



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ»

« ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΜΙΑ ΚΑΙ ΔΥΟ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ »

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΥΝΤΖΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΟΦΙΑΝΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ»

« ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΜΙΑ ΚΑΙ ΔΥΟ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ »

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΥΝΤΖΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΟΦΙΑΝΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .../.../...

Αλέξανδρος Σοφιανός, Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

Πάυλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών << Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων >> του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με συμμετέχουσες σχολές τη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών και τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με τη βοήθεια τους στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας και ιδιαίτερα:

Τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Σοφιανό Αλέξανδρο για την ανάθεση του θέματος και για την επίτευξη μιας πολύ καλής συνεργασίας.

Την Υποψήφια Διδάκτωρ κα. Γιούτα – Μήτρα Παρασκευή για την πολύτιμη βοήθεια της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νομικό Παύλο για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λουπασάκη Κωνσταντίνο για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας.

Τέλος το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου Πάρι και Βασιλική για τη συνεχή στήριξη και υπομονή τους.

Αφιερώνεται,
Στην οικογένεια μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο “ Παραμετρική ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς βραχώμαζας με μία και δύο οικογένειες ασυνεχειών ” έχει σκοπό την μελέτη της ανισότροπης μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας εντός της οποίας έχει διανοιχθεί κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου $D=10\text{m}$ σε βάθος $H=100\text{m}$. Για την μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς της βραχώμαζας πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με το πρόγραμμα phase v.8 το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για μία και για δύο οικογένειες ασυνεχειών. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι η κλίση των ασυνεχειών, η γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, η συχνότητα εμφάνισης των ασυνεχειών, ο αριθμός των οικογενειών των ασυνεχειών καθώς και ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων, είναι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την μεταβολή των τιμών των τάσεων και των παραμορφώσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που έχουν υπολογιστεί για το ίδιο κυκλικό άνοιγμα το οποίο έχει διανοιχθεί εντός ισότροπου μέσου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Στόχος της εργασίας.	8
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ	10
2.1 Είδη ασυνεχειών	10
2.2 Περιγραφή ασυνεχειών	11
2.3 Δυστροπία Ασυνεχειών	16
2.3.1. Ορθή δυστροπία K_n	16
2.3.2. Διατμητική δυστροπία K_s	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ - ΚΛΕΙΣΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ	19
3.1 Αναλυτικές σχέσεις για ισότροπο πέτρωμα	19
3.1.1. Η σχέση του Kirsch (1898)	20
3.2. Αναλυτικές σχέσεις για Ανισότροπο Πέτρωμα.	21
3.2.1. Αναλυτική λύση Daemen (1983).	21
3.2.2. Η γεωμετρική μέθοδος του Goodman (1989)	26
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ PHASE².	28
4.1. Γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα Phase ²	28
4.2. Προετοιμασία μοντέλου	28
4.2.1. Εισαγωγή γεωμετρίας.....	28
4.2.2. Προσθήκη εξωτερικού ορίου.....	28
4.2.3. Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Meshing).	29
4.2.4. Συνοριακές Συνθήκες (Boundary Conditions).	29

4.2.5.	Τασικό πεδίο (Field Stress)	29
4.2.6.	Ιδιότητες Βραχώμαζας	29
	Παραμετρικές αναλύσεις.	32
4.3.	Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=1$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 2\text{m}^{-1}$	34
4.3.1.	Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών.....	34
4.3.2.	Μεταβολή γωνίας εσωτερικής τριβής ασυνεχειών.....	42
4.4.	Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=1$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 0.66\text{m}^{-1}$	45
4.4.1.	Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών.....	45
4.5.	Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=0.5$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 2\text{m}^{-1}$	52
4.5.1.	Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών.....	52
4.5.2.	Μεταβολή γωνίας εσωτερικής τριβής ασυνεχειών.....	56
4.6.	Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=0.5$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 0.66\text{m}^{-1}$	59
4.6.1.	Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών.....	59
4.7.	Συγκεντρωτικά διαγράμματα	66
4.8	Συγκεντρωτικοί πίνακες:	99
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	102
5.1.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.	103
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος της εργασίας.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ανισότροπης μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας με μία και δύο οικογένειες ασυνεχειών, εντός της οποίας έχει γίνει διάνοιξη κυκλικού ανοίγματος διαμέτρου $D = 10$ m σε βάθος $H = 100$ m. Για την διερεύνηση της ανισότροπης συμπεριφοράς πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 v.8 της rocscience. Πιο συγκεκριμένα:

Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για μία και για δύο οικογένειες ασυνεχειών.

- I. Για τις παραμετρικές αναλύσεις με μία οικογένεια ασυνεχειών εξετάστηκαν οι κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 90° , για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda_1 = 2$ m^{-1} και $\lambda_2 = 0.66$ m^{-1} για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K = 1$ και $K = 0.5$.
- II. Για τις παραμετρικές αναλύσεις με δύο οικογένειες ασυνεχειών, κρατήθηκε σταθερή η κλίση της μίας οικογένειας ασυνεχειών $a_1 = 0^\circ$ και πραγματοποιήθηκε μεταβολή της κλίσης της δεύτερης οικογένειας ασυνεχειών a_2 έτσι ώστε οι εξεταζόμενες διαφορές στην κλίση των ασυνεχειών $\Delta a = a_2 - a_1$ να παίρνουν τιμές από 30° έως 90° , για συχνότητα ασυνεχειών $\lambda_1 = 2$ m^{-1} και $\lambda_2 = 0.66$ m^{-1} για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K = 1$ και $K = 0.5$.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελείται από πέντε κεφάλαια των οποίων το περιεχόμενο περιλαμβάνει τα εξής:

Στο κεφάλαιο 1 που αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας, αναφέρεται ο σκοπός της εργασίας και η δομή της.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα είδη των ασυνεχειών και στην περιγραφή των βασικών τους χαρακτηριστικών.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται βιβλιογραφική αναφορά σε αναλυτικές – κλειστές σχέσεις για τον υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σε ελαστικό και ισότροπο πέτρωμα, και για τον υπολογισμό ζωνών ολίσθησης σε ελαστικό και ανισότροπο πέτρωμα.

Το κεφάλαιο 4 αποτελείται από δύο μέρη: Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά στις ρυθμίσεις των τιμών των μηχανικών παραμέτρων του άρρηκτου πετρώματος και των ασυνεχειών καθώς και του εντατικού πεδίου που εισήχθησαν στο πρόγραμμα phase2 προκειμένου να πραγματοποιηθεί η γεωτεχνική προσομοίωση. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ

2.1 Είδη ασυνεχειών

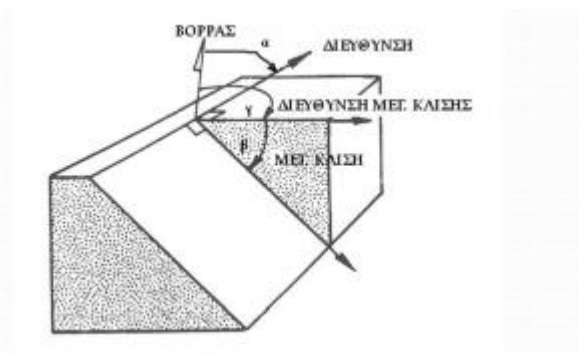
Η βραχώμαζα αποτελείται από το άρρηκτο πέτρωμα και τις ασυνέχειες που την διατρέχουν. Ως ασυνέχεια θεωρείται κάθε επιφάνεια αδυναμίας της βραχώμαζας που έχει πολύ μικρή ή μηδενική αντοχή σε εφέλκυσμό. Οι ασυνέχειες σχηματίζουν δύο κύριες ομάδες, τις συστηματικές και τις μη συστηματικές που είναι οι εξής: (Τσιαμπάος, 2014).

- I. Το επίπεδο στρώσης που παρουσιάζεται συστηματικά στα ιζηματογενή, στρωσιγενή πετρώματα και διαχωρίζει τα ιδιαίτερα στρώματα αυτών.
- II. Ο σχισμός που είναι η τάση του πετρώματος να αποχωρίζεται κατά διακεκριμένα, παράλληλα πυκνής διατάξεως επίπεδα.
- III. Η φύλλωση που είναι το αποτέλεσμα του προσανατολισμού των διαφορετικών ορυκτών σε παράλληλα επίπεδα ή της διατάξεως ενός πυκνού δικτύου παράλληλων μικρορηγμάτων στα λεπτόκοκκα πετρώματα.
- IV. Η σχιστότητα που είναι μία φύλλωση που απαντάται κυρίως σε χονδρόκοκα μεταμορφωμένα πετρώματα.
- V. Η διάκλαση που είναι ένα επίπεδο θραύσης της βραχώμαζας κατά μήκος του οποίου δεν έχει σημειωθεί κίνηση.
- VI. Το ρήγμα που είναι ένα επίπεδο θραύσεως κατά μήκος του οποίου έχει σημειωθεί σχετική κίνηση μερικών εκατοστών του μέτρου έως και μερικών χιλιομέτρων.

2.2 Περιγραφή ασυνεχειών

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι τα εξής:

- I. Προσανατολισμός: Ο προσανατολισμός μιας επίπεδης ασυνέχειας στο χώρο καθορίζεται από τη κλίση του επιπέδου ως προς τον οριζόντιο άξονα και από την διεύθυνση κλίσεων η οποία μετράται δεξιόστροφα από τον μαγνητικό βορρά. Ο προσδιορισμός της διεύθυνσης κλίσεως και της κλίσης γίνεται με την βοήθεια γεωλογικής πυξίδας.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων προσανατολισμού ασυνεχειών (www.legah.ntua.).

- II. Απόσταση μεταξύ γειτονικών ασυνεχειών: Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών. Συνήθως αναφέρεται στη μέση ή στη συνηθέστερη ορθή απόσταση ενός συνόλου ασυνεχειών. Ανάλογα με τη συνηθέστερα μετρούμενη ορθή απόσταση χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά πυκνές (<20mm) έως εξαιρετικά αραιές (>6m).
- III. *Εμμογή* (ή επιμονή ή ανάπτυξη ή συνέχεια). Είναι το μήκος του ίχνους μιας ασυνέχειας που παρατηρείται σε μία αποκάλυψη του πετρώματος. Δίνει ένα μέτρο της χωρικής έκτασης ή του μήκους διείσδυσης μιας ασυνέχειας.

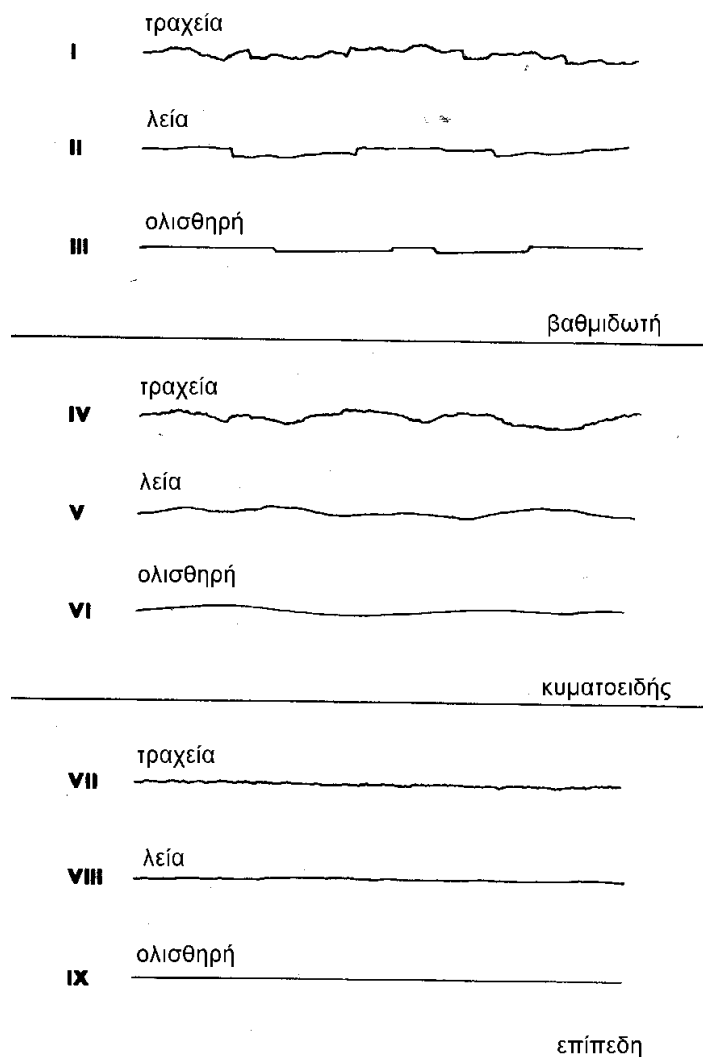
Πίνακας 2.1: Κατάταξη της απόστασης των ασυνεχειών σύμφωνα με την I.S.R.M (1981).

Χαρακτηρισμός	Απόσταση (cm)
Πάρα πολύ μικρή	2
Πολύ μικρή	2-6
Μικρή	6-20
Μεγάλη	60-200
Πολύ μεγάλη	200-600
Πάρα πολύ μεγάλη	>600

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση εμμόνης κατά I.S.R.M (1981).

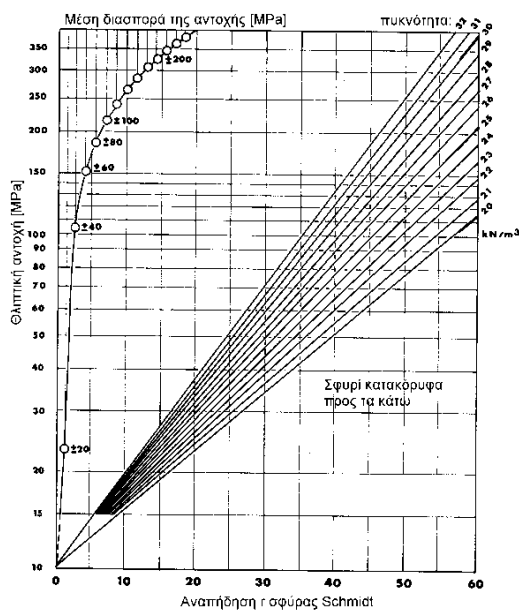
Χαρακτηρισμός	Απόσταση (m)
Πολύ μικρή	1
Μικρή	1-3
Μέση	3-10
Υψηλή	10-20
Πολύ υψηλή	>20

- IV. Τραχύτητα των ασυνεχειών: Η τραχύτητα των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας είναι καθοριστική για την αντοχή της σε διάτμηση. Η γωνία τριβής είναι συνάρτηση της βασικής γωνίας τριβής (30° περίπου για τα πετρώματα) και της γωνίας που αντιστοιχεί στη τραχύτητα των τοιχωμάτων της διακλάσεως, i .



Εικόνα 2.2: Τυπικές τομές τραχύτητας και προτεινόμενη ονοματολογία, (Σοφιανός, Νομικός).

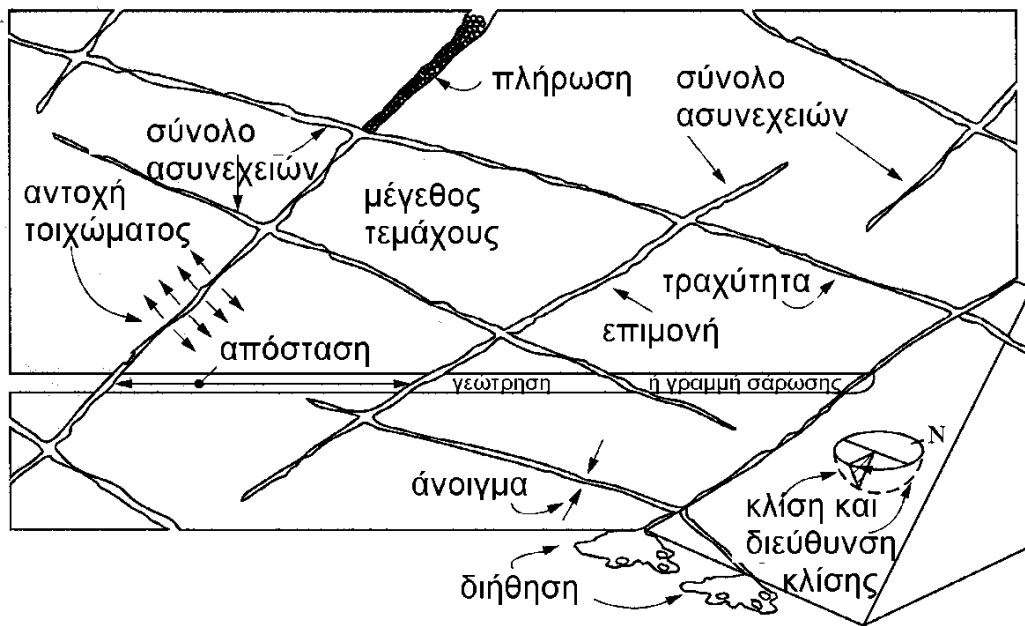
- V. Αντοχή σε θλίψη των τοιχωμάτων της ασυνέχειας: Η αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερη από αυτή του άρρηκτου πετρώματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αποσάθρωση που υφίστανται οι επιφάνειες των τοιχωμάτων. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των ασυνεχειών μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα με χρήση του σφυριού Schmidt.



Εικόνα 2.3: Έμμεσος προσδιορισμός αντοχής σε θλίψη των ασυνεχειών μέσω του σφυριού Schmidt.

- VI. Άνοιγμα των ασυνεχειών: Άνοιγμα καλείται η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας. Η ασυνέχεια μπορεί να είναι ανοικτή, κλειστή ή επουλωμένη με υλικό πλήρωσης.
- VII. Πλήθος διαφορετικών ομάδων ασυνεχειών: Το πλήθος των ομάδων (οικογενειών) των ασυνεχειών, σε συνδυασμό με την απόστασή τους καθορίζουν το μέγεθος των τεμαχίων στα οποία διαχωρίζεται η βραχώμαζα.
- VIII. Παρουσία νερού στις ασυνέχειες: Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην παρουσία νερού στις ασυνέχειες καθώς δύναται να αναπτυχθούν υδροστατικές πιέσεις. Πιο συγκεκριμένα η παρουσία νερού στις ασυνέχειες προκαλεί μείωση των

ενεργών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος των επιφανειών. Οι υδροστατικές πιέσεις δρουν με αντίθετη φορά στις ορθές τάσεις με αποτέλεσμα να τις απομειώνουν, μειώνοντας αντίστοιχα και τη διατμητική αντοχή τους. Επίσης η παρουσία νερού στις ασυνέχειες, διαβρώνει, καρστικοποιεί και αποσθρώνει την βραχώμαζα μειώνοντας την αντοχή και την τραχύτητα τους, γεγονός που οδηγεί στην μείωση της διατμητικής αντοχής τους.



Εικόνα 2.4: Πρωτογενείς ιδιότητες ασυνεχειών.

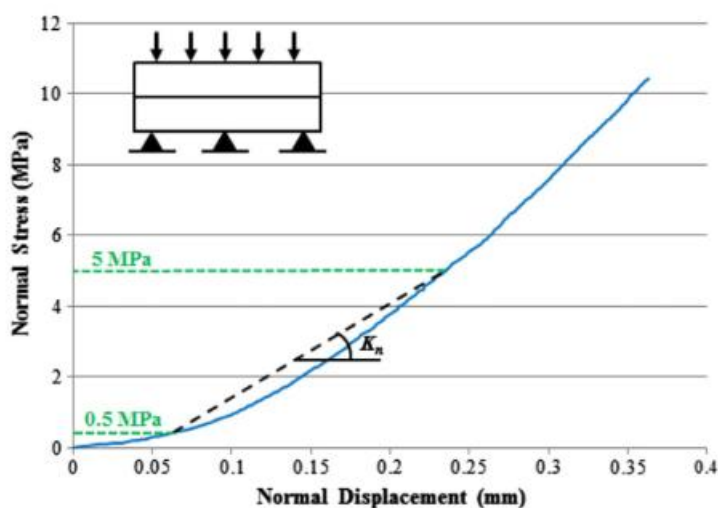
2.3 Δυστροπία Ασυνεχειών

Η παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών μπορεί να περιγραφεί σε απεικόνιση αξόνων τάσης – παραμόρφωσης. Οι Goodman et al (1968) εισήγαγαν τους όρους ορθή ακαμψία (K_n) και διατμητική ακαμψία (K_s) για να περιγράψουν τον ρυθμό μεταβολής της ορθής τάσης σε σχέση με τις ορθές παραμορφώσεις και την μεταβολή των διατμητικών τάσεων σε σχέση με τις διατμητικές παραμορφώσεις.

Οι παραπάνω παράμετροι μαζί με τις τιμές της μέγιστης και της παραμένουσας διατμητικής παραμόρφωσης και τις τιμές του μέγιστου κλεισίματος των ασυνεχειών, επιτρέπουν την εκπόνηση υπολογισμών για την εκτίμηση της επίδρασης – συνεισφοράς που έχουν οι ασυνέχειες στις συνολικές παραμορφώσεις που εμφανίζει η βραχώμαζα.

2.3.1. Ορθή δυστροπία K_n

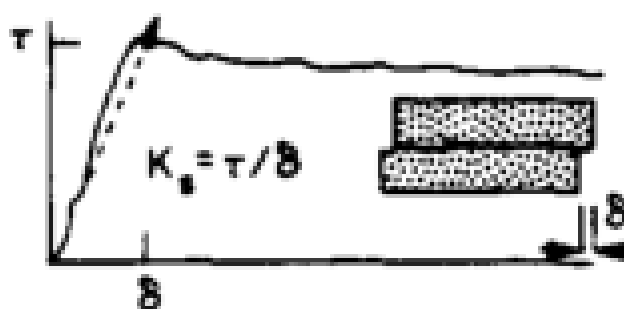
Η ορθή δυστροπία μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά, από την δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη. Κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης η ορθή δυστροπία αυξάνει βαθμιαία και η γραφική παράσταση σε άξονες τάσης παραμόρφωσης αποκλίνει από τη γραμμική συμπεριφορά και ακολουθεί συμπεριφορά υπερβολικής συνάρτησης.



Εικόνα 2.5: Ορθή δυστροπία

2.3.2. Διατμητική δυστροπία K_s

Η διατμητική δυστροπία μπορεί να εκτιμηθεί πειραματικά από την δοκιμή άμεσης διάτμησης. Η συμπεριφορά της καμπύλης η οποία απεικονίζεται σε άξονες τάσης – παραμόρφωσης παρουσιάζει ένα ανερχόμενο τμήμα και μετά ένα κατερχόμενο τμήμα.



Εικόνα 2.6: Διατμητική δυστροπία (Bandis).

Παρόλη τη μη γραμμικότητα των συναρτήσεων από τις οποίες υπολογίζεται η ορθή και η διατμητική δυστροπία, συχνά είναι αναγκαία η προσέγγιση των πραγματικών καμπυλών συμπεριφοράς από γραμμικές συναρτήσεις (Σοφιανός και Νομικός, 2010). Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση τάσης μετακίνησης της ασυνέχειας δίνεται από την παρακάτω μητρωϊκή σχέση:

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η δυστροπία συνδέει τις τάσεις με τις παραμορφώσεις μέσω της σχέσης

$$\sigma = k \times \delta \quad (2.2)$$

Όπου

- σ είναι οι ορθές τάσεις (MPa).
- k είναι η δυστροπία (MPa/m).
- δ είναι οι μετατοπίσεις σε (m).

Η ορθή και η διατμητική δυστροπία των ασυνεχειών μπορεί να υπολογιστεί με βάσει τους παρακάτω τύπους:

$$K_n = \frac{E_i E_m}{L(E_i - E_m)} \quad (2.3)$$

$$K_s = \frac{G_i G_m}{L(G_i - G_m)} \quad (2.4)$$

Όπου:

K_n : Ορθή δυστροπία (MPa/m).

K_s : Διατμητική δυστροπία (MPa/m).

E_i : Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου (MPa).

E_m : Το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας (MPa).

G_m : Το μέτρο διάτμησης της βραχώμαζας (MPa).

G_i : Το μέτρο διάτμησης του άρρηκτου βράχου (MPa).

