας FOS=1.12 μετά την εισαγωγή των τελικών μέτρων αντιστήριξης για μη σταθερό βαρυντικό πεδίο επιτάχυνσης 0.24g - Ψευδοστατική φόρτιση

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται FOS= 1.12. Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο μεταβαλλόμενος ρυθμός διάτμησης κατά την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Ο συντελεστής για τη παραπάνω ανάλυση προκύπτει ικανοποιητικός για οριζόντια επιτάχυνση σεισμού 0.24g. Η βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με την πρώτη ψευδοστατική ανάλυση του διαμορφωμένου αποκλειστικά με αναβαθμούς πρηνές ανέρχεται στο αξιόλογο ποσοστό 43.6%

## Κεφάλαιο 7 Σύνοψη διπλωματικής εργασίας

Το φυσικό πρανές μετά την απομάκρυνση των χαλαρών υλικών διαμορφώνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6.1 και υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας  $FOS = 0.96$  ο οποίος δεν είναι αποδεκτός για την ασφάλεια του απαιτείται (εικόνα 6.8). Οι συντελεστές ασφαλείας που επιδιώκονται βρίσκονται για στατικές συνθήκες φόρτισης  $FOS > 1.40$  ενώ για σεισμικές διεγέρσεις θα πρέπει  $FOS > 1.00$ . Επομένως πρέπει να εφαρμοσθούν κάποια μέτρα για τη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας προκειμένου να προκύψει  $FOS > 1.40$  για στατικές συνθήκες και ταυτόχρονα για σεισμική δόνηση που ανταποκρίνεται στη θέση του πρανούς να είναι  $FOS > 1.00$ . Στην συνέχεια μετά την διαμόρφωση αναβαθμών όπως φαίνεται στην εικόνα-6.9 ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται  $FOS = 1.19$  (εικόνα 6.16). Παρατηρείται δηλαδή βελτίωση της τάξης 23.9% ως προς τον συντελεστή ασφαλείας του φυσικού πρανούς. Η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης απεικονίζεται στις (εικόνες 6.12-6.13). Το διαμορφωμένο με αναβαθμούς πρανές υπό σεισμική διέγερση καταλήγει σε συντελεστή ασφαλείας  $FOS=0.78$ , ο οποίος δεν είναι αρκετός προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ασφάλεια. Στην εικόνα 6.23 απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας και ο ρυθμός διάτμησης για ψευδοστατική φόρτιση  $\alpha_s = 0.24g$ . Επίσης στις εικόνες 6.19-6.20 γίνεται καλύτερα αντιληπτή η αναπτυσσόμενη η επιφάνεια ολίσθησης υπό την ψευδοστατική φόρτιση.

Στη συνέχεια το επόμενο μέτρο αντιστήριξης που εφαρμόζεται είναι η εισαγωγή πασσάλων στο πόδα του πρανούς. Μετά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας παρατηρείται αμελητέα βελτίωση. Αυτό συμβαίνει διότι η επιφάνεια ολίσθησης η οποία αναπτύσσεται δεν φτάνει έως το σημείο έμπηξης των πασσάλων με αποτέλεσμα να μην λειτουργούν και επομένως να μη επιδρούν στη βελτίωση της ευστάθειας του πρανούς.

Το επόμενο μέτρο αντιστήριξης είναι η εισαγωγή διπλής σειράς αγκυρίων λίγο πιο πάνω από το πόδα του πρανούς, σε διεύθυνση σχεδόν κάθετη ως προς την κλίση και σε έκταση τέτοια ώστε να αγκυρώνονται στην υγιή βραχομάζα μακριά από την αναπτυσσόμενη επιφάνεια ολίσθησης. Ο συντελεστής ασφαλείας καταλήγει σε  $FOS = 1.29$ , παρατηρείται δηλαδή αύξηση της τάξης σχεδόν 8.4% δηλαδή μια αρκετά σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με το διαμορφωμένο κατά αναβαθμούς πρανές. Στην εικόνα 6.39 παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη της επιφάνεια ολίσθησης μειώνεται σημαντικά και σταματάει στη θέση της πρώτης σειράς αγκυρίων εικόνες 6.35–6.36.

