



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ | ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ | ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΙΧΜΗΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ ΣΕ  
ΑΜΜΩΔΗ ΕΔΑΦΗ

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΤΑΣΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ

Καθηγητής Π.Θ.

Διευθυντής Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής

Βόλος 2023

© 2023 Βασιλική Τάσιου

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).

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΙΧΜΗΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ ΣΕ ΑΜΜΩΔΗ  
ΕΔΑΦΗ

Υπεβλήθη από την

Βασιλική Τάσιου

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

Η Διπλωματική Εργασία έλαβε την έγκριση των μελών της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

.....

Πολυξένη Καλλιόγλου  
Λέκτορας Π.Θ.

.....

Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος  
Καθηγητής Π.Θ.

.....

Γρηγόριος Τσινίδης  
Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Βόλος,  
22 Ιουνίου 2023



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Αιμίλιο Κωμοδρόμο για τη διαρκή υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε ως προς την εκπόνηση της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την κυρία Πολυξένη Καλλιόγλου και τον κύριο Γρηγόριο Τσινίδη για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην ανάγνωση και τον έλεγχο της παρούσας διπλωματικής.

# Επιρροή της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη

Βασιλική Τάσιου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος, Καθηγητής

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε άμμους. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές ανάλυσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>2D</sup>, για πάσσαλο ανηγμένου μήκους  $L/D = 20$ , σε ομογενές εδαφικό σχηματισμό, για διάφορες περιπτώσεις άμμου, από πολύ χαλαρές έως πυκνές. Αποτέλεσμα των αναλύσεων, αποτέλεσαν οι καμπύλες τάσης αιχμής – καθίζησης για κάθε περίπτωση άμμου για καθιζήσεις έως και 15% της διαμέτρου του πασσάλου, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν καταλλήλως ώστε να γίνει η αξιολόγηση της επίδρασης της γωνίας διασταλτικότητας. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους σχετικούς κανονισμούς για τον προσδιορισμό της απόκρισης της αιχμής πασσάλου σε άμμους και με προτεινόμενη μέθοδο για την αξιολόγηση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

*Λέξεις κλειδιά: Αντίσταση αιχμής, Πάσσαλοι, Γωνία Διασταλτικότητας, Παραμετρική Ανάλυση, Καθιζήσεις*

# Effect of dilatancy angle on pile base resistance in sandy soils

Vasiliki Tasiou

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Emiliios M. Comodromos, Professor

## Abstract

The aim of this thesis was to investigate the influence of the angle of dilation on the base resistance of a pile in sands. In particular, parametric analyses were carried out with the finite difference program FLAC<sup>2D</sup>, for a pile of normalized length  $L/D = 20$ , in a homogeneous soil formation, for various sand conditions, from very loose to dense sands. As a result of the analyses, base stress-settlement curves were obtained for each sand case for settlements up to 15% of the pile diameter, which were appropriately grouped to evaluate the effect of the angle of dilation. Furthermore, the results were compared with the relevant regulations for determining the pile tip response in sands and with a proposed method for evaluating the method used in this thesis.

*Keywords: Base Resistance, Piles, Dilatancy Angle, Parametric Analysis, Settlements*

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</b> .....	<b>13</b>
<b>Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b> .....	<b>14</b>
2.1 Γενικά .....	14
2.2 Αντίσταση αιχμής μεμονωμένου πασσάλου σε αμμώδη εδάφη και μέθοδοι προσδιορισμού της.....	14
2.3 Κανόνες σχεδιασμού για την αντίσταση αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη .....	16
2.3.1 Γερμανικός κανονισμός DIN1054 (DIN 2005) .....	16
2.3.2 Κανόνες σχεδιασμού του API (American Petroleum Institute).....	16
2.4 Μέθοδοι διερεύνησης της απόκρισης της αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη .....	17
<b>Κεφάλαιο 3 Διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη</b> .....	<b>22</b>
3.1 Παραμετρική Ανάλυση.....	22
3.1.1 Καταστατικός νόμος στοιχείων εδάφους .....	23
3.1.2 Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών .....	23
3.1.3 Διεπιφάνειες .....	23
3.1.4 Διαδικασία προσομοίωσης.....	24
3.2 Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου σε αμμώδες έδαφος.....	25
3.3 Σύγκριση καμπυλών τάσεων αιχμής – καθίζησης με τον γερμανικό κανονισμό DIN1054.....	29
3.4 Σύγκριση των καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης με τους κανόνες σχεδιασμού πασσάλων του API (American Petroleum Institute).....	32
3.5 Σύγκριση των καμπυλών τάσεων αιχμής – καθίζησης με προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού της απόκρισης της αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη.....	34
<b>Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα</b> .....	<b>40</b>
<b>Βιβλιογραφικές Πηγές</b> .....	<b>42</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	<b>44</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 3.1</b> : Παράμετροι καταστατικού νόμου των διεπιφανειών του FLAC2D .....	24
<b>Σχήμα 3.2</b> : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης για την περίπτωση άμμου κατηγορίας Β, για $\varphi = 33$ και τιμές της γωνίας διασταλτικότητας $\psi = 0,3$ και $10$ .....	25
<b>Σχήμα 3.3</b> : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης για την περίπτωση άμμου της κατηγορίας C, για $\varphi = 37$ και τις τιμές της γωνίας διαστολής $\psi = 0$ και $7$ .....	26
<b>Σχήμα 3.4</b> : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης για την περίπτωση άμμου της κατηγορίας D, για $\varphi = 40$ και τις τιμές της γωνίας διαστολής $\psi = 0, 5$ και $10$ .....	26
<b>Σχήμα 3.5</b> : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης και για τις τέσσερις κατηγορίες άμμων, όπου $\psi = 0$ και $\sigma'_{vo} = 200$ .....	28
<b>Σχήμα 3.6</b> : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης για διαφορετικές τιμές της αρχικής κατακόρυφης τάσης στην αιχμή του πασσάλου για $\varphi = 33$ , $\psi = 3$ και $G = 20$ MPa .....	28
<b>Σχήμα 3.7</b> : Προτεινόμενοι συσχετισμοί μεταξύ της αντίστασης διείσδυσης κώνου $q_c$ , της γωνίας τριβής $\varphi$ και της κατακόρυφης ενεργής τάσης $\sigma'_{vo}$ (Robertson & Campanella, 1983) .....	30
<b>Σχήμα 3.9</b> : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC <sup>2D</sup> με DIN4014 για την περίπτωση άμμου με $\psi = 3$ , $\varphi = 33$ , $\sigma'_{vo} = 800$ kPa και $G = 20$ MPa .....	31
<b>Σχήμα 3.10</b> : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC <sup>2D</sup> με DIN4014 για τις περιπτώσεις άμμου με $\psi = 0$ και $7$ , $\varphi = 37$ , $\sigma'_{vo} = 200$ kPa και $G = 30$ MPa .....	31
<b>Σχήμα 3.8</b> : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC <sup>2D</sup> με DIN4014 για την περίπτωση άμμου με $\psi = 3$ , $\varphi = 33$ , $\sigma'_{vo} = 400$ kPa και $G = 20$ MPa .....	31
<b>Σχήμα 3.11</b> : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC <sup>2D</sup> με DIN4014 για τις περιπτώσεις άμμου με $\psi = 0, 5$ και $10$ , $\varphi = 40$ , $\sigma'_{vo} = 200$ kPa και $G = 40$ MPa .....	32
<b>Σχήμα 3.12</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Α ( $\varphi = 30$ , $\psi = 0$ , $G = 10$ MPa, $\sigma'_{vo} = 200$ kPa) με $I_d = 0.17$ .....	36
<b>Σχήμα 3.13</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Β ( $\varphi = 33$ , $\psi = 3$ , $G = 20$ MPa, $\sigma'_{vo} = 100$ kPa) με $I_d = 0.2$ .....	36
<b>Σχήμα 3.15</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Β ( $\varphi = 33$ , $\psi = 3$ , $G = 20$ MPa, $\sigma'_{vo} = 400$ kPa) με $I_d = 0.42$ .....	37
<b>Σχήμα 3.14</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για τις περιπτώσεις άμμου Β ( $\varphi = 33$ , $\psi = 0,3$ και $10$ , $G = 20$ MPa, $\sigma'_{vo} = 200$ kPa) με $I_d = 0.31$ .....	37
<b>Σχήμα 3.16</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Β ( $\varphi = 33$ , $\psi = 3$ , $G = 20$ MPa, $\sigma'_{vo} = 800$ kPa) με $I_d = 0.51$ .....	38

<b>Σχήμα 3.17</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για τις περιπτώσεις άμμου C( $\varphi = 37$ , $\psi = 0$ και 7, $G = 30$ Μρα, $\sigma'_{vo} = 200$ kPa) με $I_d = 0.55$ .....	38
<b>Σχήμα 3.18</b> : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC <sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για τις περιπτώσεις άμμου D( $\varphi = 40$ , $\psi = 0$ , 5 και 10, $G =$ 40 Μρα, $\sigma'_{vo} = 200$ kPa) με $I_d = 0.69$ .....	39

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2.1 :</b> Χαρακτηριστικές τιμές της αντίστασης αιχμής $q_{b,k}$ συναρτήσει της αντίστασης διείσδυσης κώνου $q_{c,k}$ του δείκτη καθίζησης $s/D$ σύμφωνα με τον γερμανικό κανονισμό DIN1054 .....	16
<b>Πίνακας 2.2 :</b> Προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής από τους κανόνες σχεδιασμού του API (American Petroleum Institute) .....	17
<b>Πίνακας 3.1 :</b> Παράμετροι των εδαφικών υλικών που εξετάστηκαν .....	22
<b>Πίνακας 3.2 :</b> Χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής $q_{b,k}$ , εξαρτώμενες από τον δείκτη καθίζησης $s/D$ και τη μέση αντίσταση διείσδυσης κώνου $q_{c,k}$ σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN1054 .....	29
<b>Πίνακας 3.3 :</b> Προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής με βάση τον συντελεστή φέρουσας ικανότητας $N_q$ από το API (American Petroleum Institute) .....	33
<b>Πίνακας 3.4 :</b> Σύγκριση των τιμών των τάσεων αιχμής για καθίζηση 10%D με τις προτεινόμενες τιμές σχεδιασμού από το API .....	34



## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Οι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται ως μέσο θεμελίωσης τεχνικών έργων για την μεταφορά σημαντικών φορτίων σε βαθύτερες στρώσεις του εδάφους με υψηλή διατμητική αντοχή. Τα αξονικά φορτία παραλαμβάνονται από τους πασσάλους μέσω της πλευρικής τριβής και της αντίστασης αιχμής, και εκδηλώνονται αρχικά στο έδαφος με μικρές καθιζήσεις. Στις περιπτώσεις έδρασης του πασσάλου σε αμμώδη εδάφη, η παραλαβή των φορτίσεων γίνεται κυρίως μέσω της αντίστασης που αναπτύσσεται στην αιχμή του, καθώς η πλευρική τριβή ενεργοποιείται πλήρως με την ανάπτυξη πολύ μικρών καθιζήσεων της τάξης του 0.5–2% της διαμέτρου του πασσάλου, ενώ η πλήρης ενεργοποίηση της αντίστασης αιχμής πραγματοποιείται για καθιζήσεις μεγαλύτερες του 7% της διαμέτρου του πασσάλου και γι' αυτό είναι σημαντικός ο ακριβής προσδιορισμός της. Οι υπάρχοντες κανονισμοί για τον προσδιορισμό της απόκρισης της αιχμής εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στις προτεινόμενες τιμές τους τόσο για την οριακή αντίσταση αιχμής όσο και για την απόκριση της αιχμής σε μικρά επίπεδα καθιζήσεων. Τα θέματα αυτά διερευνήθηκαν από διάφορους ερευνητές με σκοπό τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού προφίλ απόκρισης της αιχμής που να λαμβάνει υπόψη τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά τη φόρτιση ενός πασσάλου και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζουν την απόκριση της αιχμής του. Σύμφωνα με αυτή τη λογική, η συγκεκριμένη εργασία είχε ως στόχο την διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε άμμο. Η γωνία διασταλτικότητας φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο σε συνθήκες μεγάλων περιοριστικών τάσεων και κατ'επέκταση στην περίπτωση πασσάλου σε αμμώδες έδαφος.

Στην παρούσα εργασία αρχικά γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, στο Κεφάλαιο 2, των μεθόδων που αναπτύχθηκαν από διάφορους ερευνητές για τον προσδιορισμό της αντίστασης αιχμής. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$  στην αντίσταση αιχμής  $q_b$  πασσάλου σε αμμώδη εδάφη και γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τον γερμανικό κανονισμό DIN1054(2005), τους κανόνες σχεδιασμού του API (American Petroleum Institute) και τα αποτελέσματα των προτεινόμενων εξισώσεων για τον προσδιορισμό αντίστασης αιχμής από τους Comodromos & Randolph (2023). Και τέλος, στο Κεφάλαιο 4 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Γενικά

Οι θεμελιώσεις με πασσάλους αποτελούν σημαντικό ερευνητικό κομμάτι της γεωτεχνικής μηχανικής, καθώς η συνεχής ανάπτυξη του αστικού περιβάλλοντος και η βιομηχανοποίηση απαιτούν την κατασκευή τεχνικών έργων που μεταφέρουν στο έδαφος σημαντικά μεγάλες φορτίσεις που δεν θα ήταν δυνατό να παραληφθούν από επιφανειακές στρώσεις του εδαφικού υλικού. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται λόγος για το κομμάτι της φέρουσας ικανότητας πασσάλου σε αμμώδη εδάφη που αφορά την αντίσταση στην αιχμή του. Οι υπάρχοντες κανόνες σχεδιασμού βασίζονται σε εμπειρικές και ημι-εμπειρικές μεθοδολογίες και δεν λαμβάνουν υπόψη τους φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση της αιχμής πασσάλου σε άμμους. Για το λόγο αυτό διενεργούνται δοκιμαστικές φορτίσεις, ωστόσο το υψηλό κόστος και ο απαιτούμενος χρόνος για την πραγματοποίησή τους καθιστούν δύο από τα βασικά μειονεκτήματα που οδήγησαν στη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Με τη χρήση αυτών, με κατάλληλα καταστατικά μοντέλα για την προσομοίωση του εδάφους και την αλληλεπίδραση του με τον πάσσαλο μπορούν να εξεταστούν διάφοροι συνδυασμοί των παραμέτρων που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού και να ληφθούν συμπεράσματα για τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση αιχμής πασσάλου σε άμμους. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε κάποιους από τους κανονισμούς που χρησιμοποιούνται για την διαστασιολόγηση των πασσαλοθεμελιώσεων και σε προτεινόμενα πλαίσια και αριθμητικές αναλύσεις που διενεργήθηκαν από ερευνητές για τη βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού.

### 2.2 Αντίσταση αιχμής μεμονωμένου πασσάλου σε αμμώδη εδάφη και μέθοδοι προσδιορισμού της

Η φέρουσα ικανότητα ενός μεμονωμένου πασσάλου αποτελείται από δύο συνιστώσες, την αντίσταση πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται κατά μήκος της επιφάνειας πασσάλου-εδάφους και την αντίσταση στην αιχμή του, και αντιστοιχεί σε πλήρη ανάπτυξη αυτών. Δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$R = R_b + R_s \quad (2.1)$$

όπου

$R_b$ , η οριακή αντίσταση αιχμής

$R_s$ , η οριακή παράπλευρη αντίσταση

Η οριακή αντίσταση αιχμής  $R_b$  υπολογίζεται με τη γεωτεχνική μέθοδο με χρήση της θεωρίας των επιφανειακών θεμελιώσεων ως εξής

$$R_b = A_b(cN_c + \sigma_{vb}N_q + 0.5\gamma DN_\gamma) \quad (2.2)$$

με  $q_b = cN_c + \sigma_{vb}N_q + 0.5\gamma N_\gamma \quad (2.3)$

όπου

$q_b$ , η αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας της αιχμής

$A_b$ , εμβαδόν της βάσης του πασσάλου

$c$ , συνοχή

$\sigma_{vb}$ , κατακόρυφη τάση στη βάση του πασσάλου

$\gamma$ , το ειδικό βάρος του εδάφους

$D$ , η διάμετρος του πασσάλου και

$N_c, N_q, N_\gamma$ , συντελεστές φέρουσας ικανότητας, οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, τη σχετική συμπιεστότητα του εδάφους και τη γεωμετρία του πασσάλου.

Για την περίπτωση πασσάλου σε αμμώδες έδαφος ο τρίτος όρος της εξίσωσης (2.2) παραλείπεται λόγω της μικρής διαμέτρου του πασσάλου σε σχέση με το μήκος του και ο πρώτος όρος μηδενίζεται λόγω της μηδενικής συνοχής κι επομένως η σχέση (2.2) παίρνει τη μορφή

$$R_b = A_b \sigma_{vb} N_q \quad (2.4)$$

Ή  $R_b = A_b q_b \quad (2.5)$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, κατά την φόρτιση ενός πασσάλου σε άμμο η αντίσταση της πλευρικής τριβής κινητοποιείται πλήρως για μικρές καθιζήσεις της τάξεως του 0.5-2% της διαμέτρου του πασσάλου, πολύ πριν την κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής, η οποία φτάνει στο μέγιστο σε επίπεδα καθιζήσεων μεγαλύτερα του 7% της διαμέτρου του πασσάλου, γι' αυτό είναι σημαντικής σημασίας για τον σχεδιασμό των πασσάλων ο προσδιορισμός της τελευταίας, εφόσον το υπολοιπόμενο φορτίο καλείται να παραληφθεί από την αιχμή. Η απόκριση της αιχμής μπορεί να προσδιοριστεί με χρήση δοκιμαστικών φορτίσεων, δοκιμές εργαστηρίου και αριθμητικές αναλύσεις. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της αντίστασης αιχμής πασσάλου σε άμμο βασίζονται σε χαρακτηριστικές παραμέτρους του εδαφικού υλικού, όπως η γωνία διατμητικής αντοχής, η σχετική πυκνότητα και η δυσκαμψία, ή σε αποτελέσματα αντίστασης διείσδυσης κώνου  $q_c$  από δοκιμές στατικής πενетроμέτρησης CPT και αριθμού χτύπων  $N_{SPT}$  από δοκιμή τυποποιημένης διείσδυσης SPT (Randolph 1994).

Γενικά, η αντίσταση αιχμής  $q_b$  σε αμμώση εδάφη υπολογίζεται από διάφορες μεθόδους και κανονισμούς μέσω ενός δείκτη φέρουσας ικανότητας  $N_q$ , πολλαπλασιασμένο με την κατακόρυφη ενεργό τάση στην αιχμή του πασσάλου  $\sigma'_{vb}$  (Vesic 1967). Ο συντελεστής  $N_q$  εξαρτάται από την γωνία διατμητικής αντοχής του εδάφους  $\phi$ , σχετίζεται με την σχετική του πυκνότητα  $I_d$  και διαφοροποιείται στους αντίστοιχους κανονισμούς ανάλογα με τη μέθοδο τοποθέτησης των πασσάλων. Σε άλλες περιπτώσεις μεθόδων και κανονισμών η αντίσταση αιχμής μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της αντίστασης διείσδυσης κώνου  $q_c$  από την δοκιμή στατικής πενетроμέτρησης CPT.

Αναλυτικότερα, υπάρχουν δύο είδη μεθοδολογιών για τον υπολογισμό της οριακής αντίστασης αιχμής  $q_b$ . Στην πρώτη κατηγορία ο προσδιορισμός της γίνεται με βάση γεωτεχνικές μεθόδους όπως αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω, που βασίζεται σε γεωτεχνικές παραμέτρους της διατμητικής αντοχής του εδάφους και πραγματοποιείται με απλούς υπολογισμούς. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν κανονισμοί που βασίζονται σε πίνακες με εμπειρικές τιμές και συσχετίζουν την αντίσταση αιχμής με το επίπεδο καθίζησης στη βάση του πασσάλου. Τέτοιοι είναι ο γερμανικός κανονισμός σχεδιασμού DIN1054 και οι κανόνες σχεδιασμού από το API (American Petroleum Institute).

## 2.3 Κανόνες σχεδιασμού για την αντίσταση αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη

### 2.3.1 Γερμανικός κανονισμός DIN1054 (DIN 2005)

Ο γερμανικός κανονισμός DIN1054 (DIN 2005) θέτει τους κανόνες για την φέρουσα ικανότητα πασσάλων και αποτελεί σημαντικό κομμάτι των γεωτεχνικών ζητημάτων στη Γερμανία. Σύμφωνα με αυτόν, η χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής  $q_{b;k}$  δίνεται από πίνακες με εμπειρικές τιμές της. Αυτές εξαρτώνται από την αντοχή του εδάφους που εκφράζεται μέσω της αντίστασης διείσδυσης κώνου  $q_c$  και την καθίζηση στη βάση του πασσάλου ανηγμένη προς τη διάμετρο του  $s/D$ . Για μη συνεκτικά εδάφη, με αντίσταση διείσδυσης κώνου  $q_c \geq 10$  MPa δίνεται ο πίνακας 2.1 με τις προτεινόμενες τιμές χαρακτηριστικής αντίστασης αιχμής για επίπεδα καθιζήσεων 2%, 3% και 10% της διαμέτρου  $D$  του πασσάλου. Στο επίπεδο καθίζησης 10% $D$  θεωρείται ότι κινητοποιείται η οριακή φέρουσα ικανότητα του πασσάλου, ενώ το επίπεδο 3% $D$  αντιστοιχεί σε κατάσταση λειτουργίας.

Πίνακας 2.1 : Χαρακτηριστικές τιμές της αντίστασης αιχμής  $q_{b;k}$  συναρτήσει της αντίστασης διείσδυσης κώνου  $q_{c;k}$  του δείκτη καθίζησης  $s/D$  σύμφωνα με τον γερμανικό κανονισμό DIN1054

Δείκτης καθίζησης $s/D$	Χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής $q_{b;k}$ (MPa) για μέση τιμή αντίστασης διείσδυσης κώνου $q_{c;k}$ (MPa)			
	10	15	20	25
0,02	0,7	1,05	1,4	1,75
0,03	0,9	1,35	1,8	2,25
0,1	2	3	3,5	4

Θα πρέπει να προστεθεί ότι οι παραπάνω προτεινόμενες τιμές αποτελούν συντηρητική προσέγγιση ώστε ο κανονισμός να καλύπτει προς τη μεριά της ασφάλειας, καθώς μπορούν να εφαρμοστούν ελλείψει αποτελεσμάτων δοκιμαστικών φορτίσεων.

### 2.3.2 Κανόνες σχεδιασμού του API (American Petroleum Institute)

Οι κανόνες σχεδιασμού του API προτείνουν χαρακτηριστικές τιμές της αντίστασης αιχμής  $q_b$  συναρτήσει ενός συντελεστή φέρουσας ικανότητας  $N_q$ , ο οποίος χαρακτηρίζει το εδαφικό υλικό με



βάση την σχετική πυκνότητα του. Οι προτεινόμενες τιμές αντιστοιχούν σε οριακή καθίζηση 10% της διαμέτρου του πασσάλου. Στον πίνακα 2.2 δίνονται οι παραπάνω τιμές.

Πίνακας 2.2 : Προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής από τους κανόνες σχεδιασμού του API (American Petroleum Institute)

Κανόνες σχεδιασμού	Πυκνότητα εδάφους	Συντελεστής φέρουσας ικανότητας $N_q$	Τιμή αντίστασης αιχμής $q_{b,design}$ (MPa)
American Petroleum Institute (API 2003)	Πολύ χαλαρή έως χαλαρή άμμος	8	1.9
	Χαλαρή έως μέτρια πυκνή άμμος	12	2.9
	Μέτρια έως πυκνή άμμος	20	4.8
	Πυκνή έως πολύ πυκνή άμμος	40	9.6
	Πύκνη έως πολύ πυκνή άμμος με χαλίκια	50	12.0

Όσον αφορά τις τιμές σχεδιασμού για τους δύο παραπάνω κανονισμούς, εφαρμόζονται μερικοί συντελεστές επί των χαρακτηριστικών αντιστάσεων, σε αντίθεση με παλιότερες εκδόσεις των κανονισμών όπου χρησιμοποιούνταν ολικός συντελεστής ασφαλείας επί του οριακού φορτίου για τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου. Αναλυτικότερα, για τον σχεδιασμό σε οριακές συνθήκες εφαρμόζονται μερικοί επαυξητικοί συντελεστές για τα φορτία (1.35 με 1.5, σύμφωνα και με τις διατάξεις του EN 1997-1) και μερικοί μειωτικοί συντελεστές για τις αντιστάσεις (1.1 έως 1.45, σύμφωνα και με τις διατάξεις του EN 1997-1), με αποτέλεσμα ο συνολικός συντελεστής ασφαλείας να ισούται με 2, ίσος με τον ολικό συντελεστή που χρησιμοποιούνταν σε πρότερη ισχύουσα κατάσταση. Όσον αφορά, την κατάσταση λειτουργίας, το επιτρεπόμενο φορτίο μπορεί να υπολογιστεί ως το μισό του οριακού.

#### 2.4 Μέθοδοι διερεύνησης της απόκρισης της αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη

Οι διαφορές που παρατηρούνται στις προτεινόμενες τιμές των προαναφερόμενων κανονισμών και η έλλειψη ολοκληρωμένης πρόβλεψης της απόκρισης της αιχμής από τα πρώτα βήματα της φόρτισης του πασσάλου δημιούργησαν την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος της αντίστασης αιχμής και συνολικότερα της φέρουσας ικανότητας πασσάλων σε άμμους. Συγκεκριμένα, στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση θα αναφερθούν οι έρευνες που διενεργήθηκαν από τους Randolph et al. (1994), τους Lee & Salgado (1999) και τους Comodromos & Randolph (2023) για τον προσδιορισμό της αντίστασης αιχμής και των παραμέτρων του εδάφους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της.

Ο Randolph et al. (1994) διερεύνησε την αντίσταση αιχμής εμπυγνυόμενου πασσάλου σε άμμους με χρήση της αναλογίας μεταξύ της αστοχίας έδρασης και της διαστολής κοιλότητας (Gibson 1950), μέσω της σχέσης

$$q_b = p_{lim}(1 + \tan \varphi' \tan \alpha) \quad (2.6)$$

Όπου

$q_b$ , οριακή αντίσταση αιχμής

$p_{lim}$ , ισοτροπική τάση που ασκείται στην κοιλότητα

$\varphi'$ , γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση  $\varphi_{cv}$

$\alpha$ , γωνία που εξαρτάται από την  $\varphi_{cv}$ ,  $\alpha = (45 + \varphi_{cv}/2)$

Σκοπός της διερεύνησης ήταν ο προσδιορισμός της αντίστασης αιχμής με ακρίβεια και συνέπεια στην πραγματική συμπεριφορά του εδάφους και ο έλεγχος της επίδρασης ορισμένων χαρακτηριστικών του εδάφους στην αντίσταση αιχμής. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν την σχετική πυκνότητα  $I_d$ , την μέση τάση  $p'$ , το μέτρο διάτμησης  $G$  και τις γωνίες διατμητικής αντοχής  $\varphi$  και διασταλτικότητας  $\psi$ .

Αναλυτικότερα, για τον προσδιορισμό της  $p_{lim}$ , εφαρμόστηκαν λύσεις κλειστής μορφής των Carter κ.α. (1986) και Yu & Houlsby (1991) βασιζόμενες στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb για τέλεια ελαστοπλαστικό έδαφος με εισαγόμενες τις παραμέτρους της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\varphi'$ , της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$ , της μέσης ενεργού τάσης  $p'$ , του μέτρου διάτμησης  $G$  και του λόγου Poisson  $\nu$ . Οι γωνίες διασταλτικότητας  $\psi$  και διατμητικής αντοχής  $\varphi$  λήφθηκαν ως σταθερές. Ωστόσο, σε ένα πραγματικό έδαφος οι τιμές τους μεταβάλλονται με την μεταβολή της μέσης τάσης, με χαρακτηριστικές τις τιμές τους στη μέγιστη αντοχή ( $\varphi_{max}$ ,  $\psi_{max}$ ) και την κρίσιμη κατάσταση του εδάφους ( $\varphi_{cv}$ ,  $\psi=0$ ). Επομένως, κρίθηκε καταλληλότερο η χρήση μέσης τιμής των γωνιών, μεταξύ της μέγιστης τιμής τους και της τιμής τους στην κρίσιμη κατάσταση, ώστε να συμπεριληφθεί η επιρροή της μεταβολής της μέσης τάσης.

Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που προτάθηκαν από τον Bolton (1986) που συνδέουν την μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής  $\varphi'$  με τη γωνία διασταλτικότητας  $\psi$ . Σύμφωνα, με τον Bolton η μέγιστη γωνία τριβής και η γωνία διασταλτικότητας συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός δείκτη διασταλτικότητας  $I_r$ , που εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα  $I_d$  και τη μέση τάση  $p'$ . Επομένως, για διάφορες τιμές της σχετικής πυκνότητας και της μέσης τάσης λήφθηκαν και οι αντίστοιχες γωνίες  $\psi$  και  $\varphi'$ . Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε και κατάλληλη σχέση για την συσχέτιση του μέτρου διάτμησης με την σχετική πυκνότητα και την μέση τάση.