L : Η απόσταση των ασυνεχειών (m).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ - ΚΛΕΙΣΤΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Οι αναλυτικές λύσεις υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα διάνοιξης σηράγγων, βοηθούν τον μελετητή στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των πιο σημαντικών παραμέτρων και των μηχανισμών που υπεισέρχονται στη μηχανική ανάλυση ενός υπογείου έργου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών μοντέλων.

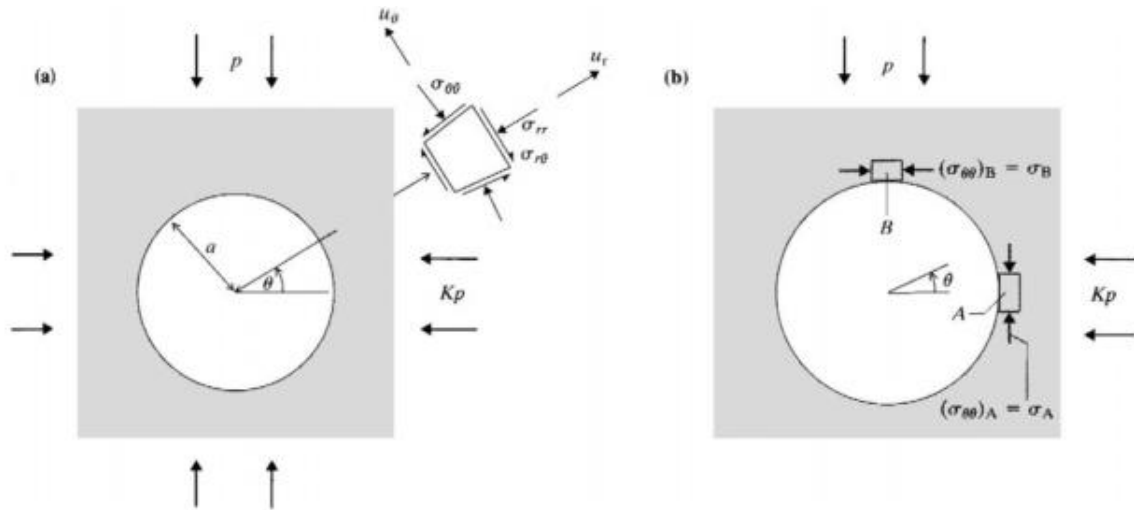
3.1 Αναλυτικές σχέσεις για ισότροπο πέτρωμα

Για τον αναλυτικό υπολογισμό των τάσεων γύρω από ανοίγματα κάτω από την επιφάνεια της Γής έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές (Αγιουτάντης, 2002) :

- Το πέτρωμα θεωρείται ελαστικό (ακολουθεί τον νόμο του Hooke), ομογενές και ισότροπο.
- Το άνοιγμα έχει γίνει σε άπειρης έκτασης μέσο. Η συνθήκη αυτή πληρούται, όταν το πλησιέστερο σύνορο του μέσου (π.χ. ένα άλλο άνοιγμα ή μία ασυνέχεια) βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της μεγαλύτερης διάστασης του ανοίγματος.
- Το άνοιγμα έχει μήκος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της διατομής του και η κατανομή των τάσεων κατά τον επιμήκη άξονα είναι ανεξάρτητη του μήκους. Με αυτή την παραδοχή πληρούνται οι συνθήκες για την μελέτη του συστήματος με τη θεώρηση της επίπεδης ανηγμένης παραμόρφωσης.
- Ο επιμήκης άξονας του ανοίγματος είναι οριζόντιος
- Η διατομή του ανοίγματος μπορεί να παρασταθεί με ένα απλό γεωμετρικό σχήμα.
- Οι δύο άξονες αναφοράς της διατομής έχουν οριζόντια και κάθετη διεύθυνση αντίστοιχα.
- Οι κατακόρυφες τάσεις που υφίστανται το άνοιγμα είναι ίσες με το βάρος των υπερκειμένων και υπολογίζονται από τη σχέση $\sigma_v = \gamma \times z$, ενώ οι οριζόντιες υπολογίζονται από τη σχέση $\sigma_h = k \times \sigma_v$.

3.1.1. Η σχέση του Kirsch (1898)

Για την περίπτωση κυκλικής διατομής από την θεωρία της ελαστικότητας προκύπτει ότι οι εξισώσεις (σε πολικές συντεταγμένες r, θ) για την εφαπτομενική σ_θ , την ακτινική σ_r , και την διατμητική τάση $\tau_{r,\theta}$, μετά τη δημιουργία κυκλικού ανοίγματος δίνονται από τις σχέσεις που ανέπτυξε ο Kirsch (1898).



Εικόνα 3.1: Αναλυτική λύση του Kirsch.

$$\sigma_r = \left\{ \frac{P+KP}{2} \right\} \times \left\{ 1 - \frac{R^2}{r^2} \right\} + \left\{ \left(\frac{KP-P}{2} \right) \times \left[1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^2}{r^4} \right] \times \cos 2\theta \right\} + \frac{P_S * R^2}{r^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_\theta = \left\{ \frac{-P+KP}{2} \right\} \times \left\{ 1 + \frac{R^2}{r^2} \right\} - \left\{ \left(\frac{KP-P}{2} \right) \times \left[1 + \frac{3R^4}{r^4} \right] \times \cos 2\theta \right\} - \frac{P_S * R^2}{r^2} \quad (3.2)$$

$$\tau_{r\theta} = \left\{ \frac{P-KP}{2} \right\} \times \left\{ \left[1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right] \times \sin 2\theta \right\} \quad (3.3)$$

Όπου,

- R : η ακτίνα του κυκλικού ανοίγματος.
- r : η απόσταση από το κέντρο του κυκλικού ανοίγματος.
- θ : η γωνία ως προς τον οριζόντιο άξονα.
- P : η κατακόρυφη γεωστατική τάση.

- K : ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων.
- P_s : η πίεση υποστήριξης.

Οι αντίστοιχες εξισώσεις για την ακτινική (u_r) και την εφαπτομενική μετατόπιση (u_θ), δίνονται από τις σχέσεις (Brady and Brown, 1993).

$$u_r = \left\{ \frac{-P \times R^2}{4Gr} \right\} \times \{ (1+K) - (1-K) \left\{ 4 \times (1-\nu) - \left[\frac{R^2}{r^2} \right] \right\} \times \cos 2\theta \} \quad (3.4)$$

$$u_\theta = \left\{ \frac{-P \times R^2}{4Gr} \right\} \times \{ -(1-K) \left\{ 2 \times (1-2\nu) + \left[\frac{R^2}{r^2} \right] \right\} \times \sin 2\theta \} \quad (3.5)$$

Όπου:

G : το μέτρο διάτμησης του υλικού.

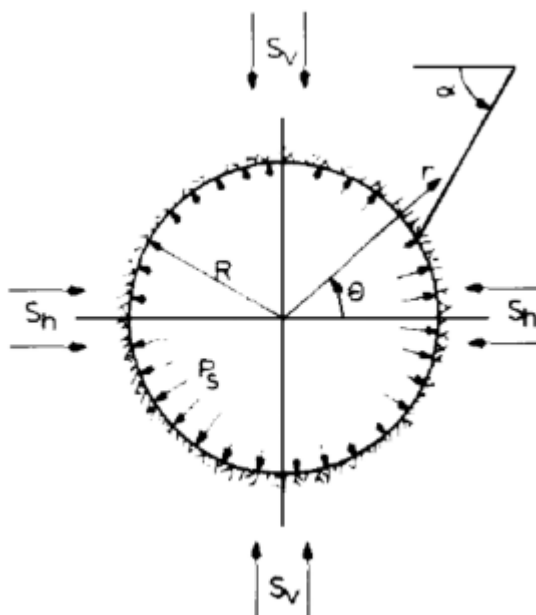
ν : ο λόγος poisson του υλικού.

3.2. Αναλυτικές σχέσεις για Ανισότροπο Πέτρωμα.

3.2.1. Αναλυτική λύση Daemen (1983).

Πρόκειται για μια μέθοδο υπολογισμού των ζωνών ολίσθησης και του βάθους που εκτείνονται στη βραχώμαζα, για παράλληλες ασυνέχειες προς τον άξονα κυκλικής σήραγγας. Σύμφωνα με τον Daemen αρχικά πραγματοποιείται ο υπολογισμός μιας ελαστικής κατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, έπειτα υπολογίζεται η διατμητική και η ορθή τάση πάνω στο επίπεδο των ασυνεχειών και συγκρίνεται με την τιμή της διατμητικής αντοχής θεωρώντας ένα κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για τις ασυνέχειες.

Κατά τη σύγκριση όπου η τιμή που υπολογίστηκε υπερβεί την διατμητική αντοχή θεωρείται ότι η ασυνέχεια ολισθαίνει.



Εικόνα 3.2: Κυκλικό άνοιγμα ακτίνας R σε διαξονικό εντατικό πεδίο (S_v , S_h), με σύστημα ασυνεχειών με αυθαίρετη κλίση (α) και διεύθυνση (Παπαβασιλείου από Daemen, 1983).

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι τύποι του Kirsch για την ακτινική, την εφαπτομενική και την διατμητική τάση γύρω από το άνοιγμα σε ομογενή και ισότροπη βραχώμαζα για την περίπτωση υδροστατικού φυσικού εντατικού πεδίου μπορούν να απλοποιηθούν στους εξής:

$$\sigma_r = P_0 \times \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + P_i \times \frac{R^2}{r^2} \quad (3.6)$$

$$\sigma_\theta = P_0 \times \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - P_i \times \frac{R^2}{r^2} \quad (3.7)$$

Η ορθή και η διατμητική τάση στο επίπεδο των ασυνεχειών υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} - \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \times \cos 2(\alpha - \theta) - \tau_{r\theta} \sin 2(\alpha - \theta) \quad (3.8)$$

$$\tau = - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \times \sin 2(\alpha - \theta) - \tau_{r\theta} \cos 2(\alpha - \theta) \quad (3.9)$$

Αντικαθιστώντας στο κριτήριο αστοχίας (ολίσθησης) των ασυνεχειών:

$$|\tau| = c + \sigma \times \tan \varphi \quad (3.10)$$

Προκύπτει η σχέση για τον υπολογισμό του βάθους που εκτείνεται η αστοχία στη βραχόμαζα:

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{(P_0 - P_i) \times [S_e \cos 2(\alpha - \theta) \tan \varphi \pm \sin 2(\alpha - \theta)]}{-S_e (c + P_0 \tan \varphi)} \quad (3.11)$$

$$S_e = \frac{\tau}{c + \sigma \times \tan \varphi} \quad (3.12)$$

Όπου:

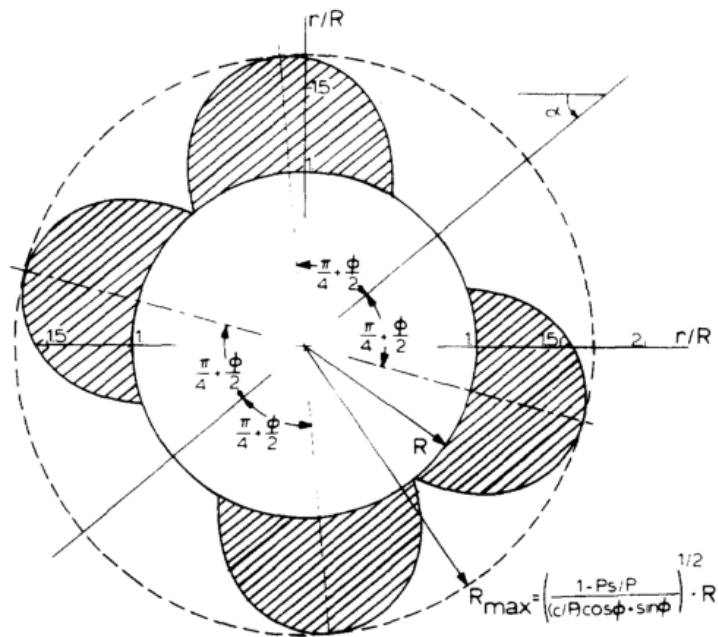
- S_e : συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης ασυνεχειών.
- α : Η κλίση των ασυνεχειών.
- φ : η γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών.
- c : η συνοχή των ασυνεχειών.
- P_0 : Η κατακόρυφη γεωστατική τάση.
- P_i : Η πίεση υποστήριξης.
- τ : Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών.

Το μέγιστο βάθος έκτασης των ζωνών ολίσθησης παρατηρείται σε γωνία θ , η οποία υπολογίζεται από την σχέση :

$$\theta = \alpha \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.13)$$

Το μέγιστο βάθος της ζώνης ολίσθησης δίνεται από την σχέση:

$$\frac{R_{max}}{R} = \left(\frac{1 - \frac{P_i}{P_0}}{\frac{c \times \cos \varphi}{P_0} + \sin \varphi} \right)^{1/2} \quad (3.14)$$



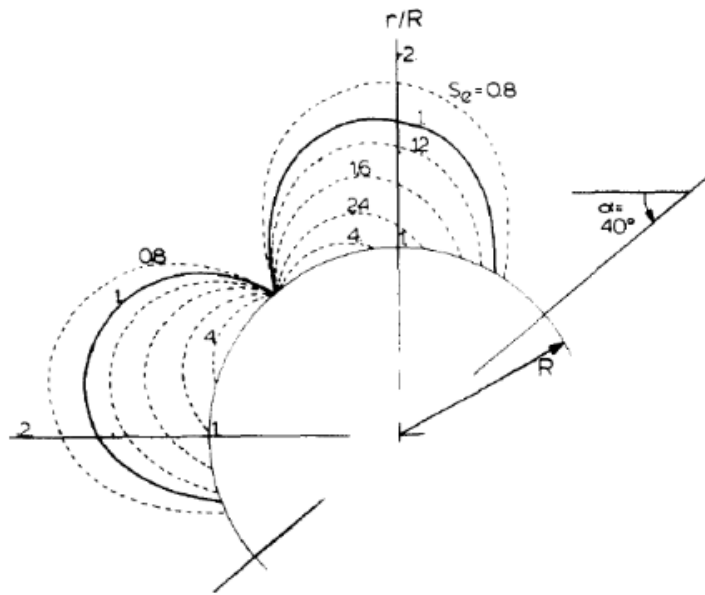
Εικόνα 3.3: Ζώνες ολίσθησης γύρω από κυκλική σήραγγα (Daemen,1983).

Το παραπάνω σχήμα αφορά υδροστατικό εντατικό πεδίο P_0 για οικογένεια ασυνεχειών με κλίση α . Σε οποιοδήποτε σημείο εντός της γραμμοσκιασμένης περιοχής η διατμητική τάση ξεπερνά την διατμητική αντοχή. Οι ζώνες ολίσθησης είναι συμμετρικές ως προς την κλίση “ α ” των ασυνεχειών με το κέντρο της σήραγγας. Το βάθος της ζώνης ολίσθησης είναι ανεξάρτητο της γωνίας της κλίσης.

Η διεύθυνση των ζωνών ολίσθησης καθορίζεται από την κλίση “ α ” και την γωνία εσωτερικής τριβής “ φ ”. Οι αριθμητικές τιμές στο παραπάνω σχήμα είναι: $\alpha = 40^\circ$, $P_i/P_0 = 0$, $c/P_0 = 0.01$, $\varphi = 20^\circ$.

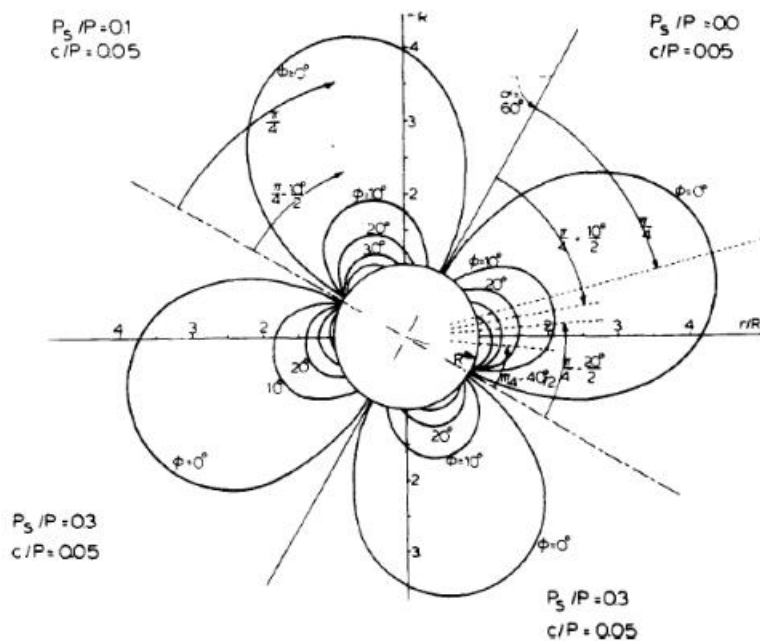
Η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης (P_i) για να αποφευχθεί η ολίσθηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{P_i}{P_0} = 1 - \left(\frac{c}{P_0} * \cos \varphi + \sin \varphi \right) \quad (3.15)$$



Εικόνα 3.4: Ζώνες ολίσθησης (συνεχείς γραμμές) και συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης ασυνεχειών (διακεκομμένες γραμμές), (Daemen, 1983).

Το πιο πάνω σχήμα αφορά κυκλική σήραγγα που βρίσκεται παράλληλα σε σύστημα ασυνεχειών. Ο συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης S_e , που είναι ο λόγος της διατμητικής τάσης που δέχονται οι ασυνέχειες προς την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών δίνεται από το περίγραμμα. Οι αριθμητικές τιμές στο παραπάνω σχήμα είναι ίδιες με τις προηγούμενες.



Εικόνα 3.5: Ζώνες ολίσθησης σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (Daemen, 1983).

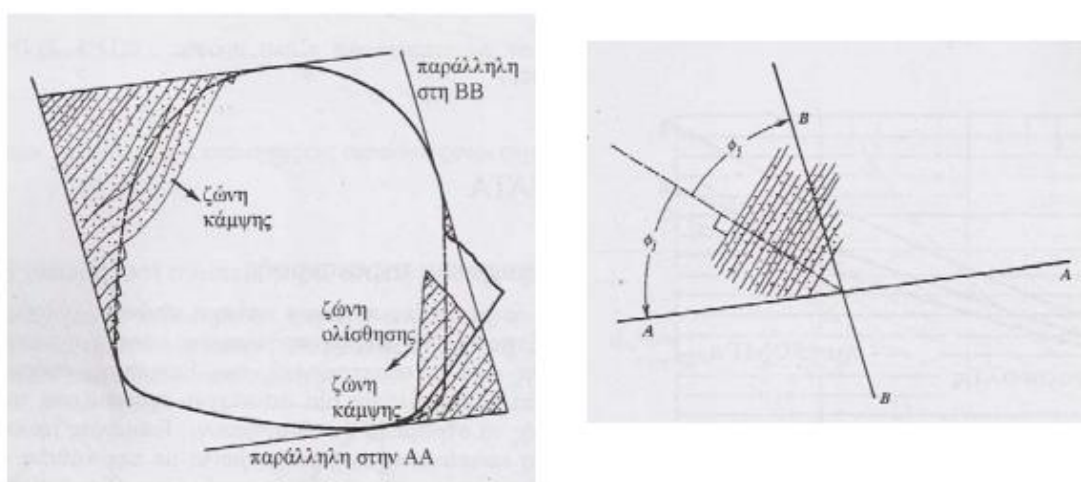
Στο παραπάνω σχήμα οι ασυνέχειες έχουν κλίση $\alpha=60^\circ$. Τα αποτελέσματα για την κάθε ομάδα παραμέτρων δίνονται μόνο σε ένα τεταρτημόριο που δημιουργείται από τις ασυνέχειες.

3.2.2. Η γεωμετρική μέθοδος του Goodman (1989)

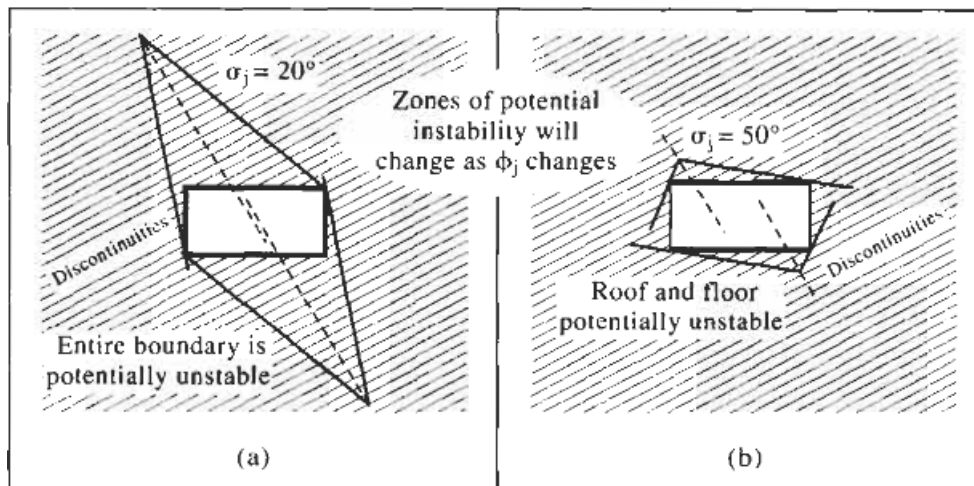
Πρόκειται για μια μέθοδο η οποία βασίζεται στον παρακάτω συλλογισμό:

Στην περίπτωση εκσκαφής σε διαστρωμένο πέτρωμα υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης των στρώσεων μεταξύ τους. Στην παρεία μιας ανυποστήρικτης οροφής η μόνη μη μηδενική συνιστώσα της τάσης, είναι η εφαπτομενική $\sigma_{\theta\theta}$. Επομένως, εφόσον η διεύθυνση της εφαπτομένης και η κάθετος σε μια ασυνέχεια σχηματίζουν γωνία μεγαλύτερη από την γωνία τριβής τα στρώματα θα ολισθήσουν, άρα μπορούν να οριοθετηθούν ζώνες όπου η εφαπτομένη σχηματίζει γωνία με την κάθετη στις ασυνέχειες μεγαλύτερη ή μικρότερη της γωνίας φ_j αντίστοιχα (Σοφιανός, 2010).

Στη μέθοδο αυτή φέρεται η κάθετος στις ασυνέχειες, έπειτα σε γωνία ίση με την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών (φ_j) σχεδιάζονται οι ευθείες AA' BB' όπως φαίνεται στην εικόνα . Οι ευθείες αυτές μεταφέρονται παράλληλα στις παρείς της σήραγγας, τα σημεία επαφής χωρίζουν την περιφέρεια του υπογείου ανοίγματος σε περιοχές ασφαλής και ανασφαλής, όσον αφορά την ολίσθηση των στρωμάτων.



Εικόνα 3.6: Εφαρμογή μεθόδου Goodman (1989).



Εικόνα 3.7: Εφαρμογή μεθόδου Goodman σε μη κυκλικό άνοιγμα για $\phi_j = 20^\circ$ και $\phi_j = 50^\circ$ (Hudson and Harrison, 2000).

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ PHASE².

4.1. Γενικές πληροφορίες για το πρόγραμμα Phase².

Το πρόγραμμα Phase2 είναι ένας διδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα Phase2, περιλαμβάνουν:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξονοσυμμετρικά προβλήματα
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις (έως 50 φάσεις)
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ.)
- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού (με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων).

4.2. Προετοιμασία μοντέλου

4.2.1. Εισαγωγή γεωμετρίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσομοίωση κυκλικού ανοίγματος ακτίνας $R = 5\text{m}$.

4.2.2. Προσθήκη εξωτερικού ορίου

Επιλέγουμε Boundaries → Add External όπου στην επιλογή Boundary type επιλέγουμε Box και στην επιλογή Expansion Factor επιλέγουμε την τιμή 5.

4.2.3. Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Meshing).

Διακριτοποίηση ορίων εκσκαφής (Discretize)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρίκομβα τριγωνικά στοιχεία.

4.2.4. Συνοριακές Συνθήκες (Boundary Conditions).

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τα μοντέλα που εξετάστηκαν, ήταν αυτές της πάκτωσης, δηλαδή όλοι οι κόμβοι του εξωτερικού ορίου να έχουν μηδενική μετατόπιση.