Στο επόμενο βήμα τοποθετήθηκαν επιπλέον αγκύρια, οι σειρές έγιναν τέσσερις συνολικά και καταλήγουν σε συντελεστή ασφαλείας  $FOS = 1.58$  δηλαδή παρατηρείται βελτίωση της τάξης 22.4% σε σχέση με τη διπλή σειρά αγκυρίων. Στις εικόνες 6.43 – 6.44 παρατηρείται ότι η ενεργή επιφάνεια ολίσθησης μειώνεται και μεταφέρεται πλέον στο ανώτερο τμήμα του πρανούς. Η συνολική βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας μέχρι αυτό το σημείο από τη κατάσταση του φυσικού πρανούς και αφού έχουν εισαχθεί ως μέτρα αντιστήριξης οι διαμορφωμένοι αναβαθμοί και τέσσερις σειρές προεντεταμένων αγκυρίων είναι της τάξης του 64.6%.

Λόγω της σημαντικής μείωσης της επιφάνειας ολίσθησης και σύμπτυξη της στο ανώτερο τμήμα του πρανούς τοποθετήθηκαν ακόμα δυο σειρές προεντεταμένων αγκυρίων προκειμένου να περιοριστεί τελείως η ανάπτυξη κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και να αυξηθεί η ενίσχυση στο πρανές. Εισάγονται δυο σειρές στο ανώτερο τμήμα του πρανούς εικόνα 6.48 με αποτέλεσμα η επιφάνεια ολίσθησης να περιορίζεται αλλά να τείνει πλέον με μικρότερους ρυθμούς και μεγέθη να επεκταθεί βαθύτερα στο πρανές (εικόνες 6.51-6.52) . Ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται είναι  $FOS = 1.78$  με βελτίωση της τάξης 12.65%. Καθώς έχει επιτευχθεί πολύ καλή βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας με τα έξι αγκύρια για στατικές συνθήκες θα ελεγχθεί σε επόμενη φάση η σεισμική απόκριση του πρανούς για σεισμική επιτάχυνση  $a_s = 0.24g$ . Πράγματι ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται είναι  $FOS = 1.09$  (στην εικόνα 6.62 φαίνεται ο ρυθμός διάτμησης). Η βελτίωση του συντελεστή από τη πρώτη ανάλυση για σεισμικές συνθήκες φόρτισης είναι της τάξης 39.74%.

Παρατηρώντας λοιπόν την τάση της επιφάνειας ολίσθησης να επεκταθεί σε μεγαλύτερο βάθος και πέρα από το πόδα του πρανούς κρίθηκε σκόπιμο να περιορισθεί – προληφθεί καθώς σε τυχόν σεισμική διέγερση το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξελιχθεί πιο έντονα. Για το λόγο αυτό το μέτρο αντιστήριξης που εφαρμόζεται είναι οι πάσσαλοι που είχαν εισαχθεί στη τρίτη ανάλυση και οι οποίοι δεν είχαν καμία επίδραση καθώς η επιφάνεια ολίσθησης δεν επεκτεινόταν ως το σημείο έμπηξης τους. Έτσι ορίζονται τα τελικά μέτρα αντιστήριξης τα οποία είναι οι έξι σειρές αγκυρίων κατά τον ανοιχτό μέτωπο του πρανούς και δύο πάσσαλοι εικόνα 6.63. Υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας  $FOS = 1.83$  δηλαδή αύξηση της τάξης 2.8% από τα μέτρα αντιστήριξης των αναβαθμών και των τεσσάρων σειρών αγκυρίων. Η αναπτυσσόμενη επιφάνεια ολίσθησης που αναπτύσσεται κατά μήκος του πρανούς παρουσιάζεται στις εικόνα 6.66–6.67–6.70 και η συνολική βελτίωση στο στάδιο αυτό από τη κατάσταση του φυσικού πρανούς είναι 90.6%.

Μέτρα προστασίας	FOS	Βελτίωση συντελεστή ασφαλείας/Στάδιο
Κανένα (Φυσικό πρανές)	0.96	0%
Αναβαθμών	1.19	23.9%
Αναβαθμοί + Πάσσαλοι	1.20	0.84%
Δυο σειρές αγκυρίων	1.29	7.50%
Τέσσερις σειρές αγκυρίων	1.58	22.48%
Έξι σειρές αγκυρίων	1.78	12.65%
Έξι σειρές αγκυρίων + Πάσσαλοι	1.83	2.81%

Πίνακας 7.1 Συντελεστές ασφαλείας αναλύσεων

Τέλος τα τελικά μέτρα αντιστήριξης για σεισμική διέγερση  $a_s = 0,24g$  καταλήγουν σε συντελεστή ασφαλείας  $FOS = 1.12$ . η εισαγωγή πασσάλων βελτίωσε σε ποσοστό 2.75% τον συντελεστή ασφαλείας. Ο παραπάνω συντελεστής ασφαλείας είναι αποδεκτός για σεισμικές φορτίσεις καθώς είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα.

## Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα

Η μελέτη της ευστάθειας του δεξιού αντερείσματος και της επίδρασης των διαφόρων μέτρων που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω αναλύσεις υπέδειξαν ότι η φυλλιτική βραχομάζα ενισχύεται επαρκώς με συντελεστή ασφαλείας  $FOS=1.78$ , αποκλειστικά με τις έξι σειρές προ-εντεταμένων αγκυρίων για στατικές συνθήκες φόρτισης. Ενώ για ψευδοστατική φόρτιση επιτάχυνσης  $a_s= 0.24g$  υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας  $FOS=1.09$ , ο οποίος είναι επαρκής για σεισμικές συνθήκες φόρτισης. Όμως λόγω της φύσης και της σπουδαιότητας του έργου κρίθηκε σκόπιμο να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας για σεισμική φόρτιση με την εισαγωγή πασσάλων στο πόδα του πρανούς. Τελικά ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται  $FOS=1.83$  για στατικές συνθήκες και  $FOS =1.12$  για ψευδοστατική φόρτιση.

Μέτρα προστασίας	FOS	Βελτίωση συντελεστή ασφαλείας
Κανένα (Φυσικό πρανές)	0.96	0%
Αναβαθμών	1.19	24.0%
Αναβαθμοί +Πάσσαλοι	1.20	25.0%
Δυο σειρές αγκυρίων	1.29	34.4%
Τέσσερις σειρές αγκυρίων	1.58	64.6%
Έξι σειρές αγκυρίων	1.78	85.4%
Έξι σειρές αγκυρίων + Πάσσαλοι	1.83	90.6%

Πίνακας 8.1 Συντελεστές ασφαλείας αναλύσεων

Ειδικότερα, παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα της ανάλυσης με μέτρα αντιστήριξης έξι προ-εντεταμένα αγκύρια, η τάση της βραχομάζας να μεγαλώσει και να επεκταθεί βαθύτερα στο πρανές πέρα από τις πακτωμένες άκρες των αγκυρίων. Αυτή η προδιάθεση του αντερείσματος η οποία μπορεί να εκτονωθεί εντονότερα υπό την επίδραση ενός μεγάλου σεισμού προλαμβάνεται με την έμπηξη των πασσάλων. Ακόμα η εισαγωγή πασσάλων προλαμβάνει τη περίπτωση ανάπτυξης ρωών προς το σώμα του φράγματος από τυχόν διηθήσεις.

Συμπληρωματικά μελλοντικό αντικείμενο προς περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να είναι η επίδραση τυχούσας κατακρήμνισης στο πρανές και ο υπολογισμός συντελεστών ασφαλείας για διάφορες εντάσεις και διάρκειες βροχής. Η ανάπτυξη δυνητικών πιέσεων και ρωών θα μπορούσε να δημιουργήσει μια εντελώς διαφορετική θεώρηση των μέτρων αντιστήριξης και της ευστάθειας του πρανούς.

Επιπλέον η ανάλυση του ίδιου προβλήματος και των μέτρων αντιστήριξης σε διάφορα προγράμματα όπως το PHASE, UDEC, PLAXIS και η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να αποτελέσει μελλοντικό αντικείμενο μελέτης.

Τέλος, ενδιαφέρουσα μελέτη μπορεί να αποτελέσει η ανάλυση του αριστερού αντερείσματος στο φράγμα του Ιλαρίωνα το οποίο παρουσίασε αρκετά προβλήματα ως προς τη στεγανότητα. Το αριστερό αντέρεισμα παρουσιάζει συνδυασμό πετρωμάτων και ασυνεχειών, και επομένως η ανάλυση του, μέσω του προγράμματος UDEC θα ήταν αρκετά ενδιαφέρουσα καθώς υπάρχει η δυνατότητα για ορισμό ασυνεχειών.