Τέλος, αποδείχτηκε μέσω της εφαρμογής του προτεινόμενου πλαισίου σημαντική η επιρροή της σχετικής πυκνότητας, της γωνίας διασταλτικότητας, του επιπέδου των τάσεων και του μέτρου διάτμησης στην αντίσταση αιχμής του πασσάλου και σε συμφωνία με άλλη προσέγγιση σχεδιασμού πασσάλων.

Οι Lee & Salgado (1999) διερεύνησαν την απόκριση της αιχμής πασσάλου  $q_b$  σε άμμους για έγχυτους πασσάλους εκτελώντας αριθμητική ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στόχος της μελέτης ήταν η πρόταση τιμών σχεδιασμού του λόγου  $q_b/q_c$ , όπου  $q_c$  η αντίσταση διείσδυσης κώνου, για επίπεδα καθίζησης στα οποία ενεργοποιείται η αντίσταση αιχμής, συγκεκριμένα για καθιζήσεις 5 και 10% της διαμέτρου του πασσάλου.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε για διάφορες τιμές της σχετικής πυκνότητας και της μέσης τάσης στη βάση του πασσάλου. Περιελάμβανε ένα υπερβολικό μοντέλο για την περιγραφή της σχέσης τάσεων - παραμορφώσεων επιτρέποντας τη μεταβολή του μέτρου διάτμησης  $G$  συναρτήσει της πρώτης αναλλοίωτης του τανυστή των τάσεων  $I_1$  και της δεύτερης αναλλοίωτης του αποκλίνοντα τανυστή  $J_2$ . Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους κατά την αστοχία χρησιμοποιήθηκε μια μορφή του κριτηρίου Drucker – Prager ενώ λόγω της υπερεκτίμησης της ογκομετρικής παραμόρφωσης από τη χρήση συζευγμένου κανόνα ροής του μοντέλου Drucker – Prager, χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση πλαστικού δυναμικού του von Mises με μη συζευγμένο κανόνα ροής.

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής  $\varphi_p$  για τον υπολογισμό των παραμέτρων του κριτηρίου αστοχίας, έγινε χρήση των εξισώσεων που προτάθηκαν από τον Bolton (1986). Συγκεκριμένα, η μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής ποσοτικοποιείται μέσω της γωνίας τριβής στην κρίσιμη κατάσταση  $\varphi_c$ , η οποία εξαρτάται από την ορυκτολογία του εδάφους (Bolton 1986) και την μέγιστη γωνία διασταλτικότητας  $\psi_p$ , η οποία είναι συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας  $I_d$  και της μέσης τάσης  $p'$ . Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι η γωνία διασταλτικότητας  $\psi$  αυξάνει με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας και μειώνεται με την αύξηση της μέσης τάσης στη βάση του πασσάλου, επομένως η επιφάνεια θραύσης είναι μη γραμμική.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης των Lee & Salgado (1999), δημιουργήθηκαν διαγράμματα της αντίστασης αιχμής με την αντίστοιχη καθίζηση για τις διάφορες τιμές σχετικής πυκνότητας που εξετάστηκαν και τη μέση τάση στη βάση του πασσάλου. Στη συνέχεια έγινε κανονικοποίηση αυτών, με την αντίσταση αιχμής ως προς την αντίσταση διείσδυσης κώνου και της καθίζησης ως προς τη διάμετρο του πασσάλου. Η αντίσταση διείσδυσης κώνου υπολογίστηκε από το πρόγραμμα CONPOINT (Salgado et al. 1997b). Προέκυψαν τιμές του λόγου  $q_b/q_c$  για επίπεδα καθίζησης έως και 20% της διαμέτρου του πασσάλου, οι οποίες έδειξαν ότι για πυκνότερες άμμους απαιτείται μεγαλύτερη καθίζηση ώστε η αντίσταση αιχμής να πάρει τιμή που φτάνει την ενεργοποίηση της αντοχής του εδάφους.

Η παραπάνω μελέτη βασίστηκε στη λογική, ότι οι προτεινόμενοι κανόνες σχεδιασμού για έγχυτους πασσάλους ορίζουν επίπεδα καθίζησης, στα οποία επιτυγχάνονται η κατάσταση λειτουργίας και η οριακή κατάσταση φόρτισης του πασσάλου. Οι τιμές του λόγου  $q_b/q_c$  που προτάθηκαν για κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής σε καθιζήσεις 5 και 10% της διαμέτρου, έδειξαν ότι οι αντίστοιχες τιμές που προτείνονται από κανόνες σχεδιασμού και άλλους ερευνητές μπορεί να είναι

αρκετά μεγάλες και για τον λόγο αυτό τοποθετούνται άνω όρια στις τιμές τους, ενώ οι τιμές του λόγου  $q_b/q_c$  της συγκεκριμένης μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς οριακές τιμές.

Οι Comodromos & Randolph (2023) διερεύνησαν την αντίσταση αιχμής πασσάλου σε άμμους για έγχυτους πασσάλους, μέσω παραμετρικής ανάλυσης με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>2D</sup>. Στόχος της μελέτης ήταν η πρόταση σχέσεων προσδιορισμού της αντίστασης αιχμής για οριακή καθίζηση 10% της διαμέτρου του πασσάλου και για την απόκριση της αιχμής με το επίπεδο καθίζησης για τον πλήρη προσδιορισμό του προφίλ της αιχμής για διάφορους τύπους άμμου.

Αναλυτικότερα, η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για διάφορους συνδυασμούς της σχετικής πυκνότητας  $I_d$  και της αρχικής κατακόρυφης τάσης στη βάση του πασσάλου  $\sigma'_{vb}$ . Δημιουργήθηκε κατάλληλο καταστατικό μοντέλο με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, διευρυμένο ώστε να επιτρέπει τη μεταβολή της γωνίας διατμητικής αντοχής και της γωνίας διασταλτικότητας σύμφωνα με την σχετική πυκνότητα και τη μέση τάση κατά την επίλυση. Η μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής δίνεται ως εξής

$$\varphi' = \begin{cases} 32 - 3 \ln\left(\frac{p'}{p_a}\right) + 13I_d & \forall p': p' > p_a \\ 32 + 13I_d & \forall p': p' \leq p_a \end{cases} \quad (2.7)$$

όπου

$p'$ , η μέση ενεργός τάση στη βάση του πασσάλου

$p_a$ , η ατμοσφαιρική πίεση

Επιπρόσθετα, ακολουθώντας την μελέτη του Bolton (1986, 1987) για την γωνία διασταλτικότητας και τον προσδιορισμό της μέσω ενός δείκτη διασταλτικότητας  $I_r$ , χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις για τον προσδιορισμό της

$$\psi = 1.875 I_r \quad (2.8)$$

όπου

$$I_r = \begin{cases} 5I_d - 1 & \forall p': p' \leq 150 \\ I_d \left(5.4 - \ln\frac{p'}{p_a}\right) - 1 & \forall p': p' > 150 \end{cases} \quad (2.9)$$

Συμπεριλήφθηκαν εξισώσεις για τον προσδιορισμό του λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της μέσης τάσης και για τον προσδιορισμό των μέτρων διάτμησης  $G$  και διόγκωσης  $K$ , συναρτήσει της μέσης τάσης και της σχετικής πυκνότητας. Συνολικά, το καταστατικό μοντέλο αποτυπώνει την εξέλιξη των παραμέτρων της μέσης τάσης και της σχετικής πυκνότητας στις τιμές της γωνίας διατμητικής αντοχής, της γωνίας διασταλτικότητας και των μέτρων διάτμησης και διόγκωσης και κατά συνέπεια στην απόκριση της αντίστασης αιχμής.

Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης προέκυψαν εξισώσεις προσδιορισμού της απόκρισης της αιχμής σύμφωνα με το επίπεδο καθίζησης και της οριακής αντίστασης αιχμής για επίπεδο καθίζησης 10% της διαμέτρου, όπως φαίνεται παρακάτω

$$q_{b,10} = (0.1 + 3.6I_{d,o}) \sqrt{\frac{\sigma'_{vo}}{p_a}} + \frac{0.004}{I_{d,o}^4} \quad (2.10)$$

$$q_b = \frac{q_{b,10}}{4} \left(\frac{S_{ns}}{0.01}\right)^{0.6} \quad (2.11)$$

όπου

$S_{ns}$ , η κανονικοποιημένη καθίζηση ως προς τη διάμετρο του πασσάλου

$I_{d,o}$ , η αρχική σχετική πυκνότητα

$\sigma'_{vo}$ , η αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση

Από τις καμπύλες των διαγραμμάτων αντίστασης αιχμής – καθίζησης που προέκυψαν για τις διάφορες περιπτώσεις άμμου σημειώθηκε σημαντική η επιρροή της σχετικής πυκνότητας και της αρχικής κατακόρυφης ενεργού τάσης στην αντίσταση αιχμής. Επιπλέον, η σύγκριση με τους κανόνες σχεδιασμού που προαναφέρθηκαν, έδειξε την προσέγγιση των Comodromos & Randolph να βρίσκεται ανάμεσα στις προτεινόμενες τιμές τους, με τον DIN1054 να προτείνει συντηρητικές τιμές αντίστασης αιχμής και το API να υπερεκτιμά την αντίσταση αιχμής για μικρές καθιζήσεις.

Συνοψίζοντας, οι προαναφερόμενες μελέτες είχαν στόχο τον προσδιορισμό της απόκρισης της αιχμής πασσάλου σε άμμους και την συμπερίληψη σε αυτές των παραγόντων που επηρεάζουν καθοριστικά την αντίσταση αιχμής. Συγκεκριμένα, η γωνία διασταλτικότητας που είναι και το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας φάνηκε να κατέχει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του εδάφους και να συνδέεται τόσο με την σχετική πυκνότητα όσο και με την μέση τάση στη βάση του πασσάλου. Επίσης, η άμεση συσχέτιση της με την γωνία διατμητικής αντοχής του εδάφους, όπως φαίνεται και από τις σχέσεις του Bolton(1986, 1987) αλλά και από τη χρήση αυτών στις προαναφερόμενες παραμετρικές αναλύσεις και το προτεινόμενο πλαίσιο για την εύρεση της αντίστασης αιχμής την καθιστά σημαντικό χαρακτηριστικό του εδάφους, ιδιαίτερης σημασίας για τη συνθήκη πασσάλου σε άμμους.

## Κεφάλαιο 3 Διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη

### 3.1 Παραμετρική Ανάλυση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης την επιρροή της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε άμμους. Για την πραγματοποίηση μη-γραμμικής επίλυσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>2D</sup>.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης εξετάστηκαν δώδεκα διαφορετικές περιπτώσεις ομογενών αμμωδών εδαφών. Αυτές χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες άμμων, τις A, B, C και D με γωνίες τριβής  $\varphi = 30, 33, 37$  και  $40$ , αντίστοιχα. Για κάθεμία από τις άμμους, επιλέχθηκαν διάφορες τιμές για τη γωνία διασταλτικότητας  $\psi$  (Πίνακας 3.1), ώστε να ελεγχθεί η επιρροή της στην αντίσταση αιχμής του πασσάλου. Επιπρόσθετα, λήφθηκαν τιμές μέτρου διάτμησης  $G = 10, 20, 30$  και  $40$  MPa που αντιστοιχούν στις κατηγορίες A, B, C και D. Όσον αφορά το ειδικό βάρος του εδάφους  $\gamma$ , εφαρμόστηκε τιμή  $\gamma = 10$  kN/m<sup>3</sup> που αντιστοιχεί σε αρχική κατακόρυφη ενεργή τάση  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa στη βάση του πασσάλου. Εφαρμόστηκαν επιπλέον, τιμές ειδικού βάρους  $\gamma = 5, 20, 40$  kN/m<sup>3</sup> σε περιπτώσεις άμμων της κατηγορίας B, ώστε να εξεταστεί η επίδραση της μέσης ενεργής τάσης  $\sigma'_m$  και της  $\sigma'_{vo}$  για τιμές 100, 400 και 800 kPa αντίστοιχα. Οι ιδιότητες των εδαφών παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1. Επιπρόσθετα, οι εδαφικές συνθήκες γύρω από τον πάσσαλο θεωρούνται οι ίδιες με αυτές πριν την τοποθέτηση του πασσάλου, επομένως οι τιμές των τάσεων αιχμής που λήφθηκαν αντιστοιχούν σε έγχυτους πασσάλους.

Πίνακας 3.1 : Παράμετροι των εδαφικών υλικών που εξετάστηκαν

Soil type	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi$	$\psi$	G (MPa)
A	10	30	0	10
B	10	33	0	20
			3	
	10			
	3			
C	10	37	0	30
			7	
			3	
D	10	40	0	40
			5	
			10	

Ο πάσσαλος έχει μήκος  $L = 20$  m και διάμετρο  $D = 1.0$  m και η συμπεριφορά του θεωρείται γραμμική ελαστική, με μέτρο ελαστικότητας  $E = 31.9$  GPa και λόγο Poisson  $\nu = 0.2$ . Για την προσομοίωση του μοντέλου εδάφους πασσάλου υιοθετήθηκε παραδοχή αξονοσυμμετρίας, καθώς το έδαφος είναι ομογενές.

### 3.1.1 Καταστατικός νόμος στοιχείων εδάφους

Ειδικότερα, για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό μοντέλο τέλει ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς Mohr – Coulomb, με μη συζευγμένο κανόνα ροής. Σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb η διατμητική αντοχή αυξάνει αυξανόμενης της ορθής τάσης στο επίπεδο θραύσης. Οι τιμές των γωνιών διατμητικής αντοχής  $\varphi$  και διασταλτικότητας  $\psi$  εισάγονται ως σταθερές στον καταστατικό νόμο. Η σταθερή τιμή της γωνίας  $\varphi$  εκφράζει την επιφάνεια θραύσης του μοντέλου εδάφους, η οποία δεν αλλάζει με την αύξηση της μέσης ενεργού τάσης. Αντίστοιχα, η τιμή της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$  ελέγχει το μέγεθος της πλαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης και διατηρείται σταθερή εφόσον το επίπεδο των τάσεων φτάσει να ταυτίζεται με την επιφάνεια θραύσης. Πλεονέκτημα του κριτηρίου Mohr-Coulomb αποτελεί η αποδεδειγμένη ισχύς του για πολλές κατηγορίες εδαφών.

### 3.1.2 Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών

Το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών κατά τις επιλύσεις είναι πυκνό στα όρια του πασσάλου – εδάφους με μεγαλύτερη πύκνωση στην αιχμή του για πιο λεπτομερή αποτύπωση της απόκρισής του, ενώ το μέγεθος των στοιχείων αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο πλησιάζοντας τα όρια του πλέγματος. Επιπλέον, στα πλευρικά όρια του δεσμεύονται οι μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση  $x$ , και στη βάση του κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ .

### 3.1.3 Διεπιφάνειες

Ακόμη, κρίνεται αναγκαία η χρήση διεπιφανειών ανάμεσα στα στοιχεία του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασής τους, όπου ολίσθηση και/ή διαχωρισμός μπορεί να προκύψουν. Τα στοιχεία διεπιφανειών που προσφέρει ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>2D</sup> έχουν ιδιότητες τριβής, συνοχής, διαστολής, ορθής και διατμητικής δυσκαμψίας και εφελκυστικής αντοχής (Σχήμα 3.1.1).

Το καταστατικό μοντέλο των στοιχείων χαρακτηρίζεται από γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής του Coulomb, το οποίο περιορίζει τη διατμητική τάση που ασκείται σε έναν κόμβο της διεπιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση

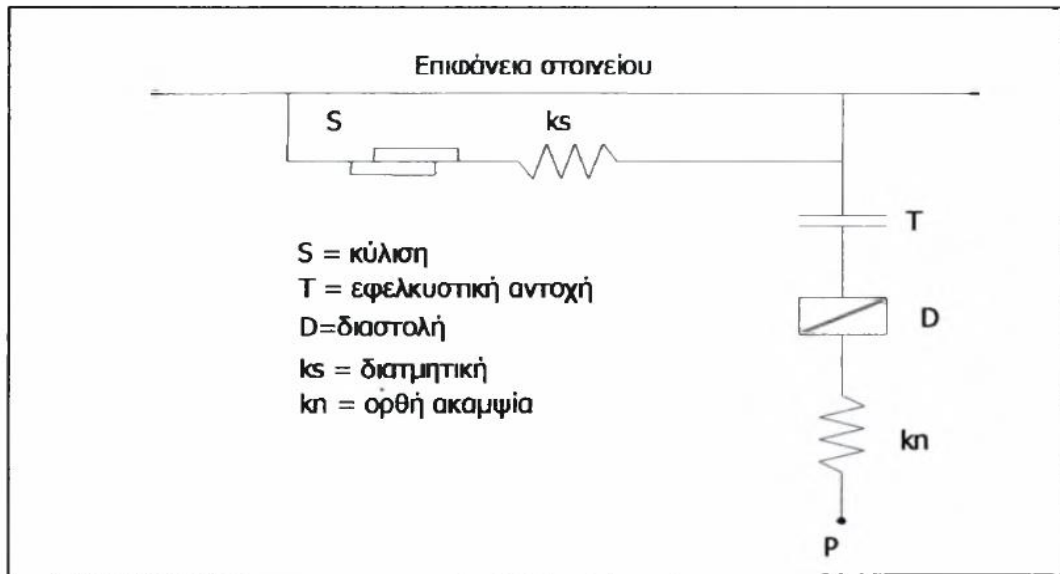
$$F_{s,max} = \tan\delta F_n \quad (3.1)$$

όπου,

$F_{s,max}$ , οριακή διατμητική τάση στη διεπιφάνεια εδάφους – πασσάλου

$\delta$ , γωνία τριβής μεταξύ εδάφους – πασσαλού

$F_n$ , ορθή τάση στη διεπιφάνεια



Σχήμα 3.1 : Παράμετροι καταστατικού νόμου των διεπιφανειών του FLAC2D

Οι ορθές και διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια καθορίζονται από τις σχέσεις

$$F_n^{(t+\Delta t)} = F_n^{(t)} - k_n \Delta u_n^{(t+1/2\Delta t)}L \quad (3.2)$$

$$F_s^{(t+\Delta t)} = F_s^{(t)} - k_s \Delta u_s^{(t+1/2\Delta t)}L \quad (3.3)$$

όπου

$k_n$ , ορθή δυσκαμψία

$\Delta u_n$ , διάνυσμα σχετικής ορθής μετατόπισης

$k_s$ , διατμητική δυσκαμψία

$\Delta u_s$ , διάνυσμα σχετικής διατμητικής μετατόπισης

$L$ , μήκος τμήματος της διεπιφάνειας

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, κατά μήκος του πασσάλου, χρησιμοποιήθηκε λεία διεπιφάνεια με μηδενική τριβή, συνοχή και γωνία διαστολής, επιτρέποντας την ολίσθηση ανάμεσα στον πάσσαλο και το έδαφος. Ακόμη, όσον αφορά την αιχμή του πασσάλου όπου συναντά το έδαφος χρησιμοποιείται διεπιφάνεια που ενώνει τα στοιχεία πασσάλου-εδάφους, επιτρέποντας την αλληλεπίδρασή τους και τη μεταφορά δυνάμεων.

### 3.1.4 Διαδικασία προσομοίωσης

Όσον αφορά τη διαδικασία προσομοίωσης, περιλαμβάνει αρχικά τη δημιουργία του καννάβου, τον προσδιορισμό των διεπιφανειών και των συνοριακών συνθηκών. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο καταστατικός νόμος που διέπει τη συμπεριφορά των υλικών του πασσάλου και του εδάφους, με τις παραμέτρους των υλικών. Ακολουθεί ο υπολογισμός του αρχικού εντατικού πεδίου, όπου οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις  $\sigma'_{vo}$  ορίζονται από την τάση του υπερκείμενου εδάφους για τις τιμές του



ειδικού βάρους  $\gamma$  που φαίνονται στον πίνακα 3.1 και οι ενεργές οριζόντιες τάσεις προκύπτουν από τη σχέση

$$\sigma'_{ho} = K_o \sigma'_{vo} \quad (3.4)$$

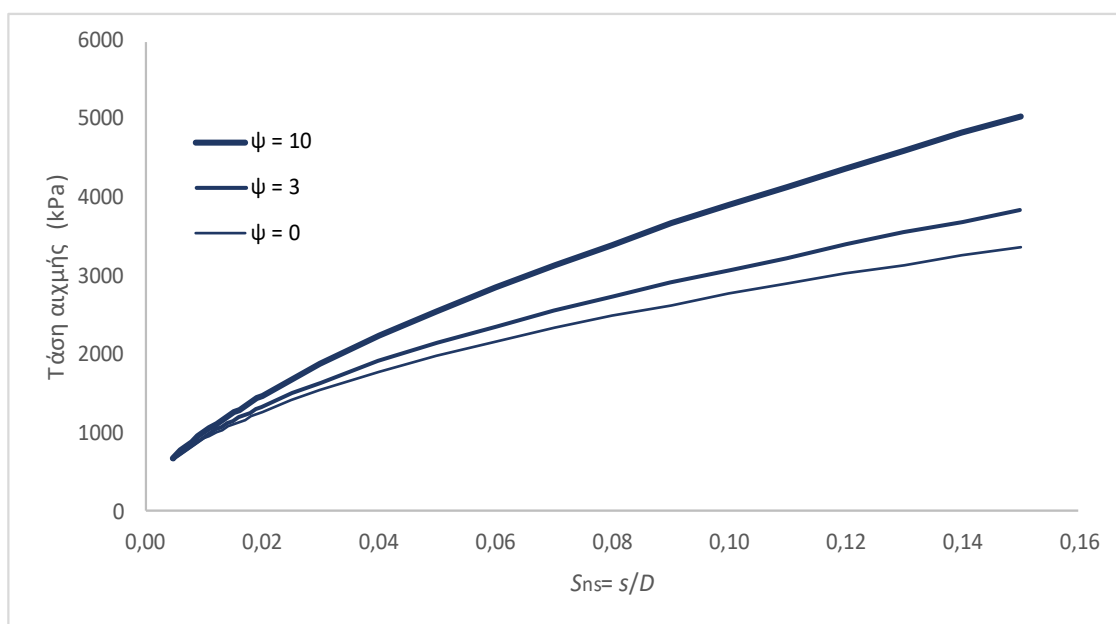
με 
$$K_o = 1 - \sin\varphi' \quad (3.5)$$

Τέλος, πραγματοποιείται η επιβολή του φορτίου, μέσω μετακίνησης στην κορυφή του πασσάλου και η επίλυση, η οποία ολοκληρώνεται μετά από 16 στάδια επιβολής του φορτίου, σε καθίζηση του 30% της διαμέτρου του πασσάλου  $D$ . Για την ανάκληση των τιμών των παραμέτρων ενδιαφέροντος (καθιζήσεις και τάσεις αιχμής στον πάσσαλο) χρησιμοποιήθηκαν ειδικές υπορουτίνες γραμμένες σε γλώσσα FISH και τα αποτελέσματα εισάχθηκαν στο πρόγραμμα MS EXCEL.

### 3.2 Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου σε αμμώδες έδαφος

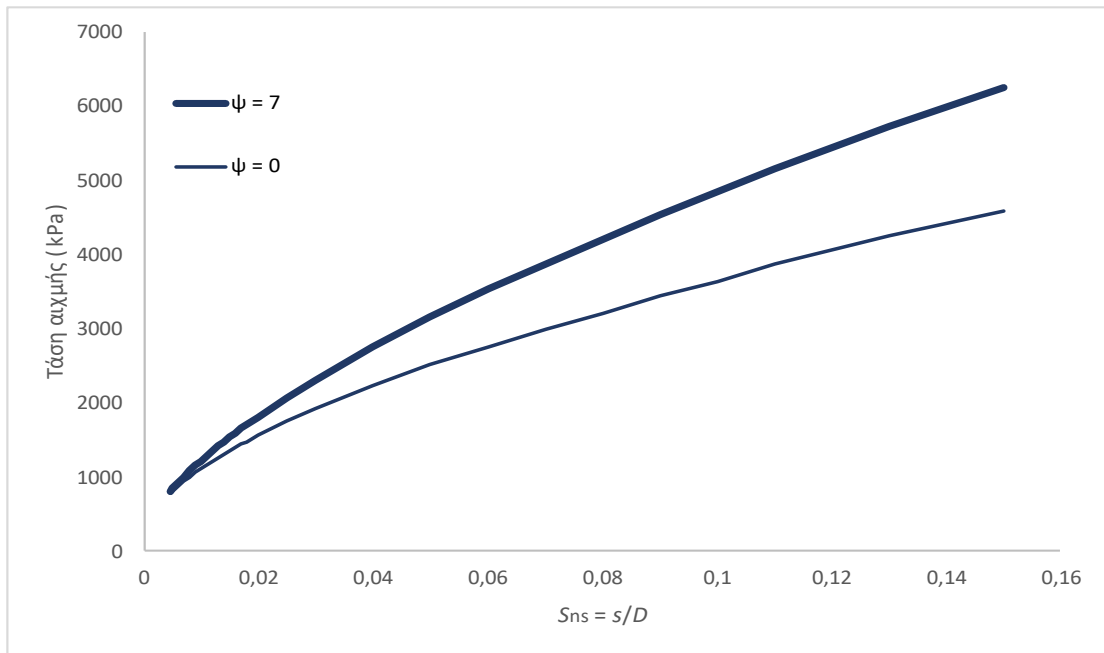
Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου, εξετάζονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων και αξιολογείται η επίδραση της γωνίας διαστολής στην αντίσταση αιχμής του πασσάλου. Οι επιλύσεις για τον πάσσαλο πραγματοποιούνται για τις δώδεκα κατηγορίες μη-συνεκτικών εδαφών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για να διερευνηθεί η επίδραση της γωνίας διαστολής στις τάσεις αιχμής του πασσάλου, εξετάστηκαν διάφορες τιμές της για την κάθε κατηγορία άμμου.

Η απόκριση της αιχμής του πασσάλου που λήφθηκαν από τις επιλύσεις δίνονται στα σχήματα 3.2, 3.3 και 3.4 για τις γωνίες τριβής  $\varphi = 33, 37$  και  $40$  αντίστοιχα, και για αρχική κατακόρυφη ενεργή τάση  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa. Η επίδραση της γωνίας διαστολής  $\psi$  παρουσιάζεται στα διαγράμματα. Η μορφή των καμπυλών της σχέσης τάση αιχμής – καθίζηση παρουσιάζεται να είναι κοίλη και να διατηρεί το ίδιο σχήμα για τις περιπτώσεις άμμου που εξετάζονται, με σαφή διαφορά στο μέγεθος που οφείλεται στην γωνία διαστολής  $\psi$ .

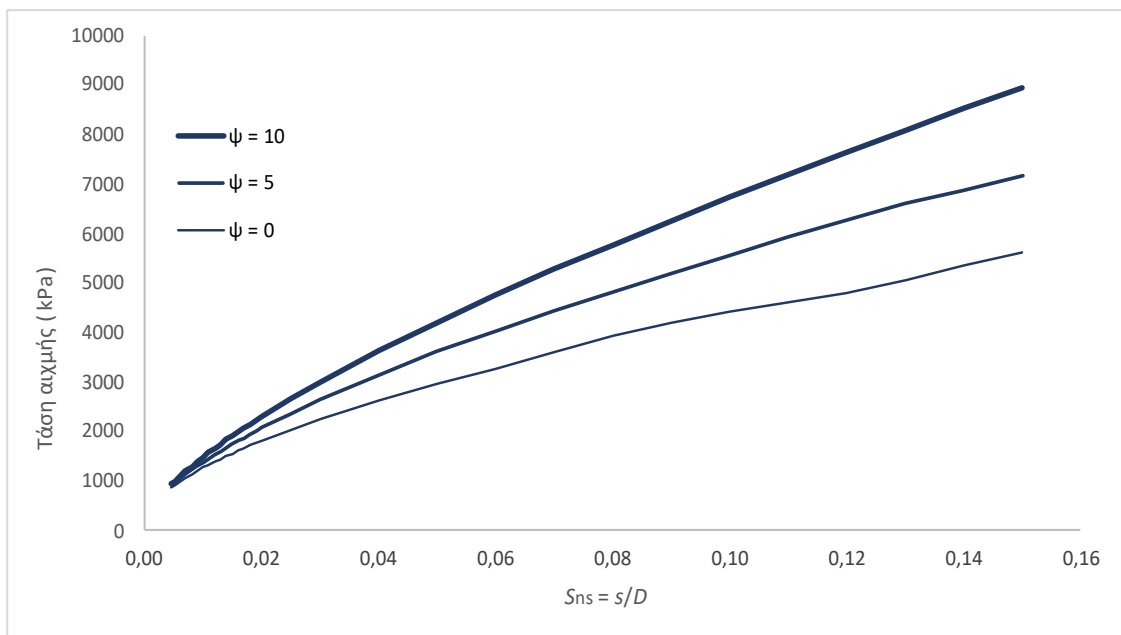


Σχήμα 3.2 : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης για την περίπτωση άμμου κατηγορίας Β, για  $\varphi = 33$  και τιμές της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi = 0, 3$  και  $10$

Αρχικά, για τις περιπτώσεις της άμμου της κατηγορίας B, με  $\varphi = 33$  και τιμές  $\psi = 0, 3$  και  $10$ , φαίνεται πως η αύξηση της τιμής της γωνίας διαστολής συνεπάγεται και αύξηση των τάσεων στην αιχμή του πασσάλου για τα ίδια επίπεδα καθιζήσεων μεταξύ των τριών περιπτώσεων. Παρατηρείται ότι για μικρές καθιζήσεις της τάξεως έως και 2% της διαμέτρου η επιρροή της είναι ελάχιστη στην αντίσταση αιχμής του πασσάλου, βλέποντας τη σύγκλιση των καμπυλών για μικρές καθιζήσεις. Ωστόσο, με την αύξηση του επιπέδου αυτών η επίδραση της διασταλτικότητας γίνεται φανερά σημαντικότερη.