4.2.5. Τασικό πεδίο (Field Stress)

Στο πρόγραμμα phase² το τασικό πεδίο μπορεί να καθοριστεί μέσω των κυρίων τάσεων ή μέσω της βαρύτητας. Στη συγκεκριμένη εργασία έχουμε επιλέξει την πρώτη περίπτωση, έχουμε δηλαδή συνεχές εντατικό πεδίο.

Για προσομοίωση υδροστατικού πεδίου ($K=1$), όλες οι δυνάμεις μας έχουν την ίδια τιμή που προκύπτει από το επιλεγμένο βάθος που βρίσκεται το κυκλικό άνοιγμα το οποίο είναι $h=100$ m πολλαπλασιασμένο με το μοναδιαίο βάρος βραχώμαζας ($\gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$), δηλαδή $\text{Sigma}1 = \text{Sigma}3 = \text{Sigma} Z = 2.6 \text{ MPa}$, ενώ για την προσομοίωση εντατικού πεδίου με συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K= 0.5$ οι τάσεις ορίζονται ως εξής $\text{Sigma} 1 = 2.6 \text{ MPa}$, $\text{Sigma} 3 = \text{Sigma} Z = 1.3 \text{ MPa}$.

4.2.6. Ιδιότητες Βραχώμαζας

Ιδιότητες άρρηκτου βράχου:

Το άρρηκτο πέτρωμα έχει επιλεγθεί να έχει ελαστική συμπεριφορά, με μέτρο ελαστικότητας $E_i = 30 \text{ GPa}$, και λόγο poisson $\nu = 0.25$, τιμές οι οποίες αντιπροσωπεύσουν τον άρρηκτο ασβεστόλιθο το οποίο είναι ένα σύνηθες πέτρωμα που απαντάται στον Ελλαδικό χώρο.

Εισαγωγή δικτύου ασυνεχειών:

Με την εντολή **Add joint Network**, γίνεται η εισαγωγή δικτύου ασυνεχειών, στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τύπος δικτύου ασυνεχειών **Parallel Deterministic**. Αυτός ο τύπος δικτύου ασυνεχειών επιτρέπει τη δημιουργία δικτύου ασυνεχειών, το οποίο αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες, όπου η μεταξύ τους απόσταση και η κλίση τους παραμένει σταθερή. Οι αποστάσεις των ασυνεχειών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι αυτές του 0.5m και 1.5m. Επιλέχτηκε όλες οι ασυνέχειες να ξεκινάνε από το κέντρο του κυκλικού ανοίγματος δηλαδή από το σημείο με συντεταγμένες $X=0$ m, $Y=0$ m. Τέλος οι συνοριακές συνθήκες των ασυνεχειών ορίστηκαν να είναι ανοιχτές μόνο στην επαφή τους με το κυκλικό άνοιγμα. Ανοιχτές συνοριακές συνθήκες μεταξύ ασυνεχειών και κυκλικού ανοίγματος συμβολίζονται από δύο κόμβους στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων στην επαφή των ασυνεχειών με το κυκλικό άνοιγμα και επιτρέπουν την σχετική ολίσθηση των ασυνεχειών μεταξύ τους, σε αντίθεση με τις κλειστές συνοριακές συνθήκες των ασυνεχειών, οι οποίες δεν επιτρέπουν την μεταξύ τους ολίσθηση και οι οποίες συμβολίζονται από ένα κόμβο στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων (www.rocscience.com).

Μηχανικές ιδιότητες ασυνεχειών:

Το κριτήριο αστοχίας που έχει επιλεγεί για τις ασυνέχειες είναι το κριτήριο Mohr-Coulomb, όπου η συνοχή των ασυνεχειών $c_j = 0.026$ MPa έτσι ώστε να ισχύει ο λόγος $c_j / P_0 = 0.01$, για να πάρουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά της αναλυτικής λύσης του Daemen, όπου P_0 είναι η κατακόρυφη γεωστατική τάση η οποία είναι ίση με 2.6 MPa.

Η γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών φ_j είναι ίση με 20° .

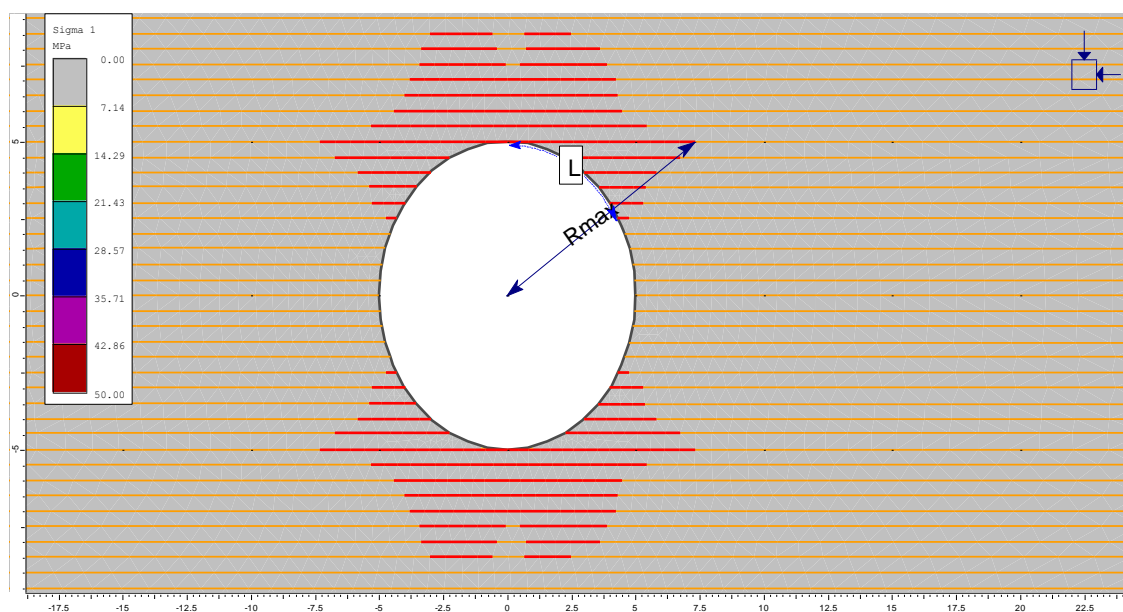
Η ορθή δυστροπία ορίστηκε ίση με 10^5 MPa/m και η διατμητική δυστροπία ίση με 10^4 MPa/m.

Ο πίνακας 4.1 απεικονίζει την μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας των ασυνεχειών R_{max} και την θέση στην οποία εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της ορθής και της διατμητικής δυστροπίας. Επίσης συγκρίνονται οι διάφορες τιμές του R_{max} που προκύπτουν με την τιμή του R_{max} η οποία προκύπτει από την αναλυτική λύση Daemen (1983). Από την σύγκριση προκύπτει ότι η μικρότερη απόκλιση

από την αναλυτική λύση υπολογίζεται για τιμές ορθής και διατμητικής δυστροπίας αντίστοιχα ίση με 15×10^3 MPa/m και 15×10^2 MPa/m. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν οι τιμές ορθής και διατμητικής δυστροπίας αντίστοιχα ίσες με 10^5 MPa/m και 10^4 MPa/m.

Πίνακας 4.1: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας ασυνεχειών συναρτήσει της ορθής και διατμητικής δυστροπίας.

Ορθή δυστροπία (MPa/m)	Διατμητική δυστροπία (MPa/m)	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m)	Γωνία Μέγιστου βάθους αστοχίας ($^\circ$)
10^6	10^5	10.78	77
10^5	10^4	9.81	75.5
5×10^4	5×10^3	8.94	72
15×10^3	15×10^2	7.93	71
10^4	10^3	7.48	69.4
Αναλυτική λύση Daemen		8.43	55



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση μέγιστου βάθους αστοχίας R_{max} και μήκους τόξου αστοχίας L .

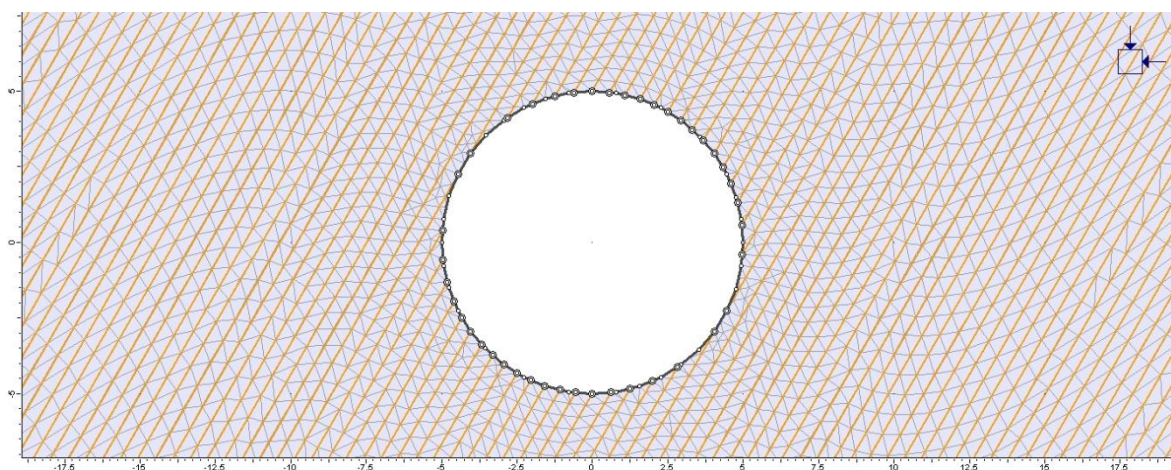
Επίσης πραγματοποιήθηκε απενεργοποίηση της επιλογής **Initial Joint Deformation**:

Αν η επιλογή Initial joint Deformation είναι ενεργή, η παραμόρφωση των ασυνεχειών βασίζεται τόσο στο φυσικό εντατικό πεδίο, όσο και στις ασκούμενες πιέσεις λόγω της εκσκαφής. Αν η επιλογή είναι ανενεργή, (όπως στην περίπτωση μας), μόνο η ασκούμενη πίεση που δημιουργείται λόγω της εκσκαφής και των υπερκειμένων λαμβάνονται υπόψη για την παραμόρφωση των ασυνεχειών.

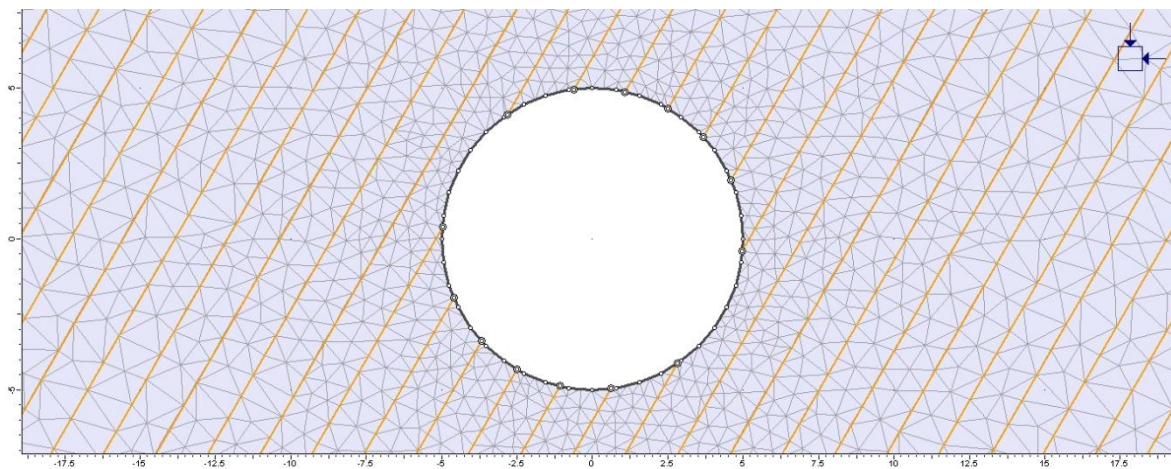
Παραμετρικές αναλύσεις.

Στο δεύτερο μέρος του τέταρτου κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για μία και για δύο οικογένειες ασυνεχειών, για τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$, (υδροστατικό πεδίο) και για τιμή του $K=0.5$.

Για την μία οικογένεια ασυνεχειών εξετάστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης των ασυνεχειών που προκύπτουν από την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών $s_1=0.5\text{m}$ και $s_2=1.5\text{m}$ αντίστοιχα $\lambda_1=2\text{ m}^{-1}$ (Εικόνα 4.2) και $\lambda_2=0.66\text{ m}^{-1}$ (Εικόνα 4.3). Εξετάστηκαν οι κλίσεις ασυνεχειών $\alpha_1 = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Τέλος έγιναν παραμετρικές αναλύσεις μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών από 20° σε 30° και 40° για σταθερή συχνότητα ασυνεχειών $\lambda_1 = 2\text{ m}^{-1}$, και σταθερή κλίση ασυνεχειών $\alpha_1=0^\circ$.

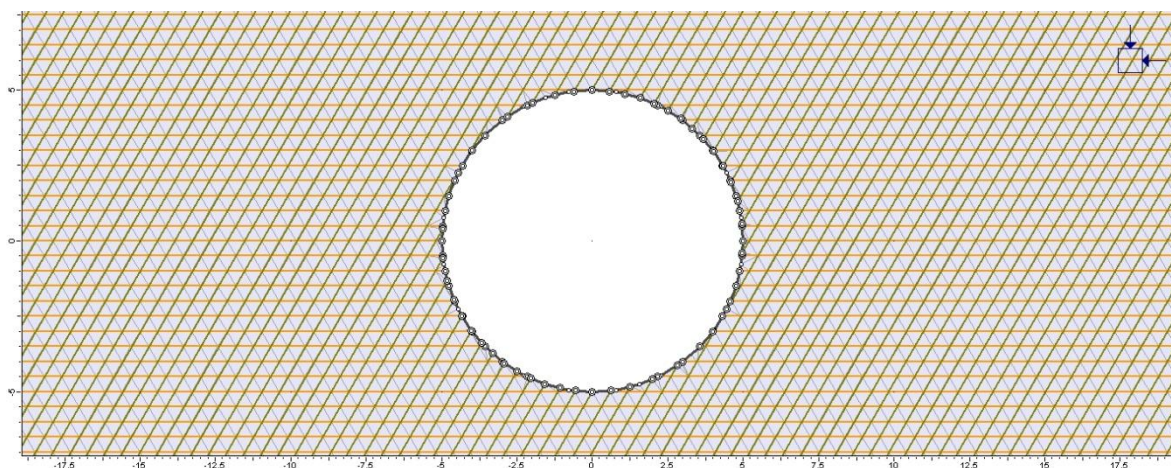


Εικόνα 4.2: Μονή οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda_1= 2\text{m}^{-1}$ και κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .

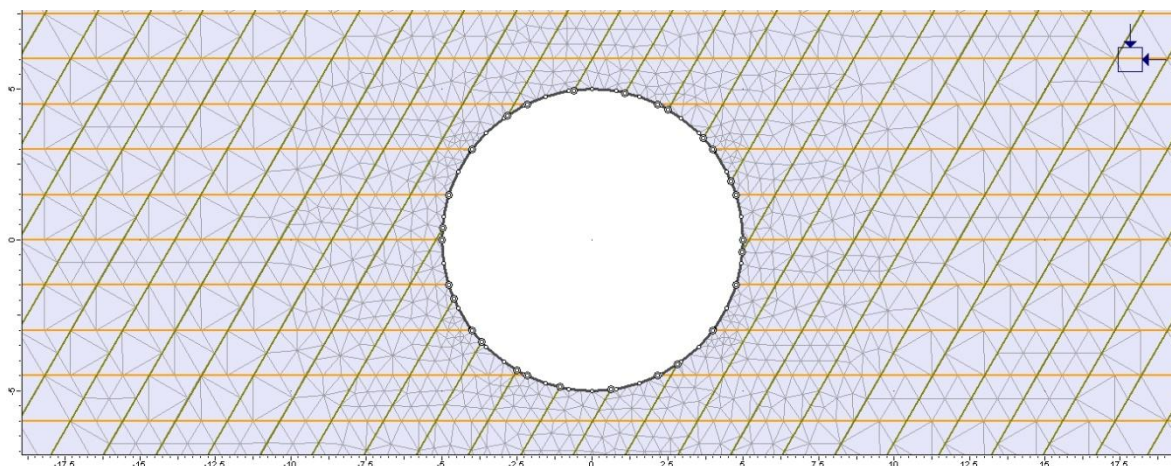


Εικόνα 4.3: Μονή οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda_2 = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .

Για τις παραμετρικές αναλύσεις με τις δύο οικογένειες ασυνεχειών η κλίση της μίας οικογένειας κρατήθηκε σταθερή $a_1 = 0^\circ$ και μεταβαλλόταν η κλίση της δεύτερης οικογένειας ασυνεχειών έτσι ώστε να προκύψει διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta a = a_2 - a_1$. Για τα μοντέλα με συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda_1 = 2 \text{ m}^{-1}$ (Εικόνα 4.4) εξετάστηκαν οι διαφορές κλίσεων ασυνεχειών των $40^\circ, 60^\circ$ και 90° . Για τα μοντέλα με συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda_2 = 0.66 \text{ m}^{-1}$, (Εικόνα 4.5) εξετάστηκαν οι διαφορές κλίσεων ασυνεχειών των $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ και 90° .



Εικόνα 4.4: Δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda_1 = 2 \text{ m}^{-1}$ και διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 60° .



Εικόνα 4.5: Δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda_2 = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 60° .

4.3. Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=1$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

4.3.1. Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών.

Μονή οικογένεια ασυνεχειών.

Τα Σχήματα 4.1 και 4.2 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με μια οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με 2 m^{-1} για κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 90° .



Σχήμα 4.1: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.2 αναγράφονται οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή εάν αλλάξει η γωνία κλίσης των ασυνεχειών λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζεται ως προς τον άξονα του κυκλικού ανοίγματος. Οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων είναι της τάξης των 3mm. Οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων παρουσιάζουν μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται στην πυκνότητα της διακριτοποίησης, με αύξηση της πυκνότητας διακριτοποίησης παρατηρείται μηδενική απόκλιση στις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων, γεγονός το οποίο αναμένεται για $K=1$. Τέλος προκύπτει ότι οι συνολικές μετατοπίσεις του ανισότροπου μέσου, είναι περίπου οι εξαπλάσιες σε σχέση με αυτές του ισότροπου μέσου.

Πίνακας 4.2: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	Max t.d (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^{\circ}$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
0	2.85	261	5.5
20	3.02	297	5.9
30	2.99	297	5.84
40	2.8	319.5	5.5
60	2.99	324	5.84
70	3.01	153	5.9
90	2.72	171	5.3



Σχήμα 4.2: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.3 αναγράφονται οι τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή εάν αλλάξει η γωνία κλίσης των ασυνεχειών, λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζεται ως προς τον άξονα του κυκλικού ανοίγματος. Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 παρουσιάζουν μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται στην πυκνότητα της διακριτοποίησης, με αύξηση της πυκνότητας διακριτοποίησης παρατηρείται μηδενική απόκλιση στις τιμές της κύριας τάσης σ_1 , γεγονός το οποίο αναμένεται για $K=1$. Η τιμή της κύριας τάσης σ_1 είναι της τάξης των 6 MPa. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει τιμή ίση με 1.32.

Πίνακας 4.3: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1,an} / \sigma_{1,is}$
0	6.25	358.2	1.34
20	6.39	25.7	1.27
30	6.69	207	1.34
40	6.63	233	1.37
60	6.57	233	1.36
70	6.2	64	1.23
90	6.24	271.8	1.35

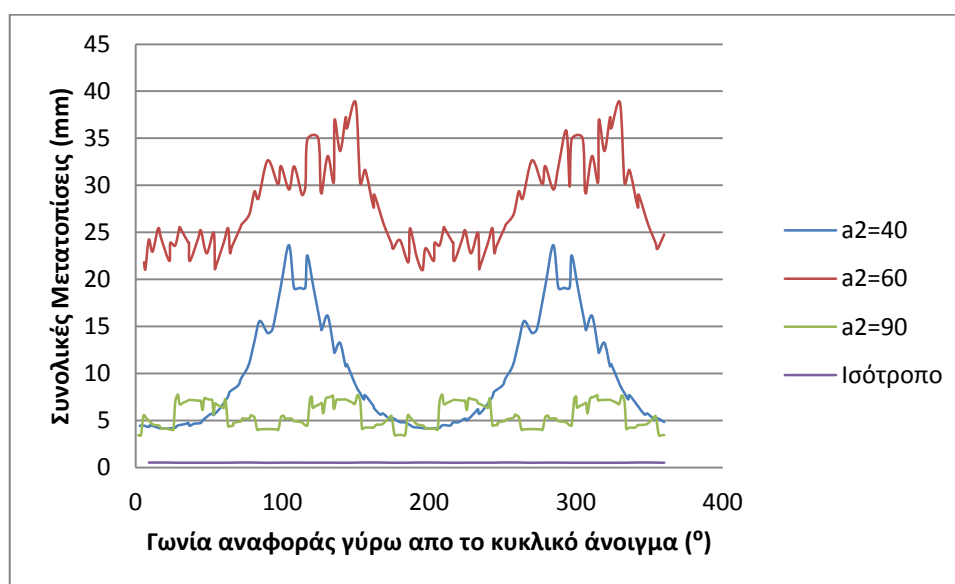
Ο πίνακας 4.4 αναγράφει το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών, και την γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα. Προκύπτει ότι λαμβάνει μέση τιμή ίση με 9.4m και ότι η απόκλιση της τιμής του μέγιστου βάθους αστοχίας μεταξύ της αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης είναι 11.5%. Αντίστοιχα η απόκλιση της γωνίας όπου παρατηρείται το μέγιστο βάθος αστοχίας έχει μέγιστη τιμή ίση με 38%. Η απόκλιση στις τιμές του μέγιστου βάθους αστοχίας των ασυνεχειών και στην γωνία όπου εκδηλώνεται οφείλονται στο ότι η αναλυτική λύση δεν λαμβάνει υπ όψιν την πλαστική συμπεριφορά των ασυνεχειών που έχει οριστεί στην αριθμητική επίλυση.

Πίνακας 4.4:Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	R_{max} (m)	$\theta_{R_{max}}$ ($^{\circ}$)	$R_{max}^{(analytical)}$ (m)	$\theta_{R_{max}}$ (analytical) ($^{\circ}$)	Απόκλιση $\theta_{R_{max}}$ από την αναλυτική λύση (%)
0	9.8	75.8	8.43	55	38
20	9.17	53	8.43	75	29.3
30	9.13	63.1	8.43	85	25.7
40	9.3	72.3	8.43	95	24
60	9.35	92.1	8.43	115	20
70	9.11	103.1	8.43	125	17.5
90	9.8	165.6	8.43	145	14.2

Δύο οικογένειες ασυνεχειών:

Τα σχήματα 4.3 και 4.4 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με 2 m^{-1} για διαφορά κλίσεων ασυνεχειών ίση με 40° , 60° και 90° .

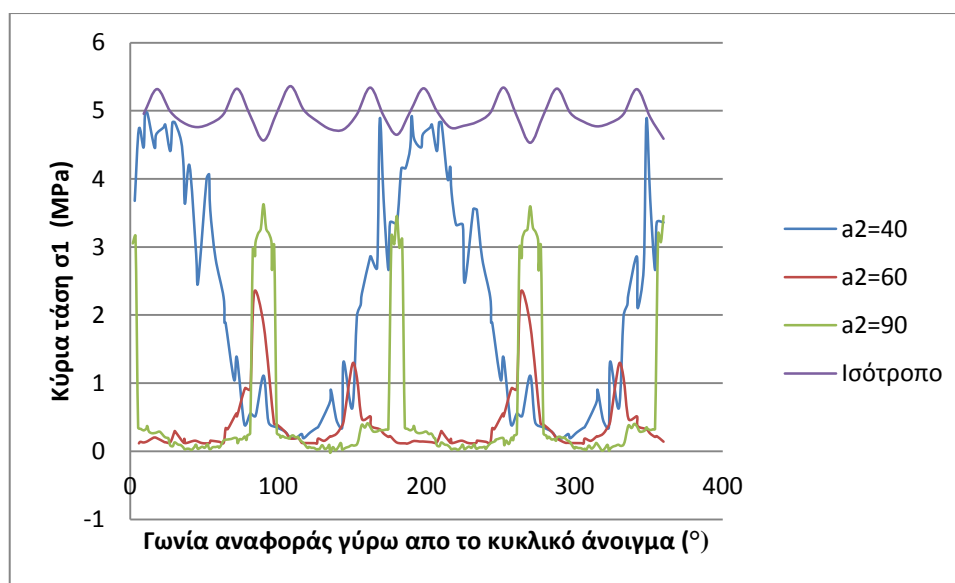


Σχήμα 4.3: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στο πίνακα 4.5 αναγράφονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° και είναι ίσες με 38.76mm. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 75.5 για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 60° .