## Βιβλιογραφία

- [1] Μπαντής Κ. Σταύρος, 2008, Τεχνική Γεωλογία, Gutenberg, Αθήνα
- [2] Σαμπατακάκης Ν., Κούκης Γ., 2002, Τεχνική Γεωλογία Εργων, Παπασωτηρίου, Αθήνα
- [3] Αγιουτάντης Ζ., 2002, Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων, Ίων, Αθήνα
- [4] Κωμοδρόμος Α., 2008, Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική, Κλειδάριθμος, Αθήνα
- [5] Πιπιλάκης Κ., 2010, Γεωτεχνική σεισμική μηχανική, ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη
- [6] Μαραγκός Χ., 2013 Τεχνικά έργα υποδομής, Εκδότης: Χ. Μαραγκός
- [7] Καββαδάς Μ., 2009, Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Συμεών, Αθήνα
- [8] Barnes G., 1995, Soil mechanics: principles and practice, Palgrave MacMillan Ltd.
- [9] Goodman R., 1989, Introduction to Rock Mechanics, Wiley
- [10] Goodman R., 1993, Engineering Geology, Wiley
- [11] Lynn M. Highland & Peter Bobrowsky, (2008), The Landslide Handbook – A guide to understanding landslides
- [12] Ρόζος Δ., (2007), Τεχνική γεωλογία, Αθήνα
- [13] Λιάκουρης Δ., 1995, Η γεωλογία και τα φράγματα της ΔΕΗ, ΔΕΚΠ/ΔΕΗ, Αθήνα
- [14] Καραγιαννίδης Α., Παπαϊωάννου, Ε., 2008, Υδροηλεκτρικά Έργα της ΔΕΗ Α.Ε. στον ποταμό Αλιάκμονα, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, 2008, Λάρισα, ΤΕΕ Τμ. Κεντρ. και Δυτ. Θεσσαλίας
- [15] Κ. Καραπαντελάκης, Γ. Εμμανουηλίδης, Β. Καραγιαννάκη & Χ. Μινόπετρος, 2008, ΥΗΕ - Ιαρίωνα: Τα σημαντικότερα γεωλογικά και γεωτεχνικά προβλήματα που



αντιμετώπισε η μελέτη και η κατασκευή μέχρι τώρα, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, 2008, Λάρισα, ΤΕΕ Τμ. Κεντρ. και Δυτ. Θεσσαλίας

- [16] Κ. Αναστασόπουλος, Κ. Αντωνακόπουλος & Χ.Παπαχατζάκη, Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων κατά την κατασκευή του Φράγματος Παρίωνα, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, 2008, Λάρισα, ΤΕΕ Τμ. Κεντρ. & Δυτ. Θεσσαλίας
- [17] Α.Γ. Παπαδημητρίου, Γ.Δ. Μπουκοβάλας, Κ. Αναστασόπουλος 2008, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, 2008, Λάρισα, ΤΕΕ Τμ. Κεντρ. και Δυτ. Θεσσαλίας
- [18] Koo R.C.H., Pappin J.W., Rule D.C., Wallace M.I. & YimArup I.P.H., Hong Kong  
Dynamic Analyses of Slopes in Hong Kong
- [19] Papanikolaou D., (1986). Late Cretaceous Paleogeography of the Metamorphic Hellenides. Geol. Geoph. Res., IGME. Hors serie volume in honor of Prof Papastamatiou, 315-328.
- [20] Christopher J. Vandewater, William M. Dunne, Matthew Mauldon, Eric C. Drumm, Vanessa Bateman, 2005, Classifying and Assessing the Geologic Contribution to Rockfall Hazard, Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XI, No.2
- [21] Hao Fengshan, Wang Lei, Application Study of FLAC in Analysis of Slope Stability, College of Civil and Traffic, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning.
- [22] Teoh Eang Aun, ‘ ‘ Numerical Modelling of Complex Slope Using FLAC/SLOPE’ ’, 2004, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying.
- [23] K. Soren, G. Budi, P. Sen, Research Scholar, ‘Stability analysis of open pit slope by finite difference method, Mining Engineering, Indian School of Mines, Jharkhand.

- [24] Michael Peter Serra October, 2013, Engineering & Sciences Geotechnical Stability Analysis Using Student Versions of FLAC, PLAXIS and SLOPE/W, University of Southern Queensland, faculty of health, engineering & sciences
- [25] Manual FLAC, (2014), Itasca Consulting Group co
- [26] Itasca FLAC (2015)  
<http://www.itascacg.com/consulting-services/civil-engineering>
- [27] Ινστιτούτο γεωλογικών και μεταλλικών ερευνών, (2015) Τμήμα γεωλογικού χάρτη περιοχής φράγματος Ιλαρίωνα
- [28] Google Earth,(2015).



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125609