Σχήμα 3.3 : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθιζήσης για την περίπτωση άμμου της κατηγορίας C, για  $\varphi = 37$  και τις τιμές της γωνίας διαστολής  $\psi = 0$  και  $7$



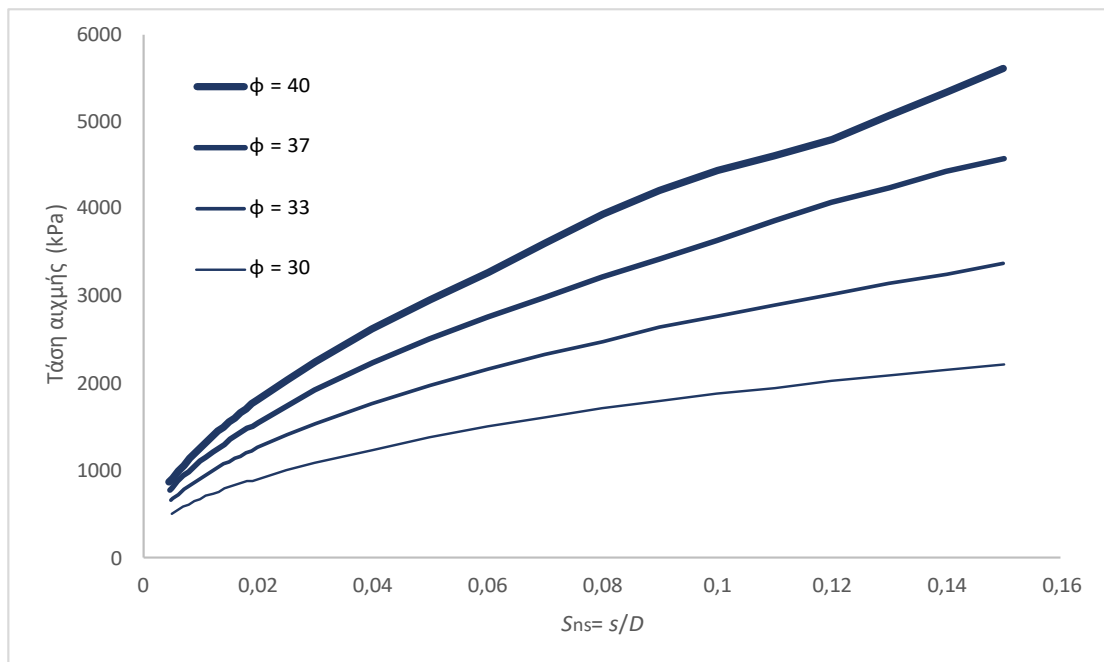
Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθιζήσης για την περίπτωση άμμου της κατηγορίας D, για  $\varphi = 40$  και τις τιμές της γωνίας διαστολής  $\psi = 0, 5$  και  $10$

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από τα διαγράμματα 3.3 και 3.4, όπου εξετάζεται η επιρροή της γωνίας διαστολής για γωνίες τριβής  $\varphi = 37$  και  $40$ , αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, για τις περιπτώσεις άμμων της κατηγορίας C, όπου  $\varphi = 37$  και  $\psi = 0$  και  $7$  παρατηρούνται εξίσου αμελητέες διαφορές μεταξύ των τάσεων αιχμής για μικρές καθιζήσεις, σε σχέση με μεγαλύτερα επίπεδα αυτών. Για την περίπτωση όπου  $\psi = 7$  παρατηρείται υψηλότερος ρυθμός αύξησης των τάσεων συγκριτικά με την περίπτωση όπου έχει τεθεί μηδενική διασταλτικότητα. Το ίδιο φαίνεται να ισχύει και για τις περιπτώσεις άμμων της κατηγορίας D.

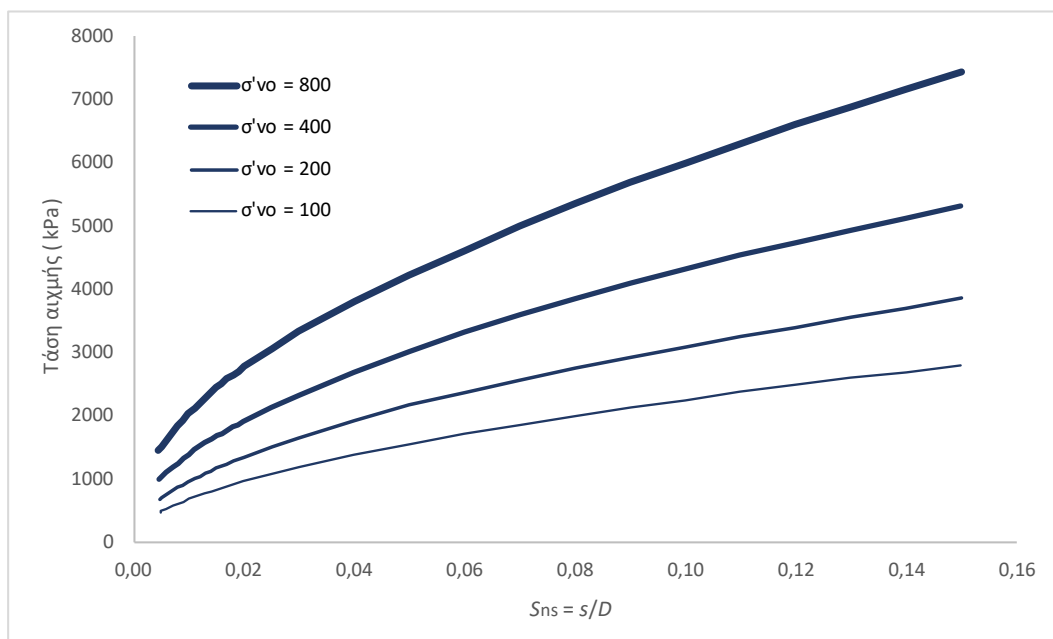
Ακόμη, παρατηρείται ότι οι καμπύλες των τάσεων αιχμής συνεχίζουν να αυξάνουν την κλίση τους με μειούμενο ρυθμό αλλά μεγαλύτερο των καμπυλών των περιπτώσεων άμμων με  $\psi = 0$ , χωρίς να φτάνουν σε κάποια οριακή τιμή, ακόμα και για επίπεδο καθίζησης  $30\%D$ . Αυτό οφείλεται στο ότι η γωνία διαστολής διατηρείται σταθερή, με αποτέλεσμα τη συνεχή ογκομετρική παραμόρφωση όσο το έδαφος δέχεται διατμητικές παραμορφώσεις. Επομένως, το έδαφος μπορεί να συνεχίζει να δέχεται αυξημένες τάσεις αιχμής για μεγάλες καθιζήσεις. Τα πραγματικά εδάφη, αντίθετα, με την αύξηση της μέσης ενεργού τάσης παρουσιάζουν μια κρίσιμη κατάσταση όπου ο όγκος τους παραμένει σταθερός και η γωνία διαστολής μειώνεται με την μέση τάση έως ότου στην κατάσταση σταθερού όγκου μηδενίζεται.

Επιπρόσθετα στα σχήματα 3.5 και 3.6 παρουσιάζεται η επιρροή της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\varphi$  και της αρχικής κατακόρυφης τάσης  $\sigma'_{vo}$  στην αντίσταση αιχμής του πασσάλου αντίστοιχα. Όσον αφορά τη γωνία  $\varphi$ , για περιπτώσεις άμμων που θεωρήθηκε μηδενική η γωνία διασταλτικότητας η επίδραση της φαίνεται καθαρά στο σχήμα 3.5. Όπως ήταν αναμενόμενο για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας διατμητικής αντοχής για την ίδια αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση, η αντίσταση αιχμής είναι υψηλότερη.

Ακόμη, από το σχήμα 3.6 γίνεται αντιληπτή η επίδραση της αρχικής κατακόρυφης ενεργού τάσης  $\sigma'_{vo}$  και της μέσης ενεργού τάσης  $\sigma'_m$  στη βάση του πασσάλου. Παρατηρείται, σημαντική η επιρροή της στην αντίσταση αιχμής του εδάφους τόσο για μικρές όσο και μεγάλες καθιζήσεις, εφόσον αυξάνεται με αύξηση του αρχικής εντατικής κατάστασης.



Σχήμα 3.5 : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης και για τις τέσσερις κατηγορίες άμμων, όπου  $\psi = 0$  και  $\sigma'_{vo} = 200$



Σχήμα 3.6 : Διάγραμμα μεταβολής της τάσης αιχμής συναρτήσει της καθίζησης για διαφορετικές τιμές της αρχικής κατακόρυφης τάσης στην αιχμή του πασσάλου για  $\phi = 33$ ,  $\psi = 3$  και  $G = 20$  MPa

### 3.3 Σύγκριση καμπυλών τάσεων αιχμής – καθίζησης με τον γερμανικό κανονισμό DIN1054

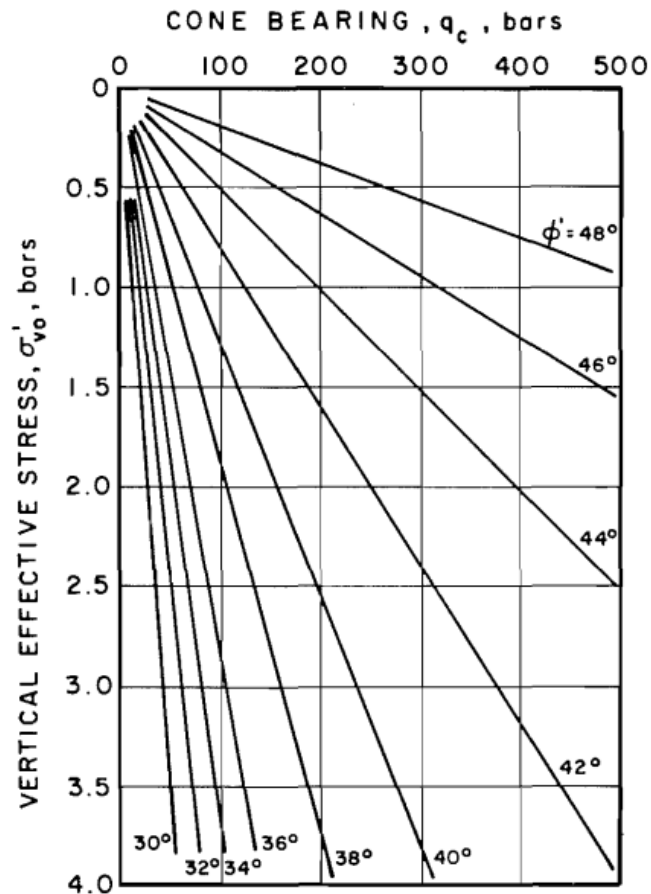
Στη συγκεκριμένη παράγραφο του κεφαλαίου γίνεται συνοπτική περιγραφή του γερμανικού κανονισμού DIN1054 (2005) και δίνονται οι τιμές που προτείνει για την χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής, σε διάφορα επίπεδα καθιζήσεων. Για τις τιμές αυτές παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα συναρτήσεως του επιπέδου καθίζησης, τα οποία συγκρίνονται στη συνέχεια με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Αναλυτικότερα, η μεθοδολογία που προτείνεται από τον συγκεκριμένο κανονισμό ορίζει το πλαίσιο για τον σχεδιασμό κατακόρυφα φορτιζόμενων πασσάλων (έγχυτων και εμπηγνυόμενων) και τονίζει ότι ο αξιόπιστος σχεδιασμός απαιτεί χρήση αριθμητικών μεθόδων και αναλυτικών υπολογισμών καθώς και δοκιμαστικών φορτίσεων. Βρίσκει ευρύ πεδίο εφαρμογής καθώς βασίζεται σε αποτελέσματα δεκάδων δοκιμαστικών φορτίσεων. Οι προτεινόμενες τιμές για την χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής  $q_{b;k}$  δίνονται με βάση αποτελέσματα δοκιμής στατικής πεντρομέτρησης (CPT) και εξαρτώνται συνεπώς από την αντοχή του εδάφους, αλλά και από τον λόγο καθίζησης  $s$  προς τη διάμετρο  $D$ . Στον πίνακα 3.2 δίνεται η μεταβολή της αντίστασης αιχμής  $q_b$  του πασσάλου συναρτήσεως του λόγου  $s/D$  (καθίζηση/διάμετρο πασσάλου) για διάφορες τιμές της αντίστασης διείδυσης κώνου  $q_c$ . Θεωρείται ότι η οριακή αντίσταση αιχμής του πασσάλου αντιστοιχεί σε καθίζηση ίση προς το 10% της διαμέτρου του ( $s=0,1D$ ). Να τονιστεί ότι για την εφαρμογή των τιμών θα πρέπει να ισχύει  $q_c \geq 10$  MPa, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει το πάχος της φέρουσας στρώσης κάτω από την αιχμή του πασσάλου να είναι μεγαλύτερο από το τριπλάσιο της διαμέτρου και τουλάχιστον μεγαλύτερο από 1.50 m.

Πίνακας 3.2 : Χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής  $q_{b;k}$ , εξαρτώμενες από τον δείκτη καθίζησης  $s/D$  και τη μέση αντίσταση διείδυσης κώνου  $q_{c;k}$  σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN1054

Δείκτης καθίζησης $s/D$	Χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής $q_{b;k}$ (MPa) για μέση τιμή αντίστασης διείδυσης κώνου $q_{c;k}$ (MPa)			
	10	15	20	25
0,02	0,7	1,05	1,4	1,75
0,03	0,9	1,35	1,8	2,25
0,1	2	3	3,5	4

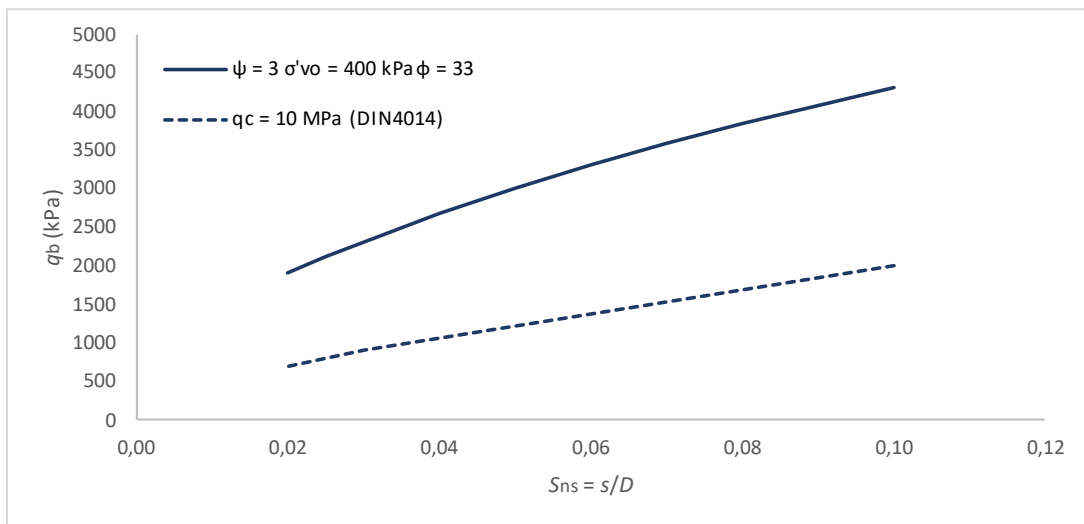
Για την σύγκριση των διαγραμμάτων τάσεων αιχμής – καθιζήσεων με τις παραπάνω χαρακτηριστικές τιμές, πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα. Σε πρώτη φάση για κάθεμία από τις δώδεκα περιπτώσεις άμμου ορίστηκε η τιμή της αντίστασης διείδυσης κώνου  $q_c$  από διάγραμμα των Robertson και Campanella (Σχήμα 3.7), όπου γίνεται συσχέτιση της γωνίας τριβής  $\varphi$  και της κατακόρυφης ενεργής τάσης  $\sigma'_{vo}$  με την αντίσταση κώνου  $q_c$ .



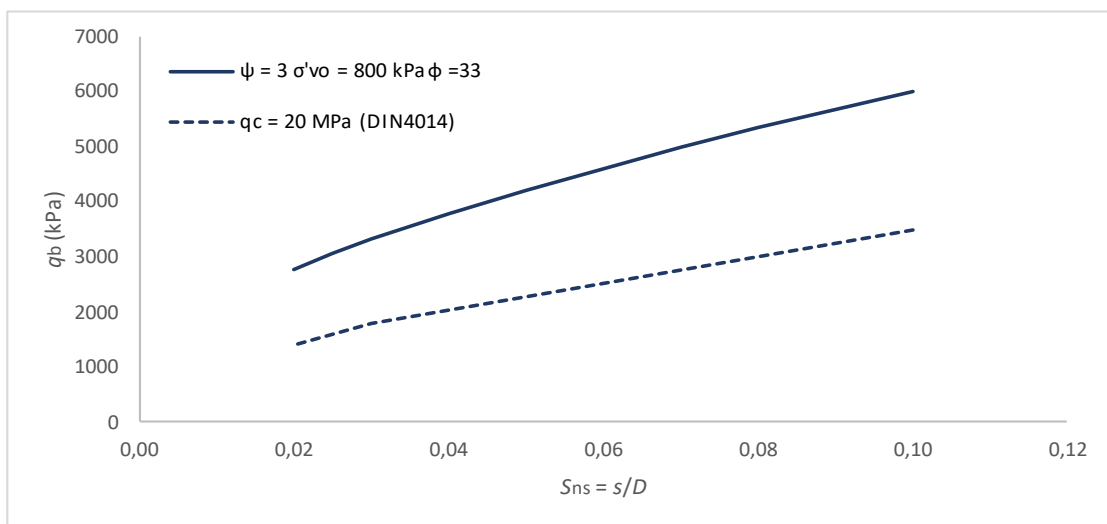
Σχήμα 3.7 : Προτεινόμενοι συσχετισμοί μεταξύ της αντίστασης διείσδυσης κώνου  $q_c$ , της γωνίας τριβής  $\phi$  και της κατακόρυφης ενεργής τάσης  $\sigma'_{vo}$  (Robertson & Campanella, 1983)

Για την κάθε περίπτωση άμμου, βρέθηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής με βάση τον πίνακα 3.2 για τις καθιζήσεις 2%, 3% και 10% της διαμέτρου του πασσάλου και σχεδιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα στο MS EXCEL ώστε να γίνει η σύγκριση με τις καμπύλες τάσεων αιχμής-καθίζησης. Για την περίπτωση άμμου της κατηγορίας A και αυτές της κατηγορίας B με αρχική κατακόρυφη τάση 100 και 200 kPa, η αντίσταση κώνου  $q_c$  βρέθηκε μικρότερη των 10 MPa, και επομένως δεν συμπεριλήφθηκαν στις συγκρίσεις με τις προτεινόμενες τιμές του κανονισμού. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις οι τιμές  $q_c$  που βρέθηκαν είναι 10, 15 και 20 MPa και των οποίων οι προτεινόμενες τιμές χαρακτηριστικής αντίστασης αιχμής δίνονται στον πίνακα 3.2.

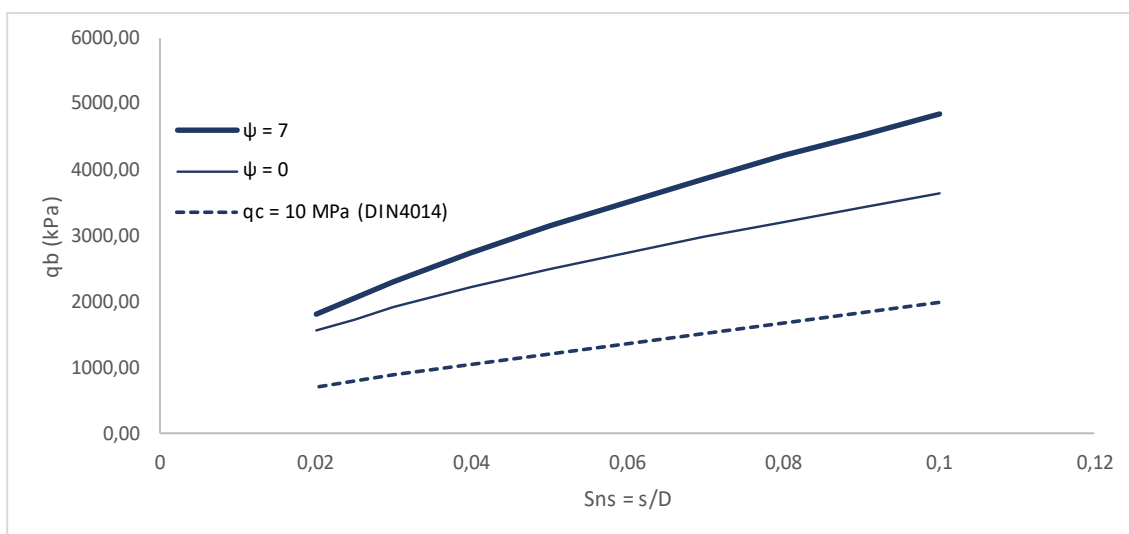
Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των καμπυλών των τάσεων αιχμής του πασσάλου για επίπεδα καθιζήσεων από 2% έως 10% της διαμέτρου του και η αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει από τις προτεινόμενες τιμές του πίνακα 3.2 του γερμανικού κανονισμού.



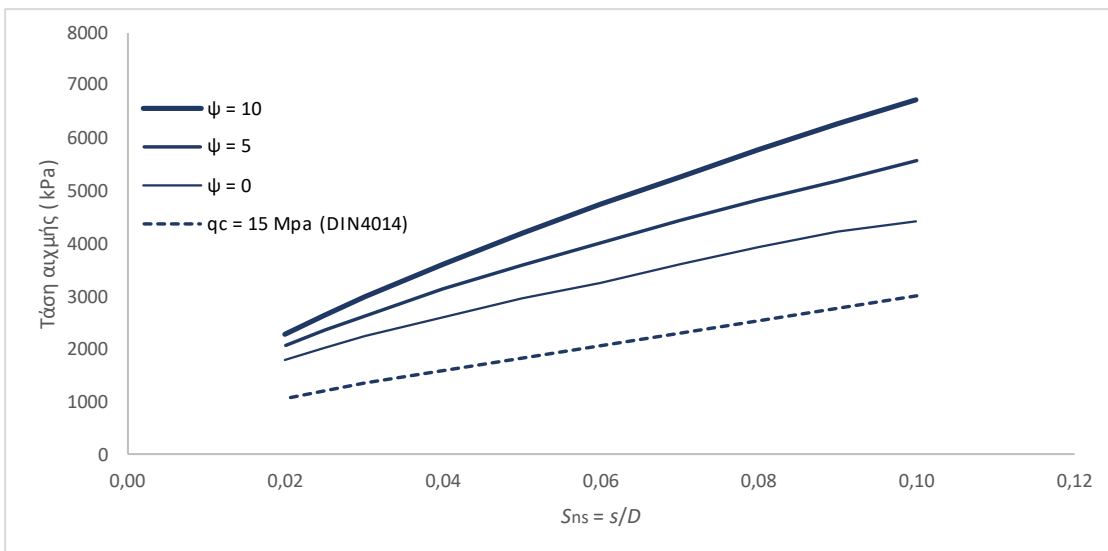
Σχήμα 3.8 : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC<sup>2D</sup> με DIN4014 για την περίπτωση άμμου με  $\psi = 3$ ,  $\phi = 33$ ,  $\sigma'_{vo} = 400$  kPa και  $G = 20$  MPa



Σχήμα 3.9 : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC<sup>2D</sup> με DIN4014 για την περίπτωση άμμου με  $\psi = 3$ ,  $\phi = 33$ ,  $\sigma'_{vo} = 800$  kPa και  $G = 20$  MPa



Σχήμα 3.10 : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC<sup>2D</sup> με DIN4014 για τις περιπτώσεις άμμου με  $\psi = 0$  και  $7$ ,  $\phi = 37$ ,  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa και  $G = 30$  MPa



Σχήμα 3.11 : Σύγκριση καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης FLAC<sup>2D</sup> με DIN4014 για τις περιπτώσεις άμμου με  $\psi = 0, 5$  και  $10$ ,  $\phi = 40$ ,  $\sigma'_{vo} = 200 \text{ kPa}$  και  $G = 40 \text{ MPa}$

Φαίνεται καθαρά από τα σχήματα 3.8, 3.9, 3.10, και 3.11 σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις τιμές αντίστασης αιχμής του DIN1054.

Παράλληλα, σύμφωνα και με άλλες μελέτες παραμετρικών αναλύσεων ο κανονισμός δίνει συντηρητικές τιμές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από παραμετρική ανάλυση των Comodromos και Randolph (2023) που θα παρουσιασθεί παρακάτω αλλά και άλλες μελέτες που εμπεριέχουν πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα (Comodromos *et al.*, 2003; 2009 and 2021).

### 3.4 Σύγκριση των καμπυλών τάσης αιχμής – καθίζησης με τους κανόνες σχεδιασμού πασσάλων του API (American Petroleum Institute)

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται παρουσίαση των προτεινόμενων τιμών αντίστασης αιχμής  $q_{b,design}$  από το API, για χαλαρές έως πολύ πυκνές άμμους και σύγκριση με τις τιμές τάσεων αιχμής της παρούσας εργασίας. Στους συγκεκριμένους κανόνες σχεδιασμού οι άμμοι κατηγοριοποιούνται με βάση την πυκνότητά τους, σύμφωνα με τον συντελεστή φέρουσας ικανότητας  $N_q$ , που παίρνει τιμές από 8 έως 12 για χαλαρές άμμους και πάνω από 40 για πολύ πυκνές άμμους. Οι προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής αντιστοιχούν σε επίπεδο καθίζησης 10% της διαμέτρου του πασσάλου, και είναι ευρέως αποδεκτό ότι σε αυτό το ποσοστό καθίζησης γίνεται ενεργοποίηση της οριακής αντίστασης αιχμής. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας (Πίνακας 3.3.1) με τις προαναφερόμενες τιμές.



Πίνακας 3.3 : Προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής με βάση τον συντελεστή φέρουσας ικανότητας  $N_q$  από το API (American Petroleum Institute)

Κανόνες σχεδιασμού	Πυκνότητα εδάφους	Συντελεστής φέρουσας ικανότητας $N_q$	Τιμή αντίστασης αιχμής $q_{b;design}$ (MPa)
American Petroleum Institute (API 2003)	Πολύ χαλαρή έως χαλαρή άμμος	8	1.9
	Χαλαρή έως μέτρια πυκνή άμμος	12	2.9
	Μέτρια έως πυκνή άμμος	20	4.8
	Πυκνή έως πολύ πυκνή άμμος	40	9.6
	Πύκνη έως πολύ πυκνή άμμος με χαλίκια	50	12.0

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων του FLAC<sup>2D</sup> με τους κανόνες σχεδιασμού του API απαιτείται η κατηγοριοποίηση των δώδεκα περιπτώσεων άμμου με βάση την σχετική πυκνότητα τους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις που συσχετίζουν το δείκτη σχετικής πυκνότητας  $I_d$  με την αντίσταση κώνου  $q_c$  και την ενεργή κατακόρυφη τάση  $\sigma'_{vo}$  (Lancellota 1983, Jamiolkowski *et al.* 1985) και αντίστοιχα με τη μέση ενεργό τάση  $p'$  (Lunne *et al.* 1997). Οι προτεινόμενες εξισώσεις είναι οι παρακάτω

$$I_d = -0.98 + 0.66 \log \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \right) \quad (3.6)$$

Και

$$I_d = \frac{1}{2.61} \ln \frac{q_c}{181(p')^{0.55}} \quad (3.7)$$

Όπου η εξίσωση (3.6) χρησιμοποιήθηκε όπως φαίνεται παρακάτω, σε αδιάστατη μορφή,

$$I_d = -0.65 + 0.287 \ln \frac{q_c/p_a}{\sqrt{\sigma'_{vo}/p_a}} \quad (3.8)$$

όπου  $p_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Από τις τιμές της σχετικής πυκνότητας που βρέθηκαν από τις εξισώσεις (3.7) και (3.8), χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους για τον χαρακτηρισμό των άμμων σύμφωνα με την πυκνότητά τους. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.4) παρουσιάζονται οι τιμές σχετικής πυκνότητας  $I_d$  κάθε περίπτωσης άμμου, ο αντίστοιχος συντελεστής φέρουσας ικανότητας  $N_q$ , η προτεινόμενη αντίσταση αιχμής από το API (2003) και η τάση αιχμής για επίπεδο καθίζησης 10% της διαμέτρου  $D$  του πασσάλου.