Πίνακας 4.5: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

$\Delta\alpha$ (°)	Max t.d. (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ (°)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
40	23.64	104.5	45.8
60	38.76	330	75.5
90	7.76	209	15



Σχήμα 4.4: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στο πίνακα 4.6 αναγράφονται οι τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 εμφανίζονται για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 40° και είναι ίσες με 4.97 MPa. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 0.98 για κλίση ασυνεχειών ίση με 40° .

Πίνακας 4.6: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

$\Delta\alpha$ ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1,an} / \sigma_{1,is}$
40	4.97	11.5	0.98
60	2.34	84	0.49
90	3.63	90	0.8

Ο πίνακας 4.7 αναγράφει το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών και την γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, απ όπου προκύπτει ότι λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με 29.4 m για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 60° .

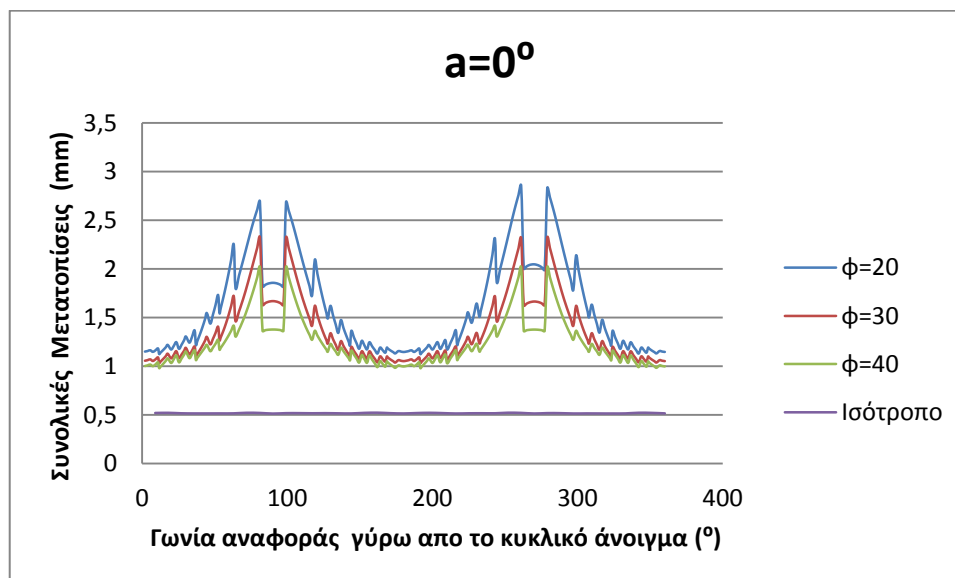
Πίνακας 4.7: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

Διαφορά Κλίσης ασυνεχειών α ($^\circ$)	Rmax (m)	θ_{Rmax} ($^\circ$)
40	17.01	105.1
60	29.4	159
90	12.7	101.3

4.3.2. Μεταβολή γωνίας εσωτερικής τριβής ασυνεχειών

Μονή οικογένεια ασυνεχειών.

Τα σχήματα 4.5 και 4.6 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κυρίων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για μια οικογένεια ασυνεχειών με την συχνότητα των ασυνεχειών να είναι ίση με 2 m^{-1} και με σταθερή κλίση ίση με 0° .

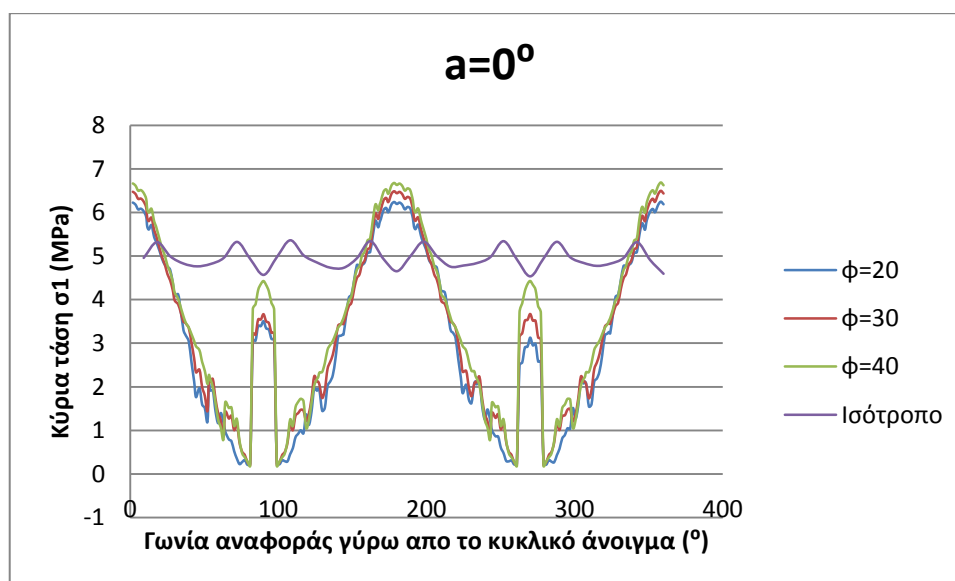


Σχήμα 4.5: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

Στον πίνακα 4.8 αναγράφονται τα αποτελέσματα των συνολικών μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν για κάθε μοντέλο μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μεγαλύτερες συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται για την μικρότερη τιμή γωνιάς εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών $\phi=20^\circ$ και είναι με 2.85mm.

Πίνακας 4.8: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

ϕ ($^\circ$)	Max t.d. (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
20	2.85	261	5.48
30	2.32	81	4.47
40	2	81	3.85



Σχήμα 4.6: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

Στον πίνακα 4.9 αναγράφονται τα αποτελέσματα των τιμών της κύριας τάσης σ_1 που υπολογίστηκαν για κάθε μοντέλο μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών. Η μεγαλύτερη τιμή της σ_1 προκύπτει για γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 40°

και είναι με 6.7 MPa, ενώ ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου έχει μέγιστη τιμή ίση με 1.44 για γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 40°.

Πίνακας 4.9: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0°.

φ (°)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ (°)	$\sigma_{1an} / \sigma_{1is}$
20	6.25	358.2	1.34
30	6.5	358.2	1.4
40	6.7	358.2	1.44

Στο πίνακα 4.10 αναγράφεται το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών το οποίο λαμβάνει την μέγιστη τιμή του η οποία είναι ίση με 9.8m για γωνία εσωτερικής τριβής ασυνεχειών $\varphi = 20^\circ$.

Πίνακας 4.10: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0°.

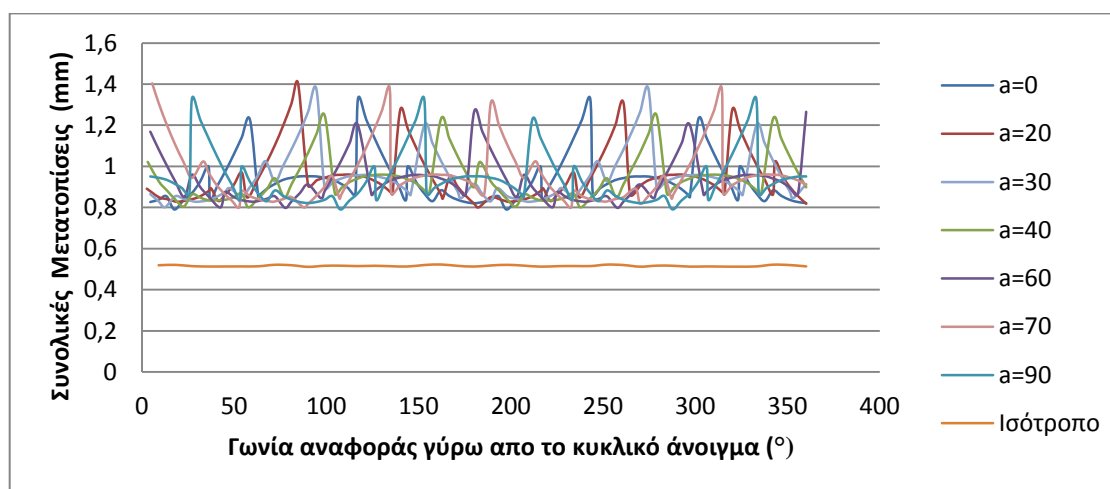
φ (°)	Rmax (m)
20	9.8
30	7.4
40	6.4

4.4. Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=1$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$.

4.4.1. Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών

Τα σχήματα 4.7 και 4.8 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με μια οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με 0.66 m^{-1} για κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 90° .

Μονή οικογένεια ασυνεχειών

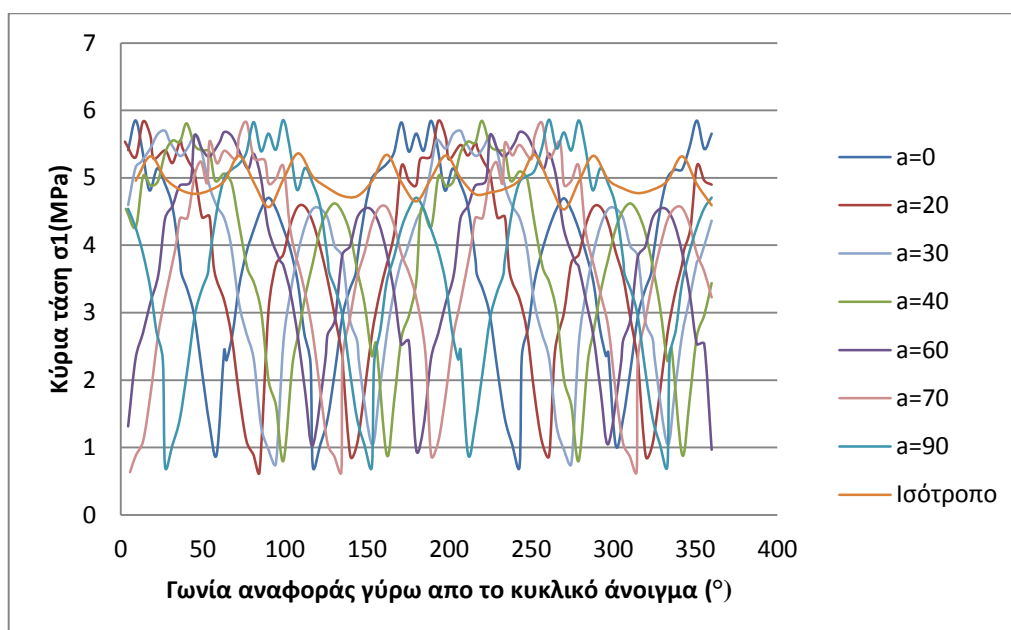


Σχήμα 4.7: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στο πίνακα 4.11 αναγράφονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή εάν αλλάξει η γωνία κλίσης των ασυνεχειών, λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζεται ως προς τον άξονα του κυκλικού ανοίγματος. . Οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων παρουσιάζουν μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται στην πυκνότητα της διακριτοποίησης, με αύξηση της πυκνότητας διακριτοποίησης παρατηρείται μηδενική απόκλιση στις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων, γεγονός το οποίο αναμένεται για $K=1$. Οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι της τάξης του 1.3 mm. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει τιμή ίση με 2.6.

Πίνακας 4.11: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	Max t.d (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^{\circ}$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
0	1.32	117	2.57
20	1.4	84.5	2.71
30	1.37	274.5	2.66
40	1.24	279	2.4
60	1.26	360	2.46
70	1.4	5.5	2.71
90	1.33	153	2.56



Σχήμα 4.8: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.12 αναγράφονται οι τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι ο δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στις τιμές της κύριας τάσης σ_1 εάν αλλάξει η γωνία κλίσης των ασυνεχειών λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζεται ως προς τον άξονα του κυκλικού ανοίγματος. Οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 παρουσιάζουν μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται στην πυκνότητα της διακριτοποίησης, με αύξηση της πυκνότητας διακριτοποίησης παρατηρείται μηδενική απόκλιση στις τιμές της κύριας τάσης σ_1 , γεγονός το οποίο αναμένεται για $K=1$. Επίσης προκύπτει ότι η τιμή της κύριας τάσης σ_1 είναι της τάξης των 5.8 MPa και ότι ο λόγος της κύριας τάσης μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει τιμή ίση με 1.16.

Πίνακας 4.12: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1,an} / \sigma_{1,is}$
0	5.85	9	1.18
20	5.84	193.5	1.13
30	5.7	27	1.14
40	5.84	220	1.22
60	5.68	243	1.14
70	5.82	76.5	1.13
90	5.86	261	1.2

Ο πίνακας 4.13 αναγράφει το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών, και την γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα. Προκύπτει ότι λαμβάνει μέση τιμή ίση με 9.4m και ότι η απόκλιση της τιμής του μέγιστου βάθους αστοχίας μεταξύ της

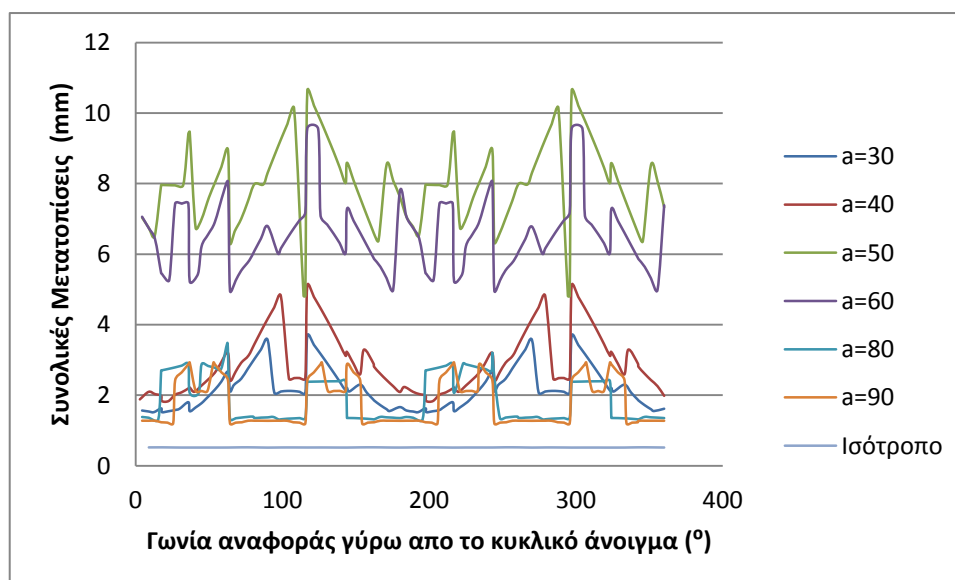
αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης είναι 11.5%. Αντίστοιχα η απόκλιση της γωνίας που παρατηρείται το μέγιστο βάθος αστοχίας έχει μέγιστη τιμή ίση με 47%. Η απόκλιση στις τιμές του μέγιστου βάθους αστοχίας των ασυνεχειών και στην γωνία όπου εκδηλώνεται οφείλονται στο ότι η αναλυτική λύση δεν λαμβάνει υπ όψιν την πλαστική συμπεριφορά των ασυνεχειών που έχει οριστεί στην αριθμητική επίλυση.

Πίνακας 4.13: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	Rmax	θ_{Rmax} ($^{\circ}$)	Rmax analytical (m)	θ_{Rmax} (analytical) ($^{\circ}$)	Απόκλιση θ_{Rmax} αποτην αναλυτική λύση (%)
0	9.132	29.2	8.43	55	47
20	9.54	48	8.43	75	36
30	9.46	58.4	8.43	85	31
40	9.6	67.9	8.43	95	28.5
60	9.62	87.9	8.43	115	23.5
70	9.54	98.1	8.43	125	21.5
90	9.132	119.2	8.43	145	18

Δύο οικογένειες ασυνεχειών

Τα σχήματα 4.9 και 4.10 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με 0.66 m^{-1} για διαφορά κλίσεων ασυνεχειών ίση με 30° , 40° , 50° , 60° , 80° και 90° .

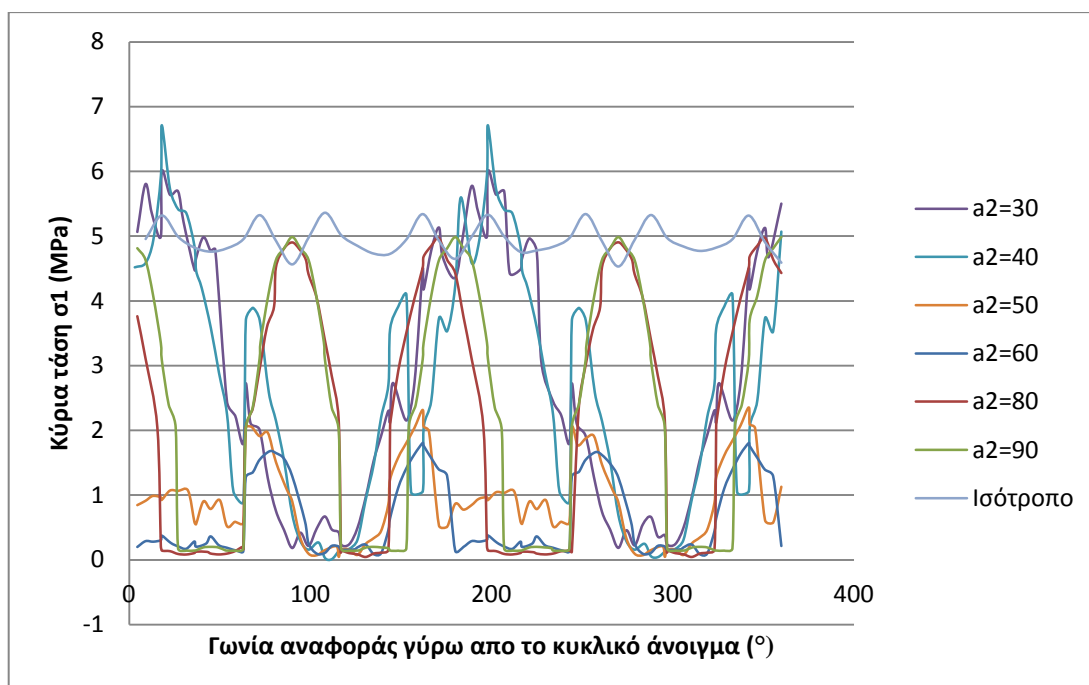


Σχήμα 4.9: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.14 αναγράφονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται για κλίση ασυνεχειών ίση με 50° και είναι ίσες με 10.63 mm. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 20.7 για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 50° .

Πίνακας 4.14: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

$\Delta\alpha$ (°)	Max t.d (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ (°)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
30	3.68	117	7.16
40	5.1	117	9.92
50	10.63	117	20.7
60	9.56	117	18.6
80	3.48	62.5	6.77
90	2.92	53	5.7



Σχήμα 4.10: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.15 αναγράφονται οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 εμφανίζονται για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 40° και είναι ίσες με 6.71 MPa. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 1.26 για κλίση ασυνεχειών ίση με 40° .

Πίνακας 4.15: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

$\Delta\alpha$ ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1an} / \sigma_{1is}$
30	6	18	1.13
40	6.71	18	1.26
50	2.35	342	0.44
60	1.8	162	0.34
80	4.97	351	1.01
90	4.98	360	1.08

Ο πίνακας 4.16 αναγράφει το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών και την γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα απ όπου προκύπτει ότι λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με 20.9 m για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 50°.

Πίνακας 4.16: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

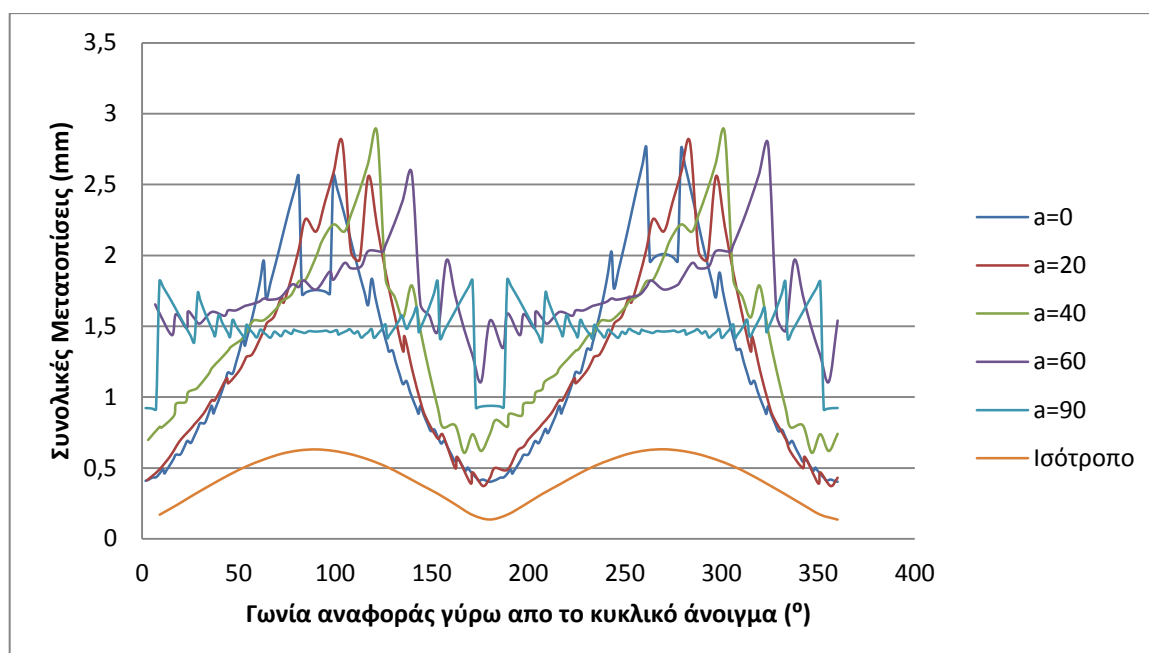
Διαφορά Κλίσης ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	R_{max} (m)	$\theta_{R_{max}}$ ($^{\circ}$)
30	12.4	88.1
40	13.2	193.1
50	20.9	68.8
60	19.3	68.9
80	11.3	68.5
90	10.1	153.4

4.5. Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=0.5$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 2m^{-1}$.

4.5.1. Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών

Μονή οικογένεια ασυνεχειών.

Τα σχήματα 4.11 και 4.12 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με μια οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με $2 m^{-1}$ για κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 90°.

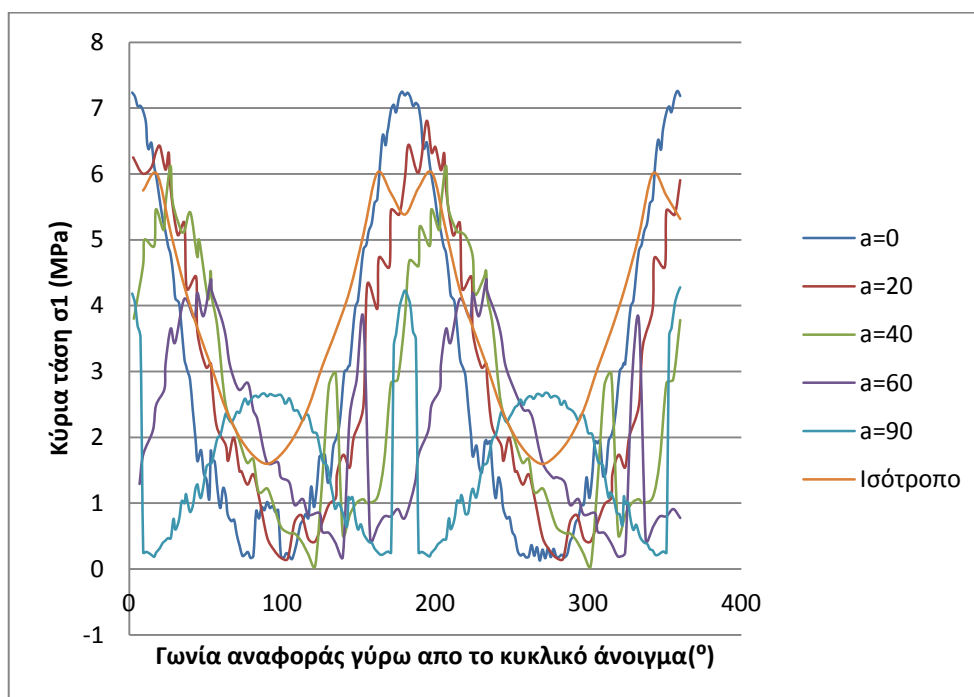


Σχήμα 4.11: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.17 αναγράφονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται για κλίση ασυνεχειών ίση με 40° και είναι ίσες με 2.87mm. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 10.64 για κλίσεις ασυνεχειών ίση με 90° .

Πίνακας 4.17: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	Max t.d (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^{\circ}$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
0	2.76	261	4.4
20	2.8	283.5	4.6
40	2.87	121.5	5.35
60	2.78	324	7.24
90	1.83	189	10.64



Σχήμα 4.12: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.18 αναγράφονται οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης σ_1 εμφανίζεται για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° και είναι ίσες με 7.26 MPa. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 1.4 για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .

Πίνακας 4.18: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1,an} / \sigma_{1,is}$
0	7.26	358.2	1.35
20	6.8	194.2	1.15
40	6.12	27	1.2
60	4.4	233.2	1.4
90	4.28	360	0.8

Ο πίνακας 4.19 αναγράφει το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών και την γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, απ όπου προκύπτει ότι λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με 69.8 m για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .

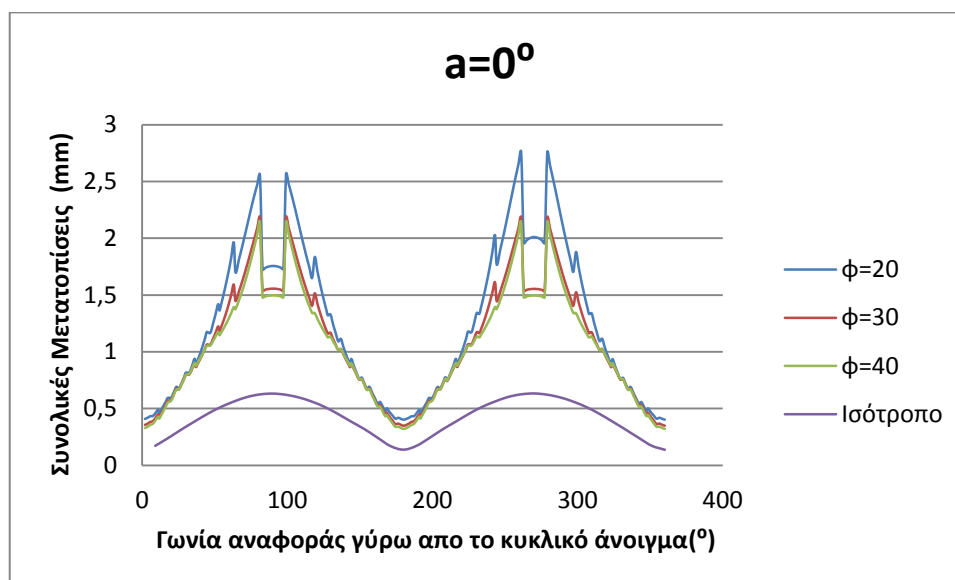
Πίνακας 4.19: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	R_{max} (m)	$\theta_{R_{max}}$ ($^{\circ}$)
0	9.74	77.2
20	15.13	117.4
40	36.9	121.3
60	69.8	136.2
90	16.45	107.6

4.5.2. Μεταβολή γωνίας εσωτερικής τριβής ασυνεχειών

Μονή οικογένεια ασυνεχειών

Τα σχήματα 4.13 και 4.14 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κυρίων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για μια οικογένεια ασυνεχειών με την συχνότητα των ασυνεχειών να είναι ίση με 2 m^{-1} και με σταθερή κλίση ίση με 0° .

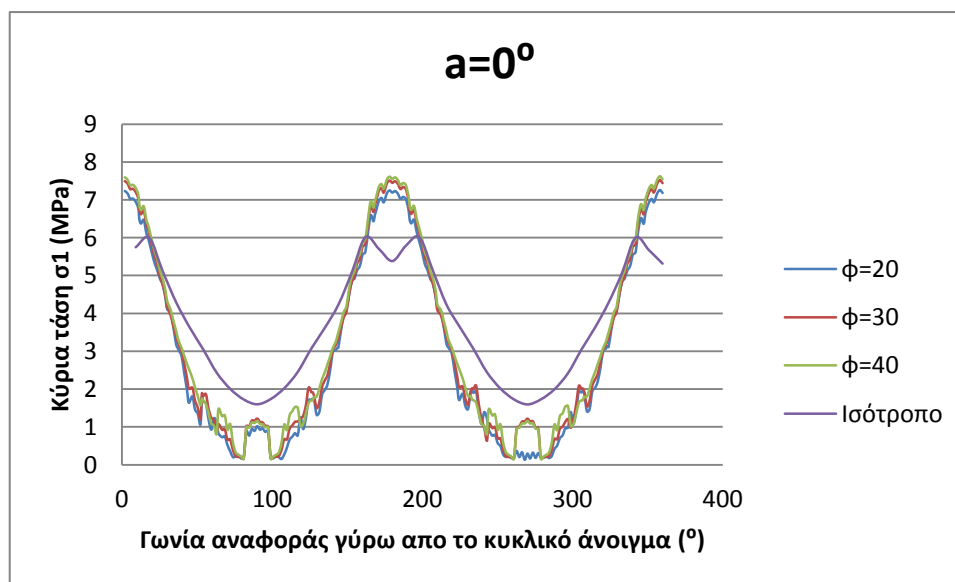


Σχήμα 4.13: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

Στον πίνακα 4.20 αναγράφονται τα αποτελέσματα των συνολικών μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν για κάθε μοντέλο μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μεγαλύτερες συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται για την μικρότερη τιμή γωνιάς εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών $\phi=20^\circ$ και είναι με 2.76mm.

Πίνακας 4.20: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

ϕ ($^\circ$)	Max t.d. (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
20	2.76	261	4.42
30	2.18	99	3.52
40	2.14	99	3.45



Σχήμα 4.14: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

Στον πίνακα 4.21 αναγράφονται τα αποτελέσματα της μέγιστης τιμής της κύριας τάσης σ_1 που υπολογίστηκαν για κάθε μοντέλο μεταβάλλοντας την γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών. Η μεγαλύτερη τιμή της σ_1 προκύπτει για γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 40° και είναι με 7.62 MPa, ενώ ο λόγος των τάσεων σ_1 ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσω έχει μέγιστη τιμή ίση με 1.41 για γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 40° .

Πίνακας 4.21: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

φ ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1an} / \sigma_{1is}$
20	7.26	358.2	1.35
30	7.52	358.2	1.39
40	7.62	358.2	1.41

Στον πίνακα 4.22 αναγράφεται το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών το οποίο λαμβάνει την μέγιστη τιμή του η οποία είναι ίση με 9.74m για γωνία εσωτερικής τριβής ασυνεχειών $\varphi = 20^\circ$.

Πίνακας 4.22: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών, για σταθερή κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

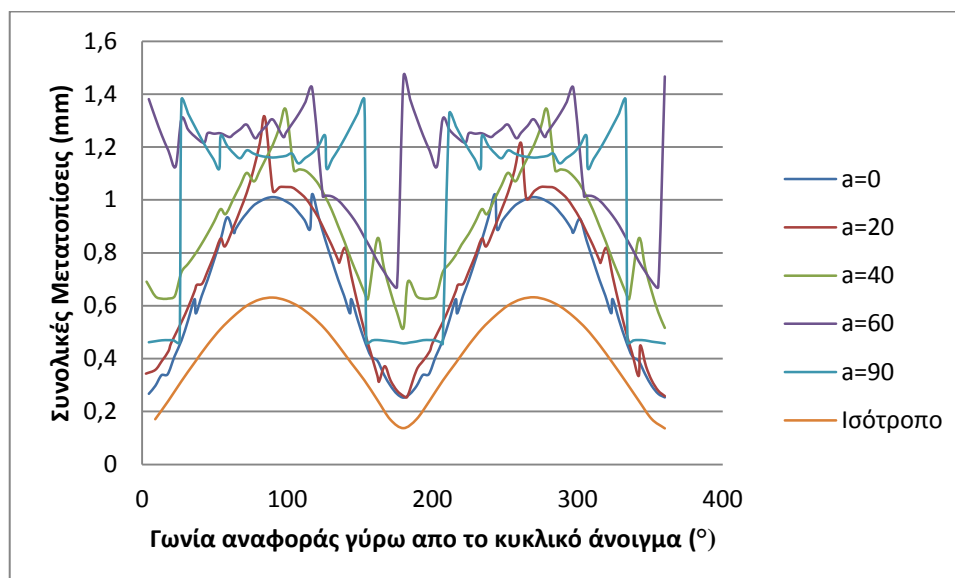
φ ($^\circ$)	Rmax (m)
20	9.74
30	7.32
40	6.33

4.6. Αναλύσεις για συντελεστή ωθήσεων $K=0.5$ και συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 0.66\text{m}^{-1}$.

4.6.1. Μεταβολή κλίσης ασυνεχειών.

Μονή οικογένεια ασυνεχειών

Τα σχήματα 4.15 και 4.16 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με μια οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με 0.66m^{-1} για κλίσεις ασυνεχειών από 0 έως 90° .



Σχήμα 4.15: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.23 αναγράφονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° και είναι ίσες με 1.47 mm . Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 10.73 για κλίσεις ασυνεχειών ίση με 60° .

Πίνακας 4.23: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	Max t.d (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^{\circ}$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
0	1.021	117	1.82
20	1.31	84.5	2.1
40	1.34	99	2.16
60	1.47	360	10.73
90	1.38	153	4.31



Σχήμα 4.16: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.24 αναγράφονται οι τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος της κύριας τάσης σ_1 ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης σ_1 εμφανίζεται για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° και είναι ίσες με 6.78 MPa. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος της κύριας τάσης μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 1.2 για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

Πίνακας 4.24: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^\circ$)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	$\sigma_{1,an} / \sigma_{1,is}$
0	6.78	351	1.2
20	6.57	193.5	1.11
40	5.67	193.5	0.96
60	4.24	225	1.17
90	5.08	355.5	0.92

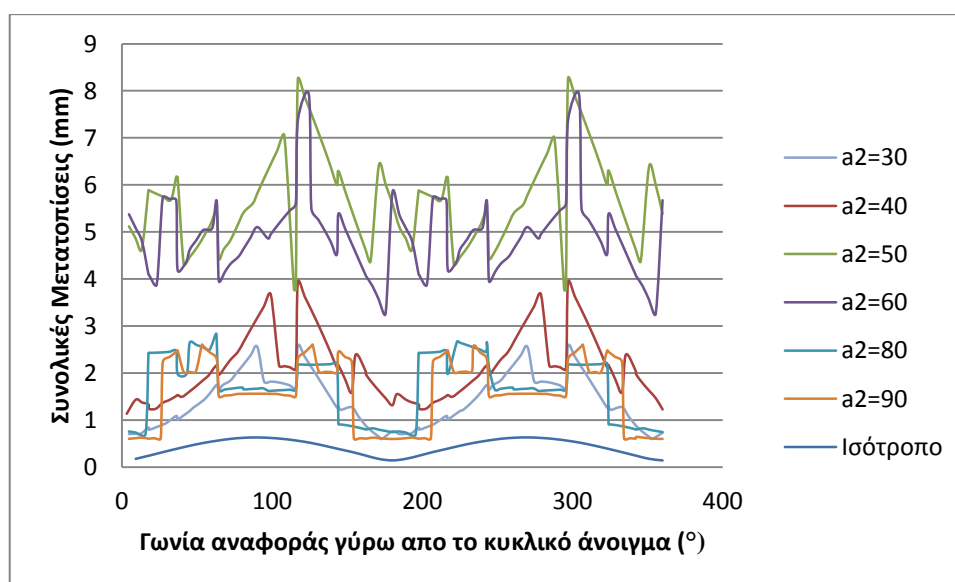
Στον πίνακα 4.25 αναγράφεται το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών και η γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα όπου λαμβάνει την μέγιστη τιμή του η οποία είναι ίση με 66.9m για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .

Πίνακας 4.25: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Κλίση ασυνεχειών α ($^{\circ}$)	R_{max} (m)	$\theta_{R_{max}}$ ($^{\circ}$)
0	8.5	61.8
20	12.5	126
40	30.4	120.6
60	66.9	140.4
90	17.8	104.5

Δύο οικογένειες ασυνεχειών.

Τα σχήματα 4.17 και 4.18 απεικονίζουν τις τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 που υπολογίστηκαν για τα μοντέλα με δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών ίση με 0.66 m^{-1} για διαφορά κλίσεων ασυνεχειών ίση με 30° , 40° , 50° , 60° , 80° και 90° .

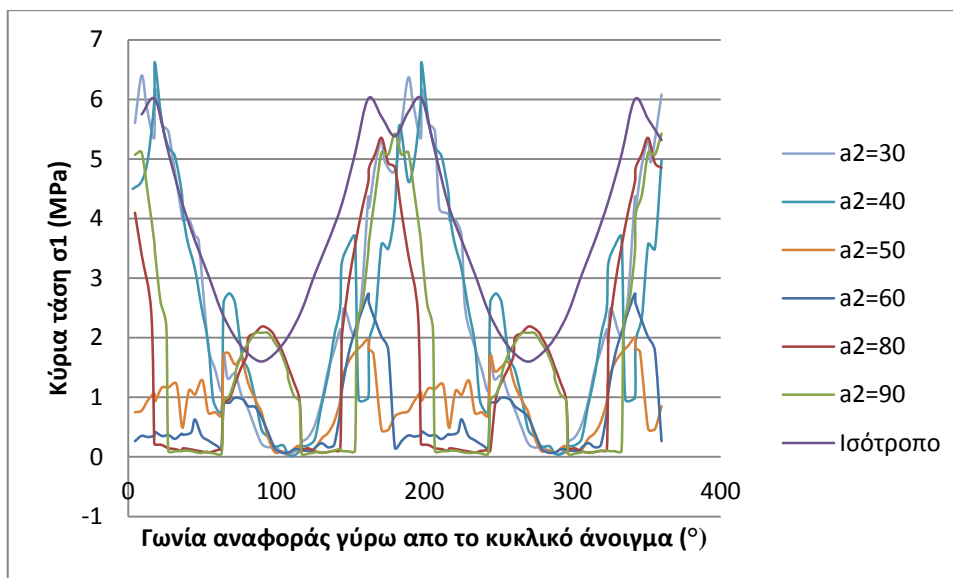


Σχήμα 4.17: Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.26 αναγράφονται οι μέγιστες μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται για κλίση ασυνεχειών ίση με 50° και είναι ίσες με 8.25 mm. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος των συνολικών μετατοπίσεων μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 15.1 για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 60° .

Πίνακας 4.26: Μεταβολή μέγιστων τιμών συνολικών μετατοπίσεων και του λόγου μέγιστων τιμών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

$\Delta\alpha$ ($^\circ$)	Max t.d (mm)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ ($^\circ$)	t.d. _{an} / t.d. _{is}
30	2.58	117	4.6
40	3.92	117	7
50	8.25	297	14.7
60	7.92	124	15.1
80	2.84	62.5	5.1
90	2.6	53	5.15



Σχήμα 4.18: Μεταβολή της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.

Στον πίνακα 4.27 αναγράφονται οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 , που υπολογίστηκαν για τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών καθώς και ο λόγος των κυρίων τάσεων σ_1 μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου. Προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης σ_1 εμφανίζεται για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 40° και είναι ίση με 6.62 MPa. Επίσης προκύπτει ότι ο λόγος της κύριας τάσης μεταξύ ανισότροπου και ισότροπου μέσου παίρνει μέγιστη τιμή ίση με 1.1 για κλίση ασυνεχειών ίση με 40° και 30° .

Πίνακας 4.27: Μεταβολή μέγιστων τιμών κύριας τάσης σ_1 και του λόγου μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, γύρω από το κυκλικό άνοιγμα, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών.

$\Delta\alpha$ (°)	Max σ_1 (MPa)	Γωνία αναφοράς γύρω από το κυκλικό άνοιγμα θ (°)	$\sigma_{1an} / \sigma_{1is}$
30	6.4	9	1.1
40	6.62	198	1.1
50	2	342	0.33
60	2.74	342	0.46
80	5.35	351	0.94
90	5.42	360	1.02

Στον πίνακα 4.28 αναγράφεται το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών και η γωνία θ όπου αυτό εμφανίζεται γύρω από το κυκλικό άνοιγμα όπου λαμβάνει την μέγιστη τιμή η οποία είναι ίση με 76.7m για κλίση ασυνεχειών ίση με 50°.

Πίνακας 4.28: Μεταβολή του μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της κλίσης των ασυνεχειών.

Διαφορά Κλίσης ασυνεχειών α (°)	Rmax (m)	θ_{Rmax} (°)
30	19.6	126.6
40	33.1	133.5
50	76.7	135.3
60	76.1	134.8
80	24.1	69.2
90	17.1	105.3

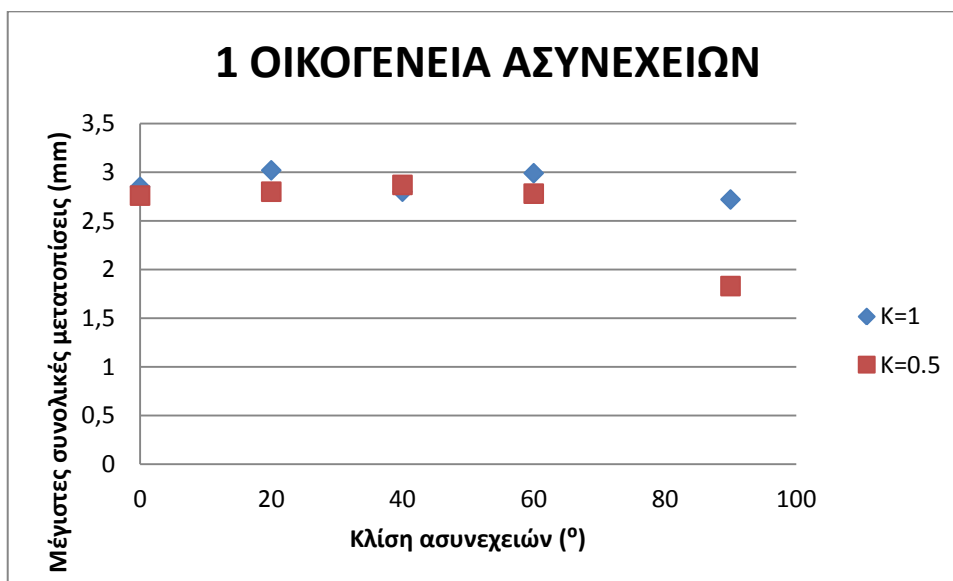
4.7. Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Μονή οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$:

Επίδραση του K:

Στα σχήματα 4.19 έως 4.28 απεικονίζονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Από το Σχήμα 4.19 προκύπτει ότι οι τιμές των συνολικών μετατοπίσεων έχουν μικρή διαφορά και για τις δύο τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στις τιμές προκύπτει για κλίση ασυνεχειών ίση με 90° για τιμή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με ένα.



Σχήμα 4.19: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

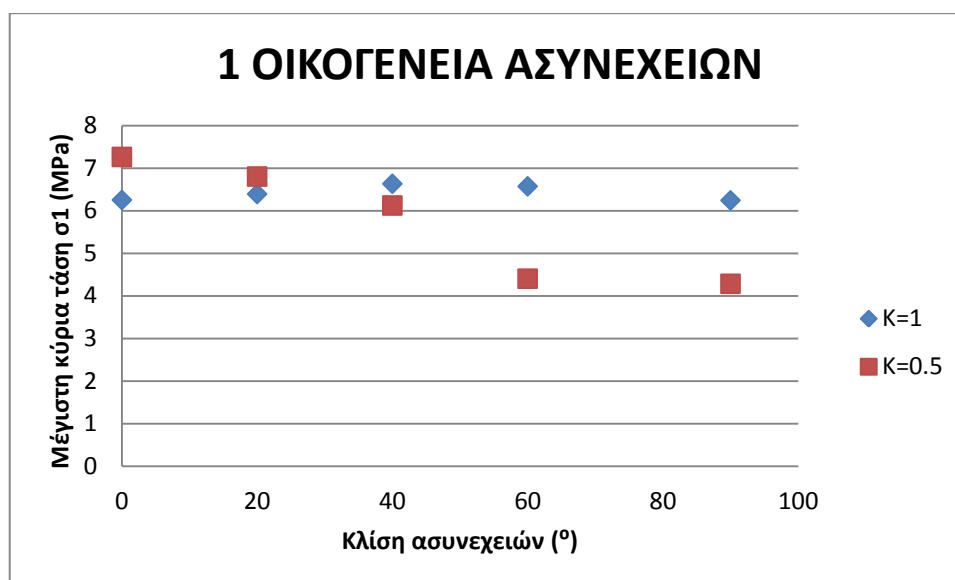
Στους πίνακες 4.29 έως 4.38 αναγράφονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της

γωνίας κλίσης των ασυνεχειών για τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.29: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $K=1$	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	2.85	2.76	3.1
20	3.02	2.8	7.3
40	2.8	2.87	-2.5
60	2.99	2.78	7
90	2.72	1.83	32.7

Από το Σχήμα 4.20 προκύπτει ότι για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° και 90° υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των τιμών της σ_1 ανάμεσα στις δύο τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων.

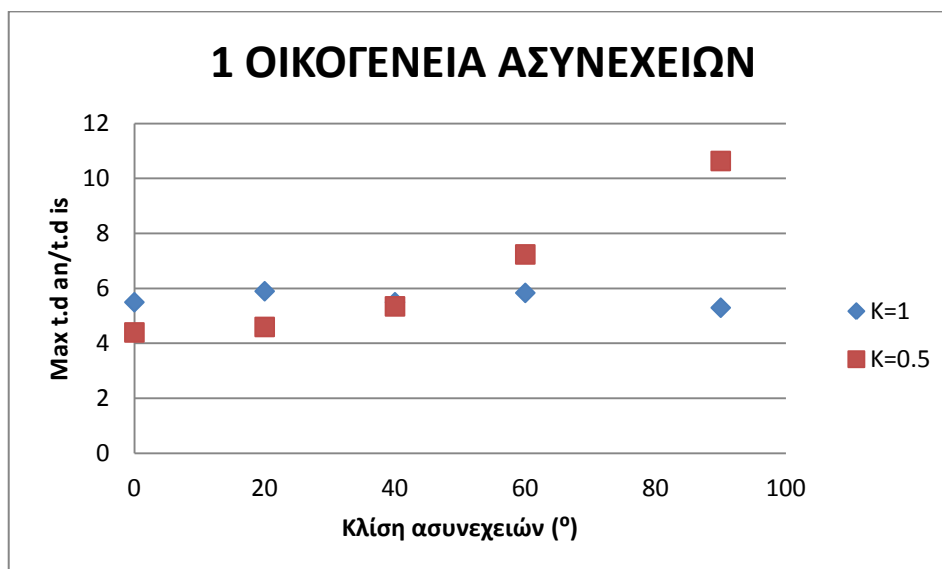


Σχήμα 4.20: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.30: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών ($^\circ$)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $K=1$	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	6.25	7.26	16
20	6.39	6.8	-6.4
40	6.63	6.12	7.7
60	6.57	4.4	33
90	6.24	4.28	31.4

Από το Σχήμα 4.21 προκύπτει ότι στις 0° και 20° η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο ως προς τις συνολικές μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερη για τιμή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με ένα. Στις 40° οι τιμές της επιβάρυνσης και για τις δύο περιπτώσεις συντελεστή πλευρικών ωθήσεων είναι σχεδόν ίσες, ενώ στις 60° και στις 90° παρατηρείται διαφοροποίηση με τις τιμές για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με μισό να είναι μεγαλύτερες.