Πίνακας 3.4 : Σύγκριση των τιμών των τάσεων αιχμής για καθίζηση 10%D με τις προτεινόμενες τιμές σχεδιασμού από το API

Περιπτώσεις άμμων		Δείκτης σχετικής πυκνότητας $I_d$	Συντελεστής φέρουσας ικανότητας $N_q$	Προτεινόμενη αντίσταση αιχμής $q_{b;design}$ (API 2003) (kPa)	Τάση αιχμής για καθίζηση 10%D (FLAC) (kPa)
<b>A</b> ( $\phi=30$ )	$\psi=0 \gamma=10\text{kN/m}^3$ $G=10\text{MPa}$	0,17	8	1900	1885,77
<b>B</b> ( $\phi=33$ , $G=20$ MPa)	$\psi=0 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,31	12	2900	2777,62
	$\psi=3 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,31	12	2900	3085,45
	$\psi=10 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,31	12	2900	3919,18
	$\psi=3 \gamma=5 \text{ kN/m}^3$	0,2	12	2900	2243,12
	$\psi=3 \gamma=20 \text{ kN/m}^3$	0,42	20	4800	4319,22
	$\psi=3 \gamma=40 \text{ kN/m}^3$	0,53	20	4800	6003,09
<b>C</b> ( $\phi=37$ , $G=30$ MPa)	$\psi=0 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,55	20	4800	3647,88
	$\psi=7 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,55	20	4800	4849,87
<b>D</b> ( $\phi=40$ , $G=40$ MPa)	$\psi=0 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,69	40	9600	4441,45
	$\psi=5 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,69	40	9600	5587,82
	$\psi=10 \gamma=10 \text{ kN/m}^3$	0,69	40	9600	6750,22

Συγκρίνοντας τις τιμές των τάσεων αιχμής που υπολογίστηκαν από το FLAC<sup>2D</sup> με τις προτεινόμενες, από το API, παρατηρείται καλή συμφωνία των τιμών στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, με εξαίρεση περιπτώσεις με οριακούς συνδυασμούς παραμέτρων όπως για χαμηλές τιμές της σχετικής πυκνότητας  $I_d$  με υψηλές τιμές της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$  και της αρχικής κατακόρυφης ενεργού τάσης και το αντίστροφο.

### 3.5 Σύγκριση των καμπυλών τάσεων αιχμής – καθίζησης με προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού της απόκρισης της αιχμής πασσάλου σε αμμώδη εδάφη

Στην συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης με τα αποτελέσματα από προτεινόμενες εξισώσεις (Comodromos & Randolph, 2023) για την απόκριση αιχμής έγχυτου πασσάλου σε άμμους συναρτήσει της καθίζησης στην αιχμή του.

Αναλυτικότερα, στόχος της παραπάνω μελέτης ήταν να δημιουργήσει ολοκληρωμένες καμπύλες για την απόκριση της αιχμής έγχυτων πασσάλων σε αμμώδη εδάφη για καθιζήσεις μέχρι και 15% της διαμέτρου του πασσάλου, τόσο για οριακές όσο και συνθήκες λειτουργικότητας. Για το λόγο αυτό,

πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>2D</sup> για διάφορες περιπτώσεις εδαφών, από χαλαρές έως πολύ πυκνές άμμους ( $I_d = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ ) και διάφορες τιμές της αρχικής κατακόρυφης ενεργού τάσης ( $\sigma'_{vo} = 100, 200, 400$ ). Η αξιολόγηση και επεξεργασία των τιμών που λήφθηκαν από τις αναλύσεις, οδήγησε στη δημιουργία σχέσεων συσχέτισης της απόκρισης της αιχμής του πασσάλου  $q_b$  με την καθίζηση στην αιχμή του ανηγμένη προς την διάμετρο του  $S_{ns}$  και της προτεινόμενης αντίστασης αιχμής του σε καθίζηση 10% της διαμέτρου του πασσάλου  $q_{b,10}$  με την αρχική σχετική πυκνότητα  $I_{d,0}$  και την αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση  $\sigma'_{vo}$ . Παρακάτω δίνονται οι προτεινόμενες σχέσεις των Comodromos & Randolph (2023)

$$q_{b,10} = (0,1 + 3,6 I_{d,0}) \sqrt{\frac{\sigma'_{vo}}{p_a}} + \left( \frac{0,004}{I_{d,0}^4} \right) \quad (3.9)$$

$$q_b = \frac{q_{b,10}}{4} \left( \frac{S_{ns}}{0,01} \right)^{0,6} \quad (3.10)$$

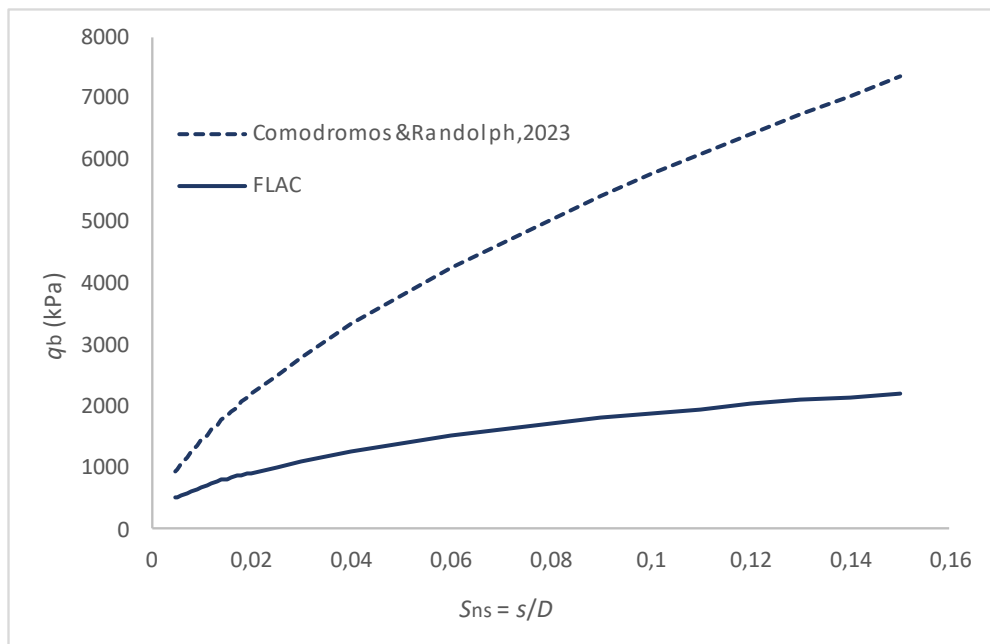
όπου,

$p_a$ , ατμοσφαιρική πίεση.

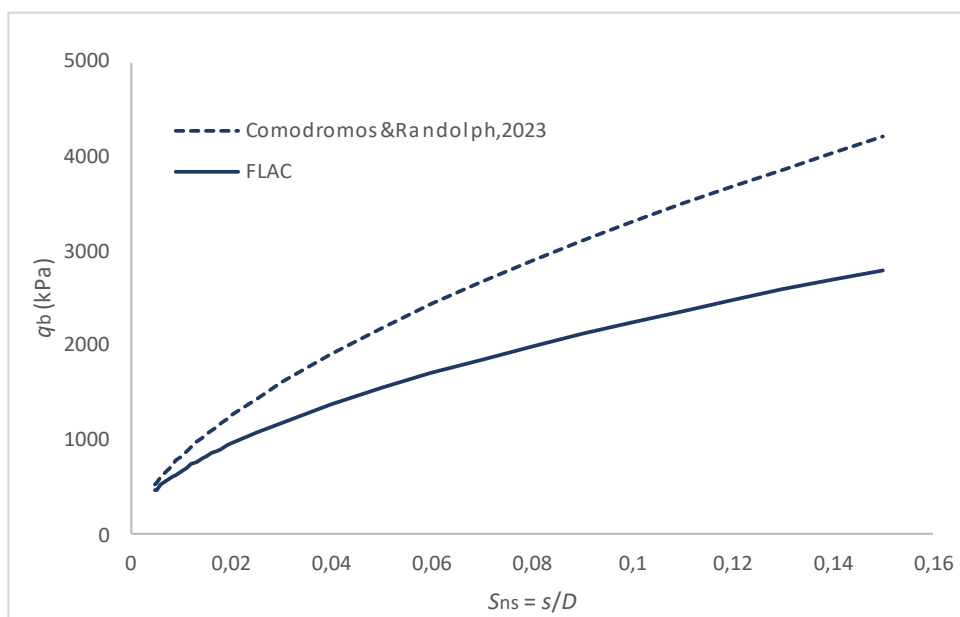
Είναι σημαντικό να αναφερθεί η μεθοδολογία και ο καταστατικός νόμος που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική ανάλυση, ώστε να γίνει ολοκληρωμένη σύγκριση των καμπυλών. Εφαρμόστηκε καταστατικό μοντέλο βασισμένο στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, με διεύρυνσή του ώστε να επιτρέπει την μεταβολή της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\varphi$  (επιφάνεια θραύσης) και την γωνία διασταλτικότητας σύμφωνα με την εξέλιξη της μέσης τάσης  $p'$  και της σχετικής πυκνότητας  $I_d$ . Η σχετική πυκνότητα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, εφόσον μεταβάλλεται και ο λόγος κενών  $e$  με την αύξηση της μέσης τάσης με κατάλληλη σχέση. Επιπλέον, εισάχθηκε σχέση ώστε να αντιπροσωπεύει την μεταβολή του μέτρου διάτμησης  $G$  αντίστοιχα με τη μέση τάση και την σχετική πυκνότητα, ενώ το μέτρο διόγκωσης  $K$  μεταβάλλεται κι αυτό σύμφωνα με το μέτρο διάτμησης.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της διπλωματικής με την προαναφερόμενη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (3.9) και (3.10), για τις δώδεκα περιπτώσεις άμμων με χρήση της σχετικής πυκνότητας που βρέθηκε στην προηγούμενη παράγραφο από τις εξισώσεις (3.7) και (3.8). Στη συνέχεια έγιναν τα αντίστοιχα διαγράμματα με την απόκριση της αιχμής που βρέθηκε από το FLAC<sup>2D</sup> και την απόκριση που δίνουν οι προτεινόμενες εξισώσεις (Comodromos & Randolph 2023).

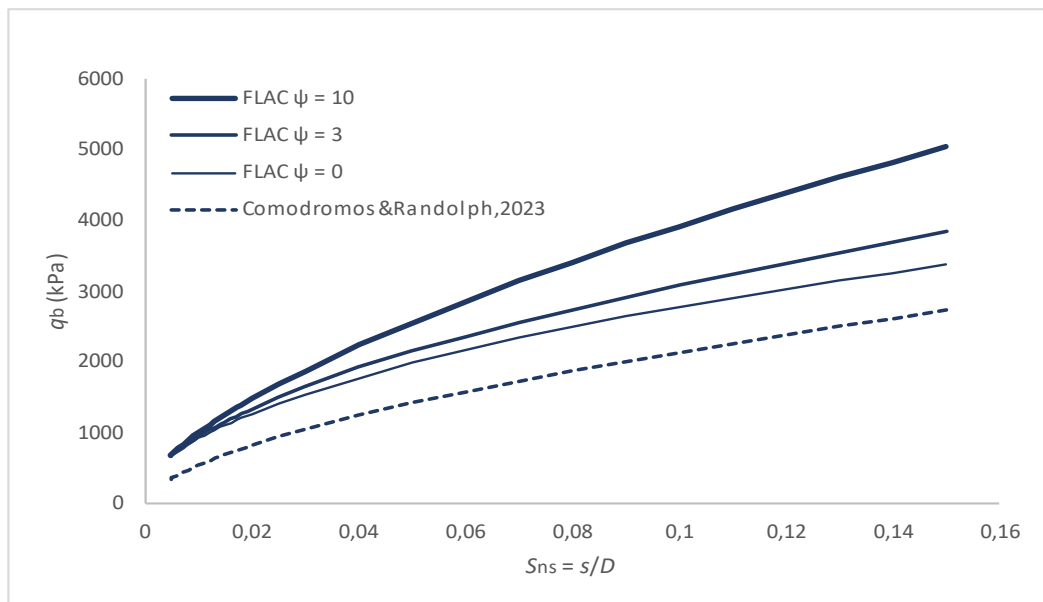
Αρχικά, παρατηρούνται, συνολικά για τις περιπτώσεις άμμων, της συγκεκριμένης εργασίας υψηλότερες τιμές για την απόκριση του πασσάλου τόσο για μικρές καθιζήσεις όσο και για επίπεδο καθίζησης του 10% της διαμέτρου. Οι διαφορές κυμαίνονται ανάμεσα σε ποσοστά 17% με 45%. Επιπλέον, παρατηρείται για τις δύο περιπτώσεις άμμων με πολύ χαμηλή σχετική πυκνότητα  $I_d = 0.17$  και 0.2 ότι συμβαίνει το αντίστροφο με τις προτεινόμενες εξισώσεις να δίνουν υψηλότερες τιμές για την απόκριση του πασσάλου, ενώ ειδικά για την ακραία περίπτωση άμμου με  $I_d = 0.17$  και  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa η διαφορά να αγγίζει το 67% για την τιμή της αντίστασης αιχμής σε επίπεδο καθίζησης 10%D.



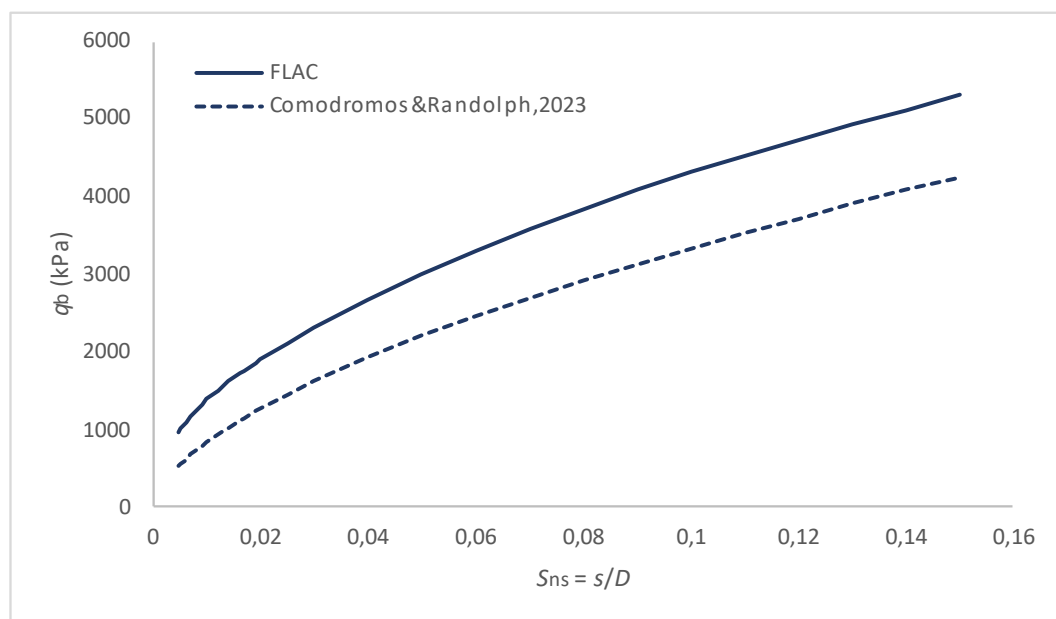
Σχήμα 3.12 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC<sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Α ( $\varphi = 30$ ,  $\psi = 0$ ,  $G = 10 \text{ Mpa}$ ,  $\sigma'_{vo} = 200 \text{ kPa}$ ) με  $l_d = 0.17$



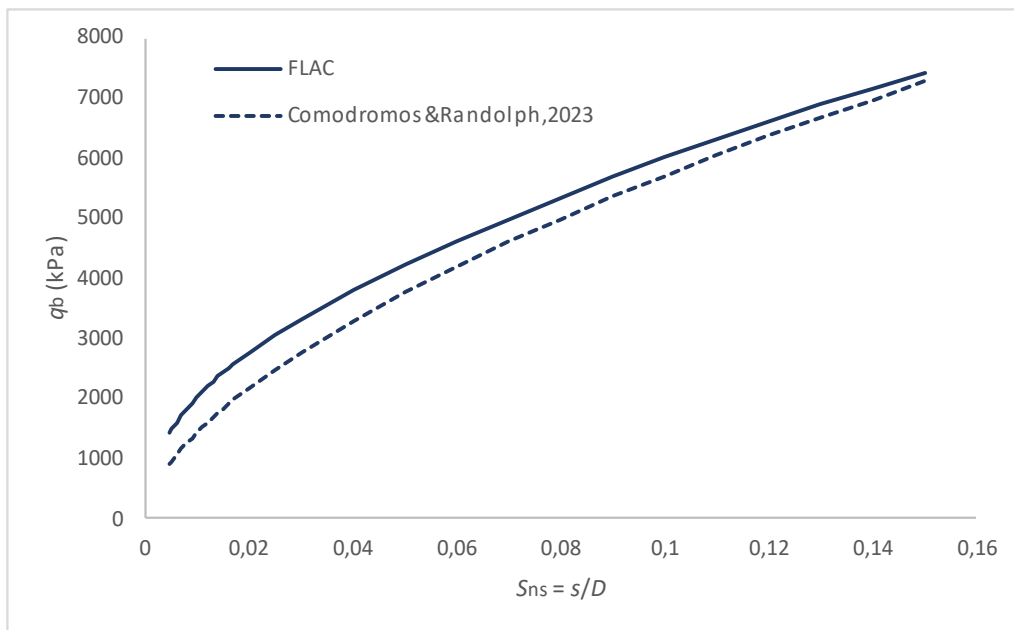
Σχήμα 3.13 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC<sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Β ( $\varphi = 33$ ,  $\psi = 3$ ,  $G = 20 \text{ Mpa}$ ,  $\sigma'_{vo} = 100 \text{ kPa}$ ) με  $l_d = 0.2$



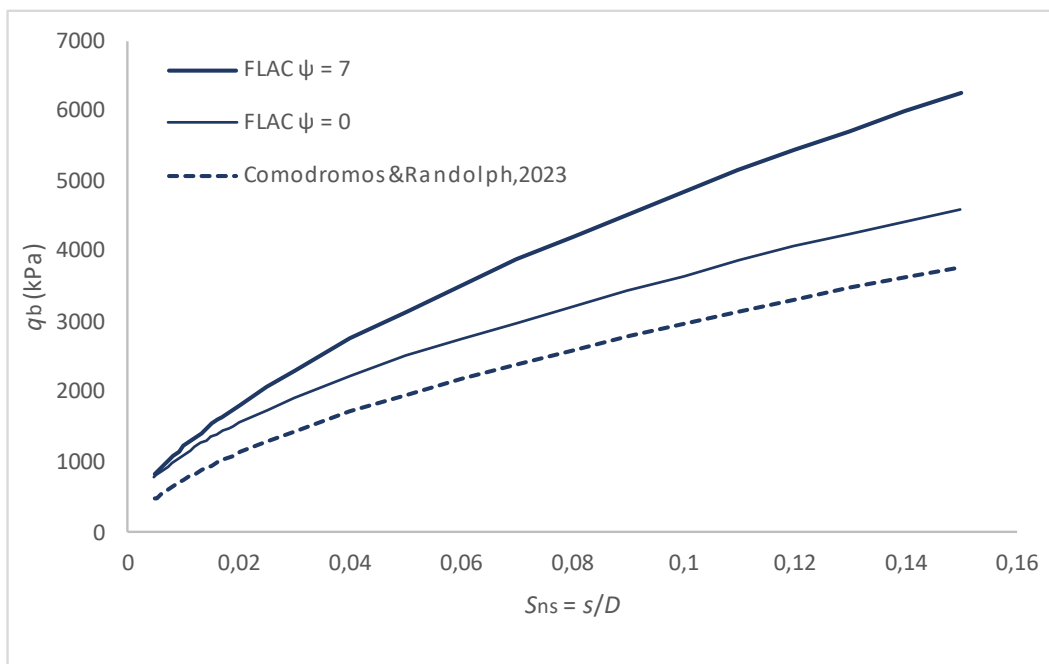
Σχήμα 3.14 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC<sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για τις περιπτώσεις άμμου Β ( $\varphi = 33$ ,  $\psi = 0,3$  και 10,  $G = 20$  Μρα,  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa) με  $l_d = 0.31$



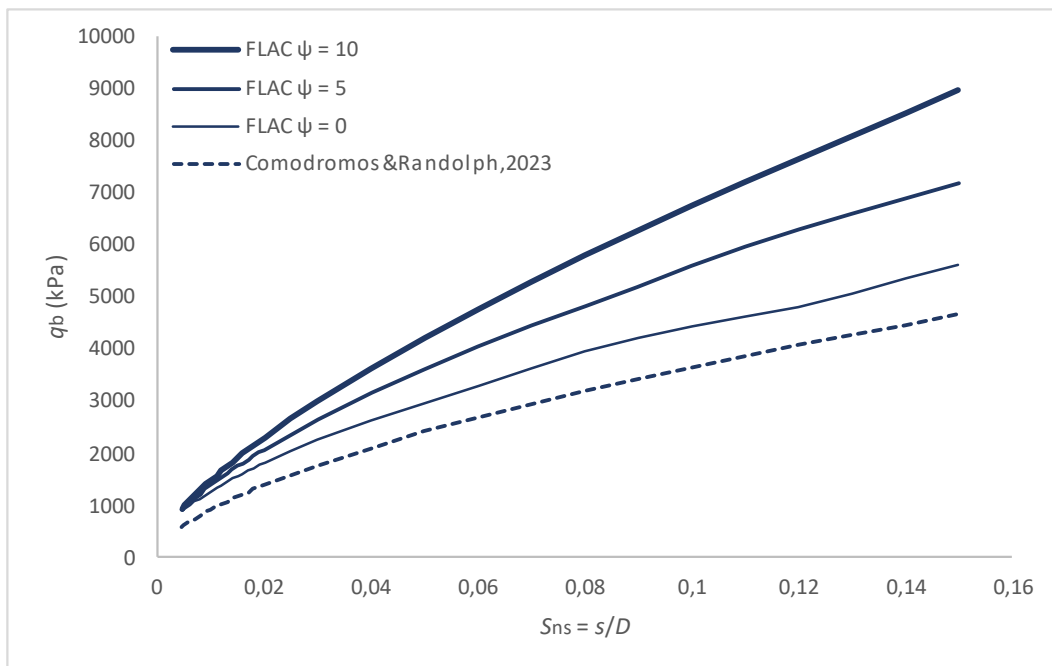
Σχήμα 3.15 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC<sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Β ( $\varphi = 33$ ,  $\psi = 3$ ,  $G = 20$  Μρα,  $\sigma'_{vo} = 400$  kPa) με  $l_d = 0.42$



Σχήμα 3.16 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του  $FLAC^{2D}$  με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για την περίπτωση άμμου Β ( $\varphi = 33$ ,  $\psi = 3$ ,  $G = 20$  Mpa,  $\sigma'_{vo} = 800$  kPa) με  $I_d = 0.53$



Σχήμα 3.17 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του  $FLAC^{2D}$  με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για τις περιπτώσεις άμμου C ( $\varphi = 37$ ,  $\psi = 0$  και  $7$ ,  $G = 30$  Mpa,  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa) με  $I_d = 0.55$



Σχήμα 3.18 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων τάσης αιχμής του FLAC<sup>2D</sup> με τις τιμές των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph, 2023 για τις περιπτώσεις άμμου D(  $\varphi = 40$ ,  $\psi = 0$ , 5 και 10,  $G = 40$  Mpa,  $\sigma'_{vo} = 200$  kPa) με  $I_d = 0.69$

Επιπλέον παρατηρήθηκε, για την περίπτωση άμμου με  $I_d = 0.53$  και  $\sigma'_{vo} = 800$  kPa σύγκλιση των τιμών σε μεγαλύτερα επίπεδα καθίζησης, με διαφορά στις τιμές του  $q_{b,10}$  της τάξης του 5%, ενώ η διαφορά μειώνεται με αύξηση της καθίζησης. Ακόμη, για τις περιπτώσεις άμμων που εξετάστηκαν, φαίνεται για αυτές που έχουν την ιδιότητα της διασταλτικότητας να παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα αποτελέσματα των προτεινόμενων εξισώσεων, ειδικά για μεγαλύτερες καθιζήσεις, συγκριτικά με αυτές με μηδενική γωνία διασταλτικότητας  $\psi$ .

Συνολικά συμπεραίνεται υπερεκτίμηση των τιμών των τάσεων αιχμής από την παραμετρική ανάλυση της παρούσας εργασίας καθώς το καταστατικό μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την μεταβολή των παραμέτρων του εδάφους ( $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $G$ ) με την αύξηση της μέσης τάσης  $p'$  και τη μεταβολή της σχετικής πυκνότητας  $I_d$  σε σχέση με την παραπάνω μελέτη, εφόσον στόχος ήταν η παρατήρηση της επίδρασης της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$  στην απόκριση αιχμής. Παρακάτω δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα και για τις 12 περιπτώσεις άμμων.

## Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταλτικότητας στην αντίσταση αιχμής πασσάλου σε άμμους. Εξετάστηκαν δώδεκα περιπτώσεις άμμων, με βάση την γωνία διατμητικής αντοχής  $\varphi$ , το μέτρο διάτμησης  $G$ , την αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση  $\sigma'_{vo}$  και την γωνία διασταλτικότητας  $\psi$ , οι οποίες συνοψίζονται στον πίνακα 3.1. Οι αναλύσεις διενεργήθηκαν μέσω του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>2D</sup> και αφορούσαν έγχυτο πάσσαλο, καθώς οι εδαφικές συνθήκες γύρω από τον πάσσαλο θεωρήθηκαν οι ίδιες με αυτές πριν την τοποθέτησή του. Από τις αναλύσεις λήφθηκαν τιμές τάσεων αιχμής με τις αντίστοιχες καθιζήσεις στη βάση του πασσάλου και έγινε σύγκριση αυτών με τις προτεινόμενες τιμές των κανόνων σχεδιασμού του API και του γερμανικού κανονισμού DIN1054(2005) και με τις τιμές από τις προτεινόμενες εξισώσεις των Comodromos & Randolph (2023).

Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων προέκυψαν διαγράμματα τάσης αιχμής – καθιζήσης, όπου έγινε φανερή η επίδραση της γωνίας διασταλτικότητας στην απόκριση της αιχμής.

- Παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση υψηλότερων τιμών στην γωνία διασταλτικότητας οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές της απόκρισης της αιχμής για τα ίδια επίπεδα καθιζήσης σε σχέση με τις ίδιες περιπτώσεις άμμου με μικρότερη ή μηδενική τιμή της γωνίας διασταλτικότητας.
- Για μικρές καθιζήσεις της τάξεως έως και 2% της διαμέτρου του πασσάλου, η επίδραση της γωνίας διασταλτικότητας στην απόκριση της αιχμής φαίνεται να είναι αμελητέα σε αντίθεση με την επιρροή της για μεγαλύτερες καθιζήσεις.
- Για μεγάλες καθιζήσεις παρατηρήθηκε συνεχής αύξηση της κλίσης των καμπυλών, ειδικότερα για τις περιπτώσεις άμμων με μη μηδενική γωνία διασταλτικότητας. Συγκεκριμένα, το έδαφος μπορεί να συνεχίζει να δέχεται αυξανόμενες διατμητικές τάσεις για μεγάλες καθιζήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb με σταθερές τις γωνίες διατμητικής αντοχής  $\varphi$  και διασταλτικότητας  $\psi$ , χωρίς να λαμβάνει υπόψη ότι οι γωνίες μεταβάλλονται συναρτήσει της μεταβολής της μέσης τάσης στη βάση του πασσάλου, μέχρι την κρίσιμη κατάσταση όπου η γωνία διασταλτικότητας μηδενίζεται.
- Παρατηρήθηκε επίσης σημαντική η επίδραση της γωνίας διατμητικής αντοχής στις τάσεις αιχμής του πασσάλου, κυρίως για καθιζήσεις μεγαλύτερες του 2% της διαμέτρου του πασσάλου. Ακόμη, σημαντική επίδραση φάνηκε να έχει και η αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση στις τάσεις αιχμής τόσο για μικρές όσο και μεγάλες καθιζήσεις.
- Από σύγκριση των διαγραμμάτων με τις προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής του γερμανικού κανονισμού DIN1054(2005) και των κανόνων σχεδιασμού του API, παρατηρήθηκε τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης να ξεπερνούν σημαντικά τις προτεινόμενες τιμές του DIN1054 ενώ υπήρχε καλή συμφωνία με τις προτεινόμενες τιμές αντίστασης αιχμής του



API, με εξαίρεση ακραίες περιπτώσεις άμμων με μικρή σχετική πυκνότητα  $I_d$  και μεγάλη γωνία διασταλτικότητας, ή το αντίστροφο.

- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις τιμές αντίστασης αιχμής των προτεινόμενων εξισώσεων των Comodromos & Randolph (2023) έδειξε υπερεκτίμηση των τάσεων αιχμής από την παραμετρική ανάλυση της παρούσας διπλωματικής. Αυτό οφείλεται στο ότι το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική περιγράφει ένα εξειδικευμένο μοντέλο εδάφους που δεν επέτρεπει τη μεταβολή των μεγεθών της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\varphi$ , της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$  και του μέτρου διάτμησης  $G$  σύμφωνα με την εξέλιξη της μέσης τάσης και της μεταβολής της σχετικής πυκνότητας, σε αντίθεση με το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε από τους Comodromos & Randolph για να προσεγγίσει τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος.