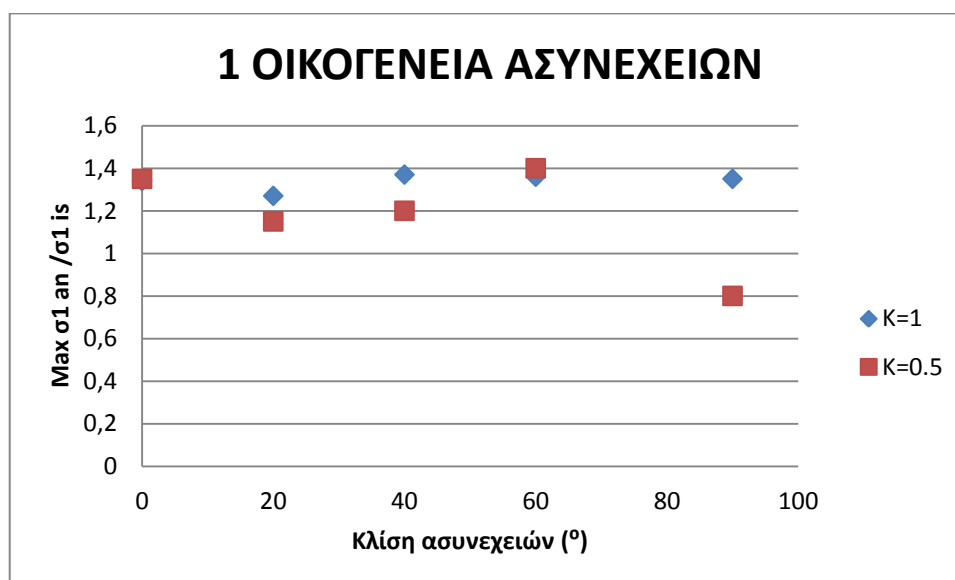


Σχήμα 4.21: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.31: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Max (t.d. an / t.d.is) για $K=1$	Max (t.d.an/t.d.is) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	5.5	4.4	20
20	5.9	4.6	22
40	5.5	5.35	2.7
60	5.84	7.24	24
90	5.3	10.64	100.1

Από το Σχήμα 4.22 προκύπτει ότι οι τιμές της επιβάρυνσης του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις τιμές της κύριας τάσης σ_1 , έχουν την μεγαλύτερη διαφοροποίηση για κλίση ασυνεχειών ίση με 90° για τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με ένα.

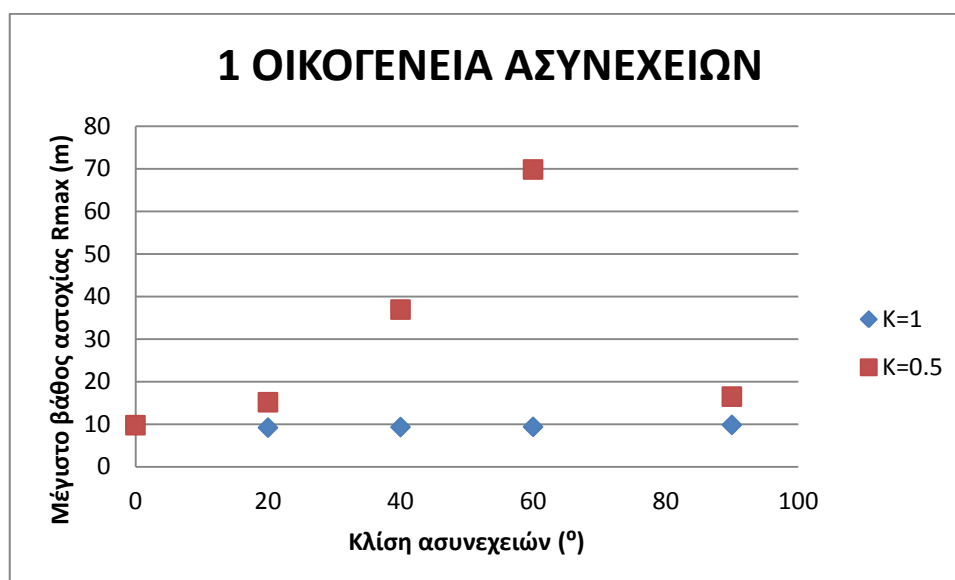


Σχήμα 4.22: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.32: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών ($^\circ$)	Max (σ_1 an / σ_1 is) για $K=1$	Max (σ_1 an/ σ_1 is) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	1.34	1.35	-0.75
20	1.27	1.15	9.4
40	1.37	1.2	12.4
60	1.36	1.4	-2.9
90	1.35	0.8	40.7

Από το Σχήμα 4.23 προκύπτει οι τιμές του μέγιστου βάθους αστοχίας των ασυνεχειών που έχουν υπολογιστεί για τιμή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με μισό, ότι είναι μεγαλύτερες για κάθε κλίση ασυνεχειών σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που έχουν υπολογιστεί για τιμή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με ένα. Επίσης προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του βάθους αστοχίας των ασυνεχειών λαμβάνει μέγιστη τιμή για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .



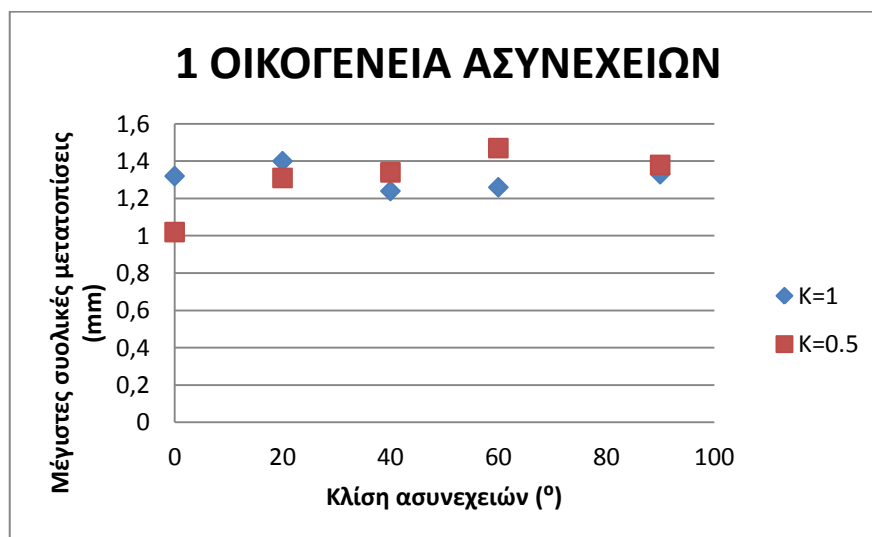
Σχήμα 4.23: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.33: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $K=1$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	9.8	9.74	0.6
20	9.17	15.13	-65
40	9.3	36.9	-297
60	9.35	69.8	-646.5
90	9.8	16.45	-68

Μονή οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$:

Από το Σχήμα 4.24 προκύπτει ότι οι τιμές των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων διαφοροποιούνται ελάχιστα και για τις δύο τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στις τιμές παρατηρούνται για κλίσεις ασυνεχειών ίση με 0° και 60° .

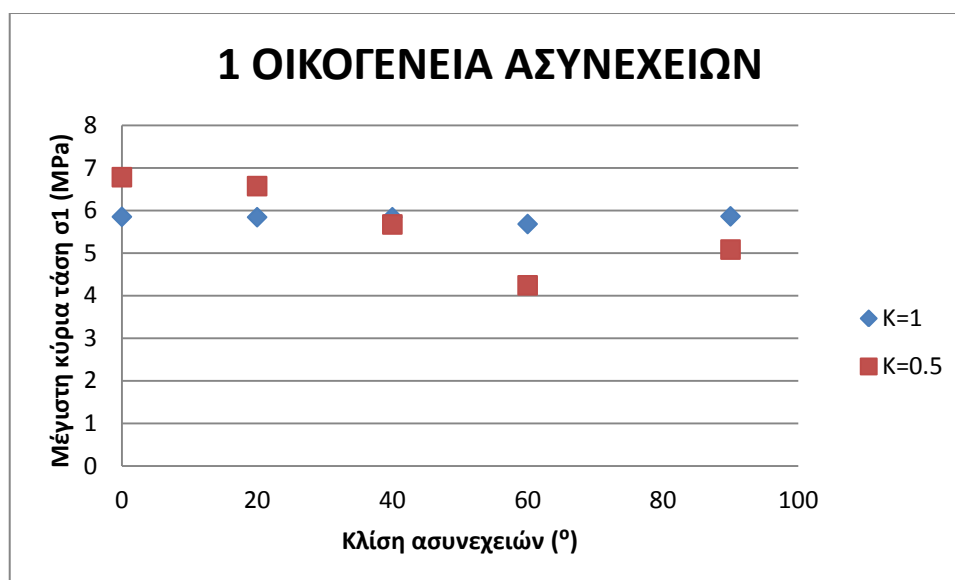


Σχήμα 4.24: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.34: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών ($^{\circ}$)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $K=1$	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	1.32	1.02	22.7
20	1.4	1.31	6.4
40	1.24	1.34	-8
60	1.26	1.47	-16.7
90	1.33	1.38	-3.7

Από το Σχήμα 4.25 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 είναι μεγαλύτερες για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με μισό για κλίσεις ασυνεχειών ίσες με 0° και 20° , στις 40° οι τιμές των τάσεων είναι σχεδόν ίδιες ενώ για κλίσεις ασυνεχειών ίσες 60° και 90° οι τιμές των τάσεων για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με ένα είναι υψηλότερες.

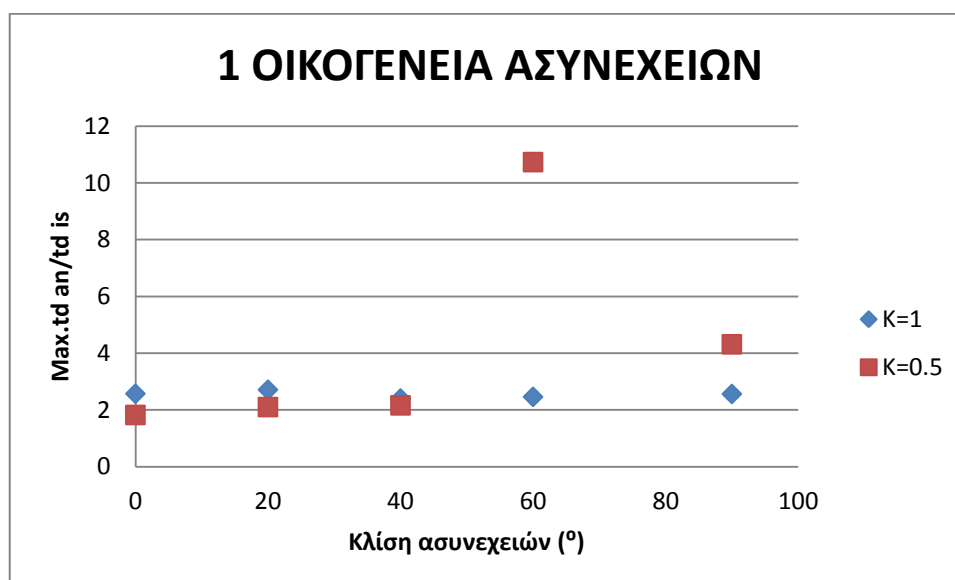


Σχήμα 4.25: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.35: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $K=1$	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	5.85	6.78	-15.9
20	5.84	6.57	-12.5
40	5.84	5.67	2.9
60	5.68	4.24	25.3
90	5.86	5.08	13.3

Από το Σχήμα 4.26 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις συνολικές μετατοπίσεις, είναι μεγαλύτερη για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με την μονάδα, για κλίσεις ασυνεχειών 0° και 20° . Στις 40° οι τιμές είναι σχεδόν ίσες, ενώ στις 60° και 90° οι τιμές του λόγου των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με μισό. Τέλος η μεγαλύτερη διαφοροποίηση παρουσιάζεται για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .

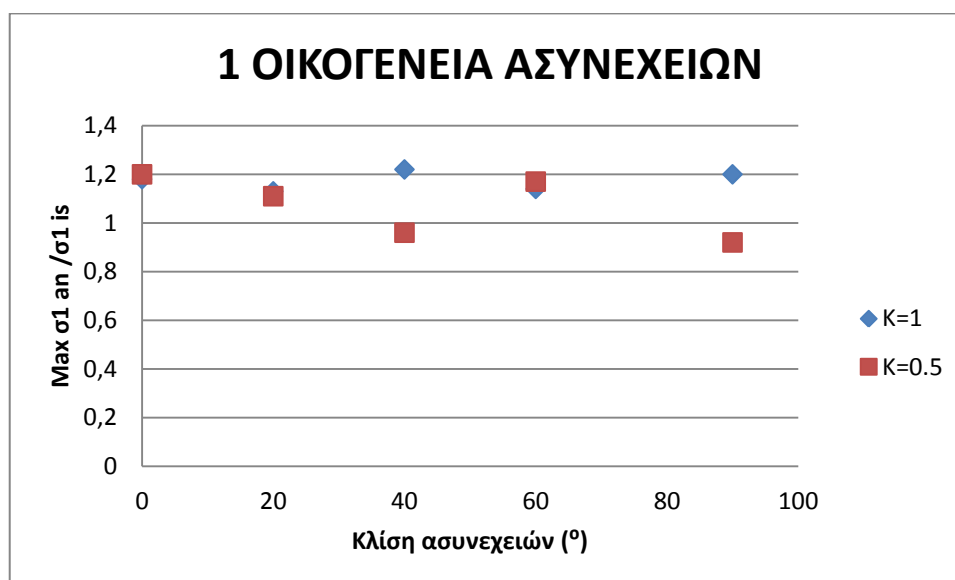


Σχήμα 4.26: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.36: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Max (t.d. an / t.d.is) για $K=1$	Max (t.d.an/t.d.is) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	2.57	1.82	29
20	2.71	2.1	22.5
40	2.4	2.16	10
60	2.46	10.73	-336
90	2.56	4.31	-68.3

Από το Σχήμα 4.27 προκύπτει ότι οι τιμές της επιβάρυνσης του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 είναι σχεδόν ίσες και για τις δύο τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K , εκτός από τις κλίσεις ασυνεχειών που είναι ίσες με 40° και 90° , όπου οι τιμές των τάσεων για τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με ένα, είναι μεγαλύτερες.

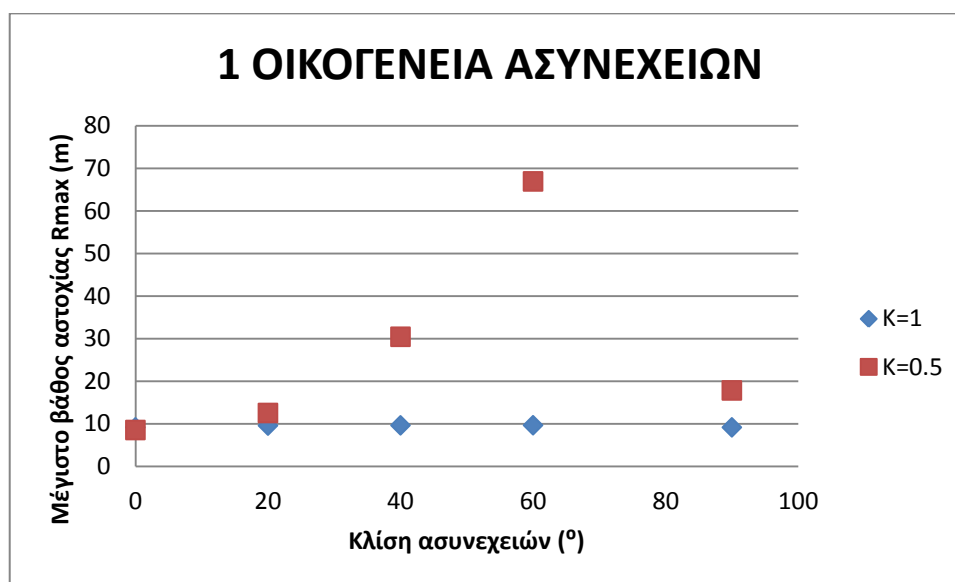


Σχήμα 4.27: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.37: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών ($^\circ$)	Max (σ_1 an / σ_1 is) για $K=1$	Max (σ_1 an/ σ_1 is) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	1.18	1.2	-1.7
20	1.13	1.11	1.8
40	1.22	0.96	21.3
60	1.14	1.17	-2.6
90	1.2	0.92	23.3

Από το Σχήμα 4.28 προκύπτει ότι για κάθε εξεταζόμενη κλίση ασυνεχειών το μέγιστο βάθος αστοχίας είναι μεγαλύτερο για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K ίσο με μισό. Τέλος η μεγαλύτερη τιμή βάθους αστοχίας εμφανίζεται για κλίση ασυνεχειών ίση με 60° .



Σχήμα 4.28: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

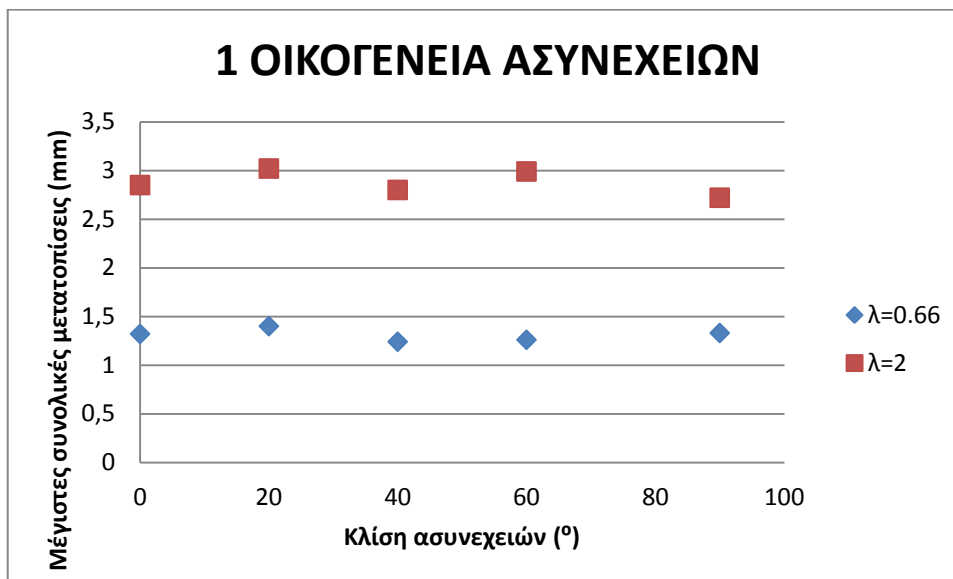
Πίνακας 4.38: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Κλίση ασυνεχειών ($^{\circ}$)	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $K=1$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $K=0.5$	% Μεταβολή
0	9.13	8.5	6.9
20	9.54	12.5	-31
40	9.6	30.4	-217
60	9.62	66.9	-595.4
90	9.13	17.8	-95

Επίδραση της συχνότητας των ασυνεχειών για σταθερή τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$:

Στα σχήματα 4.29 έως 4.38 απεικονίζονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της συχνότητας των ασυνεχειών για κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 90° .

Από το Σχήμα 4.29 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες για συχνότητα εμφάνισης $\lambda = 2\text{m}^{-1}$, για κάθε εξεταζόμενη κλίση ασυνεχειών.



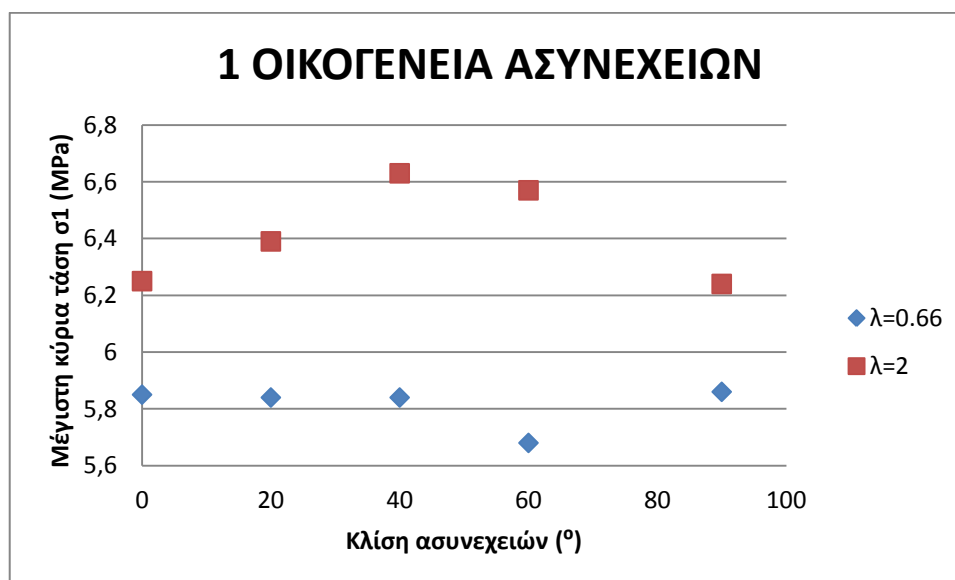
Σχήμα 4.29: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66\text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2\text{ m}^{-1}$.

Στους πίνακες 4.39 έως 4.48 αναγράφονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66\text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2\text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.39: Μεταβολή μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών ($^{\circ}$)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	1.32	2.85	-116
20	1.4	3.02	-116
40	1.24	2.8	-125.8
60	1.26	2.99	-137.3
90	1.33	2.72	-104.5

Από το Σχήμα 4.30 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 είναι μεγαλύτερες για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$, για κάθε μια από τις κλίσεις που εξετάστηκαν.

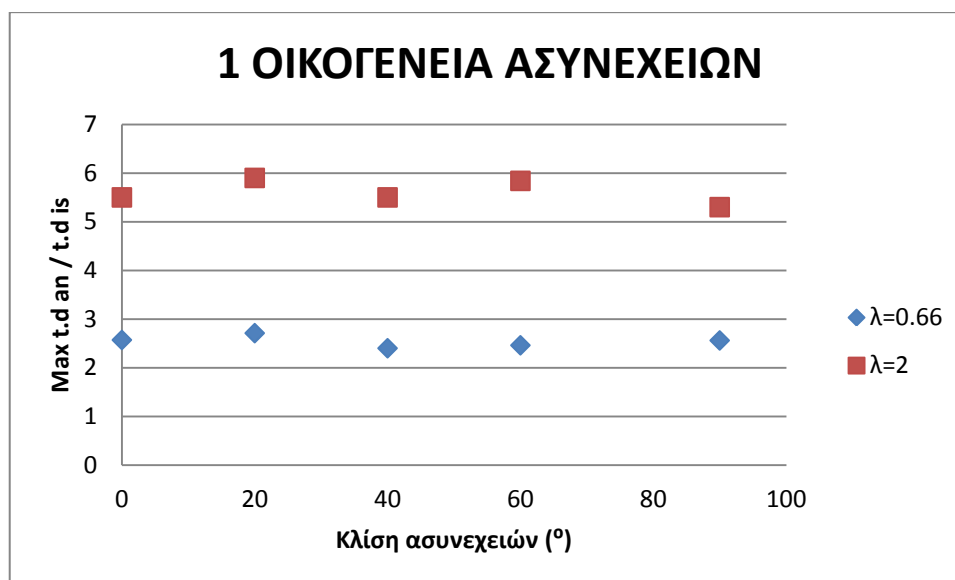


Σχήμα 4.30: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.40: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	5.85	6.25	-6.8
20	5.84	6.39	-9.4
40	5.84	6.63	-13.5
60	5.68	6.57	-15.7
90	5.86	6.24	-6.5

Από το Σχήμα 4.31 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις συνολικές μετατοπίσεις, είναι μεγαλύτερη για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$ για κάθε μια από τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών.

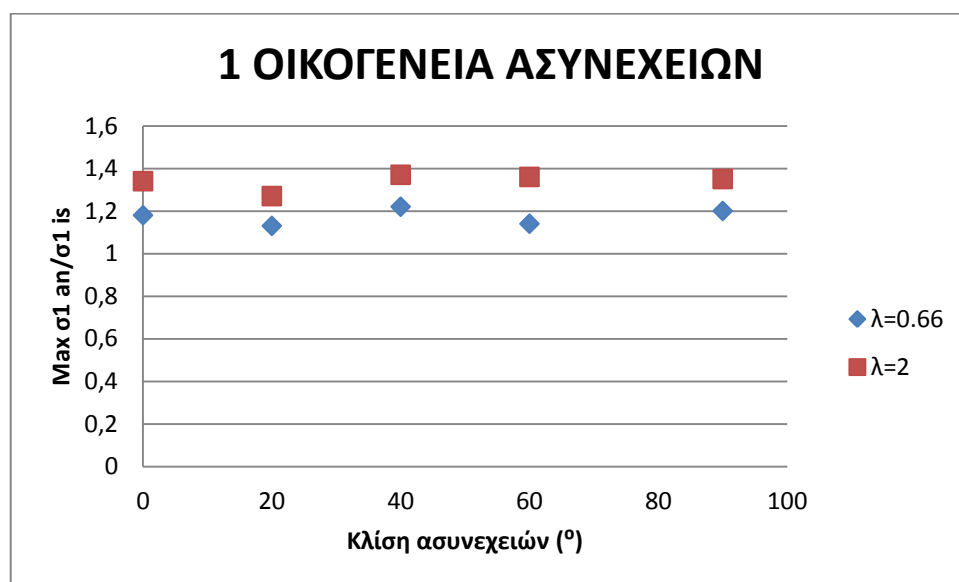


Σχήμα 4.31: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.41: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσω συναρτήσεως της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Max (t.d.an/t.d.is) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Max (t.d. an / t.d.is) για $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	2.57	5.5	-114
20	2.71	5.9	-118
40	2.4	5.5	-129
60	2.46	5.84	-137.4
90	2.56	5.3	-107

Από το σχήμα 4.32 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο ως προς την μέγιστη τιμή της κύριας τάσης σ_1 είναι μεγαλύτερη για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$ για κάθε μία από τις εξεταζόμενες κλίσεις.

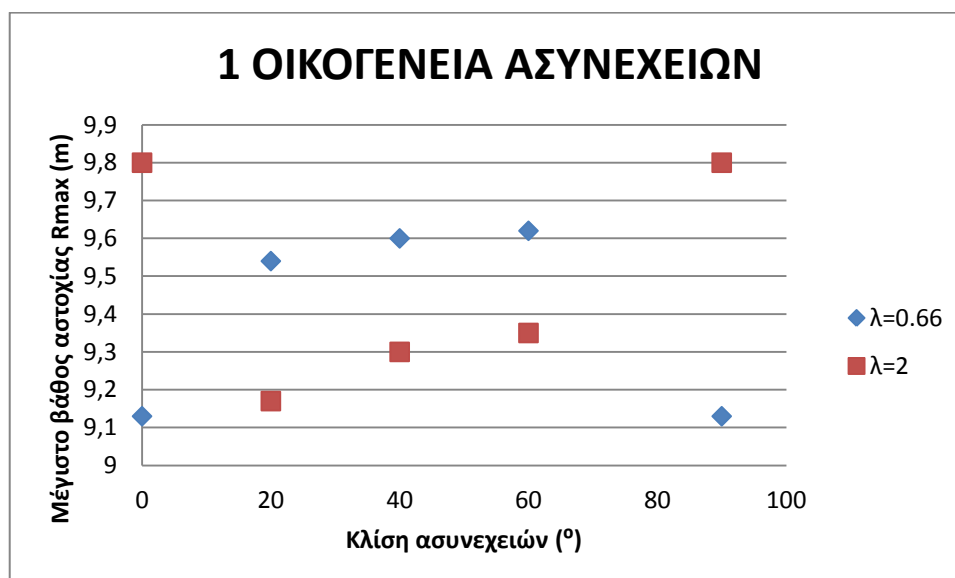


Σχήμα 4.32: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσω συναρτήσεως της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.42: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών ($^\circ$)	Max (σ_1 an/ σ_1 is) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Max (σ_1 an / σ_1 is) για $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	1.18	1.34	-13.5
20	1.13	1.27	-12.4
40	1.22	1.37	-12.3
60	1.14	1.36	-19.3
90	1.2	1.35	-12.5

Από το Σχήμα 4.33 προκύπτει ότι το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° και 90° είναι μεγαλύτερο για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2\text{m}^{-1}$ ενώ για τις υπόλοιπες κλίσεις ασυνεχειών που εξετάστηκαν, το μεγαλύτερο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών προκύπτει για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66\text{m}^{-1}$.



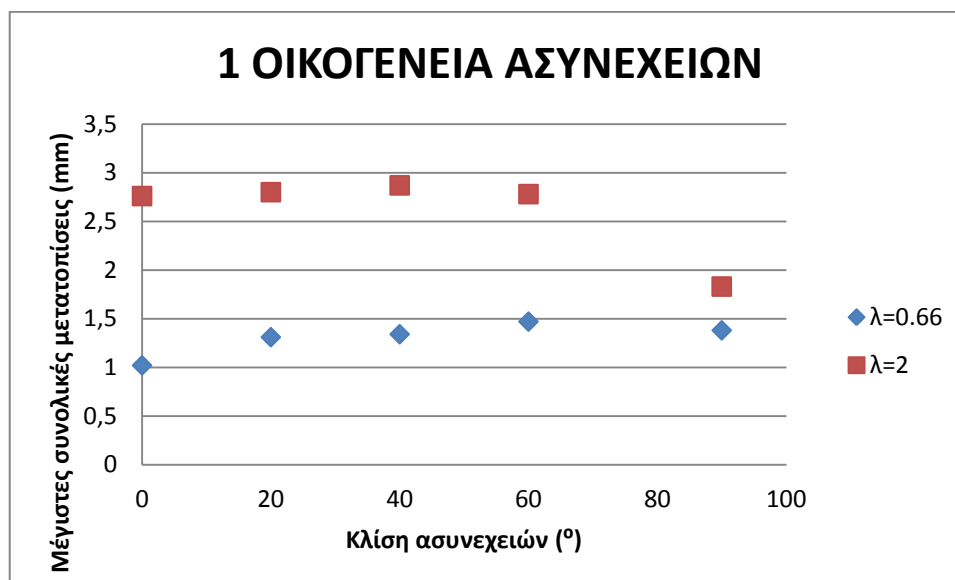
Σχήμα 4.33: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.43: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	9.13	9.8	-7.3
20	9.54	9.17	3.8
40	9.6	9.3	3.1
60	9.62	9.35	2.8
90	9.13	9.8	-7.3

Επίδραση της συχνότητας εμφάνισης των ασυνεχειών για σταθερή τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=0.5$:

Από το Σχήμα 4.34 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων, είναι μεγαλύτερες για συχνότητα ασυνεχειών $\lambda=2\text{m}^{-1}$, για κάθε εξεταζόμενη κλίση ασυνεχειών.

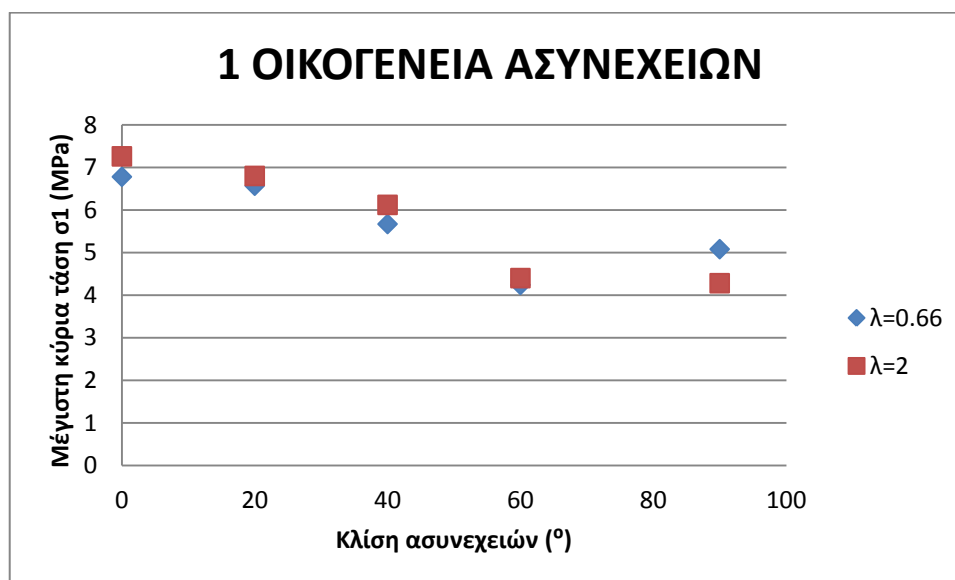


Σχήμα 4.34: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.44: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	1.02	2.76	-170.5
20	1.31	2.8	-113.7
40	1.34	2.87	-114.2
60	1.47	2.78	-89
90	1.38	1.83	-32.6

Από το Σχήμα 4.35 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 είναι μεγαλύτερες για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2\text{m}^{-1}$ για κάθε εξεταζόμενη κλίση ασυνεχειών εκτός από τις 90° , όπου η μεγαλύτερη τιμή υπολογίζεται για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66\text{m}^{-1}$.

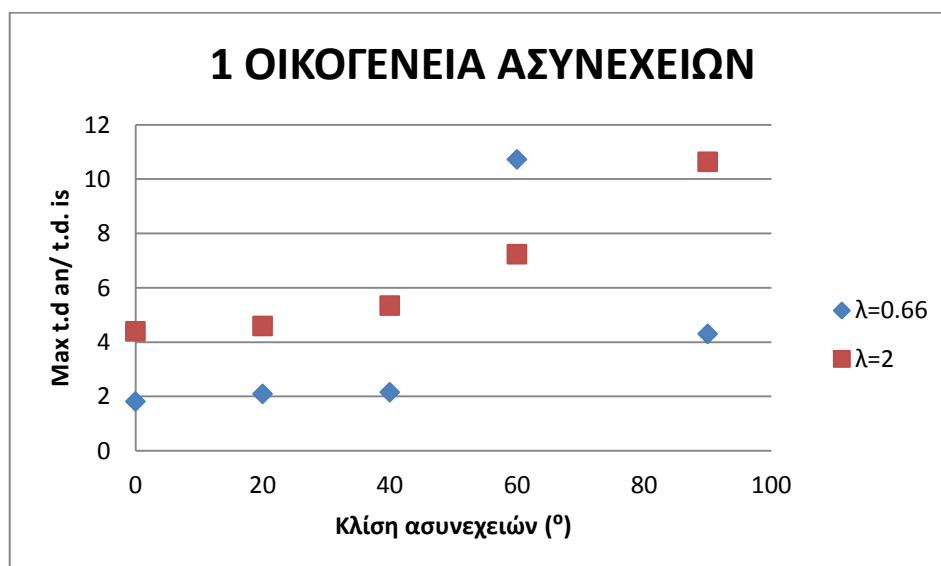


Σχήμα 4.35: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.45: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών ($^\circ$)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	6.78	7.26	-7.1
20	6.57	6.8	-3.5
40	5.67	6.12	-7..9
60	4.24	4.4	-3.8
90	5.08	4.28	15.7

Από το Σχήμα 4.36 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερη για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$ για όλες τις εξεταζόμενες κλίσεις ασυνεχειών εκτός των 60° , όπου μεγαλύτερη επιβάρυνση παρουσιάζει η συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda= 0.66 \text{ m}^{-1}$.

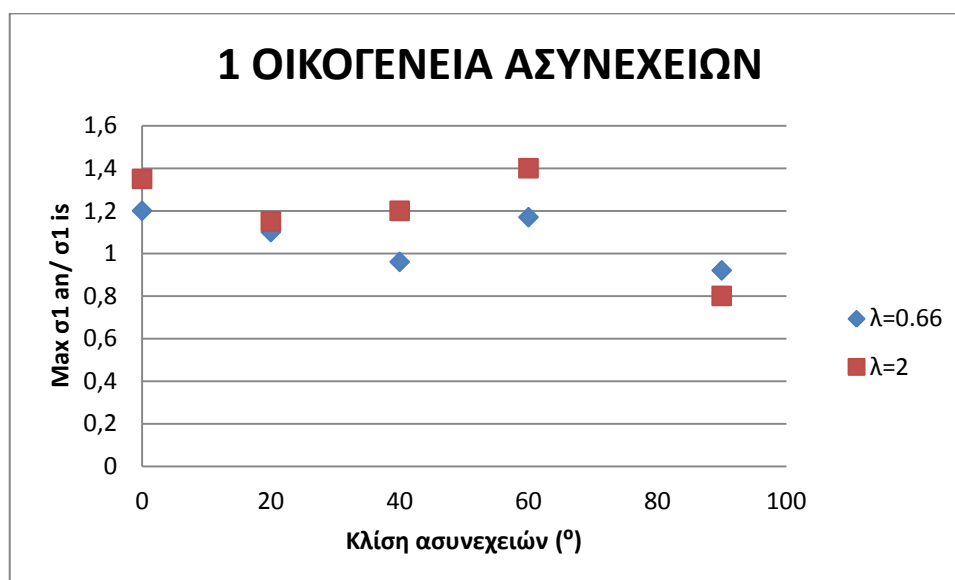


Σχήμα 4.36: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.46: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Max (t.d.an/t.d.is) για $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$	Max (t.d. an / t.d.is) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	1.82	4.4	-141.7
20	2.1	4.6	-119
40	2.16	5.35	-148
60	10.73	7.24	32.5
90	4.31	10.64	-146.8

Από το Σχήμα 4.37 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς την μέγιστη τιμή της κύριας τάσης σ_1 είναι μεγαλύτερη για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2\text{m}^{-1}$, όλες τις εξεταζόμενες κλίσεις των ασυνεχειών, εκτός από αυτή των 90° .

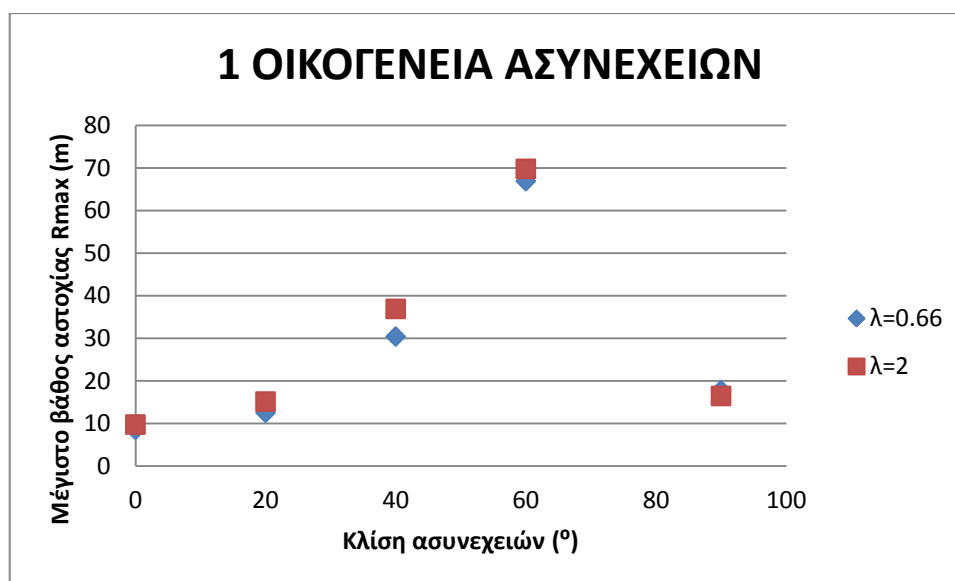


Σχήμα 4.37: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.47: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών ($^\circ$)	Max (σ_1 an/ σ_1 is) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Max (σ_1 an / σ_1 is) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	1.2	1.35	-12.5
20	1.1	1.15	-4.5
40	0.96	1.2	-25
60	1.17	1.4	-19.6
90	0.92	0.8	13

Από το Σχήμα 4.38 προκύπτει ότι το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερο για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$ για όλες τις κλίσεις εκτός των 90° .



Σχήμα 4.38: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.48: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

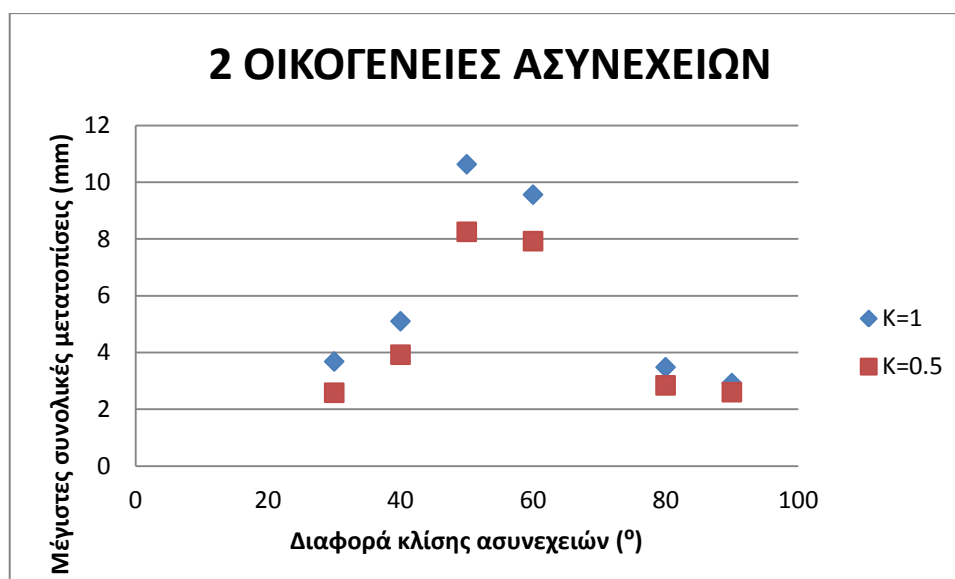
Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστο βάθος αστοχίας Rmax (m) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας Rmax (m) για $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
0	8.5	9.74	-14.6
20	12.5	15.13	-21
40	30.4	36.9	-21.4
60	66.9	69.8	-4.3
90	17.8	16.45	7.6

Δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$:

Επίδραση του K:

Στα σχήματα 4.39 έως 4.43 απεικονίζονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K = 1$ και $K = 0.5$.

Από το Σχήμα 4.39 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες σε όλες τις εξεταζόμενες κλίσεις για τιμή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με τη μονάδα.



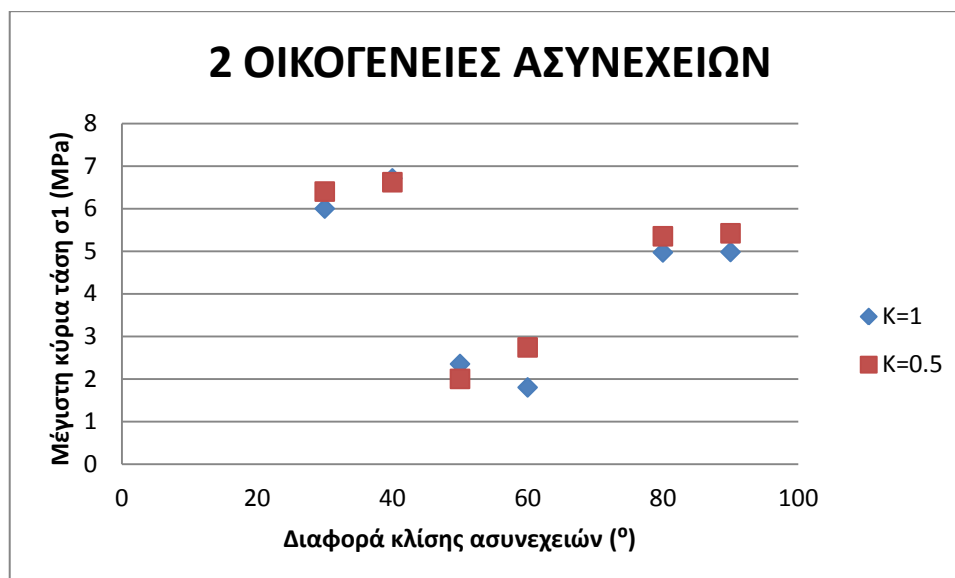
Σχήμα 4.39: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Στους πίνακες 4.49 έως 4.53 αναγράφονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.49: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις για $K=1$ (mm)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις για $K=0.5$ (mm)	% Μεταβολή
30	3.68	2.58	29.9
40	5.1	3.92	23.1
50	10.63	8.25	22.3
60	9.56	7.92	17
80	3.48	2.84	18.4
90	2.92	2.6	11

Από το Σχήμα 4.40 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 έχουν την μεγαλύτερη διαφοροποίηση για διαφορά κλίσης ίση με 60° .

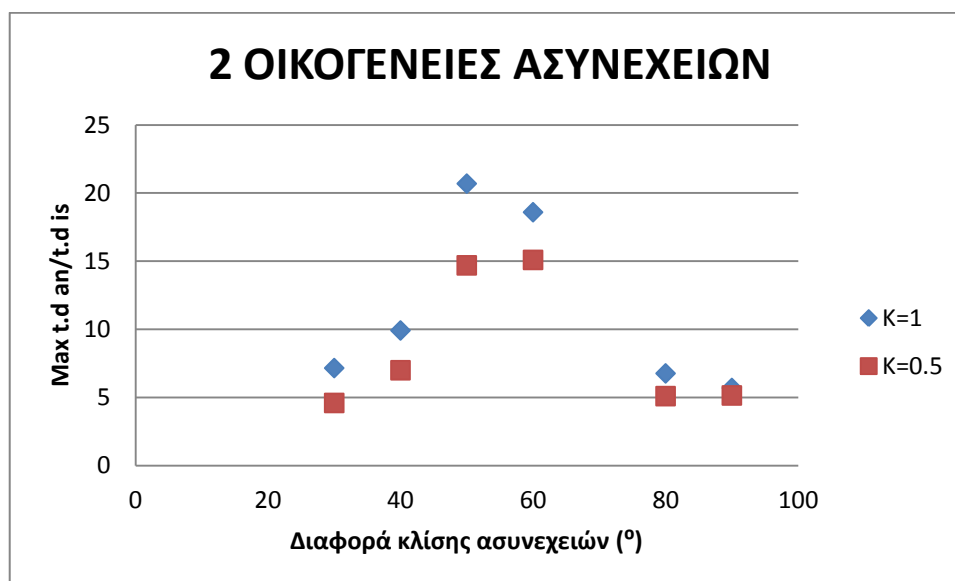


Σχήμα 4.40: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.50: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 για $K=1$ (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 για $K=0.5$ (MPa)	% Μεταβολή
30	6	6.4	-6.6
40	6.71	6.62	1.34
50	2.35	2	15
60	1.8	2.74	-52
80	4.97	5.35	-7.6
90	4.98	5.42	-8.8

Από το Σχήμα 4.41 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερη για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με τη μονάδα.

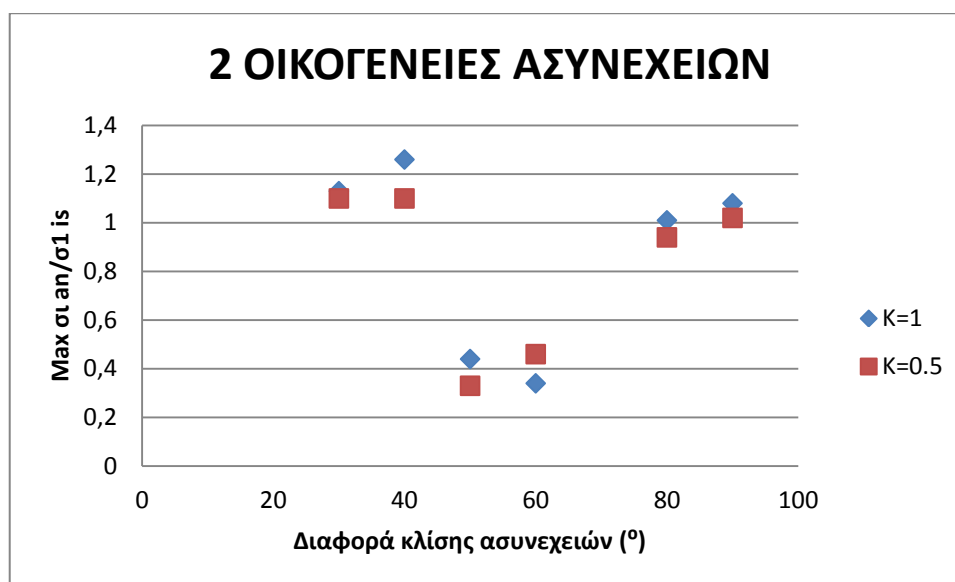


Σχήμα 4.41: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.51: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Max (t.d. an / t.d.is) για $K=1$	Max (t.d.an/t.d.is) για $K=0.5$	% Μεταβολή
30	7.16	4.6	35.7
40	9.92	7	29.4
50	20.7	14.7	29
60	18.6	15.1	19
80	6.77	5.1	24.6
90	5.7	5.15	9.6

Από το σχήμα 4.42 προκύπτει ότι ο λόγος των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου μέσου προς το ισότροπο μέσο λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με την μονάδα, για όλες τις εξεταζόμενες κλίσεις εκτός από της κλίσης των 60° .