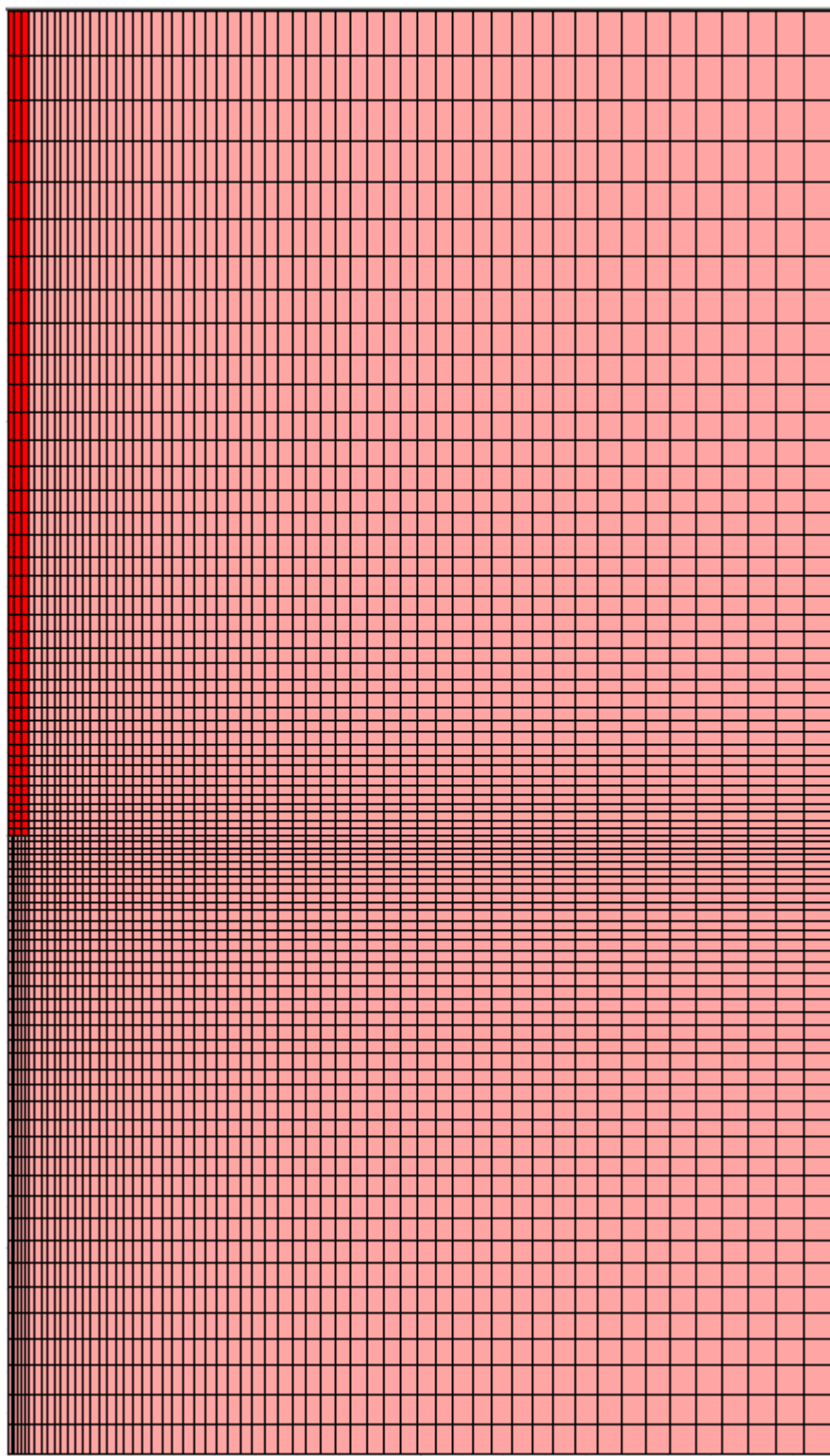
## Βιβλιογραφικές Πηγές

- API (American Petroleum Institute API). (2003). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design*. API recommended practice 2A-WSD (RP 2A-WSD), Washington, DC: API
- Bolton, M. D. (1986). "The strength of dilatancy of sands." *Géotechnique*, 36 (2): 65-78.
- Bolton, M. D. 1987. "Discussion on the strength and dilatancy of sands." *Géotechnique* 37(2): 219-226. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.2.219>
- Comodromos, E. M., & Randolph, M. F. (2023). Improved Relationships for the Pile Base Response in Sandy Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(8), 04023058. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11035>
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 2005. Ground-Verification of the safety of earthworks and foundations, DIN 1054. Berlin: DIN
- Itasca Consulting Group , Inc. (2011). "FLAC 2D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions", Version 7.0, Minneapolis, Minnesota.
- Lee, J. H., and R. Salgado. 1999. "Determination of pile base resistance in sands." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 125 (8): 673-683.
- Randolph, M., Dolwin, J. A., & Beck, R. (1994). Design of driven piles in sand. *Geotechnique*, 44(3), 427–448. <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.427>
- Robertson, P. K., & Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 718–733. <https://doi.org/10.1139/t83-078>
- Yu, H. W., & Houlsby, G. T. (1991). Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis. *Geotechnique*, 41(2), 173–183. <https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.2.173>
- Potts, D. M., Zdravkovic, L., & Zdravković, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford.
- Γεωργιάδης, Κ. & Γεωργιάδης, Μ. (2009). *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. Εκδόσεις Ζήτη
- Κωμοδρόμος, Α. Μ. (2012). *Θεμελιώσεις Αντιστηρίξεις* (2η έκδοση). Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Κωμοδρόμος, Α. Μ. (2008). *Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική* (2η έκδοση). Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

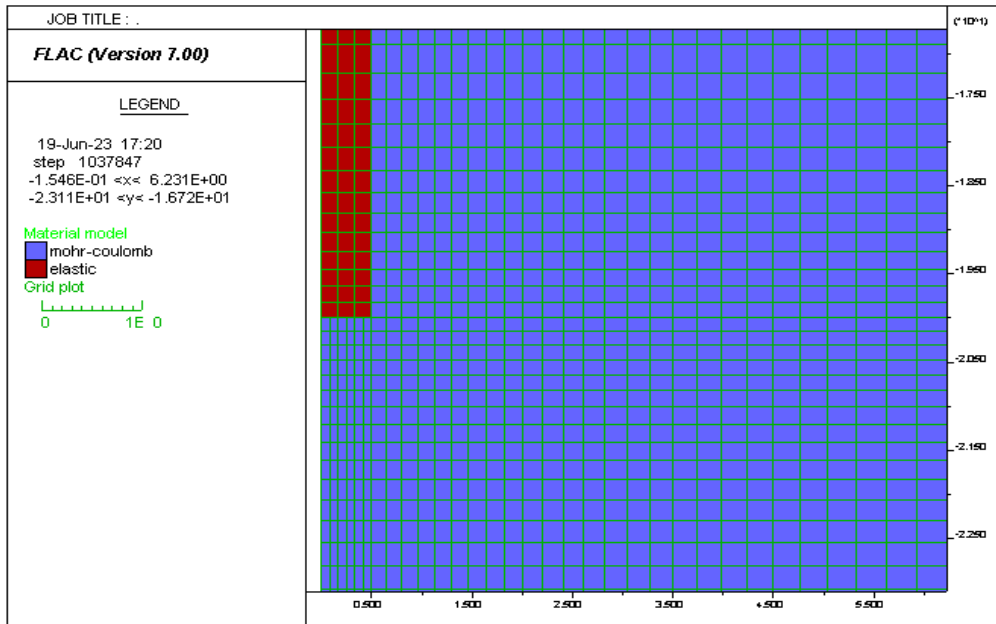


## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

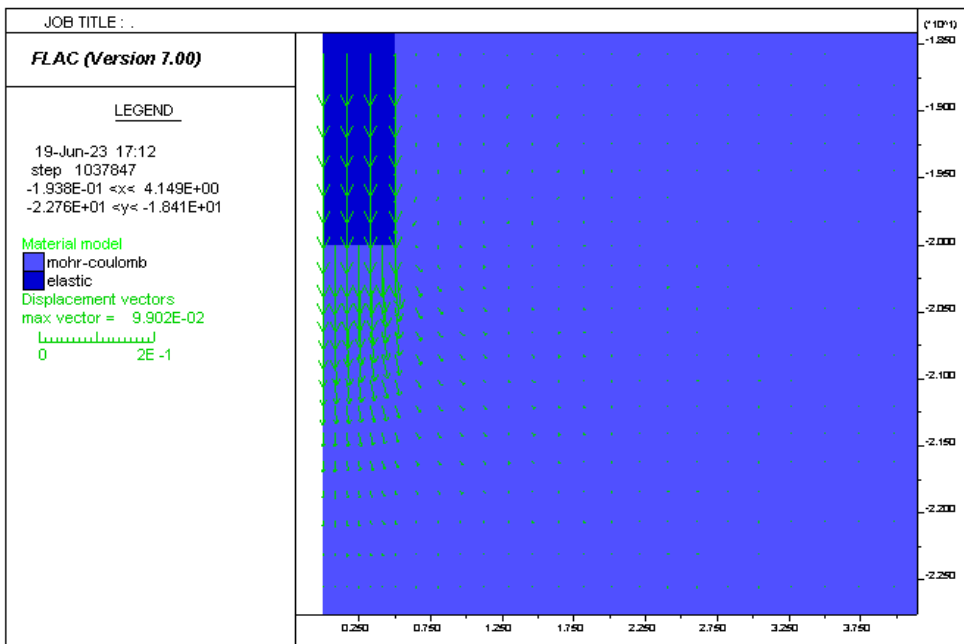
Αποτελέσματα επιλύσεων FLAC<sup>2D</sup>



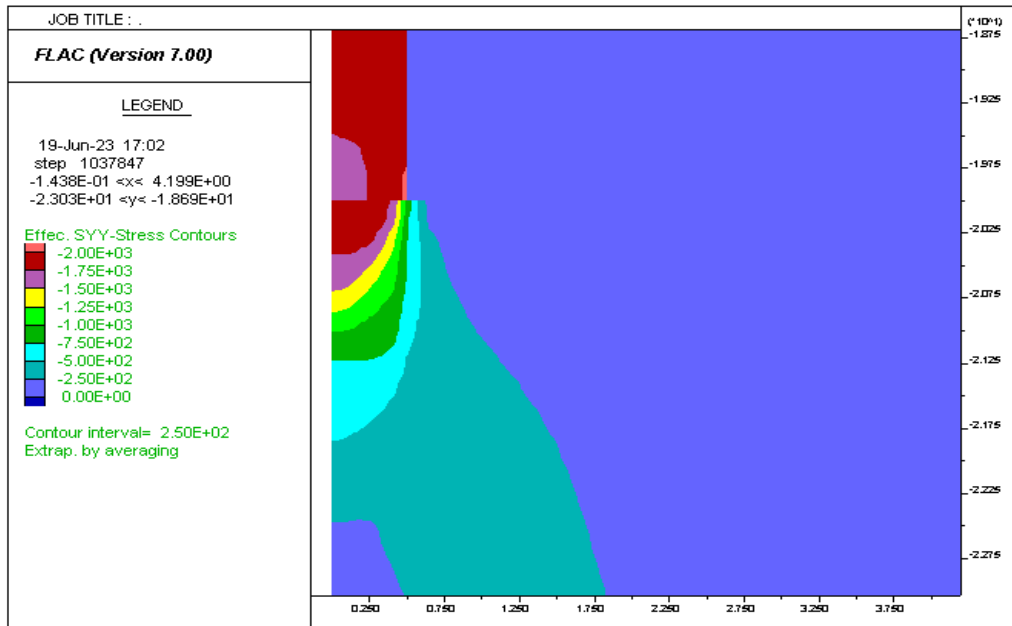
Σχήμα 1 Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών



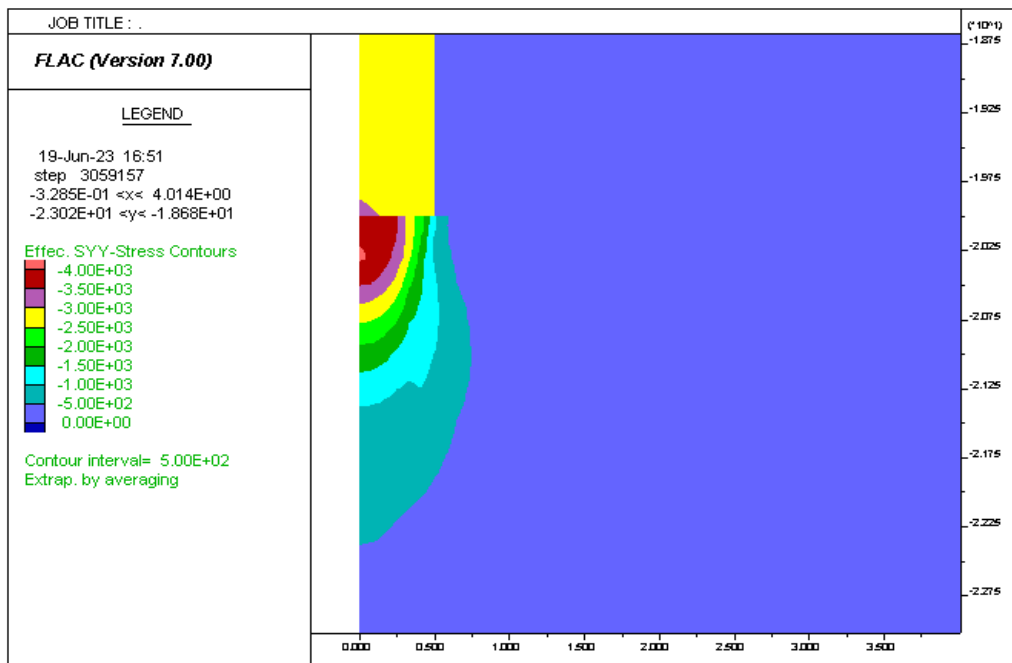
Σχήμα 2 Λεπτομέρεια πλέγματος στην αιχμή του πασσάλου



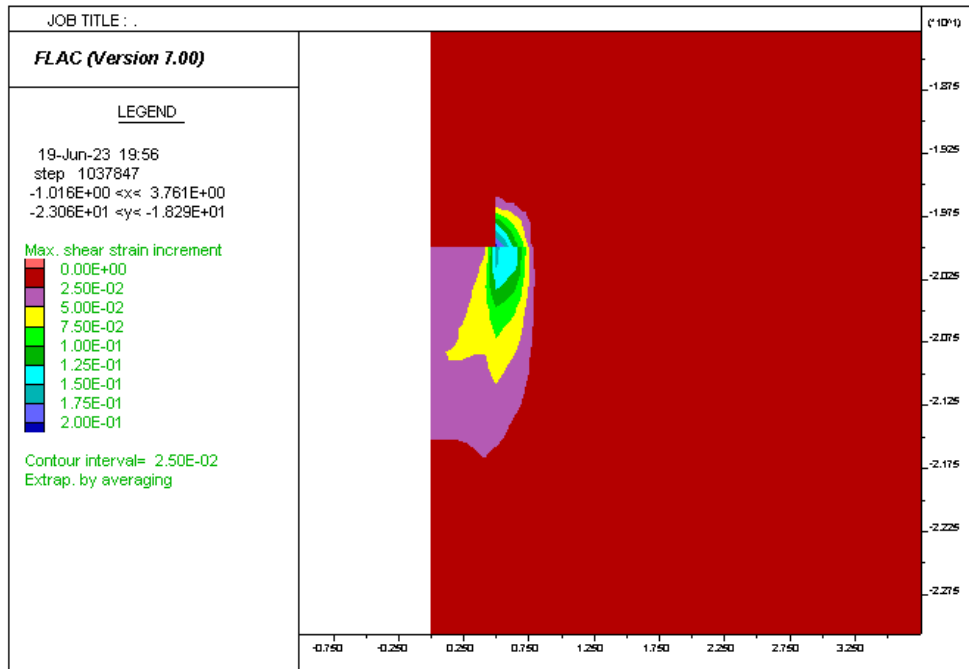
Σχήμα 3 Διανύσματα μετατοπίσεων στη βάση του πασσάλου



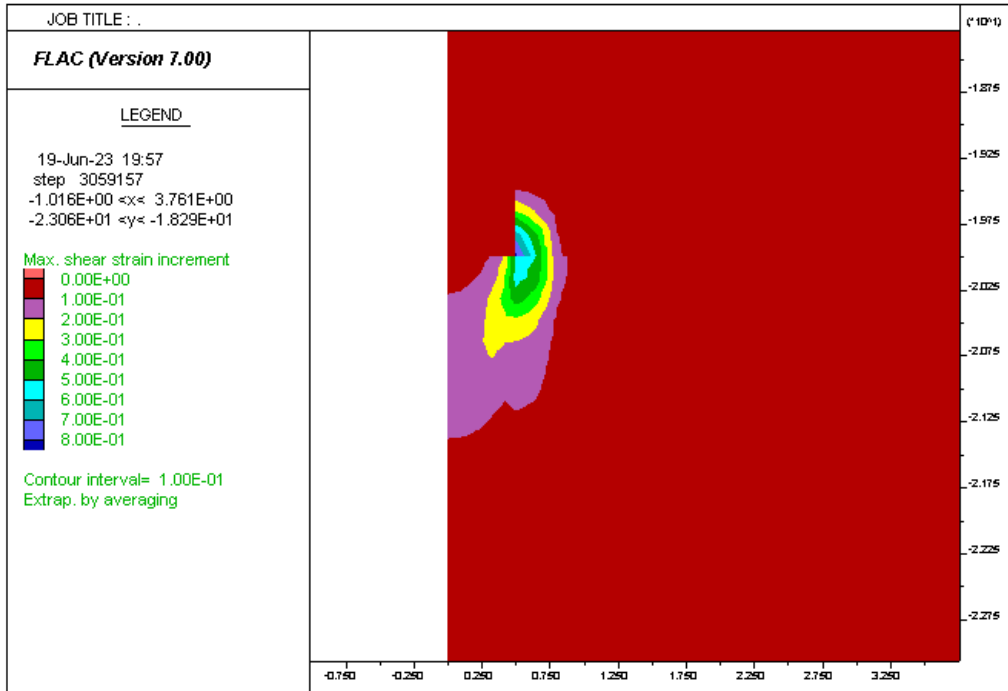
Σχήμα 4 Ισοτιμές ενεργών τάσεων στη βάση του πασσάλου για καθίζηση 10%D, για άμμο με  $\phi = 30$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 10$  MPa



Σχήμα 5 Ισοτιμές ενεργών τάσεων στη βάση του πασσάλου για καθίζηση 30%D, για άμμο με  $\phi = 30$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 10$  MPa

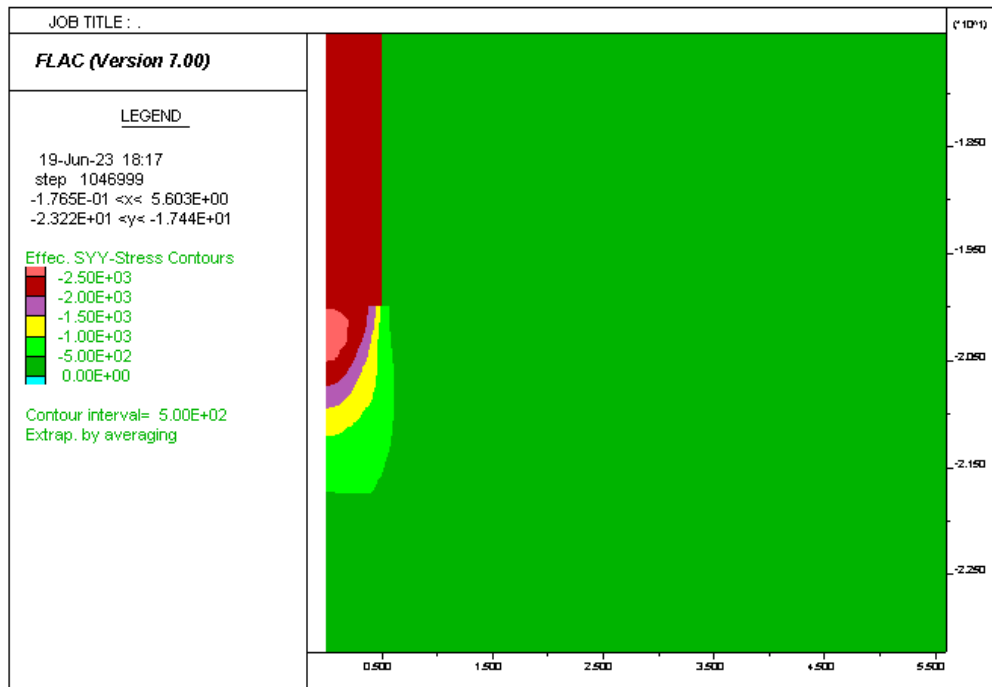


Σχήμα 6 Ισοτιμές διατμητικής παραμόρφωσης για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 30$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 10$  MPa

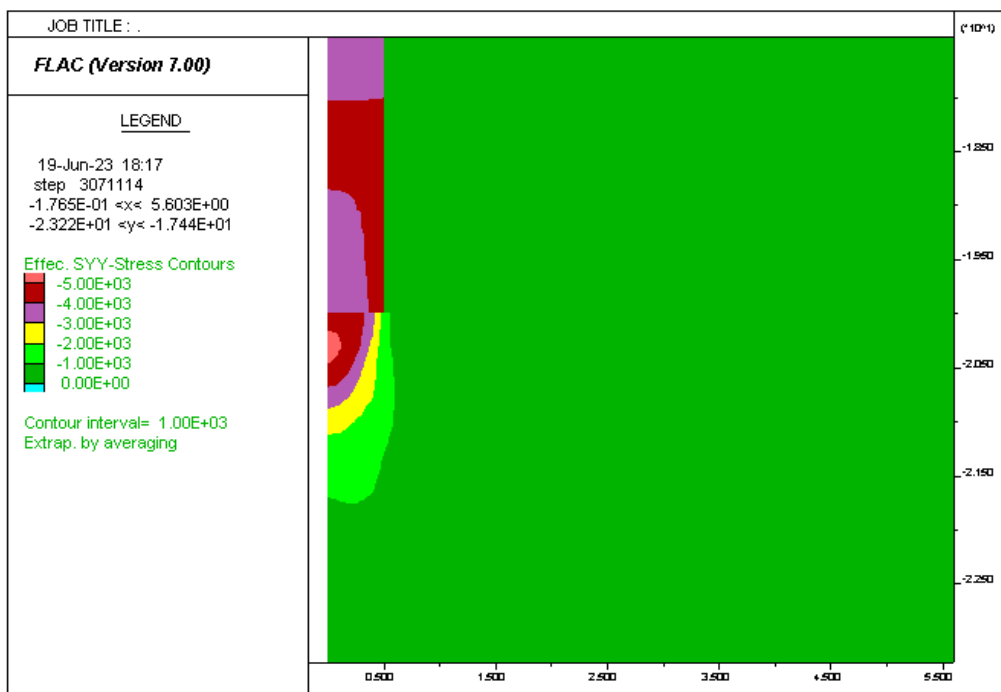


Σχήμα 7 Ισοτιμές διατμητικής παραμόρφωσης για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 30$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 10$  MPa

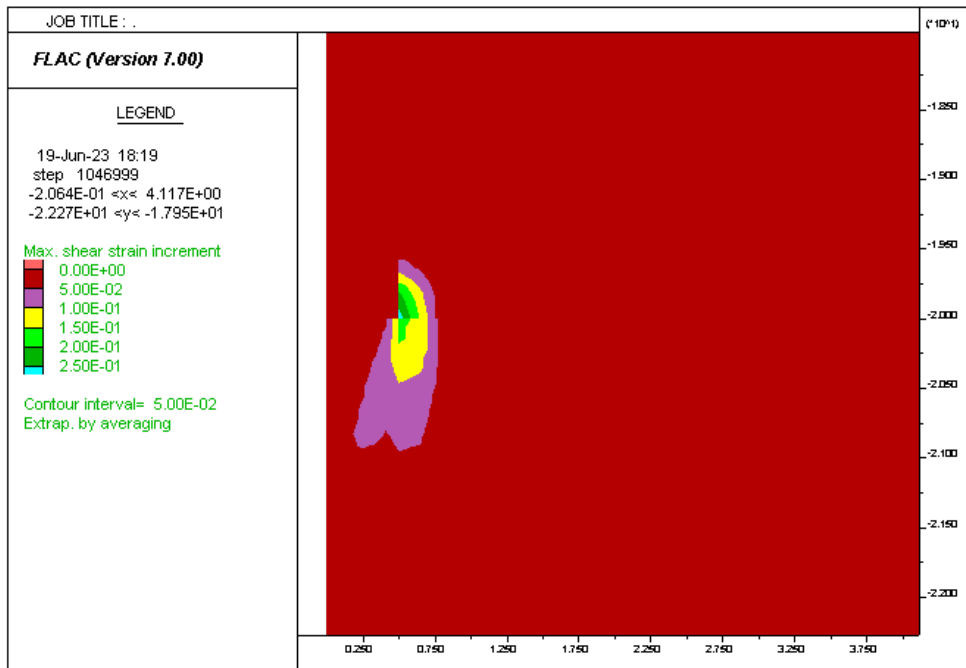




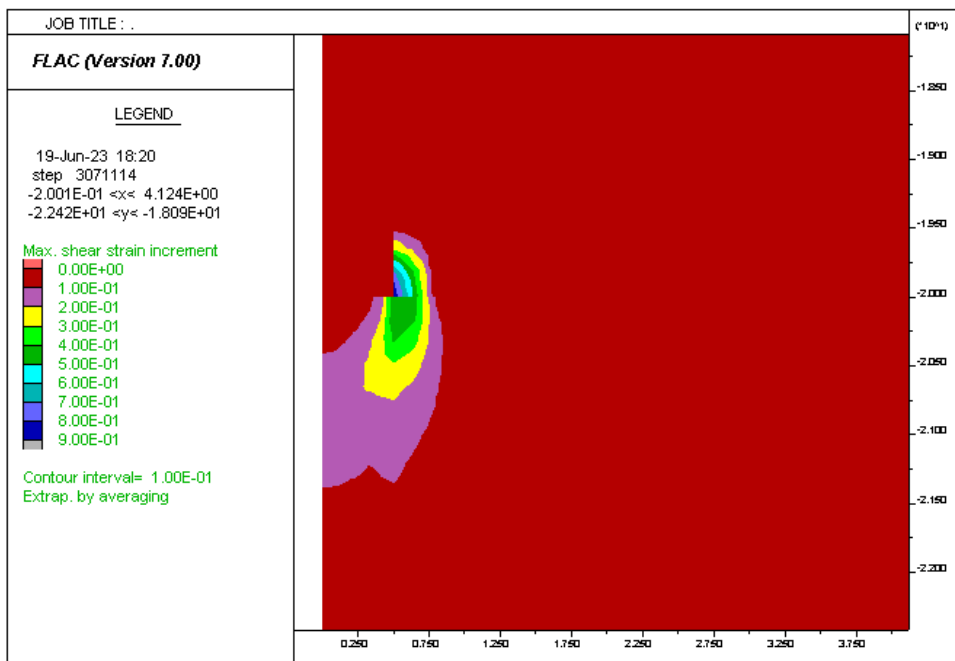
Σχήμα 8 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 100$  kPa  $G = 20$  MPa



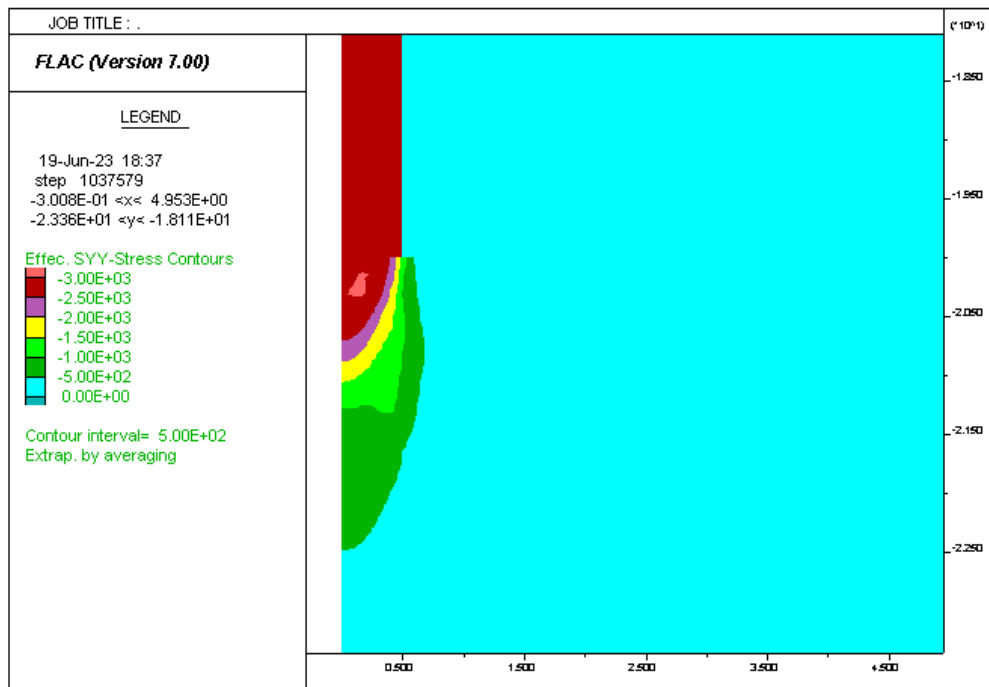
Σχήμα 9 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 100$  kPa  $G = 20$  MPa