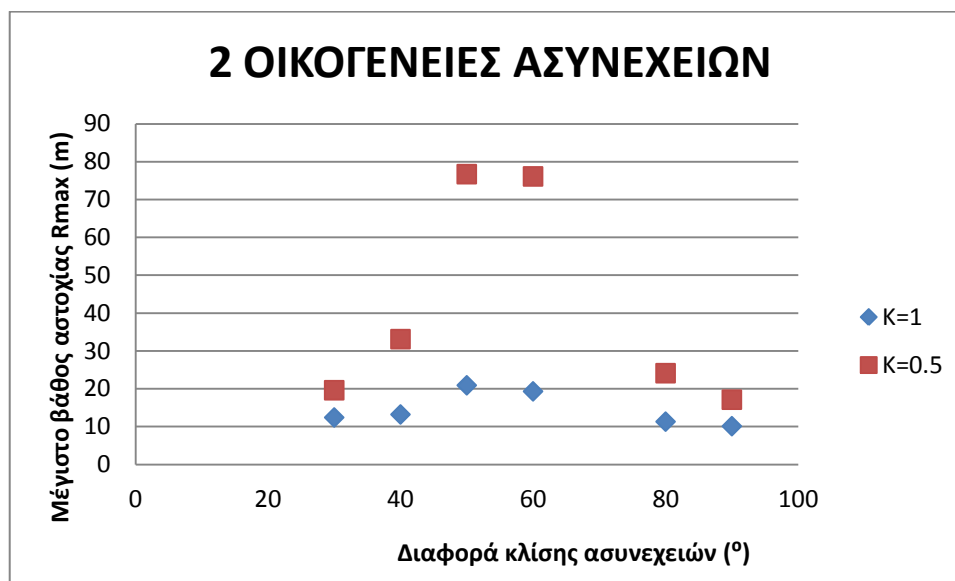


Σχήμα 4.42: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Πίνακας 4.52: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Max ($\sigma_1 an / \sigma_1 is$) για $K=1$	Max ($\sigma_1 an / \sigma_1 is$) για $K=0.5$	% Μεταβολή
30	1.13	1.1	2.65
40	1.26	1.1	12.7
50	0.44	0.33	25
60	0.34	0.46	-35.3
80	1.01	0.94	6.9
90	1.08	1.02	5.5

Από το Σχήμα 4.43 προκύπτει ότι οι τιμές του μέγιστου βάθους αστοχίας των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερες για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με μισό.



Σχήμα 4.43: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

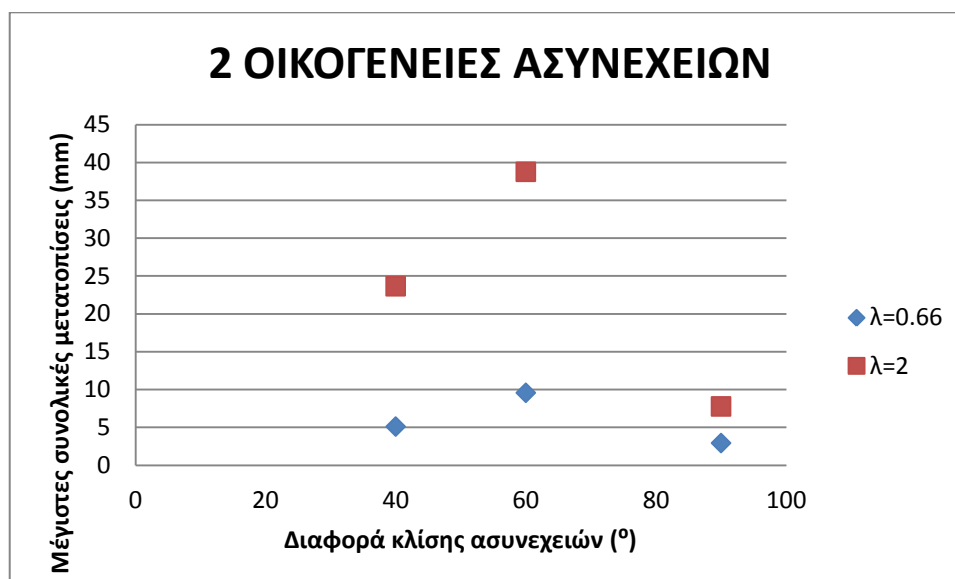
Πίνακας 4.53: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για τιμές συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$ και $K=0.5$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $K=1$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m) για $K=0.5$	% Μεταβολή
30	12.4	19.6	-58
40	13.2	33.1	-151
50	20.9	76.7	-267
60	19.3	76.1	-294.3
80	11.3	24.1	-113.3
90	10.1	17.1	-69.3

Επίδραση της συχνότητας ασυνεχειών για σταθερή τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$.

Στα σχήματα 4.44 έως 4.48 απεικονίζονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$.

Από το Σχήμα 4.44 προκύπτει ότι οι μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων είναι υψηλότερες για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$.



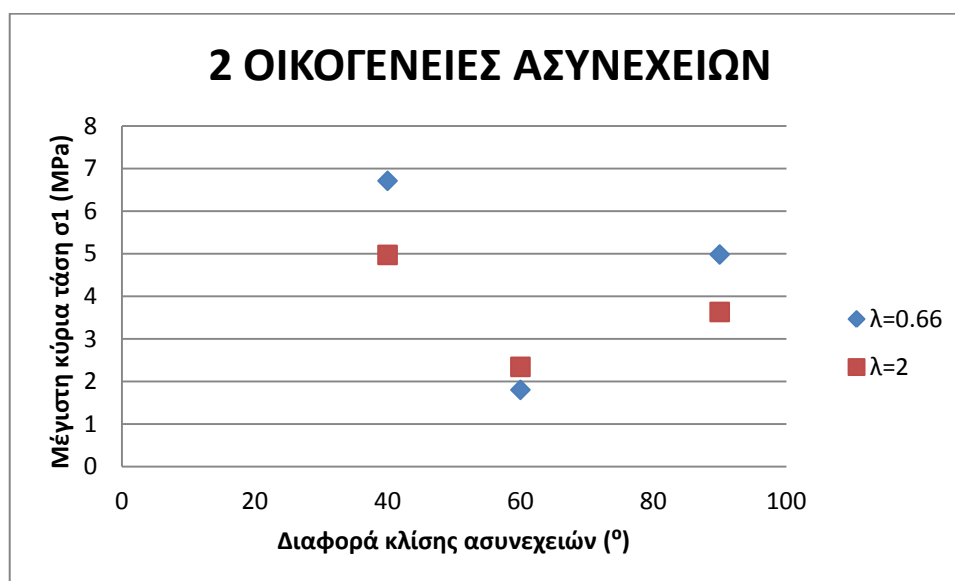
Σχήμα 4.44: Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Στους πίνακες 4.54 έως 4.58 απεικονίζονται οι μεταβολές των μέγιστων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων, της κύριας τάσης, του λόγου των συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο, του λόγου της κύριας τάσης του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο και του μέγιστου βάθους αστοχίας, συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda=2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.54: : Μεταβολή των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (mm) για $\lambda= 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
40	5.1	23.64	-363.5
60	9.56	38.76	-305.4
90	2.92	7.76	-165.7

Από το Σχήμα 4.45 προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης σ_1 είναι υψηλότερη για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$ για διαφορά κλίσης ασυνεχειών ίση με 40° και 90° , ενώ για διαφορά κλίσης ίση με 60° , η τιμή της τάσης για συχνότητα ασυνεχειών $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$ είναι υψηλότερη.

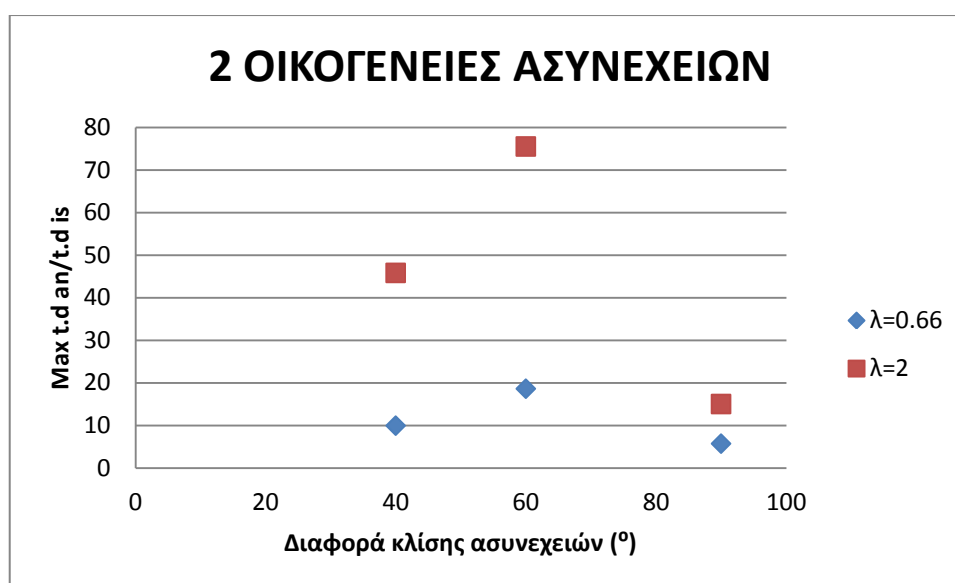


Σχήμα 4.45: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.55: Μεταβολή των μέγιστων τιμών της κύριας τάσης σ_1 συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστη κύρια τάση σ_1 (MPa) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
40	6.71	4.97	26
60	1.8	2.34	-30
90	4.98	3.63	27.1

Από το Σχήμα 4.46 προκύπτει ότι η επιβάρυνση του ανισότροπου μέσου σε σχέση με το ισότροπο μέσο ως προς τις μέγιστες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερη για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

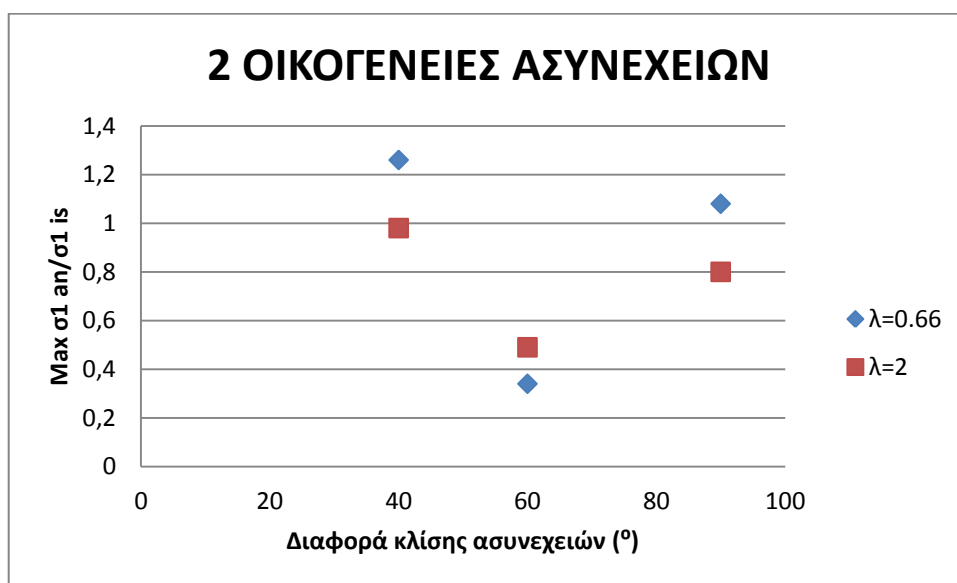


Σχήμα 4.46: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.56: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων συνολικών μετατοπίσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Max (t.d.an/t.d.is) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Max (t.d. an / t.d.is) για $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
40	9.92	45.8	-362
60	18.6	75.5	-306
90	5.7	15	-163

Από το Σχήμα 4.47 προκύπτει πως οι μέγιστες τιμές της κύριας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο είναι υψηλότερες για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=0.66\text{m}^{-1}$ για διαφορά κλίσης ίση με 40° και 90° , ενώ για 60° η υψηλότερη τιμή προκύπτει για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2\text{m}^{-1}$.

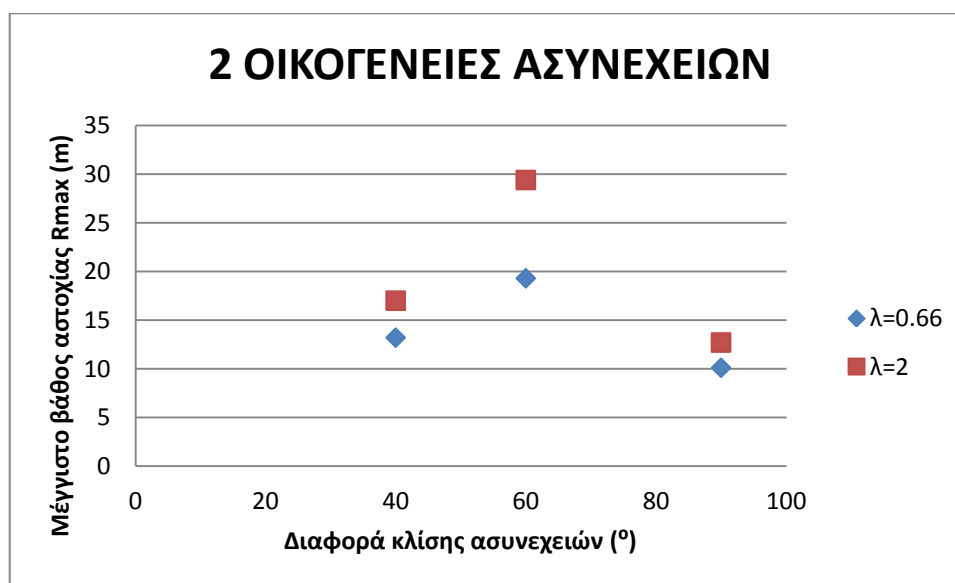


Σχήμα 4.47: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.57: Μεταβολή του λόγου της μέγιστης τιμής της κυρίας τάσης σ_1 του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Διαφορά κλίσης ασυνεχειών $\Delta\alpha$ (°)	Max (σ_1 an/ σ_1 is) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Max (σ_1 an / σ_1 is) για $\lambda= 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
40	1.26	0.98	22.2
60	0.34	0.49	-44
90	1.08	0.8	26

Από το Σχήμα 4.48 προκύπτει ότι το μέγιστο βάθος αστοχίας των ασυνεχειών εμφανίζει υψηλότερες τιμές, για συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda=2\text{m}^{-1}$.



Σχήμα 4.48: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Πίνακας 4.58: Μεταβολή μέγιστου βάθους αστοχίας συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς κλίσης των ασυνεχειών για συχνότητες εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$ και $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Κλίση ασυνεχειών (°)	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{\max} (m) για $\lambda=0.66 \text{ m}^{-1}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{\max} (m) για $\lambda= 2 \text{ m}^{-1}$	% Μεταβολή
40	13.2	17	-28.8
60	19.3	29.4	-52.3
90	10.1	12.7	-25.7

4.8 Συγκεντρωτικοί πίνακες:

Οι πίνακες 4.59 έως 4.63 αναγράφουν για κάθε περίπτωση, τον λόγο των μέγιστων συνολικών παραμορφώσεων και τάσεων του ανισότροπου προς το ισότροπο μέσο καθώς και το μέγιστο βάθος αστοχίας. Οι ασυνέχειες έχουν χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής, συνοχή ίση με 0.026 MPa και γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 20°. Τέλος η κατακόρυφη γεωστατική τάση είναι ίση με 2.6 MPa. Στην περίπτωση της μίας οικογένειας ασυνεχειών σε υδροστατικό πεδίο ($K=1$), οι τιμές των τάσεων, των παραμορφώσεων και του μέγιστου βάθους αστοχίας δεν επηρεάζονται από την μεταβολή της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών.

Μονή οικογένεια ασυνεχειών:

Πίνακας 4.59: Μονή οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα εμφάνισης $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K	Γωνία κλίσης ασυνεχειών α (°)	t.d.an / t.d.is	$\sigma_{1 \text{ an}} / \sigma_{1 \text{ is}}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας Rmax (m)
1	-	5.7	1.32	9.4
0.5	0	4.4	1.35	9.74
0.5	20	4.6	1.15	15.13
0.5	40	5.35	1.2	36.9
0.5	60	7.24	1.4	69.8
0.5	90	10.64	0.8	16.45

Πίνακας 4.60: Μονή οικογένεια ασυνεχειών με συχνότητα εμφάνισης $\lambda = 0.66 \text{ m}^{-1}$.

Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K	Γωνία κλίσης ασυνεχειών a (°)	t.d.an / t.d.is	$\sigma_{1 \text{ an}} / \sigma_{1 \text{ is}}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας Rmax (m)
1	-	2.6	1.16	9.4
0.5	0	1.82	1.2	8.5
0.5	20	2.1	1.11	12.5
0.5	40	2.16	0.96	30.4
0.5	60	10.73	1.17	67
0.5	90	4.31	0.92	17.8

Δύο οικογένειες ασυνεχειών:Πίνακας 4.61: Δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα εμφάνισης $\lambda = 2 \text{ m}^{-1}$.

Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K	Διαφορά γωνίας κλίσης Δa (°)	t.d. an / t.d. is	$\sigma_{1 \text{ an}} / \sigma_{1 \text{ is}}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας Rmax (m)
1	40	45.8	0.98	17
1	60	75.5	0.49	29.4
1	90	15	0.8	12.7

Πίνακας 1.62: Δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα εμφάνισης $\lambda = 0.66\text{m}^{-1}$ για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=1$.

Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K	Διαφορά γωνίας κλίσης ασυνεχειών α ($^\circ$)	t.d.an / t.d.is	$\sigma_{1 \text{ an}} / \sigma_{1 \text{ is}}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m)
1	30	7.16	1.13	12.4
1	40	9.92	1.26	13.2
1	50	20.7	0.44	20.9
1	60	18.6	0.34	19.3
1	80	6.77	1.01	11.3
1	90	5.7	1.08	10.1

Πίνακας 4.63: Δύο οικογένειες ασυνεχειών με συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών $\lambda = 0.66$ για συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K=0.5$.

Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K	Διαφορά γωνίας κλίσης ασυνεχειών α ($^\circ$)	t.d.an / t.d.is	$\sigma_{1 \text{ an}} / \sigma_{1 \text{ is}}$	Μέγιστο βάθος αστοχίας R_{max} (m)
0.5	30	4.6	1.1	19.6
0.5	40	7	1.1	33.1
0.5	50	14.7	0.33	76.7
0.5	60	15.1	0.46	76.1
0.5	80	5.1	0.94	24.1
0.5	90	5.15	1.02	17.1

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών οδηγεί σε:
 - Μείωση των συνολικών μετατοπίσεων γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
 - Μείωση του μέγιστου βάθους αστοχίας των ασυνεχειών γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
 - Αύξηση των τιμών της μέγιστης κύριας τάσης γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
2. Αύξηση της συχνότητας των ασυνεχειών από 0.66 m^{-1} σε 2 m^{-1} (πιο πυκνό δίκτυο ασυνεχειών) οδηγεί σε:
 - Αύξηση συνολικών μετατοπίσεων γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
 - Αύξηση τιμών της κύριας τάσης σ_1 (εφαπτομενικής) γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
3. Αύξηση των οικογενειών ασυνεχειών με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά οδηγεί σε:
 - Αύξηση συνολικών μετατοπίσεων γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
 - Αύξηση βάθους αστοχίας ασυνεχειών γύρω από το κυκλικό άνοιγμα.
4. Μεταβολή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K από 1 σε 0.5 προκαλεί:

Για μονή οικογένεια ασυνεχειών:

 - Αύξηση της επιβάρυνσης που οφείλεται στην ύπαρξη ασυνεχειών ως προς τις συνολικές μετατοπίσεις γύρω από το κυκλικό άνοιγμα για κλίσεις ασυνεχειών 60° έως 90° .
 - Αύξηση του βάθους αστοχίας των ασυνεχειών γύρω από το κυκλικό άνοιγμα για κλίσεις ασυνεχειών από 20° έως 90° .

Για δύο οικογένειες ασυνεχειών:

 - Μείωση της επιβάρυνσης που οφείλεται στην ύπαρξη ασυνεχειών ως προς τις συνολικές μετατοπίσεις γύρω από το κυκλικό άνοιγμα για διαφορά κλίσης ασυνεχειών 30° έως 90° .
 - Αύξηση του βάθους αστοχίας των ασυνεχειών γύρω από το κυκλικό άνοιγμα για διαφορά κλίσεων ασυνεχειών από 30° έως 90° .

5.1. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

- Παραμετρικές αναλύσεις ως προς την συνοχή, δυστροπία και πυκνότητα των ασυνεχειών.
- Παραμετρικές αναλύσεις ως προς τον συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K για τιμές μεγαλύτερες του 1.
- Εξέταση διαφορετικού σχήματος διατομής ανοίγματος $\pi\chi$ (πεταλοειδές διατομή).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία:

1. Daemen, J.J.K. (1983). "Slip zones for discontinuities parallel to circular tunnels or shafts". *Int.J.Rock Mech.Min.Sci & Geomech.Abstr.vol 20. No. 3.p.p. 135-148.*
2. Yiouta-Mitra, P., Proutzos, N., Sofianos, A. (2015). "A Parametric Study for the Strength of Jointed Rock Mass". *EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium Schubert (ed) © OGG.*
3. Fortsakis, P., Nikas, K., Marinos, V., Marinos, P (2012). "Anisotropic behavior of stratified rock masses". *Engineering Geology 141-142 (2012) 74-83.*
4. Lisjak, A., Garitte, B., Grasseli, G., Muller, H.R, Victor, T. (2014). "The excavation of a circular tunnel in a bedded argillaceous rock (opalinus clay): short – term rock mass reponse and FDEM numerical analysis". *Tunnelling and underground space technology 45 (2015) 227-248.*
5. Bandis, S.C, Lumsdent, A.C., Barton, N.R (1983). "Fundamentals of rock joint deformation". *Int.J.Rock.Mech.Min. Sci & Geomech.Abstr. vol 20, No. 6, pp. 249-268,1983.*
6. Hume, C,D (2011). "Numerical validation and refinement of empirical rock mass modulus estimation", postgraduate thesis, Queen's university, Ontario, Canada.
7. Brady, B.H.G and B.T. Brown (2005). "Rock mechanics for underground mining". 2005, springer science.

Ελληνική Βιβλιογραφία:

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ (2002). "Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων", Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
2. Αγιουτάντης, Ζ, Γ και Σ.Π.Μερτίκας (2003). "Ένας πρακτικός οδηγός για την συγγραφή τεχνικών κειμένων", Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
3. Τσιαμπάος, Γ.(2013). "Στόμια σηράγγων σε βραχώδεις σχηματισμούς". Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Σοφιανός, Α.(2010). "Μέτρα υποστήριξης Σηράγγων". Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

5. Σοφιανός,Α.Ι και Π.Π.Νομικός (2008). ``Προχωρημένη μηχανική πετρωμάτων'', Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
6. Λουπασάκης,Κ.(2013). ``Τεχνική Γεωλογία ΙΙ'' Διαλέξεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Παπαβασιλείου,Σ.(2010). ``Επίδραση της στρώσης των πετρωμάτων στη συμπεριφορά σήραγγας''. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Διαδικτυακές πηγές:

1. www.legah.metal.ntua.gr
2. www.rocscience.com