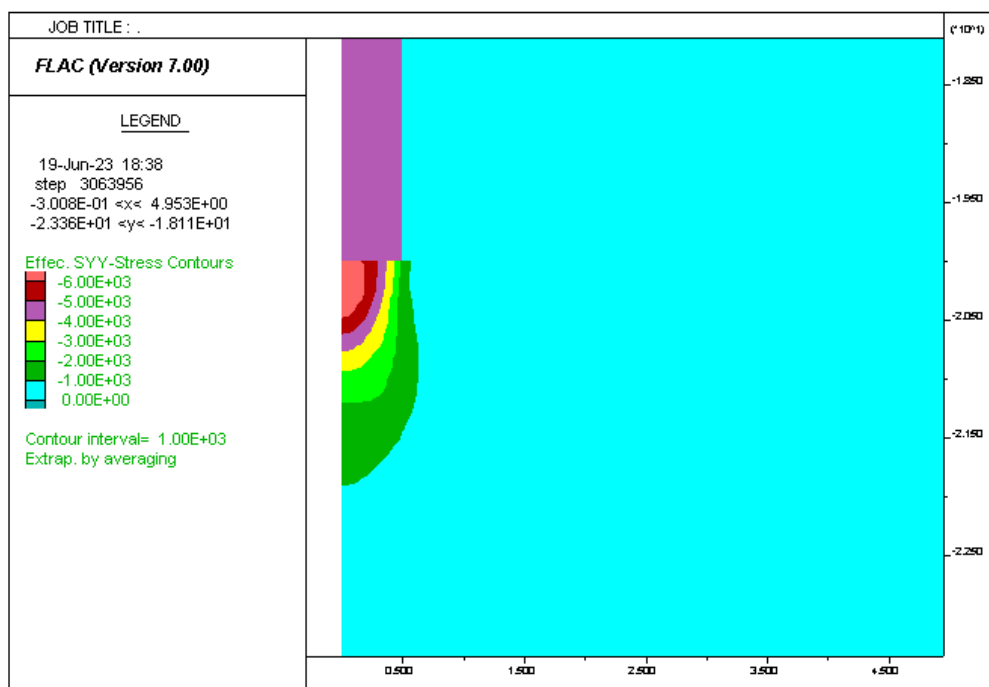
Σχήμα 10 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 100$  kPa  $G = 20$  MPa



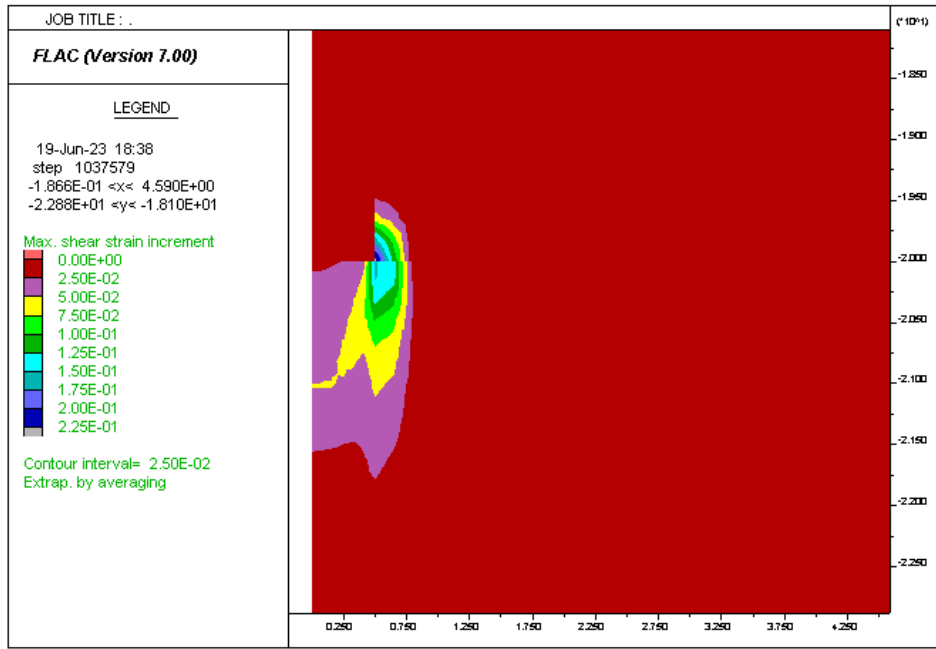
Σχήμα 11 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 100$  kPa  $G = 20$  MPa



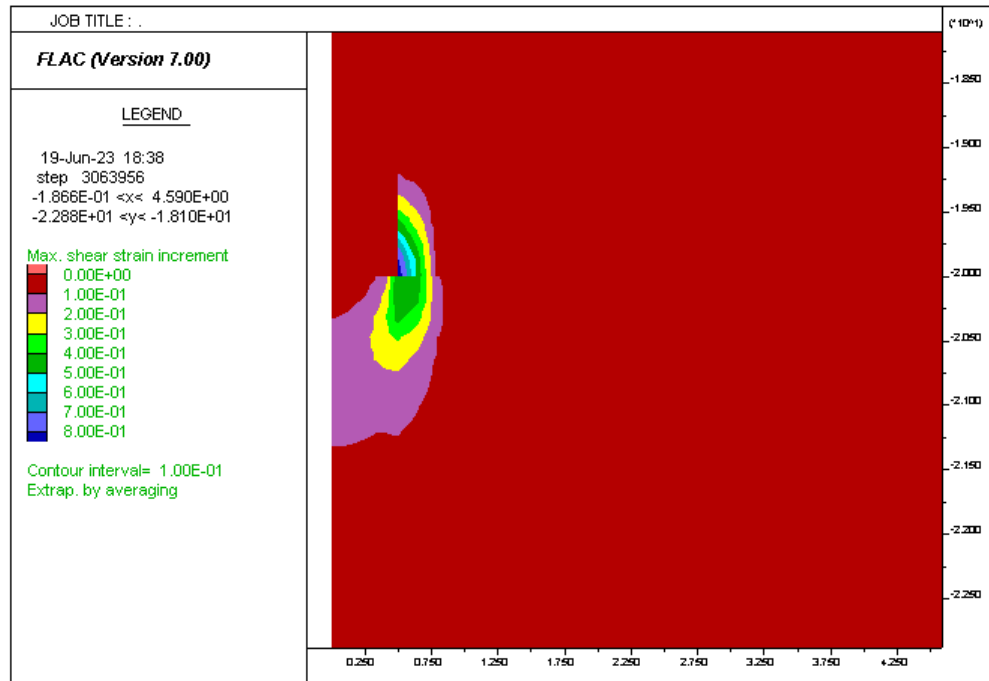
Σχήμα 12 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



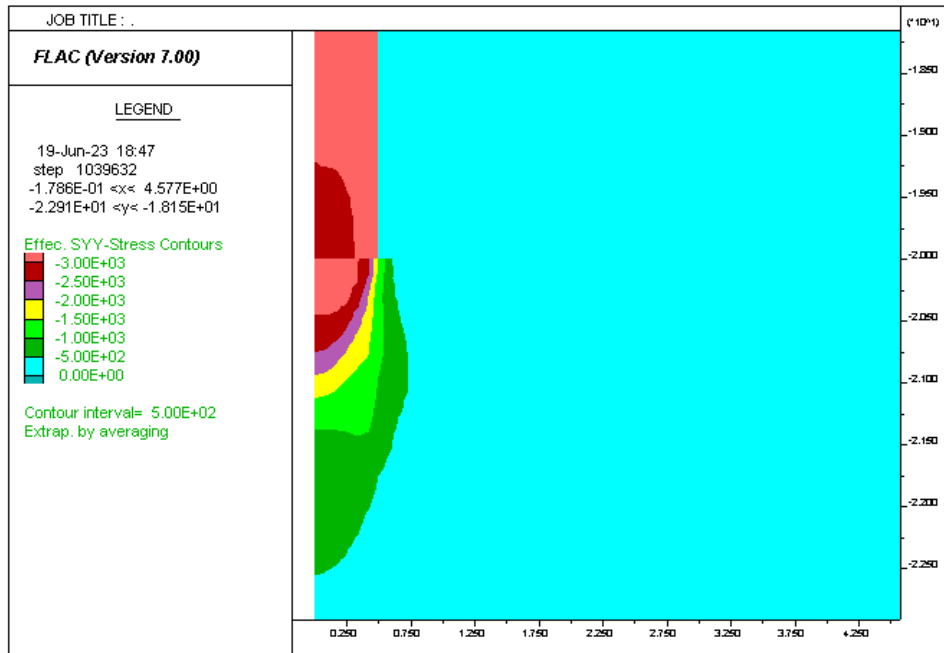
Σχήμα 13 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



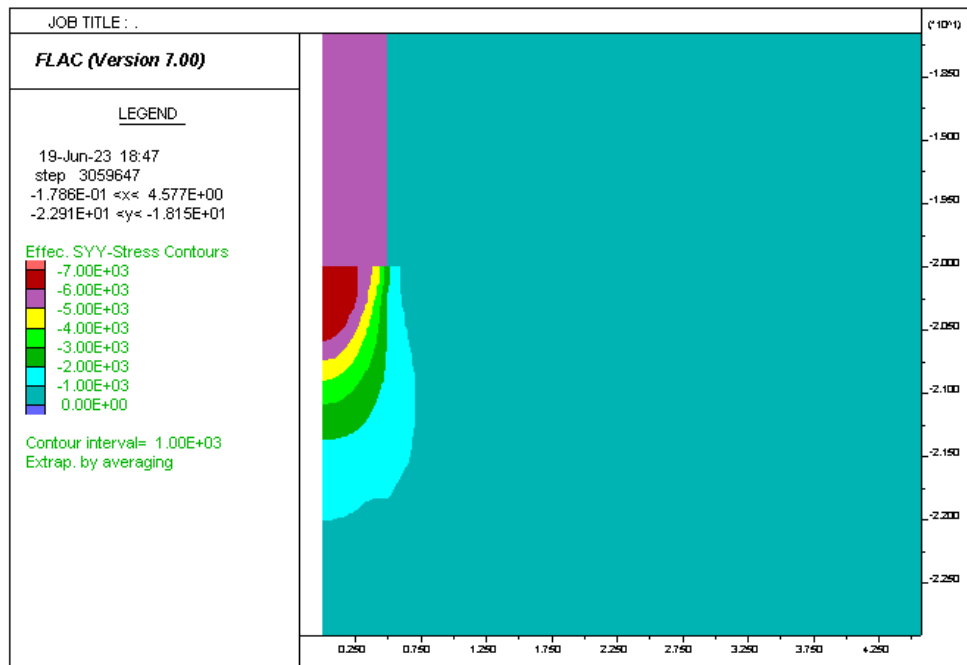
Σχήμα 14 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 0$   
 $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



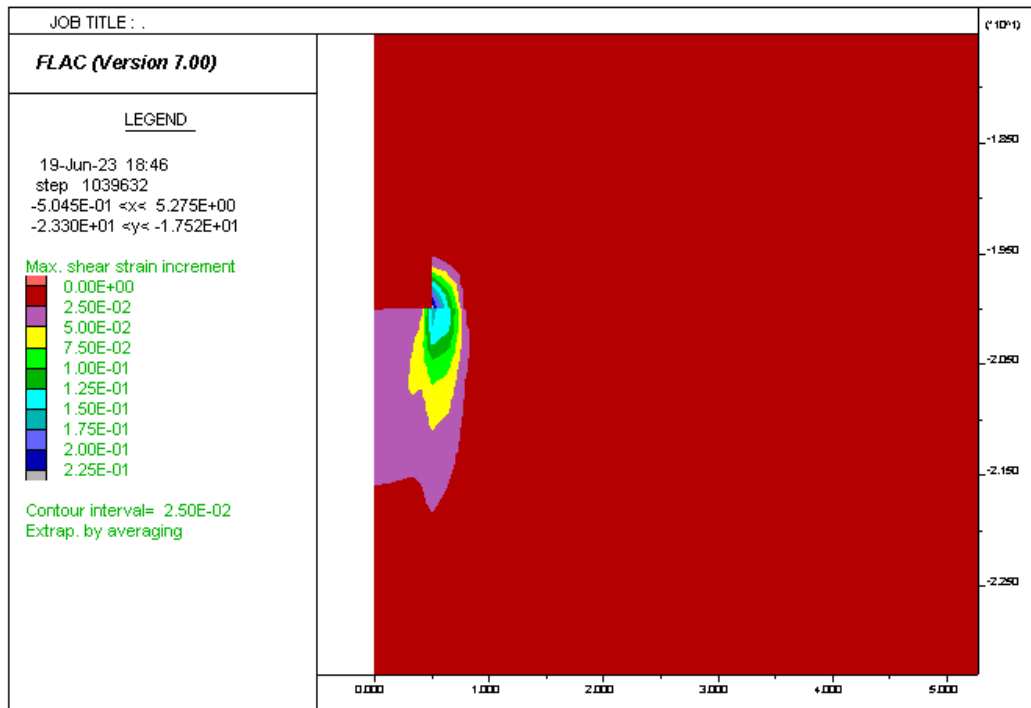
Σχήμα 15 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo}$   
 $= 200$  kPa  $G = 20$  MPa



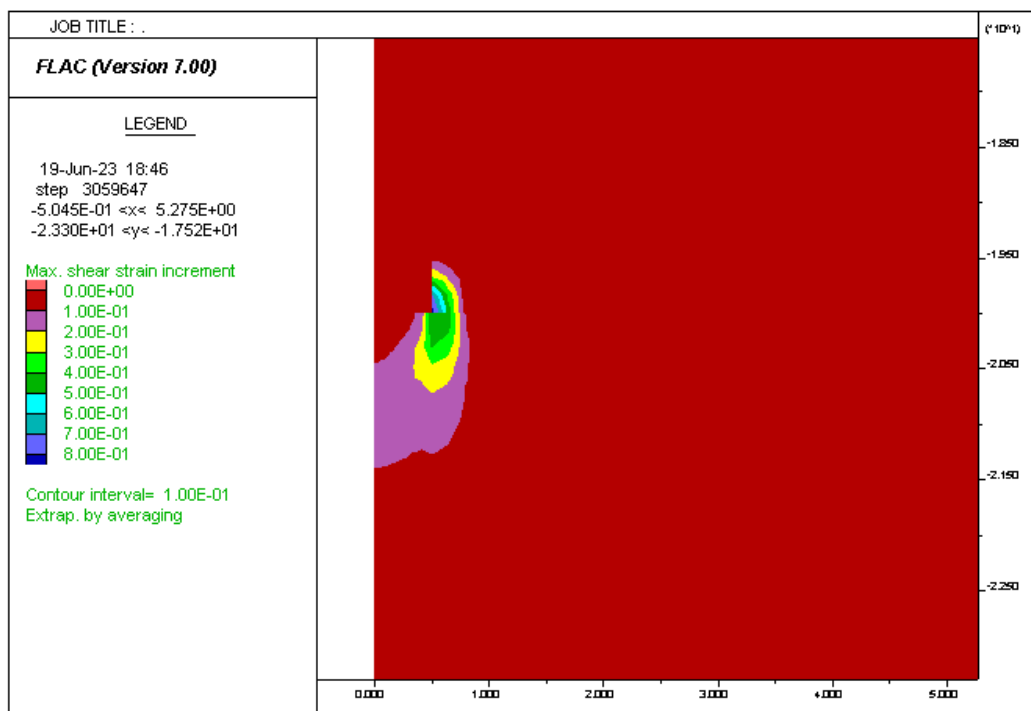
Σχήμα 16 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   
 $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



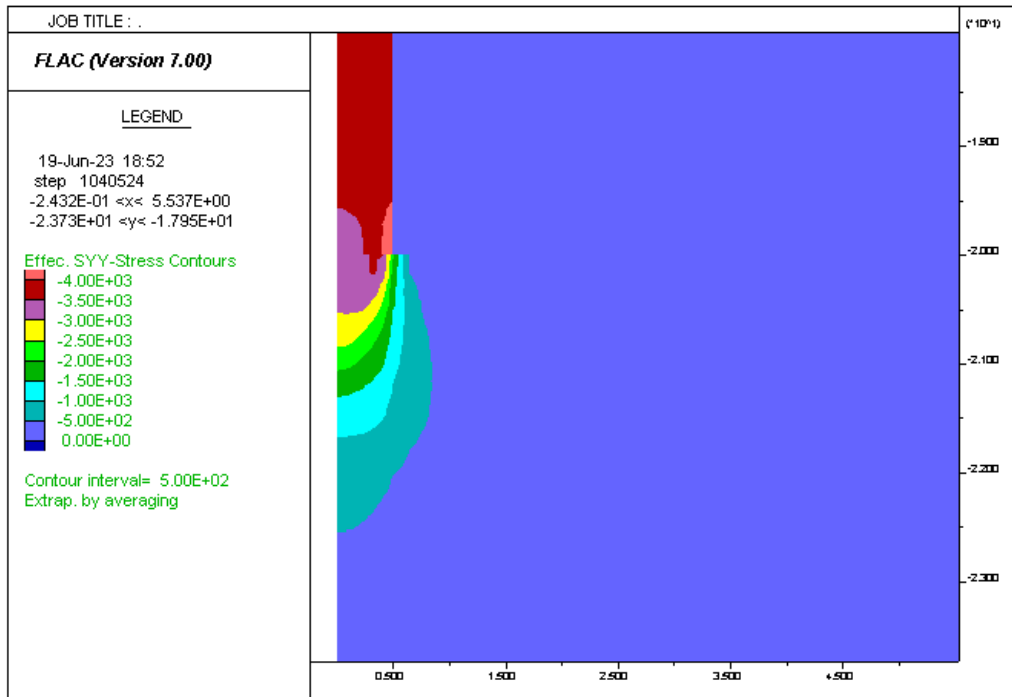
Σχήμα 17 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   
 $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



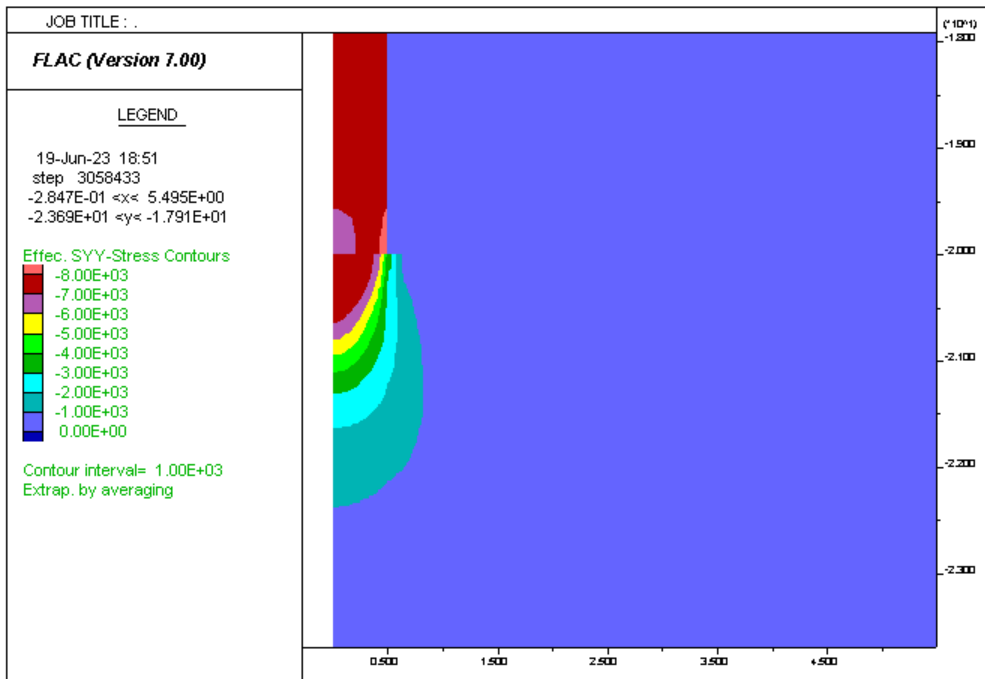
Σχήμα 18 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



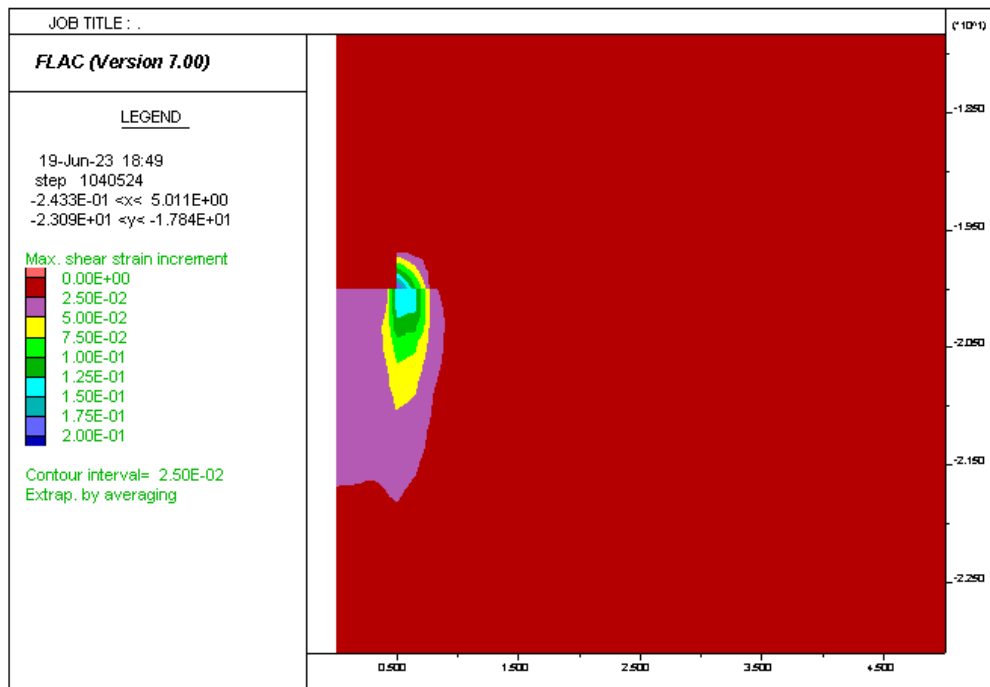
Σχήμα 19 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



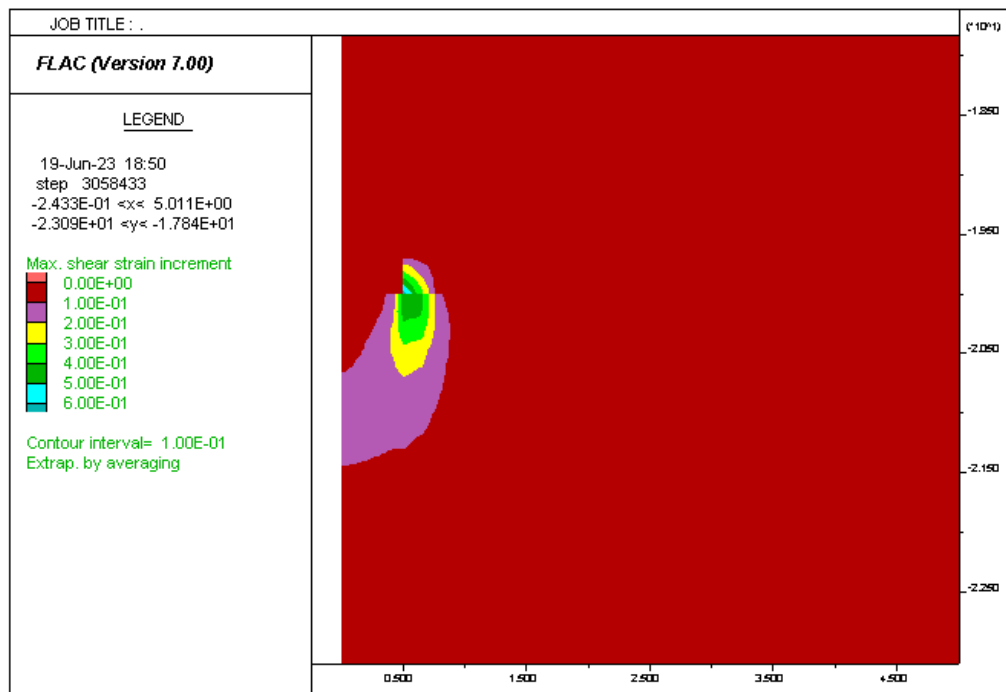
Σχήμα 20 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa



Σχήμα 21 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa

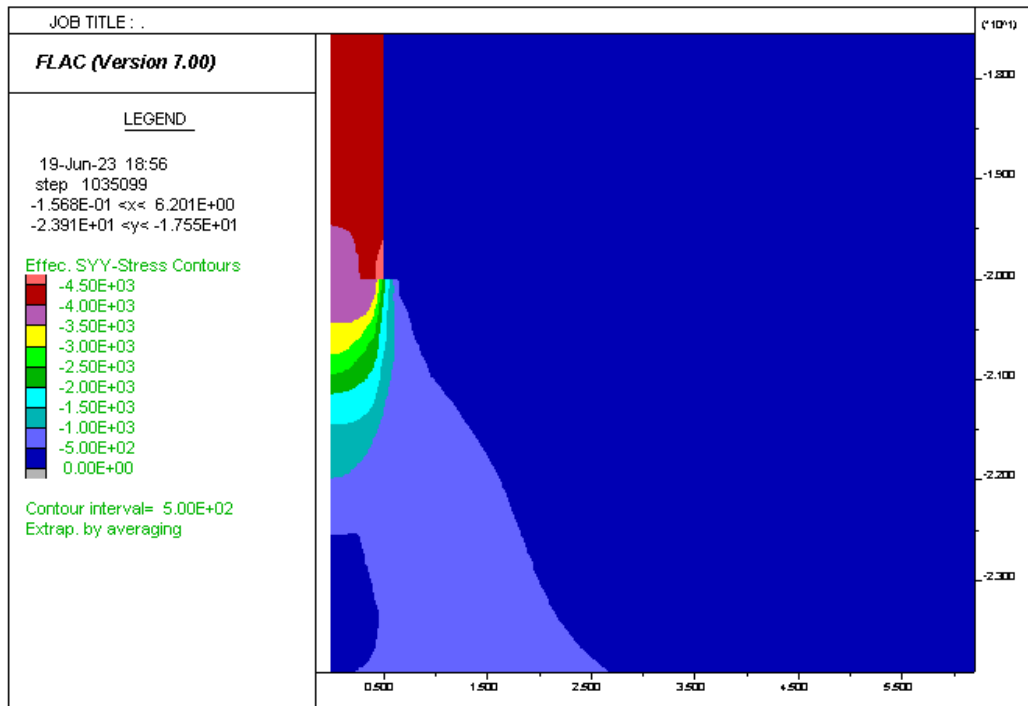


Σχήμα 22 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa

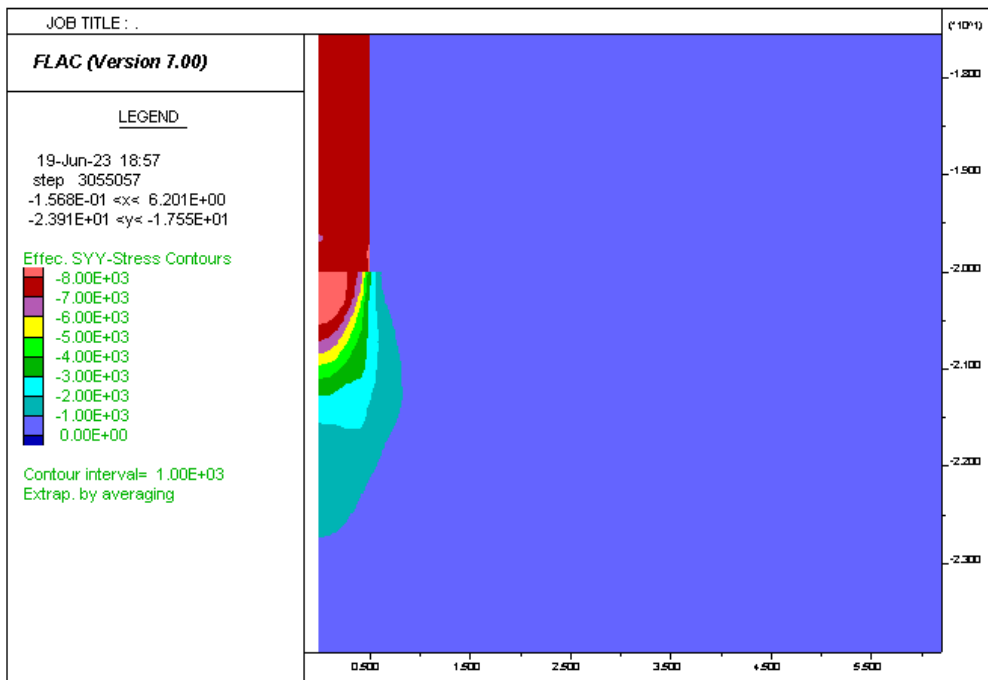


Σχήμα 23 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 20$  MPa

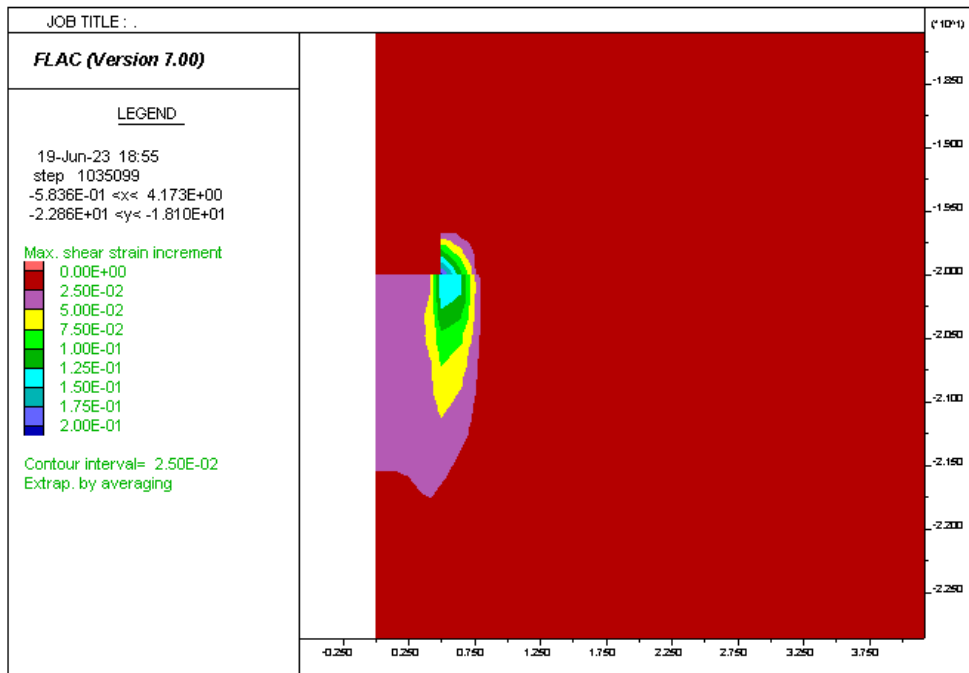




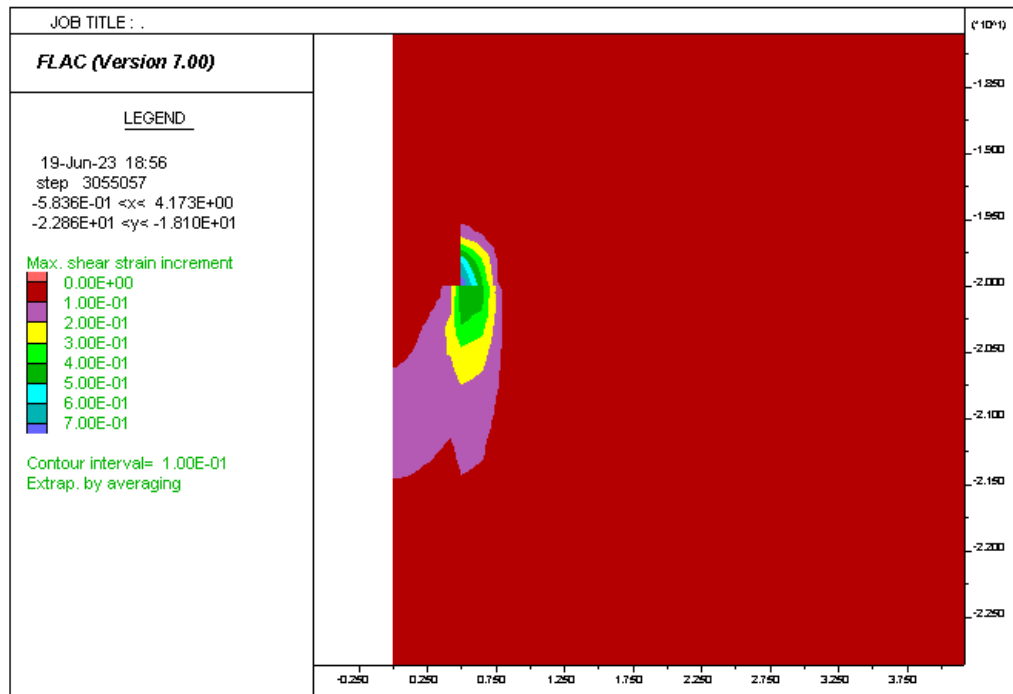
Σχήμα 24 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 400$  kPa  $G = 20$  MPa



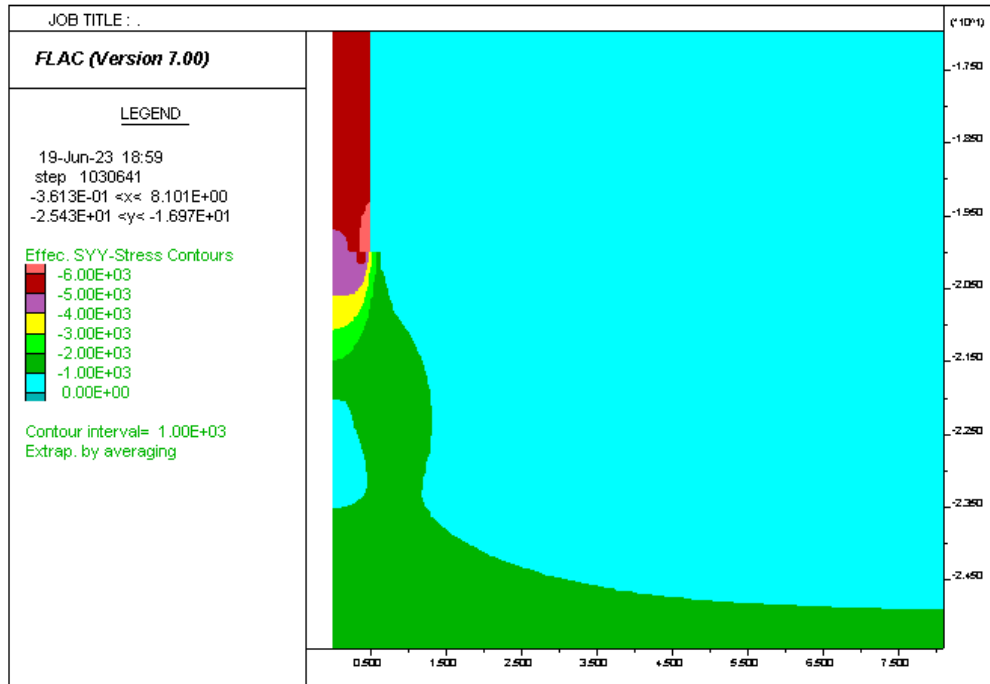
Σχήμα 25 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 400$  kPa  $G = 20$  MPa



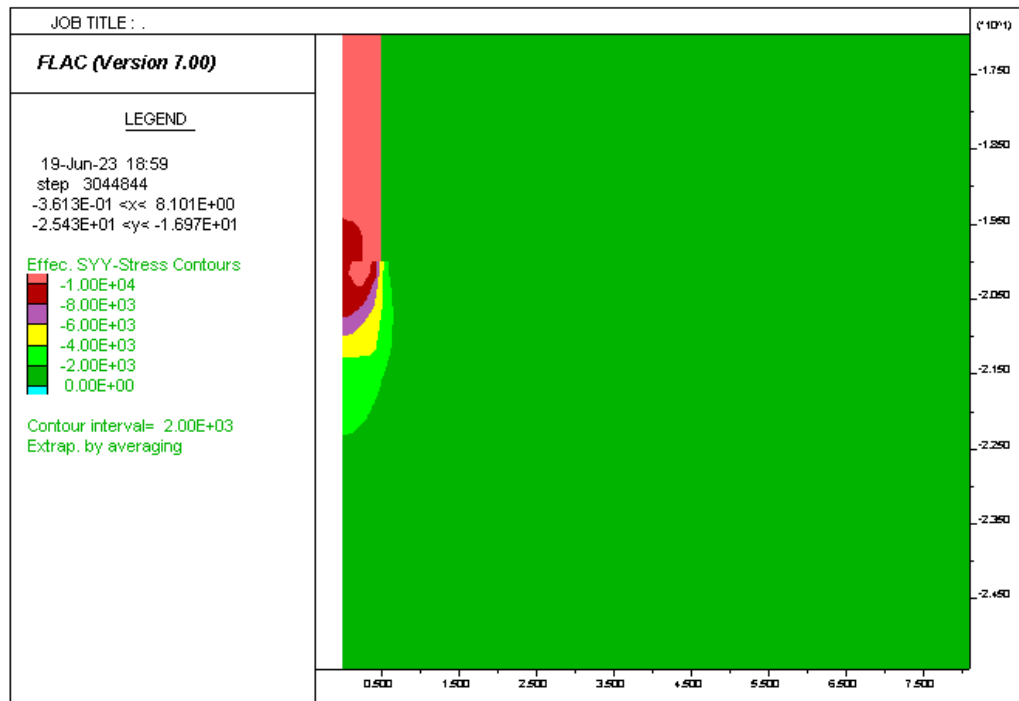
Σχήμα 26 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 400$  kPa  $G = 20$  MPa



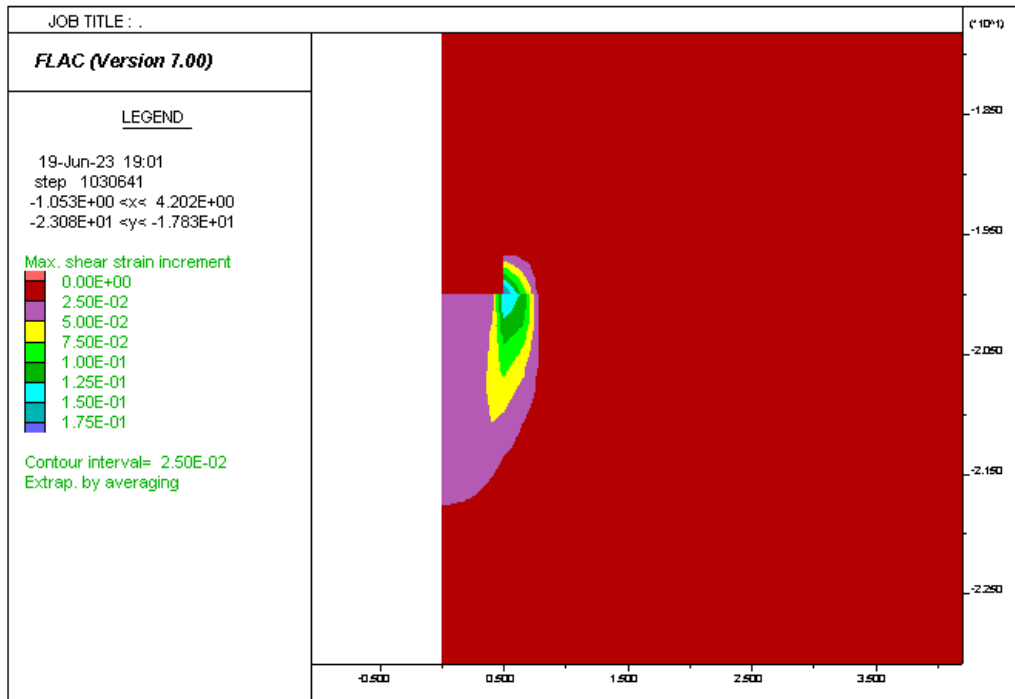
Σχήμα 27 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 400$  kPa  $G = 20$  MPa



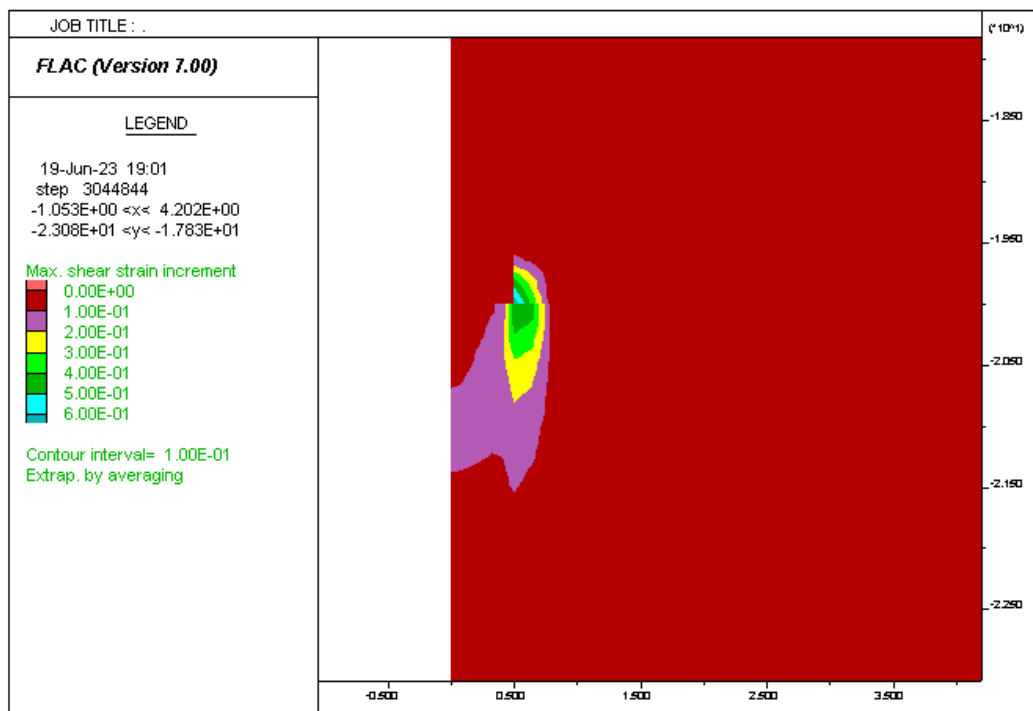
Σχήμα 28 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 800$  kPa  $G = 20$  MPa



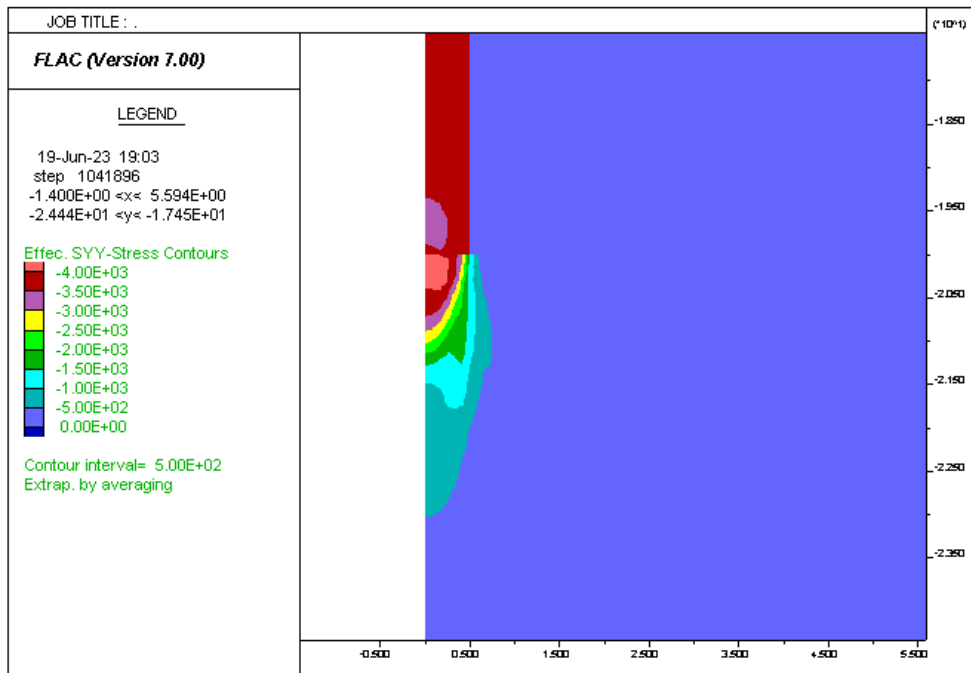
Σχήμα 29 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 800$  kPa  $G = 20$  MPa



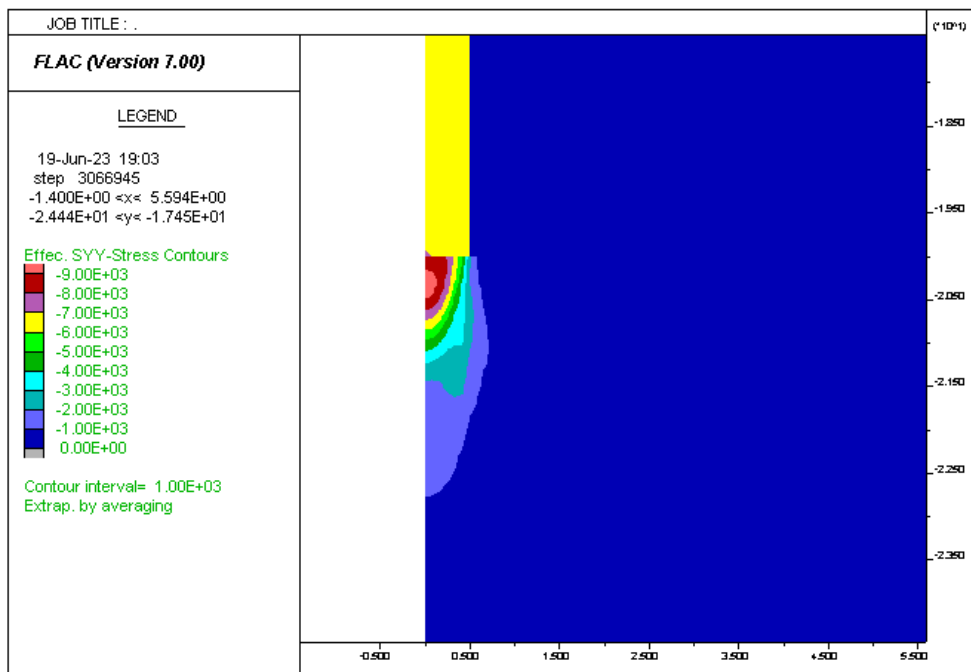
Σχήμα 30 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 800$  kPa  $G = 20$  MPa



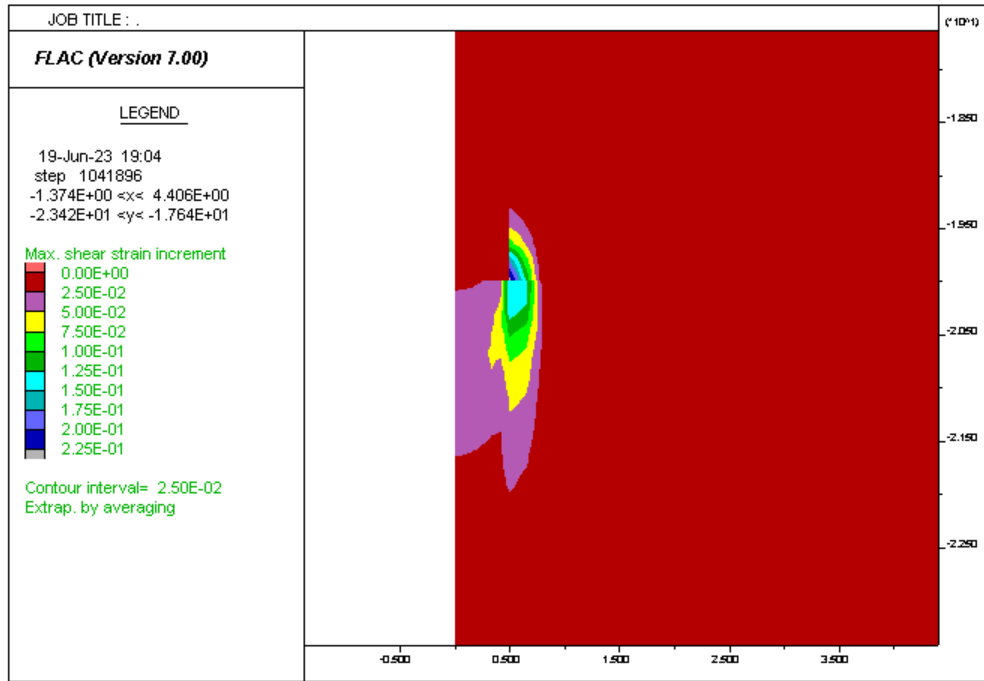
Σχήμα 31 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 33$   $\psi = 3$   $\sigma'_{vo} = 800$  kPa  $G = 20$  MPa



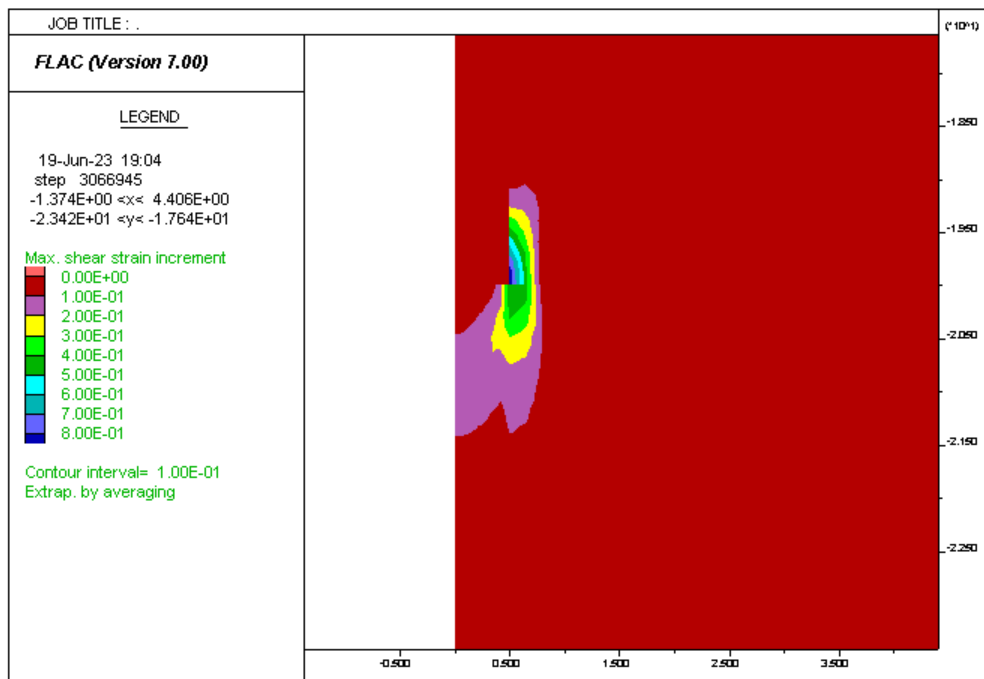
Σχήμα 32 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa



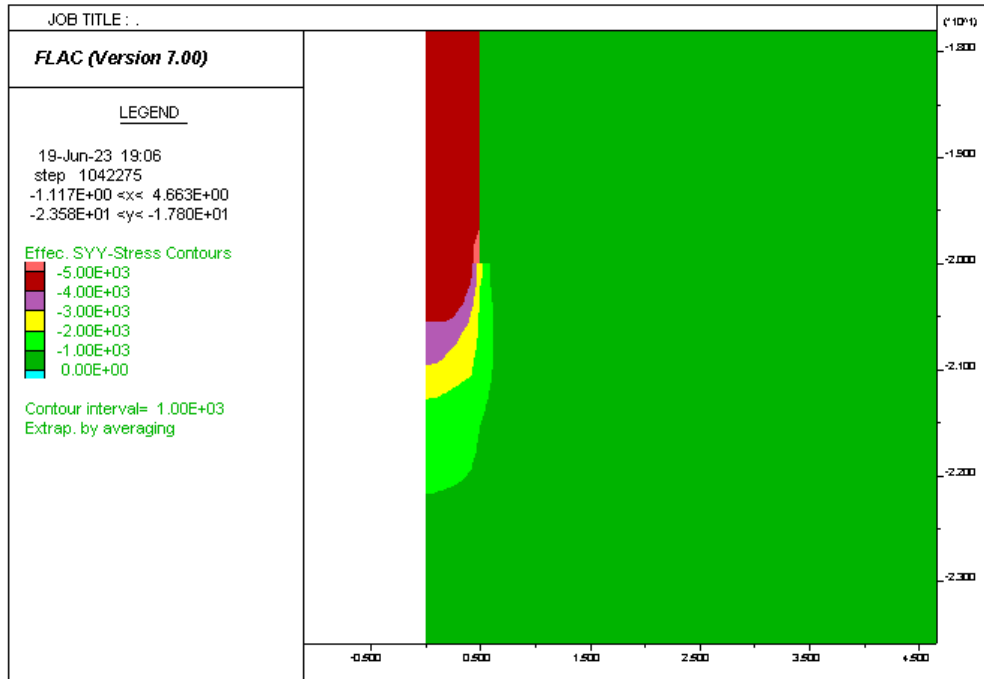
Σχήμα 33 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa



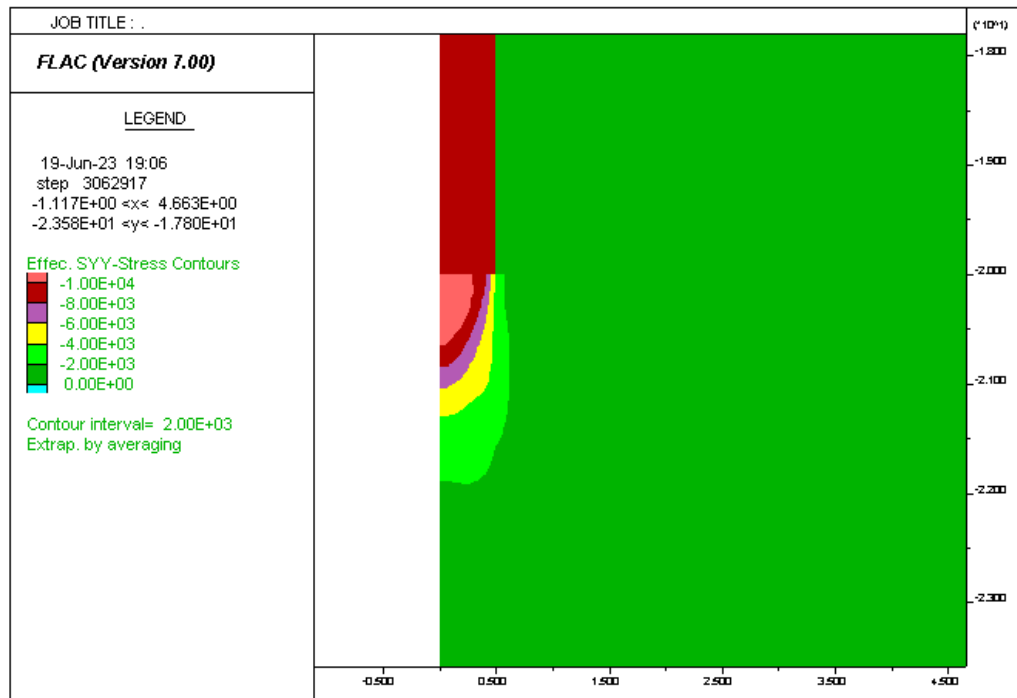
Σχήμα 34 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa



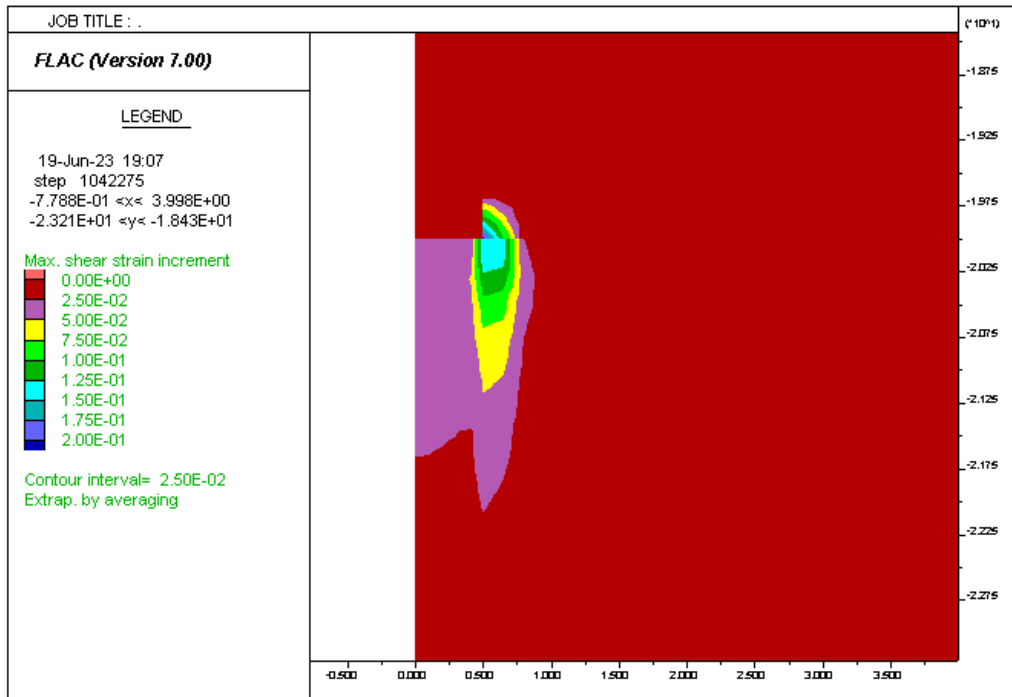
Σχήμα 35 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa



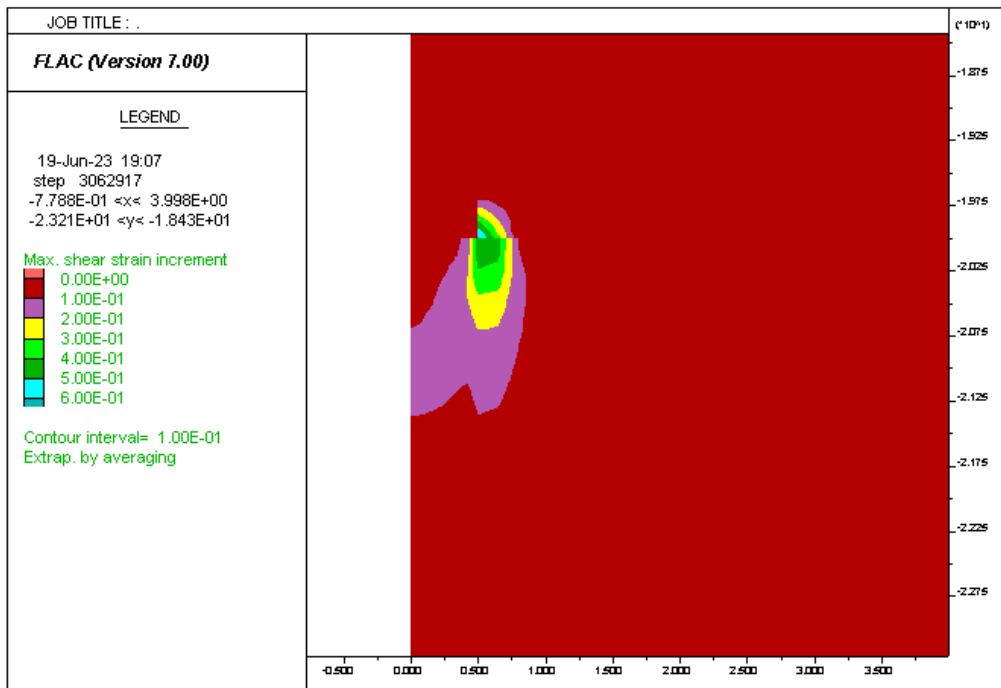
Σχήμα 36 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 7$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa



Σχήμα 37 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 7$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa

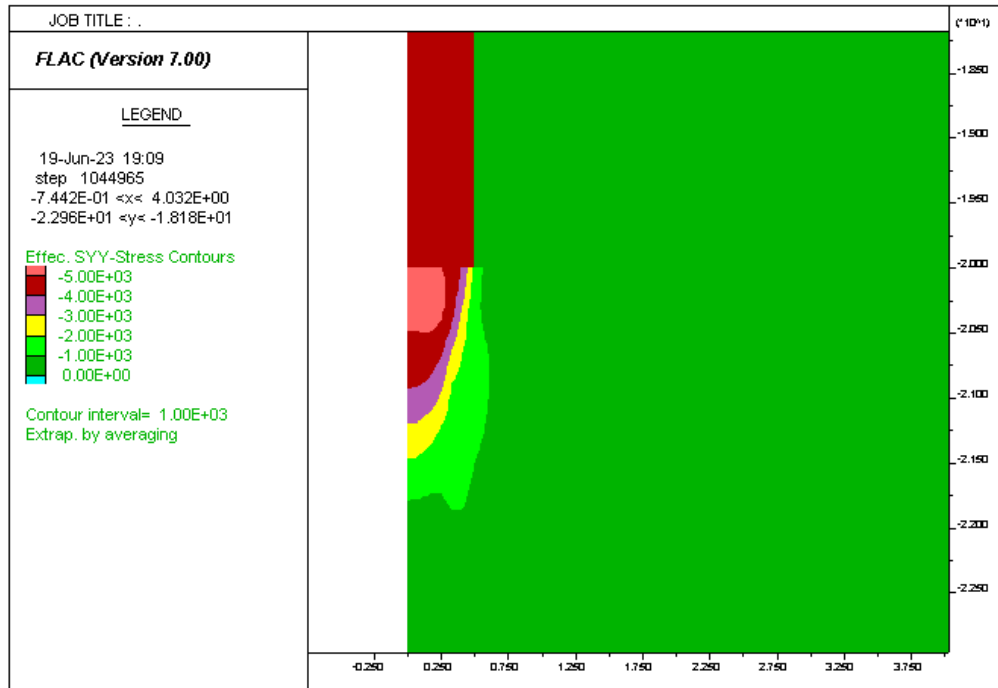


Σχήμα 38 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 7$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa

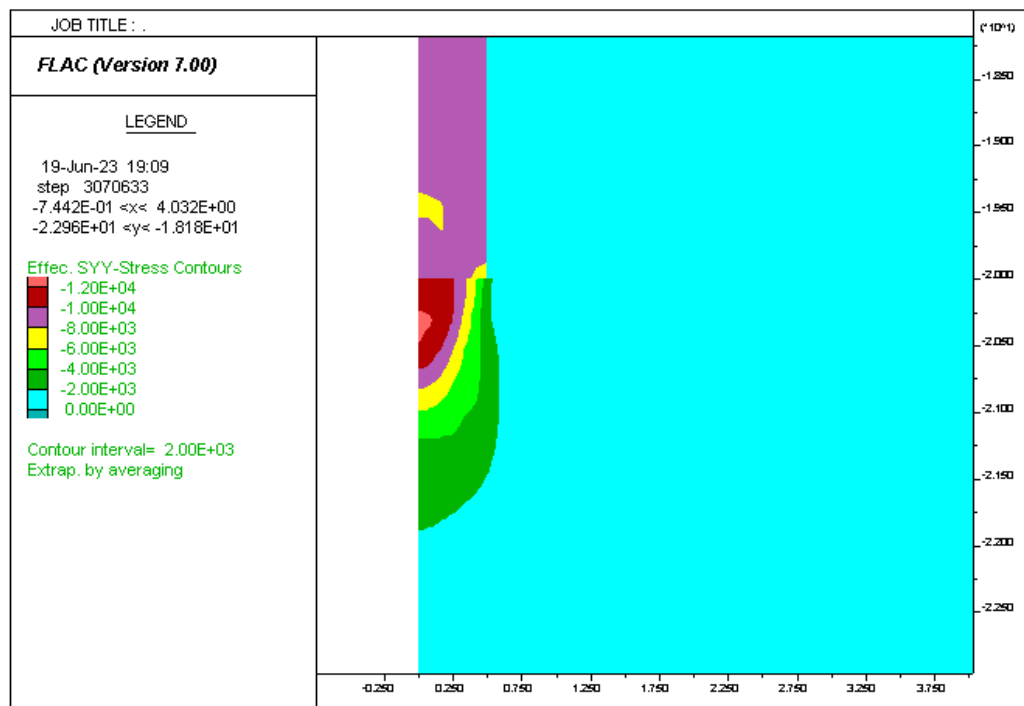


Σχήμα 39 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 37$   $\psi = 7$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa

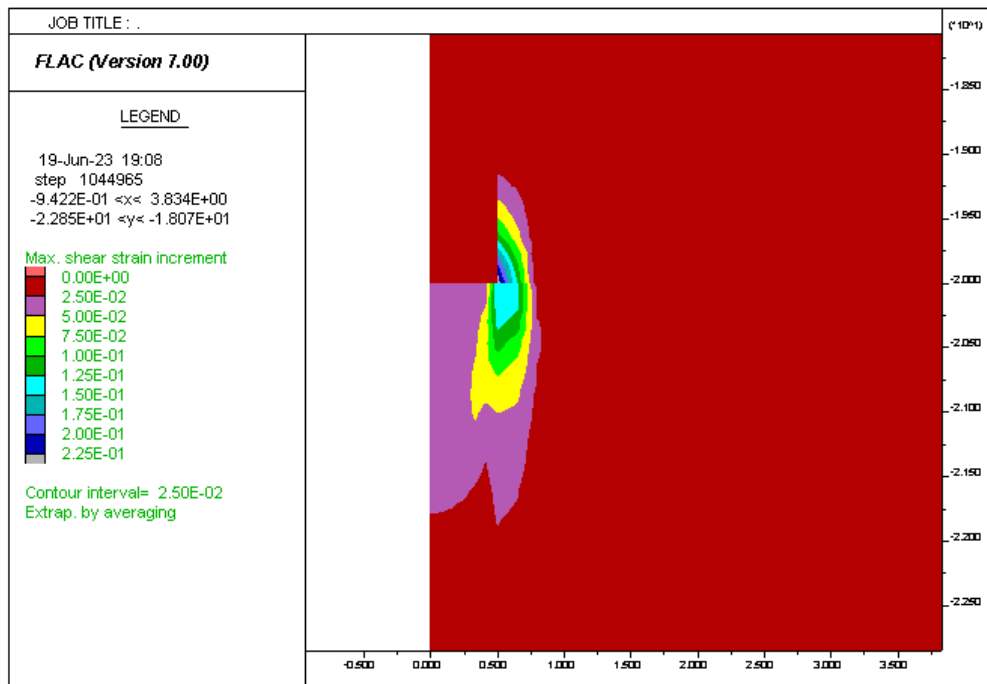




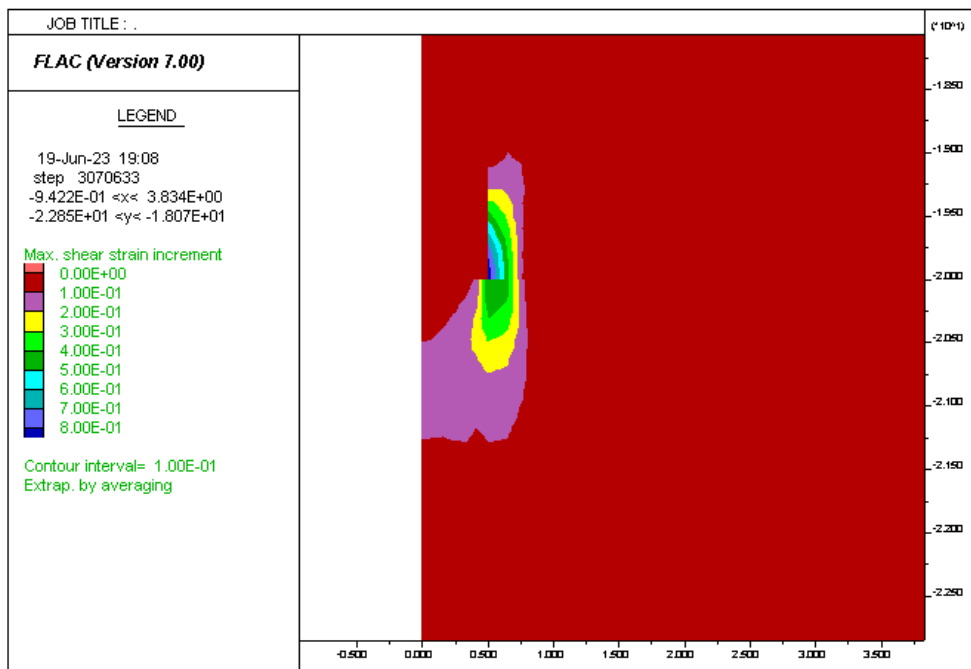
Σχήμα 40 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



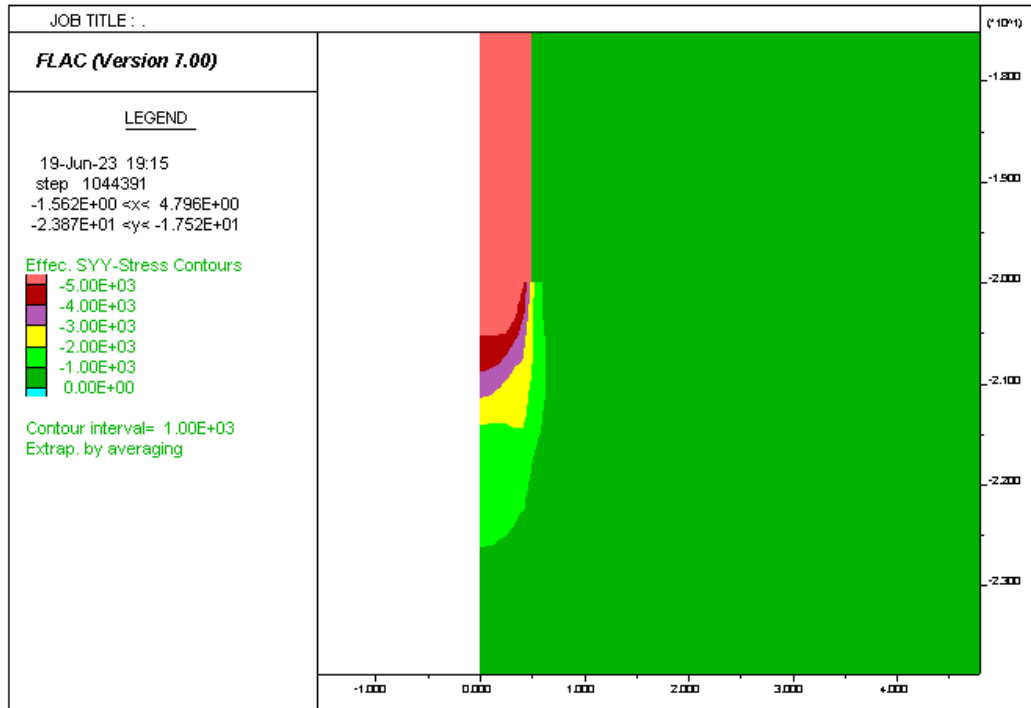
Σχήμα 41 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 30$  MPa



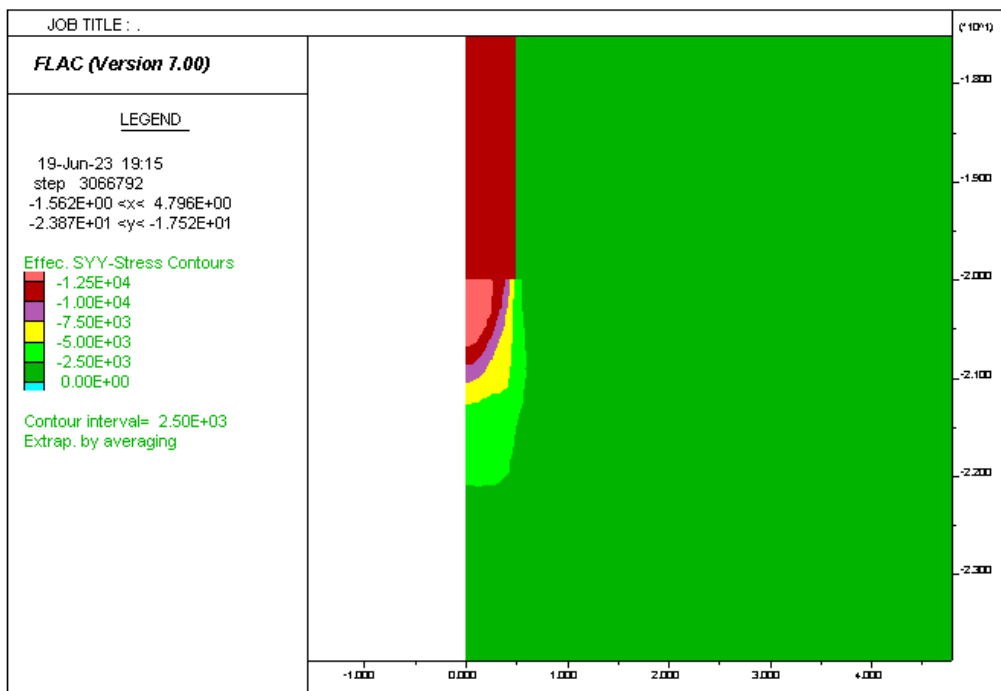
Σχήμα 42 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



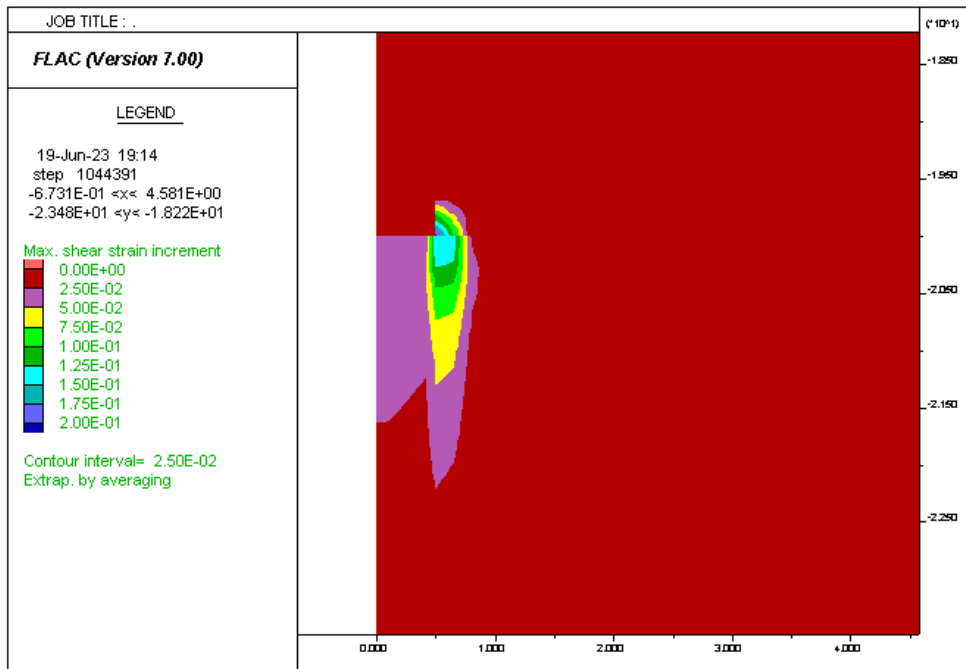
Σχήμα 43 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 0$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



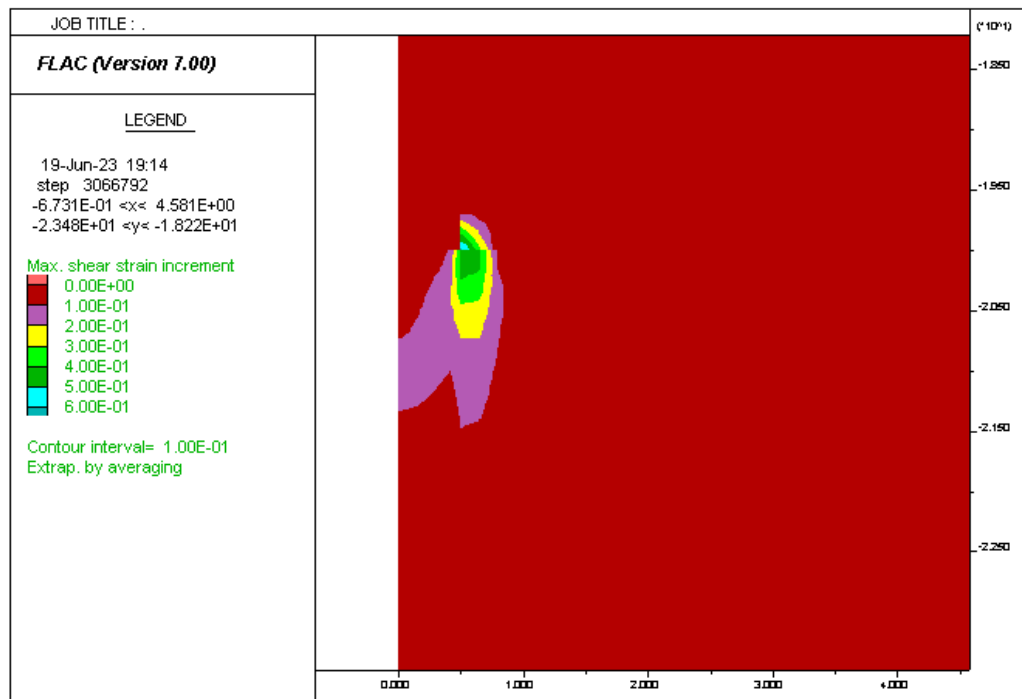
Σχήμα 44 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 5$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



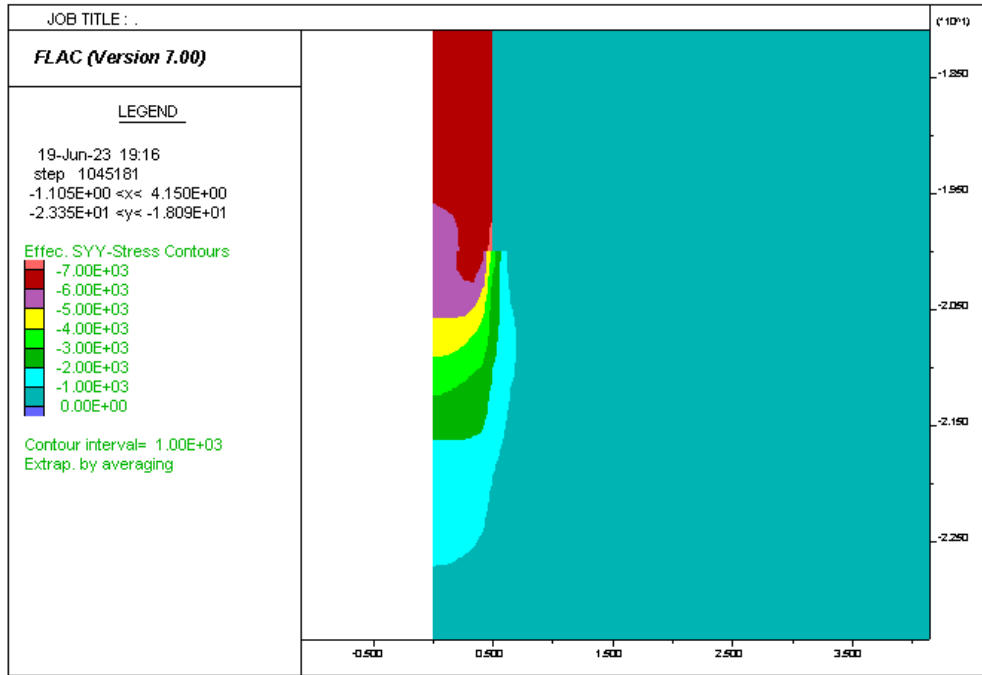
Σχήμα 45 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 5$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



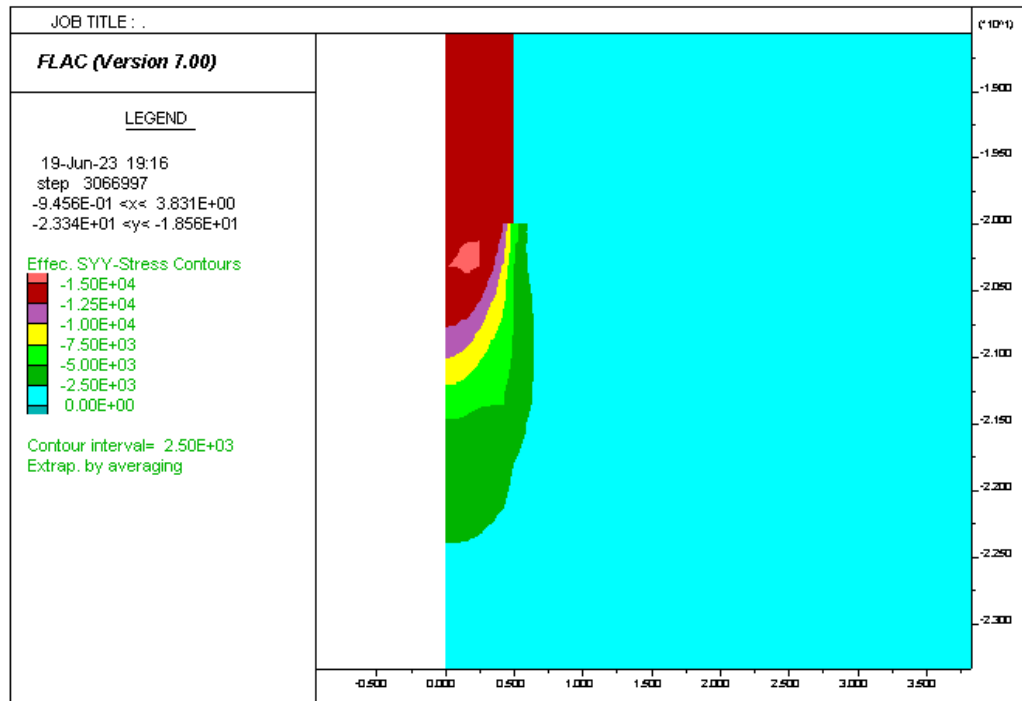
Σχήμα 46 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 5$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



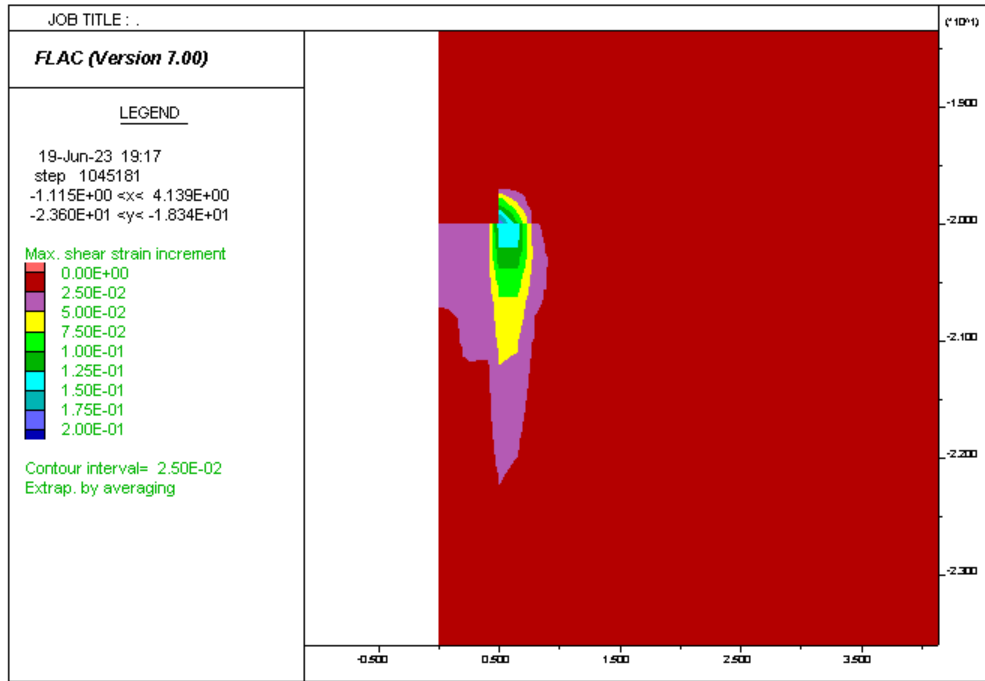
Σχήμα 47 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 5$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



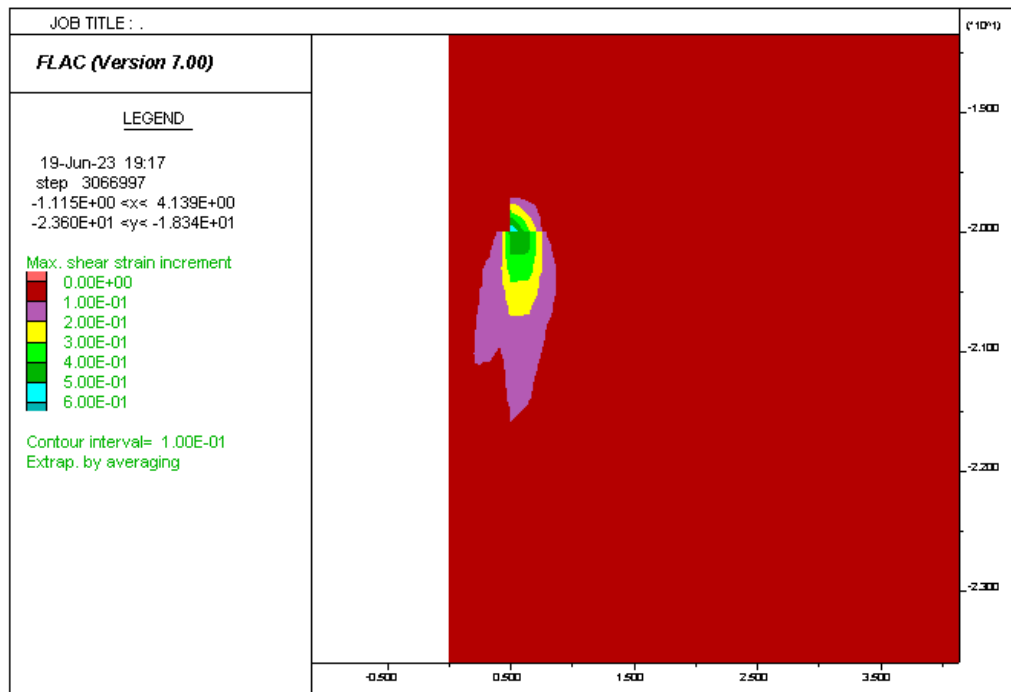
Σχήμα 48 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 10$   
 $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



Σχήμα 49 Ισοτιμές κατακόρυφων ενεργών τάσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} =$   
 $200$  kPa  $G = 40$  MPa



Σχήμα 50 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 10%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa



Σχήμα 51 Ισοτιμές διατμητικών παραμορφώσεων για καθίζηση 30%D για άμμο με  $\varphi = 40$   $\psi = 10$   $\sigma'_{vo} = 200$  kPa  $G = 40$  MPa

